保存用

共同研究報告書
整理番号第184号
26

道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書（VII）

—鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験—
—鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析—
—鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験—
—鋼製橋脚の非線形動的応答解析—

平成9年4月

建設省土木研究所
首都高速道路公団
阪神高速道路公団
名古屋高速道路公社
(社) 鋼材倶楽部
(社) 日本橋梁建設協会

Copyright©(1997) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第184号1997年4月
26

道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書(Ⅶ)

－鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験－
－鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析－
－鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験－
－鋼製橋脚の非線形動的応答解析－

建設省土木研究所
首都高速道路公団
阪神高速道路公団
名古屋高速道路公社
(社)鋼材倶楽部
(社)日本橋梁建設協会

要　旨

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震では，都市内高速道路橋における多数の鋼製橋脚に座屈，変形，われ等の被害が生じた。こうした被災状況を踏まえ，地震以降既設橋脚の補強方法および新設橋脚の耐震設計法に関する調査研究を進めているところであるが，その検討の一環として鋼製橋脚の耐力および変形性能を確認するために大型供試体を用いた二軸正負交番繰返し載荷実験，弾塑性有限変位解析，ハイブリッド地震応答実験および非線形動的応答解析を行っている。本報告書は，平成7～8年度に行った実験および解析結果についてとりまとめたものである。

キーワード：鋼製橋脚，変形性能，じん性，耐力，繰返し載荷実験，弾塑性有限変位解析，ハイブリッド地震応答実験，非線形動的応答解析，耐震設計法

まえがき

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、道路橋においても橋脚の倒壊や落橋等の多くの被害が生じた。都市内高架橋の鋼製橋脚についても、我が国では初めて大きな被害を受け、その被害は橋脚を構成する補剛板や鋼管の局部座屈、変形、われ等であり、そのうち2基は倒壊に至っている。

平成7年2月には、こうした状況を踏まえ、建設省より関係機関に「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」[1]が通知され、当面の措置として、鋼製橋脚については、コンクリートを充填すること等により必要なじん性を確保するものとし、コンクリートを充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力法が示された。しかしながら、鋼製橋脚の大地震時における応答、抵抗メカニズムおよびじん性の評価等については未解明な部分が多く、これらの特性を明らかにし早急に既設橋脚の補強方法および新設橋脚の耐震設計法を確立していく必要がある。

このような観点から、鋼製橋脚の耐震設計法の確立のための基礎的データを得ることを目的として、建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社（平成8年度から）、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会の6者において、地震以降、平成7年度～9年度の予定で鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験を中心とした検討を行っている。

本報告書は、共同研究において平成7年度から8年度に(社)日本橋梁建設協会が主に担当した正負交番繰返し載荷実験、弾塑性有限変位解析、ハイブリッド地震応答実験および非線形動的応答解析についてとりまとめたものである。

共同研究担当者名簿

（平成７～８年度）

建設省土木研究所
構造橋梁部
藤城　泰行
橋梁研究室
西川　和廣
村越　潤
山本　悟司（～H7.10）
上仙　靖
高橋　実
耐震技術研究センター
（H8.5以前は地震防災部）
横山　功一
耐震研究室
大塚　久哲（～H8.9）
運上　茂樹
寺山　徹
長屋　和宏
佐藤　貴志

首都高速道路公団
山崎　和夫（～H9.1）
小坂　寛巳
高野　晴夫
柄川　伸一（～H8.5）
半野　久光
田嶋　仁志
川田　成彦

阪神高速道路公団
中島　裕之
鈴木　巌
長沼　敏彦
南荘　淳
西岡　敬治
堀江　佳平
小林　寛

名古屋高速道路公社
吉田　守孝
深田　清明
岡本　真悟
柴田　昌弘

(社)鋼材倶楽部
大田　孝二
安波　博道
寺田　昌弘
橋本　修身
中村　聖三
篠原　敏雄
水谷　慎吾
小林　洋一
関　崇彦
下畑　隆司
中川　知和

(社)日本橋梁建設協会
高久　達将
熊谷　洋司
奥　守
石毛　立也
塚原　弘光
岡本　隆
池田　茂
安藤　紘三
川井　豊
森下　泰光

共同研究報告書の主担当および内容

報告書番号	主担当	内容
(Ⅰ) 第178号	建設省土木研究所 構造橋梁部 橋梁研究室	・鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験
(Ⅱ) 第179号	建設省土木研究所 耐震技術研究センター 耐震研究室	・鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験 ・鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験
(Ⅲ) 第180号	首都高速道路公団	・鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験
(Ⅳ) 第181号	阪神高速道路公団	・鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験
(Ⅴ) 第182号	名古屋高速道路公社	・鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験
(Ⅵ) 第183号	(社)鋼材倶楽部	・鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験
(Ⅶ) 第184号	(社)日本橋梁建設協会	・鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験 ・鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析 ・鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験 ・鋼製橋脚の非線形動的応答解析

はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、道路橋においても橋脚の倒壊や落橋等多くの被害が生じた。鋼製橋脚については、我が国では初めて大きな被害を受け、その被害は橋脚を構成する補剛板や鋼管の局部座屈、変形、割れ等であり、うち矩形断面橋脚2基では倒壊に至っている。

こうした被災状況を踏まえ、平成7年2月に建設省より通知された「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」[1]（以下、復旧仕様）では、当面の措置として、鋼製橋脚においては中埋めコンクリートを充填する等により必要なじん性を確保するものとし、コンクリートを充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法が示されている。平成7年6月には『「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案)』[2]が出版され、新設橋梁の設計や既設橋梁の補強をできるだけ円滑に行うことができるように設計計算例とこれを行う際に参考となる補足事項が示された。

しかしながら、鋼製橋脚の大地震時における応答、抵抗メカニズムおよびじん性の評価等については未解明な部分が多く、これらの特性を明らかにし早急に既設橋脚の補強方法および新設橋脚の耐震設計法を確立していく必要がある。

コンクリートを充填した鋼製橋脚については、既に提案されている地震時保有水平耐力照査法について、実験データの蓄積を図ることにより妥当性の検証を行っていく必要があると考えられる。一方、コンクリートを充填する補強方法に関しては、変形性能の向上とともに必然的に耐荷力が増加するため、基礎やアンカー部に負担がかかり、特にアンカー部や基礎の補強の困難な既設橋脚においてはその適用の難しいケースが生じることが指摘されている。したがって、コンクリートを充填せずに、耐力上昇を極力抑え変形性能のみを向上させるような鋼断面の補強方法についても検討していく必要がある。

以上の点を踏まえ、兵庫県南部地震以降、鋼製橋脚の耐力および変形性能の向上策を中心とした各種調査研究を進めているところであるが、その一環として以下の補強が耐力および変形性能に及ぼす影響を評価するために大型供試体を用いた二軸正負交番繰返し載荷実験，弾塑性有限変位解析，ハイブリッド地震応答実験および非線形動的応答解析を行っている。

①矩形断面橋脚

- 閉断面縦リブを用いた補強方法（閉断面縦ﾘﾌﾞ補強）
- 極低降伏点鋼材を用いたシェアウォールによる補強方法（シェアウォール補強）
- 角部にコーナープレートを高力ボルトにて取り付ける補強方法（角ボルト補強）

②円形断面橋脚

- 縦リブによる補強方法（縦リブ補強）
- 二重に鋼管を配置した補強方法（二重鋼管補強）

本報告書は、これらの中から平成7～8年度に行った鋼製橋脚大型供試体の繰返し載荷実験，弾塑性有限変位解析，ハイブリッド地震応答実験および非線形動的応答解析についてとりまとめたものである。

目　次

まえがき
共同研究担当者名簿
共同研究報告書の主担当および内容
はじめに

Ⅰ．鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験…… 1

1．はじめに…… 3
1.1　目的…… 3
1.2　供試体の設計方針…… 3

2．実験概要…… 4
2.1　供試体…… 4
2.1.1　形状・寸法・諸元…… 4
2.1.2　材料試験結果…… 7
2.1.3　製作および溶接条件…… 7
2.2　載荷方法…… 7
2.3　計測項目と計測位置…… 8
2.3.1　荷重…… 8
2.3.2　供試体の変位…… 8
2.3.3　供試体のひずみ…… 8
2.3.4　載荷フレームの変位…… 8
2.3.5　変形状況…… 8

3．実験結果…… 10
3.1　矩形断面…… 10
3.1.1　実験結果一覧…… 10
3.1.2　水平荷重－水平変位関係（ヒステリシスループ）…… 11
3.1.3　包絡線…… 11
3.1.4　水平荷重－鉛直変位関係…… 11
3.1.5　水平変位の鉛直方向分布…… 11
3.1.6　エネルギー吸収量…… 11
3.1.7　等価減衰定数…… 12
3.1.8　ひずみ分布…… 12
3.1.9　載荷サイクルと供試体の変形状況…… 12
3.1.10　フランジおよびウェブの面外変位等高線…… 12
3.1.11　変形状況写真（外面と内面）…… 12

3.2　円形断面…… 13
3.2.1　実験結果一覧…… 13
3.2.2　水平荷重－水平変位関係（ヒステリシスループ）…… 13
3.2.3　包絡線…… 13
3.2.4　水平荷重－鉛直変位関係…… 13

3.2.5 水平変位の鉛直方向分布 13
3.2.6 エネルギー吸収量 13
3.2.7 等価減衰定数 13
3.2.8 ひずみ分布 13
3.2.9 載荷サイクルと供試体の変形状況 13
3.2.10 面外変位分布 14
3.2.11 変形状況写真（外面と内面） 14

4．考察 15

参考文献 19

鋼製橋脚の耐震設計法に関する研究会の委員名簿と研究体制 20

図表 21

参考資料 181

1．包絡線のデジタルデータ 183
1.1 矩形断面 185
1.2 円形断面 186

2．各載荷サイクルにおける変状進行状況 187
2.1 矩形断面 189
2.2 円形断面 200

3．B6供試体の追加確認実験 207
3.1 実験目的 209
3.2 低降伏点鋼 209
3.2.1 化学成分 209
3.2.2 機械的性質 209
3.3 実験概要 210
3.3.1 供試体諸元 210
3.3.2 実験装置 218
3.3.3 載荷方法 220
3.3.4 計測方法 221
3.4 実験結果 222
3.4.1 材料試験結果 222
3.4.2 実験結果一覧 222
3.4.3 水平荷重－水平変位関係（ヒステリシスループ） 226
3.4.4 包絡線 226
3.4.5 水平変位－鉛直変位関係 226
3.4.6 エネルギー吸収量 226
3.4.7 等価減衰定数 237
3.4.8 変形状況（外面と内面） 237

3.5 まとめ……259
参考文献……260

II．鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析……261

1．はじめに……263

2．ﾍﾞﾝﾁﾏｰｸﾃｽﾄ解析-1（予備的検討）……263
2.1 解析仕様……263
2.1.1 解析条件……263
2.1.2 解析ﾓﾃﾞﾙ……263
2.2 解析結果……266
2.3 まとめ……268

3．ﾍﾞﾝﾁﾏｰｸﾃｽﾄ解析-2（弾塑性有限変位解析）……271
3.1 解析条件に関する検討……271
3.1.1 解析仕様……271
3.1.2 矩形断面橋脚ﾓﾃﾞﾙ解析……273
3.1.3 円形断面橋脚ﾓﾃﾞﾙ解析……276
3.1.4 解析上の留意点……279
3.2 ﾍﾞﾝﾁﾏｰｸﾃｽﾄ(解析ﾌﾟﾛｸﾞﾗﾑの相違が解析結果に及ぼす影響)……280
参考文献……280

4．首都公供試体,橋建協供試体の載荷試験ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ解析……282
4.1 首都公供試体(Mｼﾘｰｽﾞ)解析例……282
4.1.1 Ｍ２供試体：矩形断面橋脚……282
4.1.2 Ｍ３供試体：矩形断面橋脚……288
4.2 橋建協供試体(Bｼﾘｰｽﾞ)解析例……292
4.2.1 Ｂ３供試体：円形断面橋脚……292
4.2.2 Ｂ４供試体：円形断面橋脚……296
4.3 まとめ……300

III．鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験……301

1．はじめに……303
1.1 研究の背景……303
1.2 実験の目的……303

2．実験概要……303
2.1 実験供試体……303
2.1.1 矩形断面……303
2.1.2 円形断面……305
2.2 軸力比……305

2.3 入力地震波および入力加速度レベル……306
2.4 実験手順および相似則……306
2.5 実験装置……307
2.6 計測項目……308
2.6.1 荷重……308
2.6.2 変位……308
2.6.3 ひずみ……308
2.7 初期不整計測……308
2.7.1 矩形断面……308
2.7.2 円形断面……309

3．実験結果……309
3.1 材料試験結果……309
3.1.1 鋼材……309
3.1.2 コンクリート……309
3.2 単調載荷実験、繰返し載荷実験結果……310
3.2.1 矩形断面……310
3.2.2 円形断面……311
3.3 ハイブリッド地震応答実験……311
3.3.1 矩形断面……311
3.3.2 円形断面……313

4．まとめ……314

参考文献……315

図表……317

参考資料……389

Ⅳ．鋼製橋脚の非線形動的応答解析……401

1．入力データ……403
1.1 概要……403
1.2 構造のモデル化……404
1.2.1 1自由度非線形動的応答解析モデル……404
1.2.2 ハイブリッド地震応答実験モデル……404
1.2.3 ハイブリッド地震応答実験の相似則……405
1.3 入力地震動……407
1.3.1 時刻歴入力加速度……407
1.3.2 加速度応答スペクトル……408
1.4 減衰……410
1.5 復元力特性……411
1.5.1 硬化型バイリニアモデル……411

1.5.2 完全弾塑性型および緩勾配劣化型バイリニアモデル……413
1.5.3 劣化型トリリニアモデル……413
1.5.4 E－D履歴モデル……414
1.6 直接積分法……415

2．解析結果……416
2.1 解析結果の説明……416
2.2 矩形断面……417
2.2.1 硬化型バイリニアモデル①……417
2.2.2 硬化型バイリニアモデル②……432
2.3 円形断面……449
2.3.1 硬化型バイリニアモデル①……449
2.3.2 硬化型バイリニアモデル②……465
2.4 その他の復元力特性……483
2.4.1 完全弾塑性型バイリニアモデル……483
2.4.2 劣化型バイリニアモデル……496
2.4.3 トリリニアモデル……501
2.4.4 E－D履歴モデル……514

3．比較一覧および考察……518
3.1 比較一覧……518
3.1.1 矩形断面・硬化型バイリニアモデル……518
3.1.2 円形断面・硬化型バイリニアモデル……520
3.1.3 その他の復元力特性……522
3.1.4 解析値と実験値の比較図……524
3.1.5 解析結果と実験結果の履歴図比較……525
3.2 考察……526
3.2.1 復元力特性……526
3.2.2 硬化型バイリニアモデル……526

参考文献……527

Ⅰ．鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験

1．はじめに

1.1　目的

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震による土木構造物の被害は、予想を遥かに越えたものであり、道路橋においても橋脚の倒壊や落橋などの数多くの被害がもたらされた。鋼製橋脚においては、我が国で初めて大きな被害を受け、その被害は橋脚を構成する補剛板や鋼管の局部座屈・変形・割れなどであった。実際には、そのうちの矩形断面橋脚2基が倒壊まで至っている。

このような状況の中で、鋼製橋脚の耐震性を向上させるための設計法並びに構造細目を構築することが急務となった。橋脚に被害が発生した場合、上部工が健全であっても橋梁全体に大きな被害をもたらす危険性があり、特に都市内の高架橋では非常に重要な橋梁部位の1つと考えられる。そこで、橋脚を約1/3程度にモデル化した大型供試体を用いて二軸正負交番繰返し載荷実験を行い、じん性および座屈後の塑性化のメカニズムを定量的に把握することを目指した。

なお、本章は共同研究［建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社(平成8年度より)、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会］において、平成7年度から8年度に(社)日本橋梁建設協会が主に担当した正負交番繰返し載荷実験についてとりまとめたものである。また、参考資料として、マルチセル構造［水平力載荷方向に平行に隔壁を配置したシェアウォール補強構造（B6供試体の追加確認実験）と水平力載荷方向に直角に隔壁を配置したダブルフランジ補強構造］の正負交番繰返し載荷実験についてとりまとめたものを添付する。

1.2　供試体の設計方針

実験を行った供試体は、基本的に新設橋脚を対象として設計を行った。また、B1, B2, B4, B7, B8供試体については、既設橋脚も対象としている。各供試体の詳細は、次頁以降に記述する。

2．実験概要

2.1　供試体

2.1.1　形状・寸法・諸元

表-2.1.1に供試体断面の一覧表を示す。表-2.1.2(1)～(2)に各供試体の主なパラメータを示す。内訳は、矩形断面供試体5体(供試体B1, B5～B8)、円形断面供試体3体(B2～B4)である。また、供試体の諸元をそれぞれ表-2.1.3(1)～(2)に示し、供試体の形状・寸法を矩形断面は図-2.1.1(1)～(5)に、円形断面は図-2.1.2(1)～(3)に示す。供試体の種類を以下に示す。

①矩形断面

- 基本供試体　：1体
- 閉断面縦リブを用いた補強供試体(以下、閉断面縦リブ補強と呼ぶ)　：1体
- 極低降伏点鋼材を用いたシェアウォールによる補強供試体(以下、シェアウォール補強と呼ぶ)　：1体
- 角部にコーナープレートを高力ボルトにて取り付けた補強供試体(以下、角ボルト補強と呼ぶ)　：2体

②円形断面

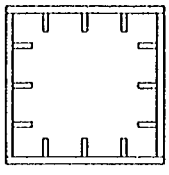
- 縦リブによる補強供試体(以下、縦リブ補強と呼ぶ)　：2体
- 二重に鋼管を配置した供試体(以下、二重鋼管補強と呼ぶ)　：1体

以下に、各供試体について説明する。

(1) 基本供試体 (B1)

本供試体は実構造物における溶接品質の再現性などを考慮して、できるだけ大きな断面構成（実橋脚の1/3程度の900mm×900mm）を持つ供試体とした。高さは載荷フレームの制約上、約3,500mmとした。断面との関係を踏まえると、実橋脚に対しては比較的細長比が小さくなっている。

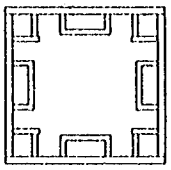
矩形断面を構成する補剛板の母材公称板厚は9mm、縦方向補剛材の公称板厚は9mm、使用材質は共にSM490材とした。また、供試体基部から900mm間隔に、公称板厚6mmの横リブあるいはﾀﾞｲﾔﾌﾗﾑを設置した。本基本供試体は、平成6年の道路橋示方書・同解説[3]の補剛板の規定に準拠している。特に、縦リブ剛度はその必要剛比の約1.4倍の値で設計している。



（B1供試体）

(2) 閉断面縦リブ補強 (B5)

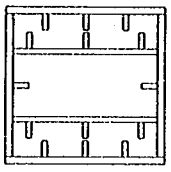
本補強は、縦リブのねじれ座屈が補剛パネル全体の座屈を引き起こす可能性があるため、縦リブを閉断面化することにより、補剛パネルの全体座屈を遅らせることを期待した構造である。



（B 5供試体）

(3) シェアウォール補強（B6）

本供試体は、矩形断面の内側に極低降伏点鋼材から成る隔壁（シェアウォール）を高力ボルトで接合したマルチセル構造である。シェアウォールは、水平力作用方向にウェブ間の1/4の位置に2列配置している。シェアウォールが先行して塑性化することにより、エネルギーを吸収し、変形性能が改善されることをねらっている。また、シェアウォールは実質的にウェブ断面の増加となり、曲げ剛性の大幅な上昇なくして、じん性およびエネルギー吸収性能を高める効果も期待できると考えられる。



（B 6供試体）

(4) 角ボルト補強（B7, B8）

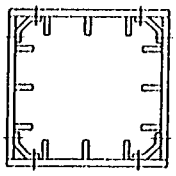
角ボルト補強は、主に既設鋼製橋脚の耐震補強を想定したものであり、角部の補強材としてコーナープレートを用いた構造とアングル部材を用いた構造がある。ここでは、コーナープレートを用いた構造についてのみ実験を行った。これは、角部が補強材によって閉断面となり、角部の座屈強度の改善が期待できる構造である。

B7供試体は、土研No. 11供試体に取付くコーナープレートを綴じあわせる高力ボルトの本数を低減すべく設計法を提案して、供試体では、ボルトをM22(F10T)@100ピッチ〈No. 11〉→M16(F8T)@145ピッチ〈B7〉としたものである。しかし、本来の設計法におけるボルトのピッチに対して、「p≦12t」が必要と考えられるが、ボルト本数を各ボルトに作用する実応力のみによって決定した供試体としている。これは、供試体の板厚などの寸法形状とHTBの供給可能サイズとの関係で相似関係を実橋脚との間で再現し難いことによる。

B8供試体は、土研No. 11供試体において、柱コーナー部を補強する鋼板の高力ボルト接合面に塗膜が介在する場合、それが橋脚の地震時保有水平耐力に及ぼす影響を検証するために行うものである。すなわち、既設橋脚の補強工事の実施にあたって、脚内の防錆用内面タールエポキシ樹脂塗料を除去せずに、補強鋼板を高力ボルト連結させた場合の鋼板との接合面での「すべり現象」が、土研No. 11供試体に比してどの程度耐震特性に影響するかを検証することを目的としている。したがって、本供試体は補強鋼板の接合面に塗装が施されている以外は、すべて土研No. 11供試体と同一である。

角ボルト補強における補強材については、横リブ・ダイヤフラム位置で断続としており、補強材と母材とは六角高力ボルトにより接合した。このように角部にコーナープレートなどの補強材を高力ボルトによって接合し、横リブ・ダイヤフラム位置において補強材を断続させる補強方法は、橋脚内部での作業性に

配慮したものである。補強範囲は供試体基部から2番目のダイヤフラムまでの高さである1,800㎜までとした。これは、座屈が発生し損傷を受ける部分を充分にカバーし、耐力や塑性率、劣化特性に影響を及ぼさない範囲と考える。

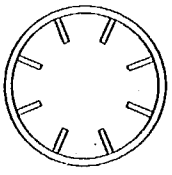


（B７・B８供試体）

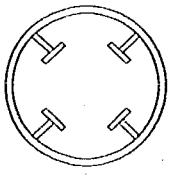
(5) 縦リブ補強供試体（B2, B4）

円形断面は矩形断面と異なり、軸圧縮力と曲げモーメントを同時に受けると、円形断面に特有な、いわゆる「ちょうちん座屈」あるいは「ダイヤモンド座屈」と呼ばれる座屈現象が生じる。この座屈の発生機構は、円形断面がある一定以上の大きさの軸圧縮力と曲げを受けると、まず最大応力が生じる最外縁に局部的に座屈が発生する。その結果、応力の再分配が行われ、その近傍にも同様に座屈が生じ、これが円周方向に急速に伝搬したものと考えられる。

実験を行った供試体は、直径900φの円形断面を平リブ（100×11）で補強した供試体（B2）とT型リブ（CT-125×125×6×9）で補強した供試体（B4）である。また、B2供試体の縦リブはダイヤフラム位置において断続であり、B4供試体は連続である。B4供試体は鋼管がリブ間で局部座屈し、その後補剛材が柱として抵抗すると考え、縦リブはダイヤフラム位置においても連続させた。また、鋼管の先行座屈により、変形性能の向上も期待できると考えられる。



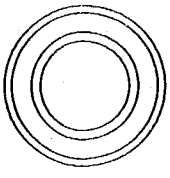
（B２供試体）



（B４供試体）

(6) 二重鋼管補強供試体（B3）

本補強は、直径900φと600φの2種類の円形断面を組み合わせた二重鋼管構造である。外管の板厚は t=6 ㎜、内管の板厚は t=18 ㎜であり、主に内管は鉛直力に抵抗し、外管は地震時の水平力により発生する曲げモーメントに抵抗させる構造体である。外管を先行座屈させることにより、じん性および変形性能も高めることができると考えられる。



（B３供試体）

2.1.2 材料試験結果

供試体テストパネル部の各鋼部材の材料試験の結果を表-2.1.4(1)～(2)に示す。

2.1.3 製作および溶接条件

角部の溶接は、外側についてはレ型開先溶接、内側については隅肉溶接である。供試体製作上、すべての溶接はCO_2半自動溶接によって行った。供試体の上ベースプレートから頂部まで(3,151mm)の橋脚本体部は、熱処理等によるひずみ取りは行っていない。

2.2 載荷方法

載荷実験は、建設省土木研究所構造力学実験施設にある載荷フレームを使用して行った。載荷フレームを写真-2.2.1に示し、載荷フレームの形状および寸法を図-2.2.1に示す。また、載荷装置の能力を表-2.1.5に、供試体の設置状況を写真-2.2.2に示す。

載荷は、まず供試体に上部工および橋脚の死荷重に相当する軸力Nを載荷した後、その軸力を一定に保持した状態で、図-2.2.2に示すように水平変位制御による水平繰返し漸増載荷を行った。軸力Nは、鋼材の公称降伏点を用いて計算した公称降伏軸力の15%を基本とした。繰返しの基本水平変位$\delta y0$は次式で与えられる。

$$\delta_{y0} = \frac{P_{yN} h^3}{3EI} \qquad \cdots\cdots(2.2.1)$$

$$P_{yN} = \left(\sigma_{yN} - \frac{N}{A}\right) \frac{Z}{h} \qquad \cdots\cdots(2.2.2)$$

ここで、P_{yN}は公称降伏水平荷重(kgf)、hは供試体基部の上ベースプレートから水平荷重載荷点までの載荷高さ(cm)、EIは曲げ剛性(kgf・cm²)、σ_{yN}は鋼材の保証降伏点強度であり、SS400材では2400kgf/cm²、SM490材では3200kgf/cm²である。また、Nは軸力(kgf)、Aは供試体の断面積(cm²)、Zは断面係数(cm³)である。

実験は、先ず、2.3.2に示す供試体の補正後水平変位DLTが$+1\delta y0$に達するように補正前変位DCを制御しながら載荷し、次に同様に補正後水平変位DLTが$-1\delta y0$に達するように補正前変位DCを制御しながら漸増載荷した。1回目の正側の漸増載荷の補正後水平変位DLTを$(DLT)n=+1$とし、1回目の正側の漸増載荷の補正前水平変位DCを$(DC)n=+1$とすると、$+1\delta y0=(DLT)n=+1>(DC)n=+1$となる。2回目以降（3回目、4回目・・・）の漸増載荷の場合には、制御時間を短縮させるために1回目と同様な載荷方法は行わずに、1回目の漸増載荷の時の変位DCを基準にとり、補正前変位DCが2倍（3倍、4倍・・・）となるようにして載荷した。なお、修正後の各$\delta y0$については、本報告書の図中では便宜上nδyと表記している。

水平変位の載荷は、約0.2mm/secの速度で行った。載荷は水平荷重が公称降伏水平荷重PyN以下に低下するまで行った。

2.3 計測項目と計測位置

以下に示す2.3.1～2.3.4の各計測項目の計測間隔は、ヒステリシスループ1ループ(1回の交番載荷によって得られるループ)につき約40点を基本とした。計測は、水平変位の載荷速度をゼロにして、停止時間は測定チャンネルが約150チャンネルで約10秒程度であった。

2.3.1 荷重

軸力載荷用ジャッキおよび水平力載荷用アクチュエータの荷重は、それぞれ容量が300tfのロードセルにより計測した。水平荷重載荷時の鉛直荷重のばらつきは±2tf程度である。

2.3.2 供試体の変位

供試体の変位計取付位置を図-2.3.1に示す。変位計は載荷フレームとは別に、床上に設置したスタンドに固定した。変位量は、変位計（ひずみゲージ式一般変位計、ワイヤ巻取り式変位計）により計測した。供試体が水平力を受けると、供試体基部（ベース部）に回転と水平力方向の変位が生じる。また、供試体頂部における水平変位を把握するためには、基部の回転量と水平方向の変位量について補正する必要があるので、供試体基部の鉛直方向変位についても計測した。水平荷重載荷位置における供試体の補正後の水平変位DLTは、基部の回転量と水平移動量を補正することにより次式のように与えられる。（図-2.3.2参照）

$$DT = DC - \frac{DS1 + DS2}{2} - \frac{(DR1 - DR2)}{L} HM \qquad \cdots(2.3.1)$$

$$DLT = \frac{HL}{HM} DT \qquad \cdots(2.3.2)$$

ここで、DTは供試体天端の水平変位計測点の補正変位である。

2.3.3 供試体のひずみ

供試体のひずみ量は、ひずみゲージ（ゲージ長5mmの弾性ゲージと塑性ゲージ）を添付して計測した。矩形断面供試体のひずみゲージ貼付位置を図-2.3.3(1)～(5)に示し、円形断面供試体のひずみゲージ貼付位置を図-2.3.4(1)～(3)に示す。

2.3.4 載荷フレームの変位

供試体載荷フレームの変位量を、変位計（ひずみゲージ式一般変位計、パイ型変位計）により計測した。載荷フレームの変位計取付位置を図-2.3.5に示す。

2.3.5 変形状況

矩形断面供試体の面外変形量は定規により計測した。図-2.3.6に面外変位の測定位置を示し、写真-2.3.1に面外変位の測定状況を示す。

円形断面供試体の面外変形量は、形取りゲージにより計測した。図-2.3.7に面外変形の測定位置を示し、

写真-2.3.2に面外変位の測定状況を示す。また、面外変形を目視により用紙に観察記録し、写真撮影を行った。計測・記録・写真撮影は、水平変位が$\pm n\,\delta y_0$に到達したときに載荷を一旦停止して行った。

3．実験結果

3.1　矩形断面

3.1.1　実験結果一覧

表-3.1.1に実験結果一覧を示す。

表中の降伏変位 δy_{EN}は、以下のように実験より得られる荷重－変位関係（正側載荷の包絡線）の初期勾配と降伏荷重 $P y_M$を用いて求めた。まず、材料試験結果の下降伏点を用いて式(2.2.2)により、降伏荷重 $P y_M$を求める。荷重－変位の実験結果（正側載荷の包絡線）において、基本的に荷重が $P y_M$の約20～40％の値のときに計測された少なくとも5点以上の荷重－変位データの割線勾配を最小二乗法によって求めたものを実験初期勾配と定義し、$P y_N$をこの実験初期勾配で除算した値を δy_{EN}とした。実験初期勾配を求める際に、荷重の範囲を $P y_M$の約20～40％としたのは、荷重が低いことによる初期勾配の誤差を除くことと荷重が高いことによる幾何学的非線形の影響を除くことを目的に設定している。また、初期勾配の計算には、基本的に+1 δy_0載荷時までのデータを用いた。なお、δy_{EN}は、2.2で述べた δy_0とは異なる。

理論初期勾配は、柱の曲げ変形のみを考慮した式(2.2.1)による水平変位 $P y_M$を式(2.2.2)の δy_0で無次元化したものであり、原点を通る直線となる。

塑性率 μを評価する場合、正規化するための降伏水平変位 δyの設定が重要となる。

降伏水平変位 δyを算定する場合の重要な要素として、①水平荷重－変位関係における初期勾配（初期剛性）と②材料降伏点 σyの2つがあげられ、今回の実験結果によればそれぞれ理論値（公称値）と実験値の間に差があり、設定にあたっては次の点に留意する必要がある。

①初期勾配について

初期勾配については曲げ剛性を考慮した理論値よりも実験値の方が傾きが大きくなる傾向にあり、実験値を基本に塑性率を求めると安全側の評価となってしまう可能性がある。

②材料降伏点 σyについて

材料降伏点の公称値と実験値の間には、今回の矩形断面供試体（鋼種SM490）を例にすると17～30%程度の差が見られる。

部材の座屈強度の評価においては、材料降伏点 σyによる実験データの正規化が妥当であることがわかっている。

図-3.1.1(a),(b)は土研の矩形断面の供試体(土研No.20)を対象として、同一の鋼種・寸法諸元を有し、材料降伏点 σyのみが異なる2供試体について、正負交番載荷時を想定したFEM解析を試行的に行い、結果を比較したものである。荷重軸側について、正規化された両者の最大耐力はほぼ一致しており、材料降伏点（実験値）を基本とした正規化が概ね妥当であることがわかる。

一方、変位軸側については、材料降伏点により正規化すると最大耐力以降の変形性能に大きな差が見られ、このような変形が進行した状態では幾何学的非線形性の影響も大きくなると考えられ、材料降伏点（実験値）を正規化のためのパラメータとして用いることは適当とは言い難い。

降伏水平変位 δyの与え方としては、初期勾配と材料降伏点の組合せにより図-3.1.1(c)に示す4ケースが考えられ、適用の際にはそれぞれ用途に応じて選択されれば良いと考えられる。このうち塑性率が最も過

小評価されるのは、材料降伏点（実験値）と初期勾配（実験値）より求められる降伏水平変位 δy_{EM}により正規化する場合である。

本研究では、実務に供することを踏まえ、変形性能についていたずらに安全側の評価をねらうことを避け現実的な値を与えることとした。ここでは降伏水平変位として δy_{EN}、すなわち初期勾配として実験勾配を、材料降伏点として上述の解析結果を参考に公称値を用いることとした。

3.1.2 水平荷重－水平変位関係（ヒステリシスループ）

図-3.1.2(1)～(5)に、荷重と載荷点における水平変位の関係(ヒステリシスループ)を示す。

3.1.3 包絡線

図-3.1.3(1)～(5)に、図-3.1.2のヒステリシスループに対する包絡線を正側載荷・負側載荷をそれぞれ区分して示す。

3.1.4 水平荷重－鉛直変位関係

図-3.1.4(1)～(5)に、水平荷重と鉛直変位との関係を示す。

3.1.5 水平変位の鉛直方向分布

図-3.1.5(1)～(5)に、各 δy_0時の水平変位の鉛直方向分布を示す。水平変位が各 δy_0に到達したときの水平変位の鉛直方向分布とする。

3.1.6 エネルギー吸収量

図-3.1.6(1)～(5)に、各サイクルにおける正側と負側の水平変位の平均値（平均水平変位と呼ぶ）とエネルギー吸収量の関係を示す。エネルギー吸収量は次のとおり算出した。

1サイクルの吸収エネルギーは、ヒステリシスループと変位軸とで囲まれる面積で表すことができ、図-3.1.7(a),(b)の斜線部分のようになる。これを図-3.1.7(c)のように台形積分により求めた。

1サイクルの始点・終点（水平変位が0mmの点）において変位やひずみ等を計測するようにしたが、計測誤差によって正確に始点・終点において計測できていないのが一般的である。そこで、各サイクルでの吸収エネルギーをそれぞれ正確に計算するために、水平変位が0mmである点（1サイクルの始点・終点）の水平荷重の値を把握するために、内挿により1サイクルの始点・終点を求めることとした。1サイクルでのエネルギー吸収量 ΔWは、次式によって求められる。

$$\Delta W = \frac{1}{2}\left\{\sum_{i=1}^{n-1}(hi+1+hi)\cdot(di+1-di)\right\} + \frac{1}{2}\left\{(h1+hs)\cdot(d1-ds)+(he+hn)(de-dn)\right\} \quad \cdots(3.1.1)$$

ここで、hi、diはそれぞれ計測した水平荷重および水平変位であり、nは1サイクル内に含まれる計測数

（図-3.1.7(c)の四角形で表した点の数）、sは内挿により求めた1サイクルの始点（同図のs点）、eは同様に求めた1サイクルの終点（同図のe点）を表す。任意のサイクルのe点とその次のサイクルのs点は同一の点となる。

3.1.7 等価減衰定数

図-3.1.8(1)～(5)に、各サイクルにおける平均水平変位と等価減衰定数heの関係を示す。

ここで、等価減衰定数heは次式で与えられる。

$$he = \frac{1}{2\pi}\frac{\Delta W}{W} \qquad \cdots(3.1.2)$$

ここに、Wは図-3.1.9に示される三角形OACと三角形OBDの面積の和で表されるエネルギーである。ただし、この2つの三角形は以下のとおりとした。1サイクルのループにおいて絶対変位が最大となる点Aと点Bの水平荷重の平均を求め、この平均水平荷重の値に対して載荷点変位軸に平行な直線Lを描く。点Aと点Bから直線Lに下ろした垂線の足をそれぞれ点C、点Dとし、点Aと点Bとを結んだ線分と直線Lとの交点を点Oとした。また、図-3.1.9における点Aと点Bを結んだ直線の勾配を、等価剛性と定義する。

3.1.8 ひずみ分布

図-3.1.10(1)～(5)に、水平変位が、ヒステリシスループにおける変位折返し点（水平変位が＋n $\delta y0$に到達した点）において計測したときの供試体基部から450㎜(ダイヤフラム間の1/2)の位置におけるひずみ分布を示す。

3.1.9 載荷サイクルと供試体の変形状況

図-3.1.11(1)～(5)に、最大荷重を超えた点および実験終了時付近における供試体の外面と内面の変形状況の目視観察記録を示す。なお、各変形状況は、ヒステリシスループにおける変位折返し点（水平変位が＋n $\delta y0$に到達した点）において計測したものである。

3.1.10 フランジおよびウェブの面外変位等高線

図-3.1.12(1)～(5)に、降伏時を超えた点、最大荷重を超えた点および実験終了時付近における供試体のフランジおよびウェブの面外変位計測結果を等高線分布として示す。なお、面外変位は、ヒステリシスループにおける変位折返し点（水平変位が＋n $\delta y0$に到達した点）において、定規により0.5㎜単位で計測したものである。

3.1.11 変形状況写真（外面と内面）

写真-3.1.1(1)～(5)に、最大荷重を超えた点および実験終了時の供試体の外面の状況および実験終了時の内面の変形状況の写真を示す。なお、ここに示す実験終了時以外の写真は、ヒステリシスループにおける変位折返し点（水平変位が＋n $\delta y0$に到達した点）において撮影したものである。

3.2 円形断面

3.2.1 実験結果一覧

表-3.2.1に実験結果一覧を示す。実験結果のまとめ方は”3.1矩形断面”と同じである。

3.2.2 水平荷重－水平変位関係（ヒステリシスループ）

図-3.2.1(1)～3.2.1(3)に荷重と載荷点における水平変位の関係(ヒステリシスループ)を示す。

3.2.3 包絡線

図-3.2.2(1)～3.2.2(3)に図-3.2.1のヒステリシス曲線に対する包絡線を正側載荷・負側載荷それぞれ区分して示す。

3.2.4 水平荷重－鉛直変位関係

図-3.2.3(1)～(3)に水平荷重と鉛直変位との関係を示す。

3.2.5 水平変位の鉛直方向分布

図-3.2.4(1)～(3)に各$\delta y0$時の水平変位の鉛直方向分布を示す。

3.2.6 エネルギー吸収量

図-3.2.5(1)～(3)に各サイクルにおける正側と負側の水平変位の平均値（平均水平変位）とエネルギー吸収量の関係を示す。エネルギー吸収量は”3.1矩形断面”と同様な方法により算出した。

3.2.7 等価減衰定数

図-3.2.6(1)～(3)に各サイクルにおける平均水平変位と等価減衰定数heの関係を示す。

3.2.8 ひずみ分布

図-3.2.7(1)～(3)に、水平変位がヒステリシスループにおける変位折返し点（水平変位が＋ｎ$\delta y0$に到達した点）において計測したときの供試体基部から450㎜(ダイヤフラム間の1/2)の位置におけるひずみ分布を示す。

3.2.9 載荷サイクルと供試体の変形状況

図-3.2.8(1)～(3)に、最大荷重を超えた点および実験終了時付近における供試体の外面と内面の変形状況の目視観察記録を示す。なお、各変形状況は、ヒステリシスループにおける変位折返し点（水平変位が＋ｎ$\delta y0$に到達した点）において計測したものである。

3.2.10 面外変位分布

図-3.2.9(1)～(3)に、降伏時を超えた点、最大荷重を超えた点および実験終了時付近における供試体のフランジおよびウェブの面外変位計測結果を等高線分布で示す。なお、面外変形は、ヒステリシスループにおける変位折返し点（水平変位が＋ｎ $\delta y0$に到達した点）において計測したものである。

3.2.11 変形状況写真（外面と内面）

写真-3.2.1(1)～(3)に、最大荷重を超えた点および実験終了時の供試体の外面の状況および実験終了時の内面の変形状況の写真を示す。なお、ここに示す実験終了時以外の写真は、ヒステリシスループにおける変位折返し点（水平変位が＋ｎ $\delta y0$に到達した点）において撮影したものである。

4．考察

(1) B1供試体

本供試体は、一連の実験の基本供試体として位置づけたものであるが、実験状況は±3δy程度まで荷重と変位の関係はほぼ線形の関係にあり、±4δyにおいてピーク（最大荷重）を示した。以後、ピークを保持することなく急激に耐力が低下し、終局状態に至っている。

±4δyで純圧縮状態にあるA・B面に縦リブ間の局部座屈が生じ、±5δyではA・B面に凹の全体座屈が発生した。±6δyでは、C・D面に凸の全体座屈が発生し、この状態で荷重はピークの75%程度まで低下している。

±7δyでは縦リブと母材との間のすみ肉溶接に割れが発生し、全体座屈の範囲が更に拡大した。±8δyでは基部近傍の角溶接部に溶接線と直角方向の割れが発生し、＋9δyへの移行中、角部のクラックが急進し、荷重が0まで低下した。

本供試体は、平成6年度道路橋示方書・同解説[3]をほぼ満足する断面構成であるが、実験からわかる通り、じん性・変形性能の点からは必ずしも満足できるものではなかった。荷重—変位の包絡線がほぼ三角形となっているように、耐力はピークを保持することなく急激に低下している。

(2) B2供試体

本実験において、水平変位±2δyまでの荷重-水平変位はほぼ線形関係を示した。
＋4δyにおいて、柱下端の縦リブ間のパネルに局部座屈が発生し、±6δyではそれらが全周に伝搬し、いわゆる「ちょうちん座屈」の状態を呈した。±5δyでは、それぞれ引張側の縦リブ下端に、円周方向に沿ってクラックが確認された。これを機に、試験体の水平耐力は急激に低下し始めた。

±9δyにおいて、圧縮側の縦リブがベースプレートに接触し、±10δyでは圧縮側縦リブに沿って軸方向にクラックが発生すると共に、母材がベースプレートに接触した状態となった。また、＋13δyにおいて、実験終了に至っている。

本供試体では、補強に伴う柱の曲げ剛性の増大を極力低く抑えるために、縦リブは軸方向に連続させずにベースプレートあるいはダイヤフラムとの間に、すき間を設けて配置した。結果的には、そのすき間のリブ端において、母材に低サイクル疲労によるクラックが発生し、これが耐力を低下させる原因となった。

(3) B3供試体

本供試体は、±3δyまでほぼ弾性挙動を示し、それ以降ピークに到達し、±11δy付近までピークを持続した後、急激に耐力が低下し、終局状態へと至っている。

外管は、＋3δyにおいてA側（圧縮側）の基部付近で局部座屈し始め、－3δyではB側（圧縮側）でも局部座屈が発生した。その後、円周方向に座屈が伝搬しているが、円周方向の約半円分が提灯形、他方がダイヤモンド形の座屈状態となった。最終的には、－15δy付近において引張り側で母材に亀裂が発生し、実験終了へ至っている。

また、内管は＋8δyにおいてA側（圧縮側）の基部付近で局部座屈し始め、－8δyにおいてB側（圧縮側）

でも局部座屈が発生し、以降円周方向へ座屈が伝搬した。終局状態において、外管の様な大きな面外変形は見受けられなかった。

本供試体は、当初予想していた破壊形態の過程をたどっている上、かなりの変形性能を有していると考えられる。ただし、実橋脚レベルに置き換えた場合、内管の板厚は厚いと考えられる。

(4) B4供試体

本供試体は、±3δyまでほぼ弾性挙動し、その後±5δy付近でピークを迎えた後、徐々に耐力が低下し、+12δyで終局状態に至った。

+3δyにおいては、A面（圧縮側）の基部付近で局部座屈が発生し、−3δyではB面（圧縮側）でも局部座屈が発生した。その後、補剛材位置およびA•B点を頂点とした6角形となった。+10δyから−10δyに移行中、引張側T型リブ位置に亀裂が発生し、終局状態に至った。

また、T型リブについては+6δyにおいて黒皮にひび割れが発生し始め、変形し始めた。その後、変形は大きくなったが、最終状態においても亀裂の発生はない。

(5) B5供試体

本供試体は、±3δyまでほぼ弾性挙動し、−4δyにおいて、基部コーナー部の補剛材下端のまわし溶接部に割れが発生した。同時期に圧縮側フランジ基部パネルには局部座屈が発生している。−6δyまで載荷すると、基部溶接部のコーナーに発生した割れと補剛材下端のまわし溶接部の割れが合体し、約20cm程度の長さの割れに達した。圧縮側は局部座屈の面外変形は小さく、全体座屈に移行するまでには至らなかった。

以後、引張側となった時に割れは軸方向に直角に進展し、圧縮側となった時には割れは閉じ、メタルタッチ状態となることを繰り返しながら、水平荷重が低下し、+11δyにおいて最終状態に至った。このとき引張側フランジの未破断部は14cm程度であった。

本供試体では、縦リブを閉断面とし、縦リブの剛性を高めたことにより、板パネルの局部座屈は発生したが、補剛パネル全体の座屈は発生しなかった。そのため、逆にパネルの変形が小さく抑えられ、基部の応力集中部にひずみ（変形）が集中し、溶接部の割れの進展を早めたものと考えられる。加えて、縦リブ基部のまわし溶接部の止端形状がオーバーラップ気味であったことから、当該部へひずみが集中し、割れが早期に発生したものと考えられる。縦リブ下端の形状及びまわし溶接止端部の形状を、グラインダー処理などにより円滑にすることにより、割れの発生をある程度遅らせることは可能と考えられる。

(6) B6供試体

本供試体は、±4δyあたりから圧縮フランジのシェアウォール間で面外変形が発生し始めた。±6δyにおいて、載荷水平力のピークに到達し、圧縮フランジのウェブ・シェアウォール間にもシェアウォール間とは逆位相の面外変形が生じた。載荷サイクルの進行と共に、フランジの面外変形はすべてのシェアウォール，縦リブを節とする変形性状へと移行し、変形量も増大し、面外変形が最大となる柱コーナー部に割

れが生じ、±16δyにて亀裂がフランジ全面でつながり、終局に至った。

本供試体は、変形に対して粘りがある結果が得られた。その原因として、

①低降伏点鋼のシェアウォールが降伏し、エネルギーが吸収された。

②柱のウェブとシェアウォールにより、複数個の閉断面が形成されるため、圧縮フランジの全体パネル座屈が抑制され、曲げ剛性の低下を遅延させることができた。

などと考えられる。

(7) B7供試体

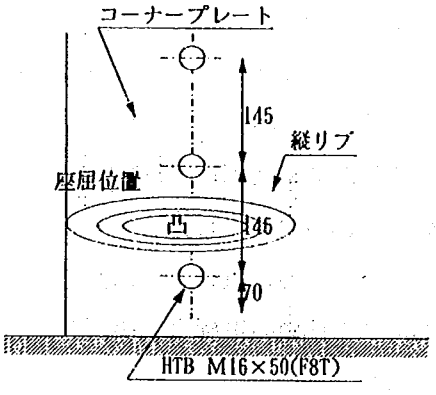
本供試体は、土研・供試体 No.11(HTB角補強)に取付くコーナープレートを綴じあわせる高力ボルトの本数を低減すべく設計法を提案して、供試体では、ボルトをM22(F10T)@100ピッチ〈No.11〉→M16(F8T)@145ピッチ〈B7〉としたものである。しかし、本来の設計法におけるボルトのピッチに対して、「p≦12t」を必要と考えられるが、ボルト本数を各ボルトに作用する応力のみによって決定した供試体としている。これは、供試体の板厚などの寸法形状とHTBの供給可能サイズとの関係で、相似関係を実橋脚との間で再現し難いことによる。

土研・供試体 No.11と比べて、97%×Pmax時を設計の終局状態とする場合の塑性率は3程度低い。

本実験の結果の考察にあたって、設計法としてボルトピッチを照査することと、今回の実験の挙動との関係が重要となる。

初期座屈は、4δyまでの座屈と考え、角部補強した縦リブ間パネルに座屈を生じていない段階とする。二次座屈は、角に最も近い縦リブパネルを含んで座屈する段階とし、5δy以後である。基準とする供試体 No.11との差はこの2次座屈のところで発生し、B7供試体では、その座屈モードは、ボルト間で外に凸で発生している(図参照)。B7供試体のボルトピッチは、145mmであり、外殻板の板厚は 9mm であり、p=145＞12t=108となっている。一方、No.11供試体は p=100＜12t=108となっている。*) したがって、外殻板の板厚について、道示を満足している供試体No.11以上の剛性となるようボルトピッチを設定すれば、塑性率を向上できると考察できる。

なお、1本のみであるがボルトが+6δyへの移行時に破断している。これは、設計を終局状態で設計しており、1本のみであったことなどから、終局強度推定法は適当であると判断し、設計での材料定数として、γ_m=1.1～1.2 程度を考慮すればよいと考えられる。



＊）ボルトの座金径を差引いた距離で比較すると以下のようとなる。

〈B7〉

$p = 14.5 - 3.2 = 11.3$ cm

$I = bt^2/12$, $A = bt$

$r = \sqrt{(I/A)}$

$= t/\sqrt{12}$

$= 0.9/\sqrt{12}$

$= 0.26$ cm

$[\lambda] = (1/\pi)\cdot\sqrt{(\sigma y/E)}\cdot(p/r)$

$= (1/\pi)\cdot\sqrt{(3200/2,100,000)}\cdot(11.3/0.26)$

$= 0.54$

$[\sigma] = \sigma cr/\sigma y$

$= 1.109 - 0.545[\lambda]$

$= 0.81$ → 降伏応力度を確保できず、弾塑性座屈の範囲。

〈B11〉

$p = 10.0 - 4.4 = 5.6$ cm

$I = bt^2/12$, $A = bt$

$r = 0.9/\sqrt{12}$

$= 0.26$ cm

$[\lambda] = (1/\pi)\cdot\sqrt{(3200/2,100,000)}\cdot(5.6/0.26)$

$= 0.27$

$[\sigma] = \sigma cr/\sigma y$

$= 1.109 - 0.545[\lambda]$

$= 0.96$ → ほぼ降伏応力度を確保できる

(8) B8供試体

本供試体は、水平変位±2δyまでは荷重-水平変位はほぼ線形性を保持し、+5δyをピークに水平耐力は急激に低下し始め、+9δyで終局状態に至った。

フランジの座屈は+3δyで発生し、かつ縦リブにもねじり変形が認められた。同時に鋼板をハンマーで叩いたような衝撃音が頻繁に発生し始め、±4δyまで続いた。水平変位+5δyになると、供試体のコーナー部にねじり変形が現れ、−5δyで供試体基部に1cm程度のクラックが認められた。以後、変形量、クラックとも増大するにつれて、耐力の著しい減少が生じた。

橋脚角補強の効果は、+5δyでコーナー部にねじり変形が生じてから、水平耐力が急落したことから明らかである。補強鋼板と母材の間にある塗膜の影響は、先に行った土研No. 11供試体の実験結果との比較からはほとんど認められないと考えられる。

【参考文献】

1)日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案), pp. 参-1～参-25, 1995年6月（但し、「兵庫県南部地震による被災した道路橋の復旧に係る仕様」は1995年2月27日に通知された）.

2)日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案), 1995年6月.

3)日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 1994年2月.

鋼製橋脚の耐震設計法に関する研究会の委員名簿

〔第1回研究会（平成7年8月1日）、第2回研究会（平成7年11月14日）時点〕

本研究を進めるにあたり、委員の方々から貴重なご意見を賜った。ここに記して謝意を表します。

座長	横山　功一	建設省土木研究所構造橋梁部長
委員	青木　徹彦	愛知工業大学工学部土木工学科教授
	家村　浩和	京都大学工学部土木工学科教授
	宇佐美　勉	名古屋大学工学部土木工学科教授
	北田　俊行	大阪市立大学工学部土木工学科助教授
	後藤　芳顕	名古屋工業大学工学部社会開発工学科教授
	崎元　達郎	熊本大学工学部土木環境工学科教授
	杉浦　邦征	京都大学工学部土木工学科助教授
	中井　博	大阪市立大学工学部土木工学科教授
	長井　正嗣	長岡技術科学大学工学部建設系助教授
	福本　啓士	大阪大学工学部土木工学科教授
	藤野　陽三	東京大学工学部土木工学科教授
	藤原　稔	東北大学工学部土木工学科教授
	増田　陳紀	武蔵工業大学工学部土木工学科教授
	三木　千寿	東京工業大学工学部土木工学科教授
	依田　照彦	早稲田大学理工学部土木工学科教授
	渡邊　英一	京都大学工学部土木工学科教授
	西川　和廣	建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室長
	大塚　久哲	〃　地震防災部耐震研究室長
	運上　茂樹	〃　地震防災部耐震研究室主任研究員
	寺山　徹	〃　地震防災部耐震研究室主任研究員
	村越　潤	〃　構造橋梁部橋梁研究室主任研究員
	山本　悟司	〃　構造橋梁部橋梁研究室研究員
	上仙　靖	〃　構造橋梁部橋梁研究室研究員
	岩城　達思	〃　構造橋梁部橋梁研究室交流研究員
	三百田健治	日本道路公団技術部構造技術課課長代理
	緒方　辰男	〃　技術部構造技術課
	柄川　伸一	首都高速道路公団工務部設計技術課課長補佐
	田嶋　仁志	〃　工務部設計技術課設計基準班長
	堀江　佳平	阪神高速道路公団工務部設計課設計係長
	乙黒　幸年	〃　保全施設部保全技術課
	大橋　治一	本州四国連絡橋公団設計第二課課長代理
	安波　博道	新日本製鐵㈱鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター主任研究員
	名取　暢	㈱横河ブリッジ技術本部研究所研究課長
事務局	植野　芳彦	(財)国土開発技術研究センター研究第二部上席主任研究員
	大場　敦史	〃　研究第二部研究員

鋼製橋脚の耐震設計法に関する研究体制

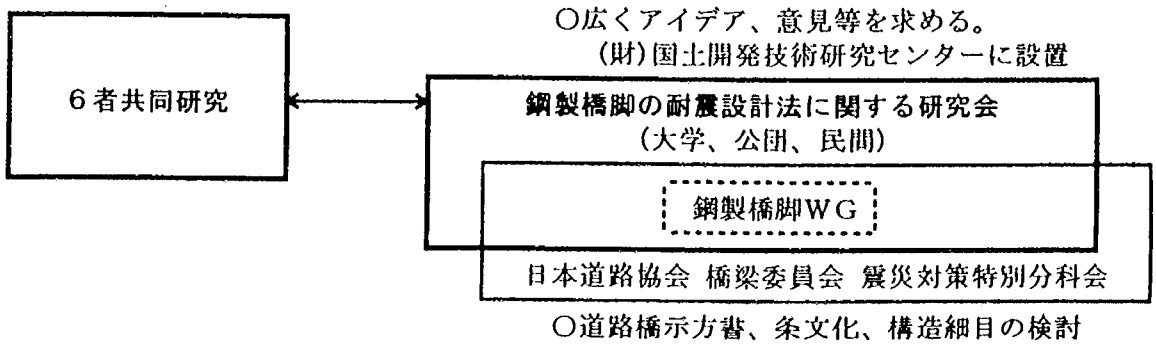


図　　表

実 験 概 要

表-2.1.1　供試体断面一覧

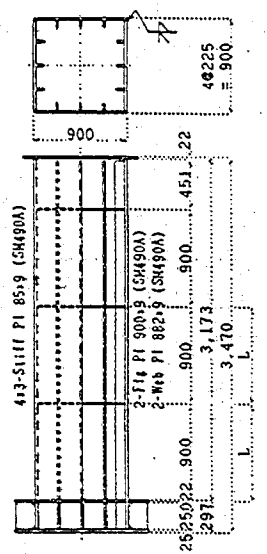
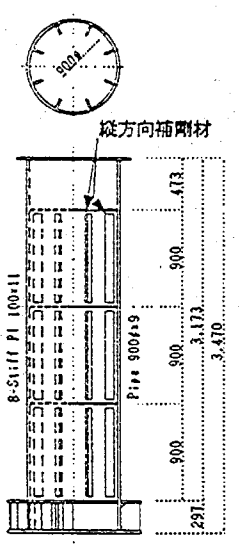
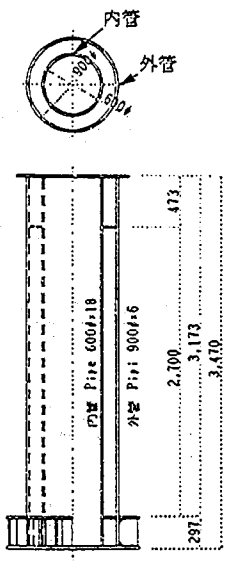
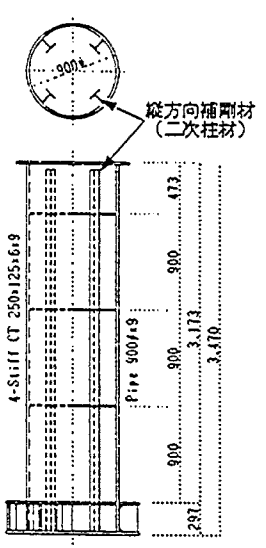
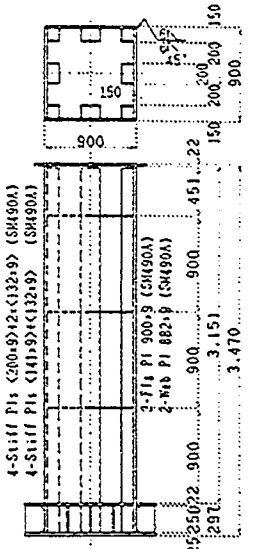
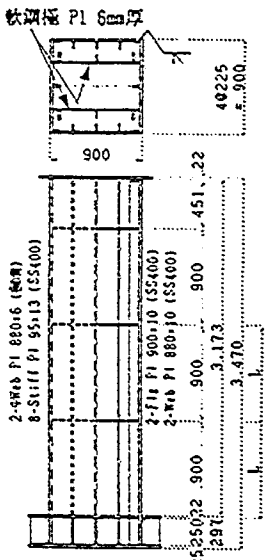
	①新設・既設対応（矩形断面） 高補剛基準断面（在来構造）	②新設・既設対応（円形断面） 縦方向補剛断面（不連続補剛材）	③新設対応（円形断面） 二重鋼管断面	④新設・既設対応（円形断面） 二次柱補剛断面（連続補剛材）	⑤新設対応（矩形断面） 閉リブ補剛断面	⑥新設対応（矩形断面断面） 極軟鋼組合せ断面
基本形状 断面図 側面図						
想定限界状態	補剛板の先行前座後、コーナー部の前壊	座屈の伝播(局部一円環)の抑制・抑止効果	外管の先行前座後、内管の前壊	鋼管の先行前座後、補剛材が柱として抵抗	板パネルの先行座屈後、閉リブ・外殻板コーナー部の前壊	中ウェブの先行前座後、外殻部材の前壊
構造パラメータ	・板厚 = 9 $R_R = \frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_y}{E}\cdot\frac{(12-\mu^2)}{\pi^2 k}}$ = 0.503 ・縦補剛材 $\gamma l = 1.43\cdot\gamma l_{req.}$, $R_H = 0.59$	・径厚比 R／t = 50 ・縦方向補剛材数:4(円周) 〃 ピッチ長 = l/l・D ・環補剛材 補剛材間隔 = D	・径厚比 外管 : R／t = 75 内管 : R／t = 16.6 ・環補剛材 補剛材間隔 = 3・D	・径厚比 R／t = 50 ・縦方向補剛材数:4(円周) 〃 形鋼:CT形鋼 ・環補剛材 補剛材間隔 = D	・板厚 = 9 $R_R = \frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_y}{E}\cdot\frac{(12-\mu^2)}{\pi^2 k}}$ = 0.456 ・縦補剛材 $R_H = 0.456$	・板厚 = 10 中ウェブ:6 $R_R = \frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_y}{E}\cdot\frac{(12-\mu^2)}{\pi^2 k}}$ = 0.267:Flg(0.449:Web) ・縦補剛材 $\gamma l = 1.04\cdot\gamma l_{req.}$, $R_H = 0.36$
主要部材寸法	・外殻板 tl= 9 ・縦リブ Web : 3-Pl 85×9 Flg : 3-Pl 85×9 ・横リブ ピッチ:L = 900 板厚 :t_s = 6	・外殻鋼管 D×t= 900× 9 ・縦リブ 8-Pl 100×11 ・横リブ(環補剛材) ピッチ:L = 900 板厚 :t_s = 9	・外殻鋼管 D_1×t_1= 900× 6　(外管) D_2×t_2= 600×18　(内管) ・縦リブ 無し ・横リブ(環補剛材) ピッチ:L = 2700 板厚 :t_s = 9	・外殻鋼管 D_1×t_1= 900× 9 ・縦リブ 4-CT 250×125 (125×125×6×9) ・横リブ(環補剛材) ピッチ:L = 900 板厚 :t_s = 9	・外殻板 tl= 9 ・縦リブ 4-Pls ⟨200×9⟩+2×⟨132×9⟩ 4-Pls ⟨141×9⟩+⟨132×9⟩ ・横リブ ピッチ:L = 900 板厚 :t_s = 9	・外殻板 tl= 10　中ウェブ:6(極軟鋼) ・縦リブ 8-Pl 95×13 4-Pl 70×13 + 2-Pl 60×6 ・横リブ ピッチ:L = 900 板厚 :t_s = 9
材質	SM490A	SS400	SS400	SS400	SM490A	SS400
特徴	在来構造で、補剛材を若干高剛性にした断面。基準断面のシリーズ出で、補剛材剛性の比較をする。	座屈の伝播(局部一円環)の抑制により、変形性能の向上を期待できる。	内管の強度(耐力)は小さいが、二重管全体の強度特性曲線の調整を可能にできる。	鋼管の座屈によりせん断剛性のみが低下し変形性能の向上を期待できる。	閉リブの初性の高さによって断面全体の初性の向上を期待できる。	部分的な低降伏点をもつ断面の早期座屈によって、断面全体の初性の向上を期待できる。
備考						

表-2.1.1　供試体断面一覧（つづき）

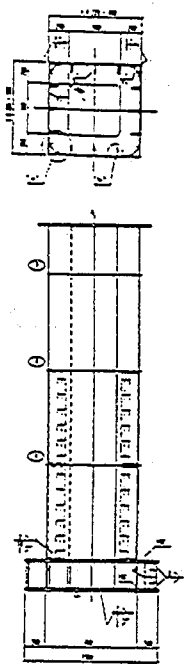
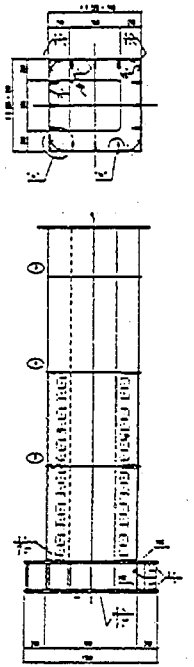
	⑦ 新設・既設対応（矩形断面）	⑧ 新設・既設対応（矩形断面）
	角補強（1）	角補強（2）
基本形状 断面図 側面図		
想定限界状態	補剛板の先行座屈後、角部の崩壊	補剛板の先行座屈後、角部の崩壊
構造パラメータ	・板厚＝9 $R_2 \frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_y}{E}\cdot\frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}}$ ＝0.51 ・縦補剛材 $\gamma_l = 0.91 \cdot \gamma_{l.req}$	・板厚＝9 $R_2 \frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_y}{E}\cdot\frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}}$ ＝0.51 ・縦補剛材 $\gamma_l = 0.91 \cdot \gamma_{l.req}$
主要部材寸法	外殻板　t1＝9 ・縦リブ Web:3-pl 80×6 Flg　:3-pl 80×6 ・横リブ ピッチ:L＝900 板厚:t_D＝6	外殻板　t1＝9 ・縦リブ Web:3-pl 80×6 Flg　:3-pl 80×6 ・横リブ ピッチ:L＝900 板厚:t_D＝6
材質	SM490A	SM490A
特徴	角部の剛性を増加させて靭性を向上させる。ボルトM16、ピッチ145mm。	角部の剛性を増加させて靭性を向上させる。ボルトM22、ピッチ100mm、ボルト部は塗装。
備考		

表-2.1.2(1)　主なパラメータ（矩形断面）

供試体	種類	角補強における補剛材*1)の断面形状寸法	載荷方法*2)	軸力比 N/N_{yM}*3)	幅厚比 R_R*4)	幅厚比 R_F*5)	リブ剛度 γ_l/γ_l^**6)	リブ剛度 $\gamma_l/\gamma_{l.req}$*7)	中詰めコンクリートの高さ(mm)	実験年度	実験場所
B1	基本	—	1	0.113	0.59	0.49	1.47	1.47	—	H7	土研
B5	新設	—	1	0.110	0.53	0.54	0.97	1.14	—	H7	土研
B6	新設	—	1	0.153	0.43	0.31	1.91	3.03	—	H7	土研
B7	角ボルト	内側CP:275x6	1	0.130	0.55	0.57	0.91	0.91	—	H8	土研
B8	角ボルト(塗装)	内側CP:275x6	1	0.130	0.55	0.57	0.91	0.91	—	H8	土研

ここに、＊1）CP:コーナープレートを意味する。

＊2）"数字"は正負交番繰り返し載荷における繰り返し回数をさす（図－2.2.2参照）。

＊3）N:軸力(tf)、N_{yM}:降伏軸力(tf)(=A・σ_{yM})、A:断面積(cm^2)
σ_{yM}:材料試験結果に基づく下降伏点(kgf/cm^2)

＊4）R_R:補剛材間のパネルの幅厚比パラメータ　$\left(=\frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_{yM}}{E}\frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k_R}}\right)$

t:板厚(cm)
b:補剛板の全幅(cm)、E:ヤング係数($2.1\times10^6 kgf/cm^2$)、μ:ポアソン比(=0.3)
k_R:座屈係数($=4n^2$)、n:縦方向補剛材によって区切られるパネル数($n\geqq2$)

＊5）R_F:補剛板全体の幅厚比パラメータ　$\left(=\frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_{yM}}{E}\frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k_F}}\right)$

k_F:座屈係数　$k_F=\frac{(1+\alpha^2)^2+n\gamma_l}{\alpha^2(1+n\delta_l)}$　$(\alpha\leq\alpha_0)$

$k_F=\frac{2(1+\sqrt{1+n\gamma_l})}{1+n\delta_l}$　$(\alpha>\alpha_0)$

γ_l:縦方向補剛材の剛比　$\left(=\frac{I_l}{\frac{bt^3}{11}}\right)$

α :補剛材の縦横寸法比、$\alpha=a/b$
α_0:限界縦横寸法比、$\alpha_0=\sqrt{(1+n\gamma_l)}$
I_l :縦方向補剛材1個の断面二次モーメント(cm4)
A_l :縦方向補剛材1個の断面積(cm2)

δ_l:補剛材の断面積比　$\left(=\frac{A_l}{bt}\right)$

＊6）γ_l^*:補剛材の限界剛比（弾性座屈理論による）

$$\gamma_l^*=\begin{cases}4\alpha^2 n(1+n\delta_l)-\dfrac{(1+\alpha^2)^2}{n} & (\alpha<\sqrt[4]{1+n\gamma_l})\\ \dfrac{1}{n}\left[\left\{2n^2(1+n\delta_l)-1\right\}^2-1\right] & (\alpha\geq\sqrt[4]{1+n\gamma_l})\end{cases}$$

＊7）$\gamma_{l.req}$:補剛材の必要剛比

表-2.1.2(2)　主なパラメータ（円形断面）

供試体	種類	鋼板巻き立て補強の仕様(mm)	軸力比 N/N_{yM}	径厚比 R／t	径厚比パラメータ $Rt^{*8)}$	中詰めコンクリートの高さ(mm)	実験年度	実験場所
B2	縦リブ断続	—	0.123	50.0	0.113	—	H7	土研
B3	二重管	—	0.112	75.0 (16.7)	0.197 (0.040)	—	H7	土研
B4	縦リブ連続	—	0.124	50.0	0.113	—	H7	土研

注）B3のカッコ内は内管を示す。

ここに、＊8)

$$R_t = \frac{(R - t/2)}{t} \cdot \frac{\sigma_{yM}}{E} \sqrt{3(1-\mu^2)}$$

R:円形断面の中心から板厚外縁までの半径

表-2.1.3(1)　矩形断面供試体の諸元

供試体番号	B1	B5	B6	B7	B8	
外形寸法(mm)	900x900	900x900	900x900	900x900	900x900	
板厚 t(mm)	9	9	10(11)	9	9	
縦リブ寸法(mm)	85x9	200x8 +2-80x8	95x13	80x6	80x6	
横リブ間隔 a(mm)	900	1050.3	900	900	900	
補剛板の全幅 b(mm)	900	900	900	900	900	
縦リブで区切られるパネル数	4	2	4	4	4	
鋼種	SM490	SM490	SS400 (極軟鋼)	SM490	SM490	
鋼材下降伏点 σ_{yM}(kgf/cm2)	4,230	4,349	2,773 (889)	3,678	3,678	
断面積 A(cm2)	412.7	404.0	454.8	378.4 (447.0)	378.4 (447.0)	
断面2次モーメント I(cm4)	513,113	517,276	533,290	480,500 (584,200)	480,500 (584,200)	
断面2次半径 r(cm)	35.26	35.78	34.24	35.63 (36.15)	35.63 (36.15)	
載荷点高さ h(cm)	342.3	342.3	342.3	342.3	342.3	
有効座屈長 l(=2h)(cm)	684.6	684.6	684.6	684.6	684.6	
細長比パラメータ λ	0.277	0.277	0.231	0.256 (0.252)	0.256 (0.252)	
幅厚比パラメータ R_R	0.59	0.53	0.43	0.55	0.55	
幅厚比パラメータ R_F	0.49	0.54	0.31	0.57	0.57	
縦リブ剛度 γ_l / γ_l*	1.47	0.97	1.91	0.91	0.91	
縦リブ剛度 $\gamma_l / \gamma_{l\,req}$	1.47	1.14	3.03	0.91	0.91	
軸力 N(tf)	198.1	193.9	192.8	181.6	181.6	
軸力比 N/N_{yN}	0.150	0.150	0.177	0.150 (0.127)	0.150 (0.127)	
軸力比 N/N_{yM}	0.113	0.110	0.153	0.130 (0.110)	0.130 (0.110)	
コンクリート圧縮強度 σc(kgf/cm2)	–	–	–	–	–	

注)1. B6のカッコ内は、シェアウェブを示す。
2. HTBによる補強材の断面等は既設橋脚の補強をイメージしたので考慮していない。
なお、参考までに補強材の断面等を考慮した値をカッコ内に示す。

表－2.1.3(2)　円形断面供試体の諸元

供試体番号	B2	B3	B4			
外形寸法(mm)	900	900	900			
半径 R(mm)	450	450 (300)	450			
板厚 t(mm)	9	6 (18)	9			
縦リブ寸法(mm)	100x11	-	125x9 +116x6			
径厚比 R／t	50.0	75.0 (16.7)	50.0			
径厚比パラメータ Rt	0.113	0.188 (0.040)	0.113			
横リブ間隔 (mm)	900	--	900			
鋼種	SS400	SS400	SS400			
鋼材下降伏点 σ_{yM}(kgf/cm2)	2,907	3,200	2,897			
断面積 A(cm2)	251.9	497.6	324.8			
断面2次モーメント I(cm4)	250,023	307,844	304,231			
断面2次半径 r(cm)	31.50	24.87	30.61			
載荷点高さ h(cm)	342.3	342.3	342.3			
有効座屈長 l(=2h)(cm)	684.6	684.6	684.6			
細長比パラメータ λ	0.257	0.342	0.264			
軸力 N(tf)	90.7	179.1	116.9			
軸力比 $N／N_{yN}$	0.150	0.150	0.150			
軸力比 $N／N_{yM}$	0.124	0.112	0.124			
鋼板巻き立て補強における隙間の大きさ(mm)	-	-	-			
中詰めコンクリート高さ(mm)	-	-	-			
コンクリート圧縮強度 σc(kgf/cm2)	-	-	-			

注）B3のカッコ内は、内管を示す。また、鋼材下降伏点は外管、内管の平均値とした。

ここに、　$\overline{\lambda} = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{\sigma_{yM}}{E}} \cdot \frac{l}{\gamma}$　,$(l = 2h)$

$\gamma = \sqrt{\frac{I}{A}}$

N_{yN}:公称降伏軸力(tf)(＝A・σ_{yN})、A:断面積(cm2)
σ_{yN}:公称降伏点(kgf/cm2)

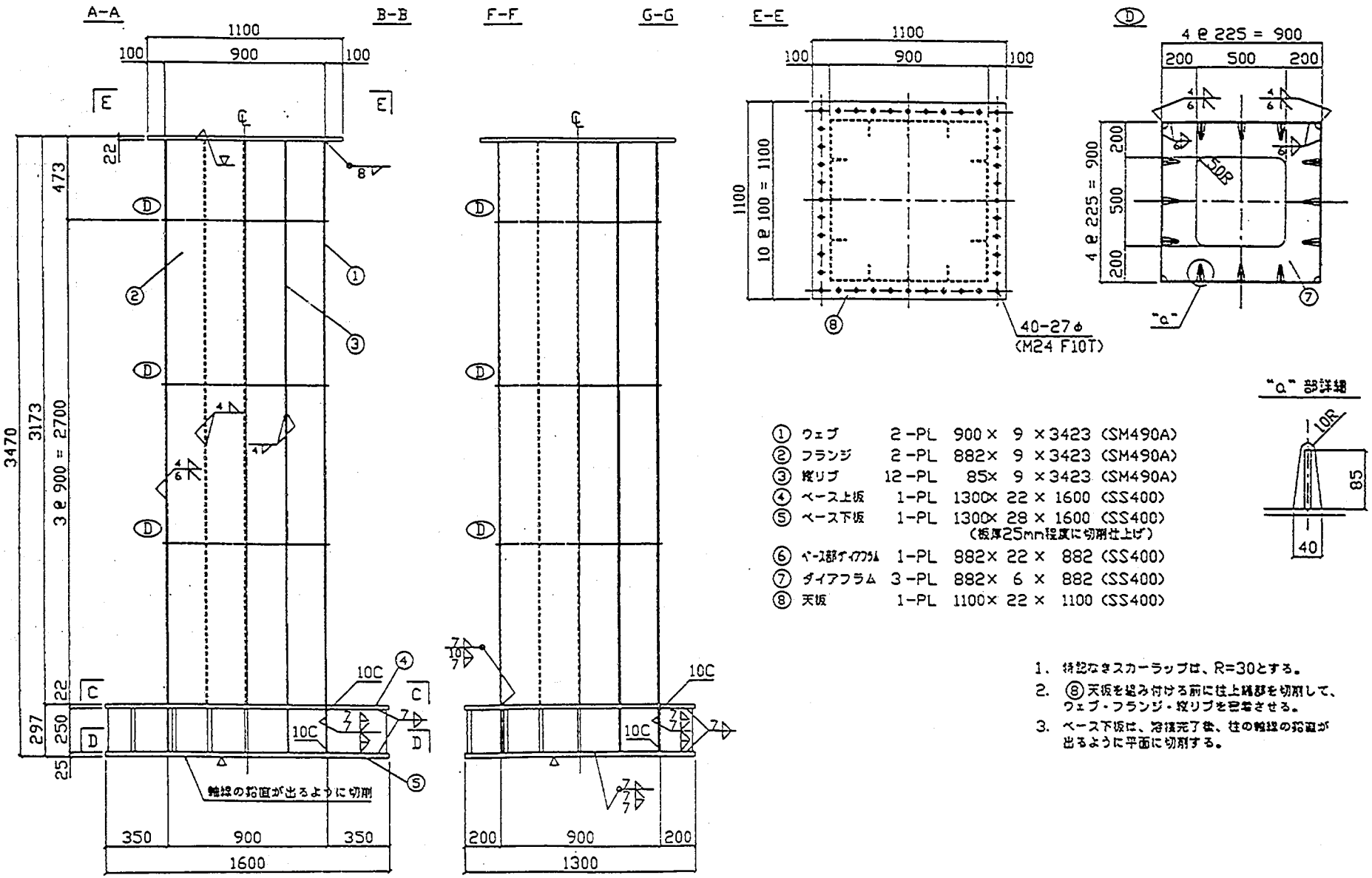
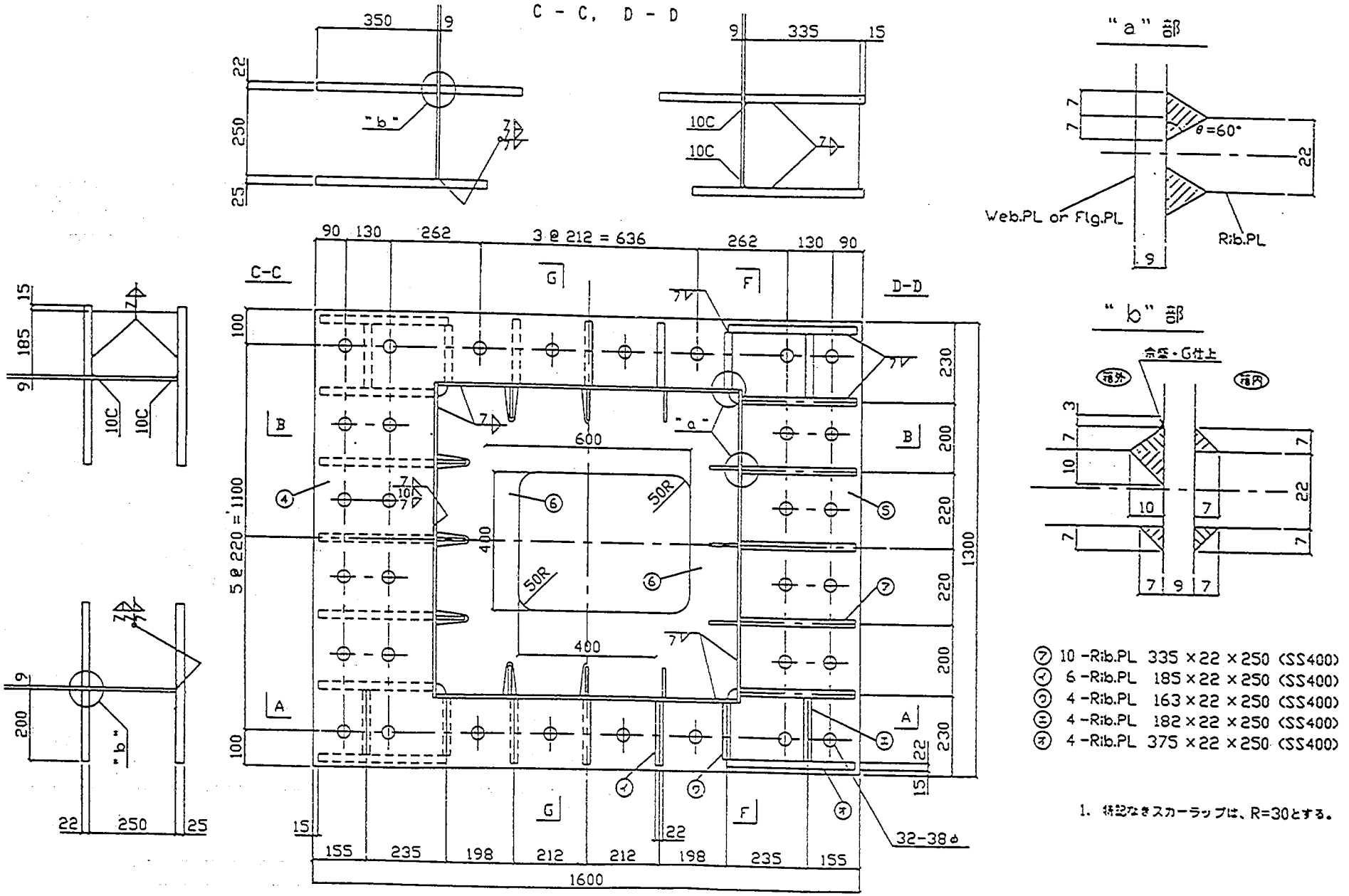


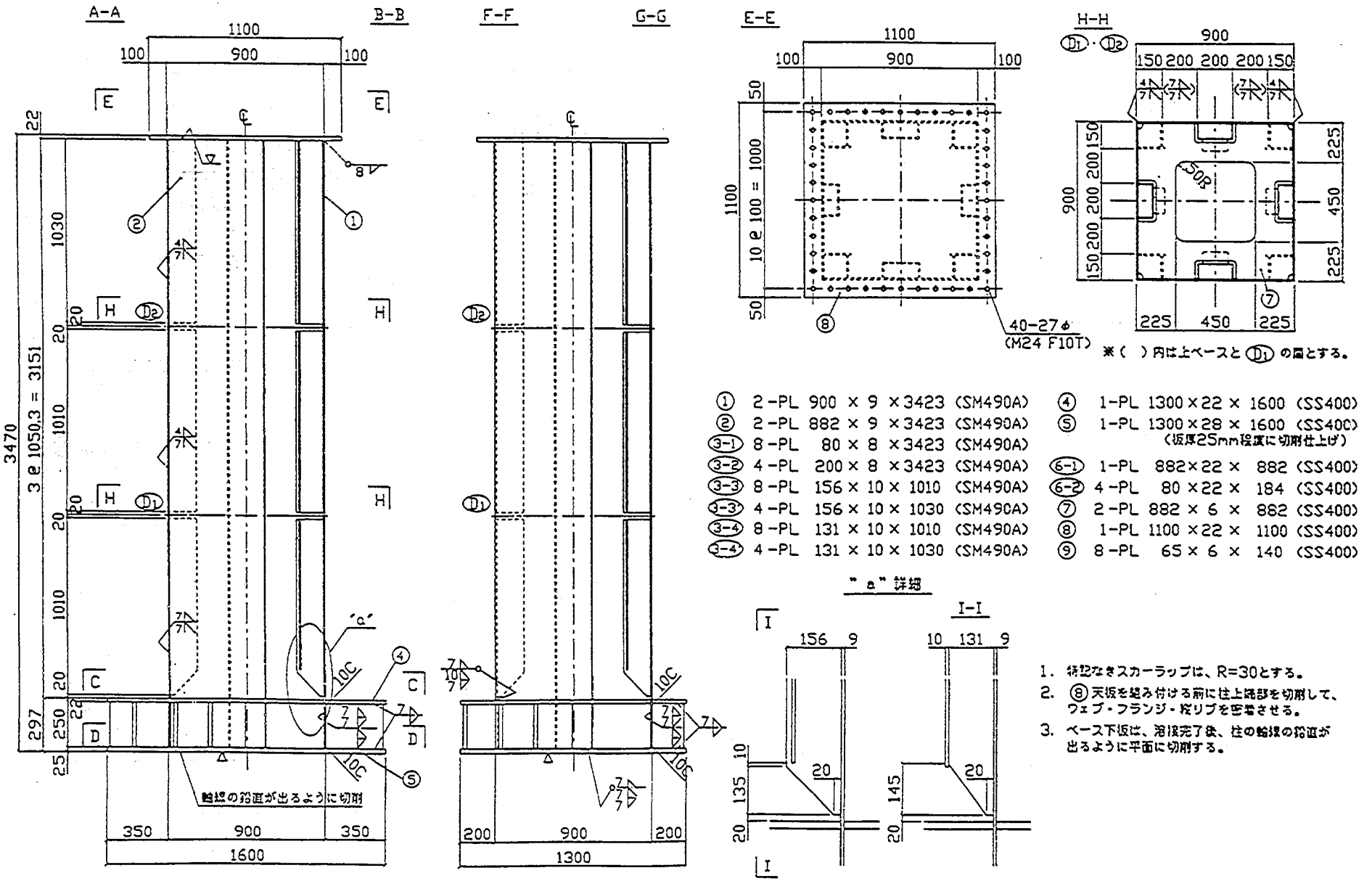
図-2.1.1(1) 矩形断面供試体の形状・寸法（B1）



⑦ 10 -Rib.PL 335 × 22 × 250 (SS400)
⑥ 6 -Rib.PL 185 × 22 × 250 (SS400)
④ 4 -Rib.PL 163 × 22 × 250 (SS400)
⑤ 4 -Rib.PL 182 × 22 × 250 (SS400)
⑧ 4 -Rib.PL 375 × 22 × 250 (SS400)

1. 特記なきスカーラップは、R=30とする。

図-2.1.1(1) 矩形断面供試体の形状・寸法（B1）（つづき）



①	2	-PL	900 × 9 × 3423	(SM490A)	④	1	-PL 1300×22 × 1600 (SS400)
②	2	-PL	882 × 9 × 3423	(SM490A)	⑤	1	-PL 1300×28 × 1600 (SS400) (板厚25mm程度に切削仕上げ)
③-1	8	-PL	80 × 8 × 3423	(SM490A)			
③-2	4	-PL	200 × 8 × 3423	(SM490A)	⑥-1	1	-PL 882×22 × 882 (SS400)
③-3	8	-PL	156 × 10 × 1010	(SM490A)	⑥-2	4	-PL 80 ×22 × 184 (SS400)
④-3	4	-PL	156 × 10 × 1030	(SM490A)	⑦	2	-PL 882 × 6 × 882 (SS400)
③-4	8	-PL	131 × 10 × 1010	(SM490A)	⑧	1	-PL 1100 ×22 × 1100 (SS400)
④-4	4	-PL	131 × 10 × 1030	(SM490A)	⑨	8	-PL 65 × 6 × 140 (SS400)

1. 特記なきスカーラップは、R=30とする。
2. ⑧天板を組み付ける前に柱上端部を切削して、ウェブ・フランジ・桁リブを密着させる。
3. ベース下板は、溶接完了後、柱の輪郭の鉛直が出るように平面に切削する。

図-2.1.1(2)　矩形断面供試体の形状・寸法（B５）

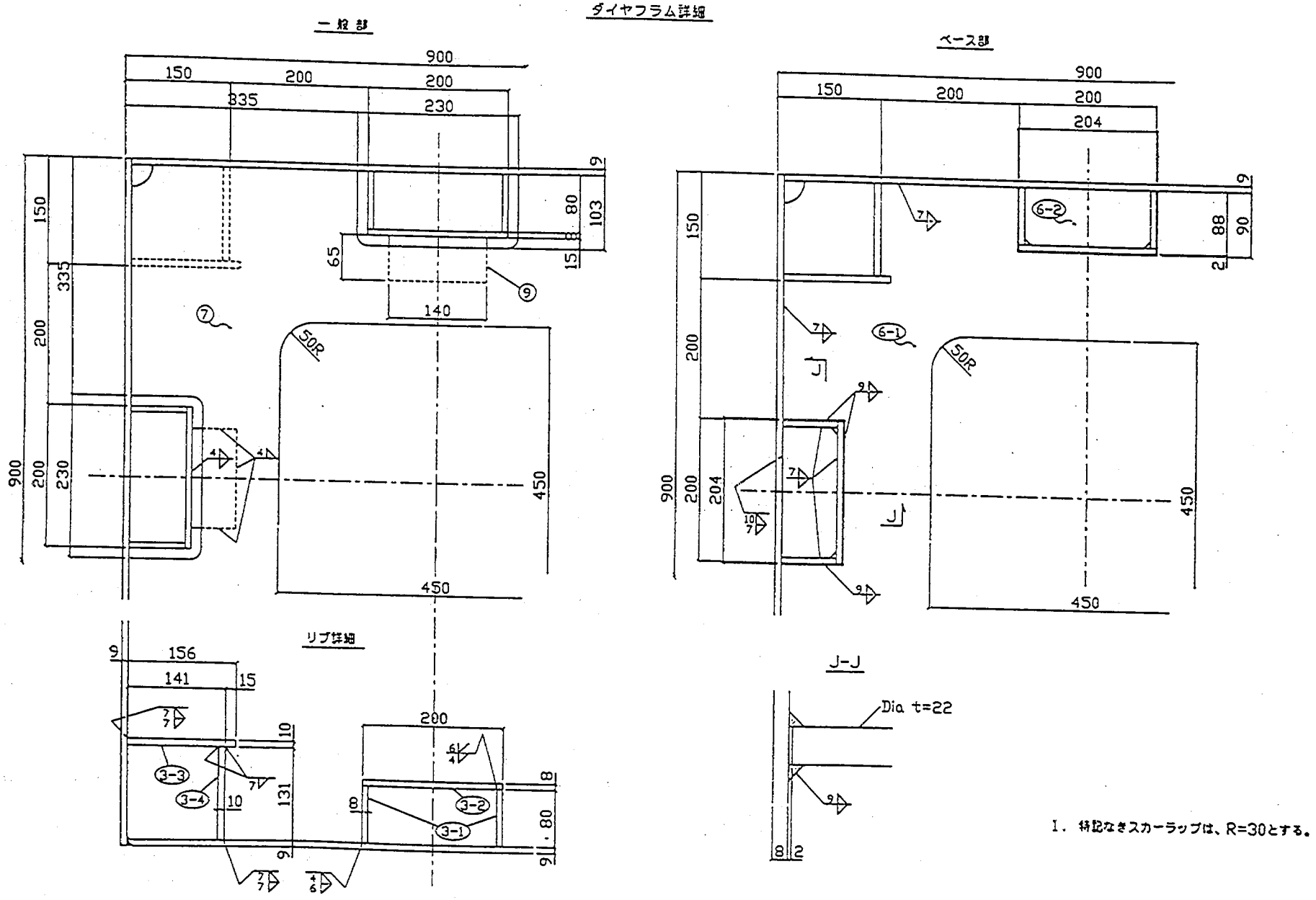


図-2.1.1(2)　矩形断面供試体の形状・寸法（Ｂ５）（つづき）

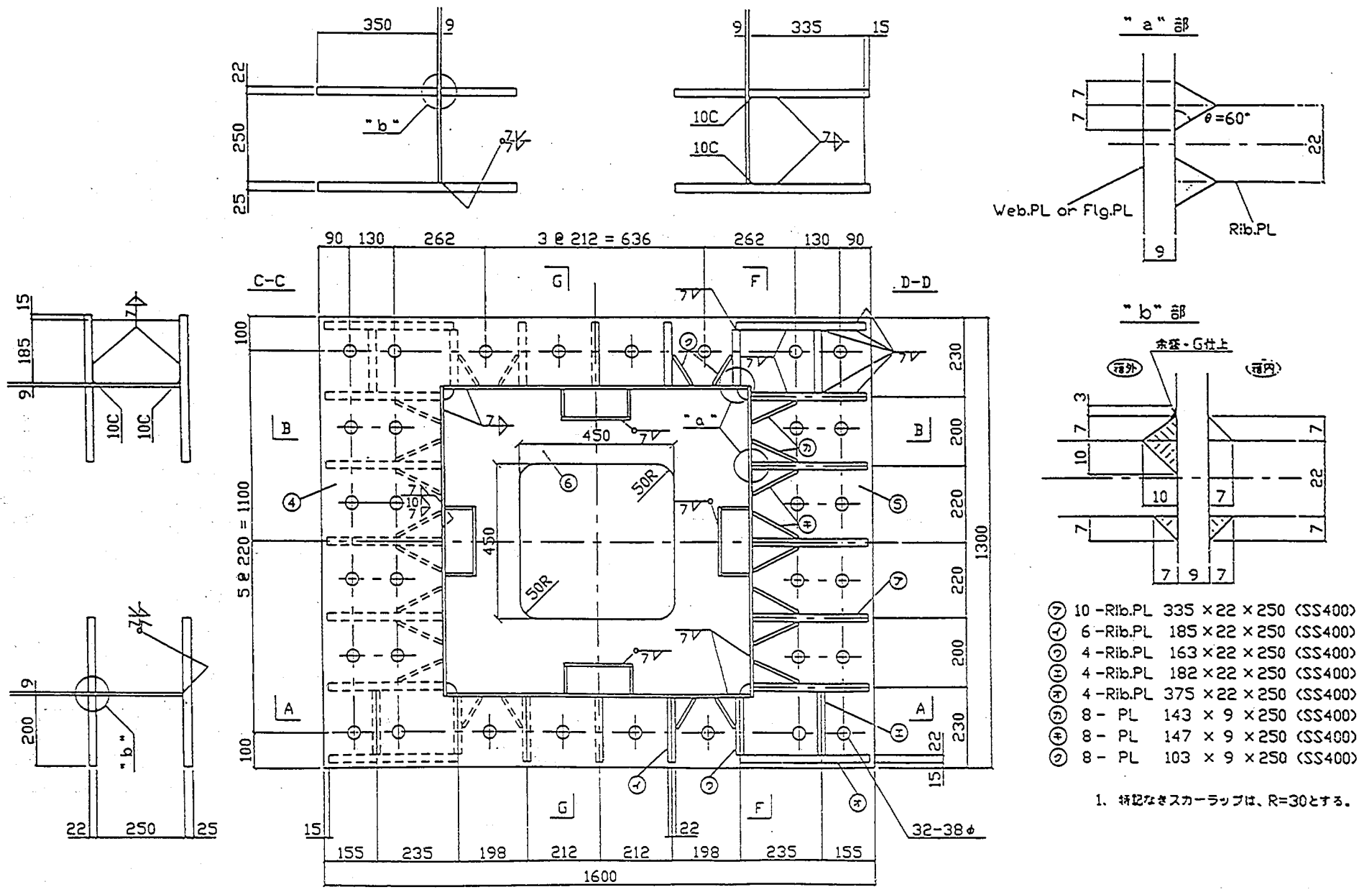
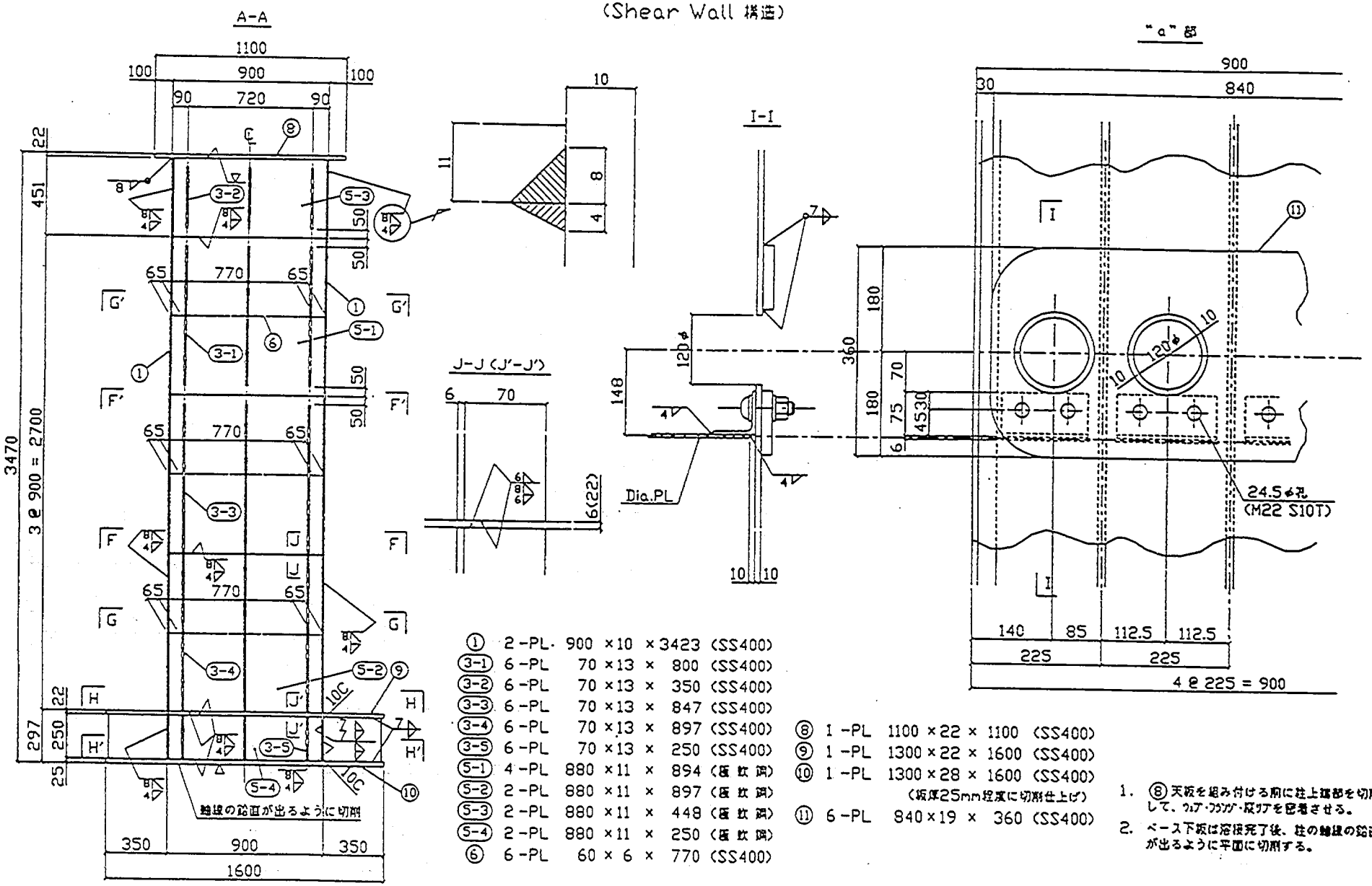


図-2.1.1(2) 矩形断面供試体の形状・寸法（B5）（つづき）

(Shear Wall 構造)

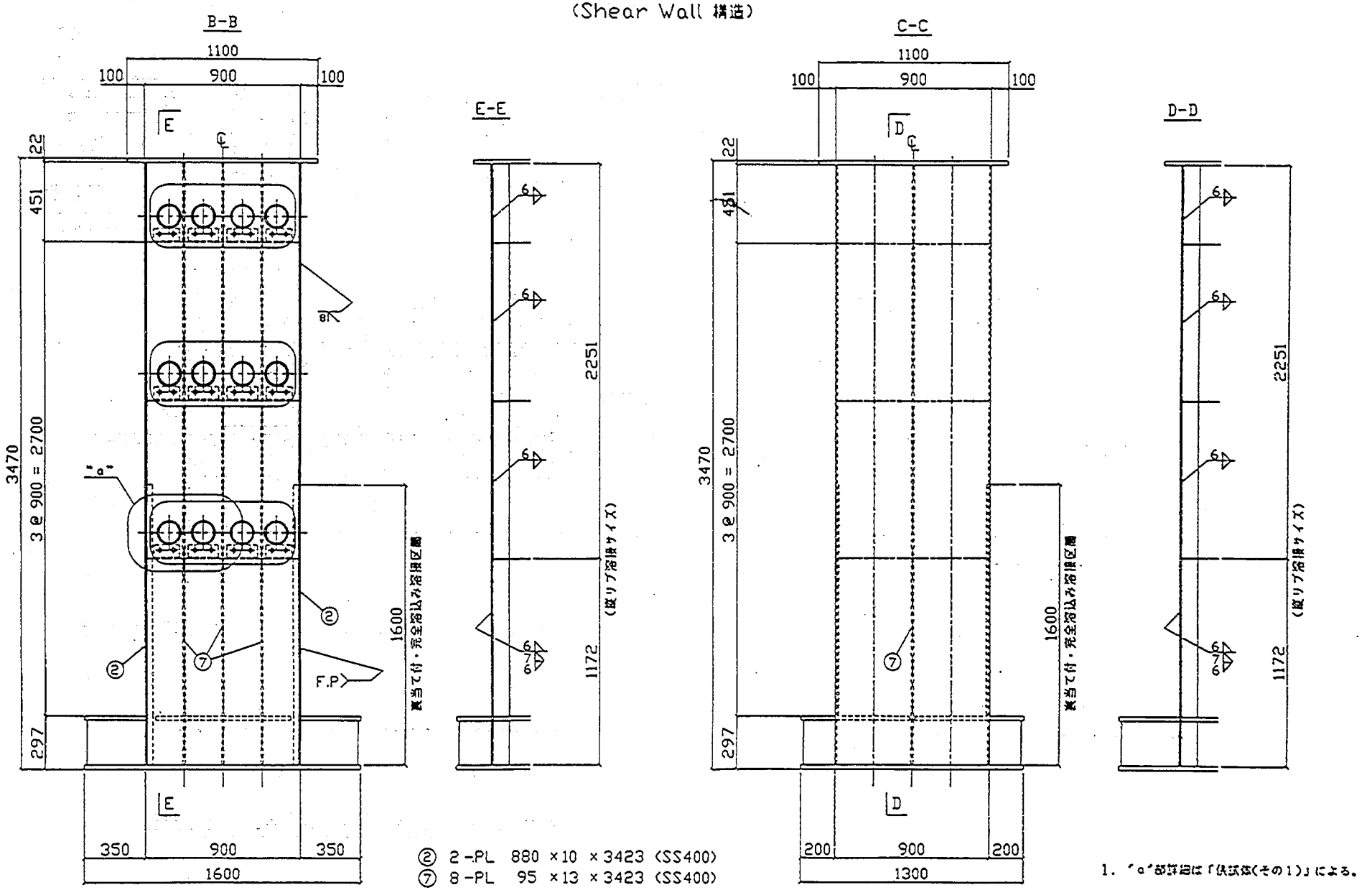


①	2 -PL	900	× 10	× 3423	(SS400)
③-1	6 -PL	70	× 13	× 800	(SS400)
③-2	6 -PL	70	× 13	× 350	(SS400)
③-3	6 -PL	70	× 13	× 847	(SS400)
③-4	6 -PL	70	× 13	× 897	(SS400)
③-5	6 -PL	70	× 13	× 250	(SS400)
⑤-1	4 -PL	880	× 11	× 894	(座 放 図)
⑤-2	2 -PL	880	× 11	× 897	(座 放 図)
⑤-3	2 -PL	880	× 11	× 448	(座 放 図)
⑤-4	2 -PL	880	× 11	× 250	(座 放 図)
⑥	6 -PL	60	× 6	× 770	(SS400)

⑧	1 -PL	1100	× 22	× 1100	(SS400)
⑨	1 -PL	1300	× 22	× 1600	(SS400)
⑩	1 -PL	1300	× 28	× 1600	(SS400)
		(板厚25mm程度に切削仕上げ)			
⑪	6 -PL	840	× 19	× 360	(SS400)

1. ⑧天板を組み付ける前に柱上端部を切削して、ウェブ・フランジ・段リアを密着させる。
2. ベース下板は溶接完了後、柱の軸線の鉛直が出るように平面に切削する。

図-2.1.1(3)　矩形断面供試体の形状・寸法.（B 6）



② 2 -PL 880 ×10 ×3423 (SS400)
⑦ 8 -PL 95 ×13 ×3423 (SS400)

1. 'a' 部詳細は「供試体(その1)」による。

図-2.1.1(3) 矩形断面供試体の形状・寸法（B６） （つづき）

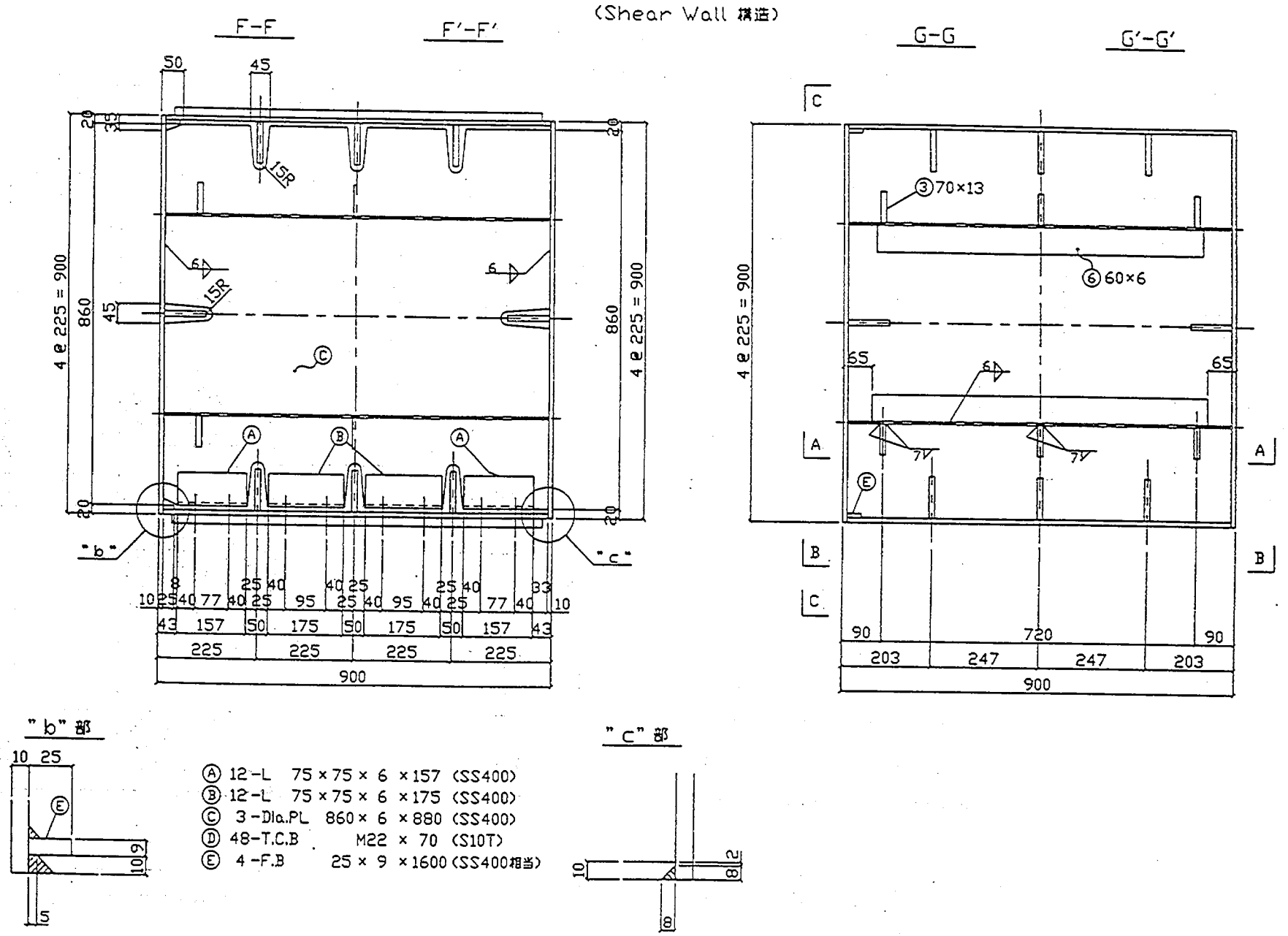


図-2.1.1(3) 矩形断面供試体の形状・寸法（B 6）（つづき）

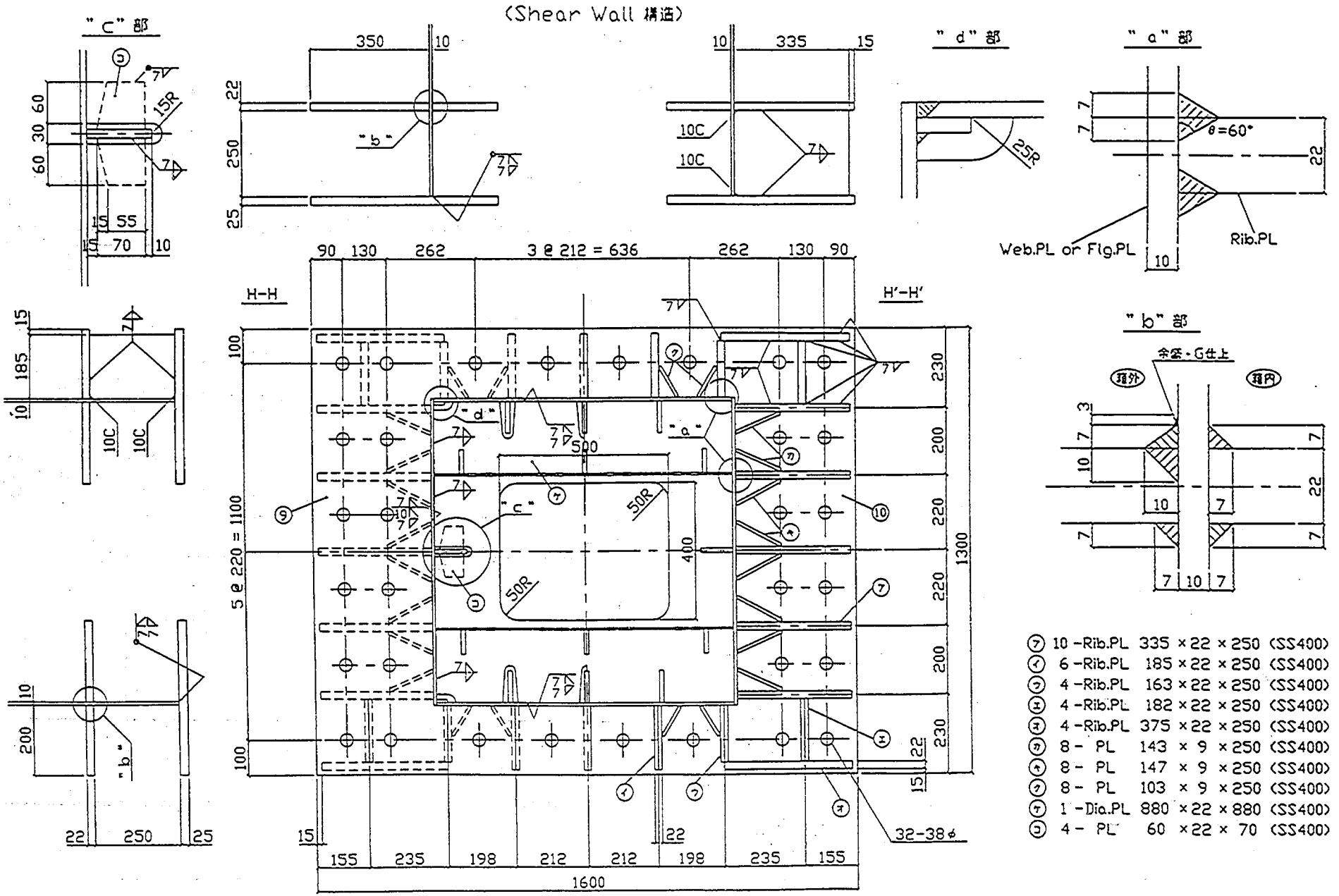
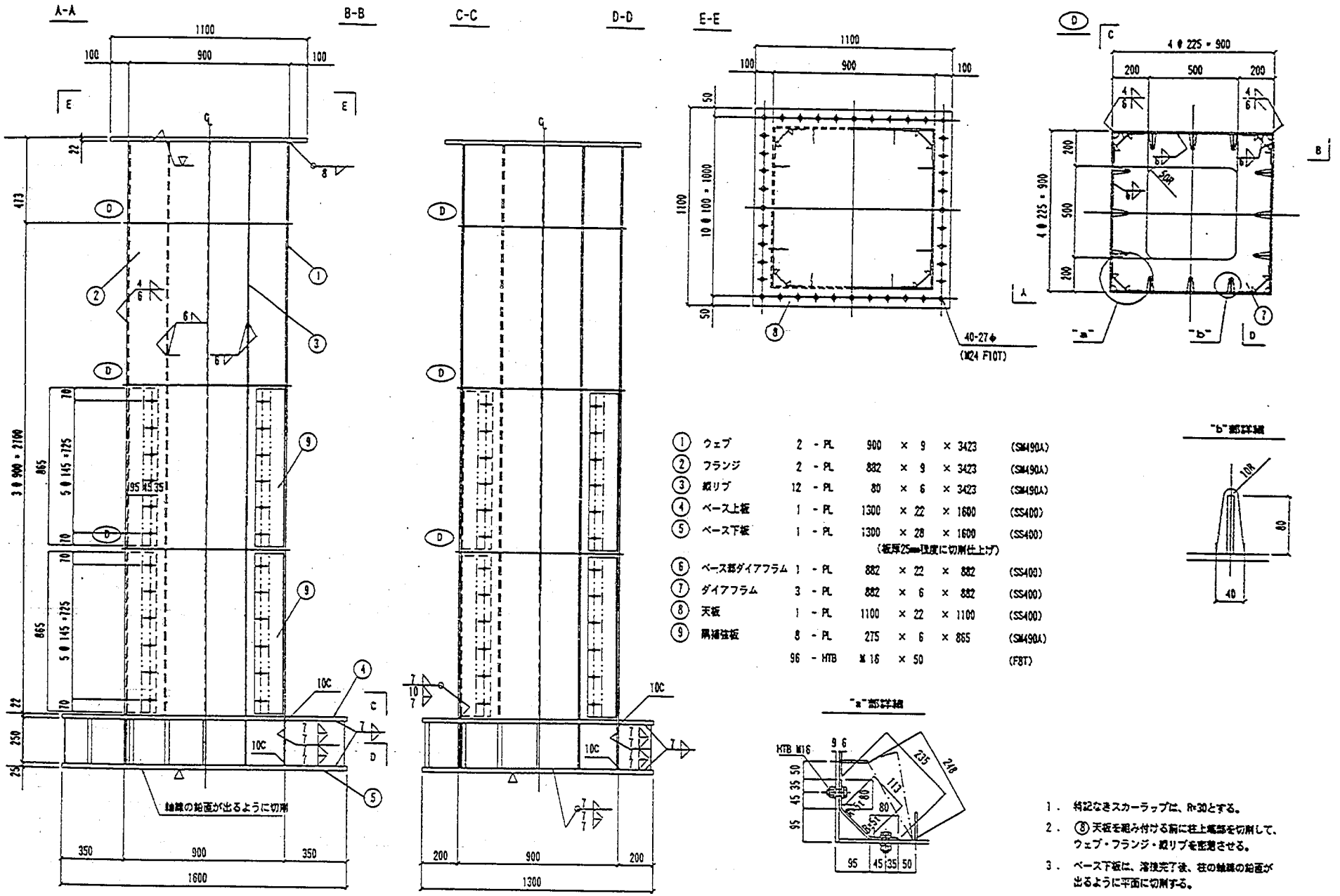


図-2.1.1(3) 矩形断面供試体の形状・寸法（B 6）（つづき）



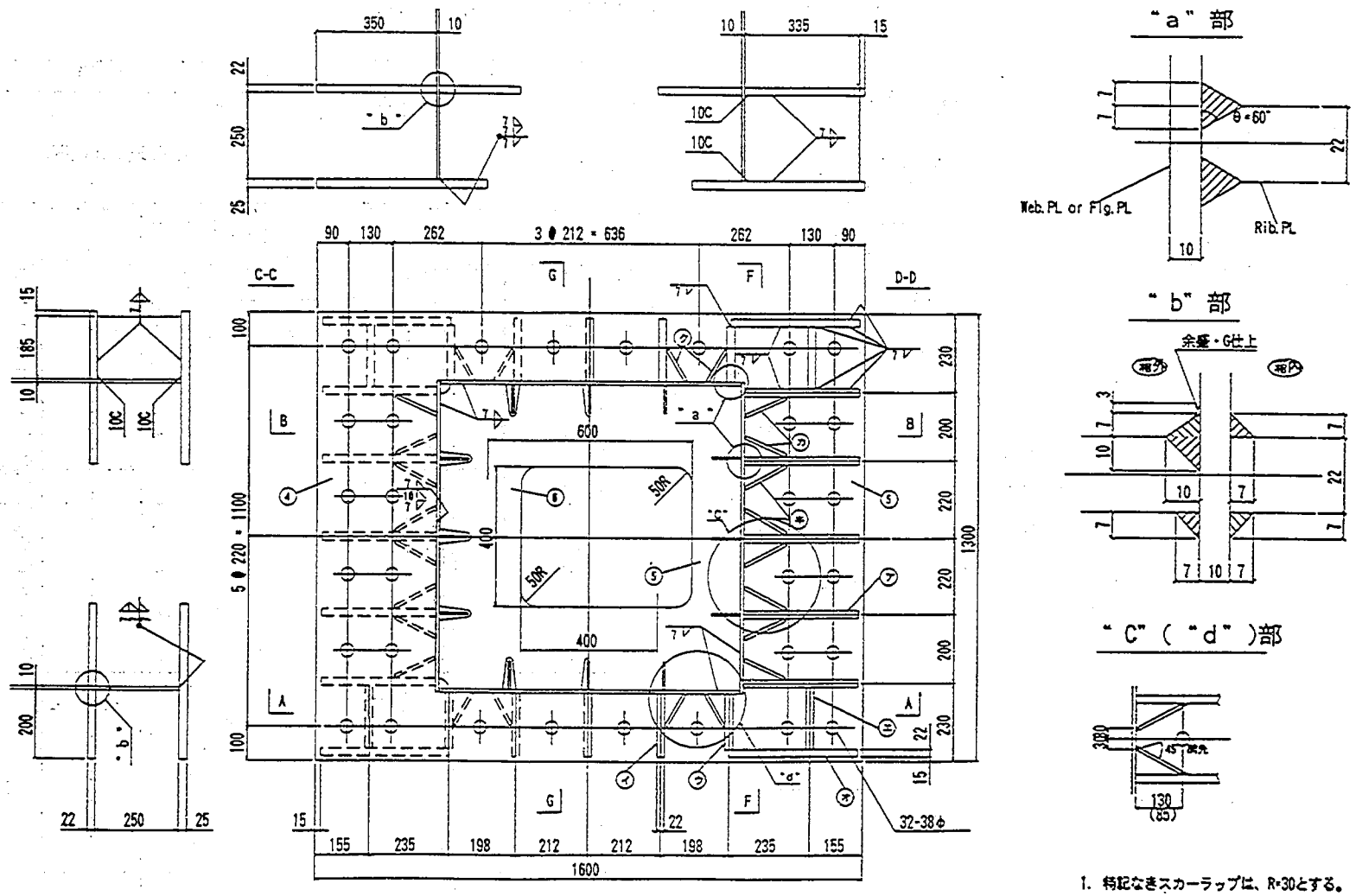
①	ウェブ	2	- PL	900	× 9	× 3423	(SM490A)
②	フランジ	2	- PL	882	× 9	× 3423	(SM490A)
③	縦リブ	12	- PL	80	× 6	× 3423	(SM490A)
④	ベース上板	1	- PL	1300	× 22	× 1600	(SS400)
⑤	ベース下板	1	- PL	1300	× 28	× 1600	(SS400)
				(板厚25mm程度に切削仕上げ)			
⑥	ベース部ダイアフラム	1	- PL	882	× 22	× 882	(SS400)
⑦	ダイアフラム	3	- PL	882	× 6	× 882	(SS400)
⑧	天板	1	- PL	1100	× 22	× 1100	(SS400)
⑨	隅補強板	8	- PL	275	× 6	× 865	(SM490A)
		96	- HTB	M 16	× 50		(F8T)

1．特記なきスカーラップは、R=30とする。

2．⑧天板を組み付ける前に柱上端部を切削して、ウェブ・フランジ・縦リブを密着させる。

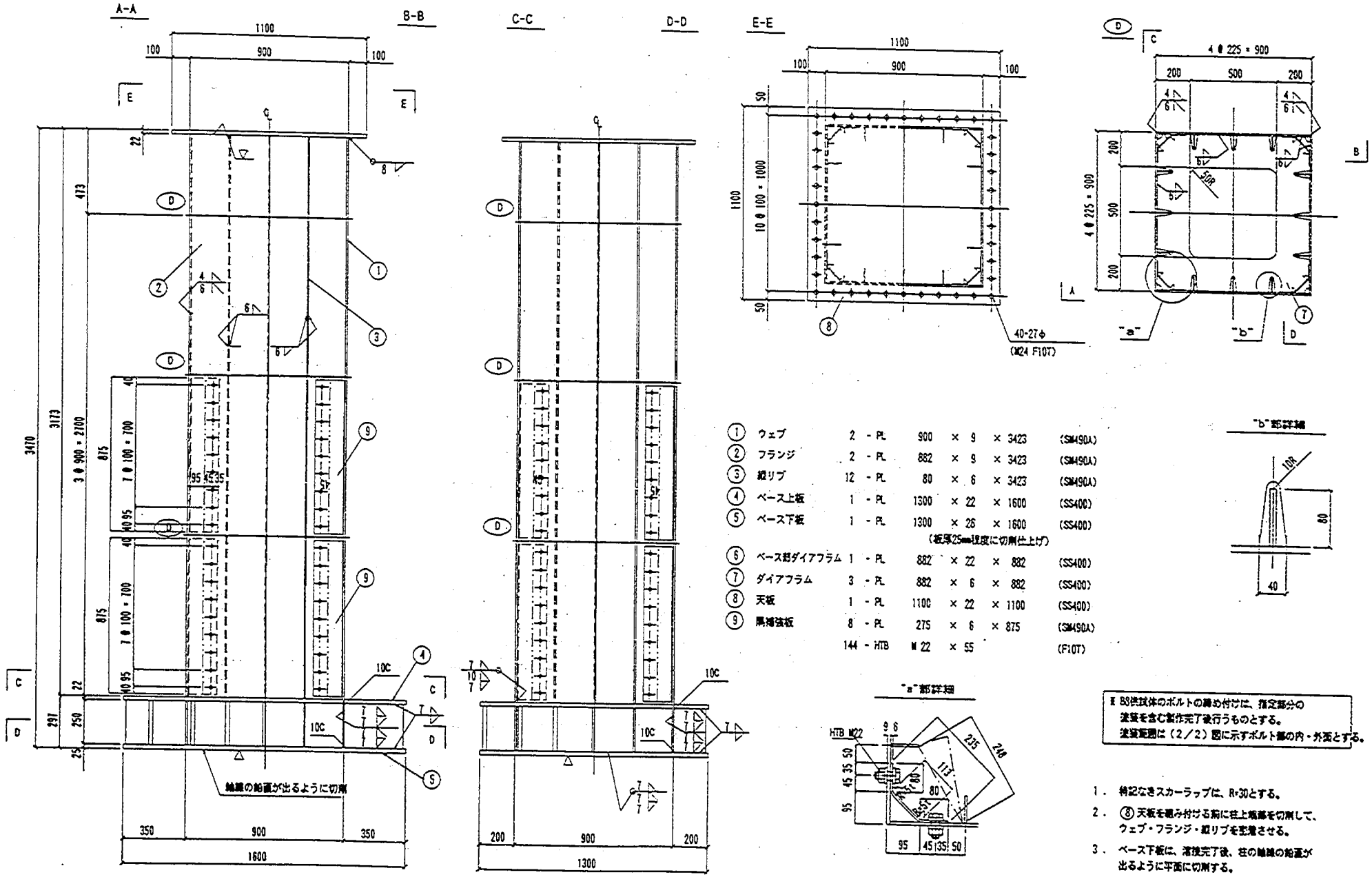
3．ベース下板は、溶接完了後、柱の軸線の鉛直が出るように平面に切削する。

図-2.1.1(4)　矩形断面供試体の形状・寸法（B７）



⑦	10 - Rib.PL	335	×22	×250	(SS400)
①	6 - Rib.PL	185	×22	×250	(SS400)
②	4 - Rib.PL	163	×22	×250	(SS400)
㊁	4 - Rib.PL	182	×22	×250	(SS400)
㊅	4 - Rib.PL	375	×22	×250	(SS400)
③	8 - PL	143	× 9	×250	(SS400)
⑧	8 - PL	147	× 9	×250	(SS400)
⑨	8 - PL	103	× 9	×250	(SS400)

図-2.1.1(4)　矩形断面供試体の形状・寸法（B７）（つづき）

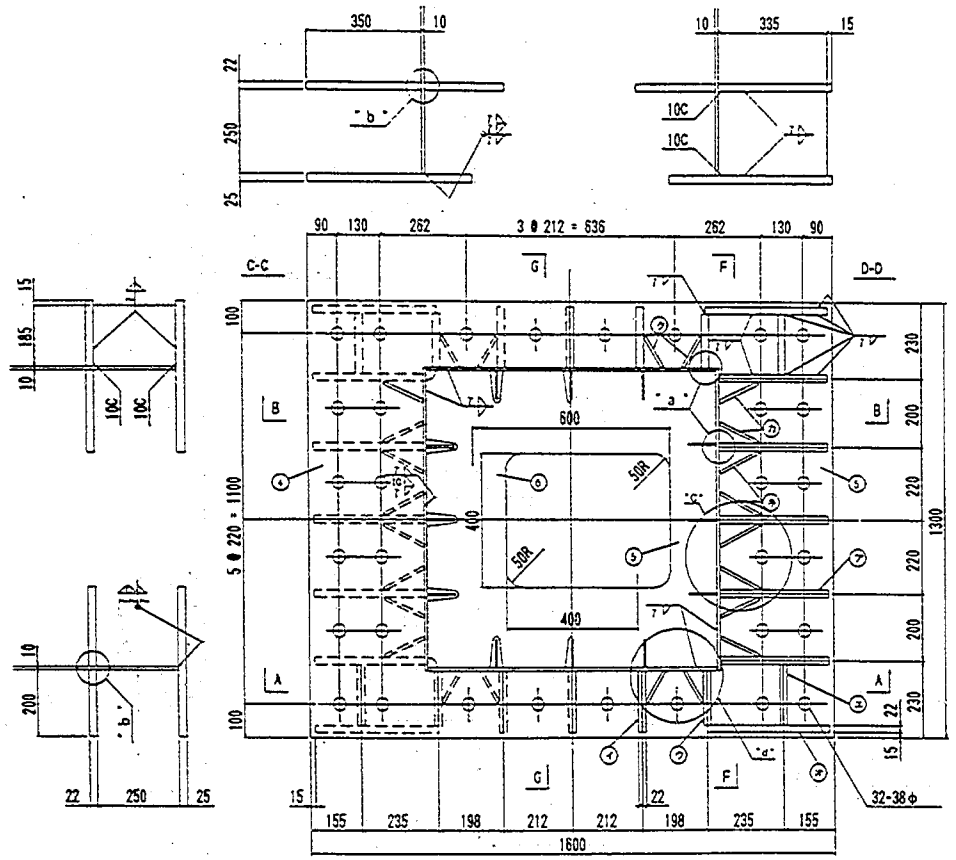


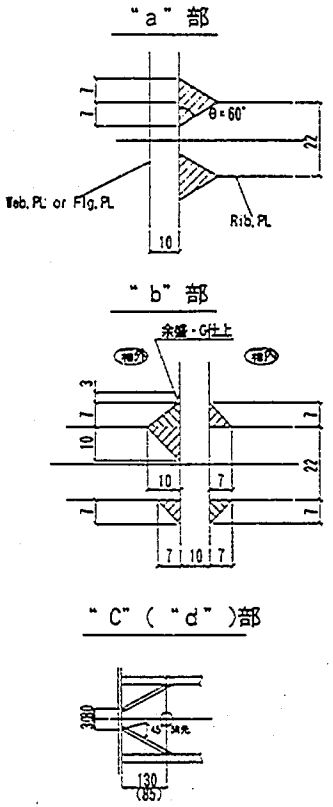
①	ウェブ	2	- PL	900	× 9	× 3423	(SM490A)
②	フランジ	2	- PL	882	× 9	× 3423	(SM490A)
③	縦リブ	12	- PL	80	× 6	× 3423	(SM490A)
④	ベース上板	1	- PL	1300	× 22	× 1600	(SS400)
⑤	ベース下板	1	- PL	1300	× 28	× 1600	(SS400)
				(板厚25mm程度に切削仕上げ)			
⑥	ベース部ダイアフラム	1	- PL	882	× 22	× 882	(SS400)
⑦	ダイアフラム	3	- PL	882	× 6	× 882	(SS400)
⑧	天板	1	- PL	1100	× 22	× 1100	(SS400)
⑨	鳥補強板	8	- PL	275	× 6	× 875	(SM490A)
		144	- HTB	M 22	× 55		(F10T)

※ B8供試体のボルトの締め付けは、指定部分の塗装を含む製作完了後行うものとする。
塗装範囲は（2／2）図に示すボルト部の内・外面とする。

1．特記なきスカーラップは、R=30とする。
2．⑧天板を組み付ける前に柱上端部を切削して、ウェブ・フランジ・縦リブを密着させる。
3．ベース下板に、溶接完了後、柱の軸線の鉛直が出るように平面に切削する。

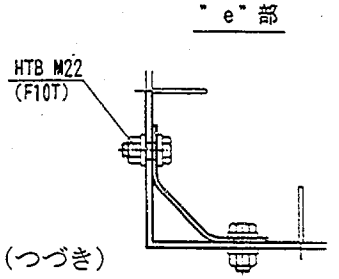
図-2.1.1(5)　矩形断面供試体の形状・寸法（Ｂ８）





1. 特記なきスカーラップは、R=30とする。

⑦	10	- Rib.PL	335	×22 ×250	(SS400)
⑥	6	- Rib.PL	185	×22 ×250	(SS400)
⑤	4	- Rib.PL	163	×22 ×250	(SS400)
④	4	- Rib.PL	182	×22 ×250	(SS400)
③	4	- Rib.PL	375	×22 ×250	(SS400)
②	8	- PL	143	× 9 ×250	(SS400)
①	8	- PL	147	× 9 ×250	(SS400)
⑧	8	- PL	103	× 9 ×250	(SS400)



塗装範囲

塗装は、B8のみ施工するものとする。
塗装範囲を斜線部および太線部とする。
塗装仕様は、以下のとおり。
前処理(内・外面):高圧洗浄(素地ブラスト)→反応型エッチングプライマ(15μm)
工場塗装(内面):タールエポキシ樹脂塗料(2×30→70μm)
〃 (外面):超速乾さび止め塗料(2×25μm)→長油性フタル酸樹脂塗料(2×25μm)

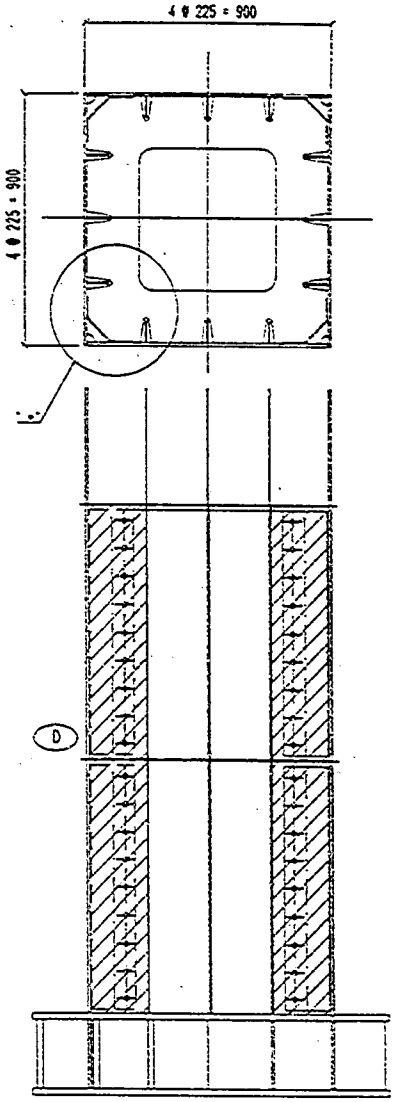
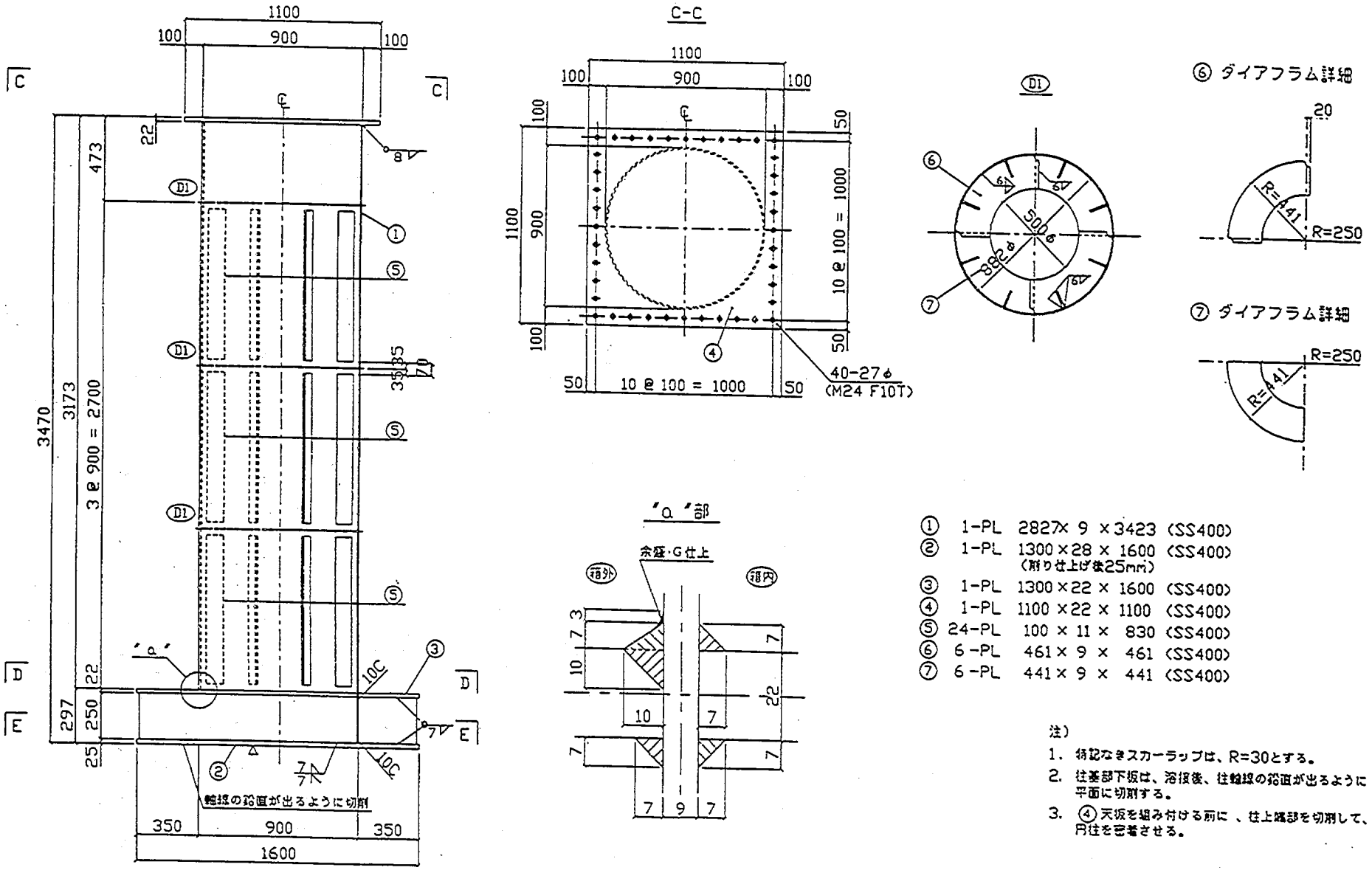


図-2.1.1(5) 矩形断面供試体の形状・寸法（B８）（つづき）



①	1-PL	2827× 9 ×3423	(SS400)
②	1-PL	1300×28 × 1600 (削り仕上げ後25mm)	(SS400)
③	1-PL	1300×22 × 1600	(SS400)
④	1-PL	1100×22 × 1100	(SS400)
⑤	24-PL	100 × 11 × 830	(SS400)
⑥	6-PL	461× 9 × 461	(SS400)
⑦	6-PL	441× 9 × 441	(SS400)

注）

1. 特記なきスカーラップは、R=30とする。
2. 柱基部下板は、溶接後、柱軸線の鉛直が出るように平面に切削する。
3. ④天板を組み付ける前に、柱上端部を切削して、円柱を密着させる。

図-2.1.2(1)　円形断面供試体の形状・寸法（B2）

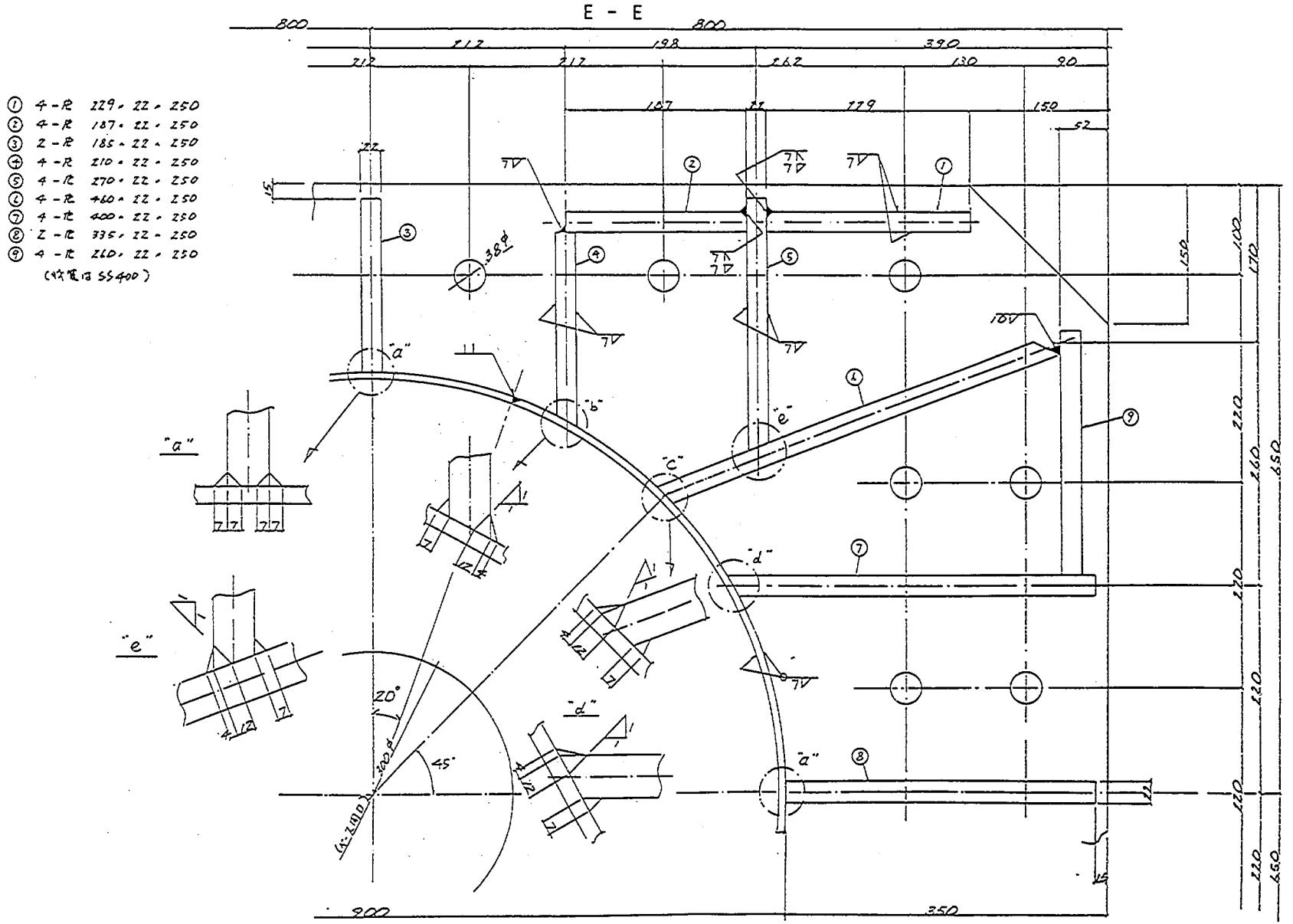
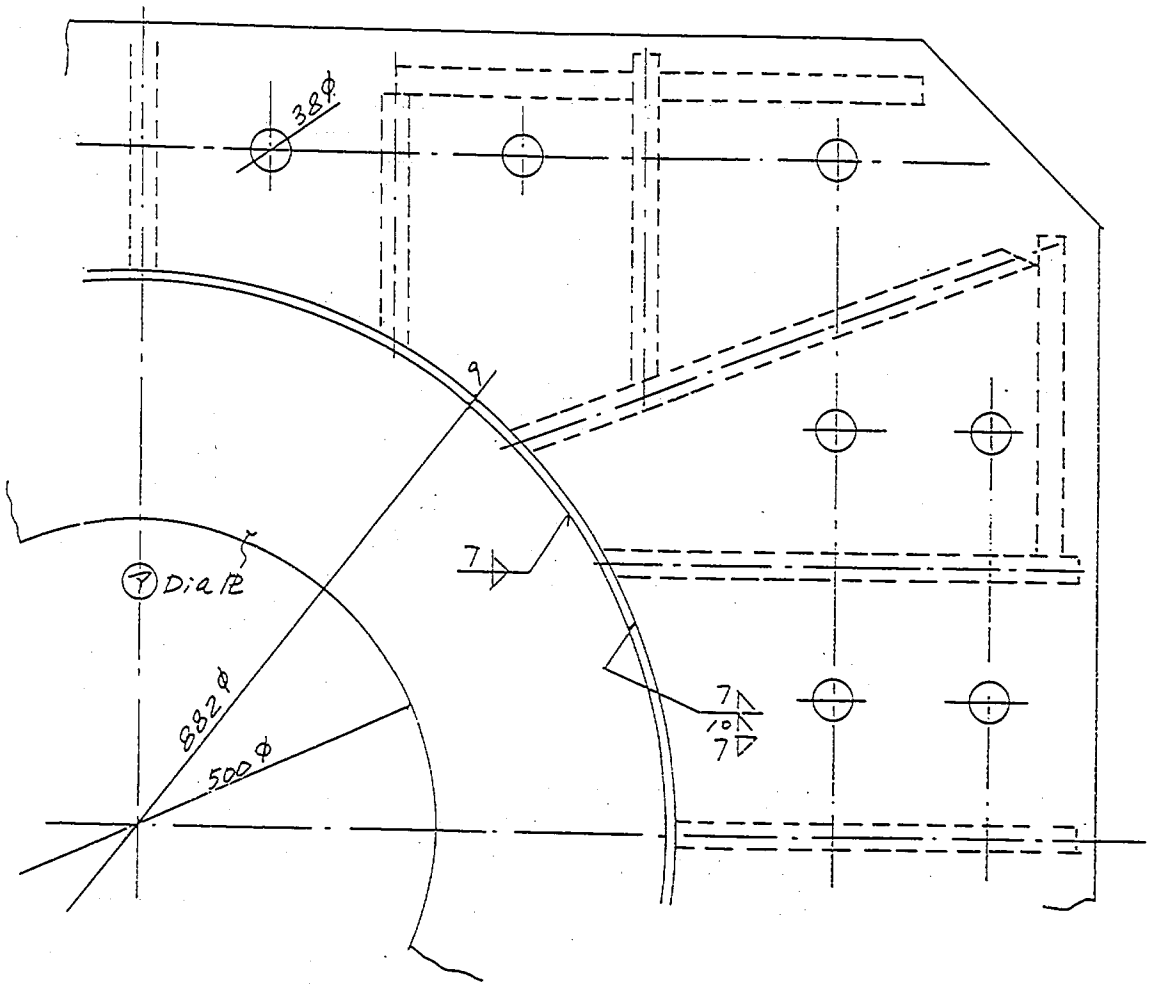


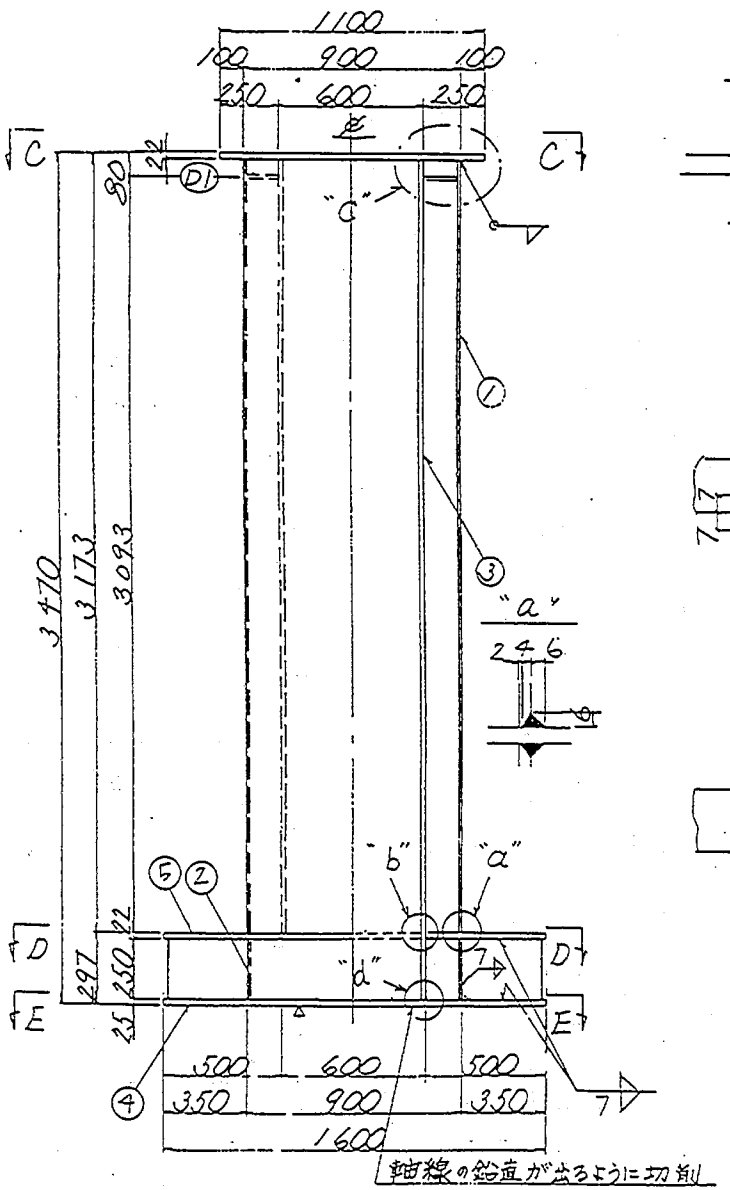
図-2.1.2(1)　円形断面供試体の形状・寸法（Ｂ２）（つづき）

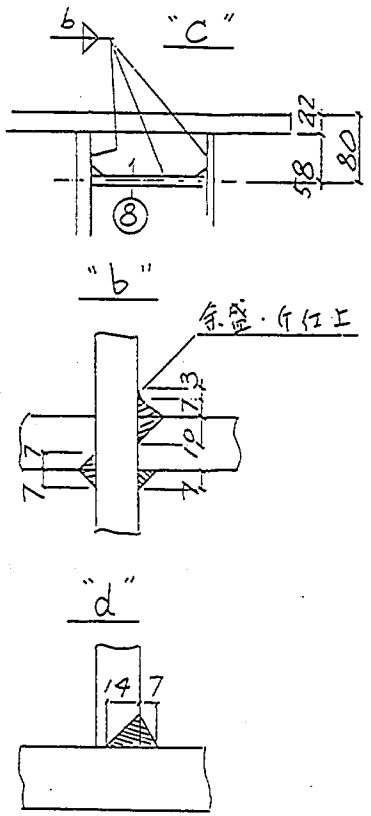
D - D

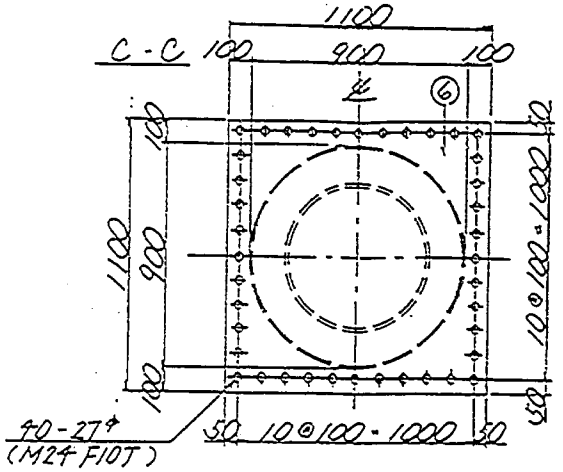


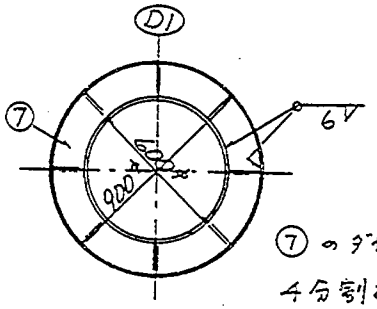
Ⓐ 1- Dia 1t 882φ × 22 (SS400)

図-2.1.2(1) 円形断面供試体の形状・寸法（B２）（つづき）









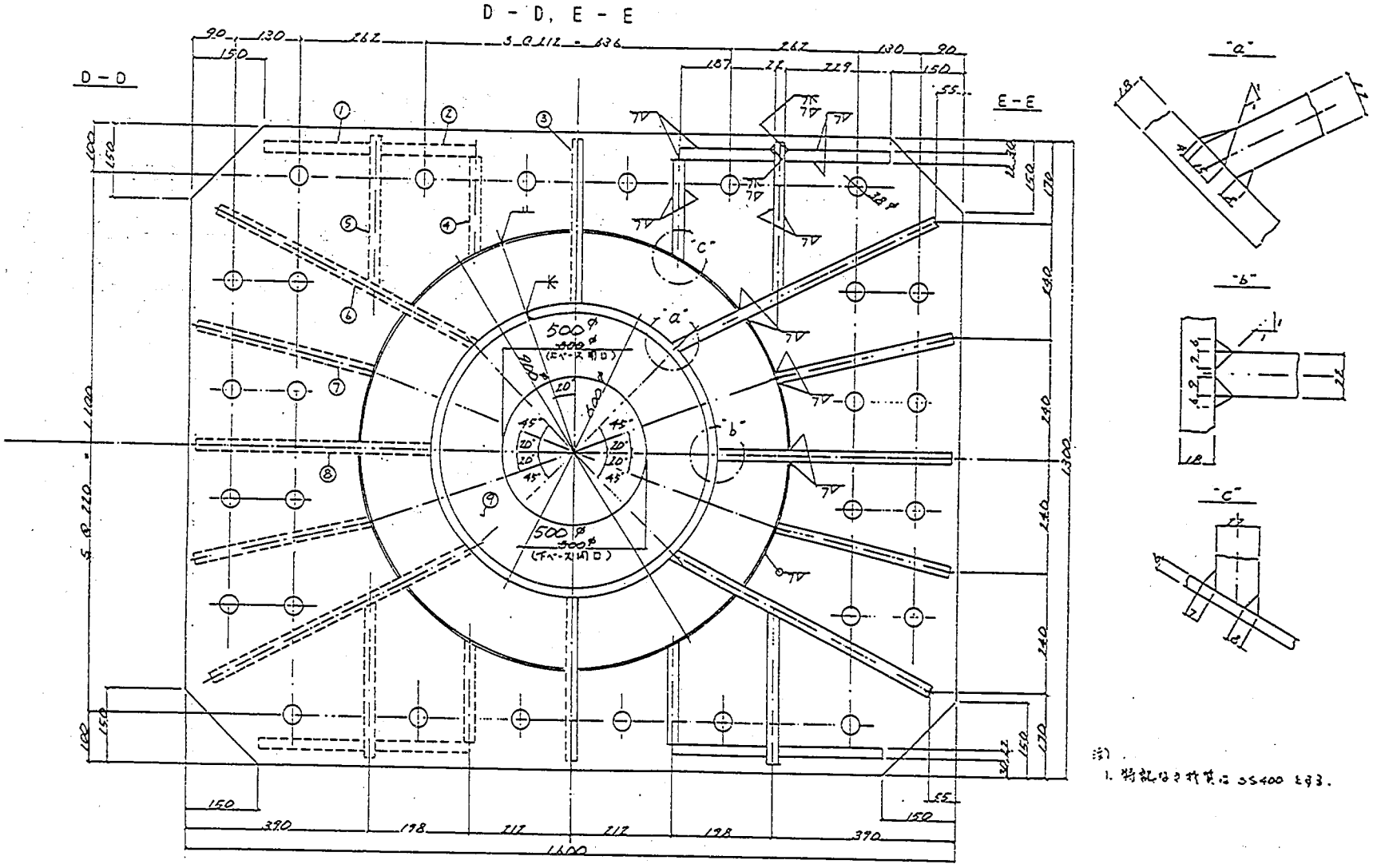
⑦のダイヤフラムは、
4分割で製作する

①	1 - 𝓅	2827	× 6 ×	3151	
②	1 - 𝓅	250	× 6 ×	2827	(リブ位置で切断)
③	1 - 𝓅	1885	× 18 ×	3423	
④	1 - 𝓅	1300	× 22 ×	1600	(削り仕上後 25㎜)
⑤	1 - 𝓅	1300	× 22 ×	1600	
⑥	1 - 𝓅	1100	× 22 ×	1100	
⑦	1 - 𝓅	882φ	× 9		
⑧	8 - 𝓅	54	× 9 ×	147	

4. D-D, E-E は (その2) に示す.

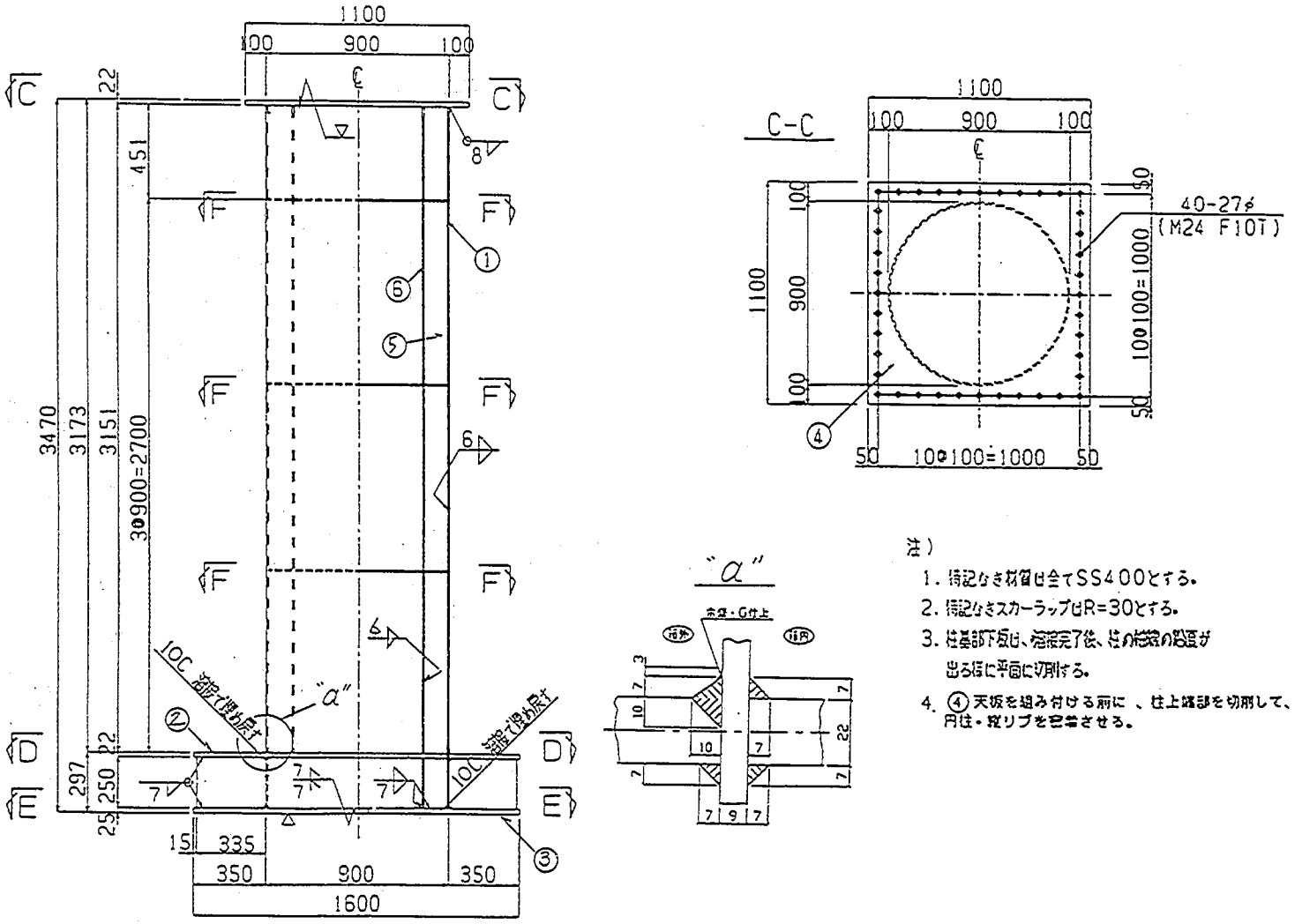
注)
1. 特記なきスカラップは R=30 とする
2. 柱基部下板は溶接後、柱軸線の鉛直が出るように平面に切削する.
3. ⑥天板を組み付ける前に、柱上端部を切削して円柱を密着させる.

図-2.1.2(2) 円形断面供試体の形状・寸法 (B3)



① 4 - R 229 × 22 × 250
② 4 - R 187 × 22 × 250
③ 2 - R 335 × 22 × 250
④ 4 - R 205 × 22 × 250
⑤ 4 - R 310 × 22 × 250
⑥ 4 - R 600 × 22 × 250
⑦ 4 - R 375 × 22 × 250
⑧ 2 - R 485 × 22 × 250
⑨ 1 - Dia R 542$^{\phi}$ × 22

図-2.1.2(2) 円形断面供試体の形状・寸法（B３）（つづき）



① 1-PL 2827×9×3423
② 1-PL 1300×22×1600
③ 1-PL 1300×28×1600
④ (削り仕上げ後 25mm)
1-PL 1100×22×1100

⑤ 4-PL 125×9×3423
⑥ 4-PL 116×6×3423

図-2.1.2(3) 円形断面供試体の形状・寸法（B４）

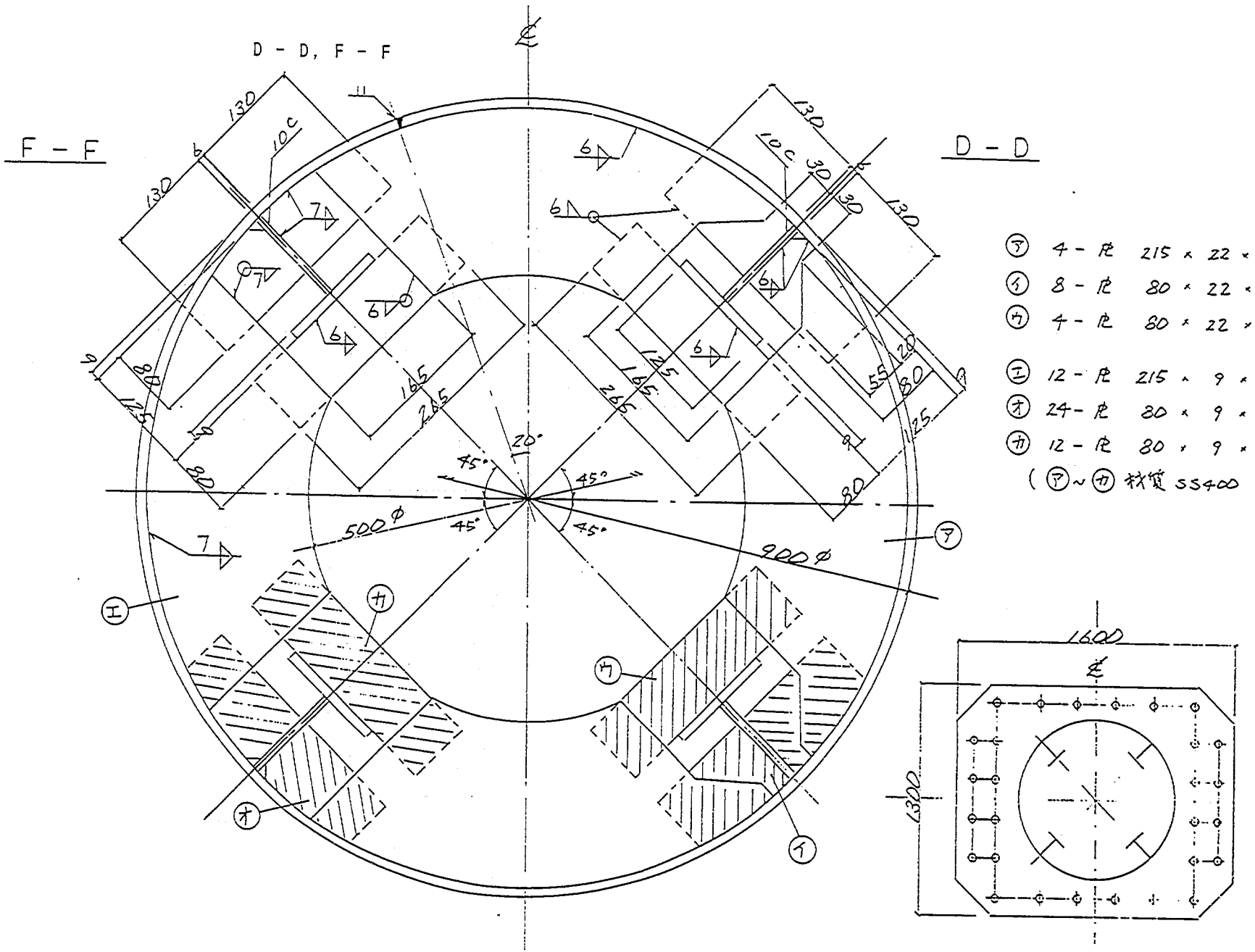


図-2.1.2(3) 円形断面供試体の形状・寸法（B４）（つづき）

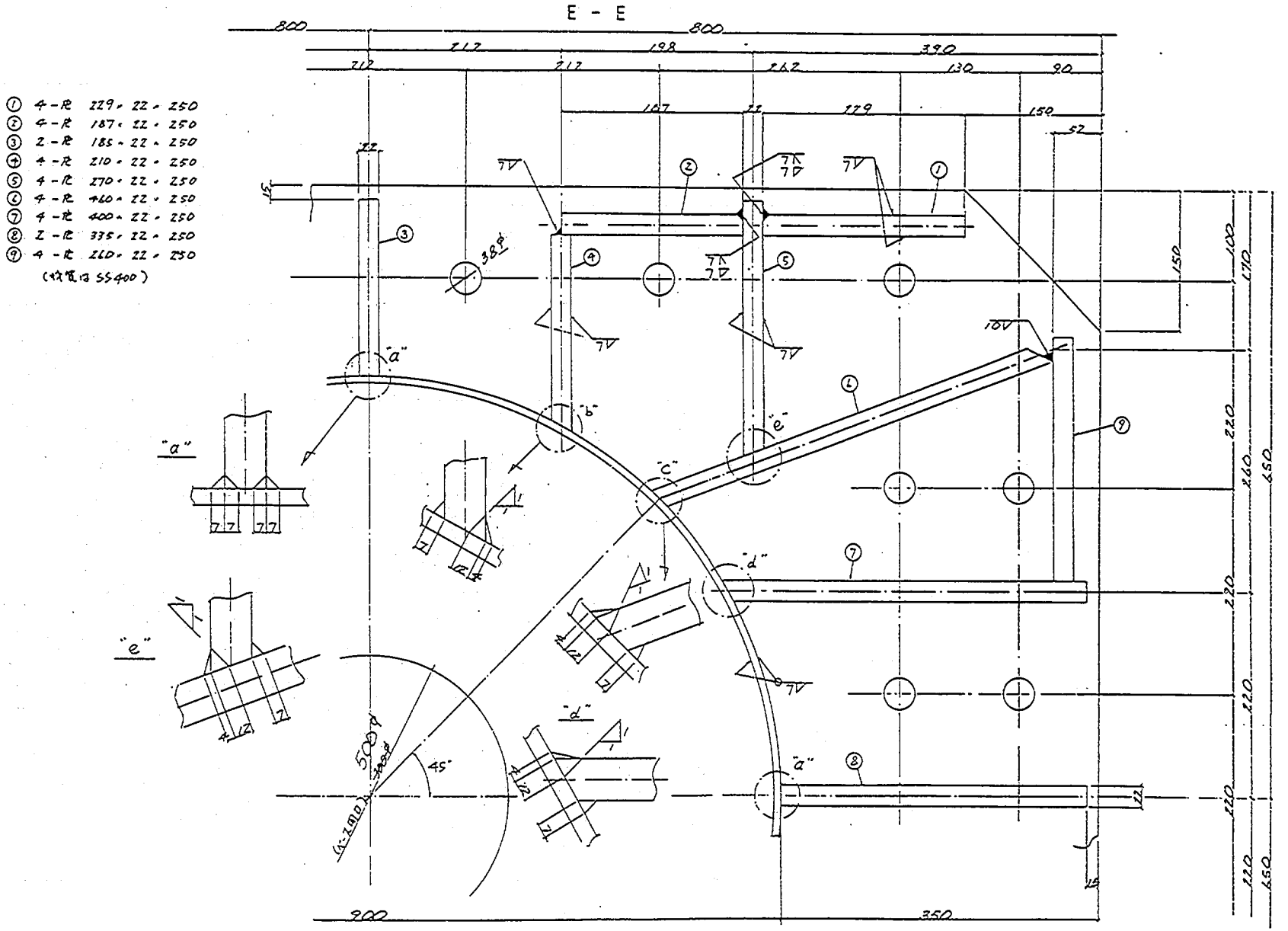


図-2.1.2(3)　円形断面供試体の形状・寸法（B４）（つづき）

表-2.1.4(1)　材料試験結果（矩形断面）

供試体番号	板取方向	試験片番号	板厚 (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm2)	上降伏点 (kgf/cm2)	下降伏点 (kgf/cm2)	引張強度 (kgf/cm2)	破断伸び (mm)	破断伸び (%)	材質
B1	L	P1	9.01	25.01	225.34	4,470	4,187	5,834	18	35	SM490
	L	P2	9.00	25.02	225.18	4,507	4,282	5,817	19	38	
ウェブ・	L	P3	9.00	25.03	225.27	4,486	4,283	5,783	19	37	
フランジ		平均	9.00	25.02	225.26	4,488	4,251	5,811	18	37	
	C	P4	9.02	25.02	225.68	4,386	4,205	5,797	18	36	SM490
	C	P5	9.04	25.02	226.18	4,513	4,174	5,814	18	37	
	C	P6	9.05	25.01	226.34	4,507	4,248	5,818	17	34	
		平均	9.04	25.02	226.07	4,469	4,209	5,810	18	36	
		総平均				4,478	4,230	5,811	18	36	
B5	L	P49	9.04	25.08	226.72	4,445	4,276	5,540	18	37	SM490
	L	P50	9.02	25.07	226.13	4,411	4,309	5,536	19	38	
ウェブ・	L	P51	9.02	25.04	225.86	4,360	4,292	5,524	18	36	
フランジ		平均	9.03	25.06	226.24	4,405	4,292	5,533	18	37	
	C	P52	9.03	25.03	226.02	4,650	4,402	5,566	17	34	SM490
	C	P53	9.00	25.09	225.81	4,665	4,406	5,553	18	35	
	C	P54	9.01	25.05	225.70	4,724	4,408	5,574	18	37	
		平均	9.01	25.06	225.84	4,680	4,405	5,564	18	35	
		総平均				4,543	4,349	5,549	18	36	
B6	L	P61	9.83	24.99	245.65	2,840	2,800	4,460	22	43	SS400
	L	P62	9.86	24.99	246.40	2,890	2,790	4,430	21	41	
ウェブ・	L	P63	9.83	24.99	245.65	2,840	2,770	4,410	21	42	
フランジ		平均	9.84	24.99	245.90	2,857	2,787	4,433	21	42	
①、②	C	P64	9.86	25.00	246.50	2,760	2,710	4,410	20	41	SS400
	C	P65	9.87	25.12	247.93	2,830	2,750	4,430	21	41	
	C	P66	9.87	25.13	248.03	2,860	2,820	4,460	20	39	
		平均	9.87	25.08	247.49	2,817	2,760	4,433	20	40	
		総平均				2,837	2,773	4,433	21	41	
B6	L	P73	11.02	25.13	276.93	—	867	2,460	31	63	
	L	P74	11.04	25.12	277.32	—	844	2,510	32	64	極軟鋼
せん断	L	P75	11.02	24.95	274.95	—	866	2,480	32	65	
パネル		平均	11.03	25.07	276.40	—	859	2,483	32	64	
⑤	C	P76	10.98	24.94	273.84	—	938	2,530	32	64	
	C	P77	10.98	24.95	273.95	—	909	2,520	33	66	極軟鋼
	C	P78	10.98	24.97	274.17	—	908	2,520	32	63	
		平均	10.98	24.95	273.99	—	918	2,523	32	64	
		総平均				—	889	2,503	32	64	
B7、B8	L	NO.1	8.61	25.11	216.20	3,707	3,612	5,273	20	39	SM490
	L	NO.2	8.61	25.04	215.59	3,706	3,671	5,274	19	39	
ウェブ・	L	NO.3	8.55	25.10	214.61	3,844	3,745	5,312	19	37	
フランジ		平均	8.59	25.08	215.47	3,752	3,676	5,286	19	38	
	C	NO.1	8.66	25.05	216.93	3,738	3,656	5,274	17	35	SM490
	C	NO.2	8.65	25.07	216.86	3,781	3,640	5,262	17	35	
	C	NO.3	8.64	25.02	216.17	4,057	3,744	5,274	18	36	
		平均	8.65	25.05	216.65	3,859	3,680	5,270	18	35	
		総平均				3,806	3,678	5,278	18	37	

注）1. 材料試験片は、フランジおよびウェブに用いる供試体製作前の鋼板であり、縦リブや補剛材等は含まれていない。また、L:ロール方向、C:クロス方向を意味する。
2. 供試体の項に示す丸数字は製作図面での番号を示す。

表-2.1.4(2)　材料試験結果（円形断面）

供試体番号	板取方向	試験片番号	板厚 (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm2)	上降伏点 (kgf/cm2)	下降伏点 (kgf/cm2)	引張強度 (kgf/cm2)	破断伸び (mm)	破断伸び (%)	材質
B2	L	P7	9.12	25.03	228.27	3,051	2,839	4,427	22	45	SS400
	L	P8	9.12	25.03	228.27	3,187	2,907	4,411	22	45	
パイプ	L	P9	9.12	25.02	228.18	3,062	2,906	4,409	22	45	
t=9		平均	9.12	25.03	228.24	3,100	2,884	4,416	22	45	
	C	P10	9.17	25.01	229.34	3,369	2,947	4,413	21	43	SS400
	C	P11	9.24	25.02	231.18	3,145	2,924	4,407	22	44	
	C	P12	9.30	25.02	232.69	3,168	2,916	4,422	22	44	
		平均	9.24	25.02	231.07	3,227	2,929	4,414	22	43	
		総平均				3,164	2,907	4,415	22	44	
B3	L	P13	12.02	23.46	281.99	4,107	3,887	5,356	—	—	SS400
	L	P14	12.06	25.01	301.62	—	2,940	4,618	22	45	
内パイプ	L	P15	12.06	25.04	301.98	3,177	3,091	4,727	22	44	
t=18		平均	12.05	24.50	295.20	3,642	3,016	4,900	22	45	
	C	P16	12.03	25.00	300.75	3,218	2,981	4,568	22	44	SS400
	C	P17	12.02	25.04	300.98	3,286	3,124	4,628	21	42	
	C	P18	12.06	25.00	301.50	3,256	3,019	4,589	20	40	
		平均	12.04	25.01	301.08	3,253	3,041	4,595	21	42	
		総平均				3,409	3,031	4,748	22	43	
B3	L	P19	5.96	25.03	149.18	3,572	3,334	4,632	20	41	SS400
	L	P20	5.92	25.04	148.24	3,701	3,374	4,657	21	42	
外パイプ	L	P21	5.95	25.03	148.93	3,580	3,374	4,599	21	42	
t=6		平均	5.94	25.03	148.78	3,618	3,361	4,629	21	42	
	C	P22	5.89	25.00	147.25	3,618	3,376	4,586	21	41	SS400
	C	P23	5.88	25.02	147.12	3,730	3,556	4,658	20	40	
	C	P24	5.90	25.01	147.56	3,371	3,198	4,496	21	42	
		平均	5.89	25.01	147.31	3,573	3,377	4,580	21	41	
		総平均				3,595	3,369	4,605	21	41	
B4	L	P25	9.13	25.00	228.25	3,072	2,871	4,381	22	45	SS400
	L	P26	9.12	25.01	228.09	3,086	2,962	4,402	22	45	
パイプ	L	P27	9.12	25.02	228.18	3,165	2,908	4,421	23	46	
t=9		平均	9.12	25.01	228.17	3,108	2,914	4,401	23	45	
	C	P28	9.03	25.02	225.93	3,049	2,822	4,382	21	42	SS400
	C	P29	9.03	25.02	225.93	2,923	2,844	4,371	22	44	
	C	P30	8.98	25.03	224.77	3,110	2,974	4,397	22	45	
		平均	9.01	25.02	225.54	3,027	2,880	4,383	22	43	
		総平均				3,068	2,897	4,392	22	44	

注）材料試験片は、供試体本体に用いる供試体製作前の平鋼板であり、補剛板等は含まれていない。また、L:ロール方向、C:クロス方向を意味する。

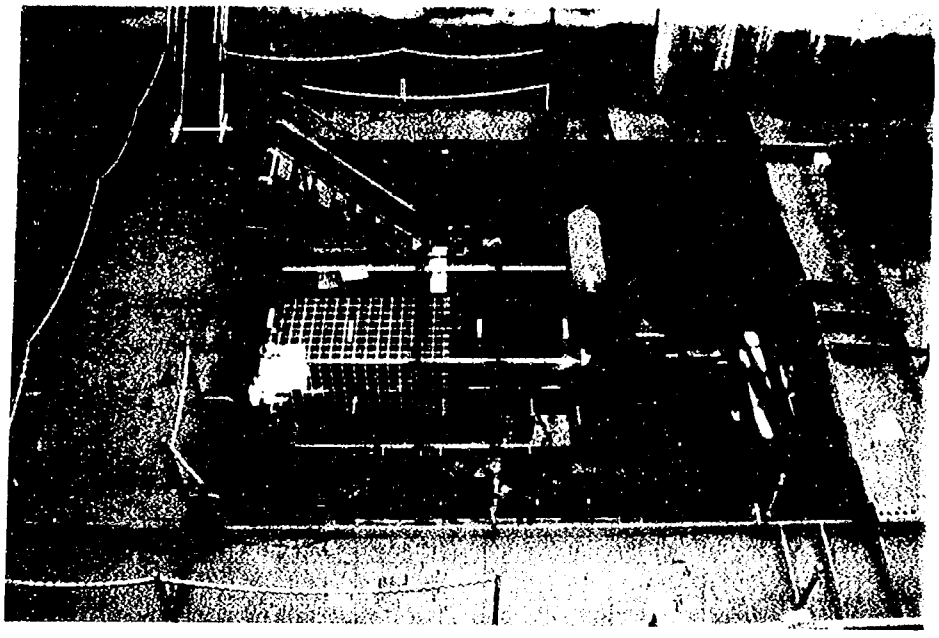


写真-2.2.1　載荷フレーム

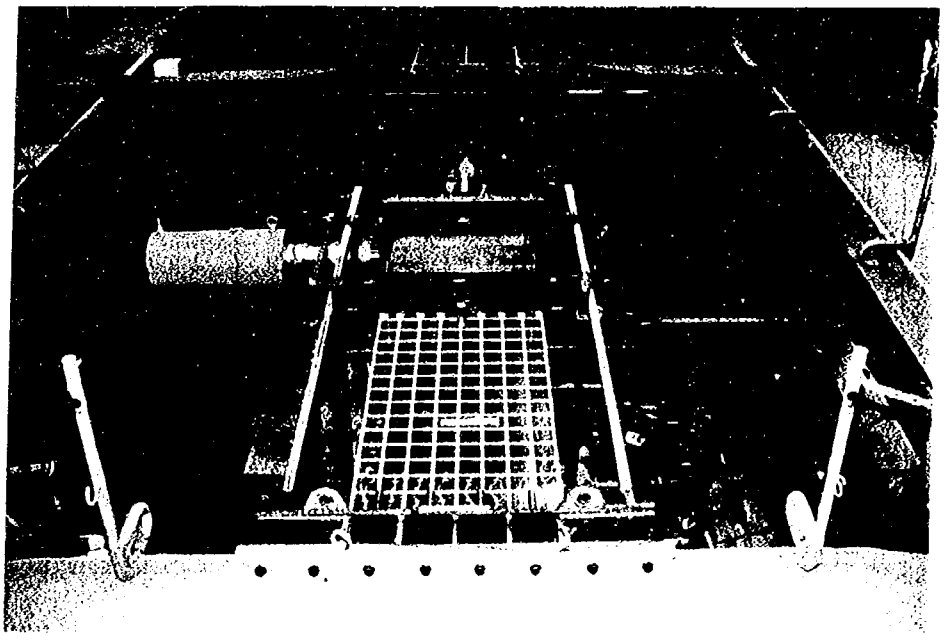


写真-2.2.2　供試体設置状況

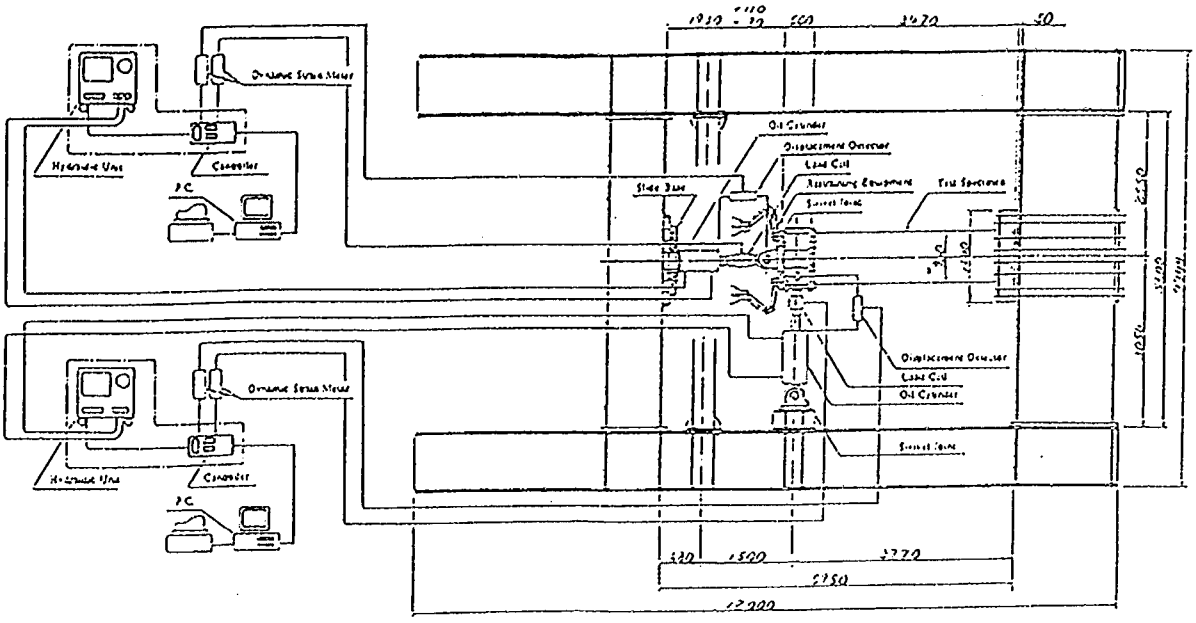
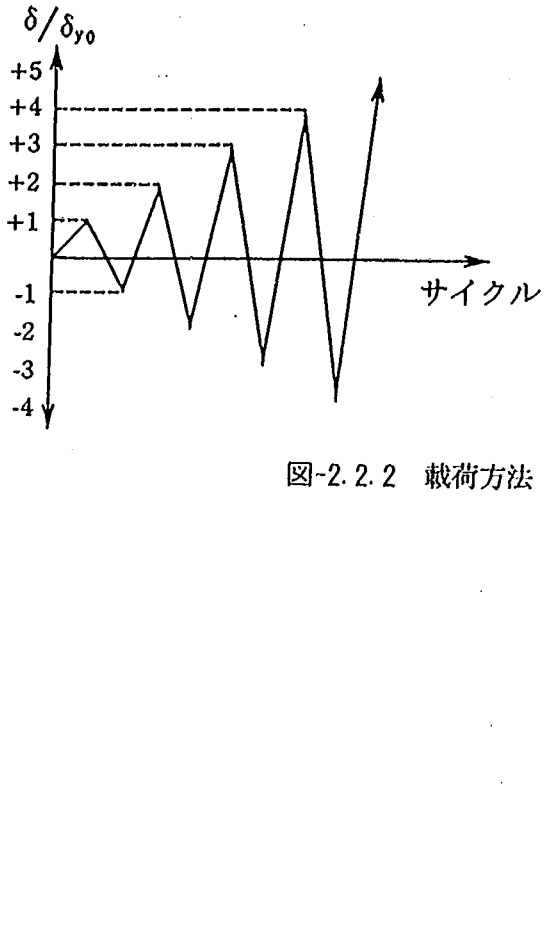


図-2.2.1　載荷フレームの形状・寸法

表-2.1.5　載荷装置の能力

Items		Specification and Performance	
Type		Horizontal type, bi-axial loading	
Specimen Size		Max. height	: 3,470mm
Loading Capacity (Static)		Axial force	: Compression ≦ 3,000kN Stroke ± 100mm
		Horizontal force	: Compression ≦ 3,000kN Tension ≦ 3,000kN Stroke ± 250mm
Control Mode		Automatic mode	: Load control, Displacement control
		Manual mode	:
Main Components	Oil Cylinder	Oil pressure	: ≦ 70MPa
	Swivel Joint	Endurable load	: 3,000kN
	Slide Base	Endurable load Stroke Friction coefficient	: 5,000kN : ≦ 500mm : ≦ 0.005
	Restraining Equipment	Restraining force Restraining range	: ≦ 100kN : Axial ± 100mm Horizontal ± 250mm



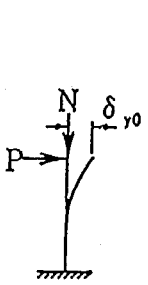


図-2.2.2　載荷方法

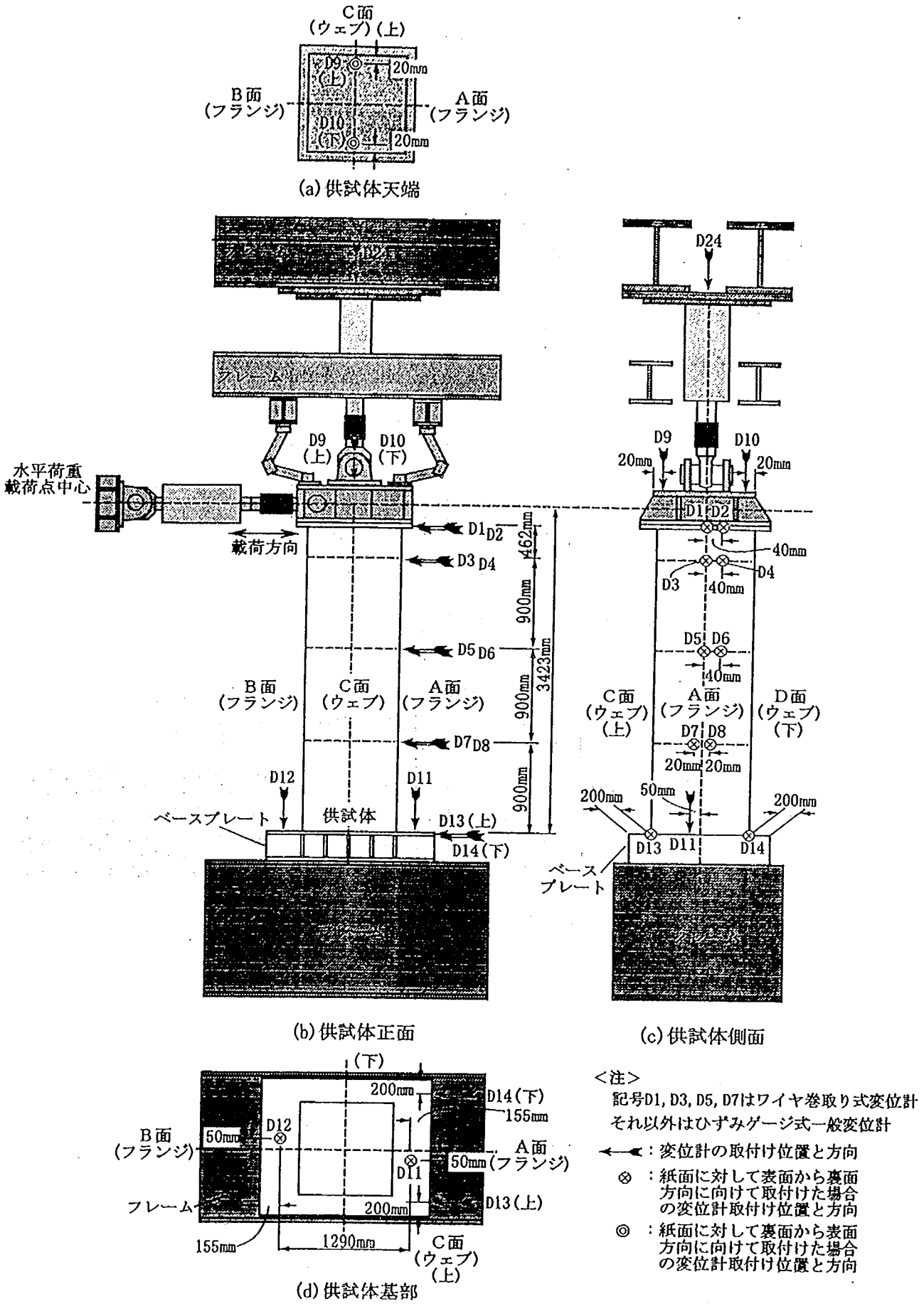


図-2.3.1　供試体の変位計取付け位置

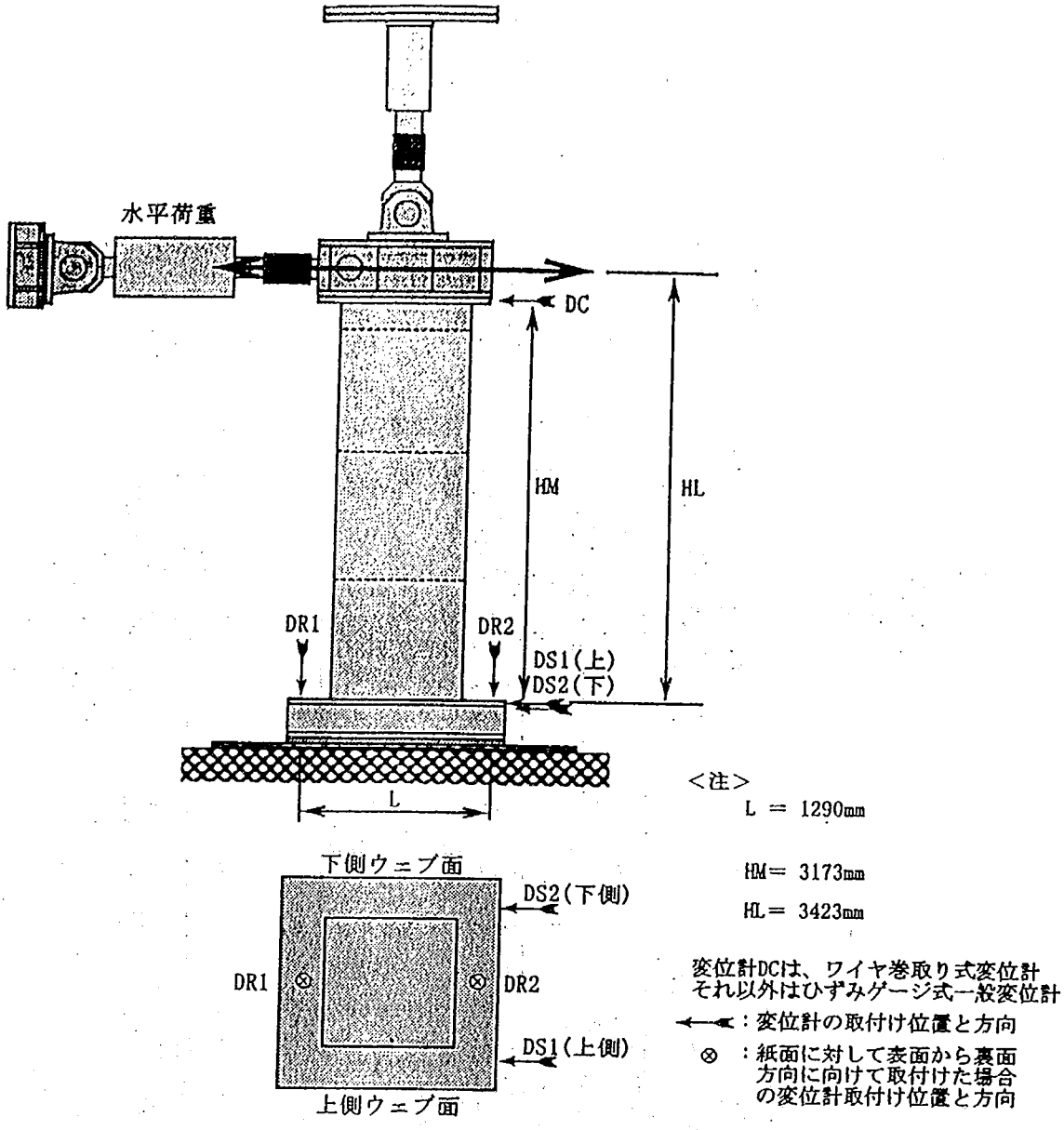


図-2.3.2　供試体の水平変位の補正

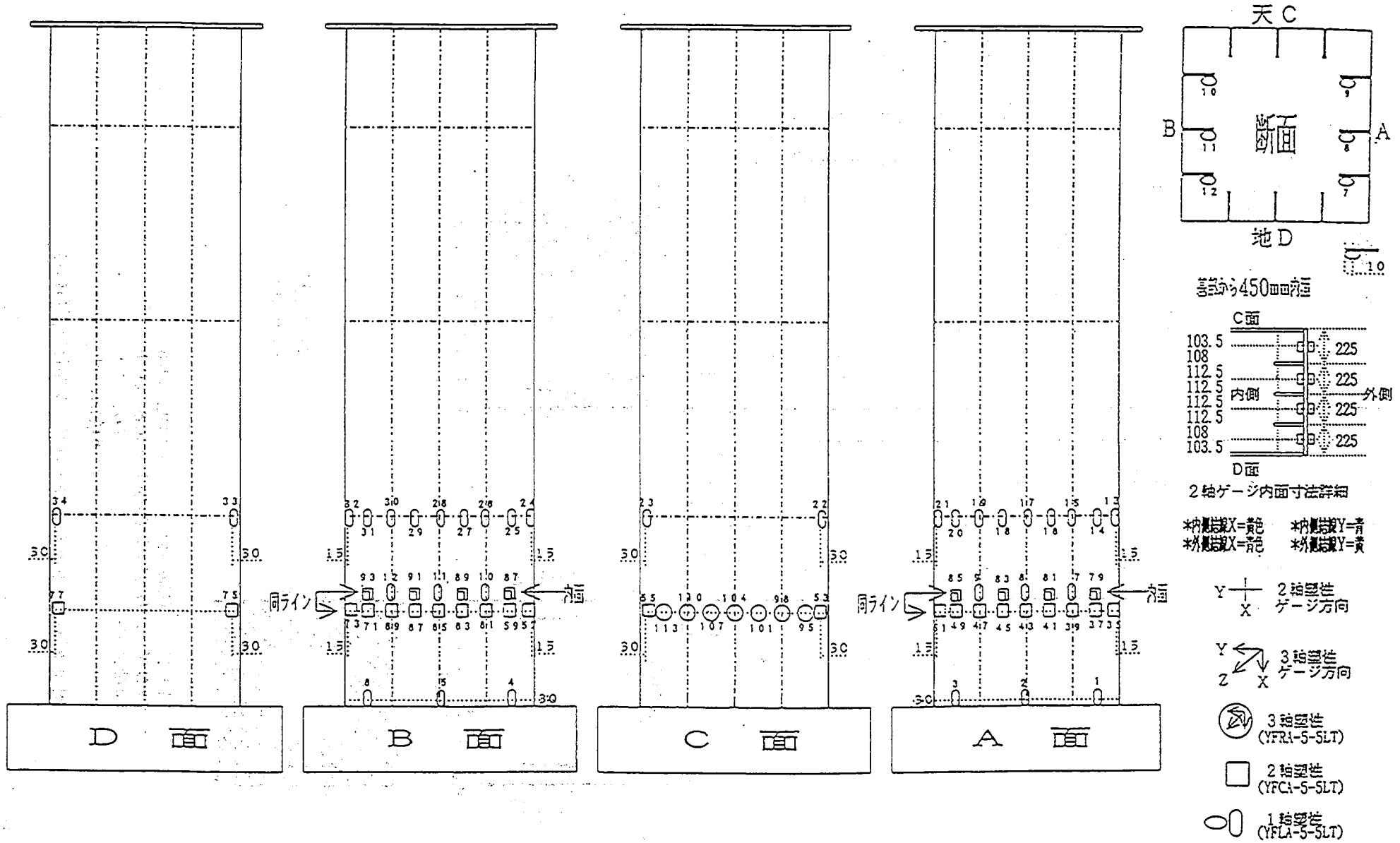
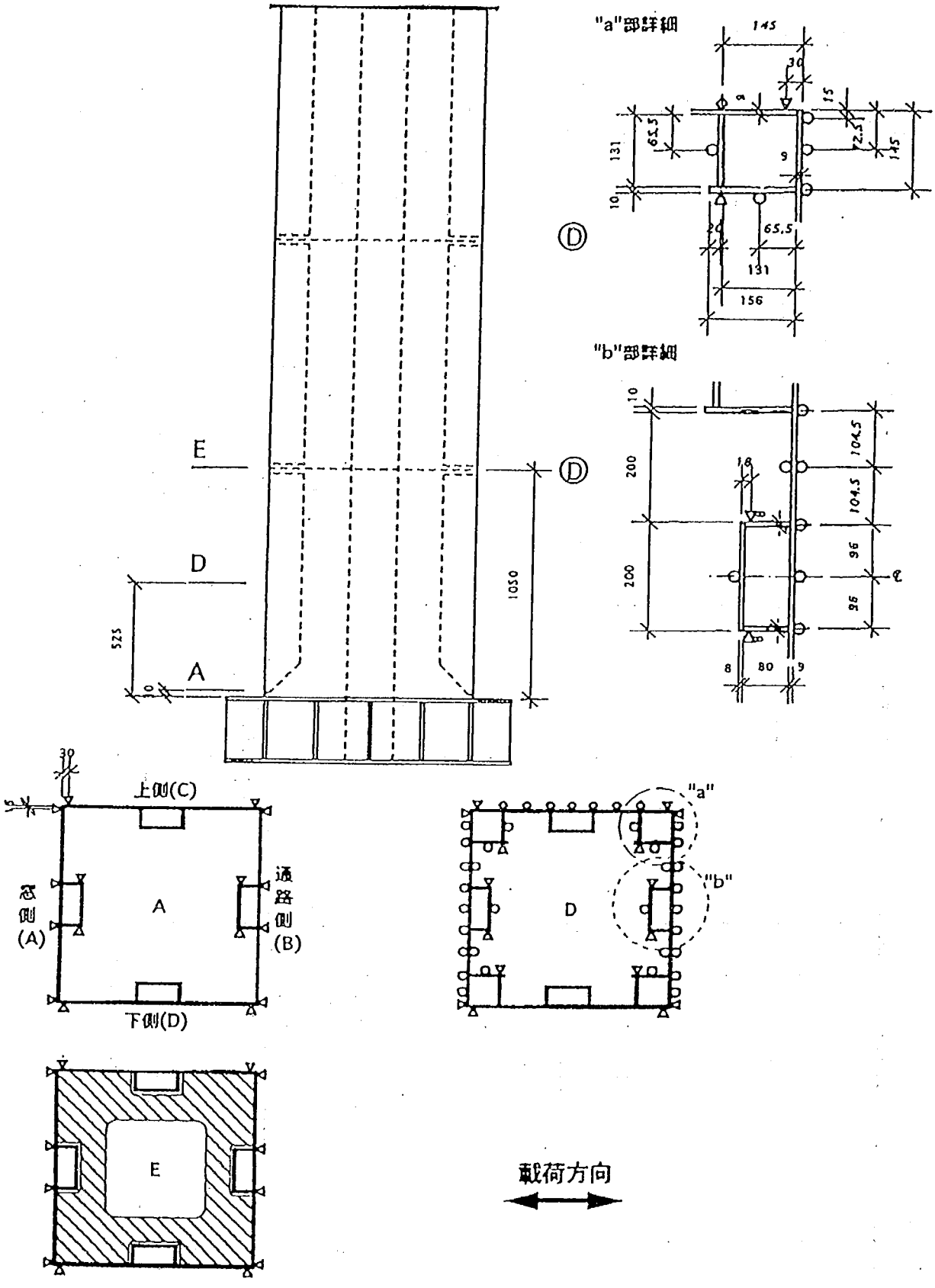


図-2.3.3(1)　供試体のひずみゲージ貼付位置(B1)



▷ ：1軸ゲージ（鉛直方向）　→44枚，44ch
○ ：2軸ゲージ（鉛直・水平方向）→30枚，60ch
◇ ：3軸ゲージ　→ 7枚，21ch
計 81枚,125ch

図-2.3.3(2)　供試体のひずみゲージ貼付位置（B５）

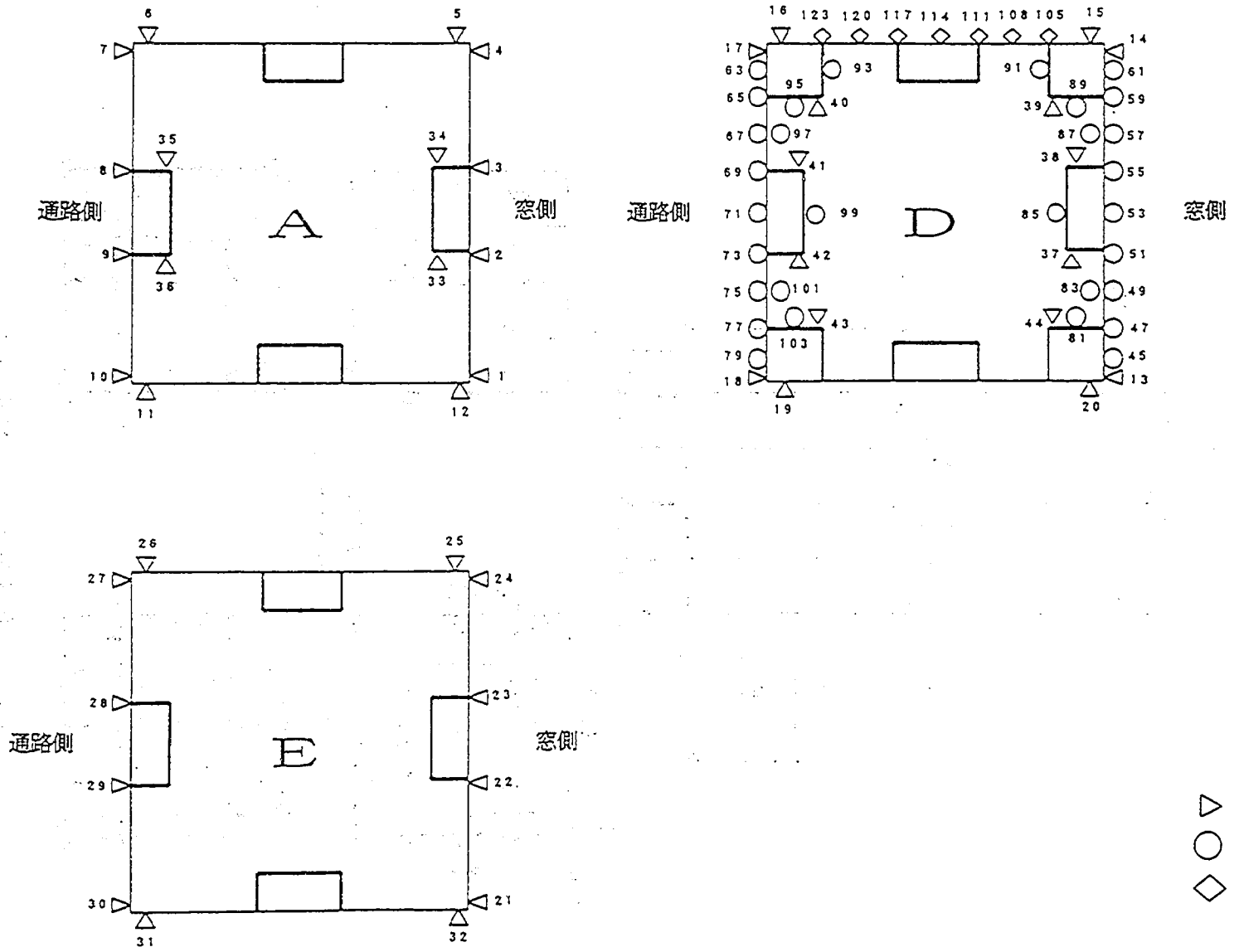
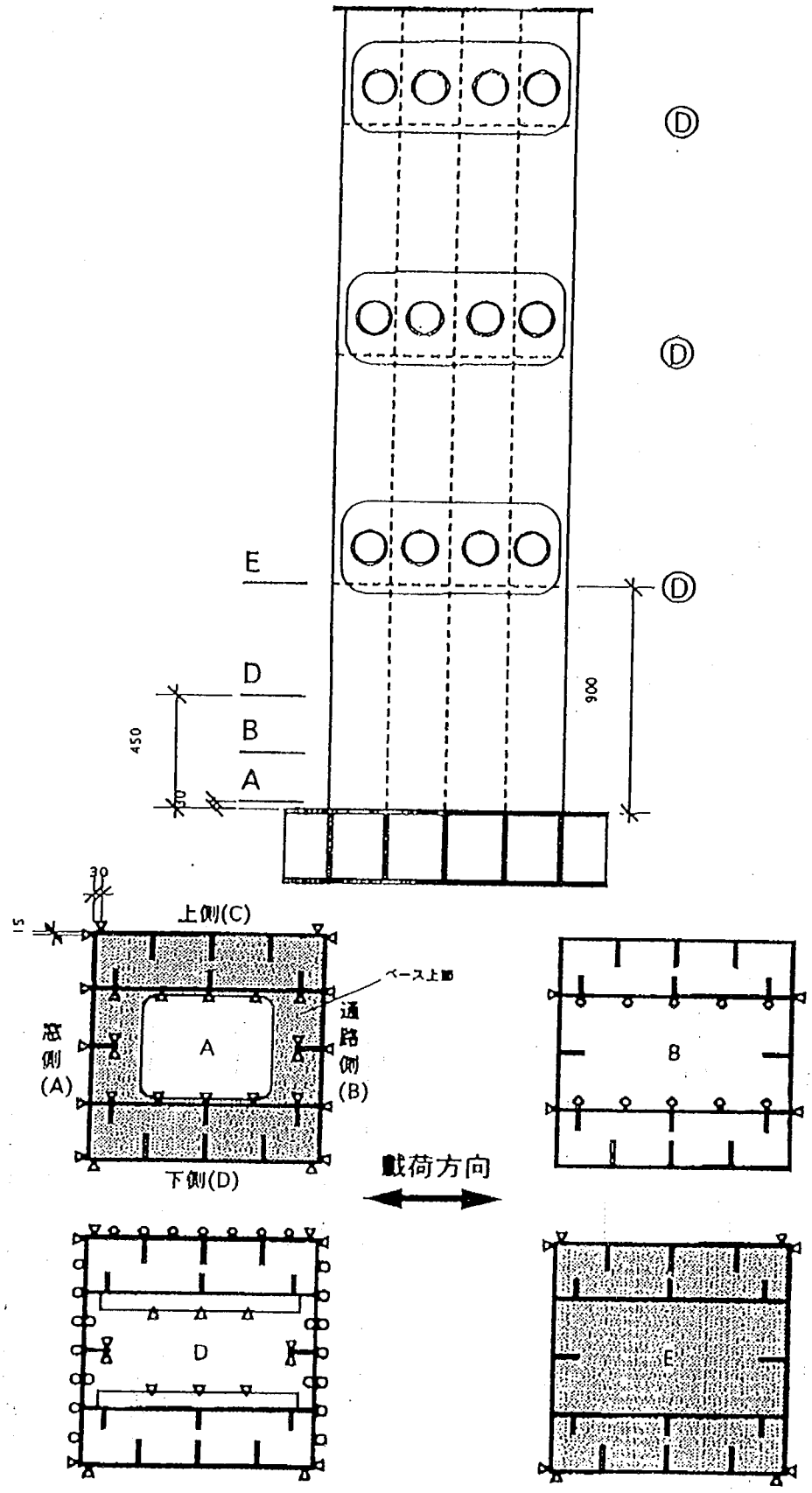


図-2.3.3(2)　供試体のひずみゲージ貼付位置(B５)（つづき）



▷ ：1軸ゲージ（鉛直方向）　→58枚，58ch
○ ：2軸ゲージ（鉛直・水平方向）→18枚，36ch
◇ ：3軸ゲージ　→17枚，51ch
計 93枚,145ch

図-2.3.3(3)　供試体のひずみゲージ貼付位置（B 6）

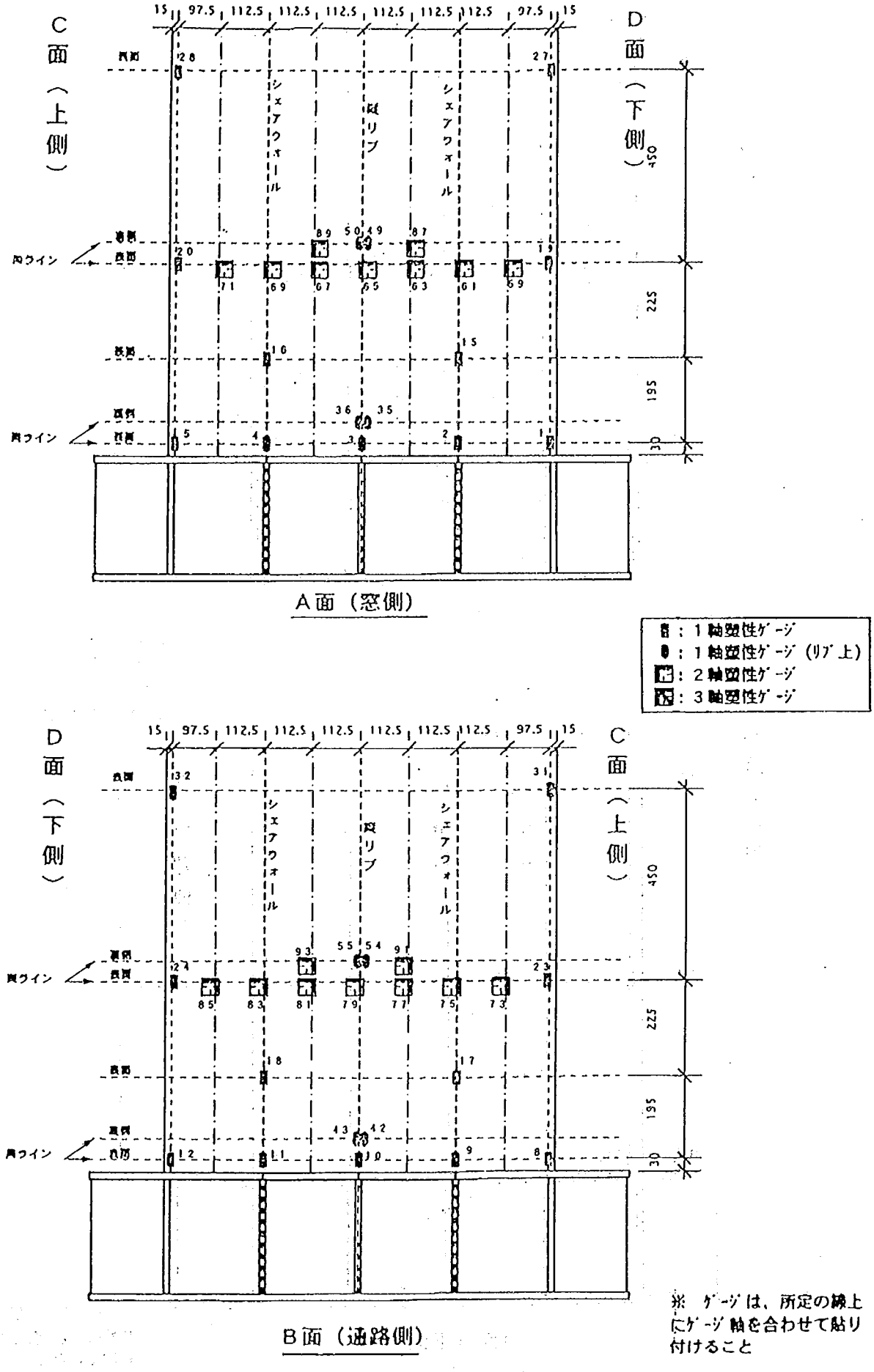


図-2.3.3(3)　供試体のひずみゲージ貼付位置（B 6）（つづき）

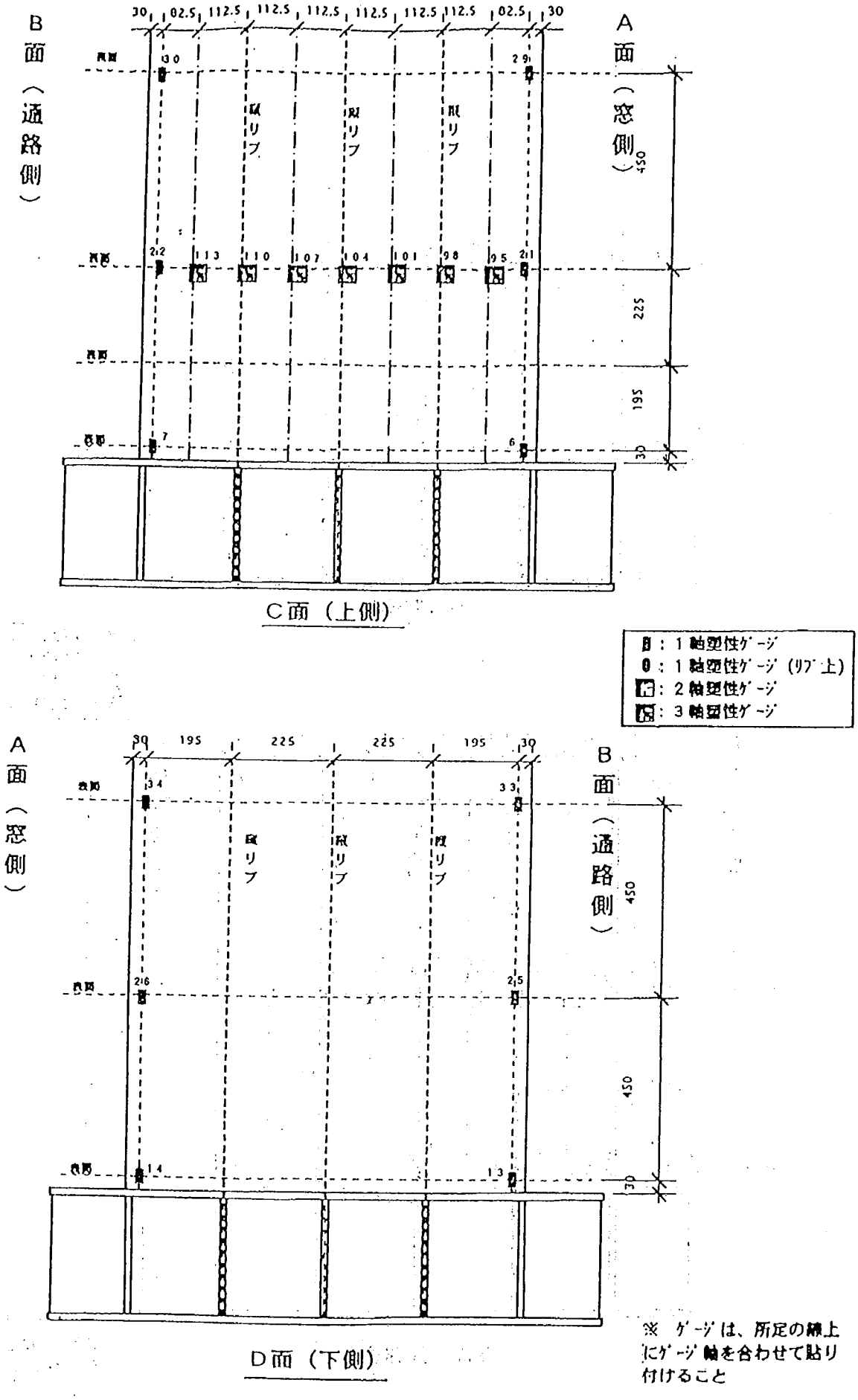
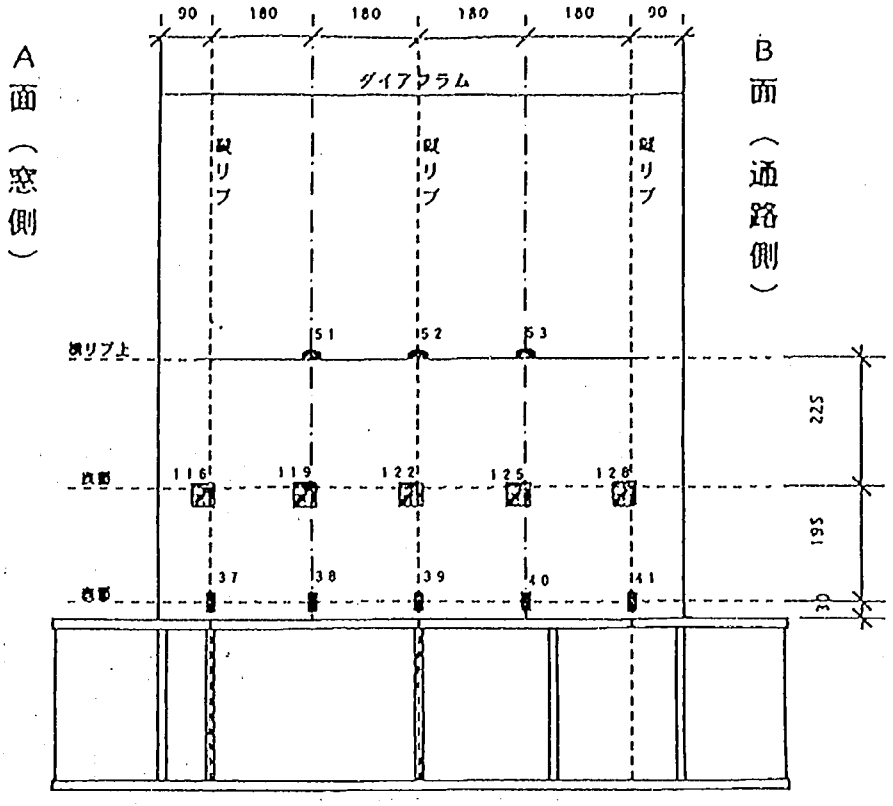
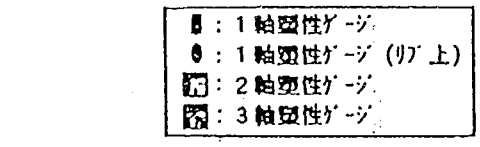
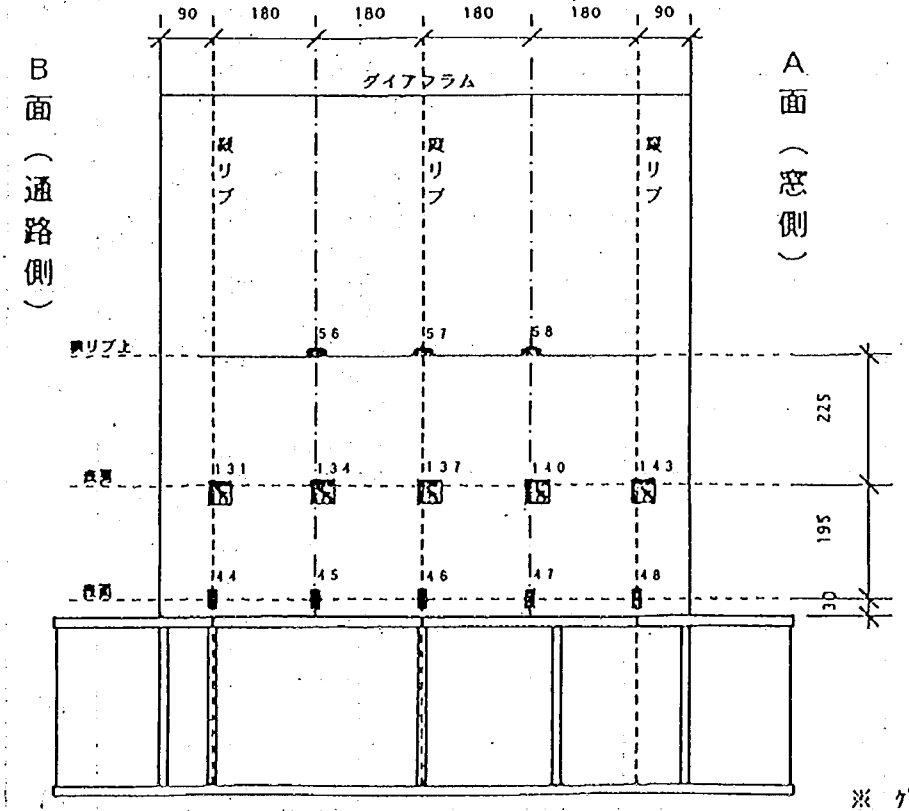


図-2.3.3(3)　供試体のひずみゲージ貼付位置（B６）（つづき）



C面（上）側シェアウォール





D面（下）側シェアウォール

※ ゲージは、所定の箇所にゲージ軸を合わせて貼り付けること

図-2.3.3(3)　供試体のひずみゲージ貼付位置（B６）（つづき）

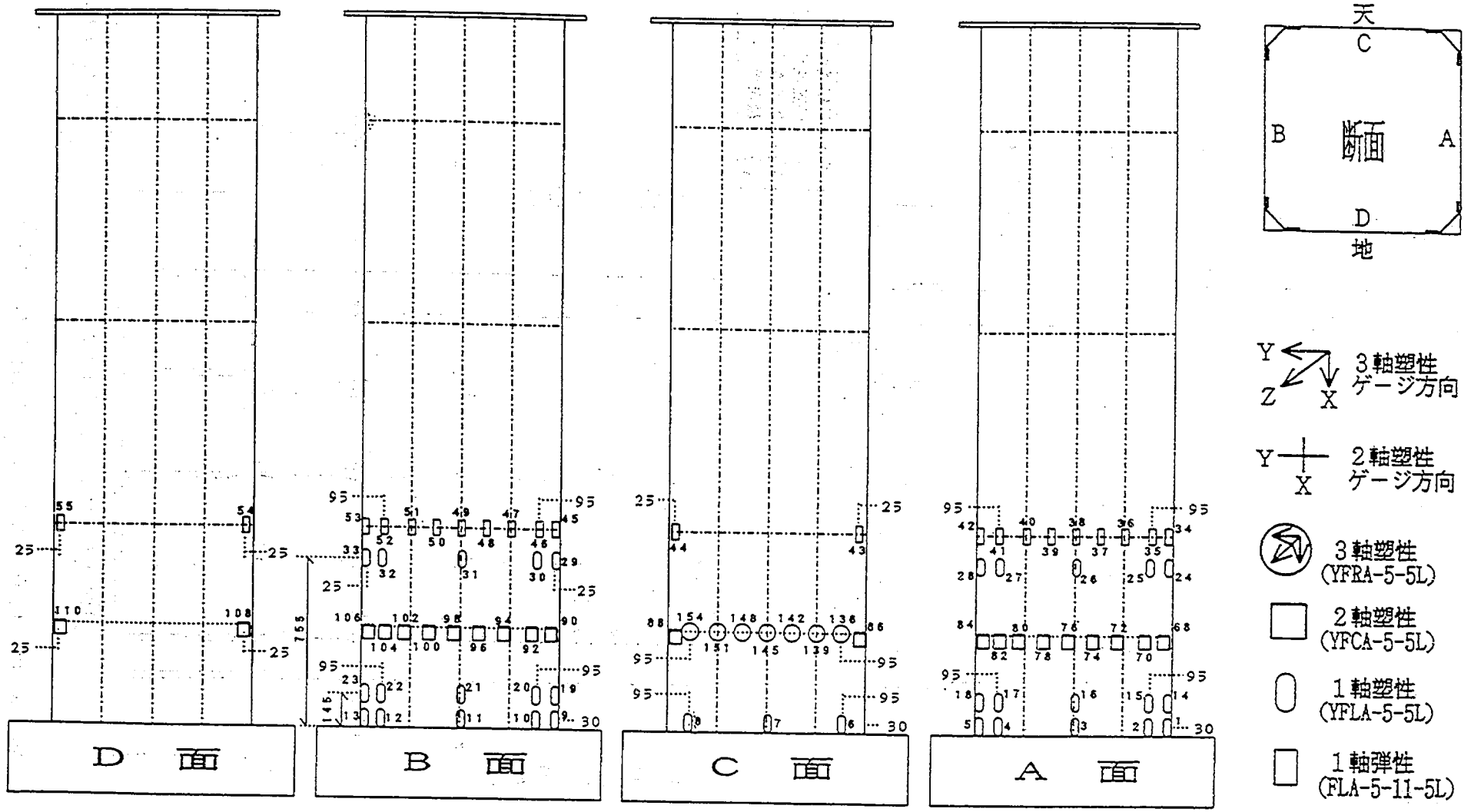
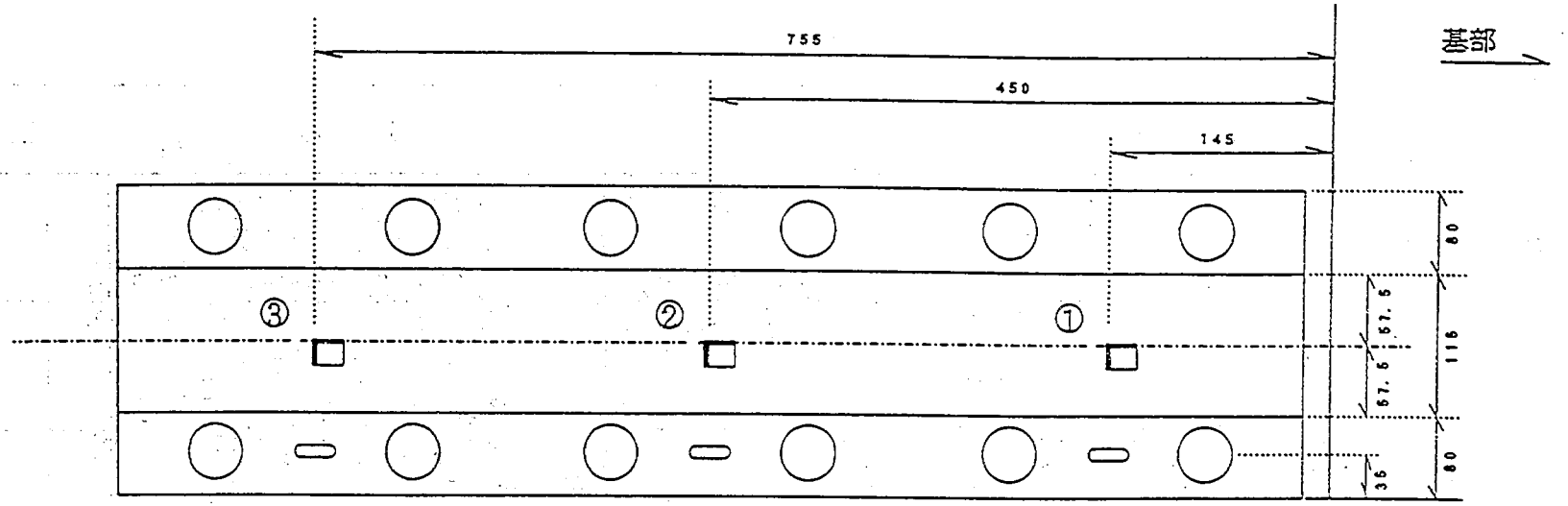
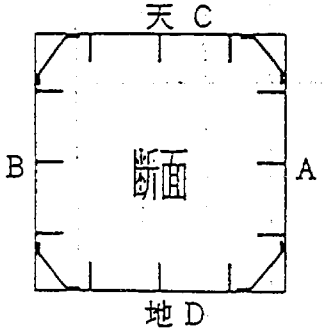


図-2.3.3(4)　供試体のひずみゲージ貼付位置(B７)



添 接 板



□ 2軸塑性ゲージ

▭ 1軸塑性ゲージ

	AC	AD	BC	BD
① 1軸塑性	57	56	58	59
2軸塑性	114	112	116	118
② 1軸弾性	61	60	62	63
2軸塑性	122	120	124	126
③ 1軸塑性	65	64	66	67
2軸弾性	130	128	132	134

図-2.3.3(4) 供試体のひずみゲージ貼付位置(B7)(つづき)

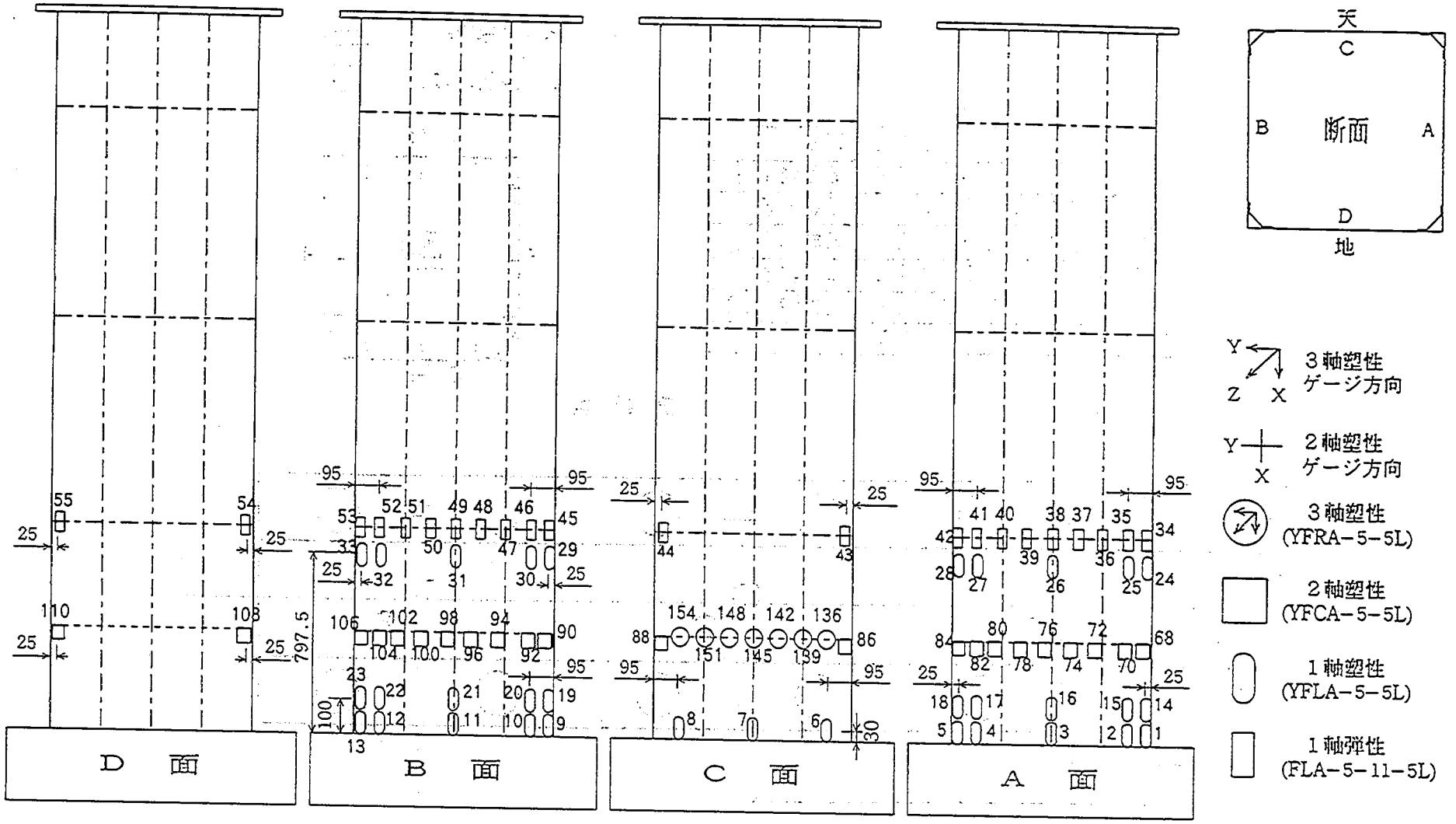


図-2.3.3(5) 供試体のひずみゲージ貼付位置(B8)

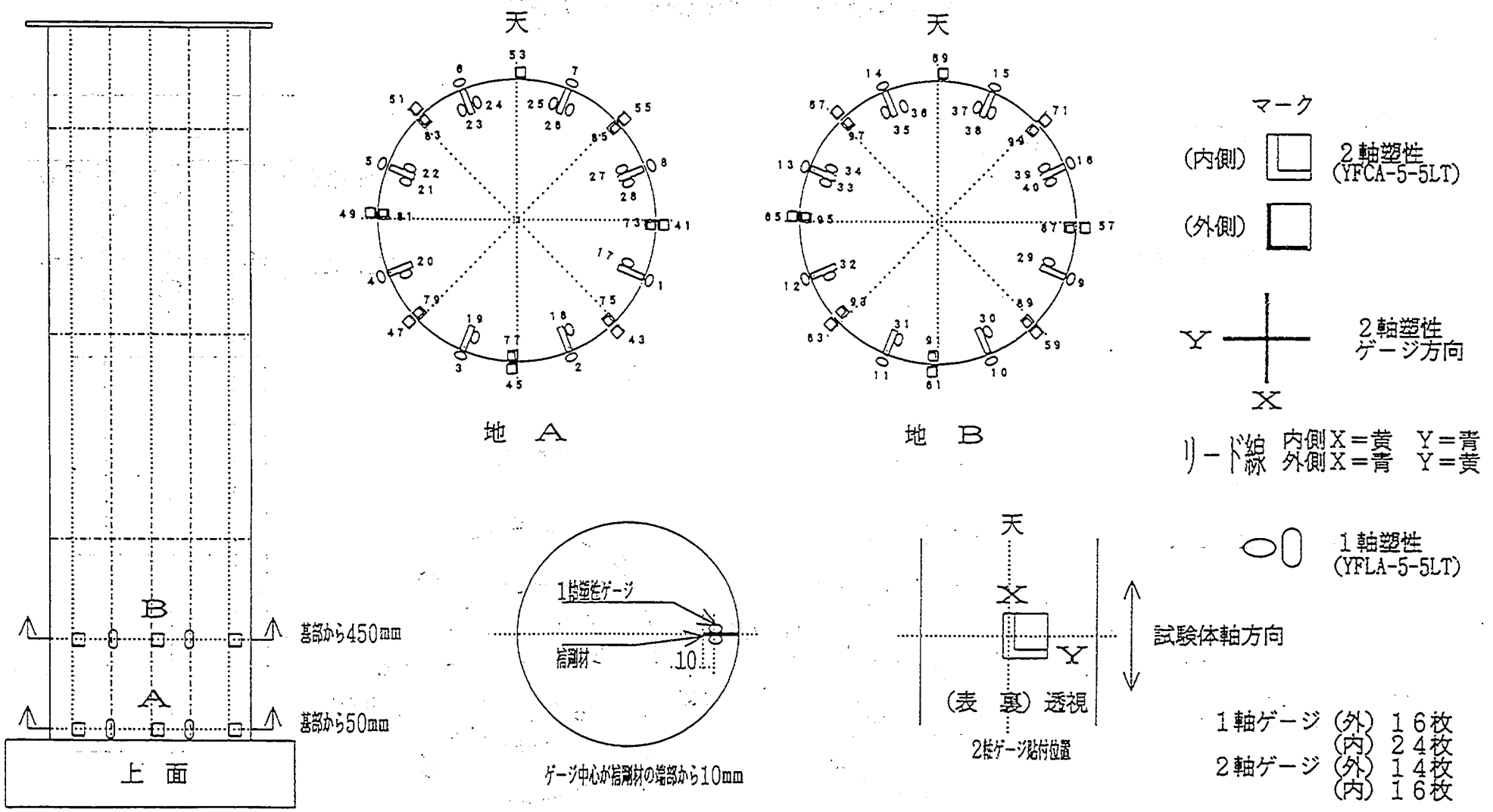


図-2.3.4(1) 供試体のひずみゲージ貼付位置(B2)

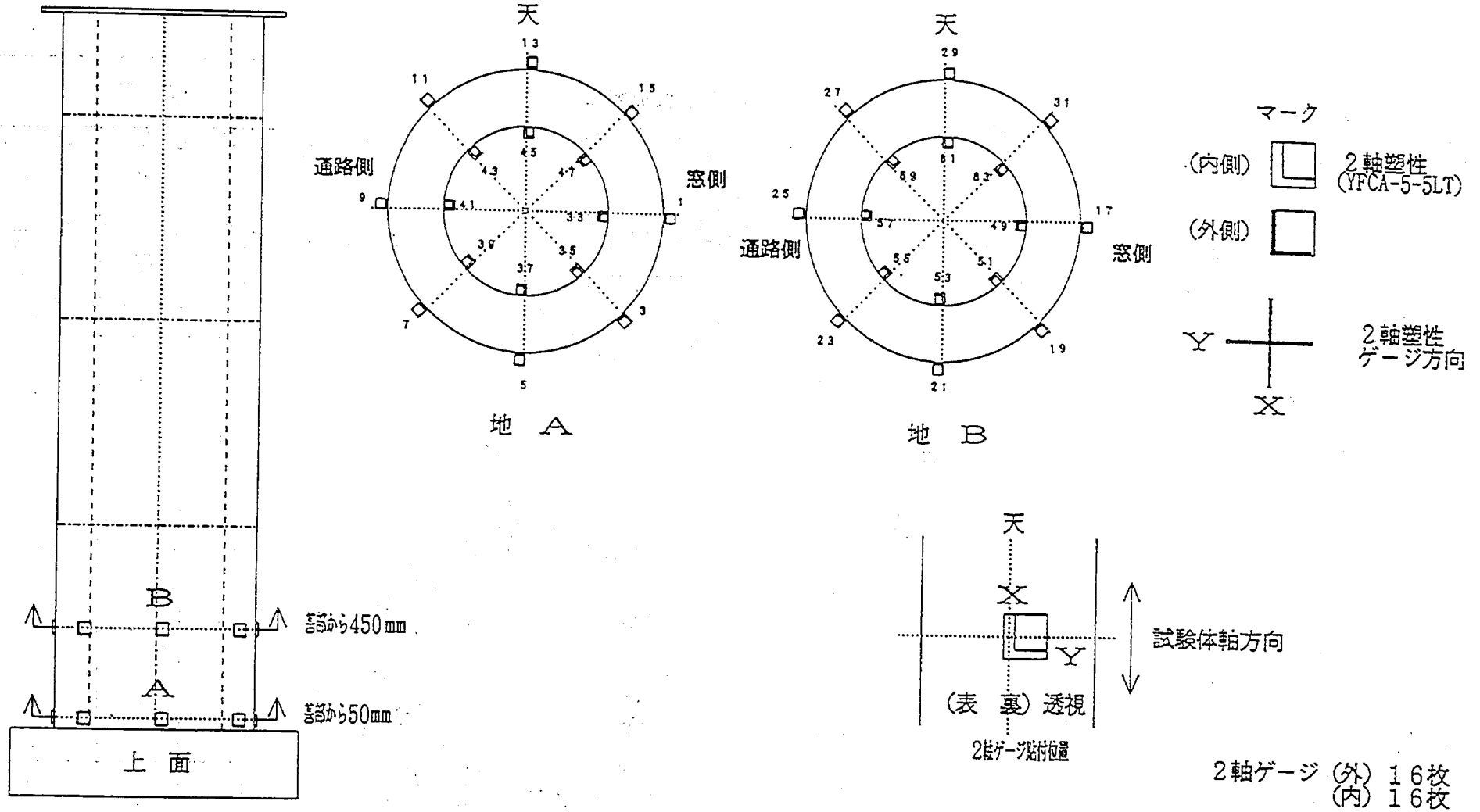


図-2.3.4(2) 供試体のひずみゲージ貼付位置(B3)

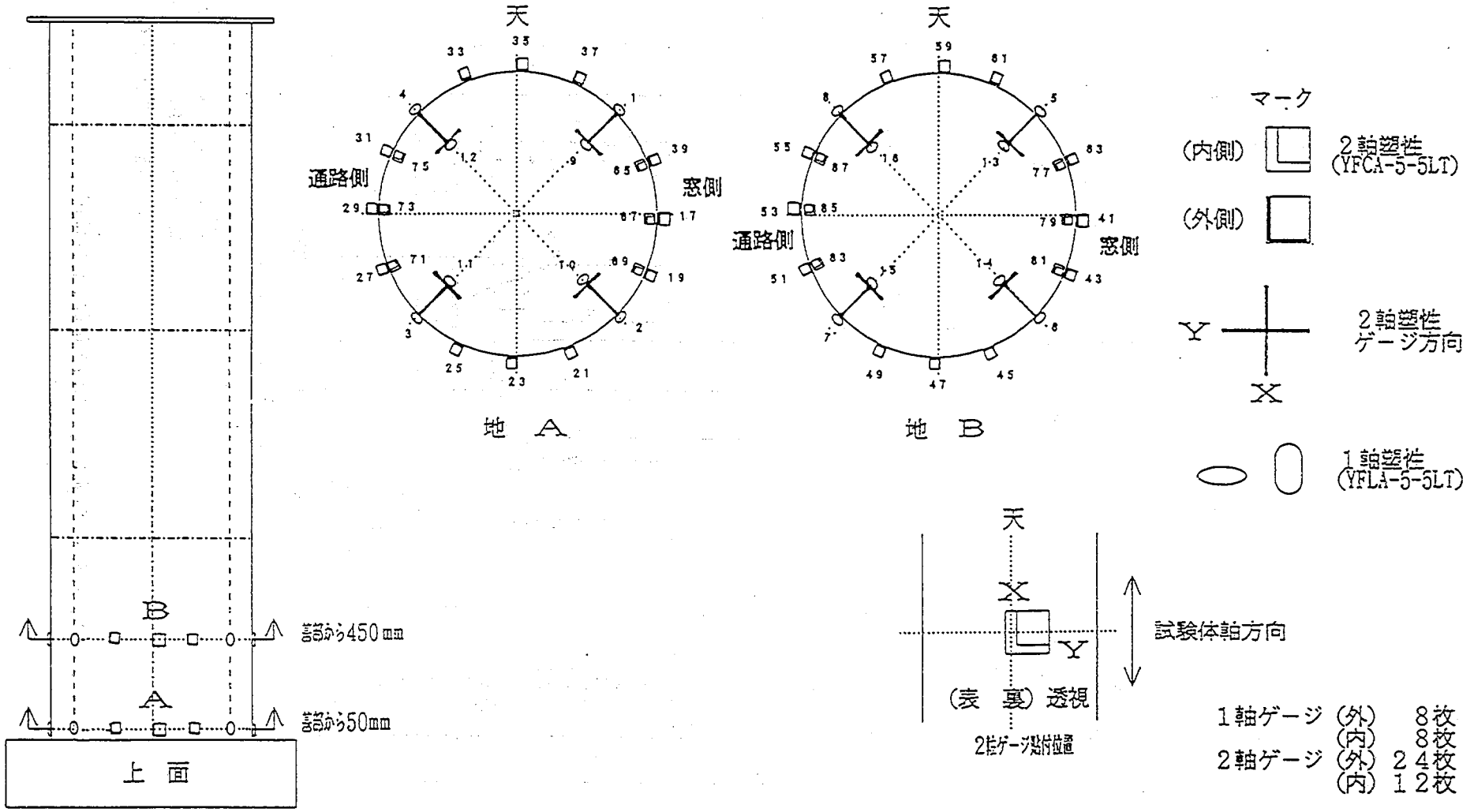


図-2.3.4(3) 供試体のひずみゲージ貼付位置(B4)

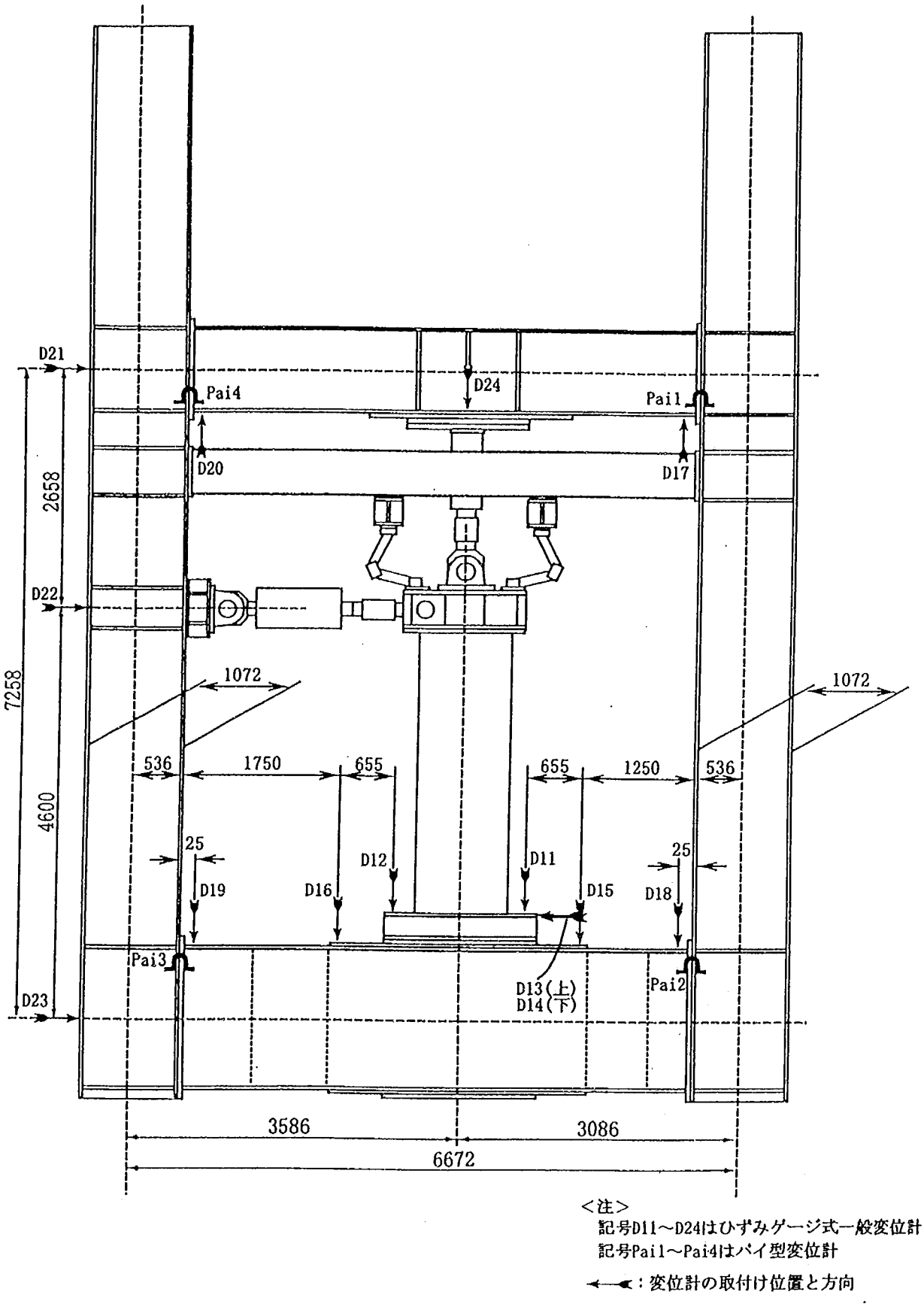
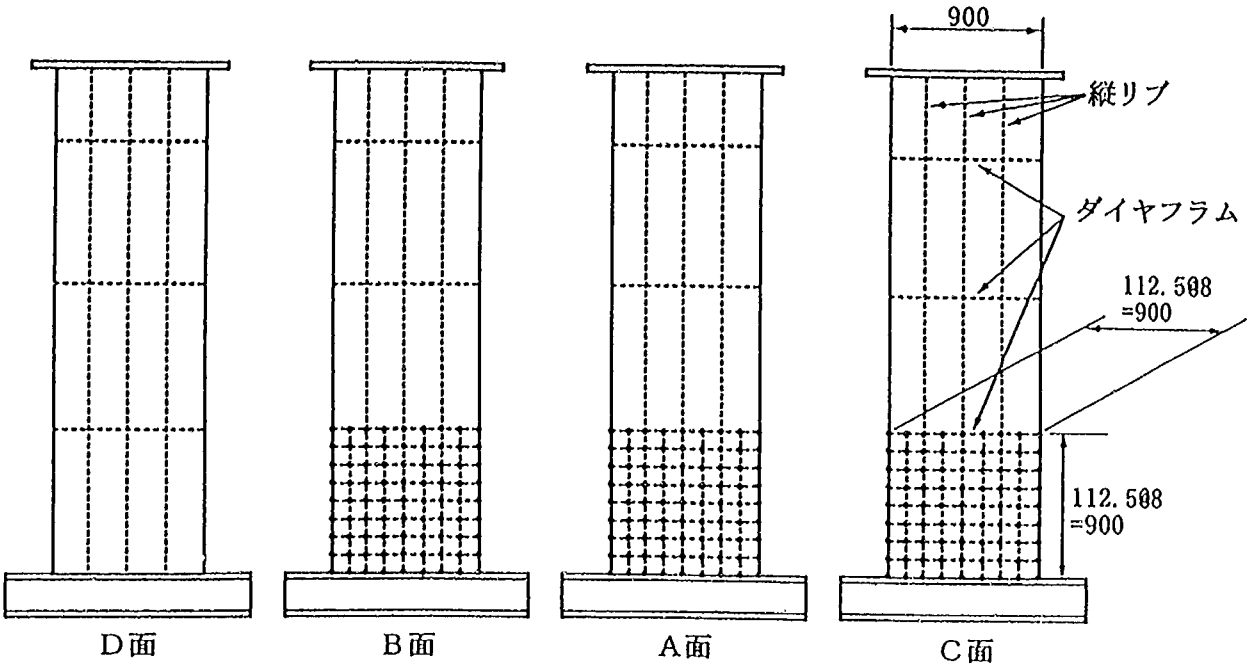


図-2.3.5　載荷フレームの変位計取付け位置



・測定点(全81×3=243点)

図-2.3.6 面外変位の測定位置(矩形断面)

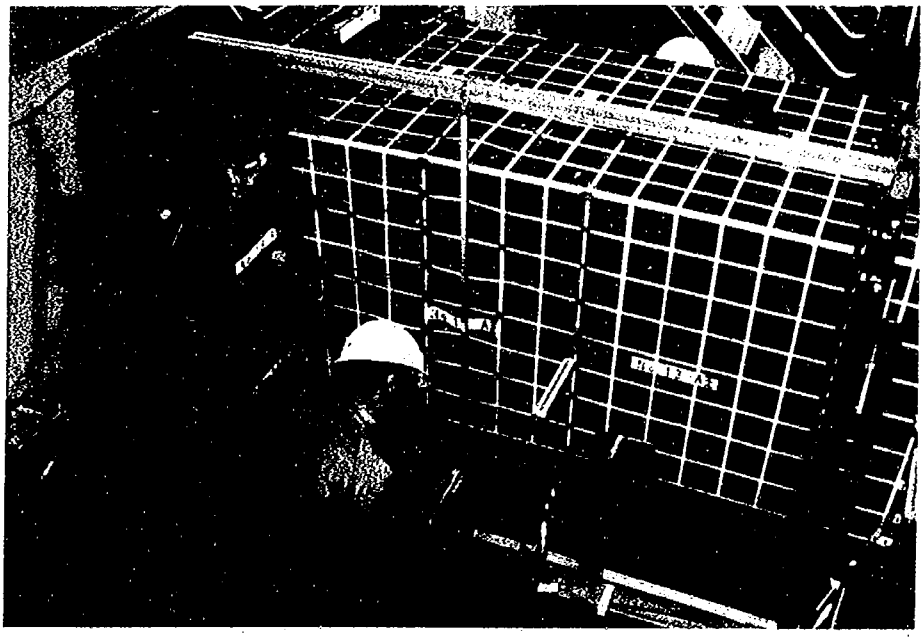


写真-2.3.1 面外変位測定状況 (矩形断面)

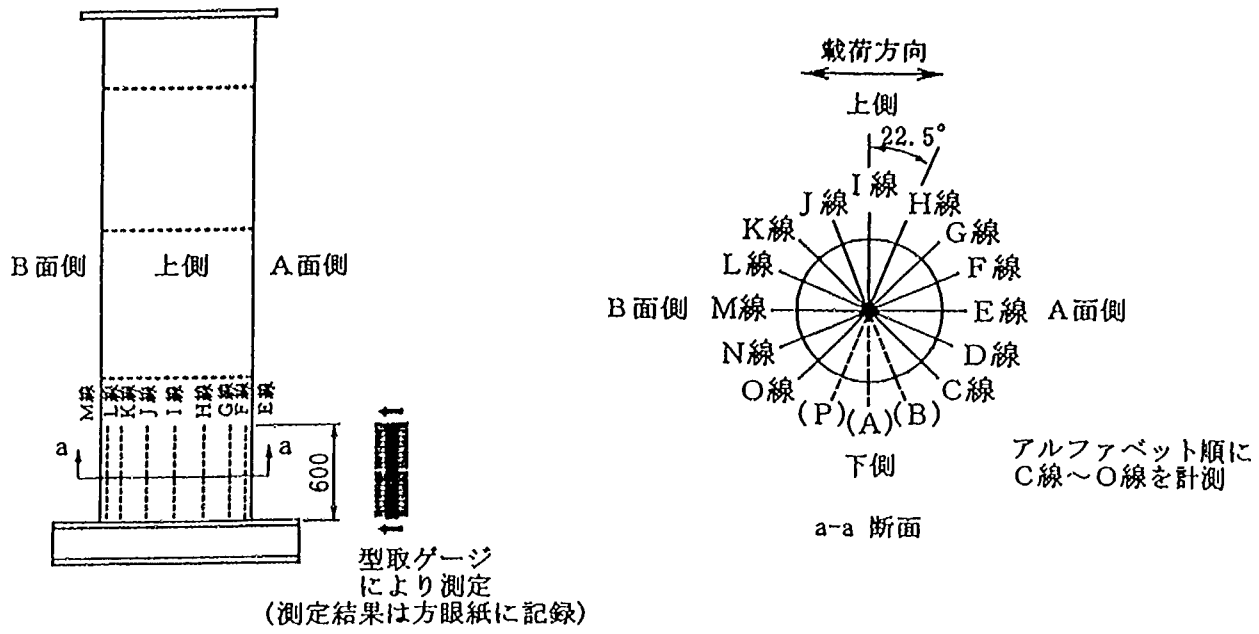


図-2.3.7 面外変位の測定位置(円形断面)

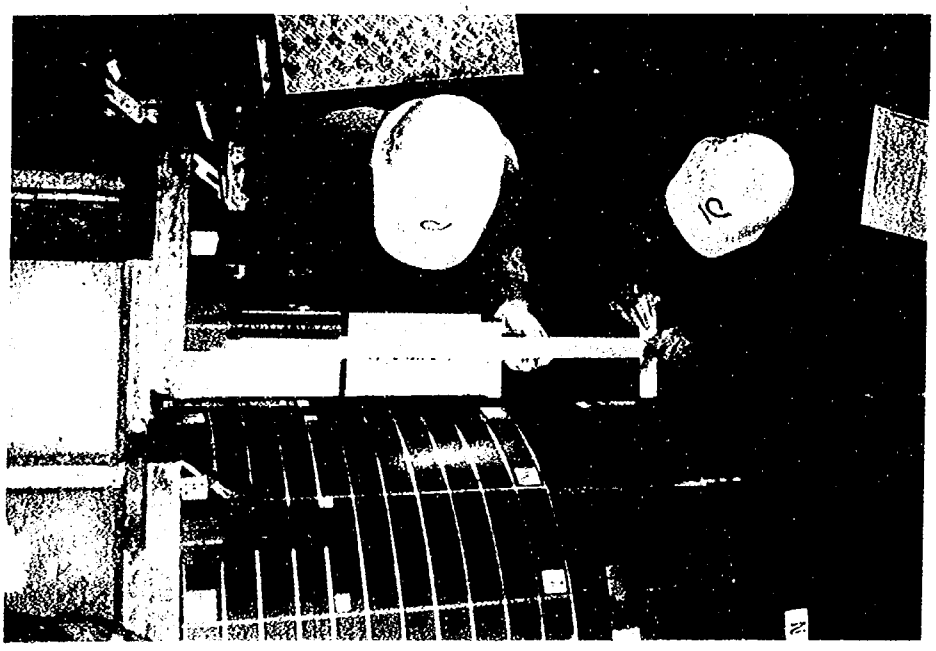


写真-2.3.2 面外変位測定状況 (円形断面)

実験結果
（矩形断面）

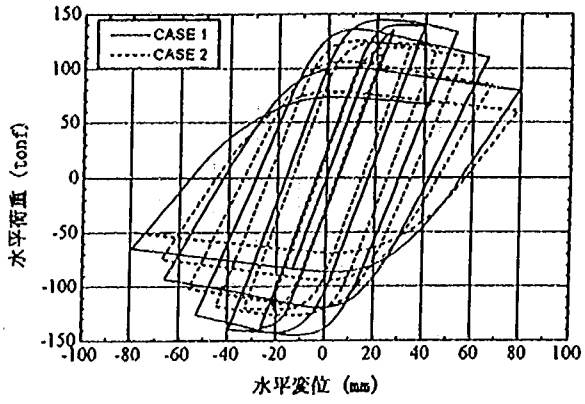
表-3.1.1　実験結果一覧

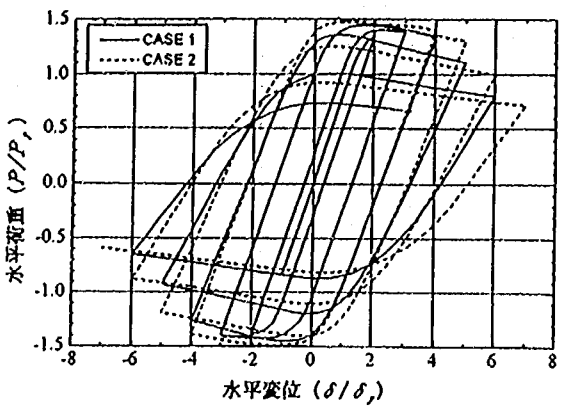
矩形断面供試体		外形寸法 bxb (mm)	板厚 t (mm)	縦リブ寸法 (mm)	横リブ間隔 a (mm)	パネル数	鋼種	鋼材降伏点 σ_{yM} (kgf/cm2)	断面積 A (cm2)	断面2次モーメント I (cm4)	断面2次半径 γ (cm)	有効長 l(=2h) (cm)	細長比 λ	幅厚比パラメータ R_R	幅厚比パラメータ R_F	リブ剛度 γ_l / γ_l^*	リブ剛度 $\gamma_l / \gamma_{l\,req}$	軸力 N (tf)	軸力比 N/N_{yN}	軸力比 N/N_{yM}
B1	基本	900x900	9	85x9	900	4	SM490	4230	412.7	513,113	35.26	684.6	0.277	0.59	0.49	1.47	1.47	198.1	0.150	0.113
B5	閉断面リブ	900x900	9	200x8 +2-80x8	1050	2	SM490	4349	404.0	517,276	35.78	684.6	0.277	0.53	0.54	0.97	1.14	193.9	0.150	0.110
B6	低降伏点鋼せん断パネル	900x900	10 (11)	95x13	900	4	SS400 (極軟鋼)	2773	454.8	533,290	34.24	684.6	0.231	0.43	0.31	1.91	3.03	192.8	0.177	0.153
B7	角補強 (⊿-HTB) (ボルト少)	900x900	9	80x6	900	4	SM490	3678	378.4 (447.0)	480,500 (584,200)	35.63 (36.15)	684.6	0.256 (0.252)	0.55	0.57	0.91	0.91	181.6	0.150 (0.127)	0.130 (0.110)
B8	角補強 (⊿-HTB) (塗装)	900x900	9	80x6	900	4	SM490	3678	378.4 (447.0)	480,500 (584,200)	35.63 (36.15)	684.6	0.256 (0.252)	0.55	0.57	0.91	0.91	181.6	0.150 (0.127)	0.130 (0.110)

注）1.B6のカッコ内はシェアウェブを示す.
2.HTBによる補強材の断面等は既設橋脚の補強をイメージしたので考慮しない。
なお、参考までに補強材の断面等を考慮した値をカッコ内に示す。

供試体	P_{yN} (tf)	P_{yM} (tf)	Pu (tf)	$\frac{Pu}{P_{yM}}$	δ_{yTN} (mm)	δ_{yTM} (mm)	δ_{yEN} (mm)	δ_{yEM} (mm)	δ m (mm)	δ 97 (mm)	δ 95 (mm)	δ lim (mm)	δ u (mm)	$\frac{\delta m}{\delta_{yEN}}$	$\frac{\delta 97}{\delta_{yEN}}$	$\frac{\delta 95}{\delta_{yEN}}$	$\frac{\delta lim}{\delta_{yEN}}$	$\frac{\delta u}{\delta_{yEN}}$
B1	90.6	124.9	157.0	1.26	11.2	15.5	14.7	20.2	45	51	54	49	75	3.1	3.5	3.7	3.3	5.1
B5	91.3	129.9	189.0	1.45	11.2	16.0	13.2	18.7	55	65	68	63	101	4.2	5.0	5.2	4.8	7.7
B6	68.4	81.3	175.2	2.15	8.2	9.7	7.0	8.3	60	77	82	79	167	8.5	10.9	11.6	11.2	23.8
B7	84.9 (106.0)	99.8 (124.1)	137.2	1.37 (1.11)	11.2 (11.6)	13.2 (13.6)	14.1 (17.5)	16.5 (20.5)	47	54	60	52	90 (69)	3.3 (2.7)	3.8 (3.1)	4.3 (3.4)	3.7 (3.0)	6.4 (3.9)
B8	84.9 (106.0)	99.8 (124.1)	134.5	1.35 (1.08)	11.2 (11.6)	13.2 (13.6)	14.3 (17.9)	16.9 (21.0)	56	68	71	69	92 (74)	3.9 (3.1)	4.8 (3.8)	5.0 (4.0)	4.8 (3.8)	6.4 (4.2)

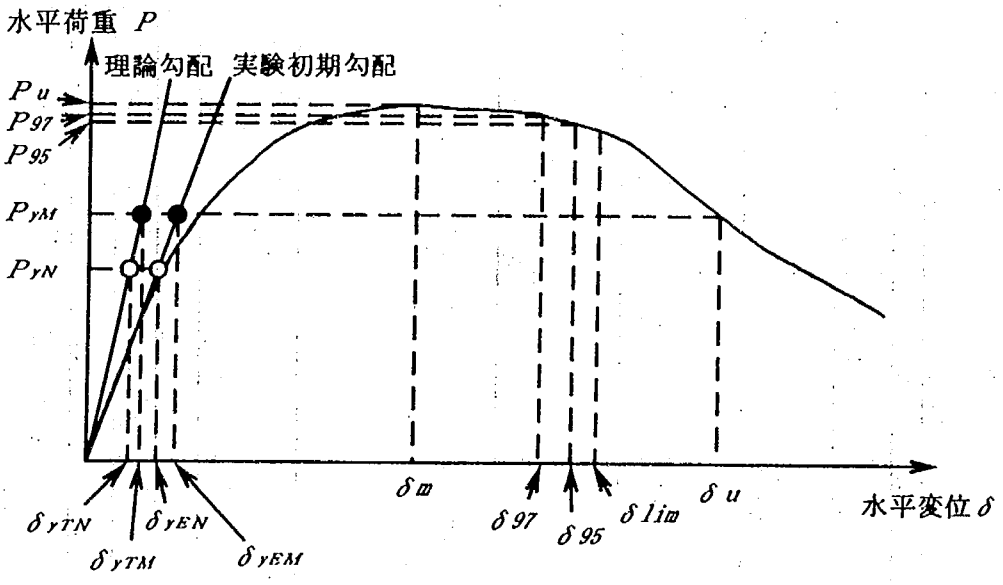
注）記号の説明については図-3.1.1を参照。





CASE 1 : σ_y =3,765 kgf/cm2, N/N_{yM} =0.15, N =213.7 tonf,
δ_y =13.22 mm, P_y =99.86 tonf
CASE 2 : σ_y =3,200 kgf/cm2, N/N_{yM} =0.15, N =181.6 tonf,
δ_y =11.24 mm, P_y =84.87 tonf

(a) FEM解析結果(正規化前)　　(b) FEM解析結果(正規化後)



図中の記号の説明:

Pu : 最大水平荷重
$P97$: Puの97%の荷重
$P95$: Puの95%の荷重

$$P_{yM} = \left(\sigma_{yM} - \frac{N}{A}\right)\frac{Z}{h}$$

$$P_{yN} = \left(\sigma_{yN} - \frac{N}{A}\right)\frac{Z}{h} \quad \cdots式(2.2.2)$$

$$\delta_{yTN} = \frac{P_{yN}\,h^3}{3EI} = \delta_{yo} \quad \cdots式(2.2.1)$$

$$\delta_{yTM} = \frac{P_{yM}\,h^3}{3EI}$$

δ_{yEN} : 実験初期勾配において水平荷重がP_{yN}の時の水平変位
δ_{yEM} : 実験初期勾配において水平荷重がP_{yM}の時の水平変位
δ_m : 包絡線において水平荷重がPu の時の水平変位
δ_{97} : 包絡線において水平荷重が$P97$ の時の水平変位
δ_{95} : 包絡線において水平荷重が$P95$ の時の水平変位
δ_{lim} : ヒステリシスループのそれぞれの変位の折り返し点において、この点と同じ水平変位における次の繰返し載荷のループの水平荷重がPuの2%以上低下(劣化)していない最大の変位折り返し点の水平変位。
δ_u : 包絡線において水平荷重がP_{yM}の時の水平変位

(c) 記号説明

図-3.1.1 水平荷重－水平変位関係

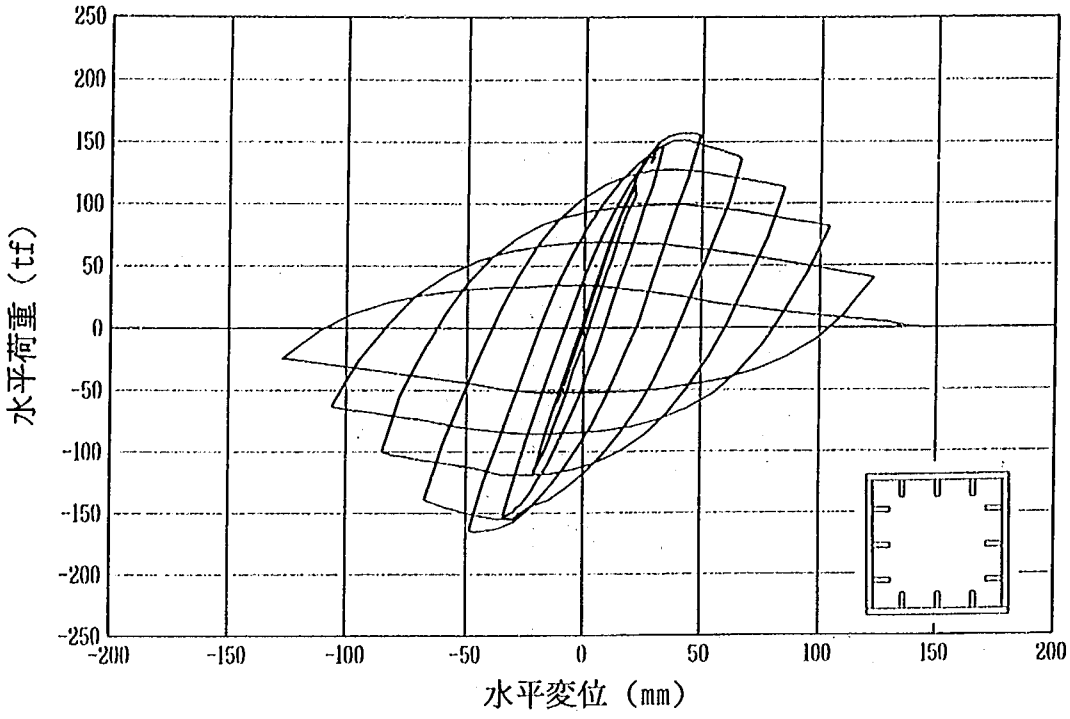


図-3.1.2(1)　水平荷重－水平変位関係(Ｂ１)

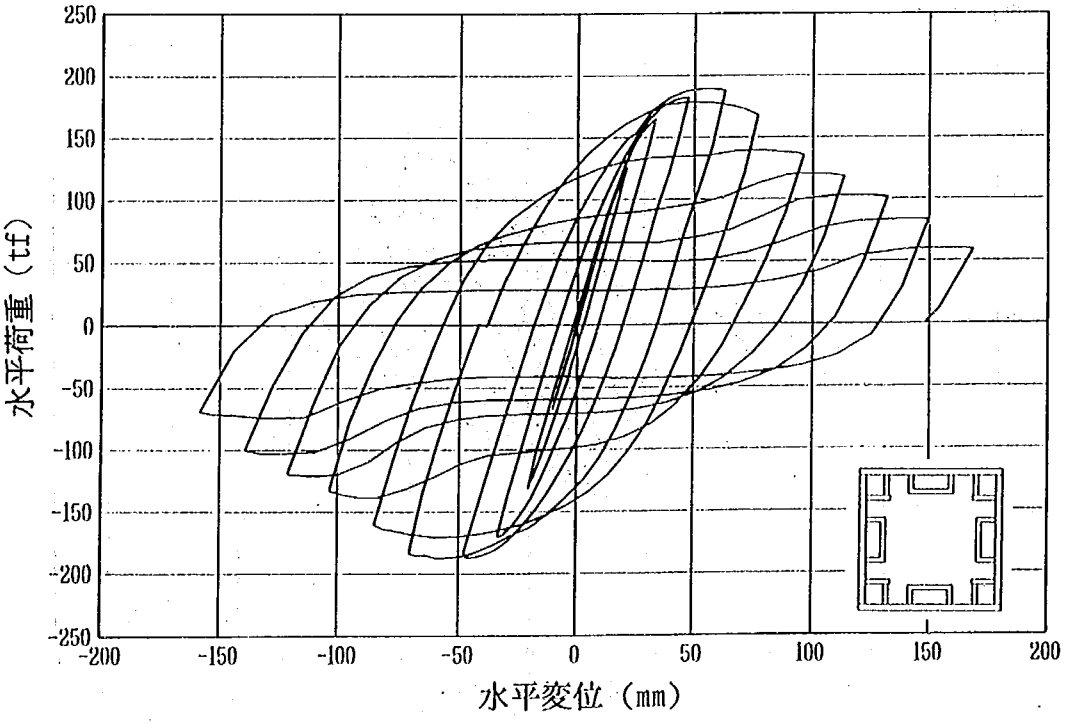


図-3.1.2(2)　水平荷重－水平変位関係(Ｂ５)

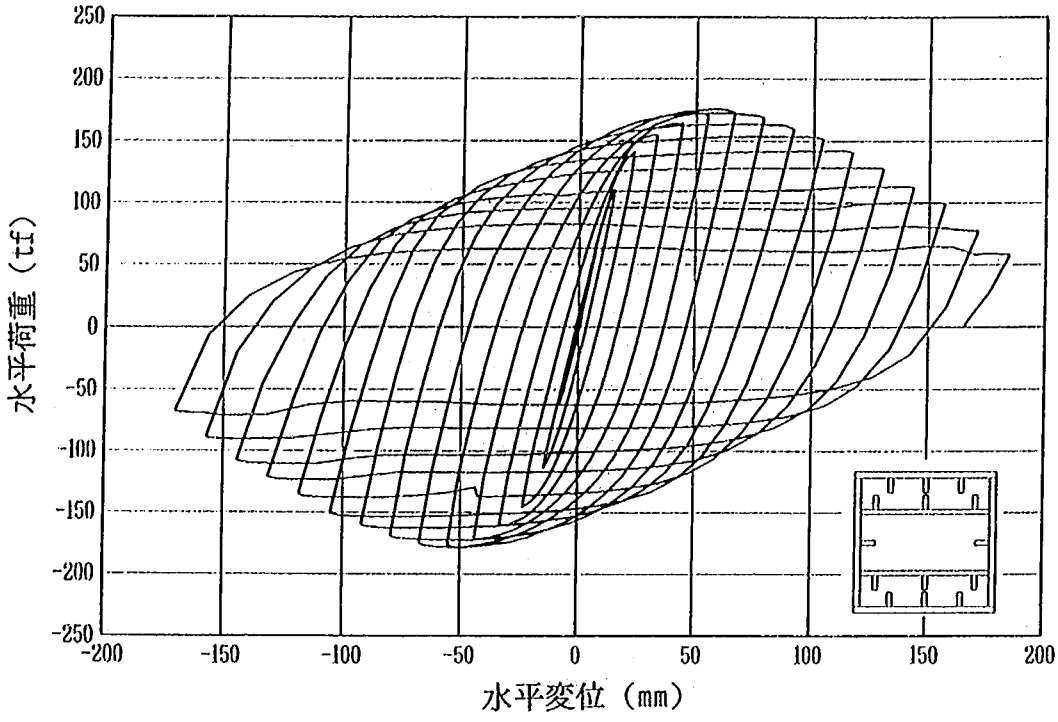


図-3.1.2(3)　水平荷重－水平変位関係(Ｂ６)

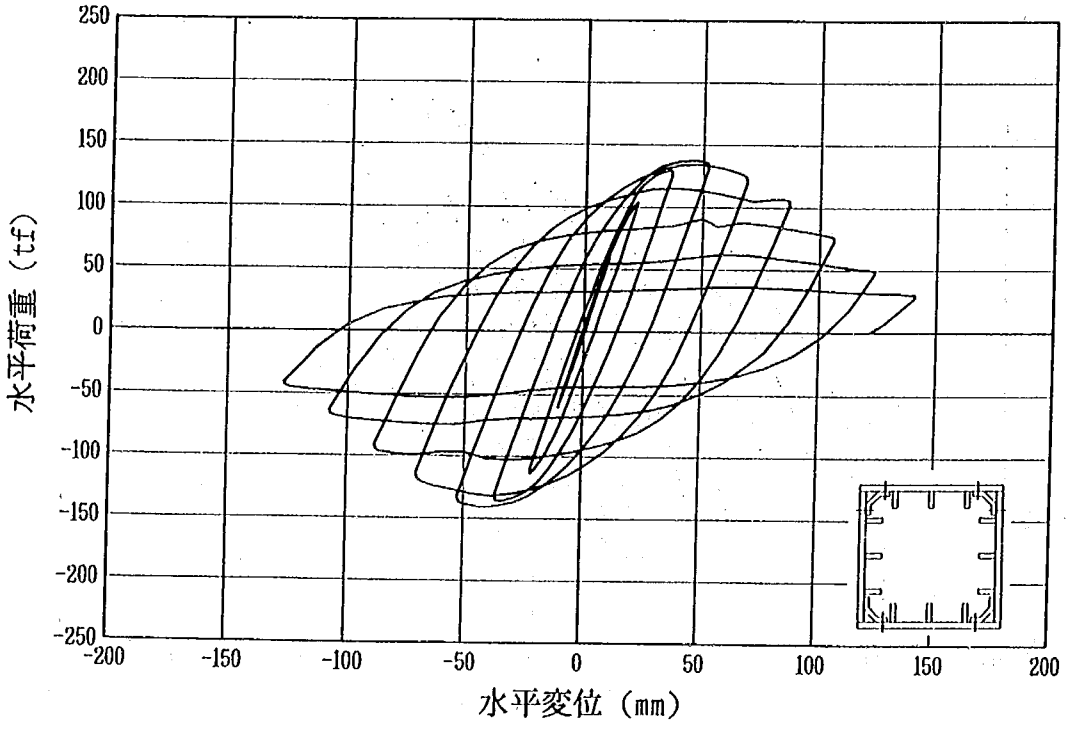


図-3.1.2(4)　水平荷重－水平変位関係(Ｂ７)

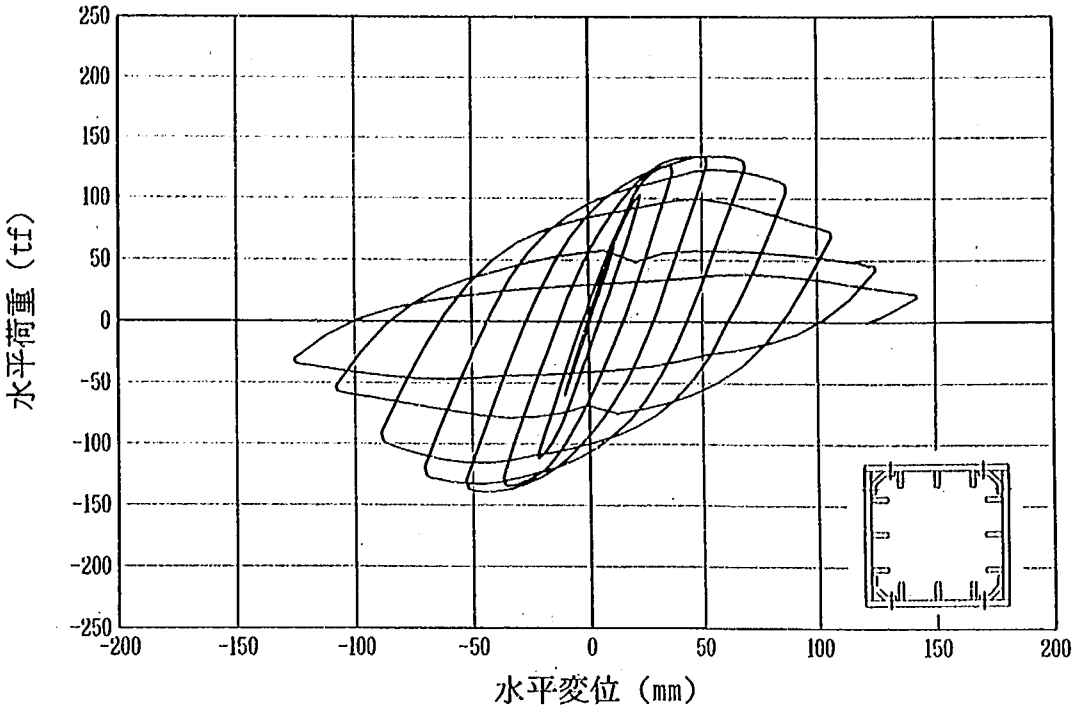


図-3.1.2(5)　水平荷重－水平変位関係(Ｂ８)

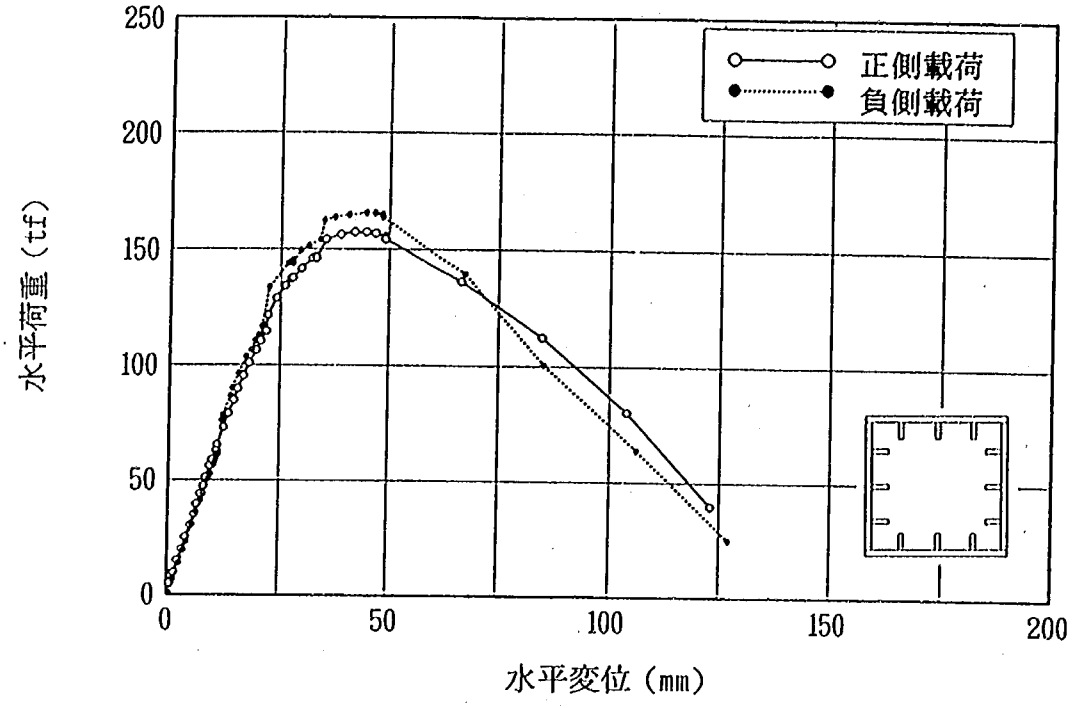


図-3.1.3(1)　水平荷重－水平変位関係の包絡線(Ｂ１)

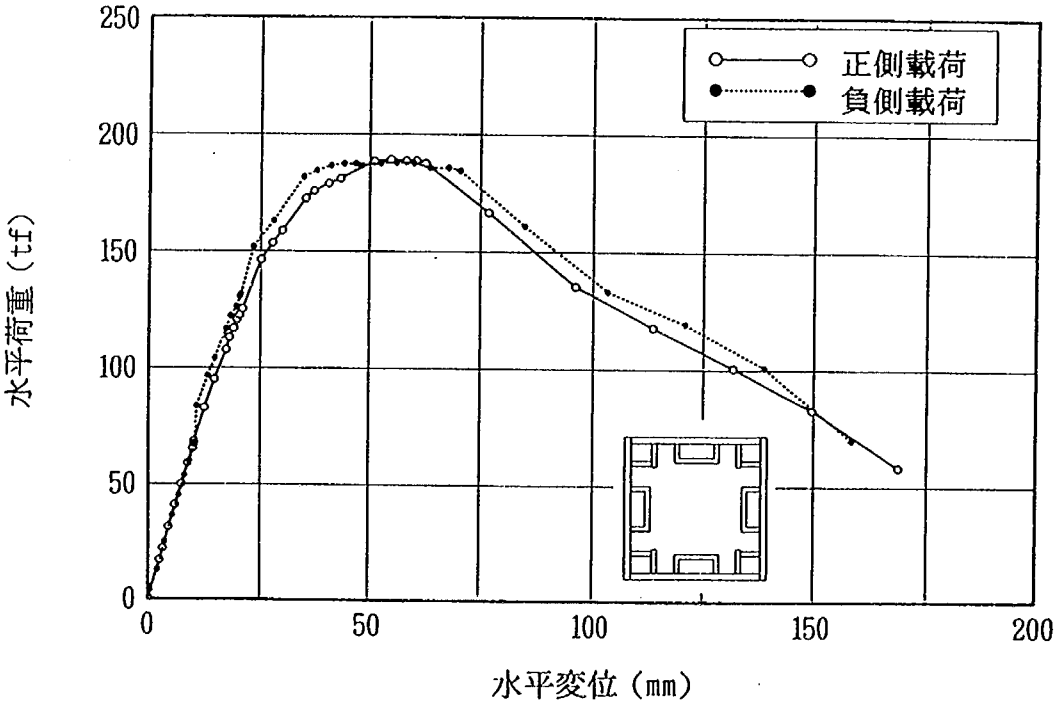


図-3.1.3(2)　水平荷重－水平変位関係の包絡線(Ｂ５)

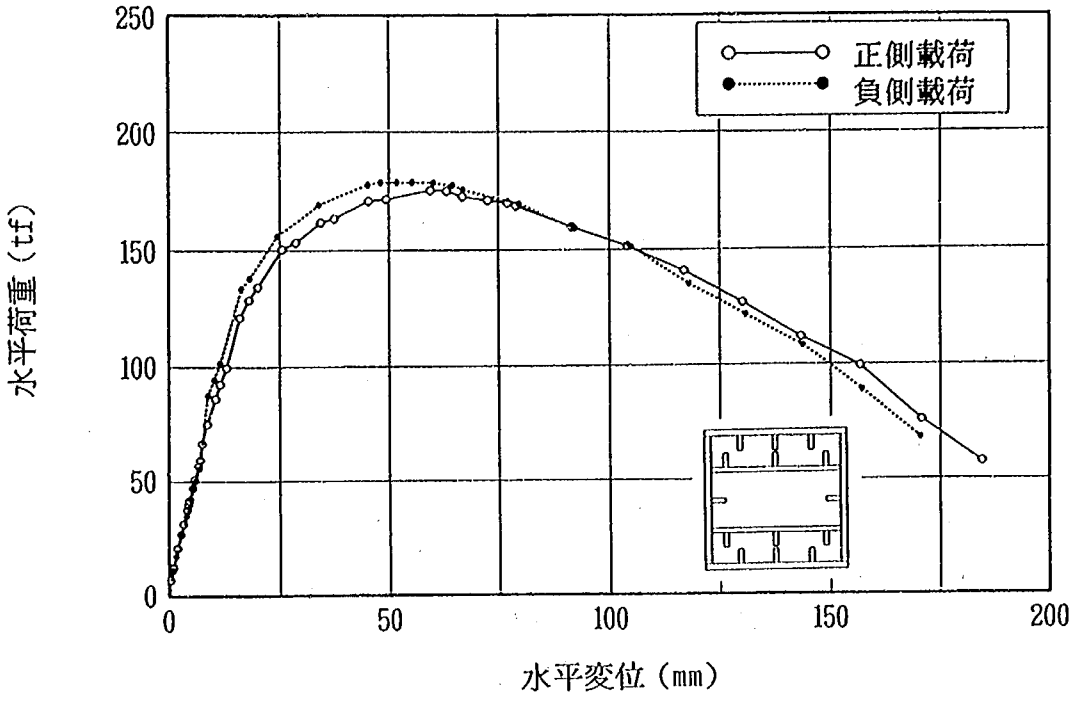


図-3.1.3(3)　水平荷重－水平変位関係の包絡線(Ｂ６)

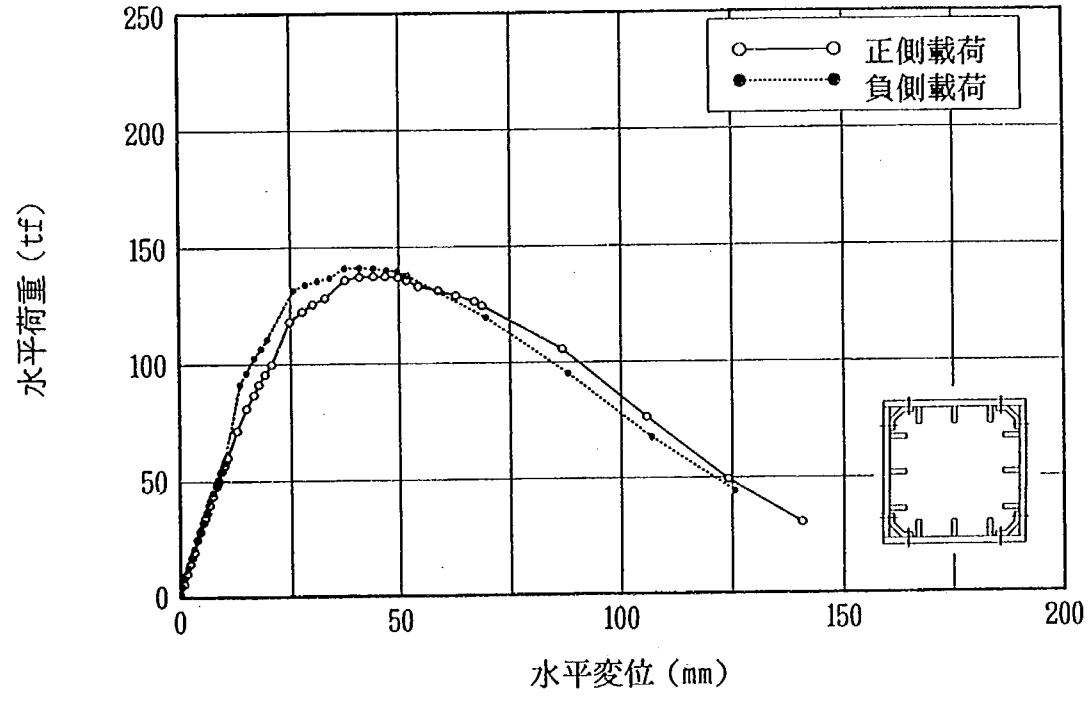


図-3.1.3(4)　水平荷重－水平変位関係の包絡線(Ｂ７)

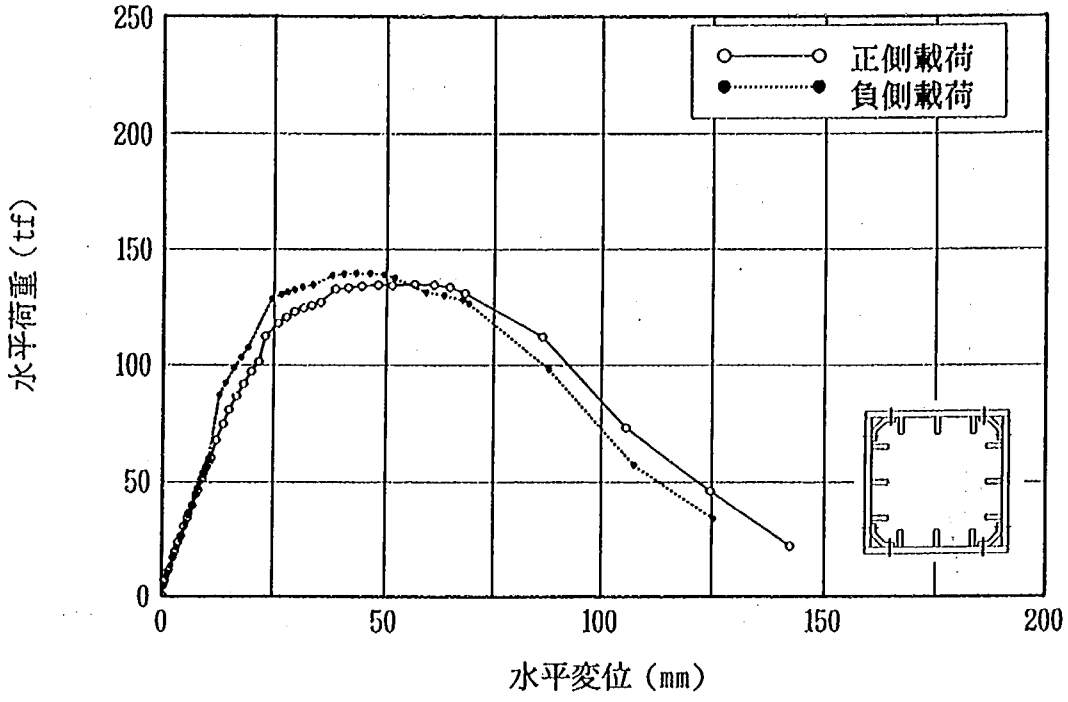
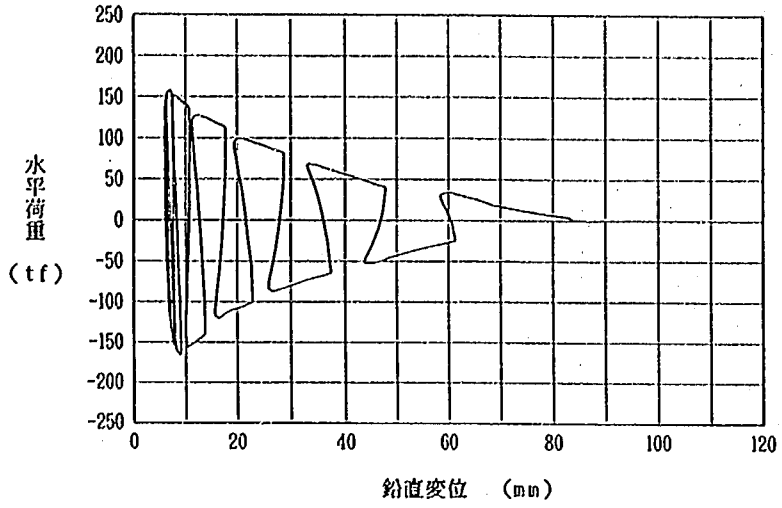
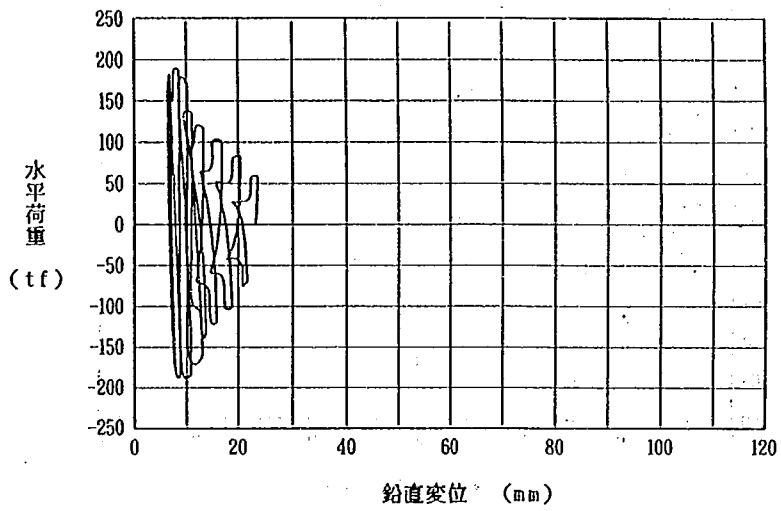


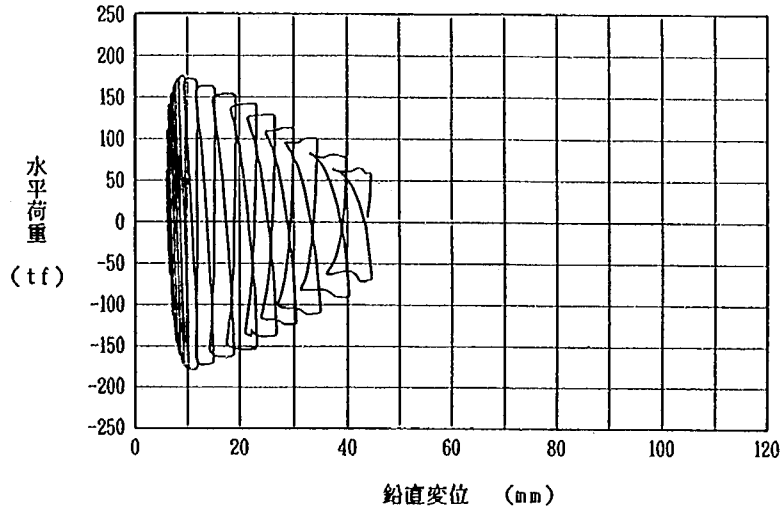
図-3.1.3(5)　水平荷重－水平変位関係の包絡線(Ｂ８)



(1) B 1

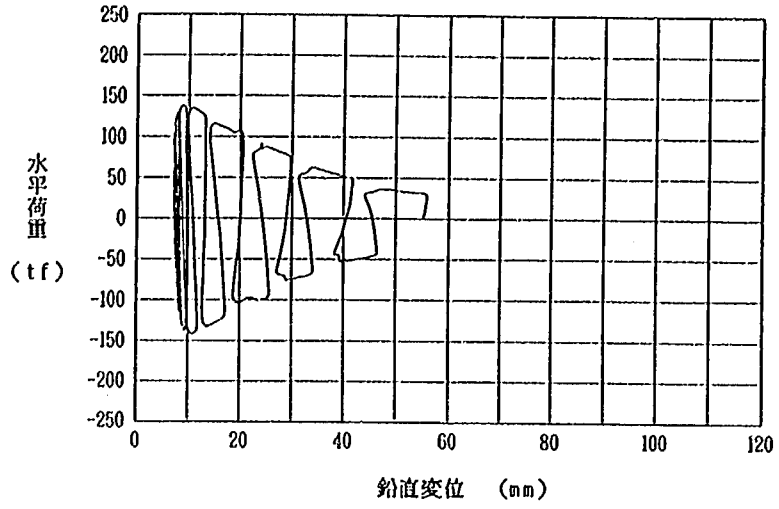


(2) B 5

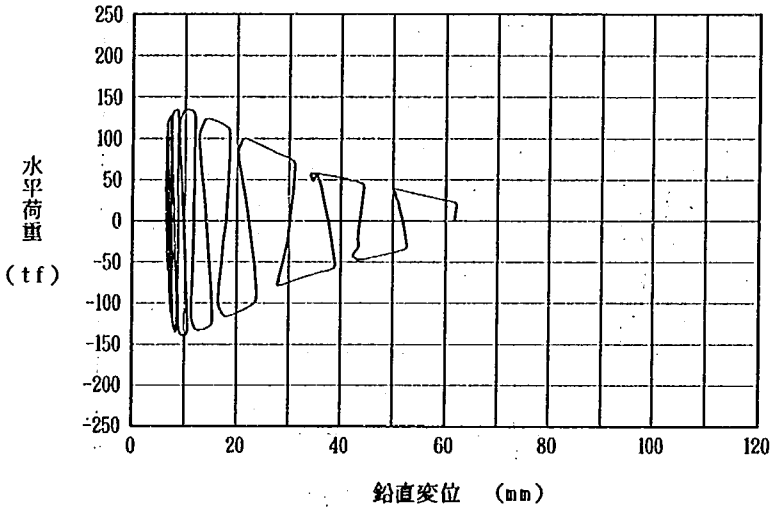


(3) B 6

図-3.1.4 水平荷重－鉛直変位関係

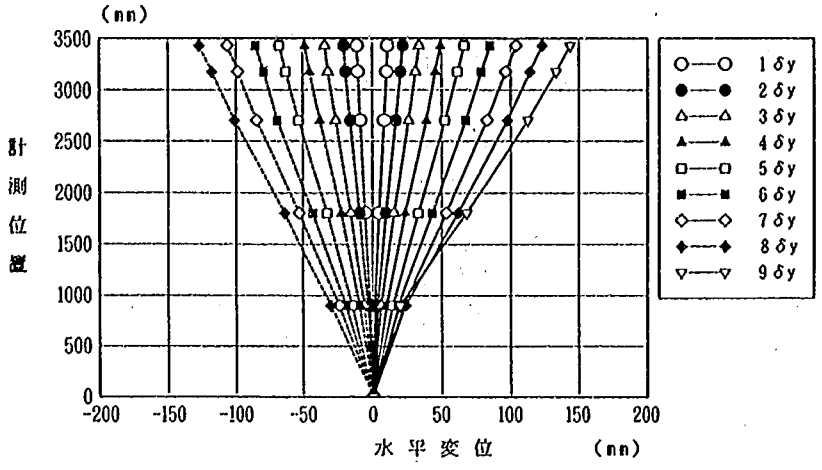


(4) B 7

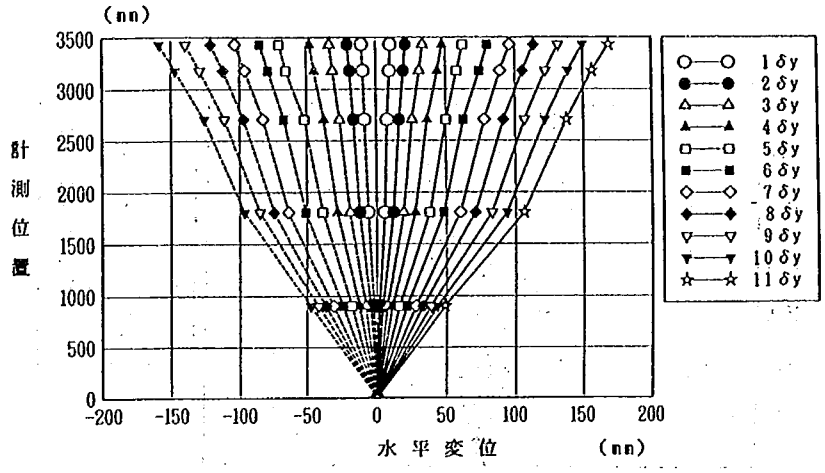


(5) B 8

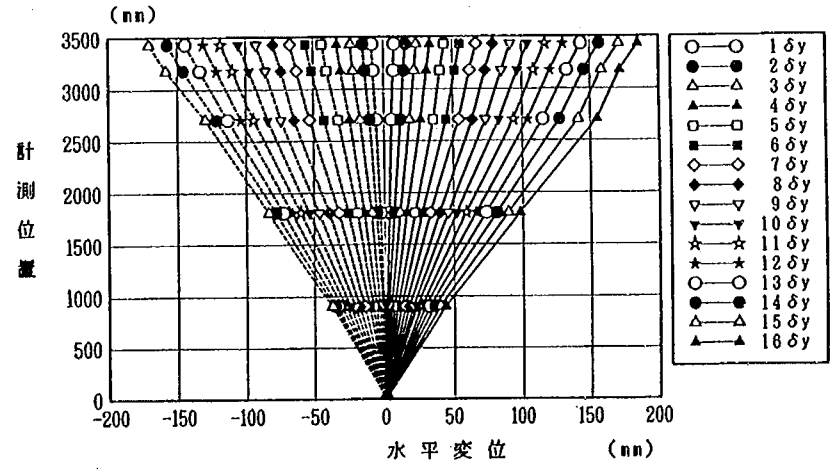
図-3.1.4 水平荷重－鉛直変位関係（つづき）



(1) B1

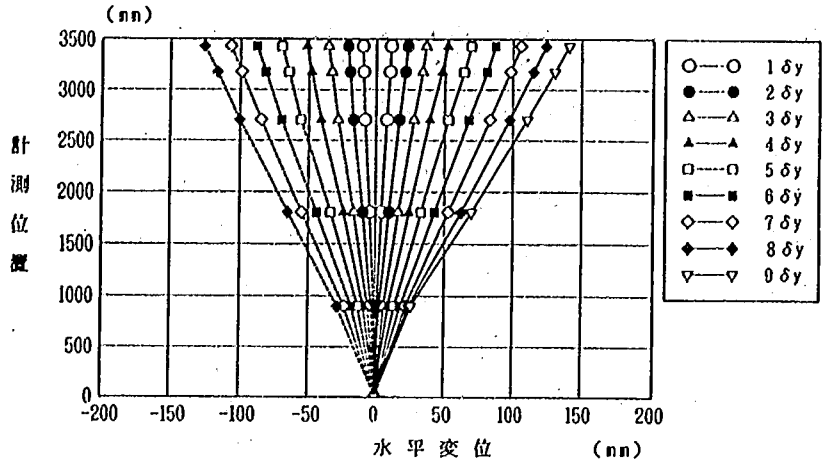


(2) B5

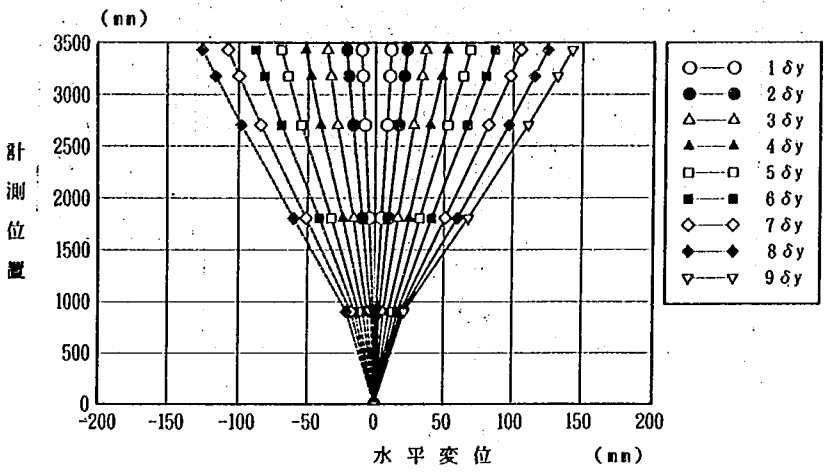


(3) B6

図-3.1.5 水平変位の鉛直方向分布

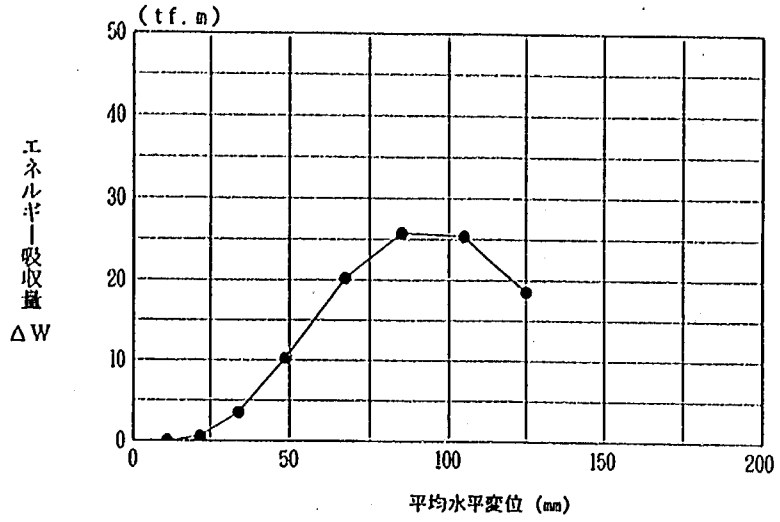


(4) B 7

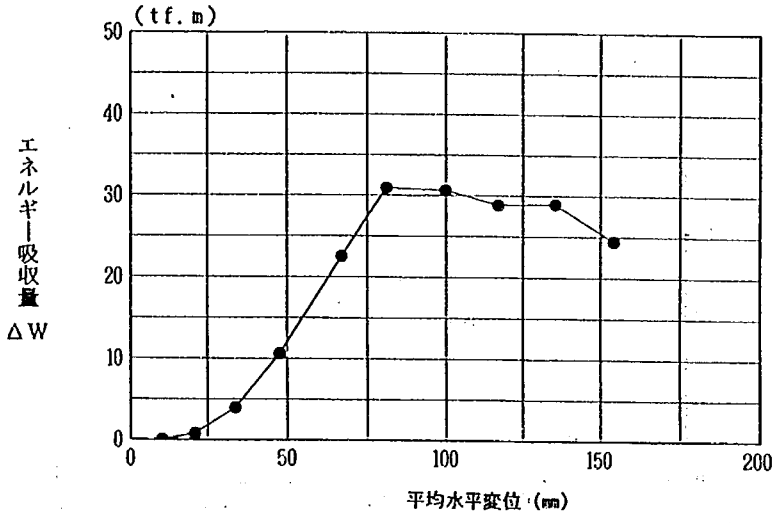


(5) B 8

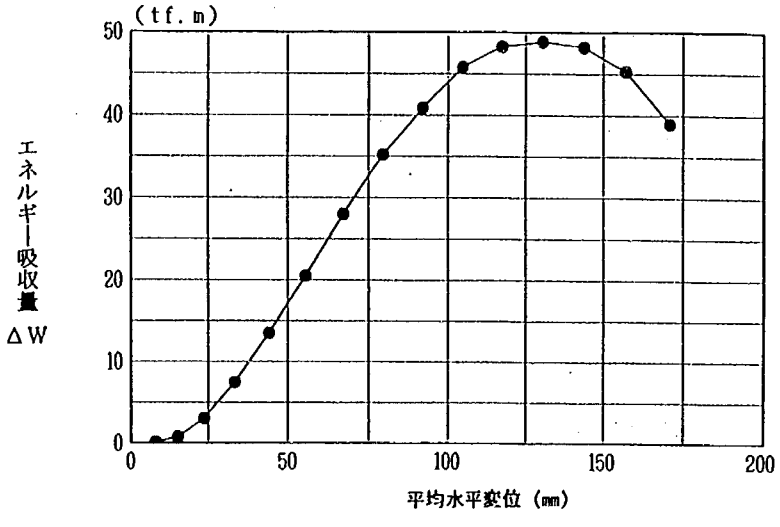
図-3.1.5 水平変位の鉛直方向分布（つづき）



(1) B 1

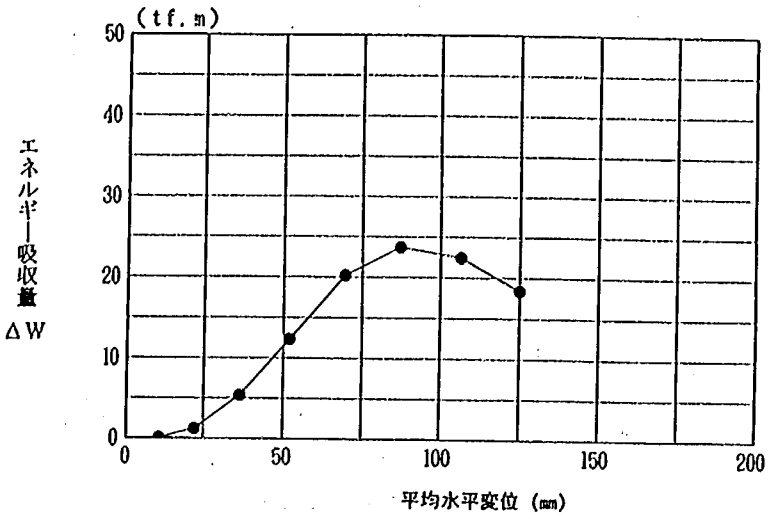


(2) B 5

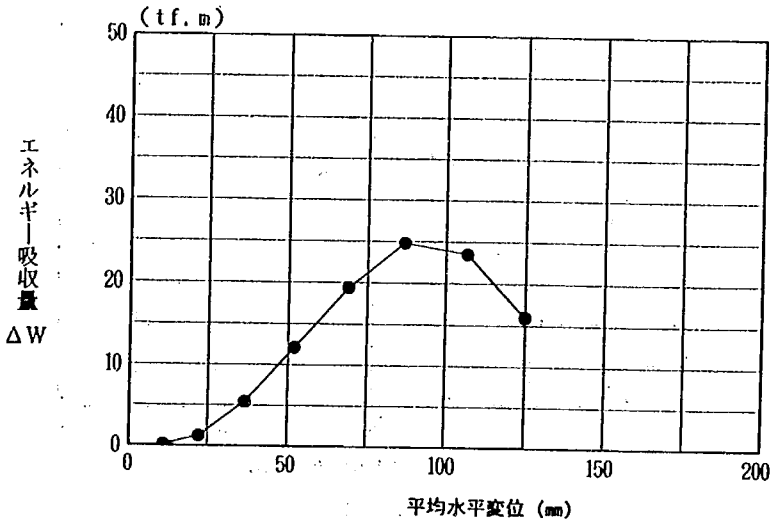


(3) B 6

図-3.1.6 エネルギー吸収量 (つづき)

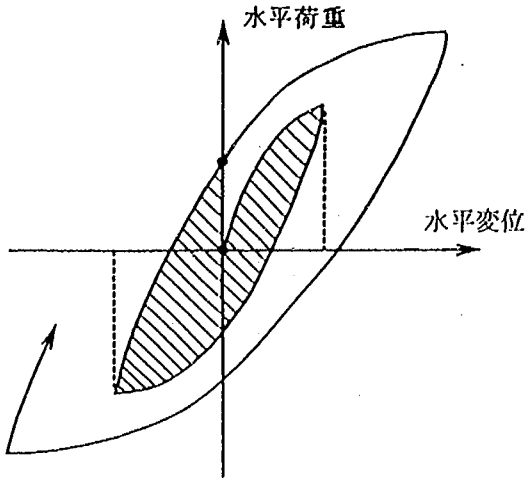


(4) B 7

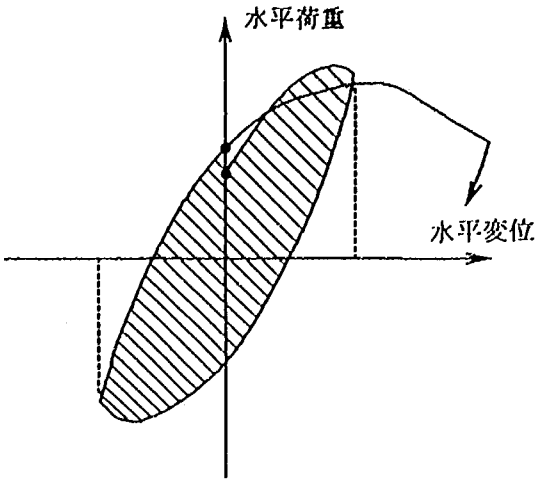


(5) B 8

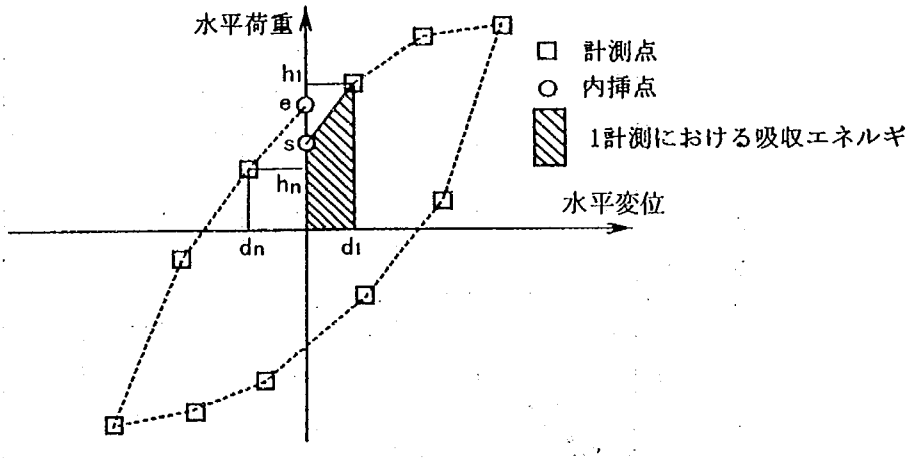
図-3.1.6 エネルギー吸収量



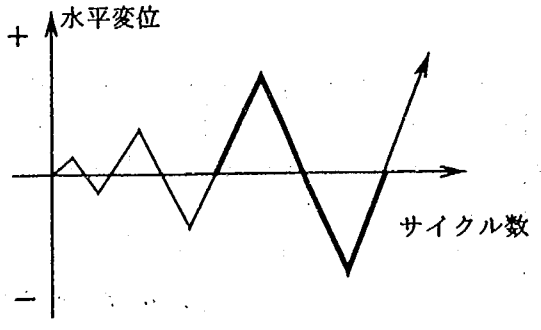
(a) 初期の場合の
吸収エネルギーの定義



(b) 強度低下を起こした場合の
吸収エネルギーの定義

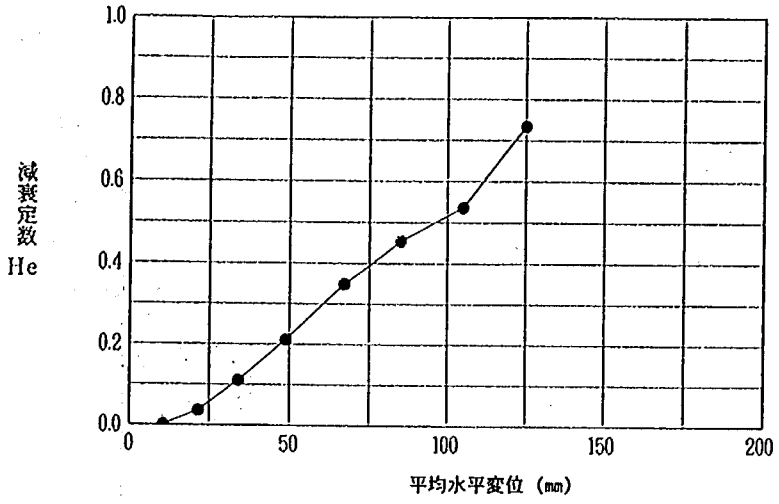


(c) 吸収エネルギーの計算方法

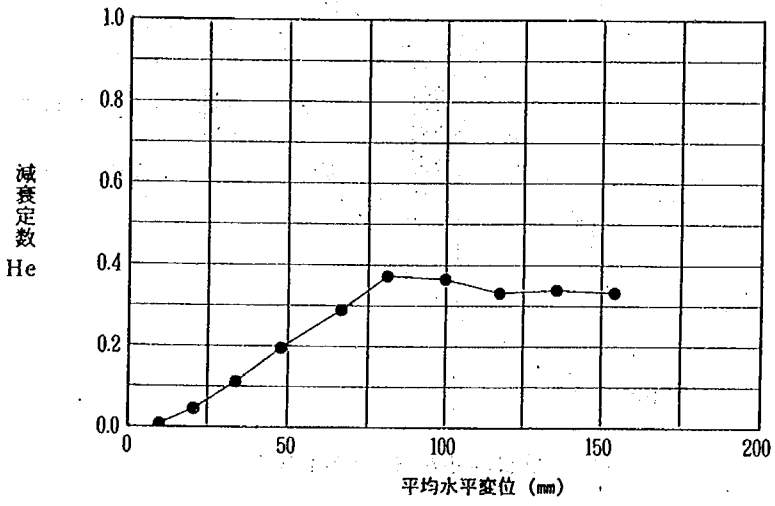


(d) 1サイクルの定義

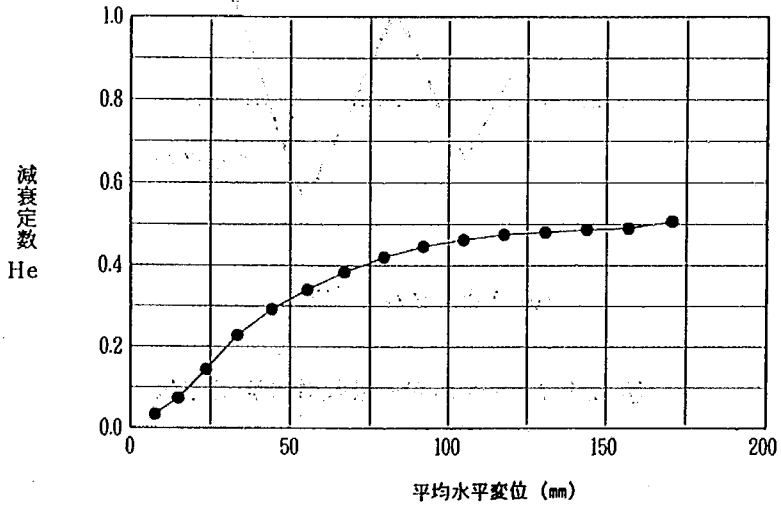
図-3.1.7 エネルギー吸収量の算出方法



(1)　B 1

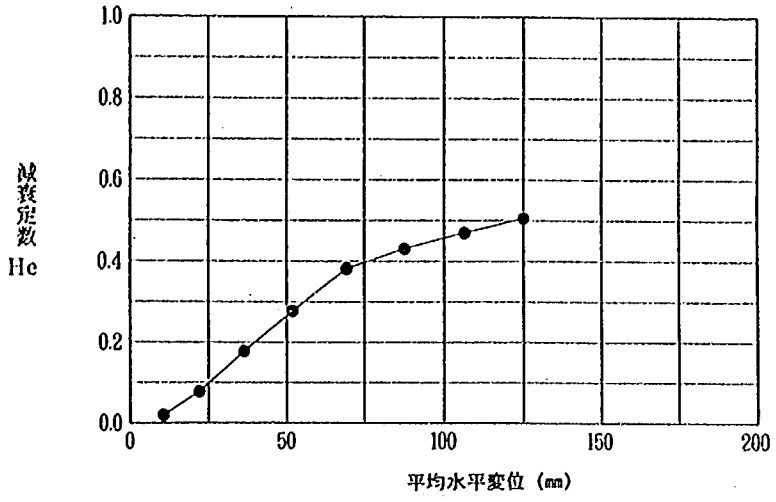


(2)　B 5

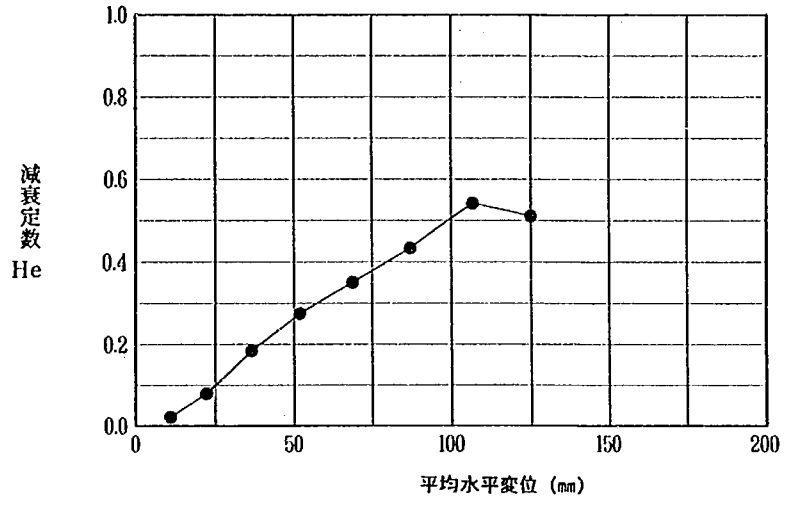


(3)　B 6

図-3.1.8　等価減衰定数



(4)　B 7



(5)　B 8

図-3.1.8　等価減衰定数（つづき）

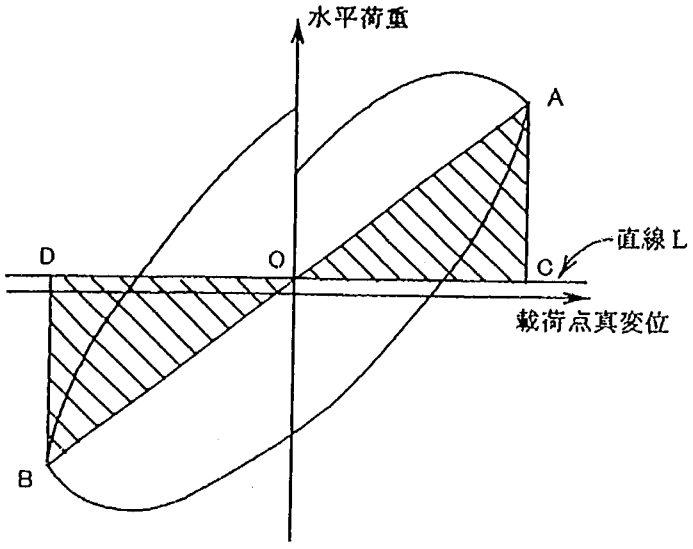
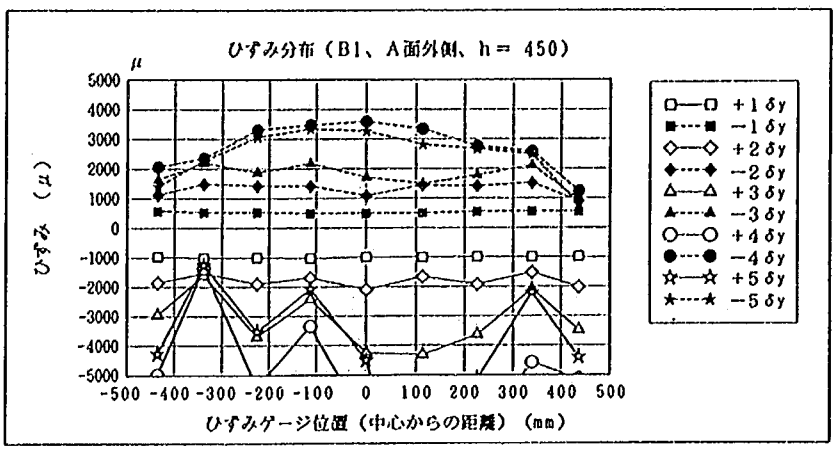
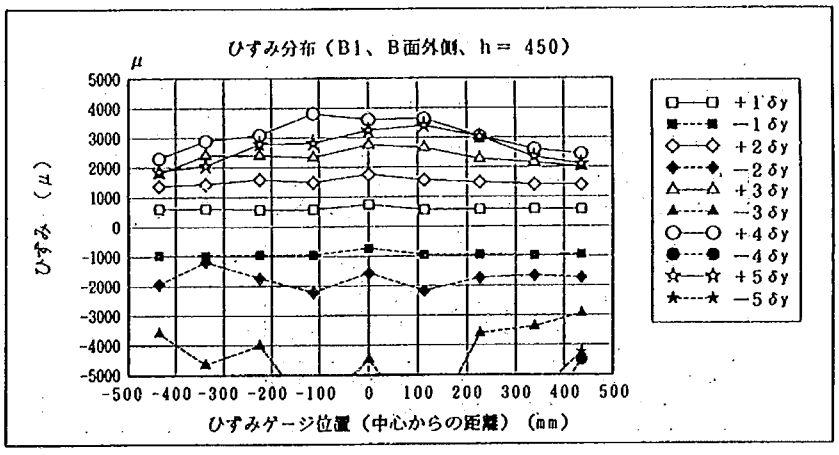


図-3.1.9　等価減衰定数と等価剛性の定義





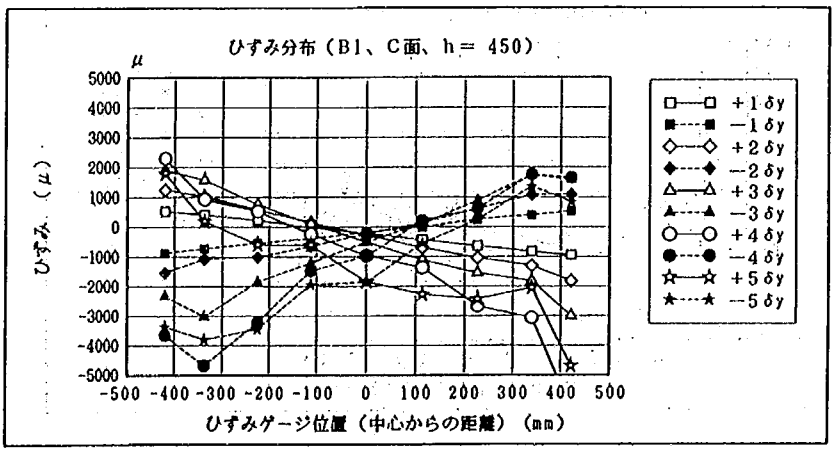
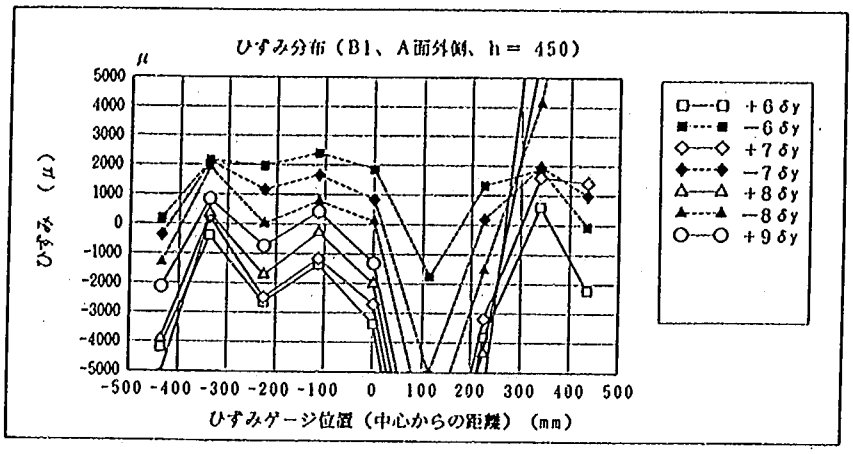
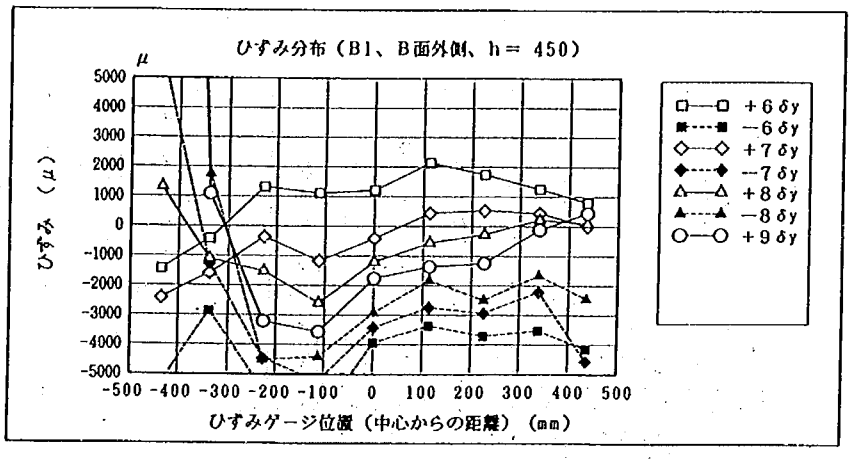


図-3.1.10(1)　ひずみ分布（Ｂ１，最大荷重を超えた点：＋４δｙ）





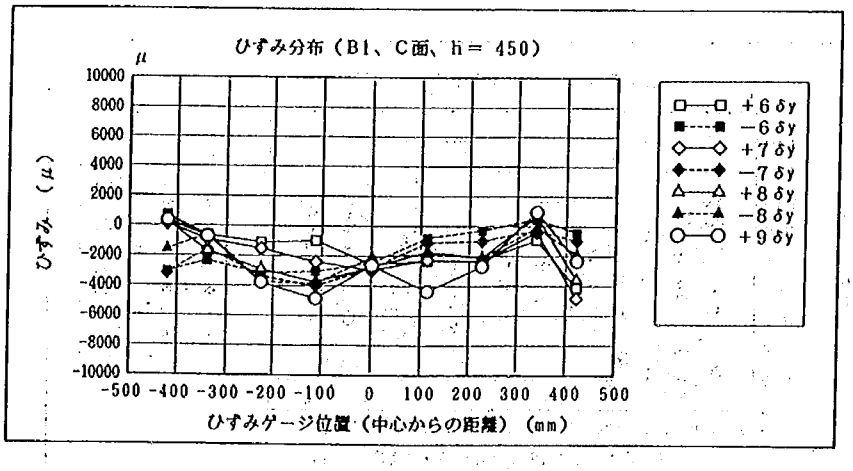
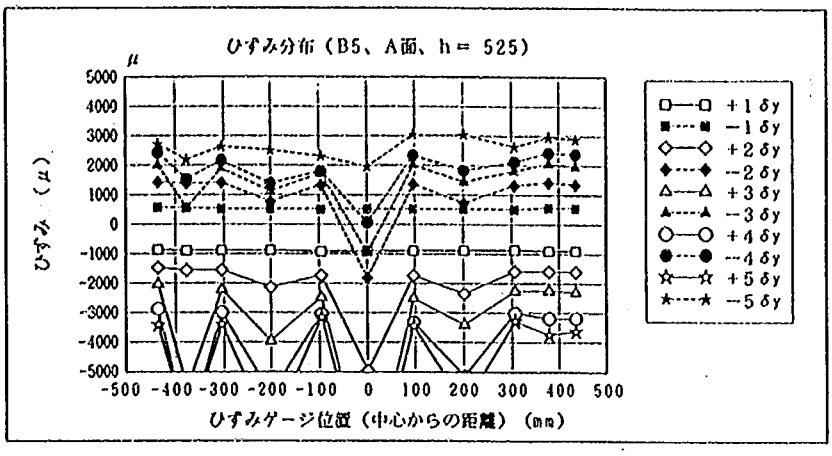
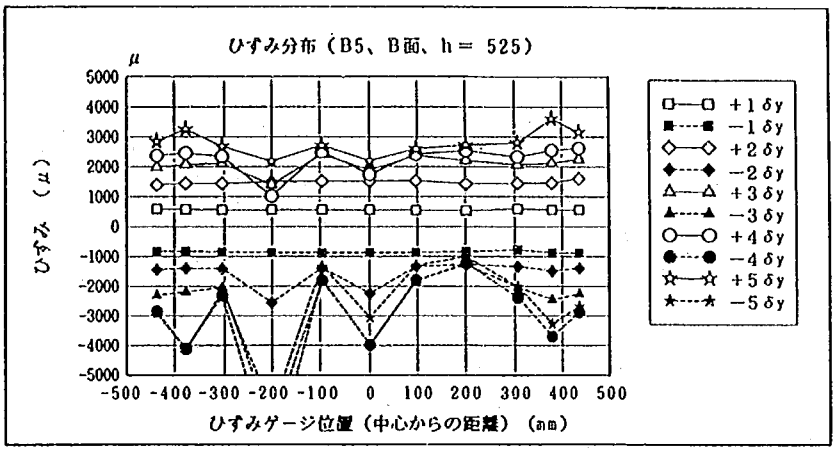


図-3.1.10(1)　ひずみ分布（B１，最大荷重を超えた点：＋4δy）（つづき）





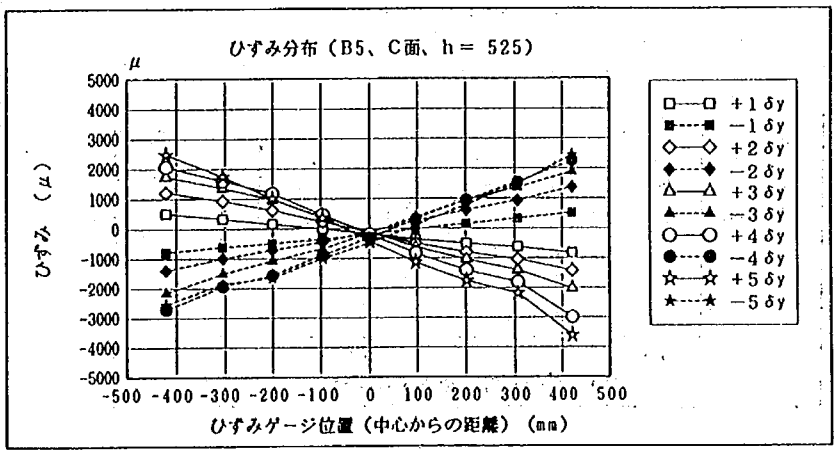
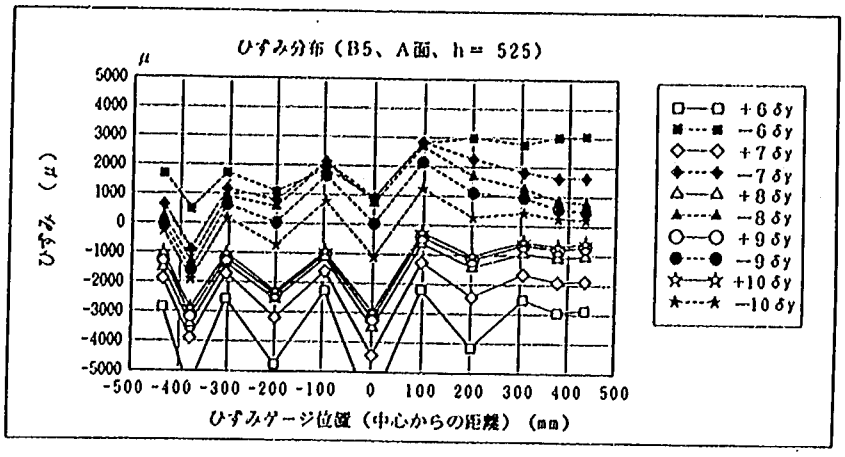
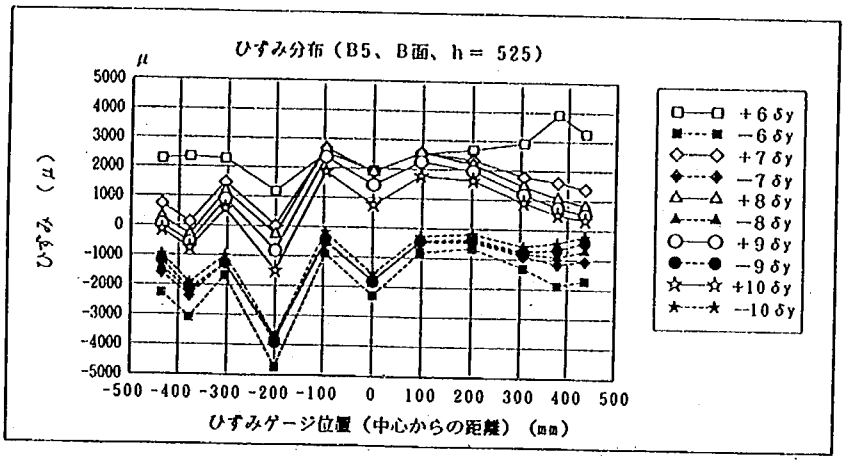


図-3.1.10(2)　ひずみ分布（Ｂ５，最大荷重を超えた点：＋５δｙ）





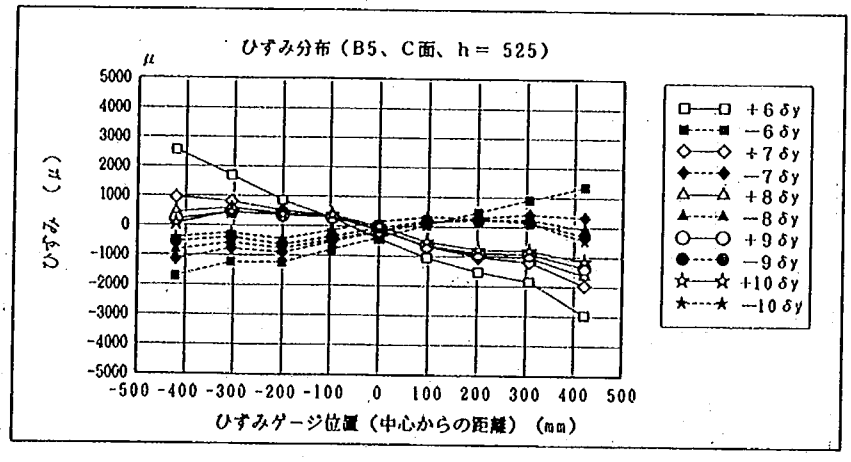
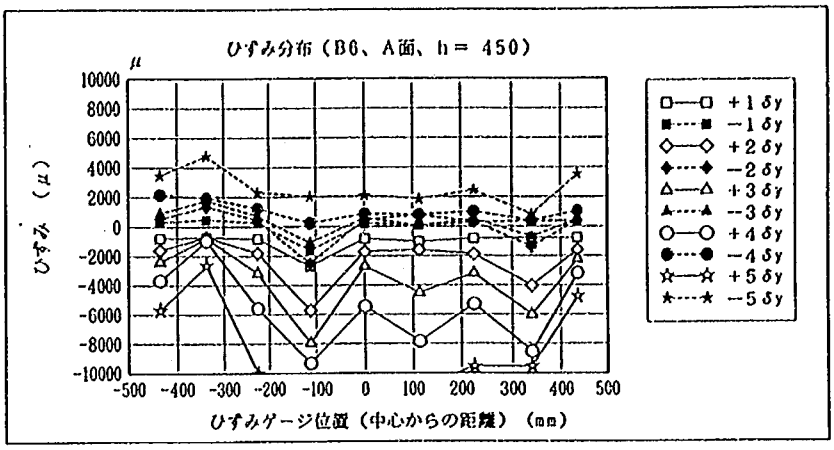
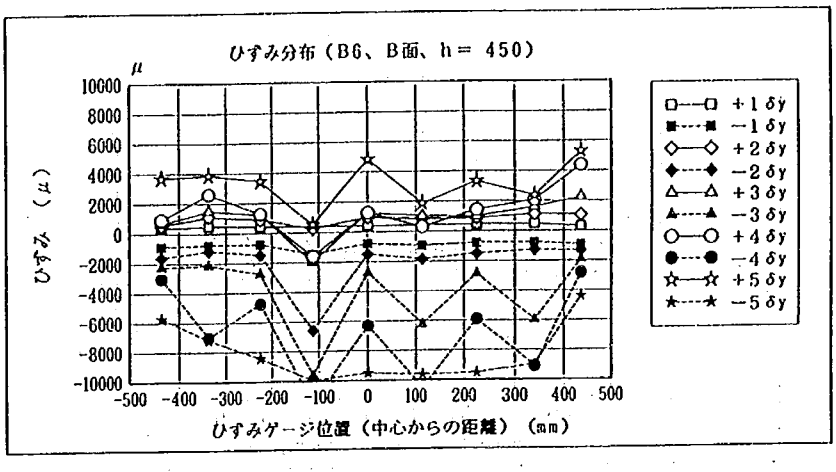


図-3.1.10(2)　ひずみ分布（Ｂ５，最大荷重を超えた点：＋５δｙ）　（つづき）





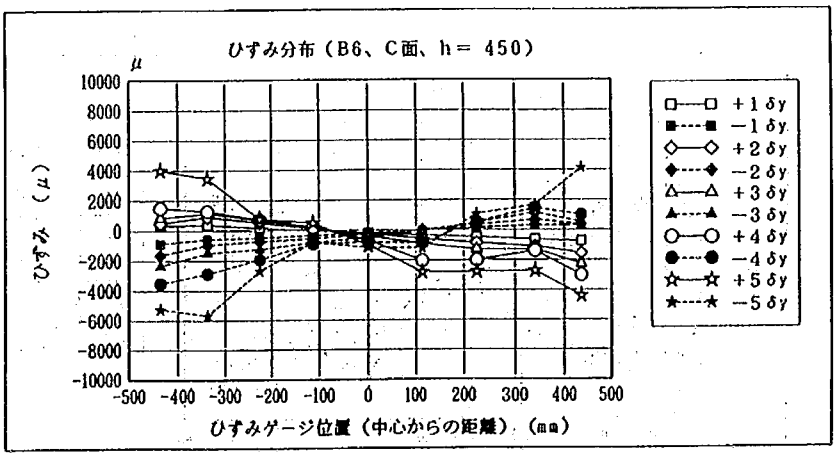
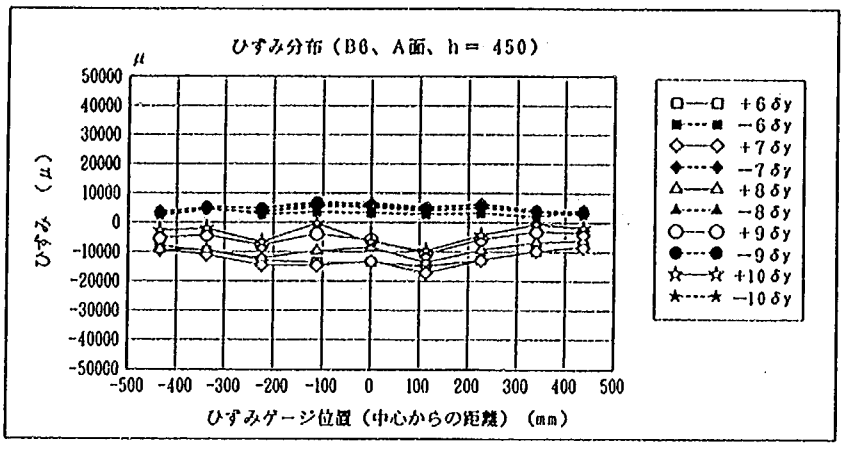
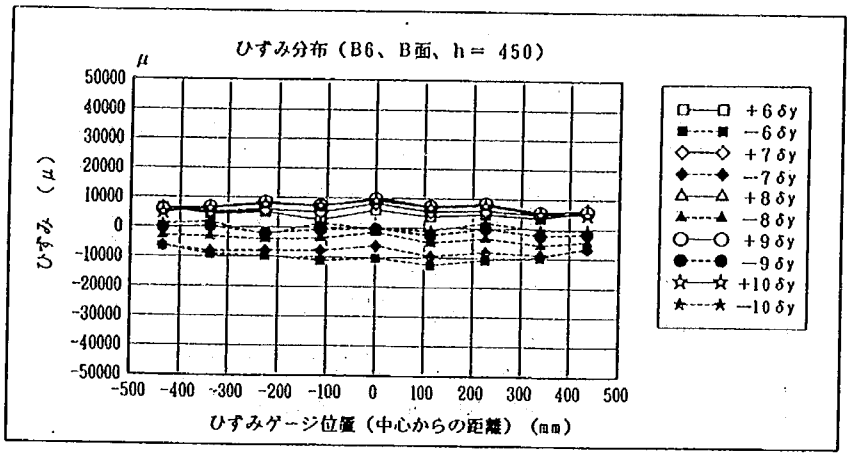


図-3.1.10(3)　ひずみ分布（Ｂ６，最大荷重を超えた点：＋７δｙ）





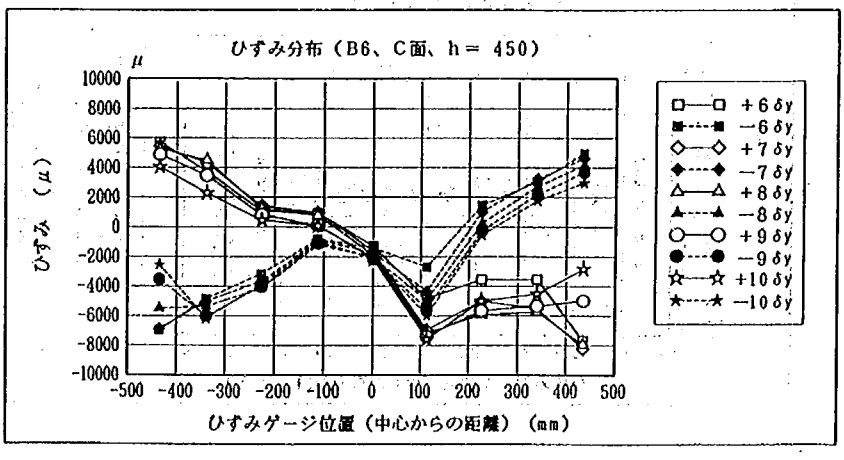
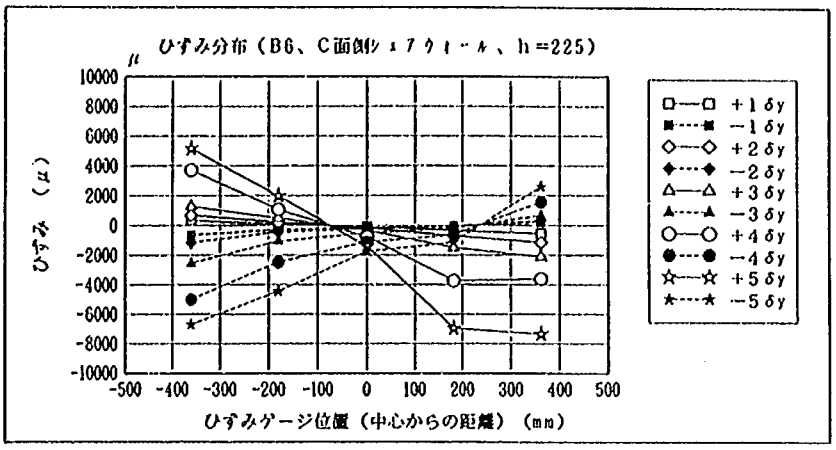


図-3.1.10(3)　ひずみ分布（Ｂ６，最大荷重を超えた点：＋７δｙ）（つづき）



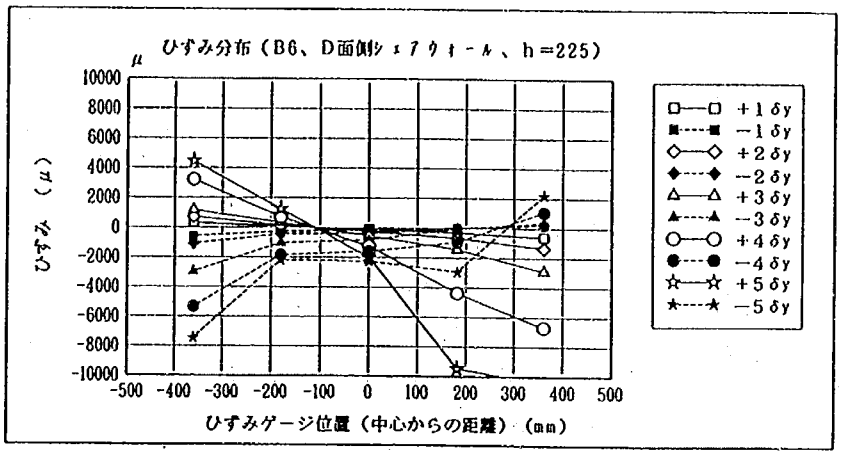
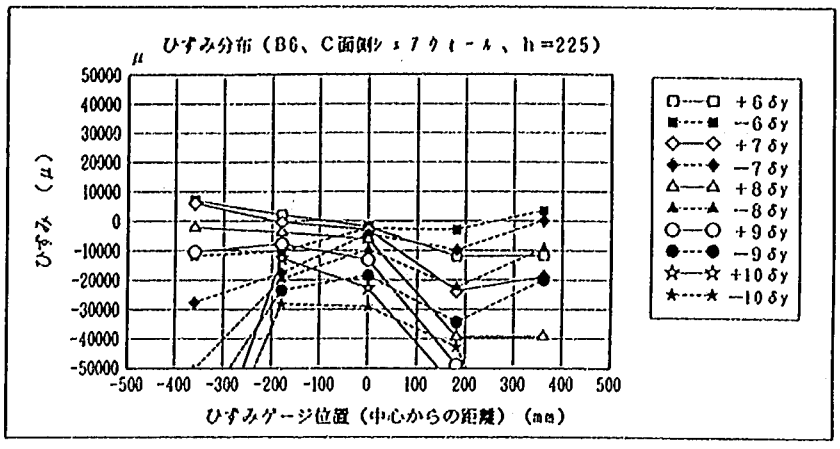


図-3.1.10(3)　ひずみ分布（Ｂ６，最大荷重を超えた点：＋７δｙ）（つづき）



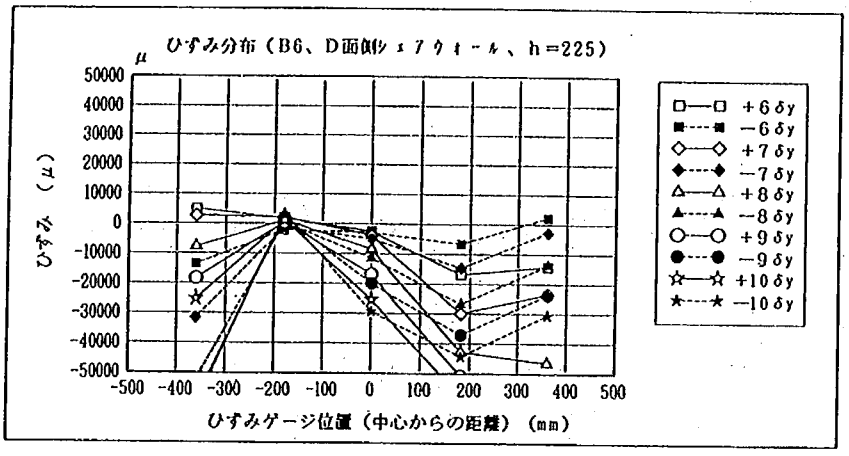
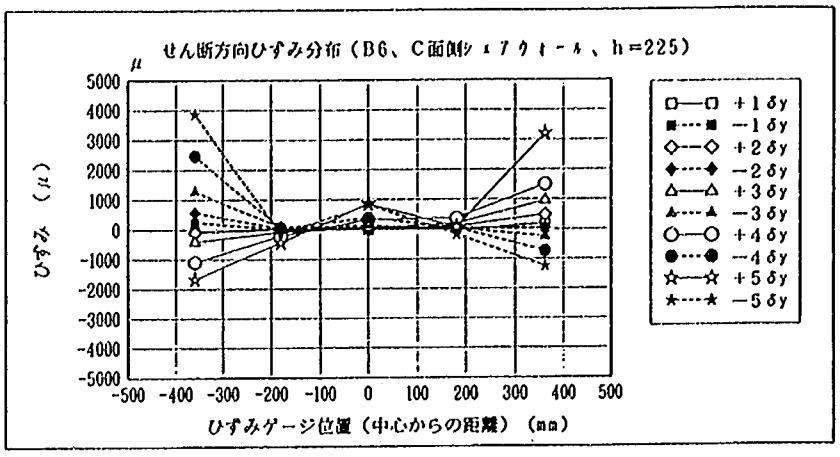


図-3.1.10(3)　ひずみ分布（B６，最大荷重を超えた点：＋7δy）（つづき）



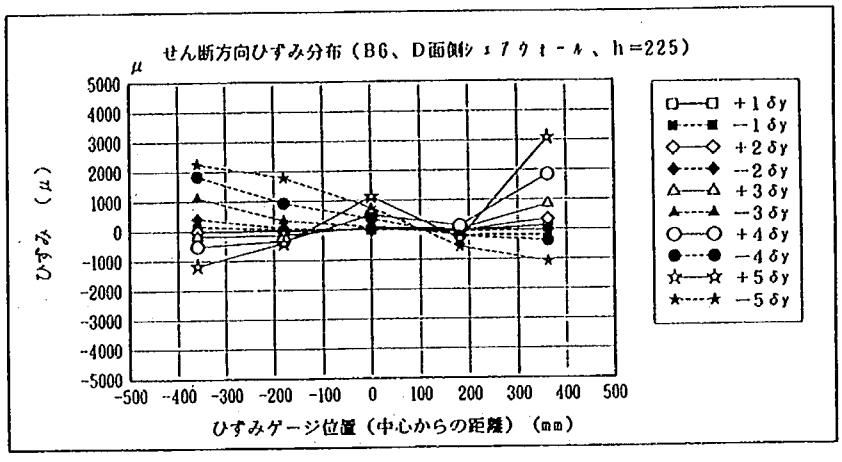
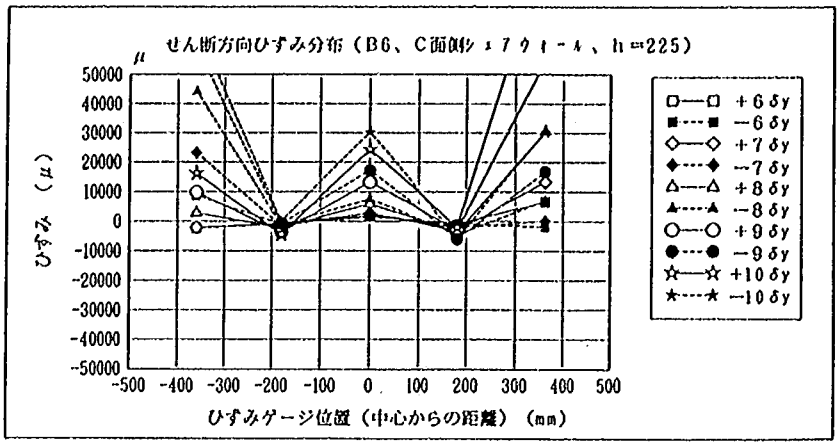


図-3.1.10(3)　ひずみ分布(B６，最大荷重を超えた点：＋7δy)　(つづき)



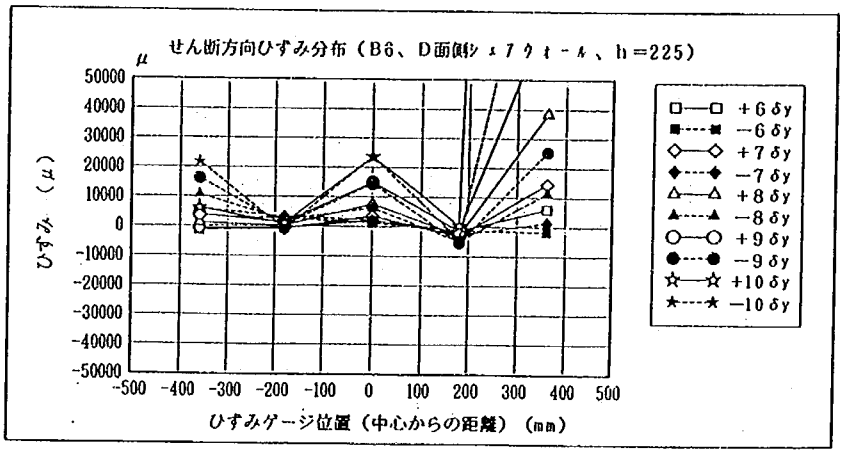
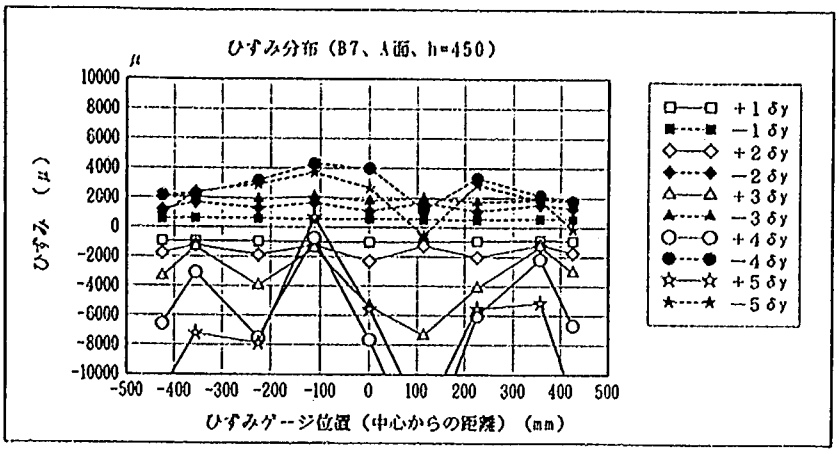
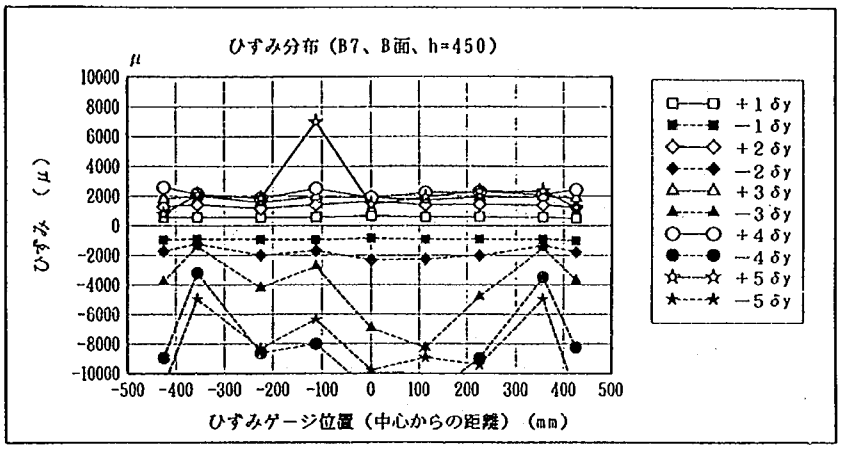


図-3.1.10(3)　ひずみ分布（B６，最大荷重を超えた点：＋７δｙ）（つづき）





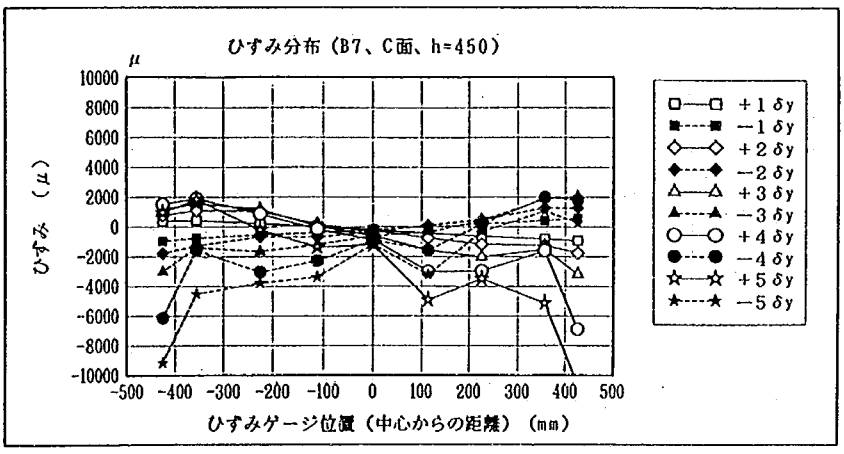
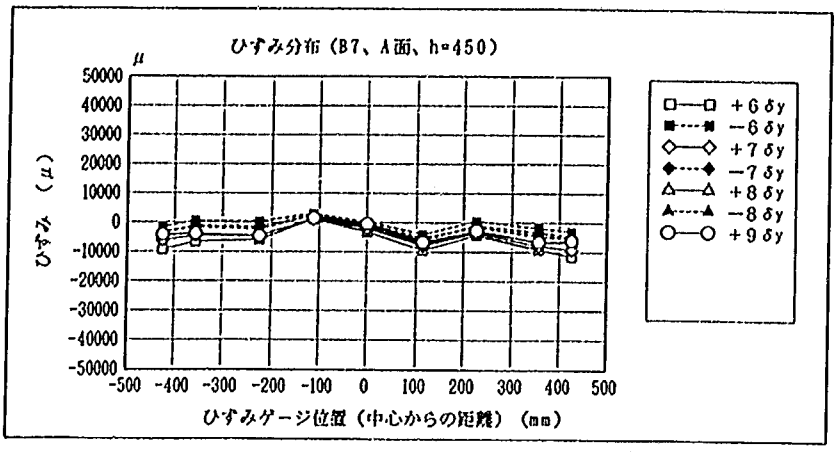
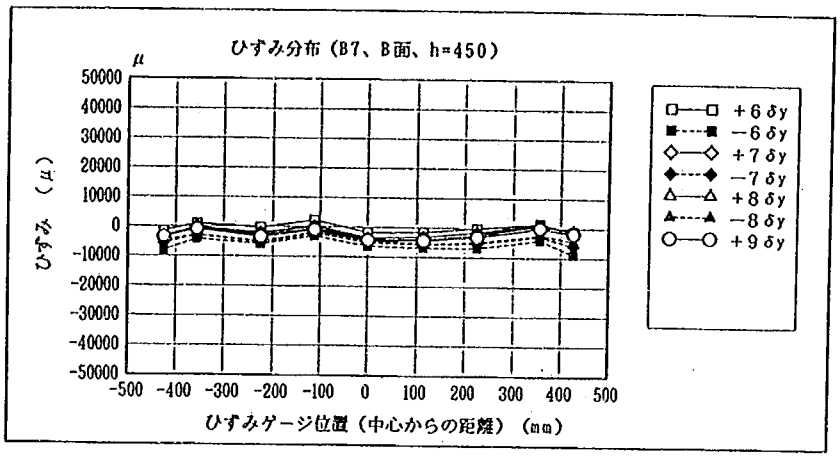


図-3.1.10(4)　ひずみ分布（B７，最大荷重を超えた点：＋４δｙ）





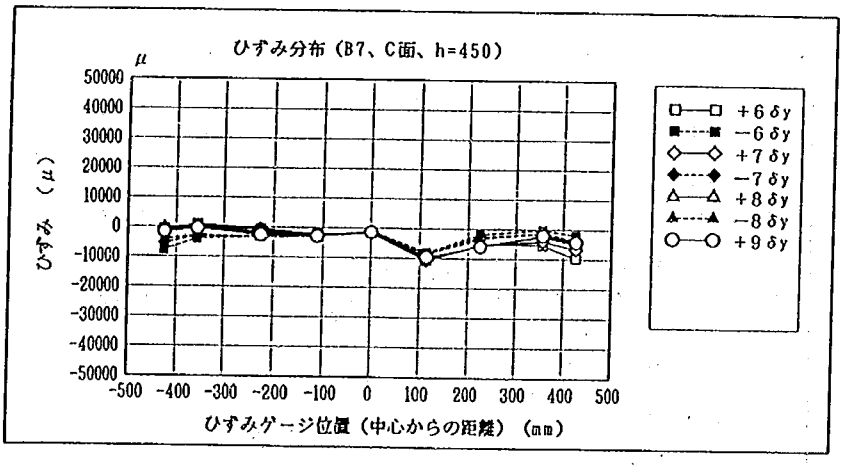
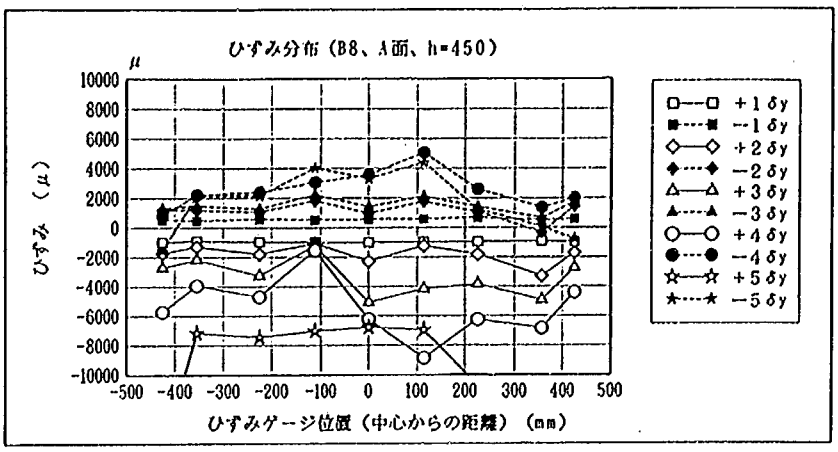
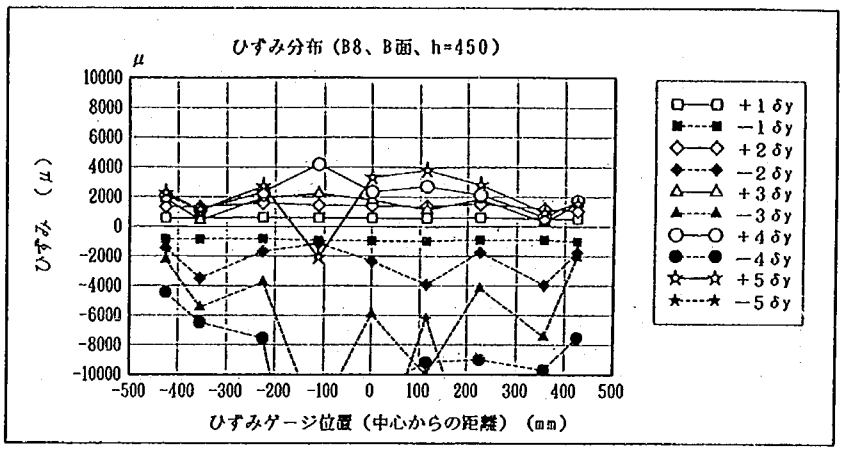


図-3.1.10(4)　ひずみ分布（B７，最大荷重を超えた点：＋4δy）（つづき）





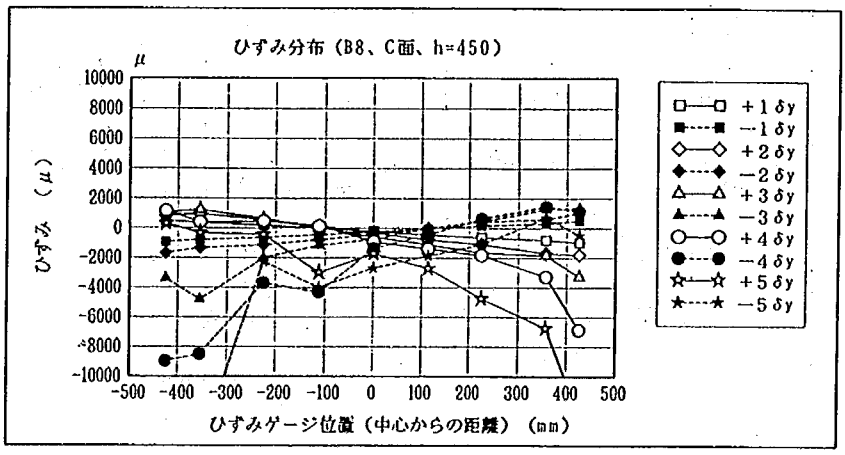
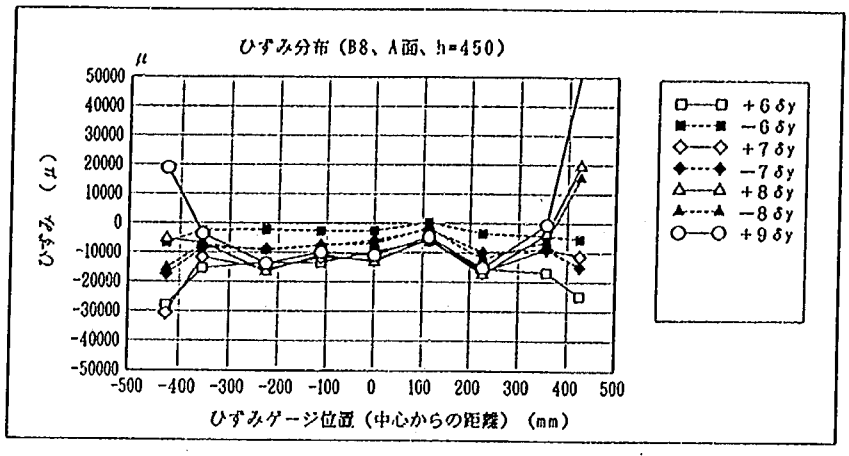
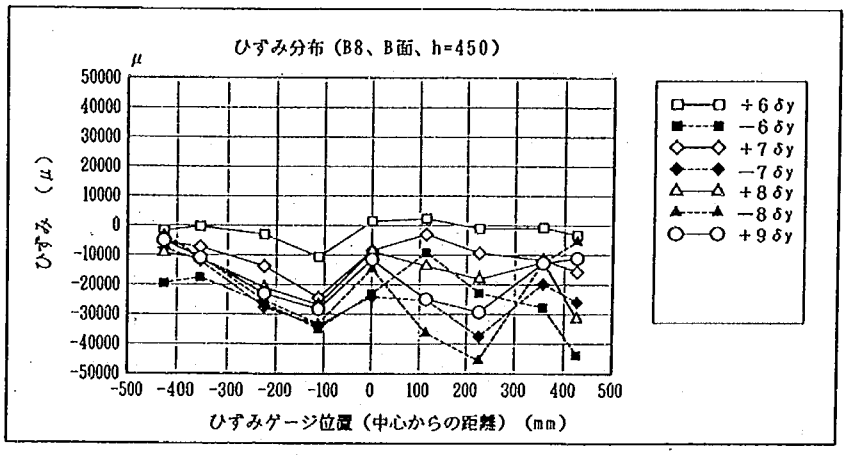


図-3.1.10(5)　ひずみ分布（B８，最大荷重を超えた点：＋５δｙ）





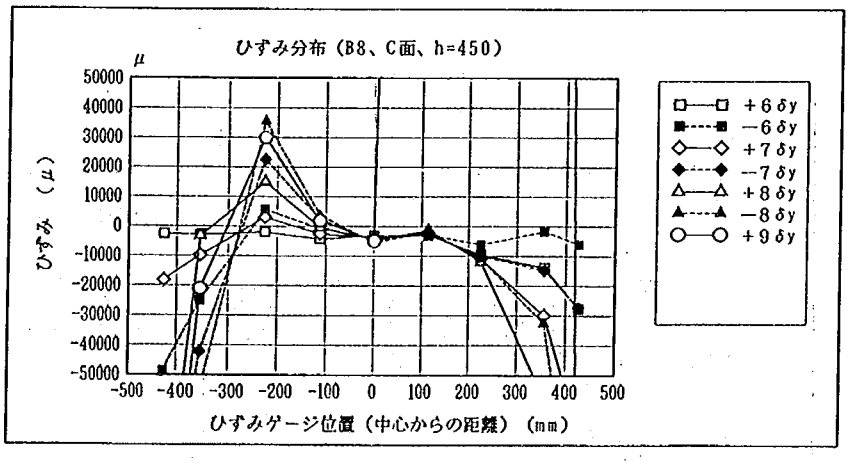
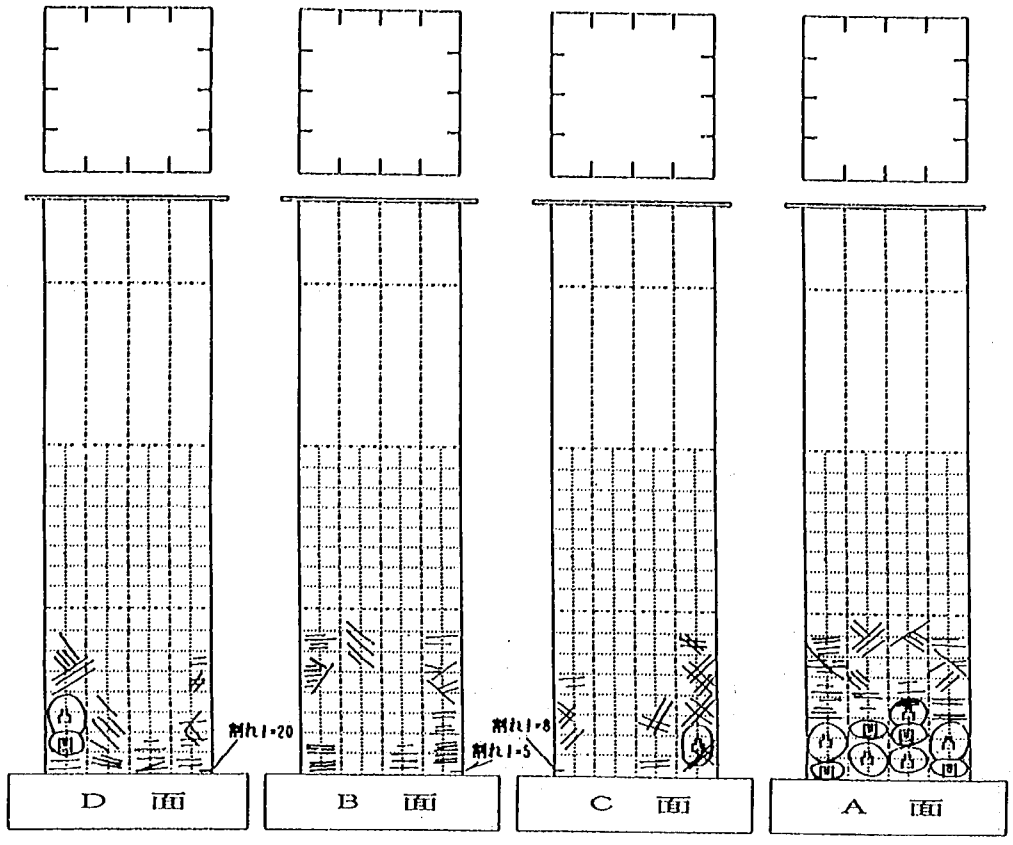


図-3.1.10(5)　ひずみ分布（B８，最大荷重を超えた点：＋5δy）（つづき）



4 δ y

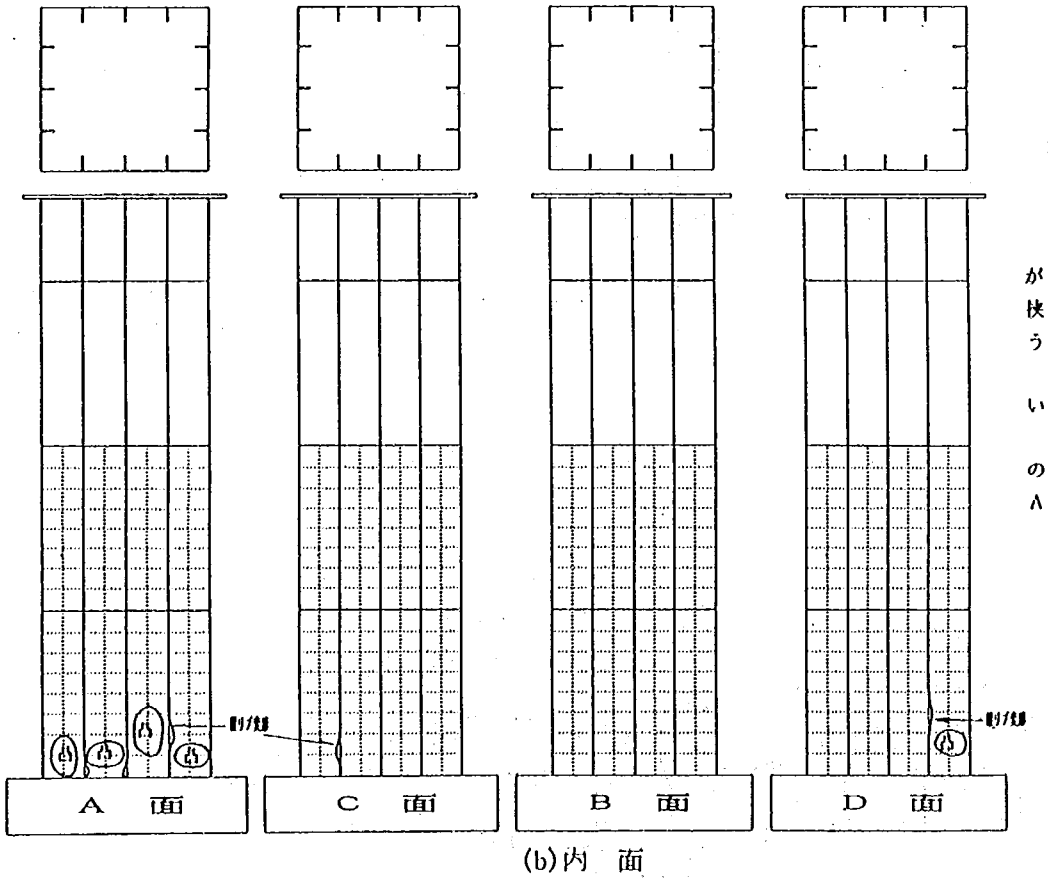
目標変位　60.00mm
水平荷重　154.2ton

A面は変形が進み、第1パネル下部では縦リブを挟んで横方向に凹凸が交互に見られる。基部付近では一部黒皮が剥落している。

B面はC面側基部付近角部に割れが発生した。

CD面共、第1パネルA面側が僅かに膨らみ、B面側の基部付近角部では割れが発生した。

(a)外　面



4 δ y

目標変位　60.00mm
水平荷重　154.2ton

A面第1パネル下部の縦リブが変形してきた。その縦リブを挟んで凹凸も少し確認できるようになった。

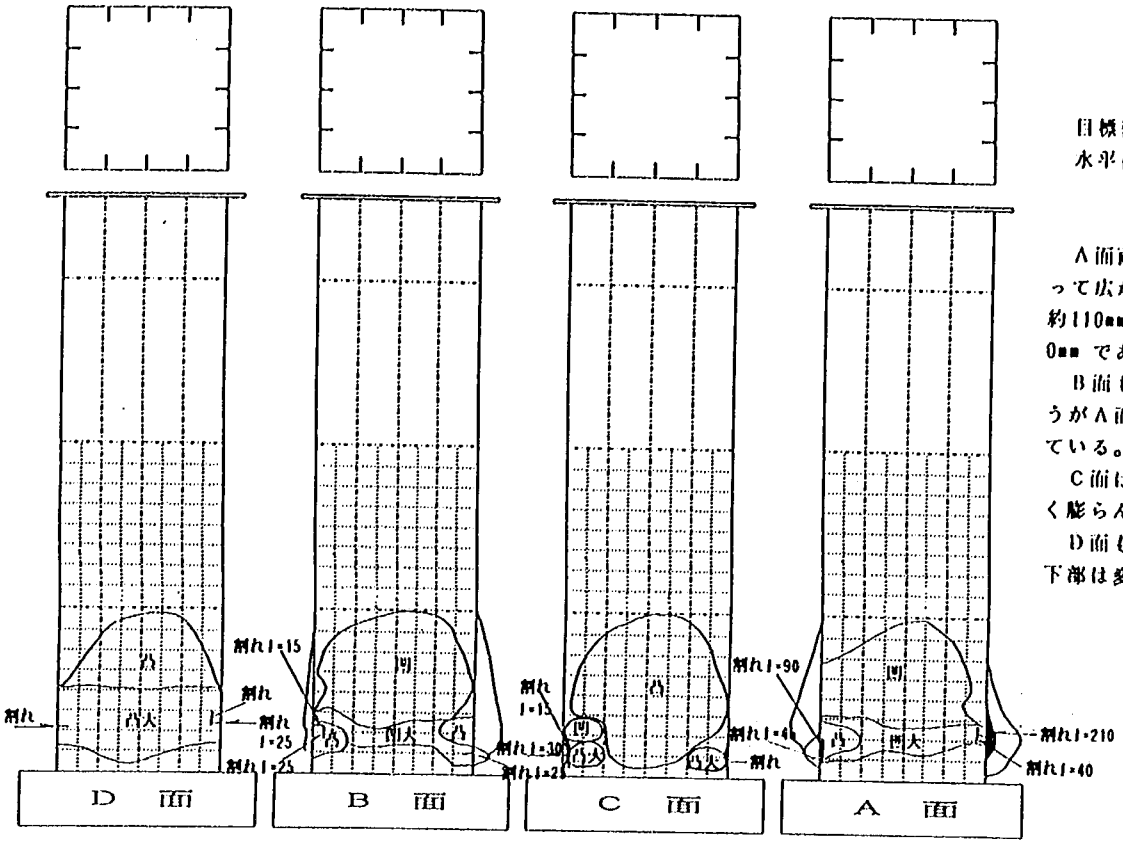
B面では、目立った変化はない。

CD面では、第1パネル下部の縦リブが一部変形し、D面のA面側は僅かに膨らんだ。

(b)内　面

(i)最大荷重を超えた点

図-3.1.11(1)　供試体の変形(B1)



9δy

目標変位　135.00㎜
水平荷重　-0.4ton

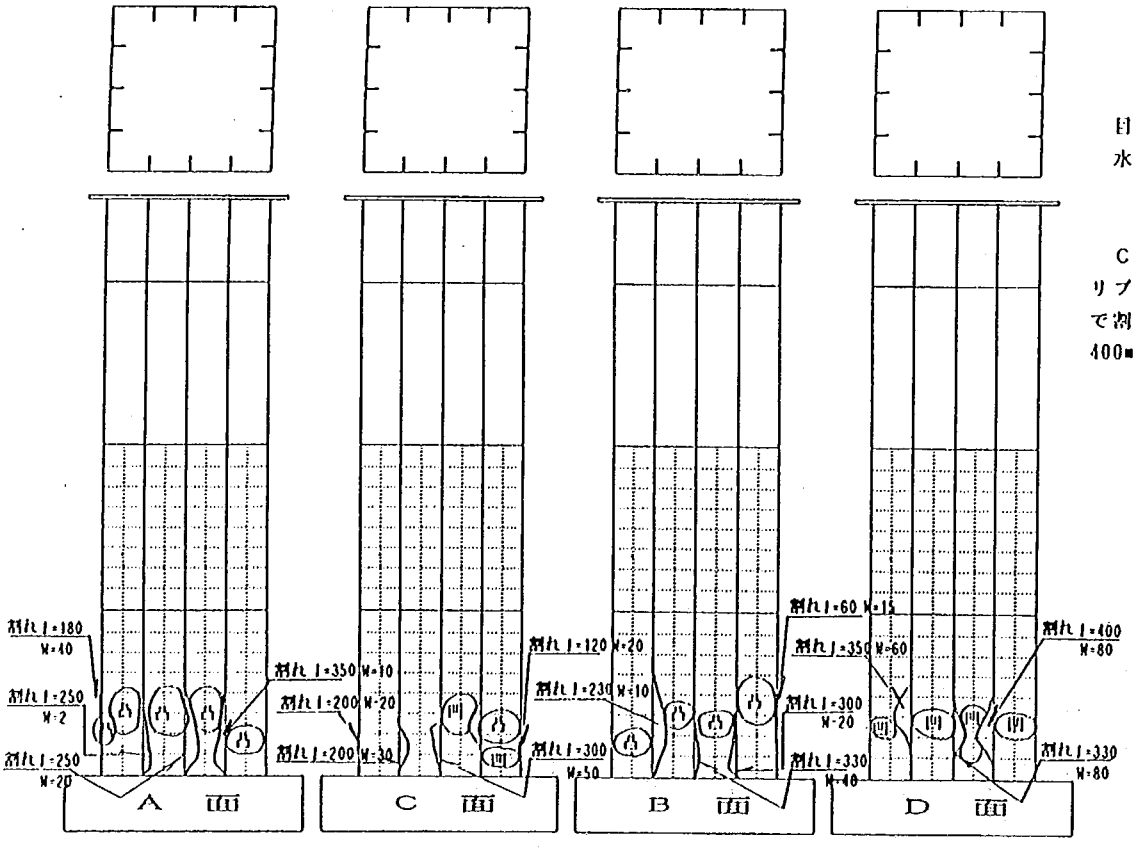
A面両端の割れは溶接部に沿って広がった。C面側角は長さ約110㎜、D面側角は長さ約210㎜である。

B面も変形の大きさは多少違うがA面と同じような変形をしている。

C面は第1パネル全体が大きく膨らんでいる。

D面もパネル全体が膨らみ、下部は変形が大きい。

(a)外　面



9δy

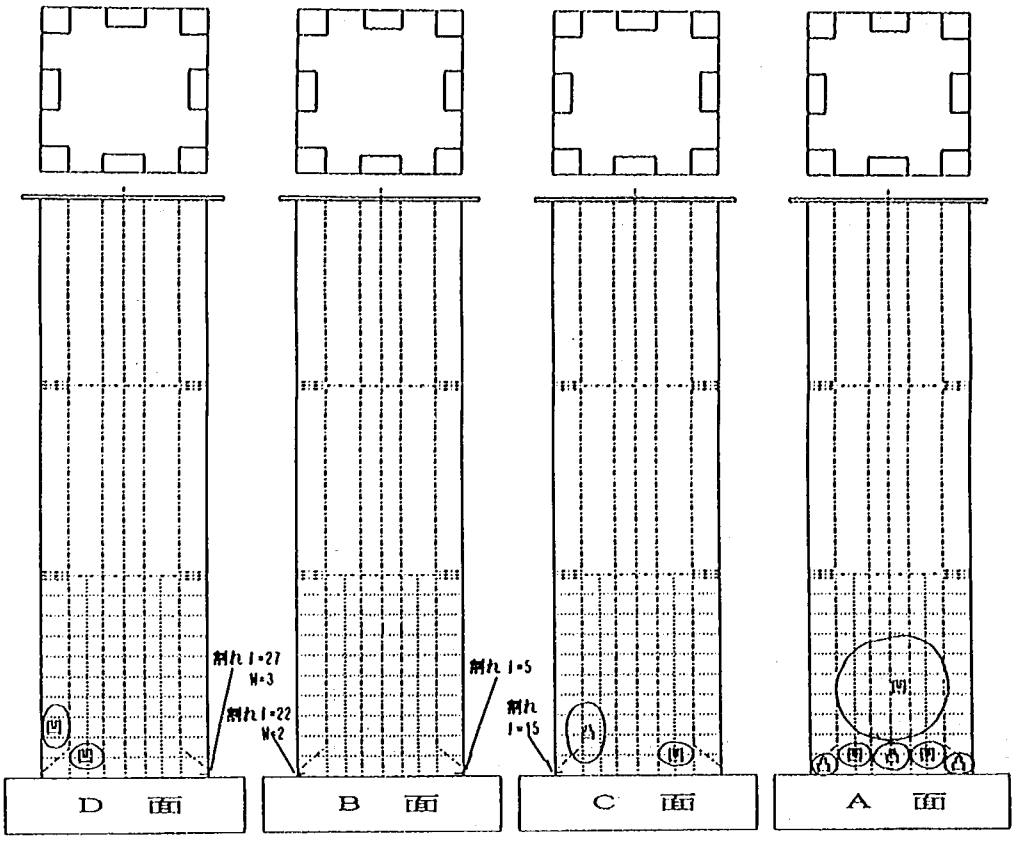
目標変位　135.00㎜
水平荷重　-0.4ton

C面第1パネル下部B面側縦リブを除く全ての縦リブ溶接部で割れが見られ、長い部分では400㎜にもなっている。

(b)内　面

(ii)実験終了時付近

図-3.1.11(1)　供試体の変形(B1)(つづき)



5δy

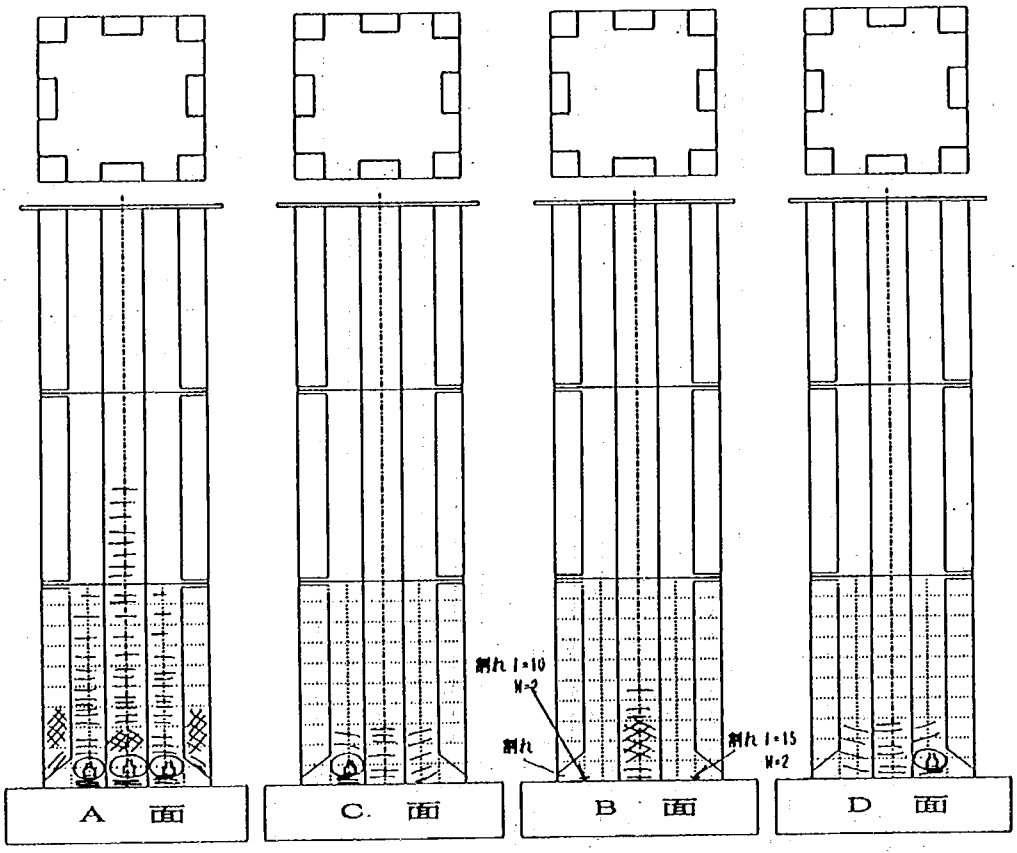
目標変位	75.50mm
水平荷重	187.4ton

圧縮側A面第1パネルの基部付近で縦リブを挟んで交互にパネルの凹凸が見られ、その上部は広く凹んでいる。

引張側B面基部の角部の両端に割れが発生した。また、パネルの変形は元に戻っている。

CD面基部でも引張側の角部に割れが発生し、圧縮側では凹みが見られるようになった。

(a)外 面



5δy

目標変位	75.50mm
水平荷重	187.4ton

圧縮側A面第1パネルの基部付近はパネル、補強材共に膨らみ、縦リブと箱型補強材には斜めに黒皮のひび割れが発生した。

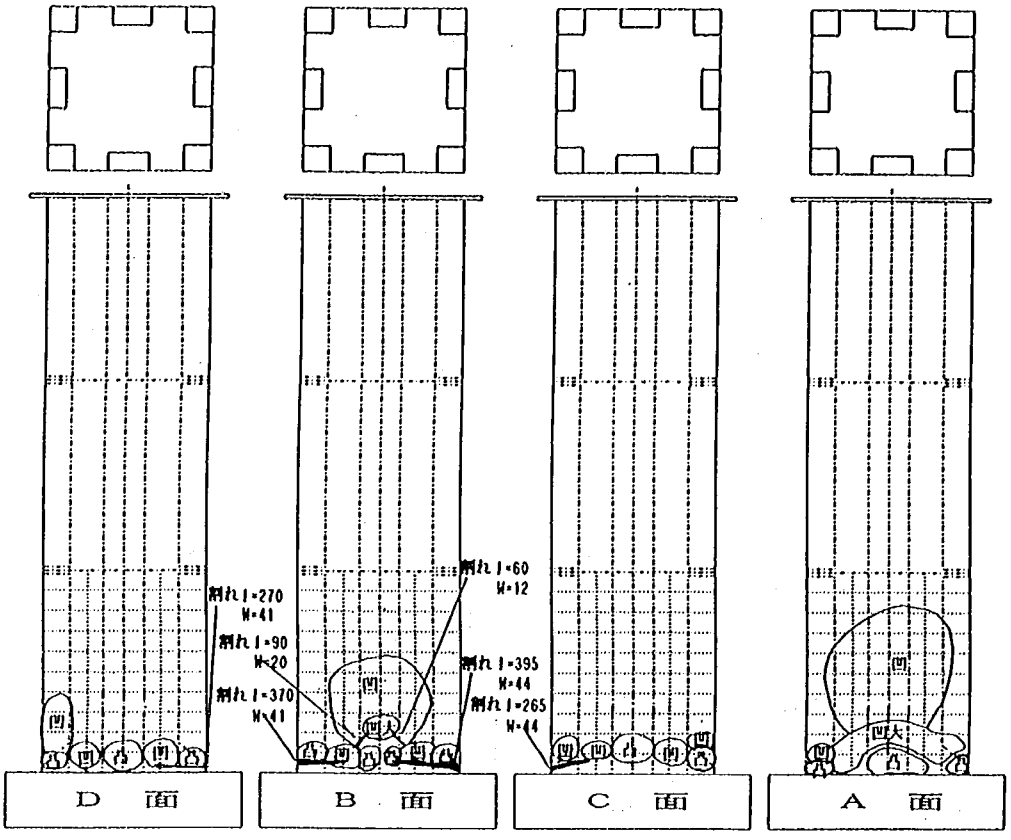
引張側B面基部の角部の両端に割れが発生した。また、載荷途中に音を発して縦リブ溶接部始端で割れが発生した。また、箱型補強材には斜めに直交する黒皮のひび割れが見られる。

CD面圧縮側ではパネルに膨らみが見られるようになった。

(b)内 面

(i)最大荷重を超えた点

図-3.1.11(2) 供試体の変形(B5)



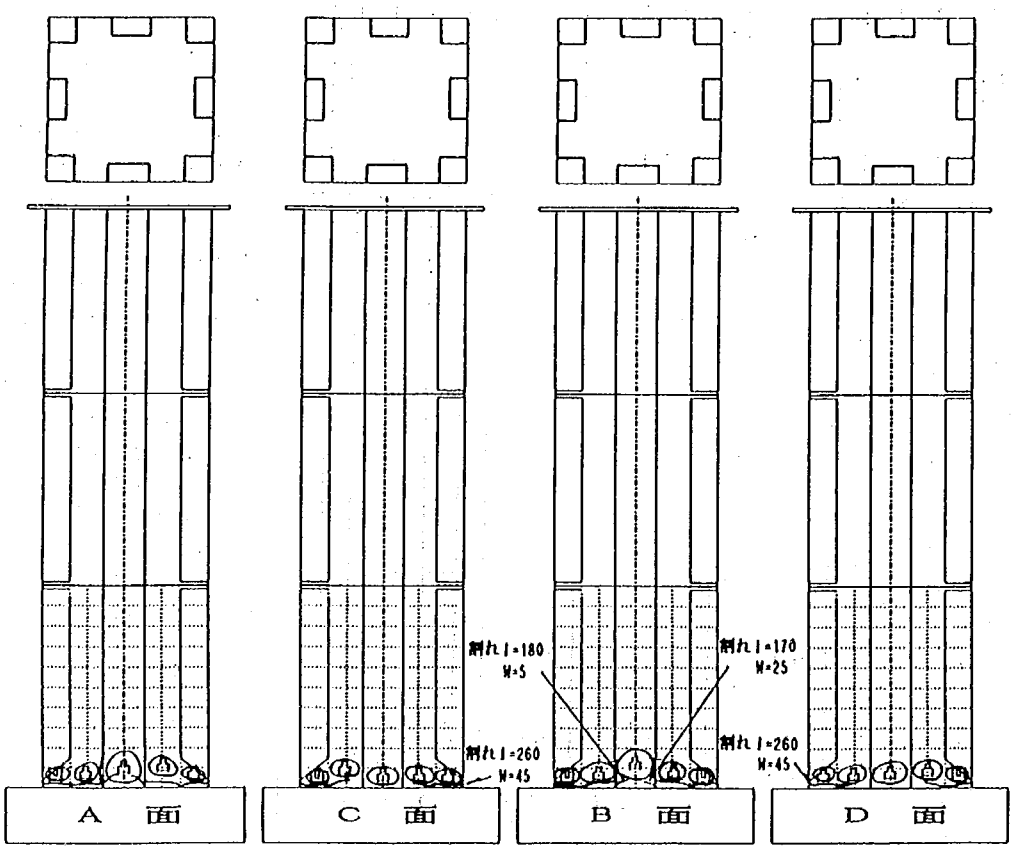
11δy

目標変位　165.50mm
水平荷重　58.0ton

圧縮側A面のパネル変形は細かい凹凸から大きな凹みへと変わった。

引張側B面の割れは伸びて、僅かに中心部が残っている状態である。

(a)外　面



11δy

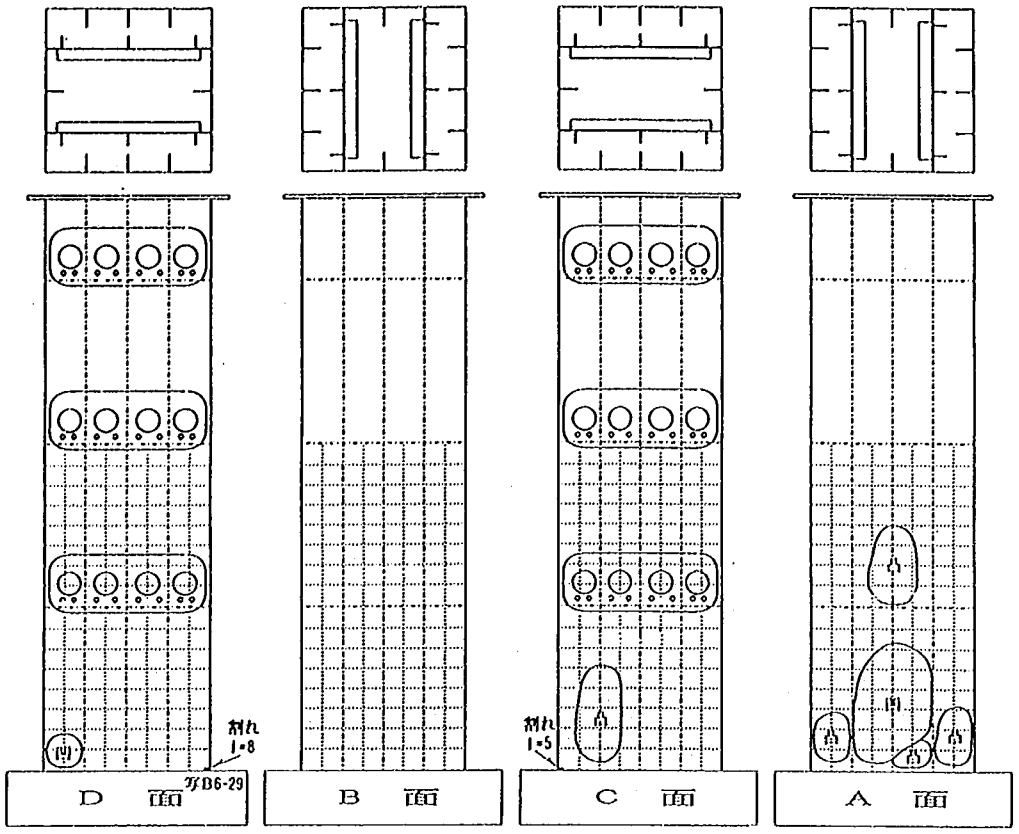
目標変位　165.50mm
水平荷重　58.0ton

AB面共に、パネル両端の割れから箱型補強材の割れまで繋った状態である。

(b)内　面

(ii)実験終了時付近

図-3.1.11(2)　供試体の変形(B5)(つづき)



(a)外 面

7δy

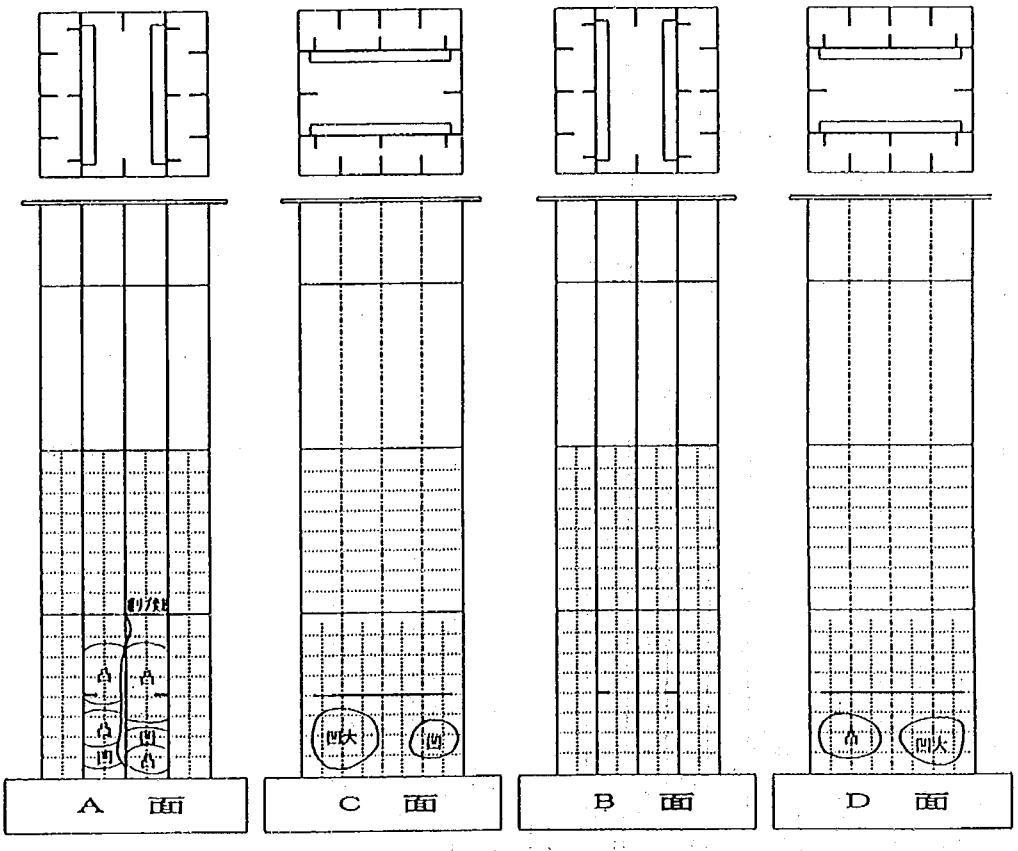
目標変位 77.00mm
水平荷重 172.4ton

圧縮側A面第1パネルはシェアウォール間が凹み、その両側が膨らんだ状態である。また、第2パネル下部の縦リブ位置でも僅かに膨らみが認められるようになった。

引張側B面のパネル変形は元に戻っている。

C面では第1パネルの引張側のシェアウォール位置で僅かに膨らみが認められ、基部付近の角部で割れが発生した。

D面引張側基部付近の割れは伸びなかった。



(b)内 面

7δy

目標変位 77.00mm
水平荷重 172.4ton

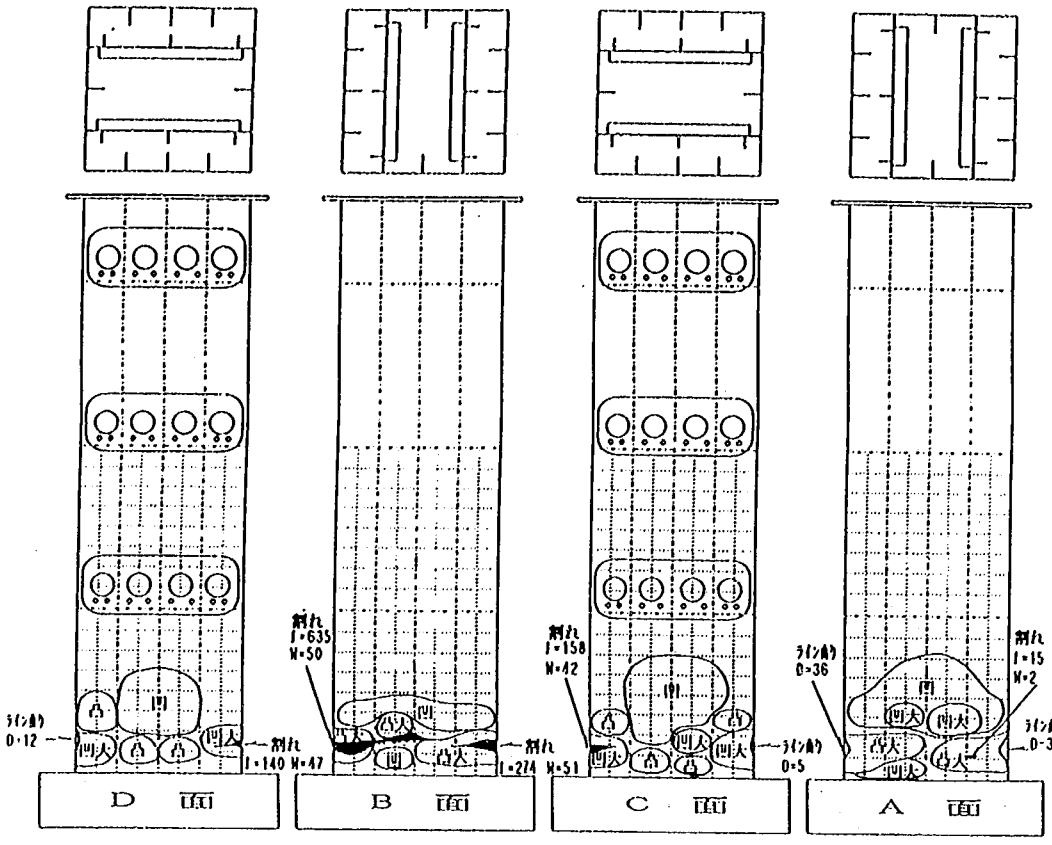
圧縮側A面第1パネルは基部付近では縦リブを境に交互に凹凸が認められ、その上部では膨らんでいる。また、中央縦リブの変形も大きい。

引張側B面のパネル、縦リブ変形は元に戻っている。

CD面のシェアウォールは圧縮側基部付近で凹み、引張側では変形が僅かに残っている。

(i)最大荷重を超えた点

図-3.1.11(3) 供試体の変形(B6)



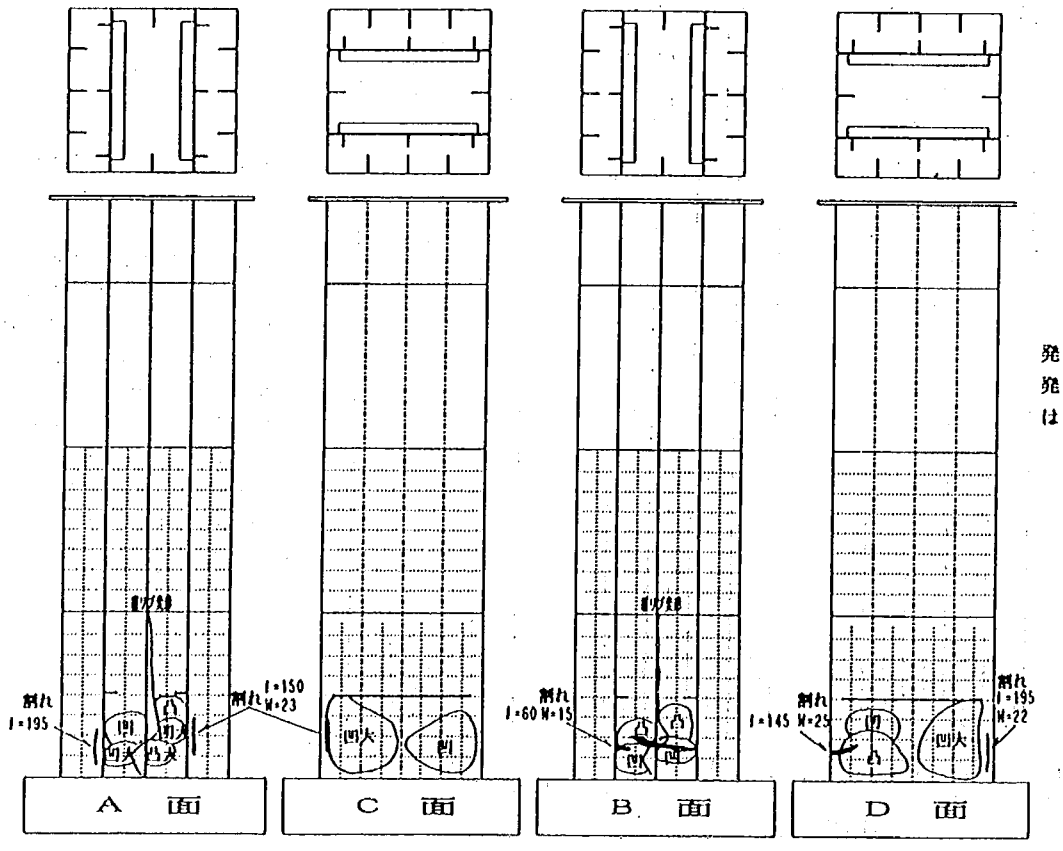
(a)外 面

1 6 δ y

目標変位 176.00mm
水平荷重 57.3ton

引張側B面中央縦リブ位置の割れとD面側角部から伸びた割れは繋がり、両角部の割れも広がっている。

圧縮側A面D面側のシェアウォール溶接部でも小さな割れが発生した。



(b)内 面

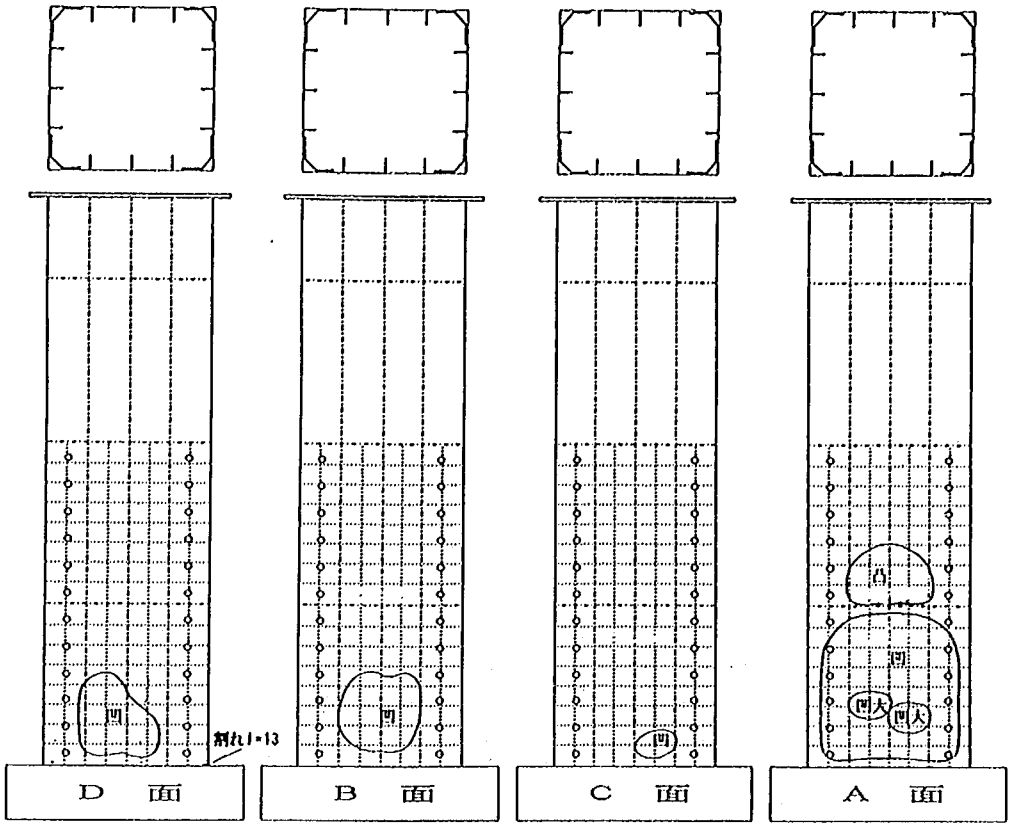
1 6 δ y

目標変位 176.00mm
水平荷重 57.3ton

引張側B面中央縦リブ位置で発生した割れとB－D角部から発生した割れが繋がった以外には、特に目立った変化はない。

(ii)実験終了時付近

図-3.1.11(3) 供試体の変形(B6)(つづき)



4δy

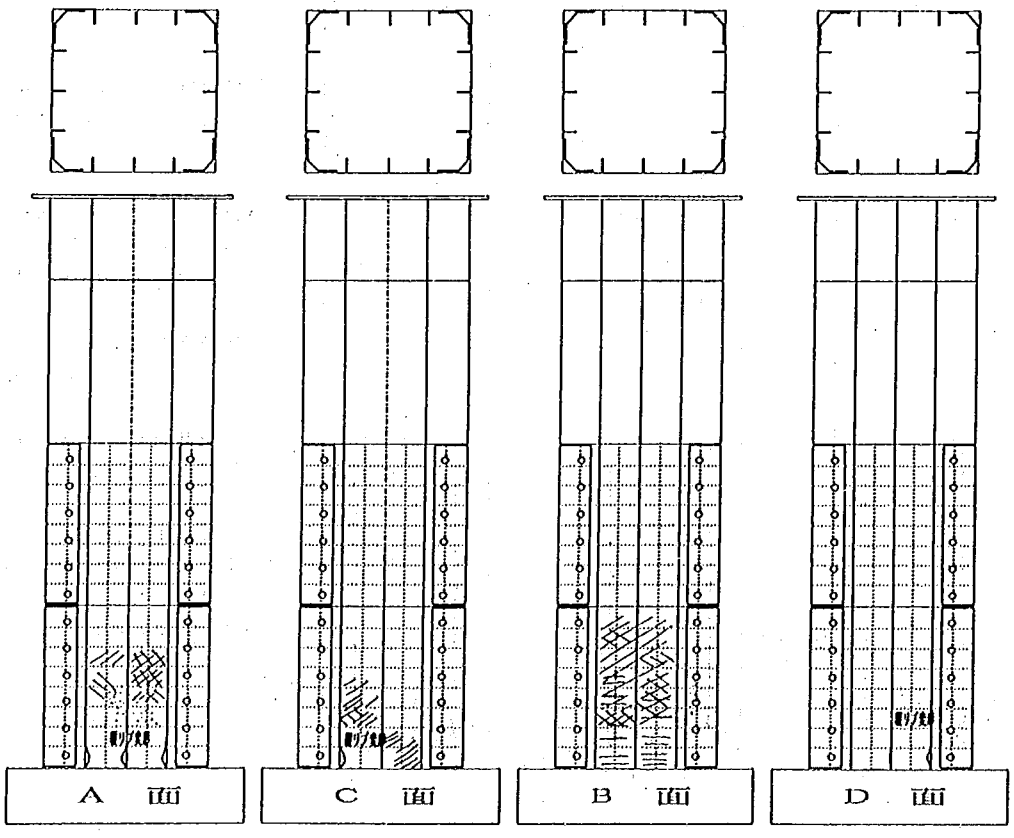
目標変位　60.00mm
水平荷重　135.4ton

圧縮側A面第1パネルは全体が凹み、基部から20～40cm付近では縦リブを挟んで大きく凹んでいる。また、第2パネル下部では僅かに膨らみが認められる。

引張側B面第1パネルでは僅かに残留変形が認められる。

CD面圧縮側では僅かに凹みが認められ、D面引張側基部付近では溶接線に沿った割れが発生した。

(a)外　面



4δy

目標変位　60.00mm
水平荷重　135.4ton

圧縮側A面基部付近の縦リブの変形が進み、第1パネル中央付近では黒皮が点状に浮き上がっている。

引張側B面の縦リブの変形は元に戻っている。

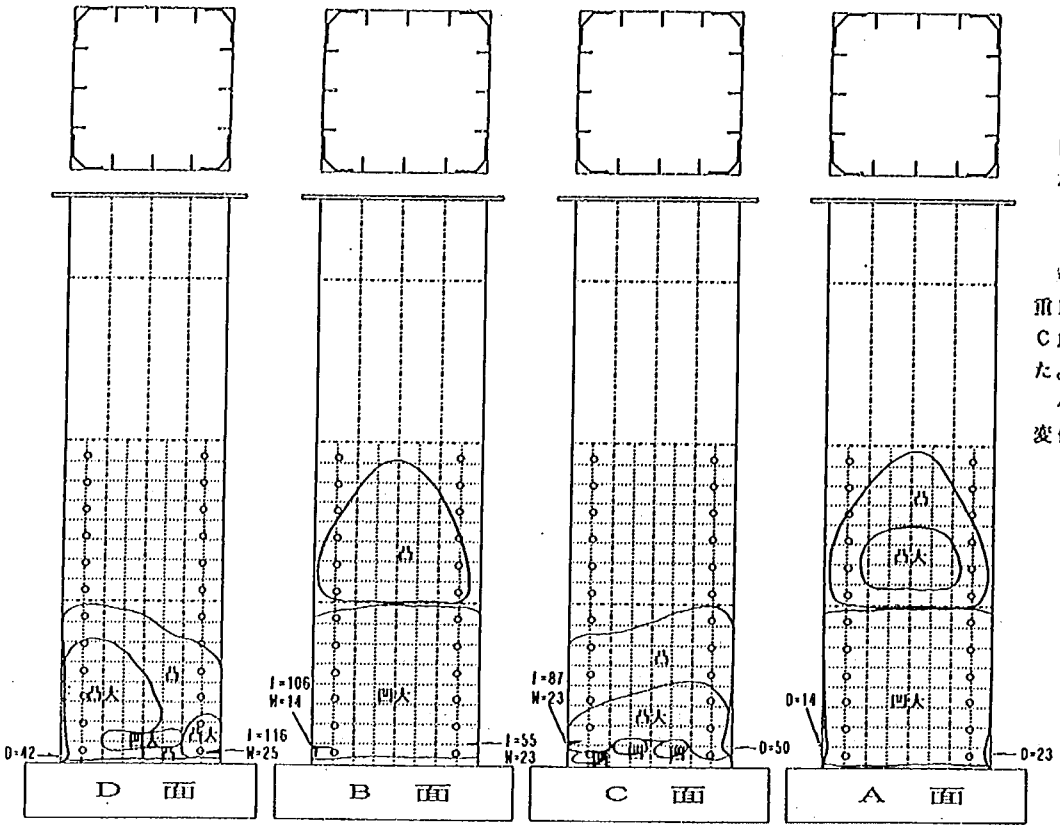
CD面ではA面側の縦リブで変形が認められるが、引張側の縦リブの変形は元に戻っている。

コーナープレートの変形はカメラを介している為、殆ど識別できない。

(b)内　面

(i)最大荷重を超えた点

図-3.1.11(4)　供試体の変形(B7)



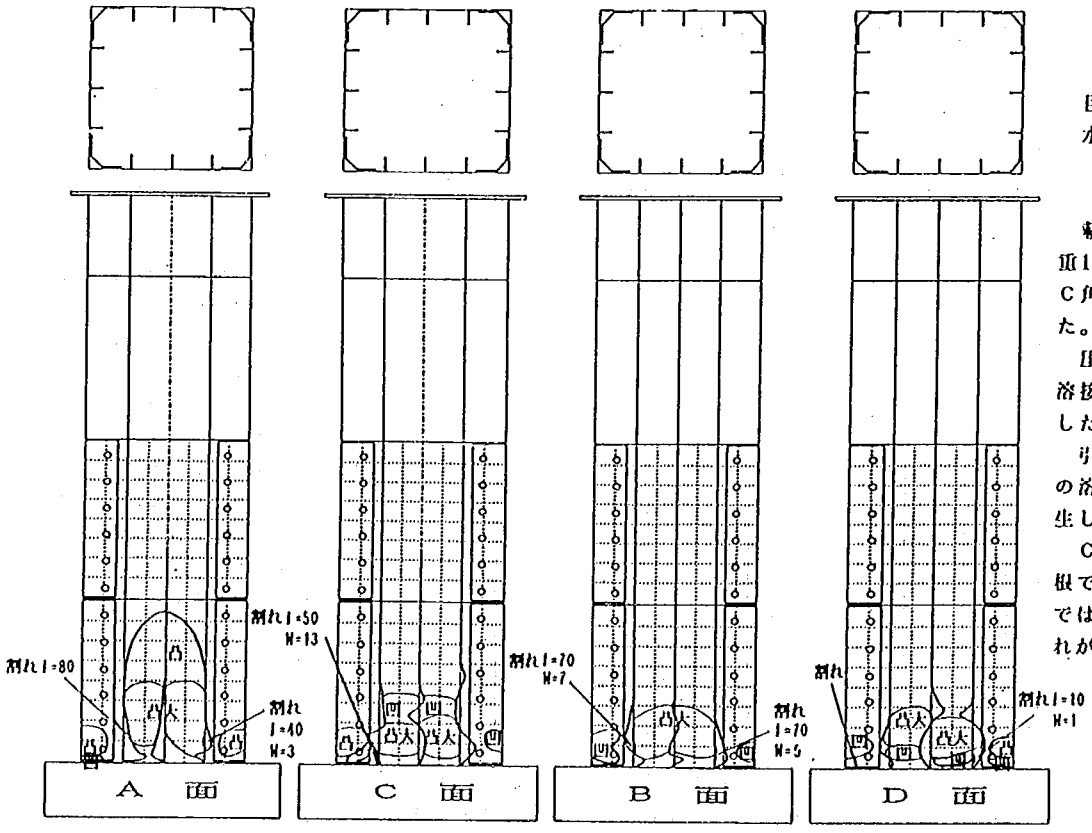
9δy

目標変位　135.00㎜
水平荷重　30.3ton

載荷途上（変位-65.0㎜、荷重17.14t）で音を発して、B－C角部で周方向の割れが発生した。

パネルの変形で特に目立った変化はない。

(a)外　面



9δy

目標変位　135.00㎜
水平荷重　30.3ton

載荷途上（変位-65.0㎜、荷重17.14t）で音を発して、B－C角部で周方向の割れが発生した。

圧縮側A面のC面側縦リブの溶接ビードに沿って割れが発生した。

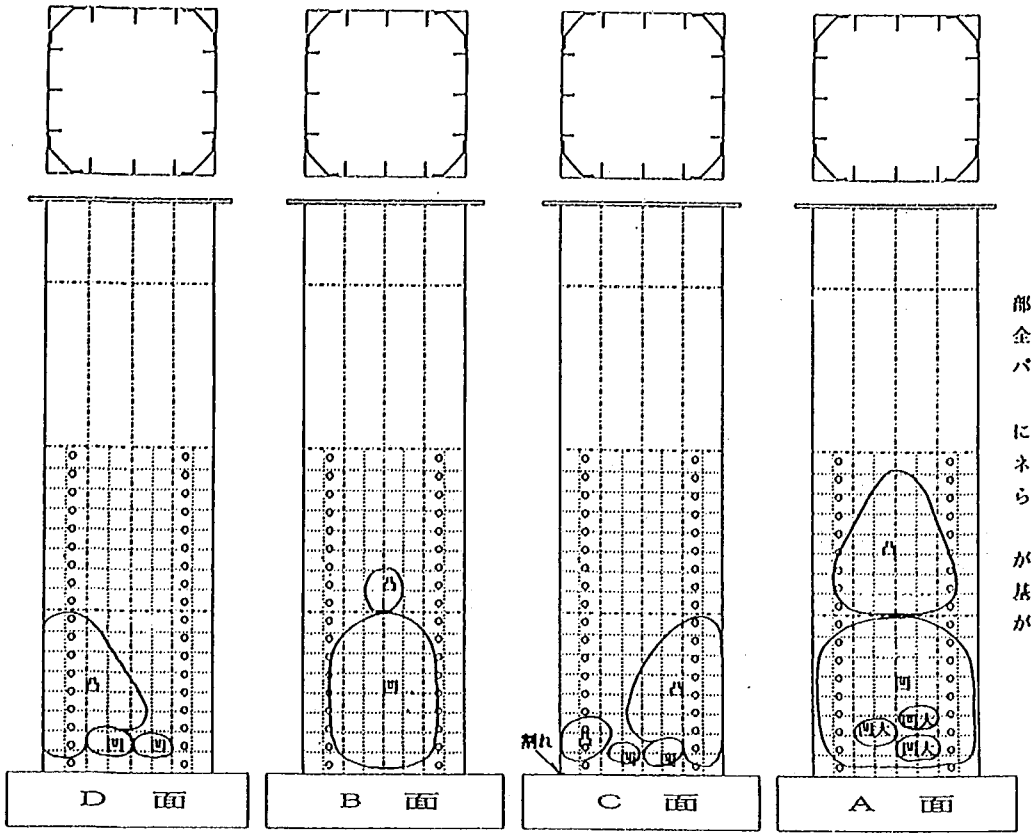
引張側B面でも両側の縦リブの溶接ビードに沿って割れが発生した。

C面では圧縮側の縦リブの付根で小さな割れが、D面圧縮側では縦リブの溶接部に沿った割れが発生している。

(b)内　面

(ii)実験終了時付近

図-3.1.11(4)　供試体の変形(B7)（つづき）



5 δ y

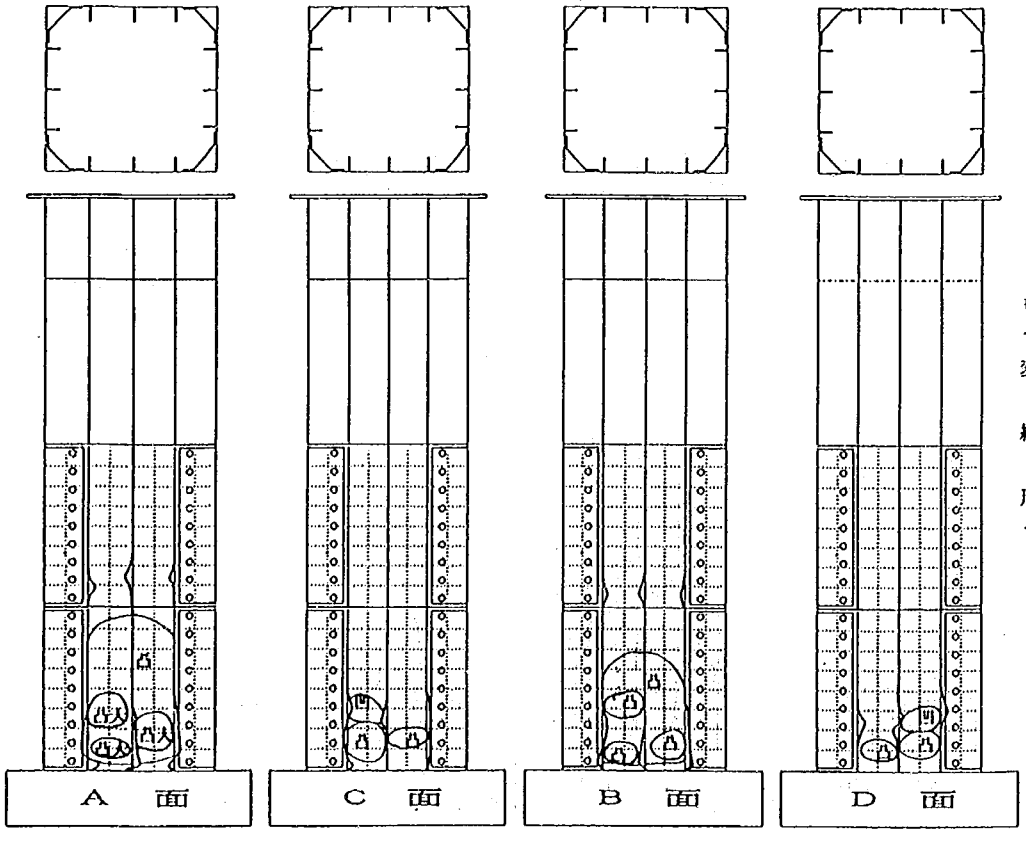
目標変位　75.00mm
水平荷重　130.6ton

圧縮側A面第1パネルでは基部から10～40cmの範囲を中心に全体が凹んでいる。また、第2パネルでは全体が膨らみ始めた。

引張側B面第1パネルは全体に残留変形が認められ、第2パネルでも僅かに残留変形が認められる。

CD面第1パネルでは圧縮側が全体的に膨らみ、C面引張側基部付近の角部では小さな割れが認められる。

(a)外　面



5 δ y

目標変位　75.00mm
水平荷重　130.6ton

圧縮側A面では第2パネルでも縦リブの変形が認められるようになり、第1パネルのパネル変形も大きい。

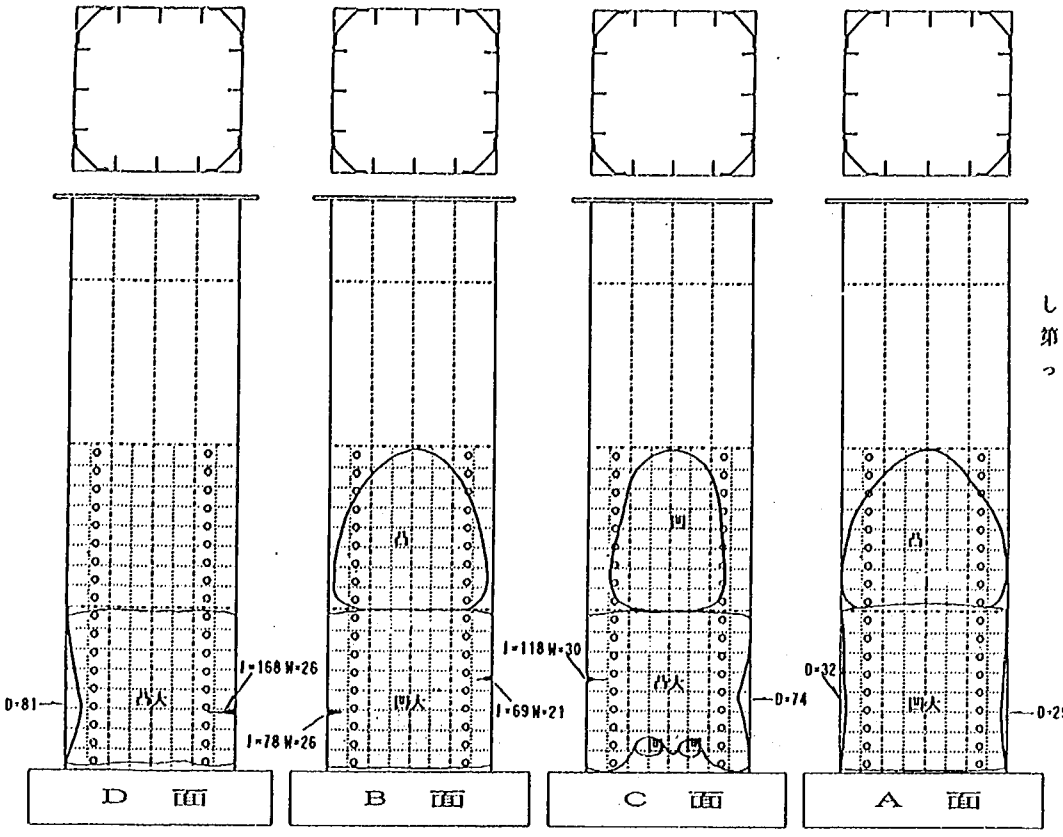
引張側B面でも第2パネルで縦リブの変形が認められる。

CD面第1パネルの縦リブ変形は中段付近でも認められるようになった。

(b)内　面

(i)最大荷重を超えた点

図-3.1.11(5)　供試体の変形(B8)

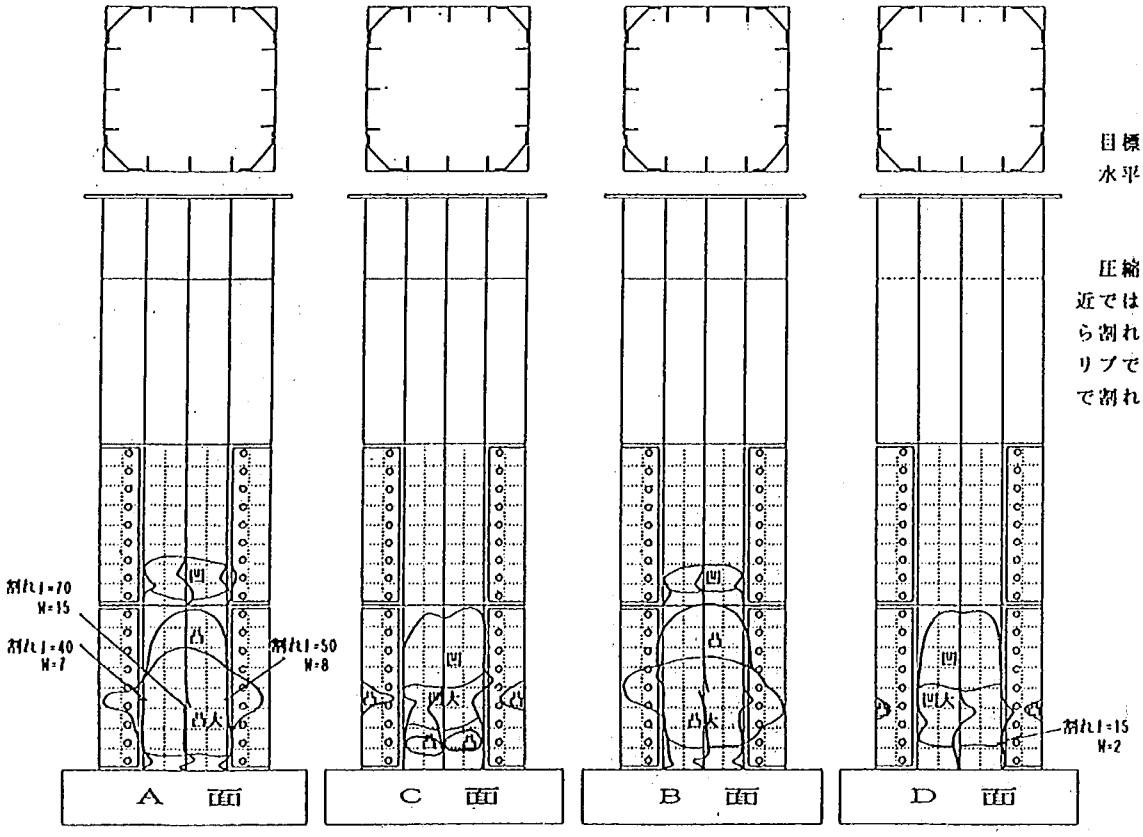


9 δ y

目標変位　135.00㎜
水平荷重　22.0ton

各角部で周方向の割れが発生した為か、圧縮側A面とD面の第2パネルでは変形が小さくなった。

(a)外　面



9 δ y

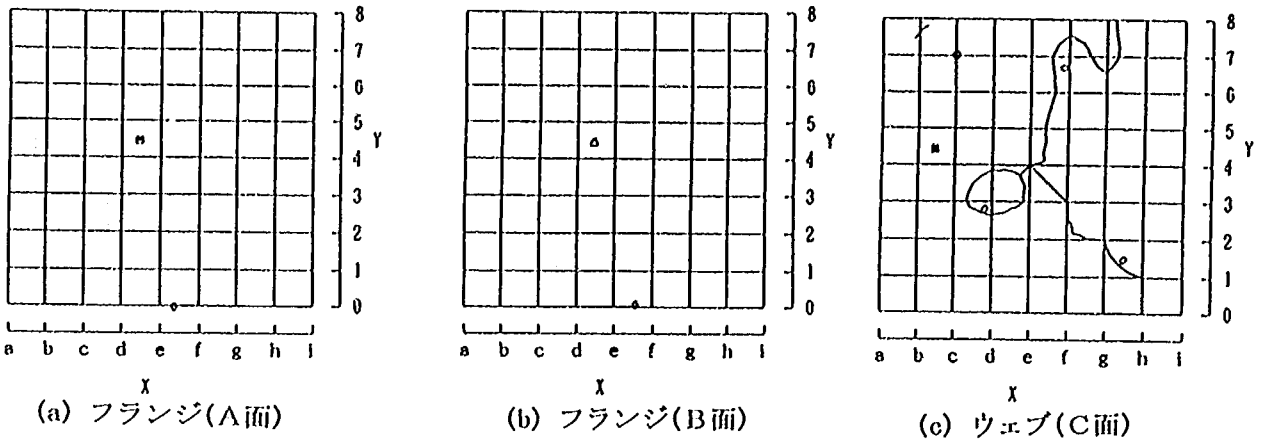
目標変位　135.00㎜
水平荷重　22.0ton

圧縮側A面第1パネル中段付近では両側の縦リブにコバ面から割れが発生し、D面圧縮側縦リブでも基部から14cm程の位置で割れが発生した。

(b)内　面

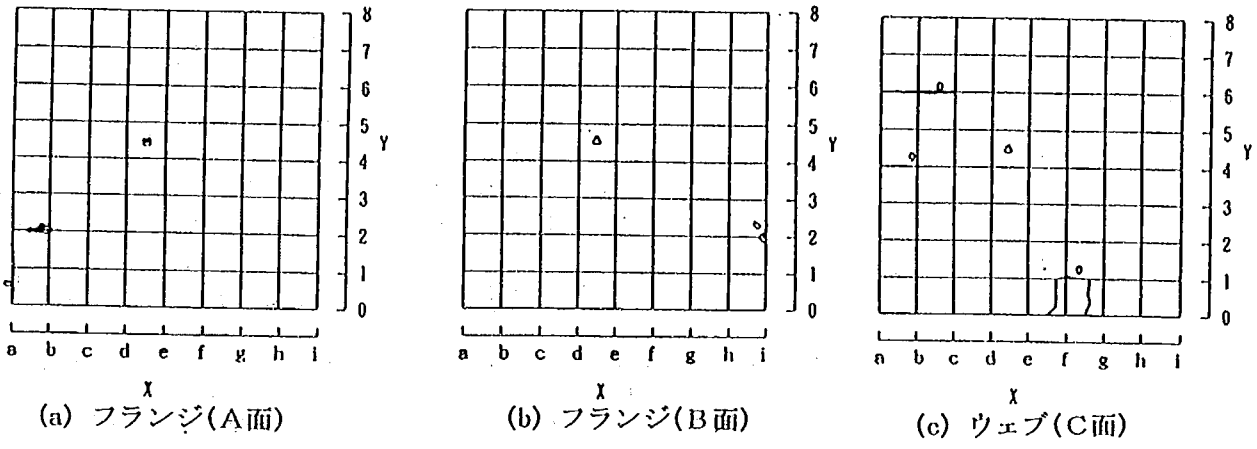
(ii)実験終了時付近

図-3.1.11(5)　供試体の変形(B8)(つづき)



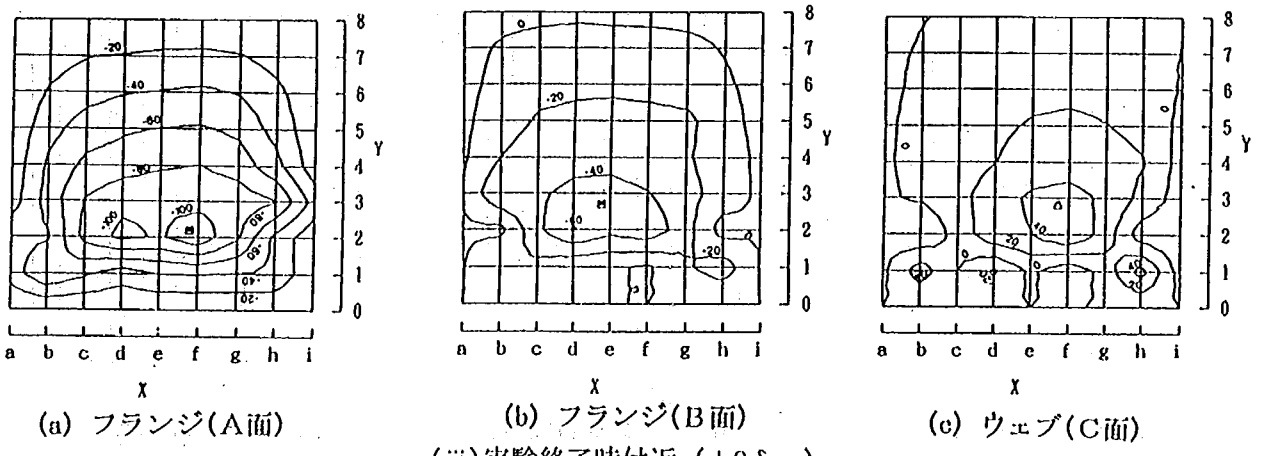
(a) フランジ(A面)　(b) フランジ(B面)　(c) ウェブ(C面)

(i)降伏時を超えた点 (+3δy)



(a) フランジ(A面)　(b) フランジ(B面)　(c) ウェブ(C面)

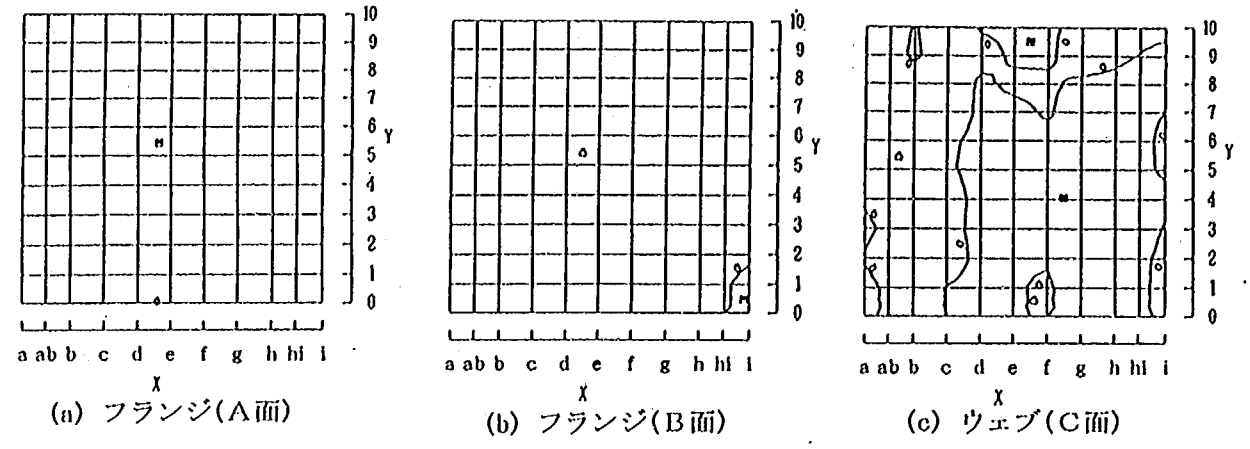
(ii)最大荷重を超えた点 (+4δy)



(a) フランジ(A面)　(b) フランジ(B面)　(c) ウェブ(C面)

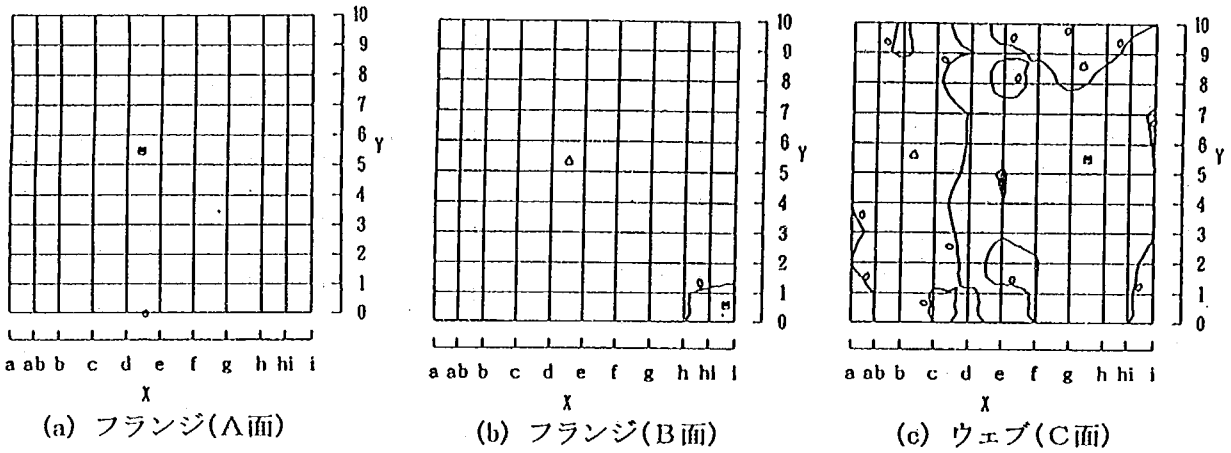
(iii)実験終了時付近 (+9δy)

図-3.1.12(1)　フランジおよびウェブの面外変位等高線図(B1)



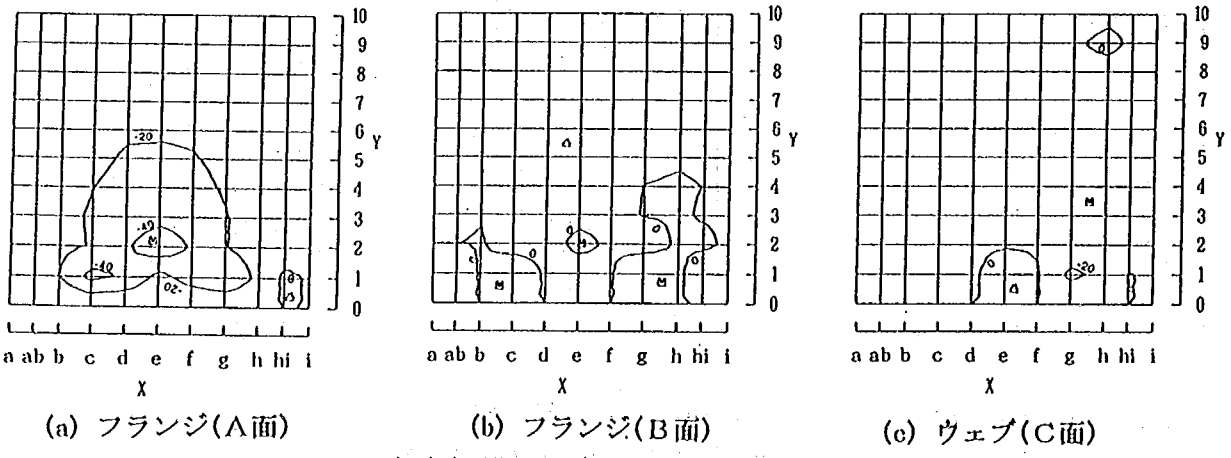
(a) フランジ(A面)　(b) フランジ(B面)　(c) ウェブ(C面)

(i)降伏時を超えた点 (+4δy)



(a) フランジ(A面)　(b) フランジ(B面)　(c) ウェブ(C面)

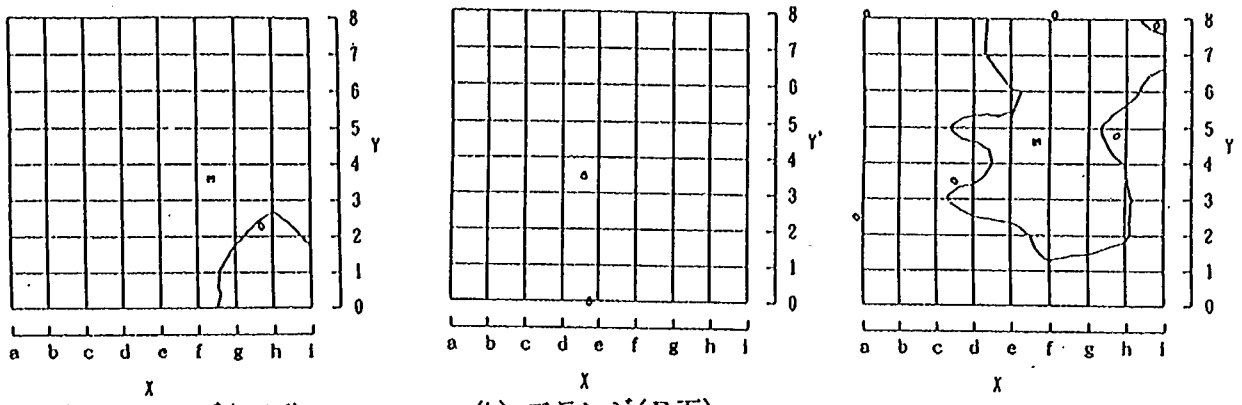
(ii)最大荷重を超えた点 (+5δy)



(a) フランジ(A面)　(b) フランジ(B面)　(c) ウェブ(C面)

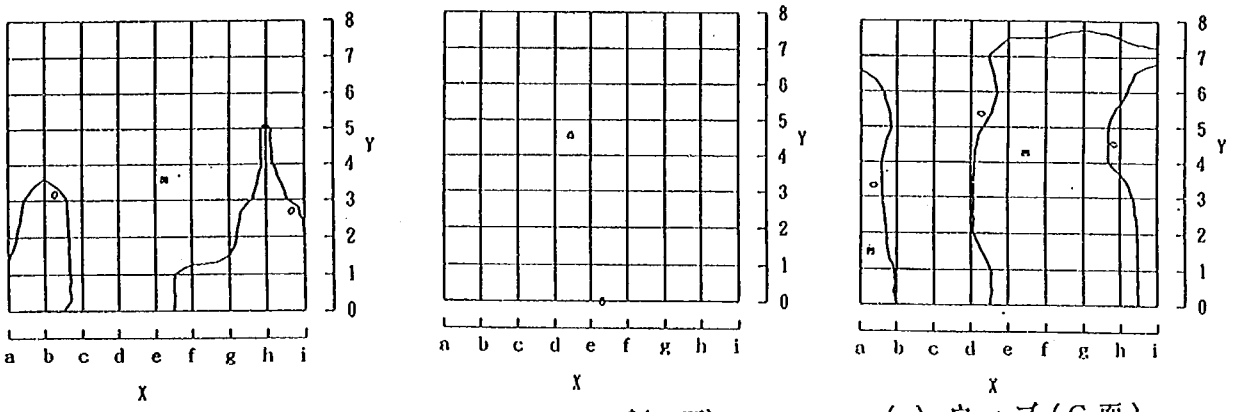
(iii)実験終了時付近 (+11δy)

図-3.1.12(2)　フランジおよびウェブの面外変位等高線図(B5)



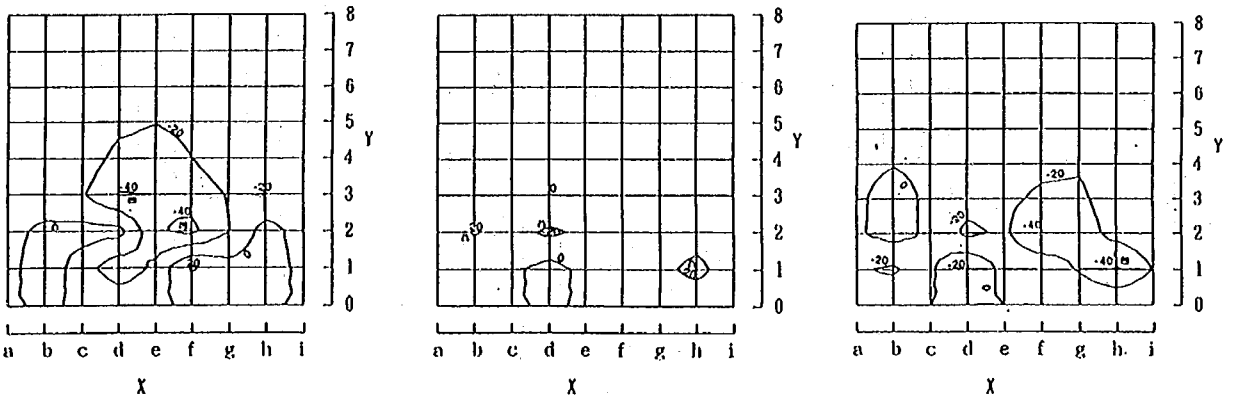
(a) フランジ(A面)　(b) フランジ(B面)　(c) ウェブ(C面)

(i)降伏時を超えた点 (+4δy)



(a) フランジ(A面)　(b) フランジ(B面)　(c) ウェブ(C面)

(ii)最大荷重を超えた点 (+7δy)



(a) フランジ(A面)　(b) フランジ(B面)　(c) ウェブ(C面)

(iii)実験終了時付近 (+16δy)

図-3.1.12(3)　フランジおよびウェブの面外変位等高線図(B6)

(ボルト破断の危険性があったため、計測せず)

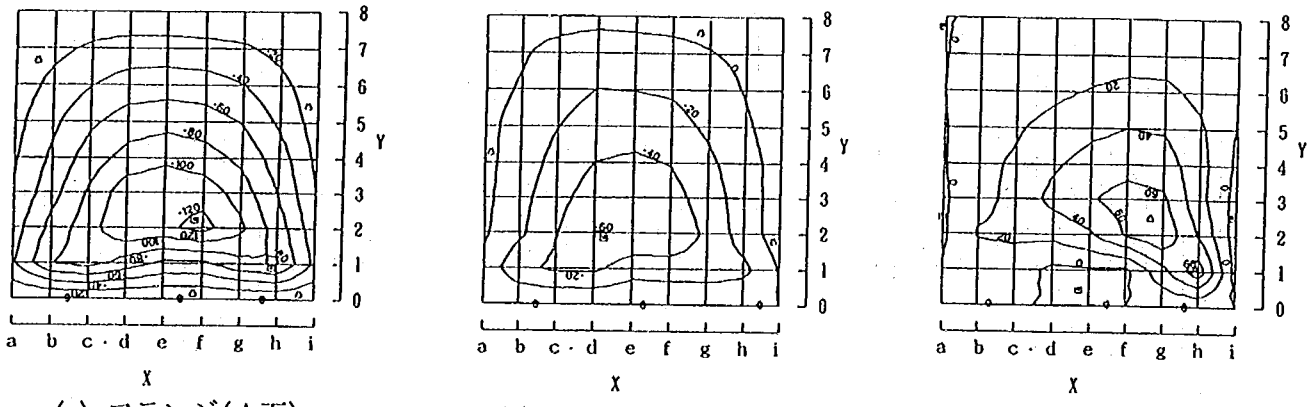
(a) フランジ(A面)　　(b) フランジ(B面)　　(c) ウェブ(C面)

(i)降伏時を超えた点 (+3δy)

(ボルト破断の危険性があったため、計測せず)

(a) フランジ(A面)　　(b) フランジ(B面)　　(c) ウェブ(C面)

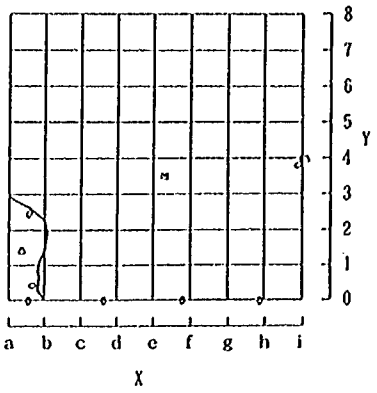
(ii)最大荷重を超えた点 (+4δy)



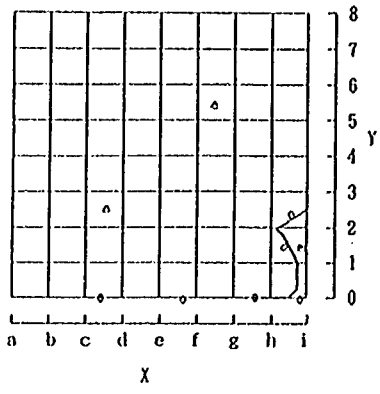
(a) フランジ(A面)　　(b) フランジ(B面)　　(c) ウェブ(C面)

(iii)実験終了時付近 (+9δy)

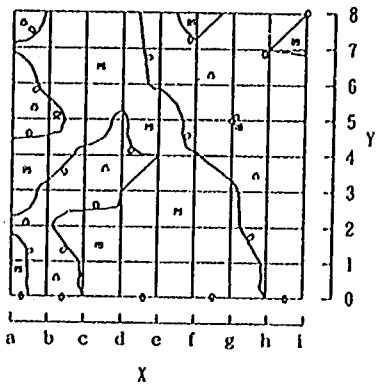
図-3.1.12(4)　フランジおよびウェブの面外変位等高線図(B7)



(a) フランジ(A面)

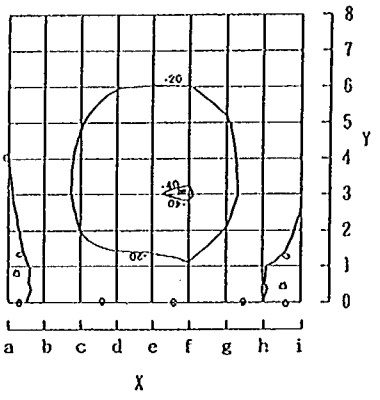


(b) フランジ(B面)

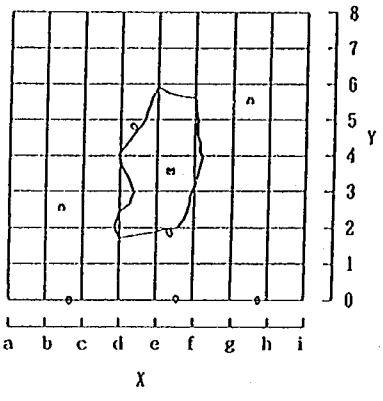


(c) ウェブ(C面)

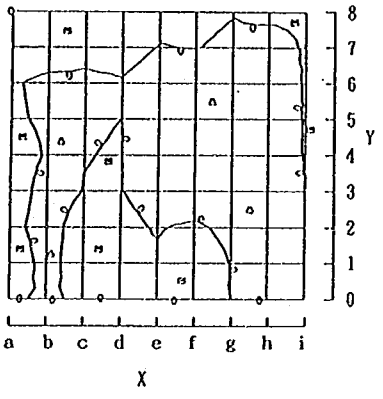
(ⅰ)降伏時を超えた点 (+3δy)



(a) フランジ(A面)

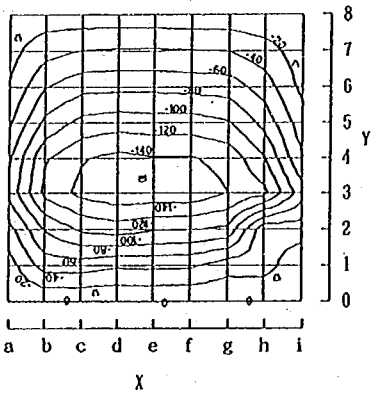


(b) フランジ(B面)

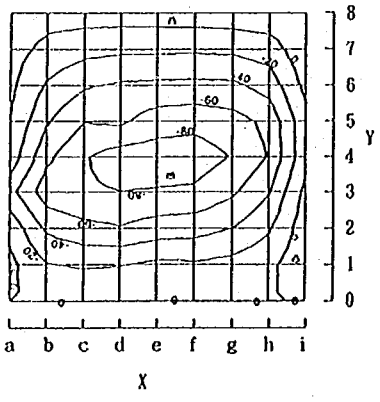


(c) ウェブ(C面)

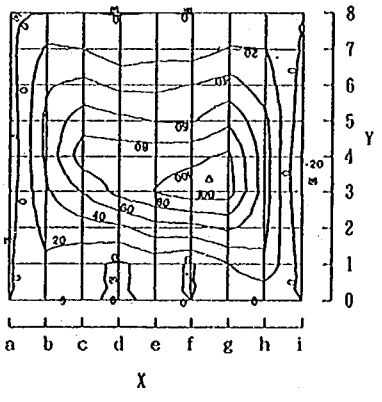
(ⅱ)最大荷重を超えた点 (+5δy)



(a) フランジ(A面)



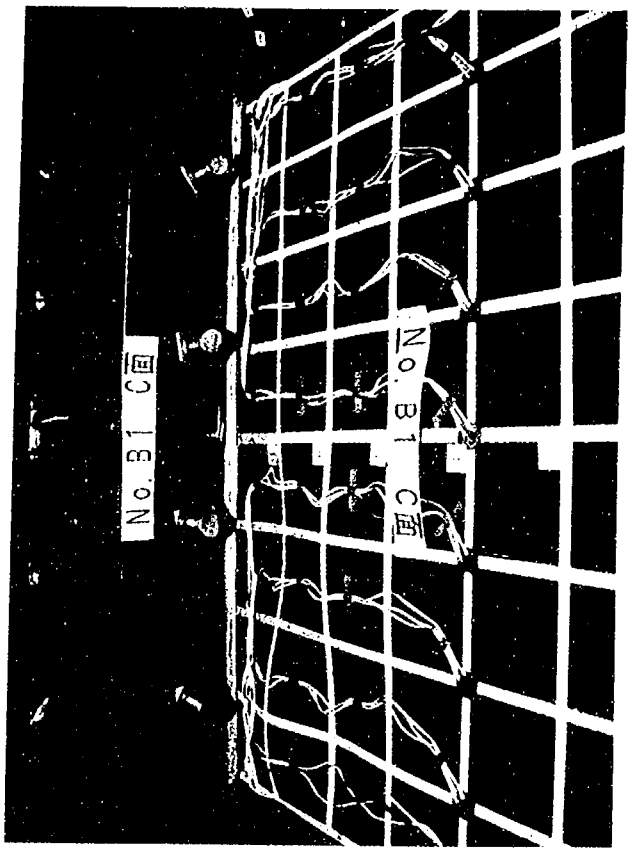
(b) フランジ(B面)

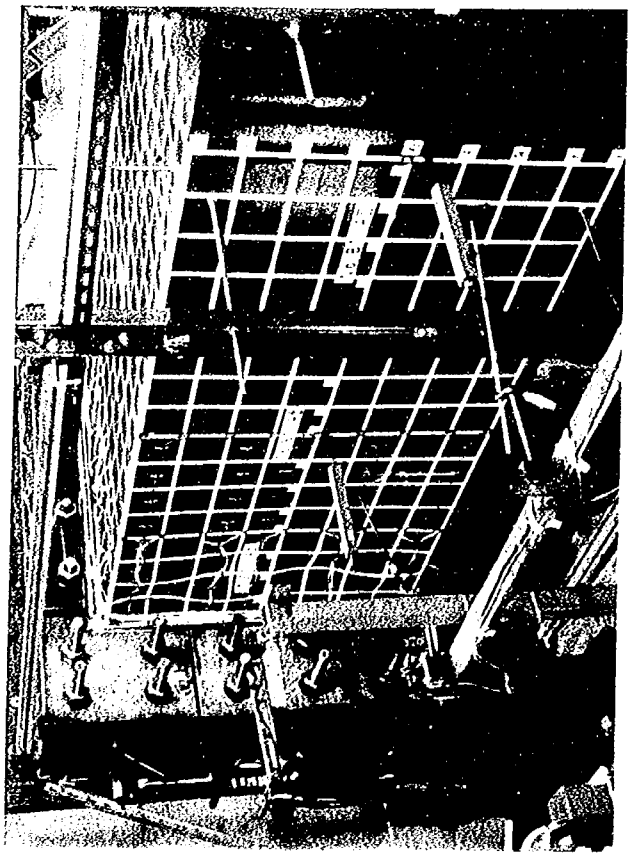


(c) ウェブ(C面)

(ⅲ)実験終了時付近 (+9δy)

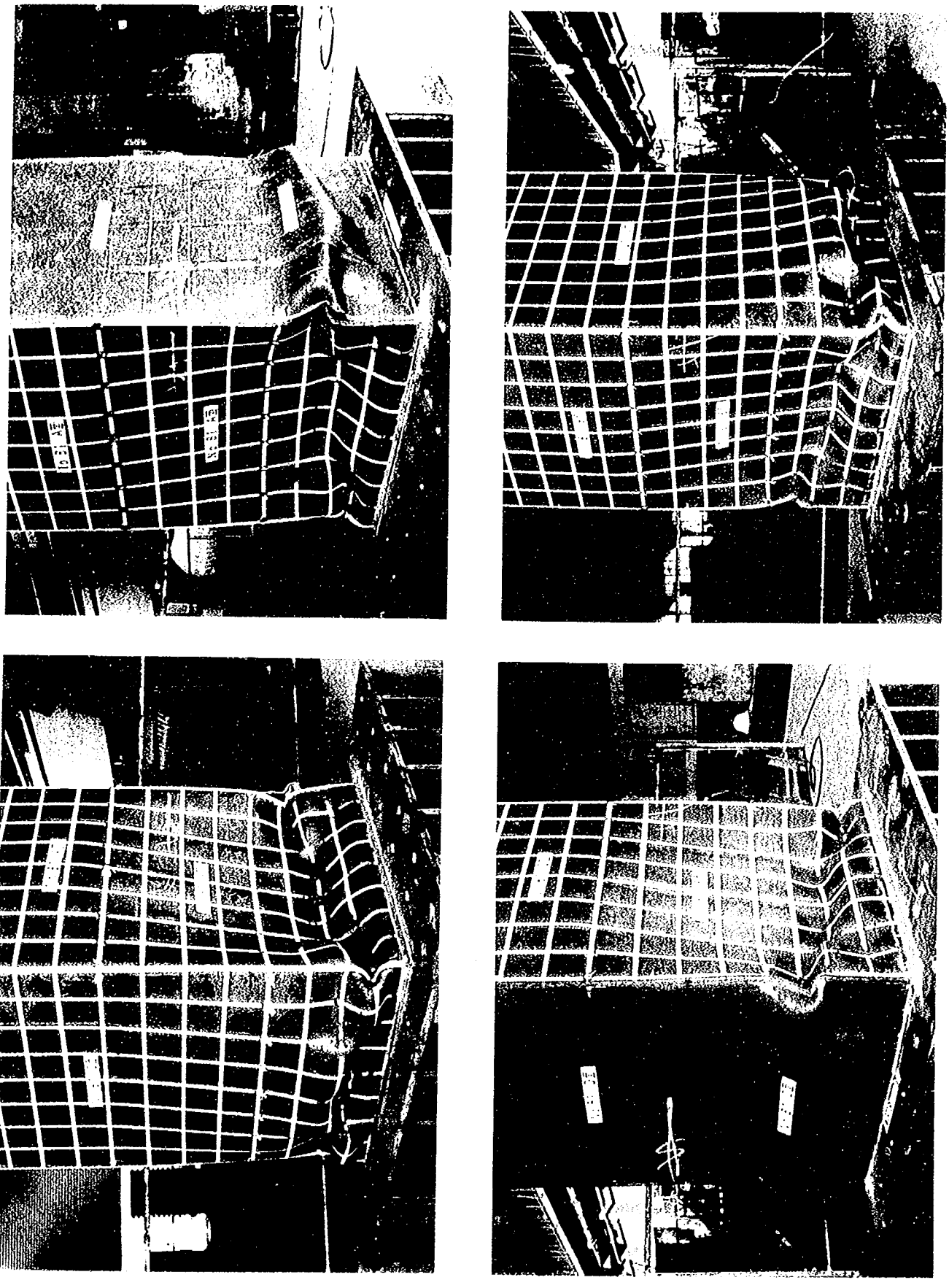
図-3.1.12(5)　フランジおよびウェブの面外変位等高線図(B8)





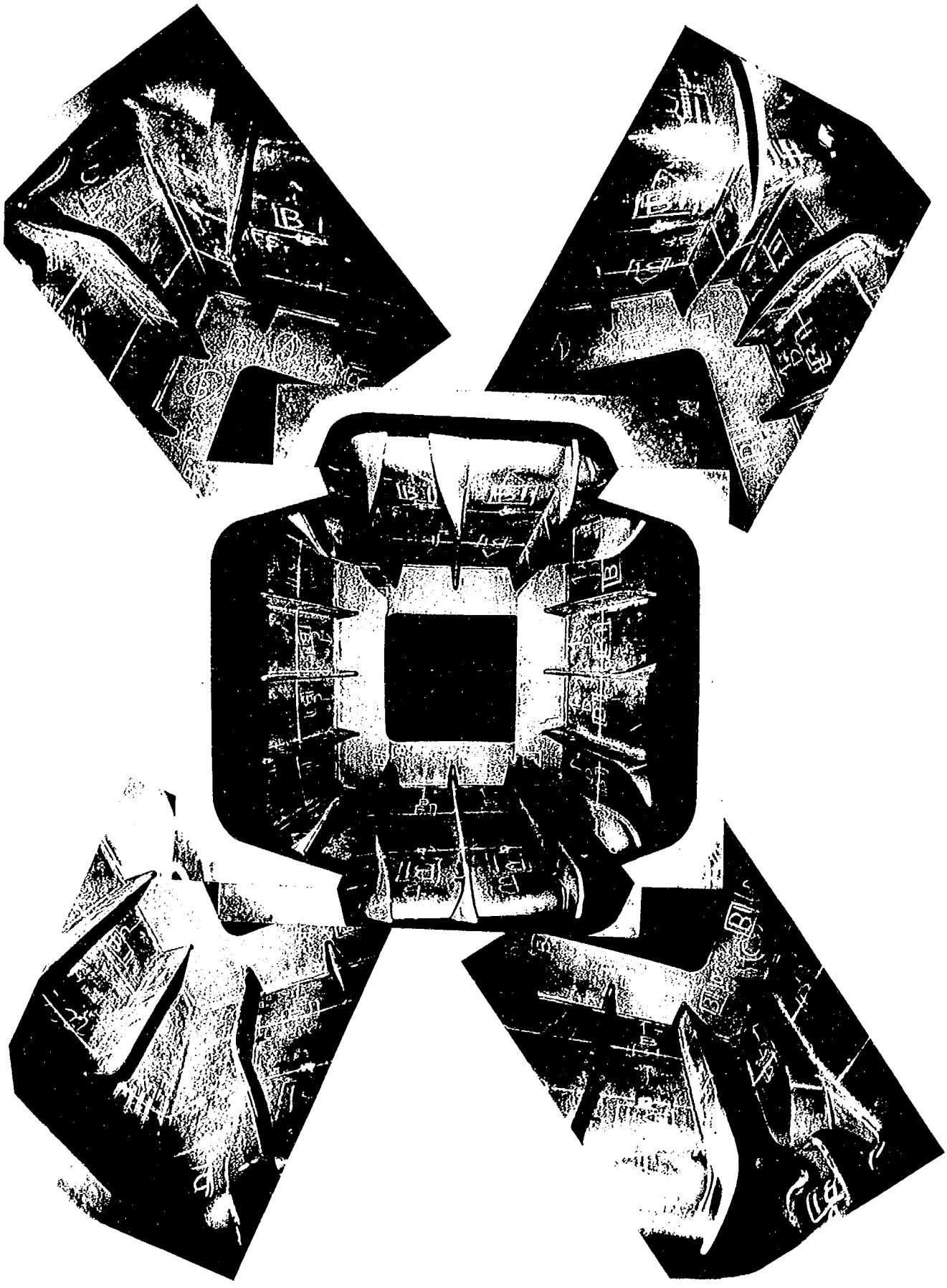


（ｉ）最大荷重を超えた点（＋４δｙ）
写真-3.1.1(1)　変形の状況（Ｂ１）



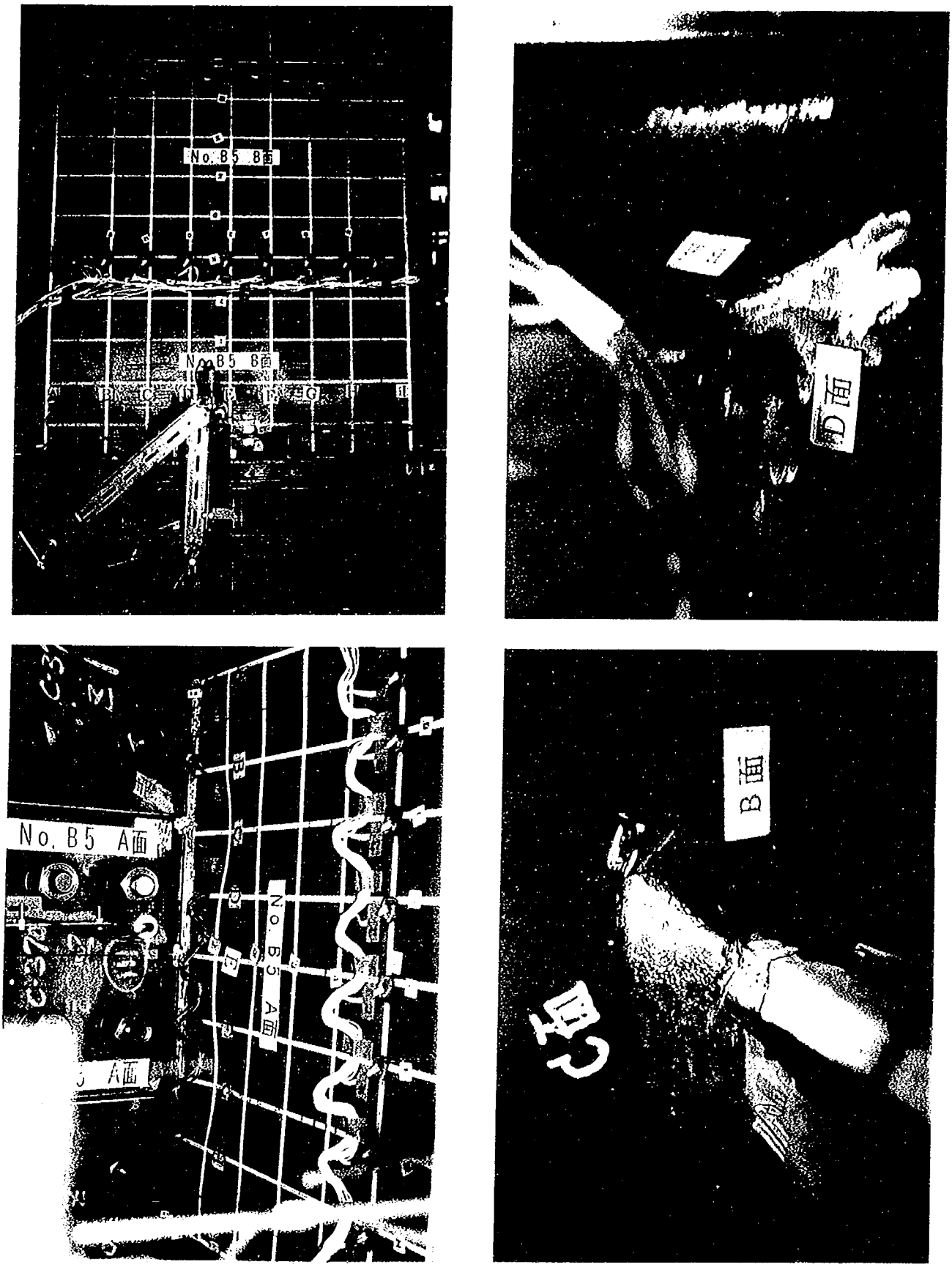
（ii）実験終了時（外面）

写真-3.1.1(1)　変形の状況（B１）　（つづき）



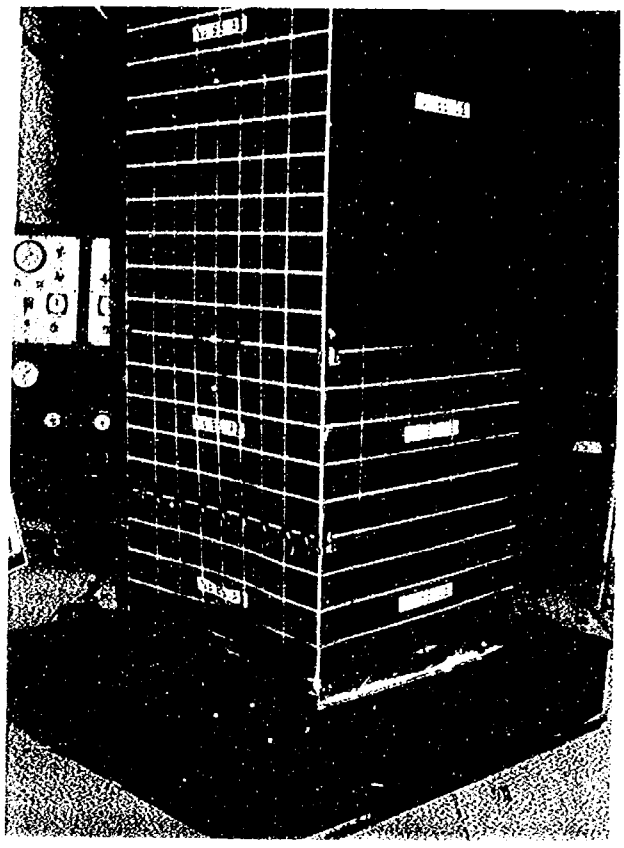
(iii)実験終了時（内面）

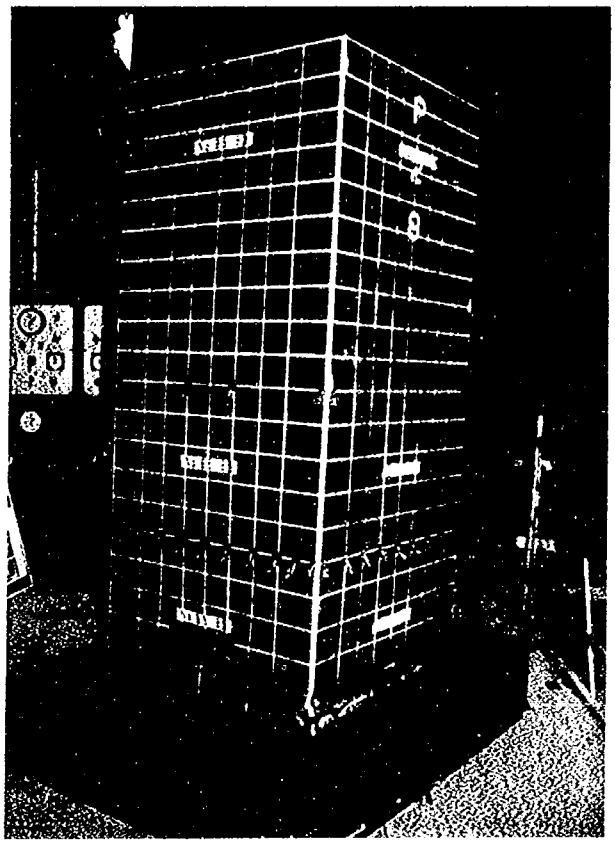
写真-3.1.1(1)　変形の状況（B 1）（つづき）

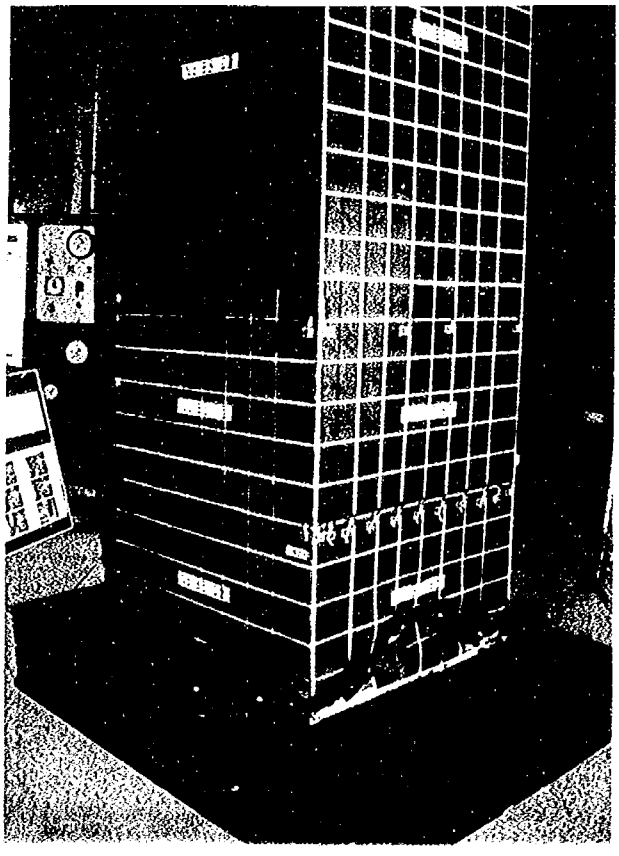


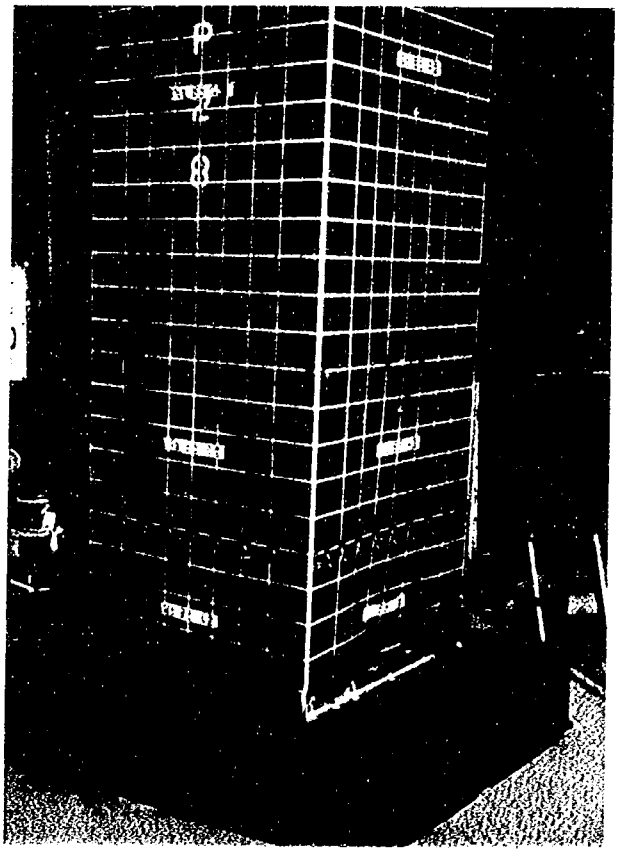
（ｉ）最大荷重を超えた点（＋５δｙ）

写真-3.1.1(2)　変形の状況（Ｂ５）



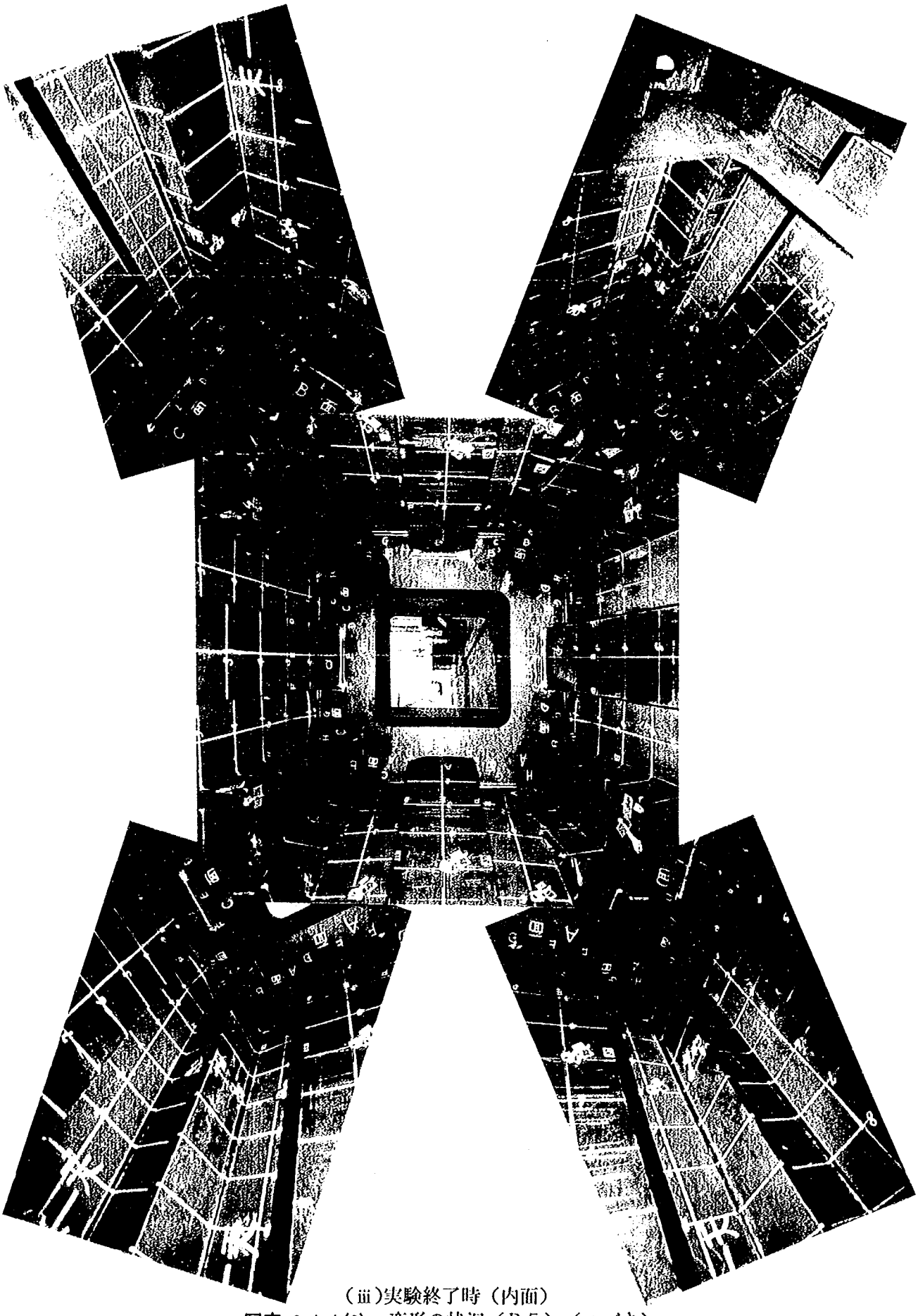






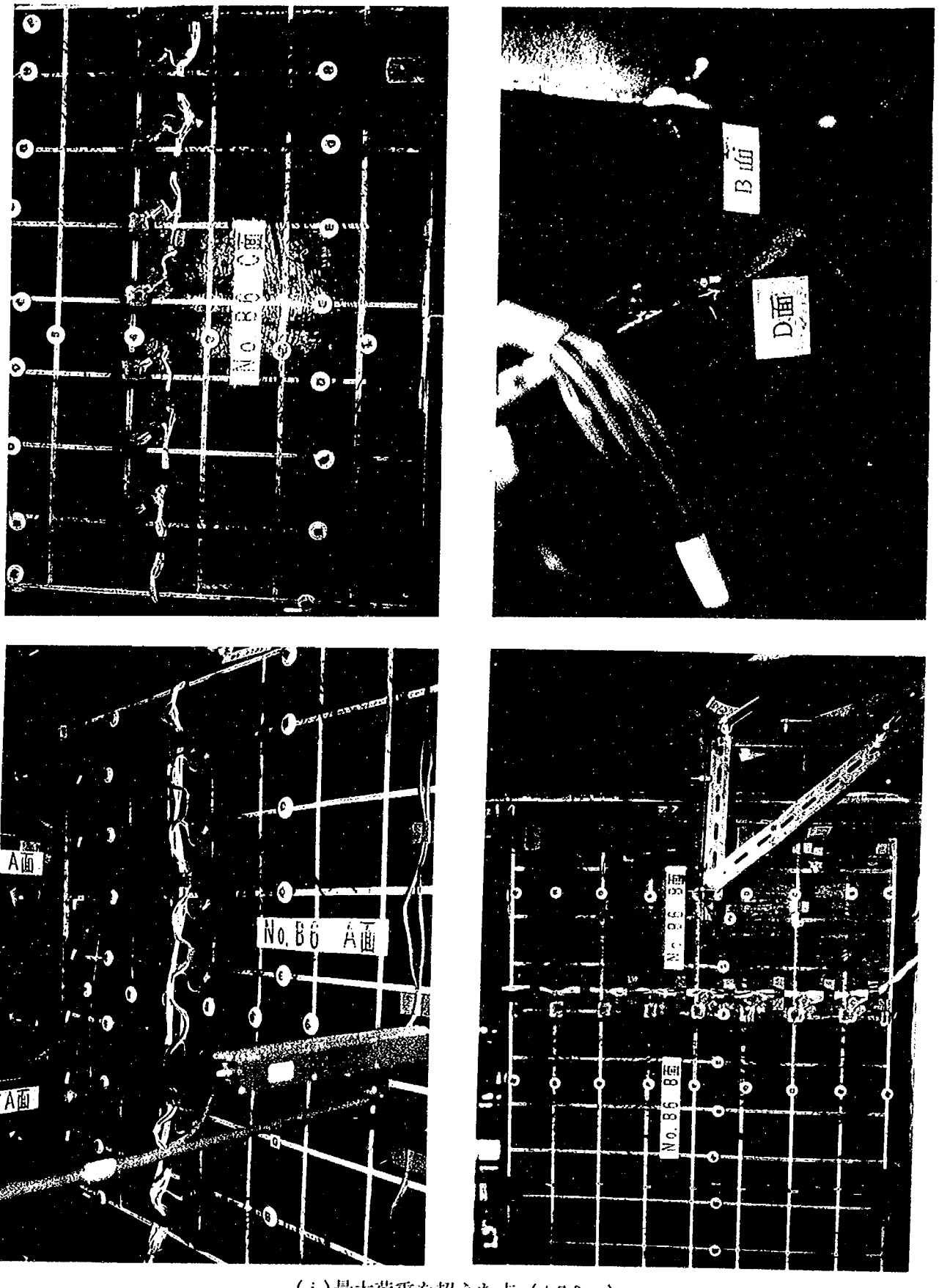
(ii)実験終了時（外面）

写真-3.1.1(2)　変形の状況（B５）（つづき）

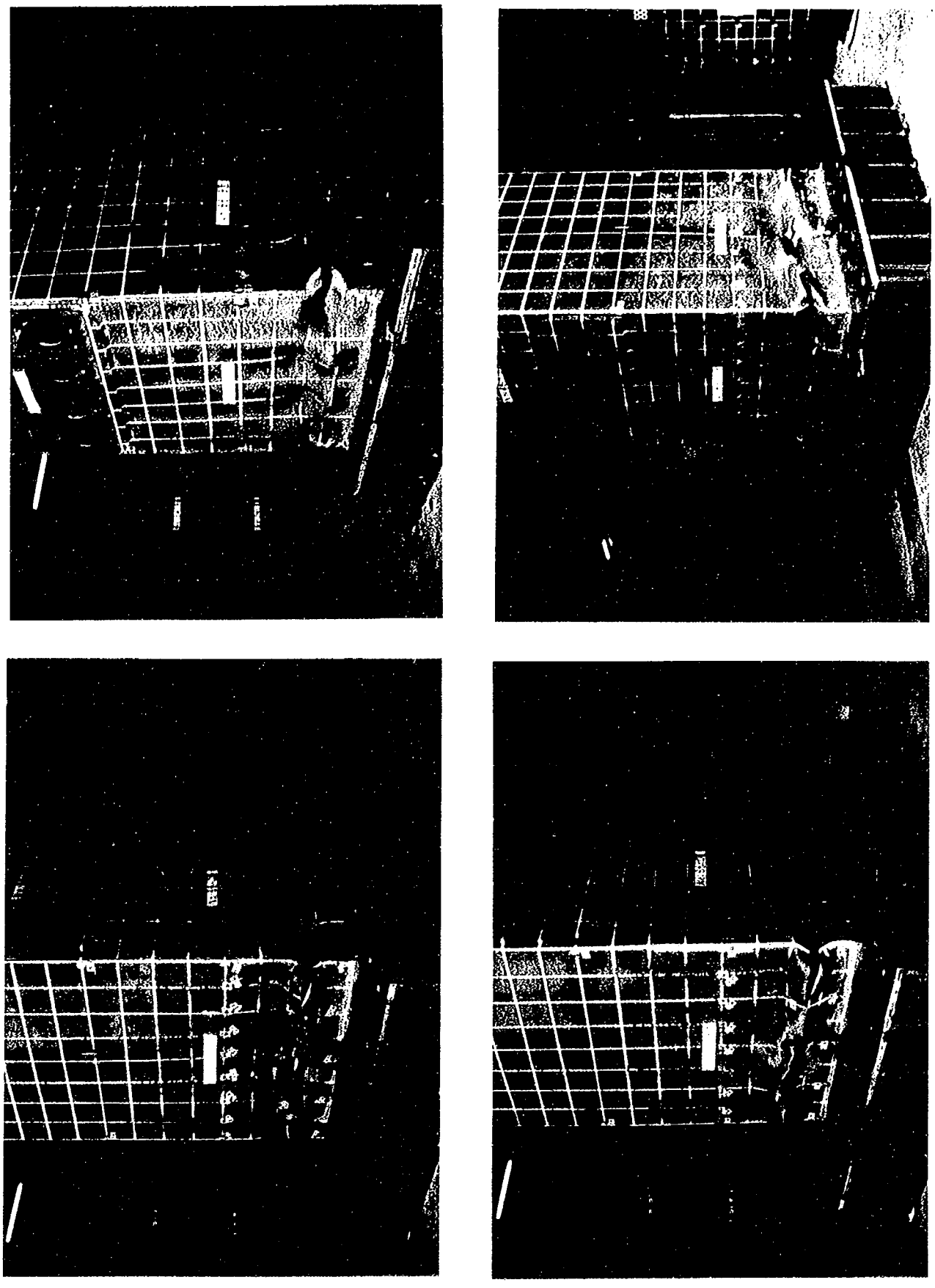


(iii)実験終了時（内面）

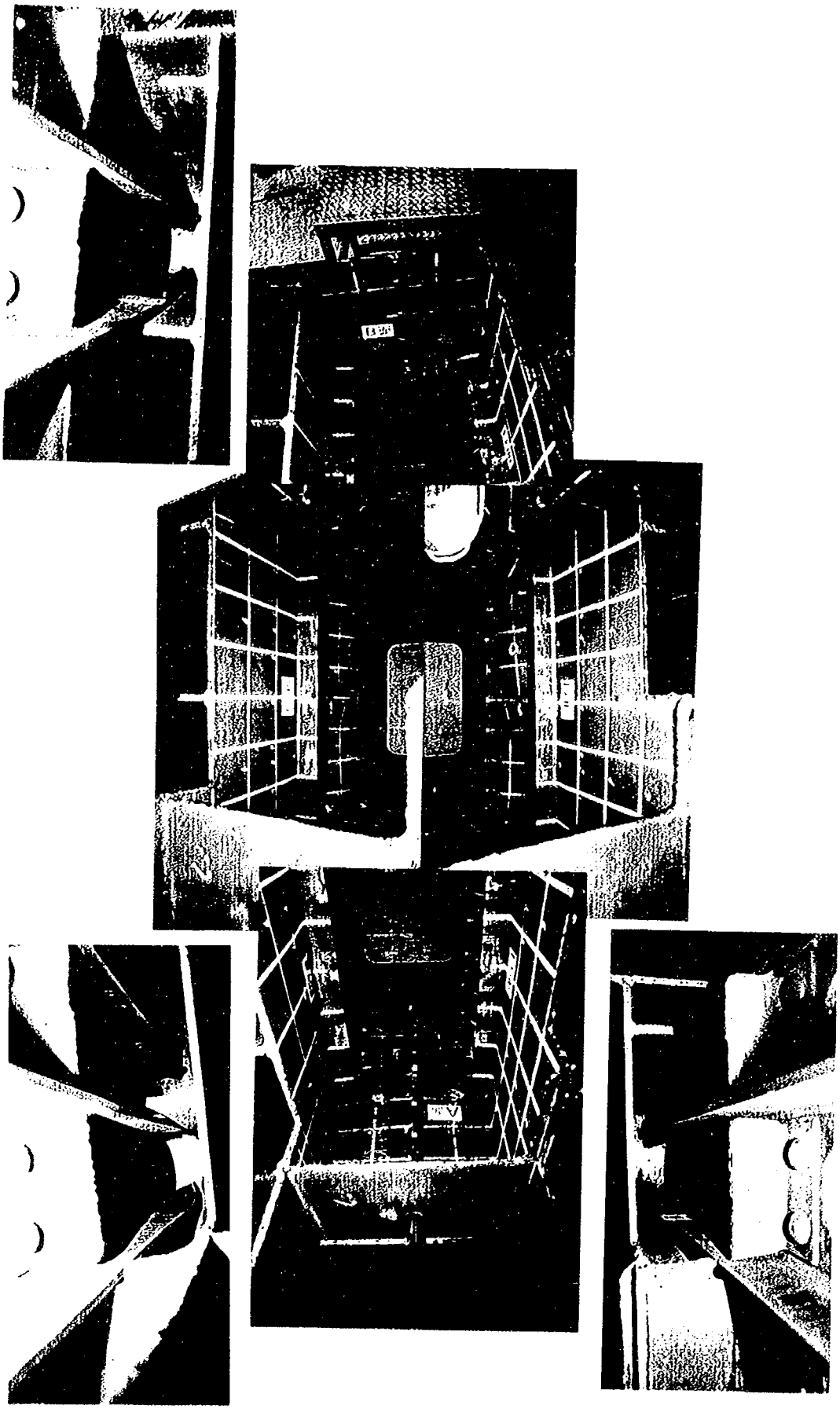
写真-3.1.1(2)　変形の状況（B５）（つづき）



(i)最大荷重を超えた点 (+7δy)
写真-3.1.1(3) 変形の状況 (B6)

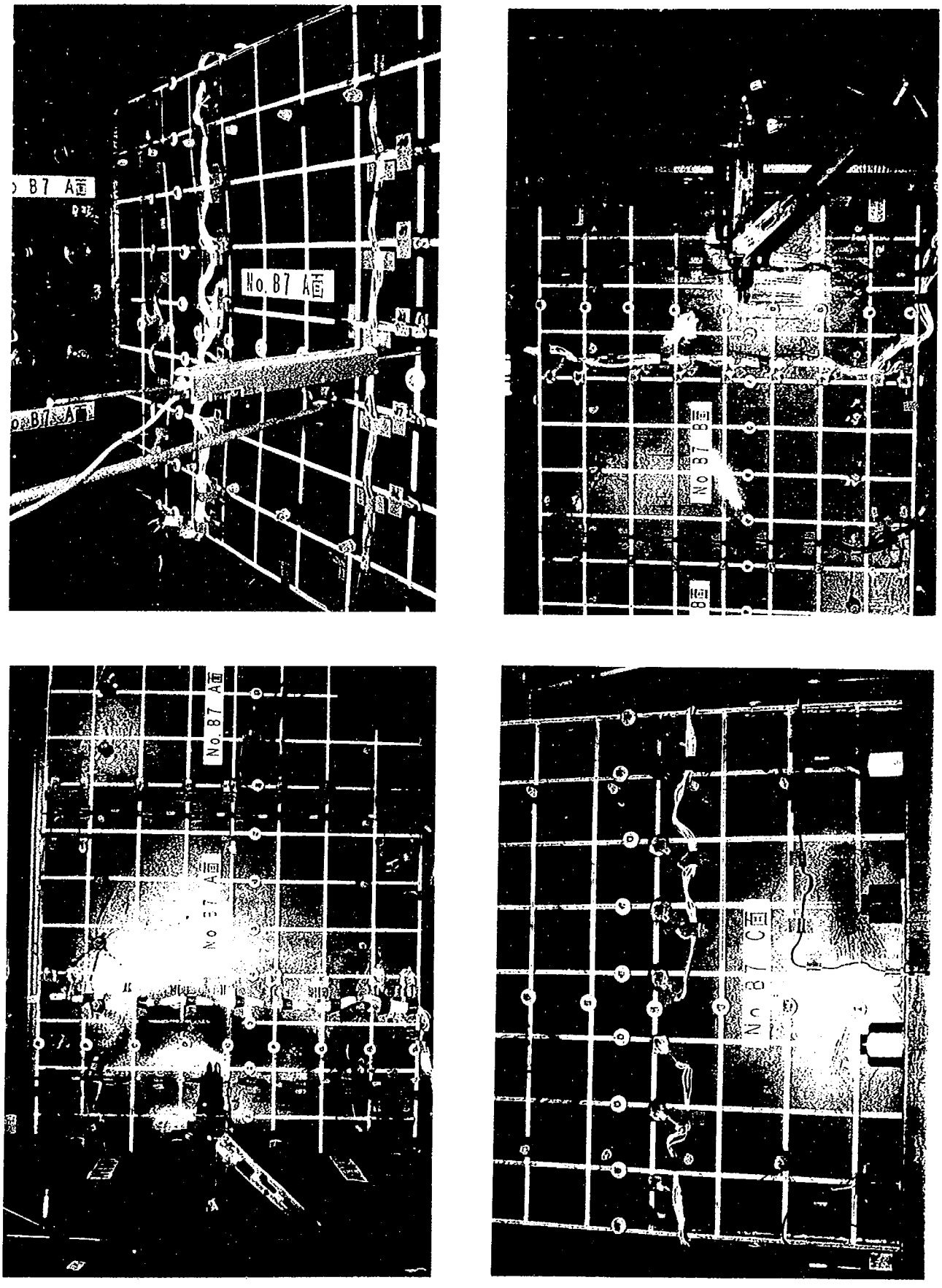


（ii）実験終了時（外面）
写真-3.1.1(3)　変形の状況（B 6）（つづき）

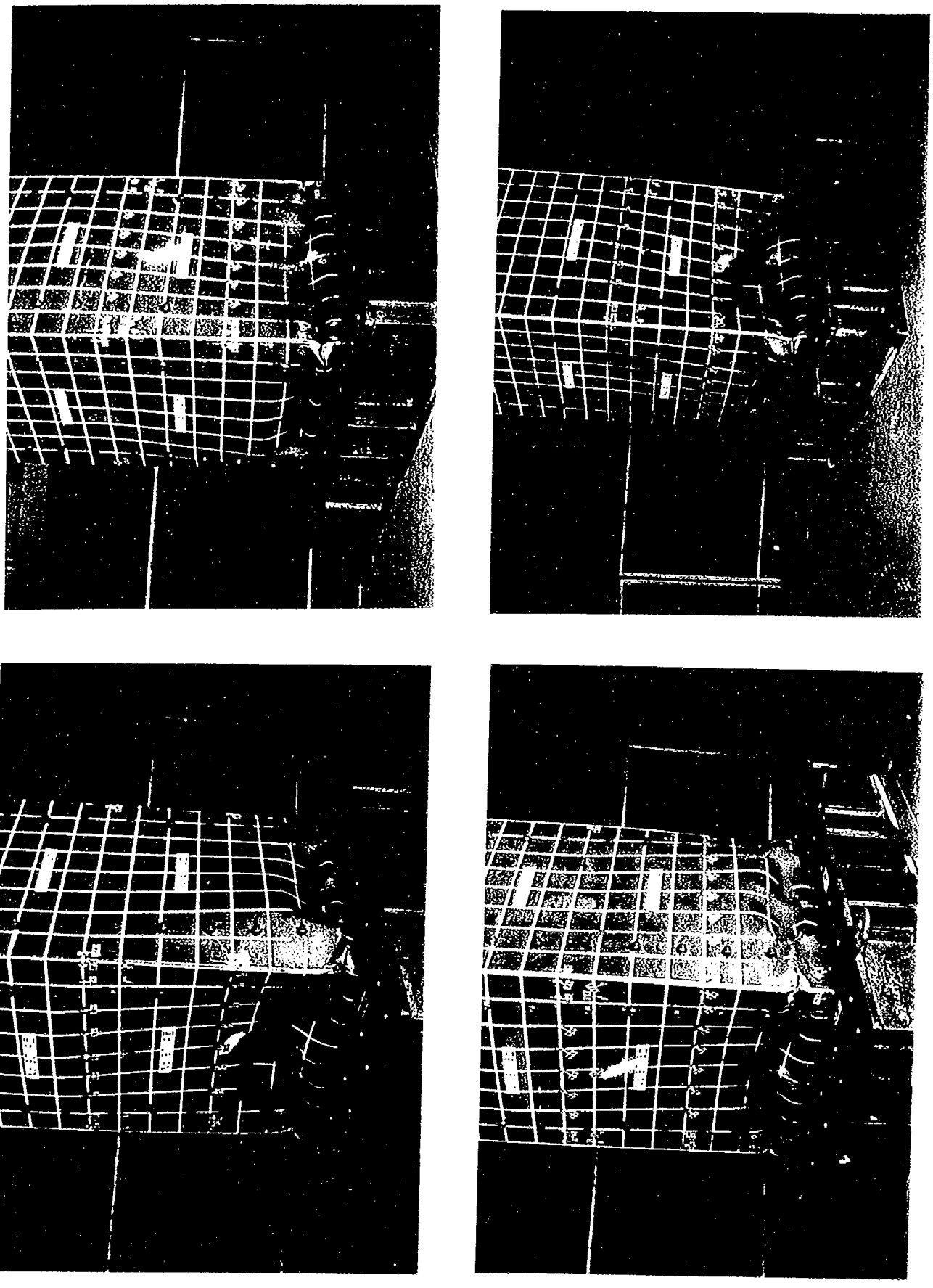


(iii)実験終了時（内面）

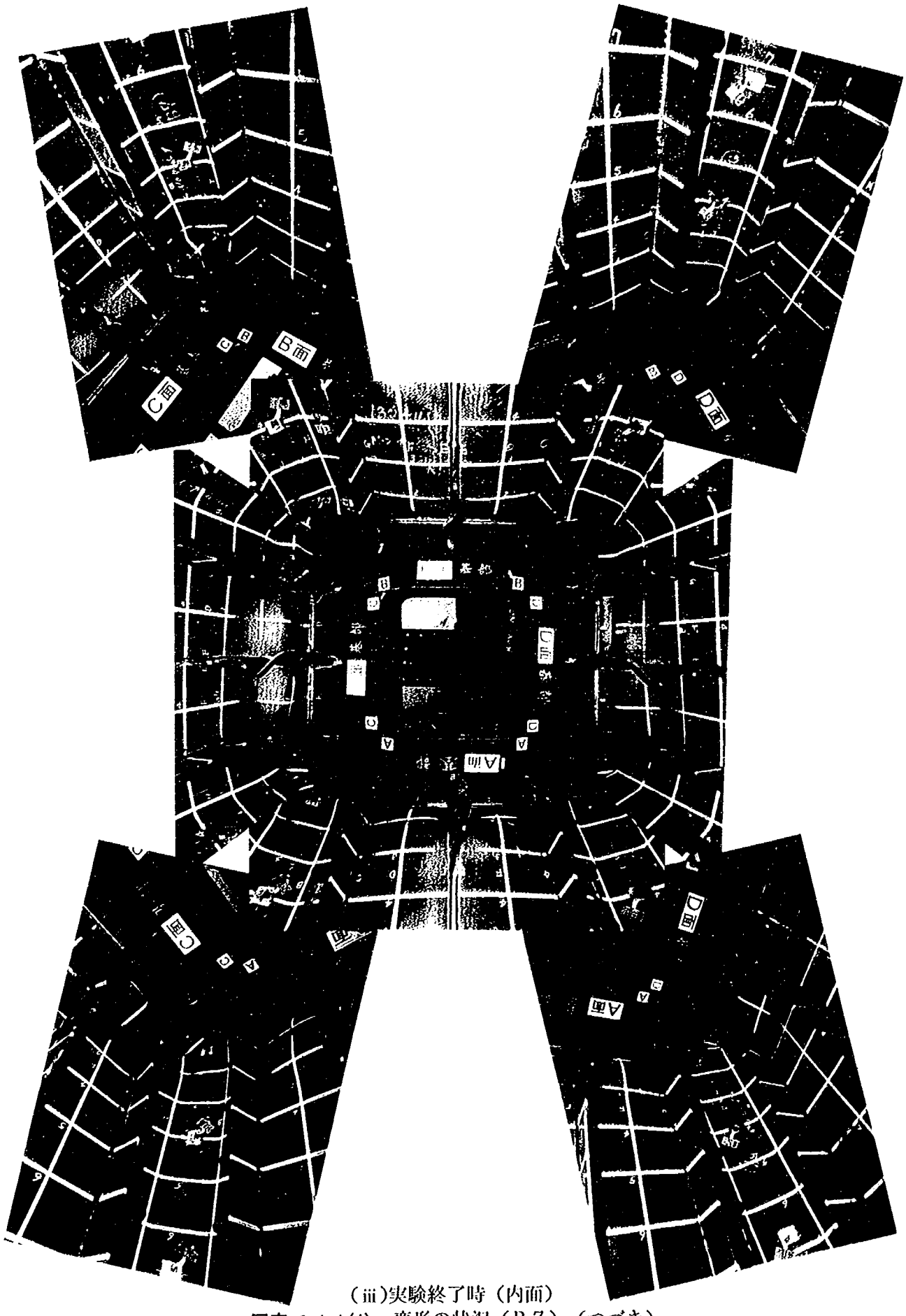
写真-3.1.1(3)　変形の状況（B 6）（つづき）



（ｉ）最大荷重を超えた点（＋４δｙ）
写真-3.1.1(4)　変形の状況（Ｂ７）

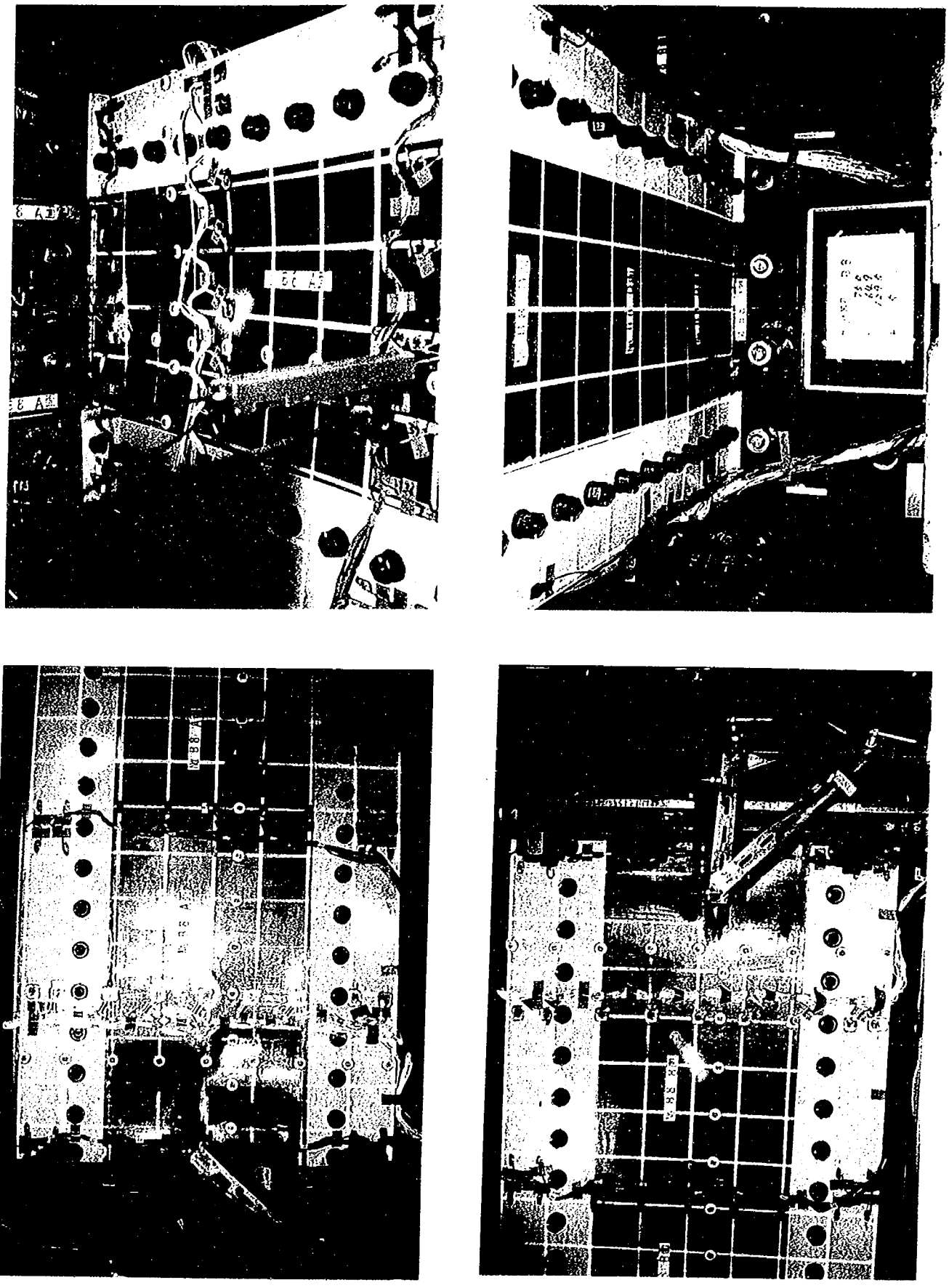


(ii)実験終了時 (外面)
写真-3.1.1(4) 変形の状況 (B 7) (つづき)

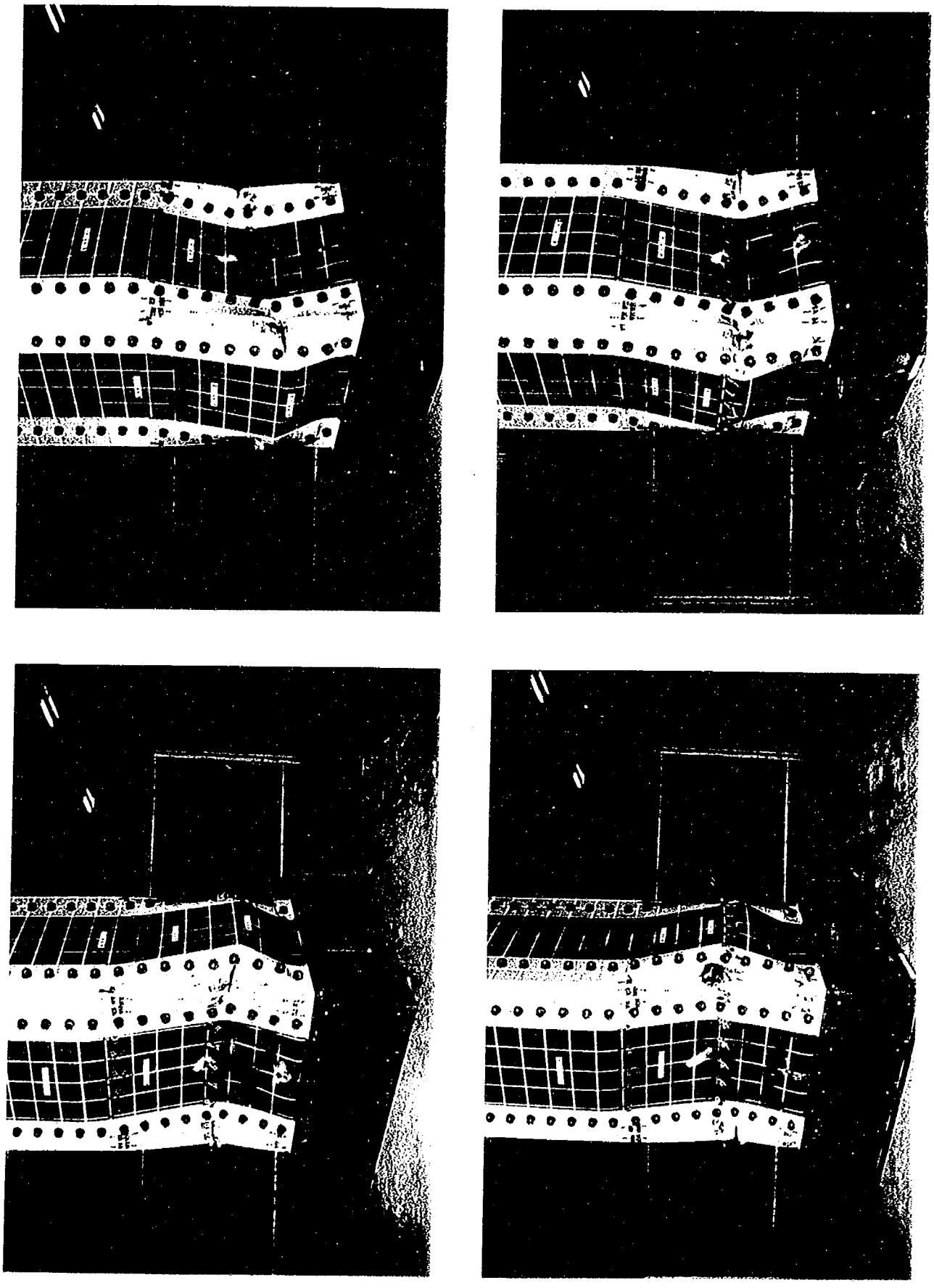


(iii)実験終了時（内面）

写真-3.1.1(4)　変形の状況（B７）（つづき）

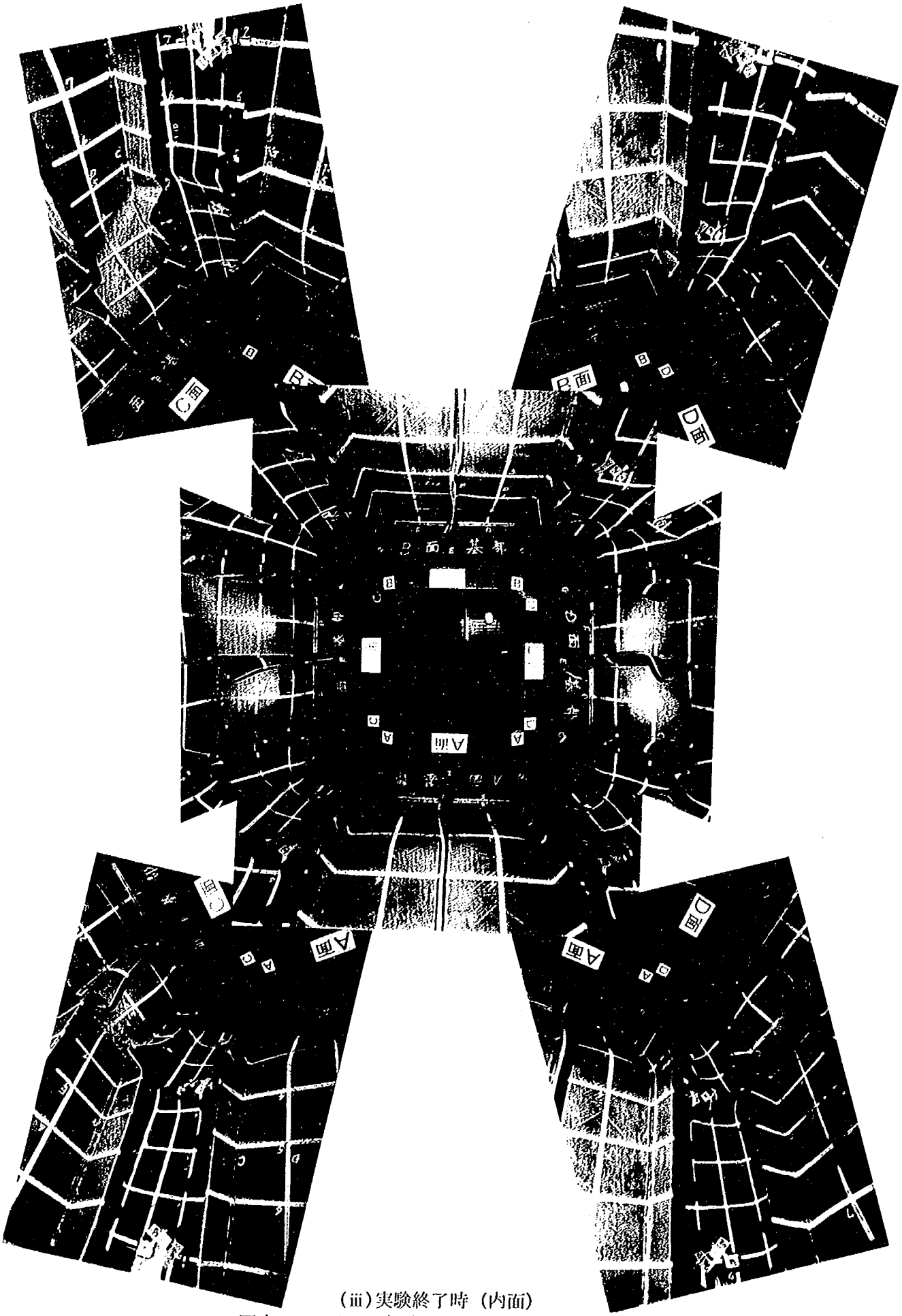


（ｉ）最大荷重を超えた点（＋５δｙ）
写真-3.1.1(5)　変形の状況（Ｂ８）



（ⅱ）実験終了時（外面）

写真-3.1.1(5)　変形の状況（B８）（つづき）



(iii)実験終了時（内面）

写真-3.1.1(5)　変形の状況（B８）（つづき）

実験結果
（円形断面）

表-3.2.1　実験結果一覧

円形断面供試体		外形寸法 2R (mm)	板厚 t (mm)	縦リブ寸法 (mm)	横リブ間隔 a (mm)	鋼種	鋼材降伏点 σ_{yM} (kgf/cm2)	断面積 A (cm2)	断面2次モーメント I (cm4)	断面2次半径 γ (cm)	有効長 l(=2h) (cm)	細長比 λ	径厚比 R/t	径厚比パラメータ Rt	軸力 N (tf)	軸力比 N/N_{yN}	軸力比 N/N_{yM}
B2	縦リブ断続	900	9	100x11	900	SS400	2907	251.9	250,023	31.50	684.6	0.257	50.0	0.113	90.7	0.150	0.124
B3	二重管	900	6(18)	—	—	SS400	3200	497.6	307,844	24.87	684.6	0.342	75.0	0.197	179.1	0.150	0.112
B4	縦リブ連続	900	9	125x9 +116x6	900	SS400	2897	324.8	304,231	30.61	684.6	0.264	50.0	0.113	116.9	0.150	0.124

注）B3のカッコ内は内管を示す.

供試体	P_{yN} (tf)	P_{yM} (tf)	Pu (tf)	$\frac{Pu}{P_{yM}}$	δ_{yTN} (mm)	δ_{yTM} (mm)	δ_{yEN} (mm)	δ_{yEM} (mm)	δm (mm)	δ97 (mm)	δ95 (mm)	δlim (mm)	δu (mm)	$\frac{\delta m}{\delta_{yEN}}$	$\frac{\delta 97}{\delta_{yEN}}$	$\frac{\delta 95}{\delta_{yEN}}$	$\frac{\delta lim}{\delta_{yEN}}$	$\frac{\delta u}{\delta_{yEN}}$
B2	33.1	41.3	71.0	1.72	8.4	10.5	9.4	11.7	39	46	49	44	88	4.1	4.9	5.3	4.7	9.4
B3	40.8	56.8	79.4	1.40	8.4	11.7	10.4	14.5	35	106	113	104	146	3.4	10.2	10.9	10.0	14.0
B4	40.3	50.1	72.5	1.45	8.4	10.5	11.0	13.7	38	53	56	54	77	3.4	4.9	5.1	4.9	7.0

注）記号の説明は図-3.1.1を参照。

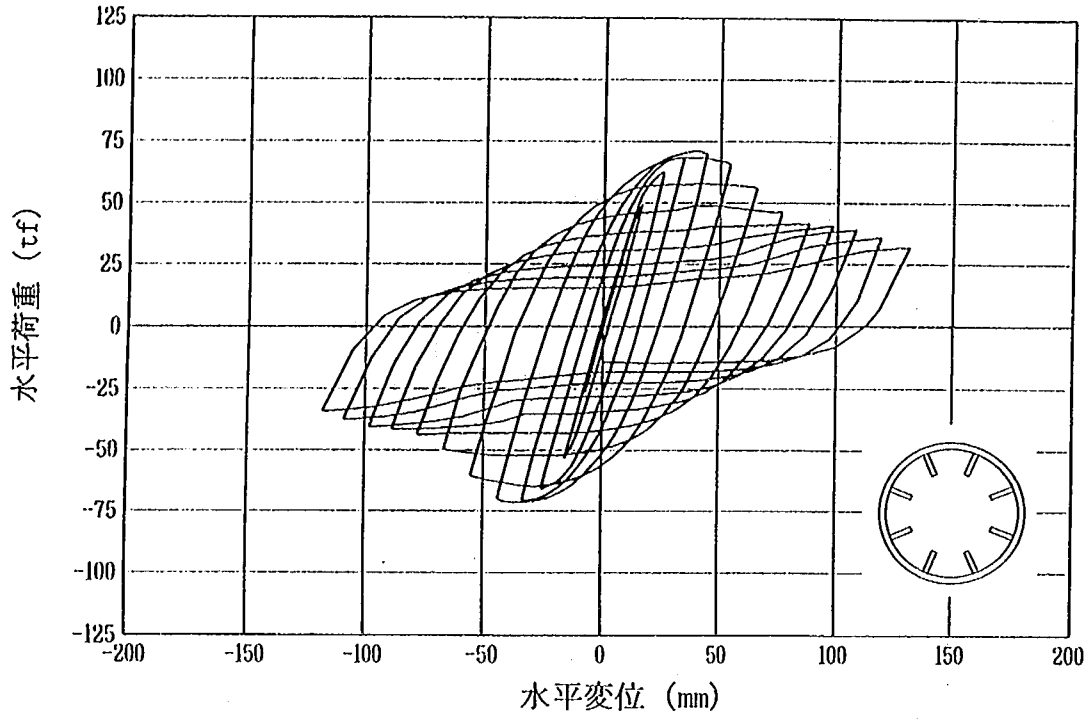


図-3.2.1(1)　水平荷重－水平変位関係（B２）

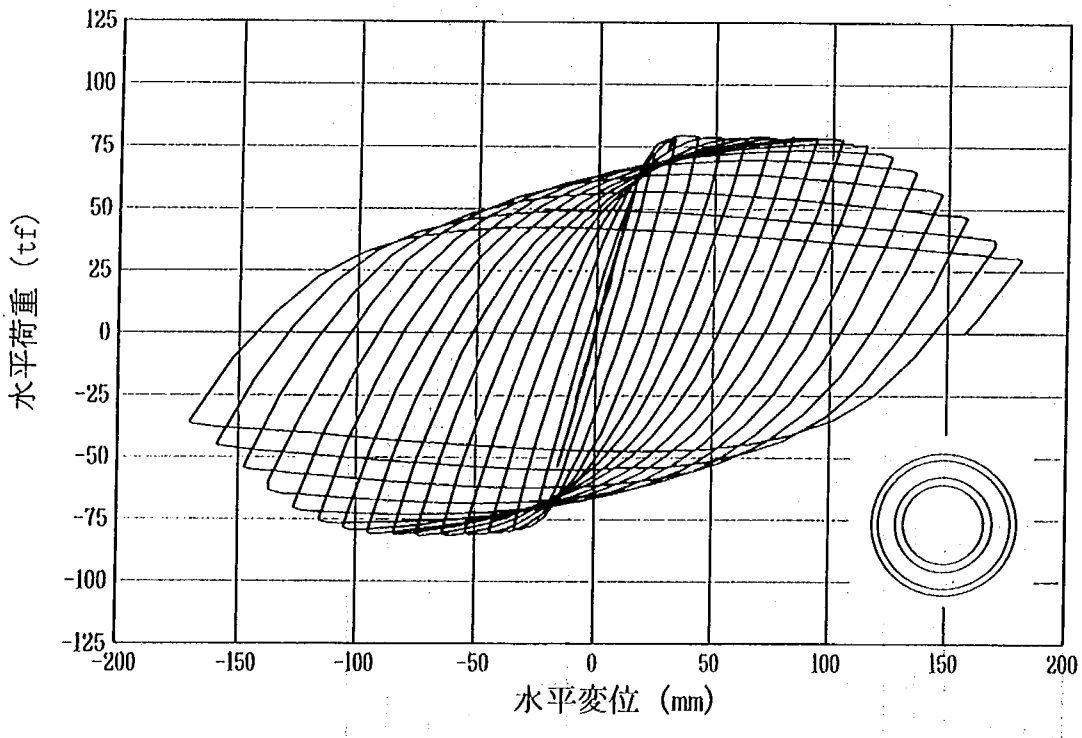


図-3.2.1(2)　水平荷重－水平変位関係（B３）

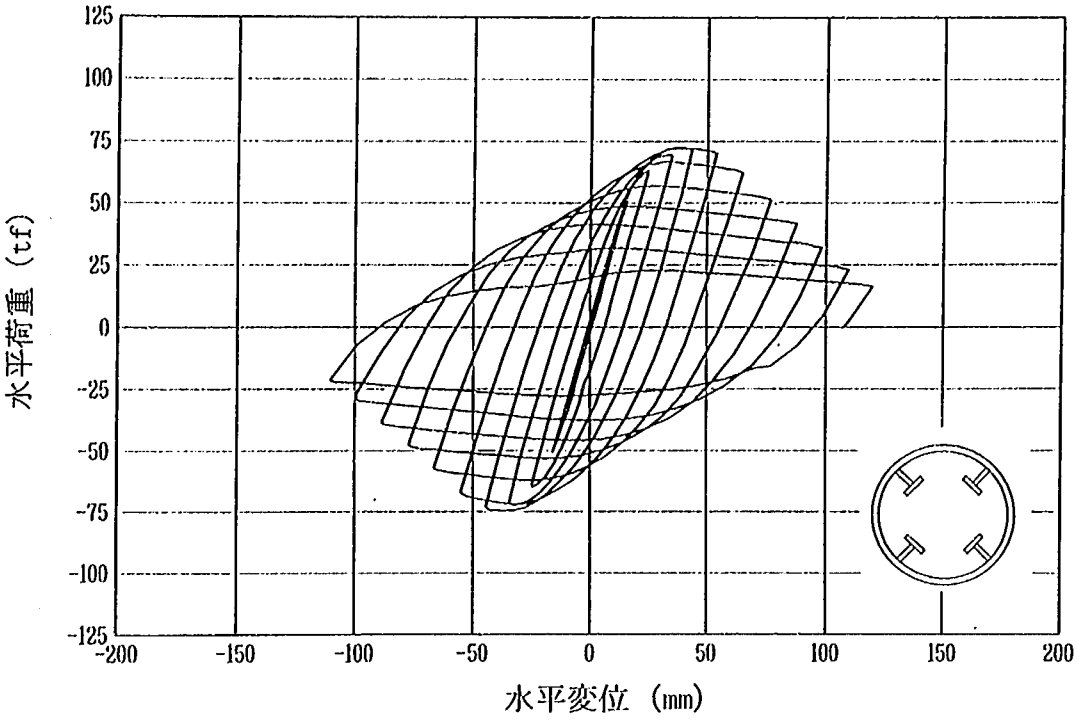


図-3.2.1(3)　水平荷重－水平変位関係（B４）

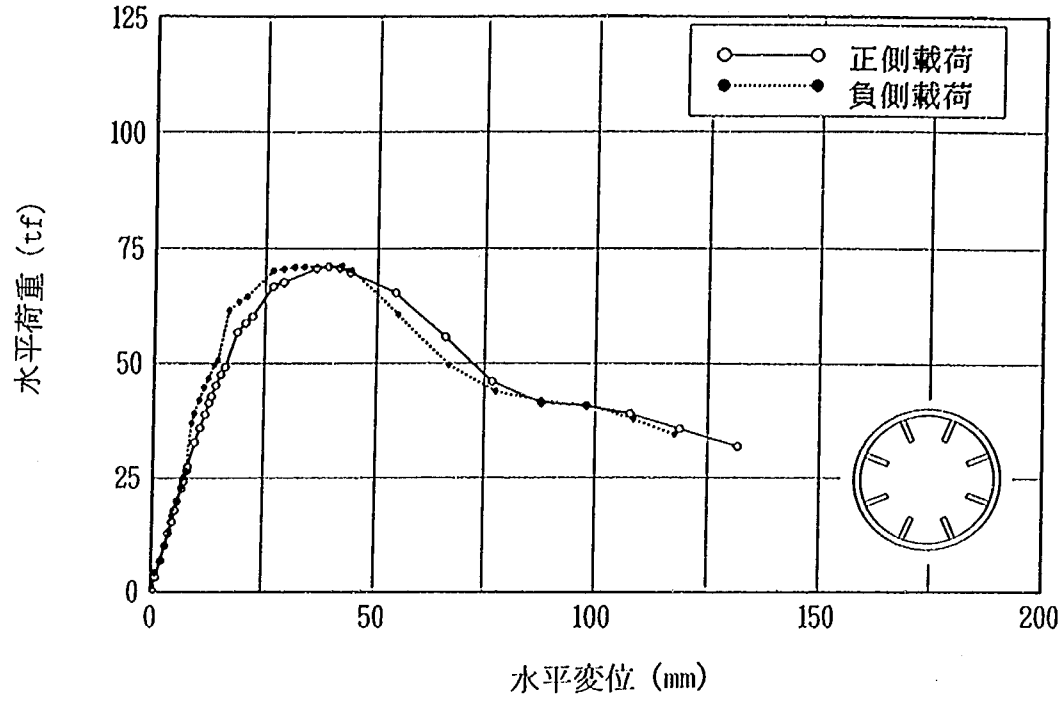


図-3.2.2(1)　水平荷重－水平変位関係の包絡線（B２）

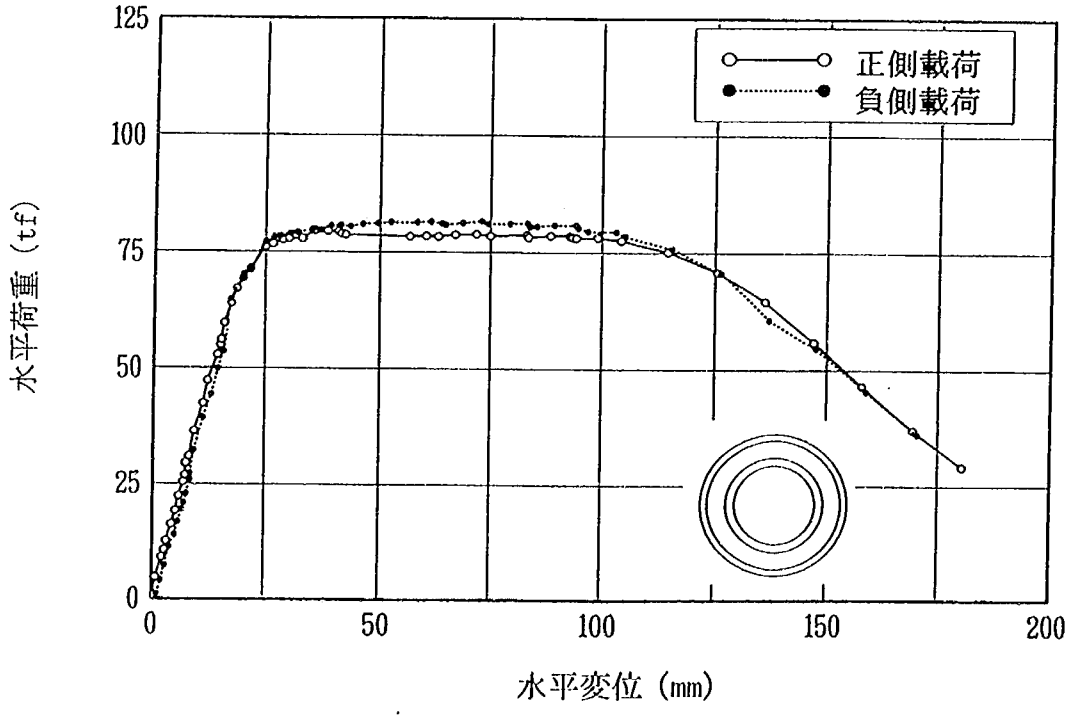


図-3.2.2(2)　水平荷重－水平変位関係の包絡線（B３）

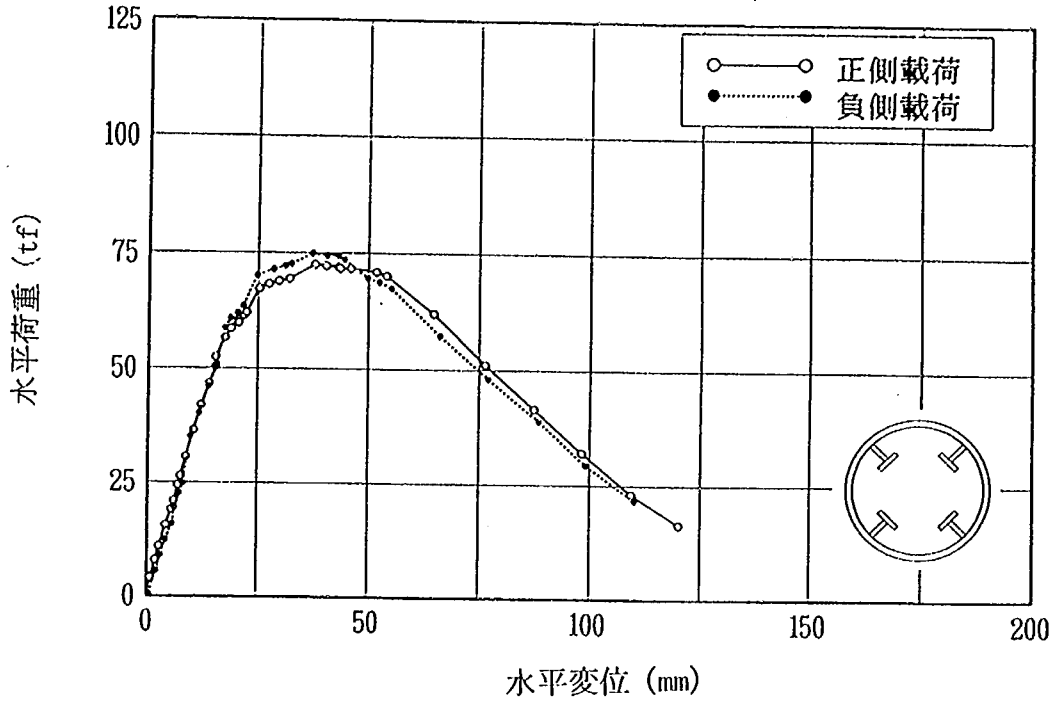
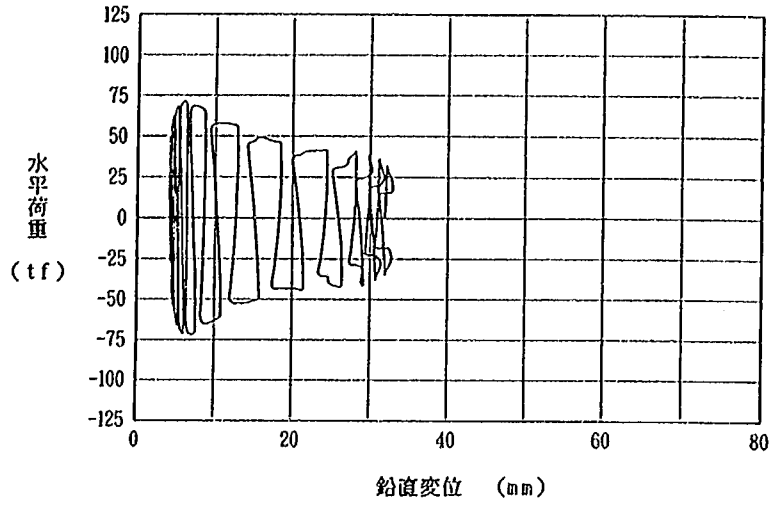
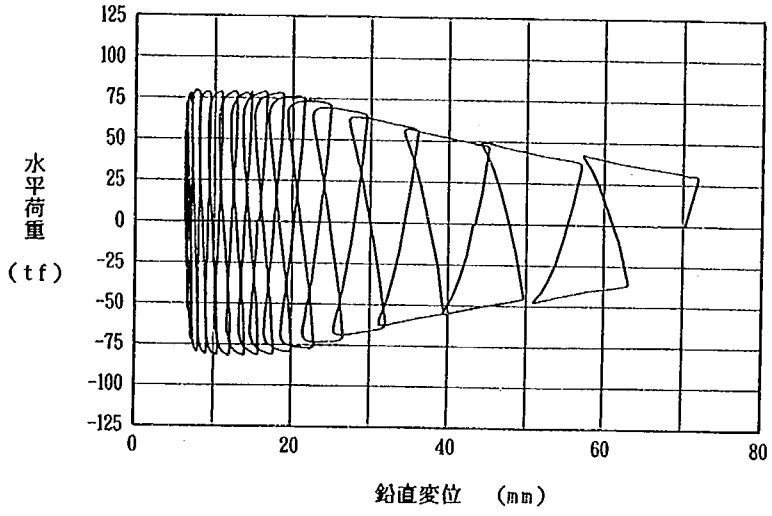


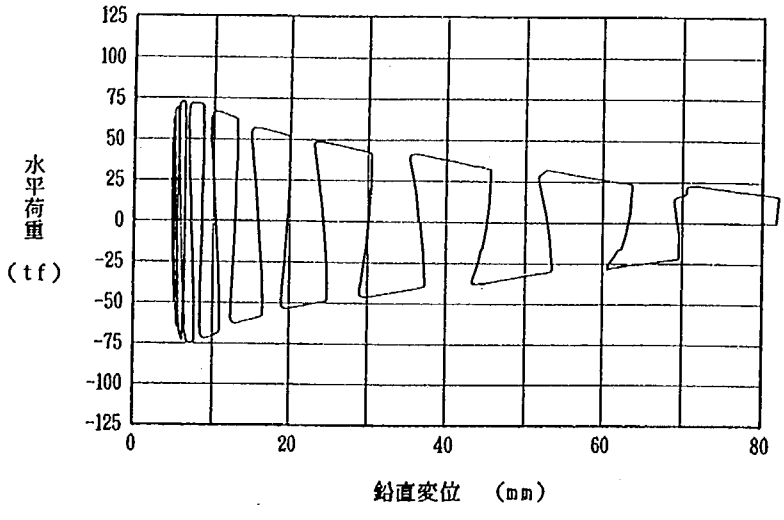
図-3.2.2(3)　水平荷重－水平変位関係の包絡線（B 4）



(1) B 2

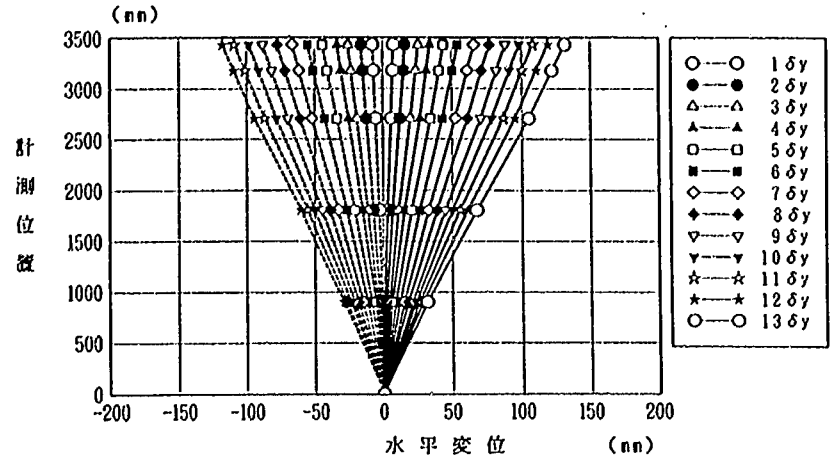


(2) B 3

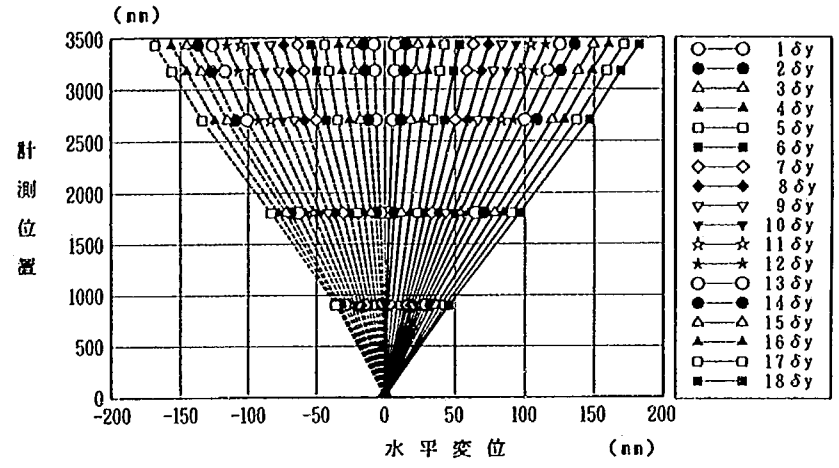


(3) B 4

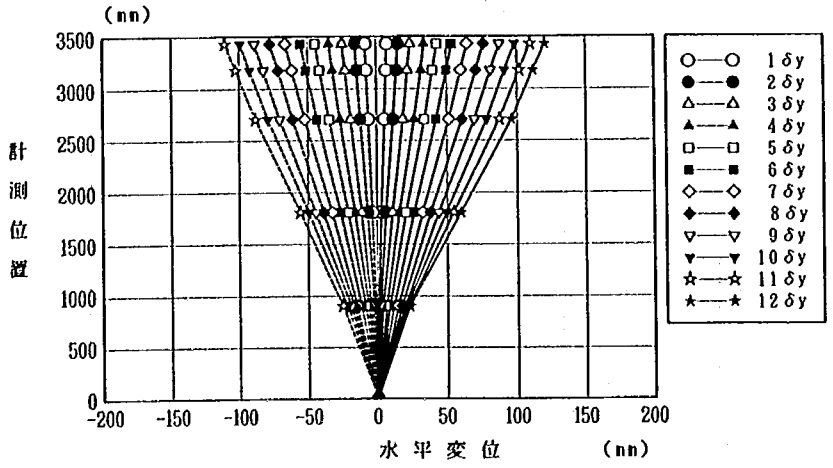
図-3.2.3 水平荷重－鉛直変位関係



(1) B 2

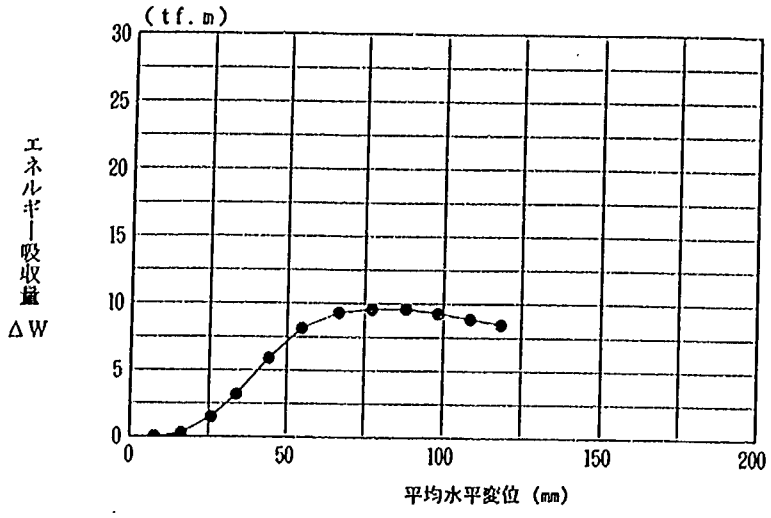


(2) B 3

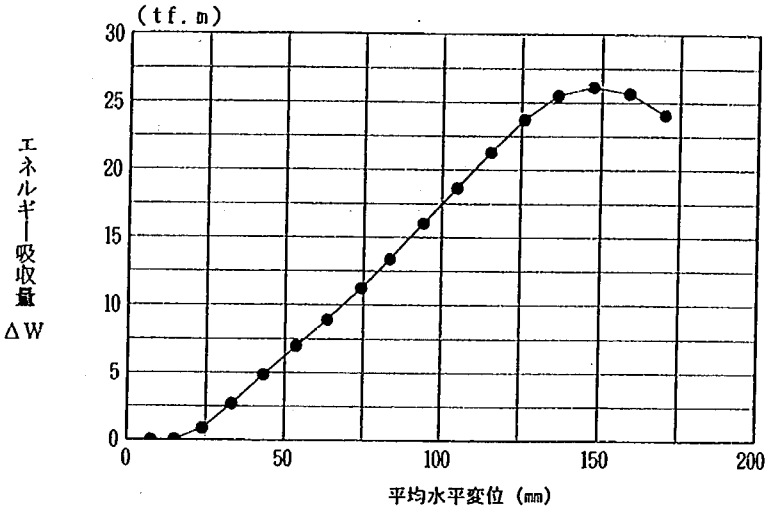


(3) B 4

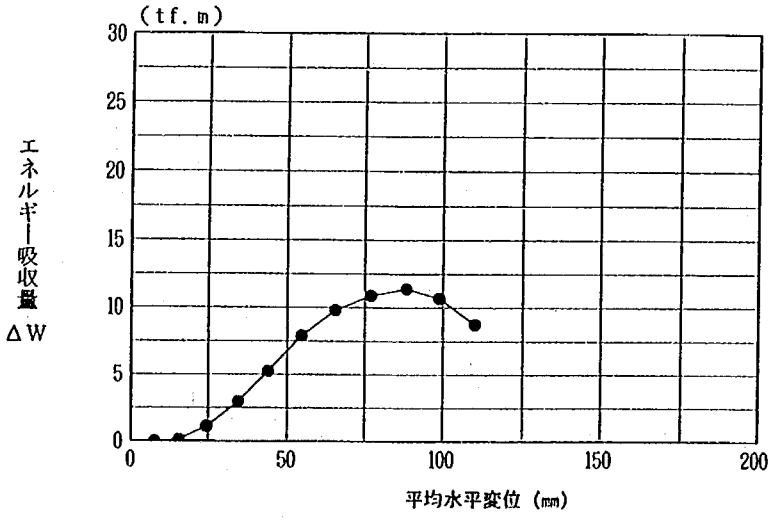
図-3.2.4 水平変位の鉛直方向分布



(1) B 2

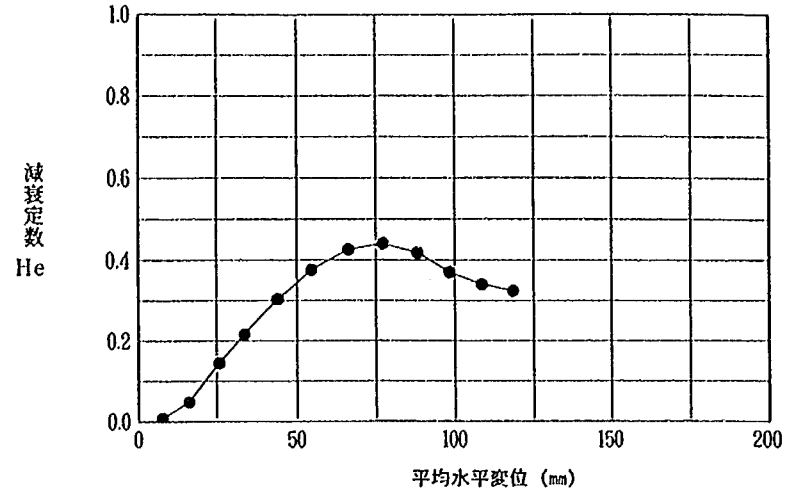


(2) B 3

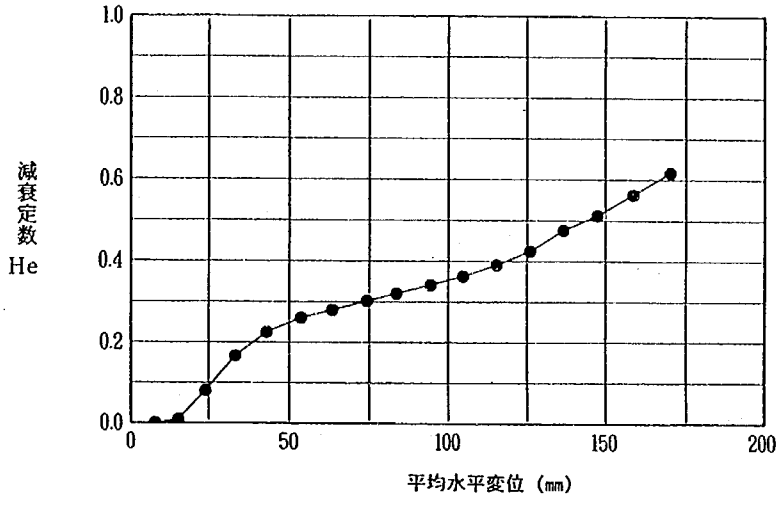


(3) B 4

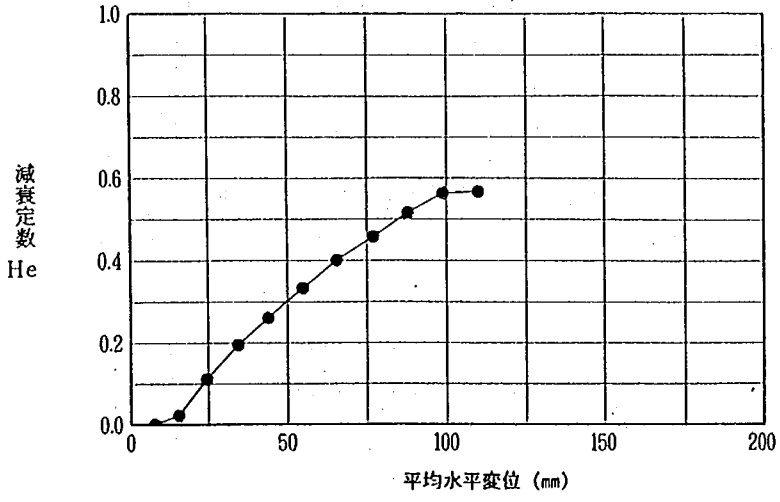
図-3.2.5 エネルギー吸収量



(1)　B 2

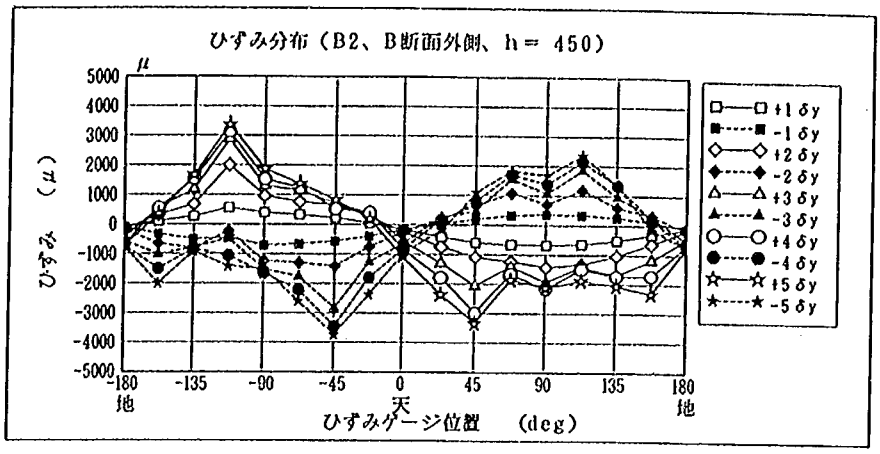


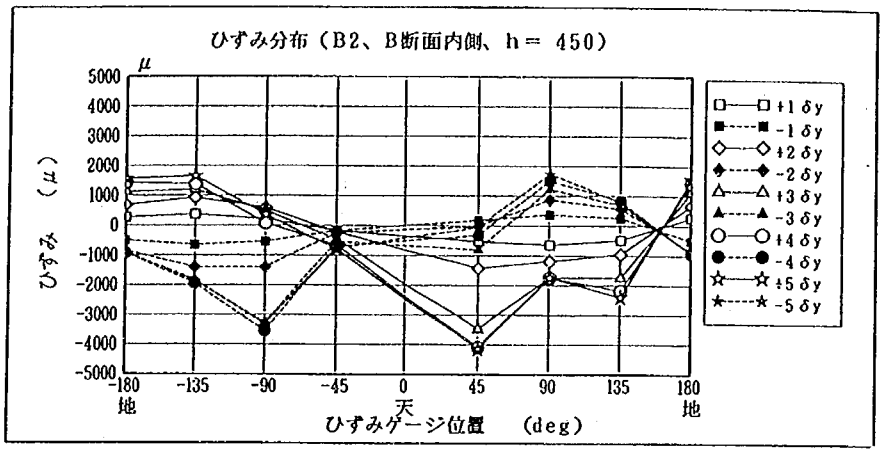
(2)　B 3



(3)　B 4

図-3.2.6　等価減衰定数





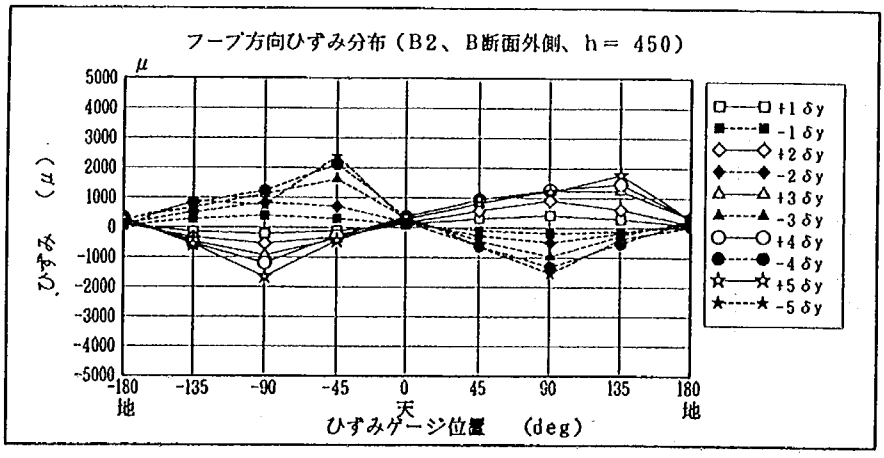
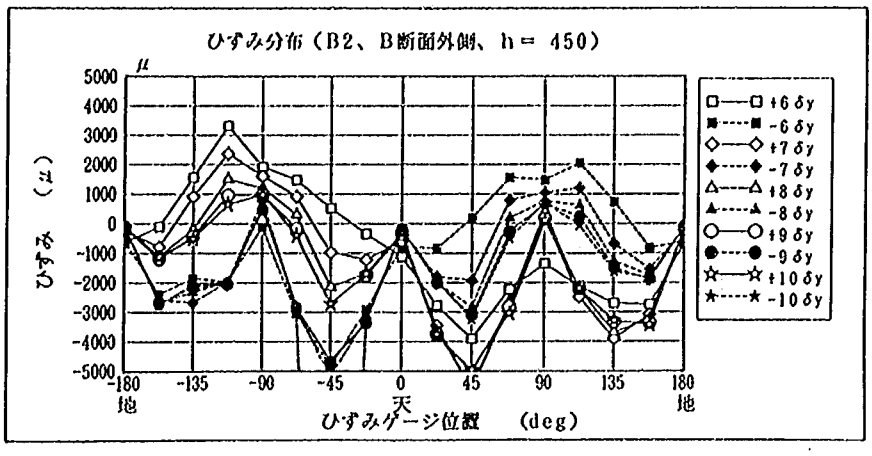
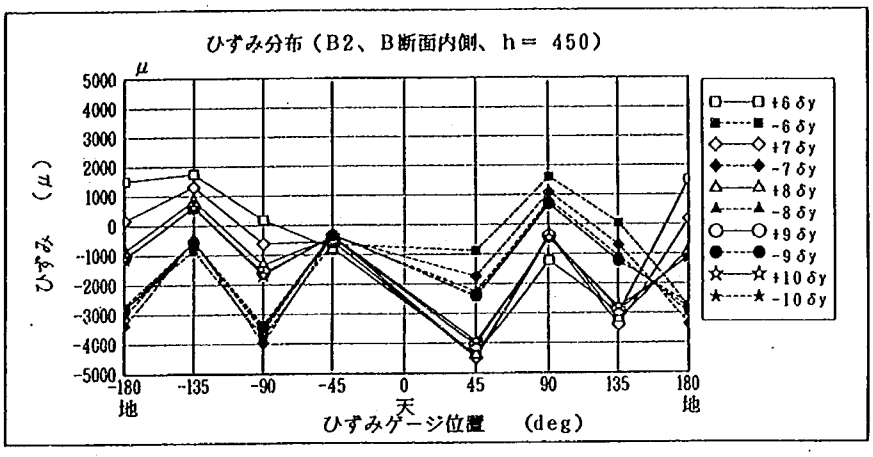


図-3.2.7(1)　ひずみ分布(B２，最大荷重を超えた点：＋5δy)





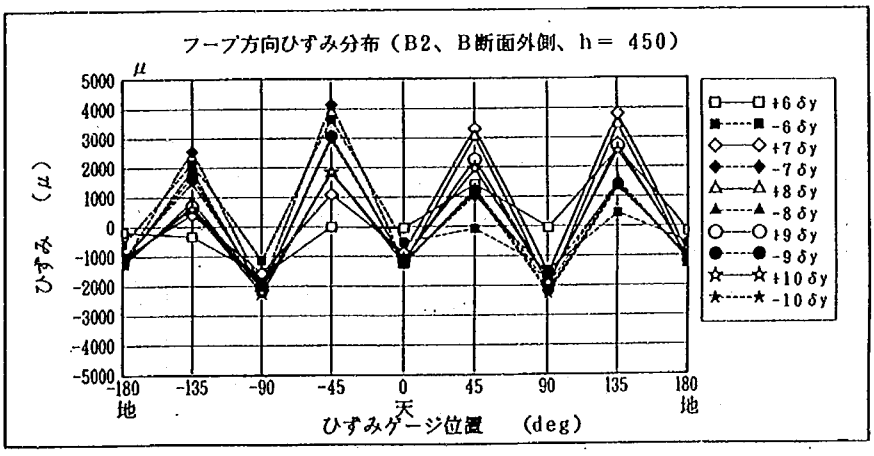
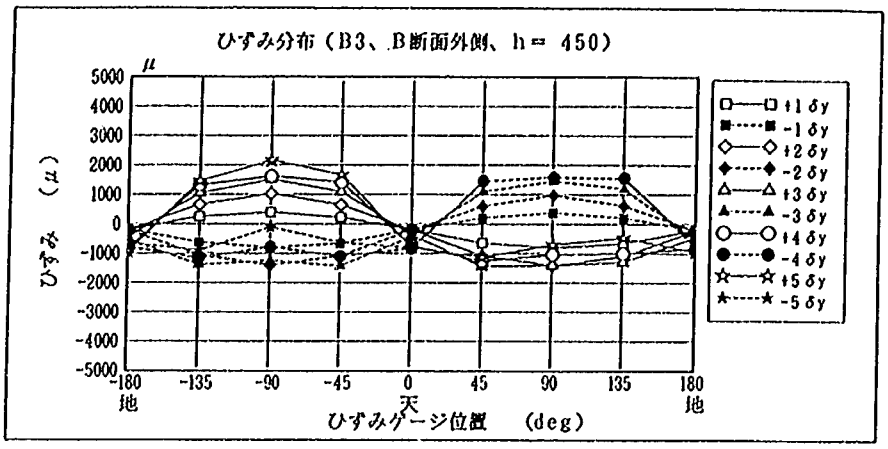
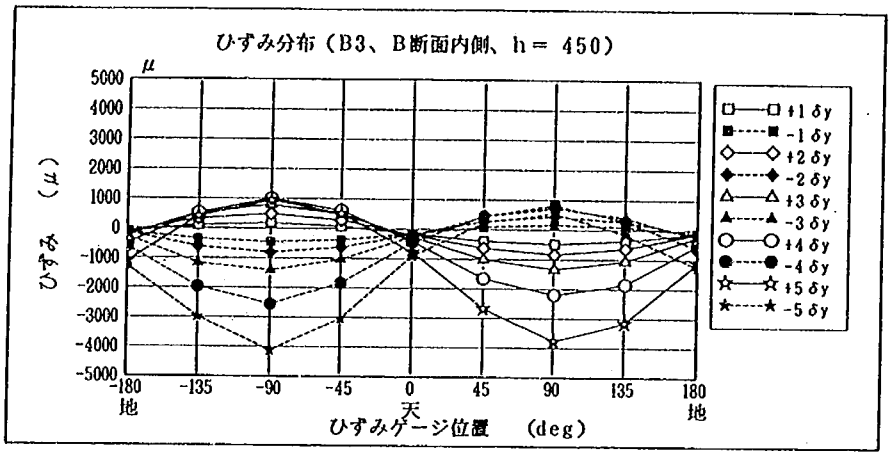


図-3.2.7(1)　ひずみ分布（Ｂ２，最大荷重を超えた点：＋５δｙ）（つづき）





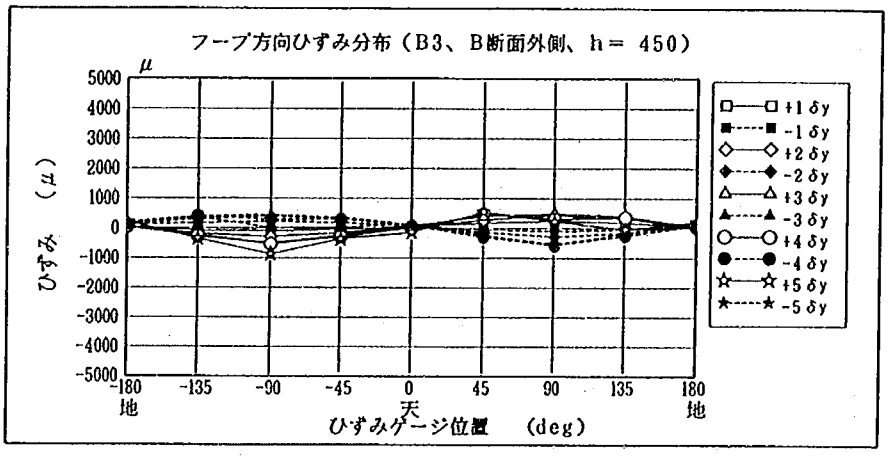
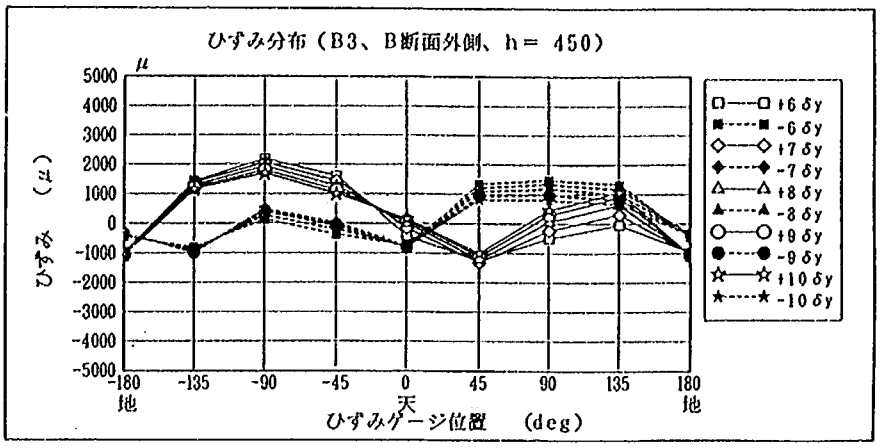
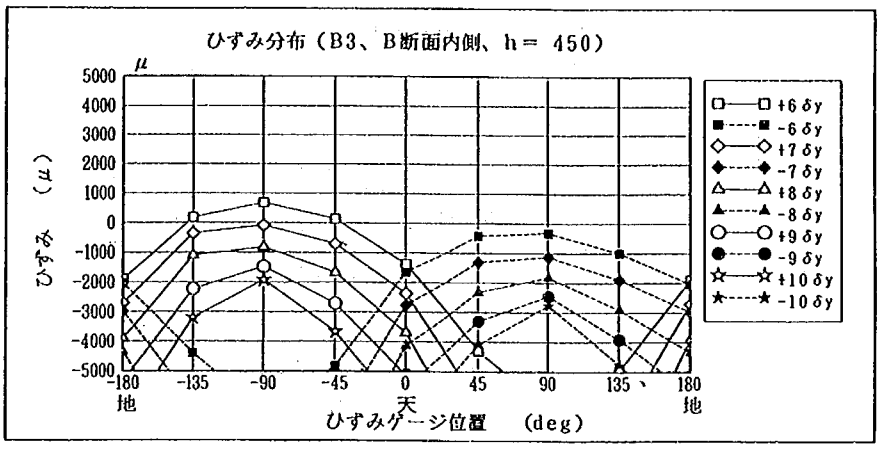


図-3.2.7(2)　ひずみ分布（Ｂ３，最大荷重を超えた点：＋９δｙ）





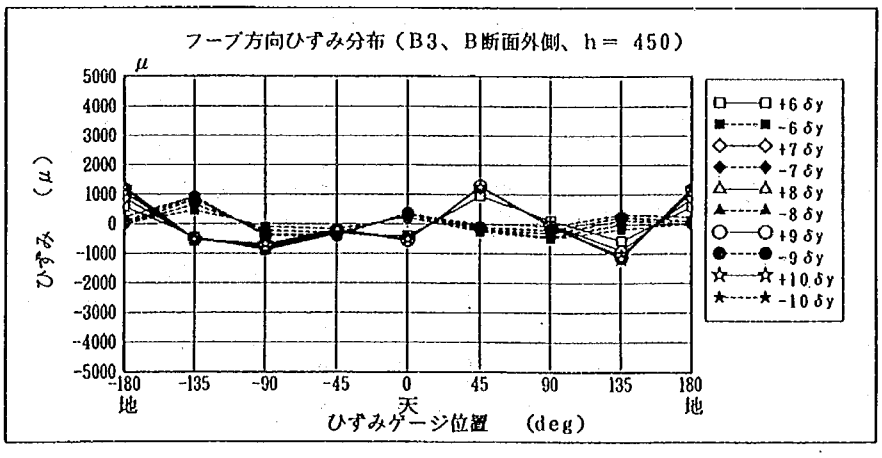
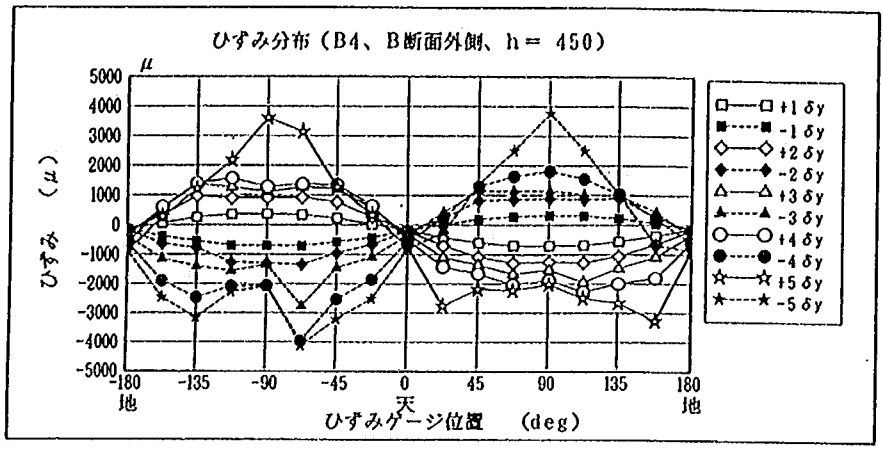
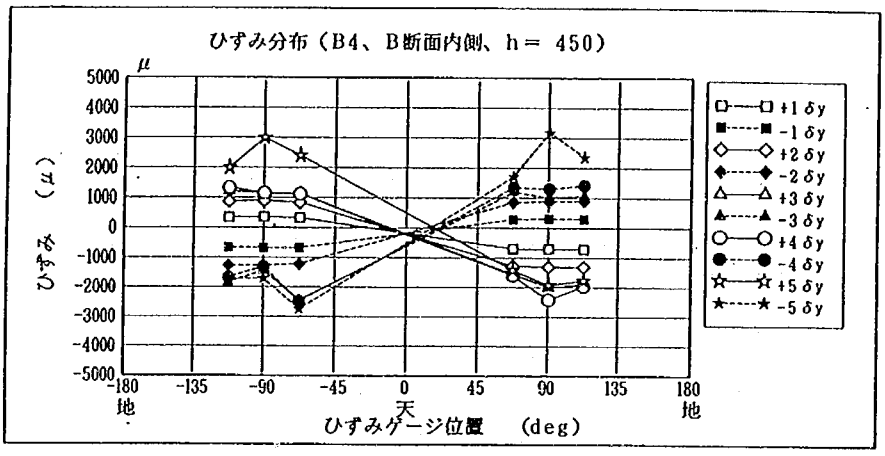


図-3.2.7(2)　ひずみ分布(Ｂ３，最大荷重を超えた点：＋９δｙ)　(つづき)





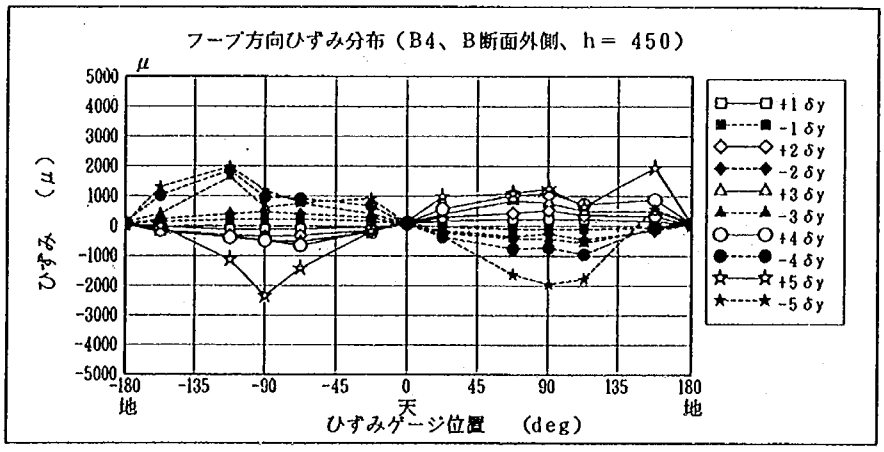
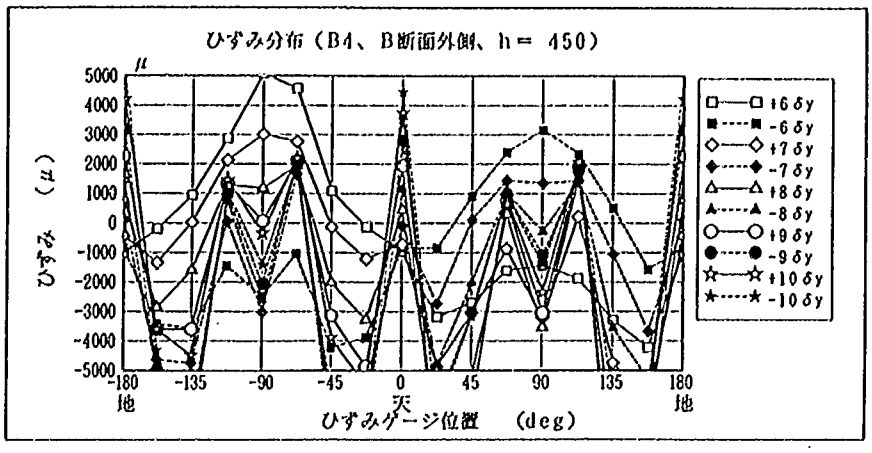
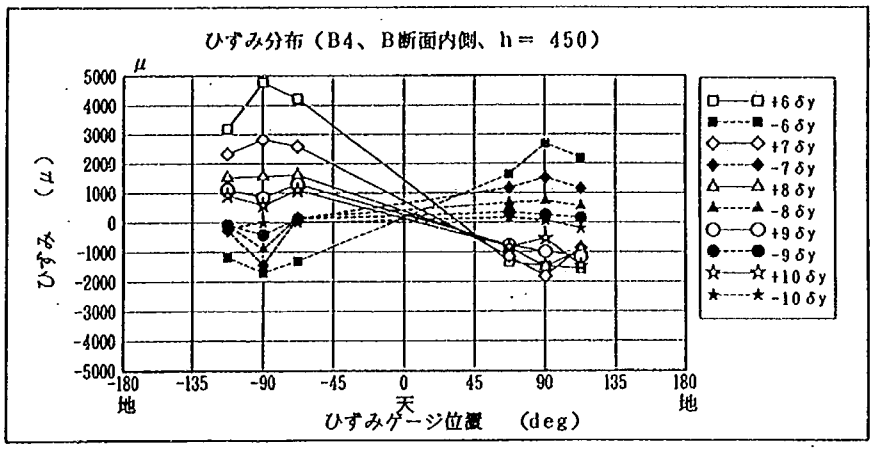


図-3.2.7(3)　ひずみ分布（Ｂ４，最大荷重を超えた点：+5δy）





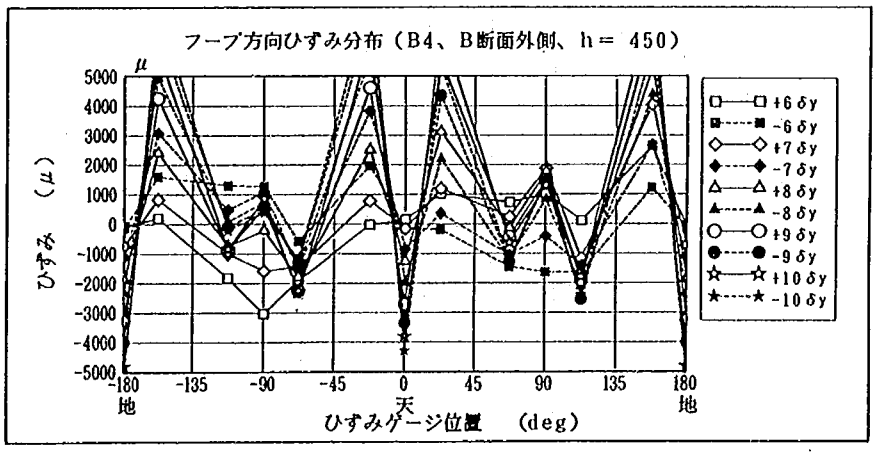
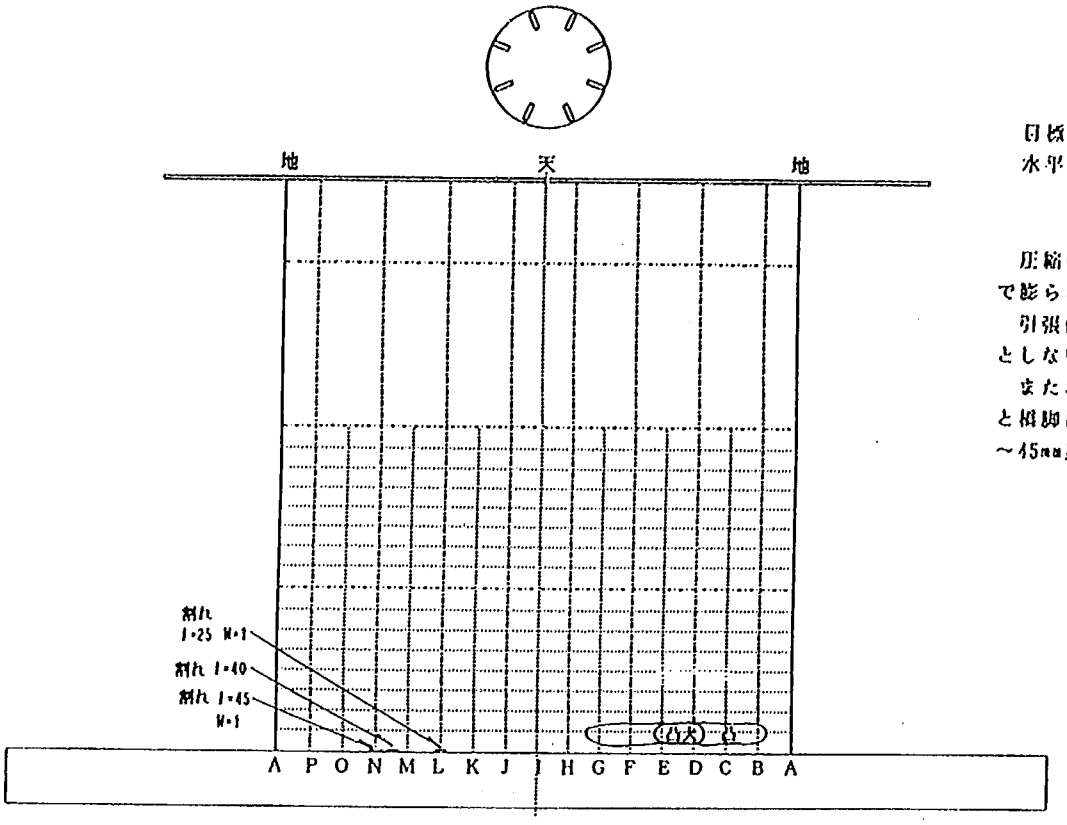


図-3.2.7(3)　ひずみ分布（B４，最大荷重を超えた点：＋5δy）（つづき）



5δy

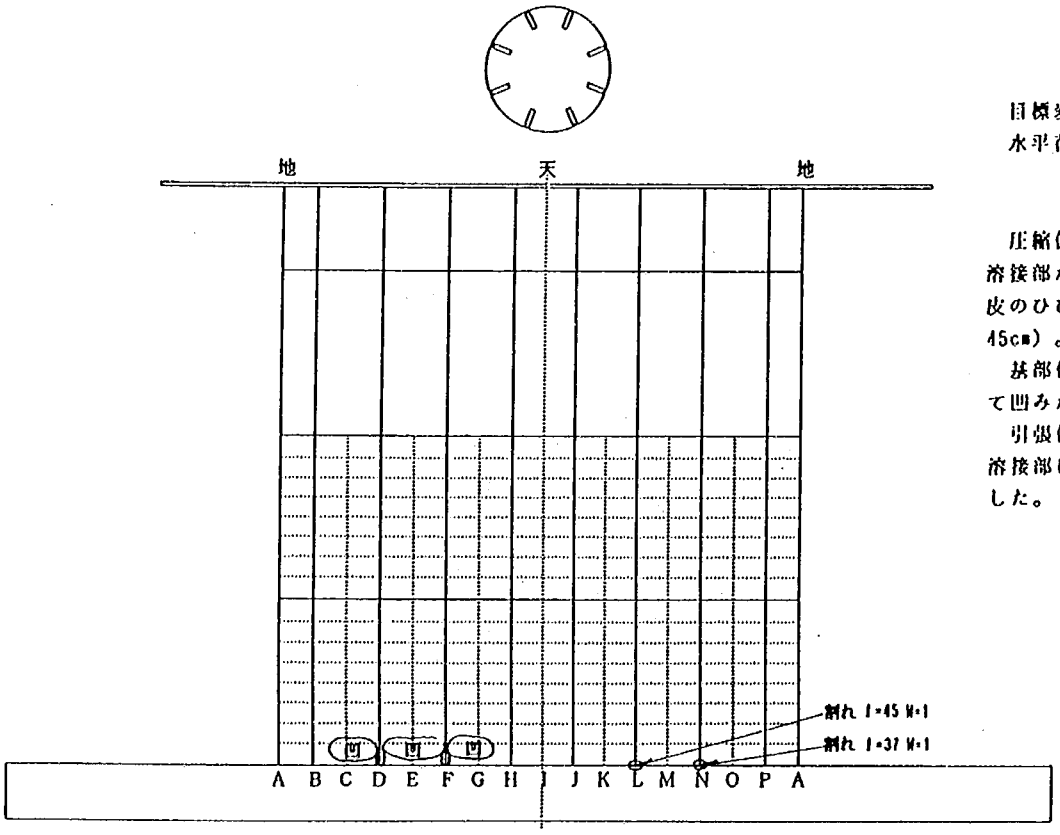
目標変位	47.50mm
水平荷重	69.7ton

圧縮側が一目で判る程度にまで膨らみが進んできた。

引張側の凹凸は戻って、判然としない。

また、引張側の基部プレートと橋脚母材との溶接境界部で25～45mm長の割れが発生した。

(a)外　面



5δy

目標変位	47.50mm
水平荷重	69.7ton

圧縮側縦リブD、Fと母材の溶接部からコバ面に向かって黒皮のひび割れが広がった（長さ45cm）。

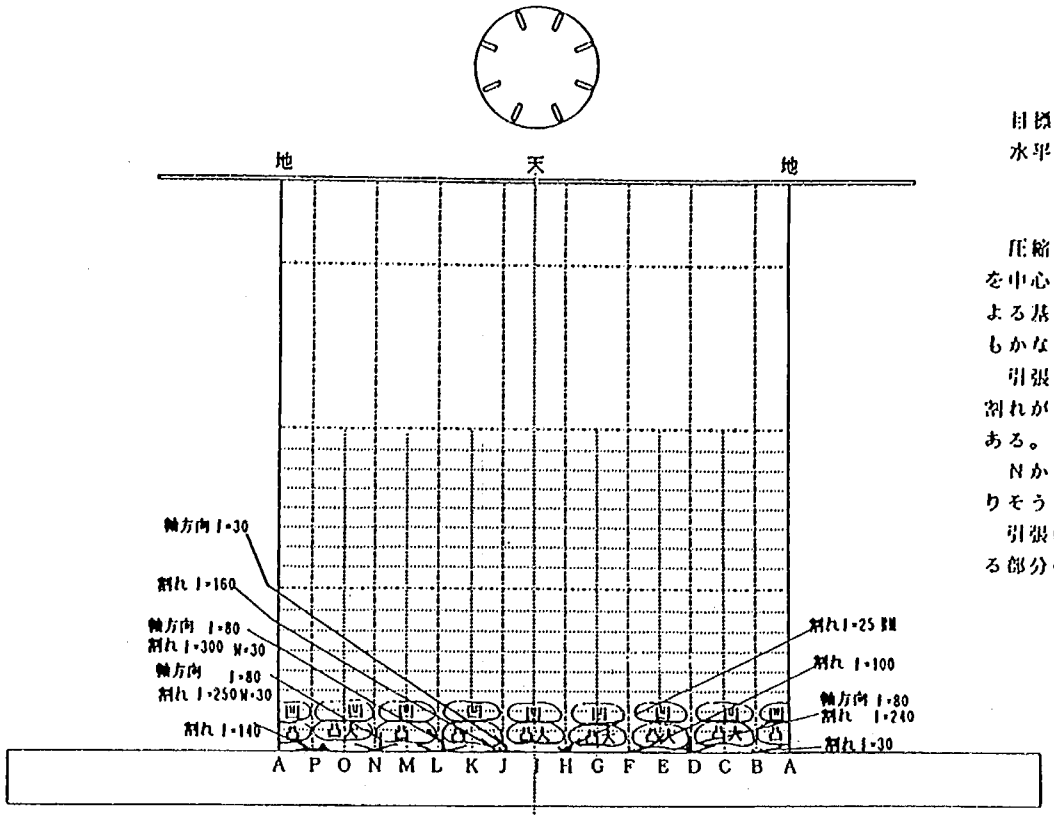
基部付近のB－H断面にかけて凹みが大きい。

引張側縦リブL、Nと母材の溶接部に幅約1mmの割れが発生した。

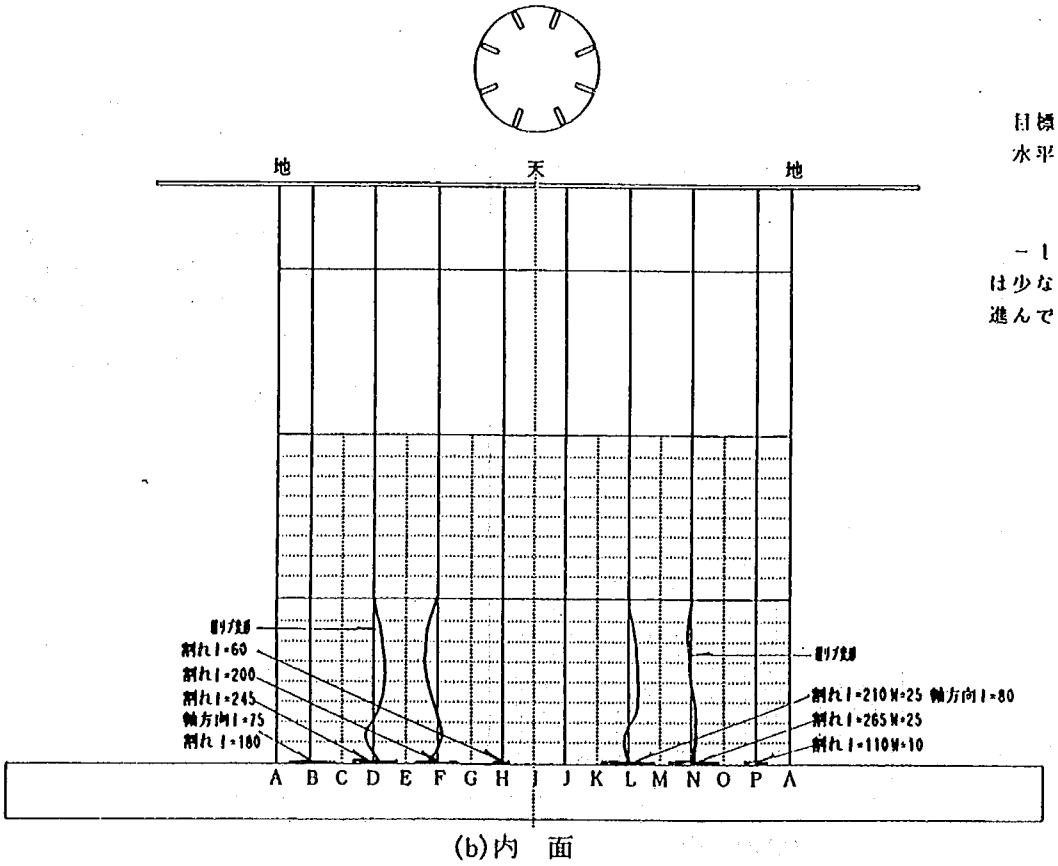
(b)内　面

(ｉ)最大荷重を超えた点

図-3.2.8(1)　供試体の変形(Ｂ２)



(a)外　面



(b)内　面

(ii)実験終了時付近

図-3.2.8(1)　供試体の変形(B 2)（つづき）

1 3 δ y

目標変位　123.50mm
水平荷重　31.7ton

圧縮側基部付近はD、F断面を中心に割れがひどく、座屈による基部プレートへの接触面積もかなり広い。

引張側はN、L断面を中心に割れがひどく、幅は約30mm程である。

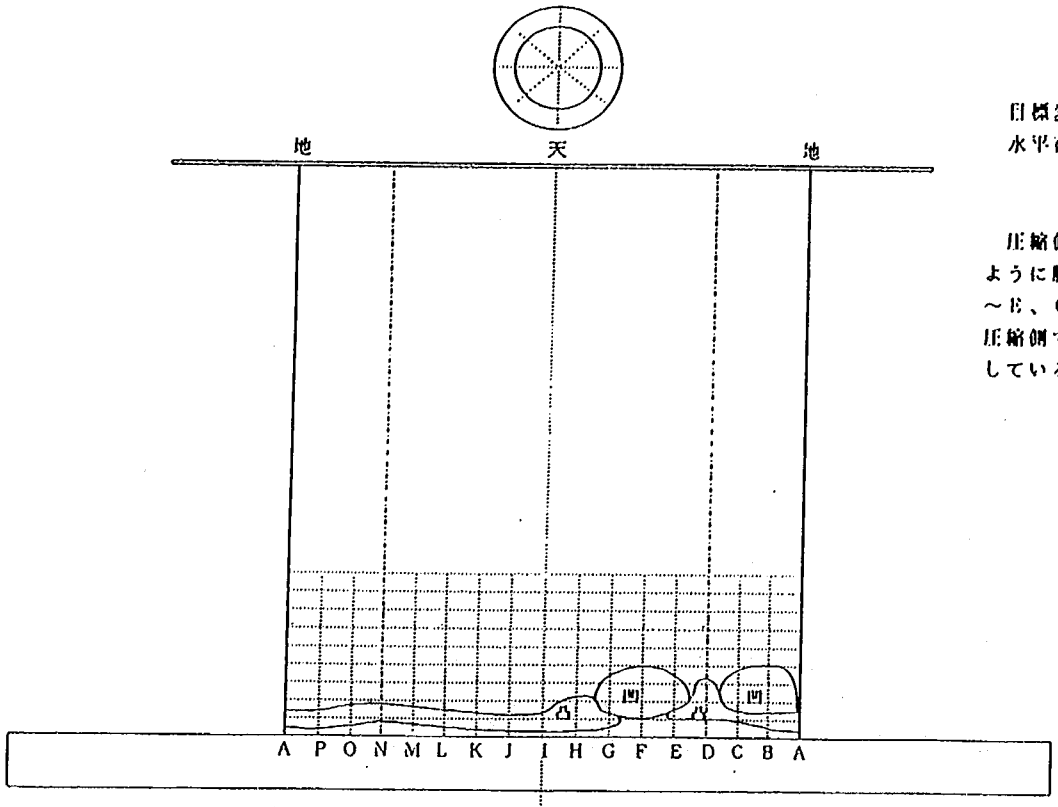
Nからしにかけては割れが繋りそうな状態である。

引張側の円周方向は割れている部分のほうが多い。

1 3 δ y

目標変位　123.50mm
水平荷重　31.7ton

－12δy同様、新しい変化は少なく、割れとリブの変形が進んでいくだけである。

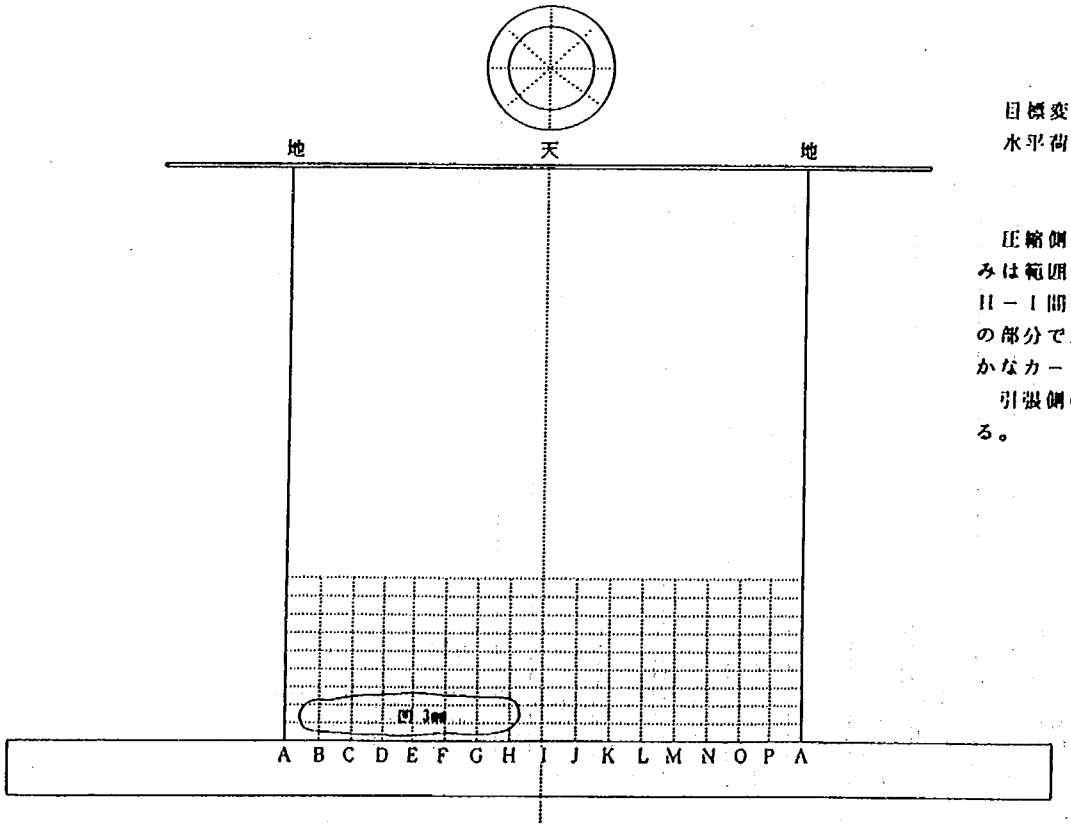


9δy

目標変位　85.50mm
水平荷重　78.7ton

圧縮側のH、D断面は尖ったように膨らみ、それを挟んだG～E、C～A間は大きく凹み、圧縮側では四角形の断面形状をしている。

(a)外　面



9δy

目標変位　85.50mm
水平荷重　78.7ton

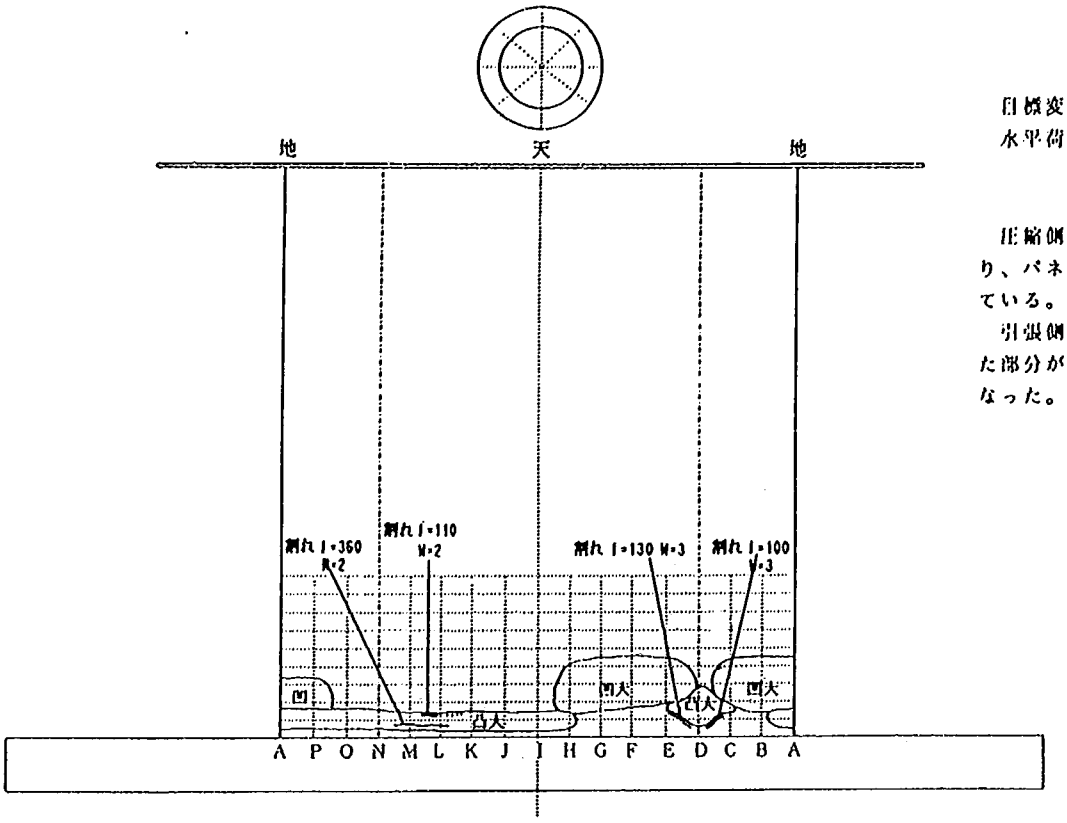
圧縮側パネルの外側への膨らみは範囲を広げ、A－B間からH－I間の基部から5cm ～25cmの部分で最大を 3mmとする緩やかなカーブを描いている。

引張側の変形は元に戻っている。

(b)内　面

(i)最大荷重を超えた点

図-3.2.8(2)　供試体の変形(B3)



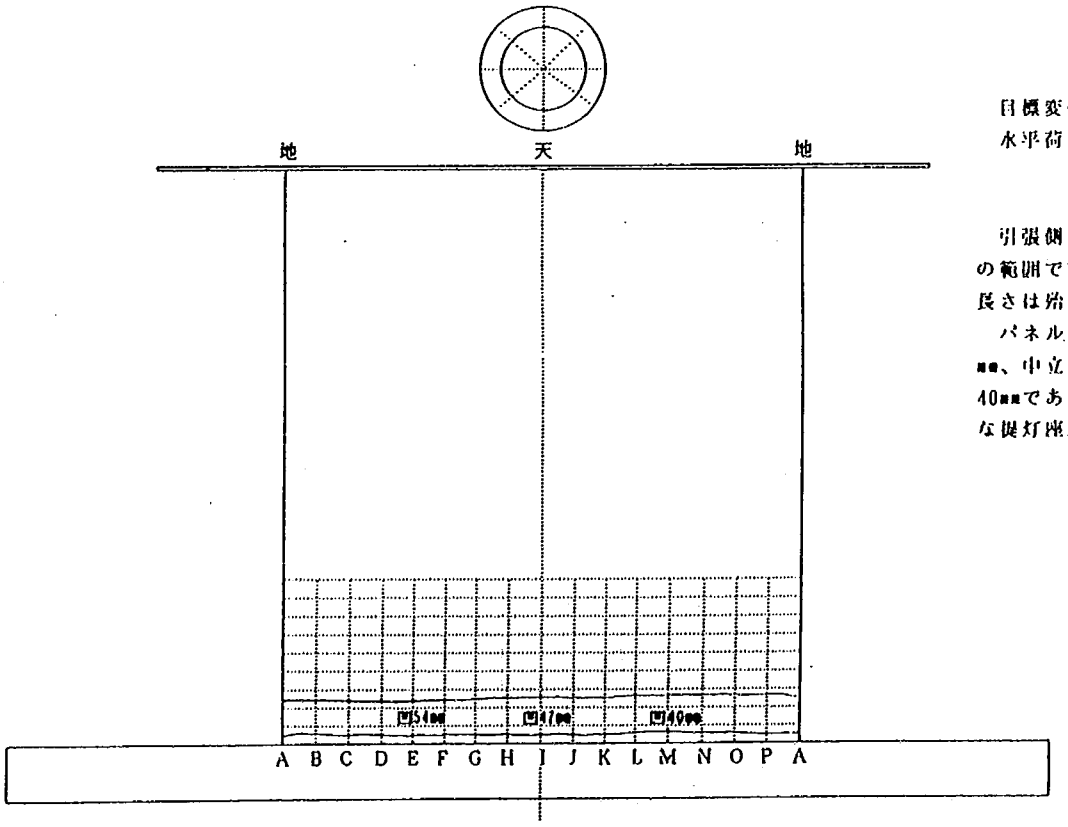
(a)外　面

1 8 δ y

目標変位　　171.00㎜
水平荷重　　29.0ton

圧縮側では変形量が大きくなり、パネルは複雑な変形を見せている。

引張側では先にひび割れていた部分が 2㎜幅程の長い割れとなった。



(b)内　面

1 8 δ y

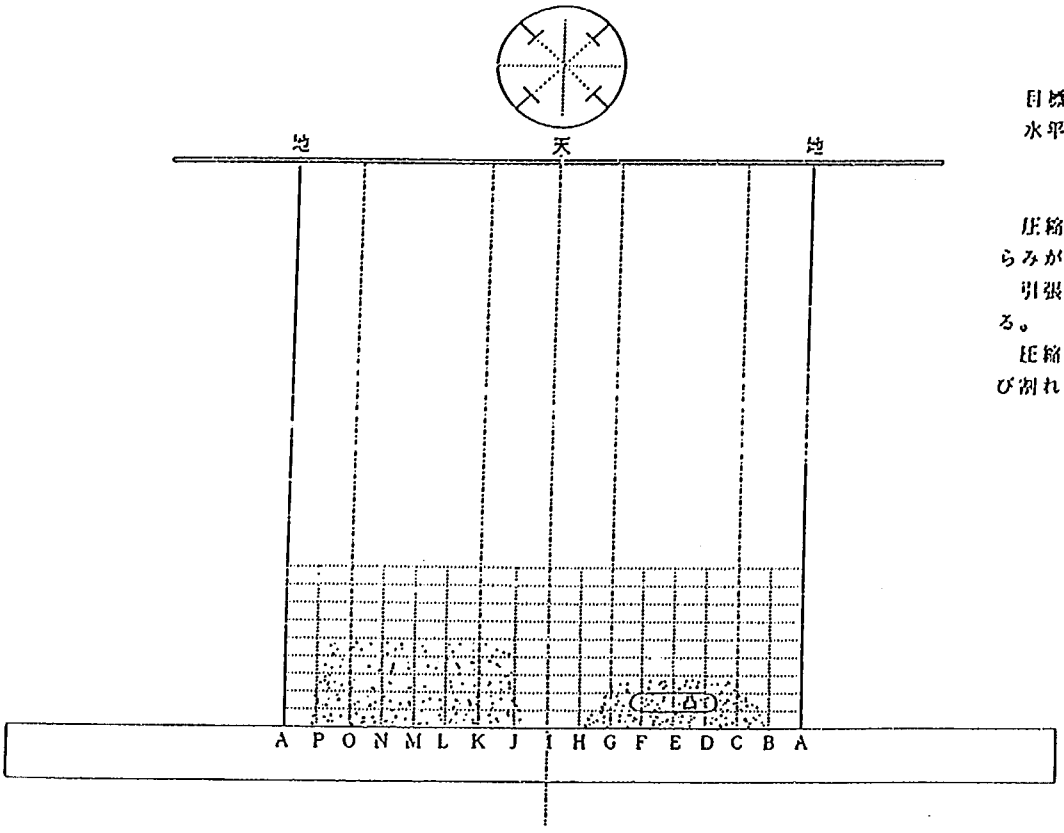
目標変位　　171.00㎜
水平荷重　　29.0ton

引張側K－L間からN－O間の範囲で微細な割れが発生した。長さは殆どが10㎜前後である。

パネルの変形量は圧縮側で54㎜、中立軸上で47㎜、引張側で40㎜であり、外面とは違う綺麗な提灯座屈が見られる。

(ii)実験終了時付近

図-3.2.8(2)　供試体の変形(B 3)（つづき）

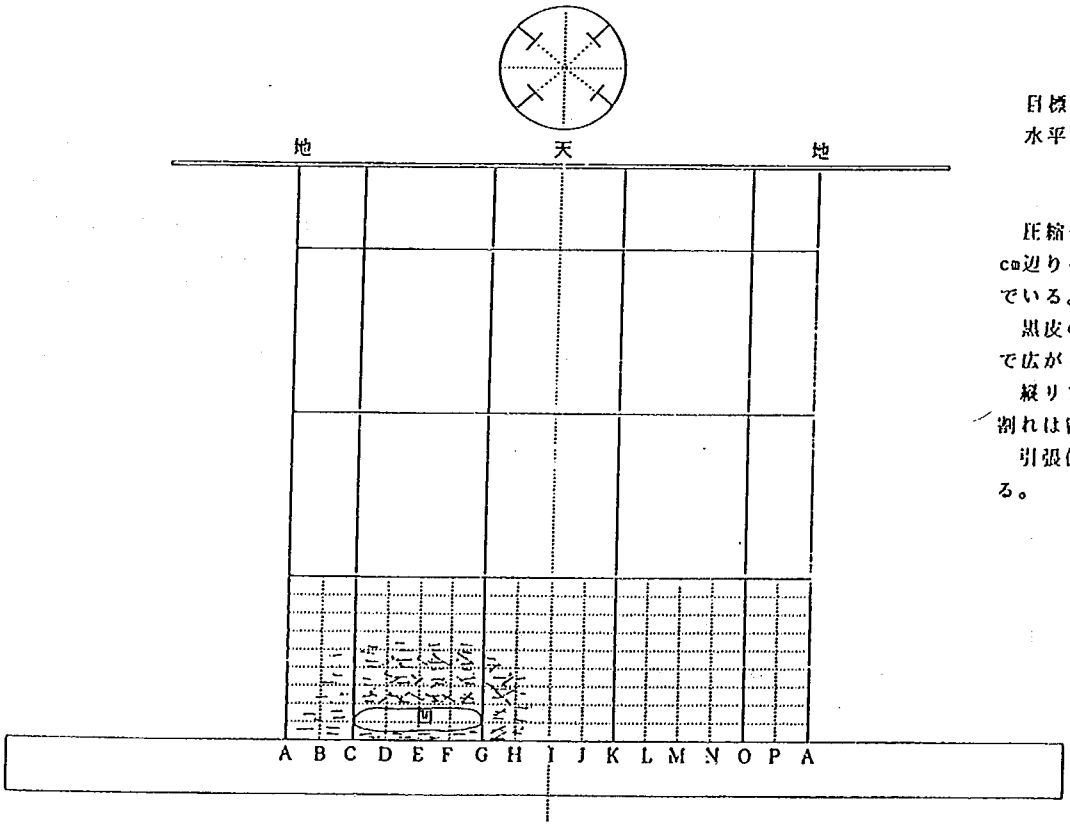


5 δ y

目標変位	47.50㎜
水平荷重	71.6ton

圧縮側基部付近のC～Cで膨らみが見られる。
引張側の変形は元に戻っている。
圧縮、引張側共に、黒皮のひび割れが点状に広がっている。

(a)外　面



5 δ y

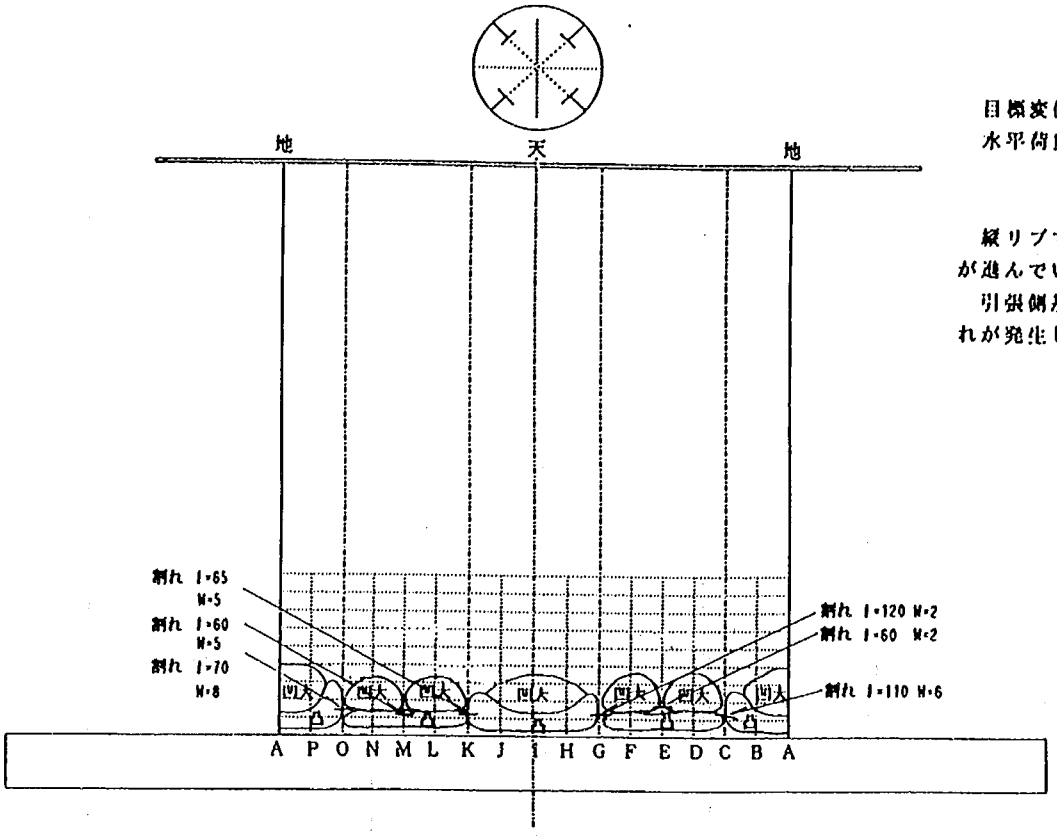
目標変位	47.50㎜
水平荷重	71.6ton

圧縮側C～G間の基部から14㎝辺りをピークに外面にはらんでいる。
黒皮のひび割れは60㎝辺りまで広がっている。
縦リブフランジの黒皮のひび割れは密になっている。
引張側の変形は元に戻っている。

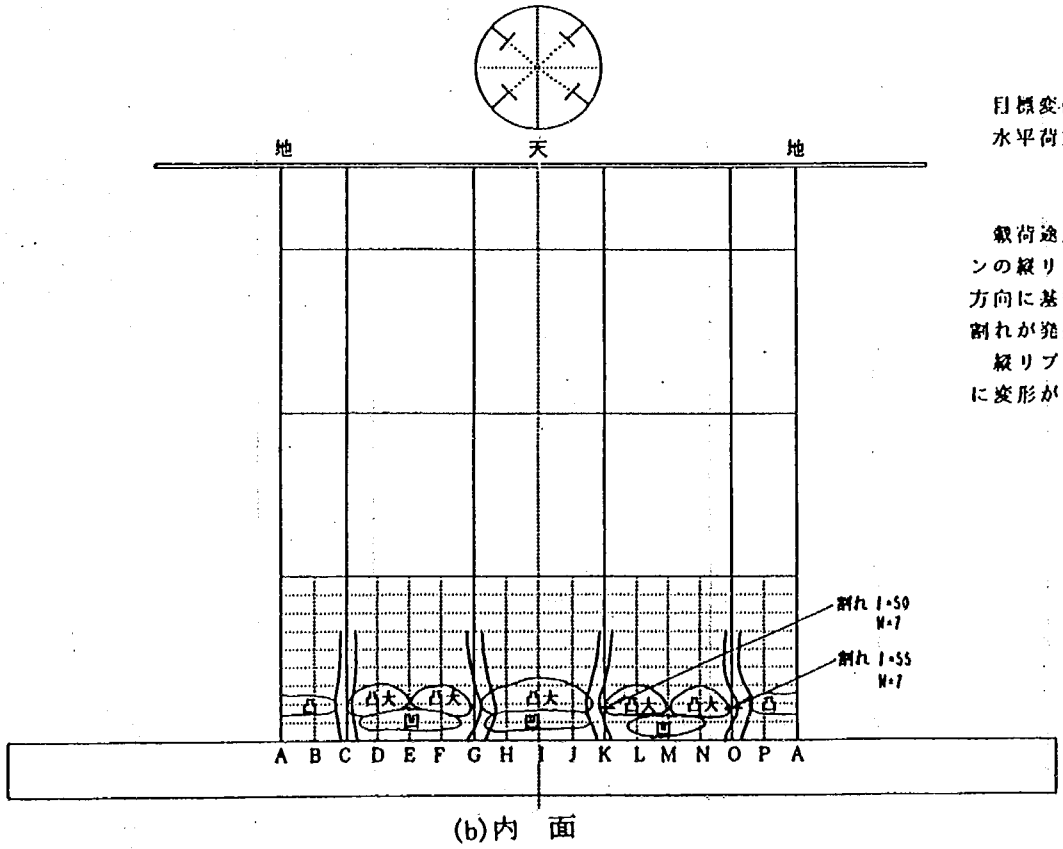
(b)内　面

(ｉ)最大荷重を超えた点

図-3.2.8(3)　供試体の変形(B４)



(a)外　面



(b)内　面

（ii）実験終了時付近

図-3.2.8(3)　供試体の変形（B４）（つづき）

１２δｙ

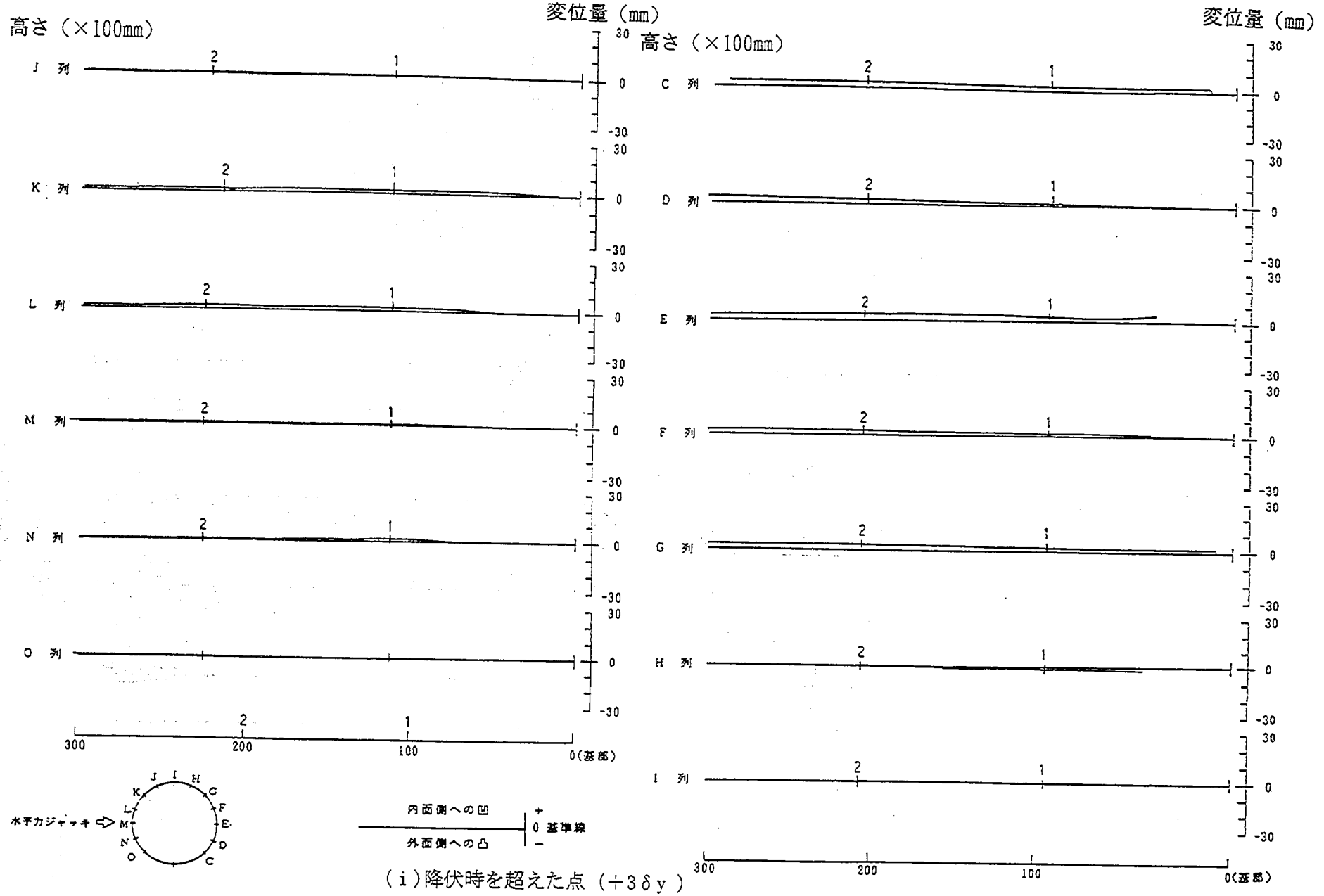
目標変位　　114.00mm
水平荷重　　16.3ton

縦リブで区切れた状態の変形が進んでいる。
引張側基部付近のＫ断面で割れが発生した。

１２δｙ

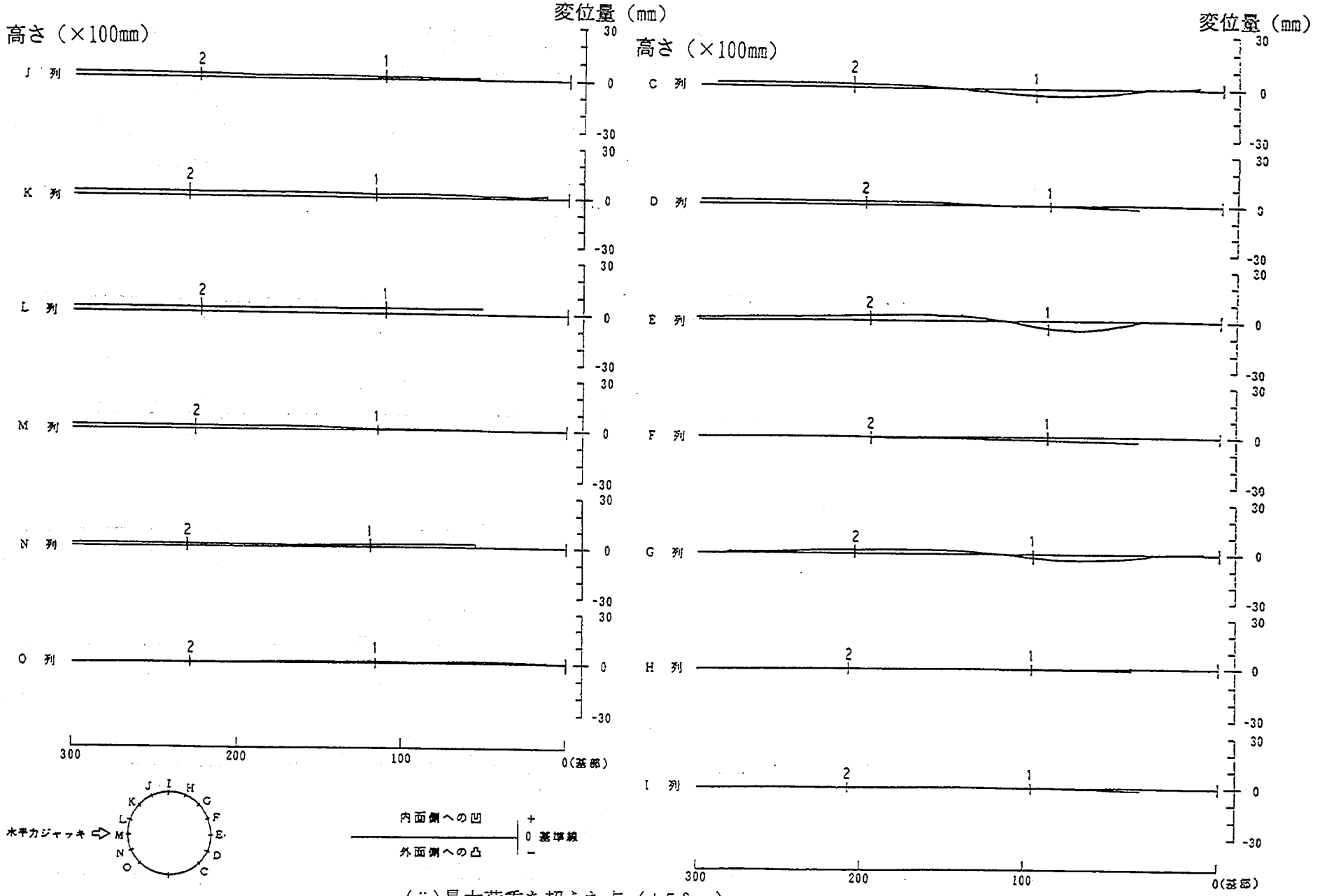
目標変位　　114.00mm
水平荷重　　16.3ton

載荷途上で音を出してＫラインの縦リブ溶接線上を跨いで周方向に基部から12cm程の位置に割れが発生した。
縦リブはウェブ、フランジ共に変形が著しい。



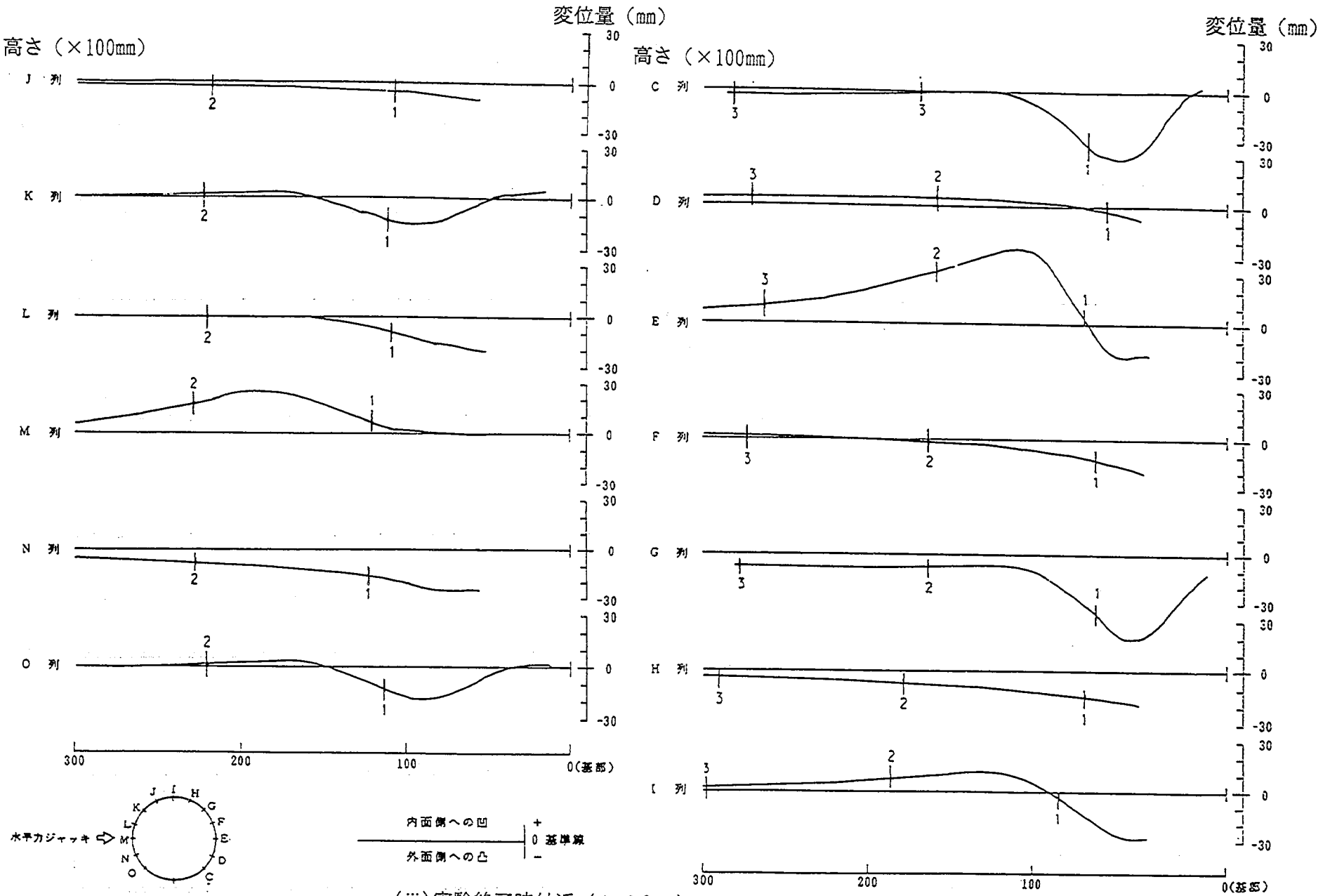
（ｉ）降伏時を超えた点（＋3δｙ）

図-3.2.9(1)　面外変位測定結果(Ｂ２)



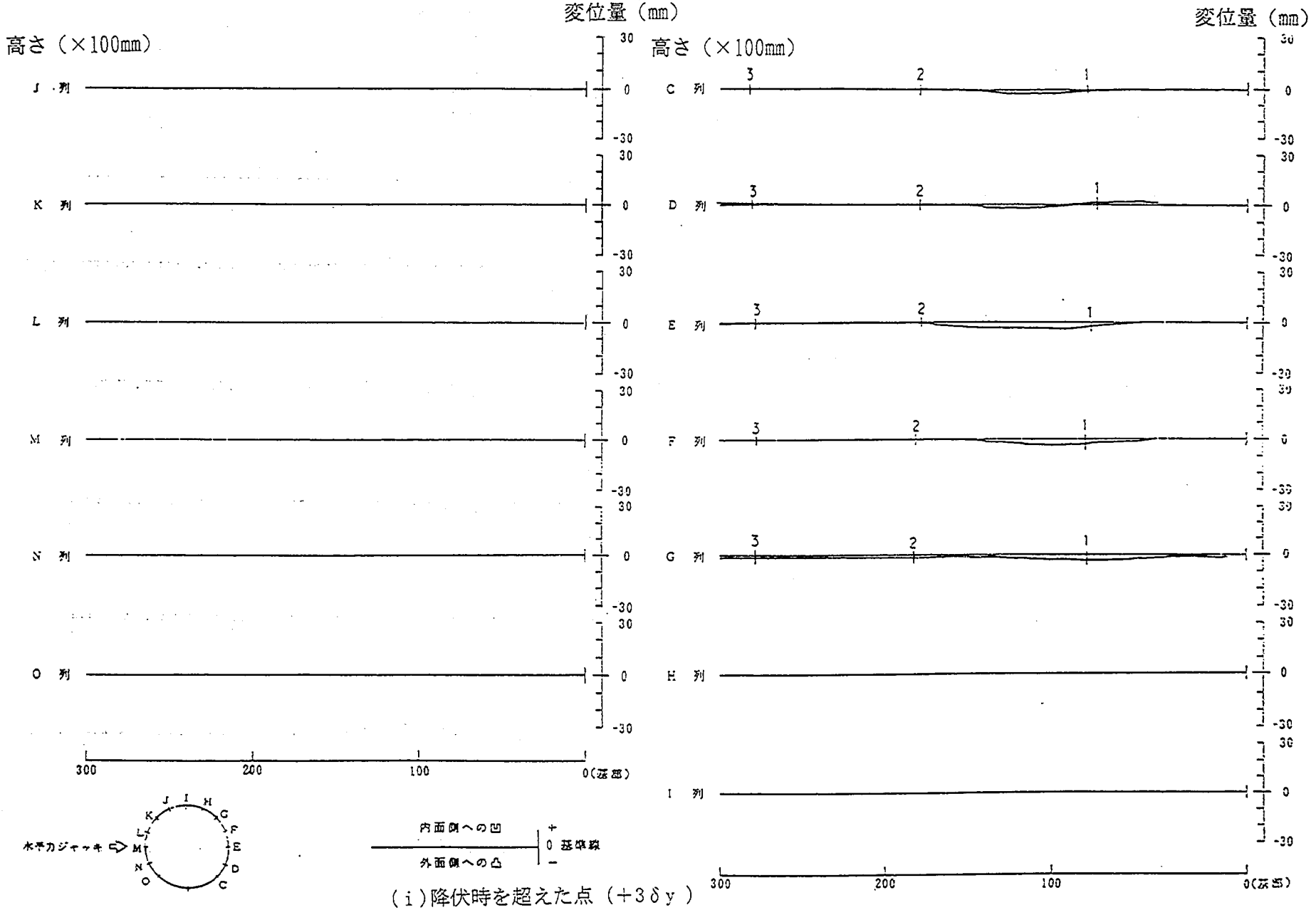
（ⅱ）最大荷重を超えた点（＋5δｙ）

図-3.2.9(1)　面外変位測定結果（Ｂ２）（つづき）



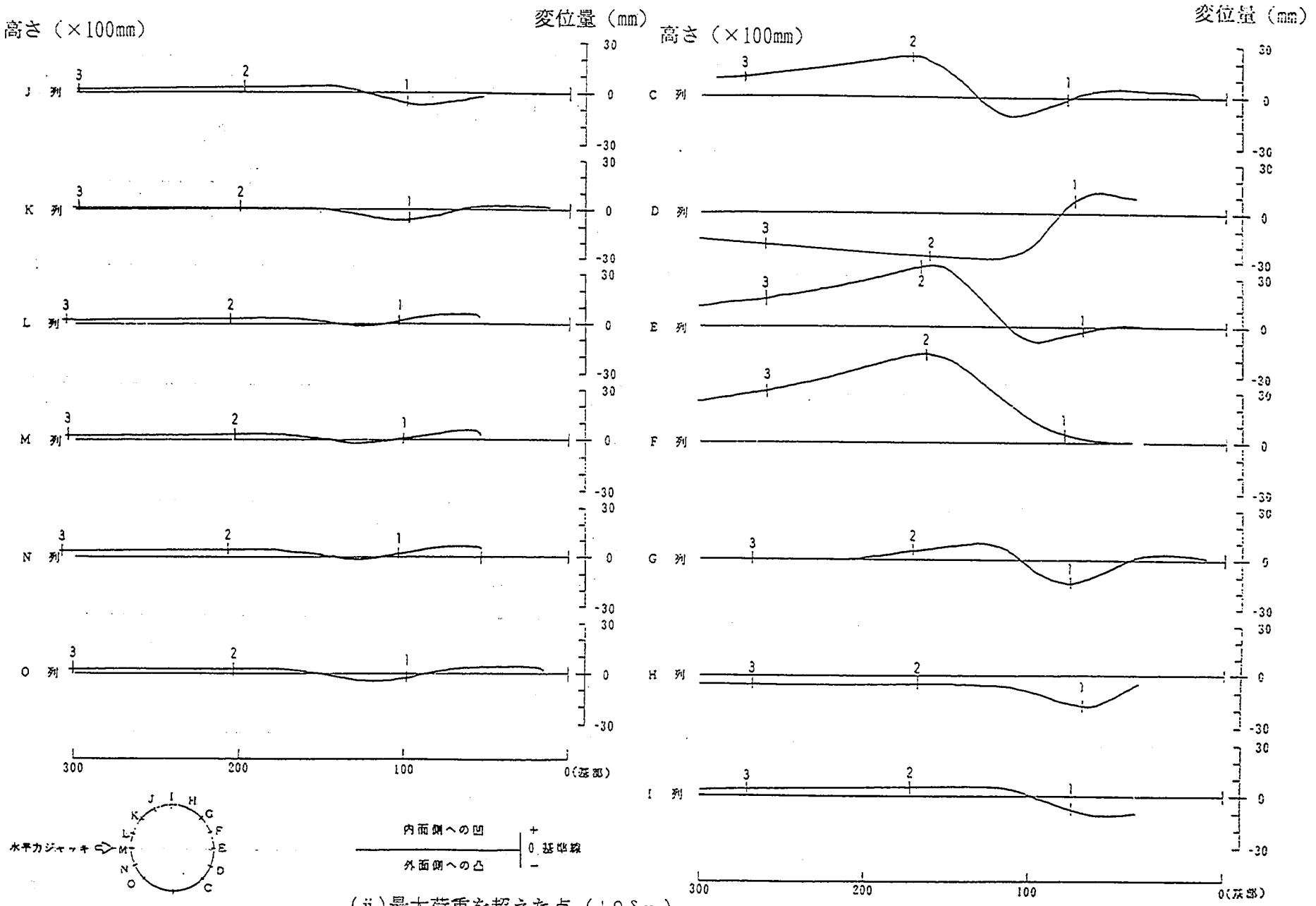
(iii)実験終了時付近（＋13δy）

図-3.2.9(1)　面外変位測定結果（B２）（つづき）



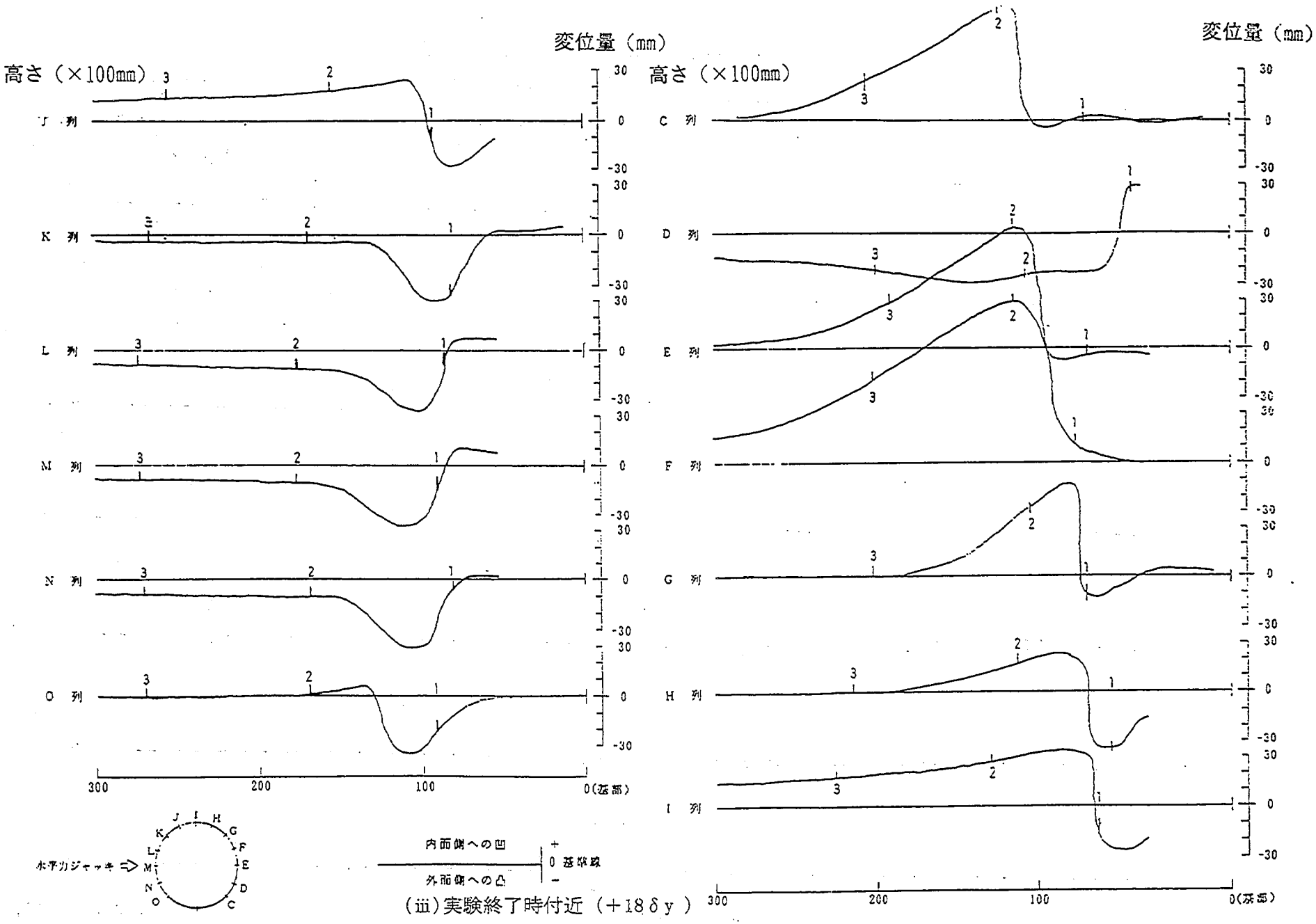
(i)降伏時を超えた点（+3δy）

図-3.2.9(2)　面外変位測定結果(B3)



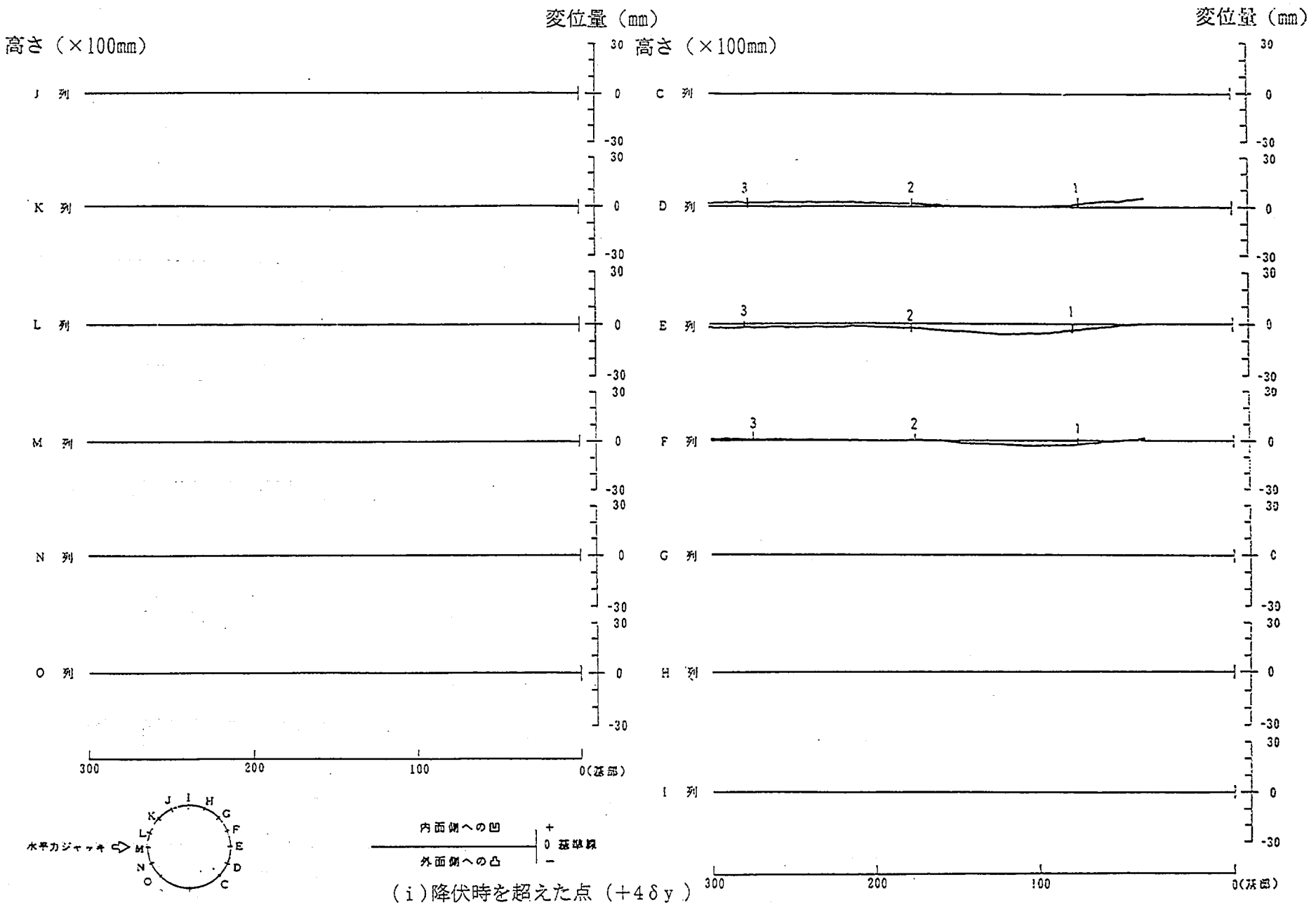
（ii）最大荷重を超えた点（＋9δy）

図-3.2.9(2)　面外変位測定結果（B３）（つづき）



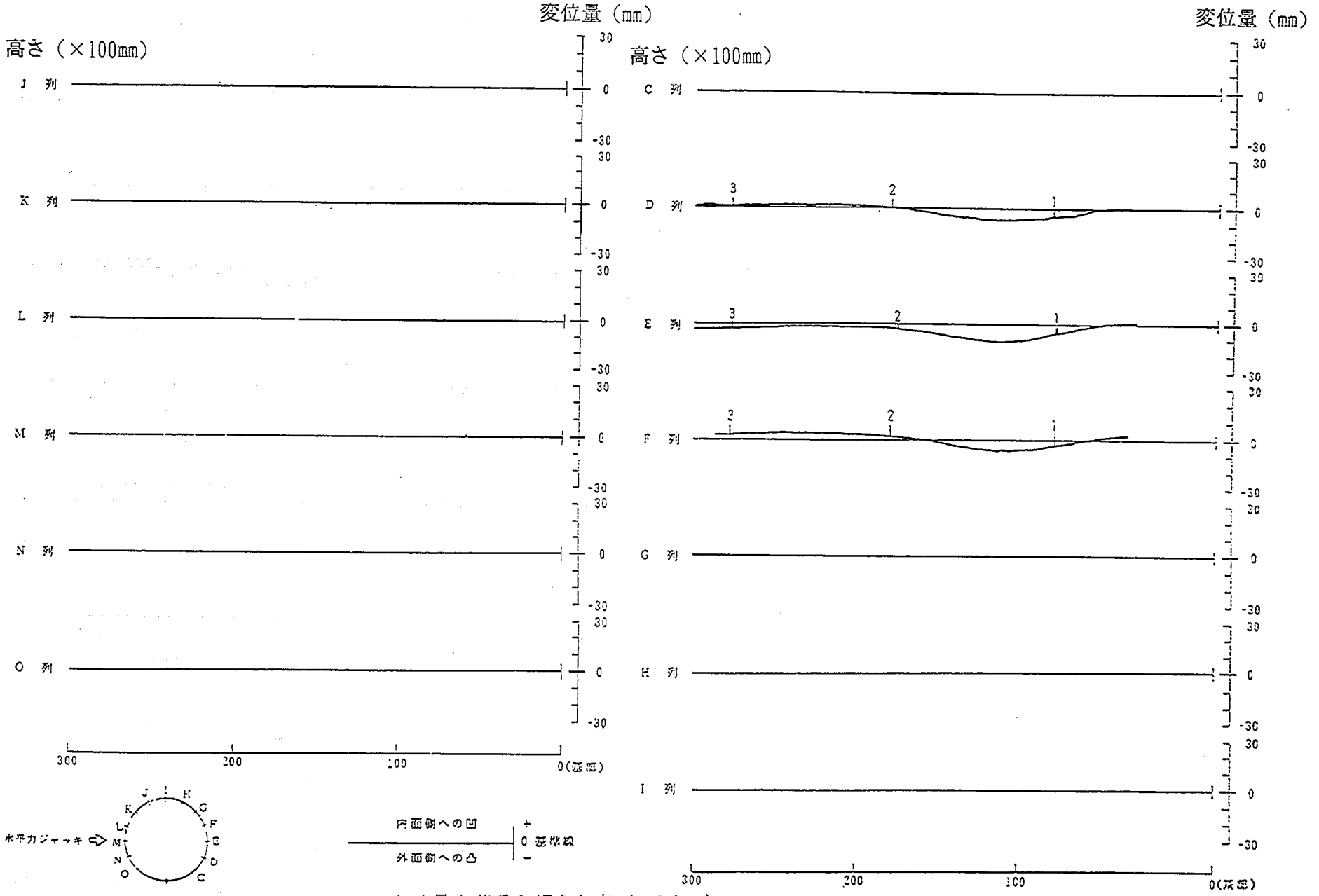
(iii)実験終了時付近（＋18δｙ）

図-3.2.9(2)　面外変位測定結果（Ｂ３）（つづき）



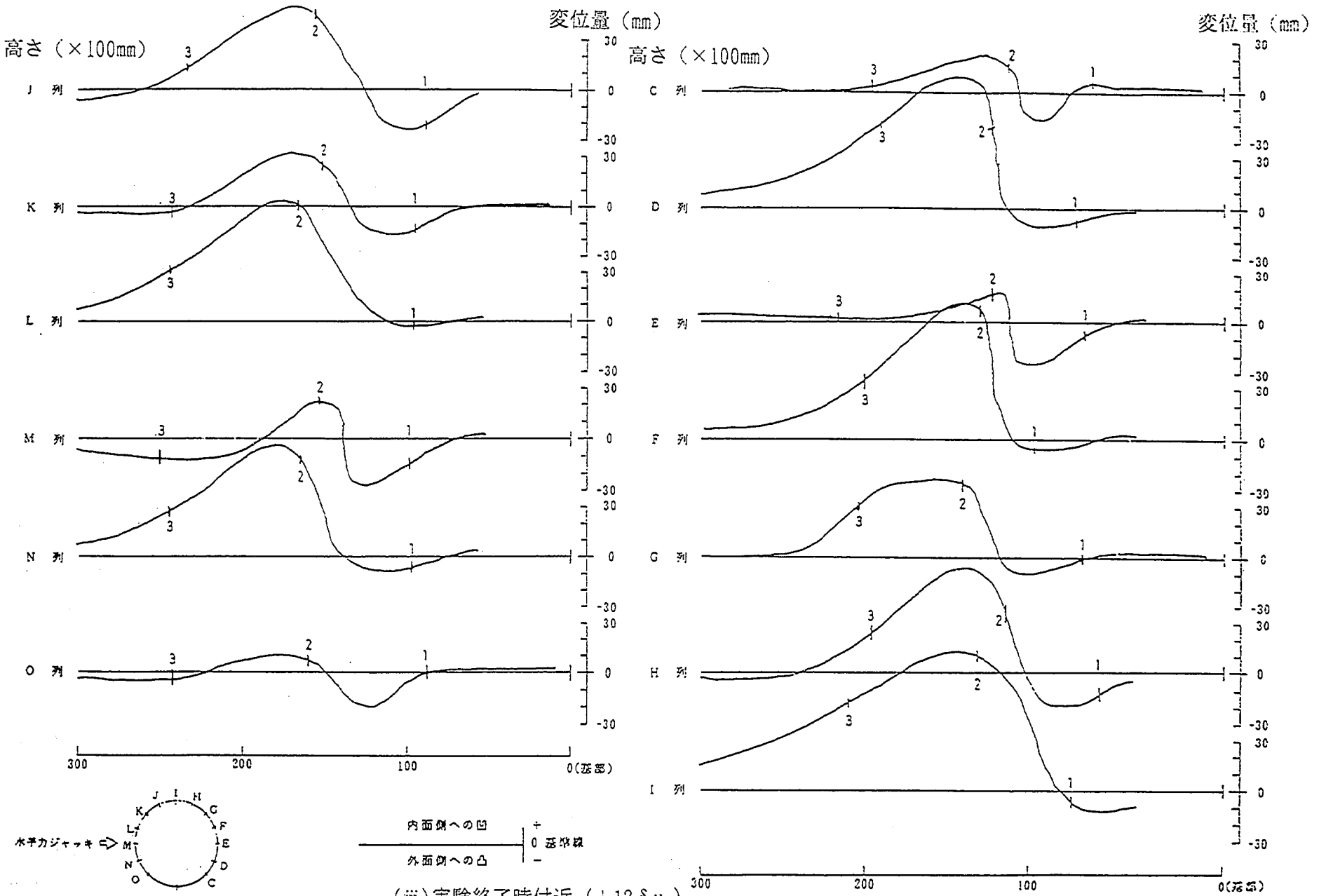
（ｉ）降伏時を超えた点（＋４δｙ）

図-3.2.9(3)　面外変位測定結果（Ｂ４）



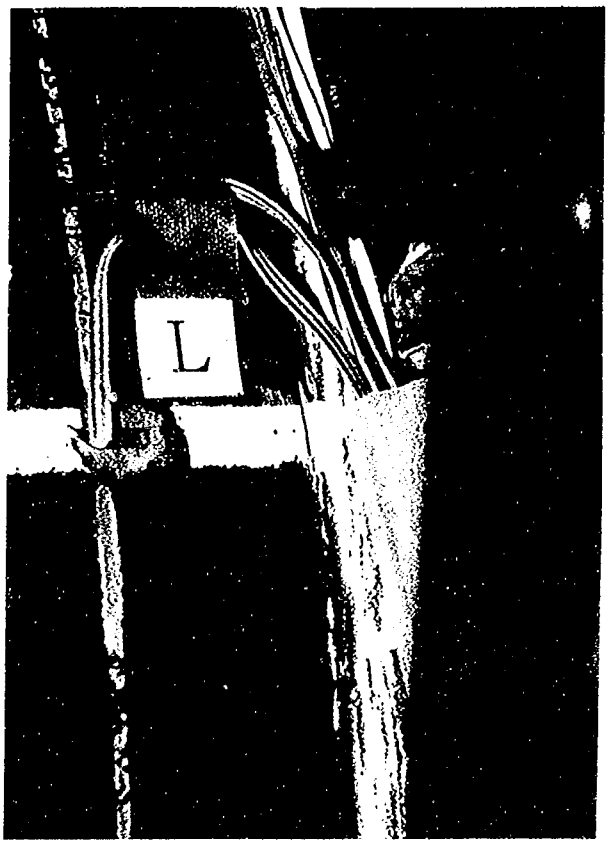
（ii）最大荷重を超えた点（＋5δy）

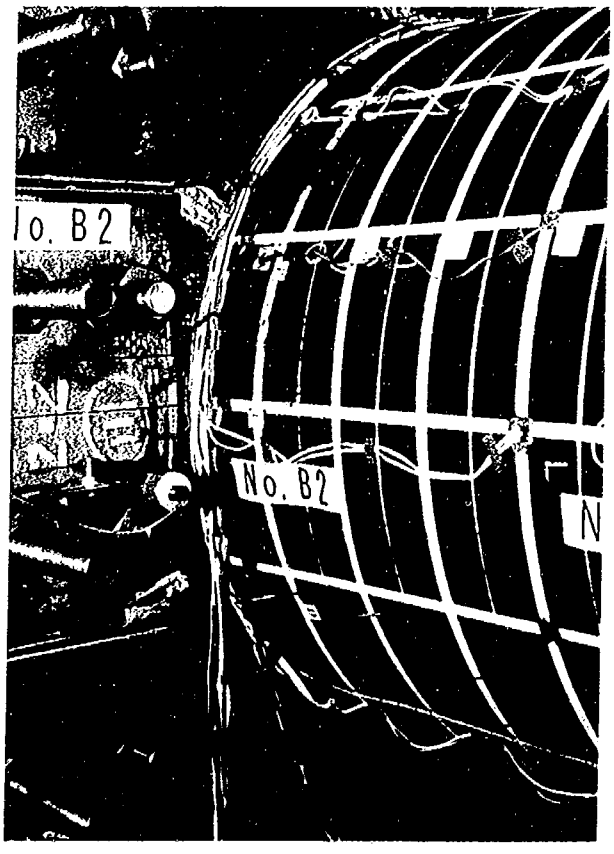
図-3.2.9(3)　面外変位測定結果（B４）（つづき）

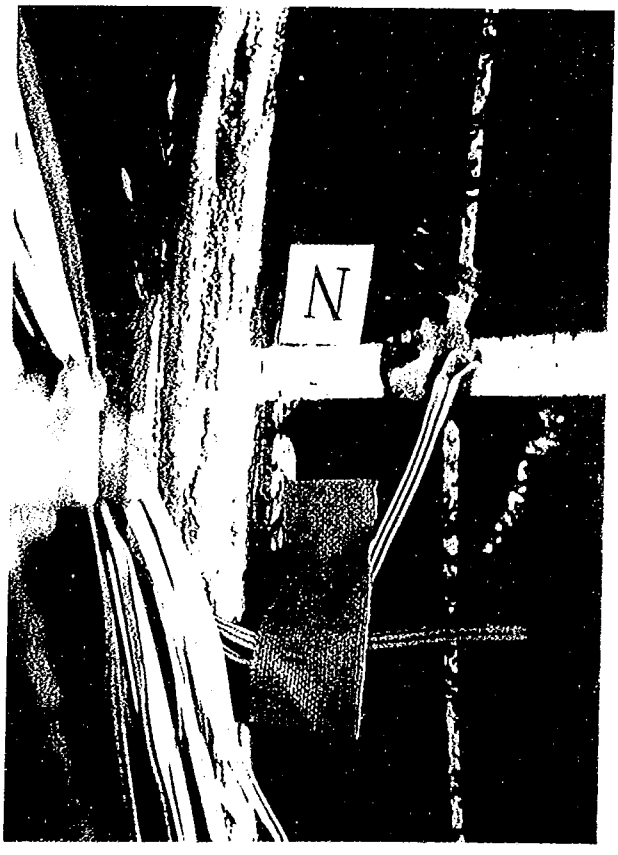


(iii)実験終了時付近（＋12δy）

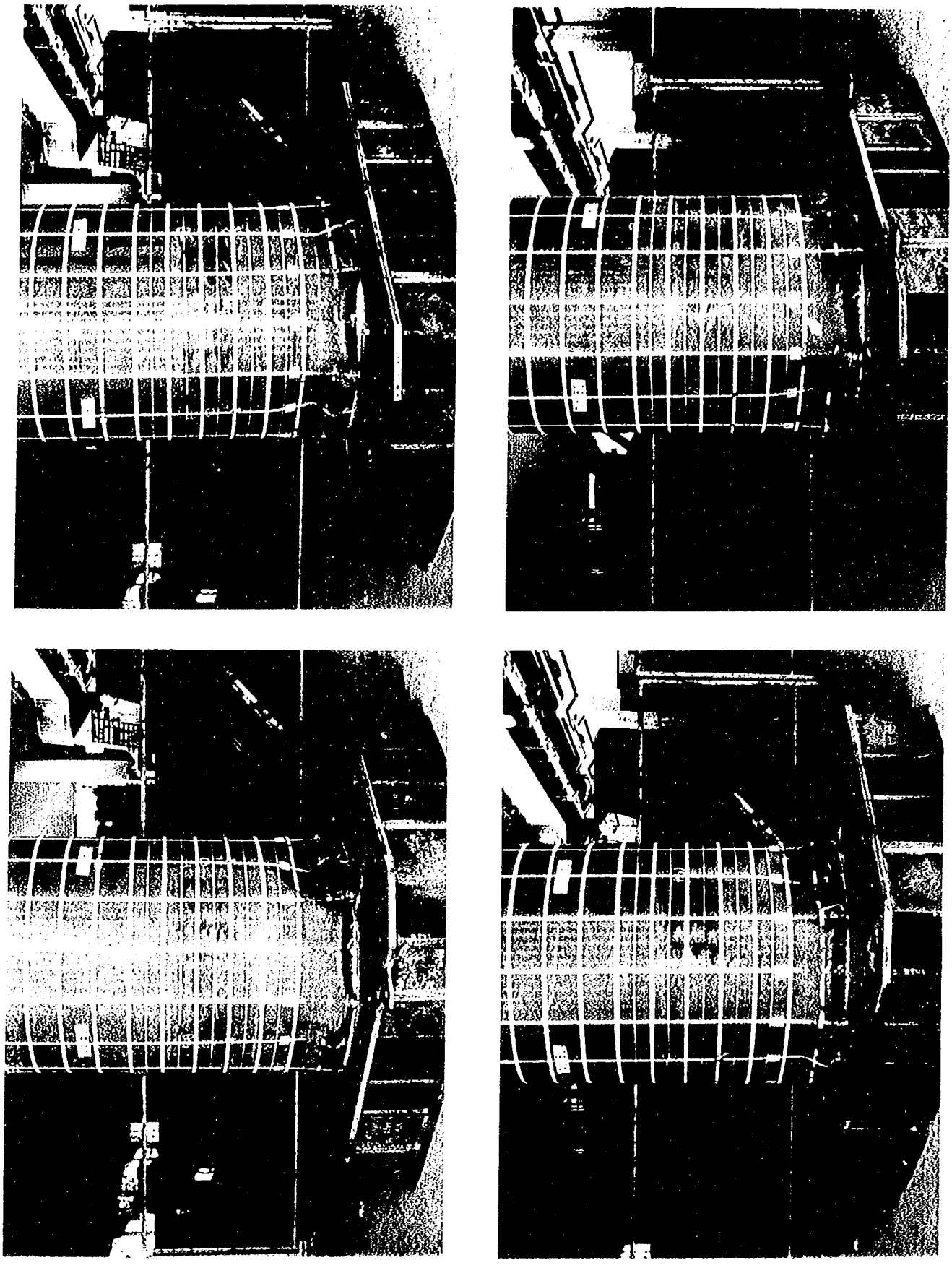
図-3.2.9(3)　面外変位測定結果（B４）（つづき）



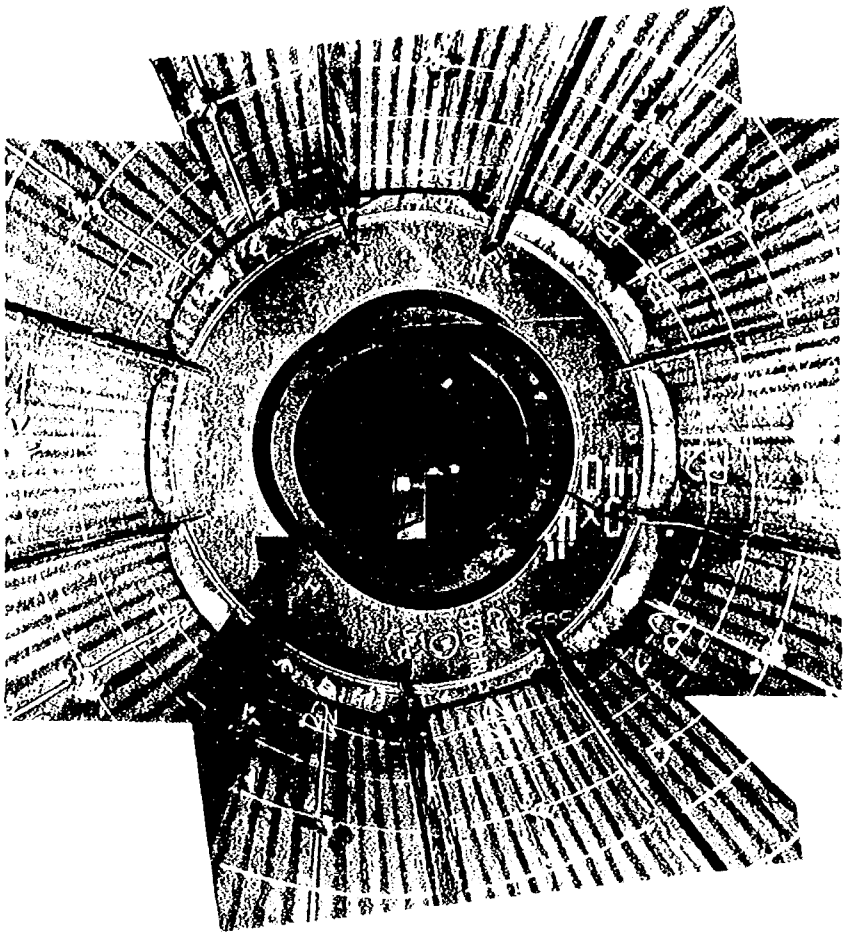




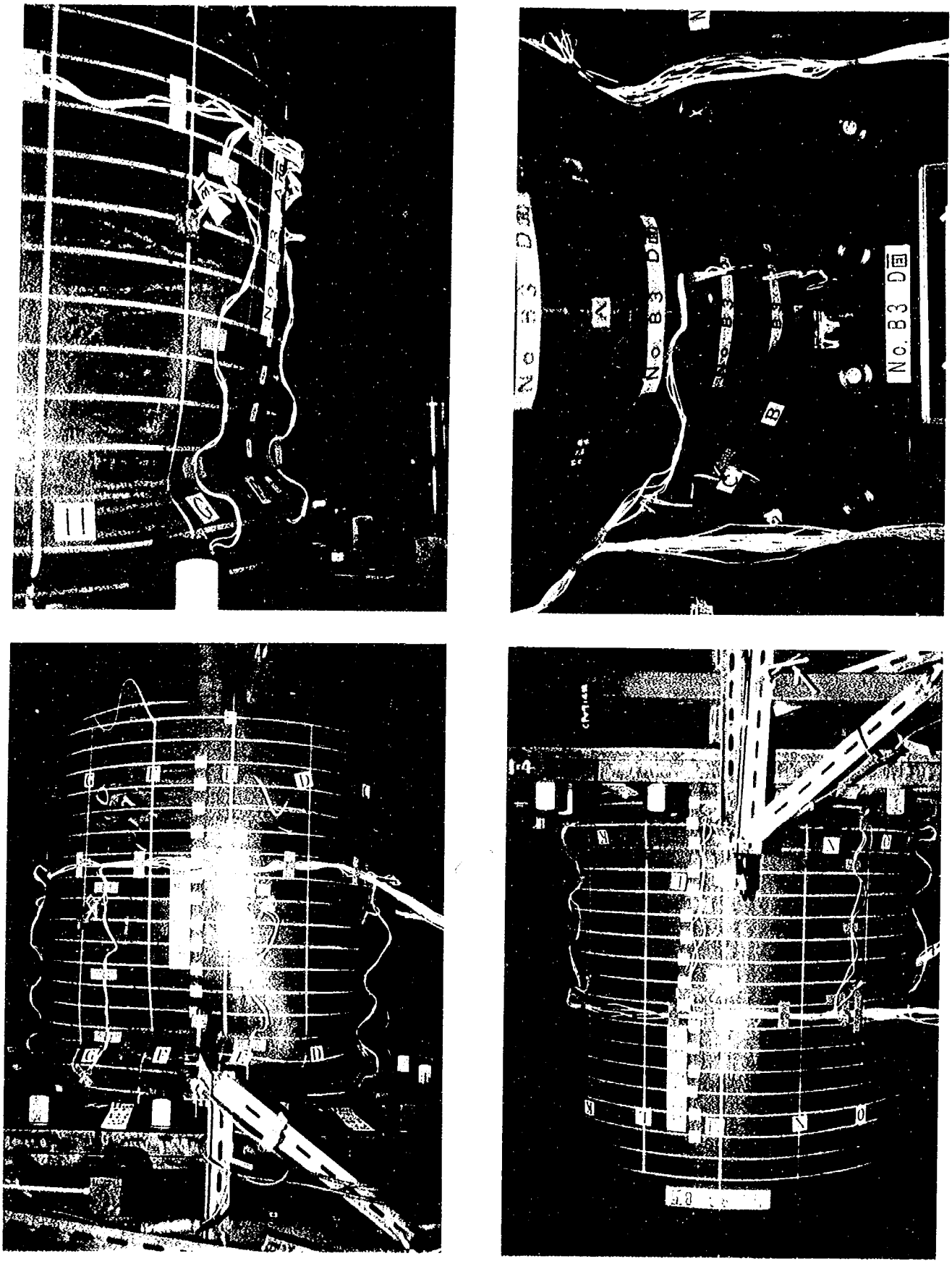
（ｉ）最大荷重を超えた点（＋５δｙ）
写真-3.2.1(1)　変形の状況（Ｂ２）



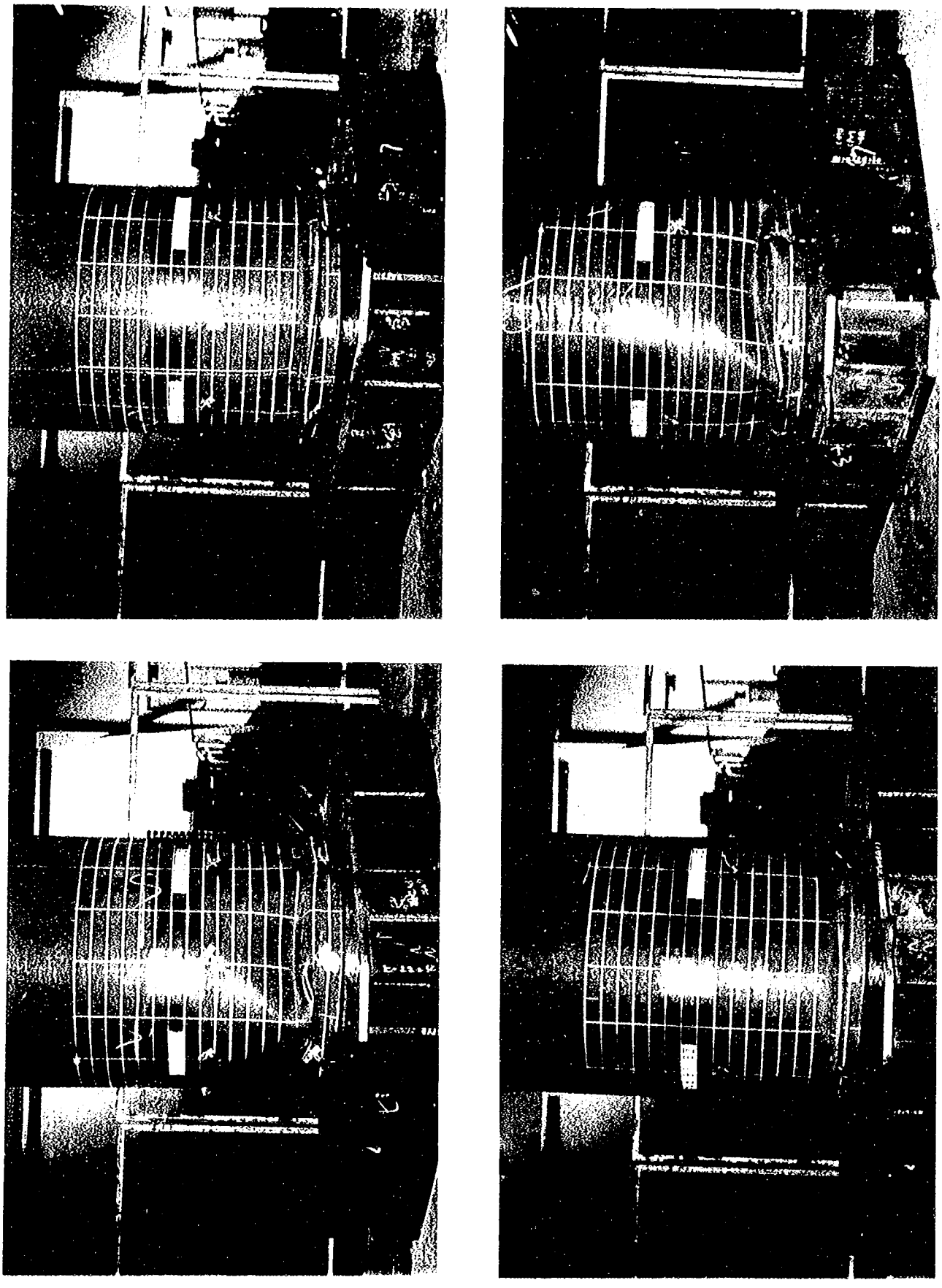
（ii）実験終了時（外面）
写真-3.2.1(1)　変形の状況（B２）（つづき）



(iii)実験終了時（内面）
写真-3.2.1(1)　変形の状況（B２）（つづき）

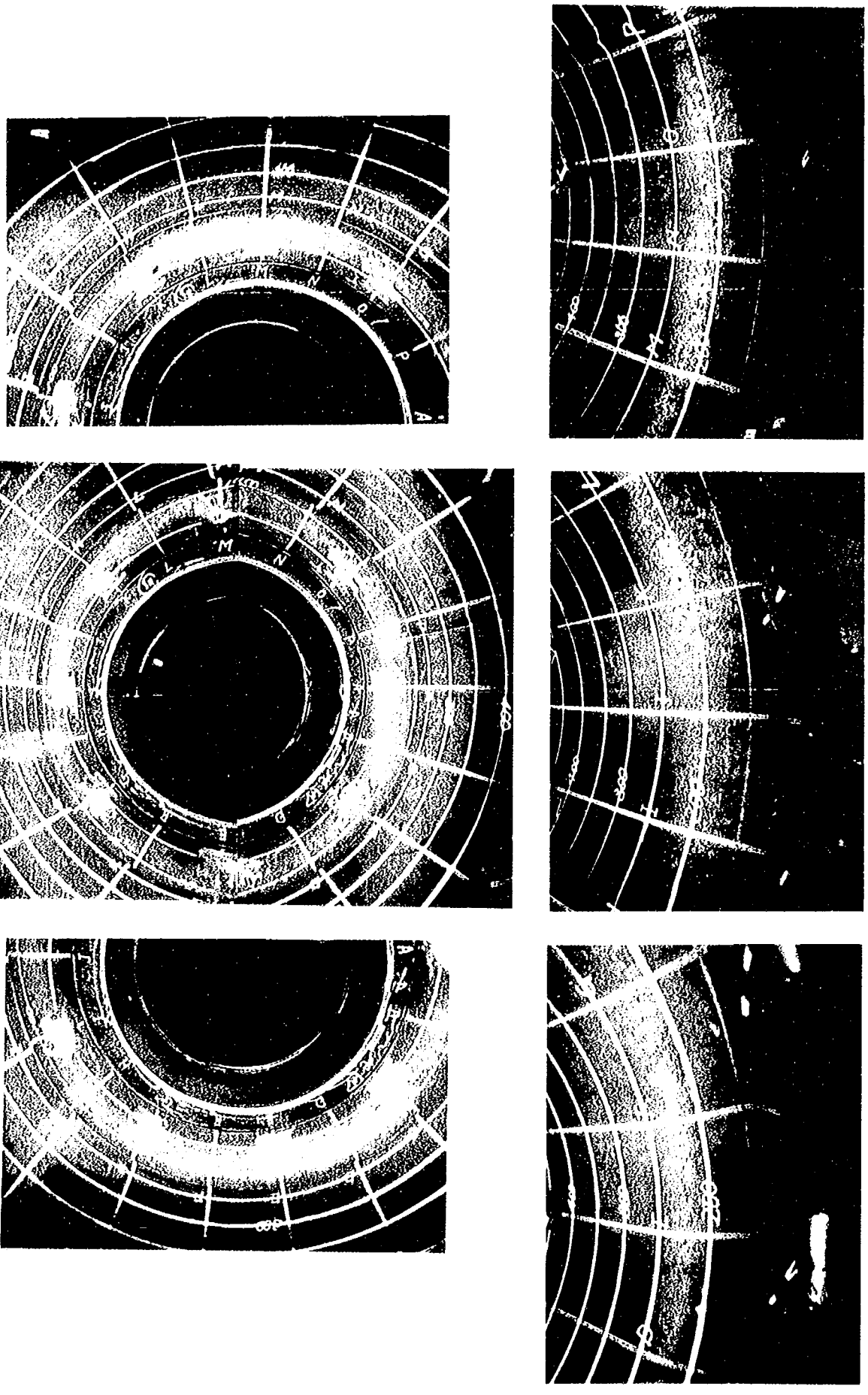


（ｉ）最大荷重を超えた点（＋9δｙ）
写真-3.2.1(2)　変形の状況（Ｂ３）



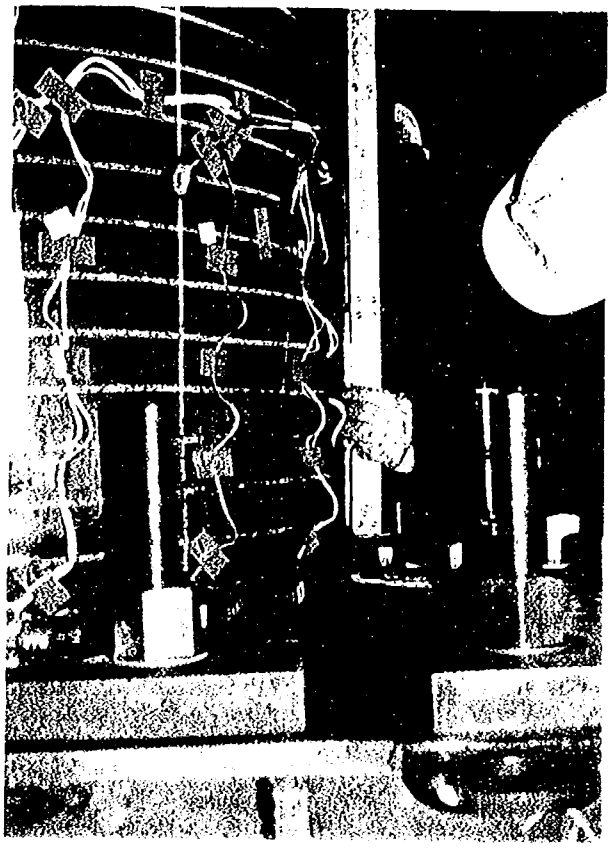
（ii）実験終了時（外面）

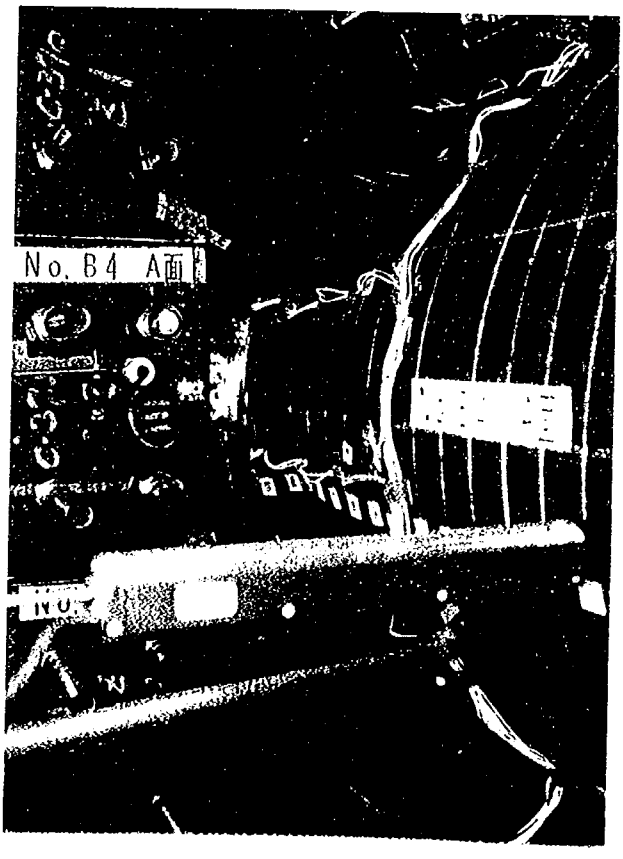
写真-3.2.1(2)　変形の状況（B３）（つづき）

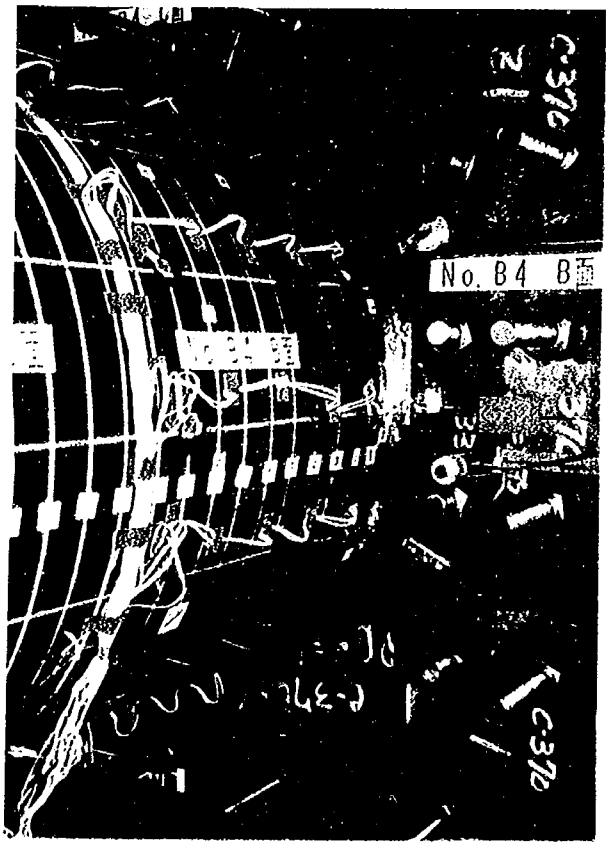


(iii)実験終了時（内面）

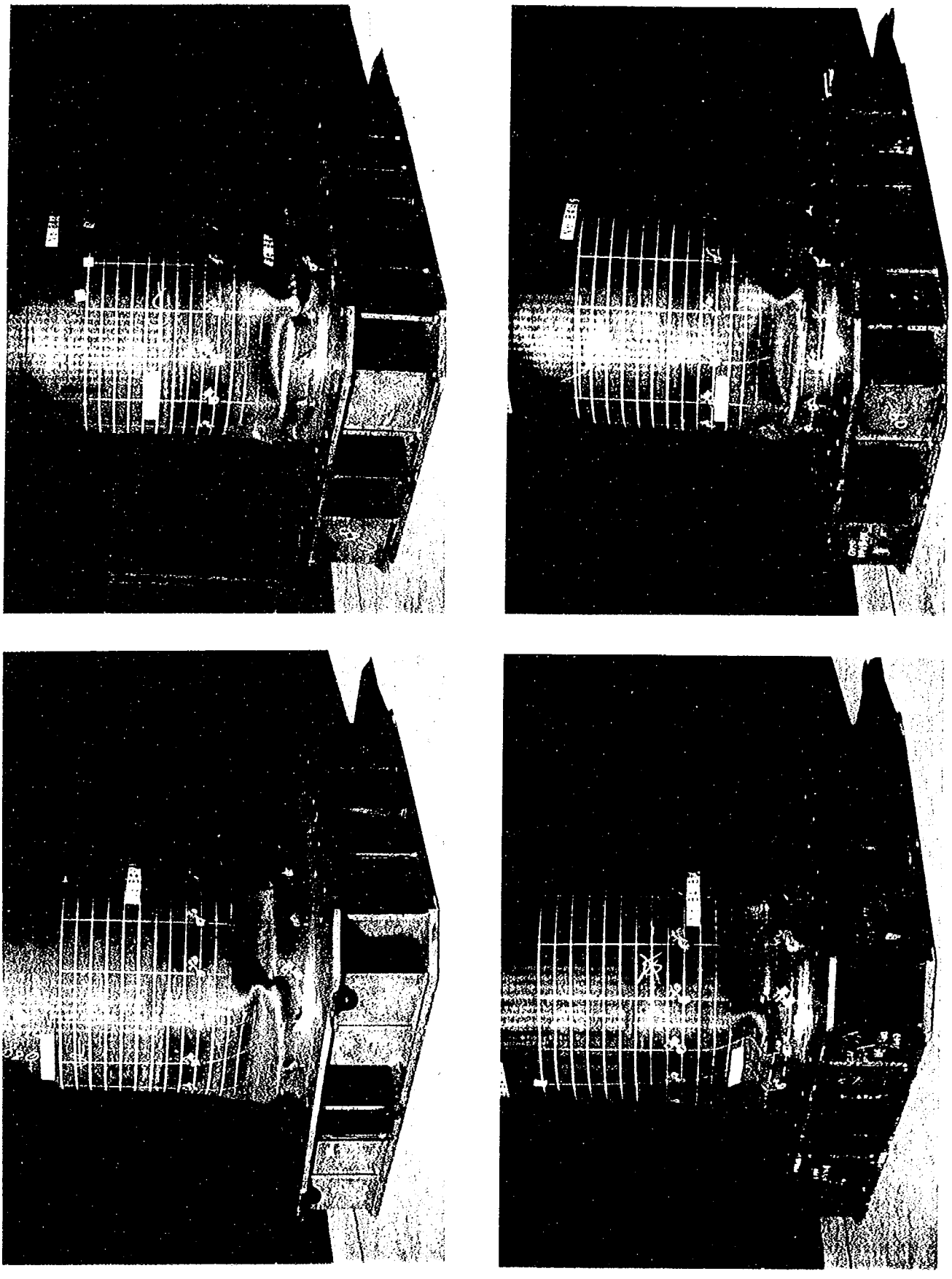
写真-3.2.1(2)　変形の状況（B３）　（つづき）





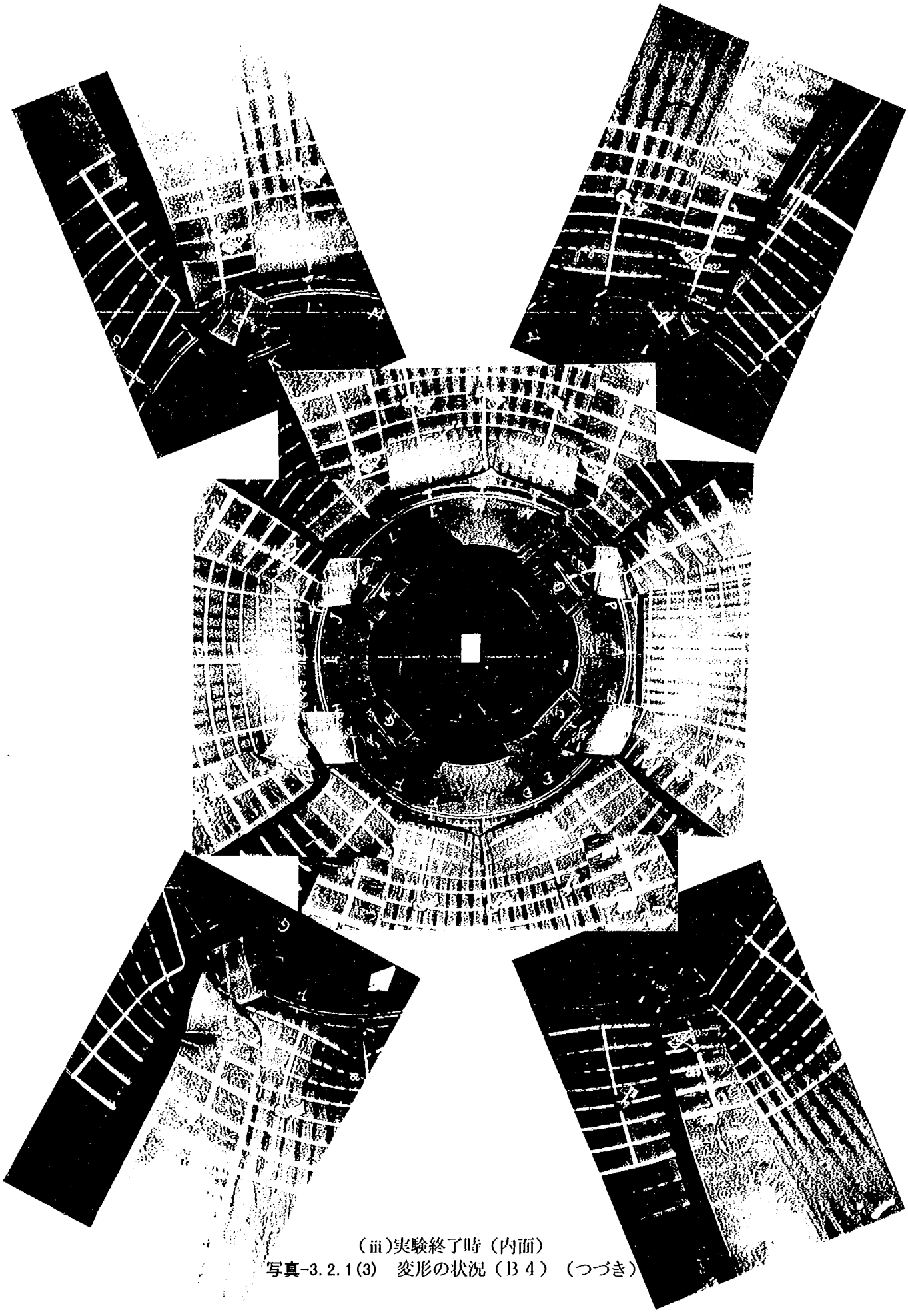


（ｉ）最大荷重を超えた点（＋5δｙ）
写真-3.2.1(3)　変形の状況（Ｂ４）



（ii）実験終了時（外面）

写真-3.2.1(3)　変形の状況（B４）（つづき）



(iii)実験終了時（内面）

写真-3.2.1(3)　変形の状況（B４）（つづき）

参考資料

1. 包絡線のデジタルデータ

1.1 矩形断面

表-参考-1.1 包絡線データ（矩形断面）

B1供試体		B5供試体		B6供試体		B7供試体		B8供試体	
水平荷重 (tonf)	水平変位 (mm)	水平荷重 (tonf)	水平変位 (mm)	水平荷重 (tonf)	水平変位 (mm)	水平荷重 (tonf)	水平変位 (mm)	水平荷重 (tonf)	水平変位 (mm)
0.00	-0.3	0.3	-0.1	-0.59	-0.2	0.89	-0.11	0.15	-0.02
5.03	0.5	0.45	-0.2	-0.74	-0.3	1.04	-0.09	0.59	-0.29
9.48	1.3	17.01	2.4	6.81	0.3	5.48	0.78	5.03	0.45
14.95	2.1	21.89	3.1	12.29	1.0	10.06	1.49	7.25	0.76
19.54	3.1	31.2	4.4	20.57	1.9	14.21	2.21	11.39	1.49
25.02	3.8	40.81	5.8	26.64	2.6	16.87	2.74	16.87	2.51
30.20	4.9	49.69	7.2	31.38	3.3	19.38	3.3	19.52	2.95
34.93	5.8	58.71	8.6	37.44	4.0	24.56	3.88	23.52	3.63
39.22	6.3	65.21	9.8	39.66	4.3	27.96	4.52	26.33	4.39
43.66	7.1	67.14	10.0	41.43	4.6	32.11	5.18	30.47	4.99
47.07	7.7	68.32	10.1	46.91	5.3	33.88	5.59	34.17	5.75
50.77	8.2	82.66	12.3	50.46	5.8	36.24	6.05	35.95	6.1
55.80	9.0	94.93	14.5	56.52	6.6	39.5	6.58	39.5	6.89
58.62	9.6	107.65	17.2	59.04	7.0	43.34	7.31	44.38	7.81
62.31	10.4	112.84	17.9	66.15	7.4	47.64	8.13	46.45	8.14
62.91	10.6	116.67	18.9	74.57	8.6	49.11	8.49	50.74	9.06
62.90	10.6	120.51	19.7	85.83	10.5	49.71	8.62	53.4	9.52
65.12	10.8	122.45	20.3	92.19	11.5	53.99	9.3	55.76	10.06
72.52	12.2	124.96	21.0	99.29	12.8	56.52	9.9	58.15	10.56
78.74	13.3	146.26	24.9	121.03	15.8	58.14	10.2	59.91	10.98
84.50	14.6	153.21	27.5	128.59	17.9	59.76	10.66	67.6	12.1
89.40	15.4	158.53	29.9	134.2	19.9	71.15	12.69	74.4	13.68
95.02	16.7	172.43	35.1	150.21	25.4	80.78	14.84	80.46	14.99
100.64	18.0	175.69	37.2	153.01	28.6	86.69	16.52	86.23	16.68
106.28	19.4	178.79	40.7	161.59	34.4	91.13	17.63	91.71	18.24
110.26	20.5	181.01	43.6	163.05	37.6	95.27	19.11	97.03	19.89
114.39	21.8	188.41	50.8	170.47	45.3	99.57	20.58	101.17	21.54
121.36	22.1	189	54.6	171.37	49.3	117.76	24.77	112.13	22.98
128.62	24.0	188.68	58.2	175.18	59.5	122.19	27.52	117.59	25.86
134.09	26.0	188.55	60.6	174.76	63.1	125.29	29.95	120.25	27.66
137.20	27.3	187.37	62.8	172.37	66.9	127.97	32.91	122.62	29.59
137.50	27.8	166.52	76.7	170.89	72.6	135.65	37.65	124.25	31.52
141.49	29.8	134.99	96.1	169.88	76.9	136.85	40.92	125.15	33.27
145.80	32.3	117.54	113.6	168.38	78.8	137.13	44.02	126.61	35.36
146.82	33.2	100.24	131.8	159.5	91.4	137.15	46.8	132.4	38.62
145.93	33.3	82.51	149.6	151.35	104.1	136.55	49.65	132.97	41.38
153.94	35.6	57.97	168.8	140.56	117.0	135.35	51.76	133.71	44.28
156.00	39.1			126.79	130.1	132.56	54.36	134.16	48
157.03	42.3			111.85	143.3	130.93	58.84	134.01	51.12
157.03	44.9			98.99	156.6	128.71	62.9	134.47	56.3
156.59	46.8			75.46	170.7	126.05	67.14	134.17	60.95
155.27	49.0			57.26	184.6	124.27	68.76	133.3	64.74
154.24	49.0					105.47	86.69	130.62	68.24
136.02	66.5					75.89	105.66	111.68	86.11
112.19	84.8					48.97	123.99	72.76	105.53
80.07	103.8					30.33	140.62	45.71	124.51
39.52	122.9							22.04	142.23

1.2 円形断面

表-参考-1.2　包絡線データ（円形断面）

B2供試体		B3供試体		B3供試体つづき		B4供試体	
水平荷重 (tonf)	水平変位 (mm)	水平荷重 (tonf)	水平変位 (mm)	水平荷重 (tonf)	水平変位 (mm)	水平荷重 (tonf)	水平変位 (mm)
0.60	0.1	0.74	0.0	75.12	114.6	0.30	-0.2
3.11	0.9	0.74	0.0	70.69	125.4	0.00	-0.3
6.81	1.9	4.58	0.8	64.47	135.9	4.00	0.7
10.07	2.9	9.02	2.0	55.76	147.1	7.84	1.7
12.73	3.5	10.65	2.5	46.29	157.9	10.80	2.6
15.25	4.4	12.57	3.0	36.96	169.3	15.53	4.1
17.76	5.0	16.12	4.1	28.98	180.3	18.93	5.3
19.69	5.6	19.08	4.9			20.86	5.9
22.50	6.5	22.19	5.6			24.26	6.8
24.13	6.9	25.29	6.6			26.18	7.4
26.50	7.8	26.77	7.0			30.47	8.5
26.35	7.7	29.14	7.2			36.23	10.3
27.23	7.8	29.29	7.2			41.86	12.0
32.56	9.4	29.28	7.2			46.59	13.9
35.81	10.4	29.43	7.2			50.28	15.3
38.63	11.5	30.91	7.9			52.36	15.3
41.14	12.4	36.23	9.1			56.49	17.3
42.62	13.0	42.30	11.1			58.56	18.8
44.99	14.0	47.17	12.0			60.34	20.5
47.36	15.2	52.65	14.1			59.75	20.4
48.98	16.1	55.02	14.8			61.37	21.7
56.68	18.8	54.86	14.9			61.97	22.3
58.61	20.6	56.05	15.0			67.15	25.2
60.08	22.1	59.60	15.6			68.19	27.2
66.59	26.6	63.89	17.2			68.92	29.4
67.48	28.9	66.99	18.5			69.36	31.7
70.60	35.9	69.20	19.9			72.47	37.6
71.04	38.6	71.28	21.6			72.17	40.2
70.74	41.6	75.87	24.8			71.87	42.7
69.70	43.9	76.60	26.5			71.58	43.3
65.27	54.3	77.49	28.7			71.59	45.7
55.65	65.7	77.79	29.9			70.85	51.6
45.88	76.6	77.79	32.8			70.10	53.9
41.14	88.0	79.42	35.4			61.97	64.6
40.55	98.0	79.26	38.1			51.03	76.2
38.78	107.9	79.27	40.5			41.41	87.3
35.52	118.9	78.82	41.3			31.95	98.2
31.67	131.3	78.68	42.3			22.92	109.6
		78.23	56.7			16.27	120.1
		78.37	60.5				
		78.22	63.1				
		78.68	66.8				
		78.83	71.6				
		78.37	74.8				
		78.67	83.1				
		78.09	83.6				
		78.53	88.5				
		78.38	92.9				
		78.09	93.5				
		77.94	94.3				
		78.09	99.0				
		77.49	104.1				

2. 各載荷サイクルにおける変状進行状況

2．1　矩形断面

表-参考-2.1.1　B１供試体

載荷サイクル nδy	変状進行状況
1	目立った変化はない。
-1	同上
2	圧縮側（A面）の第１パネルに黒皮のひび割れが発生した。
-2	同上
3	A面基部第1 パネル全体に黒皮のひび割れが広がった。黙視で確認できる凹凸はない。CD面共、第1パネルA面側で黒皮のひび割れが発生した。
-3	B面第１パネルの両端で黒皮のひび割れが広がり、一部浮き上がっている。 CD面では、第1パネルB面側角部の黒皮のひび割れが広がった。
4	A面第１パネル下部では縦リブを挟んで横方向に凹凸が交互に見られる。 CD面共、第１パネルA面側が僅かに膨らみ、B面側の基部付近角部では、溶接止端部の割れが発生した。
-4	A面の変形は元に戻っている。B面は、基部から25cm付近まで、凹凸が発生している。 CD面では、A面側の基部溶接部に割れが発生した。
5	A面 は第１パネル中央付近まで凹みが進んできた。基部から35cm辺りまでは凹凸が強調され、黒皮も剥落した。引張側基部角の割れも進展した。B面の凹凸は確認できない。B－D面基部角に割れが発生した。CD面共A面側第1パネル下部で凹凸が確認できる。
-5	A面は両端基部角の割れが少し進んだ。B面基部の変形が中央の縦リブを境に対称に変形した。ダイアフラムを境に第１パネルは凹み、第2パネル下部は僅かに膨らんだ。 CD面共、第一パネル下部のB面側で凹凸が大きい。
6	A面の基部付近の変形が進行し、凹みの最大は45mm程になった。第2パネル下部も第１パネルの変形につられて少し膨らんできた。B面には、凹凸差は10mm程度の変形が残った。CD面共、変形が進み、B面側基部角の割れも進んだ。
-6	A面には変形が残っている。B面は基部から25cmのパネル中央付近で大きく凹み（最大65mm)、ダイアフラムまで一直線の勾配で凹んでいる。基部四隅の溶接部割れは A、B面の座屈により、進展しなくなった。
7	A面第一パネル全体が凹み（最大約90mm)、ダイアフラムを境に第2パネル下部も膨らんでいる。大きな変形が生じているA面基部付近では、C，D面角のラインもねじ曲げられている。B面の変形も殆ど戻らず、橋脚全体が基部の座屈部で押しつぶされている。 CD面共、変形が少し進みA面側の凹凸が大きく膨らみの最大は約35mmである。
-7	A面には変形が残っている。B面は基部の座屈変形がさらに進み、第２パネル下部が膨らんできた。4面共、変形がすすむだけで新しい割れ等は現れない。

表-参考-2.1.1　B１供試体（つづき）

載荷サイクル nδy	変状進行状況
8	A面第1パネルは細かい凹凸から大きな凹みとなった(最大約115mm)。 第2パネルの膨らみは上部まで広がった。CD面共、第１パネルは大きく膨らみB面側角部のラインは割れの発生した辺りで曲がっている。
-8	A面第一パネル下部の両端角で割れが発生した。開口部は10～15mmとなった。膨らみも大きくなった。 B面の変形も単純化されて角部の膨らみを除いては大きな凹みとなった。第2パネルでは膨らみが広がった。
9	A面両端の割れは溶接部に沿って広がった。C面側角は長さ約110mm、D面側角は長さ約210mmである。B面もA面と同じような変形をしている。C面は第1パネル全体が大きく膨らんでいる。D面もパネル全体が膨らみ。下部は変形が大きい

表-参考-2.1.2　B５供試体

載荷サイクル nδy	変状進行状況
1	目立った変化はない。
-1	同上
2	目立った変化はない。圧縮側（A面）第1パネルに黒皮のひび割れが発生した。
-2	同上
3	黒皮のひび割れが広がる。
-3	同上
4	圧縮側A面第1パネルで広い範囲で僅かに凹みが見られ、基部付近の黒皮は一部剥落している。CD面圧縮側の黒皮のひび割れも若干広がっている。
-4	圧縮側B面第1パネルの基部付近でたてﾘﾌﾞを挟んで交互にパネルの凹凸が見られる。引張側A面基部の角部の両端に割れが発生した。また、引張側の変形は元に戻っている。CD面基部でも引張側の角部に割れが発生した。
5	圧縮側A面第1パネルの基部付近で縦ﾘﾌﾞを挟んで交互にパネルの凹凸が見られ、その上部は広く凹んでいる。引張側B面基部の角部の両端に割れが発生した。また、引張側の変形は元に戻っている。CD面基部でも引張側の角部に割れが発生し、圧縮側では凹みが見られるようになった。
-5	圧縮側B面第1パネルの変形は-4δy時と殆ど同じである。引張側A面の変形は残るようになり、基部の割れも伸びている。CD面でもパネルの変形は残るようになり、割れも伸びている。
6	圧縮側A面第１パネルの変形は基部付近を中心に細かい変形となっている。 引張側B面では縦ﾘﾌﾞの溶接部止端でパネルに割れが発生した。CD面でもB面同様に縦ﾘﾌﾞの溶接部止端でパネルに割れが発生した。
-6	圧縮側B面第1パネルの変形は基部付近を中心に細かい変形となっている。 引張側A面では先に発生した縦ﾘﾌﾞの溶接部止端の割れと角部の割れが繋がり、中央部でも溶接線に沿って細かい割れが発生した。
7	圧縮側A面ではC面側の母材の割れた部分で座屈により割れた部分から上が外側に出るようにしてパネルが重なっている。CD面の引張側では、先に割れた縦ﾘﾌ溶接部止端の割れと角部の割れが繋がった。
-7	パネルの凹凸、割れ共に変形は進んでいるが、目立った変化はない。A面は圧縮を受ける時に第1パネル中央部で広く凹みが見られるがB面が圧縮を受ける時にはそれが見られない。
8	パネルの凹凸、割れ共に変形は進んでいるが、目立った変化はない。A面はD面側でも割れた部分でパネルが重なり始めた。
-8	パネルの凹凸、割れ共に変形は進んでいるが、目立った変化はない。圧縮側B面第1パネルの中央部で広く凹みが見られるようになった。

表-参考-2.1.2　B５供試体（つづき）

載荷サイクル nδy	変状進行状況
9	パネルの凹凸、割れ共に変形は進んでいるが、目立った変化はない。
-9	同上
10	引張側Ｂ面の基部寄り中央部で縦リブ溶接部上に割れが発生した。
-10	圧縮側Ｂ面のパネル変形は細かい凹凸から大きな凹みへと変わってきた。引張側Ａ面の割れは伸びて、僅かに中心部が残っている状態である。
11	圧縮側Ａ面のパネル変形は細かい凹凸から大きな凹みへと変わった。引張側Ｂ面の割れは伸びて、僅かに中心部が残っている状態である。

表-参考-2.1.3　B6供試体

載荷サイクル nδy	変状進行状況
1	目立った変化はない。
-1	同上
2	圧縮、引張共、一気に黒皮がひび割れた。A面は第2パネル上段まで全体にB面はシェアウォール間で第2パネルまで、CD面は第1パネル中段までひび割れが認められる。
-2	黒皮のひび割れが広がり、圧縮側B面ではA面同様に第2パネル全体にひび割れが広がった。
3	圧縮、引張側共、第3パネルまで黒皮のひび割れが広がる。
-3	同上
4	黒皮のひび割れは出切った状態で、AB面の基部から45cm程の範囲では黒皮が剥落している。また、圧縮側A面の基部付近ではシェアウォールに挟まれた部分で僅かに凹みが認められる。
-4	圧縮側B面の基部付近ではシェアウォールの溶接部が僅かに膨らみ、その間では僅かに凹みが認められる。引張側A面のパネル変形は元に戻っている。
5	圧縮側A面第1パネルのシェアウォール間が広く凹んでいる。引張側B面のパネル変形は元に戻り、僅かに縦リブ溶接部が膨らんでいる。基部との溶接線付近の割れは認められない。
-5	圧縮側B面ではシェアウォール間で広く凹むようになり、C面の圧縮側基部付近でも凹みが認められるが、変形量は僅かである。　引っ張り側A面の変形は元に戻り、5δy時のB面同様に、縦リブ位置で痩せ馬状の膨らみが認められる。
6	圧縮側A面第1パネルではシェアウォール間は凹み、その両側では僅かに膨らみが認められるようになった。引張側B面は縦リブ位置の膨らみを残してパネルの変形は元に戻っている。C面では圧縮側基部付近で僅かに凹みが認められる。D面では引張側基部付近で割れが発生した。
-6	圧縮側B面第1パネルではシェアウォール間は凹み、その両側では凹みが認められる。引張側A面のパネル変形は元に戻っている。C面では圧縮側基部付近が僅かに凹み、引っ張り側の凹みは元に戻っている。また、引張側基部付近の角部で割れが発生した。D面でも引張側基部付近の角部で割れが発生した。
7	圧縮側A面第1パネルはシェアウォール間が凹み、その両側が膨らんだ状態である。また、第2パネル下部の縦リブ位置でも僅かに膨らみが認められるようになった。引張側B面のパネル変形は元に戻っている。C面では第1パネルの引張側のシェアウォール位置で僅かに膨らみが認められ、基部付近の角部で割れが発生した。D面引張側基部付近の割れは伸びなかった。

表-参考-2.1.3　B６供試体（つづき）

載荷サイクル nδy	変状進行状況
-7	圧縮側Ｂ面第１パネルはシェアウォール間が凹み、基部付近では縦ﾘﾌﾞ、シェアウォールを挟んで細かく変形し始めた。引張側Ａ面では基部付近で凹みが残るようになった。ＣＤ面圧縮側基部付近では僅かに凹んでいる。
8	圧縮側Ａ面第１パネルは基部付近では縦ﾘﾌﾞ、シェアウォールを挟んで変形し、その上部ではシェアウォール間で広く凹んでいる。また、第２パネルではシェアウォール間で膨らみが認められる。引張側Ｂ面では基部付近で縦ﾘﾌﾞ、シェアウォールの溶接部で痩せ馬状に僅かな膨らみが残っている。ＣＤ面では基部付近で細かい変形が広がっている。
-8	圧縮側Ｂ面では基部付近から第１パネル中段にかけて細かく変形するようになった。また。Ｂ－Ｃ、Ｂ－Ｄ角部では僅かにラインが曲がり始めた。引張側Ａ面では第２パネルでも僅かに変形を残している。ＣＤ面では圧縮側を中心にＢ面同様に細かく変形している。
9	圧縮側Ａ面では基部付近から第１パネル中段にかけて細かく変形するようになったまたＡ－Ｃ、Ａ－Ｄ角部では僅かにラインが曲がり始めた。引張側Ｂ面では、基部付近で細かい変形をそのまま残している。ＣＤ面では圧縮側を中心にＡ面同様に細かく変形し、引張側でも細かい変形をそのまま残している。 基部付近の割れはあまり伸びていない。
-9	変形量が増えているが、-8δyと同様の変形を繰り返し、特に目立った変化はない。
10	同上
-10	同上
11	載荷途上(変位-43.4mm、荷重94.2t)で音を発してＢ－Ｃ角部で周方向に割れが発生した。Ｄ面引張側の角部でも周方向に微細なひび割れが多数認められる。
-11	載荷途上(変位-50.6mm荷重136.1t)で音を発してＡ－Ｄ角部で周方向に割れが発生した。Ｃ面引張側の角部でも周方向に割れが発生した。パネルの変形は-10δy時と殆ど変わりない。
12	引張側Ｂ－Ｃ、Ｂ－Ｄ角部の割れは伸びて、Ｂ面中央縦ﾘﾌﾞ位置でも僅かに割れが発生した。また、引張側基部の角部の割れも伸びている。 パネル変形に目立った変化は認められない。
-12	引張側Ａ－Ｃ角部の割れはＡ面側でも認められるようになり、開口幅も大きい。圧縮側Ｂ面では割れが閉じてＢ－Ｃ、Ｂ－Ｄ角部のラインもパネルの変形量の増大に伴い、大きく曲がっている。

表-参考-2.1.3　B６供試体（つづき）

載荷サイクル nδy	変状進行状況
13	引張側の割れが伸びているが、パネル変形は12δy時と同様で特に目立った変化はない。
-13	同上
14	圧縮側Ａ面基部付近のＣ面側のシェアウォール溶接部で小さな割れが認められる引っ張り側の割れは伸びて、開口幅も大きくなった。パネルの変形は単純化している。
-14	圧縮側Ｂ面基部付近では全体的なパネル変形となっている。その他は-13δyと同様の変形を繰り返している。
15	引っ張り側の割れが伸びているがパネル変形は14δy時と同様で特に目立った変化はない。
-15	引張側Ａ面中央縦リブ位置で周方向の割れが発生した。また、シェアウォール溶接部の小さな割れとＣ面側角部から伸びた割れは繋がり、開口幅も大きい。パネルの変形に目立った変化はない。
16	引っ張り側Ｂ面中央縦リブ位置の割れとＤ面側角部から伸びた割れは繋がり、両角部の割れも広がっている。圧縮側Ａ面Ｄ面側のシェアウォール溶接部でも小さな割れが発生した。

表-参考-2.1.4　B７供試体

載荷サイクル n δy	変状進行状況
1	目立った変化はない。
-1	同上
2	圧縮側Ａ面の基部付近でボルト穴から延びるように黒皮のひび割れが認められる引張側Ｂ面基部付近とＣＤ面圧縮側でもＡ面同様にボルト穴付近で黒皮のひび割れが認められる。
-2	各面共に一気に黒皮のひび割れが広がった。圧縮側Ｂ面では第１パネル全体と第２パネルのボルト穴付近で線状に黒皮がひび割れている。引張側Ａ面ではＢ面程ではないが、第２パネル中断付近まで黒皮のひび割れが広がっている。ＣＤ面では第２パネル中断付近までのボルト穴付近で黒皮のひび割れが認められる。
3	圧縮側Ａ面第１パネルは角補強部を含めて全体が凹み、基部から20cmの範囲では黒皮が剥離している。Ｃ面圧縮側では基部から25cm付近を中心に僅かに膨らみが認められる。
-3	圧縮側Ｂ面第１パネルは角補強部を含めて全体が凹み、Ａ面に比べて黒皮の剥離が多い。引張側Ａ面では角補強部以外で残留変形が認められる。Ｃ面圧縮側では僅かに膨らみが認められ、引張側の変形は元に戻っている。Ｄ面圧縮側では僅かに凹みが認められる。
4	圧縮側Ａ面第１パネルは全体が凹み、基部から20～40cm付近では縦リブを挟んで大きく凹んでいる。また、第２パネル下部では僅かに膨らみが認められる。引張側Ｂ面第１パネルでは僅かに残留変形が認められる。ＣＤ面圧縮側では僅かに凹みが認められ、Ｄ面引張側基部付近では溶接線に沿った割れが発生した。
-4	圧縮側Ｂ面第１パネルでは基部から22～50cmの範囲を中心に全体が凹んでいる。また、第２パネルでは全体が膨らみ始めた。引張側Ａ面第１パネルは全体に残留変形が認められ、基部付近両端の溶接部では溶接線に沿って小さな割れが発生した。ＣＤ面では第１パネルの下部で縦リブを挟んだ凹凸が認められ、引張側基部付近ではＡ面同様に溶接線に沿った割れが発生した。
5	圧縮側Ａ面第１パネルでは基部から13～55cmの範囲を中心に全体が凹んでいる。また、第２パネルでは全体が膨らみ始めた。引張側Ｂ面第１パネルは全体に残留変形が認められ、基部付近のＢ－Ｄ角部では溶接線に沿って小さな割れが発生した。ＣＤ面第１パネルでは圧縮側の角補強部は膨らみ、その内側の母材は凹んでいる。また、Ｃ面引張側基部付近では割れが発生した。

表-参考-2.1.4　B７供試体（つづき）

載荷サイクル n δy	変状進行状況
-5	圧縮側Ｂ面第１パネルではパネルの変形に伴って、角部のラインが曲り始めた。引張側Ａ面では第２パネルでも残留変形が認められる。ＣＤ面第１パネルでは角補強部が膨らみ、内側の母材部分は凹んでいる。
6	圧縮側Ａ面第１パネルは全体が大きく凹み、角部のライン変形も大きい。引張側Ｂ面の残留変形も大きく、基部付近の割れも僅かに伸びている。また、角部のライン変形も残るようになった。ＣＤ面のパネル変形は複雑で圧縮側の角補強部では基部付近を中心に大きく膨らみ、その内側は大きく凹んでいる。
-6	載荷途上（変位-54.75mm、荷重-101.91）で大きな音を発してＣ面圧縮側の基部から１本目のボルトが切れた。各面共に同じ変形を繰り返している。Ｂ－Ｃ、Ｂ－Ｄ角部ではパネルの大変形に伴って、大きくラインが曲がっている。引張側Ａ面のパネル変形はかなり残るようになった。
7	載荷途上（変位58.75mm、荷重90.27t）で音を発して、Ｂ－Ｄ角部で周方向の割れが発生した。ＣＤ面では圧縮側の膨らみが広がっている。基部付近の割れは伸びていない。
-7	載荷途上（変位64.75mm、荷重-15.6t）で音を発して、Ａ－Ｄ角部で周方向の割れが発生した。ＡＢ面では第１パネルは大きく凹み、ダイアフラムを境に第２パネルは全体が膨らんでいる。ＣＤ面第１パネルでは膨らみが広がり、中央付近の凹みが吸収されている。
8	引張側Ｂ面では周方向の割れに直交するように軸方向の割れが発生した。また、Ｃ面側角部では白く小さなひび割れが複数認められる。ＣＤ面第１パネルは全体が膨らむようになった。
-8	引張側Ａ面では両端の周方向の割れに直交するように軸方向の割れが発生した。
9	載荷途上（変位-65.0mm、荷重17.14t）で音を発して、Ｂ－Ｃ角部で周方向の割れが発生した。

表-参考-2.1.5　B８供試体

載荷サイクル n δy	変状進行状況（外面）
1	目立った変化はない。
-1	同上
2	圧縮側Ａ面では角補強部を除いて第２パネルまで黒皮のひび割れが認められる。Ｃ面でも僅かに黒皮のひび割れが認められる。
-2	圧縮側Ｂ面では第１パネル下部とダイアフラム付近で黒皮のひび割れが認められる。
3	圧縮側Ａ面第１パネルは角補強部を含めて全体が僅かに凹んでいる。ＣＤ面圧縮側では黒皮のひび割れが認められ、角補強部の塗装にも皺が認められる。
-3	圧縮側Ｂ面第１パネルは角補強部を含めて全体が僅かに凹んでいる。引張側Ａ面のパネル変形は元に戻っている。ＣＤ面圧縮側では黒皮のひび割れが認められ、両側の角補強部ではボルト穴から延びるように塗装の皺が多数認められる。
4	圧縮側Ａ面第１パネルは全体が凹み、第２パネル下半部では真ん中の縦リブ付近で僅かに膨らみが認められる。引張側Ｂ面第１パネルでは僅かに残留変形が認められる。ＣＤ面圧縮側基部付近で僅かに凹みが認められ、斜めの黒皮のひび割れも認められる。各塗装部のボルト穴付近ではボルトの滑りによって塗装が捲れ始めた。
-4	圧縮側Ｂ面第１パネルは全体が凹み、第２パネルでは真ん中の縦リブ付近で僅かに膨らみが認められる。引張側Ａ面第１パネルでは僅かに残留変形が認められるＣＤ面圧縮側基部付近で僅かに凹みが認められ、引張側でも変形が残るようになった。また、Ｄ面のダイアフラム付近ではボルト穴周辺で塗装の皺が多数認められる。
5	圧縮側Ａ面第１パネルでは基部から10～40cmの範囲を中心に全体が凹んでいる。また、第２パネルでは全体が膨らみ始めた。引張側Ｂ面第１パネルは全体に残留変形が認められ、第２パネルでも僅かに残留変形が認められる。ＣＤ面第１パネルでは圧縮側が全体的に膨らみ、Ｃ面引張側基部付近の角部では小さな割れが認められる。
-5	圧縮側Ｂ面では第１、２パネル共に全体的に変形が進んでいる。引張側Ａ面第１パネルは全体に残留変形が認められ、第２パネルでも残留変形が認められる。ＣＤ面第１パネルは全体的に膨らみ、Ｄ面引張側基部付近では溶接線に沿って小さな割れが認められる。

表-参考-2.1.5　B８供試体（つづき）

載荷サイクル n δy	変状進行状況（外面）
6	各面共に同じようなパネル変形を繰り返しているが、圧縮側Ａ－Ｃ，Ａ－Ｄ角部でラインが曲り始めた。
-6	各面共に同じようなパネル変形を繰り返している。圧縮Ｂ－Ｃ、Ｂ－Ｄではラインが曲り、引張側Ａ－Ｃ、Ａ－Ｄ角部のライン変形は元に戻っている。また、Ａ面基部付近の両端では小さな割れが認められる。
7	各面共に同じようなパネル変形を繰り返し、Ｄ面では第２パネルでも僅かに凹みが認められる。引張側のライン変形は元に戻っている。
-7	載荷途上（変位-6.0mm、荷重-74.4t）で音を発して、Ａ－Ｄ角部で周方向の割れが発生した。圧縮側角部のライン変形も大きく、引張側のライン変形も残るようになった。
8	載荷途上（変位25.25mm、荷重57.2t）で音を発して、Ｂ－Ｄ角部で周方向の割れが発生した。また、Ｂ－Ｃ角部でも周方向の割れが発生した。パネルの変形は各面共に大きく、第２パネルまで広がっている。
-8	引張側Ａ－Ｃ角部で周方向の割れが発生し、Ａ－Ｄ角部の割れはＤ面でボルト穴まで達している。周方向の割れが発生した付近を最大に各角部のラインは大きく変形している。
9	各角部で周方向の割れが発生した為か、圧縮側Ａ面とＤ面の第２パネルでは変形が小さくなった。

2．2　円形断面

表-参考-2.2.1　B２供試体

載荷サイクル nδy	変状進行状況
1	目立った変化はない。
-1	同上
2	圧縮側で黒皮がひび割れてきた。
-2	同上
3	圧縮側の基部付近に僅かに膨らみが認められる。
-3	圧縮側基部10cm辺りで僅かに膨らみが見られる。
4	圧縮側基部から11cmで外面への膨らみが視認できるようになった。
-4	圧縮側の基部近く10cm辺りにおよそ1/4周程度の広い範囲で外面への膨らみが見られるようになった。　他には特記するほどの変化は見られない。
5	圧縮側が一目で判る程度にまで膨らみが進んできた。　引張側の変形は戻っている。引張側の基部プレートと橋脚母材との溶接境界部で25～45mm長の割れが発生した。
-5	引張側の変形は引き戻されてほぼ平坦に戻っている。 基部溶接線近傍で割れが多数発生し長い物は80mmにもおよんでいる。 Dライン（内面に縦ﾘﾌﾞが溶接されている）の付根の割れは橋脚の方が内面側に2mm程引き込まれるように段差がついている。
6	圧縮側はDラインの縦ﾘﾌﾞを挟んで大きく外面に膨らんでいる。また、F－D間の膨らみのすぐ上で僅かながら凹みが見られる。 Dラインの付根の段差は-5δy時の逆になり橋脚本体が外側にずれ出ている。　引張側の割れはそれぞれ進展し4mm程度開口している。開口部では本体が内面側にめり込む形で段差がついている。基部10cm付近の膨らみ変形は全周にわたっている。
-6	圧縮側の膨らみが一層大きくなりL、Nライン（縦ﾘﾌﾞ位置）の基部近くに発生している割れの両端が軸方向に伸び始めた。引張側の基部ではDラインの基部近傍で本体が内面側にめり込む形で段差が出ており、開口幅も6ｍｍと大きくなってきた。
7	圧縮側は凹凸が大きくなり、Fライン基部付近の割れは軸方向にも伸びようとしている。　引張側N、Lラインの基部プレートと母材の段差はもどった。
-7	基部の溶接部は円周方向にほぼ一周割れが伸びた状態である。圧縮側では基部付近母材の割れが広がり、中の明かりが見える部分もある。Jライン基部付近も縦ﾘﾌﾞに割れが発生しそうな膨らみがある。　引張側ではFライン基部の割れが大きい。B－A間の軸方向の母材の溶接部にも基部付近で割れが発生している。

表-参考-2.2.1　B２供試体（つづき）

載荷サイクル nδy	変状進行状況
8	圧縮側縦リブの基部付近の割れ部分は基部プレートに接触しそうな状態である。H、Jラインでは割れずに膨らんでいる。引張側では割れに伴う面のずれの大半は戻るものの長さは少し伸びた。また、割れた部分の変形に伴い、縦リブが基部プレートに接触している
-8	圧縮側N、Lライン（縦リブ位置）では、割れ部分の母材が基部プレートに接触した。この接触により、荷重は落ちずに目標変位まで進んだ。引張側ではFラインを挟んだ周方向の割れ幅が広がった。
9	圧縮側はD、F、Hラインで割れた母材部分が基部プレートに接触した。 引張側は圧縮時に接触した母材部分が基部プレートから離れている。
-9	圧縮側ではN、L、Jライン基部付近の割れに伴う母材の基部プレートへの接触により耐力が落ちない。引張側では接触部は離れている。
10	圧縮側は凹凸も大きくなり、Bラインを除く縦リブは全て基部プレートに接触している。引張側は割れ部分の開口部が大きくなっている。
-10	圧縮側の縦リブ位置は全て基部付近で、割れ、基部プレートに接触している。 Nライン基部付近の割れは周方向、軸方向共にかなり大きく割れている。引張側ではDライン基部の割れが周方向、軸方向共に大きく穴が空いた状態である。
11	圧縮側では基部プレートと母材の接触による凹凸が大きくなっている。 引張側では基部の割れが伸びて周方向の溶接部の半分は割れている状態である。
-11	圧縮引張側共、基部の割れは軸方向にも大きく伸びて穴状になっている。
12	圧縮引張側共、新しい部分の変化はほとんどなく、パネルの凹凸、割れとも変化が進んでいくだけである。
-12	12δy同様、圧縮引張側共、新しい部分の変化はほとんどなく、パネルの凹凸割れ共変形が進んでいくだけである。
13	圧縮側基部付近はD、Fラインを中心に割れがひどく、座屈による基部プレートへの接触面積もかなり広い。　引張側はN、Lラインを中心に割れがひどく、幅は約30mm程である。　NからLにかけては割れが繋がりそうな状態である。 引張側の円周方向は割れている部分の方が多い。

表-参考-2.2.2　B3供試体

載荷サイクル nδy	外管変状進行状況
1	目立った変化はない。
-1	同上
2	目立った変化はない。
-2	同上
3	圧縮側の基部付近のF～Dで僅かに黒皮のひび割れが見られる。また、C～Gでは僅かに膨らみが見られる。
-3	圧縮側基部付近のO～Kで僅かにパネルが膨らんでいる。また、M付近では黒皮のひび割れが見られる。引張側のパネルの変形は僅かに残るようになった。
4	圧縮側基部付近のB～Hで膨らみ、E付近では少し天板寄りで膨らんでいる。 引張側の膨らみは元に戻っている。
-4	圧縮側基部付近のP～Jでパネルの膨らみが見られる。引張側では変形が残り、F～C間では黒皮の剥落が見られる。
5	膨らみが全周に広がった他は特に目立った変化はない。
-5	目立った変化はないが、通路側の断面は圧縮を受けても窓側の断面ほどパネルの変形が見られない。
6	圧縮側基部付近の膨らみの上部でG～E、C～A間で凹みが見られるようになった。
-6	圧縮側では6δy時の圧縮側に見られたパネルの凹みは現れなかった。引張側では膨らみは残ったが、凹みは元に戻った。
7	圧縮側ではG～E、C～A間の凹みが広がり、圧縮側だけ見ると断面形状が四角形になっている。
-7	特に目立った変化はなく、変形量が増えているだけである。
8	圧縮側ではパネルの変形が大きくなり、GとDﾗｲﾝは尖ったように見えるまでになってきた。窓側と、通路側のパネルでは同じ圧縮を受けても、窓側ではパネルの凹みが見られるが、通路側ではパネルの凹みがまったく見られない。
-8	特に目立った変化はないが、引っ張り側ではパネルの凹みが残るようになった。
9	圧縮側のH、Dﾗｲﾝは尖ったように膨らみ、それを挟んだG～E、C～A間は大きく凹み、圧縮側では四角形の断面形状をしている。
-9	変形量は増えているが-8δy時と同じような状態である。
10	変形量が増えているだけで特に変化はない。
-10	同上

表-参考-2.2.2　B３供試体（つづき）

載荷サイクル n δy	外管変状進行状況
11	変形量が増えているだけで特に変化はない。
-11	同上
12	同上
-12	変形量が増えているだけで特に変化はないが、引張側Ｅ～Ｄ間の膨らんでいる部分では母材が白くひび割れている。
13	変形量が増えているだけで特に目立った変化はない。
-13	同上
14	圧縮側Ｅ～Ｃ間の膨らんでいる部分でパネルに白くひび割れが広がっている。
-14	特に変化はないが、引張側Ｅ～Ｃ間のひび割れは170㎜程までに伸びている。
15	特に目立った変化はない。
-15	引張側Ｅ～Ｄ間の白くひび割れていた部分が割れた。
16	圧縮側ではＥ～Ｄ間の割れが伸び、引っ張り側ではＮ～Ｋ間で長いひび割れが発生した。
-16	引張側Ｄ断面のひび割れは3㎜幅の割れとなりＧ断面付近ではパネルの凹凸の境界辺りが白くひび割れている。圧縮側（通路側)は漸く四角形の断面変化を見せるようになった。
17	割れ、ひび割れが少し伸びている以外に目立った変化はない。
-17	圧縮側Ｍ～Ｌ間の大きく膨らんだ部分で割れが発生した。引張側では先に割れが発生した部分の基部側で割れが発生している。
18	圧縮側では変形量が大きくなり、パネルは複雑な変形を見せている。引張側では先にひび割れていた部分が2㎜幅程の長い割れとなった。

表-参考-2.2.2　B３供試体（つづき）

載荷サイクル nδy	内管変状進行状況
-1	目立った変化はない。
～　7	同上
8	圧縮側Ｄ～Ｆの基部から15cm程の部分が外へ膨らんでいる。
-8	圧縮側Ｋ～Ｏで外へ膨らんでいる。引っ張り側の変形は元に戻っている。
9	圧縮側パネルの外側への膨らみは範囲を広げ、Ａ－Ｂ間からＨ－Ｉ間の基部から5cm～25cmの部分で最大凸みを3mmとする緩やかなカーブを描いている。 引っ張り側の変形は元に戻っている。
-9	基部から5cm～25cmで膨らみは一周している。変形量は僅かで目視だけでは判然としない。
10	変形量が増えているだけで特に変化はなく、圧縮側の変形がはっきりしてきた程度である。
-10	基部から5cm～25cm迄の20cmの範囲で全周に外側への膨らみが見られる。
11	圧縮側Ｂ～Ｈ間の25cm～30cm間で僅かに内側にパネルが凹んできた。 外側への膨らみは変形量が増えているだけである。
-11	圧縮側Ｊ～Ｐ間で僅かに内側にパネルが凹んできた。外側への膨らみは変形量が増えているだけである。
12	変形量が増えているだけで特に変化はない。
-12	同上
13	変形量が増えているだけで特に目立った変化はない。
-13	同上
14	同上
-14	同上
15	圧縮側Ｅライン14cm位置で外面への膨らみが30mmに達した他、25cm～30cmの内面の僅かな凹みは見られなくなった。引張側の残留変形も17mmと大きくなり、提灯座屈の形状を呈してきた。
-15	変形量が増えているだけで特に目立った変化はない。
16	同上
-16	同上
17	基部から14cmの位置を最大に一周するように提灯座屈している。変形量は圧縮側で最大47mm、中立軸上で37mm、引張側で30mmである。
-17	引張側Ｄ～Ｆ間で細かく疲労割れのような形状の割れが深さ0。2mm程で散見できる。
18	引張側Ｋ－Ｌ間からＮ－Ｏ間の範囲で微細な割れが発生した。長さは殆どが10mm前後である。パネルの変形量は圧縮側で54mm、中立軸上で47mm 引張側で40mmであり、外面とは違う綺麗な提灯座屈が見られる。

表-参考-2.2.3　B4供試体

載荷サイクル n δy	変状進行状況
1	目立った変化はない。
-1	同上
2	目立った変化はない。
-2	同上
3	圧縮側基部付近のF～Dで僅かにパネルが膨らんでいる。また、その周辺では黒皮のひび割れが見られる。
-3	圧縮側基部付近のN～Lで僅かにパネルが膨らんでいる。また、その周辺では黒皮のひび割れが見られる。　引張側の変形は戻っている。
4	圧縮側基部付近のF～Dで膨らみが見られる黒皮のひび割れも密になっている。引張側の膨らみは元に戻っている。
-4	圧縮側基部付近のN～Lでパネルの膨らみが見られる。引張側の変形は元に戻っている。
5	圧縮側基部付近のG～Cで膨らみが見られる。引張側の変形は元に戻っている。
-5	圧縮側基部付近の膨らみは縦リブを挟むように膨らみ、引張側の変形も残るようになった。
6	同上
-6	圧縮側では縦リブの変形に伴って、複雑な凹凸が見られるようになった。 引張側の変形は残るようになった。
7	圧縮、引張側共に、基部に近い部分では膨らみ、その上部では凹みが見られる。
-7	同上
8	縦リブで区切られた状態の変形が進んでいる。
-8	同上　変形量が大きくなるだけである。
9	同上
-9	同上
10	同上
-10	縦リブで区切られた状態の変形が進んでいる。引張側基部付近のCラインで 割れが発生した。
11	縦リブで区切られた状態の変形が進んでいる。引張側基部付近のM、Oラインで割れが発生した。
-11	縦リブで区切られた状態の変形が進んでいる。引張側基部付近のG、 Eラインで割れが発生した。
12	縦リブで区切られた状態の変形が進んでいる　引張側基部付近のKライン で割れが発生した。

3. Ｂ６供試体の追加確認実験

3.1 実験目的

6者共研の一環として、平成8年7月に建設省土木研究所に於いて、低降伏点鋼をシェアウォールとして用いたマルチセル構造の供試体(B6供試体)の繰返し載荷実験を実施した。実験の結果、降伏荷重に劣化するまでの塑性率が約13とじん性に富んだ構造であることを確認した。ここでは、B6供試体の追加実験として、①マルチセル構造の内壁の鋼種として「低降伏点鋼」の場合と「普通鋼」の場合での挙動の違い、②マルチセル構造の内壁を載荷方向とした「シェアウォール構造」と載荷直角方向とした「ダブルフランジ構造」での挙動の違いを確認することを目的として、繰返し載荷実験を実施した。なお、本実験はC社(日本鋼管㈱基盤技術研究所)の実験設備を使用した。

3.2 低降伏点鋼

低降伏点鋼(NK-LY100)は従来の普通鋼(SS400)と比較して、強度が1/2～1/3、伸びが約2倍の低強度、高変形能の特性を有する鋼材である。

3.2.1 化学成分

表-参考-3.2.1に鋼材の化学成分を示す。最新の製鋼技術を駆使して、降伏強度を上昇させる固溶状態の炭素や他の不純物元素の含有量を低減し、さらに、これらの固溶成分を炭窒化物として固定する元素を添加した成分系である。低降伏点鋼は熱間圧延後、特殊熱処理により製造される。

表-参考-3.2.1 鋼材の化学成分(単位：%)

成分	C	Si	Mn	P	S
NK-LY100	≦0.003	≦0.03	0.1～0.2	≦0.02	≦0.01
SS400	—	--	—	≦0.05	≦0.05

3.2.2 機械的性質

表-参考-3.2.2に鋼材の機械的性質を示す。普通鋼と比較して、極めて低い強度(降伏強度、引張強度)と、極めて高い変形能(伸び)を実現している。図-参考-3.2.2に応力～ひずみ曲線を示す。なお、要求に応じてさらに低い強度の鋼材も、圧延・熱処理条件の精密な制御により製造可能である。

表-参考-3.2.2 鋼材の機械的性質

項目	板厚 (mm)	0.2%耐力 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	破断伸び (%)
NK-LY100	6～	90～130	200～300	50以上
SS400	4.5～	235以上	400～510	21以上

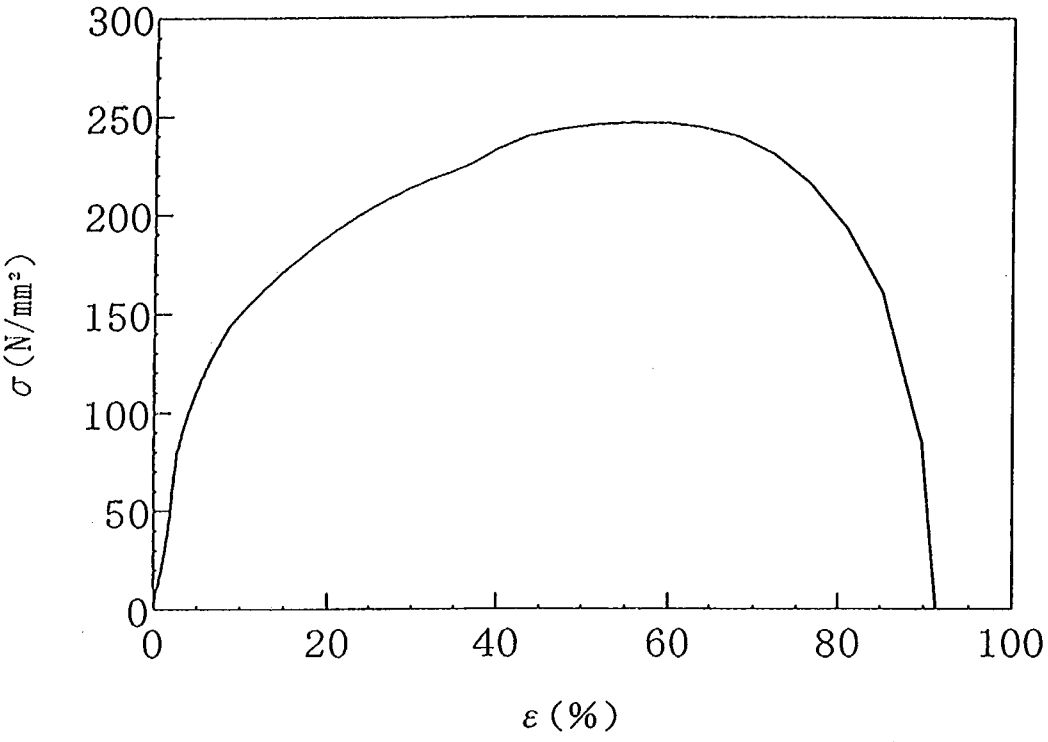


図-参考-3.2.2　低降伏点鋼の応力～ひずみ曲線

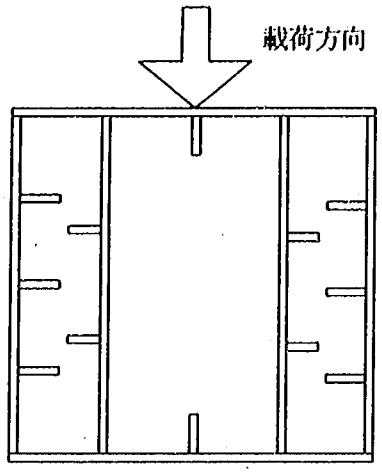
3.3　実験概要

3.3.1　供試体諸元

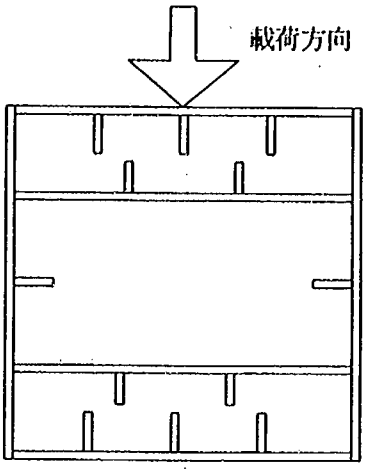
供試体は、全部で4体とし、試験条件を表-参考-3.3.1(1)に示し、水平荷重の載荷方向を図-参考-3.3.1(1)に示す。基準値を用いた各供試体の諸元および構造パラメータを表-参考-3.3.1(2)に、形状・寸法を図-参考-3.3.1(2)～(3)に示す。供試体断面寸法は、B 6供試体(900mm×900mm)の半分(450mm×450mm)とした。橋脚の実績調査[1)]によると、実橋の細長比パラメータ$\bar{\lambda}$は$0.2 \leqq \bar{\lambda} \leqq 0.4$のものが全体の85%であり、B 6供試体の細長比パラメータ$\bar{\lambda}$が$\bar{\lambda}=0.23$と下限に近い値であったことから、本実験では上限に近い値$\bar{\lambda}=0.4$(このときの供試体高さhはh＝2500mm)とした。

表-参考-3.3.1(1)　試験条件

試験体名	内壁の鋼種	内壁の構造
B 9	低降伏点鋼	シェアウォール
B10	低降伏点鋼	ダブルフランジ
B11	普通鋼	シェアウォール
B12	普通鋼	ダブルフランジ



Ｂ６、Ｂ９、Ｂ１１供試体

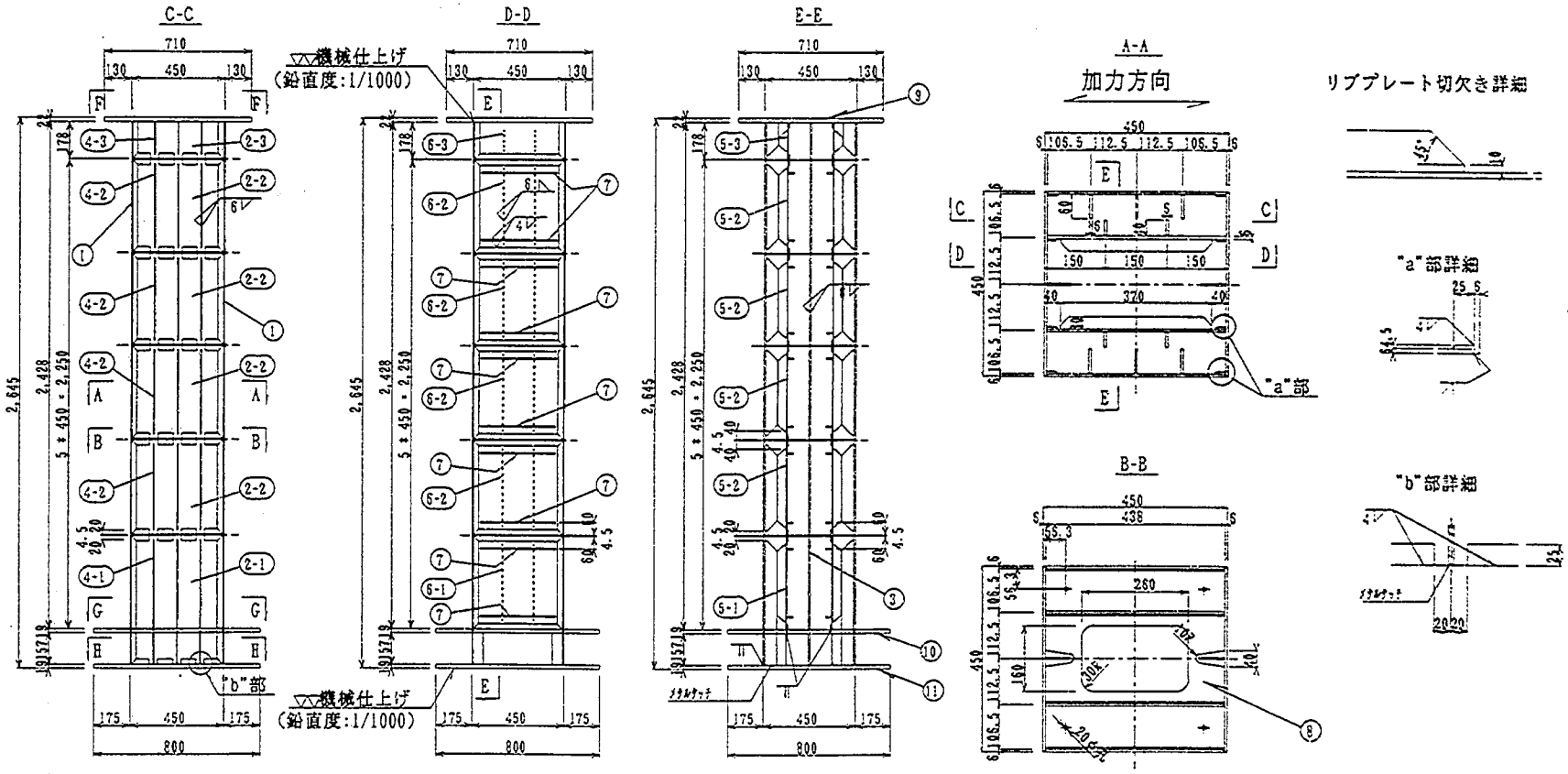


Ｂ１０、Ｂ１２供試体

図-参考-3.3.1(1)　載荷方向

表-参考-3.3.1(2)　試験体の構造パラメータ(設計値)

(単位:cm、kgf)		B9		B10		B11		B12		シェアウォールをリブに換算した断面
			シェアウォール	ウェブ、フランジ	ダブルフランジ	ウェブ、フランジ	シェアウォール	ウェブ、フランジ	ダブルフランジ	
部材高	h	242.8		242.8		242.8		242.8		242.8
有効座屈長	l(片持柱)	485.6		485.6		485.6		485.6		485.6
降伏応力度	σy	2400	1000	2400	1000	2400	2400	2400	2400	2400
弾性係数	E	2.1E+06	2.1E+06	2.1E+06	2.1E+06	2.1E+06	2.1E+06	2.1E+06	2.1E+06	2.1E+06
断面積	A	187.92		187.92		187.92		187.92		149.76
断面2次モーメント	I	47837		49452		47837		49452		44621
断面2次半径	rx	15.955		16.222		15.955		16.222		17.261
細長比パラメータ	λ	0.32751		0.32212		0.32751		0.32212		0.30273
断面係数	Z	1063		1099		1063		1099		992
補剛板幅	b	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	
補剛板板厚	t	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	
ダイヤフラム間隔	a	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	
縦横寸法比	α=a/b	1.0274	1.0274	1.0274	1.0274	1.0274	1.0274	1.0274	1.0274	
補剛材幅		6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	
補剛材板厚		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	
補剛材の断面積比	δl	0.1370	0.0913	0.1370	0.0913	0.1370	0.0913	0.1370	0.0913	
補剛材の剛比	γl	50.2283	14.8825	50.2283	14.8825	50.2283	14.8825	50.2283	14.8825	
パネル数	n	4	3	4	3	4	3	4	3	
限界縦横寸法比	α0	3.7696	2.5993	3.7696	2.5993	3.7696	2.5993	3.7696	2.5993	
板厚(f=1.0)	t0	0.3911	0.5214	0.3911	0.5214	0.3911	0.5214	0.3911	0.5214	
道示必要剛比	γlreq	10.0498	10.7788	10.0498	10.7788	10.0498	10.7788	10.0498	10.7788	
	γl／γlreq	4.9979	1.3807	4.9979	1.3807	4.9979	1.3807	4.9979	1.3807	
最適剛比	γ*	25.0865	14.7284	25.0865	14.7284	25.0865	14.7284	25.0865	14.7284	
	γl／γ*	2.0022	1.0105	2.0022	1.0105	2.0022	1.0105	2.0022	1.0105	
幅厚比パラメータ	R_R	0.324	0.279	0.324	0.279	0.324	0.433	0.324	0.433	
座屈係数	k_F	125.549	36.344	125.549	36.344	125.549	36.344	125.549	36.344	
幅厚比パラメータ	R_F	0.232	0.278	0.232	0.278	0.232	0.431	0.232	0.431	
幅厚比パラメータ	R_h	0.542	0.362	0.542	0.362	0.542	0.362	0.542	0.362	



①	2-PL	450	×	6	×	2609	(SS400)		
②-1	2-PL	438	×	6	×	623	(SS400)		
②-2	8-PL	438	×	6	×	445	(SS400)		
②-3	2-PL	438	×	6	×	180	(SS400)		
③	2-PL	60	×	6	×	2609	(SS400)		
④-1	6-PL	60	×	6	×	604	(SS400)		
④-2	24-PL	60	×	6	×	406	(SS400)		
④-3	2-PL	60	×	6	×	151	(SS400)		
⑤-1	2-PL	438	×	6	×	447	(B9低降伏点鋼、B11 SS400)		
⑤-2	8-PL	438	×	6	×	445	(B9低降伏点鋼、B11 SS400)		
⑤-3	2-PL	438	×	6	×	180	(B9低降伏点鋼、B11 SS400)		
⑥-1	4-PL	40	×	6	×	368	(SS400)		
⑥-2	16-PL	40	×	6	×	366	(SS400)		
⑥-3	4-PL	40	×	6	×	96	(SS400)		
⑦	20-PL	30	×	4.5	×	370	(SS400)		
⑧	5-PL	450	×	4.5	×	438	(SS400)		
⑨	1-PL	710	×	22	×	710	(SS400)		
⑩	2-PL	429	×	19	×	800	(SS400)		
⑪	1-PL	800	×	19	×	800	(SS400)		

裏当て材				
4-FB	25	× 4.5	× 623	(SS400相当)
4-FB	25	× 4.5	× 447	(SS400相当)
32-FB	25	× 4.5	× 445	(SS400相当)
8-FB	25	× 4.5	× 180	(SS400相当)
22-FB	25	× 4.5	× 438	(SS400相当)
44-FB	25	× 4.5	× 87	(SS400相当)
44-FB	25	× 4.5	× 73	(SS400相当)

注記
1. ベース部の構造詳細は(その2)図面による。

図-参考-3.3.1(2)　試験体の形状・寸法(B9、B11)

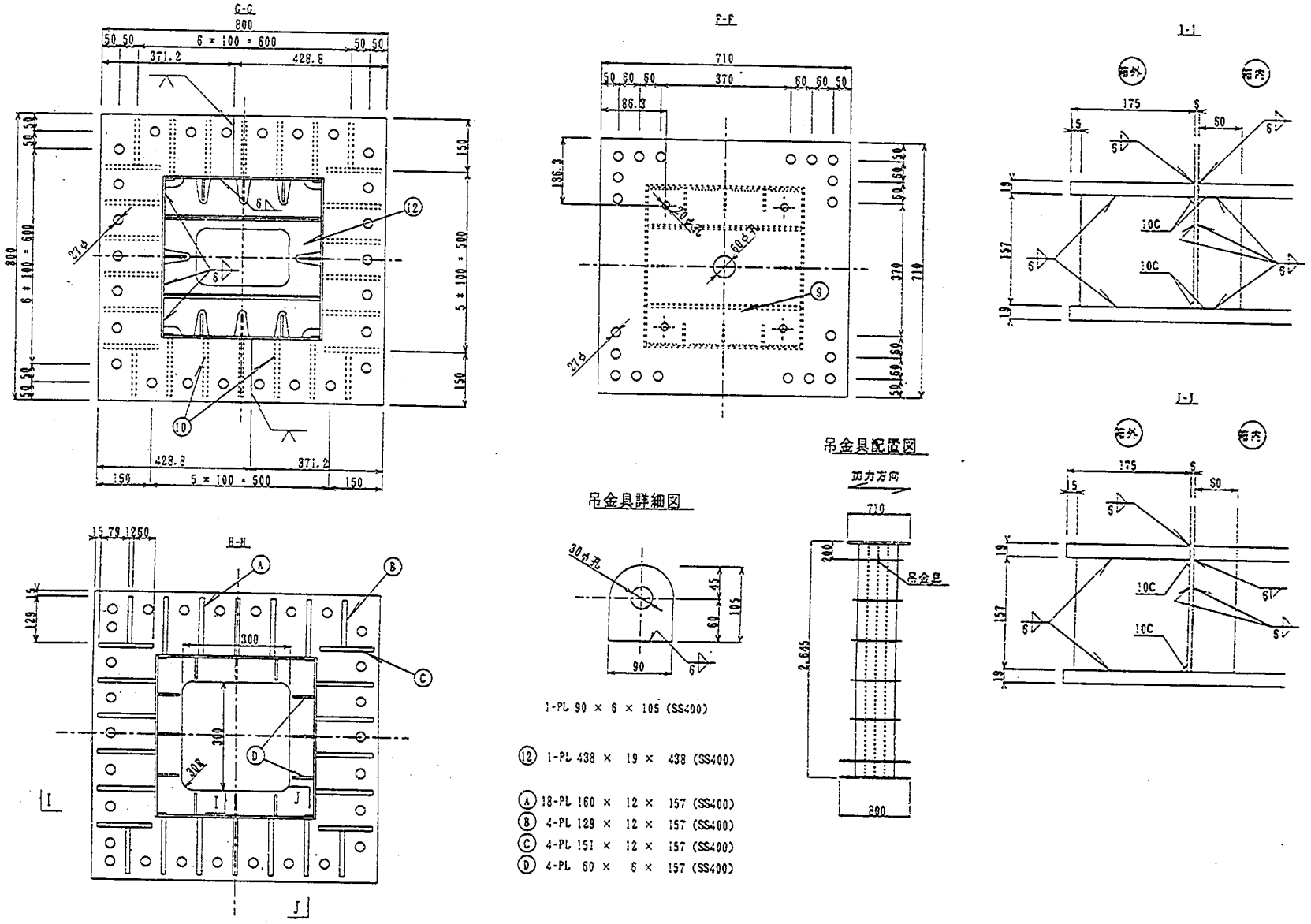
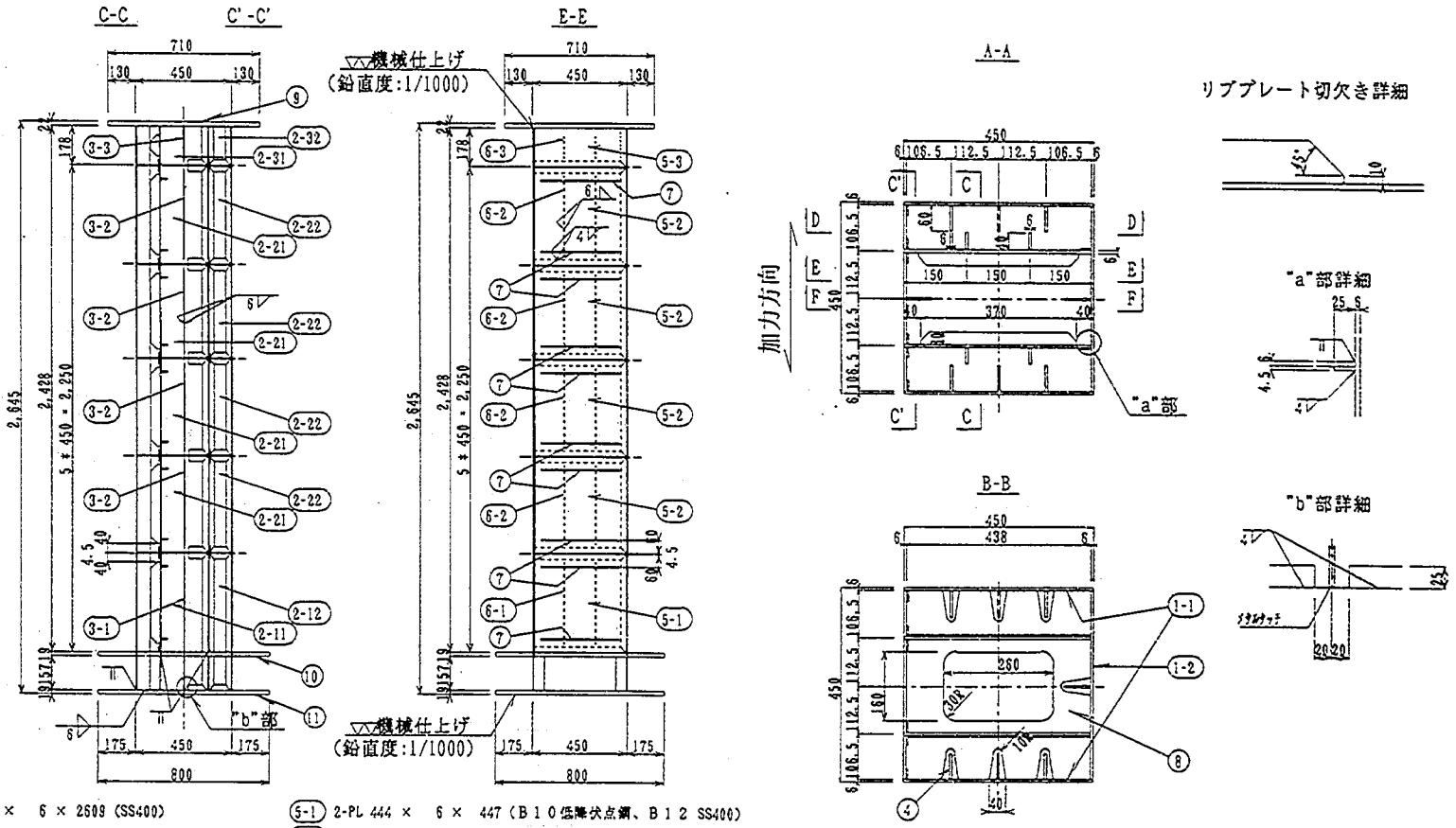


図-参考-3.3.1(2)　試験体の形状・寸法(Ｂ９、Ｂ11)(続き)



(1-1)	2-PL	450 ×	6 ×	2609	(SS400)		
(1-2)	1-PL	438 ×	6 ×	2609	(SS400)		
(2-11)	1-PL	219 ×	6 ×	623	(SS400)		
(2-12)	2-PL	103 ×	6 ×	623	(SS400)		
(2-21)	4-PL	219 ×	6 ×	445	(SS400)		
(2-22)	8-PL	103 ×	6 ×	445	(SS400)		
(2-31)	1-PL	219 ×	6 ×	180	(SS400)		
(2-32)	2-PL	103 ×	6 ×	180	(SS400)		
(3-1)	1-PL	60 ×	6 ×	604	(SS400)		
(3-2)	4-PL	60 ×	6 ×	406	(SS400)		
(3-3)	1-PL	60 ×	6 ×	161	(SS400)		
(4)	7-PL	60 ×	6 ×	2609	(SS400)		

(5-1)	2-PL	444 ×	6 ×	447	(B10低降伏点鋼、B12 SS400)		
(5-2)	8-PL	444 ×	6 ×	445	(B10低降伏点鋼、B12 SS400)		
(5-3)	2-PL	444 ×	6 ×	180	(B10低降伏点鋼、B12 SS400)		
(6-1)	4-PL	40 ×	6 ×	368	(SS400)		
(6-2)	16-PL	40 ×	6 ×	366	(SS400)		
(6-3)	4-PL	40 ×	6 ×	96	(SS400)		
(7)	20-PL	30 ×	4.5 ×	370	(SS400)		
(8)	5-PL	444 ×	4.5 ×	438	(SS400)		
(9)	1-PL	710 ×	22 ×	710	(SS400)		
(10)	2-PL	429 ×	19 ×	800	(SS400)		
(11)	1-PL	800 ×	19 ×	800	(SS400)		

裏当て材

22-FB	25 ×	4.5 ×	433	(SS400相当)		
6-FB	25 ×	4.5 ×	447	(SS400相当)		
24-FB	25 ×	4.5 ×	445	(SS400相当)		
6-FB	25 ×	4.5 ×	180	(SS400相当)		
22-FB	25 ×	4.5 ×	103	(SS400相当)		
22-FB	25 ×	4.5 ×	86	(SS400相当)		

注記
1.ベース部の構造寸法は(その5)図面による。

図-参考-3.3.1(3)　試験体の形状・寸法(B10、B12)

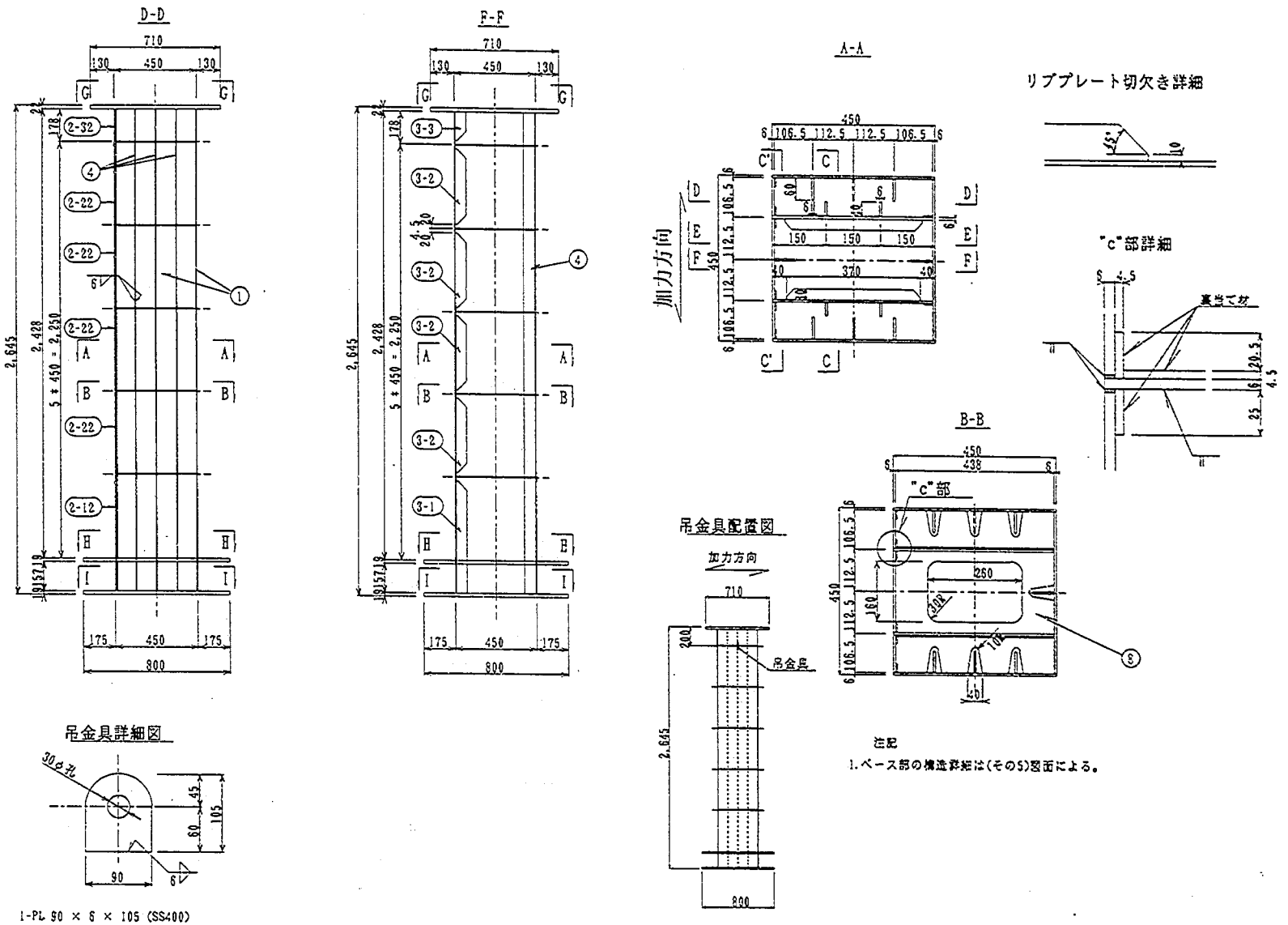


図-参考-3.3.1(3)　試験体の形状・寸法(B10、B12)(続き)

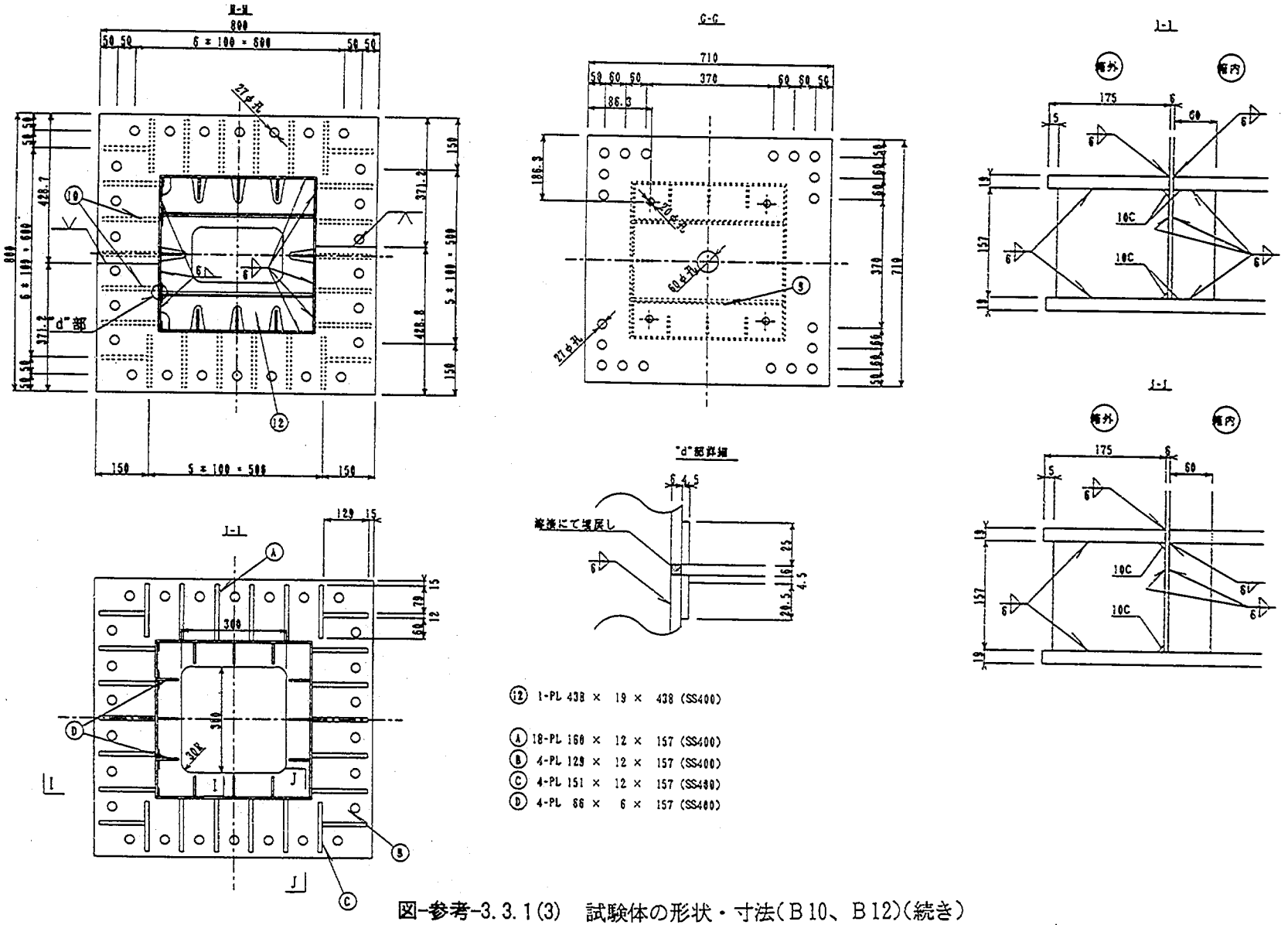


図-参考-3.3.1(3)　試験体の形状・寸法(B10、B12)(続き)

矩形断面のフランジ、ウェブを構成する補剛板の板厚tはt＝6㎜、縦方向補剛材の寸法は60㎜×6㎜とした。マルチセル構造の内壁の板厚は6㎜とし、内壁の縦方向補剛材は圧縮側補剛材として設計し、寸法は40㎜×6㎜とした。鋼種は、フランジ、ウェブは普通鋼とし、内壁は低降伏点鋼と普通鋼を供試体によって使い分けた。供試体基部から450㎜間隔で板厚4.5㎜のダイアフラムを設置した。

供試体の設計は基準降伏応力を用いて、構造パラメータを計算して決定した。各パラメータの値は、フランジ、ウェブの幅厚比パラメータR_Rが$R_R \leq 0.4$、補剛材剛比γ/γ'が$\gamma/\gamma' \geq 2$、内壁のR_Rは$R_R \leq 0.5$、γ/γ'は$\gamma/\gamma' \geq 1$とした。この値は、内壁については道路橋示方書[2]の補剛板レベルとし、フランジ、ウェブについてはそれ以上となるように意図したものである。

供試体の寸法が小さいために、外側から溶接作業を行って製作した。また、載荷直角方向のフランジと載荷方向に平行なウェブの内の片方は供試体基部から載荷点まで連続であるが、ウェブの残りはダイアフラム毎に1パネルずつ分かれている構造とした。

3.3.2 実験装置

実験装置の写真を写真-参考-3.3.2(1),(2)に示す。図-参考-3.3.2に示すように載荷柱、載荷梁を組み立て、載荷梁に鉛直力載荷用の油圧ジャッキを固定し、反力壁に水平力載荷用のアクチュエータを固定した。鉛直力載荷用の油圧ジャッキと載荷梁の間にはスライド装置を配置し、鉛直力載荷用の油圧ジャッキを制御する油圧ポンプには一定荷重保持装置を配置した。これらの装置により、上部構造の重量に相当する一定鉛直力は供試体が水平に変位した状態においても載荷が可能となる。

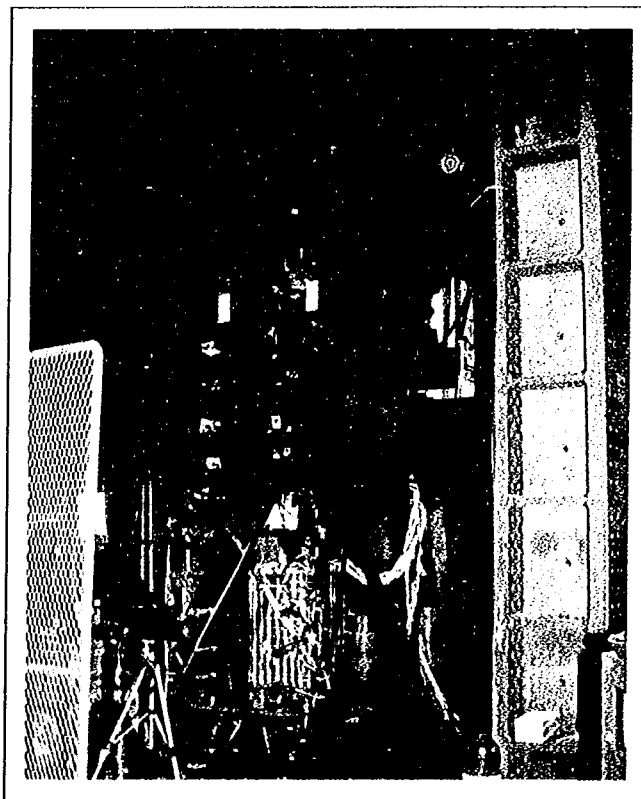


写真-参考-3.3.2(1)　実験装置(斜視図)

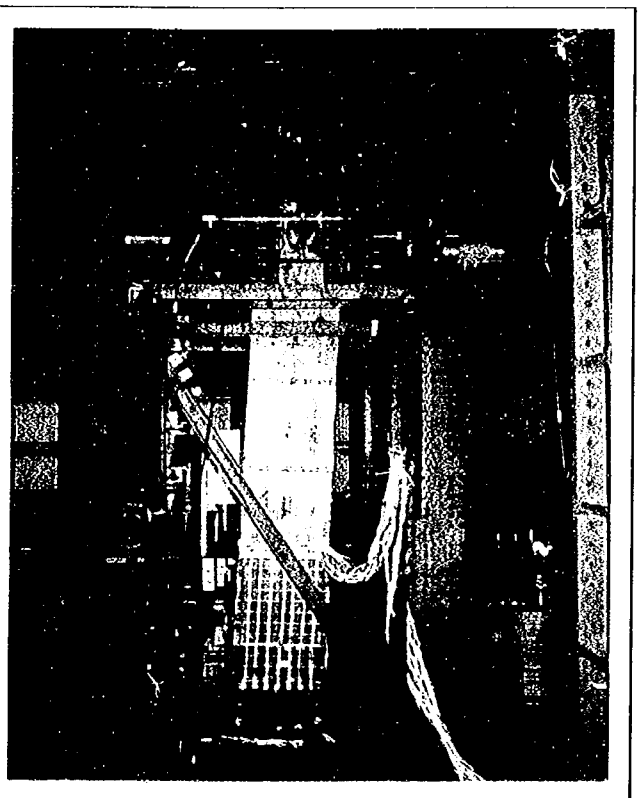
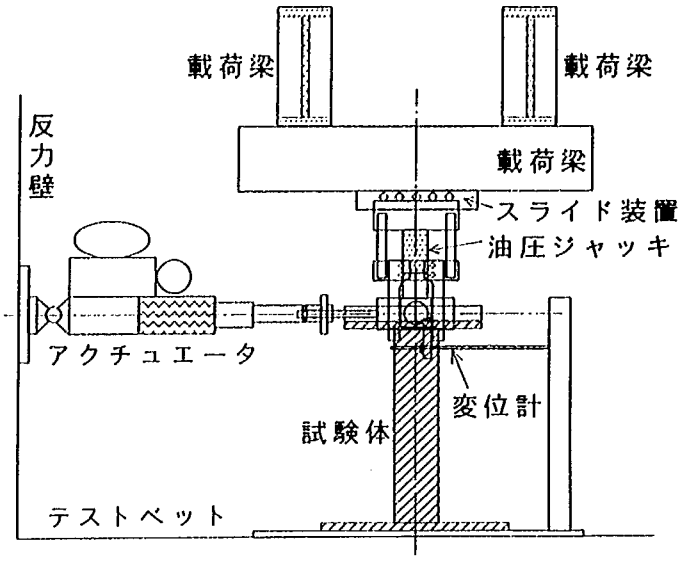
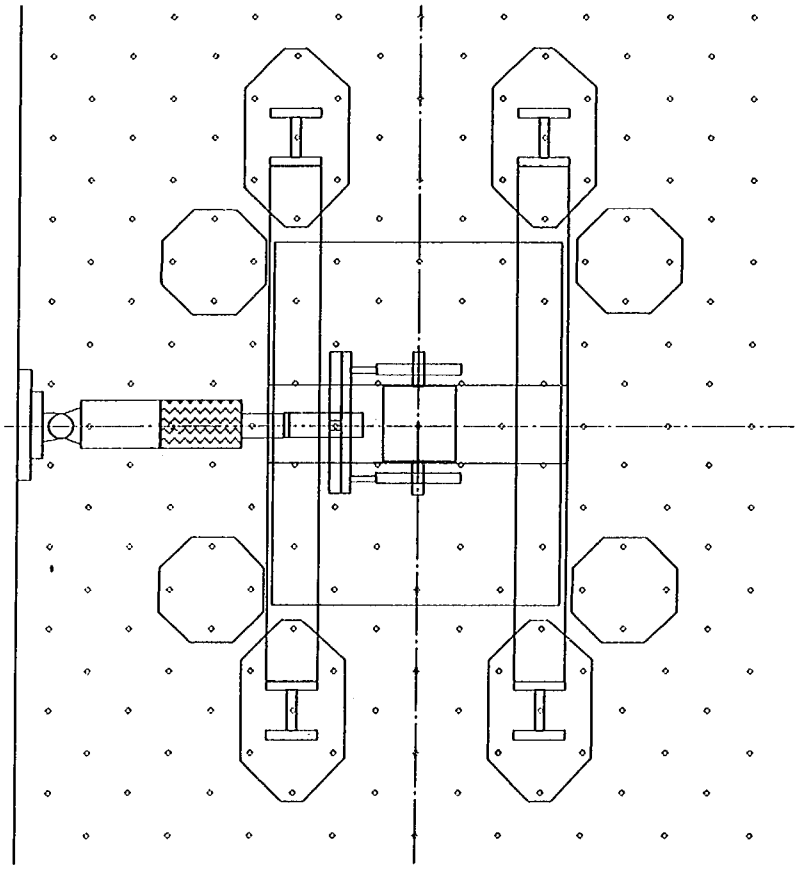


写真-参考-3.3.2(2)　実験装置(側面図)



(a)側面図



(b)平面図

図-参考-3.3.2　載荷フレーム

3.3.3 載荷方法

供試体に上部構造重量に相当する軸力Ｎを載荷した後、その軸力を一定に保持した状態で、図-参考-3.3.3(1)に示すように水平変位制御による水平繰返し漸増載荷を実施した。軸力の算出には図-参考-3.3.3(2)に示すような内壁を用いない通常の補剛断面を仮定し、軸力Ｎは普通鋼の基準降伏応力2,400 kgf/cm^{2}および公称板厚６㎜を用いて算出した降伏軸力の15％とした。

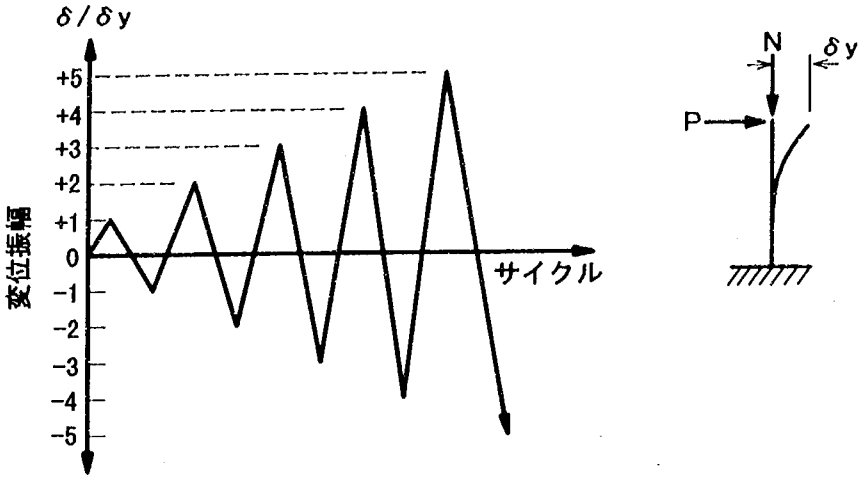


図-参考-3.3.3(1)　載荷方法

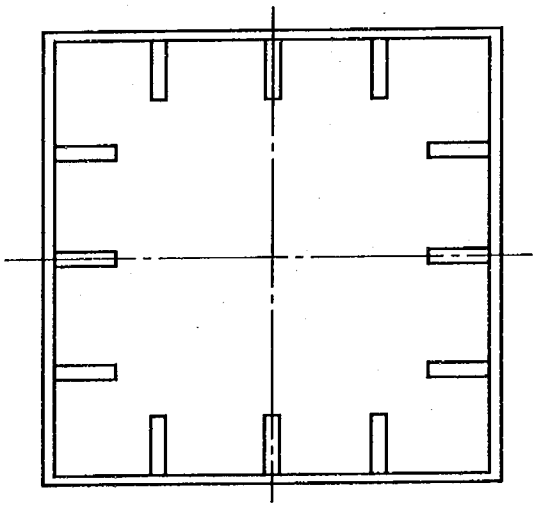


図-参考-3.3.3(2)　軸力算出に用いた断面

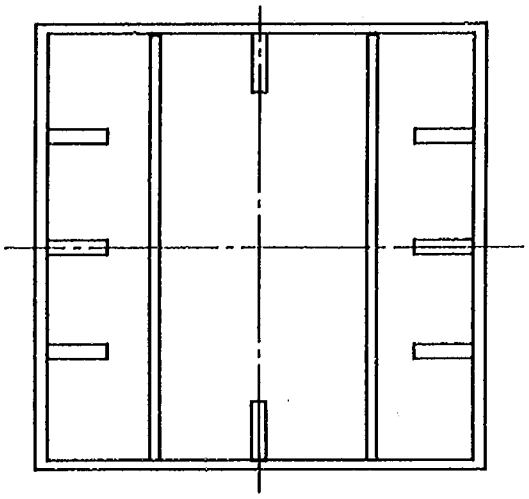


図-参考-3.3.3(3)　降伏変位算出に用いた断面

繰返しの基本水平変位であるδ_yの算出には、図-参考-3.3.3(3)に示す実際の供試体の断面で、実測降伏応力(普通鋼は3,118kgf/cm^2)と実測板厚(普通鋼は5.77mm、低降伏点鋼は5.89mm)を用いた。

まず、式(3.3.1)により、補剛板が降伏するまで内壁が降伏しないとして軸力Nを考慮した降伏荷重P_yを算出した。次に、式(3.3.2)により、曲げ変形δ_bおよび剪断変形δ_sを考慮した降伏変位δ_yを算出した。

$$P_y=(1-N/N_y)\cdot\sigma_y\cdot(Z/h) \qquad \cdots\cdots(3.3.1)$$

$$\delta_y=\delta_b+\delta_s$$
$$=\{P_y\cdot h^3/(3EI)\}+\{P_y\cdot h/(\kappa GA)\} \qquad \cdots\cdots(3.3.2)$$

この降伏変位δ_yを基準として、図-参考-3.3.3(1)に示すように$\pm\delta_y$、$\pm 2\delta_y$、$\pm 3\delta_y$、・・・・、$\pm n\delta_y$と漸次振幅を増加させながら載荷し、各振幅における繰返し回数は1回とした。載荷は荷重が降伏荷重P_y以下に低下するまで実施した。

3.3.4　計測方法

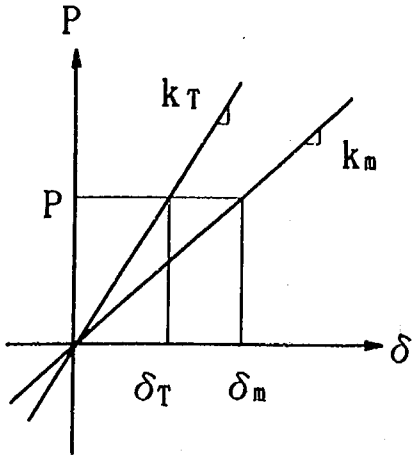
実験において計測した項目について、以下に示す。

(1)荷重

鉛直荷重は鉛直力載荷用油圧ジャッキと供試体との間に配置したロードセルにより、水平荷重は水平力載荷用アクチュエータと供試体の間には配置したロードセルにより測定した。

(2)変位

供試体の水平変位は供試体上部に配置した変位計により計測した。供試体基部は治具に固定されている



$$\delta_T = \delta_m - P\left(\frac{1}{k_m} - \frac{1}{k_T}\right)$$

図-参考-3.3.4(2)　変位の補正方法

のが一般的であり、この固定治具が載荷時に弾性変形するため、計測変位δ_mは理論変位δ_T(曲げ変形と剪断変形を考慮)よりも大きい（図-参考-3.3.4(2)）。実験時に治具の弾性変形を取り除くため、実験に先立ち弾性範囲内で変位を与え、その反力から算出した実測剛性k_mを算出し、このk_mと理論剛性k_Tとの差は荷重Pに比例するものと仮定して、式(3.3.3)のように弾性変形を取り除いた変位δを算出して制御変位とした。

$$\delta = \delta_m - P\cdot\{(1/k_m)-(1/k_T)\} \qquad \cdots\cdots(3.3.3)$$

3.4　実験結果

3.4.1　材料試験結果

供試体の製作に用いた鋼板からＪＩＳ５号試験片をロール方向およびロール直角方向に３本ずつ製作し、これらの試験片により引張試験を実施して、上降伏点、下降伏点、引張強度、および破断伸びを求めた。鋼材の材料試験結果を表-参考-3.4.1に示す。

3.4.2　実験結果一覧

鋼材の材料試験結果に基づいた供試体の構造パラメータを表-参考-3.4.2(1)に、実験結果一覧を表-参考-3.4.2(2)に示す。

表-参考-3.4.1　鋼材の材料試験結果

試験体	鋼種	公称板厚 (mm)	試験体の採取方向	試験体に使用する部位	製作図面の番号		板厚 (mm)	板幅 (mm)	断面積 (mm^2)	上降伏点 (kgf/cm^2)	下降伏点 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)	破断伸び (%)
B9 B10 B11 B12	SS400	6	ロール方向	ウェブ，フランジ内壁，縦リブ	①、②、③ ④、⑤、⑥	No. 1	5.76	25.22	145.30	3149	3107	4511	38.7
						No. 2	5.76	25.18	145.09	3239	3167	4518	40.0
						No. 3	5.76	25.25	145.37	3274	3123	4506	38.9
						No. 4	5.76	25.26	145.57	3325	3122	4472	36.0
						平均	5.76	25.23	145.28	3247	3130	4502	38.4
	SS400	6	ロール直角方向	ウェブ，フランジ内壁，縦リブ	①、②、③ ④、⑤、⑥	No. 1	5.80	25.20	146.21	3211	3126	4521	38.7
						No. 2	5.79	25.23	146.12	3176	3134	4520	39.5
						No. 3	5.77	25.22	145.41	3112	3047	4456	41.0
						No. 4	—	—	—	—	—	—	—
						平均	5.79	25.23	146.00	3166	3102	4499	39.7
	NK-LY100	6	ロール方向	内壁	⑤	No. 1	5.90	25.17	148.51	—	1018	2683	61.0
						No. 2	5.90	25.12	148.71	—	1105	2683	61.0
						No. 3	5.89	25.22	148.61	—	1123	2675	60.9
						No. 4	5.90	25.15	148.45	—	1159	2681	60.7
						平均	5.90	25.17	148.57	—	1101	2681	60.9
	NK-LY100	6	ロール直角方向	内壁	⑤	No. 1	5.81	25.32	147.02	—	963.1	2634	61.9
						No. 2	5.84	25.25	147.43	—	1004	2676	62.1
						No. 3	5.95	25.17	149.84	—	1052	2650	62.4
						No. 4	5.96	25.23	150.29	—	1017	2618	62.5
						平均	5.89	25.24	148.65	—	1009	2644	62.2

（備考）ＪＩＳ５号試験片、標点距離50mm
NK-LY100の降伏強度は0.2%オフセット耐力で求めた。

表-参考-3.4.2(1)　供試体の構造パラメータ（実測値）

パラメータ		B9 低降伏点鋼 シェアウォール	B10 低降伏点鋼 ダブルフランジ	B11 普通鋼 シェアウォール	B12 普通鋼 ダブルフランジ	B6(5) 低降伏点鋼 シェアウォール
降伏応力	普通鋼	3118	3118	3118	3118	2772
σ_y(kgf/cm^2)	低降伏点鋼	1055	1055	1055	1055	889
断面幅B(cm)		45	45	45	45	90
試験体高さh(cm)		250	250	250	250	342.3
幅厚比パラメータ(1) R_R		0.396	0.396	0.396	0.396	0.432
細長比パラメータ(1) $\bar{\lambda}$		0.364	0.364	0.364	0.364	0.230
補剛材剛比(1) γ/γ^*		2.18	2.18	2.18	2.18	1.92
全断面降伏軸力(1) N_y(tonf)		463	463	463	463	1380
軸力(2) N(tonf)		53.9	53.9	53.9	53.9	192.8
軸力比N/N_y		0.117	0.117	0.117	0.117	0.140
降伏荷重(3) P_y(tonf)		22.56	23.30	22.48	23.23	107.94
降伏変位(4) δ_y(cm)		1.28	1.32	1.28	1.32	1.11
κ		0.568	0.353	0.568	0.353	0.532
弾性剛性k(tonf/cm)		17.66	17.62	17.60	17.57	97.40

（1）$\gamma = 2\gamma^*$の縦方向補剛材3本で一辺を補剛している矩形断面(板厚、降伏応力は実測値）の値
（2）$\gamma = 2\gamma^*$の縦方向補剛材3本で一辺を補剛している矩形断面(板厚、降伏応力は公称値）の全断面降伏軸力の15%
（3）降伏荷重P_yは、軸力を考慮した値
（4）降伏変位δ_yは、曲げ変形と剪断変形を考慮した値
（5）内壁の縦方向補剛材は、構造計算に考慮していない

表-参考-3.4.2(2)　実験結果一覧

	B9 低降伏点鋼 シェアウォール	B10 低降伏点鋼 ダブルフランジ	B11 普通鋼 シェアウォール	B12 普通鋼 ダブルフランジ	B6 低降伏点鋼 シェアウォール
降伏荷重 P_y(tonf)	22.56	23.30	22.48	23.23	107.94
最大水平荷重 P_u(tonf)	38.43	36.48	44.13	39.68	172.37
荷重上昇率 P_u/P_y	1.70	1.57	1.96	1.71	1.60
降伏変位 δ_y(cm)	1.28	1.32	1.28	1.32	1.11
最大荷重時の変位 δ_m(cm)	7.61	6.61	7.67	6.62	6.69
δ_{97}(cm)	8.37	7.92	8.27	7.81	8.05
δ_{95}(cm)	8.88	8.35	8.68	8.15	8.54
δ_{lim}(cm)(1)	8.89	7.93	7.67	7.94	7.75
δ_u(cm)	12.90	12.66	10.46	12.30	14.73
δ_m/δ_y	5.95	5.01	5.99	5.02	6.03
δ_{97}/δ_y	6.54	6.00	6.46	5.92	7.25
δ_{95}/δ_y	6.94	6.33	6.78	6.17	7.69
δ_{lim}/δ_y	6.95	6.01	5.99	6.02	6.98
δ_u/δ_y	10.08	9.59	8.17	9.32	13.27

（1）荷重～変位履歴曲線の各々の変位折り返し点において、この点と同じ変位における次の繰返し載荷のループの水平荷重が、P_uの２％以上低下していない最大の変位折り返し点の水平変位

3.4.3 水平荷重－水平変位関係(ヒステリシスループ)

図-参考-3.4.3(1)～(4)に降伏荷重P_yと降伏変位δ_yで基準化した各供試体の水平荷重－水平変位関係(ヒステリシスループ)を示す。

B9供試体の実験結果を、建設省土木研究所で実施したB6供試体と比較して図-参考-3.4.3(5)に示す。両者の履歴曲線は、最大荷重までほぼ等しく、最大荷重以降の劣化勾配が異なっている。これは供試体の寸法効果と細長比パラメータの違い[3)]の影響によるものと考えられる。

マルチセル構造の内壁の鋼種の違いによる影響を、B9供試体(低降伏点鋼)とB11供試体(普通鋼)、B10供試体(低降伏点鋼)とB12供試体(普通鋼)で比較する。図-参考-3.4.3(6)の水平荷重－水平変位関係に示すように、低降伏点鋼を用いた供試体の方が劣化勾配が緩やかであり、最大耐力を越えて降伏耐力まで強度が低下したときを終局状態とした塑性率μ_uが普通鋼を用いた供試体よりも大きい。最大耐力P_{max}は、強度の高い普通鋼を用いた供試体の方が、低降伏点鋼を用いた供試体よりも大きい。

マルチセル構造の内壁の配置の違いによる影響を、B9供試体(シェアウォール)とB10供試体(ダブルフランジ)、B11供試体(シェアウォール)とB12供試体(ダブルフランジ)で比較する。図-参考-3.4.3(7)の水平荷重－水平変位関係に示すように、どちらの鋼種を用いた場合も、最大耐力はシェアウォール構造の方がダブルフランジ構造よりも高いが、塑性率μ_uは内壁の配置に依存しない。

3.4.4 包絡線

降伏荷重P_yと降伏変位δ_yで基準化した各供試体の水平荷重－水平変位関係において正側(第1象限)の包絡線を図-参考-3.4.4に示す。

3.4.5 水平変位－鉛直変位関係

図-参考-3.4.5(1)～(4)に水平変位－鉛直変位関係を示す。内壁に低降伏点鋼を用いた供試体（B9とB10）の方が、普通鋼を用いた供試体（B11とB12）よりも鉛直変位が大きかった。

3.4.6 エネルギー吸収量

図-参考-3.4.6(1)に各サイクルにおける水平変位δ/δ_yと、基準エネルギー$W(=H_y \cdot \delta_y)$で基準化したエネルギー吸収量$\triangle W/W$の関係を示す。エネルギー吸収量は、次の通り算出した。

1サイクルの吸収エネルギーは、履歴曲線と変位軸とで囲まれる面積で表すことができ、図-参考-3.4.6(2)の(a), (b)の斜線部分のようになる。これを(c)のように台形積分により算出した。

マルチセル構造の内壁の鋼種の違いによる影響を、B9供試体(低降伏点鋼)とB11供試体(普通鋼)、B10供試体(低降伏点鋼)とB12供試体(普通鋼)で比較する。1サイクルのエネルギー吸収量の最大までは鋼種による差は見られず、最大値以降は低降伏点鋼を用いた供試体の方がエネルギー吸収量が大きい。最大耐力P_{max}は普通鋼を用いた供試体の方が大きいが、各サイクルでのループの膨らみが低降伏点鋼を用いた供試体の方が大きいためと考えられる。

低降伏点鋼　シェアウォール

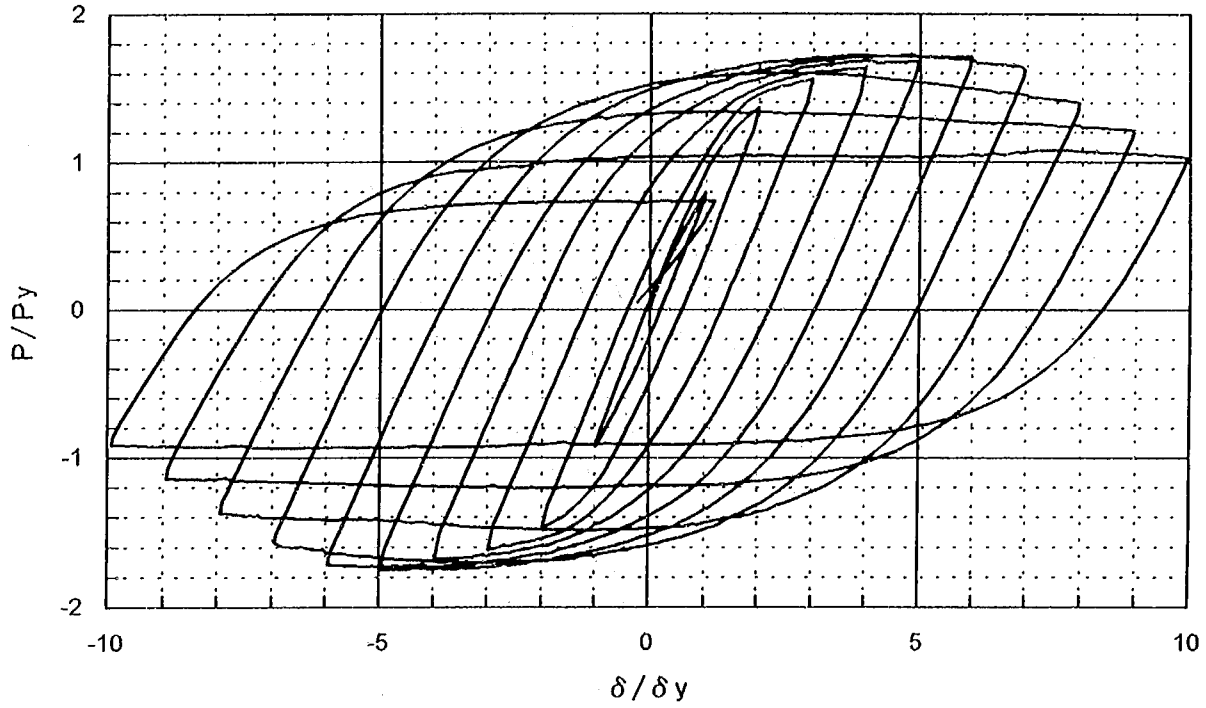


図-参考-3.4.3(1)　水平荷重－水平変位関係(B 9)

低降伏点鋼　ダブルフランジ

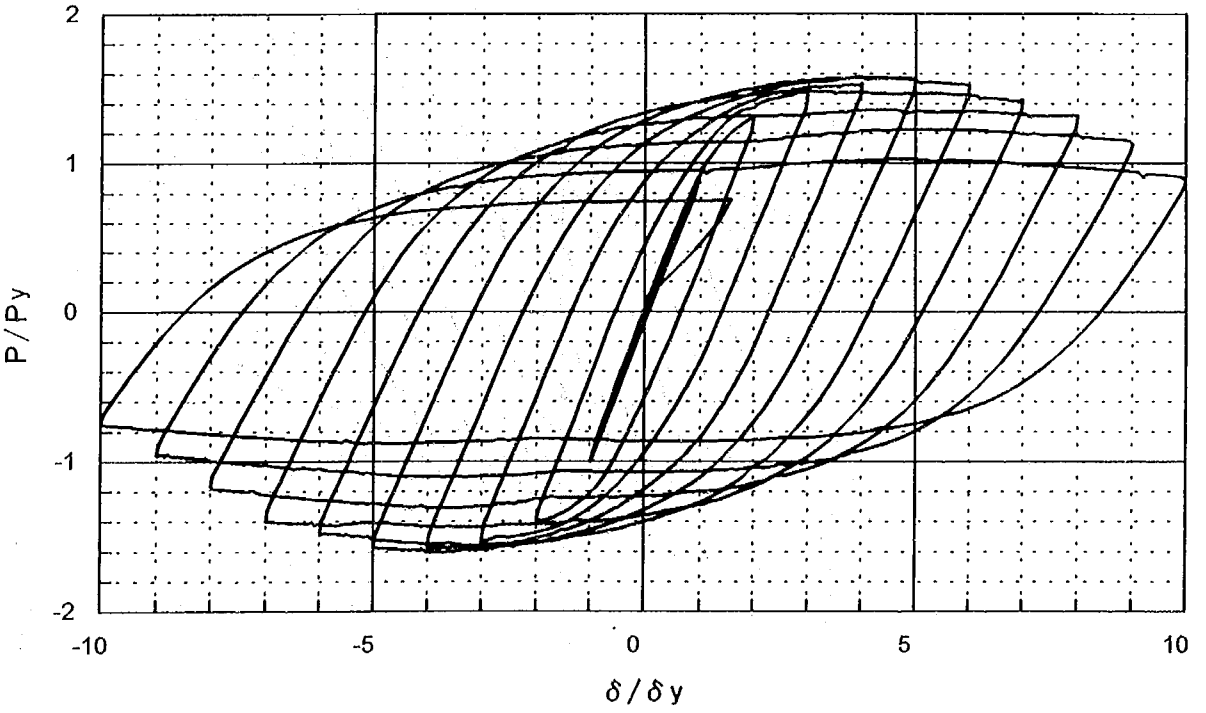


図-参考-3.4.3(2)　水平荷重－水平変位関係(B 10)

普通鋼　シェアウォール

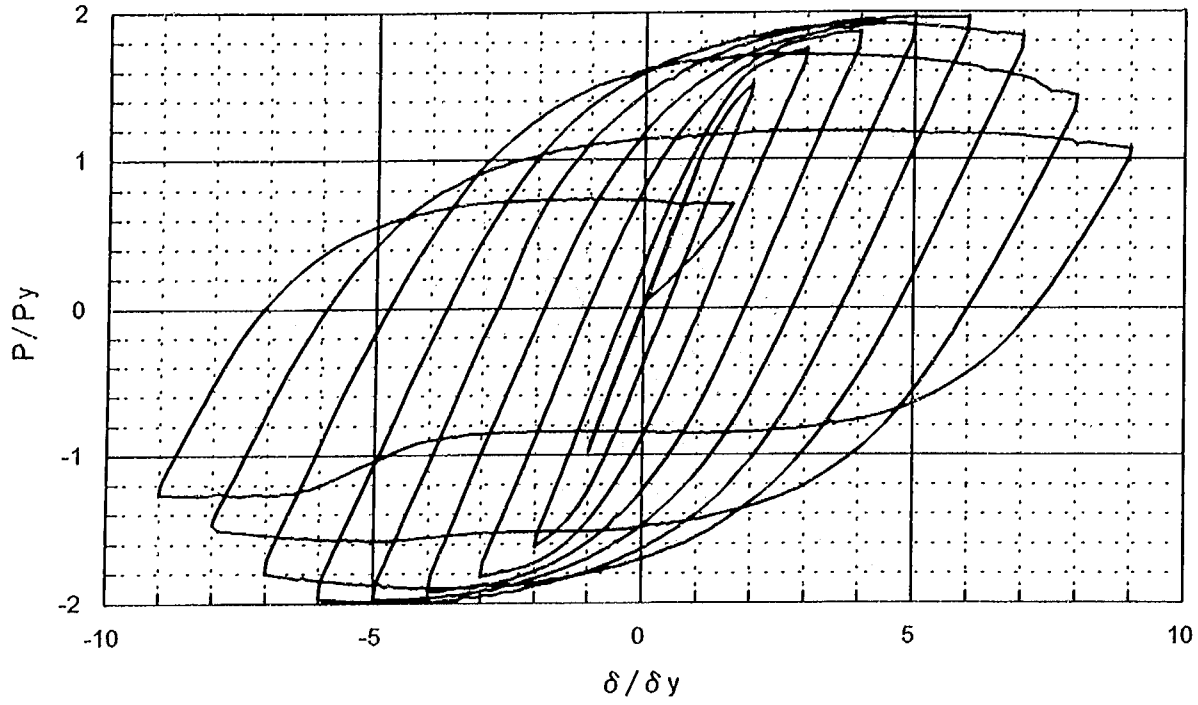


図-参考-3.4.3(3)　水平荷重－水平変位関係（B11）

普通鋼　ダブルフランジ

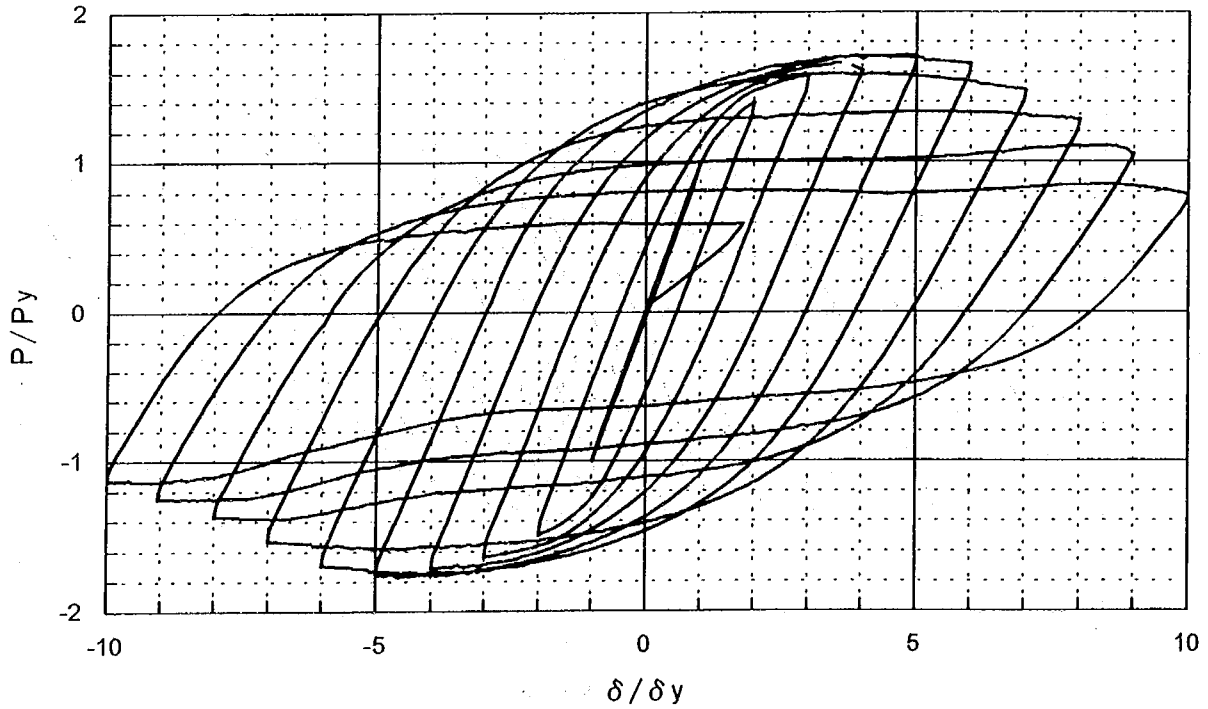


図-参考-3.4.3(4)　水平荷重－水平変位関係（B12）

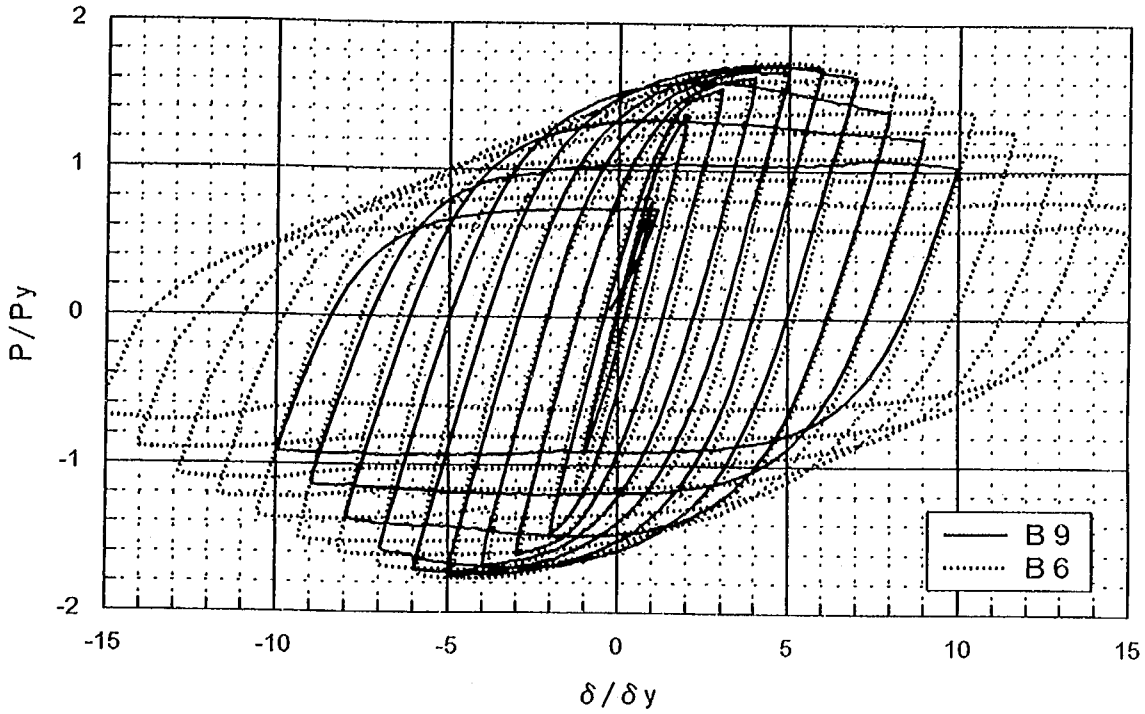
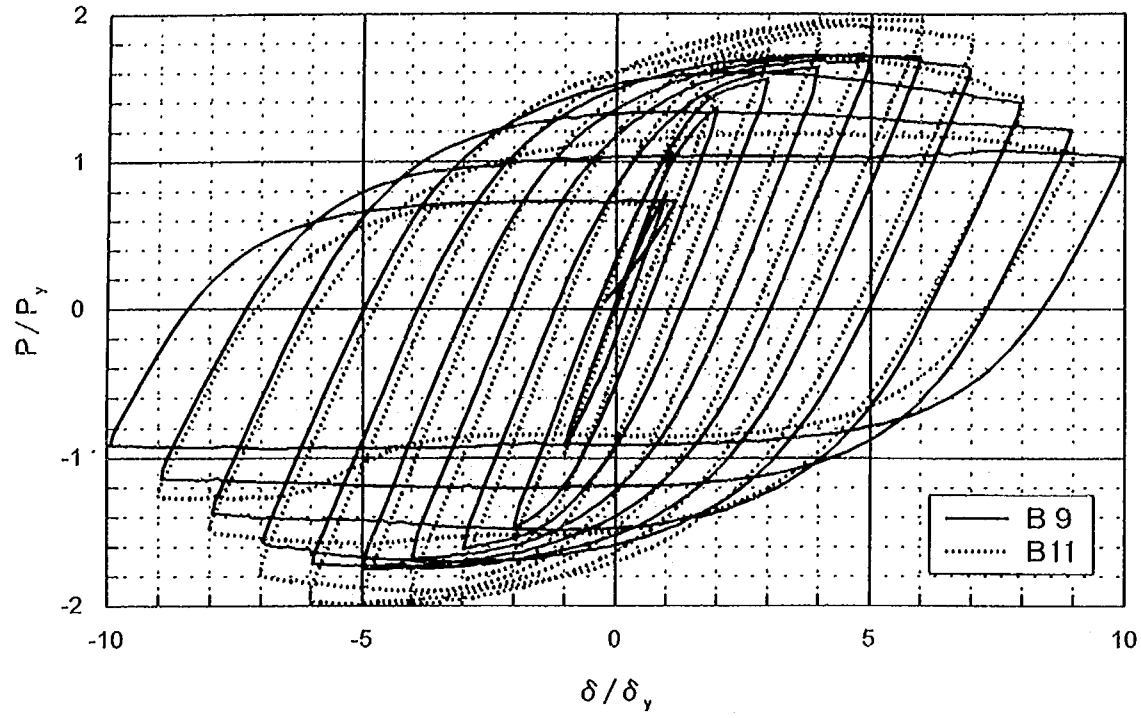
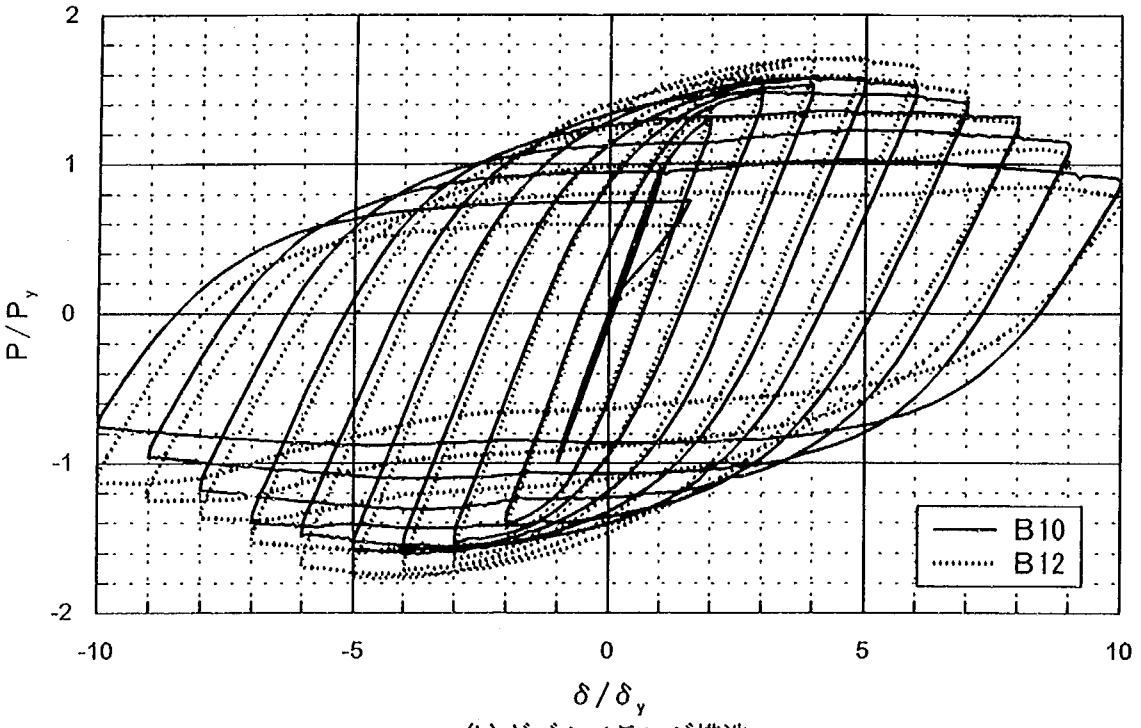


図-参考-3.4.3(5)　　B６供試体とB９供試体の比較

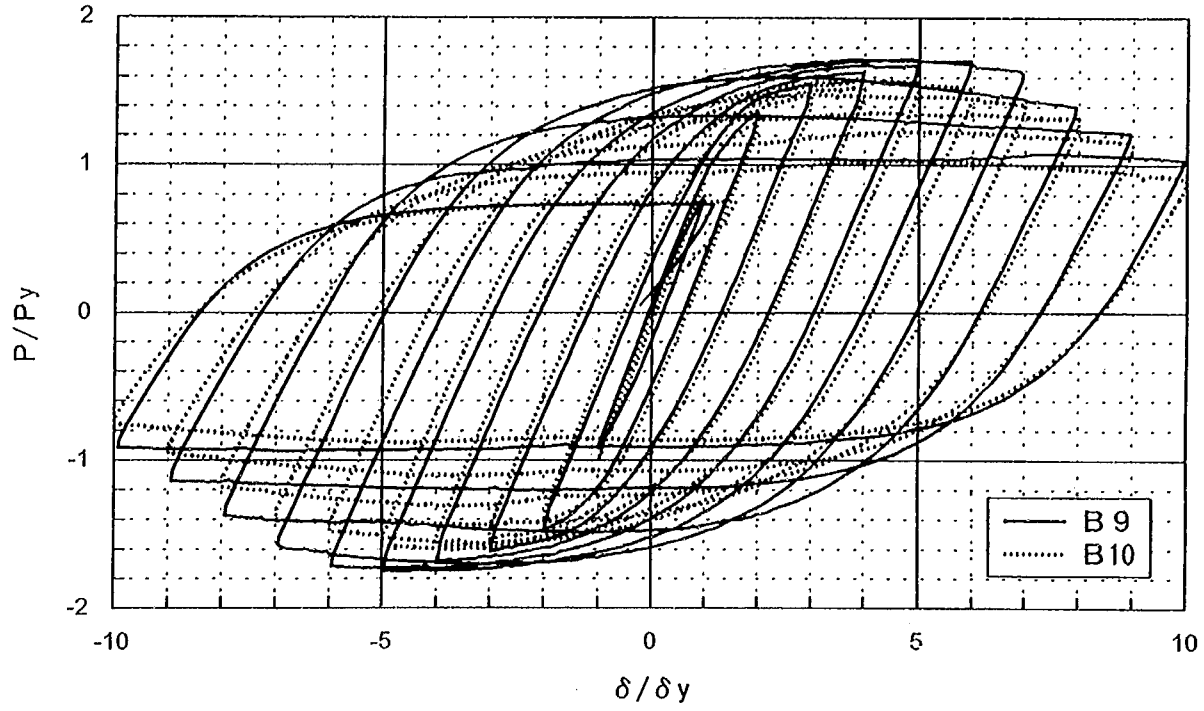


(a) シェアウォール構造

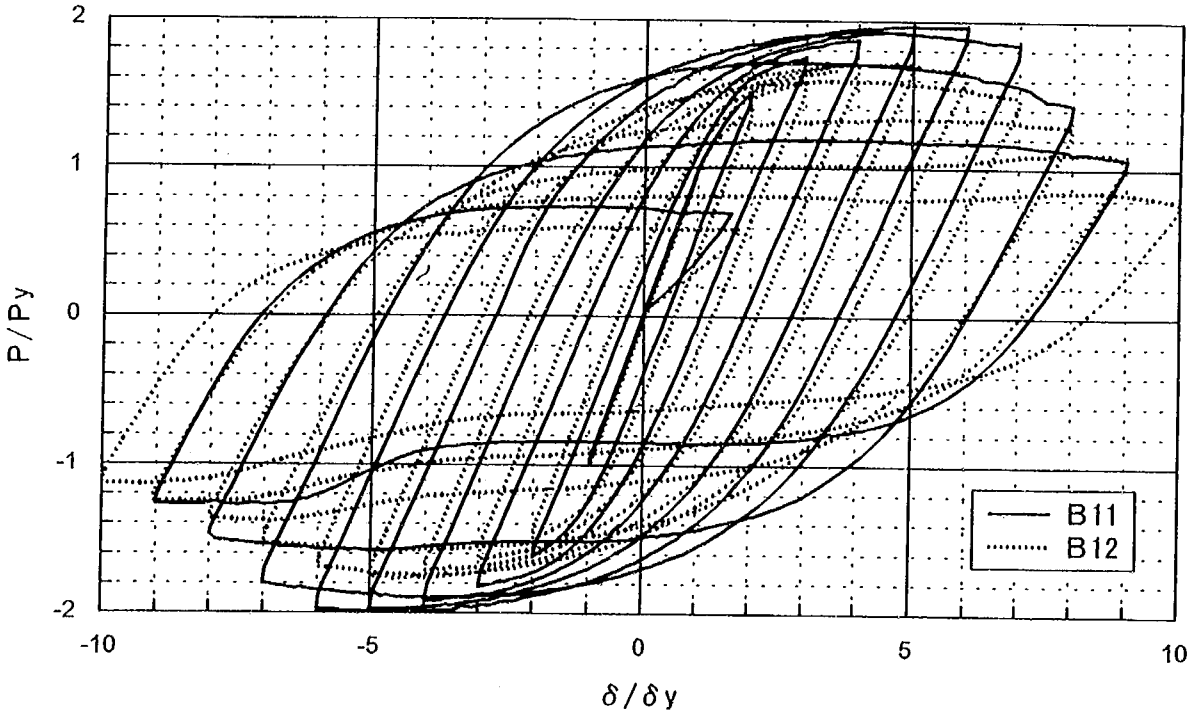


(b) ダブルフランジ構造

図-参考-3.4.3(6)　内壁の鋼種の違いによる比較



(a)低降伏点鋼



(b)普通鋼

図-参考-3.4.3(7)　内壁の配置の違いによる影響

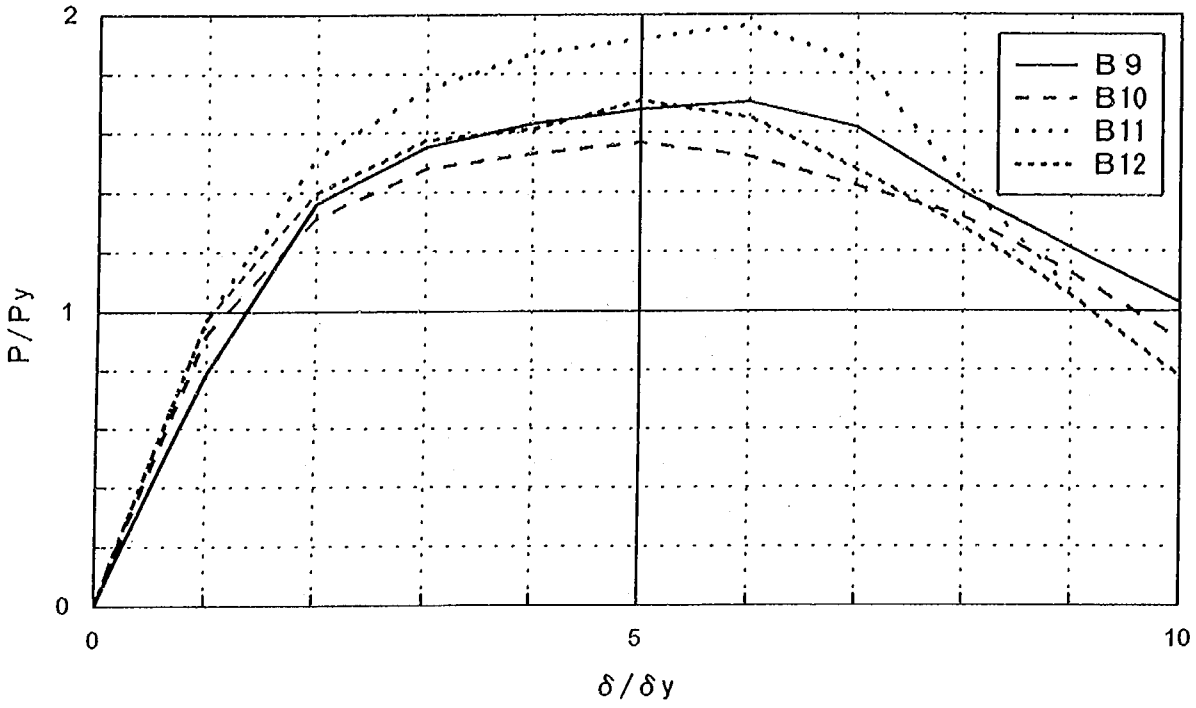


図-参考-3.4.4　水平荷重－水平変位関係の包絡線

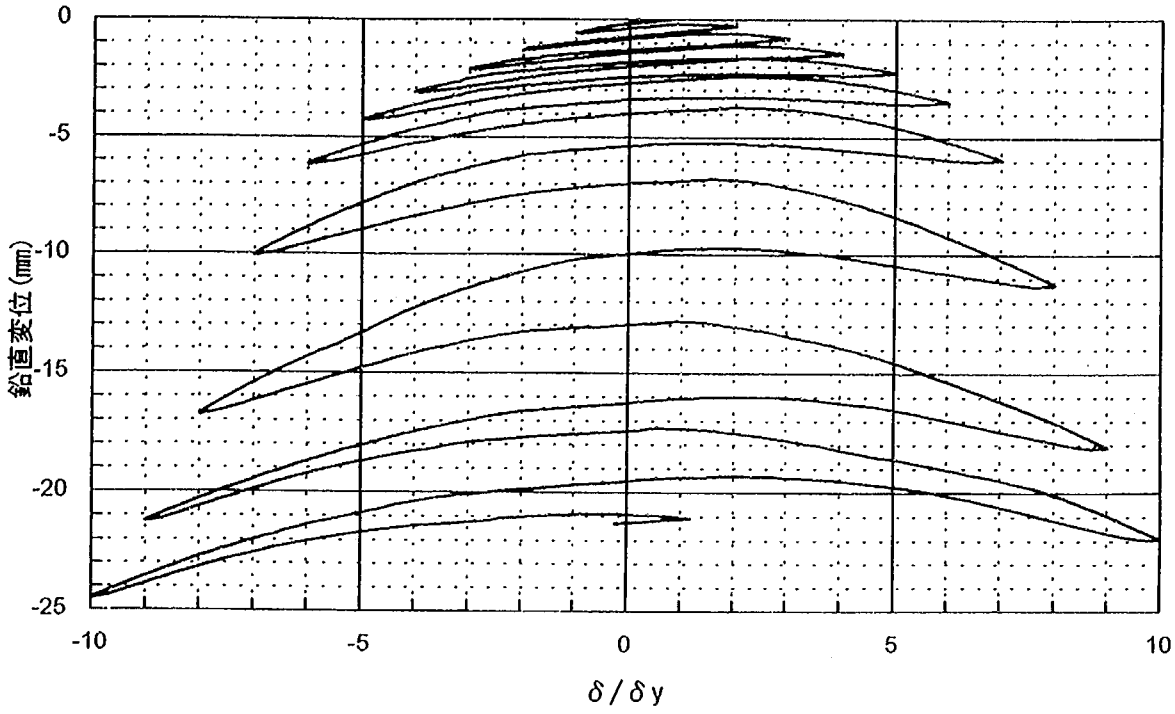


図-参考-3.4.5(1)　水平変位－鉛直変位関係(B 9)

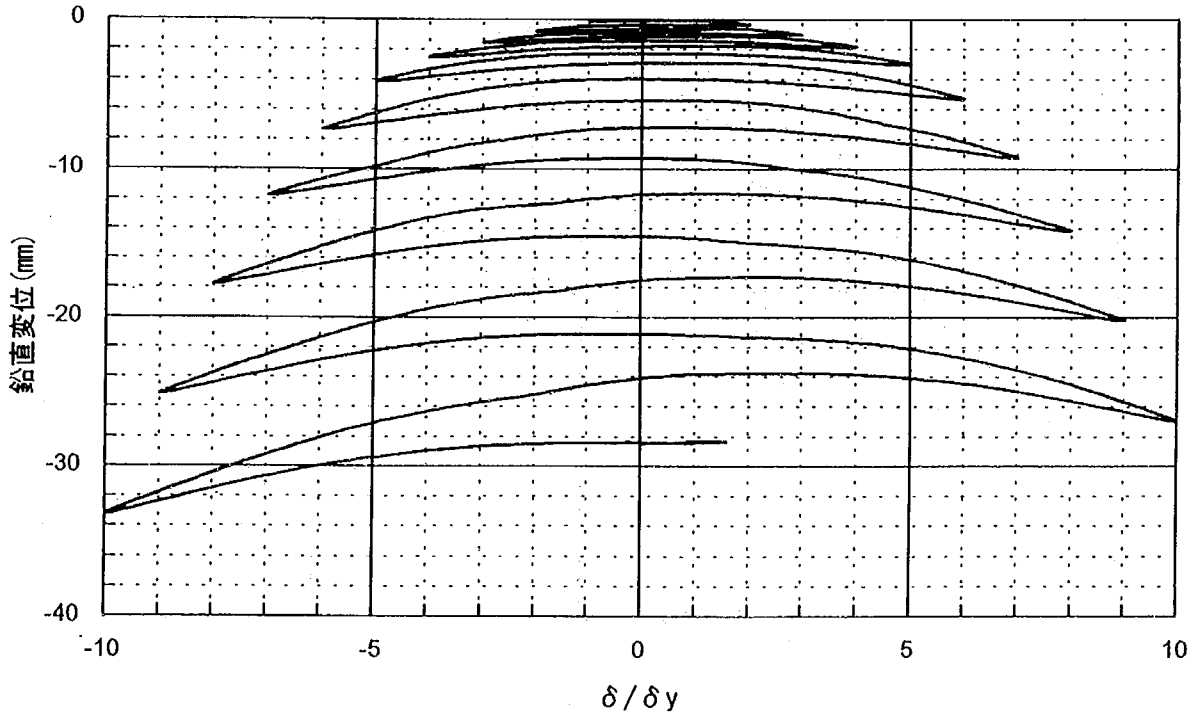


図-参考-3.4.5(2)　水平変位－鉛直変位関係(B 10)

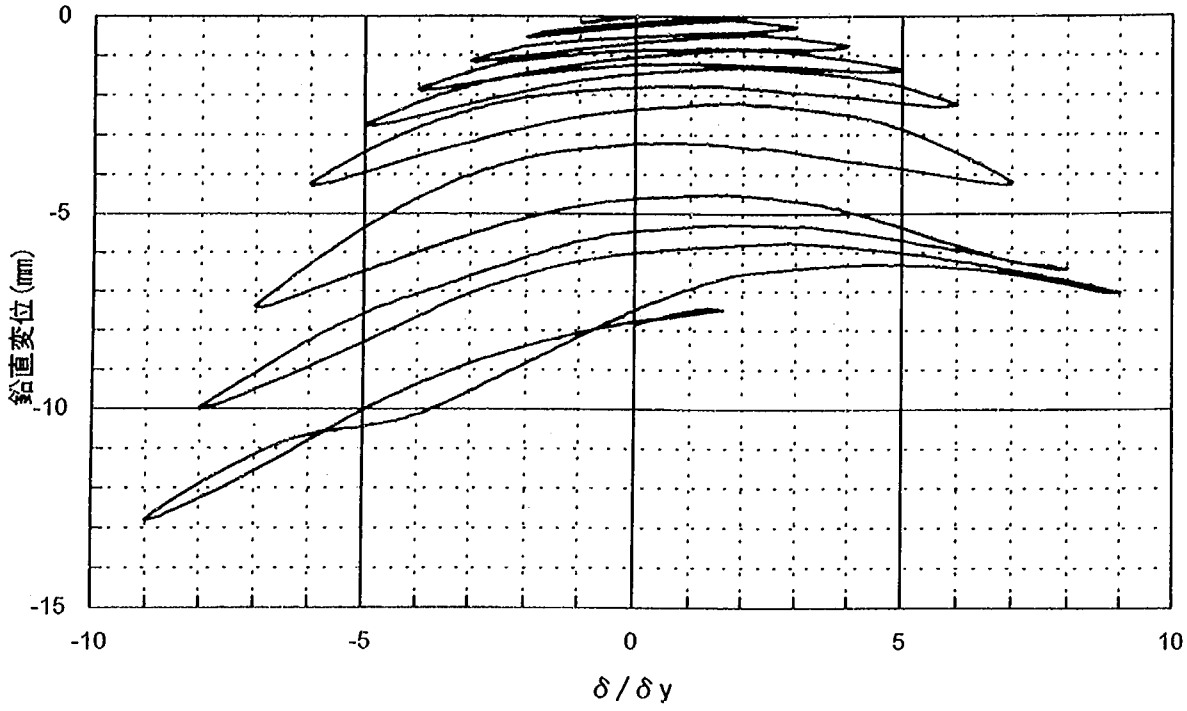


図-参考-3.4.5(3)　水平変位－鉛直変位関係(B11)

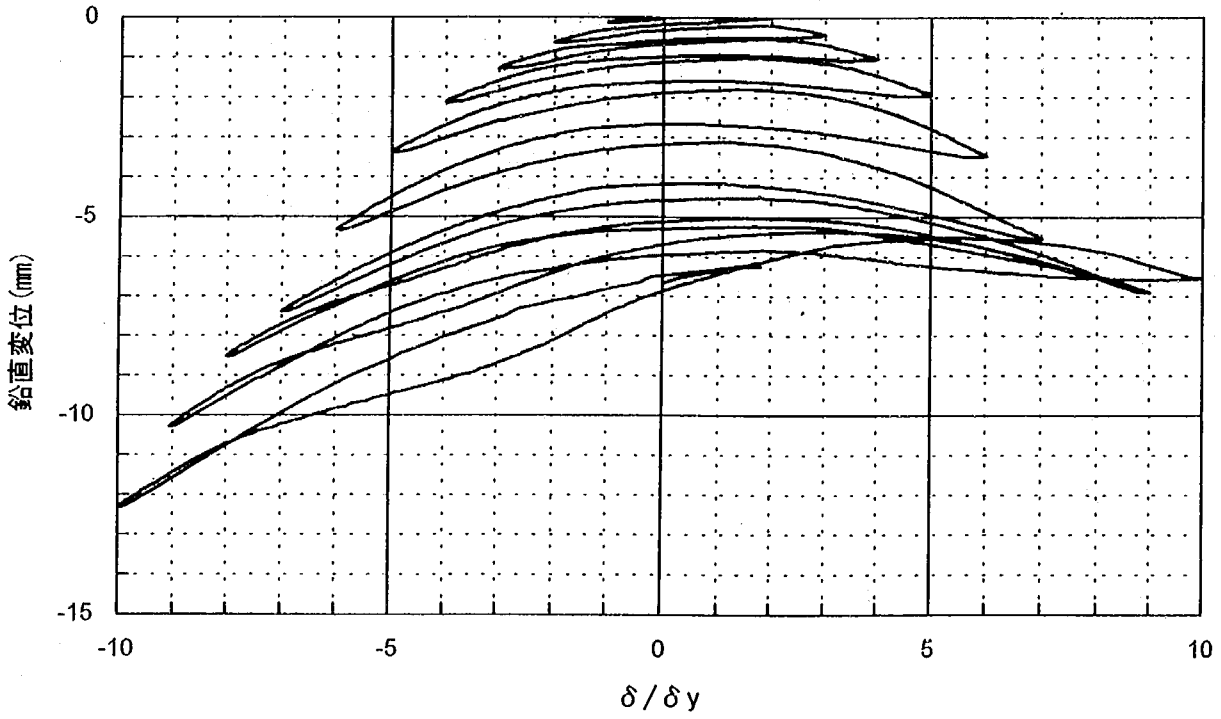


図-参考-3.4.5(4)　水平変位－鉛直変位関係(B12)

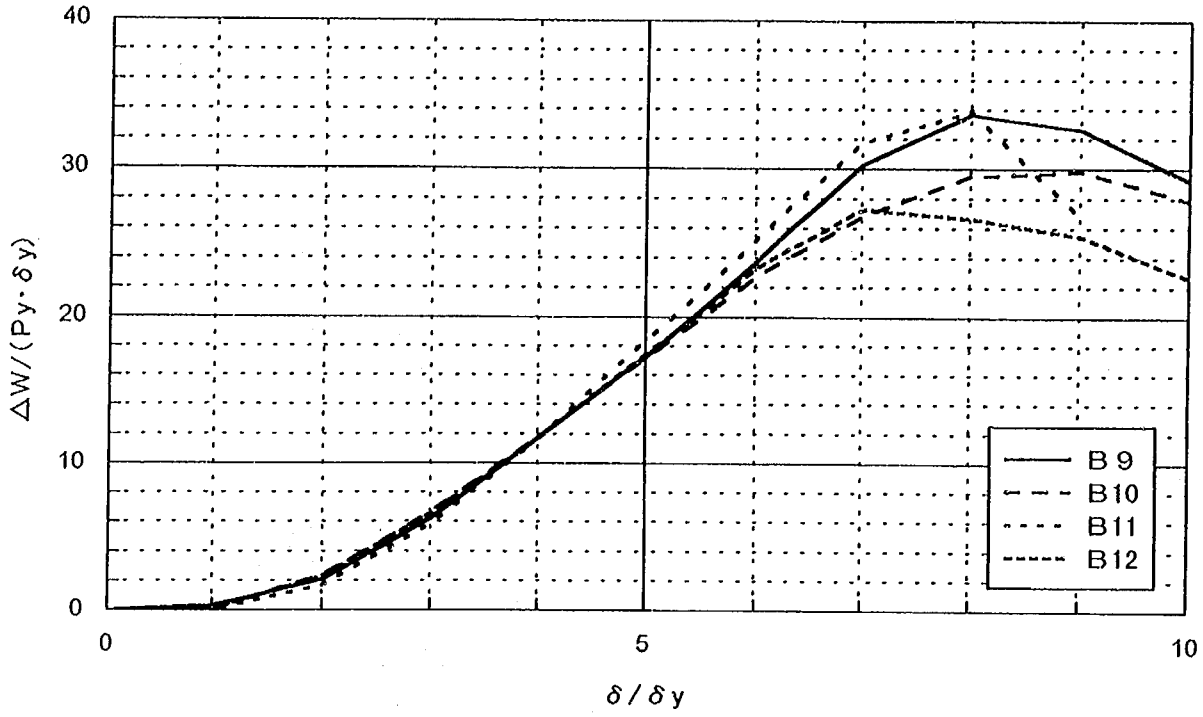
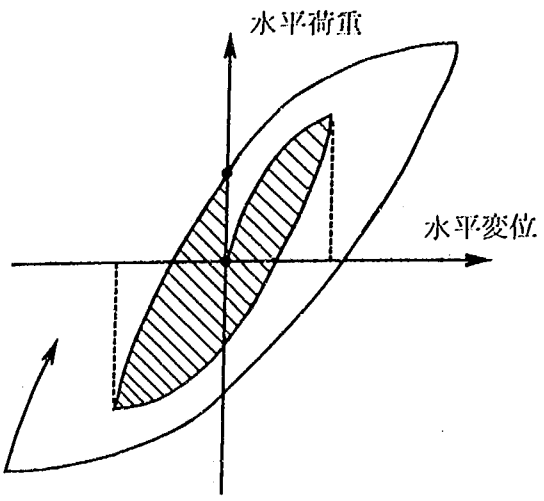
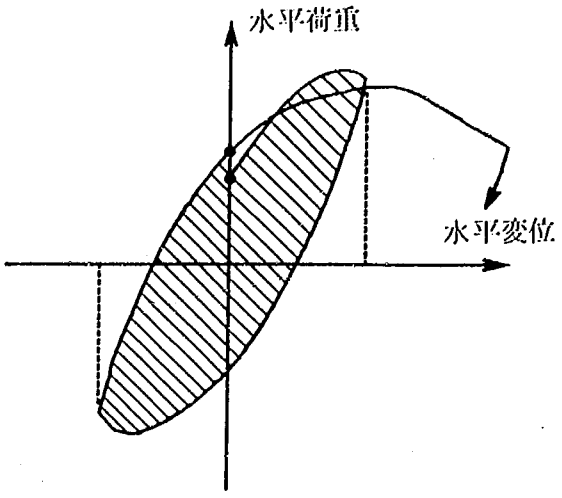


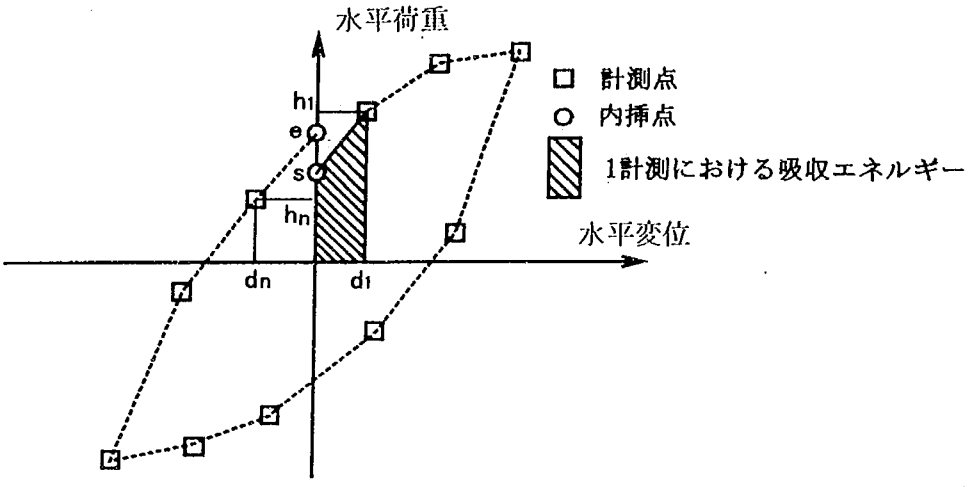
図-参考-3.4.6(1)　エネルギー吸収量



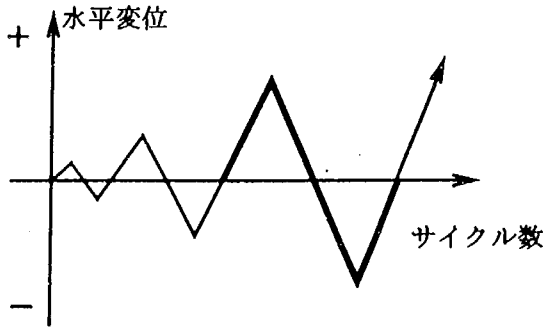
(a) 初期の場合の
吸収エネルギーの定義



(b) 強度低下を起こした場合の
吸収エネルギーの定義



(c) 吸収エネルギーの計算方法



(d) 1サイクルの定義

図-参考-3.4.6(2) エネルギー吸収量の算出方法

3.4.7 等価減衰定数

図-参考-3.4.7に各サイクルにおける水平変位と等価減衰定数h_eの関係を示す。ここで、等価減衰定数h_eは式(3.4.1)で与えられる。

$$h_e = \triangle W / (2\pi \cdot W) \qquad \cdots\cdots (3.4.1)$$

3.4.8 変形状況（外面と内面）

供試体の変形状況の説明を表-参考-3.4.8(1)～(4)に示す。また、実験終了後の供試体の外面の破壊状況を写真-参考-3.4.8(1)～(4)に示す。内壁の鋼種として低降伏点鋼を用いた供試体（B 9供試体とB 10供試体）では、補剛板に発生した亀裂の長さは5cm以下であった。他方、内壁の鋼種として普通鋼を用いた供試体（B 11供試体とB 12供試体）では、補剛板に約20cmの長さの亀裂が発生した。内面の破壊状況を写真-参考-3.4.8(5)～(8)に示す。内壁の鋼種として低降伏点鋼を用いた供試体（B 9供試体とB 10供試体）の内壁は、大きく局部座屈している。他方、内壁の鋼種として普通鋼を用いた供試体（B 11供試体とB 12供試体）の内壁は、ほとんど座屈していない。内壁の鋼種に低降伏点鋼を用いることにより、内壁が座屈して補剛板の損傷を緩和する効果がある。

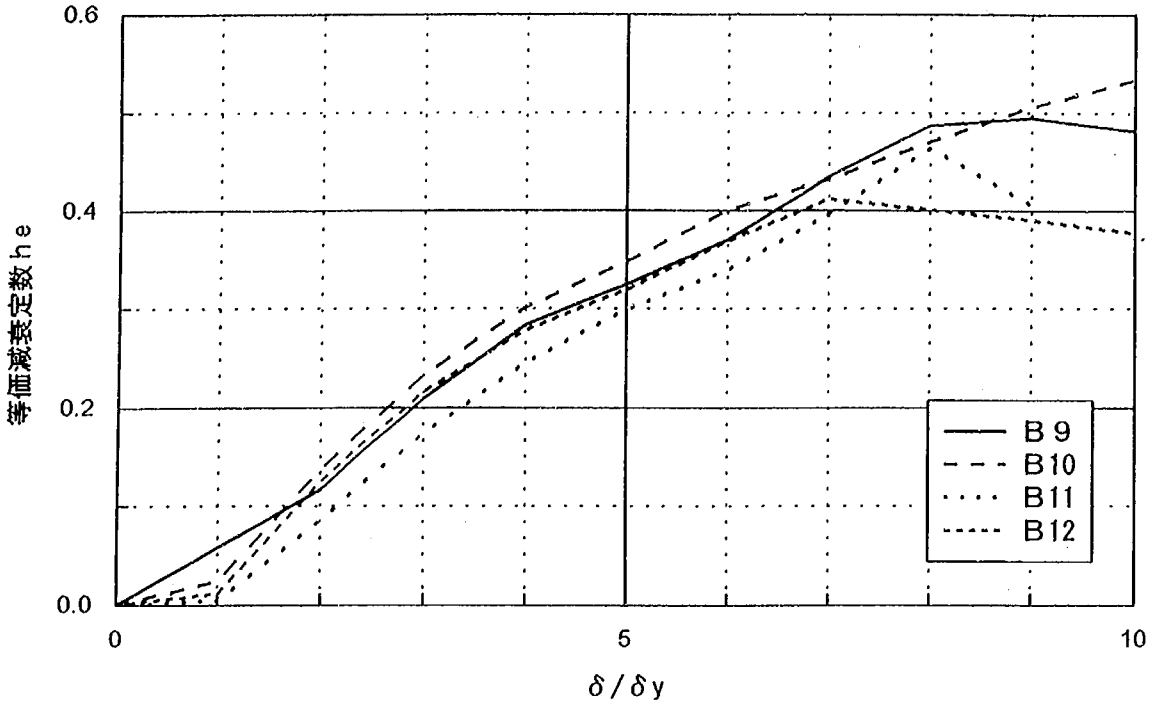


図-参考-3.4.7　等価減衰定数

表-参考-3.4.8(1)　供試体の変形状況の説明(B 9 供試体)

変位振幅	変形状況
＋１δ_y	S面　黒皮に水平方向のひびが入る
－１δ_y	特になし
＋２δ_y	S面　ベースプレートから50mmの位置がわずかに凸む
－２δ_y	N面　黒皮に水平方向のひびが入る
＋３δ_y	S面　黒皮が剥がれる
－３δ_y	N面　黒皮が剥がれる
＋４δ_y	S面　２枚の剪断パネル間の黒皮がほとんど剥がれる
－４δ_y	N面　２枚の剪断パネル間の黒皮がほとんど剥がれる
＋５δ_y	S面　ベースプレートから225mmの位置　２枚の剪断パネル間が全体的に凹む E、W面　S側寄り凹む
－５δ_y	N面　ベースプレートから225mmの位置　２枚の剪断パネル間が全体的に凹む E、W面　N側寄り凹む
＋６δ_y	S面　ベースプレートから100mmの位置　小さな局部座屈（凸み）
－６δ_y	N面　フランジ中央の補剛材を節とする局部座屈
＋７δ_y	S面　フランジ中央の補剛材を節とする局部座屈
－７δ_y	N面　座屈の凹凸が大きくなる（最大2.5cm） E，W面　N側寄り　全体パネルで凹む
＋８δ_y	S面　全体パネルの局部座屈モードとなる
－８δ_y	N面　座屈の凹凸が大きくなる（最大4.5cm）
＋９δ_y	－
－９δ_y 移行中	SE角　ベースプレートから75mmの位置　亀裂 SW角　ベースプレートから100mmの位置　亀裂 載荷中に、「カン」という金属音 NE角　ベースプレートから150mmの位置　亀裂
－９δ_y	SE角の亀裂の開き20mm、東面50mm、南面30mmの長さ SW角の亀裂の開き15mm、西面30mm、南面30mmの長さ N面　座屈の凹凸が大きくなる（最大６cm）
＋10δ_y	N面　ベースプレートから150mm　東寄りＬＹ鋼の位置に水平方向の亀裂　長さ40mm
－10δ_y 移行中	S面　ベースプレートから50mm　ＬＹ鋼の位置（両側とも）に水平方向の亀裂

表-参考-3.4.8(2)　供試体の変形状況の説明(B10供試体)

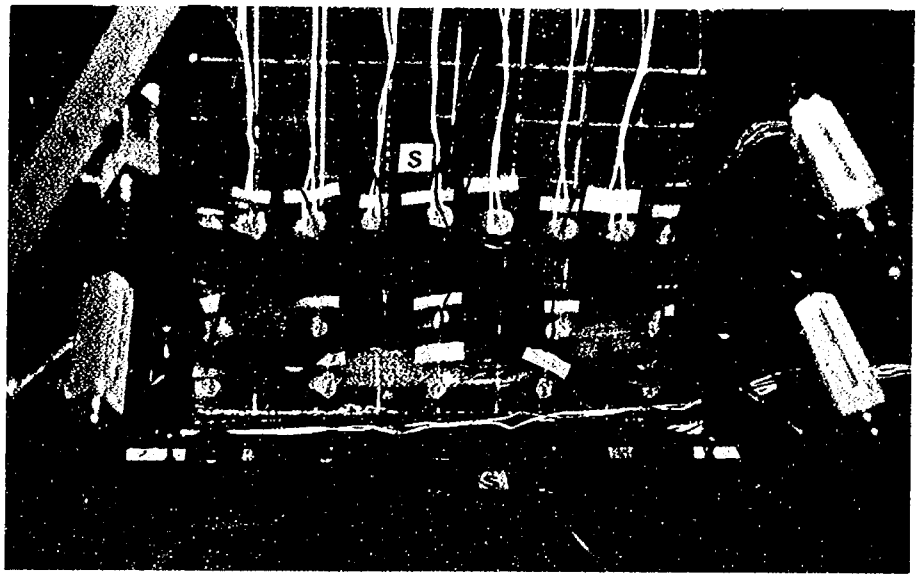
変位振幅	変形状況
＋1δ_y	S面　黒皮に水平方向のひびが入る
－1δ_y	N面　黒皮に水平方向のひびが入る
＋2δ_y	S面　黒皮が剥がれる
－2δ_y	N面　黒皮が剥がれる
＋3δ_y	S面　黒皮がさらに剥がれる
－3δ_y	N面　ベースプレートから100mmの位置　局部座屈
＋4δ_y	S面　ベースプレートから225mmの位置　全体的に凹む
－4δ_y	N面　補剛材を節とする局部座屈
＋5δ_y	S面　補剛材を節とする局部座屈
－5δ_y	N面　補剛材を節とする局部座屈が明確となる
＋6δ_y	S面　補剛材を節とする局部座屈が明確となる E、W面　S側寄り凸む
－6δ_y	N面　座屈の凹凸が大きくなる（最大1.5cm） E、W面　N側寄り凸む
＋7δ_y	－
－7δ_y	－
＋8δ_y	－
－8δ_y	N面　ベースプレートから225mmの高さまで凹凸が規則的に並ぶ 座屈の凹凸が大きくなる（最大3cm）
＋9δ_y 移行中	ピンチングで荷重が上昇
＋9δ_y	N面　座屈の凹凸が大きくなる（最大4cm）
－9δ_y	S面　座屈の凹凸が大きくなる（最大4cm）
＋10δ_y 移行中	載荷中に、「カン」という金属音 NE角　ベースプレートから140mmの位置に亀裂　東面20mm、北面20mm

表-参考-3.4.8(3)　供試体の変形状況の説明(B11供試体)

変位振幅	変形状況
＋1δ_y	S面　黒皮に水平方向のひびが入る
－1δ_y	N面　黒皮に水平方向のひびが入る
＋2δ_y	S面　黒皮のひびが増加する　載荷中に「カン」いう金属音
－2δ_y	N面　黒皮が浮いてくる
＋3δ_y	S面　黒皮が剥がれる
－3δ_y	N面　黒皮が剥がれる
＋4δ_y	S面　ベースプレートから150mmの位置　2枚の剪断パネル間が全体的に凹む
－4δ_y	N面　ベースプレートから150mmの位置　2枚の剪断パネル間が全体的に凹む
＋5δ_y	S面　ベースプレートから50mmの位置　2枚の剪断パネルの外側が凸む E、W面　S側寄り凹む
－5δ_y	N面　ベースプレートから50mmの位置　2枚の剪断パネルの外側が凸む
＋6δ_y	S面　ベースプレートから50mmの位置　フランジ中央の補剛材を節とする局部座屈
－6δ_y	N面　ベースプレートから50mmの位置　フランジ中央の補剛材を節とする局部座屈 E、W面　N側寄り凸む　載荷中に「カン」いう金属音
＋7δ_y	S面　座屈の凹凸が大きくなる（最大2.5cm）
－7δ_y	N面　座屈の凹凸が大きくなる（最大3.5cm）
＋8δ_y	S面　座屈の凹凸が大きくなる
－8δ_y 移行中	「プシュ」という圧力が抜けるような音　4隅に亀裂
－8δ_y	4隅の亀裂が進展
＋9δ_y	N面　亀裂の開き15mm
－9δ_y	SW角　亀裂の開き15mm

表-参考-3.4.8(4)　供試体の変形状況の説明(B12供試体)

変位振幅	変形状況
＋1δ_y	S面　黒皮に水平方向のひびが入る
－1δ_y	N面　特になし
＋2δ_y	S面　黒皮が浮く
－2δ_y	N面　黒皮が浮く
＋3δ_y	S面　黒皮が剥がれる E，W面　S側寄り　黒皮が剥がれる
－3δ_y	N面　黒皮が剥がれる E，W面　N側寄り　黒皮が剥がれる
＋4δ_y	S面　ベースプレートから225mmの位置　全体的に凹む
－4δ_y 移行中	「プシュ」という圧力が抜けるような音 →表面的には変化無し
－4δ_y	N面　ベースプレートから225mmの位置　全体的に凹む
＋5δ_y	S面　補剛材を節とする局部座屈 E，W面　S側寄り凸む
－5δ_y	N面　補剛材を節とする局部座屈 E，W面　N側寄り凸む
＋6δ_y	S面　座屈の凹凸が大きくなる（最大1cm）
－6δ_y	N面　座屈の凹凸が大きくなる（最大1cm）
＋7δ_y 移行中	NE角、NW角　ベースプレートとの境に亀裂
＋7δ_y	NE角　亀裂幅10mm、E面　亀裂長さ6cm、N面　亀裂長さ4cm NW角　亀裂幅5mm、N面　亀裂長さ2.5cm、W面　亀裂長さ2.5cm S面　座屈の凹凸が大きくなる（最大2cm）
－7δ_y 移行中	SE角　ベースプレートとの境に亀裂
－7δ_y	SE角　亀裂幅10mm、E面　亀裂長さ3cm、S面　亀裂長さ4cm N面　座屈の凹凸が大きくなる（最大2cm）
＋8δ_y	亀裂が進展
－8δ_y	亀裂が進展
＋9δ_y	亀裂が進展
－9δ_y	SE角　亀裂幅20mm、E面　亀裂長さ17cm、S面　亀裂長さ12cm NE角　亀裂幅20mm、N面　亀裂長さ13cm、E面　亀裂長さ18cm NW角　亀裂幅20mm、N面　亀裂長さ12cm、W面　亀裂長さ15cm S面　座屈の凹凸が大きくなる（最大4cm）
＋10δ_y	SE角　亀裂幅20mm、E面　亀裂長さ17cm、S面　亀裂長さ12cm NE角　亀裂幅20mm、N面　亀裂長さ18cm、E面　亀裂長さ20cm NW角　亀裂幅20mm、N面　亀裂長さ20cm、W面　亀裂長さ17cm S面　座屈の凹凸が大きくなる（最大4cm）
－10δ_y	SE角　亀裂幅20mm、E面　亀裂長さ18cm、S面　亀裂長さ12cm SW角　亀裂幅3mm、W面　亀裂長さ3cm、S面　亀裂長さ2cm NE角　亀裂幅20mm、N面　亀裂長さ20cm、E面　亀裂長さ20cm NW角　亀裂幅20mm、N面　亀裂長さ20cm、W面　亀裂長さ21cm S面　座屈の凹凸が大きくなる（最大4cm）



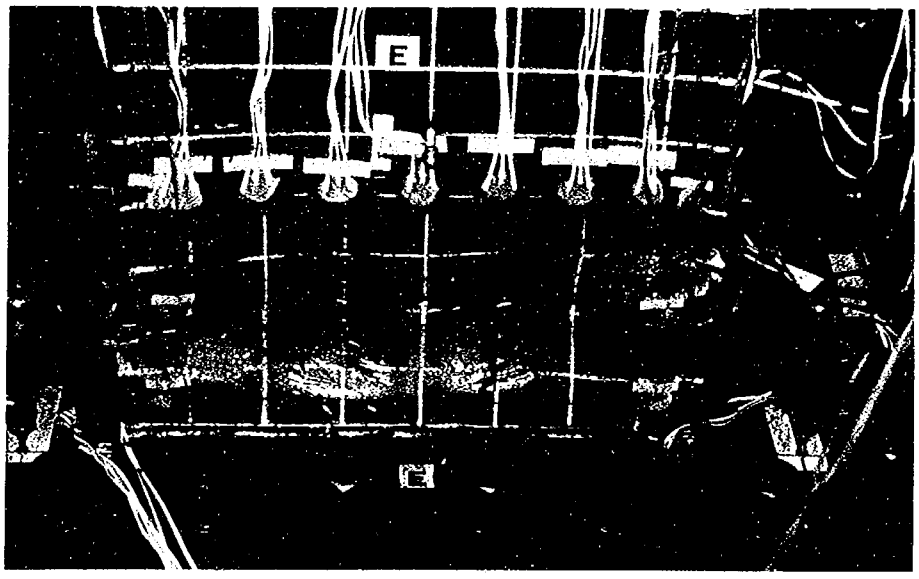
S面（載荷方向）

２枚の剪断パネル間が全体的に凹む

ＳＥ角、長さ30㎜の亀裂（基部から75㎜の高さ）

ＳＷ角、長さ30㎜の亀裂（基部から100㎜の高さ）

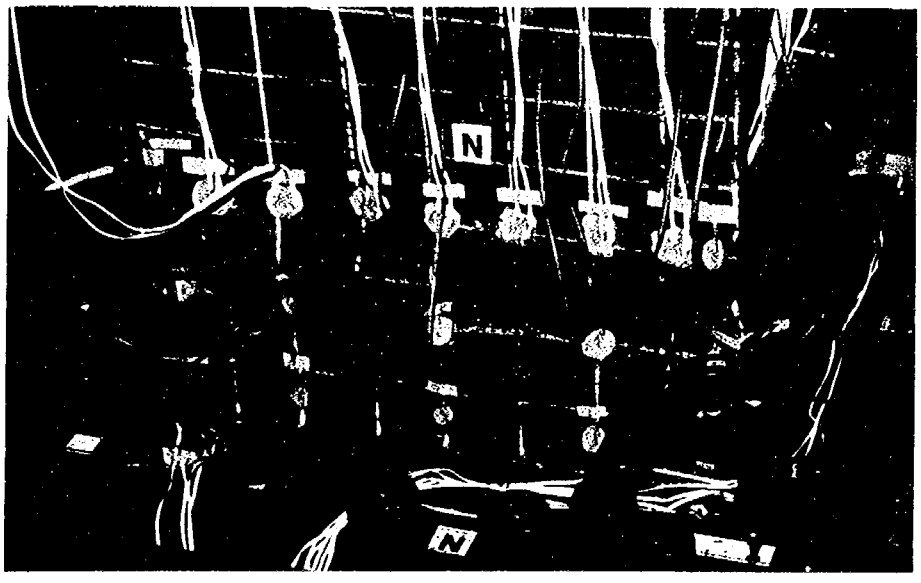
低降伏点鋼の位置に水平方向の亀裂（基部から50㎜の高さ）



E面（載荷直角方向）

ＳＥ角、長さ50㎜の亀裂（基部から75㎜の高さ）

ＮＥ角、長さ25㎜の亀裂（基部から150㎜の高さ）



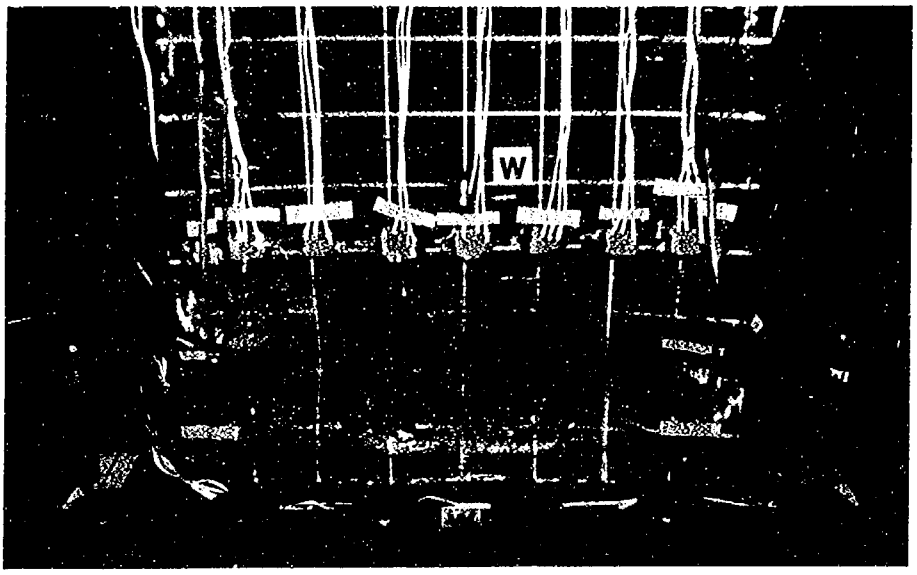
N面（載荷方向）

E側半分は補剛材を節とする局部座屈

ＮＥ角、長さ50㎜の亀裂（基部から150㎜の高さ）

E側の低降伏点鋼の位置に水平方向の亀裂（基部から150㎜の高さ）

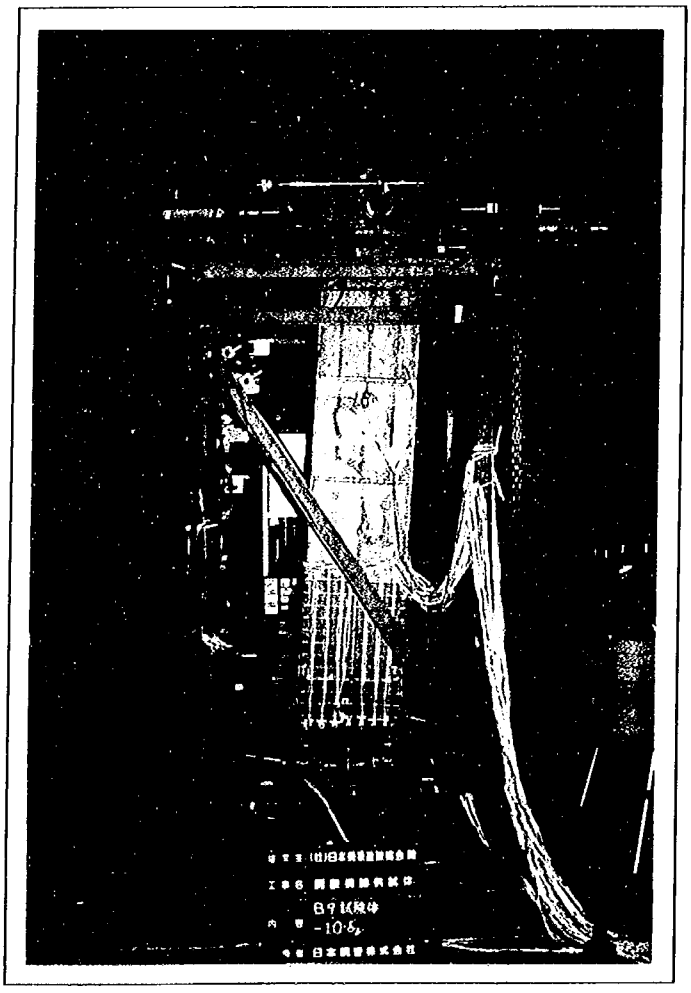
写真-参考-3.4.8(1)　実験終了後の破壊状況（Ｂ９供試体）

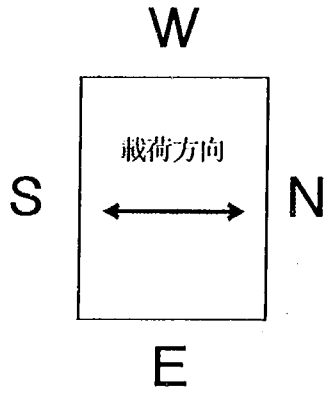


W面（載荷直角方向）

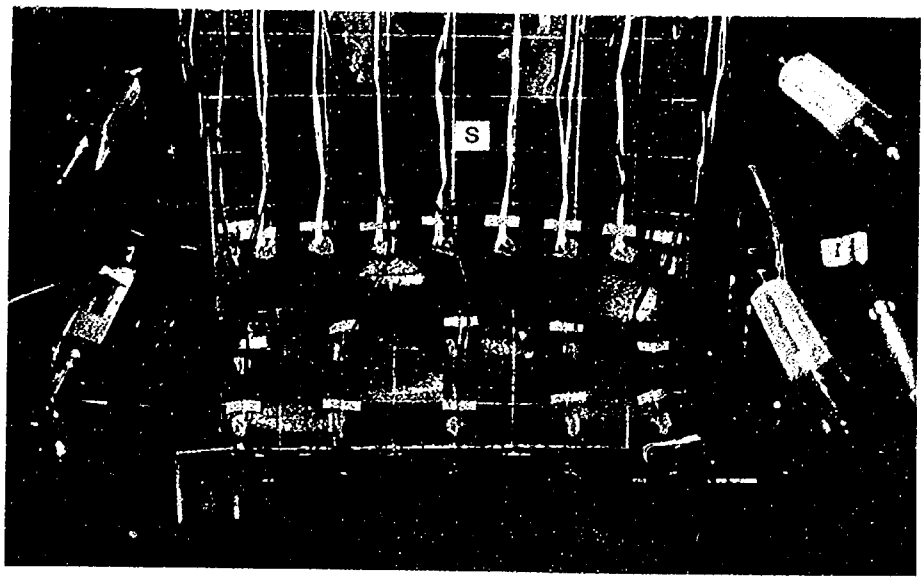
ＳＷ角、長さ30㎜の亀裂
（基部から100㎜の高さ）

写真-参考-3.4.8(1)　実験終了後の破壊状況（Ｂ９供試体）





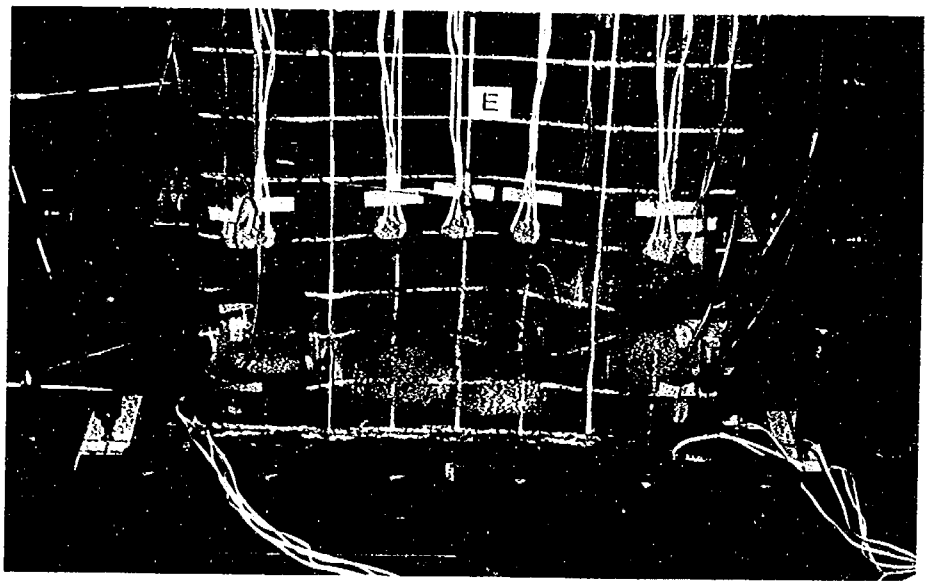
試験体全景（Ｂ９供試体）
Ｅ面から撮影、Ｓ～Ｎ方向に載荷



S面（載荷方向）

補剛材を節とする局部座屈

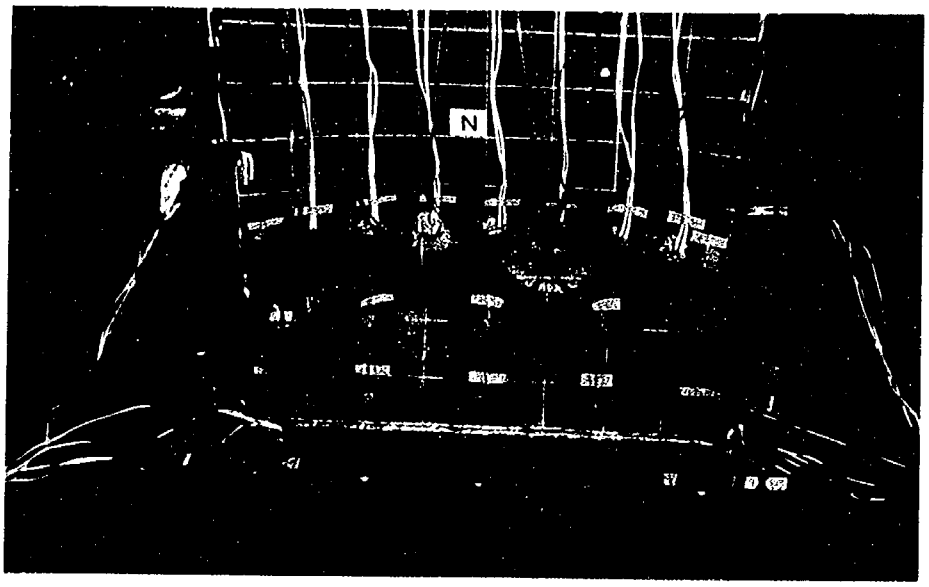
ＳＥ角、長さ30㎜の亀裂（基部から75㎜の高さ）



E面（載荷直角方向）

ＳＥ角、長さ50㎜の亀裂（基部から75㎜の高さ）

ＮＥ角、長さ40㎜の亀裂（基部から125㎜の高さ）



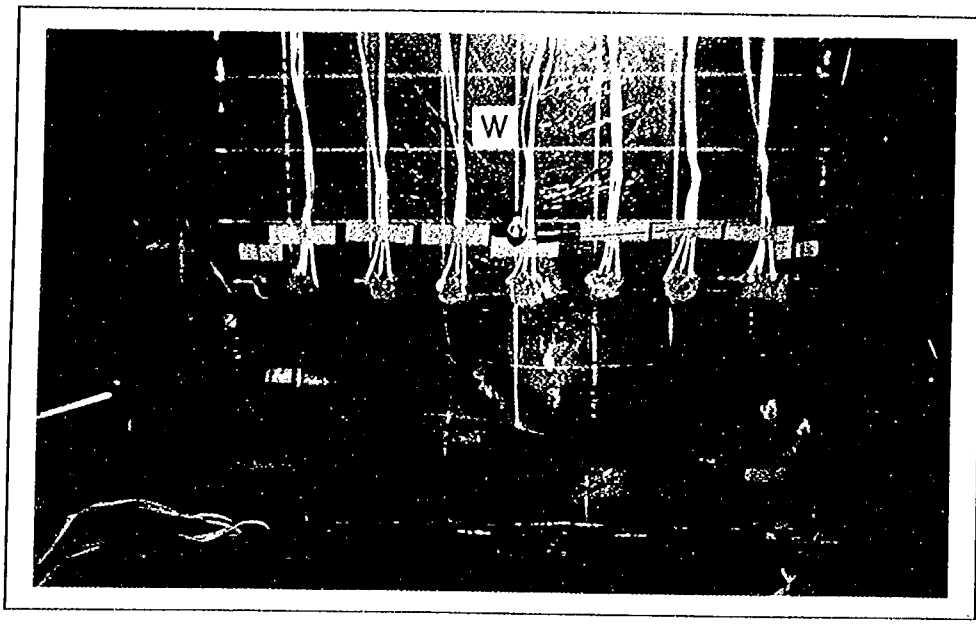
N面（載荷方向）

基部から225㎜の位置を中心として全体パネルで凹む

ＮＥ角、長さ30㎜の亀裂（基部から125㎜の高さ）

ＮＷ角、長さ20㎜の亀裂（基部から150㎜の高さ）

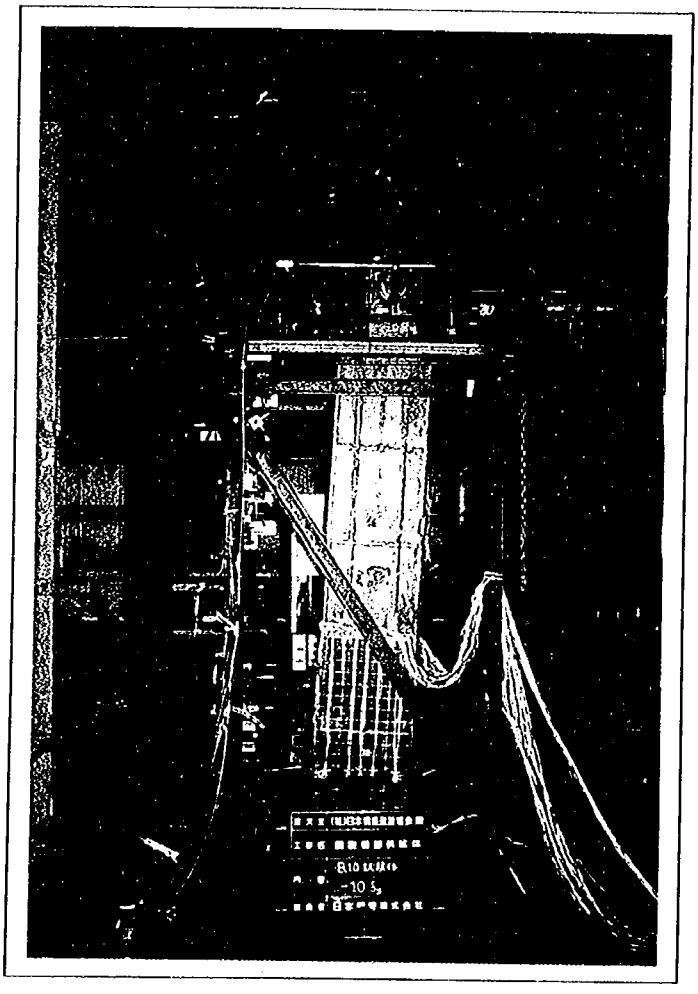
写真-参考-3.4.8(2)　実験終了後の破壊状況（B10供試体）

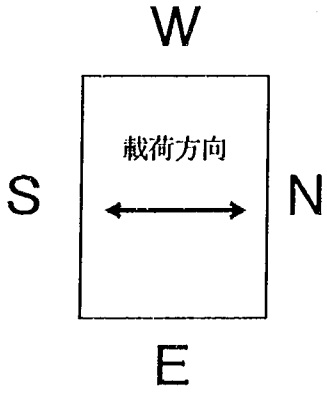


W面（載荷直角方向）

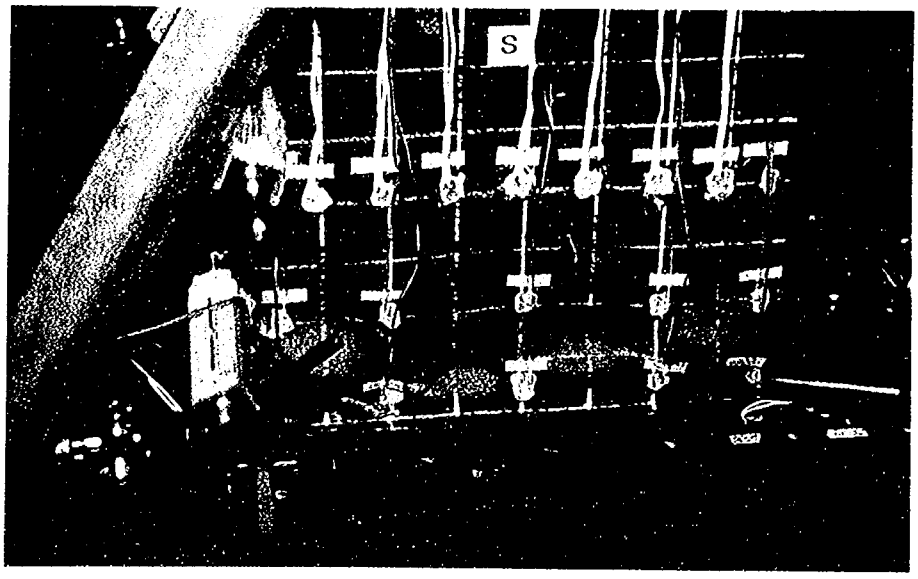
NW角、長さ25mmの亀裂
（基部から150mmの高さ）

写真-参考-3.4.8(2)　実験終了後の破壊状況（B10供試体）





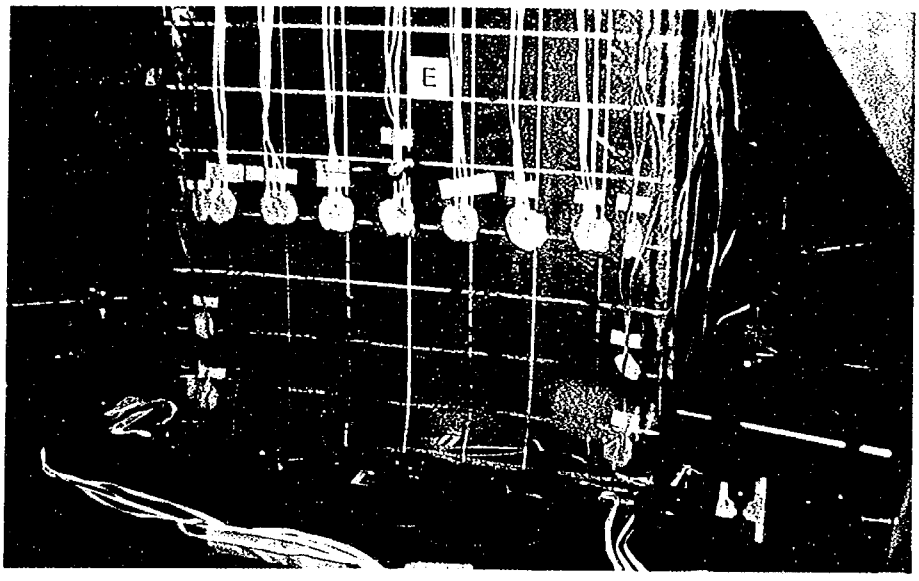
試験体全景（B10供試体）
E面から撮影、S～N方向に載荷



S面（載荷方向）

SE角、長さ15mmの亀裂
（基部から20mmの高さ）

SW角、長さ150mmの亀裂
（基部から20mmの高さ）

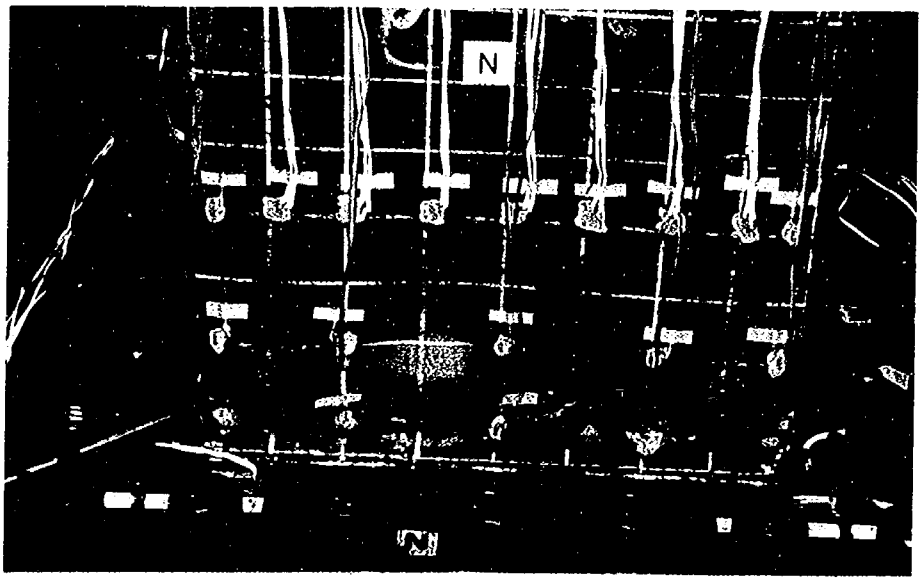


E面（載荷直角方向）

補剛材間パネルが4つとも凹む

SE角、長さ30mmの亀裂
（基部から10mmの高さ）

NE角、長さ100mmの亀裂
（基部から10mmの高さ）



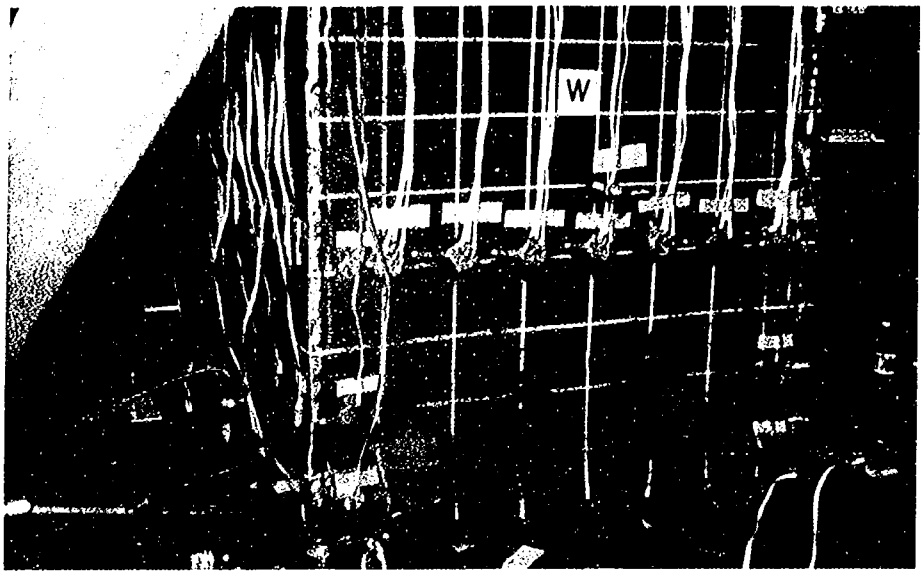
N面（載荷方向）

W側半分は補剛材を節とする局部座屈

NE角、長さ225mmの亀裂
（基部から10mmの高さ）

NE角、長さ200mmの亀裂
（基部から10mmの高さ）

写真-参考-3.4.8(3)　実験終了後の破壊状況（B11供試体）



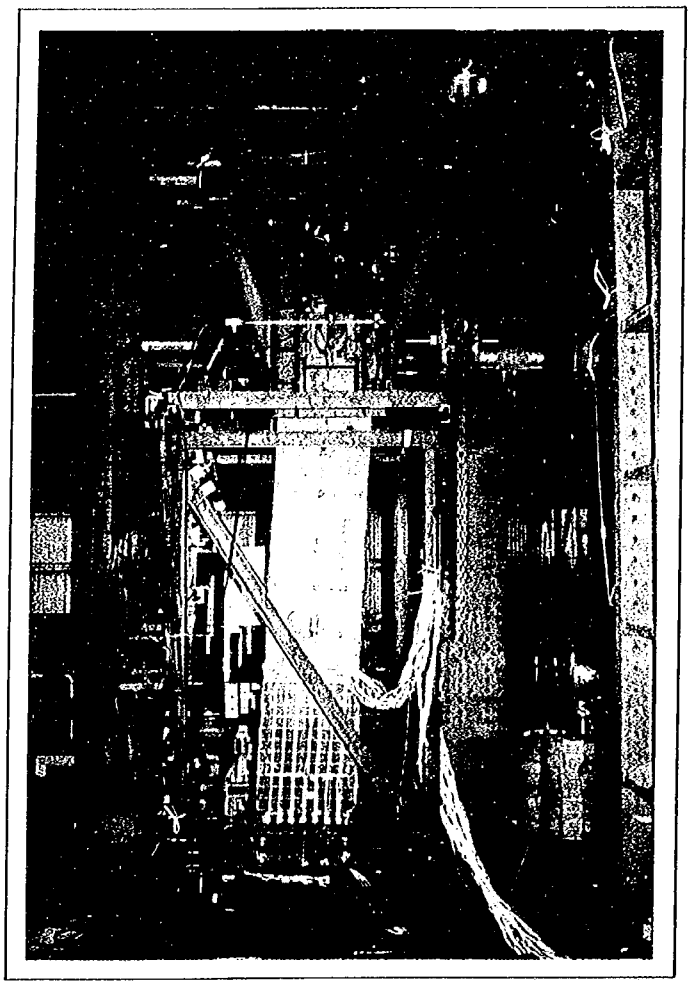
W面（載荷直角方向）

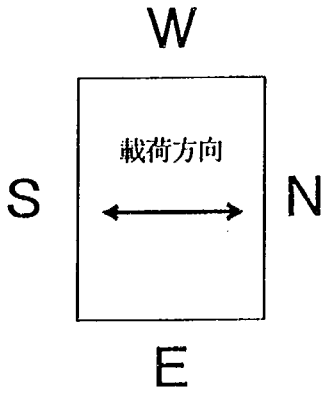
補剛材間パネルが４つとも凹む

ＮＷ角、長さ100㎜の亀裂
（基部から10㎜の高さ）

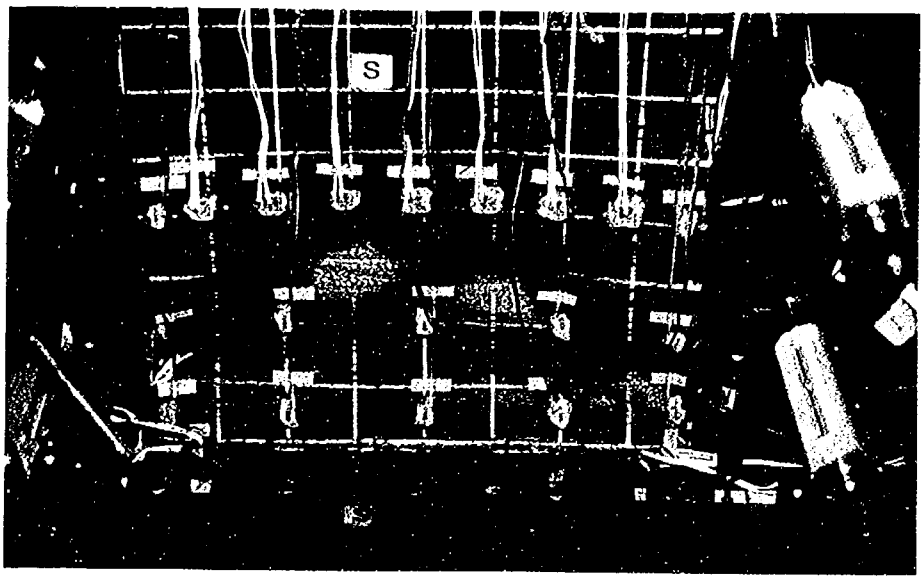
ＳＷ角、長さ75㎜の亀裂
（基部から10㎜の高さ）

写真-参考-3.4.8(3)　実験終了後の破壊状況（Ｂ11供試体）





試験体全景（Ｂ11供試体）
Ｅ面から撮影、Ｓ～Ｎ方向に載荷

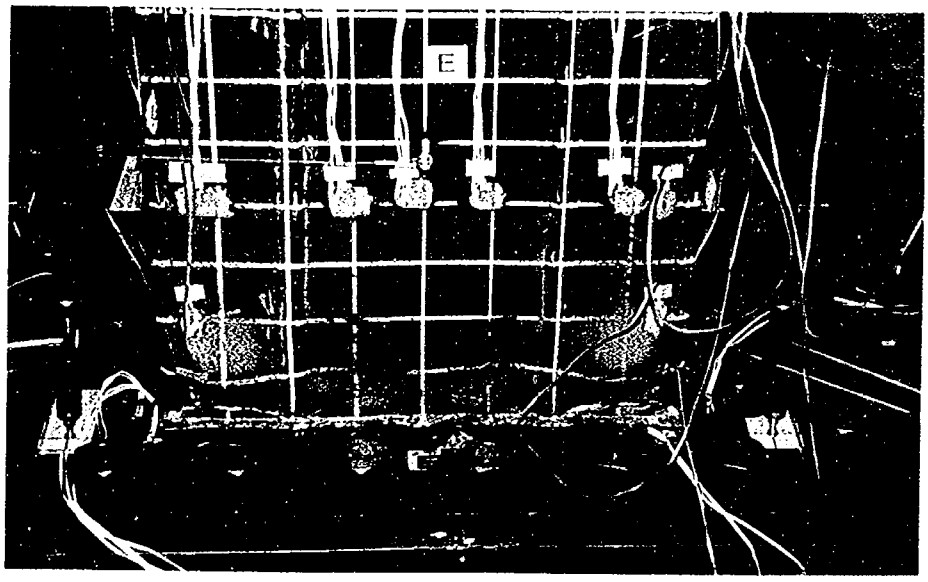


S面（載荷方向）

基部から150㎜の位置を中心として全体パネルで囲む

ＳＥ角、長さ110㎜の亀裂が斜めに伸びる
（基部から10㎜の高さ）

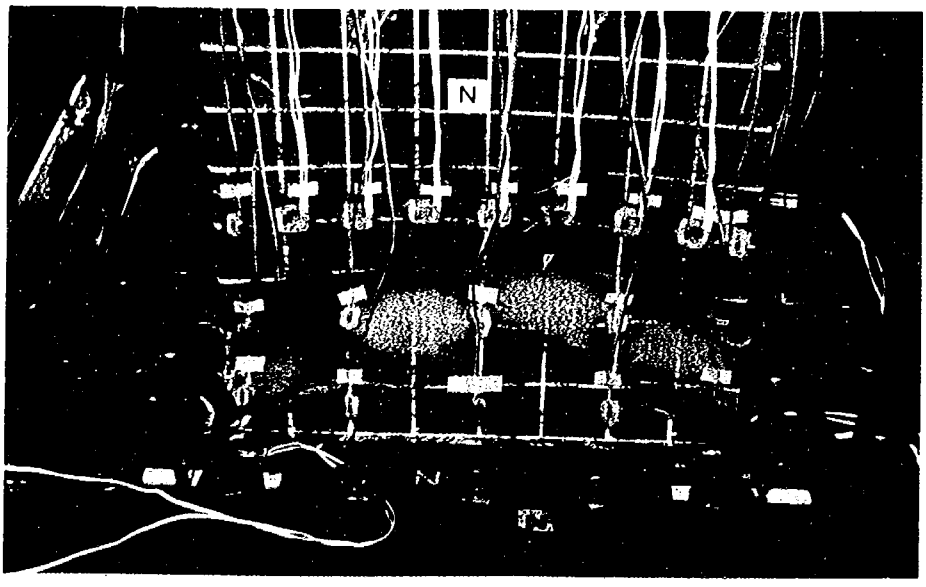
ＳＷ角、長さ30㎜の亀裂
（基部から75㎜の高さ）



E面（載荷直角方向）

ＳＥ角、長さ200㎜の亀裂
（基部から10㎜の高さ）

ＮＥ角、長さ200㎜の亀裂
（基部から10㎜の高さ）



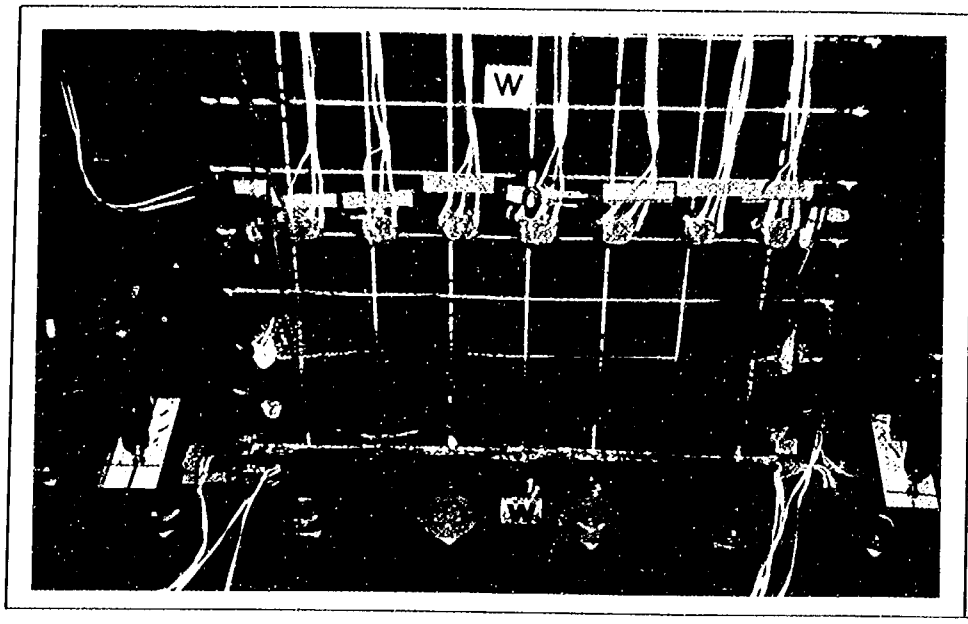
N面（載荷方向）

基部から150㎜の位置を中心として全体パネルで囲む

ＮＥ角、長さ110㎜の亀裂が斜めに伸びる
（基部から25㎜の高さ）

ＮＷ角、長さ180㎜の亀裂
（基部から10㎜の高さ）

写真-参考-3.4.8(4)　実験終了後の破壊状況（Ｂ12供試体）

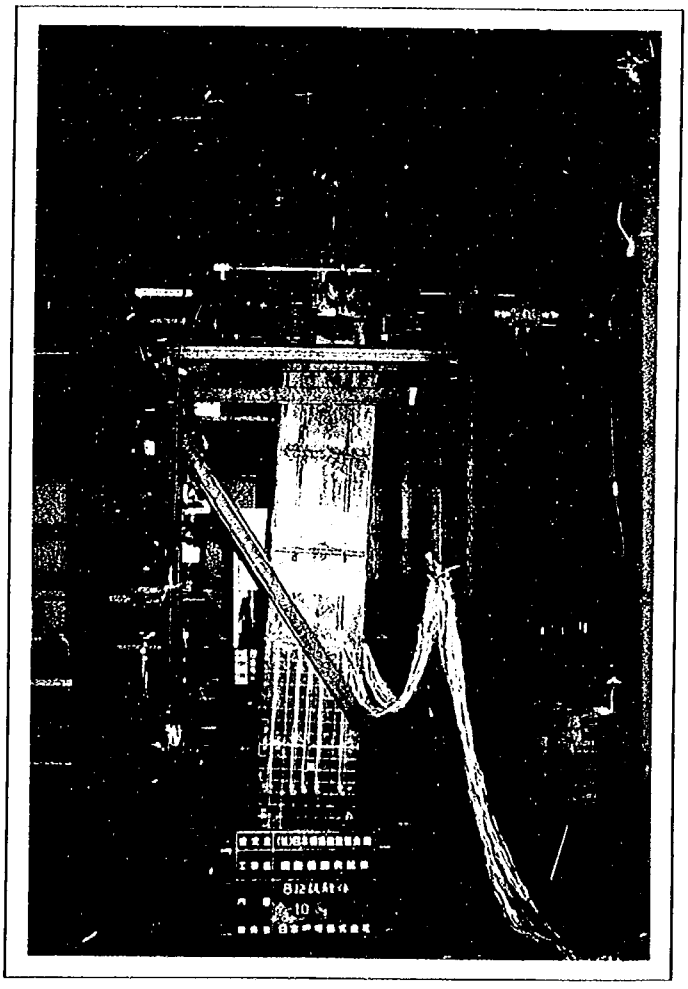


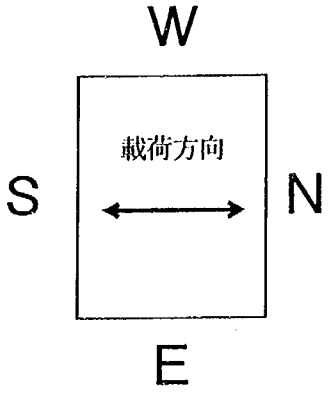
W面（載荷直角方向）

ＮＷ角、長さ170㎜の亀裂
（基部から10㎜の高さ）

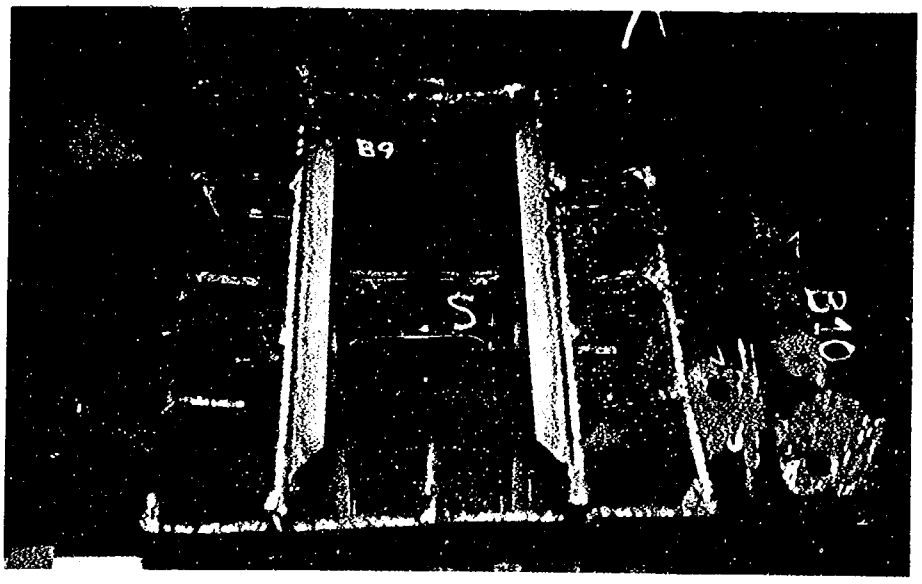
ＳＷ角、長さ20㎜の亀裂
（基部から75㎜の高さ）

写真-参考-3.4.8(4)　実験終了後の破壊状況（Ｂ12供試体）



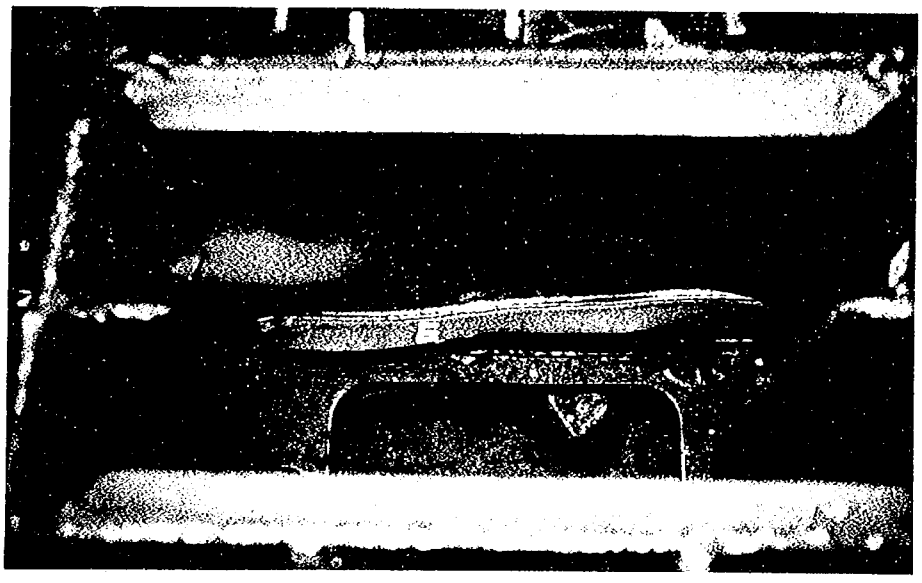


試験体全景（Ｂ12供試体）
Ｅ面から撮影、Ｓ～Ｎ方向に載荷



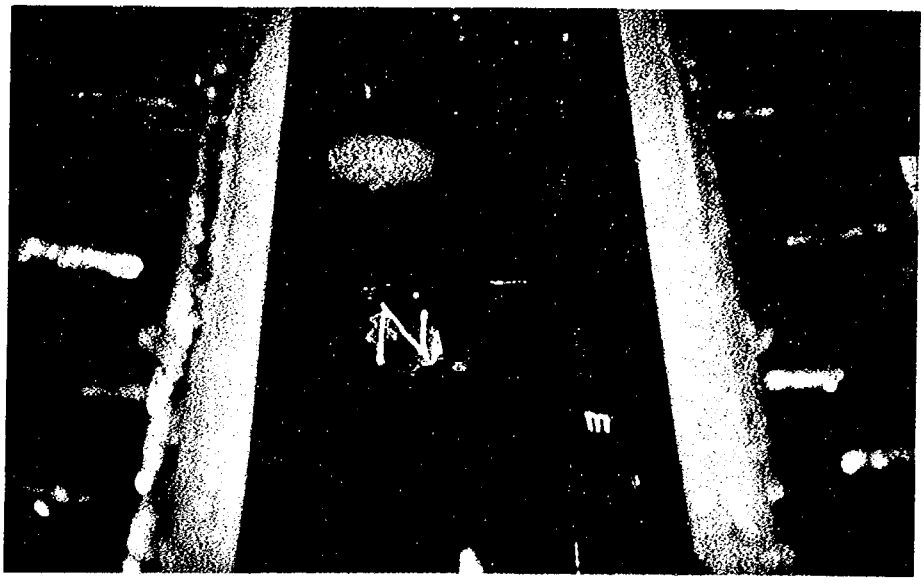
S面（載荷方向）

補剛板（フランジ）が内側へ凹む



E面（載荷直角方向）

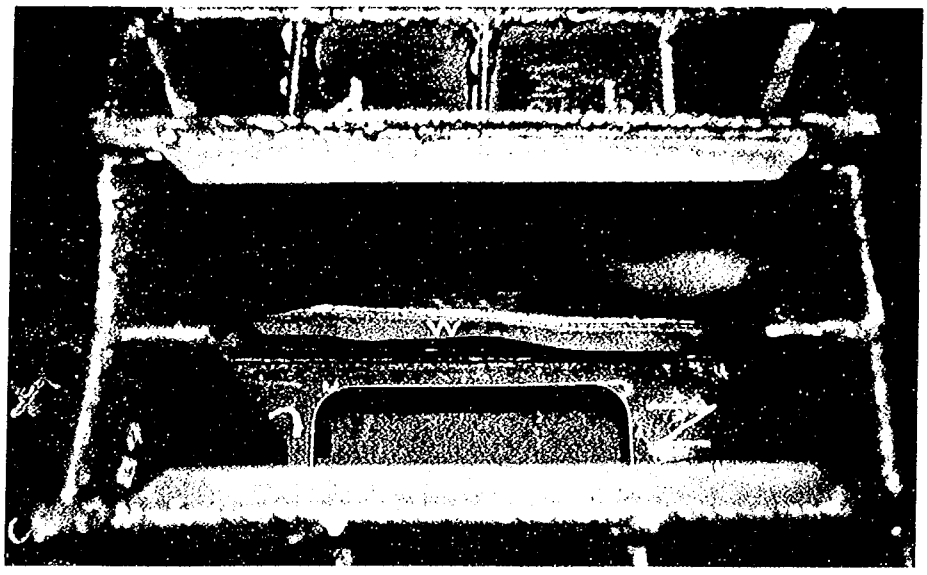
内壁（シェアウォール）の局部座屈



N面（載荷方向）

補剛材を節とする補剛板（フランジ）の凹凸（局部座屈）

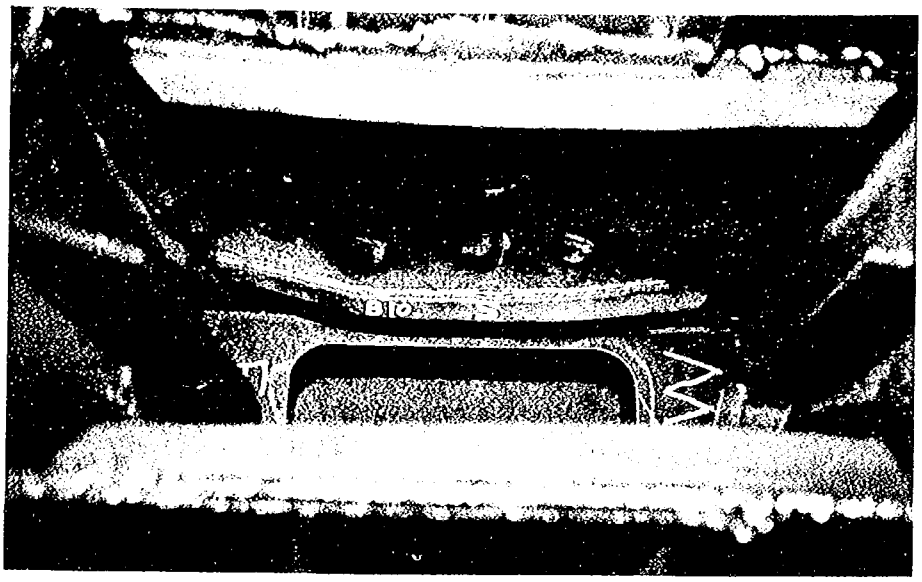
写真-参考-3.4.8(5)　内部の破壊状況（B 9 供試体）



W面（載荷直角方向）

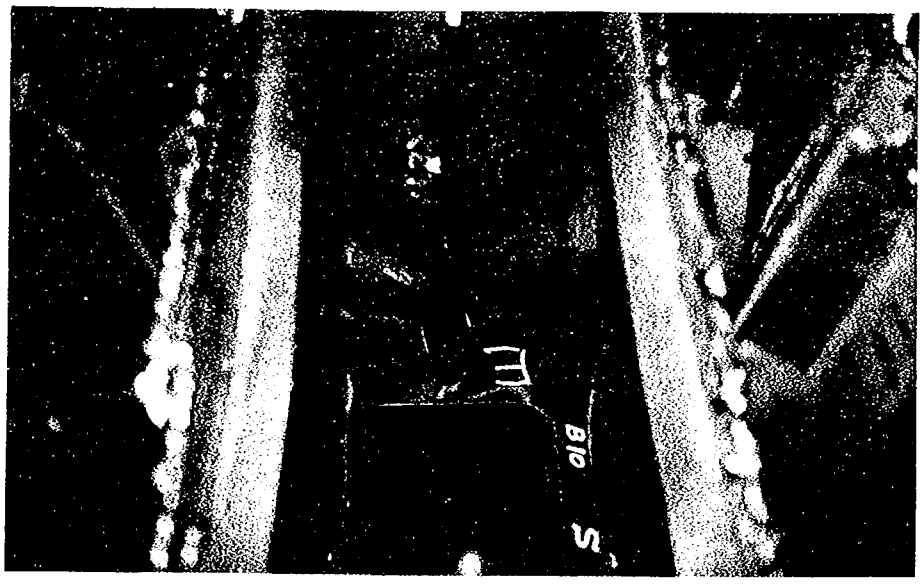
内壁（シェアウォール）の局部座屈

写真-参考-3.4.8(5)　内部の破壊状況（B 9供試体）



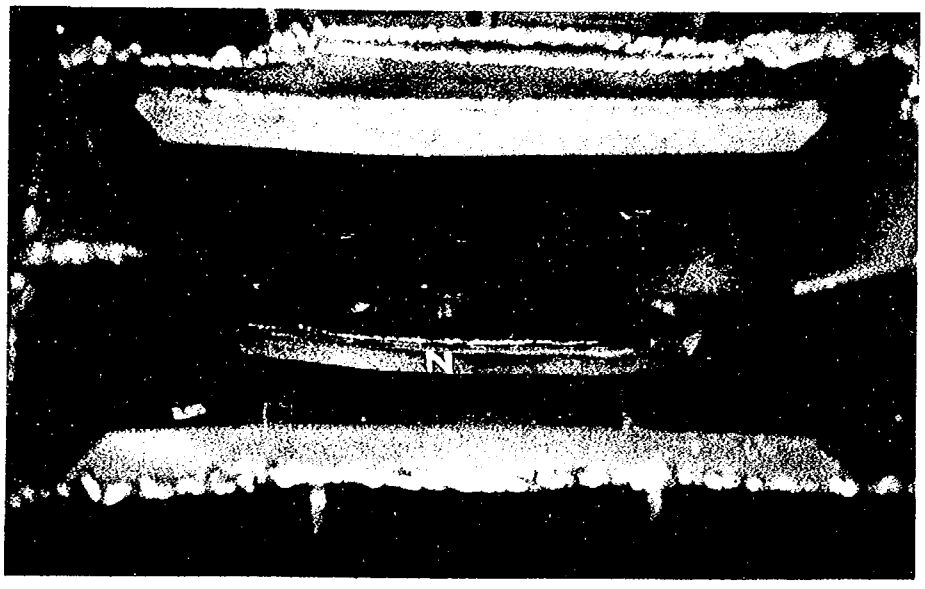
S面（載荷方向）

内壁（ダブルフランジ）の局部座屈



E面（載荷直角方向）

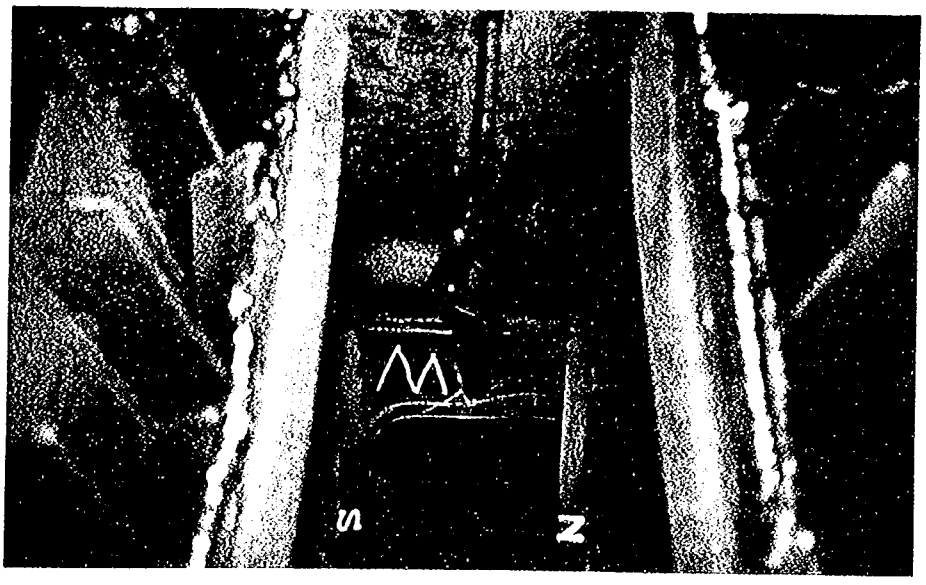
補剛板（ウェブ）の局部座屈



N面（載荷方向）

内壁（ダブルフランジ）の局部座屈

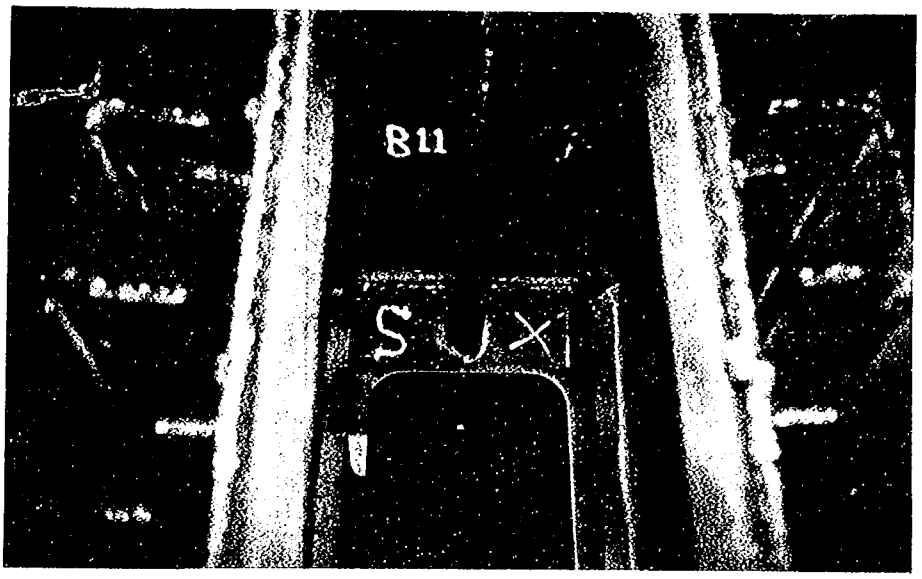
写真-参考-3.4.8(6)　内部の破壊状況（B10供試体）



W面（載荷直角方向）

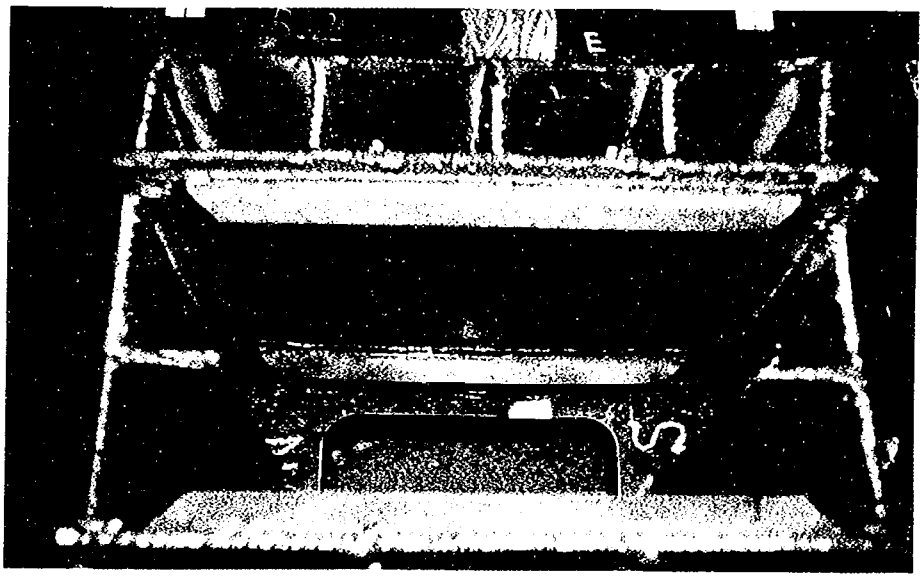
補剛板（ウェブ）の局部座屈

写真-参考-3.4.8(6)　内部の破壊状況（B10供試体）



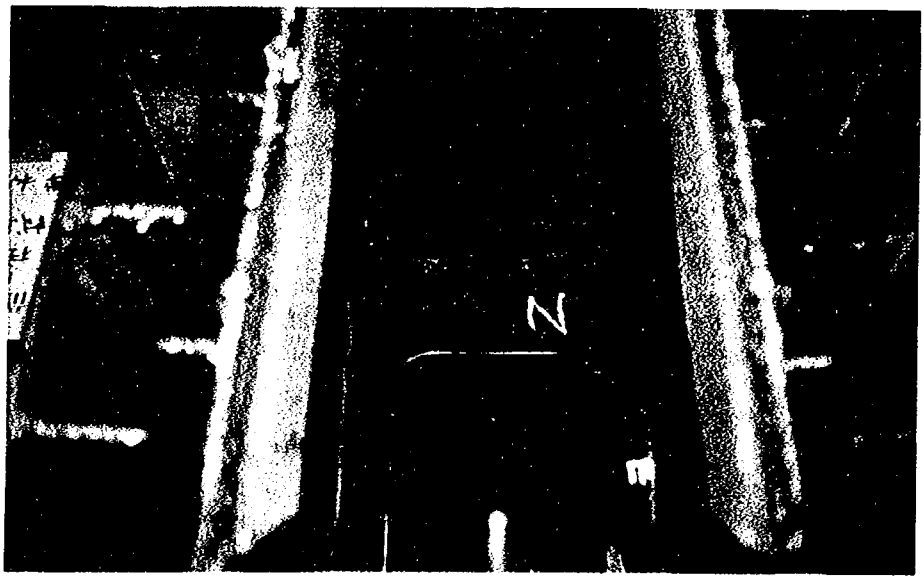
S面（載荷方向）

補剛板（フランジ）が内側へ凹む



E面（載荷直角方向）

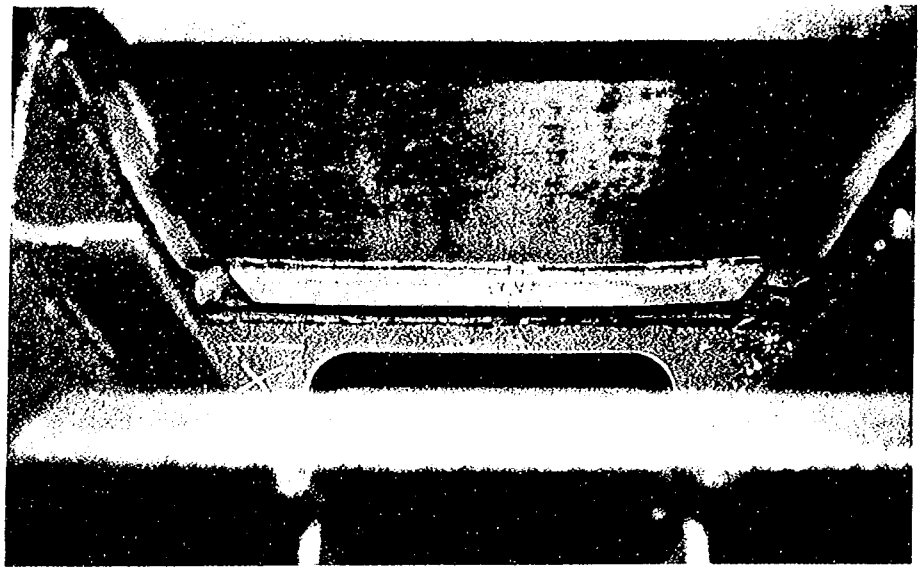
内壁（シェアウォール）には、ほとんど損傷がない



N面（載荷方向）

補剛材を節とする補剛板（フランジ）の局部座屈

写真-参考-3.4.8(7)　内部の破壊状況（B11供試体）



W面（載荷直角方向）

内壁（シェアウォール）には、ほとんど損傷がない

写真--参考-3.4.8(7)　内部の破壊状況（B 11供試体）

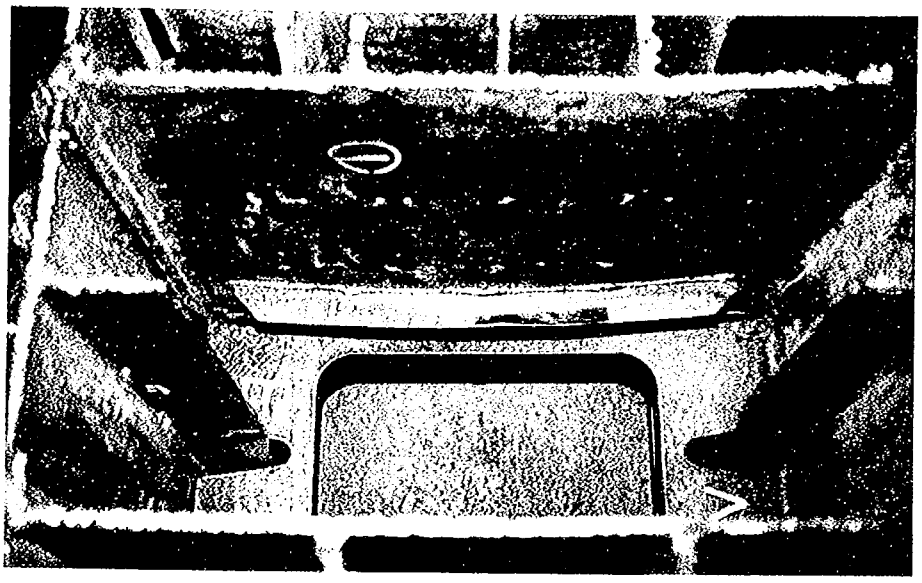
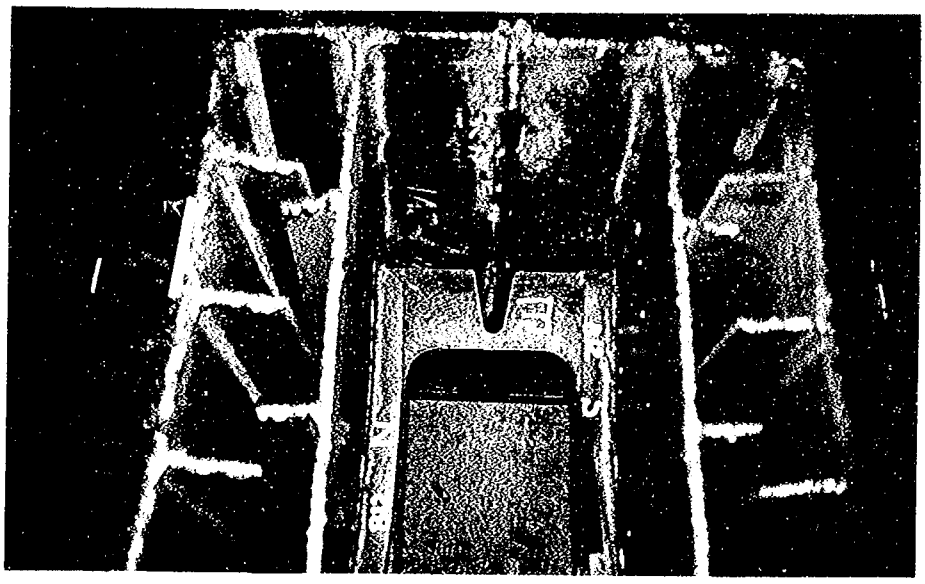
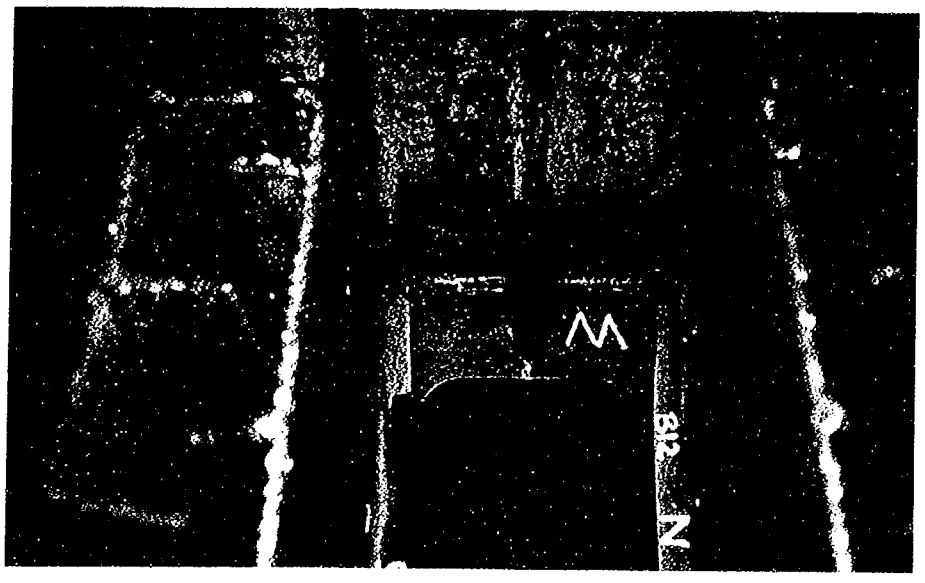
	S面（載荷方向） 内壁（ダブルフランジ）には、ほとんど損傷がない
	E面（載荷直角方向） 補剛板（ウェブ）が、僅かに内側へ凹む
	N面（載荷方向） 内壁（ダブルフランジ）には、ほとんど損傷がない

写真-参考-3.4.8(8)　内部の破壊状況（B 12供試体）



W面（載荷直角方向）

補剛材を節とする補剛板（ウェブ）の局部座屈

写真-参考-3.4.8(8)　内部の破壊状況（B 12供試体）

3.5 まとめ

B 6供試体の追加実験として実施した繰返し載荷実験により、以下のことを確認した。

(1)マルチセル構造の内壁の鋼種として「低降伏点鋼」の場合と「普通鋼」の場合での挙動の違い

マルチセル構造の内壁の鋼種に低降伏点鋼を用いた供試体の方が普通鋼を用いた供試体より、劣化勾配が緩やかであり、降伏荷重P_yに低下するまでの塑性率も大きい。また、最大耐力P_{max}は普通鋼を用いた供試体の方が大きいが、1サイクルのループの膨らみは低降伏点鋼を用いた供試体の方が大きいため、エネルギー吸収量は低降伏点鋼を用いた供試体の方が大きい。

内壁の鋼種に低降伏点鋼を用いることにより、内壁が座屈して補剛板の損傷を緩和する効果がある。

(2)マルチセル構造の内壁を載荷方向とした「シェアウォール構造」と載荷直角方向とした「ダブルフランジ構造」での挙動の違い

内壁をシェアウォールとして配置した場合と、ダブルフランジとして配置した場合を比較すると、最大耐力はシェアウォールとして配置した方が大きい。しかし、最大荷重を越えて降伏荷重まで劣化したときを終局状態とした塑性率μ_uは、内壁の配置には依存しない。

以上のことより、柱の座屈安定性、じん性向上の一般的な方策は、次のように要約できる。

(1)大変形、局部変形を極力防止する。幾何学的非線形性を最小にする。

(2)材料の弾塑性効果を最大限に引き出す。材料非線形性を最大にする。

具体的には、次のような構造が有効である。

(1)曲げ＋軸力を受ける部材を、各々の断面力を分担する機能別構造にする。すなわち、断面構成を曲げ部材と軸力を受ける部材に分離する。すなわち、センターコアを設け、軸力を分担させ、従来の外壁は曲げのみを受ける構造とする。こうすることにより、極限状態でP－△効果が最小に押さえられ、曲げ部材のじん性が向上する。マルチセル構造は極限状態で形状を保持し、センターコアの役割を果たす。

(2)弾塑性の効果を最大限に引き出すためには、材料特性の異なる複合構造が有効である。例えば、免震支承の鉛＋高減衰ゴム、鋼＋コンクリートの合成構造などである。履歴曲線を見ると、バイリニア、トリリニア曲線を有する構造である。すなわち、「剛性の高い材料」＋「剛性の小さい材料」の組み合わせが有効である。

鋼製橋脚にコンクリートを充填した構造は、上記を満足しているものと考えられる。その効果を分析すると、以下のようになる。

(1)コンクリート充填は極限状態で形状を保持する。座屈変形は拘束され、外側にのみ変形する。

(2)コンクリートがセンターコアの役割を示し、鉛直荷重を極限状態で支持している。

(3)コンクリートの弾塑性効果、個体が砂状化するエネルギー吸収効果がある。

マルチセル構造はコンクリート充填と同じ、あるいはそれ以上の効果を期待する構造であり、コンクリートに代わる材料を選択し、断面力に応じた最適配置により、高いじん性を期待できる。

【参考文献】

1）中井博，河井章好，吉井紀，北田俊行，酒造敏廣：鋼製ラーメン橋脚の実績調査（上），橋梁と基礎，1982年6月．

2）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，1996年12月．

3）宇佐美勉，水谷慎吾，青木徹彦，伊藤義人，安波博道：補剛箱形断面鋼圧縮部材の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol．38A，1992年３月．

Ⅱ．鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析

1. はじめに

鋼製橋脚の保有水平耐力の算定や非線形動的解析を行うに当たっては、橋脚構造の形式に対応した水平荷重－水平変位関係(H-δ曲線)が必要となる。基本的には、大型の供試体を用いた繰り返し載荷試験から得られる水平荷重－水平変位のヒステリシスループを元に骨格曲線を求め、設計用の復元力特性を作成することになる。この実験を解析的にシミュレーションすることが出来れば、新たな構造形式の提案があった場合にも、数値解析シミュレーションでその復元力特性をある程度評価することが可能と考えられる。

しかし、鋼製橋脚の耐震性の検討を数値解析によるシミュレーションで行うにあたっては、材料非線形性と幾何学的非線形性を同時に考慮した弾塑性有限変位解析を行う必要がある。特に、後座屈挙動をかなりの大変形領域まで追尾する必要があることから、使用する解析プログラムの特性、解析条件の設定、解析モデルの作成方法などにより解析結果に相違が生じる可能性がある。ここでは、解析プログラムの相違による解析結果の相違の有無を調べるとともに、適切な解析モデルの作成方法や解析条件の設定法について調査するため、市販の汎用ＦＥＭ解析プログラムを用いて行った幾つかの解析結果について紹介する。

先ず 2. で予備的検討として、市販の汎用ＦＥＭ解析プログラムを用いて、主として材料の非線形性が卓越すると思われる領域（±3δy）までの３次元ＦＥＭ解析での使用プログラム及び解析仕様が解析結果に及ぼす影響について検討するためのベンチマークテスト解析について述べる。次に、3. では材料の非線形性と幾何学的非線形性の両者が強く現れる領域（±7δy）までを対象に、使用プログラム及び解析仕様をパラメータとしたベンチマークテストを行い、推奨解析仕様と解析上の留意点についての検討結果を示す。さらに、4. では、これらのベンチマークテストの結果を元に実施した大型供試体を用いた実験に対するシミュレーション結果について紹介する。　なお、本解析は、（社）日本橋梁建設協会（以下橋建協）のメンバー会社１０社と電算会社４社が主に担当し実施したものである。

2. ベンチマークテスト解析－１（予備的検討）

予備的な検討として、使用プログラム及び解析仕様が解析結果に及ぼす影響について検討するためベンチマークテストを行った。ここでは、７種類の解析プログラム(ABAQUS, MARC, COSMOS/M, ADINA, DIANA, LUSAS, NASTRAN)を用いて、①弾性固有値解析と、②座屈による幾何学的非線形性が比較的弱く、材料非線形性が卓越すると思われる±3δy までの１サイクルの繰り返し水平載荷解析を実施し、基本的な解析特性の比較を行った。

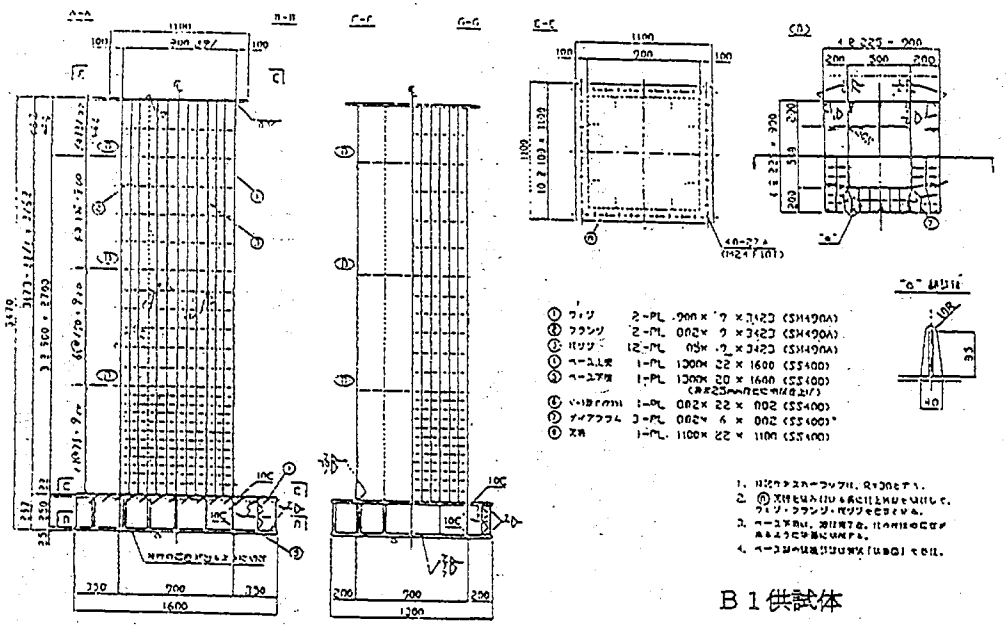
2.1 解析仕様

2.1.1 解析条件

解析プログラム間の解析結果の比較を行うことを主目的に、基本的な解析条件を表-2.1 に示すように統一した。

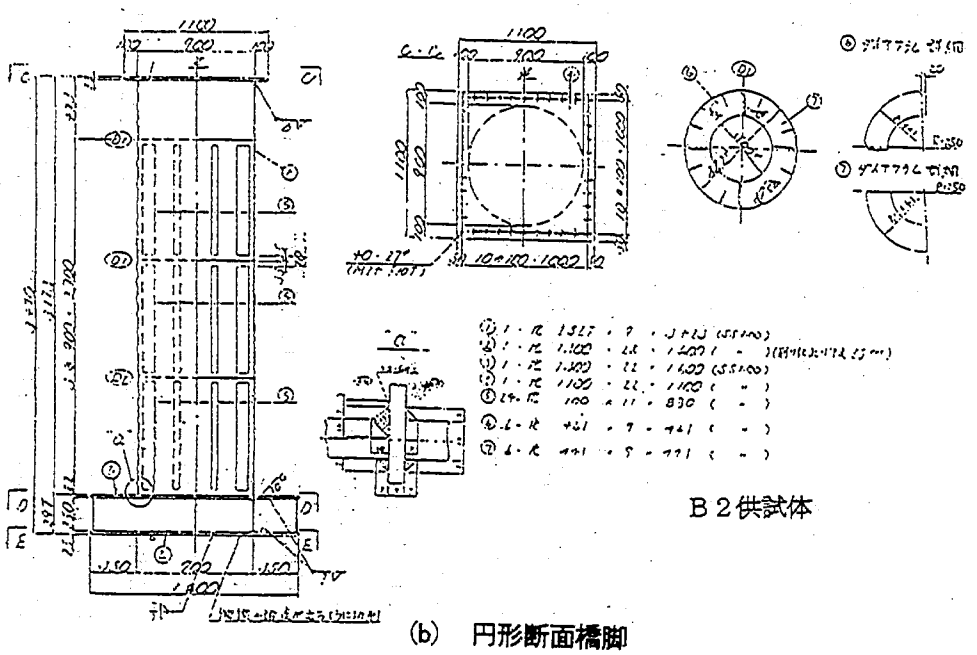
2.1.2 解析モデル

解析モデルとしては、橋建協が主に担当した載荷試験用供試体の中から、矩形断面橋脚としてＢ１を、円形断面橋脚としてＢ２を選んだ。各試験体の寸法諸元を図-2.1 に示す。試験体の解析モデルを作成するにあたっては、以下の点について共通仕様とした。また、初期不整や残留応力を考慮しないことから、対



B１供試体

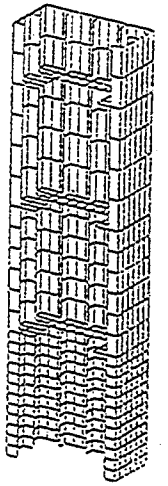
(a)　矩形断面橋脚



B２供試体

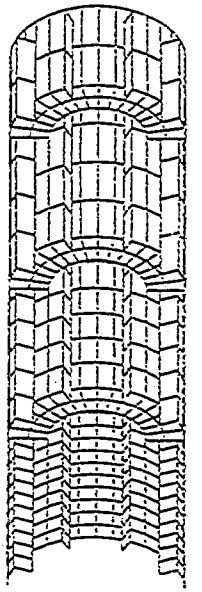
(b)　円形断面橋脚

図-2.1　解析対象モデルの諸元（供試体諸元）



B１供試体

(a)　矩形断面橋脚



B２供試体

(b)　円形断面橋脚

図-2.2　メッシュ分割図

表-2.1 解析条件（ベンチマークテスト－１；予備的検討用）

項目		解析仕様
共通仕様	解析モデル	水平荷重載荷方向を含む鉛直面を対称面とした全体の１／２モデルの３次元シェル構造
	使用要素	４節点シェル要素
	積分点	面内２ｘ２、板厚方向５
	剛性評価	ロッキングシェアの除去
	応力評価点：	積分点
	応力度－ひずみ曲線：	Bi-Linear 型（引張試験データに準じる）
	降伏条件：	Von Mises
	ひずみ硬化係数：	０．０１・Ｅ（ヤング係数の１／１００）
	硬化則：	等方硬化則
	幾何学的非線形性	① ひずみ、応力表示：グリーンのひずみ他、Caucy の応力またはキルヒホッフの応力等記述。 ② 定式化：Updated Lagrandian または Total Lagrangian による定式化の記述。
	初期条件	初期不整、初期応力（残留応力）：なし
その他の解析条件		その他、収束条件等の上記以外の解析条件については、各プログラムの推奨値を用いるか各解析担当会社の判断によることとした。

称条件が成り立つため、１／２でモデル化した。矩形断面と円形断面のメッシュ分割図を図-2.2に示す。

(1) モデリング

1) 天板を除くベース上板から上の部分をモデル化の対象とする。ただし、載荷試験機の水平荷重作用中心点の位置は考慮に入れない。 図-2.3おける境界条件での h'はゼロとする。

2) ダイアフラム及び縦リブは、それぞれウエブ、フランジと結合し、ダイアフラムと縦リブは直接結合しない。

3) ダイアフラムのスカラップ（Ｒ＝５０ｍｍ）は無視する。

4) 縦リブの天板側上縁はフリーとする。

5) 縦リブのベースプレート下端は完全拘束とする。

6) 天板の断面は平面保持させる。

7) 板厚中心でモデル化する。

(2) 材料定数

材料定数は全て表-2.2に示す公称値とする。

表-2.2 材料定数（公称値）

部材名	ウエブ／フランジ／縦リブ		ダイアフラム
	矩形断面橋脚	円形断面橋脚	
鋼材	ＳＭ４９０Ａ	ＳＳ４００	ＳＳ４００
ヤング係数；Ｅ(kgf/cm²)	２．１ｘ１０^6		
ポアソン比；ν	０．３		
降伏応力；σy(kgf/cm²)	３，２００	２，４００	２，４００

(3) 境界条件

1) 鉛直荷重載荷点

図-2.3に示すA点に軸力；P＝0．１５Pyを作用させる。

2) 水平強制変位作用点

図-2.3に示すA点に水平変位；δを与える。このとき、A点の回転はフリーとする。

3) 対称条件

図-2.3に示す如く、対称面上の節点自由度$\delta y, \theta x, \theta z$を拘束する。

対称面上のリブの板厚は１／２でモデル化する。

A点に作用させる鉛直荷重はP／２で与える。

(4) 解析内容

解析は、各々の解析モデルについて使用プログラム別に以下の２種類を行った。

1) 弾性固有値解析

幾何剛性；K_Gの精度チェックを行うことを目的に、鉛直荷重；Pyまたは0.15Pyに対する弾性固有値解析（座屈解析）を行った。

2) 繰返し載荷解析

予備的な検討として、軸力載荷時の降伏変位；δyを基準として図-2.4に示すように±３・δyの１サイクルを変位増分法により繰返し載荷を行った。

2.2 解析結果

(1) 弾性固有値解析結果

７種類の解析プログラムを用いて行った弾性固有値解析（座屈荷重解析）の結果を、表-2.3中にPcrとして示す。 図-2.5、図-2.6に、矩形断面脚および円形断面脚の座屈モード図の一例を示す。

表-2.3 ベンチマークテスト－１（予備的検討）の解析結果

解析	橋建協供試体；Ｂ１（矩形断面）				橋建協供試体；Ｂ２（円形断面）			
ﾌﾟﾛｸﾞﾗﾑ	担当会社	Ｐｃｒ	H(+3δy)	H(-3δy)	担当会社	Ｐｃｒ	H(+3δy)	H(-3δy)
ABAQUS	A社	5,171	+137.0	-139.0	C社	6,120	+63.0	-67.6
	B社	5,166	+128.5	-131.5	D社	6,260	+63.8	-68.5
MARC	E社	5,869	+141.5	-146.6	H社	5,124	+70.0	-73.0
	F社	5,755	+141.0	-146.6	I社	6,620	+70.3	-74.1
	G社	5,672	+142.0	-147.0	----	----	-----	-----
COSMOS/M	J社	5,330	+145.0	-154.0	I社	6,620	+72.7	-76.3
	K社	5,274	+149.0	-154.0	----	----	-----	-----
ADINA	L社	5,871	+141.5	-146.9	L社	6,087	+70.2	-74.1
	-----	-----	-----	-----	M社		+72.5	-76.0
DIANA	-----	-----	-----	-----	N社		+71.8	-72.2
LUSAS	I社	5,985	-----	-----	----		+71.8	-72.2
NASTRAN	A社	5,624	-----	-----	N社	6,420	-----	-----
実験結果			+142.0	-146.0			+62.0	-66.0

Pcr:座屈限界荷重（全断面；tonf）、H(±3δy):繰返し載荷時の水平荷重（全断面;tonf）

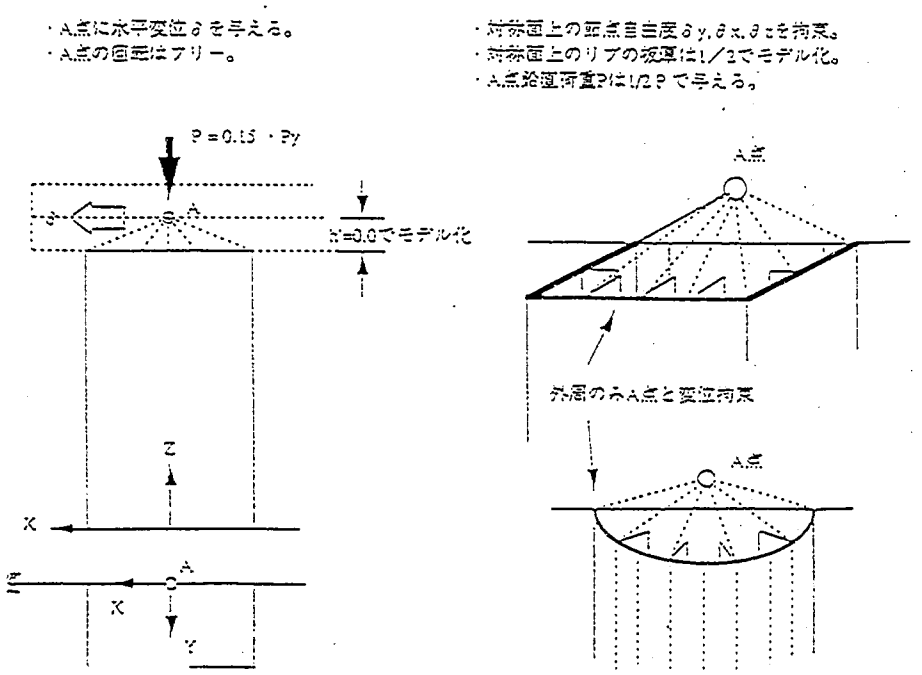
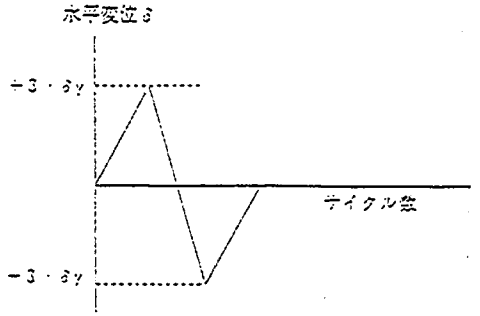


図-2.3　境界条件



$\delta y = Hy \cdot h^3 / 3EI$,　　$Hy = (\sigma y - P/A) \cdot Z/h$

$P = 0.15Py$　　,　　$Py = A \cdot \sigma y$

σy：鋼材の降伏応力（公称値）

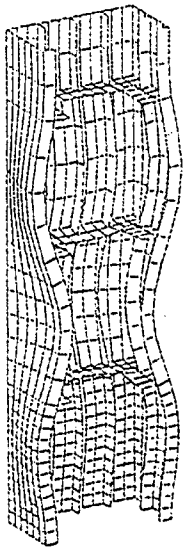
Hy:降伏水平荷重　h：供試体高さ

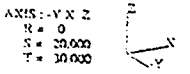
P　:軸力,　　Py:降伏軸力

δy：脚基部降伏時の脚頭の水平変位

A：供試体断面積　Z：断面係数　EI：曲げ剛性

図-2.4　繰り返し載荷条件

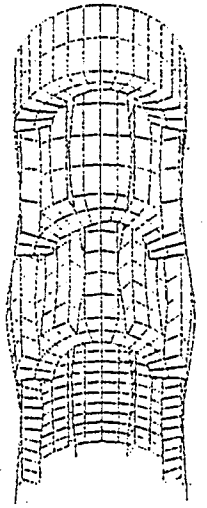




固有値：33.543

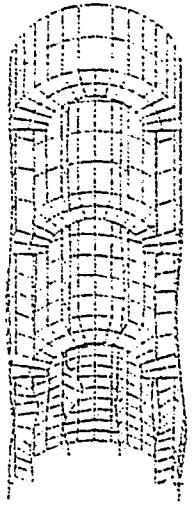
Pcr=5、164tf

図-2.5　座屈モード図の一例（矩形断面橋脚）



（a）一次モード

（固有値:8.475, Pcr=5,124tf）



（b）二次モード

（固有値:13.18, Pcr=7,969tf）

図-2.6　座屈モード図の一例（円形断面橋脚）

(2) 繰返し載荷解析結果

表-2.3に繰り返し載荷解析により得られた± 3δy時の水平荷重；H（± 3 δy）を比較して示す。同表には、実験結果も併記したが、本解析では降伏応力に公称値を用いていることからあくまで解析値の絶対値は参考値であり、解析値との比較は出来ないことに留意する必要がある。

図-2.7～図-2.10には、（±）3δy時における変形図と応力分布図の一例を示す。

2.3 まとめ

以上の予備的なベンチマークテスト解析の結果以下の知見を得ることができた。

(1) 弾性固有値解析（座屈解析）の結果、矩形断面橋脚については使用した解析プログラムにより差異が見られるが、解析担当会社による差異は余り見られなかった。

(2) 円形断面橋脚についても、使用した解析プログラムによる差異がみられたが、特に MARC においては解析担当会社によっても異なる結果がでており、共通の解析仕様以外の条件設定の相違が解析結果に影響を及ぼすことが判る。

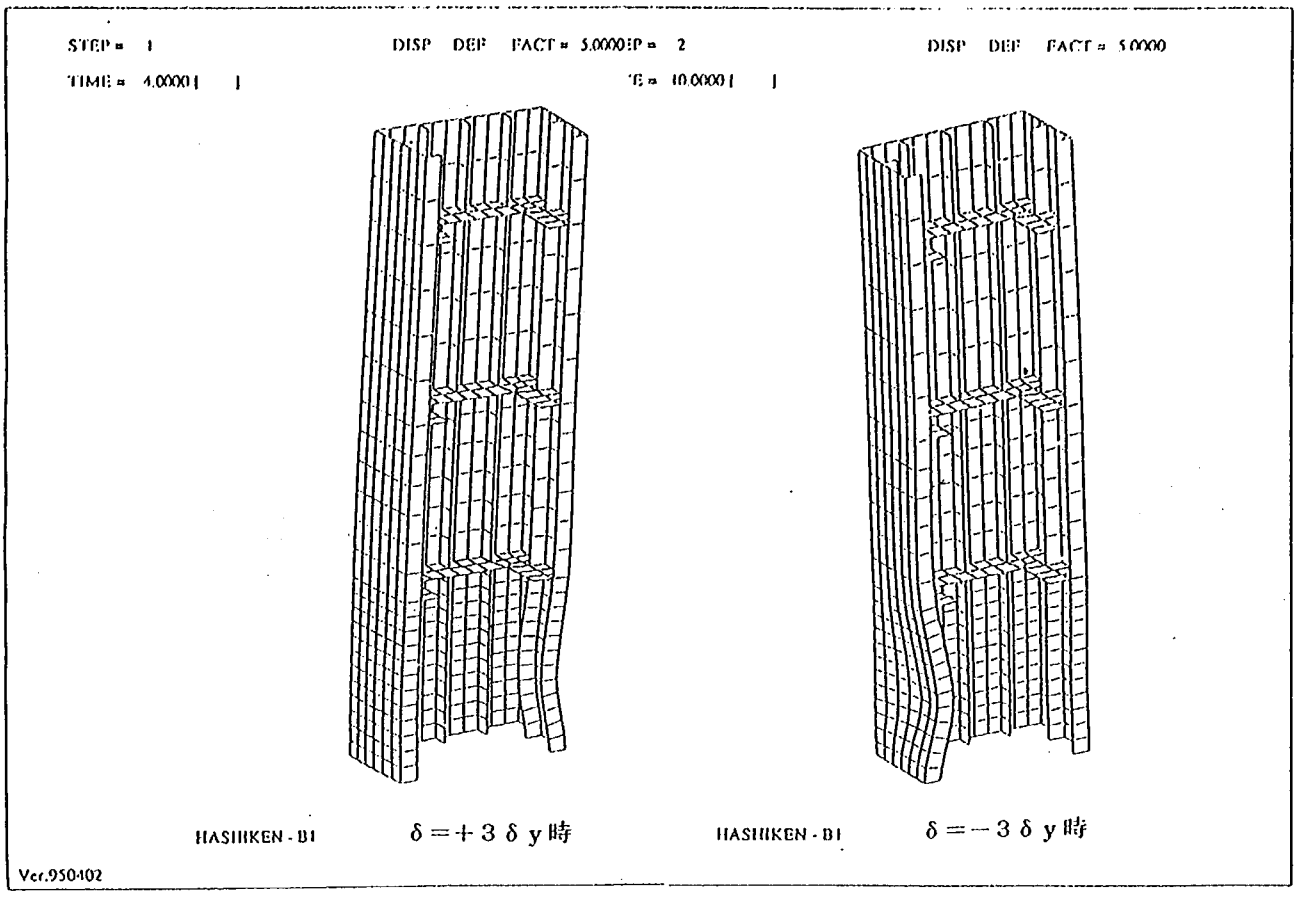
(3) 弾性固有値解析の結果にこのような差異が生じた理由として、今回の解析対象モデルでは、矩形・円形ともに固有値が接近した値に多数存在することが挙げられる。固有値が接近している場合、収束条件の相違により結果がばらつくことが考えられ、収束条件を揃えることによりある程度差異は解消されると推測される。これは、各解析結果で各々座屈モードが異なっていることからも裏付けられよう。

(4) 繰返し載荷解析結果においても、矩形断面橋脚に関しては使用したプログラムによる差異が認められる。

(5) また、矩形断面橋脚では同一プログラムでも ABAQUS において解析担当会社による差異がみられた。

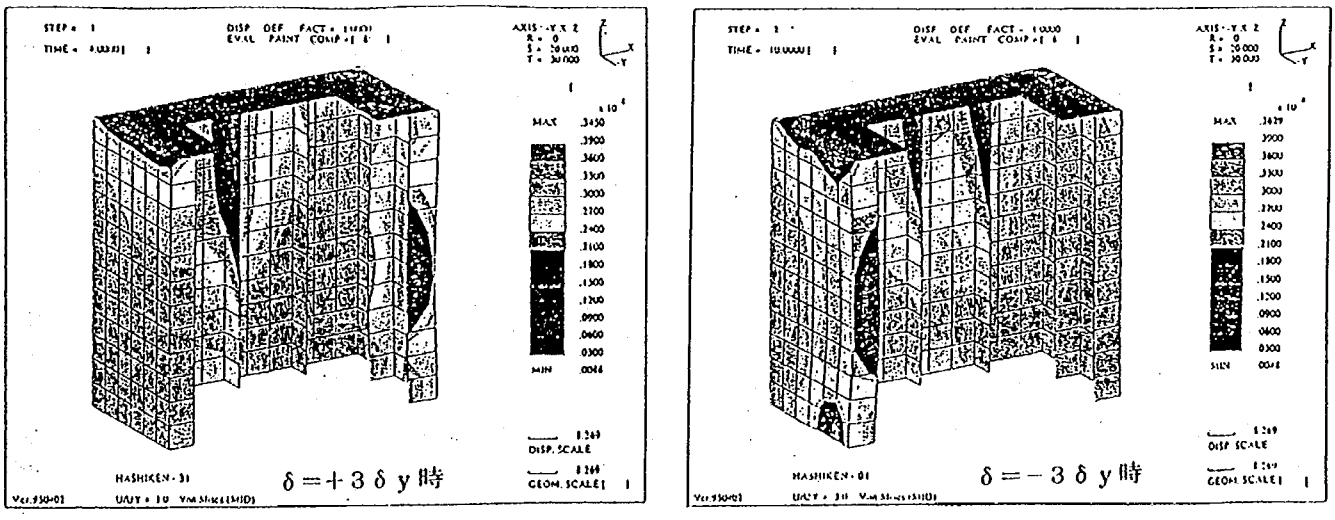
(6) 円形断面橋脚では解析プログラムによる差異は認められたが、解析担当会社間の差異はほとんどなかった。

(7) 本ベンチマーク解析の結果から、基本的解析条件とメッシュ分割さえ適切に行えば使用プログラムの相違が解析結果の精度に及ぼす影響は余り無いと考えられる。



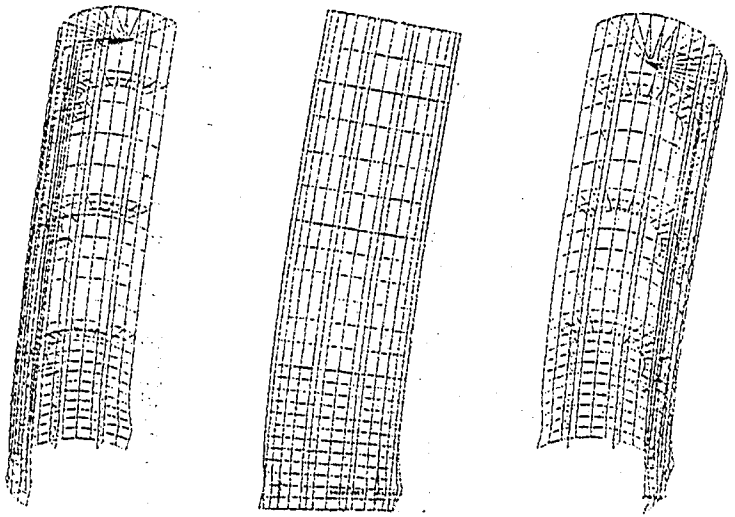
(ABAQUS)

図-2.7　繰り返し載荷時の変形図の一例（矩形断面橋脚：±3δy時）

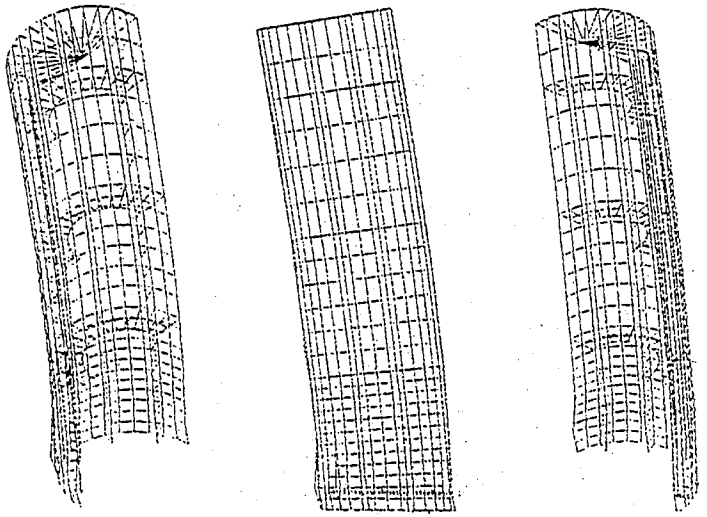


(ABAQUS)

図-2.8　繰り返し載荷時の応力分布図の一例（矩形断面橋脚：±3δy時）

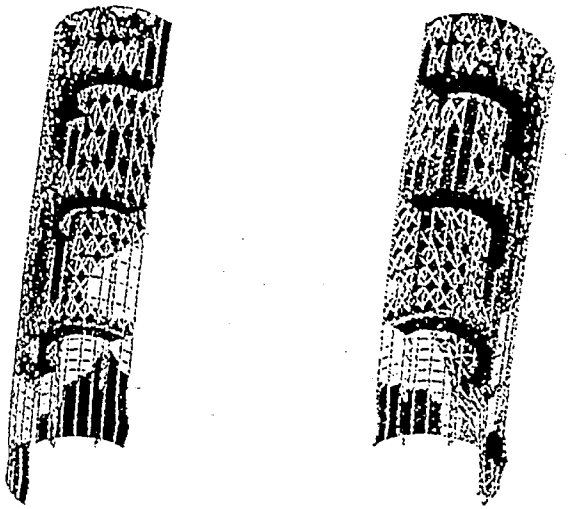


δ＝＋３δｙ時

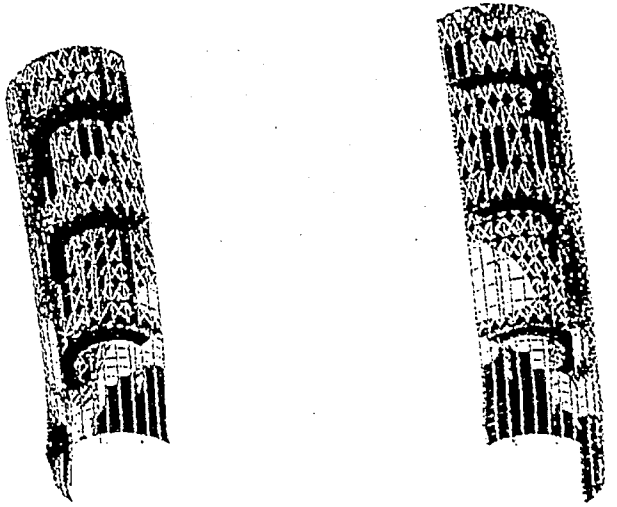


δ＝－３δｙ時

図-2.9　繰り返し載荷時の変形図の一例（円形断面橋脚：±３δｙ時）



δ＝＋３δｙ時



δ＝－３δｙ時

図-2.10　繰り返し載荷時の応力分布図の一例（円形断面橋脚：±３δｙ時）

3. ベンチマークテスト解析－２（弾塑性有限変位解析）

前節では、座屈による幾何学的非線形性が比較的小さい領域で、使用プログラムと解析仕様が解析結果に及ぼす影響について検討した。ここでは、次ぎのステップとして座屈による幾何学的非線形性が強く現れる±７δｙまでを対象に繰返し載荷試験のシミュレーション解析についてベンチマークテストを行った。

3.1 解析条件に関する検討

矩形断面橋脚と円形断面橋脚について大型模型実験に用いた供試体を対象に、汎用弾塑性有限変位ＦＥＭ解析プログラムを用いて、ＦＥＭ解析による繰り返し載荷試験の数値解析シミュレーションを行った。ここでは、使用プログラムによる影響を排除するため、市販の汎用ＦＥＭ解析プログラムのうちMARCを用いた解析結果と実験結果を比較することにより、ＦＥＭ解析上の基本的入力条件、解析実施上の問題点、解析精度等について示すとともに、今後解析を行う上での留意点などについてまとめた。

3.1.1 解析仕様

(1) 解析条件

2.での検討結果を参考に、表-3.1に示す解析条件を用いた。

表-3.1 解析条件（ベンチマークテスト－２；弾塑性有限変位解析用）

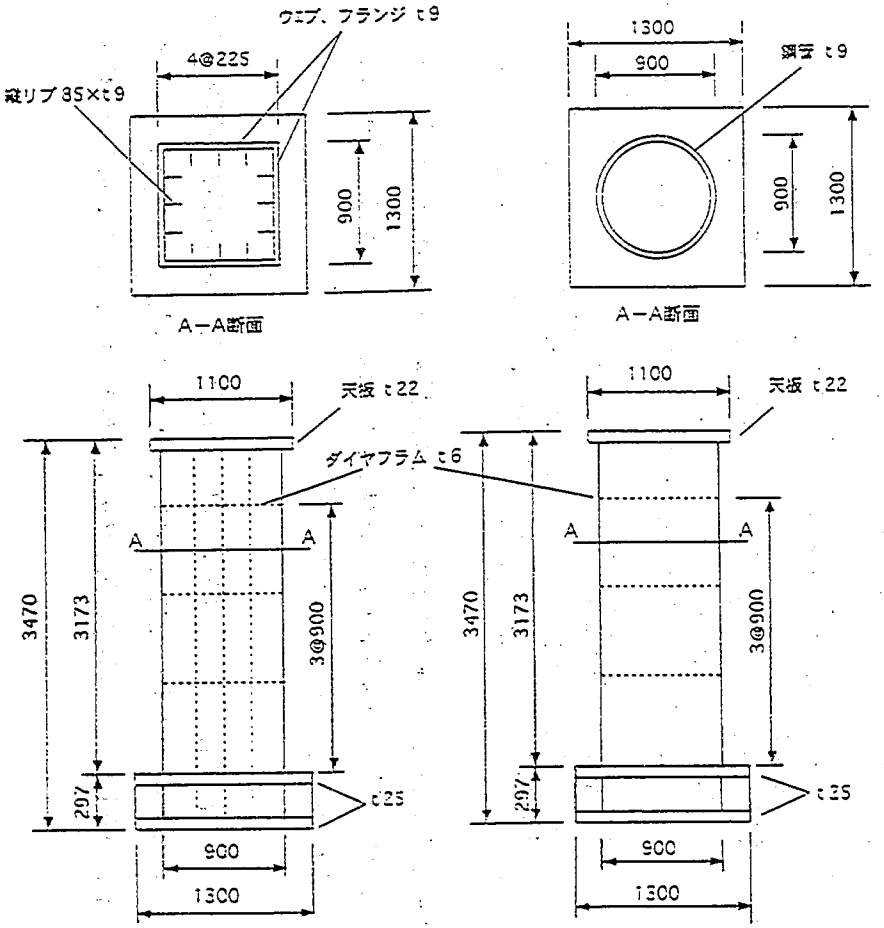
項目		解析仕様
共通仕様	解析モデル	水平荷重載荷方向を含む鉛直面を対称面とした全体の１／２モデルの３次元シェル構造
	使用要素	４節点シェル要素
	積分点	面内２ｘ２、板厚方向５
	剛性評価	ロッキングシェアの除去
	応力評価点：	積分点
	応力度－ひずみ曲線：	Bi-Linear型（引張試験データに準じる）
	降伏条件：	Von Mises
	ひずみ硬化係数：	０．０１・Ｅ（ヤング係数の１／１００）
	硬化則：	移動硬化則
	幾何学的非線形性	① ひずみ、応力表示：グリーンのひずみ他、Caucyの応力またはキルヒホッフの応力等記述。 ② 定式化：Updated Lagrandian または Total Lagrangian による定式化の記述。
	初期条件	初期不整、初期応力（残留応力）：なし
その他の解析条件		その他、収束条件等の上記以外の解析条件については、各プログラムの推奨値を用いるか各解析担当会社の判断による。

(2) 解析対象モデル

解析対象としては、前節と同様に６者共同研究に用いられた載荷実験[1]用供試体の中から、図-3.1に示す矩形断面橋脚および円形断面橋脚供試体を選んだ。鋼材は、1.と同様に脚パネル・縦リブにＳＭ４９０Ａ、それ以外（９mm鋼管を含む）はＳＳ４００である。

(3) 荷重条件

荷重条件は、載荷実験の載荷方法に合わせ、図-3.2に示すように供試体に所定の軸力（全断面降伏荷重の15%）を載荷した後、その軸力を一定に保った状態で橋脚部の所定の載荷点に正負の繰り返し水平荷重を静的に載荷する水平交番載荷とした。 載荷は、供試体の下端が降伏するときの載荷点の変位をδｙと



(a) 矩形断面橋脚　　(b) 円形断面橋脚

図-3.1 解析対象モデルの諸元（供試体諸元）

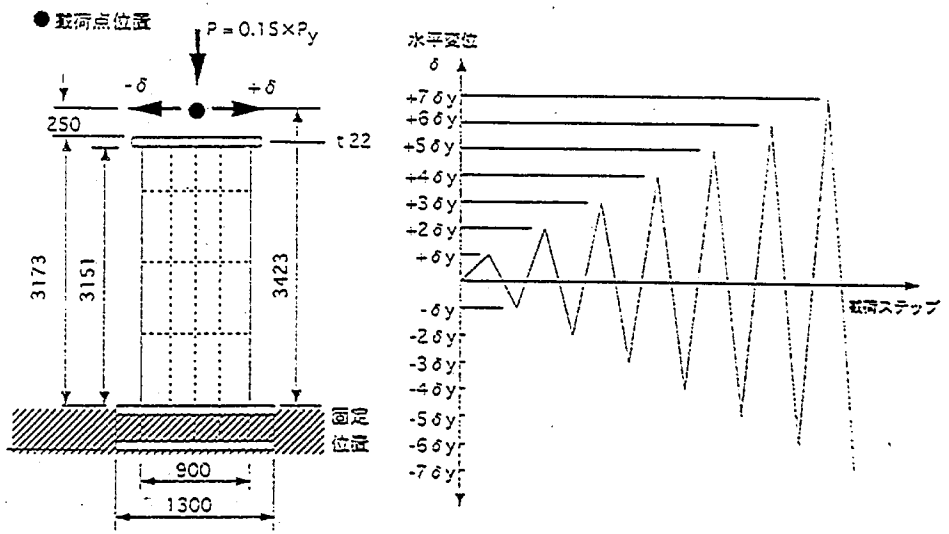


図-3.2 載荷方法と載荷サイクルの概念図

し、$\delta = 0 \rightarrow +\delta y \rightarrow -\delta y \rightarrow +2\delta y \rightarrow -2\delta y \rightarrow \cdots$の如く振幅を漸次増やしながら変位制御で行った。なお、各振幅における繰り返しは1回である。

繰り返し載荷の基本となるδyは、以下により算出した。ここでは、鋼材の降伏応力；σyは、各使用鋼材の公称降伏応力（SM490A；3,200kgf/cm²、SS400；2,400kgf/cm²）を用いている。

$$\delta y = Hy \cdot h^3 / 3EI, \qquad Hy = (\sigma y - P/A) \cdot Z/h$$

$$P = 0.15Py \quad , \qquad Py = A \cdot \sigma y$$

ここに、δy：脚基部降伏時の脚頭の水平変位

σy：鋼材の降伏応力（公称値）

Hy:降伏水平荷重，h：供試体高さ，A：供試体断面積，Z：断面係数，EI：曲げ剛性

(4) 材料特性値

解析における材料特性値のうち降伏応力には、供試体に用いられた鋼材の材料試験により求められた実測値を用いた。表-3.2には、解析諸元をまとめて示す。

表-3.2 解析諸元

項　目	矩形断面		円形断面
解析対象モデル	橋建協：B1供試体		土　研：No. 8供試体
鋼　材	ｳｪﾌﾞ/ﾌﾗﾝｼﾞ/ﾘﾌﾞ	ﾀﾞｲｱﾌﾗﾑ	
	SM490	SS400	SS400
降伏応力；σy(kgf/cm²)	3,825	2,950	2,950
ヤング係数；E(kgf/cm²)	2.1×10^6		
鉛直荷重（軸力）；P(tf)	198.03		90.69
降伏変位；δy(cm)	1.12		0.84
載荷パターン	$\pm\delta y, \pm 2\delta y, \pm 3\delta y, \cdots \cdot \pm 7\delta y$（各1サイクル）		
供試体高さ(cm)	315.1（ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ上面～天板下端；図-3.2参照）		
載荷点位置	342.3（ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ上面からの高さ；図-3.2参照）		

(5) モデリング

2.と同一条件。

3.1.2 矩形断面橋脚モデル解析

(1) メッシュ分割

矩形断面脚モデルに対するメッシュ分割を図-3.3に示す。メッシュ分割に際しては、縦リブ、縦リブ間のフランジおよびウエブの局所座屈モード、さらに曲げと軸力による橋脚基部の圧縮座屈が発生する際の弾性座屈解析による座屈長を考慮した。

また、ここでは初期不整および残留応力については考慮しないことから、破壊モードは対称形に限定し解析モデルは1／2対称モデルとした。

(2) 解析結果

図-3.4(a)には、繰返し載荷解析による水平荷重と作用点での水平変位の関係（ヒステリシスループ）を示す。また、比較のため、実験結果の包絡線を図上にプロットした。　参考のため、図-3.4(b)に実験で

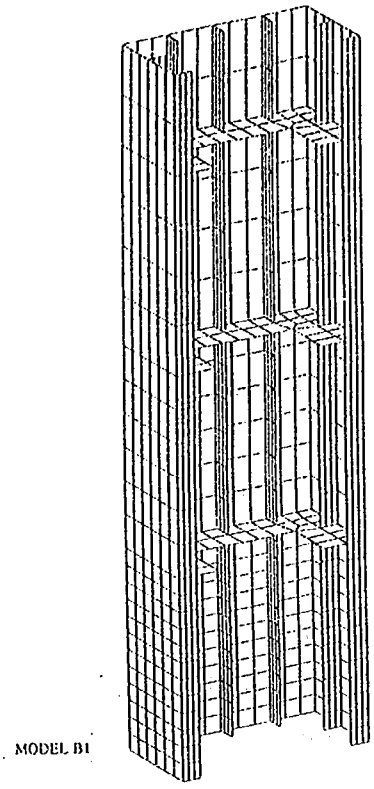
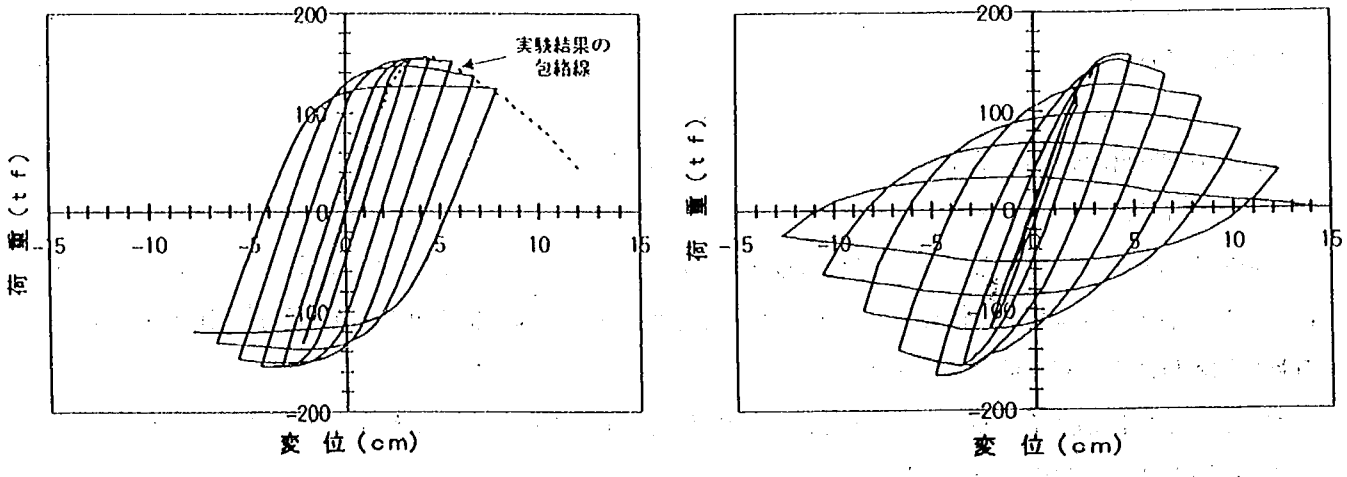


図-3.3　矩形断面橋脚モデルのメッシュ分割図



(a)　解析結果　　(MARC)

(b)　実験結果

図-3.4　矩形断面橋脚のヒステリシスループ

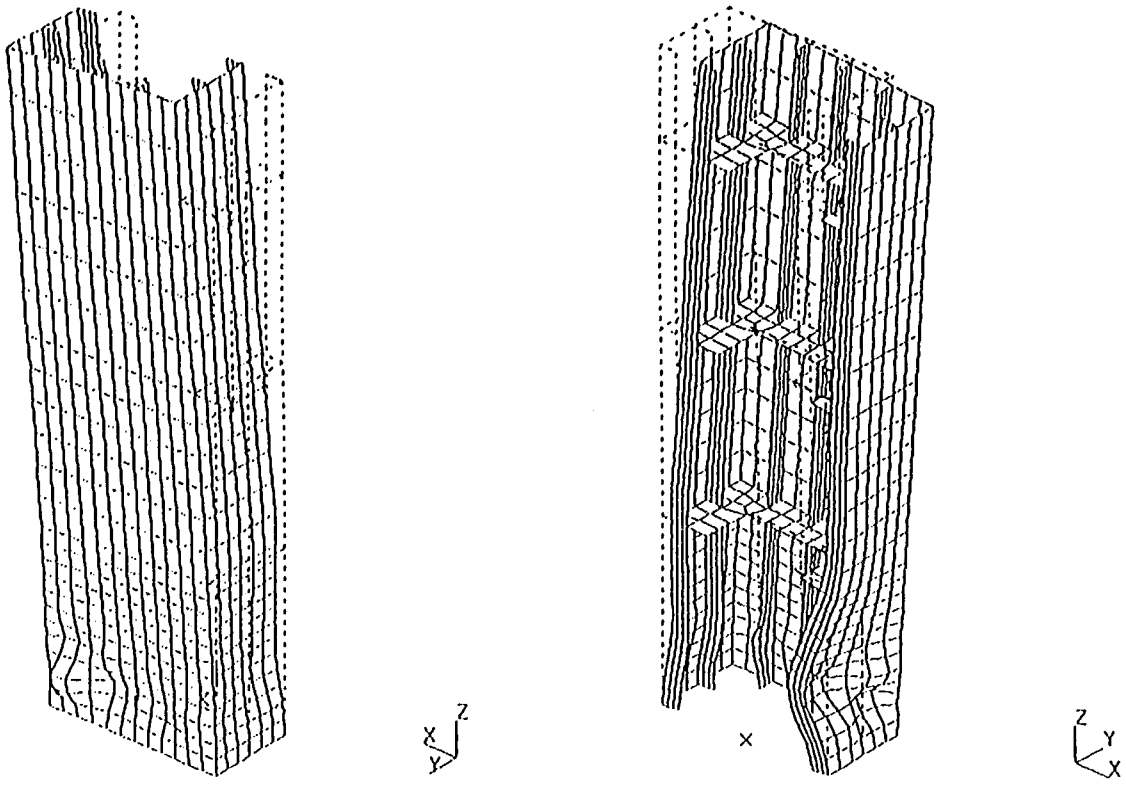


図-3.5　矩形断面橋脚の変形モード図（変形を３倍に拡大；＋７δｙ時）

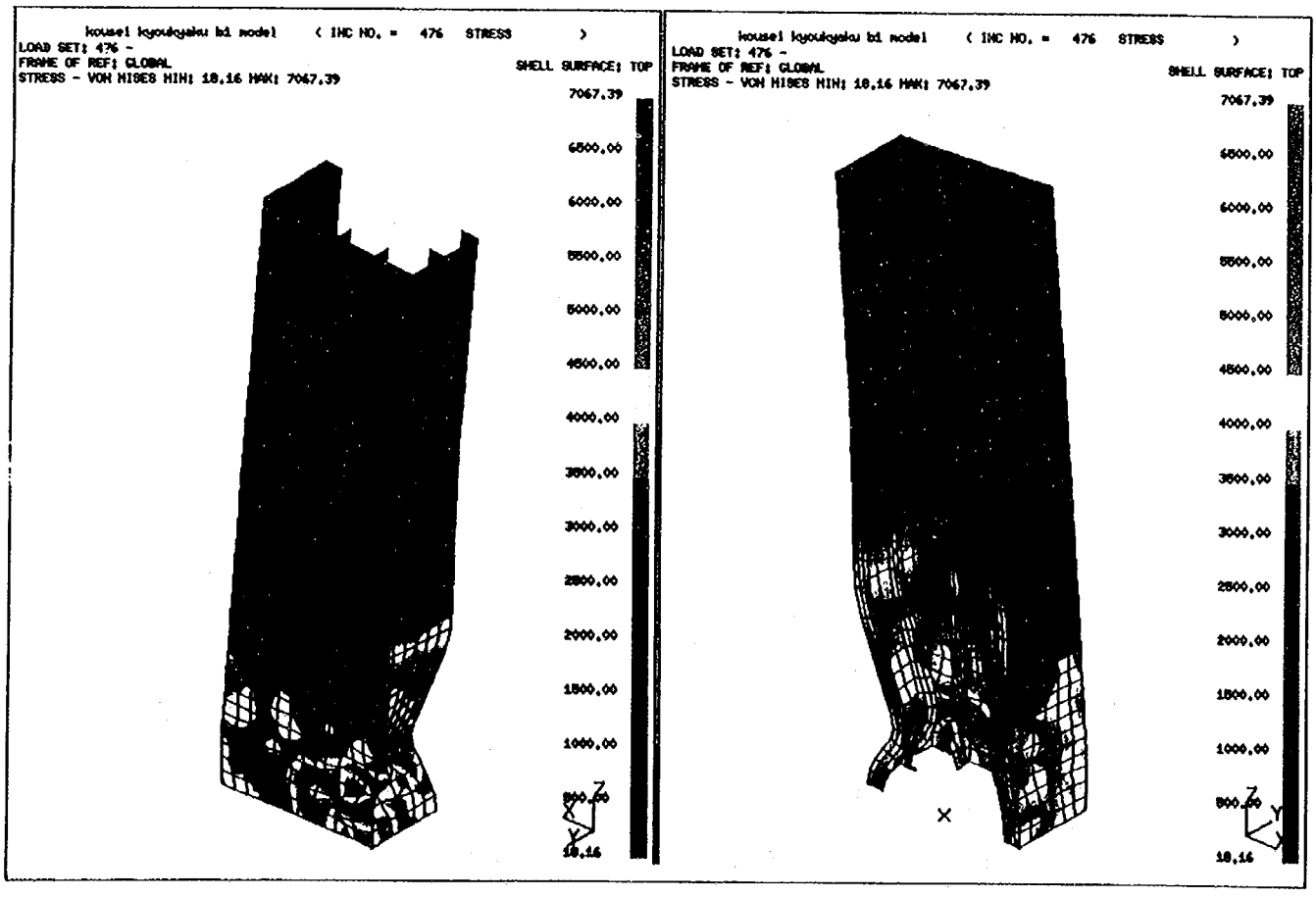


図-3.6　矩形断面橋脚の応力分布図

得られたヒステリシスループを示す。解析結果の包絡線は降伏時から最高荷重時にかけておおむね実験結果と一致している。ただし、最高荷重時以後の水平荷重は実験結果と比較して多少大きく、水平変位の増加に対する水平荷重の低減率が低くなっている。この原因については、

①材料の応力度－ひずみ曲線の設定方法

②使用した構成則

③初期不整、残留応力などの初期条件を考慮していないこと等、局部的な発生応力の違いによることが考えられる。また、図-3.5 には、$-7\delta_y$変形時での変形モード図を示す。解析による橋脚基部の全体変形モードはおおむね実験と一致した。図-3.6 には、参考のために応力分布図を示す。

3.1.3　円形断面橋脚モデル解析

(1) メッシュ分割

円形断面モデルではメッシュ分割の違いが解析精度に及ぼす影響について調査するため、図-3.7(a)～(d)のような４タイプのメッシュ分割によるモデルの解析を実施した。ケース２～４の高さ方向については弾性座屈長（$=1.72\sqrt{(R \cdot t)}$、ここに、R：円形断面橋脚半径、t：板厚）を考慮して分割を行っている。また、矩形断面橋脚モデルと同様に１／２対称モデルで解析を行った。

(2) 解析結果

図-3.8(a)には、最も実験結果と一致したケース４のメッシュ分割モデルによるヒステリシスループを示す。比較のため、実験結果の包絡線を併せてプロットした。また、図-3.8(b)には実験で得られたヒステリシスループを示す。さらに、図-3.9 に各メッシュ分割モデルでの繰返し載荷解析結果の包絡線を示す。解析結果では、高さ方向にメッシュ分割を最も細かく行ったケース４の結果が実験結果に最も良く一致した。ケース２および３では、ピーク荷重後の水平荷重の低減率が実験結果と比較して多少精度が悪いものの、橋脚基部の高さ方向の分割幅が十分に弾性座屈長以下であれば$5\delta_y$程度まではほぼ一致した結果となった。図-3.10 にケース４での$+7\delta_y$変形時での変形図を示す。解析による橋脚基部の全体変形モードは矩

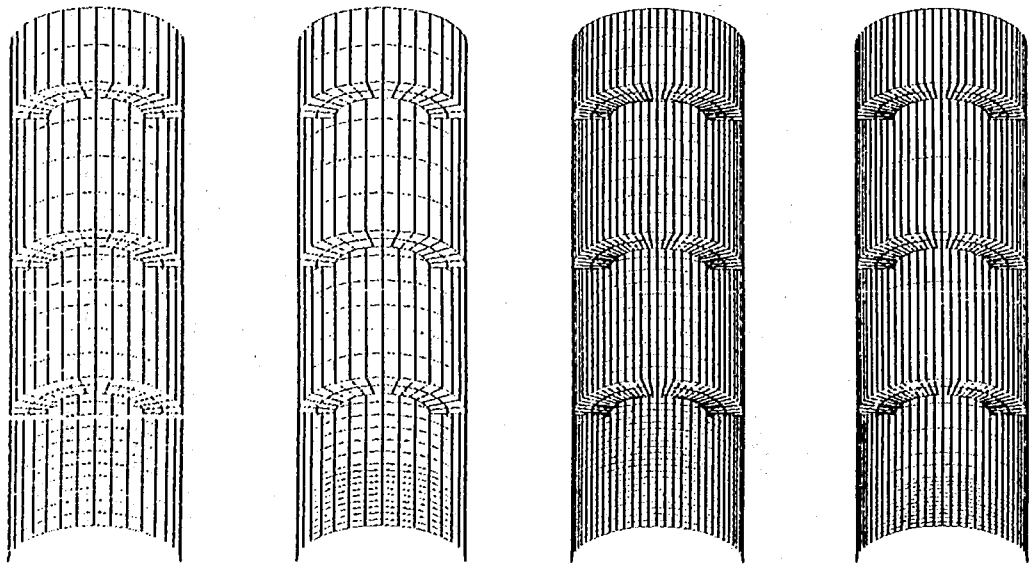
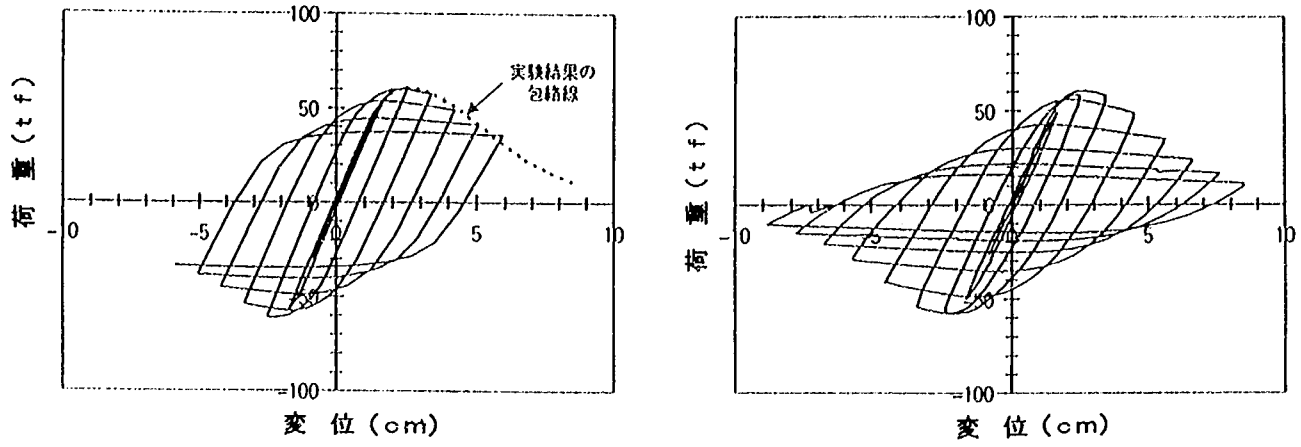


図-3.7　円形断面橋脚モデルのメッシュ分割図



(a) 解析結果の一例（MARC)　　(b) 実験結果

図-3.8　円形断面橋脚のヒステリシスループ

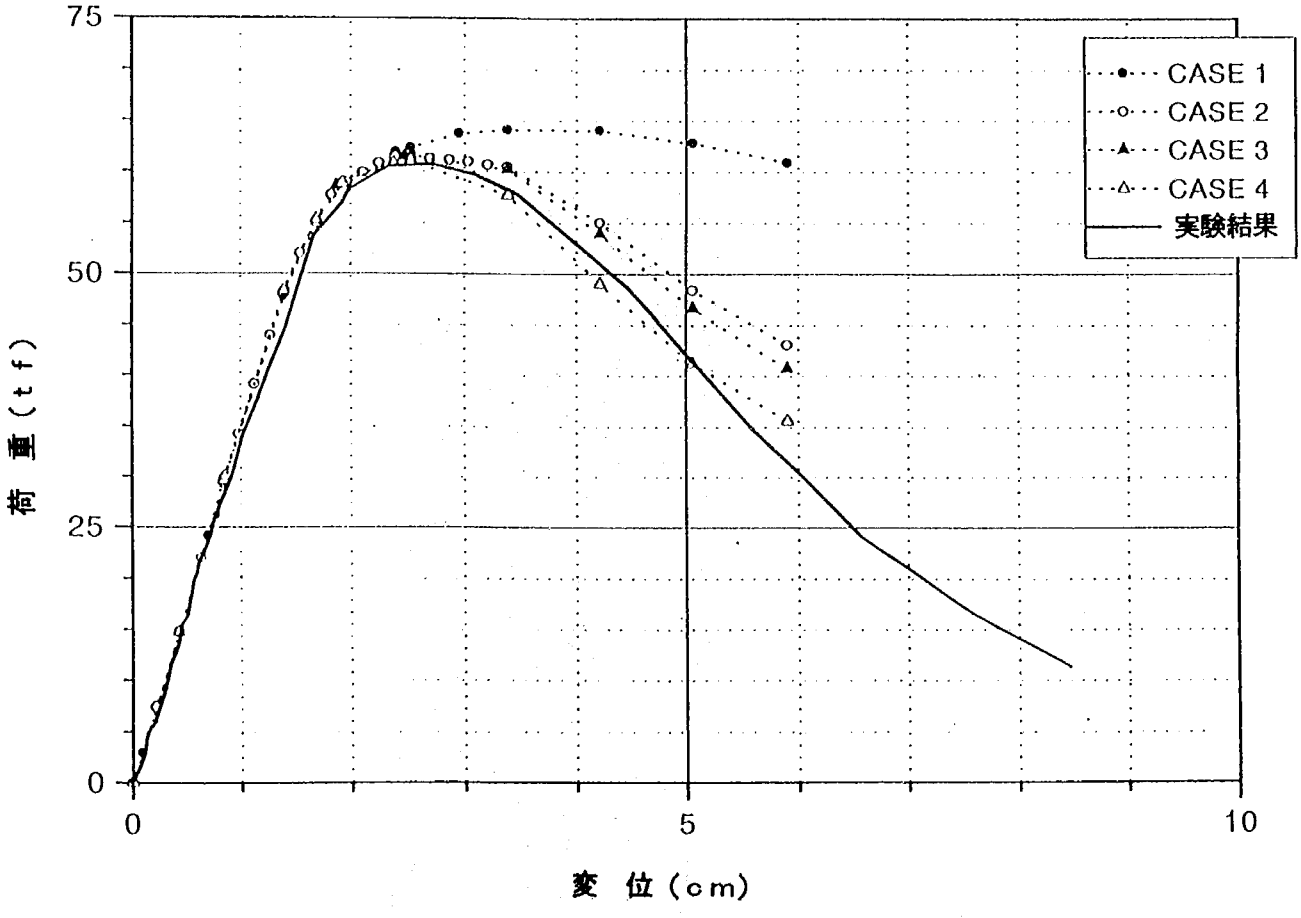


図-3.9　各メッシュ分割における骨格曲線の比較

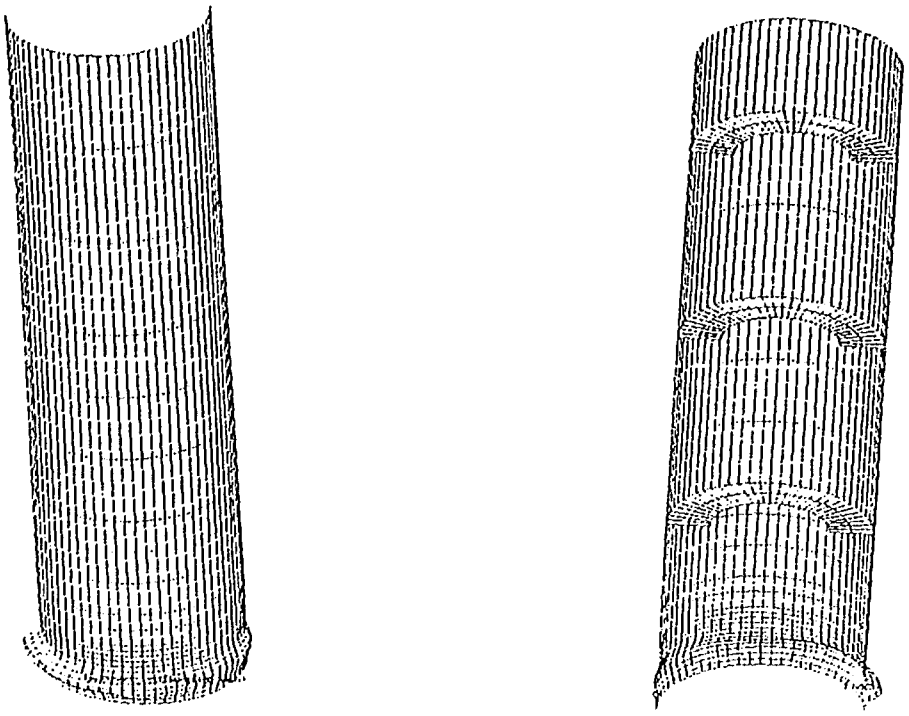


図-3.10　円形断面橋脚の変形モード図（変形を３倍に拡大；＋７δy時）

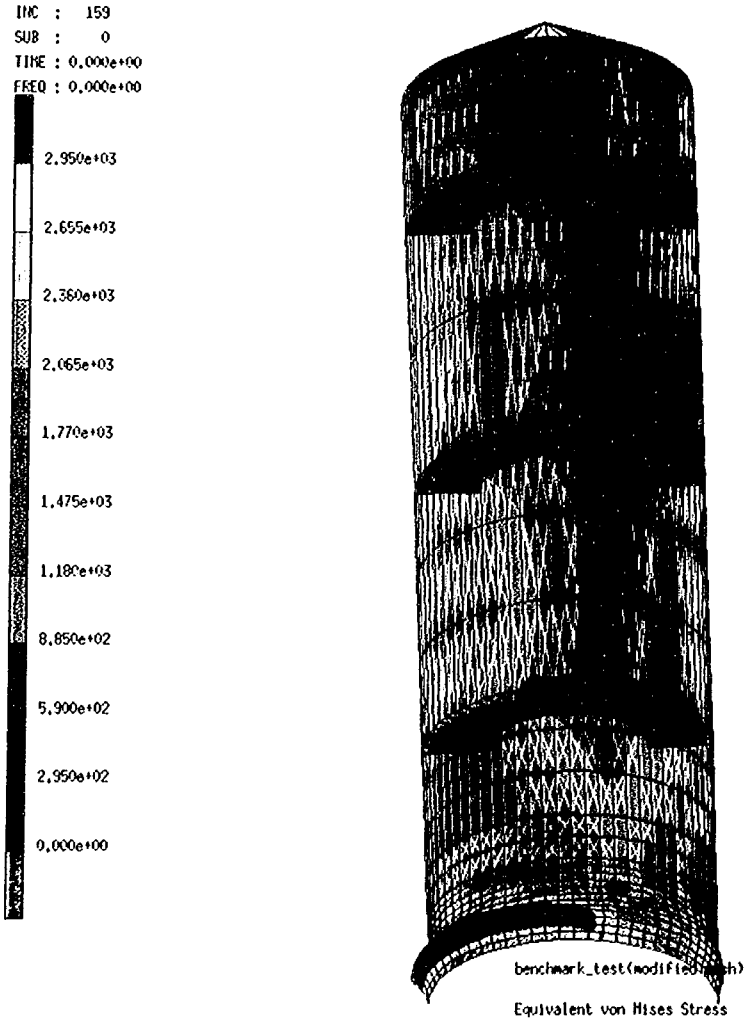


図-3.11　円形断面橋脚の応力分布図

形断面橋脚と同様におおむね一致する結果となった。図-3.11 には、参考のためこのときの応力分布図を示す。

3.1.4 解析上の留意点

以上、解析を実施した中で得られた知見と併せてＦＥＭ解析上の留意点を以下に示す。

① 材料特性曲線を実験値と合わせる。引張試験での応力度－ひずみ曲線を用いることで最高荷重到達後も５～６δ_y 程度までは実験値とほぼ一致したヒステリシスループを得ることができる。応力－ひずみ曲線が棚部から第２勾配以後まで計測されている場合には、モデル化に取り組むことで、水平変位が５～６δ_yより大きくなった場合にも解析精度の向上が期待できると考えられる。

② 構成則は、一般的に用いられている Von Mises の降伏荷重で移動硬化則を併用すれば、降伏荷重、最高荷重までは十分な精度で合わせることが可能である。特に、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編では、コンクリート充填されない鋼製橋脚に対し、非線形性を考慮した動的解析により耐震性を判定するのが良いことが示されている。ここで使用される復元力特性は、Bi-Linear 型のモデルが基本と考えられており、終局変位を矩形断面橋脚では４～５δy、円形断面橋脚では５～６δy として規定されていることから、本解析も７δy 程度までの挙動が把握できれば実用的には十分であると判断した。ただし、後座屈後の挙動まで含めて、より精度の高い解析を実施したい場合は、繰返し載荷による影響を考慮した修正２曲面モデル、３曲面モデルなどの構成則を用いるのが良いと考えられる。

③ 初期不整、残留応力は無視しても、今回検討した範囲内では ヒステリシスループのレベルで、解析値と実験値はほぼ一致する結果が得られた。

④ メッシュ分割に際しては、橋脚基部は弾性座屈長を考慮して行う必要がある。縦リブも面外座屈が表現できるよう配慮する。

⑤ 荷重作用位置と脚の各パネル間との結合条件は極力剛梁結合とする。弾性梁結合で断面剛性を大きくした場合では、解析精度が低下する場合がある。

3.2　ベンチマークテスト（解析プログラムの相違が解析結果に及ぼす影響）

ここでは、市販されている５種類の汎用ＦＥＭプログラム（ABAQUS, MARC, COSMOS, ADINA, DIANA）を用いて、解析条件を合わせた上で、矩形断面橋脚および円形断面橋脚について実験結果と比較解析を行った。

解析で得られたヒステリシスループの包絡線を、矩形断面橋脚、円形断面橋脚について実験結果の包絡線と比較してそれぞれ図-3.12, 図-3.13 に示す。全般的には、最高荷重到達後の後座屈までの挙動は、どのプログラムを用いても実験結果と良く一致するす結果が得られた。なお、同一プログラムを用いても、表-3.1 に示した以外の細かい解析条件の相違によりわづかながら差異を生じた。また、実験と各プログラムそれぞれの最高荷重値、最小荷重値の比較結果を表-3.3 にまとめて示す。表から分かるように、ヒステリシスループと同様に用いた解析プログラムの相違による解析結果の差異はほとんど無くほぼ同一の結果となっていると言えよう。

表-3.3　汎用ＦＥＭ解析プログラムを用いた弾塑性有限変位解析結果の比較

解析ﾌﾟﾛｸﾞﾗﾑ名	解析担当会社	矩形断面橋脚モデル		解析担当会社	円形断面橋脚モデル	
		＋側最大荷重（tf）	－側最大荷重（tf）		＋側最大荷重（tf）	－側最大荷重（tf）
ABAQUS	A社	152.66	-151.06	A社	59.67	-59.59
	B社	152.72	-152.40	C社	59.06	-59.20
		------	-------	D社	60.32	-59.99
MARC	E社	155.72	-154.72	H社	60.96	-60.70
	F社	155.70	-154.00	I社	60.85	-60.88
	G社	155.61	-154.62		------	-------
COSMOS/M	J社	156.27	-155.33	I社	60.85	-60.86
	K社	151.47	-151.46		------	--------
ADINA	L社	156.49	-155.24	L社	60.34	-60.42
	B社	-------	--------	M社	60.28	-60.27
DIANA		-------	--------	N社	60.94	-60.72
実験結果		157.03			60.71	

以上の結果から、汎用ＦＥＭ解析プログラムを用いても、解析条件を適切に設定することにより、最高荷重に関してはほぼ実験結果と合致する解析結果が得られることが分かった。ただし、各プログラムごとに特徴のある項目もあり、それぞれ使用する上で十分に使用要素などを検討する必要がある。今回はベンチマークテストという意味から最低限の条件を揃えることとしたが、それぞれの解析モデルに応じて使用要素、構成則などを変更することにより、更に精度の高い結果が得られるプログラムもあると思われる。

参考文献

1）　西川、山本、名取、寺尾、安波、寺田：既設鋼製橋脚の耐震性能改善方法に関する実験的研究、構造工学論文集, Vol.42A, pp.975～986, 1996年3月.

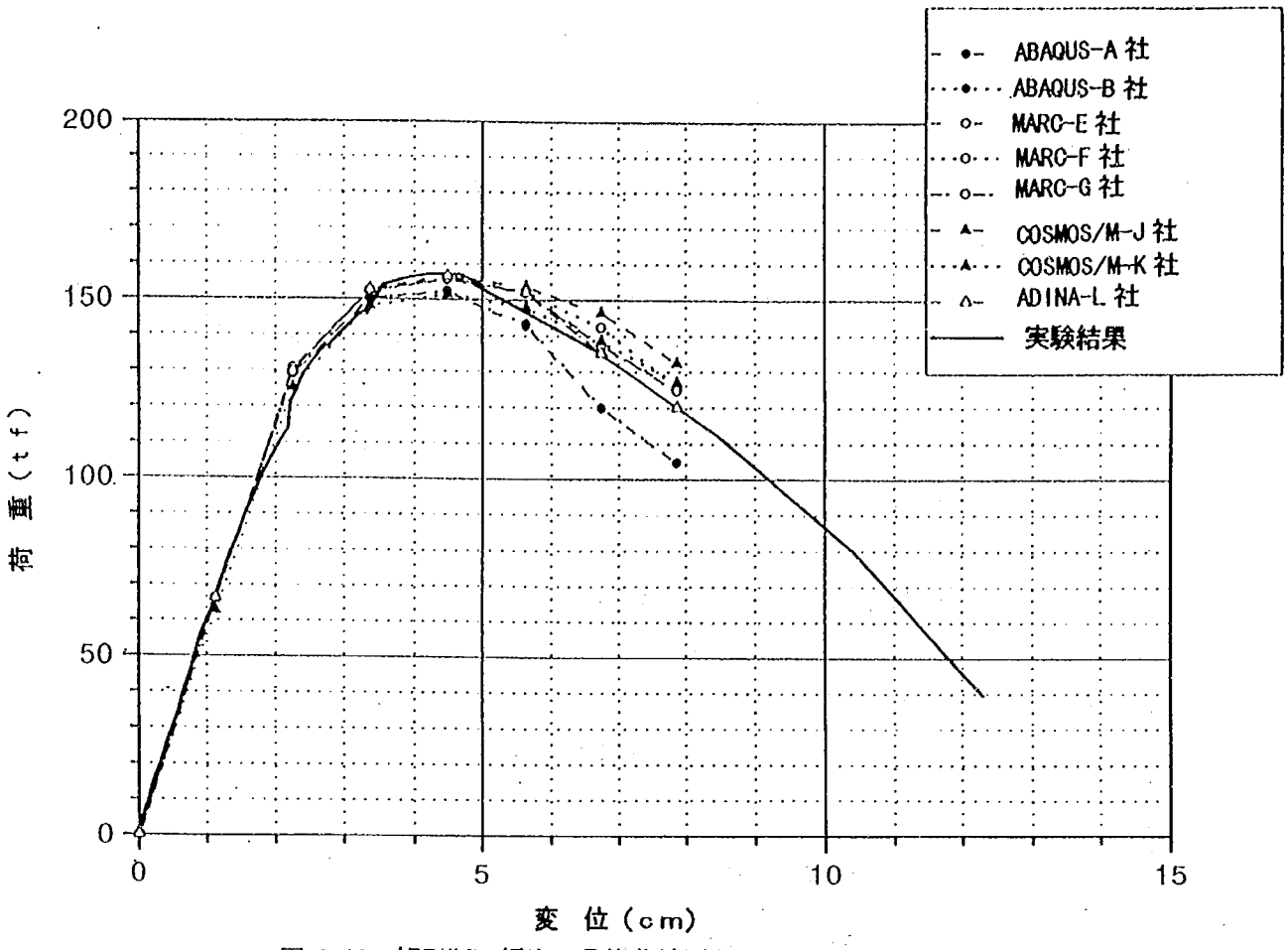


図-3.12　矩形断面橋脚の骨格曲線（ベンチマークテスト結果）

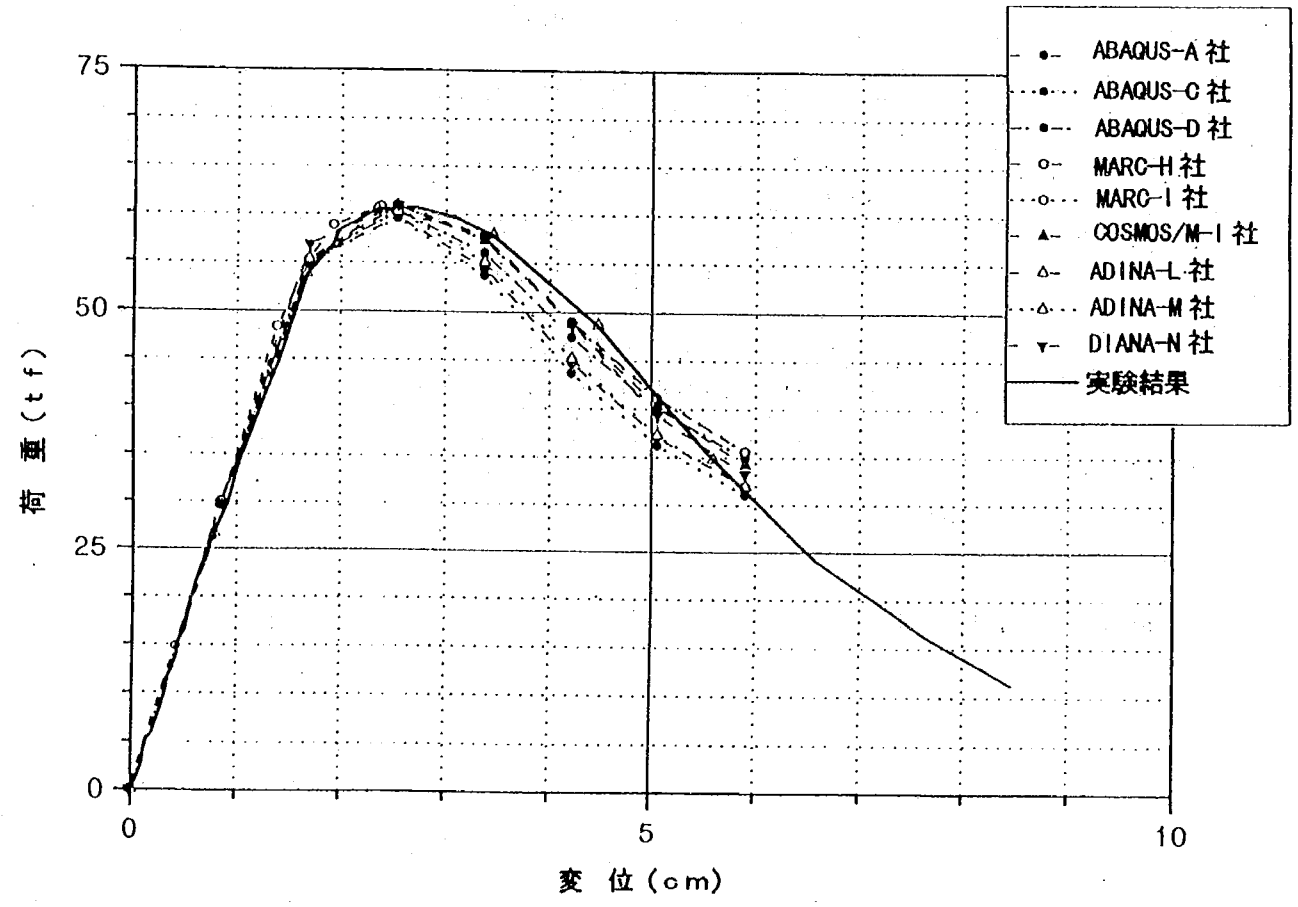


図-3.13　円形断面橋脚の骨格曲線（ベンチマークテスト結果）

4. 首都高速道路公団（以下、首都公）供試体（M－シリーズ）、
日本橋梁建設協会（以下、橋建協）供試体（B－シリーズ）の載荷試験シミュレーション解析

3. で示したベンチマーク解析結果をベースに解析条件の共通仕様化を行い、平成７年度から８年度にかけて実施された「鋼製橋脚の耐震設計法に関する共同研究（６者共同研究）」における繰返し載荷実験の数値解析シミュレーションを行った。ここでは、一連の実験シリーズの中から首都高速道路公団（以下、首都公）供試体（Ｍ１～Ｍ６）と日本橋梁建設協会（以下、橋建協）供試体（Ｂ１～Ｂ５）の代表的供試体４例を選び、汎用ＦＥＭ解析プログラムを用いて行った弾塑性有限変位解析による実験の数値解析シミュレーション結果を紹介する。

4.1 首都公供試体（Mシリーズ）解析例

4.1.1 Ｍ２供試体：矩形断面橋脚

(1) 解析対象モデル

図-4.1に解析対象としたＭ２供試体の形状・寸法諸元を示す。

(2) 解析仕様

主な解析仕様を表-4.1にとりまとめて示す。

表-4.1 解析仕様（Ｍ２供試体用）

項目		解析仕様
解析プログラム名		ＭＡＲＣ
共通仕様	解析モデル	水平荷重載荷方向を含む鉛直面を対称面とした全体の１／２モデルの３次元シェル構造
	使用要素	４節点シェル要素
	積分点	面内２ｘ２、板厚方向５
	剛性評価	ロッキングシェアの除去（低減積分による）
	応力評価点：	積分点
	応力度－ひずみ曲線：	Bi-Linear 型（引張試験データに準じる）
	降伏条件：	Von Mises
	ひずみ硬化係数：	０．０１・Ｅ（ヤング係数の１／１００）
	硬化則：	移動硬化則
	幾何学的非線形性	① ひずみ、応力表示：工学ひずみ、工学応力 ② 定式化：Updated Lagrandian または Total Lagrangian による定式化の記述。
	初期条件	初期不整、初期応力（残留応力）：なし
その他の解析条件		収束条件：最大残差力／最大反力≦１０％ 収束法：ニュートン－ラプソン法

(3) 解析モデル

図-4.2にメッシュ分割図を示す。

(4) 解析諸元

主な解析諸元を表-4.2に示す。

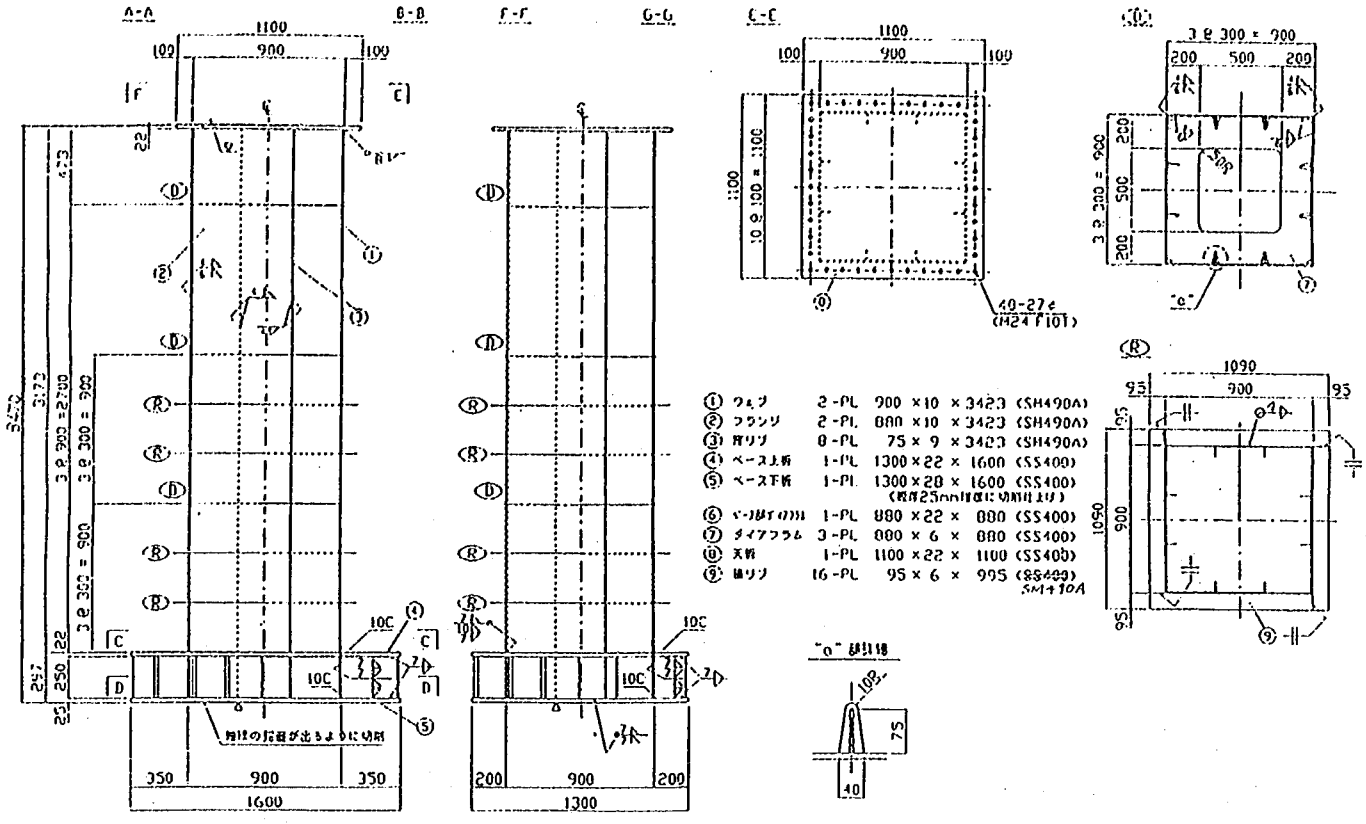


図-4.1　M２供試体の形状・寸法

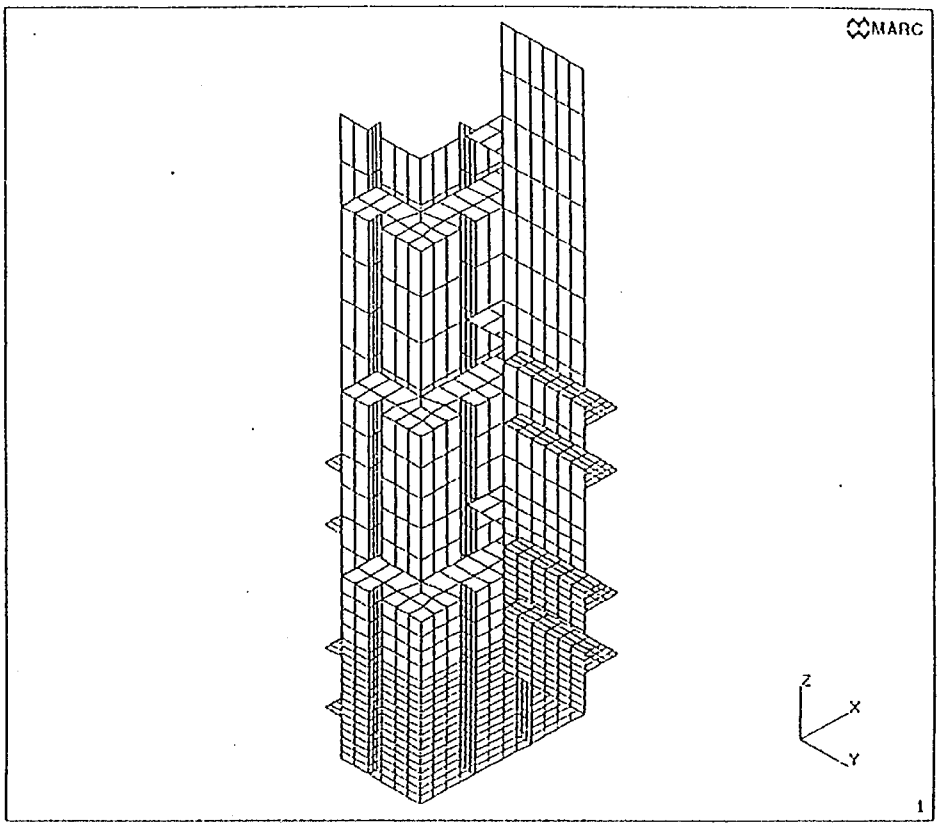


図-4.2　M２供試体のメッシュ分割図

表-4.2　解析諸元（M２供試体）

項　目	諸　元		
鋼　材	ｳｪﾌﾞ/ﾌﾗﾝｼﾞ	縦ﾘﾌﾞ/横ﾘﾌﾞ	ﾀﾞｲｱﾌﾗﾑ
	SM４９０	SM４９０	SS４００
降伏応力；σy(kgf/cm²)	3,620	3,740	2,400
ヤング係数；E(kgf/cm²)	2.1x10⁶		
断面積；A(cm²)	2(90x1+88x1+4x7.5x0.9) = 410.0		
降伏軸力；Py(tf)	σy・A＝3200x410＝1,312.0（σy：公称値）		
鉛直荷重（軸力）；P(tf)	0.15xPy＝196.8		
降伏水平力；Hy(tf)	(σy-P/A) x(I/y/h)=114.1		
降伏変位；δy(cm)	Hyxh³/3EI＝1.12		
載荷パターン	±δy, ±2δy, ±3δy, …・±７δy （各１サイクル）		
供試体高さ(cm)	315.1（ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ上面～天板下端）		
載荷点位置(cm)	342.3(ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ上面からの高さ)		
境界条件	反力支持点：ベース上板位置で完全（６自由度）拘束 荷重載荷点：載荷ビームの剛度 1.0xE6cm⁴		

(5) 解析結果

解析結果の中から、図-4.3(a)に水平荷重－水平変位（H－δ）の関係をヒステリシスループ図（履歴曲線）として示す。また、図-4.3(b)には実験により求められたヒステリシスループ図を比較して示す。

図-4.4には代表的な荷重ステップにおける変形図を、また図-4.5にはそのときの応力分布図を示す。

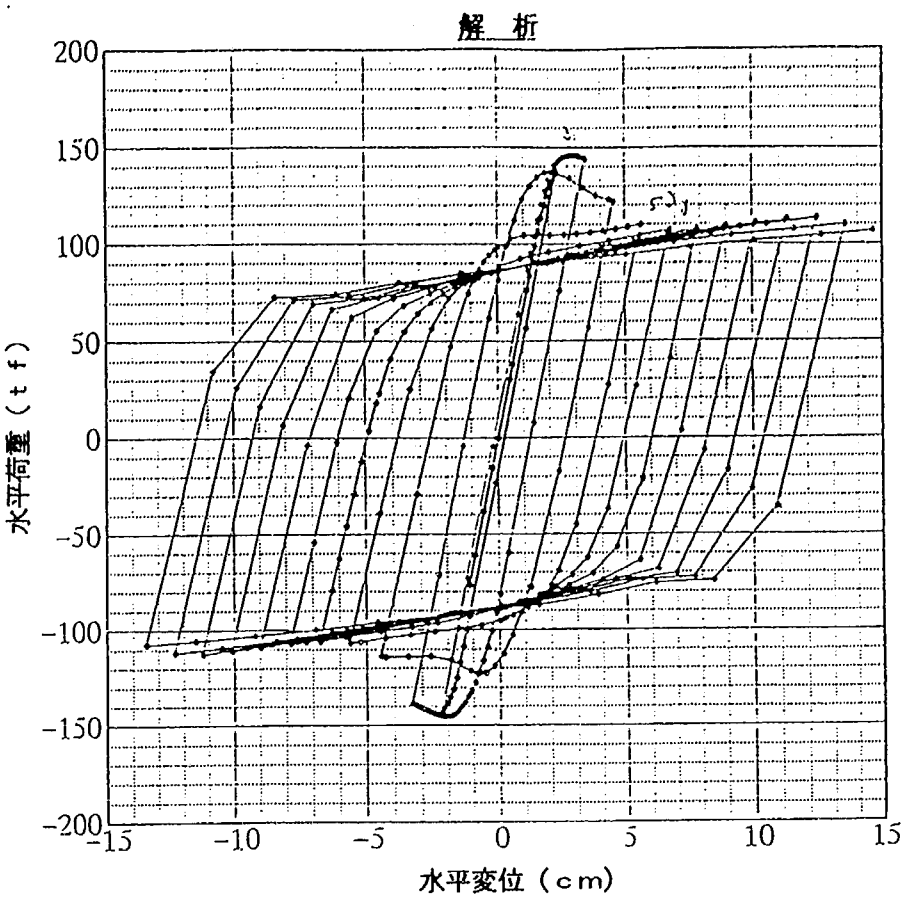


図-4.3(a)　Ｍ２供試体のヒステリシスループ（解析結果）

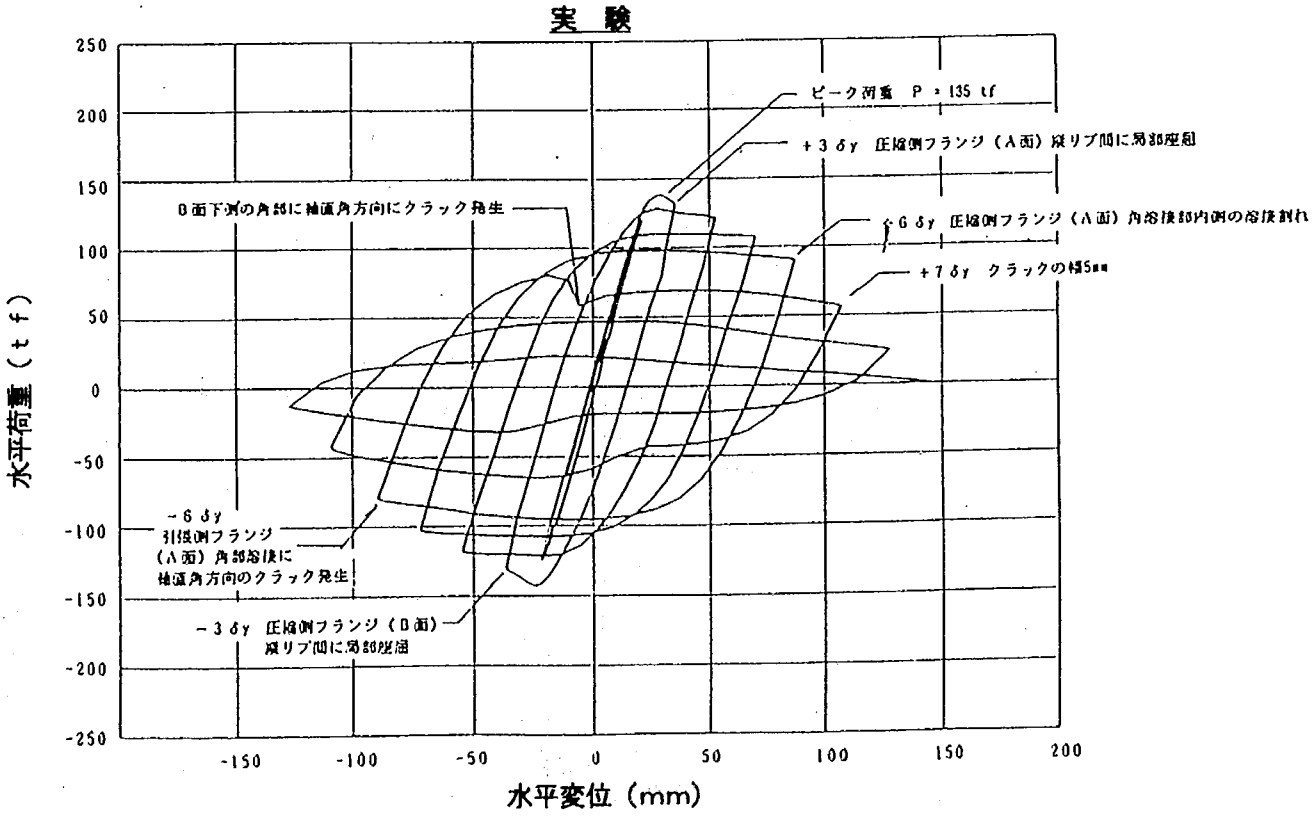
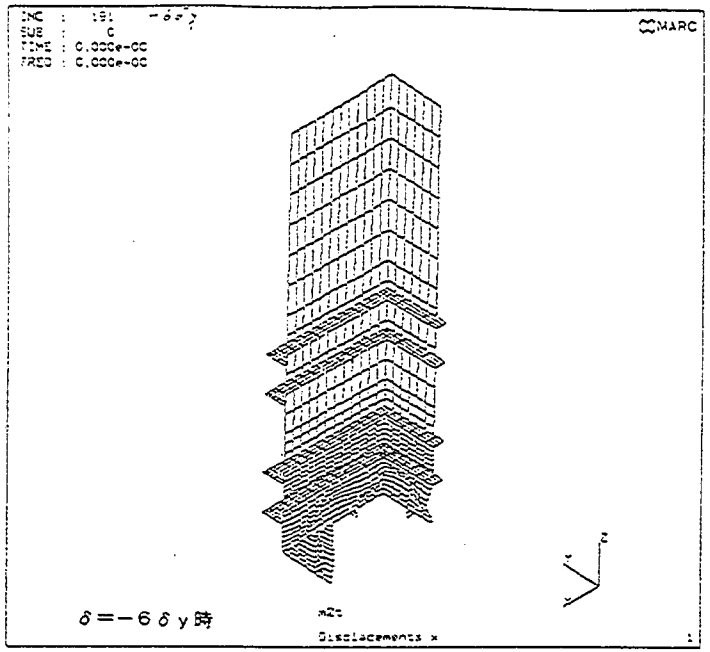
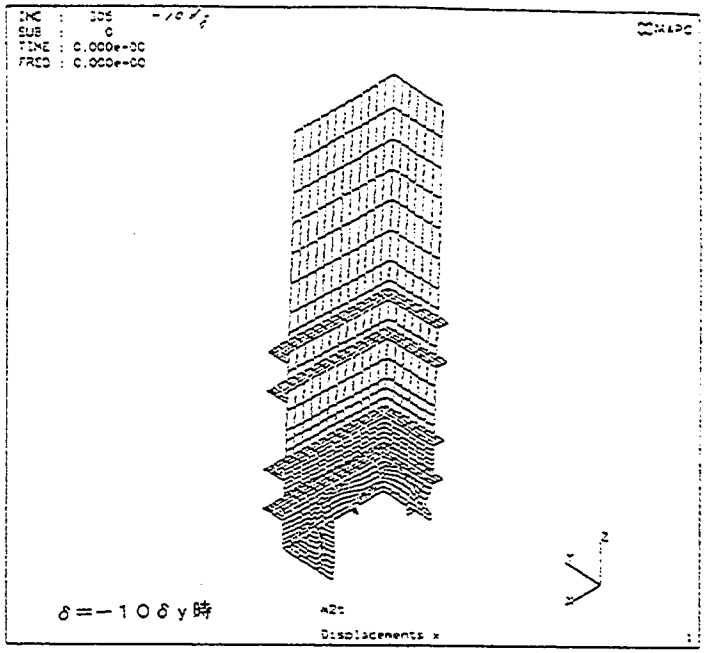
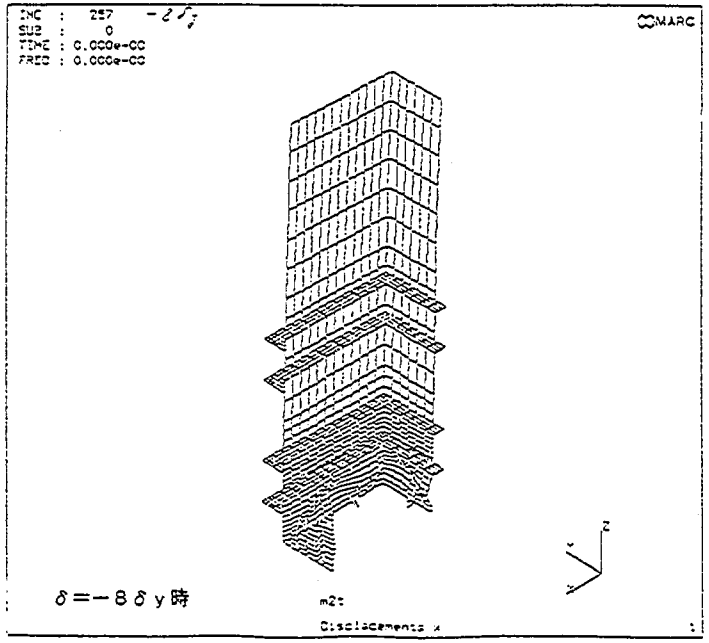


図-4.3(b)　Ｍ２供試体のヒステリシスループ（実験結果）







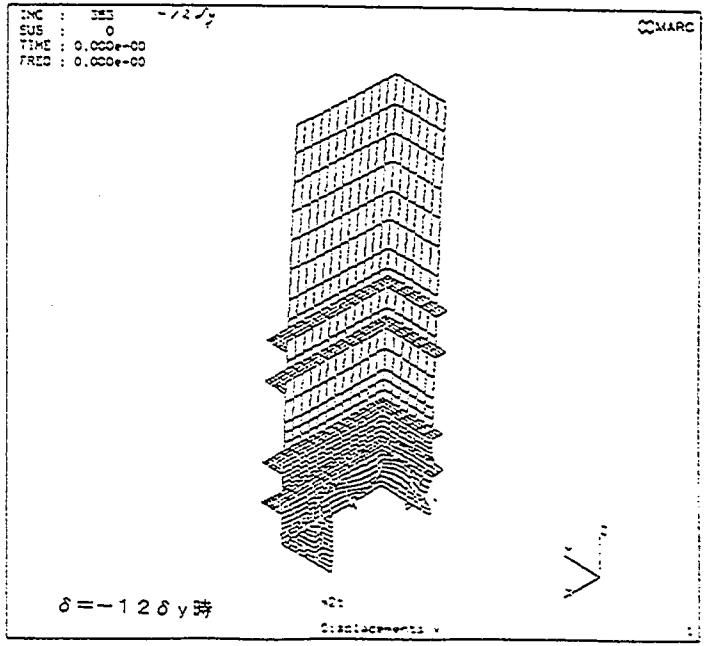


図-4.4　Ｍ２供試体の解析結果（変形図）

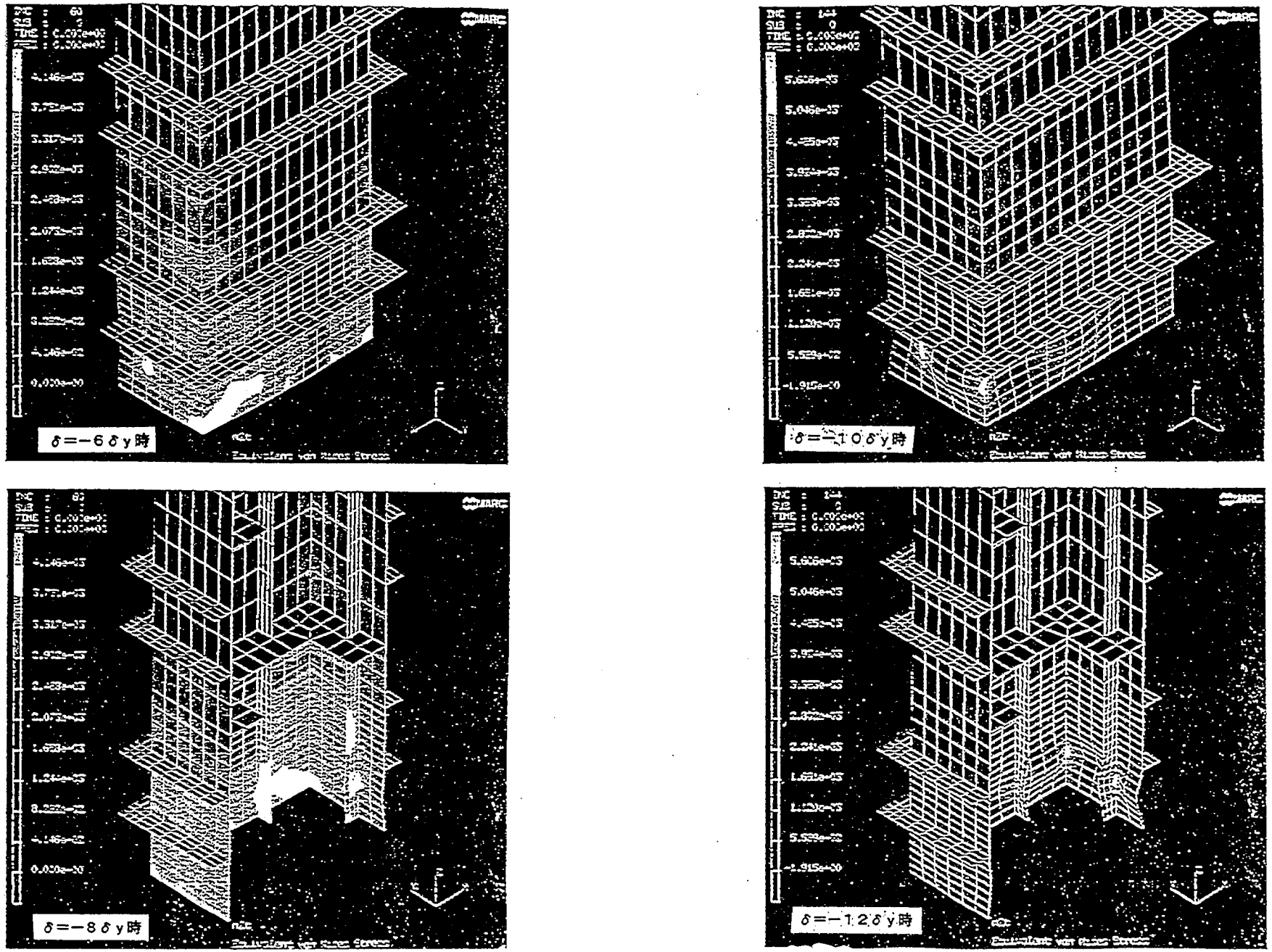


図-4.5　M２供試体の解析結果（応力分布図）

4.1.2　M３供試体：矩形断面橋脚

(1)　解析対象モデル

図-4.6に解析対象としたＭ３供試体の形状・寸法諸元を示す。

(2)　解析仕様

主な解析仕様を表-4.3にとりまとめて示す。

表-4.3　解析条件（Ｍ３供試体用）

項　目		解　析　仕　様
解析プログラム名		ＡＤＩＮＡ（Ｖｅｒ．5.0）
共通仕様	解析モデル	水平荷重載荷方向を含む鉛直面を対称面とした全体の１／２モデルの３次元シェル構造
	使用要素	４節点シェル要素
	積分点	面内２ｘ２、板厚方向５
	剛性評価	ロッキングシェアの除去（低減積分による）
	応力評価点	積分点
	応力度－ひずみ曲線	Bi-Linear 型（引張試験データに準じる）
	降伏条件	Von Mises
	ひずみ硬化係数	０．０１・Ｅ（ヤング係数の１／１００）
	硬化則	移動硬化則
	幾何学的非線形性	ひずみ、応力表示：Green のひずみ、Kirchhoff の応力 定式化：Total Lagrangian
	初期条件	初期不整、初期応力（残留応力）：なし
その他の解析条件		収束条件：相対変位収束判定値　　0.001

(3)　解析モデル

図-4.7にメッシュ分割図を示す。

(4)　解析諸元

主な解析諸元を表-4.4に示す。

表-4.4　解析諸元（Ｍ３供試体）

項　目	諸　元		
鋼　材	ｳｴﾌﾞ/ﾌﾗﾝｼﾞ	縦ﾘﾌﾞ/横ﾘﾌﾞ	ﾀﾞｲｱﾌﾗﾑ
	ＳＭ４９０	ＳＭ４９０	ＳＳ４００
降伏応力；σ y(kgf/cm^2)	3,790	3,880	2,400
ヤング係数；E(kgf/cm^2)	2.1x10^6		
断面積；A(cm^2)	445.04		
降伏軸力；P y(tf)	σ y・A＝3200x445.04＝1,424.28（σ y：公称値）		
鉛直荷重（軸力）；P(tf)	0.15x P y＝213.62		
降伏水平力；H y(tf)	(σ y-P/A) x(I/y/h)=72.23		
降伏変位；δ y(cm)	Hyxh^3/3EI＝1.12		
載荷パターン	±δ y, ±2 δ y, ±3 δ y, …・±７δ y （各１サイクル）		
供試体高さ(cm)	315.1（ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ上面～天板下端）		
載荷点位置(cm)	342.3(ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ上面からの高さ)		
境界条件	反力支持点：ベース上板位置で完全（６自由度）拘束 荷重載荷点：載荷ビームの剛度 1.0xE6cm^4		

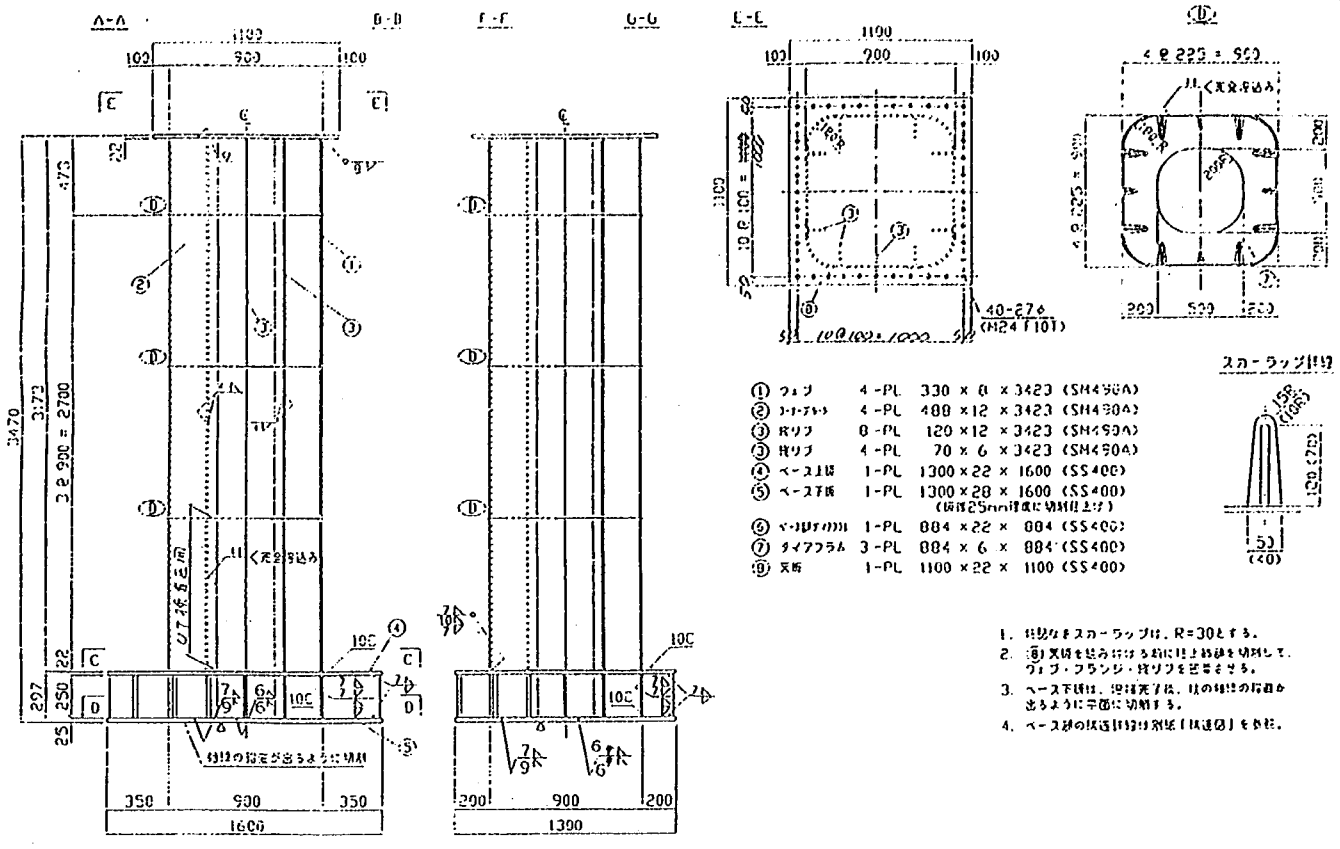


図-4.6　M３供試体の形状・寸法

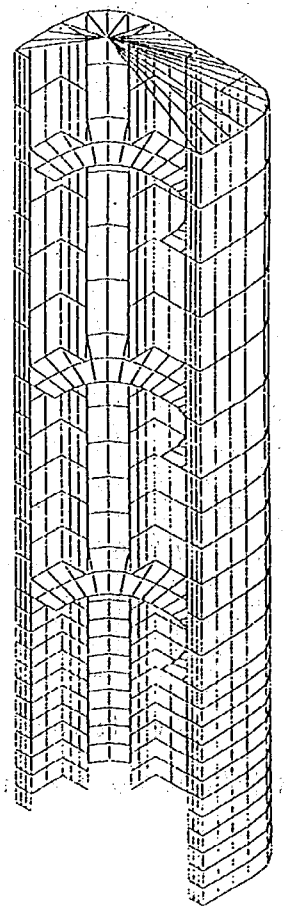


図-4.7　M３供試体のメッシュ分割図

(5) 解析結果

解析結果の中から、図-4.8.(a)に水平荷重－水平変位（H－δ）の関係をヒステリシスループ図（履歴曲線）として示す。また、図-4.8(b)には実験により求められたヒステリシスループ図を比較して示す。

図-4.9には代表的な荷重ステップにおける変形図を示す。

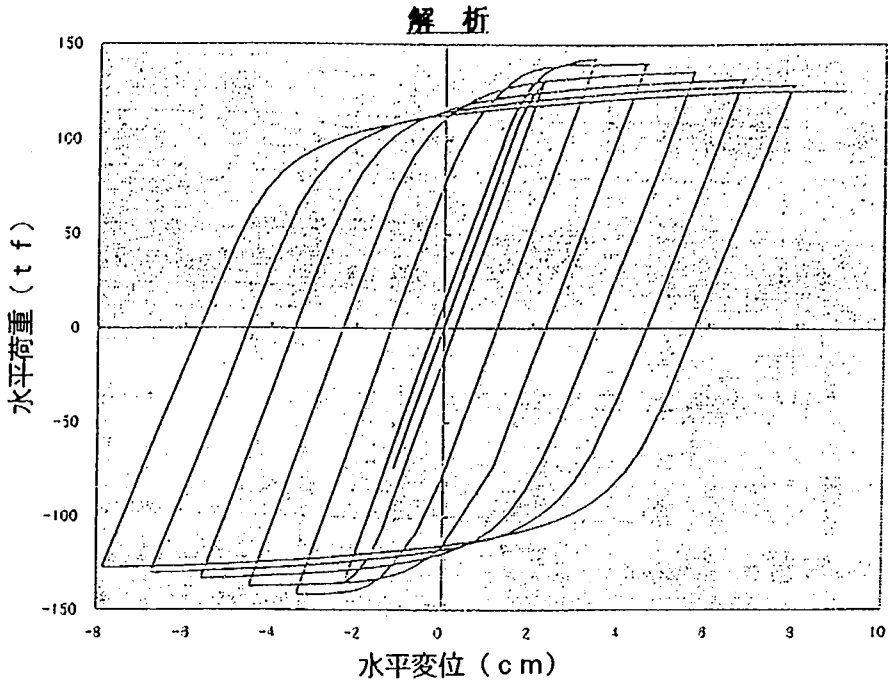


図-4.8(a) Ｍ３供試体のヒステリシスループ（解析結果）

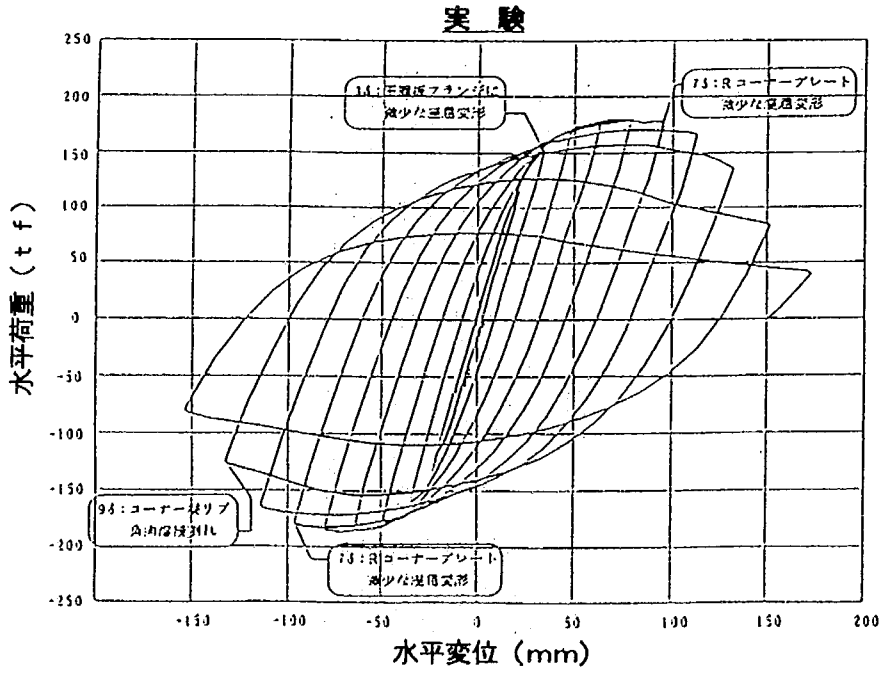
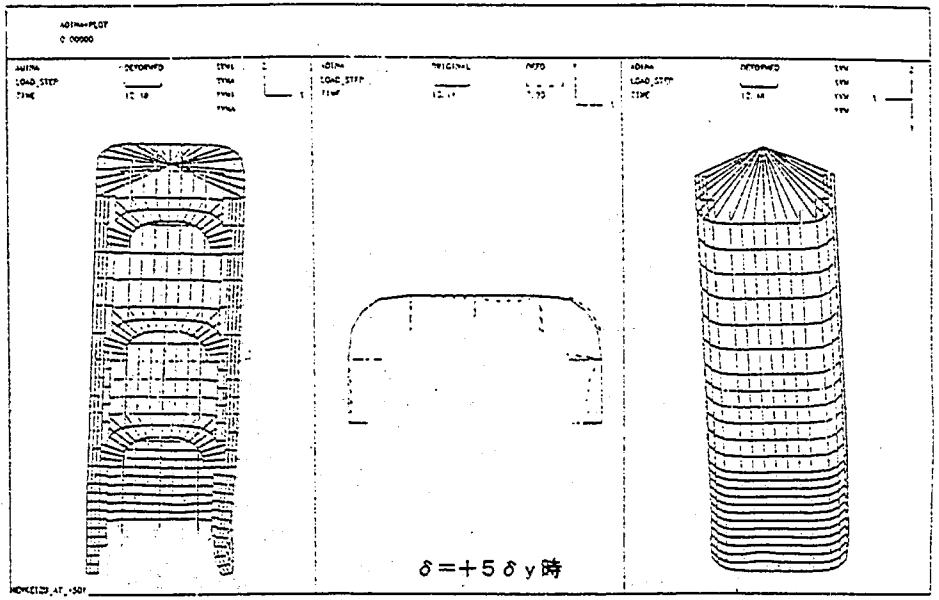
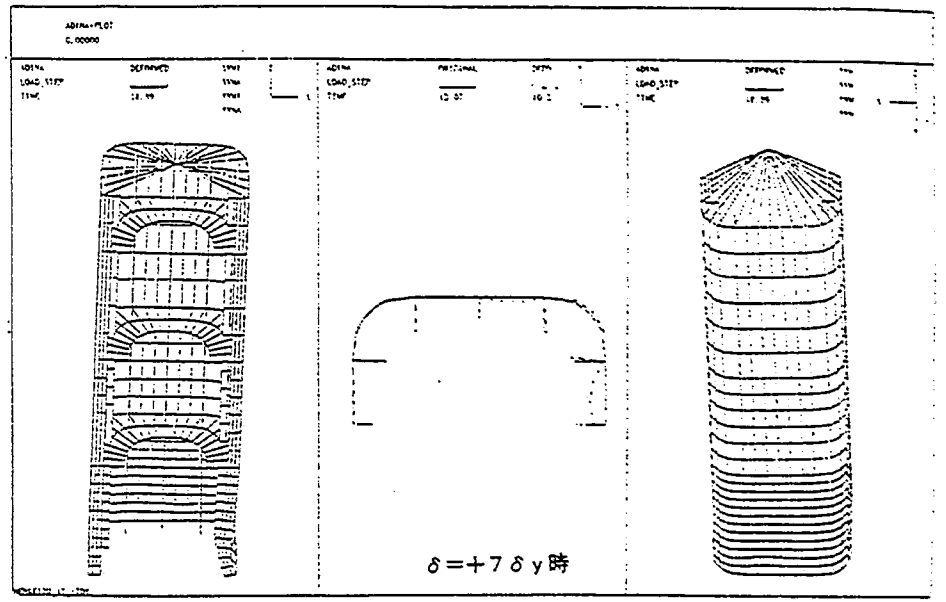
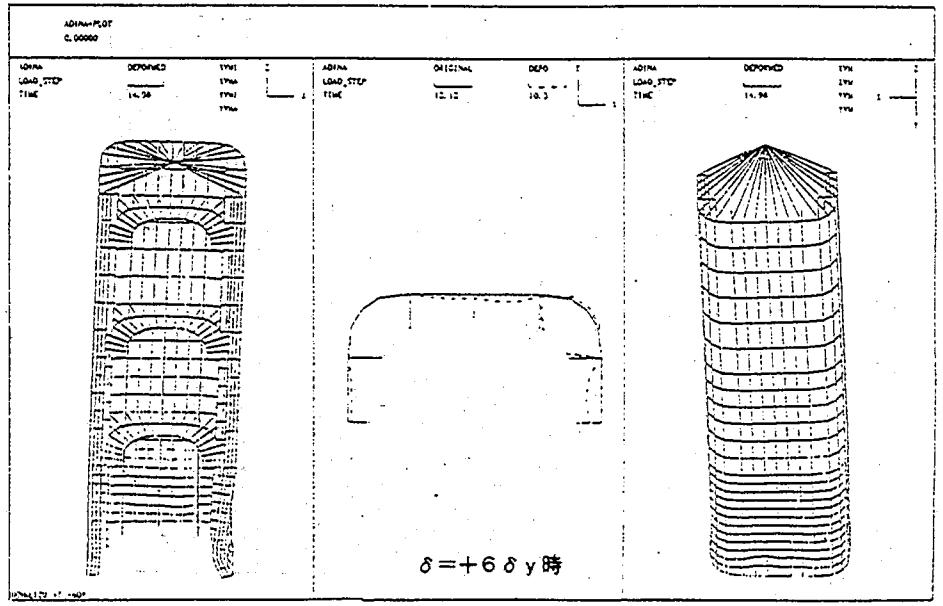


図-4.8(b) Ｍ３供試体のヒステリシスループ（実験結果）







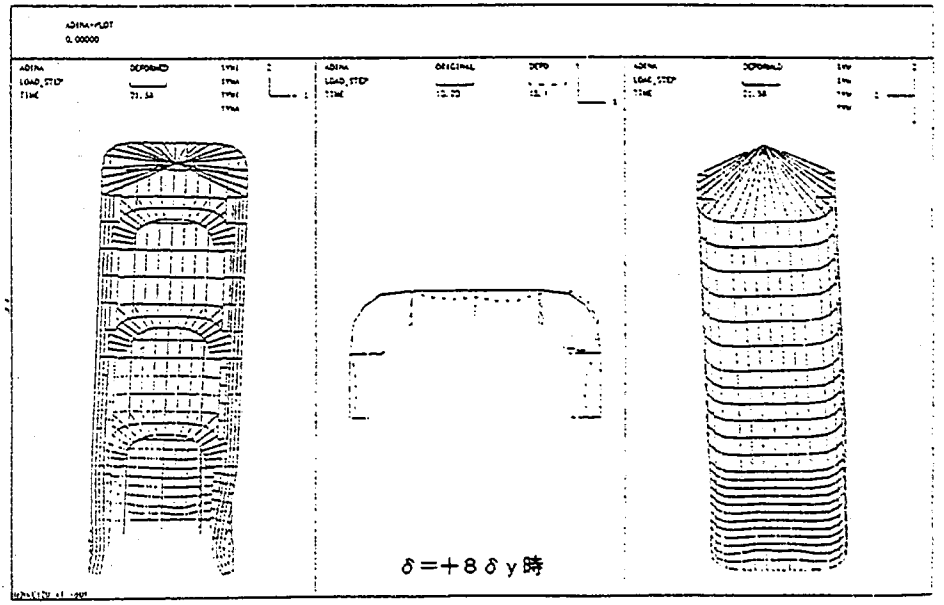


図-4.9　Ｍ３供試体の解析結果（変形図）

4.2　橋建協供試体（Bシリーズ）解析例

4.2.1　B３供試体：円形断面橋脚

(1)　解析対象モデル

図-4.10に解析対象としたB３供試体の形状・寸法諸元を示す。

(2)　解析仕様

主な解析仕様を表-4.5にとりまとめて示す。

表-4.5　解析仕様（B３供試体用）

項　目		解　析　仕　様
解析プログラム名		MARC　K6－1
共通仕様	解析モデル	水平荷重載荷方向を含む鉛直面を対称面とした全体の１／２モデルの３次元シェル構造
	使用要素	四辺形厚肉線形シェル要素
	積分点	面内２ｘ２、板厚方向５
	剛性評価	完全積分
	応力評価点：	積分点
	応力度－ひずみ曲線：	Bi-Linear 型（引張試験データに準じる）
	降伏条件：	Von Mises
	ひずみ硬化係数：	０．０１・E（ヤング係数の１／１００）
	硬化則：	移動硬化則
	幾何学的非線形性	①　ひずみ、応力表示：対数ひずみ、Caucy 応力 ②　定式化：Updated Lagrandian
	初期条件	初期不整、初期応力（残留応力）：なし
その他の解析条件		収束条件：最大残差力／最大反力≦0.005

(3)　解析モデル

図-4.11にメッシュ分割図を示す。

(4)　解析諸元

主な解析諸元を表-4.6に示す。

表-4.6　解析諸元（B３供試体）

項　目	諸　元		
鋼　材	外パイプ	内パイプ	ﾀﾞｲｱﾌﾗﾑ/ﾘﾌﾞ
	ＳＳ４００	ＳＳ４００	ＳＳ４００
降伏応力；σy(kgf/cm²)	3,364	2,980	2,400
ヤング係数；E(kgf/cm²)	2.1x10⁶		
断面積；A(cm²)	497.63		
降伏軸力；Py(tf)	σy・A＝2,400x497.63＝1,194.3（σy：公称値）		
鉛直荷重（軸力）；P(tf)	0.15xPy＝179.15		
降伏水平力；Hy(tf)	(σy-P/A) x(I/y/h)=		
降伏変位；δy(cm)	Hyxh³/3EI＝0.843		
載荷パターン	±δy, ±2δy, ±3δy, …・±７δy （各１サイクル）		
供試体高さ(cm)	315.1（ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ上面～天板下端）		
載荷点位置(cm)	342.3（ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ上面からの高さ）		
境界条件	反力支持点：ベース上板位置で完全（６自由度）拘束 荷重載荷点：載荷ビームの剛度1.0xE6cm⁴		

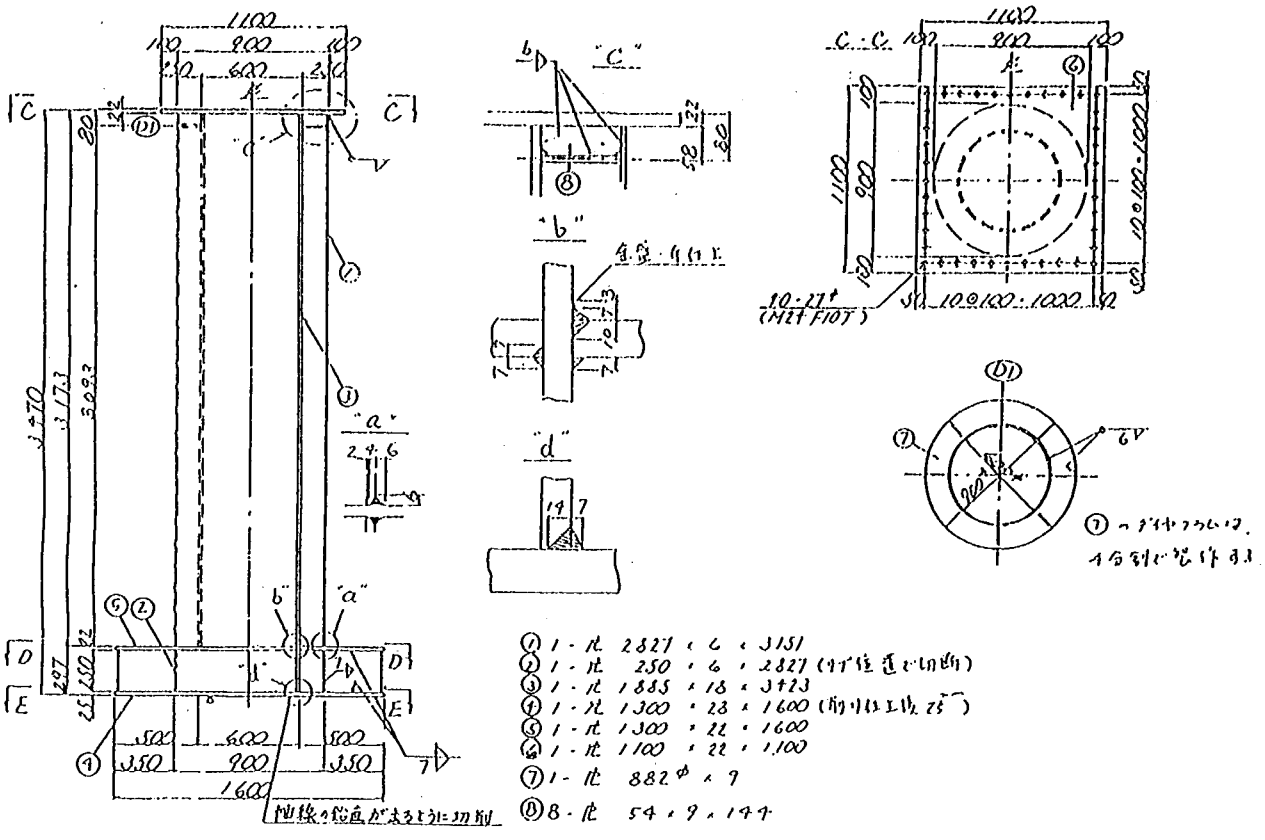


図-4.10　B３供試体の形状・寸法

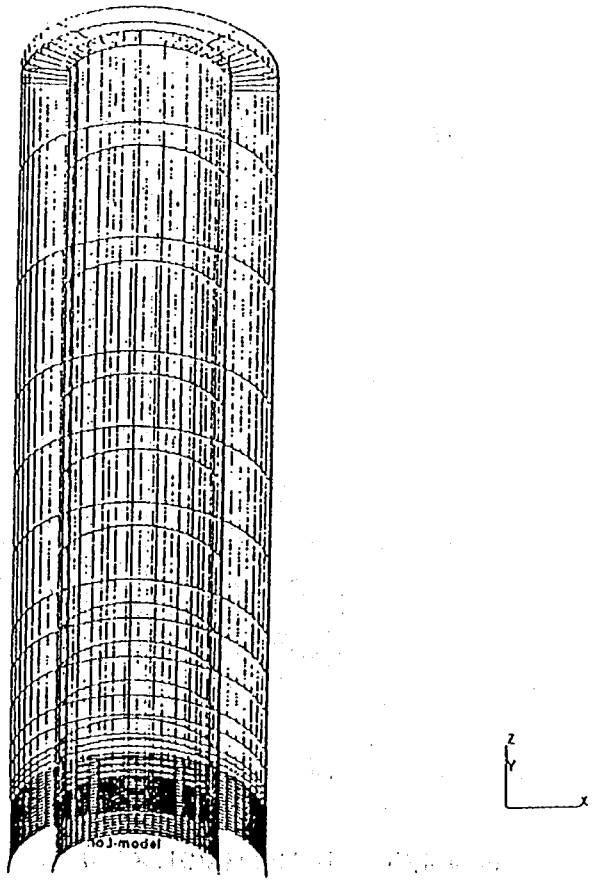


図-4.11　B３供試体のメッシュ分割図

(5) 解析結果

解析結果の中から、図-4.12(a)に水平荷重－水平変位（H－δ）の関係をヒステリシスループ図（履歴曲線）として示す。また、図-4.12(b)には実験により求められたヒステリシスループ図を比較して示す。

図-4.13には代表的な荷重ステップにおける変形図を示す。

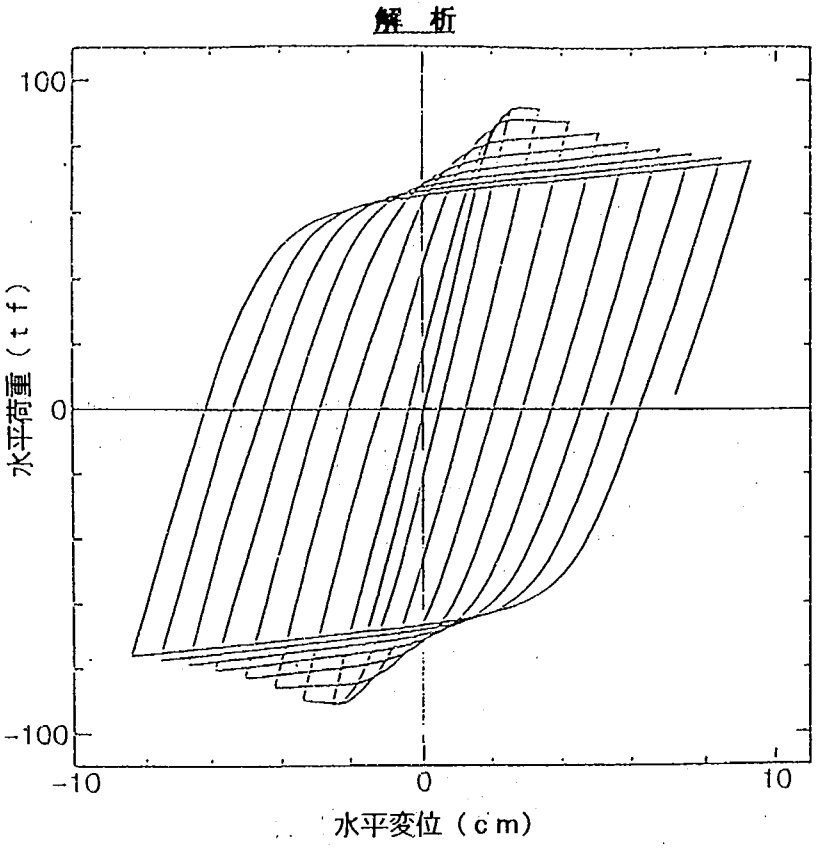


図-4.12(a)　B３供試体のヒステリシスループ（解析結果）

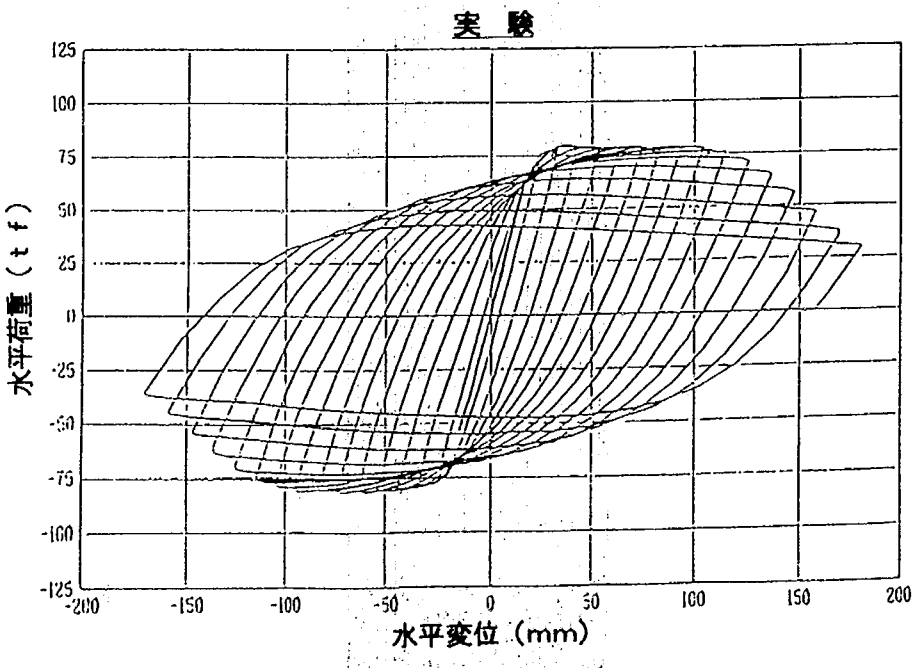
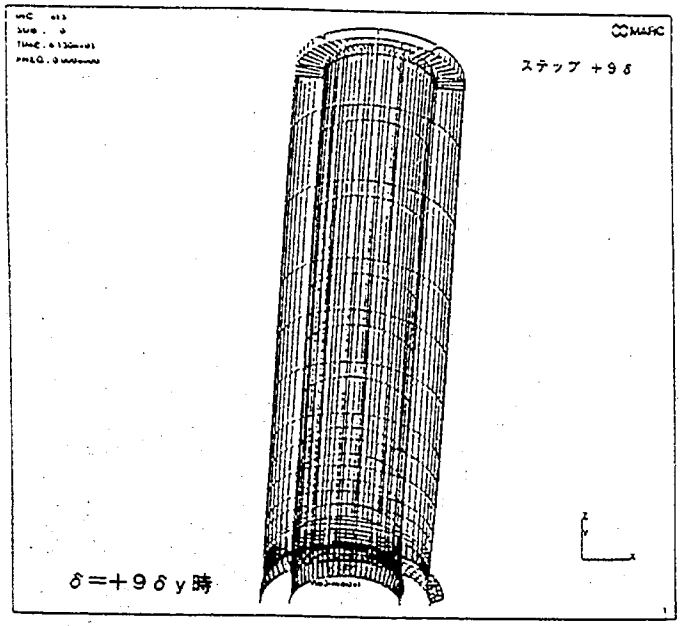
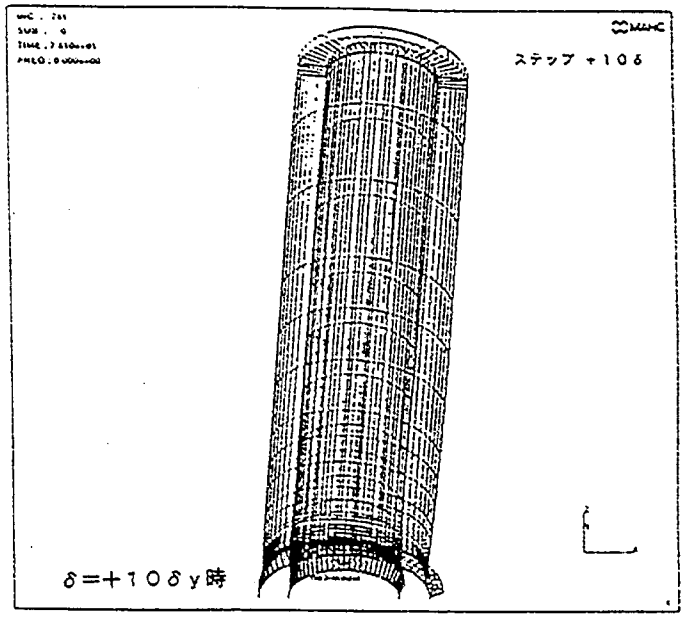
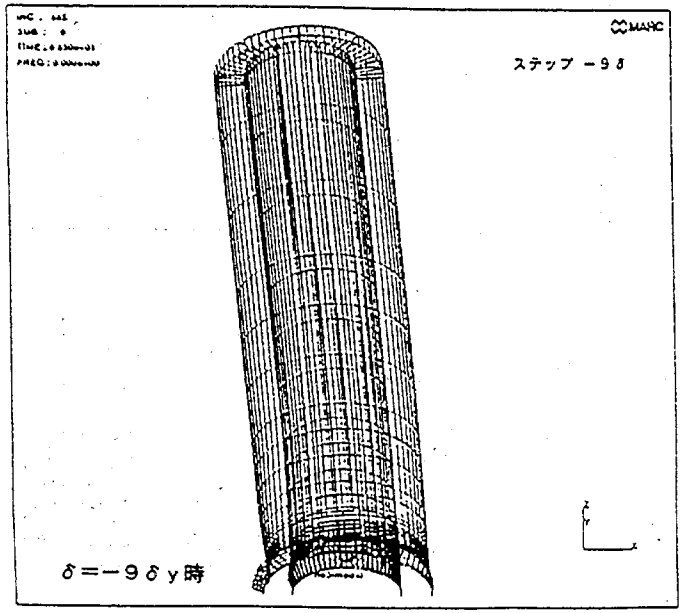


図-4.12(b)　B３供試体のヒステリシスループ（実験結果）







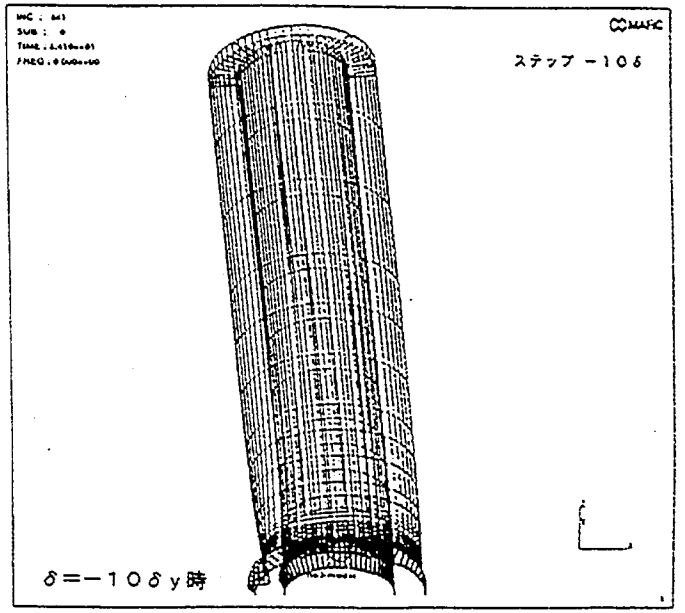


図-4.13　Ｂ３供試体の解析結果（変形図）

4.2.2　B４供試体：円形断面橋脚

(1)　解析対象モデル

図-4.14に解析対象としたM２供試体の形状・寸法諸元を示す。

(2)　解析仕様

主な解析仕様を表-4.7にとりまとめて示す。

表-4.7　解析仕様（B４供試体用）

項　目		解　析　仕　様
解析プログラム名		ＡＢＡＱＵＳ　Ver.5.4-1
共通仕様	解析モデル	水平荷重載荷方向を含む鉛直面を対称面とした全体の１／２モデルの３次元シェル構造
	使用要素	４節点シェル要素（１次要素）　　S4R5
	積分点.	面内１、板厚方向５
	剛性評価	シアロッキングの除去、次数低減積分
	応力評価点	積分点
	応力度－ひずみ曲線	Bi-Linear 型（引張試験データに準じる）
	降伏条件	Von Mises
	ひずみ硬化係数	０．０１・Ｅ（ヤング係数の１／１００）
	硬化則	移動硬化則
	幾何学的非線形性	①　ひずみ、応力表示：Green ひずみ、Caucy 応力 ②　定式化：Updated Lagrandian
	初期条件	初期不整、初期応力（残留応力）：なし
その他の解析条件		収束条件：残差力のノルム　0.5%以下（ABAQUS のﾃﾞﾌｫﾙﾄ値）

(3)　解析モデル

図-4.15にメッシュ分割図を示す。

(4)　解析諸元

主な解析諸元を表-4.8に示す。

表-4.8　解析諸元（B４供試体）

項　目	諸　元		
鋼　材	パイプ	縦ﾘﾌﾞﾌﾗﾝｼﾞ（t=9mm）	縦ﾘﾌﾞｳｪﾌﾞ（t=6mm）
	ＳＳ４００	ＳＳ４００	ＳＳ４００
降伏応力；σ y(kgf/cm^2)	2,910	2,900	3,370
ヤング係数；E(kgf/cm^2)	2.1x10^6		
断面積；A(cm^2)	32.38		
降伏軸力；P y(tf)	σ y・A＝2,400x32.48＝779.43　　（σ y：公称値）		
鉛直荷重（軸力）；P(tf)	0.15x P y＝116.91		
降伏水平力；H y(tf)	(σ y-P/A) x(I/y/h)=		
降伏変位；δ y(cm)	Hyxh^3/3EI＝0.843		
載荷パターン	±δ y, ±2 δ y, ±3 δ y, … ・ ±７δ y （各１サイクル）		
供試体高さ(cm)	315.1（ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ上面～天板下端）		
載荷点位置(cm)	342.3(ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ上面からの高さ)		
境界条件	反力支持点：ベース上板位置で完全（６自由度）拘束		

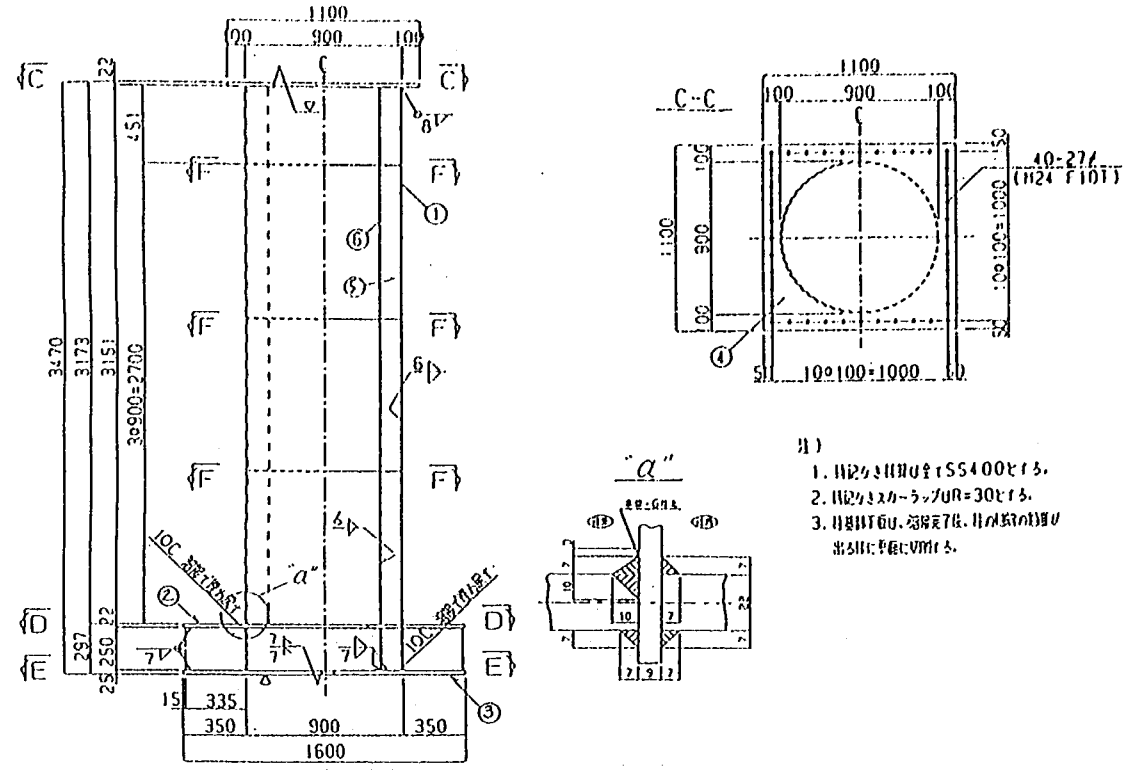


図-4.14　B４供試体の形状・寸法

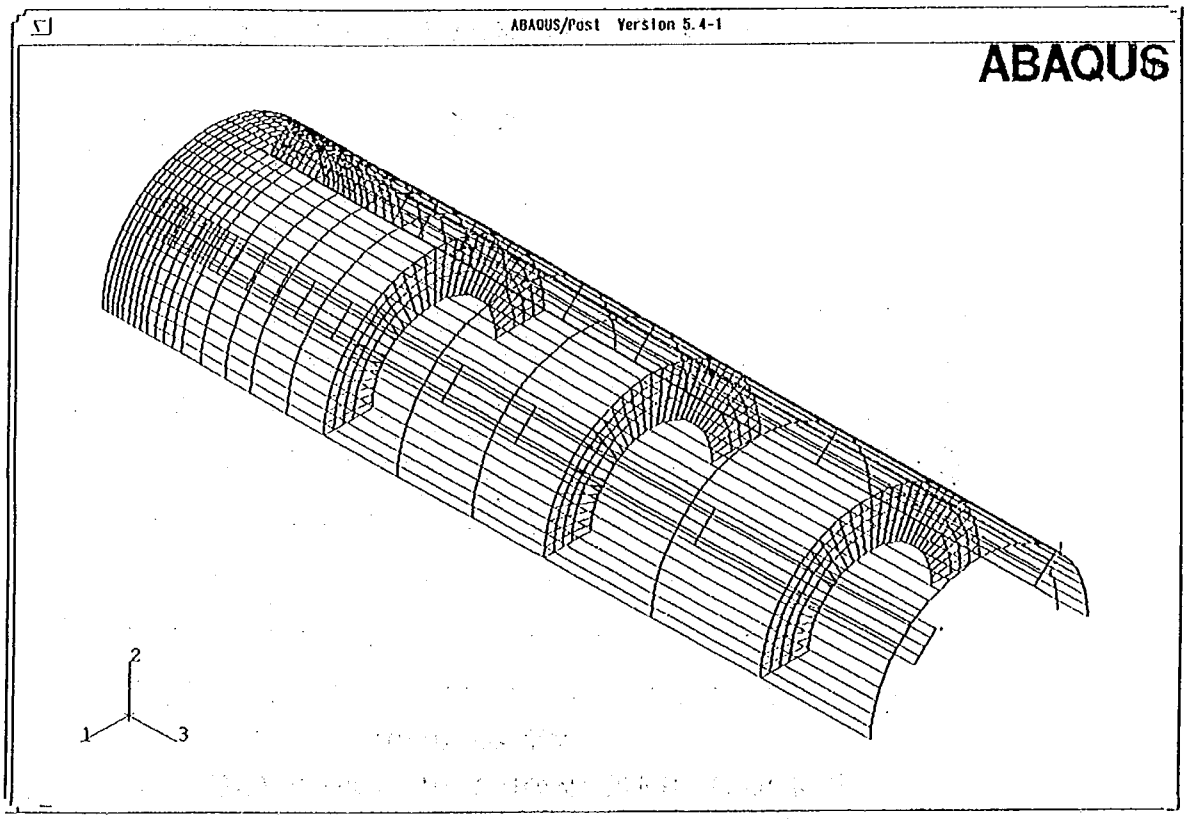


図-4.15　B４供試体のメッシュ分割図

(5) 解析結果

解析結果の中から、図-4.16(a)に水平荷重－水平変位（H－δ）の関係をヒステリシスループ図（履歴曲線）として示す。また、図-4.16(b)には実験により求められたヒステリシスループ図を比較して示す。

図-4.17には代表的な荷重ステップにおける変形図を示す。

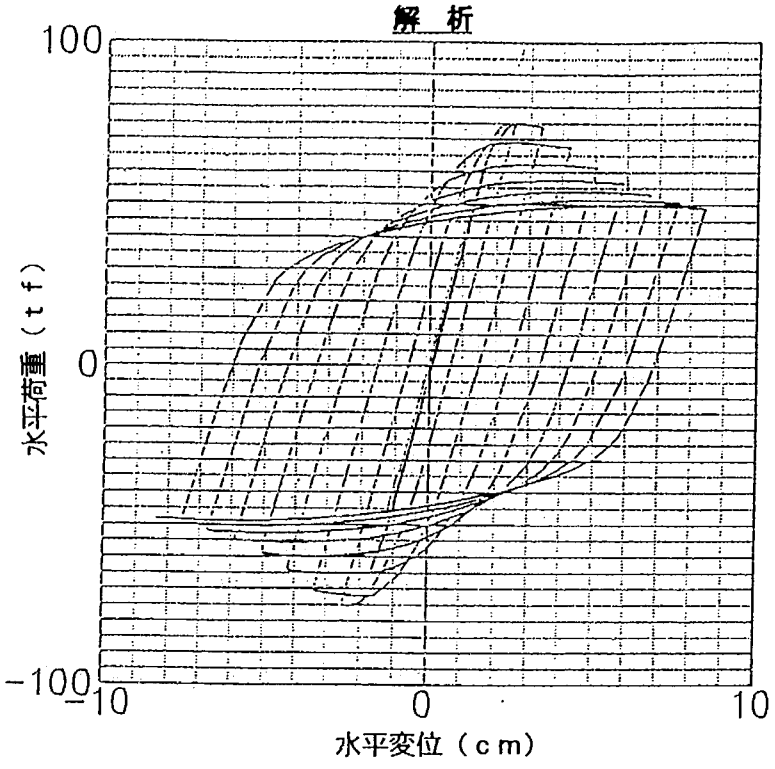


図-4.16(a)　Ｂ４供試体のヒステリシスループ（解析結果）

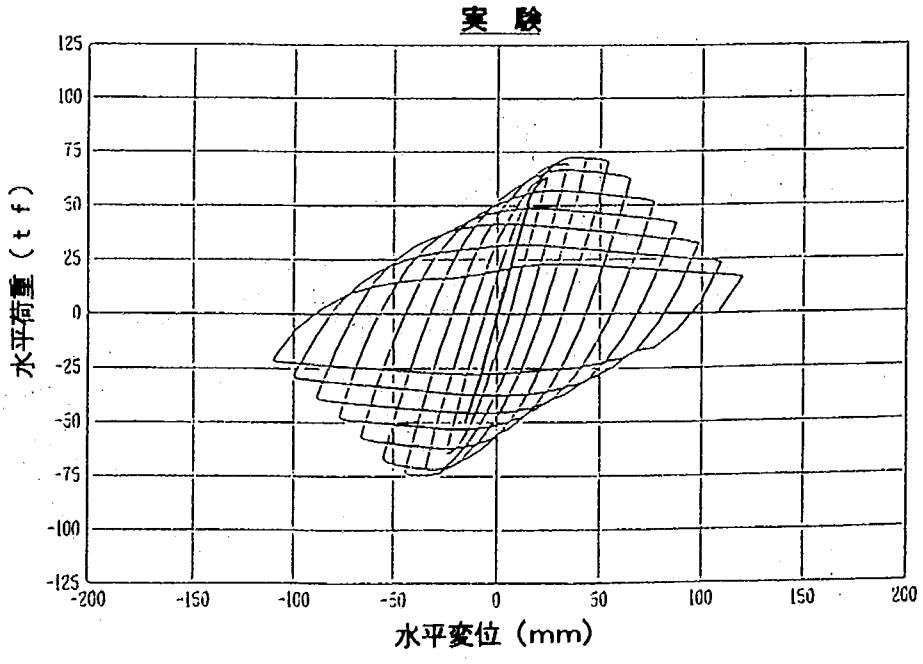
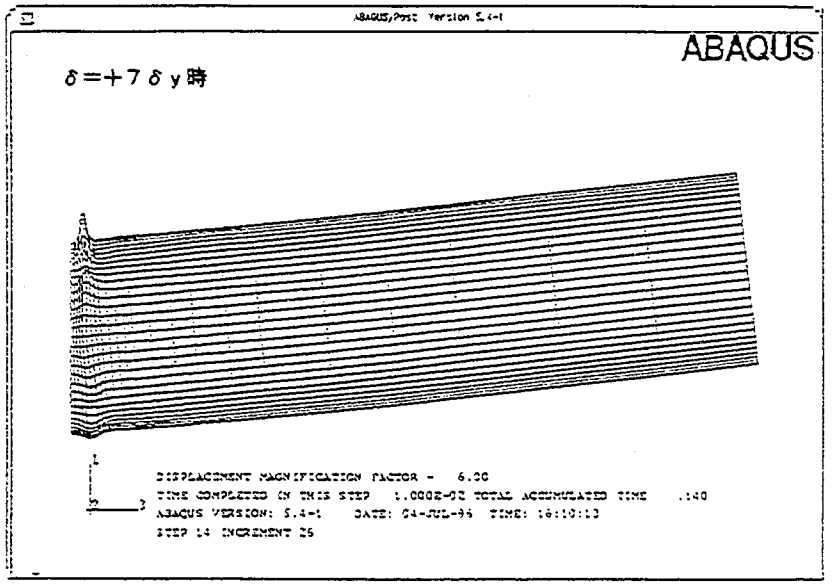
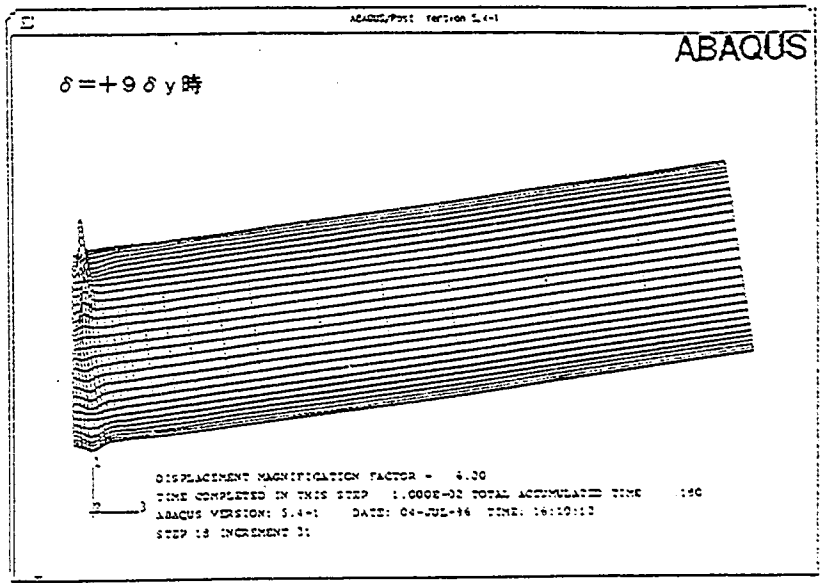


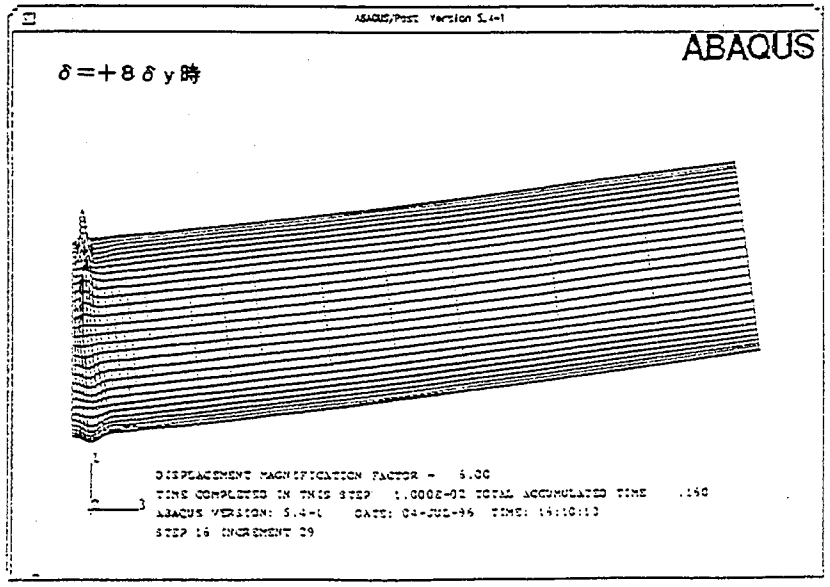
図-4.16(b)　Ｂ４供試体のヒステリシスループ（実験結果）



δ x= ７δ ｙの時の変形図



δ x= ９δ ｙの時の変形図



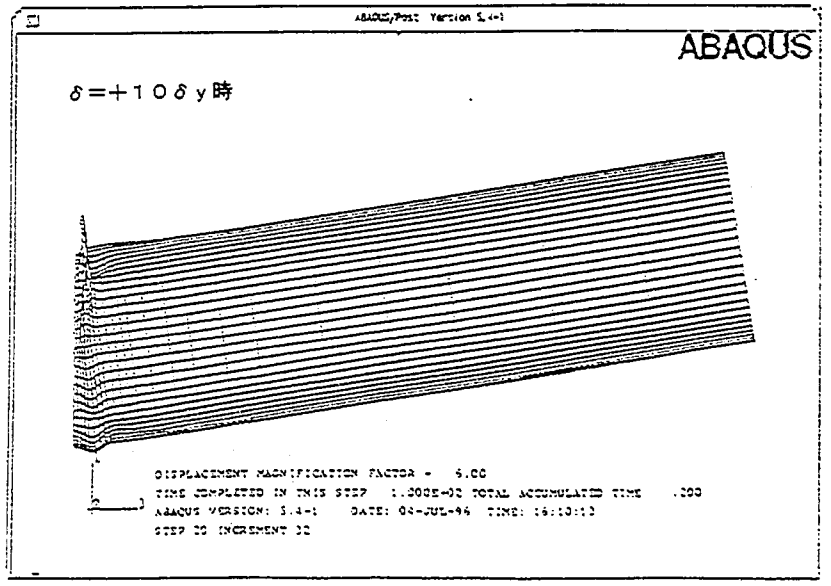


図-4.17　Ｂ４供試体の解析結果（変形図）

4.3 まとめ

以上の解析の結果、得られた知見を以下に列挙する。

(1) 首都公供試体（M－シリーズ）及び橋建協供試体（B－シリーズ）の内、中詰めコンクリートを有していない供試体では、いずれの解析結果も実験値とを比較した場合、3. でのベンチマークテスト解析と同様、最大荷重まで程度は実験における供試体挙動を果を比較的良くシミュレートしていると考えらる。

(2) いずれの解析結果も最大荷重はほぼ実験値と一致するが、最大荷重到達後の挙動に関しては荷重の低下率が実験結果に比べ小さい傾向となった。

(3) このような最大荷重到達以降の挙動に関しては、劣化時の構成則や亀裂の発生による断面欠損なども考慮した解析が必要と考えられる。

なお、本文中には記載していないが、中詰めコンクリートを有する供試体（M5，M6）に対してもFEM解析を実施したが、鋼材の材料非線形、幾何学的非線形に加えてコンクリートのひび割れによる非線形性が重畳することから収束性が極めて悪く、計算時間が膨大になることが判った。そのため、繰り返し載荷に代えて荷重条件を一方向の単調増加として実施した。

Ⅲ. 鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験

1. はじめに

1.1 研究の背景

市街地における高速道路（都市高速）では、形状を自由に選択できること、比較的小さな占有面積でよいこと、また軽量であることなどの理由から鋼製橋脚が使用されている。鋼製橋脚はこれまで地震被害の経験が無かったが、平成７年１月に発生した兵庫県南部地震では設計水平震度を大きく上回る地震力を受けて鋼製橋脚にも局部座屈などの被害が発生した。これに対し、建設省土木研究所を中心として首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社、(社)鋼材倶楽部、および(社)日本橋梁建設協会では、耐震設計法の見直し、耐震性向上のためのじん性を確保できる新たな構造形式や構造細目の開発、補強工法の検討を目的とした「道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究」を実施している。本ハイブリッド地震応答実験は、この研究の一環として鋼製橋脚の地震時挙動を確認するために実施したものである。

1.2 実験の目的

本共同研究では、耐震設計法の基本となる変形性能に着目し、繰返し載荷実験により耐荷力、じん性、およびエネルギー吸収量の確認を進めてきた。しかし、繰返し載荷実験からは、実際の地震動を受けた場合の鋼製橋脚の動的挙動に関する情報は得られない。「ハイブリッド地震応答実験（擬似動的実験）」は、供試体とコンピュータをオンラインとし、供試体から測定した復元力を用いてコンピュータ内で地震応答解析を実施する実験手法であり、上記共同研究では、繰返し載荷実験の次ステップとして、鋼製橋脚が地震波を受けた場合の動的挙動および損傷状態を確認することを目的として、ハイブリッド地震応答実験を実施した。なお、本実験は名古屋大学およびＣ社（日本鋼管㈱基盤技術研究所）に於いて実施した。

ここで得られた実験結果は、非線形動的応答解析における復元力モデルおよび応答解析結果の妥当性の検証にも用いる。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

2.1.1 矩形断面

矩形断面供試体は図-2.1.1(1)に示すようにフランジが長辺となる長方形断面であり、供試体に用いる鋼材はSS400を基本とした。供試体は表-2.1.1に示すように全23体であり、復元力モデルを作成するために必要である単調載荷実験および繰返し載荷実験の供試体も用意した。供試体は大きく分けて「基本１シリーズ」と「基本２シリーズ」の２種類を設定し、断面寸法は、鋼材の降伏強度σ_yをσ_y＝3,000kgf/cm^{2}と仮定して構造パラメータを計算して決定した。なお、「基本１シリーズ」における繰返し載荷実験においては、正負両方向に変位を漸増する「両振り載荷実験」と、正側のみに変位を漸増する「片振り載荷実験」

を実施した。

基本1シリーズ（No.1～No.13）は、平成6年発行の道路橋示方書[1]に従って設計した供試体であり、基本的な構造は幅厚比パラメータ$R_R=0.5$、補剛材剛比$\gamma_1/\gamma_{1\cdot req}=1$である。この中には、細長比パラメータ$\bar{\lambda}$の影響を確認するための供試体も含まれる（No.8とNo.9）。なお、R_R、γ_1、$\gamma_{1\cdot req}$、および$\bar{\lambda}$のパラメータは式(2.1.1)～(2.1.4)で表される。

$$R_R=(b/t)\times\sqrt{\{(\sigma_y/E)\times(12(1-\nu^2)/(\pi^2 k))\}} \quad \cdots\cdots(2.1.1)$$

$$\gamma_1=I_1/(bt^3/11) \quad \cdots\cdots(2.1.2)$$

$$\gamma_{1\cdot req}=1/n[\{2n^2(t_0/t)^2(1+n\delta_1)-1\}^2-1] \quad (t\geqq t_0)$$
$$=1/n[\{2n^2(1+n\delta_1)-1\}^2-1] \quad (t<t_0) \quad \cdots\cdots(2.1.3)$$

$$\bar{\lambda}=(2h/r)\times(1/\pi)\times\sqrt{(\sigma_y/E)} \quad \cdots\cdots(2.1.4)$$

ここに、b：断面幅、t：補剛板の板厚、σ_y：鋼材の降伏応力、E：鋼材の弾性係数、ν：鋼材のポアソン比、k：板の座屈係数（4辺単純支持の場合$k=4n^2$）、I_1：縦方向補剛材1個の断面二次モーメント、n：縦方向補剛材によって区切られるパネル数、t_0：補剛板の必要板厚、δ_1：縦方向補剛材1個の断面積比，$\delta_1=A_1/bt$、h：供試体長、およびr：鋼断面の断面二次半径である。

基本2シリーズ（No.14～No.19）は、耐震性向上を目指して構造パラメータなどを考慮した供試体であり、基本的な構造は$R_R=0.35$、$\gamma_1/\gamma^*=3$、および$R_R\sqrt{\bar{\lambda}}=0.2$である。これらのパラメータを設定した理由は、宇佐美らの研究[2]において、$\gamma_1/\gamma^*=3$とすることにより塑性率の上昇が期待できると報告されていること、鈴木らの研究[3]において$R_R\sqrt{\bar{\lambda}}<0.2$の領域では変形能が格段に向上すると報告されていることによる。なお、γ^*は、式(2.1.3)において補剛板の板厚tによる低減を考えない（$t_0=t$）必要剛比であり、供試体基部の横リブ間隔を小さくすることにより$\gamma_1/\gamma^*=3$とした。

No.20は、補剛材剛比の影響を確認する供試体であり、No.17供試体（$\gamma_1/\gamma^*=3$）の基部の横リブを一つ取り除き、補剛材剛比$\gamma_1/\gamma^*=1$と小さくした供試体である。

No.21は、$R_R=0.3$と小さくした供試体であり、No.22は補剛材の鋼種を補剛板よりも高強度（SM570）とすることにより補剛材の降伏を遅らせてじん性の向上を期待した供試体である。また、No.23は、充填コンクリートにより補剛板の内側への座屈を拘束し、じん性の向上を図った供試体である。

供試体断面は幅b＝430mm、高さd＝290mmの矩形断面で、供試体高さh＝1850mmを基本としており、実橋脚の1/8のモデルを想定した。各供試体の詳細を図-2.1.1(2)～図-2.1.1(8)に示す。

2.1.2 円形断面

円形断面供試体は図-2.1.2(1)に示すように無補剛の円形断面であり、供試体に用いた鋼管はSS400の鋼板から曲げ加工により製作したものである。供試体は表-2.1.2に示すように全21体であり、矩形断面供試体と同様に、復元力モデルを作成するために必要である繰返し載荷実験および単調載荷実験の供試体も含まれる。供試体は大きく分けて「基本1シリーズ」と「基本2シリーズ」の2種類を想定しており、断面寸法はσ_y=3,200kgf/cm^{2}と仮定して構造パラメータを計算して決定した。また、「基本1シリーズ」における繰返し載荷実験では、正負両方向に変位を漸増する「両振り載荷実験」と、正側のみに変位を漸増する「片振り載荷実験」を実施した。

基本1シリーズ（No.1～No.13）は、道路橋示方書[1]に従って設計した供試体であり、径厚比パラメータR_t=0.11である。この内、No.8とNo.9は$\bar{\lambda}$の影響を確認するための供試体である。なお、径厚比パラメータR_tは式(2.1.5)で表される。

$$R_t=(R/t)\times(\sigma_y/E)\times\sqrt{(3(1-\nu^2))} \qquad \cdots\cdots(2.1.5)$$

ここに、R：鋼管半径、t：鋼管板厚、σ_y：鋼管の降伏応力、E：鋼材の弾性係数、およびν：鋼材のポアソン比である。

基本2シリーズ（No.14～No.21）は、耐震性向上を目指して径厚比パラメータR_t=0.08とした供試体である。径厚比パラメータR_t=0.08と設定した理由は、$R_t\leqq0.10$の領域では変形能が向上することが確認されていること[4]、また、阪神高速神戸線の被害調査において$R_t<0.085$の領域で大きな被害が発生しなかったことによる。No.21は充填コンクリートにより鋼管の内側への座屈を拘束して、じん性の向上を図った供試体である。

供試体断面は直径400mmの円形断面で、供試体高さ1800mmを基本としており、実橋脚の1/8のモデルを想定した。各供試体の形状・寸法を図-2.1.2(2)～図-2.1.2(6)に示す。

2.2 軸力比

軸力比は、大きな変形が発生した場合にP－△効果により付加的な曲げモーメントが発生するなど、結果に与える影響が大きなファクターである。ここでは、橋脚が支える上部構造の重量Nと全断面降伏軸力N_yの比である軸力比N／N_yは、以下の2つの不等式を満たす最大値を採用した。式(2.2.1)が柱の安定照査式、式(2.2.2)が断面強度式である。

$$(\nu N/N_u)+\nu M/\{Q_B M_y(1-\nu N/N_E)\}\leqq1.0 \qquad \cdots\cdots(2.2.1)$$

$$(\nu N/Q\cdot N_y)+(\nu M/Q_B\cdot M_y)\leqq1.0 \qquad \cdots\cdots(2.2.2)$$

ここに、N_u：中心軸圧縮強度、M：部材端モーメント，$M=k_h\cdot N\cdot h$、ν：安全率，ν=1.14、N_E：オ

イラー座屈強度、Q：断面の圧縮強度[5]、Q_B：断面の曲げ強度[5]である。式(2.2.1)と式(2.2.2)を整理すると式(2.2.3)と式(2.2.4)が得られ、軸力比N/N_yは設計水平震度k_hと柱高さhの関数として与えられ、k_hおよびhを決定するとN/N_yが求まる。k_hまたはhが大きい場合、モーメントが支配的となるため、N/N_yはそれに応じて小さくなる。この軸力比N/N_yから上部構造重量Nが決定され、それを重力加速度で除した値が上部構造の質量Mとなり、橋脚の剛性が与えられれば固有周期Tが求まる。

$$(\nu^2 Q_B M_y N_y^2/N_E)(N/N_y)^2-(\nu Q_B M_y+\nu Q_B M_y N_u/N_E+0.85\nu k_h h N_u)N_y(N/N_y)$$
$$+Q_B M_y N_u \geqq 0 \qquad \cdots\cdots(2.2.3)$$

$$N/N_y \leqq 1/\{(\nu/Q)+(\nu \cdot k_h \cdot h \cdot N_y)/(Q_B \cdot M_y)\} \qquad \cdots\cdots(2.2.4)$$

「基本1シリーズ」では式(2.2.1)と式(2.2.2)の右辺＝0.85として、許容応力度に対して15％の余裕を持たせた軸力比N/N_yを作用させた。また、「基本2シリーズ」では2つの式の右辺＝1.0として、許容応力度の限界の軸力比N/N_yを作用させた。なお、式(2.2.1)と式(2.2.2)において$Q=Q_B=1$として求められる軸力比N/N_yは、現行の道路橋示方書[1]で設計された橋脚に作用する軸力比に等しくなる。

2.3 入力地震波および入力加速度レベル

地震波は「道路橋の免震設計法マニュアル(案)[6]」に記載されている時刻歴応答解析用地震波のⅠ種地盤（以下、免震Ⅰ種）とⅢ種地盤（以下、免震Ⅲ種）、兵庫県南部地震で観測された地震波[7]のうちⅠ種地盤の神戸海洋気象台（以下、ＪＭＡ）、Ⅲ種地盤の東神戸大橋（以下、ＨＫＢ）とした。入力地震波として、これらの地盤種別の波を採用した理由は、Ⅲ種地盤では鋼製橋脚が建設されることが多いこと、また、建設数は少ないがⅠ種地盤では兵庫県南部地震で大きな加速度が観察されたことによる。これらの地震波の波形を図-2.3.1に、加速度応答スペクトルを図-2.3.2に示す。また、地震波の入力加速度レベルは、「原波形」と「拡大波形」の2種類とした。「原波形」とは文献[6),7)]に記載されているそのままの加速度レベル（1倍）であり、「拡大波形」とは強度が降伏耐力程度まで劣化することを想定して入力加速度レベルを増幅した波形である。なお、その拡大レベルは事前に動的応答解析を実施して求めた。

2.4 実験手順および相似則

ハイブリッド地震応答実験では、供試体とコンピュータをオンラインとして、情報のやり取りを行いながら実験を進めていく。この実験手順は図-2.4.1に示すように、①上部構造の質量、構造減衰などの構造特性と入力地震波を設定する。②式(2.4.1)の運動方程式による地震応答解析により次ステップ（iステップ）における応答変位x_iを算出する。

$$M\ddot{x}_i+C\dot{x}_i+R=-M\ddot{x}_0 \qquad \cdots\cdots(2.4.1)$$

ここに、M：上部構造の質量、C：粘性減衰係数、R：復元力(＝Kx$_i$)、$\ddot{x}_0$：入力地震波の加速度、x$_i$：変位である。③算出された応答変位x$_i$をアクチュエータ制御装置に伝達し、供試体に水平変位を与える。④与えられた水平変位に対する反力をロードセルにより計測する。この水平変位と反力は、復元力特性（式(2.4.1)におけるR）として、次ステップの地震応答解析に反映される。⑤地震波入力終了まで、②～④の手順を繰り返す。

なお、この一連の実験手順において、供試体は模型であり、コンピュータ内で運動方程式を解く際は、実際の地震波の周波数特性を反映させるため実構造物を想定するのが一般的である。そのため、供試体に与える変位、復元力特性を得る供試体反力は、模型と実構造物の相似則に基づき換算してデータのやり取りを行うことになる。本実験では、表-2.4.1に示す相似則を用いた。ここでは長さL、質量M、および時間Tの３つの基本的な次元があり、独立した３要素を選択すると、他の要素は自動的に決定される。本実験では以下のように考えた相似則を適用した。矩形断面供試体では、長さLをS倍、質量Mは体積に比例するためS^{3}倍、実橋も供試体も応力ML^{-1}T^{-2}は等しいため１倍と仮定して、他の要素の比を算出した。円形断面供試体では、長さLをS倍、応力を１倍、実橋も供試体も重力加速度は等しいため加速度LT^{-2}を１倍と仮定して、他の要素の比を算出した。いずれの相似則を用いて実験を実施しても実橋レベルで整理した場合は等価となる[8)]。なお、後節3.3で述べる実験結果は実橋レベルに換算して整理した。

また、実橋と模型の比である相似比Sは、対象とする橋脚の固有周期Tに影響を与え、入力地震波の周波数特性との間に関係がある。ここでは以下の①～③の理由により相似比S＝８とし、固有周期T＝0.7～１秒とした。すなわち、①名古屋大学でこれまでに実施されてきたハイブリッド地震応答実験結果（S＝８）と比較が容易である、②上記固有周期の範囲では、免震Ⅰ種、免震Ⅲ種、およびＨＫＢの加速度応答スペクトルは最大となる領域である、③上記固有周期の範囲は、ＪＭＡの加速度応答スペクトルが最大となる領域より固有周期が長いが、変形が大きくなると剛性が低下して長周期化することも考えられるためこのように設定した。

2.5 実験装置

実験装置は図-2.5.1に示すように載荷柱、載荷梁を組み立て、載荷梁に鉛直力載荷用の油圧ジャッキを固定し、反力壁に水平力載荷用のアクチュエータを固定した。鉛直力載荷用の油圧ジャッキと載荷梁の間にはスライド装置を配置し、鉛直力載荷用の油圧ポンプには一定荷重保持装置を配置した。これらの装置により、上部構造の重量に相当する一定鉛直力は供試体が水平に変位した状態においても載荷が可能となる。

2.6 計測項目

実験において計測した項目について、以下に示す。

2.6.1 荷重

鉛直荷重は鉛直力載荷用油圧ジャッキと供試体との間に配置したロードセルにより、水平荷重は水平力載荷用アクチュエータと供試体の間には配置したロードセルにより測定した。

2.6.2 変位

供試体の水平変位は供試体上部に配置した変位計により計測した。供試体基部は治具に固定されているのが一般的であり、この固定治具が載荷時に弾性変形するため、計測変位δ_mは理論変位δ_T(曲げ変形と剪断変形を考慮)よりも大きいのが一般的である（図-2.6.2）。載荷時に治具の弾性変形を取り除くため、実験に先立ち弾性範囲内で変位を与え、その反力から算出した実測剛性k_mを算出し、このk_mと理論剛性k_Tとの差は荷重Pに比例すると仮定して、式(2.6.1)のように弾性変形を取り除いた変位δを算出して制御した。

$$\delta = \delta_m - P \cdot \{(1/k_m)-(1/k_T)\} \qquad \cdots\cdots\cdots (2.6.1)$$

2.6.3 ひずみ

供試体基部に局部座屈が発生するひずみレベルなど、各変位段階で発生するひずみのデータを得るためにひずみゲージを配置した。矩形断面では図-2.6.3(1)に示すように、供試体の固定端近傍、ダイアフラムまでの高さの半分の位置、およびダイアフラムの高さの3断面において、補剛板上の縦方向補剛材の位置でひずみを計測した。円形断面では、図-2.6.3(2)に示すように基部から25mmと100mmの高さにおいて軸方向ひずみを1断面当たり8箇所（45度ピッチ）で計測した。このゲージの位置はシェルの弾性座屈の半波長（$=1.72\sqrt{(R \cdot t)}$）を考慮して決定した。

2.7 初期不整計測

2.7.1 矩形断面

供試体の直線性の精度を評価するために、道路橋示方書[1)]の規定に採択されている補剛板の平面度δ_1/b（δ_1:補剛板のたわみ、b:補剛板の板幅）と、補剛材の曲がりδ_2/l_d（δ_2:補剛材のたわみ、l_d:ダイアフラム間隔）を測定した。補剛板のたわみδ_1は 図-参考-2.7.1（参考資料を参照）に示す補剛板の板幅を結んだ直線からの最大たわみ量であり、補剛材のたわみδ_2 、δ_3 は図-参考-2.7.1に示すダイアフラム間隔を結んだ直線からの最大たわみ量である。道路橋示方書の規定では、δ_1/bの許容誤差はb/150であり、δ_2/l_d、δ_3/l_dの許容誤差は$l_d/1000$である。表-参考-2.7.1にδ_1/b、δ_2/l_d、およびδ_3/l_dをそれぞれの許容誤差で無次元化した値を示すように、全て基準を満足していた。

2.7.2 円形断面

供試体の直線性の精度を評価するためにECCS[9]の規定に採択されているOOS(Out-of-Straightness)、真円性の精度を評価するためにAPI[10]の規定に採択されているOOR(Out-of-Roundness)を測定した。

OOSとは式(2.7.1)で示される長さl_rの直線定規を供試体表面に当てた場合の隙間のことであり、ベースプレートから3.0mm、5.5mm、8.0mm、10.5mm、および13.0mmの5断面において、1断面当たり8方向（45°ピッチ）のOOSを隙間ゲージを用いて測定した。

$$l_r = 4\sqrt{(R_c \cdot t)} \qquad \cdots\cdots (2.7.1)$$

ここに、R_c：肉厚中心までの半径、t：板厚である。ECCSの規定によればOOSの制限値は$0.02\,l_r$であり、各供試体の各方向でのOOSの最大値は表-参考-2.7.2(1)（参考資料を参照）に示すように制限値を満足していた。

また、OORは外径の最大値と最小値の差と外径の平均値との比であり、式(2.7.2)で表される。

$$OOR = (D_{max} - D_{min}) / D_{ave} \qquad \cdots\cdots (2.7.2)$$

ここに、D_{max}：外径の最大値、D_{min}：外径の最小値、D_{ave}：外径の平均値である。APIの規定によればOORの制限値は0.01である。結果は表-参考-2.7.2(2)に示すように制限値を満足していた。

3. 実験結果

3.1 材料試験結果

3.1.1 鋼材

矩形断面供試体の製作に用いた鋼板からＪＩＳ５号試験片をロール方向およびロール直角方向に３本ずつ製作し、また円形断面供試体の製作に用いた鋼管から管軸方向にＪＩＳ５号試験片を３本ずつ製作した。これらの試験片により引張試験を実施し、上降伏点、下降伏点、引張強度、および破断伸びを求めた。矩形断面供試体の引張試験結果を表-3.1.1(1)に、円形断面供試体の引張試験結果を表-3.1.1(2)に示す。

3.1.2 コンクリート

供試体に充填したコンクリートの特性を得るために、標準水中養生の円柱供試体に対して、材令７日と材令28日に、材料強度試験（圧縮強度試験、引張強度試験）を実施した。また、ハイブリッド地震応答実験当日のコンクリート強度を得るために、現場封緘養生の円柱供試体に対して、材料強度試験（圧縮強度試験、引張強度試験）を実施した。矩形断面供試体に充填したコンクリートの配合はスランプフロー値

500mmを目指したものであり、粗骨材最大寸法15mm、細骨材率s/a=54.6%、水セメント比W/C=60.0%である。また、円形断面供試体に充填したコンクリートの配合は材令28日の圧縮強度が180kgf/cm²を目指したものであり、粗骨材最大寸法20mm、細骨材率s/a=49.6%、水セメント比W/C=67.8%、スランプ18cmとした。矩形断面供試体と円形断面供試体で異なるコンクリートを用いた理由は、円形断面供試体は内部に障害物が無いため、スランプ18cm程度のコンクリートで充填可能と考えられるが、矩形断面供試体は内部に縦方向補剛材が存在しており、円形断面と比較してコンクリートの充填に困難が伴うためである。

矩形断面供試体の標準水中養生の圧縮強度試験と引張強度試験結果を表-3.1.2(1)に、現場封緘養生の圧縮強度試験と引張強度試験結果を表-3.1.2(2)に示す。また、円形断面供試体のスランプ試験と空気量試験結果を表-3.1.2(3)に、標準水中養生の圧縮強度試験と引張強度試験結果を表-3.1.2(4)に、現場封緘養生の圧縮強度試験と引張強度試験結果を表-3.1.2(5)に示す。

以上の材料試験結果を用いて算出した供試体の構造パラメータを、矩形断面は表-3.1(1)に、円形断面は表-3.1(2)に示す。

3.2 単調載荷実験、繰返し載荷実験結果

3.2.1 矩形断面

表-3.2.1に実験結果一覧を示す。

幅厚比パラメータR_R=0.49（No.1）とR_R=0.35（No.14）の単調載荷試験結果の比較を図-3.2.1(1)に示す。幅厚比パラメータR_R=0.49の供試体では、変位δ_m（δ_m：最大荷重時の変位）が2.61δ_y（δ_y：軸力、曲げ変形、および剪断変形の影響を考慮した降伏変位）の時点で、最大荷重P_{max}と降伏荷重P_yの比がP_{max}/P_y=1.33まで上昇し、それ以降は変位の増加につれて強度が劣化して塑性率μ（=δ_u/δ_y）はμ=7.5であった（ここに、δ_u：P_{max}を越えてP_yまで強度が劣化した時点での変位）。R_R=0.35の供試体では、最大水平荷重はP_{max}/P_y=1.68まで上昇し、変位が10δ_y付近に達するまで強度の劣化はなく、$\mu=\delta_u/\delta_y$=21であった。

幅厚比パラメータR_R=0.49における単調載荷実験（No.1）、両振り載荷実験（No.2）、および片振り載荷実験（No.3）の比較と、幅厚比パラメータR_R=0.35における単調載荷実験（No.14）と両振り載荷実験（No.15）の比較を図-3.2.1(2)に示す。両振り載荷実験は単調載荷実験と比較して、最大荷重が約9%上昇した。これは、繰返しによるひずみ硬化の影響によると考えられる。R_R=0.49の供試体の両振り載荷実験での塑性率μはμ=5、R_R=0.35の供試体の両振り載荷実験での塑性率μはμ=15であり、R_R=0.35と小さくすることにより、繰返しによる強度の劣化を緩和できることを示している。

また、片振り載荷実験の荷重～変位履歴曲線の包絡線は、最大荷重までは両振り載荷実験結果に近い挙動を示し、また、劣化勾配は単調載荷実験結果に近い挙動を示した。

3.2.2 円形断面

表-3.2.2に実験結果一覧を示す。

径厚比パラメータR_t=0.11（No.1）とR_t=0.08（No.14）の単調載荷試験結果の比較を図-3.2.2(1)に示す。径厚比パラメータR_t=0.08の供試体は、最大水平荷重P_{max}/P_y=1.51まで上昇し、塑性率μはμ=9.5であった。

径厚比パラメータR_t=0.11における単調載荷実験（No.1）と両振り載荷実験（No.2）、および片振り載荷実験（No.3）の比較と、径厚比パラメータR_t=0.08における単調載荷実験（No.14)と両振り載荷実験（No.15）の比較を図-3.2.2(2)に示す。両振り載荷実験は単調載荷実験と比較して、最大荷重が約8％上昇した。これは、繰返しによるひずみ硬化の影響によると考えられる。R_t=0.11の供試体の両振り載荷実験での最大荷重時の変位はδ_m/δ_y=2、塑性率μはμ=5であり、R_t=0.08の供試体の両振り載荷実験での最大荷重時の変位はδ_m/δ_y=3、塑性率μはμ=9.5である。これは、R_t=0.08と小さくすることにより繰返しによる強度の劣化を緩和できることを示している。また、片振り載荷実験の荷重～変位履歴曲線の包絡線の劣化勾配は、単調載荷実験結果と両振り載荷実験結果の間に位置している。

3.3 ハイブリッド地震応答実験

3.3.1 矩形断面

実験結果一覧を表-3.3.1に、各供試体の荷重～変位履歴曲線、変位の時刻歴曲線を図-3.3.1(1)～図-3.3.1(10)に、および実験終了後の写真を写真-3.3.1(1)～写真-3.3.1(6)に示す。

前節2.3に示す4つの地震波を「原波形」で作用させた場合、最大荷重を越えた時点で局部座屈を確認したが、この座屈は小さかった。強度が降伏耐力程度まで劣化することを想定して入力加速度レベルを増幅した「拡大波形」を作用させた場合は、原波形で作用させた場合と比較して最大応答変位$|\delta|_{max}$は約2倍となり、局部座屈の凹凸が大きくなった。

免震Ⅰ種（No.4）、ＨＫＢ（No.12）を原波形で作用させた供試体では初期に最大応答変位を示して供試体が大きく傾き、その後の揺れ返しが小さいために変位が戻りきらず、結果的に0.6～1.0δ_y程度の残留変位となった。

免震Ⅲ種は応答の繰返し回数が多い地震波である。この地震波を原波形で作用させた場合（No.6）には、試験体の最大耐力を越えておらず、強度が劣化していないために残留変位は小さい。拡大波形で作用させた場合（No.7）には、t＝8secの時刻に強度の劣化域に入り、その後の繰返しにより劣化が進行した。このため、t＝41secの時刻には供試体が大きく変位し、No.6供試体と比較して、最大応答変位$|\delta|_{max}$は2.5倍、残留変位δ_Rは15倍と大きくなった。

ＪＭＡを原波形で作用させた場合（No.10）は、初期に大きな応答変位が発生するが、正負両方向に動揺するため結果的に残留変位は小さくなった。また、ＪＭＡを拡大波形で作用させた場合（No.11）は、t＝4.6secの時刻に強度の劣化域に入り、その後の応答の繰返しにより強度劣化が進行し、No.10供試体と比較して、最大応答変位$|\delta|_{max}$は1.5倍、残留変位δ_Rは2.2倍となった。

細長比パラメータ$\bar{\lambda}$の影響を、免震Ⅰ種を原波形で作用させたNo.4（$\bar{\lambda}$＝0.38、固有周期T＝1.07sec）とNo.8（$\bar{\lambda}$＝0.28、T＝0.81sec）で比較する。$\bar{\lambda}$＝0.38の供試体では、最大応答変位$|\delta|_{max}$は$|\delta|_{max}$＝2.64δ_y、残留変位δ_Rはδ_R＝-0.6δ_yであり、$\bar{\lambda}$＝0.28の供試体でも、$|\delta|_{max}$＝3.09δ_y、δ_R＝-0.9δ_yとなり、応答に大きな差異はなかった。応答にそれほど差異が表れなかった理由として、地震の初期t＝2secに大きな加速度が作用し、それにより大きな応答が発生して挙動が決定されること、また、この大きな加速度が作用するまでは、ほとんど弾性状態であり、0.3sec≦T≦1.7secの範囲では弾性応答スペクトル値(図-2.3.2)が一定であることからも判るように、この範囲の$\bar{\lambda}$では、応答にそれほど差異が表れなかったものと考えられる。

幅厚比パラメータR_Rの影響を、ＪＭＡを原波形で作用させたNo.10（R_R＝0.49）、No.17（R_R＝0.36）、およびNo.21（R_R＝0.26）で比較する。R_R＝0.49の供試体では最大応答変位$|\delta|_{max}$＝3.51δ_y（時刻t＝7.4sec）、残留変位δ_R＝-1.5δ_yであったのに対し、R_R＝0.36の供試体では$|\delta|_{max}$＝3.87δ_y（t＝4.7sec）、δ_R＝-1.2δ_yであり、R_R＝0.26の供試体では$|\delta|_{max}$＝4.59δ_y（t＝5.0sec）、δ_R＝+0.3δ_yであった。R_R＝0.49の供試体では初期に大きな加速度が作用した時刻（t＝4.7sec)に強度が劣化したため、次の大きな加速度が作用した際（t＝7.4sec)にも応答変位が-3.5δ_yと大きくなり、残留変位も大きくなった。R_R＝0.36の供試体では初期に大きな加速度が作用した時刻（t＝4.7sec）にδ＝-3.8δ_yと大きな応答変位を示したが、強度が劣化していないため残留変位は小さい。R_R＝0.26の供試体ではt＝4.7secの時刻にδ＝-4δ_yと大きく応答し、t＝5.0secの時刻に反対側にもδ＝+4.6δ_yと大きく応答したが、強度は劣化していないため残留変位は小さかった。以上のことから判断すると、兵庫県南部地震レベルの地震に耐えられるようにするには、径厚比パラメータR_R≦0.36程度とすることが有効であると判断できる。

補剛材の剛比γ_1/γ^*の影響を、ＪＭＡを原波形で作用させたNo.17（γ_1/γ^*＝3.5、R_R＝0.36）とNo.20（γ_1/γ^*＝0.83、R_R＝0.35）で比較する。γ_1/γ^*＝3.5の供試体では$|\delta|_{max}$＝3.87δ_yとδ_R＝-1.2δ_yであり、γ_1/γ^*＝0.83の供試体では$|\delta|_{max}$＝4.05δ_yとδ_R＝-1.4δ_yと、両供試体の間には大きな差異はなかった。幅厚比パラメータR_R＝0.36と比較的厚肉の場合には、ある程度の補剛材剛比γ_1/γ^*が確保されれば応答に大きな影響を与えないものと考えられる。

ハイブリッド補剛の効果を、ＪＭＡを原波形で作用させたNo.17（補剛材の鋼種SS400、γ_1/γ^*＝3.4）とNo.22（補剛材の鋼種SM570、γ_1/γ^*＝3.4）で比較する。補剛材の鋼種がSS400の供試体では$|\delta|_{max}$＝3.87δ_yとδ_R＝-1.2δ_yであり、補剛材の鋼種がSM570の供試体でも$|\delta|_{max}$＝4.13δ_yとδ_R＝-1.2δ_yと明確な差は確認できなかった。補剛材剛度γ_1がγ_1＝3γ^*程度であれば、ハイブリッド補剛と無関係に縦方向補剛材を節とした座屈形状になるため両供試体に明確な差が表れなかったものと考えられる。

コンクリート充填の影響を、ＪＭＡを原波形で作用させたNo.10（コンクリート無充填）とNo.23（コンクリート充填）で比較する。コンクリート無充填の供試体では強度が劣化したのに対し、コンクリート充填の供試体では耐力の上昇率が大きく、強度は劣化していない。また、コンクリート無充填の供試体では$|\delta|_{max}$＝3.51δ_yとδ_R＝-1.5δ_yであったのに対し、コンクリート充填の供試体では$|\delta|_{max}$＝2.83δ_yとδ_R＝-0.7δ_yであり、コンクリートを充填することにより、最大応答変位$|\delta|_{max}$と残留変位δ_Rを抑制す

ることが可能であると考えられる。

3.3.2 円形断面

実験結果一覧を表-3.3.2に、各供試体の荷重～変位履歴曲線、変位の時刻歴曲線を図-3.3.2(1)～図-3.3.2(9)に、供試体の破壊状況を写真-3.3.2(1)～写真-3.3.2(6)に示す。なお、実験時の代表的なサイクルの座屈モードを図-参考-3.3.2(1)～図-参考-3.3.2(7)（参考資料を参照）に示す。

前節2.3に示す４つの地震波を「原波形」で作用させた場合、最大荷重を越えた時点で局部座屈を確認したが、この座屈は小さかった。強度が降伏耐力程度まで劣化することを想定して入力加速度レベルを増幅した「拡大波形」を作用させた場合は、原波形で作用させた場合と比較して最大応答変位$|\delta|_{max}$は約２倍となり、局部座屈の変形が大きくなった。

免震Ｉ種（No.4）、ＨＫＢ（No.12）を原波形で作用させた供試体では初期に最大応答変位を示して供試体が大きく傾き、その後の揺れ返しは小さいために変位が戻りきらず、結果的に$0.8\sim1.4\delta_y$程度の残留変位となった。

免震Ⅲ種は応答の繰返し回数が多い地震波である。原波形で作用させた場合（No.6）には、最大耐力を越えておらず、強度が劣化していないために、残留変位は小さい。拡大波形で作用させた場合（No.7）には、$t=5$secの時刻に強度の劣化域に入り、その後の繰返しにより劣化が進行して変位が大きくなった。$t=30$secの時点で実験装置のストロークの限界に達したため、実験を中断した。

ＪＭＡを原波形で作用させた場合（No.10）は、初期に大きな応答変位が発生するが、正負両方向に動揺するため結果的に残留変位は小さくなった。また、ＪＭＡを拡大波形で作用させた場合（No.11）は、$t=4$secの時刻に強度の劣化域に入り、その後の繰返しにより強度劣化が進行し、No.10供試体と比較して最大応答変位$|\delta|_{max}$は2.9倍、残留変位δ_Rは47倍となった。

細長比パラメータ$\bar{\lambda}$の影響を、免震Ｉ種を原波形で作用させたNo.4（$\bar{\lambda}=0.33$、固有周期$T=0.94$sec）とNo.8（$\bar{\lambda}=0.27$、$T=0.75$sec）で比較する。$\bar{\lambda}=0.33$の供試体では、最大応答変位$|\delta|_{max}=3.28\delta_y$、残留変位$\delta_R=-1.3\delta_y$であり、$\bar{\lambda}=0.27$の供試体においても、$|\delta|_{max}=3.03\delta_y$、$\delta_R=-1.2\delta_y$であり、応答に大きな差異はなかった。応答にそれほど差異が表れなかった理由として、地震の初期$t=2$secの大きな加速度による応答で挙動が決定されていること、また、この大きな加速度が作用するまではほとんど弾性状態であり、$0.3\text{sec}\leqq T\leqq1.7$secの範囲では弾性応答スペクトル値が一定であることからも判るように、この範囲の$\bar{\lambda}$では、応答にそれほど差異が表れなかったものと考えられる。

径厚比パラメータR_tの影響を、ＪＭＡを原波形で作用させたNo.10（$R_t=0.11$）とNo.19（$R_t=0.08$）で比較する。$R_t=0.11$の供試体では$|\delta|_{max}=2.96\delta_y$、$\delta_R=-0.138\delta_y$に対し、$R_t=0.08$の供試体では$|\delta|_{max}=3.39\delta_y$、$\delta_R=-0.823\delta_y$と径厚比が小さい場合に応答が大きくなったが、その差は小さい。また、$R_t=0.11$の供試体は$\delta=2\delta_y$程度で強度の劣化域に到達したのに対し、$R_t=0.08$の供試体は$\delta=3\delta_y$を越えても強度は劣化しておらずじん性が大きい。また、実験後の供試体の状況からも判断して、兵庫県南部地震レベルの地震に耐えられるように耐震性を高めるために、径厚比パラメータR_tを$R_t\leqq0.08$とすることは有効であると考えられる。

コンクリート充填の影響を、ＪＭＡを原波形で作用させたNo.10（コンクリート無充填）とNo.21（コンクリート充填）で比較する。コンクリート無充填の供試体は$\delta \fallingdotseq 2\delta_y$程度で強度が劣化したのに対し、コンクリート充填の供試体は$\delta \fallingdotseq 3\delta_y$程度でも強度が劣化しておらずじん性が大きい。コンクリート無充填の供試体では$|\delta|_{max}=3.0\delta_y$、$\delta_R=-0.14\delta_y$であったのに対し、コンクリート充填の供試体では$|\delta|_{max}=2.5\delta_y$、$\delta_R=+0.027\delta_y$となり、コンクリートを充填することにより応答変位とりわけ残留変位δ_Rを抑制の効果があるものと考えられる。

4. まとめ

鋼製橋脚が地震波を受けた場合の動的挙動および損傷状態を確認することを目的として、ハイブリッド地震応答実験を実施した。供試体は大きく分けて２種類であり、「基本１シリーズ」は、平成６年発行の道路橋示方書に従って設計し、現状の橋脚が地震力を受けた場合の挙動を確認することを目的とした供試体であり、「基本２シリーズ」は、耐震性（じん性）の向上を目指し、パラメータを制限することにより局部座屈の発生、進展を遅らせることを目的とした供試体である。

入力地震波は４種類であり、道路橋の免震設計法マニュアル(案)[6]に記載されている時刻歴応答解析用地震波（免震Ⅰ種、免震Ⅲ種）と、兵庫県南部地震での観測地震波（神戸海洋気象台(Ⅰ種地盤)、東神戸大橋(Ⅲ種地盤)）とした。

実験結果は、矩形断面と円形断面ともに同様の傾向があり、それらをまとめて以下に示す。

(1)単調載荷実験において「基本１シリーズ」と「基本２シリーズ」を比較すると、幅厚比パラメータR_Rまたは径厚比パラメータR_tが小さいほど、最大荷重P_{max}と降伏荷重P_yの比P_{max}/P_y、最大荷重時の変位δ_mと降伏変位δ_yの比δ_m/δ_yが大きくなる。これは幅厚比または径厚比を小さくなることにより、局部座屈の発生が遅れ、ひずみ硬化により強度が上昇することによるものと考えられる。

(2)道路橋の免震設計法マニュアル（案）の地震波と兵庫県南部地震での観測地震波を「原波形」で作用させた場合、供試体は最大耐力を越えた時点で局部座屈を確認したが、その凹凸は小さい。入力加速度を増幅して降伏耐力程度まで劣化することを想定した「拡大波形」を作用させた場合、「原波形」を作用させた場合と比較して、最大応答変位$|\delta|_{max}$は約２倍となり、局部座屈はかなり大きくなった。

(3)免震Ⅰ種、東神戸大橋(Ⅲ種地盤)の地震波を原波形で作用させた場合、初期に大きな応答変位が発生し、その後の揺り返しでは変位が戻りきらず、大きな残留変位となった。

(4)免震Ⅲ種は応答の繰返し回数が多い地震波であるが、原波形で作用させた場合には、最大耐力を越えないため、強度劣化が少なく残留変位は小さい。拡大波形を作用させた場合は、供試体が大きく変位し、応答変位、残留変位ともに大きくなった。

(5)神戸海洋気象台(Ⅰ種地盤)を原波形で作用させた場合、初期に大きな応答変位が発生するが、揺り戻しにより反対方向にも大きく動揺して、結果的に残留変位は小さくなった。神戸海洋気象台(Ⅰ種地盤)の拡大波形を作用させた場合は、初期の応答で劣化域に到達するため応答変位と残留変位はともに大きくなった。

(6)細長比パラメータ$\bar{\lambda}$が$0.28 \leqq \bar{\lambda} \leqq 0.38$の範囲においては、免震Ⅰ種を原波形で作用させた際の挙動に大

きな差異はなかった。

(7)矩形断面では幅厚比パラメータ$R_R \leqq 0.35$、および円形断面では径厚比パラメータ$R_t \leqq 0.08$とすることにより、兵庫県南部地震レベルの地震を受けても強度の劣化が生じず、じん性を大きくすることができる。

(8)供試体基部にコンクリートを充填した場合は、耐力上昇と局部座屈による強度劣化の抑制が見られるため、応答変位、残留変位ともに抑制できる効果が認められる。

また、矩形断面においては次の結果を得た。

(9)幅厚比パラメータ$R_R = 0.36$程度と比較的厚肉の場合には、ある程度の補剛材剛比γ_1/γ^*が確保されていれば、剛比は応答に大きな影響を与えないものと考えられる。

(10)ハイブリッド補剛（補剛材の鋼種を補剛板よりも高強度とした構造）では、補剛材剛比γ_1/γ^*が$\gamma_1/\gamma^* = 3$程度であれば縦方向補剛材を節とした座屈形状となるため、補剛材を高強度部材とする効果は明確には表れなかった。

【参考文献】

1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編,1994年２月.

2) 宇佐美勉,今井康幸,青木徹彦,伊藤義人:繰り返し荷重を受ける鋼圧縮部材の強度と変形能に関する実験的研究,構造工学論文集,Vol. 37A, pp. 93-106, 1991年3月.

3) 鈴木森晶,宇佐美勉:繰り返し荷重下における鋼製橋脚モデルの強度と変形能の推定式に関する研究,土木学会論文集,No. 519/Ⅰ-32, pp. 115-125, 1995年7月.

4) 水谷慎吾,宇佐美勉,青木徹彦,伊藤義人,岡本隆:パイプ断面鋼圧縮部材の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究,構造工学論文集,Vol. 42A, pp. 105-114, 1996年3月.

5) 宇佐美勉:鋼平面ラーメン構造物の極限強度評価式の実験データによる検証,構造工学論文集,Vol. 36A, pp. 79-88, 1990年3月.

6) 建設省:道路橋の免震設計法マニュアル(案),土木研究センター,1992年12月.

7) 日本道路協会:「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案),1995年6月.

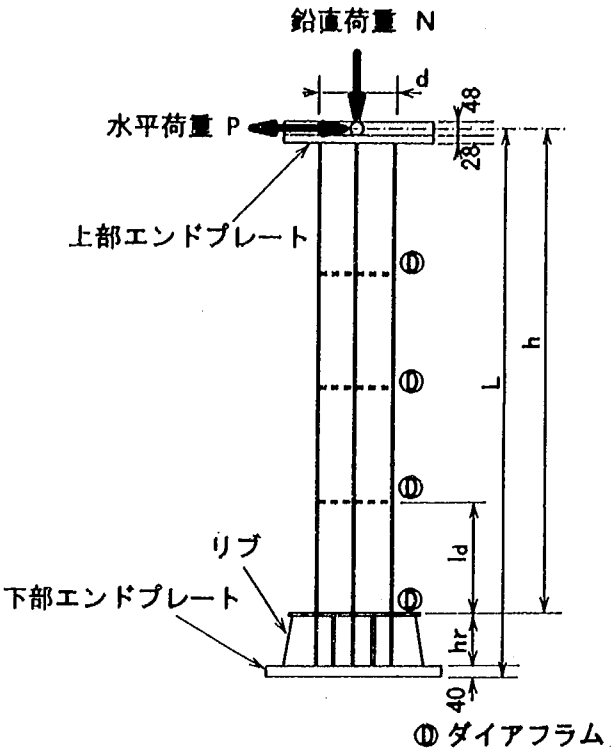
8) 才塚邦宏,伊藤義人,木曽英滋,宇佐美勉:相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験手法に関する考察,土木学会論文集,No. 507/Ⅰ-30, pp. 179-190, 1995年1月.

9) ECCS-Technical Committee 8 : European Recommendations for Steel Construction: Buckling of Shells, 1983.

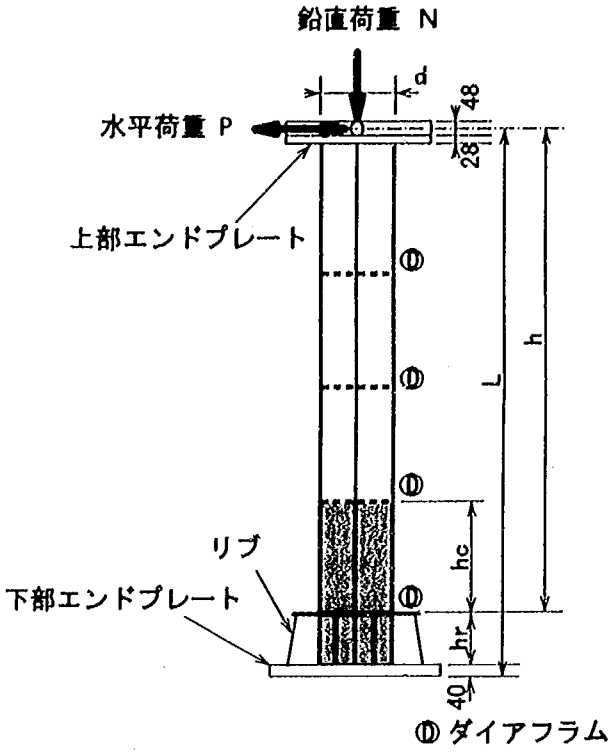
10) American Petroleum Institute : Specification for Fabricated Structural Steel Pipe, Spec. 2B, 1972.

図　　表

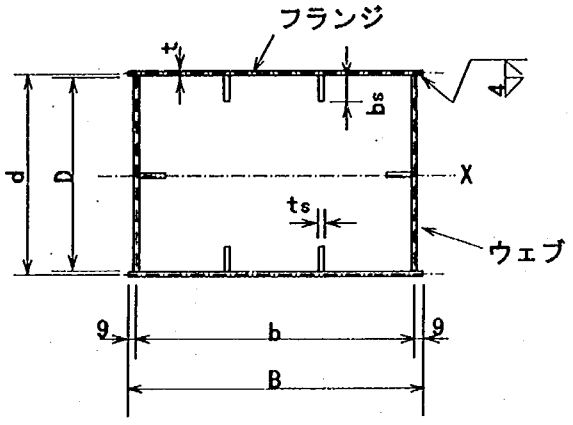
実験概要



（ｉ）鋼断面供試体側面図



（ii）コンクリート充填供試体側面図



（iii）断面図

b ：断面幅
d ：断面高さ
t ：板厚
bs：縦方向補剛材高さ
ts：縦方向補剛材板厚
h ：供試体長
ld：ダイアフラム間隔
hc：コンクリート充填高さ

図-2.1.1(1)　矩形断面供試体

表-2.1.1　矩形断面試験体パラメータ（計画値）

		地震波	設計水平震度	地震波入力レベル	構造パラメータ					軸力比	実橋の固有周期	柱高さ	備考
					R_R	$\bar{\lambda}$	γ/γ_{req}	γ/γ^*	$R_R\sqrt{\bar{\lambda}}$	N/N_y	T_p	h (mm)	
1	基本1	単調	—	—	0.5	0.4	1	0.7	0.3	0.15	—	1847	
2		両振り	—	—	0.5	0.4	1	0.7	0.3	0.15	—	1847	
3		片振り	—	—	0.5	0.4	1	0.7	0.3	0.15	—	1847	
4		免震Ⅰ種	0.2	原波形	0.5	0.4	1	0.7	0.3	0.15	1.1	1847	
5		免震Ⅰ種	0.2	拡大波形	0.5	0.4	1	0.7	0.3	0.15	1.1	1847	
6		免震Ⅲ種	0.3	原波形	0.5	0.4	1	0.7	0.3	0.11	0.9	1847	
7		免震Ⅲ種	0.3	拡大波形	0.5	0.4	1	0.7	0.3	0.11	0.9	1847	
8		免震Ⅰ種	0.2	原波形	0.5	0.3	1	0.7	0.3	0.19	0.8	1396	
9		免震Ⅰ種	0.2	拡大波形	0.5	0.3	1	0.7	0.3	0.19	0.8	1396	
10		JMA	0.2	原波形	0.5	0.4	1	0.7	0.3	0.15	1.1	1847	
11		JMA	0.2	拡大波形	0.5	0.4	1	0.7	0.3	0.15	1.1	1847	
12		HKB	0.3	原波形	0.5	0.4	1	0.7	0.3	0.11	0.9	1847	
13		HKB	0.3	拡大波形	0.5	0.4	1	0.7	0.3	0.11	0.9	1847	
14	基本2	単調	—	—	0.35	0.4	11	3	0.2	0.18	—	1388	
15		両振り	—	—	0.35	0.4	11	3	0.2	0.18	—	1388	
16		免震Ⅰ種	0.2	原波形	0.35	0.4	11	3	0.2	0.18	1.0	1388	
17		JMA	0.2	原波形	0.35	0.4	11	3	0.2	0.18	1.0	1388	
18		JMA	0.2	拡大波形	0.35	0.4	11	3	0.2	0.18	1.0	1388	
19		HKB	0.3	原波形	0.35	0.4	11	3	0.2	0.13	0.8	1388	
20		JMA	0.2	原波形	0.35	0.4	2	1	0.2	0.18	1.0	1388	
21		JMA	0.2	原波形	0.30	0.4	34	3	0.2	0.18	0.8	1388	
22		JMA	0.2	原波形	0.35	0.4	11	3	0.2	0.18	1.0	1388	ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ補剛材
23		JMA	0.2	原波形	0.5	0.4	11	3	0.3	0.15	—	1847	ｺﾝｸﾘｰﾄ充填

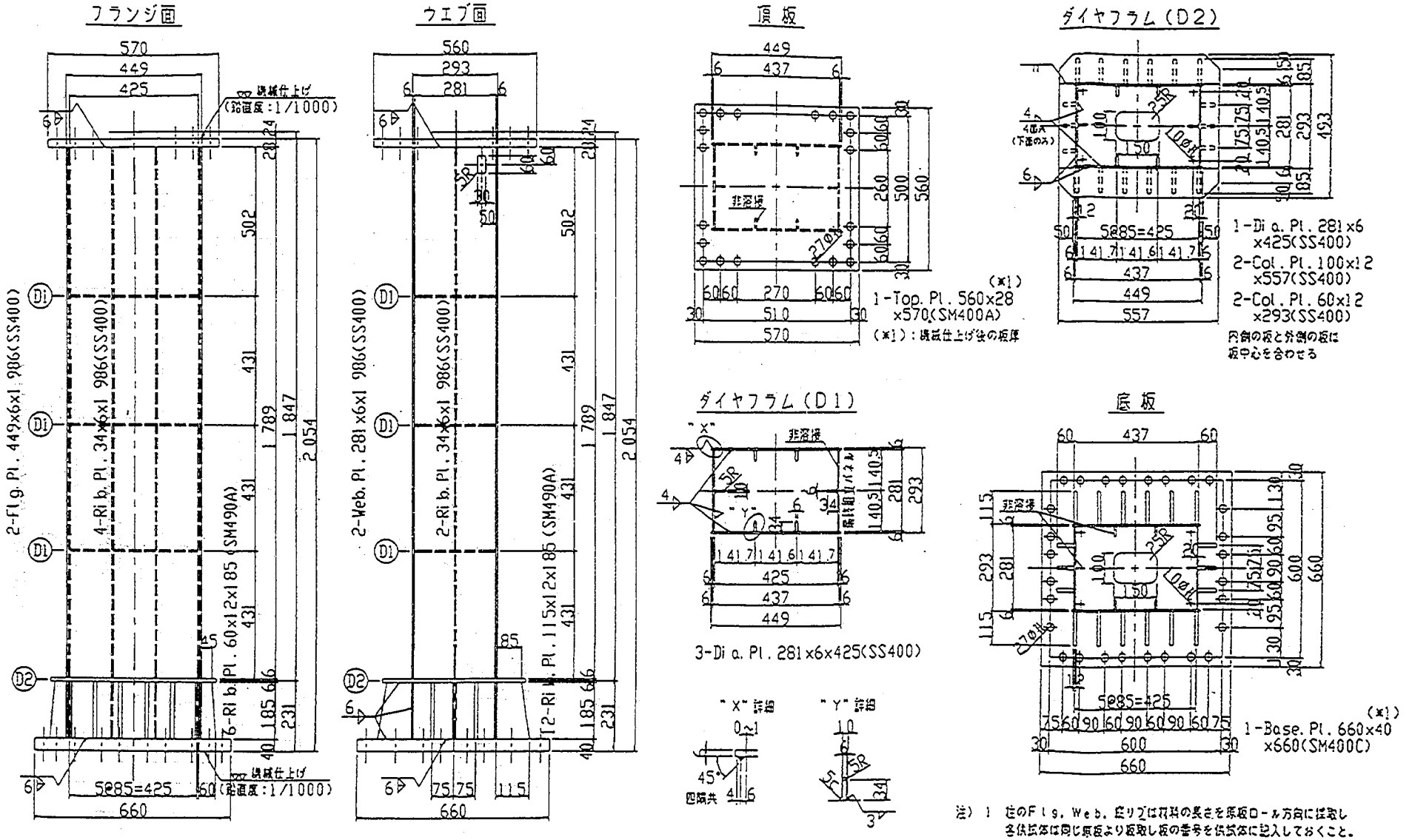
（注意１）地震波の欄において、「単調」は単調載荷試験を示す。「両振り」、「片振り」は繰返し載荷実験において正負両方向へ変位制御した実験と、正側のみ変位制御した実験を示す。また、「免震Ⅰ種」、「免震Ⅲ種」は「道路橋の免震設計法マニュアル(案)」に記載されている時刻歴応答解析用地震波のⅠ種地盤、Ⅲ種地盤を示し、「JMA」、「HKB」は兵庫県南部地震において神戸海洋気象台、東神戸大橋で観測された地震波を示す。

（注意２）地震波入力レベルの欄において、「原波形」は文献に記載または観測された加速度レベル（１倍）であり、「拡大波形」は動的応答解析により試験体の応答が最大耐力を越えて降伏耐力以下まで劣化するように、加速度レベルの倍率を決定した加速度レベルを示す。

（注意３）R_R、$\bar{\lambda}$、N_yは$\sigma_y = 3000 kgf/cm^2$として計算

ハイブリッド試験用・供試体（その1）

No 1～7, 10～13（基1）…11台＋予備1台

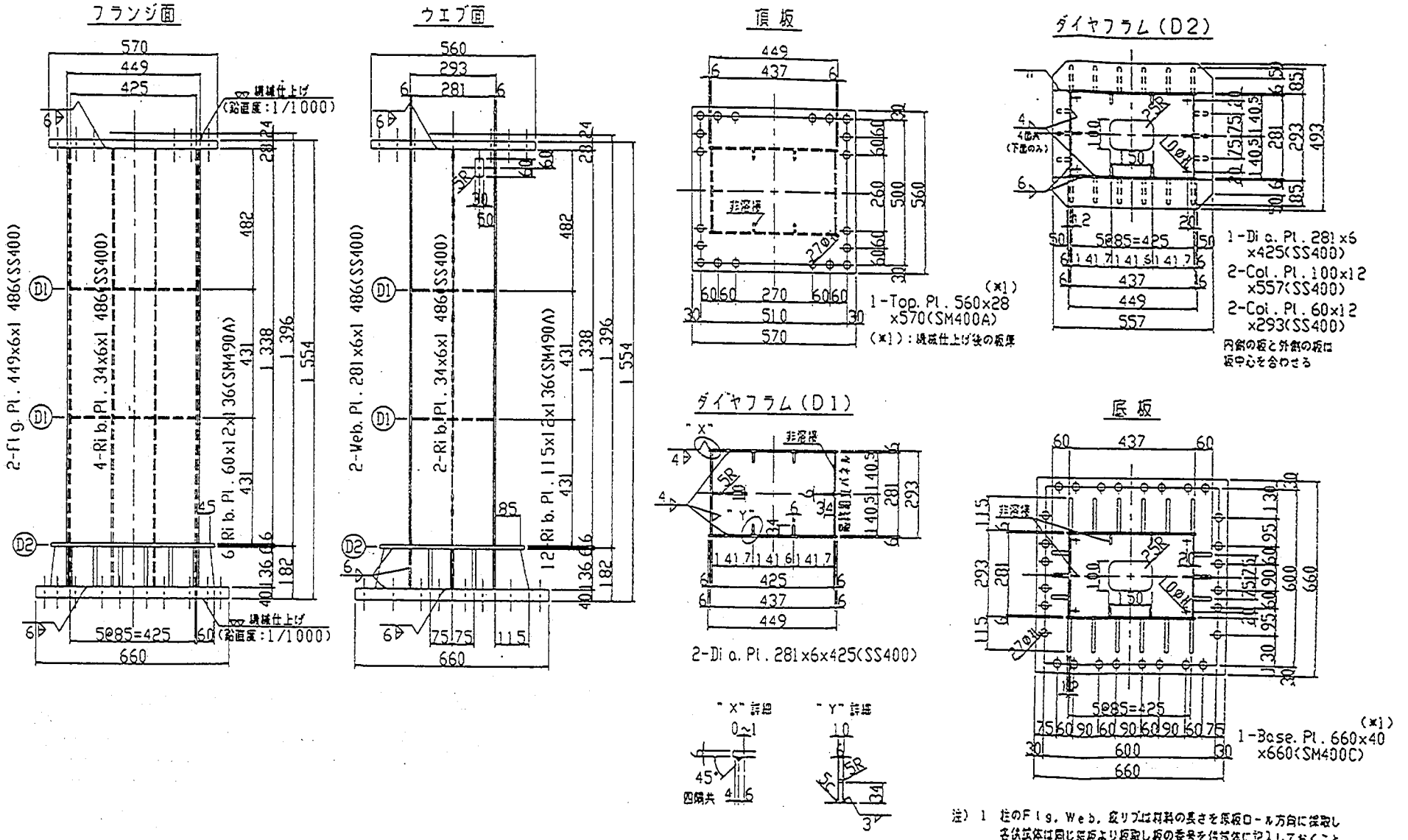


注）1 柱のFlg, Web, 縦リブは圧延の長さを原板ロール方向に採取し 各供試体は同じ原板より採取し板の番号を供試体に記入しておくこと。
2 板のFlg, Web, 縦リブの表面処理は黒皮のままとする。
3 柱の勾配度にあるH／1000とし底板と脚柱及び頂板と脚柱も同勾配とする。

図-2.1.1(2)　矩形断面供試体No. 1～7, No. 10～13

ハイブリッド試験用・供試体（その2）

No8, 9（基1（短））…2台

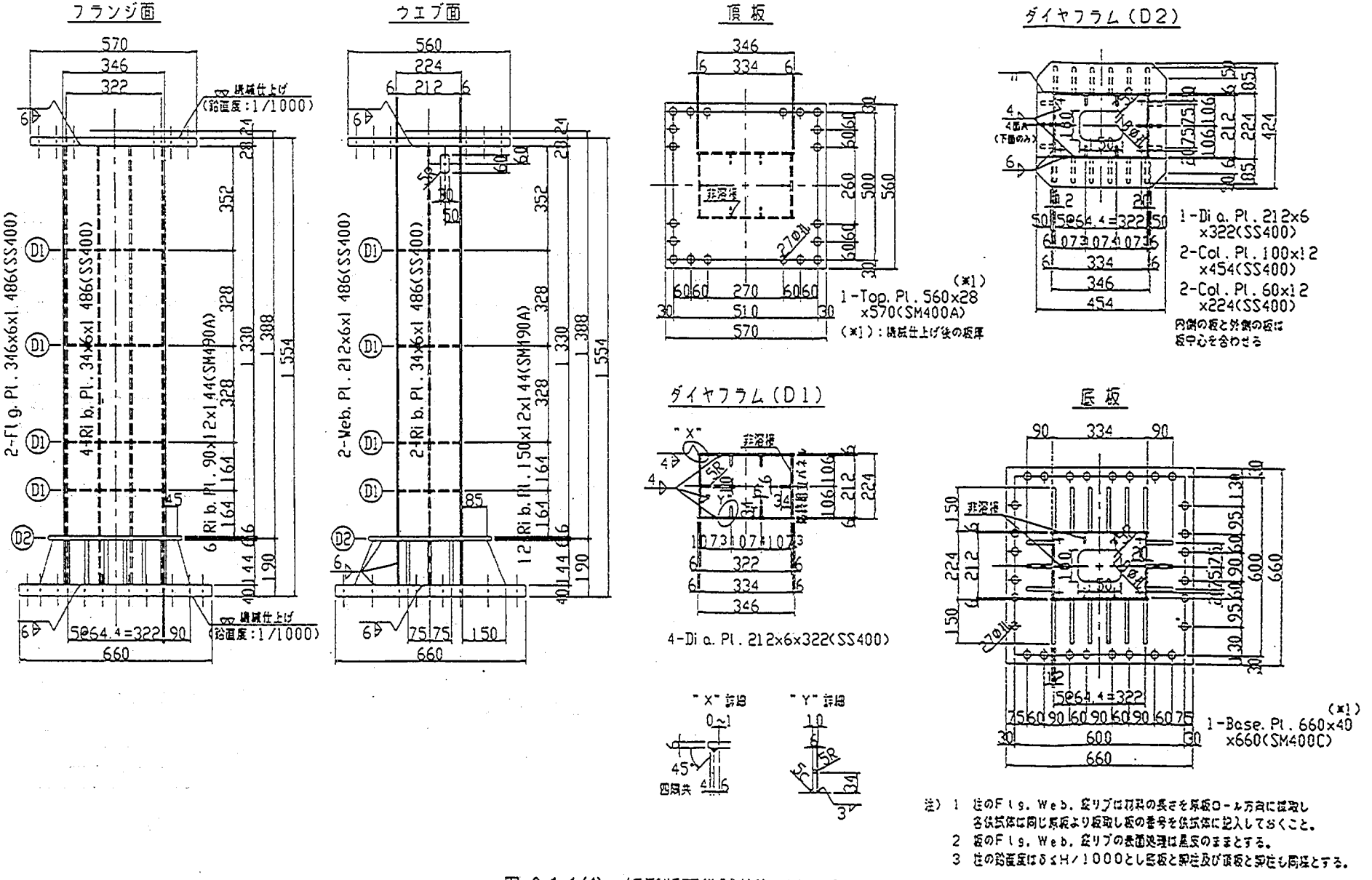


注）1 柱のFlg, Web, 縦リブは材料の長さを原板ロール方向に採取し各供試体は同じ原板より採取し板の番号を供試体に記入しておくこと。
2 板のFlg, Web, 縦リブの表面処理は黒皮のままとする。
3 柱の勾配度は δ≦H／1000とし底板と脚柱及び頂板と脚柱も同様とする。

図-2.1.1(3)　矩形断面供試体No. 8, 9

ハイブリッド試験用・供試体（その3）

No14～19（基2）…6台

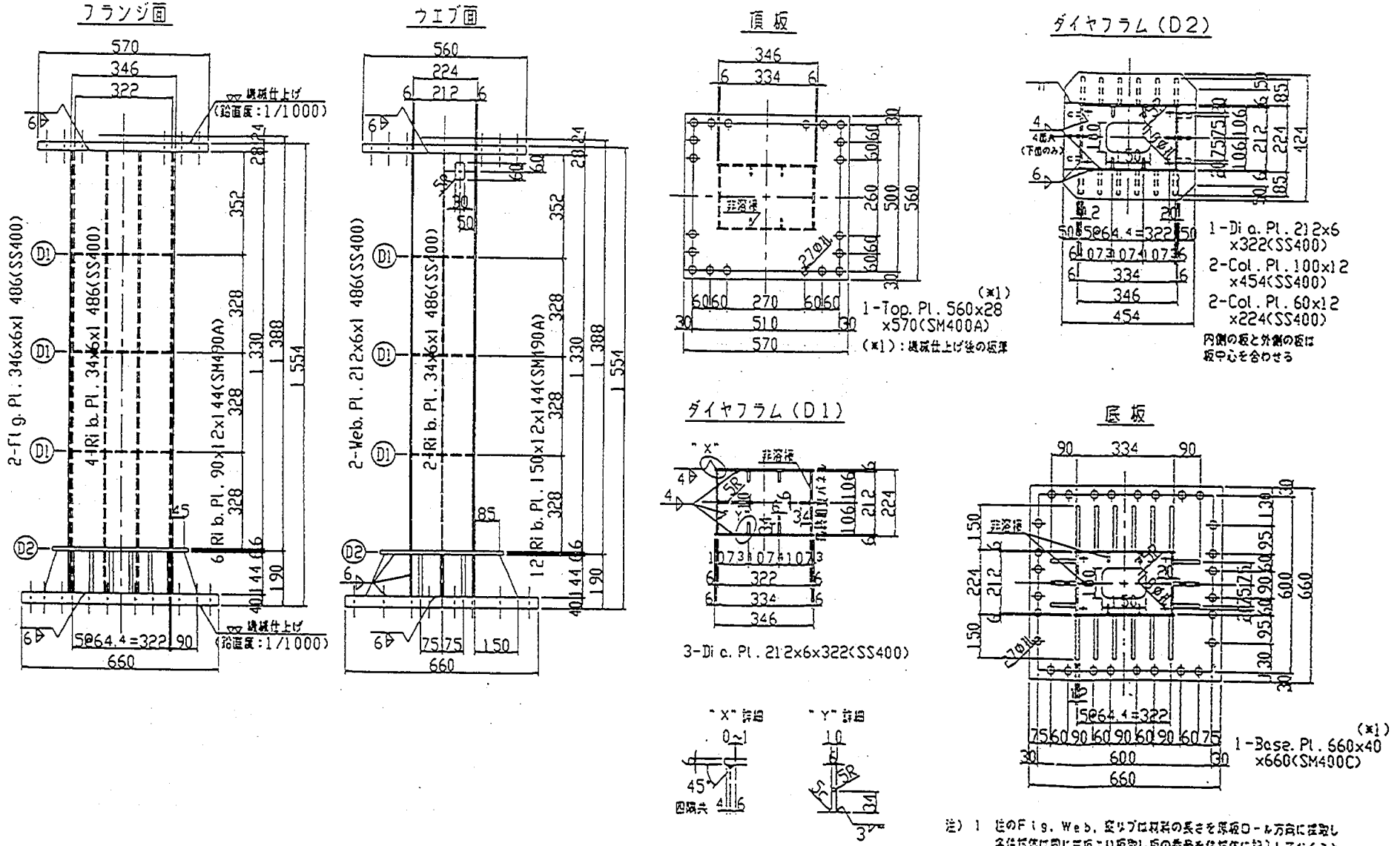


注）1 柱のFlg. Web. 縦リブは切断の長さを原板ロール方向に採取し 各供試体に同じ原板より採取し板の番号を供試体に記入しておくこと。
2 板のFlg. Web. 縦リブの表面処理は黒皮のままとする。
3 柱の鉛直度は$\delta \leq H/1000$とし底板と柱芯及び頂板と柱芯も同様とする。

図-2.1.1(4)　矩形断面供試体No. 14～19

ハイブリッド試験用・供試体（その4）

No20（基2 α=1.0）…1台

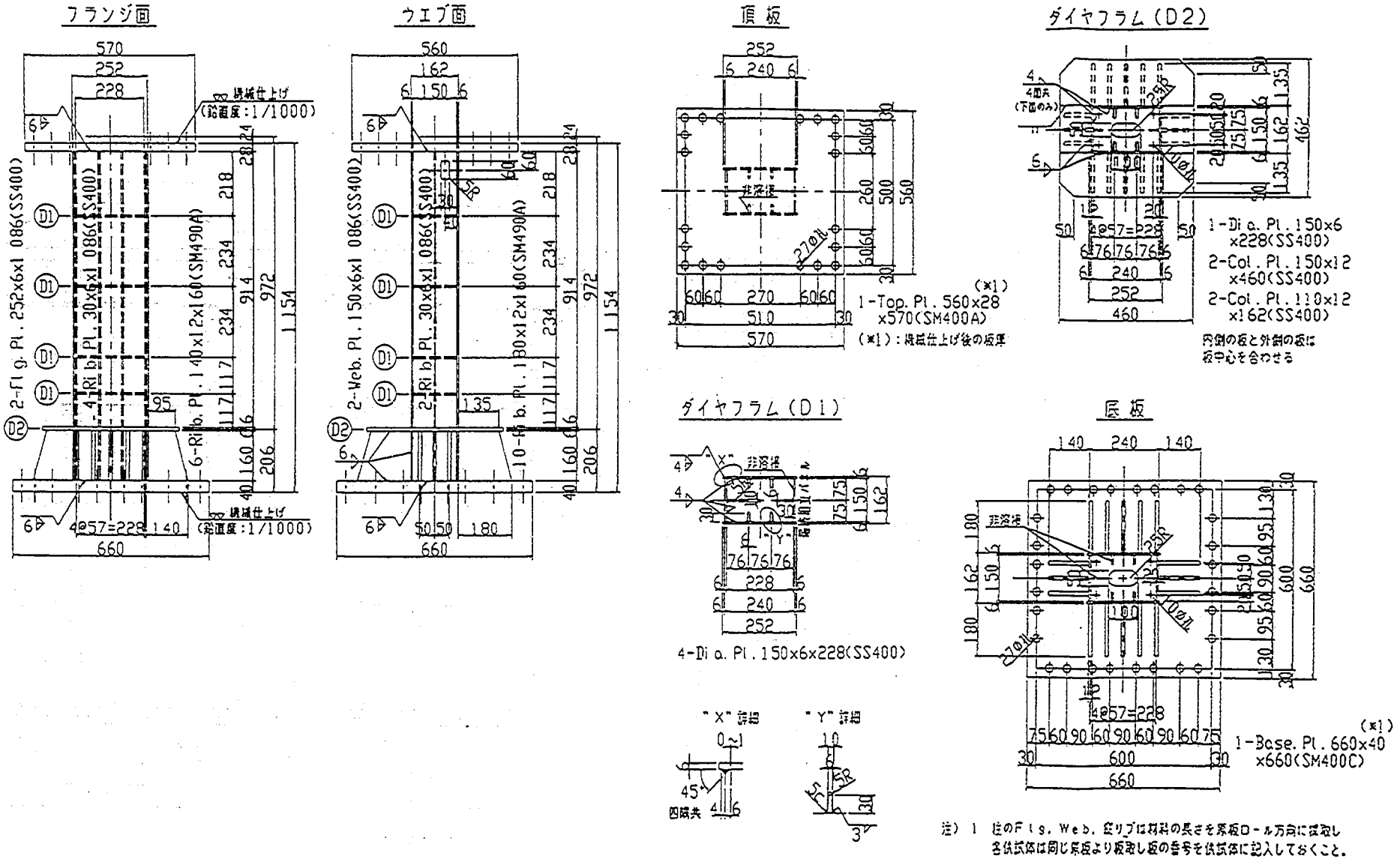


注）1 主のFlg. Web. 変リブは材料の長さを原板ロール方向に採取し各供試体に同じ原板より採取し板の番号を供試体に記入しておくこと。
2 板のFlg. Web. 変リブの表面処理は黒皮のままとする。
3 主の勾配度は δ≦H／1000とし底板と脚柱及び頂板と脚柱は同様とする。

図-2.1.1(5)　矩形断面供試体No.20

ハイブリッド試験用・供試体（その5）

No21（　λs<0.2）…1台

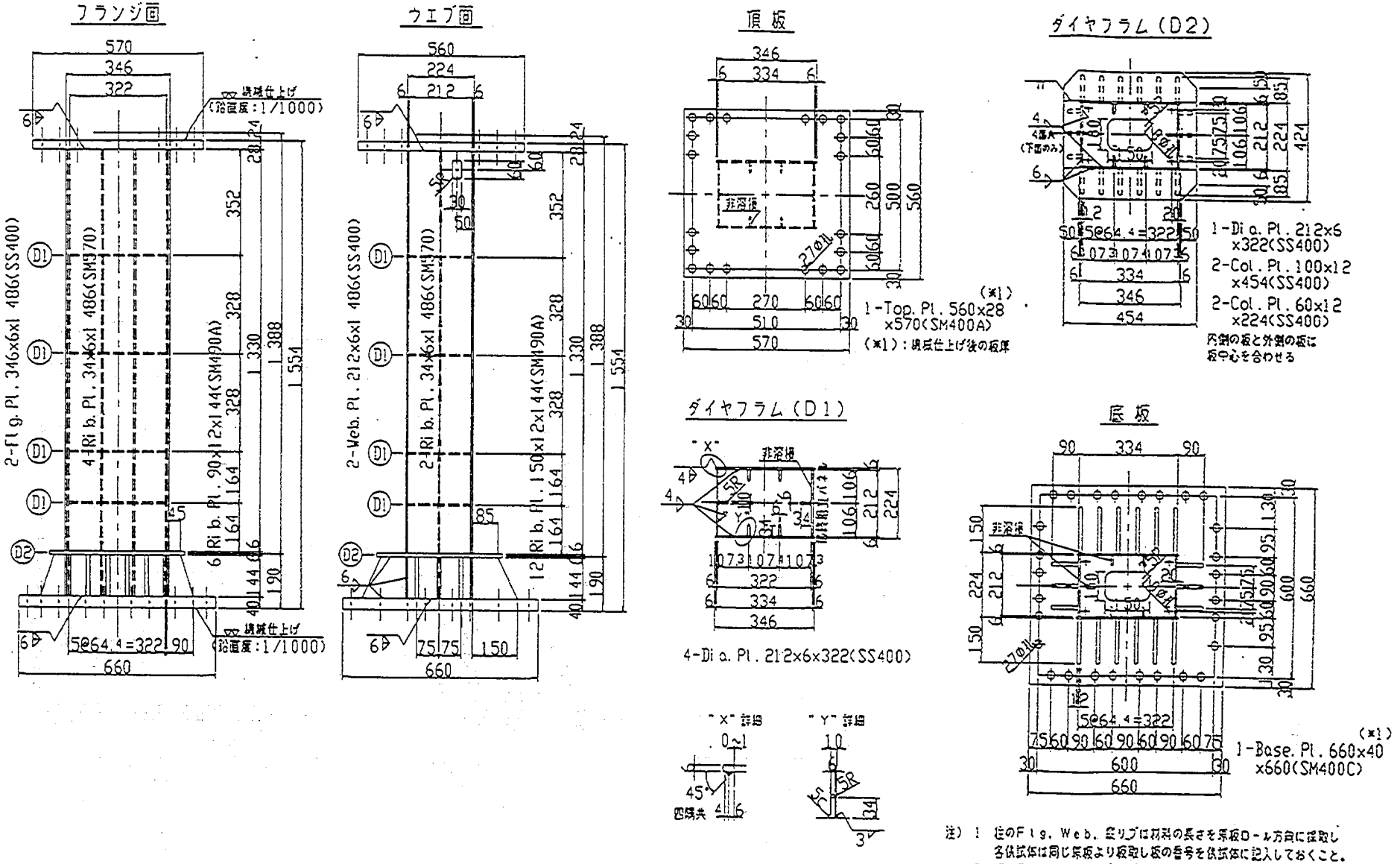


注）1　柱のFlg. Web. 縦リブは材料の長さを原板ロール方向に採取し
各供試体は同じ原板より板取し板の番号を供試体に記入しておくこと。
2　板のFlg. Web. 縦リブの表面処理は黒皮のままとする。
3　柱の勾配度は8≦H／1000とし底板と脚柱及び頂板と脚柱も同勾配とする。

図-2.1.1(6)　矩形断面供試体No.21

ハイブリッド試験用・供試体（その6）

No22（基2　ハイブリッド補剛）…1台



注）1　柱のFlg. Web. 縦リブは材料の長さを底板ロール方向に採取し
　　各供試体は同じ底板より板取し板の番号を供試体に記入しておくこと。
　2　板のFlg. Web. 縦リブの表面処理は黒皮のままとする。
　3　柱の勾配度は3≦H／1000とし底板と脚柱及び頂板と脚柱も同様とする。

図-2.1.1(7)　矩形断面供試体No.22

ハイブリッド試験用・供試体（その7）

No23（基1　コンクリート充填）…1台

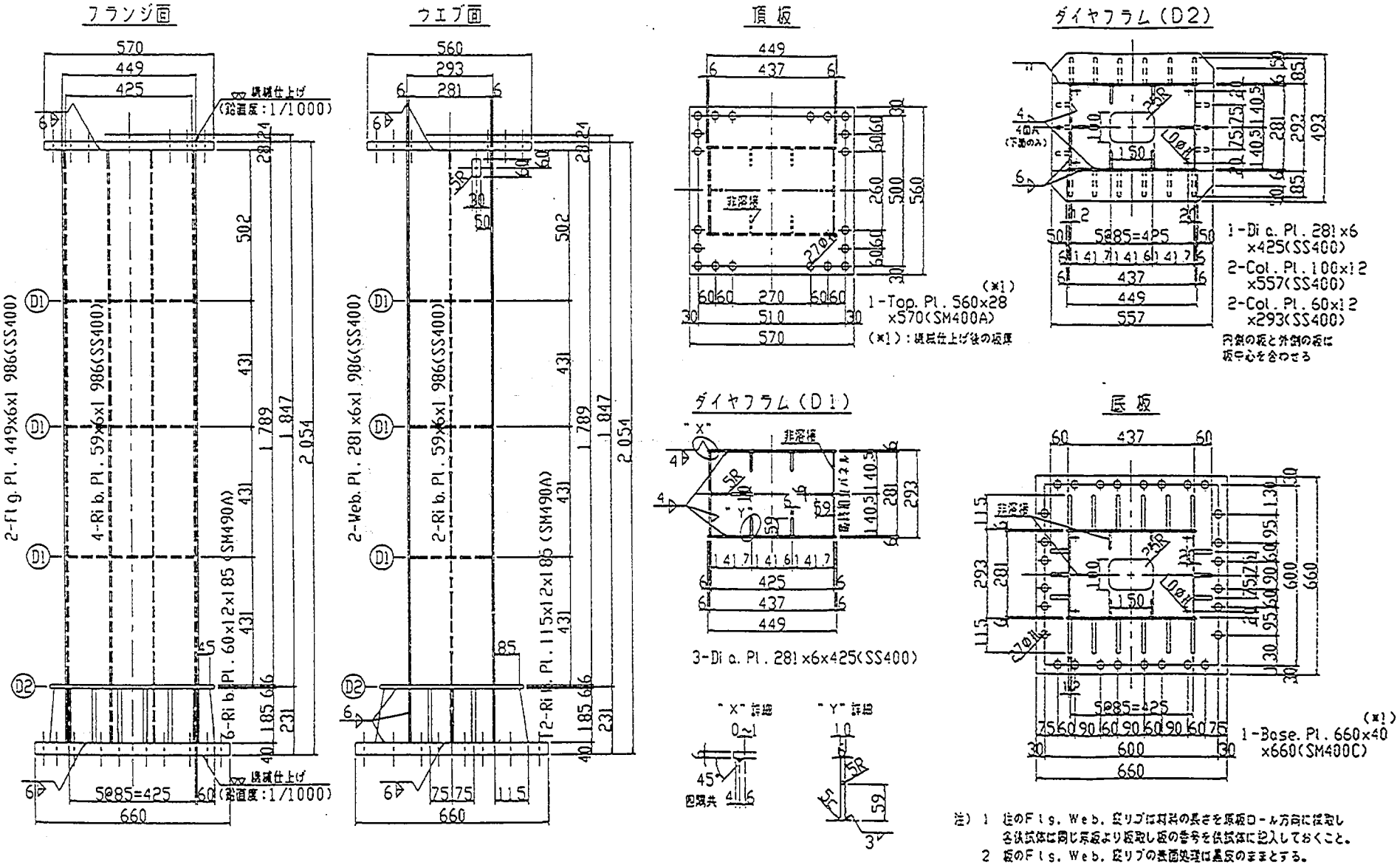
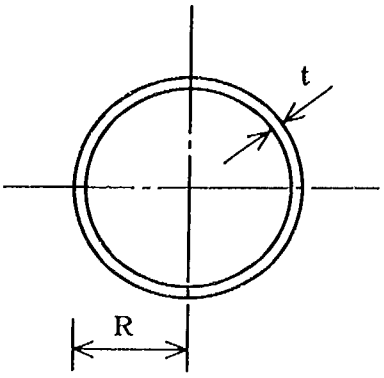
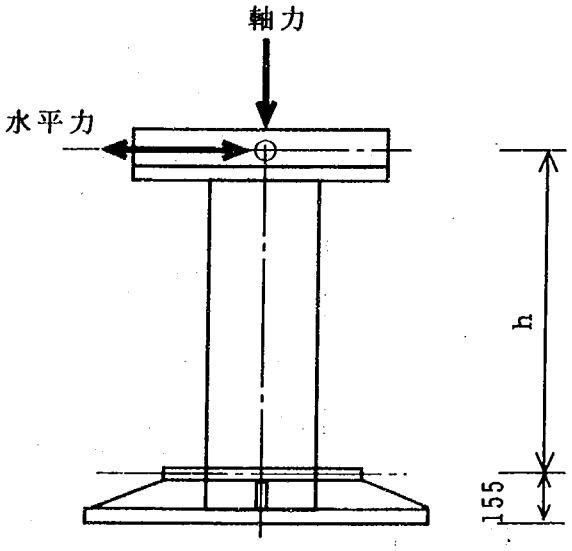


図-2.1.1(8)　矩形断面供試体No.23

注）1　柱のFlg. Web. 及リブは材料の長さを原板ロール方向に採取し各供試体に同じ原板より採取し板の番号を供試体に記入しておくこと。
2　板のFlg. Web. 及リブの表面処理は黒皮のままとする。
3　柱の勾配度は δ≦H／1000とし底板と脚柱及び頂板と梁とも同じとする。



断面図



側面図

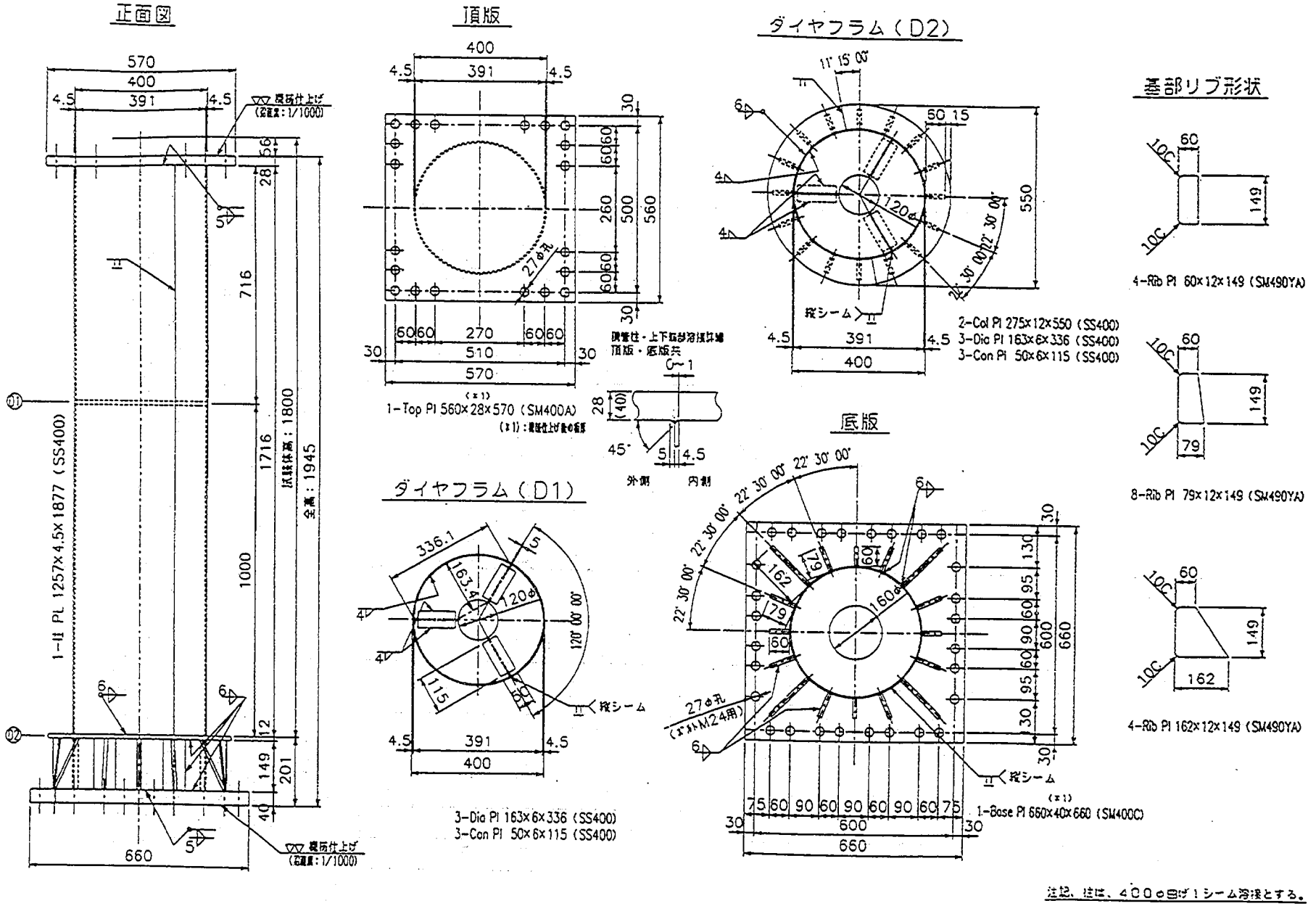
図-2.1.2(1)　円形断面供試体

表-2.1.2　円形断面試験体パラメータ（計画値）

		地震波	設計水平震度	地震波入力レベル	構造パラメータ		軸力比	実橋の固有周期	柱高さ	備考
					R_s	$\overline{\lambda}$	N/N$_y$	Tp(sec)	h (mm)	
1	基本1	単調	—	—	0.11	0.3	0.16	—	1800	
2		両振り	—	—	0.11	0.3	0.16	—	1800	
3		片振り	—	—	0.11	0.3	0.16	—	1800	
4		免震Ⅰ種	0.2	原波形	0.11	0.3	0.16	0.9	1800	
5		免震Ⅰ種	0.2	拡大波形	0.11	0.3	0.16	0.9	1800	
6		免震Ⅲ種	0.3	原波形	0.11	0.3	0.11	0.8	1800	
7		免震Ⅲ種	0.3	拡大波形	0.11	0.3	0.11	0.8	1800	
8		免震Ⅰ種	0.2	原波形	0.11	0.2	0.18	0.7	1500	
9		免震Ⅰ種	0.2	拡大波形	0.11	0.2	0.18	0.7	1500	
10		JMA	0.2	原波形	0.11	0.3	0.16	0.9	1800	
11		JMA	0.2	拡大波形	0.11	0.3	0.16	0.9	1800	
12		HKB	0.3	原波形	0.11	0.3	0.11	0.8	1800	
13		HKB	0.3	拡大波形	0.11	0.3	0.11	0.8	1800	
14	基本2	単調	—	—	0.08	0.3	0.18	—	1800	
15		両振り	—	—	0.08	0.3	0.18	—	1800	
16		免震Ⅰ種	0.2	原波形	0.08	0.3	0.18	0.9	1800	
17		免震Ⅲ種	0.3	原波形	0.08	0.3	0.13	0.8	1800	
18		免震Ⅰ種	0.2	原波形	0.08	0.2	0.21	0.8	1500	
19		JMA	0.2	原波形	0.08	0.3	0.18	0.9	1800	
20		HKB	0.3	原波形	0.08	0.3	0.18	0.8	1800	
21		JMA	0.2	原波形	0.11	0.3	0.16	1.0	1800	ｺﾝｸﾘｰﾄ充填

（注意１）地震波の欄において、「単調」は単調載荷実験を示す。「両振り」は正負両方向に変位を漸増する両振り載荷実験、「片振り」は正側のみに変位を漸増する片振り載荷実験を示す。また、「免震Ⅰ種」と「免震Ⅲ種」は「道路橋の免震設計法マニュアル(案)」に記載されている時刻歴応答解析用地震波のⅠ種地盤とⅢ種地盤を示し、「JMA」と「HKB」は兵庫県南部地震において神戸海洋気象台(Ⅰ種地盤)と東神戸大橋(Ⅲ種地盤)で観測された地震波を示す。

（注意２）地震波入力レベルの欄において、「原波形」は文献に記載されているそのままの加速度レベル（１倍）であり、「拡大波形」とは強度が降伏耐力程度まで劣化することを想定して入力加速度レベルを増幅した波形である。



注記、ほに、４００φ回げ１シーム溶接とする。

図-2.1.2(2)　円形断面供試体No. 1～7, No. 10～13（φ400×t4.5×1800）

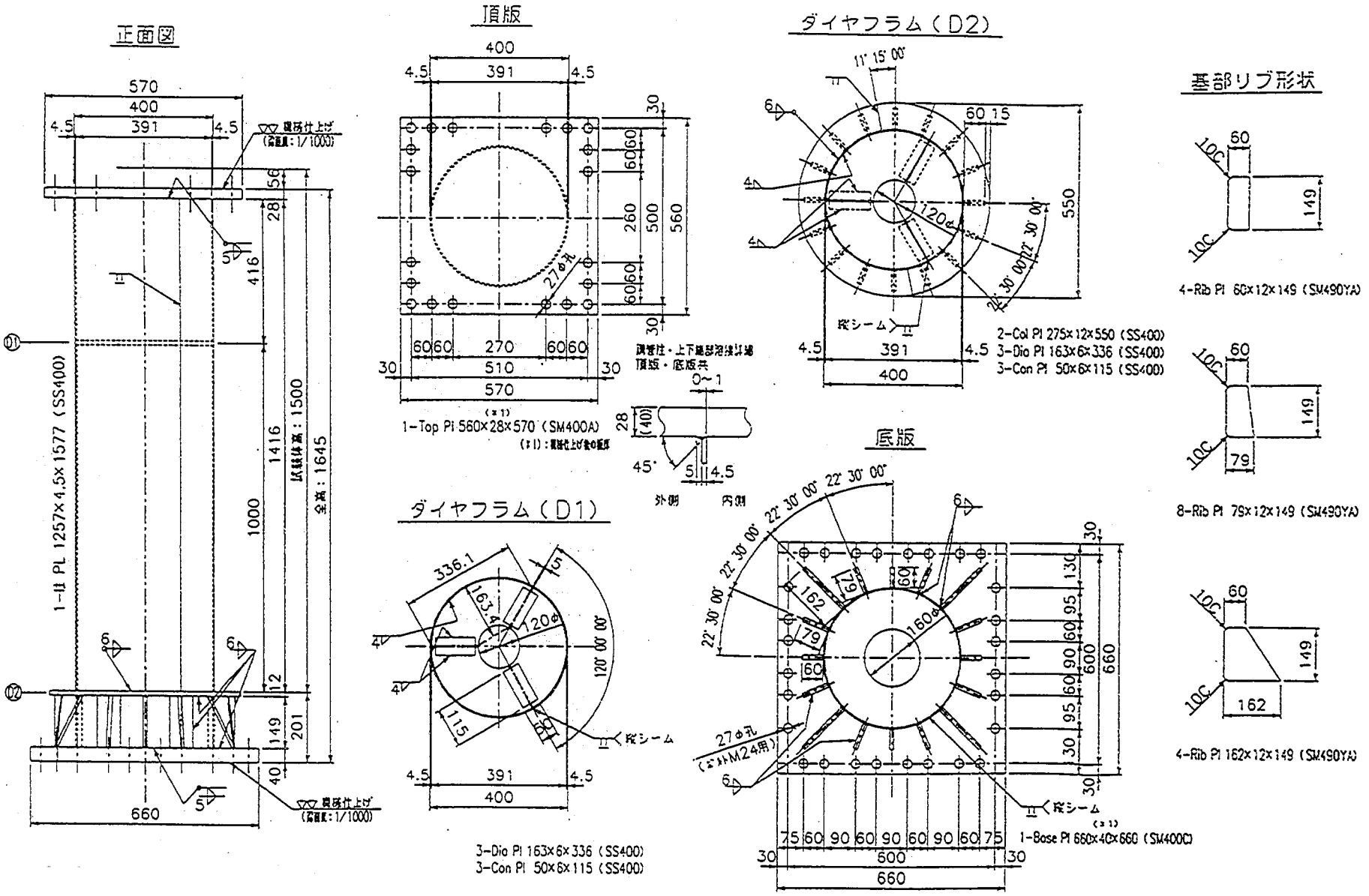


図-2.1.2(3)　円形断面供試体No.8,9（φ400×t4.5×1500）

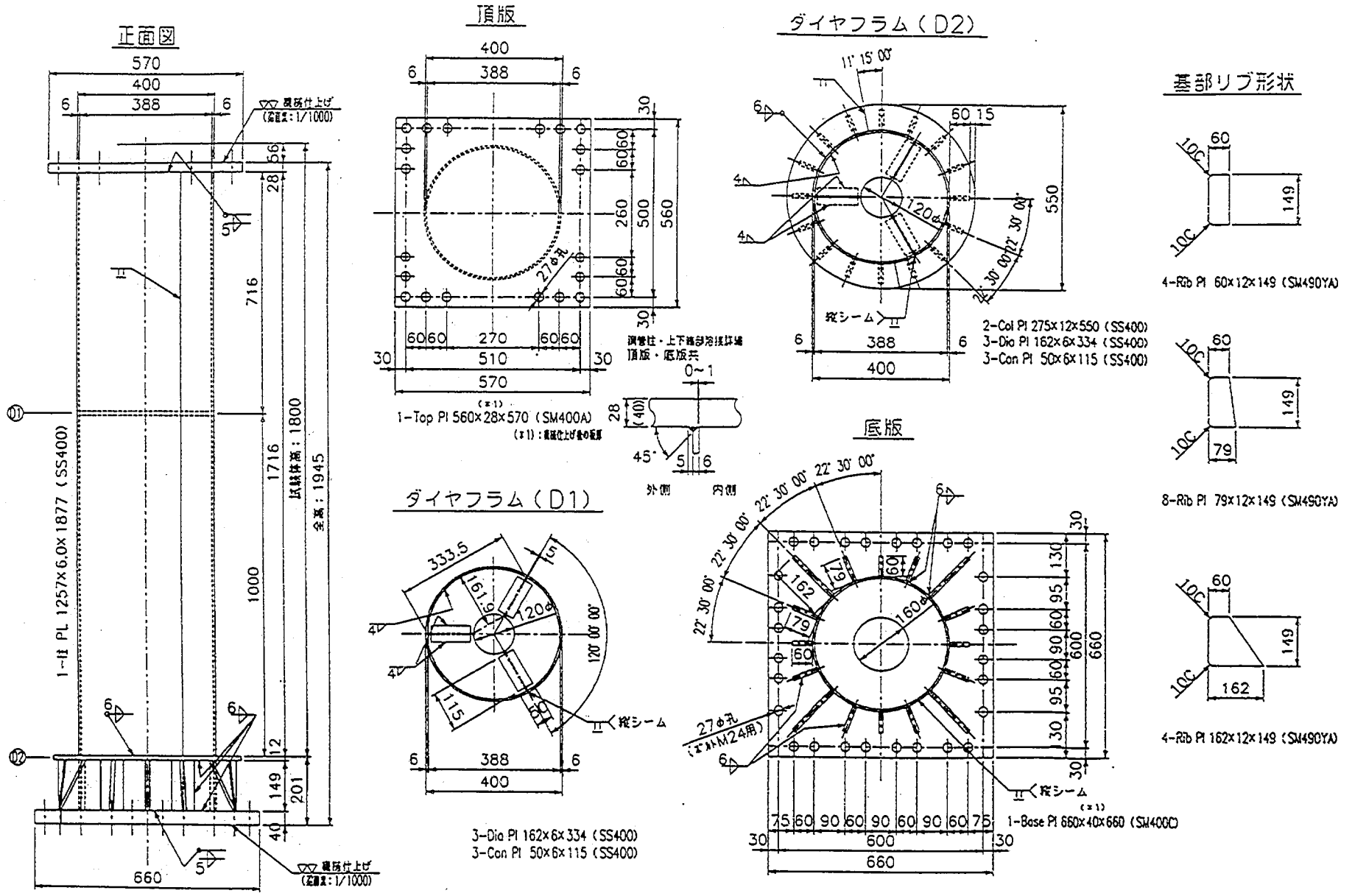


図-2.1.2(4)　円形断面供試体No. 14～17, No. 19, 20 (φ400×t6.0×1800)

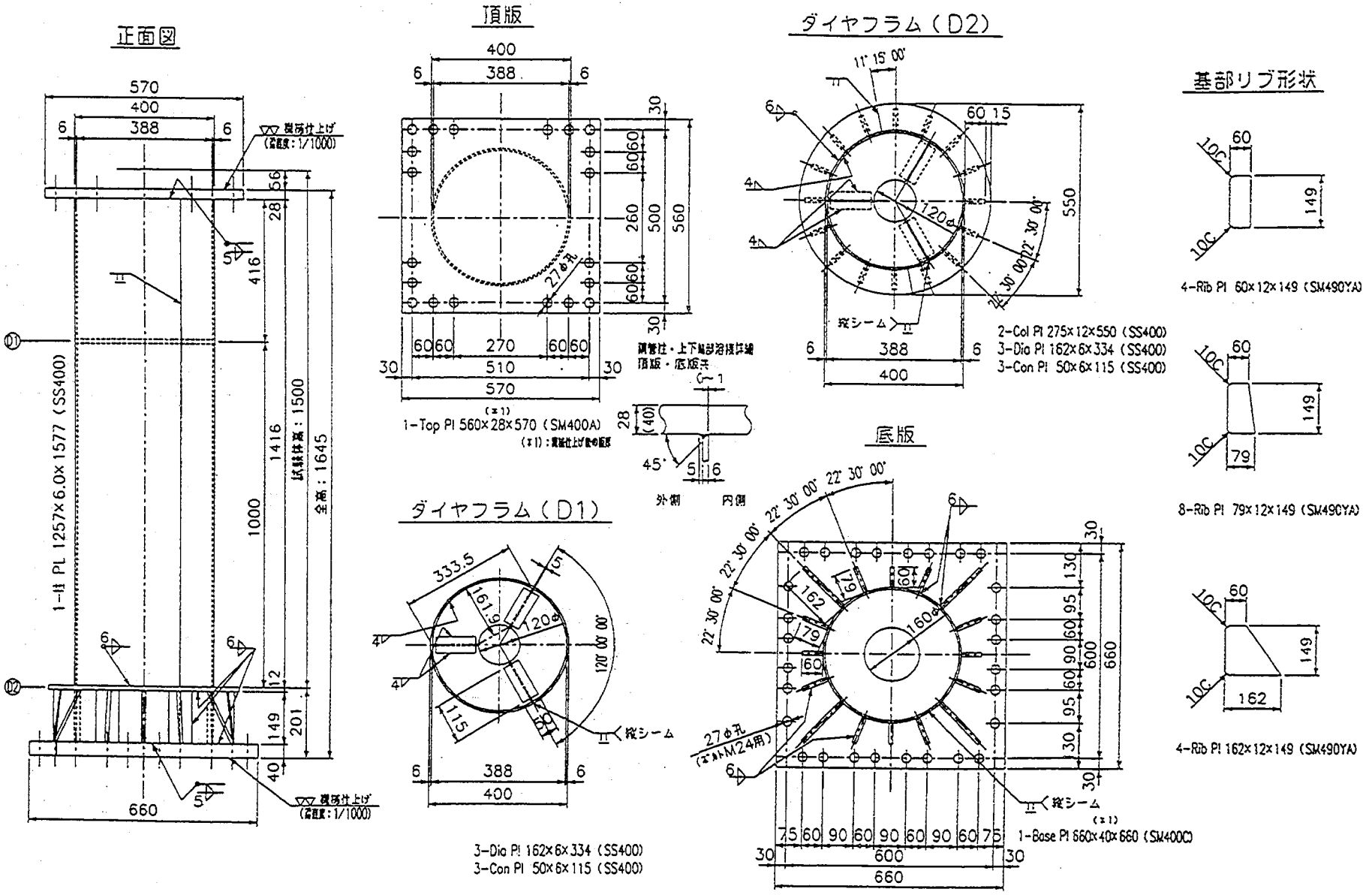


図-2.1.2(5)　円形断面供試体No.18（φ400×t6.0×1500）

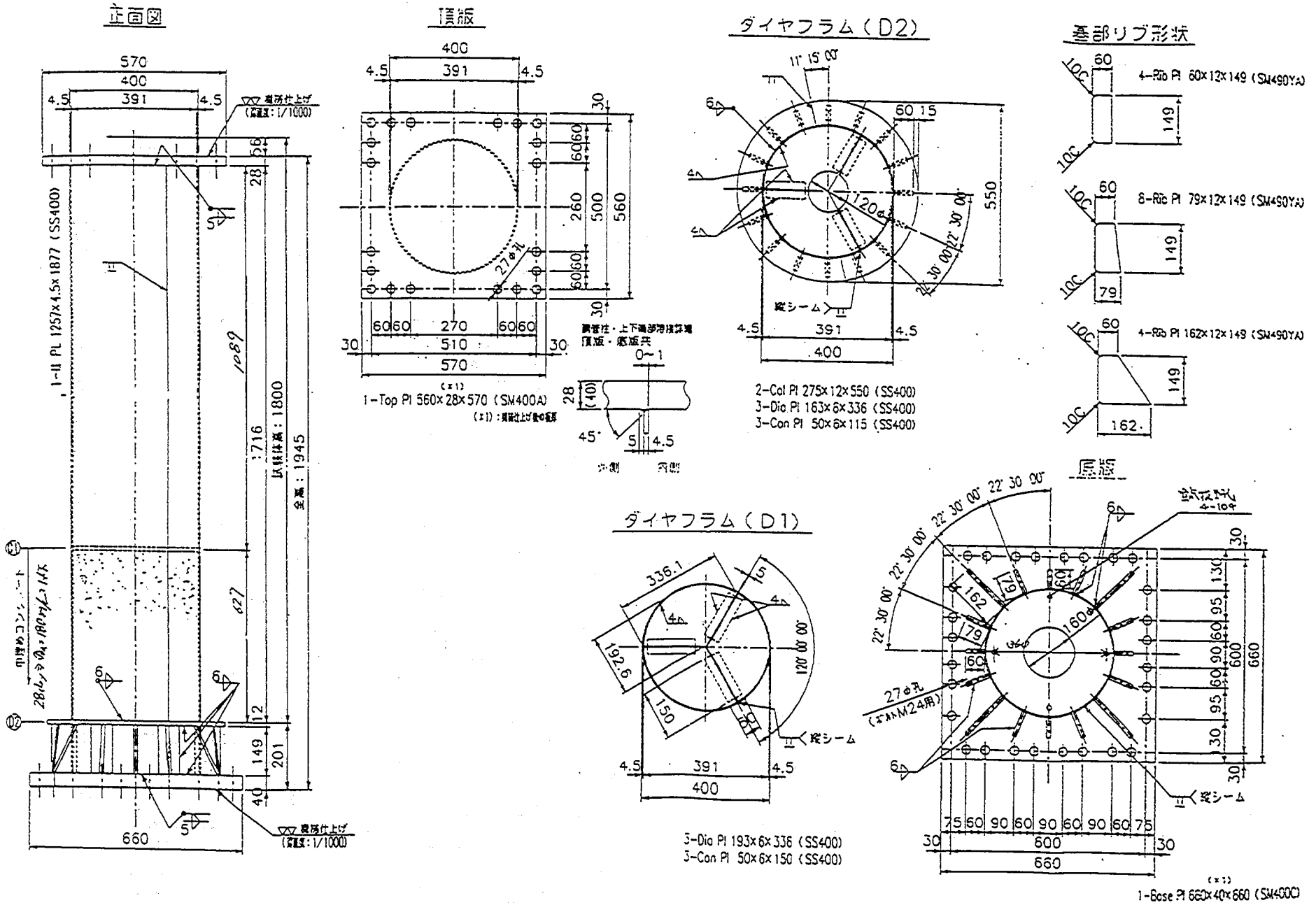
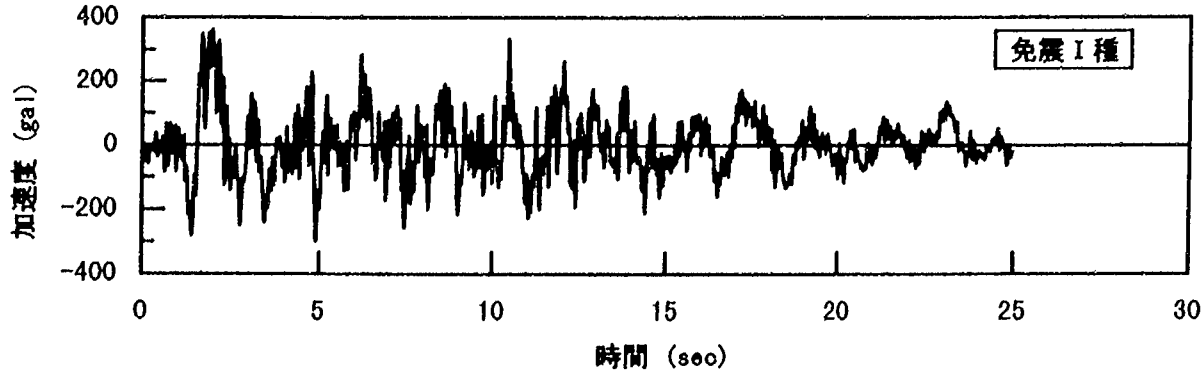
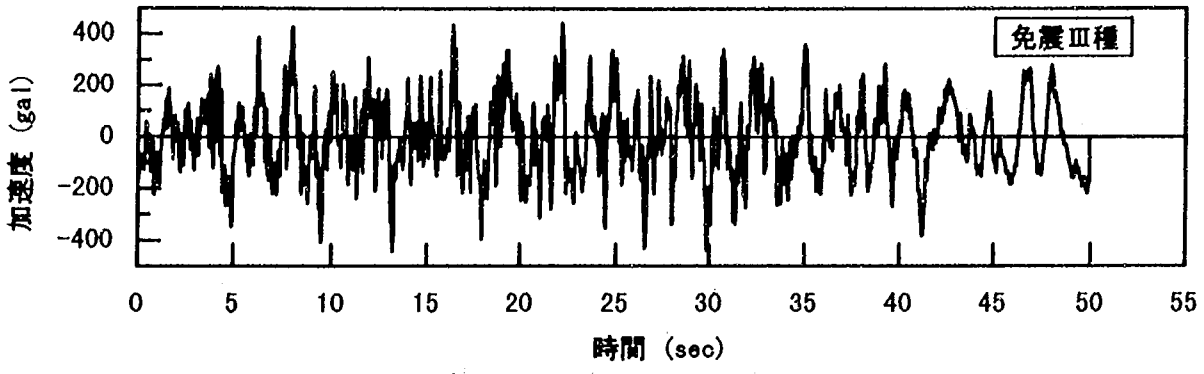


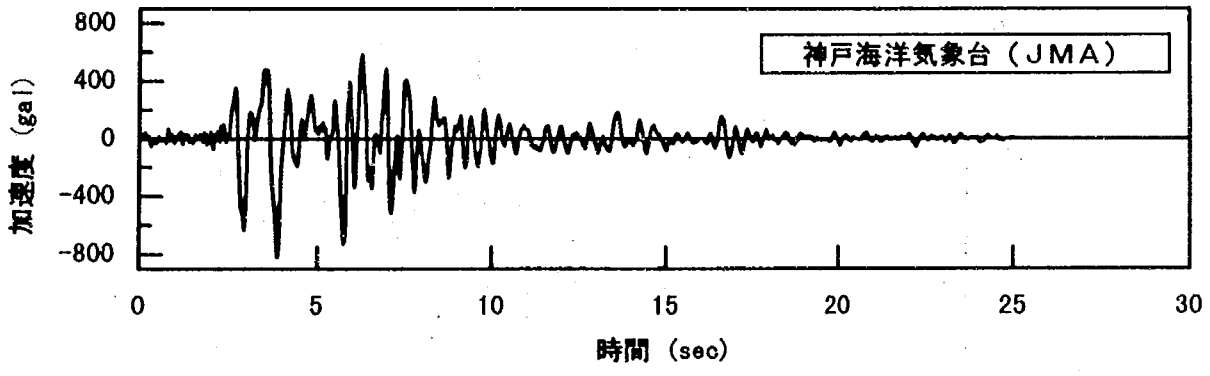
図-2.1.2(6)　円形断面供試体No.21（充填コンクリート，φ400×t4.5×1800）

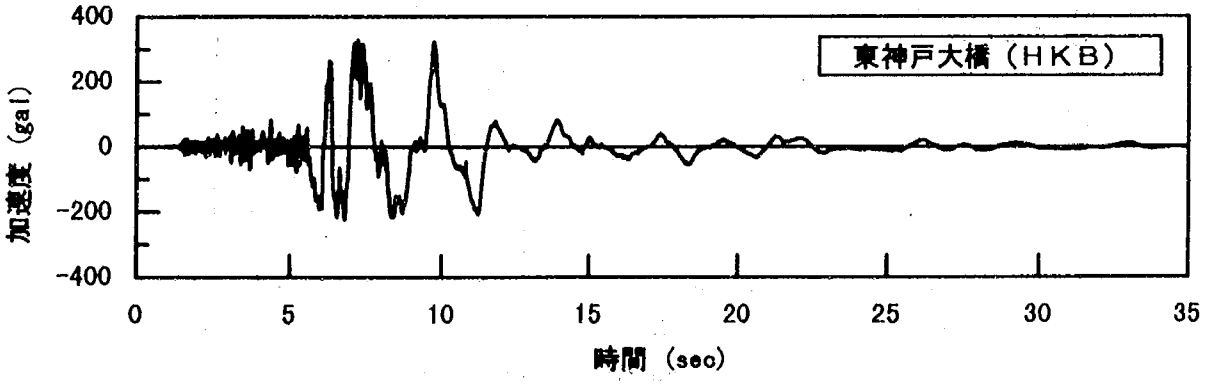
注記：ここに，400φ合せ1シーム溶接とする。





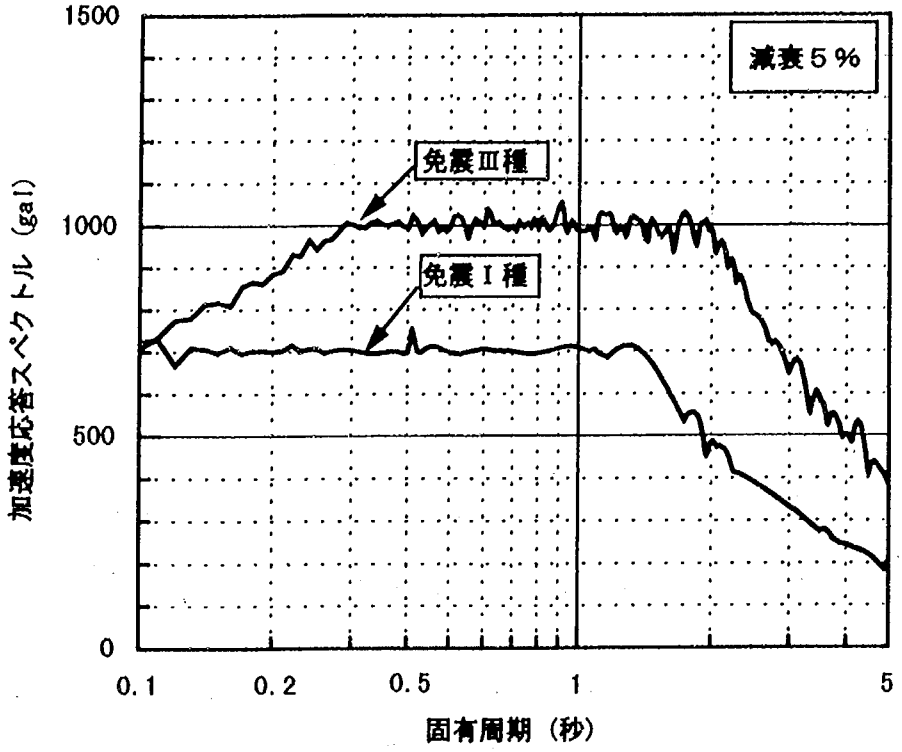
(1) 「免震設計法マニュアル(案)」の時刻歴応答解析用地震波



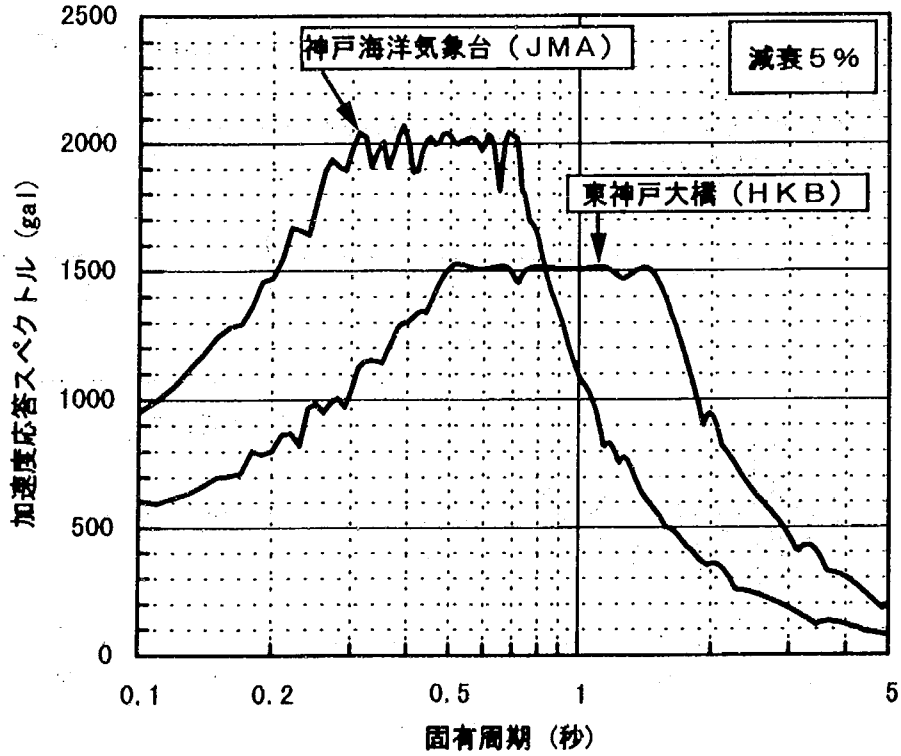


(2) 兵庫県南部地震観測地震波

図-2.3.1 入力地震波



(1) 「免震設計法マニュアル(案)」の時刻歴応答解析用地震波



(2) 兵庫県南部地震観測地震波

図-2.3.2 加速度応答スペクトル

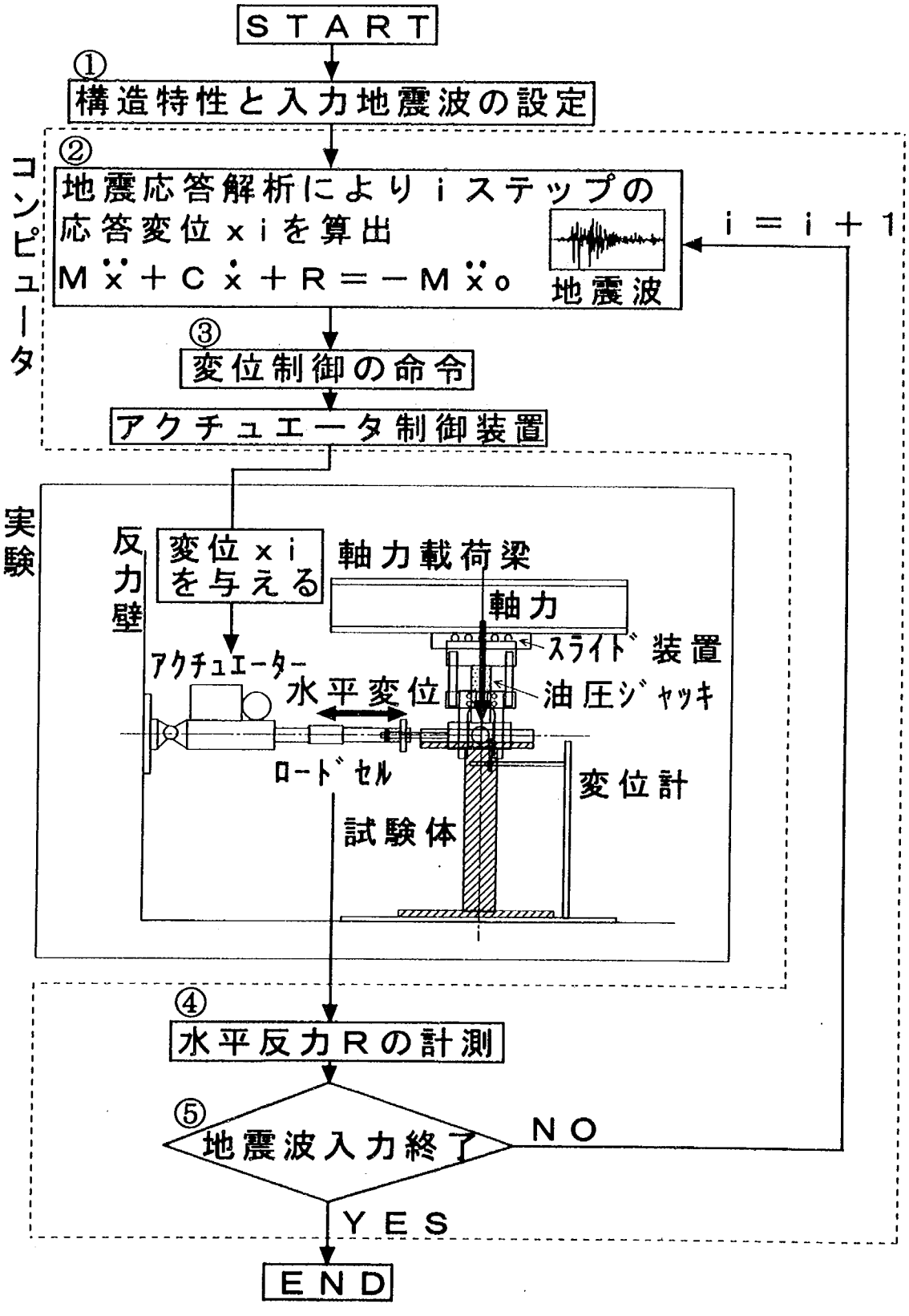


図-2.4.1　ハイブリッド地震応答実験の手順

表-2.4.1　ハイブリッド地震応答実験に用いる相似則

要素	次元	矩形断面 実橋／試験体	円形断面 実橋／試験体
長さ 質量 時間	L M T	S S^3 S	S S^2 $S^{1/2}$
応力 速度 加速度 力 剛性	$ML^{-1}T^{-2}$ LT^{-1} LT^{-2} MLT^{-2} MT^{-2}	1 1 1／S S^2 S	1 $S^{1/2}$ 1 S^2 S

(備考)各断面とも数字が白抜きになっている３要素の比を定めて、
他の要素の比を算出した。

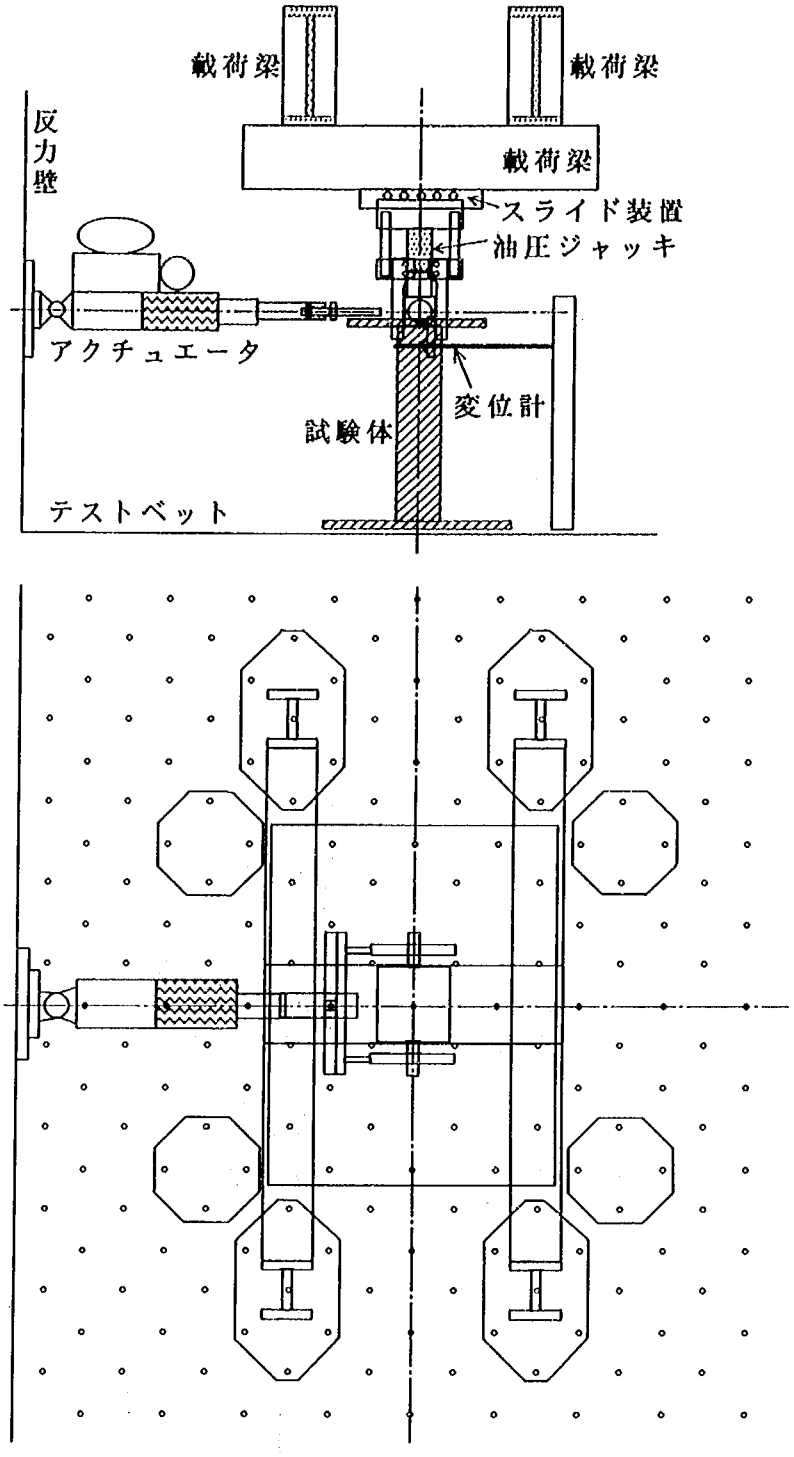
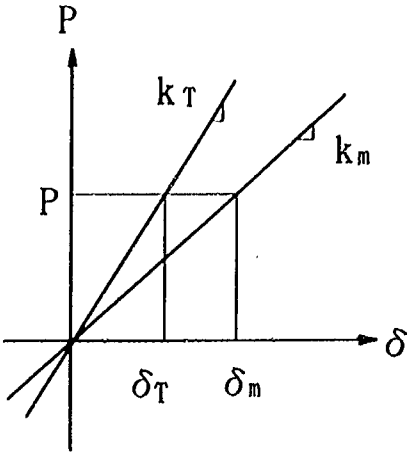


図-2.5.1　実験装置



$$\delta_T = \delta_m - P\left(\frac{1}{k_m} - \frac{1}{k_T}\right)$$

図-2.6.2　供試体基部の回転補正方法

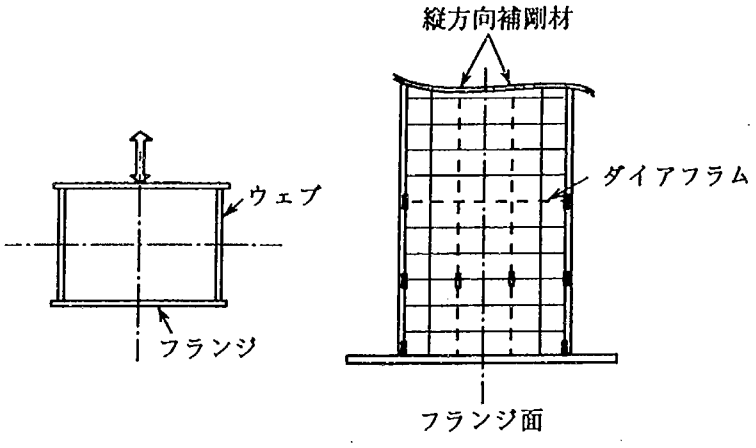


図-2.6.3(1)　矩形断面供試体の歪み計測位置

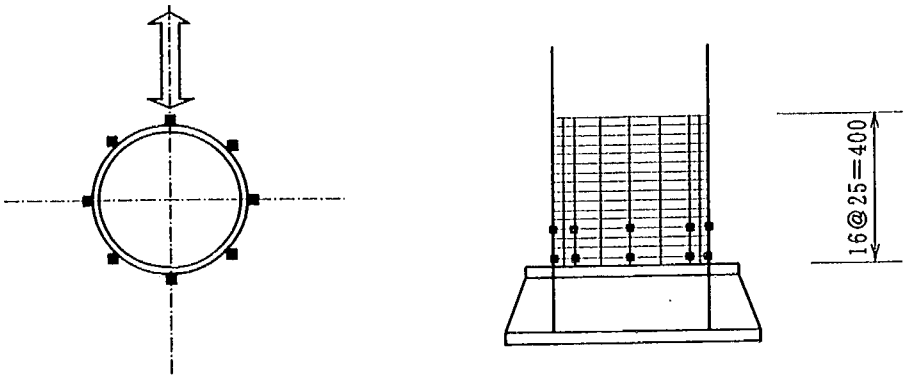


図-2.6.3(2)　円形断面供試体の歪み計測位置

実　験　結　果

表-3.1.1(1)　矩形断面試験体の鋼材引張試験結果

試験体	鋼種	公称板厚 (mm)		板厚 (mm)	上降伏点 (kgf/cm^2)	下降伏点 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)	破断伸び (%)
No.1 No.2 No.4 No.12	SS400	6.0	No.1	--	--	--	--	--
			No.2	6.12	3231	3112	4554	33.4
			No.3	6.05	3473	3191	4655	29.5
			平均	6.09	3352	3152	4605	31.5
No.5 No.7 No.10 No.13	SS400	6.0	No.1	--	--	--	--	--
			No.2	6.05	3312	3165	4671	32.3
			No.3	6.08	3322	3138	4653	31.2
			平均	6.07	3317	3151	4662	31.8
No.3 No.6 No.11 No.23	SS400	6.0	No.1	6.01	3324	3126	4674	29.8
			No.2	6.08	3234	3056	4614	30.9
			No.3	6.00	3375	3112	4673	30.7
			平均	6.03	3310	3098	4654	30.5
No.8 No.9 No.21 No.22	SS400	6.0	No.1	5.98	3402	3126	4932	32.0
			No.2	6.00	3322	3120	4651	31.5
			No.3	6.05	3323	3092	4623	31.2
			平均	6.01	3349	3113	4735	31.6
No.14 No.15 No.16 No.17 No.18 No.19 No.20	SS400	6.0	No.1	5.98	3329	2987	4514	26.0
			No.2	6.08	3116	2946	4449	26.7
			No.3	6.03	3071	2934	4455	26.9
			平均	6.03	3172	2956	4472	26.5
No.22 補剛材	SM570	6.0	No.1	6.60	6556	5745	7273	22.7
			No.2	6.59	6463	5750	7143	22.0
			No.3	6.62	6557	5716	7271	23.3
			平均	6.60	6525	5737	7229	22.7

（備考）ＪＩＳ５号試験片、標点距離50mm

表-3.1.1(2)　円形断面試験体の鋼材引張試験結果

試験体	鋼種	公称板厚 (mm)		板厚 (mm)	上降伏点 (kgf/cm^2)	下降伏点 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)	破断伸び (%)
No. 1	SS400	4.5	No. 1	4.61	3240	3233	4507	36.1
			No. 2	4.62	3308	3279	4460	33.2
			No. 3	4.58	3258	3240	4513	31.6
			平均	4.60	3269	3251	4493	33.6
No. 2	SS400	4.5	No. 1	4.64	3122	3107	4414	32.8
			No. 2	4.65	3185	3178	4382	34.6
			No. 3	4.68	3304	3303	4433	29.9
			平均	4.66	3204	3196	4410	32.4
No. 3	SS400	4.5	No. 1	4.66	—	3658	4516	30.9
			No. 2	4.65	3883	3795	4864	27.1
			No. 3	4.68	3689	3644	4694	26.7
			平均	4.66	3786	3699	4691	28.2
No. 4	SS400	4.5	No. 1	4.67	3403	3356	4505	35.1
			No. 2	4.68	3514	3438	4522	33.1
			No. 3	4.68	3505	3471	4559	30.6
			平均	4.68	3474	3422	4528	32.9
No. 5	SS400	4.5	No. 1	4.74	3309	3275	4404	31.0
			No. 2	4.78	3370	3307	4425	31.5
			No. 3	4.81	3429	3341	4448	30.3
			平均	4.78	3369	3307	4426	30.9
No. 6	SS400	4.5	No. 1	4.58	3571	3495	4586	33.2
			No. 2	4.58	3628	3501	4583	31.6
			No. 3	4.58	3698	3553	4642	33.2
			平均	4.58	3632	3516	4604	32.7
No. 7	SS400	4.5	No. 1	4.64	3537	3448	4550	32.5
			No. 2	4.62	3456	3432	4544	29.1
			No. 3	4.61	3479	3467	4594	30.6
			平均	4.62	3491	3449	4563	30.7
No. 8	SS400	4.5	No. 1	4.59	3271	3183	4381	34.4
			No. 2	4.59	3152	3124	4369	33.6
			No. 3	4.59	3154	3153	4396	34.4
			平均	4.59	3192	3153	4382	34.1
No. 9	SS400	4.5	No. 1	4.60	3182	3162	4362	33.8
			No. 2	4.60	3124	3077	4362	35.4
			No. 3	4.59	3079	3079	4349	32.5
			平均	4.60	3128	3106	4358	33.9
No. 10	SS400	4.5	No. 1	4.84	3140	3083	4292	34.0
			No. 2	4.71	3185	3160	4335	34.0
			No. 3	4.84	3153	3118	4238	34.4
			平均	4.80	3159	3121	4288	34.1
No. 11	SS400	4.5	No. 1	4.64	3181	3065	4285	32.1
			No. 2	4.64	3107	3056	4267	34.0
			No. 3	4.62	3123	3119	4313	34.4
			平均	4.63	3137	3080	4289	32.9

試験体	鋼種	公称板厚 (mm)		板厚 (mm)	上降伏点 (kgf/cm^2)	下降伏点 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)	破断伸び (%)
No. 12	SS400	4.5	No. 1	4.69	3610	3523	4618	35.0
			No. 2	4.71	3549	3544	4619	29.4
			No. 3	4.71	3683	3596	4631	31.3
			平均	4.71	3614	3554	4623	31.9
No. 13	SS400	4.5	No. 1	4.69	3716	3619	4706	29.4
			No. 2	4.85	3529	3470	4493	28.4
			No. 3	4.75	3524	3510	4512	29.9
			平均	4.76	3589	3533	4570	29.2
No. 14	SS400	6.0	No. 1	6.16	3105	3050	4253	33.6
			No. 2	6.13	3243	3122	4238	33.4
			No. 3	6.13	3101	3052	4247	33.4
			平均	6.14	3149	3074	4246	33.5
No. 15	SS400	6.0	No. 1	6.05	3048	3016	4353	36.3
			No. 2	6.07	3167	3128	4252	33.7
			No. 3	6.06	3134	3057	4230	35.7
			平均	6.06	3117	3067	4279	35.2
No. 16	SS400	6.0	No. 1	6.06	3093	3062	4277	35.6
			No. 2	6.04	3157	3092	4292	34.1
			No. 3	6.07	3249	3187	4299	33.7
			平均	6.05	3166	3113	4289	34.5
No. 17	SS400	6.0	No. 1	6.14	3277	3270	4373	34.5
			No. 2	6.17	3300	3229	4309	33.5
			No. 3	6.15	3279	3245	4334	32.0
			平均	6.15	3285	3248	4338	33.3
No. 18	SS400	6.0	No. 1	6.09	3100	3088	4239	34.1
			No. 2	6.11	3258	3143	4238	33.7
			No. 3	6.08	3044	2986	4227	36.1
			平均	6.09	3134	3072	4235	34.6
No. 19	SS400	6.0	No. 1	6.10	3195	3125	4271	33.1
			No. 2	6.10	3159	3149	4277	32.3
			No. 3	6.10	3315	3170	4301	33.0
			平均	6.10	3223	3148	4283	32.8
No. 20	SS400	6.0	No. 1	6.10	3226	3154	4304	32.6
			No. 2	6.10	—	3192	4292	32.6
			No. 3	6.10	3227	3218	4287	32.9
			平均	6.10	3226	3188	4294	32.7
No. 21	SS400	4.5	No. 1	4.66	3762	3643	4663	31.1
			No. 2	4.65	3692	3614	4686	33.9
			No. 3	4.64	3769	3666	4672	29.7
			平均	4.65	3741	3641	4674	31.6

（備考）ＪＩＳ５号試験片、標点距離50mm

表-3.1.2(1)　矩形断面試験体の充填コンクリートの標準水中養生の圧縮強度、引張強度試験結果

No.23 材令７日	圧縮強度 (kgf/cm²)	弾性係数 (kgf/cm²)	ポアソン比	引張強度 (kgf/cm²)
Ｎｏ．１	186	1.86×10^5	0.204	15.1
Ｎｏ．２	202	2.14×10^5	0.230	14.0
Ｎｏ．３	180	1.80×10^5	0.157	15.3
平均	189	1.93×10^5	0.197	14.8
材令28日	圧縮強度 (kgf/cm²)	弾性係数 (kgf/cm²)	ポアソン比	引張強度 (kgf/cm²)
Ｎｏ．１	218	1.90×10^5	0.165	13.9
Ｎｏ．２	164	2.08×10^5	0.186	18.9
Ｎｏ．３	190	1.92×10^5	0.213	18.1
平均	191	1.97×10^5	0.188	16.9

表-3.1.2(2)　矩形断面試験体の充填コンクリートの現場封緘養生の圧縮強度、引張強度試験結果

No.23 実験当日	圧縮強度 (kgf/cm²)	弾性係数 (kgf/cm²)	ポアソン比	引張強度 (kgf/cm²)
Ｎｏ．１	182	1.87×10^5	0.183	15.9
Ｎｏ．２	169	1.87×10^5	0.197	15.7
Ｎｏ．３	180	1.63×10^5	0.186	14.4
平均	177	1.79×10^5	0.189	15.4

表-3.1.2(3)　円形断面試験体の充填コンクリートのスランプ試験、空気量試験結果

スランプ	16.5 cm
空気量	4.6 %

コンクリート温度25℃、外気温22℃

表-3.1.2(4)　円形断面試験体の充填コンクリートの標準水中養生の圧縮強度、引張強度試験結果

材令7日	圧縮強度 (kgf/cm^2)	弾性係数 (kgf/cm^2)	ポアソン比	引張強度 (kgf/cm^2)
No. 1	176	2.24×10^5	0.189	17.4
No. 2	180	2.29×10^5	0.188	15.7
No. 3	195	2.27×10^5	0.176	20.0
平均	184	2.27×10^5	0.184	17.7
材令28日	圧縮強度 (kgf/cm^2)	弾性係数 (kgf/cm^2)	ポアソン比	引張強度 (kgf/cm^2)
No. 1	265	2.73×10^5	0.203	24.9
No. 2	265	2.77×10^5	0.170	27.9
No. 3	273	2.73×10^5	0.180	23.6
平均	268	2.74×10^5	0.185	25.5

表-3.1.2(5)　円形断面試験体の充填コンクリートの現場封緘養生の圧縮強度、引張強度試験結果

No.21 実験当日	圧縮強度 (kgf/cm^2)	弾性係数 (kgf/cm^2)	ポアソン比	引張強度 (kgf/cm^2)
No. 1	304	3.41×10^5	0.179	29.1
No. 2	299	2.65×10^5	0.191	24.8
No. 3	293	2.76×10^5	0.190	26.6
平均	299	2.94×10^5	0.186	26.8

表-3.1(1)　矩形断面試験体一覧表

		地震波	設計水平震度	地震波振幅倍率	構造パラメータ				軸力比	軸力	降伏荷重	降伏変位	実橋の固有周期	降伏応力	柱高さ	備考
					R_R	$\overline{\lambda}$	γ/γ_{req}	γ/γ^*	N/N_y	N tonf	P_y tonf	δ_y mm	T_p(sec)	σ_y kgf/cm²	h (mm)	
1	基本1	単調	---	-----	0.485	0.377	0.98	0.67	0.152	48.3	14.5	10.7	--	3152	1847	
2		両振り	---	-----	0.485	0.377	0.98	0.67	0.152	48.3	14.5	10.7	--	3152	1847	
3		片振り	---	-----	0.479	0.373	0.98	0.68	0.152	47.3	14.2	10.7	--	3098	1847	
4		免震Ⅰ種	0.2	1	0.495	0.377	0.97	0.70	0.152	47.3	14.2	10.7	1.07	3152	1847	
5		免震Ⅰ種	0.2	1.5	0.491	0.376	0.97	0.69	0.152	47.5	14.3	10.6	1.21	3151	1847	
6		免震Ⅲ種	0.3	1	0.479	0.373	0.98	0.68	0.113	35.3	14.9	10.9	1.21	3098	1847	
7		免震Ⅲ種	0.3	1.5	0.489	0.376	0.98	0.69	0.113	35.5	14.9	11.1	0.93	3151	1847	
8		免震Ⅰ種	0.2	1	0.481	0.284	0.98	0.67	0.191	59.8	18.0	6.10	0.81	3113	1396	
9		免震Ⅰ種	0.2	1.5	0.481	0.284	0.98	0.67	0.190	59.7	18.0	6.10	0.81	3113	1396	
10		JMA	0.2	1	0.487	0.376	0.98	0.69	0.152	47.8	14.4	10.6	1.07	3151	1847	
11		JMA	0.2	1.5	0.480	0.373	0.98	0.68	0.155	47.1	14.1	10.5	1.06	3098	1847	
12		HKB	0.3	1	0.488	0.377	0.98	0.68	0.113	35.8	15.1	11.2	0.93	3152	1847	
13		HKB	0.3	1.5	0.491	0.376	0.97	0.69	0.113	35.4	14.9	11.1	0.93	3151	1847	
14	基本2	単調	----	------	0.353	0.362	10.76	3.49	0.176	41.4	10.2	7.08	------	2956	1388	
15		両振り	----	------	0.355	0.362	10.68	3.53	0.176	41.3	10.2	7.07	------	2956	1388	
16		免震Ⅰ種	0.2	1	0.355	0.362	10.73	3.54	0.176	41.2	10.2	7.07	0.96	2956	1388	
17		JMA	0.2	1	0.355	0.362	10.70	3.54	0.176	41.2	10.2	7.07	0.96	2956	1388	
18		JMA	0.2	1.5	0.354	0.362	10.76	3.51	0.176	41.4	10.2	7.07	0.96	2956	1388	
19		HKB	0.3	1	0.354	0.363	10.75	3.51	0.131	30.8	10.8	7.47	0.83	2956	1388	
20		JMA	0.2	1	0.353	0.362	2.30	0.83	0.176	41.5	10.3	7.08	0.96	2956	1388	横リブ補強無し
21		JMA	0.2	1	0.262	0.372	32.27	3.18	0.174	32.1	7.97	5.18	0.82	3113	972	$R_R=0.3$
22		JMA	0.2	1	0.366	0.374	10.77	3.48	0.176	43.8	10.9	7.58	0.99	3113	1388	基本2＋ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ補剛材(SM570)
23		JMA	0.2	1	0.481	0.382	4.39	3.09	0.146	49.4	14.8	8.53	0.96	3098	1847	基本1＋3γ^*＋ｺﾝｸﾘｰﾄ充填($h_c=431$)

表-3.1(2)　円形断面試験体一覧表

		地震波	設計水平震度	地震波振幅倍率	構造パラメータ				軸力 N tonf	降伏荷重 P_y tonf	降伏変位 δ_y mm	実橋の固有周期 T_p(sec)	降伏応力 σ_y kg/cm²	高さ h mm	備考
					R_f	R/t	$\overline{\lambda}$	N/N_y							
1	基本1	単調	---	------	0.111	43.4	0.323	0.154	28.7	8.519	7.74	---	3250	1800	
2		両振り	---	------	0.108	42.9	0.320	0.154	28.5	8.451	7.62	---	3196	1800	
3		片振り	---	------	0.125	42.9	0.344	0.154	32.9	9.822	8.81	---	3699	1800	
4		免震Ⅰ種	0.2	1	0.115	42.8	0.331	0.154	30.7	9.126	8.14	0.94	3422	1800	
5		免震Ⅰ種	0.2	1.2	0.109	41.8	0.326	0.154	30.2	8.982	7.88	0.92	3307	1800	
6		免震Ⅲ種	0.3	1	0.121	43.7	0.335	0.112	22.3	9.654	8.79	0.81	3516	1800	
7		免震Ⅲ種	0.3	1.37	0.117	43.3	0.332	0.112	22.1	9.562	8.62	0.80	3449	1800	
8		免震Ⅰ種	0.2	1	0.108	43.6	0.265	0.180	32.3	9.580	5.25	0.75	3153	1500	
9		免震Ⅰ種	0.2	1.2	0.106	43.5	0.263	0.180	31.9	9.517	5.16	0.74	3106	1500	
10		JMA	0.2	1	0.102	41.7	0.316	0.155	28.7	8.517	7.42	0.90	3121	1800	
11		JMA	0.2	1.5	0.105	43.2	0.314	0.155	27.5	8.153	7.31	0.89	3080	1800	
12		HKB	0.3	1	0.119	42.5	0.338	0.111	23.1	9.992	8.89	0.81	3554	1800	
13		HKB	0.3	1.5	0.117	42.0	0.337	0.111	23.3	10.06	8.84	0.81	3533	1800	
14	基本2	単調	---	------	0.079	32.6	0.314	0.181	42.3	10.35	7.07	---	3074	1800	
15		両振り	---	------	0.080	33.0	0.314	0.181	41.6	10.15	7.07	---	3067	1800	
16		免震Ⅰ種	0.2	1	0.081	33.1	0.317	0.181	42.2	10.31	7.17	0.97	3113	1800	
17		免震Ⅲ種	0.3	1	0.083	32.5	0.324	0.130	32.2	11.59	7.94	0.84	3248	1800	
18		免震Ⅰ種	0.2	1	0.079	32.8	0.262	0.210	48.6	11.81	4.92	0.81	3072	1500	
19		JMA	0.2	1	0.081	32.8	0.318	0.181	43.0	10.51	7.25	0.98	3148	1800	
20		HKB	0.3	1	0.082	32.8	0.321	0.130	31.4	11.27	7.80	0.84	3189	1800	
21		JMA	0.2	1	0.123	43.0	0.341	0.154	32.4	14.35	9.69	0.84	3641	1800	コンクリート充填

表-3.2.1　矩形断面の変位制御実験結果一覧表

試験体	R_R	$\bar{\lambda}$	γ / γ^*	P_{max}/P_y	δ_m/δ_y
No. 1	0.485	0.377	0.65	1.33	2.61
No. 2	0.485	0.377	0.65	1.45	2.26
No. 3	0.479	0.373	0.65	1.43	2.36
No. 14	0.353	0.362	3.36	1.68	6.26
No. 15	0.355	0.362	3.39	1.82	5.26

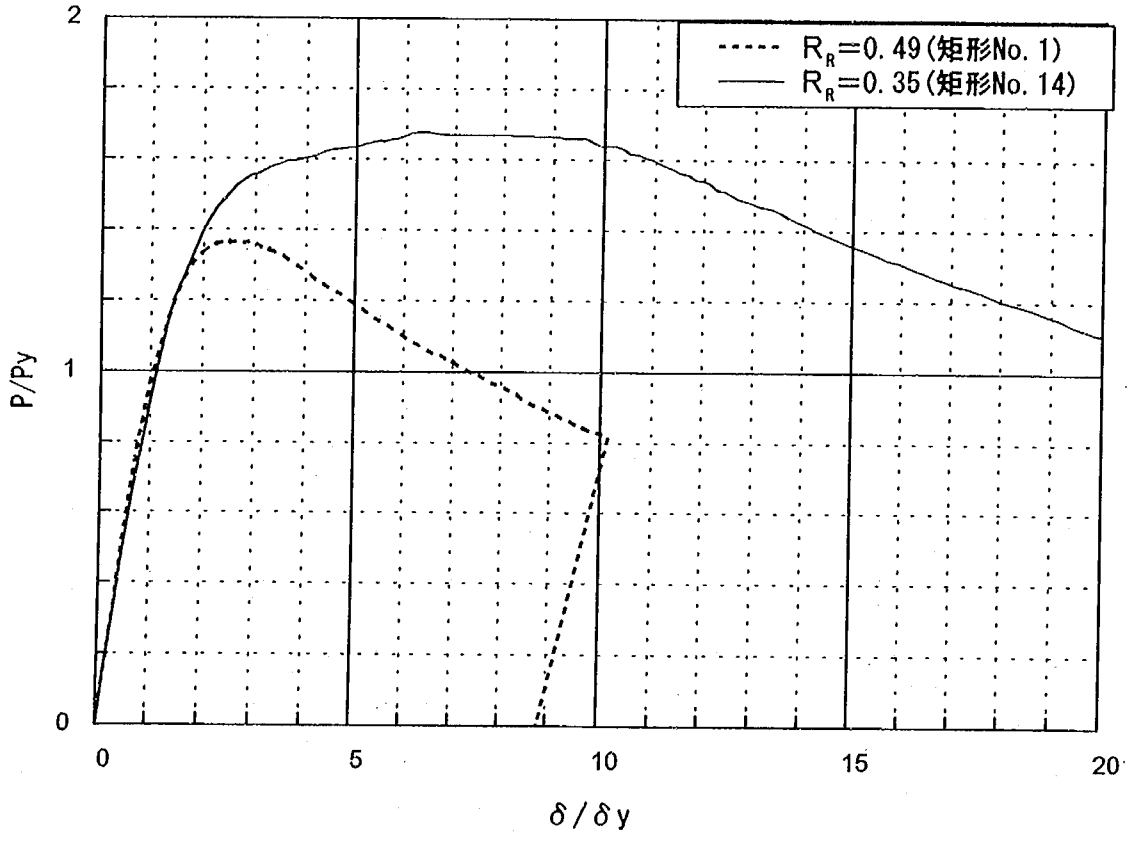
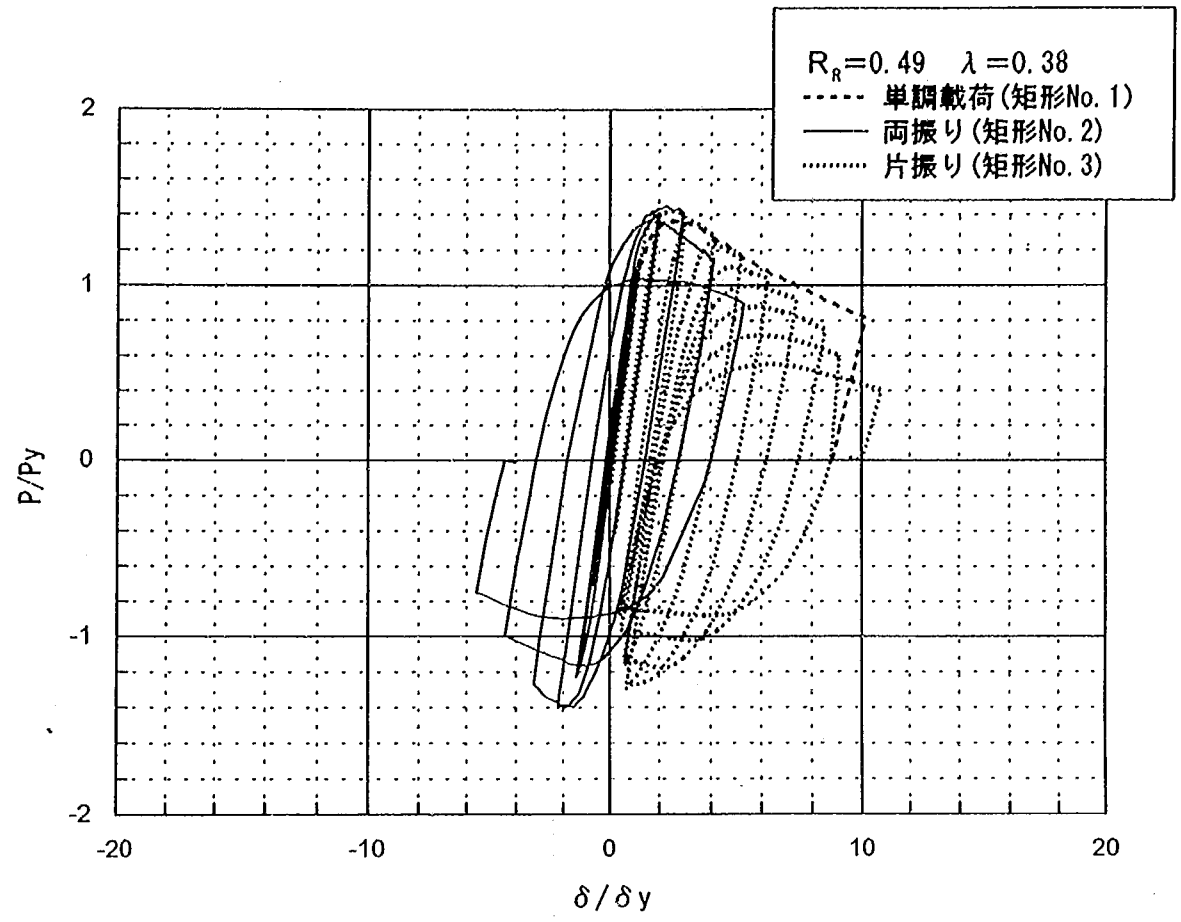


図-3.2.1(1)　矩形断面の単調載荷試験結果の比較



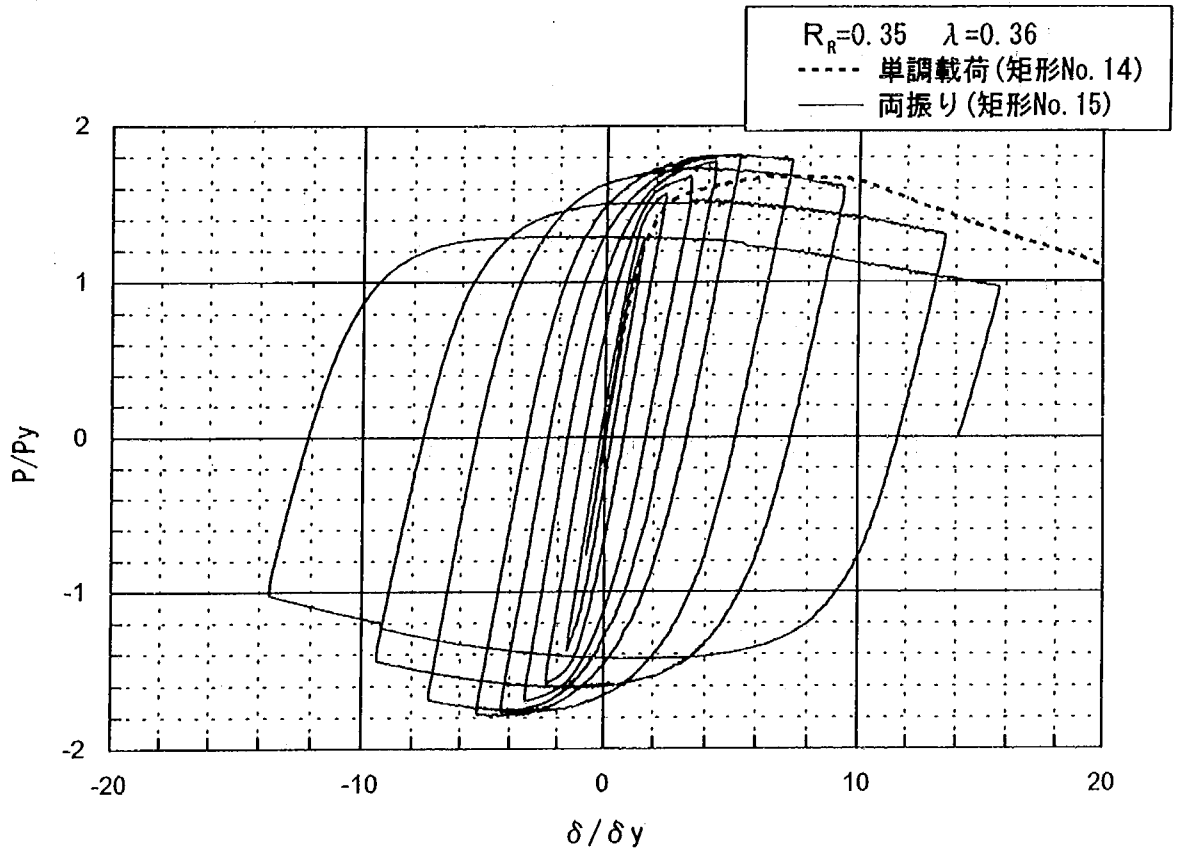


図-3.2.1(2)　矩形断面の単調載荷と繰返し載荷の比較

表-3.2.2　円形断面の変位制御実験結果一覧表

試験体	R_t	$\bar{\lambda}$	P_{max}/P_y	δ_m/δ_y
No. 1	0.111	0.323	1.35	2.00
No. 2	0.108	0.320	1.46	1.90
No. 3	0.125	0.344	1.26	2.01
No. 14	0.079	0.314	1.51	3.02
No. 15	0.080	0.314	1.56	3.21

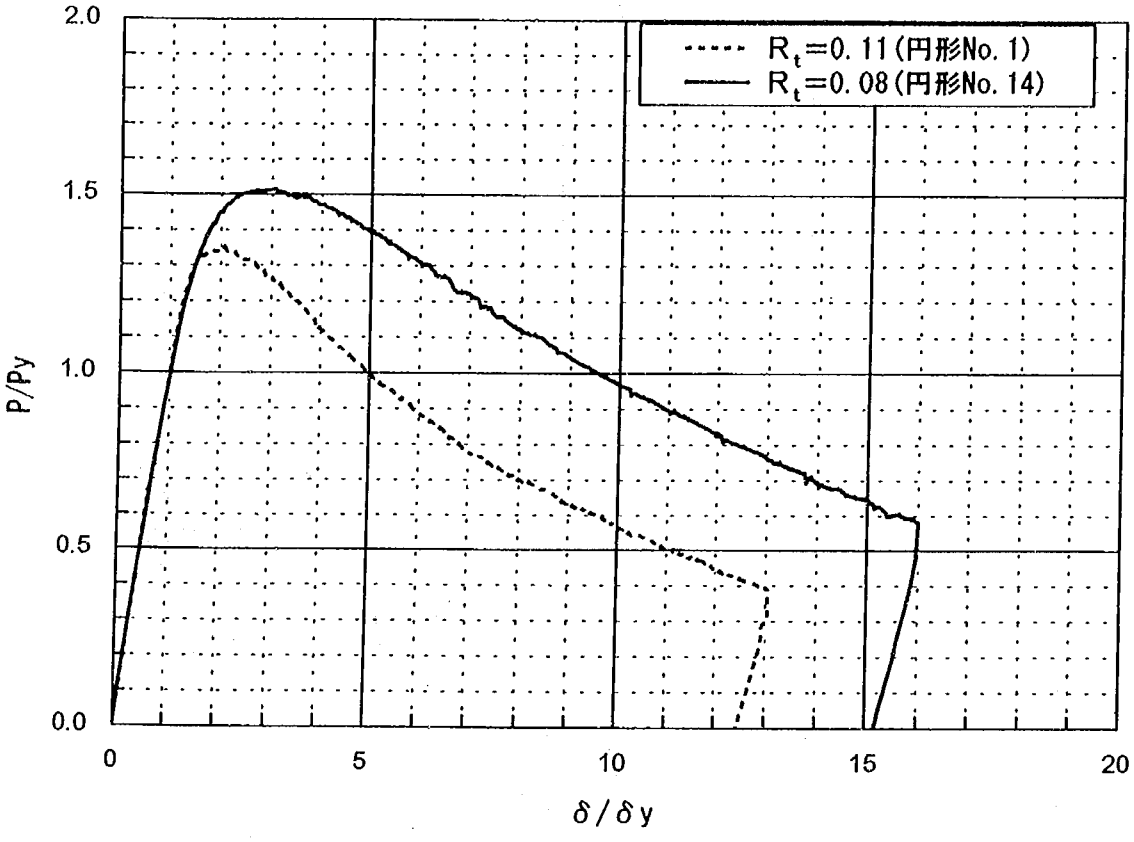
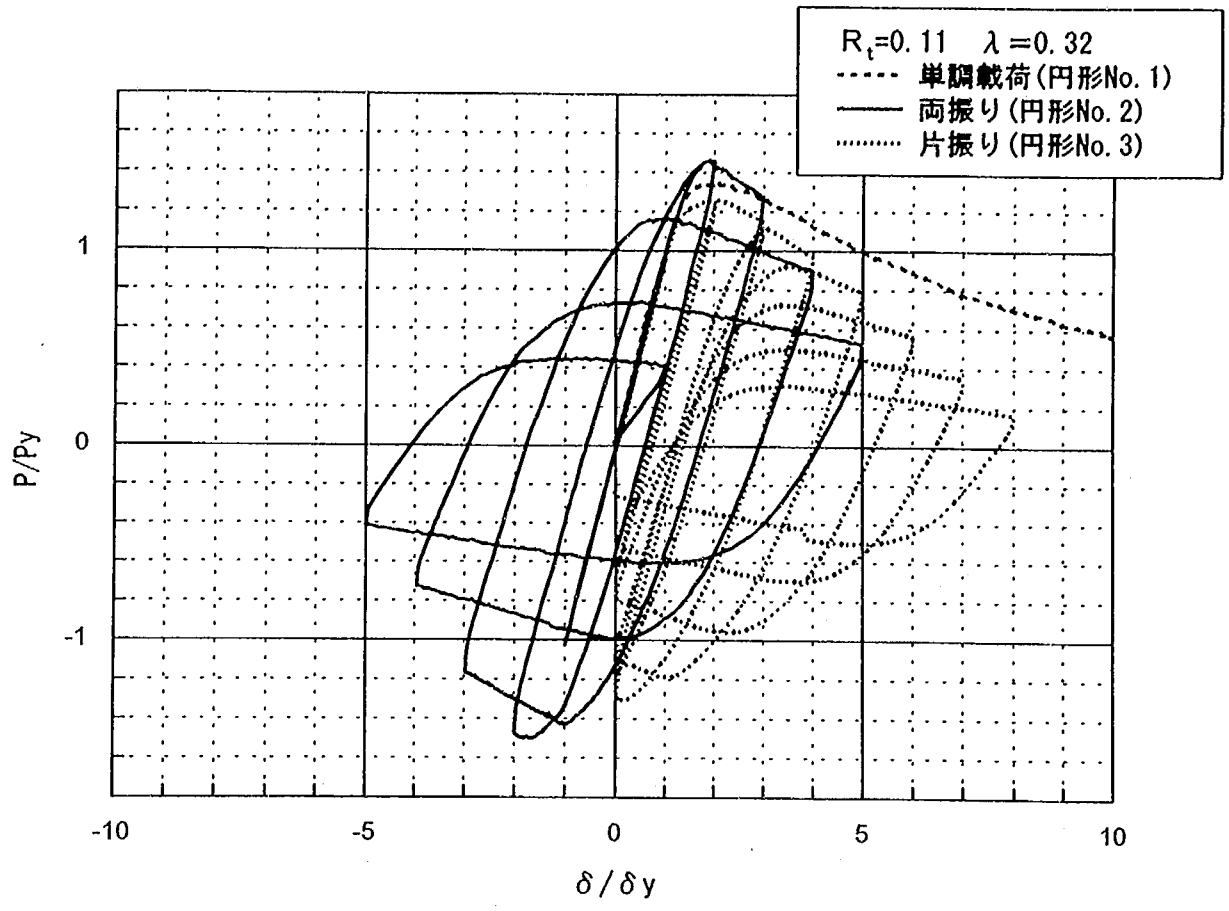


図-3.2.2(1)　円形断面の単調載荷試験結果の比較



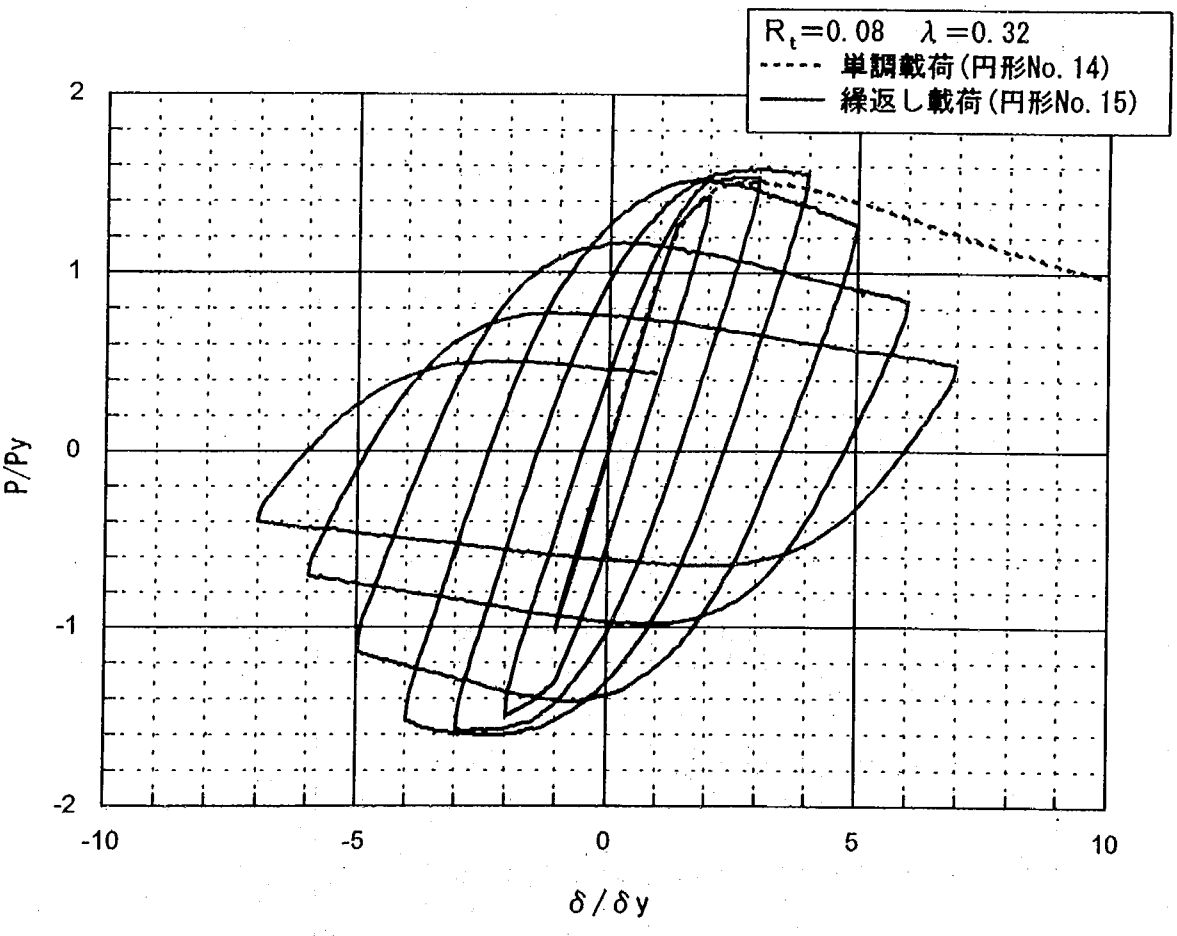


図-3.2.2(2)　円形断面の単調載荷と繰返し載荷の比較

表-3.3.1　矩形断面のハイブリッド地震応答実験結果一覧表（実橋レベル）

	R_R	$\bar{\lambda}$	入力地震波	倍率	P_{max} (tonf)	P_{max}/P_y	P_{min} (tonf)	P_{min}/P_y	δ_{max} (cm)	δ_{max}/δ_y	δ_{min} (cm)	δ_{min}/δ_y	δ_R (cm)	δ_R/δ_y	$\lvert\delta_R\rvert/h$
4	0.495	0.377	免震Ⅰ種	1.0	1263.1	1.39	-1324.5	-1.46	8.7	1.02	-22.5	-2.64	-5.47	-0.64	1/ 270.2
5	0.491	0.376	免震Ⅰ種	1.5	1170.8	1.28	-1313.8	-1.44	10.7	1.26	-59.3	-6.98	-43.53	-5.13	1/ 33.9
6	0.479	0.373	免震Ⅲ種	1.0	1338.5	1.41	-1338.1	-1.41	17.3	2.00	-16.1	-1.85	0.39	0.05	1/3846.2
7	0.489	0.376	免震Ⅲ種	1.5	1335.6	1.40	-1337.6	-1.40	44.0	4.95	-27.3	-3.07	6.67	0.75	1/ 221.2
8	0.481	0.284	免震Ⅰ種	1.0	1642.3	1.42	-1729.8	-1.50	5.5	1.13	-15.1	-3.09	-4.14	-0.85	1/ 269.5
9	0.481	0.284	免震Ⅰ種	1.5	1476.2	1.28	-1796.0	-1.56	8.0	1.64	-56.0	-11.47	-48.48	-9.93	1/ 23.0
10	0.487	0.376	JMA	1.0	1216.3	1.32	-1323.8	-1.44	13.5	1.60	-29.8	-3.51	-12.95	-1.53	1/ 114.0
11	0.480	0.373	JMA	1.5	1311.1	1.45	-1275.4	-1.41	19.9	2.38	-44.9	-5.37	-28.63	-3.42	1/ 51.6
12	0.488	0.377	HKB	1.0	1038.7	1.08	-1319.3	-1.37	10.2	1.15	-23.1	-2.58	-8.04	-0.90	1/ 183.8
13	0.491	0.376	HKB	1.5	1249.9	1.31	-1172.9	-1.39	14.7	1.65	-43.7	-4.93	-24.90	-2.80	1/ 59.3
16	0.355	0.362	免震Ⅰ種	1.0	979.6	1.50	-1069.8	-1.64	7.2	1.27	-22.5	-3.99	-6.49	-1.15	1/ 170.9
17	0.355	0.362	JMA	1.0	1064.0	1.63	-1073.4	-1.64	14.4	2.54	-21.9	-3.87	-6.44	-1.14	1/ 172.4
18	0.354	0.362	JMA	1.5	1134.7	1.73	-1159.7	-1.77	25.1	4.42	-22.2	-3.92	-3.69	-0.65	1/ 301.2
19	0.354	0.363	HKB	1.0	971.7	1.41	-1065.8	-1.55	10.3	1.72	-19.1	-3.20	-7.62	-1.27	1/ 145.8
20	0.353	0.362	JMA	1.0	1048.9	1.60	-1053.3	-1.60	14.2	2.51	-22.9	-4.05	-8.54	-1.51	1/ 129.9
21	0.262	0.372	JMA	1.0	983.0	1.93	-979.9	-1.92	19.0	4.59	-16.5	-3.99	0.80	0.19	1/ 970.9
22	0.366	0.374	JMA	1.0	1179.7	1.69	-1227.2	-1.76	14.0	2.31	-25.0	-4.13	-7.38	-1.22	1/ 150.6
23	0.481	0.382	JMA	1.0	1306.1	1.38	-1557.5	-1.67	8.9	1.30	-19.3	-2.83	-4.59	-0.67	1/ 322.6

No. 1試験体(基本1シリーズの単調載荷試験)の、最大荷重時の変位 $\delta_m = 2.90\,\delta_y$
No. 14試験体(基本2シリーズの単調載荷試験)の、最大荷重時の変位 $\delta_m = 6.26\,\delta_y$

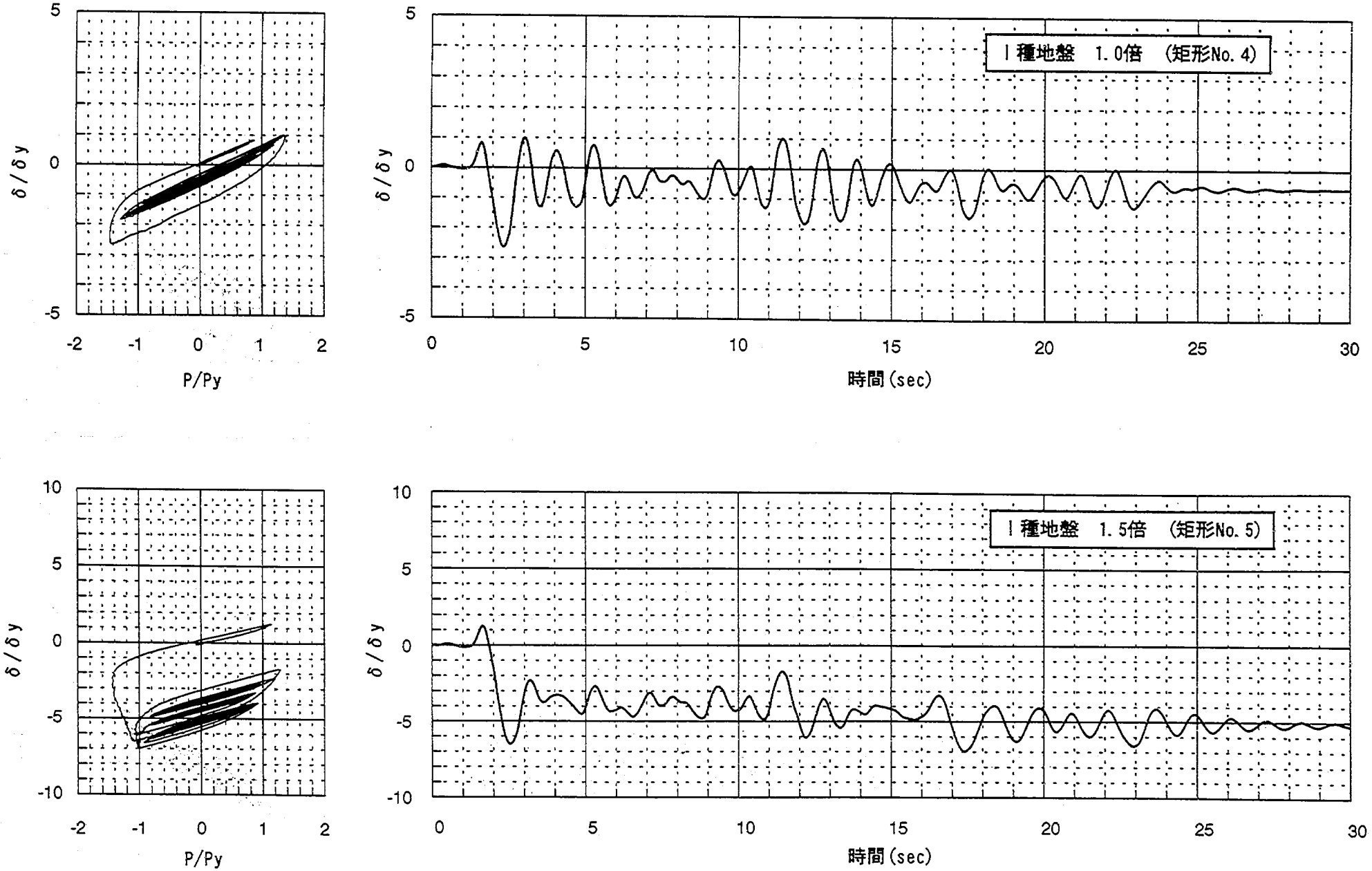


図-3.3.1(1)　免震Ⅰ種 入力時の実験結果

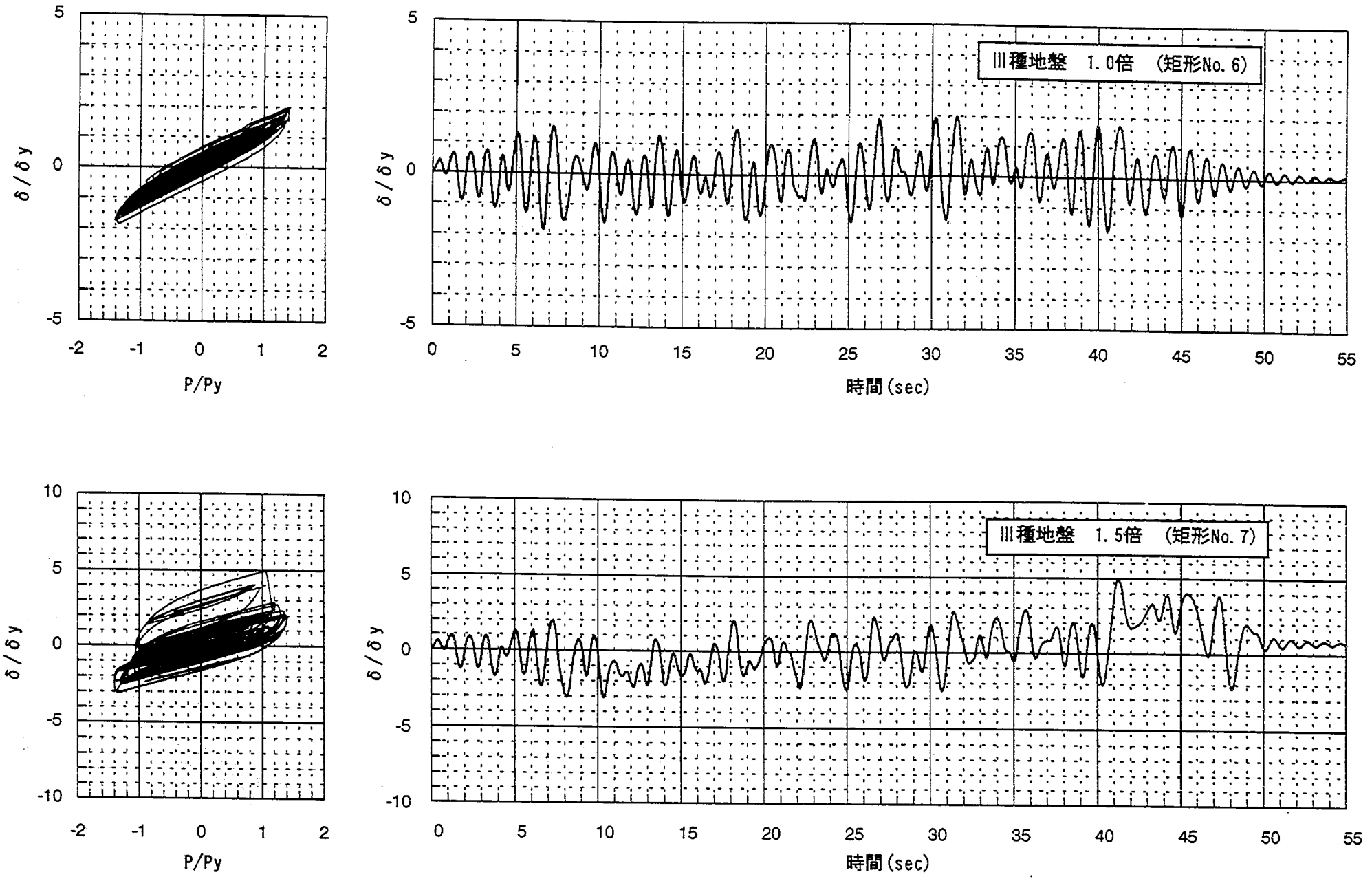


図-3.3.1(2)　免震Ⅲ種 入力時の実験結果

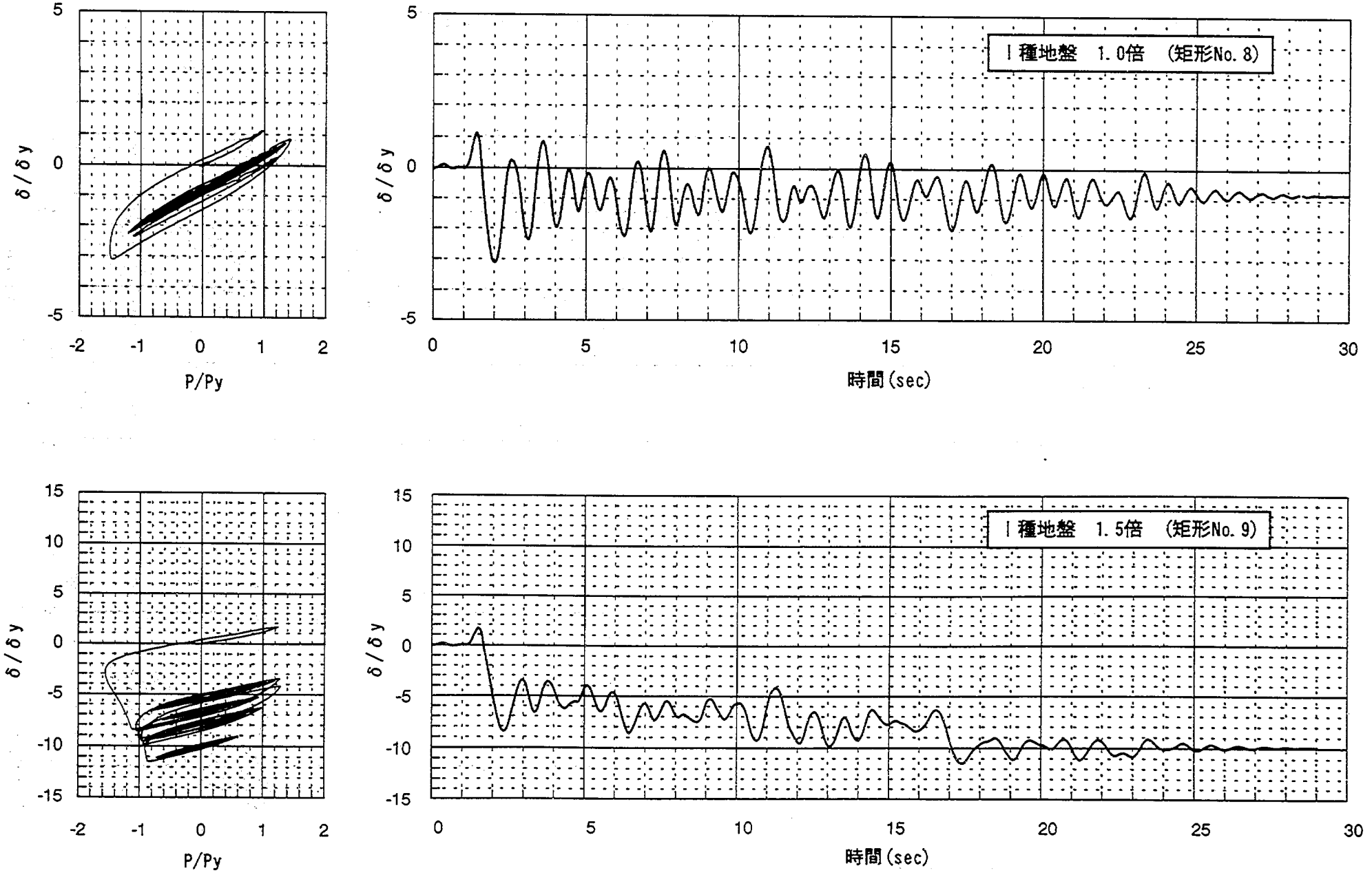


図-3.3.1(3)　免震Ⅰ種 入力時の実験結果

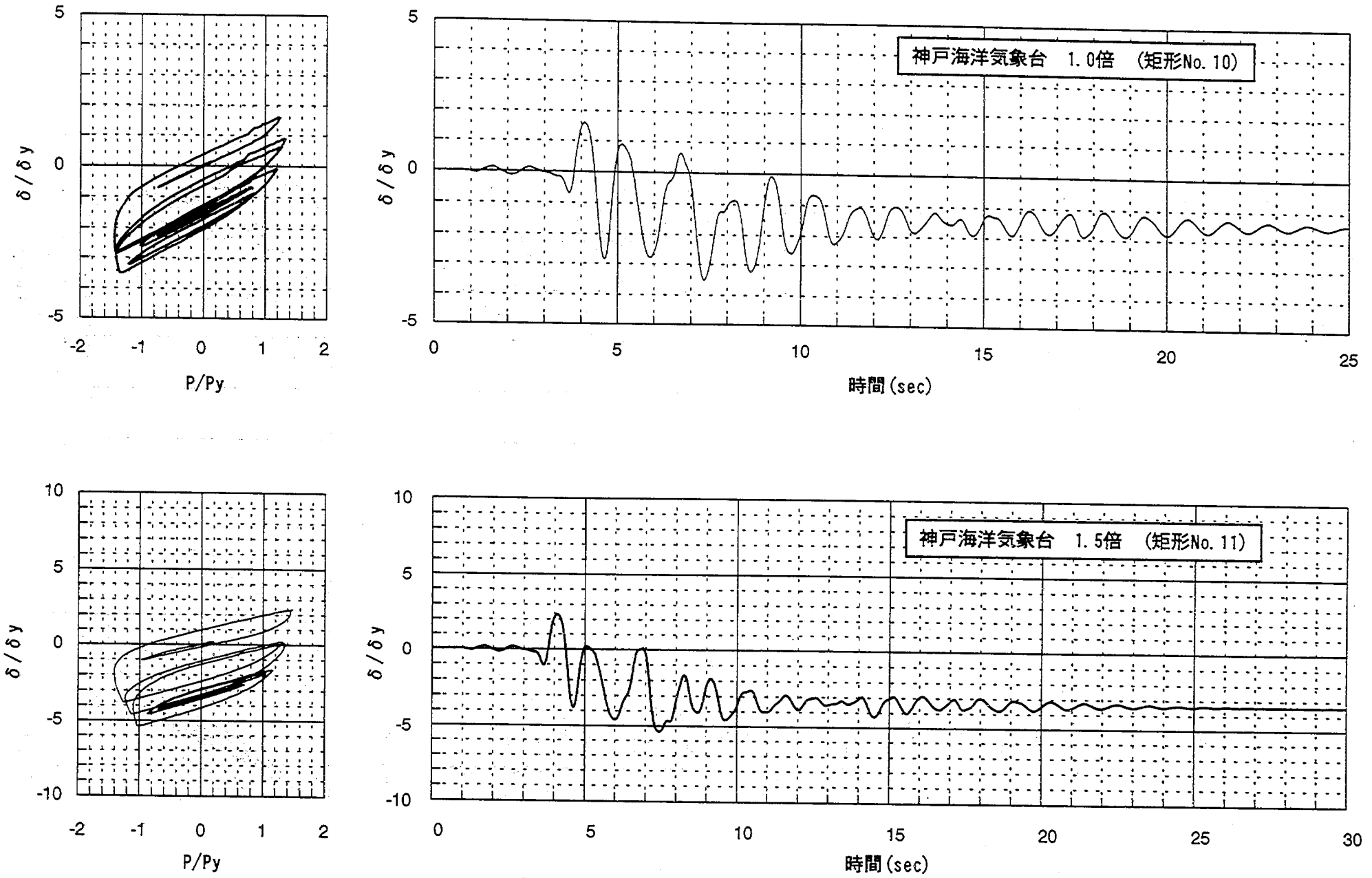


図-3.3.1(4)　神戸海洋気象台(Ⅰ種地盤)入力時の実験結果

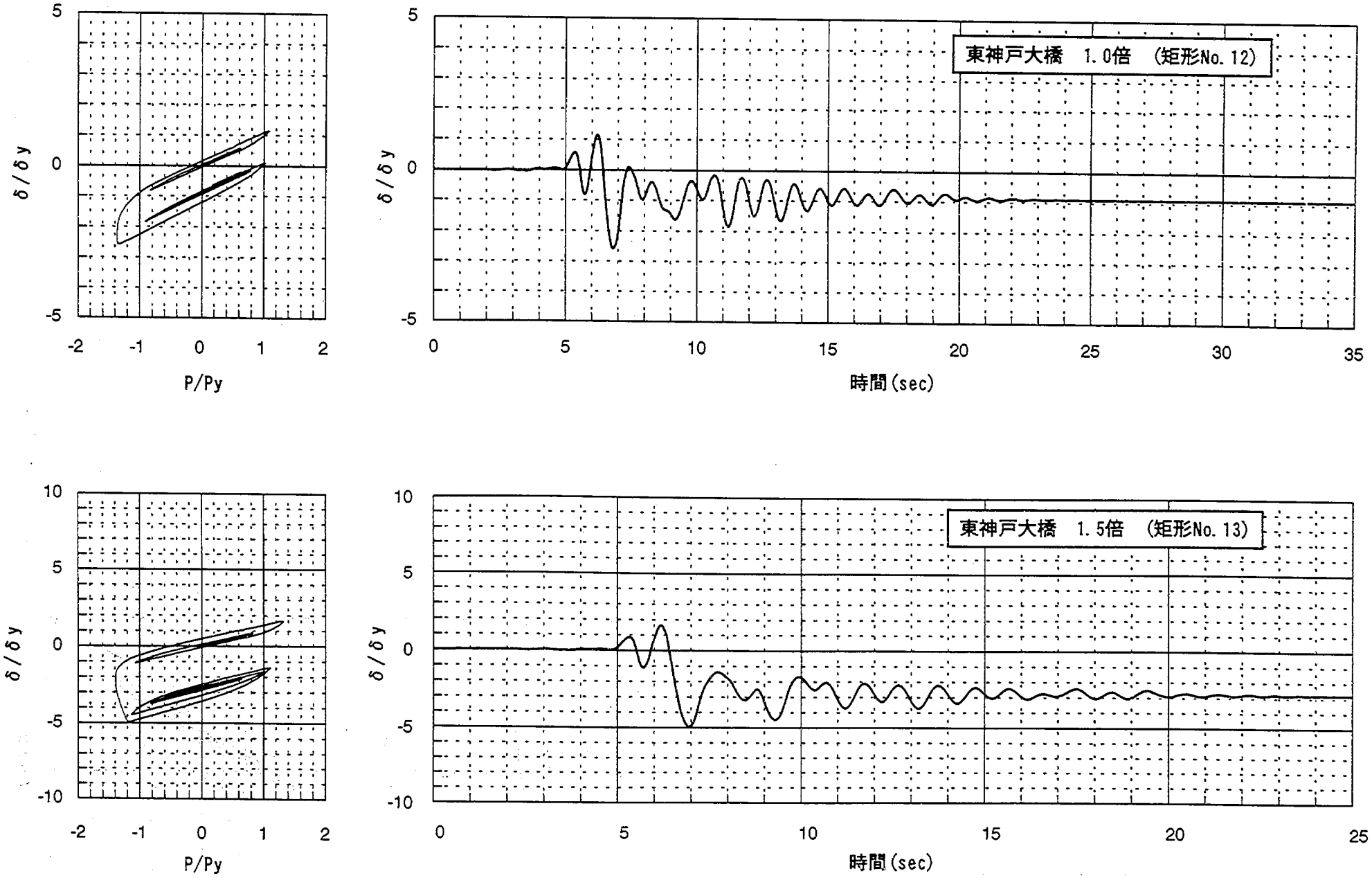


図-3.3.1(5)　東神戸大橋(Ⅲ種地盤) 入力時の実験結果

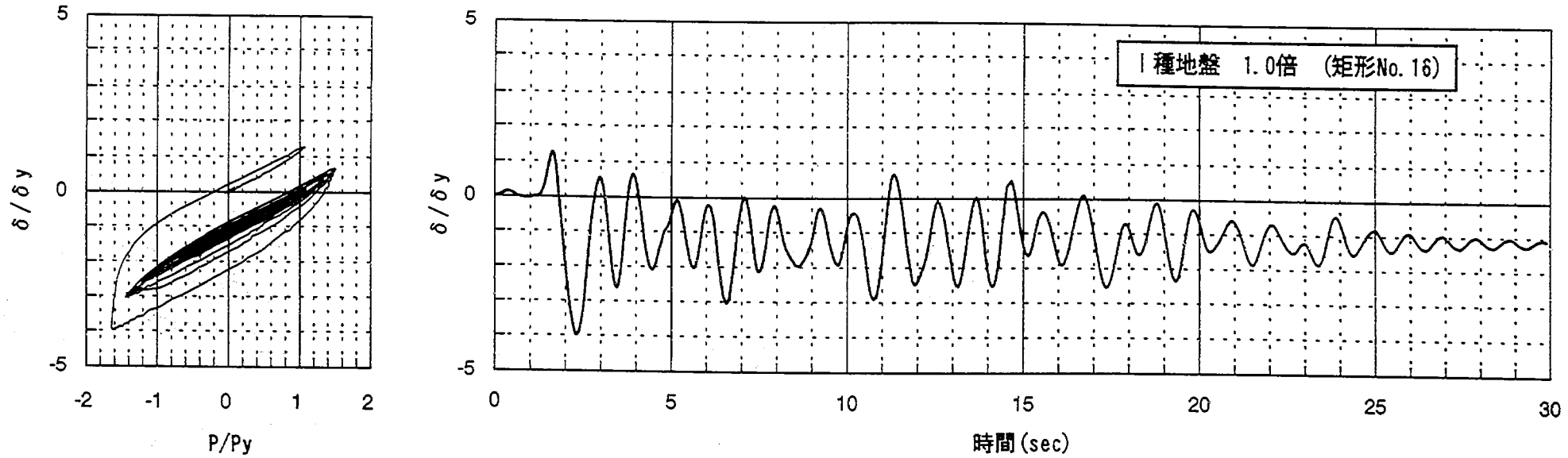
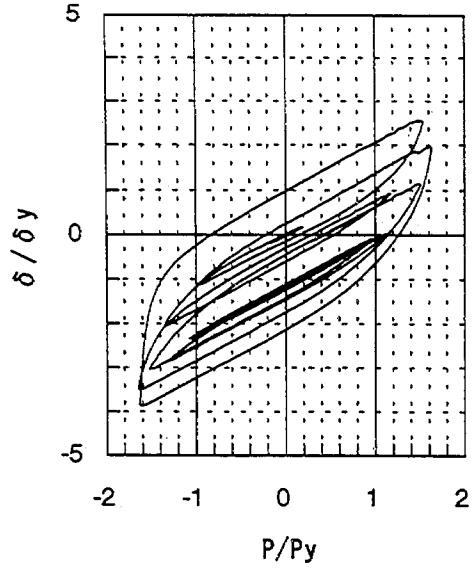
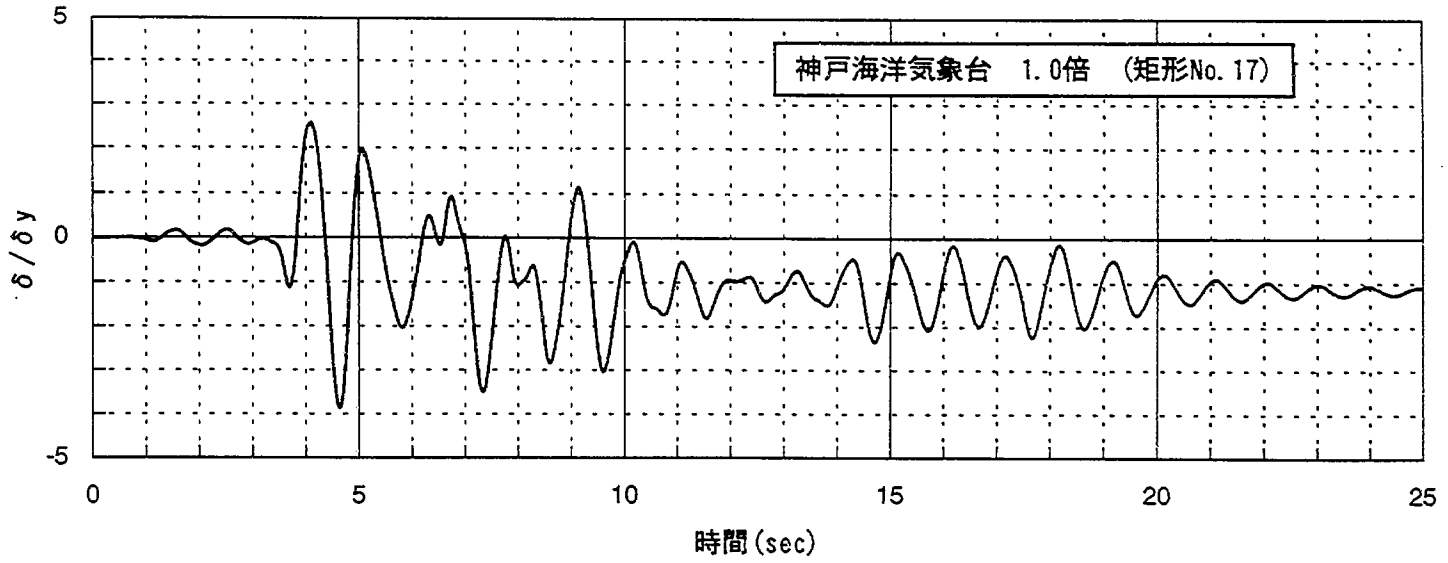
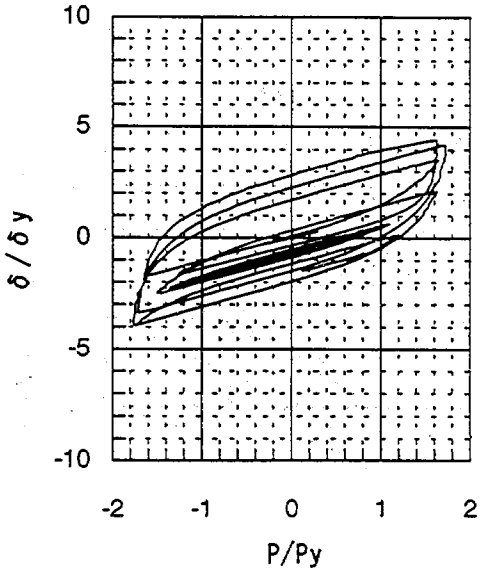


図-3.3.1(6)　免震Ⅰ種 入力時の実験結果







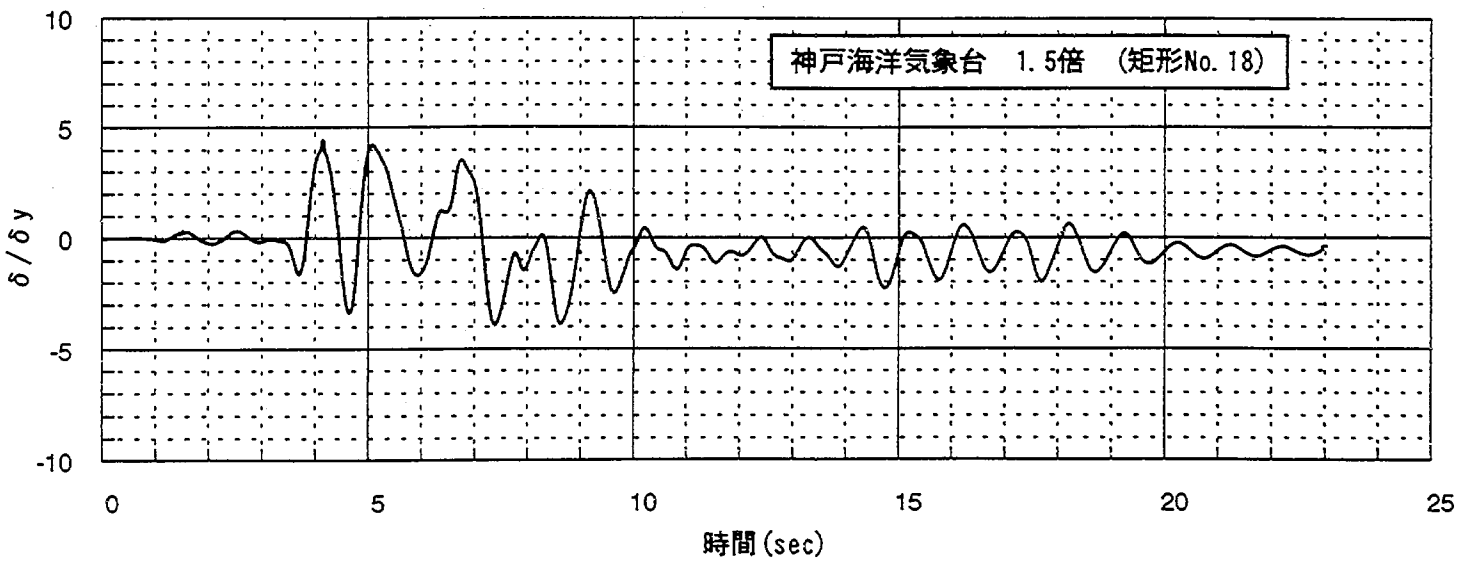


図-3.3.1(7)　神戸海洋気象台(Ⅰ種地盤) 入力時の実験結果

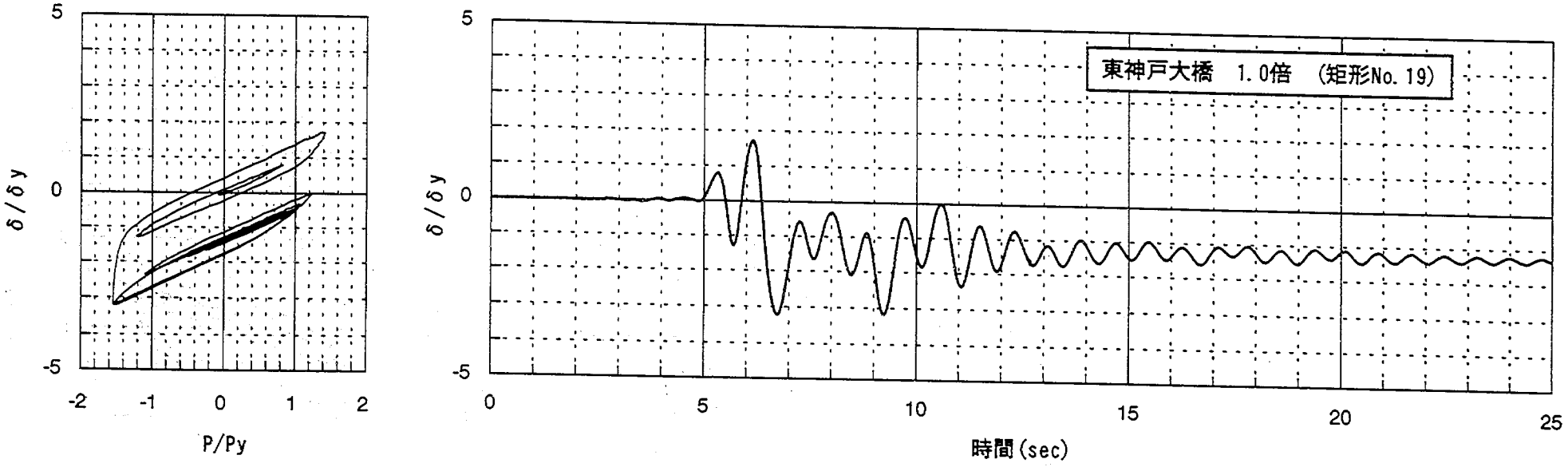


図-3.3.1(8)　東神戸大橋(Ⅲ種地盤) 入力時の実験結果

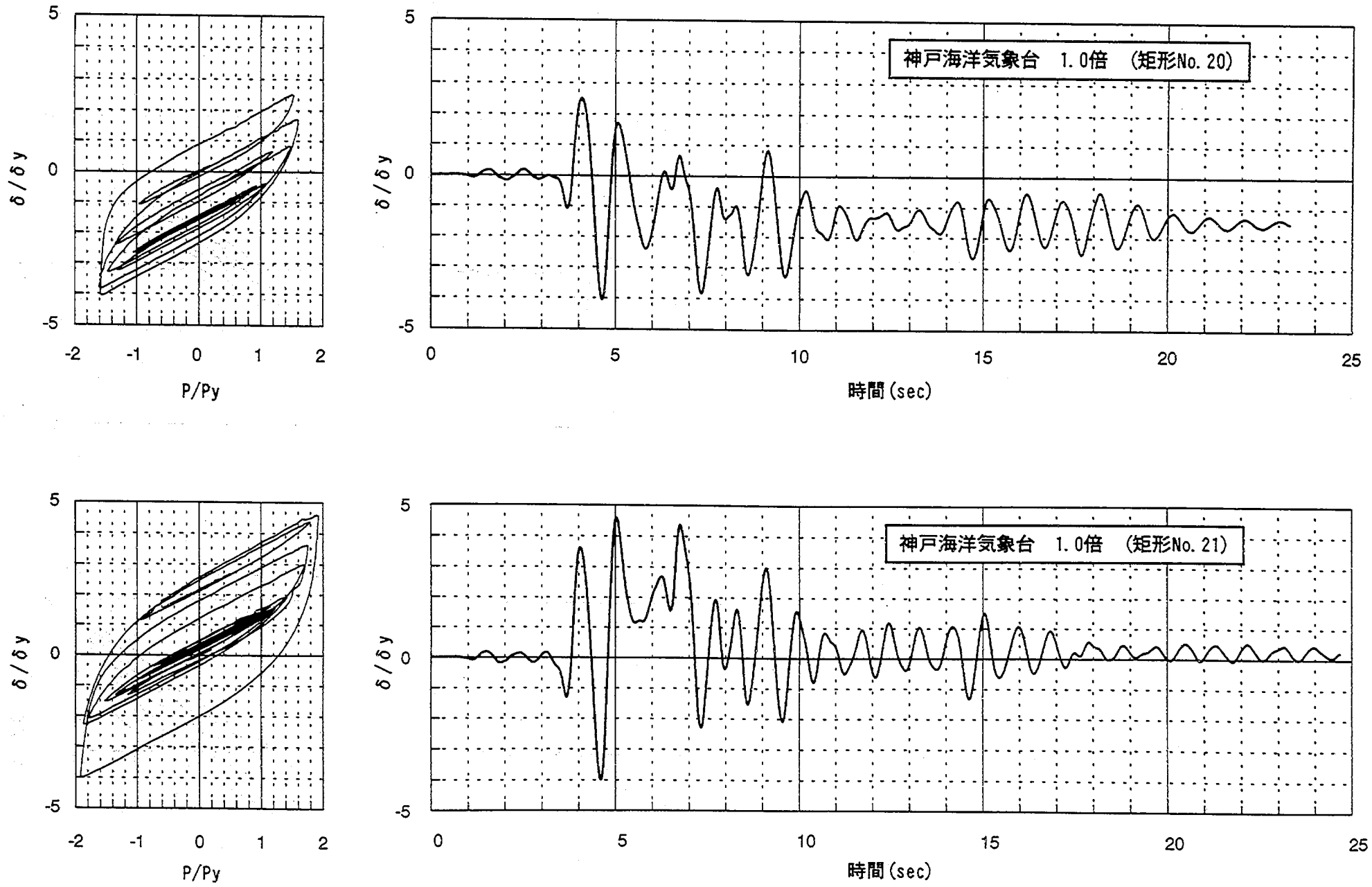


図-3.3.1(9)　神戸海洋気象台(Ⅰ種地盤)入力時の実験結果

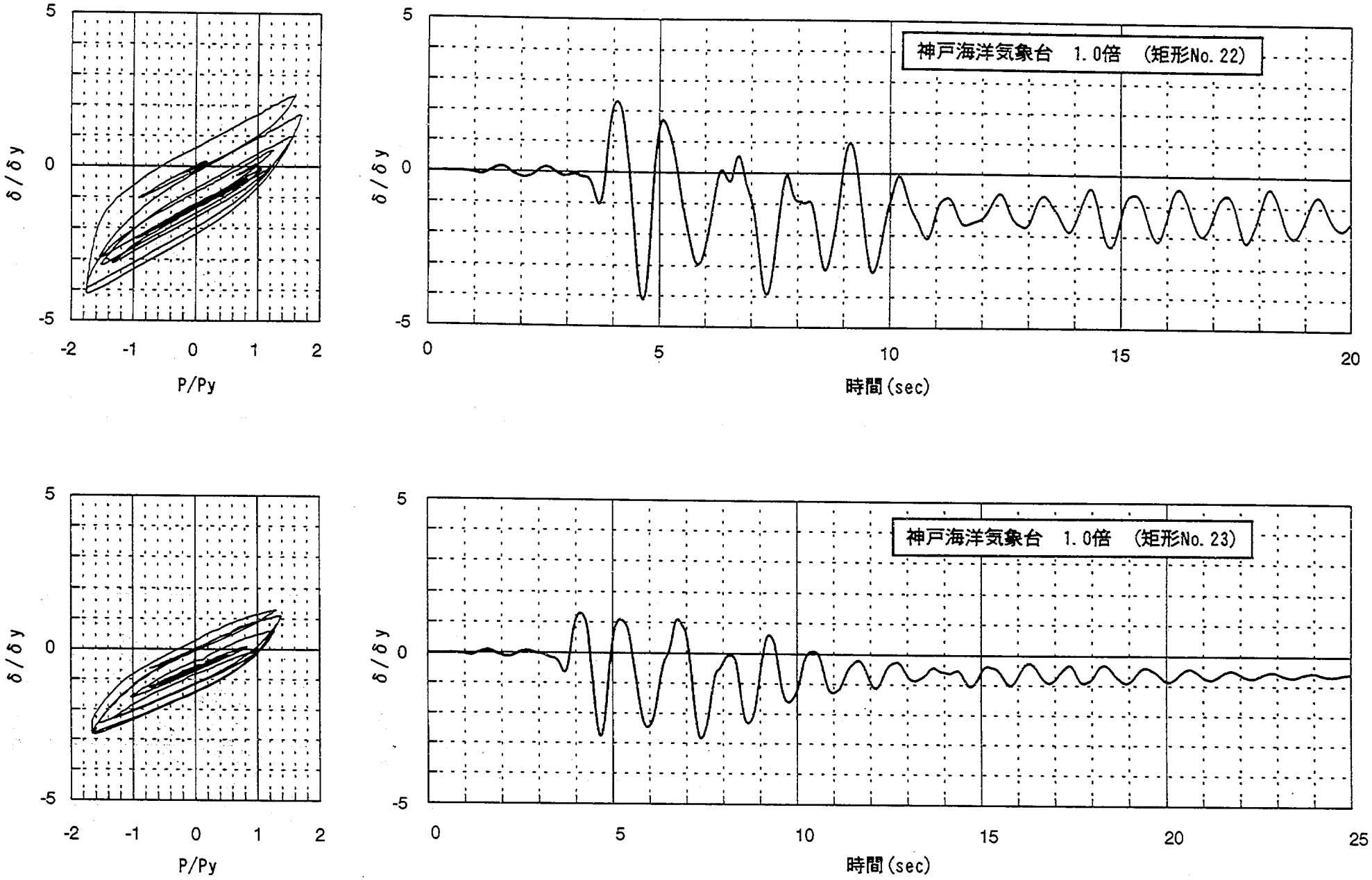


図-3.3.1(10)　神戸海洋気象台(Ⅰ種地盤)入力時の実験結果

表-3.3.2　円形断面のハイブリッド地震応答実験結果一覧表（実橋レベル）

	R_t	$\bar{\lambda}$	入力地震波	倍率	P_{max} (tonf)	P_{max}/P_y	P_{min} (tonf)	P_{min}/P_y	δ_{max} (cm)	δ_{max}/δ_y	δ_{min} (cm)	δ_{min}/δ_y	δ_R (cm)	δ_R/δ_y	$\lvert\delta_R\rvert/h$
4	0.115	0.331	免震Ⅰ種	1.0	678.4	1.16	-825.6	-1.41	6.5	1.00	-21.4	-3.28	-9.03	-1.39	1/ 159.4
5	0.109	0.326	免震Ⅰ種	1.2	691.2	1.20	-819.2	-1.43	7.8	1.24	-58.9	-9.35	-53.3	-8.46	1/ 27.0
6	0.121	0.335	免震Ⅲ種	1.0	902.4	1.46	-883.2	-1.42	14.1	2.01	-13.5	-1.92	0.655	0.0932	1/2197.5
7	0.117	0.332	免震Ⅲ種	1.37	857.6	1.40	-857.6	-1.40	—	—	—	—	—	—	—
8	0.108	0.265	免震Ⅰ種	1.0	883.2	1.44	-953.6	-1.56	5.0	1.18	-12.7	-3.03	-5.22	-1.24	1/ 230.0
9	0.106	0.263	免震Ⅰ種	1.2	889.6	1.46	-915.2	-1.53	6.0	1.46	-21.9	-5.31	-16.1	-3.91	1/ 74.3
10	0.102	0.316	JMA	1.0	806.4	1.48	-825.6	-1.51	15.5	2.61	-17.6	-2.96	-0.819	-0.138	1/1758.6
11	0.105	0.314	JMA	1.5	806.4	1.55	-774.4	-1.48	44.2	7.55	-15.0	-2.56	37.9	6.49	1/ 38.0
12	0.119	0.338	HKB	1.0	857.6	1.34	-876.8	-1.37	11.7	1.64	-17.6	-2.47	-5.86	-0.824	1/ 245.8
13	0.117	0.337	HKB	1.5	928.0	1.44	-940.8	-1.46	17.2	2.43	-33.2	-4.69	-21.9	-3.10	1/ 65.6
16	0.081	0.317	免震Ⅰ種	1.0	1024.0	1.55	-1011.2	-1.53	7.1	1.23	-24.5	-4.27	-10.8	-1.89	1/ 133.1
17	0.083	0.324	免震Ⅲ種	1.0	1011.2	1.36	-1030.4	-1.39	22.5	3.55	-7.7	-1.22	8.49	1.34	1/ 169.7
18	0.079	0.262	免震Ⅰ種	1.0	1145.6	1.52	-1184.0	-1.57	5.4	1.38	-17.6	-4.47	-8.29	-2.11	1/ 144.8
19	0.081	0.318	JMA	1.0	1043.2	1.55	-1049.6	-1.56	15.5	2.68	-19.7	-3.39	-4.77	-0.823	1/ 301.8
20	0.082	0.321	HKB	1.0	979.2	1.36	-1017.6	-1.41	11.8	1.90	-18.4	-2.95	-6.84	-1.10	1/ 210.4
21	0.123	0.341	JMA	1.0	1286.4	1.40	-1216.0	-1.33	21.6	2.79	-19.3	-2.49	0.212	0.0274	1/6792.5

No. 1 試験体（基本1シリーズの単調載荷試験）の、最大荷重時の変位 $\delta_m = 2.08\,\delta_y$

No. 14試験体（基本2シリーズの単調載荷試験）の、最大荷重時の変位 $\delta_m = 3.08\,\delta_y$

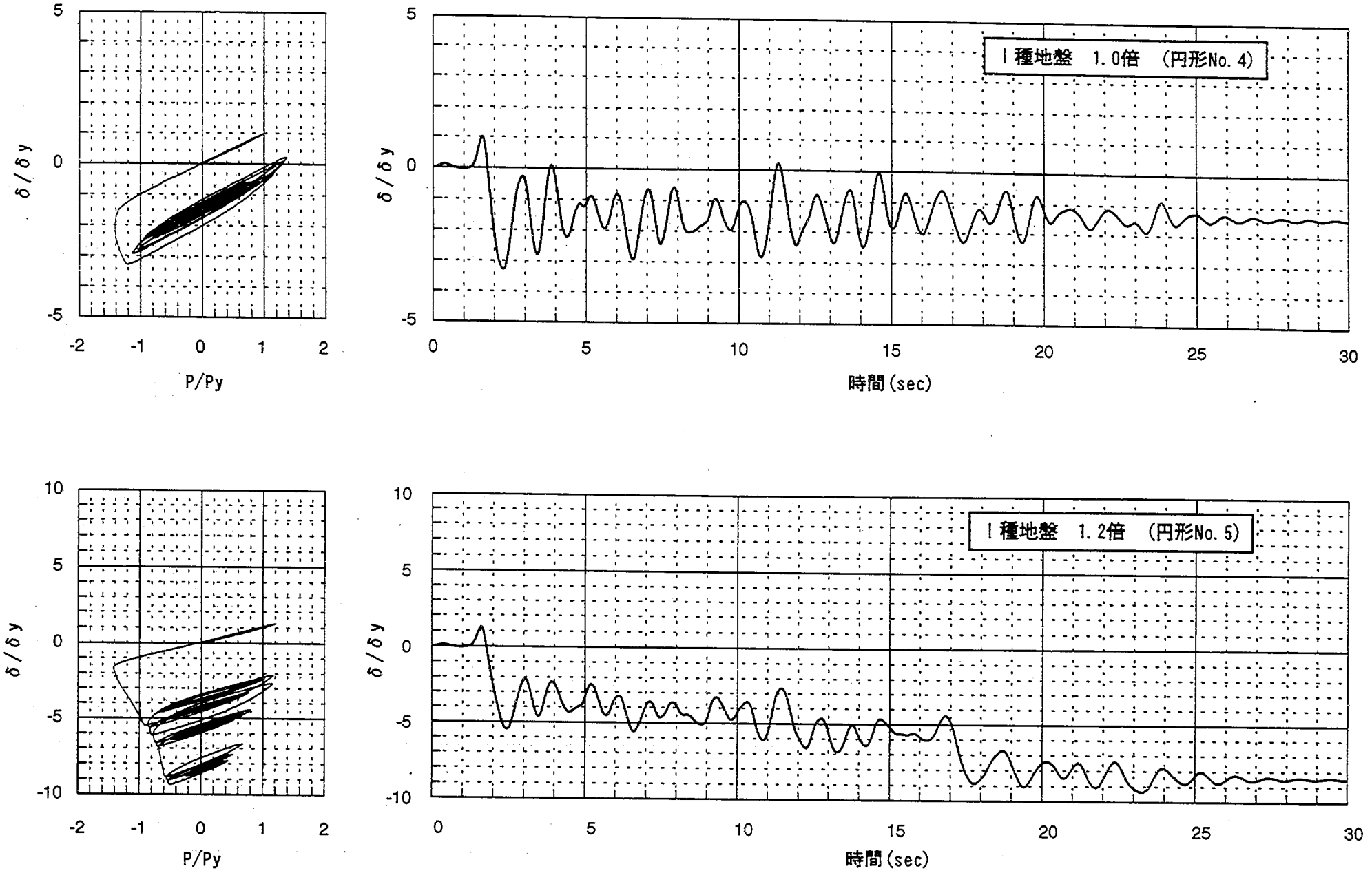


図-3.3.2(1)　免震Ⅰ種 入力時の実験結果

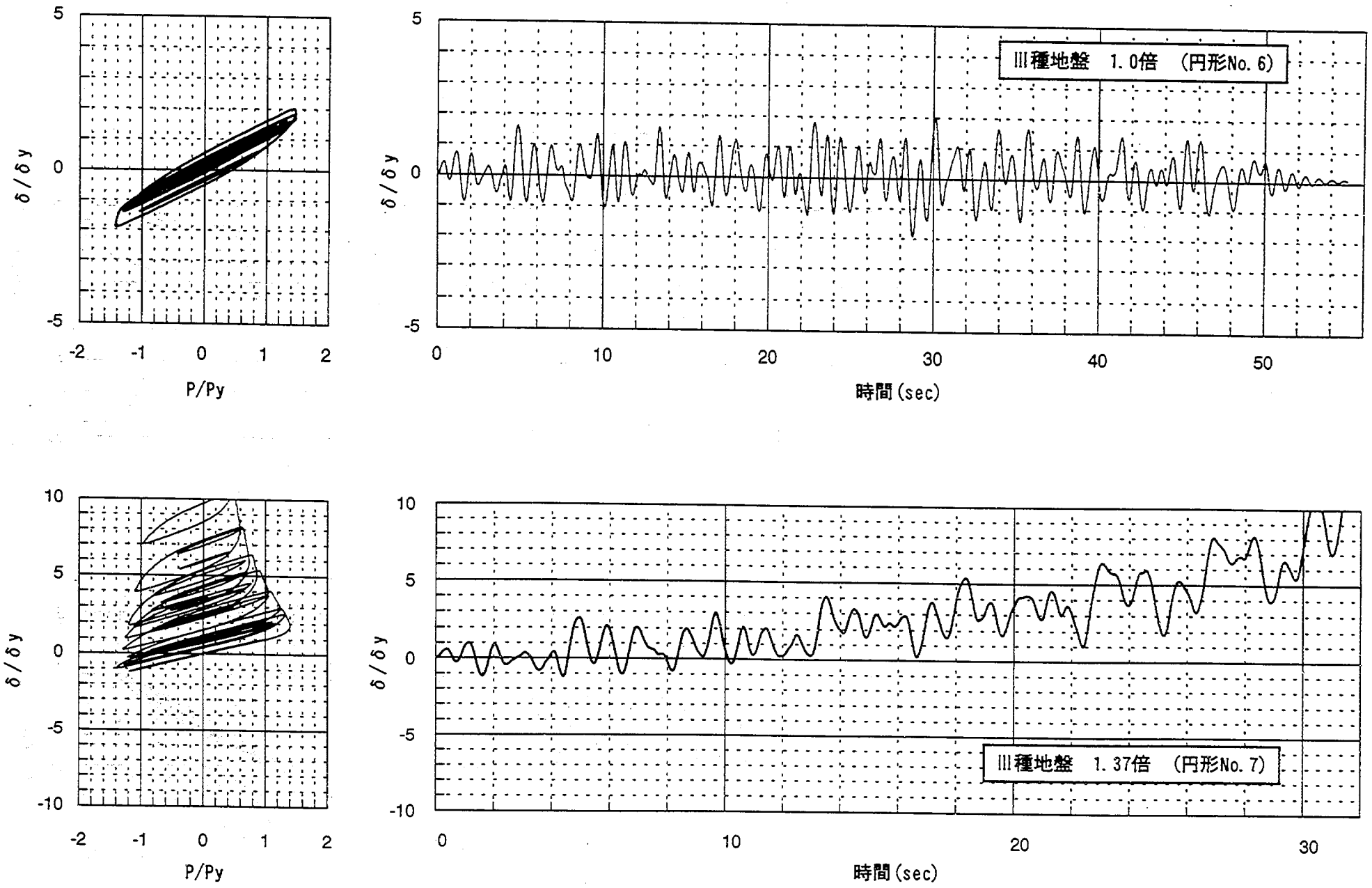
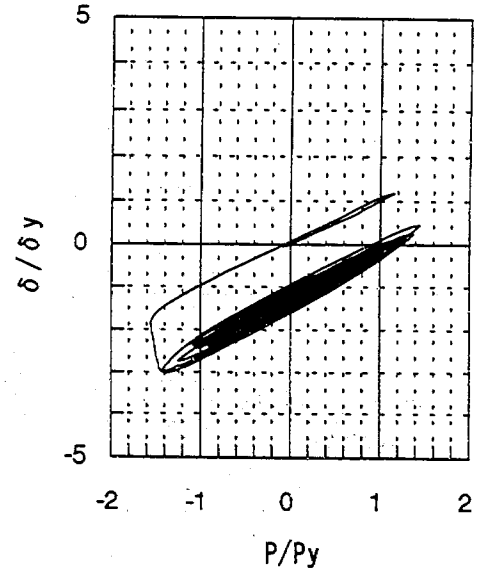
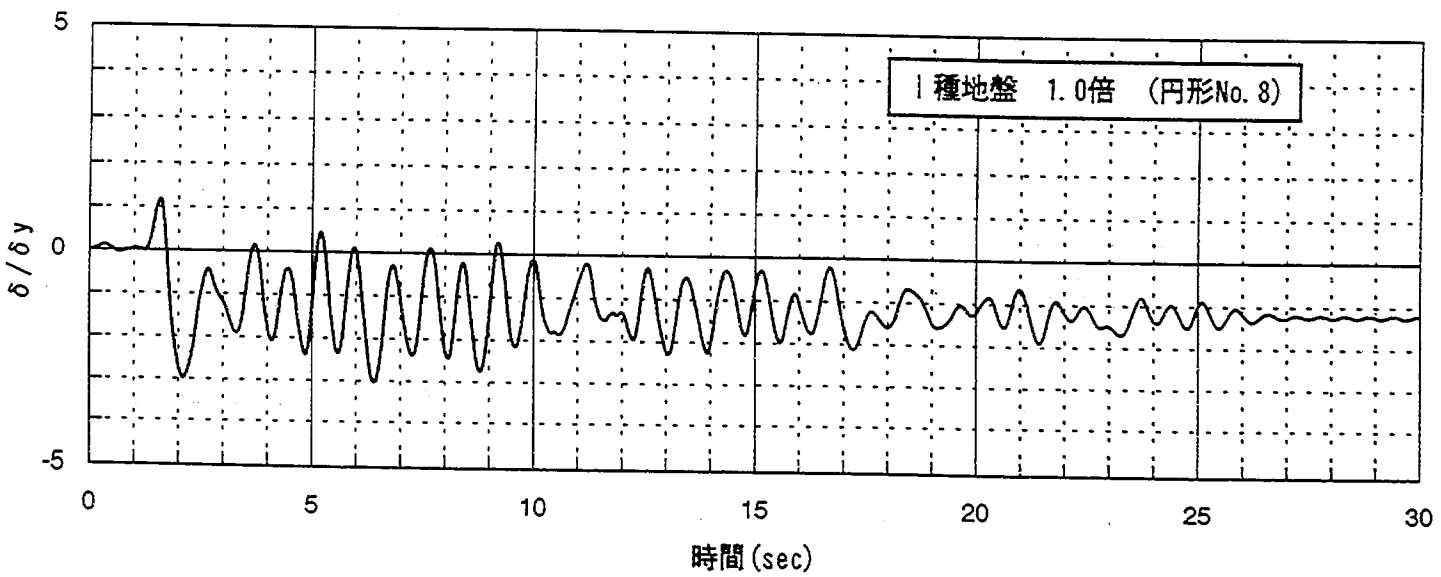
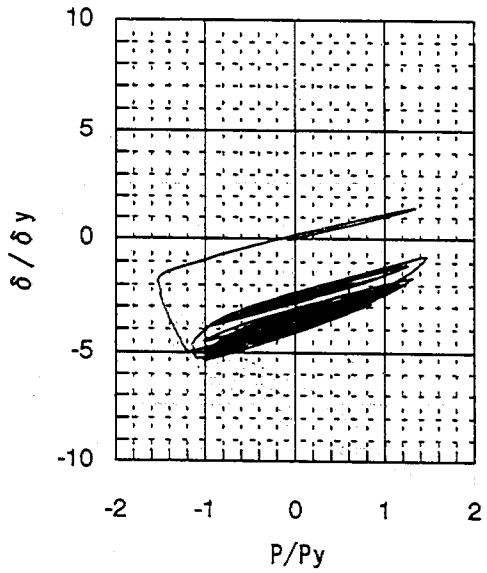


図-3.3.2(2)　免震III種 入力時の実験結果







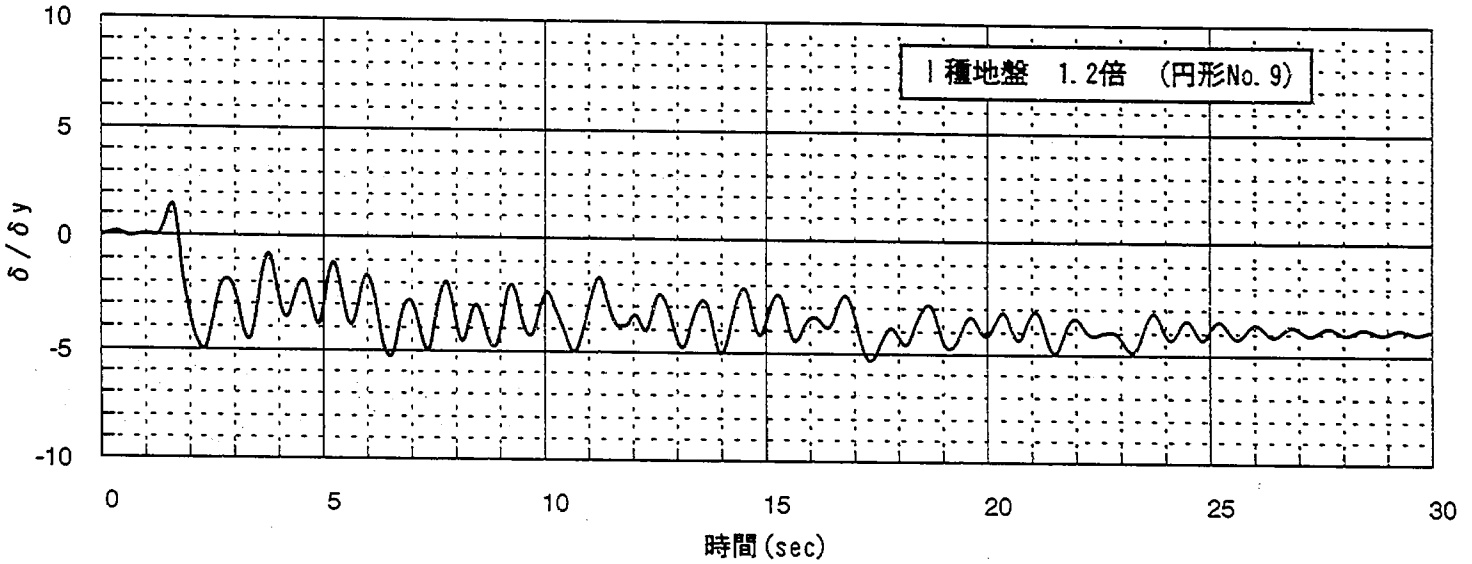


図-3.3.2(3)　免震Ⅰ種 入力時の実験結果

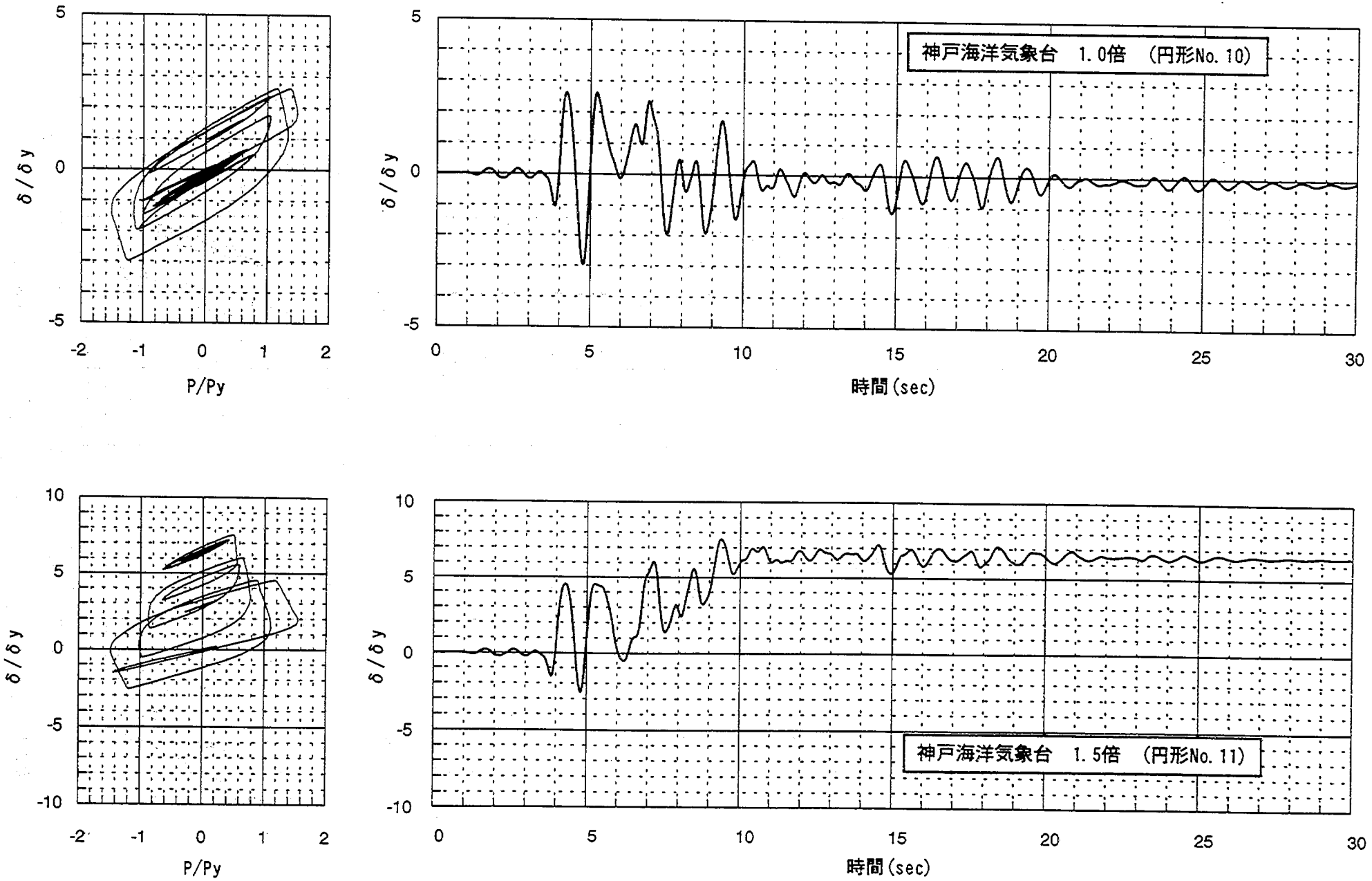


図-3.3.2(4)　神戸海洋気象台(Ⅰ種地盤)入力時の実験結果

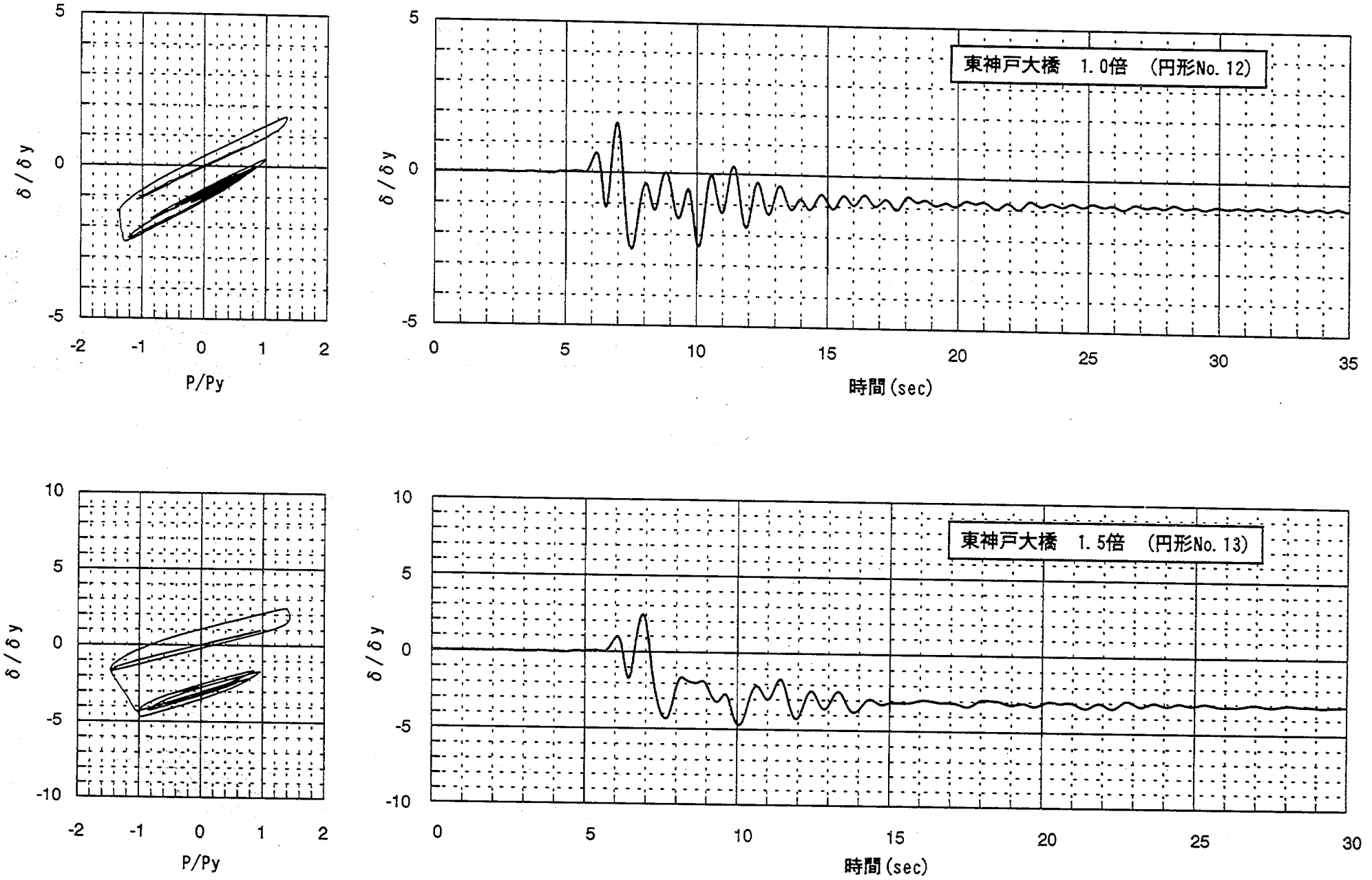


図-3.3.2(5)　東神戸大橋(Ⅲ種地盤) 入力時の実験結果

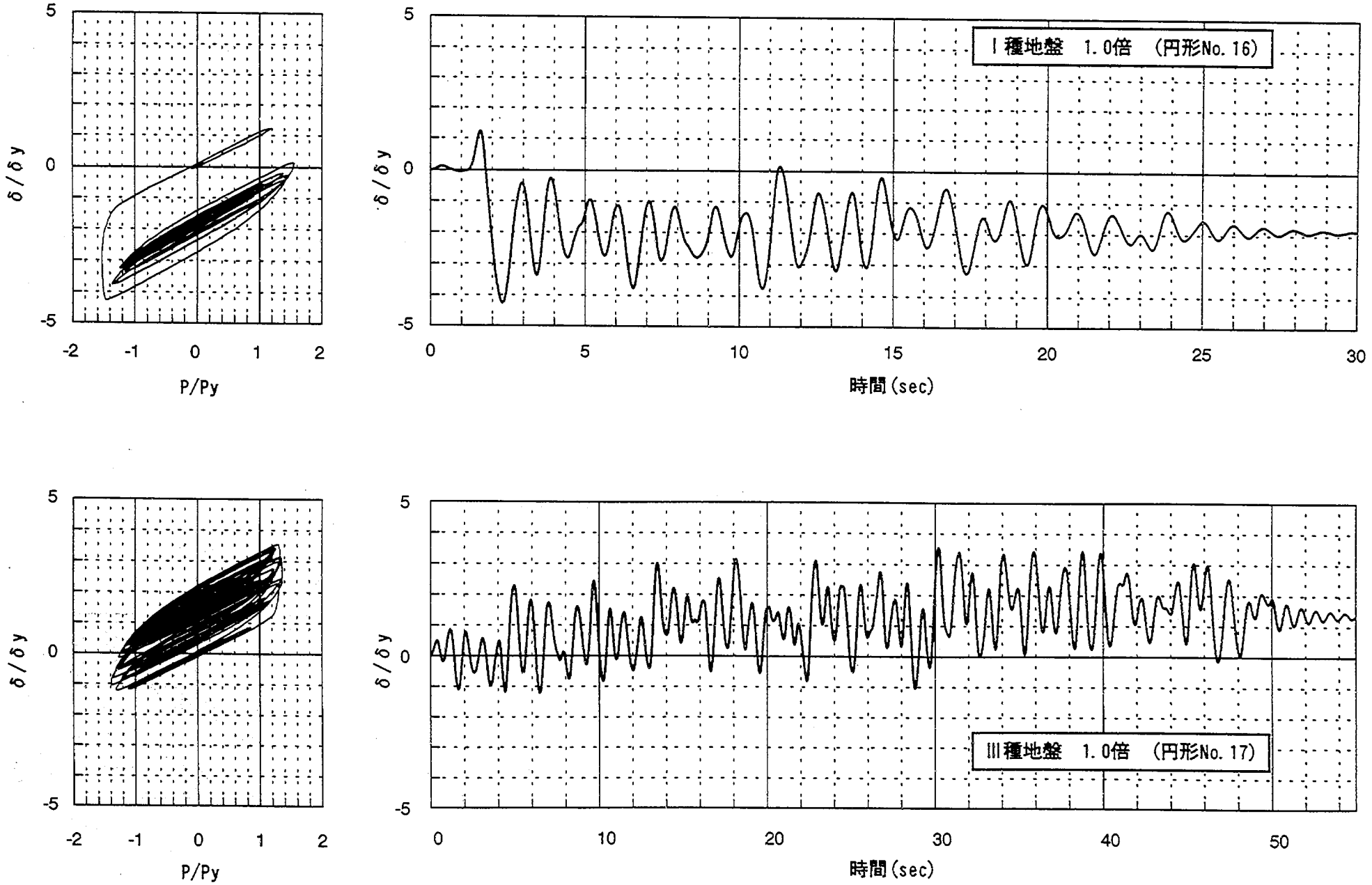


図-3.3.2(6)　免震Ⅰ種および免震Ⅲ種 入力時の実験結果

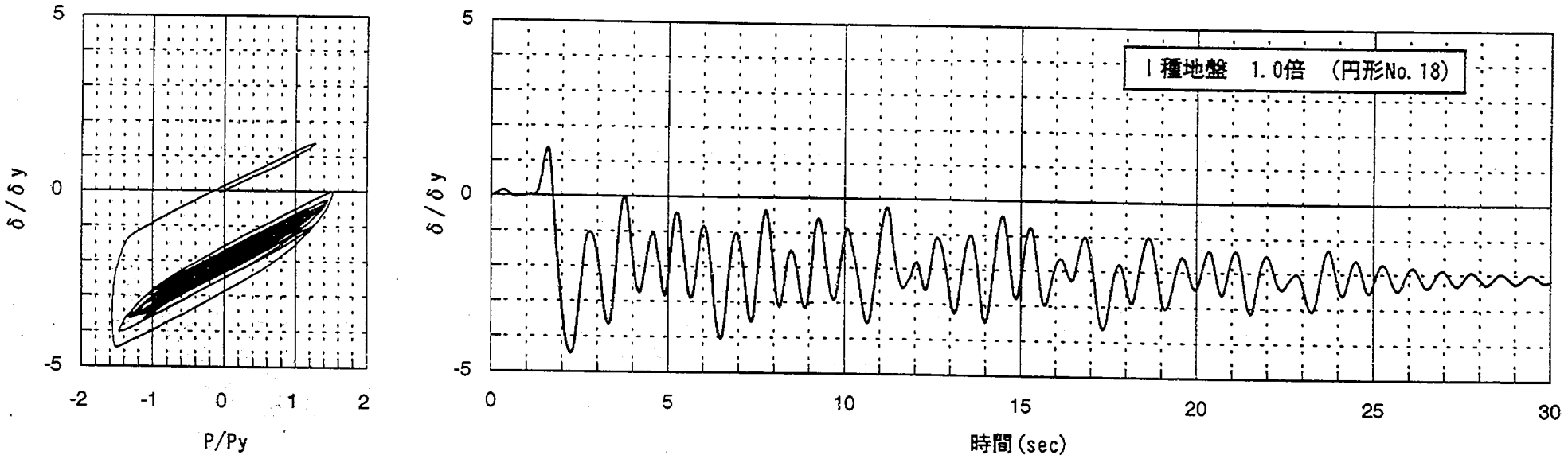


図-3.3.2(7)　免震Ⅰ種 入力時の実験結果

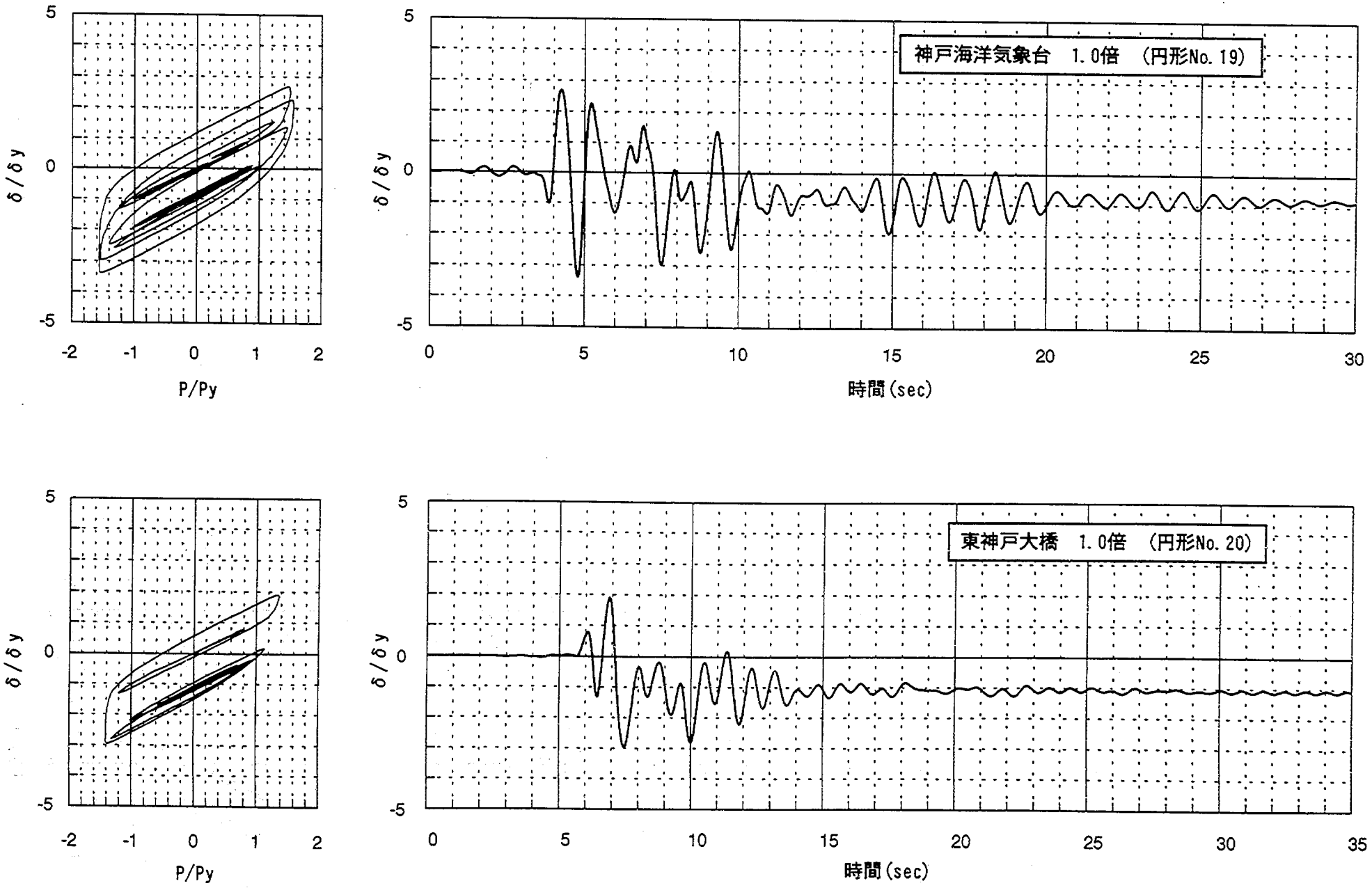


図-3.3.2(8)　神戸海洋気象台(Ⅰ種地盤)および東神戸大橋(Ⅲ種地盤) 入力時の実験結果

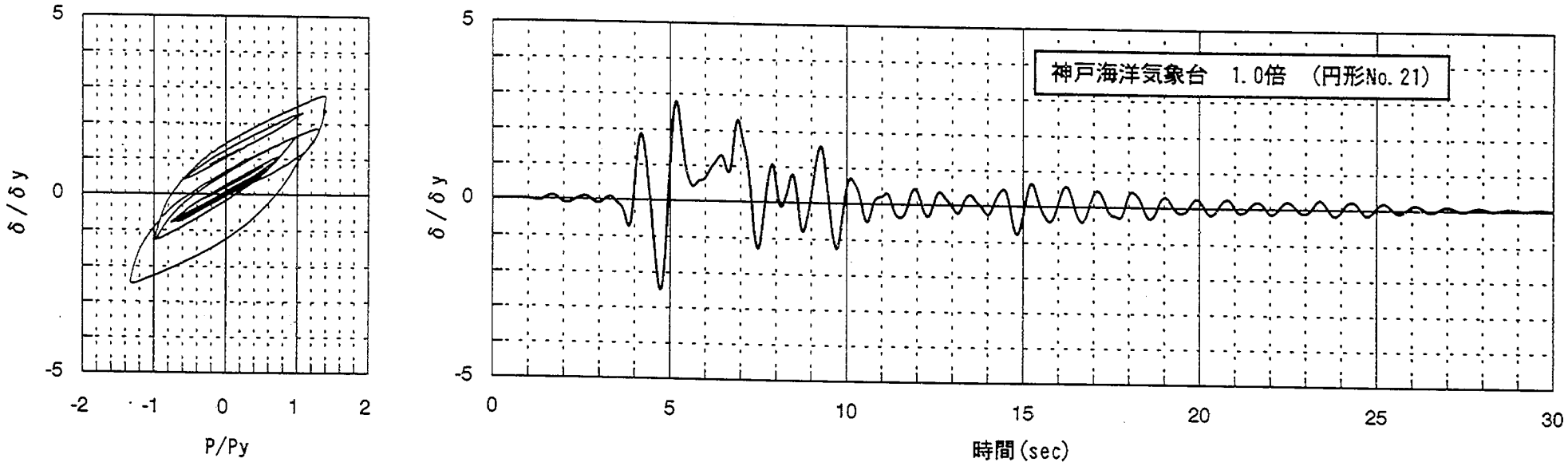
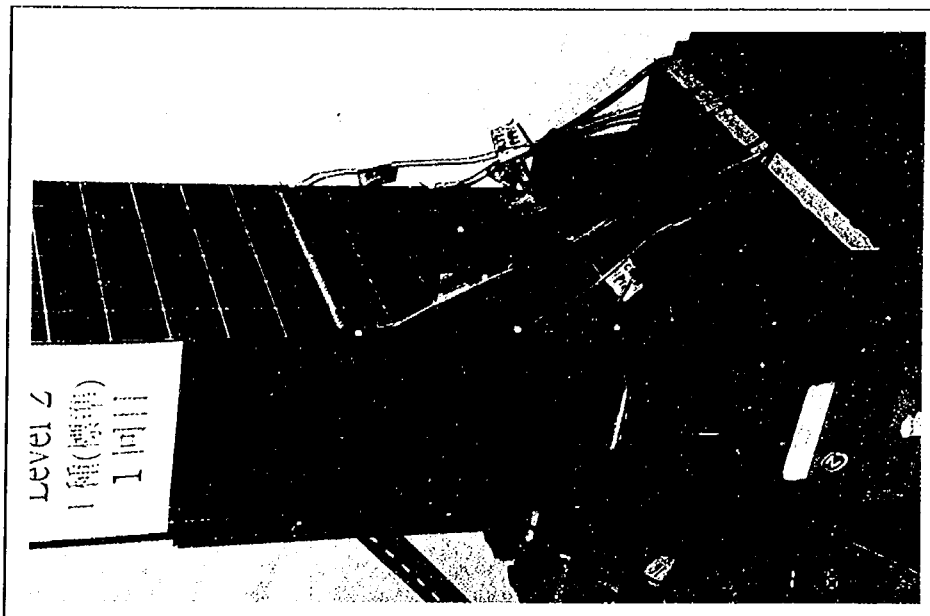
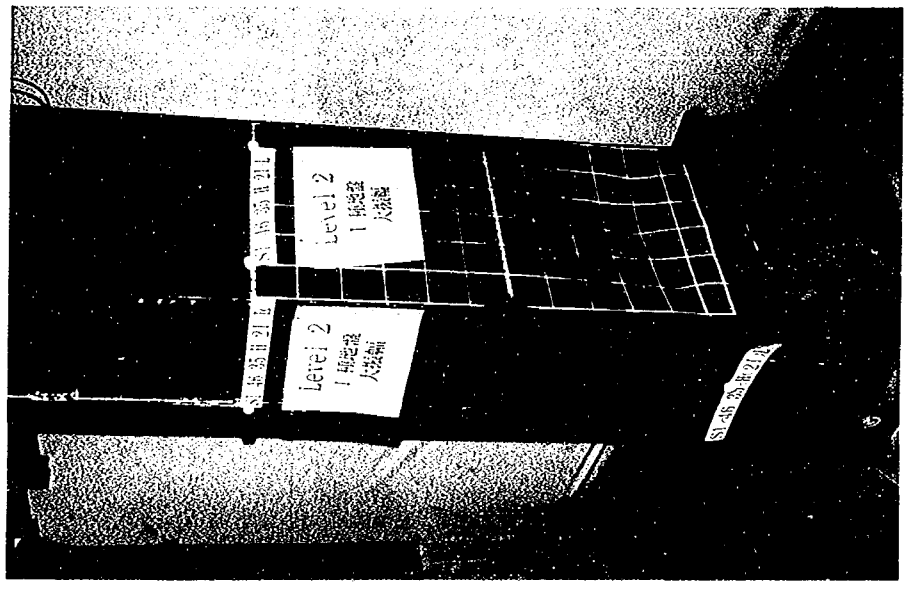


図-3.3.2(9)　神戸海洋気象台（Ⅰ種地盤）入力時の実験結果



矩形No. 4

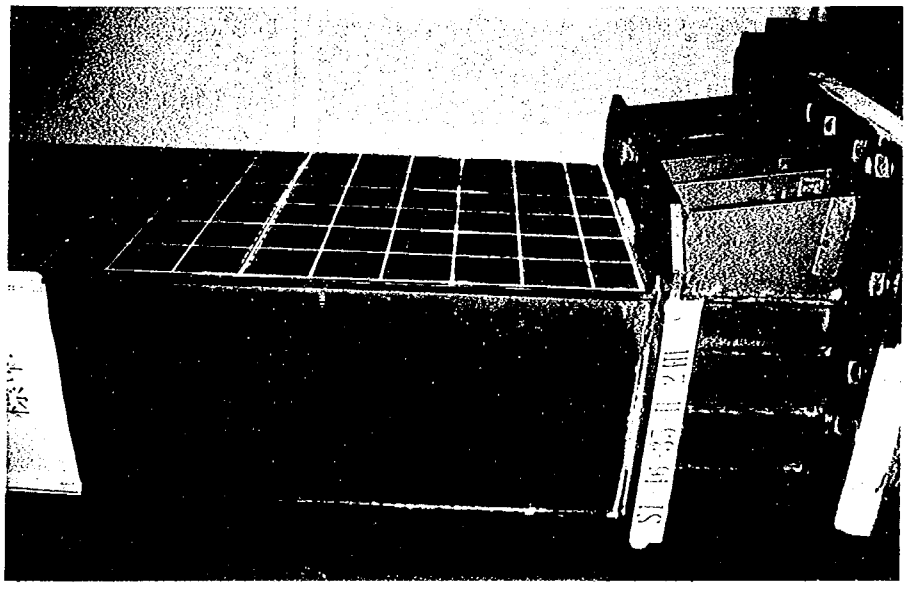
免震Ⅰ種を原波形で入力



矩形No. 5

免震Ⅰ種を拡大波形で入力

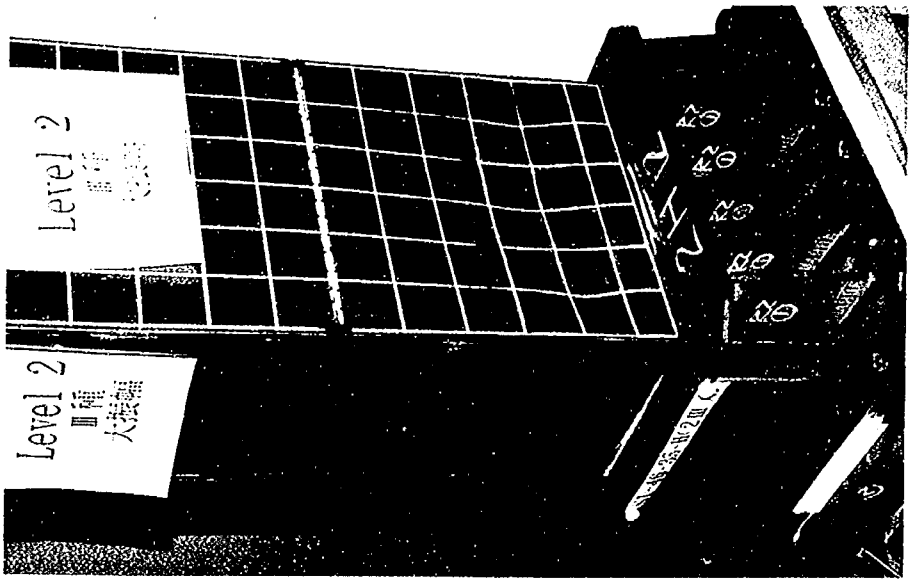
基部が全体パネルの局部座屈



矩形No. 6

免震Ⅲ種を原波形で入力

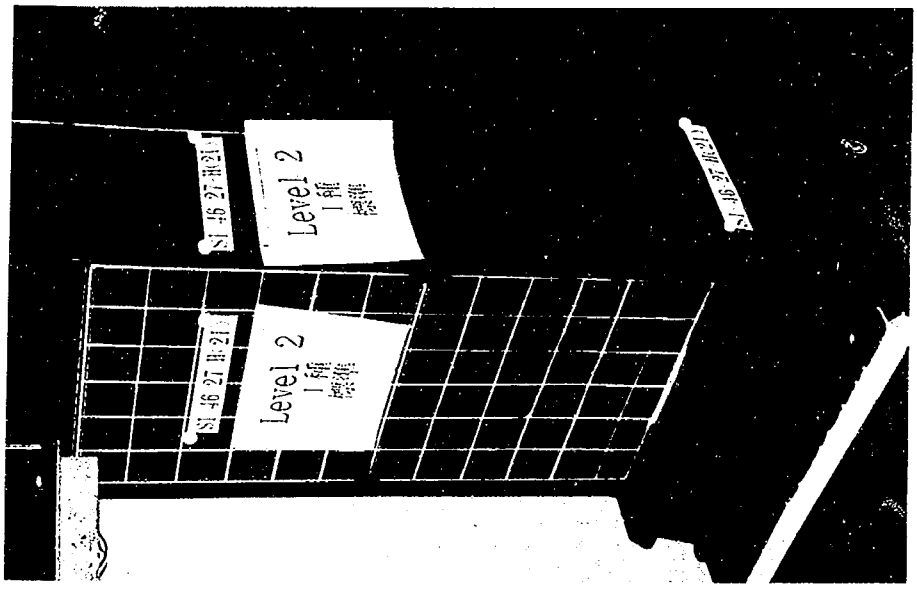
写真-3.3.1(1)　矩形断面試験体の破壊状況



矩形No. 7

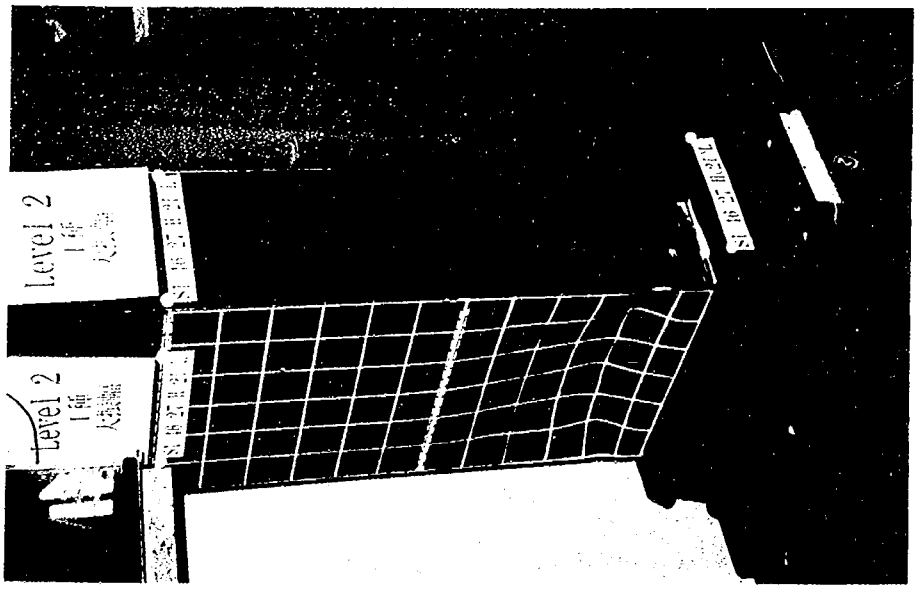
免震Ⅲ種を拡大波形で入力

基部が全体パネルの局部座屈



矩形No. 8

免震Ⅰ種を原波形で入力

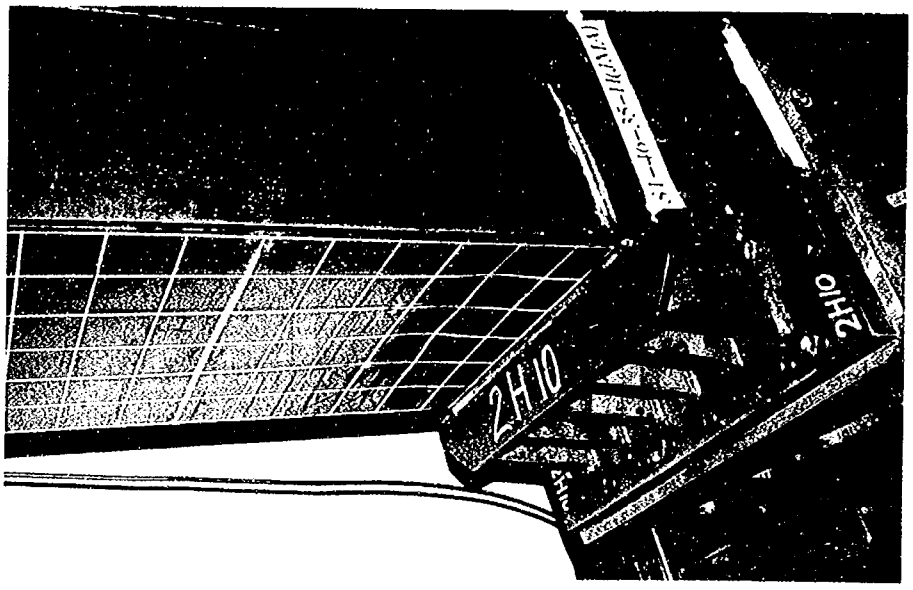


矩形No. 9

免震Ⅰ種を拡大波形で入力

基部が全体パネルの局部座屈

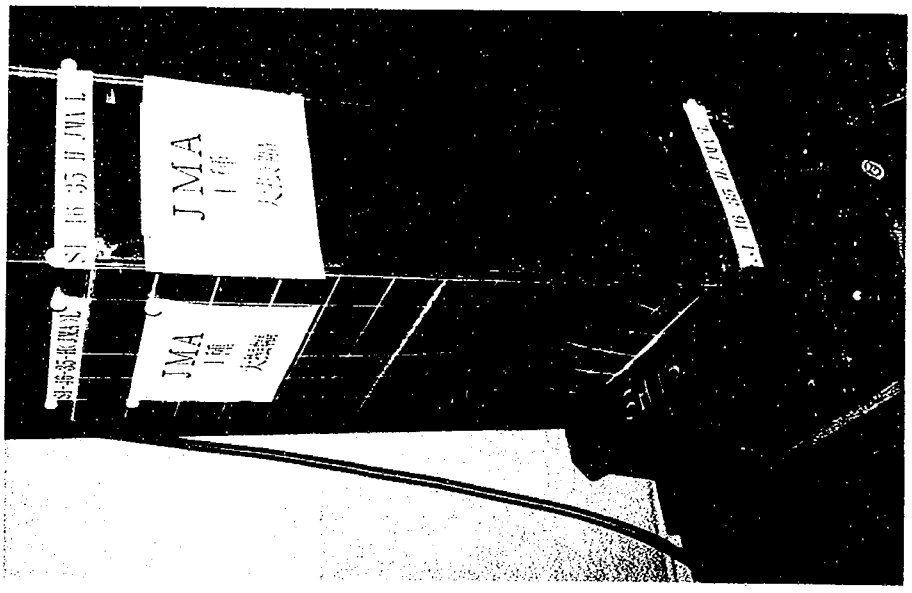
写真-3.3.1(2)　矩形断面試験体の破壊状況



矩形No. 10

ＪＭＡを原波形で
入力

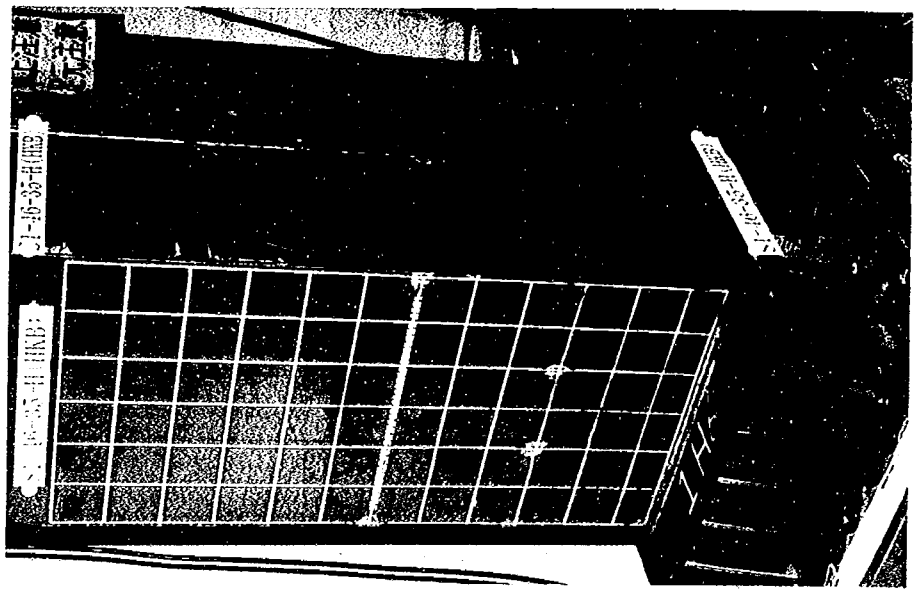
基部が全体パネルの局部
座屈



矩形No. 11

ＪＭＡを拡大波形で
入力

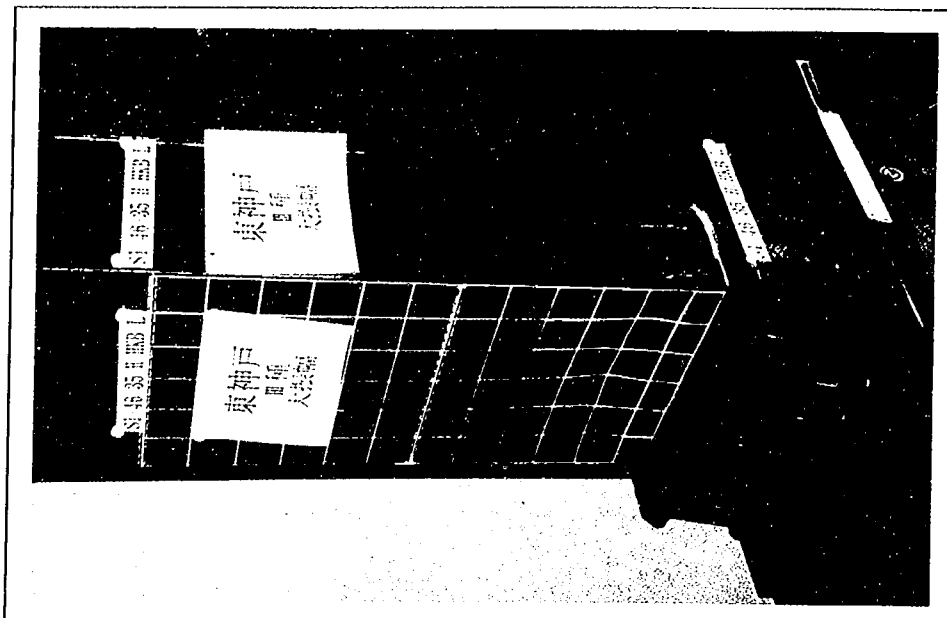
基部が全体パネルの局部
座屈



矩形No. 12

ＨＫＢを原波形で
入力

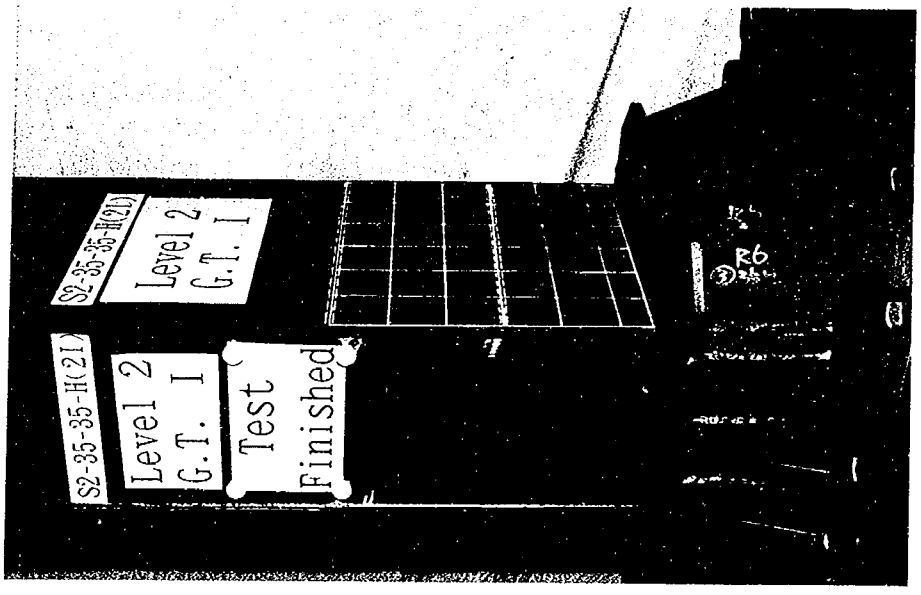
写真-3.3.1(3)　矩形断面試験体の破壊状況



矩形No. 13

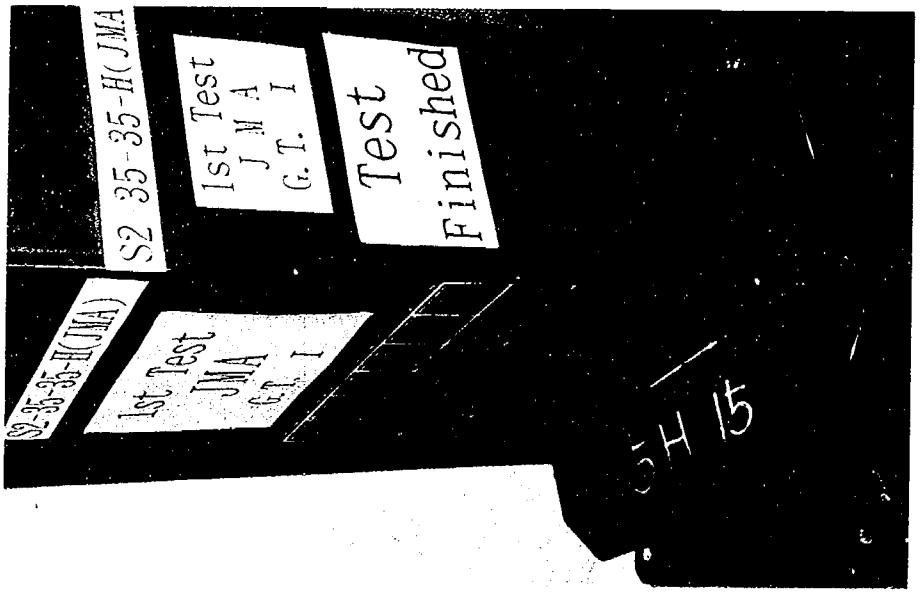
ＨＫＢを拡大波形で入力

基部が全体パネルの局部座屈



矩形No. 16

免震Ⅰ種を原波形で入力



矩形No. 17

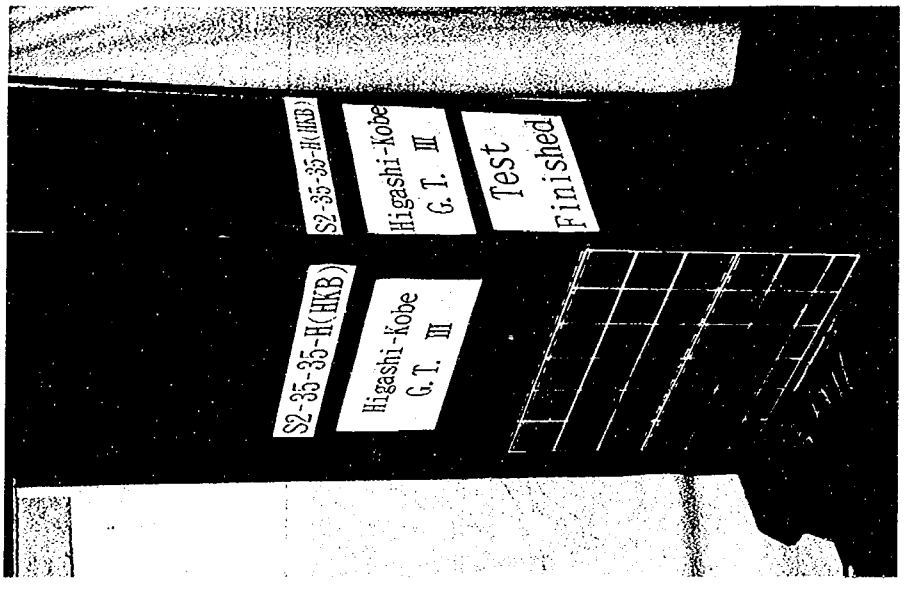
ＪＭＡを原波形で入力

写真-3.3.1(4)　矩形断面試験体の破壊状況



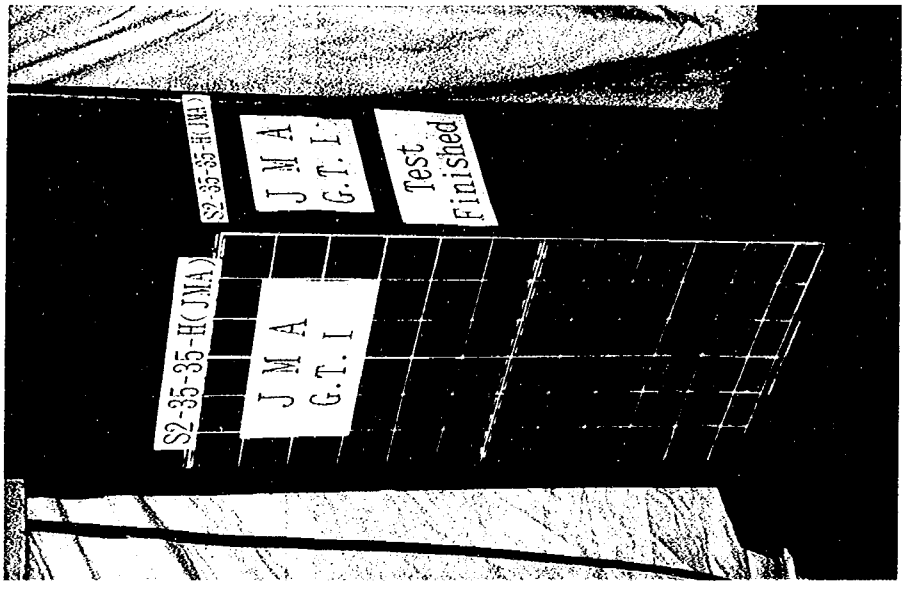
矩形No. 18

ＪＭＡを拡大波形で
入力



矩形No. 19

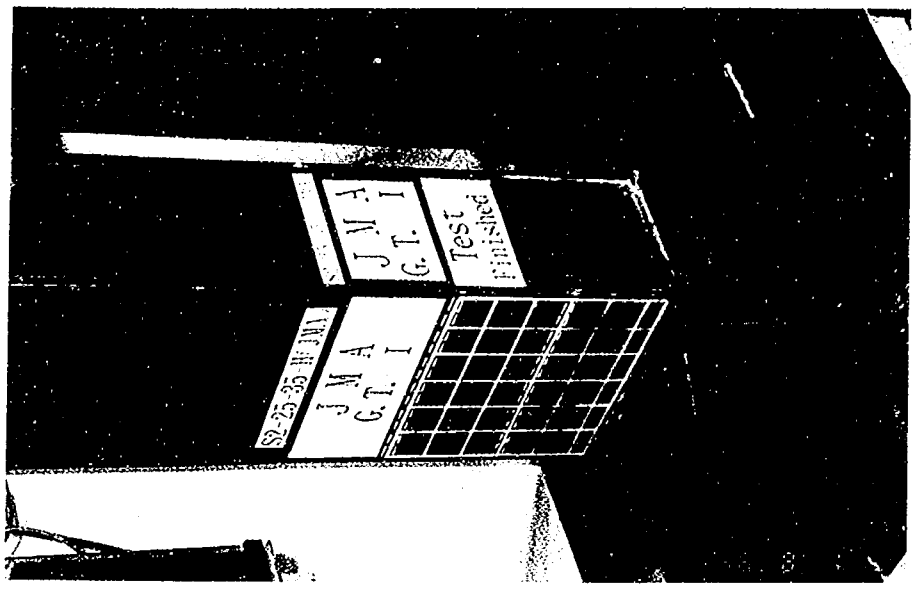
ＨＫＢを原波形で
入力



矩形No. 20

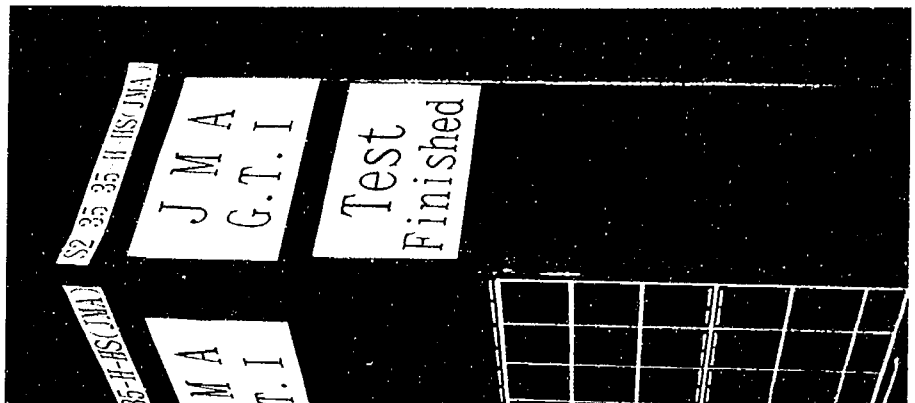
ＪＭＡを原波形で
入力

写真-3.3.1(5)　矩形断面試験体の破壊状況



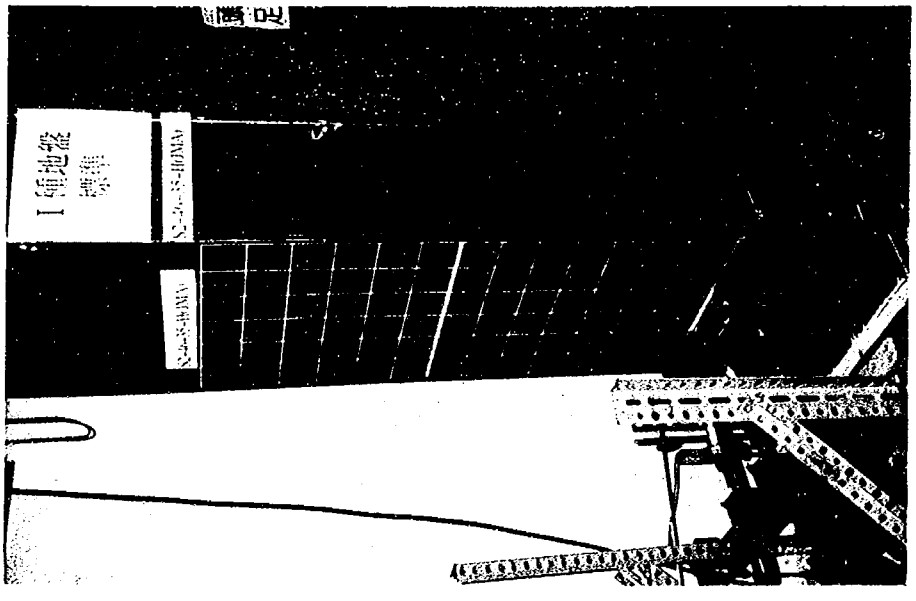
矩形No. 21

ＪＭＡを原波形で
入力



矩形No. 22

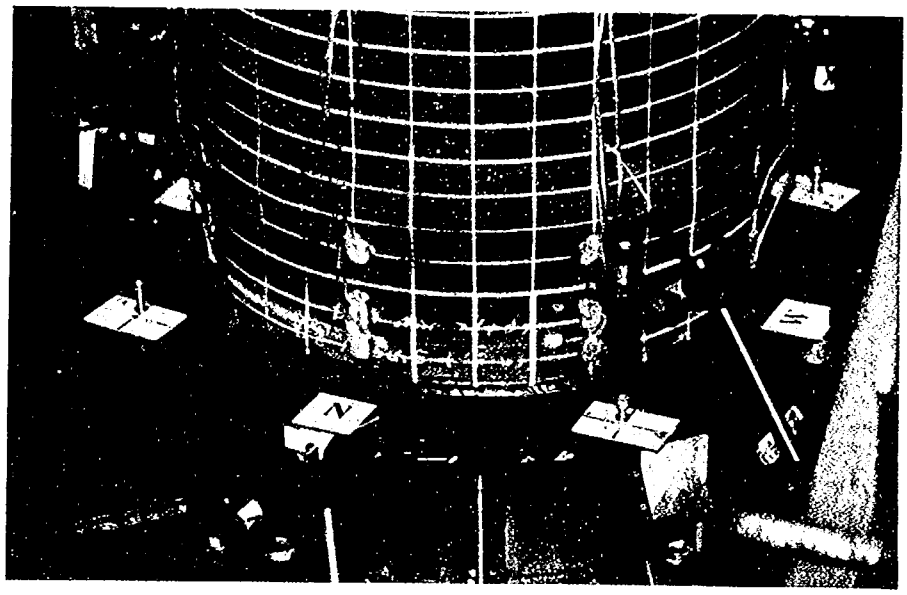
ＪＭＡを原波形で
入力



矩形No. 23

ＪＭＡを原波形で
入力

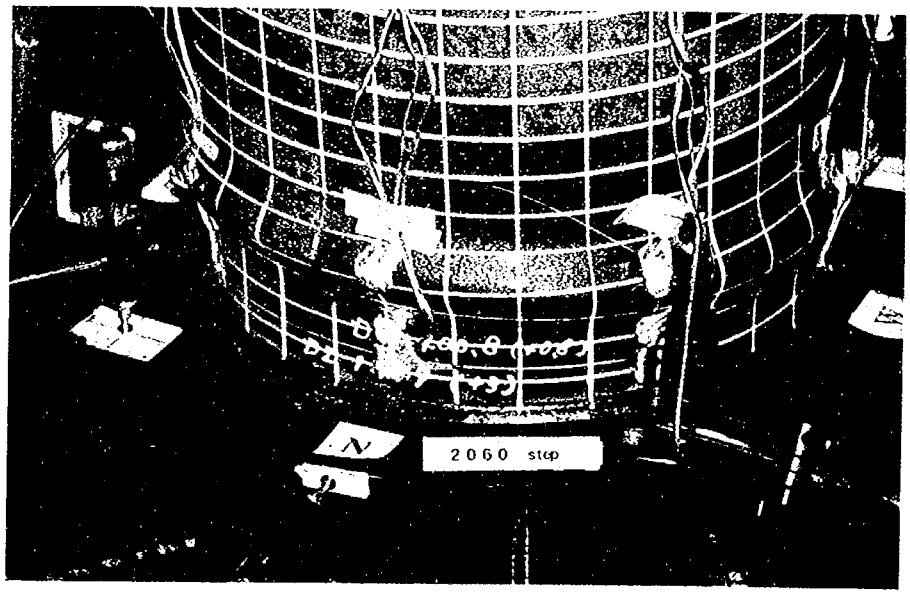
写真-3.3.1(6)　矩形断面試験体の破壊状況



円形No. 4

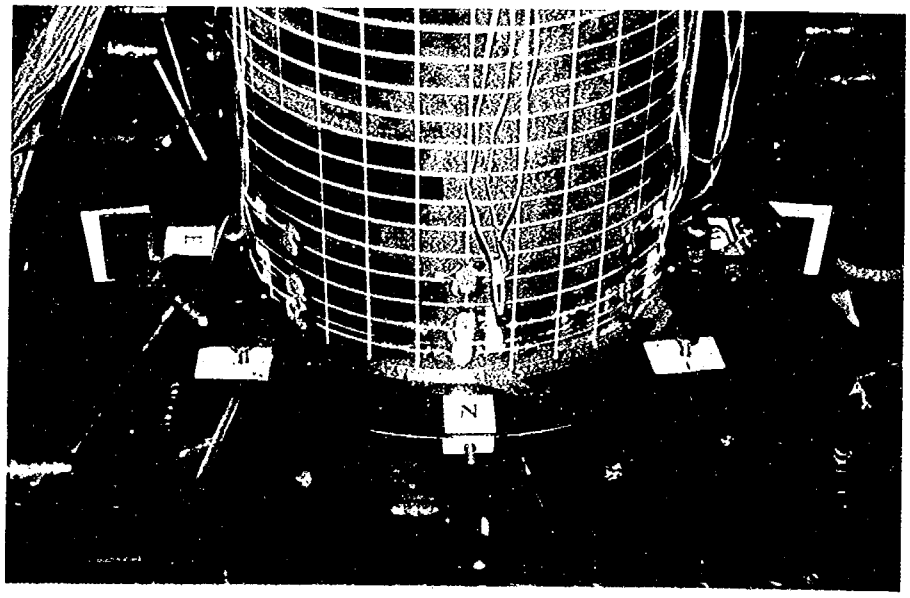
免震Ⅰ種を原波形で入力

基部から100mmの高さで局部座屈



円形No. 5

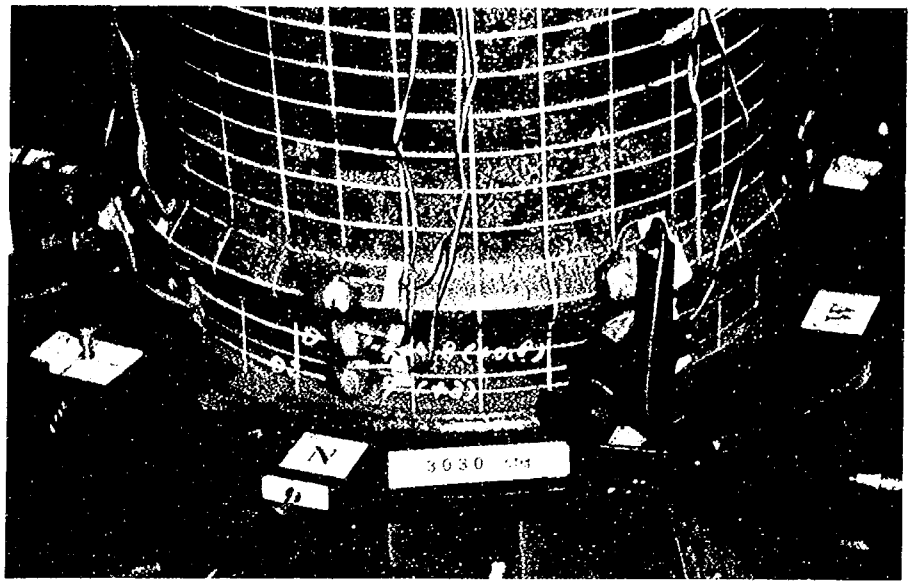
免震Ⅰ種を拡大波形で入力



円形No. 6

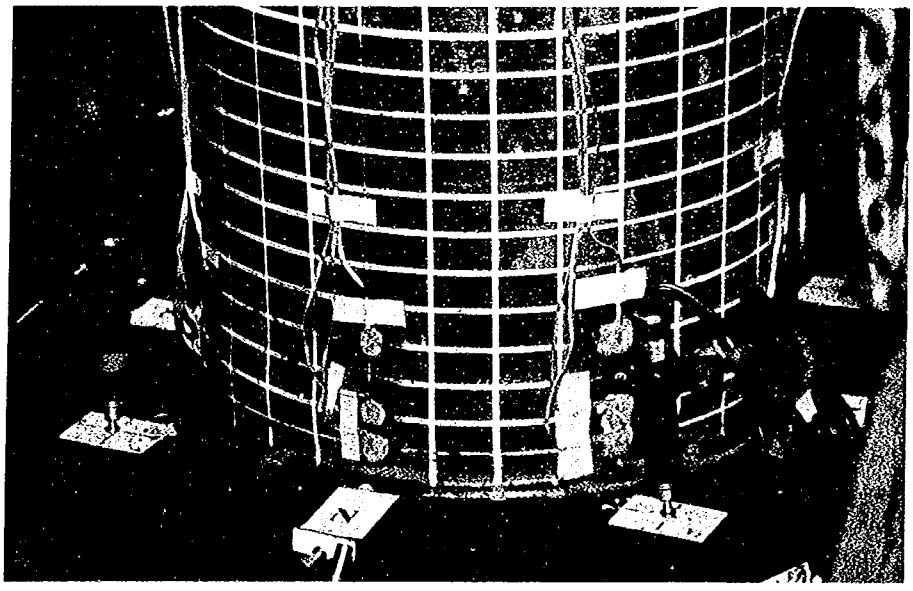
免震Ⅲ種を原波形で入力

写真-3.3.2(1)　円形断面試験体の破壊状況



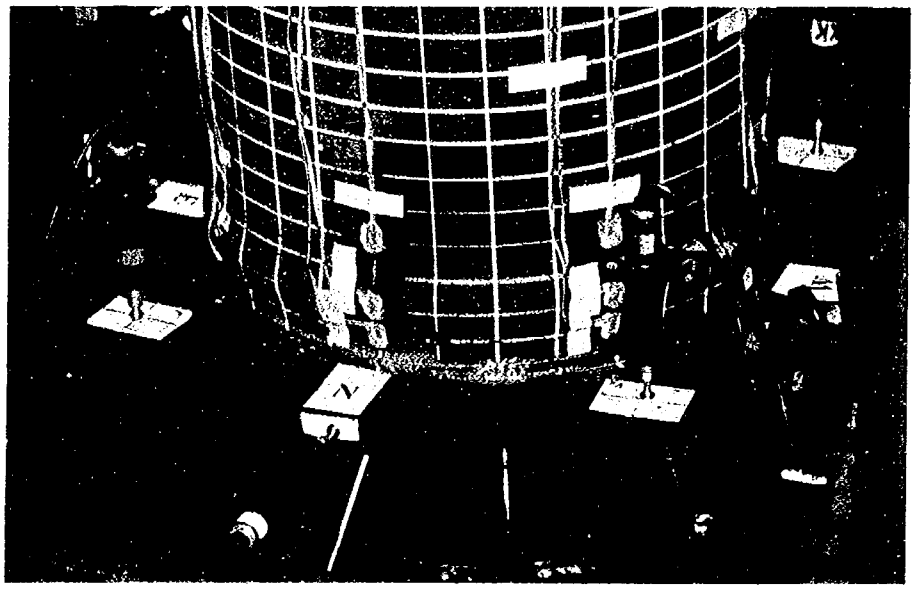
円形No. 7

免震Ⅲ種を拡大波形で入力



円形No. 8

免震Ⅰ種を原波形で入力

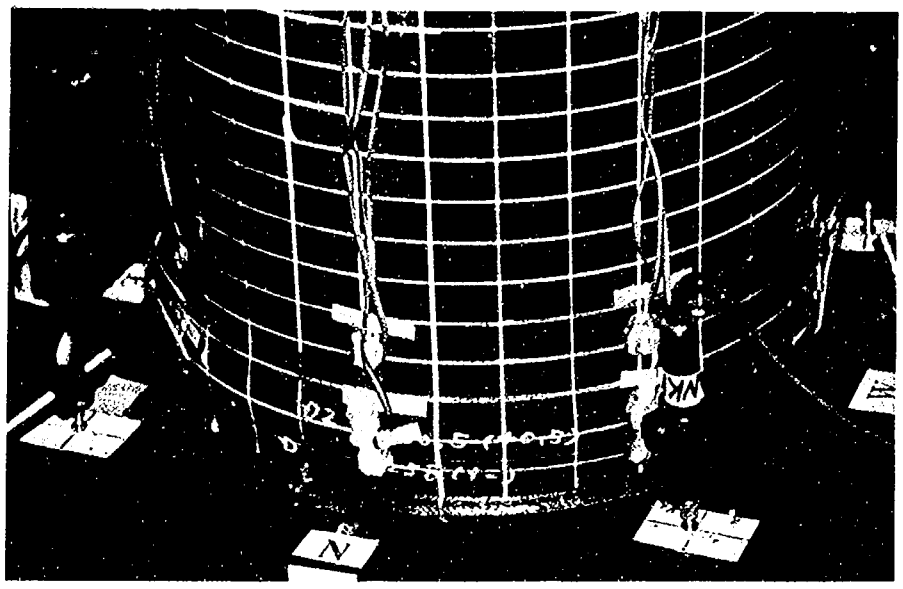


円形No. 9

免震Ⅰ種を拡大波形で入力

基部から50mmの高さで局部座屈

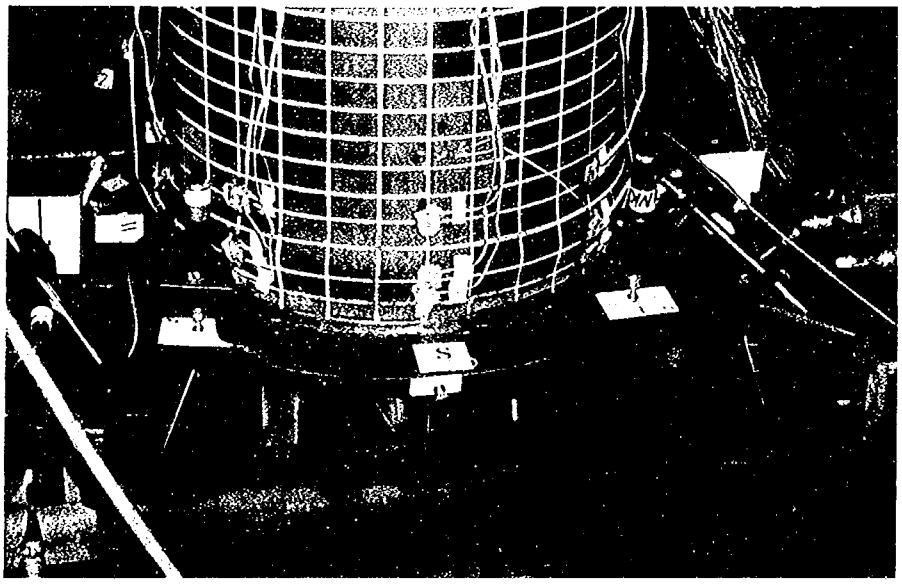
写真-3.3.2(2)　円形断面試験体の破壊状況



円形No. 10

ＪＭＡを原波形で
入力

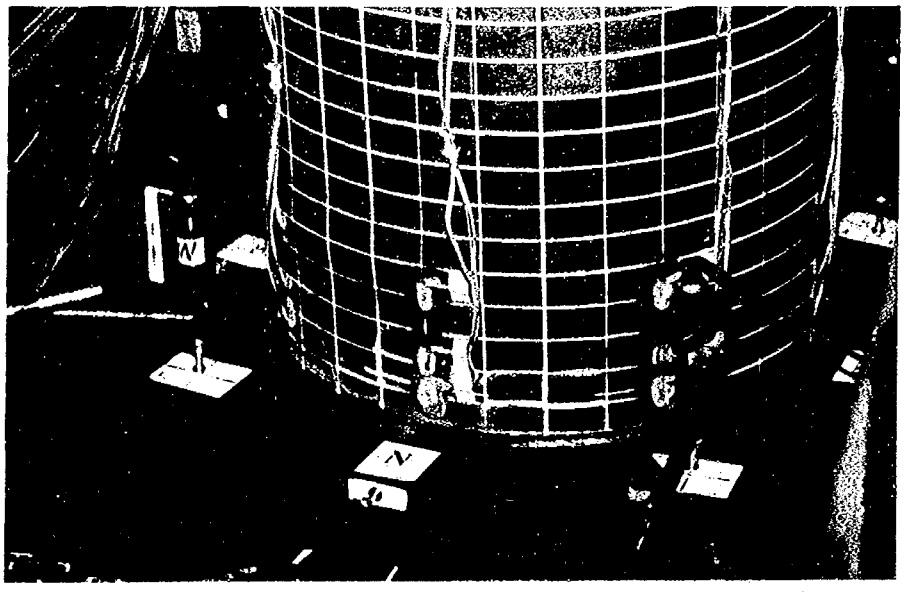
基部から50㎜の高さで局
部座屈



円形No. 11

ＪＭＡを拡大波形で
入力

基部から50㎜の高さで局
部座屈

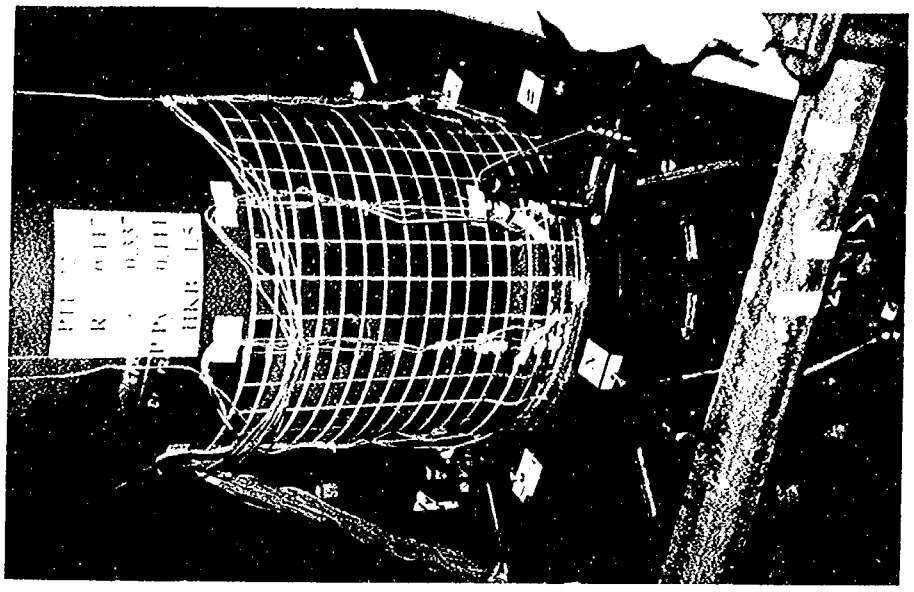


円形No. 12

ＨＫＢを原波形で
入力

基部から125㎜の高さで
局部座屈

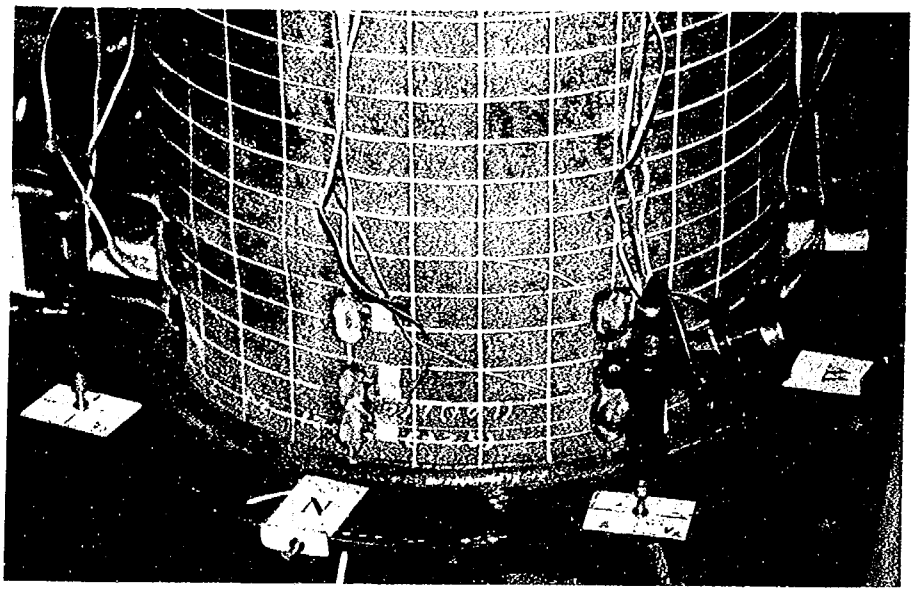
写真-3.3.2(3)　円形断面試験体の破壊状況



円形No. 13

ＨＫＢを拡大波形で入力

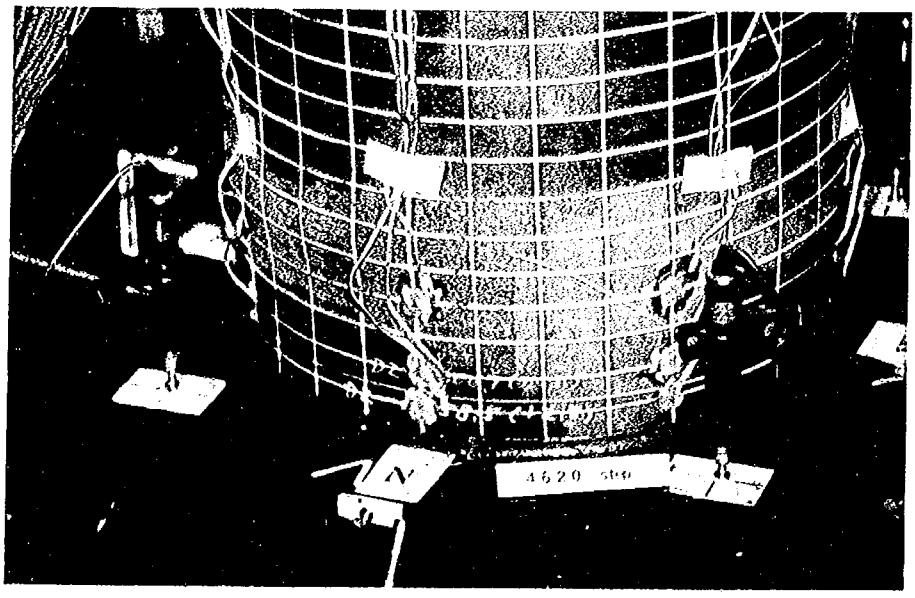
基部から60㎜の高さで局部座屈



円形No. 16

免震Ⅰ種を原波形で入力

基部から125㎜の高さで局部座屈

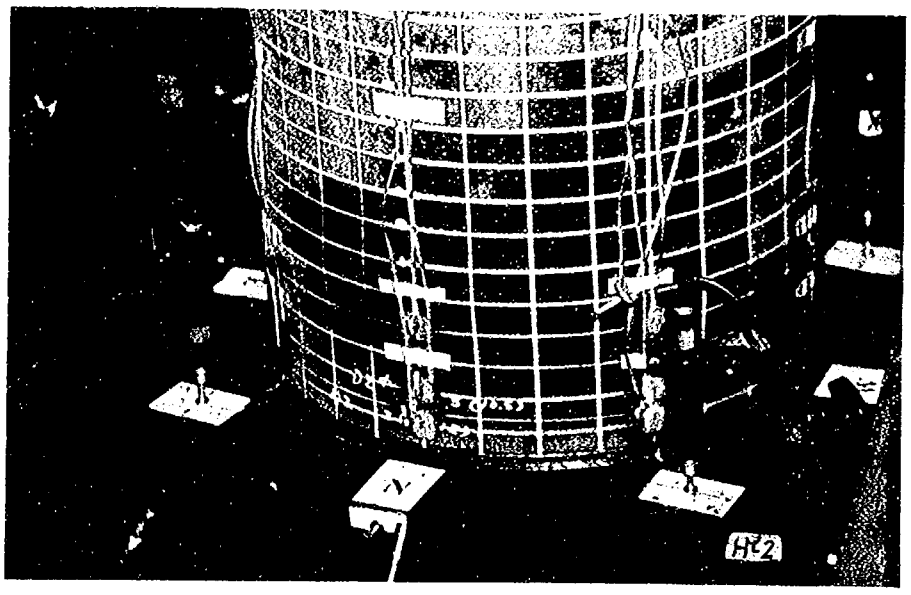


円形No. 17

ＨＫＢを拡大波形で入力

基部から125㎜の高さで局部座屈

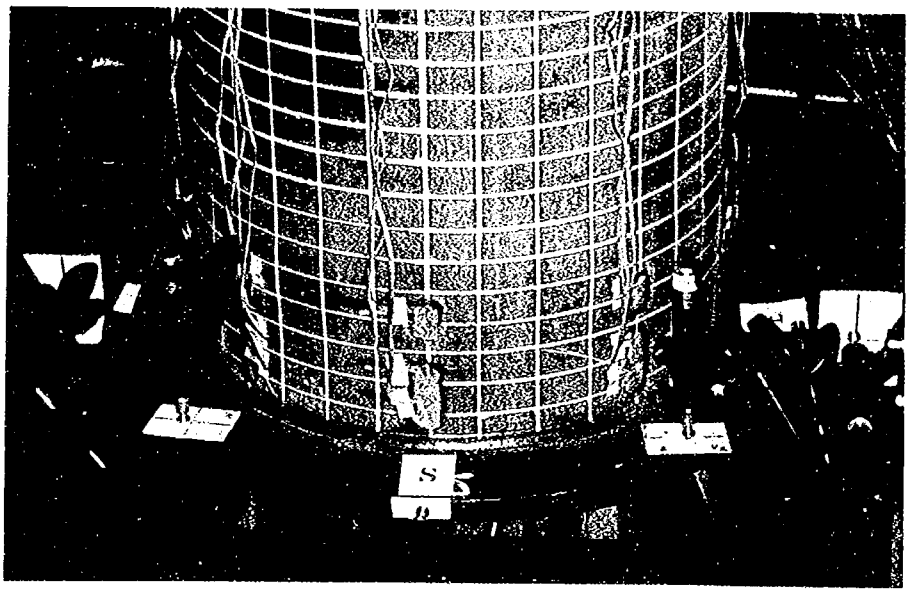
写真-3.3.2(4)　円形断面試験体の破壊状況



円形No. 18

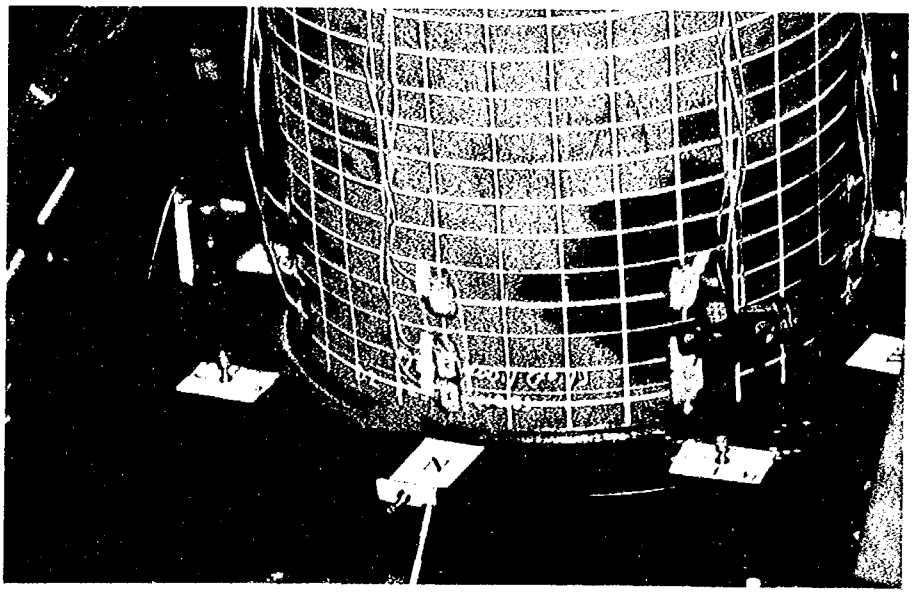
免震Ⅰ種を原波形で入力

基部から125㎜の高さで局部座屈



円形No. 19

ＪＭＡを原波形で入力

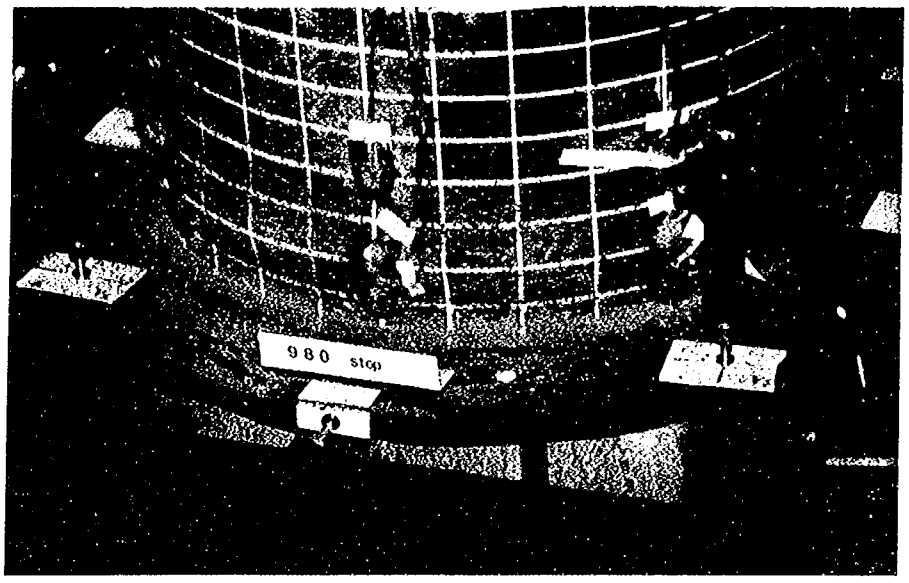


円形No. 20

ＨＫＢを原波形で入力

基部から100㎜の高さで局部座屈

写真-3.3.2(5)　円形断面試験体の破壊状況



円形No. 21

ＪＭＡを原波形で入力

写真-3.3.2(6)　円形断面試験体の破壊状況

参考資料

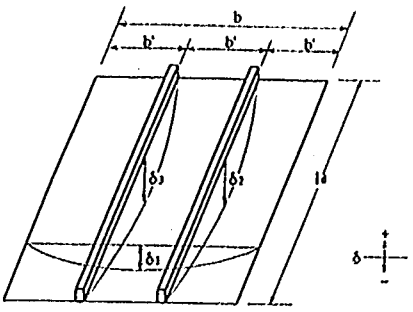


図-参考-2.7.1　矩形断面試験体の初期不整

表-参考-2.7.1　矩形断面試験体の初期不整測定結果

試験体	面	$(\delta_1/b)/(b/150)(\%)$		$(\delta_2/l_d)/(l_d/1000)(\%)$		$(\delta_3/l_d)/(l_d/1000)(\%)$	
		+	−	+	−	+	−
No. 1	A	0.0281	0.0316	0.0723	0.0517	0.0516	0.0146
	B	0.0451	0.0511	0.0552	0.0146	0.0612	0.0131
No. 2	A	0.0992	0.0128	0.0752	0.1024	0.0954	−
	B	0.1020	0.1010	0.2514	0.1714	0.0420	0.0158
No. 3	A	0.0544	0.0547	0.0029	0.0567	0.0443	0.0068
	B	0.0453	0.0624	0.0423	0.0234	0.0676	0.0423
No. 4	A	0.0678	0.0458	0.0233	0.0448	0.0607	0.0343
	B	0.0363	0.0636	0.0323	0.0351	0.0159	0.0514
No. 5	A	0.0205	0.0235	0.0563	0.1331	0.0475	0.0245
	B	0.0467	0.0267	0.0125	0.0557	0.0560	0.0513
No. 6	A	0.0465	0.0215	0.0155	0.0104	0.0659	0.0305
	B	0.0232	0.0255	0.0135	0.0696	0.0026	0.0693
No. 7	A	0.0631	0.0224	0.0435	0.0258	0.0012	0.0156
	B	0.0239	0.0138	0.0502	0.0158	0.2640	0.0562
No. 8	A	0.0505	0.0662	0.0424	0.0644	0.1028	0.0246
	B	0.0506	0.0463	0.0541	0.0364	0.0208	0.0194
No. 9	A	0.0483	0.0604	0.0043	0.0404	0.0353	0.0346
	B	0.0867	0.0469	0.0485	0.0629	0.0166	0.0604
No. 10	A	0.0246	0.0323	0.0256	0.0346	0.0256	0.0647
	B	0.0335	0.0564	0.0235	0.0535	0.0545	0.0345
No. 11	A	0.0485	0.0685	0.0634	0.0568	0.0355	0.0633
	B	0.0085	0.0575	0.0030	0.0085	0.0387	0.0733
No. 12	A	0.0395	0.0585	0.0250	0.0578	0.0376	0.0435
	B	0.0325	0.0520	0.0767	0.0475	0.0365	0.0335
No. 13	A	0.0367	0.0286	0.0335	0.0535	0.0283	0.0223
	B	0.0185	0.0182	0.0330	0.0481	0.0115	0.0552
No. 14	A	0.0325	0.0185	0.0241	0.0181	0.0315	0.0345
	B	0.0383	0.0485	0.0210	0.0082	0.0364	0.0363
No. 15	A	0.0384	0.0535	0.0220	0.0553	0.0336	0.0433
	B	0.0245	0.0563	0.0264	0.0645	0.0353	0.0245
No. 16	A	0.0345	0.0565	0.0630	0.0545	0.0363	0.0643
	B	0.0364	0.0545	0.0250	0.0575	0.0365	0.0223
No. 17	A	0.0305	0.0085	0.0730	0.0485	0.0585	0.0733
	B	0.0585	0.0565	0.0738	0.0689	0.0378	0.0733
No. 18	A	0.0785	0.0545	0.0438	0.0582	0.0283	0.0436
	B	0.0374	0.0565	0.0247	0.0486	0.0384	0.0345
No. 19	A	0.0304	0.0565	0.0234	0.0535	0.0685	0.0532
	B	0.0685	0.0585	0.0230	0.0744	0.0374	0.0378
No. 20	A	0.0345	0.0545	0.0240	0.0584	0.0585	0.0333
	B	0.0335	0.0385	0.0330	0.0865	0.0235	0.0632
No. 21	A	0.0305	0.0065	0.0276	0.0335	0.0387	0.0363
	B	0.0085	0.0575	0.0278	0.0500	0.0375	0.0770
No. 22	A	0.0346	0.0698	0.0270	0.0685	0.0398	0.0393
	B	0.0384	0.0557	0.0734	0.0455	0.0374	0.0734
No. 23	A	0.0234	0.0577	0.0256	0.0335	0.0355	0.0334
	B	0.0325	0.0385	0.0430	0.0555	0.0686	0.0634

表-参考-2.7.2(1)　ＯＯＳ計測結果（単位：mm）

試験体名	S	SE	E	NE	N	NW	W	SW	$0.08\times\sqrt{(R\cdot t)}$
No. 1	0.06	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	2.43
No. 2	0.04	0.06	0.06	0.15	0.03	0.04	0.06	0.05	2.44
No. 3	0.08	0.06	0.05	0.07	0.03	0.0	0.04	0.05	2.44
No. 4	0.03	0.03	0.0	0.03	0.05	0.04	0.0	0.03	2.42
No. 5	0.06	0.08	0.09	0.12	0.08	0.13	0.09	0.09	2.47
No. 6	0.03	0.03	0.03	0.03	0.0	0.03	0.0	0.03	2.42
No. 7	0.25	0.07	0.11	0.06	0.05	0.09	0.03	0.18	2.43
No. 8	0.23	0.0	0.04	0.09	0.08	0.09	0.13	0.17	2.42
No. 9	0.10	0.08	0.07	0.07	0.16	0.07	0.14	0.19	2.43
No. 10	0.0	0.06	0.0	0.08	0.03	0.04	0.04	0.07	2.48
No. 11	0.05	0.0	0.04	0.0	0.0	0.06	0.04	0.06	2.44
No. 12	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	2.45
No. 13	0.09	0.0	0.03	0.0	0.05	0.04	0.03	0.0	2.47
No. 14	0.0	0.0	0.0	0.03	0.0	0.0	0.0	0.05	2.81
No. 15	0.03	0.03	0.04	0.0	0.0	0.04	0.03	0.03	2.78
No. 16	0.05	0.04	0.03	0.05	0.0	0.10	0.05	0.19	2.78
No. 17	0.0	0.08	0.27	0.0	0.11	0.10	0.08	0.07	2.81
No. 18	0.03	0.05	0.04	0.13	0.11	0.11	0.11	0.08	2.79
No. 19	0.07	0.03	0.03	0.0	0.0	0.10	0.03	0.06	2.80
No. 20	0.07	0.20	0.11	0.05	0.09	0.11	0.05	0.08	2.79
No. 21	0.08	0.07	0.14	0.04	0.08	0.10	0.18	0.09	2.44

表-参考-2.7.2(2)　円形断面試験体の外径計測結果とＯＯＲ

試験体名	1回目	2回目	3回目	平均	ＯＯＲ[1)]（＜0.01）
No. 1	400.20	398.60	400.30	399.70	0.00425
No. 2	398.25	399.60	399.80	399.22	0.00388
No. 3	399.40	399.80	400.05	399.75	0.00163
No. 4	400.20	400.10	400.20	400.17	0.000250
No. 5	399.90	399.10	399.80	399.60	0.00200
No. 6	399.80	399.80	400.70	400.10	0.00225
No. 7	399.45	399.80	401.30	400.18	0.00462
No. 8	399.20	399.30	399.80	399.43	0.00150
No. 9	401.10	400.80	400.50	400.83	0.00150
No. 10	399.80	400.20	399.90	399.97	0.00100
No. 11	401.20	399.80	400.50	400.52	0.00350
No. 12	400.65	399.00	399.00	399.55	0.00413
No. 13	400.00	400.10	399.20	399.77	0.00225
No. 14	400.95	401.50	399.85	400.77	0.00412
No. 15	400.60	399.35	399.70	399.88	0.00313
No. 16	399.65	400.60	400.30	400.18	0.00237
No. 17	401.05	400.20	398.80	400.02	0.00562
No. 18	399.30	400.05	399.10	399.48	0.00375
No. 19	400.05	400.60	400.55	400.40	0.00137
No. 20	401.00	399.15	399.25	399.80	0.00463
No. 21	400.85	399.85	399.00	399.90	0.00250

1)$OOR=(D_{max}-D_{min})/D_{ave}$　　（単位：mm）

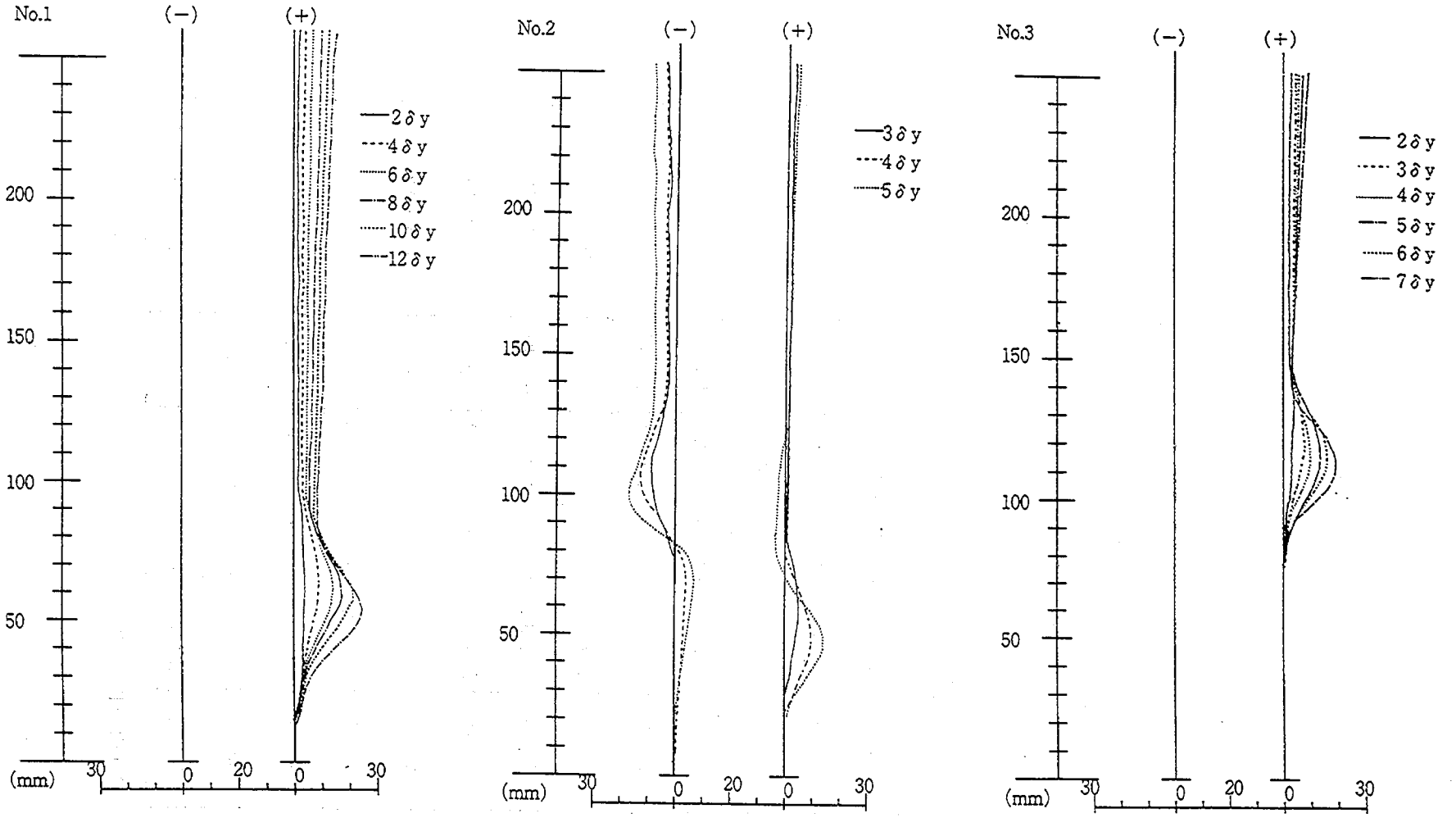


図-参考-3.3.2(1)　円形断面供試体座屈モード

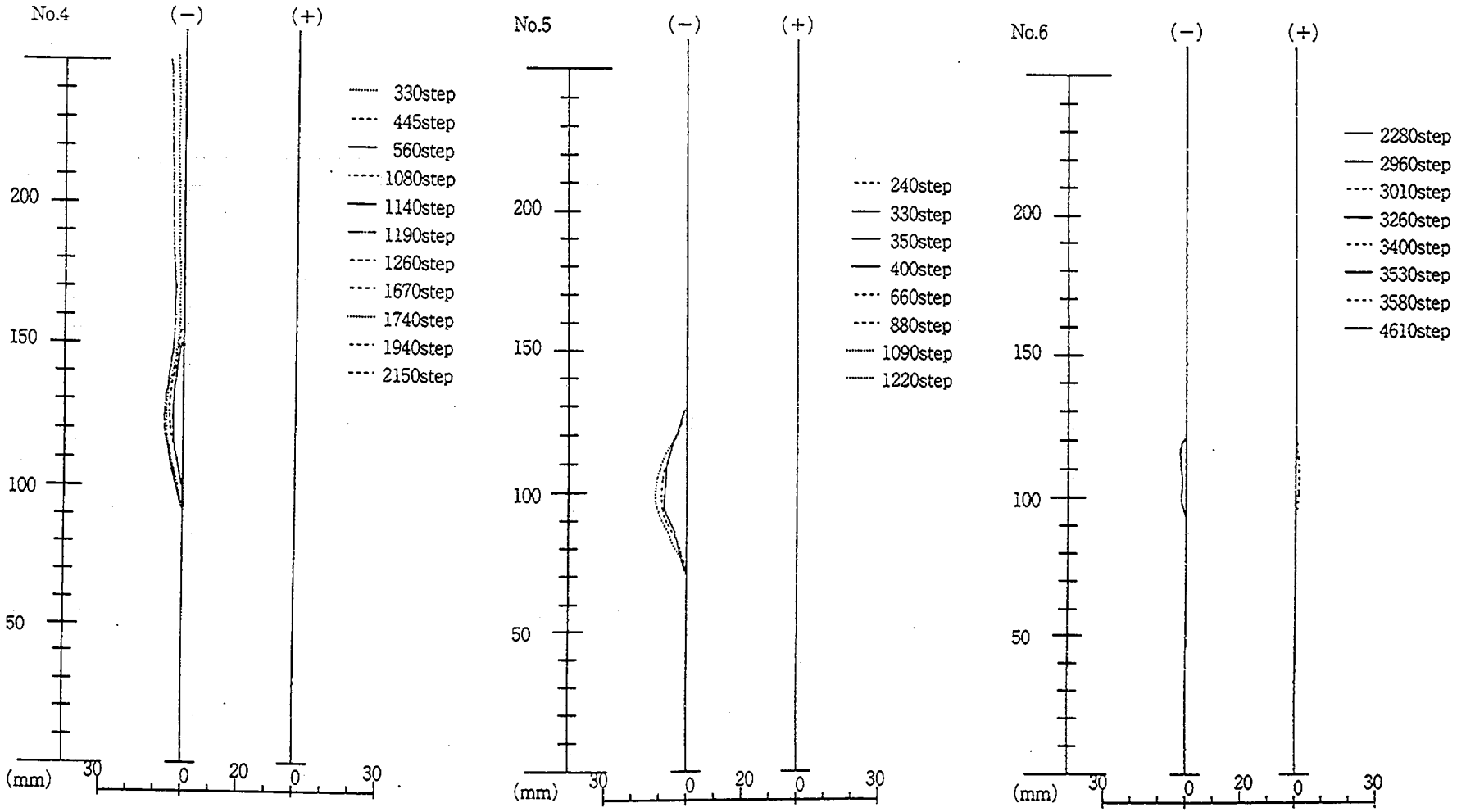


図-参考-3.3.2(2)　円形断面供試体座屈モード

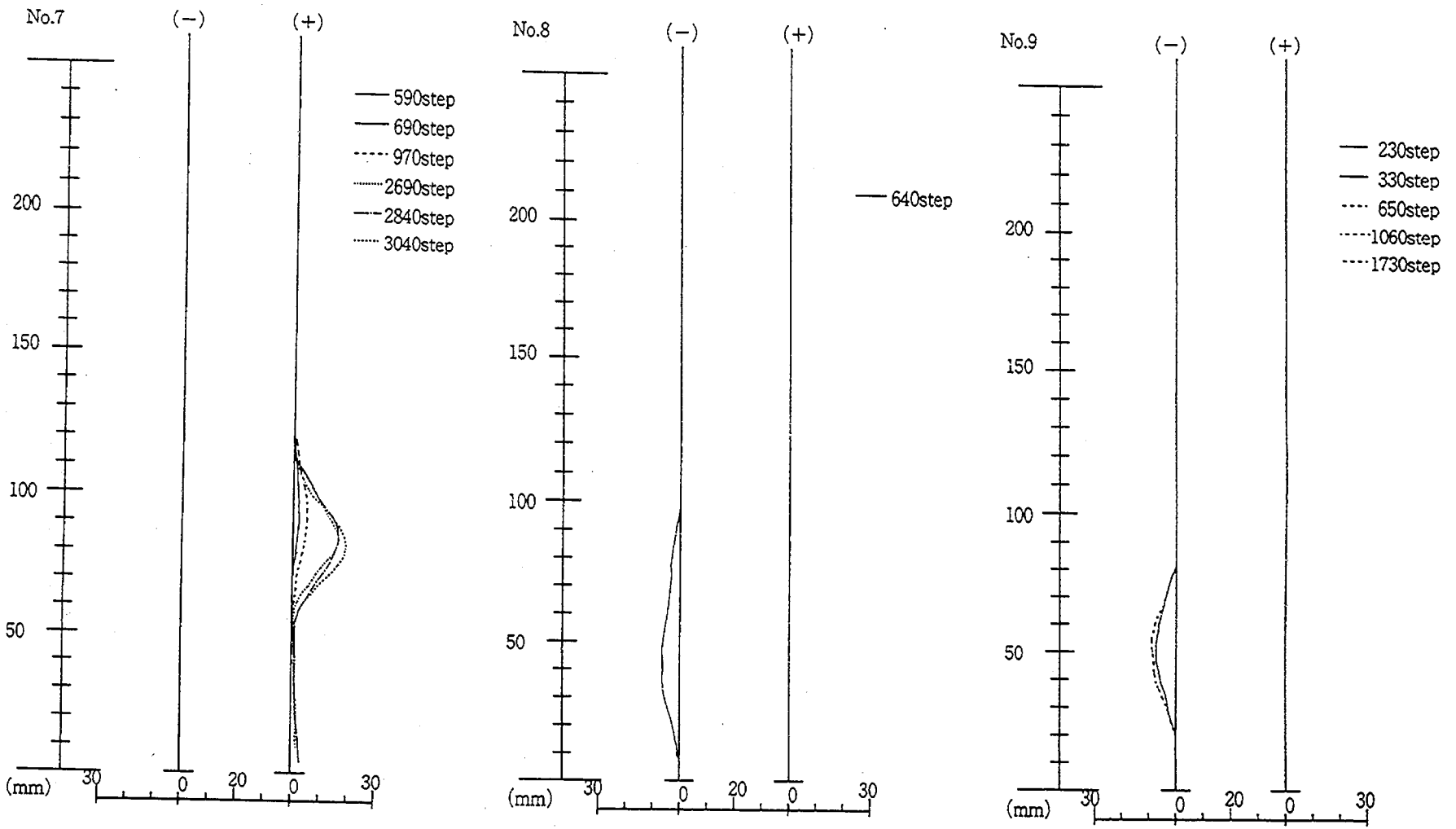


図-参考-3.3.2(3)　円形断面供試体座屈モード

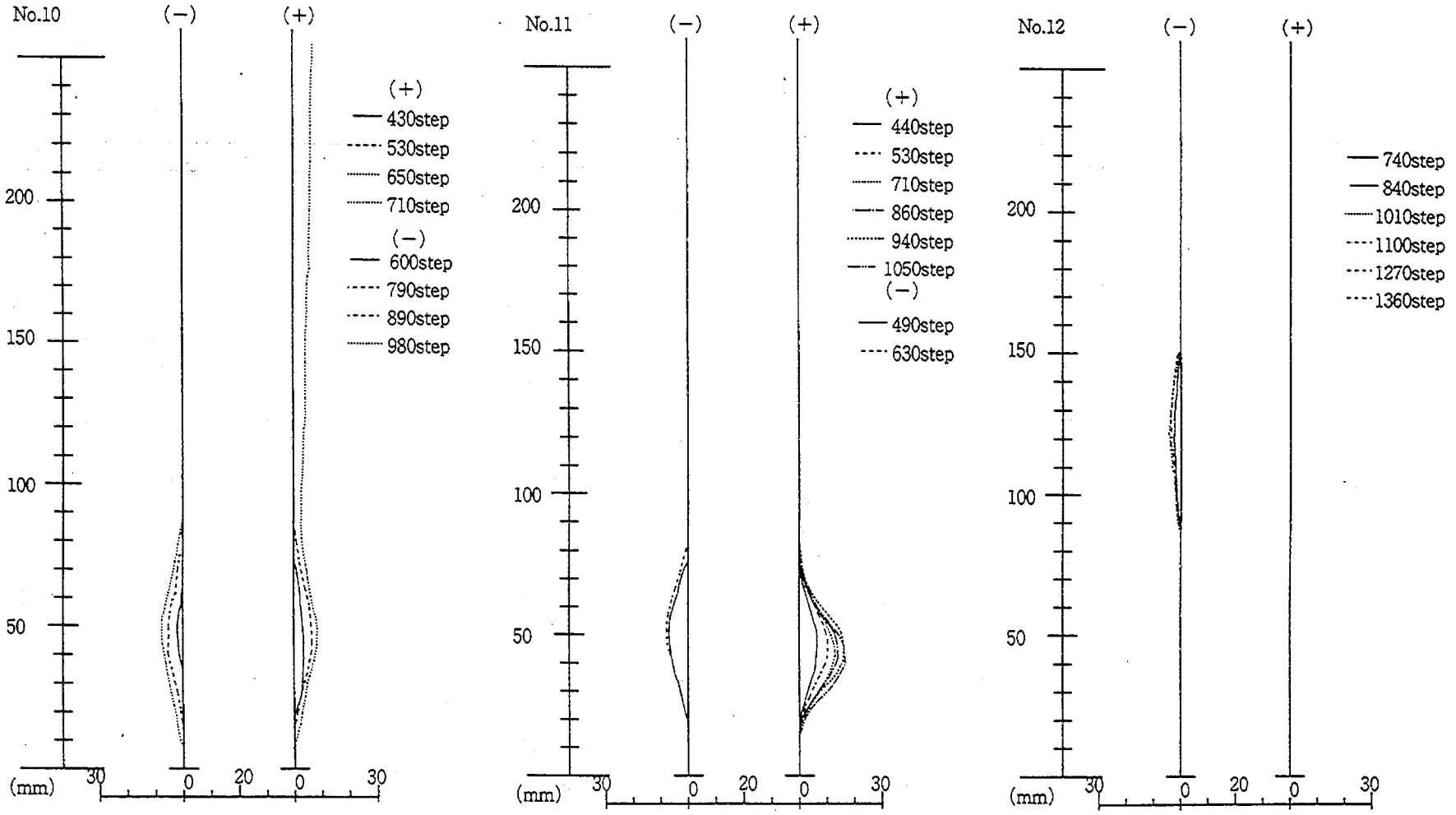


図-参考-3.3.2(4)　円形断面供試体座屈モード

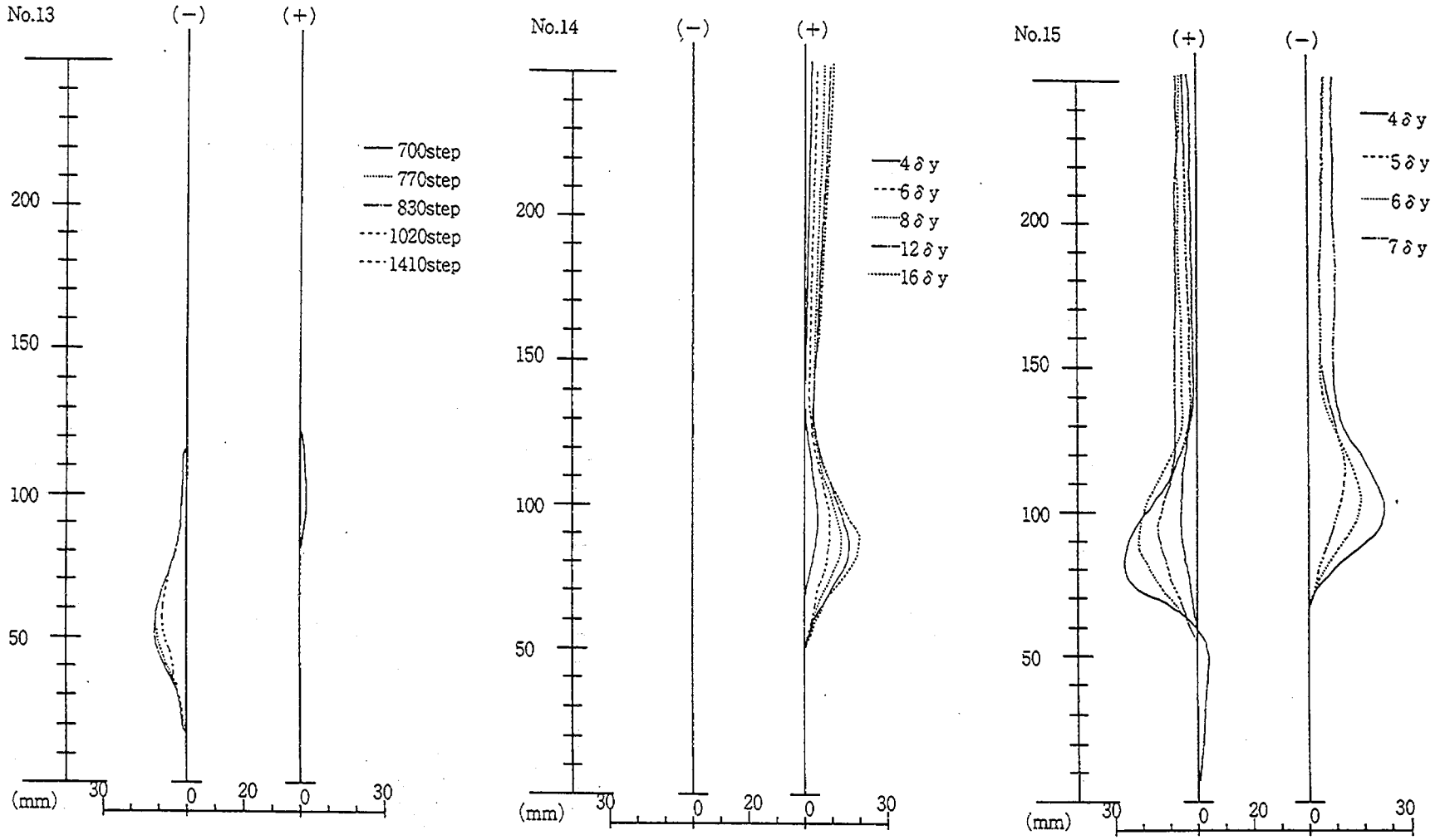


図-参考-3.3.2(5)　円形断面供試体座屈モード

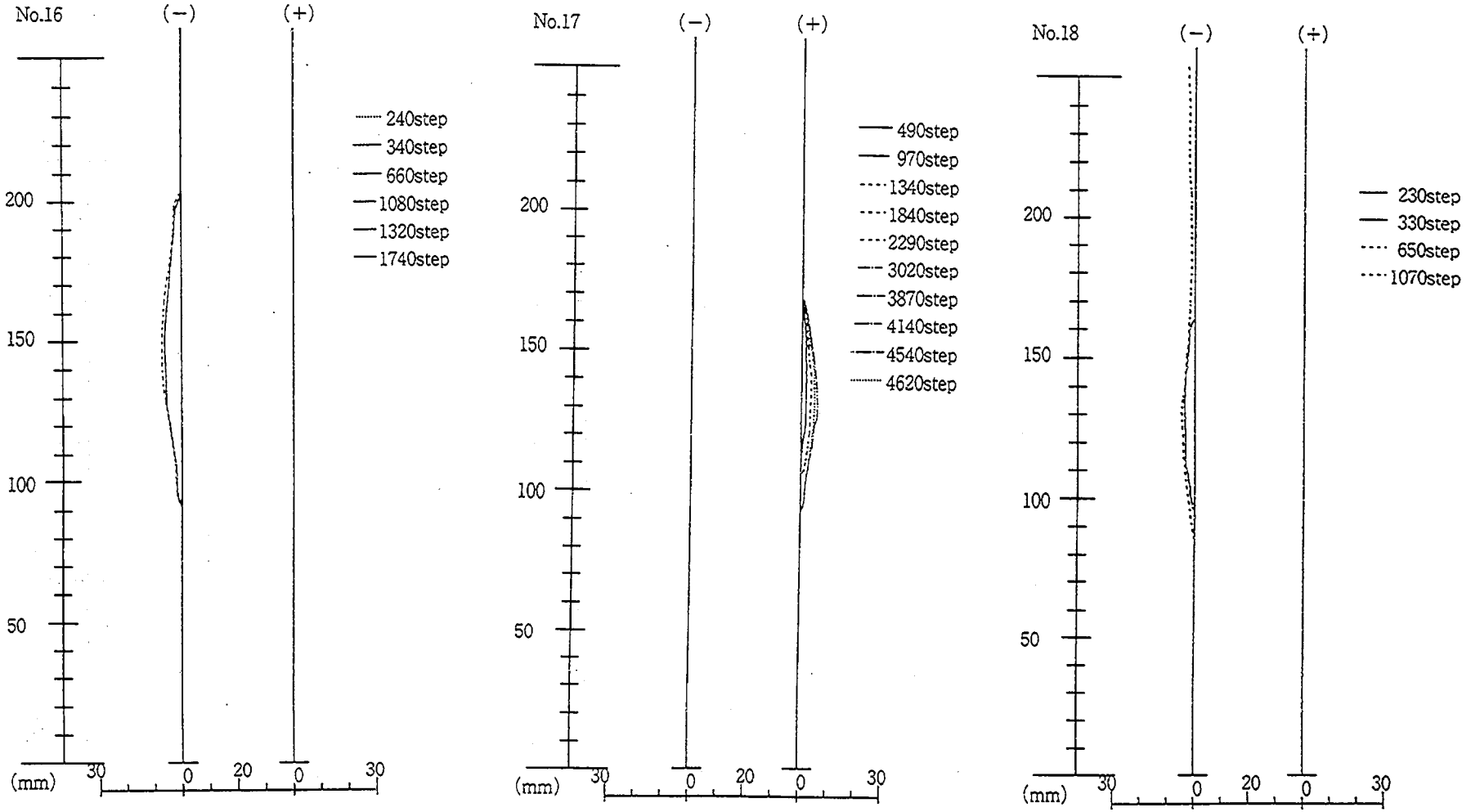


図-参考-3.3.2(6)　円形断面供試体座屈モード

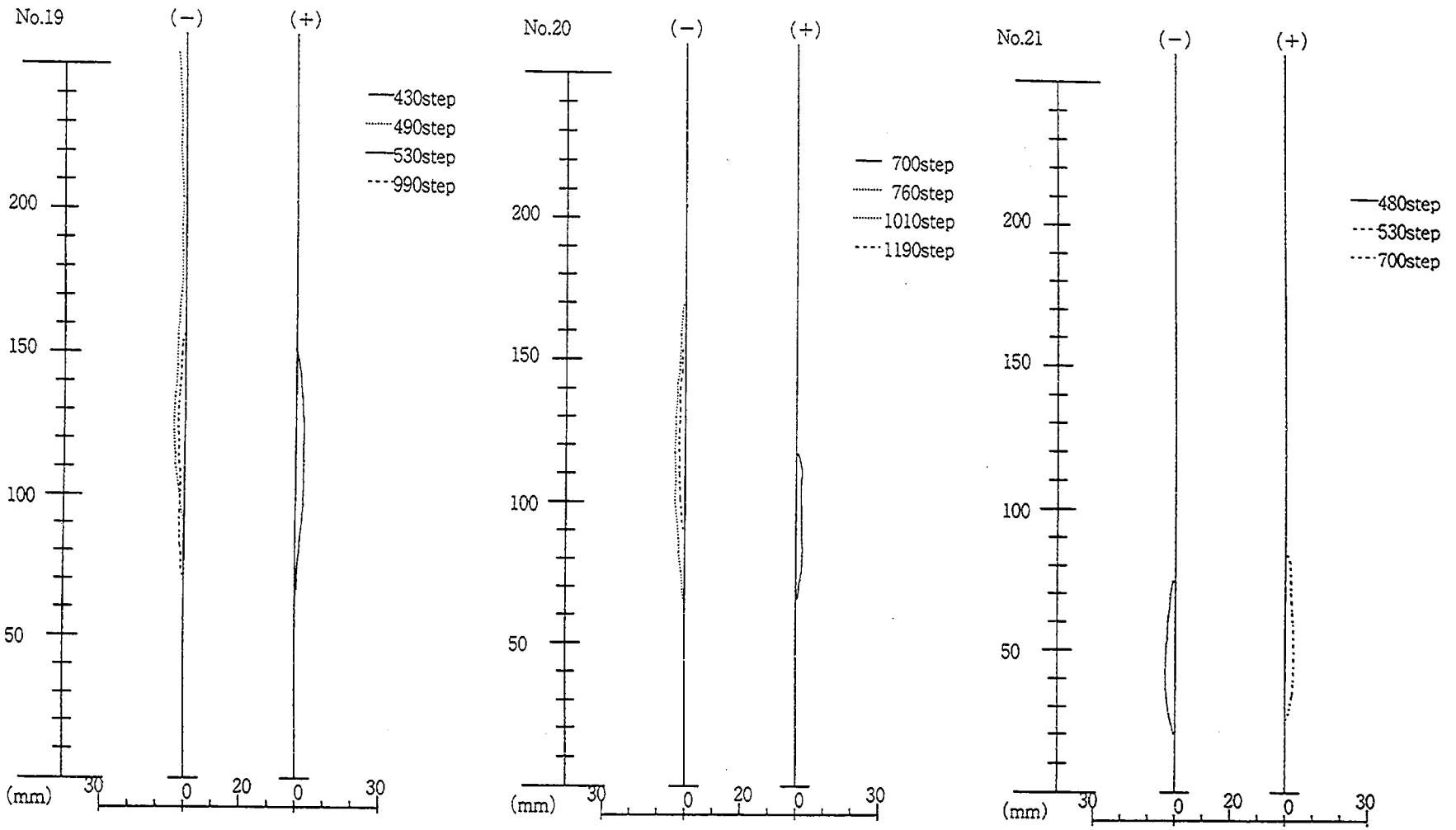


図-参考-3.3.2(7)　円形断面供試体座屈モード

IV. 鋼製橋脚の非線形動的応答解析

1. 入力データ

1.1 概要

平成８年11月に改訂された道路橋示方書Ⅴ耐震設計編では、コンクリートを充填しない鋼製橋脚は、繰返しの影響を考慮した水平載荷実験等に基づき、非線形動的応答解析により耐震性を判定するのがよいとされた。

本編では、第Ⅲ編に記載した名古屋大学とＣ社(日本鋼管(株)基盤技術研究所)の実験設備を使用して、ハイブリッド地震応答実験を行った成果と動的応答解析結果を比較している。また、１自由度の非線形動的応答解析結果とハイブリッド地震応答実験結果を比較することによって、非線形動的応答解析における復元力特性の設定方法を検討した。

1.2 構造のモデル化

1.2.1 1自由度非線形動的応答解析モデル

1自由度の非線形動的解析の振動モデルの概要を図-1.2.1に示す。ここで、復元力を有する部材は、スカラーばね要素としている。

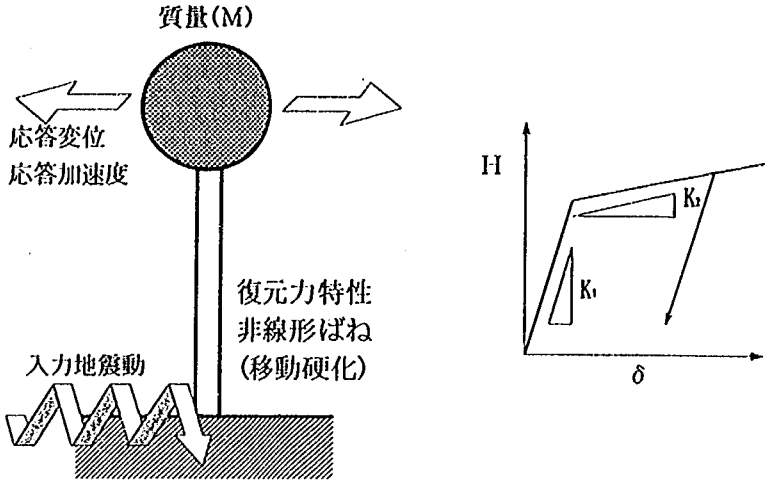


図-1.2.1 1自由度非線形動的応答解析モデル

1.2.2 ハイブリッド地震応答実験モデル

ハイブリッド地震応答実験の振動モデルの概念は図-1.2.2のようである。この試験では、供試体の頂部の変位とジャッキの力から復元力を測定し、1自由度の振動モデルを仮想して微分方程式を解いている。

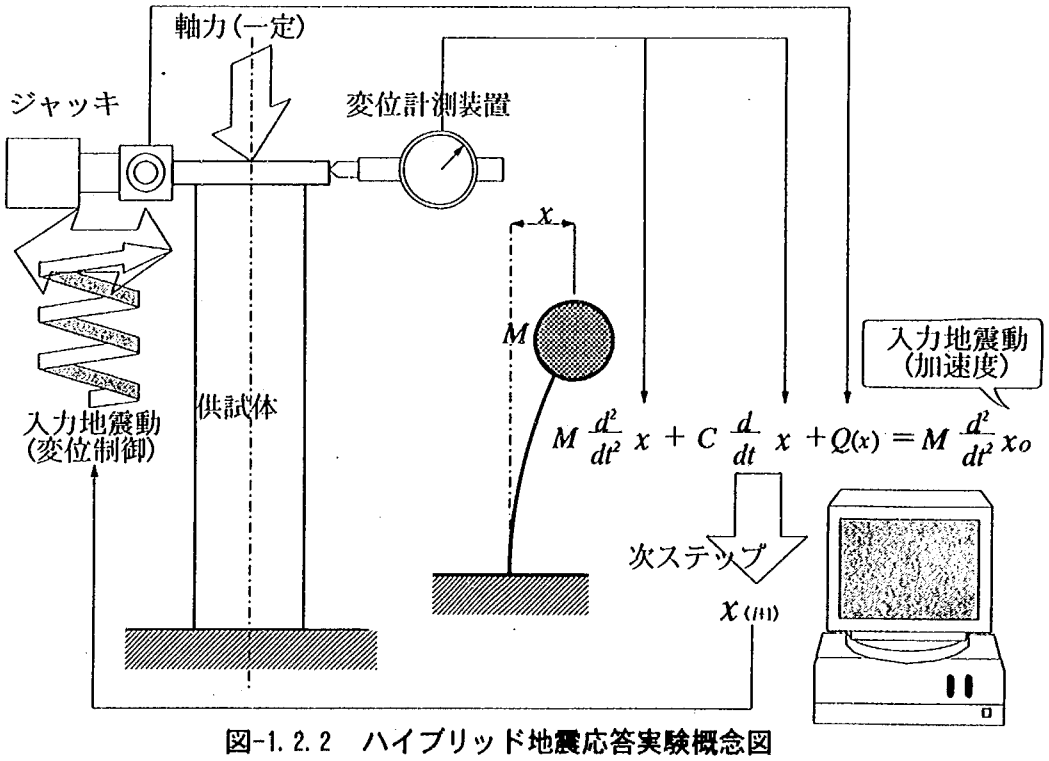


図-1.2.2 ハイブリッド地震応答実験概念図

1.2.3 ハイブリッド地震応答実験の相似則

ハイブリッド地震応答実験では、実橋脚に対してその縮尺率を１／８として実験している。

動的応答解析は、この実橋脚モデルについて行う。この場合の相似則に基づいた質量、復元力、変位、加速度等を表-1.2.1 にまとめて示す。

表-1.2.1　ハイブリッド地震応答実験に用いる相似則

項　目	次元	矩形断面	円形断面
長さ	L	S	S
質量	M	S^3	S^2
時間	T	S	$\sqrt{S}$
応力度	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1
速度	LT^{-1}	1	$\sqrt{S}$
加速度	LT^{-2}	1/S	1
力	MLT^{-2}	S^2	S^2
剛性	MT^{-2}	S	S

記号説明：
S：縮尺率

この相似則に基づき計算した、ハイブリッド地震応答実験での供試体の実寸モデル(実橋脚)の質量、材料の引張試験より得られる降伏応力度にもとづいて計算した降伏水平力および降伏変位を表-1.2.2 に示す。また、これらのハイブリッド地震応答実験結果の履歴図を表-1.2.3 に示す

表-1.2.2　相似則による実橋脚モデルの構造特性

		モデル番号(供試体)	質　量 ($tf \cdot s^2/cm$)	降伏水平力 (tf)	降伏変位 (cm)
矩形断面	基本断面1	R-04	3.110	910.2	8.55
		R-05	3.127	914.9	8.49
		R-06	2.331	951.6	8.73
		R-07	2.338	954.8	8.89
		R-08	3.919	1153.5	4.88
		R-09	3.916	1152.7	4.88
		R-10	3.142	919.4	8.49
		R-11	3.096	905.0	8.36
		R-12	2.363	965.1	8.94
		R-13	2.336	953.7	8.88
	基本断面2	R-16	2.703	652.1	5.66
		R-17	2.706	652.8	5.65
		R-18	2.717	655.4	5.66
		R-19	2.025	688.8	5.98
円形断面	基本断面1	P-04	2.002	584.1	6.51
		P-05	1.974	574.8	6.30
		P-06	1.458	617.9	7.03
		P-07	1.445	612.0	6.90
		P-08	2.103	613.1	4.20
		P-09	2.090	609.1	4.13
		P-10	1.876	545.1	5.94
		P-11	1.797	521.8	5.85
		P-12	1.508	639.5	7.11
		P-13	1.518	643.6	7.07
	基本断面2	P-16	2.754	659.9	5.74
		P-17	2.106	741.4	6.35
		P-18	3.167	755.6	3.94
		P-19	2.806	672.8	5.80
		P-20	2.049	721.2	6.24

表-1.2.3　ハイブリッド地震応答実験結果の概要

断面		供試体高(mm)	番号 地震波(gal)	実験結果(大変位側を正符号で整理) -5 0 変位 (x/δy) +10
矩形断面	基本断面：1：低補剛断面	1847	R_04 免震Ⅰ 360.0	
			R_05 免震Ⅰ 540.0	
			R_06 免震Ⅲ 442.9	
			R_07 免震Ⅲ 664.3	
		1396	R_08 免震Ⅰ 360.0	
			R_09 免震Ⅰ 540.0	11.47
		1847	R_10 兵庫Ⅰ 818.0	
			R_11 兵庫Ⅰ 1227.0	
			R_12 兵庫Ⅲ 325.8	
			R_13 兵庫Ⅲ 488.8	
	基本断面：2：高補剛断面	1388	R_16 免震Ⅰ 360.0	
			R_17 兵庫Ⅰ 818.0	
			R_18 兵庫Ⅰ 1227.0	
			R_19 兵庫Ⅲ 325.8	

断面		供試体高(mm)	番号 地震波(gal)	実験結果(大変位側を正符号で整理) -5 0 変位 (x/δy) +10
円形断面	基本断面：1：薄肉断面	1800	P_04 免震Ⅰ 360.0	
			P_05 免震Ⅰ 432.0	
			P_06 免震Ⅲ 442.9	
			P_07 免震Ⅲ 606.8	15:中断
		1500	P_08 免震Ⅰ 360.0	
			P_09 免震Ⅰ 432.0	
		1800	P_10 兵庫Ⅰ 818.0	
			P_11 兵庫Ⅰ 1227.0	
			P_12 兵庫Ⅲ 325.8	
			P_13 兵庫Ⅲ 488.8	
	基本断面：2：厚肉断面		P_16 免震Ⅰ 360.0	
			P_17 免震Ⅲ 442.9	
			P_18 免震Ⅰ 360.0	
			P_19 兵庫Ⅰ 818.0	
			P_20 兵庫Ⅲ 325.8	

・地震波は以下の記号で示す。

免震Ⅰ：免震マニュアル標準地震波／Ⅰ種地盤
免震Ⅲ：〃　／Ⅲ種地盤
兵庫Ⅰ：兵庫県南部地震波／Ⅰ種地盤
兵庫Ⅲ：〃　／3種地盤

1.3 入力地震動

1.3.1 時刻歴入力加速度

図-1.3.1 に動的応答解析に用いた入力地震波を示す。 これらの地震波は地盤種別の免震マニュアル地震波[1]と兵庫県南部地震波であり、最大加速度が 1.0 となるように正規化した。

また、それぞれの加速度振幅については、表-1.3.1 に示す倍率を掛けた値を用いる。

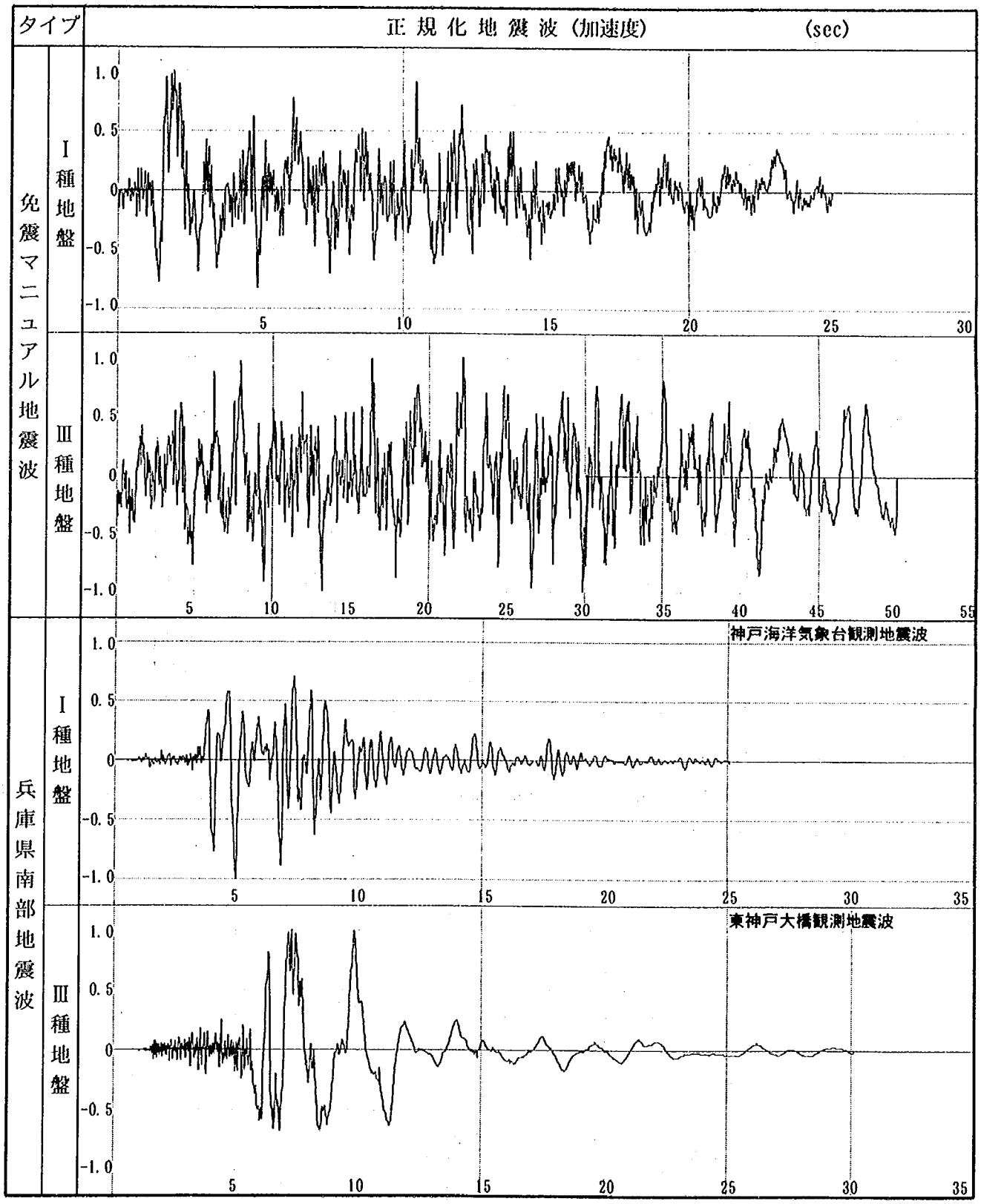


図-1.3.1 正規化地震波(加速度)

表-1. 3. 1 入力地震波の最大加速度振幅

		モデル番号(供試体)	地震波タイプ		最大加速度(gal)
			地震波	地盤種別	
矩形断面	基本断面1	R-04	免震マニュアル	Ⅰ種	360.0
		R-05			540.0
		R-06		Ⅲ種	442.9
		R-07			664.3
		R-08		Ⅰ種	360.0
		R-09			540.0
		R-10	兵庫県南部地震	Ⅰ種	818.0
		R-11			1227.0
		R-12		Ⅲ種	325.8
		R-13			488.8
	基本断面2	R-16	免震マニュアル	Ⅰ種	360.0
		R-17	兵庫県南部地震	Ⅰ種	818.0
		R-18		Ⅰ種	1227.0
		R-19		Ⅲ種	325.8
円形断面	基本断面1	P-04	免震マニュアル	Ⅰ種	360.0
		P-05			432.0
		P-06		Ⅲ種	442.9
		P-07			606.8
		P-08		Ⅰ種	360.0
		P-09			432.0
		P-10	兵庫県南部地震	Ⅰ種	818.0
		P-11			1227.0
		P-12		Ⅲ種	325.8
		P-13			488.8
	基本断面2	P-16	免震マニュアル	Ⅰ種	360.0
		P-17		Ⅲ種	442.9
		P-18		Ⅰ種	360.0
		P-19	兵庫県南部地震	Ⅰ種	818.0
		P-20		Ⅲ種	325.8

1. 3. 2 加速度応答スペクトル

動的応答解析に用いたⅠ種地盤、Ⅲ種地盤に対する免震マニュアル地震波と兵庫県南部地震波の加速度応答スペクトルを図-1. 3. 1(1)および(2)に示す。

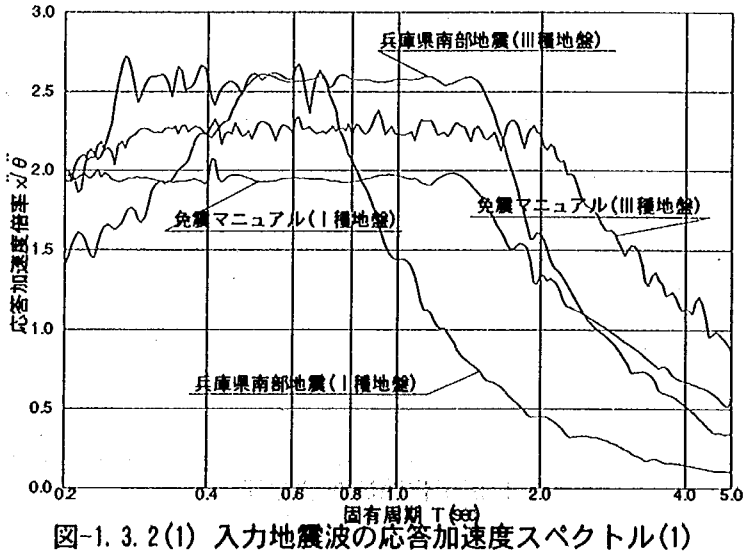


図-1. 3. 2(1) 入力地震波の応答加速度スペクトル(1)

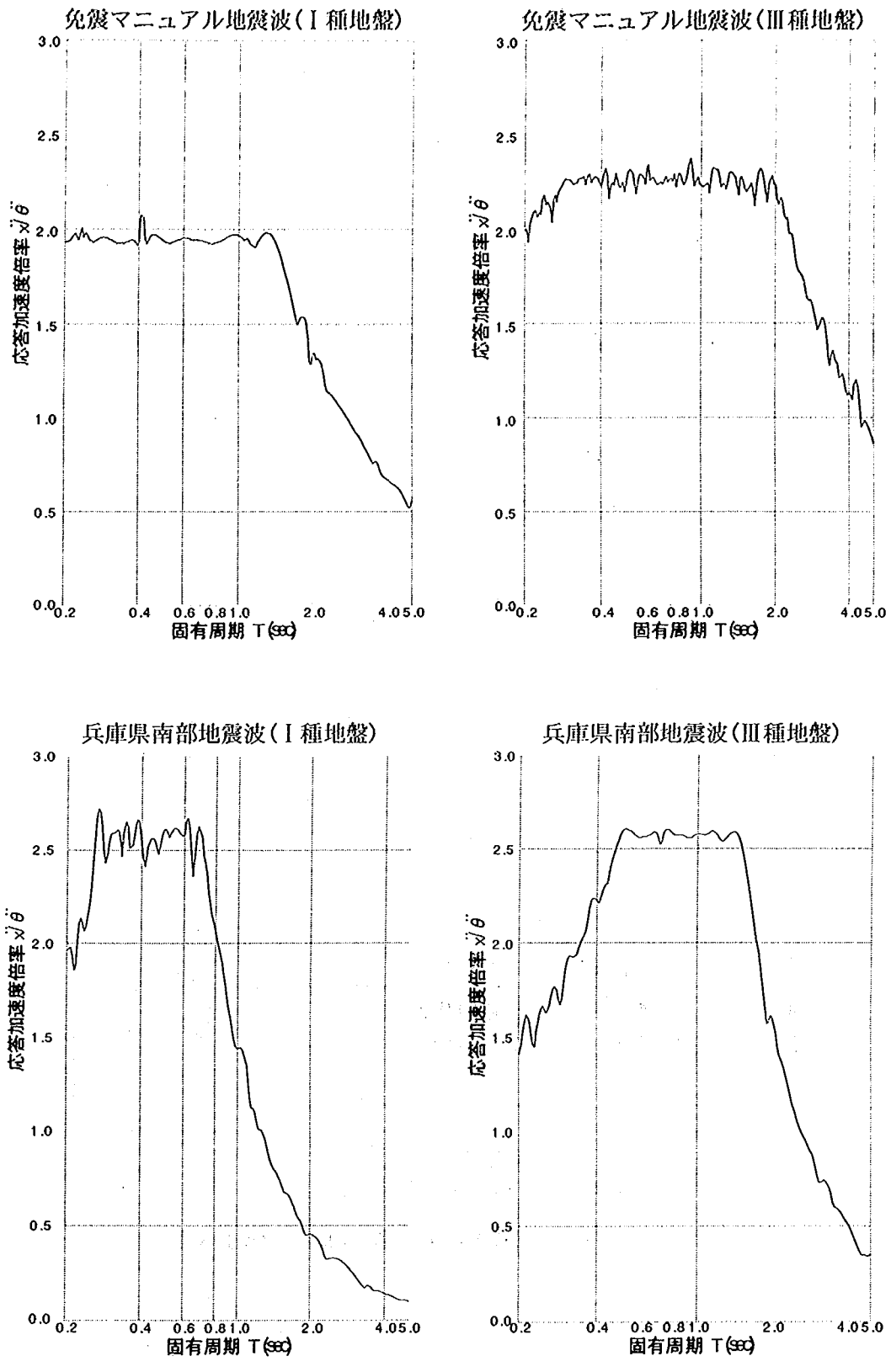


図-1.3.2(2) 入力地震波の応答加速度スペクトル(2)

1.4 減衰

減衰としては、レーリー減衰、粘性減衰、質量比例減衰、剛性比例減衰、履歴減衰などがあるが、ここではすべての解析において剛性比例減衰を用いた。

また、解析における減衰率はハイブリッド地震応答実験と同じ値とし、次の数値を用いた。

$$h = 0.05$$

この減衰率を与えると、図-1.4.1に示す動的応答解析結果のひとつである応答加速度－反力関係が履歴ループを描く。

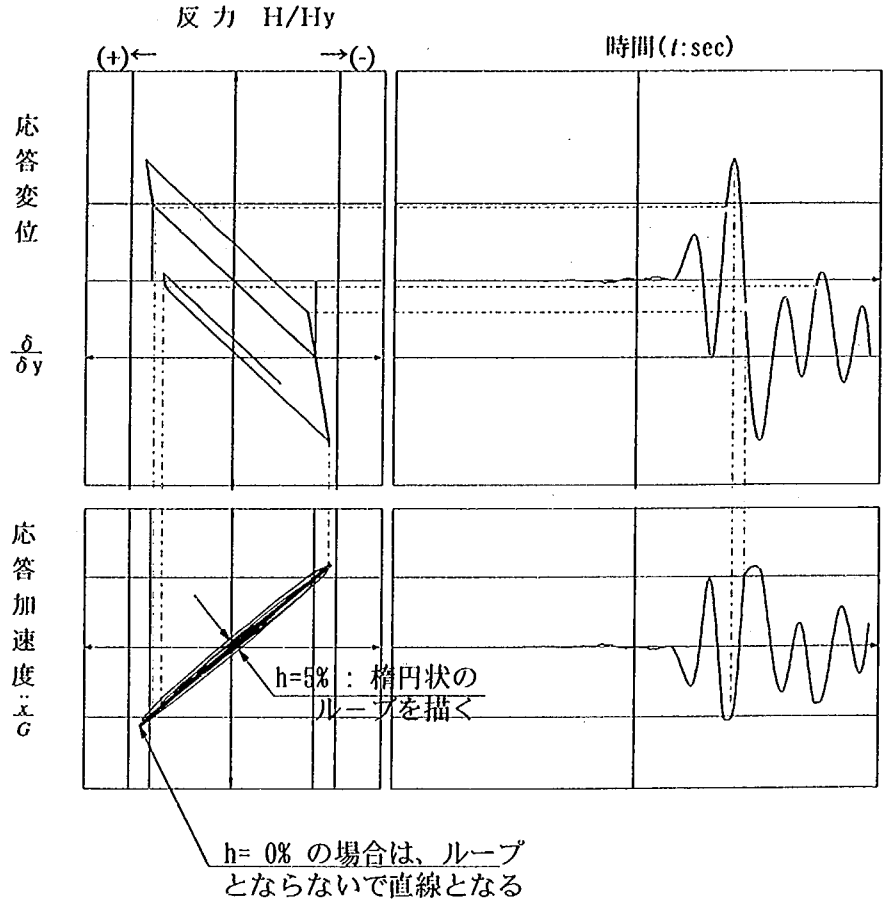


図-1.4.1 減衰率による応答加速度と反力関係

1.5 復元力特性

1.5.1 硬化型バイリニアモデル

最も単純で、また、多くの解析プログラムに用いられている復元力特性である硬化型バイリニアタイプの場合、変位は弾性変位と塑性変位に分解すれば、図-1.5.1(1)のようになり、水平荷重と水平変位の関係は塑性域が生じると、一般的に図-1.5.1(2)のように菱形のループを形成する。

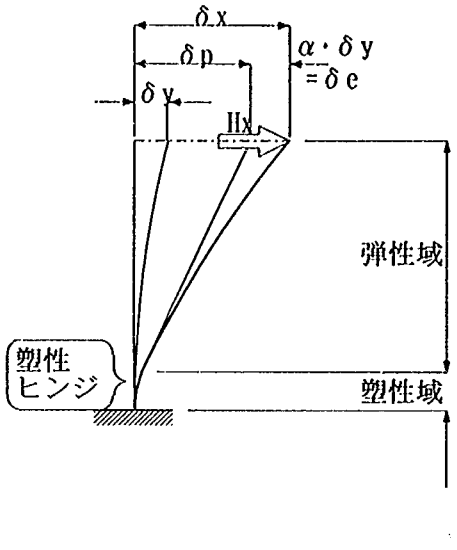


図-1.5.1(1) 非線形部材の変位図

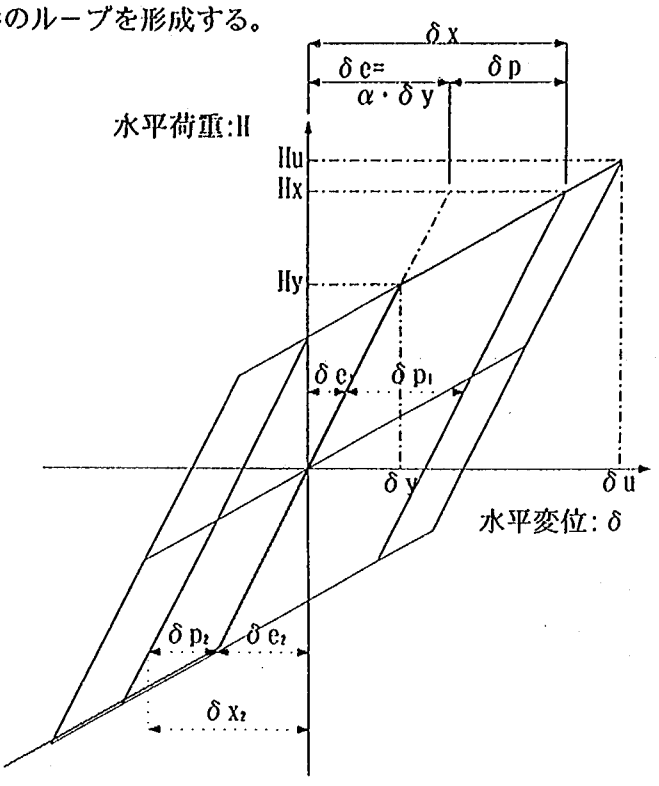


図-1.5.1(2) 硬化型バイリニアモデル

このモデルの定義方法を図-1.5.2(1)、(2) に示す。許容塑性率μを包絡する骨格曲線が最大水平力の97%の水平変位と、降伏変位との比で定義する。また、最大水平力を降伏水平力との比でαとして定義する。

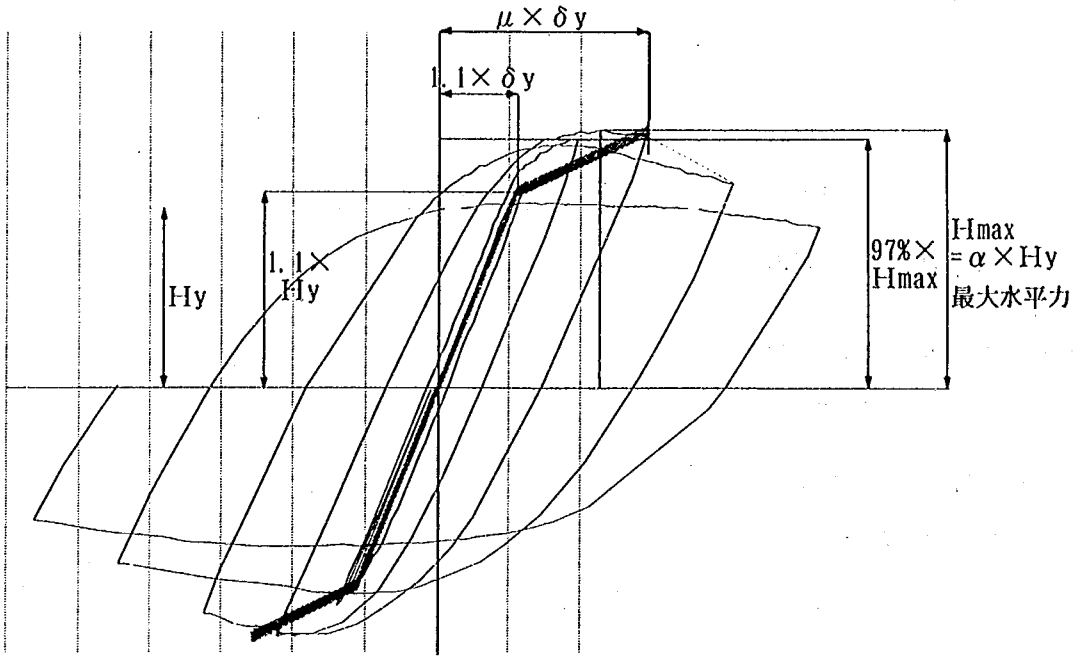


図-1.5.2(1) 硬化型バイリニアモデル復元力特性の定義方法

また、バイリニアの折れ点となる位置は材料の試験から得られる降伏応力度から計算した降伏水平力および降伏変位のそれぞれ 1.1倍とする。

ここでは硬化型バイリニアモデルを次の２ケースとし、モデル②では矩形、円形断面の基本断面１と基本断面２についてそれぞれ異なるものを用いた。

(1)硬化型バイリニアモデル①：共同研究の静的繰り返し載荷試験の複数の結果から定めたもの

(2)硬化型バイリニアモデル②：ハイブリッド地震応答実験で同断面の繰り返し載荷試験を行い、その結果から定めたもの

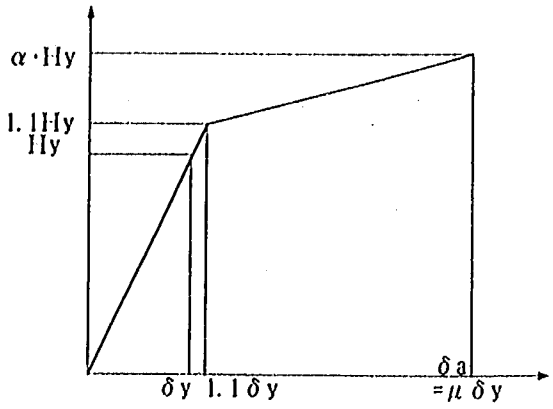


図-1.5.2(2) 硬化型バイリニアモデル
復元力特性の定義方法

(1) 硬化型バイリニアモデル①

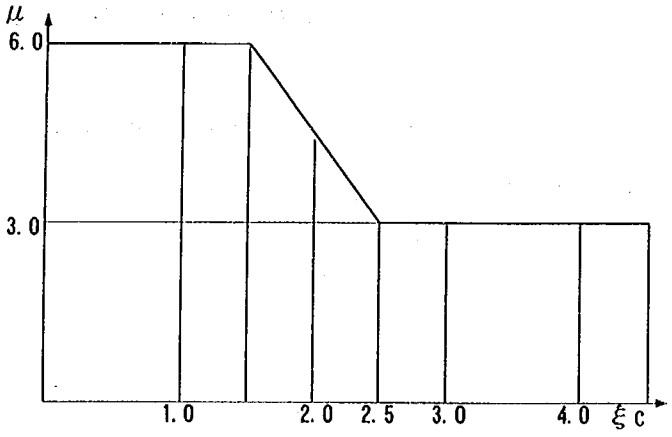
【矩形断面】
〈基本断面1〉R-04～R-13の10体
〈基本断面2〉R-16～R-19の4体

α=1.35、 μ=2.5

【円形断面】
〈基本断面1〉P-04～P-13の10体
〈基本断面2〉P-16～P-20の5体

α=1.40、 μ=3.0～6.0

（下図による:基本断面１はすべてμ=3.0の範囲内）



横軸のパラメータは以下のとおり

$$\xi_c = \frac{\sigma_s}{\sigma_y} \cdot \lambda \frac{1}{2} \cdot Rt \frac{3}{2} \times 1,000$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}\frac{2h}{}$$

$$Rt = \frac{R}{t}\frac{\sigma_y}{E}\sqrt{3(1-\nu^2)}$$

(2) 硬化型バイリニアモデル②

【矩形断面】
〈基本断面１〉R-04～R-13の10体

α=1.4、 μ=3.0

〈基本断面２〉R-16～R-19の4体

α=1.8、 μ=7.5

【円形断面】

〈基本断面１〉P-04～P-13の10体

α=1.45、 μ=2.2

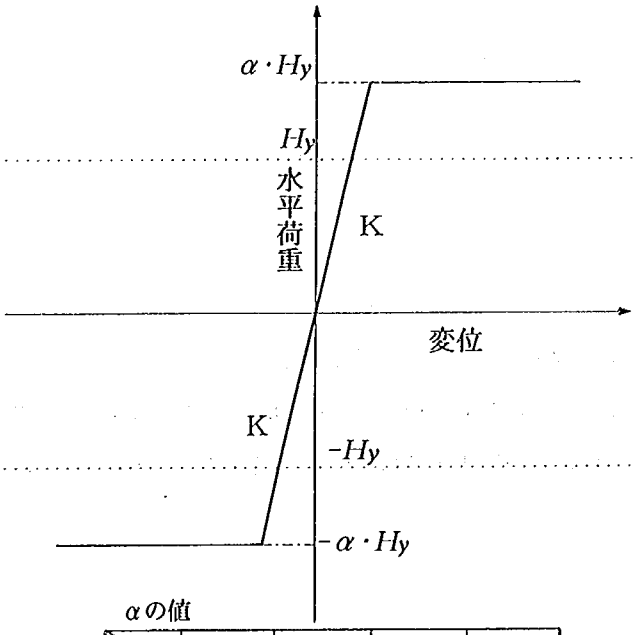
〈基本断面２〉P-16～P-20の5体

α=1.60、 μ=4.0

1.5.2 完全弾塑性型および緩勾配劣化型バイリニアモデル

バイリニア復元力特性を図-1.5.3(1)、(2) に示すように、２次勾配をほぼ０、あるいは比較的小さい負勾配とする復元力特性として定義する。

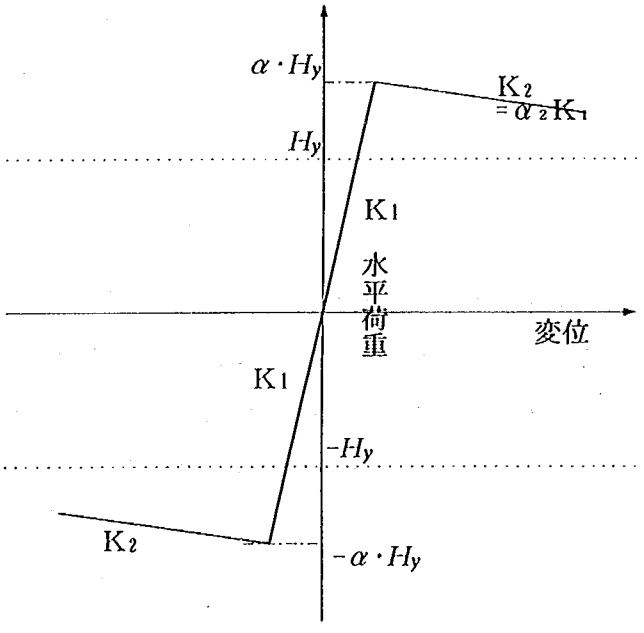
完全弾塑性型バイリニアモデルは、その降伏点高さのみが変数となっていることからこれを調整し設定することで最大変位などを比較的高い精度で計算できる。ここでは、４種類の矩形断面橋脚を対象として、完全弾塑性型バイリニアモデルとしては①～③のケースを考え、緩勾配劣化型バイリニアモデルとしては１ケースのみを考えた。ただし、この場合でも、最小変位、残留変位などを同時に高精度に得ることは難しい。



αの値

	R-04	R-05	R-10	R-11
①	1.46	1.44	1.44	1.46
②	1.41	1.42	1.40	1.40
③	1.38	1.37	1.47	1.49

図-1.5.3(1) 完全弾塑性型バイリニアモデル

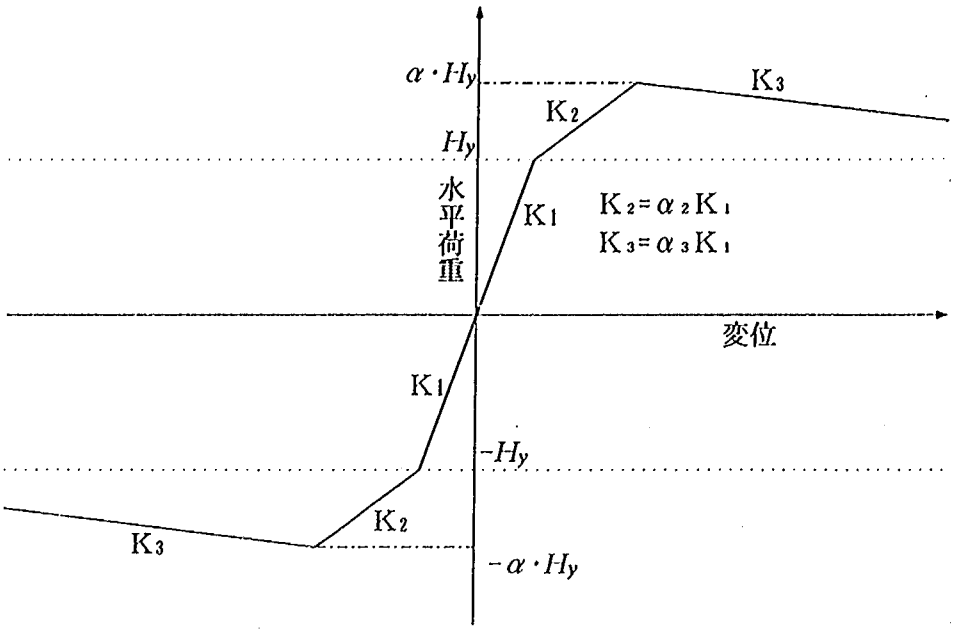


	R-04, R-05, R-10, R-11
α	1.44
α_2	-0.045

図-1.5.3(2) 緩勾配劣化型バイリニアモデル

1.5.3 劣化型トリリニアモデル

繰り返し載荷実験などによって鋼材の強度および断面について３つの直線を用いてフィッティングした復元力特性を図-1.5.4 のようなトリリニアモデルとして定義することができる。ここでは、４種類の矩形断面橋脚を対象とし、トリリニアモデルとしては①～③のケースを考えた。



	α	α2	α3
①	2.61	0.226	-0.072
②	2.18	0.418	-0.111
③	2.43	0.443	-0.153

図-1.5.4 劣化型トリリニアモデル

1.5.4 E-D履歴モデル

設計式として適用するためには、まだ、十分なデータがないが、繰り返し載荷試験によって得られる変位－荷重履歴曲線に沿った復元力を定義する方法として、進行性劣化(E-D)履歴モデル(Damage Index based on Evalutionary-degrading Hysteric Model)[2)]を用いて復元力特性を図-1.5.5(1)のように定義し、動的応答解析を行った。

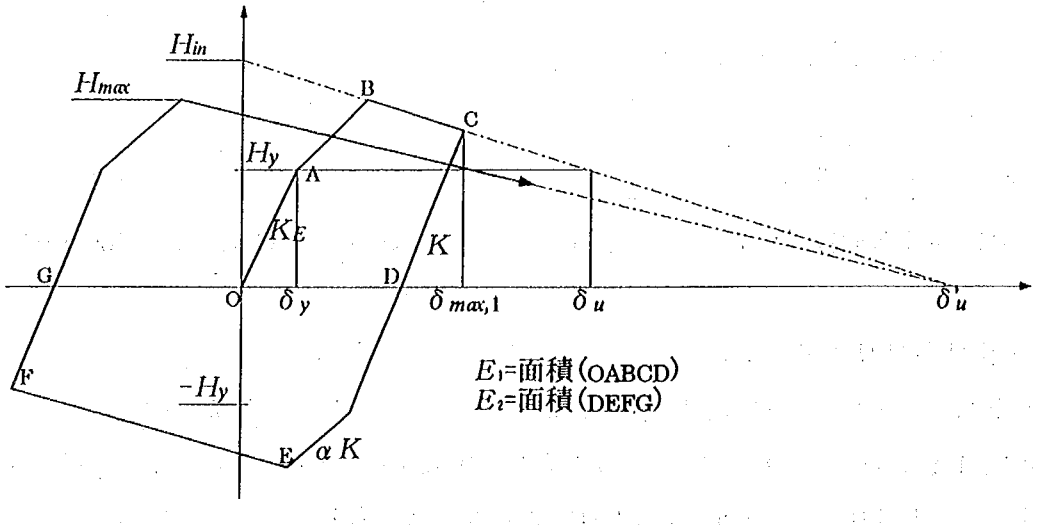


図-1.5.5(1) E－D履歴モデル

損傷指数(Damage Index)を次のように定義しする。

$$D=(1-\beta)\sum_{j=1}^{N_1}\left(\frac{\delta_{maxj}-\delta_y}{\delta_u-\delta_y}\right)^c+\beta\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{E_i}{H_y(\delta_u-\delta_y)}\right)^c$$

この損傷指数によって劣化する水平荷重と変位－荷重勾配を次式のように定義する。

$$H_{max} = H_{in}\cdot e^{-[\ln(H_{in}/H_y)]D}$$

$$K = K_E\cdot e^{-[\ln(H_{in}/H_y)]D}$$

円形断面　No.P-02 について計算した復元力曲線は図-1.5.5(2)のようである。

ここでは、３種類の円形断面を対象とし、図-1.5.5(2)に示した復元力曲線を動的解析に用いた。

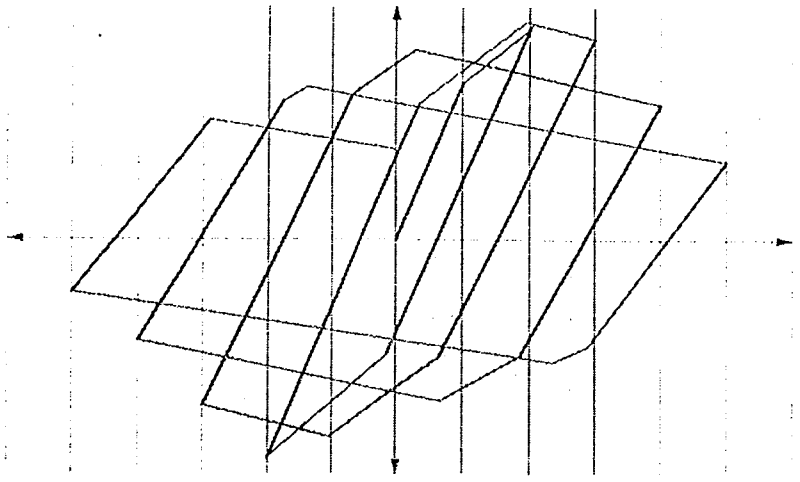


図-1.5.5(2)　動的解析に用いたＥ－Ｄ履歴モデル復元力曲線

δ／δy	H／Hy
0.00	0.00
1.00	1.00
2.00	1.35
-0.14	-0.74
-2.00	-1.39
0.34	0.87
1.94	1.40
3.00	1.29
0.64	-0.76
-1.03	-1.27
-3.00	-1.07
-0.68	0.93
0.30	1.22
4.00	0.87
1.84	-0.75
0.66	-1.04
-4.00	-0.65
-1.76	0.89
-1.39	0.98
5.00	0.50
2.89	-0.69
2.36	-0.79
-5.00	-0.34
-2.90	0.77
0.00	0.58

1.6 直接積分法

積分法の種類として、ニューマークβ法、クラフ(ウィルソンθ)法、ルンゲ・クッター・ギル法などがあるが、すべての解析プログラムで、ニューマークβ法を用いた。

2. 解析結果

2.1 解析結果の説明

動的応答解析によって得られる結果の内、ハイブリッド地震応答実験結果との照合を行うものとして以下のものを一定の書式によって示す。

(1) 構造特性

右の表のとおり

矩形断面の場合

質　量	M	
減　衰	h 形式	
軸力比	N／Ny	
細長比	λ	
断面の補剛パラメータ	$R_B(R_t)$ R_F R_H	

円形断面の場合

質　量	M	
減　衰	h 形式	
軸力比	N／Ny	
細長比	λ	
断面の補剛パラメータ	R_t	

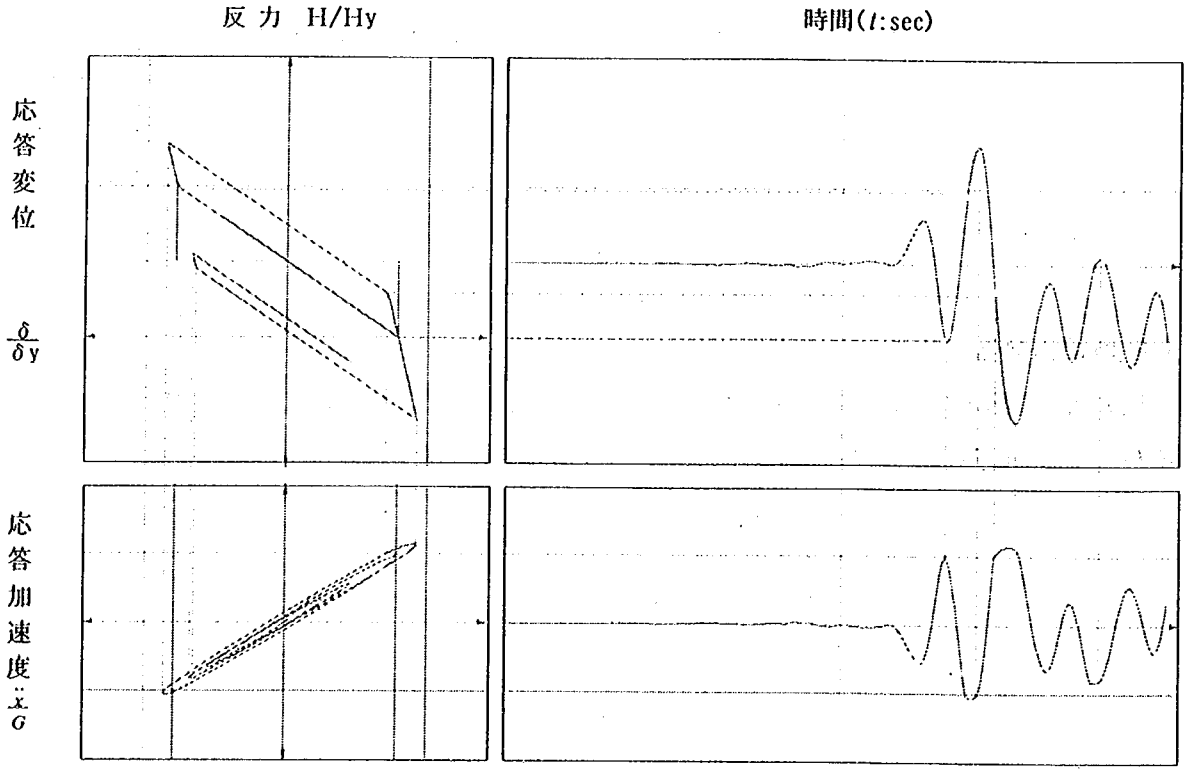
(2) 最大・最小反力
最大・最小変位
最大・最小加速度
残留変位

右の表のとおり

		解析値		無次元数値(解析・実験値)	
反　力	H_{max}		H_{max}/Hy		
	H_{min}		H_{min}/Hy		
変　位	x_{max}		$x_{max}/\delta y$		
	x_{min}		$x_{min}/\delta y$		
加速度	$\ddot{x}_{max}$		$\ddot{x}_{max}/G$		
	$\ddot{x}_{min}$		$\ddot{x}_{min}/G$		
残留変位	x_{rsd}		$x_{rsd}/\delta y$		

(3) 変位－反力履歴曲線
反力－加速度曲線
時間－応答変位
時間－応答加速度

下図のとおり



2.2 矩形断面

2.2.1 硬化型バイリニアモデル①

動的応答解析に用いる復元力特性を硬化型バイリニアモデルとし、Ha = α・Hy（α = 1.35）、δa = μ・δy（μ = 2.5）とした。

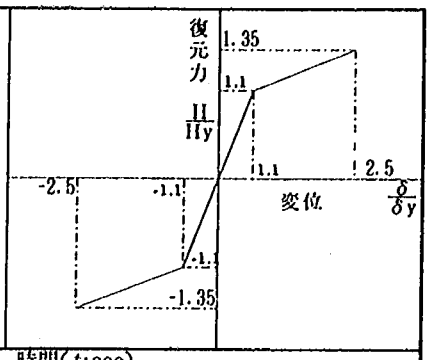
解析結果を表-2.2.1 にまとめる。

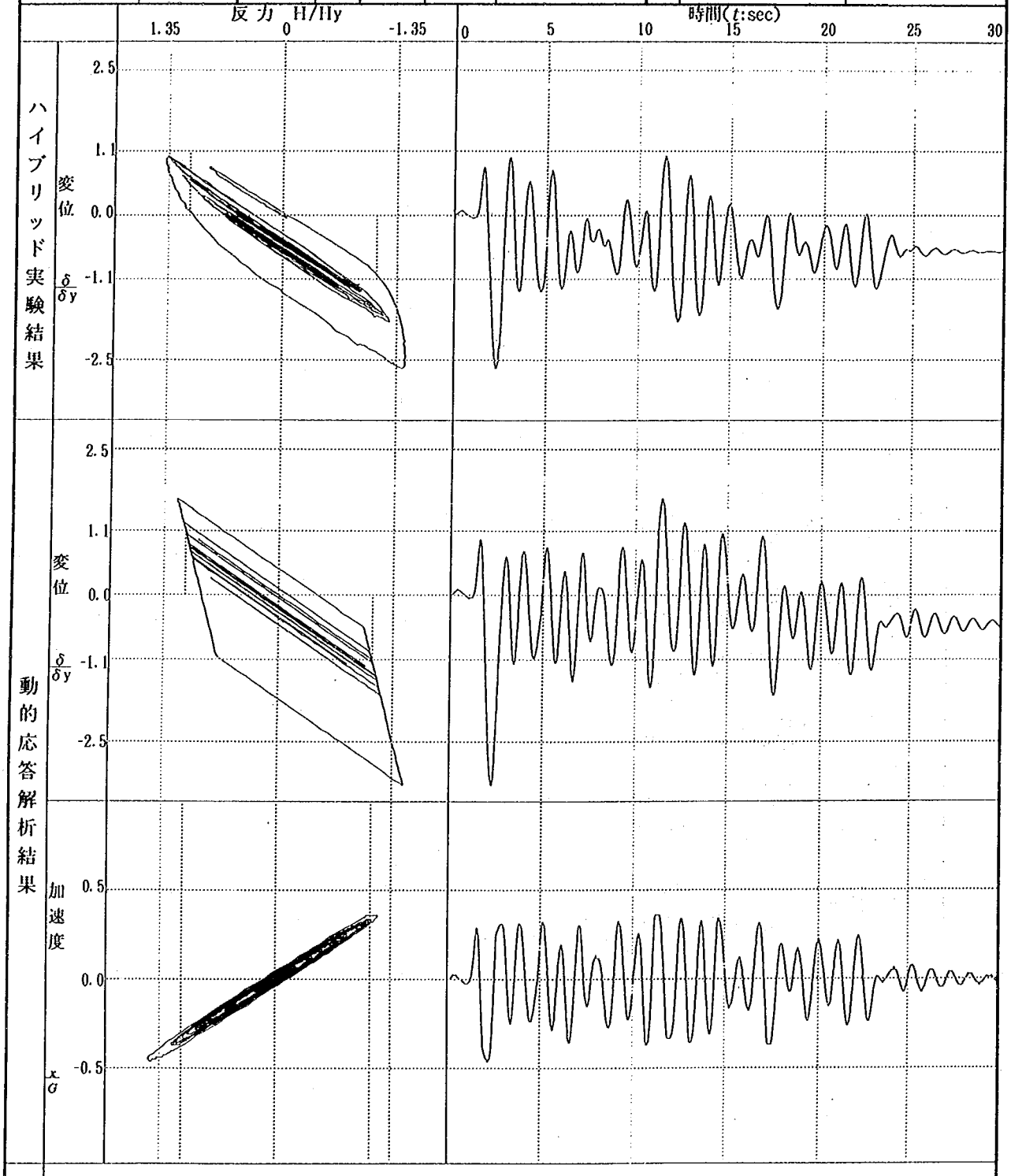
表-2.2.1 解析結果：矩形断面・硬化型バイリニアモデル①

		反力		変位		残留変位
		H max／Hy	H min／Hy	x max／δy	x min／δy	x rsd／δy
矩形断面:R-04 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.20	-1.49	1.65	-3.35	-0.51
	実験値	1.38	-1.46	1.02	-2.64	-0.70
矩形断面:R-05 土研提案L2・Ⅰ種地盤 540.0gal	解析値	1.31	-1.90	2.27	-5.52	-0.86
	実験値	1.28	-1.44	1.26	-6.98	-5.20
矩形断面:R-06 土研提案L2・Ⅲ種地盤 442.9gal	解析値	1.19	-1.34	2.41	-1.63	-0.44
	実験値	1.41	-1.41	2.00	-1.85	0.10
矩形断面:R-07 土研提案L2・Ⅲ種地盤 664.3gal	解析値	1.32	-1.40	3.38	-2.31	-1.83
	実験値	1.40	-1.40	4.95	-3.07	-0.70
矩形断面:R-08 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.16	-1.52	1.43	-3.44	-0.21
	実験値	1.42	-1.50	1.13	-3.09	-0.80
矩形断面:R-09 土研提案L2・Ⅰ種地盤 540.0gal	解析値	1.39	-2.01	2.70	-6.17	-0.36
	実験値	1.28	-1.56	1.64	-11.47	-9.80
矩形断面:R-10 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.24	-1.39	1.87	-2.71	-0.24
	実験値	1.32	-1.44	1.60	-3.51	-1.50
矩形断面:R-11 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 1227.0gal	解析値	1.47	-1.49	3.13	-3.28	-0.12
	実験値	1.45	-1.41	2.38	-5.37	-3.40
矩形断面:R-12 兵庫県南部地震・Ⅲ種地盤 325.8gal	解析値	1.18	-1.35	1.53	-2.51	-0.82
	実験値	1.08	-1.37	1.15	-2.58	-0.90
矩形断面:R-13 兵庫県南部地震・Ⅲ種地盤 488.8gal	解析値	1.25	-1.61	1.95	-3.93	-0.46
	実験値	1.31	-1.23	1.65	-4.93	-2.60
矩形断面:R-16 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.23	-1.70	1.81	-4.46	0.23
	実験値	1.50	-1.64	1.27	-3.99	-1.16
矩形断面:R-17 土研提案L2・Ⅲ種地盤 818.0gal	解析値	1.42	-1.51	2.91	-3.42	-0.32
	実験値	1.63	-1.64	2.56	-3.87	-1.15
矩形断面:R-18 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 1227.0gal	解析値	1.77	-1.63	4.03	-4.79	-0.30
	実験値	1.73	-1.77	4.43	-3.92	-0.58
矩形断面:R-19 兵庫県南部地震・Ⅲ種地盤 325.8gal	解析値	1.23	-1.45	1.85	-3.08	-0.61
	実験値	1.41	-1.55	1.72	-3.32	-1.31

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-04　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{O}_{max}$=360.0gal）						
質量 M	3.110 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	1091 tf	H_{max}/H_y	1.20	1.38
			H_{min}	-1353 tf	H_{min}/H_y	-1.49	-1.46
軸力比 N／Ny	0.152	変位	x_{max}	14.1 cm	x_{max}/δ_y	1.65	1.02
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-27.8 cm	x_{min}/δ_y	-3.25	-2.64
断面の補剛パラメータ $R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	357 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.36	
R_F	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-444 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.45	
R_H	0.34	残留変位	x_{rsd}	-4.3 cm	x_{rsd}/δ_y	-0.51	-0.7

復元力特性

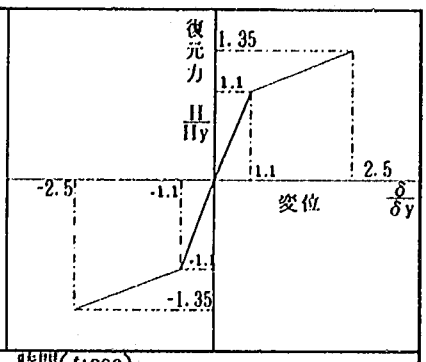


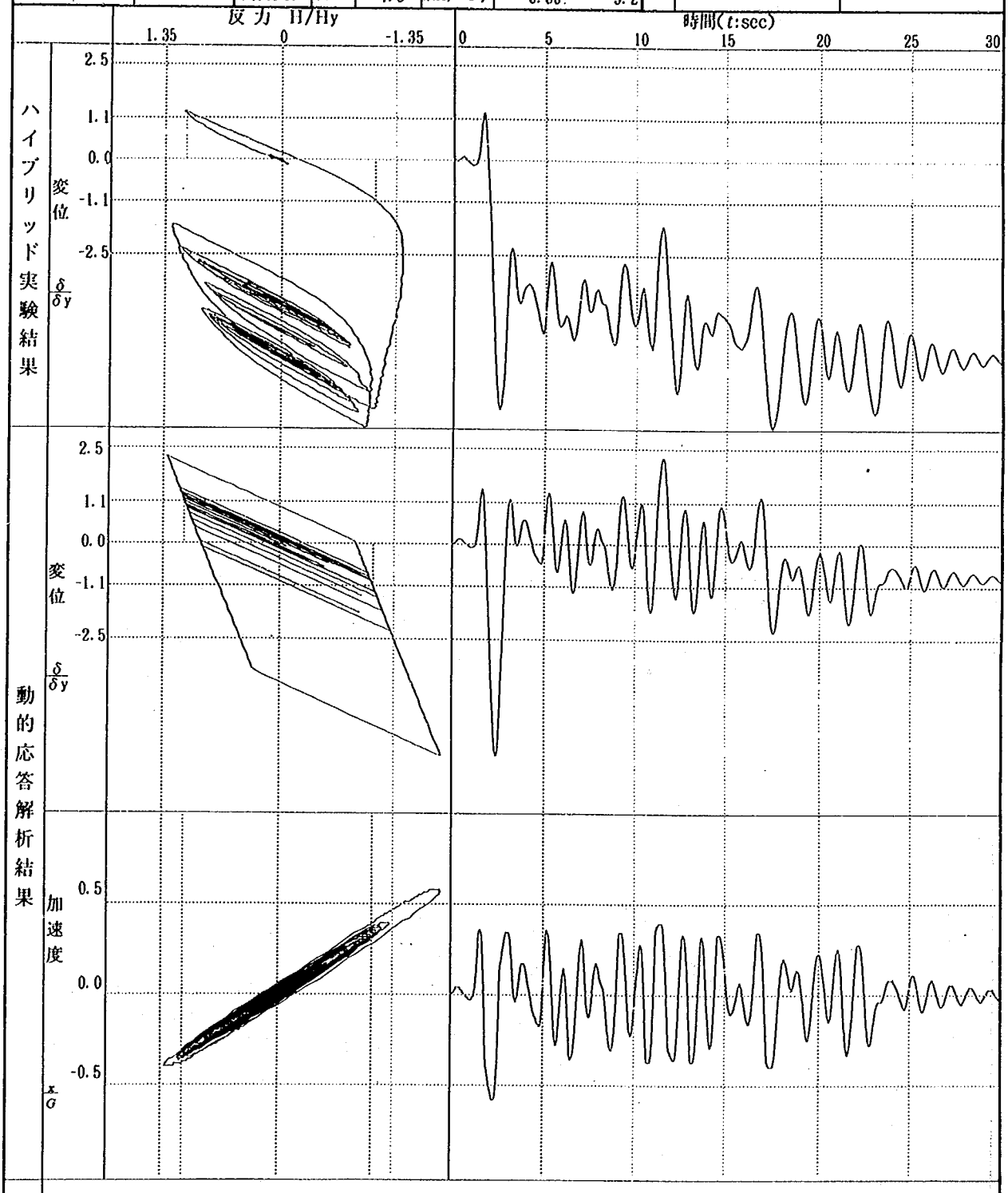


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面：No. R-05　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=540.0gal）						
質　量　M	3.127 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1199 tf	H_{max}/Hy	1.31	1.28
			H_{min}	-1736 tf	H_{min}/Hy	-1.90	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	19.3 cm	$x_{max}/\delta y$	2.27	1.26
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-46.9 cm	$x_{min}/\delta y$	-5.52	-6.98
断面の　$R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	392 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.40	
補剛パ　R_F	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-572 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.58	
ラメータ　R_H	0.34	残留変位	x_{rsd}	-7.3 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.86	-5.2

復元力特性

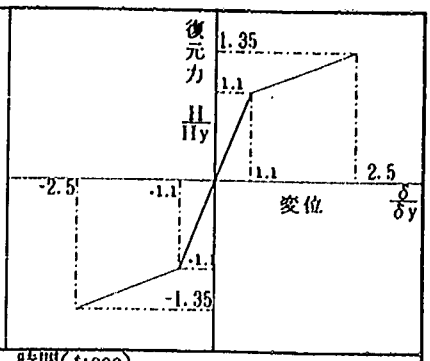


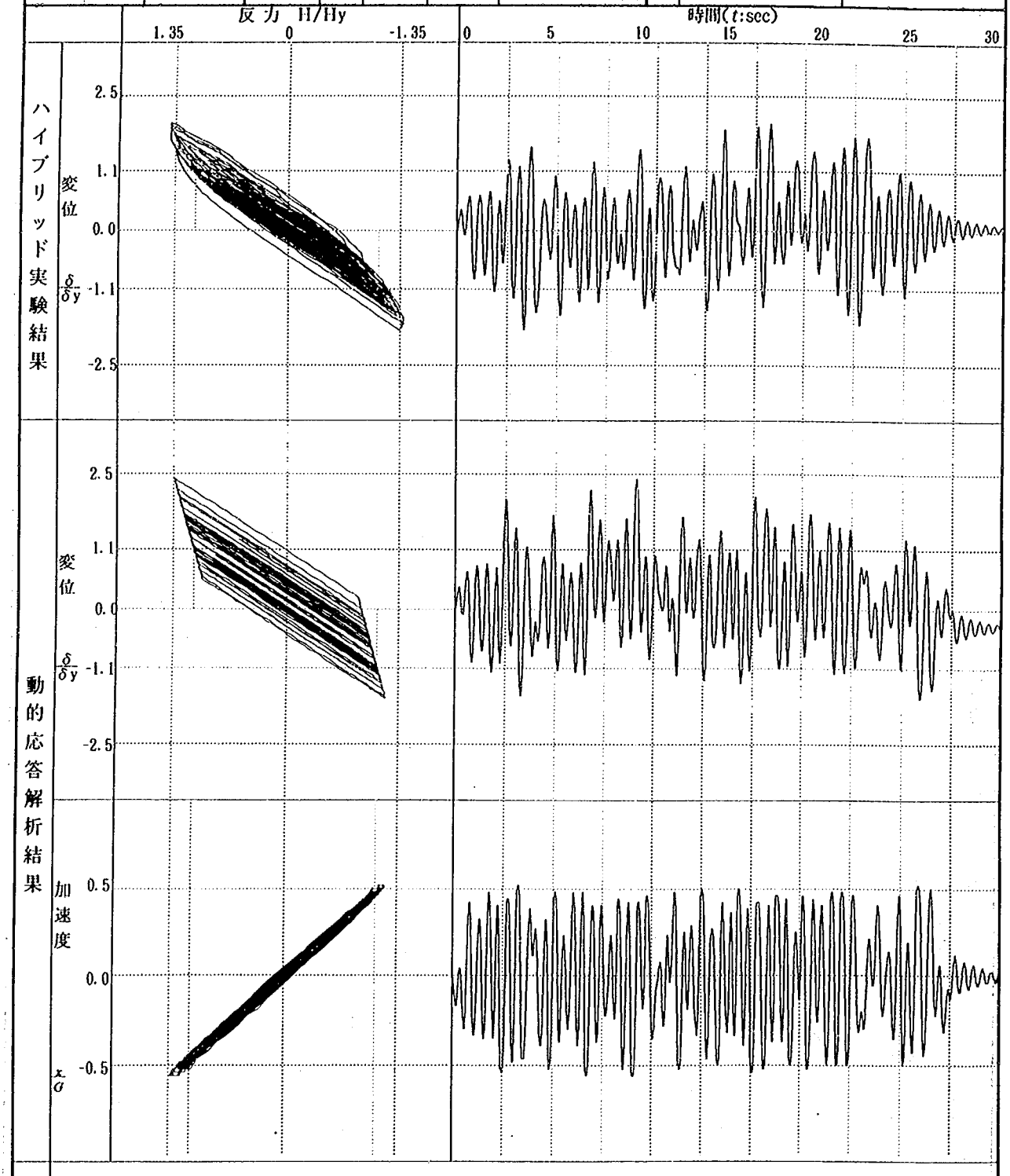


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-06　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅲ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=442.9gal）						
質　量　M	2.331 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1137 tf	H_{max}/Hy	1.19	1.41
			H_{min}	-1271 tf	H_{min}/Hy	-1.34	-1.41
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	21.0 cm	$x_{max}/\delta y$	2.41	2.00
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-14.2 cm	$x_{min}/\delta y$	-1.63	-1.85
断面の補剛パラメータ　$R_s(R_l)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	498 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.51	
	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-556 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.57	
R_f							
R_{II}	0.34	残留変位	x_{rsd}	-3.8 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.44	0.1

復元力特性

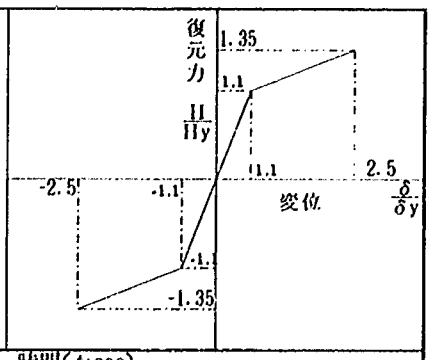


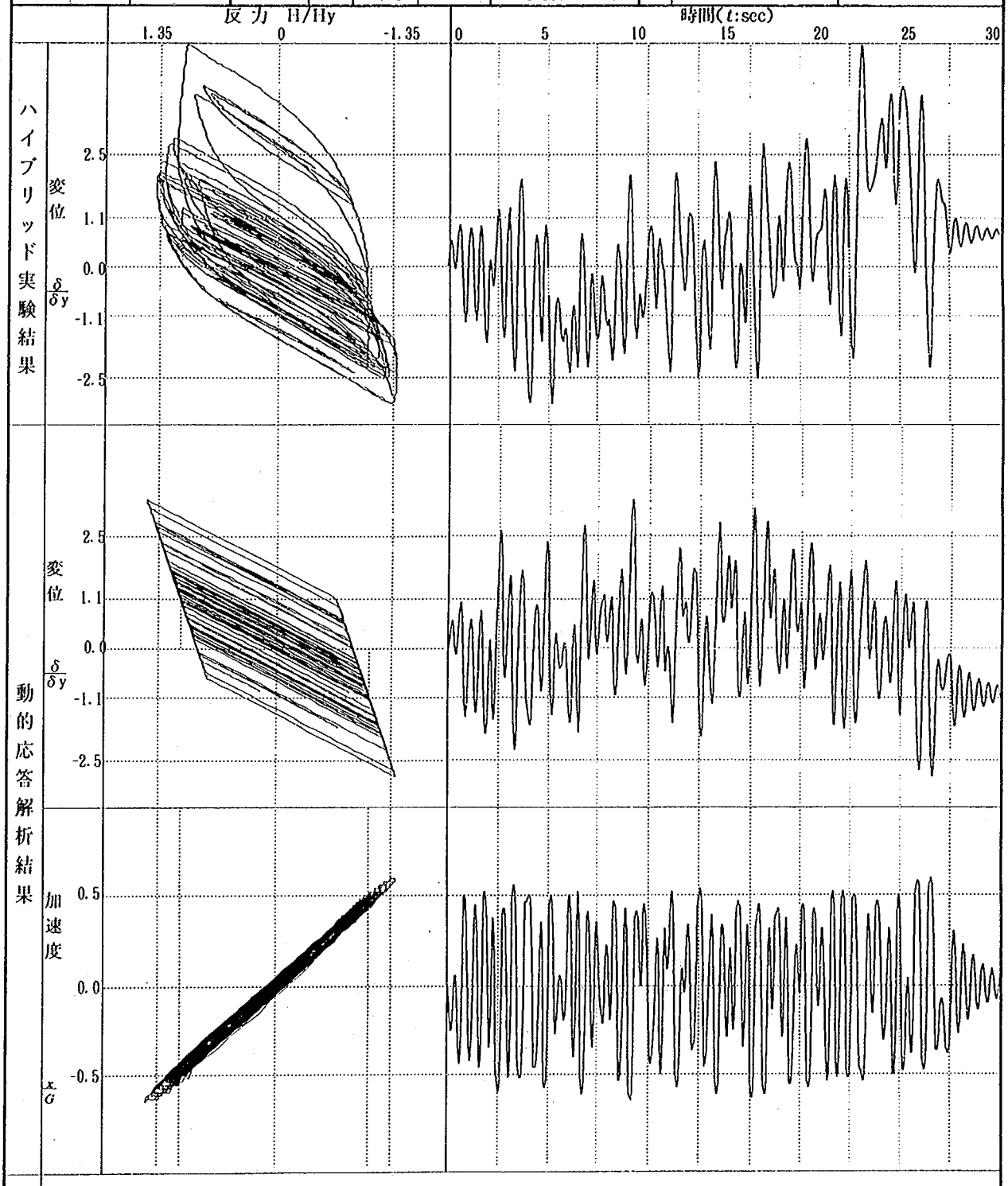


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-07　　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・III種地盤（$\ddot{x}_{max}$=664.3gal）						
質量 M	2.338 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	1257 tf	H_{max}/Hy	1.32	1.40
			H_{min}	-1437 tf	H_{min}/Hy	-1.51	-1.40
軸力比 N／Ny	0.152	変位	x_{max}	30.1 cm	$x_{max}/\delta y$	3.38	4.95
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-20.6 cm	$x_{min}/\delta y$	-2.31	-3.07
断面の補剛パラメータ $R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	552 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.56	
R_F	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-622 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.63	
R_H	0.34	残留変位	x_{rsd}	-7.4 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.83	-0.7

復元力特性

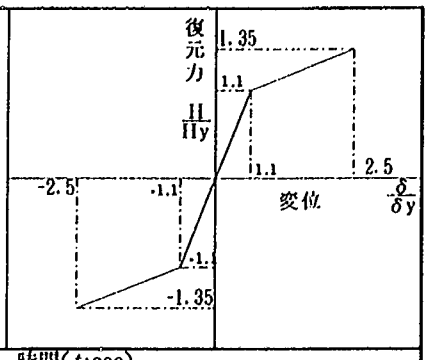


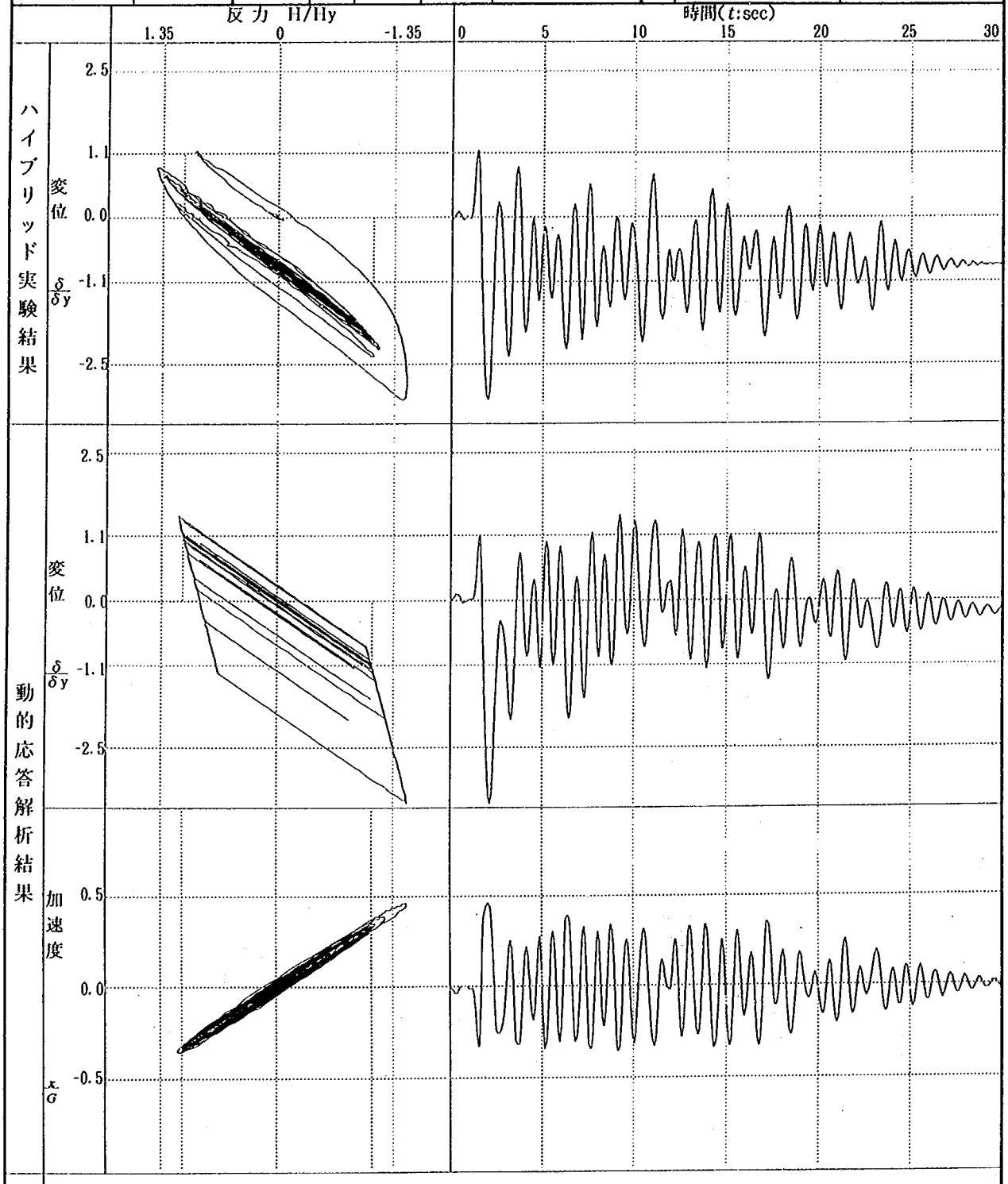


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面:No. R-08　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=360.0gal）						
質　量 M	3.919 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰 h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1338 tf	H_{max}/Hy	1.16	1.42
			H_{min}	-1755 tf	H_{min}/Hy	-1.52	-1.50
軸力比 N／Ny	0.191	変　位	x_{max}	7.0 cm	$x_{max}/\delta y$	1.43	1.13
細長比 $\bar{\lambda}$	0.28		x_{min}	-16.8 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.44	-3.09
断面の $R_A(R_I)$ 補剛パ R_F ラメータ R_H	0.47 0.58 0.34	加速度	$\ddot{x}_{max}$	456 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.47	
			$\ddot{x}_{min}$	-353 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.36	
		残留変位	x_{rsd}	-1.0 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.21	-0.8

復元力特性

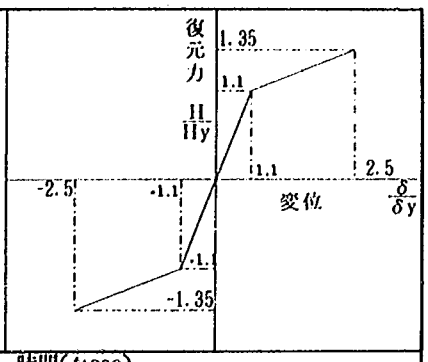


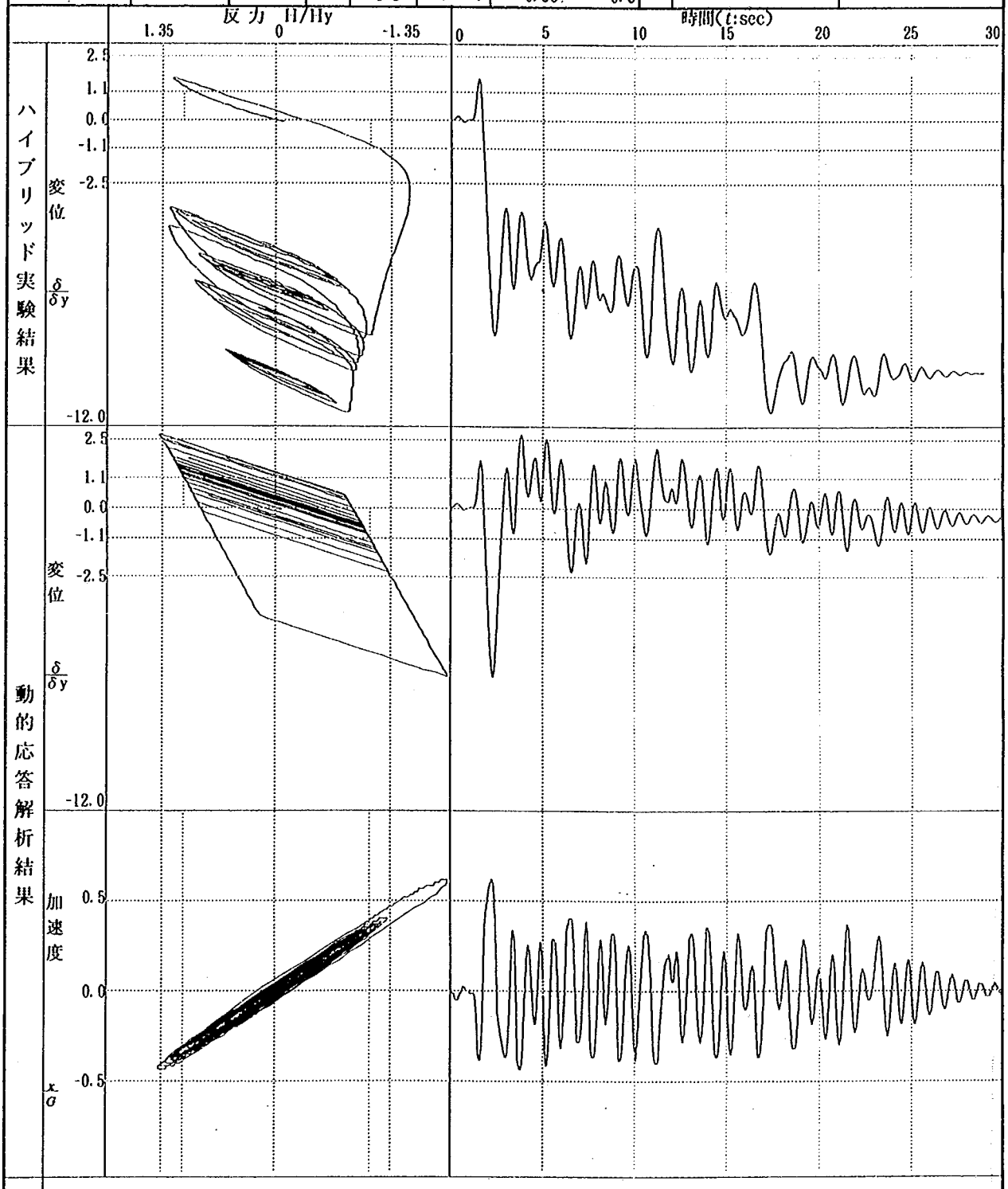


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-09　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=540.0gal）						
質　量　M	3.917 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h　形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1599 tf	H_{max}/Hy	1.39	1.28
			H_{min}	-2318 tf	H_{min}/Hy	-2.01	-1.56
軸力比　N／Ny	0.191	変　位	x_{max}	13.2 cm	$x_{max}/\delta y$	2.70	1.64
			x_{min}	-30.1 cm	$x_{min}/\delta y$	-6.17	-11.47
細長比　$\bar{\lambda}$	0.28	加速度	$\ddot{x}_{max}$	604 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.62	
			$\ddot{x}_{min}$	-420 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.43	
断面の　$R_A(R_I)$	0.47	残留変位	x_{rsd}	-1.8 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.36	-9.8
補剛バ　R_r	0.58						
ラメータ　R_H	0.34						

復元力特性

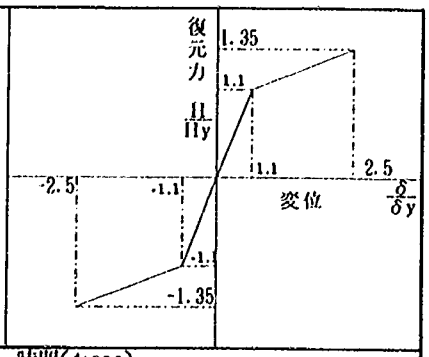


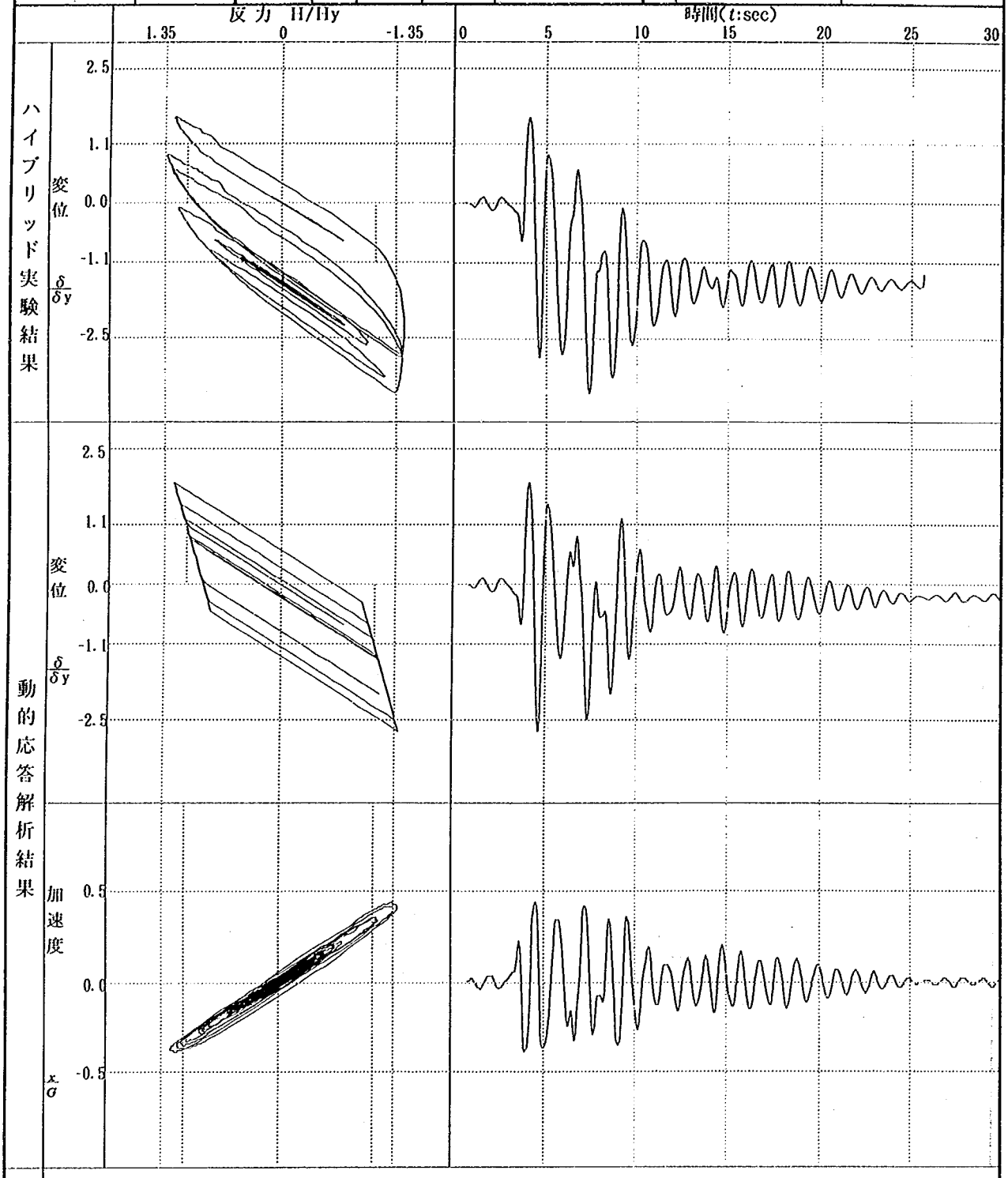


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-10　硬化型バイリニアモデル① 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=818.0gal）						
質　量　M	3.142 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1140 tf	H_{max}/Hy	1.24	1.32
			H_{min}	-1278 tf	H_{min}/Hy	-1.39	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	15.9 cm	$x_{max}/\delta y$	1.87	1.60
			x_{min}	-23.0 cm	$x_{min}/\delta y$	-2.71	-3.51
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38	加速度	$\ddot{x}_{max}$	429 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.44	
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.47		$\ddot{x}_{min}$	-377 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.38	
	0.58	残留変位	x_{rsd}	-2.0 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.24	-1.5
	0.34						

復元力特性

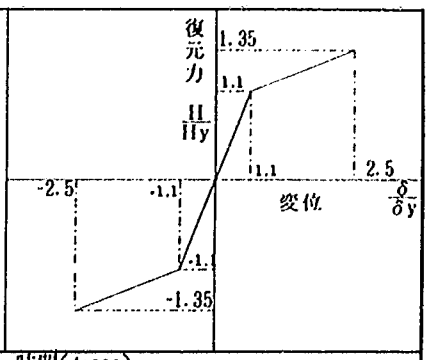


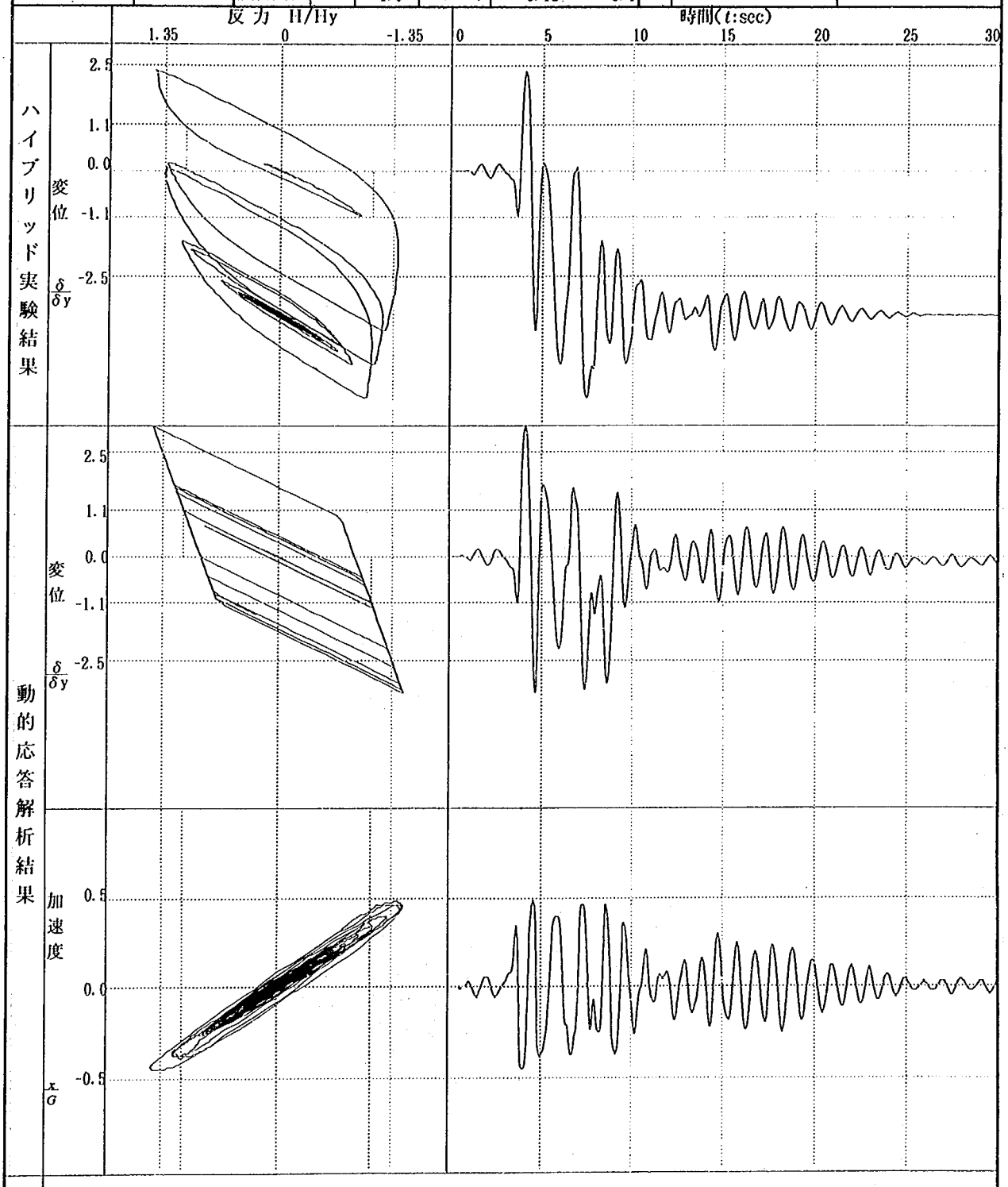


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-11　　硬化型バイリニアモデル① 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=1227.0gal）						
質　量　M	3.096 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1326 tf	H_{max}/Hy	1.47	1.45
			H_{min}	-1351 tf	H_{min}/Hy	-1.49	-1.41
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	26.2 cm	$x_{max}/\delta y$	3.13	2.38
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-27.4 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.28	-5.37
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$ R_F R_H	0.47 0.58 0.34	加速度	$\ddot{x}_{max}$	468 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.48	
			$\ddot{x}_{min}$	-444 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.45	
		残留変位	x_{rsd}	-1.0 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.12	-3.4

復元力特性

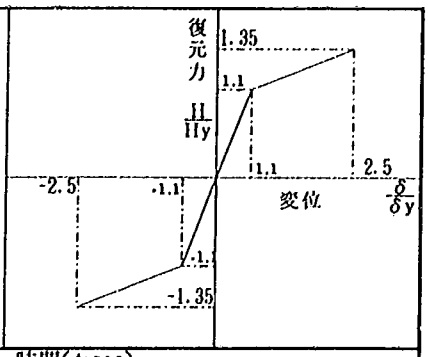


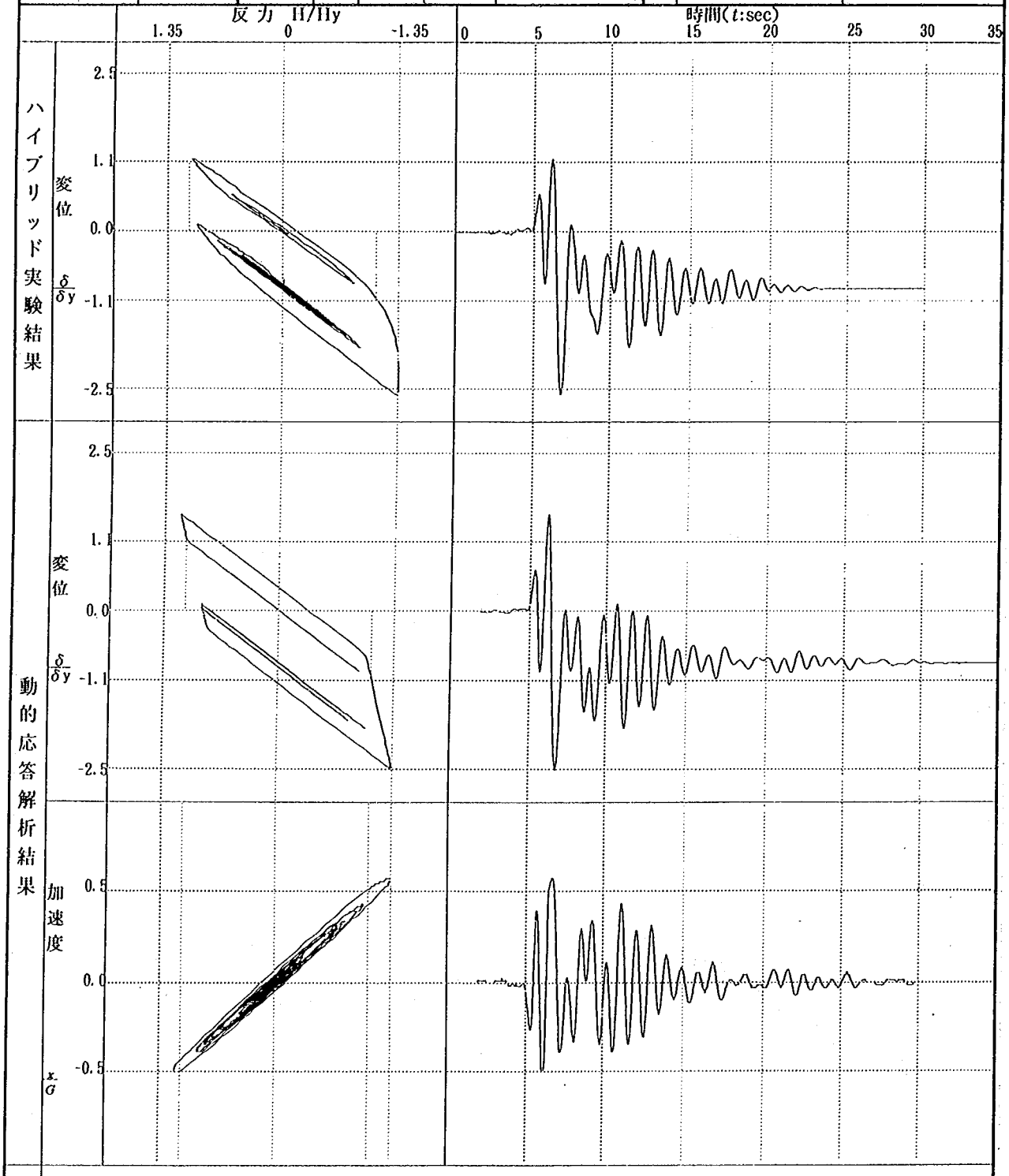


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-12 兵庫県南部地震波・III種地盤（$\ddot{x}_{max}$=325.8gal）		硬化型バイリニアモデル①			
			解析値	無次元数値（解析・実験値）		
質量 M	2.364 tf·s²/cm	反力	Hmax 1136 tf	Hmax／Hy	1.18	1.08
減衰 h 形式	5 % 剛性比例		Hmin -1306 tf	Hmin／Hy	-1.35	-1.37
軸力比 N／Ny	0.110	変位	xmax 13.7 cm	xmax／δy	1.53	1.15
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		xmin -22.4 cm	xmin／δy	-2.51	-2.58
断面の補剛パラメータ $R_R(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}$ max 563gal	$\ddot{x}$ max／G	0.57	
	R_F 0.58		$\ddot{x}$ min -494gal	$\ddot{x}$ min／G	-0.5	
	R_{II} 0.34	残留変位	xrsd -7.4 cm	xrsd／δy	-0.82	-0.9

復元力特性

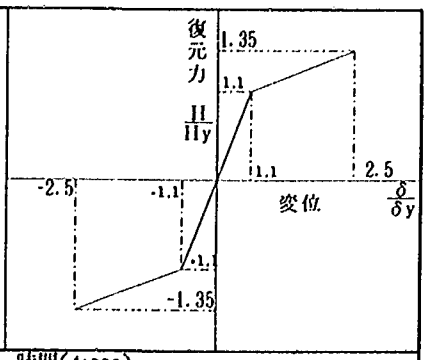


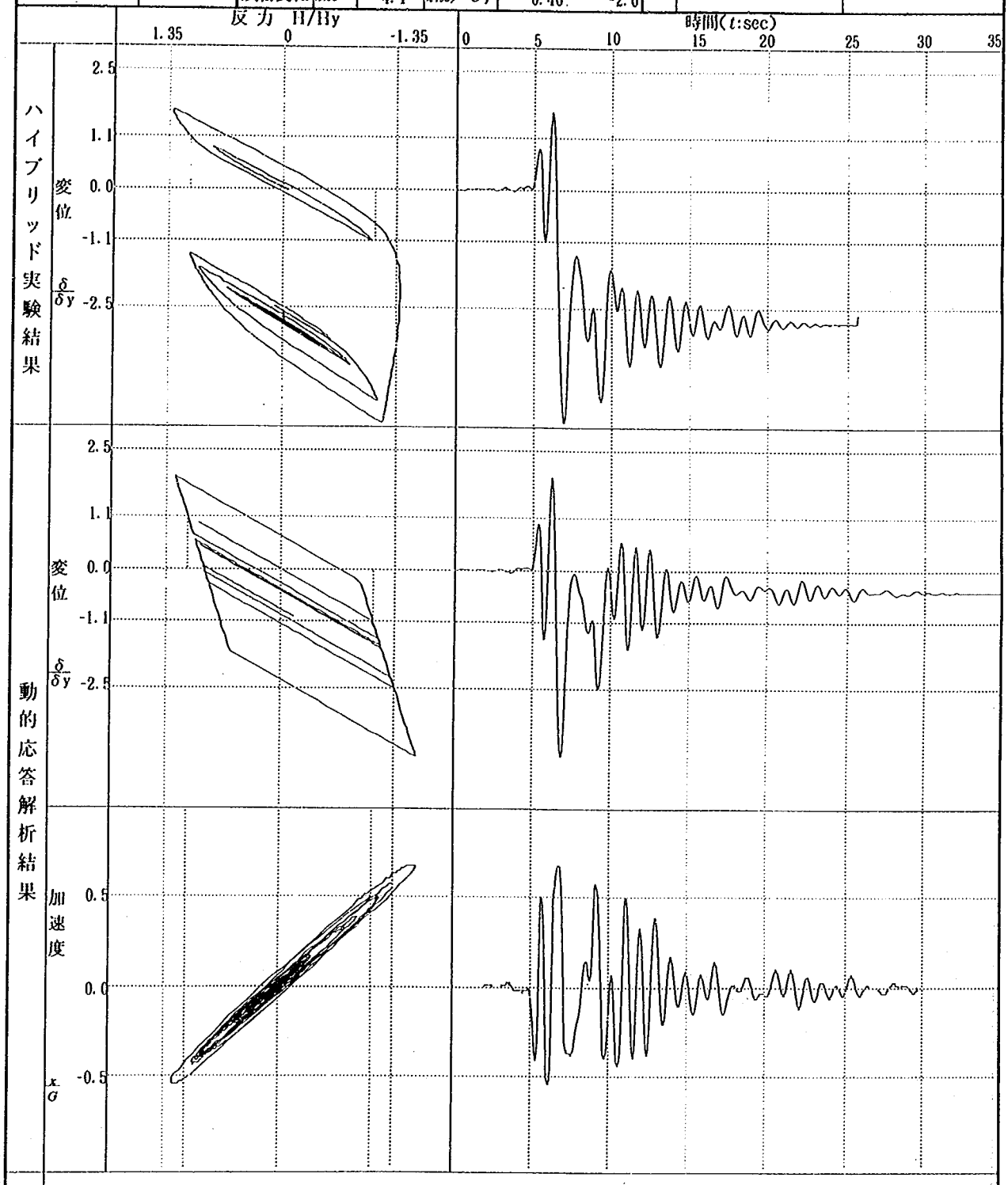


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面：No. R-13 兵庫県南部地震波・III種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=488.8gal）		硬化型バイリニアモデル①			
質量 M	2.336 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	1195 tf	H_{max}/Hy	1.25 1.31
			H_{min}	-1536 tf	H_{min}/Hy	-1.61 -1.23
軸力比 N／Ny	0.110	変位	x_{max}	17.3 cm	$x_{max}/\delta y$	1.95 1.31
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-34.9 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.93 -1.39
断面の補剛パラメータ $R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	669 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.68
R_F	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-529 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.54
R_{II}	0.34	残留変位	x_{rsd}	-4.1 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.46 -2.6

復元力特性

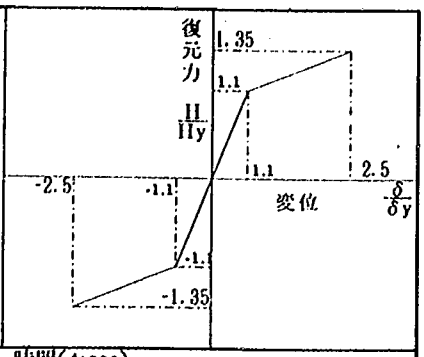


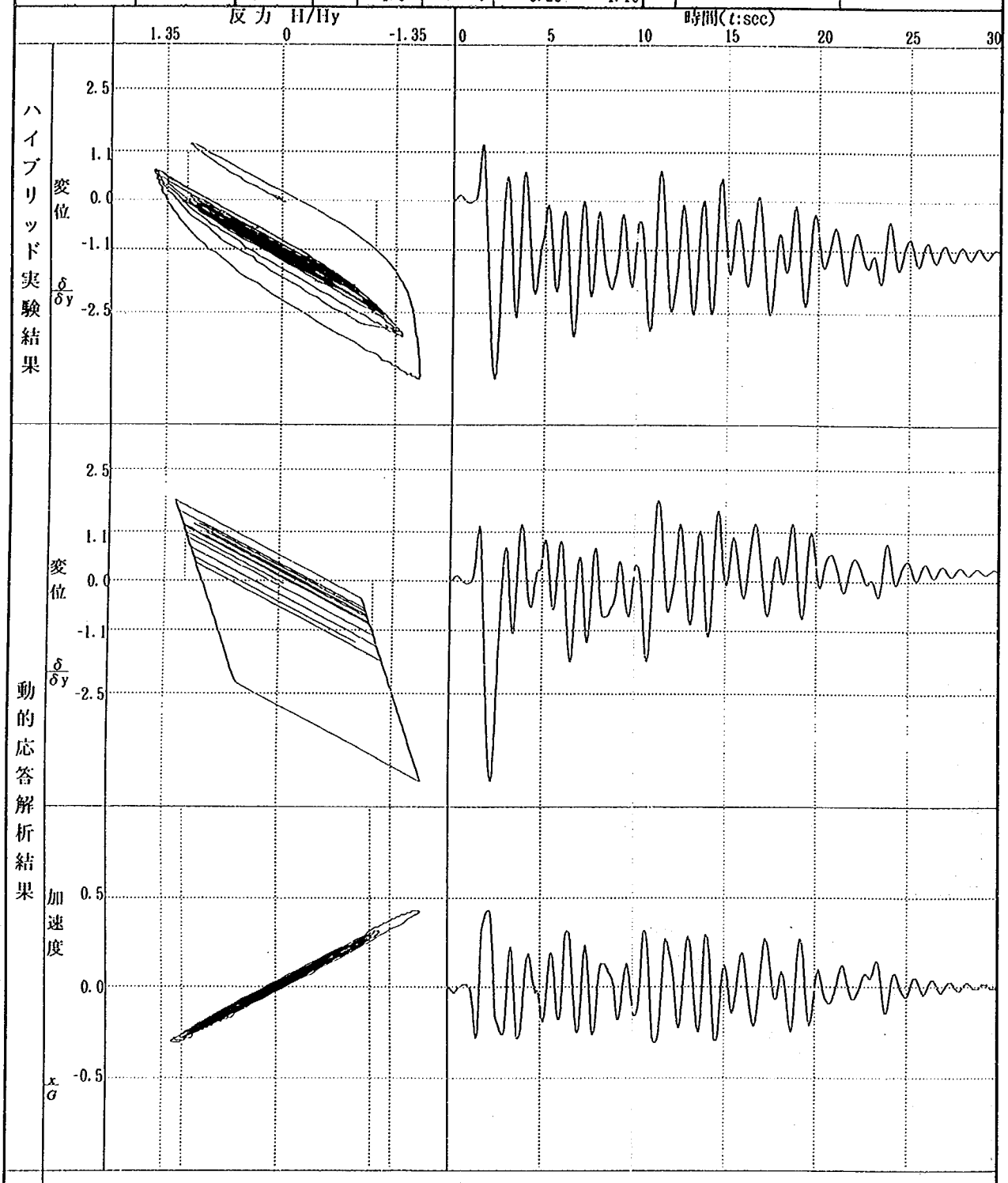


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-16　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{O}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	2.703 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形　式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	800 tf	H_{max}/Hy	1.23	1.50
			H_{min}	-1109 tf	H_{min}/Hy	-1.70	-1.64
軸力比　N／Ny	0.150	変　位	x_{max}	10.2 cm	$x_{max}/\delta y$	1.81	1.27
			x_{min}	-25.3 cm	$x_{min}/\delta y$	-4.46	-3.99
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38	加速度	$\ddot{x}_{max}$	419 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.43	
			$\ddot{x}_{min}$	-306 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.31	
断面の　$R_R(R_I)$	0.37	残留変位	x_{rsd}	1.3 cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.23	-1.16
補剛バ　R_I	0.21						
ラメータ　R_H	0.36						

復元力特性

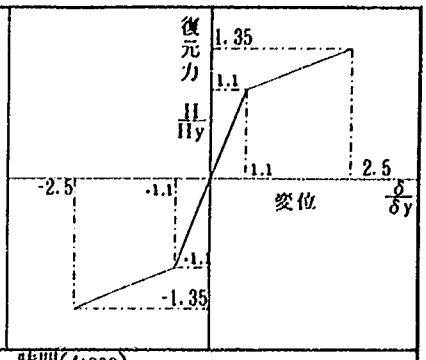


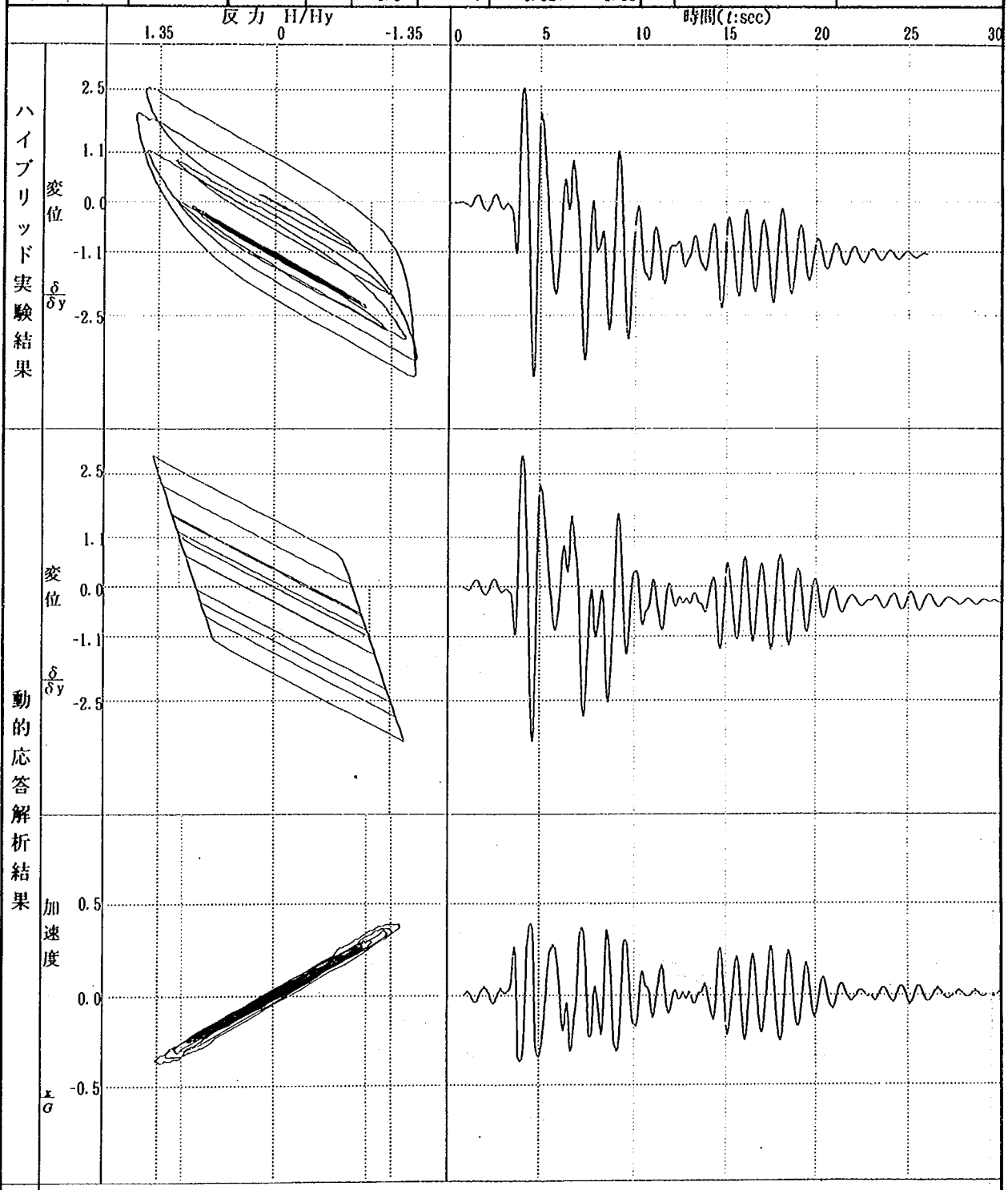


備考

モデル（供試体）（入力地震波）		矩形断面：No. R-17 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=818.0gal）			硬化型バイリニアモデル①		
質量	M	2.706 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減衰	h 形式	5 % 剛性比例	反力	Hmax	929 tf	Hmax／Hy	1.42　1.63
				Hmin	-988 tf	Hmin／Hy	-1.51　-1.64
軸力比	N／Ny	0.109	変位	xmax	16.4 cm	xmax／δy	2.91　2.56
細長比	$\bar{\lambda}$	0.38		xmin	-19.3 cm	xmin／δy	-3.42　-3.87
断面の補剛パラメータ	$R_A(R_I)$ R_F R_H	0.37 0.21 0.36	加速度	$\ddot{x}$ max	387 gal	$\ddot{x}$ max／G	0.39
				$\ddot{x}$ min	-357 gal	$\ddot{x}$ min／G	-0.36
			残留変位	xrsd	-1.8 cm	xrsd／δy	-0.32　-1.15

復元力特性

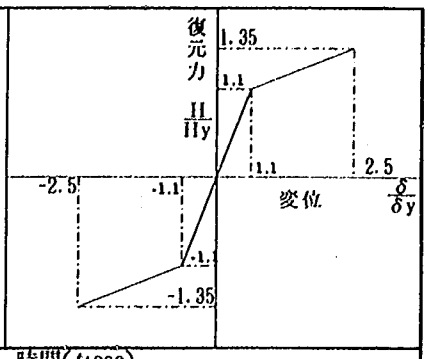


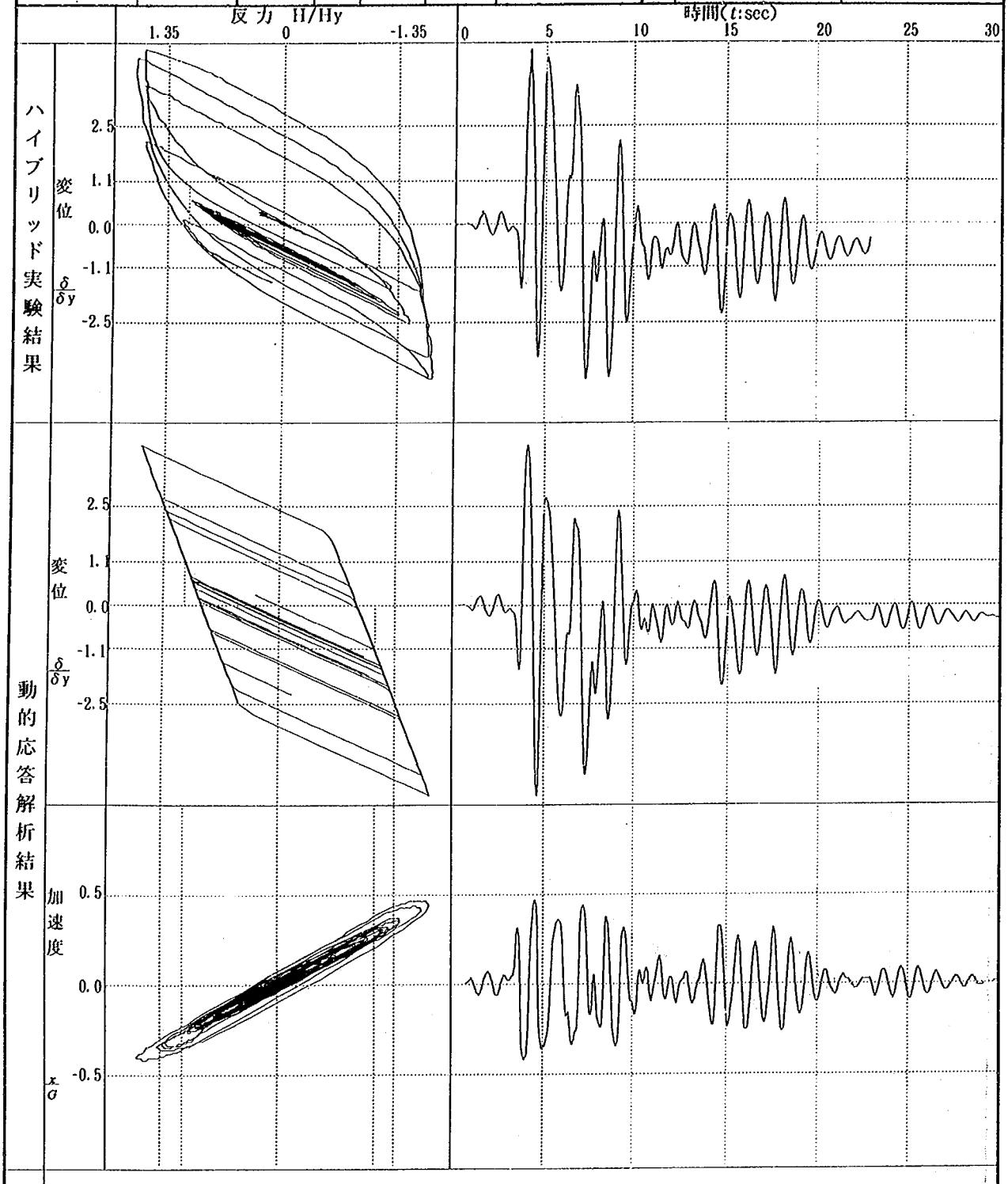


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面：No. R-18　硬化型バイリニアモデル① 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{O}_{max}$=1227.0gal）						
質　量 M	2.717 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰 h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1157 tf	H_{max}/Hy	1.77	1.73
			H_{min}	-1066 tf	H_{min}/Hy	-1.63	-1.77
軸力比 N／Ny	0.150	変　位	x_{max}	22.8 cm	$x_{max}/\delta y$	4.03	4.43
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-27.1 cm	$x_{min}/\delta y$	-4.79	-3.92
断面の補剛パラメータ $R_R(R_I)$	0.37	加速度	$\ddot{x}_{max}$	457 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.47	
R_F	0.21		$\ddot{x}_{min}$	-407 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.41	
R_H	0.36	残留変位	x_{rsd}	-1.7 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.30	-0.58

復元力特性

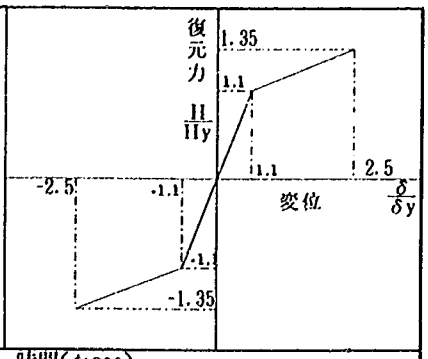


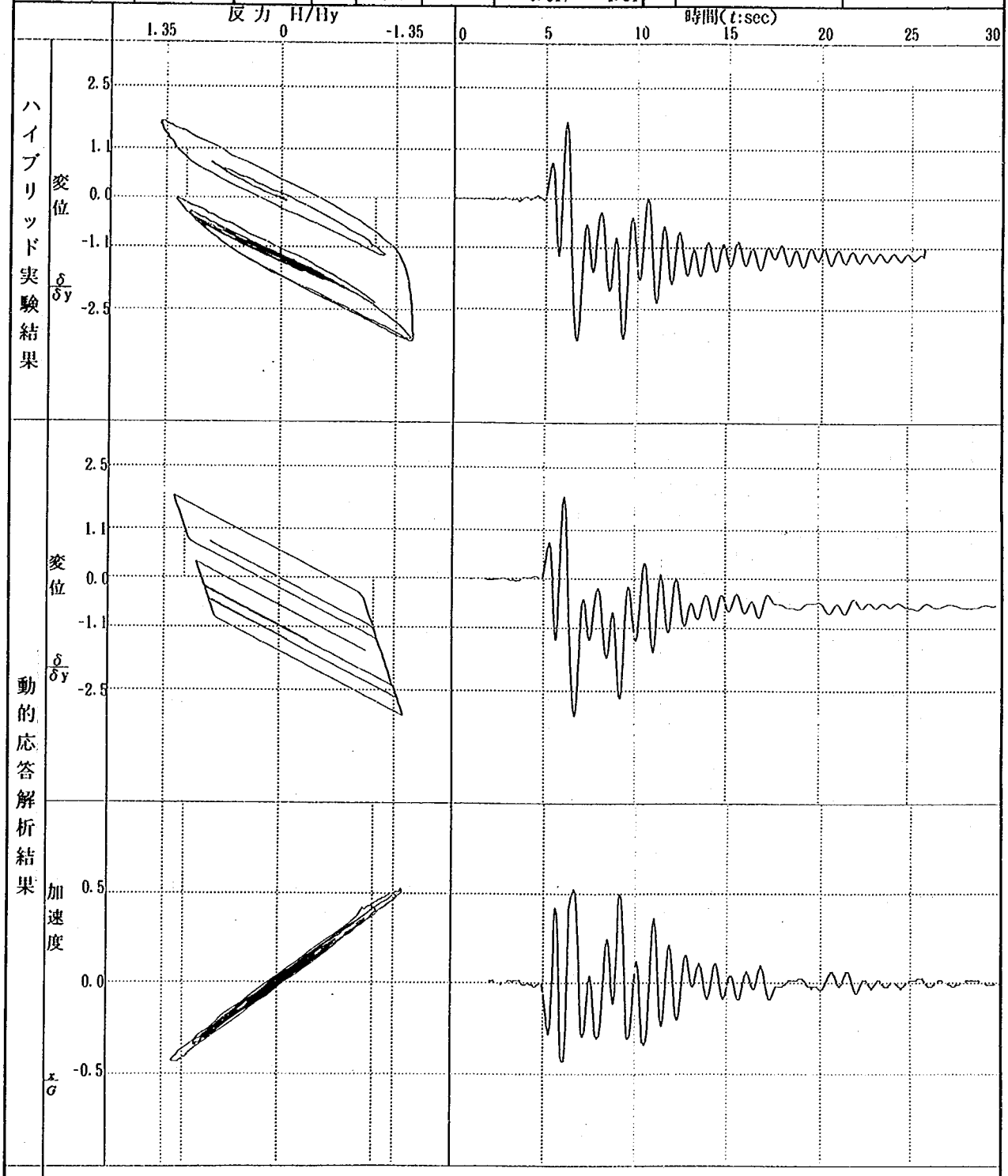


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-19 兵庫県南部地震波・Ⅲ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=325.8gal）			硬化型バイリニアモデル①		
質量 M	2.025 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	850 tf	H_{max}/Hy	1.23 1.41
			H_{min}	-1002 tf	H_{min}/Hy	-1.45 -1.55
軸力比 N／Ny	0.109	変位	x_{max}	11.1 cm	$x_{max}/\delta y$	1.85 1.72
			x_{min}	-18.4 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.08 -3.21
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38	加速度	$\ddot{x}_{max}$	503 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.51
			$\ddot{x}_{min}$	-430 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.44
断面の補剛パラメータ $R_R(R_I)$	0.37	残留変位	x_{rsd}	-3.7 cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.61 -1.31
R_I	0.21					
R_H	0.36					

復元力特性





備考

2.2.2 硬化型バイリニアモデル②

動的応答解析に用いる復元力特性を硬化型バイリニアモデルとし、Ha = α・Hy（α = 1.4:R-04～13、α = 1.8:R-16～19）、δa = μ・δy（μ = 3.0:R-04～13、μ = 7.5:R-16～19）とした。

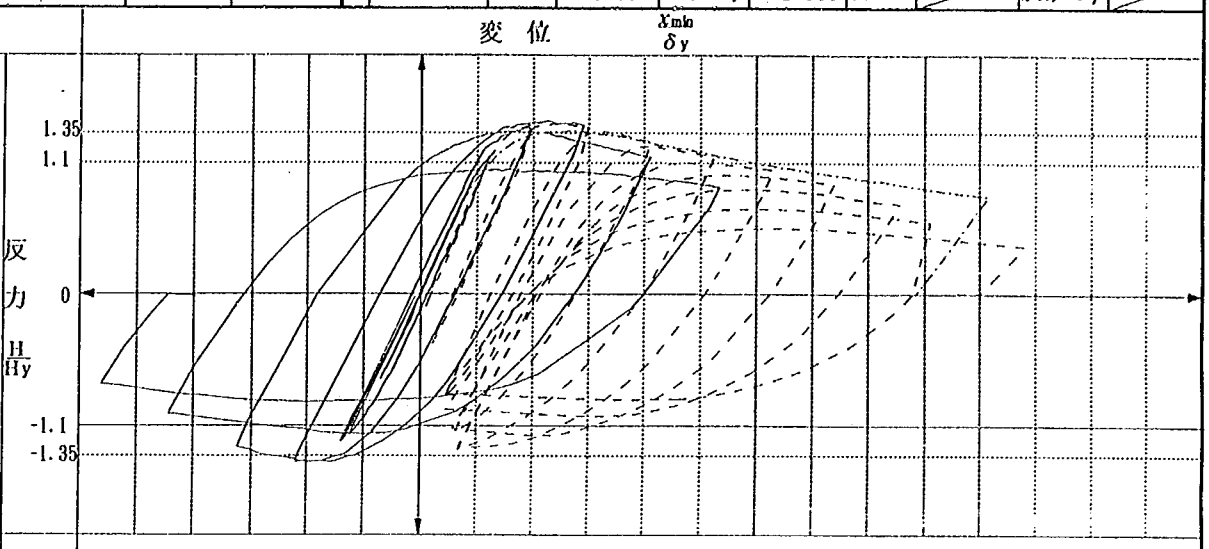
解析結果を表-2.2.2 にまとめる。

表-2.2.2 解析結果：矩形断面・硬化型バイリニアモデル②

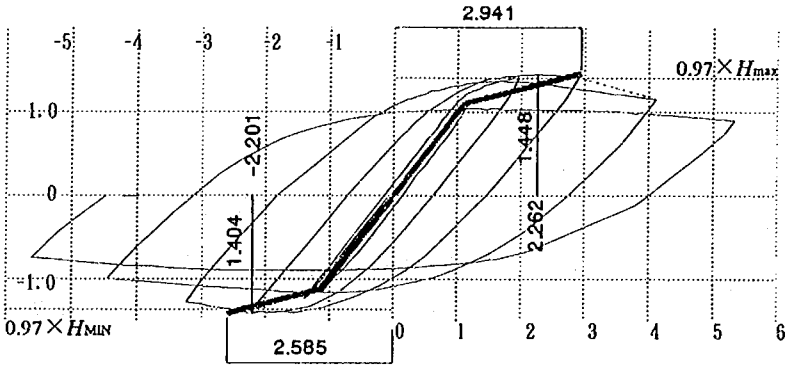
		反力		変位		残留変位
		Hmax／Hy	H min／Hy	xmax／δy	xmin／δy	xrsd／δy
矩形断面:R-04 土研提案L2・I種地盤 360.0gal	解析値	1.18	-1.45	1.58	-3.30	-0.58
	実験値	1.38	-1.46	1.02	-2.64	-0.70
矩形断面:R-05 土研提案L2・I種地盤 540.0gal	解析値	1.28	-1.82	2.21	-5.66	-1.00
	実験値	1.28	-1.44	1.26	-6.98	-5.20
矩形断面:R-06 土研提案L2・III種地盤 442.9gal	解析値	1.32	-1.19	2.49	-1.64	-0.40
	実験値	1.41	-1.41	2.00	-1.85	0.10
矩形断面:R-07 土研提案L2・III種地盤 664.3gal	解析値	1.45	-1.37	3.33	-2.81	-1.30
	実験値	1.40	-1.40	4.95	-3.07	-0.70
矩形断面:R-08 土研提案L2・I種地盤 360.0gal	解析値	1.15	-1.48	1.39	-3.52	-0.16
	実験値	1.42	-1.50	1.13	-3.09	-0.80
矩形断面:R-09 土研提案L2・I種地盤 540.0gal	解析値	1.34	-1.93	2.64	-6.39	-0.29
	実験値	1.28	-1.56	1.64	-11.47	-9.80
矩形断面:R-10 兵庫県南部地震・I種地盤 818.0gal	解析値	1.22	-1.35	1.88	-2.67	-0.28
	実験値	1.32	-1.44	1.60	-3.51	-1.50
矩形断面:R-11 兵庫県南部地震・I種地盤 1227.0gal	解析値	1.42	-1.44	3.15	-3.25	-0.18
	実験値	1.45	-1.41	2.38	-5.37	-3.40
矩形断面:R-12 兵庫県南部地震・III種地盤 325.8gal	解析値	1.17	-1.32	1.53	-2.52	-0.93
	実験値	1.08	-1.37	1.15	-2.58	-0.90
矩形断面:R-13 兵庫県南部地震・III種地盤 488.8gal	解析値	1.23	-1.55	1.93	-3.97	-0.60
	実験値	1.31	-1.23	1.65	-4.93	-2.60
矩形断面:R-16 土研提案L2・I種地盤 360.0gal	解析値	1.12	-1.51	1.32	-4.86	0.07
	実験値	1.50	-1.64	1.27	-3.99	-1.16
矩形断面:R-17 土研提案L2・III種地盤 818.0gal	解析値	1.30	-1.31	2.97	-3.03	-0.57
	実験値	1.63	-1.64	2.56	-3.87	-1.15
矩形断面:R-18 兵庫県南部地震・I種地盤 1227.0gal	解析値	1.43	-1.43	4.09	-4.09	-0.65
	実験値	1.73	-1.77	4.43	-3.92	-0.58
矩形断面:R-19 兵庫県南部地震・III種地盤 325.8gal	解析値	1.18	-1.32	1.82	-3.11	-1.14
	実験値	1.41	-1.55	1.72	-3.32	-1.31

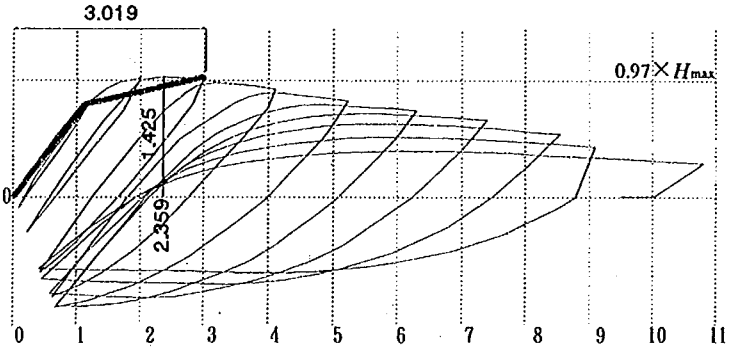
モデル（供試体）	矩形断面：No. R-01, 02, 03										
軸力比 N／Ny	0.152	0.152			両振り繰返し載荷				片振り繰返し載荷			
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38	0.38			計測値		無次元数値		計測値		無次元数値	
断面の補剛パラメータ $R_A(R_I)$	0.47	0.47	反力		H_{max}	25.34tf	H_{max}/H_y	1.448	H_{max}	24.94tf	H_{max}/H_y	1.425
R_F	0.58	0.58			H_{min}	24.57tf	H_{min}/H_y	-1.404	H_{min}		H_{min}/H_y	
R_H	0.34	0.34	変位	最大最小反力時	x_{max}	26.24mm	x_{max}/δ_y	2.262	x_{max}	27.36mm	x_{max}/δ_y	2.359
					x_{min}	25.53mm	x_{min}/δ_y	-2.201	x_{min}		x_{min}/δ_y	
脚柱全体のパラメータ ξ	0.034	0.034		97%×最大最小反力時	x_{+97}	34.12mm	x_{+97}/δ_y	2.941	x_{+97}	35.02mm	x_{+97}/δ_y	3.019
					x_{-97}	29.99mm	x_{-97}/δ_y	-2.585	x_{-97}		x_{-97}/δ_y	

ハイブリッド実験結果



復元力特性

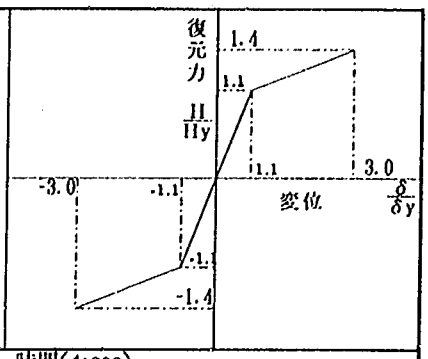


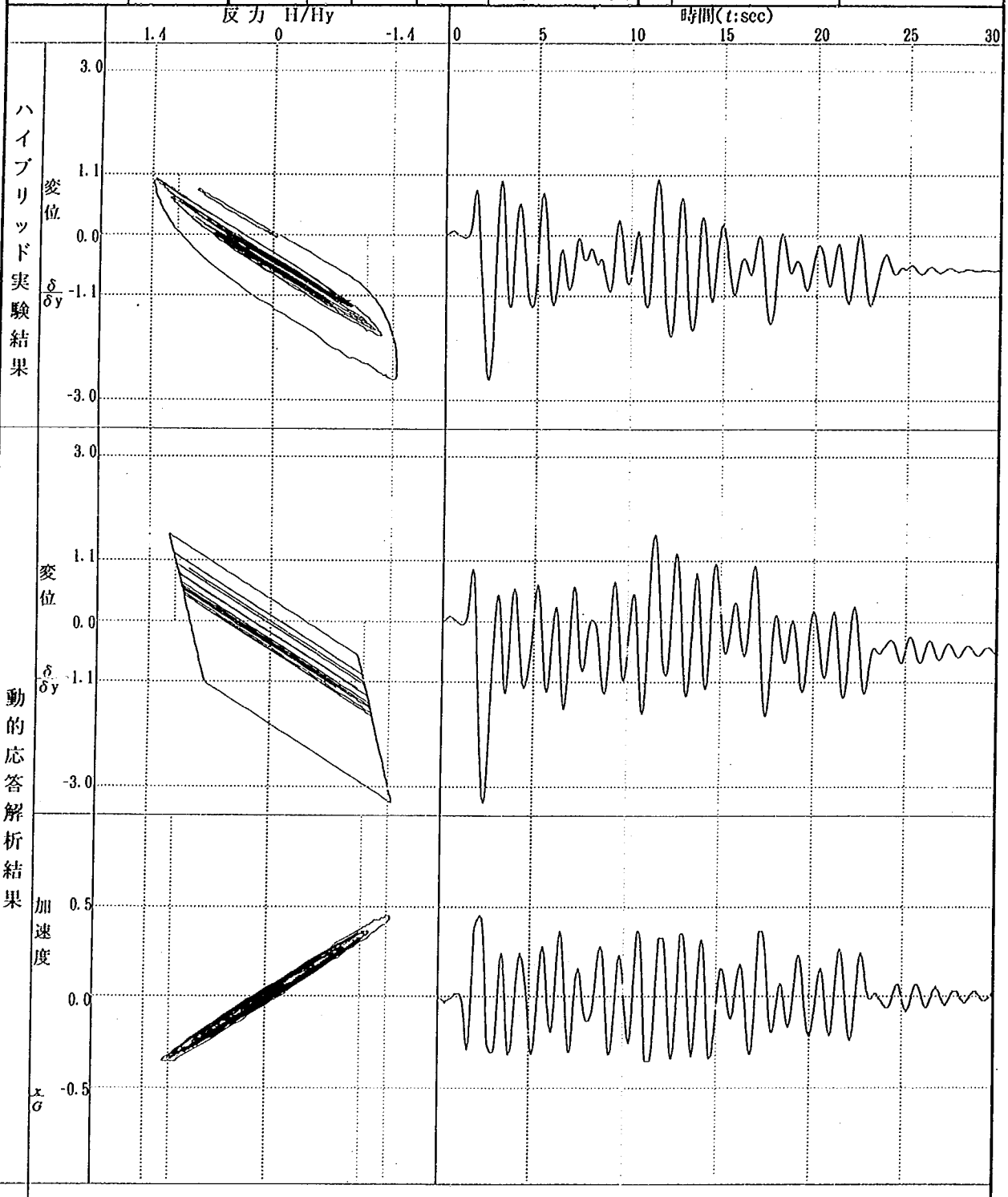


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-04　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	3.110tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1070tf	H_{max}/Hy	1.18	1.38
			H_{min}	-1317tf	H_{min}/Hy	-1.45	-1.46
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	13.5cm	$x_{max}/\delta y$	1.58	1.02
			x_{min}	-28.2cm	$x_{min}/\delta y$	-3.30	-2.64
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38	加速度	$\ddot{x}_{max}$	4348gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.44	
			$\ddot{x}_{min}$	-351gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.36	
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.47	残留変位	x_{rsd}	-5.0cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.58	-0.7
断面の補剛パラメータ　R_I	0.58						
断面の補剛パラメータ　R_H	0.34						

復元力特性

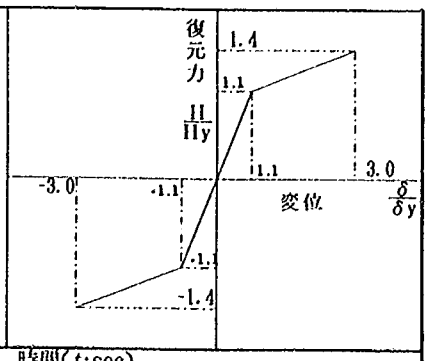


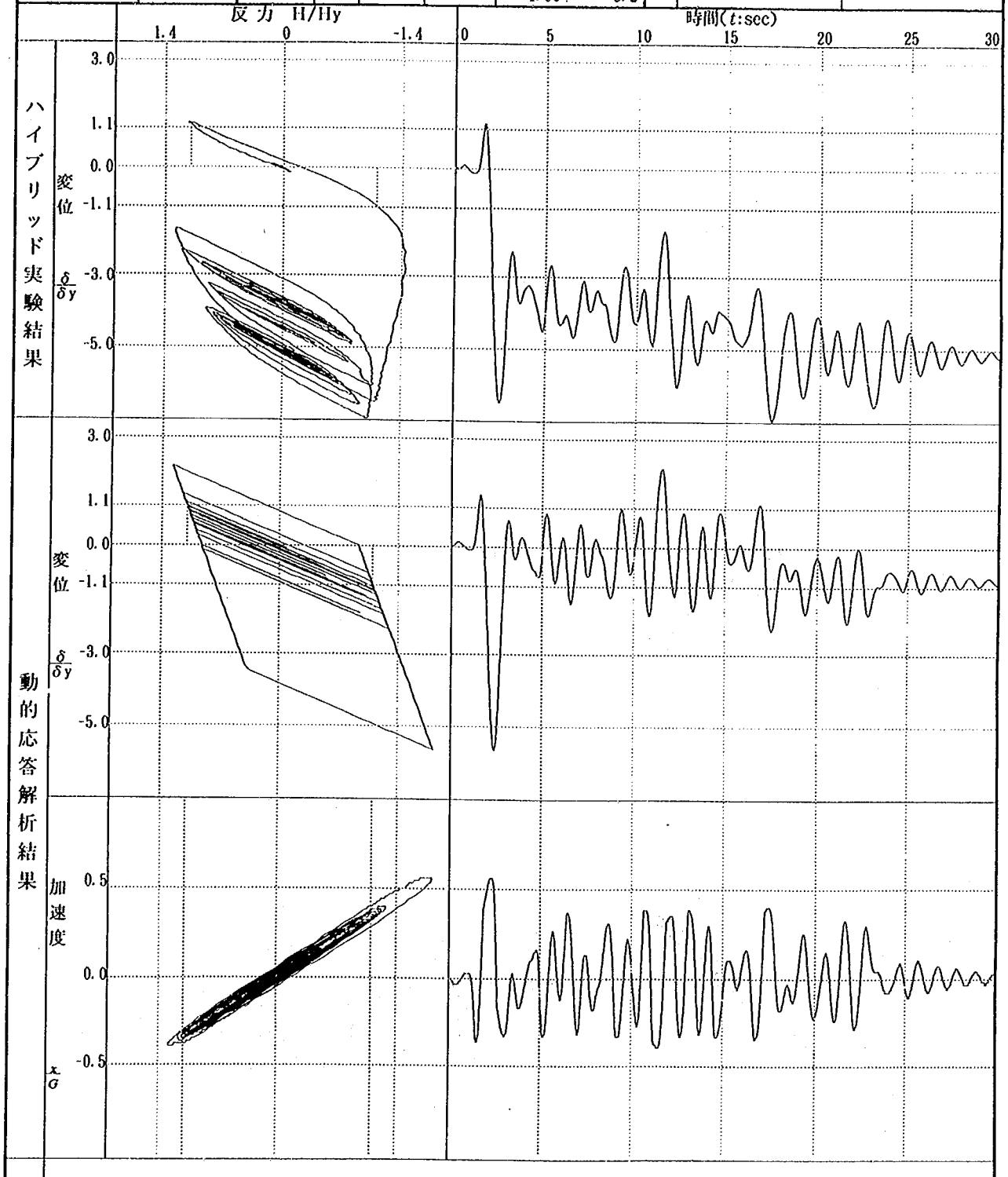


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	短形断面：No. R-05　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・I種地盤（$\ddot{x}_{max}$=540.0gal）						
質量 M	3.127tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	11167tf	H_{max}/Hy	1.28	1.28
			H_{min}	-1665tf	H_{min}/Hy	-1.82	-1.44
軸力比 N／Ny	0.152	変位	x_{max}	18.8cm	$x_{max}/\delta y$	2.21	1.26
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-48.0cm	$x_{min}/\delta y$	-5.66	-6.98
断面の $R_R(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	551gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.56	
補剛バ R_F	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-383gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.39	
ラメータ R_H	0.34	残留変位	x_{rsd}	-8.5cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.00	-5.2

復元力特性

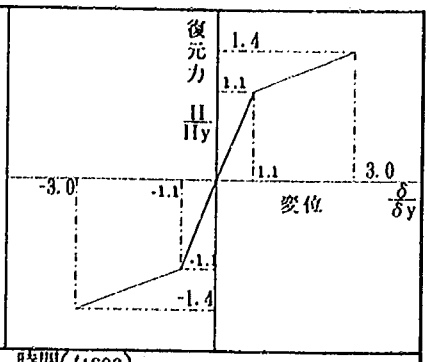


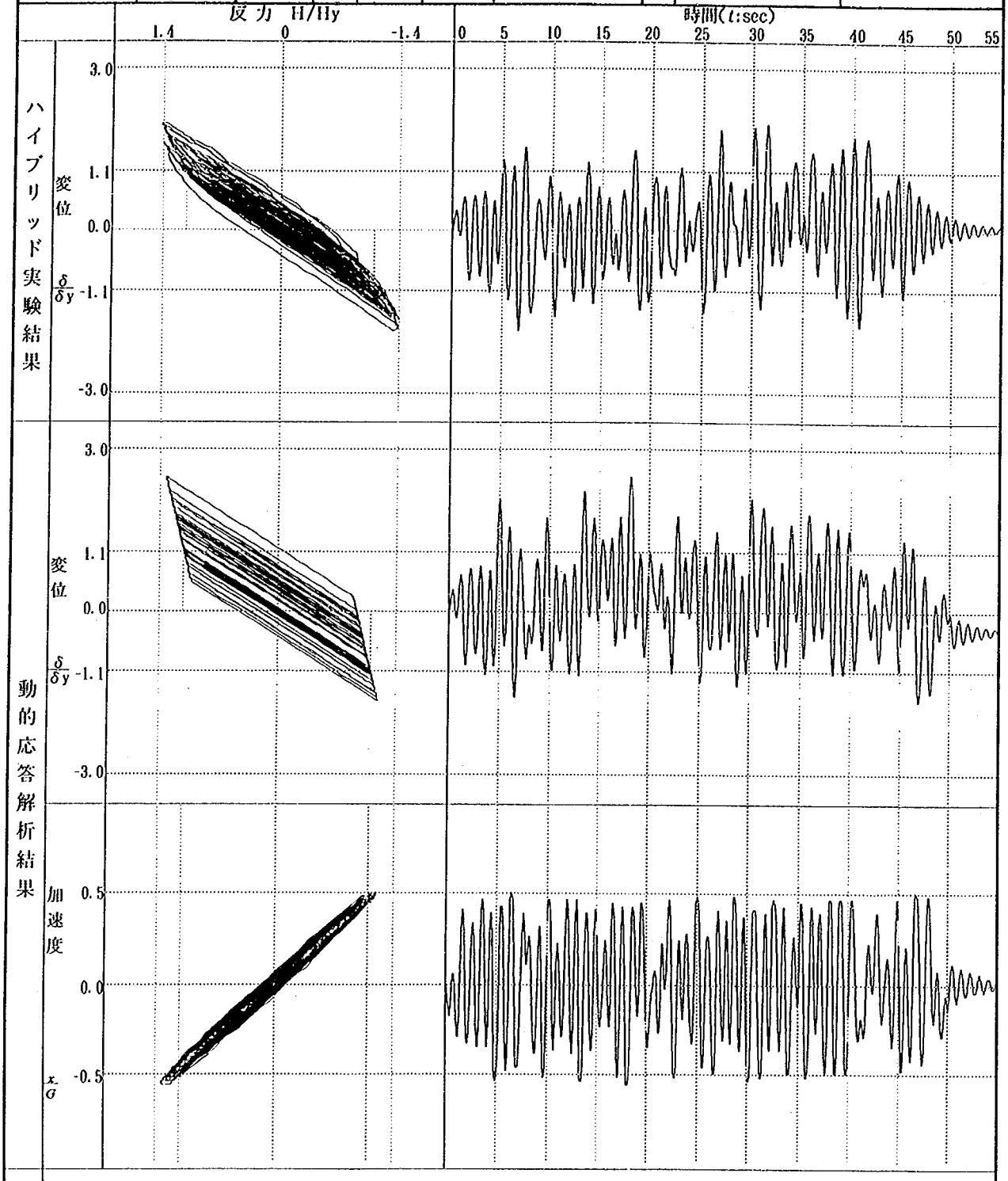


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面：No. R-06　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・III種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=442.9gal）						
質　量　M	2.331 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1255 tf	H_{max}/Hy	1.32	1.41
			H_{min}	-1128 tf	$_{min}/Hy$	-1.19	-1.41
軸力比　N／Ny	0.110	変　位	x_{max}	21.7 cm	$x_{max}/\delta y$	2.49	2.00
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-14.4 cm	$x_{min}/\delta y$	-1.64	-1.85
断面の補剛パラメータ　$R_R(R_I)$ R_F R_H	0.47 0.58 0.34	加速度	$\ddot{x}_{max}$	492 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.50	
			$\ddot{x}_{min}$	-551 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.56	
		残留変位	x_{rsd}	-0.3 cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.04	0.1

復元力特性

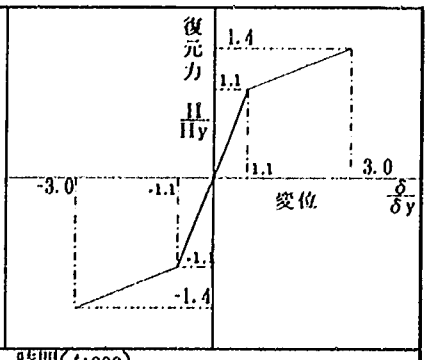


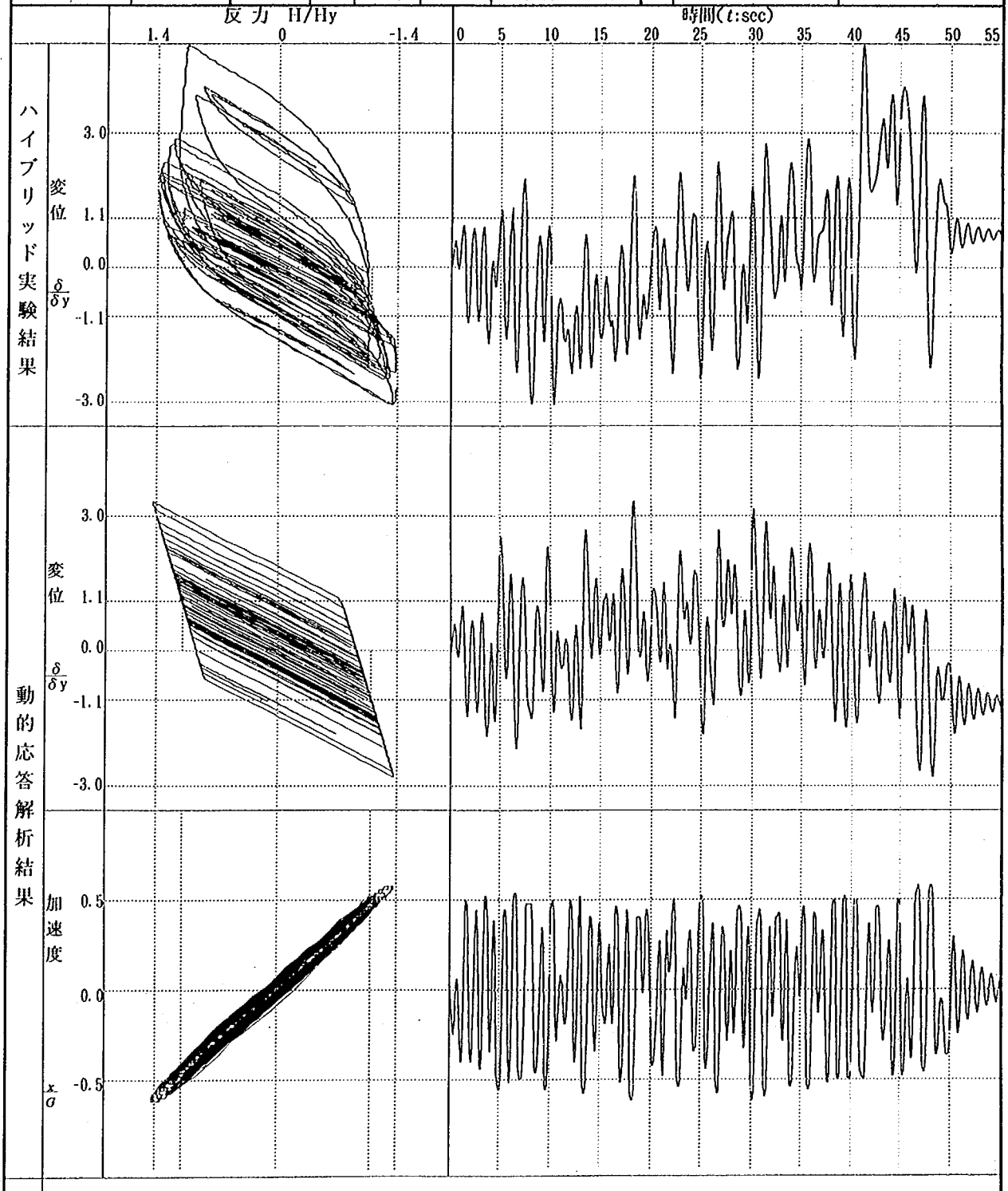


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-07　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅲ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=664.3gal）						
質　量　M	2.338tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1386tf	H_{max}/Hy	1.45	1.40
			H_{min}	-1309tf	H_{min}/Hy	-1.37	-1.40
軸力比　N／Ny	0.110	変　位	x_{max}	29.6cm	$x_{max}/\delta y$	3.33	4.95
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-25.0cm	$x_{min}/\delta y$	-2.81	-3.07
断面の補剛パラメータ　$R_R(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	571gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.58	
	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-603gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.61	
	R_f						
	0.34	残留変位	x_{rsd}	-11.6cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.30	-0.7
	R_{II}						

復元力特性

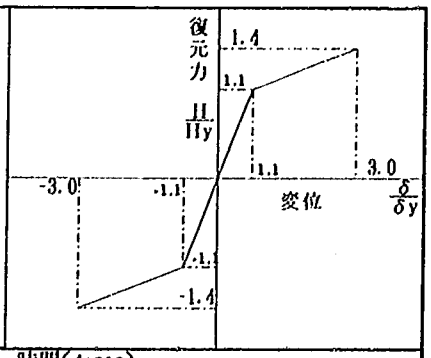


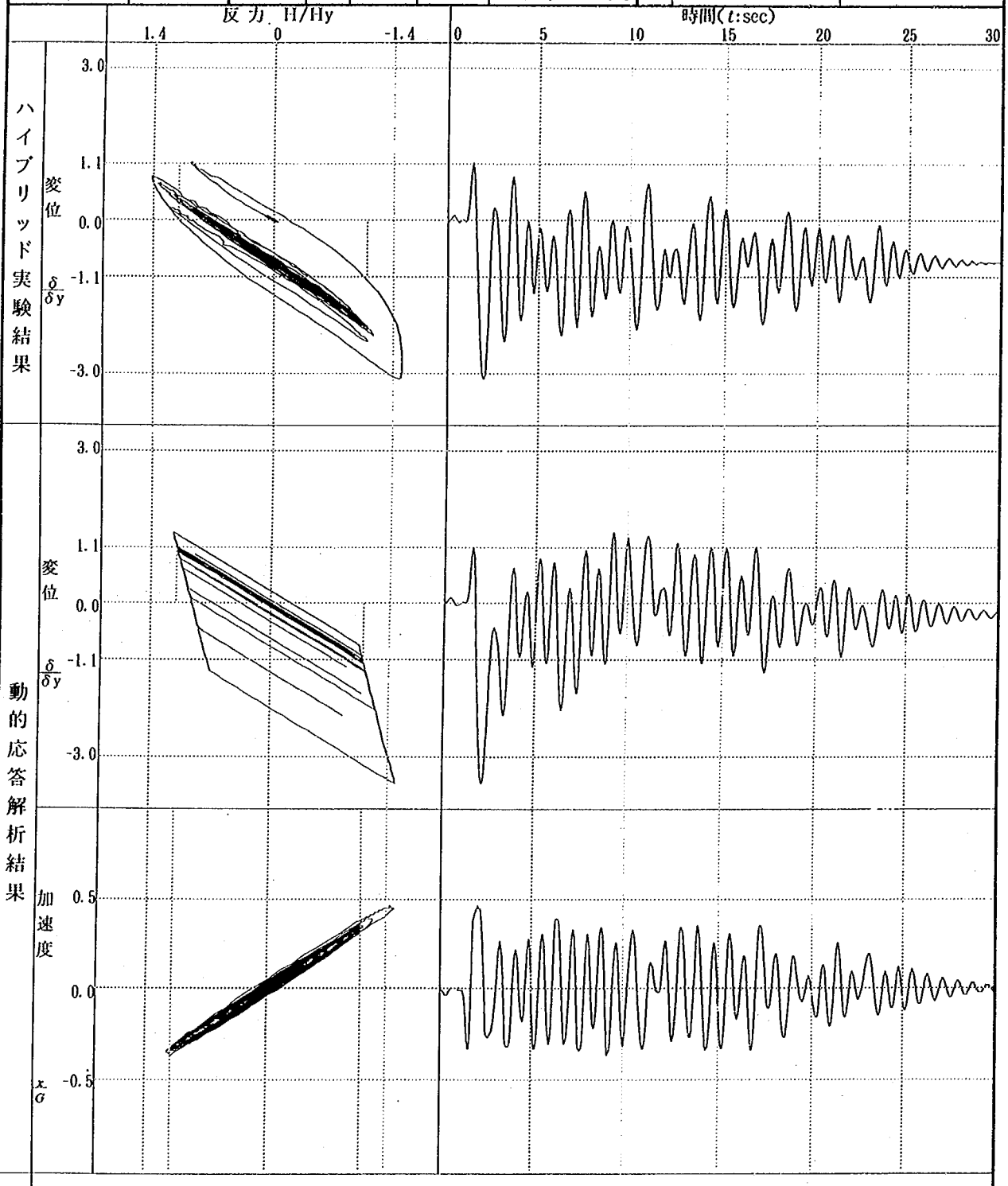


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-08　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	3.919tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1321tf	H_{max}/Hy	1.15	1.42
			H_{min}	-1710tf	H_{min}/Hy	-1.48	-1.50
軸力比　N／Ny	0.191	変　位	x_{max}	6.8cm	$x_{max}/\delta y$	1.39	1.13
細長比　$\bar{\lambda}$	0.28		x_{min}	-17.2cm	$x_{min}/\delta y$	-3.52	-3.09
断面の補剛パラメータ　$R_s(R_f)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	445gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.45	
	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-351gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.36	
	R_F						
	0.34	残留変位	x_{rsd}	-0.8cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.16	-0.8

復元力特性

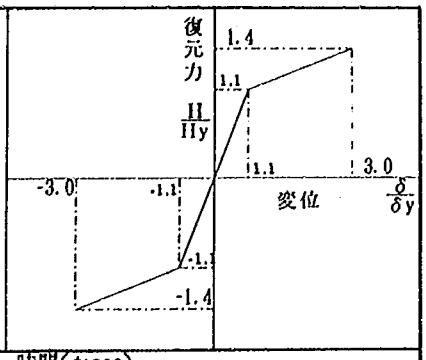


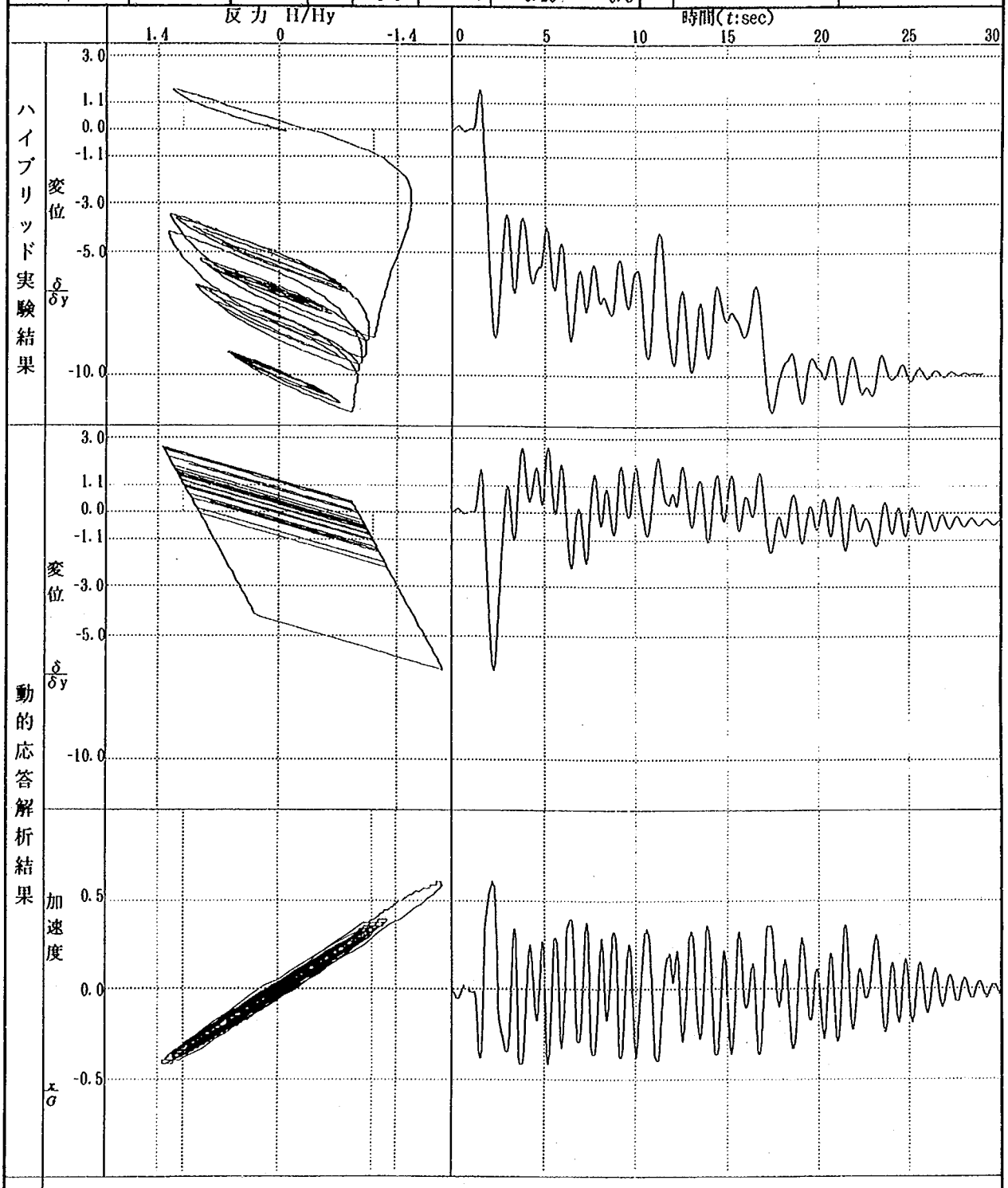


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-09　　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=540.0gal）						
質量 M	3.917tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	1549tf	H_{max}/H_y	1.34	1.28
			H_{min}	-2230tf	H_{min}/H_y	-1.93	-1.56
軸力比 N／Ny	0.191	変位	x_{max}	12.9cm	x_{max}/δ_y	2.64	1.64
細長比 $\bar{\lambda}$	0.28		x_{min}	-31.2cm	x_{min}/δ_y	-6.39	-11.47
断面の補剛パラメータ $R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	583gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.59	
R_I	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-410gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.42	
R_{II}	0.34	残留変位	x_{rsd}	-1.4cm	x_{rsd}/δ_y	-0.29	-9.8

復元力特性

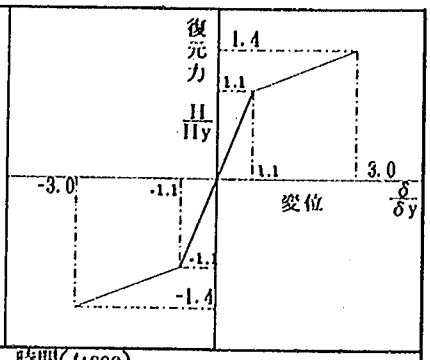


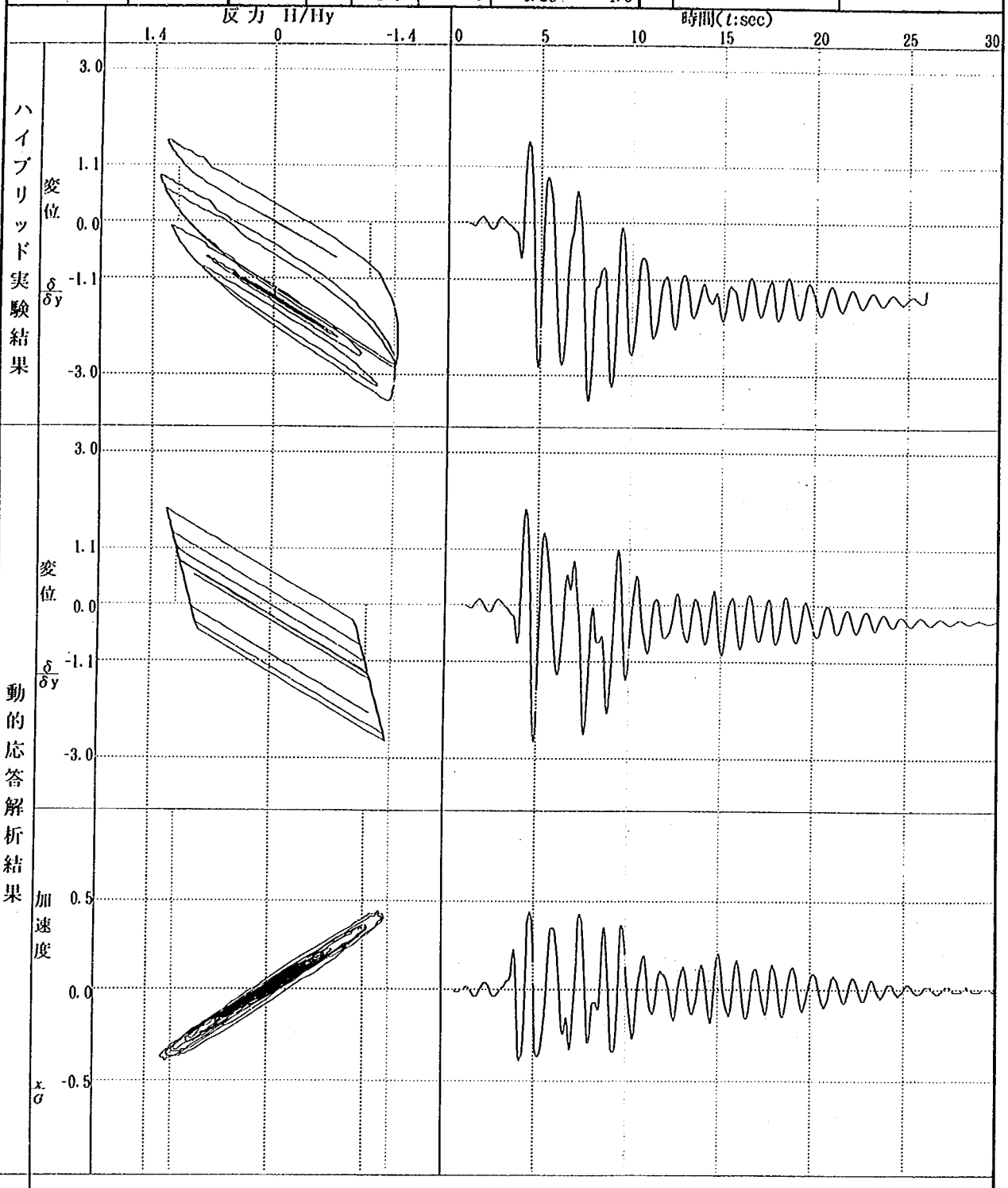


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-10　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{O}_{max}$=818.0gal）						
質　量　M	3.142tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1124tf	H_{max}/Hy	1.22	1.32
			H_{min}	-1240tf	$_{min}/Hy$	-1.35	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	16.0cm	$x_{max}/\delta y$	1.88	1.60
細長比　λ	0,.38		x_{min}	-22.7cm	$x_{min}/\delta y$	-2.67	-3.51
断面の　$R_x(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	420gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.43	
補剛バ　R_r	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-375gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.38	
ラメータ　R_{II}	0.34	残留変位	x_{rsd}	-2.4cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.28	-1.5

復元力特性

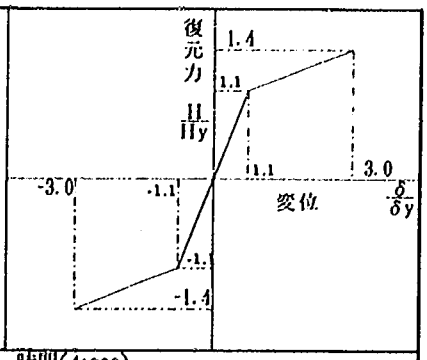




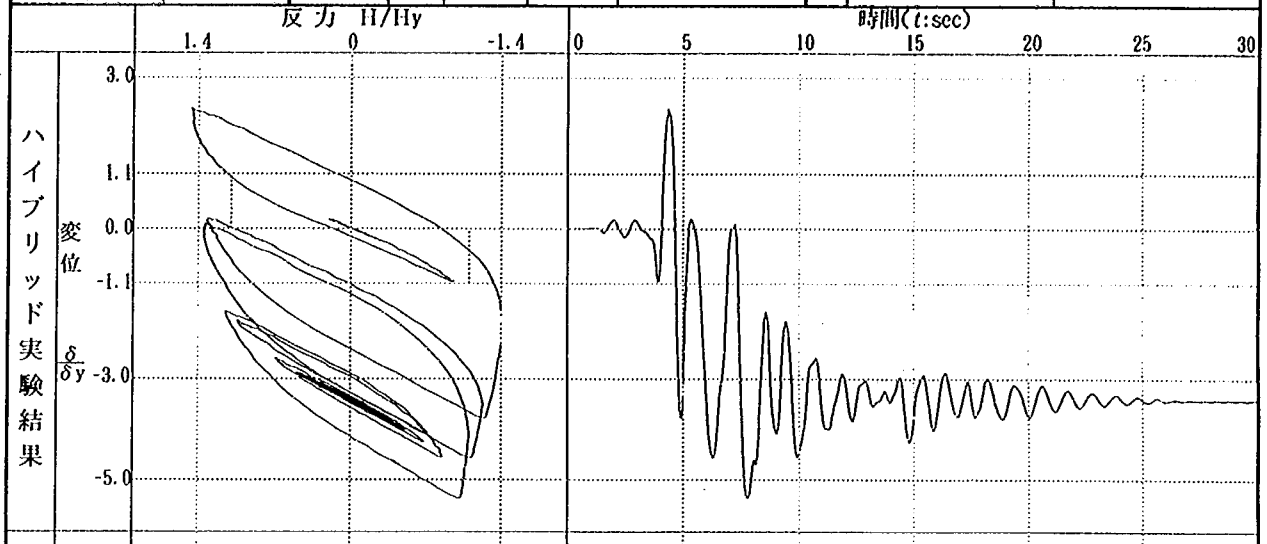
備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面；No. R-11　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=1227.0gal）						
質　量　M	3.096 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1289 tf	H_{max}/Hy	1.42	1.45
			H_{min}	-1303 tf	H_{min}/Hy	-1.44	-1.41
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	26.4 cm	$x_{max}/\delta y$	3.15	2.38
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-27.2 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.25	-5.37
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	451 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.46	
	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-435 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.44	
R_F		残留変位	x_{rsd}	-1.5 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.18	-3.4
R_H	0.34						

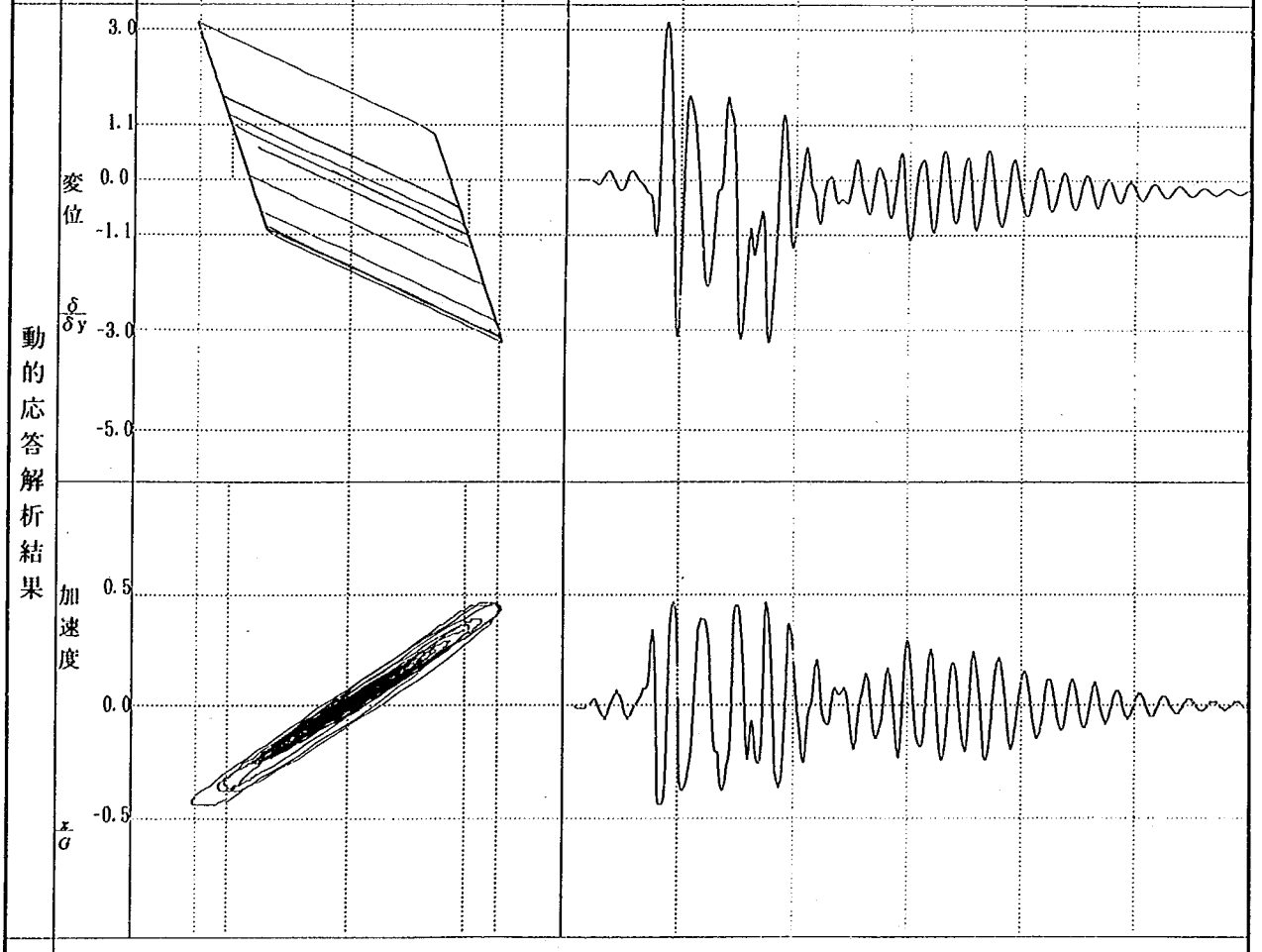
復元力特性



ハイブリッド実験結果



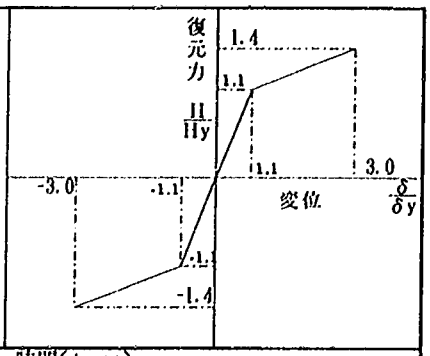
動的応答解析結果

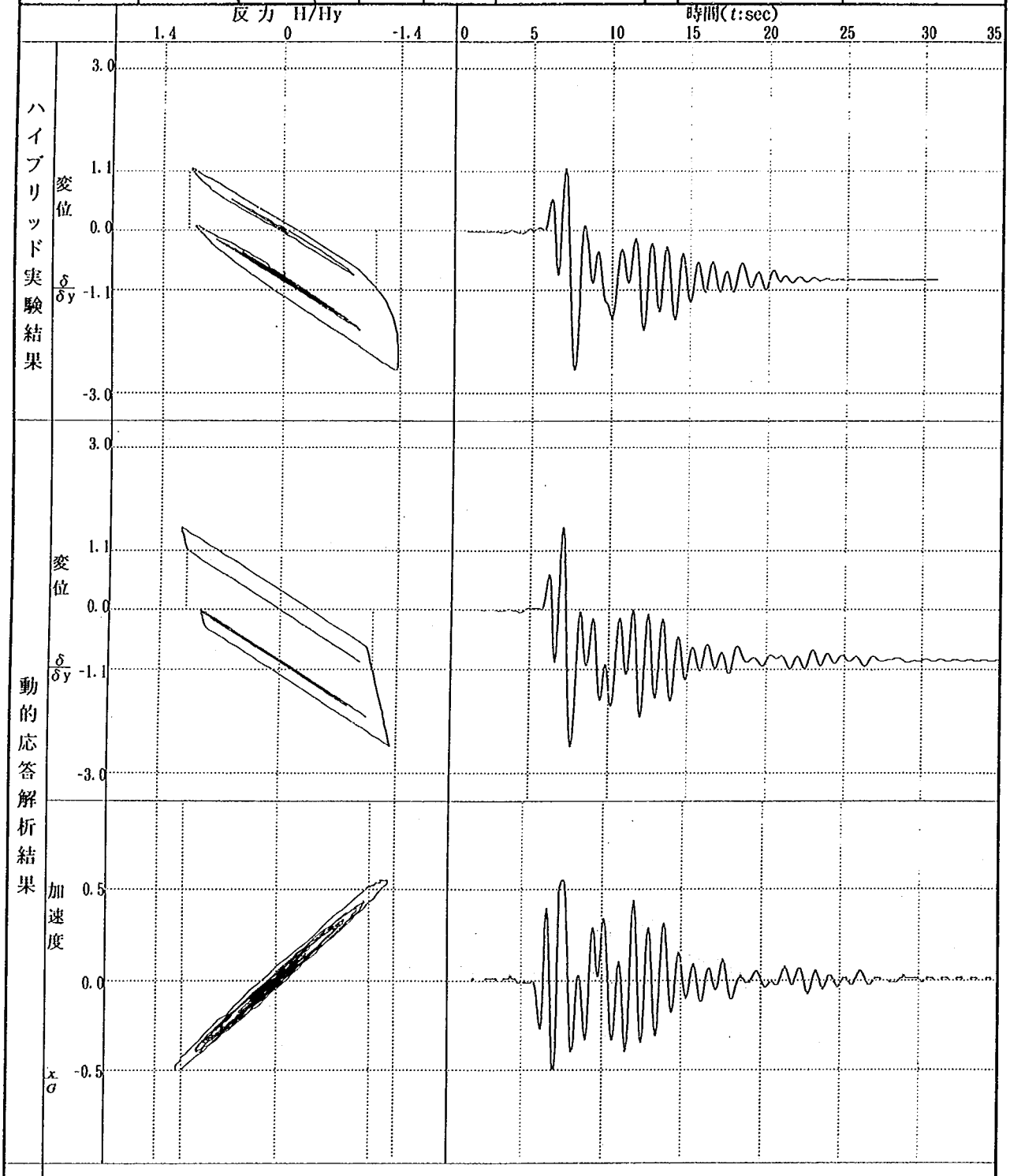


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-12　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・III種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=325.8gal）					
質　量 M	2.364 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1126 tf	H_{max}/Hy	1.17　1.08
			H_{min}	-1275 tf	H_{min}/Hy	-1.32　-1.37
軸力比 N／Ny	0.110	変　位	x_{max}	13.7 cm	$x_{max}/\delta y$	1.53　1.15
			x_{min}	-22.5 cm	$x_{min}/\delta y$	-2.52　-2.58
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38	加速度	$\ddot{x}_{max}$	552 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.56
断面の補剛パラメータ $R_s(R_I)$	0.47		$\ddot{x}_{min}$	-491 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.50
R_F	0.58	残留変位	x_{rsd}	-8.3 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.9　-0.9
R_H	0.34					

復元力特性

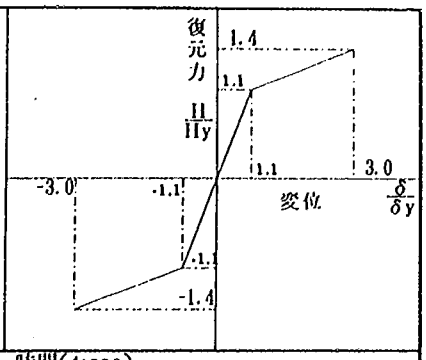


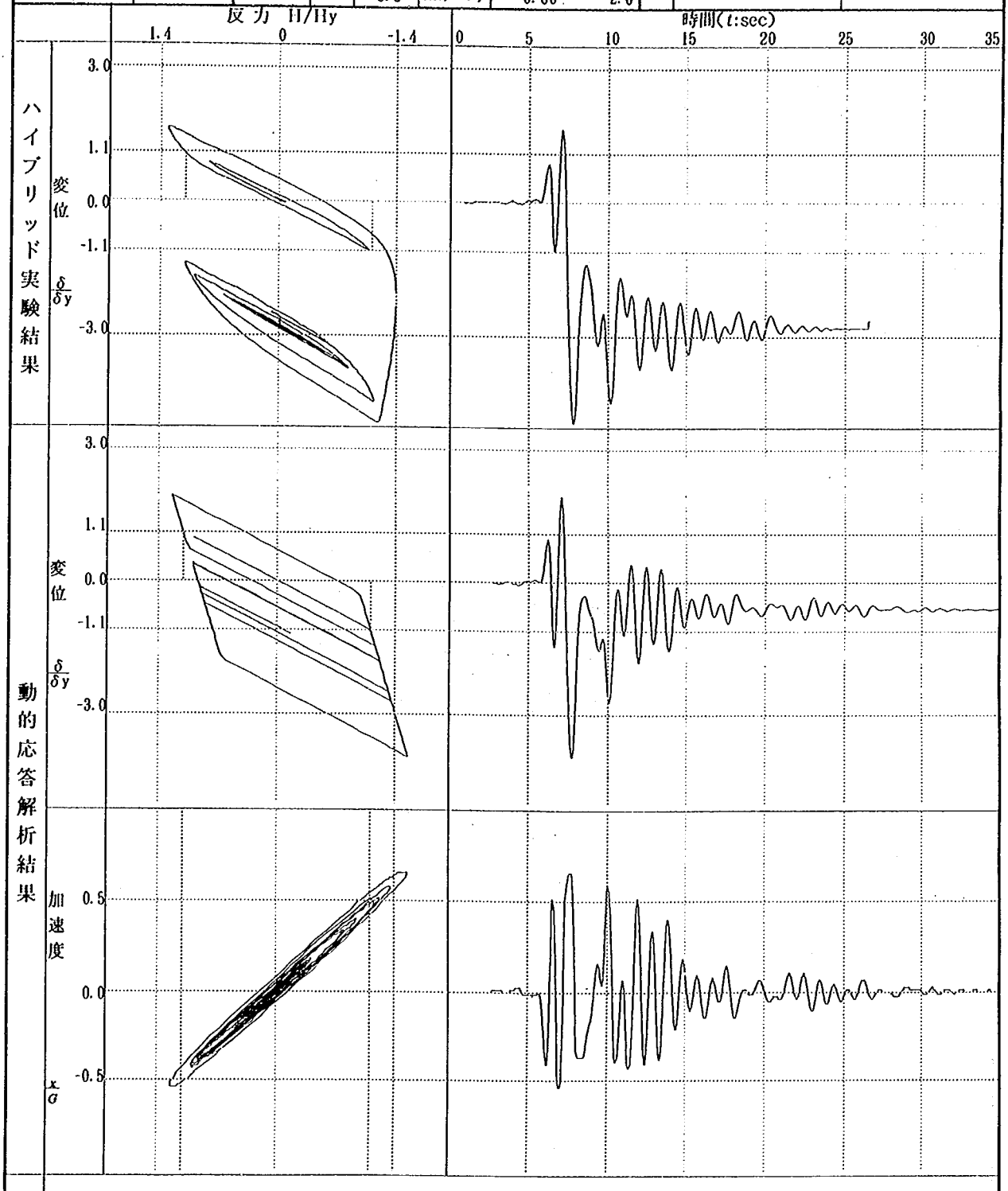


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-13　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・III種地盤（$\ddot{x}_{max}$=488.8gal）						
質量 M	2.336tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	1174tf	H_{max}/Hy	1.23	1.31
			H_{min}	-1481tf	H_{min}/Hy	-1.55	-1.39
軸力比 N／Ny	0.110	変位	x_{max}	17.1cm	$x_{max}/\delta y$	1.93	1.65
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-35.2cm	$x_{min}/\delta y$	-3.97	-4.93
断面の $R_R(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	647gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.66	
補剛バ R_F	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-522gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.53	
ラメータ R_H	0.34	残留変位	x_{rsd}	-5.3cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.60	-2.6

復元力特性



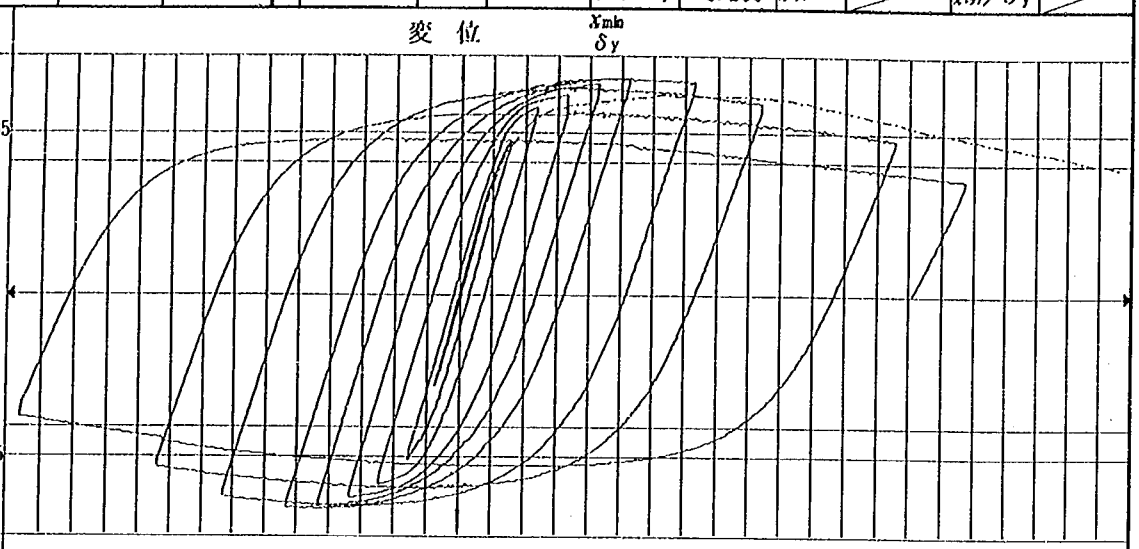


備考

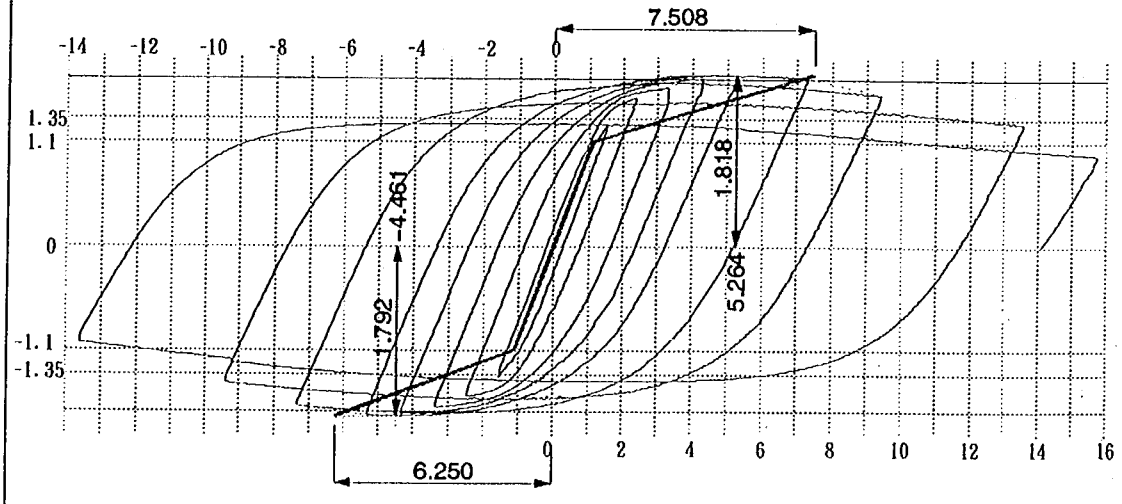
モデル（供試体）	矩形断面：No. R-14, 15	
軸力比 N／Ny	0.176	0.176
細長比 λ	0.202	0.202
断面の補剛パラメータ $R_A(R_I)$	0.353	0.355
	0.210	0.210
R_F	0.350	0.352
R_H		
脚柱全体のパラメータ ξ	0.0075	0.0075

			両振り繰返し載荷				片振り繰返し載荷			
			計測値		無次元数値		計測値		無次元数値	
反力		H_{max}	1, 188	H_{max}/Hy	1.818	H_{max}	-	H_{max}/Hy	-
		H_{min}	-1, 171	H_{min}/Hy	-1.792	H_{min}		H_{min}/Hy	
変位	最大最小反力時	x_{max}	29.8	x_{max}/δ_y	5.264	x_{max}	-	x_{max}/δ_y	-
		x_{min}	-25.2	x_{min}/δ_y	-4.461	x_{min}		x_{min}/δ_y	
	97%×最大最小反力時	x_{+97}	42.5	x_{+97}/δ_y	7.508	x_{+97}	-	x_{+97}/δ_y	-
		x_{-97}	-35.4	x_{-97}/δ_y	-6.250	x_{-97}		x_{-97}/δ_y	

ハイブリッド実験結果



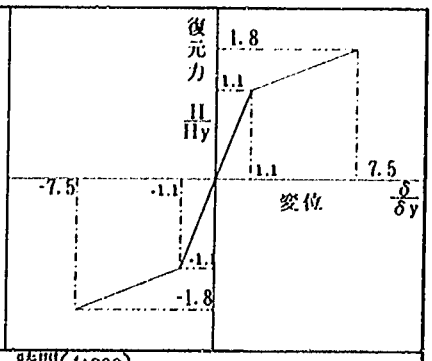
復元力特性

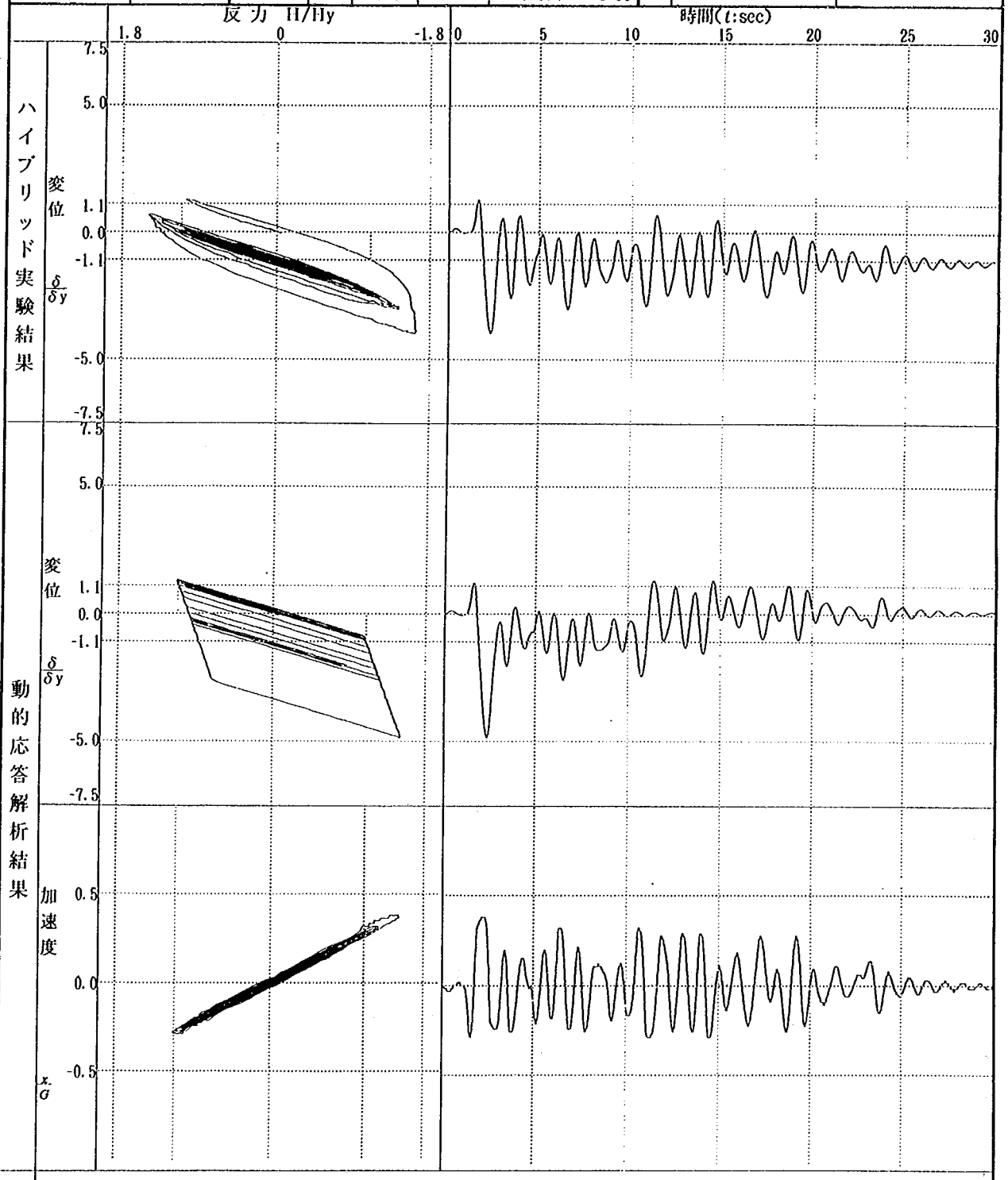


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-16　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	2.703tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	733tf	H_{max}/Hy	1.12	1.50
			H_{min}	-985tf	H_{min}/Hy	-1.51	-1.64
軸力比　N／Ny	0.150	変　位	x_{max}	7.5cm	$x_{max}/\delta y$	1.32	1.27
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-27.5cm	$x_{min}/\delta y$	-4.86	-3.99
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.37	加速度	$\ddot{x}_{max}$	377gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.38	
	R_P 0.21		$\ddot{x}_{min}$	-288gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.29	
	R_H 0.36	残留変位	x_{rsd}	0.4cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.07	-1.16

復元力特性

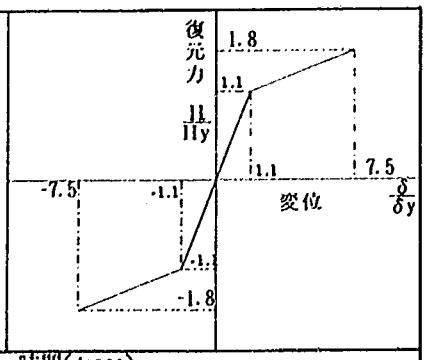


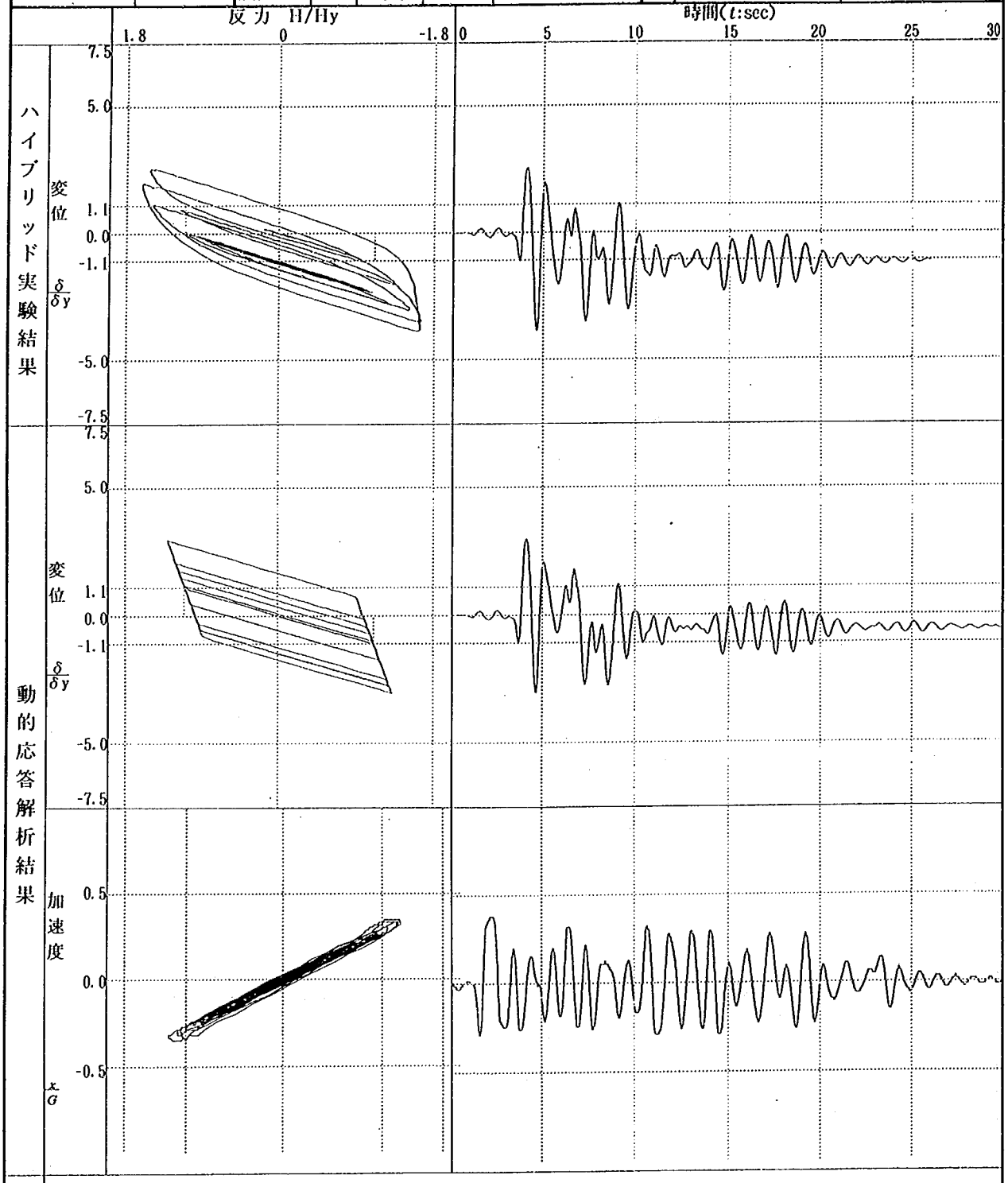


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-17　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{O}_{max}$=818.0gal）						
質　量　M	2.706 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	851 tf	H_{max}/Hy	1.30	1.63
			H_{min}	-856 tf	H_{min}/Hy	-1.31	-1.64
軸力比　N／Ny	0.109	変　位	x_{max}	16.8 cm	$x_{max}/\delta y$	2.97	2.56
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-17.4 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.03	-3.87
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.37	加速度	$\ddot{x}_{max}$	347 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.35	
	R_F 0.21		$\ddot{x}_{min}$	-337 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.34	
	R_H 0.36	残留変位	x_{rsd}	-3.2 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.57	-1.15

復元力特性

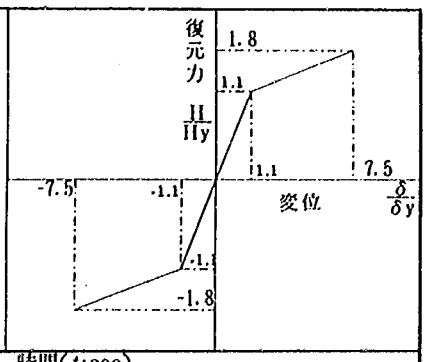


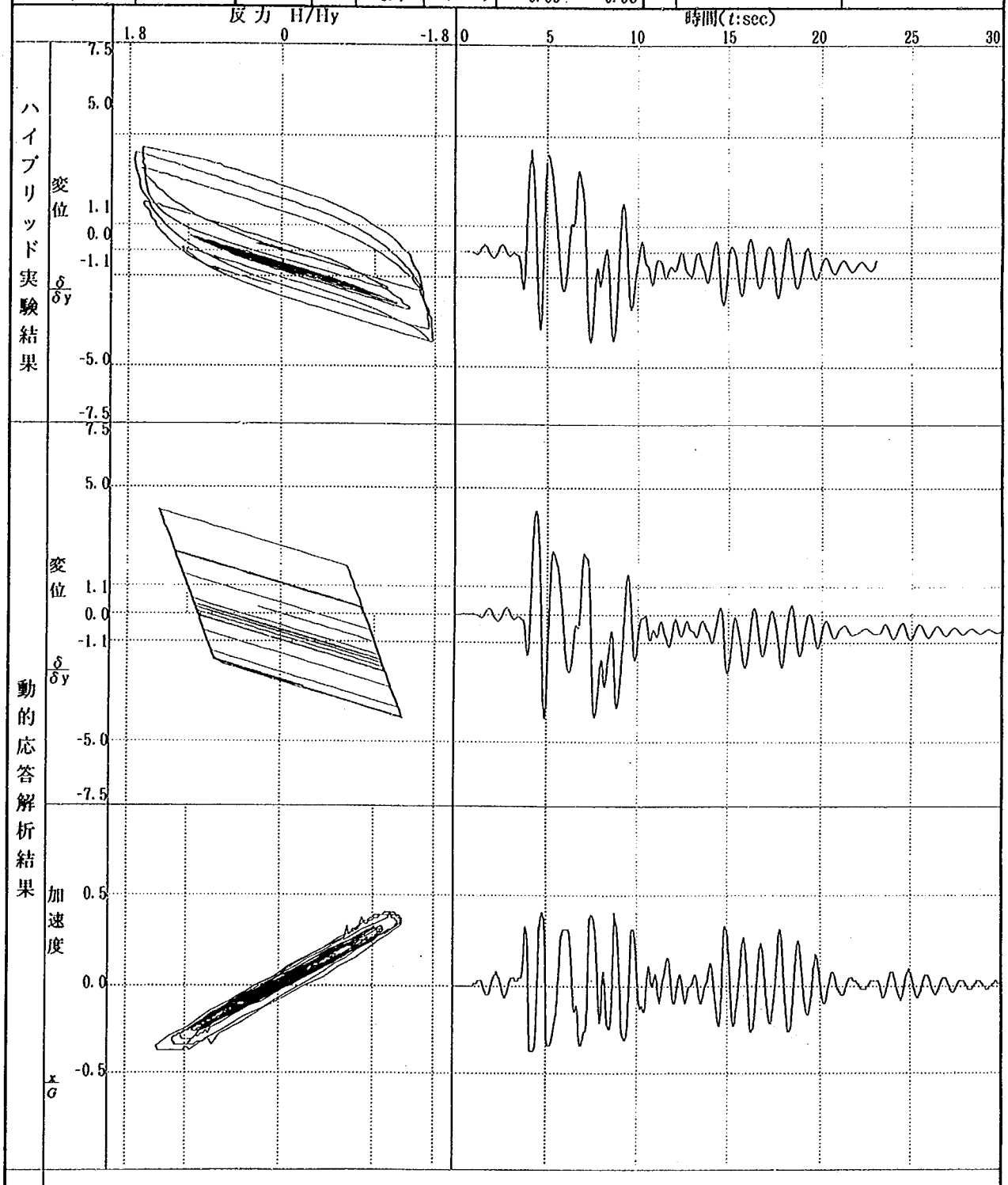


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-18　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=1227.0gal）						
質　量　M	2.717tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	935tf	H_{max}/Hy	1.43	1.73
			H_{min}	-935tf	$_{min}/Hy$	-1.43	-1.77
軸力比　N／Ny	0.150	変　位	x_{max}	23.1cm	$x_{max}/\delta y$	4.09	4.43
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-23.2cm	$x_{min}/\delta y$	-4.09	-3.92
断面の　$R_R(R_I)$	0.37	加速度	$\ddot{x}_{max}$	393gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.40	
剛性　R_I	0.21		$\ddot{x}_{min}$	-370gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.38	
パラメータ　R_{II}	0.36	残留変位	x_{rsd}	-3.7cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.65	-0.58

復元力特性

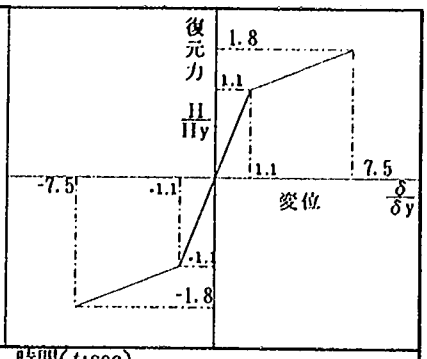


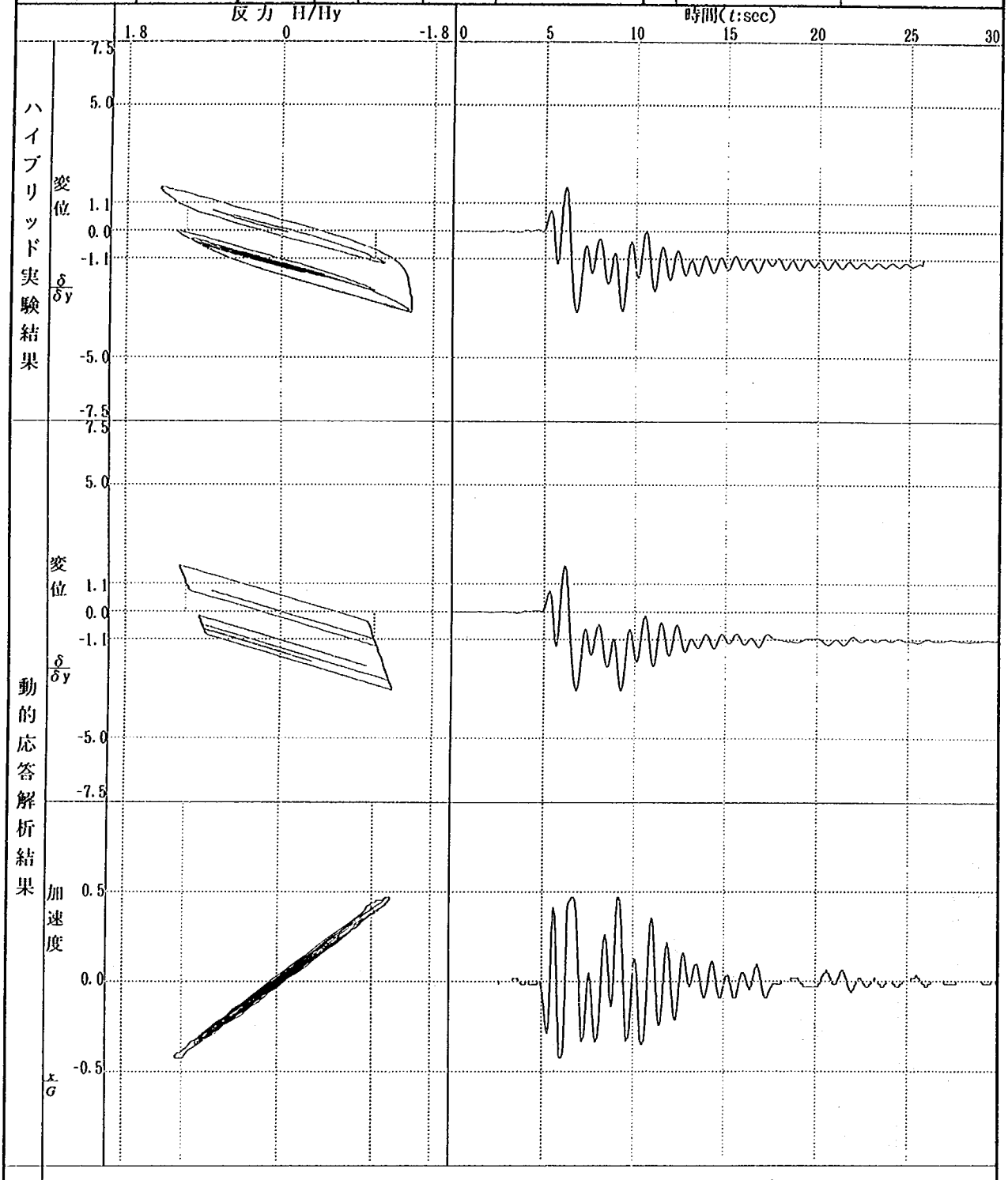


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-19　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・III種地盤（$\ddot{x}_{max}$=325.8gal）						
質量 M	2.025tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h	5 %	反力	Hmax	812tf	Hmax／Hy	1.18	1.41
形式	剛性比例		Hmin	-909tf	Hmin／Hy	-1.32	-1.55
軸力比 N／Ny	0.109	変位	xmax	10.9cm	xmax／δy	1.82	1.72
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		xmin	-18.6cm	xmin／δy	-3.11	-3.21
断面の $R_s(R_f)$	0.37	加速度	$\ddot{x}_{max}$	469gal	$\ddot{x}_{max}$／G	0.48	
補剛パ R_F	0.21		$\ddot{x}_{min}$	-420gal	$\ddot{x}_{min}$／G	-0.43	
ラメータ R_H	0.36	残留変位	xrsd	-6.8cm	xrsd／δy	-1.14	-1.31

復元力特性





備考

2.3 円形断面

2.3.1 硬化型バイリニアモデル①

動的応答解析に用いる復元力特性を硬化型バイリニアモデルとし、Ha = α・Hy（α = 1.4）、δa = μ・δy（μ=3.0:P-04～13、μ=3.5:P-16、μ=5.2:P-17、μ=3.3:P-18、μ=3.4:P-19、μ=5.3:P-20）とした。

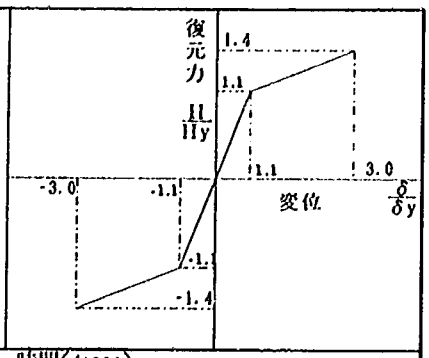
解析結果を表-2.3.1 にまとめる。

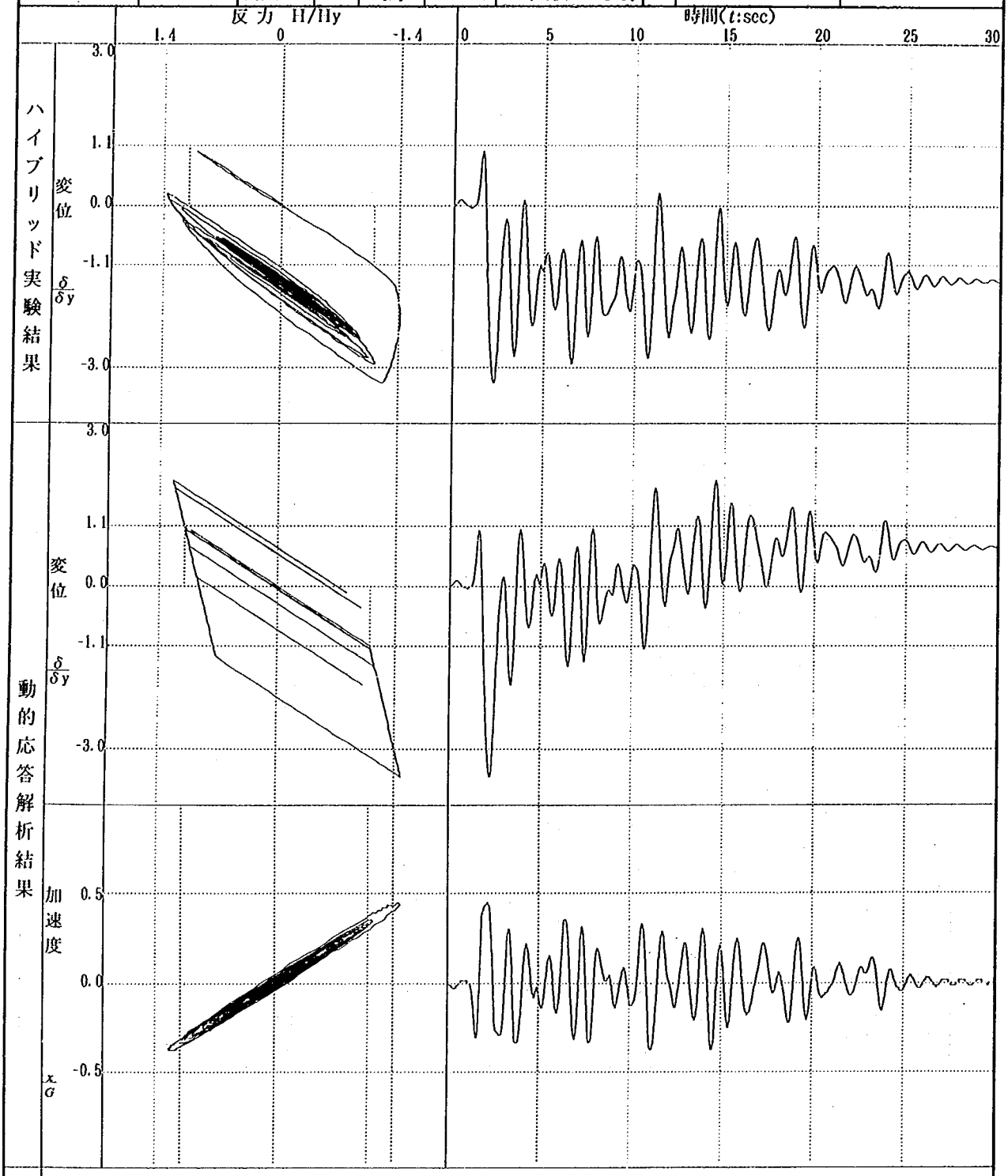
表-2.3.1 解析結果：円形断面・硬化型バイリニアモデル①

		反力		変位		残留変位
		H max／Hy	H min／Hy	x max／δy	x min／δy	x rsd／δy
円形断面:P-04 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.23	-1.48	1.94	-3.51	0.71
	実験値	1.16	-1.41	1.00	-3.28	-1.39
円形断面:P-05 土研提案L2・Ⅰ種地盤 432.0gal	解析値	1.22	-1.65	1.87	-4.57	0.52
	実験値	1.20	-1.43	1.24	-9.35	-8.46
円形断面:P-06 土研提案L2・Ⅲ種地盤 442.9gal	解析値	1.23	-1.25	1.94	-2.06	0.17
	実験値	1.46	-1.42	2.01	-1.92	0.09
円形断面:P-07 土研提案L2・Ⅲ種地盤 606.8gal	解析値	1.39	-1.34	2.94	-2.63	-0.04
	実験値	1.40	-1.40	-	-	-
円形断面:P-08 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.12	-1.49	1.20	-3.53	0.05
	実験値	1.44	-1.56	1.18	-3.03	-1.24
円形断面:P-09 土研提案L2・Ⅰ種地盤 432.0gal	解析値	1.25	-1.66	2.08	-4.62	0.22
	実験値	1.46	-1.50	1.46	-5.31	-3.91
円形断面:P-10 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.36	-1.42	2.75	-3.10	-0.44
	実験値	1.48	-1.51	2.61	-2.96	-0.14
円形断面:P-11 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 1227.0gal	解析値	1.54	-1.64	3.91	-4.52	-0.70
	実験値	1.55	-1.48	7.55	2.56	6.49
円形断面:P-12 兵庫県南部地震・Ⅲ種地盤 325.8gal	解析値	1.20	-1.30	1.73	-2.35	-0.79
	実験値	1.34	-1.37	1.64	-2.47	-0.82
円形断面:P-13 兵庫県南部地震・Ⅲ種地盤 488.8gal	解析値	1.24	-1.56	1.98	-4.00	0.84
	実験値	1.44	-1.46	2.43	-4.69	-3.10
円形断面:P-16 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.14	-1.56	1.43	-4.80	-0.02
	実験値	1.55	-1.53	1.23	-4.27	-1.89
円形断面:P-17 土研提案L2・Ⅲ種地盤 442.9gal	解析値	1.18	-1.25	3.24	-2.27	-0.11
	実験値	1.36	-1.39	3.55	-1.22	1.34
円形断面:P-18 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.62	-1.18	1.70	-4.91	-0.29
	実験値	1.52	-1.57	1.38	-4.47	-2.11
円形断面:P-19 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.22	-1.23	2.91	-2.84	-0.73
	実験値	1.55	-1.56	2.68	-3.39	-0.82
円形断面:P-20 兵庫県南部地震・Ⅲ種地盤 325.8gal	解析値	1.25	-1.15	1.80	-3.22	-1.45
	実験値	1.36	-1.41	1.90	-2.93	-0.82

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-04　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（θ_{max}=360.0gal）						
質　量　M	2.002tf·s2/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	720tf	H_{max}/Hy	1.23	1.16
			H_{min}	-864tf	H_{min}/Hy	-1.48	-1.14
軸力比　N／Ny	0.154	変　位	x_{max}	12.6cm	$x_{max}/\delta y$	1.94	1.00
			x_{min}	-22.8cm	$x_{min}/\delta y$	-3.51	-3.28
細長比　$\bar{\lambda}$	0.331	加速度	$\ddot{x}_{max}$	439gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.45	
			$\ddot{x}_{min}$	-368gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.38	
断面の補剛パラメータ　R_t	0.115	残留変位	x_{rsd}	4.6cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.71	-1.39

復元力特性

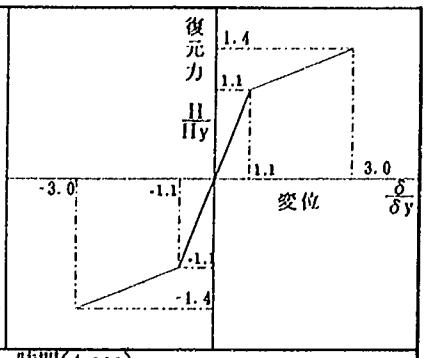


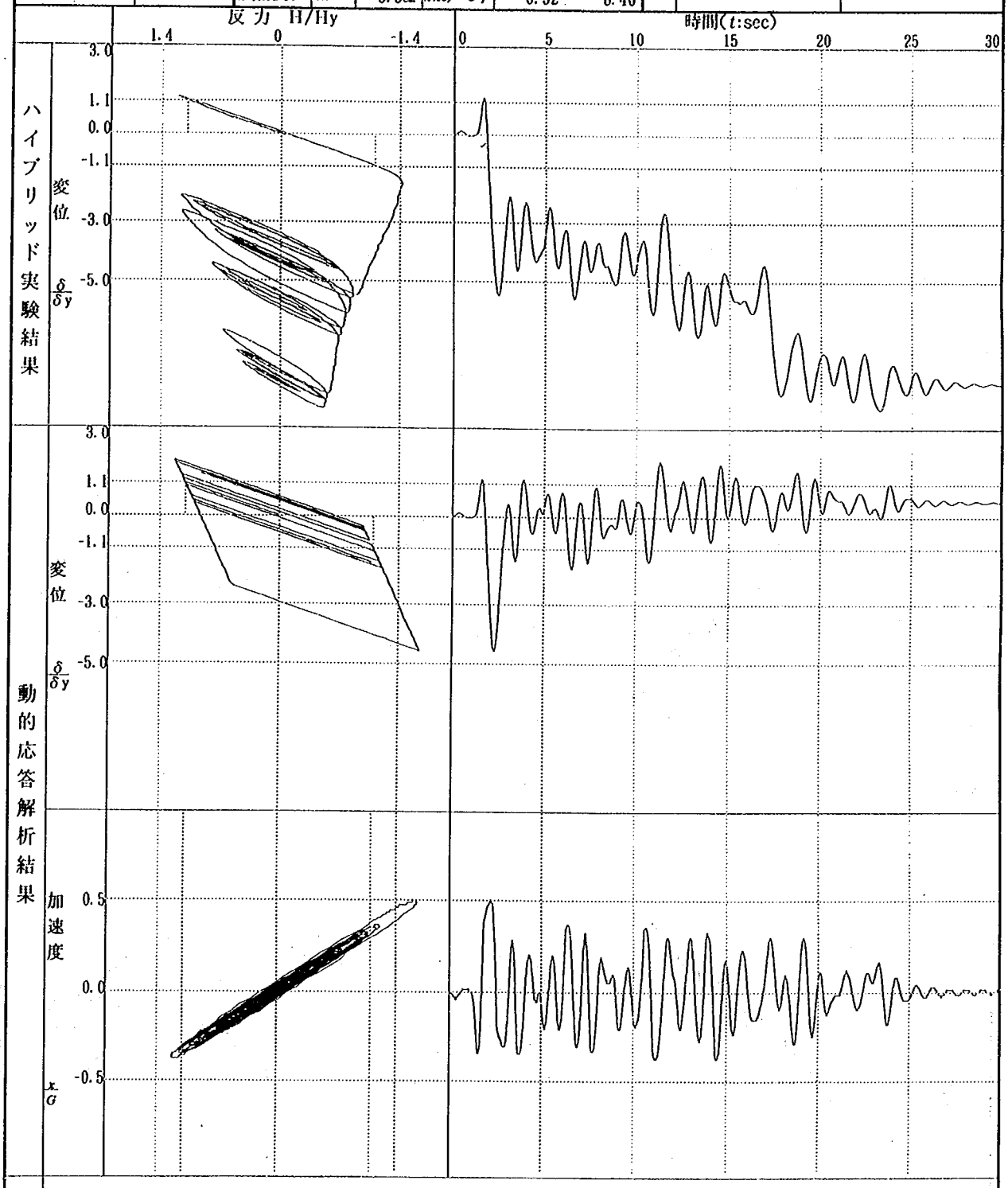


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-05　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（θ_{max}=432.0gal）						
質　量 M	1.974tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰 h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	702tf	H_{max}/Hy	1.22	1.20
			H_{min}	-947tf	H_{min}/Hy	-1.65	-1.43
軸力比 N／Ny	0.154	変　位	x_{max}	11.8cm	$x_{max}/\delta y$	1.87	1.24
細長比 $\bar{\lambda}$	0.326		x_{min}	-28.8cm	$x_{min}/\delta y$	-4.57	-9.35
断面の補剛パラメータ R_t	0.109	加速度	$\ddot{x}_{max}$	491gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.50	
			$\ddot{x}_{min}$	-369gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.38	
		残留変位	x_{rsd}	3.3cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.52	-8.46

復元力特性

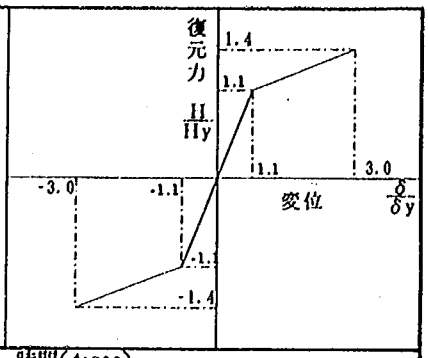


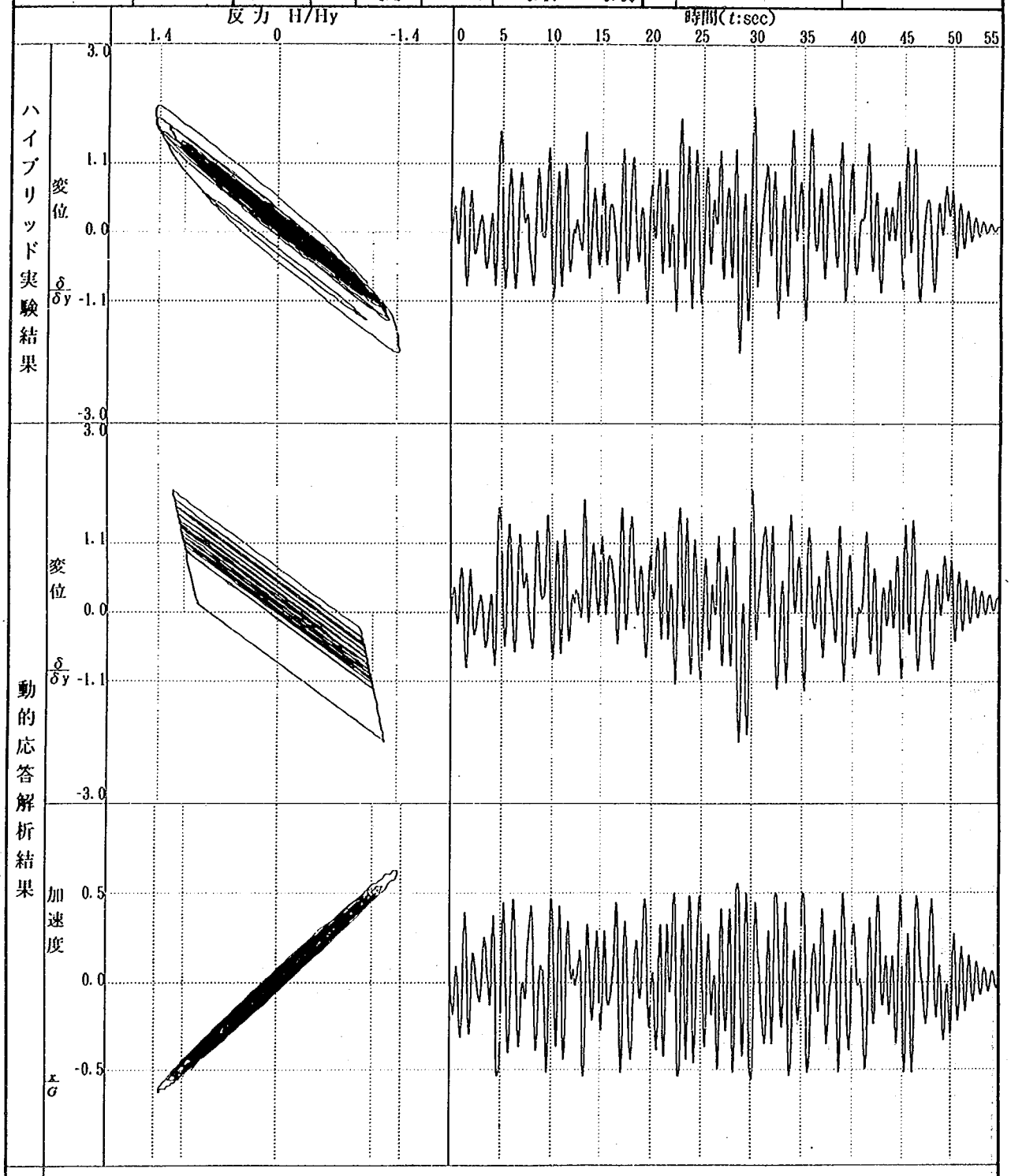


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-06　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅲ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=442.9gal）						
質　量 M	1.458tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰 h / 形式	5 % / 剛性比例	反　力	H_{max}	761tf	H_{max}/Hy	1.23	1.46
			H_{min}	-773tf	H_{min}/Hy	-1.25	-1.42
軸力比 N／N_y	0.112	変　位	x_{max}	13.6cm	$x_{max}/\delta y$	1.94	2.01
細長比 $\bar{\lambda}$	0.335		x_{min}	-14.5cm	$x_{min}/\delta y$	-2.06	-1.92
断面の補剛パラメータ R_t	0.121	加速度	$\ddot{x}_{max}$	545gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.56	
			$\ddot{x}_{min}$	-537gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.55	
		残留変位	x_{rsd}	1.2cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.17	0.09

復元力特性

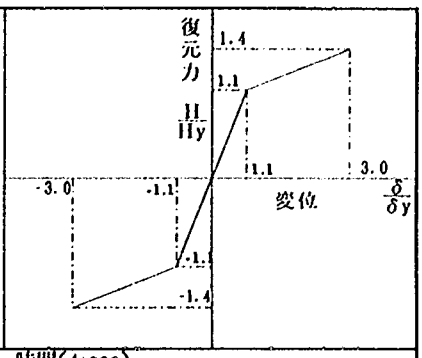


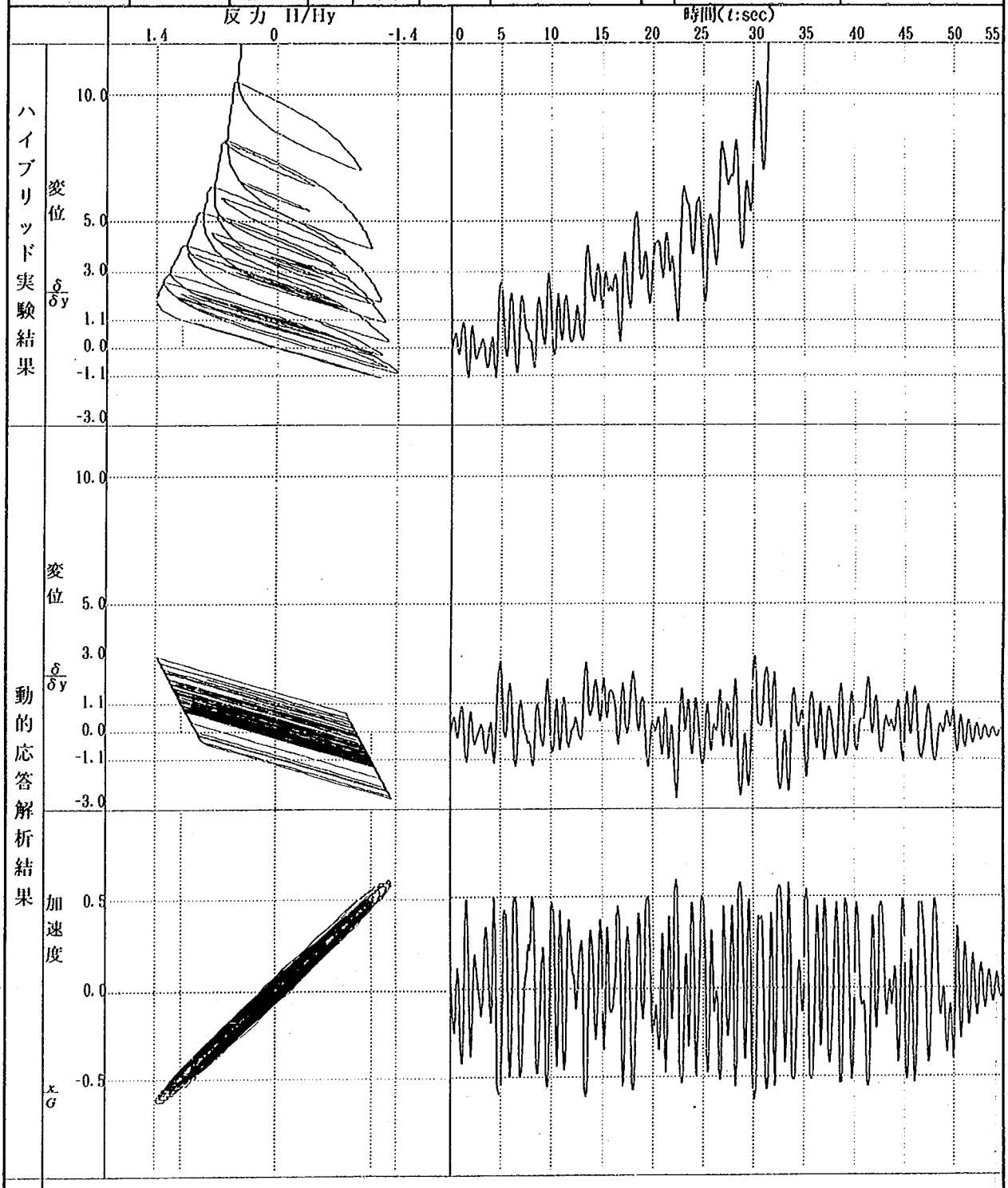


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No.P-07　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・III種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=606.8gal）							
質量 M	1.445tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）			
減衰 h	5 %	反力	H_{max}	851tf	H_{max}/Hy	1.39	1.40
減衰 形式	剛性比例	反力	H_{min}	-821tf	H_{min}/Hy	-1.34	-1.40
軸力比 N／Ny	0.112	変位	x_{max}	20.3cm	$x_{max}/\delta y$	2.94	-
細長比 $\bar{\lambda}$	0.332	変位	x_{min}	-18.1cm	$x_{min}/\delta y$	-2.63	-
断面の補剛パラメータ Rt	0.117	加速度	$\ddot{x}_{max}$	585gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.60	
		加速度	$\ddot{x}_{min}$	-606gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.62	
		残留変位	x_{rsd}	-0.3cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.04	-

復元力特性

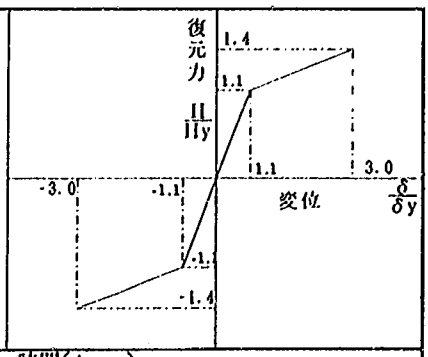


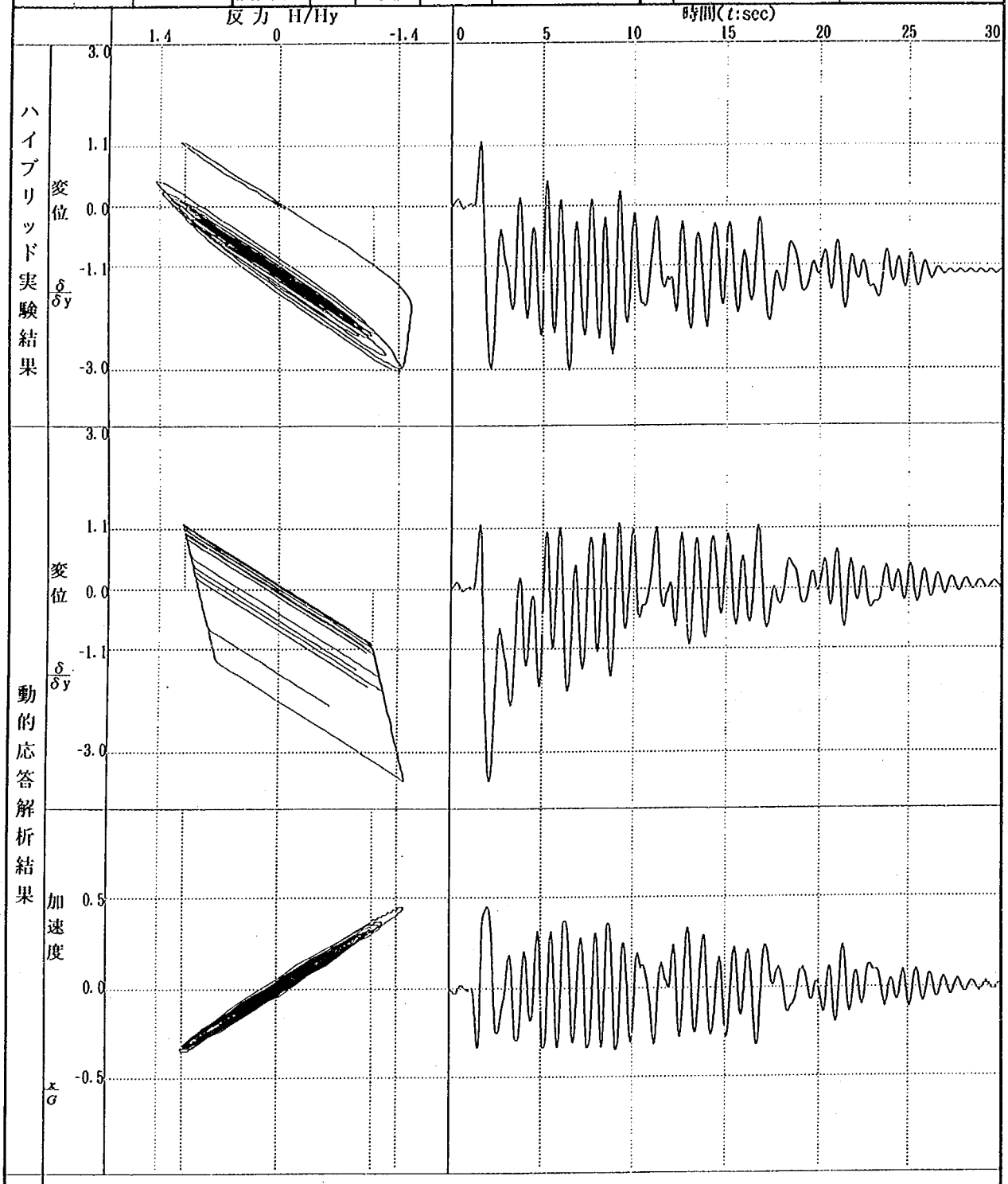


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-08　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	2.103tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h	5 %	反　力	H_{max}	686tf	H_{max}/Hy	1.12	1.44
減　衰　形式	剛性比例	反　力	H_{min}	-912tf	H_{min}/Hy	-1.49	-1.56
軸力比　N／Ny	0.180	変　位	x_{max}	5.0cm	$x_{max}/\delta y$	1.20	1.18
細長比　$\bar{\lambda}$	0.265	変　位	x_{min}	-14.8cm	$x_{min}/\delta y$	-3.53	-3.03
断面の補剛パラメータ　R_t	0.108	加速度	$\ddot{x}_{max}$	442gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.45	
		加速度	$\ddot{x}_{min}$	-338gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.34	
		残留変位	x_{rsd}	0.2cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.05	-1.24

復元力特性

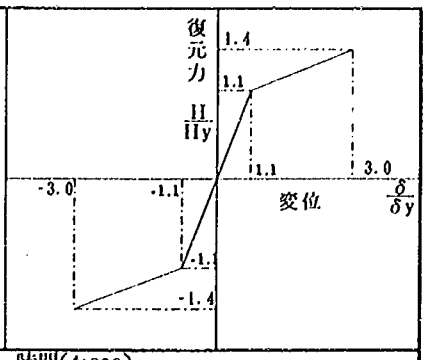


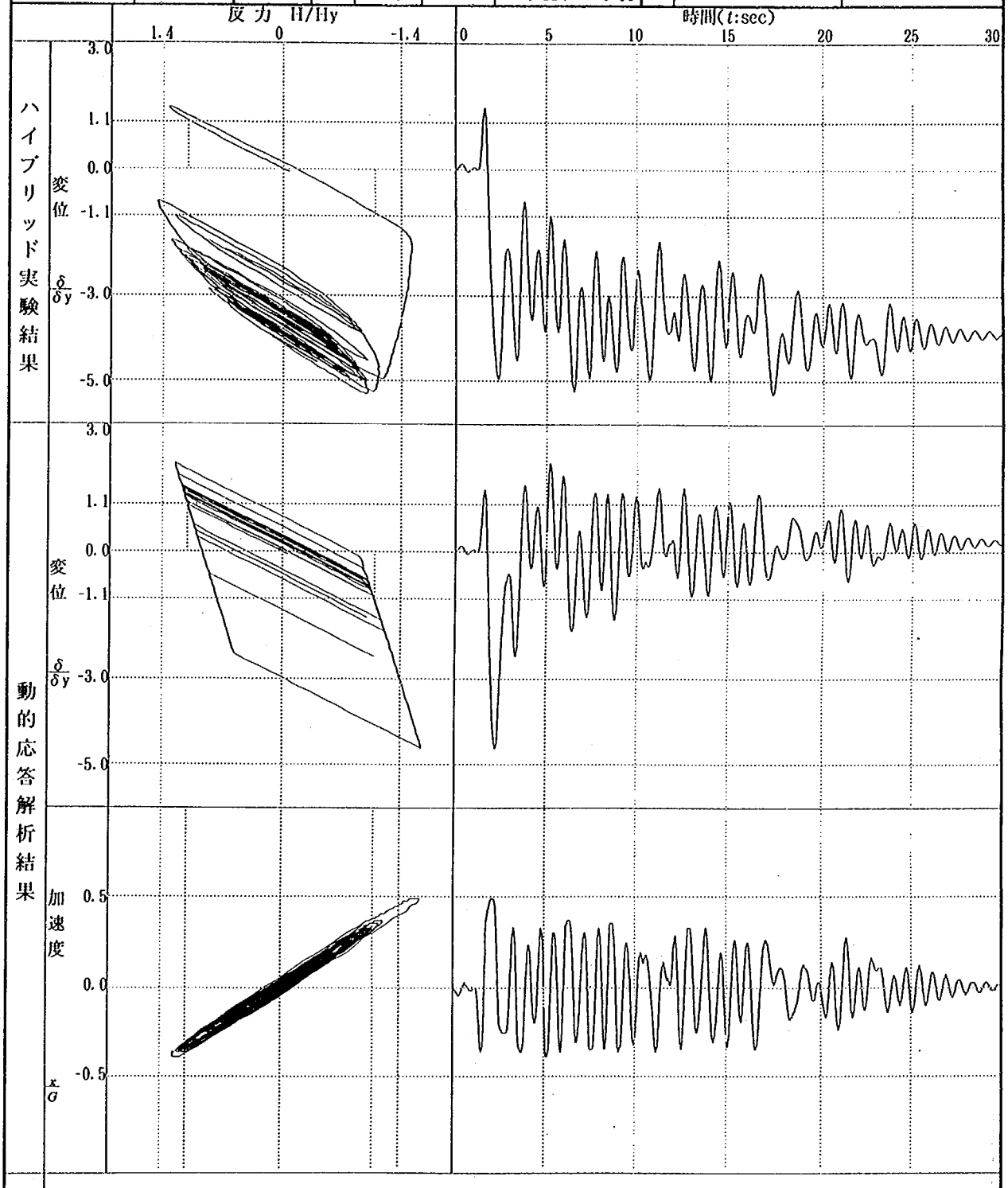


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-09　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=432.0gal）						
質　量　M	2.090tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	762tf	H_{max}/Hy	1.25	1.46
			H_{min}	-1009tf	H_{min}/Hy	-1.66	-1.50
軸力比　N/N_y	0.180	変　位	x_{max}	8.6cm	$x_{max}/\delta y$	2.08	1.46
			x_{min}	-19.1cm	$x_{min}/\delta y$	-4.62	-5.31
細長比　$\bar{\lambda}$	0.263	加速度	$\ddot{x}_{max}$	489gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.50	
			$\ddot{x}_{min}$	-378gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.39	
断面の補剛パラメータ　R_t	0.106	残留変位	x_{rsd}	0.9cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.22	-3.91

復元力特性

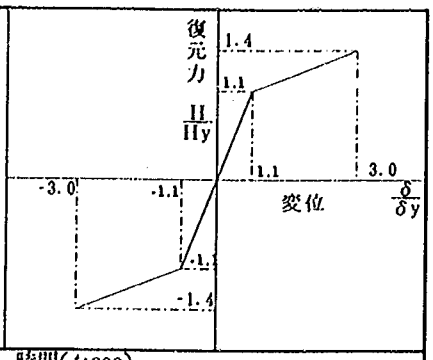


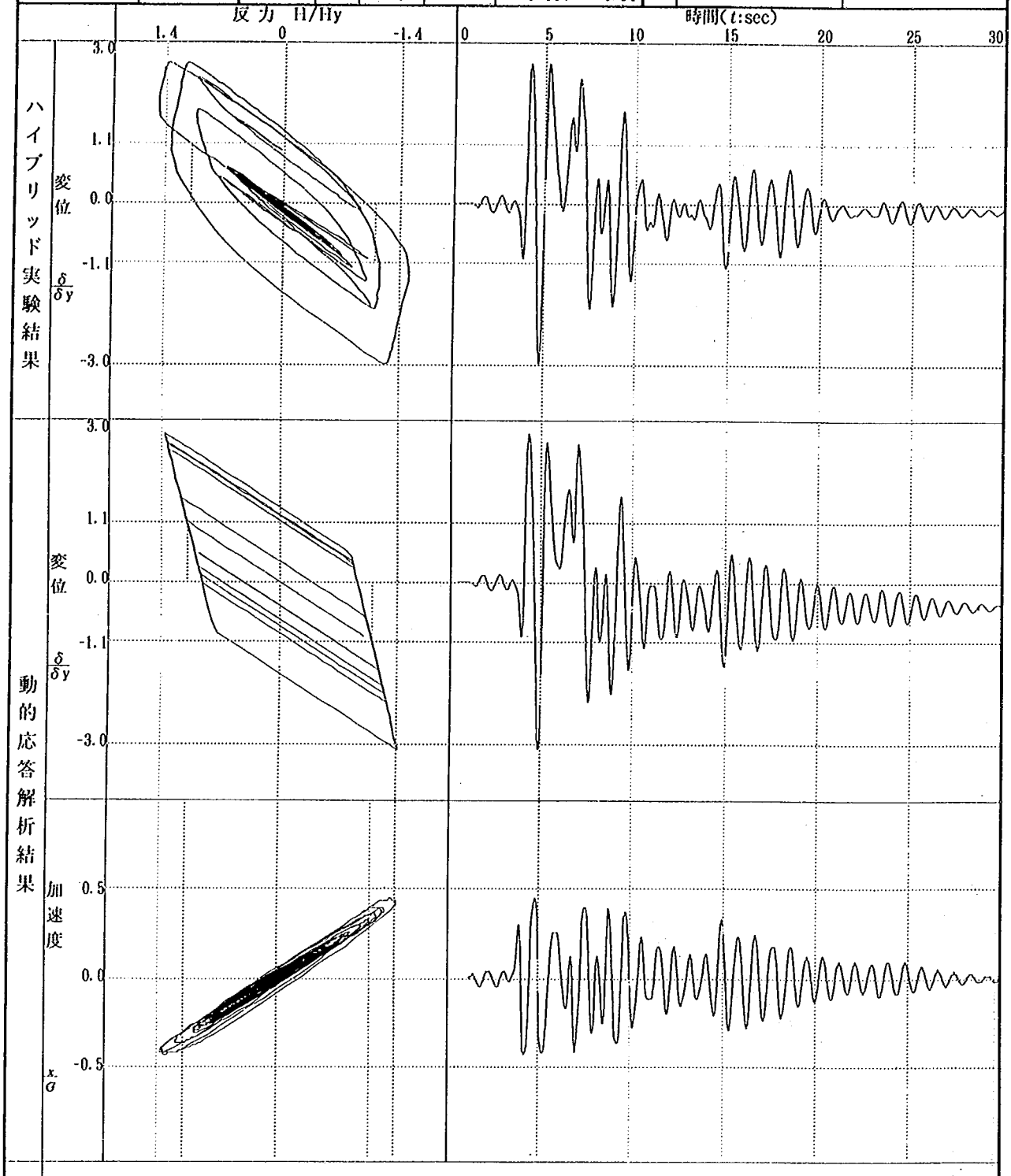


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	円形断面：No. P-10 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=818.0gal）						硬化型バイリニアモデル①
質量 M	1.876tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	741tf	H_{max}/Hy	1.36	1.48
			H_{min}	-772tf	H_{min}/Hy	-1.42	-1.51
軸力比 N／Ny	0.155	変位	x_{max}	16.3cm	$x_{max}/\delta y$	2.75	2.61
細長比 $\bar{\lambda}$	0.316		x_{min}	-18.4cm	$x_{min}/\delta y$	-3.10	-2.96
断面の補剛パラメータ R_f	0.102	加速度	$\ddot{x}_{max}$	436gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.44	
			$\ddot{x}_{min}$	-414gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.42	
		残留変位	x_{rsd}	-2.6cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.44	-0.14

復元力特性

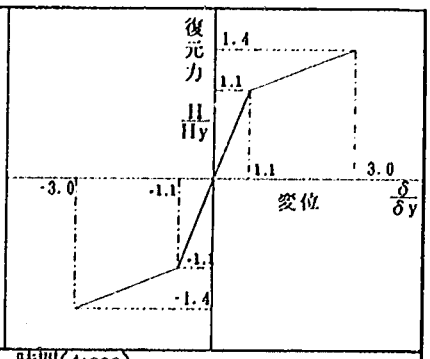




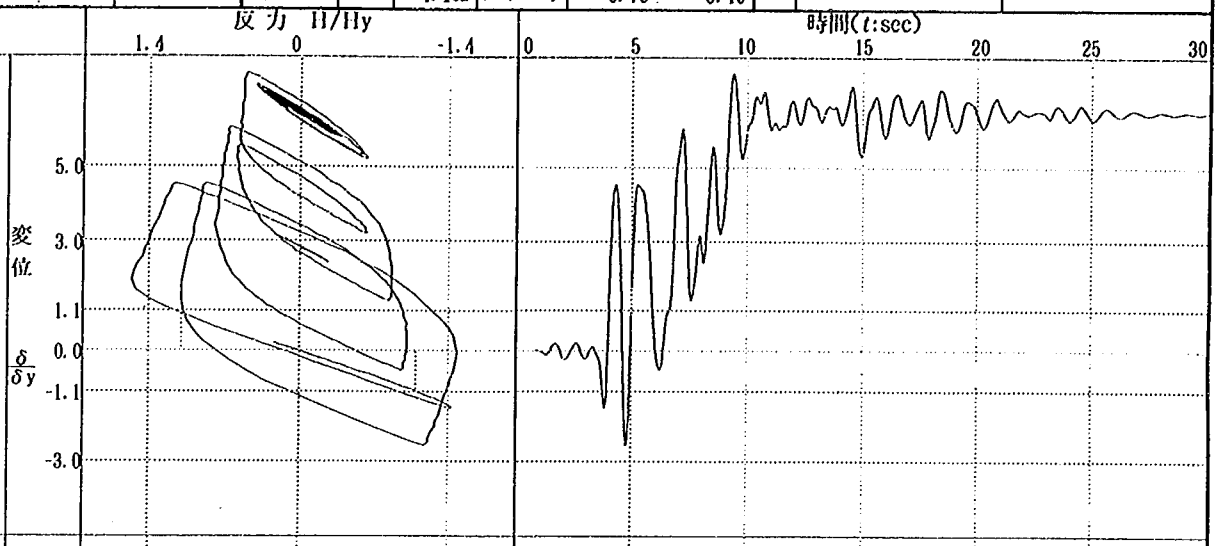
備考

モデル（供試体）（人力地震波）	円形断面：No. P-11　硬化型バイリニアモデル① 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=1227.0gal）						
質量 M	1.797tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	806tf	H_{max}/Hy	1.54	1.55
			H_{min}	-856tf	H_{min}/Hy	-1.64	-1.48
軸力比 N／Ny	0.155	変位	x_{max}	22.9cm	$x_{max}/\delta y$	3.91	7.55
細長比 $\bar{\lambda}$	0.314		x_{min}	-26.4cm	$x_{min}/\delta y$	-4.52	-2.56
断面の補剛パラメータ Rt	0.105	加速度	$\ddot{x}_{max}$	512gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.52	
			$\ddot{x}_{min}$	-470gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.48	
		残留変位	x_{rsd}	-4.1cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.70	6.49

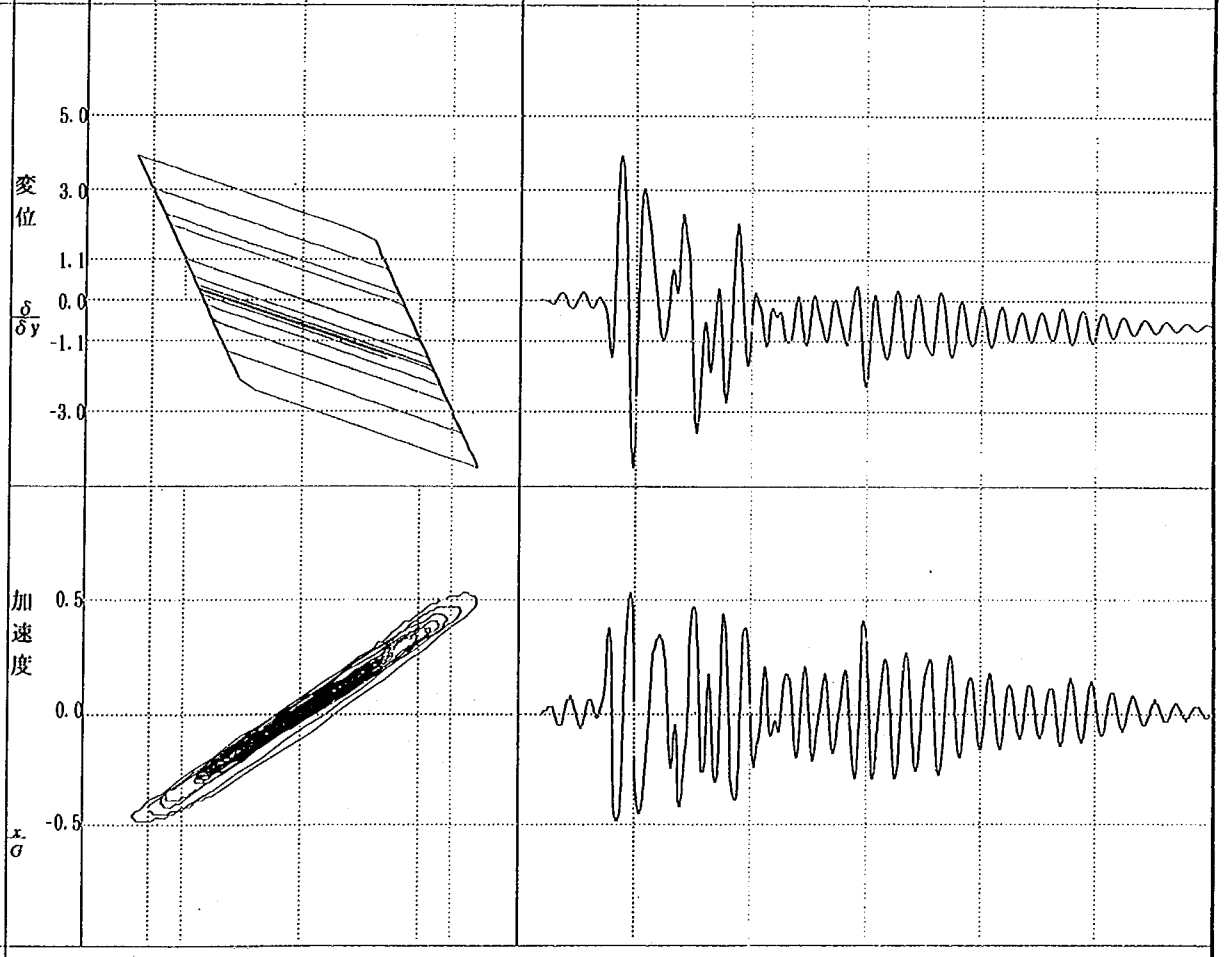
復元力特性



ハイブリッド実験結果



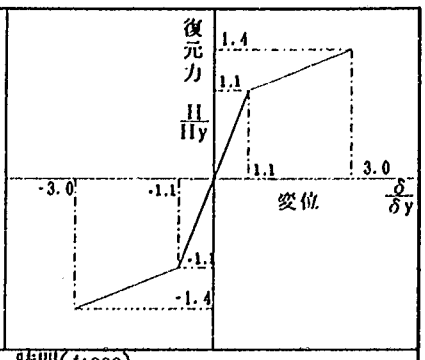
動的応答解析結果

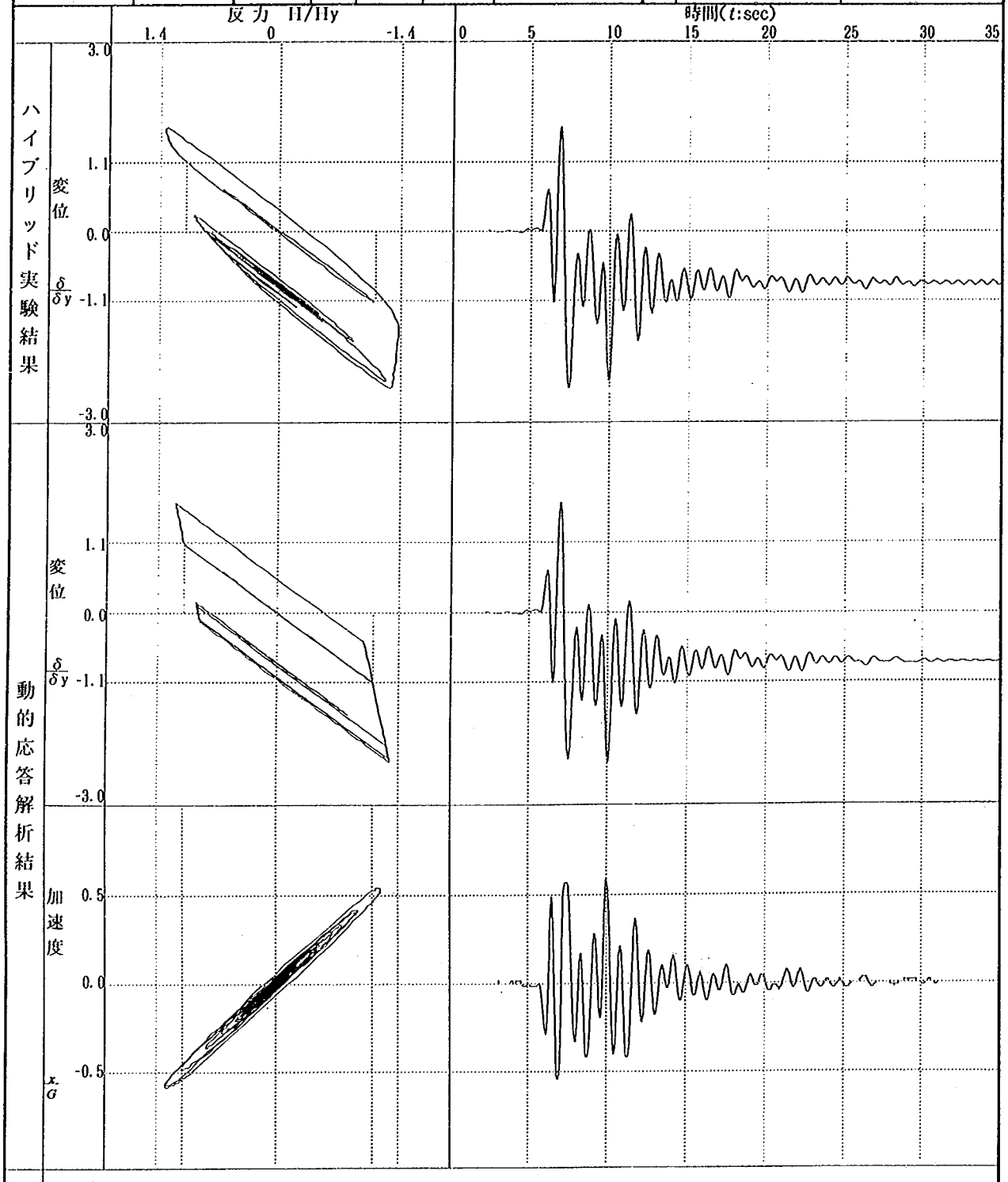


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-12　硬化型バイリニアモデル① 兵庫県南部地震波・Ⅲ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=325.8gal）						
質量 M	1.508tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h	5 %	反力	H_{max}	767tf	H_{max}/Hy	1.20	1.34
減衰 形式	剛性比例		H_{min}	-830tf	H_{min}/Hy	-1.30	-1.37
軸力比 N／Ny	0.111	変位	x_{max}	12.3cm	$x_{max}/\delta y$	1.73	1.64
細長比 $\bar{\lambda}$	0.338		x_{min}	-16.7cm	$x_{min}/\delta y$	-2.35	-2.47
断面の補剛パラメータ Rt	0.119	加速度	$\ddot{x}_{max}$	563gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.57	
			$\ddot{x}_{min}$	-521gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.53	
		残留変位	x_{rsd}	-5.6cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.79	-0.82

復元力特性

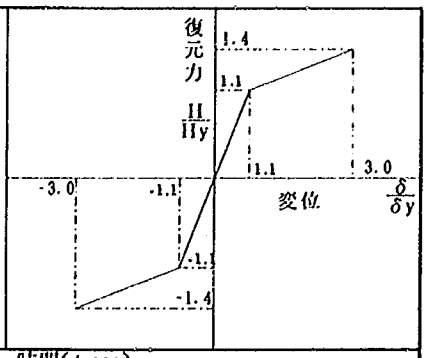


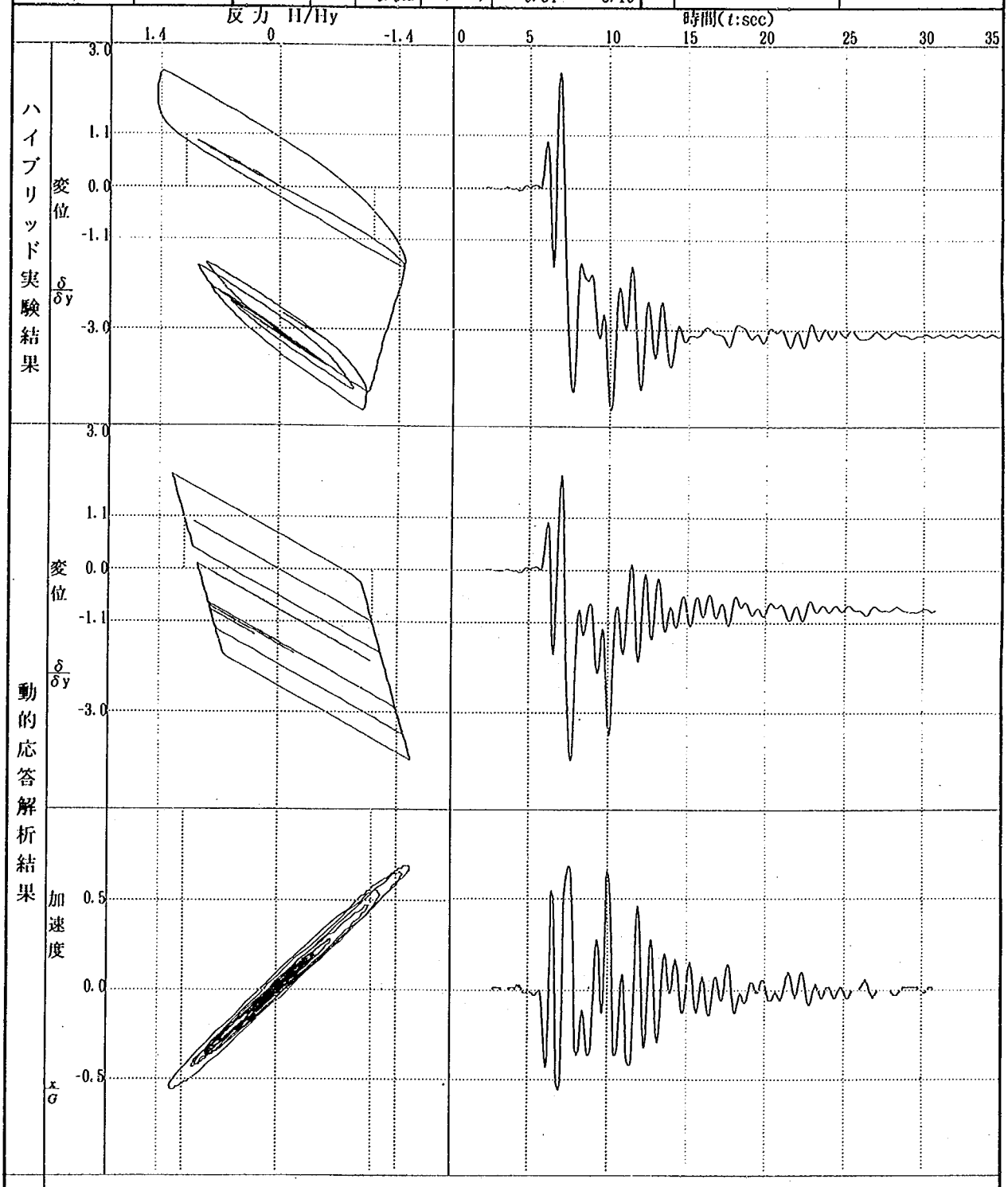


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-13　硬化型バイリニアモデル① 兵庫県南部地震波・III種地盤（$\ddot{x}_{max}$=488.8gal）						
質　量	M	1.518tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減　衰	h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	798tf	H_{max}/Hy	1.24　1.44
				H_{min}	-1003tf	H_{min}/Hy	-1.56　-1.46
軸力比	N／Ny	0.111	変　位	x_{max}	14.0cm	$x_{max}/\delta y$	1.98　2.43
細長比	$\bar{\lambda}$	0.337		x_{min}	-28.3cm	$x_{min}/\delta y$	-4.00　-4.69
断面の補剛パラメータ	R_t	0.117	加速度	$\ddot{x}_{max}$	674gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.69
				$\ddot{x}_{min}$	-539gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.55
			残留変位	x_{rsd}	-5.9cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.84　-3.10

復元力特性

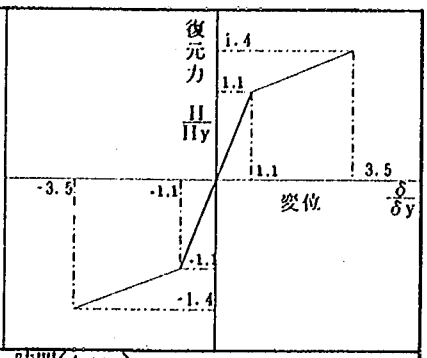


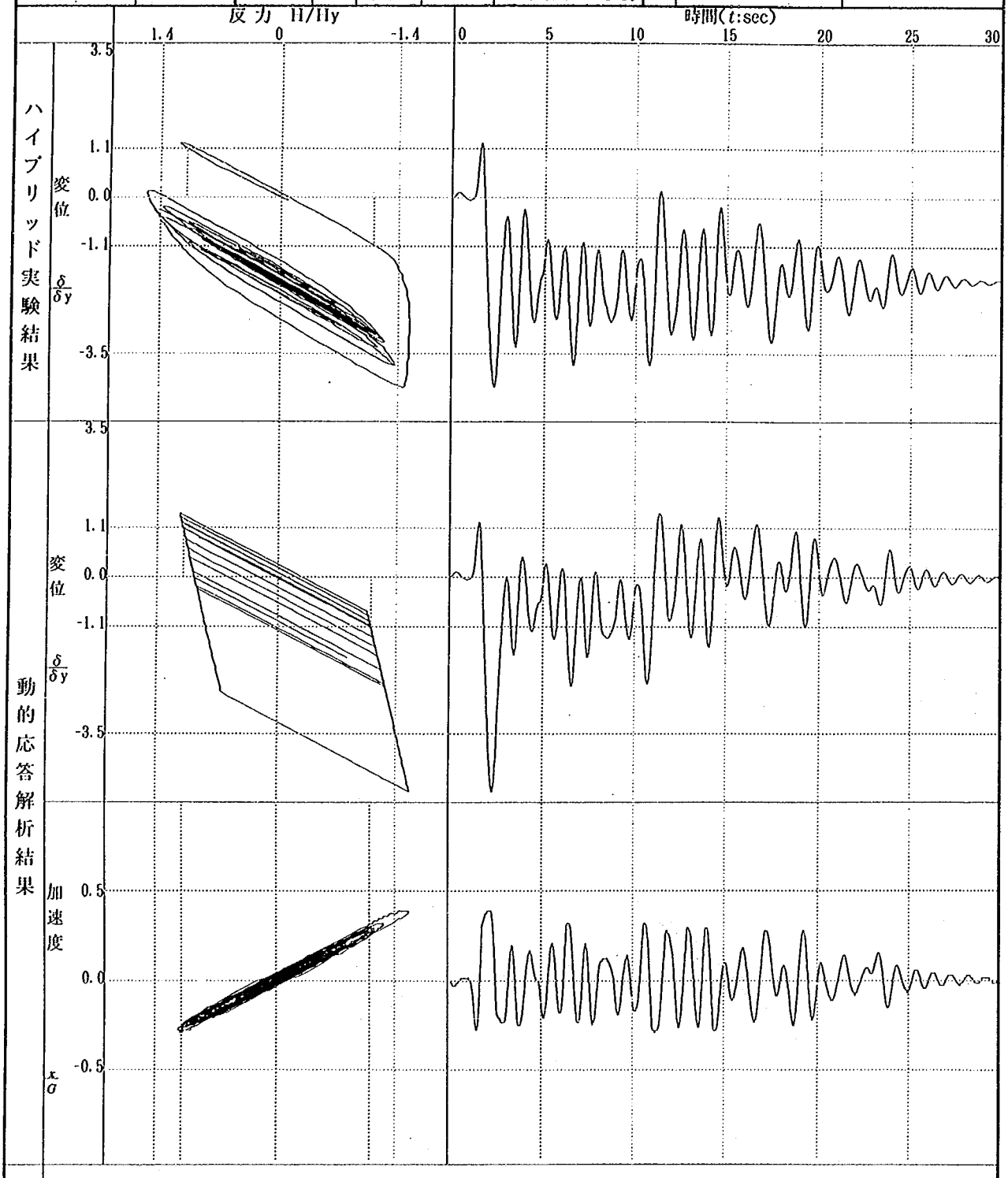


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	円形断面：No. P-16　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=360.0gal）						
質量 M	2.754tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h	5 %	反力	H_{max}	753tf	H_{max}/Hy	1.14	1.55
減衰 形式	剛性比例	反力	H_{min}	-1031tf	H_{min}/Hy	-1.56	-1.53
軸力比 N／Ny	0.181	変位	x_{max}	1.03cm	$x_{max}/\delta y$	1.43	1.23
細長比 $\bar{\lambda}$	0.317	変位	x_{min}	-3.44cm	$x_{min}/\delta y$	-4.80	-4.27
断面の補剛パラメータ Rt	0.081	加速度	$\ddot{x}_{max}$	385gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.39	
		加速度	$\ddot{x}_{min}$	-285gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.29	
		残留変位	x_{rsd}	-0.02cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.02	-1.89

復元力特性

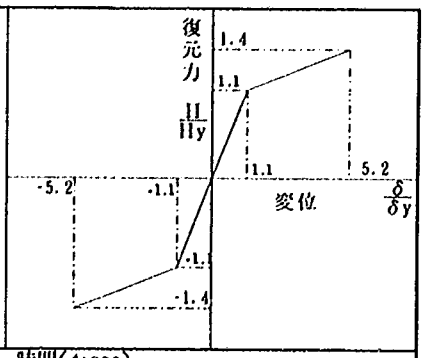


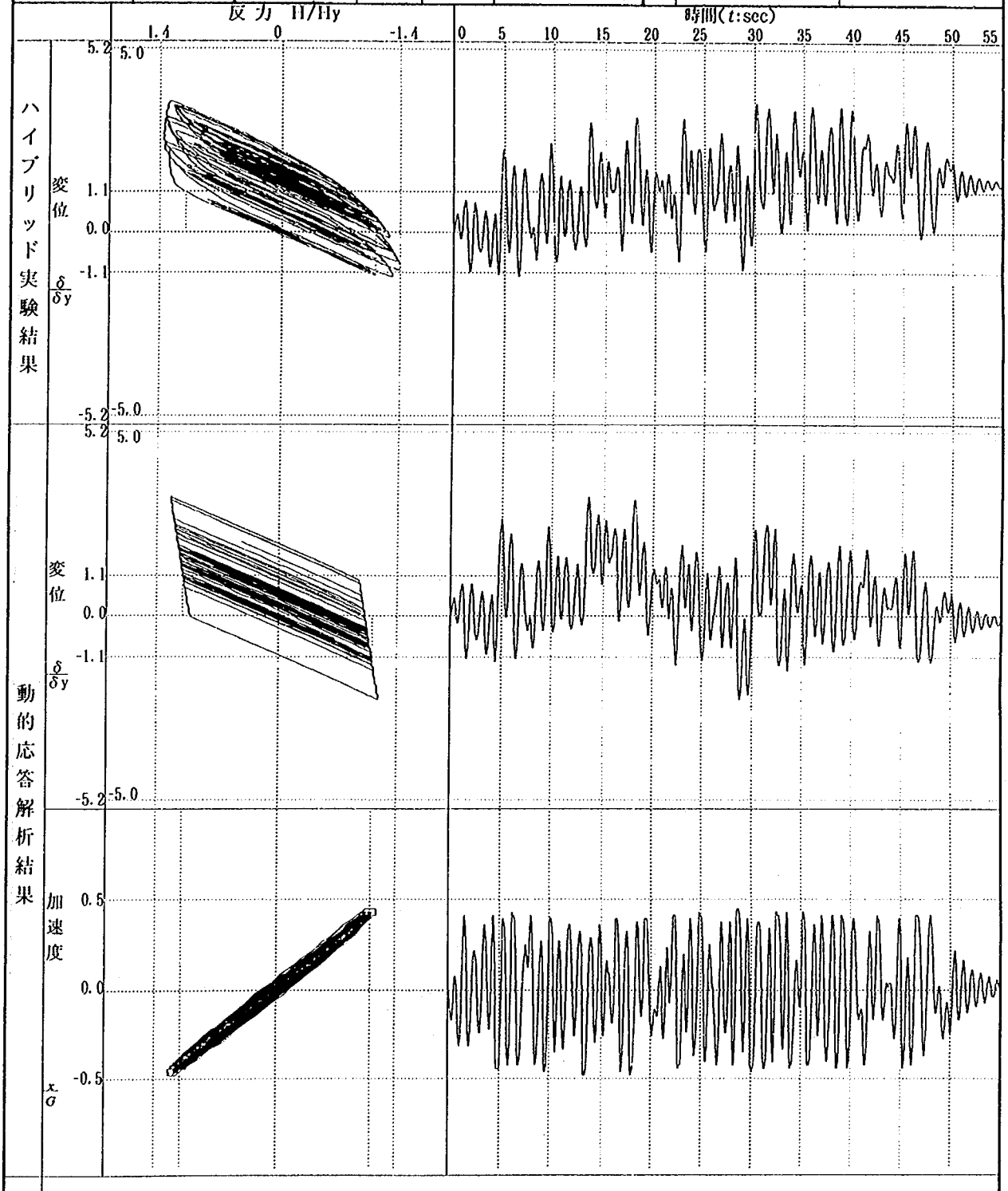


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	円形断面：No. P-17　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・III種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=442.9gal）						
質　量　M	2.106tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	876tf	H_{max}/Hy	1.18	1.36
			H_{min}	-927tf	H_{min}/Hy	-1.25	-1.39
軸力比　N／Ny	0.130	変　位	x_{max}	-20.5cm	$x_{max}/\delta y$	3.24	3.55
細長比　$\bar{\lambda}$	0.324		x_{min}	-14.4cm	$x_{min}/\delta y$	-2.27	-1.22
断面の補剛パラメータ　R_t	0.083	加速度	$\ddot{x}_{max}$	439gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.45	
			$\ddot{x}_{min}$	-471gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.48	
		残留変位	x_{rsd}	-0.7cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.11	1.34

復元力特性

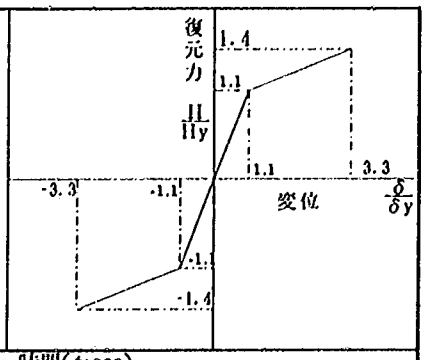


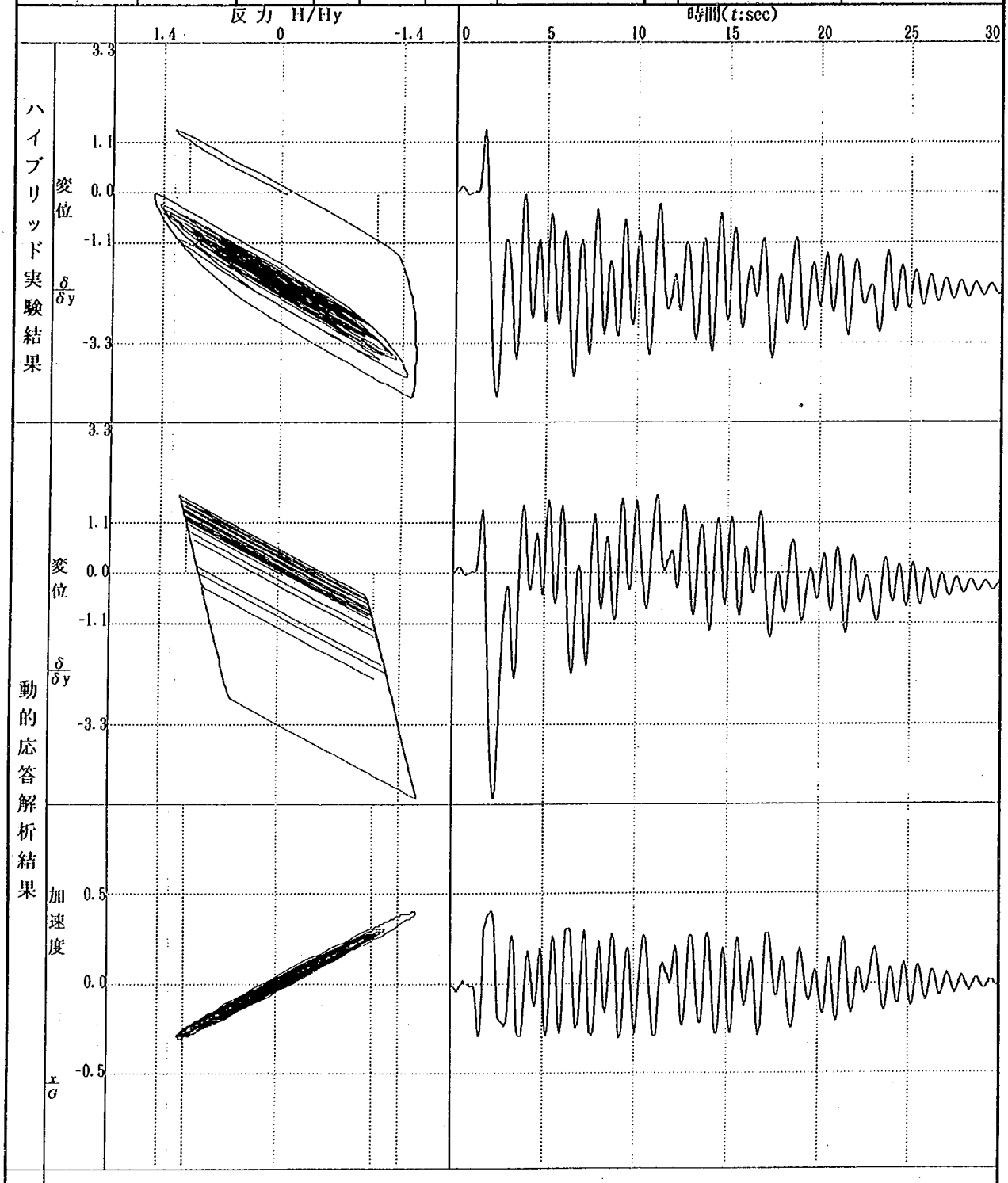


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-18　硬化型バイリニアモデル① 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	3.167tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1223tf	H_{max}/Hy	1.62	1.52
			H_{min}	-893tf	H_{min}/Hy	-1.18	-1.57
軸力比　N／Ny	0.210	変　位	x_{max}	6.7cm	$x_{max}/\delta y$	1.70	1.38
細長比　$\bar{\lambda}$	0.262		x_{min}	-19.3cm	$x_{min}/\delta y$	-4.91	-4.47
断面の剛性パラメータ　R_t	0.079	加速度	$\ddot{x}_{max}$	394gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.40	
			$\ddot{x}_{min}$	-294gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.30	
		残留変位	x_{rsd}	-1.1cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.29	-2.11

復元力特性

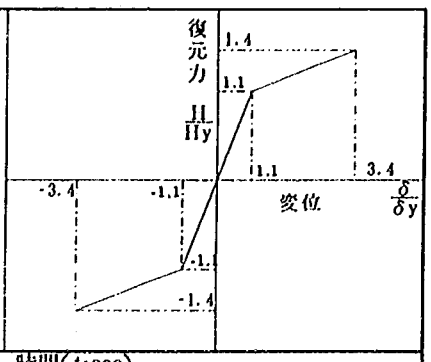


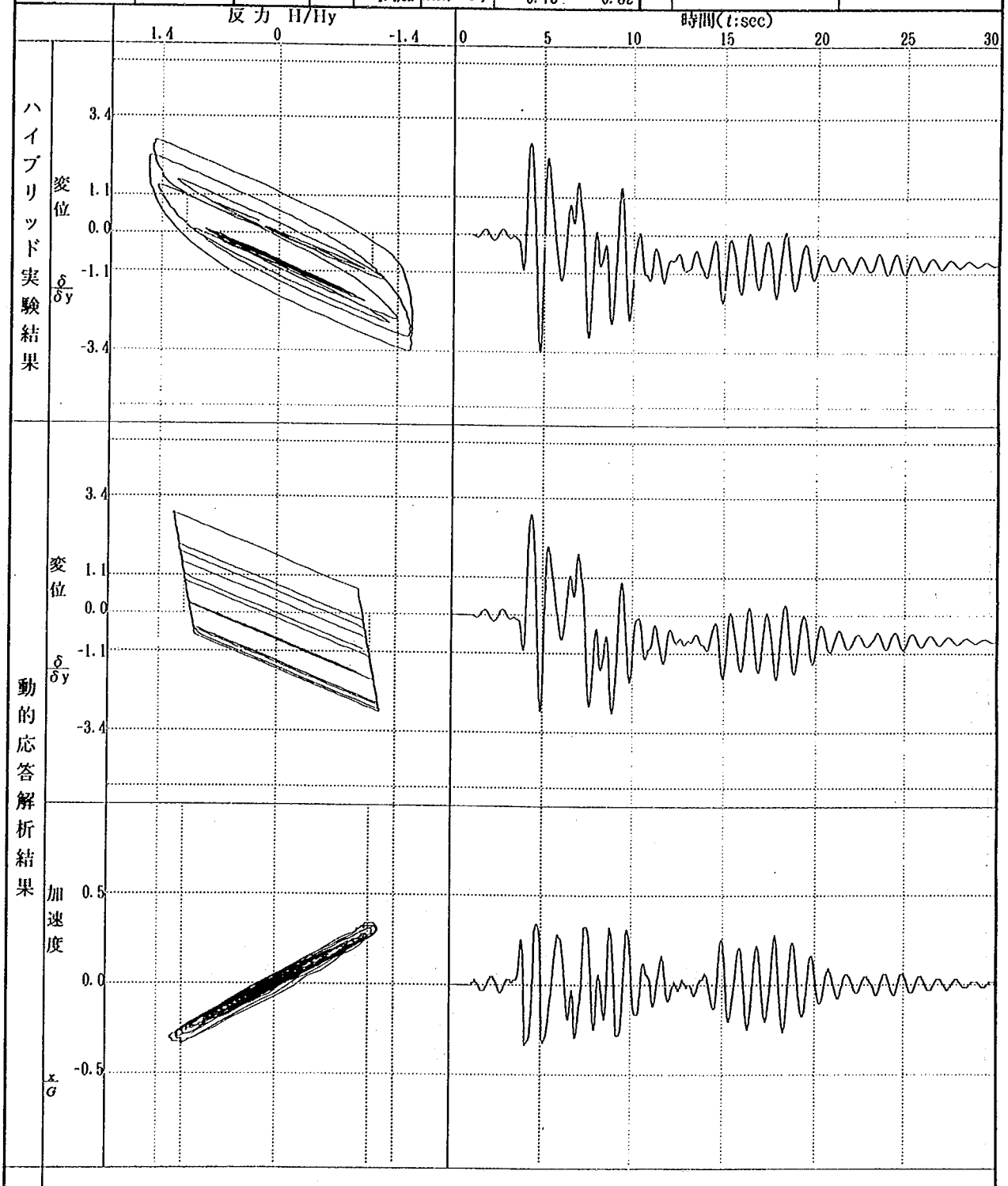


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-19　硬化型バイリニアモデル① 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=818.0gal）						
質量 M	2.806tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	823tf	H_{max}/Hy	1.22	1.55
			H_{min}	-827tf	H_{min}/Hy	-1.23	-1.523
軸力比 N／Ny	0.181	変位	x_{max}	16.9cm	$x_{max}/\delta y$	2.91	2.68
細長比 $\bar{\lambda}$	0.318		x_{min}	-16.5cm	$x_{min}/\delta y$	-2.84	-3.39
断面の補剛パラメータ R_t	0.081	加速度	$\ddot{x}_{max}$	332gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.34	
			$\ddot{x}_{min}$	-339gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.35	
		残留変位	x_{rsd}	-4.2cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.73	-0.82

復元力特性

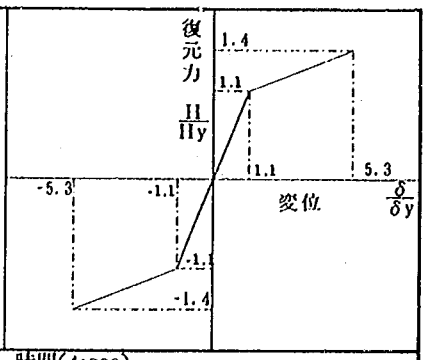


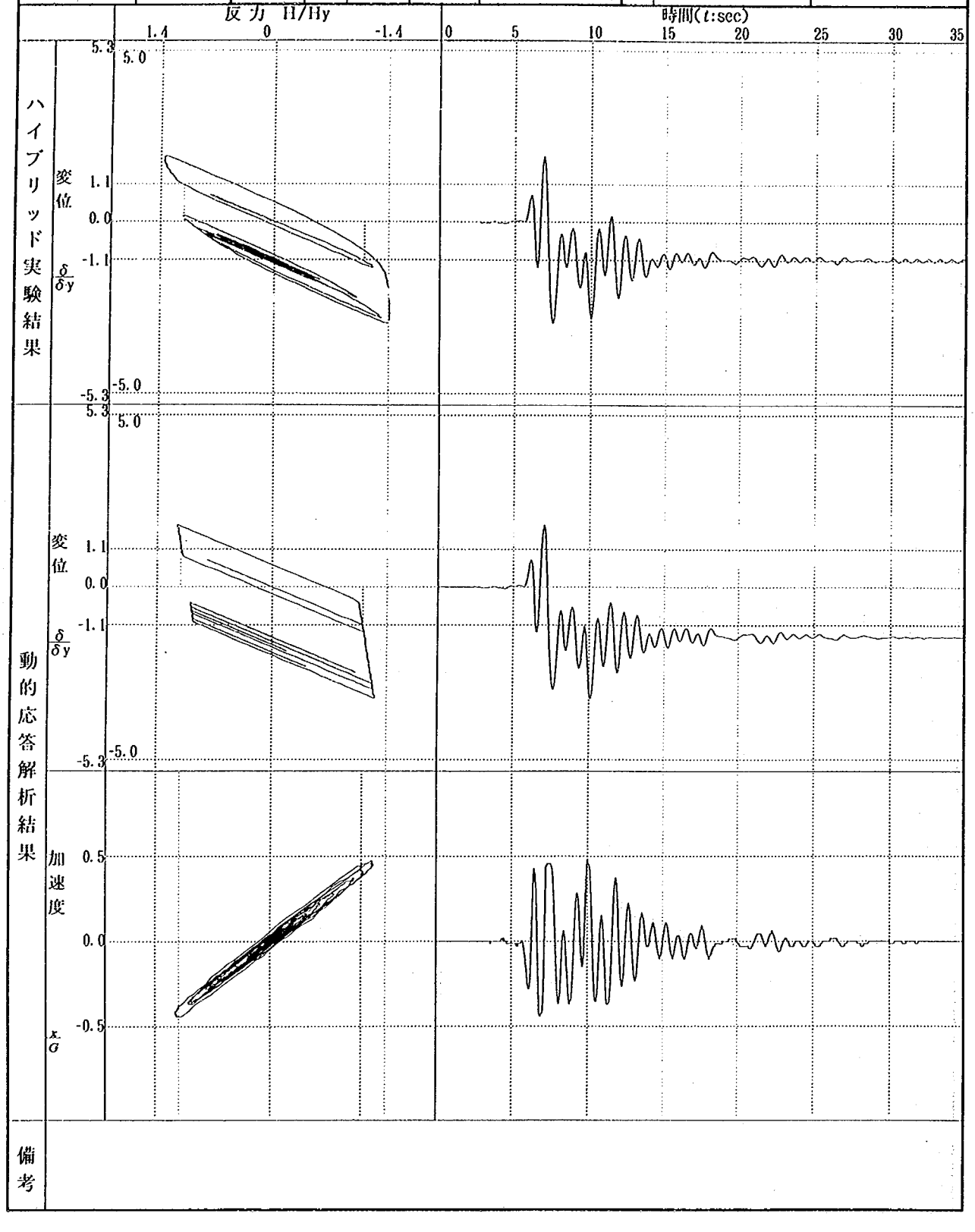


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	円形断面：No. P-20　硬化型バイリニアモデル① 兵庫県南部地震波・Ⅲ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=325.8gal）					
質量 M	2.049tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	903tf	H_{max}/H_y	1.25　1.36
			H_{min}	-829tf	H_{min}/H_y	-1.15　-1.41
軸力比 N／Ny	0.130	変位	x_{max}	11.2cm	x_{max}/δ_y	1.80　1.90
細長比 $\bar{\lambda}$	0.321		x_{min}	-20.1cm	x_{min}/δ_y	-3.22　-2.95
断面の補剛パラメータ Rt	0.082	加速度	$\ddot{x}_{max}$	465gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.47
			$\ddot{x}_{min}$	-425gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.43
		残留変位	x_{rsd}	-9.0cm	x_{rsd}/δ_y	-1.45　-1.10

復元力特性





備考

2.3.2 硬化型バイリニアモデル②

動的応答解析に用いる復元力特性を硬化型バイリニアモデルとし、Ha = α・Hy（α = 1.45:R-04～13、α = 1.6:R-16～20）、δa = μ・δy（μ = 2.2:R-04～13、μ = 4.0:R-16～20）とした。

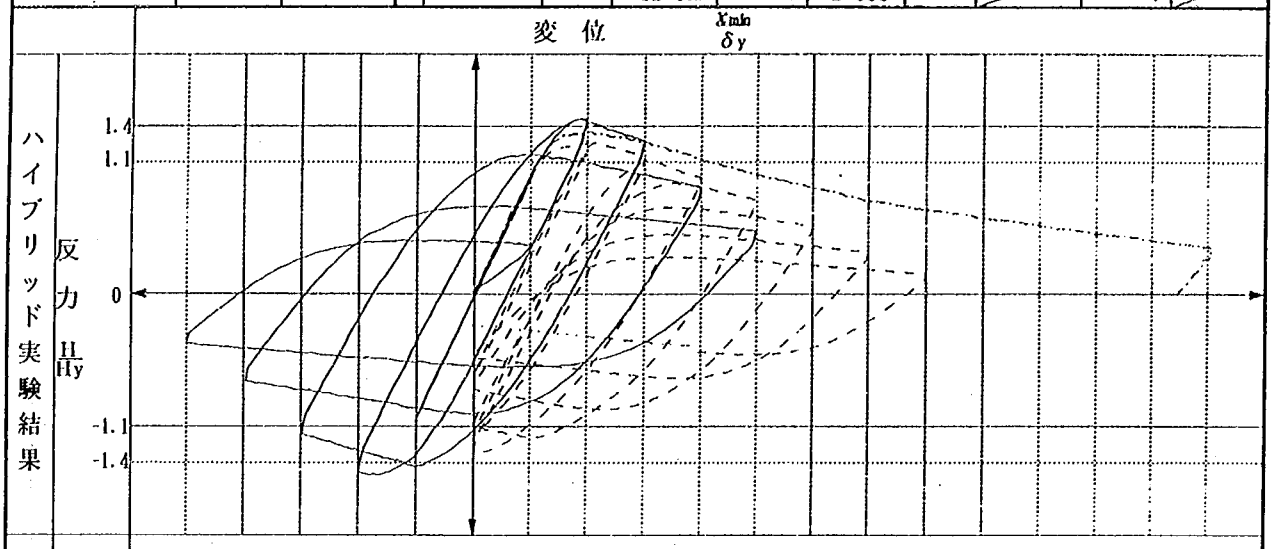
解析結果を表-2.3.2 にまとめる。

表-2.3.2 解析結果：円形断面・硬化型バイリニアモデル②

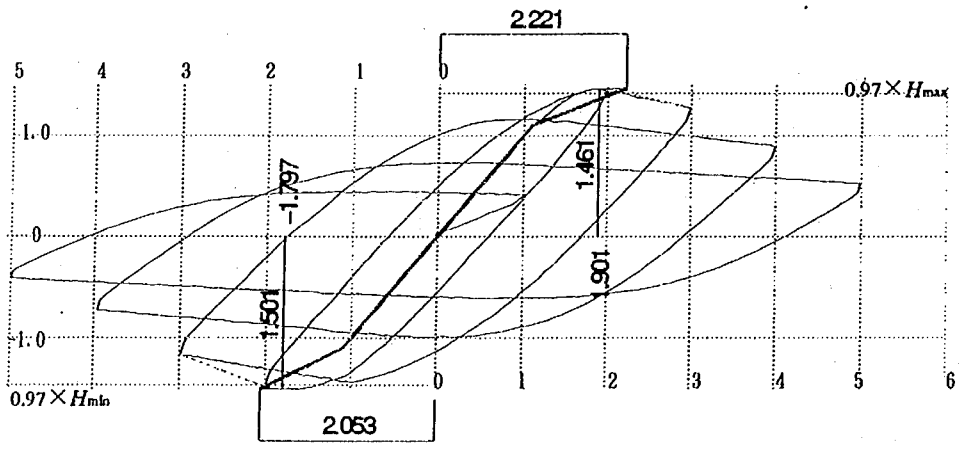
		反力		変位		残留変位
		Hmax／Hy	Hmin／Hy	xmax／δy	xmin／δy	xrsd／δy
円形断面:P-04 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.35	-1.73	1.88	-3.08	0.38
	実験値	1.16	-1.41	1.00	-3.28	-1.39
円形断面:P-05 土研提案L2・Ⅰ種地盤 432.0gal	解析値	1.40	-1.99	2.03	-3.89	0.28
	実験値	1.20	-1.43	1.24	-9.35	-8.46
円形断面:P-06 土研提案L2・Ⅲ種地盤 442.9gal	解析値	1.40	-1.41	2.02	-2.09	0.01
	実験値	1.46	-1.42	2.01	-1.92	0.09
円形断面:P-07 土研提案L2・Ⅲ種地盤 606.8gal	解析値	1.68	-1.62	2.91	-2.71	-0.73
	実験値	1.40	-1.40	-	-	-
円形断面:P-08 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.25	-1.73	1.59	-3.08	-0.15
	実験値	1.44	-1.56	1.18	-3.03	-1.24
円形断面:P-09 土研提案L2・Ⅰ種地盤 432.0gal	解析値	1.38	-1.99	1.96	-3.87	0.15
	実験値	1.46	-1.50	1.46	-5.31	-3.91
円形断面:P-10 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.87	-1.91	3.52	-3.64	-0.37
	実験値	1.48	-1.51	2.61	-2.96	-0.14
円形断面:P-11 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 1227.0gal	解析値	2.28	-2.52	4.81	-5.55	-0.23
	実験値	1.55	-1.48	7.55	2.56	6.49
円形断面:P-12 兵庫県南部地震・Ⅲ種地盤 325.8gal	解析値	1.29	-1.50	1.70	-2.38	-0.29
	実験値	1.34	-1.37	1.64	-2.47	-0.82
円形断面:P-13 兵庫県南部地震・Ⅲ種地盤 488.8gal	解析値	1.44	-1.96	2.19	-3.80	0.03
	実験値	1.44	-1.46	2.43	-4.69	-3.10
円形断面:P-16 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.21	-1.69	1.75	-4.52	0.09
	実験値	1.55	-1.53	1.23	-4.27	-1.89
円形断面:P-17 土研提案L2・Ⅲ種地盤 442.9gal	解析値	1.37	-1.31	2.74	-2.38	-0.30
	実験値	1.36	-1.39	3.55	-1.22	1.34
円形断面:P-18 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.25	-1.71	1.96	-4.65	-0.28
	実験値	1.52	-1.57	1.38	-4.47	-2.11
円形断面:P-19 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.48	-1.40	2.83	-3.34	-0.27
	実験値	1.55	-1.56	2.68	-3.39	-0.82
円形断面:P-20 兵庫県南部地震・Ⅲ種地盤 325.8gal	解析値	1.23	-1.42	1.83	-2.95	-0.63
	実験値	1.36	-1.40	1.90	-2.93	-0.82

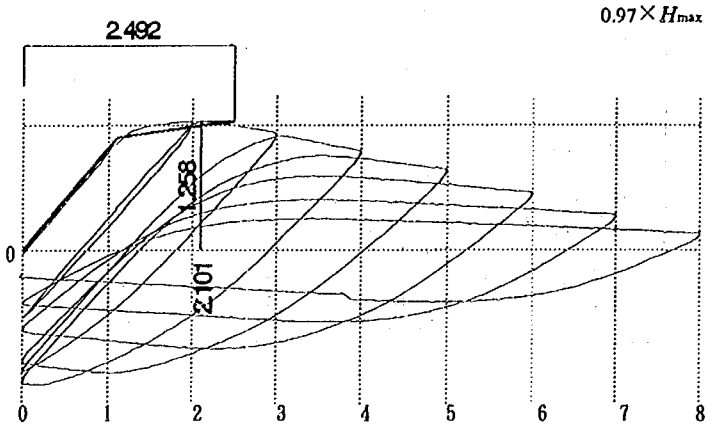
モデル（供試体）	円形断面：No. P-01, 02, 03											
軸力比 N／Ny	0.154	0.154			両振り繰返し載荷				片振り繰返し載荷			
細長比 λ	0.320	0.344			計測値		無次元数値		計測値		無次元数値	
断面の補剛パラメータ Rt	0.108	0.125	反力		Hmax	791tf	Hmax／Hy	1.461	Hmax	8.9cm	Hmax／Hy	1.258
					Hmin	813tf	Hmin／Hy	-1.501	Hmin		Hmin／Hy	
			変位	最大最小反力時	xmax	11.6cm	xmax／δy	1.901	xmax	14.9cm	xmax／δy	2.101
					xmin	11.0cm	xmin／δy	-1.797	xmin		xmin／δy	
脚柱全体のパ ξ	0.0031	0.0038		97%×最大最小反力時	x+97	13.6cm	x+97／δy	2.221	x+97	17.7cm	x+97／δy	2.492
					x-97	12.5cm	x-97／δy	-2.053	x-97		x-97／δy	

ハイブリッド実験結果



復元力特性

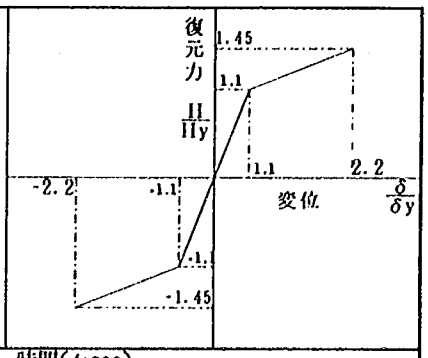


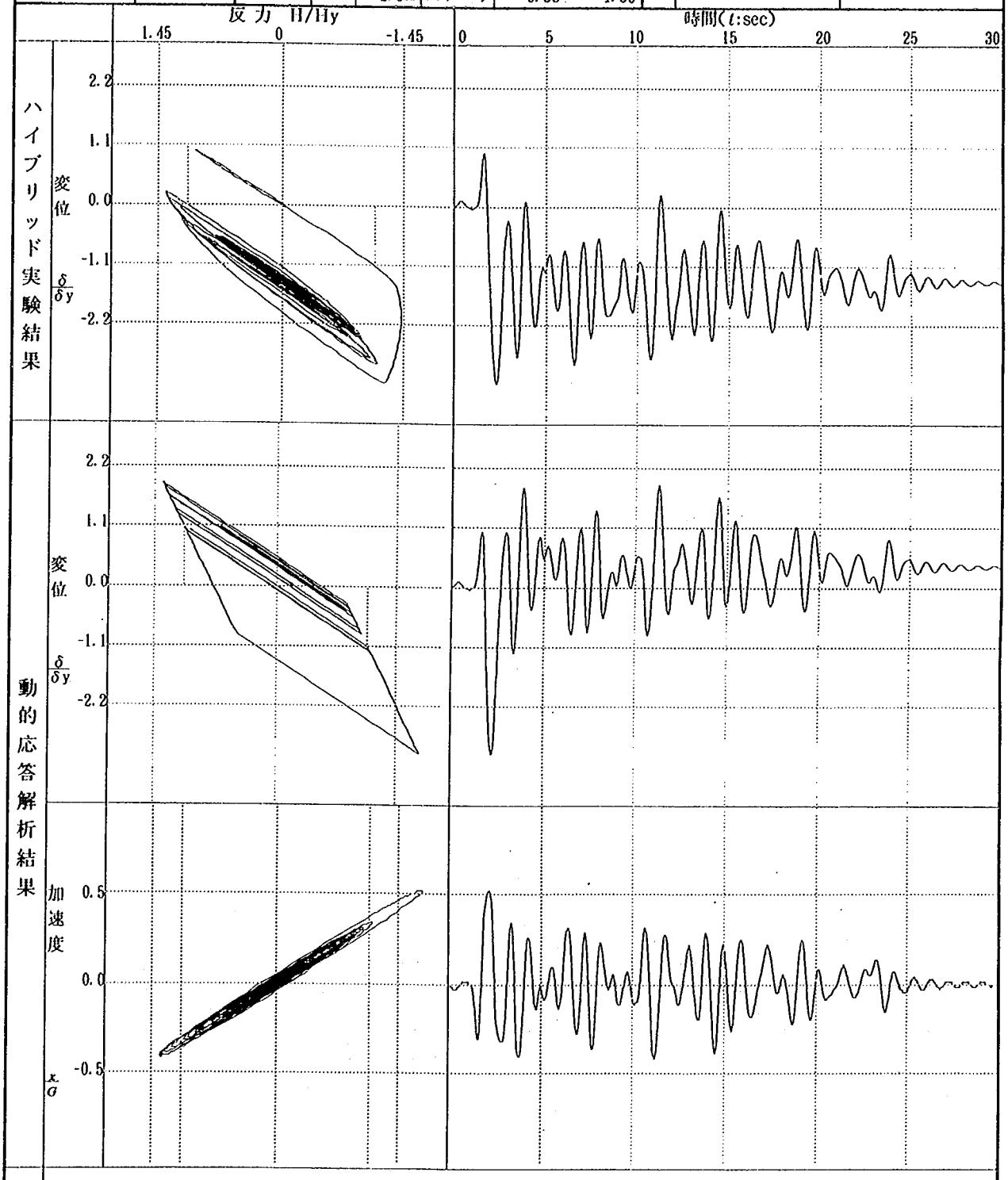


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	円形断面：No. P-04　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=360.0gal）						
質　量 M	2.002tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰 h 形式	5 %	反　力	H_{max}	790tf	H_{max}/Hy	1.35	1.16
			H_{min}	-1011tf	H_{min}/Hy	-1.73	-1.41
軸力比 N／Ny	0.154	変　位	x_{max}	12.3cm	$x_{max}/\delta y$	1.88	1.00
細長比 $\bar{\lambda}$	0.331		x_{min}	-20.3cm	$x_{min}/\delta y$	-3.08	-3.28
断面の補剛パラメータ R_t	0.115	加速度	$\ddot{x}_{max}$	508gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.52	
			$\ddot{x}_{min}$	-401gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.41	
		残留変位	x_{rsd}	-2.5cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.38	-1.39

復元力特性

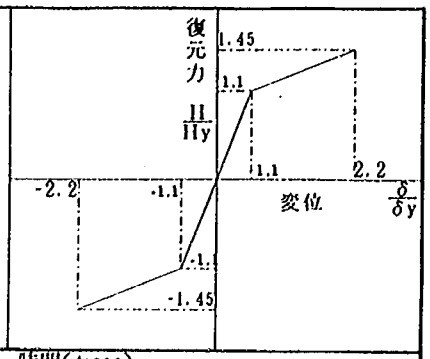


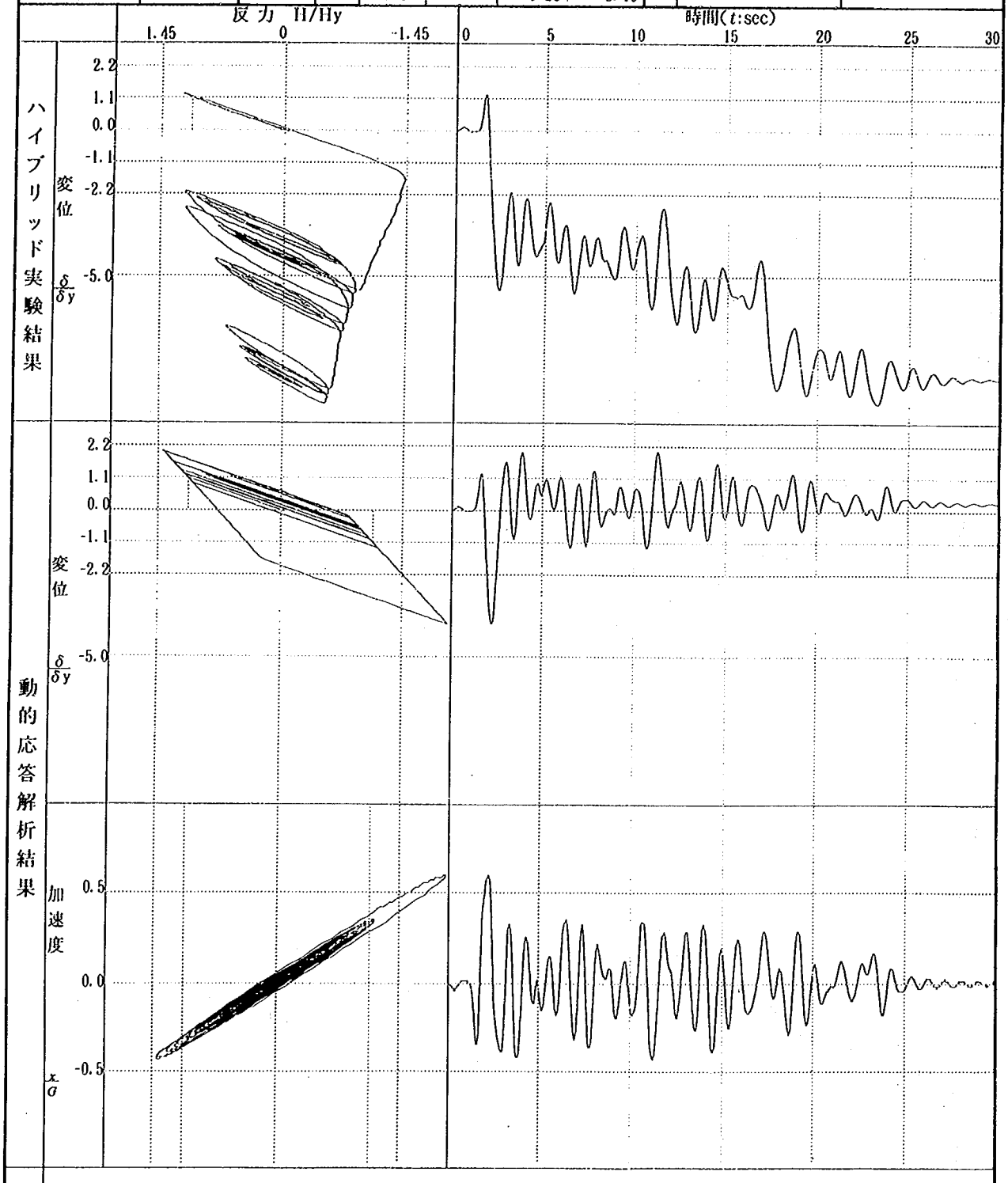


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-05　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=432.0gal）						
質量 M	1.974tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 %	反力	H_{max}	804tf	H_{max}/Hy	1.40	1.20
			H_{min}	-1144tf	H_{min}/Hy	-1.99	-1.43
軸力比 N／Ny	0.154	変位	x_{max}	12.8cm	$x_{max}/\delta y$	2.03	1.24
細長比 $\bar{\lambda}$	0.326		x_{min}	-24.5cm	$x_{min}/\delta y$	-3.89	-9.35
断面の補剛パラメータ Rt	0.109	加速度	$\ddot{x}_{max}$	585gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.60	
			$\ddot{x}_{min}$	-415gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.42	
		残留変位	x_{rsd}	1.8cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.28	-8.46

復元力特性

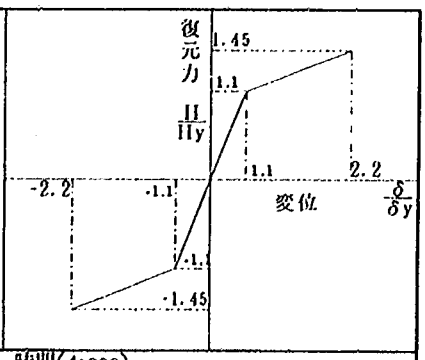




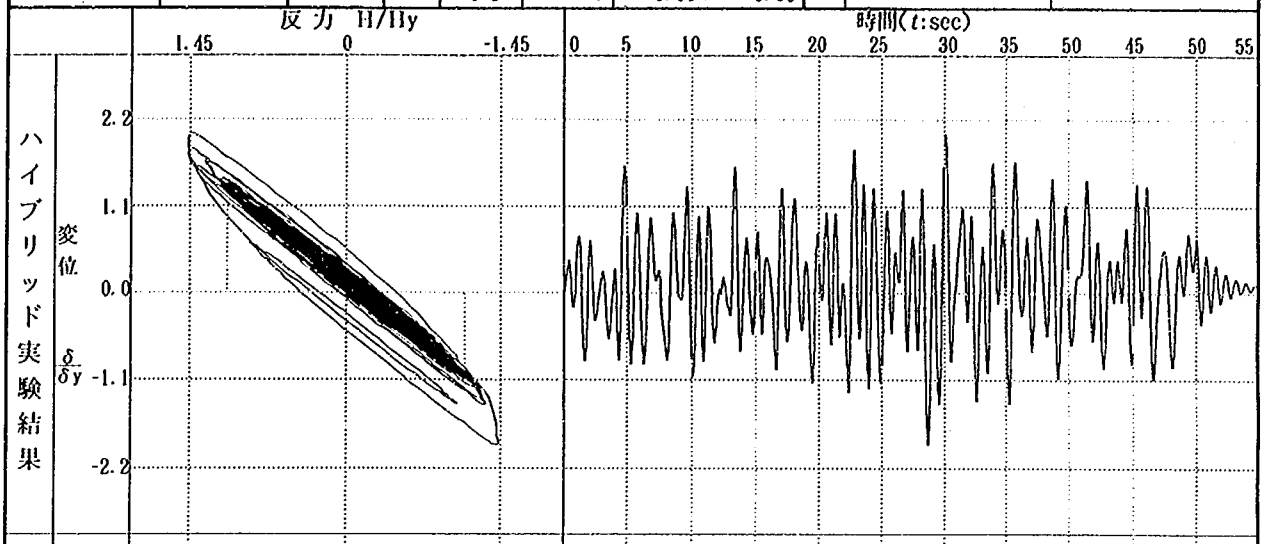
備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-06　　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・III種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=442.9gal）						
質　量　M	1.458tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 %	反　力	H_{max}	862tf	H_{max}/Hy	1.40	1.46
			H_{min}	-872tf	H_{min}/Hy	-1.41	-1.42
軸力比　N／Ny	0.112	変　位	x_{max}	14.2cm	$x_{max}/\delta y$	2.02	2.01
細長比　$\bar{\lambda}$	0.335		x_{min}	-14.7cm	$x_{min}/\delta y$	-2.09	-1.92
断面の補剛パラメータ　Rt	0.121	加速度	$\ddot{x}_{max}$	607gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.62	
			$\ddot{x}_{min}$	-599gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.61	
		残留変位	x_{rsd}	0.1cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.01	0.09

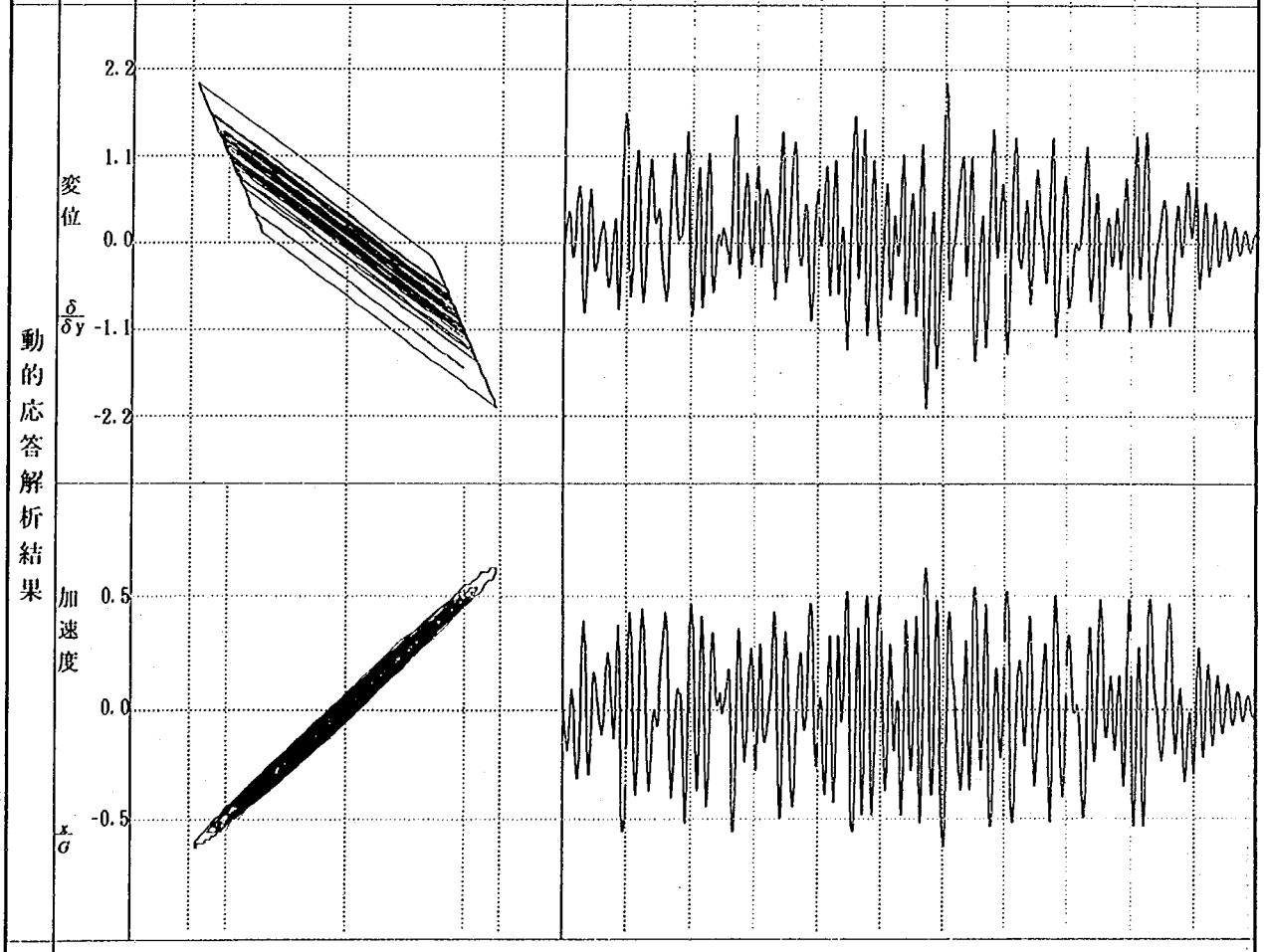
復元力特性



ハイブリッド実験結果



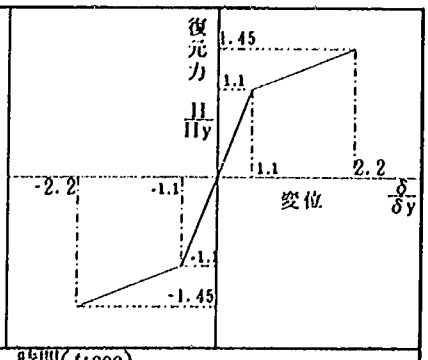
動的応答解析結果



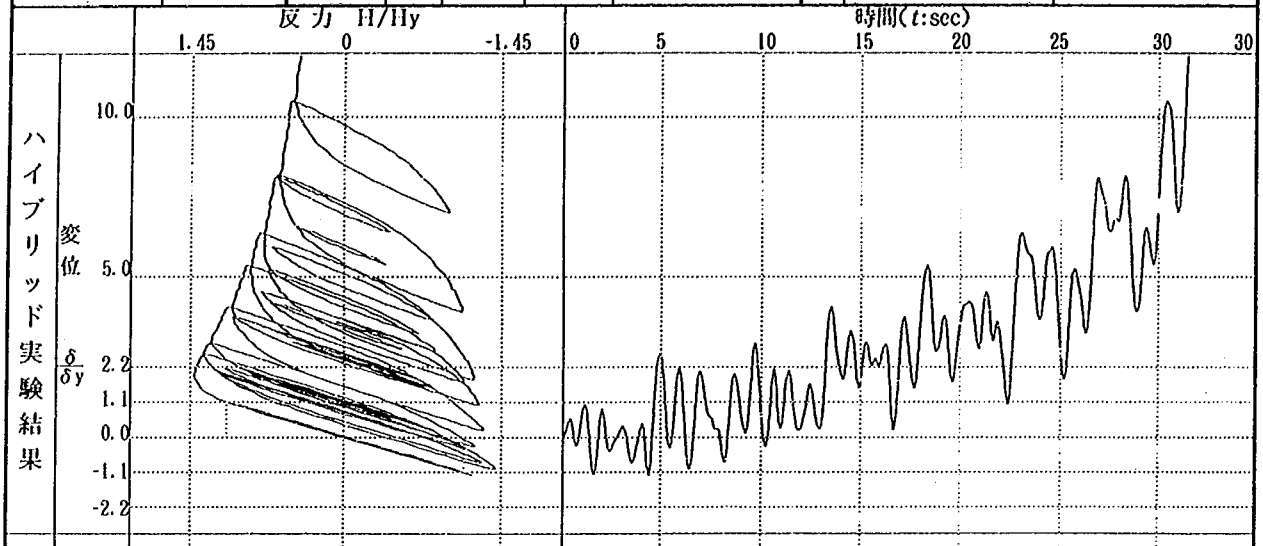
備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-07　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・III種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=606.8gal）						
質量 M	1.445tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 %	反力	Hmax	1027tf	Hmax／Hy	1.68	1.40
			Hmin	-989tf	Hmin／Hy	-1.62	-1.40
軸力比 N／Ny	0.112	変位	xmax	20.0cm	xmax／δy	2.91	-
細長比 λ	0.332		xmin	-18.7cm	xmin／δy	-2.71	-
断面の補剛パラメータ Rt	0.117	加速度	$\ddot{x}$ max	692gal	$\ddot{x}$ max／G	0.71	
			$\ddot{x}$ min	-722gal	$\ddot{x}$ min／G	-0.74	
		残留変位	xrsd	-5.1cm	xrsd／δy	-0.73	-

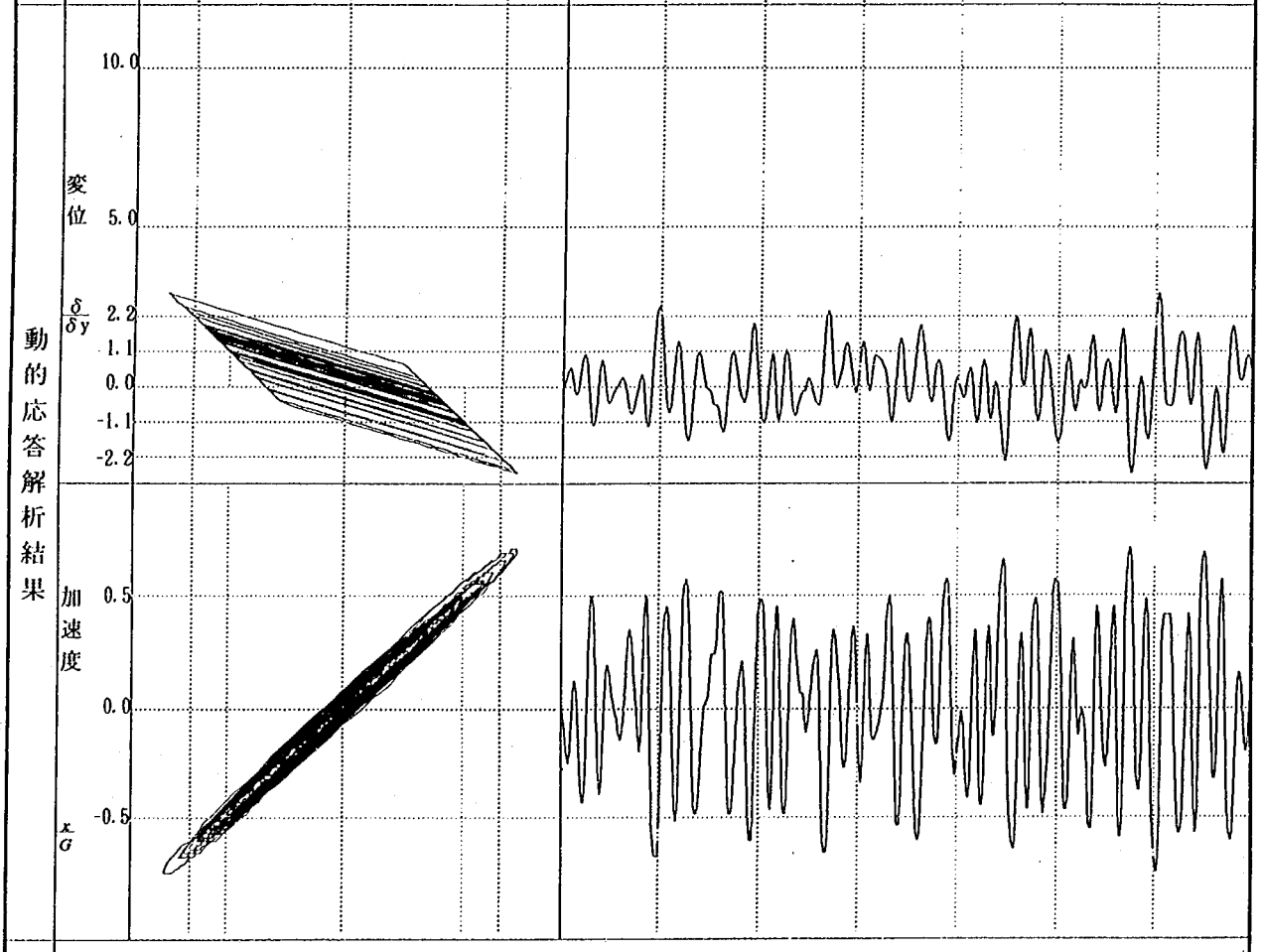
復元力特性



ハイブリッド実験結果



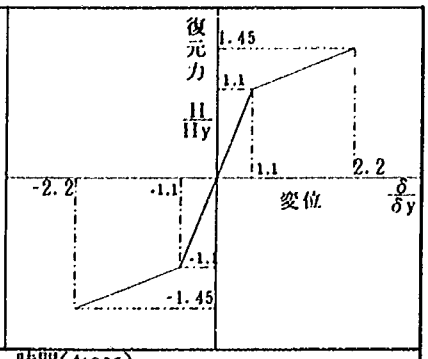
動的応答解析結果

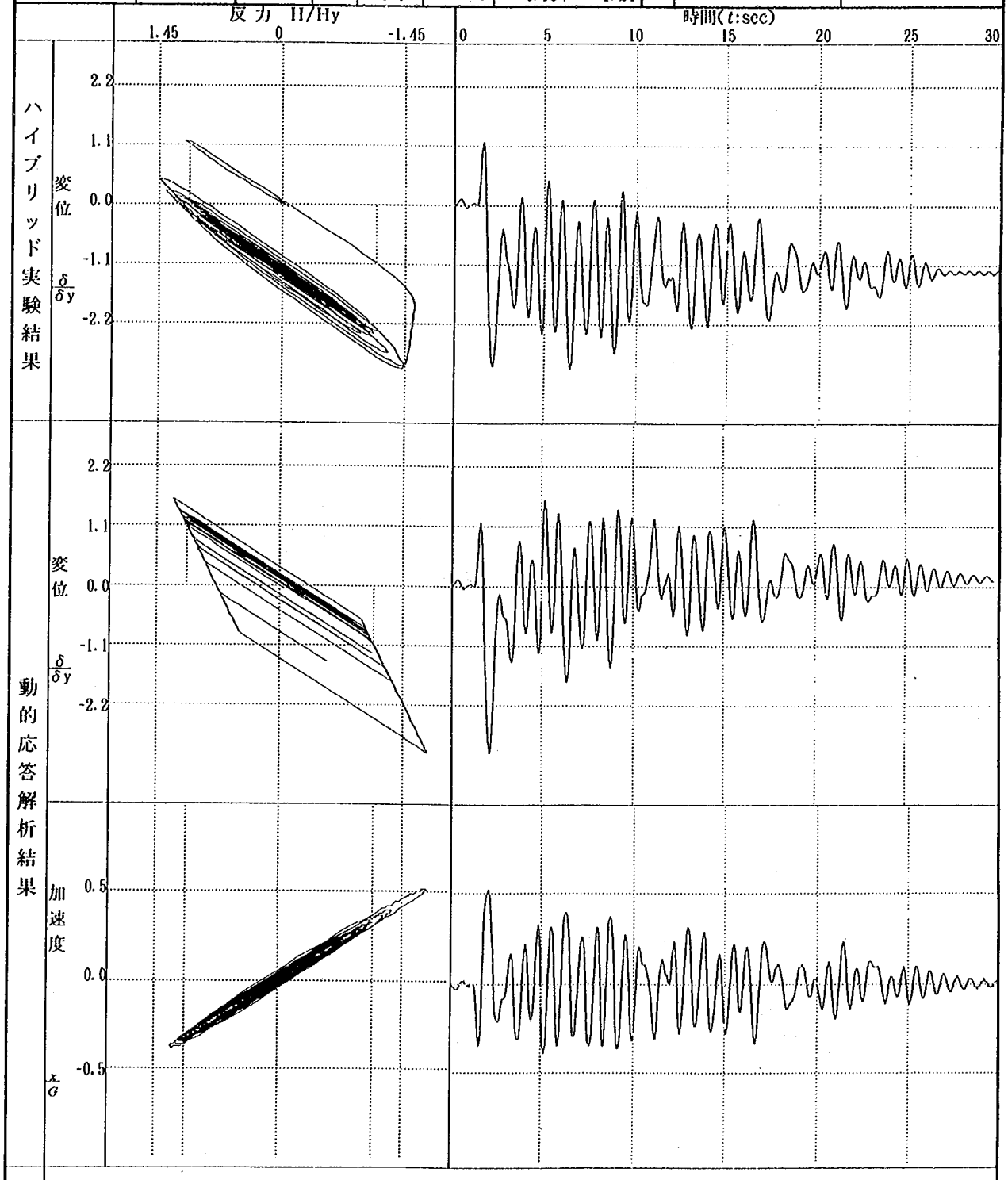


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-08　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	2.103tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 %	反　力	H_{max}	769tf	H_{max}/Hy	1.25	1.44
			H_{min}	-1064tf	H_{min}/Hy	-1.73	-1.56
軸力比　N／Ny	0.180	変　位	x_{max}	6.68cm	$x_{max}/\delta y$	1.59	1.18
細長比　$\bar{\lambda}$	0.265		x_{min}	-12.9cm	$x_{min}/\delta y$	-3.08	-3.03
断面の補剛パラメータ　R_t	0.108	加速度	$\ddot{x}_{max}$	510gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.52	
			$\ddot{x}_{min}$	-373gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.38	
		残留変位	x_{rsd}	0.6cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.15	-1.24

復元力特性

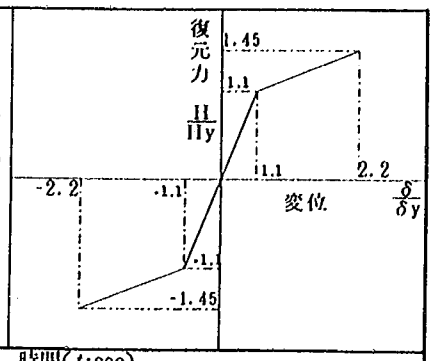


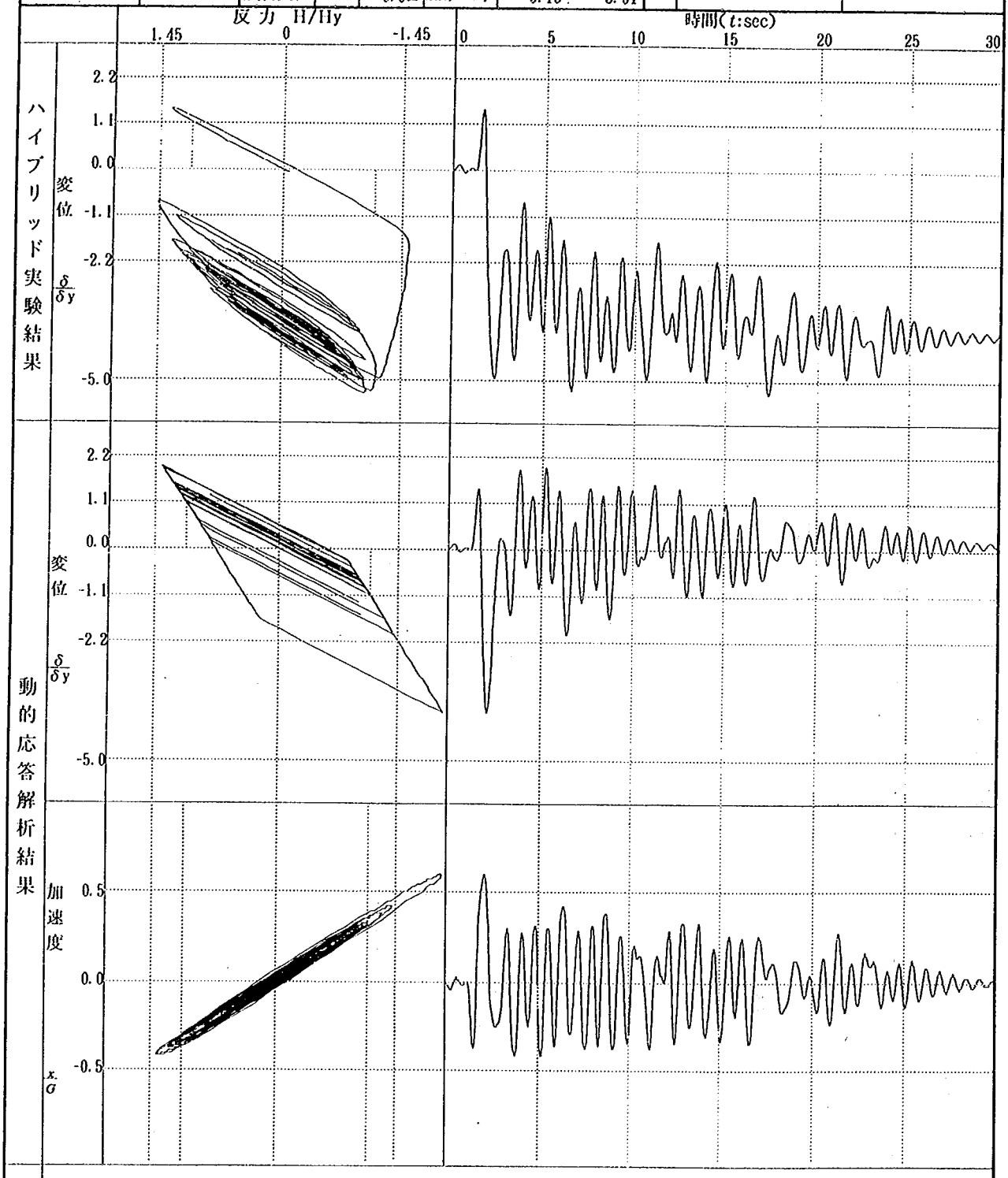


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-09　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=432.0gal）						
質量 M	2.090tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 %	反力	H_{max}	838tf	H_{max}/Hy	1.38	1.46
			H_{min}	-1210tf	H_{min}/Hy	-1.99	-1.50
軸力比 N／Ny	0.180	変位	x_{max}	8.08cm	$x_{max}/\delta y$	1.96	1.46
細長比 $\bar{\lambda}$	0.263		x_{min}	-16.0cm	$x_{min}/\delta y$	-3.87	-5.31
断面の補剛パラメータ Rt	0.106	加速度	$\ddot{x}_{max}$	585gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.60	
			$\ddot{x}_{min}$	-409gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.42	
		残留変位	x_{rsd}	0.6cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.15	-3.91

復元力特性

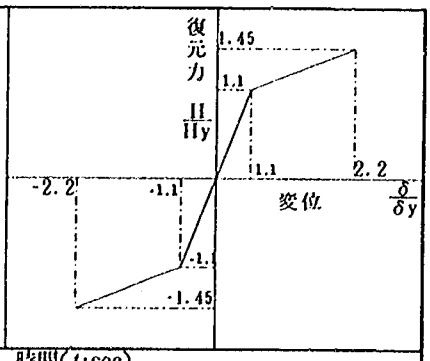


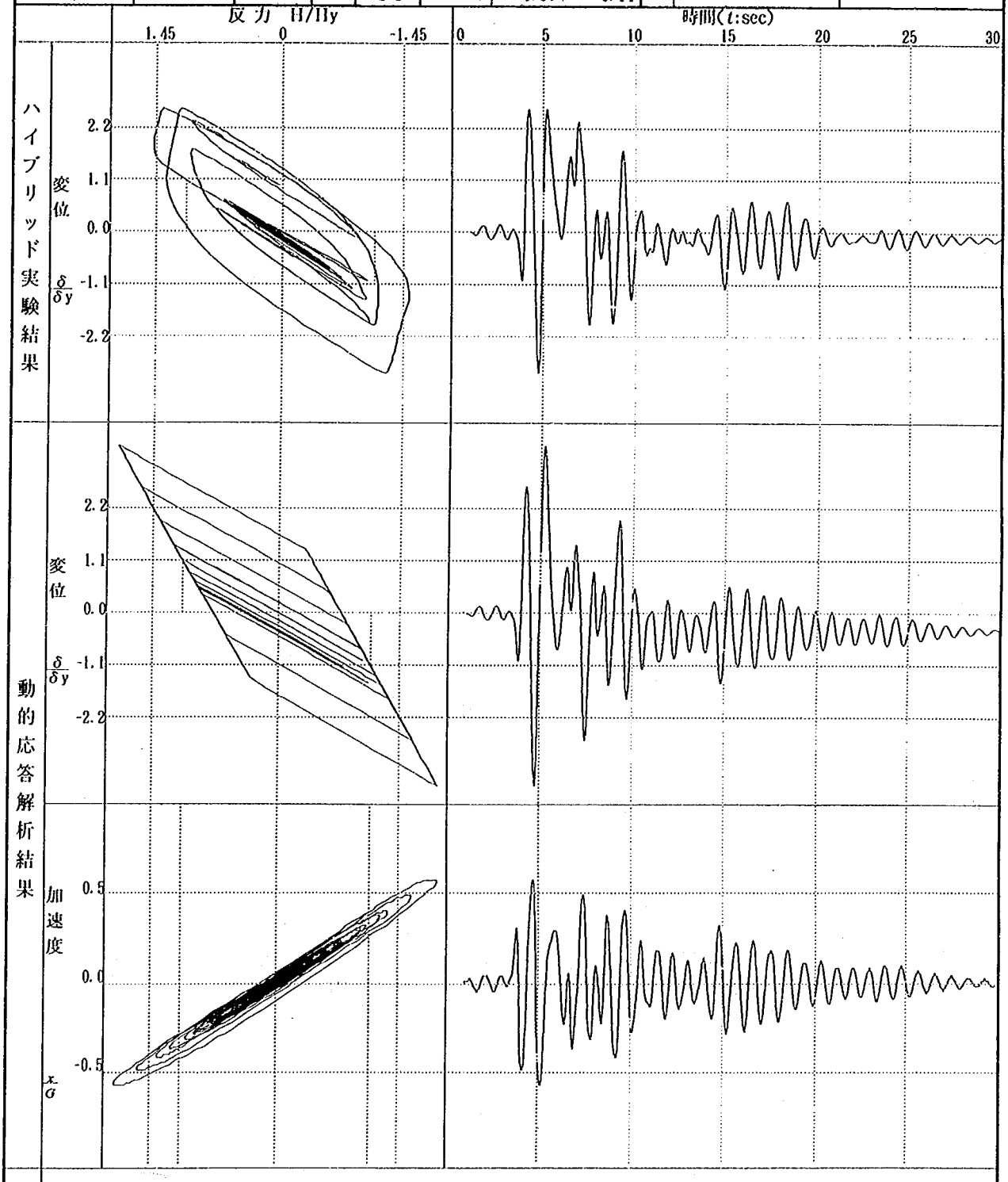


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-10　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=818.0gal）						
質　量　M	1.876tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 %	反　力	H_{max}	1020tf	H_{max}/Hy	1.87	1.48
			H_{min}	-1041tf	H_{min}/Hy	-1.91	-1.51
軸力比　N／Ny	0.155	変　位	x_{max}	20.9cm	$x_{max}/\delta y$	3.52	2.61
細長比　$\bar{\lambda}$	0.316		x_{min}	-21.6cm	$x_{min}/\delta y$	-3.64	-2.96
断面の補剛パラメータ　Rt	0.102	加速度	$\ddot{x}_{max}$	569cm	$\ddot{x}_{max}/G$	0.58	
			$\ddot{x}_{min}$	-557cm	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.57	
		残留変位	x_{rsd}	2.2cm	$x_{rsd}/\delta y$	0.37	-0.14

復元力特性

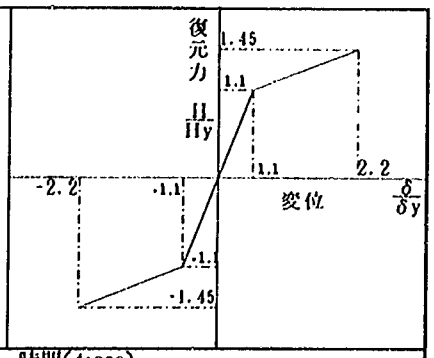


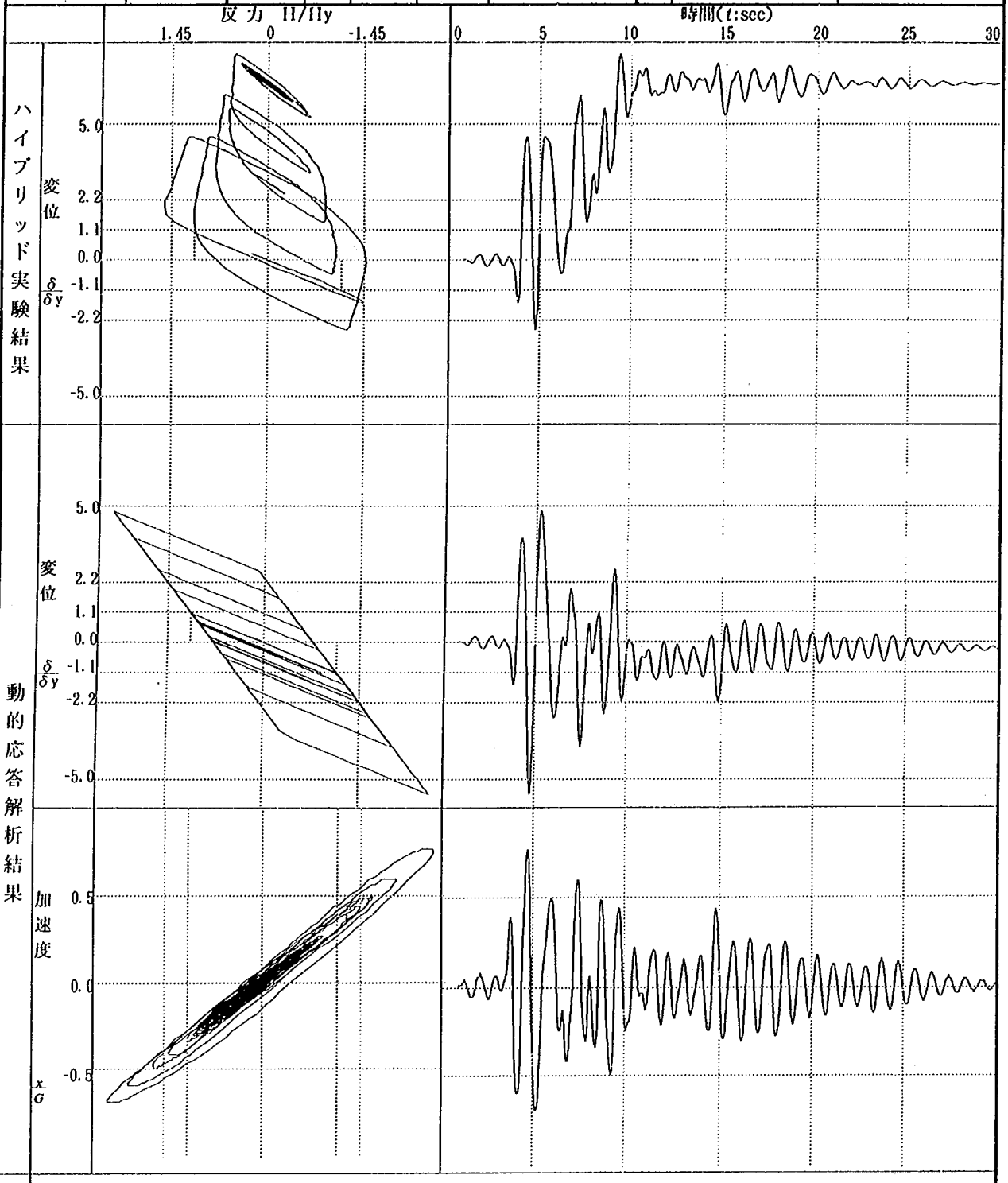


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-11　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=1227.0gal）						
質　量　M	1.797tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 %	反　力	H_{max}	1191tf	H_{max}/H_y	2.28	1.55
			H_{min}	-1313tf	H_{min}/H_y	-2.52	-1.48
軸力比　N／Ny	0.155	変　位	x_{max}	28.1cm	x_{max}/δ_y	4.81	7.55
細長比　$\bar{\lambda}$	0.314		x_{min}	32.4cm	x_{min}/δ_y	-5.55	-2.56
断面の補剛パラメータ　R_t	0.105	加速度	$\ddot{x}_{max}$	753gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.77	
			$\ddot{x}_{min}$	-678gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.69	
		残留変位	x_{rsd}	-1.3cm	x_{rsd}/δ_y	0.23	6.49

復元力特性

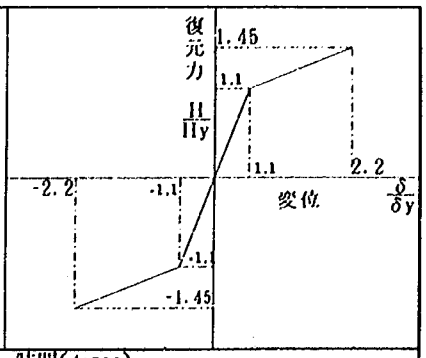


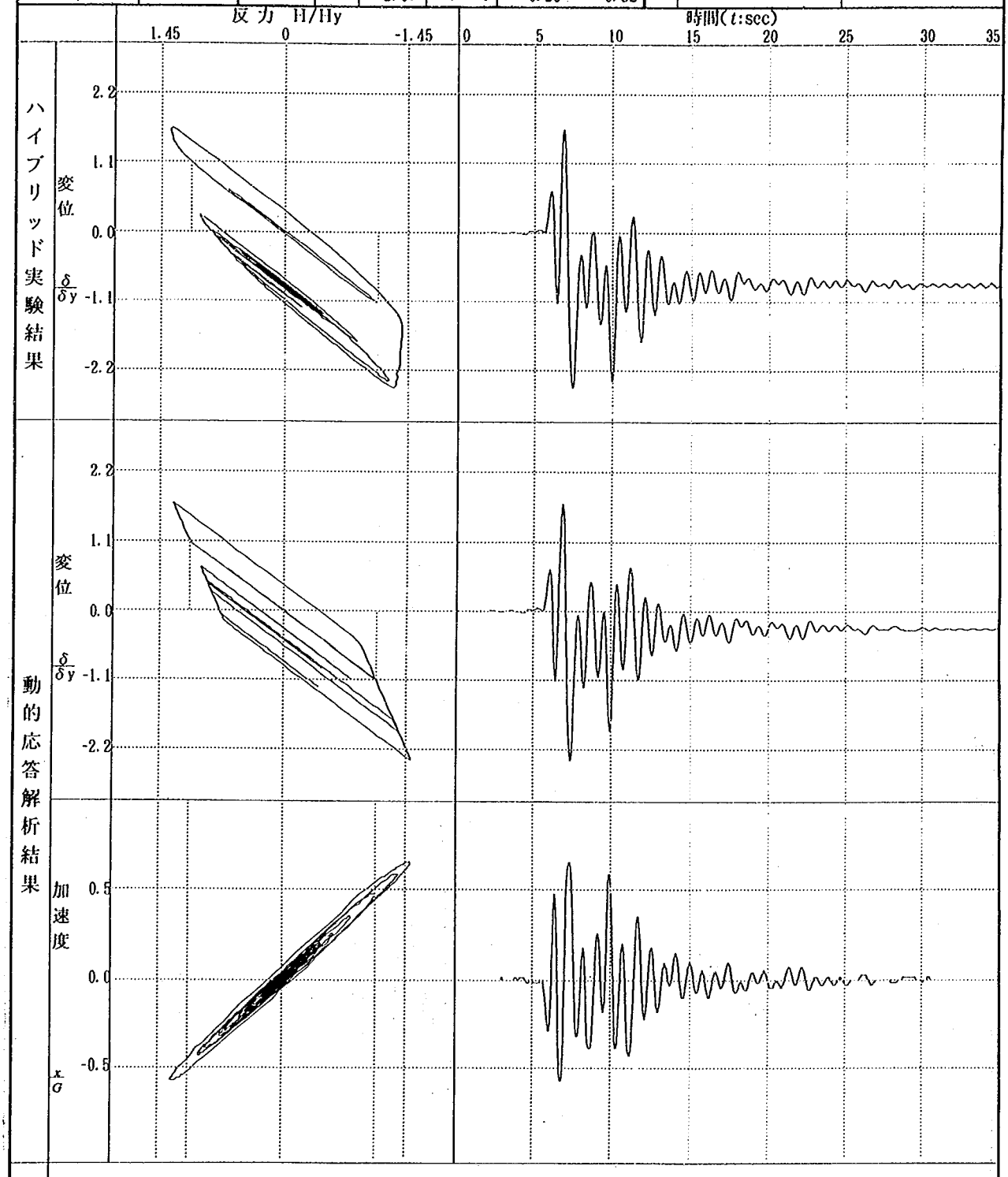


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-12　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・III種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=325.8gal）						
質　量　M	1.508tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h　形式	5 %	反　力	H_{max}	827tf	H_{max}/Hy	1.29	1.34
			H_{min}	-962tf	H_{min}/Hy	-1.50	-1.37
軸力比　N／Ny	0.111	変　位	x_{max}	12.1cm	$x_{max}/\delta y$	1.70	1.64
細長比　$\bar{\lambda}$	0.338		x_{min}	-16.9cm	$x_{min}/\delta y$	-2.38	-2.47
断面の補剛パラメータ　R_t	0.119	加速度	$\ddot{x}_{max}$	644gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.66	
			$\ddot{x}_{min}$	-556gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.57	
		残留変位	x_{rsd}	-2.0cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.29	-0.82

復元力特性

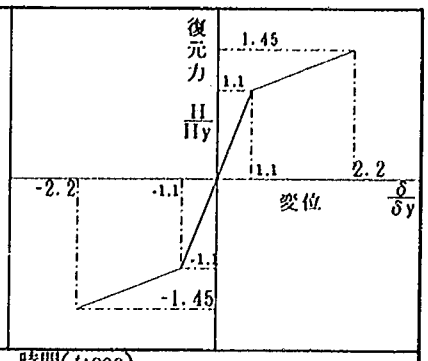


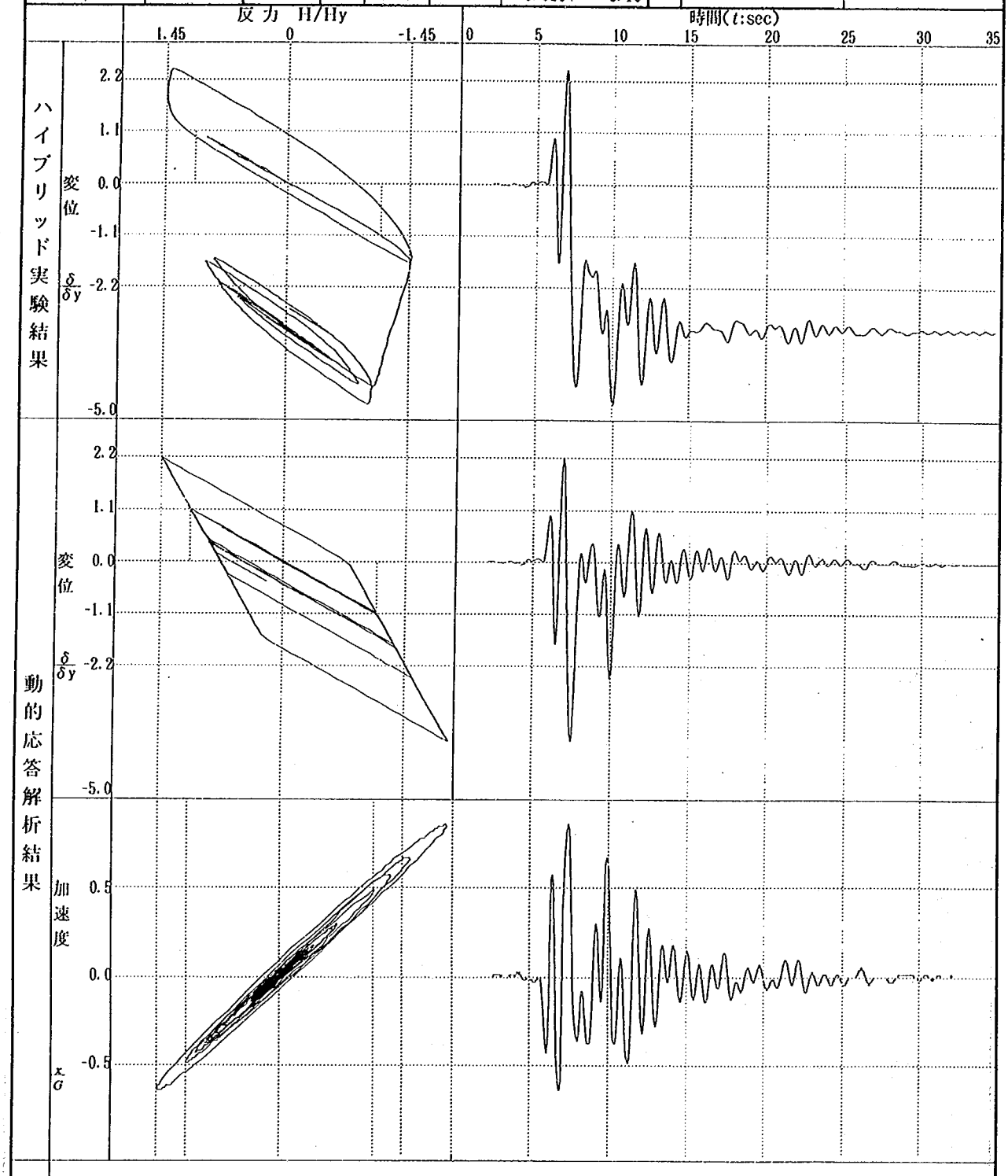


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	円形断面：No. P-13　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・III種地盤（$\ddot{O}_{max}$=488.8gal）						
質量 M	1.518tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 %	反力	H_{max}	929tf	H_{max}/Hy	1.44	1.44
			H_{min}	-1265tf	H_{min}/Hy	-1.96	-1.46
軸力比 N／Ny	0.111	変位	x_{max}	15.4cm	$x_{max}/\delta y$	2.19	2.43
細長比 $\bar{\lambda}$	0.337		x_{min}	-26.8cm	$x_{min}/\delta y$	-3.80	-4.69
断面の補剛パラメータ Rt	0.117	加速度	$\ddot{x}_{max}$	841gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.86	
			$\ddot{x}_{min}$	-621gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.6364	
		残留変位	x_{rsd}	-0.15cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.026	-3.10

復元力特性

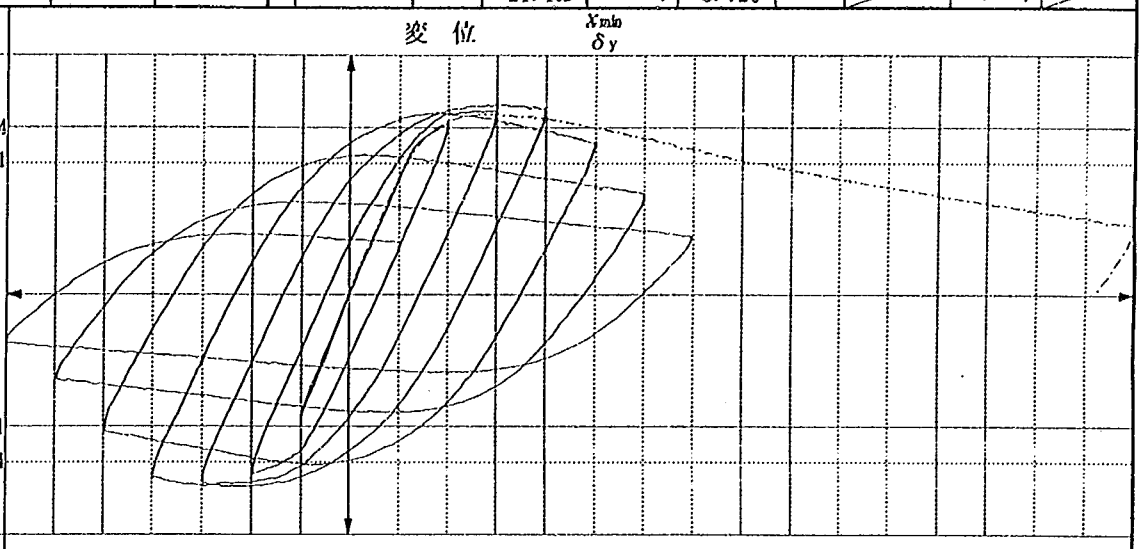




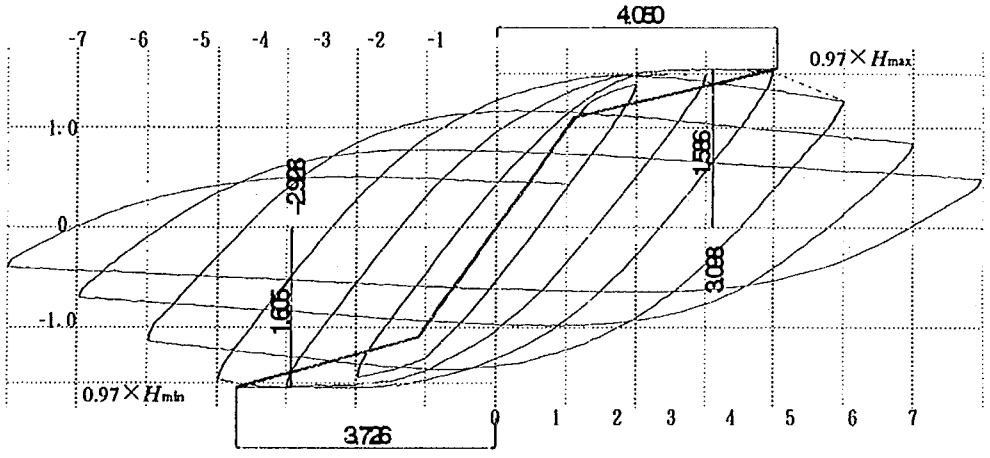
備考

モデル（供試体）		円形断面：No. P-14, P-15											
軸力比	N／Ny	0.181				両振り繰返し載荷				片振り繰返し載荷			
細長比	λ	0.314				計測値		無次元数値		計測値		無次元数値	
断面の補剛パラメータ	Rt	0.080		反力		Hmax	1031tf	Hmax／Hy	1.586	Hmax		Hmax／Hy	
						Hmin	1043tf	Hmin／Hy	-1.605	Hmin		Hmin／Hy	
脚柱全体のパ	ξ	0.0023		変位	最大最小反力時	xmax	17.5cm	xmax／δy	3.098	xmax		xmax／δy	
						xmin	16.6cm	xmin／δy	-2.928	xmin		xmin／δy	
					97%×最大最小反力時	x+97	22.9cm	x+97／δy	4.050	x+97		x+97／δy	
						x-97	21.1cm	x-97／δy	-3.726	x-97		x-97／δy	

ハイブリッド実験結果



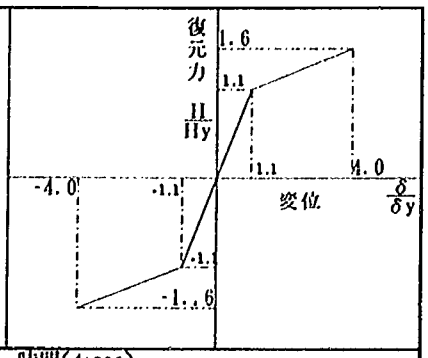
復元力特性

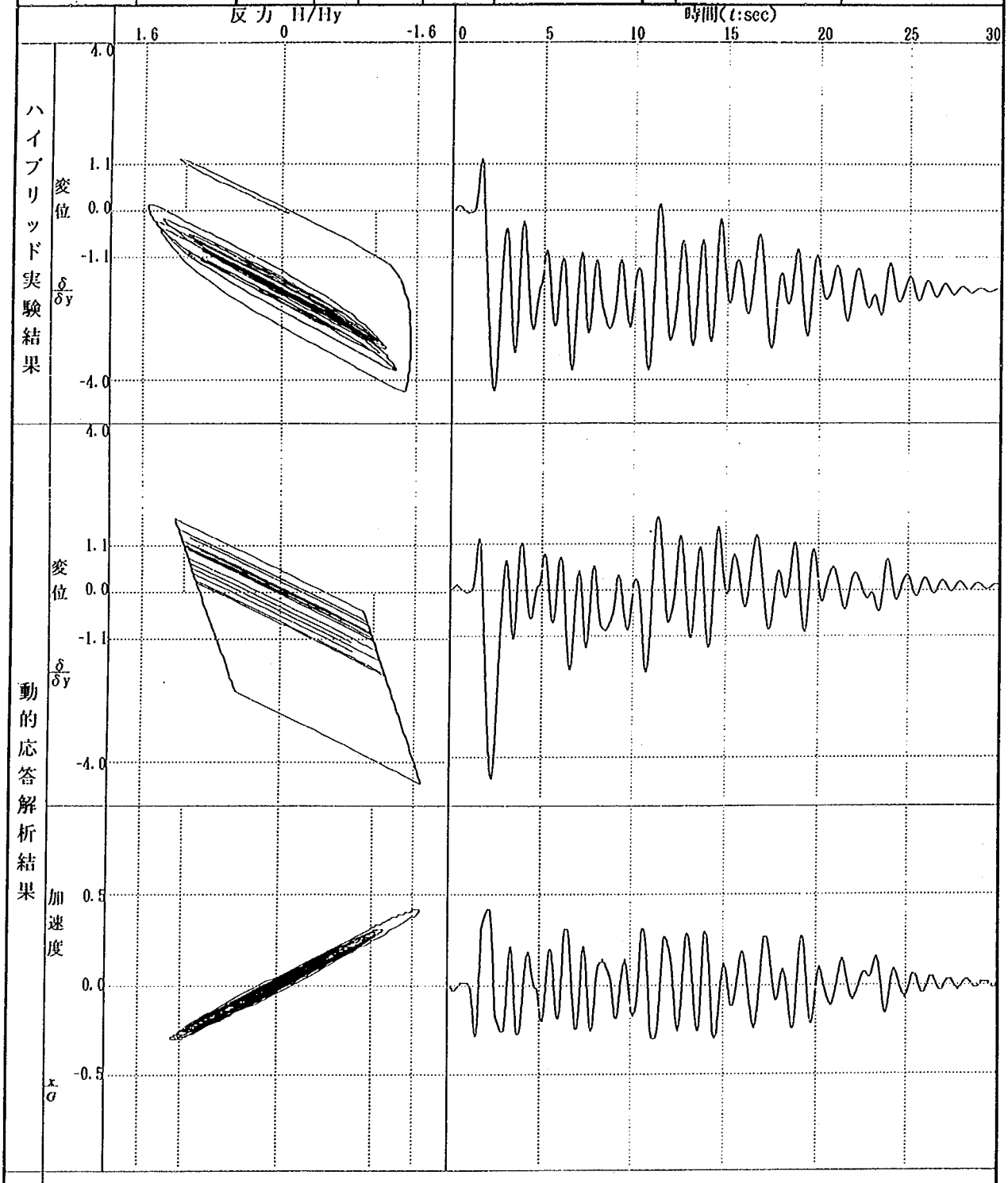


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-16　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=360.0gal）						
質　量 M	2.754tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰 h 形式	5 %	反　力	H_{max}	800tf	H_{max}/H_y	1.21	1.55
			H_{min}	-1117tf	H_{min}/H_y	-1.69	-1.53
軸力比 N／N_y	0.181	変　位	x_{max}	10.0cm	x_{max}/δ_y	1.75	1.23
細長比 $\bar{\lambda}$	0.317		x_{min}	-25.9cm	x_{min}/δ_y	-4.52	-4.27
断面の補剛パラメータ R_t	0.081	加速度	$\ddot{x}_{max}$	414gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.42	
			$\ddot{x}_{min}$	-300gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.31	
		残留変位	x_{rsd}	0.49cm	x_{rsd}/δ_y	0.09	-1.89

復元力特性

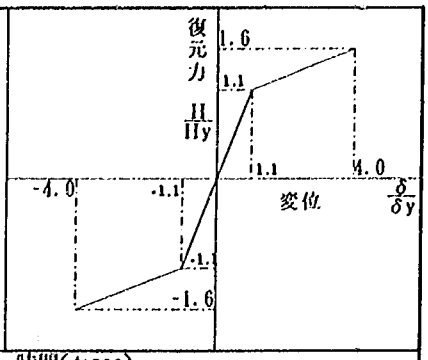


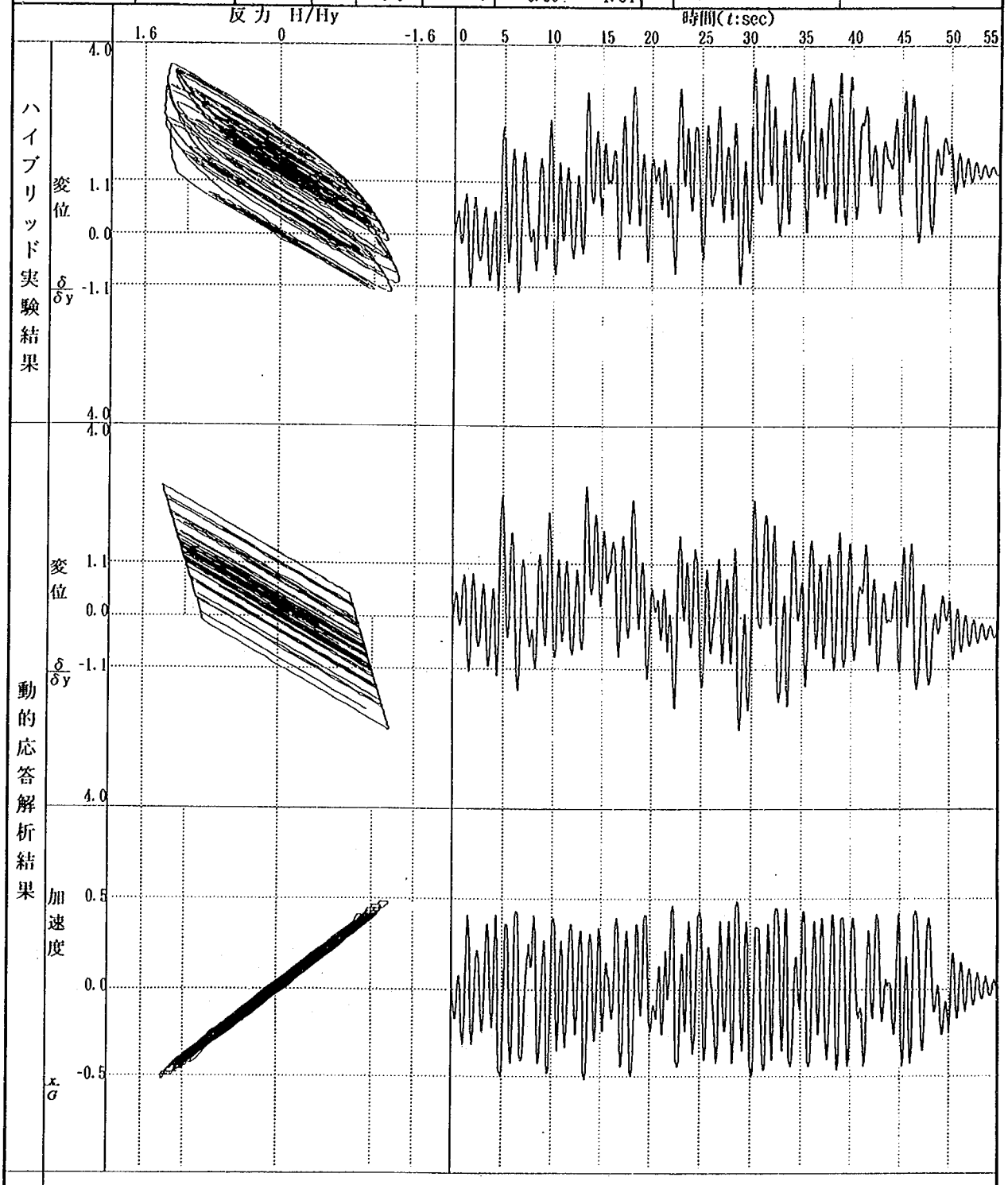


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-17　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅲ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=442.9gal）						
質　量 M	2.106tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰 h 形式	5 %	反　力	H_{max}	1015tf	H_{max}/Hy	1.37	1.36
			H_{min}	-971tf	H_{min}/Hy	-1.31	-1.39
軸力比 N／Ny	0.130	変　位	x_{max}	17.4cm	$x_{max}/\delta y$	2.74	3.55
			x_{min}	-15.1cm	$x_{min}/\delta y$	-2.38	-1.22
細長比 $\bar{\lambda}$	0.324	加速度	$\ddot{x}_{max}$	472gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.48	
			$\ddot{x}_{min}$	-493gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.50	
断面の補剛パラメータ R_t	0.083	残留変位	x_{rsd}	-1.9cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.30	1.34

復元力特性

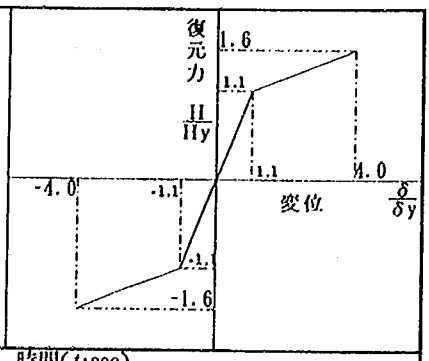


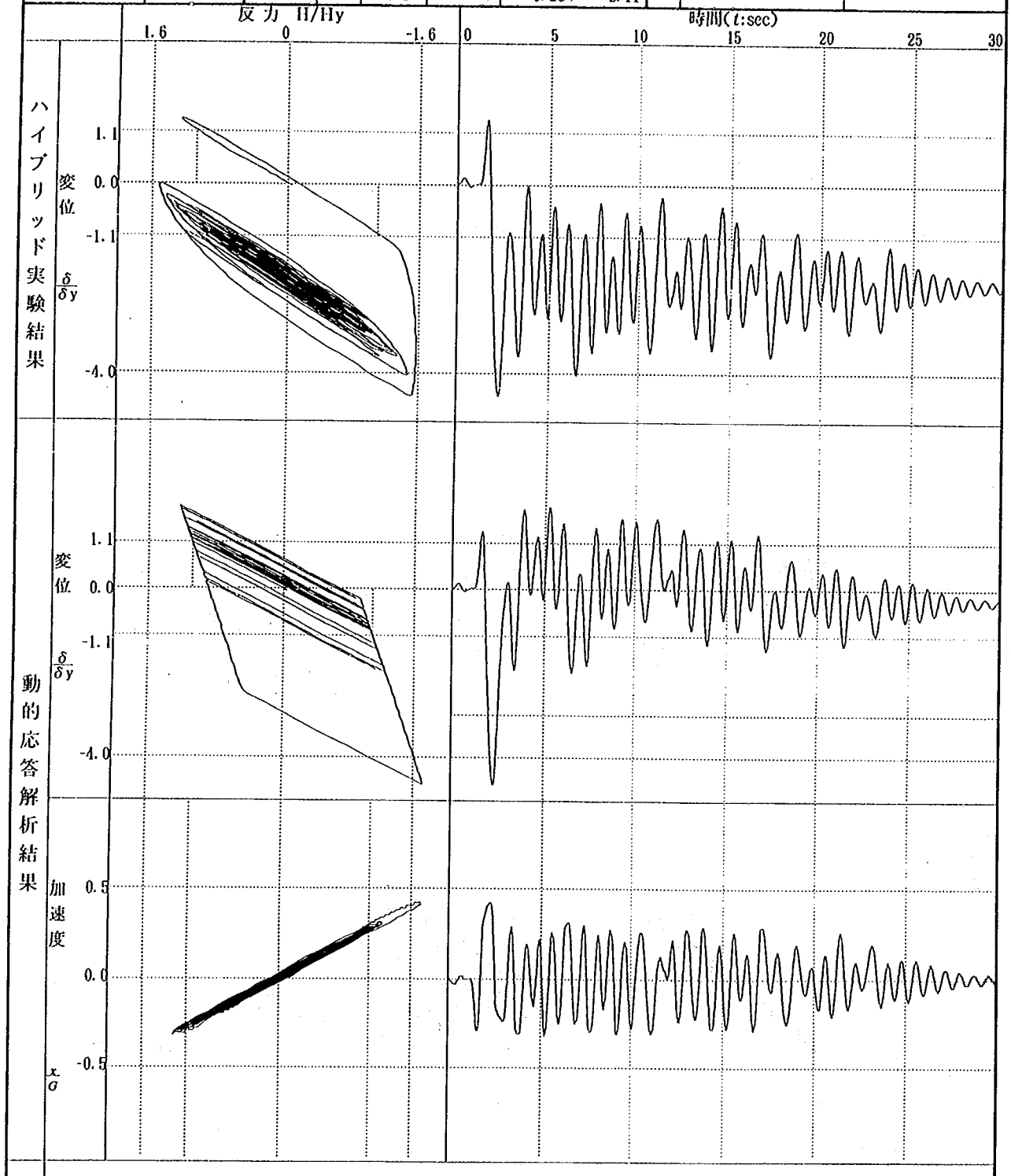


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-18　硬化型バイリニアモデル② 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=360.0gal）					
質量 M	3.167tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減衰 h 形式	5 %	反力	H_{max}	943tf	H_{max}/Hy	1.25 : 1.52
軸力比 N／Ny	0.210		H_{min}	-1294tf	H_{min}/Hy	-1.71 : -1.57
細長比 $\bar{\lambda}$	0.262	変位	x_{max}	7.7cm	$x_{max}/\delta y$	1.96 : 1.38
			x_{min}	-18.3cm	$x_{min}/\delta y$	-4.65 : -4.47
断面の補剛パラメータ R_t	0.079	加速度	$\ddot{x}_{max}$	414gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.42 :
			$\ddot{x}_{min}$	-306gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.31 :
		残留変位	x_{rsd}	-1.1cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.28 : -2.11

復元力特性

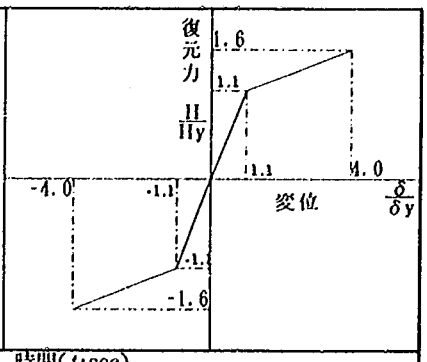


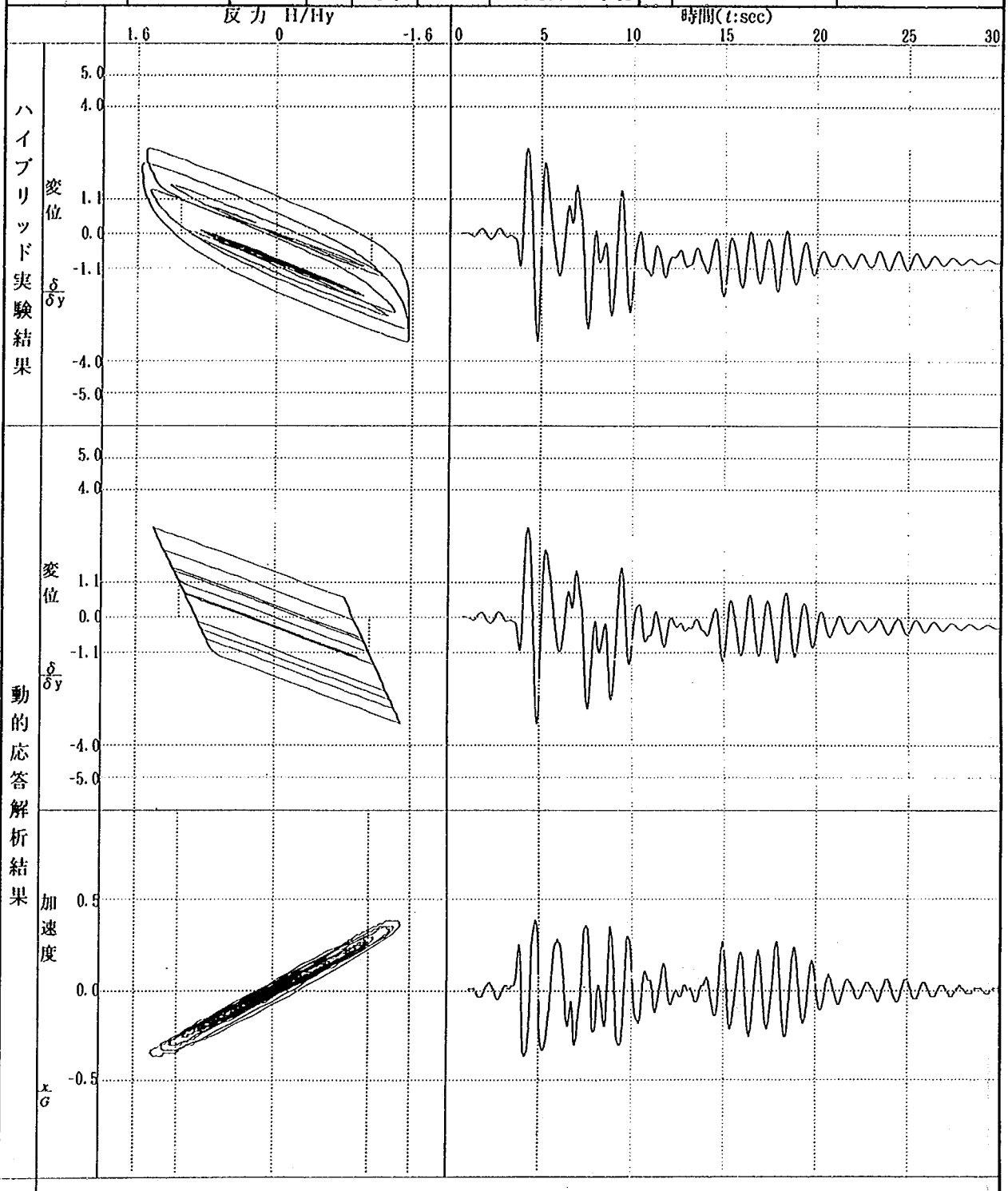


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-19　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{O}_{max}$=818.0gal）						
質　量　M	2.806tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h　形式	5 %	反　力	H_{max}	999tf	H_{max}/H_y	1.48	1.55
			H_{min}	-940.1tf	H_{min}/H_y	-1.40	-1.56
軸力比　N／Ny	0.181	変　位	x_{max}	16.4cm	x_{max}/δ_y	2.83	2.68
細長比　$\bar{\lambda}$	0.318		x_{min}	-19.3cm	x_{min}/δ_y	-3.34	-3.39
断面の補剛パラメータ　R_f	0.081	加速度	$\ddot{x}_{max}$	379gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.39	
			$\ddot{x}_{min}$	349gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.36	
		残留変位	x_{rsd}	-1.6cm	x_{rsd}/δ_y	-0.27	-0.82

復元力特性

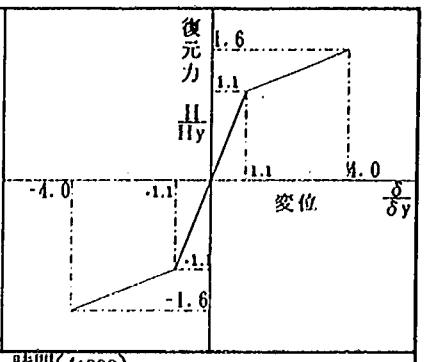


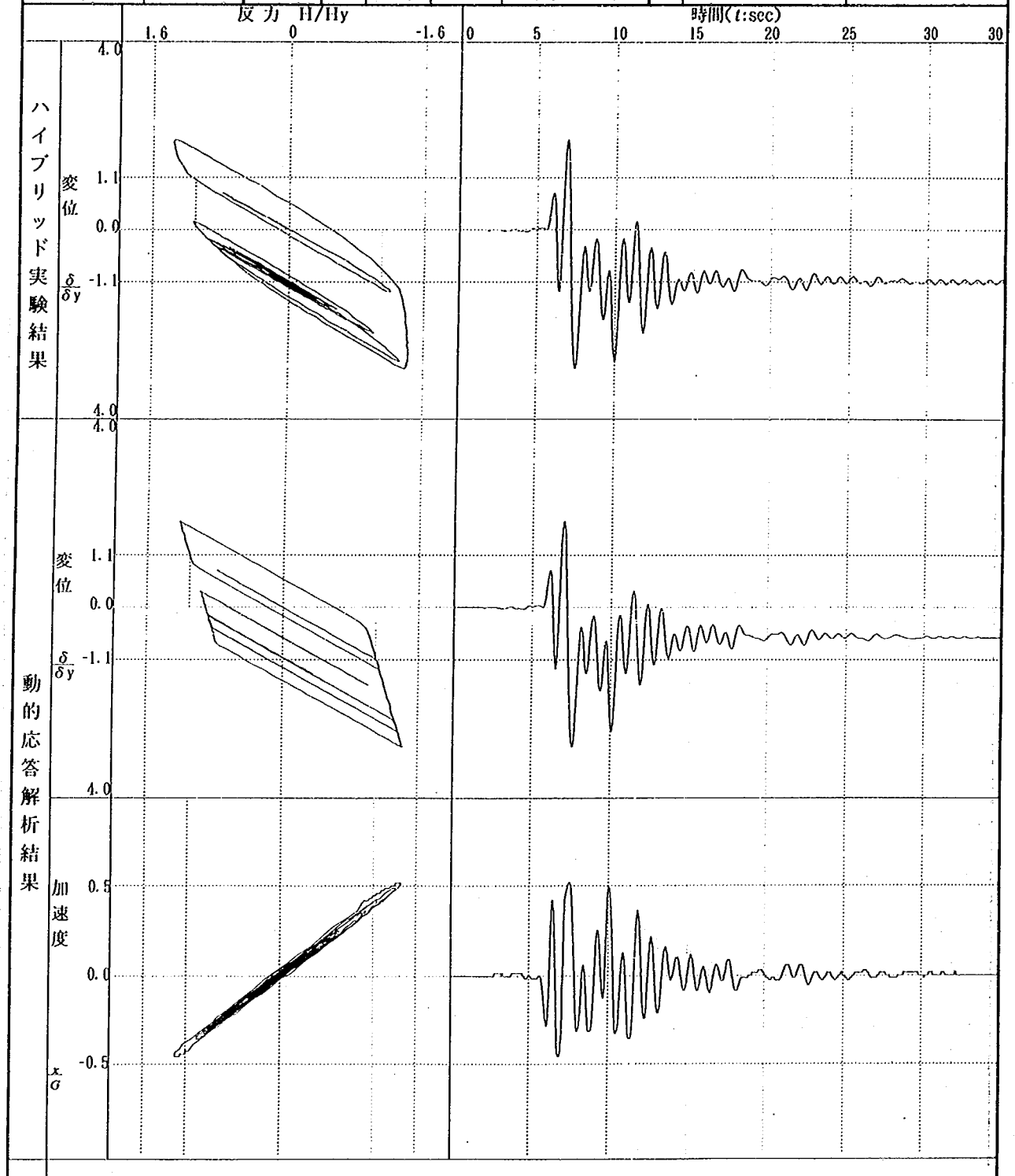


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-20　硬化型バイリニアモデル② 兵庫県南部地震波・Ⅲ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=325.8gal）						
質量 M	2.049tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 %	反力	H_{max}	884tf	H_{max}/Hy	1.23	1.36
			H_{min}	-1024tf	H_{min}/Hy	-1.42	-1.40
軸力比 N／Ny	0.130	変位	x_{max}	11.4cm	$x_{max}/\delta y$	1.83	2.68
細長比 $\bar{\lambda}$	0.321		x_{min}	-18.4cm	$x_{min}/\delta y$	-2.95	-1.90
断面の補剛パラメータ Rt	0.082	加速度	$\ddot{x}_{max}$	508gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.623	
			$\ddot{x}_{min}$	-442gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.472	
		残留変位	x_{rsd}	-3.9cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.63	-0.82

復元力特性





備考

2.4 その他の復元力特性

2.4.1 完全弾塑性型バイリニアモデル

動的応答解析に用いる復元力特性を完全弾塑性型バイリニアモデルとし、αを３ケース設定し解析した。解析結果を表-2.4.1(1)、(2)および(3) にまとめる。

表-2.4.1(1) 解析結果：矩形断面・完全弾塑性型バイリニアモデル①

ケース ①		反力		変位		残留変位	α
		H_{max}/H_y	H_{min}/H_y	x_{max}/δ_y	x_{min}/δ_y	x_{rsd}/δ_y	
矩形断面:R-04 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.46	-1.46	1.28	-2.93	-0.58	1.46
	実験値	1.38	-1.46	1.02	-2.64	-0.63	
矩形断面:R-05 土研提案L2・Ⅰ種地盤 540.0gal	解析値	1.44	-1.44	1.43	-6.56	-5.10	1.44
	実験値	1.28	-1.44	1.26	-6.98	-5.10	
矩形断面:R-10 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.44	-1.44	1.89	-3.24	-1.07	1.44
	実験値	1.32	-1.44	1.60	-3.51	-1.48	
矩形断面:R-11 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 1227.0gal	解析値	1.46	-1.46	3.03	-3.82	-1.69	1.46
	実験値	1.45	-1.41	2.38	-5.37	-3.42	

表-2.4.1(2) 解析結果：矩形断面・完全弾塑性型バイリニアモデル②

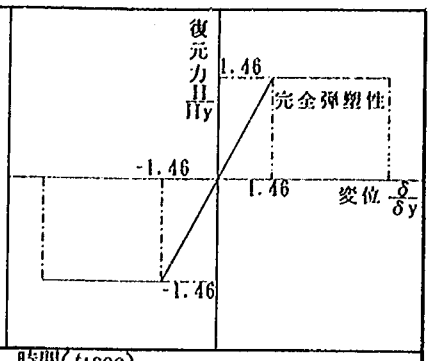
ケース ②		反力		変位		残留変位	α
		H_{max}/H_y	H_{min}/H_y	x_{max}/δ_y	x_{min}/δ_y	x_{rsd}/δ_y	
矩形断面:R-04 土研提案L2・Ⅰ種地盤	解析値	1.41	-1.41	1.05	-3.09	-1.06	1.41
	実験値	1.38	-1.46	1.02	-2.64	-0.63	
矩形断面:R-05 土研提案L2・Ⅰ種地盤 540.0gal	解析値	1.42	-1.42	1.45	-6.80	-5.46	1.42
	実験値	1.28	-1.44	1.26	-6.98	-5.10	
矩形断面:R-10 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.40	-1.40	1.81	-3.01	-1.00	1.40
	実験値	1.32	-1.44	1.60	-3.51	-1.50	
矩形断面:R-11 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 1227.0gal	解析値	1.40	-1.40	3.11	-3.70	-1.60	1.40
	実験値	1.45	-1.41	2.38	-5.37	-3.42	

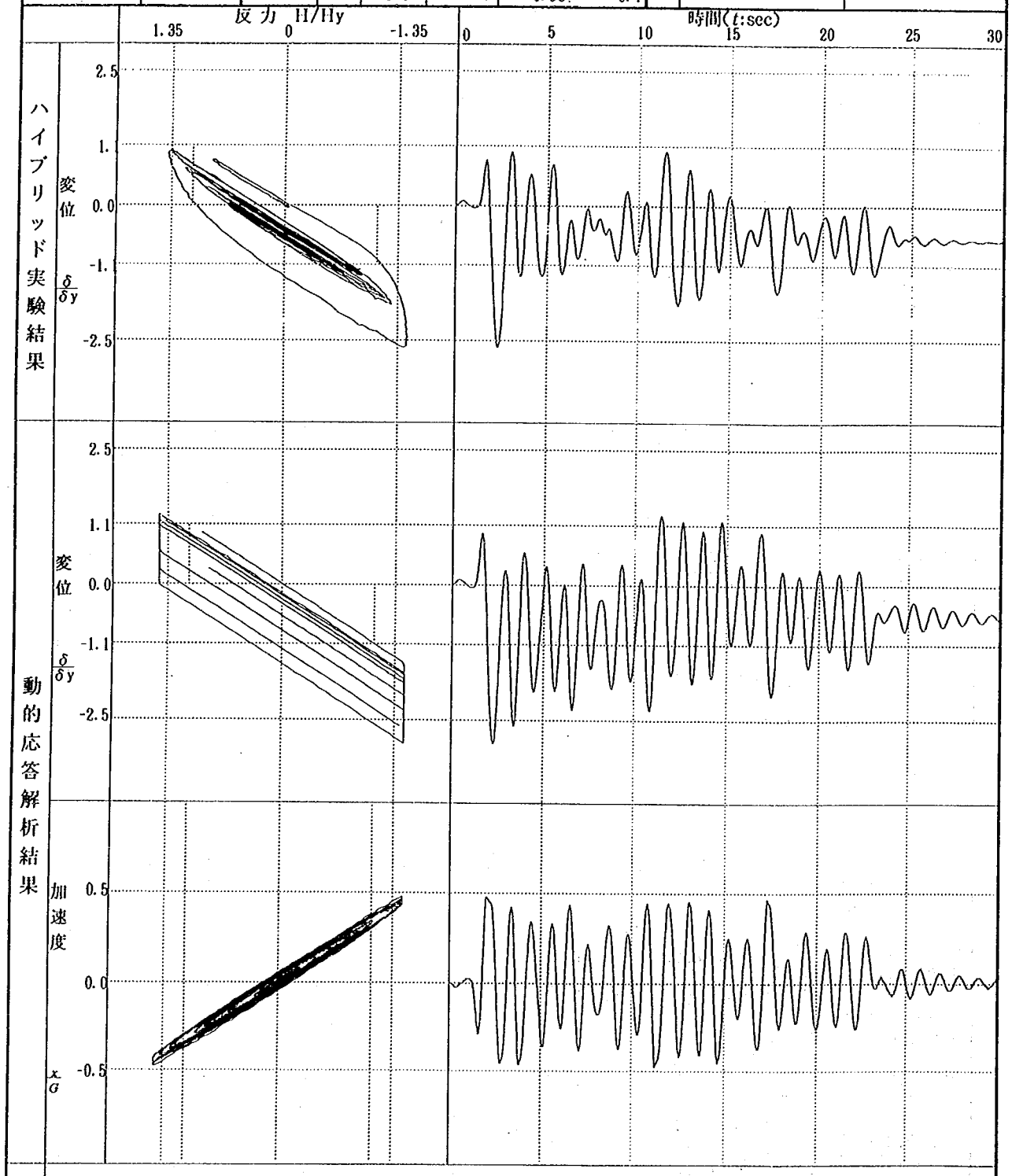
表-2.4.1(3) 解析結果：矩形断面・完全弾塑性型バイリニアモデル③

ケース ③		反力		変位		残留変位	α
		H_{max}/H_y	H_{min}/H_y	x_{max}/δ_y	x_{min}/δ_y	x_{rsd}/δ_y	
矩形断面:R-04 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.38	-1.38	0.92	-3.00	-0.75	1.38
	実験値	1.38	-1.46	1.02	-2.64	-0.63	
矩形断面:R-05 土研提案L2・Ⅰ種地盤 540.0gal	解析値	1.37	-1.37	1.42	-6.63	-5.26	1.37
	実験値	1.28	-1.44	1.26	-6.98	-5.10	
矩形断面:R-10 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.47	-1.47	1.86	-3.37	-1.43	1.47
	実験値	1.32	-1.44	1.60	-3.51	-1.48	
矩形断面:R-11 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 1227.0gal	解析値	1.49	-1.49	3.18	-5.17	-2.36	1.49
	実験値	1.45	-1.41	2.38	-5.37	-3.42	

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-04　（完全弾塑性①） 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	3.110 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h　形式	5 %　剛性比例	反　力	Hmax	1325 tf	Hmax／Hy	1.46	1.38
			Hmin	-1325 tf	Hmin／Hy	-1.46	-1.46
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	xmax	10.9 cm	xmax／δy	1.28	1.02
細長比　λ̄	0.38		xmin	-25.0 cm	xmin／δy	-2.93	-2.64
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	468 gal	$\ddot{x}_{max}$／G	0.48	
	R_F 0.58		$\ddot{x}_{min}$	-467 gal	$\ddot{x}_{min}$／G	-0.48	
	R_H 0.34	残留変位	xrsd	-5.0 cm	xrsd／δy	-0.58	-0.7

復元力特性

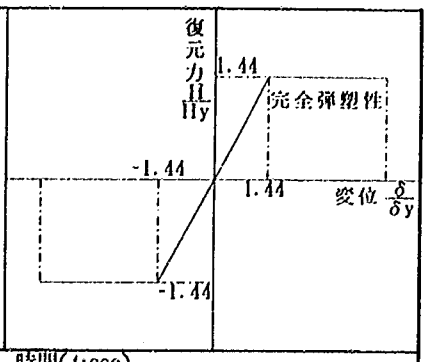


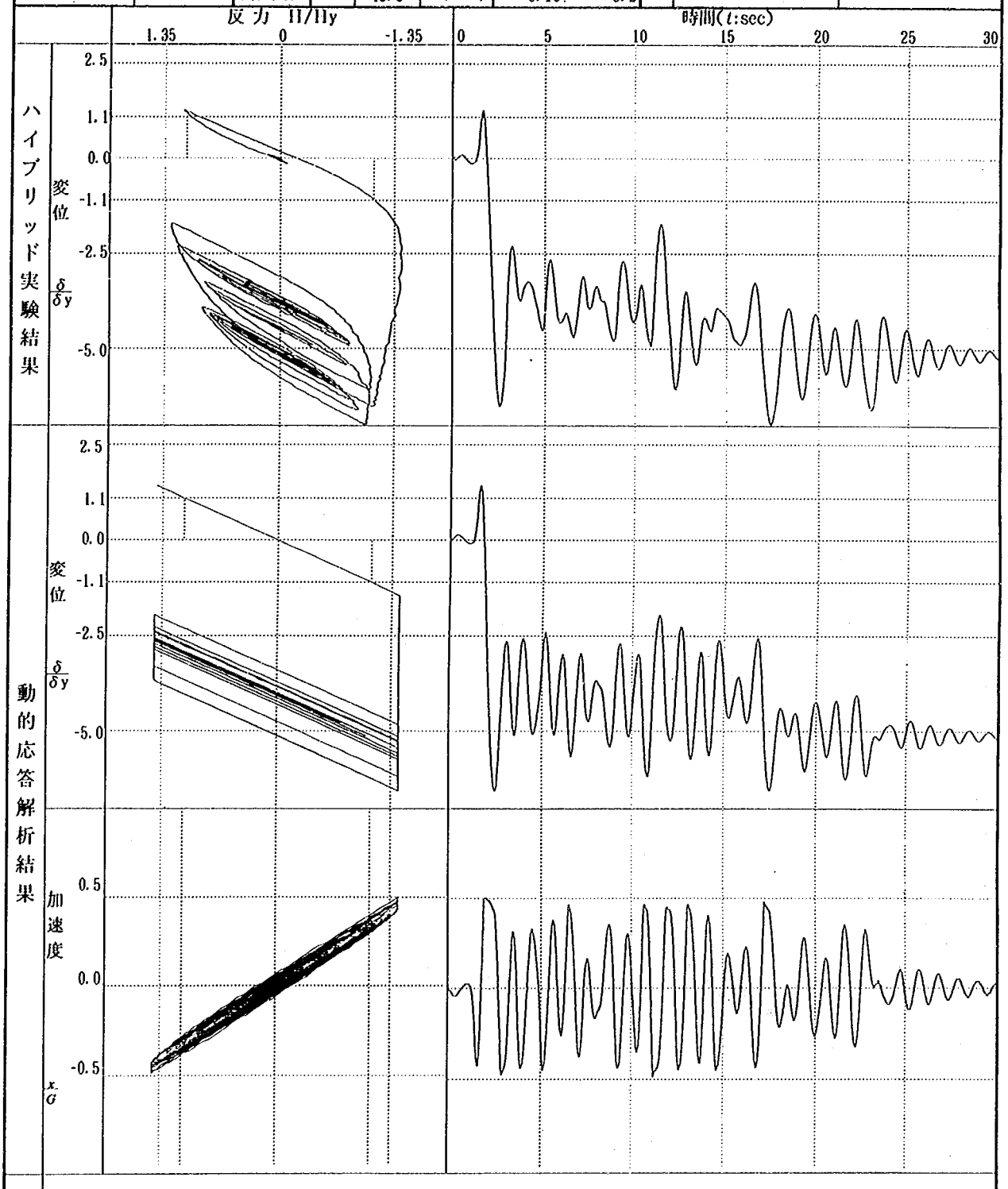


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面：No. R-05　（完全弾塑性①） 免震マニュアル標準波・I種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=540.0gal）						
質　量　M	3.127 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1314 tf	H_{max}/Hy	1.44	1.28
			H_{min}	-1314 tf	H_{min}/Hy	-1.44	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	12.1 cm	$x_{max}/\delta y$	1.43	1.26
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-55.7 cm	$x_{min}/\delta y$	-6.56	-6.98
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	488 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.50	
R_F	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-475 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.48	
R_{II}	0.34	残留変位	x_{rsd}	-43.3 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-5.10	-5.2

復元力特性

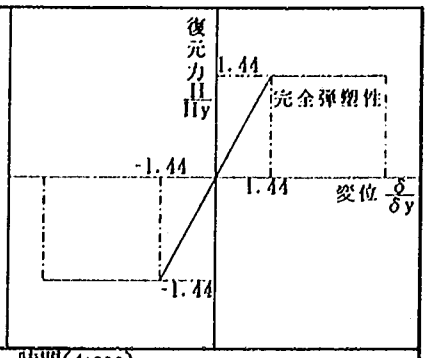


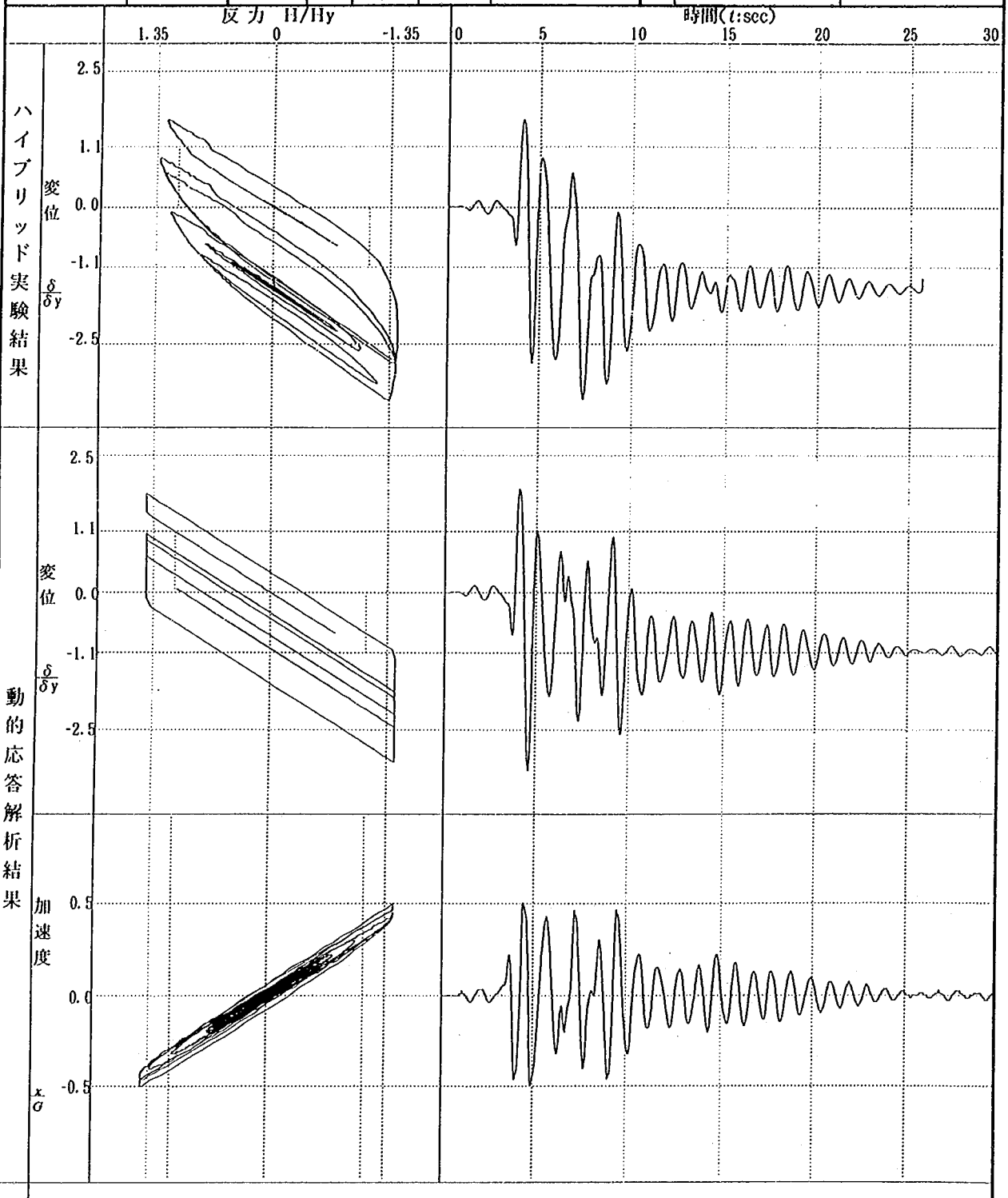


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面:No. R-10 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=818.0gal）								
					解析値		無次元数値（解析・実験値）		
質量 M	3.142 tf·s²/cm								
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	1324 tf	H_{max}/H_y	1.44	1.32
			H_{min}	-1324 tf	H_{min}/H_y	-1.44	-1.44
軸力比 N／Ny	0.152	変位	x_{max}	16.0 cm	x_{max}/δ_y	1.89	1.60
			x_{min}	-27.5 cm	x_{min}/δ_y	-3.24	-3.51
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38	加速度	$\ddot{x}_{max}$	494 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.50	
断面の補剛パラメータ $R_A(R_I)$	0.47		$\ddot{x}_{min}$	-490 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.50	
R_F	0.58						
R_H	0.34	残留変位	x_{rsd}	-9.1 cm	x_{rsd}/δ_y	-1.07	-1.5

復元力特性

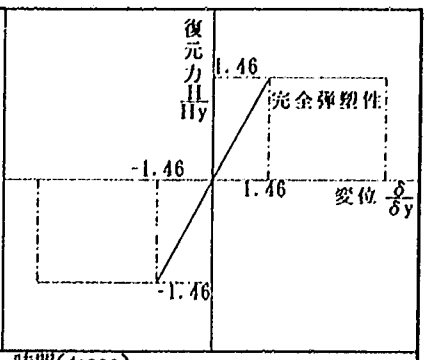


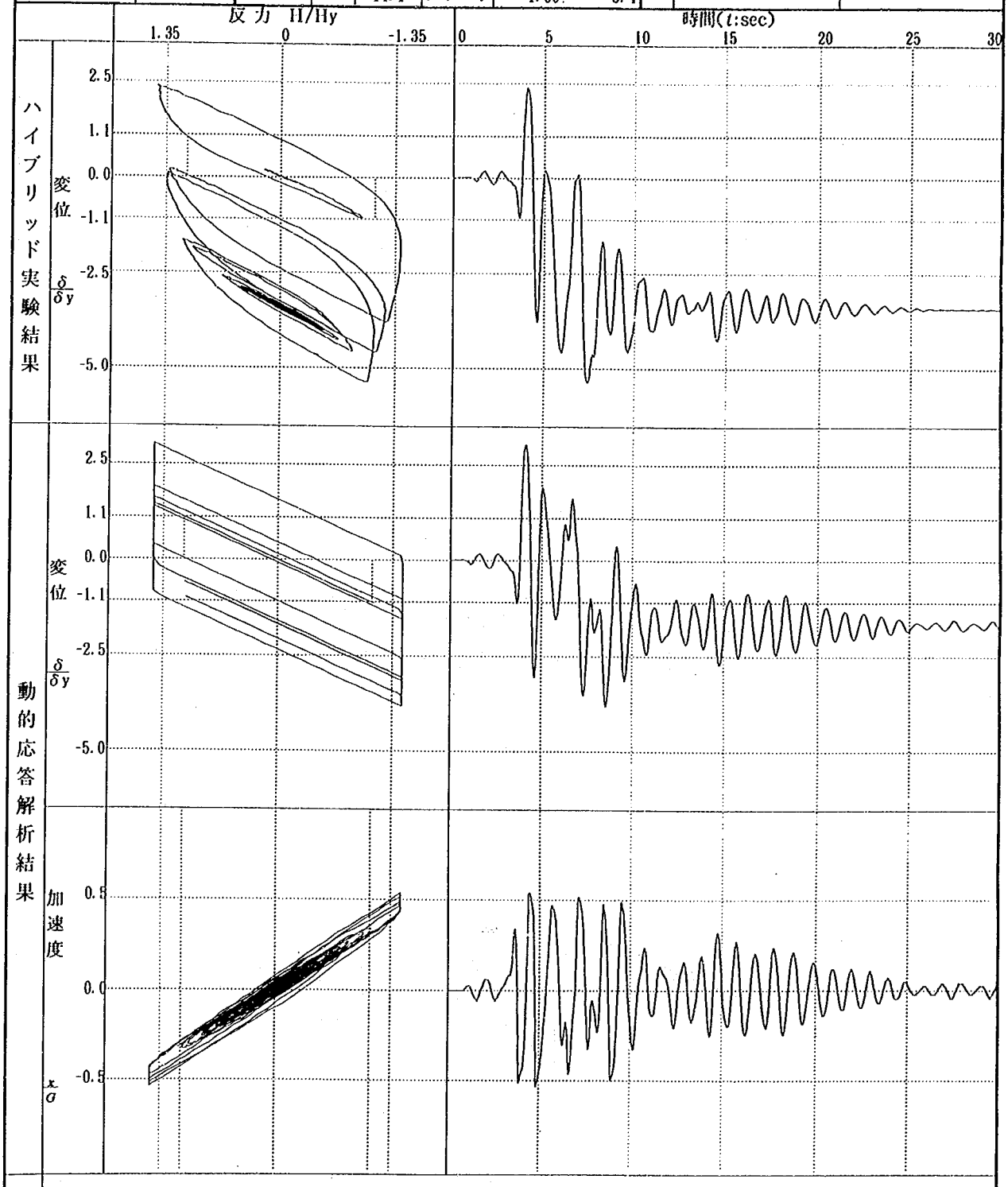


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面：No. R-11　（完全弾塑性①） 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=1227.0gal）						
質　量 M	3.096 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰 h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1325 tf	H_{max}/Hy	1.46	1.45
			H_{min}	-1325 tf	H_{min}/Hy	-1.46	-1.41
軸力比 N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	25.3 cm	$x_{max}/\delta y$	3.03	2.38
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-31.9 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.82	-5.37
断面の補剛パラメータ $R_R(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	524 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.53	
R_F	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-523 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.53	
R_H	0.34	残留変位	x_{rsd}	-14.1 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.69	-3.4

復元力特性

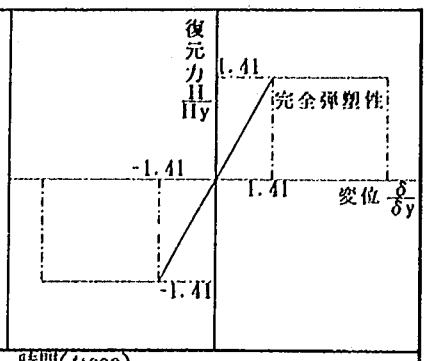


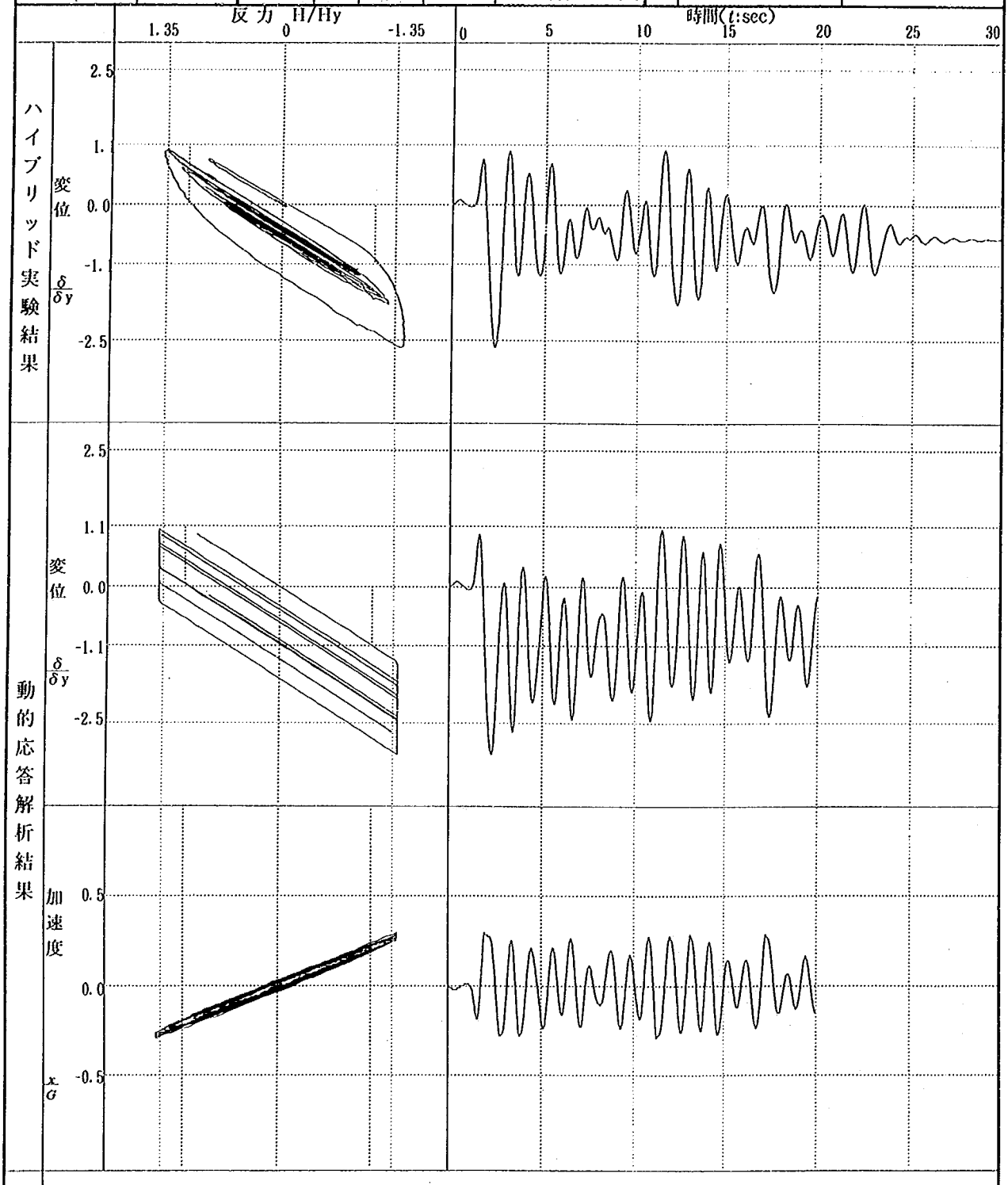


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-04　（完全弾塑性②） 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	3.110 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1281 tf	H_{max}/Hy	1.41	1.38
			H_{min}	-1281 tf	H_{min}/Hy	-1.41	-1.46
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	8.9 cm	$x_{max}/\delta y$	1.05	1.02
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-26.4 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.09	-2.64
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	439 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.45	
	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-436 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.44	
	R_F						
	0.34	残留変位	x_{rsd}	-9.1 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.06	-0.7

復元力特性

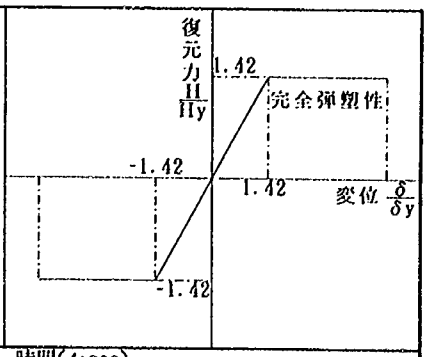


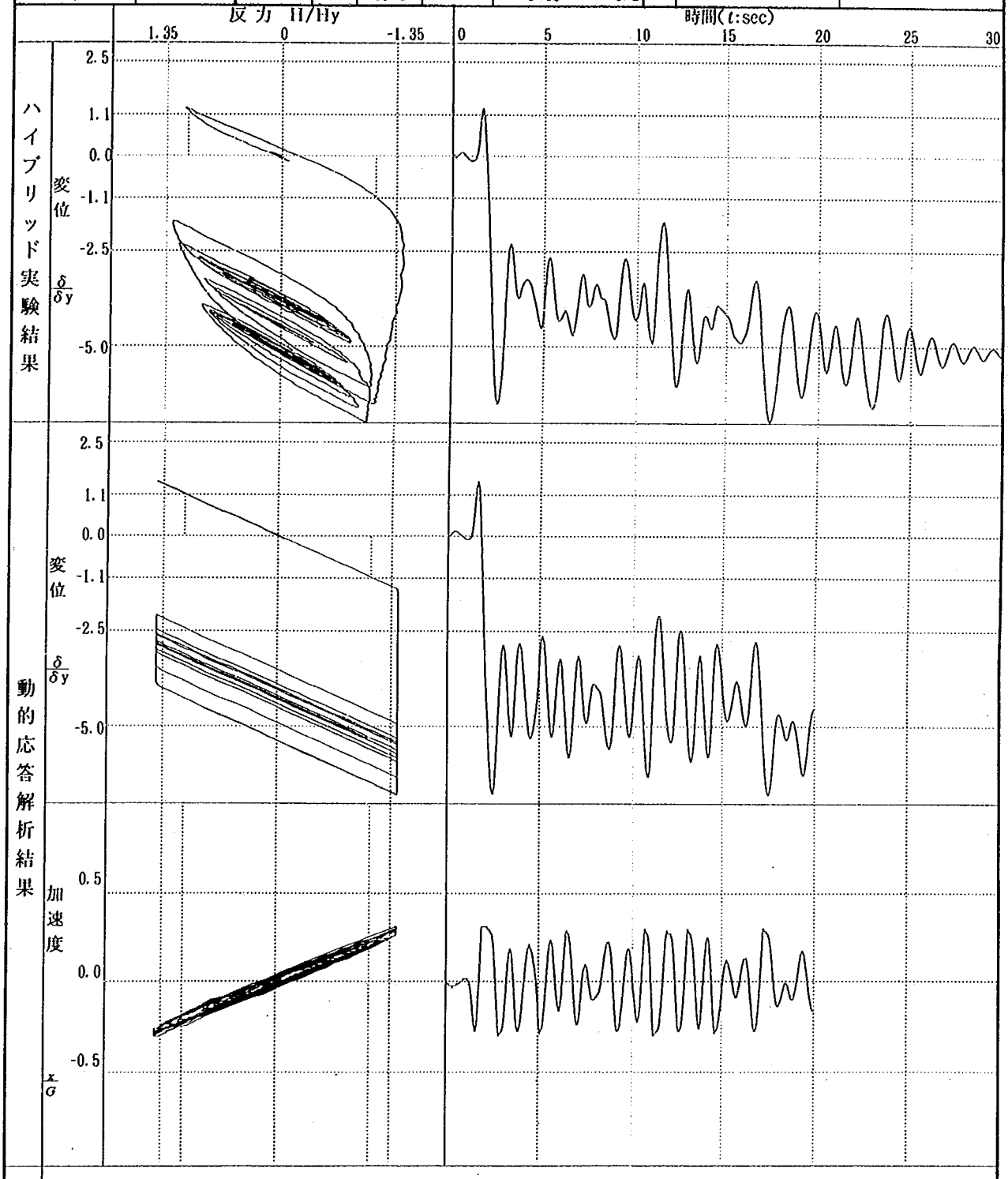


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-05　（完全弾塑性②） 免震マニュアル標準波・1種地盤（$\ddot{x}_{max}$=540.0gal）						
質　量　M	3.127 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1295 tf	H_{max}/Hy	1.42	1.28
			H_{min}	-1295 tf	H_{min}/Hy	-1.42	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	12.3 cm	$x_{max}/\delta y$	1.45	1.26
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-57.7 cm	$x_{min}/\delta y$	-6.80	-6.98
断面の補剛パラメータ　$R_R(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	466 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.47	
	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-453 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.46	
	R_F						
	0.34	残留変位	x_{rsd}	-46.4 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-5.46	-5.2

復元力特性

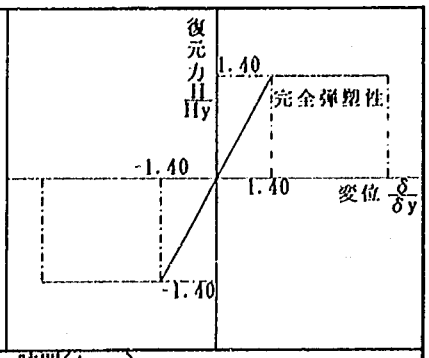


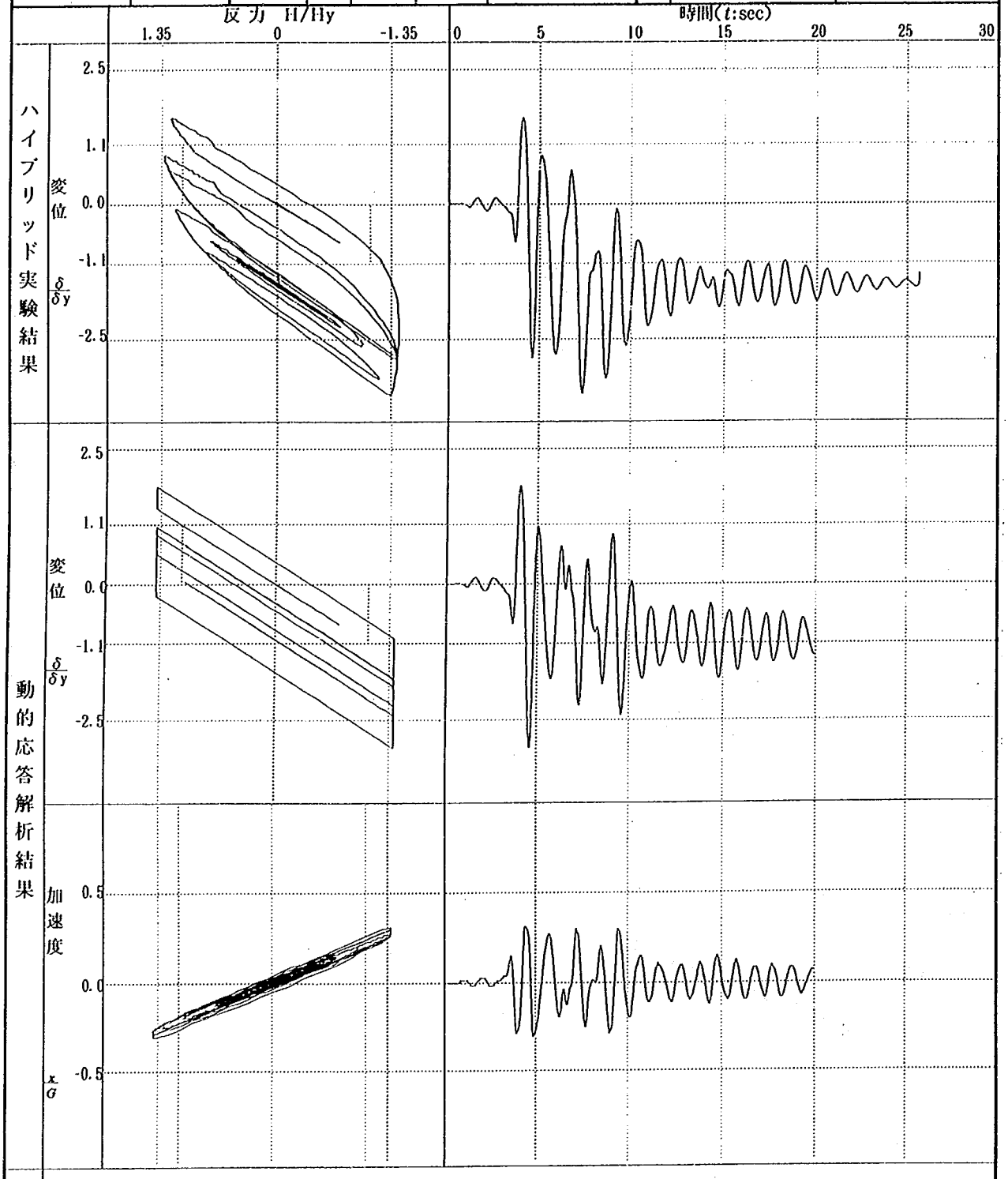


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面：No. R-10　兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{o}_{max}$=818.0gal）							
				解析値		無次元数値（解析・実験値）		
質量	M	3.142 tf·s²/cm	反力	Hmax	1288 tf	Hmax／Hy	1.40	1.32
減衰	h 形式	5 % 剛性比例		Hmin	-1288 tf	Hmin／Hy	-1.40	-1.44
軸力比	N／Ny	0.152	変位	xmax	15.3 cm	xmax／δy	1.81	1.60
細長比	λ	0.38		xmin	-25.6 cm	xmin／δy	-3.01	-3.51
断面の補剛パラメータ	$R_k(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}$ max	469 gal	$\ddot{x}$ max／G	0.48	
	R_F	0.58		$\ddot{x}$ min	-468 gal	$\ddot{x}$ min／G	-0.48	
	R_{II}	0.34	残留変位	xrsd	-8.5 cm	xrsd／δy	-1.00	-1.5

復元力特性

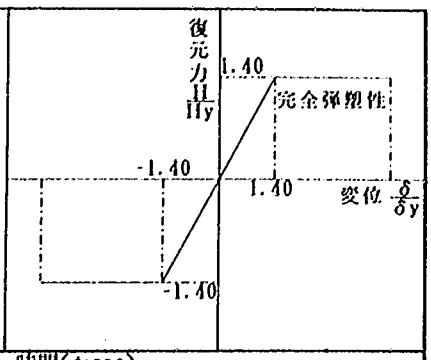


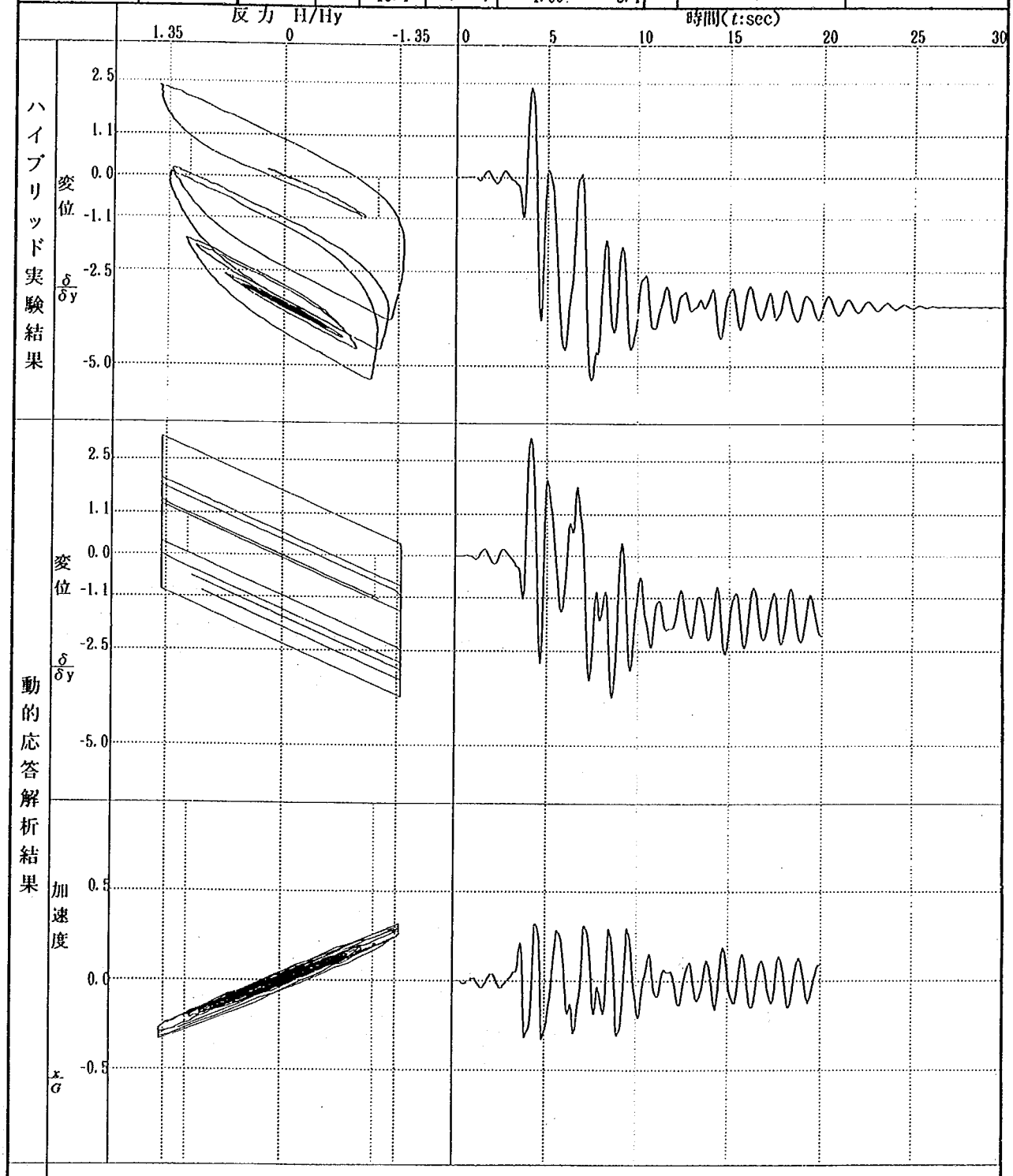


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-11　兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{O}_{max}$=1227.0gal）								
				解析値		無次元数値（解析・実験値）		
質量	M	3.096 tf·s²/cm	反力	H_{max}	1267 tf	H_{max}/Hy	1.40	1.45
減衰	h 形式	5 % 剛性比例		H_{min}	-1267 tf	H_{min}/Hy	-1.40	-1.41
軸力比	N／Ny	0.152	変位	x_{max}	26.0 cm	$x_{max}/\delta y$	3.11	2.38
細長比	$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-31.2 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.73	-5.37
断面の補剛パラメータ	$R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	488 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.50	
	R_F	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-485 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.49	
	R_H	0.34	残留変位	x_{rsd}	-13.4 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.60	-3.4

復元力特性

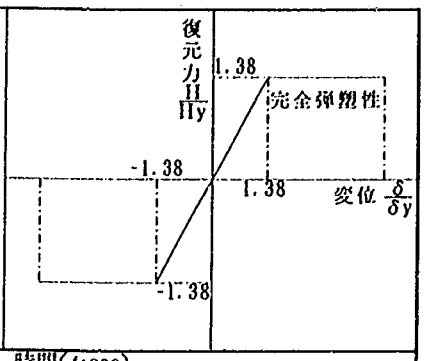


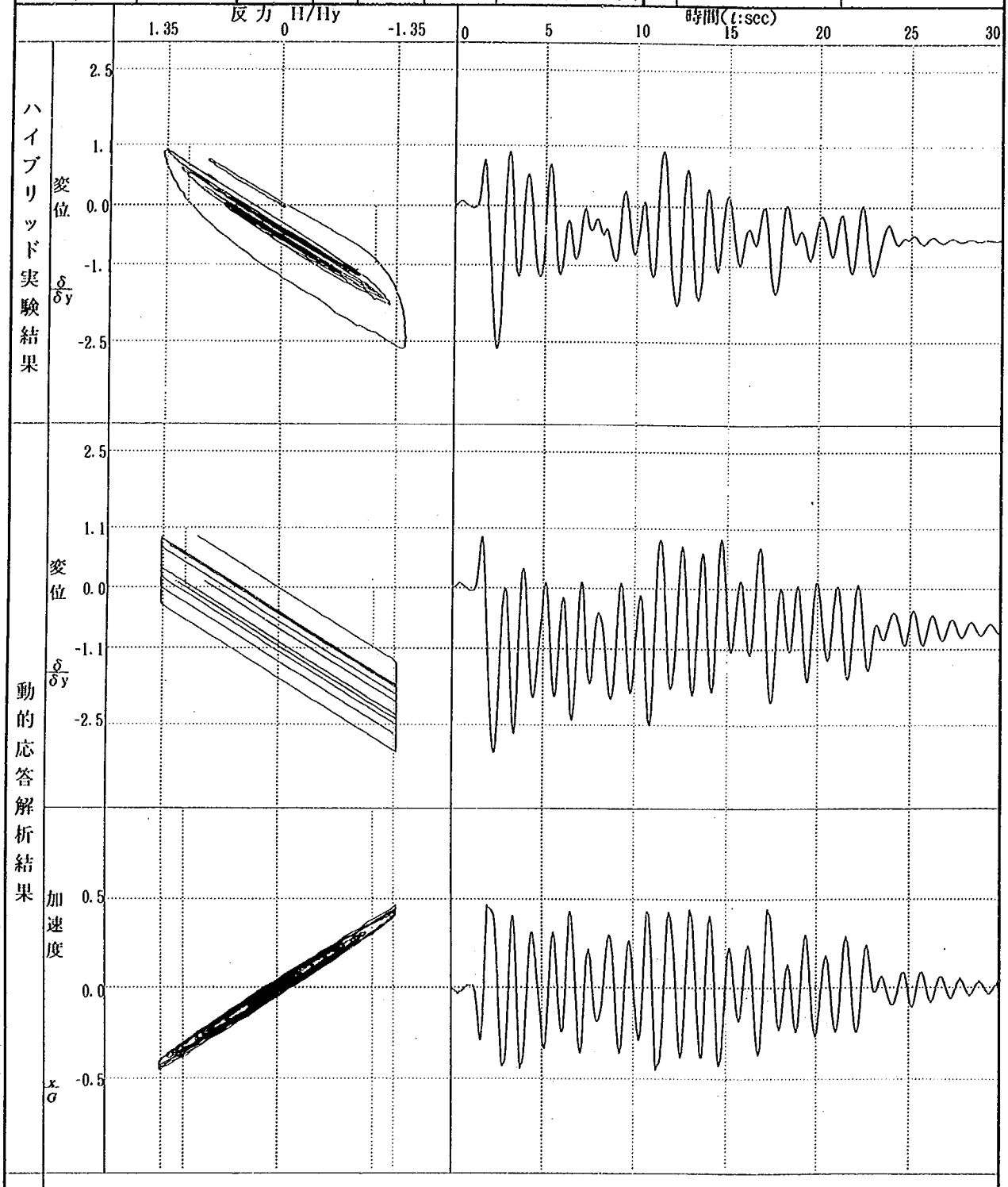


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面：No. R-04　（完全弾塑性③） 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	3.110 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	Hmax	1256 tf	Hmax／Hy	1.38	1.38
			Hmin	-1256 tf	Hmin／Hy	-1.38	-1.46
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	xmax	8.0 cm	xmax／δy	0.93	1.02
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		xmin	-25.7 cm	xmin／δy	-3.00	-2.64
断面の補剛パラメータ　$R_S(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}$ max	447 gal	$\ddot{x}$ max／G	0.46	
	R_F 0.58		$\ddot{x}$ min	-445 gal	$\ddot{x}$ min／G	-0.45	
	R_H 0.34	残留変位	xrsd	-6.4 cm	xrsd／δy	-0.75	-0.7

復元力特性

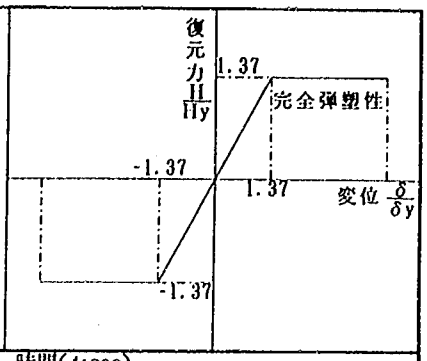


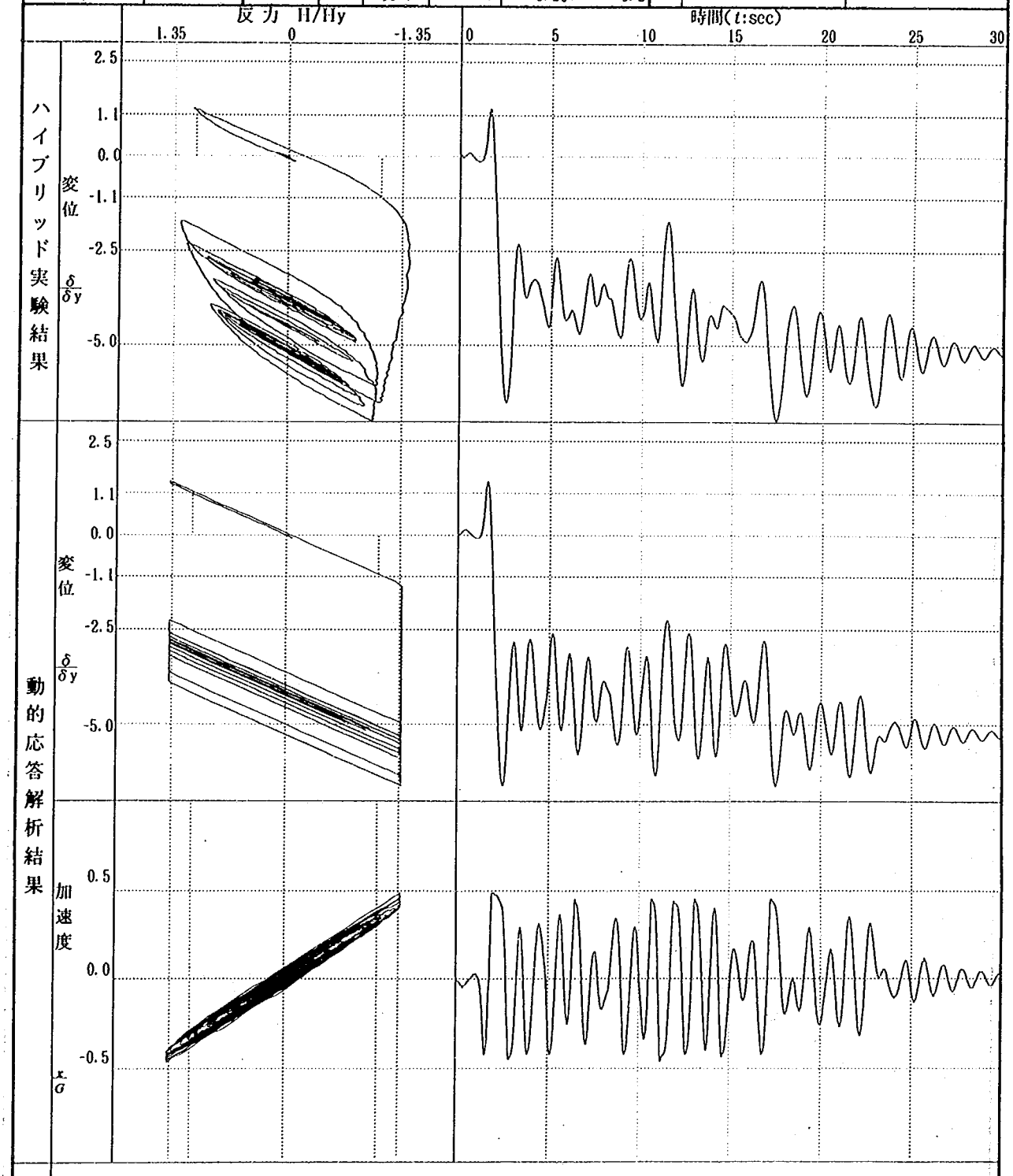


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-05　（完全弾塑性③） 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=540.0gal）						
質　量　M	3.127 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h　形式	5 %　剛性比例	反　力	H_{max}	1256 tf	H_{max}/Hy	1.37	1.28
			H_{min}	-1256 tf	H_{min}/Hy	-1.37	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	12.0 cm	$x_{max}/\delta y$	1.42	1.26
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-56.2 cm	$x_{min}/\delta y$	-6.63	-6.98
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	469 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.48	
	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-456 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.47	
	R_F						
	0.34	残留変位	x_{rsd}	-44.7 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-5.26	-5.2

復元力特性

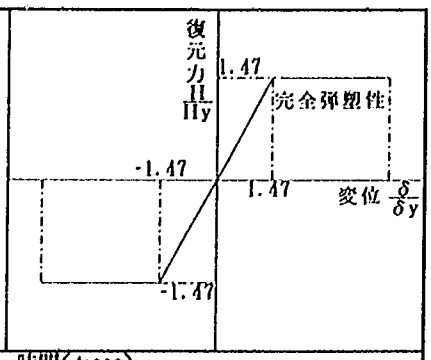


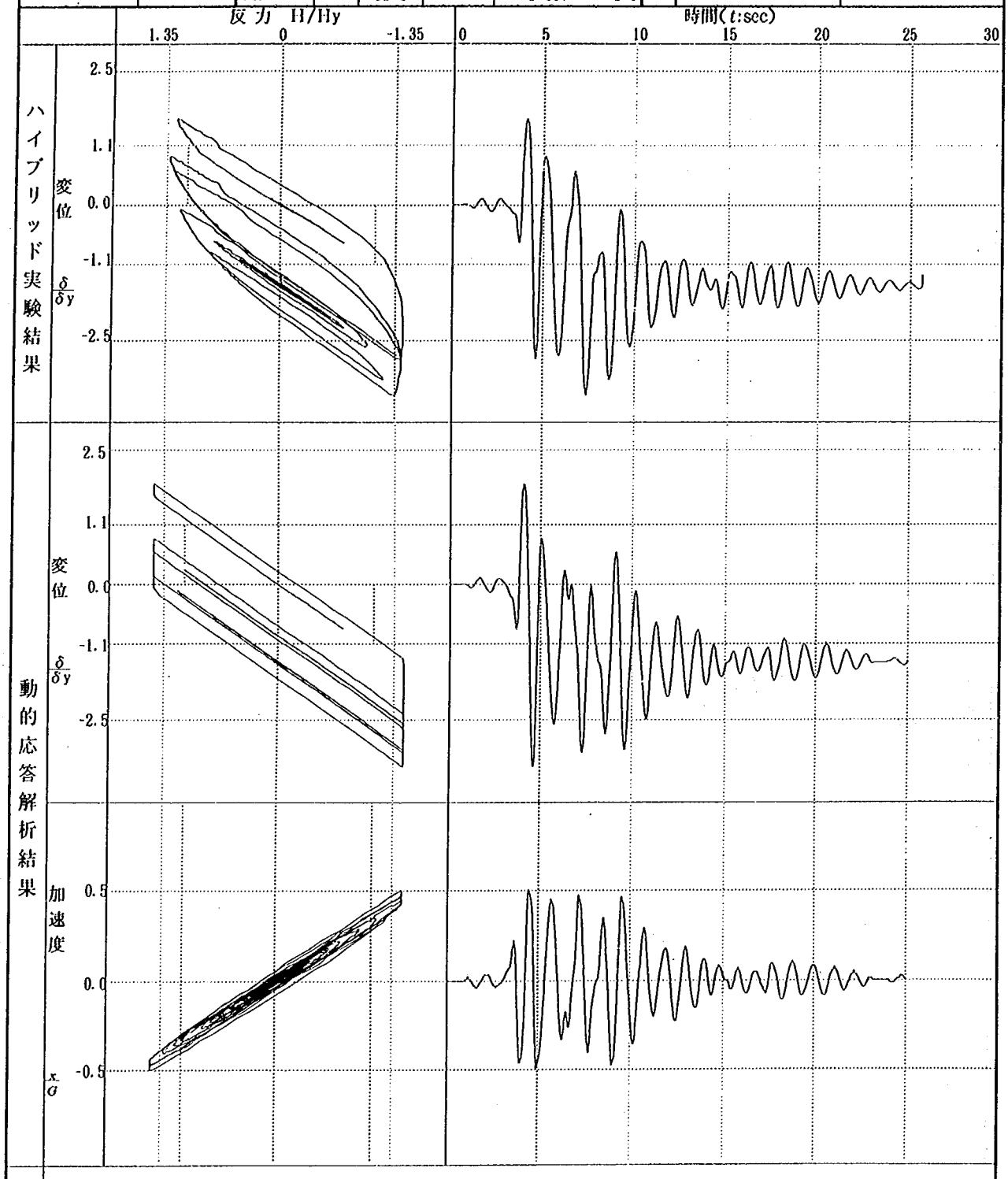


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-10　（完全弾塑性③） 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{y}_{max}$=818.0gal）						
質量 M	3.142 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h	5 %	反力	Hmax	1350 tf	Hmax／Hy	1.47	1.32
形式	剛性比例		Hmin	-1350 tf	Hmin／Hy	-1.47	-1.44
軸力比 N／Ny	0.152	変位	xmax	15.8 cm	xmax／δy	1.86	1.60
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		xmin	-28.6 cm	xmin／δy	-3.37	-3.51
断面の補剛パラメータ $R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	499 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.51	
	R_F 0.58		$\ddot{x}_{min}$	-487 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.50	
	R_H 0.34	残留変位	xrsd	-12.1 cm	xrsd／δy	-1.43	-1.5

復元力特性

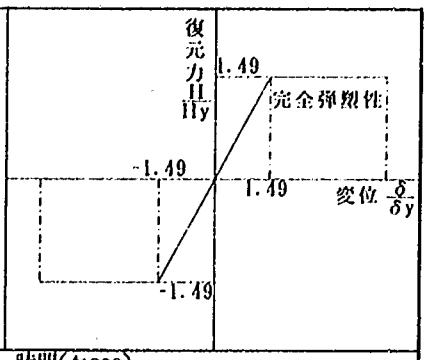


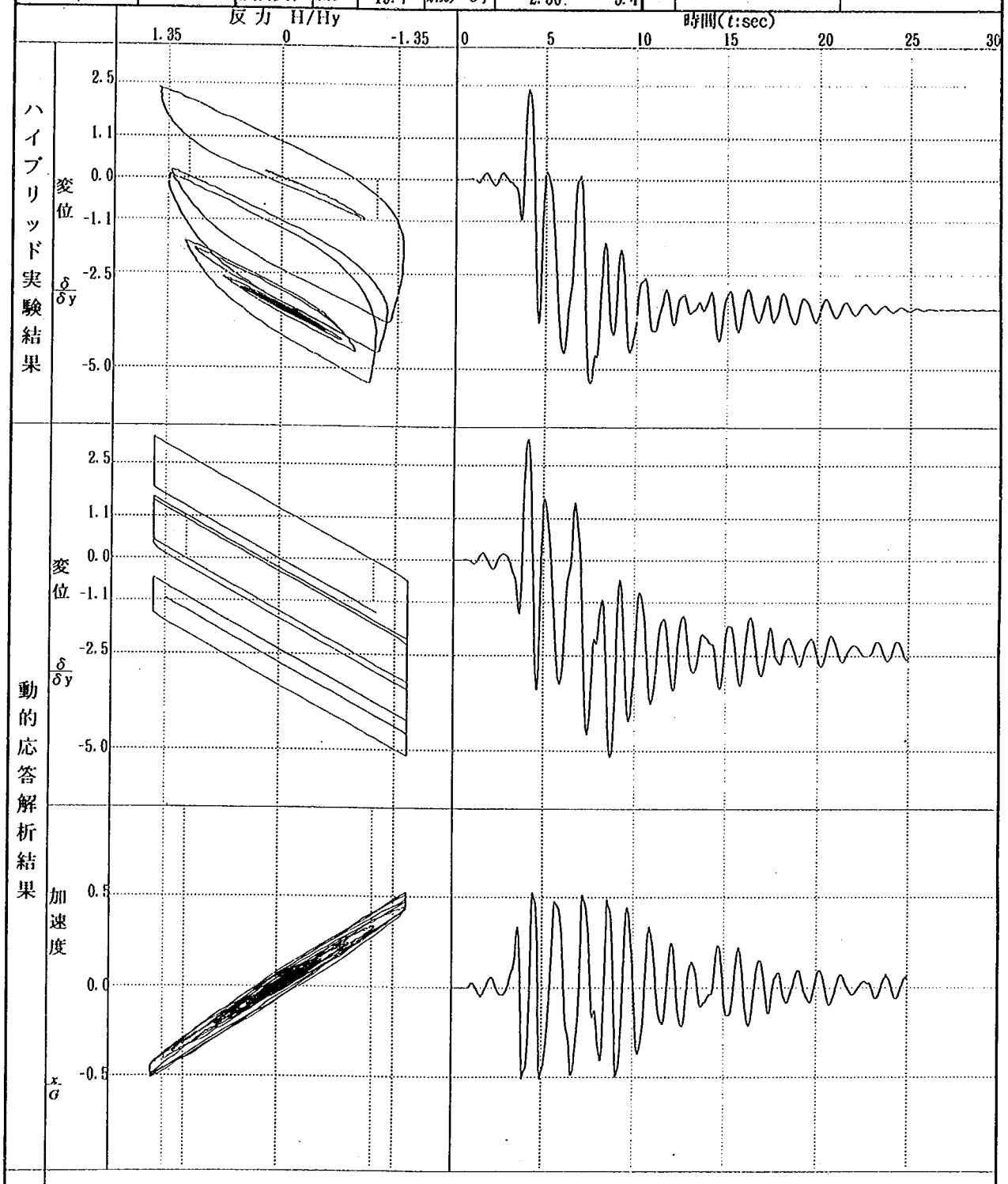


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-11 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=1227.0gal）						(完全弾塑性③)
質量	M	3.096 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減衰	h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	1349 tf	H_{max}/H_y	1.49 1.45
				H_{min}	-1349 tf	H_{min}/H_y	-1.49 -1.41
軸力比	N／Ny	0.152	変位	x_{max}	26.6 cm	x_{max}/δ_y	3.18 2.38
細長比	$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-43.2 cm	x_{min}/δ_y	-5.17 -5.37
断面の補剛パラメータ	$R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	523 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.53
	R_F	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-500 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.51
	R_H	0.34	残留変位	x_{rsd}	-19.7 cm	x_{rsd}/δ_y	-2.36 -3.4

復元力特性





備考

2.4.2 劣化型バイリニアモデル

動的応答解析に用いる復元力特性を緩勾配劣化型バイリニアモデルとし、Ha = α・Hy (α = 1.44)、$K_2 = \alpha_2 \cdot K_1$ (α_2 = -0.045)とした。

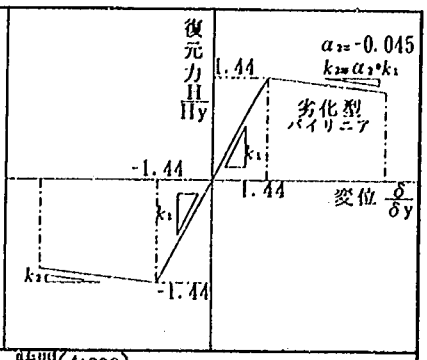
解析結果を表-2.4.2 にまとめる。

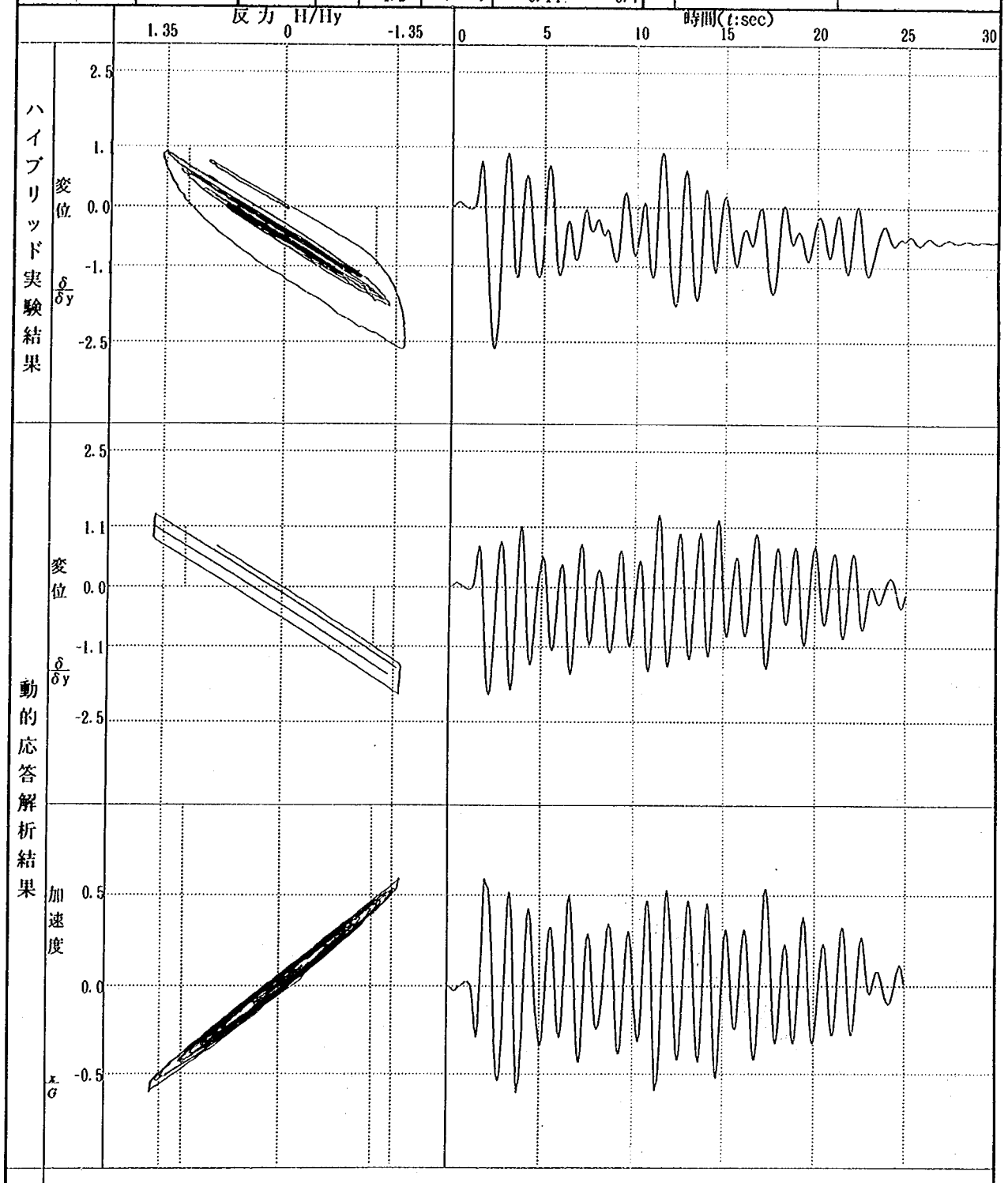
表-2.4.2 解析結果：矩形断面・緩勾配劣化型バイリニアモデル

		反力		変位		残留変位
		*H*max／*H*y	*H* min／*H*y	*x*max／δy	*x*min／δy	*x*rsd／δy
矩形断面:R-04 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.46	-1.44	1.33	-1.99	-0.14
	実験値	1.38	-1.46	1.02	-2.64	-0.63
矩形断面:R-05 土研提案L2・Ⅰ種地盤 540.0gal	解析値	1.58	-1.44	1.12	-5.61	-4.38
	実験値	1.28	-1.44	1.26	-6.98	-5.10
矩形断面:R-10 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.50	-1.44	1.40	-2.89	-1.09
	実験値	1.32	-1.44	1.60	-3.51	-1.48
矩形断面:R-11 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 1227.0gal	解析値	1.51	-1.47	2.21	-3.04	-1.40
	実験値	1.45	-1.41	2.38	-5.37	-3.42

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面:No. R-04　（劣化型バイリニア） 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	3.110 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1331 tf	H_{max}/Hy	1.46	1.38
			H_{min}	-13007 tf	H_{min}/Hy	-1.44	-1.46
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	11.4 cm	$x_{max}/\delta y$	1.33	1.02
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-17.0 cm	$x_{min}/\delta y$	-1.99	-2.64
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$ R_F R_H	0.47 0.58 0.34	加速度	$\ddot{x}_{max}$	572 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.58	
			$\ddot{x}_{min}$	-583 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.59	
		残留変位	x_{rsd}	-1.2 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.14	-0.7

復元力特性

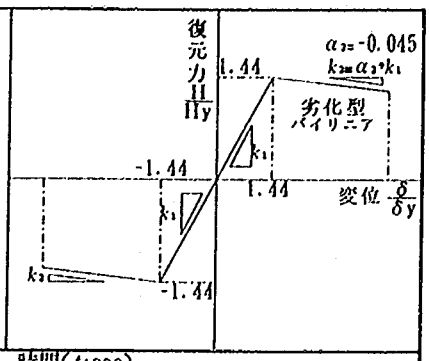


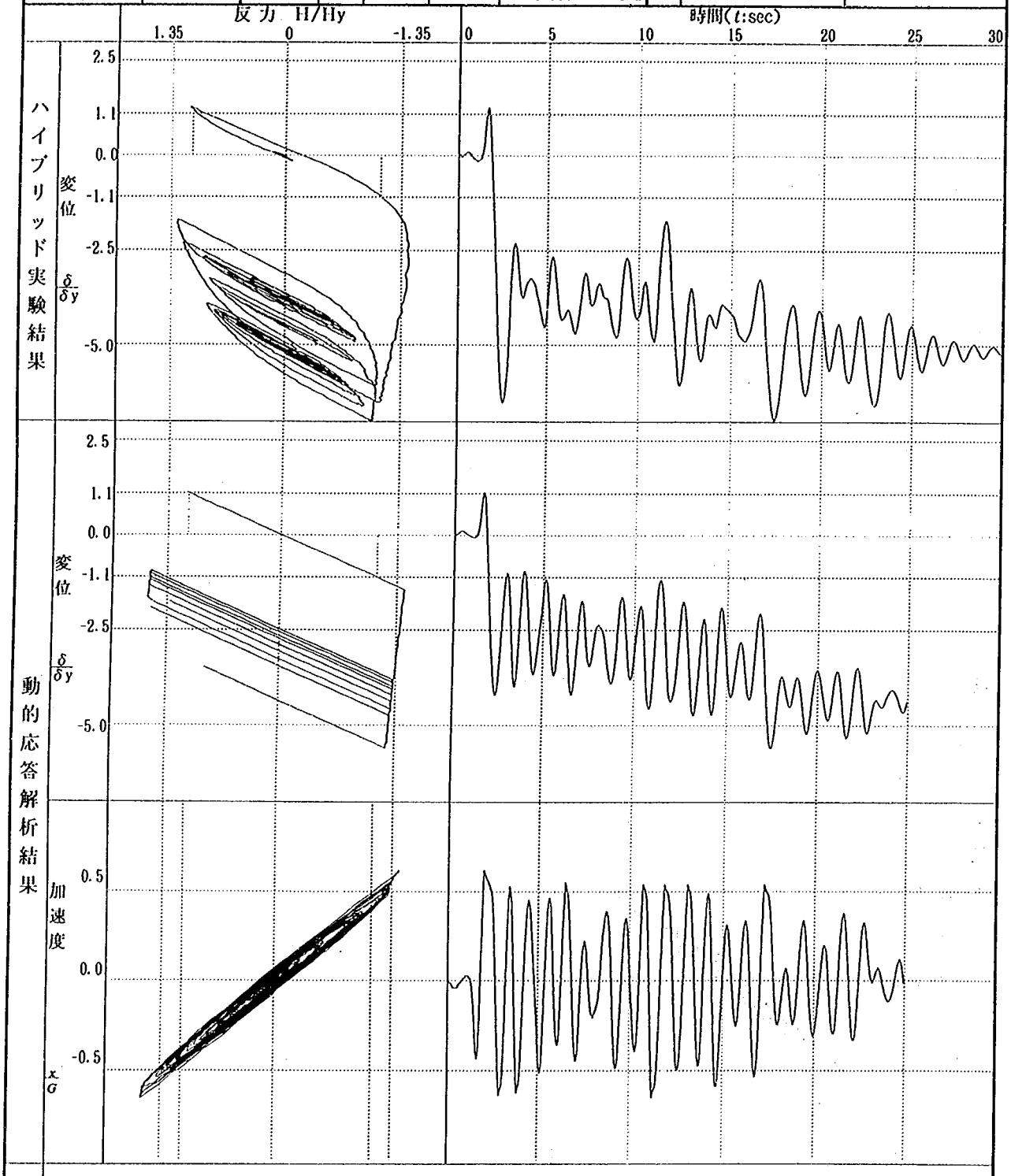


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-05　（劣化型バイリニア） 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=540.0gal）						
質　量　M	3.127 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1443 tf	H_{max}/Hy	1.58	1.28
			H_{min}	-1315 tf	H_{min}/Hy	-1.44	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	9.5 cm	$x_{max}/\delta y$	1.12	1.26
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-47.6 cm	$x_{min}/\delta y$	-5.61	-6.98
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$ R_F R_H	0.47 0.58 0.34	加速度	$\ddot{x}_{max}$	608 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.62	
			$\ddot{x}_{min}$	-637 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.65	
		残留変位	x_{rsd}	-37.2 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-4.38	-5.2

復元力特性

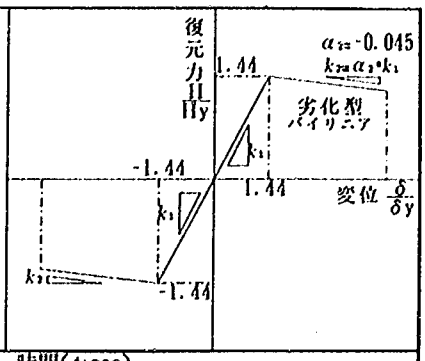


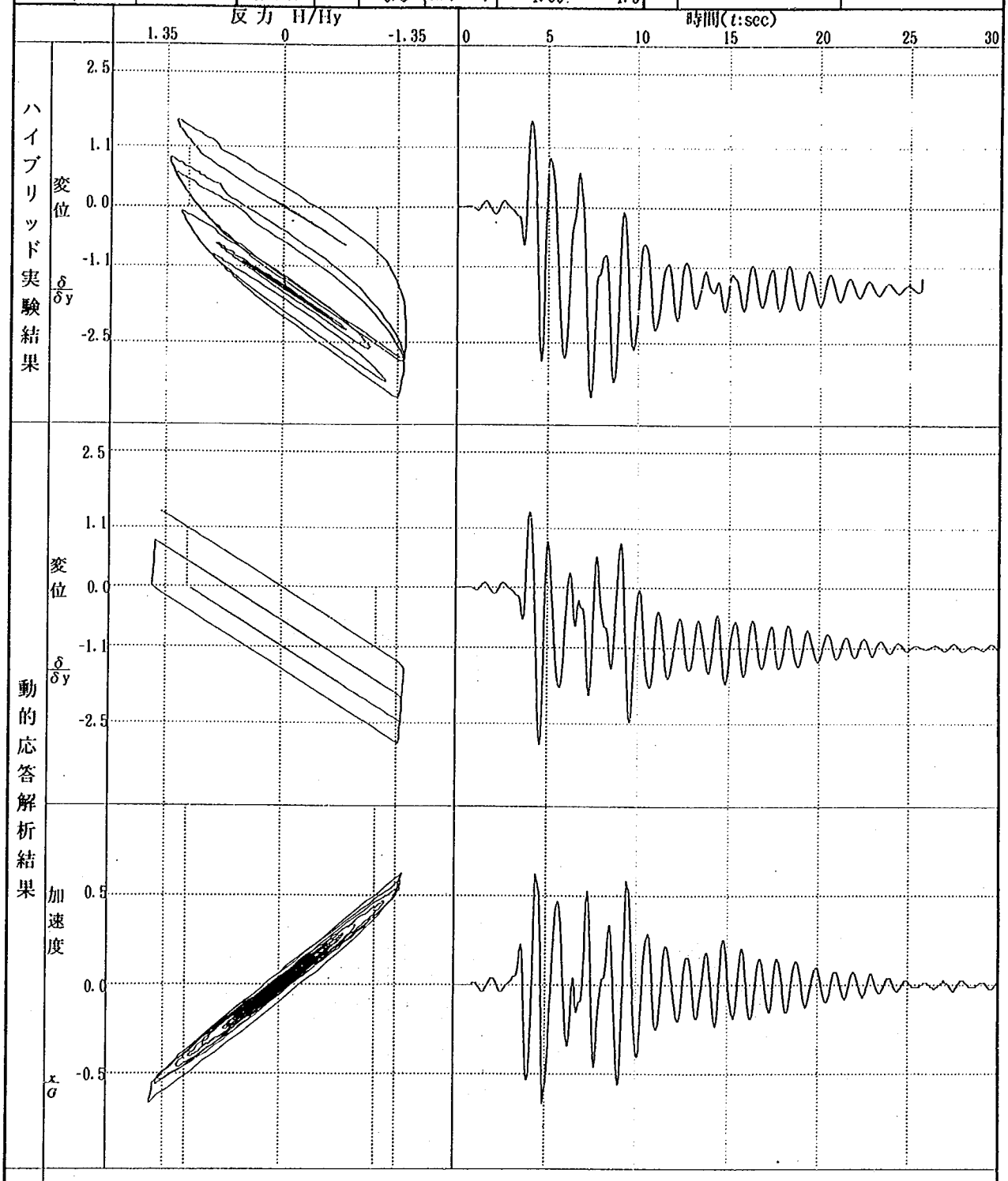


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面：No. R-10　兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=818.0gal）　（劣化型バイリニア）						
質量 M	3.142 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	1381 tf	H_{max}/Hy	1.50	1.32
			H_{min}	-1320 tf	H_{min}/Hy	-1.44	-1.44
軸力比 N／Ny	0.152	変位	x_{max}	11.8 cm	$x_{max}/\delta y$	1.40	1.60
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-24.5 cm	$x_{min}/\delta y$	-2.89	-3.51
断面の $R_R(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	611 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.62	
補剛パ R_F	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-644 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.66	
ラメータ R_H	0.34	残留変位	x_{rsd}	-9.3 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.09	-1.5

復元力特性

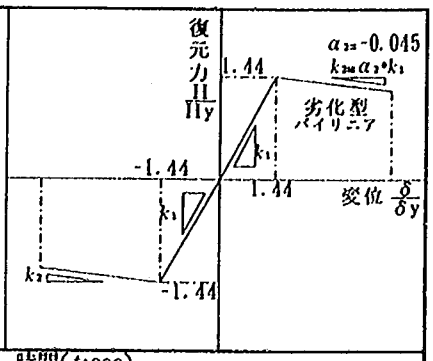


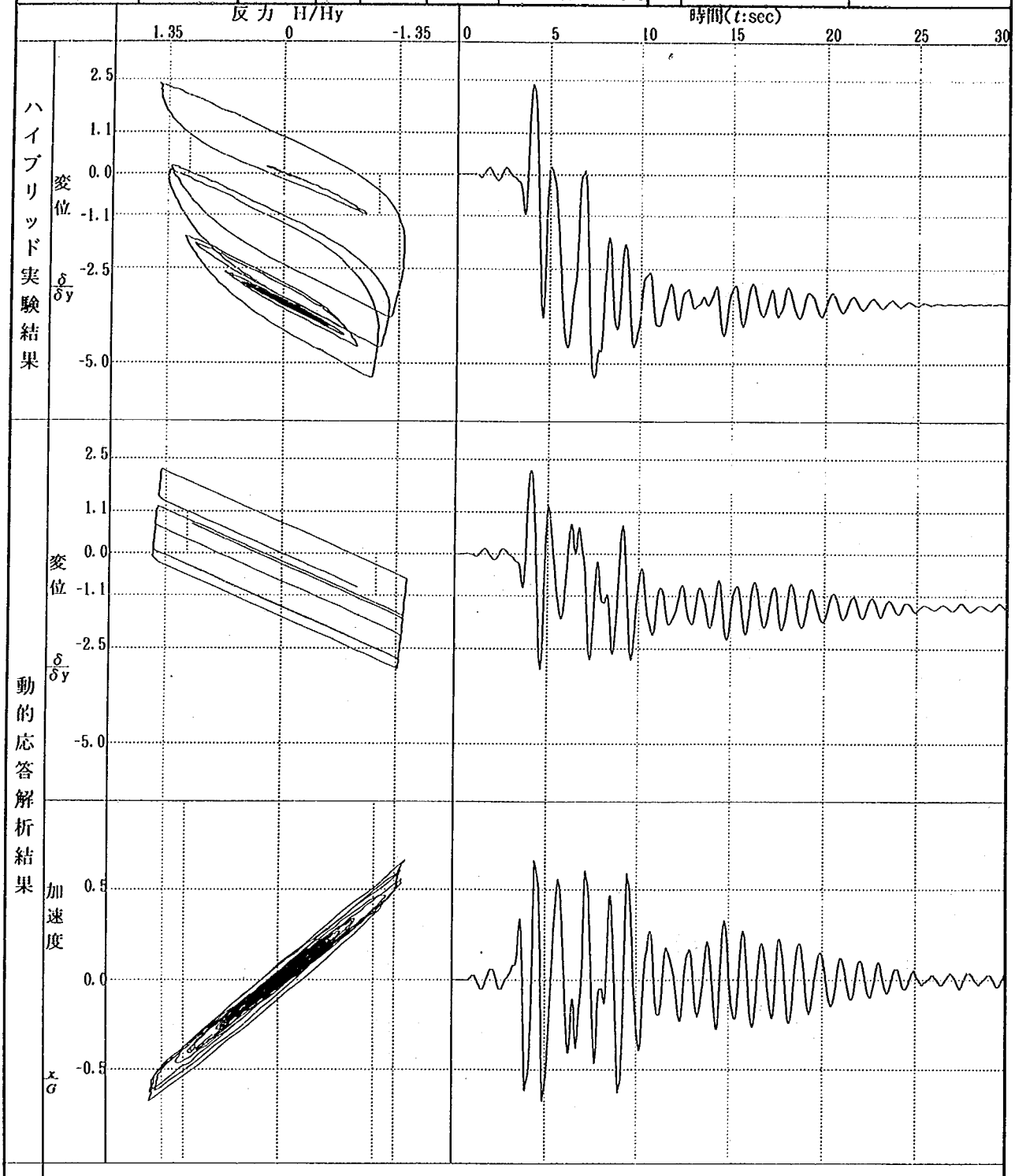


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面:No. R-11　兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{O}_{max}$=1227.0gal）						（劣化型バイリニア）
質　量　M	3.096 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h	5 %	反　力	Hmax	1363 tf	Hmax／Hy	1.51	1.45
減　衰　形式	剛性比例	反　力	Hmin	-1332 tf	Hmin／Hy	-1.47	-1.41
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	xmax	18.5 cm	xmax／δy	2.21	2.38
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38	変　位	xmin	-25.4 cm	xmin／δy	-3.04	-5.37
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}$ max	652gal	$\ddot{x}$ max／G	0.66	
断面の補剛パラメータ　R_F	0.58	加速度	$\ddot{x}$ min	-660gal	$\ddot{x}$ min／G	-0.67	
断面の補剛パラメータ　R_H	0.34	残留変位	xrsd	-11.7 cm	xrsd／δy	-1.40	-3.4

復元力特性





備考

2.4.3 トリリニアモデル

動的応答解析に用いる復元力特性を劣化型トリリニアモデルとし、次の３ケースを設定し解析した。

ケース①：Ha=α・Hy（α= 2.61）、$K_2=\alpha_2\cdot K_1$（α_2= 0.226）、$K_3=\alpha_3\cdot K_1$（α_3= -0.072）
ケース②：Ha=α・Hy（α= 2.18）、$K_2=\alpha_2\cdot K_1$（α_2= 0.418）、$K_3=\alpha_3\cdot K_1$（α_3= -0.111）
ケース③：Ha=α・Hy（α= 2.43）、$K_2=\alpha_2\cdot K_1$（α_2= 0.443）、$K_3=\alpha_3\cdot K_1$（α_3= -0.153）

解析結果を表-2.4.3(1)、(2)および(3) にまとめる。

表-2.4.3(1) 解析結果：矩形断面・劣化型トリリニアモデル①

ケース ①		反力		変位		残留変位
		Hmax／Hy	H min／Hy	xmax／δy	xmin／δy	xrsd／δy
矩形断面:R-04 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.34	-1.63	1.04	-2.97	-1.00
	実験値	1.38	-1.46	1.02	-2.64	-0.63
矩形断面:R-05 土研提案L2・Ⅰ種地盤 540.0gal	解析値	1.48	-1.63	1.49	----	----
	実験値	1.28	-1.44	1.26	-6.98	-5.10
矩形断面:R-10 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.57	-1.62	1.86	-3.04	-0.97
	実験値	1.32	-1.44	1.60	-3.51	-1.48
矩形断面:R-11 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 1227.0gal	解析値	1.82	-1.69	2.92	-6.22	-5.15
	実験値	1.45	-1.41	2.38	-5.37	-3.42

表-2.4.3(2) 解析結果：矩形断面・劣化型トリリニアモデル②

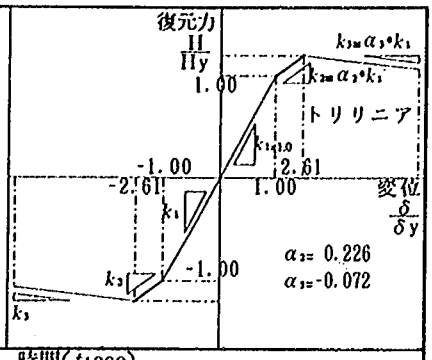
ケース ②		反力		変位		残留変位
		Hmax／Hy	H min／Hy	xmax／δy	xmin／δy	xrsd／δy
矩形断面:R-04 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.31	-1.49	0.95	-3.09	-1.46
	実験値	1.38	-1.46	1.02	-2.64	-0.63
矩形断面:R-05 土研提案L2・Ⅰ種地盤 540.0gal	解析値	1.47	-1.49	1.45	----	----
	実験値	1.28	-1.44	1.26	-6.98	-5.10
矩形断面:R-10 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.49	-1.49	1.86	-3.30	-1.60
	実験値	1.32	-1.44	1.60	-3.51	-1.48
矩形断面:R-11 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 1227.0gal	解析値	1.60	-1.57	2.97	-4.19	-2.20
	実験値	1.45	-1.41	2.38	-5.37	-3.42

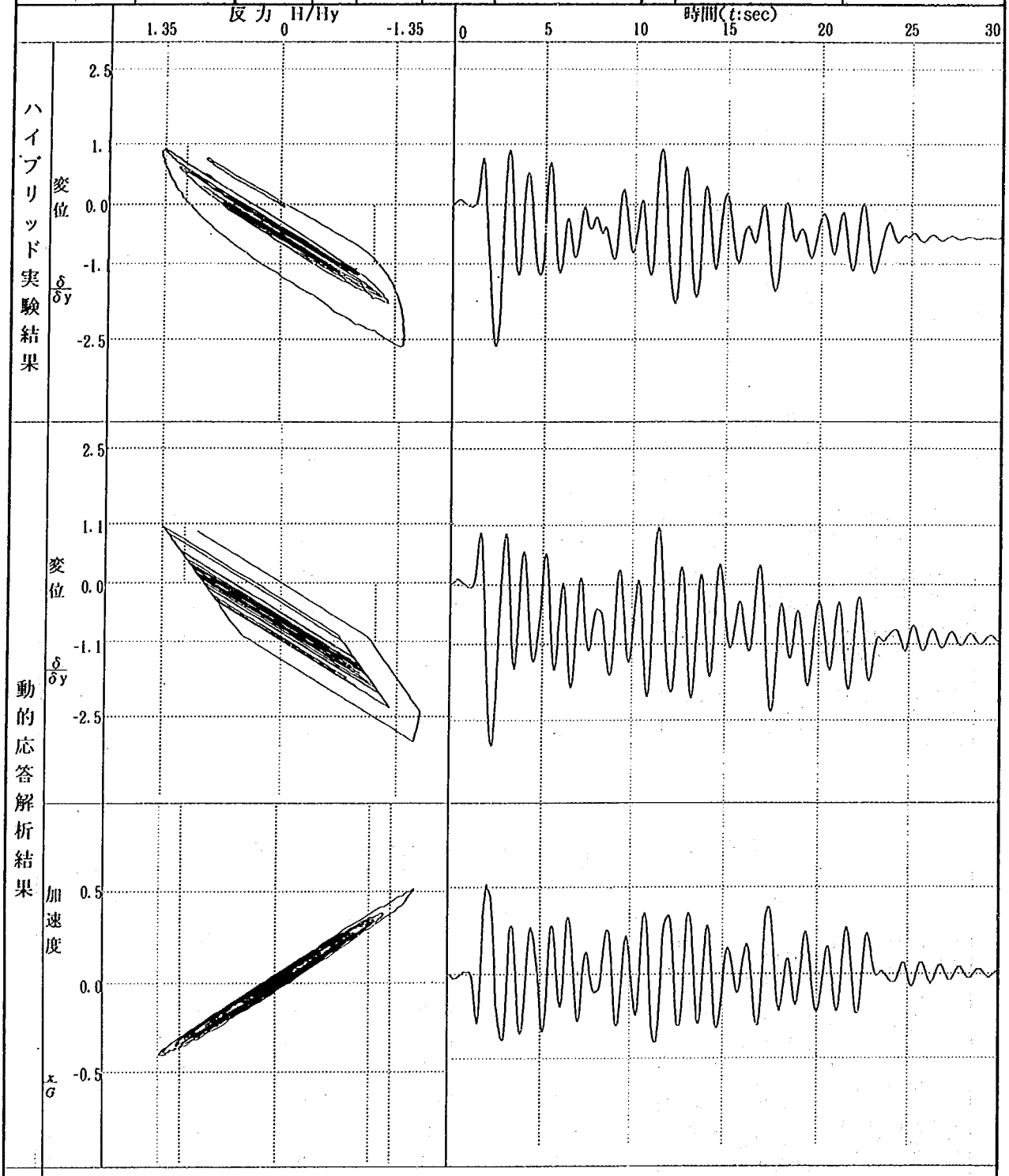
表-2.4.3(3) 解析結果：矩形断面・劣化型トリリニアモデル③

ケース ③		反力		変位		残留変位
		Hmax／Hy	H min／Hy	xmax／δy	xmin／δy	xrsd／δy
矩形断面:R-04 土研提案L2・Ⅰ種地盤 360.0gal	解析値	1.15	-1.36	0.95	-3.40	-1.58
	実験値	1.38	-1.46	1.02	-2.64	-0.63
矩形断面:R-05 土研提案L2・Ⅰ種地盤 540.0gal	解析値	1.30	-1.36	1.46	-9.24	-8.40
	実験値	1.28	-1.44	1.26	-6.98	-5.10
矩形断面:R-10 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.21	-1.37	1.91	-2.67	-0.12
	実験値	1.32	-1.44	1.60	-3.51	-1.48
矩形断面:R-11 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 1227.0gal	解析値	1.36	-1.39	3.05	-3.60	-1.33
	実験値	1.45	-1.41	2.38	-5.37	-3.42

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-04　（トリリニア①） 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=360.0gal）						
質　量　M	3.110 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1222 tf	H_{max}/Hy	1.34	1.38
			H_{min}	-1485 tf	H_{min}/Hy	-1.63	-1.46
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	8.9 cm	$x_{max}/\delta y$	1.04	1.02
			x_{min}	-25.4 cm	$x_{min}/\delta y$	-2.97	-2.64
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38	加速度	$\ddot{x}_{max}$	505 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.52	
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.47		$\ddot{x}_{min}$	-396 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.40	
R_F	0.58	残留変位	x_{rsd}	-18.5 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.00	-0.7
R_H	0.34						

復元力特性

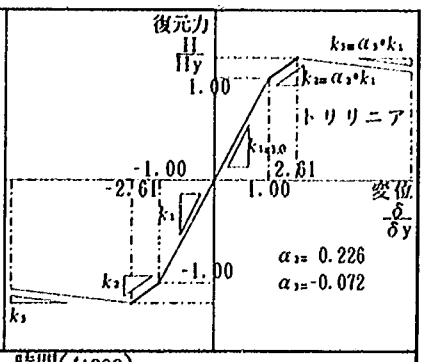


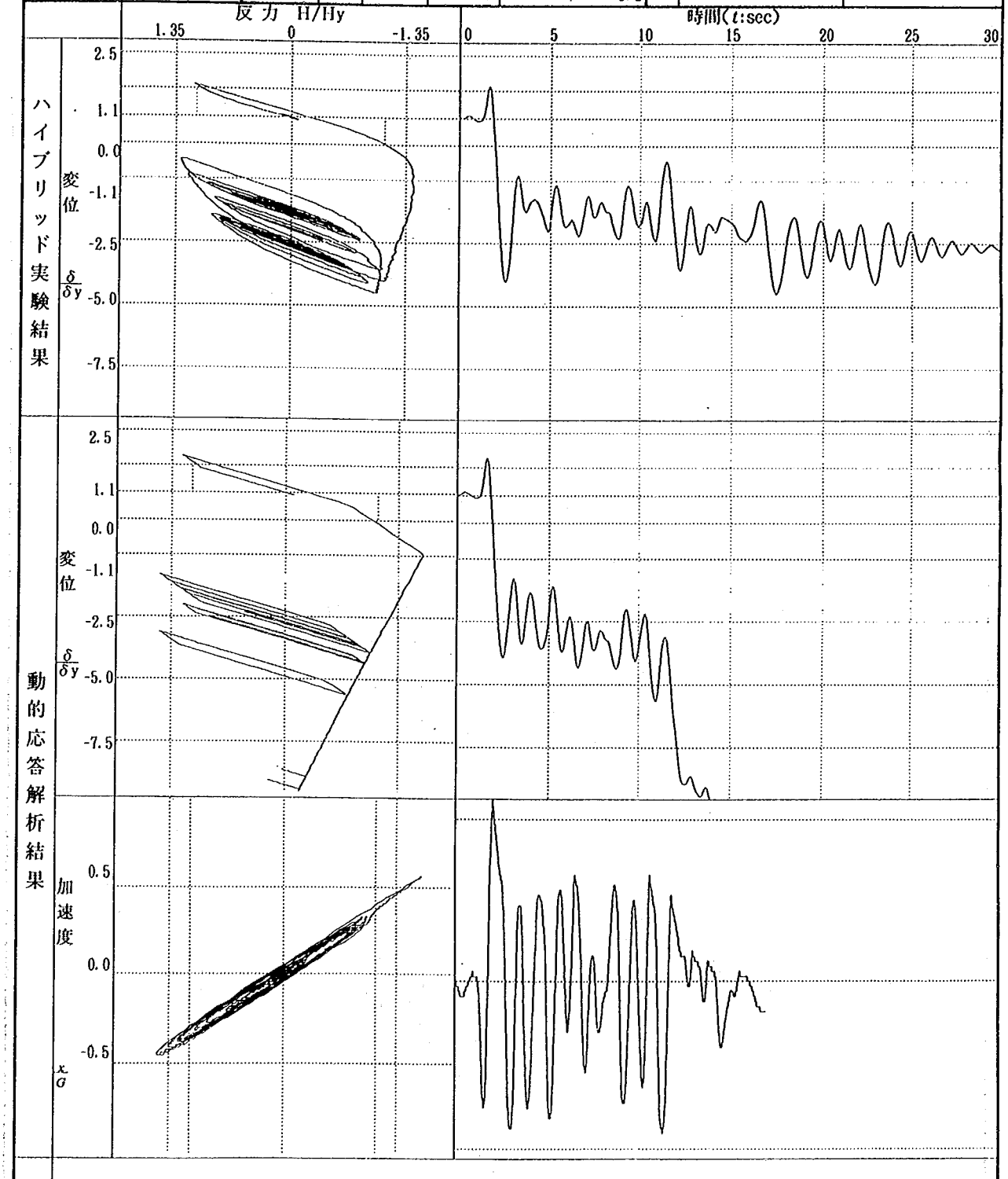


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-05　（トリリニア①） 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=540.0gal）						
質　量　M	3.127 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1358 tf	H_{max}/Hy	1.48	1.28
			H_{min}	-1492 tf	H_{min}/Hy	-1.63	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	12.6 cm	$x_{max}/\delta y$	1.49	1.26
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	- cm	$x_{min}/\delta y$	-	-6.98
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	544 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.55	
	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-438 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.45	
R_F		残留変位	x_{rsd}	- cm	$x_{rsd}/\delta y$	-	-5.2
R_H	0.34						

復元力特性

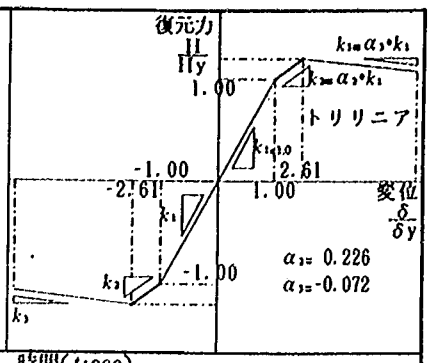


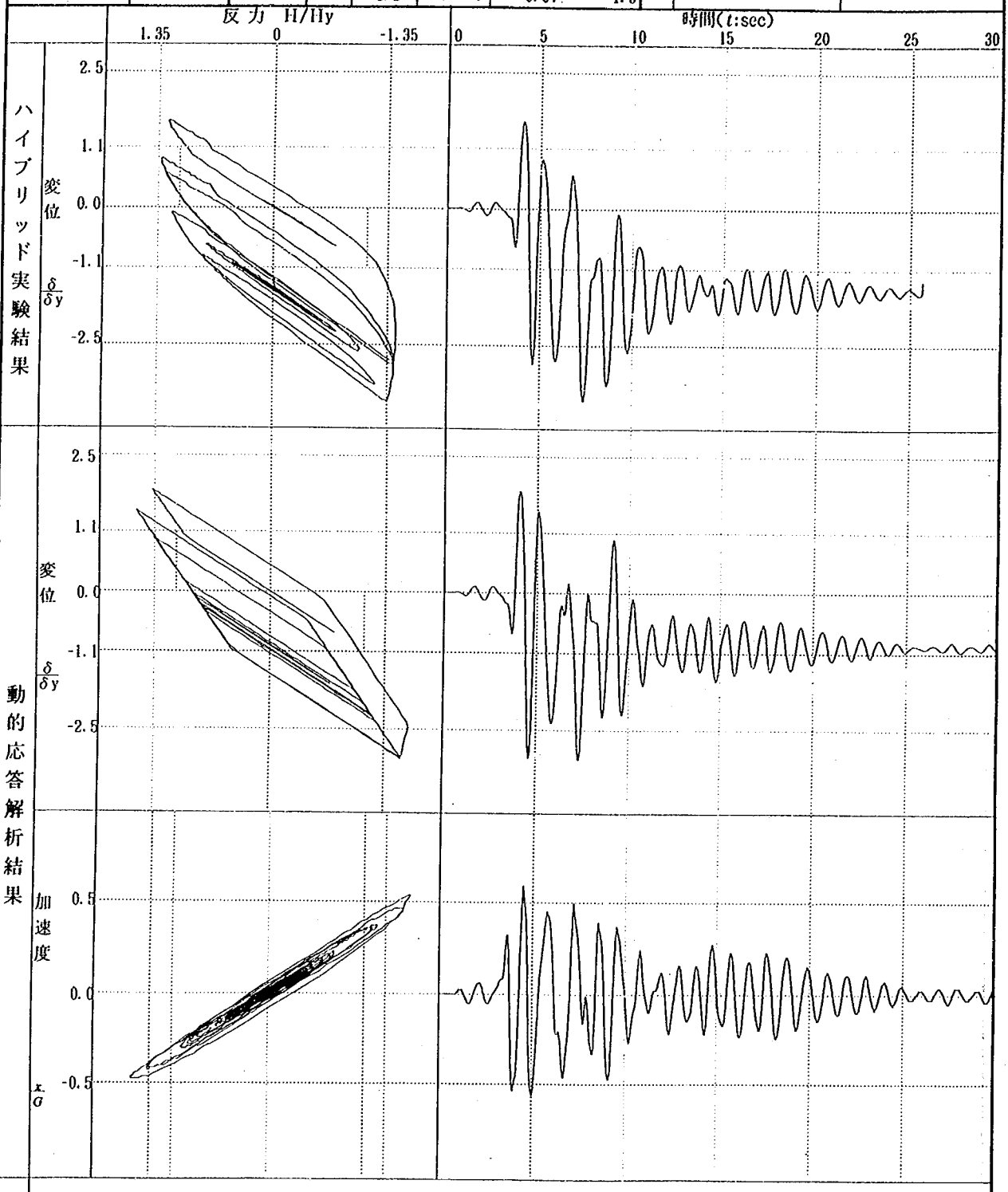


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面:No. R-10　（トリリニア①） 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=818.0gal）						
質　量　M	3.142 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1444 tf	H_{max}/Hy	1.57	1.32
			H_{min}	-1494 tf	H_{min}/Hy	-1.62	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	15.8 cm	$x_{max}/\delta y$	1.86	1.60
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-25.8 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.04	-3.51
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$ R_F R_H	0.47 0.58 0.34	加速度	$\ddot{x}_{max}$	527 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.54	
			$\ddot{x}_{min}$	-467 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.48	
		残留変位	x_{rsd}	-8.2 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.97	-1.5

復元力特性

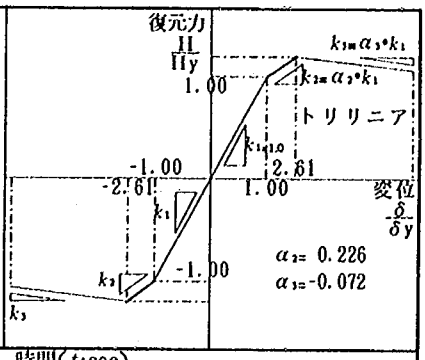


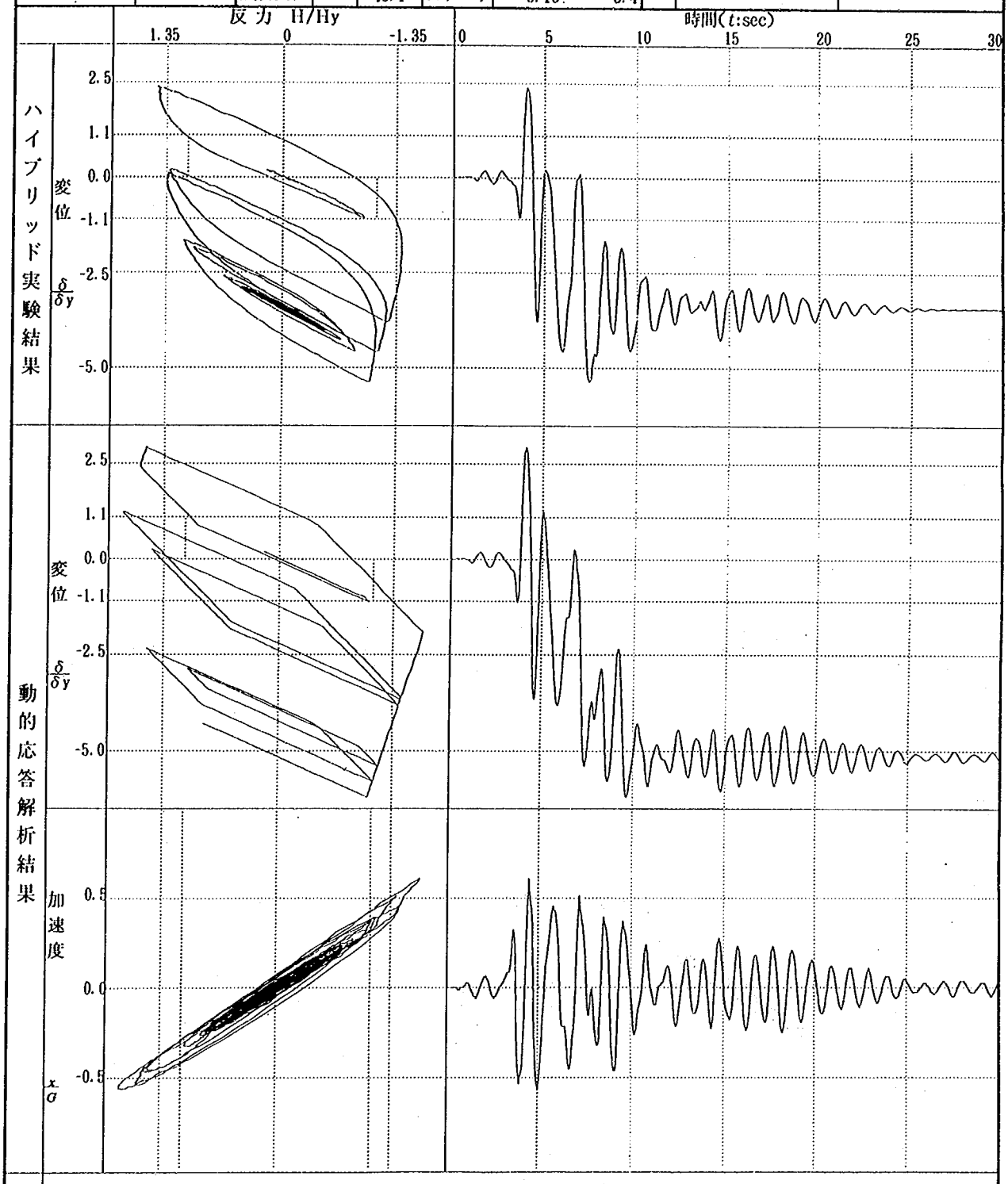


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-11　兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=1227.0gal）								
				解析値		無次元数値（解析・実験値）			
質　量	M	3.096 tf·s²/cm	反　力	H_{max}	1649 tf	H_{max}/Hy	1.3682	1.45
減　衰	h 形式	5 % 剛性比例		H_{min}	-1531 tf	H_{min}/Hy	-1.69	-1.41
軸力比	N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	24.5 cm	$x_{max}/\delta y$	2.92	2.38
細長比	$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-52.0 cm	$x_{min}/\delta y$	-6.22	-5.37
断面の補剛パラメーク	$R_R(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	592 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.60	
	R_P	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-547 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.56	
	R_H	0.34	残留変位	x_{rsd}	-43.1 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-5.15	-3.4

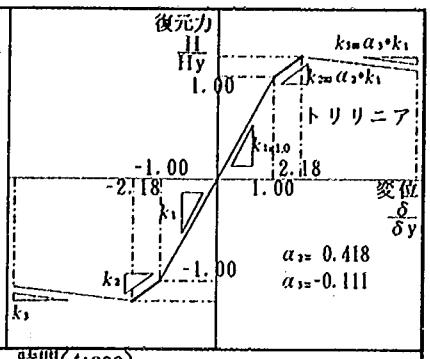
復元力特性

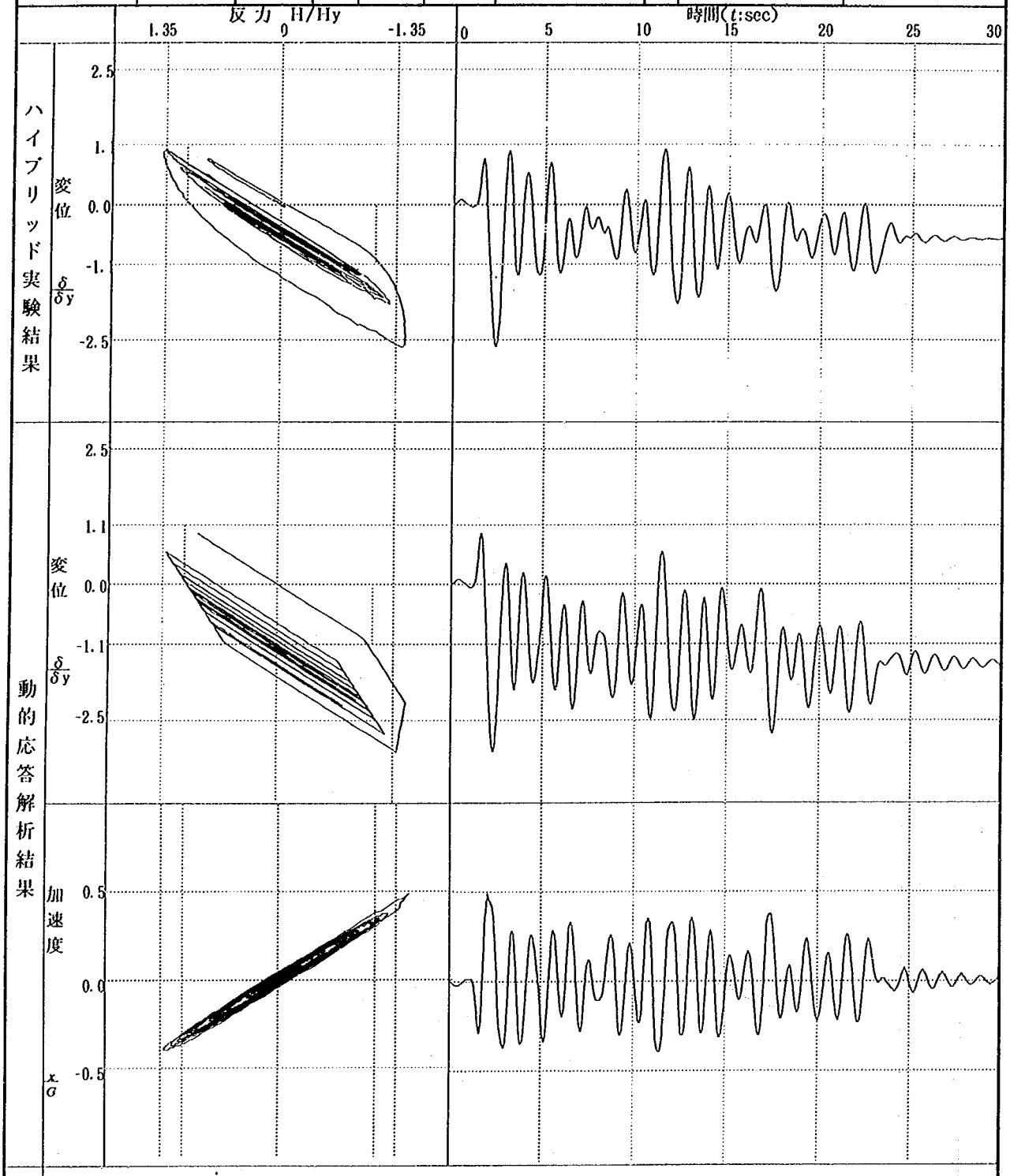




備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面:No. R-04 免震マニュアル標準波・I種地盤（θ_{max}=360.0gal）			（トリリニア②）			復元力特性
質量 M	3.110 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減衰 h 形式	5 % 剛性比例	反力	H_{max}	1197 tf	H_{max}/Hy	1.31	1.38
			H_{min}	-1359 tf	H_{min}/Hy	-1.49	-1.46
軸力比 N／Ny	0.152	変位	x_{max}	8.1 cm	$x_{max}/\delta y$	0.95	1.02
細長比 $\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-26.4 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.09	-2.64
断面の 補剛パラメータ $R_A(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	475 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.48	
	0.58 R_F		$\ddot{x}_{min}$	-390 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.40	
	0.34 R_H	残留変位	x_{rsd}	-12.5 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.46	-0.7

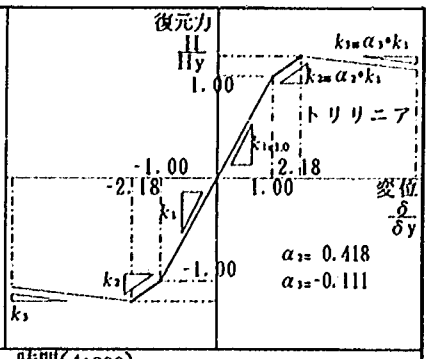


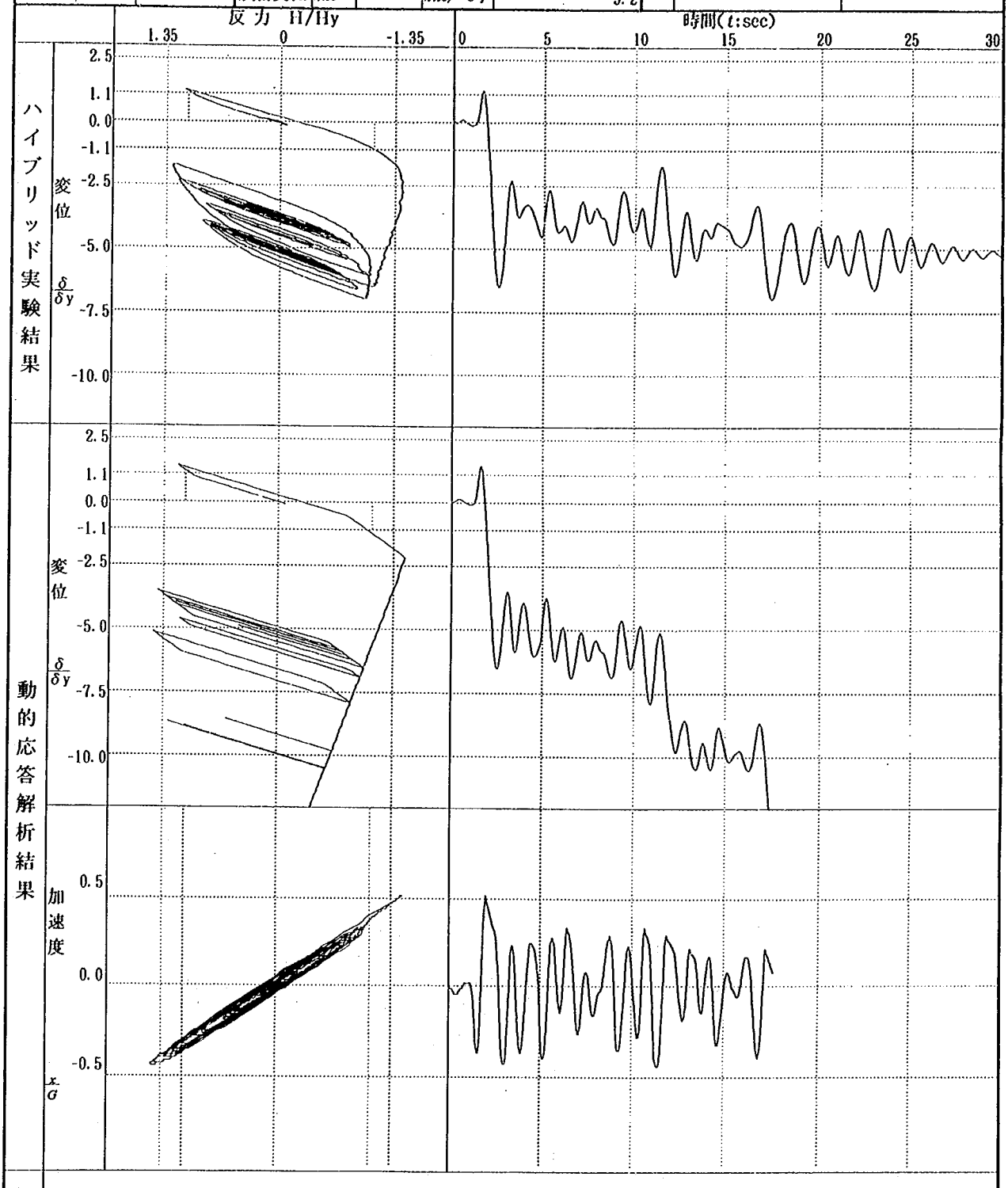


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-05　（トリリニア②） 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=540.0gal）						
質　量　M	3.127 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1345 tf	H_{max}/Hy	1.47	1.28
			H_{min}	-1364 tf	H_{min}/Hy	-1.49	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	12.3 cm	$x_{max}/\delta y$	1.45	1.26
			x_{min}	- cm	$x_{min}/\delta y$	-	-6.98
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38	加速度	$\ddot{x}_{max}$	505 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.51	
断面の補剛パラメータ　$R_R(R_I)$	0.47		$\ddot{x}_{min}$	-436 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.44	
	R_F 0.58	残留変位	x_{rsd}	- cm	$x_{rsd}/\delta y$	-	-5.2
	R_H 0.34						

復元力特性

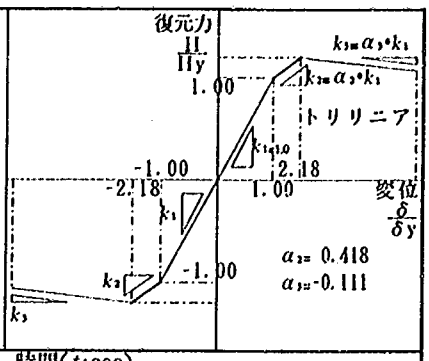


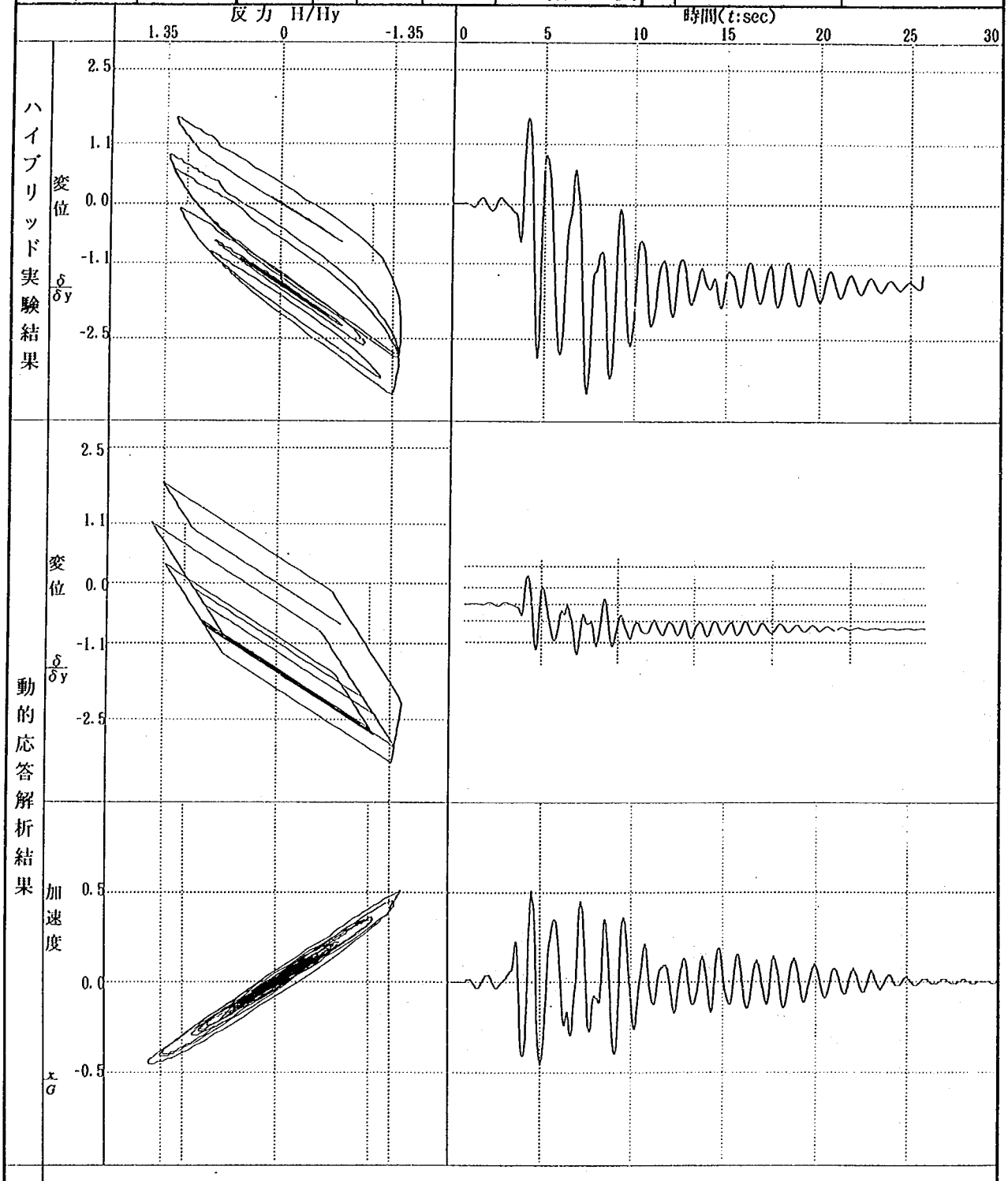


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面:No. R-10　（トリリニア②） 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=818.0gal）						
質　量　M	3.142 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1367 tf	H_{max}/Hy	1.49	1.32
			H_{min}	-1369 tf	H_{min}/Hy	-1.49	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	15.8 cm	$x_{max}/\delta y$	1.86	1.60
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-28.1 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.30	-3.51
断面の補剛パラメータ　$R_R(R_I)$ R_F R_H	0.47 0.58 0.34	加速度	$\ddot{x}_{max}$	495 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.51	
			$\ddot{x}_{min}$	-466 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.45	
		残留変位	x_{rsd}	-13.6 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.60	-1.5

復元力特性

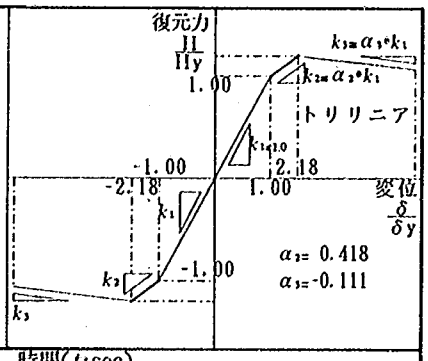


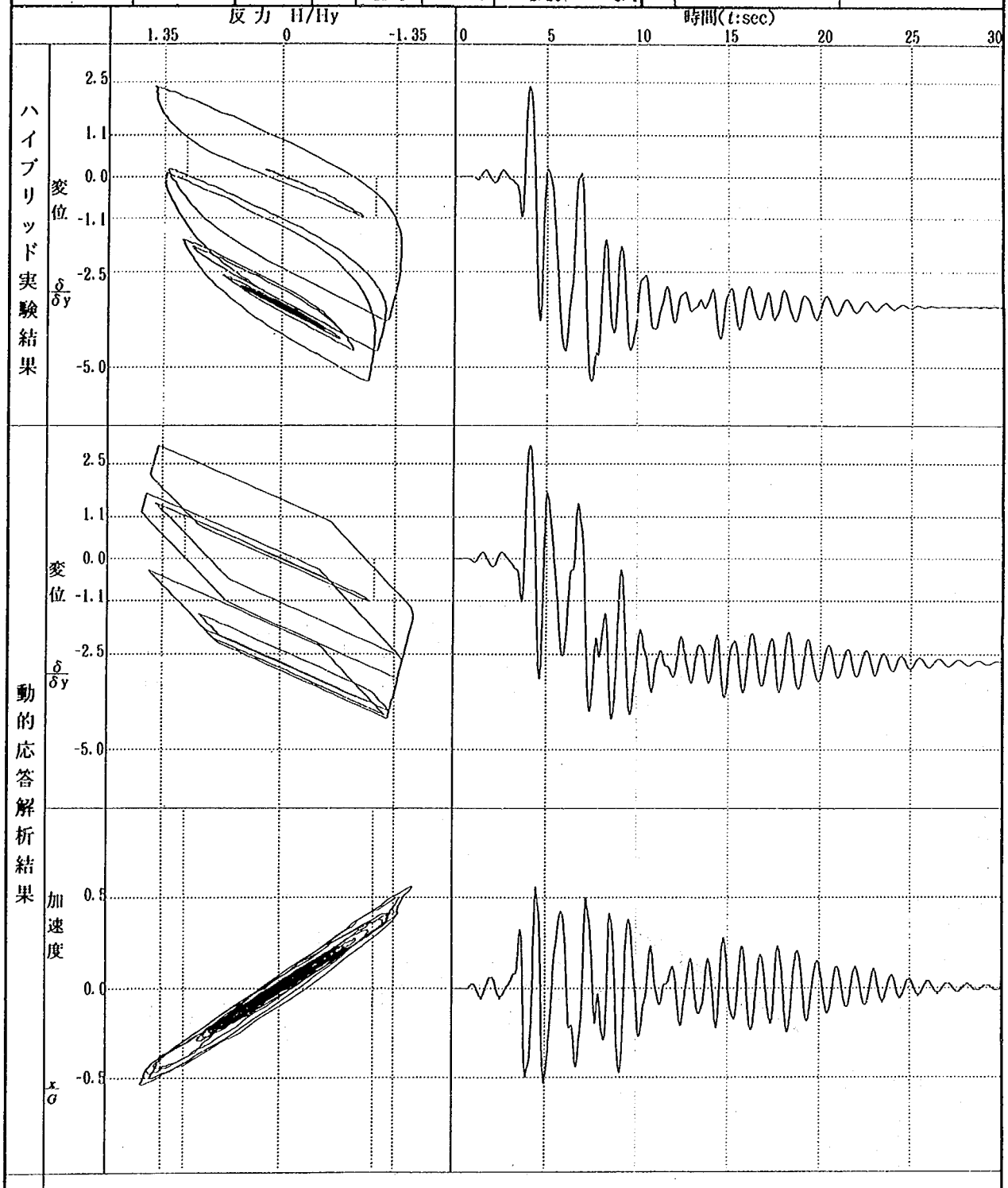


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面：No. R-11　（トリリニア②） 兵庫県南部地震波・I種地盤（$\ddot{x}_{max}$=1227.0gal）						
質　量　M	3.096 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1447 tf	H_{max}/Hy	1.60	1.45
			H_{min}	-1421 tf	H_{min}/Hy	-1.57	-1.41
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	24.9 cm	$x_{max}/\delta y$	2.97	2.38
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-35.0 cm	$x_{min}/\delta y$	-4.19	-5.37
断面の　$R_R(R_I)$ 補剛パ　R_F ラメータ　R_H	0.47 0.58 0.34	加速度	$\ddot{x}_{max}$	552 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.56	
			$\ddot{x}_{min}$	-522 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.53	
		残留変位	x_{rsd}	-18.4 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-2.20	-3.4

復元力特性

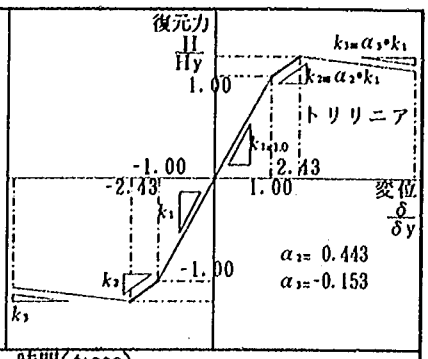


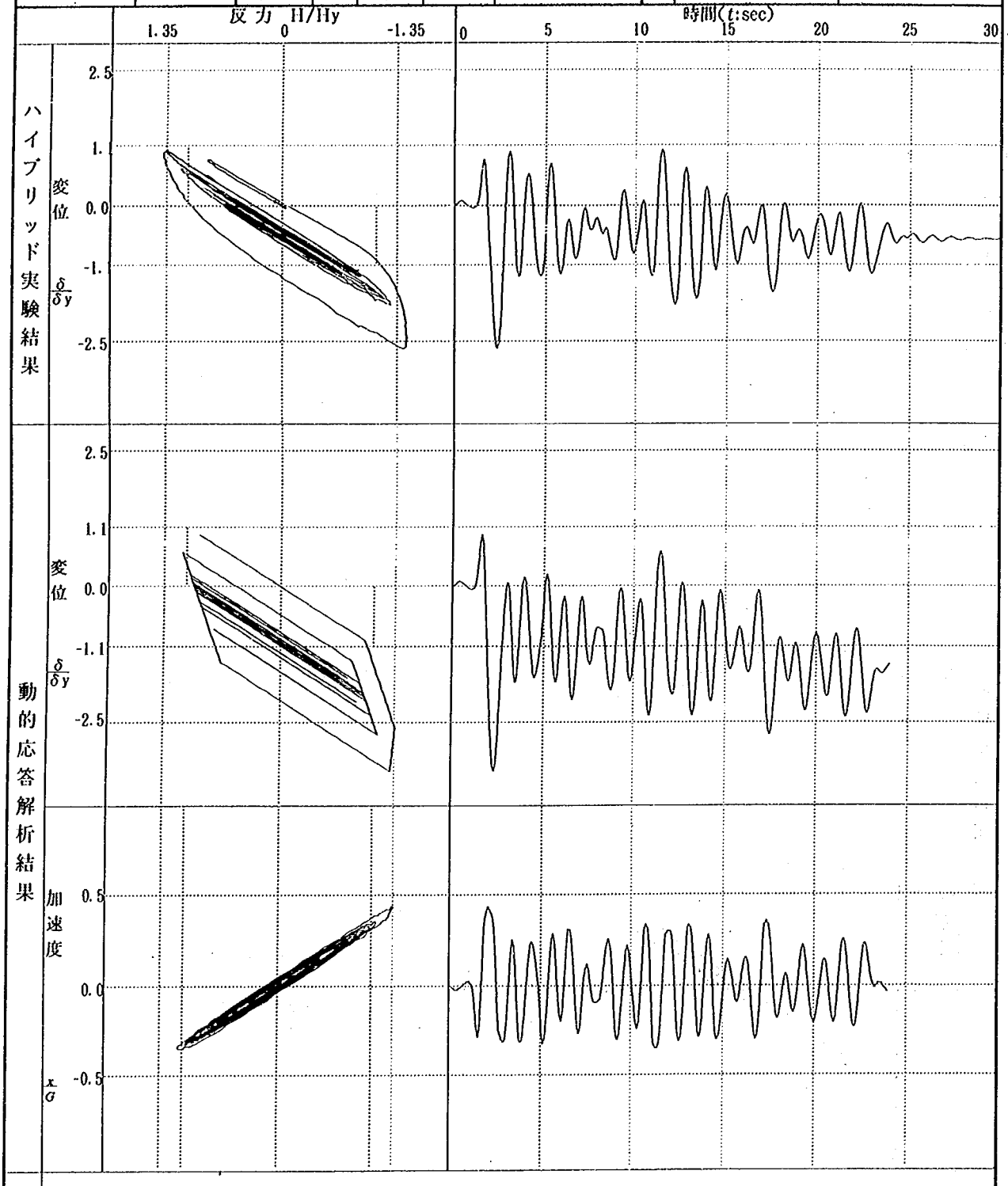


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-04　（トリリニア③） 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=360.0gal）					
質　量　M	3.110 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1048 tf	H_{max}/Hy	1.15　1.38
			H_{min}	-1238 tf	H_{min}/Hy	-1.36　-1.46
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	8.1 cm	$x_{max}/\delta y$	0.95　1.02
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-29.0 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.40　-2.64
断面の $R_A(R_I)$ 補剛パ R_F ラメータ R_H	0.47 0.58 0.34	加速度	$\ddot{x}_{max}$	428 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.44
			$\ddot{x}_{min}$	-343 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.35
		残留変位	x_{rsd}	-13.5 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.58　-0.7

復元力特性

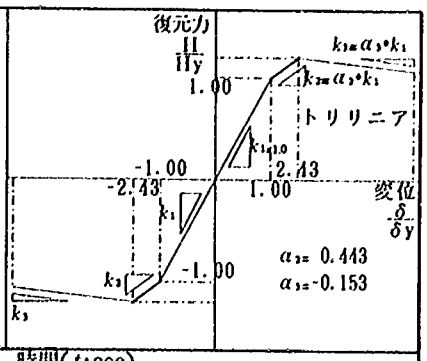


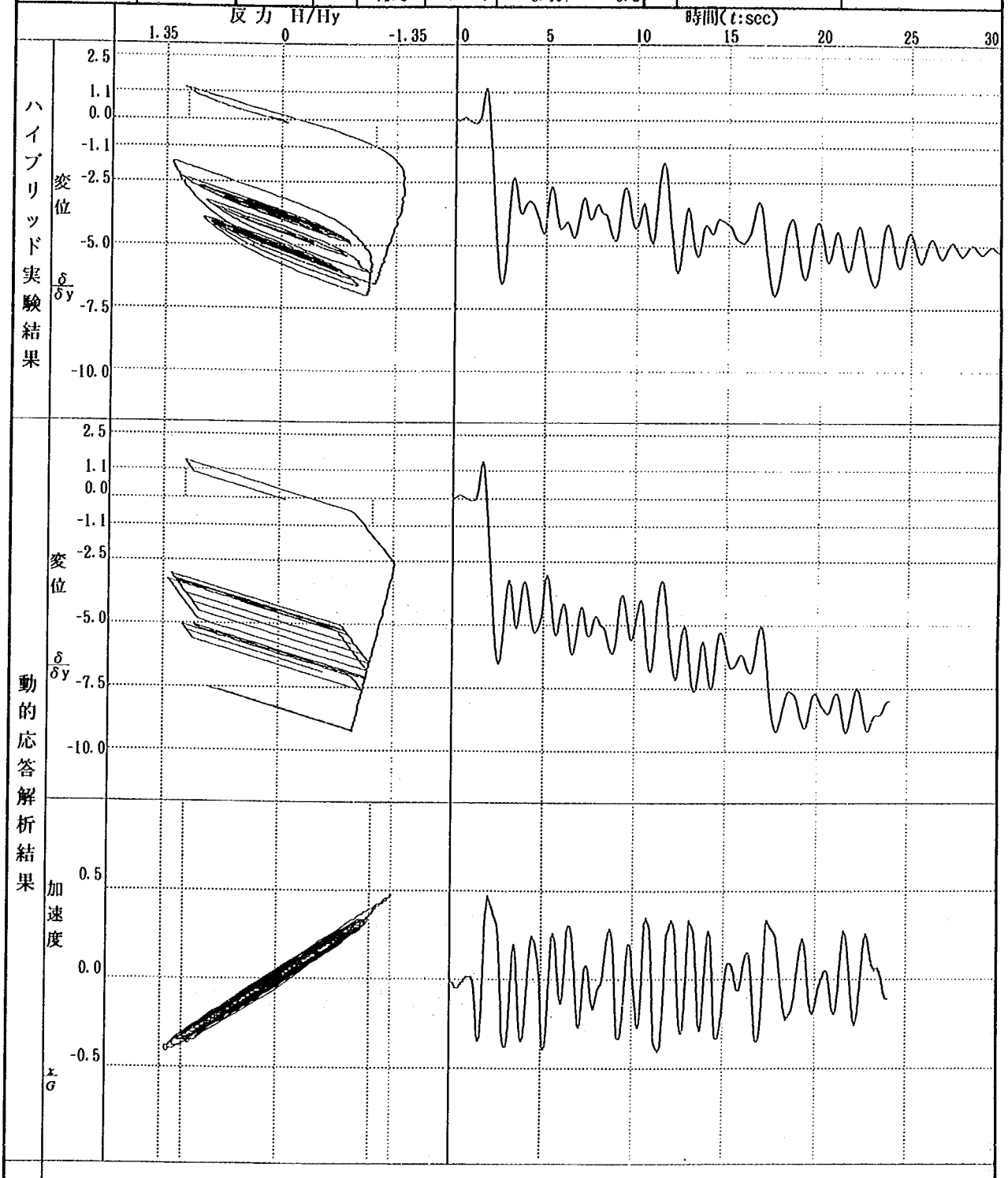


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-05　（トリリニア③） 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（$\ddot{x}_{max}$=540.0gal）						
質　量	M	3.127 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減　衰	h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1188 tf	H_{max}/Hy	1.30　1.28
				H_{min}	-1244 tf	H_{min}/Hy	-1.36　-1.44
軸力比	N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	12.4 cm	$x_{max}/\delta y$	1.46　1.26
細長比	$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-78.5 cm	$x_{min}/\delta y$	-9.24　-6.98
断面の補剛パラメータ	$R_A(R_I)$ R_F R_H	0.47 0.58 0.34	加速度	$\ddot{x}_{max}$	463 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.47
				$\ddot{x}_{min}$	-378 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.39
			残留変位	x_{rsd}	-71.3 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-8.40　-5.2

復元力特性

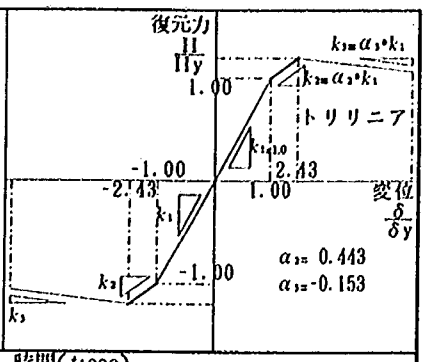


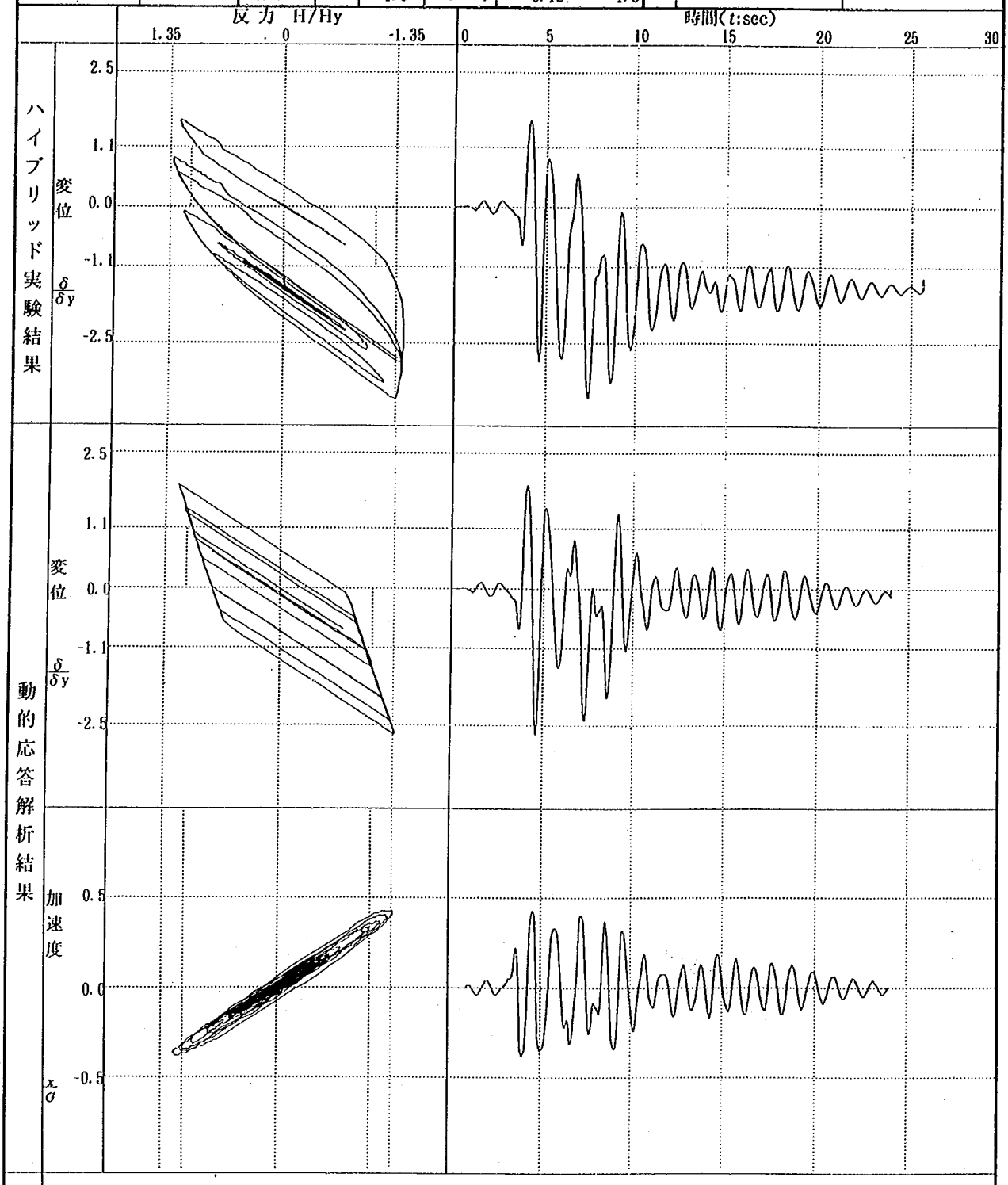


備考

モデル（供試体）（入力地震波）	矩形断面：No. R-10　（トリリニア③） 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=818.0gal）						
質　量　M	3.142 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1109 tf	H_{max}/Hy	1.21	1.32
			H_{min}	-1256 tf	H_{min}/Hy	-1.37	-1.44
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	16.2 cm	$x_{max}/\delta y$	1.91	1.60
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-22.7 cm	$x_{min}/\delta y$	-2.67	-3.51
断面の補剛パラメータ　$R_A(R_I)$ R_F R_H	0.47 0.58 0.34	加速度	$\ddot{x}_{max}$	422 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.43	
			$\ddot{x}_{min}$	-363 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.37	
		残留変位	x_{rsd}	-1.0 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.12	-1.5

復元力特性

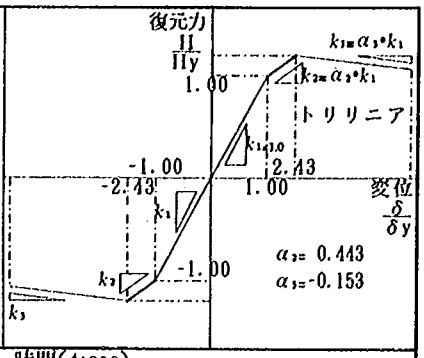


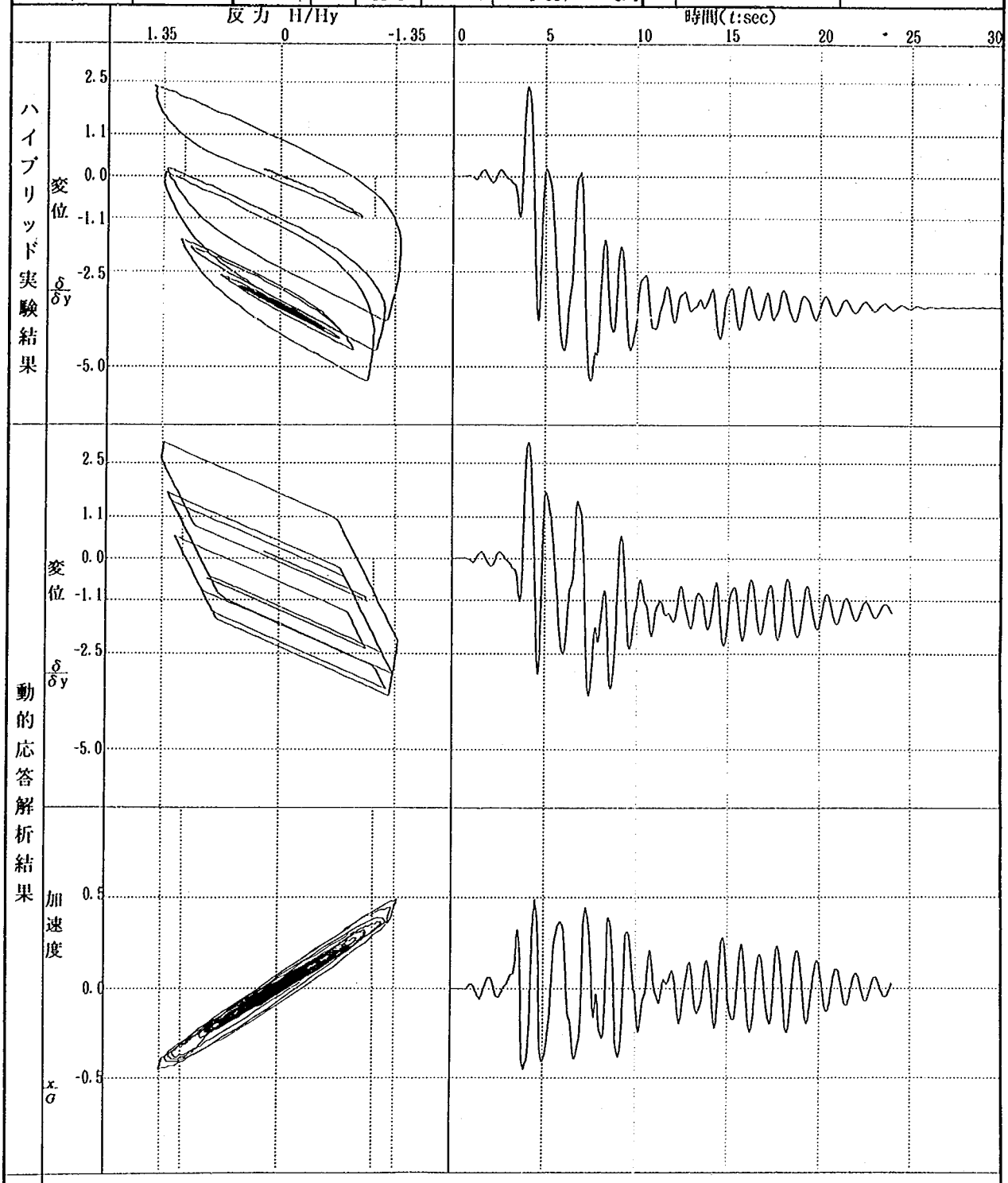


備考

モデル（供試体）（人力地震波）	矩形断面：No. R-11　（トリリニア③） 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=1227.0gal）						
質　量　M	3.096 tf·s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）		
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	1228 tf	H_{max}/Hy	1.36	1.45
			H_{min}	-1256 tf	H_{min}/Hy	-1.39	-1.41
軸力比　N／Ny	0.152	変　位	x_{max}	25.5 cm	$x_{max}/\delta y$	3.05	2.38
細長比　$\bar{\lambda}$	0.38		x_{min}	-30.1 cm	$x_{min}/\delta y$	-3.60	-5.37
断面の補剛パラメータ　$R_R(R_I)$	0.47	加速度	$\ddot{x}_{max}$	479 gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.49	
	0.58		$\ddot{x}_{min}$	-434 gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.44	
R_F		残留変位	x_{rsd}	-11.1 cm	$x_{rsd}/\delta y$	-1.33	-3.4
R_H	0.34						

復元力特性





備考

2.4.4 E－D履歴モデル

動的応答解析に用いる復元力特性を進行性劣化(E-D)履歴モデルとし、復元力曲線としては図-1.5.5(2)を用いた。

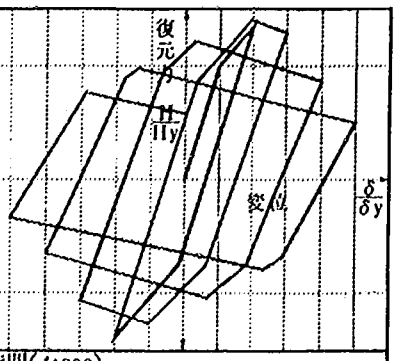
解析結果を表-2.4.4にまとめる。

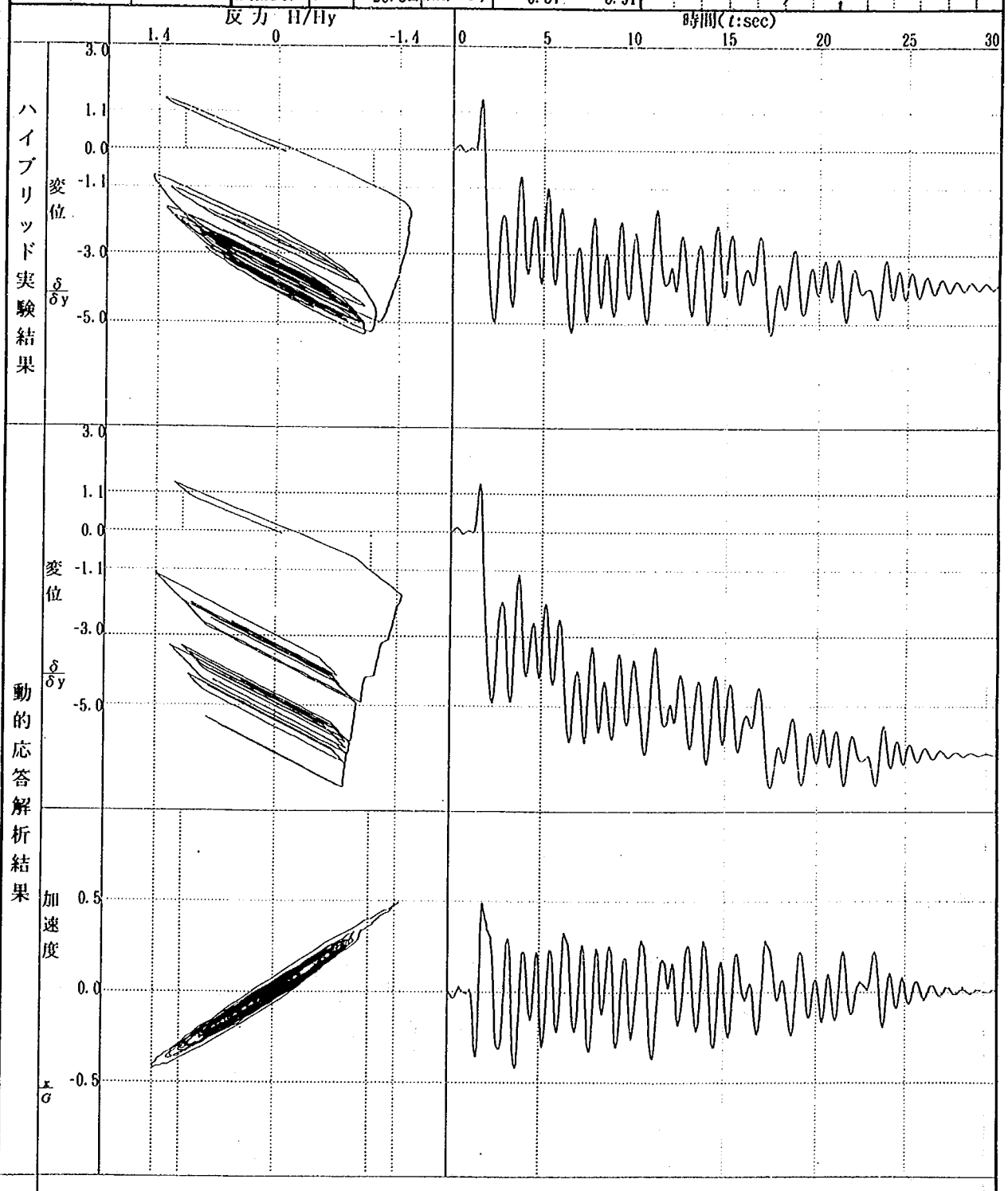
表-2.4.4 解析結果：円形断面・E－D履歴モデル

		反力		変位		残留変位
		H_{max}/H_y	H_{min}/H_y	x_{max}/δ_y	x_{min}/δ_y	x_{rsd}/δ_y
円形断面:P-09 土研提案L2・Ⅰ種地盤 432.0gal	解析値	1.40	-1.46	1.38	-7.33	-6.37
	実験値	1.46	-1.50	1.46	-5.31	-3.91
円形断面:P-10 兵庫県南部地震・Ⅰ種地盤 818.0gal	解析値	1.46	-1.43	2.55	-2.71	-0.33
	実験値	1.48	-1.51	2.61	-2.96	-0.14
円形断面:P-13 兵庫県南部地震・Ⅲ種地盤 488.8gal	解析値	1.42	-1.42	2.06	-4.75	-3.50
	実験値	1.44	-1.46	2.43	-4.69	-3.10

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-09　E-D履歴モデル 免震マニュアル標準波・Ⅰ種地盤（θ_{max}=432.0gal）					
質　量　M	2.090tf・s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	853tf	H_{max}/Hy	1.40　1.46
			H_{min}	-889tf	H_{min}/Hy	-1.46　-1.50
軸力比　N／Ny	0.180	変　位	x_{max}	5.7cm	$x_{max}/\delta y$	1.38　1.46
細長比　$\bar{\lambda}$	0.263		x_{min}	-30.3cm	$x_{min}/\delta y$	-7.33　-5.31
断面の補剛パラメータ　R_t	0.106	加速度	$\ddot{x}_{max}$	471gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.48
			$\ddot{x}_{min}$	-412gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.42
		残留変位	x_{rsd}	-26.3cm	$x_{rsd}/\delta y$	-6.37　-3.91

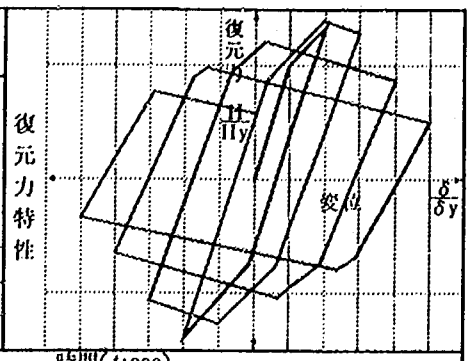
復元力特性

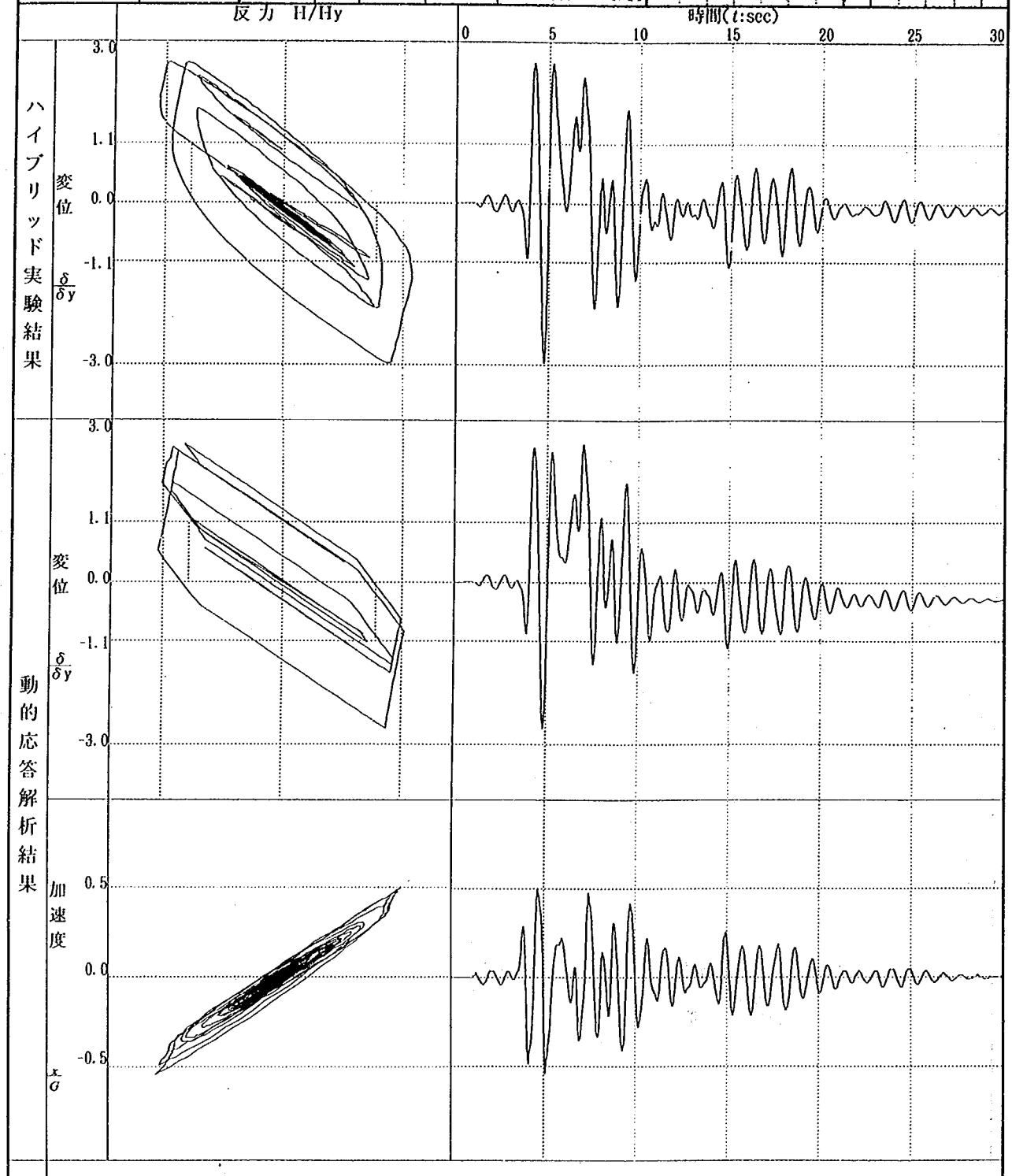




備考

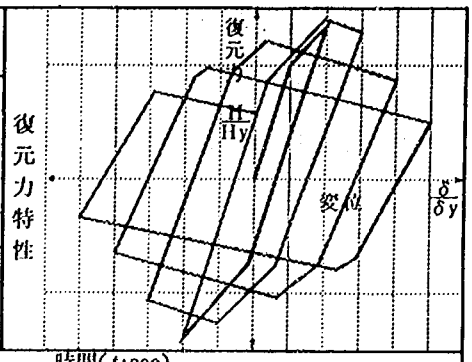
モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面：No. P-10 兵庫県南部地震波・Ⅰ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=818.0gal）				E-D履歴モデル	
			解析値		無次元数値（解析・実験値）	
質量 M	1.876tf・s²/cm	反力	H_{max}	796tf	H_{max}/Hy	1.46 1.48
減衰 h 形式	5 % 剛性比例		H_{min}	-779tf	H_{min}/Hy	-1.43 -1.51
軸力比 N／Ny	0.155	変位	x_{max}	15.1cm	$x_{max}/\delta y$	2.55 2.61
細長比 $\bar{\lambda}$	0.316		x_{min}	-16.1cm	$x_{min}/\delta y$	-2.71 -2.96
断面の補剛パラメータ R_t	0.102	加速度	$\ddot{x}_{max}$	490gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.50
			$\ddot{x}_{min}$	-530gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.54
		残留変位	x_{rsd}	-2.0cm	$x_{rsd}/\delta y$	-0.33 -0.14

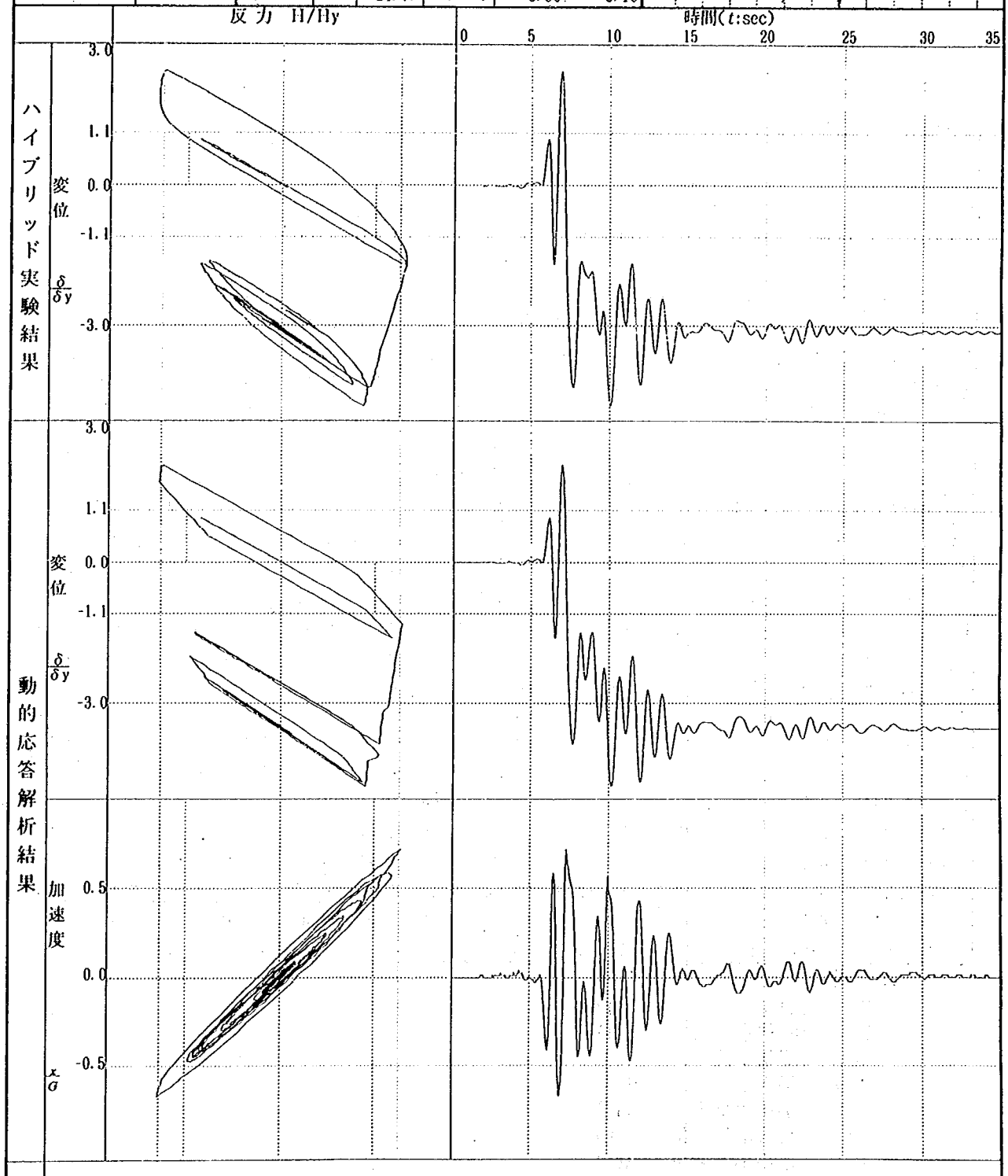




備考

モデル（供試体）（入力地震波）	円形断面:No. P-13 兵庫県南部地震波・Ⅲ種地盤（$\ddot{\delta}_{max}$=488.8gal）				E-D履歴モデル	
質　量　M	1.518tf・s²/cm		解析値		無次元数値（解析・実験値）	
減　衰　h 形式	5 % 剛性比例	反　力	H_{max}	916tf	H_{max}/Hy	1.42　1.44
			H_{min}	-916tf	H_{min}/Hy	-1.42　-1.46
軸力比　N／Ny	0.111	変　位	x_{max}	14.6cm	$x_{max}/\delta y$	2.06　2.43
細長比　$\bar{\lambda}$	0.337		x_{min}	-33.6cm	$x_{min}/\delta y$	-4.75　-4.69
断面の補剛パラメータ　R_t	0.117	加速度	$\ddot{x}_{max}$	706gal	$\ddot{x}_{max}/G$	0.72
			$\ddot{x}_{min}$	-657gal	$\ddot{x}_{min}/G$	-0.67
		残留変位	x_{rsd}	-24.7cm	$x_{rsd}/\delta y$	-3.50　-3.10





備考

3. 比較一覧および考察

3.1 比較一覧

3.1.1 矩形断面・硬化型バイリニアモデル

表-3.1.1(1) 解析・試験結果比較：矩形断面・硬化型バイリニアモデル

硬化型バイリニア①				動的応答解析結果							ハイブリッド試験結果				
番号	M	Hy	Xy	Hmax	Hmin	Xmax	Xmin	αmax	αmin	Xrsd	Hmax	Hmin	Xmax	Xmin	Xrsd
R-04	3.110	910	8.55	1.20	-1.49	1.65	-3.25	0.36	-0.45	-0.51	1.38	-1.46	1.02	-2.64	-0.63
R-05	3.127	915	8.49	1.31	-1.90	2.27	-5.52	0.40	-0.58	-0.86	1.28	-1.44	1.26	-6.98	-5.10
R-06	2.331	952	8.73	1.19	-1.34	2.41	-1.63	0.51	-0.57	-0.44	1.41	-1.41	2.00	-1.85	0.08
R-07	2.338	955	8.89	1.32	-1.51	3.38	-2.31	0.56	-0.63	-0.83	1.40	-1.40	4.95	-3.07	0.74
R-08	3.919	1,153	4.88	1.16	-1.52	1.43	-3.44	0.47	-0.36	-0.21	1.42	-1.50	1.13	-3.09	-0.82
R-09	3.917	1,153	4.88	1.39	-2.01	2.70	-6.17	0.62	-0.43	-0.36	1.28	-1.56	1.64	-11.47	-9.92
R-10	3.142	919	8.49	1.24	-1.39	1.87	-2.71	0.44	-0.38	-0.24	1.32	-1.44	1.60	-3.51	-1.48
R-11	3.096	905	8.36	1.47	-1.49	3.13	-3.28	0.48	-0.45	-0.12	1.45	-1.41	2.38	-5.37	-3.42
R-12	2.364	965	8.94	1.18	-1.35	1.53	-2.51	0.57	-0.50	-0.82	1.08	-1.37	1.15	-2.58	-0.89
R-13	2.336	954	8.88	1.25	-1.61	1.95	-3.93	0.68	-0.54	-0.46	1.31	-1.39	1.65	-4.93	-2.81
R-16	2.703	652	5.66	1.23	-1.70	1.81	-4.46	0.43	-0.31	0.23	1.50	-1.64	1.27	-3.99	-1.16
R-17	2.706	653	5.65	1.42	-1.51	2.91	-3.42	0.39	-0.36	-0.32	1.63	-1.64	2.56	-3.87	-1.15
R-18	2.717	655	5.66	1.77	-1.63	4.03	-4.79	0.47	-0.41	-0.30	1.73	-1.77	4.43	-3.92	-0.58
R-19	2.025	689	5.98	1.23	-1.45	1.85	-3.08	0.51	-0.44	-0.61	1.41	-1.55	1.72	-3.21	-1.31

硬化型バイリニア②				動的応答解析結果							ハイブリッド試験結果				
番号	M	Hy	Xy	Hmax	Hmin	Xmax	Xmin	αmax	αmin	Xrsd	Hmax	Hmin	Xmax	Xmin	Xrsd
R-04	3.110	910	8.55	1.18	-1.45	1.58	-3.30	0.44	-0.36	-0.58	1.38	-1.46	1.02	-2.64	-0.63
R-05	3.127	915	8.49	1.28	-1.82	2.21	-5.66	0.56	-0.39	-1.00	1.28	-1.44	1.26	-6.98	-5.10
R-06	2.331	952	8.73	1.32	-1.19	2.49	-1.64	0.50	-0.56	-0.38	1.41	-1.41	2.00	-1.85	0.08
R-07	2.338	955	8.89	1.39	-1.33	3.72	-3.21	0.57	-0.61	-1.54	1.40	-1.40	4.95	-3.07	0.74
R-08	3.919	1,153	4.88	1.15	-1.48	1.39	-3.52	0.45	-0.36	-0.16	1.42	-1.50	1.13	-3.09	-0.82
R-09	3.917	1,153	4.88	1.34	-1.93	2.64	-6.39	0.59	-0.42	-0.29	1.28	-1.56	1.64	-11.47	-9.92
R-10	3.142	919	8.49	1.22	-1.35	1.88	-2.67	0.43	-0.38	-0.28	1.32	-1.44	1.60	-3.51	-1.48
R-11	3.096	905	8.36	1.42	-1.44	3.15	-3.25	0.46	-0.44	-0.18	1.45	-1.41	2.38	-5.37	-3.42
R-12	2.364	965	8.94	1.17	-1.32	1.53	-2.52	0.56	-0.50	-0.93	1.08	-1.37	1.15	-2.58	-0.89
R-13	2.336	954	8.88	1.23	-1.55	1.93	-3.97	0.66	-0.53	-0.60	1.31	-1.39	1.65	-4.93	-2.81
R-16	2.703	652	5.66	1.12	-1.51	1.32	-4.86	0.38	-0.29	0.07	1.50	-1.64	1.27	-3.99	-1.16
R-17	2.706	653	5.65	1.30	-1.31	2.97	-3.03	0.35	-0.34	-0.57	1.63	-1.64	2.56	-3.87	-1.15
R-18	2.717	655	5.66	1.43	-1.43	4.09	-4.09	0.40	-0.38	-0.65	1.73	-1.77	4.43	-3.92	-0.58
R-19	2.025	689	5.98	1.18	-1.32	1.82	-3.11	0.48	-0.43	-1.14	1.41	-1.55	1.72	-3.21	-1.31

記号説明

M	:質量	(tf/cm²)
Hy	:降伏水平力	(tf)
Xy	:降伏変位	(cm)
Hmax	:最大水平力	(tf)
Hmin	:最小水平力	(tf)
Xmax	:最大応答変位	(cm)
Xmin	:最小応答変位	(cm)
αmax	:最大応答加速度	(gal)
αmin	:最小応答加速度	(gal)
Xrsd	:残留変位	(cm)

表-3.1.1(2) 解析・試験結果比較：矩形断面・硬化型バイリニアモデル

μa= 2.50　　1<△< 1.20 ($\times \mu a$)　　1<△< 1.20 ($\times \mu a$)

バイリニア①			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.35	2.50	0.66	-1.30	▲	-0.20	0.41	-1.06	△	-0.25	1.62	1.23	1.23	0.80
R-05	1.35	2.50	0.91	-2.21	▲	-0.34	0.50	-2.79	▲	-2.04	1.80	0.79	0.79	0.17
R-06	1.35	2.50	0.96	-0.65	○	-0.18	0.80	-0.74	○	0.03	1.21	0.88	1.21	-5.50
R-07	1.35	2.50	1.35	-0.93	▲	-0.33	1.98	-1.23	▲	0.30	0.68	0.75	0.68	-1.12
R-08	1.35	2.50	0.57	-1.38	▲	-0.08	0.45	-1.24	▲	-0.33	1.27	1.11	1.11	0.25
R-09	1.35	2.50	1.08	-2.47	▲	-0.15	0.66	-4.59	▲	-3.97	1.65	0.54	0.54	0.04
R-10	1.35	2.50	0.75	-1.08	△	-0.09	0.64	-1.40	▲	-0.59	1.17	0.77	0.77	0.16
R-11	1.35	2.50	1.25	-1.31	▲	-0.05	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.32	0.61	0.61	0.04
R-12	1.35	2.50	0.61	-1.00	△	-0.33	0.46	-1.03	△	-0.36	1.33	0.97	0.97	0.93
R-13	1.35	2.50	0.78	-1.57	▲	-0.18	0.66	-1.97	▲	-1.12	1.18	0.80	0.80	0.16
R-16	1.35	4.50	0.40	-0.99	○	0.05	0.28	-0.89	○	-0.26	1.42	1.12	1.12	-0.20
R-17	1.35	4.50	0.65	-0.76	○	-0.07	0.57	-0.86	○	-0.26	1.14	0.88	0.88	0.28
R-18	1.35	4.50	0.89	-1.07	△	-0.07	0.98	-0.87	○	-0.13	0.91	1.22	1.08	0.52
R-19	1.35	4.50	0.41	-0.69	○	-0.14	0.38	-0.71	○	-0.29	1.07	0.96	0.96	0.47

バイリニア②			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.40	3.00	0.53	-1.10	△	-0.19	0.34	-0.88	○	-0.21	1.55	1.25	1.25	0.92
R-05	1.40	3.00	0.74	-1.89	▲	-0.33	0.42	-2.33	▲	-1.70	1.76	0.81	0.81	0.20
R-06	1.40	3.00	0.83	-0.55	○	-0.13	0.67	-0.62	○	0.03	1.24	0.89	1.24	-4.75
R-07	1.40	3.00	1.24	-1.07	▲	-0.51	1.65	-1.02	▲	0.25	0.75	1.05	0.75	-2.08
R-08	1.40	3.00	0.46	-1.17	△	-0.05	0.38	-1.03	△	-0.27	1.23	1.14	1.14	0.20
R-09	1.40	3.00	0.88	-2.13	▲	-0.10	0.55	-3.82	▲	-3.31	1.61	0.56	0.56	0.03
R-10	1.40	3.00	0.63	-0.89	○	-0.09	0.53	-1.17	△	-0.49	1.17	0.76	0.76	0.19
R-11	1.40	3.00	1.05	-1.08	△	-0.06	0.79	-1.79	▲	-1.14	1.33	0.61	0.61	0.05
R-12	1.40	3.00	0.51	-0.84	○	-0.31	0.38	-0.86	○	-0.30	1.33	0.98	0.98	1.04
R-13	1.40	3.00	0.64	-1.32	▲	-0.20	0.55	-1.64	▲	-0.94	1.17	0.80	0.80	0.21
R-16	1.80	7.50	0.18	-0.65	○	0.01	0.17	-0.53	○	-0.15	1.04	1.22	1.22	-0.06
R-17	1.80	7.50	0.40	-0.40	○	-0.08	0.34	-0.52	○	-0.15	1.16	0.78	0.78	0.50
R-18	1.80	7.50	0.54	-0.55	○	-0.09	0.59	-0.52	○	-0.08	0.92	1.04	0.92	1.12
R-19	1.80	7.50	0.24	-0.41	○	-0.15	0.23	-0.43	○	-0.17	1.06	0.97	0.97	0.87

3.1.2 円形断面・硬化型バイリニアモデル

表-3.1.2(1) 解析・試験結果比較：円形断面・硬化型バイリニアモデル

硬化型バイリニア①				動的応答解析結果							ハイブリッド試験結果				
番号	M	Hy	Xy	Hmax	Hmin	Xmax	Xmin	αmax	αmin	Xrsd	Hmax	Hmin	Xmax	Xmin	Xrsd
P_04	2.002	584	6.51	1.23	-1.48	1.94	-3.51	0.45	-0.38	0.71	1.16	-1.41	1.00	-3.28	-1.39
P_05	1.974	575	6.30	1.22	-1.65	1.87	-4.57	0.50	-0.38	0.52	1.20	-1.43	1.24	-9.35	-8.46
P_06	1.458	618	7.03	1.23	-1.25	1.94	-2.06	0.56	-0.55	0.17	1.46	-1.42	2.01	-1.92	0.09
P_07	1.445	612	6.90	1.39	-1.34	2.94	-2.63	0.60	-0.62	-0.04	1.40	-1.40	-	-	-
P_08	2.103	613	4.20	1.12	-1.49	1.20	-3.53	0.45	-0.34	0.05	1.44	-1.56	1.18	-3.03	-1.24
P_09	2.090	609	4.13	1.25	-1.66	2.08	-4.62	0.50	-0.39	0.22	1.46	-1.50	1.46	-5.31	-3.91
P_10	1.876	545	5.94	1.36	-1.42	2.75	-3.10	0.44	-0.42	-0.44	1.48	-1.51	2.61	-2.96	-0.14
P_11	1.797	522	5.85	1.54	-1.64	3.91	-4.52	0.52	-0.48	-0.70	1.55	-1.48	7.55	-2.56	6.49
P_12	1.508	640	7.11	1.20	-1.30	1.73	-2.35	0.57	-0.53	-0.79	1.34	-1.37	1.64	-2.47	-0.82
P_13	1.518	644	7.07	1.24	-1.56	1.98	-4.00	0.69	-0.55	-0.84	1.44	-1.46	2.43	-4.69	-3.10
P_16	2.754	660	5.74	1.14	-1.56	1.43	-4.80	0.39	-0.29	-0.02	1.55	-1.53	1.23	-4.27	-1.89
P_17	2.106	741	6.35	1.18	-1.25	3.24	-2.27	0.45	-0.48	-0.11	1.36	-1.39	3.55	-1.22	1.34
P_18	3.167	756	3.94	1.62	-1.18	1.70	-4.91	0.40	-0.30	-0.29	1.52	-1.57	1.38	-4.47	-2.11
P_19	2.806	673	5.80	1.22	-1.23	2.91	-2.84	0.34	-0.35	-0.73	1.55	-1.56	2.68	-3.39	-0.82
P_20	2.049	721	6.24	1.25	-1.15	1.80	-3.22	0.47	-0.43	-1.45	1.36	-1.40	1.90	-2.93	-0.82

硬化型バイリニア②				動的応答解析結果							ハイブリッド試験結果				
番号	M	Hy	Xy	Hmax	Hmin	Xmax	Xmin	αmax	αmin	Xrsd	Hmax	Hmin	Xmax	Xmin	Xrsd
P_04	2.002	584	6.51	1.35	-1.73	1.88	-3.08	0.52	-0.41	-0.38	1.16	-1.41	1.00	-3.28	-1.39
P_05	1.974	575	6.30	1.40	-1.99	2.03	-3.89	0.60	-0.42	0.28	1.20	-1.43	1.24	-9.35	-8.46
P_06	1.458	618	7.03	1.40	-1.41	2.02	-2.09	0.62	-0.61	0.01	1.46	-1.42	2.01	-1.92	0.09
P_07	1.445	612	6.90	1.68	-1.62	2.91	-2.71	0.71	-0.74	-0.73	1.40	-1.40	-	-	-
P_08	2.103	613	4.20	1.25	-1.73	1.59	-3.08	0.52	-0.38	-0.15	1.44	-1.56	1.18	-3.03	-1.24
P_09	2.090	609	4.13	1.38	-1.99	1.96	-3.87	0.60	-0.42	0.15	1.46	-1.50	1.46	-5.31	-3.91
P_10	1.876	545	5.94	1.87	-1.91	3.52	-3.64	0.58	-0.57	0.37	1.48	-1.51	2.61	-2.96	-0.14
P_11	1.797	522	5.85	2.28	-2.52	4.81	-5.55	0.77	-0.69	0.23	1.55	-1.48	7.55	-2.56	6.49
P_12	1.508	640	7.11	1.29	-1.50	1.70	-2.38	0.66	-0.57	-0.29	1.34	-1.37	1.64	-2.47	-0.82
P_13	1.518	644	7.07	1.44	-1.96	2.19	-3.80	0.86	-0.63	-0.02	1.44	-1.46	2.43	-4.69	-3.10
P_16	2.754	660	5.74	1.21	-1.69	1.75	-4.52	0.42	-0.31	0.09	1.55	-1.53	1.23	-4.27	-1.89
P_17	2.106	741	6.35	1.37	-1.31	2.74	-2.38	0.48	-0.50	-0.30	1.36	-1.39	3.55	-1.22	1.34
P_18	3.167	756	3.94	1.25	-1.71	1.96	-4.65	0.42	-0.31	-0.28	1.52	-1.57	1.38	-4.47	-2.11
P_19	2.806	673	5.80	1.48	-1.40	2.83	-3.34	0.39	-0.36	-0.27	1.55	-1.56	2.68	-3.39	-0.82
P_20	2.049	721	6.24	1.23	-1.42	1.83	-2.95	0.52	-0.45	-0.63	1.36	-1.40	1.90	-2.93	-0.82

表-3.1.2(2) 解析・試験結果比較：円形断面・硬化型バイリニアモデル

1<△< 1.20 ($\times\mu a$)　　1<△< 1.20 ($\times\mu a$)

バイリニア①			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
P_04	1.40	3.00	0.65	-1.17	△	0.24	0.33	-1.09	△	-0.46	1.94	1.07	1.07	-0.51
P_05	1.40	3.00	0.62	-1.52	▲	0.17	0.41	-3.12	▲	-2.82	1.51	0.49	0.49	-0.06
P_06	1.40	3.00	0.65	-0.69	○	0.06	0.67	-0.64	○	0.03	0.96	1.07	1.02	1.89
P_07	1.40	3.00	0.98	-0.88	○	-0.01	-	-	▲	-	-	-	-	-
P_08	1.40	3.00	0.40	-1.18	△	0.02	0.39	-1.01	△	-0.41	1.01	1.17	1.17	-0.04
P_09	1.40	3.00	0.69	-1.54	▲	0.07	0.49	-1.77	▲	-1.30	1.42	0.87	0.87	-0.06
P_10	1.40	3.00	0.92	-1.03	△	-0.15	0.87	-0.99	○	-0.05	1.05	1.05	1.05	3.15
P_11	1.40	3.00	1.30	-1.51	▲	-0.23	2.52	-0.85	▲	2.16	0.52	1.77	0.60	-0.11
P_12	1.40	3.00	0.58	-0.78	○	-0.26	0.55	-0.82	○	-0.27	1.05	0.95	0.95	0.97
P_13	1.40	3.00	0.66	-1.33	▲	-0.28	0.81	-1.56	▲	-1.03	0.81	0.85	0.85	0.27
P_16	1.40	3.50	0.41	-1.37	▲	-0.01	0.35	-1.22	▲	-0.54	1.16	1.12	1.12	0.01
P_17	1.40	5.20	0.62	-0.44	○	-0.02	0.68	-0.23	○	0.26	0.91	1.86	0.91	-0.08
P_18	1.40	3.30	0.52	-1.49	▲	-0.09	0.42	-1.35	▲	-0.64	1.23	1.10	1.10	0.14
P_19	1.40	3.40	0.86	-0.83	○	-0.21	0.79	-1.00	○	-0.24	1.09	0.84	0.86	0.89
P_20	1.40	5.30	0.34	-0.61	○	-0.27	0.36	-0.55	○	-0.15	0.94	1.10	1.10	1.77

バイリニア②			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
P_04	1.45	2.20	0.85	-1.40	▲	-0.17	0.45	-1.49	▲	-0.63	1.88	0.94	0.94	0.27
P_05	1.45	2.20	0.92	-1.77	▲	0.13	0.56	-4.25	▲	-3.85	1.64	0.42	0.42	-0.03
P_06	1.45	2.20	0.92	-0.95	○	0.01	0.91	-0.87	○	0.04	1.00	1.09	1.04	0.16
P_07	1.45	2.20	1.32	-1.23	▲	-0.33	-	-	▲	-	-	-	-	-
P_08	1.45	2.20	0.72	-1.40	▲	-0.07	0.54	-1.38	▲	-0.56	1.35	1.02	1.02	0.12
P_09	1.45	2.20	0.89	-1.76	▲	0.07	0.66	-2.41	▲	-1.78	1.34	0.73	0.73	-0.04
P_10	1.45	2.20	1.60	-1.65	▲	0.17	1.19	-1.35	▲	-0.06	1.35	1.23	1.23	-2.61
P_11	1.45	2.20	2.19	-2.52	▲	0.10	3.43	-1.16	▲	2.95	0.64	2.17	0.74	0.03
P_12	1.45	2.20	0.77	-1.08	△	-0.13	0.75	-1.12	△	-0.37	1.04	0.96	0.96	0.35
P_13	1.45	2.20	1.00	-1.73	▲	-0.01	1.10	-2.13	▲	-1.41	0.90	0.81	0.81	0.01
P_16	1.60	4.00	0.44	-1.13	△	0.02	0.31	-1.07	△	-0.47	1.42	1.06	1.06	-0.05
P_17	1.60	4.00	0.68	-0.60	○	-0.08	0.89	-0.31	○	0.34	0.77	1.95	0.77	-0.22
P_18	1.60	4.00	0.49	-1.16	△	-0.07	0.35	-1.12	△	-0.53	1.42	1.04	1.04	0.13
P_19	1.60	4.00	0.71	-0.83	○	-0.07	0.67	-0.85	○	-0.21	1.05	0.98	0.98	0.33
P_20	1.60	4.00	0.46	-0.74	○	-0.16	0.48	-0.73	○	-0.21	0.96	1.01	1.01	0.77

3.1.3 その他の復元力特性

表-3.1.3(1) 解析・試験結果比較：各種復元力特性

完全弾塑性形①			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.46	2.50	0.51	-1.17	△	-0.23	0.41	-1.06	△	-0.25	1.25	1.11	1.11	0.92
R-05	1.44	2.50	0.57	-2.62	▲	-2.04	0.50	-2.79	▲	-2.04	1.13	0.94	0.94	1.00
R-10	1.44	2.50	0.75	-1.30	▲	-0.43	0.64	-1.40	▲	-0.59	1.18	0.92	0.92	0.72
R-11	1.46	2.50	1.21	-1.53	▲	-0.68	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.27	0.71	0.71	0.49

完全弾塑性形②			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.41	2.50	0.42	-1.23	▲	-0.42	0.41	-1.06	△	0.25	1.03	1.17	1.17	-1.68
R-05	1.42	2.50	0.58	-2.72	▲	-2.18	0.50	-2.79	▲	2.04	1.15	0.97	0.97	-1.07
R-10	1.40	2.50	0.72	-1.21	▲	-0.40	0.64	-1.40	▲	-0.59	1.13	0.86	0.86	0.68
R-11	1.40	2.50	1.24	-1.49	▲	-0.64	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.31	0.69	0.69	0.47

完全弾塑性形③			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.38	2.50	0.37	-1.20	▲	-0.30	0.41	-1.06	△	-0.25	0.92	1.14	1.14	1.19
R-05	1.37	2.50	0.57	-2.65	▲	-2.10	0.50	-2.79	▲	-2.04	1.12	0.95	0.95	1.03
R-10	1.47	2.50	0.75	-1.35	▲	-0.57	0.64	-1.40	▲	-0.59	1.16	0.96	0.96	0.97
R-11	1.49	2.50	1.27	-2.07	▲	-0.94	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.34	0.96	0.96	0.69

劣化形バイリニア			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.46	2.50	0.53	-0.79	○	-0.06	0.41	-1.06	△	-0.25	1.30	0.75	0.75	0.22
R-05	1.58	2.50	0.45	-2.24	▲	-1.75	0.50	-2.79	▲	-2.04	0.89	0.80	0.80	0.86
R-10	1.50	2.50	0.56	-1.15	△	-0.44	0.64	-1.40	▲	-0.59	0.87	0.82	0.82	0.74
R-11	1.51	2.50	0.88	-1.22	▲	-0.56	0.95	-2.15	▲	-1.37	0.93	0.57	0.57	0.41

トリリニア①			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.34	2.50	0.42	-1.19	△	-0.40	0.41	-1.06	△	-0.25	1.02	1.13	1.13	1.59
R-05	1.48	2.50	0.59	-39.60	▲	-5.40	0.50	-2.79	▲	-2.04	1.18	14.18	14.18	2.65
R-10	1.57	2.50	0.74	-1.22	▲	-0.39	0.64	-1.40	▲	-0.59	1.16	0.87	0.87	0.66
R-11	1.82	2.50	1.17	-2.49	▲	-2.06	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.23	1.16	1.16	1.51

トリリニア②			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.31	2.50	0.38	-1.24	▲	-0.58	0.41	-1.06	△	-0.25	0.93	1.17	1.17	2.32
R-05	1.47	2.50	0.58	-39.60	▲	-3.93	0.50	-2.79	▲	-2.04	1.15	14.18	14.18	1.93
R-10	1.49	2.50	0.74	-1.32	▲	-0.64	0.64	-1.40	▲	-0.59	1.16	0.94	0.94	1.08
R-11	1.60	2.50	1.19	-1.68	▲	-0.88	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.25	0.78	0.78	0.64

トリリニア③.			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.15	2.50	0.38	-1.36	▲	-0.63	0.41	-1.06	△	-0.25	0.93	1.29	1.29	2.51
R-05	1.30	2.50	0.58	-3.70	▲	-3.36	0.50	-2.79	▲	-2.04	1.16	1.32	1.32	1.65
R-10	1.21	2.50	0.76	-1.07	△	-0.05	0.64	-1.40	▲	-0.59	1.19	0.76	0.76	0.08
R-11	1.36	2.50	1.22	-1.44	▲	-0.53	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.28	0.67	0.67	0.39

ＥＤ履歴モデル			動的応答解析結果				ハイブリッド試験結果				比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
P_09	1.46	2.20	0.63	-3.33	▲	-2.90	0.66	-2.41	▲	-1.78	0.95	1.38	1.38	1.63
P_10	1.44	2.20	1.16	-1.23	▲	-0.15	1.19	-1.35	▲	-0.06	0.98	0.92	0.92	2.36
P_13	1.46	2.20	0.94	-2.16	▲	-1.59	1.10	-2.13	▲	-1.41	0.85	1.01	1.01	1.13

表-3.1.3(2) 解析・試験結果比較：各種復元力特性

完全弾塑性形①			動的応答解析結果					ハイブリッド試験結果					比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.46	2.50	0.51	-1.17	△	-0.23	0.23	0.41	-1.06	△	-0.25	0.25	1.25	1.11	1.11	0.92
R-05	1.44	2.50	0.57	-2.62	▲	-2.04	2.04	0.50	-2.79	▲	-2.04	2.04	1.13	0.94	0.94	1.00
R-10	1.44	2.50	0.75	-1.30	▲	-0.43	0.43	0.64	-1.40	▲	-0.59	0.59	1.18	0.92	0.92	0.72
R-11	1.46	2.50	1.21	-1.53	▲	-0.68	0.68	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.37	1.27	0.71	0.71	0.49

完全弾塑性形②			動的応答解析結果					ハイブリッド試験結果					比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.41	2.50	0.42	-1.23	▲	-0.42	0.42	0.41	-1.06	△	0.25	0.25	1.03	1.17	1.17	-1.68
R-05	1.42	2.50	0.58	-2.72	▲	-2.18	2.18	0.50	-2.79	▲	2.04	2.04	1.15	0.97	0.97	-1.07
R-10	1.40	2.50	0.72	-1.21	▲	-0.40	0.40	0.64	-1.40	▲	-0.59	0.59	1.13	0.86	0.86	0.68
R-11	1.40	2.50	1.24	-1.49	▲	-0.64	0.64	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.37	1.31	0.69	0.69	0.47

完全弾塑性形③			動的応答解析結果					ハイブリッド試験結果					比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.38	2.50	0.37	-1.20	▲	-0.30	0.30	0.41	-1.06	△	-0.25	0.25	0.92	1.14	1.14	1.19
R-05	1.37	2.50	0.57	-2.65	▲	-2.10	2.10	0.50	-2.79	▲	-2.04	2.04	1.12	0.95	0.95	1.03
R-10	1.47	2.50	0.75	-1.35	▲	-0.57	0.57	0.64	-1.40	▲	-0.59	0.59	1.16	0.96	0.96	0.97
R-11	1.49	2.50	1.27	-2.07	▲	-0.94	0.94	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.37	1.34	0.96	0.96	0.69

劣化形バイリニア			動的応答解析結果					ハイブリッド試験結果					比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.46	2.50	0.53	-0.79	○	-0.06	0.06	0.41	-1.06	△	-0.25	0.25	1.30	0.75	0.75	0.22
R-05	1.58	2.50	0.45	-2.24	▲	-1.75	1.75	0.50	-2.79	▲	-2.04	2.04	0.89	0.80	0.80	0.86
R-10	1.50	2.50	0.56	-1.15	△	-0.44	0.44	0.64	-1.40	▲	-0.59	0.59	0.87	0.82	0.82	0.74
R-11	1.51	2.50	0.88	-1.22	▲	-0.56	0.56	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.37	0.93	0.57	0.57	0.41

トリリニア①			動的応答解析結果					ハイブリッド試験結果					比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.34	2.50	0.42	-1.19	△	-0.40	0.40	0.41	-1.06	△	-0.25	0.25	1.02	1.13	1.13	1.59
R-05	1.48	2.50	0.59	-39.60	▲	-5.40	5.40	0.50	-2.79	▲	-2.04	2.04	1.18	14.18	14.18	2.65
R-10	1.57	2.50	0.74	-1.22	▲	-0.39	0.39	0.64	-1.40	▲	-0.59	0.59	1.16	0.87	0.87	0.66
R-11	1.82	2.50	1.17	-2.49	▲	-2.06	2.06	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.37	1.23	1.16	1.16	1.51

トリリニア②			動的応答解析結果					ハイブリッド試験結果					比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.31	2.50	0.38	-1.24	▲	-0.58	0.58	0.41	-1.06	△	-0.25	0.25	0.93	1.17	1.17	2.32
R-05	1.47	2.50	0.58	-39.60	▲	-3.93	3.93	0.50	-2.79	▲	-2.04	2.04	1.15	14.18	14.18	1.93
R-10	1.49	2.50	0.74	-1.32	▲	-0.64	0.64	0.64	-1.40	▲	-0.59	0.59	1.16	0.94	0.94	1.08
R-11	1.60	2.50	1.19	-1.68	▲	-0.88	0.88	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.37	1.25	0.78	0.78	0.64

トリリニア③			動的応答解析結果					ハイブリッド試験結果					比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
R-04	1.15	2.50	0.38	-1.36	▲	-0.63	0.63	0.41	-1.06	△	-0.25	0.25	0.93	1.29	1.29	2.51
R-05	1.30	2.50	0.58	-3.70	▲	-3.36	3.36	0.50	-2.79	▲	-2.04	2.04	1.16	1.32	1.32	1.65
R-10	1.21	2.50	0.76	-1.07	△	-0.05	0.05	0.64	-1.40	▲	-0.59	0.59	1.19	0.76	0.76	0.08
R-11	1.36	2.50	1.22	-1.44	▲	-0.53	0.53	0.95	-2.15	▲	-1.37	1.37	1.28	0.67	0.67	0.39

ED履歴モデル			動的応答解析結果					ハイブリッド試験結果					比較値(動解／試験)			
番号	α	μa	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	X_{max}/μ_a	X_{min}/μ_a	判定	X_{rsd}/μ_a	ξ rsd	Xmax	Xmin	|X|max	Xrsd
P_09	1.46	2.20	0.63	-3.33	▲	-2.90	2.90	0.66	-2.41	▲	-1.78	1.78	0.95	1.38	1.38	1.63
P_10	1.44	2.20	1.16	-1.23	▲	-0.15	0.15	1.19	-1.35	▲	-0.06	0.06	0.98	0.92	0.92	2.36
P_13	1.46	2.20	0.94	-2.16	▲	-1.59	1.59	1.10	-2.13	▲	-1.41	1.41	0.85	1.01	1.01	1.13

3. 1. 4 解析値と実験値の比較図

前項3. 1. 1, 2, 3に示した表の比較値を図-3. 1. 4(1)、(2)および(3)にプロットし比較する。

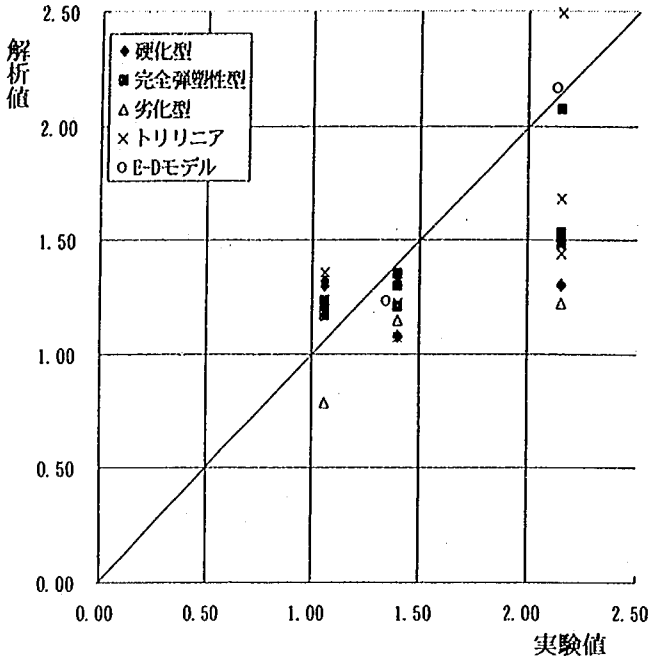


図-3. 1. 4(1) 各種復元力特性に対する最大変位の実験値と解析値

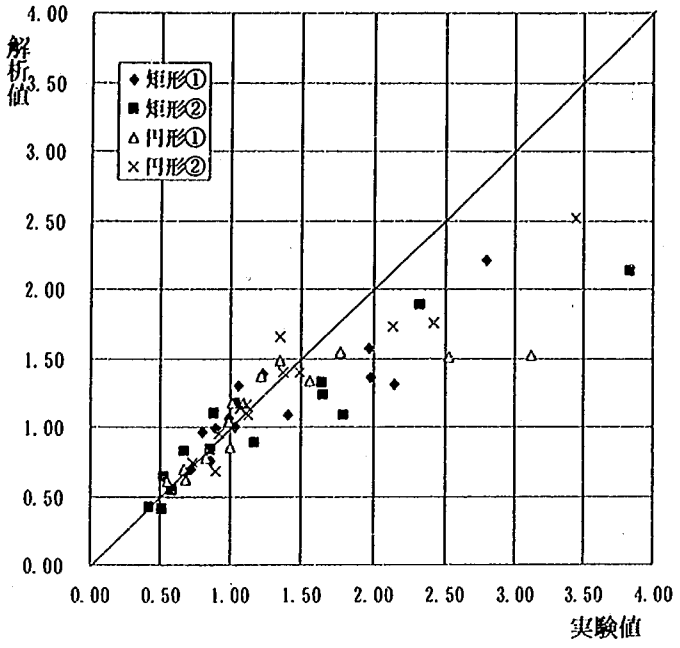


図-3. 1. 4(2) バイリニアモデルに対する最大変位の実験値と解析値 (全解析データ)

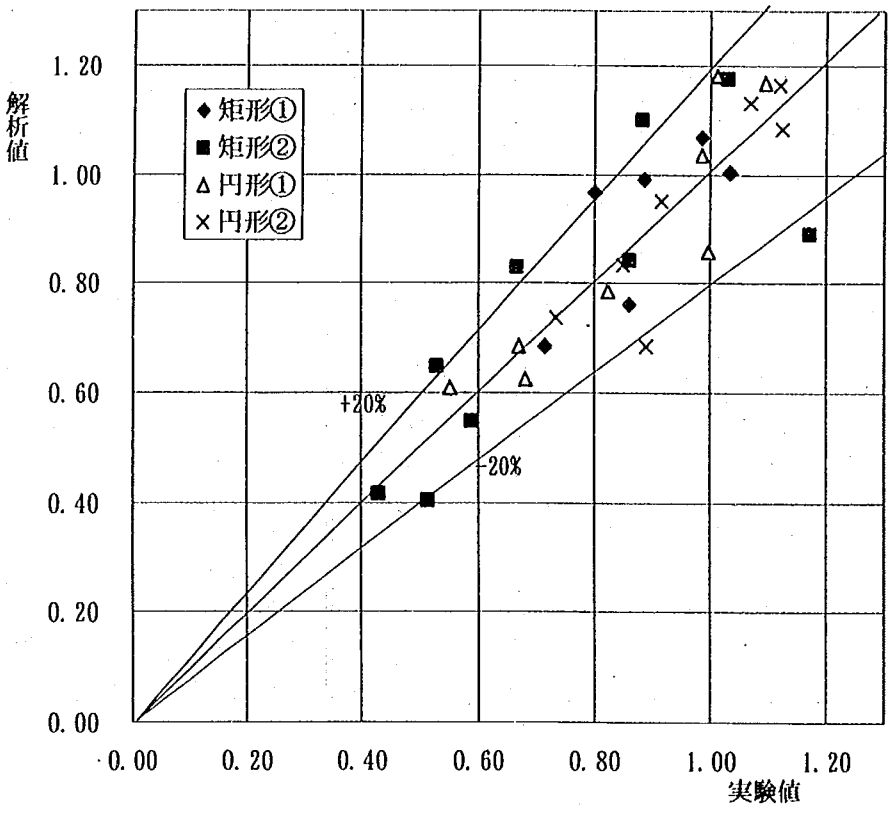
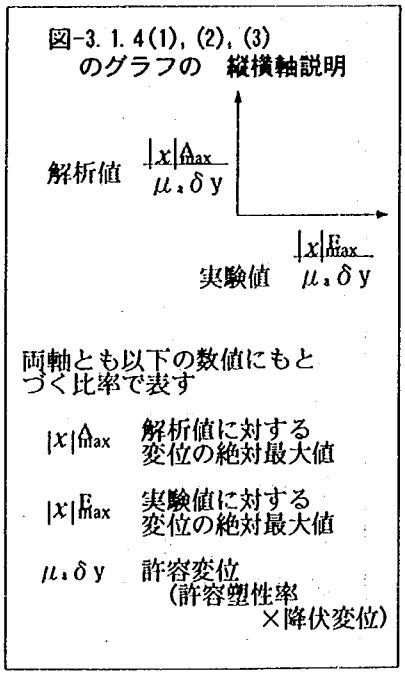


図-3. 1. 4(3) バイリニアモデルに対する最大変位の実験値と解析値 (解析値が1. 2以下のもの)



3.1.5 解析結果と実験結果の履歴図比較

解析結果およびハイブリッド地震応答実験結果のうち、最も特徴の表れるP－δ履歴図を並列配置して図-3.1.5 に示す。

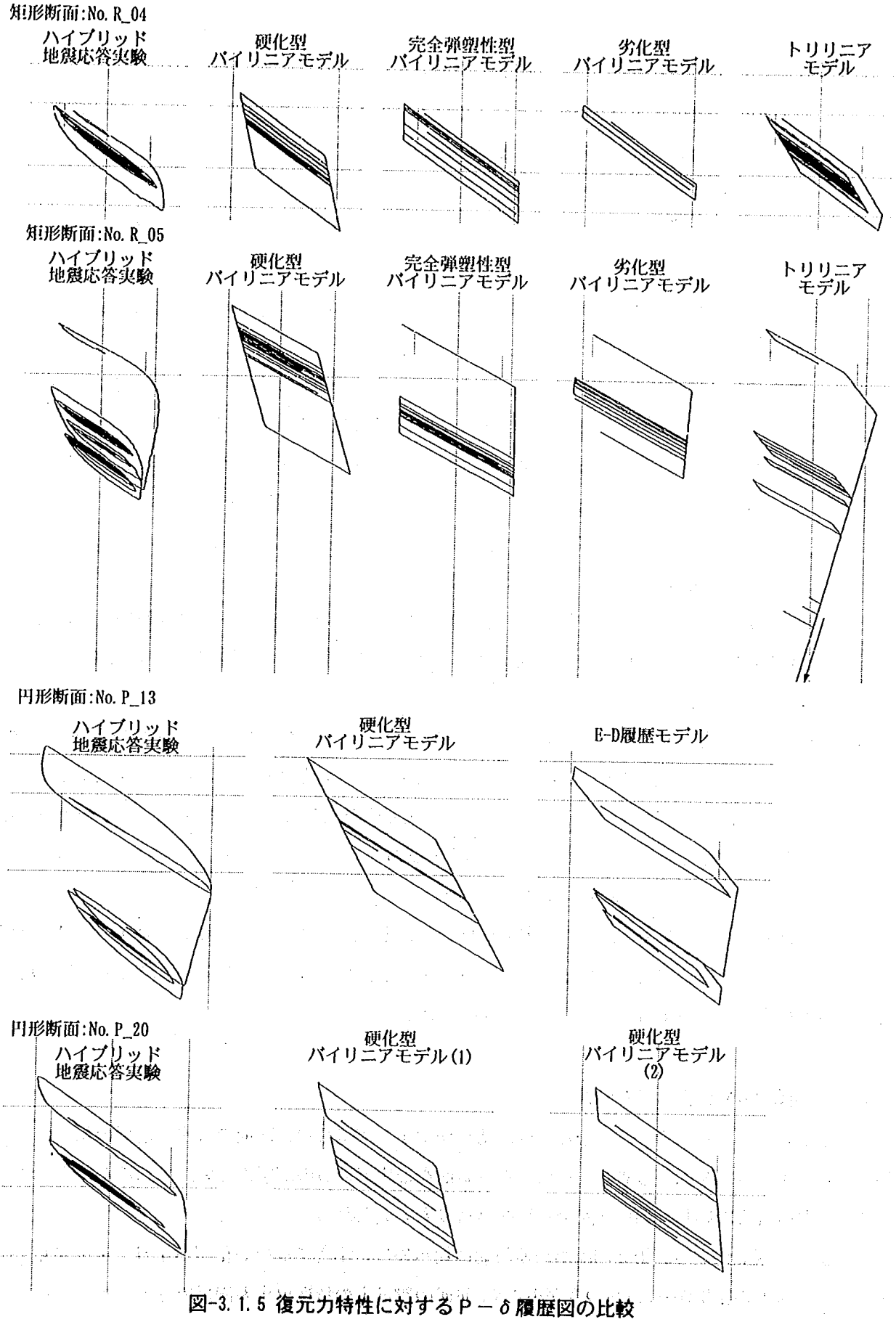


図-3.1.5 復元力特性に対するP－δ履歴図の比較

3.2 考察

3.2.1 復元力特性

数種類の復元力特性を用いた解析とハイブリッド地震応答実験との比較において次のような考察をおこなった。

- 試験の結果がある場合のように既知の履歴曲線に対して、完全弾塑性型バイリニアモデルでは、その降伏点高さのみが変数となっていることからこれを調整し設定することで最大変位などを比較的高い精度で計算できる。ただし、最小変位、残留変位などを同時に高精度に得ることは難しい。このように、調整した場合の解析による最大変位は、0.96～1.14(0.96～1.14)の範囲に、残留変位を0.69～1.19(0.97～1.19)の範囲にすることも可能である。{( )内は大きな劣化の無い範囲のみに限定した数値を示す}
- 劣化型バイリニアモデルでは、劣化が緩勾配である場合、完全弾塑性型にほぼ近い解析ができる。
- 第3勾配を劣化型とした標準的なトリリニアモデルでは、比較的僅かな振幅増のケースで、発散してしまう場合がある。これは劣化勾配の程度に関係していると思われる。解析結果の最大変位は、発散しない場合では試験結果比で 0.67～1.29(0.76～1.29)程度となる。
- E－D履歴モデルでは、十分なパラメータ設定のもとで、図-3.1.5 からも分るように、反力と変位の関係などをかなり高い精度な再現性を有している。ここに示した比較値において、最大変位は0.92～1.38(0.92)の範囲である。
- 硬化型バイリニアモデルは、その供試体の材料降伏応力度と2ケースの繰り返し載荷試験結果を用いて設定したが、ここに示した比較値において、最大変位は0.61～1.25(0.76～1.25)の範囲である。
- 以上では最大変位のみに着目したが、水平変位－反力の履歴曲線の形状は劣化域までを考えれば、①E－D履歴モデル、②トリリニアモデル、③完全弾塑性型あるいは緩劣化型バイリニアモデル、④硬化型バイリニアモデルの順で再現性が高いといえる。しかし、最大荷重を越えない範囲では、完全弾塑性型を除き同様な設定が可能であることから、ここでは比較解析していないが、順位をつけにくいと思われる。

以上より復元力特性として、高度な設定をした場合と単純な場合では、最大変位のみに着目した場合、大差があると判断できない。勿論、それぞれの復元力特性に含まれるパラメータを最適に設定された場合には高度なものの精度がより高まるであろうことは推測できる。

3.2.2 硬化型バイリニアモデル

設計手法の一部として考えるならば、解析結果が安定して得られ、断面の設定と解析の結果に連続的な関係があり、不十分な断面から設計上目標とする断面を推定できるのが望ましい。もちろん、安全性の確認ができなければならないし、過度な安全としない精度も必要となる。

このような観点に立ち、第2勾配が初期勾配に比べ極度に小さくない硬化型バイリニアモデルでは、ベンチマークテストの結果から、ばらつきが小さく、前述の設計上の特性要求も満足できる。本モデルは、道路橋

示方書の耐震設計編の解説に角補強構造の設定例としても示されており、静的な繰り返し載荷試験などによって得られる許容塑性率として制限される範囲を設定し、その範囲内での解析結果の妥当性が期待される。ここでは、この許容塑性率は、繰り返し載荷試験結果から得られる骨格曲線上で、最大荷重の 97% まで劣化した水平荷重に相当する変位とした。さらにここで、梁部材の非線形特性をM-φで定義する場合を図-3. 2. 1のように考えることとする。この場合も硬化型バイリニアでM－φを定義し、本論文の対象とした単柱式の橋脚では橋脚高に対する曲げ、曲率、たわみ角、変位の分布を順に積分すればよい。ここで、設計の終局状態は、劣化域を含まないこと、また、降伏点と最大荷重点はM-φ上の曲げモーメントに適当な差があることが条件となる。つまり、最も単純化すれば、硬化型バイリニアが条件となる。M-φが硬化型バイリニアである場合, P-δはバイリニアとはならないが、一様な増加関数となり、最も単純化すれば、硬化型バイリニアとなる。このような考え方に基づいて、設計復元力特性をバイリニアとすることは有益であると考え、その動的応答解析とハイブリッド地震応答実験結果を比較し、以下のように考察する。

・図-1. 5. 2(1) に示すように定義した硬化型バイリニア復元力特性を用いた動的応答解析は許容塑性率を最大荷重点あるいは僅かな劣化(97%)で定義すれば, 図-3. 1. 4(2)および(3)で解析値が1. 0以下で、実験値が1. 0以上となる結果のプロットは１ケースであることから、ほとんどの解析ケースでハイブリッド地震応答実験の安全性の判定と同じ判定となる。したがって、動的応答解析による耐震性能の安全照査の信頼性は、許容塑性率を過度に高く設定しないならば、最大応答変位解析値は実験値に対して±20％程度の誤差を含んで、概ね妥当となる。

・免震マニュアル地震波・Ⅲ種地盤を入力した場合、ハイブリッド地震応答実験では、その後半で劣化が加速される。しかし、硬化型バイリニアモデルでは、十分に再現できないことから、長時間で繰り返しの多い入力地震波に対して、許容塑性率を少し下げるなどの対応が必要である。

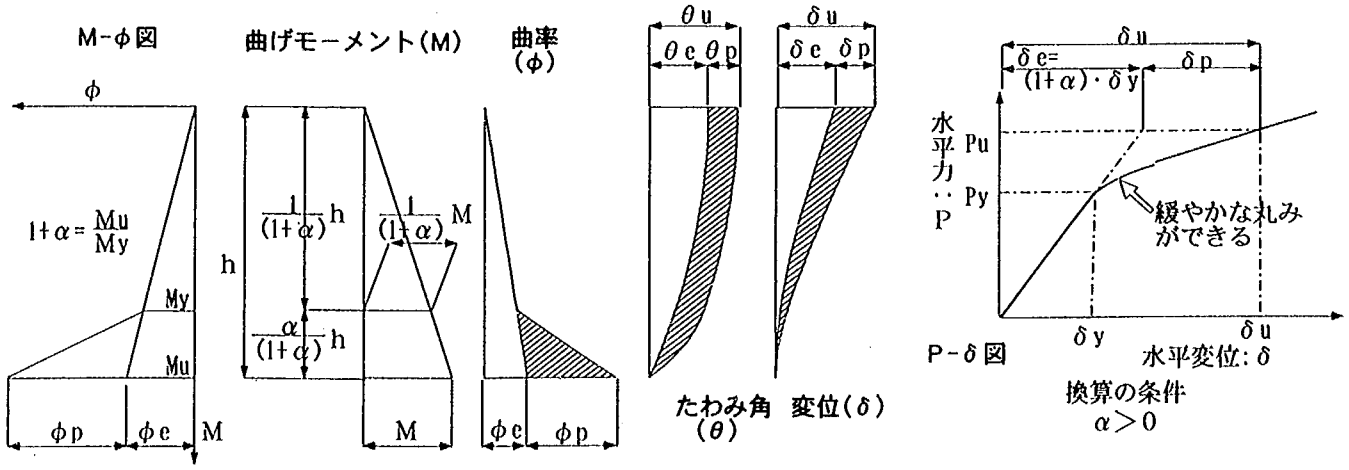


図-3. 2. 1 硬化型バイリニアモデルのM－φとP－δの関係

参考文献

1) 建設省：道路橋の免震設計法マニュアル(案)；(財)土木研究センター、平成４年１２月

2) Satish Kummar、Tsutomu Usami：An Evolutionary-degrading Hysteretic Model for Thin-walled Steel Structure、Engineering Structure、1996.7

道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書（VII）

共同研究報告書第184号
平成9年4月（1997）

建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、
名古屋高速道路公社、（社）鋼材倶楽部、（社）日本橋梁建設協会

要　旨　平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、都市内高速道路橋における多数の鋼製橋脚に座屈、変形、われ等の被害が生じた。こうした被災状況を踏まえ、地震以降既設橋脚の補強方法および新設橋脚の耐震設計法に関する調査研究を進めているところであるが、その検討の一環として鋼製橋脚の耐力および変形性能を確認するために大型供試体を用いた二軸正負交番繰返し載荷実験、弾塑性有限変位解析、ハイブリッド地震応答実験および非線形動的応答解析を行っている。本報告書は、平成7～8年度に行った実験および解析結果についてとりまとめたものである。

キーワード：鋼製橋脚、変形性能、じん性、耐力、繰返し載荷実験、弾塑性有限変位解析、ハイブリッド地震応答実験、非線形動的応答解析、耐震設計法

郵便はがき

50円切手をはって下さい

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市旭一番地

建設省土木研究所
構造橋梁部橋梁研究室　御中

No. 26

No. 26

配布先氏名

配布先住所

共同研究報告書　第184号　　部

上記のとおり受領しました。

所　　属（住所）

氏　名　　印