

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（Ⅵ）

—鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験—

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。

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 (VI)
－鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験－

正誤表

平成9年4月

頁	行	誤	正
1	上から8行目	靱性	じん性
1	下から7行目	鋼製脚	鋼製橋脚
4	上から4行目 上から5行目と 17行目 上から11行目	σ_y $\pm 2\sigma_y$ 、 $\pm 3\sigma_y$ 、 $\pm 4\sigma_y$ hは試験体高さ	σ_{yo} $\pm 2\sigma_{yo}$ 、 $\pm 3\sigma_{yo}$ 、 $\pm 4\sigma_{yo}$ 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
23	記号説明文の 下から5行目	σ_y 材料降伏点	σ_y 材料降伏点 (公称値)
76	表-3.1.1の 記号説明文	δ_u 包絡線において 水平荷重が P_{yx} の時 の水平変化	δ_u 包絡線において 水平荷重が P_{yu} の時 の水平変化

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（Ⅵ）

—鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験—

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を行っている。本報告書は、平成7～8年度に行った大型供試体15体の実験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、少補剛コンパクト断面、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)鋼材倶楽部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。

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 (～H8.10)

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

中嶋 裕之

鈴木 巖

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

目 次

まえがき

共同研究担当者の名簿

共同研究報告書の主担当および内容

1. 概説	1
2. 実験概要	2
2.1 供試体	2
2.1.1 形状・寸法・諸元	2
2.1.2 材料試験結果	3
2.1.3 製作および溶接条件	3
2.2 載荷方法	3
2.3 計測項目と計測位置	4
2.3.1 荷重	4
2.3.2 試供体の変位	4
2.3.3 試供体のひずみ	5
2.3.4 載荷・反力装置の変位	5
2.3.5 変形状況	5
3. 実験結果	6
3.1 矩形断面	6
3.1.1 実験結果一覧表	6
3.1.2 水平荷重－水平変位関係（ヒステリシス曲線）	6
3.1.3 包絡線	6
3.1.4 水平荷重－鉛直変位関係	6
3.1.5 水平変位の鉛直方向分布	6
3.1.6 エネルギー吸収量	7
3.1.7 等価減衰定数	7
3.1.8 ひずみ分布	7
3.1.9 変形状況写真	7
3.2 円形断面	8
3.2.1 実験結果一覧表	8
3.2.2 水平荷重－水平変位関係（ヒステリシス曲線）	8
3.2.3 包絡線	8
3.2.4 水平荷重－鉛直変位関係	8

3.2.5 水平変位の鉛直方向分布	8
3.2.6 エネルギー吸収量	8
3.2.7 等価減衰定数	8
3.2.8 ひずみ分布	8
3.2.9 変形状況写真	8
3.3 コーナー角鋼管断面	8
3.3.1 実験結果一覧表	8
3.3.2 水平荷重－水平変位関係（ヒステリシス曲線）	9
3.3.3 包絡線	9
3.3.4 水平荷重－鉛直変位関係	9
3.3.5 水平変位の鉛直方向分布	9
3.3.6 エネルギー吸収量	9
3.3.7 等価減衰定数	9
3.3.8 ひずみ分布	9
3.3.9 変形状況写真	9
4. 考察	10
4.1 矩形断面	10
4.2 円形断面	11
4.3 コーナー角鋼管断面	12
参考文献	13
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	14
図表	15
参考資料	163
参考資料－1：厚肉少補剛断面橋脚のハイブリッド実験	165
参考資料－2：円形断面鋼製橋脚のFEM解析	209
参考資料－3：箱型断面鋼製橋脚のFEM解析	233

1. 概説

本研究では、都市内に設置される標準的な高架橋として、スパン 60m 程度の 3 径間連続箱桁橋 (55m+60m+55m) を想定して鋼製脚の試設計を行い、その結果を標準的な供試体に反映し、縮尺を 1/3 に選んで実験に供した。

供試体の特徴としては、今後の製作における省力化に対応することを目的として、断面の構成要素に比較的厚肉の鋼板を用いたケースを対象としたことが挙げられる。特に、矩形断面の KD-4 や円形断面の KC-1 は極厚の断面構成となっており、実構造では常識的な板厚の値を超えると評価させる可能性もあるが、今後、採用可能性のある設計に対し、データ的に内挿で推定可能となるよう大きな板厚での実験を行ったものである。結果的には、厚肉 (コンパクト) 断面の供試体は橋脚として優れた靱性を示した。今後の厚肉部材の適用を期待したい。

これらの実験を遂行するかたわら、鋼材倶楽部ではワーキンググループを組織し、実験的、解析的な研究を行って、その結果を参考資料に取りまとめた。実験的研究としては、コンパクト断面でのハイブリッド実験を実施し、繰り返し載荷試験結果との比較検討を行った。また、解析研究としては、弾塑性 FEM 解析で実験過程の追跡を行い、矩形断面、円形断面のいずれに対しても解析での追跡可能性を確認した。今後の鋼製脚の解析のみならず、実験の予測や設計にも十分適用できる可能性を得ることができたと考えている。

本報告書は鋼材倶楽部で実施した一連の研究に関する成果を、正負交番繰り返し載荷実験を中心として、データ集的に取りまとめたものである。本文では、まず、第 2 章で供試体、実験装置、実験方法など実験概要を示す。次に、第 3 章では水平荷重—水平変位の関係を中心に実験結果を取りまとめ、最後に、第 4 章では実験結果に対して若干の考察を加えている。また、参考資料として、コンパクト断面のハイブリッド実験、円形断面鋼製橋脚の FEM 解析、箱形断面鋼製橋脚の FEM 解析についても掲載している。

2. 実験概要

2.1 供試体

2.1.1 形状・寸法・諸元

載荷実験に用いる供試体の設定に当たり、地上の一般道路の上空に建設される上下 4 車線（総幅員 20.4m）の都市内高架橋（図-2.1.1 参照）を想定し、中間支点に位置する P2 橋脚を対象に試設計を実施した。上部構造は支間が 55m+60m+55m の 3 径間連続鋼箱桁橋とし、橋脚は鋼製矩形断面の T 型一本柱形式とした。P2 橋脚が支持する上部構造の重量は、1,628tf である。地盤種別としては II 種地盤を想定した。地震荷重は橋軸直角方向について考え、設計水平震度 0.25 の水平地震力を橋脚基部から 13.9m の位置に作用させた。なお、本試設計では橋脚基部に打設される中詰めコンクリートは無いものとし、橋脚自身の地震時慣性力は無視している。試設計により得られた断面を 1/3 にスケールダウンしたものを供試体の基本構造とした。

表-2.1.1 に供試体の一覧を、表-2.1.2(1)～(3)に供試体諸元を示す。内訳は矩形断面供試体 11 体（供試体 KD-1～KD-10）、円形断面供試体 4 体（KC-1～KC-3）、コーナ角鋼管断面供試体（KA-1）である。このうち、KD-8 のみハイブリッド試験に供した。参考に、本共同研究で行われた土木研究所の基本供試体 No.20 の諸元をあわせて示す。また、図-2.1.2(1)～(13)に供試体形状・寸法を示す。

矩形断面供試体 KD-1 は、従来の道路橋示方書（平成 6 年 2 月）で試設計された耐震補強前の基本構造断面で、断面寸法は 900mm×900mm である。本実験の供試体シリーズ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を与えることとした。

供試体の高さについては、載荷試験装置の制約から 1/4.12 スケールとなっており、大部分の試験体では 3470mm、KD-7_1、KD-7_3 および KD-8 のみ 3440mm とした。本シリーズでは、耐震性の向上の観点から幅厚比パラメータ R_R を 0.4 程度以下を目途に供試体の設定を行った。

他方、円形断面は土木研究所で行われた No.8 供試体を比較基準とし、これより厚肉断面の供試体を設定した。

矩形断面、円形断面とも細長比は、実橋脚に対し比較的小さいものとなっている。

供試体の具体的内容を列記すると以下の通りである。

(1) 矩形断面供試体（KD シリーズ）

- ① 供試体 KD-1 は本シリーズの比較基準であり、土木研究所供試体 No.20（幅厚比パラメータ $R_R=0.585$ 、補剛材剛比 $\gamma/\gamma^*=0.914$ ）と同一の外形及びパラメータレベルにあり、縦リブ本数を 4 本、横リブ間隔を 500mm、 $\gamma/\gamma^*=1.0$ に設定。
- ② 供試体 KD-2 は、KD-1 に比べ、 R_F を 0.410 から 0.240 へ、 γ/γ^* を 3.0 に設定。
- ③ 供試体 KD-3 は、KD-2 に対し、 R_R 、 R_F 、 γ/γ^* は同程度にしながら断面を 900mm×900mm から 750mm×750mm にコンパクト化し、板厚 9mm から 12mm に、縦リブ本数 4 本から 2 本に設定。
- ④ 供試体 KD-4 は、KD-3 に対し断面を 600mm×600mm と更にコンパクト化し、板厚を 22mm とし $R_R=0.28$ に設定。

- ⑤ 供試体 KD-5 は、KD-3 と同一形状で軸力比 N/N_y を 0.136 から 0.185 に増加。
- ⑥ 供試体 KD-6 は、KD-3 と同程度の R_R 、 R_F 、 γ/γ^* としながら、断面を 750mm×750mm から 600mm×600mm として、細長比を 0.280 から 0.351 に増加。
- ⑦ 供試体 KD-8 は、KD-3 をベースにハイブリッド実験用としたもので、試設計を断面方向にも 1/4.12 縮尺とし断面寸法を 546mm×546mm に設定。
- ⑧ 供試体 KD-7_1、KD-7_3 は、ハイブリッド実験と静的繰返し載荷の違いを検証するために設定。載荷の繰返し回数を前者は 1 回、後者は 3 回として繰返し回数の影響をも調査。
- ⑨ 供試体 KD-9 は、KD-6 の鋼種を SM490A から SM570 に高強度化。
- ⑩ 供試体 KD-10 は、KD-3 あるいは KD-8 に対して γ/γ^* を 4.1 とし、補剛材細長比を 0.18 に設定。

(2) 円形断面供試体 (KC シリーズ)

- ① 供試体 KC-1 は、土木研究所供試体 No.8 の断面 $\phi 900 \times 9$ ($R/t=50.0$) に対し、 $\phi 600 \times 20$ ($R/t=15$) とさらに厚肉コンパクト化し、かつ材質を SS400 に設定。
- ② 供試体 KC-2_1、KC-2_3 は、土木研究所 No.8 に対し、 N/N_y を 0.122 から 0.200 に増加させ、載荷の繰返し回数を前者は 1 回、後者は 3 回として繰返し回数の比較用に設定。なお、KC-2_1 の材質は SM490YA、KC-2_3 は SM490A である。
- ③ 供試体 KC-3 は、KC-2_1、KC-2_3 の鋼種を SM490YA、SM490A から SM570 に高強度化。

(3) コーナー角鋼管断面供試体 (KA-1)

- ① コーナー部に角形鋼管を配し、ウェブパネルがせん断変形することによるエネルギー吸収を狙った供試体。

2.1.2 材料試験結果

使用した鋼材の材料試験結果を表-2.1.3(1)～(5)に示す。

2.1.3 製作および溶接条件

矩形断面供試体の角部の溶接にあたっては、外側については開先を取り、内側については開先を取っていない。主たる溶接は CO_2 半自動溶接にて行い、一部の溶接には被覆アーク溶接を用いた。使用した溶接材料と溶接条件を表-2.1.4 に示す。

2.2 載荷方法

載荷実験は、KD-7_1、KD-7_3 および KD-8 のみ A 社 (新日本製鉄株式会社鋼構造研究センター) 内の載荷フレームで実施し、それ以外は B 社 (川崎製鉄株式会社鋼構造研究所) 内の工作実験棟テストベッドにて行った。それぞれの載荷装置を写真-2.2.1、2.2.2 に示し、その形状・寸法を図-2.2.1、2.2.2 に示す。さらに、載荷装置の能力を表-2.2.1、2.2.2 に示し、供試体の設置状況を写真-2.2.3、2.2.4 に示す。

載荷は、まず所定の鉛直軸力（全断面降伏荷重の約 10%～20%）を載荷した後、その軸力を一定に保持した状態で、柱部の所定の位置に正負の繰り返し水平荷重を加える準静的水平交番載荷を行った。ここでは、水平方向ジャッキが伸張する方向を正方向、短縮する方向を負方向と呼ぶ。供試体の下端が降伏するときの載荷点の変位を δ_y とすると、繰り返し載荷の方法は、図-2.2.3 に示すように δ_y を片振幅とし、以降 δ_y の整数倍の変位を片振幅とした両振りの交番載荷を $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ 、 $\pm 4\delta_y$ 、・・・という様に漸次振幅を増加させた。なお、各振幅の繰り返し数は 1 回（KD-7_3 および KC-2_3 供試体については 3 回）とし、載荷は供試体が終局状態に至ったと見なせるか、載荷装置の都合で実行が不可能になるまで行った。繰り返しの基本水平変位である δ_{y0} は次式で与えられる。

$$\delta_{y0} = \frac{P_y h^3}{3EI} \quad \cdots \cdots (2.2.1)$$

$$P_y = \left(\sigma_y - \frac{N}{A} \right) \frac{Z}{h} \quad \cdots \cdots (2.2.2)$$

ここで、 P_y は降伏水平荷重、 h は試験体高さ、 EI は曲げ剛性、 σ_y は鋼材の公称降伏応力、 N は軸力、 A は供試体の断面積、 Z は供試体の断面係数である。

2.3 計測項目と計測位置

2.3.1 荷重

鉛直ジャッキによる載荷重及び水平ジャッキによる載荷重はロードセルにより計測した。水平荷重はロードセルからの出力を動ひずみ計を通すことによりリアルタイムに計測・記録を行った。鉛直荷重は、油圧コントローラを通して一定荷重を保持し、交番載荷 $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ 、 $\pm 4\delta_y$ 、・・・時点で載荷を停止し計測を行った。

2.3.2 供試体の変位

- ① 水平載荷に伴う供試体の水平変位をひずみゲージ式変位計にて計測した。計測は動ひずみ計を用いてリアルタイムに行った。また柱頭部のみでなく供試体中間部にもひずみ式変位計を配し、水平変位を計測した。
- ② 供試体頂部の鉛直変位は、ひずみゲージ式変位計で計測した。
- ③ 供試体柱部の曲げ変形をより正確に把握するため、ベースプレートの水平移動量及び剛体回転量をひずみゲージ式変位計で計測し、供試体の水平変位を補正した。

各供試体の変位計の設置位置を図-2.3.1(1)～(15)に示す。また、水平荷重載荷位置における供試体の水平変位 DLT は次式により算定した（図-2.3.2 参照）。

$$DT = DC - \frac{DS1 + DS2}{2} - \frac{DR1 - DR2}{L} HM \quad \cdots \cdots (2.2.3)$$

$$DLT = \frac{HL}{HM} DT \quad \cdots \cdots (2.2.4)$$

2.3.3 供試体のひずみ

供試体各部のひずみはひずみゲージ（ゲージ長 2mm の弾性ゲージと塑性ゲージ）を貼付して計測した。供試体表面のひずみゲージ貼付位置を図-2.3.3(1)～(15)に示す。

2.3.4 載荷・反力装置の変位

B 社での実験では、一部の載荷・反力装置の変位量を計測した。載荷・反力装置の変位計取り付け位置を図-2.3.1 に合わせて示す。

2.3.5 変形状況

柱基部の局部変形を目視により観察した。また、面外変形量を、KD-1～KD-3 および KA-1 については供試体表面のグリッド上にて、定規をあてて計測し、その他の供試体については、形取りゲージにより計測した。同時に写真撮影を行い、供試体の変形を記録した。面外変位の計測・記録・写真撮影は、水平変位が $\pm n\delta_0$ に達したときに載荷を一旦中止して行った。

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 δ_{yEN} は、以下のように実験より得られる荷重変位曲線の初期勾配と降伏荷重 P_{yM} 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_{yM} を求める。荷重－変位の実験結果において、基本的に荷重が P_{yM} の約20～70%の値の時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し、 P_{yN} をこの実験初期勾配で除した値を δ_{yEN} とした。実験初期勾配を求める際に荷重の範囲を P_{yM} の約20～70%としたのは、荷重が低いと荷重が低いことによる誤差を含みやすいこと、逆に荷重が高いと変位量が座屈等の幾何学的非線形の影響を受けやすいことを考慮したものである。また、初期勾配の計算には、基本的に+1 δ_0 載荷時までのデータを用いた。なお、 δ_{yEN} は2.2で述べた載荷実験時における δ_0 とは異なる。

理論初期勾配は、式(2.2.1)を用いて求めた P_{yN} を式(2.2.2)を用いて求めた δ_0 で除算したものであり、原点を通る直線である。

なお、塑性率 μ の評価において、降伏水平変位として δ_{yEN} 、すなわち初期勾配として実験勾配を、材料降伏点として公称値を用いている根拠については、共同研究報告書（I）を参照されたい。

3.1.2 水平荷重－水平変位関係（ヒステリシス曲線）

図-3.1.1(1)～3.1.1(10)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-3.1.2(1)～3.1.2(10)に図-3.1.1 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。

3.1.4 水平荷重－鉛直変位関係

図-3.1.3(1)～3.1.3(7)に水平荷重と鉛直変位との関係を示す。なお、KD-1については変位計がうまく動作しなかったため、また、KD-7_1、7_3は試験装置の都合上変位計が設置できなかったためデータが取れていない。

3.1.5 水平変位の鉛直方向分布

図-3.1.4(1)～3.1.4(8)に各 δ_0 時の水平変位の鉛直方向分布を示す。水平変位が各 δ_0 に到達したときの水平変位の鉛直方向分布とする。なお、KD-7_1、7_3については、試験装置の都合上変位計が設置できなかったためデータが取れていない。

3.1.6 エネルギー吸収量

図-3.1.5(1)～3.1.5(10)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通り算出した。

1 サイクルの吸収エネルギーは、ヒステリシス曲線と変位軸とで囲まれる面積で表すことができ、図-3.1.6(a), (b)の斜線部分のようになる。これを図-3.1.6(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（水平荷重が 0mm の点）において変位・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正確に計算するため、水平変位が 0mm の点を内挿により求めることとした。1 サイクルでの吸収エネルギーは次式によって求められる。

$$\Delta W = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} (h_{i+1} + h_i) \cdot (d_{i+1} - d_i) \right\} + \frac{1}{2} \{ (h_1 + h_s) \cdot (d_1 - d_s) + (h_e + h_n) \cdot (d_e - d_n) \} \cdots (3.1.1)$$

ここで、 h_i 、 d_i はそれぞれ計測した水平荷重および載荷点真変位であり、 n は 1 サイクル内に含まれる計測数（図-3.1.6(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 点は同一の点である。

3.1.7 等価減衰定数

図-3.1.7(1)～3.1.7(10)に各サイクルにおける平均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 は次式で与えられる。

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

ここに、 W は図-3.1.8 に示される三角形 OAC と三角形 OBD の面積の輪で表されるエネルギーである。但し、この 2 つの三角形は以下の通りとした。1 サイクルのループにおいて絶対変位が最大となる A 点と B 点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 の垂線の足をそれぞれ C、D とし、点 A と点 B とを結んだ線分と直線 L との交点を O とした。参考として、図-3.1.8 における A 点と B 点を結んだ直線の勾配は等価剛性にあたる。

3.1.8 ひずみ分布

図-3.1.9(1)～3.1.9(10)に代表的な荷重ステップ（降伏荷重時、最大荷重時）における供試体基部からダイヤフラム間隔の 1/2 の位置におけるひずみ分布を示す。

3.1.9 変形状況写真

写真-3.1.1(1)～(10)に最大荷重時および実験終了時の供試体の変形状況写真を示す。

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（ヒステリシス曲線）

図-3.2.1(1)～3.2.1(4)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(4)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)～3.2.3(4)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)～3.2.4(4)に各 δ_0 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)～3.2.5(4)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 3.1 矩形断面と同じ方法により算出した。

3.2.7 等価減衰定数

図-3.2.6(1)～3.2.6(4)に各サイクルにおける平均水平変位と等価減衰定数 h_e の関係を示す。

3.2.8 ひずみ分布

図-3.2.7(1)～3.2.7(4)に代表的な荷重ステップ（降伏荷重時、最大荷重時）における供試体基部から外径の 1/2 の位置におけるひずみ分布を示す。

3.2.9 変形状況写真

写真-3.2.1(1)～(4)に最大荷重時および実験終了時の供試体の変形状況写真を示す。

3.3 コーナー角鋼管断面

3.3.1 実験結果一覧

表-3.3.1 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。ただし、角形鋼管に SM490A、パネルに SS400 を用いており、水平荷重に対してパネルの方が先に降伏することから、同

表における P_y は引張側パネルが降伏する荷重としている。その際、断面はパネルを含め全断面有効とした。また、軸力比については、鋼管、パネルおよび縦補剛材それぞれの断面積と降伏応力の積を合計した値を N_y として算定している。

3.3.2 水平荷重—水平変位関係（ヒステリシス曲線）

図-3.3.1 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。

3.3.3 包絡線

図-3.3.2 に図-3.3.1 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。

3.3.4 水平荷重—鉛直変位関係

図-3.3.3 に水平荷重と鉛直変位との関係を示す。

3.3.5 水平変位の鉛直方向分布

図-3.3.4 に各 δ_0 時の水平変位の鉛直方向分布を示す。

3.3.6 エネルギー吸収量

図-3.3.5 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 3.1 矩形断面と同じ方法で算出した。

3.3.7 等価減衰定数

図-3.3.6 に各サイクルにおける平均水平変位と等価減衰定数 h_e の関係を示す。

3.3.8 ひずみ分布

図-3.3.7 に代表的な荷重ステップ（降伏荷重時、最大荷重時）における供試体基部から 450mm の位置におけるひずみ分布を示す。

3.3.9 変形状況写真

写真-3.3.1 に最大荷重時および実験終了時の供試体の変形状況写真を示す。

4. 考察

4.1 矩形断面

(1) 厚肉コンパクト化の効果

図-4.1.1 に KD-1～KD-4 供試体の柱頭部における水平荷重－水平変位曲線の包絡線を示す。

まず、実測値に基づく包絡線を見ると、KD-1 供試体は他の試験体と比較してフランジの幅厚比パラメーターが大きいのに加え補剛材の剛度が小さいため、比較的早期に最大耐荷力に達し、それ以降の強度劣化が著しい。KD-2 はこれらの試験体の中で最も断面剛性および断面係数が大きいと、初期弾性勾配、最大耐荷力が最も大きくなっている。KD-3 は設計上の断面係数は KD-1 と同程度であるが、材料降伏点が高かったため最大耐荷力は小さい。しかし、最大耐荷力に至るまでの変位は大きく、それ以降の強度劣化も緩やかである。KD-4 は使用した実験装置で与えられる最大の変位を与えても最大耐荷力に到達しなかったため、最大変位を 3 回繰り返して繰り返し載荷したが、強度の劣化は認められず安定した挙動を示した。

縦軸を降伏水平荷重 P_{yM} で、横軸を降伏水平変位 δ_{yEN} で無次元化した包絡線を見ると、最大耐荷力、変形能に影響を及ぼすと考えられる細長比パラメーター λ 、幅厚比パラメーター R_R 、 R_F 、リブ剛度 γ/γ^* 、および軸力比 N/N_y の値がほぼ等しい KD-2 と KD-3 は、非常に類似した包絡線形状となっており、断面形状を厚肉コンパクト化しても、これらのパラメーターの組み合わせにより、包絡線の形状が決定されることを示唆していると考えられる。

(2) 軸力比の影響

図-4.1.2 に供試体の寸法・形状は等しく、軸力のみを変化させた KD-3 と KD-5 の包絡線を比較して示す。既往の研究でも指摘されているように、無次元化した包絡線で比較すると、軸力比は最大耐荷力までの荷重－変位関係にはあまり影響を及ぼさず、最大耐荷力以降の強度劣化に影響を与え、軸力比が大きい方が強度劣化が激しいことがわかる。

(3) 細長比の影響

図-4.1.3 に細長比パラメーターのみが異なるように計画した KD-3 と KD-6 の包絡線を比較して示す。鋼材の引張試験結果をもとに算定した幅厚比パラメーターや軸力比も両者ではほぼ等しくなっている。細長比の影響についても軸力比の影響と同様、無次元化した包絡線で比較した場合、最大耐荷力までの荷重－変位関係にはあまり影響を及ぼさず、最大耐荷力以降の強度劣化に影響を与え、細長比パラメーターが大きい方が強度劣化が激しいという既往の研究成果を追認する結果が得られた。

また、KD-5 と KD-6 の無次元化された包絡線はほぼ一致しており、軸力比が 0.118 から 0.166 へ約 40% 増加した効果と細長比パラメーターが 0.300 から 0.392 へ約 30% 増加した効果がほぼ等価であると言える。

(4) 最終耐荷力・塑性率などの推定式の適用性

図-4.1.4～4.1.6 には、それぞれ P_u/P_{yM} と $R_R \cdot \lambda$ の関係、 δ_m/δ_y と $R_R \cdot \lambda^{0.5}$ の関係、 δ_y/δ_y と $(1+N/N_y) \cdot R_R \cdot \lambda^{0.5}$ との関係を示す。同図には δ_y として公称降伏点に基づく δ_{yN} を用いた場合と材料試験で得られた降伏点に基づく δ_{yM} を用いた場合とを示している。また、実線と破線は以下に示す P_u/P_{yM} 、 δ_m/δ_y 、および δ_y/δ_y の推定式²⁾をプロットしたものであり、実線が平均値曲線、破線が(平均値－標準偏差)の曲線である。

$$\frac{P_u}{P_y} = 0.101 \cdot (R_R \cdot \lambda)^{-1.0} + 0.880 \quad (S=0.242)$$

$$\frac{\delta_m}{\delta_y} = 0.00759 \cdot (R_R \cdot \sqrt{\lambda})^{-3.5} + 2.59 \quad (S=1.32)$$

$$\frac{\delta_{95}}{\delta_y} = 0.0147 \cdot \left\{ (1 + N/N_y) \cdot R_R \cdot \sqrt{\lambda} \right\}^{-3.5} + 4.20 \quad (S=1.40)$$

ただし、 $0.3 \leq R_R \leq 0.7$ 、 $0.25 \leq \lambda \leq 0.5$ 、 $0.0 \leq N/N_y \leq 0.2$ 、 $\gamma/\gamma^* \geq 3.0$

いずれの図においても、 δ_y として材料試験で得られた降伏点に基づく δ_{yM} を用いた場合には、(平均値－標準偏差)の曲線は実験データの下限值付近を押さえており、上記推定式の適用可能性を示していると考えられる。

図-4.1.7には δ_{97}/δ_{yEN} と $N/N_{yM} \cdot R_R \cdot \lambda$ 、 $N/N_{yM} \cdot R_F \cdot \lambda$ との関係を示す。同図には、縦軸のパラメーターが横軸のパラメーターの指数関数で表現されると仮定した場合の回帰曲線も合わせて示している。幅厚比パラメーターとして R_F と R_R のどちらを用いても、相関はほとんど変わらず、 $N/N_{yM} \cdot R \cdot \lambda$ の0.68乗に反比例する結果となっている。

4.2 円形断面

図-4.2.1にKC-1～KC-3供試体の柱頭部における水平荷重－水平変位曲線の包絡線を示す。(a)は実測値に基づく包絡線、(b)は縦軸を降伏水平荷重 P_{yM} で、横軸を降伏水平変位 δ_{yEN} で無次元化した包絡線である。

円形断面供試体のうち、KC-1のみが寸法・形状が異なり、KC-2_1、KC-2_3、KC-3は形状・寸法は同一で、使用鋼材あるいは載荷方法が異なる。実測値に基づく包絡線を見ると、形状・寸法の等しいKC-2_1、KC-2_3、KC-3は初期弾性勾配がほぼ等しい。最大耐力については、材料降伏点が高いKC-3が最も高く、KC-2_1とKC-2_3がほぼ同じ最大耐力でそれに続き、材料降伏点が最も低く、断面もコンパクト化されたKC-1が最も低い結果となっている。一方最大耐力を超えた後の耐力劣化の度合いは、KC-1、KC-2_1、KC-3、KC-2_3の順で大きくなっている。特に厚肉コンパクト断面としたKC-1については、降伏以降も緩やかに耐力が上昇し、最大耐力を迎えるまでに大きな変形能を有しているのに加え、最大耐力以降の耐力劣化も非常に小さいことが分かる。

一方、無次元化した包絡線を見ると、降伏後の耐荷力上昇率 P_u/P_{yM} はKC-2_1とKC-3が1.23程度と最も低く、KC-2_3の約1.5、KC-1の約1.8の順で大きくなっている。最大耐力までの変形能については、KC-2_1とKC-3がほぼ等しく $2\delta_{yEN}$ 程度、KC-2_3が $3\delta_{yEN}$ 程度、KC-1が $9\delta_{yEN}$ 程度となっている。さらに、KC-2_1とKC-3は非常に類似している。前者は径厚比パラメーター $R_t=0.111$ 、軸力比 $N/N_{yM}=0.145$ の実験結果であり、後者は径厚比パラメーター $R_t=0.158$ 、軸力比 $N/N_{yM}=0.111$ の実験結果である。両試験体において、径厚比パラメーターの増加率と軸力比の低下率が同程度(約40%)であるため、これら2つのパラメーターが無次元包絡線に与える影響は同程度であると考えられる。

図-4.2.2、図-4.2.3には、それぞれ P_u/P_{yM} と $N/N_{yM} \cdot \lambda \cdot R_t^{1.5}$ との関係、 δ_{97}/δ_{yEN} と $N/N_{yM} \cdot \lambda \cdot R_t^{1.5}$ との関係

を示す。同図には、縦軸のパラメーターが横軸のパラメーターの指数関数で表現されると仮定した場合の回帰曲線も合わせて示している。データ数が少ないため確実なことは言えないが、 P_t/P_{yM} および δ_{y7}/δ_{yEN} は近似的に $N/N_{yM} \cdot \lambda \cdot R_t^{1.5}$ の指数関数により表現できる可能性があるものと思われる。

4.3 コーナー角鋼管断面

本供試体の最終破壊形態は、耐力上昇中のコーナー角鋼管およびパネルの破断であった。最初の割れは $-11\delta_o$ に向かって載荷途中、補正前の載荷点変位約 70mm の時点で引張領域にある上側角鋼管のコーナー部から発生した。このとき、角鋼管部での割れはウェブ側に鋼管の半分程度まで、フランジ側は鋼管外側を貫通しフランジパネルにも 50mm 程度進入したが、荷重の低下は小さかった。この割れは $-12\delta_o$ に向かって載荷中、補正前の載荷点変位約 95mm の時点でウェブ側にさらに進展した。その後、 $+13\delta_o$ に向かって載荷中、補正前の載荷点変位約 94mm の時点で引張側（最初の割れとは反対側）に別の割れが発生し、引張領域の角鋼管の外側は上下ともほぼ破断し、フランジパネルも半分近くが破断した。この際、荷重は 40tf 程度低下したが、実験は継続可能であった。最終的には、 $-13\delta_o$ に向かって載荷中、補正前の載荷点変位約 50mm の時点で最初に発生した割れが進展し、引張側角鋼管が完全に破断するとともに、下側角鋼管も完全に破断して荷重が急激に低下したため、実験を終了した。実験終了まで圧縮側角鋼管、パネルともほとんど座屈しなかった。最終破壊に至るまでの亀裂の発生・進展状況を水平荷重－水平変位曲線と合わせて、図-4.3.1 に示す。

いずれの割れも角鋼管と上側ベースプレートとのすみ肉溶接の角鋼管側止端部に発生した低サイクル疲労亀裂を起点として、脆性的に進展したものであり、本試験体のように座屈が発生しない、またはしにくい構造の場合は、構造的あるいは材料的に脆性的な破壊が発生しないような工夫が必要であると言える。例えば KD-4 試験体のように、靱性の高い TMCP 鋼を用いる、低サイクル疲労亀裂の発生が予想される位置にスカラップを取って溶接を無くすなどの対策が考えられる。こうした対策を採ることにより、本試験体の最終耐荷力と塑性率はより改善されるものと思われる。

【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り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) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG(主査：宇佐美勉)：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術、1996年
- 3) 中川知和、安波博道、小林洋一、橋本修身、水谷慎吾、森脇清明：弾塑性有限変位解析による箱形鋼製橋脚の耐荷力と変形能の評価、第1回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp.599~604、1996年1月
- 4) 橋本修身、安波博道、水谷慎吾、小林洋一、中川知和：コンパクト断面橋脚の耐震性に関する検討、橋梁と基礎、Vol.30、No.8、pp.135~137、1996年8月
- 5) 末田明、橋本修身、水谷慎吾、小林洋一、安波博道、中川知和、西川和廣：繰返し荷重を受ける箱断面鋼製橋脚の変形性能に関する実験的研究、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、I-B282、PP.564~565、1996年9月
- 6) 末田明、安波博道、水谷慎吾、小林洋一、中川知和：繰返し荷重を受ける鋼製橋脚の変形性能に関する研究、鋼構造年次論文報告集、第4巻、pp.17~24、1996年11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 喙士	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(株)鋼鉄研究所鋼構造研究開発センター主任研究員
	名取 暢	(株)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

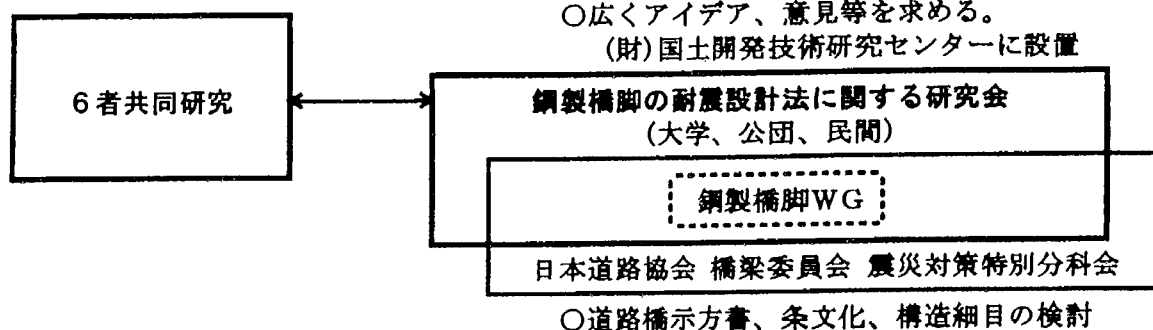


図 表

2. 実験概要

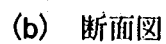
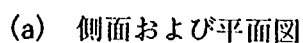


図-2.1.1 想定した高架橋

表-2.1.1 鋼製橋脚試験体一覧表

断面形状	矩形断面							
試験体名 (実施)	KD-1 (平成7年度 KSC)	KD-2 (平成7年度 KSC)	KD-3 (平成7年度 KSC)	KD-4 (平成8年度 KSC)	KD-5 (平成8年度 KSC)	KD-6 (平成8年度 KSC)	KD-7.1 (平成8年度 NSC)	KD-7.3 (平成8年度 NSC)
基本形状								
構造 パラ メー タ	- 補剛板 $R_R=0.411$ $R_F=0.410$ - 細長比λラメータ $\lambda=0.229$ - 縦補剛材 $\gamma/\gamma^*=1.006$ $\lambda_s=0.40$ - 軸力比 $N/N_F=0.150$	- 補剛板 $R_R=0.411$ $R_F=0.240$ - 細長比λラメータ $\lambda=0.233$ - 縦補剛材 $\gamma/\gamma^*=3.004$ $\lambda_s=0.26$ - 軸力比 $N/N_F=0.131$	- 補剛板 $R_R=0.428$ $R_F=0.254$ - 細長比λラメータ $\lambda=0.280$ - 縦補剛材 $\gamma/\gamma^*=3.054$ $\lambda_s=0.26$ - 軸力比 $N/N_F=0.136$	- 補剛板 $R_R=0.280$ $R_F=0.172$ - 細長比λラメータ $\lambda=0.360$ - 縦補剛材 $\gamma/\gamma^*=3.09$ $\lambda_s=0.17$ - 軸力比 $N/N_F=0.099$	- 補剛板 $R_R=0.428$ $R_F=0.254$ - 細長比λラメータ $\lambda=0.280$ - 縦補剛材 $\gamma/\gamma^*=3.05$ $\lambda_s=0.26$ - 軸力比 $N/N_F=0.185$	- 補剛板 $R_R=0.411$ $R_F=0.243$ - 細長比λラメータ $\lambda=0.351$ - 縦補剛材 $\gamma/\gamma^*=3.07$ $\lambda_s=0.25$ - 軸力比 $N/N_F=0.136$	- 補剛板 $R_R=0.374$ $R_F=0.216$ - 細長比λラメータ $\lambda=0.396$ - 縦補剛材 $\gamma/\gamma^*=3.21$ $\lambda_s=0.22$ - 軸力比 $N/N_F=0.118$	- 補剛板 $R_R=0.374$ $R_F=0.216$ - 細長比λラメータ $\lambda=0.396$ - 縦補剛材 $\gamma/\gamma^*=3.21$ $\lambda_s=0.22$ - 軸力比 $N/N_F=0.118$
主要 部 材 寸 法	- 外殻板 $B=900, t=9$ - 縦補剛材 $PI 60 \times 6$ - タイヤラム $t=6$	- 外殻板 $B=900, t=9$ - 縦補剛材 $PI 80 \times 9$ - タイヤラム $t=6$	- 外殻板 $B=750, t=12$ - 縦補剛材 $PI 90 \times 9$ - タイヤラム $t=6$	- 外殻板 $B=600, t=22$ - 縦補剛材 $PI 135 \times 12$ - タイヤラム $t=6$	- 外殻板 $B=750, t=12$ - 縦補剛材 $PI 90 \times 9$ - タイヤラム $t=6$	- 外殻板 $B=600, t=10$ - 縦補剛材 $PI 73 \times 8$ - タイヤラム $t=6$	- 外殻板 $B=546, t=10$ - 縦補剛材 $PI 75 \times 7$ - タイヤラム $t=6$	- 外殻板 $B=546, t=10$ - 縦補剛材 $PI 75 \times 7$ - タイヤラム $t=6$
材質	SM490A	SM490A	SM490A	SM490C-TMC	SM490A	SM490A	SM490A	SM490YA
繰返し数	1	1	1	1	1	1	1	3
備考	基準断面	パラメータ制限	パラメータ制限+コンパクト	極厚化	KD-3 軸力比 up	KD-3 細長比 up	ハイブリット比較用	ハイブリット比較用

表-2.1.1 鋼製橋脚試験体一覧表 (つづき)

断面形状	矩形断面			円形断面				コーナー角鋼管
試験体名 (実施)	KD-8 (平成8年度 NSC)	KD-9 (平成8年度 KSC)	KD-10 (平成8年度 KSC)	KC-1 (平成7年度 KSC)	KC-2.1 (平成8年度 KSC)	KC-2.3 (平成8年度 KSC)	KC-3 (平成8年度 KSC)	KA-1 (平成7年度 KSC)
基本形状								
構造 パラ メー タ	・補剛板 $R_R=0.374$ $R_F=0.216$ ・細長比λラメータ $\lambda=0.396$ ・縦補剛材 $\gamma/\gamma^*=3.21$ $\lambda_s=0.22$ ・軸力比 $N/N_y=0.118$	・補剛板 $R_R=0.492$ $R_F=0.291$ ・細長比λラメータ $\lambda=0.421$ ・縦補剛材 $\gamma/\gamma^*=3.07$ $\lambda_s=0.30$ ・軸力比 $N/N_y=0.136$	・補剛板 $R_R=0.352$ $R_F=0.183$ ・細長比λラメータ $\lambda=0.293$ ・縦補剛材 $\gamma/\gamma^*=4.12$ $\lambda_s=0.18$ ・軸力比 $N/N_y=0.150$	・鋼管 $R_F=0.027$ ・細長比λラメータ $\lambda=0.346$ ・軸力比 $N/N_y=0.104$	・鋼管 $R_F=0.081$ ・細長比λラメータ $\lambda=0.277$ ・軸力比 $N/N_y=0.200$	・鋼管 $R_F=0.081$ ・細長比λラメータ $\lambda=0.277$ ・軸力比 $N/N_y=0.200$	・鋼管 $R_F=0.117$ ・細長比λラメータ $\lambda=0.333$ ・軸力比 $N/N_y=0.150$	・角形鋼管 $R_R=0.35$ ・細長比λラメータ $\lambda=0.25$
主要 部 材 寸 法	・外殻板 $B=546, t=10$ ・縦補剛材 $Pl 75 \times 7$ ・タイヤラム $t=6$	・外殻板 $B=600, t=10$ ・縦補剛材 $Pl 73 \times 8$ ・タイヤラム $t=6$	・外殻板 $B=720, t=14$ ・縦補剛材 $Pl 90 \times 10$ ・タイヤラム $t=6$	・鋼管 $D=600, t=20$ ($R/t=15.0$)	・鋼管 $D=850, t=13$ ($R/t=32.7$)	・鋼管 $D=850, t=13$ ($R/t=32.7$)	・鋼管 $D=850, t=13$ ($R/t=32.7$)	・角形鋼管 $B=200, t=12$ ・ハネル $B=500, t=9$ ・縦補剛材 $Pl 65 \times 9$
材質	SM490A	SM570A	SM490A	SM490A	SM490YA	SM490A	SM570A	SM490A, SS400
繰返し数	—	1	1	1	1	3	1	1
備考	パイロット用	KD-6 鋼種変更	補剛材細長比制限	コンパクト断面	$R_F=0.08$, 軸力比 up	$R_F=0.08$, 軸力比 up	KC-2 鋼種変更	—

表-2.1.2(1) 矩形断面供試体の諸元

供試体番号	KD-1	KD-2	KD-3	KD-4	KD-5
外形寸法 (mm)	900×900	900×900	750×750	600×600	750×750
板厚 t (mm)	9	9	12	22	12
縦リブ寸法 (mm)	60×6	80×9	90×9	135×12	90×9
横リブ間隔 a (mm)	500	500	500	500	500
補剛板の全幅 b (mm)	900	900	750	600	750
縦リブで区切られるハネ数	5	5	3	2	3
鋼種	SM490A	SM490A	SM490A	SM490C-TMC	SM490A
鋼材下降伏点 σ_y (kgf/cm ²)	3,200	3,200	3,200	3,200	3,200
断面積 A (cm ²)	378.4	436.0	419.0	573.4	419.0
断面2次モーメント I (cm ⁴)	484,853	540,713	359,690	298,477	359,690
断面2次半径 r (cm)	35.8	35.2	29.3	22.8	29.3
載荷点高さ h (cm)	330.3	330.3	330.3	330.3	330.3
有効座屈長 $l(=2h)$ (cm)	660.6	660.6	660.6	660.6	660.6
細長比 λ ラメーター λ	0.229	0.233	0.280	0.360	0.280
幅厚比 λ ラメーター R_R	0.411	0.411	0.428	0.280	0.428
幅厚比 λ ラメーター R_F	0.410	0.240	0.254	0.172	0.254
縦リブ剛度 γ/γ^*	1.006	3.004	3.054	3.090	3.054
縦リブ細長比 λ ラメーター λ_s	0.45	0.28	0.28	0.17	0.26
軸力 N (tf)	182	182	182	182	248
軸力比 N/N_y	0.150	0.131	0.136	0.099	0.185

表-2.1.2(1) 矩形断面供試体の諸元 (つづき)

供試体番号	KD-6	KD-7_1	KD-7_3	KD-9	KD-10
外形寸法 (mm)	600×600	546×546	546×546	600×600	720×720
板厚 t (mm)	10	10	10	10	14
縦リブ寸法 (mm)	73×8	75×7	75×7	73×8	90×10
横リブ間隔 a (mm)	400	364	364	400	360
補剛板の全幅 b (mm)	600	546	546	600	720
縦リブで区切られるハネ数	3	3	3	3	3
鋼種	SM490A	SM490A	SM490A	SM570Q	SM490A
鋼材下降伏点 σ_y (kgf/cm ²)	3,200	3,200	3,200	4,600	3,200
断面積 A (cm ²)	282.7	256.4	256.4	282.7	467.4
断面2次モーメント I (cm ⁴)	154,411	115,213	115,213	154,411	366,612
断面2次半径 r (cm)	23.4	21.2	21.2	23.4	28.0
載荷点高さ h (cm)	330.3	330.3	330.3	330.3	330.3
有効座屈長 $l(=2h)$ (cm)	660.6	660.6	660.6	660.6	660.6
細長比 λ ラメーター λ	0.351	0.396	0.396	0.421	0.293
幅厚比 λ ラメーター R_R	0.411	0.374	0.374	0.492	0.352
幅厚比 λ ラメーター R_F	0.243	0.216	0.216	0.291	0.183
縦リブ剛度 γ/γ^*	3.070	3.211	3.211	3.070	4.121
縦リブ細長比 λ ラメーター λ_s	0.25	0.22	0.22	0.30	0.18
軸力 N (tf)	182	182	182	182	248
軸力比 N/N_y	0.136	0.118	0.118	0.136	0.150

表-2.1.2(2) 円形断面供試体の諸元

供試体番号	KC-1	KC-2_1	KC-2_3	KC-3
外形寸法 (mm)	600	850	850	850
半径 R (mm)	300	425	425	425
板厚 t (mm)	20	13	13	13
径厚比 R/t (mm)	15.0	32.7	32.7	32.7
径厚比パラメータ R_t	0.027	0.091	0.081	0.117
鋼種	SS400	SM490Y	SM490A	SM570Q
鋼材降伏点 σ_y (kgf/cm ²)	2,400	3,600	3,200	4,600
断面積 A (cm ²)	364.4	341.8	341.8	341.8
断面2次モーメント I (cm ⁴)	153,423	299,422	299,422	299,422
断面2次半径 r (cm)	20.5	31.3	31.3	31.3
載荷点高さ h (cm)	330.3	330.3	330.3	330.3
有効座屈長 $l(=2h)$ (cm)	660.6	660.6	660.6	660.6
細長比パラメータ λ	0.346	0.294	0.277	0.333
軸力 N (tf)	91	219	219	236
軸力比 N/N_y	0.104	0.178	0.200	0.150

表-2.1.2(3) コーナー角鋼管断面供試体の諸元

供試体番号	KA-1
角形鋼管外形寸法 (mm)	200×200
角形鋼管板厚 (mm)	12
パネル幅 (mm)	500
パネル板厚 (mm)	9
縦リフ寸法 (mm)	65×9
横リフ間隔 a (mm)	900
角形鋼管鋼種	SM490A
パネル鋼種	SS400
断面積 A (cm ²)	534.7
断面2次モーメント I (cm ⁴)	575,219
断面2次半径 r (cm)	32.8
載荷点高さ h (cm)	330.3
有効座屈長 $l(=2h)$ (cm)	660.6
細長比パラメータ λ	0.246
軸力 N (tf)	182
軸力比 N/N_y	0.118

ここに、

N : 軸力、 N_y : 降伏軸力 ($=A \cdot \sigma_y$)、 A : 断面積、 σ_y : 材料降伏点

$$R_R: \text{補剛材間の幅厚比パラメータ} \left(= \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k_R}} \right)$$

t : 板厚、 b : 補剛板の全幅、 E : ヤング係数 ($=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)、 μ : ポアソン比 ($=0.3$)

k_R : 座屈係数 ($=4n^2$)、 n : 縦補剛材によって区切られるパネル数 ($n \geq 2$)

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

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

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

γ_l : 縦補剛材の剛比、 δ_l : 補剛材断面積比

α : 補剛材の縦横寸法比 ($=a/b$)、 α_0 : 限界縦横寸法比 ($=\sqrt{1+n\gamma_l}$)

γ : 補剛材の剛比、 γ^* : 弾性座屈理論による補剛材の限界剛比

$$\lambda: \text{細長比パラメータ} = \left(\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \frac{l}{r} \right)$$

$$R_l: \text{径厚比パラメータ} = \left(\frac{R-t/2}{t} \cdot \frac{\sigma_y}{E} \sqrt{3(1-\mu^2)} \right)$$

R : 円形断面の中心から板厚外縁までの半径

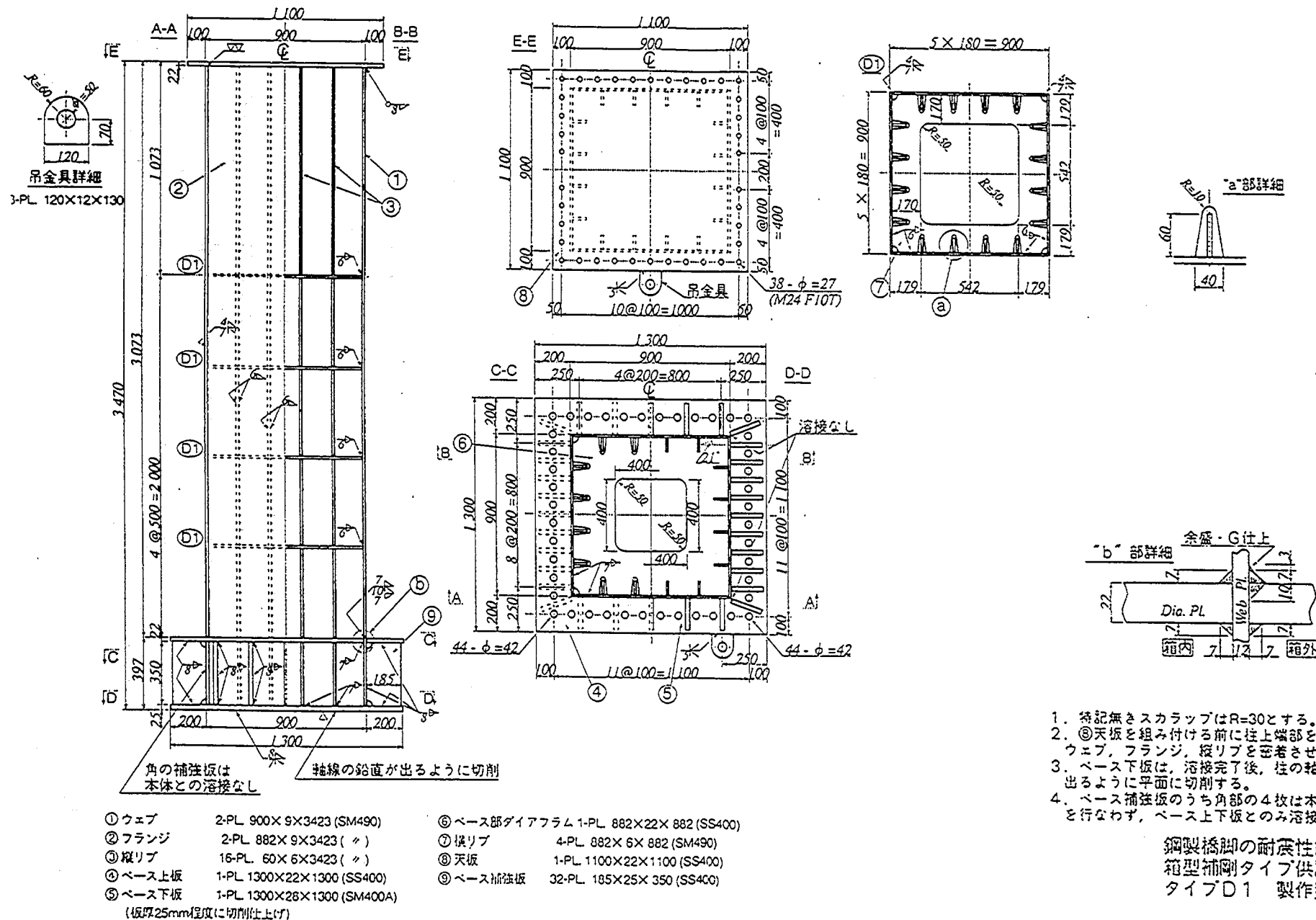
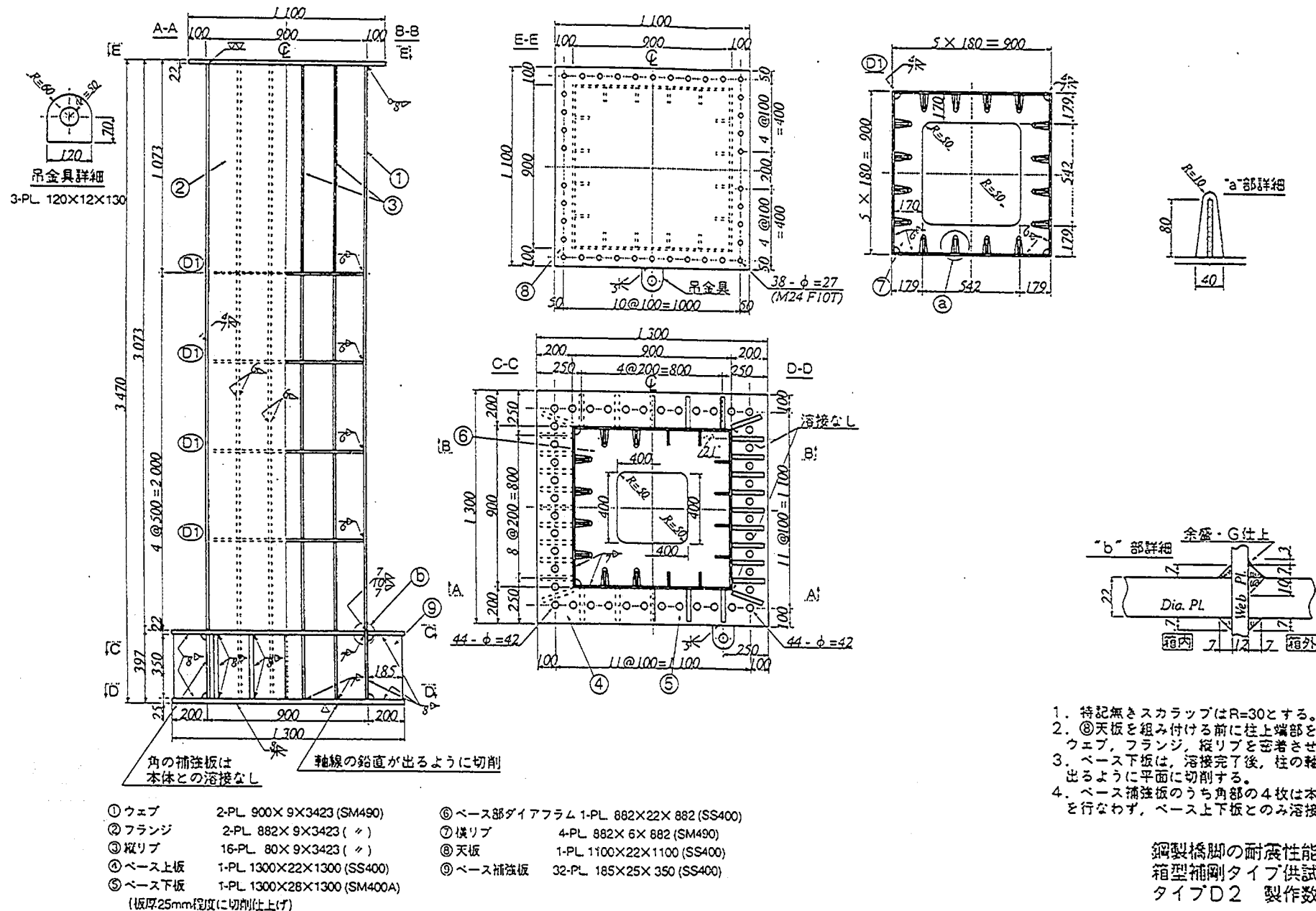


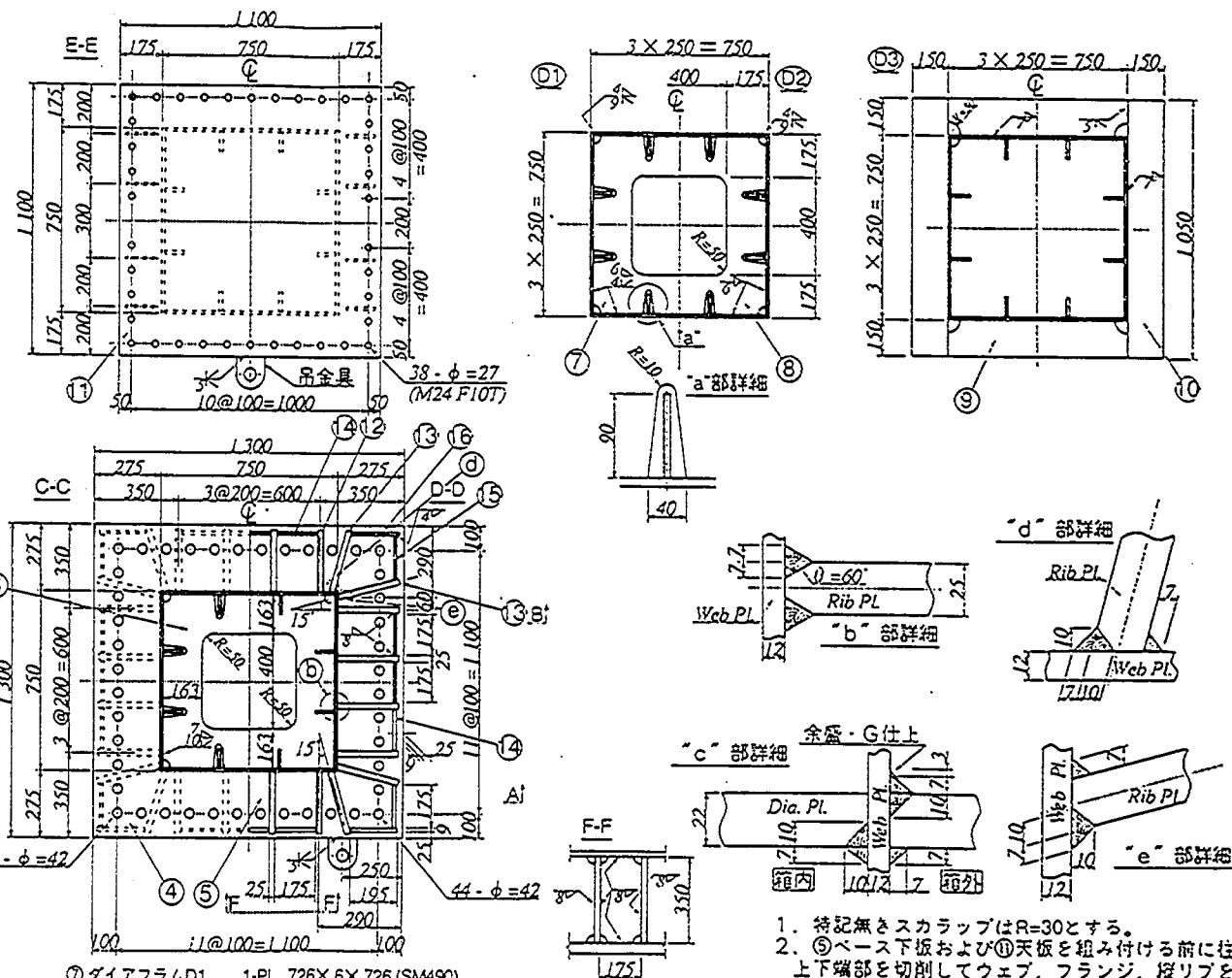
図-2.1.2(1) KD-1 供試体の形状・寸法



1. 特記無きスカラップは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。
4. ベース補強板のうち角部の4枚は本体との溶接を行わず、ベース上下板とのみ溶接する。

- ① ウェブ 2-PL 750×12×3423 (SM490)
 ② フランジ 2-PL 726×12×3423 ()
 ③ 縦リブ 8-PL 90×9×3423 ()
 ④ ベース上板 1-PL 1300×22×1300 (SS400)
 ⑤ ベース下板 1-PL 1300×28×1300 (SM400A)
 (板厚25mm程度に切削仕上)
 ⑥ ベース部ダイアフラム 1-PL 726×22×726 (SS400)

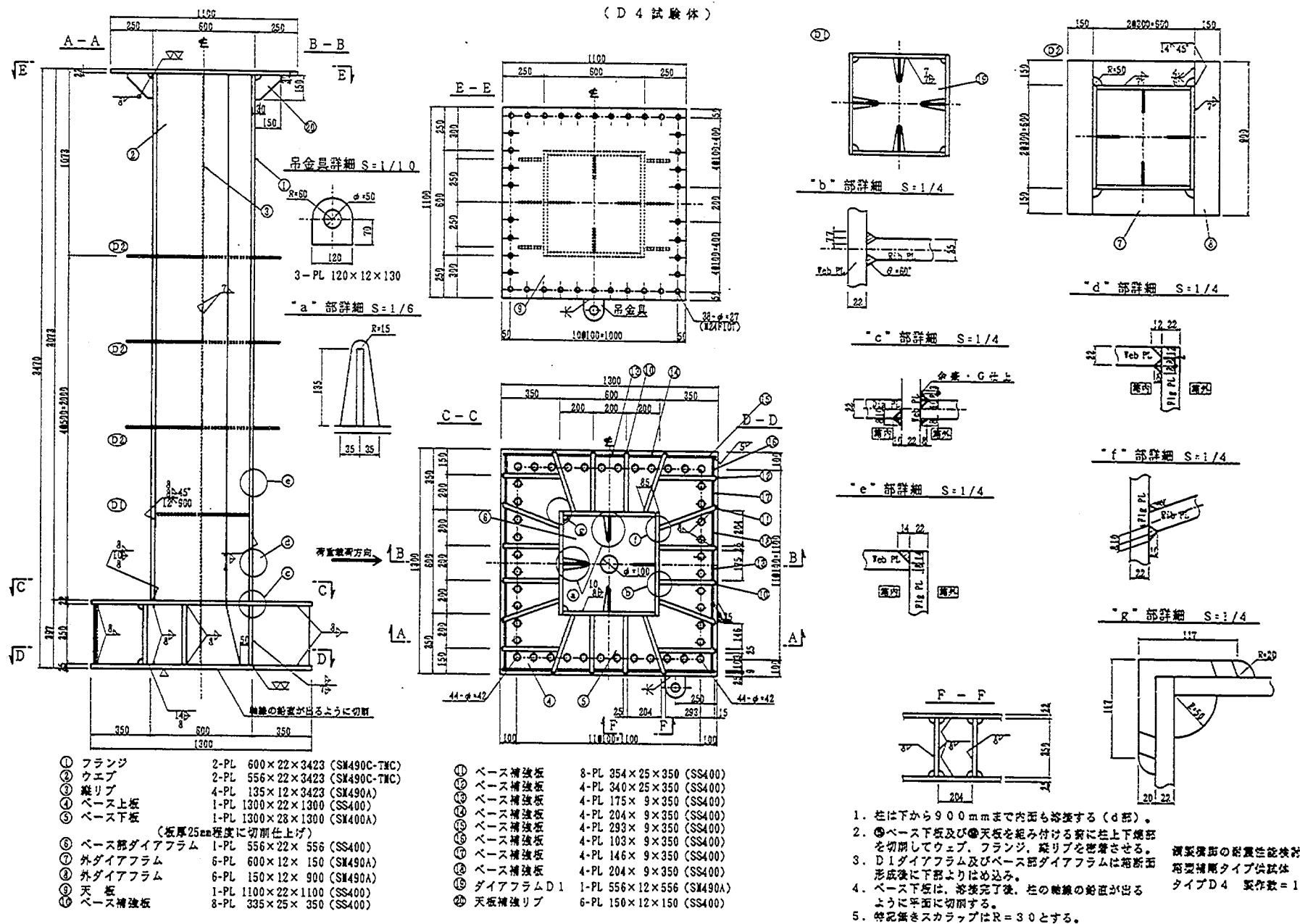
- | | |
|------------|-----------------------------|
| ⑦ ダイアフラムD1 | 1-PL 726X 6X 726 (SM490) |
| ⑧ ダイアフラムD2 | 1-PL 726X 6X 726 (〃) |
| ⑨ 外ダイアフラム | 4-PL 150X 6X 1050 (〃) |
| ⑩ 外ダイアフラム | 4-PL 150X 6X 750 (〃) |
| ⑪ 天板 | 1-PL 1100X 22X 1100 (SS400) |
| ⑫ ベース補強板 | 16-PL 260X 25X 350 (SS400) |
| ⑬ 〃 | 8-PL 280X 25X 350 (〃) |
| ⑭ 〃 | 12-PL 174X 9X 350 (〃) |
| ⑮ 〃 | 4-PL 174X 9X 350 (〃) |
| ⑯ 〃 | 4-PL 195X 5X 350 (〃) |
| ⑰ 天板部補強リブ | 8-PL 150X 12X 150 (〃) |



1. 特記無きスカラップはR=30とする。
2. ⑤ベース下板および⑩天板を組み付ける前に柱上下端部を切削してウェブ、フランジ、旋りリブを密着させる。
3. D1ダイアフラムおよびベース部ダイアフラムは荷断面前後に下部よりはめ込み。
4. 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。

鋼製橋脚の耐震性能検討
箱型補剛タイプ供試体
タイプD3 製作数=1

図-2.1.2(3) KD-3 供試体の形状・寸法



(D5 試験体)

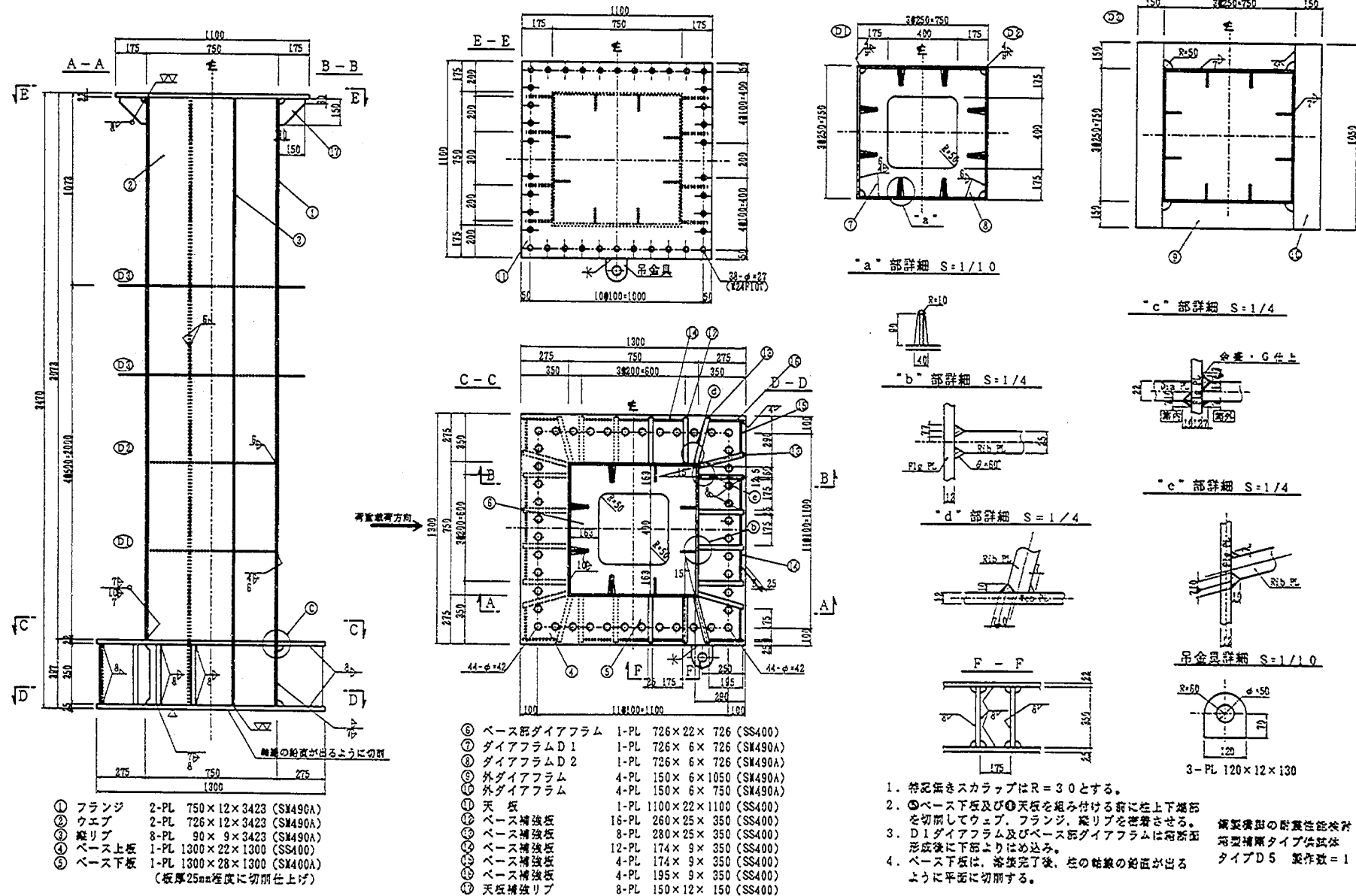


図-2.1.2(5) KD-5 供試体の形状・寸法

(D 6 試驗體)

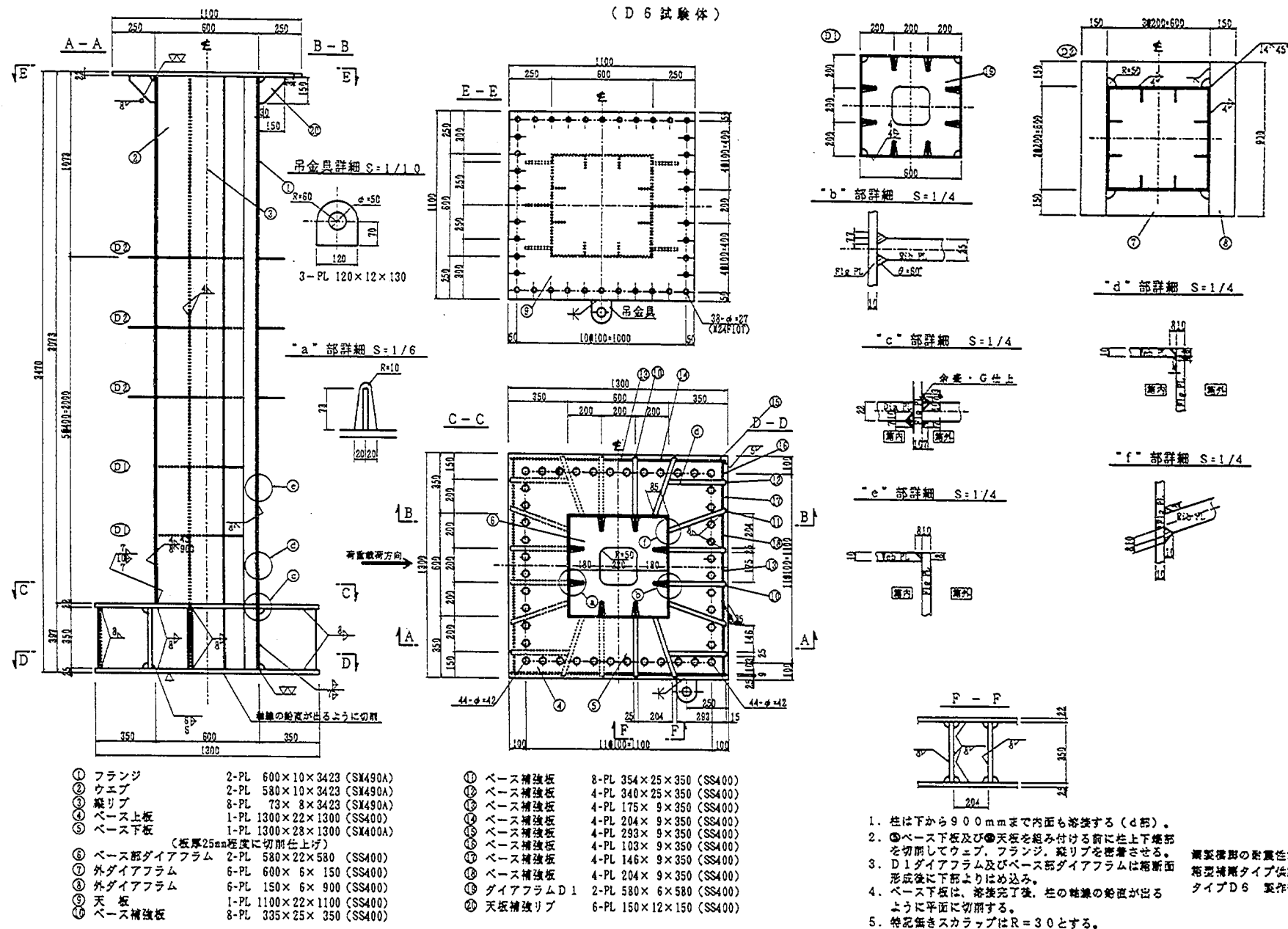


図-2.1.2(6) KD-6 供試体の形状・寸法

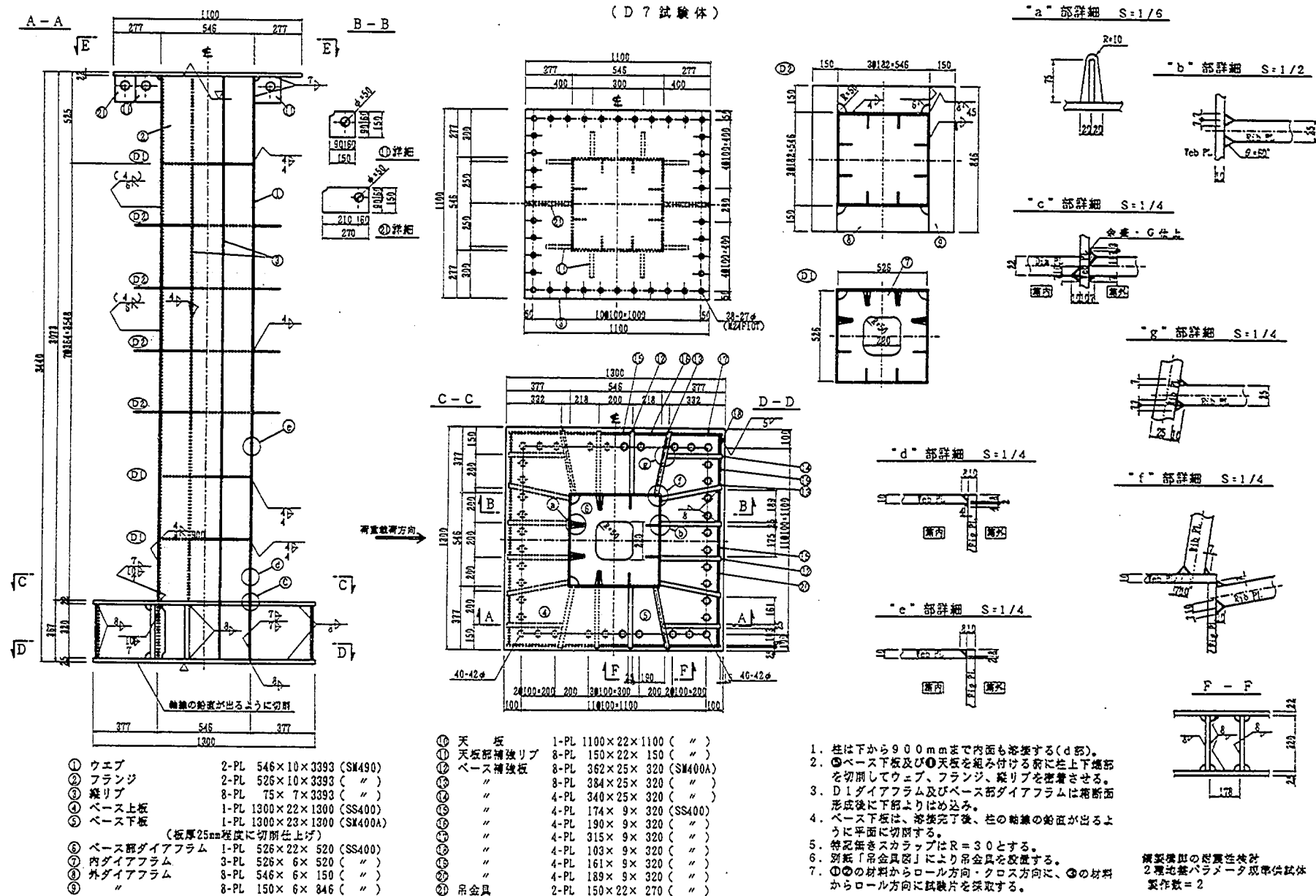


図-2.1.2(7) KD-7, KD-8 供試体の形状・寸法

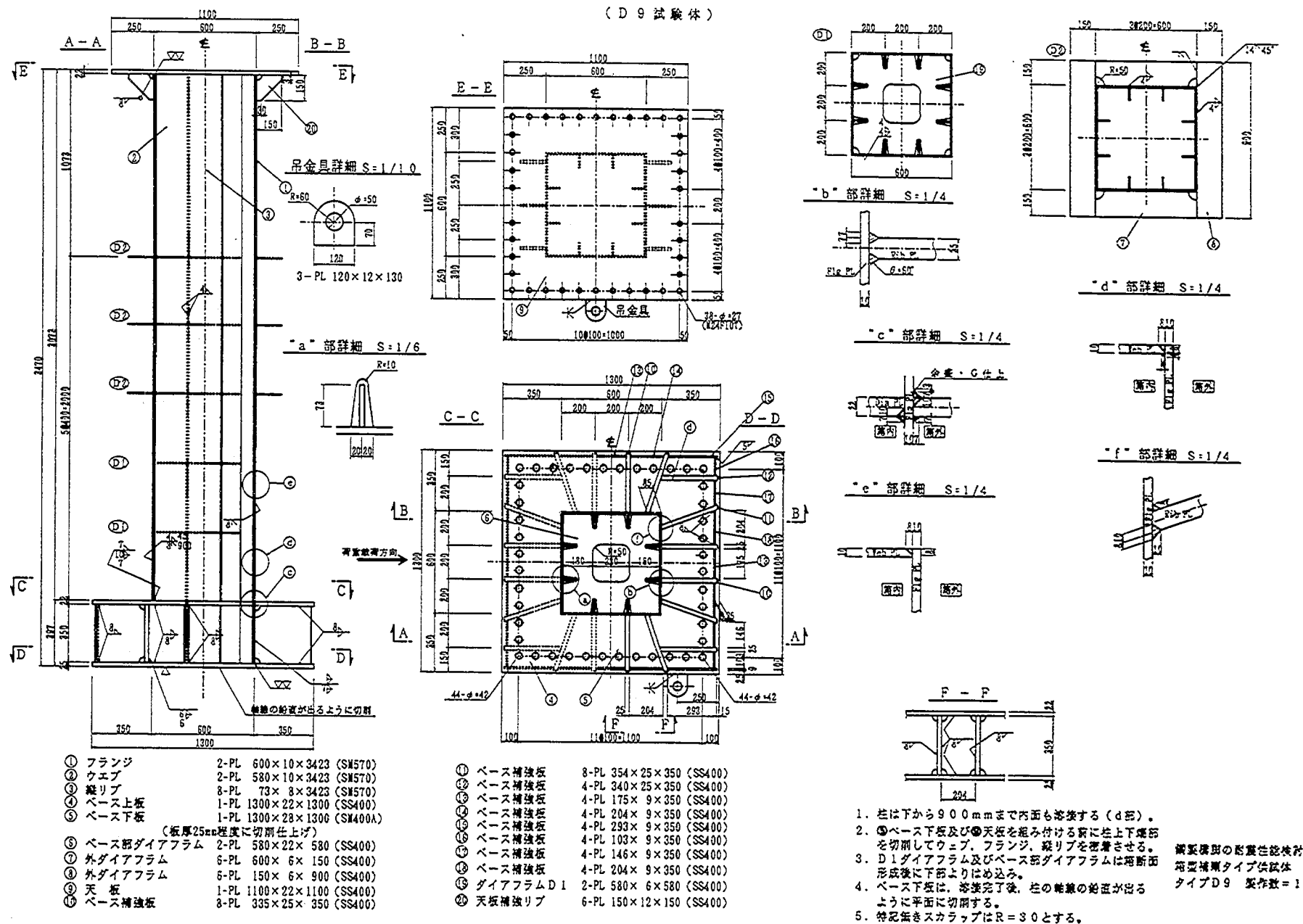


図-2.1.2(8) KD-9 供試体の形状・寸法

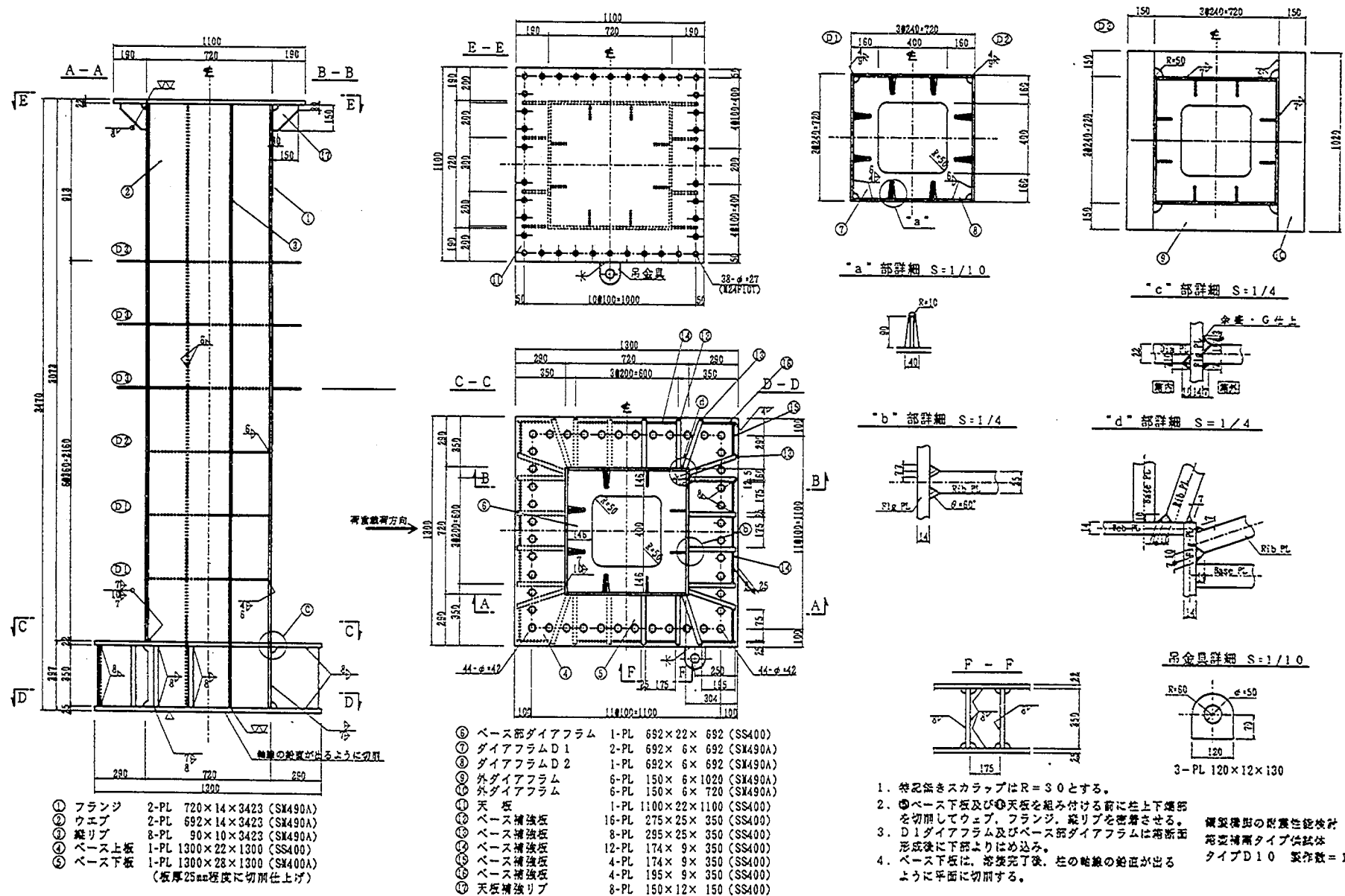


図-2.1.2(9) KD-10 供試体の形状・寸法

鋼製橋脚実験供試体ベース構造図 (その1)

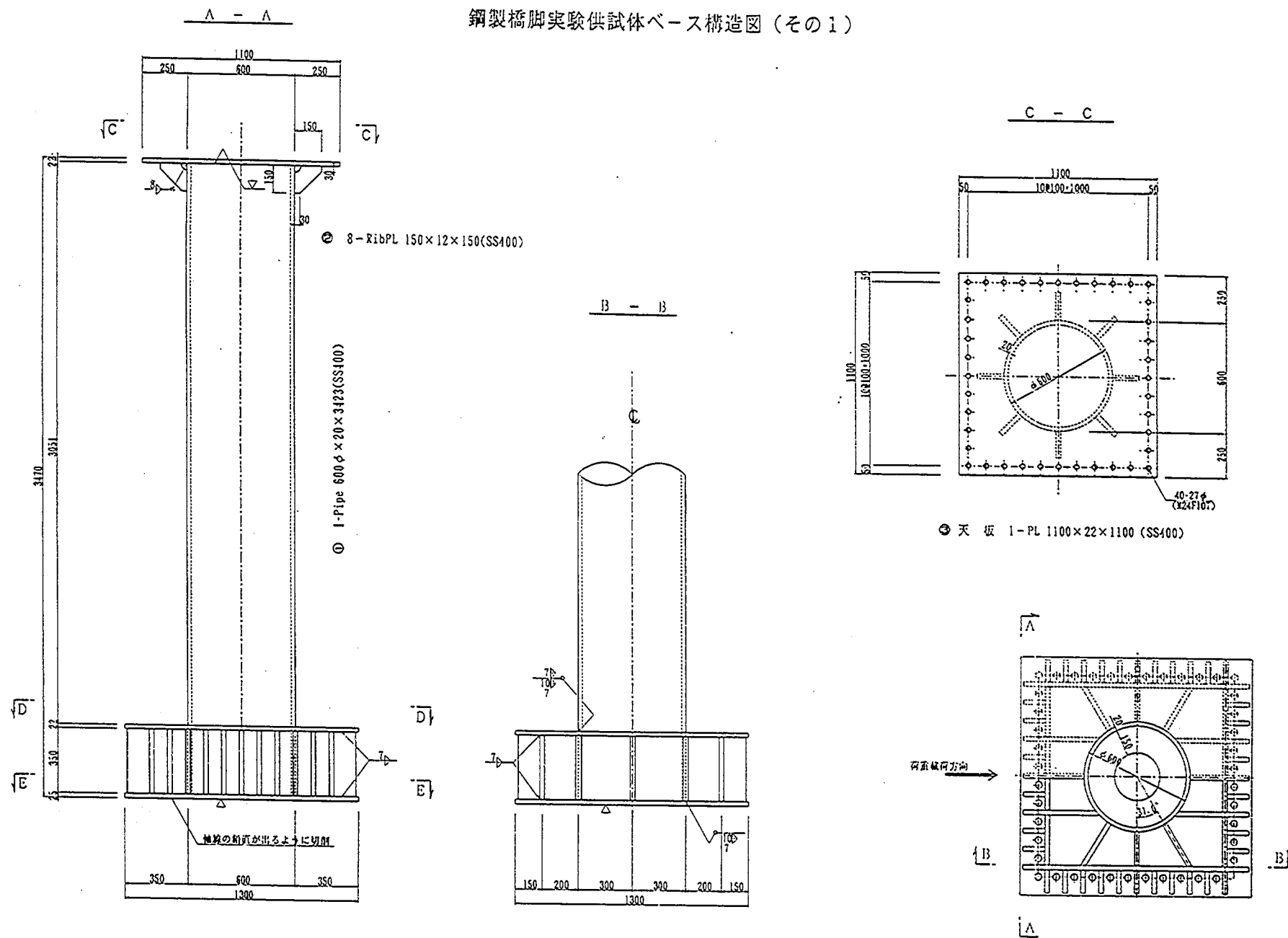


図-2.1.2(10) KC-1 供試体の形状・寸法 (全体図)

鋼製橋脚実験供試体ベース構造図（その2）

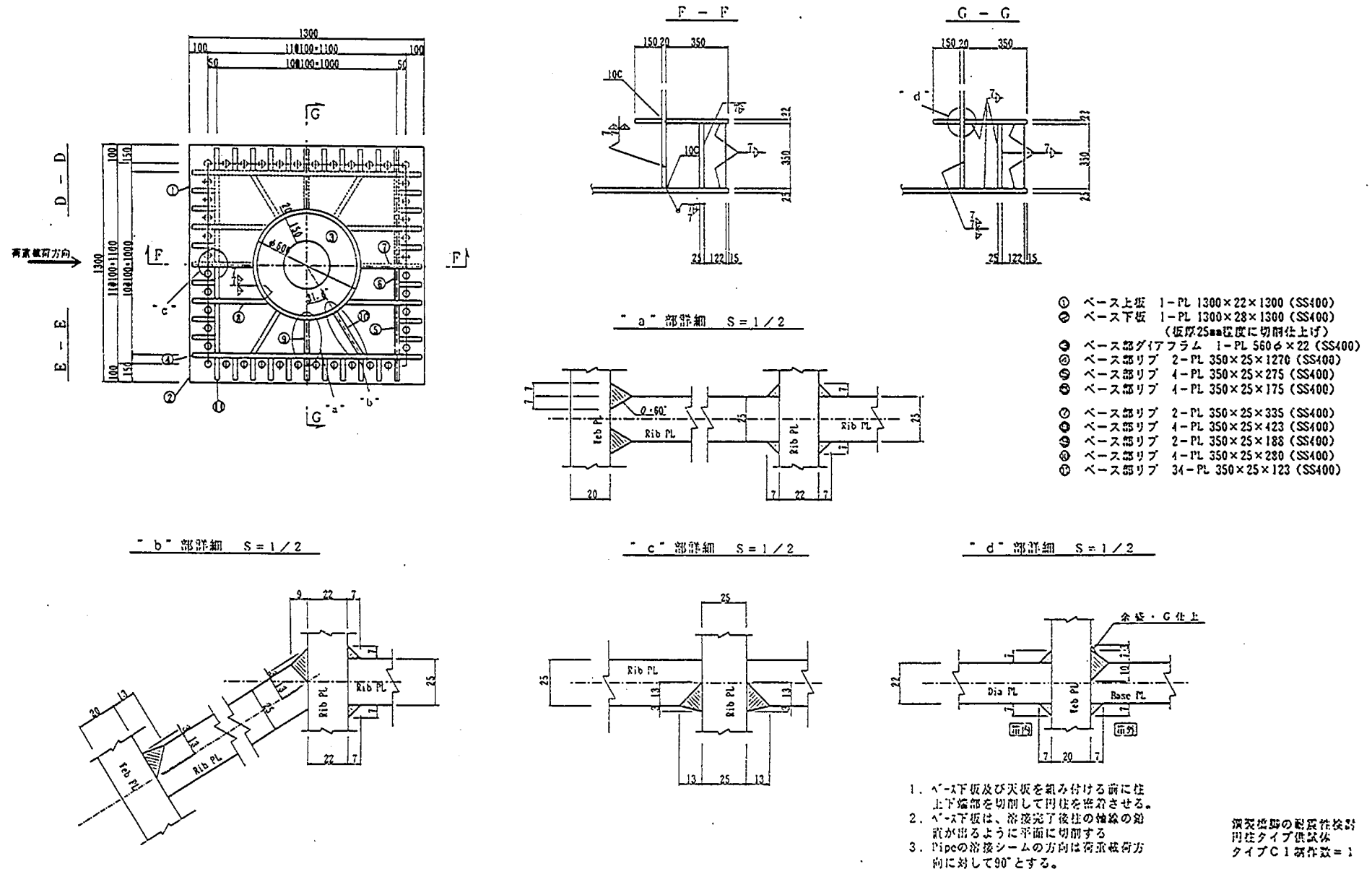


図-2.1.2(10) KC-1 供試体の形状・寸法（ベース部詳細図）

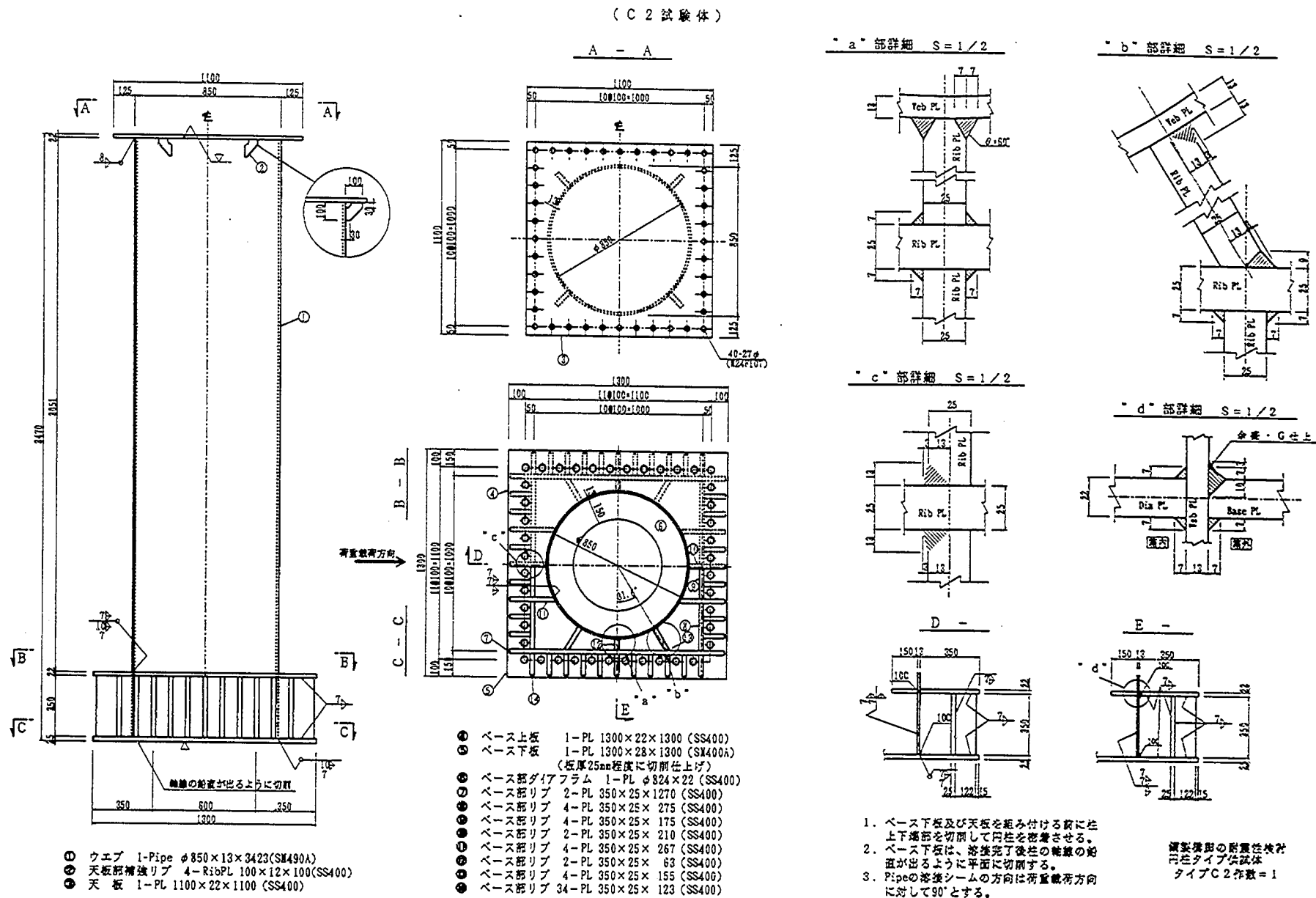
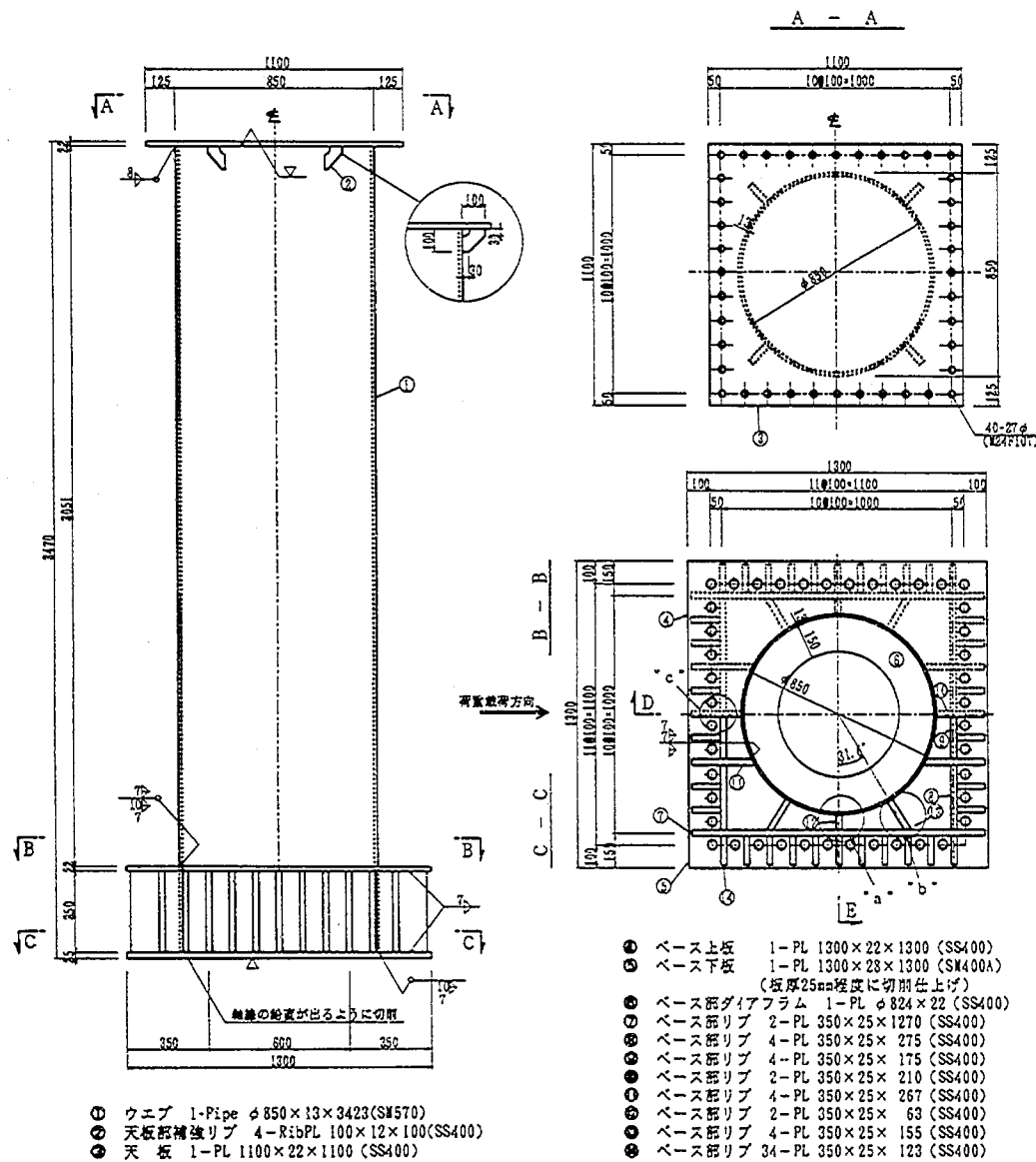
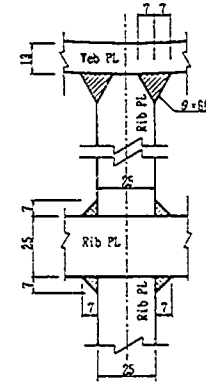


図-2.1.2(11) KC-2 供試体の形状・寸法

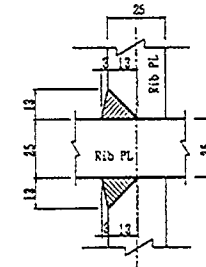
(C3 試験体)



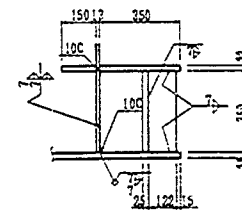
"a" 部詳細 S=1/2



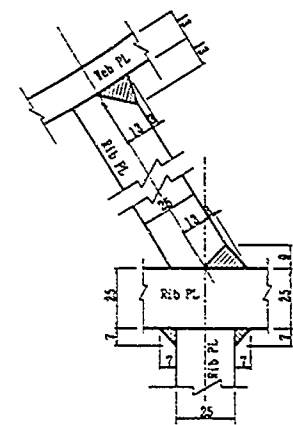
"c" 部詳細 S=1/2



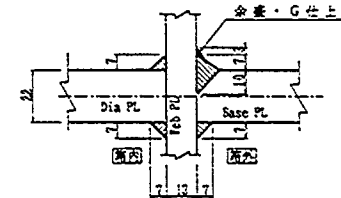
D -



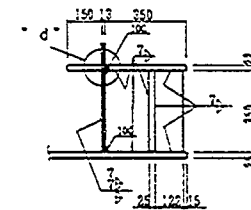
"b" 部詳細 S=1/2



"d" 部詳細 S=1/2



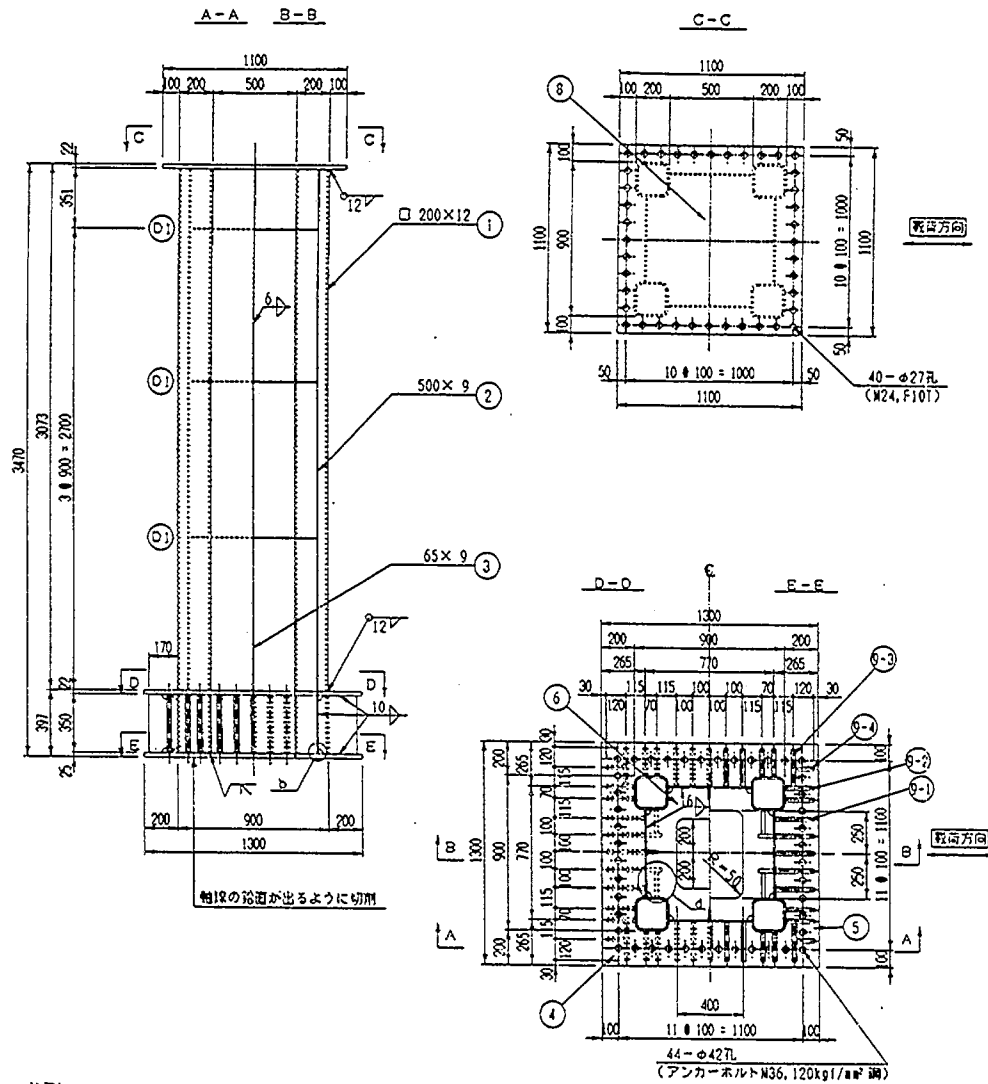
E -



1. ベース下板及び天板を組み付ける前に柱上下端部を切削して円性を確保させる。
2. ベース下板に、溶接完了後の柱の乾燥の鉛直が出るように平面に切削する。
3. Pipeの溶接シームの方向は荷重載荷方向に対して90°とする。

鋼製試験体の設置方法
 円柱タイプ試験体
 タイプC3作数=1

図-2.1.2(12) KC-3 供試体の形状・寸法



注記

1. 特記無きスカラーは $R=30$ とする。
2. 天板を組付けする前に上端部を切削して、ウェブ、フランジ、腹リブを露出させる。
3. ベース下底には、浴槽完了後、柱の軸線が出るように平面を切削する。
4. 角形鋼管はプレス曲げ製作とする。
浴槽シームは2シームとし、シーム位置は乾両方向に設ける。

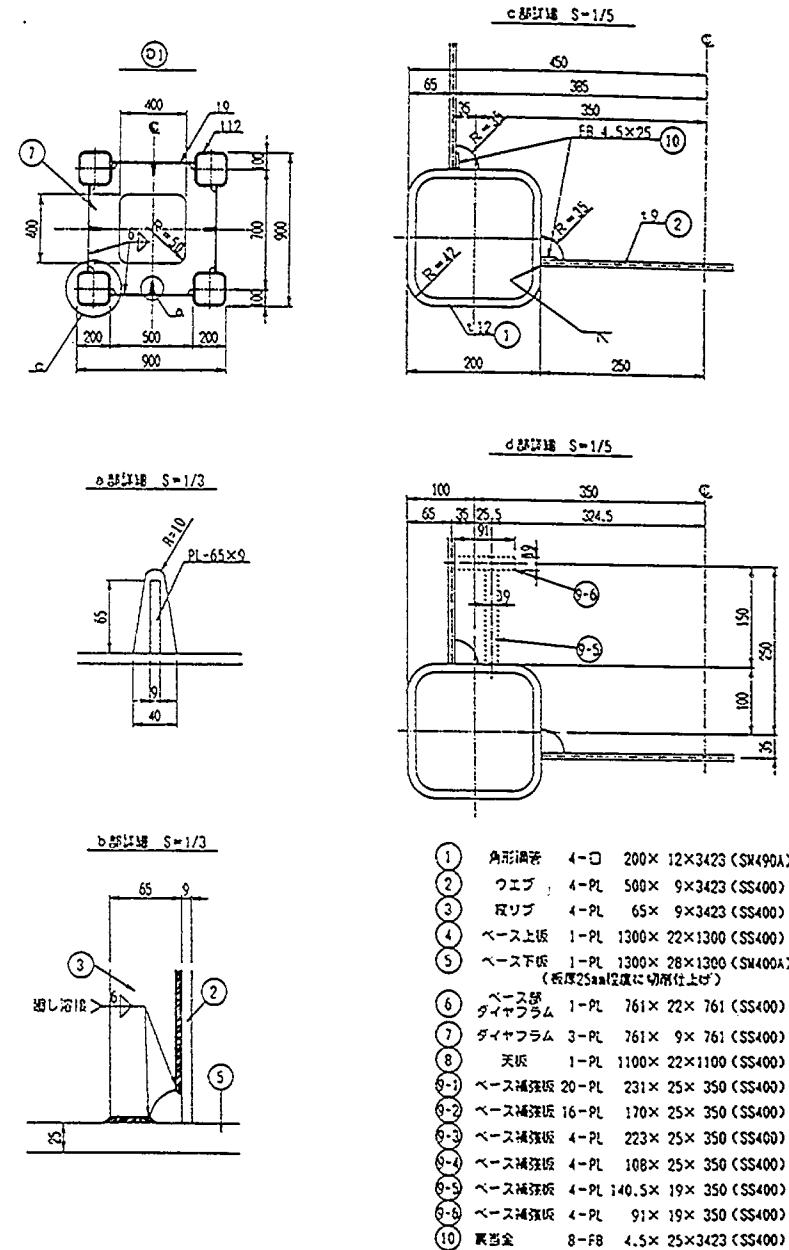


図-2.1.2(13) KA-1 供試体の形状・寸法

- | | | | |
|-----|----------------|-------|---|
| ① | 角形鋼管 | 4-□ | 200×12×3423 (SM490A) |
| ② | ウェブ | 4-PL | 500×9×3423 (SS400) |
| ③ | 腹リブ | 4-PL | 65×9×3423 (SS400) |
| ④ | ベース上板 | 1-PL | 1300×22×1300 (SS400) |
| ⑤ | ベース下板 | 1-PL | 1300×28×1300 (SS400A)
(板厚25mmに切削仕上げ) |
| ⑥ | ベース部
ダイヤフラム | 1-PL | 761×22×761 (SS400) |
| ⑦ | ダイヤフラム | 3-PL | 761×9×761 (SS400) |
| ⑧ | 天板 | 1-PL | 1100×22×1100 (SS400) |
| ⑧-1 | ベース補強板 | 20-PL | 231×25×350 (SS400) |
| ⑧-2 | ベース補強板 | 16-PL | 170×25×350 (SS400) |
| ⑧-3 | ベース補強板 | 4-PL | 223×25×350 (SS400) |
| ⑧-4 | ベース補強板 | 4-PL | 108×25×350 (SS400) |
| ⑧-5 | ベース補強板 | 4-PL | 140.5×19×350 (SS400) |
| ⑧-6 | ベース補強板 | 4-PL | 91×19×350 (SS400) |
| ⑩ | 裏面金 | 8-F8 | 4.5×25×3423 (SS400) |

表-2.1.3(1) 材料試験結果 (矩形断面)

試験片No.		試験片形状			上降伏点		下降伏点		引張強度		伸び		降伏比	
		t(mm)	w(mm)	A(mm ²)	tf	kgf/mm ²	tf	kgf/mm ²	tf	kgf/mm ²	mm	%	UYP/TS	LYP/TS
KD-1 フランジ L方向 平均	1	8.97	25.00	224.25	8.67	38.65	8.26	36.83	12.63	56.34	18.71	37.42	68.61	65.38
	2	9.00	25.00	225.00	9.00	40.02	8.72	38.75	12.82	56.97	19.30	38.60	70.25	68.02
	3	8.97	25.00	224.25	8.67	38.65	8.55	38.11	12.74	56.83	18.50	37.00	68.01	67.05
		8.98				39.11		37.90		56.71		37.67	68.96	66.82
KD-1 ウェブ L方向 平均	1	9.10	25.00	227.50	8.92	39.22	8.39	36.89	12.74	55.98	19.58	39.16	70.06	65.89
	2	9.05	25.01	226.34	8.62	38.07	8.46	37.39	12.72	56.18	19.33	38.66	67.76	66.56
	3	9.06	25.03	226.77	8.51	37.55	8.41	37.10	12.73	56.11	18.72	37.44	66.91	66.11
		9.07				38.28		37.13		56.09		38.42	68.24	66.19
KD-1 補剛材 L方向 平均	1	6.15	25.02	153.87	6.71	43.61	6.37	41.42	8.91	57.93	18.14	36.27	75.28	71.50
	2	6.16	25.03	154.18	6.73	43.65	6.40	41.53	8.91	57.81	18.19	36.38	75.51	71.85
	3	6.17	25.03	154.44	6.71	43.45	6.37	41.27	8.95	57.98	18.19	36.38	74.93	71.18
		6.16				43.57		41.41		57.91		36.34	75.24	71.51
KD-2 フランジ L方向 平均	1	9.01	25.00	225.25	8.72	38.71	8.62	38.25	12.59	55.90	20.19	40.38	69.24	68.43
	2	8.97	25.01	224.34	8.77	39.09	8.67	38.64	12.57	56.04	20.79	41.58	69.75	68.94
	3	9.01	25.03	225.52	8.77	38.89	8.67	38.43	12.59	55.84	19.36	38.72	69.64	68.83
		9.00				38.89		38.44		55.93		40.23	69.54	68.73
KD-2 ウェブ L方向 平均	1	8.94	25.00	223.50	8.92	39.92	8.80	39.37	12.79	57.21	19.35	38.70	69.78	68.83
	2	8.93	25.03	223.52	9.02	40.37	8.82	39.46	12.80	57.25	18.86	37.72	70.52	68.92
	3	8.91	25.00	222.75	8.92	40.06	8.92	40.06	12.80	57.45	18.50	37.00	69.72	69.72
		8.93				40.12		39.63		57.31		37.81	70.01	69.16
KD-2 補剛材 L方向 平均	1	9.13	25.00	228.25	9.13	39.98	8.74	38.31	12.82	56.16	19.74	39.48	71.20	68.22
	2	9.18	25.01	229.59	9.30	40.53	9.00	39.20	12.90	56.18	19.39	38.77	72.13	69.76
	3	9.19	25.02	229.93	9.20	40.02	8.90	38.69	12.94	56.28	19.83	39.66	71.12	68.75
		9.17				40.18		38.73		56.21		39.30	71.48	68.91

表-2.1.3(2) 材料試験結果 (矩形断面)

試験片No.	試験片形状			上降伏点		下降伏点		引張強度		伸び		降伏比		
	t(mm)	w(mm)	A(mm ²)	tf	kgf/mm ²	tf	kgf/mm ²	tf	kgf/mm ²	mm	%	UYP/TS	LYP/TS	
KD-3 フランジ L方向 平均	1	12.03	25.03	301.11	11.29	37.51	10.91	36.24	16.97	56.37	21.01	42.02	66.53	64.28
	2	12.05	24.99	301.13	11.50	38.18	11.14	37.00	17.01	56.50	20.92	41.84	67.57	65.47
	3	12.05	24.99	301.13	11.62	38.60	11.14	37.00	17.06	56.64	20.24	40.48	68.15	65.31
	平均	12.04				38.10		36.74		56.51		41.45	67.42	65.02
KD-3 ウェブ L方向 平均	1	11.95	25.02	298.99	11.24	37.60	10.81	36.15	16.89	56.50	20.59	41.18	66.55	63.99
	2	11.97	25.01	299.37	11.34	37.89	10.53	35.17	16.89	56.43	20.41	40.82	67.16	62.33
	3	11.97	24.98	299.01	11.22	37.51	10.91	36.49	16.89	56.50	20.21	40.42	66.40	64.59
	平均	11.96				37.67		35.94		56.47		40.81	66.70	63.63
KD-3 補剛材 L方向 平均	1	9.13	25.00	228.25	9.13	39.98	8.74	38.31	12.82	56.16	19.74	39.48	71.20	68.22
	2	9.18	25.01	229.59	9.30	40.53	9.00	39.20	12.90	56.18	19.39	38.77	72.13	69.76
	3	9.19	25.02	229.93	9.20	40.02	8.90	38.69	12.94	56.28	19.83	39.66	71.12	68.75
	平均	9.17				40.18		38.73		56.21		39.30	71.48	68.91
KD-4 ウェブ 軸方向 平均	1	22.18	25.07	556.05	22.99	41.35	22.48	40.44	30.29	54.47	25.50	50.55	75.93	74.24
	2	22.18	25.12	557.16	22.69	40.72	22.13	39.72	30.39	54.54	25.60	50.69	74.66	72.82
	3	22.18	25.12	557.16	23.20	41.64	22.79	40.90	30.59	54.91	26.55	52.63	75.83	74.50
	平均	22.18				41.24		40.35		54.64		51.29	75.47	73.85
KD-4 補剛材 軸方向 平均	1	11.92	25.09	299.07	12.21	40.83	11.78	39.38	16.75	56.00	20.20	40.08	72.91	70.32
	2	11.89	25.12	298.68	12.26	41.05	11.83	39.60	16.72	55.99	20.20	40.08	73.32	70.73
	3	11.93	25.13	299.80	12.13	40.48	11.75	39.20	16.70	55.70	20.00	39.68	72.67	70.38
	平均	11.91				40.79		39.39		55.90		39.95	72.97	70.48
KD-5 ウェブ 軸方向 平均	1	11.95	25.10	299.95	11.17	37.23	10.91	36.38	16.29	54.31	20.75	41.01	68.54	66.98
	2	11.95	25.10	299.95	11.17	37.23	10.71	35.70	16.16	53.88	20.55	40.57	69.09	66.25
	3	11.95	25.10	299.95	11.14	37.14	10.50	35.02	16.21	54.05	21.20	41.86	68.71	64.78
	平均	11.95				37.20		35.70		54.08		41.15	68.78	66.00
KD-5 補剛材 軸方向 平均	1	8.85	25.09	222.05	8.74	39.38	8.21	36.97	12.21	54.99	18.10	35.91	71.61	67.22
	2	8.85	25.09	222.05	8.67	39.04	8.18	36.85	12.03	54.19	18.90	37.43	72.03	68.01
	3	8.85	25.09	222.05	8.62	38.81	8.16	36.74	12.01	54.07	18.85	37.29	71.76	67.94
	平均	8.85				39.07		36.85		54.42		36.88	71.80	67.72

表-2.1.3(3) 材料試験結果 (矩形断面)

試験片No.	試験片形状			上降伏点		下降伏点		引張強度		伸び		降伏比		
	t(mm)	w(mm)	A(mm ²)	tf	kgf/mm ²	tf	kgf/mm ²	tf	kgf/mm ²	mm	%	UYP/TS	LYP/TS	
KD-6 ウェブ 軸方向	1	10.03	25.05	251.25	10.17	40.48	10.10	40.18	14.02	55.81	20.00	39.60	72.55	72.00
	2	10.06	25.05	252.00	10.04	39.86	9.92	39.35	14.15	56.14	19.00	37.62	70.99	70.09
	3	10.08	25.05	252.50	10.22	40.49	10.10	39.98	14.20	56.23	20.25	40.06	71.99	71.10
	平均	10.06				40.28		39.84		56.06		39.10	71.84	71.06
KD-6 補剛材 軸方向	1	7.98	25.02	199.66	8.41	42.14	8.36	41.88	11.32	56.69	20.10	39.84	74.32	73.87
	2	8.00	25.07	200.56	8.67	43.22	8.51	42.45	11.37	56.69	19.20	38.02	76.23	74.89
	3	8.01	25.06	200.73	8.67	43.18	8.57	42.67	11.34	56.52	18.60	36.98	76.40	75.51
	平均	8.00				42.84		42.34		56.63		38.28	75.65	74.76
KD-7_1 フランジ L方向	1	9.96	25.02	249.20	9.90	39.75	9.60	38.52	13.44	53.94	20.34	40.69	73.68	71.40
	2	9.95	25.01	248.85	9.99	40.16	9.46	38.01	13.36	53.69	20.36	40.72	74.79	70.79
	3	9.96	25.01	249.10	9.87	39.61	9.48	38.07	13.36	53.64	20.12	40.25	73.84	70.98
	平均	9.96				39.84		38.20		53.76		40.55	74.10	71.05
KD-7_1 補剛材 L方向	1	7.21	25.00	180.25	8.32	46.18	8.09	44.91	10.07	55.88	17.71	35.42	82.64	80.36
	2	7.21	24.99	180.18	8.31	46.12	8.16	45.28	10.05	55.79	18.06	36.12	82.68	81.16
	3	7.21	24.99	180.18	8.37	46.48	8.13	45.13	10.06	55.84	17.45	34.90	83.24	80.82
	平均	7.21				46.26		45.11		55.84		35.48	82.85	80.78
KD-7_3 フランジ L方向	1	10.11	25.03	253.05	12.24	48.36	11.73	46.34	14.62	57.79	19.56	39.13	83.68	80.20
	2	10.12	25.02	253.20	12.08	47.72	11.78	46.52	14.62	57.75	19.50	39.00	82.64	80.54
	3	10.12	25.01	253.10	12.44	49.15	12.03	47.54	14.58	57.61	18.48	36.95	85.31	82.52
	平均					48.41		46.80		57.72		38.36	83.88	81.09
KD-7_3 補剛材 L方向	1	7.22	25.00	180.50	7.99	44.28	7.56	41.88	10.42	57.72	17.09	34.18	76.72	72.56
	2	7.21	25.01	180.32	7.16	39.73	7.11	39.44	10.41	57.72	17.42	34.84	68.83	68.34
	3	7.20	25.00	180.00	7.48	41.57	7.43	41.29	10.39	57.71	17.99	35.98	72.03	71.54
	平均	7.21				41.86		40.87		57.72		35.00	72.52	70.81

表-2.1.3(4) 材料試験結果 (矩形断面)

試験片No.	試験片形状			上降伏点		下降伏点		引張強度		伸び		降伏比	
	t(mm)	w(mm)	A(mm ²)	tf	kgf/mm ²	tf	kgf/mm ²	tf	kgf/mm ²	mm	%	UYP/TS	LYP/TS
KD-9	1	9.94	25.11	249.59	16.06	64.35	16.06	64.35	17.62	70.58	14.50	28.74	91.17
ウェブ	2	9.90	25.13	248.79	16.29	65.48	15.98	64.25	17.51	70.40	14.85	29.46	93.01
軸方向	3	9.97	25.08	250.05	15.63	62.50	15.63	62.50	17.44	69.74	14.60	28.91	89.62
平均		9.94				64.11		63.70		70.24		29.04	91.27
KD-9	1	7.89	25.11	198.12	11.98	60.48	11.88	59.96	13.51	68.20	13.95	27.65	88.68
補剛材	2	7.88	25.10	197.79	12.16	61.48	12.01	60.71	13.59	68.70	13.40	26.59	89.49
軸方向	3	7.88	25.09	197.71	12.24	61.89	12.03	60.86	13.59	68.73	13.85	27.53	90.06
平均		7.88				61.28		60.51		68.54		27.26	89.41
KD-10	1	14.01	25.05	350.95	12.19	34.72	11.55	32.91	18.51	52.74	22.65	44.81	65.84
ウェブ	2	14.00	25.05	350.70	11.73	33.44	11.22	31.98	18.61	53.06	22.00	43.52	63.01
軸方向	3	13.99	25.05	350.45	11.91	33.97	11.42	32.59	18.48	52.74	22.80	45.10	64.41
平均		14.00				34.04		32.49		52.85		44.48	64.42
KD-10	1	9.93	25.03	248.55	10.32	41.54	9.69	38.98	13.43	54.05	20.40	40.36	76.85
補剛材	2	9.94	25.03	248.80	9.79	39.35	9.64	38.73	13.49	54.20	20.45	40.45	72.59
軸方向	3	9.95	25.04	249.15	9.92	39.80	9.59	38.47	13.41	53.82	20.75	41.09	73.95
平均		9.94				40.23		38.73		54.03		40.63	74.46
KA-1	1	6.03	—	28.56	1.11	38.83	1.11	38.83	1.70	59.36	—	34.70	65.41
角鋼管	2	6.03	—	28.56	1.15	40.39	1.15	40.39	1.65	57.93	—	37.20	69.72
軸方向	3	6.02	—	28.46	1.18	41.42	1.18	41.42	1.71	59.92	—	30.00	69.13
平均		6.03				40.22		40.22		59.07		33.97	68.09
KA-1	1	9.16	39.96	366.03	11.47	31.34	10.25	28.00	16.85	46.04	50.65	25.33	68.08
ハネ	2	9.17	39.95	366.34	11.47	31.31	10.46	28.54	16.83	45.93	52.95	26.48	68.18
L方向	3	9.17	40.09	367.63	11.42	31.07	10.46	28.46	16.90	45.98	51.70	25.85	67.57
平均		9.17				31.24		28.33		45.98		25.88	67.94
KA-1	1	9.16	39.96	366.03	11.47	31.34	10.25	28.00	16.85	46.04	50.65	25.33	68.08
補剛材	2	9.17	39.95	366.34	11.47	31.31	10.46	28.54	16.83	45.93	52.95	26.48	68.18
L方向	3	9.17	40.09	367.63	11.42	31.07	10.46	28.46	16.90	45.98	51.70	25.85	67.57
平均		9.17				31.24		28.33		45.98		25.88	67.94

表-2.1.3(5) 材料試験結果 (円形断面)

試験片No.	試験片形状			上降伏点		下降伏点		引張強度		伸び		降伏比		
	t(mm)	w(mm)	A(mm ²)	tf	kgf/mm ²	tf	kgf/mm ²	tf	kgf/mm ²	mm	%	UYP/TS	LYP/TS	
KC-1 加工前 L方向 平均	1	18.85	40.19	757.58	22.18	29.28	21.15	27.92	33.65	44.42	18.71	37.42	65.91	62.85
	2	18.85	40.15	756.83	21.82	28.83	20.86	27.57	33.96	44.87	19.30	38.60	64.26	61.44
	3	18.80	40.22	756.14	21.92	28.99	20.72	27.40	34.06	45.04	18.50	37.00	64.37	60.84
		18.83				29.03		27.63		44.78		37.67	64.85	61.71
KC-1 加工後 L方向 平均	1	18.60	25.09	466.67	13.77	29.50	13.77	29.50	22.18	47.53	19.58	39.16	62.07	62.07
	2	18.50	25.07	463.80	13.26	28.58	13.26	28.58	21.92	47.27	19.33	38.66	60.47	60.47
	3	18.50	25.05	463.43	12.24	26.40	12.24	26.40	21.72	46.87	18.72	37.44	56.34	56.34
		18.53				28.16		28.16		47.22		38.42	59.62	59.62
KC-2_1 加工後 L方向 平均	1	12.90	25.08	323.53	15.40	47.59	14.56	44.99	18.25	56.42	18.14	36.27	84.36	79.75
	2	12.90	25.10	323.79	14.68	45.35	14.02	43.30	18.25	56.37	18.19	36.38	80.45	76.82
	3	12.90	25.10	323.79	14.07	43.46	14.07	43.46	18.15	56.06	18.19	36.38	77.53	77.53
		12.90				45.47		43.92		56.28		36.34	80.78	78.03
KC-2_3 加工前 L方向 平均	1	13.07	25.11	328.19	12.24	37.29	11.62	35.42	17.41	53.05	20.19	40.38	70.28	66.76
	2	13.07	25.08	327.80	12.42	37.87	11.62	35.46	17.34	52.88	20.79	41.58	71.62	67.06
	3	13.07	25.11	328.19	12.16	37.05	11.45	34.88	17.46	53.21	19.36	38.72	69.64	65.55
		13.07				37.40		35.25		53.05		40.23	70.51	66.46
KC-2_3 加工後 L方向 平均	1	12.92	25.15	324.94	12.34	37.97	11.98	36.87	17.64	54.29	20.70	41.11	69.94	67.92
	2	12.93	25.12	324.80	12.67	39.01	12.19	37.52	17.59	54.16	20.45	40.58	72.03	69.28
	3	12.93	25.10	324.54	12.39	38.18	12.21	37.63	17.62	54.28	19.40	38.34	70.33	69.32
		12.93				38.39		37.34		54.24		40.01	70.77	68.84
KC-3 加工後 L方向 平均	1	12.95	25.12	325.30	20.19	62.07	20.19	62.07	22.13	68.02	19.74	39.48	91.24	91.24
	2	12.95	25.13	325.43	20.34	62.51	20.34	62.51	22.18	68.15	19.39	38.77	91.72	91.72
	3	12.95	25.13	325.43	20.32	62.43	20.32	62.43	22.18	68.15	19.83	39.66	91.61	91.61
		12.95				62.34		62.34		68.11		39.30	91.53	91.53

表-2.1.4(1) 平成8年度分試験体の製作に使用した溶接材料と溶接条件 (CO₂半自動溶接)

(a) 溶接材料

JIS 規格	ワイヤ銘柄	包被ガス	適用鋼種
YGW11	KC-50	CO ₂	50 キロ鋼
YGW21	KC-60	CO ₂	60 キロ鋼

(b) 溶接条件

溶接サイズ (mm)	ワイヤ径 φ (mm)	層 数	電 流 (A)	電 圧 (V)	シールドガス	ガス流量	姿 勢
4	1.2	1	280	28	CO2-100%	20 l/min	下向水平
5	1.2	1	280	28			
6	1.2	1	280	28			
7	1.2	1	280	28			
8	1.2	2	280	28			
9	1.2	2	280	28			

表-2.1.4(2) 平成8年度分試験体の製作に使用した溶接材料と溶接条件 (手溶接)

(a) 溶接材料

JIS 規格	用 途	被覆材の系統	銘 柄
D4301	全姿勢	アルミナ付系	KS-8
D5000	水平すみ肉	特殊系	KS-78
D4301	全姿勢	低水素系	KS-76

(b) 溶接条件

溶接サイズ (mm)	ワイヤ径 φ (mm)	層 数	電 流 (A)	電 圧 (V)	姿 勢
4	4.0	1	190	—	下向水平
5	5.0	1	240	—	
6	6.0	1	280	—	
7	6.0	2	280	—	
8	6.0	2	280	—	
9	5.0	2	280	—	
6	5.0	1	240	—	下進

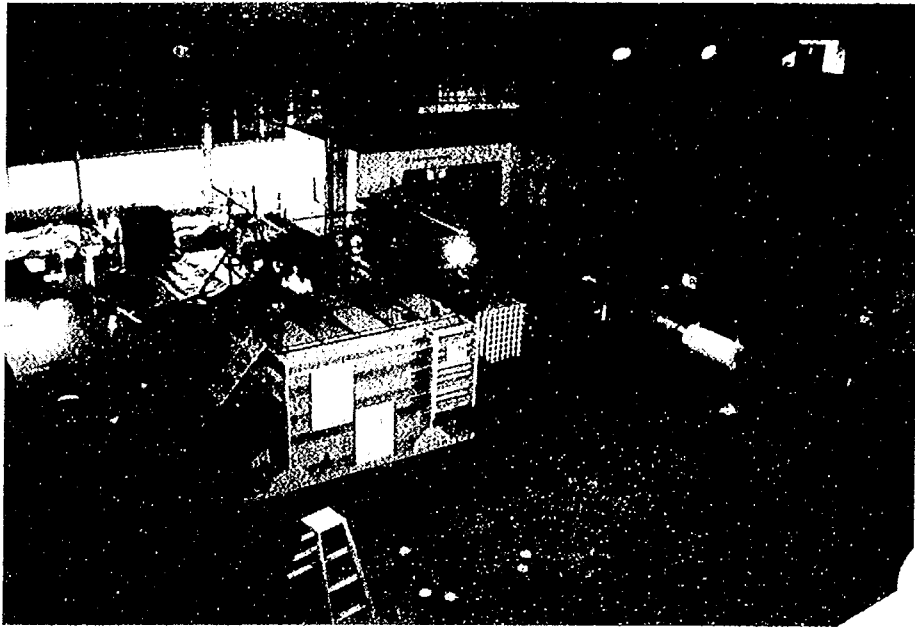


写真-2.2.1 B社の載荷フレーム

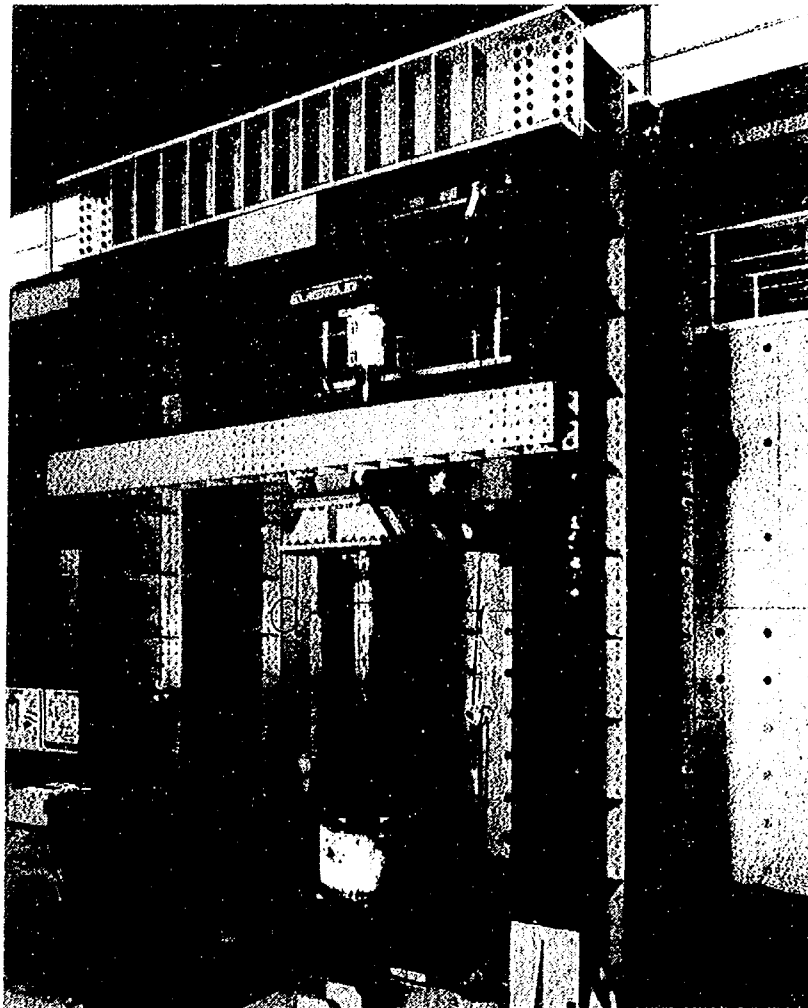


写真-2.2.2 A社の載荷フレーム

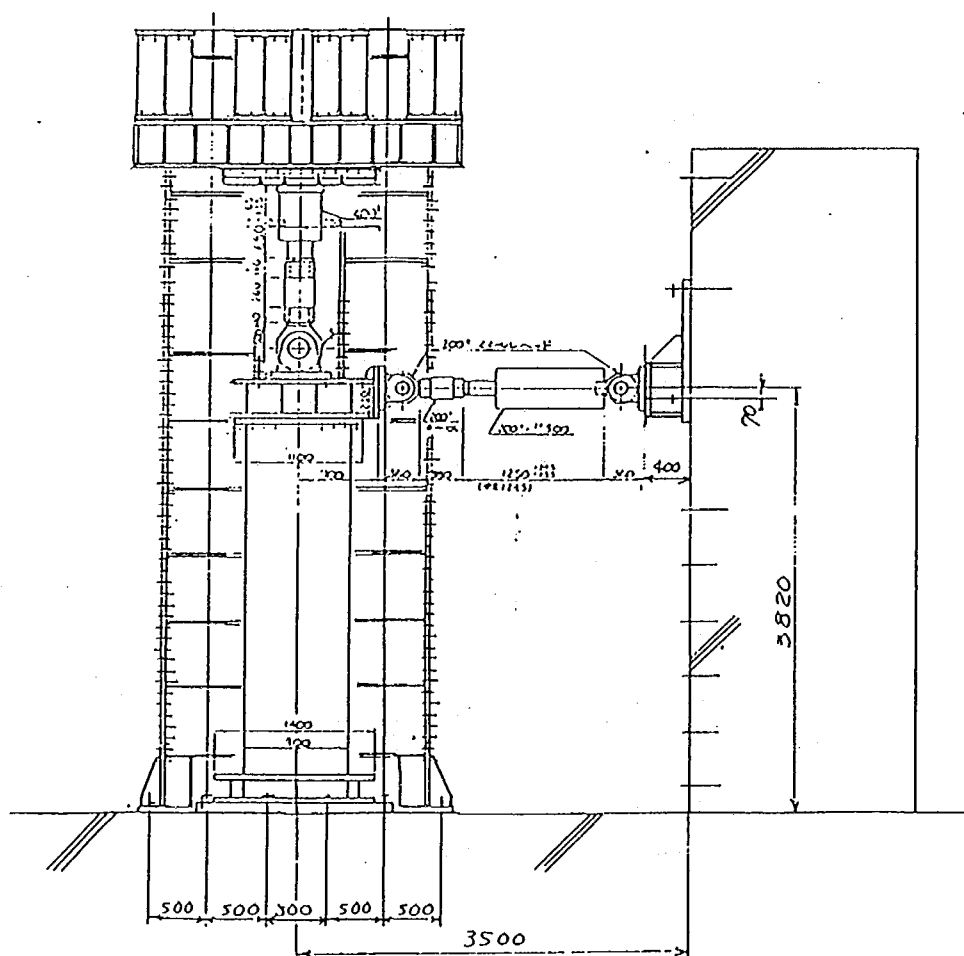
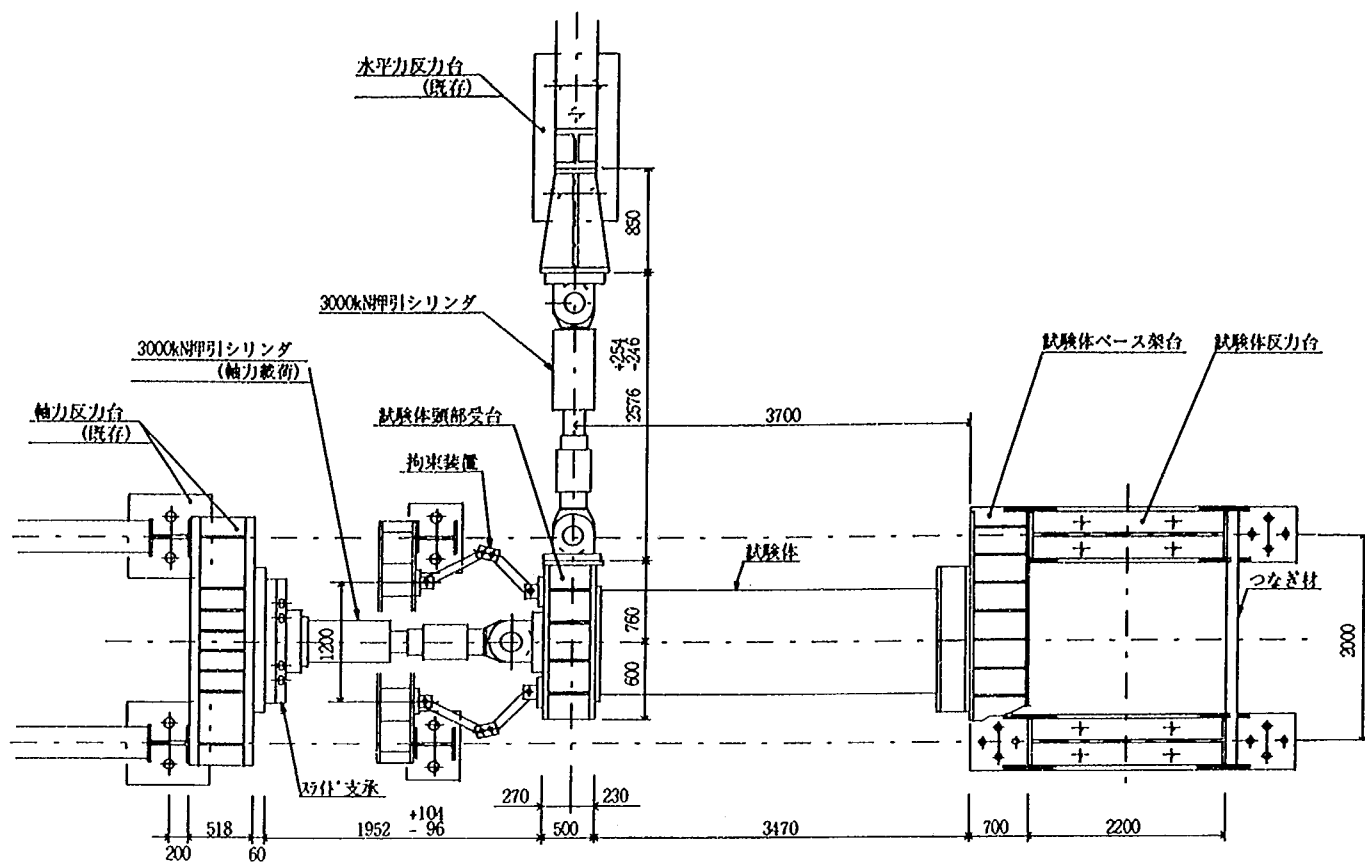


図-2.2.2 A社の載荷フレームの形状・寸法（立面図）

表-2.2.1 B社の载荷装置の能力

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	± 200mm
		Horizontal force	; Compression	≤ 3,000kN
			; Tension	≤ 3,000kN
			; Stroke	± 250mm
Control Mode		Manual		
Main Components	Oil Cylinder	Oil pressure	; ≤ 70MPa	
	Swivel Joint	Endurable load	; 3,000kN	
	Slide Base	Endurable load	; 5,000kN	
		Stroke	; ± 250mm	
Friction coefficient		; ≤ 0.005		
	Restraining Equipment	Restraining force	; ≤ 100kN	
		Restraining range	; Axial	±100mm
			; Horizontal	±250mm

表-2.2.2 A社の载荷装置の能力

Items		Specification and Performance		
Type		Horizontal type, bi-axial loading		
Specimen Size		Max. height	; 3,470mm	
Loading Capacity (Static)		Axial force	; Compression	≤ 4,000kN
			; Stroke	± 100mm
		Horizontal force	; Compression	≤ 3,000kN
			; Tension	≤ 2,000kN
			; Stroke	± 250mm
Control Mode		Automatic mode	; Load control, Displacement control	
		Manual mode		
Main Components	Oil Cylinder	Oil pressure	; ≤ 70MPa	
	Swivel Joint	Endurable load	; V: 5,000kN, H: 2,000kN	
	Slide Base	Endurable load	; 5,000kN	
		Stroke	; ≤ 500mm	
Friction coefficient		; ≤ 0.005		
	Restraining Equipment	Restraining force	; ≤ 100kN	
		Restraining range	; Axial	±100mm
			; Horizontal	±250mm

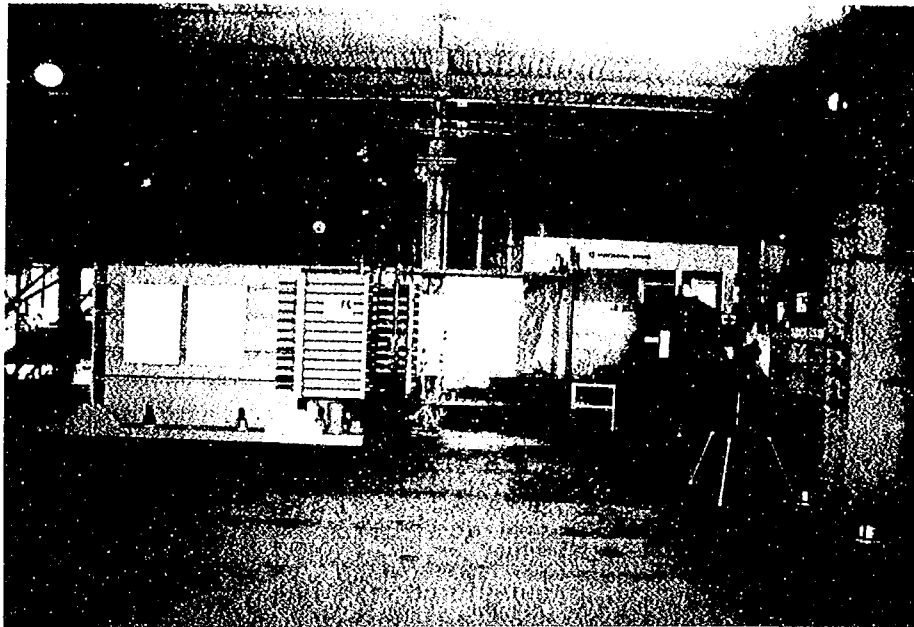


写真-2.2.3 B社の供試体設置状況

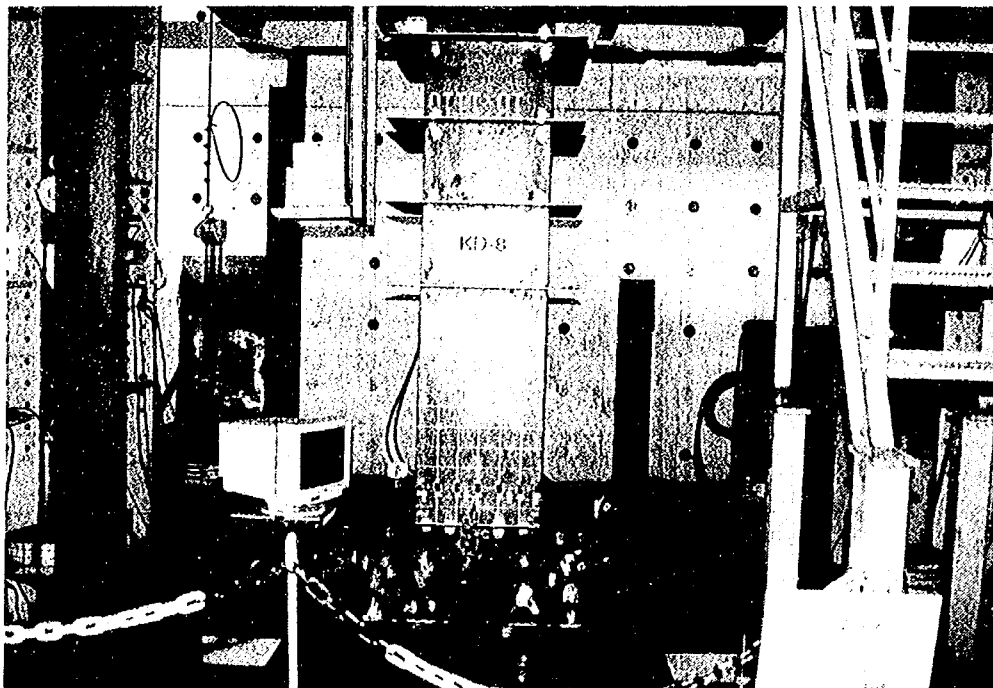
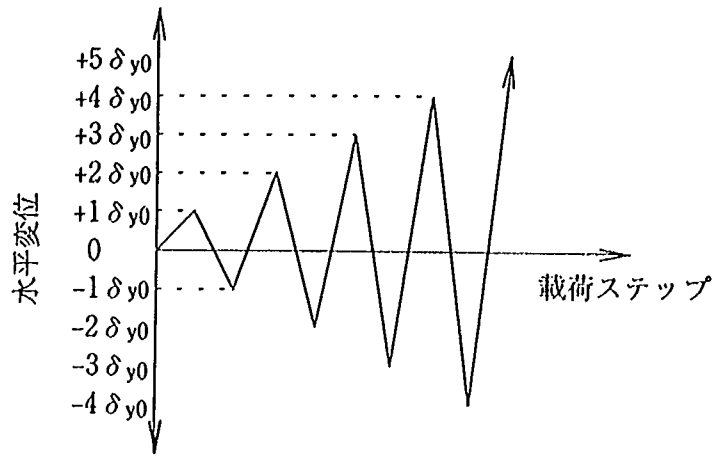
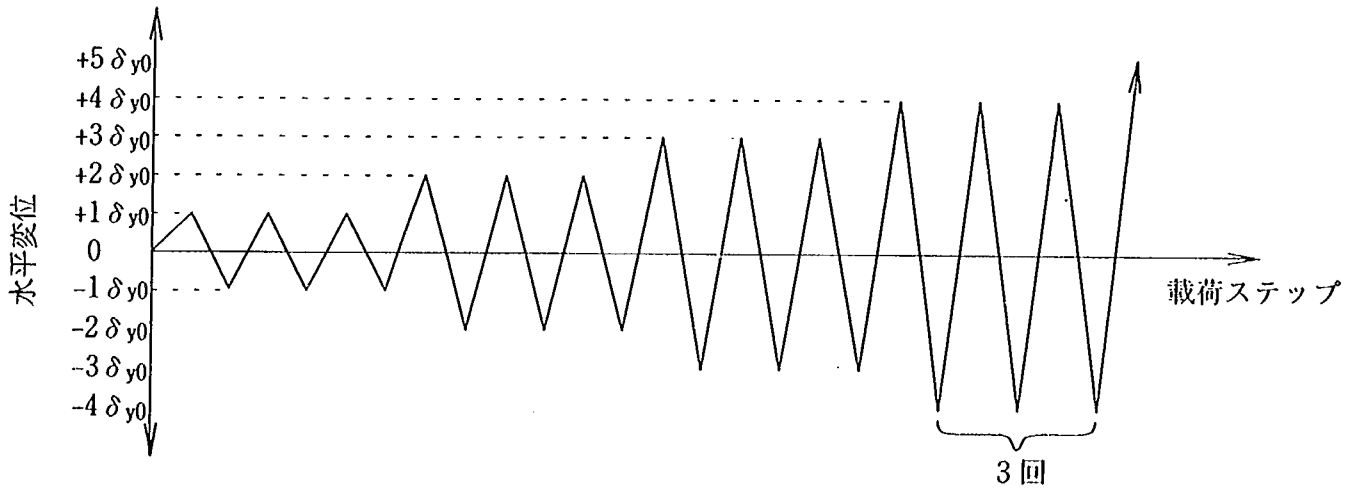


写真-2.2.4 A社の供試体設置状況



(a) 振幅の繰り返し 1 回



(b) 振幅の繰り返し 3 回

図-2.2.3 载荷方法

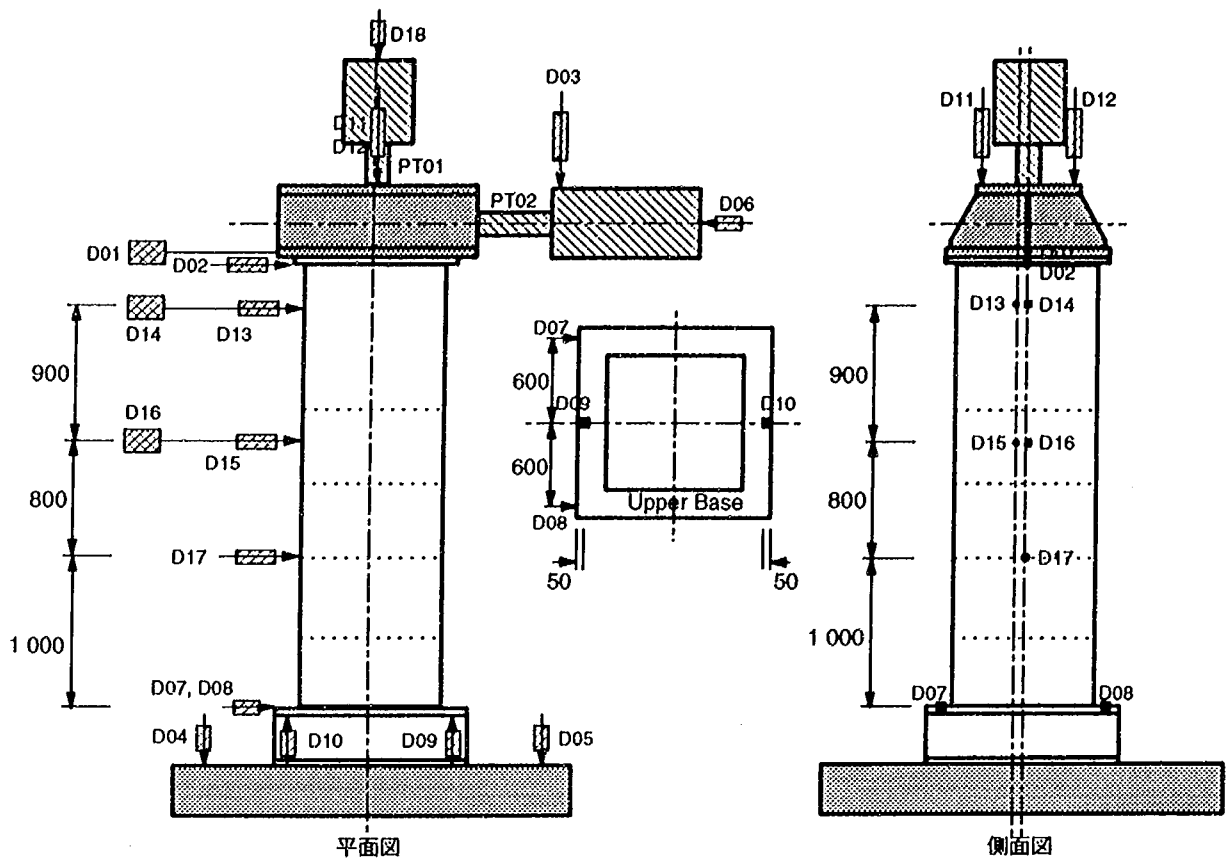


図-2.3.1(1) 変位計の設置位置 (KD-1)

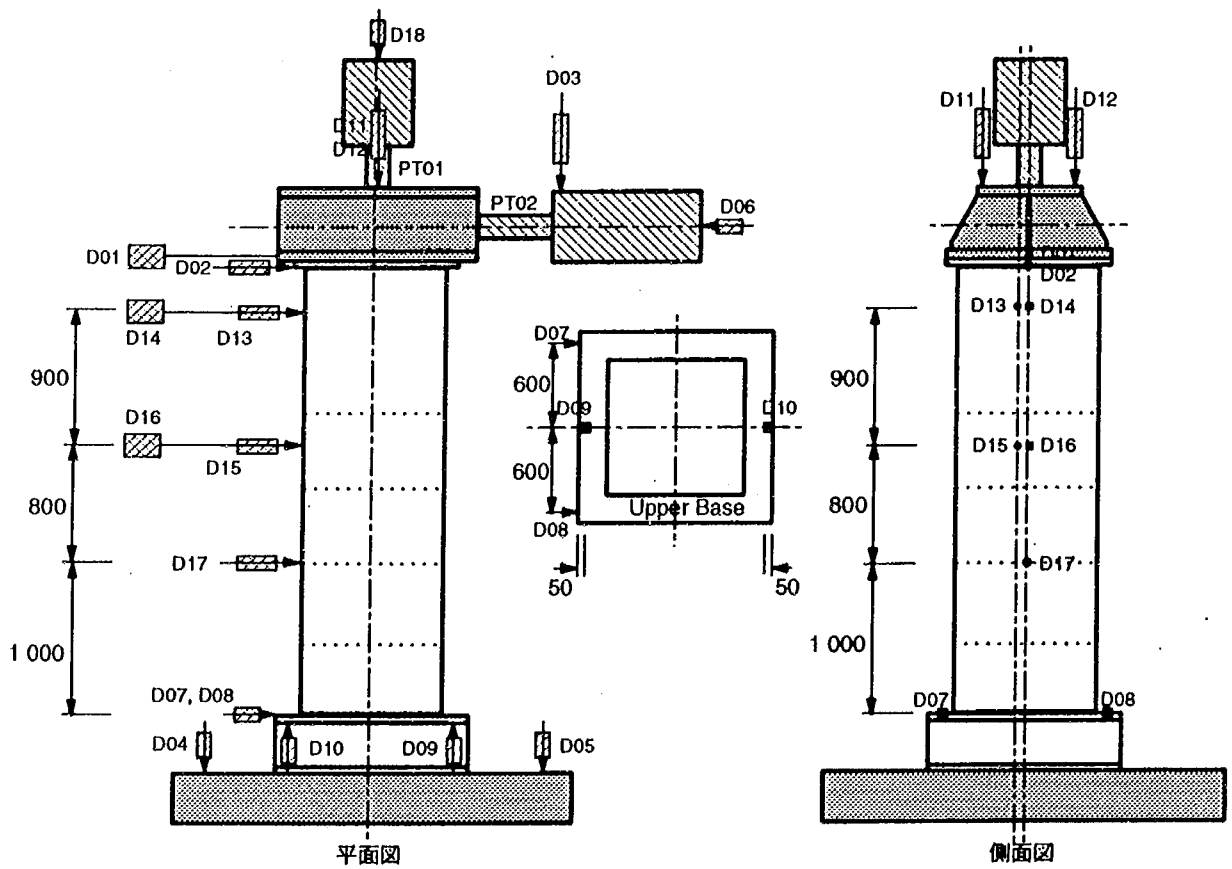


図-2.3.1(2) 変位計の設置位置 (KD-2)

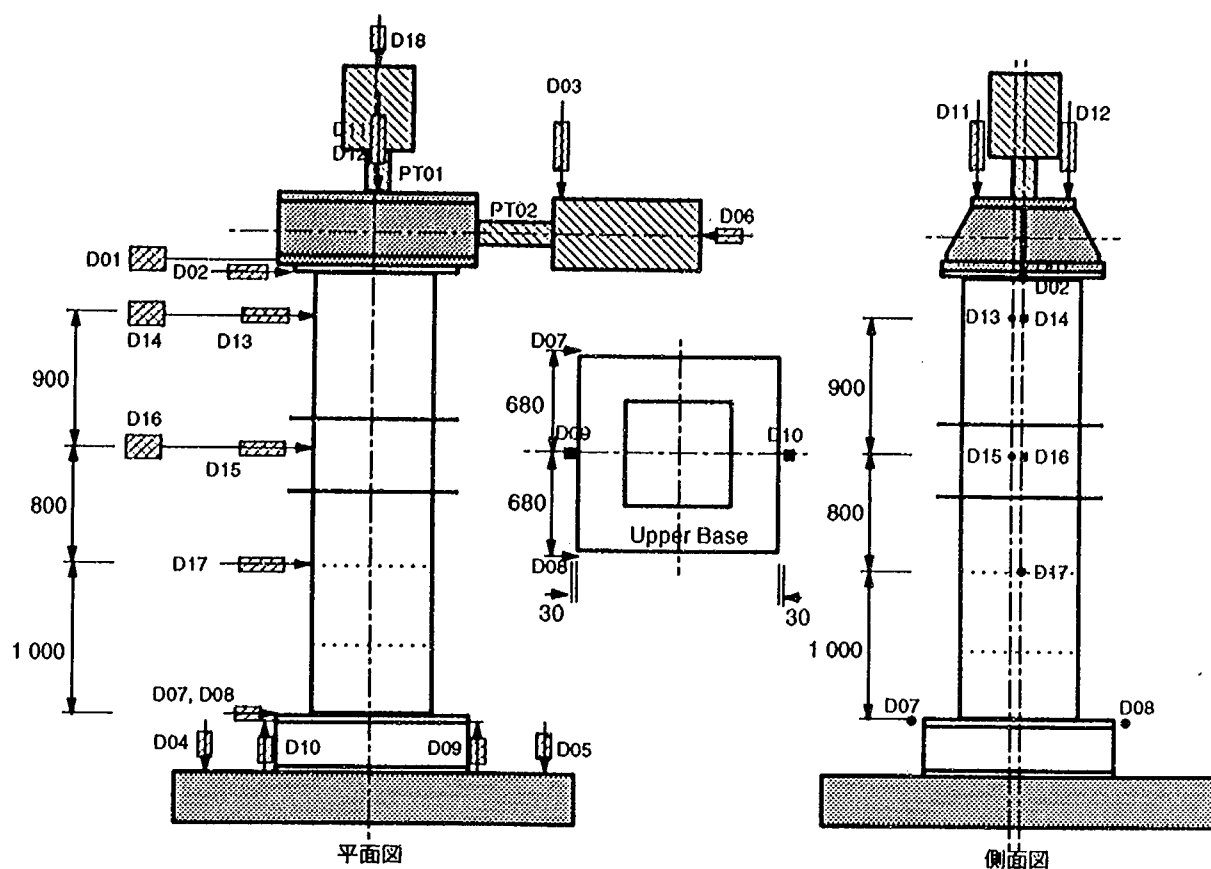


図-2.3.1(3) 変位計の設置位置 (KD-3)

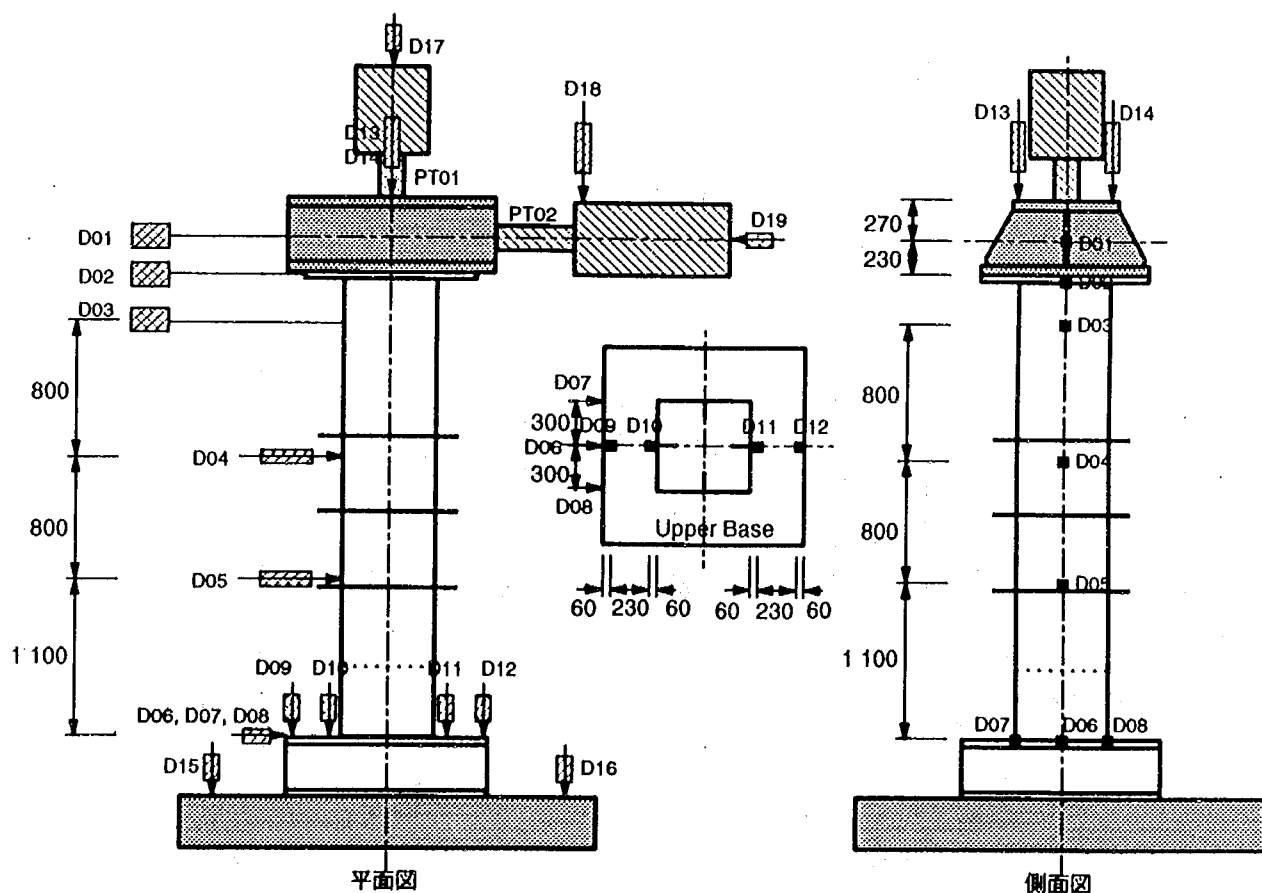


図-2.3.1(4) 変位計の設置位置 (KD-4)

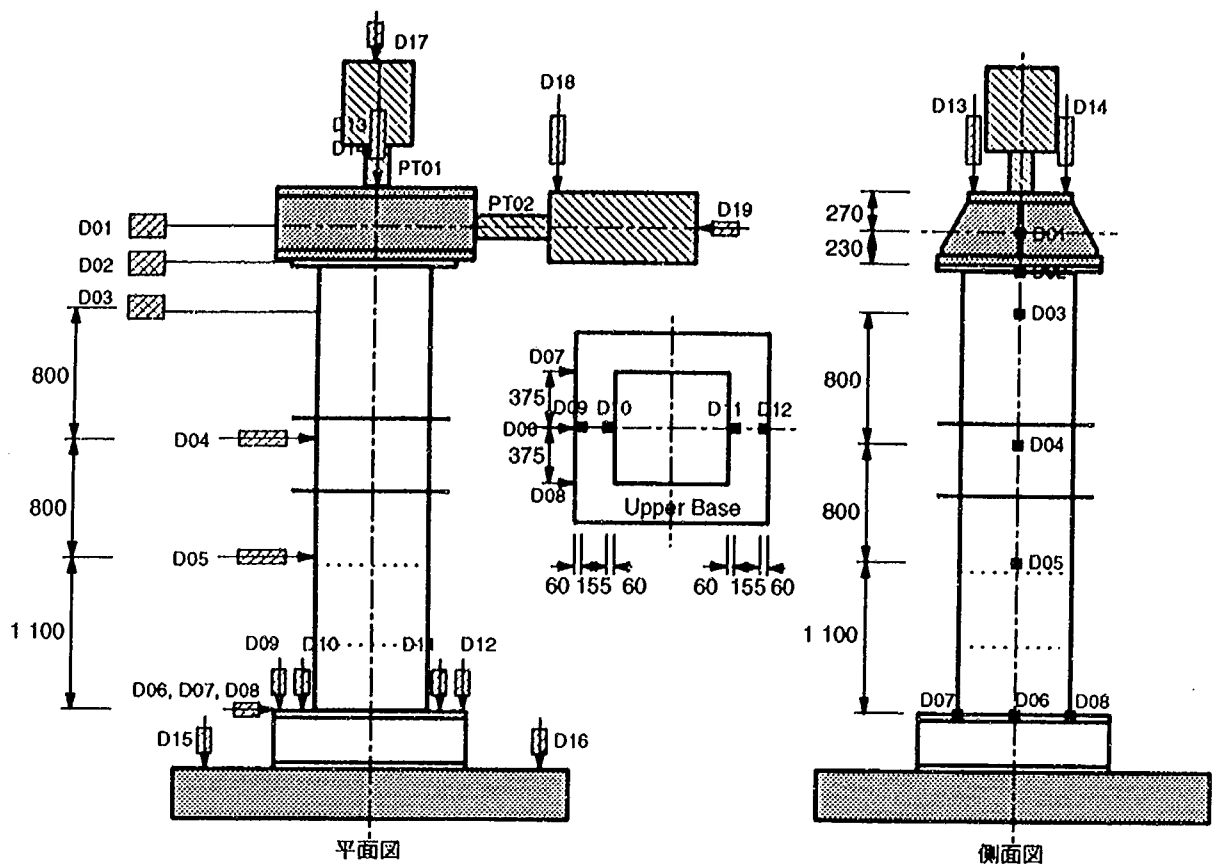


図-2.3.1(5) 変位計の設置位置 (KD-5)

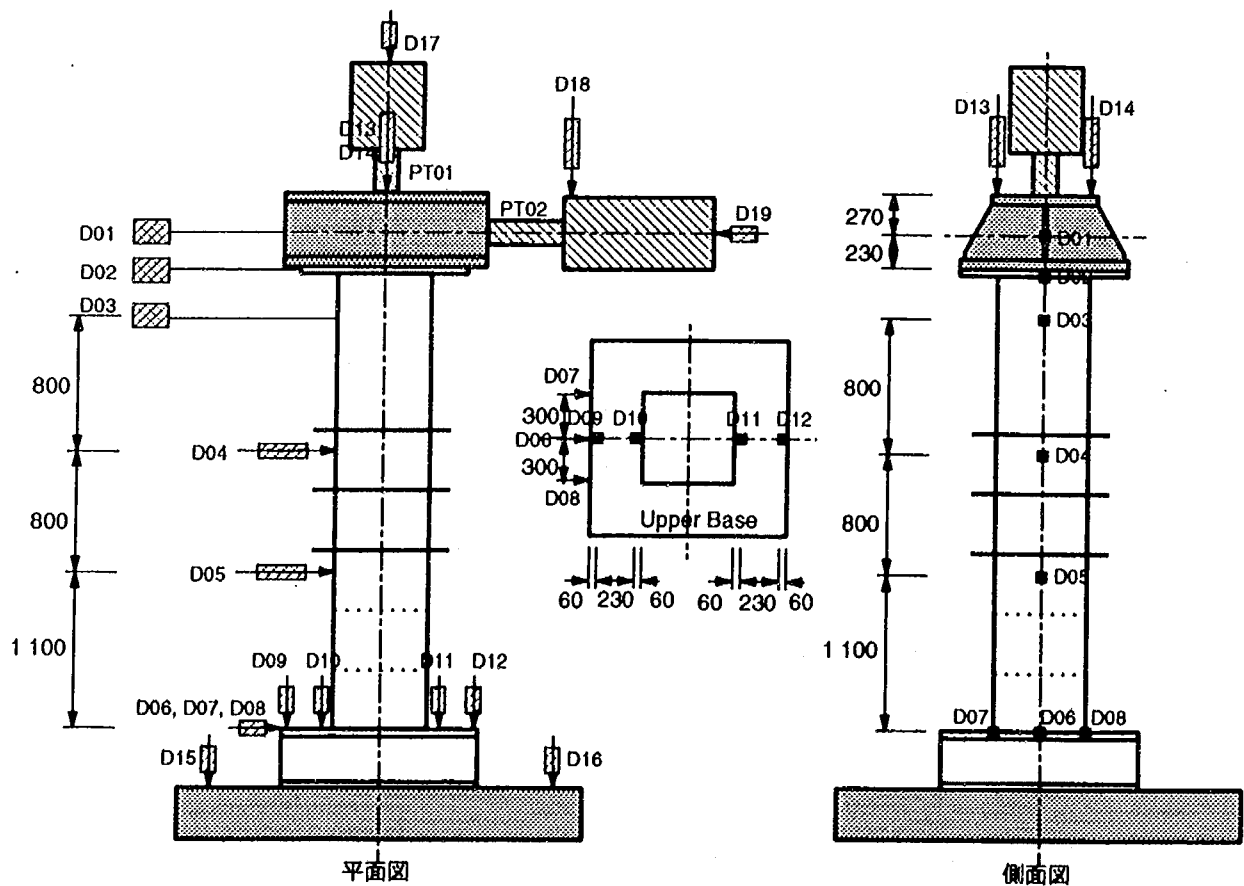


図-2.3.1(6) 変位計の設置位置 (KD-6)

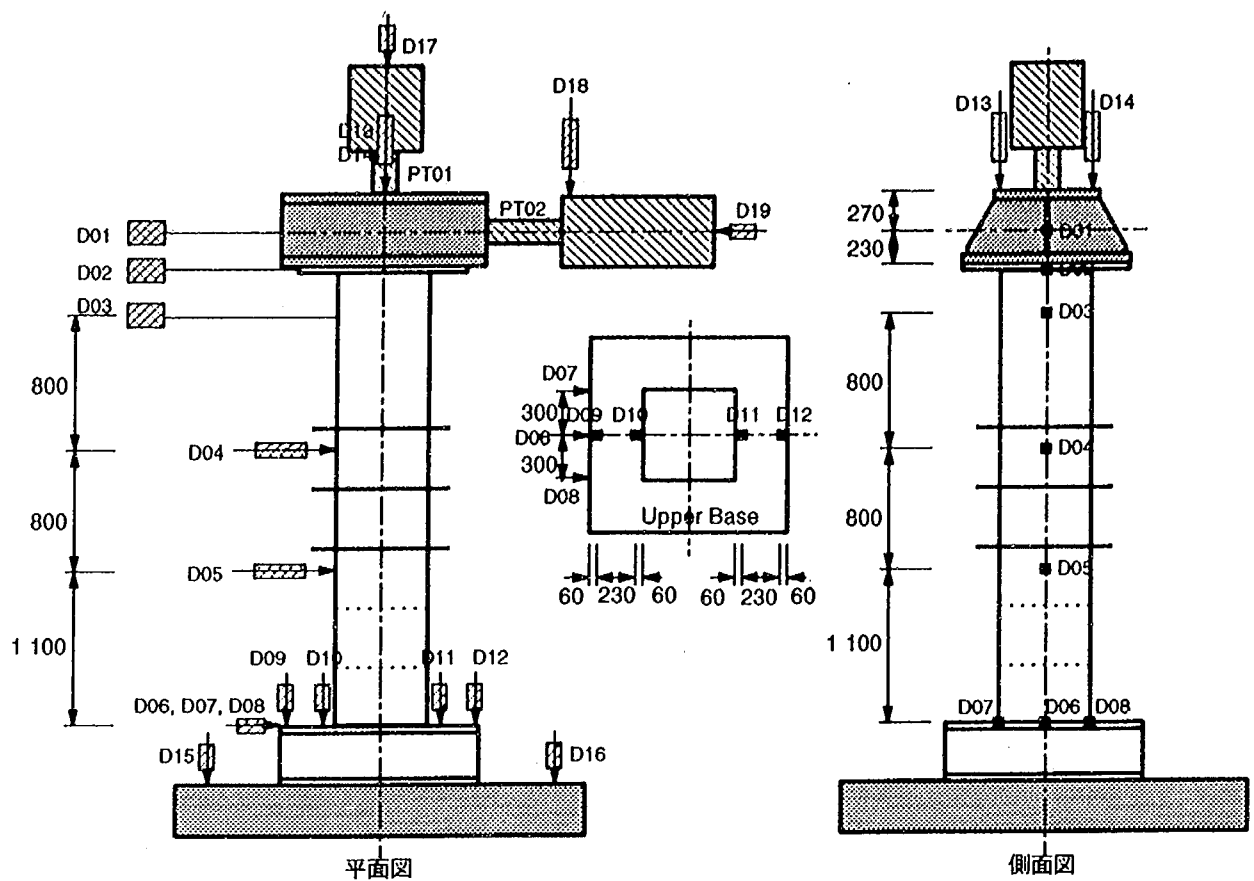


図-2.3.1(9) 変位計の設置位置 (KD-9)

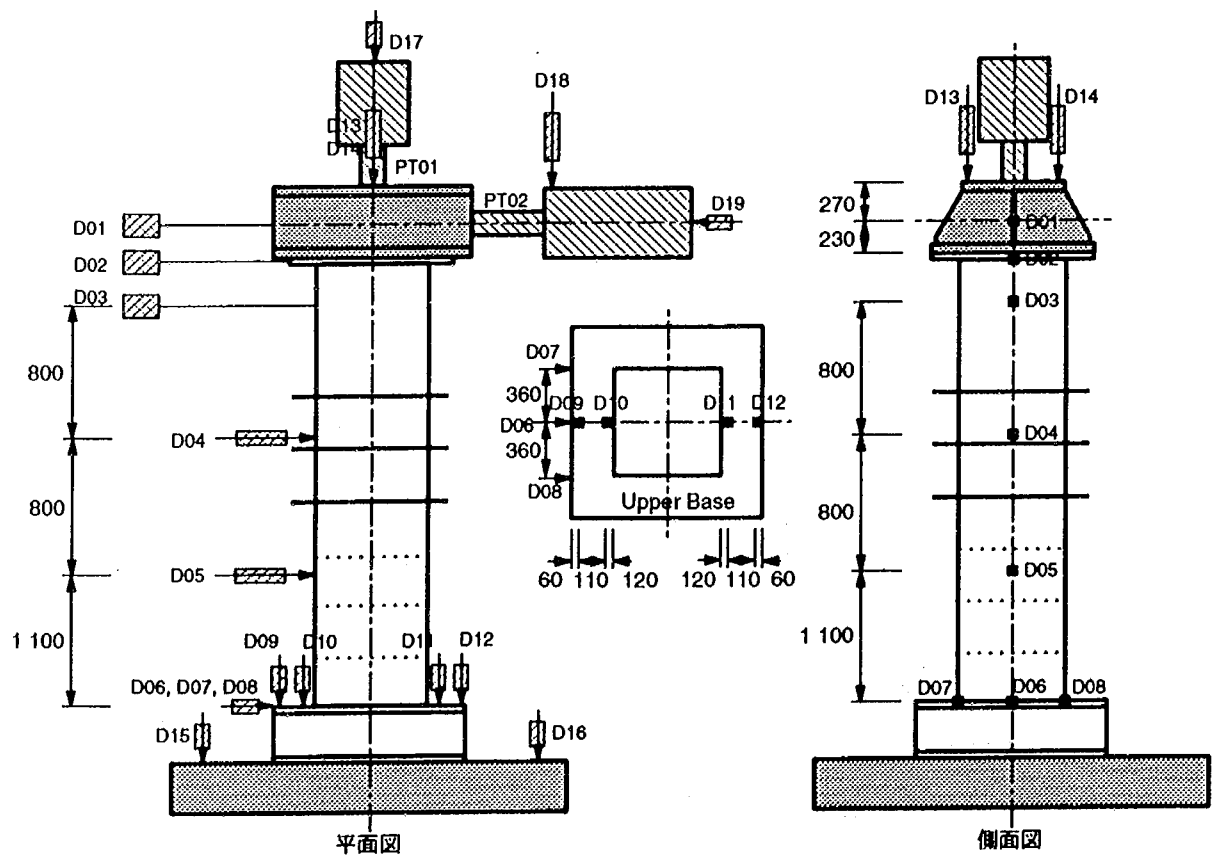


図-2.3.1(10) 変位計の設置位置 (KD-10)

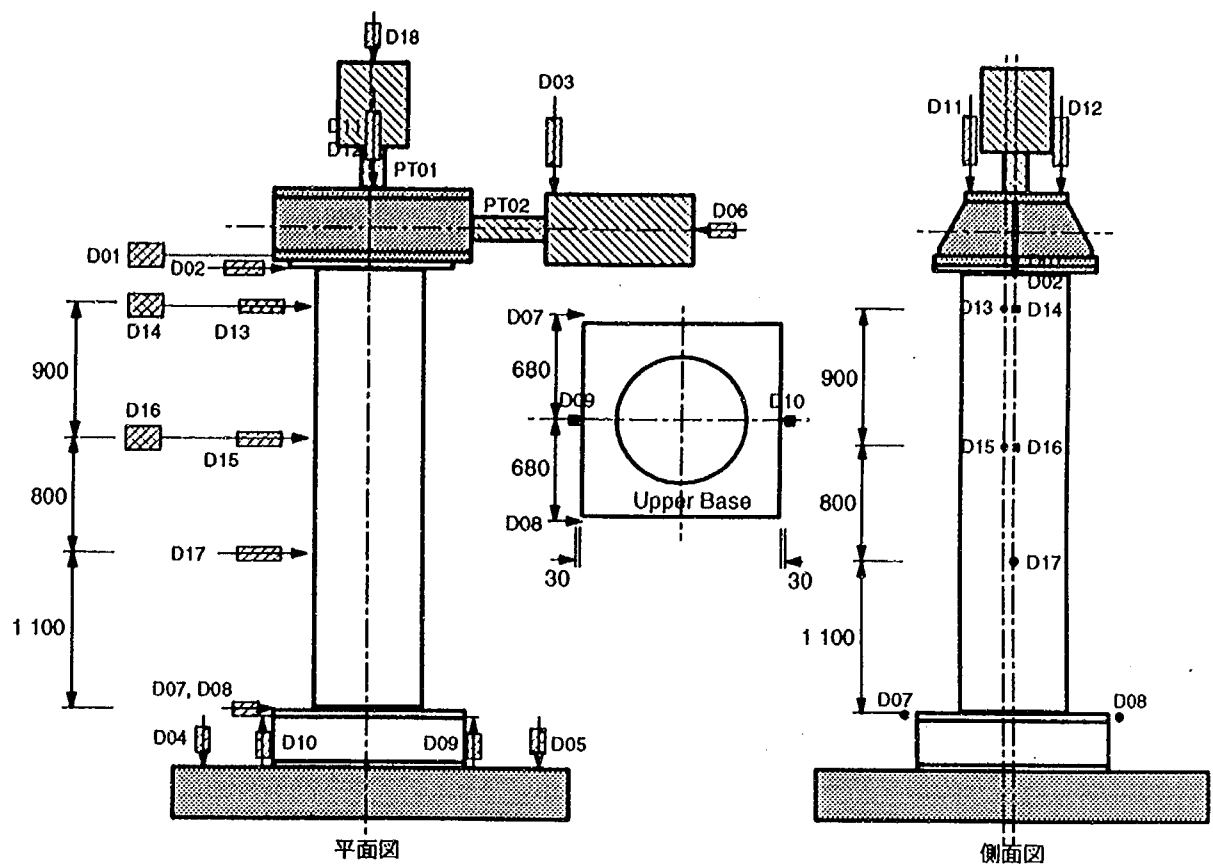


図-2.3.1(11) 変位計の設置位置 (KC-1)

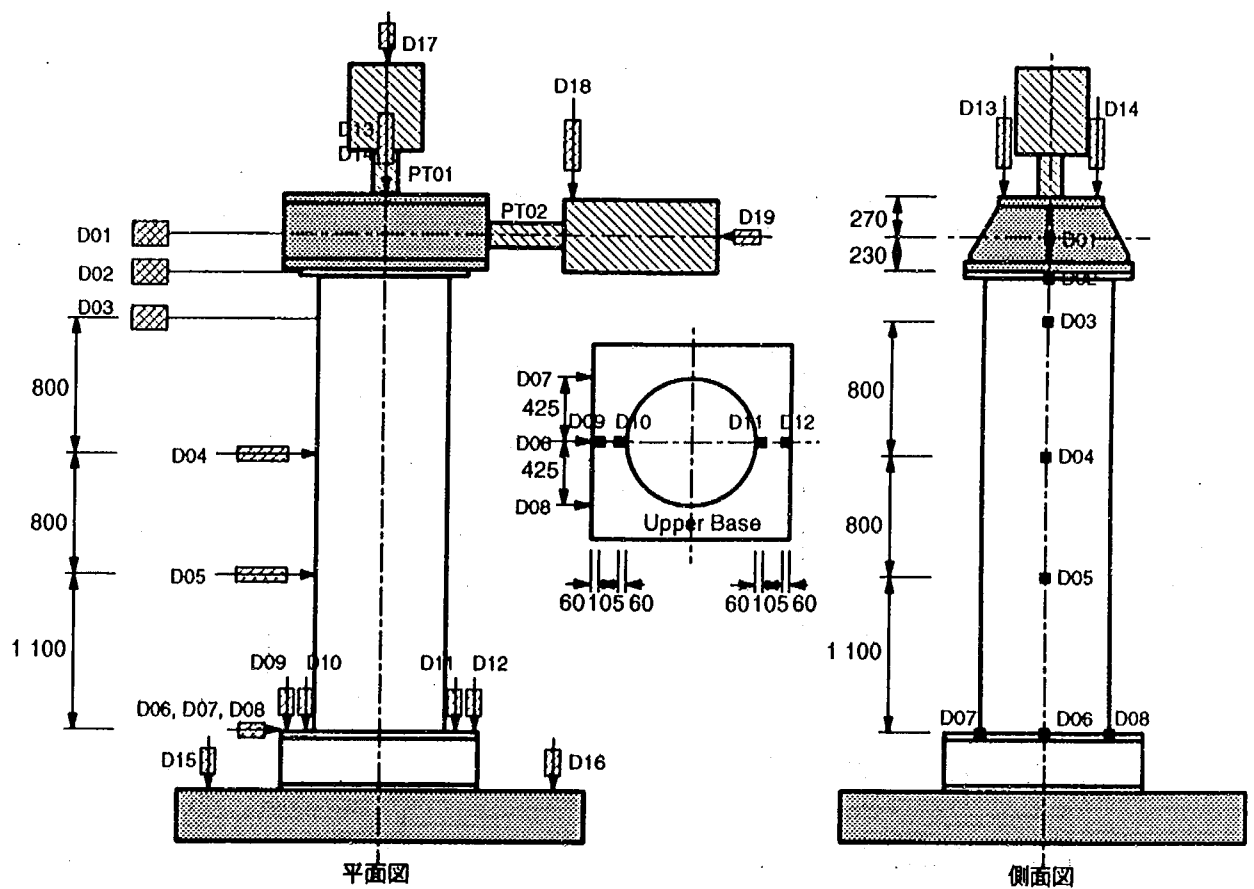


図-2.3.1(12) 変位計の設置位置 (KC-2_1)

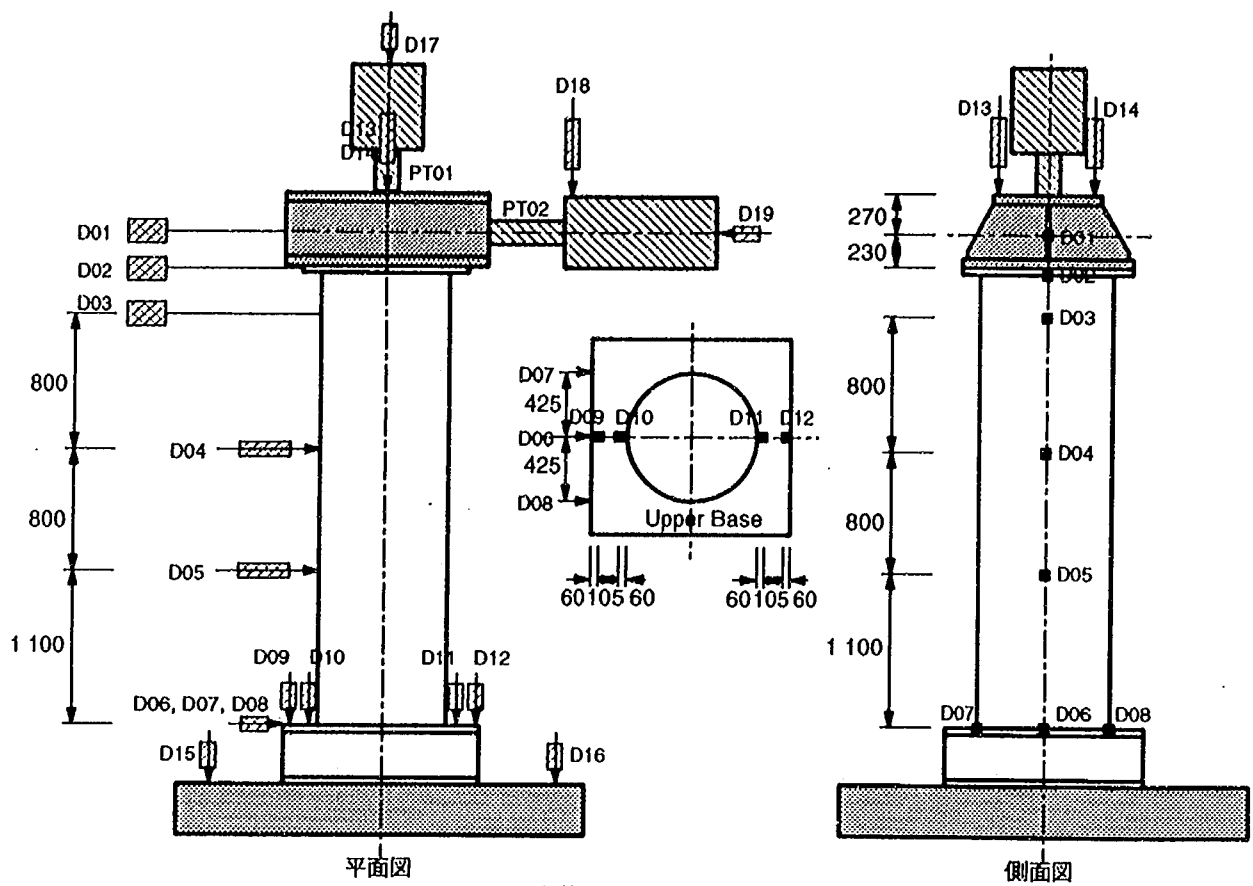


図-2.3.1(13) 変位計の設置位置 (KC-2_3)

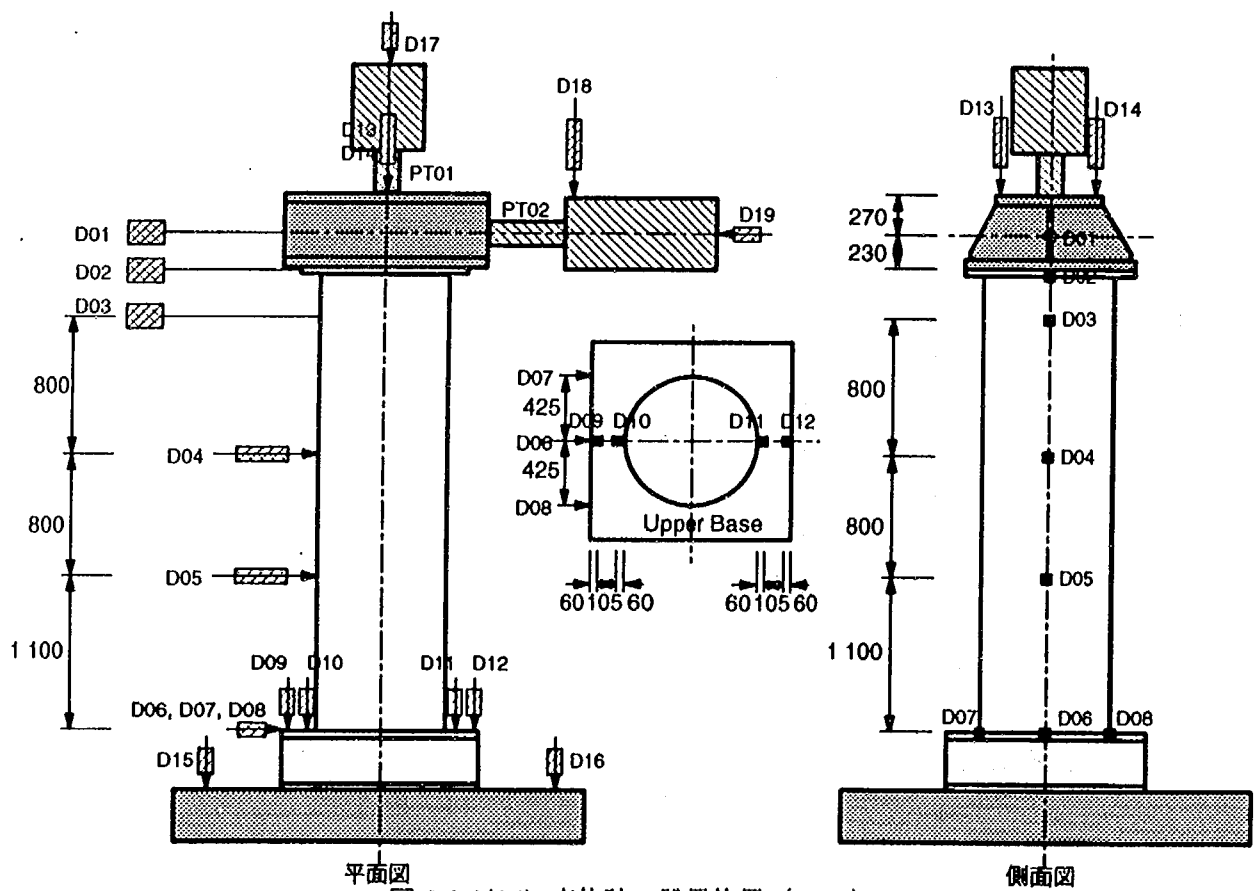


図-2.3.1(14) 変位計の設置位置 (KC-3)

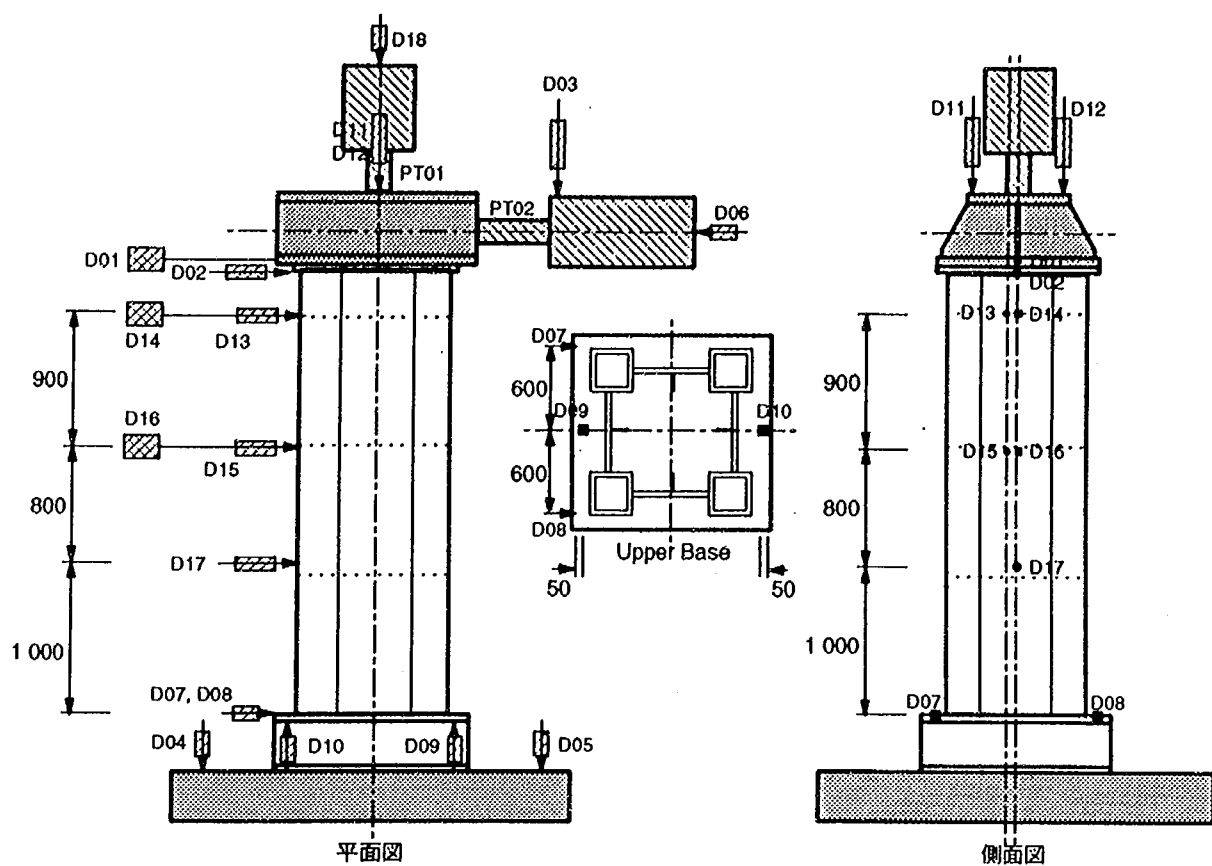
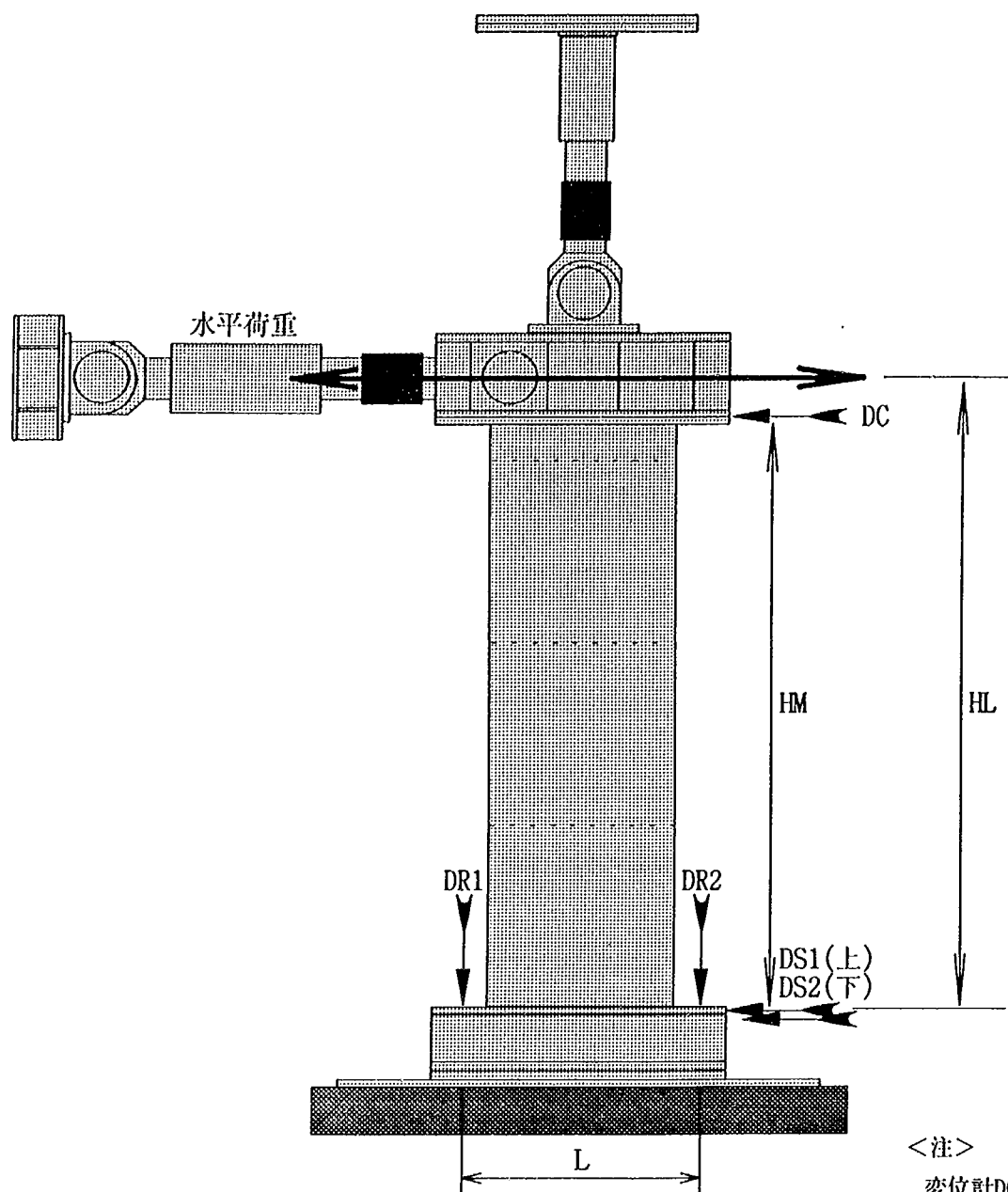


図-2.3.1(15) 変位計の設置位置 (KA-1)



<注>

変位計DCは、ワイヤー巻取式変位計
それ以外はひずみゲージ式一般変位計

◄◄：変位計の取付け位置と方向

⊗：紙面に対して表面から裏面
方向に向けて取付けた場合
の変位計取付け位置と方向

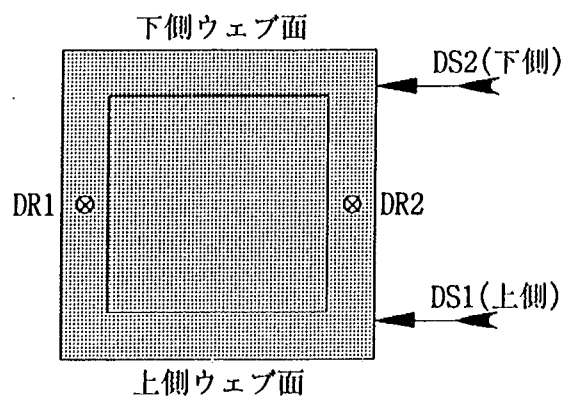


図-2.3.2 供試体の水平変位の補正

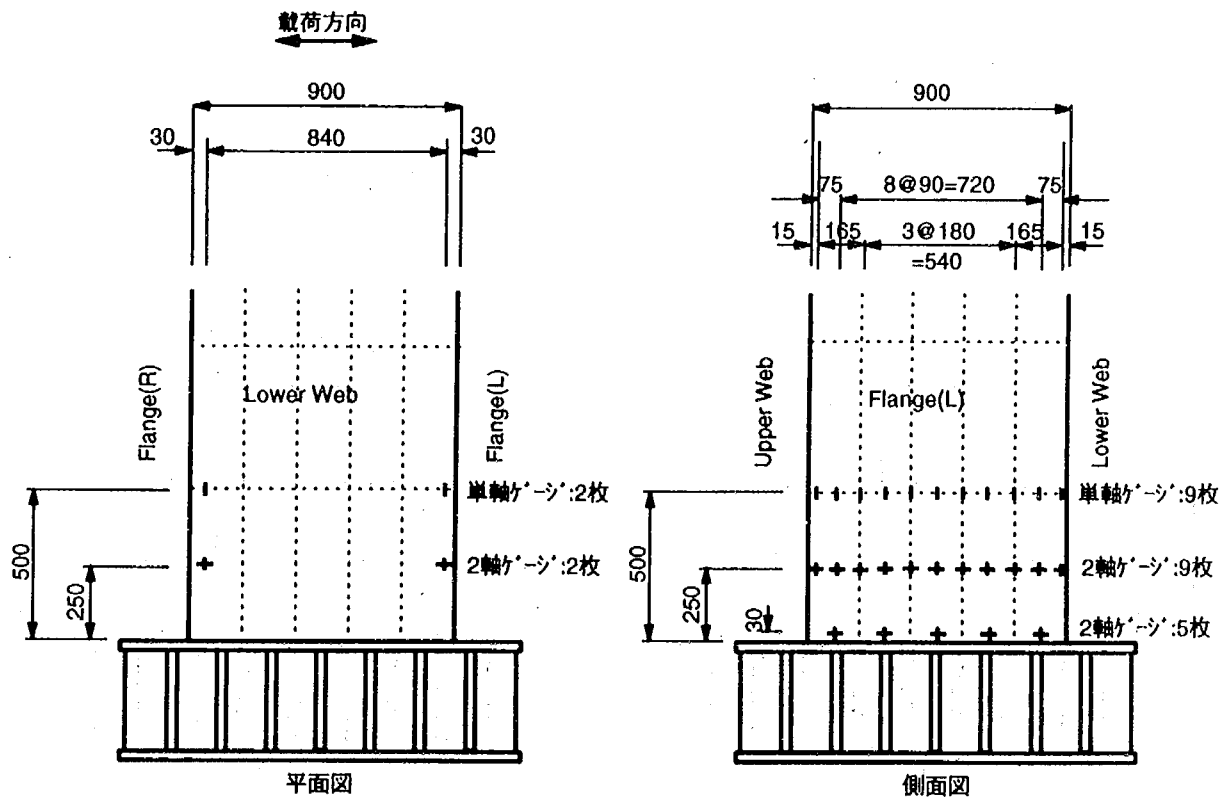
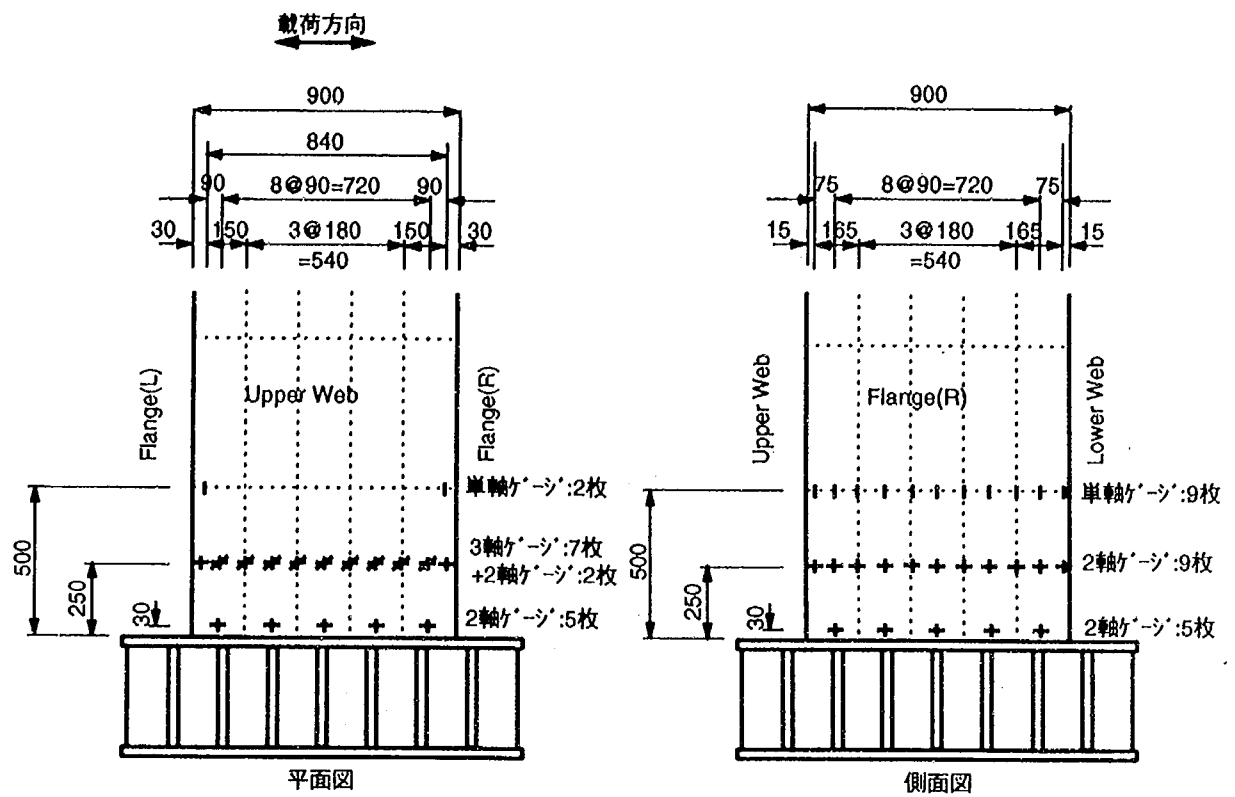


図-2.3.3(1) ひずみゲージ貼付位置 (KD-1)

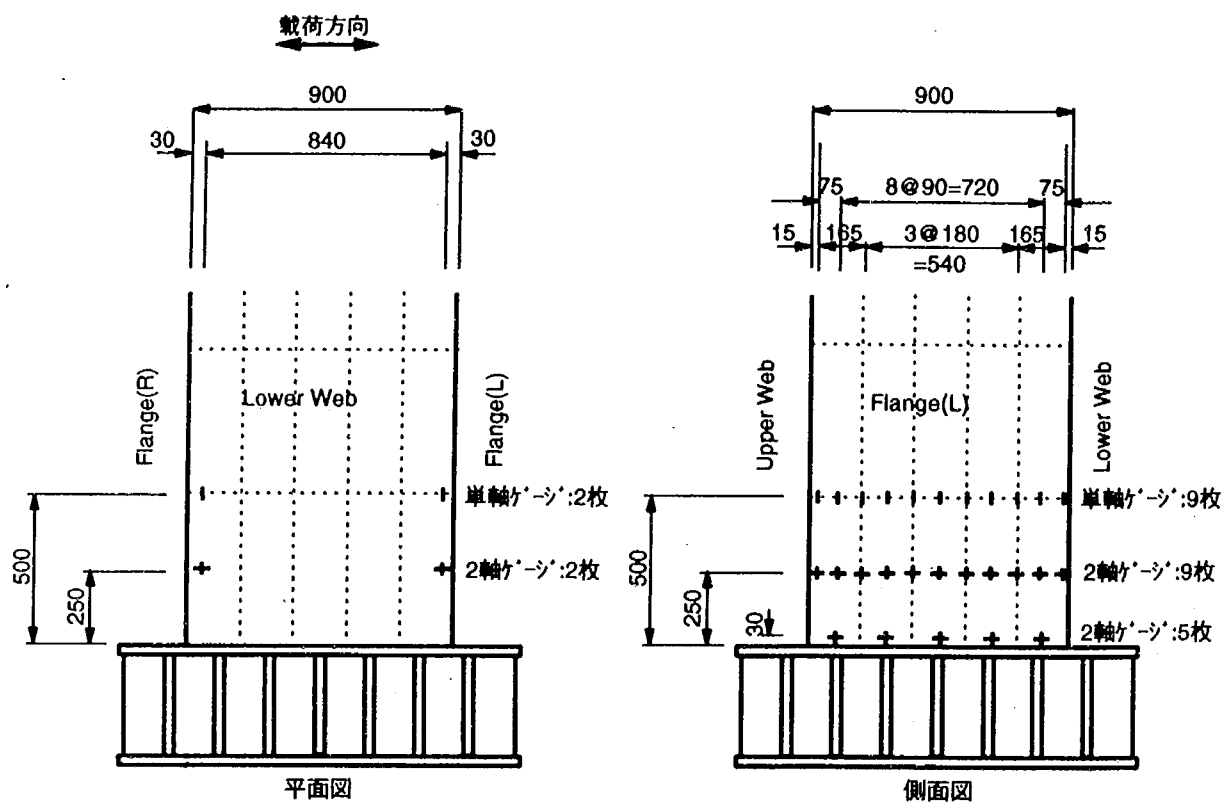
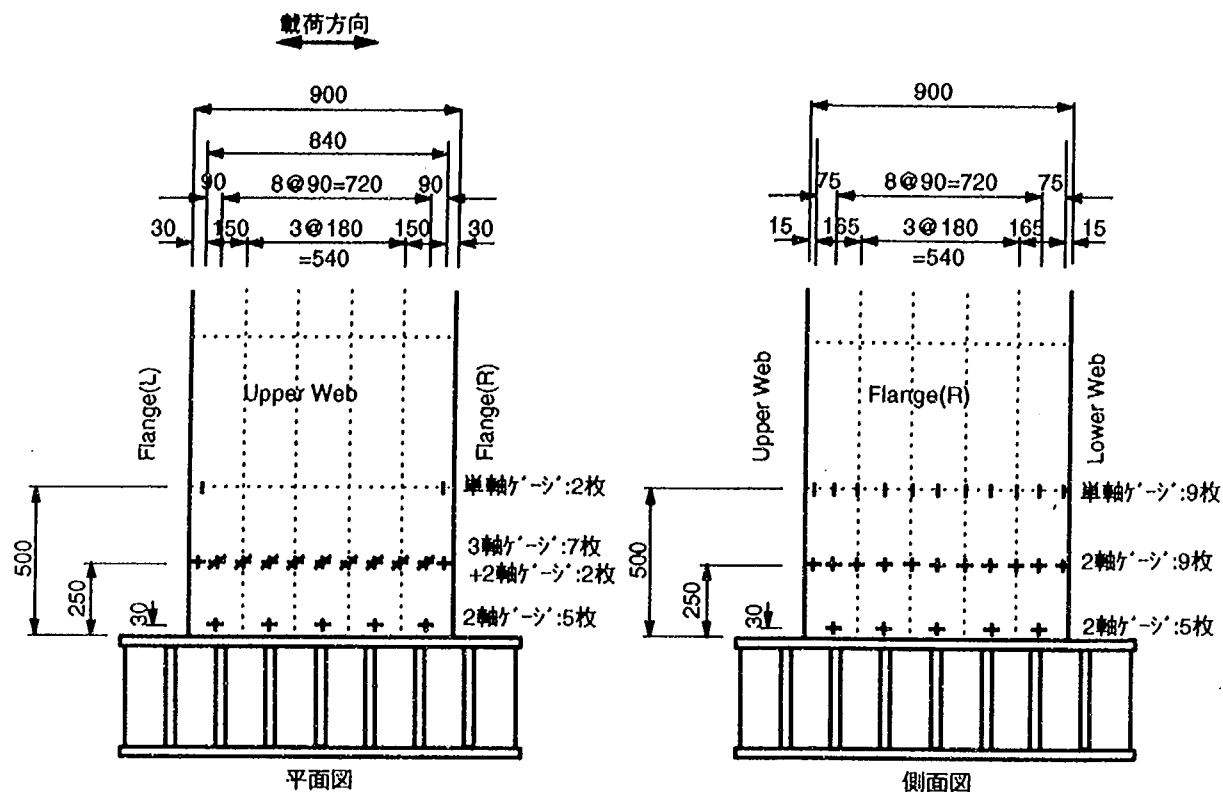


図-2.3.3(2) ひずみゲージ貼付位置 (KD-2)

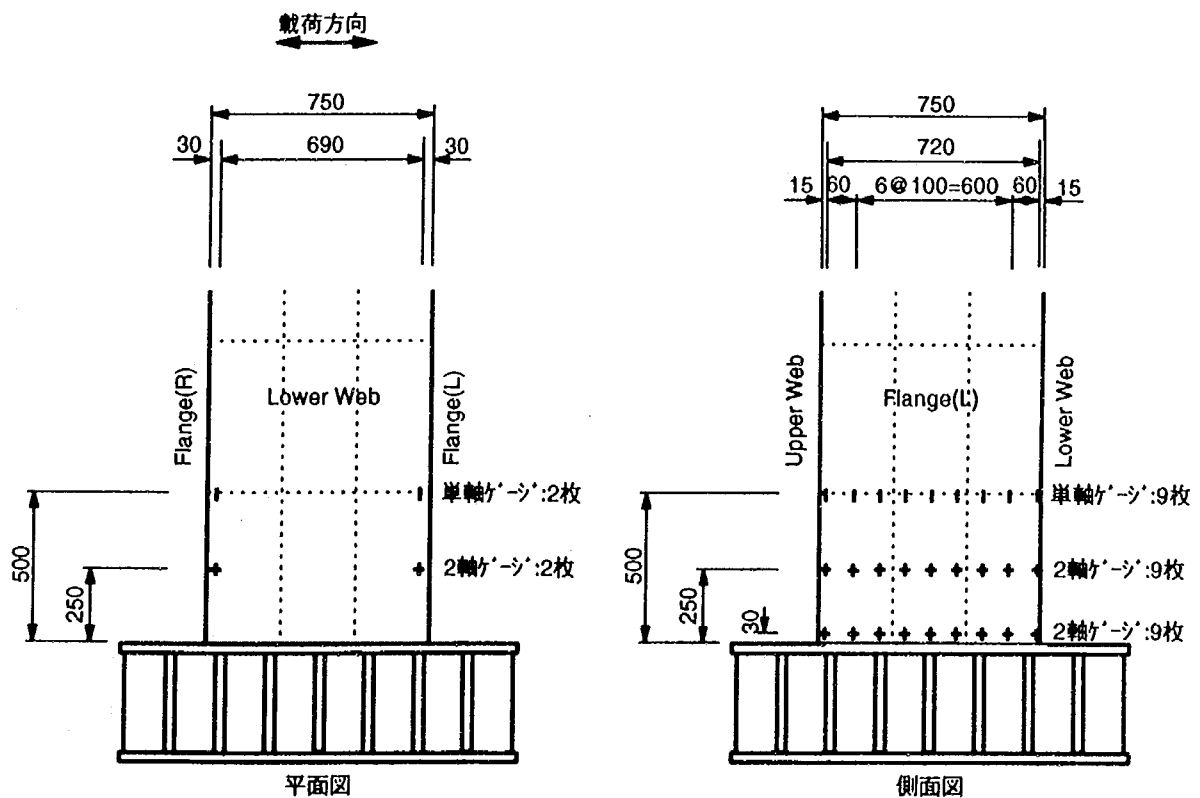
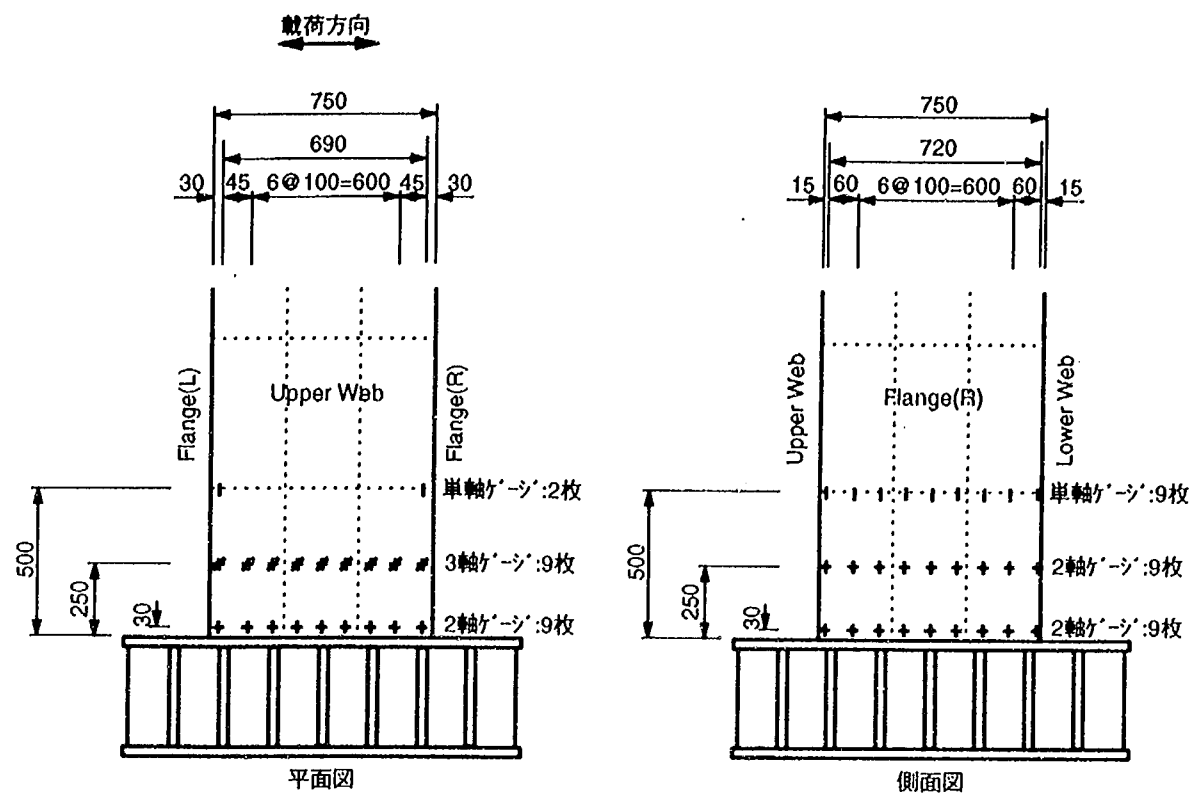


図-2.3.3(3) ひずみゲージ貼付位置 (KD-3)

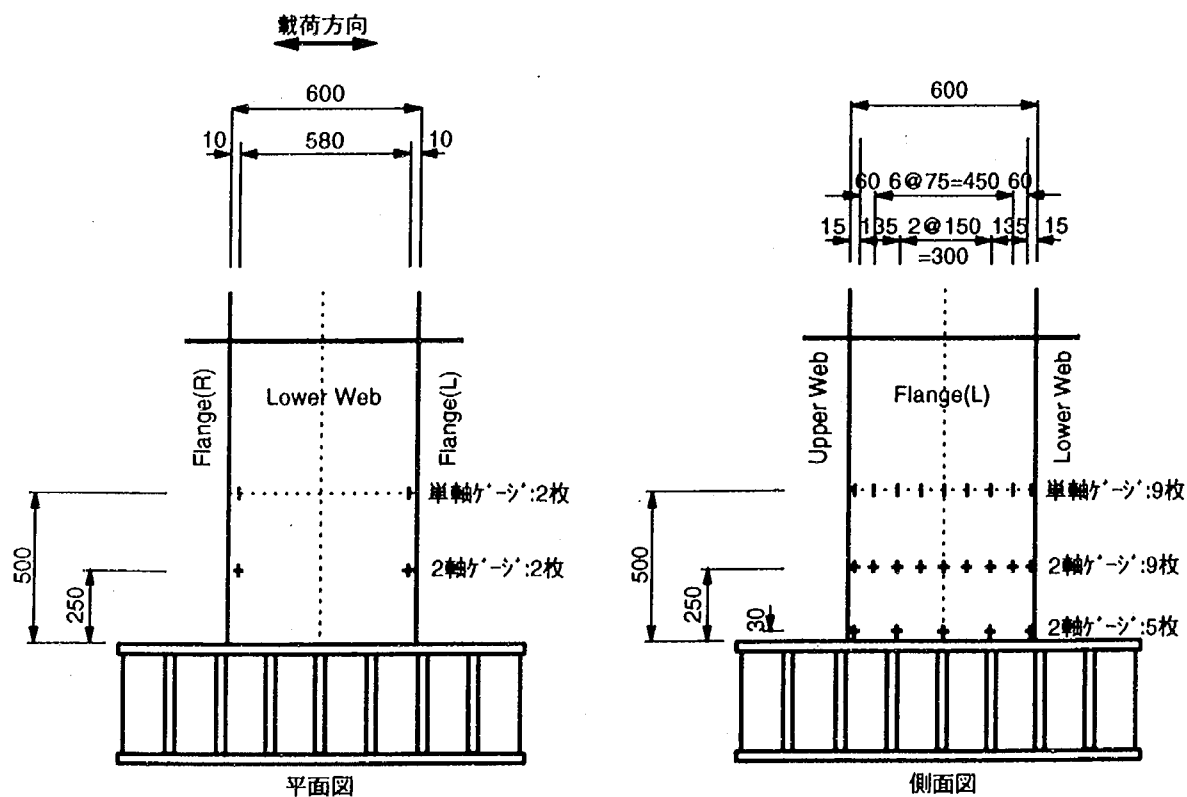
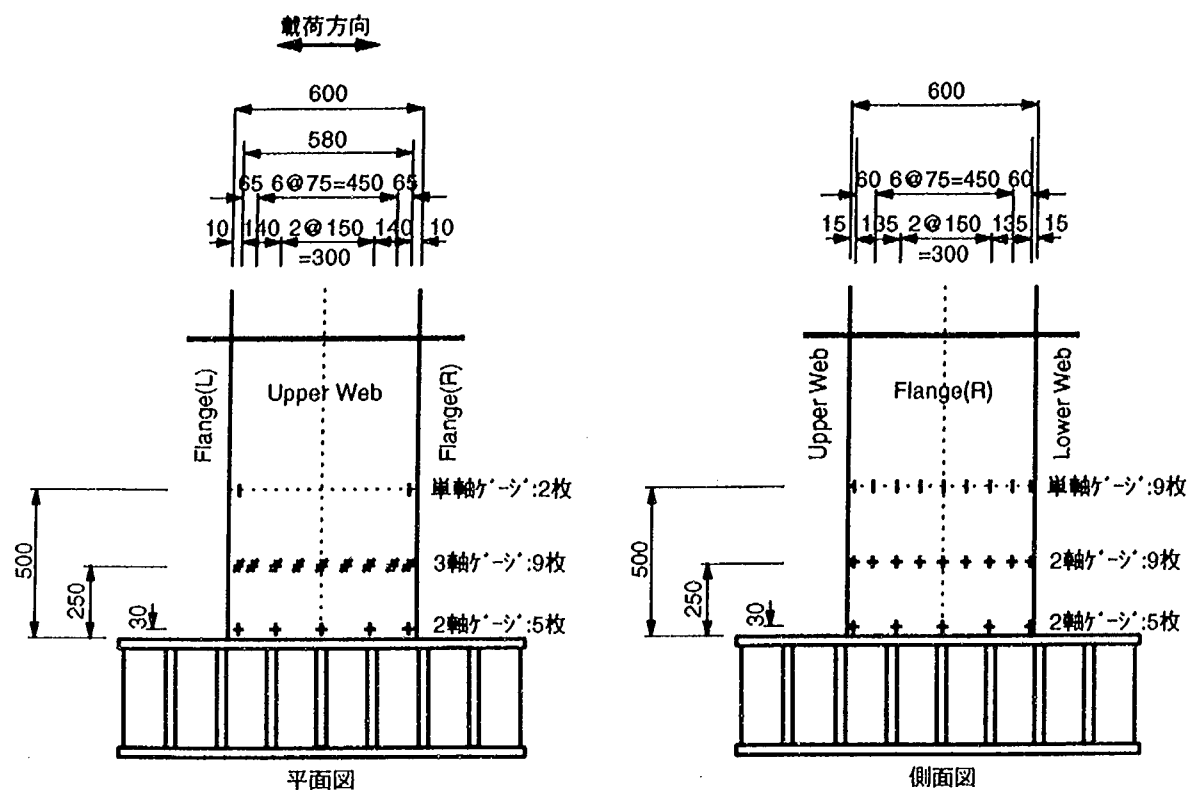


図-2.3.3(4) ひずみゲージ貼付位置 (KD-4)

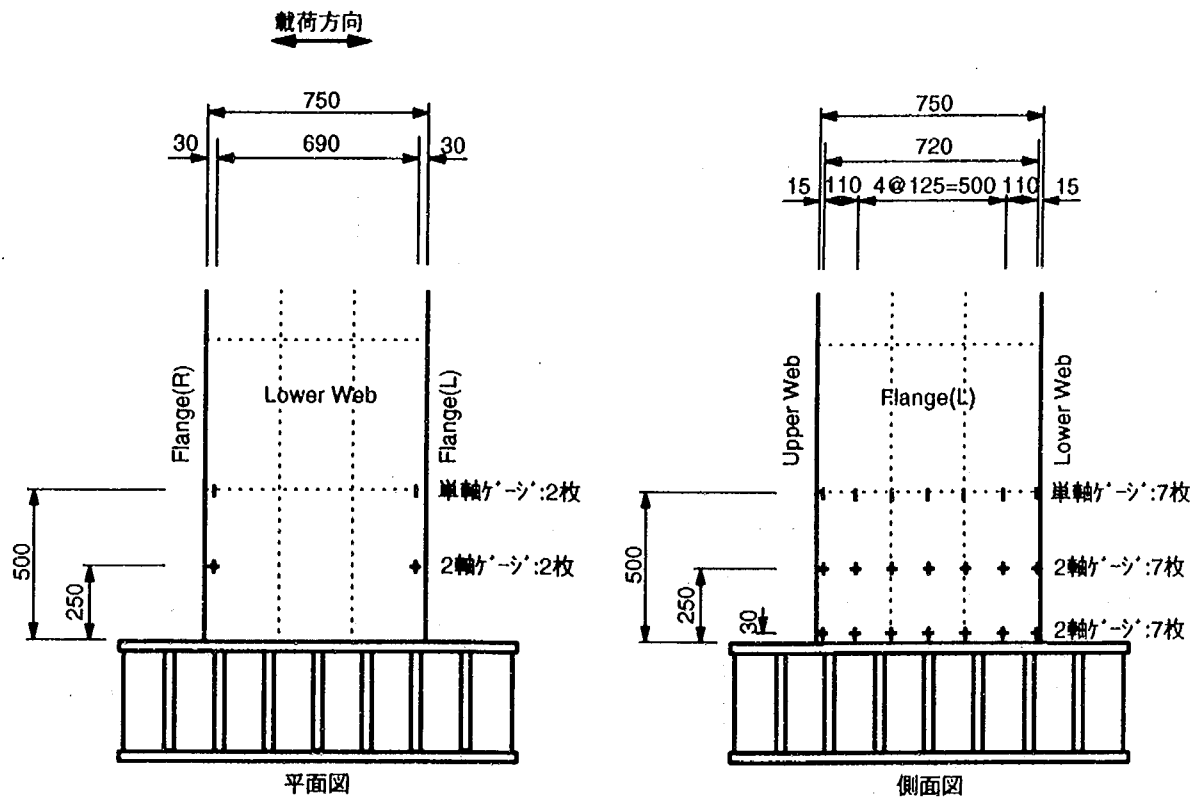
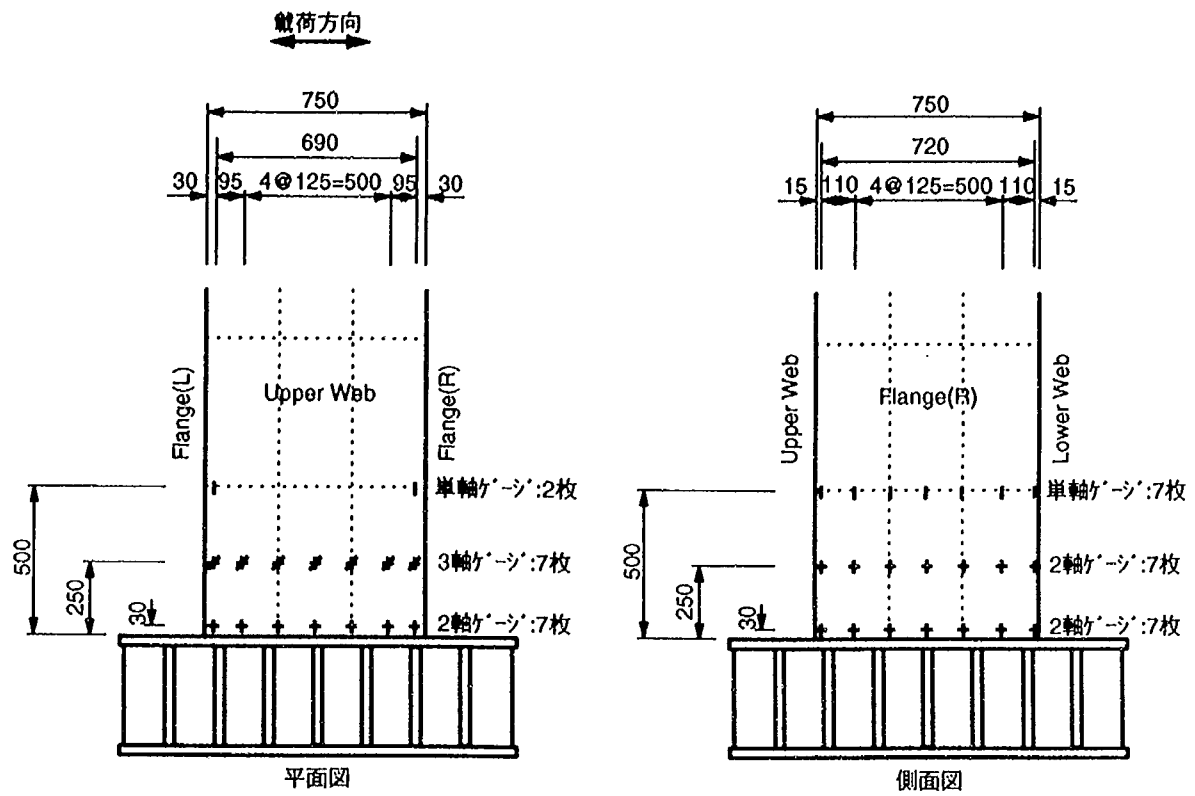


図-2.3.3(5) ひずみゲージ貼付位置 (KD-5)

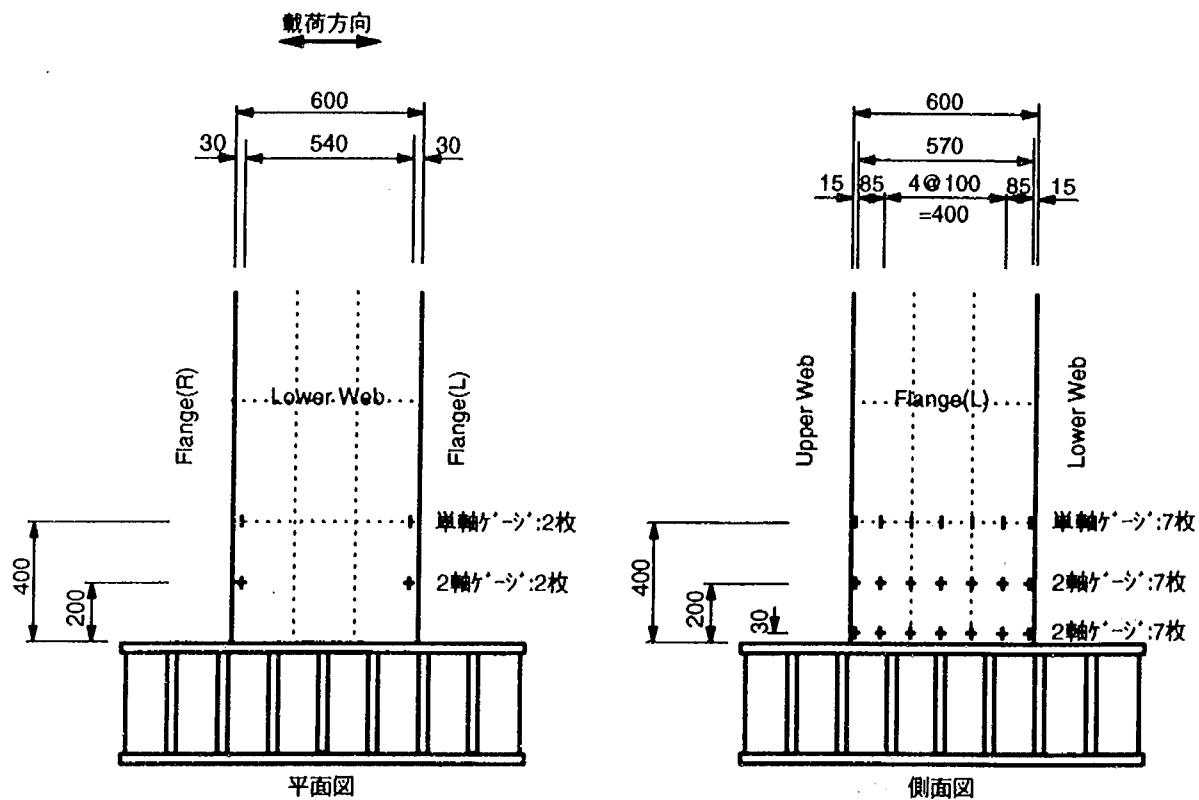
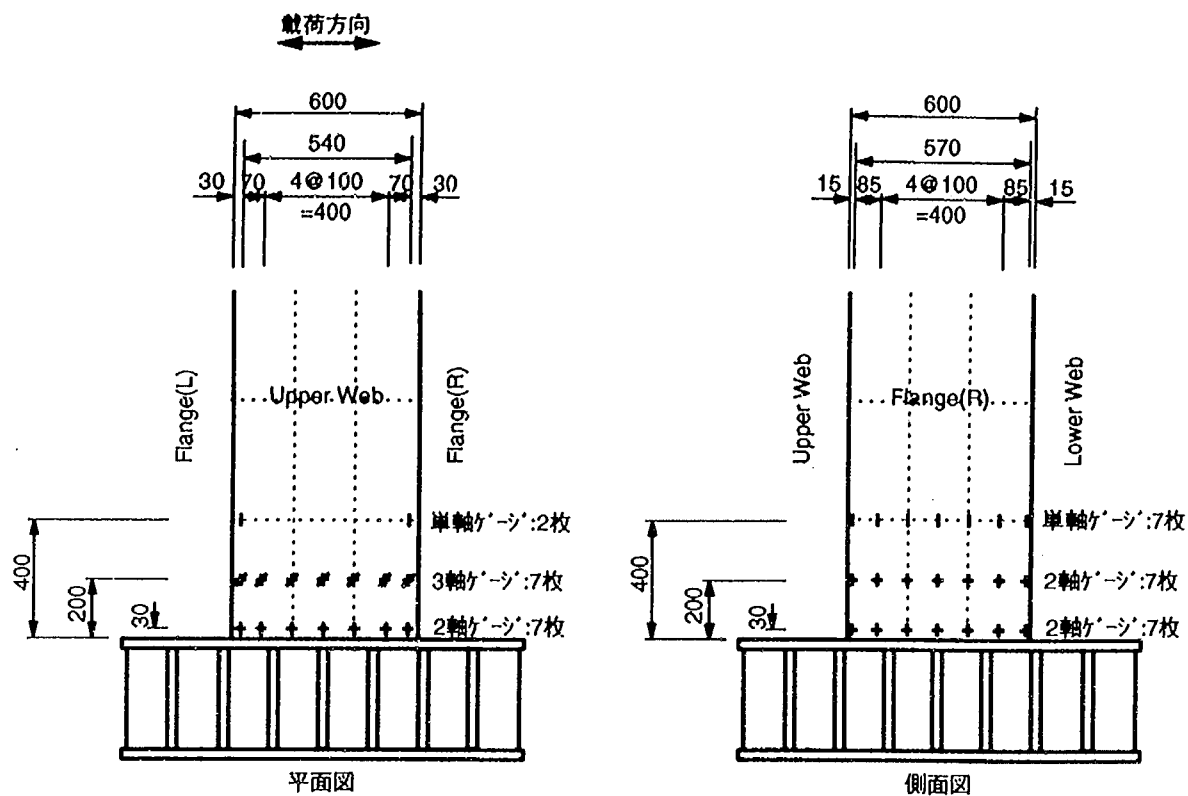


図-2.3.3(6) ひずみゲージ貼付位置 (KD-6)

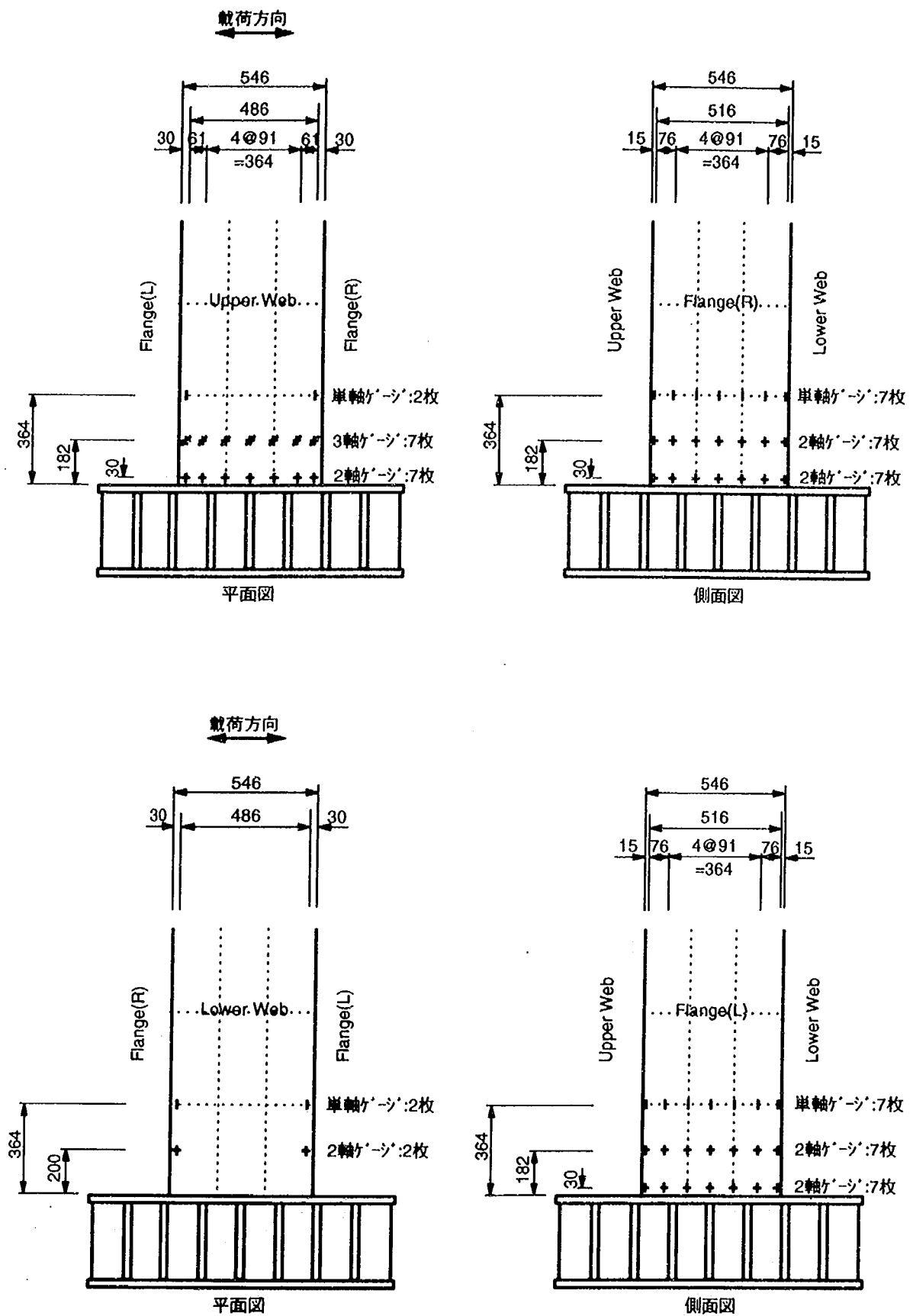


図-2.3.3(7) ひずみゲージ貼付位置 (KD-7_1)

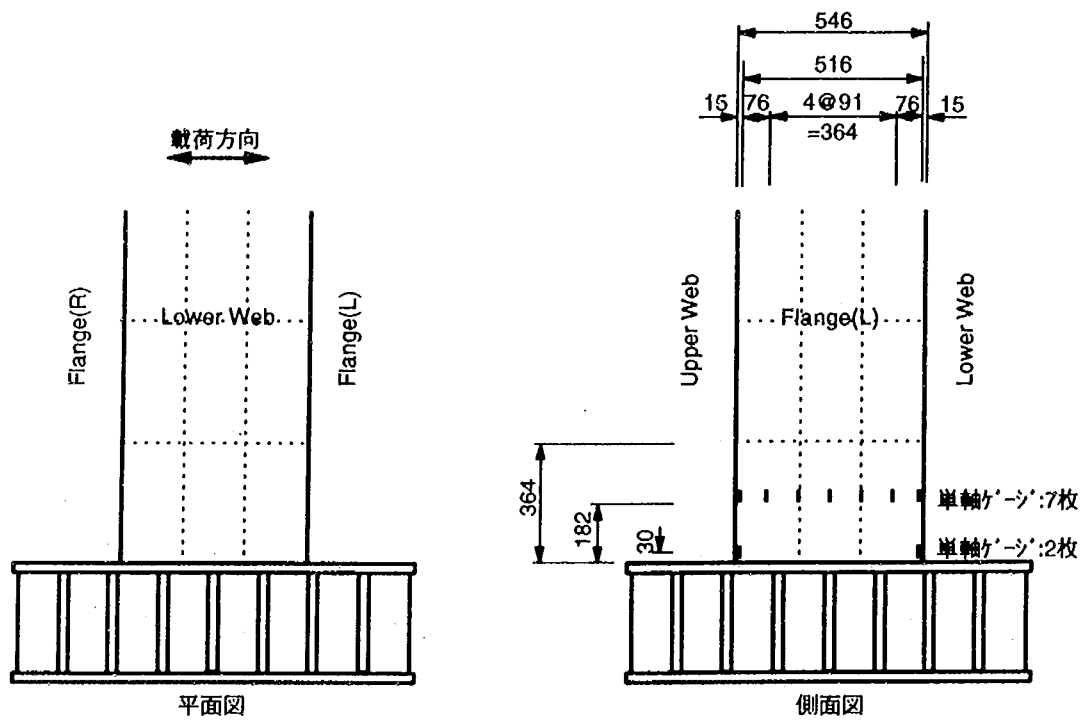
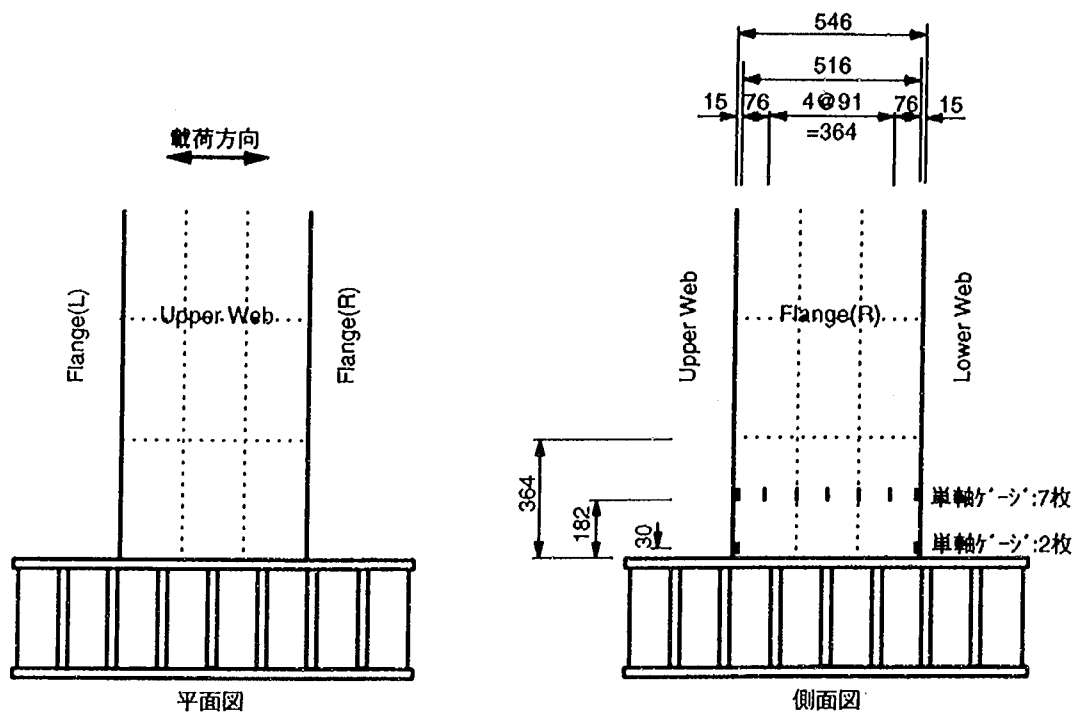


図-2.3.3(7) ひずみゲージ貼付位置 (KD-7_3)

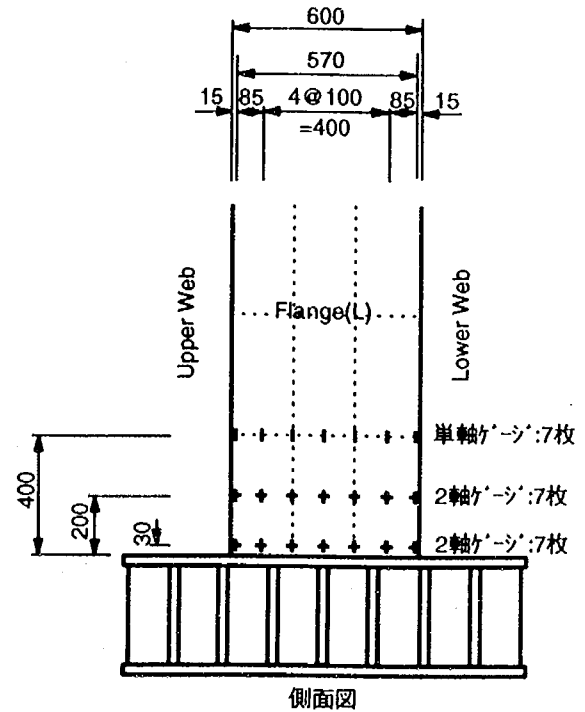
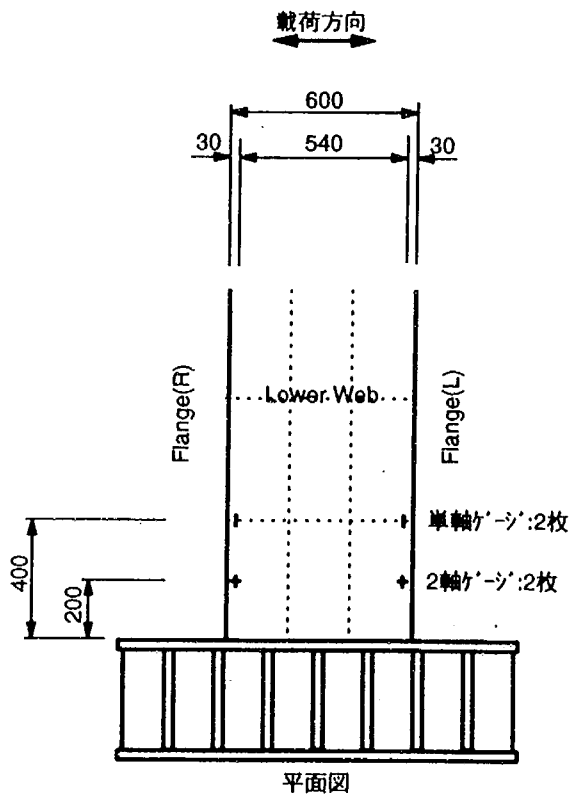
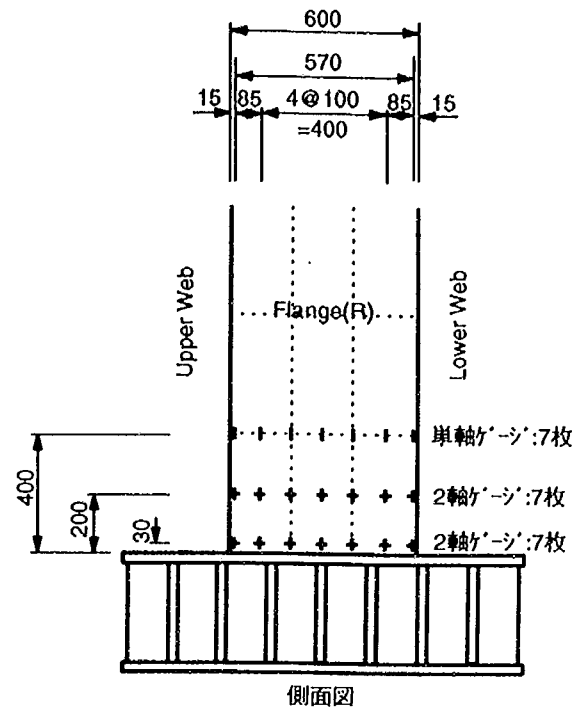
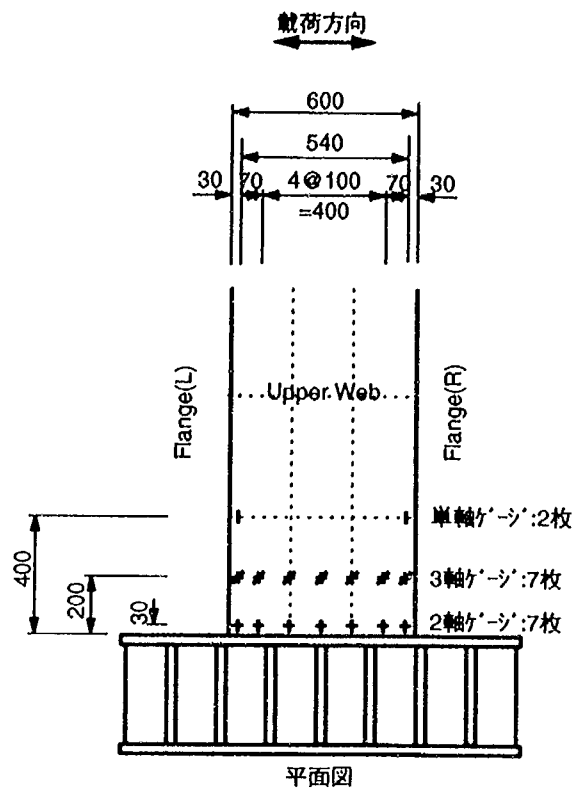


図-2.3.3(9) ひずみゲージ貼付位置 (KD-9)

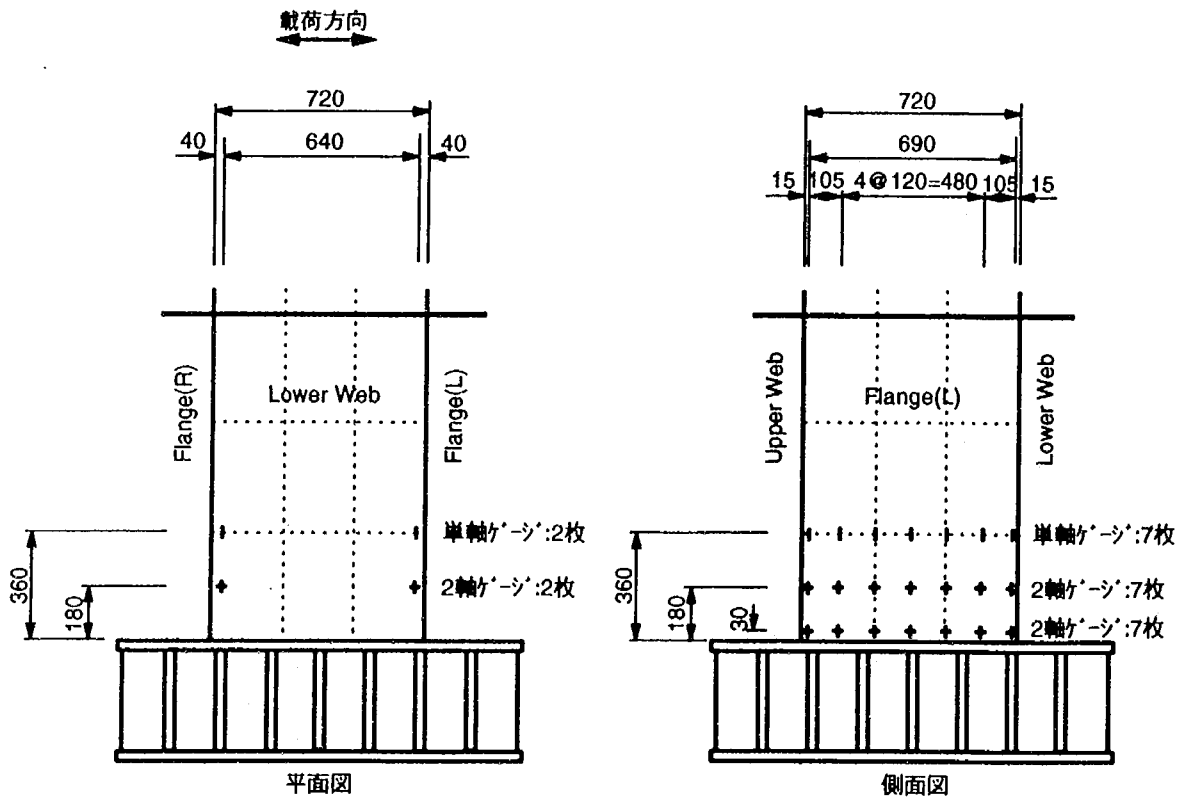
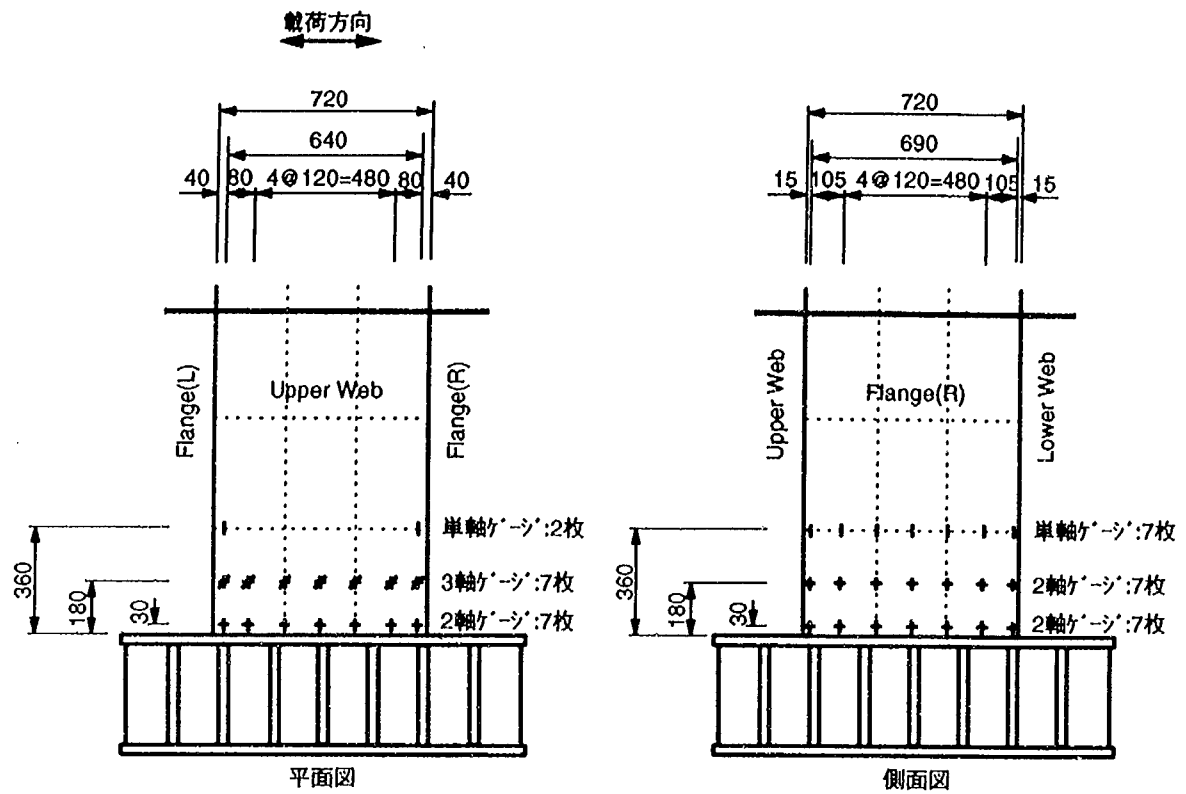
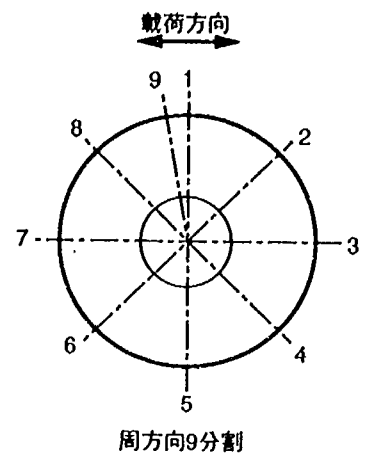
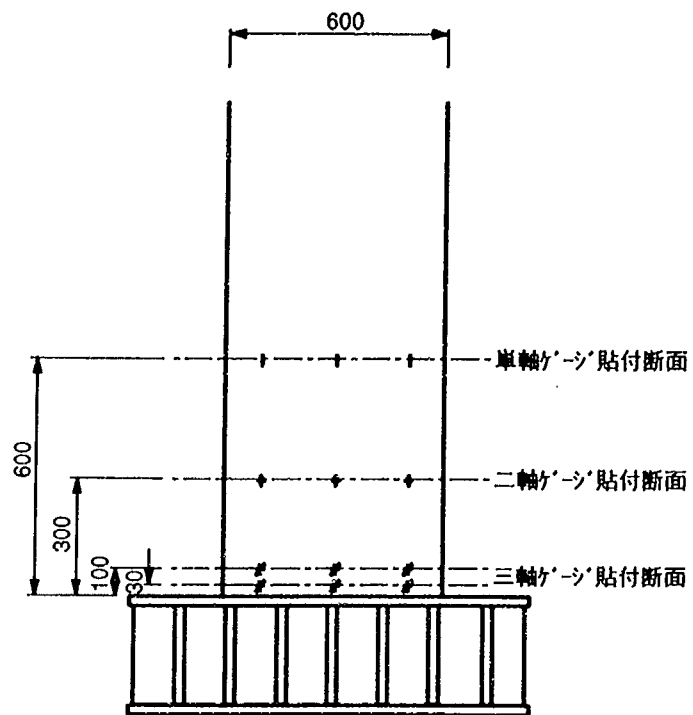
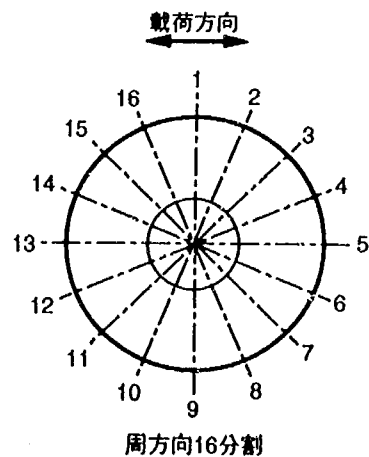
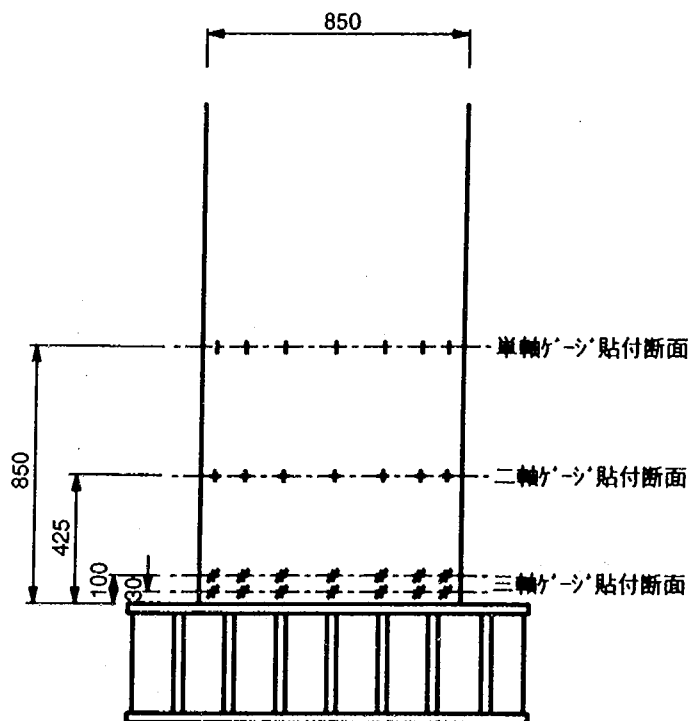


図-2.3.3(10) ひずみゲージ貼付位置 (KD-10)



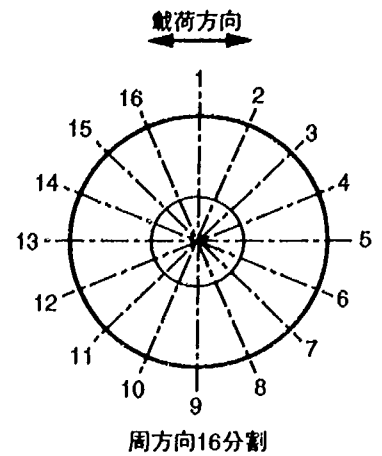
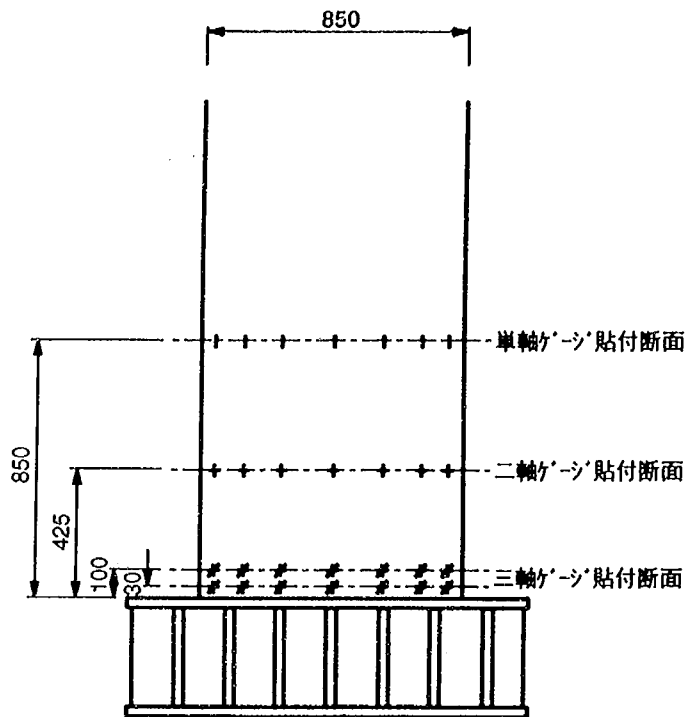
単軸ゲージ：9枚
 二軸ゲージ：9枚
 三軸ゲージ：18枚

図-2.3.3(11) ひずみゲージ貼付位置 (KC-1)



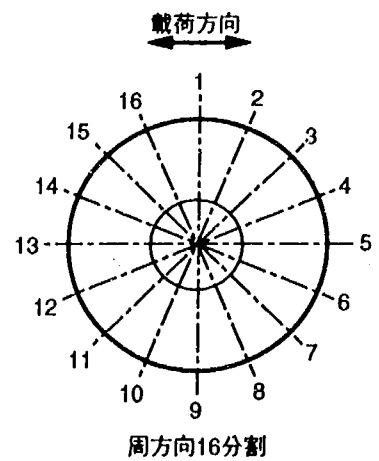
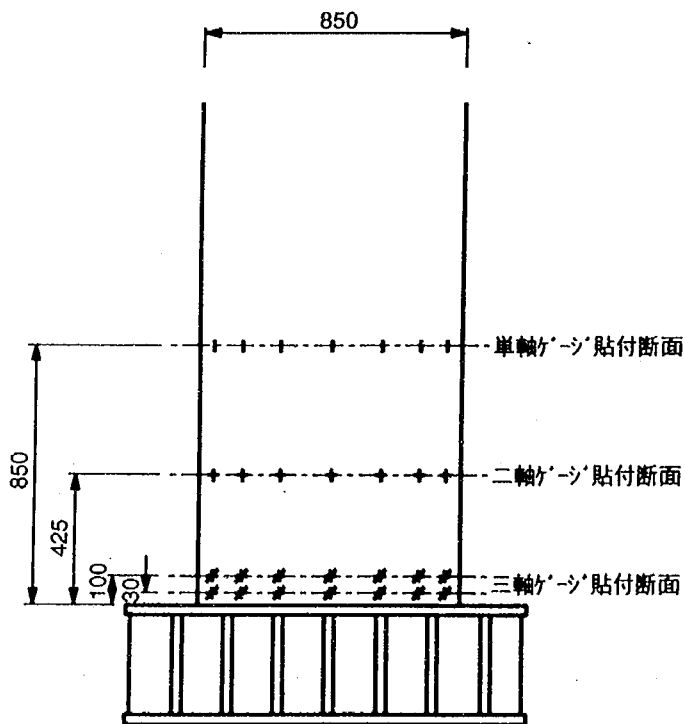
単軸ゲージ：16枚
 二軸ゲージ：16枚
 三軸ゲージ：32枚

図-2.3.3(12) ひずみゲージ貼付位置 (KC-2_1)



単軸ゲージ：16枚
二軸ゲージ：16枚
三軸ゲージ：32枚

図-2.3.3(13) ひずみゲージ貼付位置 (KC-2_3)



単軸ゲージ：16枚
二軸ゲージ：16枚
三軸ゲージ：32枚

図-2.3.3(14) ひずみゲージ貼付位置 (KC-3)

3. 実験結果

3.1 矩形断面

表-3.1.1 矩形断面供試体・実験結果一覧

矩形断面 供試体	矩形断面 $b \times b$ (mm)	板厚 t (mm)	縦リブ 寸法 (mm)	横リブ 間隔 a (mm)	ハネ 数	鋼種	降伏点 σ_y (kgf/cm ²)	断面積 A (cm ²)	断面2次 モーメント I (cm ⁴)	断面2次 半径 r (cm)	有効長 $l (=2h)$ (cm)	細長比 ハネ率 λ	幅厚比ハネ率 R_R R_F		リブ剛度 γ_i / γ_i^*	リブ剛度 $\gamma_i / \gamma_{i, req}$	軸力 N (tf)	軸力比 N/N_{yw}	軸力比 N/N_{ym}
KD-1	900×900	9	60×6	500	5	SM490A	3,790	378.4	484,853	35.8	660.6	0.250	0.447	0.446	1.006	1.479	182	0.150	0.127
KD-2	900×900	9	80×9	500	5	SM490A	3,844	436.0	540,713	35.2	660.6	0.255	0.450	0.263	3.004	4.403	182	0.130	0.109
KD-3	750×750	12	90×9	500	3	SM490A	3,674	419.0	359,690	29.3	660.6	0.300	0.458	0.272	3.054	4.211	182	0.136	0.118
KD-4	600×600	22	135×12	500	2	SM490C	4,035	573.4	298,477	22.8	660.6	0.404	0.314	0.193	3.090	21.23	182	0.099	0.079
KD-5	750×750	12	90×9	500	3	SM490A	3,570	419.0	359,690	29.3	660.6	0.296	0.452	0.268	3.054	4.211	248	0.185	0.166
KD-6	600×600	10	73×8	400	3	SM490A	3,984	282.7	154,411	23.4	660.6	0.392	0.458	0.271	3.070	4.650	123	0.136	0.109
KD-7_1	546×546	10	75×7	364	3	SM490A	3,820	256.4	115,213	21.2	660.6	0.423	0.408	0.236	3.211	6.090	92	0.112	0.094
KD-7_3	546×546	10	75×7	364	3	SM490Y	4,680	256.4	115,213	21.2	660.6	0.468	0.452	0.261	3.211	6.090	92	0.100	0.077
KD-9	600×600	10	73×8	400	3	SM570Q	6,370	282.7	154,411	23.4	660.6	0.496	0.579	0.343	3.070	4.650	177	0.136	0.098
KD-10	720×720	14	90×10	360	3	SM490A	3,249	467.4	366,612	28.0	660.6	0.295	0.355	0.185	4.121	9.529	224	0.150	0.148

表-3.1.1 矩形断面供試体・実験結果一覧（つづき）

供試体	P_{yN} (tf)	P_{yM} (tf)	P_u (tf)	P_u/P_{yM}	(δ_{yEM}) (mm)	δ_{yEN} (mm)	(δ_{yTN}) (mm)	δ_m (mm)	δ_{97} (mm)	δ_{95} (mm)	δ_{lim} (mm)	δ_u (mm)	$\mu_m =$ δ_m/δ_{yEN}	$\mu_{97} =$ δ_{97}/δ_{yEN}	$\mu_{95} =$ δ_{95}/δ_{yEN}	$\mu_{lim} =$ $\delta_{lim}/\delta_{yEN}$	$\mu_u =$ δ_u/δ_{yEN}
KD-1	88.7	108	152	1.41	15.9	13.0	10.5	40.7	47.7	49.2	48.1	64.7	3.12	3.66	3.77	3.69	4.96
KD-2	101	125	183	1.46	19.4	15.7	10.7	55.7	73.6	76.4	70.2	107	3.54	4.68	4.86	4.46	6.81
KD-3	80.3	94.1	137	1.46	22.0	18.8	12.8	58.4	79.9	82.5	74.6	114	3.11	4.25	4.38	3.96	6.05
KD-4	86.8	112.0	161	1.44	32.7	25.4	16.6	>177	>177	>177	>177	>177	>7.02	>7.02	>7.02	>7.02	>7.02
KD-5	75.7	86.5	127	1.47	18.1	15.8	12.0	64.3	70.8	75.2	64.3	96.0	4.06	4.48	4.75	4.06	6.06
KD-6	43.1	55.3	79.4	1.44	28.4	22.1	16.0	84.9	104	106	103	130	3.84	4.72	4.81	4.65	5.88
KD-7_1	36.3	44.2	69.4	1.57	25.7	21.1	18.7	113	127	128	126	174	5.38	6.03	6.08	5.98	8.28
KD-7_3	41.4	55.2	72.2	1.31	35.4	26.6	27.4	90.0	100	107	90.0	126	3.38	3.77	4.03	3.38	4.74
KD-9	61.9	89.5	109	1.21	43.0	29.8	22.9	73.0	83.9	88.4	73.0	98.0	2.45	2.82	2.97	2.45	3.29
KD-10	83.9	85.4	143	1.67	18.9	18.6	13.1	83.9	98.6	102	83.9	132	4.52	5.31	5.48	4.52	7.10

記号の説明：

P_u ：最大水平荷重

P_{97} ： P_u の 97% の荷重

P_{95} ： P_u の 95% の荷重

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

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

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

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

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

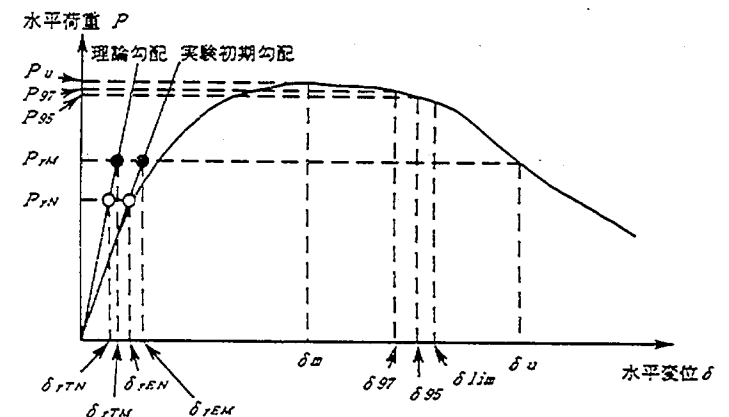
δ_m ：包絡線において水平荷重が P_u の時の水平変位

δ_{97} ：包絡線において水平荷重が P_{97} の時の水平変位

δ_{95} ：包絡線において水平荷重が P_{95} 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 P_u 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_{yN} の時の水平変位



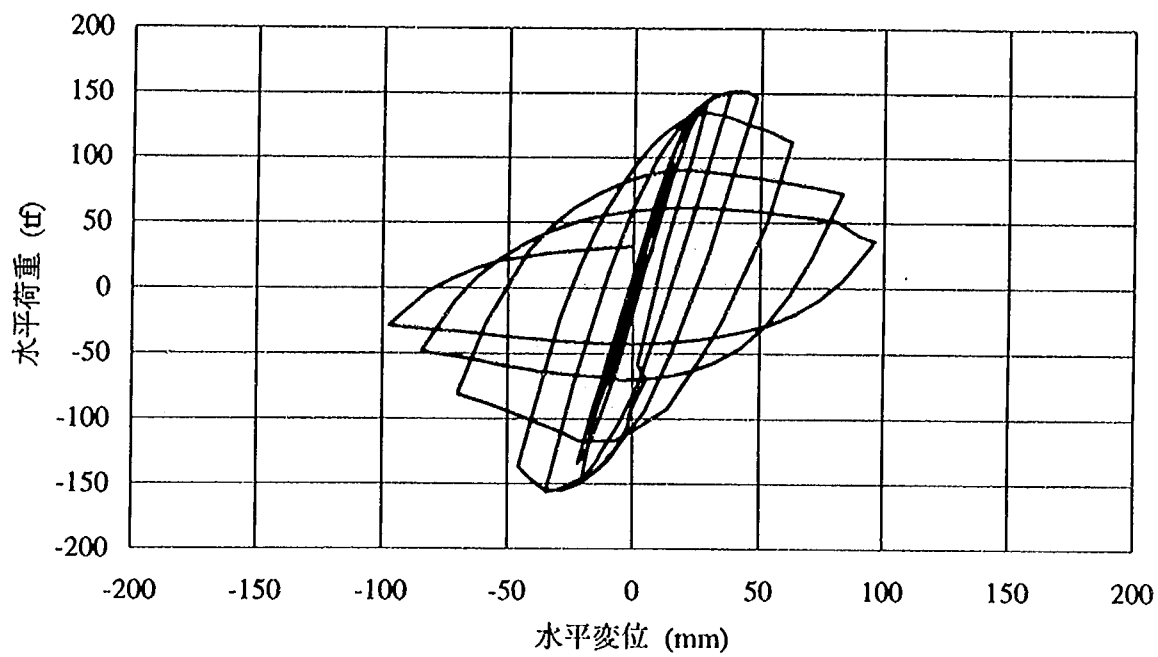


図-3.1.1(1) 水平荷重—水平変位関係 (KD-1)

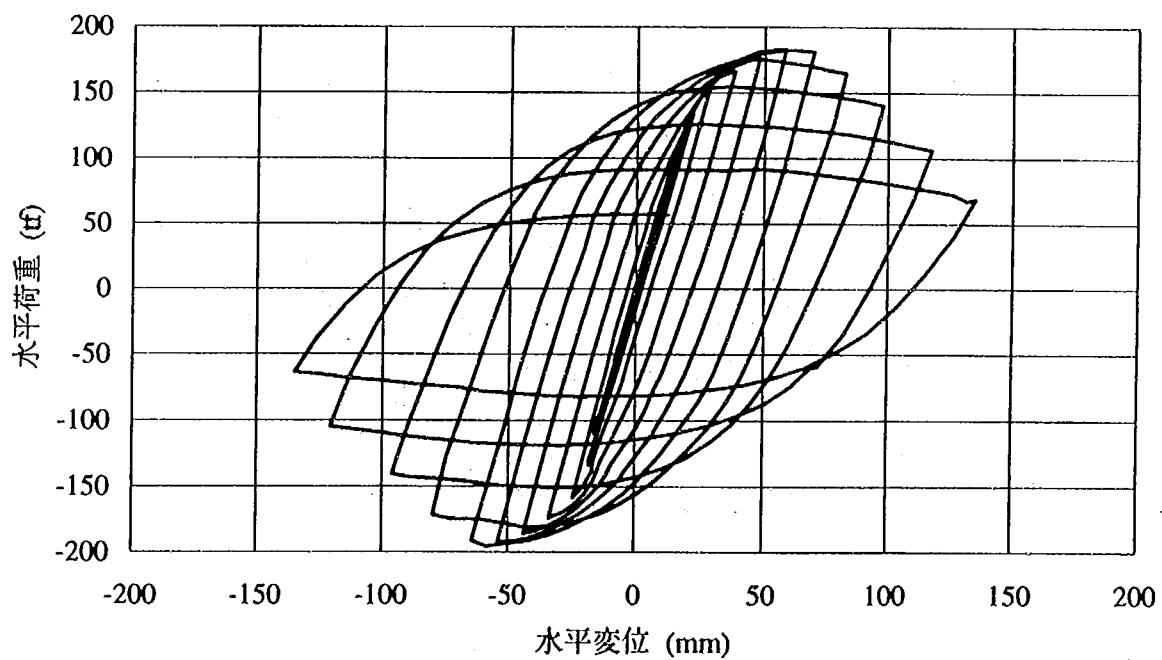


図-3.1.1(2) 水平荷重—水平変位関係 (KD-2)

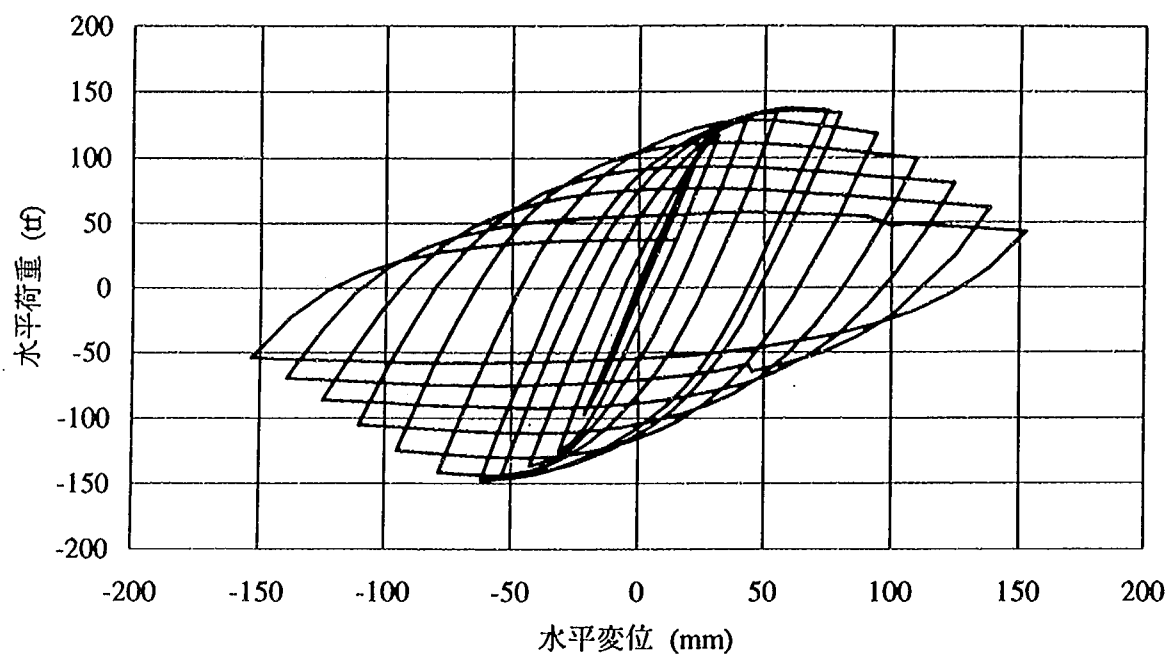


図-3.1.1(3) 水平荷重—水平変位関係 (KD-3)

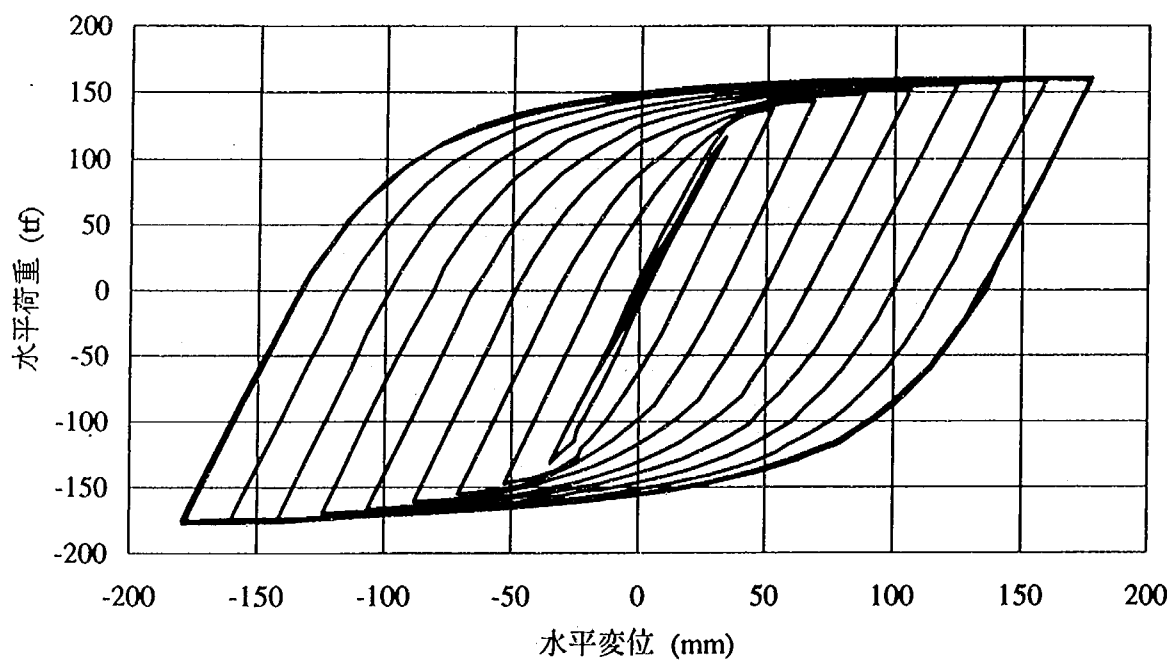


図-3.1.1(4) 水平荷重—水平変位関係 (KD-4)

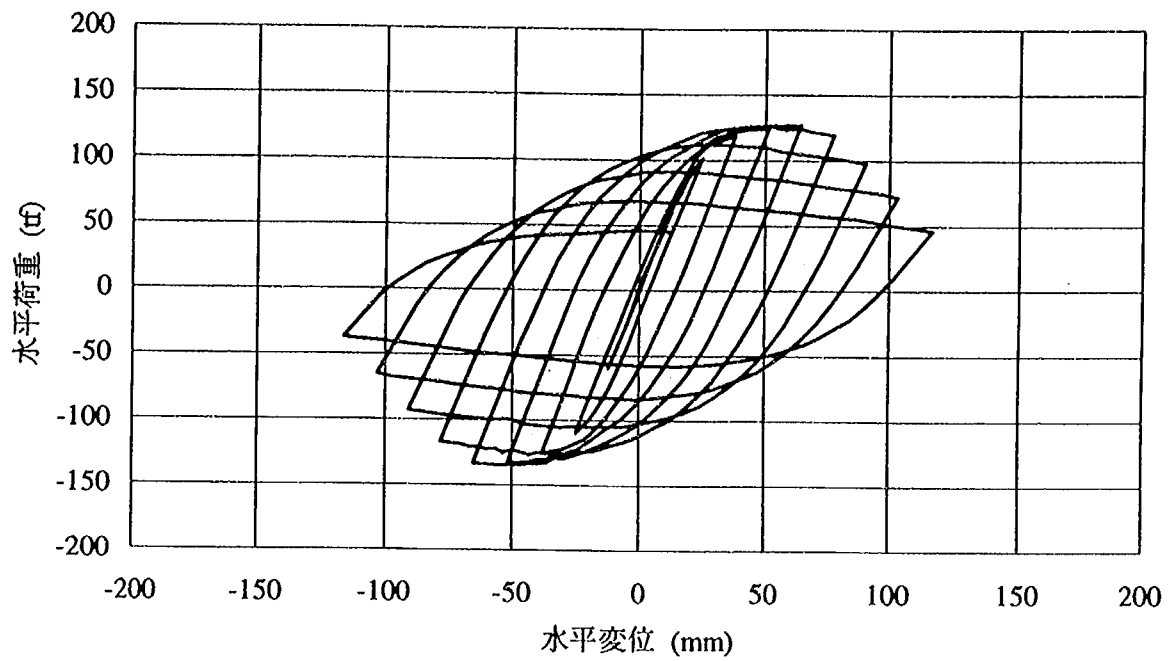


図-3.1.1(5) 水平荷重—水平変位関係 (KD-5)

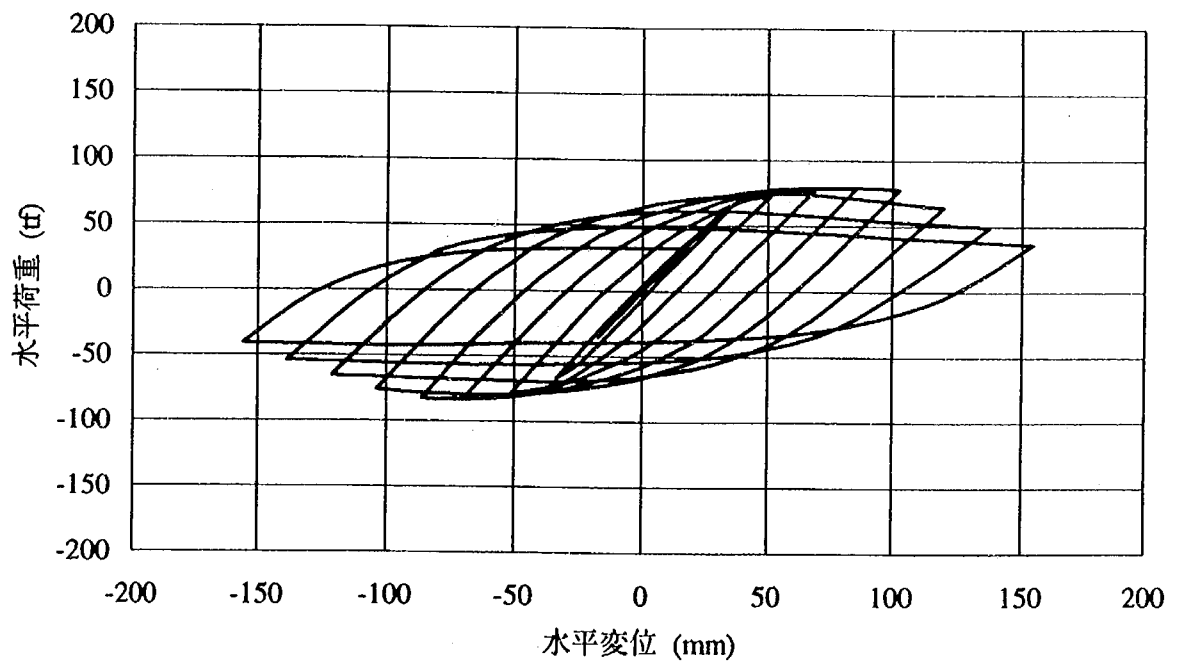


図-3.1.1(6) 水平荷重—水平変位関係 (KD-6)

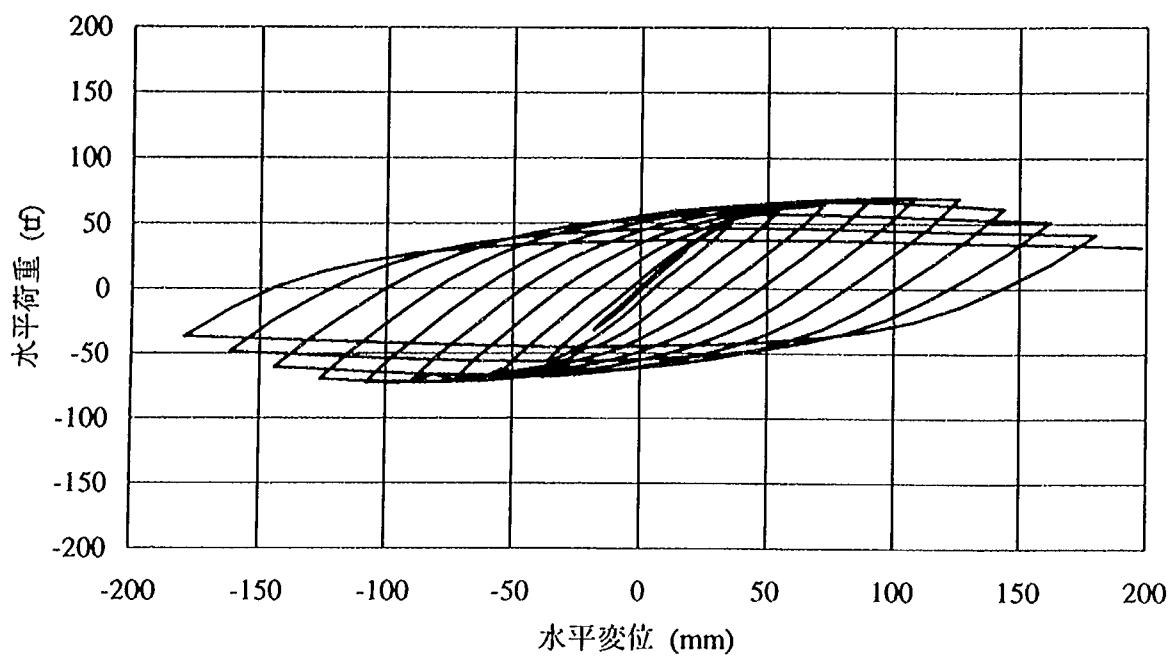


図-3.1.1(7) 水平荷重—水平変位関係 (KD-7_1)

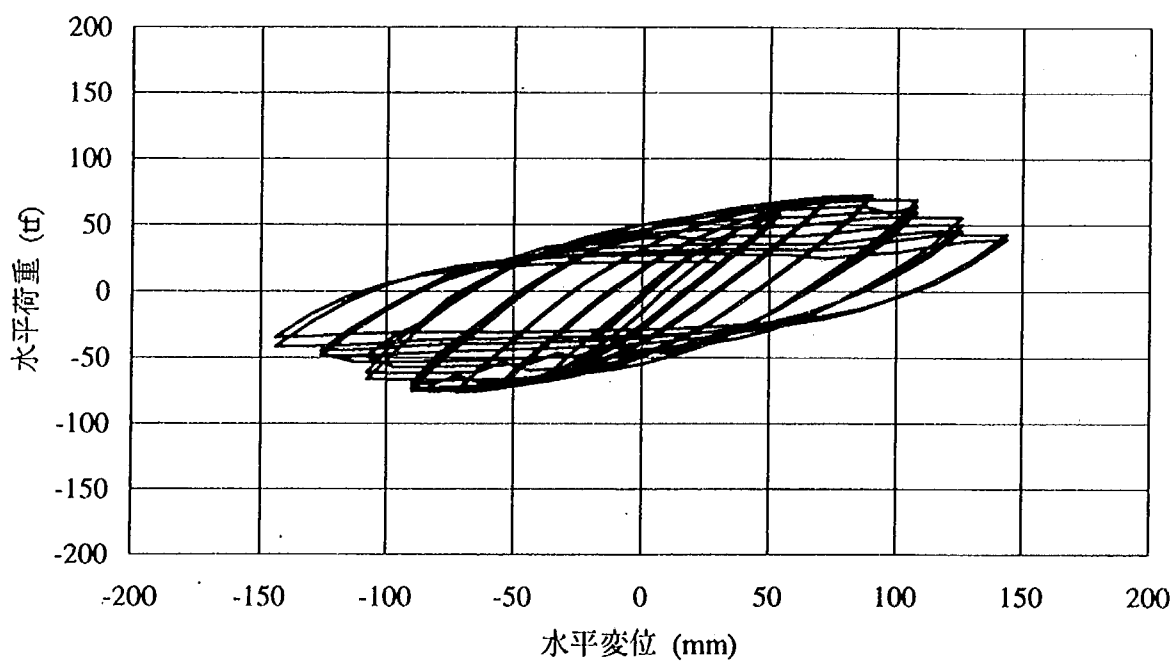


図-3.1.1(8) 水平荷重—水平変位関係 (KD-7_3)

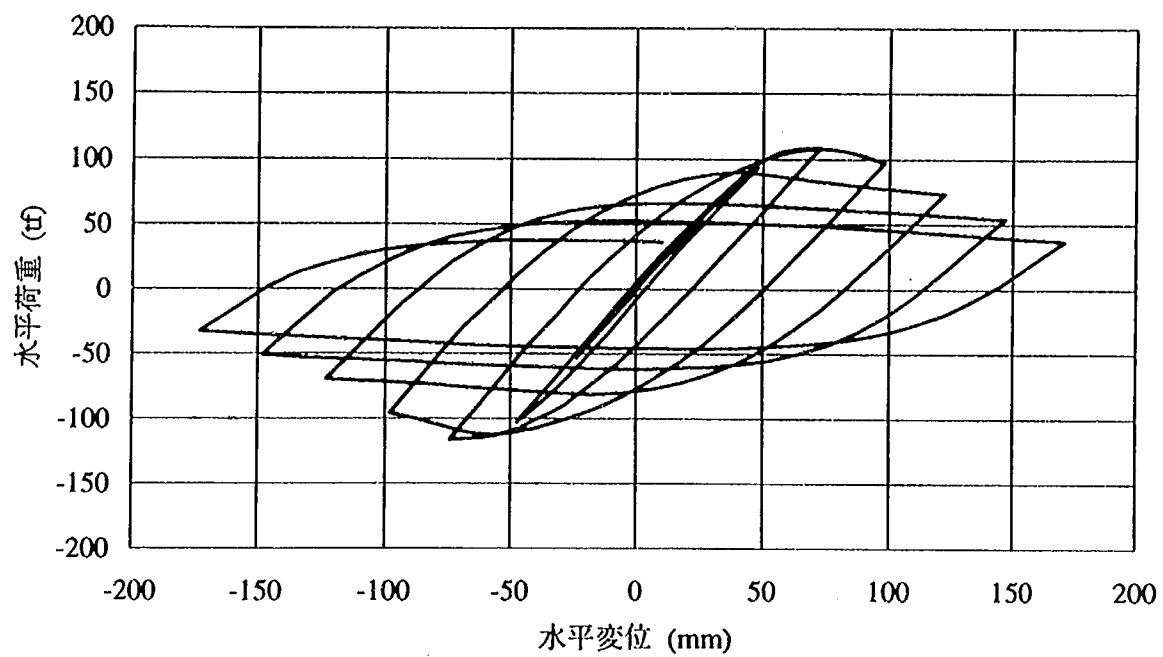


図-3.1.1(9) 水平荷重—水平変位関係 (KD-9)

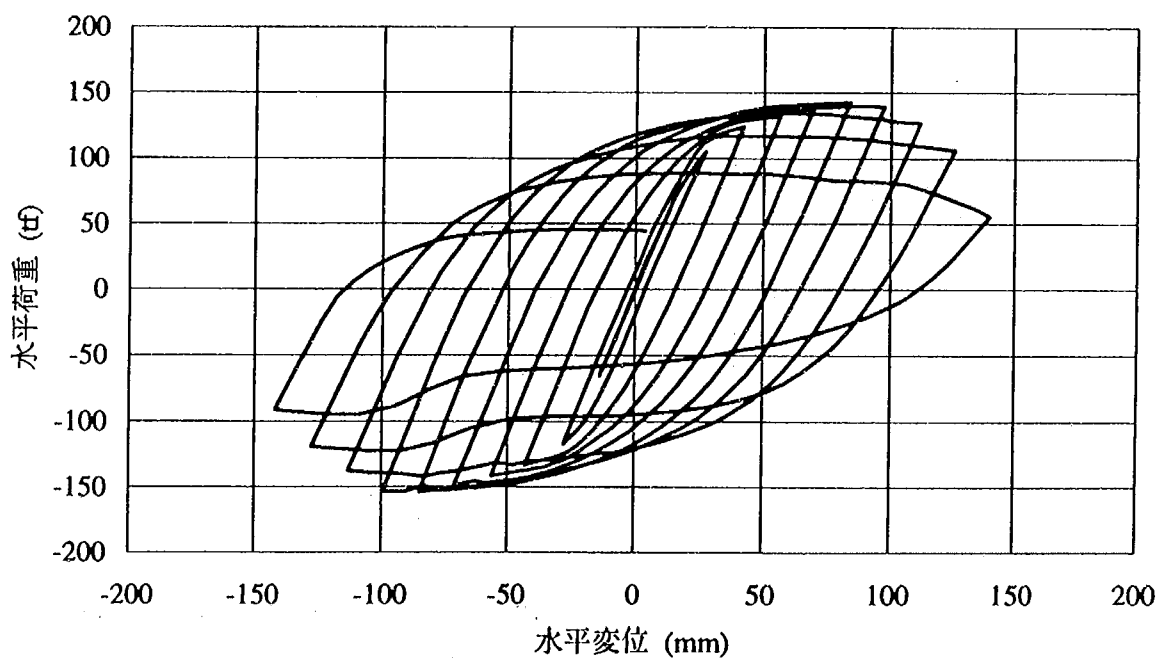


図-3.1.1(10) 水平荷重—水平変位関係 (KD-10)

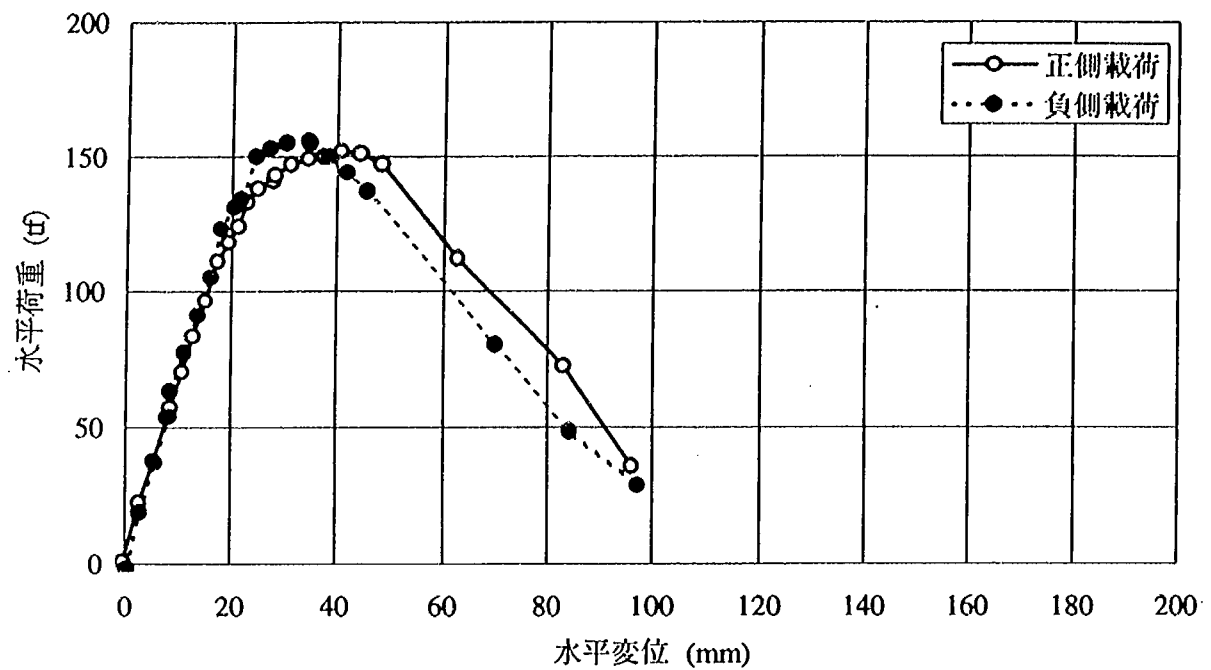


図-3.1.2(1) 水平荷重—水平変位関係の包絡線 (KD-1)

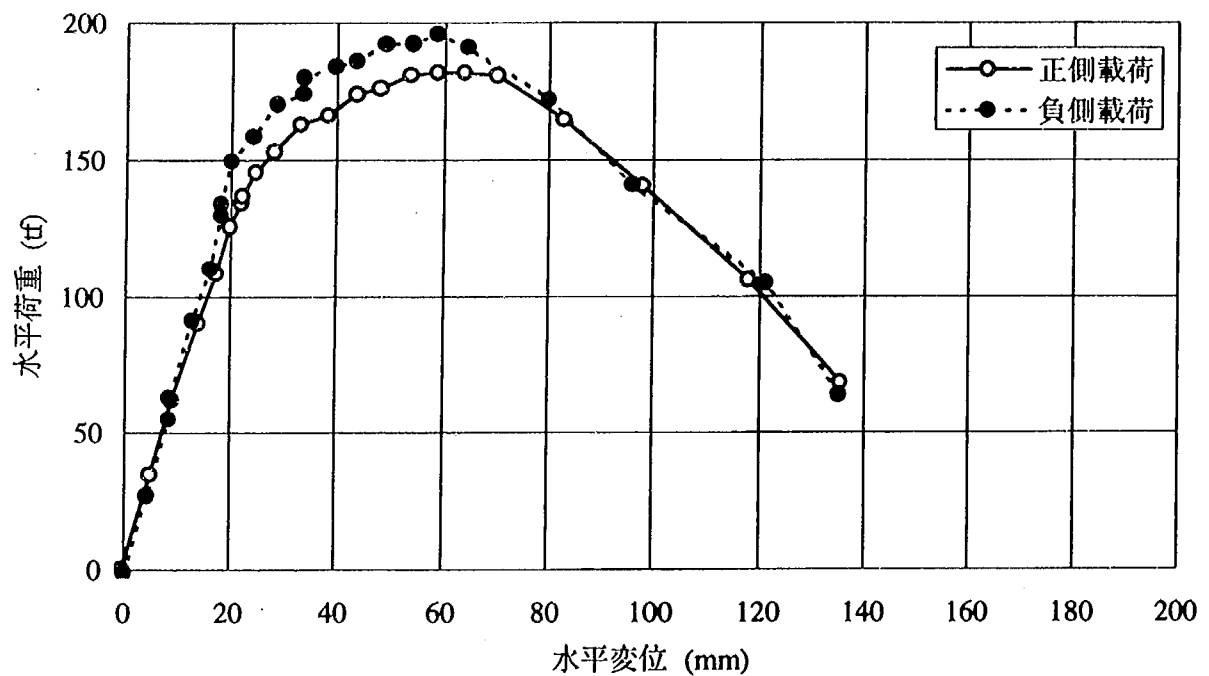


図-3.1.2(2) 水平荷重—水平変位関係の包絡線 (KD-2)

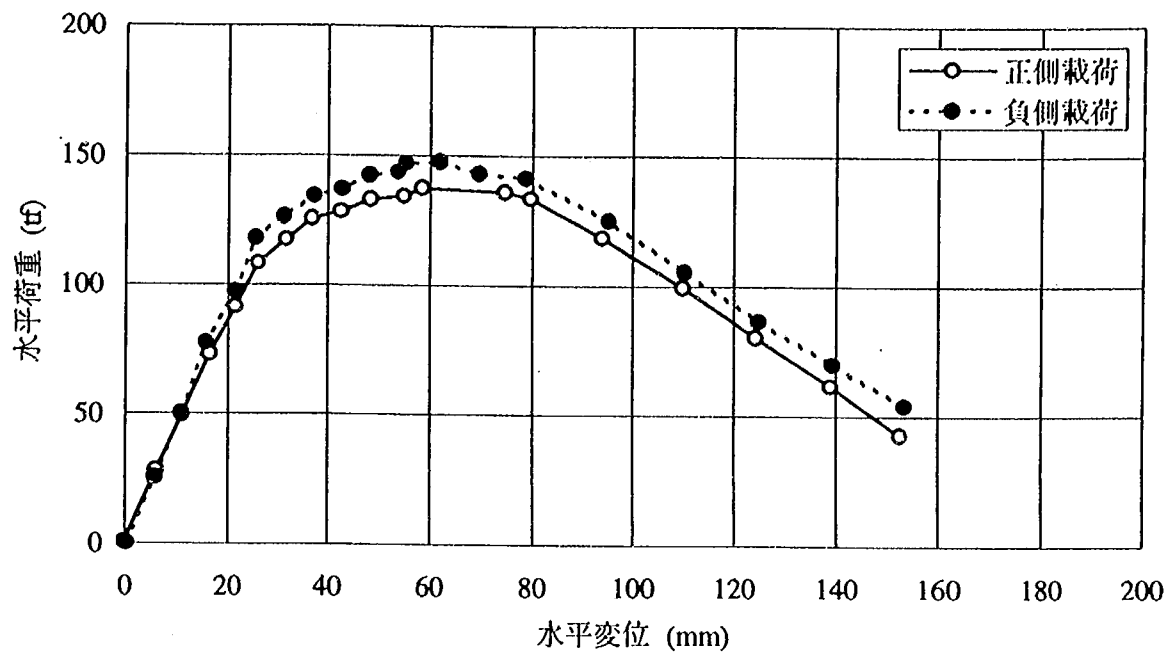


図-3.1.2(3) 水平荷重—水平変位関係の包絡線 (KD-3)

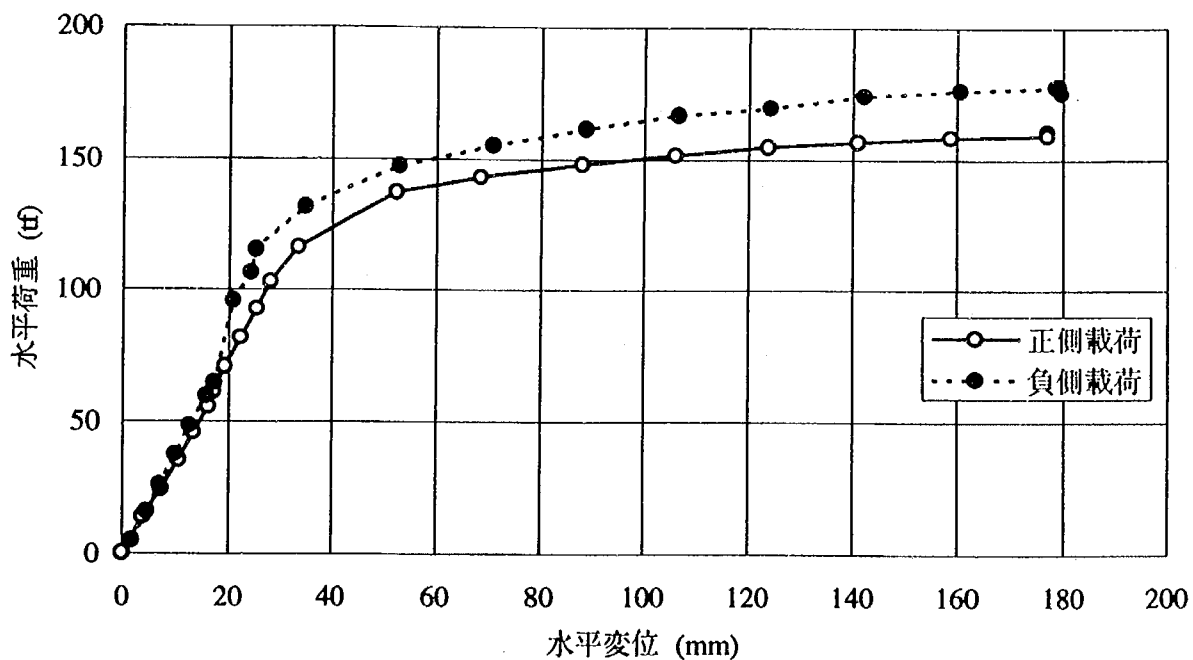


図-3.1.2(4) 水平荷重—水平変位関係の包絡線 (KD-4)

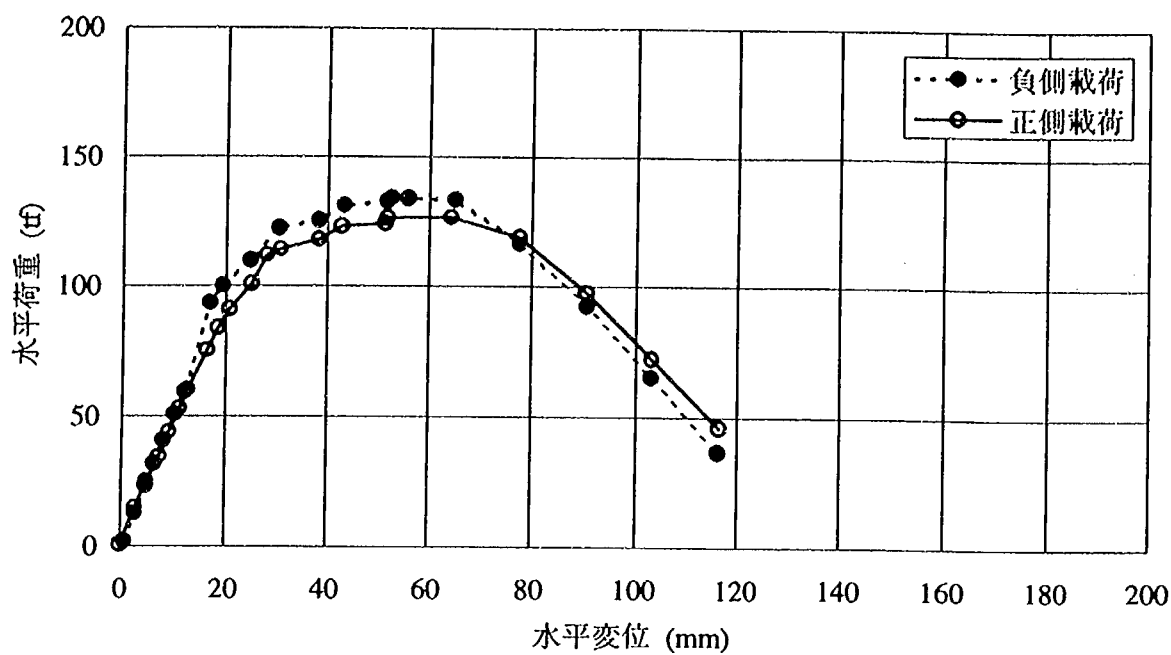


図-3.1.2(5) 水平荷重—水平変位関係の包絡線 (KD-5)

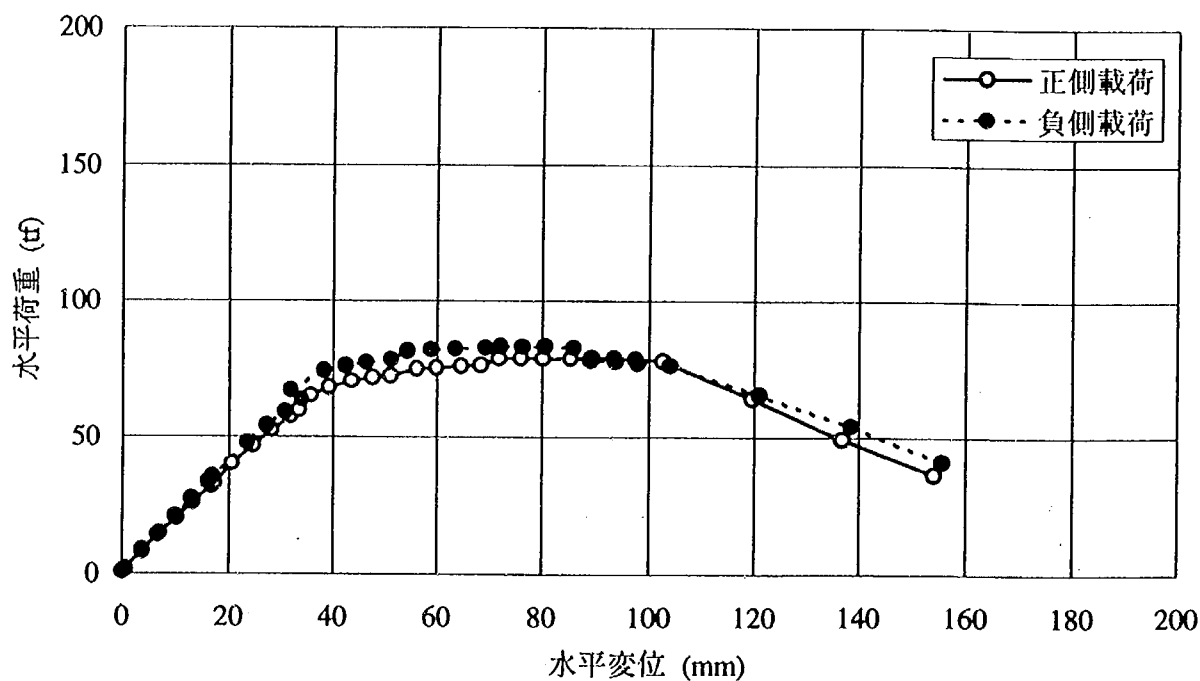


図-3.1.2(6) 水平荷重—水平変位関係の包絡線 (KD-6)

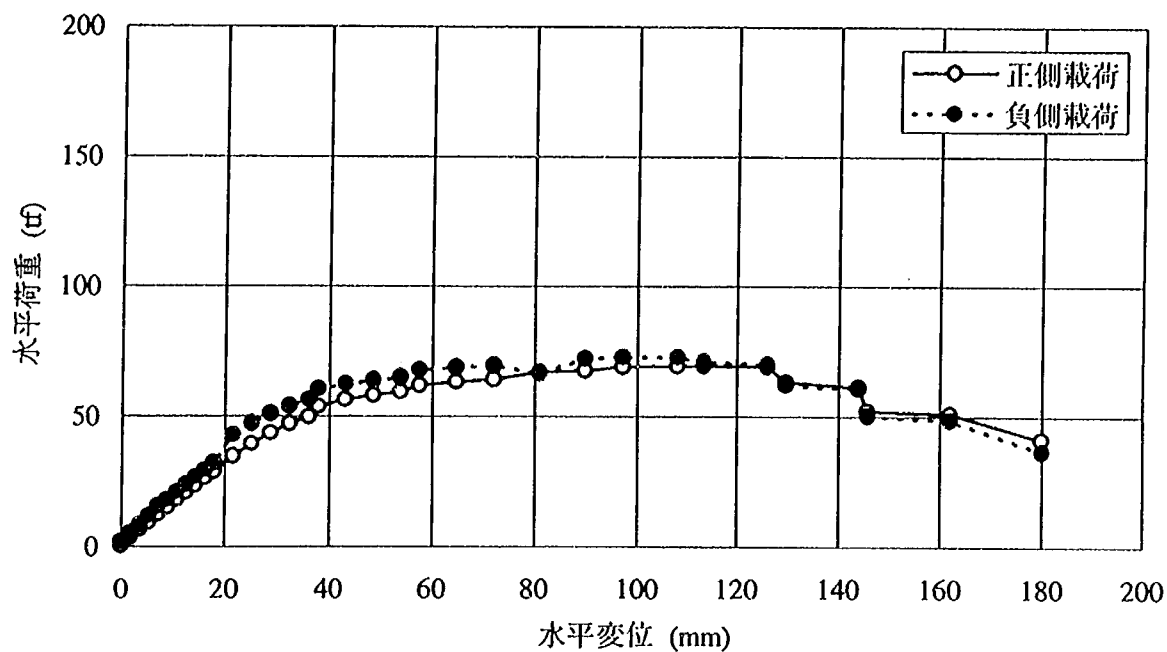


図-3.1.2(7) 水平荷重－水平変位関係の包絡線 (KD-7_1)

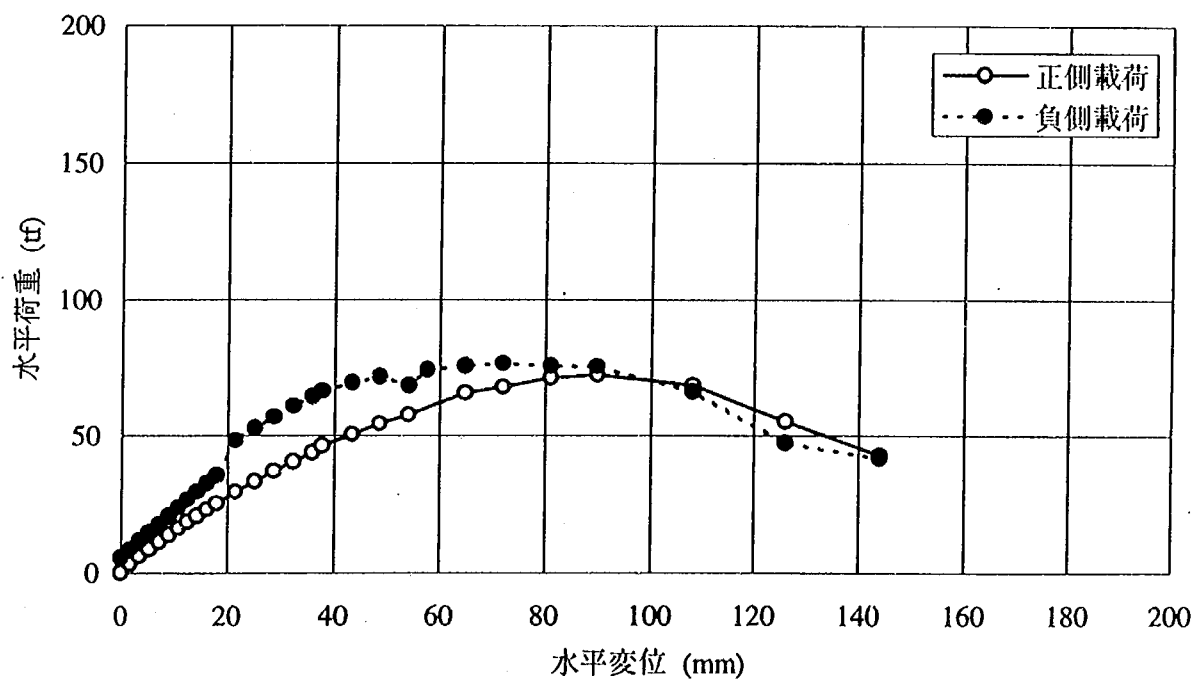


図-3.1.2(8) 水平荷重－水平変位関係の包絡線 (KD-7_3)

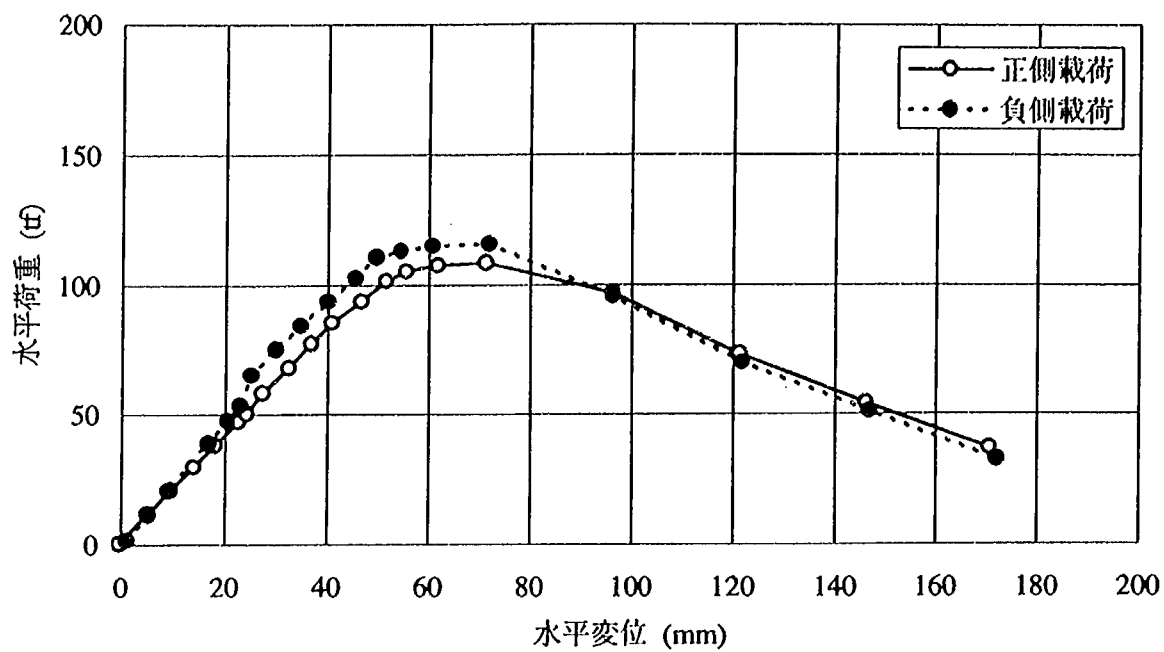


図-3.1.2(9) 水平荷重－水平変位関係の包絡線 (KD-9)

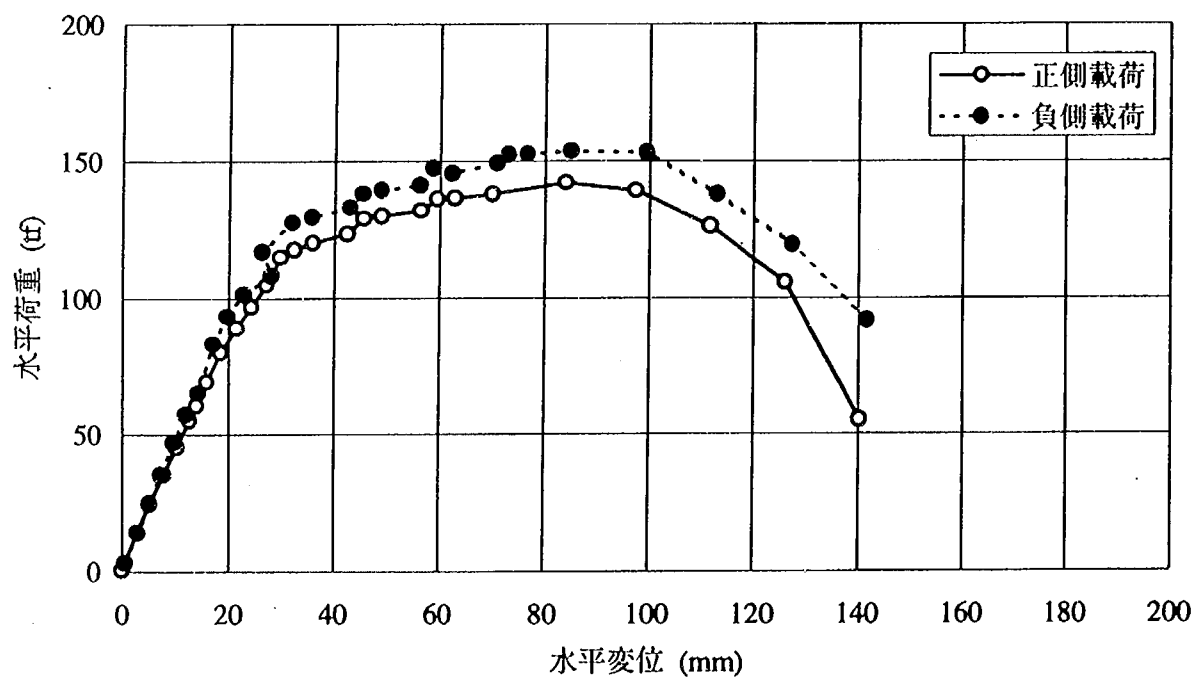
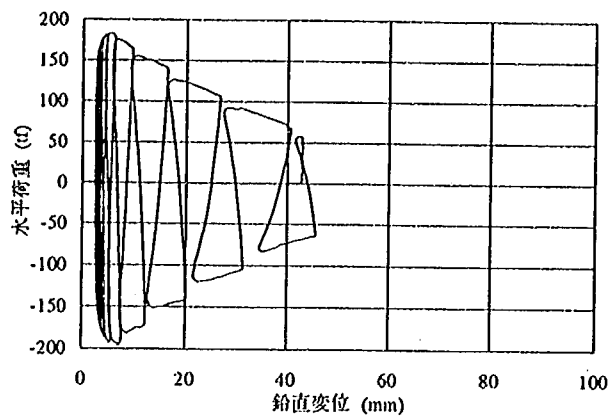
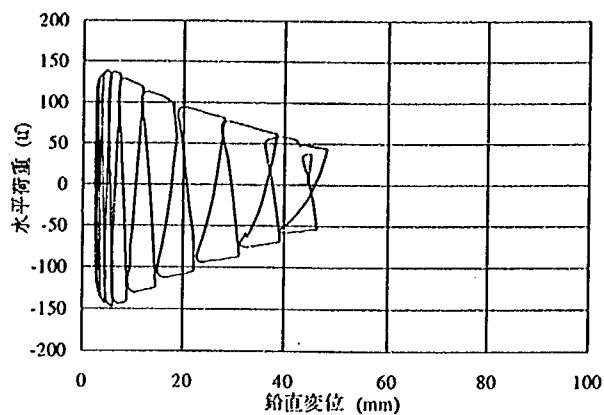


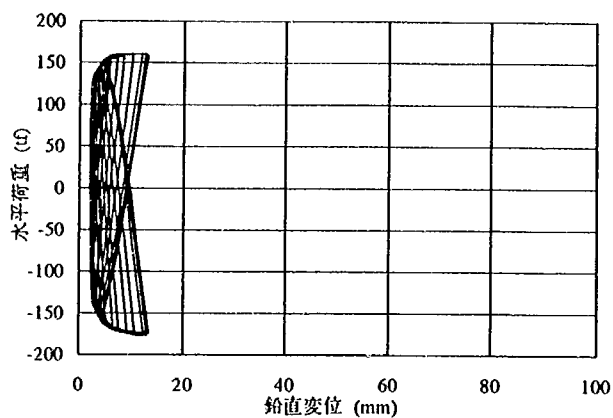
図-3.1.2(10) 水平荷重－水平変位関係の包絡線 (KD-10)



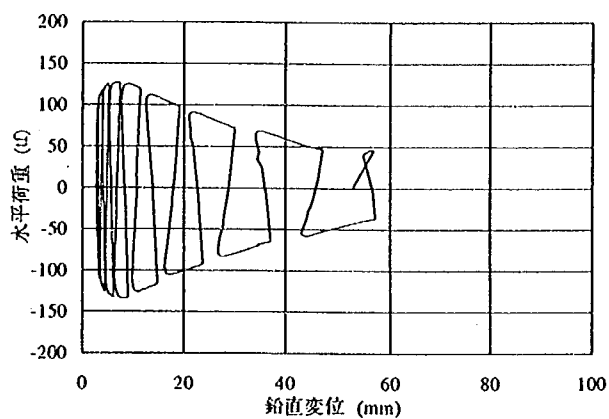
(1) KD-2



(2) KD-3

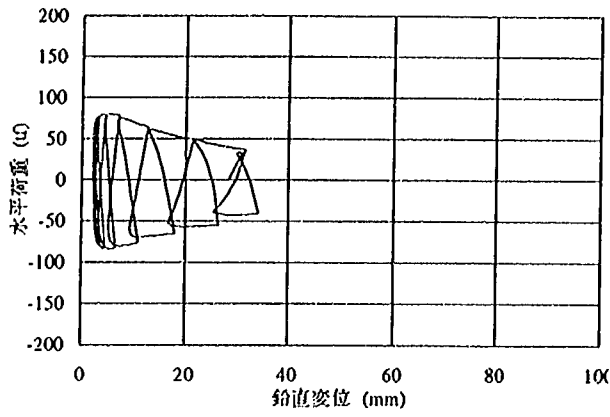


(3) KD-4

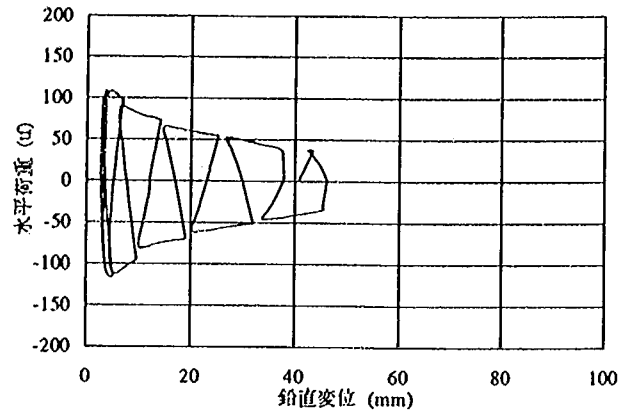


(4) KD-5

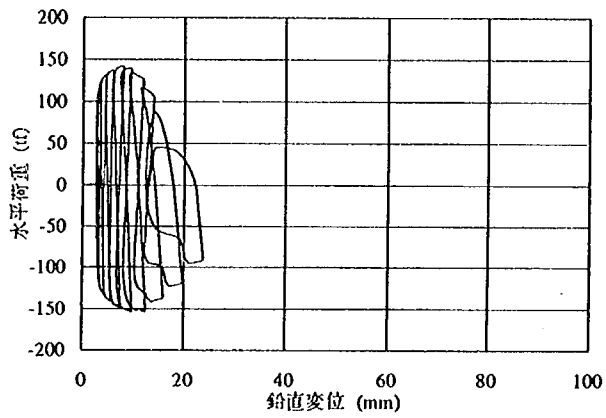
図-3.1.3 水平荷重—鉛直変位関係



(5) KD-6

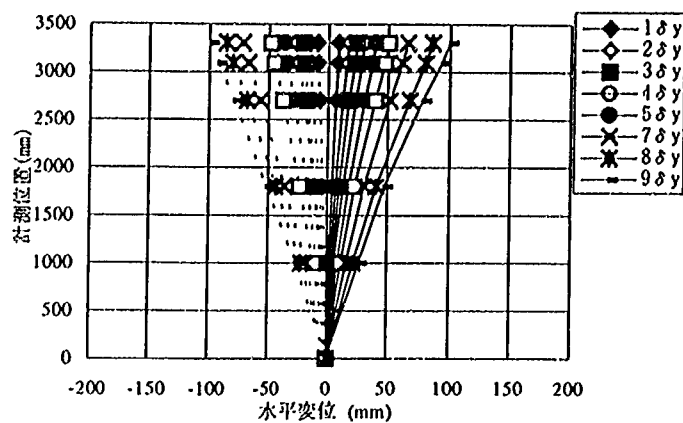


(6) KD-9

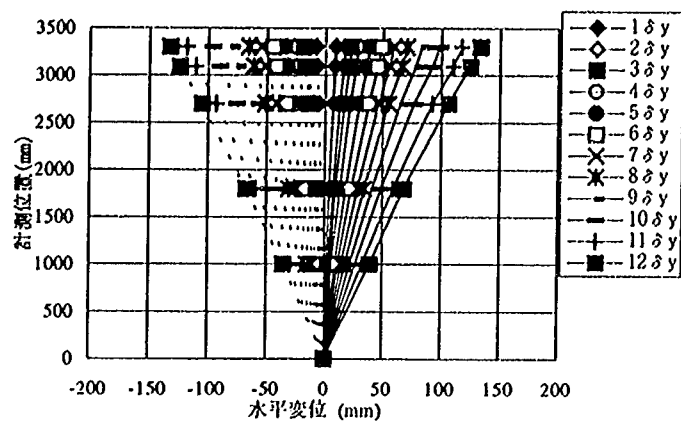


(7) KD-10

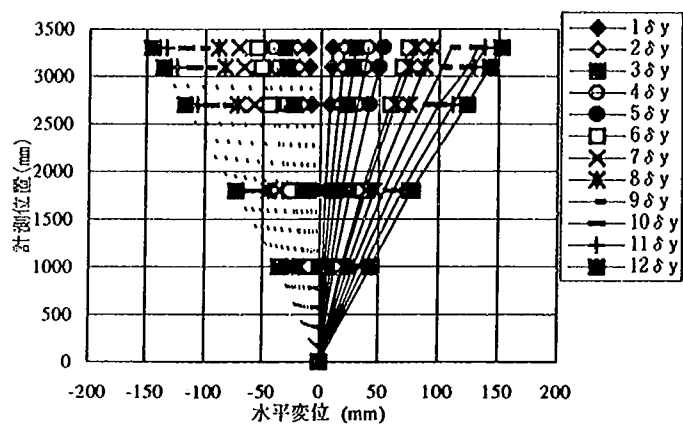
图-3.1.3 水平荷重—鉛直変位関係



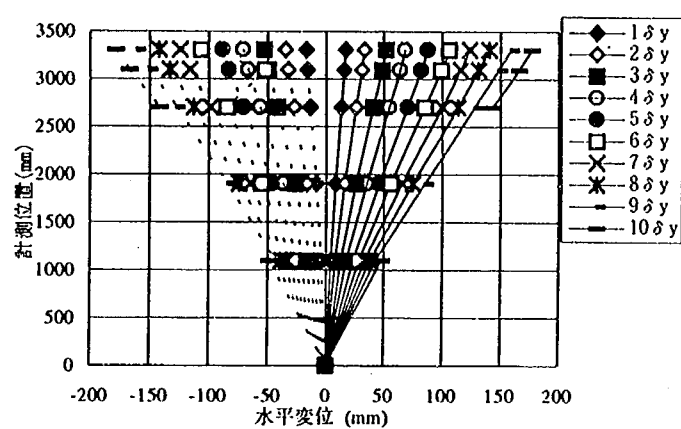
(1) KD-1



(2) KD-2

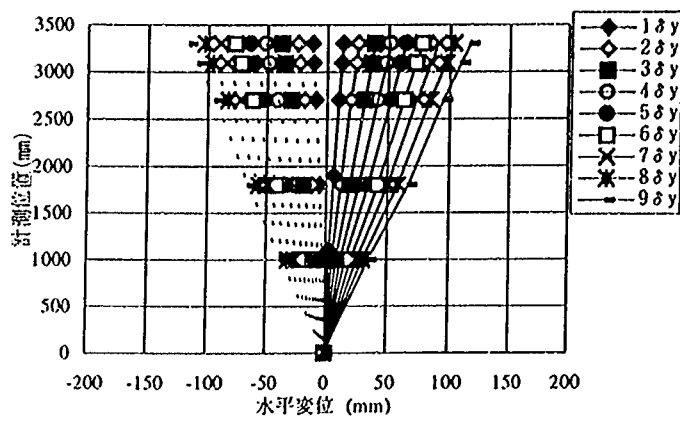


(3) KD-3

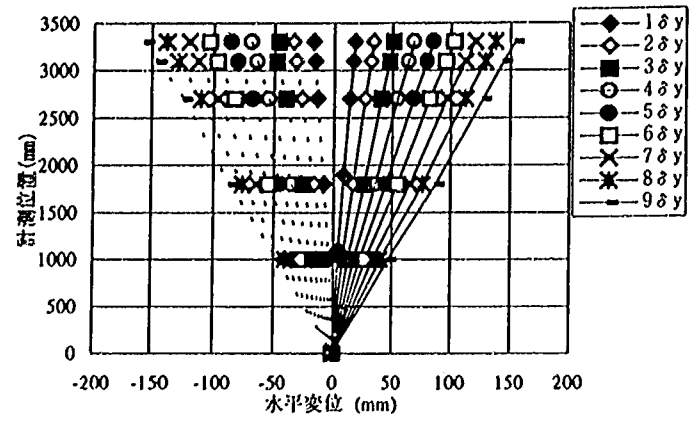


(4) KD-4

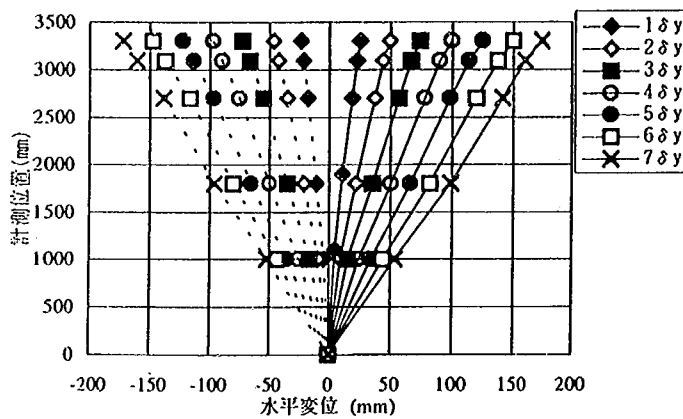
図-3.1.4 水平変位の鉛直方向分布



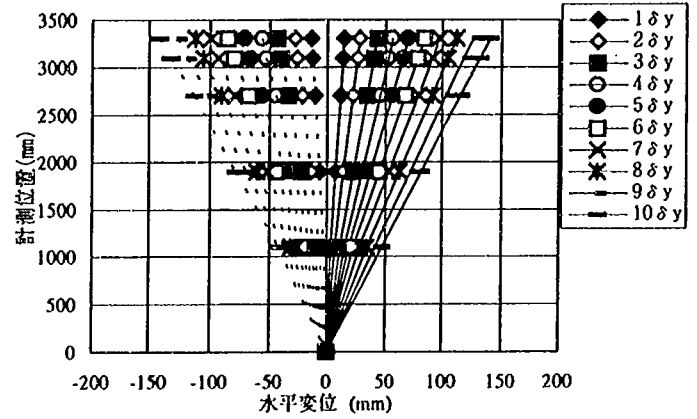
(5) KD-5



(6) KD-6

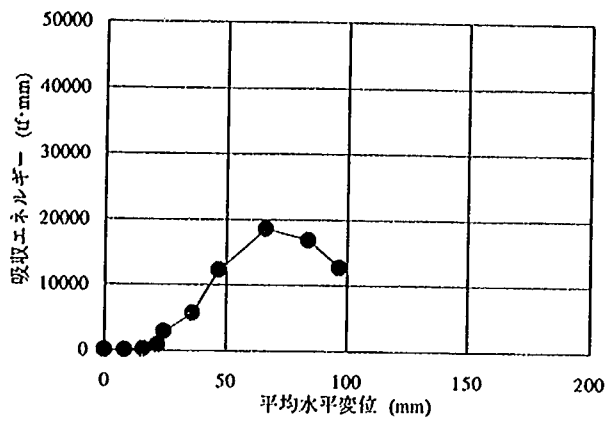


(7) KD-9

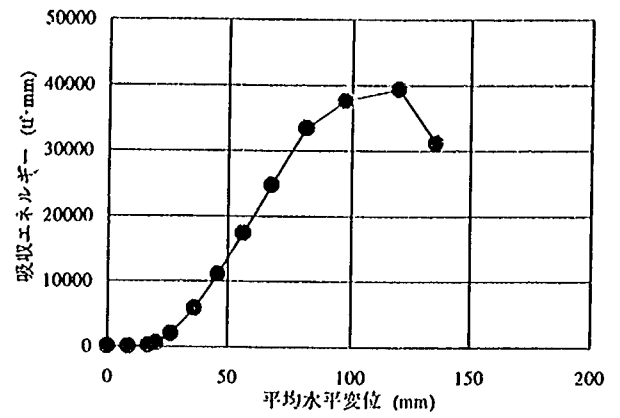


(8) KD-10

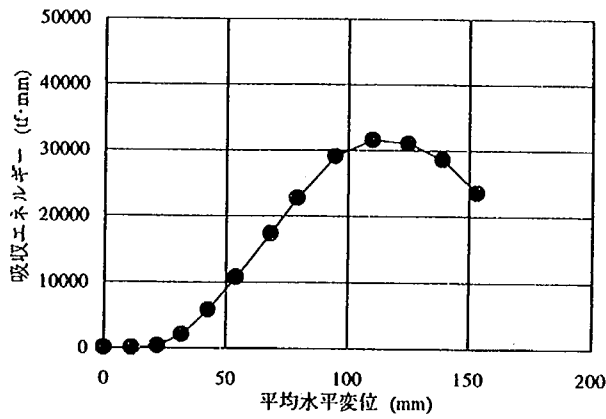
図-3.1.4 水平変位の鉛直方向分布



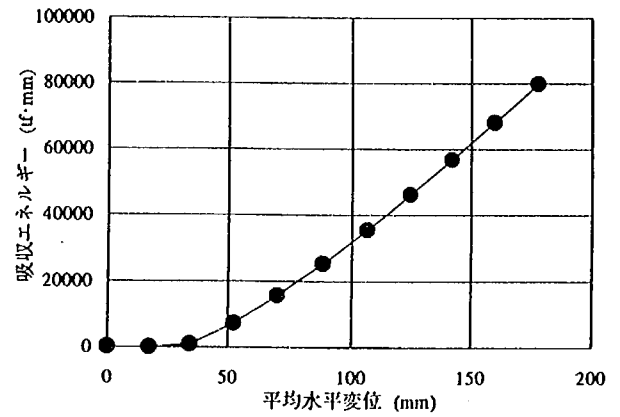
(1) KD-1



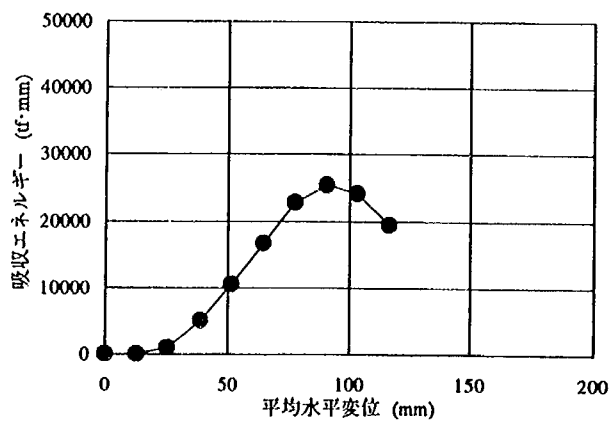
(2) KD-2



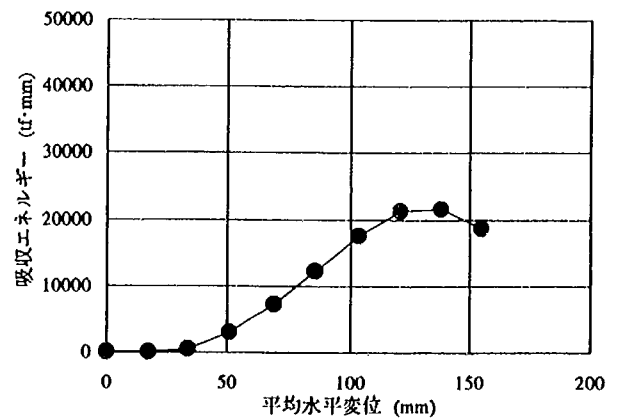
(3) KD-3



(4) KD-4

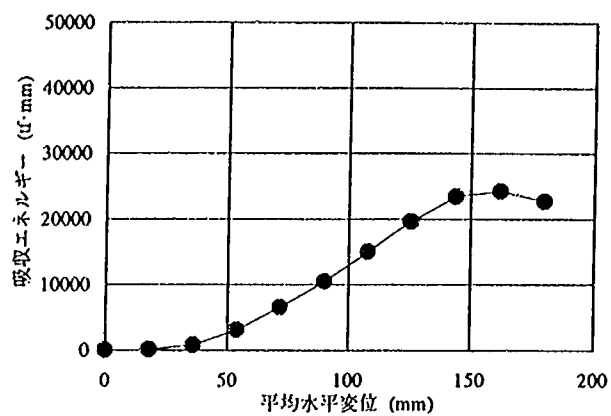


(5) KD-5

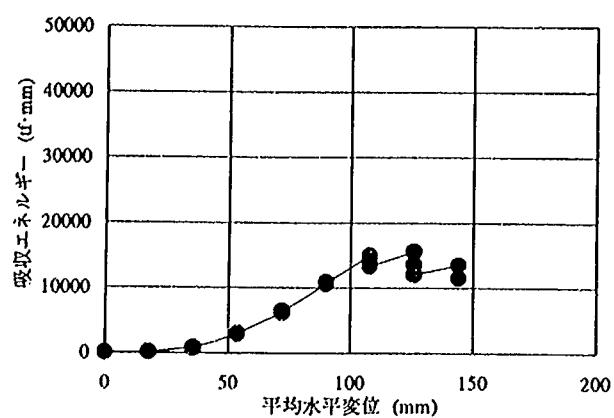


(6) KD-6

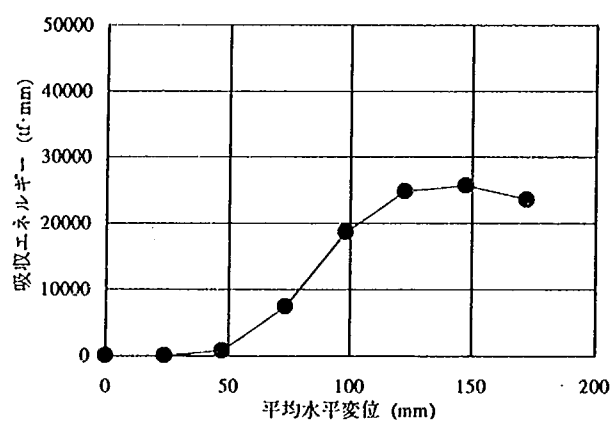
図-3.1.5 エネルギー吸収量



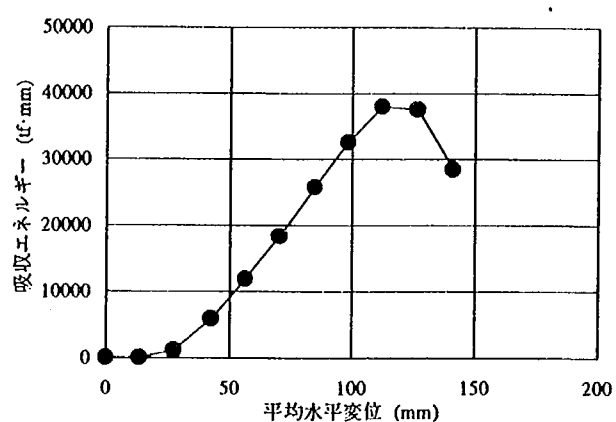
(7) KD-7_1



(8) KD-7_3

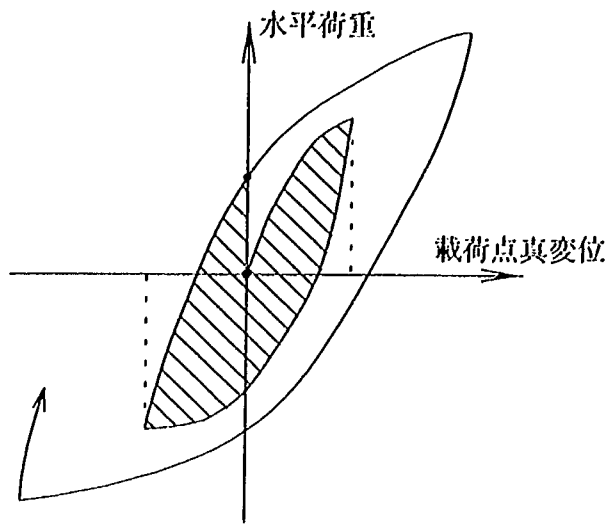


(9) KD-9

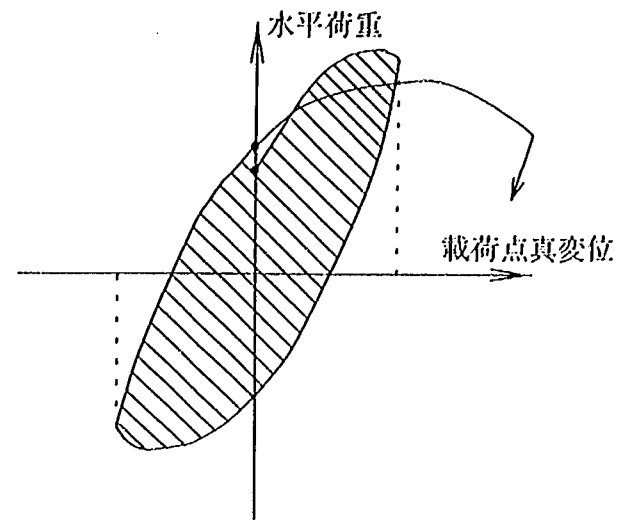


(10) KD-10

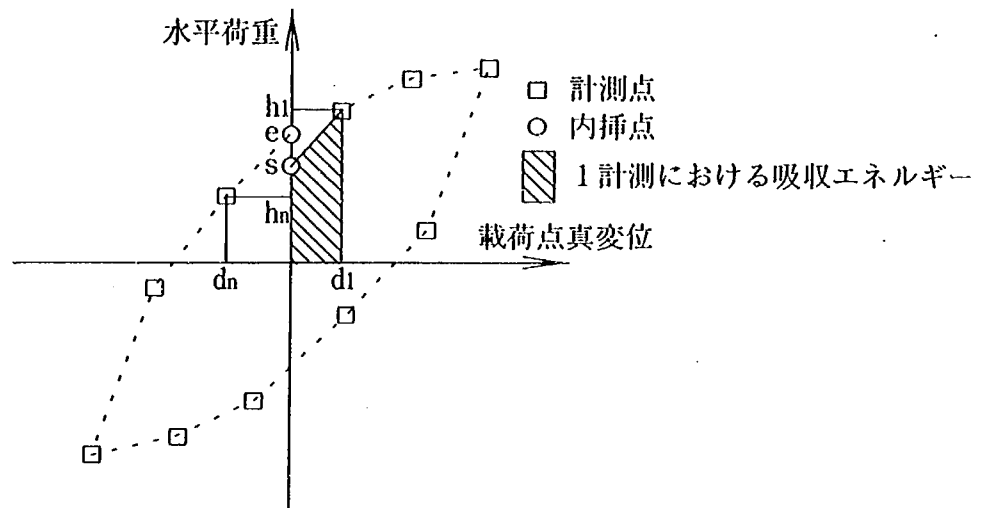
図-3.1.5 エネルギー吸収量



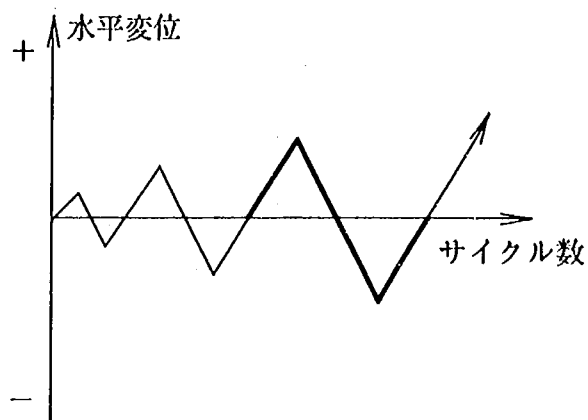
(a) 初期の場合の
吸収エネルギーの定義



(b) 強度低下を起こした場合の
吸収エネルギーの定義

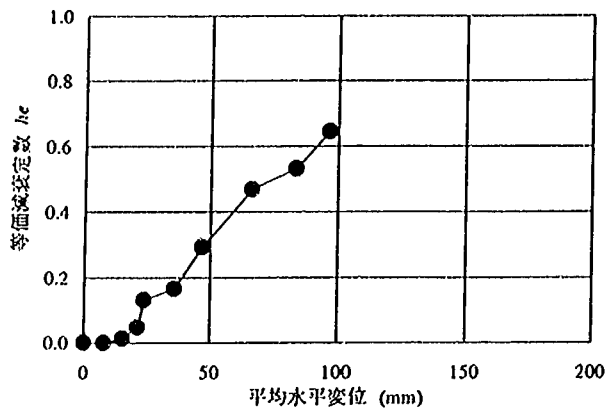


(c) 吸収エネルギーの計算方法

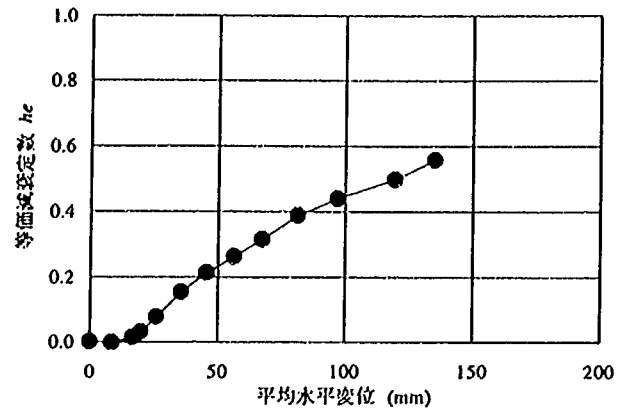


(d) 1サイクルの定義

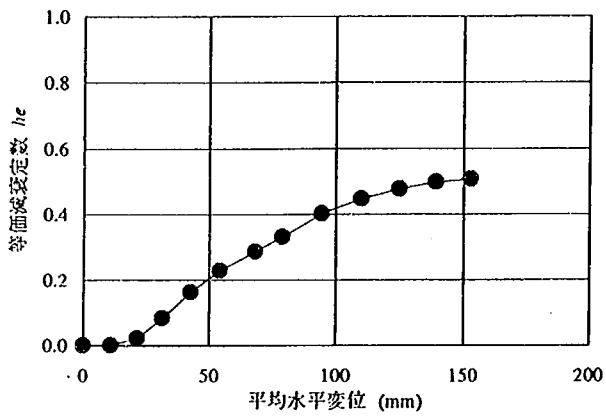
図-3.1.6 エネルギー吸収量の算出方法



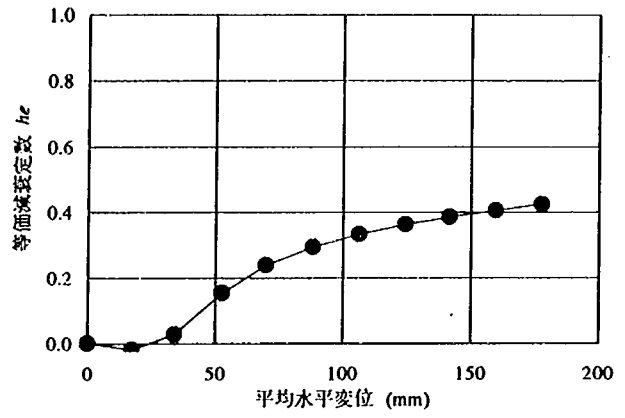
(1) KD-1



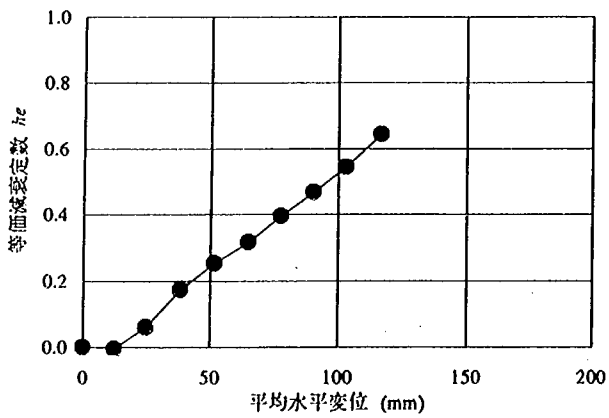
(2) KD-2



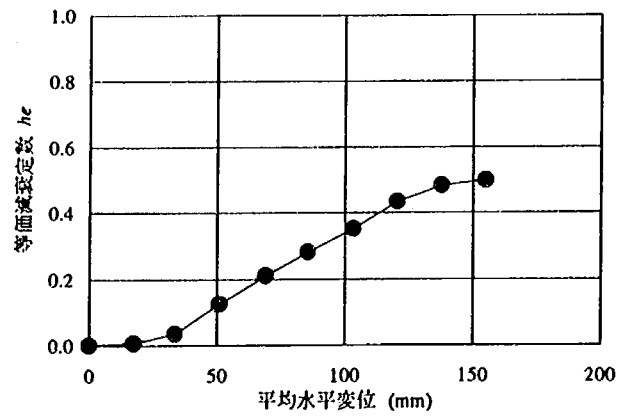
(3) KD-3



(4) KD-4

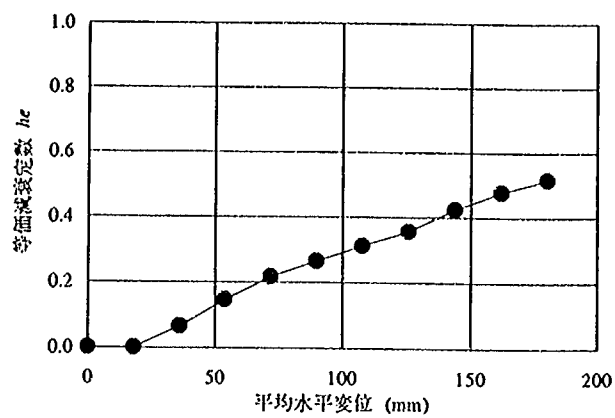


(5) KD-5

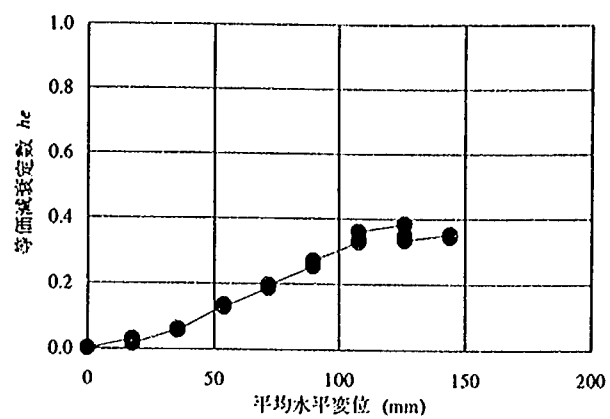


(6) KD-6

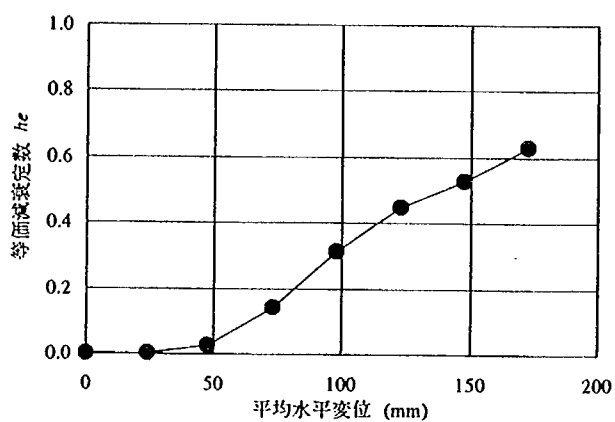
図-3.1.7 等価減衰定数



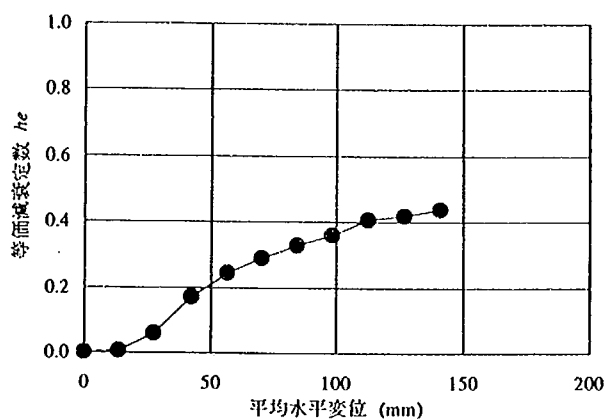
(7) KD-7_1



(8) KD-7_3



(9) KD-9



(10) KD-10

图-3.1.7 等值衰减定数

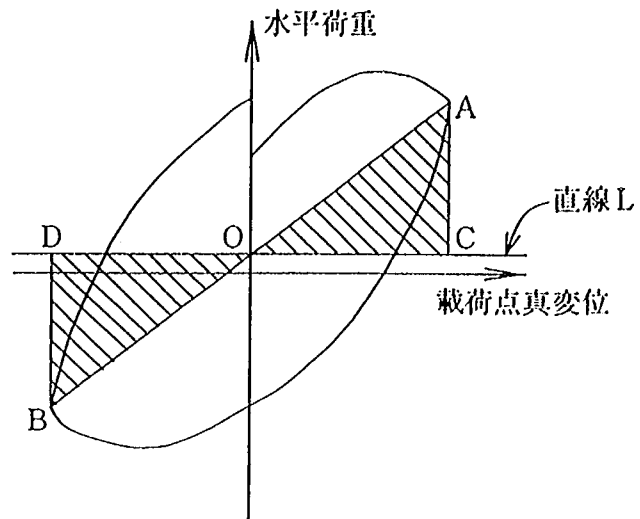
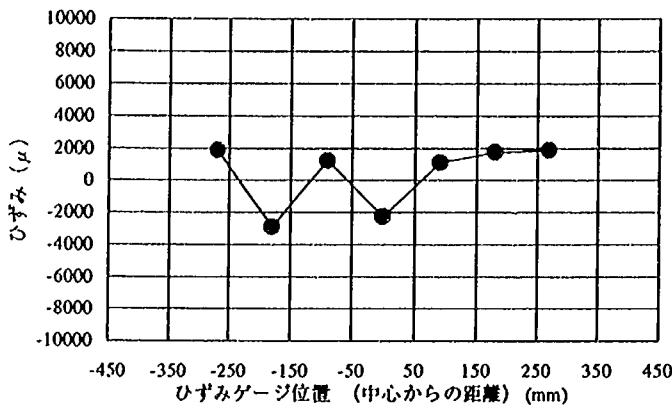
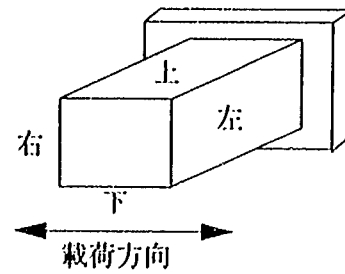
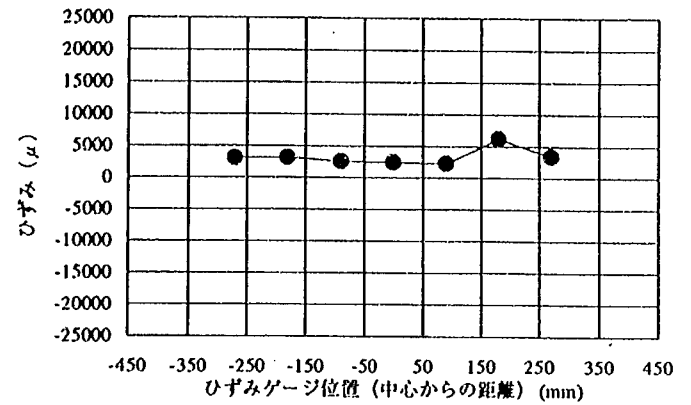


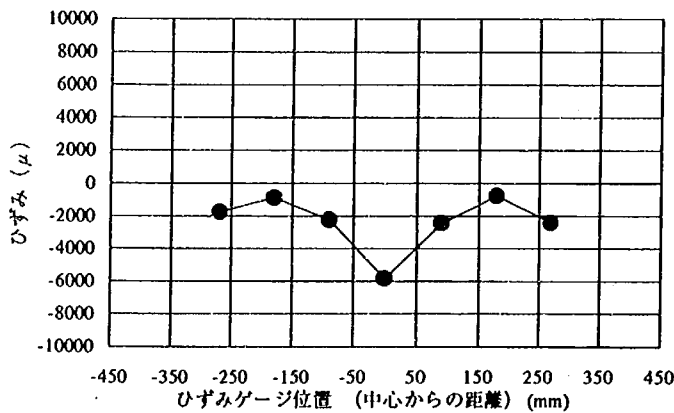
図-3.1.8 等価減衰定数と等価剛性の定義



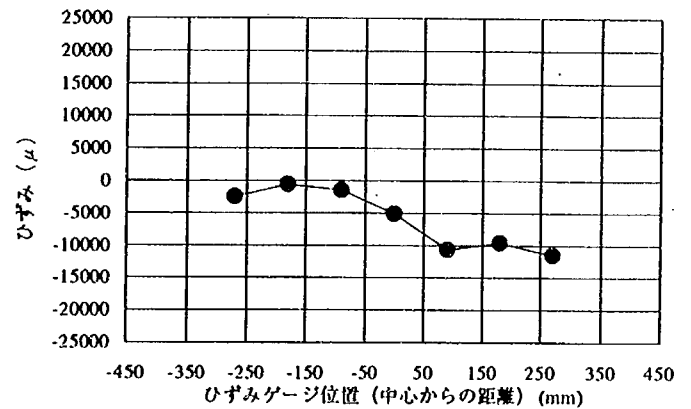
(a) フランジ (右)



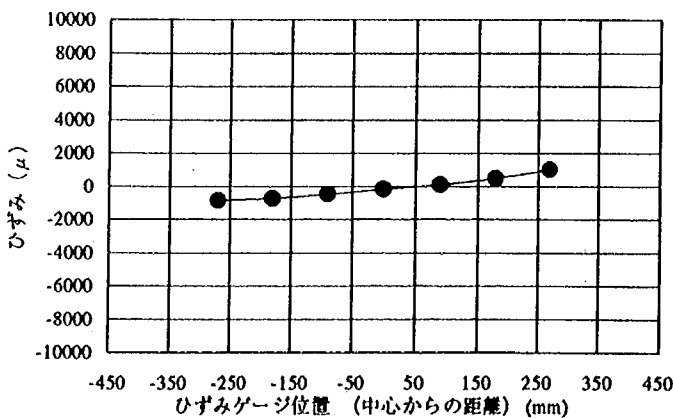
(a) フランジ (右)



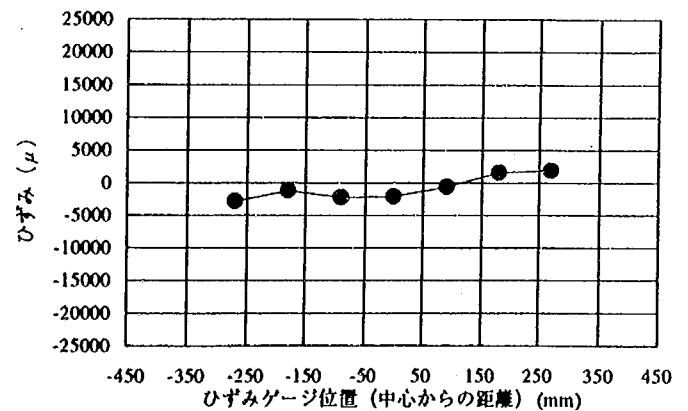
(b) フランジ (左)



(b) フランジ (左)



(c) ウェブ (上)

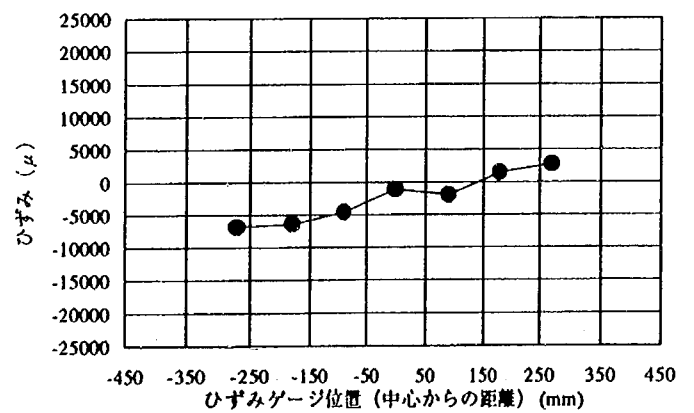
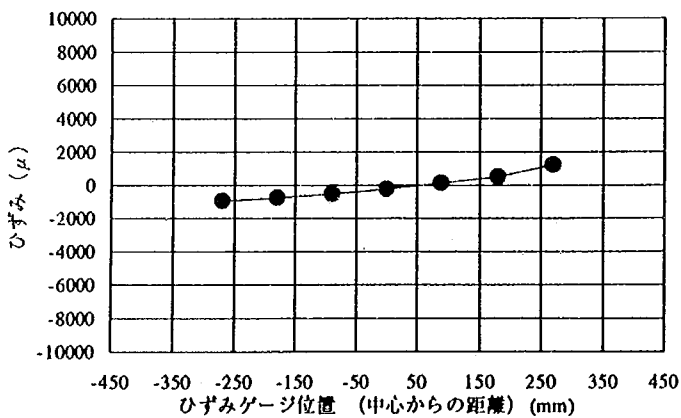
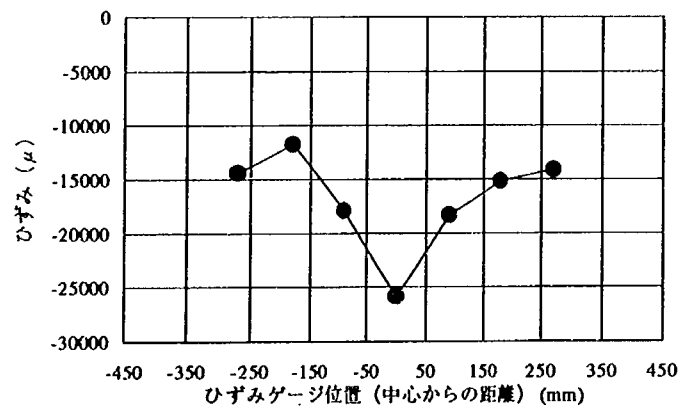
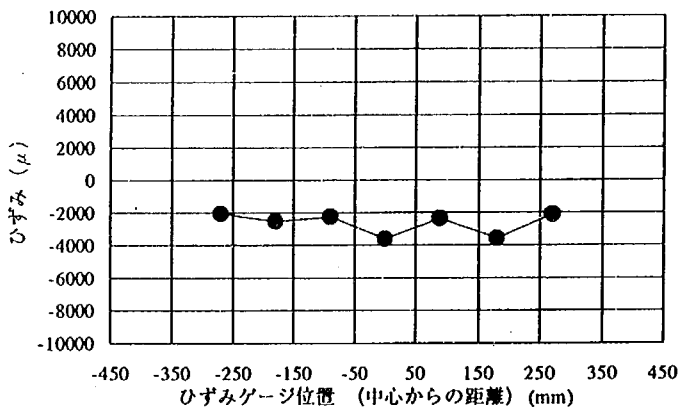
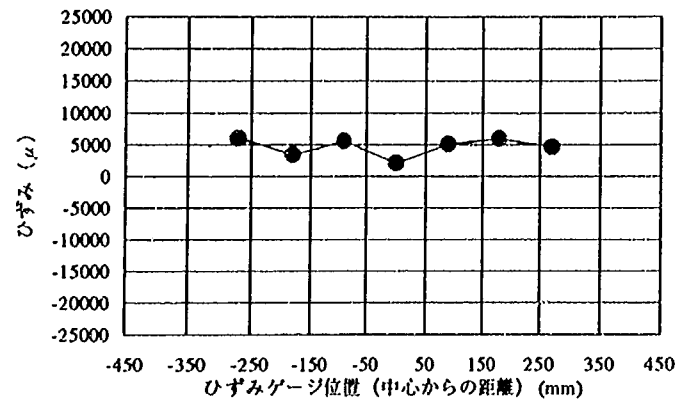
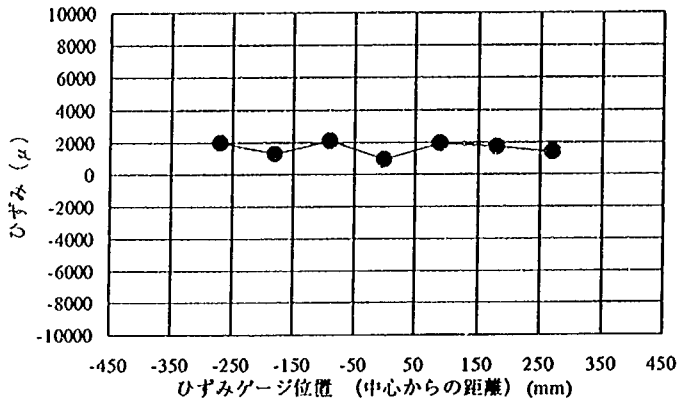
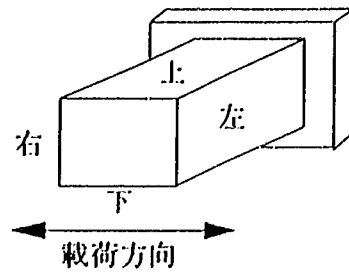


(c) ウェブ (上)

(i) 降伏時

(ii) 最大荷重時

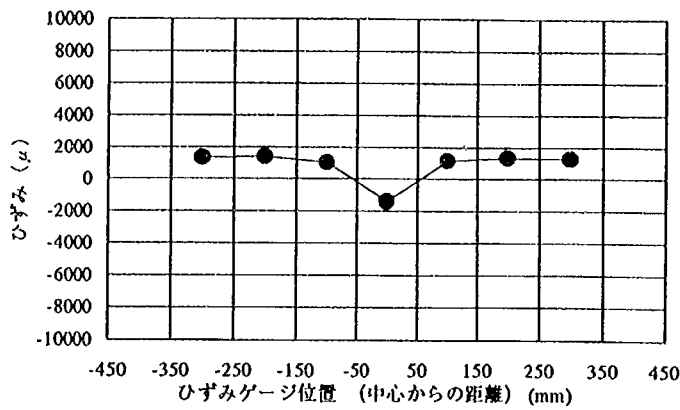
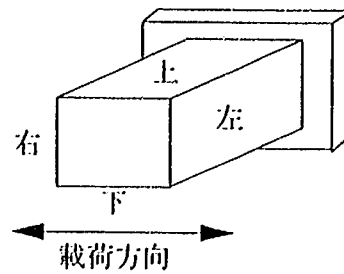
図-3.1.9(1) ひずみ分布 (KD-1)



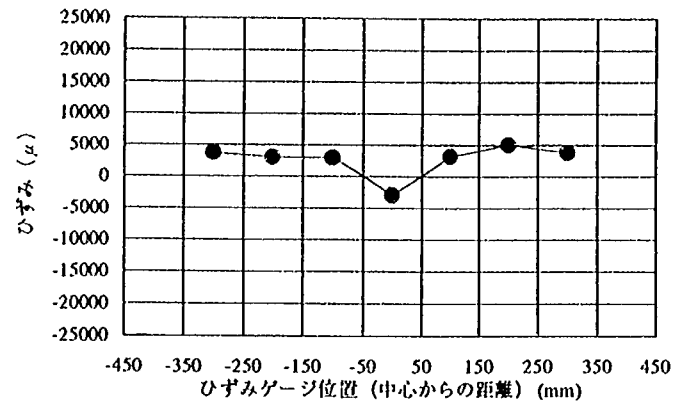
(i) 降伏時

(ii) 最大荷重時

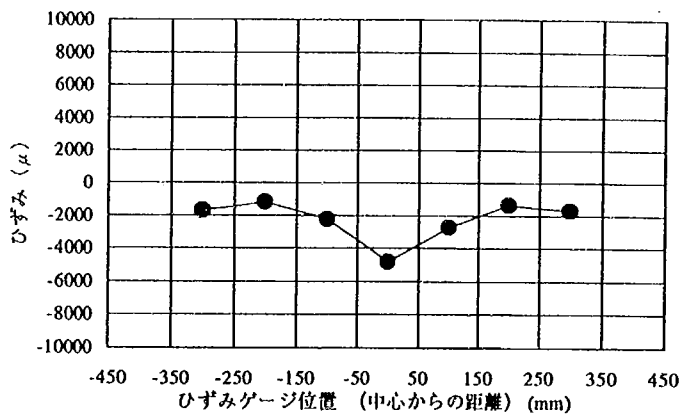
図-3.1.9(2) ひずみ分布 (KD-2)



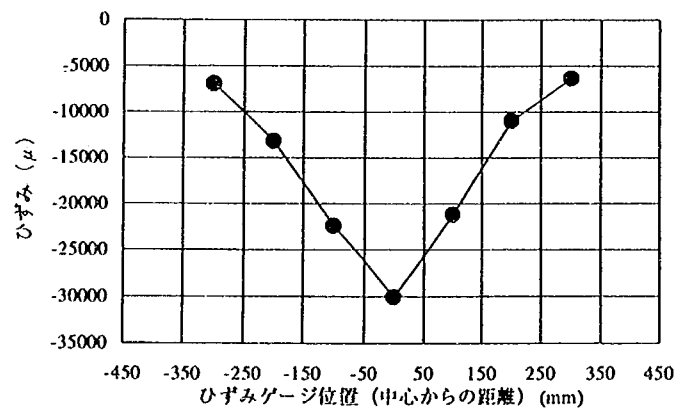
(a) フランジ (右)



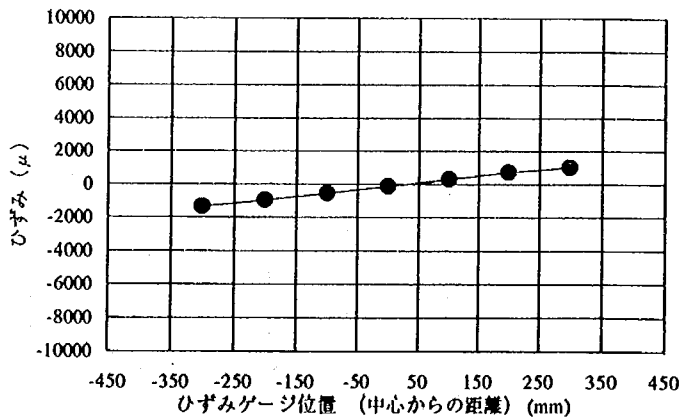
(a) フランジ (右)



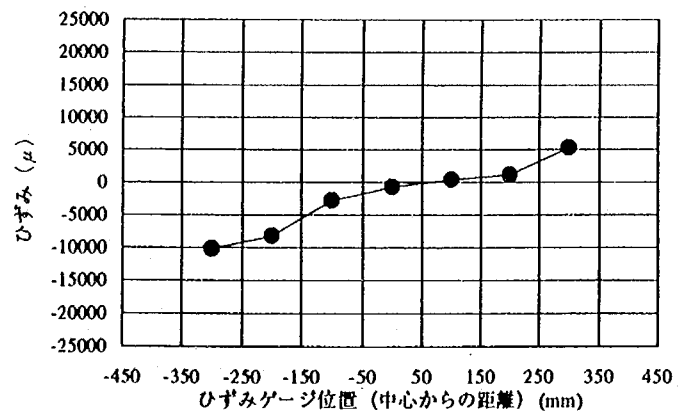
(b) フランジ (左)



(b) フランジ (左)



(c) ウェブ (上)

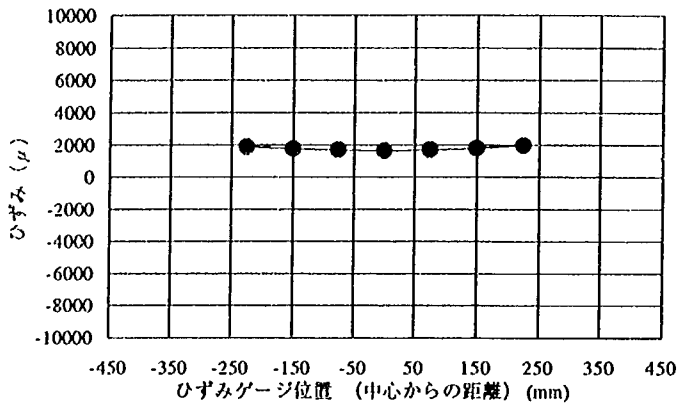
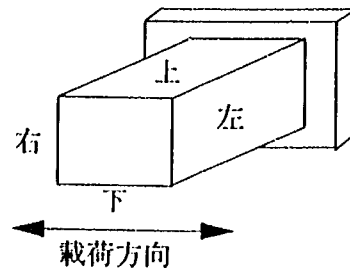


(c) ウェブ (上)

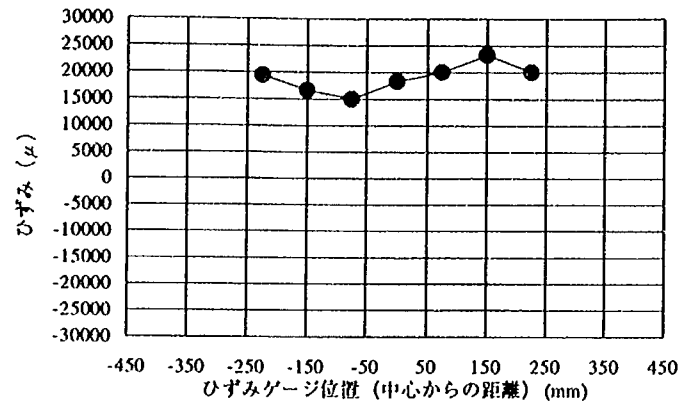
(i) 降伏時

(ii) 最大荷重時

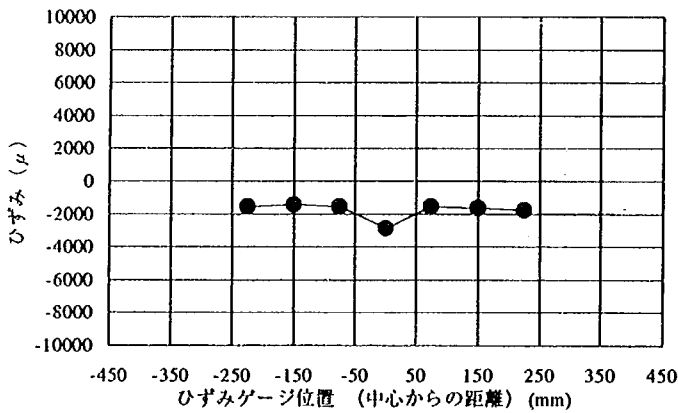
図-3.1.9(3) ひずみ分布 (KD-3)



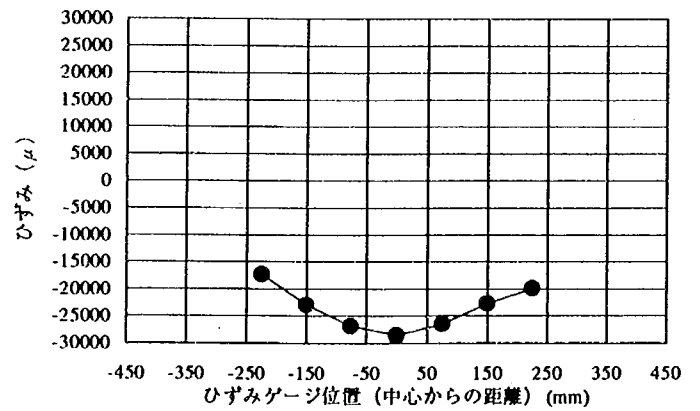
(a) フランジ (右)



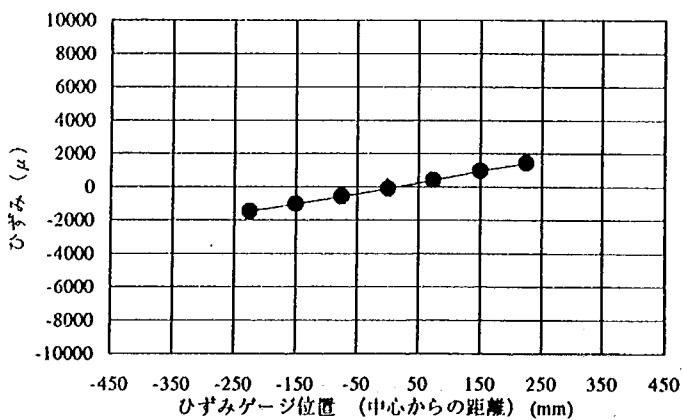
(a) フランジ (右)



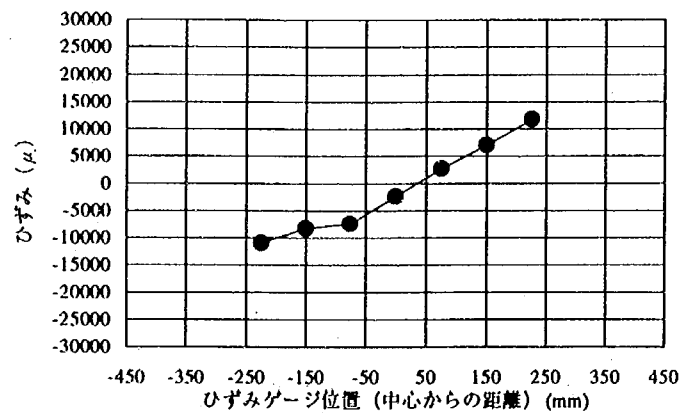
(b) フランジ (左)



(b) フランジ (左)



(c) ウェブ (上)

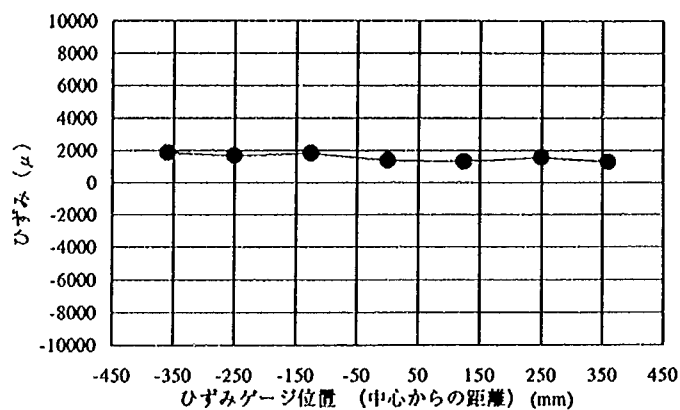
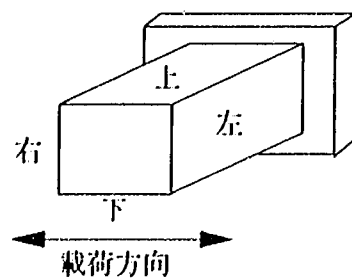


(c) ウェブ (上)

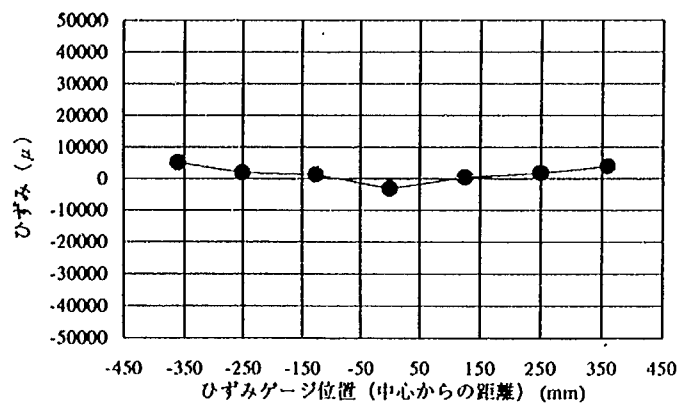
(i) 降伏時

(ii) 最大荷重時

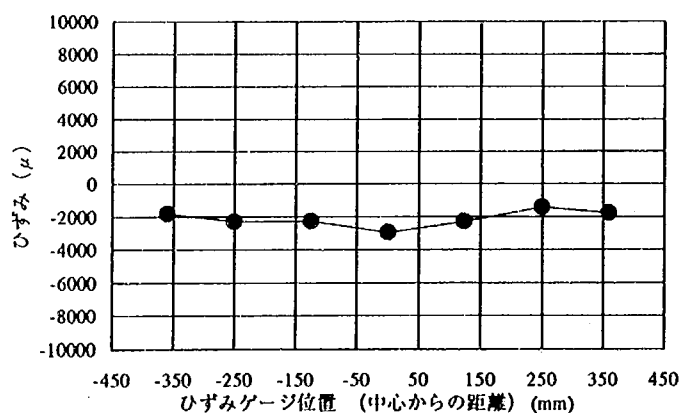
図-3.1.9(4) ひずみ分布 (KD-4)



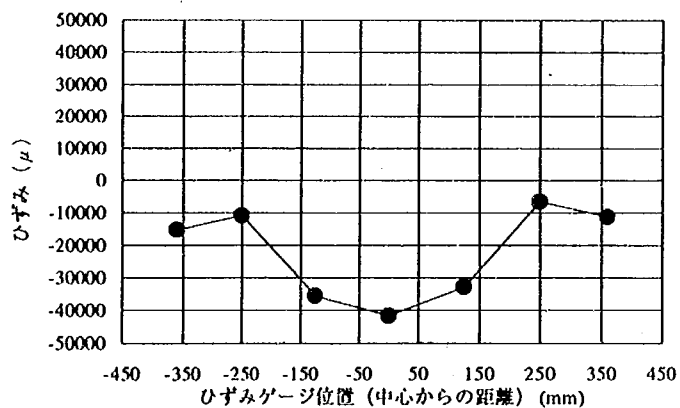
(a) フランジ (右)



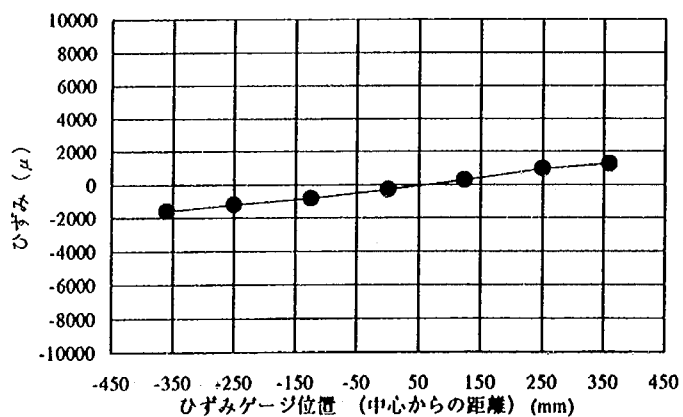
(a) フランジ (右)



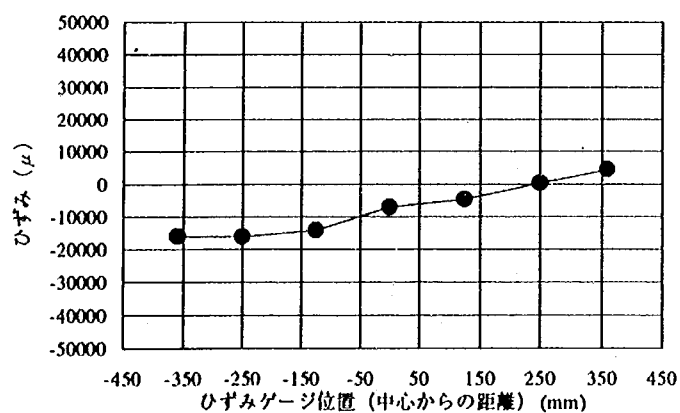
(b) フランジ (左)



(b) フランジ (左)



(c) ウェブ (上)

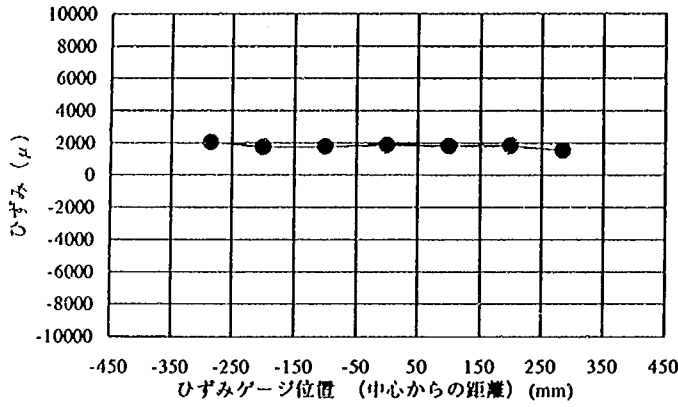
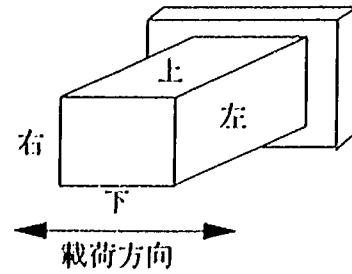


(c) ウェブ (上)

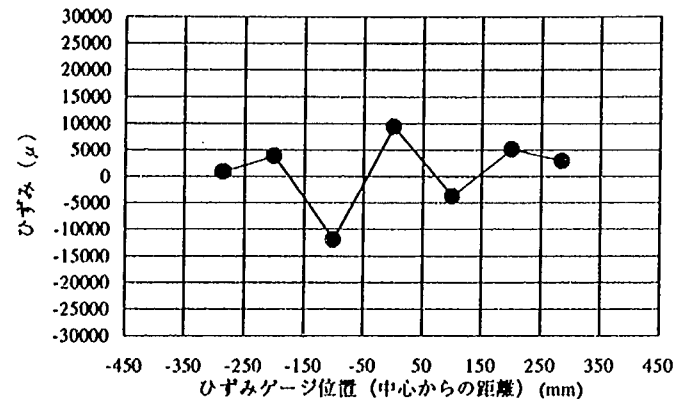
(i) 降伏時

(ii) 最大荷重時

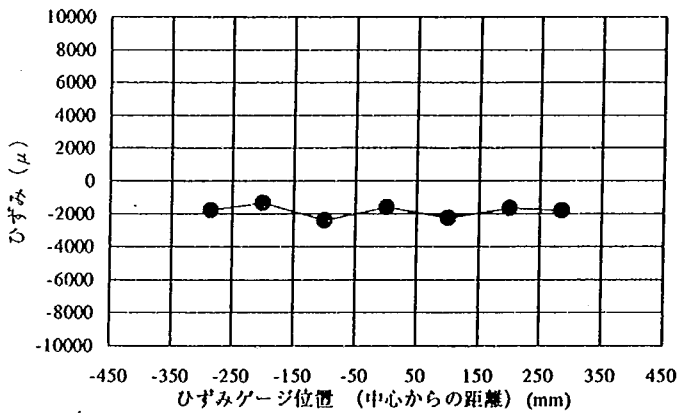
図-3.1.9(5) ひずみ分布 (KD-5)



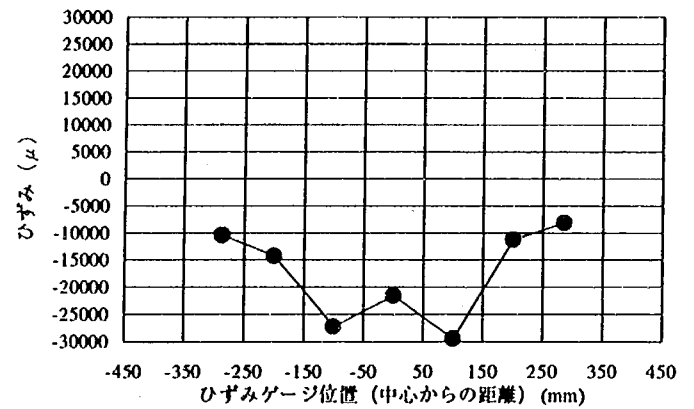
(a) フランジ (右)



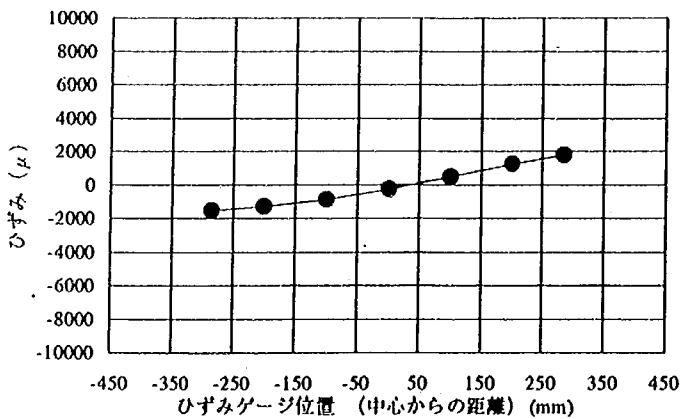
(a) フランジ (右)



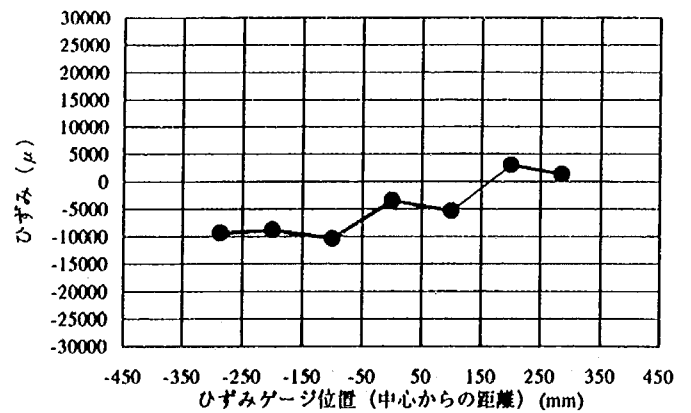
(b) フランジ (左)



(b) フランジ (左)



(c) ウェブ (上)

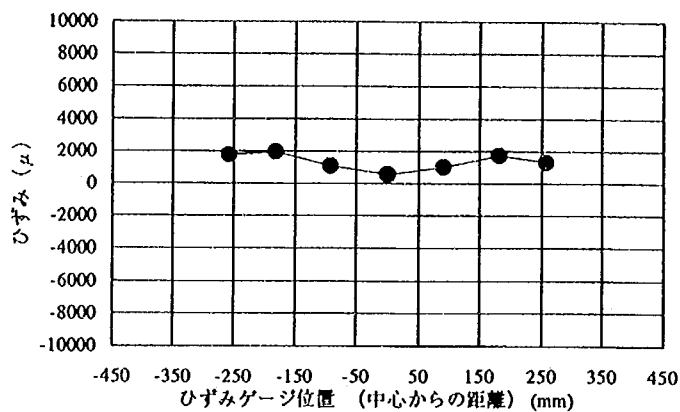
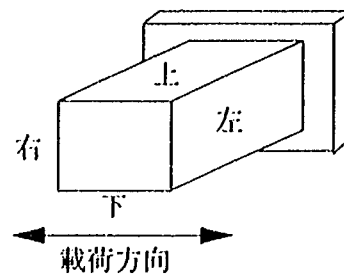


(c) ウェブ (上)

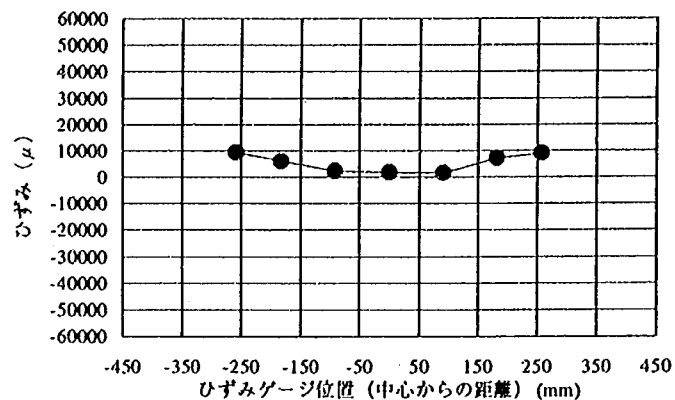
(i) 降伏時

(ii) 最大荷重時

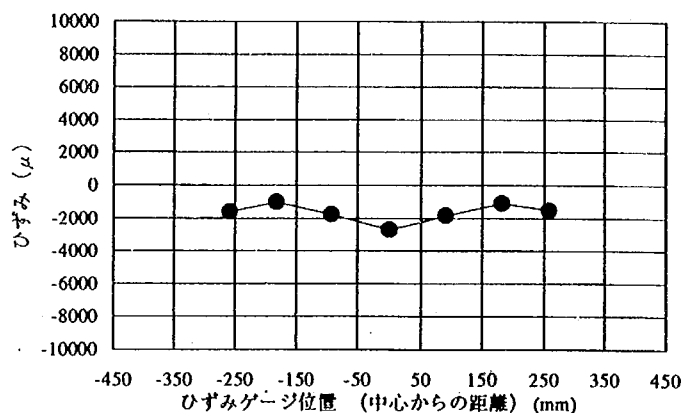
図-3.1.9(6) ひずみ分布 (KD-6)



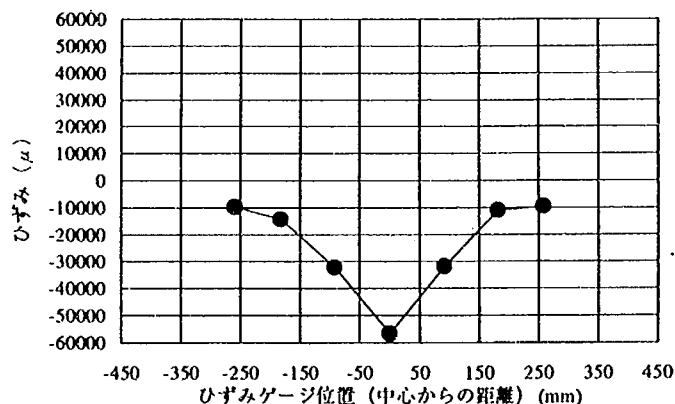
(a) フランジ (右)



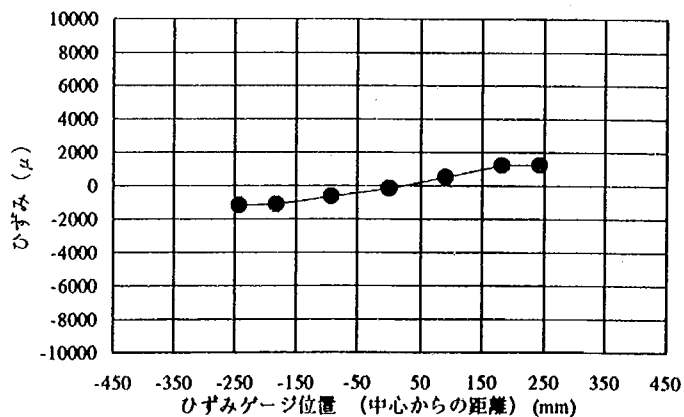
(a) フランジ (右)



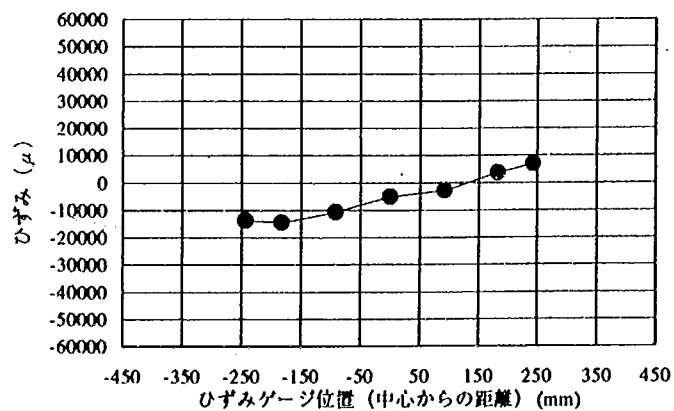
(b) フランジ (左)



(b) フランジ (左)



(c) ウェブ (上)

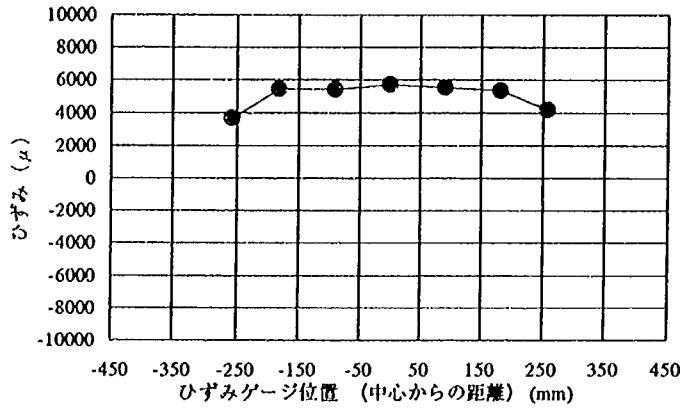
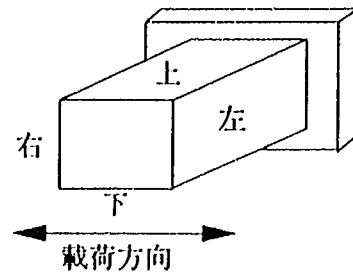


(c) ウェブ (上)

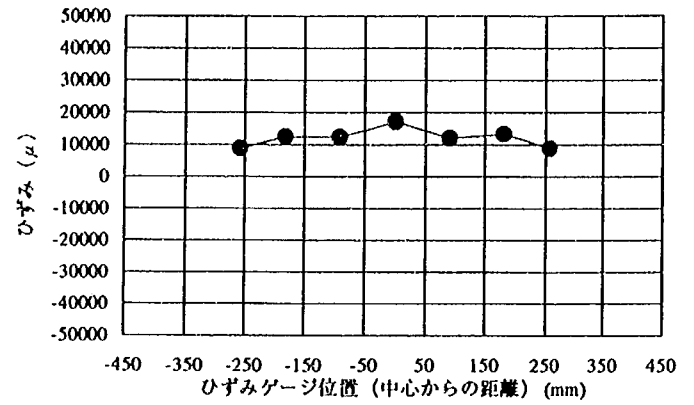
(i) 降伏時

(ii) 最大荷重時

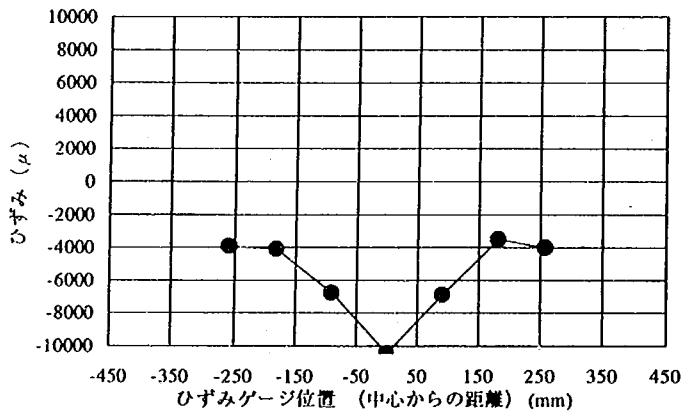
図-3.1.9(7) ひずみ分布 (KD-7_1)



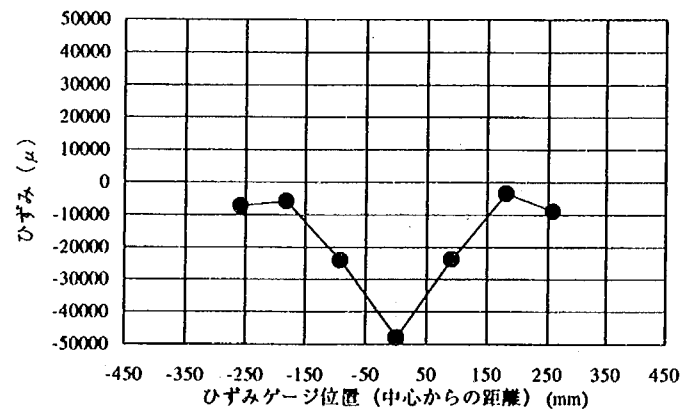
(a) フランジ (右)



(a) フランジ (右)



(b) フランジ (左)



(b) フランジ (左)

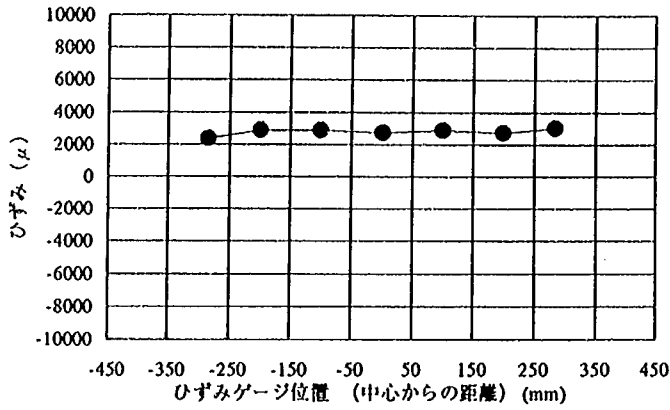
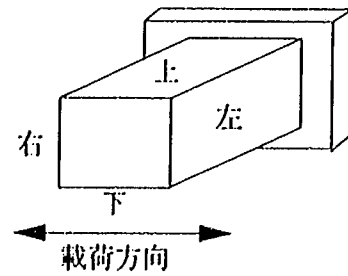
データなし
(c) ウェブ (上)

(i) 降伏時

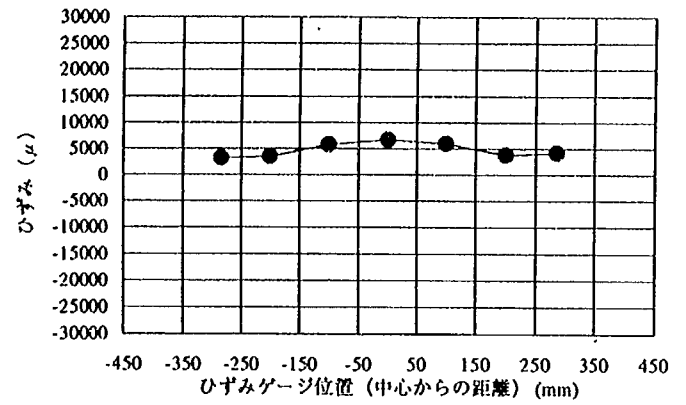
データなし
(c) ウェブ (上)

(ii) 最大荷重時

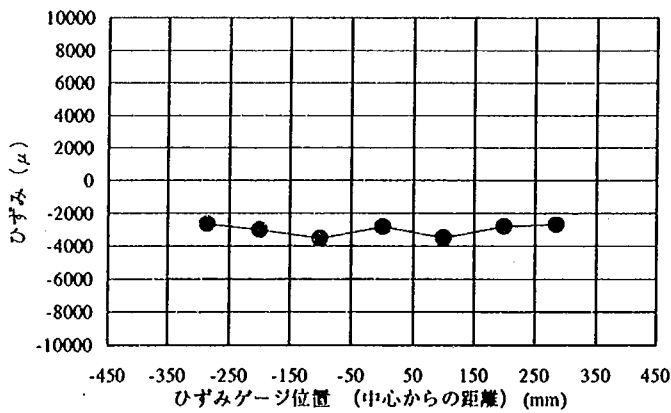
図-3.1.9(8) ひずみ分布 (KD-7_3)



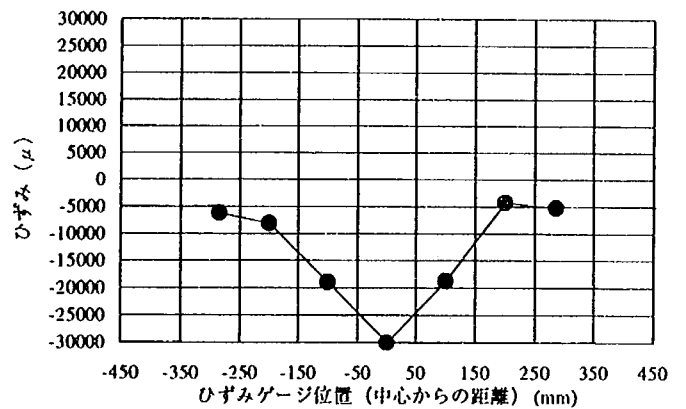
(a) フランジ (右)



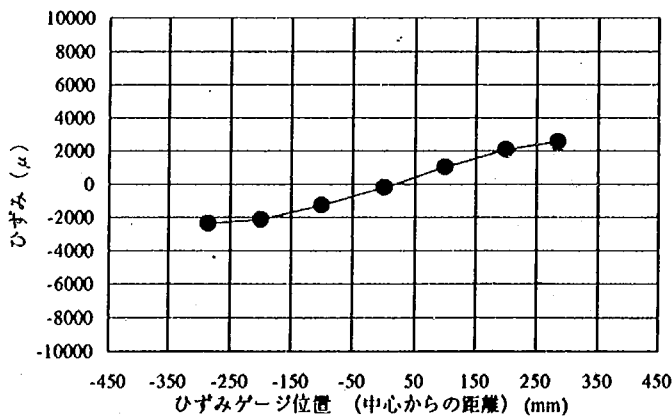
(a) フランジ (右)



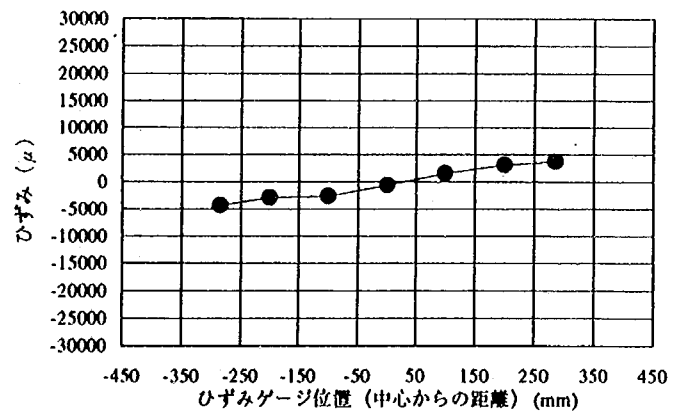
(b) フランジ (左)



(b) フランジ (左)



(c) ウェブ (上)

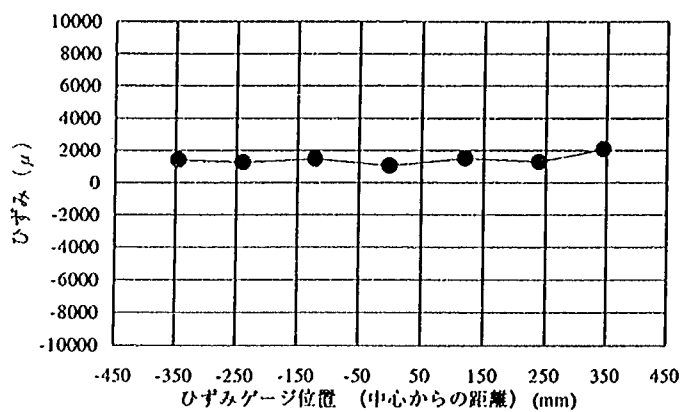
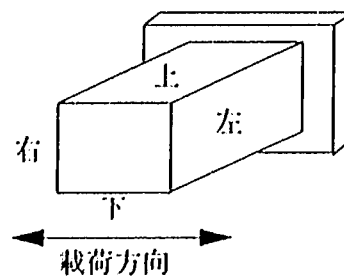


(c) ウェブ (上)

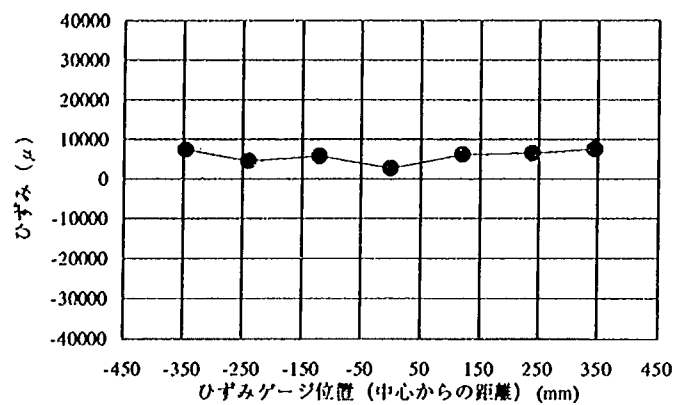
(i) 降伏時

(ii) 最大荷重時

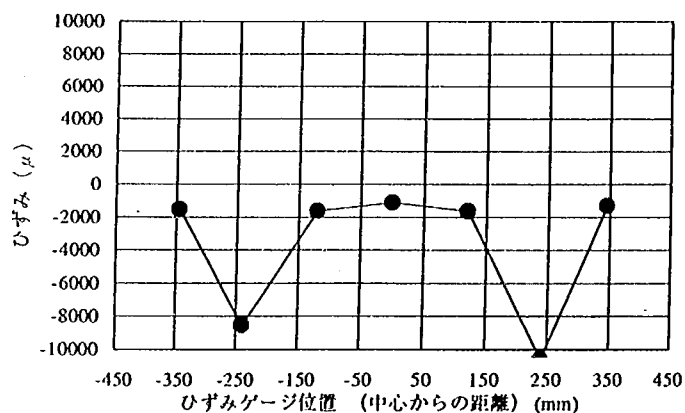
図-3.1.9(9) ひずみ分布 (KD-9)



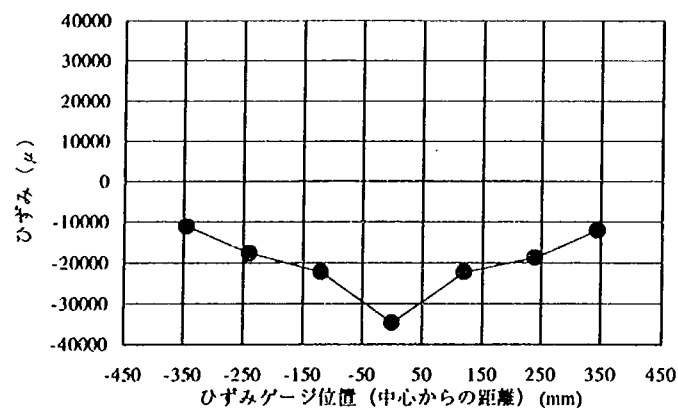
(a) フランジ (右)



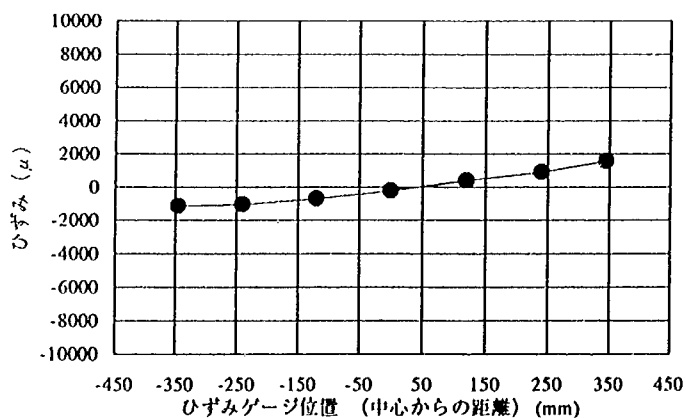
(a) フランジ (右)



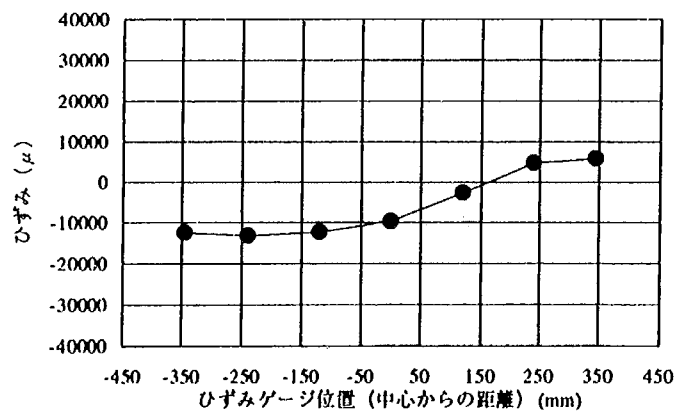
(b) フランジ (左)



(b) フランジ (左)



(c) ウェブ (上)

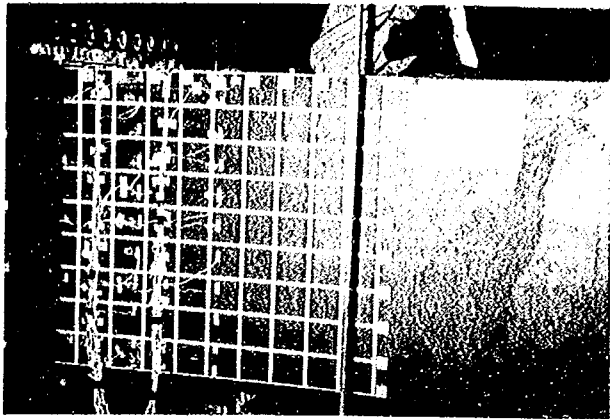


(c) ウェブ (上)

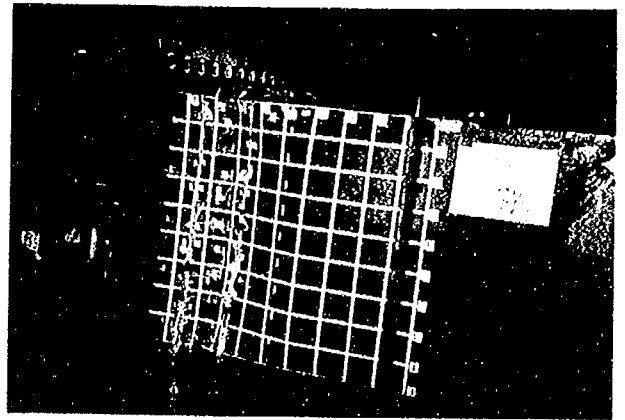
(i) 降伏時

(ii) 最大荷重時

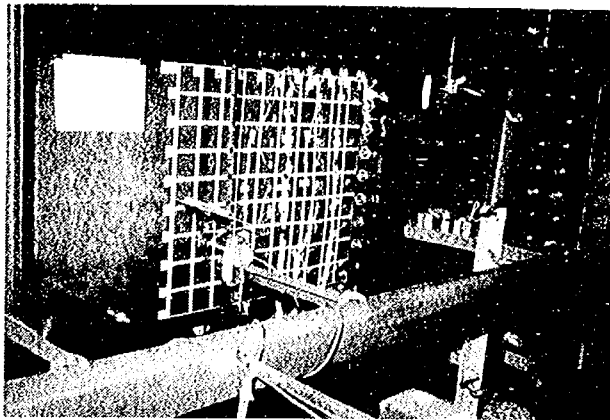
図-3.1.9(10) ひずみ分布 (KD-10)



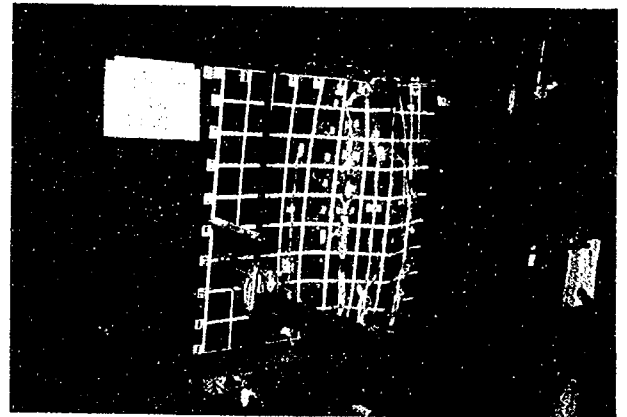
Flange (R)



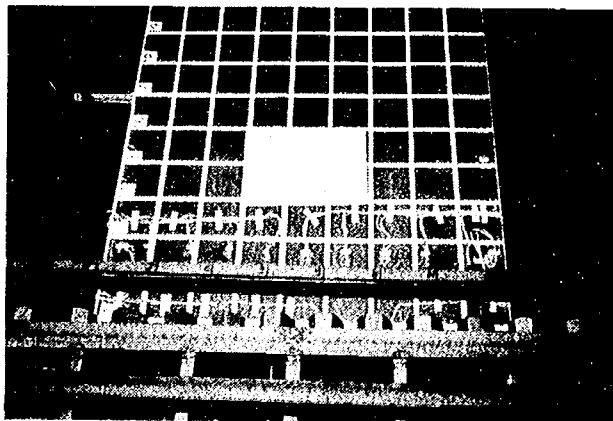
Flange (R)



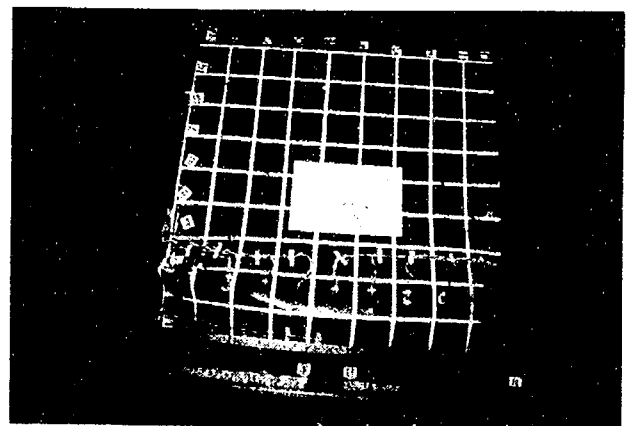
Flange (L)



Flange (L)



Upper Web

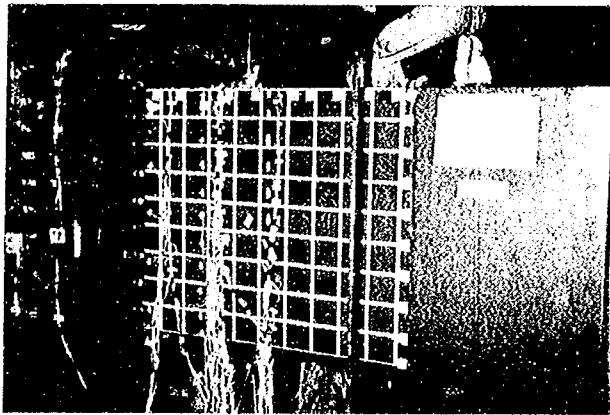


Upper Web

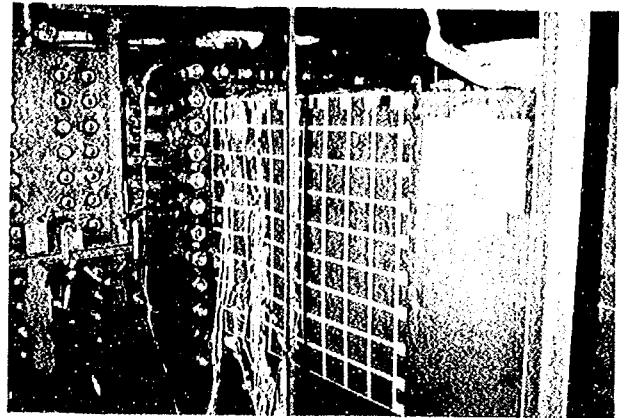
(i) 最大荷重を越えた付近 ($+6\delta_{y0}$)

(ii) 実験終了時付近 ($+9\delta_{y0}$)

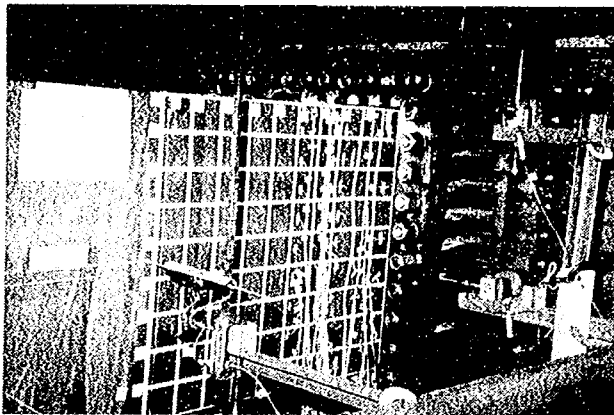
写真-3.1.1(1) KD-1 供試体の変形状況



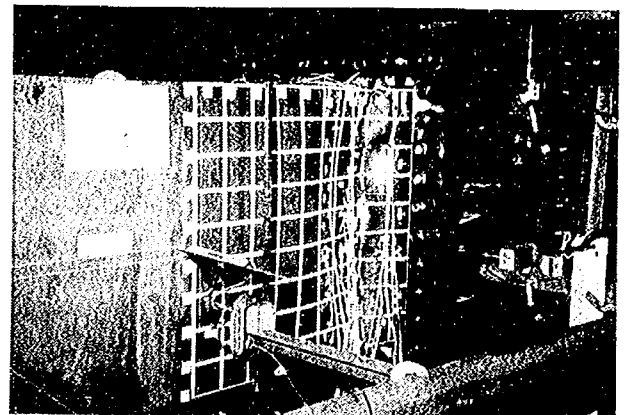
Flange (R)



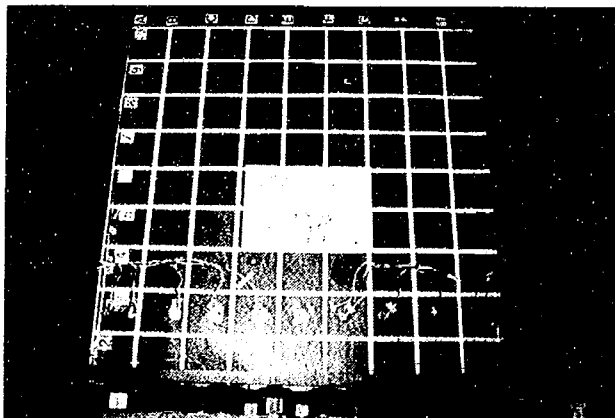
Flange (R)



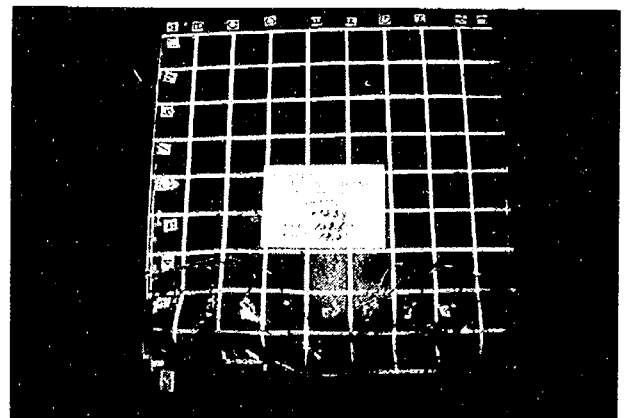
Flange (L)



Flange (L)



Upper Web

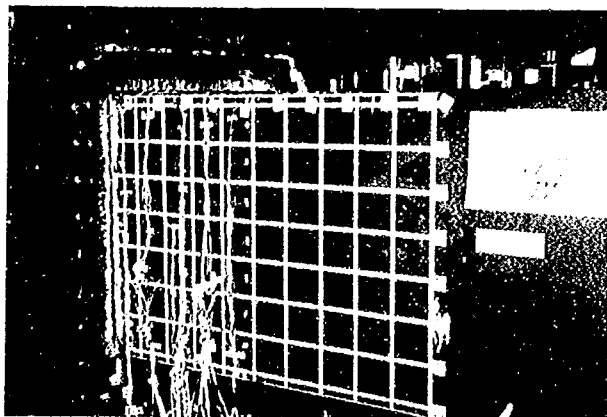


Upper Web

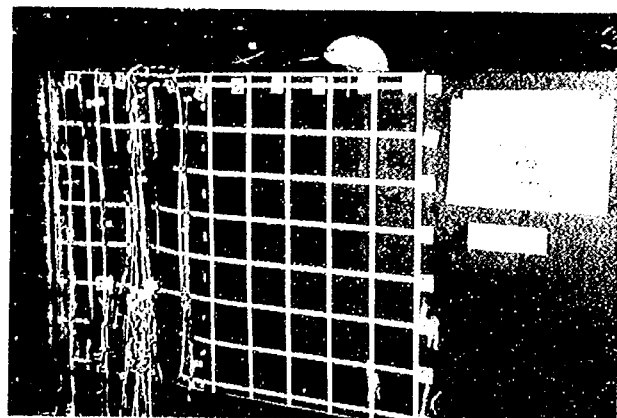
(i) 最大荷重を越えた付近 ($+8\delta_{y0}$)

(ii) 実験終了時付近 ($+12\delta_{y0}$)

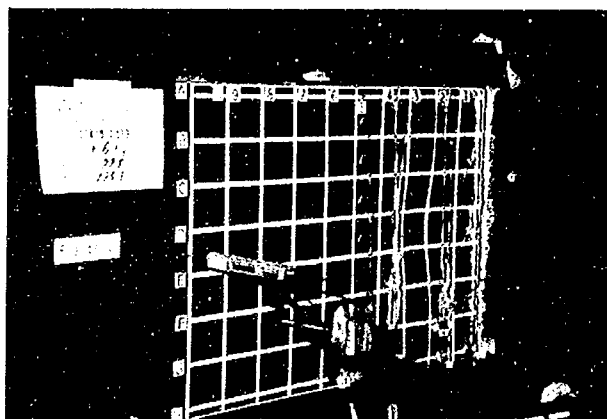
写真-3.1.1(2) KD-2 供試体の変形状況



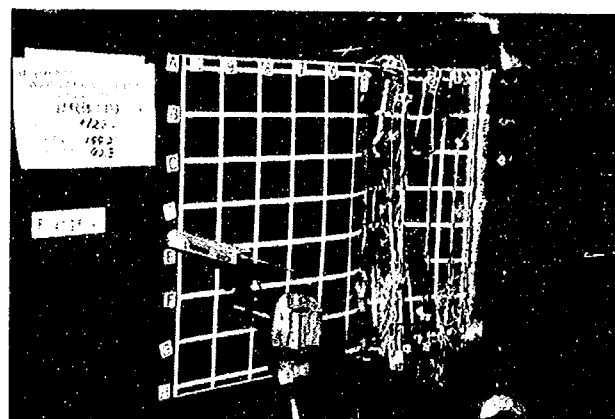
Flange (R)



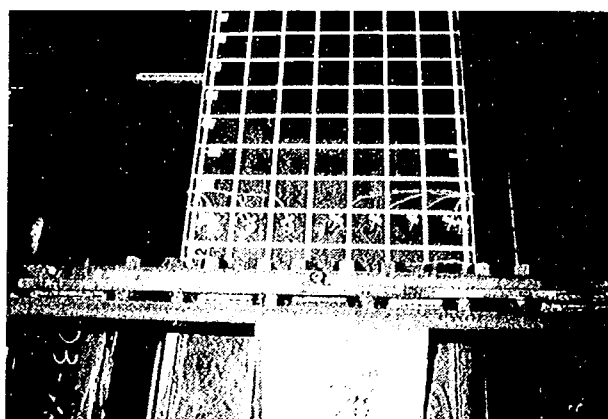
Flange (R)



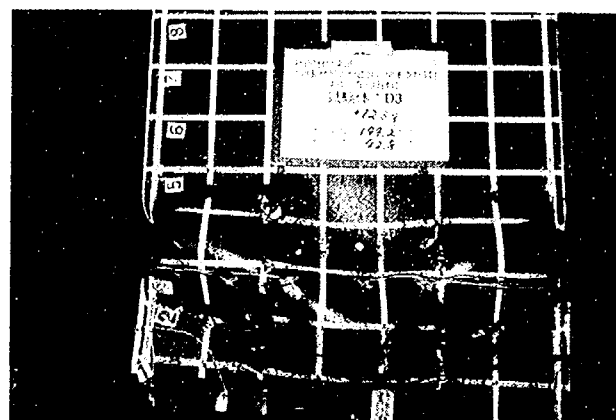
Flange (L)



Flange (L)



Upper Web

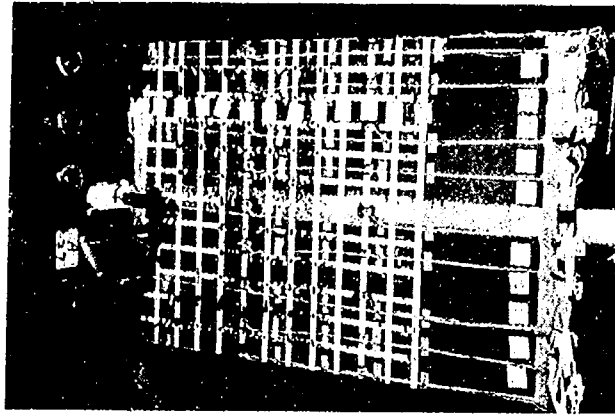


Upper Web

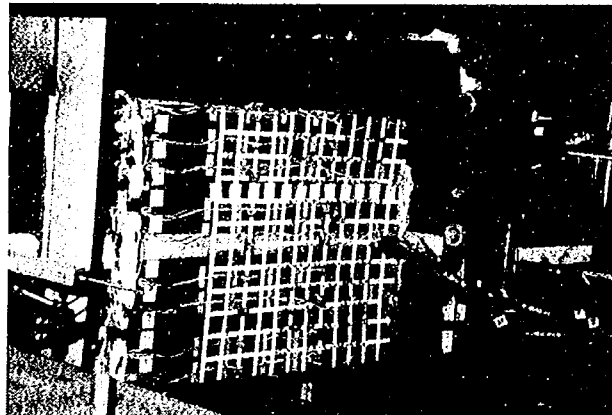
(i) 最大荷重を越えた付近 ($+6\delta_{y0}$)

(ii) 実験終了時付近 ($+12\delta_{y0}$)

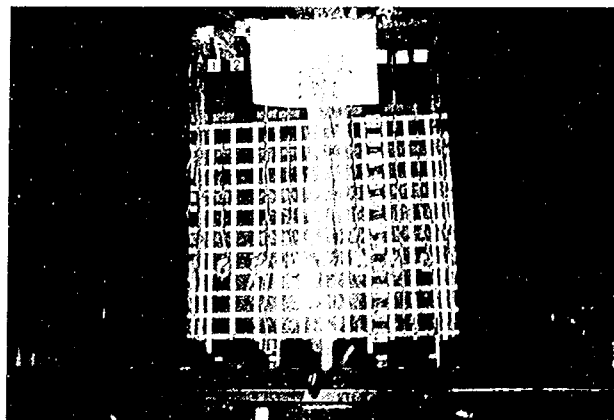
写真-3.1.1(3) KD-3 供試体の変形状況



Flange (R)



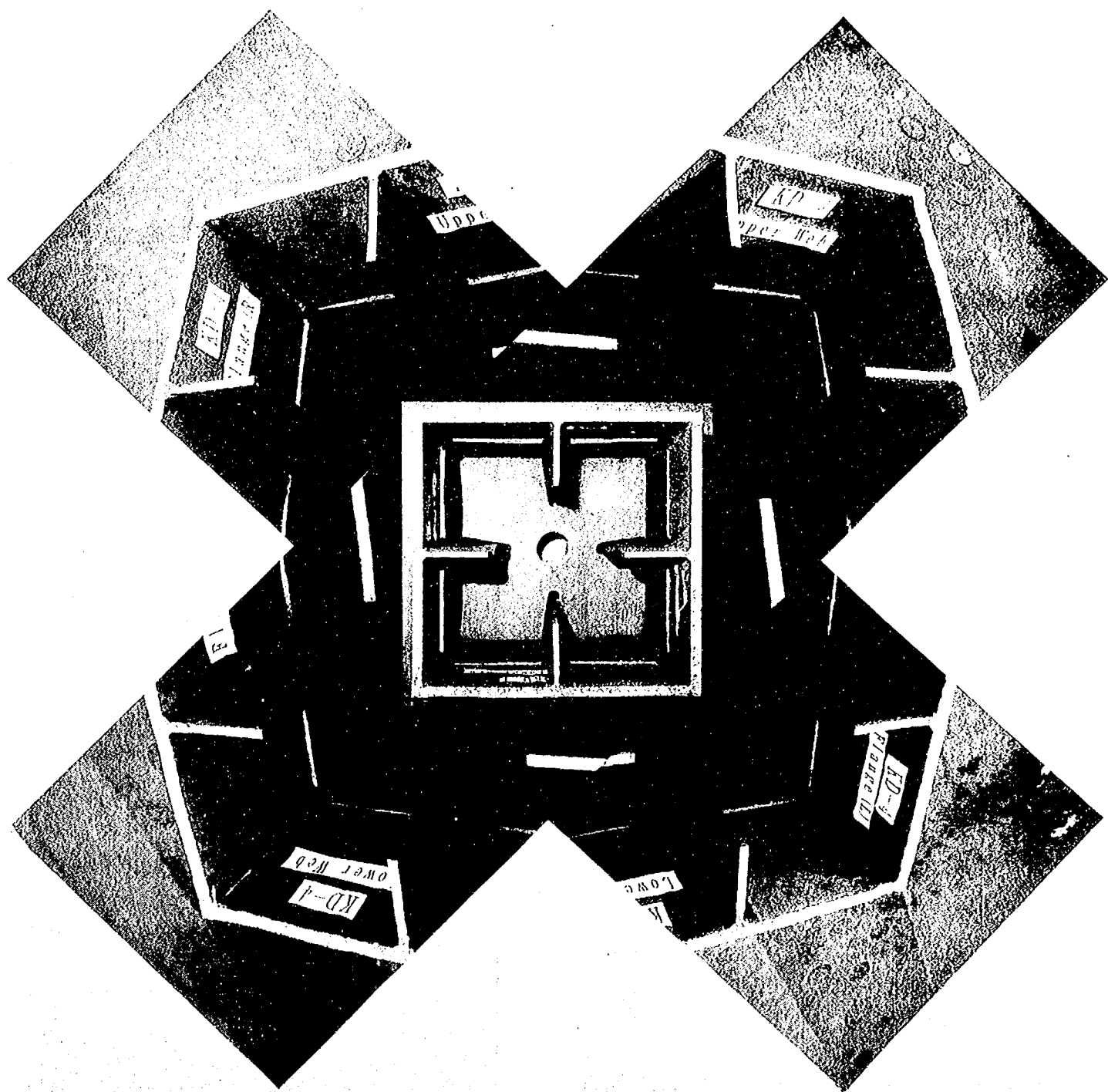
Flange (L)



Upper Web

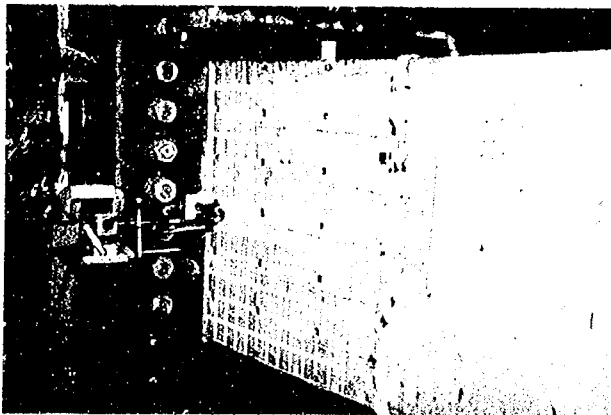
実験終了時付近 ($+10\delta_{y0}$)

写真-3.1.1(4) KD-4 供試体の変形状況

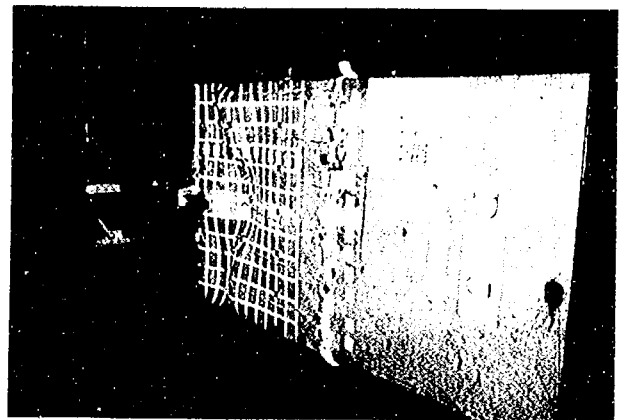


実験終了時（内面）

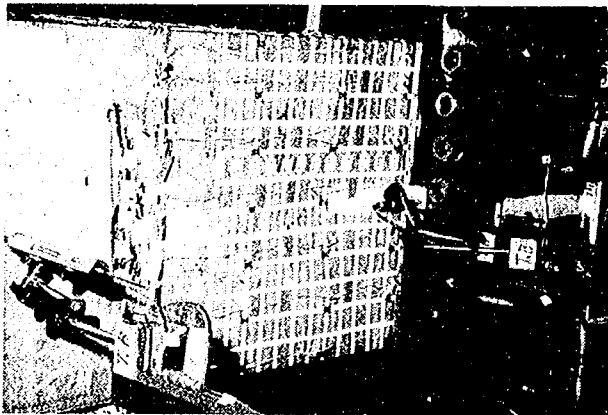
写真-3.1.1(4) KD-4 供試体の変形状況（つづき）



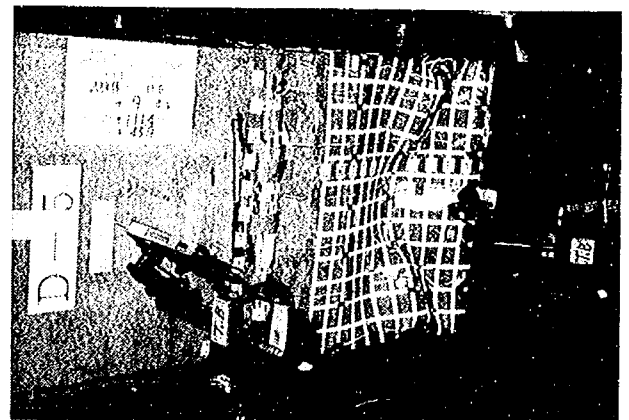
Flange (R)



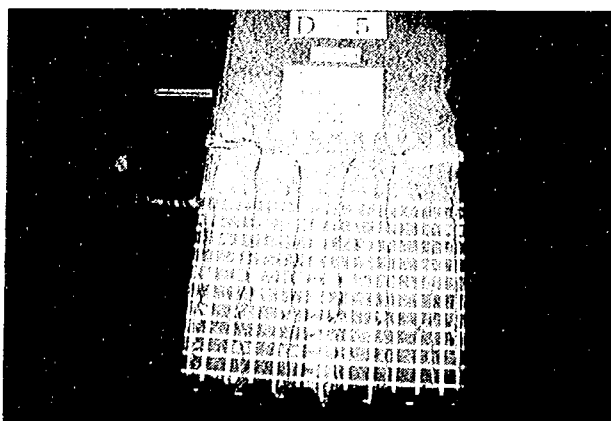
Flange (R)



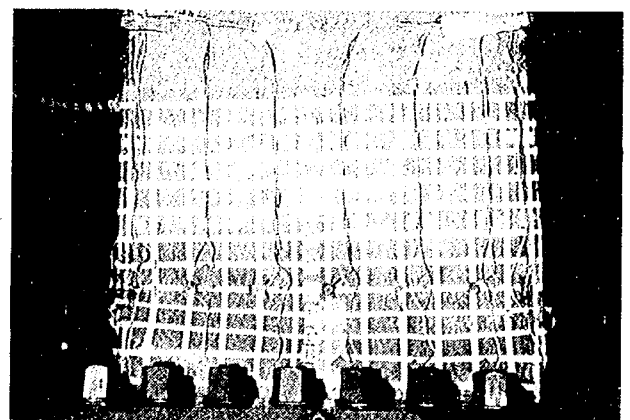
Flange (L)



Flange (L)



Upper Web

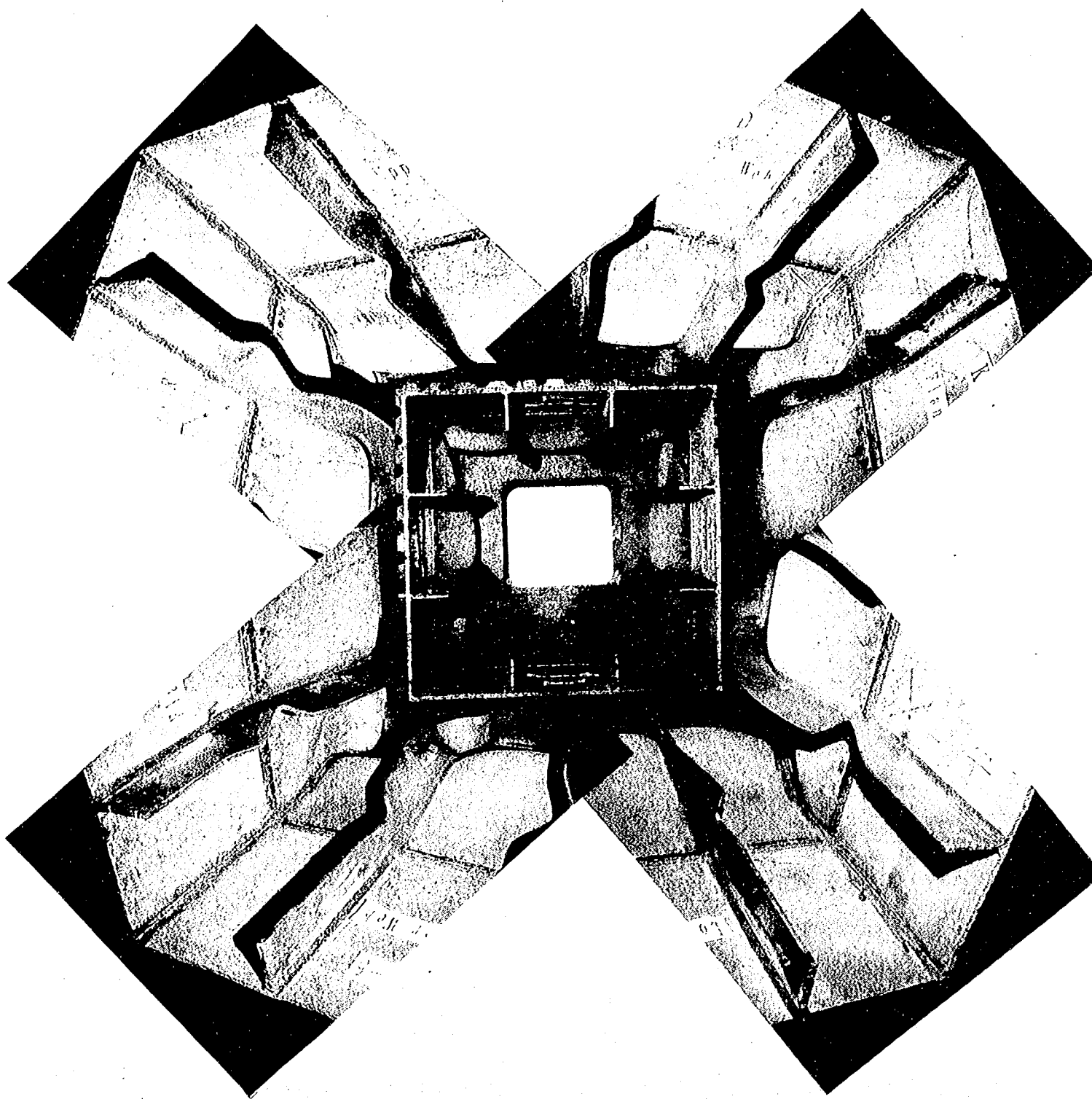


Upper Web

(i) 最大荷重を越えた付近 ($+5\delta_{y0}$)

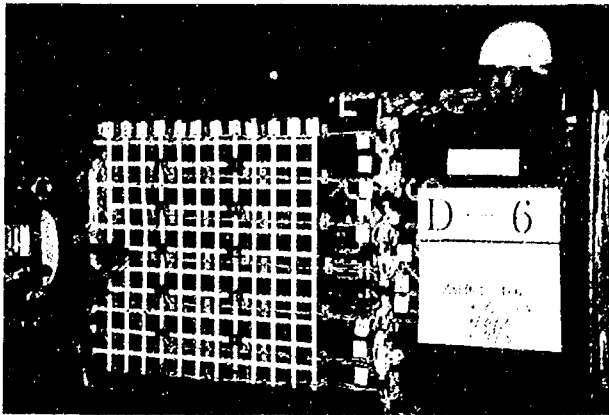
(ii) 実験終了時付近 ($+9\delta_{y0}$)

写真-3.1.1(5) KD-5 供試体の変形状況

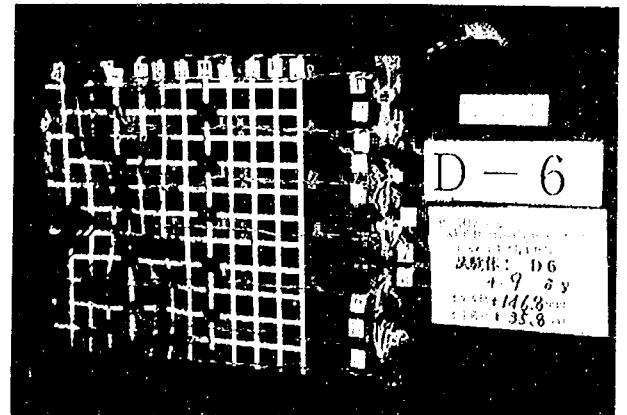


実験終了時（内面）

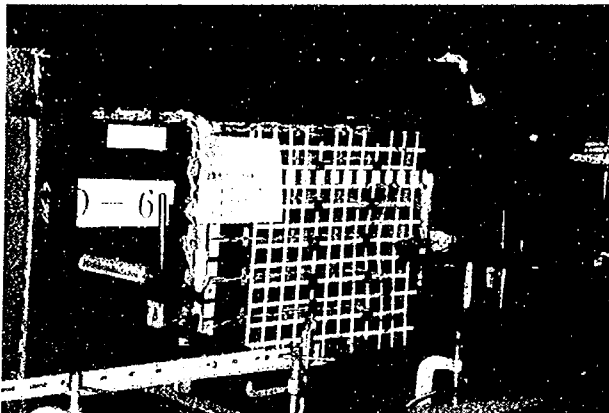
写真-3.1.1(5) KD-5 供試体の変形状況（つづき）



Flange (R)



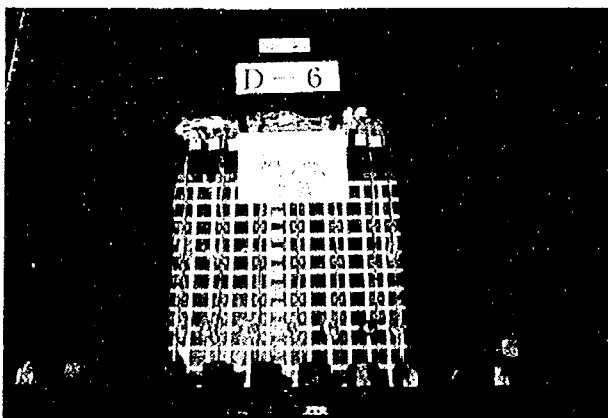
Flange (R)



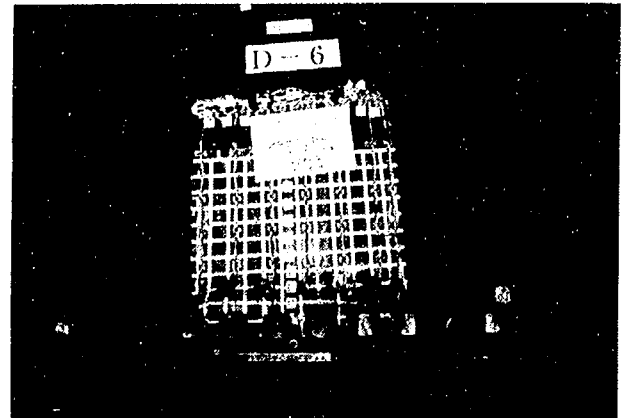
Flange (L)



Flange (L)



Upper Web

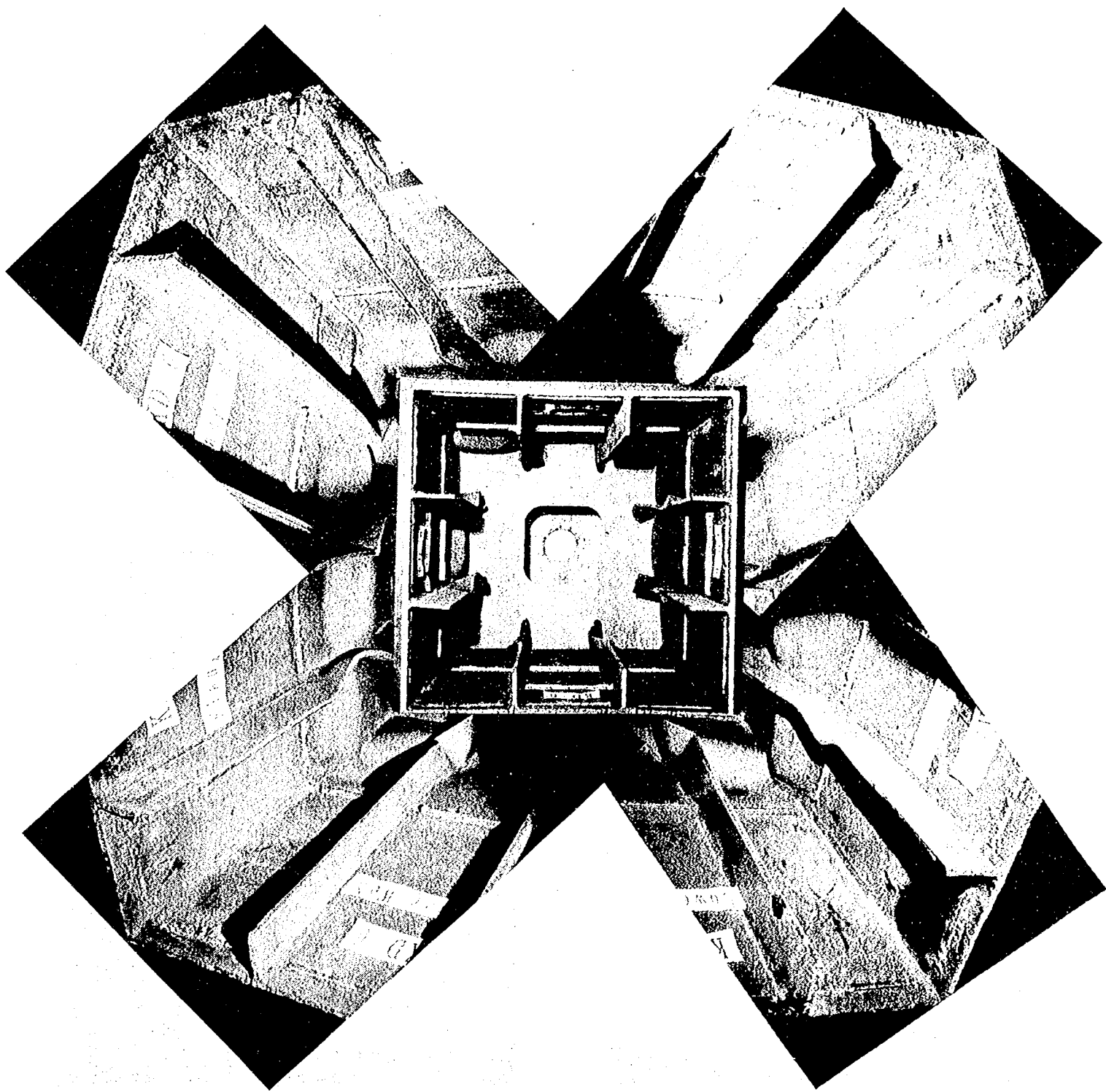


Upper Web

(i) 最大荷重を越えた付近 ($+6\delta_{y0}$)

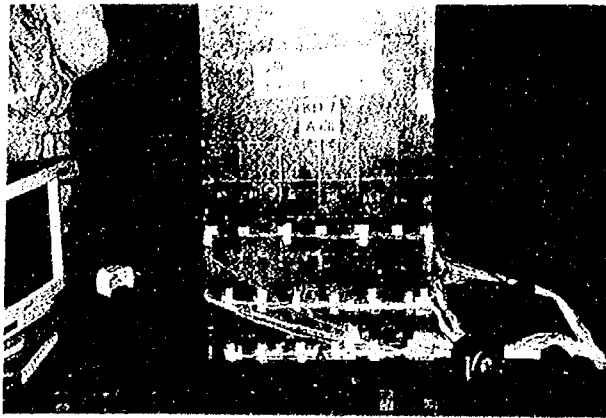
(ii) 実験終了時付近 ($+9\delta_{y0}$)

写真-3.1.1(6) KD-6 供試体の変形状況

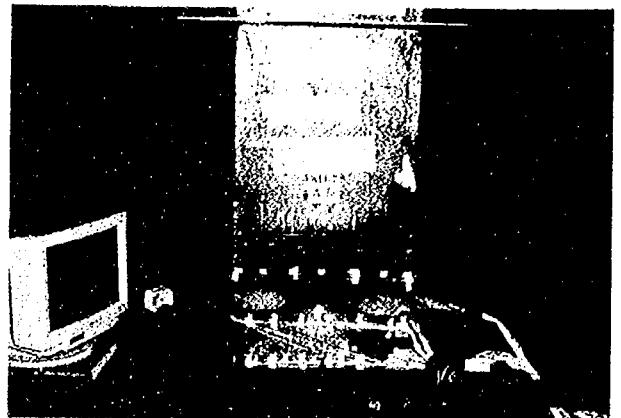


実験終了時（内面）

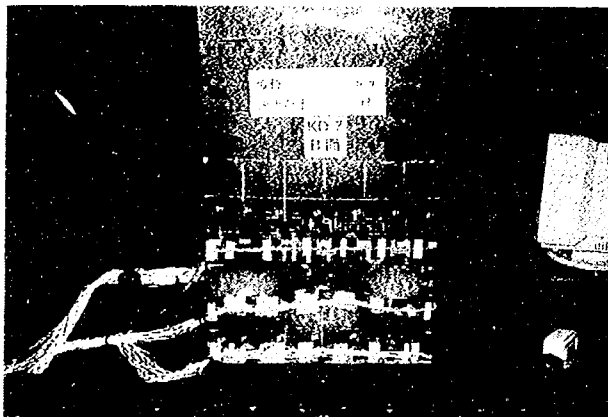
写真-3.1.1(6) KD-6 供試体の変形状況（つづき）



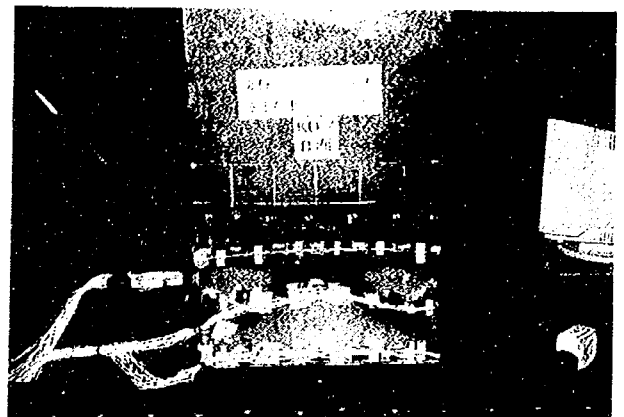
Flange (R)



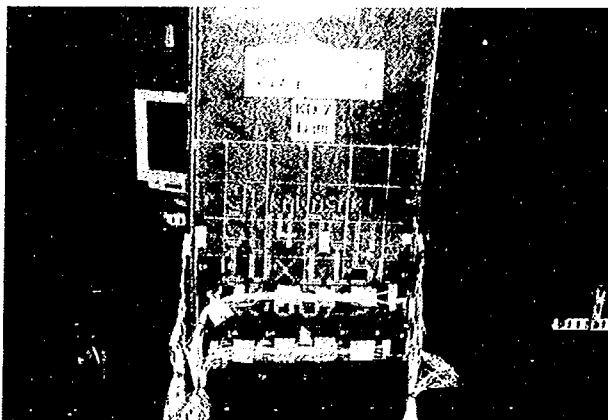
Flange (R)



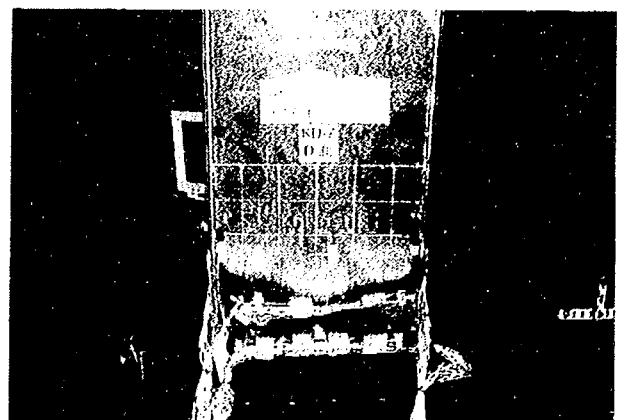
Flange (L)



Flange (L)



Upper Web

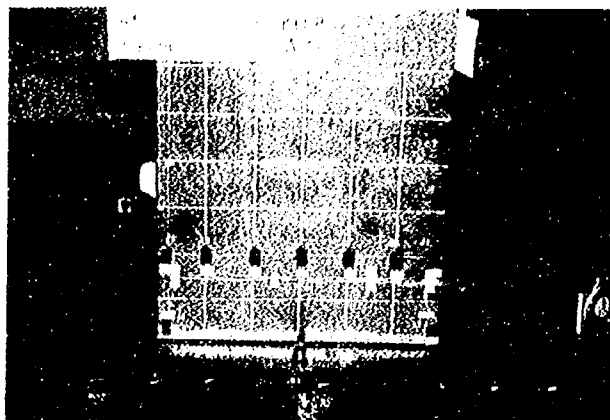


Upper Web

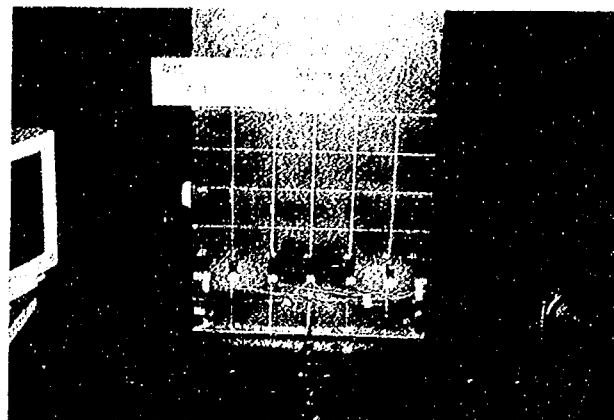
(i) 最大荷重を越えた付近 ($+8\delta_{y0}$)

(ii) 実験終了時付近 ($+11\delta_{y0}$)

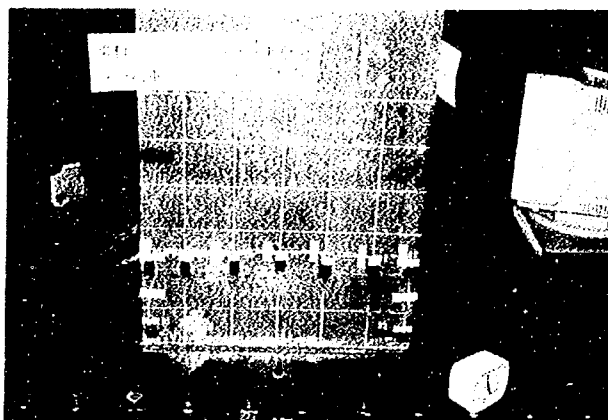
写真-3.1.1(7) KD-7_1 供試体の変形状況



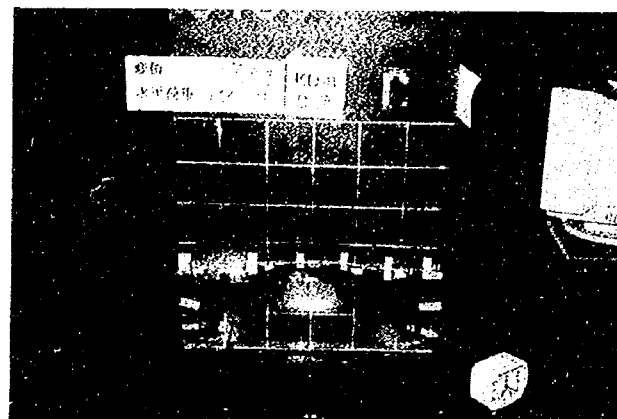
Flange (R)



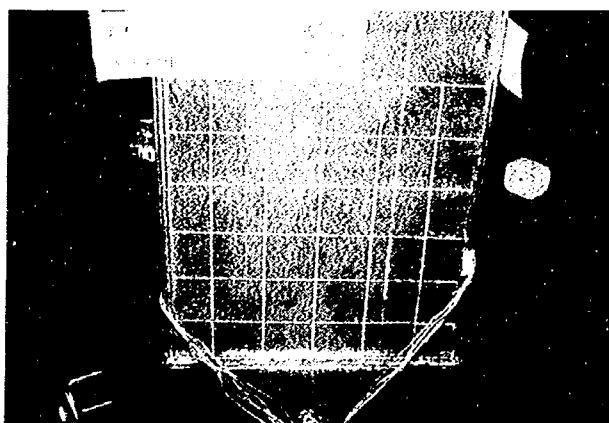
Flange (R)



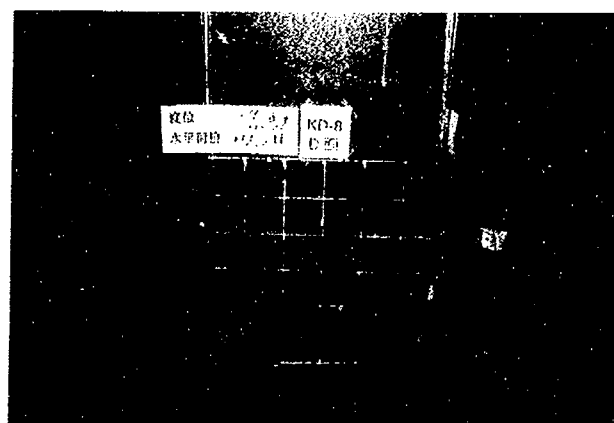
Flange (L)



Flange (L)



Upper Web

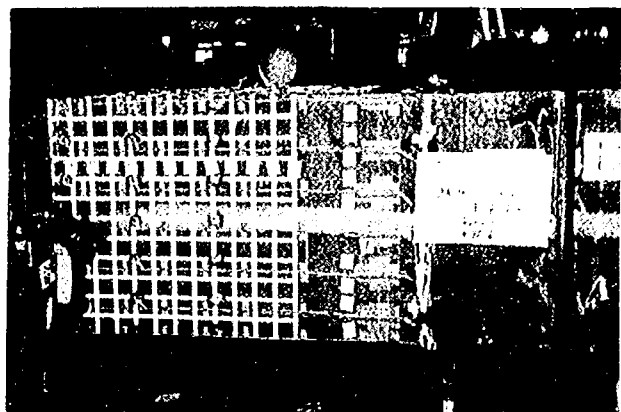


Upper Web

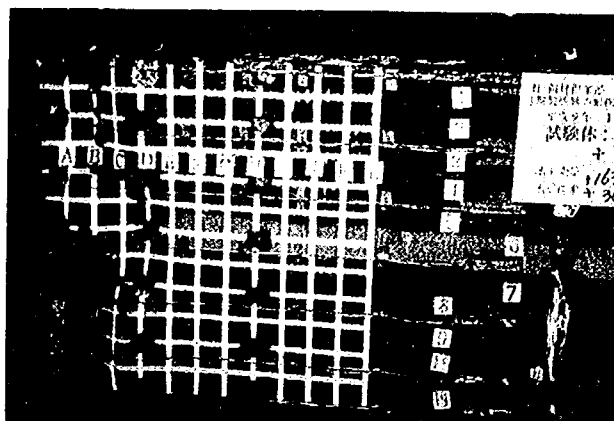
(i) 最大荷重を越えた付近 ($+58\delta_{y0}$)

(ii) 実験終了時付近 ($+78\delta_{y0}$)

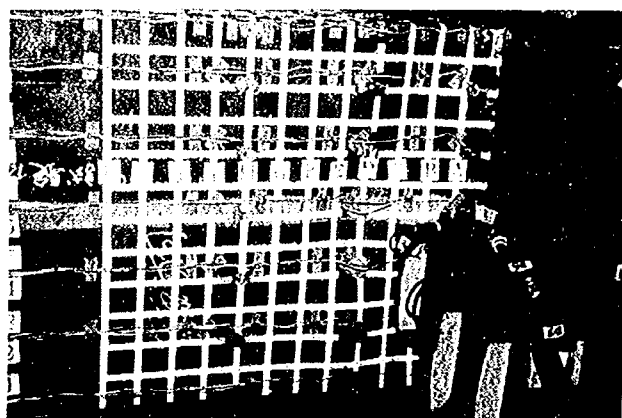
写真-3.1.1(8) KD-7_3 供試体の変形状況



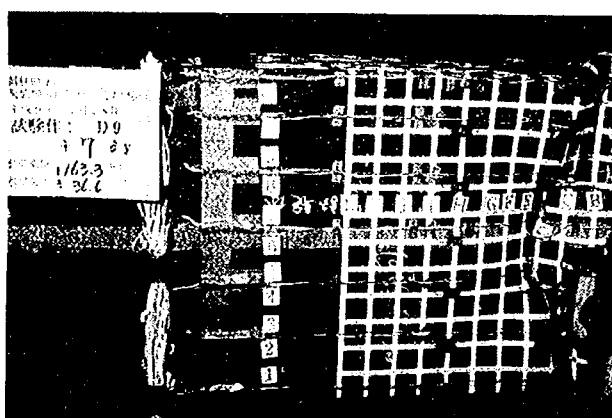
Flange (R)



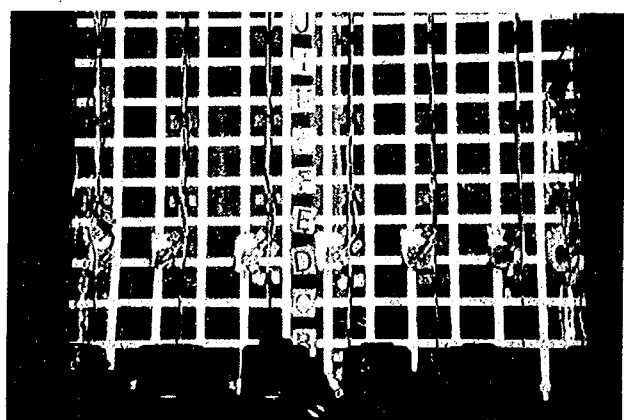
Flange (R)



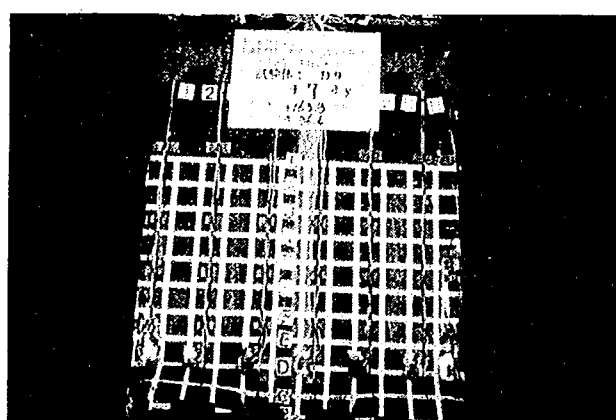
Flange (L)



Flange (L)



Upper Web

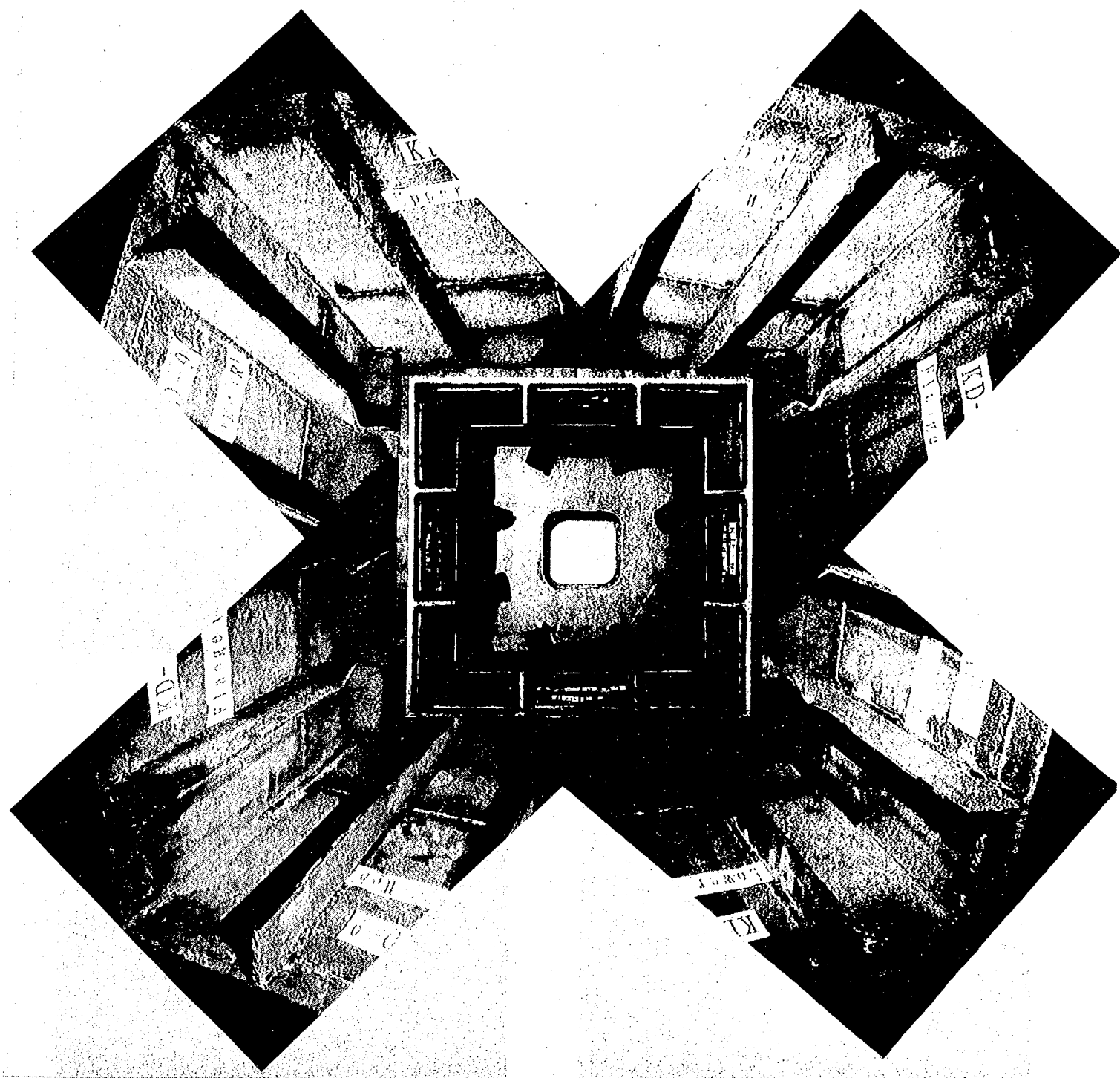


Upper Web

(i) 最大荷重を越えた付近 ($+48\delta_{y0}$)

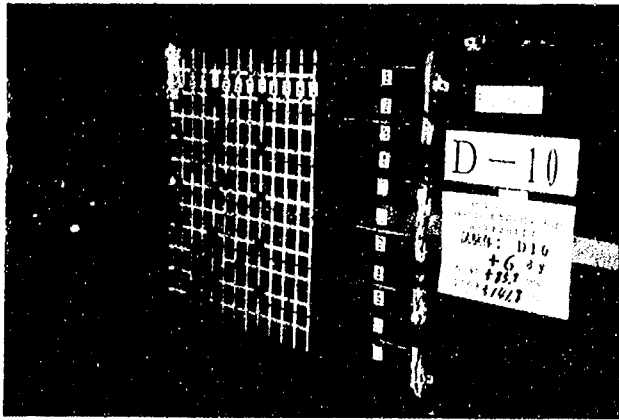
(ii) 実験終了時付近 ($+78\delta_{y0}$)

写真-3.1.1(9) KD-9 供試体の変形状況

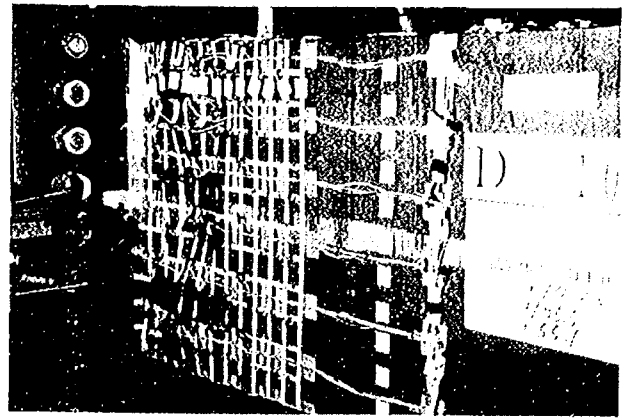


実験終了時（内面）

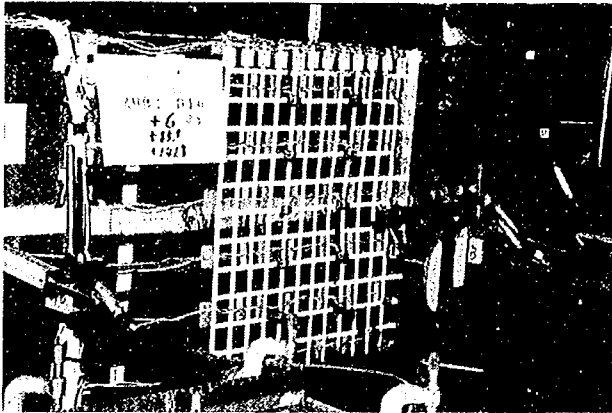
写真-3.1.1(9) KD-9 供試体の変形状況（つづき）



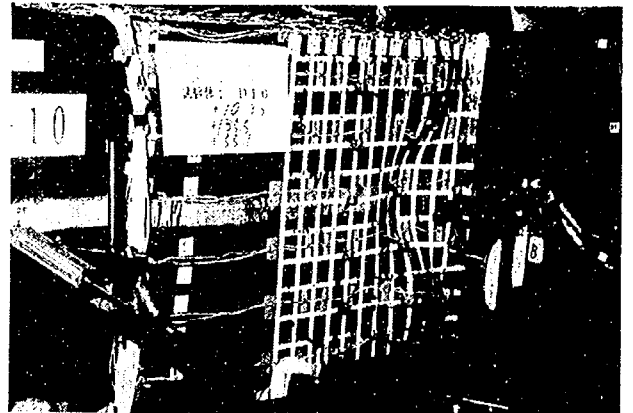
Flange (R)



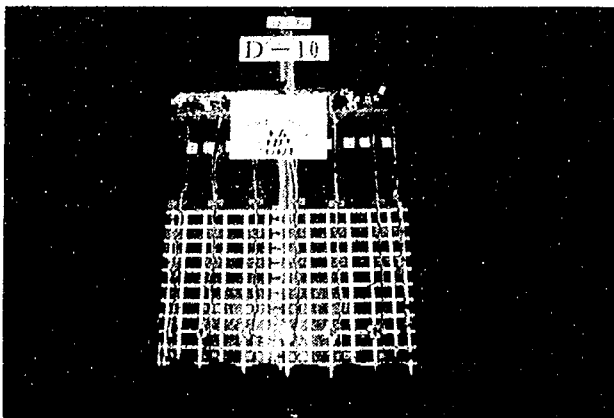
Flange (R)



Flange (L)

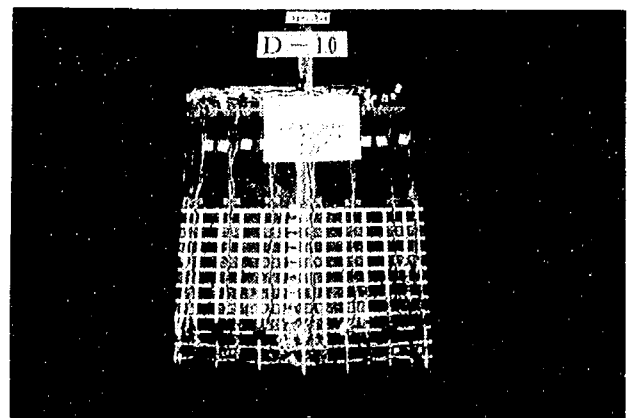


Flange (L)



Upper Web

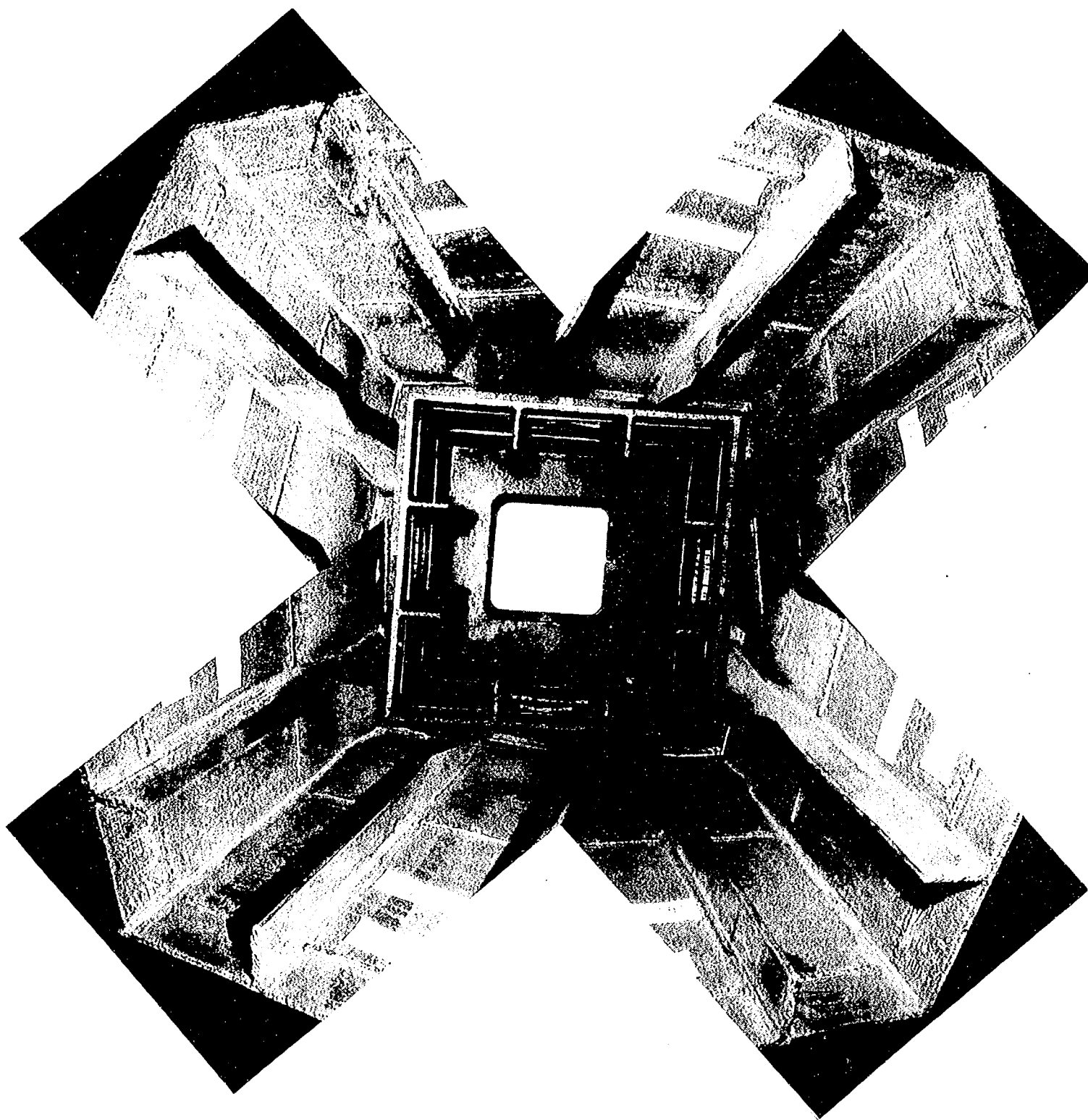
(i) 最大荷重を越えた付近 ($+6\delta_{y0}$)



Upper Web

(ii) 実験終了時付近 ($+10\delta_{y0}$)

写真-3.1.1(10) KD-10 供試体の変形状況



実験終了時（内面）

写真-3.1.1(10) KD-10 供試体の変形状況（つづき）

3.2 円形断面

表-3.2.1 円形断面・実験結果一覧

円形断面 供試体	外形寸法 2R (mm)	板厚 t (mm)	横リブ間隔 a (mm)	鋼種	降伏点 σ_y (kgf/cm ²)	断面積 A (cm ²)	断面2次モーメント I (cm ⁴)	断面2次半径 r (cm)	有効長 l(=2h) (cm)	細長比 λ	径厚比 R/t	径厚比 パラメータ R _t	軸力 N (tf)	軸力比 N/N _{yN}	軸力比 N/N _{yM}
KC-1	600	18.6	なし	SS400	2,816	339.7	143,695	20.6	660.6	0.374	16.1	0.035	90.7	0.111	0.095
KC-2_1	850	13	なし	SM490Y	4,392	341.8	299,422	29.6	660.6	0.325	32.7	0.111	219	0.178	0.146
KC-2_3	850	13	なし	SM490A	3,734	341.8	299,422	29.6	660.6	0.300	32.7	0.095	219	0.200	0.171
KC-3	850	13	なし	SM570Q	6,234	341.8	299,422	29.6	660.6	0.387	32.7	0.158	236	0.150	0.111

表-3.2.1 円形断面・実験結果一覧 (つづき)

供試体	P _{yN} (tf)	P _{yM} (tf)	P _u (tf)	P _u /P _{yM}	(δ_{yEM}) (mm)	δ_{yEN} (mm)	(δ_{yTN}) (mm)	δ_m (mm)	δ_{97} (mm)	δ_{95} (mm)	δ_{lim} (mm)	δ_u (mm)	$\mu_m =$ δ_m/δ_{yEN}	$\mu_{97} =$ δ_{97}/δ_{yEN}	$\mu_{95} =$ δ_{95}/δ_{yEN}	$\mu_{lim} =$ $\delta_{lim}/\delta_{yEN}$	$\mu_u =$ δ_u/δ_{yEN}
KC-1	33.3	37.0	67.1	1.81	19.3	17.4	12.3	102	174	180	171	>198	5.86	10.0	10.4	9.82	>11.4
KC-2_1	63.1	80.0	100	1.25	19.9	15.7	12.1	43.9	48.5	51.5	43.9	62.3	2.80	3.09	3.28	2.80	3.97
KC-2_3	54.6	66.0	95.4	1.45	18.4	15.2	10.4	44.2	49.5	53.1	44.2	63.3	2.90	3.25	3.48	2.90	4.15
KC-3	83.4	118	148	1.25	34.2	24.1	15.9	52.1	61.4	66.0	68.1	77.9	2.16	2.54	2.73	2.82	3.23

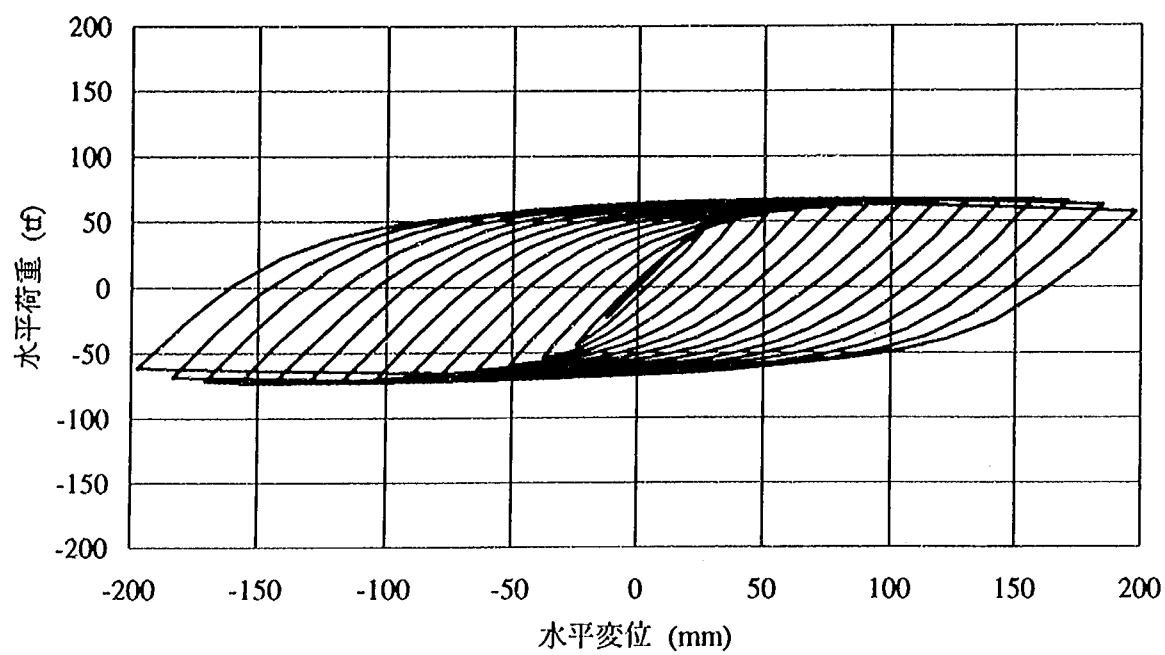


図-3.2.1(1) 水平荷重—水平変位関係 (KC-1)

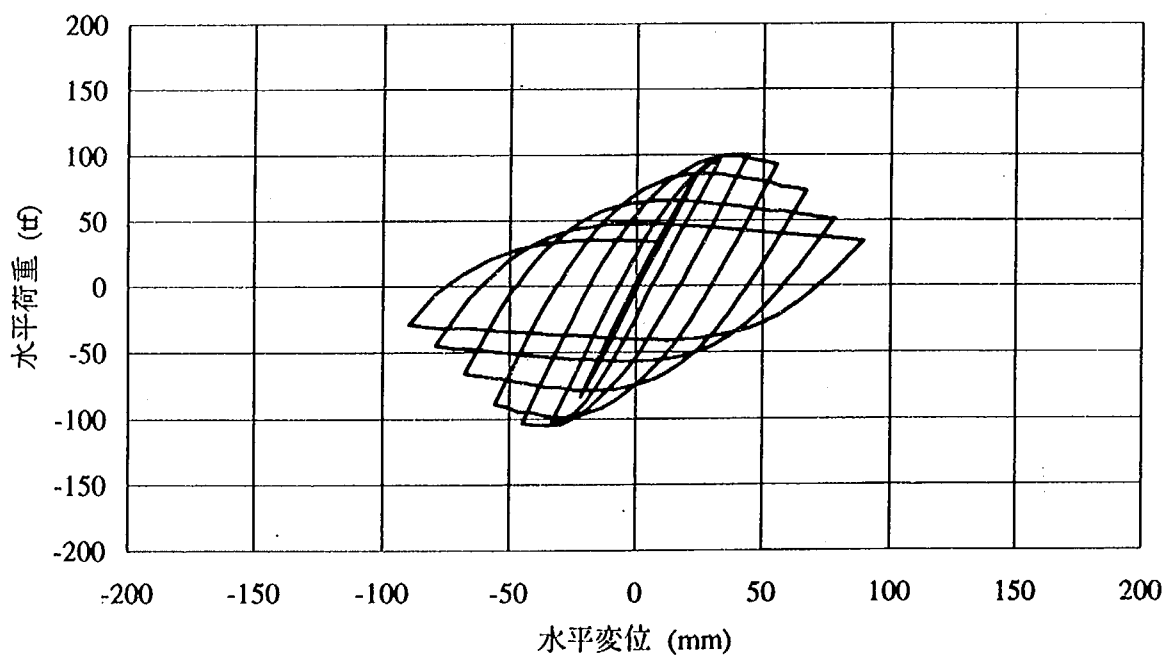


図-3.2.1(2) 水平荷重—水平変位関係 (KC-2_1)

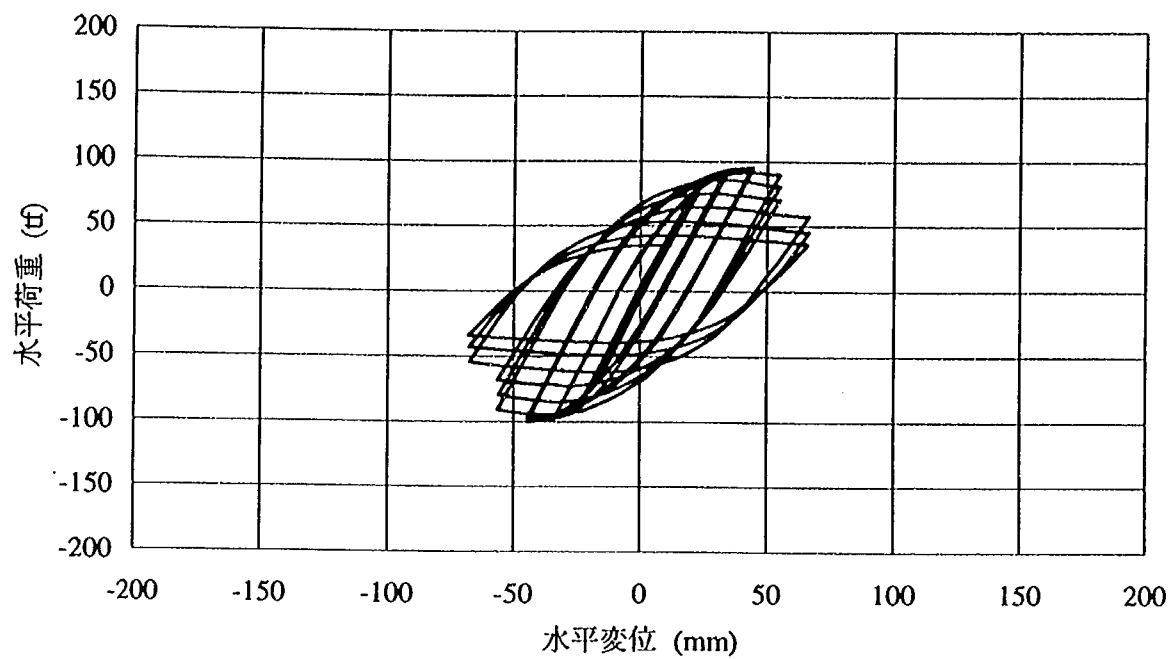


図-3.2.1(3) 水平荷重—水平変位関係 (KC-2_3)

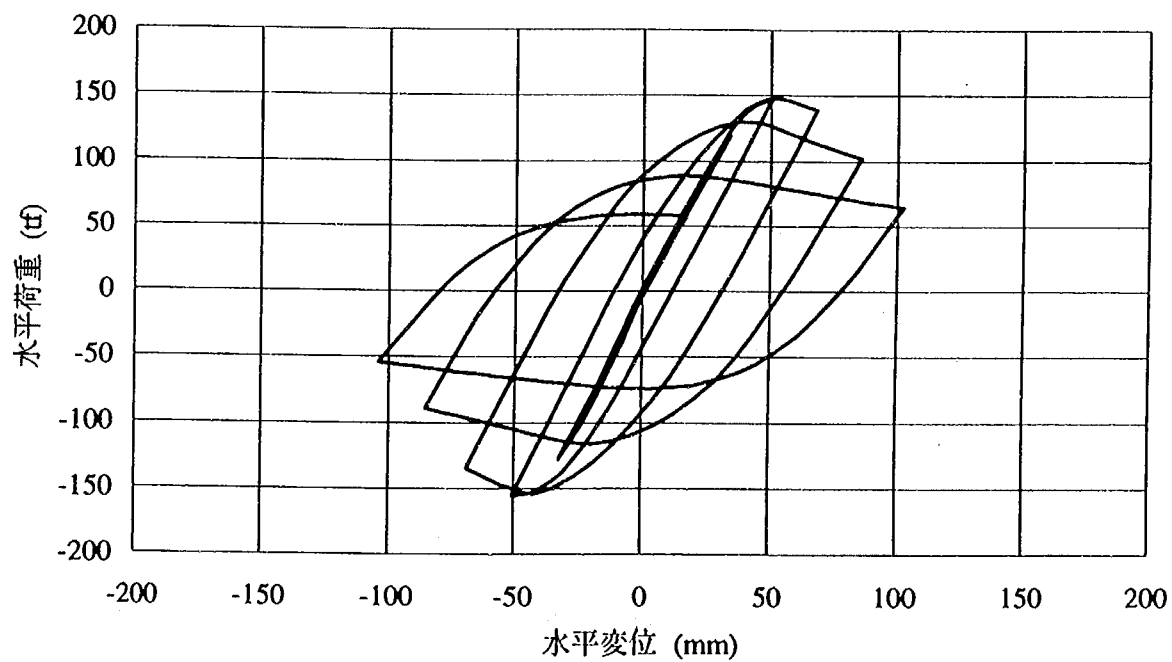


図-3.2.1(4) 水平荷重—水平変位関係 (KC-3)

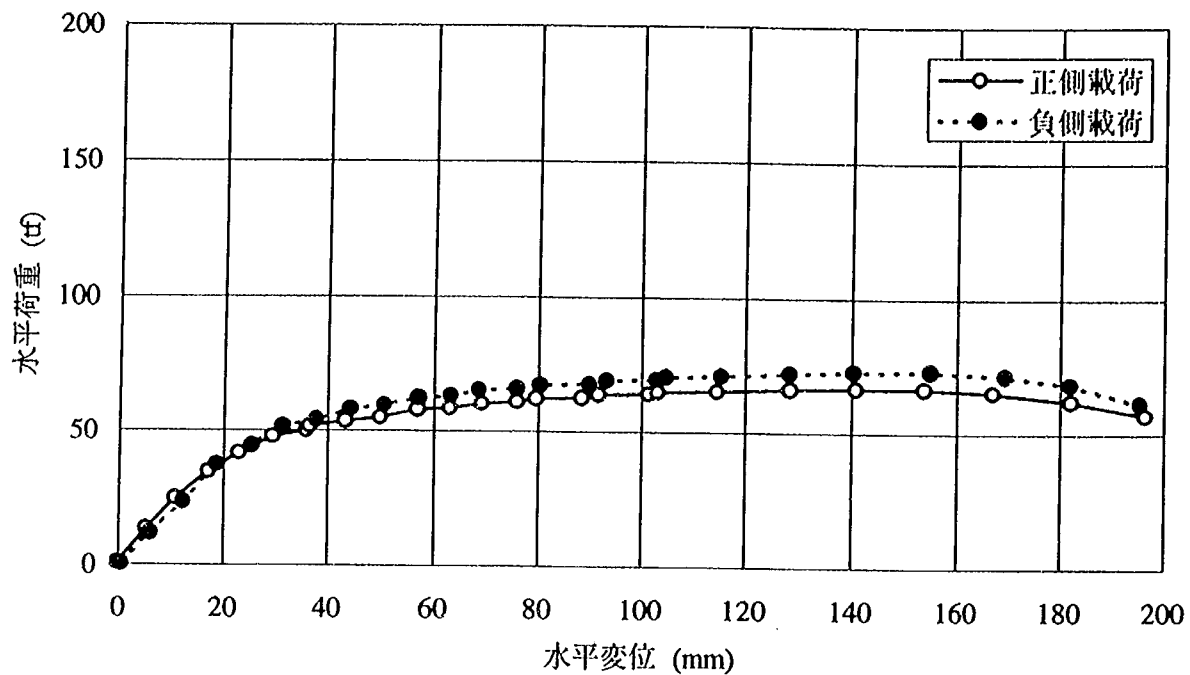


図-3.2.2(1) 水平荷重—水平変位関係の包絡線 (KC-1)

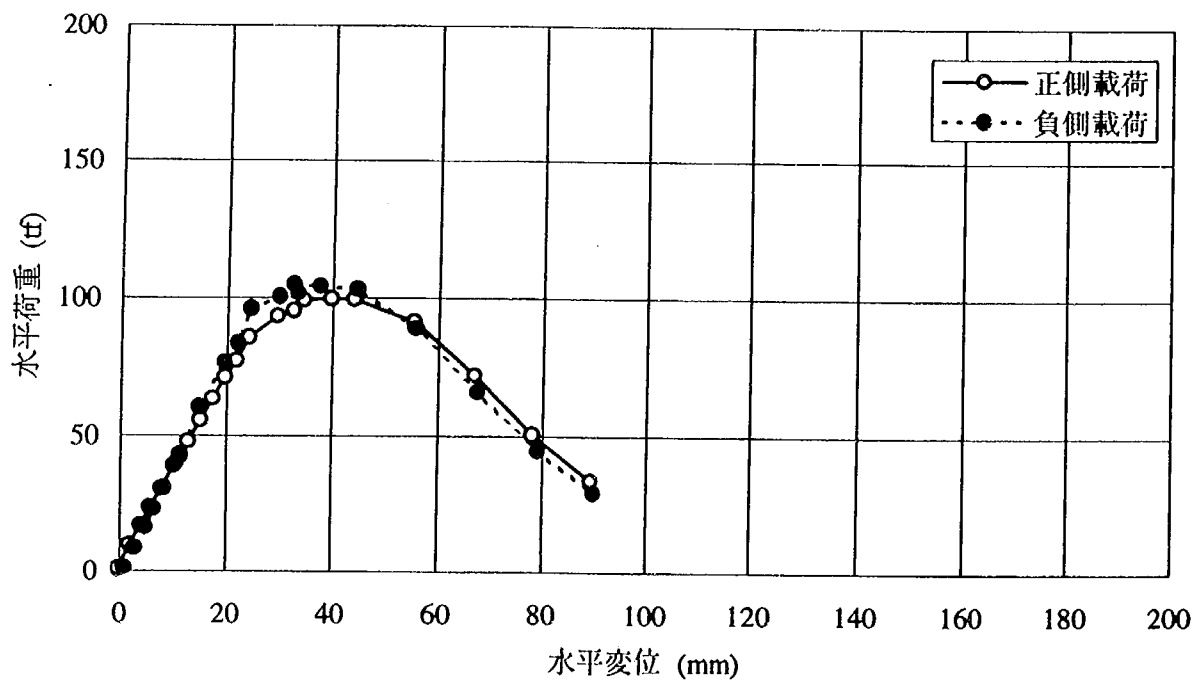


図-3.2.2(2) 水平荷重—水平変位関係の包絡線 (KC-2_1)

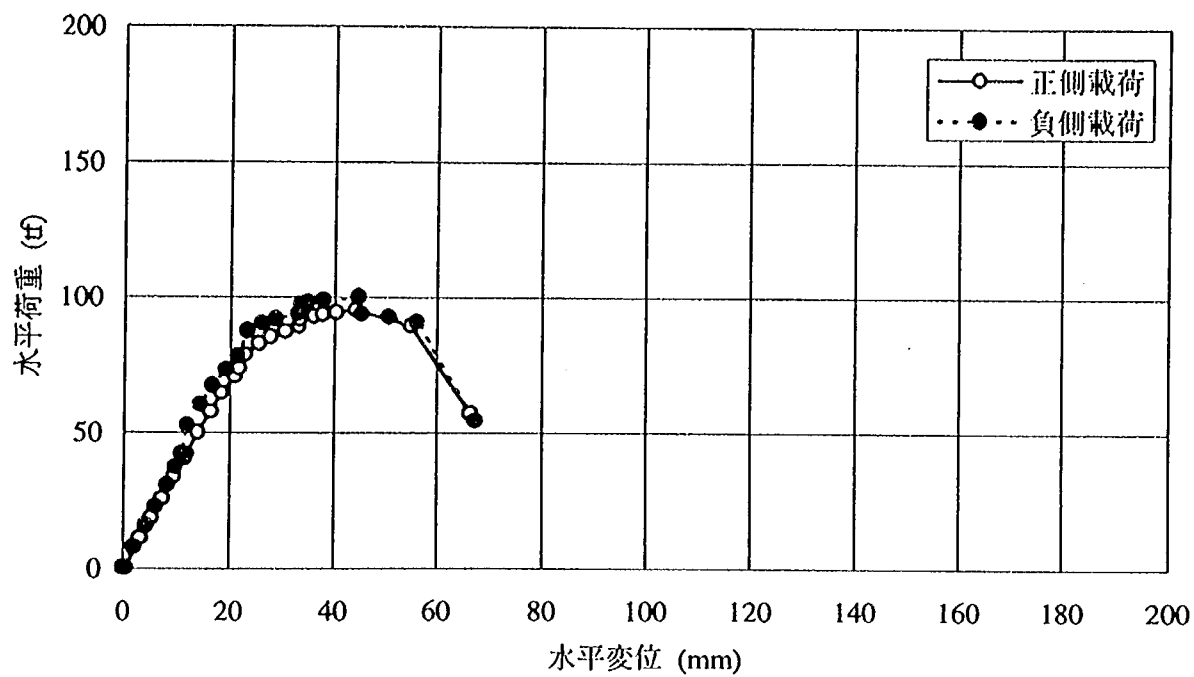


図-3.2.2(3) 水平荷重—水平変位関係の包絡線 (KC-2_3)

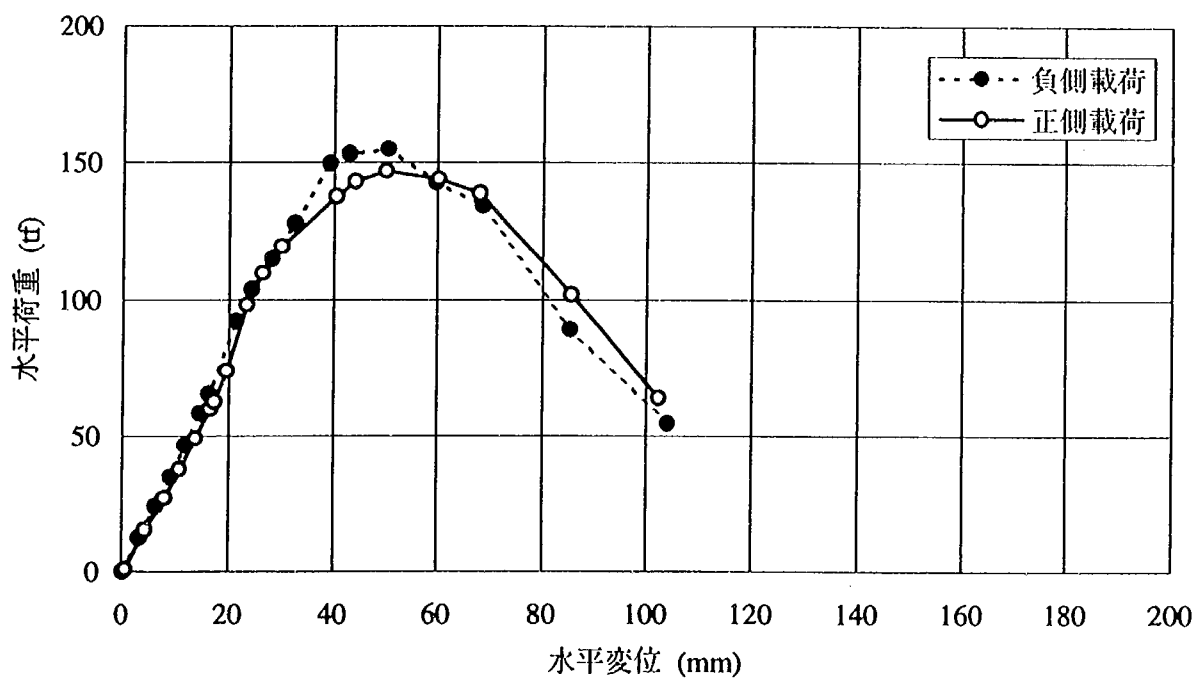
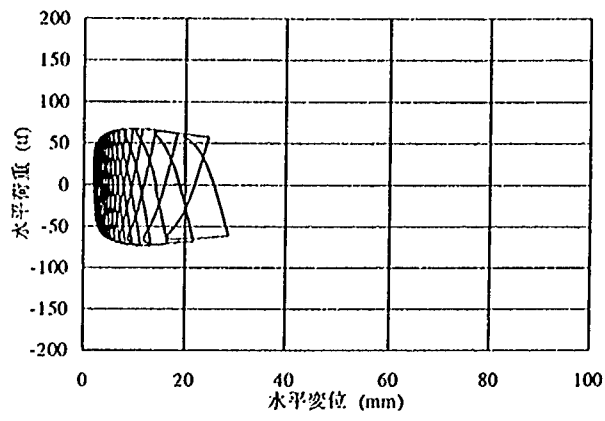
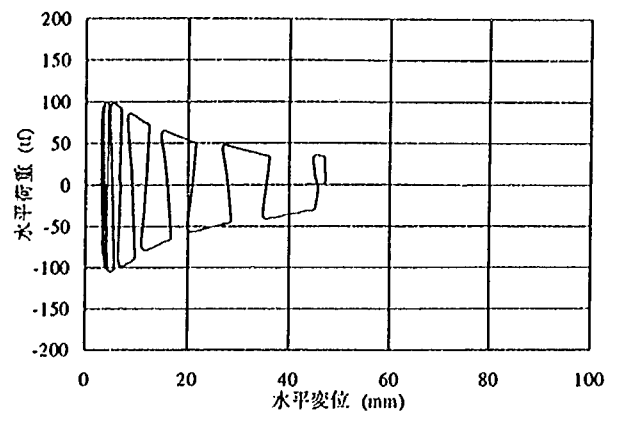


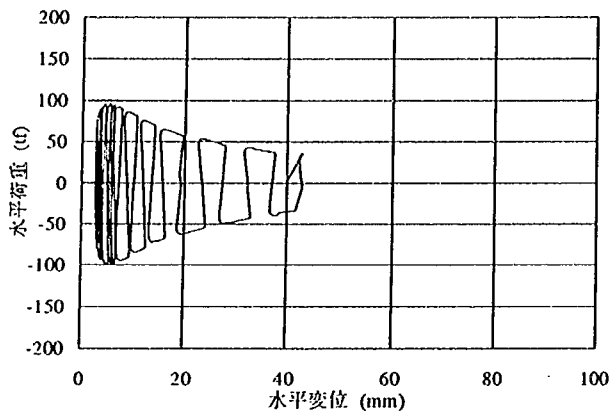
図-3.2.2(4) 水平荷重—水平変位関係の包絡線 (KC-3)



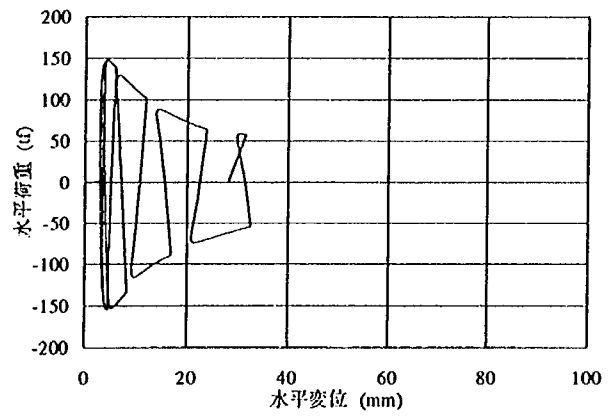
(1) KC-1



(2) KC-2_1

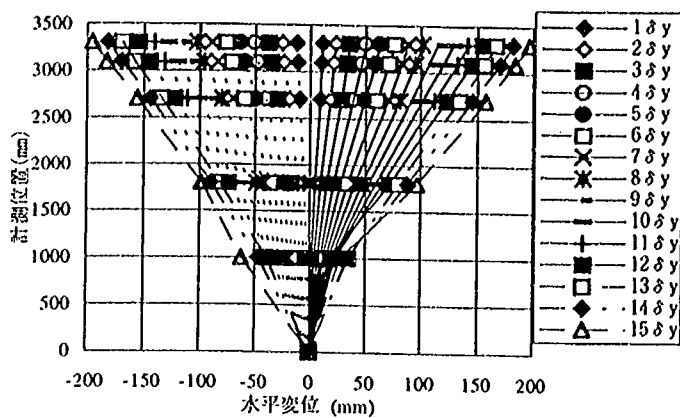


(3) KC-2_3

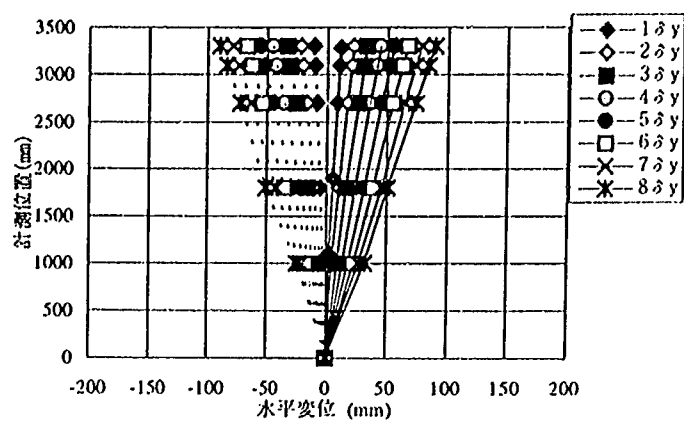


(4) KC-3

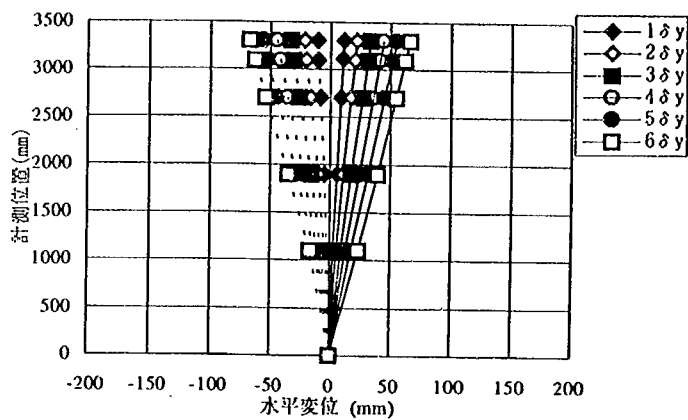
図-3.2.3 水平荷重—鉛直変位関係



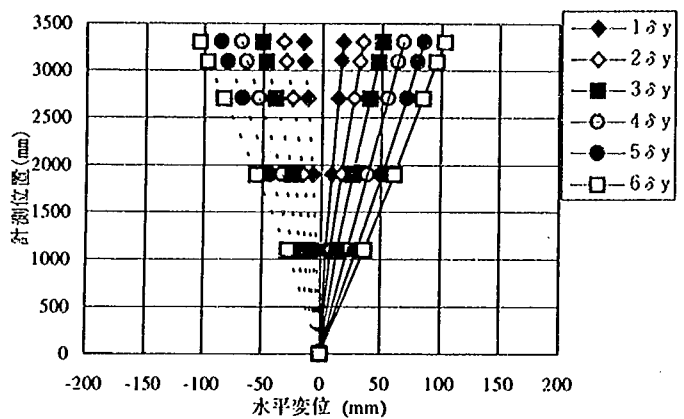
(1) KC-1



(2) KC-2_1

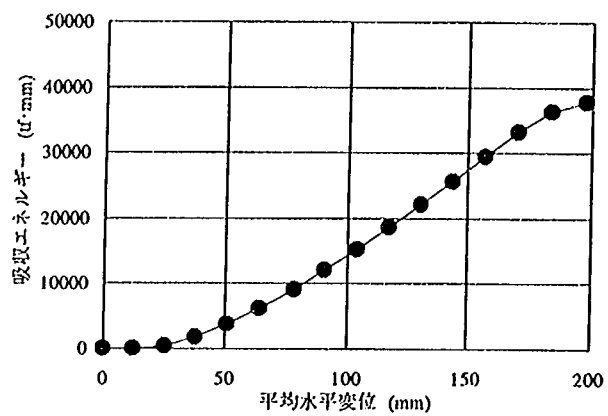


(3) KC-2_3

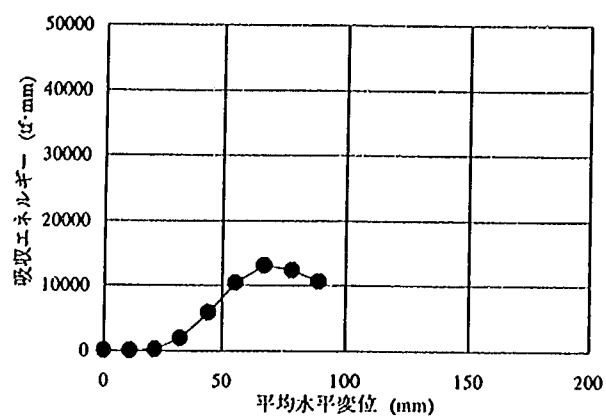


(4) KC-3

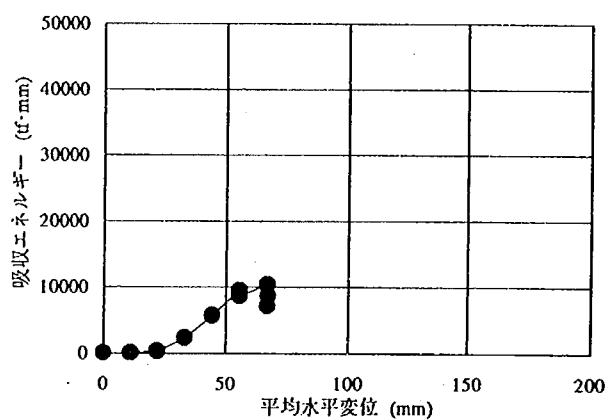
図-3.2.4 水平変位の鉛直方向分布



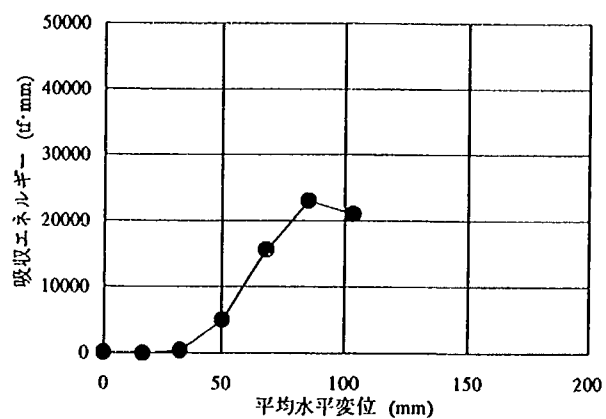
(1) KC-1



(2) KC-2_1

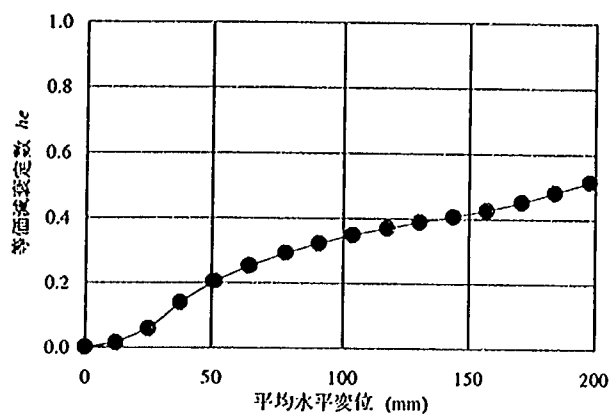


(3) KC-2_3

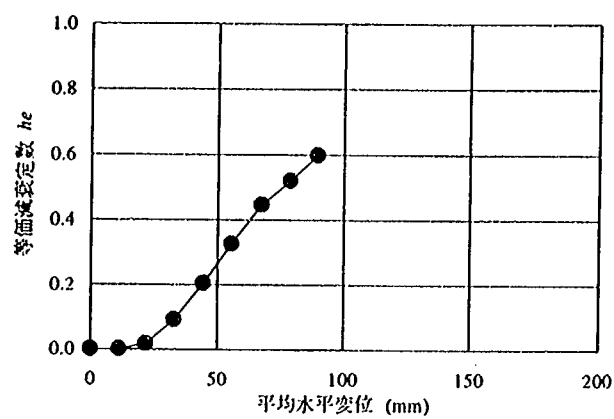


(4) KC-3

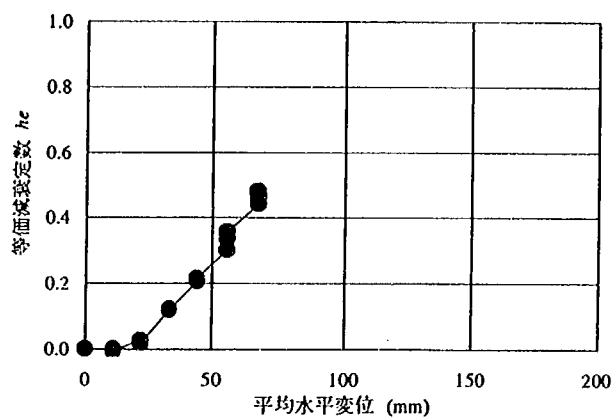
図-3.2.5 エネルギー吸収量



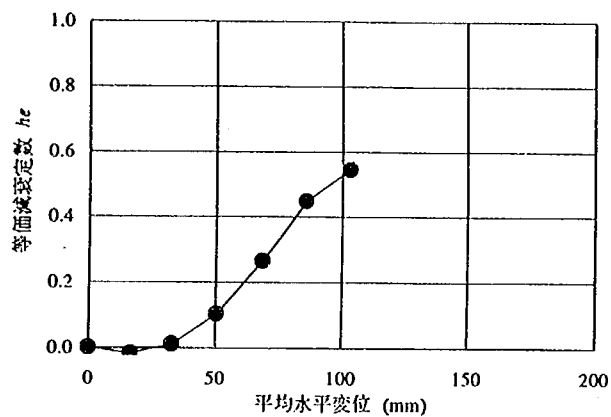
(1) KC-1



(2) KC-2_1

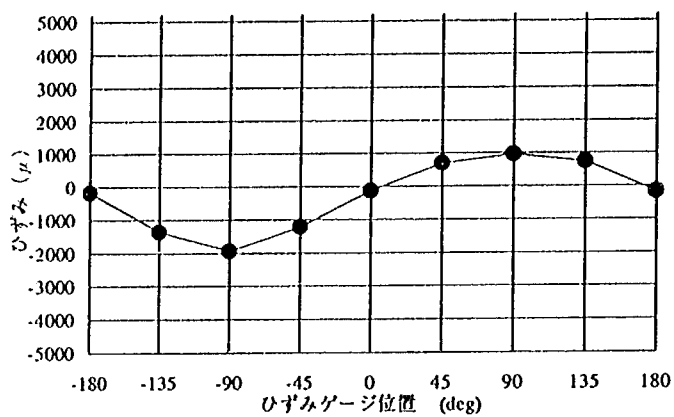


(3) KC-2_3

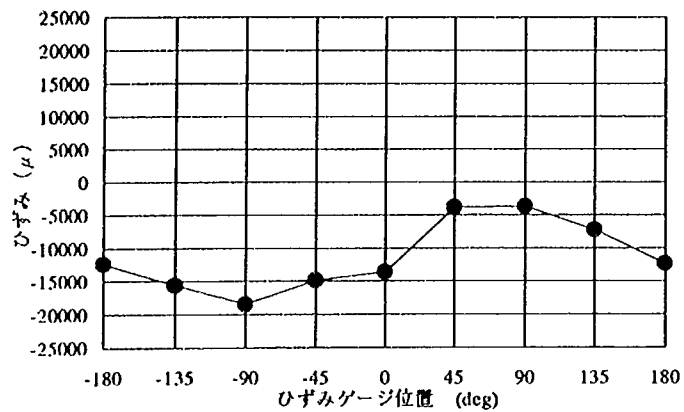


(4) KC-3

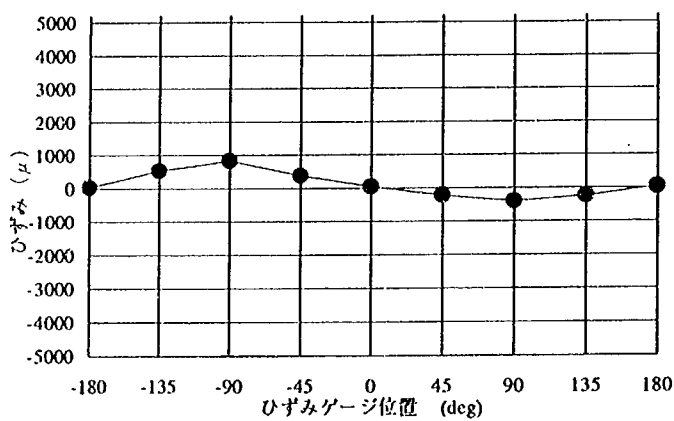
图-3.2.6 等価減衰定数



(a) 軸方向

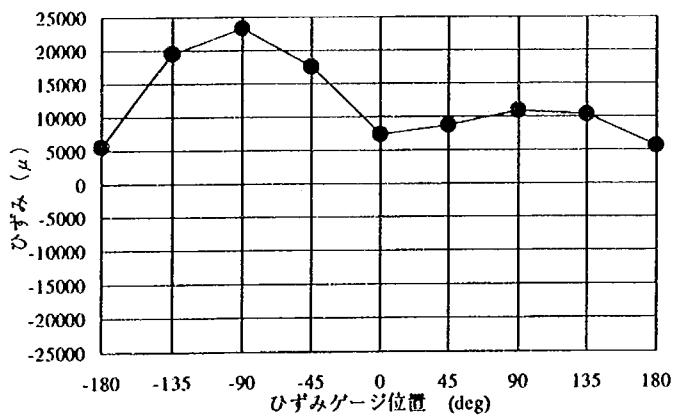


(a) 軸方向



(b) 周方向

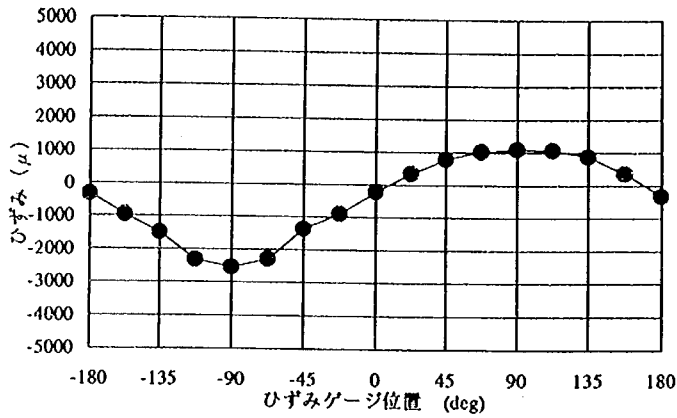
(i) 降伏時



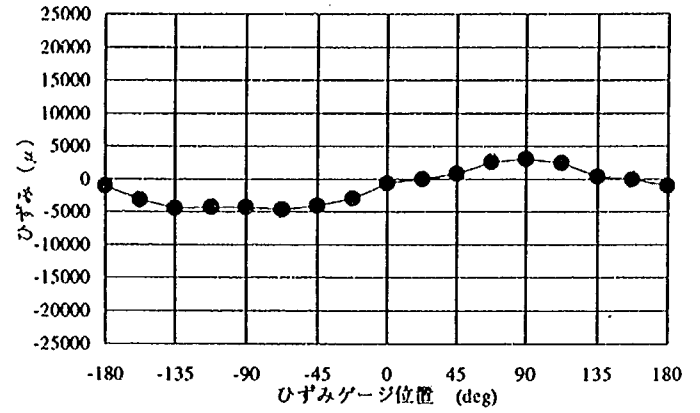
(b) 周方向

(ii) 最大荷重時

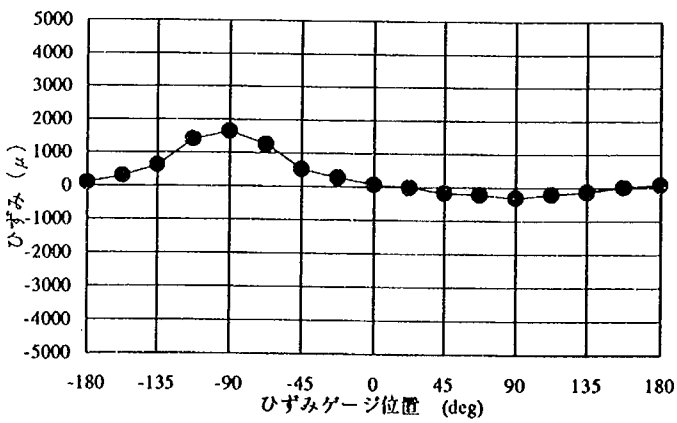
図-3.2.7(1) ひずみ分布 (KC-1)



(a) 軸方向

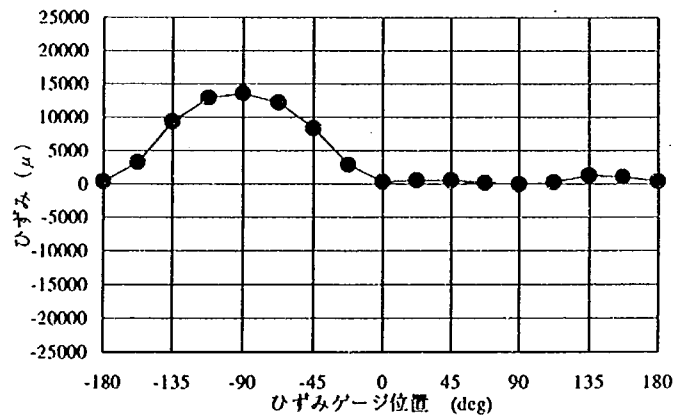


(a) 軸方向



(b) 周方向

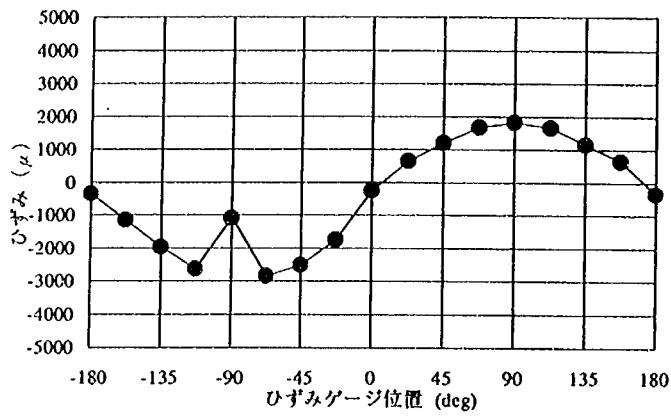
(i) 降伏時



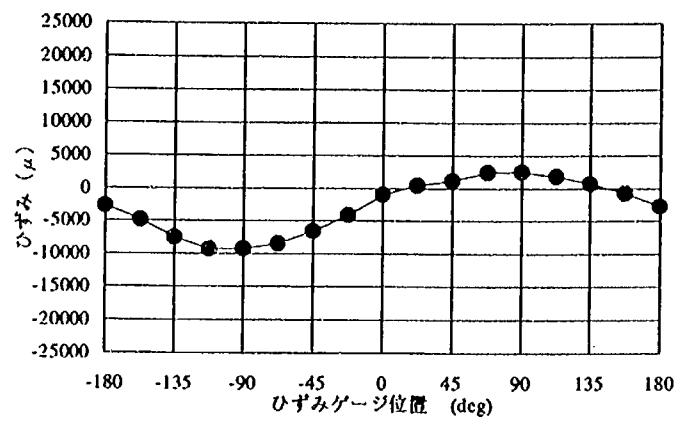
(b) 周方向

(ii) 最大荷重時

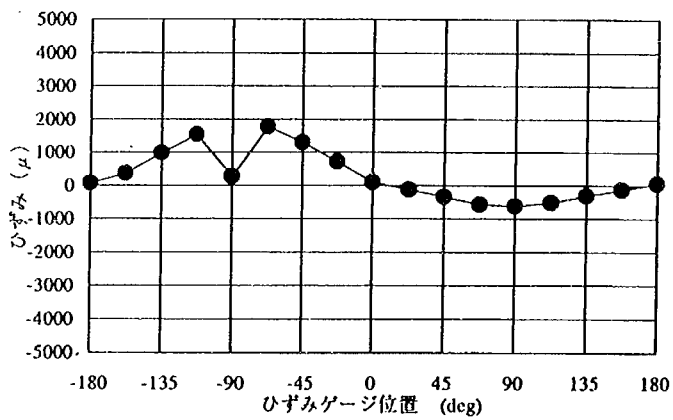
図-3.2.7(2) ひずみ分布 (KC-2.1)



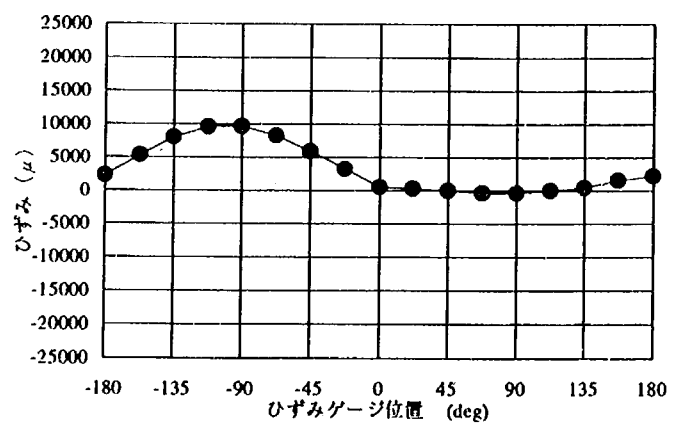
(a) 軸方向



(a) 軸方向



(b) 周方向

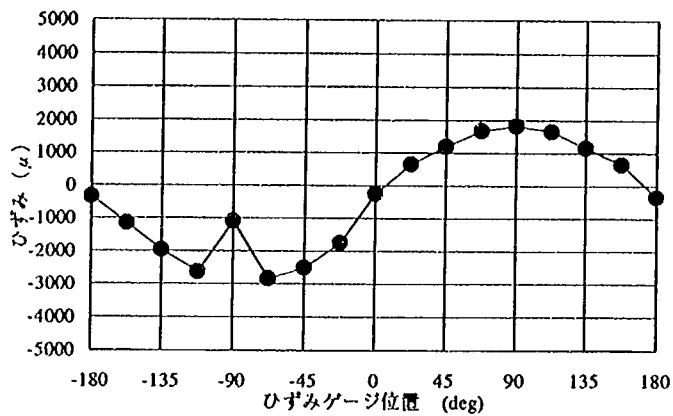


(b) 周方向

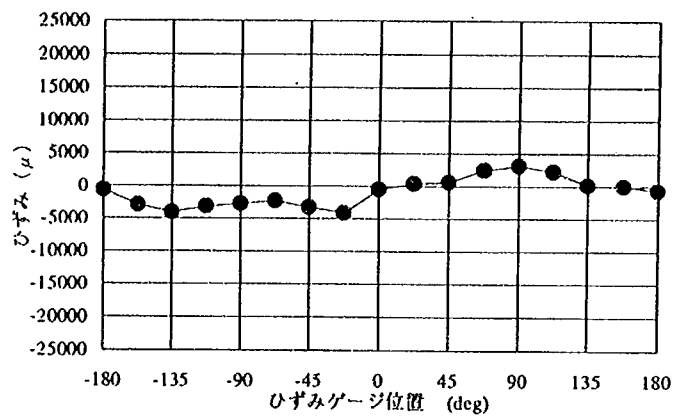
(i) 降伏時

(ii) 最大荷重時

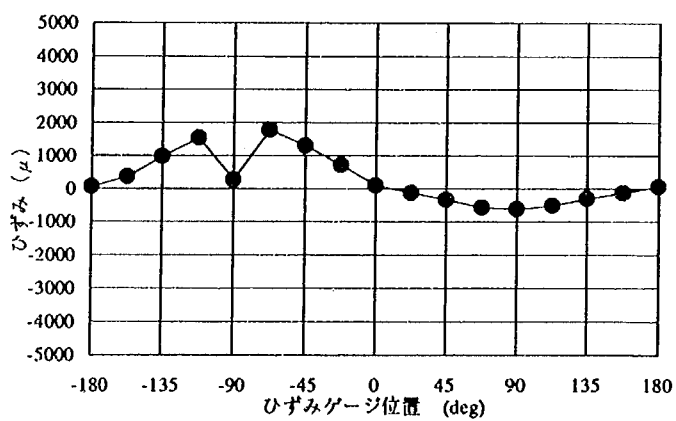
図-3.2.7(3) ひずみ分布 (KC-2,3)



(a) 軸方向

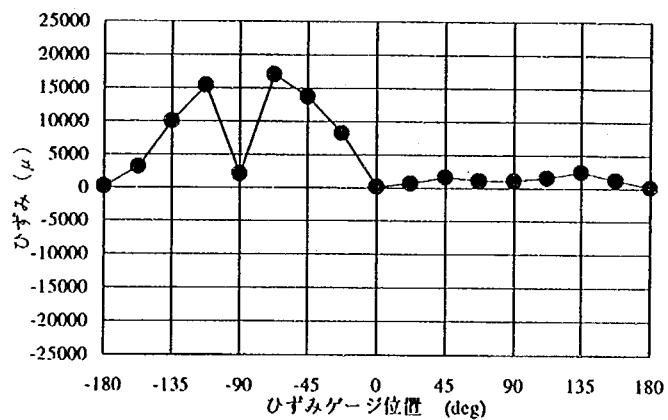


(a) 軸方向



(b) 周方向

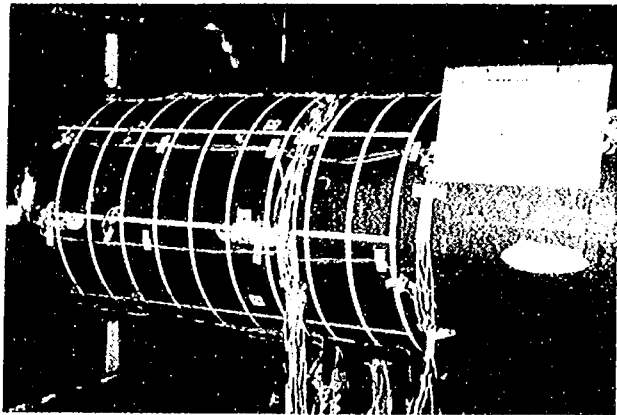
(i) 降伏時



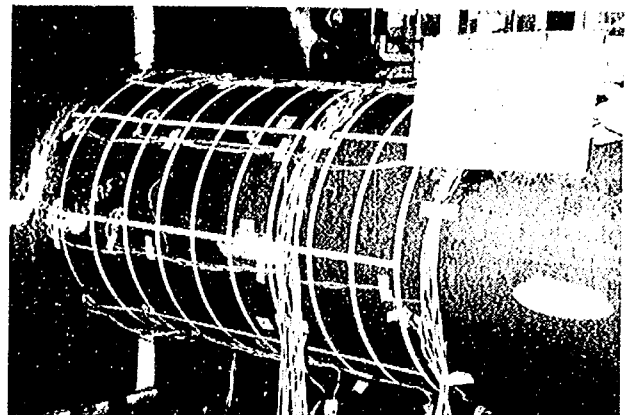
(b) 周方向

(ii) 最大荷重時

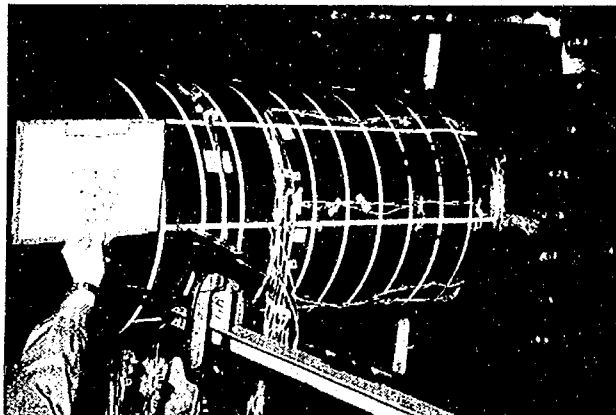
図-3.2.7(4) ひずみ分布 (KC-3)



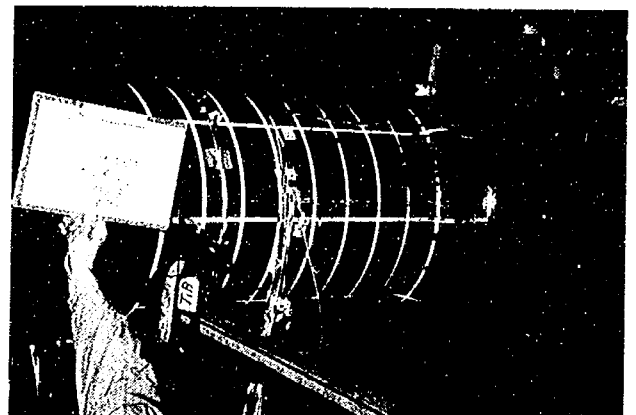
Right Side



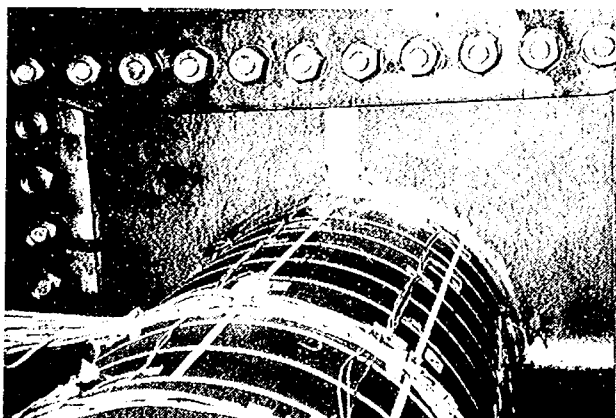
Right Side



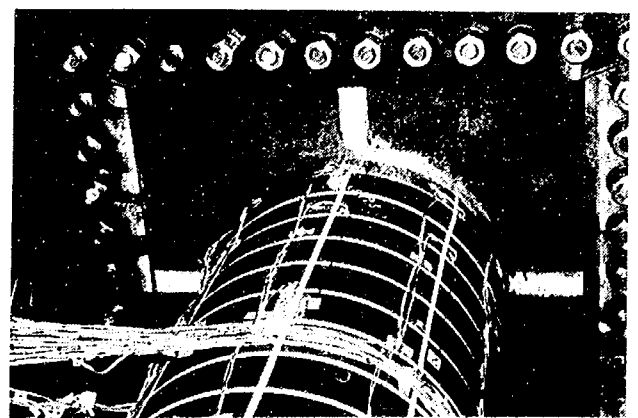
Left Side



Left Side



Upper Side

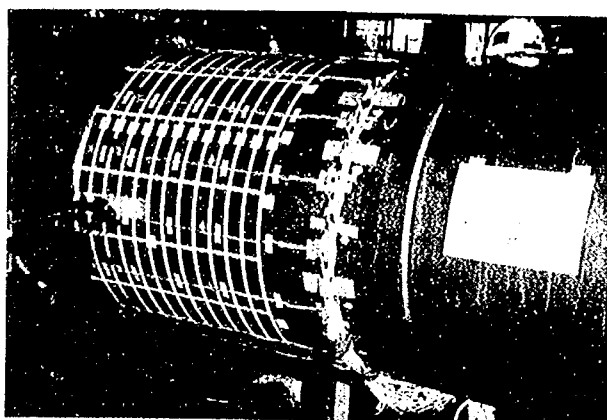


Upper Side

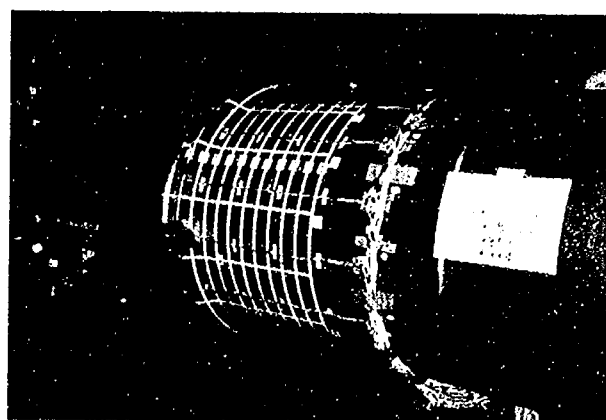
(i) 最大荷重を越えた付近 ($+12\delta_{y0}$)

(ii) 実験終了時付近 ($+15\delta_{y0}$)

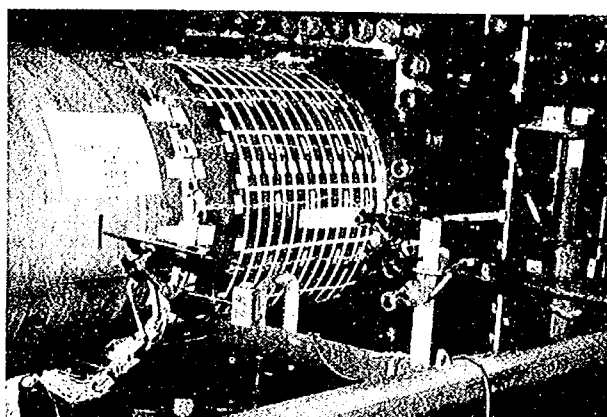
写真-3.2.1(1) KC-1 供試体の変形状況



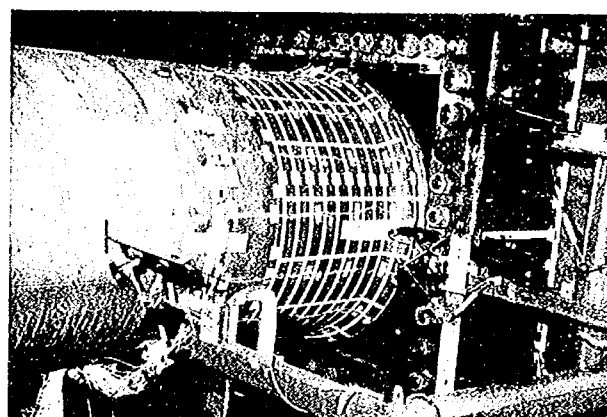
Right Side



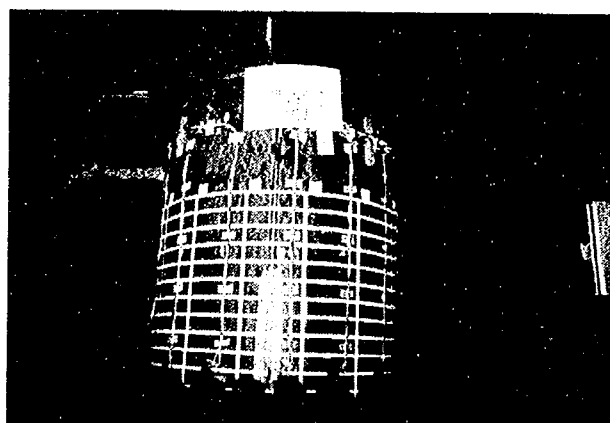
Right Side



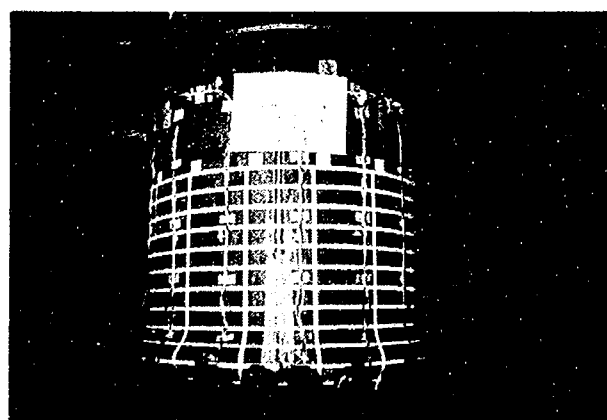
Left Side



Left Side



Upper Side

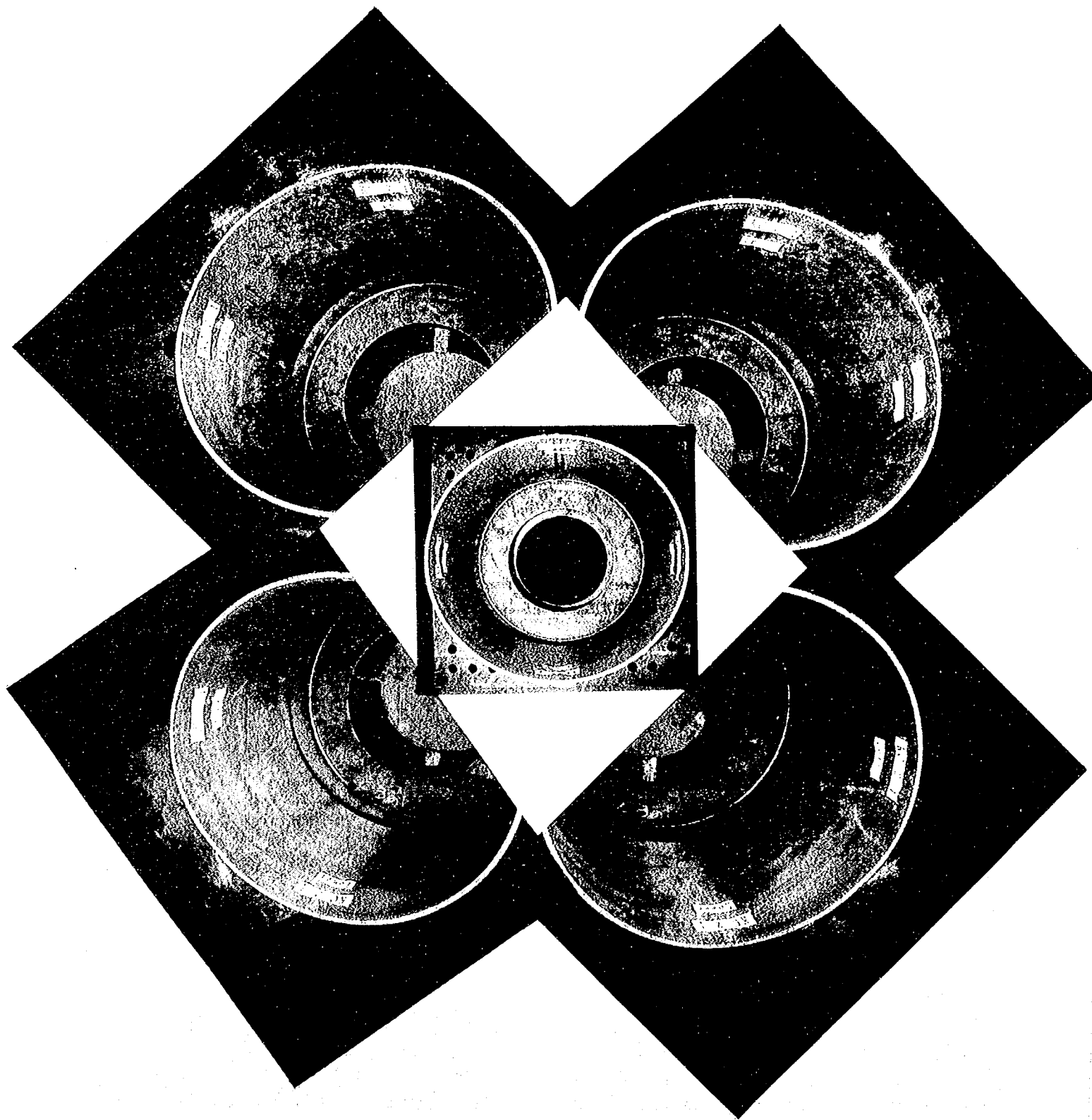


Upper Side

(i) 最大荷重を越えた付近 ($+48\delta_{y0}$)

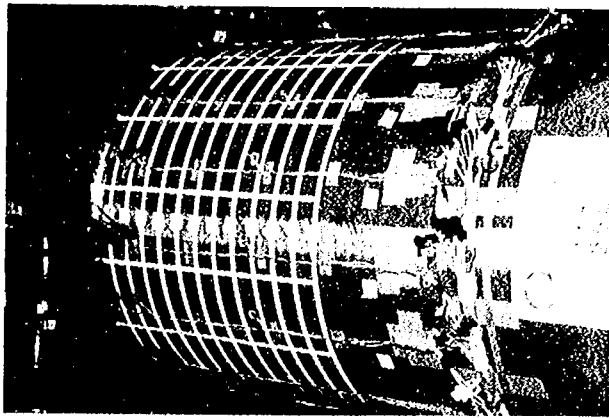
(ii) 実験終了時付近 ($+88\delta_{y0}$)

写真-3.2.1(2) KC-2_1 供試体の変形状況

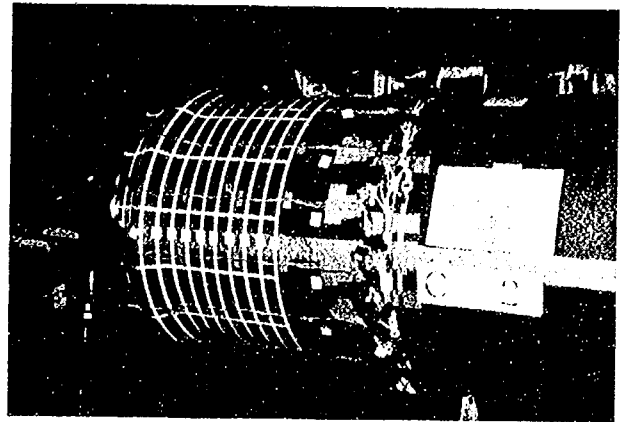


実験終了時（内面）

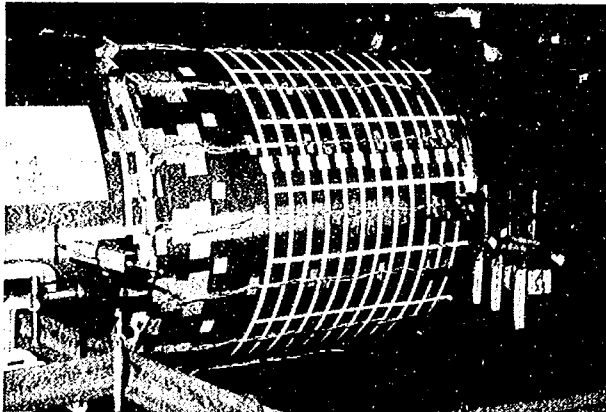
写真-3.2.1(2) KC-2_1 供試体の変形状況（つづき）



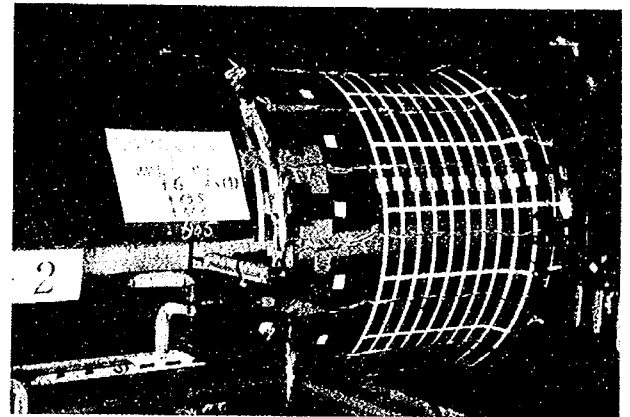
Right Side



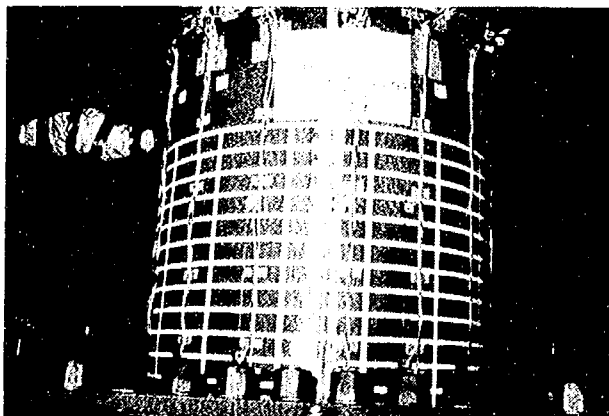
Right Side



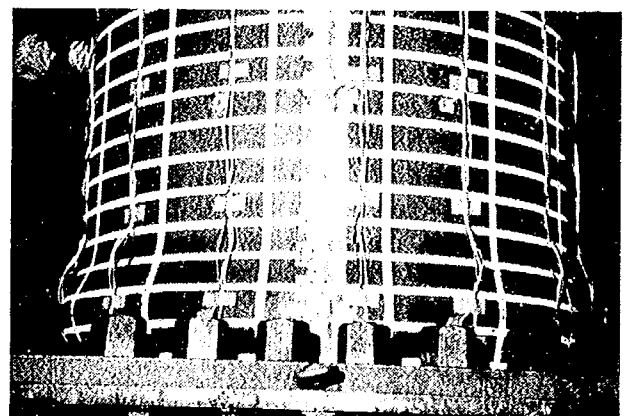
Left Side



Left Side



Upper Side

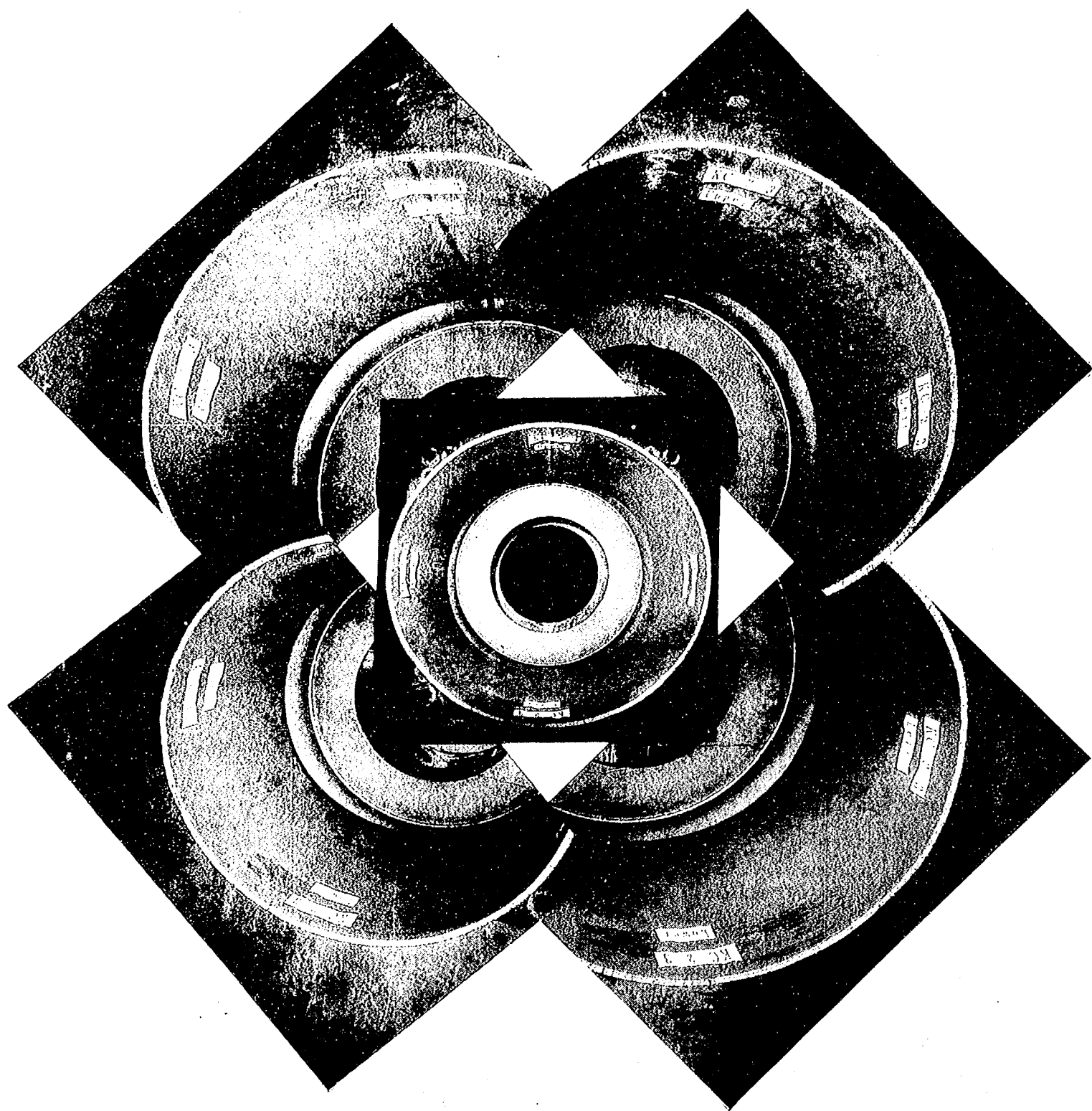


Upper Side

(i) 最大荷重を越えた付近 ($+48\delta_{y0}$)

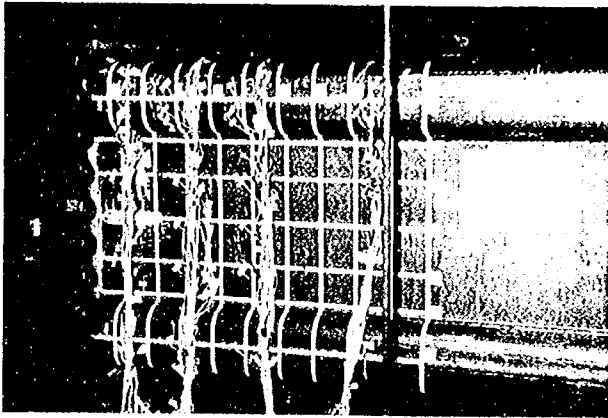
(ii) 実験終了時付近 ($+68\delta_{y0}$)

写真-3.2.1(3) KC-2_3 供試体の変形状況

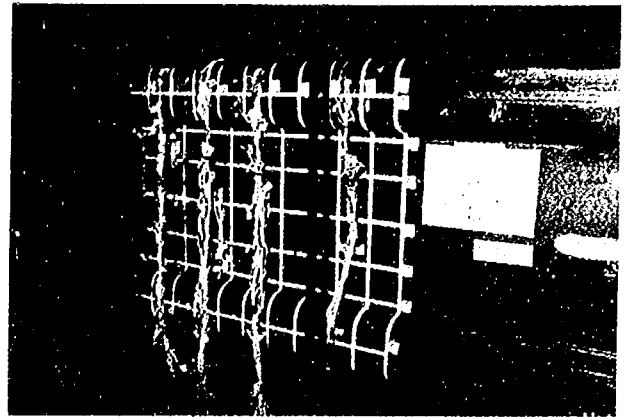


実験終了時（内面）

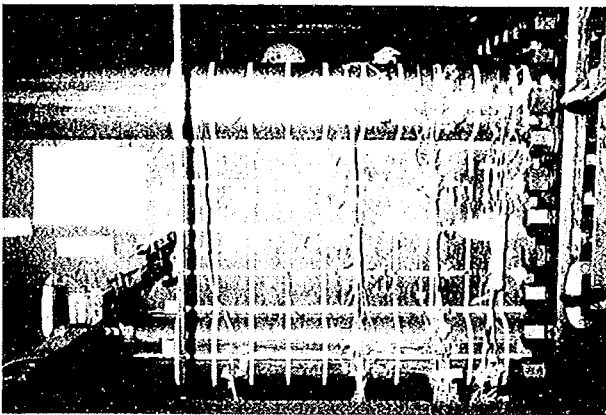
写真-3.2.1(3) KC-2_3 供試体の変形状況（つづき）



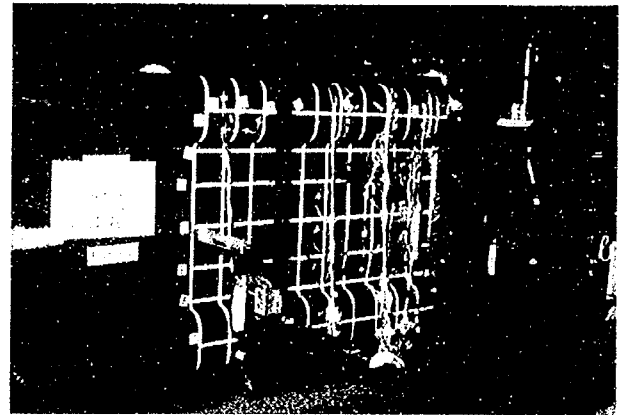
Flange (R)



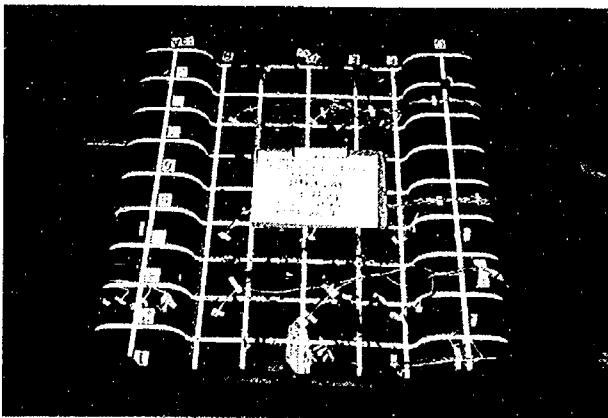
Flange (R)



Flange (L)

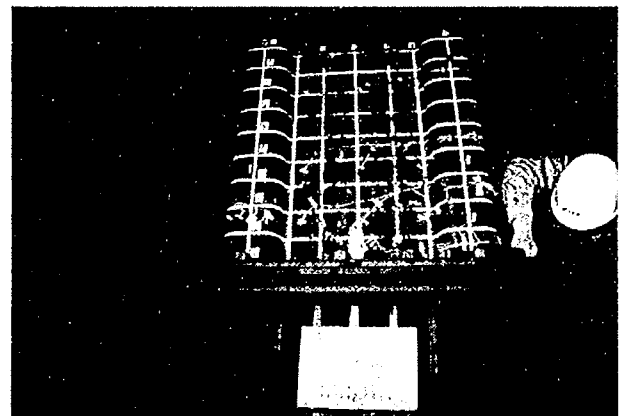


Flange (L)



Upper Web

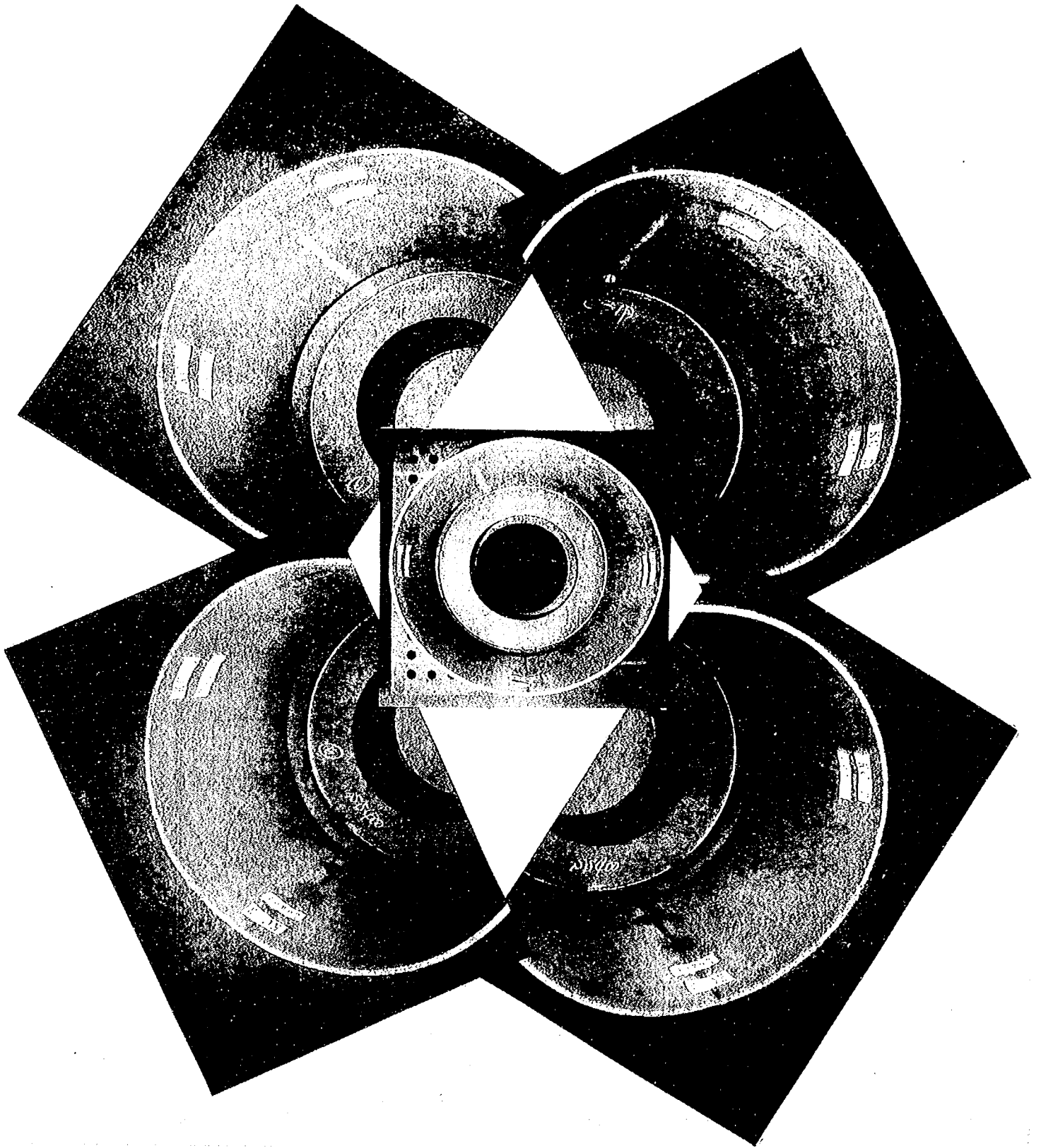
(i) 最大荷重を越えた付近 ($+11\delta_{y0}$)



Upper Web

(ii) 実験終了時付近 ($+12\delta_{y0}$)

写真-3.3.1 KA-1 供試体の変形状況



実験終了時（内面）

写真-3.2.1(4) KC-3 供試体の変形状況（つづき）

3.3 コーナー角鋼管断面

表-3.3.1 コーナー角鋼管断面供試体・実験結果

矩形断面 供試体	角形鋼管 断面寸法 (mm)	鋼管 板厚 (mm)	パネル 寸法 (mm)	縦リブ 寸法 (mm)	横リブ 間隔	鋼種	降伏点 σ_y (kgf/cm ²)	断面積 A (cm ²)	断面2次 モーメント I (cm ⁴)	断面2次 半径 r (cm)	有効長 $l(=2h)$ (cm)	細長比 パラメータ λ	幅厚比パラメータ		軸力 N (tf)	軸力比 N/N_{yN}	軸力比 N/N_{yM}
													鋼管 R_R	パネル R_R			
KA-1	200×200	12	500×9	65×9	900	SM490A	4,022	534.7	593,550	33.3	660.6	0.275	0.336	0.537	182	0.118	0.095
							2,833										

表-3.3.1 コーナー角鋼管断面供試体・実験結果 (つづき)

供試体	P_{yN} (tf)	P_{yM} (tf)	P_u (tf)	P_u/P_{yM}	(δ_{yEM}) (mm)	δ_{yEN} (mm)	(δ_{yTN}) (mm)	δ_m (mm)	δ_{97} (mm)	δ_{95} (mm)	δ_{lim} (mm)	δ_u (mm)	$\mu_m =$ δ_m/δ_{yEN}	$\mu_{97} =$ δ_{97}/δ_{yEN}	$\mu_{95} =$ δ_{95}/δ_{yEN}	$\mu_{lim} =$ $\delta_{lim}/\delta_{yEN}$	$\mu_u =$ δ_u/δ_{yEN}
KA-1	94.7	115	205	1.78	15.7	12.9	9.12	90.4	92.2	93.4	90.4	>104	7.01	7.15	7.24	7.01	>8.06

・角形鋼管に SM490A、パネルに SS400 を用いており、水平荷重に対してパネルの方が先に降伏することから、この表における P_y は引張側パネルが降伏する荷重としている。また、軸力比については、鋼管、パネルおよび縦補剛材それぞれの断面積と降伏応力の積を合計した値を N_y とし算定している。

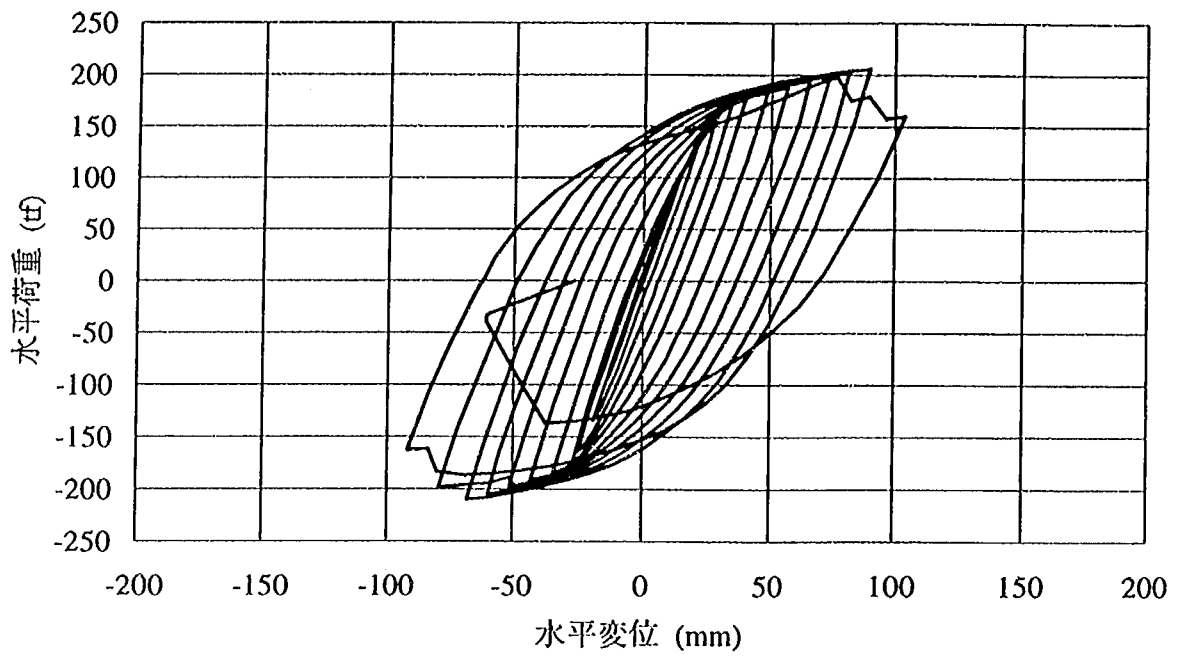


図-3.3.1 水平荷重－水平変位関係 (KA-1)

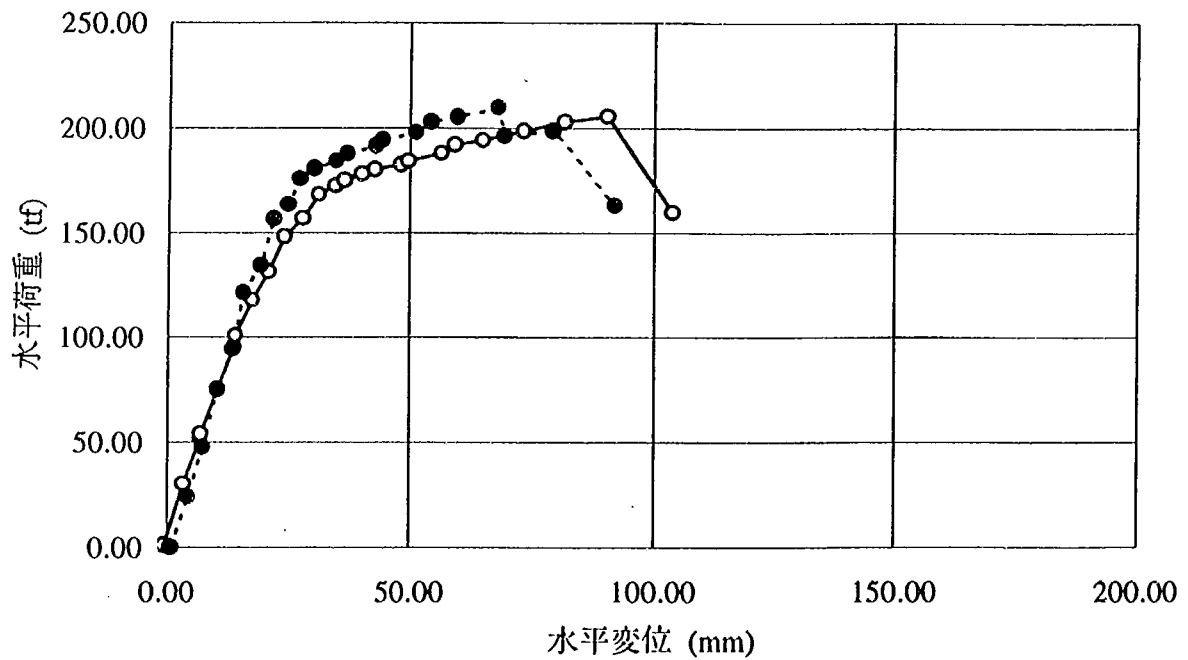


図-3.3.2 水平荷重－水平変位関係の包絡線 (KA-1)

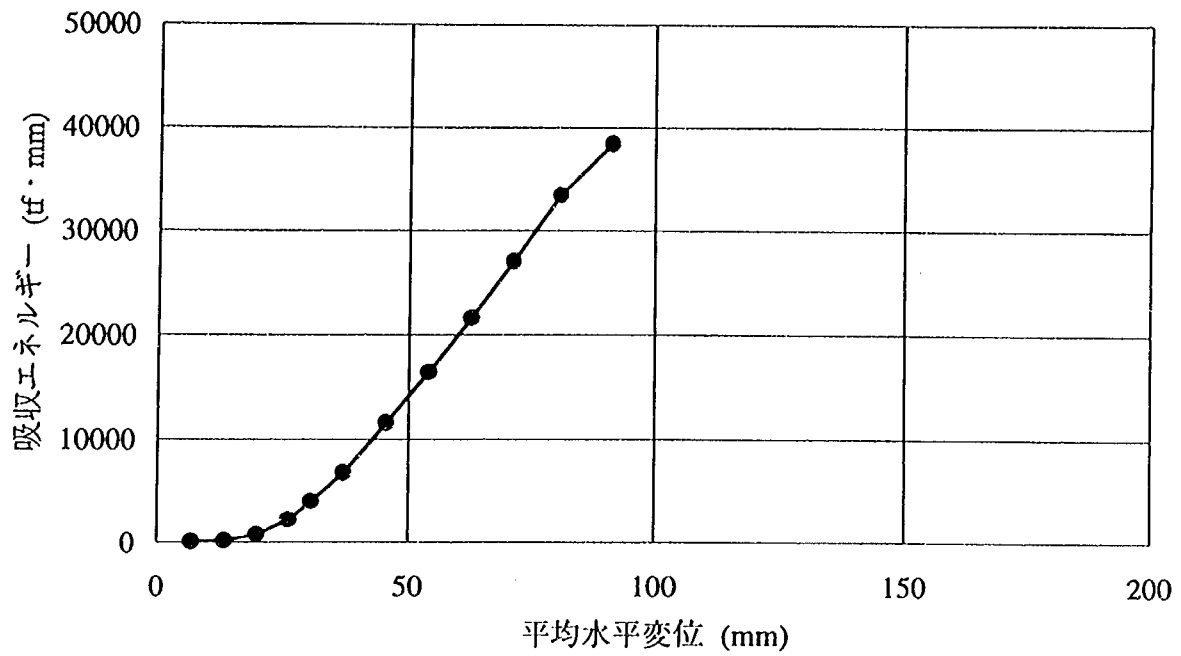


図-3.3.5 エネルギー吸収量 (KA-1)

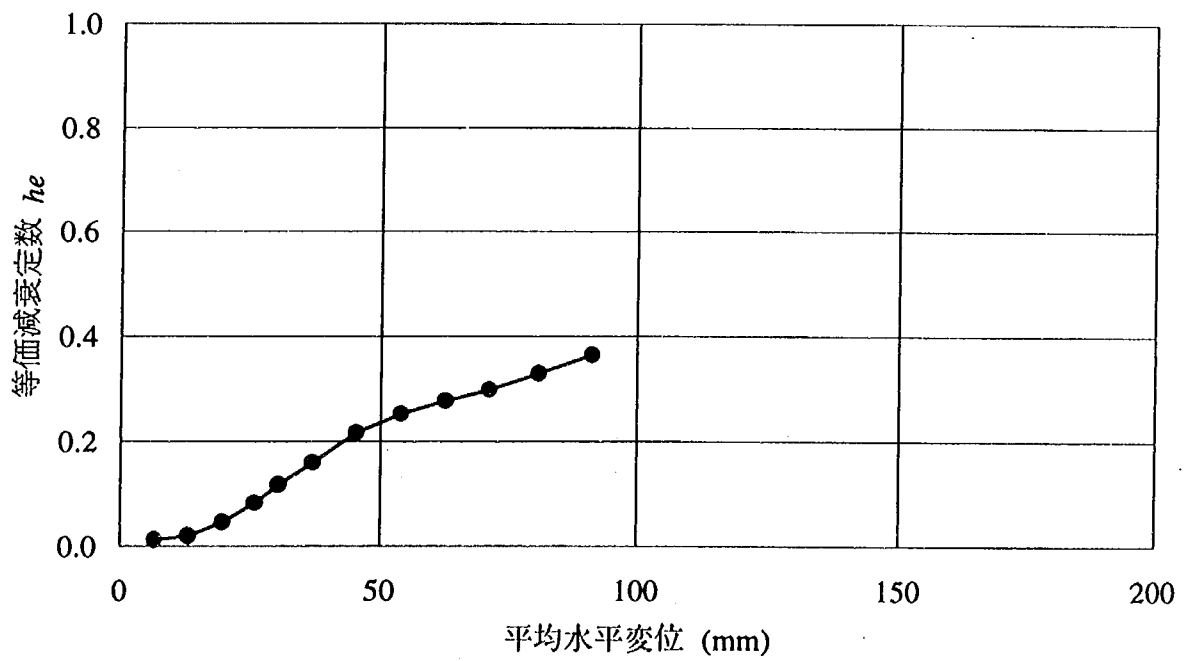
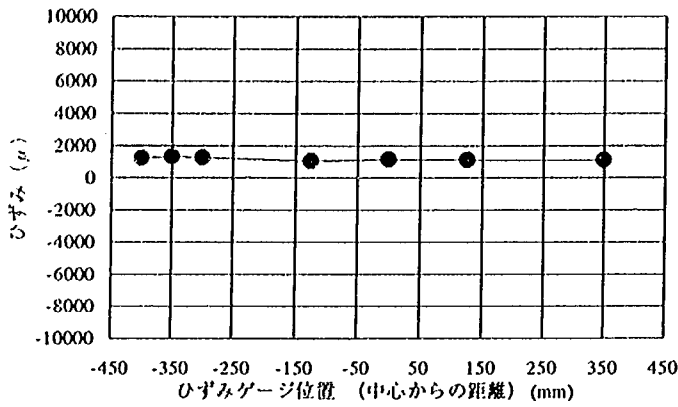
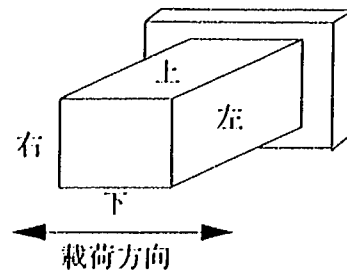
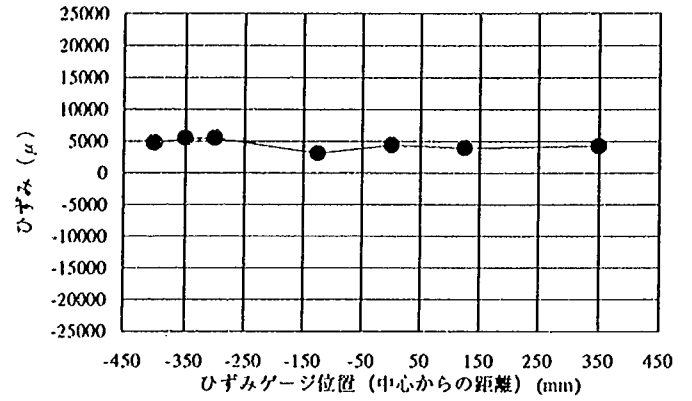


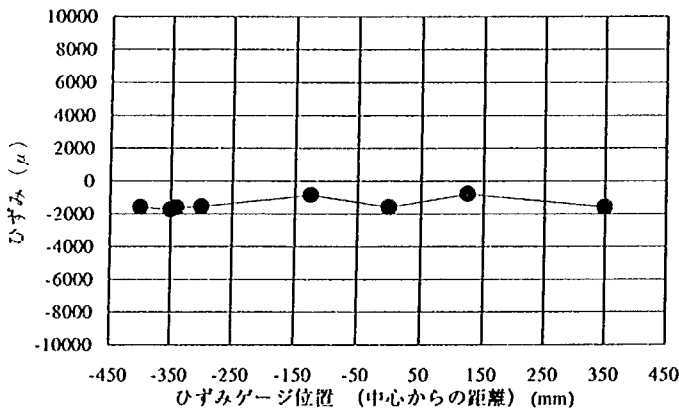
図-3.3.6 等価減衰定数 (KA-1)



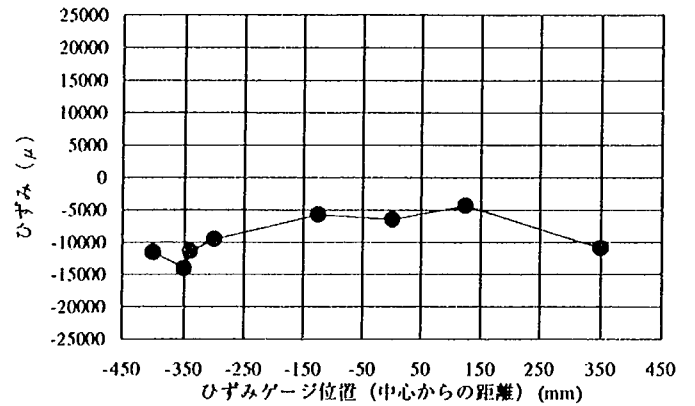
(a) フランジ (右)



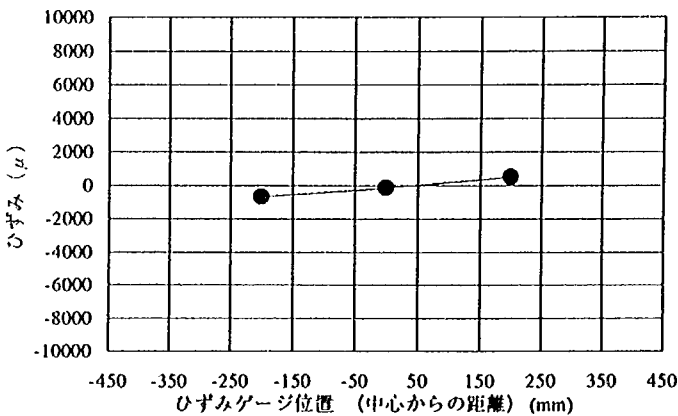
(a) フランジ (右)



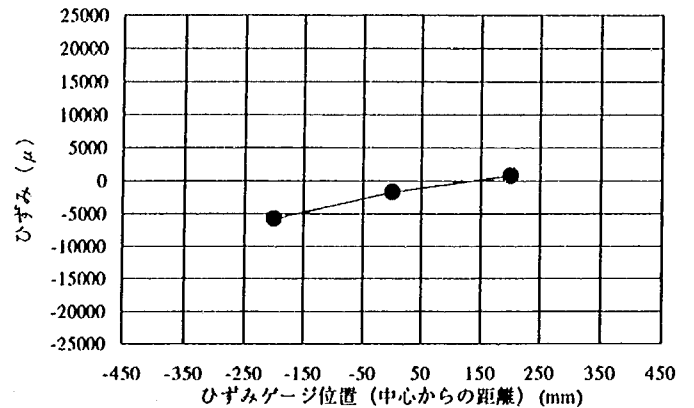
(b) フランジ (左)



(b) フランジ (左)



(c) ウェブ (上)

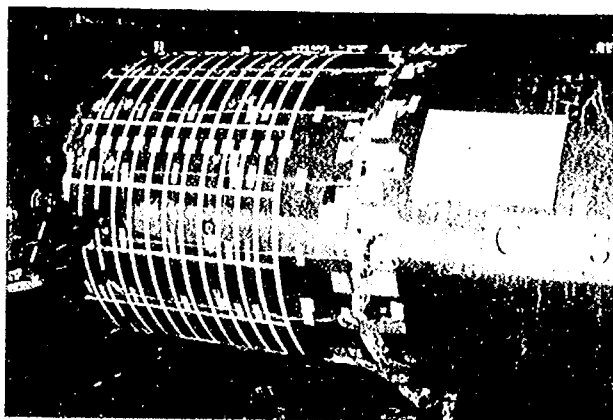


(c) ウェブ (上)

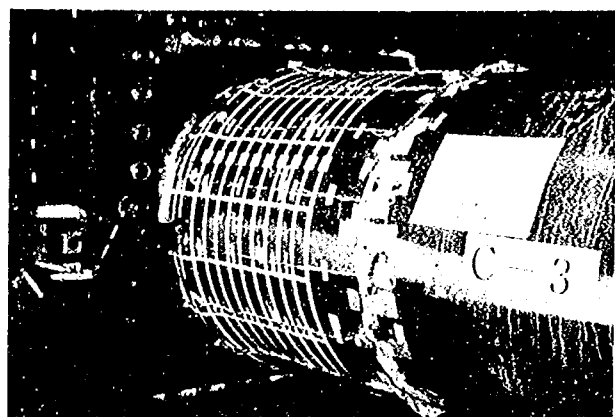
(i) 降伏時

(ii) 最大荷重時

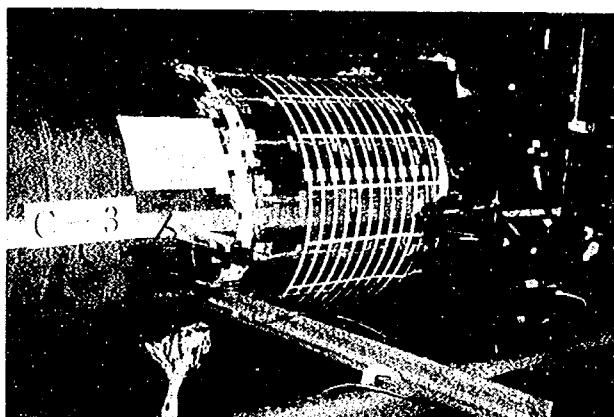
図-3.3.7 ひずみ分布 (KA-1)



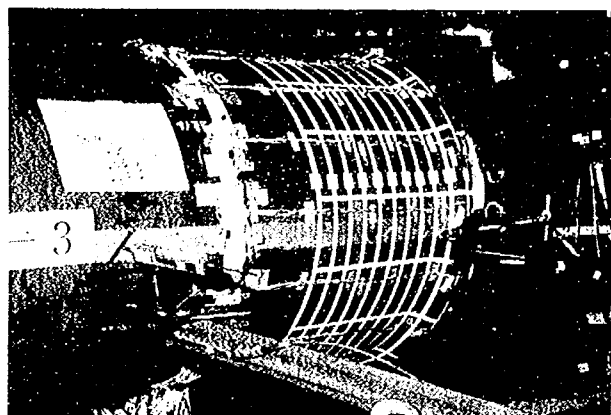
Right Side



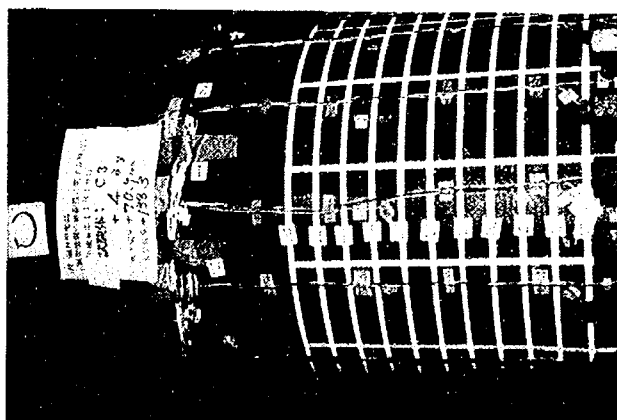
Right Side



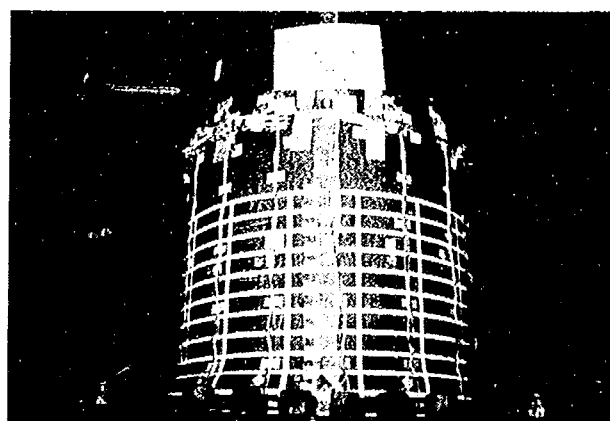
Left Side



Left Side



Upper Side



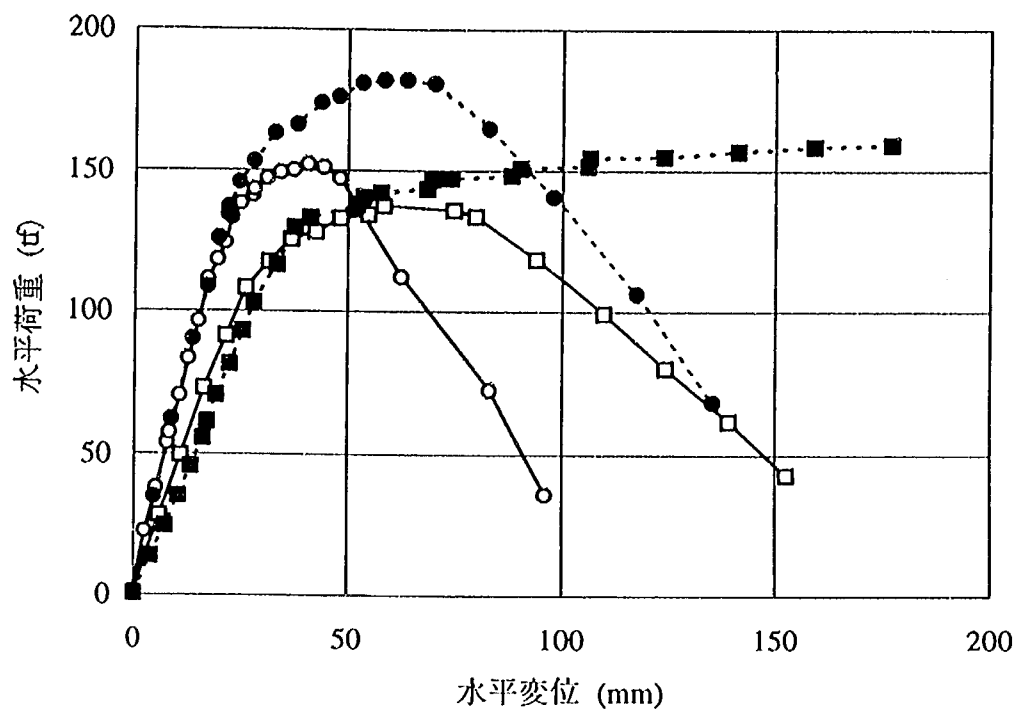
Upper Side

(i) 最大荷重を越えた付近 ($+4\delta_{y0}$)

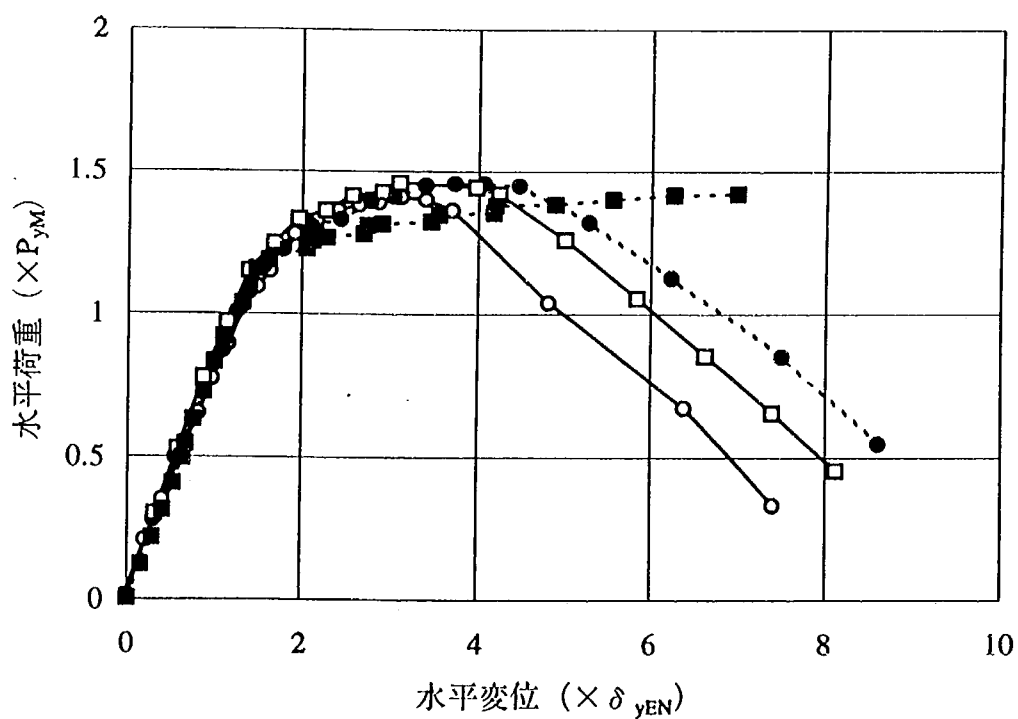
(ii) 実験終了時付近 ($+6\delta_{y0}$)

写真-3.2.1(4) KC-3 供試体の変形状況

4. 考 察

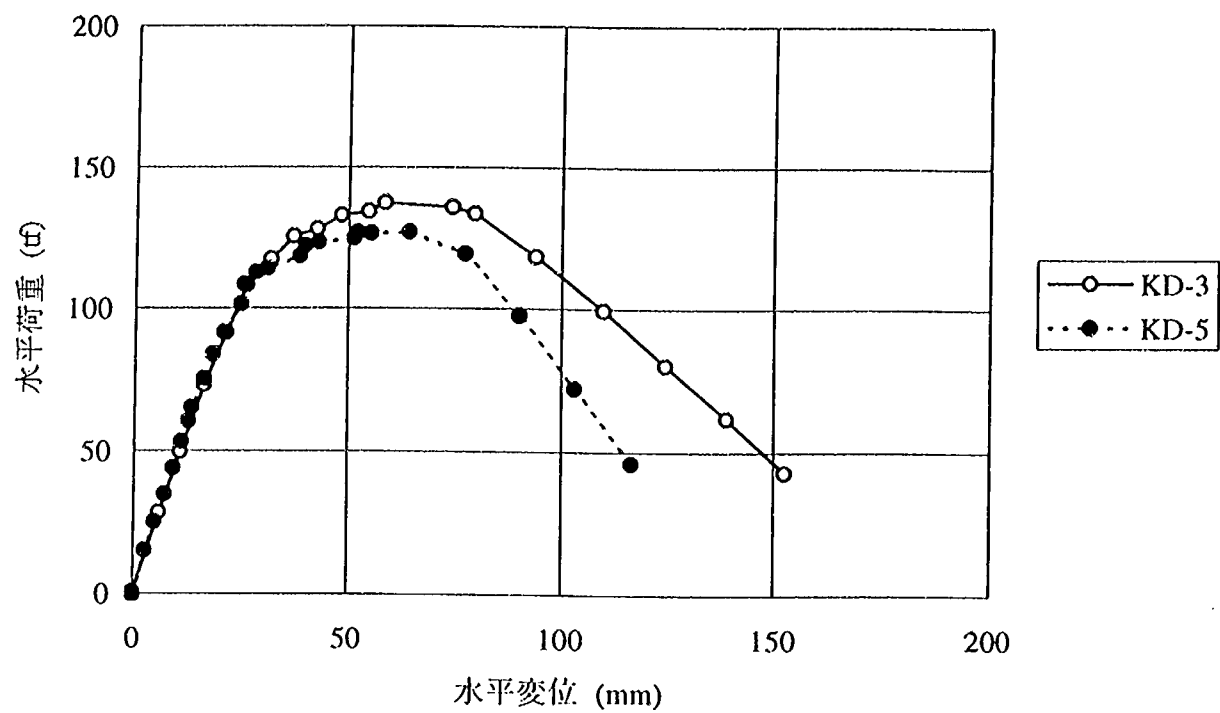


(a) 実測値

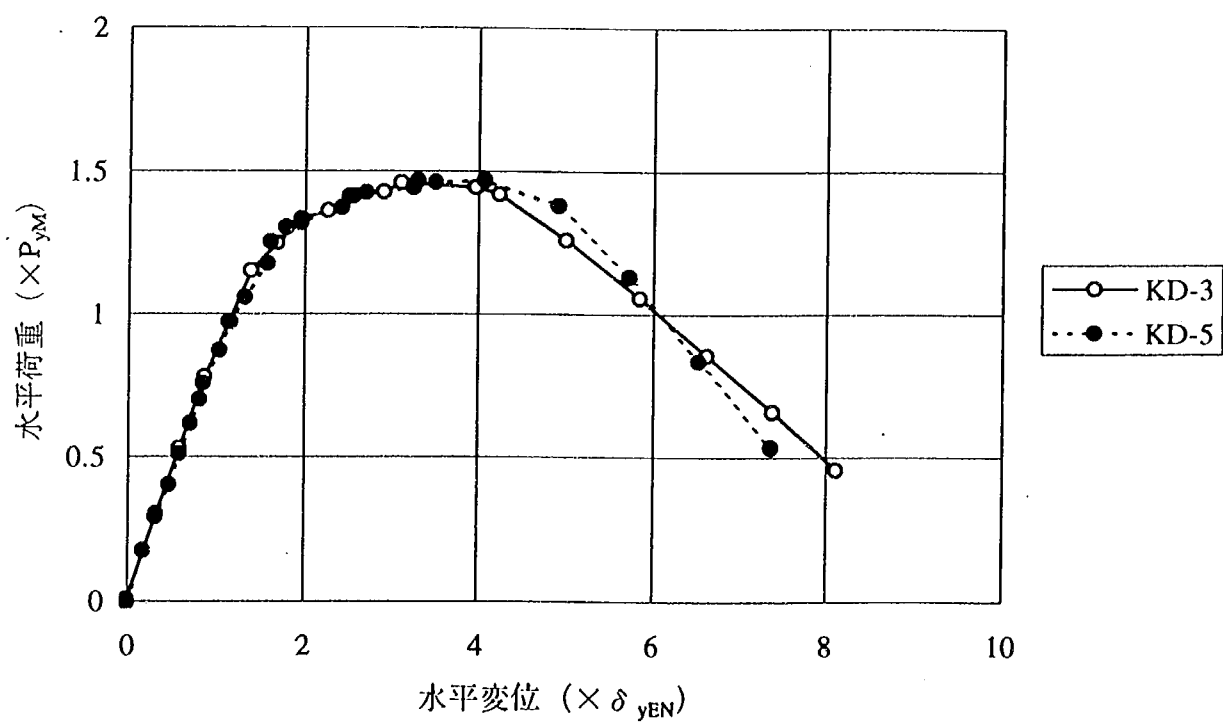


(b) 無次元化

図-4.1.1 包絡線の比較 (KD-1~KD-4)

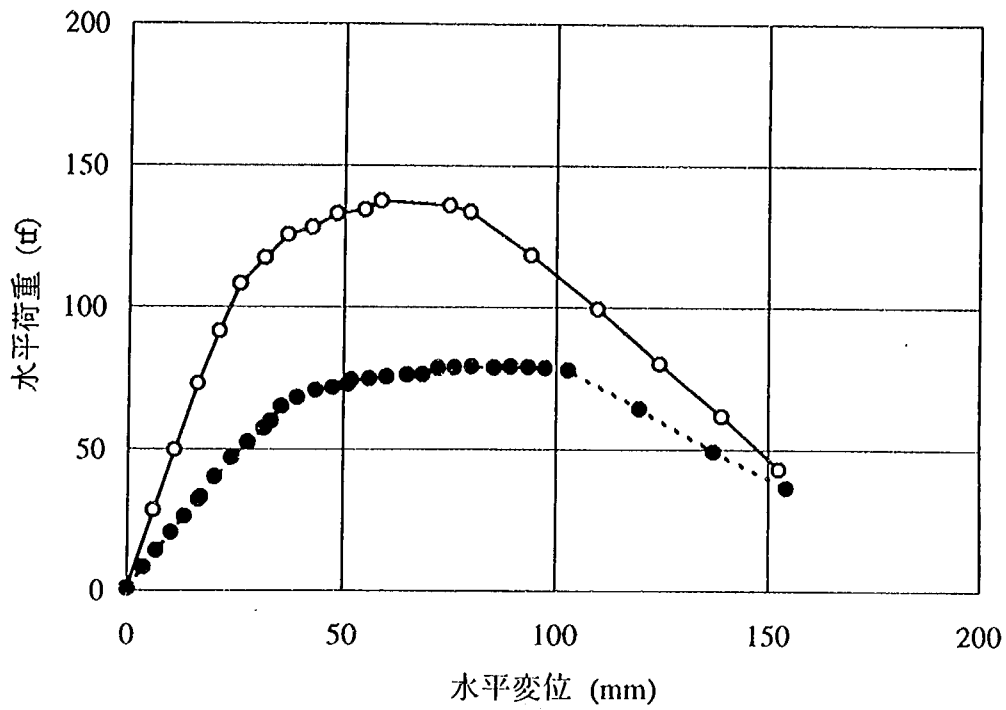


(a) 実測値

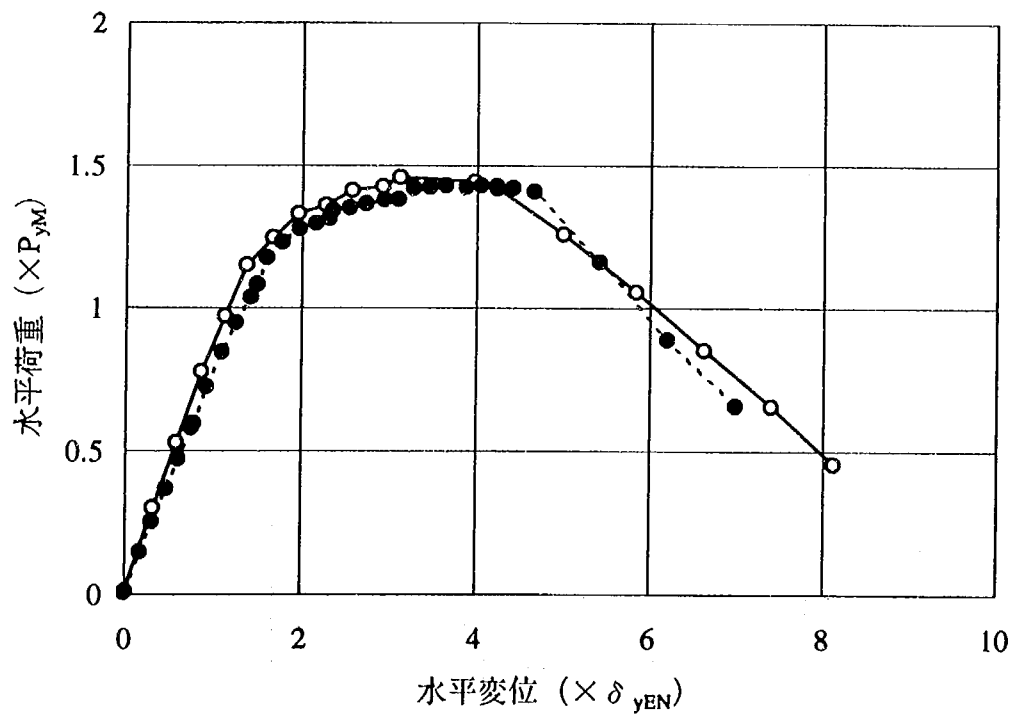


(b) 無次元化

図-4.1.2 包絡線の比較 (軸力比の影響: KD-3、KD-5)



(a) 実測値



(b) 無次元化

図-4.1.3 包絡線の比較 (細長比の影響: KD-3、KD-6)

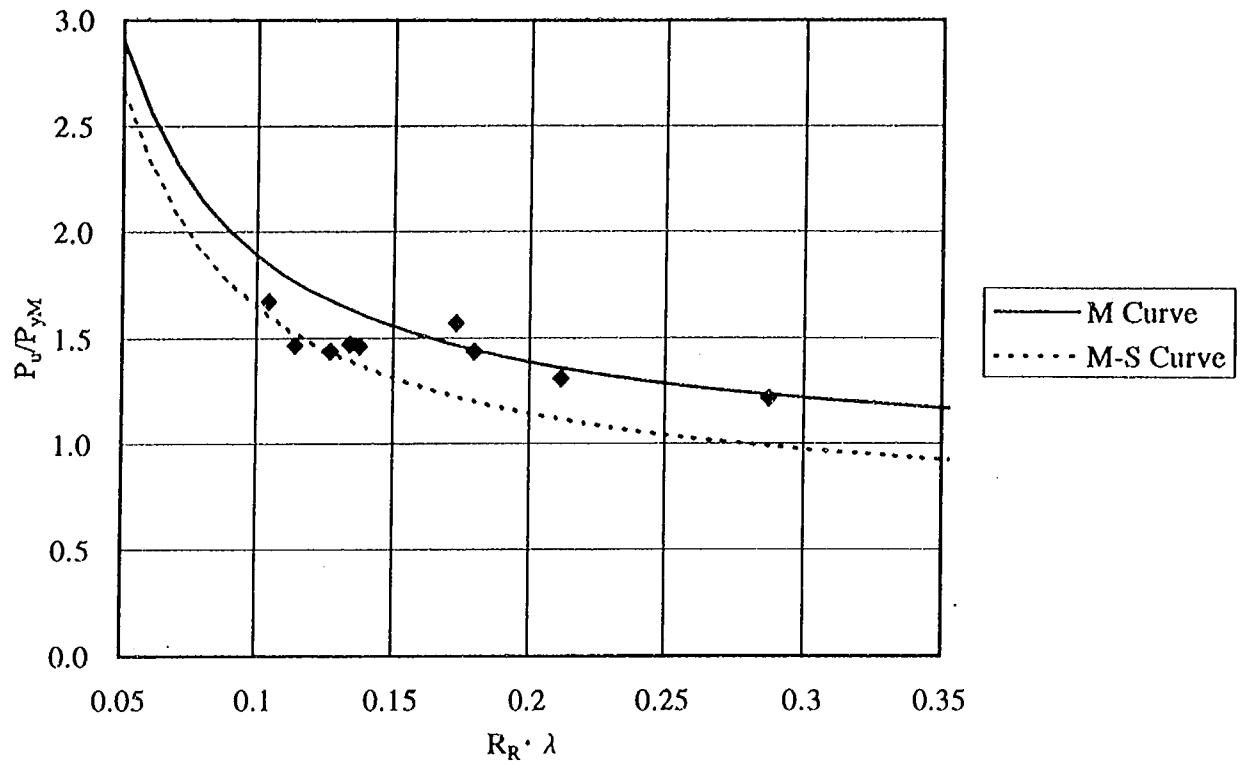


図-4.1.4 P_v/P_{yM} と $R_R \cdot \lambda$ との関係

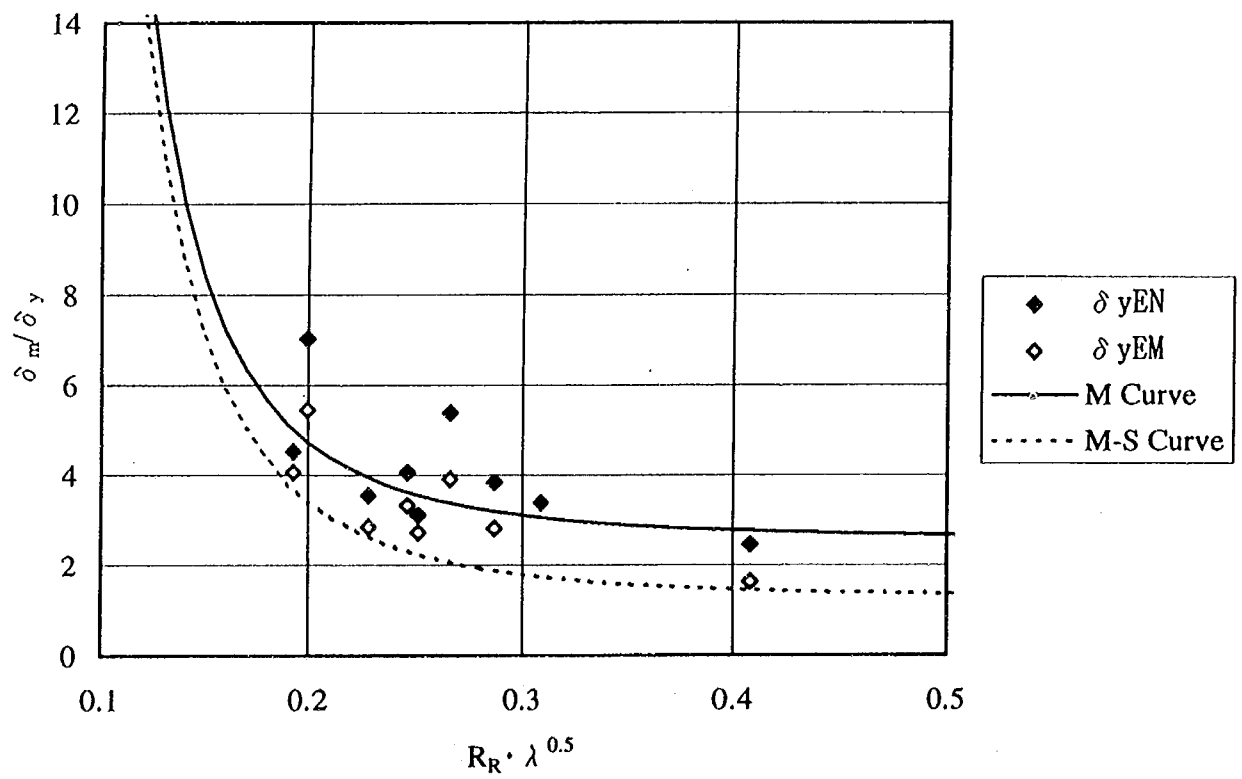


図-4.1.5 δ_m/δ_y と $R_R \cdot \lambda^{0.5}$ との関係

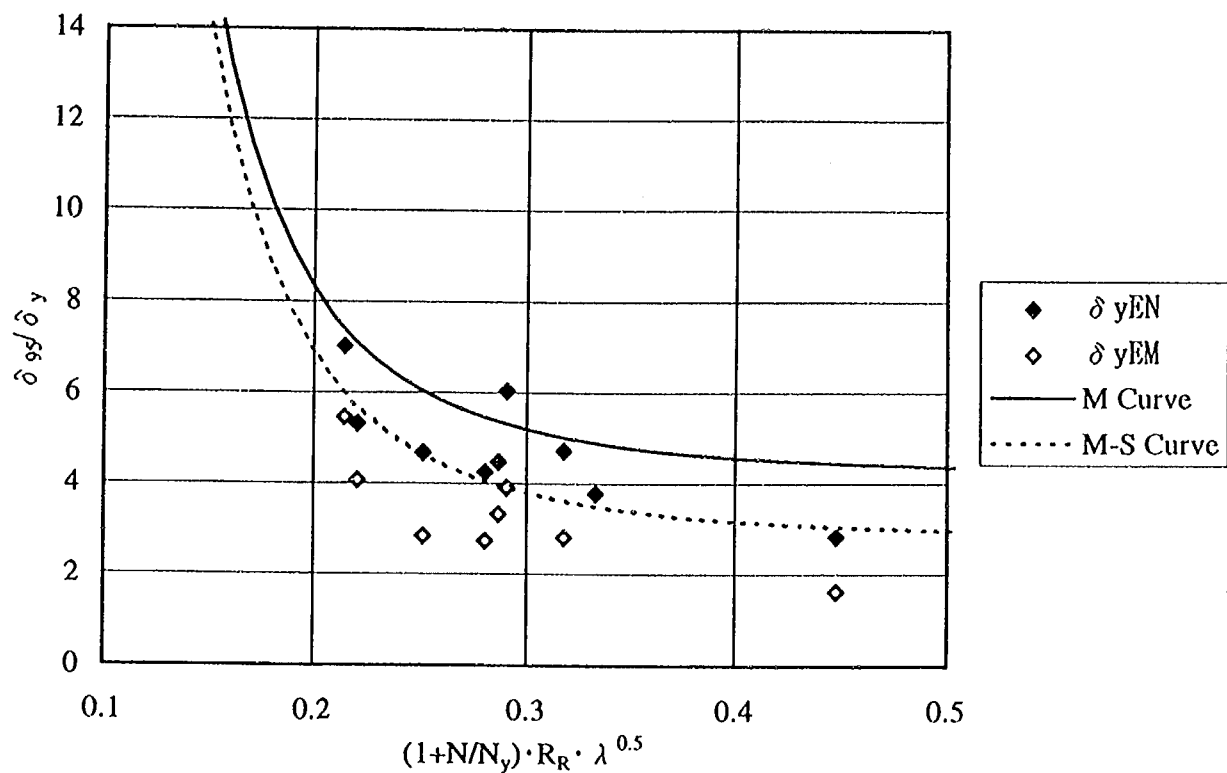


図-4.1.6 δ_{95}/δ_y と $(1+N/N_y) \cdot R_R \cdot \lambda^{0.5}$ との関係

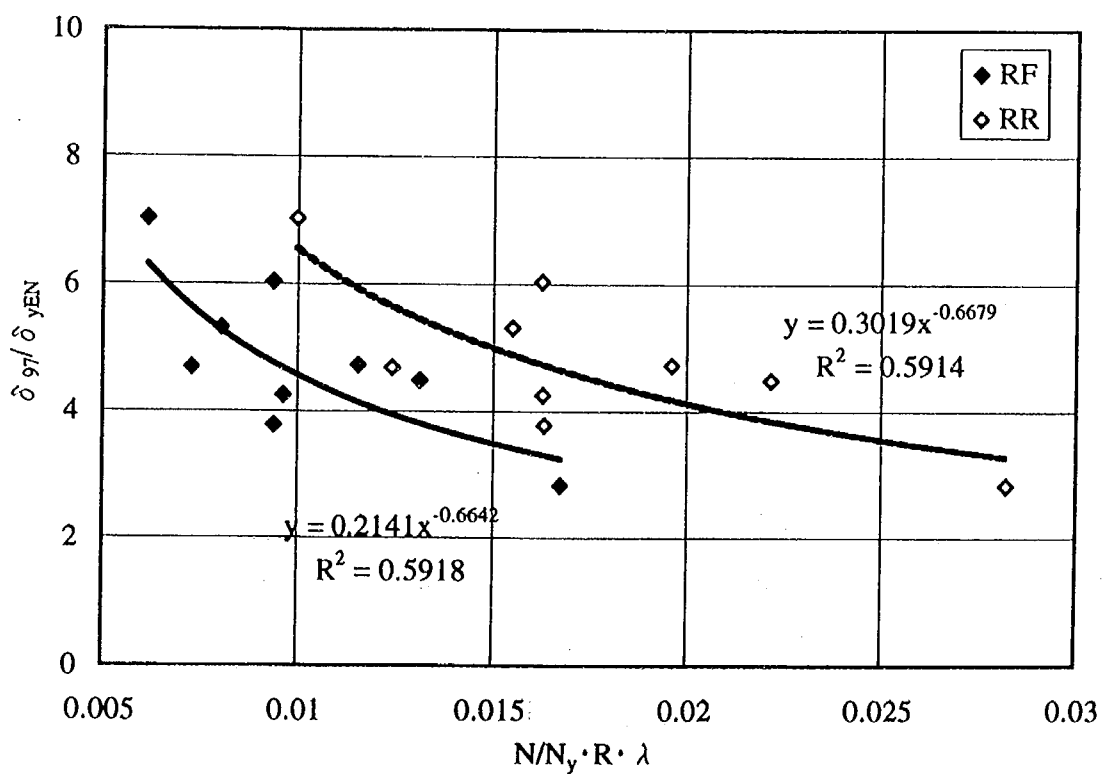
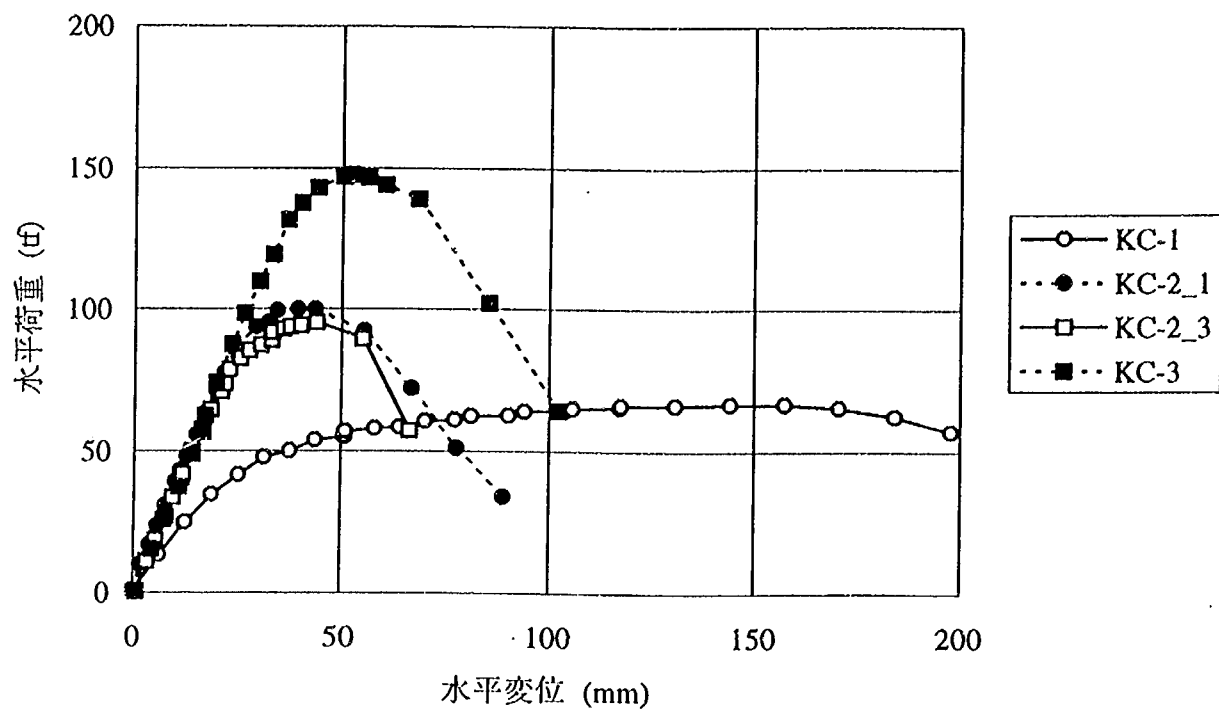
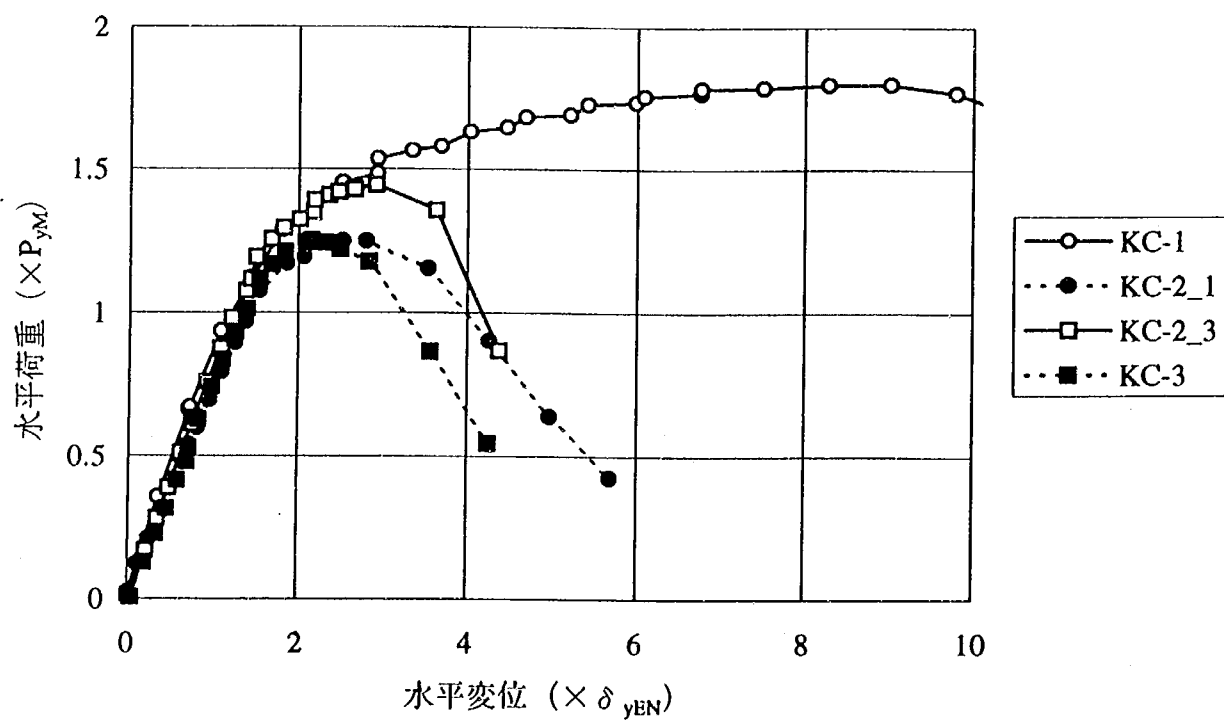


図-4.1.7 δ_{97}/δ_y と $N/N_y \cdot R \cdot \lambda$ との関係



(a) 実測値



(b) 無次元化

図-4.2.1 包絡線の比較 (KC-1~KC-3)

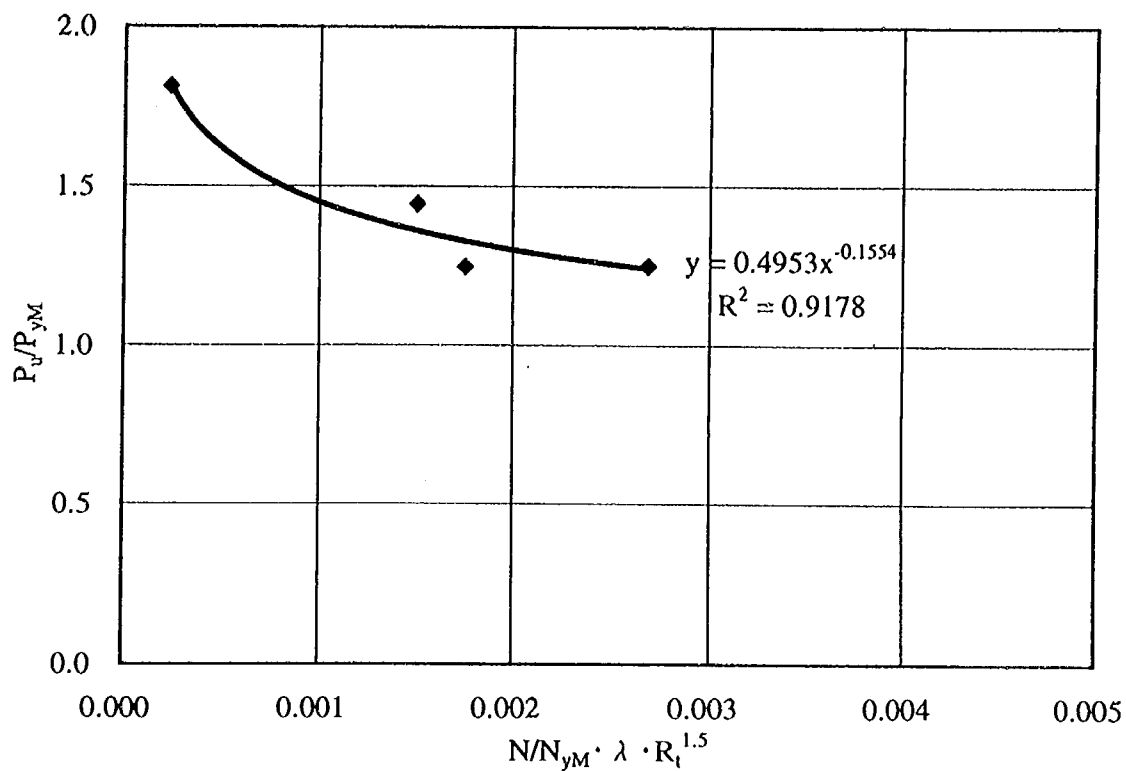


図-4.2.2 P_u/P_{yM} と $N/N_{yM} \cdot \lambda \cdot R_t^{1.5}$ との関係

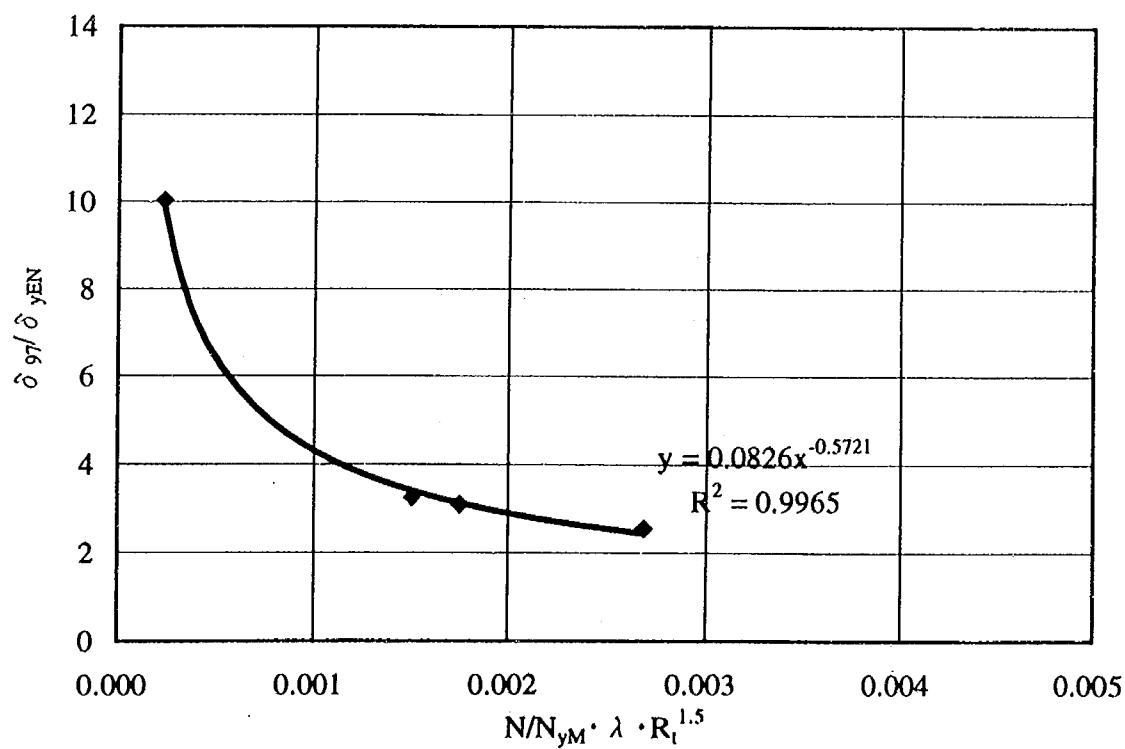
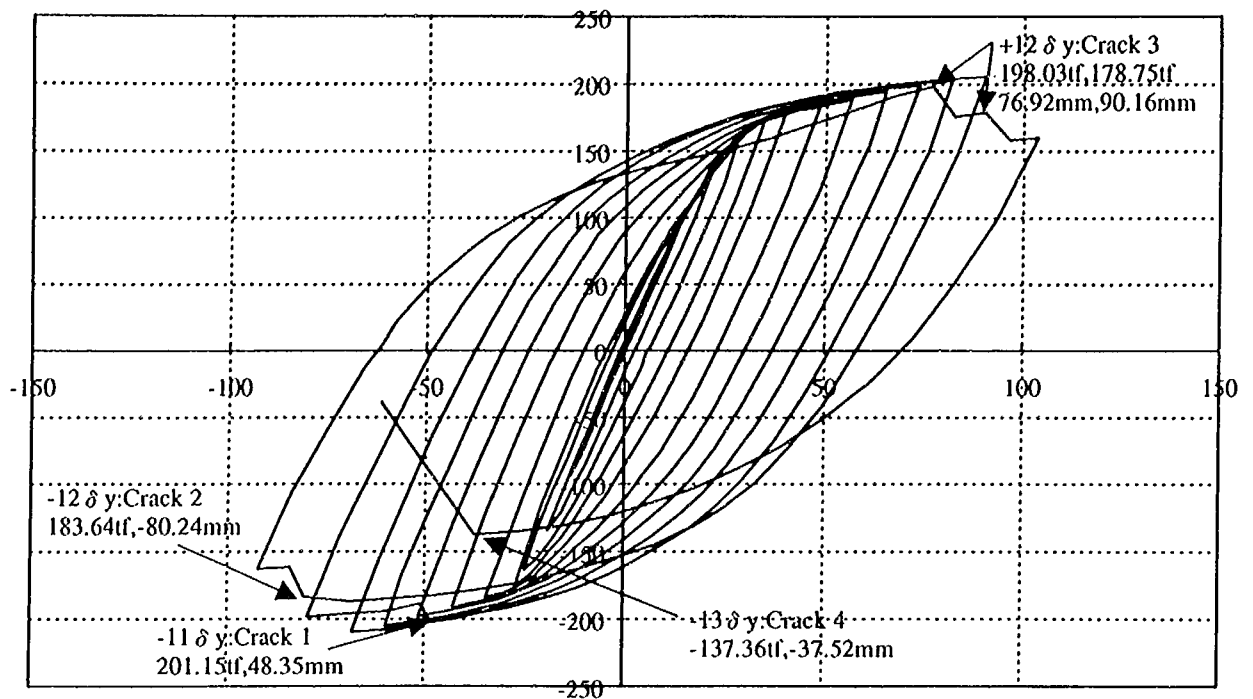
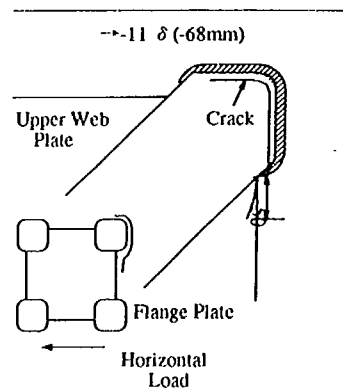


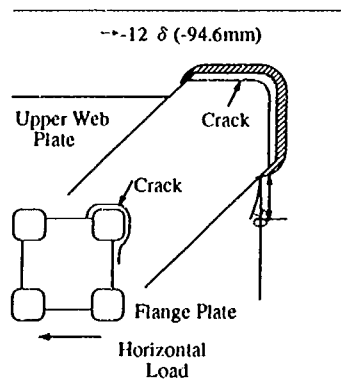
図-4.2.3 δ_{97}/δ_{yEN} と $N/N_{yM} \cdot \lambda \cdot R_t^{1.5}$ との関係



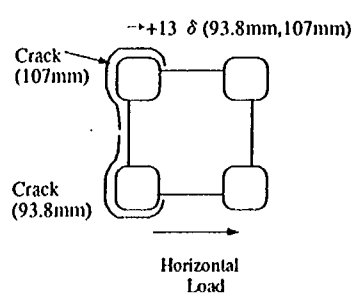
Crack 1



Crack 2



Crack 3



Crack 4

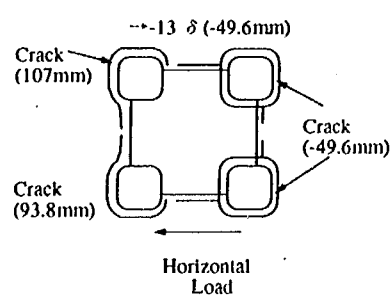


図-4.3.1 供試体 KA-1 における亀裂の発生・進展状況

参考資料

参考資料ー 1

厚肉少補剛断面橋脚のハイブリッド実験

1. 緒言

1. 1 ハイブリッド地震応答実験について

平成7年1月の兵庫県南部地震における阪神高速道路高架橋脚の被害の大きさから、道路橋の耐震設計基準についての多くの議論がなされている。そして、極めて大きな地震時の構造物の安全性については、静的な耐荷力だけに注目するのではなく動的な特性も考慮すべきだという声が高まっており、実験や数値解析技術を用いた橋脚の弾塑性挙動の解明が求められている。

道路橋脚をはじめとした構造物の耐震性能を明らかにするためにこれまで広く行われてきた、または一般的に考えられる代表的な研究手法は数種有り、それぞれが異なった特徴をもっている。まず思いつのが振動台を用いた実験である。これにより動的な特性を調査することはできるが、1) 振動台装置及び動的計測装置が非常に高価であり容易に行えない、2) スケールダウンモデルで実験を行うときの相似則の取り扱いが複雑である、などの欠点を持っている。

これまでは準静的載荷実験により、構造物の基本的な変形能を明らかにすることが試みられてきた。数年前まで、鋼製橋脚については、長期にわたり研究成果の蓄積されてきたRC橋脚と比較して研究数が少なく基礎データが不足していると言われていたが、近年数多くの実験的研究が大学を始めとして行われ、かなりの知見が得られたと考えられている。しかし、準静的実験からは実際の地震動を受けた場合の構造物の動的挙動に関する情報は得られない。

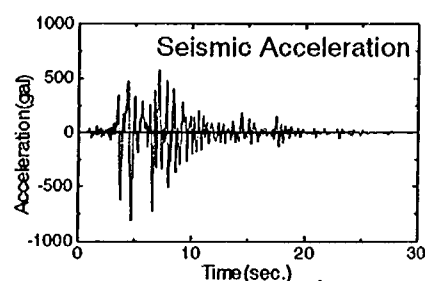
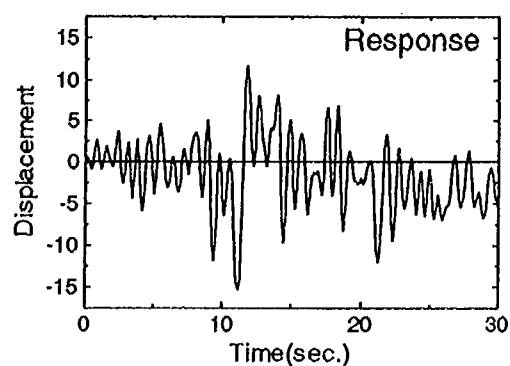
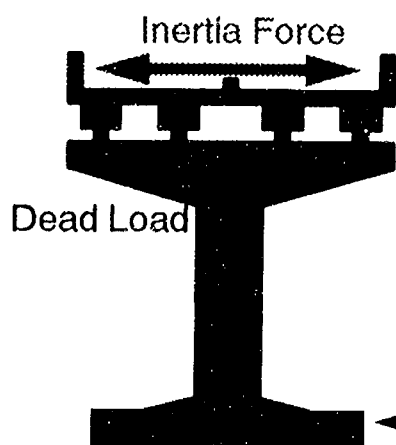
そこで次のステップとして、弾塑性応答解析による解析的な研究が考えられる。これは、構造物の復元力特性（構造物の構成則）を数学的にモデル化して微分方程式に用い、地震加速度を入力することで実地震時の時刻歴応答を求めるものである。このときの復元力特性を準静的実験の結果から構築して応答解析を行った研究が、近年、鋼製橋脚についても行われており、その結果を用いた設計法の提案もされている。しかし、この復元力モデルの有効性を確認するには応答解析の結果を信頼性の高い方法で検証する必要がある。

このように、1) 比較的安価・容易、2) 動的な特性を考慮、3) 実験を用いた高い信頼性、といった条件を満たす手法として注目され、道路橋についても数年前からいくつかの大学で行われているのが、コンピュータによる微分方程式の計算と実験装置による復元力の計測とを組み合わせた実験である。計算と計測を組み合わせたところからハイブリッド実験、または、コンピュータと実験装置を結んだところからオンライン実験等と呼ばれている。本参考資料で以後ハイブリッド実験と呼ぶこの実験は、時刻歴応答解析時の微分方程式中の復元力の項（数値解析では関数で近似される）を、実際の供試体に変位を与えたときの復元力で置き換えたものである。実際には疑似動的実験であり、リアルタイムで地震応答を再現するものではないので、時間（速度）に依存する粘性減衰や衝撃の影響などは再現できないが、静的な実験装置を用いた耐震性能評価方法としては、現在最も正解に近い地震応答を再現できる手法として期待できる。

ハイブリッド実験自体は20年以上前に提案・開発されたものであるが、今日でも信頼できる結果が得られるよう実験を実行するには、1) 実験装置、2) 実験実行のノウハウ、3) 準静的載荷実験や弾塑性応答解析、4) 微分方程式の取扱いについての技術、といったバックグラウンドに関する多くの知見が必要であると考えられる。

ハイブリッド実験の概念を図-参考 1-1.1.1 に示す。

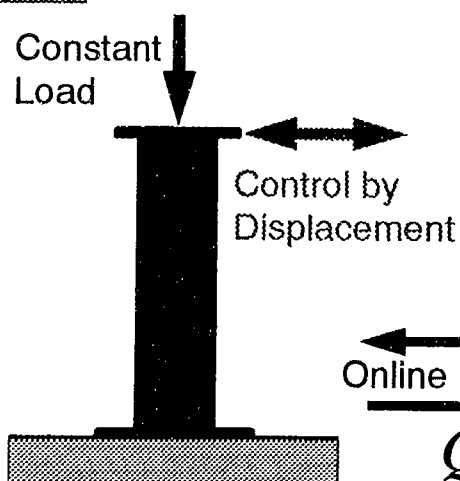
Real Structure



Modeling

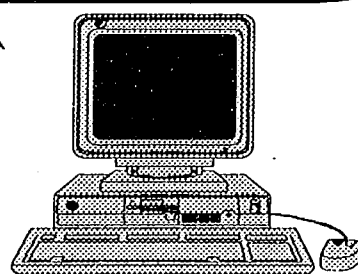


Test



$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Q(x) = -m\ddot{x}_0$$

Online Processing



Experiment to Obtain Restoring Force

Calculation to Obtain Displacement at Next Step

図-参考 1-1.1.1 ハイブリッド実験の概念

1. 2 本実験の目的

動的応答を考慮した鋼製橋脚の耐震設計手法を構築するための基礎実験として、実地震で記録された加速度を用いて強震時の鋼製橋脚の時刻歴応答をシミュレートし、

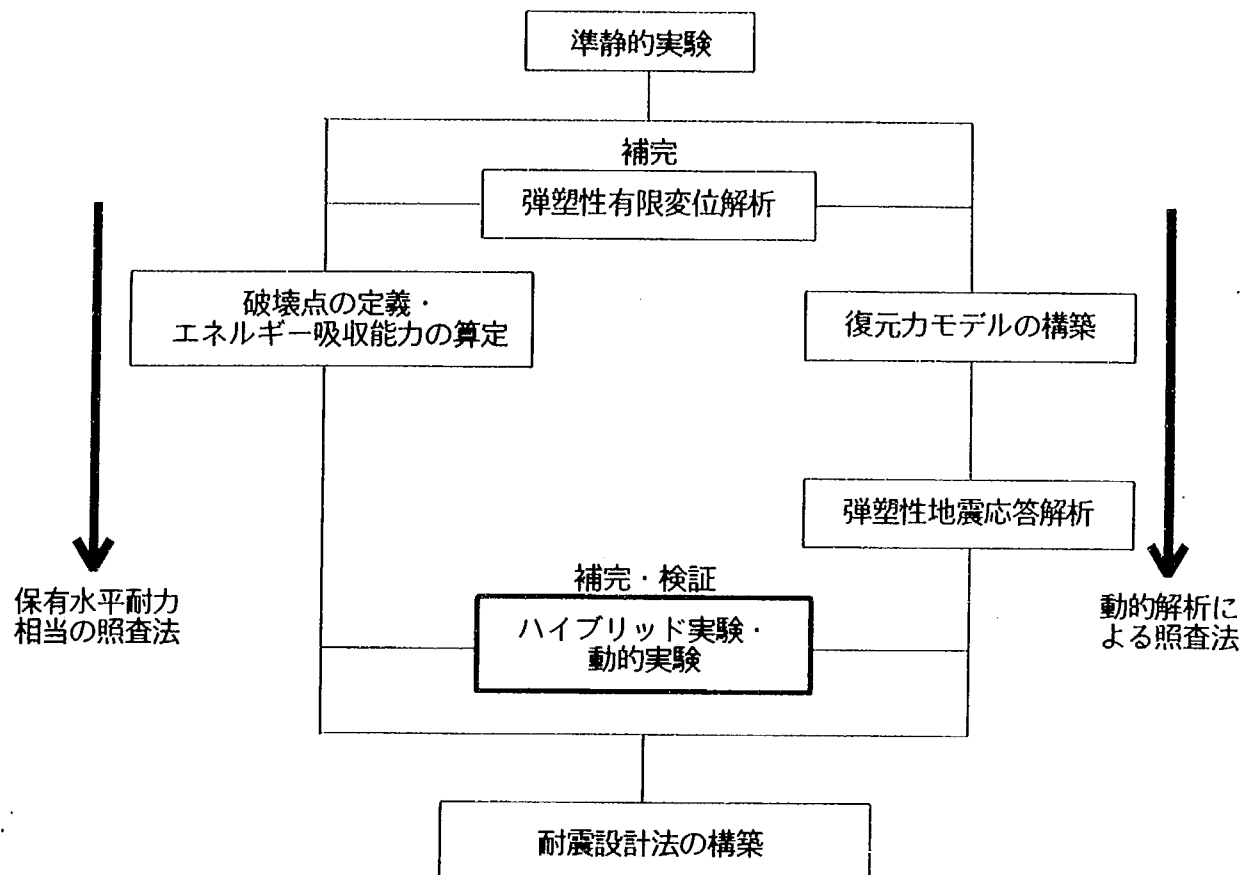
- 実地震下での鋼製橋脚の安全性を評価する。
- 動的応答特性と耐震性能の関係を調べる。

- 動的応答特性と準静的載荷による変形能の関係を調べる。
- 復元力モデルを用いた応答解析の結果を検証し、モデル再構築の基礎データを得る。

1. 3 ハイブリッド実験の位置付け

1. 3. 1 耐震性能評価における位置付け

現在、ハイブリッド実験は、種々の研究過程によって得られた結果の検証として位置付けられている。図・参考 1-1.3.1 に、耐震設計法策定のフローを示す。



図・参考 1-1.3.1 耐震設計法策定の流れ

1. 3. 2 他のハイブリッド実験に対する位置付け

他の機関で行われているハイブリッド実験との位置付けの違いを明確にすることが、効率的な研究を行う上で重要である。

これまで、土木分野では幾つかの大学を中心にしてハイブリッド実験が行われ、結果が論文集や各種委員会などで報告されている。これら既往の実験と比較したときに本実験の大きな特徴といえるのが、実験装置の大きさである。本実験用の設備では、従来大学では行えなかったような大きな供試体（数をこなすことのできるスモールモデルと実構造物の中間のスケール）の実験を行うことができる。従って、

- スモールモデルでは再現できない、ディテール（溶接部等）について信頼性の高いデータが得られる。

- 実験におけるスケール効果を検証できる。

等が期待でき、単に個別の供試体の地震応答が得られるだけでなく、従来の実験結果を有効利用するためのリファレンスになると考えられる。

2. 実験の諸条件

2. 1 実験ケースの設定

実験で対象としたのは単柱形式の鋼製橋脚で、地盤種別はII種地盤とした。供試体は、パラメータ制限設計のKD-7と同じ物とした。KD-8とKD-8Yの違いは載荷軸力で、KD-8は92tf、KD-8Yは120tfとした。

表-参考 1-2.1.1 載荷ケース一覧

材料種別	設計基準	地盤種別	断面形状	1回目載荷条件	供試体名
鋼製橋脚	パラメータ規準	II種地盤	角柱	兵庫県南部地震(JR鷹取駅記録)	KD-8
〃	〃	〃	〃	兵庫県南部地震(JR鷹取駅記録)	KD-8Y

2. 2 上部工の仮定

ハイブリッド実験の主旨を考慮すれば、実際に構築されている構造物をスケールダウンして実験供試体とするべきであるが、上部工荷重や構造の面から必ずしも供試体とするに適切なものばかりではない。そこでここでは、実際に十分あり得る設計条件を、いくつかの実設計を基に設定し、上部工を通常の手順と同様にして設計した。上部工は、図-参考 1-2.2.1 および図-参考 1-2.2.2 に示すように、三径関連続鋼箱形4主桁橋とした。各橋脚の死荷重反力を表-参考 1-2.3.1 に示す。

2. 3 橋脚の設計

2. 3. 1 荷重条件

表-参考 1-2.3.1 死荷重反力

橋脚	反力(tf)
P 1	548. 8
P 2	1628. 4
P 3	1628. 4
P 4	548. 8

3. 実験供試体

3. 1 供試体の相似率

2章で設計した橋脚を，実験に用いる載荷装置に合わせて縮小し，実験供試体寸法を決定した．供試体高さはベースを含めて3440mmになるようにしており，実橋との相似率は，4.12である．ただし，構成部材の板厚や鉄筋径を厳密に縮小することは困難であるので，入手可能な材料を用いて座屈パラメータや鉄筋比を合わせるように，部材断面や配置を設定し直した．鋼種は，補剛板，縦リブがSM490A，それ以外はSS400とした．

4. 実験方法

4. 1 装置・計測

4. 1. 1 装置

実験は，新日本製鐵株式会社所有の大型載荷フレーム及び橋脚繰返し載荷実験装置を用いて実施する．フレームは反力床から鉛直に設置し，上部の水平梁にスライド装置と軸力載荷用ジャッキを設置する．水平力載荷用ジャッキは，反力壁に設置する．供試体は，反力床にP C鋼棒で固定した厚さ120mmのプレートにボルトで鉛直に取り付ける．供試体を組み込んだ載荷装置を図-参考 1-4.1.1に示す．

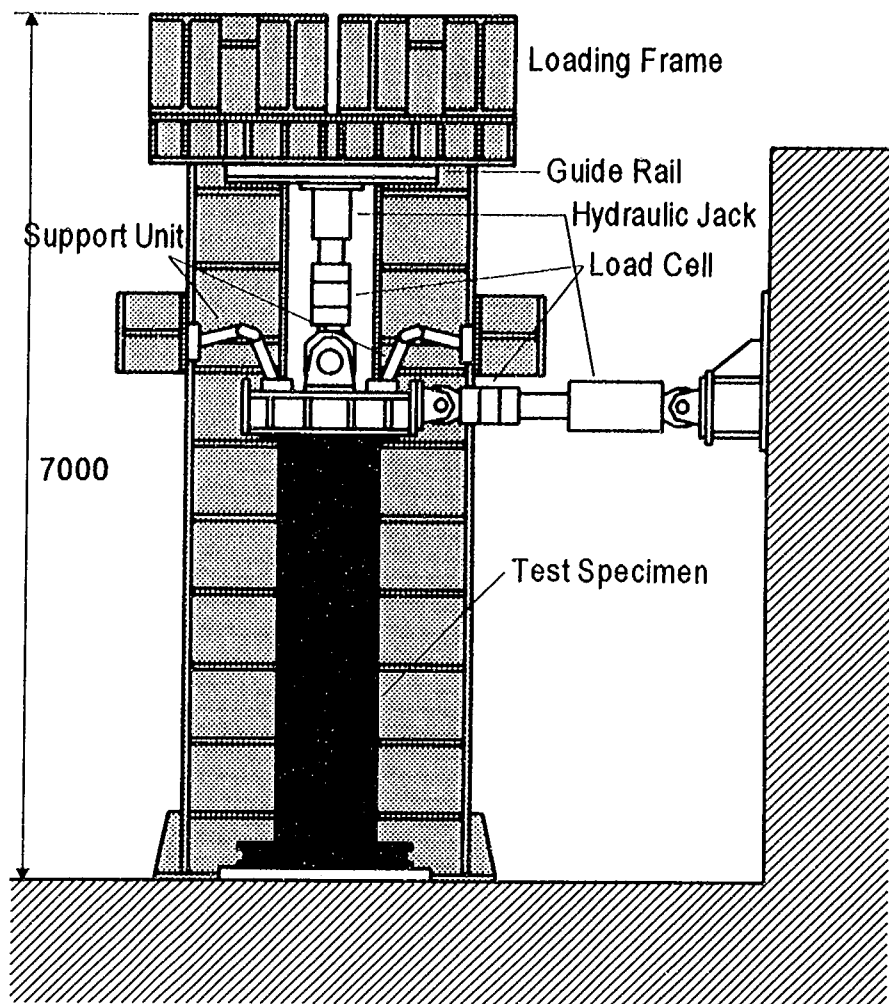


図-参考 1-4.1.1 載荷装置

4. 1. 2 計測・制御システム

実験の制御・計測は、図 4-1-2 に示す装置で行う。2 台のパーソナルコンピュータにより処理を二系統に分散して制御・計測を行う。以下に、各系統の内容を示す。

- Computer A は、磁歪式変位計からの変位の監視、動ひずみ計を介した荷重・変位の監視、基部のスライドと剛体回転の影響を差し引いた載荷点の真変位の計算、(1) ハイブリッド実験の場合、内部記憶装置に保持した地震加速度記録と真変位・水平荷重を用いた応答計算、(2) 準静的繰り返し載荷実験の場合、あらかじめ作成された載荷変位プログラムの読み出し、算出された目標変位を供試体を与えるための水平荷重用油圧コントローラの制御、一定軸力を与えるための鉛直荷重用油圧コントローラの制御、真変位が目標変位に達する点（計測点）での Computer B への計測指令、を行う。
- Computer B は、Computer A からの計測指令を受け取ったときに、スキャナーを介してひずみゲージにから得られるひずみの計測を行う。

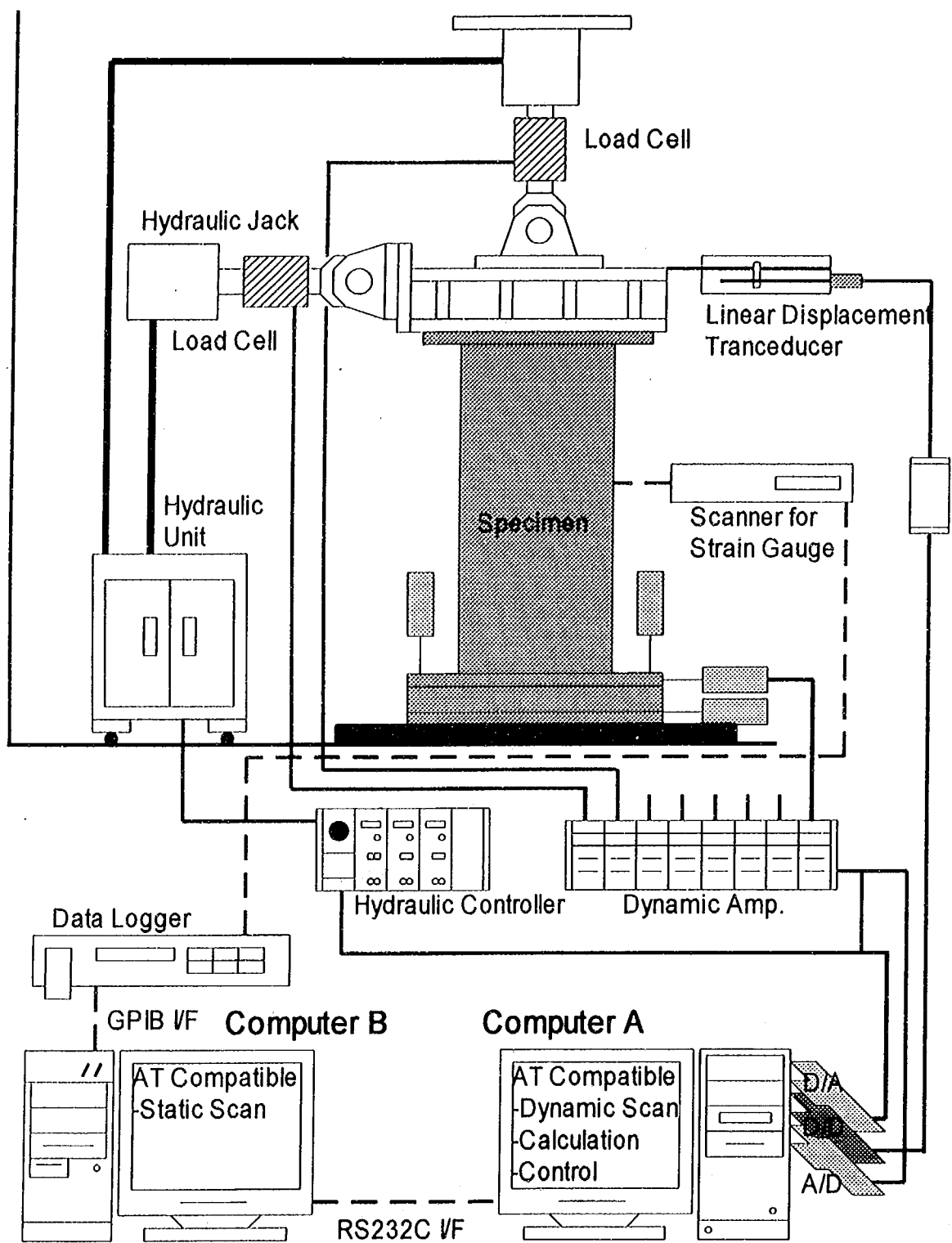


図-参考 1-4.1.2 計測・制御システム

4. 1. 3 観察位置の呼称

写真撮影・観察時に供試体の部位を明確にするために，図-参考 1-4.1.3 のように定めた．供試体を設置したときに反力壁と反対側を A 面とし，供試体を鉛直上方から見たときに，時計周りに A・C・B・D 面と定めた．

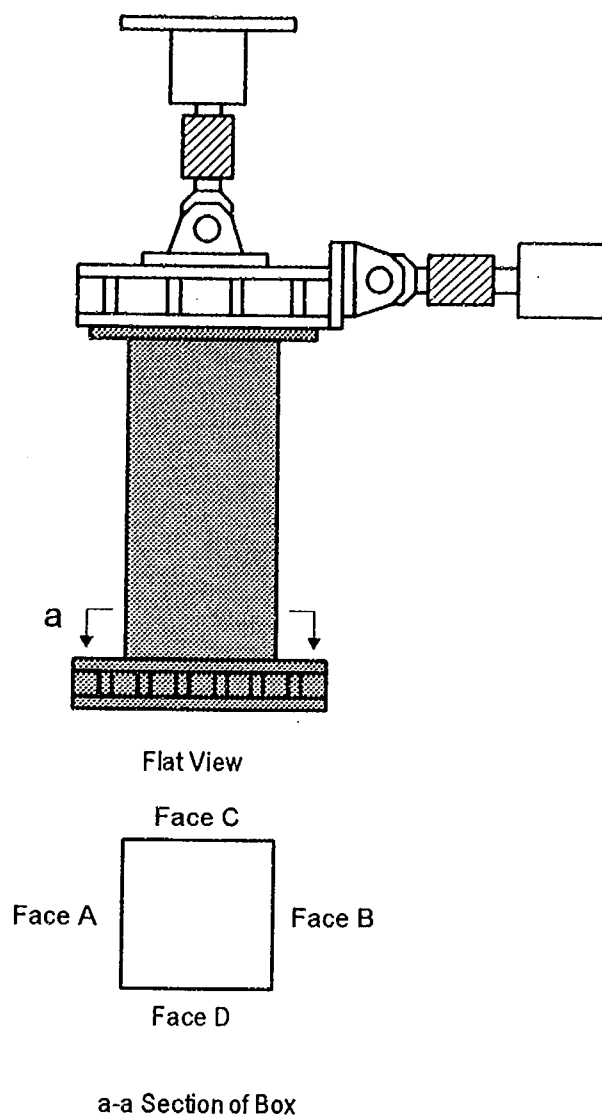


図-参考 1-4.1.3 観察位置の呼称

4. 1. 4 変位計位置

変位計は，磁歪式変位計を水平荷重載荷点高さに設置し，基部には水平変位及び剛体回転計測用のアナログ変位計を設置する．

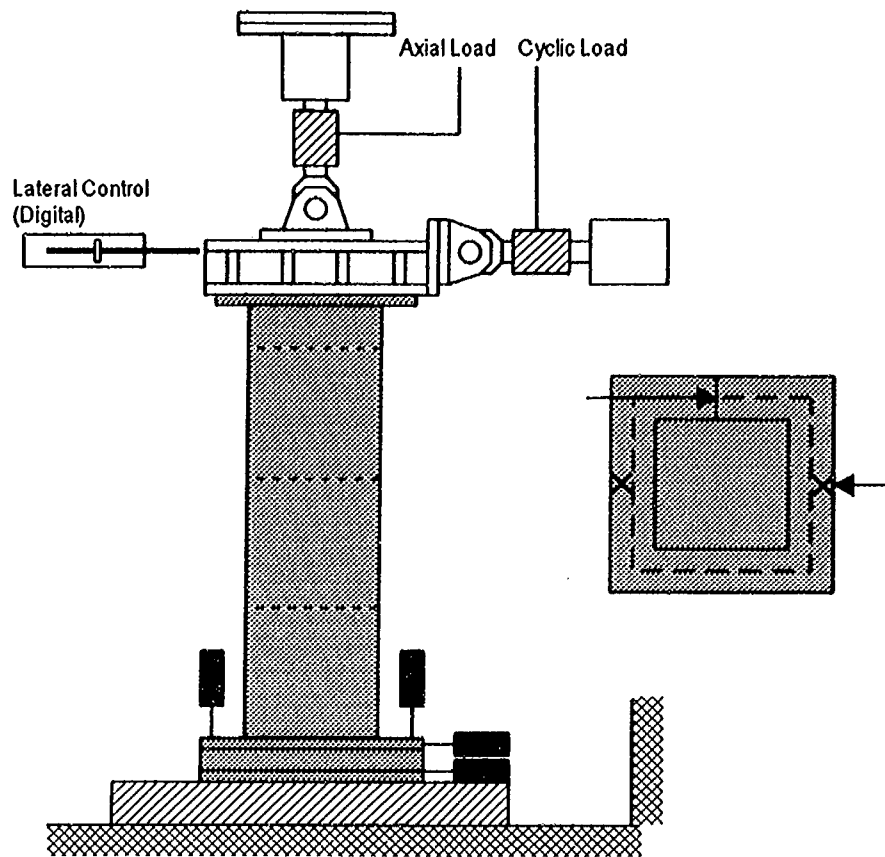


図-参考 1-4.1.4 変位計取り付け位置（鋼製橋脚供試体）

4. 1. 5 ひずみゲージ位置

ゲージの貼付位置を図-参考 1-4.1.6 に示す

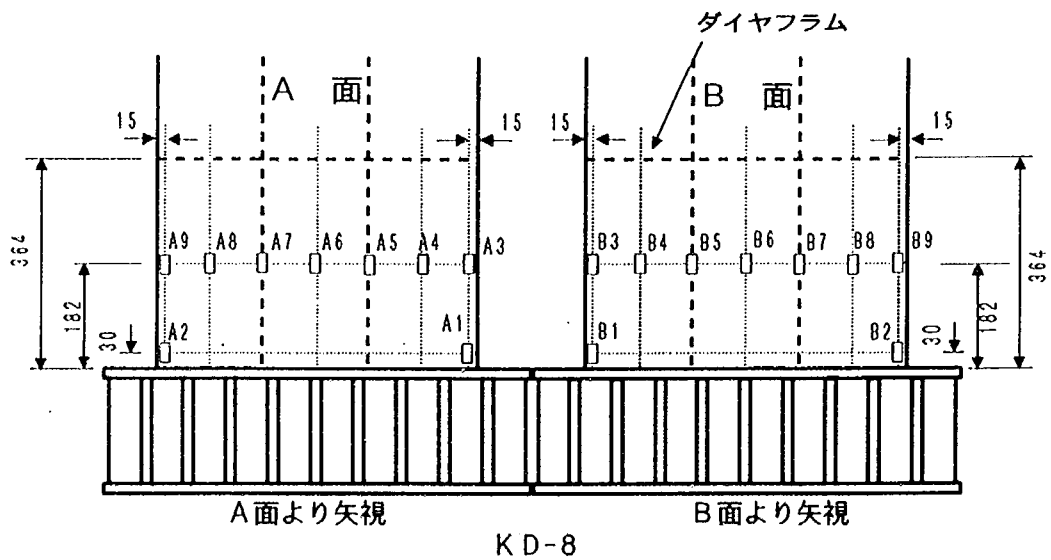


図-参考 1-4.1.6 ひずみゲージ位置（KD-8&KD-8Y）

4. 2 ハイブリッド実験

4. 2. 1 入力地震波

兵庫県南部地震のJR鷹取駅記録（修正）を用いた。

4. 2. 2 観察項目

前述の測定装置により、入力加速度の0.01秒相当経過毎に、水平力、変位量、およびひずみ量を計測した。特徴的な応答変位が生じた時点で供試体の変形性状を写真撮影し、局部座屈が認められる場合にはその変形量を定規により測定するなどして細かく観察を行なった。また、載荷実験全体を通して2方向からビデオ撮影を行ない、供試体の変形状況と計測器による測定値との対比が行なえるように配慮した。

4. 2. 3 相似則

ハイブリッド実験はあくまでも実橋のスケールダウンモデルで行う実験であるため、実験と数値解析間での入出力においては、相似率を考慮しなければならない。本実験では、名古屋大学構造研究室によって提案されている、1) 実構造物解析型手法、2) 相似モデル解析型手法、3) 周波数特性同調解析型手法、のうち、1) の手法を用いる。

この手法では、ステップバイステップで変位を計算する微分方程式を、実物大構造物について解く。式中の復元力は、供試体が実構造物の $1/S$ モデルである場合、実験から得られる復元力を S の二乗倍した値を用いる。そして計算の結果得られた次ステップの変位を $1/S$ 倍して実験制御を行う（図-参考 1-4.2.1）。供試体に与える軸力は、柱の全断面降伏荷重に対する比率が実物大橋脚と等しくなるように与える。

この手法の良いところは、実物大の振動を想定するために実構造物の固有周期に振動が影響され、地震加速度のサンプリング間隔 0.01 秒をそのまま使えることである。また、計測データの記録も実物大で行うと、実構造物の応答のイメージがわかりやすいという利点もあるが、今回の実験では、計測データの記録は応答計算の手前（相似率を乗ずる手前）で行ったため、荷重・変位とも供試体スケールでの記録とした。

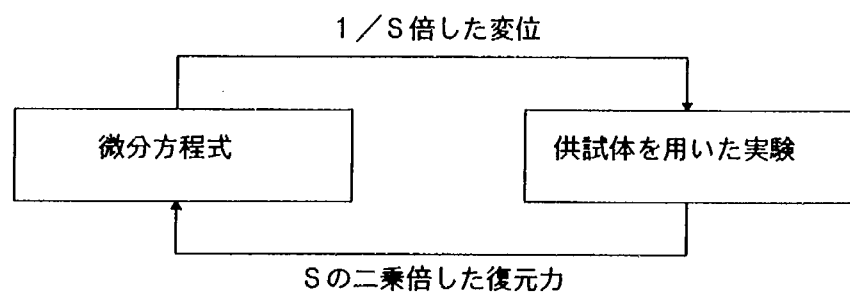


図-参考 1-4.2.1 実験中での相似率

4. 2. 4 微分方程式

線形加速度法によりスタートし、その後、中央差分法に切り替える。これは、中央差分法では第一ステップの計算が行えないためである。線形加速度法を用いる場合の剛性は、供試体の弾性域での静的な予備載荷を実験毎に行い、得られた剛性を用いる。

4. 2. 5 精度の検定と対策

ハイブリッド実験の精度に影響を及ぼす諸因子を本実験から除去するため、予備実験用供試体を用いて精度の検定を行った。一般的に検定が必要とされる項目と対策を以下に挙げる。

(1) 装置の摩擦力

軸力ジャッキをすえつけてあるスライド装置をはじめとする駆動部の摩擦力により、復元力の絶対値が真値よりも大きめに計測されることが考えられる。これにより、エネルギー吸収が過大に生じ、振動を減衰させることになる。

そのため、供試体の弾性域でくり返し載荷を行い、理論直線からの復元力の差を定数として求めておく。これを実験中得られる復元力から常に差し引くことで、摩擦の影響を除外する。

(2) 水平力載荷アクチュエータのオーバーシュート及びアンダーシュート

供試体載荷点が目標値に達したかどうかの判別は、変位計の精度及び目標値への到達までの時間を考慮して、ある程度の幅を設けて行う。その際、実際の変位が目標値に対して常に手前にある（アンダーシュート）と、ヒステリシスはエネルギー減衰となり、振動を発散させる。逆に常に行き過ぎている（オーバーシュート）と、過度のエネルギー吸収になり振動を減衰させる。

これを避けるため、1) 目標値への到達を判別する際の幅を変化させてテストを行い、目標値到達までにかかる時間とシューティングの様子をみながら、許容変位幅を調整する、2) それでも一貫してアンダーシュートまたはオーバーシュートが生じる場合は、目標値をどちらかへ若干オフセットして制御を行う、ことにする。

(3) 供試体基部の剛体回転

これは、動ひずみアンプがない場合に特に問題となる。本実験では、剛体回転量計算に用いる変位もすべて動ひずみアンプを用いて計測するため、常に補正された変位をピックアップすることができるので、特別な対策は必要ないと考えられる。

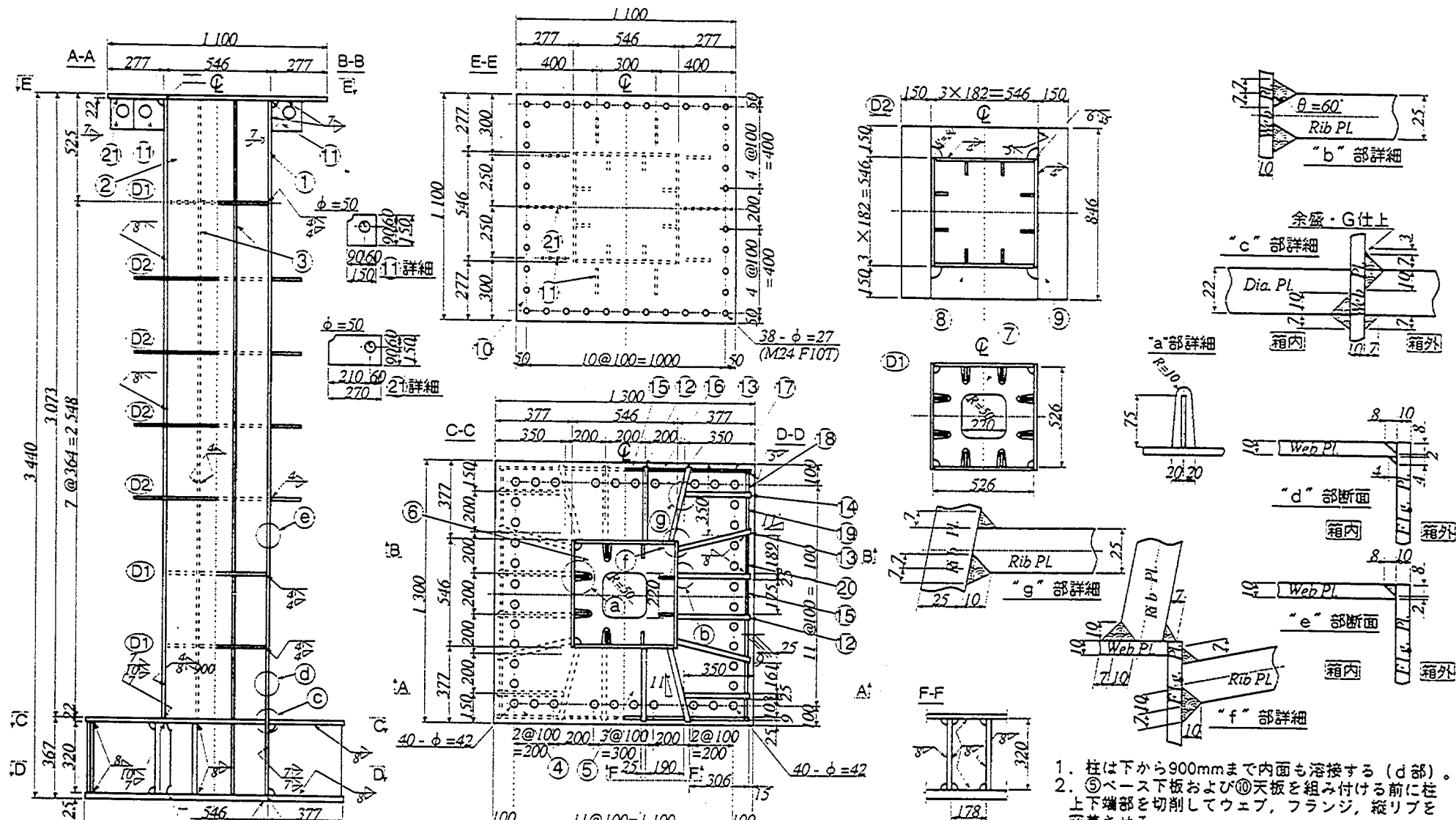
5. 仕様一覧

5. 1 使用機器

表-参考 1-5.1.1 使用機器リスト

種別	品名	メーカー	型番	個数
変位計	棒状変位計	東京測器研究所	SDP-200R	1台
	磁歪式変位計	(株) サンテスト	GYDC-03	1台
	棒状変位計	東京測器研究所	CDP-25	4台
	ワイヤ式変位計	東京測器研究所	DP-500C	1台
荷重計	2000k Nロードセル	(株) 巴技研	TRD-2000kN	1台
	5000k Nロードセル	(株) 巴技研	TRD-5000kN	1台
動ひずみ計	動ひずみアンプ	共和電業 (株)	DPM-711B	8台
スイッチボックス	スキャニングボックス	共和電業 (株)	USB-51A	1台
データ集録機	データロガー	共和電業 (株)	UCAM-10A	1台
油圧コントローラ	鉛直荷重用コントローラ 水平荷重用コントローラ	島津 (株)	EHF-JK-3.0L	1台
データ記録装置	パーソナル コンピュータ	富士通	FM/V 590	1台
		S S D C	M A R I M O P 466	1台

5. 2 供試体詳細図



- ① ウェブ 2-PL. 546X10X3393 (SM490)
 ② フランジ 2-PL. 526X10X3393 (〃)
 ③ 縦リブ 8-PL. 75X7X3393 (〃)
 ④ ベース上板 1-PL. 1300X22X1300 (SS400)
 ⑤ ベース下板 1-PL. 1300X28X1300 (SM400A)

(板厚25mm程度に切削仕上げ)

- ⑥ ベース部ダイアフラム 1-PL. 526X22X 520 (SS400)
 ⑦ 内ダイアフラム 3-PL. 526X 6X 520 (〃)
 ⑧ 外ダイアフラム 8-PL. 546X 6X 150 (〃)
 ⑨ 外ダイアフラム 8-PL. 150X 6X 846 (〃)
 ⑩ 天板 1-PL. 1100X22X1100 (〃)
 ⑪ 天板部補強リブ 8-PL. 150X22X150 (〃)

- ⑫ ベース補強板 8-PL. 362X25X 320 (SM400A)
 ⑬ 〃 8-PL. 384X25X 320 (〃)
 ⑭ 〃 4-PL. 340X25X 320 (〃)
 ⑮ 〃 4-PL. 174X 9X 320 (SS400)
 ⑯ 〃 4-PL. 190X 9X 320 (〃)
 ⑰ 〃 4-PL. 315X 9X 320 (〃)
 ⑱ 〃 4-PL. 103X 9X 320 (〃)
 ⑲ 〃 4-PL. 161X 9X 320 (〃)
 ⑳ 〃 4-PL. 189X 9X 320 (〃)
 ㉑ 吊金具 2-PL. 150X22X 270 (〃)

- 柱は下から900mmまで内面も溶接する (d部)。
- ⑤ベース下板および⑩天板を組み付ける前に柱上下端部を切削してウェブ、フランジ、縦リブを密着させる。
- D1ダイアフラムおよびベース部ダイアフラムは箱断面形成後に下部よりはめ込み。
- 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。
- 特記無きスカラップはR=30とする。
- 別紙「吊金具図」により吊金具を設置する。
- ①②の材料からロール方向・クロス方向に、③の材料からロール方向に試験片を採取する。

6. 解説

以後，実験結果を，材料試験結果，ハイブリッド実験結果の順に示す．

7.実験結果

7.1 解説

鋼製橋脚供試体の 1 回目の実験結果を以下に示す.示すのは,

- ハイブリッド実験
 - 荷重-変位関係
 - 時刻歴応答変位
 - 履歴吸収エネルギー
 - 荷重-ひずみ関係

である.

ここに用いた変位はすべて, 基部のスライドや剛体回転を除去した, 載荷点高さにおける変位である.
エネルギー-吸収能の算定は, 台形則を用いた.

7.2 材料試験結果

7.2.1 鋼材引張試験

供試体に用いた鋼材の材料試験結果を示す。試験片は、原板毎に圧延（L）方向、圧延と直角（C）方向それぞれ 3 本ずつ切り出した。ただし縦リブは、全て L 方向のみ本を採取した。すべて JIS Z2201 5 号の試験片である。

表-参考 1-7.2.1 角柱の鋼材引張試験結果

供試体	方向	材質	試験片	板厚 (mm)	UYP (N/mm ²)	LYP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)
KD-8	L	SM490A	JIS5	9.98	392	374	531	39
KD-8	L	SM490A	JIS5	9.98	391	377	530	39
KD-8	L	SM490A	JIS5	9.98	394	372	529	39
平均					392	374	530	39
KD-8	C	SM490A	JIS5	9.99	396	378	536	38
KD-8	C	SM490A	JIS5	9.99	399	374	531	39
KD-8	C	SM490A	JIS5	9.99	395	375	532	39
平均					397	376	533	39
KD-8	L	SM490A	JIS5	9.96	403	377	529	40
KD-8	L	SM490A	JIS5	9.95	388	373	528	40
KD-8	L	SM490A	JIS5	9.95	395	376	528	41
平均					395	375	528	40
KD-8	C	SM490A	JIS5	9.95	395	378	530	38
KD-8	C	SM490A	JIS5	9.94	393	378	528	39
KD-8	C	SM490A	JIS5	9.95	393	376	527	39
平均					394	377	528	39
KD-8	L	SM490A	JIS5	9.98	387	376	529	39
KD-8	L	SM490A	JIS5	9.99	391	378	527	41
KD-8	L	SM490A	JIS5	9.99	394	375	526	40
平均					391	376	527	40
KD-8	C	SM490A	JIS5	10.0	402	380	528	39
KD-8	C	SM490A	JIS5	9.98	394	376	528	38
KD-8	C	SM490A	JIS5	9.99	390	376	525	40
平均					395	377	527	39
KD-8Y	L	SM490YA	JIS5	10.11	474	454	567	39
KD-8Y	L	SM490YA	JIS5	10.12	468	456	566	39
KD-8Y	L	SM490YA	JIS5	10.13	482	466	565	37
平均					475	459	566	38
KD-8Y	C	SM490YA	JIS5	10.10	463	452	562	38
KD-8Y	C	SM490YA	JIS5	10.11	478	450	561	38
KD-8Y	C	SM490YA	JIS5	10.13	484	462	563	38
平均					475	455	562	38
KD-8Y	L	SM490YA	JIS5	10.03	460	446	555	38
KD-8Y	L	SM490YA	JIS5	10.03	465	441	554	40
KD-8Y	L	SM490YA	JIS5	10.02	469	455	556	40
平均					465	447	555	39
KD-8Y	C	SM490YA	JIS5	10.03	468	456	563	36
KD-8Y	C	SM490YA	JIS5	10.04	472	448	561	37
KD-8Y	C	SM490YA	JIS5	10.03	469	450	560	36
平均					470	451	561	36

表-参考 1-7.2.2 リブの鋼材引張試験結果

供試体	方向	材質	試験片	板厚 (mm)	UYP (N/mm ²)	LYP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)
KD-8	リブ	SM490A	JIS5	7.21	453	440	548	35
KD-8	リブ	SM490A	JIS5	7.21	452	444	547	36
KD-8	リブ	SM490A	JIS5	7.21	456	443	548	34
平均					454	442	548	35
KD-8Y	リブ	SM490YA	JIS5	7.22	434	411	566	34
KD-8Y	リブ	SM490YA	JIS5	7.21	390	387	566	35
KD-8Y	リブ	SM490YA	JIS5	7.20	408	405	566	36
平均					411	401	566	35

7.3 KD-8シリーズ

7.3.1 K D-8

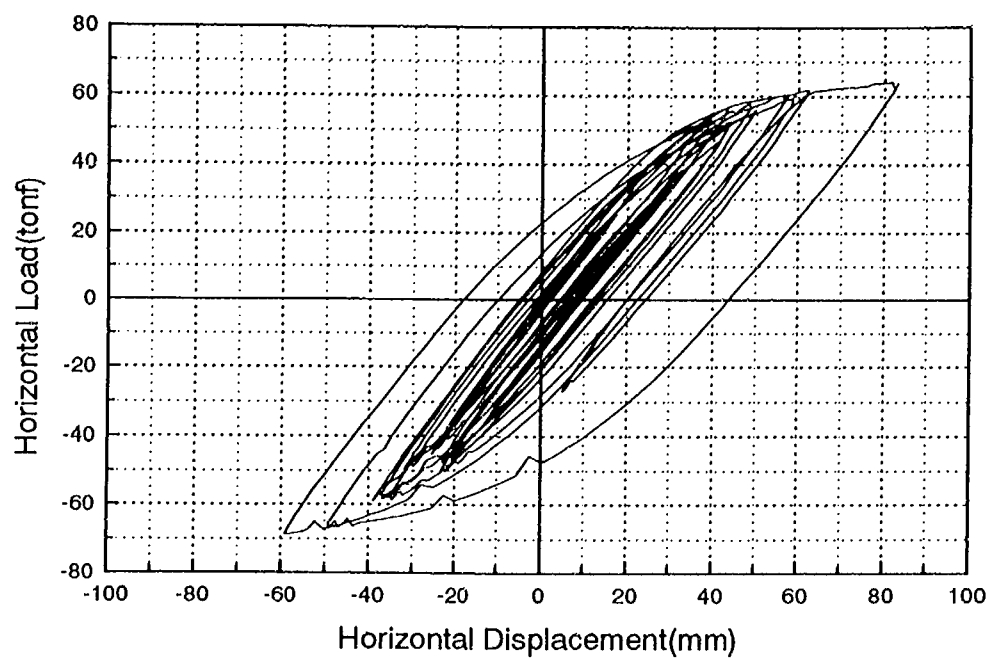


図-参考 1-7.3.1 水平荷重-変位履歴曲線 (K D-8)

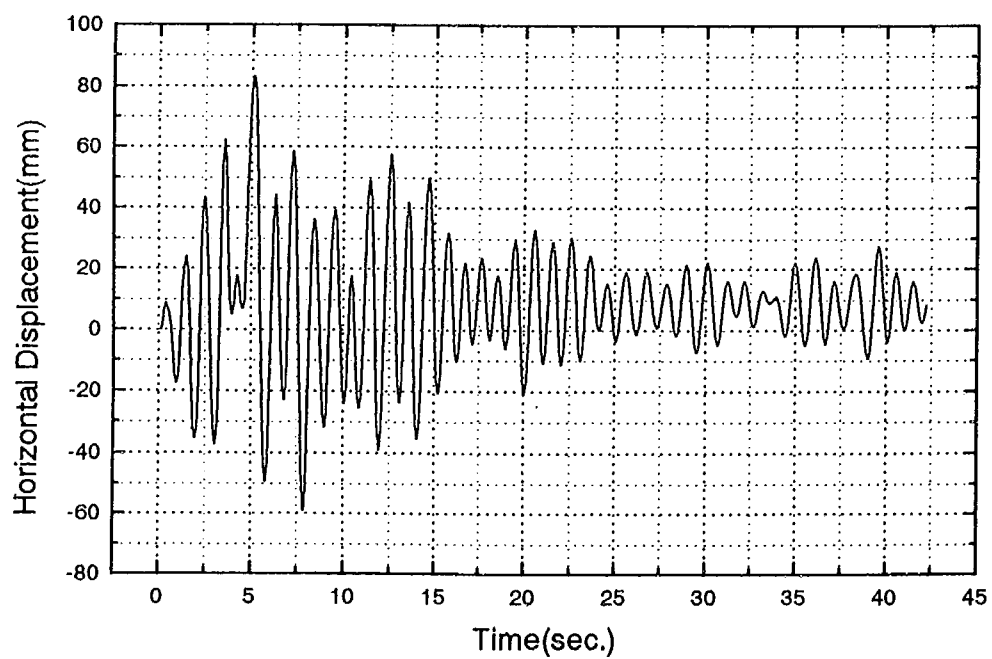


図-参考 1-7.3.2 時刻歴応答変位 (K D-8)

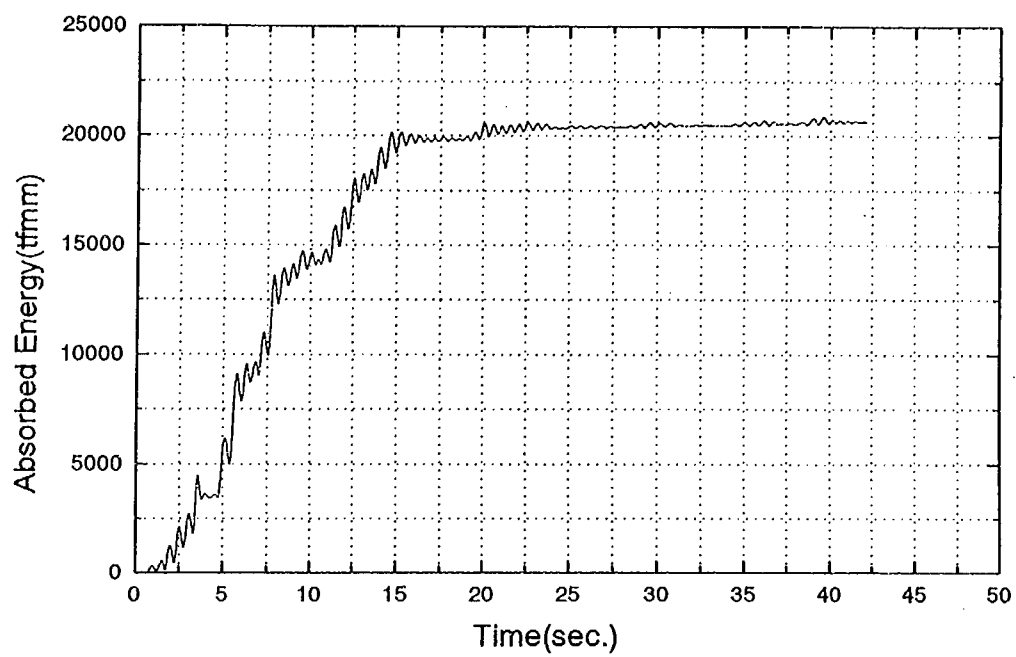


図-参考 1-7.3.3 累積エネルギー-吸収量 (K D-8)

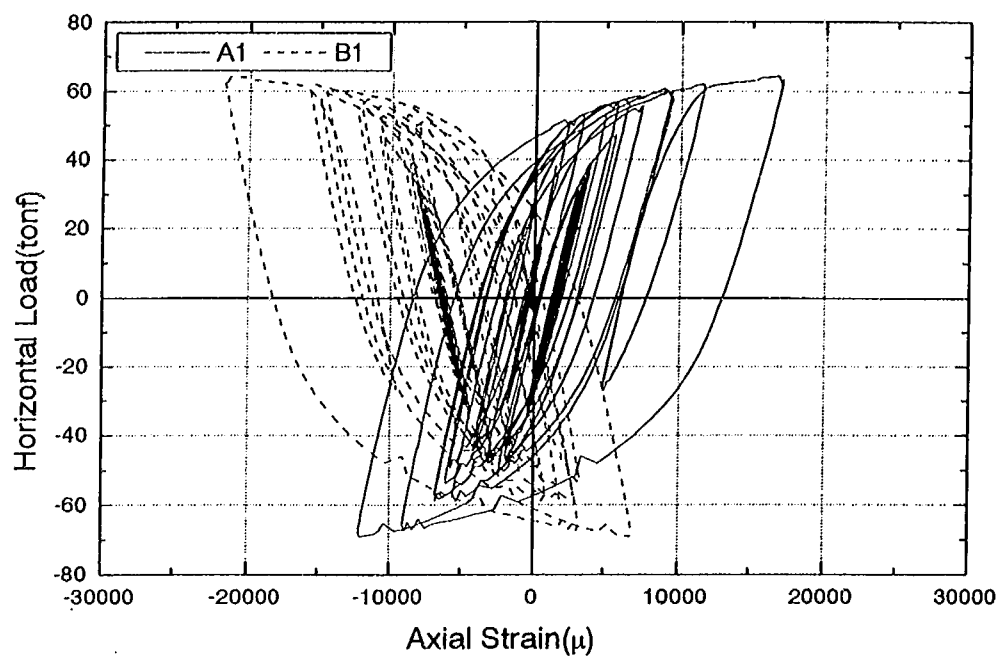


図-参考 1-7.3.4 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8、A 1 & B 1)

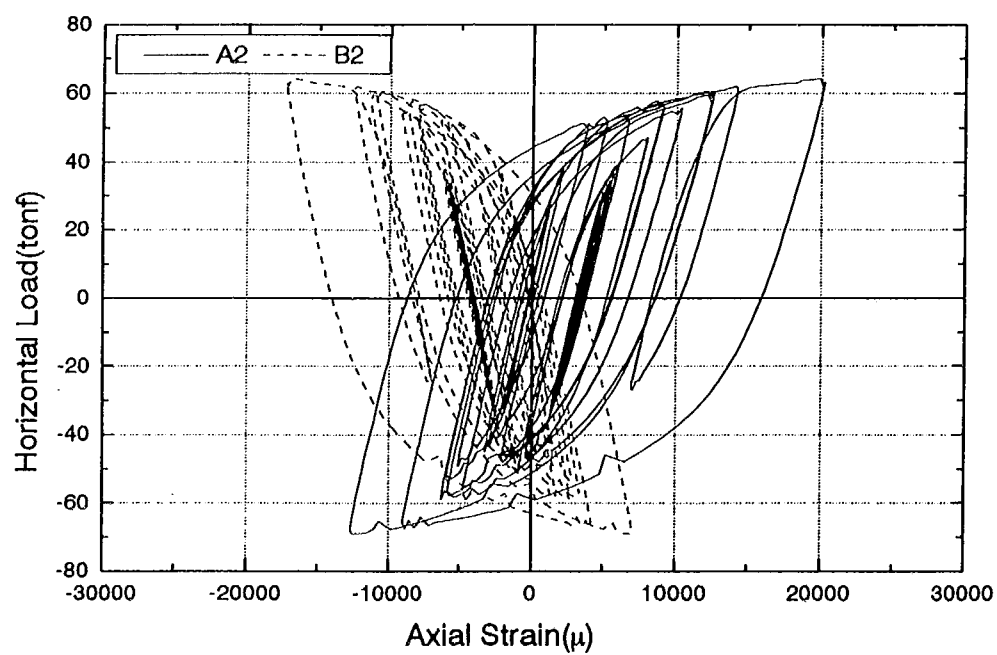


図-参考 1-7.3.5 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8、A 2 & B 2)

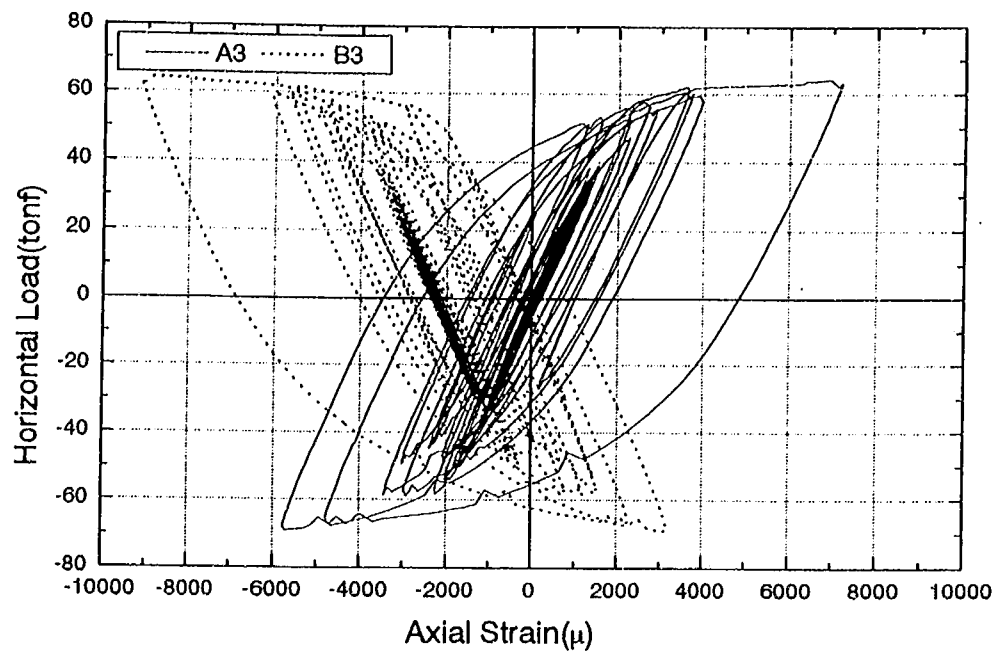


図-参考 1-7.3.6 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8、A 3& B 3)

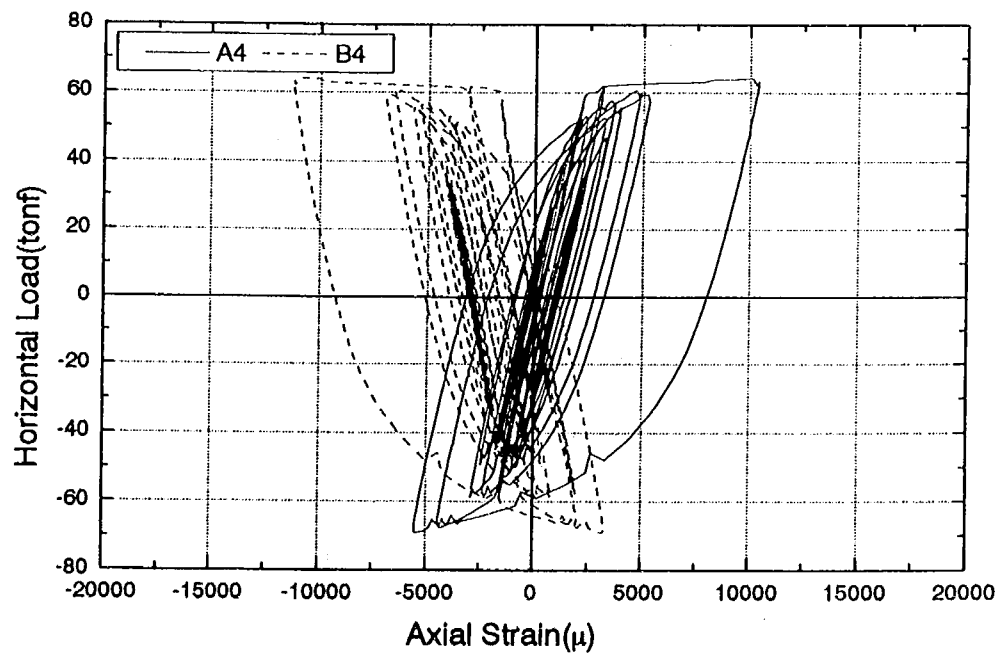


図-参考 1-7.3.7 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8、A 4& B 4)

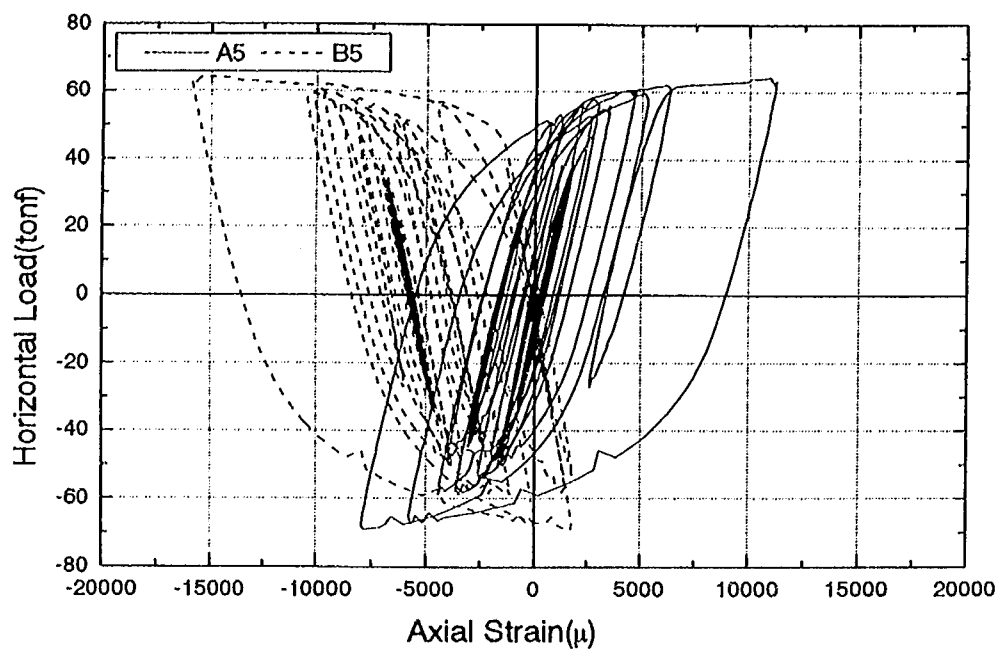


図-参考 1-7.3.8 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8、A 5& B 5)

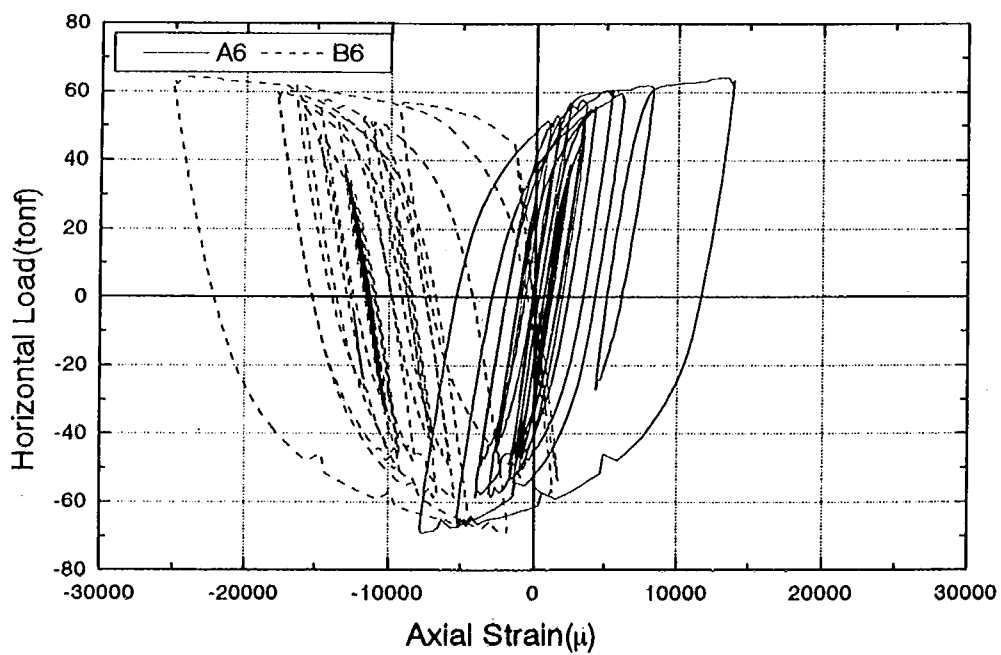


図-参考 1-7.3.9 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8、A 6& B 6)

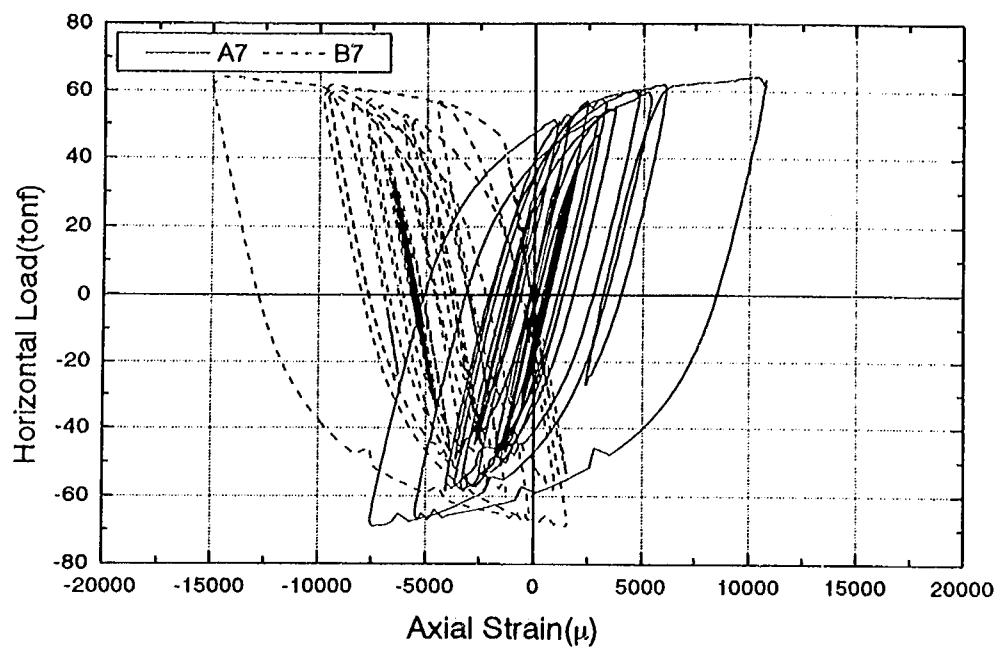


図-参考 1-7.3.10 水平荷重-ひずみ関係 (KD-8、A 7 & B 7)

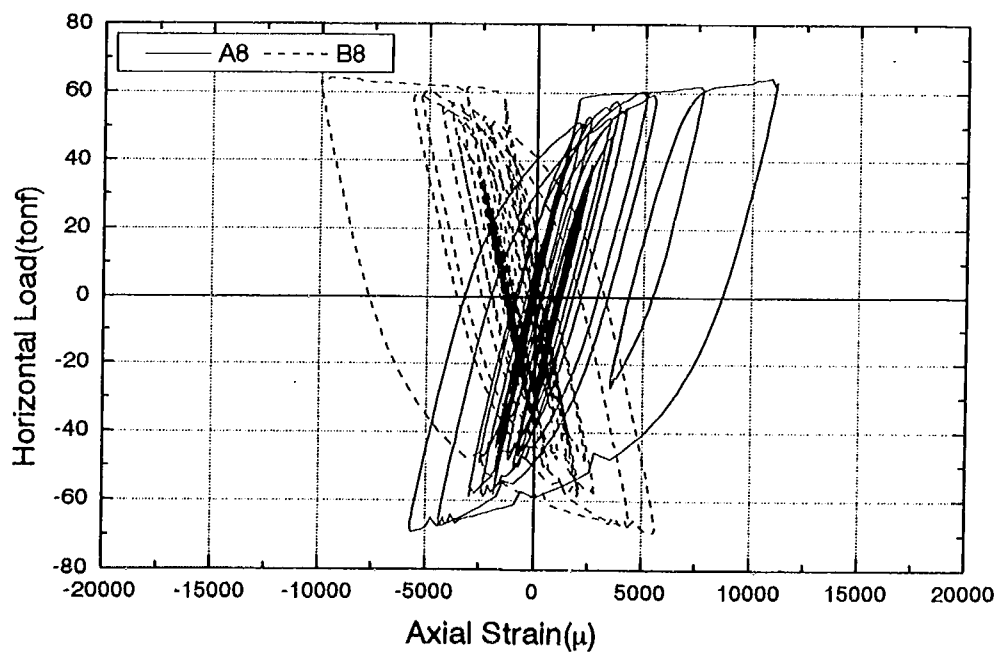


図-参考 1-7.3.11 水平荷重-ひずみ関係 (KD-8、A 8 & B 8)

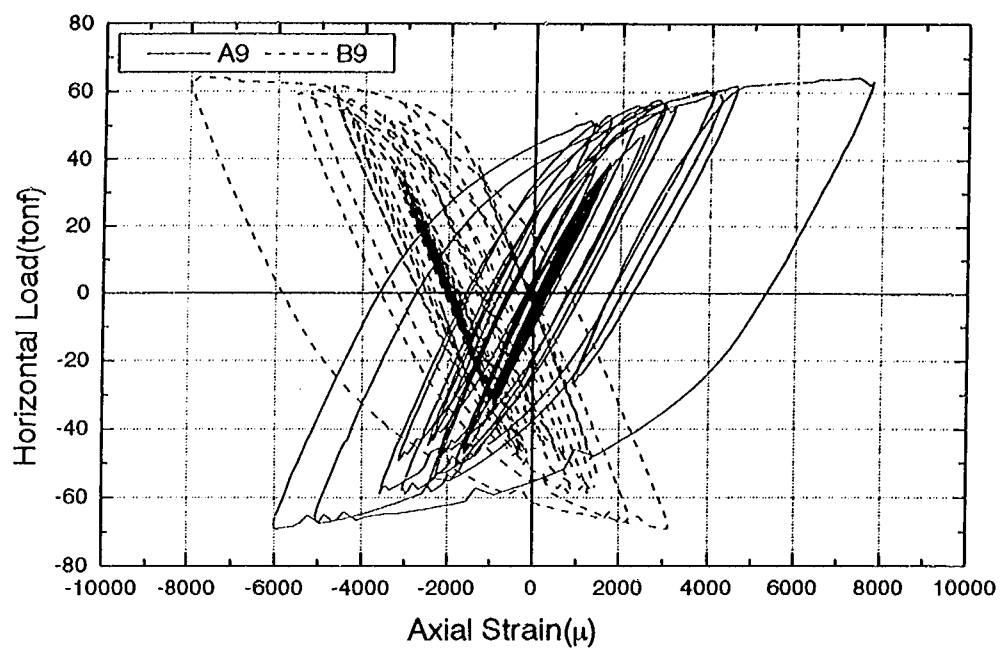
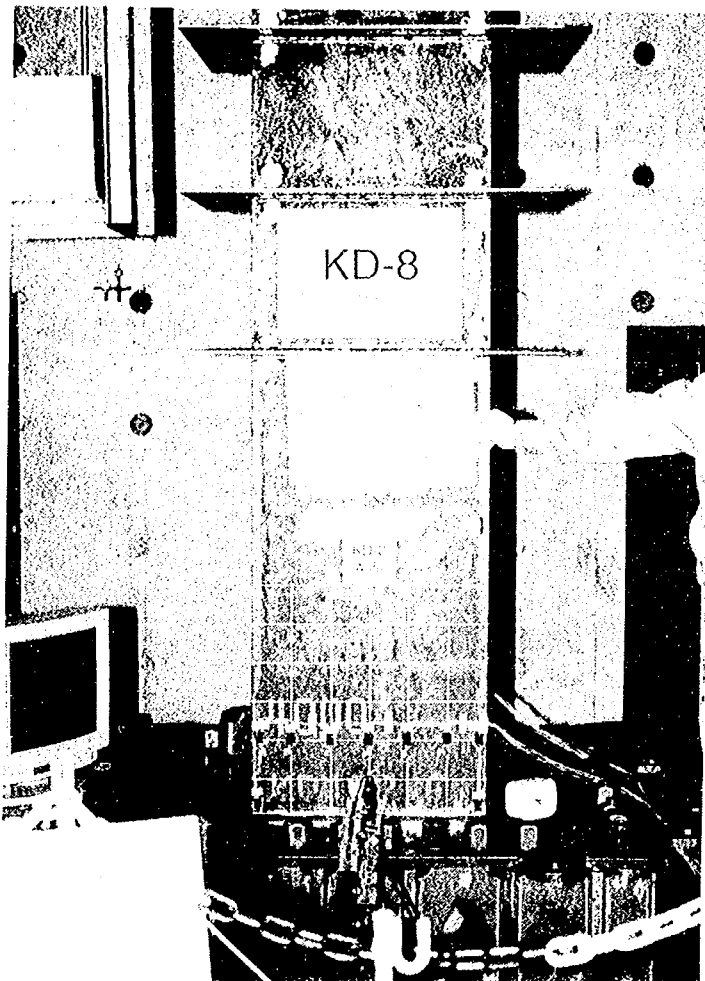
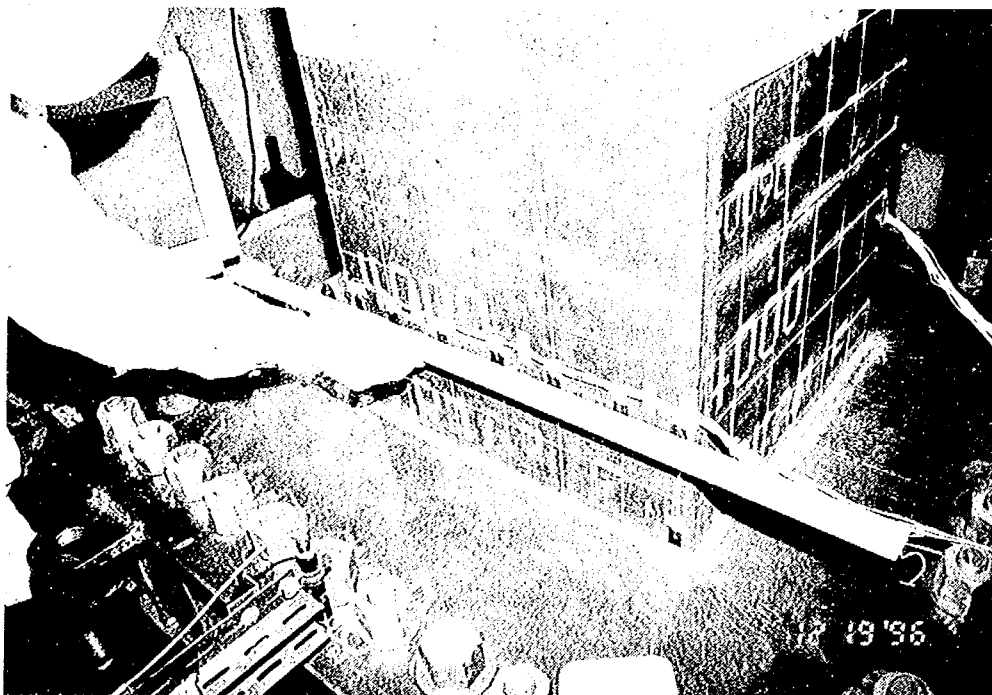
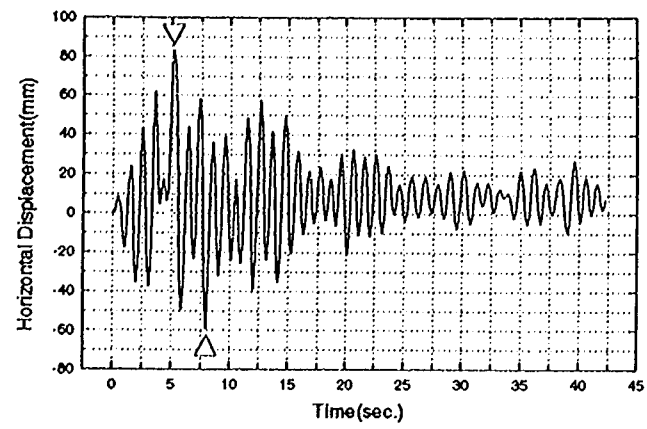
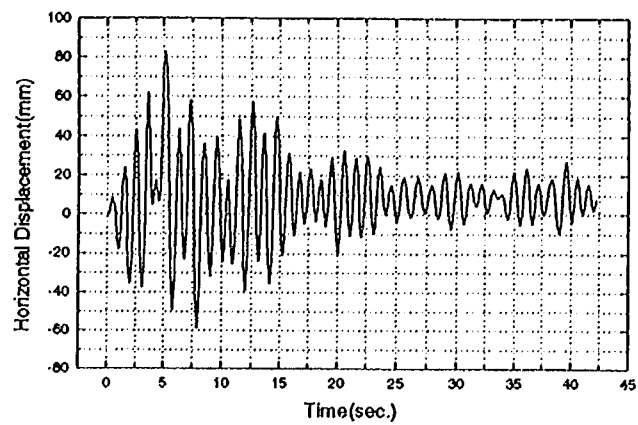


図-参考 1-7.3.12 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8、A 9 & B 9)







7.3.2 K D-8 Y

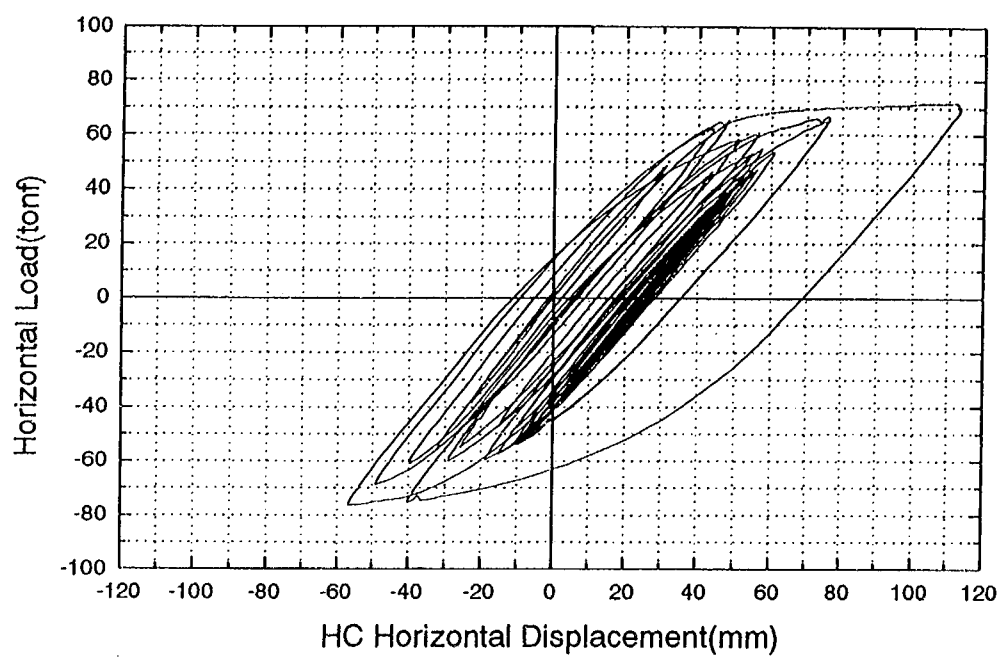


图-参考 1-7.3.13 水平荷重-变位履歴曲線 (K D-8 Y)

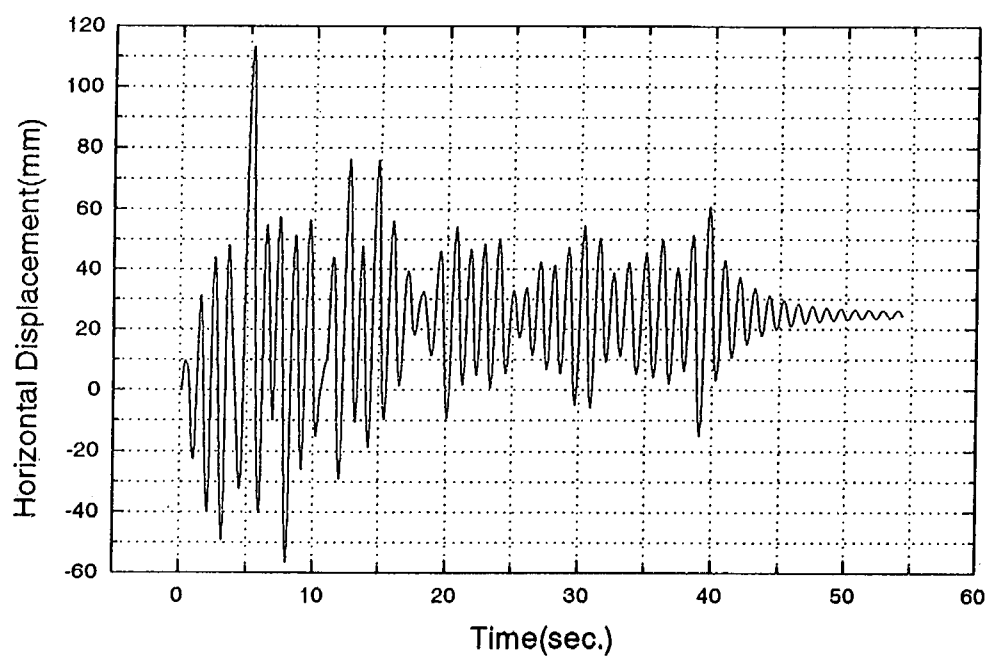


图-参考 1-7.3.14 時刻歴応答変位 (K D-8 Y)

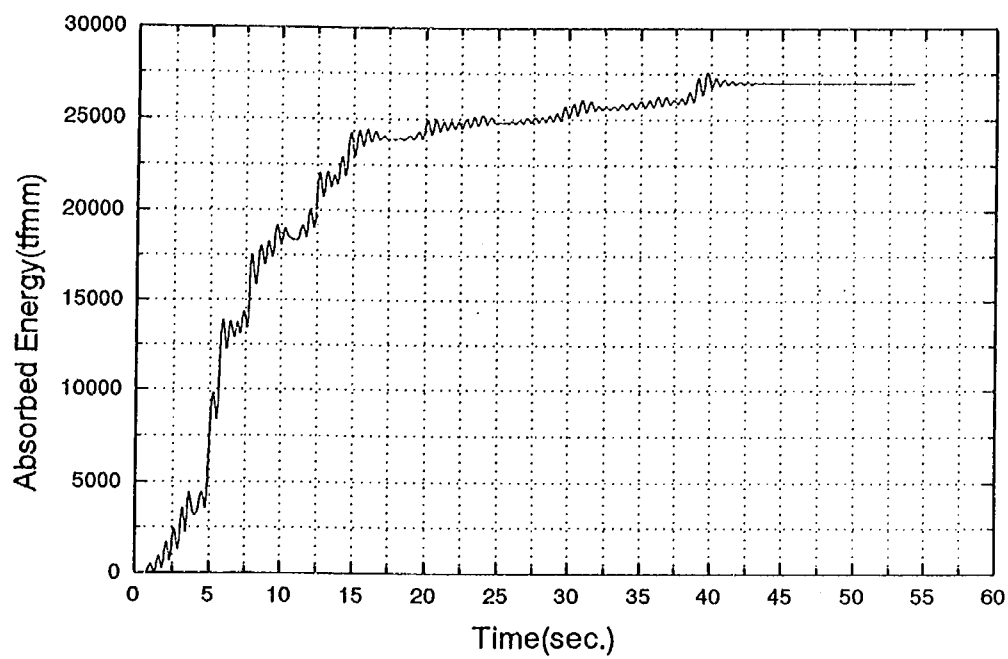


図-参考 1-7.3.15 累積エネルギー-吸収量 (K D-8 Y)

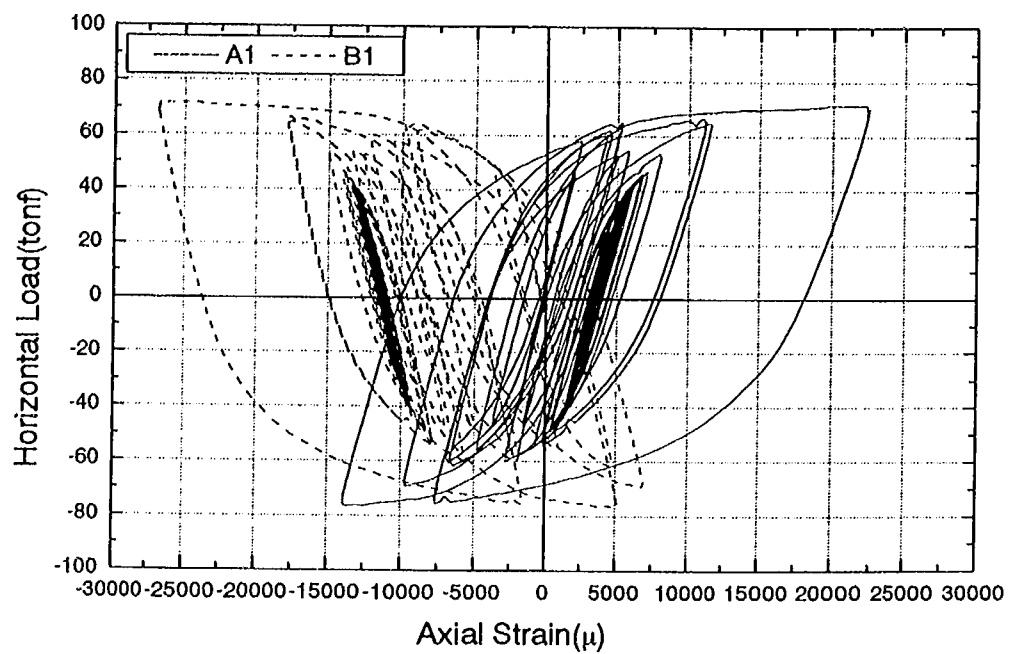


図-参考 1-7.3.16 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8 Y、A 1 & B 1)

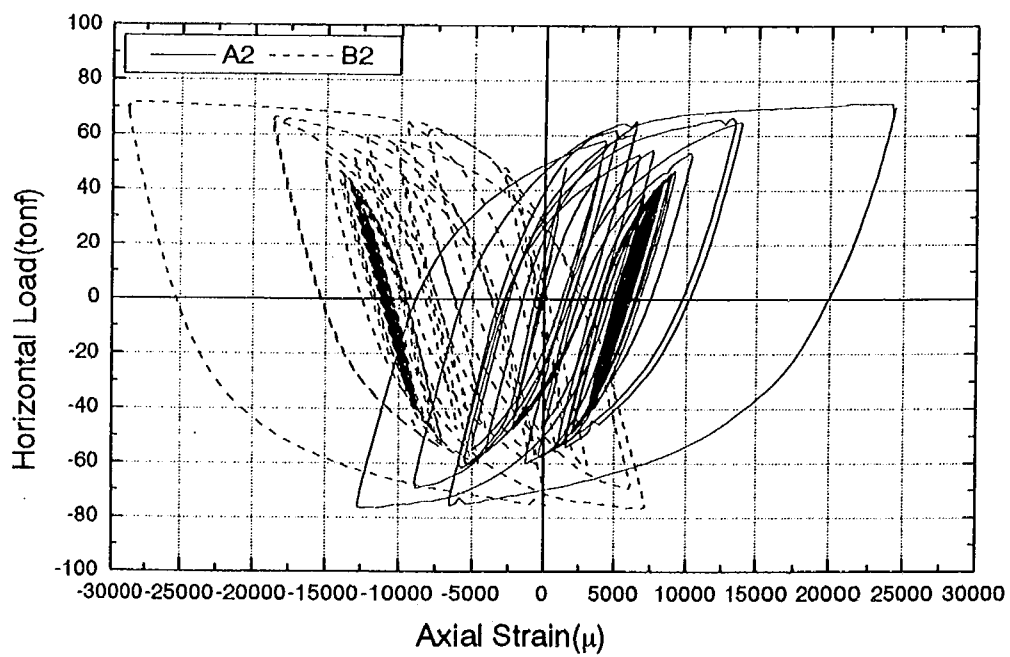


図-参考 1-7.3.17 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8 Y、A 2 & B 2)

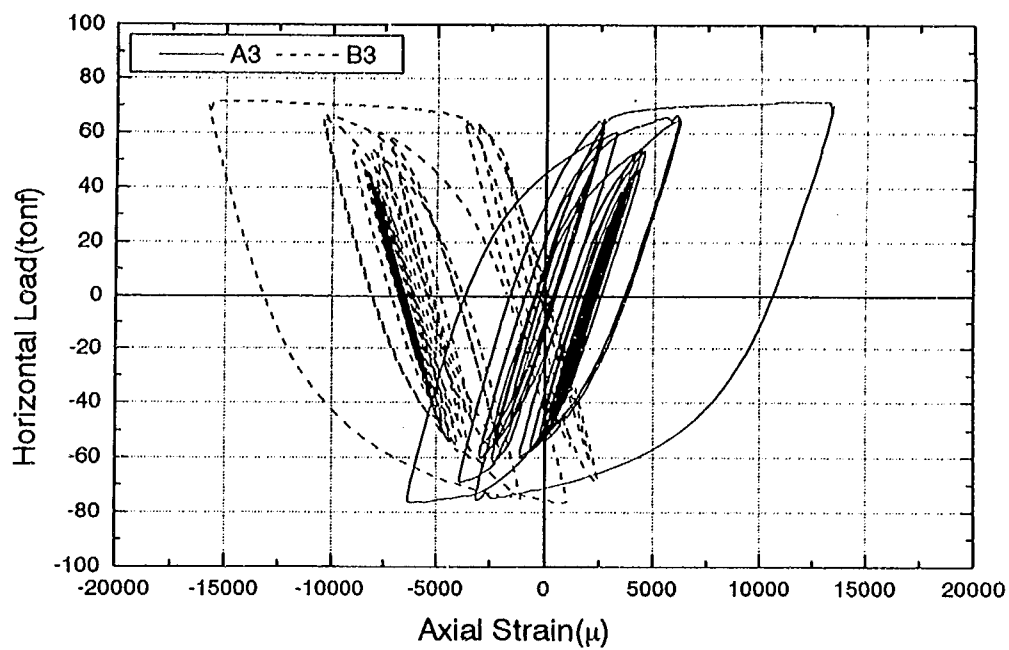


図-参考 1-7.3.18 水平荷重-ひずみ関係 (KD-8 Y、A 3& B 3)

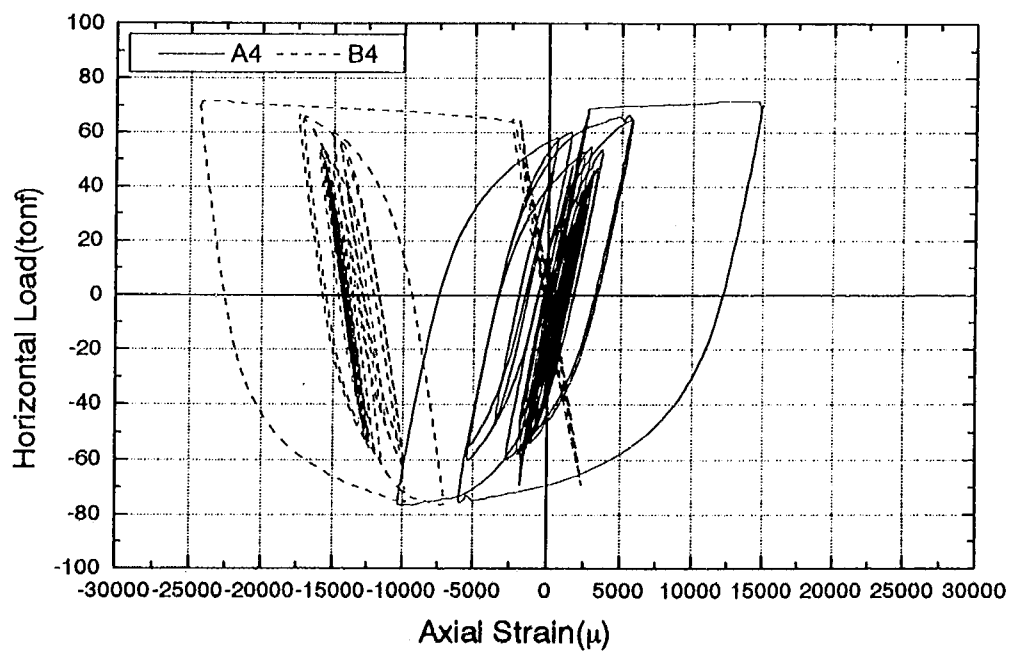


図-参考 1-7.3.19 水平荷重-ひずみ関係 (KD-8 Y、A 4& B 4)

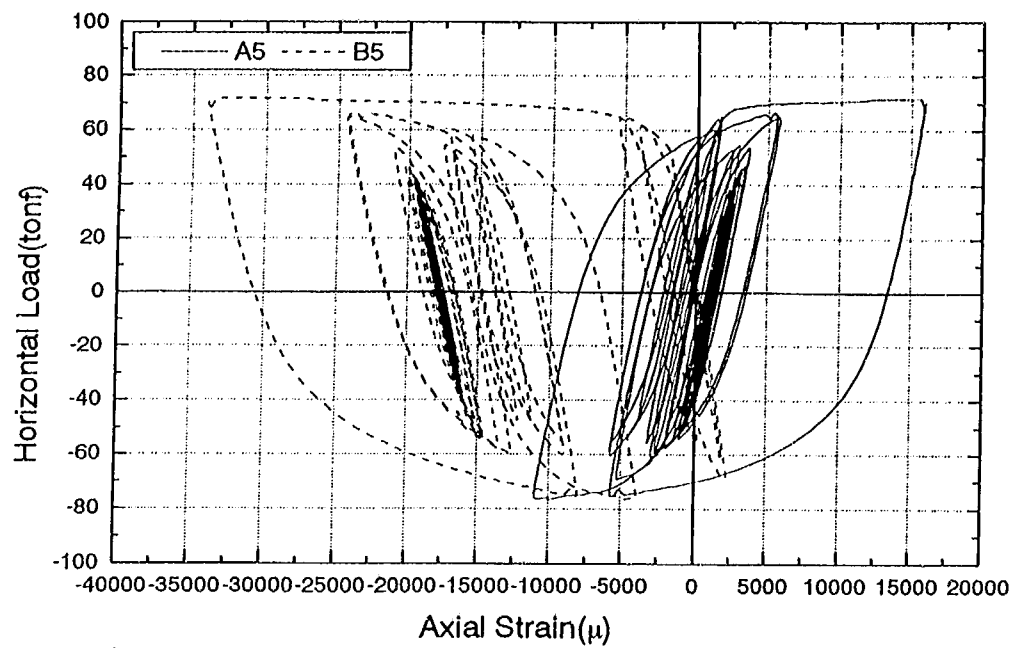


図-参考 1-7.3.20 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8 Y、A 5& B 5)

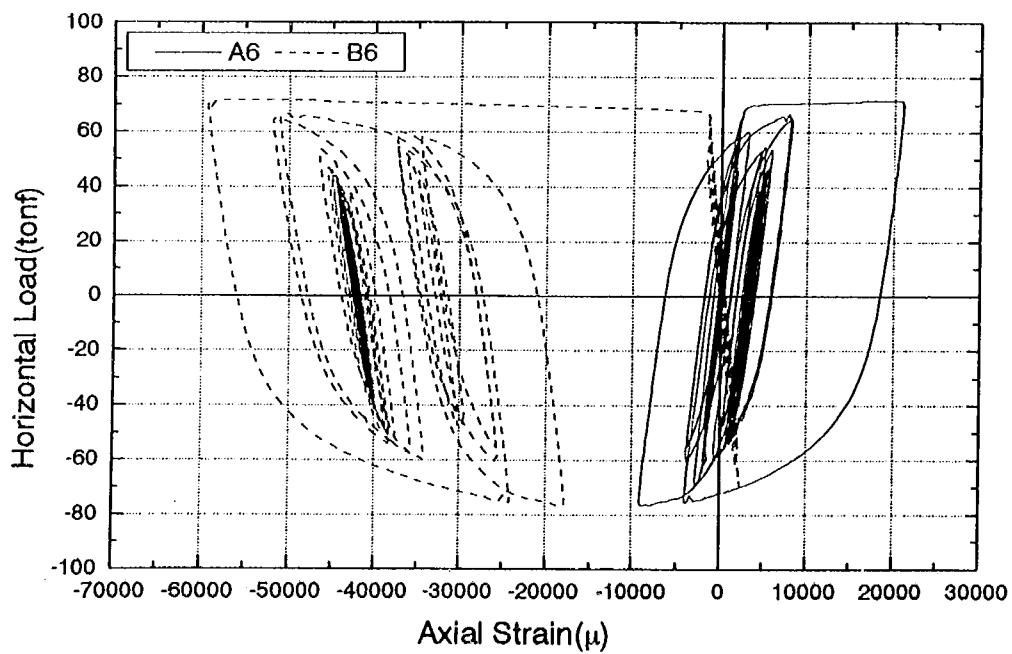


図-参考 1-7.3.21 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8 Y、A 6& B 6)

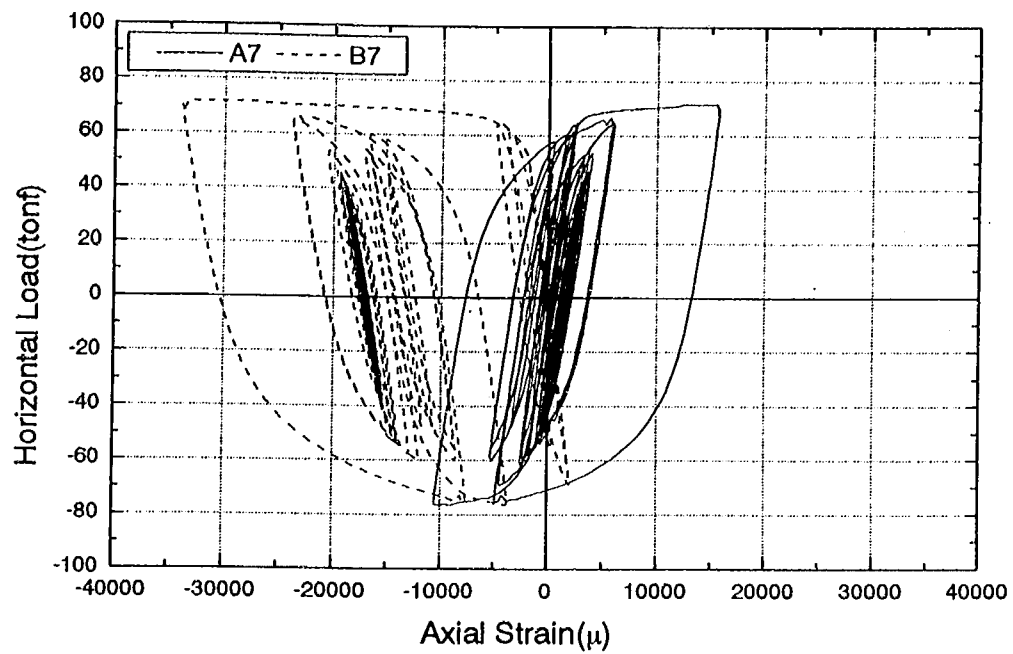


図-参考 1-7.3.22 水平荷重-ひずみ関係 (KD-8 Y、A 7& B 7)

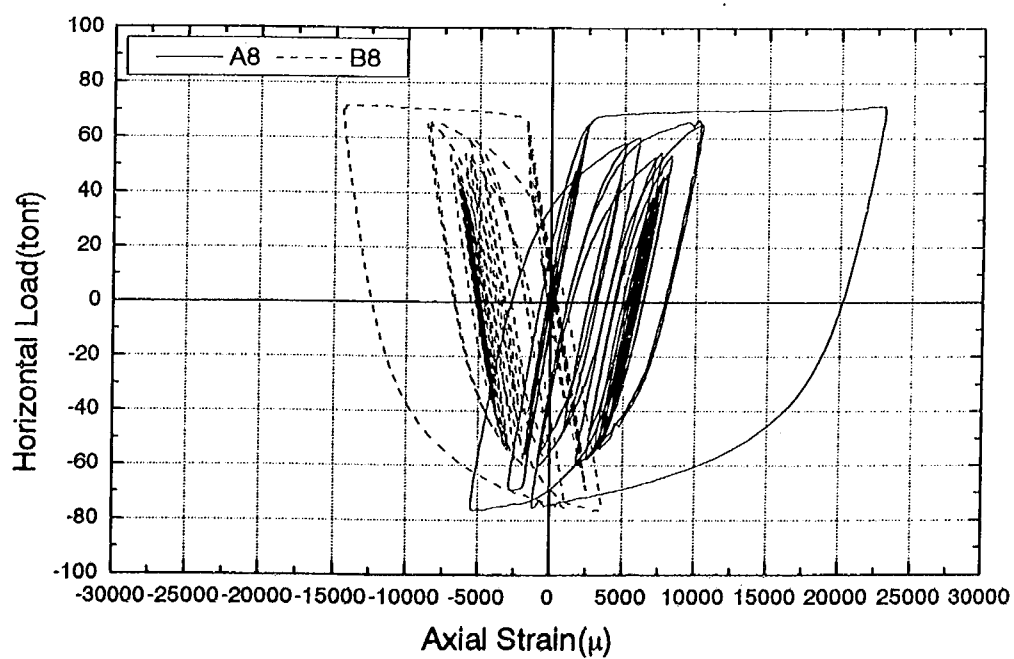


図-参考 1-7.3.23 水平荷重-ひずみ関係 (KD-8 Y、A 8& B 8)

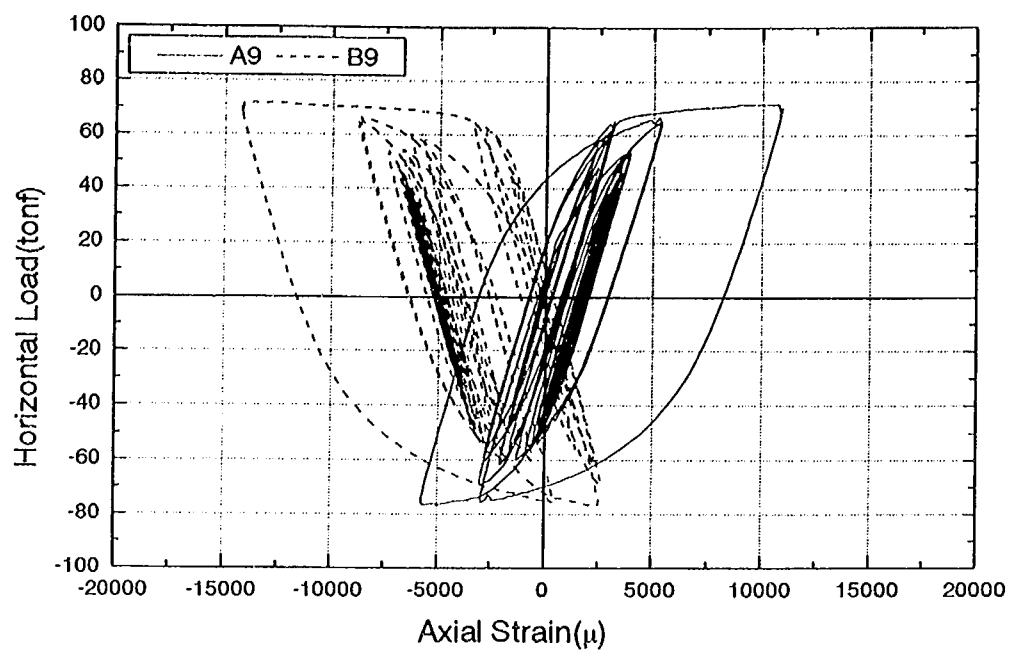
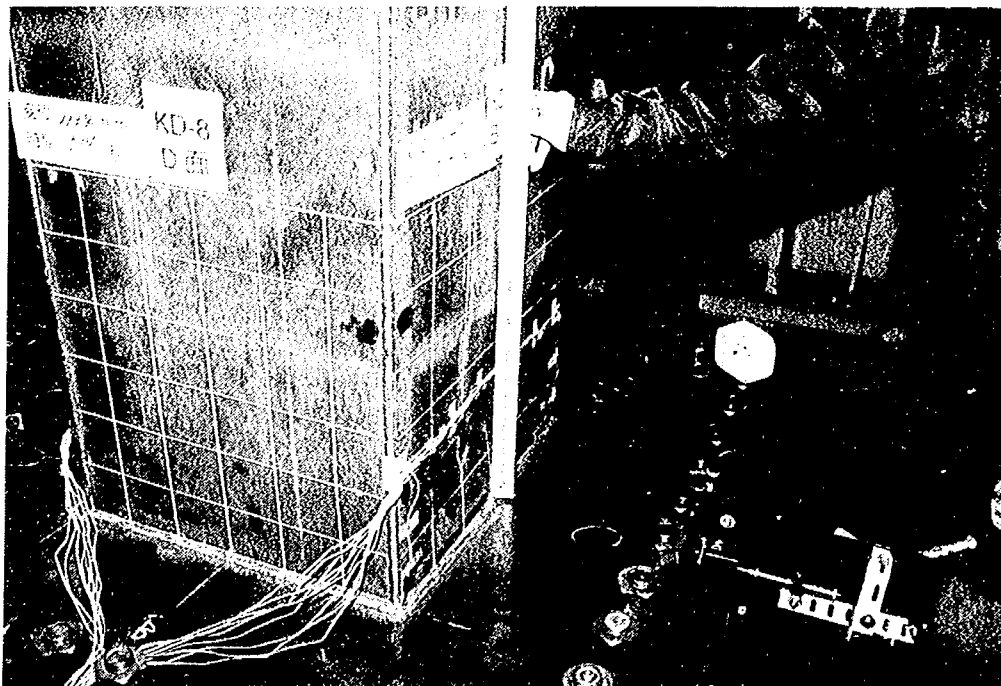
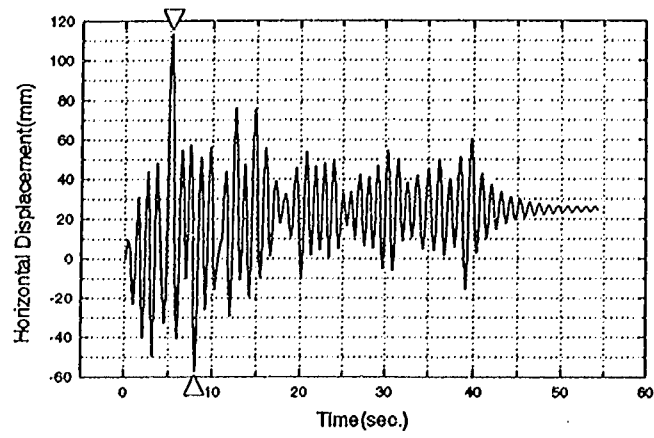
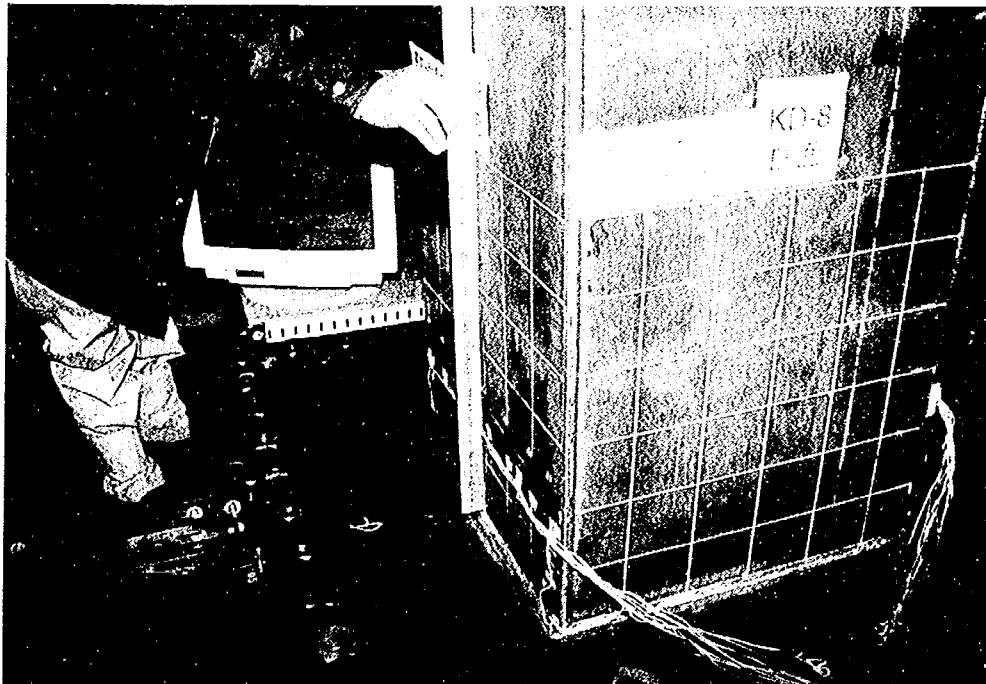
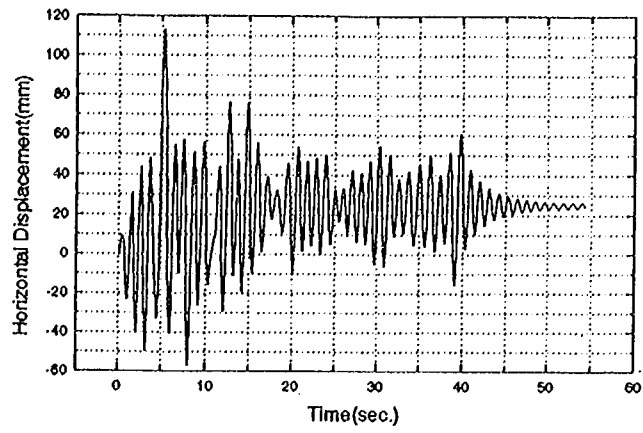


図-参考 1-7.3.24 水平荷重-ひずみ関係 (K D-8 Y、A 9 & B 9)







参考資料一 2

円形断面鋼製橋脚の FEM 解析

1. まえがき

先の兵庫県南部地震は、高架橋を中心にじん性の高い鋼製橋脚にも被害を与えた。この被害の多くは、橋脚に軸圧縮力が作用した状態で、繰り返し水平荷重が作用したことにより発生したとされている。これを契機に、鋼製橋脚の耐震について精力的に各方面で研究がなされている。

大地震時における鋼製橋脚の弾塑性挙動を解明するには、実験だけでは不十分であり、数値解析的な検討が必要になってくる。また費用および時間的にもこの解析的な手法は有効であると考えられる。このことから、最近では、この解析的研究が多く行われている。例えば、鈴木ら¹⁾は汎用非線形構造解析ソフトウェア MARC を用いて、箱形断面鋼製橋脚に対し単調増大の荷重を作用させた弾塑性有限変形解析を行い、強度と変形能について研究を行っている。中川ら²⁾は、汎用非線形構造解析ソフトウェア ABAQUS を用いて、繰り返し荷重を受ける箱形断面鋼製橋脚に対し、等方硬化則で弾塑性有限変形解析を行い、断面形式の変形能に及ぼす効果を調べている。安波ら³⁾は、MARC を用いて、繰り返し荷重を受ける円断面鋼製橋脚に対し等方硬化則と移動硬化則で弾塑性解析を行い、実験との比較を行っている。

また、一般の汎用解析ソフトウェアで利用可能な構成則では、構造用鋼材の繰り返し弾塑性の特性が十分に反映されないとして、宇佐美ら⁴⁾は、修正 2 曲面モデルを開発している。さらに、後藤ら⁵⁾も、大ひずみ領域でも精度が保てる 3 曲面モデルについての研究を行っている。

従来、非線形解析は、一部の解析者が行っていたが、コンピュータの性能の飛躍的向上、汎用解析ソフトウェアの普及により、比較的容易に行えるようになってきた。このことから、この汎用解析ソフトウェアの精度と適用限界を知ることは、非常に重要と考えられる。

上記観点から、(社)鋼材倶楽部では円形断面鋼製橋脚を対象として、代表的な汎用非線形構造解析ソフトウェアにより、種々の構成則を用いた弾塑性有限変形解析を実施し、実験との比較検討を行うことにより、汎用解析ソフトウェアの構造用鋼材の繰り返し塑性解析への適用性について考察するとともに、実験を補完するパラメータ解析を実施した。本参考資料はその結果について報告するものである。

2. 汎用非線形構造解析ソフトウェアの比較

2.1 解析対象モデル

2.1.1 実験供試体の諸元

解析対象の円断面鋼製橋脚の供試体を図-参考 2-2.1 および表-参考 2-2.1 に示す。

2.1.2 載荷条件

円断面鋼製橋脚の柱頭部に全断面降伏軸力の 15% の一定軸圧縮力を作用させた状態で、水平方向に単調増大変位と繰り返し変位を与える。

繰り返し変位は、図-参考 2-2.2 に示すような降伏変位 δ_y を基本にした漸増繰り返し $(+1\delta_y, -1\delta_y, +2\delta_y, -2\delta_y, +3\delta_y, \dots)$ の強制変位である（ただし、この強制変位量は正確には δ_y の整数倍にはならず、実際の載荷実験の変位量に合わせた）。

2.2 解析方法

2.2.1 解析モデル

解析モデルは、解析時間を短縮させるため、図-参考 2-2.3 に示すように片持ち柱の応力状態を考えて、直径の 2 倍の高さまでをシェル要素でモデル化し、残りを梁要素でモデル化した。局部座屈が発生すると思われるところには、さらに細かく要素分割を行った。シェル要素と梁要素の結合部は、柱の円断面の形状が不変と仮定して連続条件を設定している。境界条件として、柱下端部は完全固定とした。また、構造および荷重条件の対称性を考えて、1/2 モデルで解析を行った。なお、この解析には、初期不整、残留応力は考慮していない。

汎用解析ソフトウェアは、真応力-真ひずみ関係を入力する必要があるため、次式より工学応力 σ_E と工学ひずみ ε_E から算出した。

$$\sigma = \sigma_E (1 + \varepsilon_E) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \ln (1 + \varepsilon_E) \quad (2.2)$$

この算出した曲線を図-参考 2-2.4 に示すように 2 直線近似と多直線近似で定義した。

2.2.2 解析ソフト

解析に使用した汎用非線形構造解析ソフトウェアは、ABAQUS、MARC、ADINA、ANSYS である。

2.2.3 構成則

構成則として、汎用解析ソフトウェアで利用可能な等方硬化則と移動硬化則、宇佐美らが開発した修正 2 曲面モデル、後藤らが開発した 3 曲面モデルを用いて解析を行った。修正 2 曲面モデルおよび 3 曲面モデルの詳細については、文献 4)、5) を参照されたい。

なお、ABAQUS の解析において、移動硬化則で応力-ひずみ関係を多直線近似した場合と、修正 2 曲面モデルおよび 3 曲面モデルを用いた場合は、ユーザサブルーチンとして ABAQUS に組み込んで解析を

行った。

2.2.4 解析条件

各解析ソフトで使用した要素を表-参考 2-2.2 に示す。使用材料は SS400 であり、ヤング率 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、降伏応力 $\sigma_y = 2950 \text{ kgf/cm}^2$ とした。これ以外の解析条件（例えば、収束の判定条件、荷重ステップ数、降伏条件など）は、各解析ソフトが推奨する方法で各々行った。

2.3 解析結果

2.3.1 単調載荷の結果

単調載荷で解析を行ったときの各解析ソフトウエアの比較結果を図-参考 2-2.5 に示す。この場合、応力-ひずみ関係を多直線近似および関数定義（修正 2 曲面モデル、3 曲面モデル）している。この図からわかるように、最大耐荷力までは、全解析ソフトウエアでよく一致している。また、最大耐荷力を過ぎた劣化域においては、ABAQUS（修正 2 曲面モデル、3 曲面モデル）、MARC および ANSYS の結果が同じ結果になるが、ABAQUS（多直線近似）は劣化度合が小さく、また、ADINA は反対に大きくなっている。

ABAQUS を例に、応力-ひずみ関係を、2 直線近似、多直線近似および関数定義（修正 2 曲面モデル、3 曲面モデル）したときの解析結果の比較を図-参考 2-2.6 に示す。全変位領域において 2 直線近似の耐荷力が他の場合より多少大きくなる傾向を示し、特に最大耐荷力が大きくなっている。この最大耐荷力が大きくなった原因は、応力-ひずみ関係を 2 直線近似した場合に、最大耐荷力のときが応力-ひずみ関係の降伏棚の部分に当たり、高い応力値で計算することになったためと思われる。

2.3.2 繰り返し載荷の結果

構成則として、移動硬化則（修正 2 曲面モデル、3 曲面モデルも含む）と等方硬化則を用いて、繰り返し載荷で解析した結果を実験値と対比して示す。

(1) 移動硬化則の結果

1) 多直線近似、修正 2 曲面モデル、3 曲面モデル

各解析ソフトウエアの解析結果を以下に示す。

ABAQUS：応力-ひずみ関係を多直線近似したときの解析結果を図-参考 2-2.8(a)に示す。この図からわかるように最大耐荷力については実験値とよく一致している。劣化域についても、耐荷力は $5\delta_y$ まではよく一致しており、これ以降は、多少高くなる傾向を示している。図-参考 2-2.9 の包絡線において、この解析ソフトウエアに限らず初期勾配が実験の方が小さくなっているのがわかる。これは、供試体の初期不整の影響や実験装置の初期補正が不完全であったためと思われる。履歴ループの形については、実験と異なり、角張った紡錘形になっている。これは、この構成則が弾性域の縮小を考慮していないためと思われる。その結果、図-参考 2-2.10 のように、履歴吸収エネルギーが実験値と比較して高くなっている。なお、この履歴吸収エネルギーは、図-参考 2-2.7 に示したようにヒステリシス曲線の各ループで囲まれた面積で表される。

修正 2 曲面モデルを ABAQUS に組み込み、解析した結果を図-参考 2-2.8(b)に示す。この図から最大耐荷力が実験値とよく一致しているのがわかる。劣化域についても、耐荷力は実験値と一致している。7 δ_y からは多少高くなっているが、これは、このモデルがそれほど大きくないひずみの場合を前提につくられているからである。ヒステリシス曲線の形についても、実験と一致しており、履歴吸収エネルギーも図-参考 2-2.10 からわかうように 6 δ_y までは実験値とよく一致している。

3 曲面モデルを ABAQUS に組み込み解析した結果を図-参考 2-2.8(c)に示す。この図から最大耐荷力が実験値とよく一致しているのがわかる。全劣化域についても実験値と概ね一致している。これは、このモデルが大ひずみをも考慮してつくられているからである。ヒステリシス曲線の形および履歴吸収エネルギーについても、全変位領域において実験と概ね一致している。

MARC：応力－ひずみ関係を多直線近似したときの MARC の解析結果を図-参考 2-2.8(d)に示す。この図からわかるように最大耐荷力については実験値とよく一致している。劣化域についても、6 δ_y まではよく一致しており、これ以降は、多少高くなる傾向を示している。ヒステリシス曲線の形については、実験と異なり、ABAQUS の多直線近似の場合と同様に角張った紡錘形になっている。その結果、図-参考 2-2.10 のように履歴吸収エネルギーが実験値と比較して高くなっている。

ADINA：応力－ひずみ関係を多直線近似したときの ADINA の解析結果を図-参考 2-2.8(e)に示す。この図からわかるように最大耐荷力については実験値とよく一致している。劣化域についても、7 δ_y まではよく一致しており、これ以降は、多少低くなる傾向を示している。この解析ソフトウェアだけが、このように低くなる傾向を示している。単調載荷のときでもこの解析ソフトウェアは劣化傾向が強かったので、使用した要素の定式化などの相違によるものと思われる。ヒステリシス曲線の形については、実験と異なり、ABAQUS の多直線近似の場合と同様に角張った紡錘形になっている。しかし、劣化傾向が強いため、結果的には、図-参考 2-2.10 のように履歴吸収エネルギーは他の解析ソフトウェアの多直線近似の場合に比べ実験値に近くなっている。

ANASYS：応力－ひずみ関係を多直線近似したときの ANSYS の解析結果を図-参考 2-2.8(f)に示す。この図からわかるように最大耐荷力については実験値とよく一致している。劣化域についても、5 δ_y まではよく一致しており、これ以降は、高くなる傾向を示している。ヒステリシス曲線の形については、実験と異なり、ABAQUS の多直線近似の場合と同様に角張った紡錘形になっている。しかし、劣化傾向が弱いため、図-参考 2-2.10 のように履歴吸収エネルギーは、他の解析ソフトウェアの多直線近似の場合と異なり増加し続けて減少しない。これは、多直線近似の移動硬化則が他の解析ソフトウェアと異なり、除荷後の逆負荷過程においても降伏棚ができるような特性をもっているためと思われる。

2) 2 直線近似

応力-ひずみ関係を2直線近似したときのABAQUSの解析結果を図-参考2-2.11に示す。この図からわかるように最大耐荷力については実験値と概ね一致している。劣化域については、耐荷力は高くなっている。この理由は、応力-ひずみ関係を2直線近似で定義しているの、大ひずみになると応力が実際より大きくなってしまふからである。

他の解析ソフトウェアを含めて、包絡線と履歴吸収エネルギーの図を図-参考2-2.12、2.13に示す。これらの図からわかるように耐荷力は、全変位領域において実験より高くなり、履歴吸収エネルギーも実験より高く劣化が進んでも減少しない傾向を示している。また、多直線近似の場合(図-参考2-2.9、2.10参照)では、各解析ソフトウェアで解析結果が異なっているのに対し、この2直線近似の場合では、ほとんどその差がないことがわかる。

3) 多直線近似と2直線近似の比較

ABAQUSを例にとり、多直線近似と2直線近似の場合を比較してみると、図-参考2-2.14、2.15からわかるように最大耐荷力までは耐荷力、履歴吸収エネルギーともに概ね一致しているが、劣化が進むにつれて2直線近似した場合の方が高くなる傾向を示している。

(2) 等方硬化則の結果

等方硬化則で応力-ひずみ関係を多直線近似したときのABAQUSの解析結果を図-参考2-2.16に示す。この図からわかるように最大耐荷力および全変位領域において実験値より高くなっている。ただし、図-参考2-2.17に示したような除荷時の折り返し点を結んだ包絡線においては、最大値は実験値と一致している。ヒステリシス曲線の形については、移動硬化則で示した角張った紡錘形にはならず、実験に近い形になっている。図-参考2-2.18に示すように履歴吸収エネルギーにおいては、ヒステリシス曲線の形は実験と似ているが、全変位領域において耐荷力が実験値より高いので、その分高くなっている。

(3) 移動硬化則と等方硬化則の比較

応力-ひずみ関係を多直線近似したときの移動硬化と等方硬化の相違について、ABAQUSの場合を例にとり比較した結果を図-参考2-2.19、2.20に示す。図-参考2-2.19の包絡線においては、移動硬化の方が、実験に近い傾向を示す。ただし、劣化が進むと移動硬化と等方硬化の差はなくなる。また、図-参考2-2.20の履歴吸収エネルギーにおいては、どちらも実験値より高い値を示すが、劣化の傾向は、等方硬化の方が実験に近くなっている。

2.3.3 変形モードの結果

修正2曲面を用いてABAQUSで解析したときの座屈モードの例を図-参考2-2.21に示す。この図から橋脚基部に局部座屈(ちょうちん座屈)が発生しているのがわかる。

この局部座屈している橋脚基部近辺の左右の座屈モードを、各解析ソフトウェアについて実験と比較した結果を図-参考2-2.22に示す。ABAQUSは、修正2曲面モデルを用い、他の解析ソフトウェアは、移動

硬化則で応力－ひずみ関係を多直線近似した場合の解析結果である。

これらの図からわかるように、各解析ソフトウェアの結果は、概ね実験と一致している。特に、包絡線、履歴吸収エネルギーで $6\delta_y$ まで実験と一致している修正 2 曲面モデルにおいては、最大変形量、座屈モードの形状ともに実験とよく一致している。

2.4 まとめ

汎用非線形構造解析ソフトウェア ABAQUS、MARC、ADINA、ANSYS を用い、構成則として一般的な等方硬化則、移動硬化則、さらに修正 2 曲面モデル、3 曲面モデルを加えて、円断面鋼製橋脚の弾塑性有限変形解析を行い、実験との比較検討を行った。

本研究によって得られた結論をまとめると以下のようになる。

(1) 解析結果を比較検討する上で

- ・ 包絡線（最大耐荷力および劣化域の耐荷力）
- ・ ヒステリシス曲線の形
- ・ 履歴吸収エネルギー
- ・ 座屈モード

について、着目した。その比較検討の結果、使用する構成則により解析結果が大きく異なってくる。また同じ構成則でも使用する解析ソフトウェアにより、多少の差がでてくることが確認できた。

(2) 汎用非線形構造解析ソフトウェアで利用可能な移動硬化則で、応力－ひずみ関係を多直線近似した構成則であれば、 $5\delta_y$ くらいまでは耐荷力および履歴吸収エネルギーにおいて概ね実験値一致させることができる。なお、 $5\delta_y$ は最大耐荷力を過ぎ劣化域に入っている変形量である。

(3) 汎用非線形構造解析ソフトウェアで、利用可能な硬化則では、特に劣化域において耐荷力および履歴吸収エネルギーを大きめに評価することとなり、より実験値と一致させるには修正 2 曲面モデル、3 曲面モデルが必要である。

3. パラメータ解析⁶⁾

3.1 解析手法

解析の対象は、図-参考 2-3.1 に示すように、柱頭部に一定鉛直力と変動変位振幅の繰り返し水平力を受ける円形断面柱である。局部座屈は柱基部近傍に発生することから、図-参考 2-3.1 に示すように、柱基部には直径 D の 2 倍の高さまでシェル要素を用い、残りの部分ははり要素を用いてモデル化した。シェル部分については、局部座屈が発生する可能性が最も高い部分 ($0.5D$) を細かく分割し、その上は比較的粗く分割した。解析は対称性から 1/2 モデルとして行った。

解析に使用したソフトは、修正 2 曲面モデルを ABAQUS に組み込んだものである。また、要素としては、同ソフトに提供されている Euler-Bernoulli のはり理論に基づくはり要素 B31OSH と 4 節点の低減積分有限膜ひずみシェル要素 S4R を用いた。

本研究においては、径厚比、細長比および軸力を主要なパラメータとして考えた。表-参考 2-3.1 には、解析に用いた各パラメータの値を示してある。ここで、径厚比パラメータ R_t と細長比パラメータ λ は次式で定義される。

$$R_t = \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{\sigma_y D}{E t} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2)$$

ここで、 σ_y = 降伏応力、 E = ヤング係数、 ν = ポアソン比、 D = 直径、 t = 厚さ、 h = 柱長、 r = 断面 2 次半径である。材料特性は表-参考 2-3.2 に示してある。なお、 P は軸圧縮力の大きさと、 P_y は全断面降伏軸力である。実験供試体である P1、P7 および P10 以外のものでは、P8 シリーズを除いて、軸力比 P/P_y を 0.15 とした。P8 シリーズでは軸力の影響を調べるため、 P/P_y として 0.10、0.15、0.20 および 0.30 の 4 ケースを考えた。さらに、表-参考 2-3.1 では N は繰り返し回数を表し、 $N = 0, 1$ および 3 はそれぞれ単調増大、ある変位レベルで 1 ループの繰り返し載荷、および 3 ループずつの繰り返し載荷を意味する。同表からわかるように、繰り返し回数の影響を調べるため、P8-15 について N を 0、1 および 3 と設定し解析を行ったが、その他の柱については、単調増大載荷と 1 ループ繰り返し載荷の解析のみを行った。

なお、以降の解析は全て名古屋大学工学部土木工学科の宇佐美研究室で実施されたものである。

3.2 解析結果と考察

この節では、径厚比パラメータ、細長比パラメータ、軸力比および繰り返し回数の、鋼製橋脚の強度とダクティリティに及ぼす影響を調べるために行ったパラメトリック解析の結果について述べる。図-参考 2-3.2 は、解析より得られた水平荷重-水平変位履歴曲線の一部を示したものであり、幅厚比と細長比の履歴特性に及ぼす影響が明瞭にわかる。なお、荷重-変位曲線のデータ整理を行う際に、横軸は δ_y で無次元化した柱上端部の水平変位、縦軸は H_y で無次元化した水平荷重とした。降伏荷重 H_y は式(3)、(4)から求められたものの小さい方の値とし、降伏変位 δ_y は式(5)より求めた。

$$H_y = \frac{M_y}{h} \left(1 - \frac{P}{P_y} \right) \quad (3)$$

$$H_y = \frac{M_y}{h} \left(1 - \frac{P}{P_E} \right) \left(1 - \frac{P}{P_u} \right) \quad (4)$$

$$\delta_y = \frac{H_y h^3}{3EI} \quad (5)$$

ここに、 M_y = 降伏モーメント、 P_E = 片持ち柱のオイラー座屈荷重、 P_u = 中心圧縮柱の強度である。以上のようにして求めた各柱の H_y と δ_y が表-参考 2-3.1 に示されている。ただし、 P_u としては道路橋示方書⁷⁾ の中心軸圧縮柱の強度式を用いた。

以下、水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線を用いて各パラメータの影響を述べる。

3.2.1 径厚比パラメータの影響

図-参考 2-3.3 には、細長比パラメータ λ が 0.25、0.30 および 0.50 の時、径厚比パラメータ R_t を変えて行った解析結果が示されている。 $\lambda = 0.25$ で R_t を 0.110、0.100 および 0.076 とした時の解析結果(図-参考 2-3.3(a))をみると、径厚比が小さくなるほど、最大強度とそれに対応する変位が大きくなっている。特に、径厚比の小さい鋼柱 P7 ($R_t = 0.076$) の場合、最大荷重点での変位が約 $4\delta_y$ であり、径厚比の比較的大きい鋼柱 P1($R_t = 0.110$) と P4($R_t = 0.100$) に比べて、最大荷重点における変位は 2 倍ほど大きくなっている。また、 $\lambda = 0.30$ (図-参考 2-3.3(b)) と $\lambda = 0.50$ (図-参考 2-3.3(c)) のいずれの場合も、上述した傾向がみられる。ここで、特筆すべきことは、 $\lambda = 0.30$ と $R_t = 0.050$ のケース(図-参考 2-3.3(b)を参照)で、最大荷重点における変位が $5\delta_y$ となっており、非常に大きいことである。このことから、径厚比パラメータをある値以下に制限することによって、ハイダクティリティー橋脚の設計が可能と思われる。

3.2.2 細長比パラメータの影響

図-参考 2-3.4 は、径厚比パラメータ R_t を 0.075、0.10 または 0.115 と一定し、種々の細長比パラメータ λ について解析し得られた結果を示したものである。これらの図から、いずれの場合も細長比が大きくなるにつれて変形能が減少することがわかる。特に、 $\lambda = 0.50$ の場合、最大荷重点での変位が小さく、最大荷重後の強度劣化も著しい。これは、主に $P-\Delta$ 効果によるものと考えられる。従って、細長比の大きい橋脚については、径厚比を小さくすることのみでは大きな変形能を確保するのが難しいと言えよう。

3.2.3 軸力比の影響

軸力の影響を調べるために、P8 シリーズ ($\lambda = 0.30$ 、 $R_t = 0.075$) について軸力比 P/P_y を 0.10 から 0.30 まで変化させた 4 つのケースについて解析を行った。得られた各ケースの水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線が図-参考 2-3.5 に示されている。これまでに、水平荷重と水平変位をそれぞれ H_y と δ_y で無次元化した但、ここでは、軸力の影響を示すため軸力を考慮していない H_{y0} (式(3)、(4)で $P=0$ と置いて求められる H_y と対応する水平変位 δ_{y0}) を用いる。この図からわかるように、軸力が大きくなるほど、最大荷重が小

さくなっている。最大荷重点での変位に関しては、用いた軸力比の範囲内においては、ほとんど差がない。ただし、ポストピーク挙動に及ぼす軸力の影響がみられた。これらの事実は、箱形断面橋脚の実験から得られた傾向とほぼ一致する。

3.2.4 繰り返し回数の影響

これまでの研究成果⁸⁾によれば、繰り返し数の影響は最大荷重点までほとんど無く、ポストピーク後はかなり大きい。このことを調べるために、P8-15 ($\lambda=0.30$ 、 $R_t=0.075$ 、 $P/P_y=0.15$)について1回繰り返し載荷と3回繰り返し載荷の解析を行い、その結果を図-参考 2-3.6 に示す。同図より、最大荷重とそれに対応する変位は、繰り返し数にあまり依存しないが、3回繰り返し載荷の方が最大荷重後の強度劣化が激しいことがわかる。これは、繰り返し載荷ごとに局部座屈変形が進展していくためである。また、この結果についても、箱形断面橋脚の実験から得られた傾向と同一である。

3.2.5 強度と変形能の評価

表-参考 2-3.3 には、全ケースについて解析より得られた最大水平荷重(H_{max}/H_y)、そのときの水平変位(δ_m/δ_y)およびピーク後の最大荷重の95%まで降下した点での水平変位(δ_{95}/δ_y)を示す。また、これらの強度と変形能を主なパラメータである R_t 、 λ または P/P_y の積に対して、ばらつきが最も小さくなるように試行錯誤的プロットしたものが、図-参考 2-3.7 と図-参考 2-3.8 である。解析結果は多少のばらつきはあるものの、実験結果に比すれば格段にばらつきが小さく⁹⁾、このような整理方法が妥当であることがわかる。解析値から最小2乗法によって求められた近似式は次の通りである。

$$\frac{H_{max}}{H_y} = \frac{0.02}{(R_t \lambda)^{0.8}} + 1.10 \quad (6)$$

$$\frac{\delta_m}{\delta_y} = \frac{1}{3(R_t \lambda^{0.5})^{0.8}} - \frac{2}{3} \quad (7)$$

$$\frac{\delta_{95}}{\delta_y} = \frac{0.24}{(1 + P/P_y)^{2/3} \lambda^{1/3} R_t} \quad (8)$$

ここで、 δ_{95}/δ_y を塑性率に採用したとき、その目標値を4.0、5.0、6.0または7.0以上に確保するために必要な径厚比パラメータ R_t の制限値を求めてみる。軸力 $P=0.15P_y$ で、細長比パラメータ λ を0.25、0.30、0.40および0.50と仮定して式(8)より求められた R_t の値を表-参考 2-3.4 に示す。同表より、橋脚の細長比パラメータ λ が0.50以下の橋脚に対しては、 R_t を0.055以下に制限することにより、塑性率 δ_{95}/δ_y を5.0以上に確保できることがわかる。

3.3 まとめ

構造用鋼材の構成則として開発された修正2曲面モデルを用い、鋼製円形断面橋脚の繰り返し弾塑性挙動を解析的に求めた。得られた結論を要約すると次のようである。

- (1) 鋼製円形断面橋脚の強度と変形能は、式(6)~(9)により近似的に推定できる。

- (2) 細長比パラメータ λ が0.50以下のとき、 R_t を0.055以下にすれば塑性率 δ_y/δ_t を5.0以上に確保できる。
- (3) 本研究の数値解析結果をもとに、種々のパラメータを持つ鋼製円形断面橋脚の弾塑性地震応答解析に必要な復元力モデルが、信頼できる精度で構築可能になると考えられる。

<参考文献>

- 1) 鈴木森晶、宇佐美勉：軸圧縮力と横力を受ける箱形断面鋼片持柱の強度と変形能に関する解析的研究、構造工学論文集、Vol.41A、pp.265-276、1995年3月
- 2) 中川知和、安波博道、小林洋一、橋本修身、水谷慎吾、森脇清明：弾塑性有限変位解析による箱形鋼製橋脚の耐荷力と変形能の評価、第1回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集 pp.599-604、1996年1月
- 3) 安波博道、寺田昌弘、名取暢、寺尾圭史、西川和廣：弾塑性 FEM による鋼管柱載荷実験のシミュレーション解析、鋼構造論文集、JSSC、1996年3月
- 4) Shen, C., Usami, T. and Mizuno, E.: Development of a Cyclic Two-Surface Model for Structural Steels with Yield Plateau, NUCC Research Report, No.9302, Department of Civil Engineering, Nagoya University, 1993
- 5) 王慶雲、後藤芳顯、高橋宣男、小畑誠：繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析について、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集
- 6) 葛漢彬、高聖彬、宇佐美勉、松村寿男：繰り返し荷重を受ける鋼製パイプ断面橋脚の強度と変形能に関する解析的研究、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、丸善、1990年
- 8) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計WG(主査：宇佐美勉)：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術、1996年5月
- 9) 宇佐美勉：鋼製橋脚の耐震性向上技術に関する研究、第1回鋼構造シンポジウム、鋼材倶楽部、1996年11月

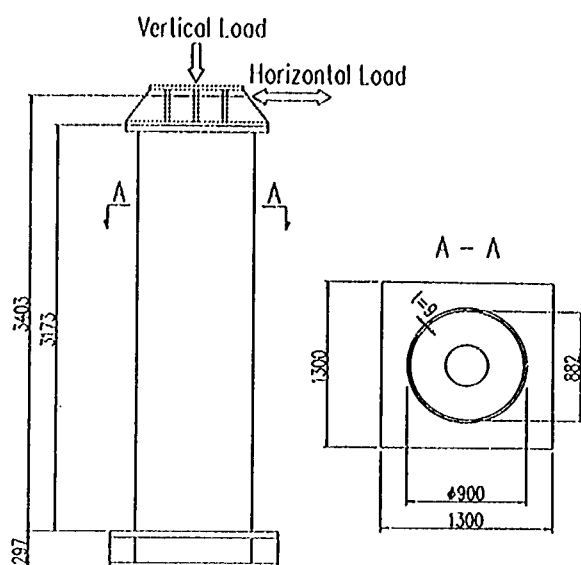


図-参考 2-2.1 解析対象とした供試体

表-参考 2-2.1 供試体の諸元

Material	σ_y (kgf/cm ²)	R/t	R_i	λ
SS400	2,950	50	0.110	0.26

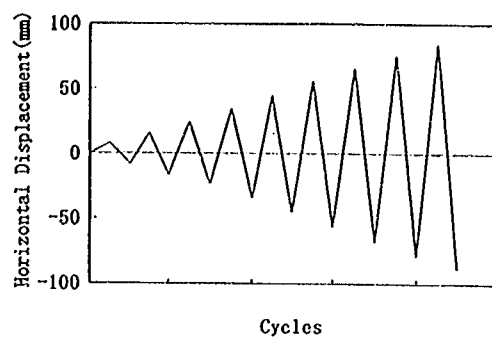


図-参考 2-2.2 荷重プログラム

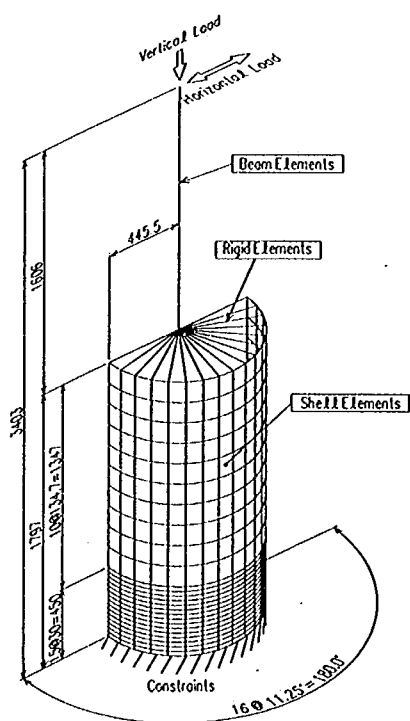


図-参考 2-2.3 解析モデル

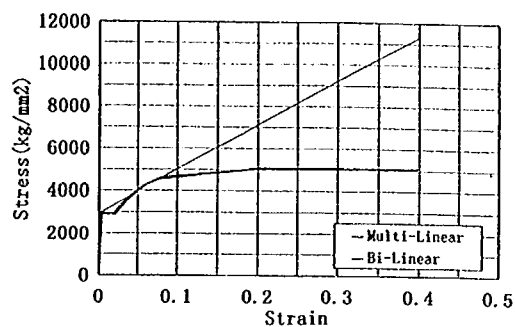


図-参考 2-2.4 応力-ひずみ曲線

表-参考 2-2.2 使用した有限要素

ABAQUS	4 節点低減積分シェル要素(S4R)
MARC	四辺形厚肉線形シェル要素(要素 75)
ADINA	4 節点曲面シェル要素
ANSYS	四辺形塑性シェル要素(4 節点)

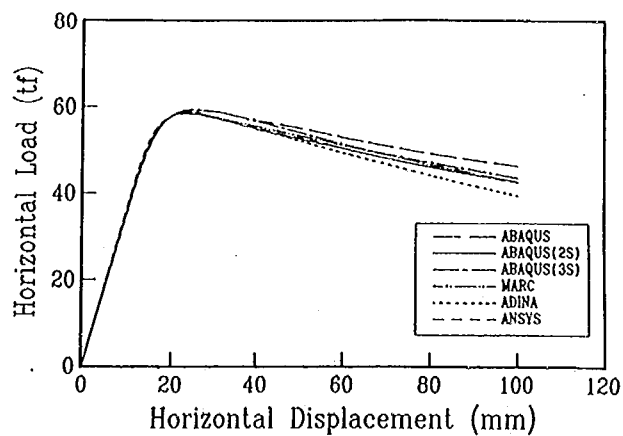


図-参考 2-2.5 単調荷重時の荷重-変位曲線

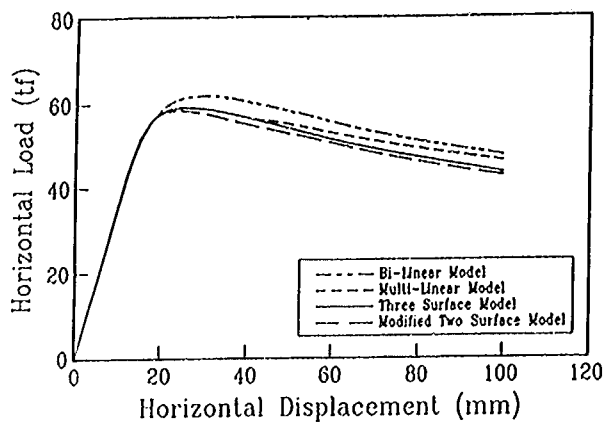


図-参考 2-2.6 単調載荷時の荷重-変位曲線

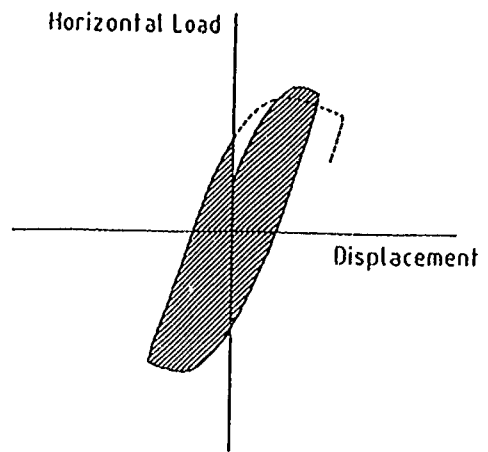
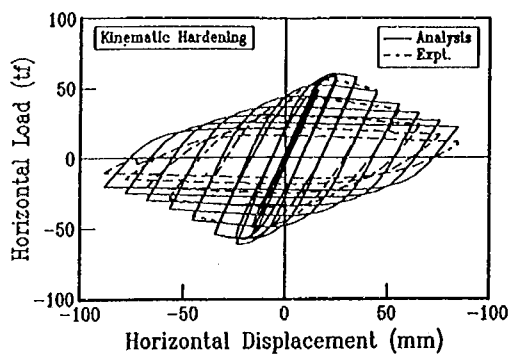
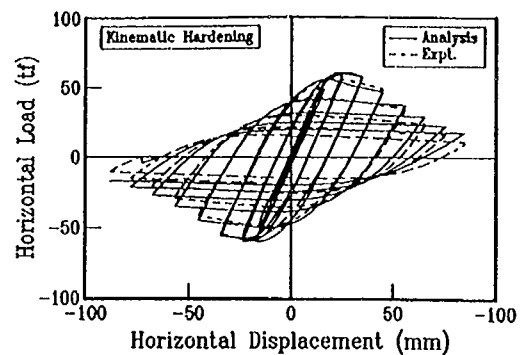


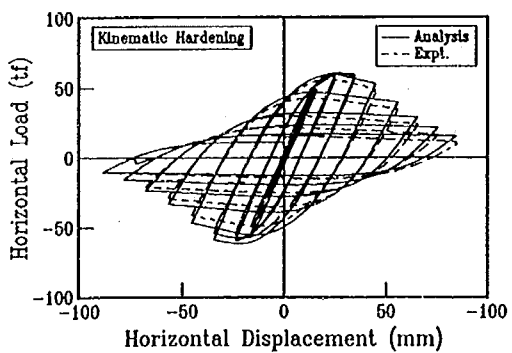
図-参考 2-2.7 1 ループの吸収エネルギー



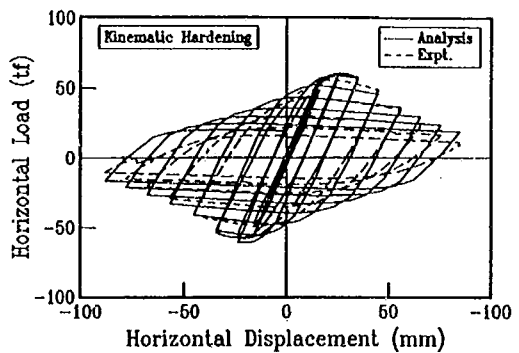
(a) ABAQUS



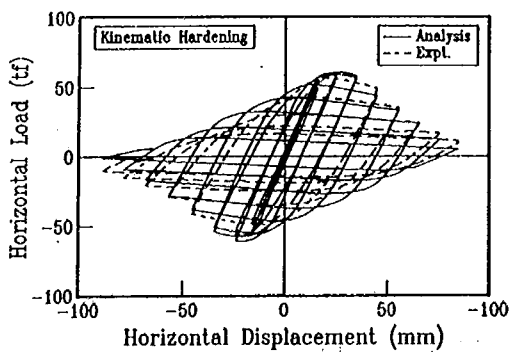
(b) ABAQUS (Modified Two Surface Model)



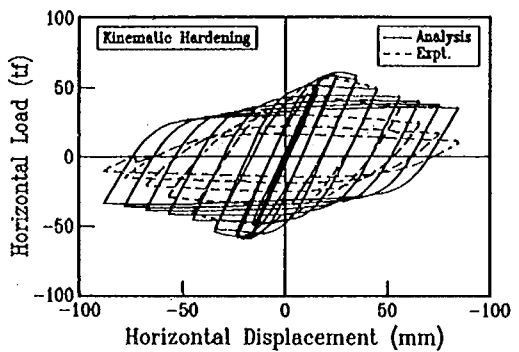
(c) ABAQUS (Three Surface Model)



(d) MARC



(e) ADINA



(f) ANSYS

図-参考 2-2.8 ヒステリシス曲線

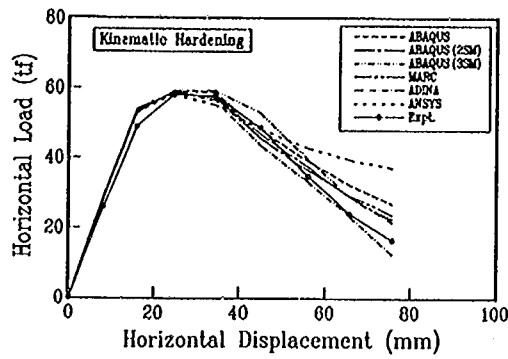


図-参考 2-2.9 正側包絡線

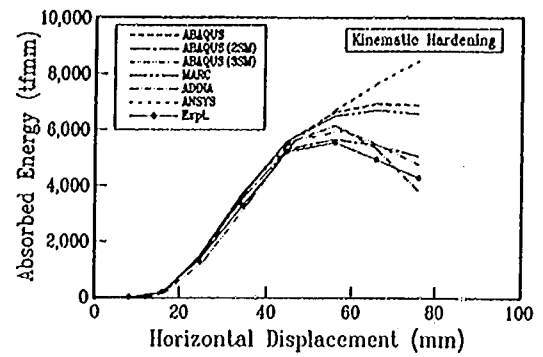


図-参考 2-2.10 各ループの吸収エネルギー

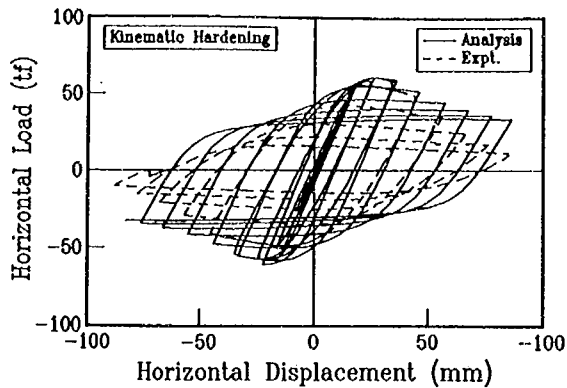


図-参考 2-2.11 ヒステリシス曲線 (Bi-Linear)

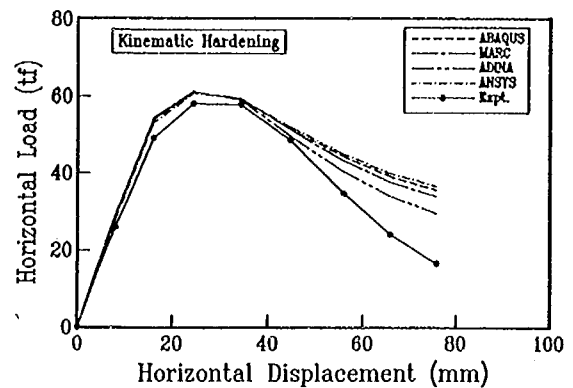


図-参考 2-2.12 正側包絡線 (Bi-Linear)

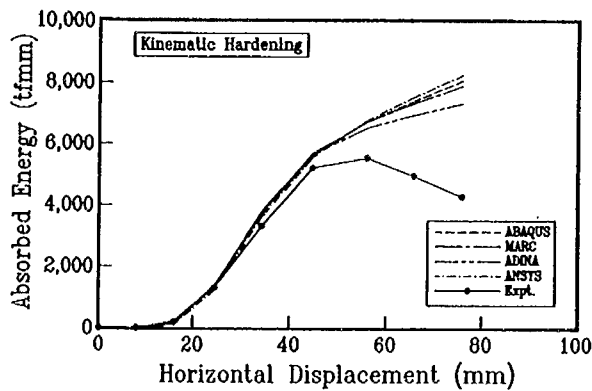


図-参考 2-2.13 吸収エネルギー (Bi-Linear)

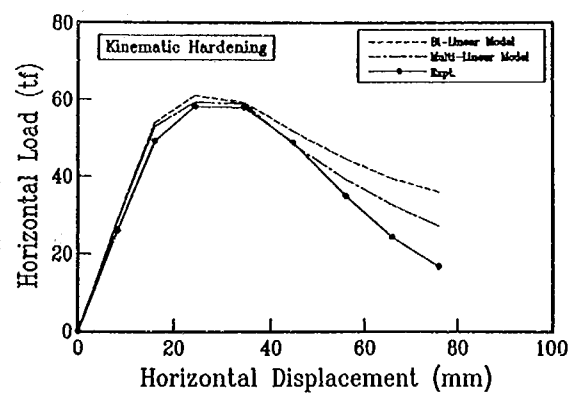


図-参考 2-2.14 Bi-Linear, Multi-Linear の包絡線比較

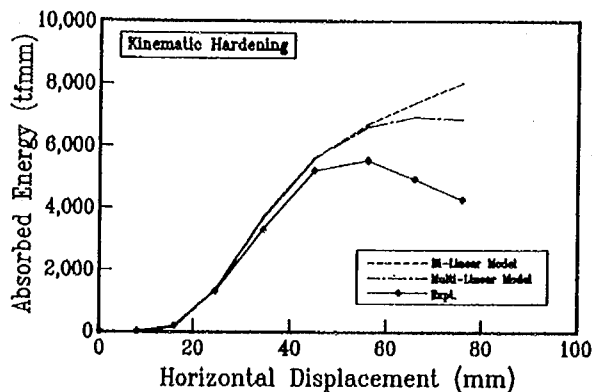


図-参考 2-2.15 吸収エネルギーの比較
(Bi-Linear・Multi-Linear)

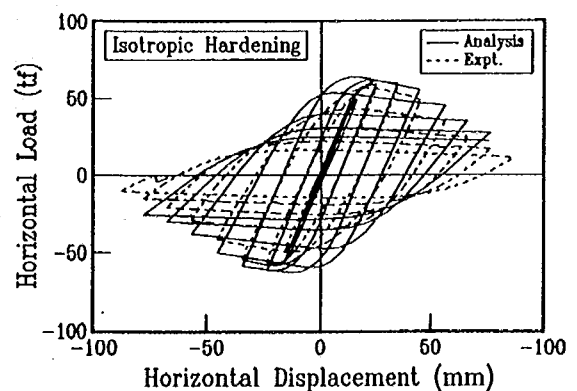


図-参考 2-2.16 ヒステリシス曲線 (等方硬化)

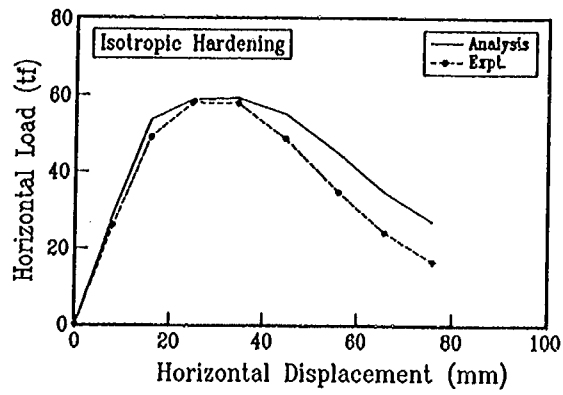


図-参考 2-2.17 正側包絡線 (等方硬化)

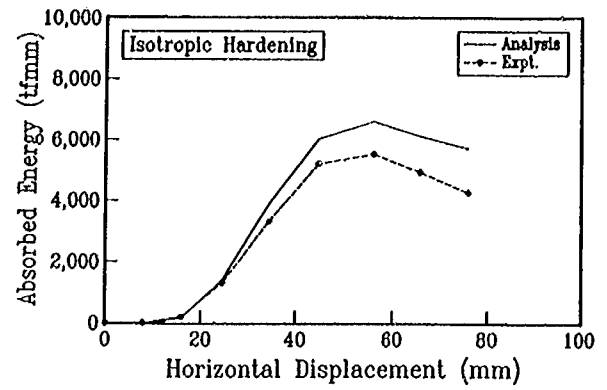


図-参考 2-2.18 吸収エネルギー (等方硬化)

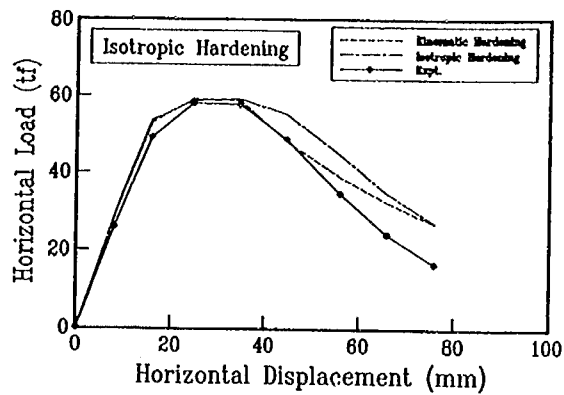


図-参考 2-2.19 硬化則による包絡線の違い

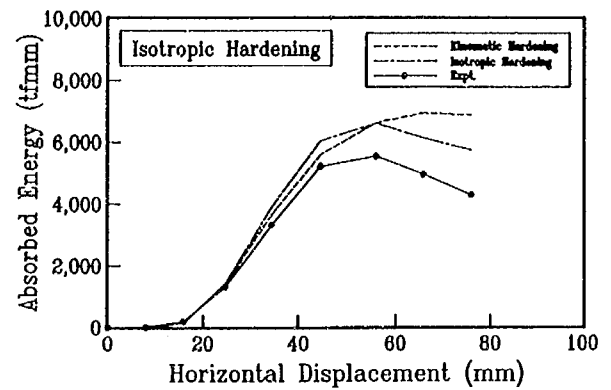


図-参考 2-2.20 硬化則による吸収エネルギーの違い

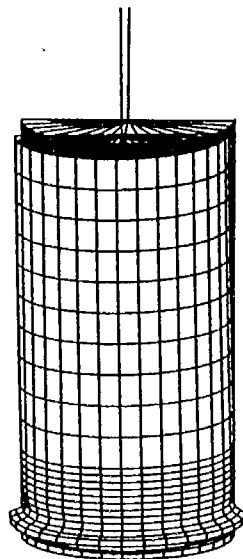
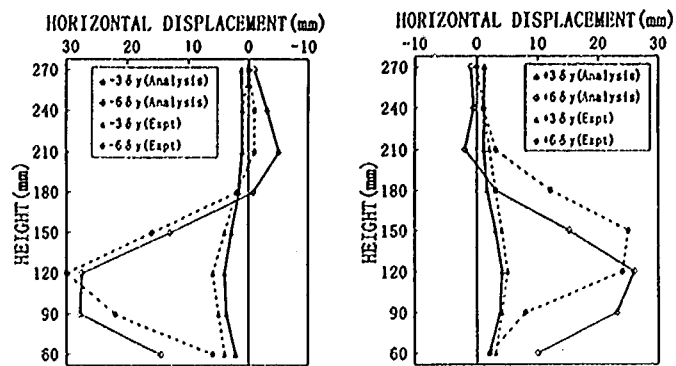
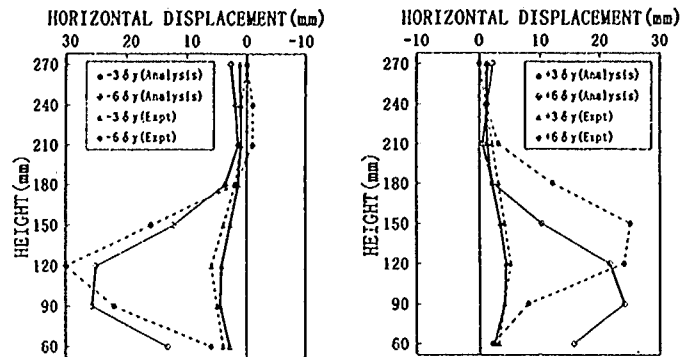


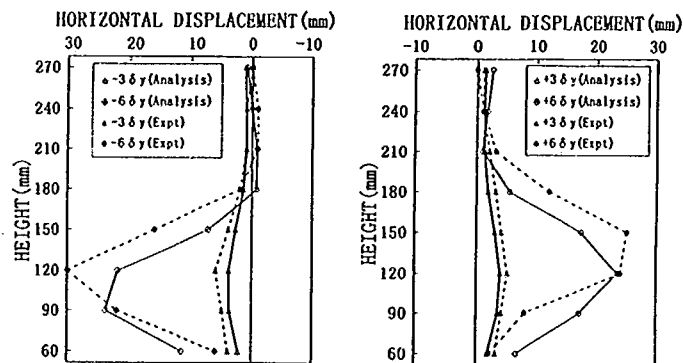
図-参考 2-2.21 解析における座屈モード



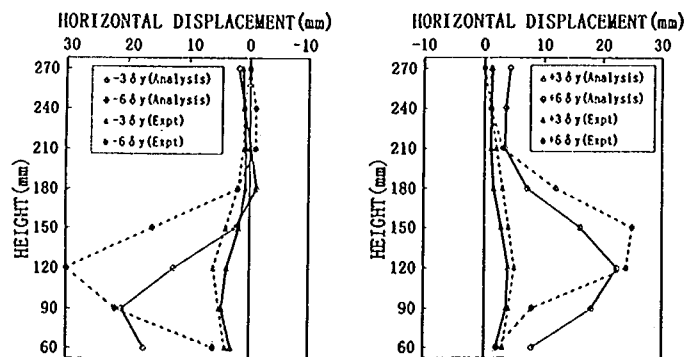
(a) ABUQUS



(b) MARC



(c) ADINA



(d) ANSYS

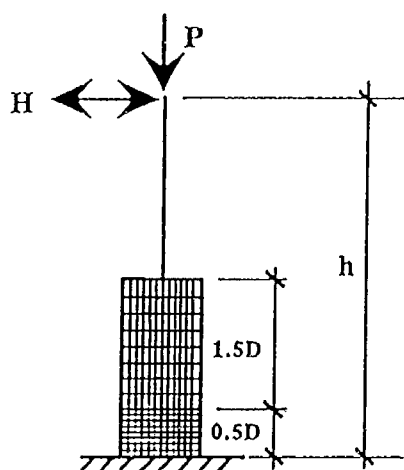
図-参考 2-2.22 座屈変形の解析値と実験値との比較

表-参考 2-3.1 解析モデルの諸元

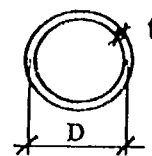
モデル No.	h (mm)	D (mm)	t (mm)	R_t	λ	P/P_y	N	材質
P1	3,403	891	9.00	0.110	0.26	0.12	0, 1	SS400
P1-20	3,403	891	9.00	0.110	0.26	0.20	0, 1	SS400
P2	4,391	891	7.32	0.115	0.30	0.15	0, 1	SS400
P3	7,319	891	7.32	0.115	0.50	0.15	0, 1	SS400
P4	3,659	891	8.41	0.110	0.25	0.15	0, 1	SS400
P5	4,391	891	8.41	0.110	0.30	0.15	0, 1	SS400
P6	7,319	891	8.41	0.110	0.50	0.15	0, 1	SS400
P7	3,403	884	16.0	0.076	0.28	0.13	0, 1	SM490
P8-10	4,391	891	11.2	0.075	0.30	0.10	0, 1	SS400
P8-15	4,391	891	11.2	0.075	0.30	0.15	0, 1, 3	SS400
P8-20	4,391	891	11.2	0.075	0.30	0.20	0, 1	SS400
P8-30	4,391	891	11.2	0.075	0.30	0.30	0, 1	SS400
P9	7,319	891	11.2	0.075	0.50	0.15	0, 1	SS400
P10	3,303	580	20.0	0.031	0.37	0.09	0, 1	SS400
P11	4,391	891	9.61	0.088	0.30	0.15	0, 1	SS400
P12	4,391	891	16.8	0.050	0.30	0.15	0, 1	SS400

表-参考 2-3.2 解析に用いた材料特性

解析モデル	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E/E_H	ϵ_H/ϵ_y
P1	289.6	510.0	40	14.0
P7	344.3	609.0	30	9.0
P10	269.1	464.3	40	14.0
その他	235.4	426.1	40	10.0
$E = 2.06 \times 10^5$ (MPa), $\nu = 0.3$				



(a) Elevation



(b) Cross Section

図-参考 2-3.1 解析モデル

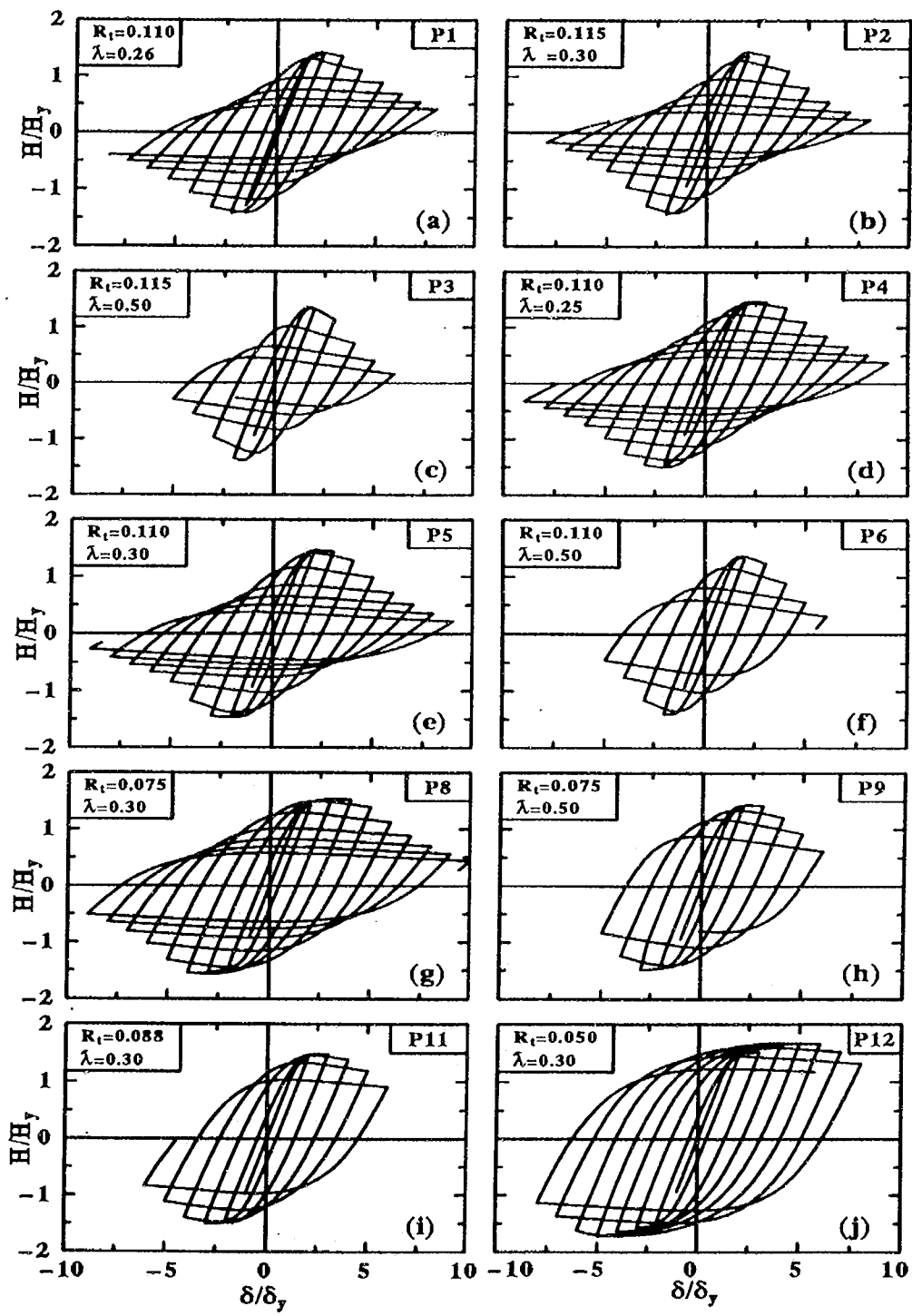


図-参考2-3.2 計算モデルの履歴曲線

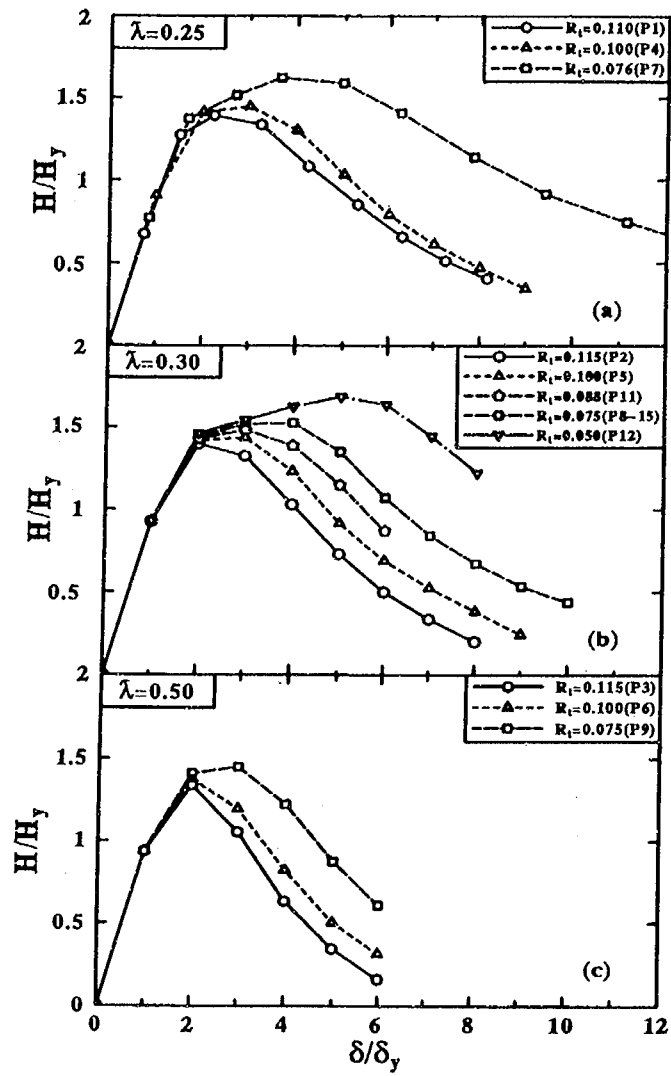


図-参考 2-3.3 径厚比パラメータ R_i の影響

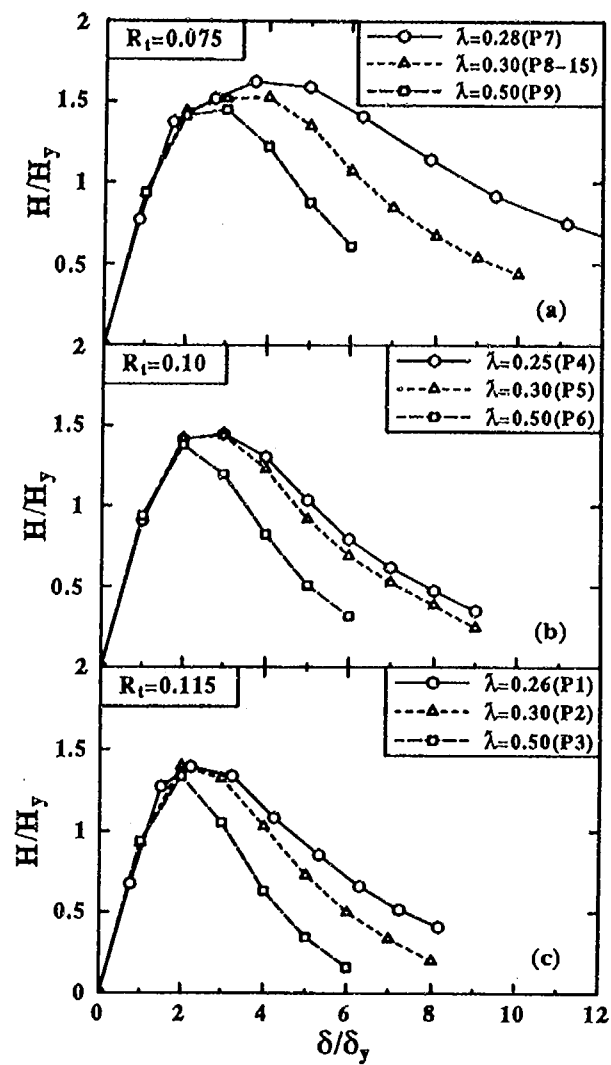


図-参考 2-3.4 細長比パラメータ λ の影響

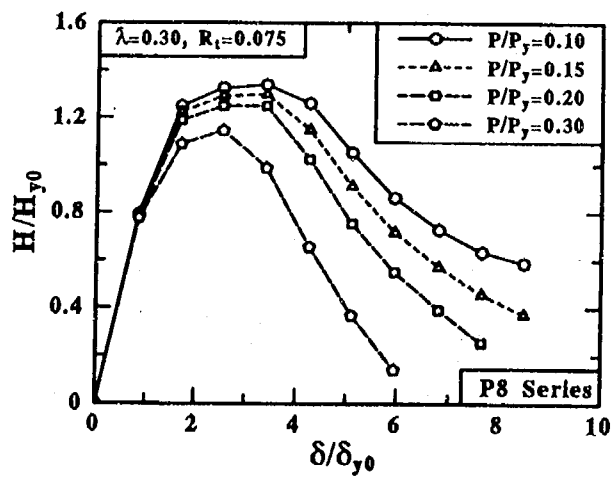


図-参考 2-3.5 軸力比 P/P_y の影響

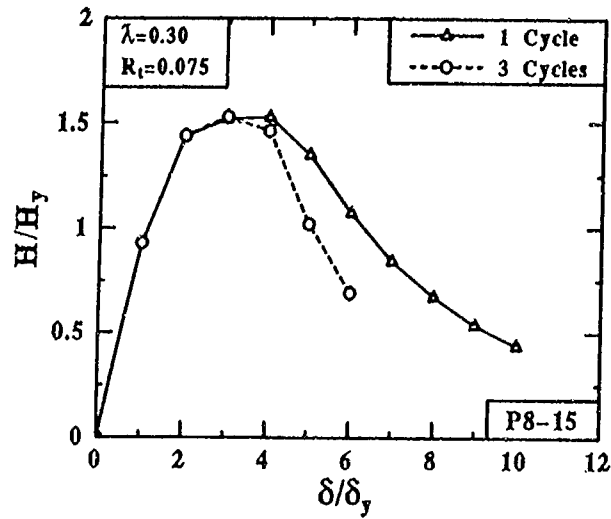


図-参考 2-3.6 繰返し数 N の影響

表-参考 2-3.3 強度と変形能

モデル No.	H_y (tf)	δ_y (mm)	H_{max}/H_y	δ_m/δ_y	δ_{95}/δ_y
P1	42.3	10.6	1.39	2.24	3.30
P1-20	38.6	9.65	1.42	2.50	2.96
P2	21.0	13.9	1.40	2.00	2.94
P3	12.6	38.6	1.34	2.00	2.24
P4	29.0	9.64	1.45	3.00	3.50
P5	24.1	13.9	1.44	3.00	3.35
P6	14.5	38.6	1.38	2.00	2.38
P7	86.6	12.5	1.62	3.66	5.31
P8-10	34.0	14.7	1.49	3.78	4.58
P8-15	32.1	13.8	1.53	4.00	4.43
P8-20	30.2	13.0	1.56	4.25	4.54
P8-30	26.4	11.4	1.64	3.64	4.08
P9	19.3	38.5	1.45	3.00	3.32
P10	38.6	14.4	1.79	7.57	9.69
P11	27.6	13.9	1.48	3.00	3.77
P12	47.9	13.8	1.69	5.00	6.18

表-参考 2-3.4 目標塑性率に対する R_t の制限値

δ_{95}/δ_y		4.0	5.0	6.0	7.0
R_t	$\lambda = 0.25$	0.086	0.069	0.057	0.049
	$\lambda = 0.30$	0.081	0.065	0.054	0.046
	$\lambda = 0.40$	0.074	0.059	0.049	0.043
	$\lambda = 0.50$	0.068	0.055	0.045	0.039
$P/P_y = 0.15$					

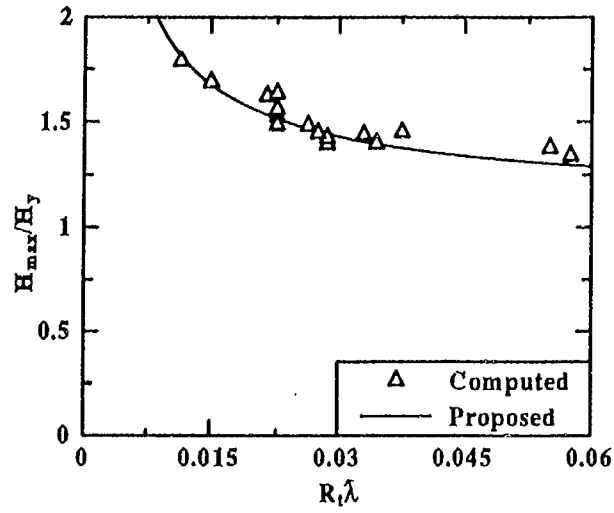


図-参考 2-3.7 最大耐荷力の提案式

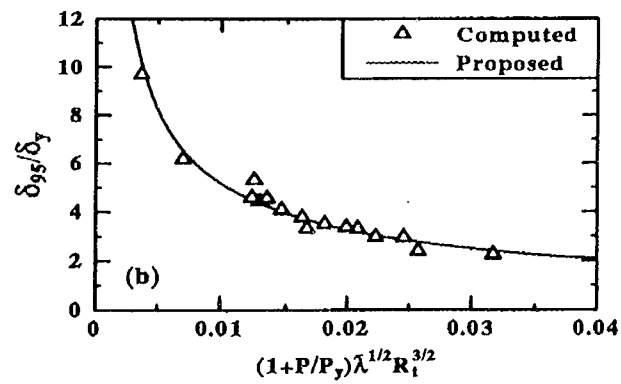
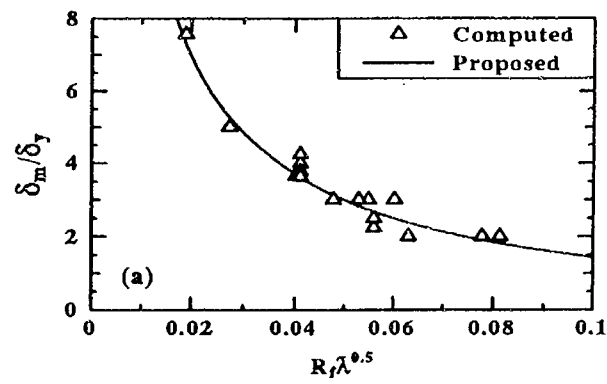


図-参考 2-3.8 塑性率の提案式

参考資料一 3

箱形断面鋼製橋脚の FEM 解析

1 概要

本資料は、箱形断面鋼製橋脚のFEM解析結果をまとめたものである。本解析の目的は、FEM解析の適用性を、各種の解析モデルと実験値の比較を通じて検証するとともに、これまであまり実験が実施されていないパラメータ領域（特に厚肉少補剛断面）に関して、解析によりその耐荷力特性を把握しようとするものである。

第2章では、FEM解析の適用性検討のために、土木研究所実験No.2および鋼材倶楽部実験KD-3の解析を実施し、構成則およびメッシュ分割が結果に及ぼす影響を調べた。

また、第3章では、13種類の解析モデルを使って、各種パラメータとヒステリシス曲線の関係を調べた。

2 実験と解析との比較

土木研究所実験No.2および鋼材倶楽部実験KD-3について、解析と実験との比較を行った。以下に解析データおよび結果を示す。

2.1 解析モデル

表-参考3-2.1.1に示すように、メッシュおよび構成則を変化させてそれらの影響を調べることにした。

用いた解析プログラムはABAQUS(Version5)で、要素は四辺形アイソパラメトリックシェル要素S4Rおよびビーム要素B31である。また、幾何学的非線形性および材料非線形性を考慮した。

表-参考3-2.1.1 解析モデル

メッシュ 形状	材料の 構成則	応力- ひずみ関係	備考
1 (図-参考3- 2.1.1)	バイリニア移動硬化則	図-参考3-2.1.4	垂直補剛材をビーム要素でモデル化
	マルチリニア移動硬化則		
	3 曲面モデル	文献1)参照	
	等方硬化則	図-参考3-2.1.4	
2 (図-参考3- 2.1.2)	2 曲面モデル	文献2)参照	
3 (図-参考3- 2.1.3)	マルチリニア移動硬化則	図-参考3-2.1.4	
	等方硬化則		

2. 2 ヒステリシス曲線の比較

図-参考3-2.2.1～図-参考3-2.2.3に、土木研究所実験No.2の解析結果を示す。以下に考察を述べる。

- 1) バイリニア移動硬化則を用いると、高ひずみ域で降伏応力が実際より高めに評価されるため、包絡線の劣化勾配が実験値よりも低めになる。(図-参考3-2.2.1(1))
- 2) 2曲面モデルまたは3曲面モデルは $4\delta y$ までは実験結果と非常良い一致を示す。ただし、 $4\delta y$ 以降は、やや実験値よりも水平荷重が高めになる。これは、2曲面モデルでは、高ひずみ領域での硬化係数が高めに与えられていること、三曲面モデルの解析では、垂直補剛材を梁要素で近似しているため局部座屈後の剛性を高めに評価することによると思われる。(図-参考3-2.2.1(3)、図-参考3-2.2.2)
- 3) マルチリニア移動硬化則または等方硬化則を使用すると、ほぼ実験と一致した結果になる。これは、応力-ひずみ関係として、高ひずみ域まで含めて実際の測定値を使用しているためと思われる。(図-参考3-2.2.1(2),(4)、図-参考3-2.2.3(1),(2))
- 4) メッシュ1とメッシュ3を、同一の硬化則に関して比較すると、メッシュ3の方が包絡線の劣化勾配が大きくなり、実験により近くなる。これは、メッシュ1では垂直補剛材を梁要素で近似したことによると思われる。

図-参考3-2.2.4～図-参考3-2.2.6に、実験KD-3の解析結果を示す。うえと同様のことが言えるが、特に、4)の事柄が、等方硬化則に関して顕著に現れている。

2. 3 変形モードの比較

図-参考3-2.3.1および図-参考3-2.3.2に、解析により求められた変形図を示す(変形量のスケールは形状のそれと同一である)。同図において、メッシュ1とメッシュ3の比較を示したが、両者ほぼ同じ変形パターンになっている。

3 パラメータ解析

3.1 パラメータ解析に用いたデータ

表-参考3-3.1.1および表-参考3-3.1.2に、13種類の解析モデルの各種パラメータを示す。これらの値は、主に、実験例の少ない厚肉断面に関するものである。

また、用いた構成則は、2曲面モデルおよびマルチリニア移動硬化則であり、応力-ひずみ関係は図-3.1.1のように設定した。

表-参考3-3.1.1 箱型断面鋼製橋脚の各種パラメータ

補剛材本数=2
鋼種: SM490

No.	R_f	λ	α	P/P_y	γ/γ^*	備考
B1	0.46	0.20	1.0	0.15	1.0	
B2	0.46	0.35	1.0	0.15	1.0	
B3	0.46	0.35	0.5	0.15	3.0	
B4	0.46	0.50	1.0	0.15	1.0	
B5	0.35	0.20	0.5	0.15	3.0	
B6	0.35	0.35	0.5	0.15	3.0	
B7	0.35	0.35	1.0	0.15	3.0	
B8	0.35	0.35	0.5	0.15	1.0	
B9	0.35	0.35	0.5	0.15	3.0	補剛材のみSM570
B10	0.35	0.50	0.5	0.15	3.0	
B11	0.25	0.20	0.5	0.15	3.0	
B12	0.25	0.35	0.5	0.15	3.0	
B13	0.25	0.50	0.5	0.15	3.0	

R_f : フランジ幅厚比パラメータ ($R_f = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{4\pi^2 n^2}}$)

λ : 細長比パラメータ ($\lambda = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{h}{r}$) α : ダイアフラム間隔/フランジ幅

P/P_y : 軸力比 γ^* : 線形座屈から求めた必要剛比

表-参考3-3.1.2 箱型断面の寸法など

板厚は全て 20 mm

No.	b (mm)	b _s (mm)	h (mm)	L (mm)	δ_y (mm)	P (tf)	Hy (tf)
B1	1344	119	4318	1344	11.98	608	341.5
B2	1344	119	7556	1344	36.68	608	195.2
B3	1344	112	7569	672	36.81	602	193.8
B4	1344	119	10795	1344	74.87	608	136.6
B5	1023	104	3272	512	9.04	472	264.7
B6	1023	104	5727	512	27.68	472	151.2
B7	1023	178	5572	1023	26.21	530	164.8
B8	1023	70	5788	512	28.28	446	141.4
B9	1023	104	5727	512	27.68	472	151.2
B10	1023	104	8181	512	56.49	472	105.8
B11	731	96	2314	366	6.33	354	196.4
B12	731	96	4049	366	19.37	354	112.2
B13	731	96	5785	366	39.53	354	78.5

b : フランジ幅 (=ウェブ長) b_s : リブ高さ h : 橋脚全長 L : パネル高さ δ_y : 軸力を考慮して求めた基部の弾性限界水平変位

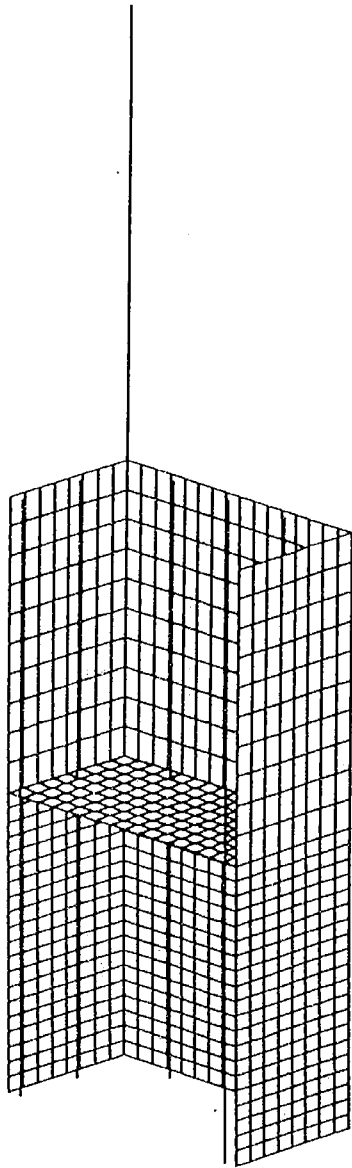
P : 軸力

3. 2 ヒステリシス曲線の比較

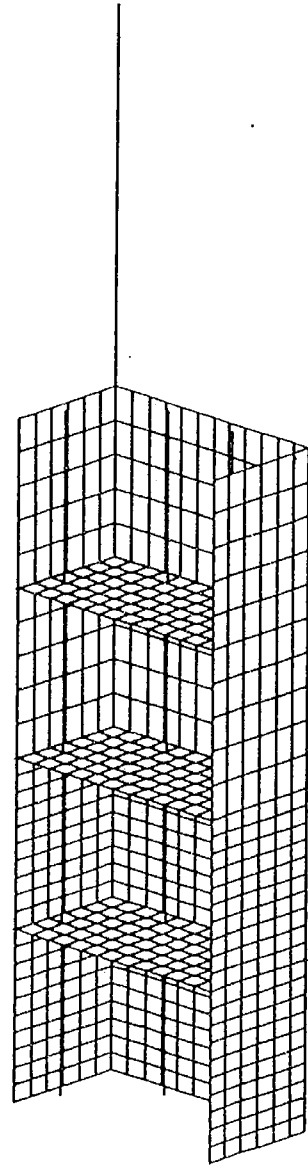
図-参考3-3.2.1~図-参考3-3.2.13に、各ケースのヒステリシス曲線を示す。構成則として、2曲面モデルおよびマルチリニア移動硬化則の2種類を比較したが、全ケース、2曲面モデルの方が包絡線の劣化勾配が小さくなった。この理由のひとつとして、2曲面モデルでは、くり返し加工硬化の影響が考慮されていることが挙げられる（マルチリニア移動硬化則ではこれが考慮されていない）。

[参考文献]

- 1) 王慶雲、後藤芳顯、高橋宣男、小畑誠：「繰り返し荷重下の有限要素法による解析について」第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp.369-376, 1997年1月
- 2) Shen, C., Usami, T. and Mizuno, E.: Development of a Cyclic Two-surface Model for Structural Steels with Yield Plateau, NUCE Research Report, No.9302, Department of Civil Engineering, Nagoya University, 1993.

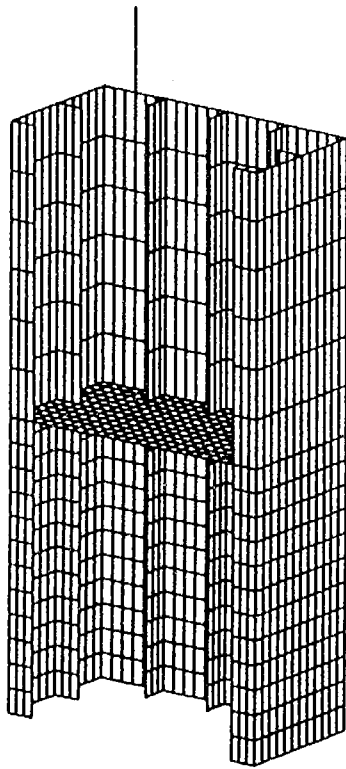


土木研究所実験No.2

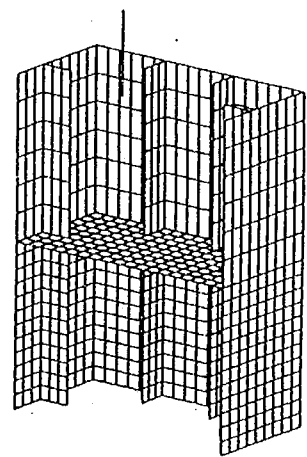


鋼材倶楽部実験KD-3

図-参考3-2.1.1 メッシュ分割図 (メッシュ1)

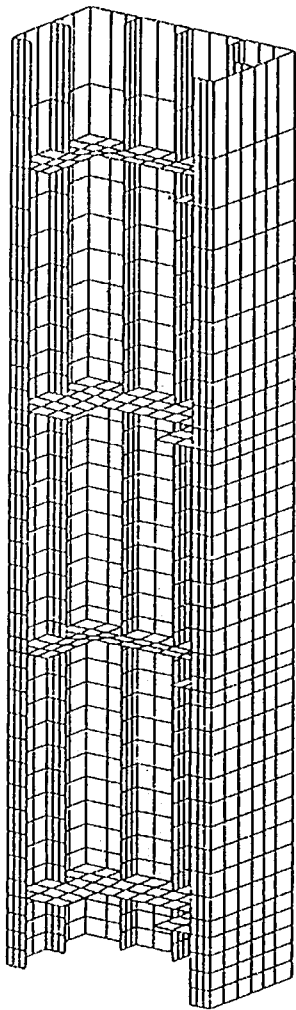


土木研究所実験No.2

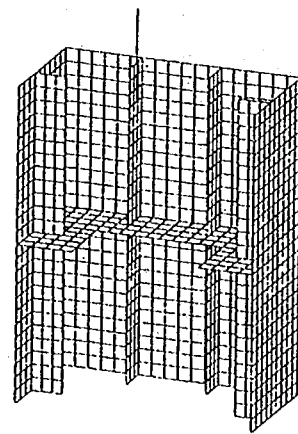


鋼材倶楽部実験KD-3

図-参考3-2.1.2 メッシュ分割図 (メッシュ2)



土木研究所実験No.2



鋼材倶楽部実験KD-3

図-参考3-2.1.3 メッシュ分割図 (メッシュ3)

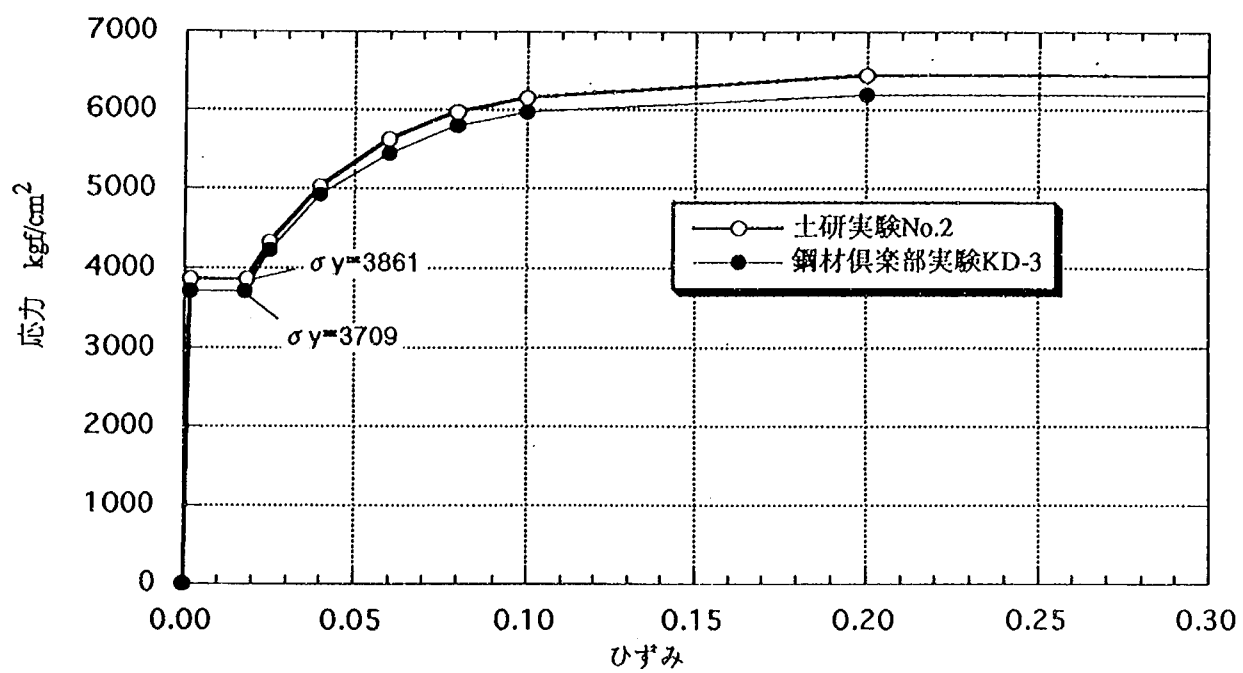


図-参考3-2.1.4 実験との比較解析に用いた応力-ひずみ関係

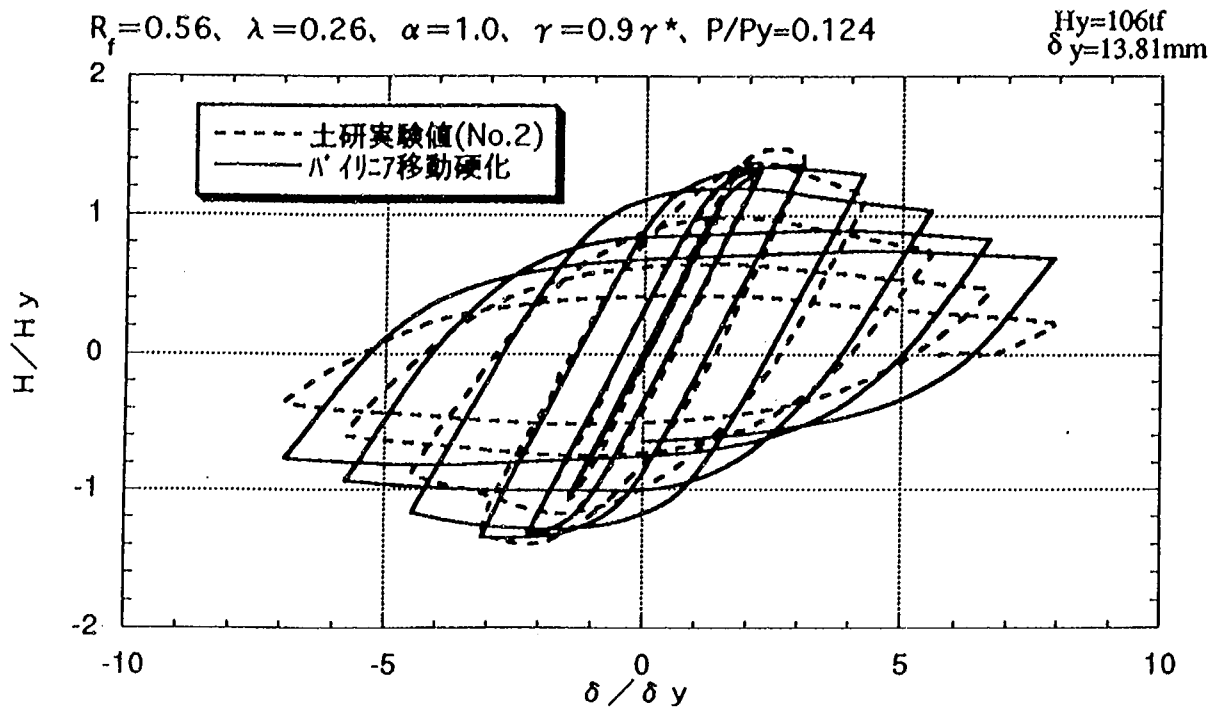


図-参考3-2.2.1(1) 水平荷重—水平変位関係
 (土研実験No. 2、バイリニア移動硬化モデル、メッシュ1)

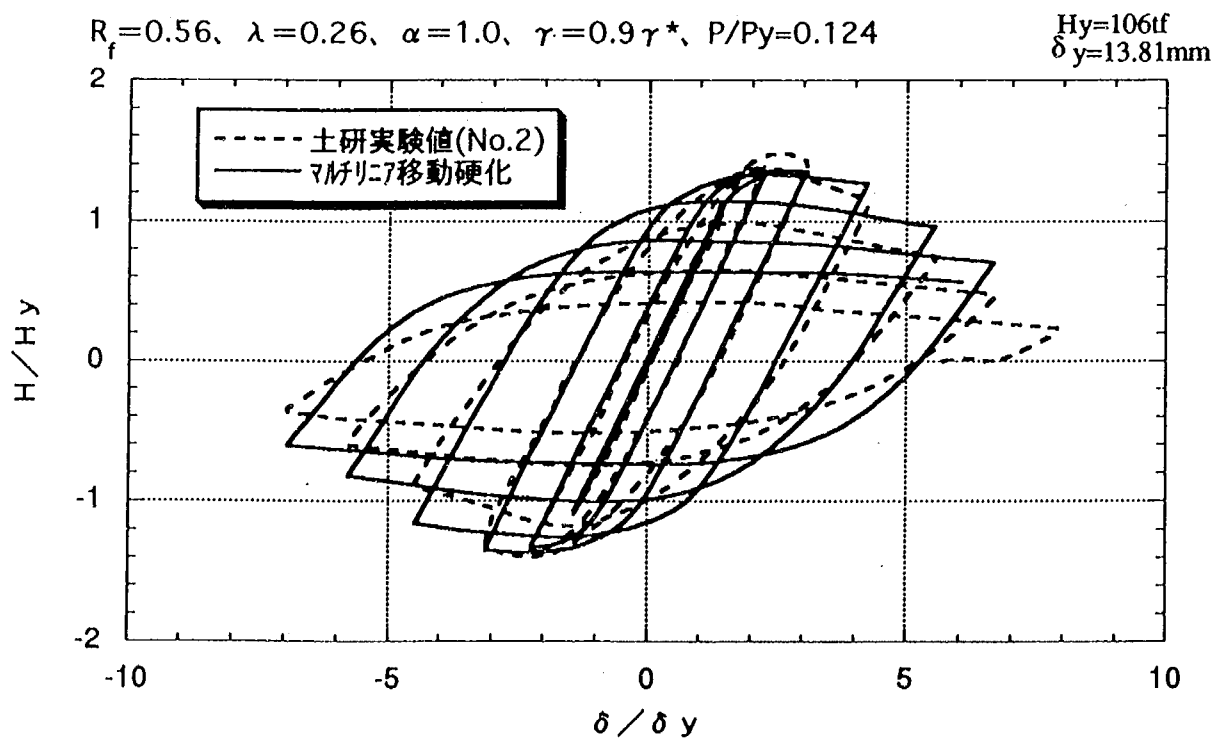


図-参考3-2.2.1(2) 水平荷重—水平変位関係
 (土研実験No. 2、マルチリニア移動硬化モデル、メッシュ1)

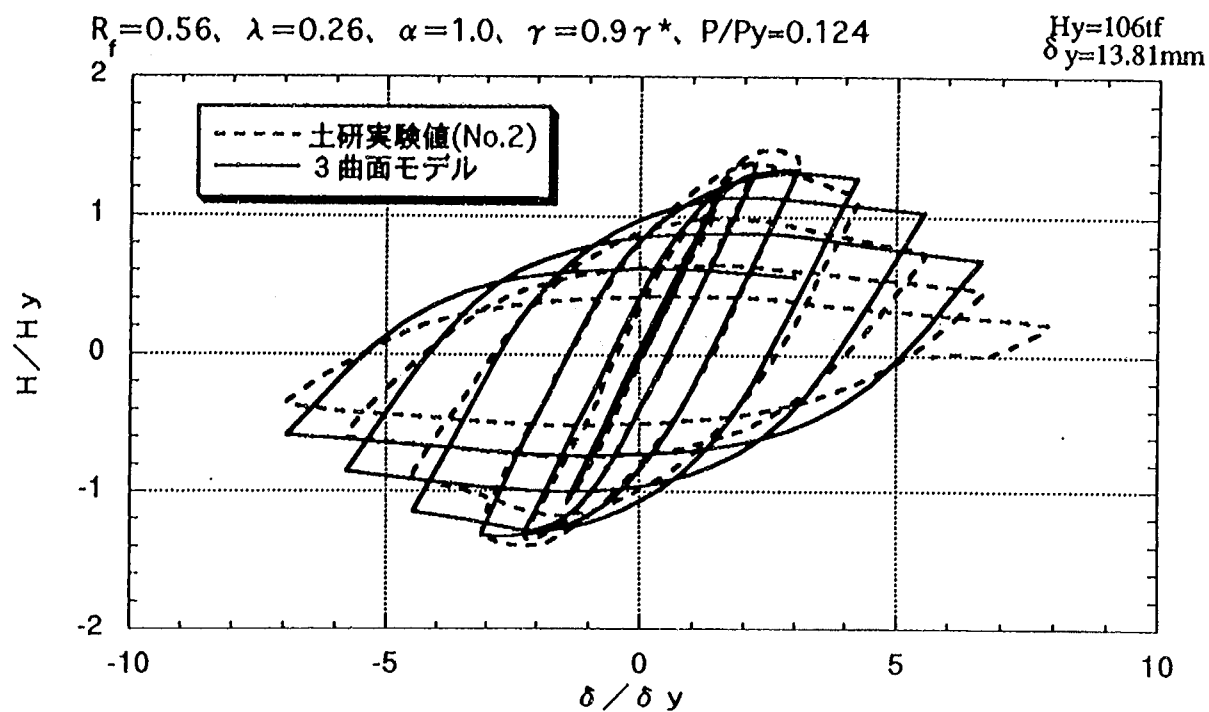


図-参考3-2.2.1(3) 水平荷重—水平変位関係
 (土研実験No. 2、3曲面モデル、メッシュ1)

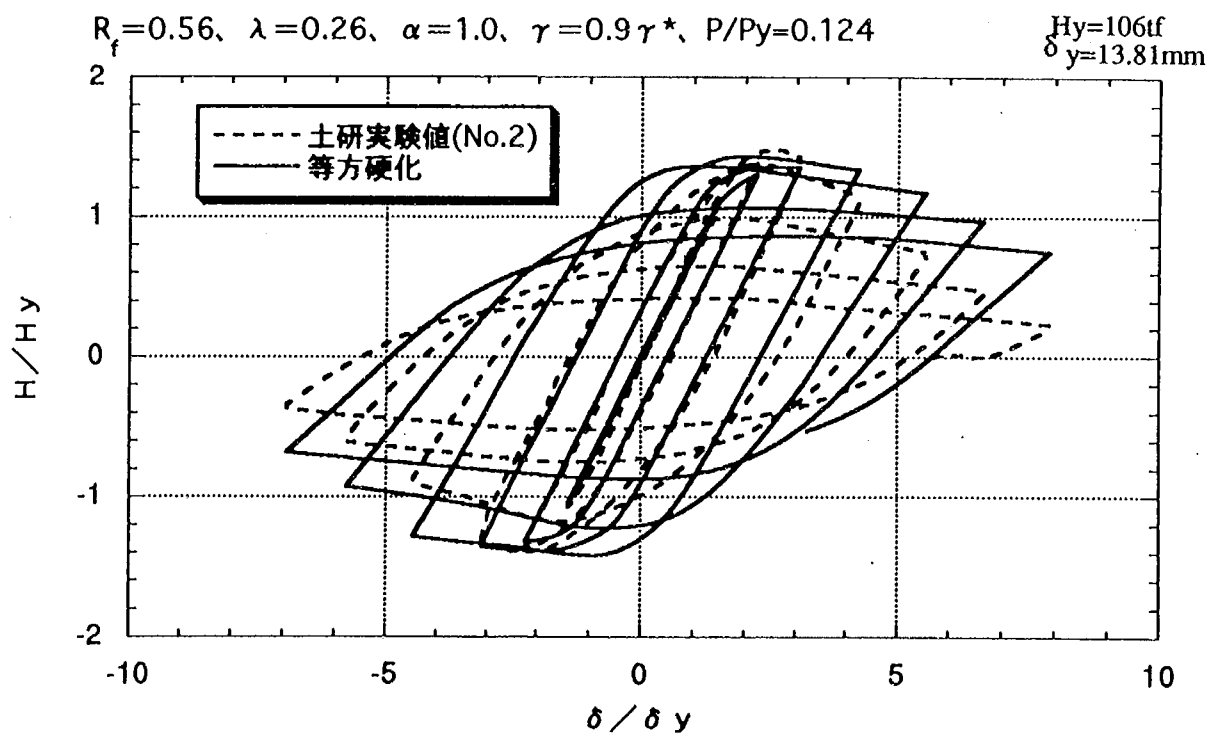


図-参考3-2.2.1(4) 水平荷重—水平変位関係
 (土研実験No. 2、等方硬化モデル、メッシュ1)

$R_f=0.56, \lambda=0.26, \alpha=1.0, \gamma=0.9\gamma^*, P/Py=0.124$

$H_y=106tf$
 $\delta_y=13.81mm$

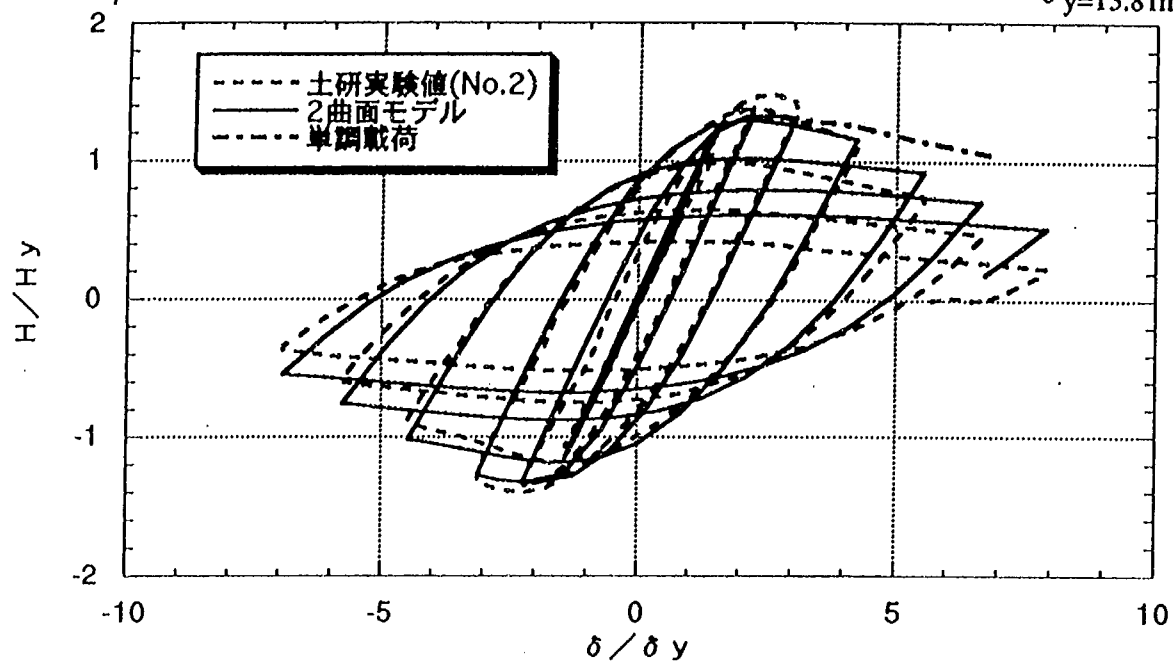


図-参考3-2.2.2 水平荷重—水平変位関係
 (土研実験No. 2、2曲面モデル、メッシュ2)

$R_f=0.56$, $\lambda=0.26$, $\alpha=1.0$, $\gamma=0.9\gamma^*$, $P/Py=0.124$

$H_y=106tf$
 $\delta_y=13.81mm$

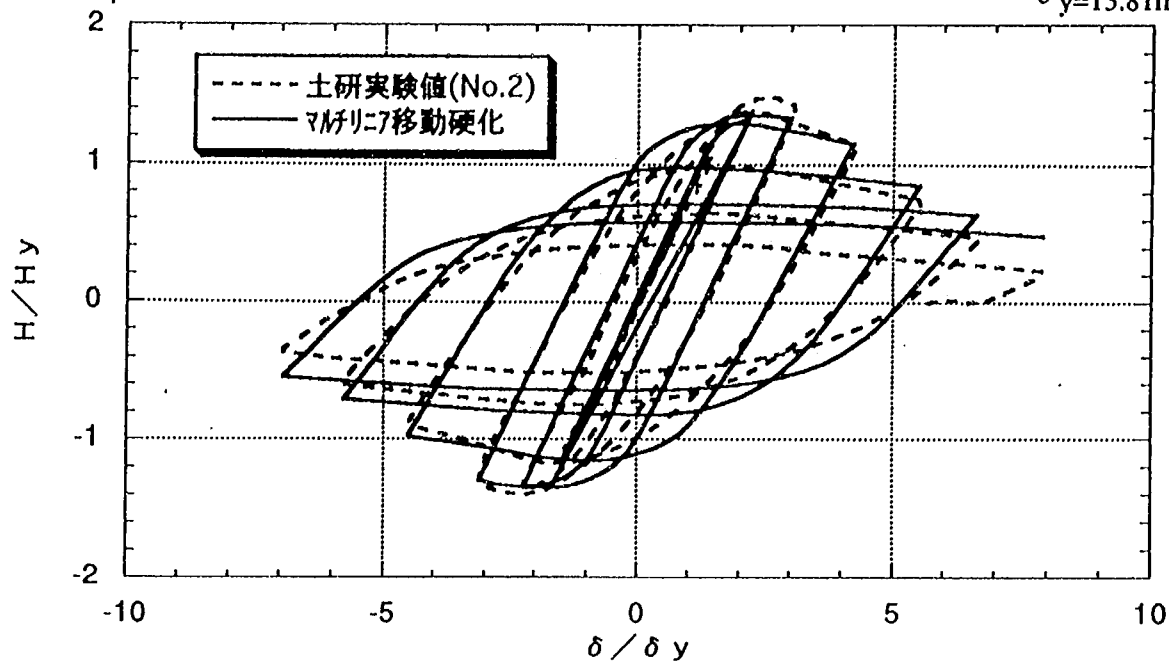


図-参考3-2.2.3(1) 水平荷重-水平変位関係
(土研実験No. 2、マルチリニア移動硬化モデル、メッシュ3)

$R_f=0.56$, $\lambda=0.26$, $\alpha=1.0$, $\gamma=0.9\gamma^*$, $P/Py=0.124$

$H_y=106tf$
 $\delta_y=13.81mm$

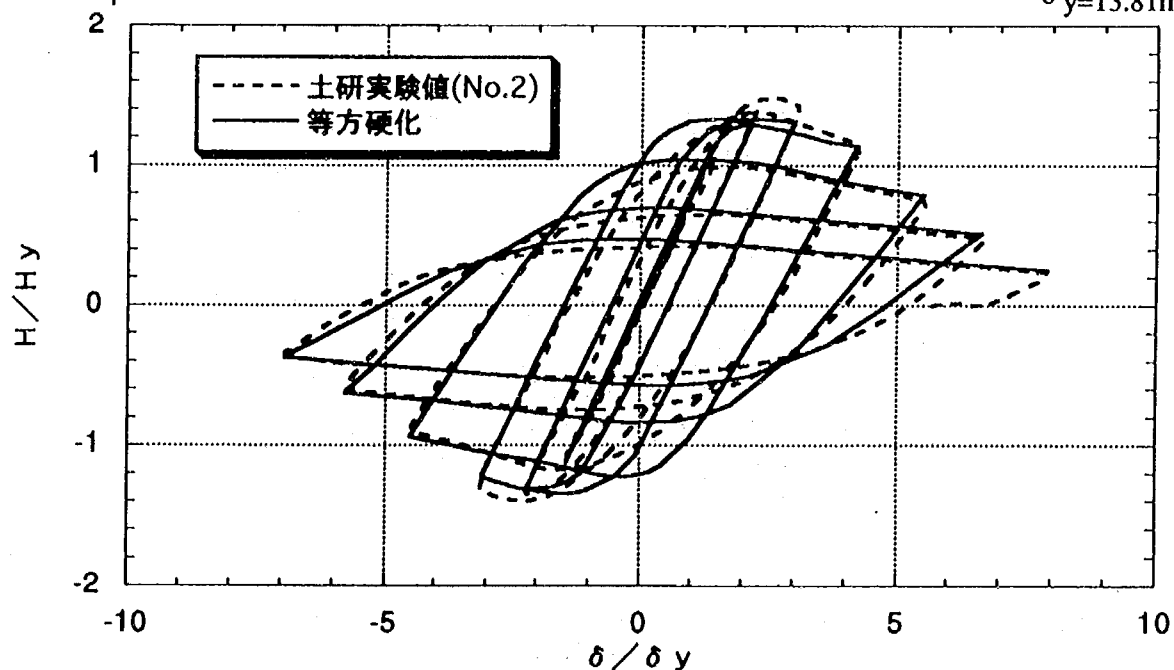


図-参考3-2.2.3(2) 水平荷重-水平変位関係
(土研実験No. 2、等方硬化モデル、メッシュ3)

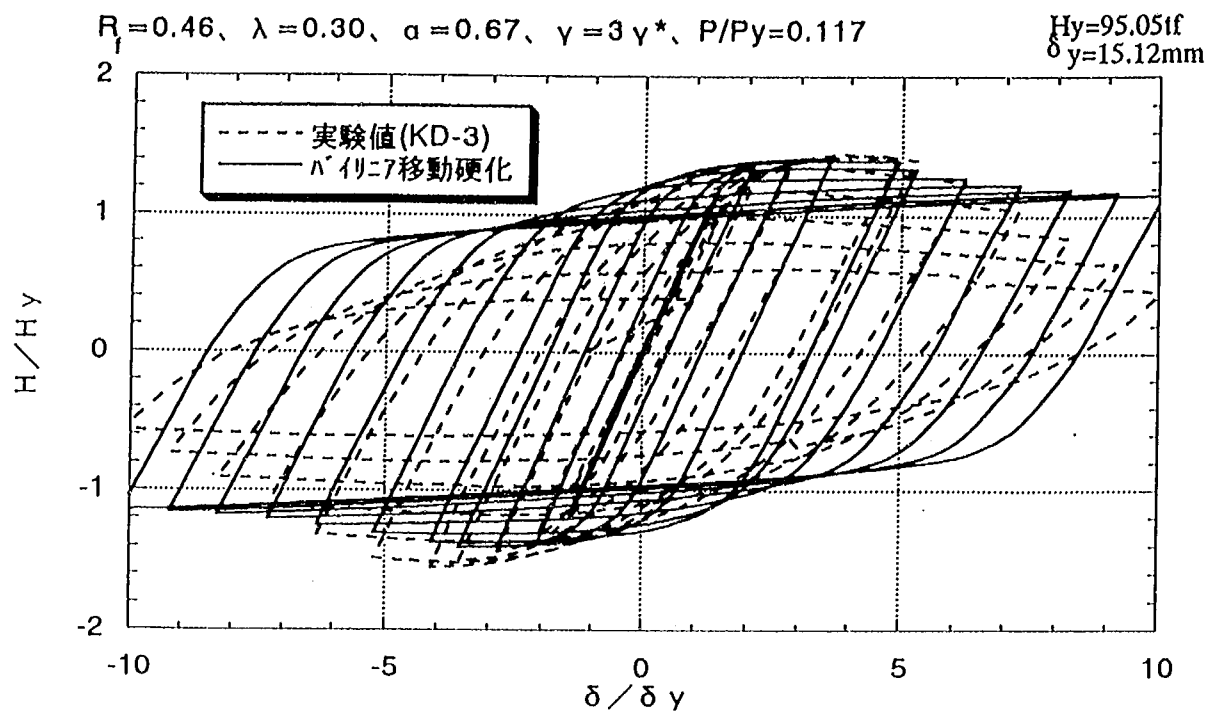


図-参考3-2.2.4(1) 水平荷重－水平変位関係
 (実験KD-3、バイリニア移動硬化モデル、メッシュ1)

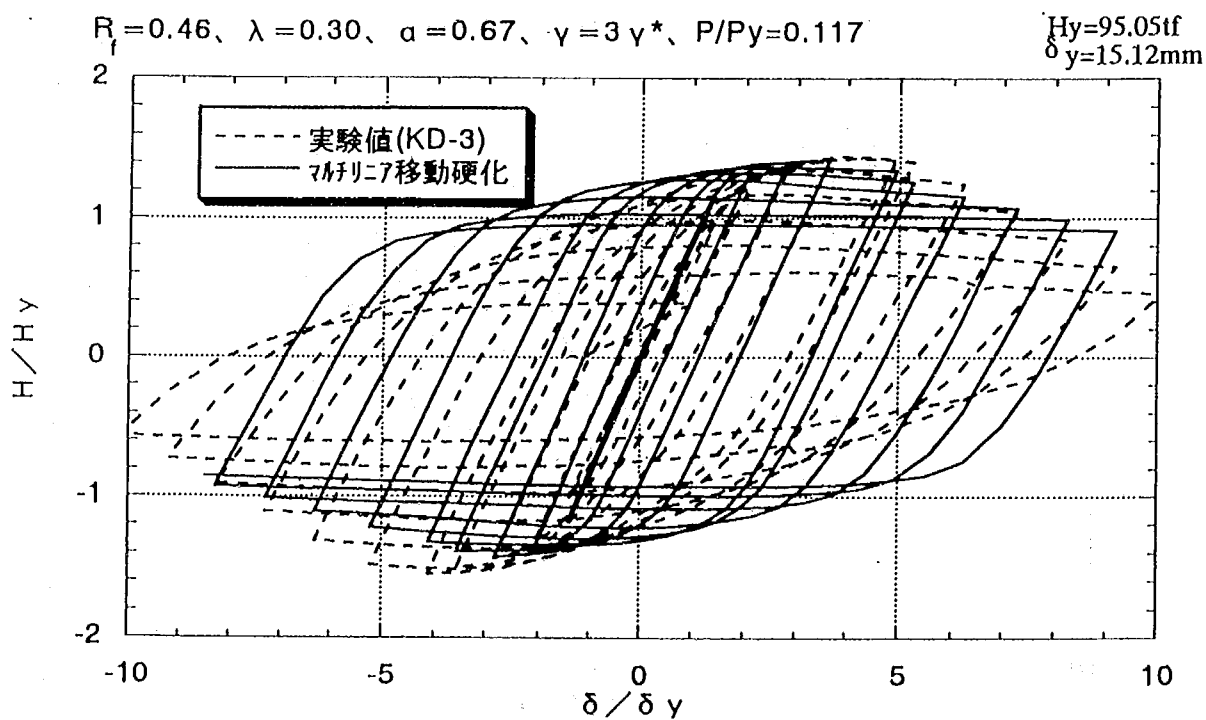


図-参考3-2.2.4(2) 水平荷重－水平変位関係
 (実験KD-3、マルチリニア移動硬化モデル、メッシュ1)

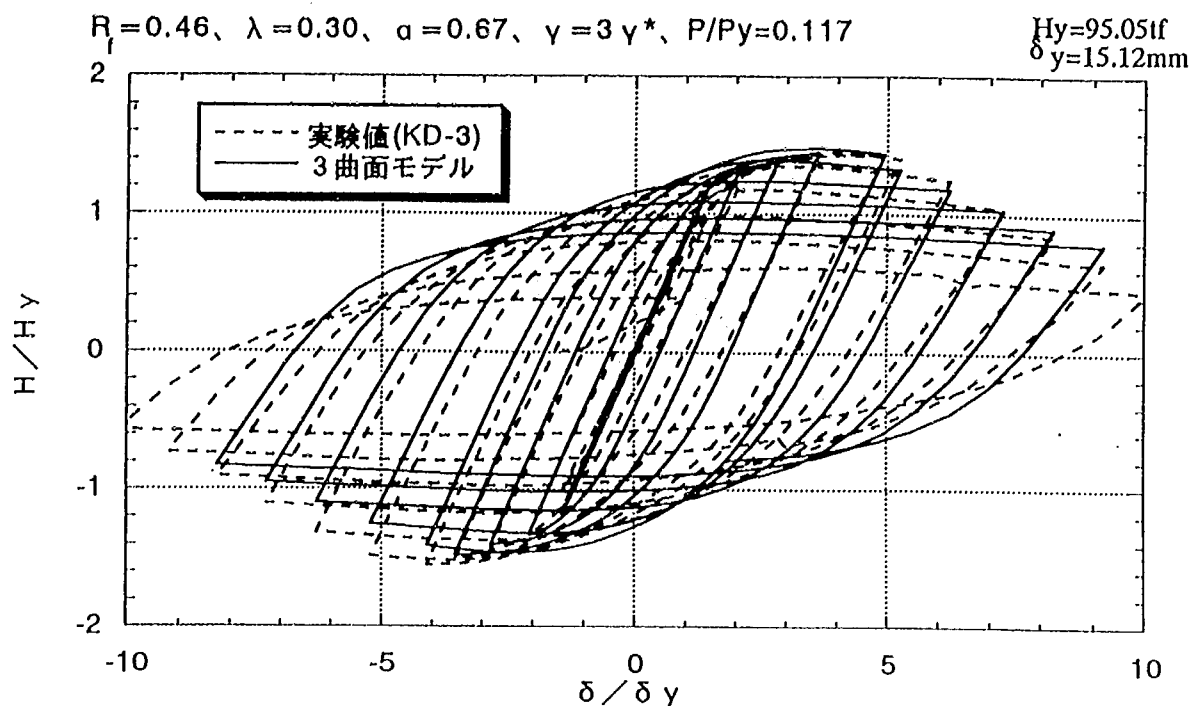


図-参考3-2.2.4(3) 水平荷重-水平変位関係
 (実験KD-3、3曲面モデル、メッシュ1)

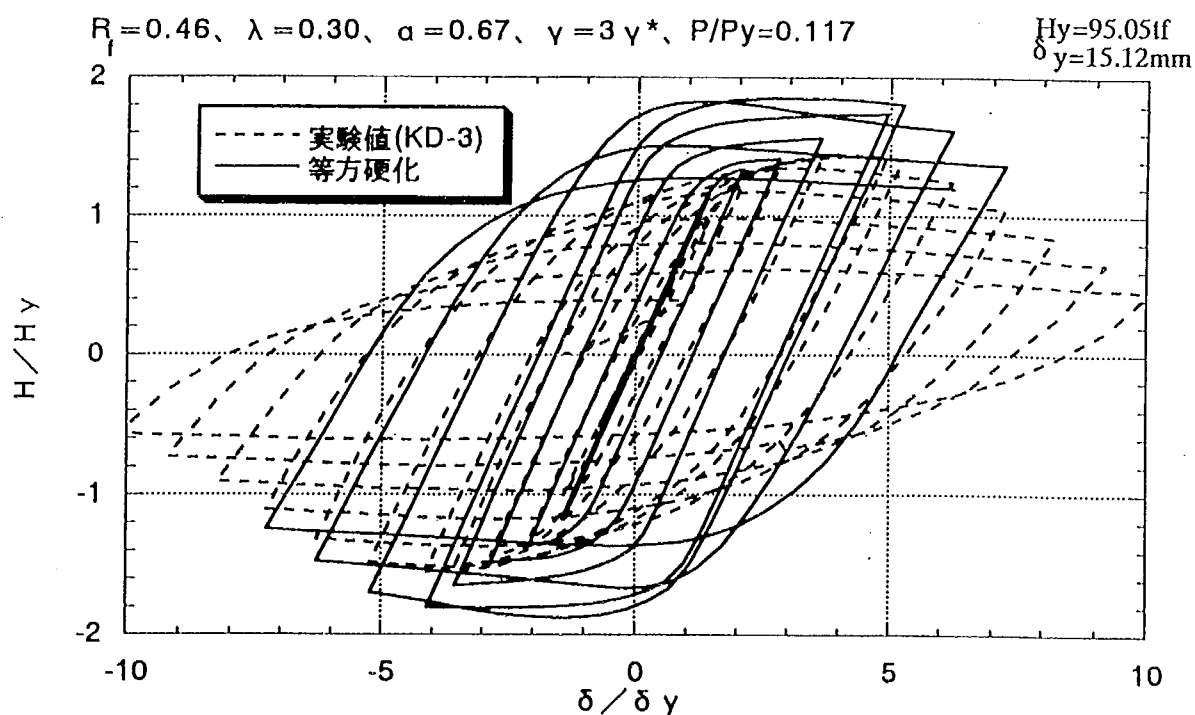


図-参考3-2.2.4(4) 水平荷重-水平変位関係
 (実験KD-3、等方硬化モデル、メッシュ1)

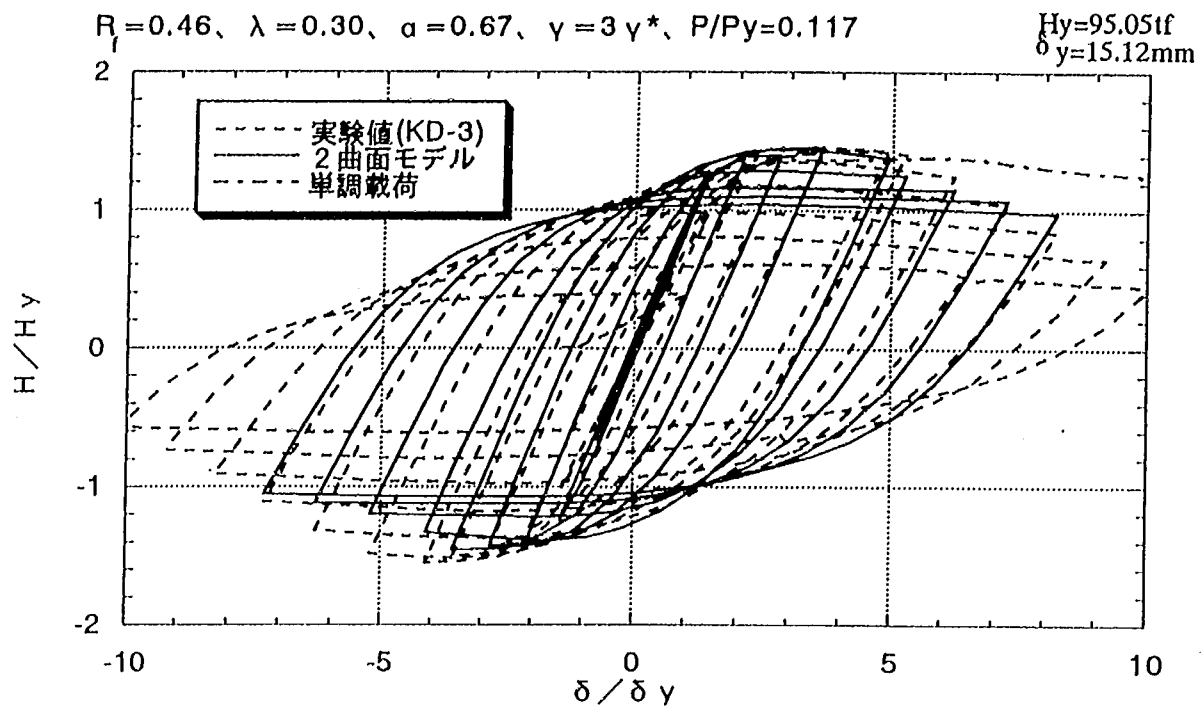


図-参考3-2.2.5 水平荷重—水平変位関係
 (実験KD-3、2曲面モデル、メッシュ2)

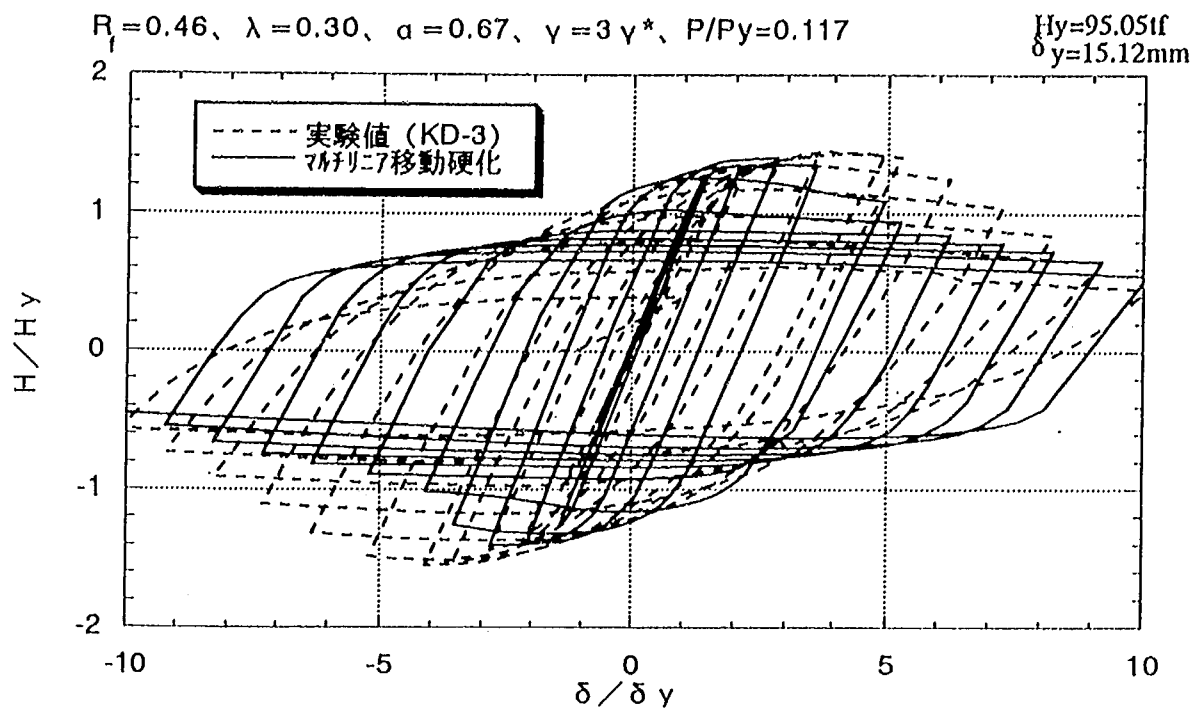


図-参考3-2.2.6(1) 水平荷重-水平変位関係
 (実験KD-3、マルチリニア移動硬化モデル、メッシュ3)

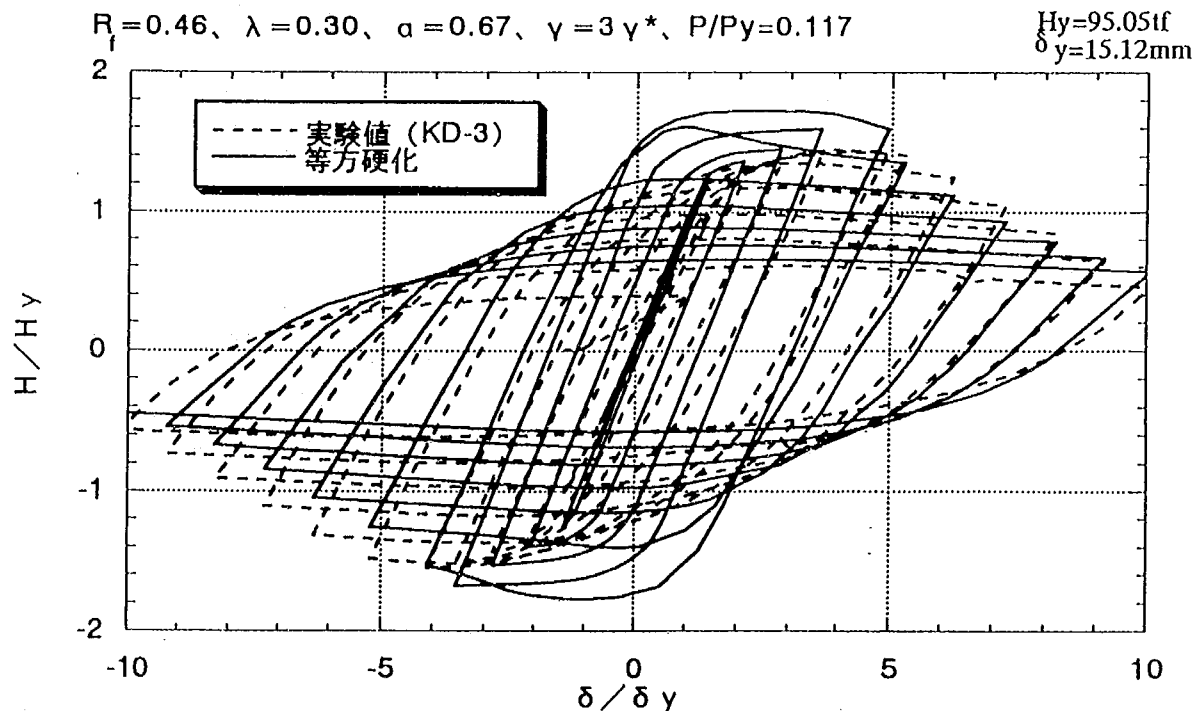
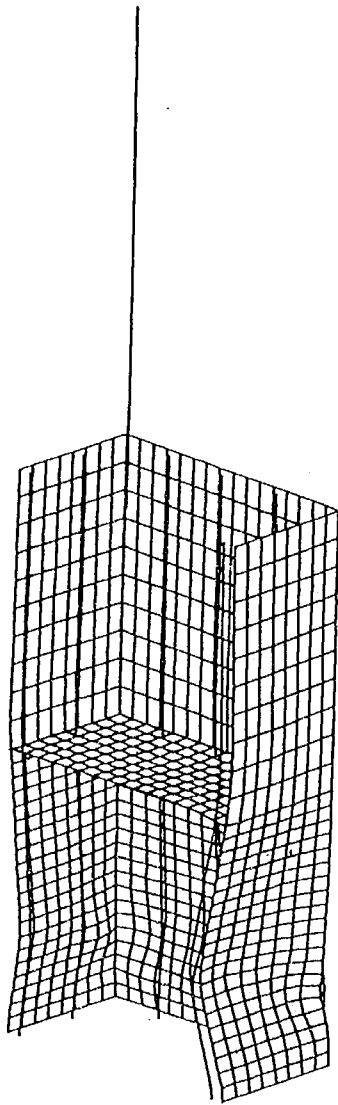
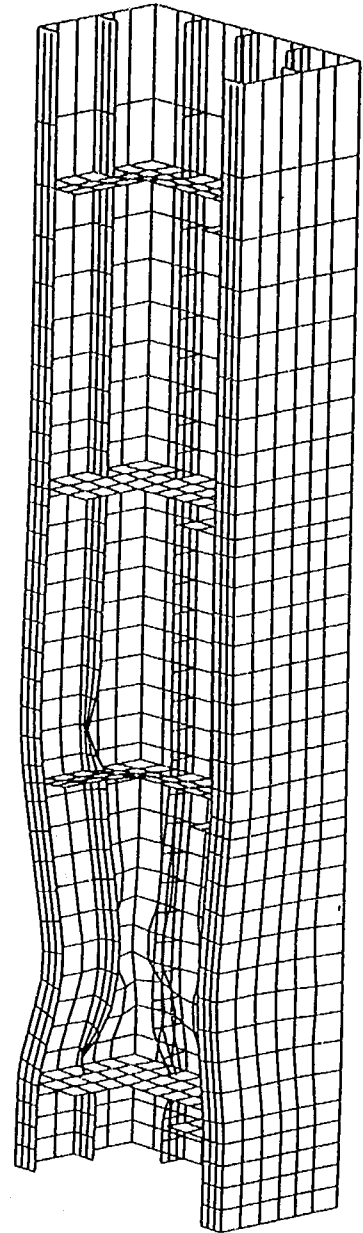


図-参考3-2.2.6(2) 水平荷重-水平変位関係
 (実験KD-3、等方硬化モデル、メッシュ3)

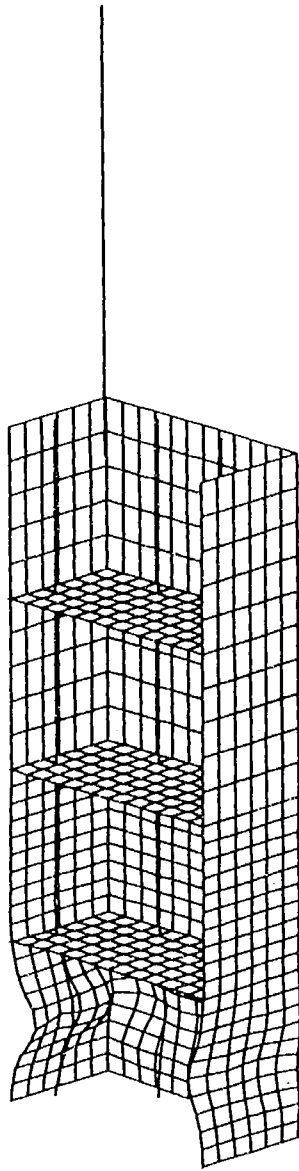


メッシュ1 (3曲面モデル)

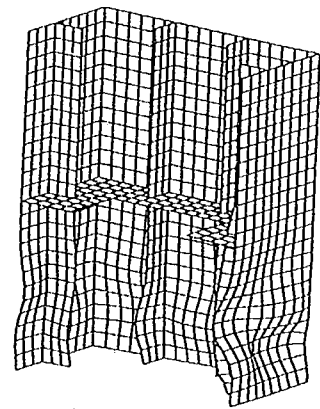


メッシュ3 (マルチリニア移動硬化則)

図-参考3-2.3.1 土木研究所実験No.2の解析結果 (+7 δy 終了時の変形図)



メッシュ1 (3曲面モデル)



メッシュ3 (マルチリニア移動硬化則)

図-参考3-2.3.2 鋼材倶楽部実験KD-3の解析結果 (+11 δy 終了時の変形図)

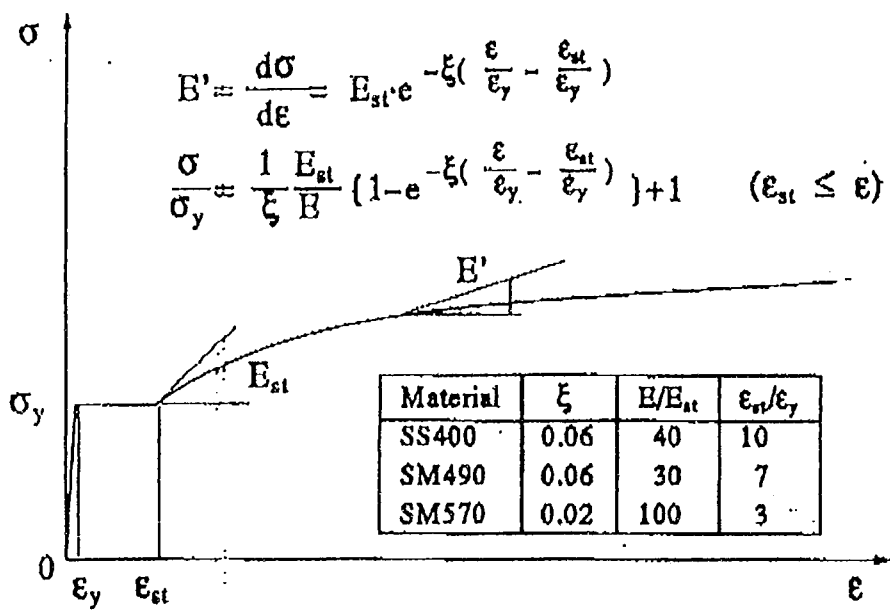


図-参考3-3.1.1 パラメータ解析に用いた応力-ひずみ関係

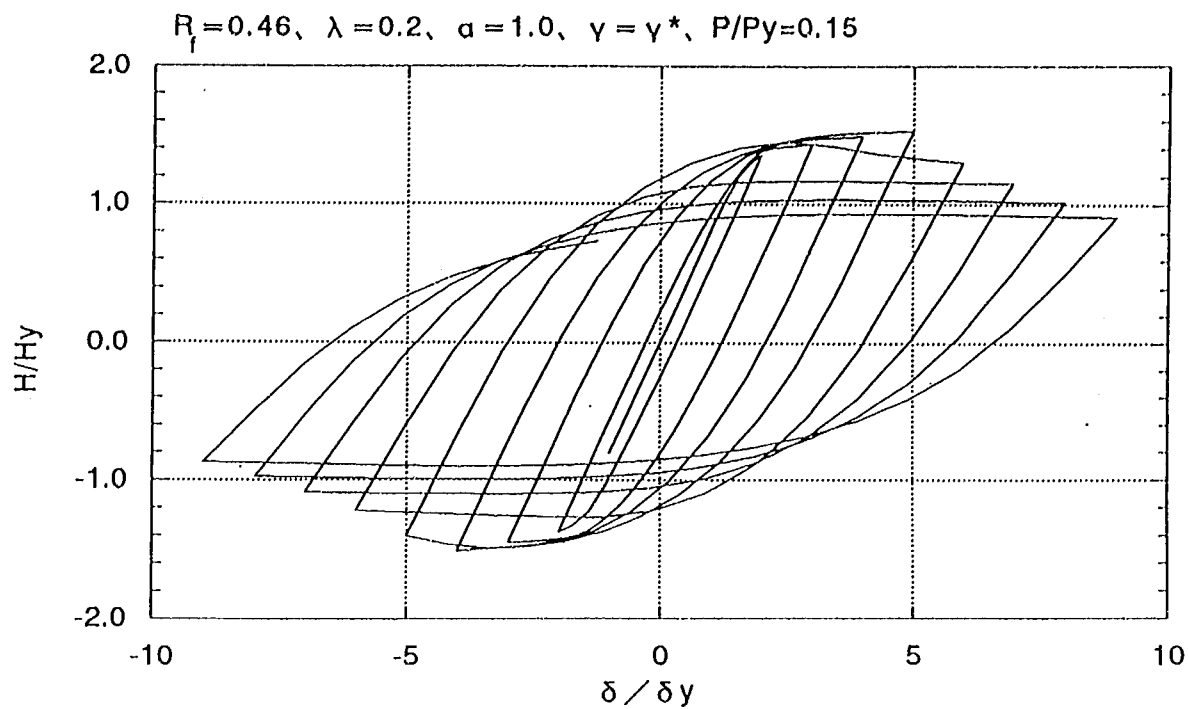


図-参考3-3.2.1(1) B 1の水平荷重-水平変位関係(2曲面モデル)

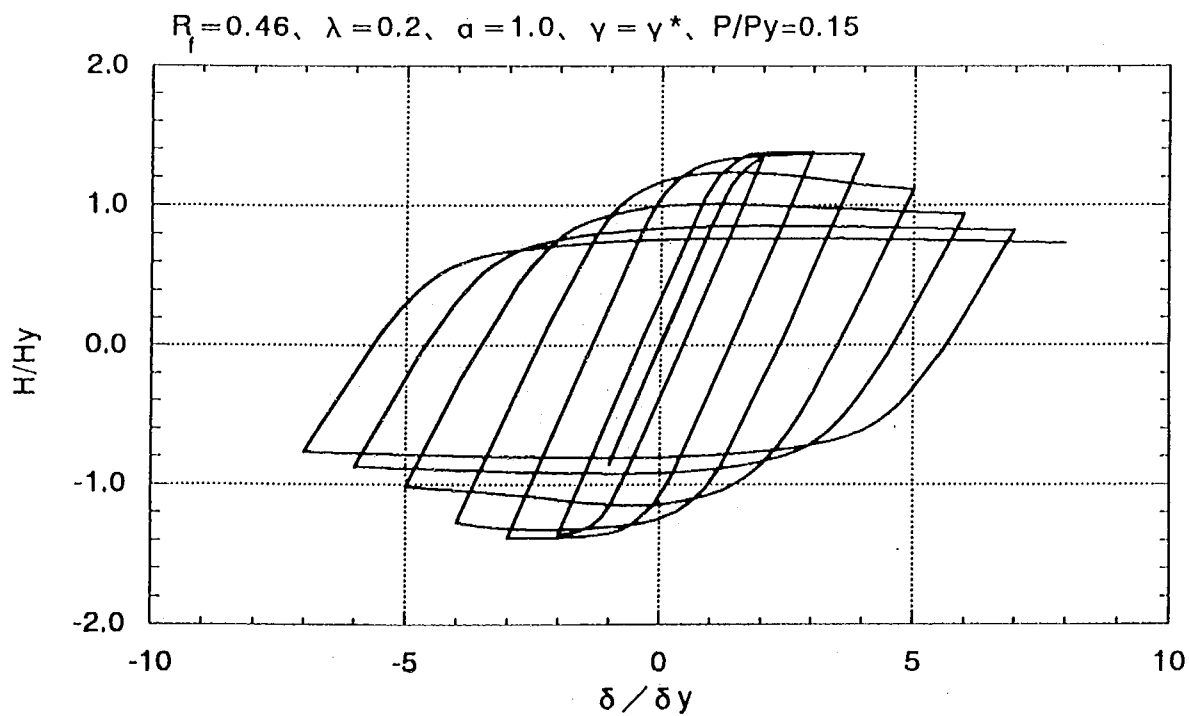


図-参考3-3.2.1(2) B 1の水平荷重-水平変位関係(マルチリニア移動硬化硬化モデル)

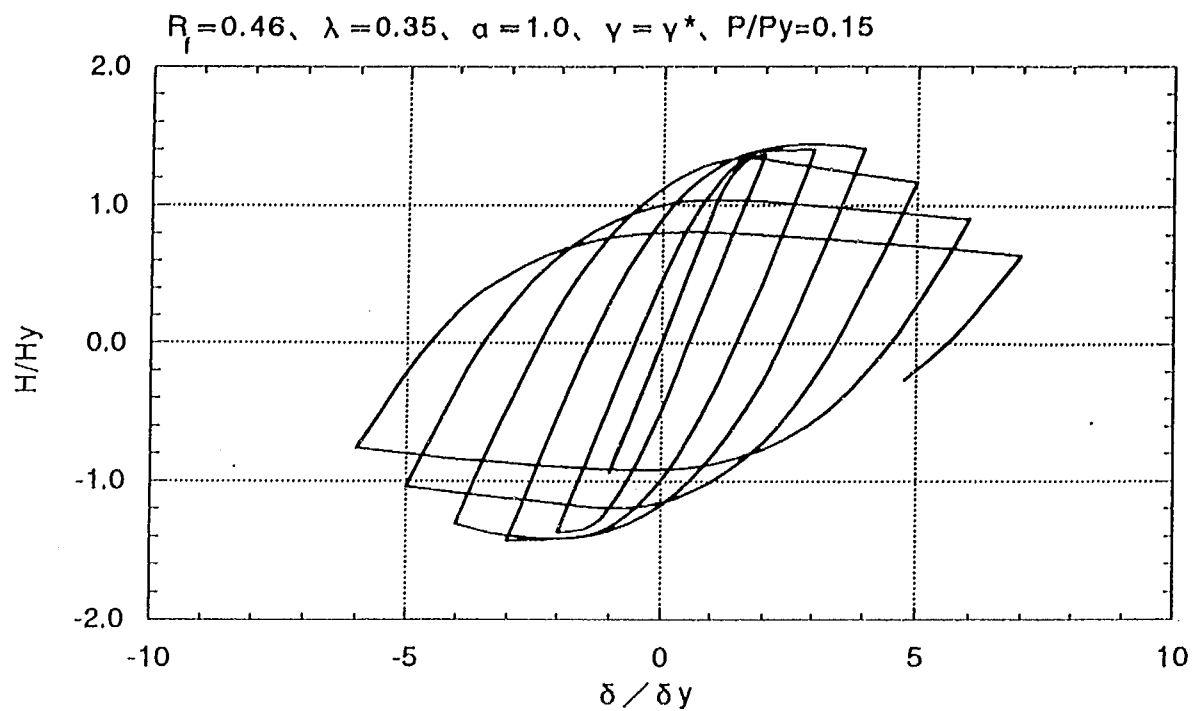


図-参考3-3.2.2(1) B 2の水平荷重-水平変位関係 (2 曲面モデル)

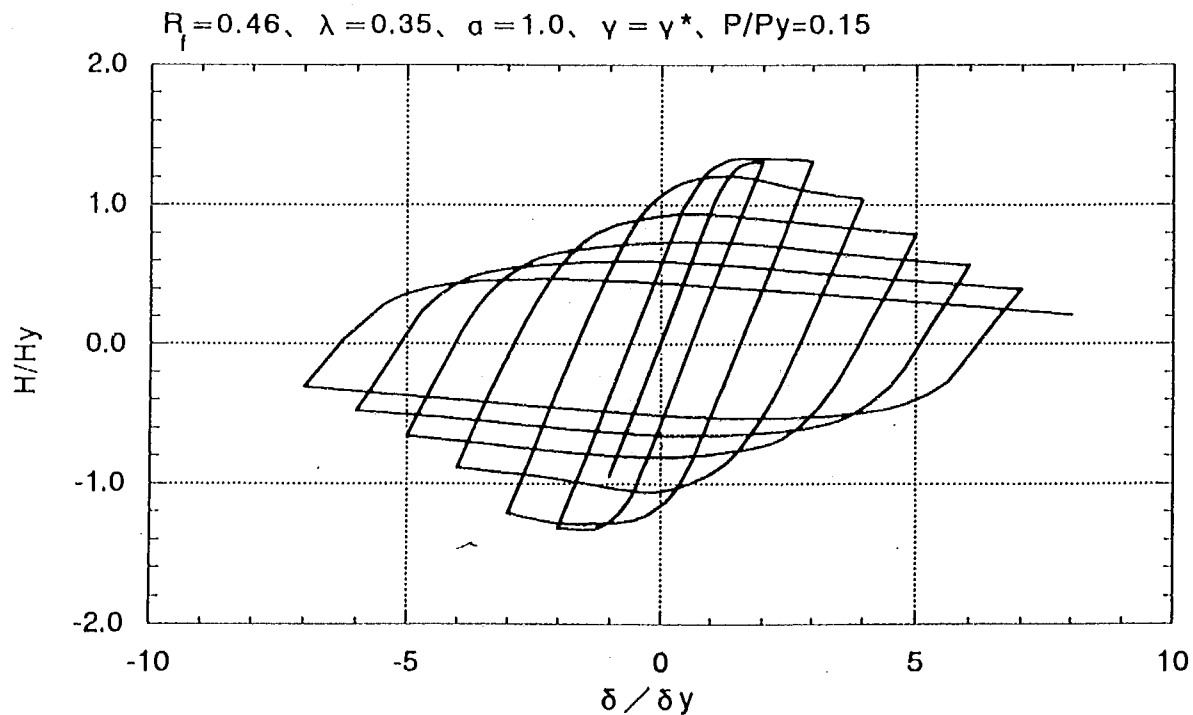


図-参考3-3.2.2(2) B 2の水平荷重-水平変位関係 (マルチリニア移動硬化モデル)

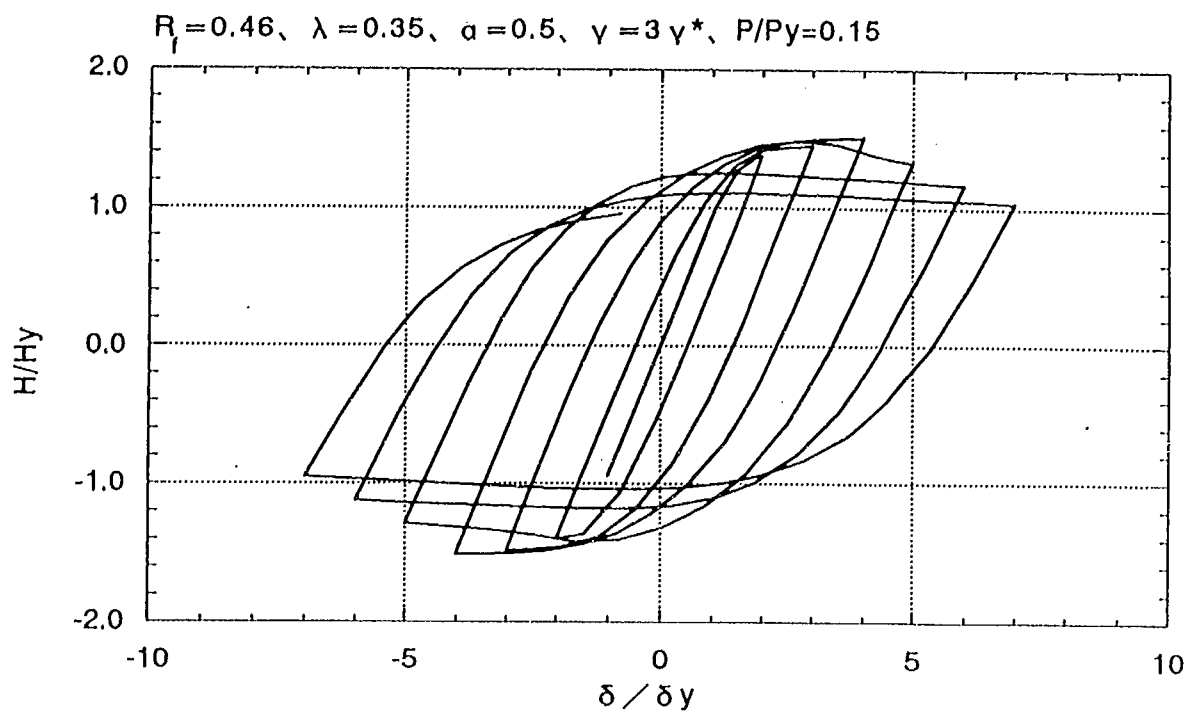


図-参考3-3.2.3(1) B 3 の水平荷重-水平変位関係 (2 曲面モデル)

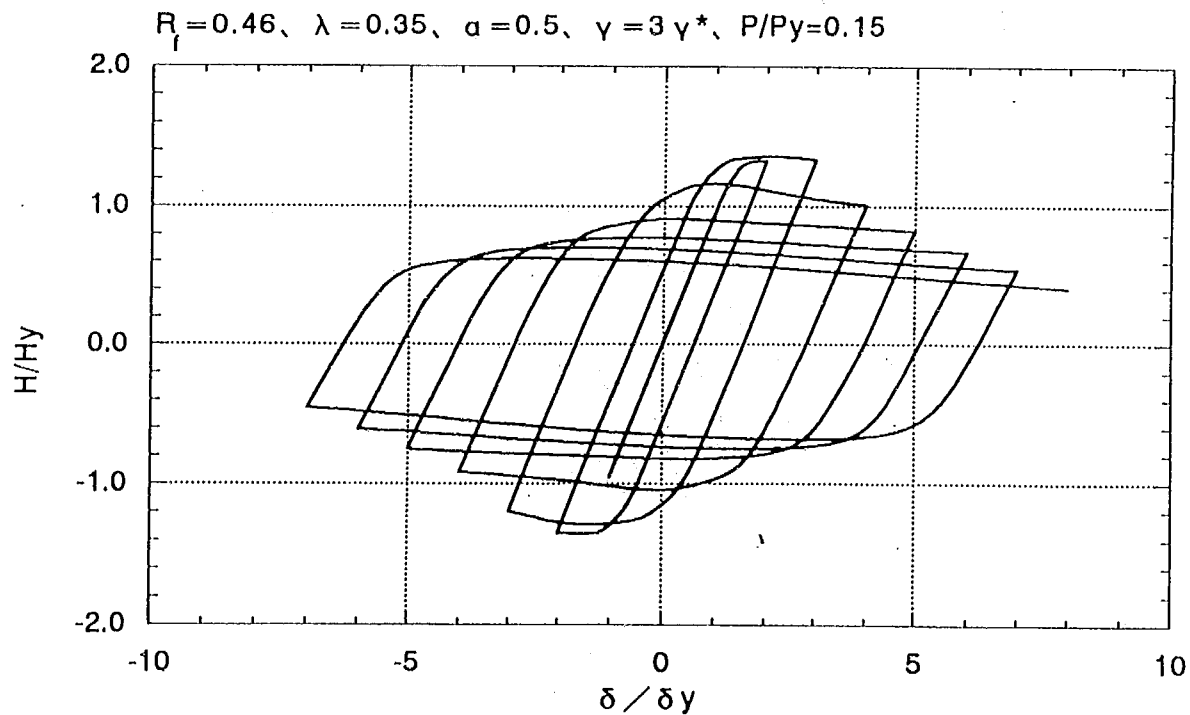


図-参考3-3.2.3(2) B 3 の水平荷重-水平変位関係 (マルチリニア移動硬化モデル)

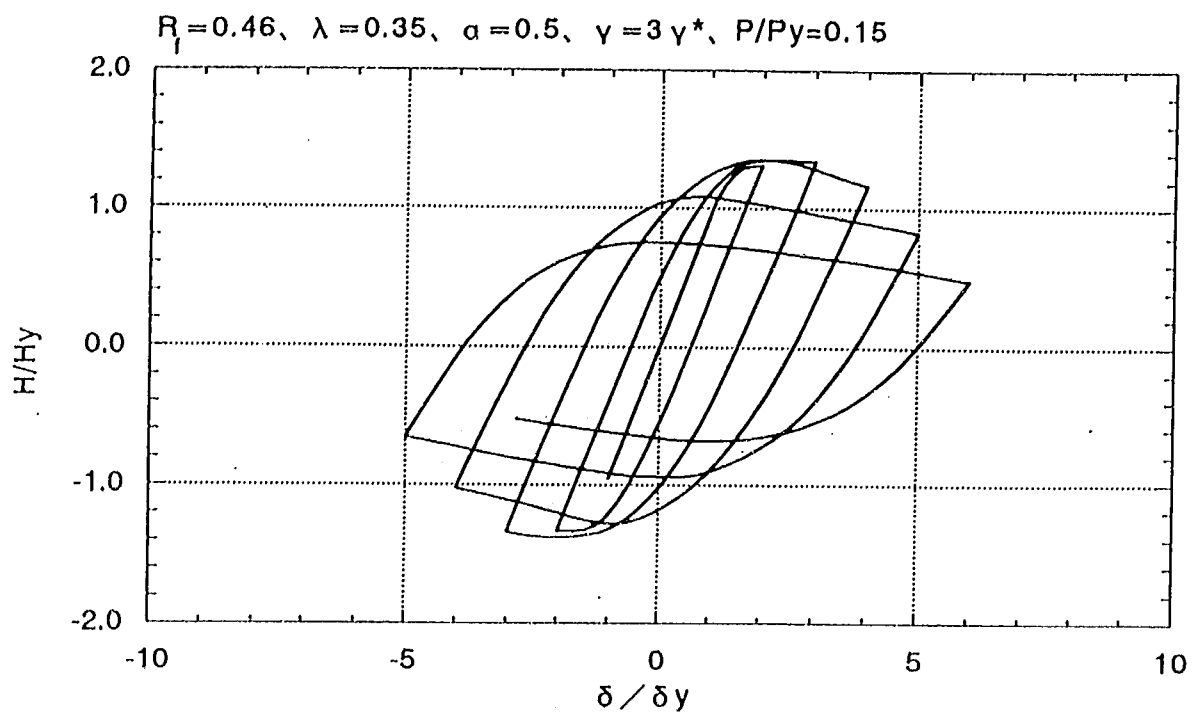


図-参考3-3.2.4(1) B 4 の水平荷重-水平変位関係 (2 曲面モデル)

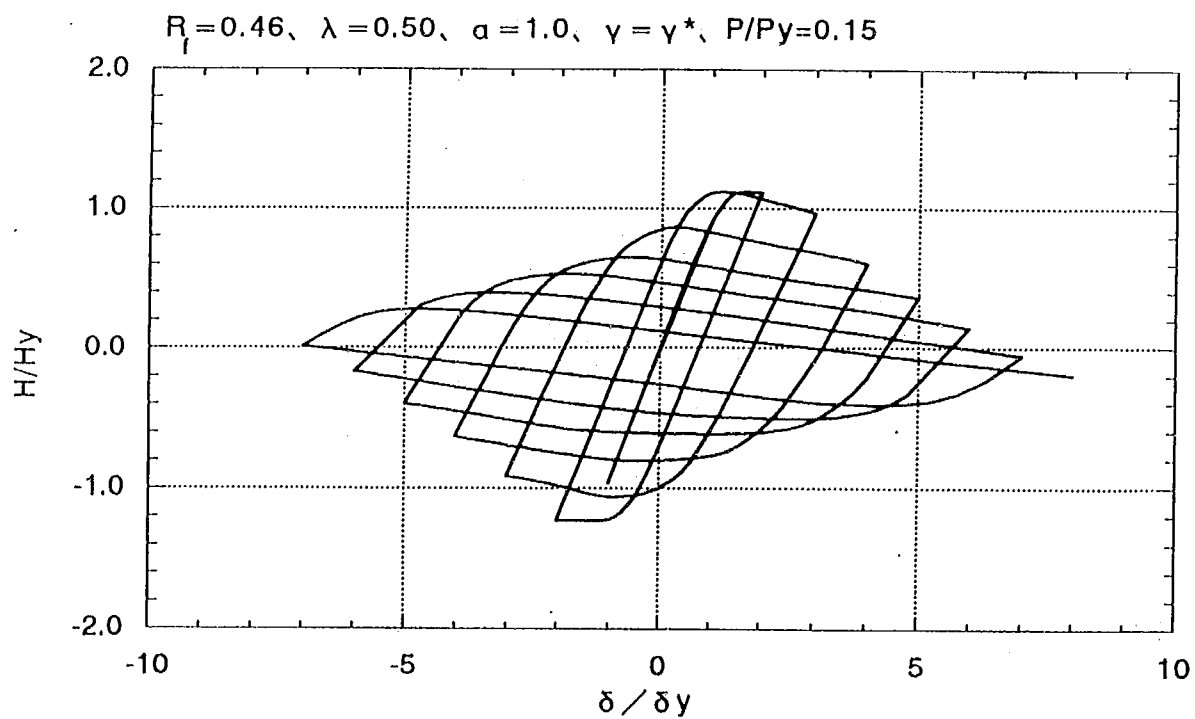


図-参考3-3.2.4(2) B 4 の水平荷重-水平変位関係 (マルチリニア移動硬化モデル)

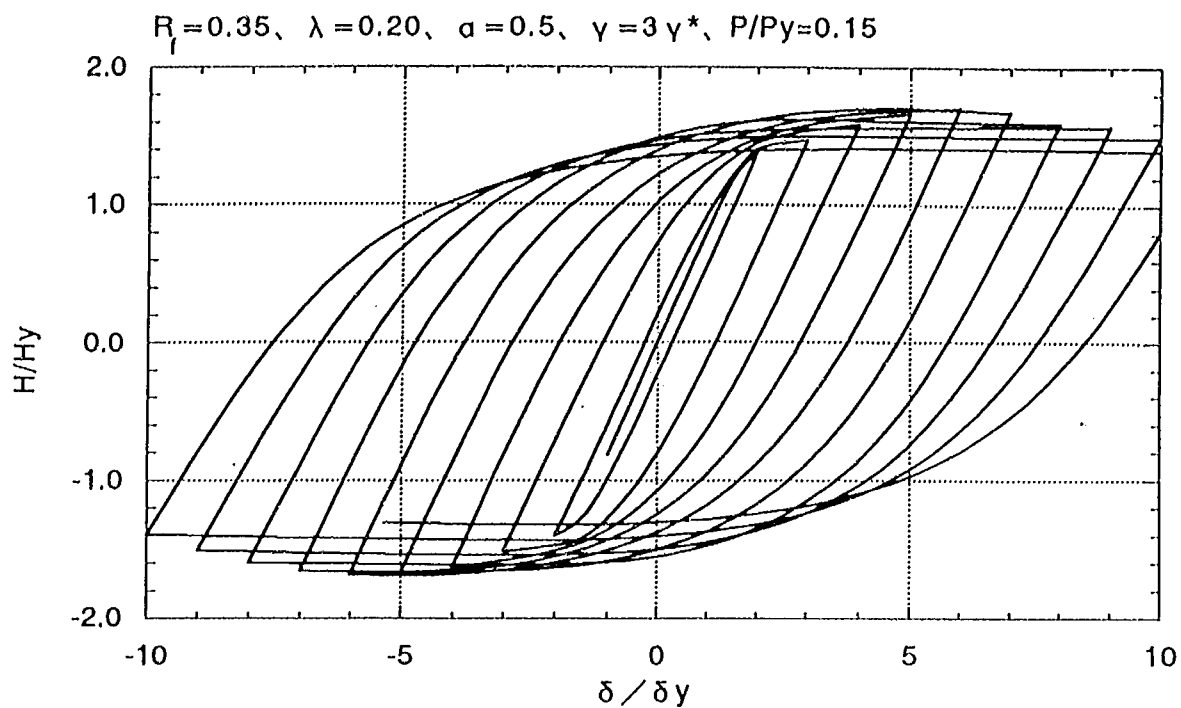


図-参考3-3.2.5(1) B 5の水平荷重-水平変位関係(2曲面モデル)

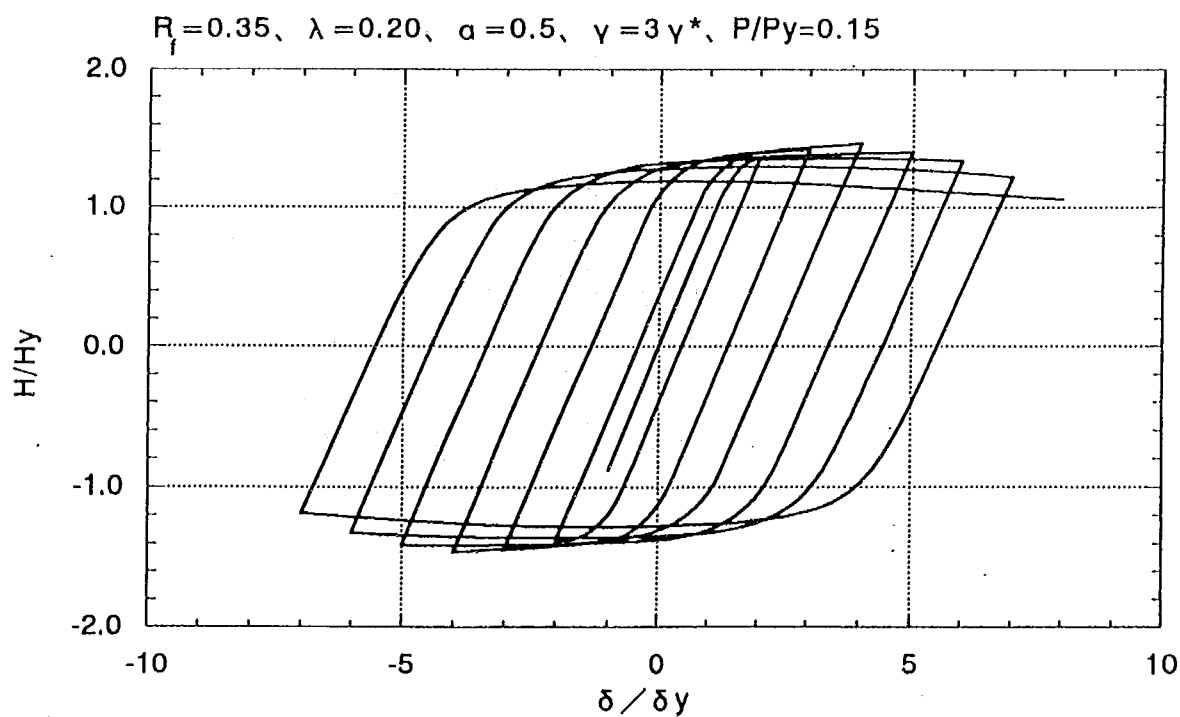


図-参考3-3.2.5(2) B 5の水平荷重-水平変位関係(マルチリニア移動硬化モデル)

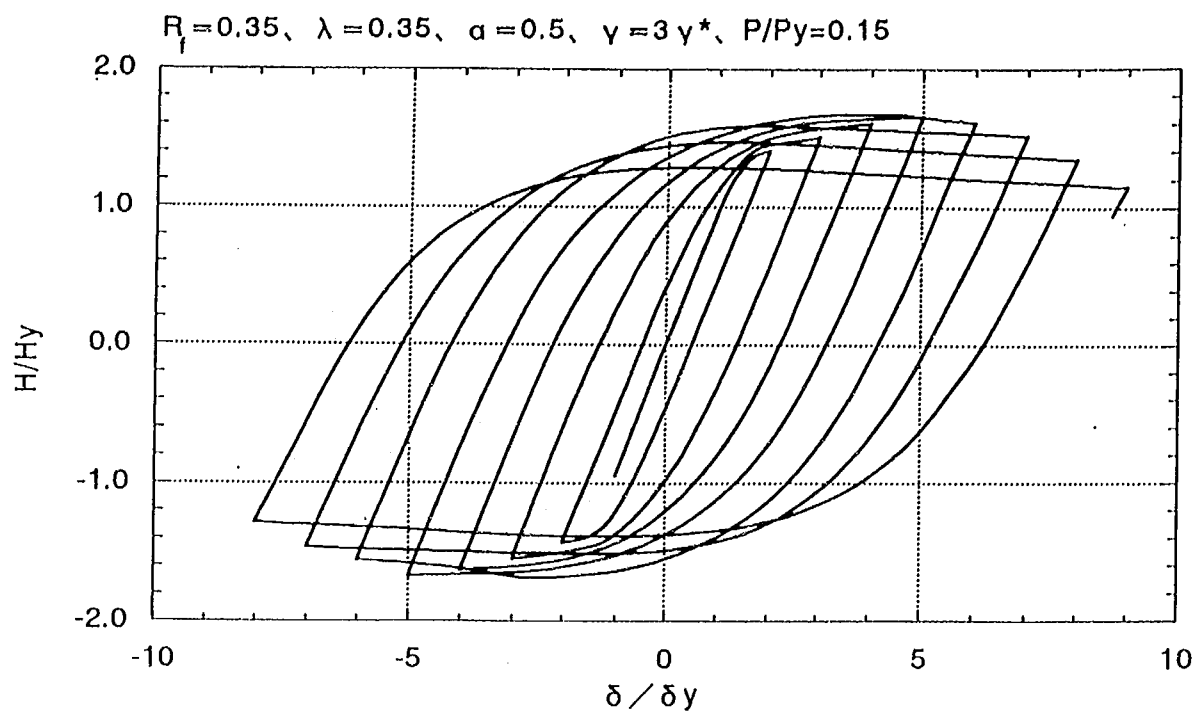


図-参考3-3.2.6(1) B 6の水平荷重－水平変位関係（2曲面モデル）

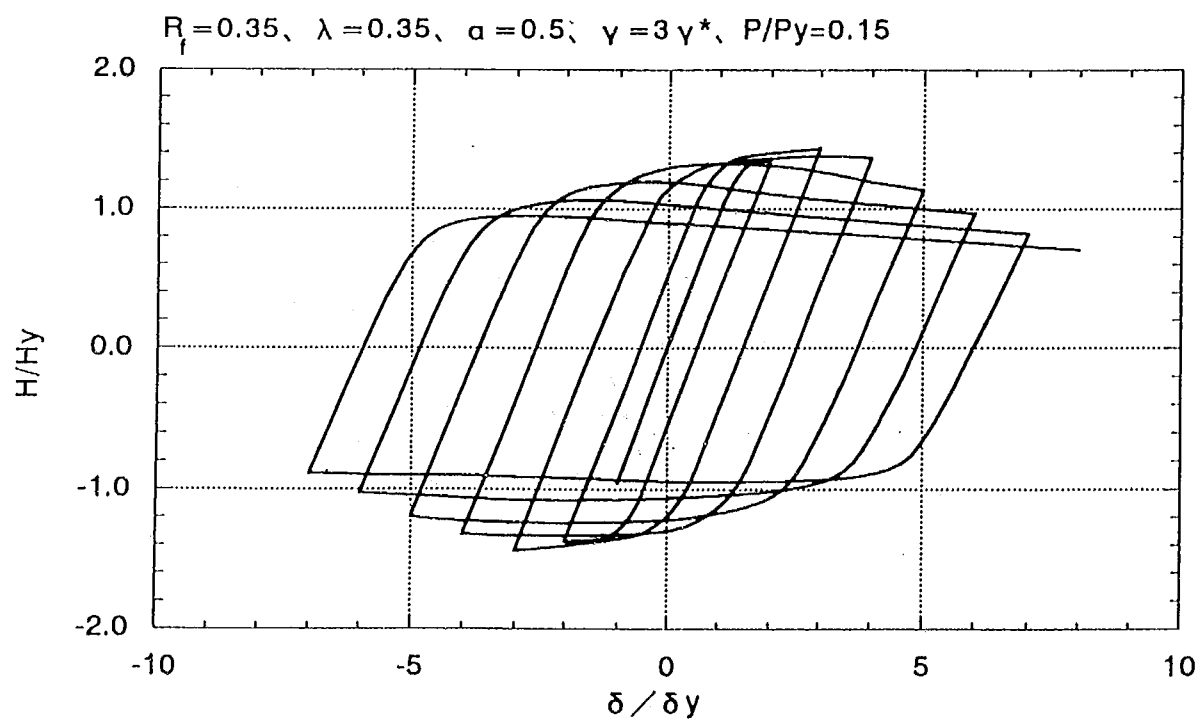


図-参考3-3.2.6(2) B 6の水平荷重－水平変位関係（マルチライン移動硬化モデル）

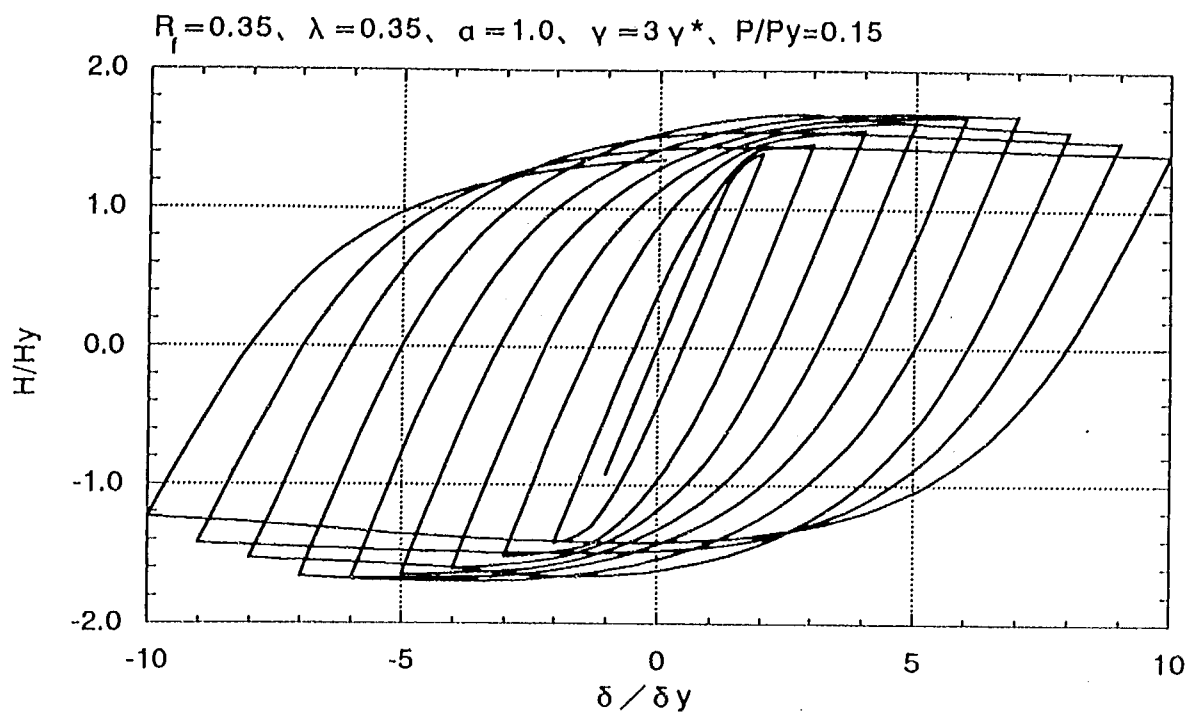


図-参考3-3.2.7(1) B 7 の水平荷重－水平変位関係（2 曲面モデル）

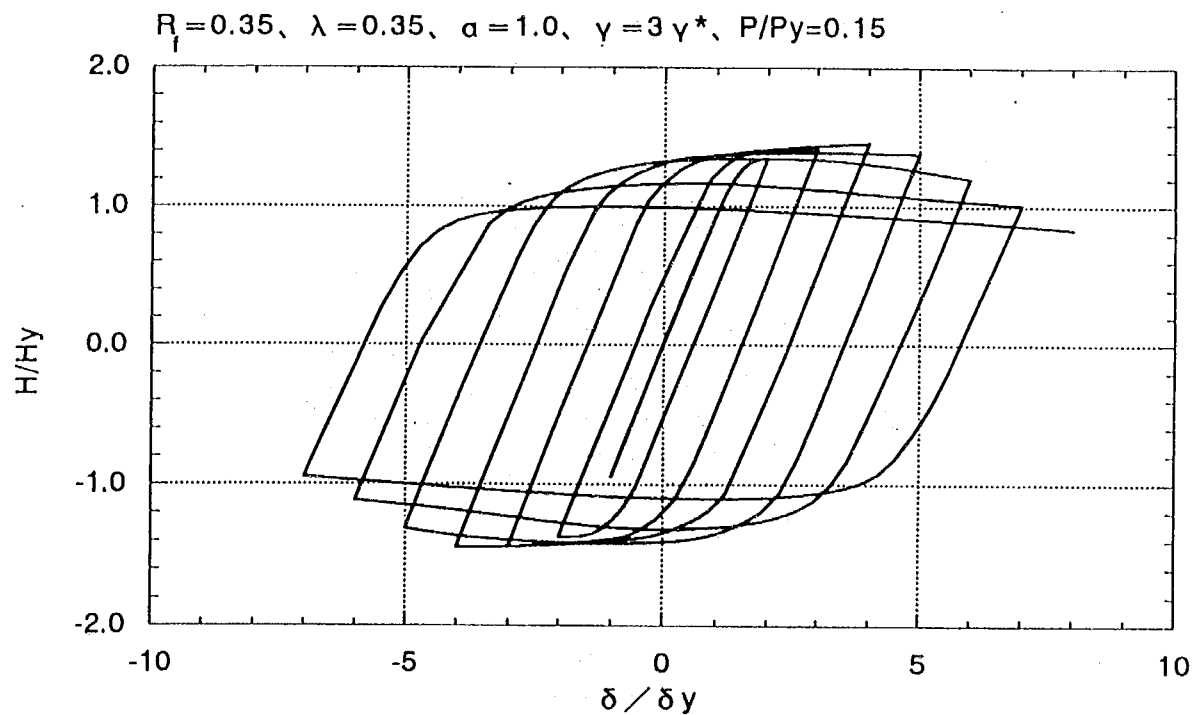


図-参考3-3.2.7(2) B 7 の水平荷重－水平変位関係（マルチリニア移動硬化モデル）

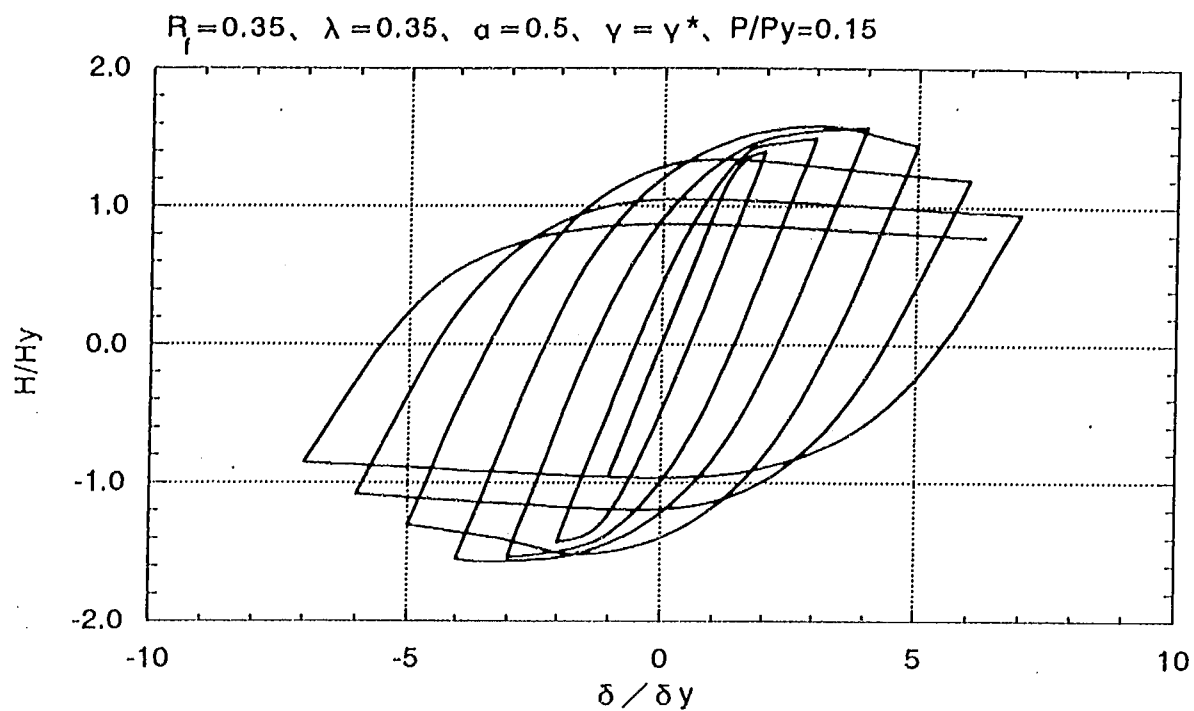


図-参考3-3.2.8(1) B 8の水平荷重-水平変位関係(2曲面モデル)

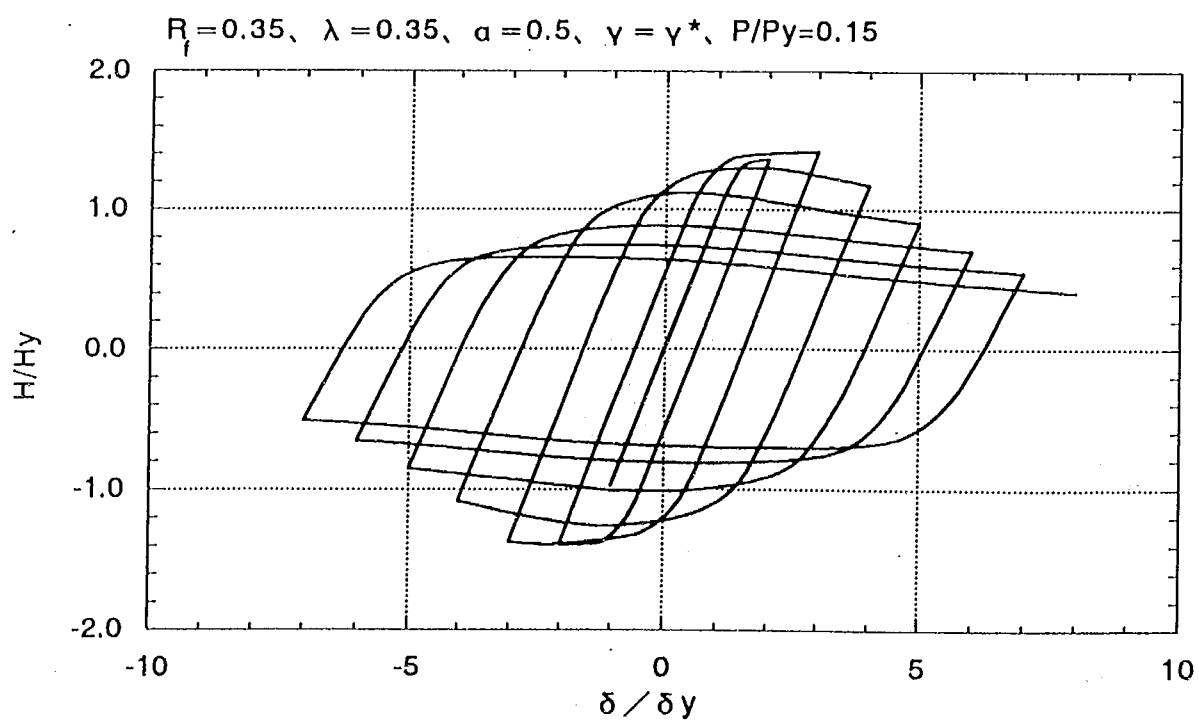


図-参考3-3.2.8(2) B 8の水平荷重-水平変位関係(マルチリニア移動硬化モデル)

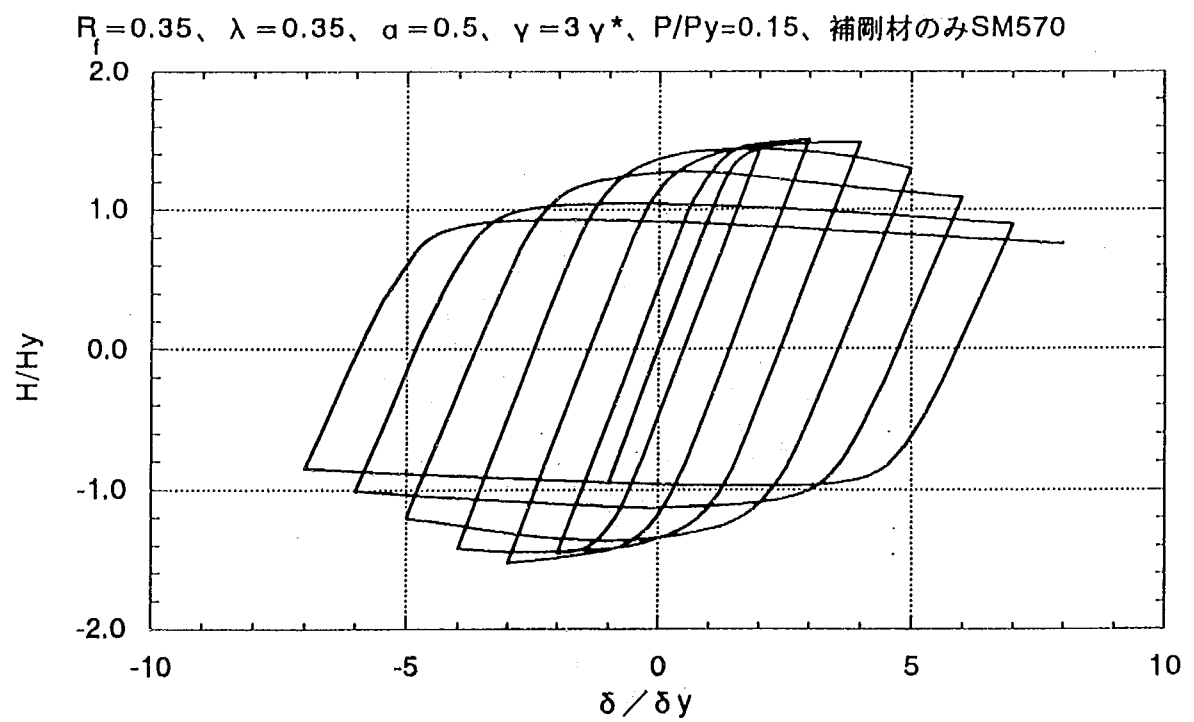


図-参考3-3.2.9 B9の水平荷重-水平変位関係(マルチリニア移動硬化モデル)

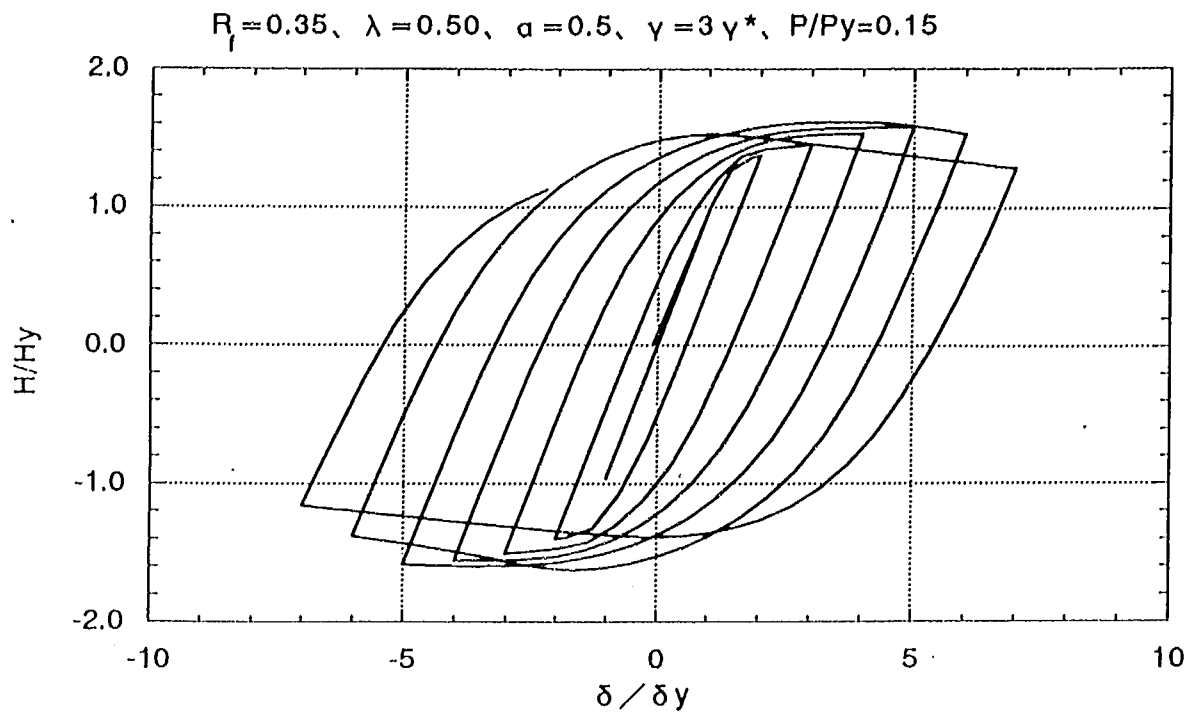


図-参考3-3.2.10(1) B 1 0 の水平荷重-水平変位関係 (2 曲面モデル)

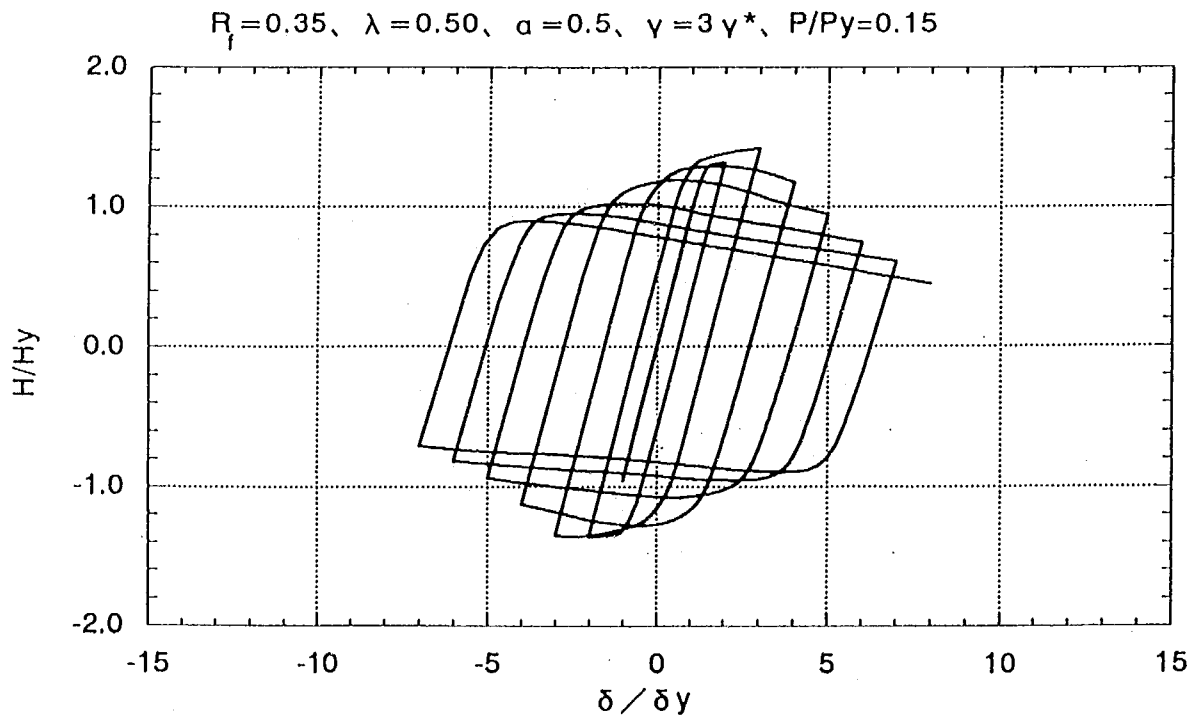


図-参考3-3.2.10(2) B 1 0 の水平荷重-水平変位関係 (マルチリニア移動硬化モデル)

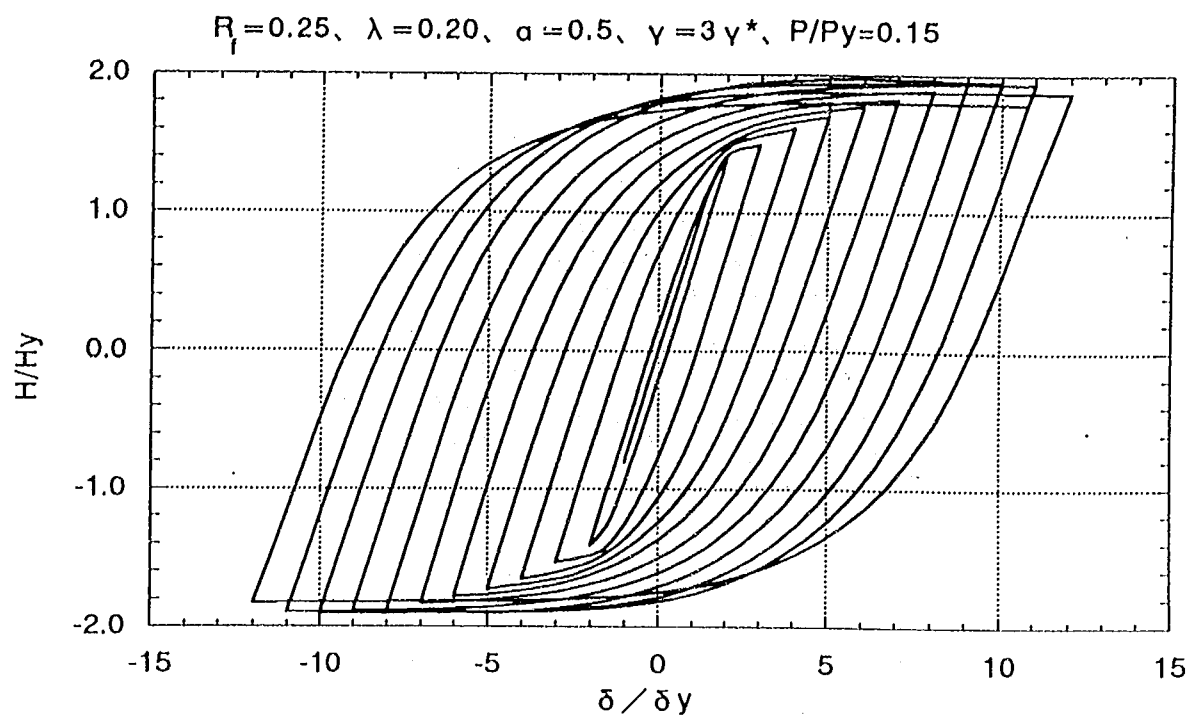


図-参考3-3.2.11(1) B 1 1の水平荷重-水平変位関係(2曲面モデル)

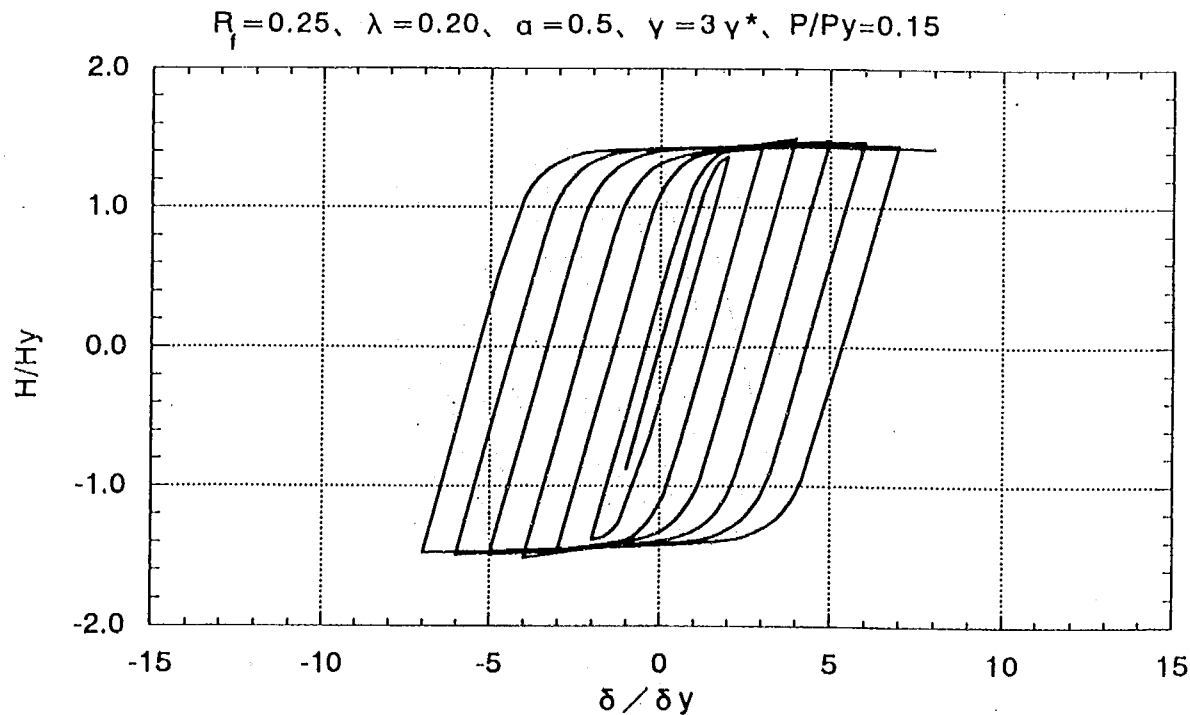


図-参考3-3.2.11(2) B 1 1の水平荷重-水平変位関係(マルチリニア移動硬化モデル)

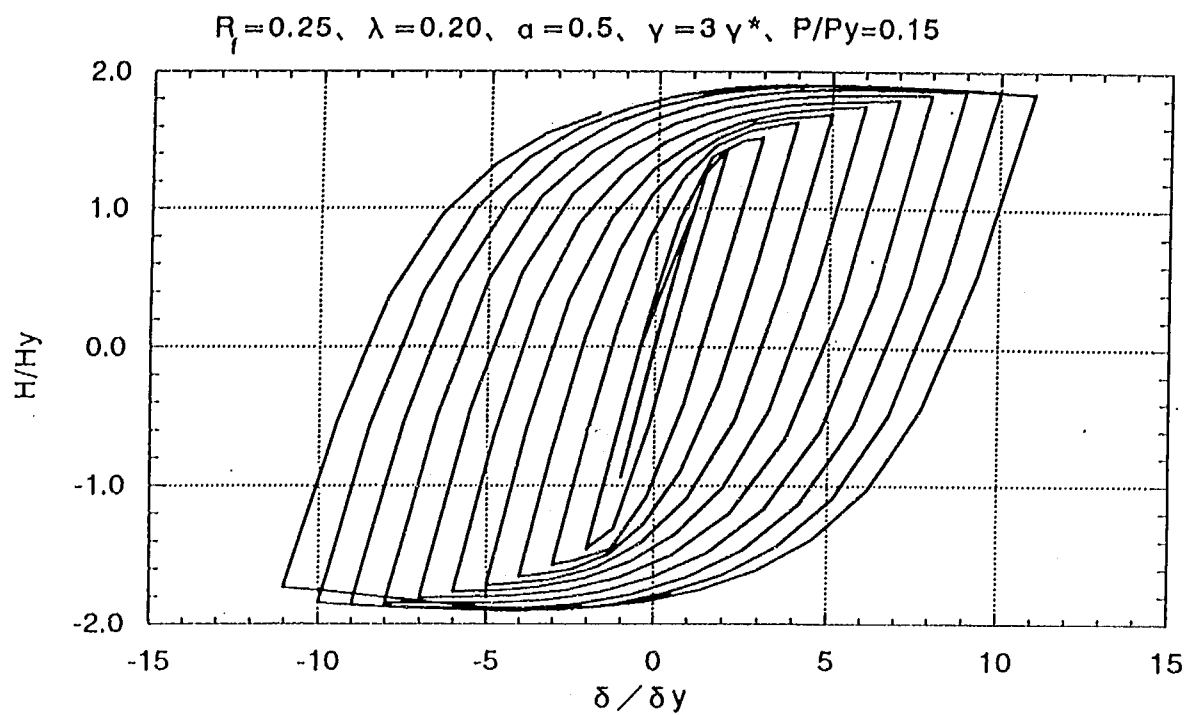


図-参考3-3.2.12(1) B 1 2 の水平荷重-水平変位関係 (2 曲面モデル)

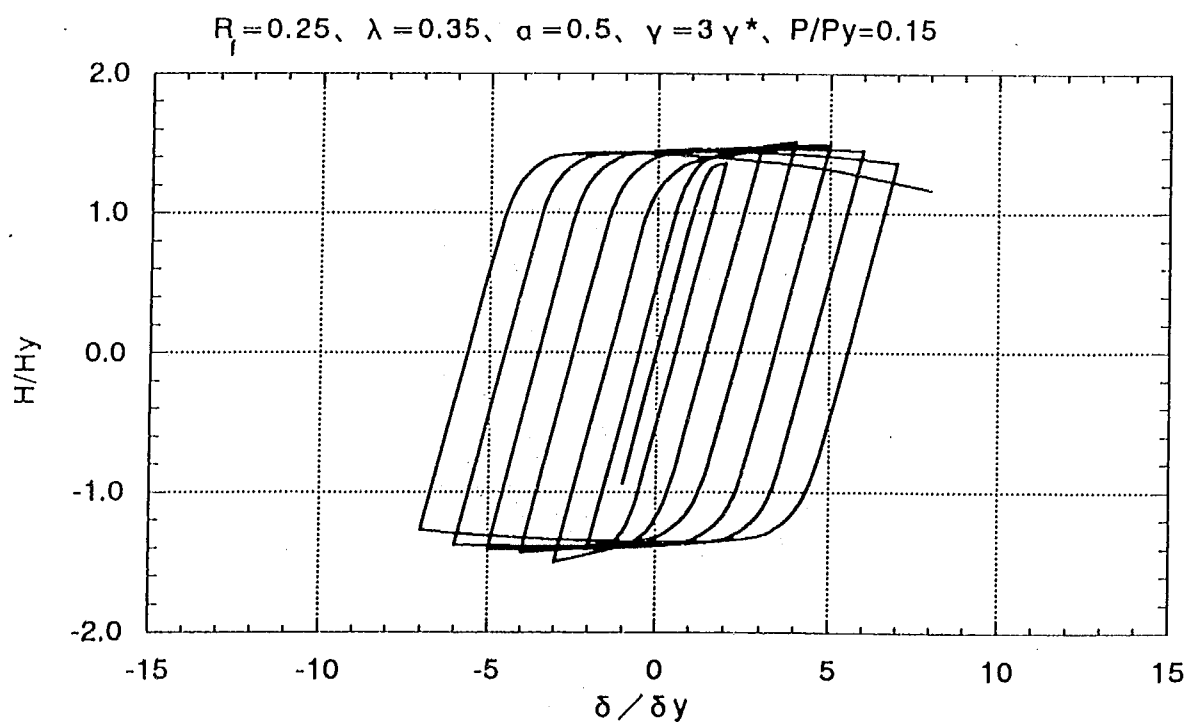


図-参考3-3.2.12(2) B 1 2 の水平荷重-水平変位関係 (マルチリニア移動硬化モデル)

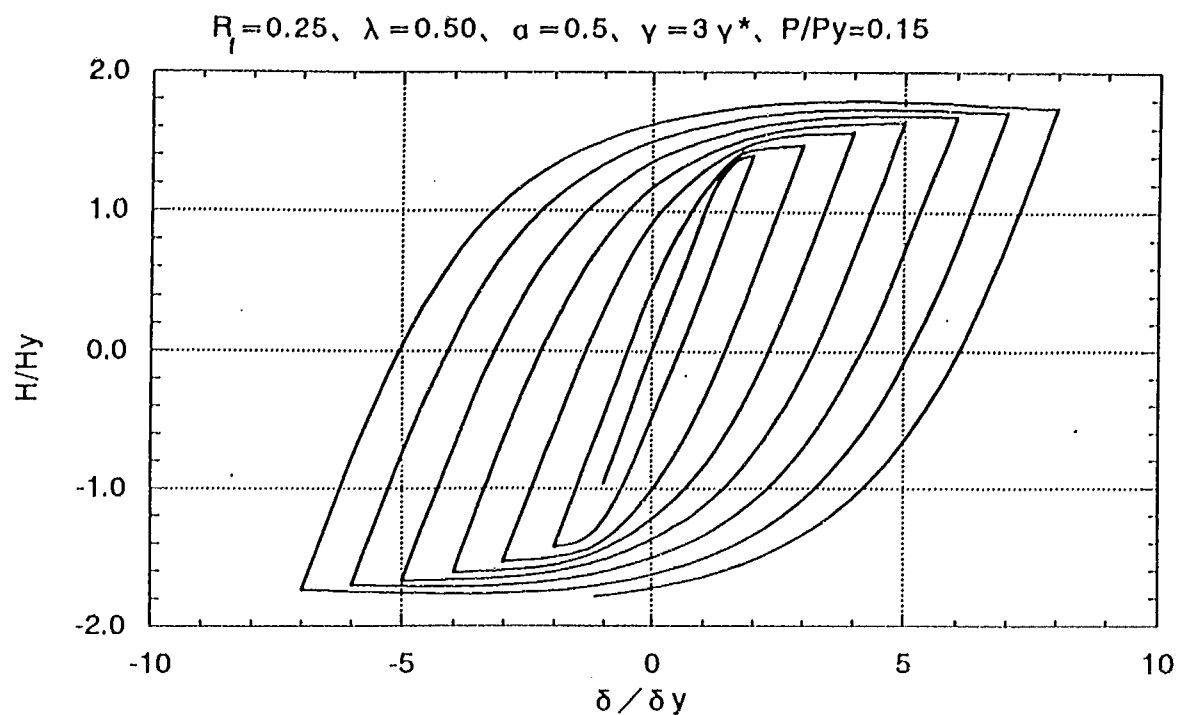


図-参考3-3.2.13(1) B 1 3の水平荷重-水平変位関係(2曲面モデル)

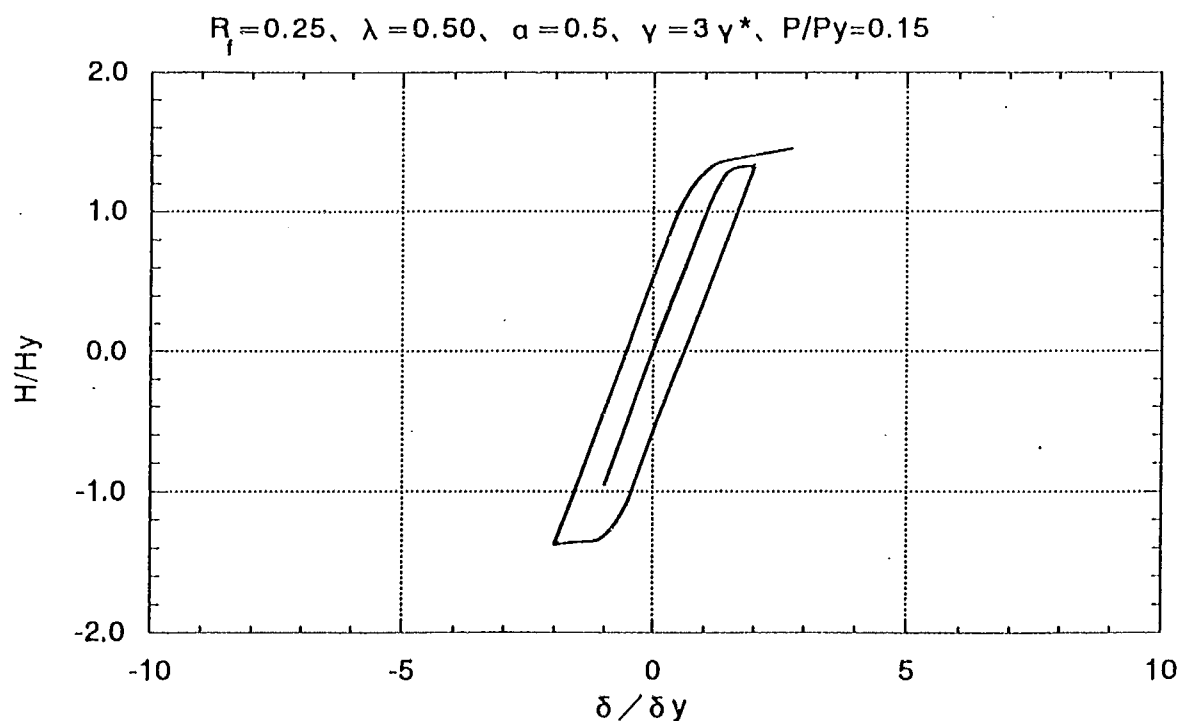


図-参考3-3.2.13(2) B 1 3の水平荷重-水平変位関係(マルチリニア移動硬化モデル)

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（Ⅵ）

共同研究報告書第183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、(株)鋼材倶楽部、(株)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を行っている。本報告書は、平成7～8年度に行った大型供試体15体の実験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、角補強、隙間
あけ鋼板巻立て補強、コンクリート充填補強、耐震設計法

郵便はがき

50円切手
をはって
下さい

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
構造橋梁部橋梁研究室

御中

No. 25

No. 25

共同研究報告書第183号

配布先氏名
配布先住所



共同研究報告書 第183号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印

共同研究報告書第183号

