

土 木 研 究 所 資 料

鋼製橋脚模型正負交番載荷実験

昭和59年 3 月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

Copyright © 1984 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承認を得ずしてこれを行なってはならない。

土木研究所資料

第2147号

昭和59年3月

鋼製橋脚模型正負交番載荷実験

耐震研究室 室長 岩崎敏男

研究員 萩原良二

研究員 長谷川金二

小山達彦

吉田武史

要 旨

都市高速道路の高架橋などにおいて、桁下空間を確保する必要上橋脚軀体断面を大きくできない場合があり、このような時には鋼製橋脚が採用されている。鋼製橋脚を有する橋の顕著な地震被災事例はなく、地震時の被災パターンなどに関する実測資料は得られていない。また、鋼製橋脚の地震時の挙動に関する実験例も数少なく、地震荷重に対する鋼製橋脚の耐力、変形性能などに関しては十分解明されていない。

本文は、鋼製橋脚模型の正負交番載荷実験を行い、鋼製橋脚の地震荷重による損傷モード、地震時の耐力、変形性能などについて調査した結果をまとめたものである。

キーワード

鋼製橋脚、耐震性、模型実験、高架橋、変形性能

目 次

1. 概 要	1
2. 実験内容	2
2.1 鋼製橋脚模型	2
2.2 実験施設	2
2.3 載荷方法	3
2.4 計 測	3
3. 実験結果	9
3.1 材料試験結果	9
3.2 損傷モード	9
3.3 耐力と変形性能	10
3.4 履歴減衰	11
4. まとめ	68
謝 辞	69
参考文献	70

1. 概 要

本実験は、建設省土木研究所と首都高速道路公団による共同研究として、道路橋鋼製橋脚の地震時の耐力、変形性能などを調べるために実施したものである。

実験に用いた供試体としては、鋼製ラーメン橋脚の柱部分を対象に1/3 縮小模型 2 体を製作し、橋軸方向（ラーメン面外方向）の地震荷重を想定して模型載荷実験を行った。

実験は建設省土木研究所の部材耐震強度実験施設を用いて行い、SEEEケーブルによって軸力を載荷した上で柱頭部に取付けた加振負荷装置によって水平力正負交番載荷実験を行った。供試体 1 体に対しては静的載荷とし、もう 1 体に対しては動的載荷（入力周波数 1 Hz ）とした。入力としては降伏変位 δ_y から $0.1\delta_y$ ずつ変位振幅を漸増させた載荷履歴とした。

鋼製橋脚の耐震性に関するこの種の実験的研究例は数少ないが、本実験によって鋼製橋脚の地震時挙動に関して、損傷モード、耐力、変形性能、履歴減衰、載荷速度の影響などに関するデータが得られた。

2. 実 験 内 容

2.1 鋼製橋脚模型

実験に用いた供試体は、図2-1に示した鋼製ラーメン橋脚の柱部分の1/3縮小模型2体とした。

模型の諸元を図2-2に示す。模型は鋼製の柱とベースプレートで構成されており、柱下端から載荷点までの柱高は3.62m、柱断面は0.6m×0.6mの箱型断面である。柱断面は3区間に分かれ、実橋と同様に下部区間の鋼材はS M58、中間区間はS M50 Y、上部区間はS M58を使用している。なお、実橋においては柱下部に中詰コンクリートを打設することがあるが、本実験においてはそれを考慮していない。また、上部構造死荷重反力と橋脚自重に相当する軸力を導入するために、柱のまん中にSEEE ケーブルを設置した。

鋼製橋脚模型はベースプレートをアンカーボルトによって架台に連結し、架台を介して反力壁に固定する構造とした。また、柱頭部は変形を防止するためにコンクリートを中詰めし、アンカーボルトで載荷装置（加振負荷装置）と連結する構造とした。

模型製作においてはできる限り原型との相似性を満足するようにしたが、以下の点で原型と模型は相異している。

- (1) 模型の断面寸法は実橋の1/3縮小寸法に比べ、板厚が若干厚くなっている（表2-1）。
- (2) 溶接法が以下の点で異なっている。
 - 1) 2枚のウェブ（載荷方向に平行する面）のうちの1枚は、内側から溶接することが困難であるため外側から溶接した。このウェブはダイヤフラム位置で切断してダイヤフラムに溶接しており、ウェブを補剛する縦リブはダイヤフラム位置で不連続となっている。
 - 2) ベースプレート部の両面すみ肉溶接部において、同一の溶接ができない箇所があり、その場合は全断面溶込み溶接とした。
 - 3) ダイヤフラムのスカラップ部とリブは溶接しないものとした。
 - 4) すみ肉溶接は施工性を考慮して最小脚長を3㎜とした（1/3縮小寸法では2㎜となる）。
- (3) 死荷重によるラーメン面内方向の曲げモーメントを無視した。
- (4) 柱下端部（実橋では柱下端から5mの高さまで）の中詰コンクリートの影響を無視した。
- (5) 水平力載荷位置は加振負荷装置のストロークの関係上梁中心位置とした。

2.2 実験施設

実験は建設省土木研究所の部材耐震強度実験施設を用いて行った。

実験はテストピット（15m×20m×深さ5m）内で実施した。載荷実験は加振負荷装置（最大加振力±125t、最大変位振幅125㎜、最大載荷速度振幅1m/sec、周波数範囲DC～30Hz）を用いて行った。データ収集装置は、32チャンネルの動的データと128チャンネルの静的データの収録能力を有している。

2.3 載荷方法

実験の状況を図2-3、写真2-1に示す。供試体は柱高が大きく、テストピット内で立てて実験を行うことができないため、柱を水平にして実験を行った。

橋軸方向（ラーメン面外方向）の地震荷重を想定して、柱頭部に加振負荷装置を取付けて水平力を載荷した。また、上部構造死荷重反力と橋脚自重に相当する軸力（ $N = 87.7t$ ）をSEEEケーブルによって載荷した。

載荷履歴はフランジ（載荷方向に直交する面）が降伏するまでは荷重制御で荷重を増大させた。降伏後は変位制御で $0.1\delta_y$ （ δ_y は降伏変位）ずつ変位振幅を増大させた正負交番載荷とした（図2-4）。

供試体2体に対して、1体は静的載荷とし、もう1体は動的載荷とした。動的載荷においては、入力波形を周波数1Hzの正弦波とし、第1波形（5波： $1.0\delta_y \sim 1.4\delta_y$ ）、第2波形（5波： $1.5\delta_y \sim 1.9\delta_y$ ）、第3波形（5波： $2.0\delta_y \sim 2.4\delta_y$ ）、第4波形（6波： $2.5\delta_y \sim 3.0\delta_y$ ）に分けて入力した。

2.4 計 測

計測器の配置を図2-5、2-6に示す。計測項目は以下のとおりである。

- (1) 加振負荷装置による荷重、入力変位
- (2) 柱の水平変位（載荷点、中間部（SM50Y）下端等）
- (3) ベースプレートの柱軸方向および柱軸直角方向の変位（アンカーボルトの伸びによるベースプレートの回転、ベースプレートと架台のずれを測定するため）
- (4) フランジ、ウェブのひずみ（降伏すると予想される中間部（SM50Y）下端、下部（SM58）下端付近）
- (5) 柱頭加速度（動的載荷実験における慣性力補正のため）
- (6) 動的載荷実験における各波形入力後の軸力

静的載荷実験は計160点、動的載荷実験は計32点の計測を行った。

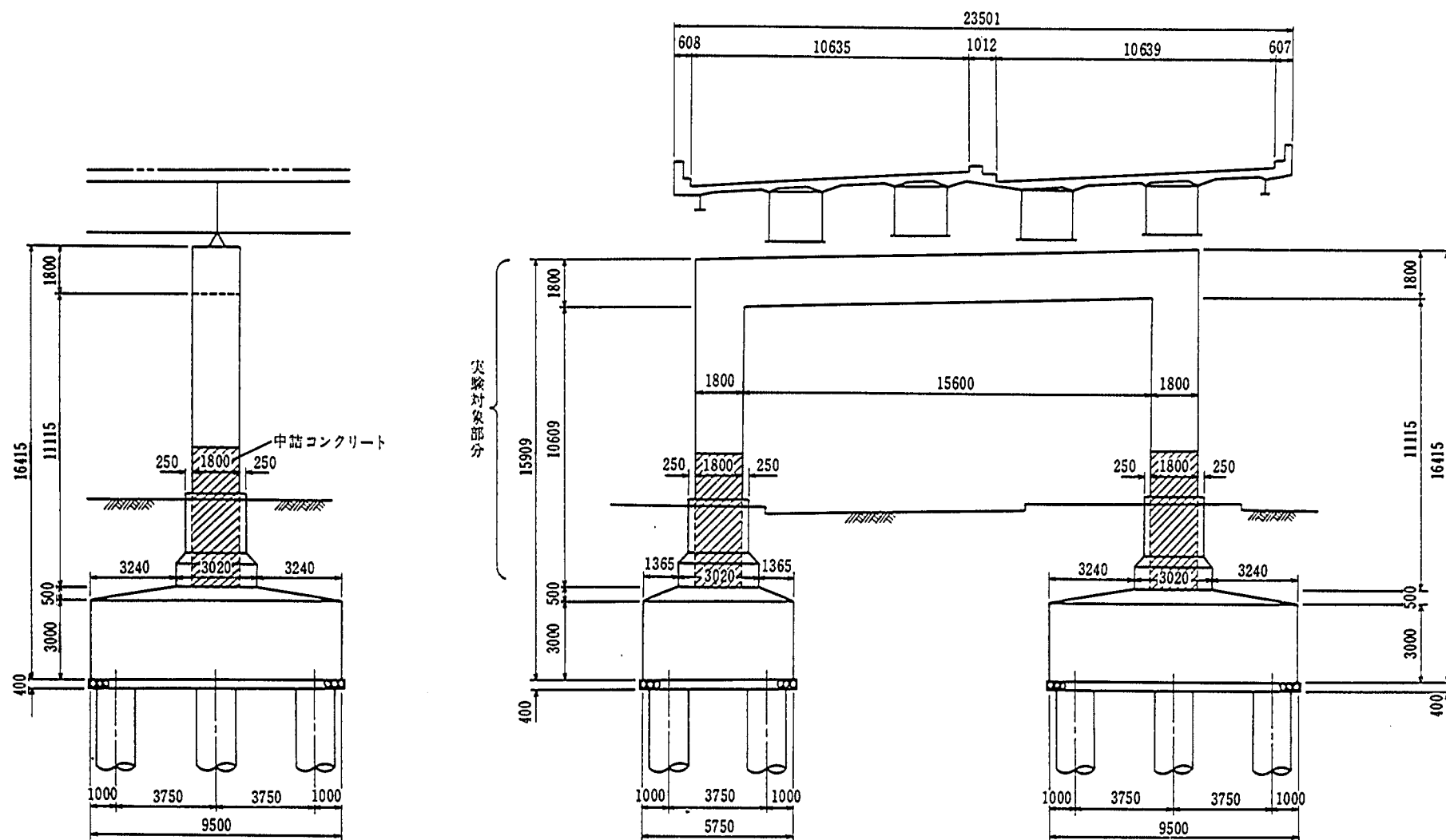


図 2 - 1 実橋鋼製橋脚の諸元

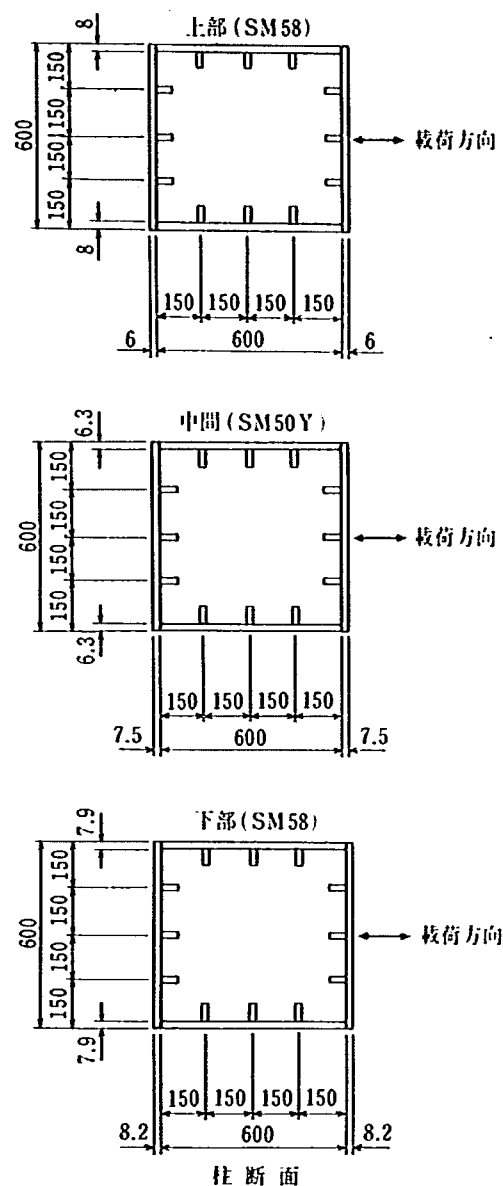
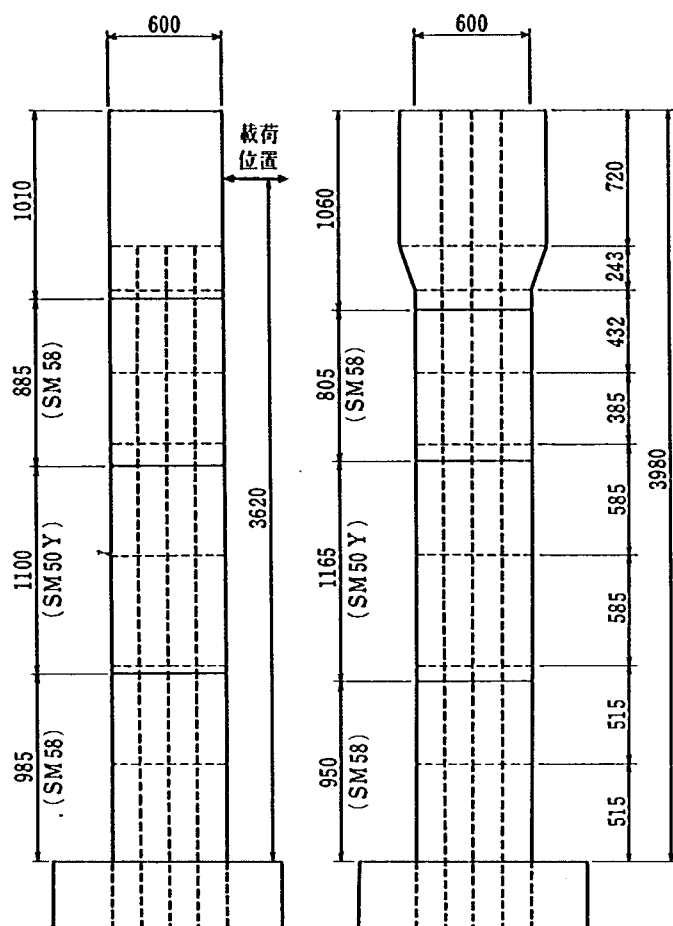
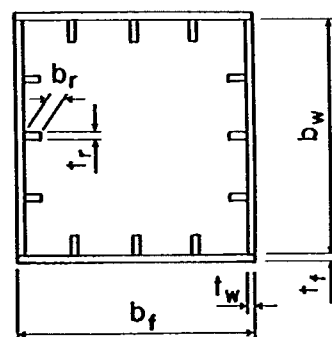


図 2-2 鋼製橋脚模型の諸元

表 2-1 1/3 縮小寸法と供試体寸法

			1/3 縮小寸法	供試体寸法
中間部 (SM50Y)	フランジ寸法	$b_f \times t_f$	600 × 7.3	600 × 7.5
	ウェブ寸法	$b_w \times t_w$	600 × 5.0	600 × 6.3
	リブ寸法	$b_r \times t_r$	60 × 5.3	50 × 6.3
下端部 (SM58)	フランジ寸法	$b_f \times t_f$	600 × 8.0	600 × 8.2
	ウェブ寸法	$b_w \times t_w$	600 × 7.3	600 × 7.9
	リブ寸法	$b_r \times t_r$	60 × 5.3	50 × 6.7



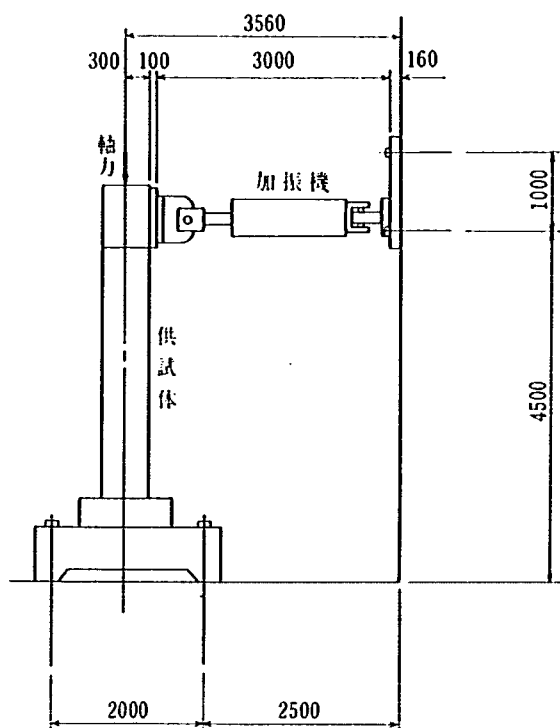


図 2-3 実験の状況

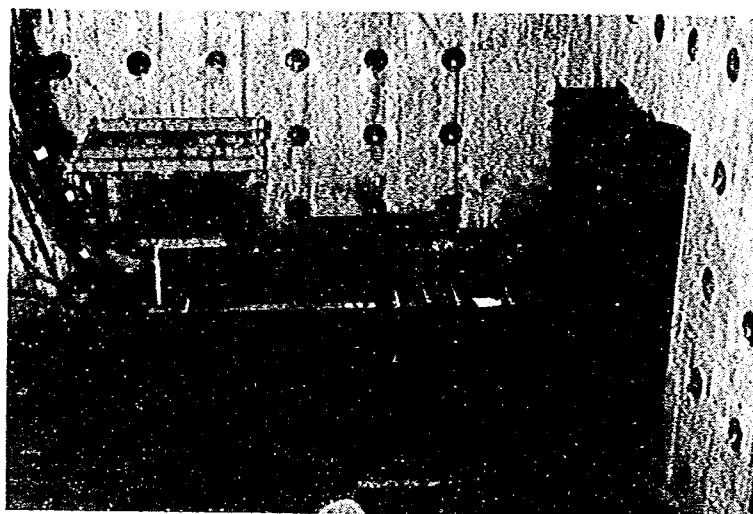


写真 2-1 供試体設置状況

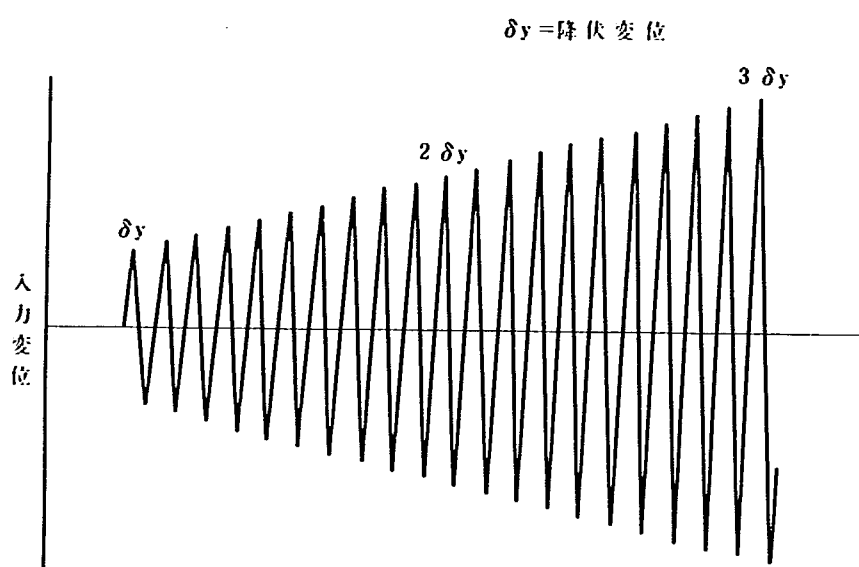
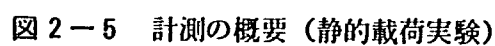


図 2-4 載荷履歴

(柱水平变位测定点)



3. 実験結果

3.1 材料試験結果

下部フランジ、ウェブ、リブ (S M58)、中間部フランジ、ウェブ、リブ (S M50 Y) の材料試験による応力—ひずみ曲線、ヤング係数、降伏応力、降伏ひずみを図 3—1 に示す。

3.2 損傷モード

各载荷段階ごとの供試体の変状を表 3—1、3—2 に示す。また、顕著な変状を写真 3—1～3—17 に示す。静的载荷実験終了時および動的载荷実験各波形入力終了時のフランジ、ウェブの変状を図 3—2～3—5 に示す。

静的および動的载荷実験ともに柱中間部 (S M50 Y) の下側パネルにおいて、フランジの降伏、局部座屈、ウェブとフランジ、ダイヤフラムの溶接部破断へと損傷が進展して破壊に至った。

以下、柱の载荷点変位は柱の変形だけを考慮した値とし (ベースプレートの回転による変位は含まない)、降伏変位 δ_y 、降伏耐力 P_y は後述する模型製作時の残留ひずみを考慮した場合の値 ($\delta_y = 30$ mm, $P_y = 41$ t) として検討している。

静的载荷実験では、各入力サイクルごとに変位最大時および変位 0 時の変状を観察した。

2 サイクル目 ($\delta = 1.3 \delta_y = 38$ mm) までは変状は見られなかった。3 サイクル目 ($\delta = 1.4 \delta_y = 41$ mm) において、変位最大時にフランジの黒皮はく離が生じ、5 サイクル目 ($\delta = 1.6 \delta_y = 48$ mm) において、変位最大時に下側ウェブにも黒皮はく離が生じた。6 サイクル目 ($\delta = 1.7 \delta_y = 51$ mm) の変位最大時にフランジパネルの座屈が目視により確認された。7 サイクル目 ($\delta = 1.9 \delta_y = 56$ mm) には柱とベースプレートの溶接部に亀裂が生じた。

フランジの座屈後は、入力変位の増大とともに変形が進行し、10 サイクル目 ($\delta = 2.2 \delta_y = 67$ mm) では、変位最大時にフランジのへこみ量 10～14 mm、下側ウェブのへこみ量 4～5 mm となり、変位 0 時のフランジの残留へこみ量は 5～9 mm であった。この時点で荷重は終局耐力程度となり、その後は損傷の進行とともに耐力が低下している。

13 サイクル目 ($\delta = 2.7 \delta_y = 80$ mm) において、下側ウェブとフランジ、ダイヤフラムの溶接部が破断し、14 サイクル目 ($\delta = 2.9 \delta_y = 86$ mm) において溶接部の破断、フランジおよびウェブの変形が更に進行し、残留耐力が降伏耐力程度に低下した。なお、実験当初に軸力として 87.7 t を導入していたが、実験後は 33 t に低下していた。

動的载荷実験では、各波形入力終了時に変状を観察した。

第 1 波形 (5 サイクル目 ($\delta = 1.6 \delta_y = 47$ mm) まで) 入力終了時には、フランジの黒皮はく離が見られたが、それ以外の変状は目視によっては確認されなかった。軸力は、入力前の 87.7 t が 77.5 t に低下していた。

第 2 波形 (10 サイクル目 ($\delta = 2.1 \delta_y = 64$ mm) まで) 入力終了時においても、フランジの黒皮はく離が増加した程度で、特に顕著な変状は見られなかった。軸力は、入力前に 87.7 t まで再導入したもの

が83.0 tまで低下していた。

第3波形（15サイクル目（ $\delta = 2.5 \delta_y = 76 \text{ mm}$ ）まで）入力終了時においてフランジの残留変形（南側フランジは1 cm程度のへこみ、北側フランジは0.4 cm程度のはらみ出し）が目視により確認された。また、柱とベースプレートの溶接部に亀裂が生じた。軸力は87.7 t から87.5 t に低下し、柱は自重により天端で1 cmへたっていた。なお、13サイクル目（ $\delta = 2.5 \delta_y = 74 \text{ mm}$ ）あたりで荷重は終局耐力程度となり、その後は損傷の進行とともに耐力が低下している。

第4波形（21サイクル目（ $\delta = 3.2 \delta_y = 95 \text{ mm}$ ）まで）入力終了時には、下側ウェブとフランジ、ダイヤフラムの溶接部が破断していた。軸力は残留変形が大きくなったことから87.7 t が27.5 t に低下していた。実験後87.7 t の軸力を再導入したが、20分後には83 t に低下しており、死荷重に相当する軸力によって変形が進行しているものと考えられた。また、柱天端は9.5 cmへたっていた。なお、18サイクル目（ $\delta = 2.9 \delta_y = 88 \text{ mm}$ ）において座屈変形が急激に進行し、残留耐力が降伏耐力程度に低下した。

図3-6～3-9に降伏時、終局耐力時、最終載荷時の入力変位最大時変位分布、残留変位分布を示す。柱中間部（S M50Y）の下側パネル部で座屈が起こり、変形が大きくなっている。特に荷重が終局耐力程度に達した後において残留変形が大きくなっている。

図3-10、3-11は柱頭の入力変位と残留変位の関係を示したものである。入力変位の増加に伴って損傷が進行し、残留変位も増加している。特に荷重が終局耐力程度に達したあたり（静的載荷実験：10サイクル目、動的載荷実験：13サイクル目）から座屈変形が顕著になり、残留変位が急増する傾向が見られる。

図3-12、3-13には、降伏時および終局耐力時における入力変位最大時ひずみおよび残留ひずみの分布を示している。このひずみ分布から、柱中間部（S M50Y）の下側パネルにおいて、圧縮フランジの降伏、圧縮フランジの局部座屈、引張フランジの降伏および圧縮フランジの局部座屈進行による変形の増大と損傷が進展していった破壊に至ったものと考えられる。

3.3 耐力と変形性能

柱頭の荷重－変位曲線を図3-14、3-15に示す。また、各入力サイクルごとの荷重、変位の値を表3-3、3-4に、荷重－変位包絡線を図3-16、3-17に示す。ここで、変位は変位計によって測定された値（全変位）からベースプレートの回転による変位を差引いた柱の変形だけによる変位としている。動的載荷実験においては、柱天端の加速度から柱および加振負荷装置のヘッド部の慣性力を求めて、荷重測定値を補正している。

ヒステリシスループの形状は、静的および動的載荷実験ともにほぼ同様の紡錘形となっているが、静的載荷の方がやや膨らんだ形となっている。

荷重は、静的載荷の場合は変位64 mm（ $2.1 \delta_y$ ）で最大値（終局耐力）69 t（正負平均）を示し、動的載荷の場合は変位72 mm（ $2.4 \delta_y$ ）で最大値（終局耐力）72 t（正負平均）を示した。荷重が最大値に達した後は、急激に耐力が低下している。

図3-18は静的および動的載荷実験の荷重－変位包絡線の比較を示したものである。両者はほぼ一致

しているが、動的載荷の方がやや耐力が大きくなっている。これは静的載荷の場合は載荷時間が長くなるため、降伏後の塑性ひずみの進行によって座屈の進行が早まるためと考えられる。

図3-19は荷重—変位包絡線上に柱の変状を示したものである。フランジの局部座屈による残留変形が生じるあたりまでは終局耐力程度の耐力を保有しているが、残留変形が生じた後は急激に耐力が低下し、溶接部の破断によって終局に至っている。

本実験によって得られた鋼製橋脚モデルの耐力、変形性能を表3-5、3-6に示す。実験実施においては、フランジの平均圧縮ひずみが材料試験による降伏ひずみに達した時を柱の降伏とし、降伏荷重 $P_y = 47.0 \text{ t}$ 、降伏変位 $\delta_y = 36.7 \text{ mm}$ として実験を進めた。しかしながら、模型製作時の溶接によって残留圧縮ひずみが約 500μ 生じていたものと推定されたため、この残留ひずみ考慮して実験データを整理したものが表3-5である。また、この残留ひずみ 500μ に相当する弾性ひずみを生じさせる荷重は 16 t 、変位は 9 mm となるため、これらを表3-5の降伏荷重 ($P_y = 41 \text{ t}$)、降伏変位 ($\delta_y = 30 \text{ mm}$) に加えて、残留ひずみがなかったものとして実験データを整理したものが表3-6である。

残留ひずみを考慮した場合は、降伏耐力 $P_y = 41 \text{ t}$ 、降伏変位 $\delta_y = 30 \text{ mm}$ である。終局耐力は、静的載荷の場合は 69 t (降伏耐力の1.7倍)、動的載荷の場合は 72 t (降伏耐力の1.8倍) であり、動的載荷の方がやや大きな値となっている。終局変位 (耐力が降伏耐力まで低下する時の変位) は、静的載荷の場合は 87 mm 、動的載荷の場合は 90 mm であり、動的載荷の方がやや大きくなっている。したがってじん性率 δ_u / δ_y はそれぞれ2.9および3.0で、動的載荷の方がわずかに大きい。

残留ひずみがなかったものとした場合の降伏耐力 P_y は 57 t 、降伏変位 δ_y は 39 mm である。塑性化が進んだ状態では初期の残留ひずみの影響はほとんどないものと考えて、終局耐力については実験における荷重最大値として上記の 69 t (静的載荷：降伏耐力の1.2倍) および 72 t (動的載荷：降伏耐力の1.3倍) とした。終局変位は静的載荷の場合は 81 mm 、動的載荷の場合は 82 mm であり、じん性率は2.1である。

降伏荷重計算値は 60.9 t であり、残留ひずみがなかったものとした場合の実験値 (57 t) とはほぼ一致している。終局耐力については、実験では局部座屈によってその値 (静的載荷 69 t 、動的載荷 72 t) が支配されているため、全塑性モーメント荷重計算値 (77.2 t) に比べて小さな値となっている。

3.4 履歴減衰

履歴曲線から求めた等価減衰定数を表3-7、図3-20に示す。等価減衰定数は入力変位が大きくなるにしたがって増加している。等価減衰定数の値は、降伏時で静的載荷0.03、動的載荷0.02、終局耐力時で静的載荷0.14、動的載荷0.13、終局変位時で静的載荷0.34、動的載荷0.27となっている。

動的載荷に比べて静的載荷の方が等価減衰定数が大きくなっているが、静的載荷の場合は載荷時間が長くなり、そのために塑性ひずみが進行することがその理由として考えられる。

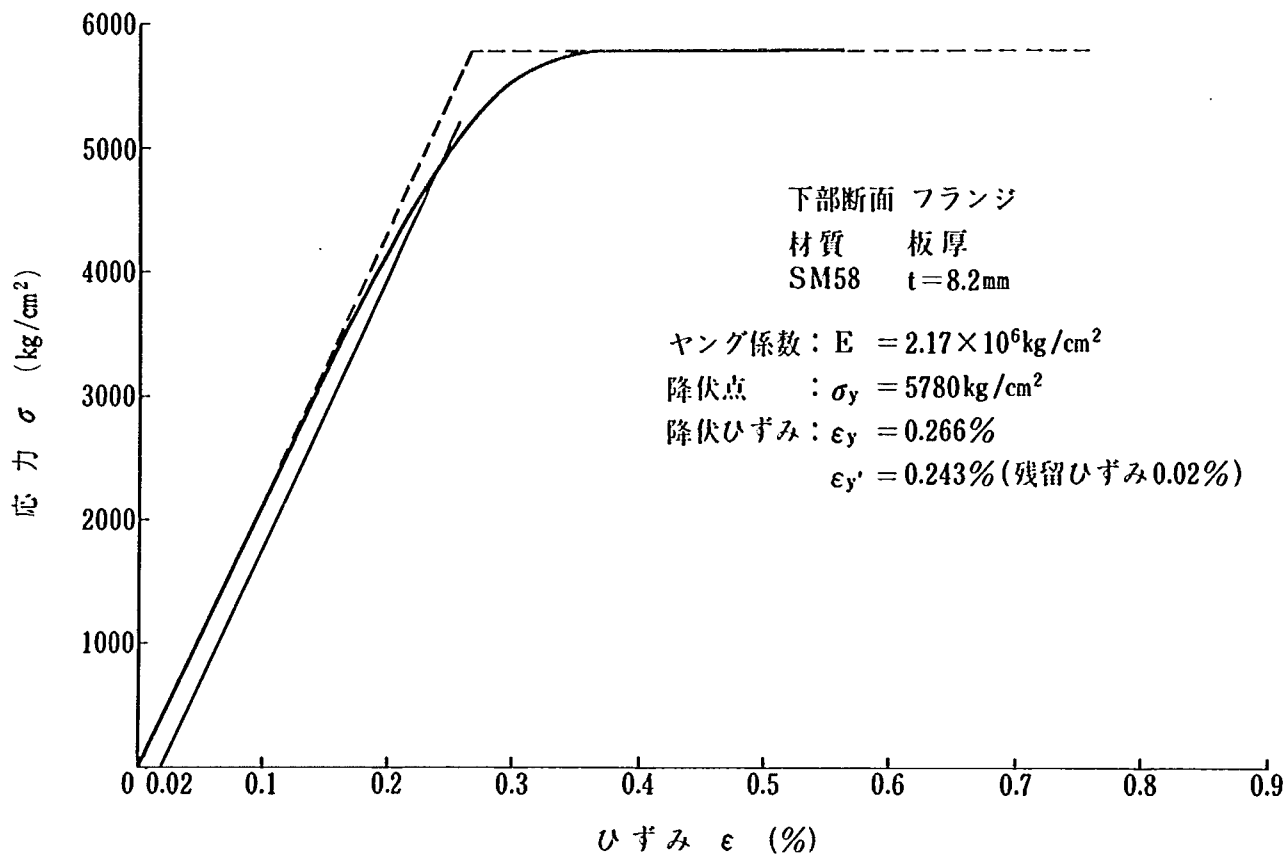


図 3-1 材料試験結果 (その 1)

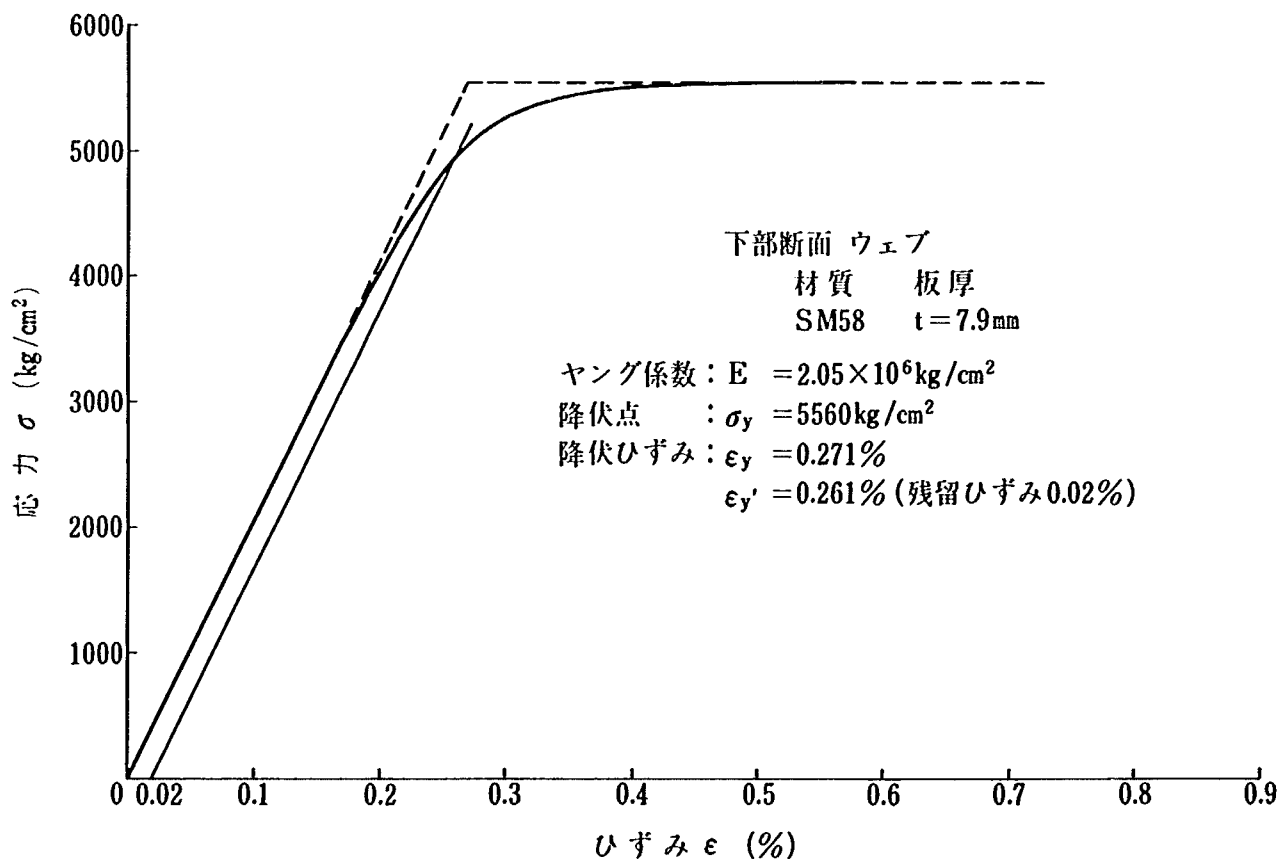


図 3-1 材料試験結果 (その 2)

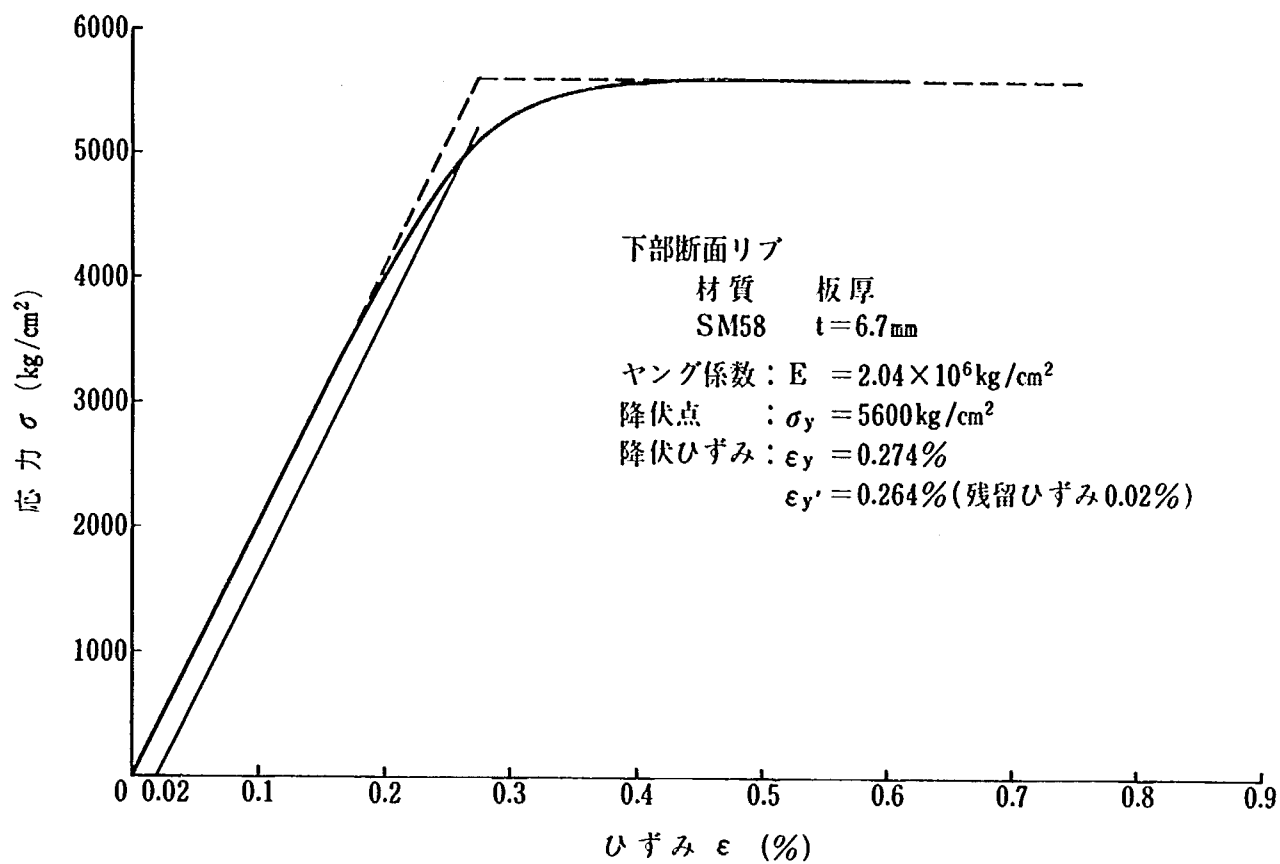


図 3-1 材料試験結果 (その 3)

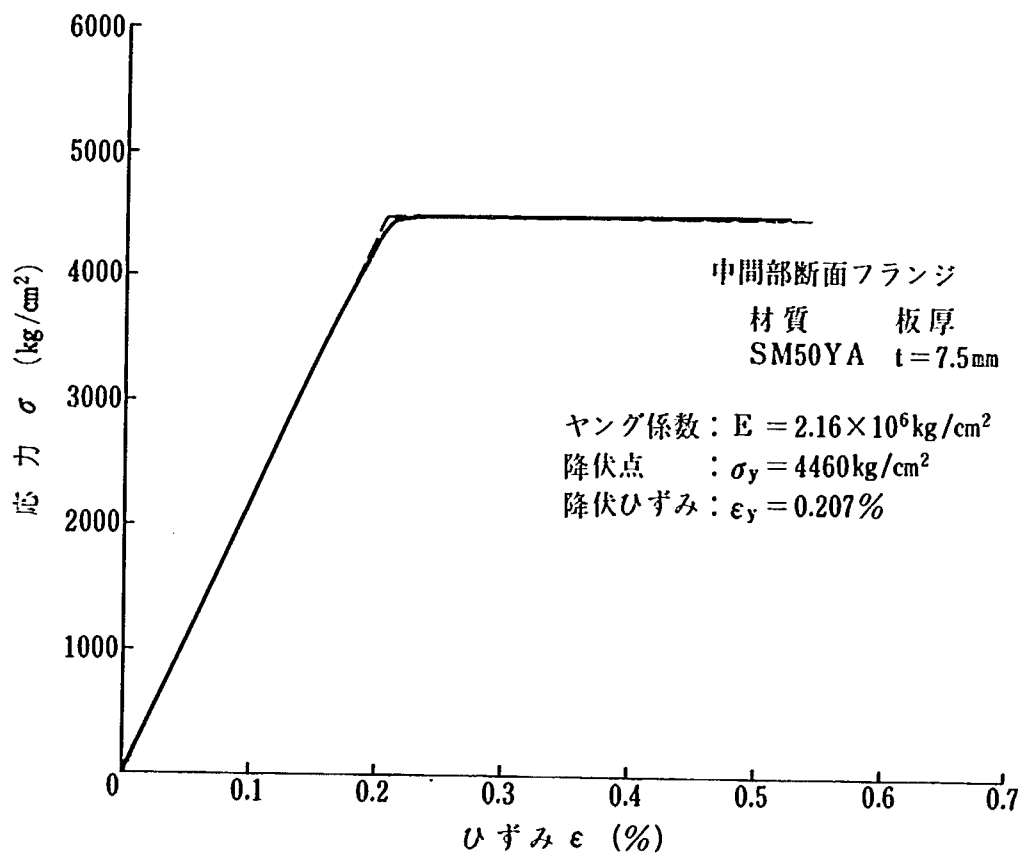


図 3-1 材料試験結果 (その 4)

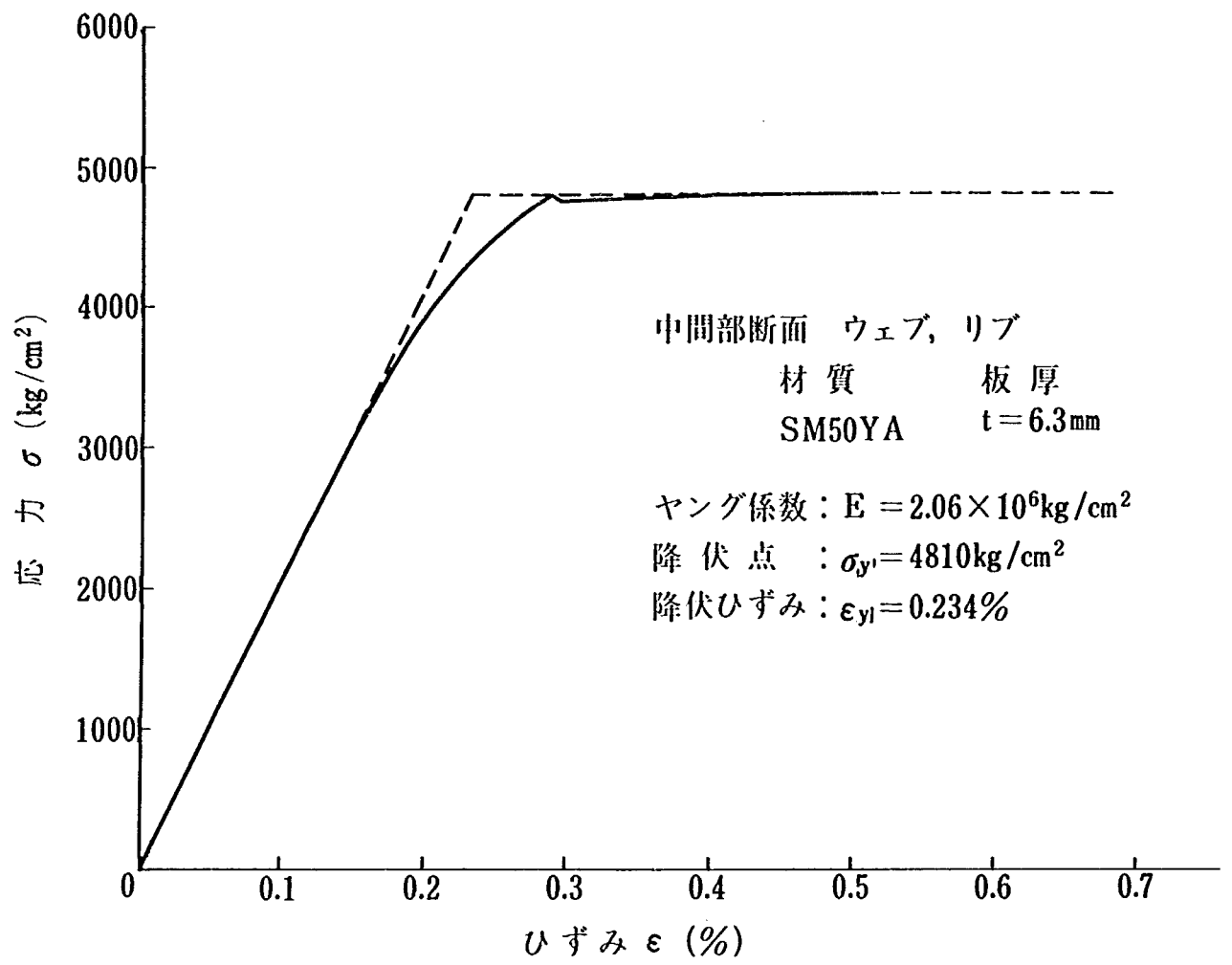


図 3-1 材料試験結果 (その 5)

表 3 - 1 鋼製橋脚模型の変状 (静的載荷実験)

入 力 サイクル	変 位 (mm)	荷 重 (t)	変 状
1	3 4	4 9	変状なし
	- 3 5	- 5 4	"
2	3 7	5 3	"
	- 3 8	- 5 8	"
3	4 1	5 7	B - B, C - C 断面 (S M 50 Y) 付近フランジの黒皮はく離
	- 4 1	- 6 1	"
4	4 4	5 9	"
	- 4 4	- 6 4	"
5	4 7	6 2	下側ウェブの黒皮はく離
	- 4 8	- 6 6	"
6	5 1	6 4	B - B, C - C 断面を中心としたフランジの座屈を目視により確認
	- 5 1	- 6 8	"
7	5 6	6 5	座屈がより明確になる。柱下端部南側フランジとベースプレートの溶接部に亀裂 (下縁より $\ell \div 2$ cm)
	- 5 5	- 6 9	座屈がより明確になる。柱下端部北側フランジとベースプレートの溶接部に亀裂 (下縁より $\ell \div 2$ cm)
8	5 8	6 6	北側フランジの最大へこみ量 5 mm 柱下端部の溶接部亀裂 $\ell = 2.5$ cm に拡大
	- 5 9	- 7 0	南側フランジの最大へこみ量 5 mm 下側ウェブの変形を確認 (へこみ量 4 mm) 柱下端部の溶接部亀裂が下側ウェブにも発生 ($\ell = 1$ cm)
9	6 2	6 7	北側フランジへこみ量 8 mm 下側ウェブへこみ量 3 mm
	- 6 2	- 7 0	南側フランジへこみ量 9 mm 下側ウェブへこみ量 4 mm
10	6 6	6 7	北側フランジへこみ量 10 mm (残留変形 5 mm ($\delta = 0$ 時)) 下側ウェブへこみ量 4 mm 柱下端部の溶接部亀裂 $\ell = 3.5$ cm に拡大
	- 6 7	- 7 0	南側フランジへこみ量 14 mm (残留変形 9 mm) 下側ウェブへこみ量 5 mm
11	7 0	6 6	北側フランジへこみ量 15 mm (残留変形 10 mm) 下側ウェブへこみ量 4.5 mm
	- 7 1	- 6 9	南側フランジへこみ量 19 mm (残留変形 12 mm) 下側ウェブへこみ量 5.5 mm
12	7 4	6 4	北側フランジへこみ量 25 mm (残留変形 15 mm) 下側ウェブへこみ量 7 mm 南側フランジへこみ量 2 mm
	- 7 5	- 6 5	南側フランジへこみ量 26 mm (残留変形 20 mm) 下側ウェブへこみ量 7 mm 北側フランジへこみ量 3 mm

表 3 - 1 鋼製橋脚模型の変状（静的載荷実験）（つづき）

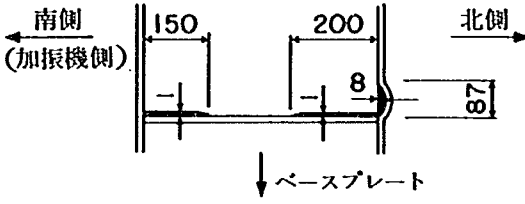
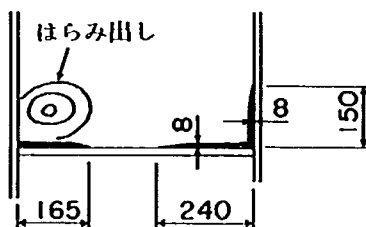
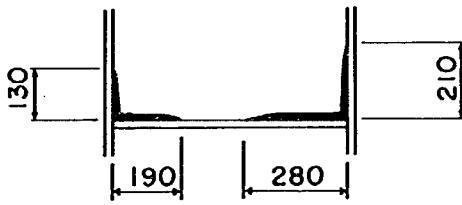
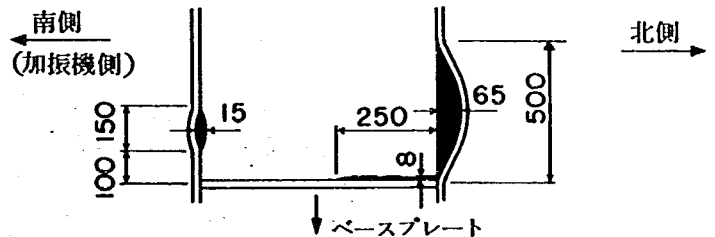
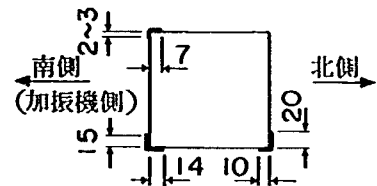
入 力 サイクル	変 位 (mm)	荷 重 (t)	変 状
13	80	57	北側フランジへこみ量35mm（残留変形26mm） 下側ウェブへこみ量15mm 下側ウェブとフランジ，ダイヤフラムの溶接部が下図のように破断 上側ウェブの若干のはらみ出し 
	-81	-59	南側フランジへこみ量35mm（残留変形29mm） 北側フランジへこみ量9mm 下側ウェブは全体にへこみ一部はらみ出し 上側ウェブの若干のはらみ出し 上下ウェブの変形もほとんどが残留変形として残る。 下側ウェブとフランジ，ダイヤフラムの溶接部の破断が下図のように進展 
14	86	41	北側フランジへこみ量49mm（残留変形37mm） 下側ウェブへこみ量17mm
	-87	-43	南側フランジへこみ量49mm 下側ウェブへこみ量17.5mm 北側フランジへこみ量17mm 下側ウェブとフランジ，ダイヤフラムの溶接部の破断が下図のように進行 

表 3 - 2 鋼製橋脚模型の変状 (動的載荷実験)

入力波	入 力 サイクル	変 位 (mm)	荷 重 (t)	変 状
第 1 波 形	1	33	45	柱中間部 (SM50Y) 断面フランジの黒皮はく離
		-36	-49	
	2	35	50	ウエブの黒皮はく離はほとんどなし
		-39	-52	
	3	38	54	軸力の変化 $N = 87.7 \text{ t} \rightarrow 77.5 \text{ t}$
		-42	-56	
	4	42	57	柱天端のへたり 3 mm
		-46	-59	
	5	45	60	
		-49	-62	
第 2 波 形	6	48	63	柱中間部 (SM50Y) 断面フランジの黒皮はく離増加
		-52	-64	
	7	51	65	ウエブに微細な縞が現れる (柱軸直角方向)
		-56	-67	
	8	54	67	軸力の変化 $N = 87.7 \text{ t} \rightarrow 83.0 \text{ t}$
		-58	-68	
	9	57	68	柱天端のへたり 6 mm
		-62	-70	
	10	61	70	
		-66	-71	
第 3 波 形	11	65	70	両面のフランジに残留変形 (北側凸, 南側凹) ダイヤフラム位置のフランジ下方部が鉛色に変色
		-70	-72	
	12	68	71	柱下部 (SM58) フランジの全体的な変色 柱下端とベースプレートの溶接部に亀裂 (下図)
		-74	-72	
	13	71	71	黒皮はく離の進展は見られない
		-77	-72	
	14	72	71	軸力の変化 $N = 87.7 \text{ t} \rightarrow 82.5 \text{ t}$
		-78	-71	
	15	73	70	柱天端のへたり 10 mm
		-80	-70	
第 4 波 形	16	76	66	18サイクル目で柱中間部 (SM50Y) のパネルの座屈変形が急激に進行 座屈変形部分の下側ウエブとフランジ, ダイヤフラムの溶接部の破断 (下図)
		-82	-66	
	17	80	54	
		-86	-57	
	18	86	39	
		-91	-47	
	19	87	35	
		-95	-41	
	20	90	32	軸力の変化 $N = 87.7 \text{ t} \rightarrow 27.5 \text{ t}$ (87.7 t を再導入したが 20 分後には 83 t に低下した)
		-98	-37	
	21	91	31	柱天端のへたり 95 mm
		-100	-35	



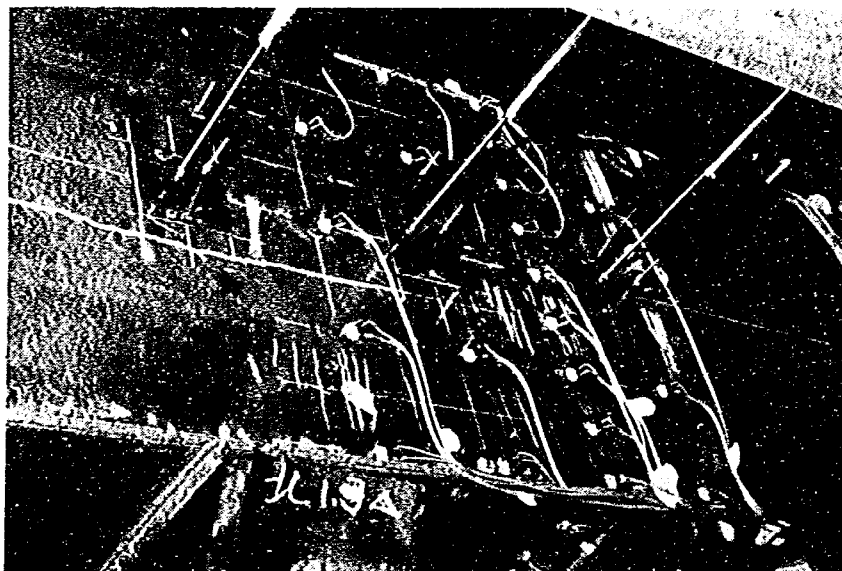


写真 3-1 静的載荷実験 3 サイクル目 (変位 41mm) 入力時
(フランジの黒皮はく離発生)

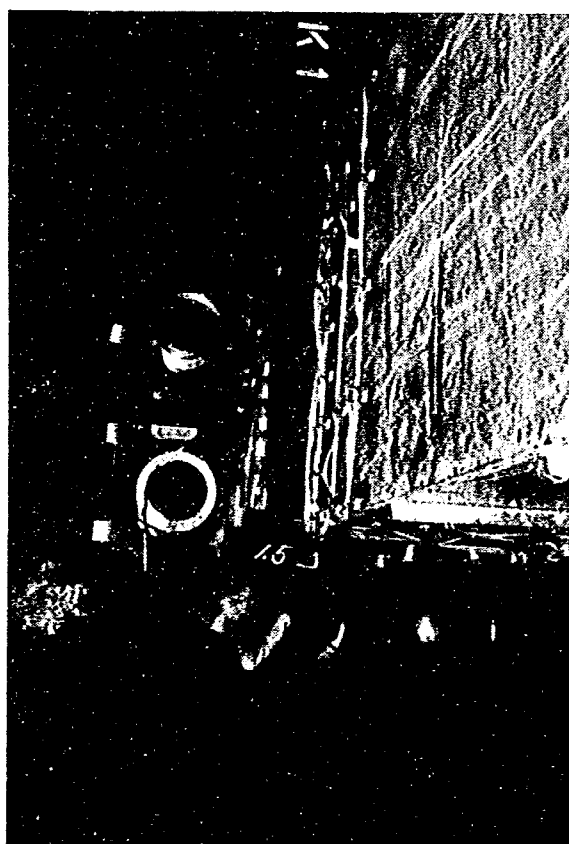


写真 3-2 静的載荷実験 6 サイクル目 (変位 51mm) 入力時
(局部座屈を目視により確認)

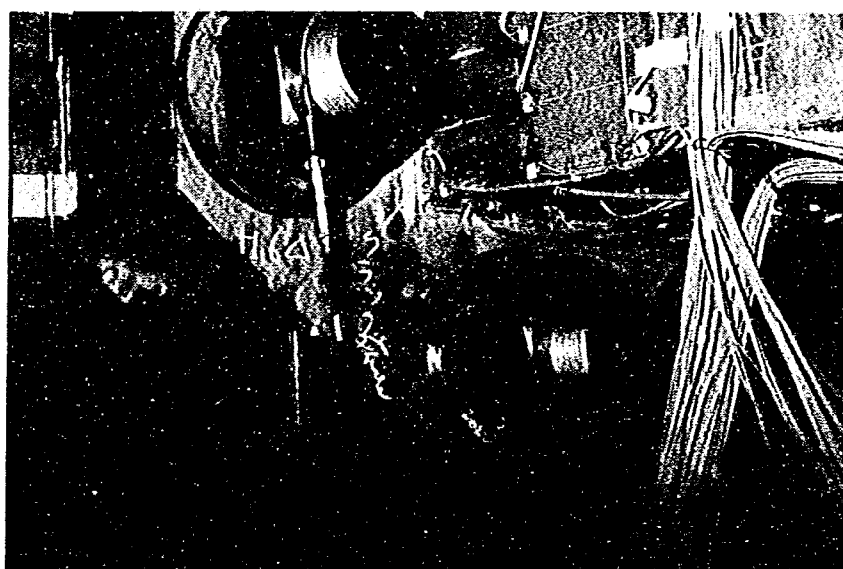


写真 3-3 静的載荷実験 7 サイクル目 (変位 56mm) 入力時
(柱下端部フランジとベースプレートの溶接部に亀裂発生)

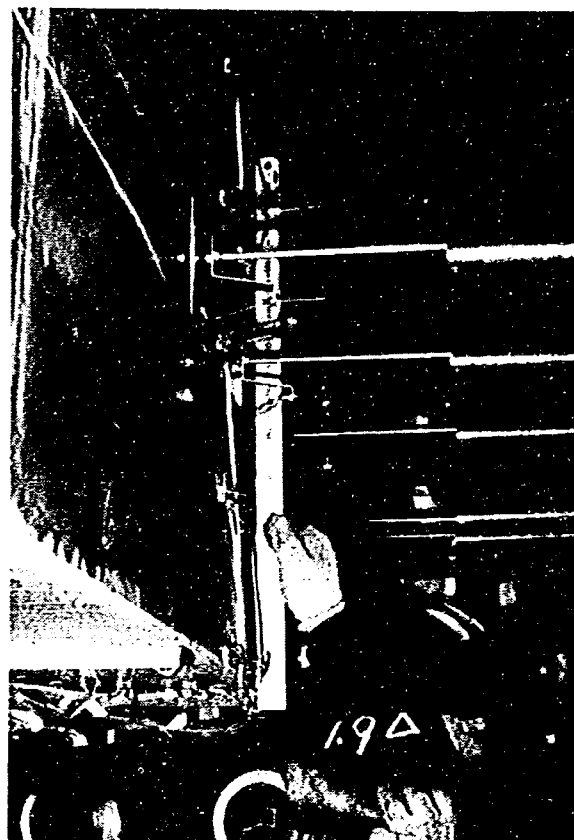


写真 3-4 静的載荷実験 10 サイクル目 (変位 67mm) 入力時
(フランジの局部座屈による残留変形を目視により確認)

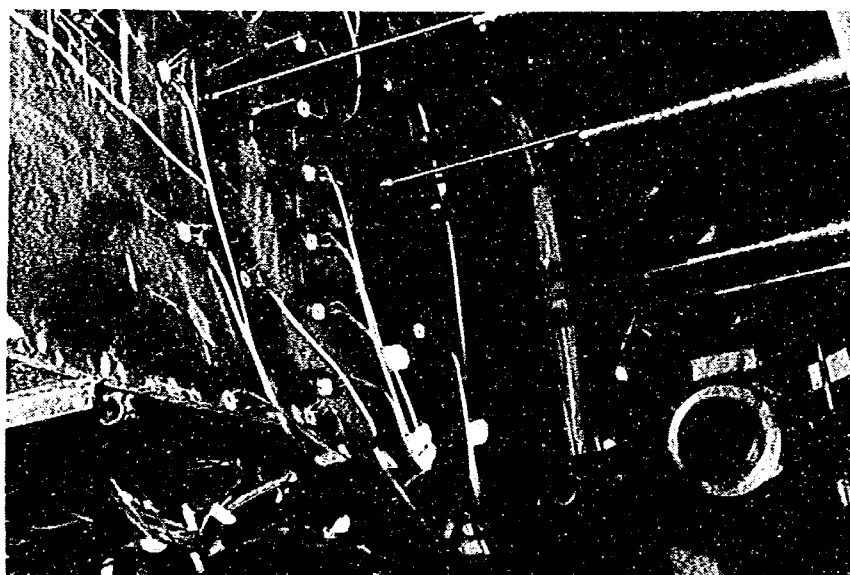


写真 3-5 静的載荷実験13サイクル目（変位80mm）入力時
（下側ウェブとフランジの溶接部破断）

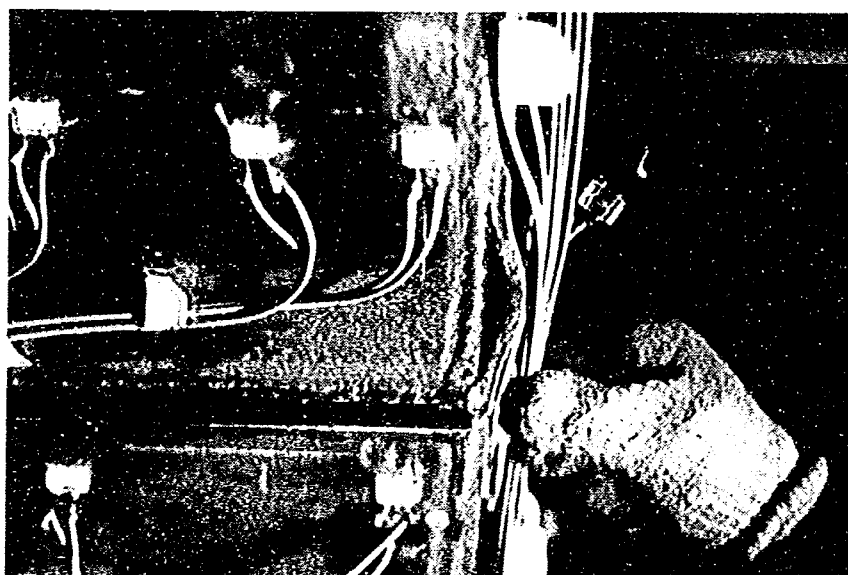


写真 3-6 静的載荷実験13サイクル目（変位80mm）入力時
（下側ウェブとフランジの溶接部破断）



写真 3-7 静的載荷実験13サイクル目（変位80mm）入力時
（上側ウェブのはらみ出し）

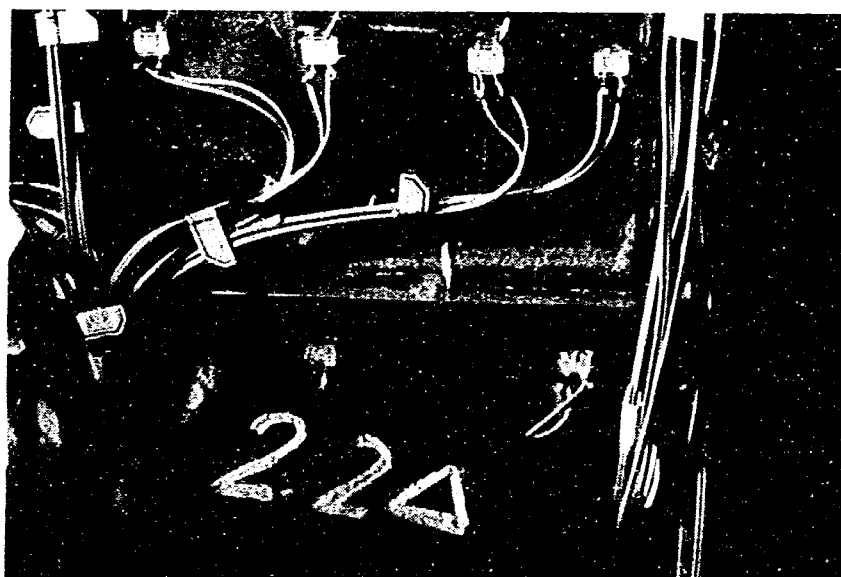


写真 3-8 静的載荷実験13サイクル目（変位80mm）入力時
（下側ウェブとフランジ，ダイヤフラムの溶接部破断）

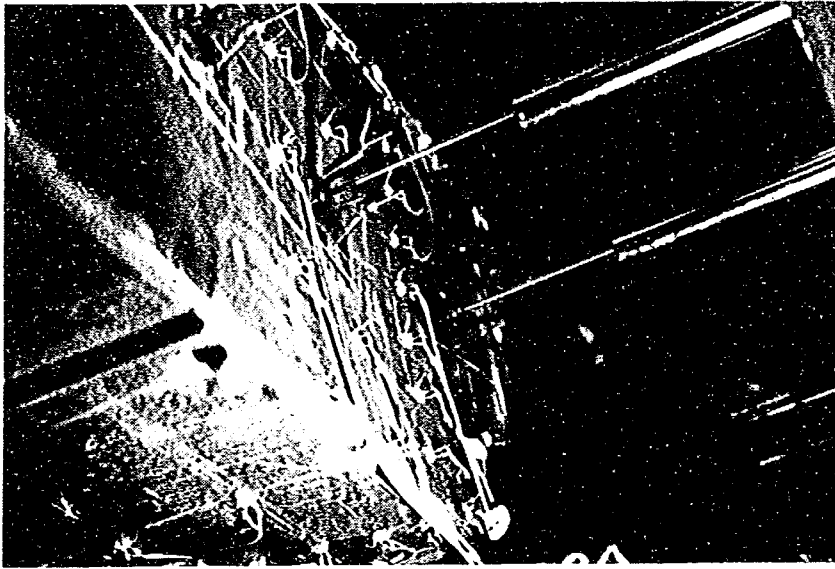


写真3-9 静的載荷実験14サイクル目(変位86mm)入力時
(終局状況: フランジのへこみ, 溶接部破断)

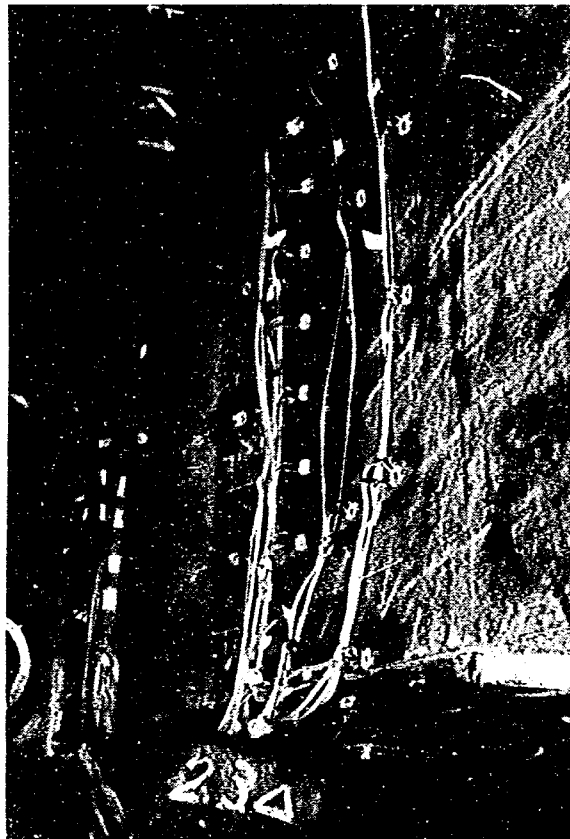


写真3-10 静的載荷実験14サイクル目(変位86mm)入力時
(終局状況: フランジのへこみ, 溶接部破断)

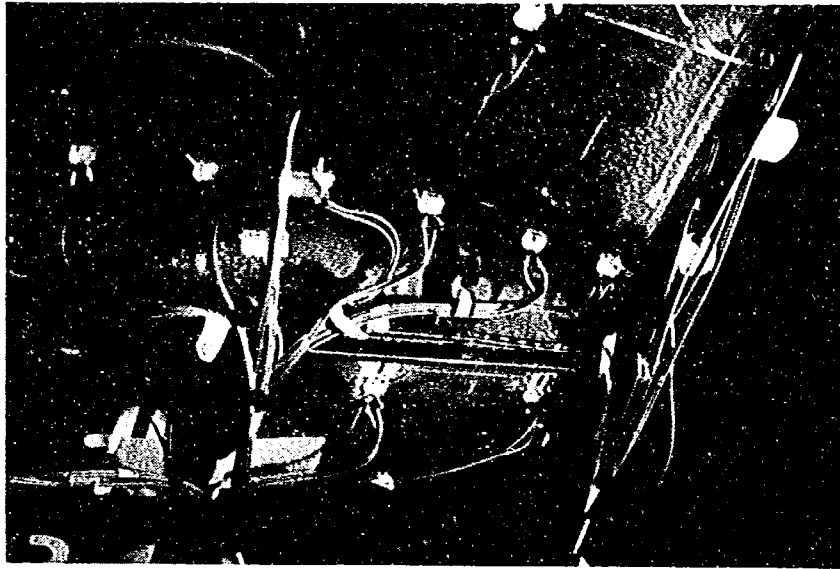


写真 3-11 静的載荷実験14サイクル目（変位86mm）入力時
（終局状況：下側ウェブのへこみ，溶接部破断）

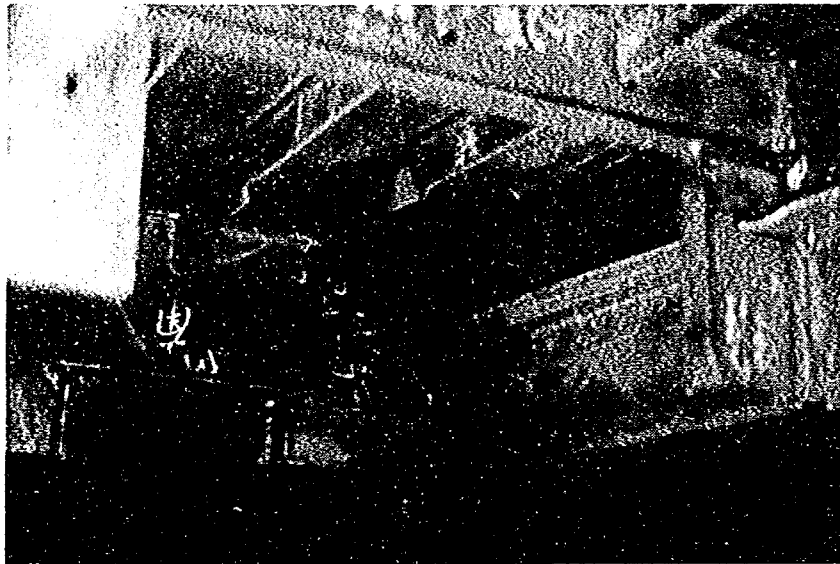


写真 3 - 12 静的載荷実験終了時の柱内部の変状（リブの変状）
（北側フランジ、上側ウェブ）

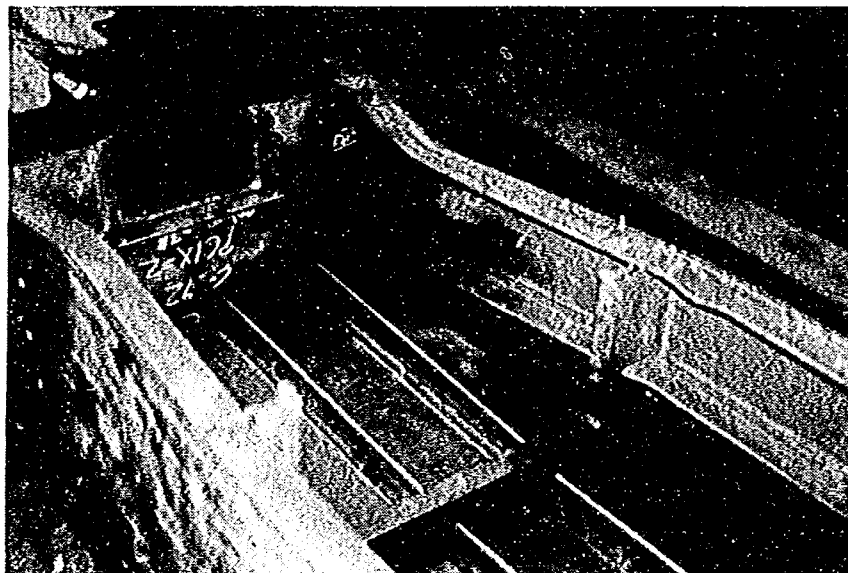


写真 3 - 13 静的載荷実験終了時の柱内部の変状（リブの変状）
（北側フランジ、下側ウェブ）

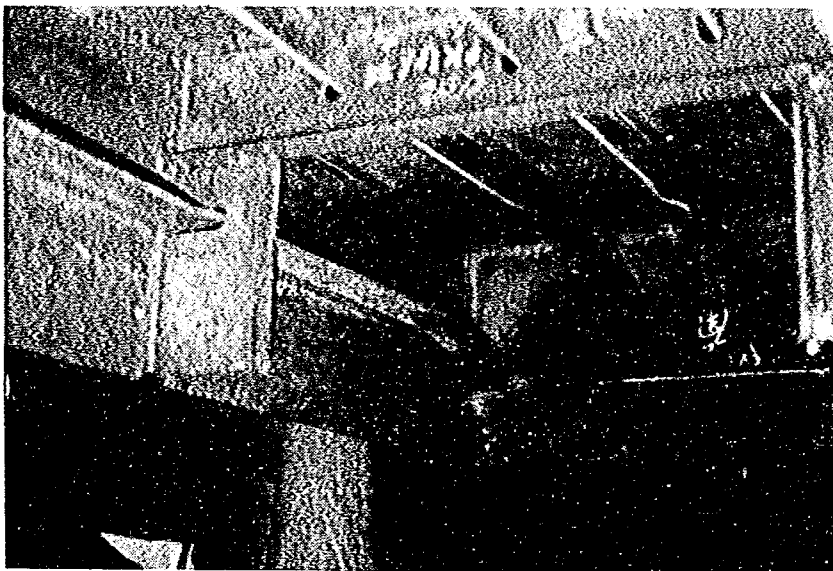


写真 3-14 静的載荷実験終了時の柱内部の変状（リブの変状）
（南側フランジ，上側ウェブ）

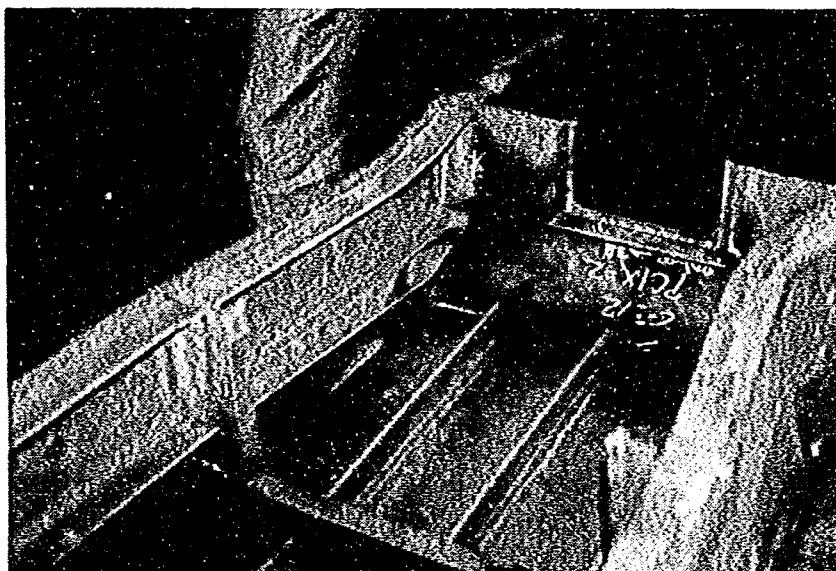


写真 3-15 静的載荷実験終了時の柱内部の変状（リブの変状）
（南側フランジ，下側ウェブ）

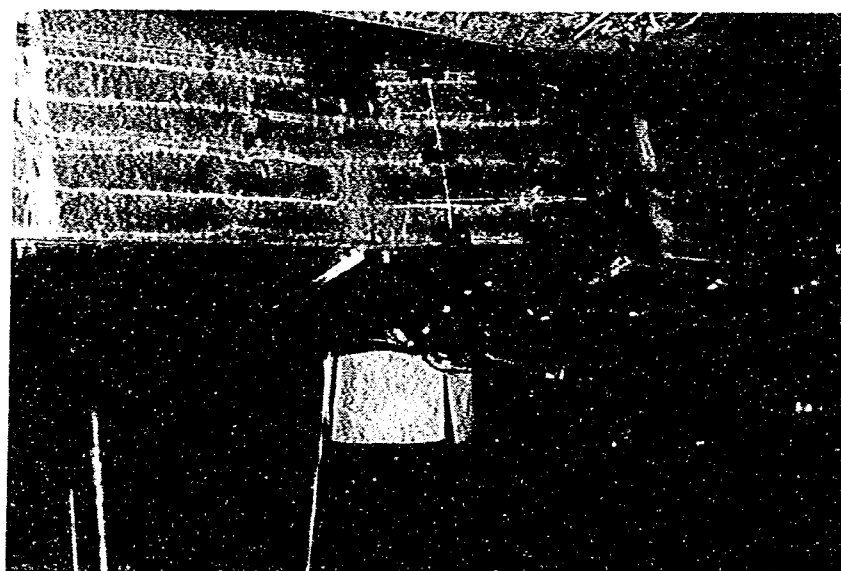


写真 3-16 動的載荷実験終了時の変状（北側フランジのはらみ出し，下側ウェブのへこみ，溶接部破断）

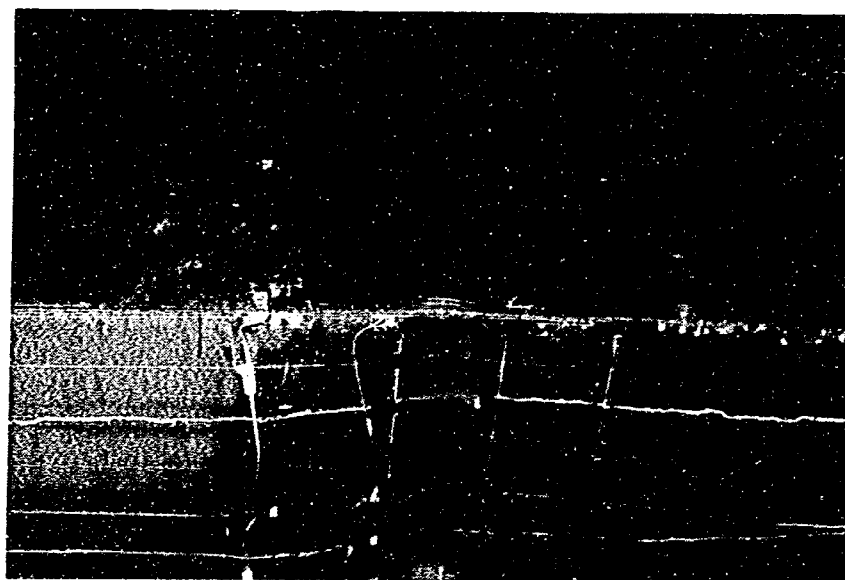


写真 3-17 動的載荷実験終了時の変状（南側フランジのへこみ，上側ウェブのはらみ出し）

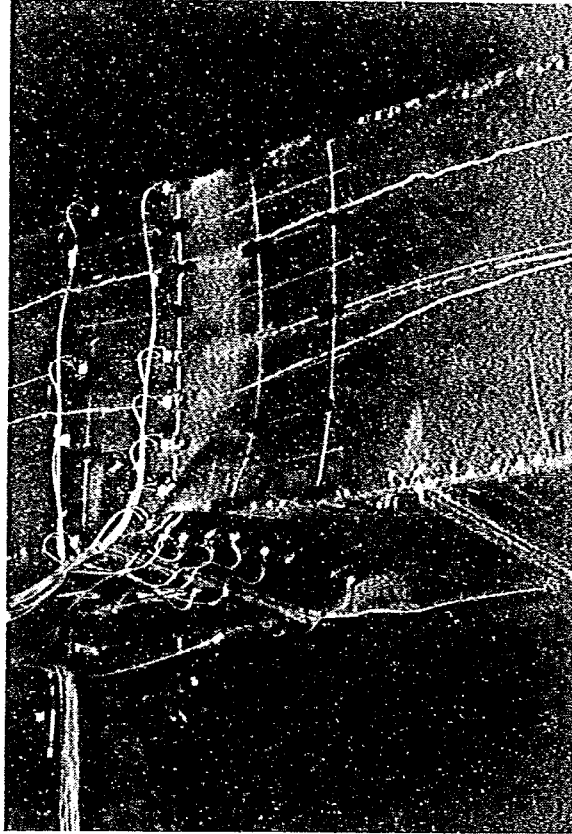


写真 3-18 動的載荷実験終了時の変状（南側フランジのへこみ，
下側ウェブのへこみ，溶接部破断）

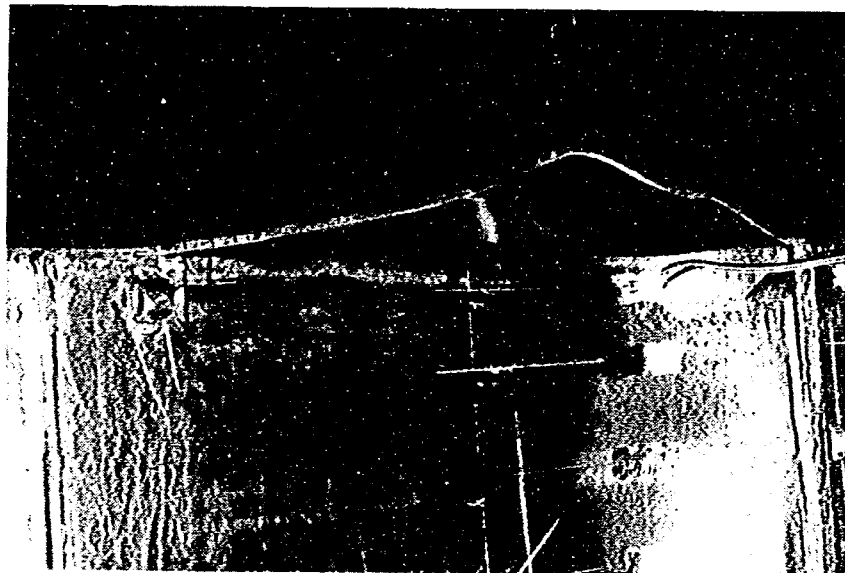


写真 3-19 動的載荷実験終了時の変状（下側ウェブのへこみ，
北側フランジのはらみ出し，溶接部破断）

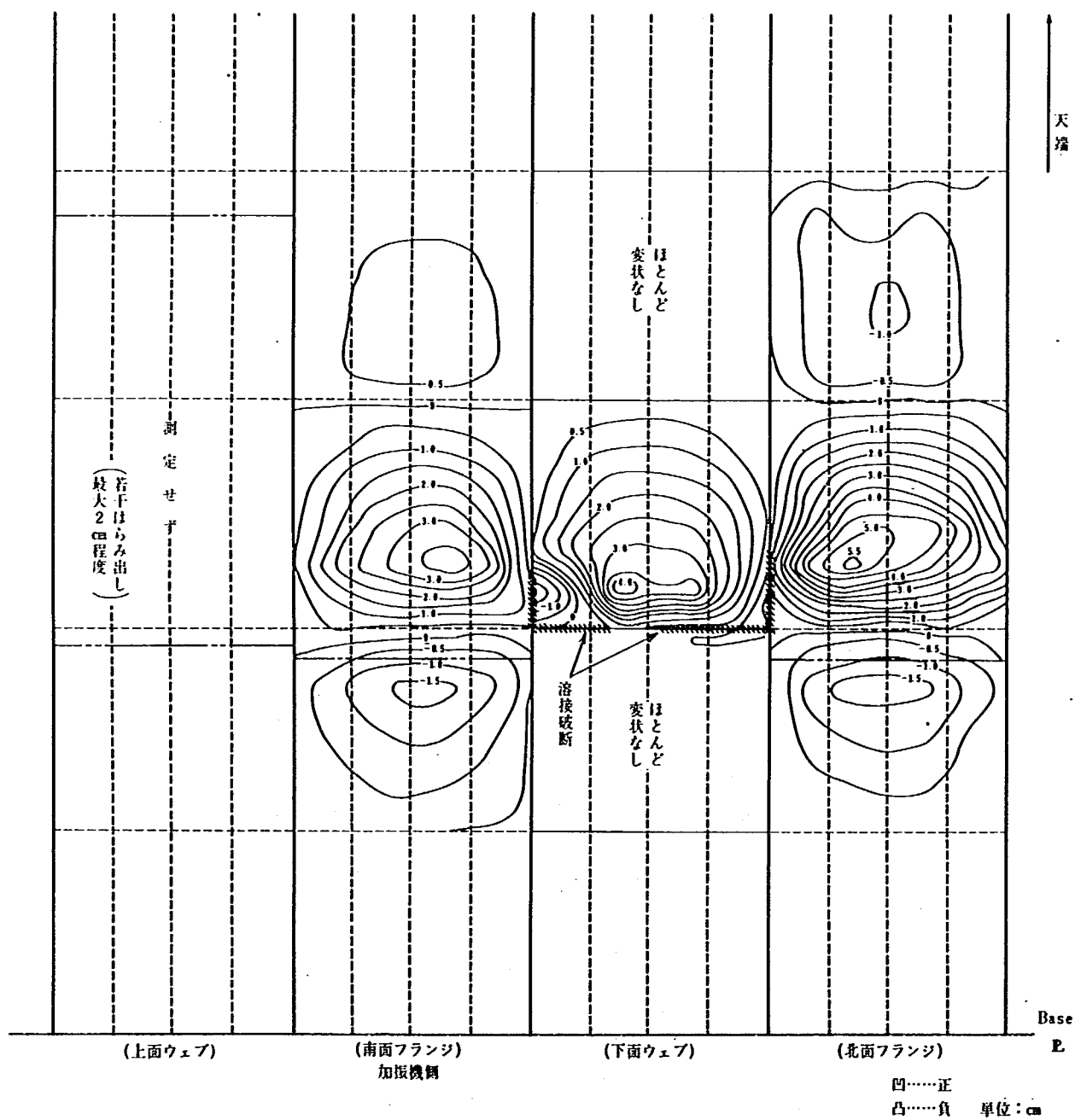


図 3-2 静的載荷実験終了時の変状

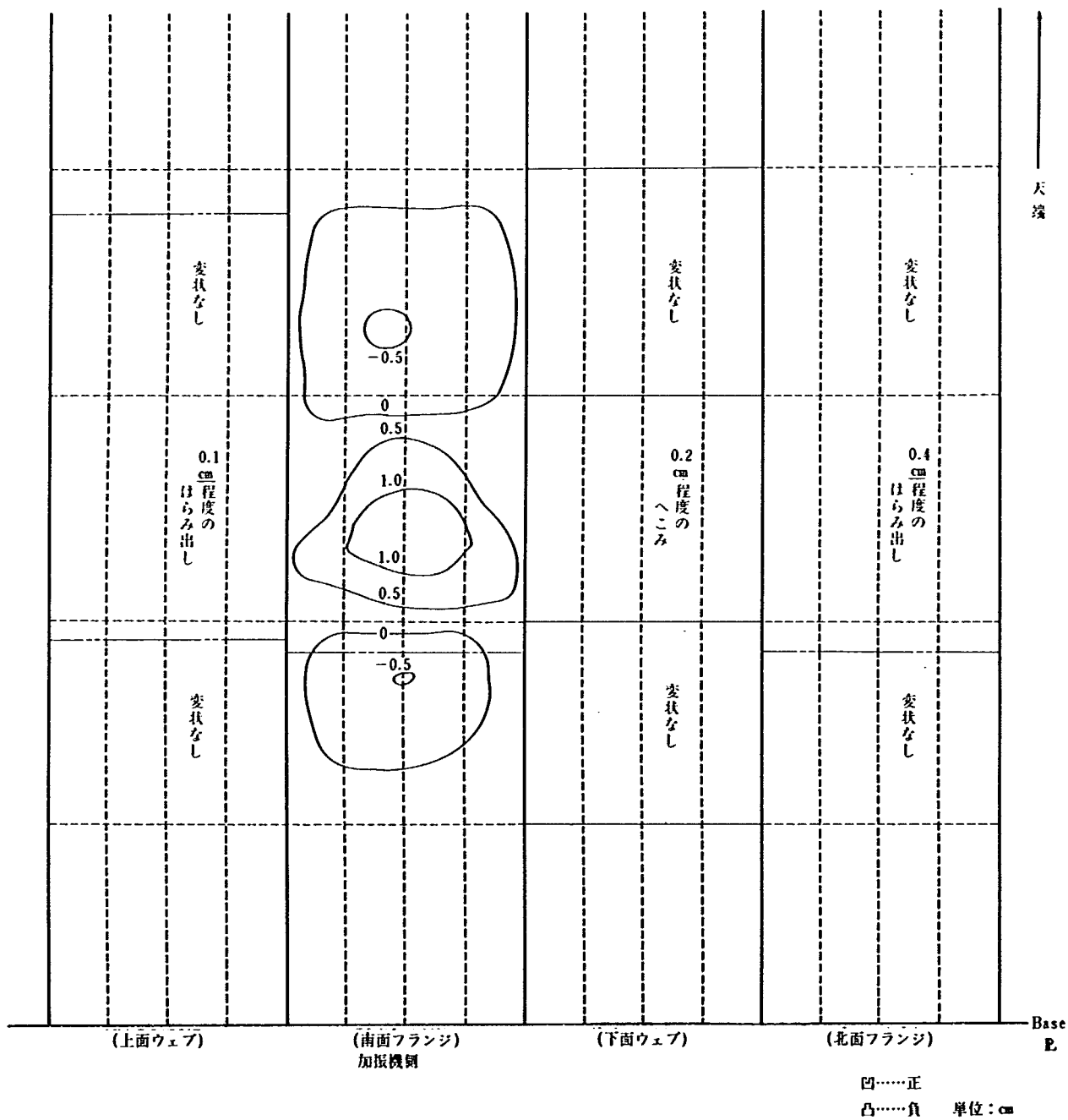


図 3-4 動的載荷実験第 3 波形入力終了時の変状

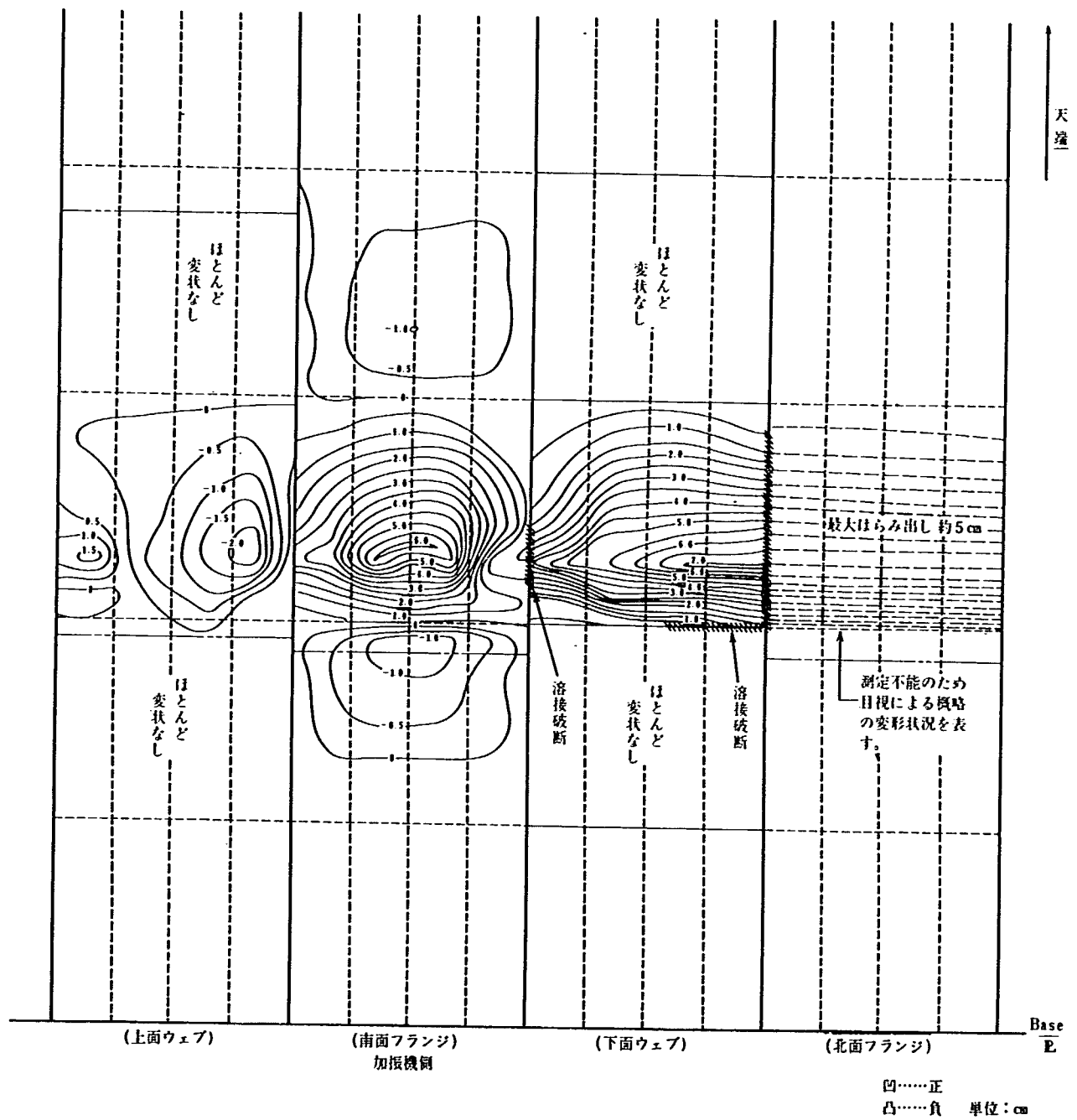


図 3-5 動的載荷実験第 4 波形入力終了時の変状

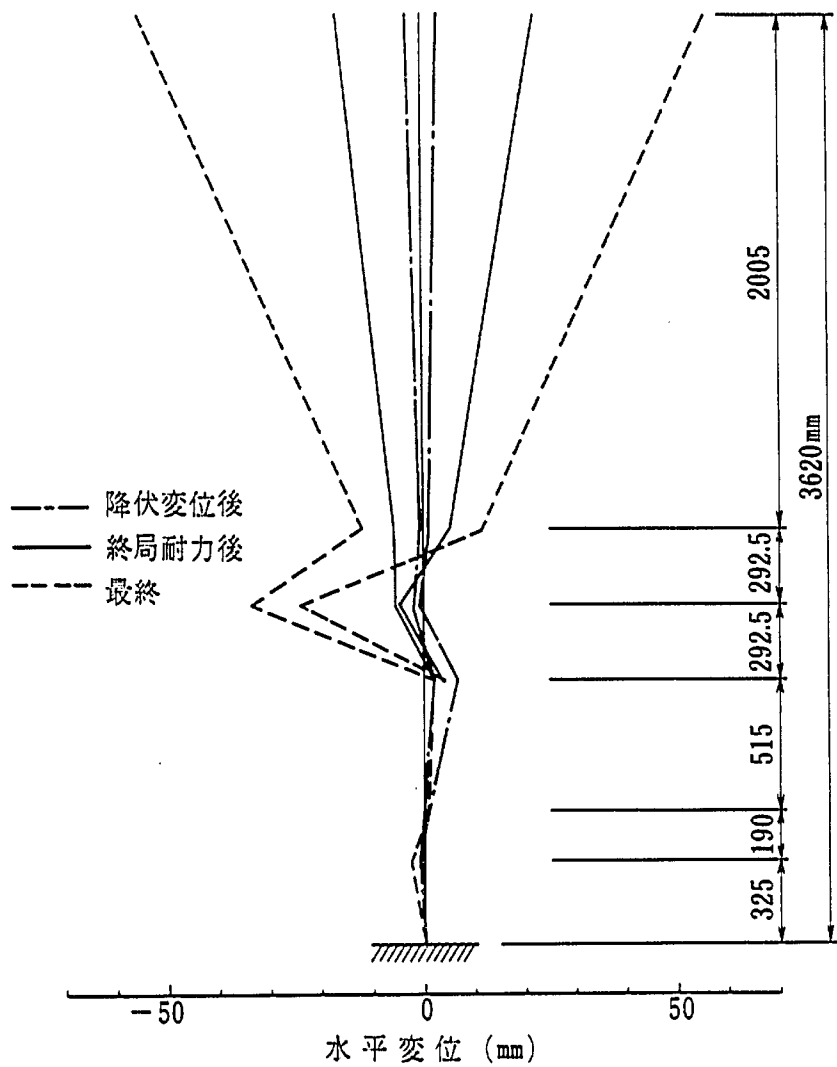


图 3-7 静的载荷実験残留変位分布

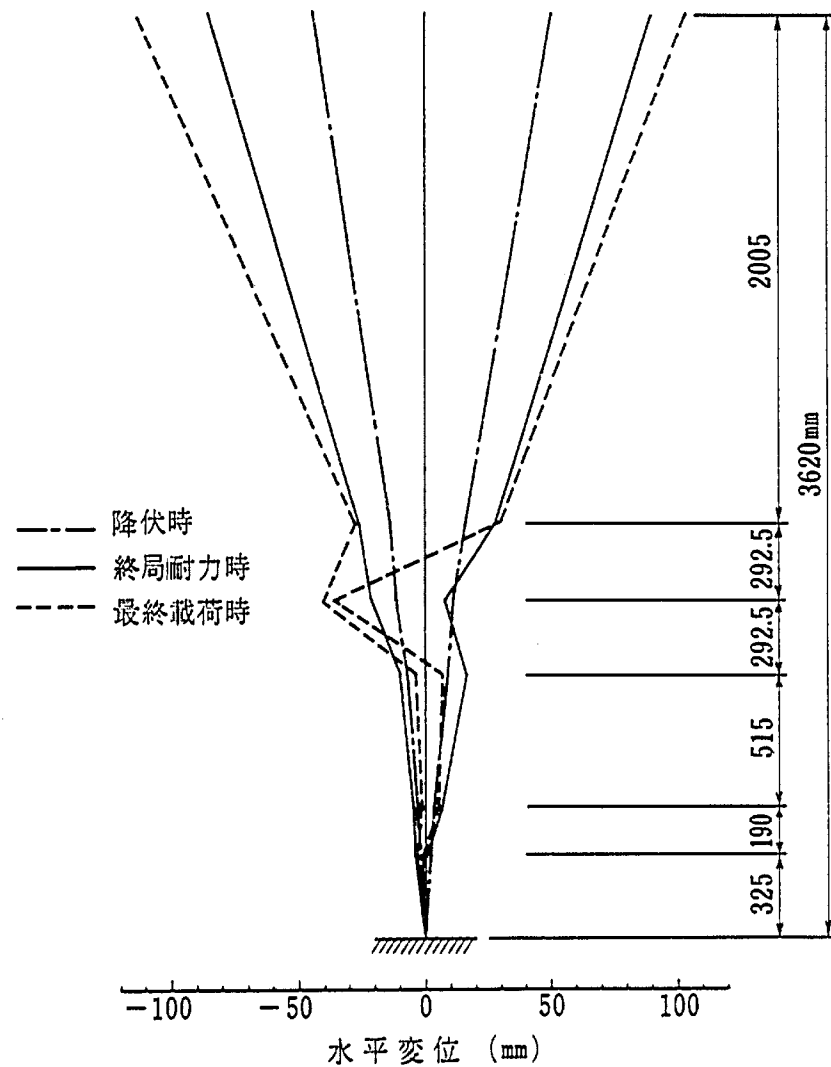


图 3-6 静的载荷実験载荷時変位分布

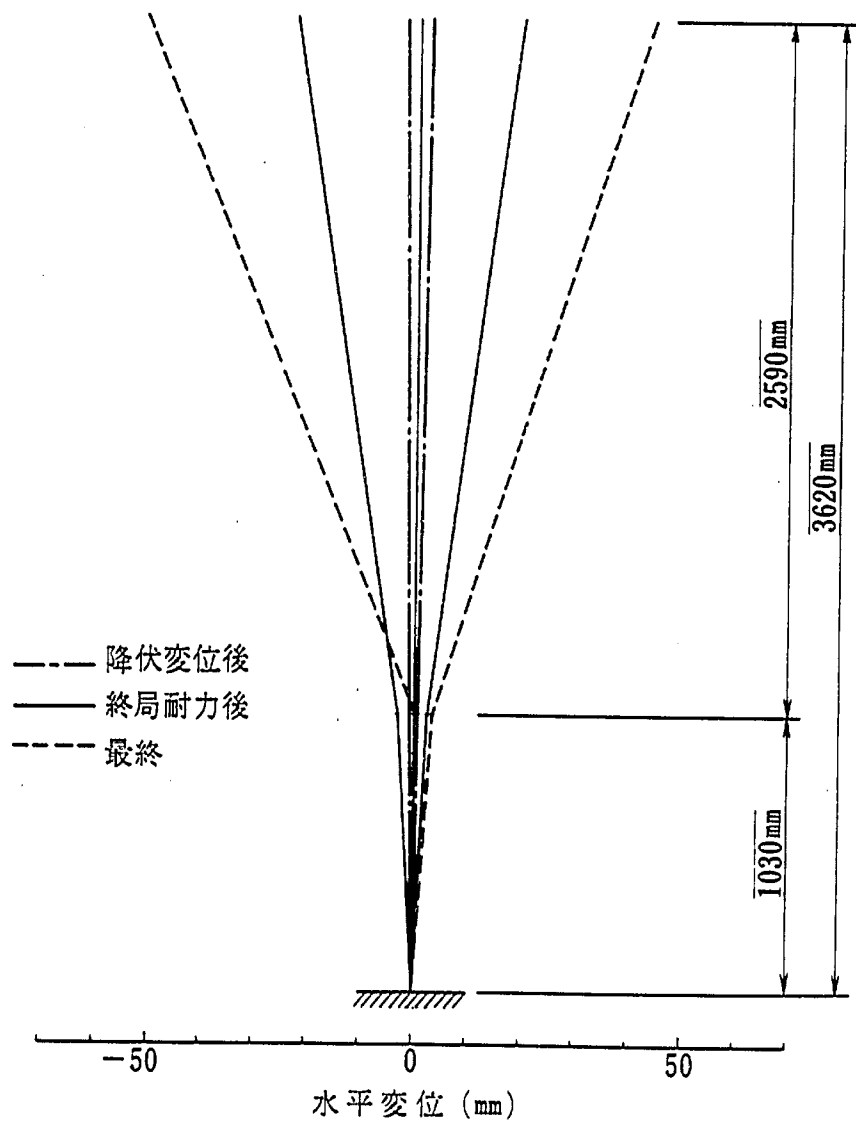


图 3-9 動的载荷実験残留変位分布

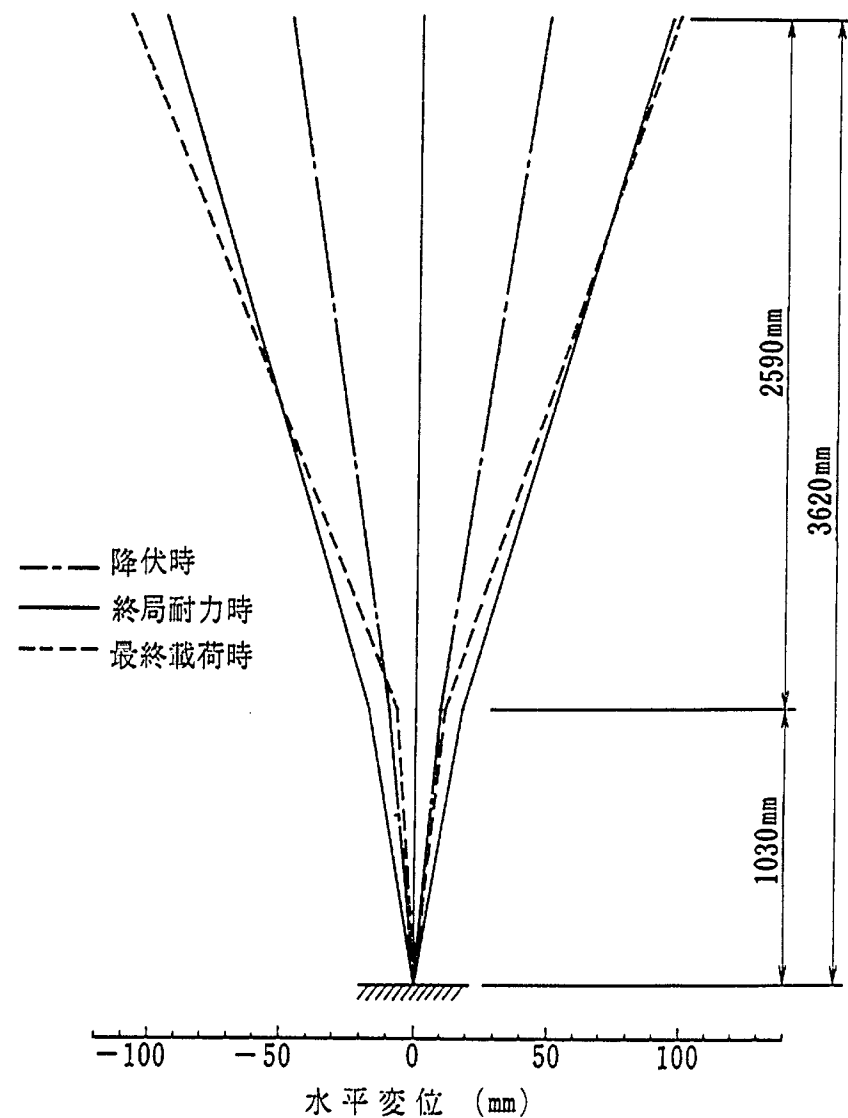


图 3-8 動的载荷実験载荷時変位分布

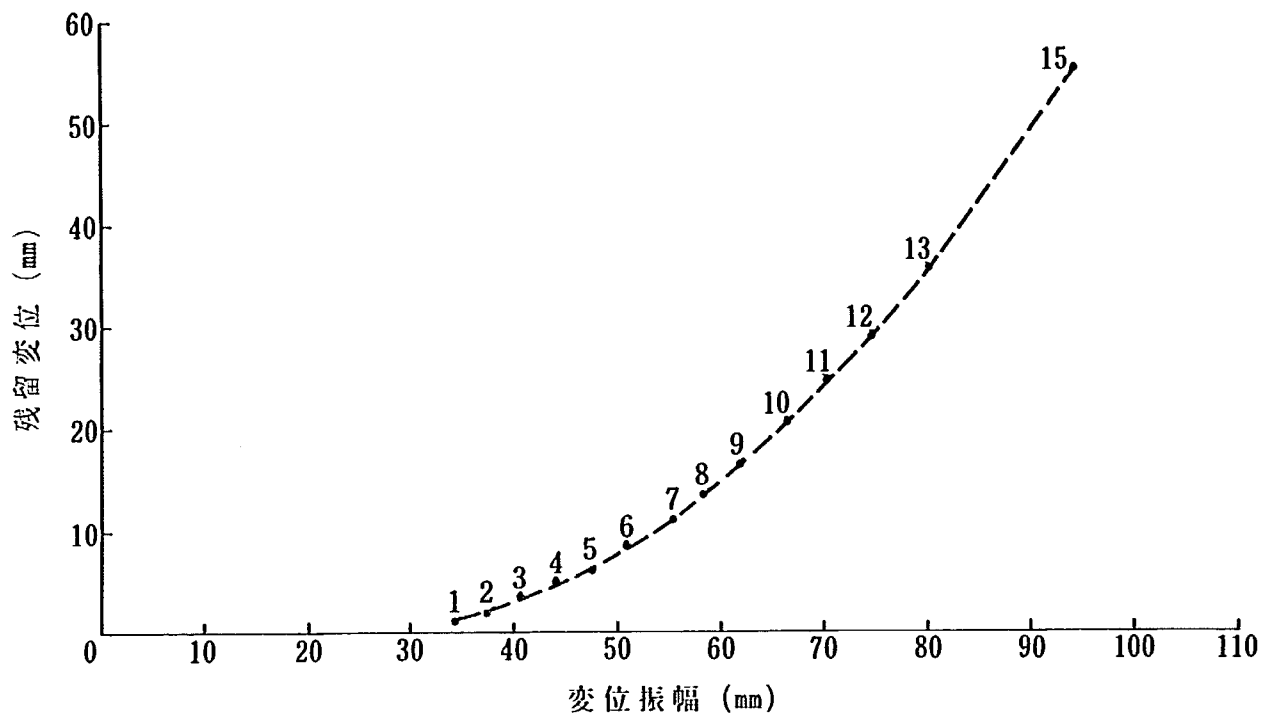


図 3-10 柱頭入力変位と残留変位の関係（静的載荷実験）

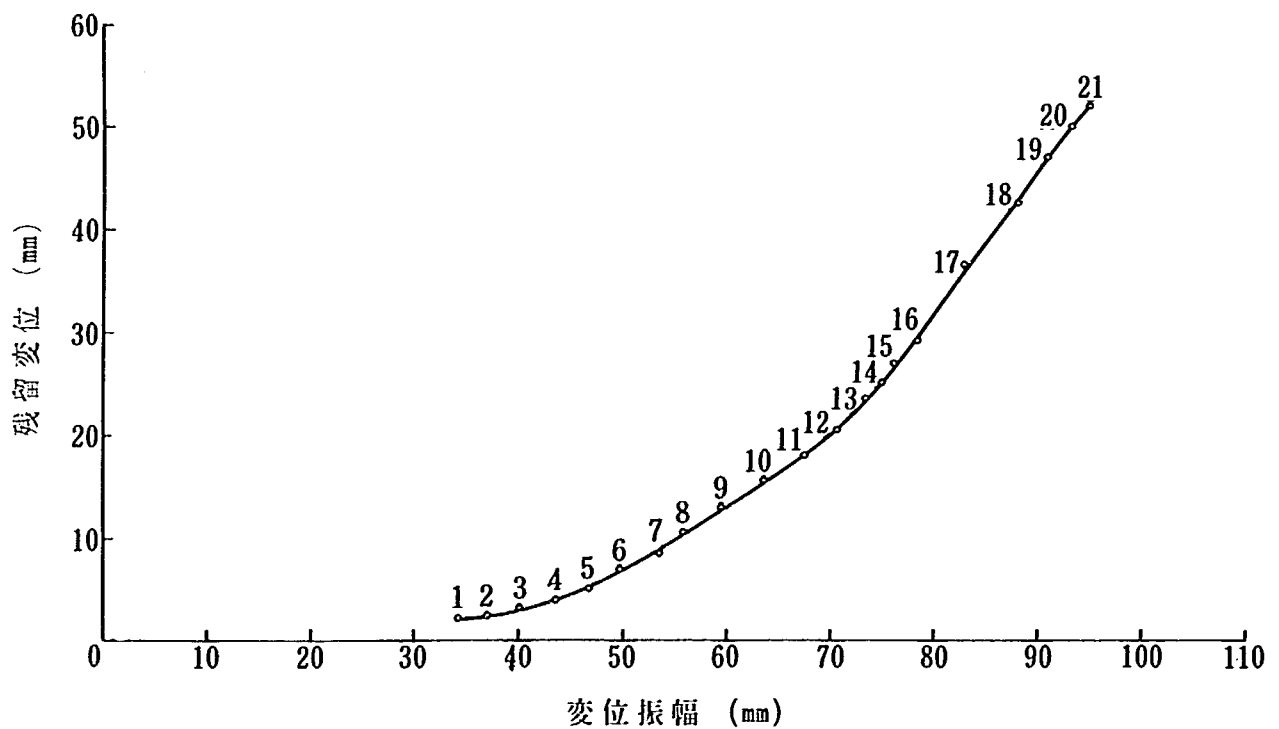


図 3-11 柱頭入力変位と残留変位の関係（動的載荷実験）

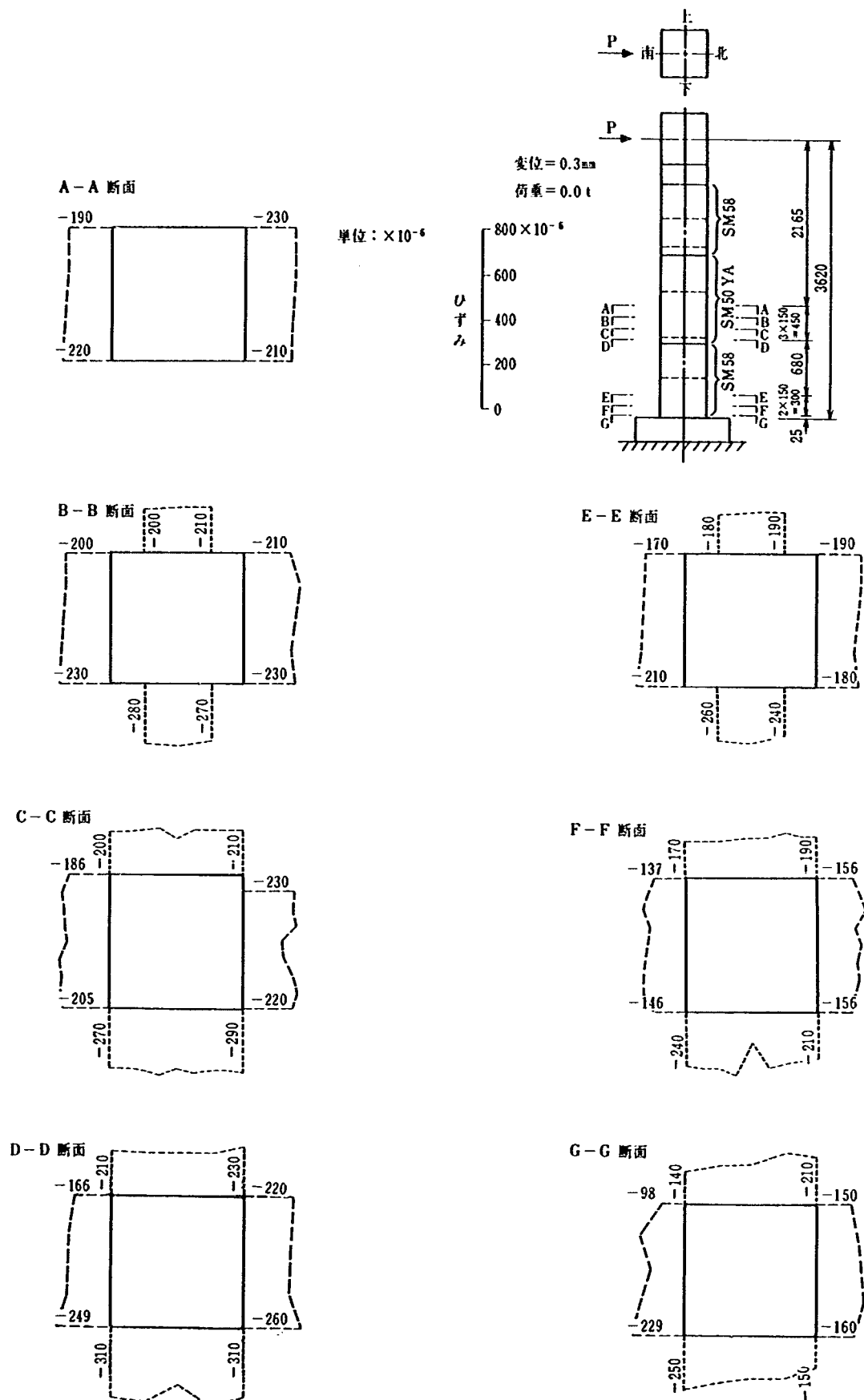


図 3-12 静的載荷実験ひずみ分布その 1 (軸力 (N = 87.7 t) 導入時ひずみ分布)

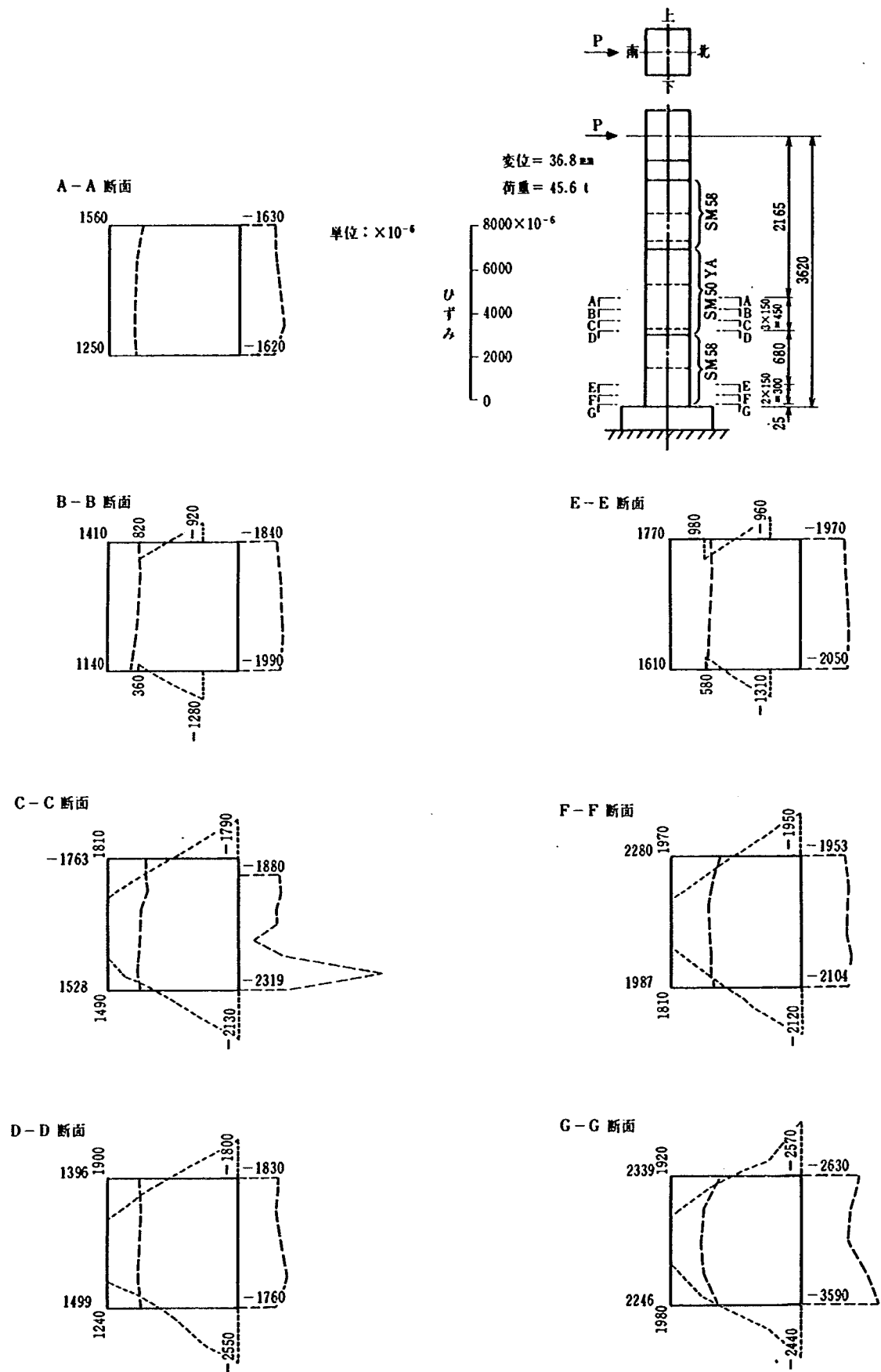


図 3-12 静的載荷実験ひずみ分布その 2 (降伏荷重 (正) 載荷時ひずみ分布)

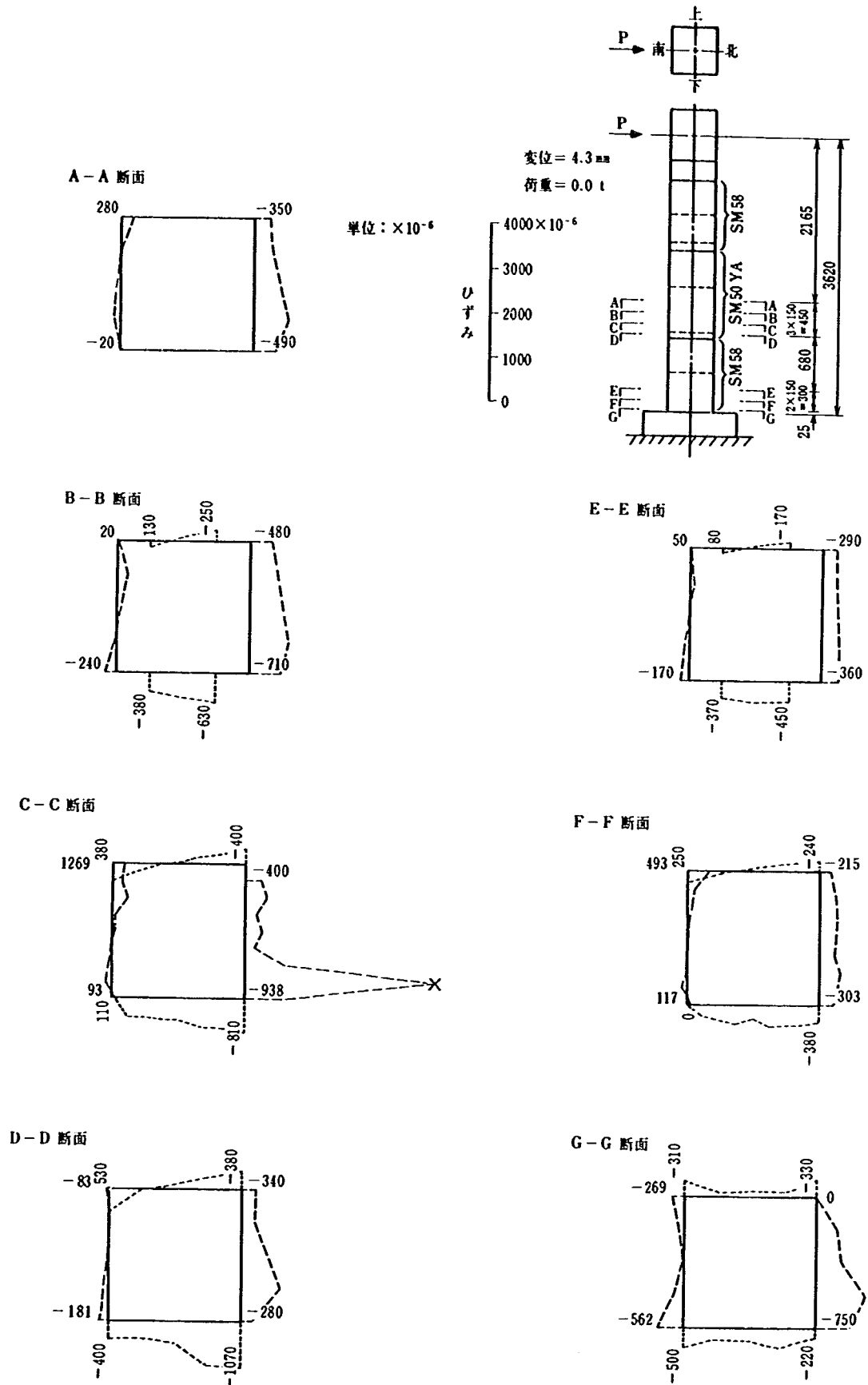


図 3-12 静的載荷実験ひずみ分布その 3 (降伏荷重 (正) 載荷後残留ひずみ分布)

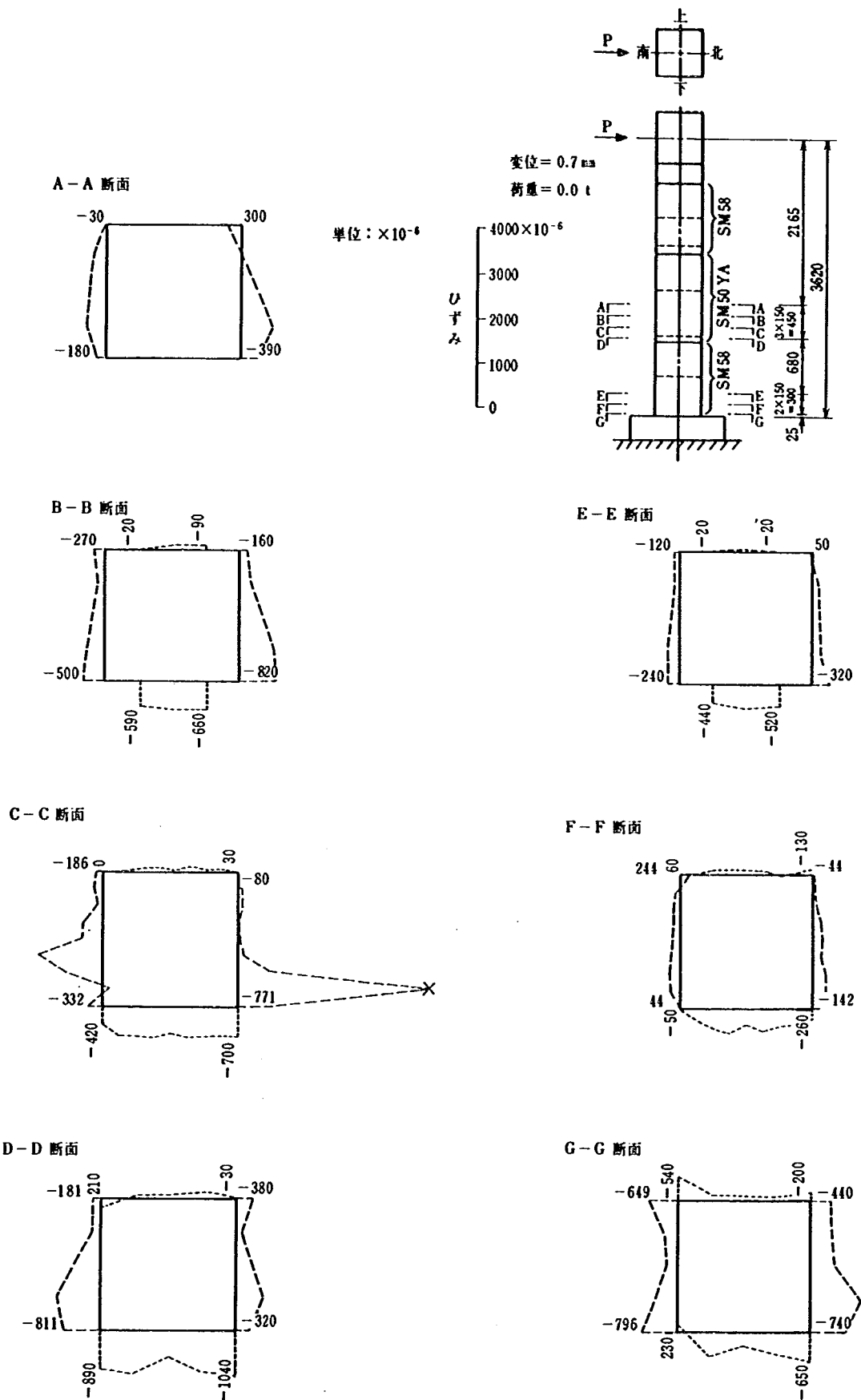


図 3-12 静的載荷実験ひずみ分布その 5 (降伏荷重 (負) 載荷後残留ひずみ分布)

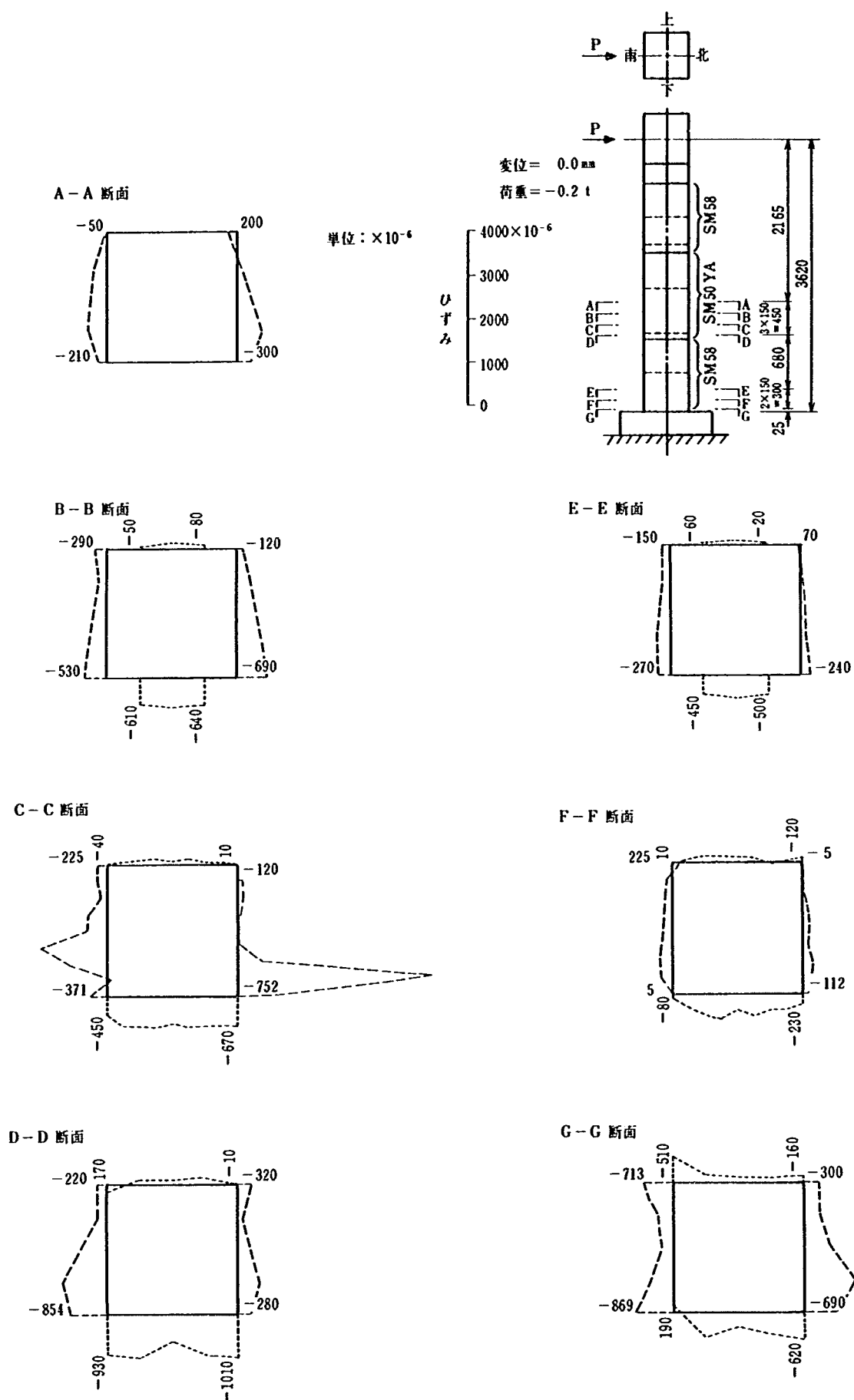


図 3-12 静的載荷実験ひずみ分布その 6 (変位制御入力開始時ひずみ分布)

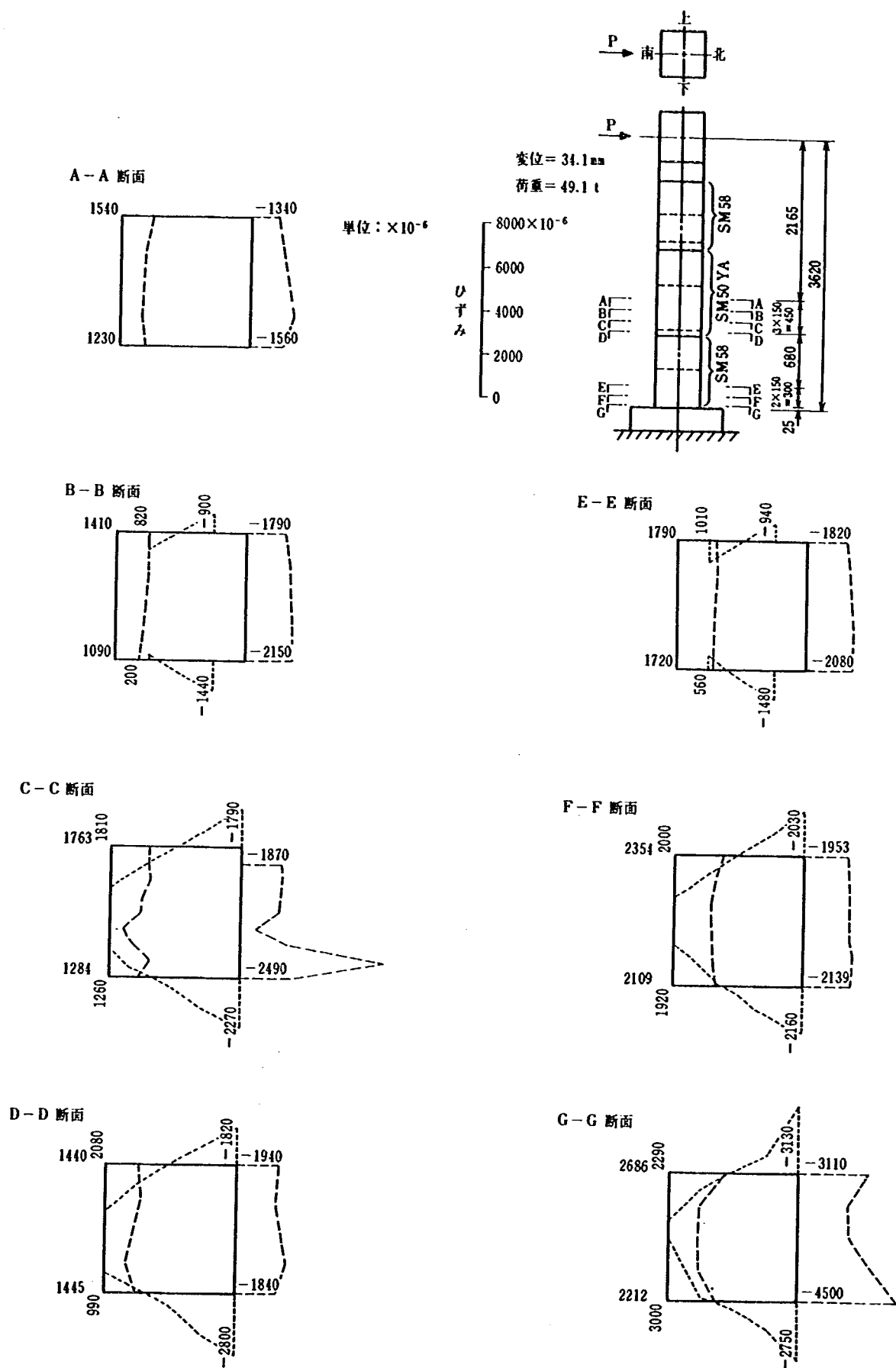


図 3-12 静的載荷実験ひずみ分布その 7 (降伏変位 (正) 入力時ひずみ分布)

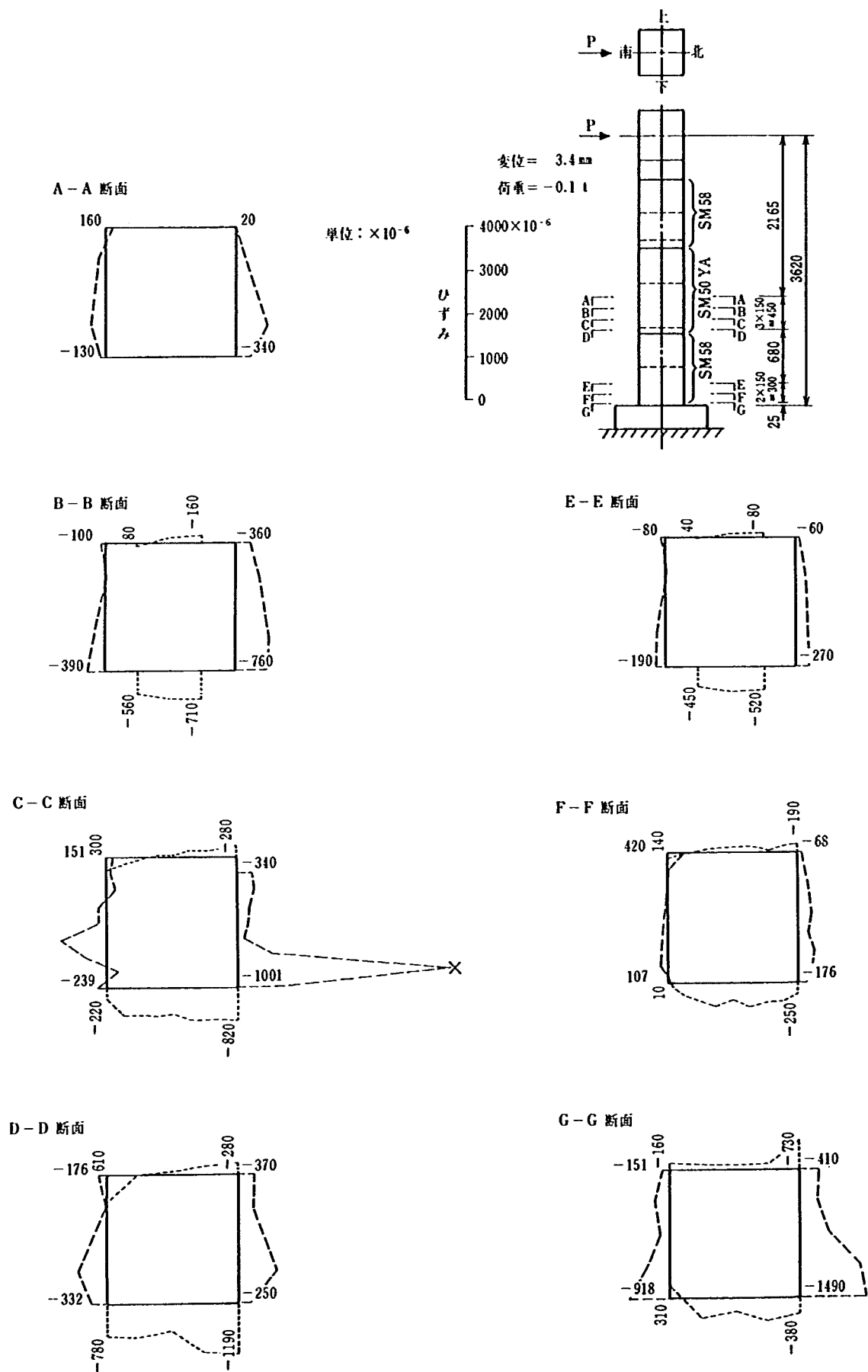


図 3-12 静的載荷実験ひずみ分布その 8 (降伏変位 (正) 入力後残留ひずみ分布)

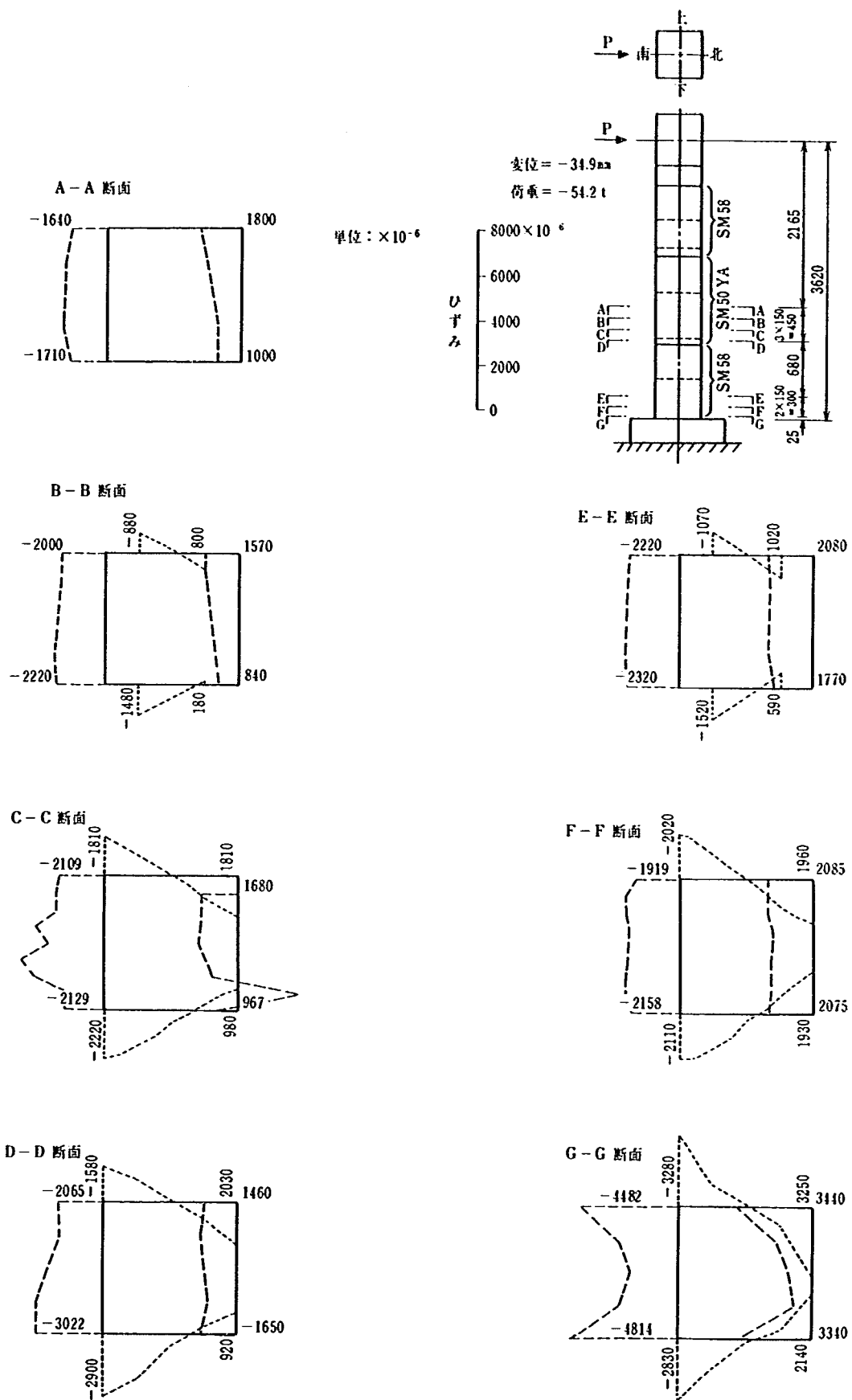


図 3-12 静的載荷実験ひずみ分布その 9 (降伏変位 (負) 入力時ひずみ分布)

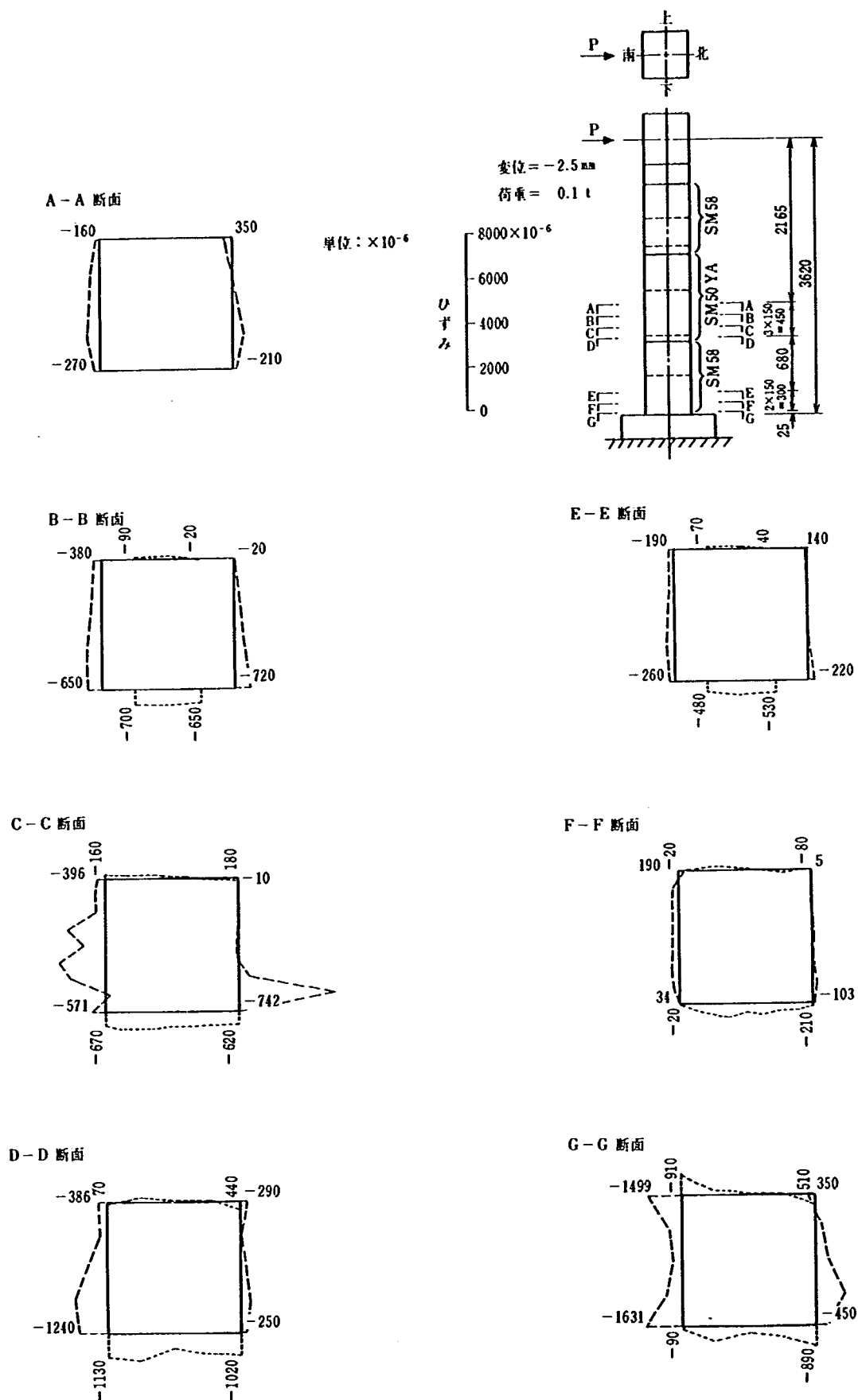


図 3-12 静的載荷実験ひずみ分布その10 (降伏変位 (負) 入力後残留ひずみ分布)

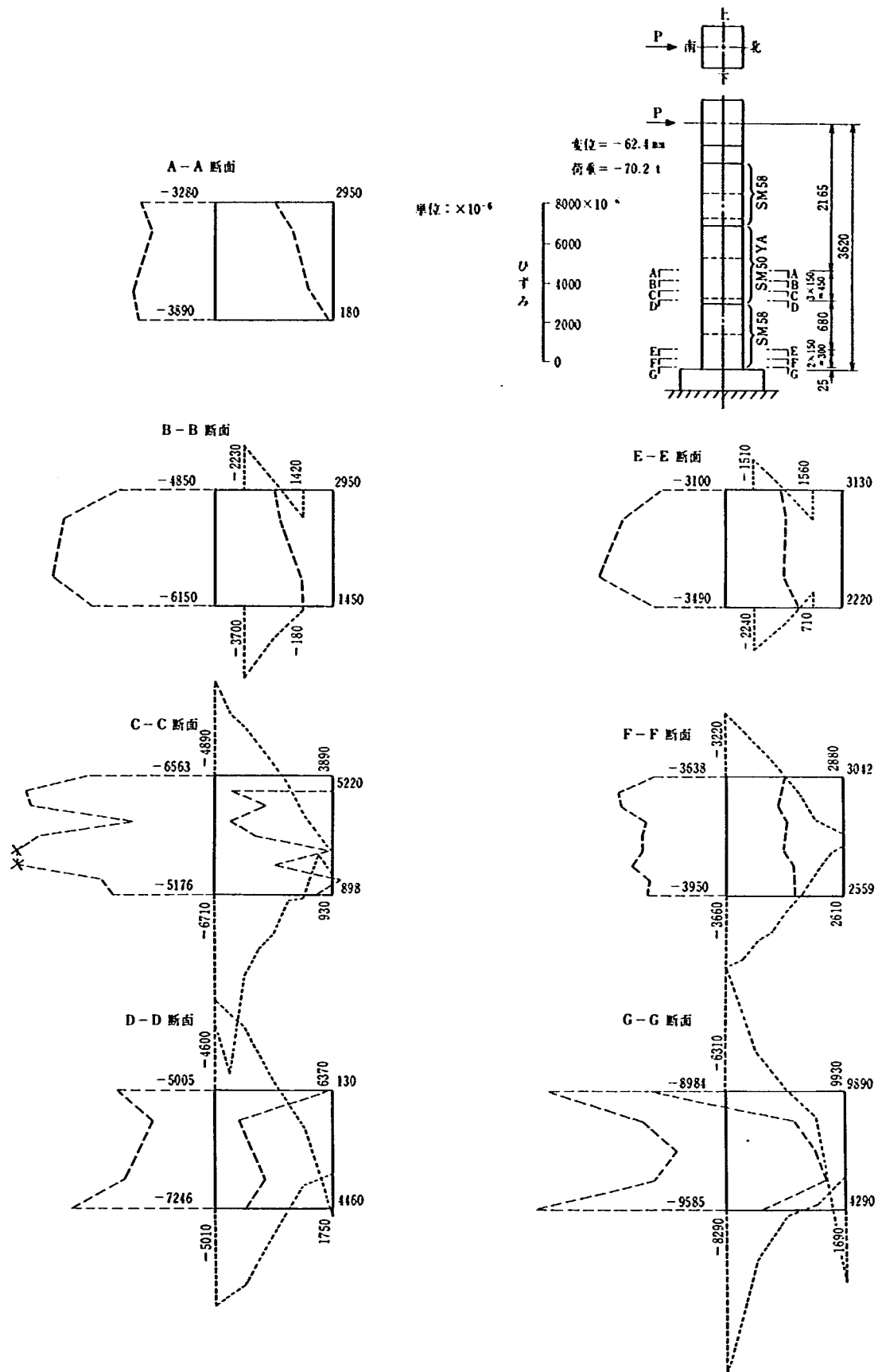


図 3-12 静的載荷実験ひずみ分布その11 (終局耐力 (負) (最大荷重) 時ひずみ分布)

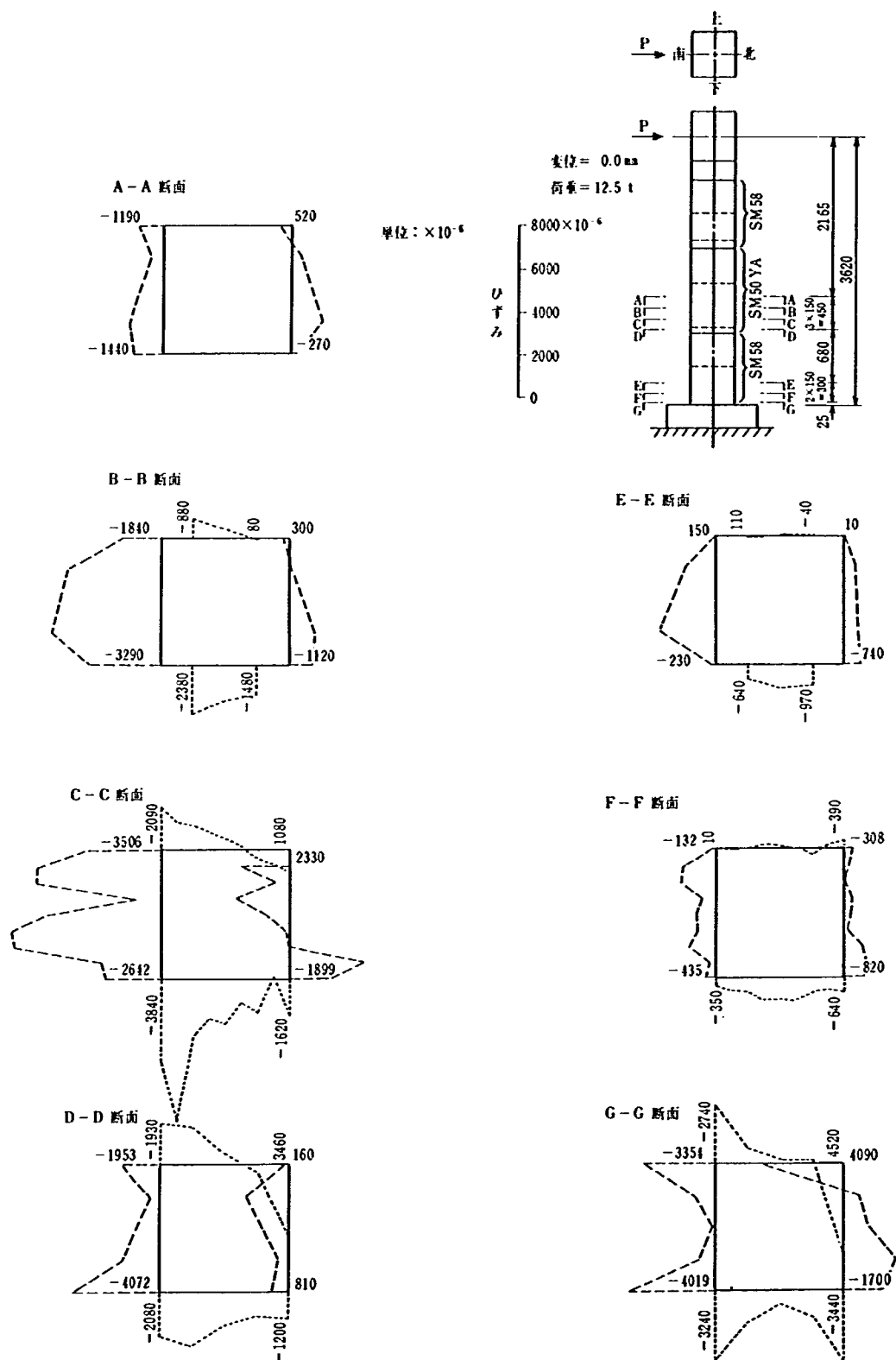


図 3-12 静的载荷実験ひずみ分布その12 (終局耐力 (負) (最大荷重) 後残留ひずみ分布)

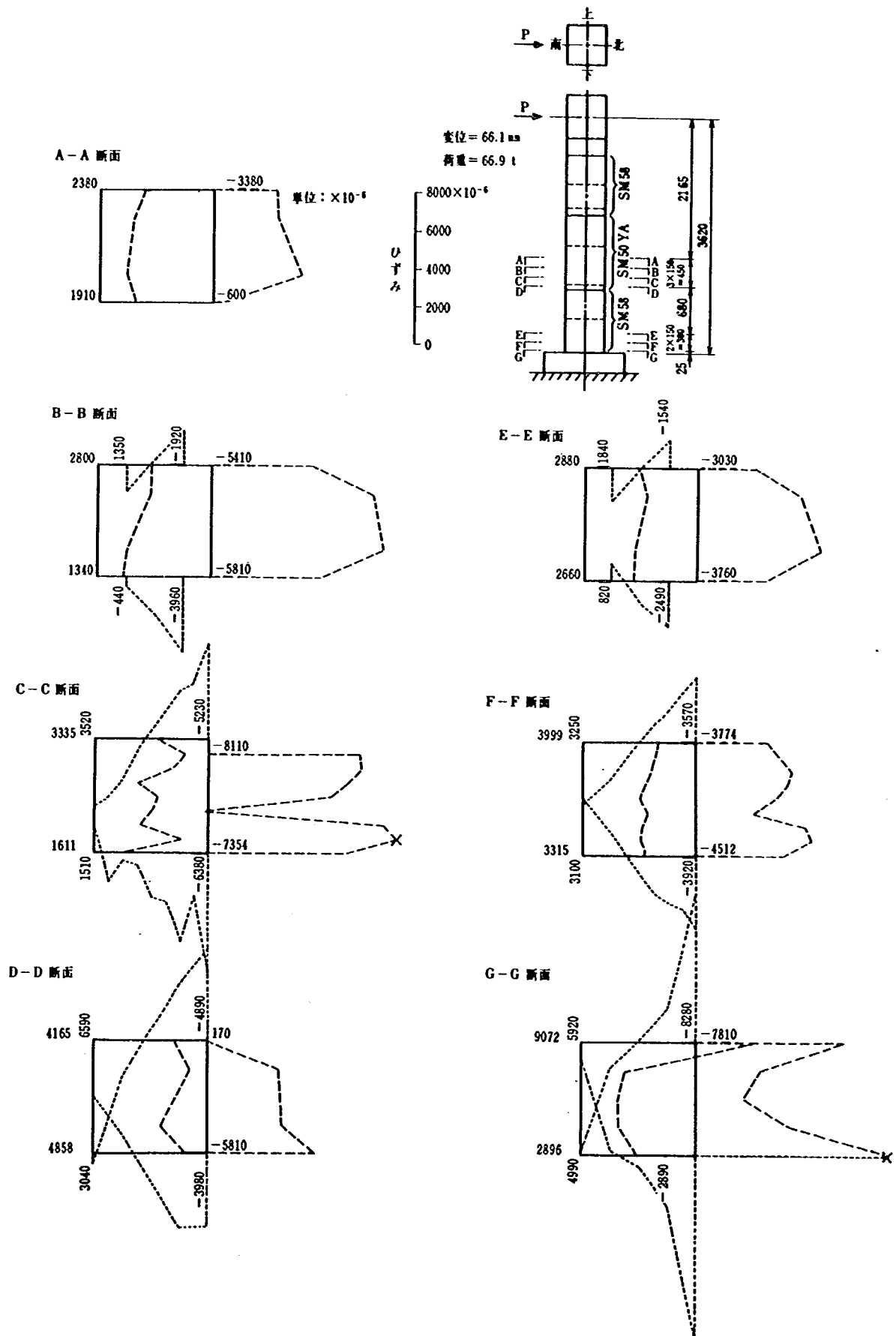


図 3-12 静的荷重実験ひずみ分布その13 (最大耐力 (正) (最大荷重) 時ひずみ分布)

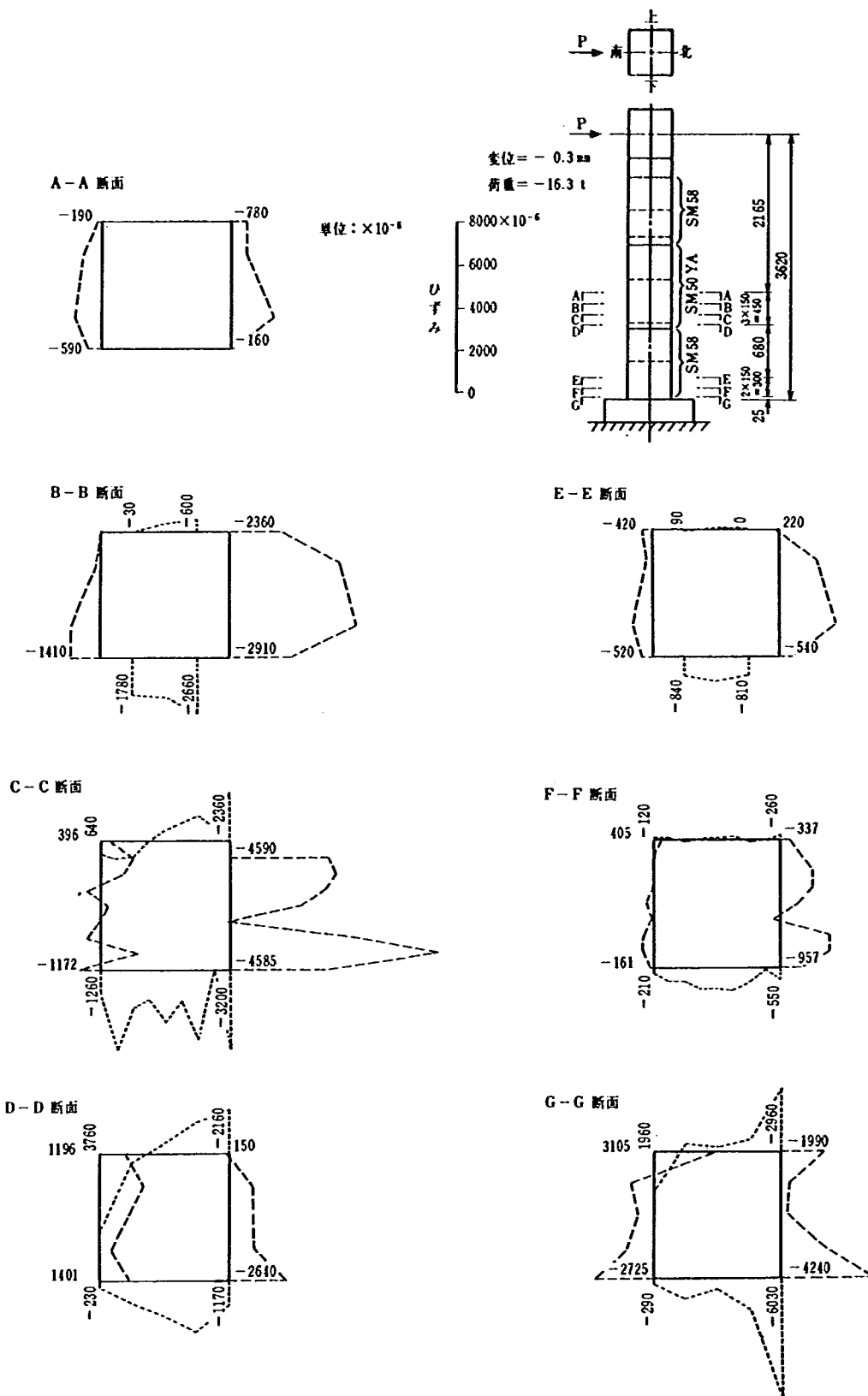
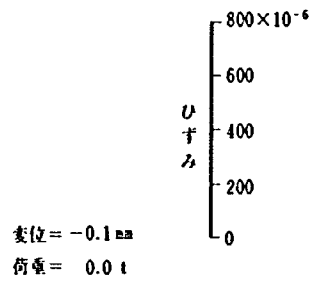
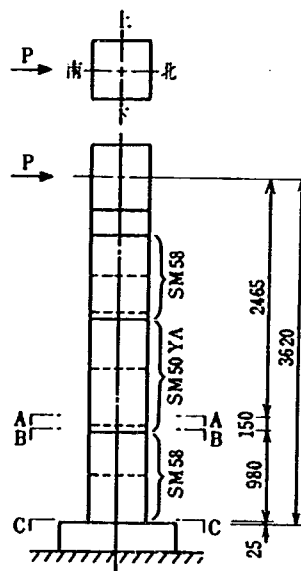
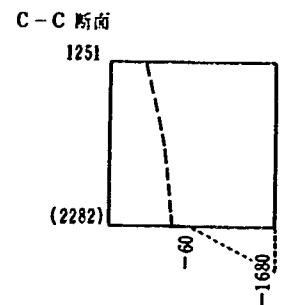
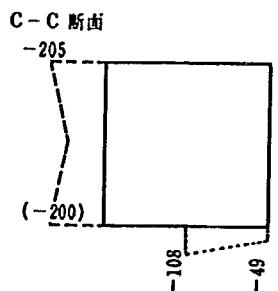
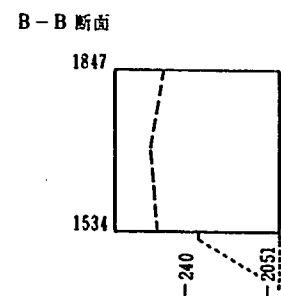
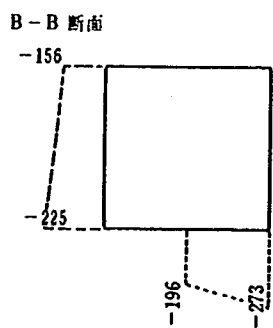
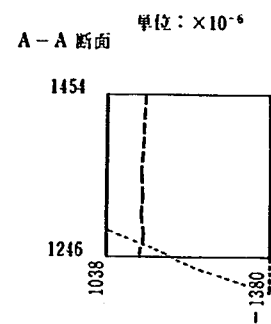
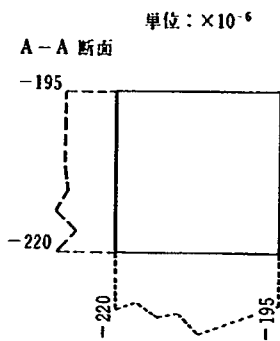
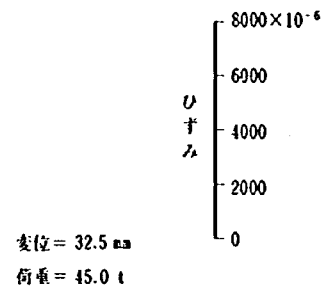


図 3-12 静的载荷実験ひずみ分布その 14 (最大耐力 (正) (最大荷重) 後残留ひずみ分布)

変位制御入力開始時ひずみ分布



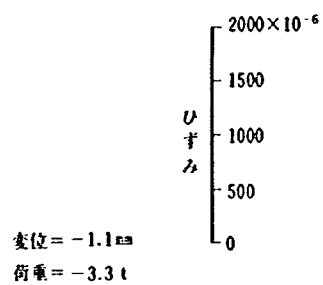
降伏変位（正）入力時ひずみ分布



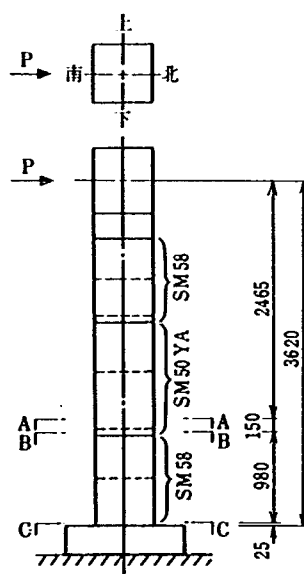
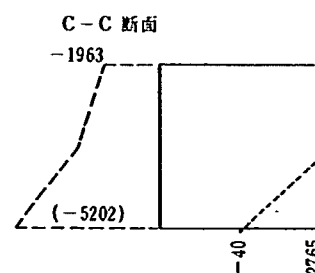
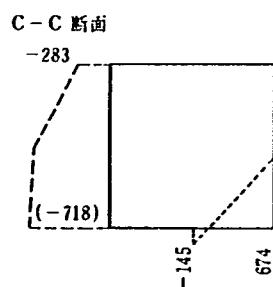
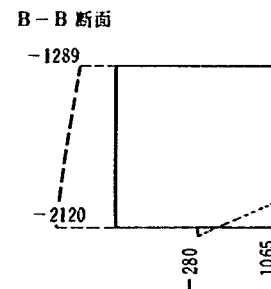
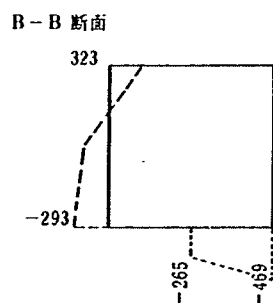
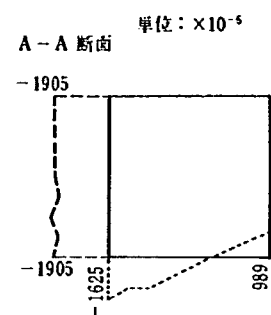
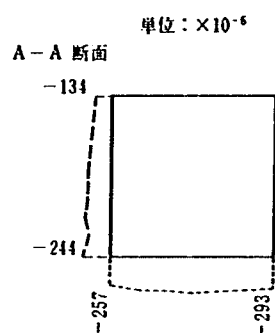
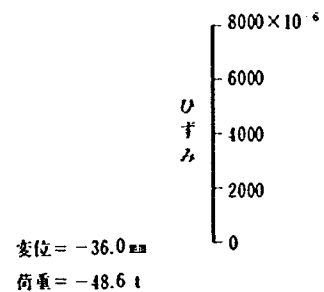
注: () 内は計測不良

図 3-13 動的載荷実験ひずみ分布その 1

降伏変位（正）入力後ひずみ分布



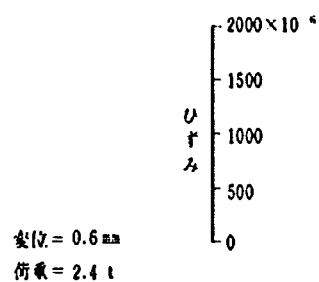
降伏変位（負）入力時ひずみ分布



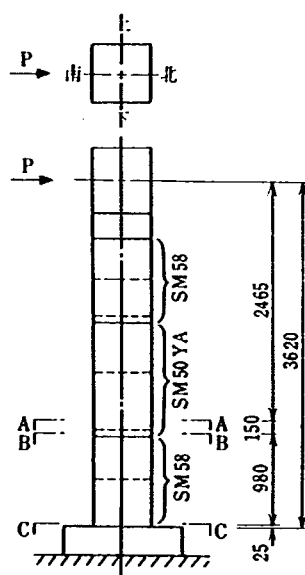
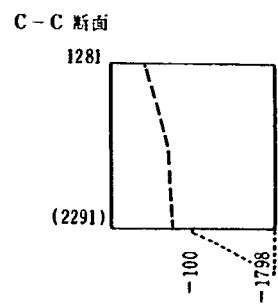
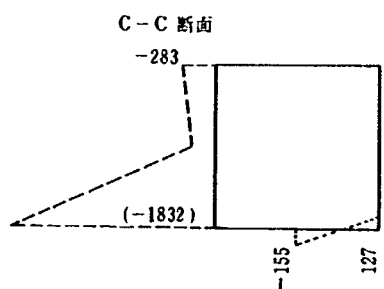
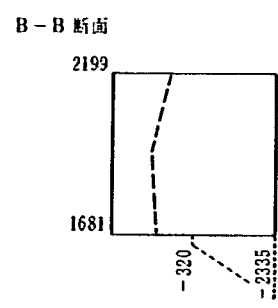
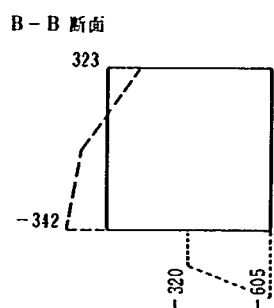
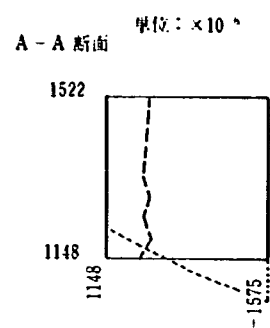
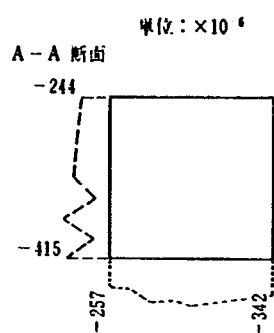
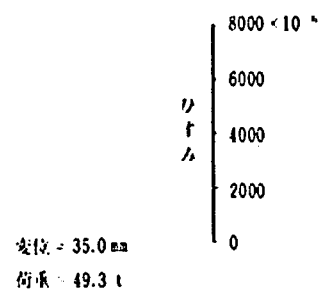
注: () 内は計測不良

図 3-13 動的載荷実験ひずみ分布その 2

降伏変位（負）入力後ひずみ分布



2 サイクル目（正）入力時ひずみ分布



注: () 内は計測不良

図 3-13 動的載荷実験ひずみ分布その 3

11サイクル目（負）入力後ひずみ分布

12サイクル目（正）入力時ひずみ分布

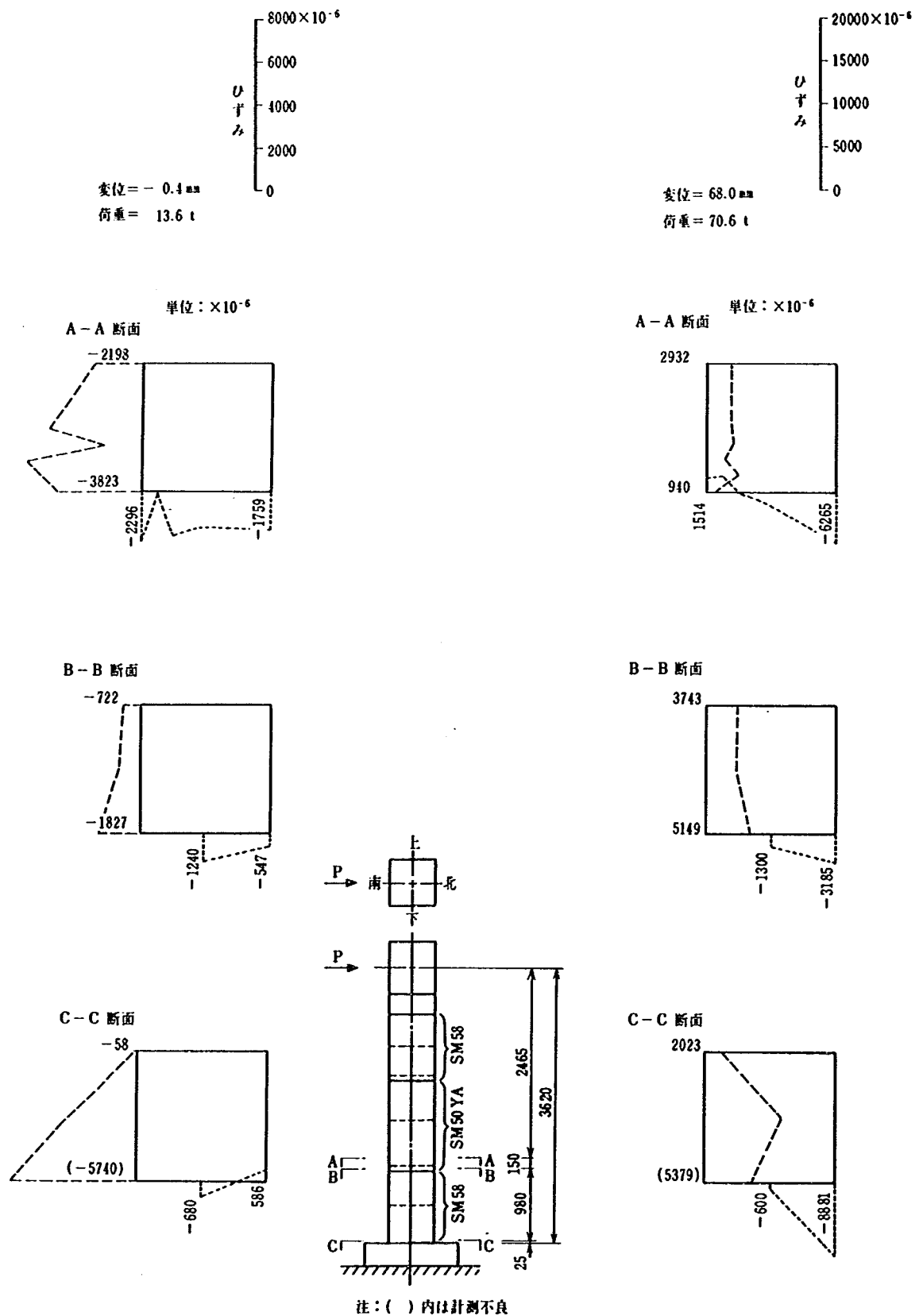
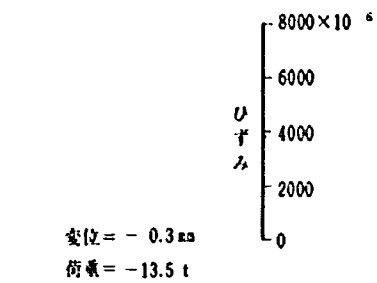
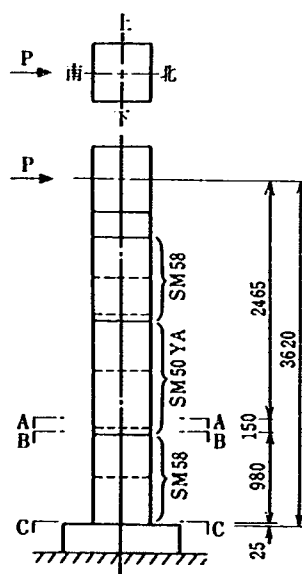
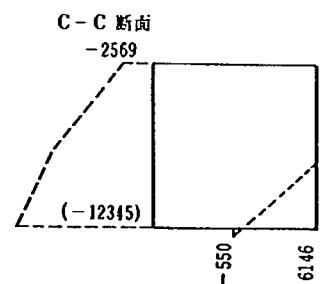
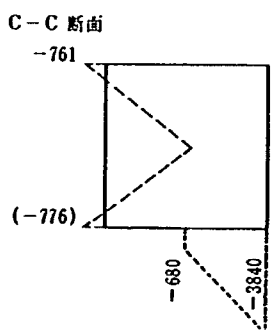
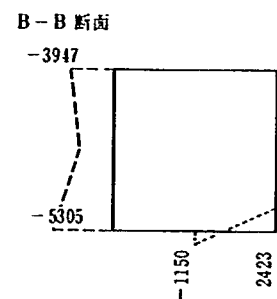
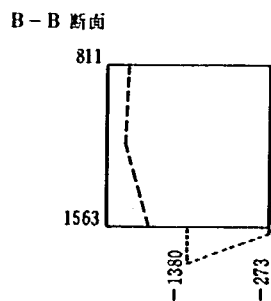
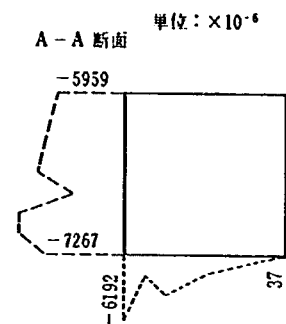
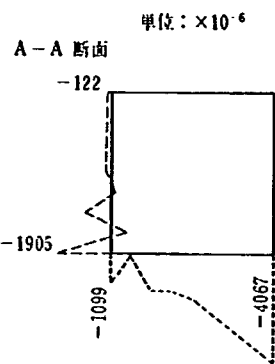
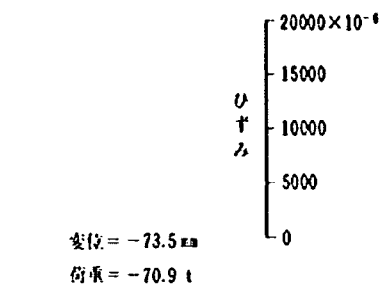


図 3-13 動的載荷実験ひずみ分布その 4

12サイクル目（正）入力後ひずみ分布



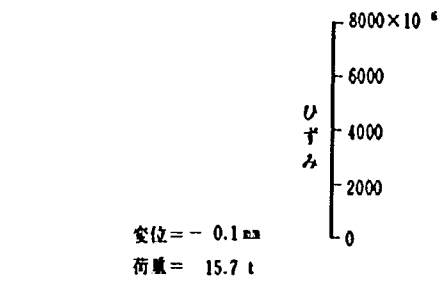
12サイクル目（負）入力時ひずみ分布



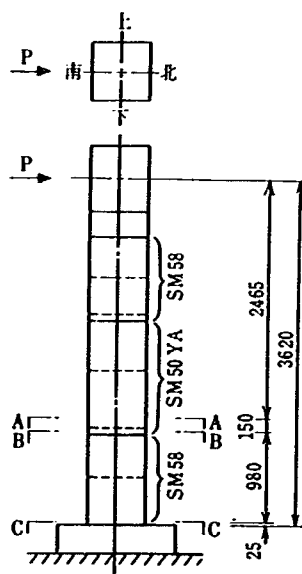
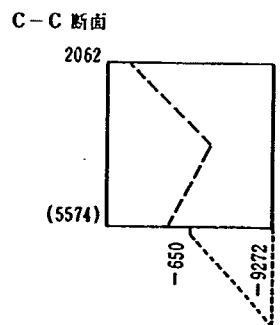
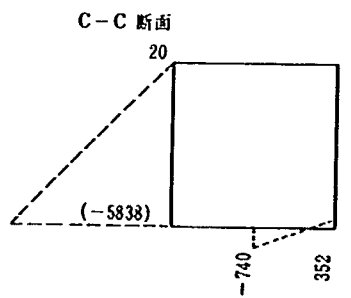
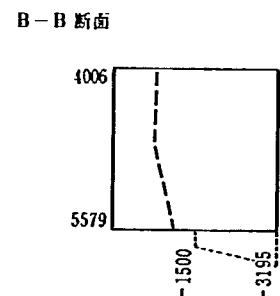
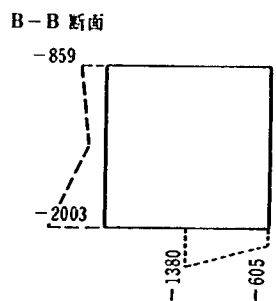
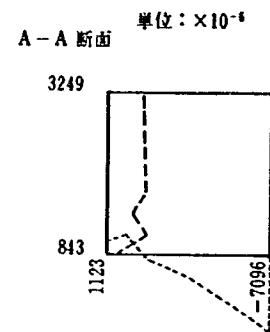
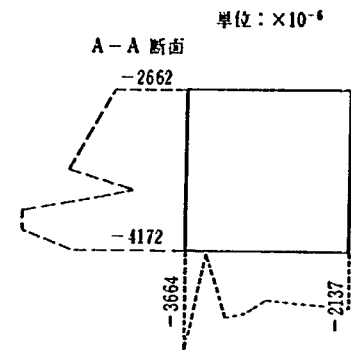
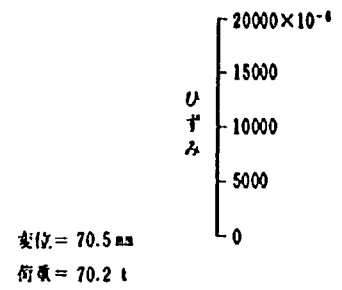
注: () 内は計測不良

図 3-13 動的載荷実験ひずみ分布その 5

12サイクル目（負）入力後ひずみ分布



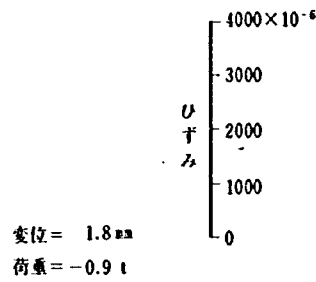
13サイクル目（正）入力時ひずみ分布



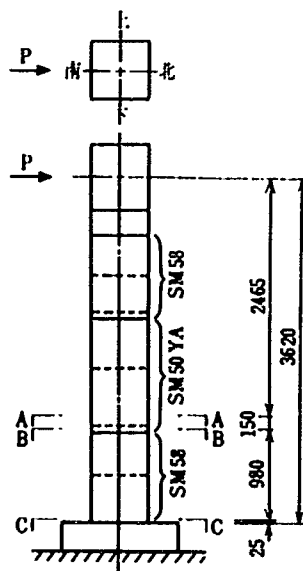
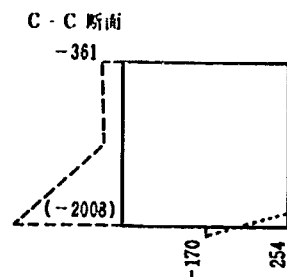
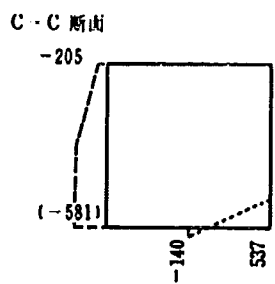
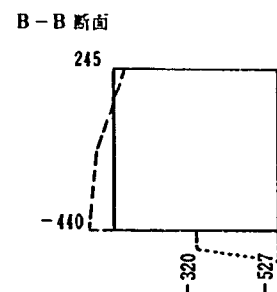
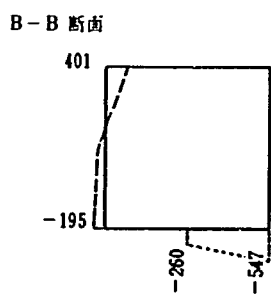
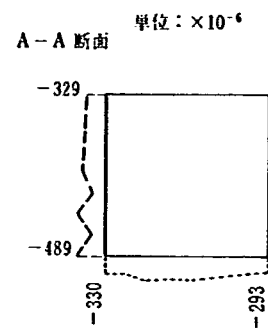
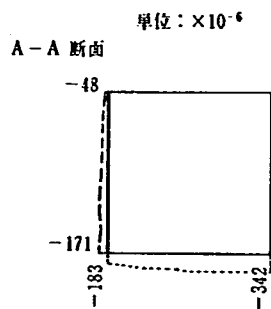
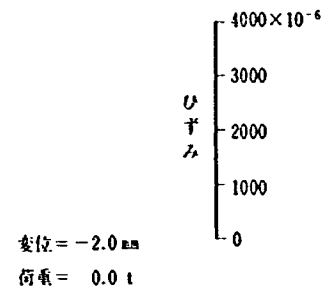
注: () 内は計測不良

図 3-13 動的載荷実験ひずみ分布その 6

降伏変位（正）入力後残留ひずみ分布



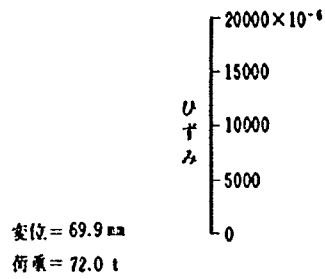
降伏変位（負）入力後残留ひずみ分布



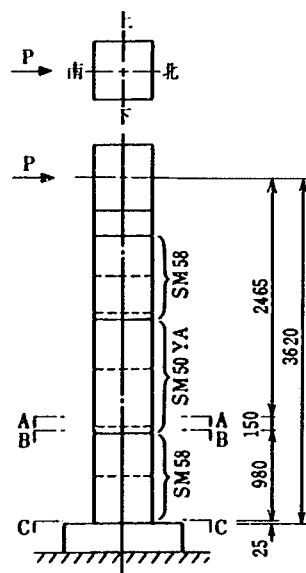
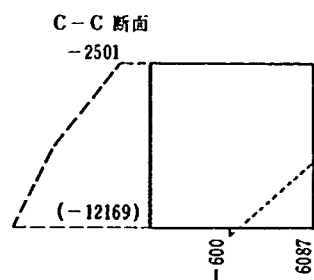
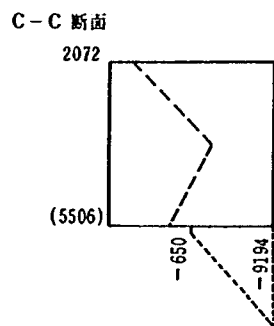
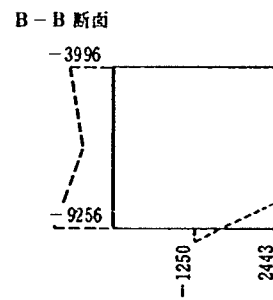
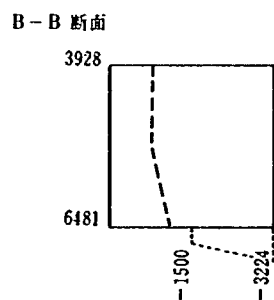
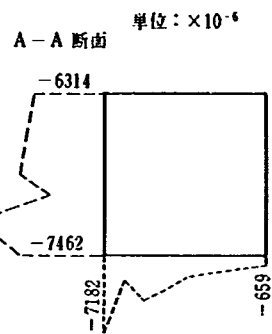
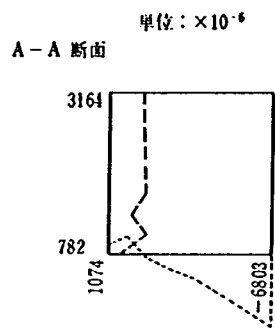
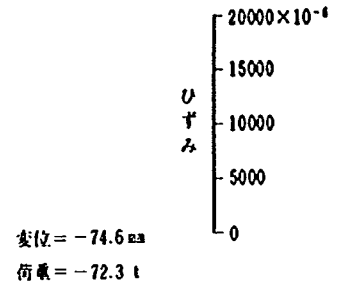
注: () 内は計測不良

図 3-13 動的載荷実験ひずみ分布その 7

終局耐力（正）（最大荷重）時ひずみ分布



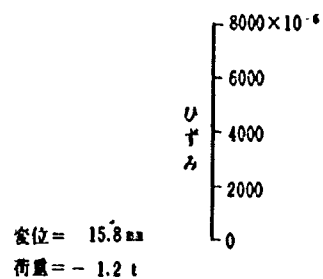
終局耐力（負）（最大荷重）時ひずみ分布



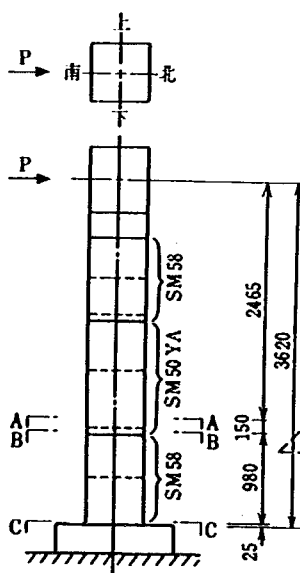
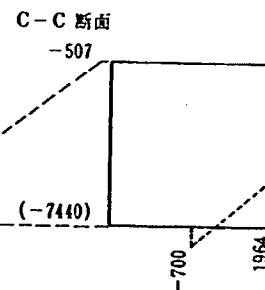
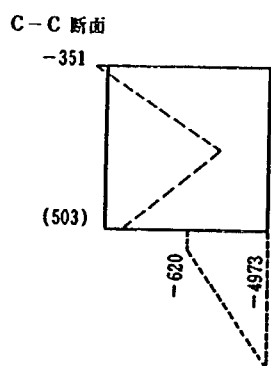
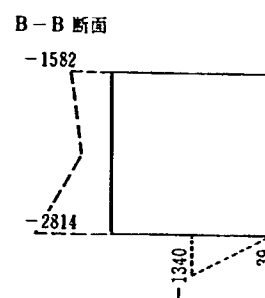
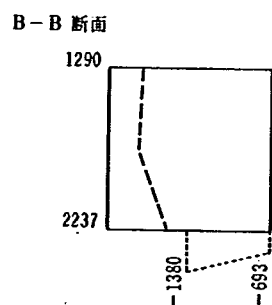
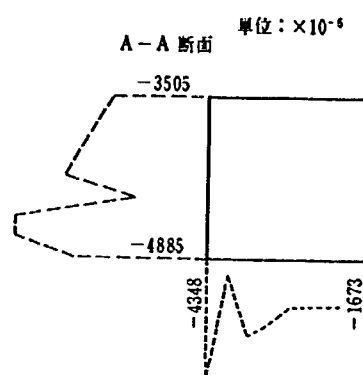
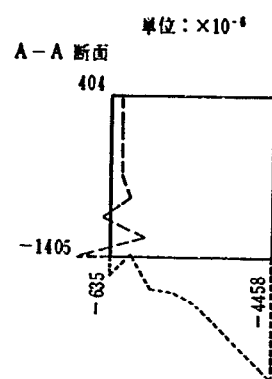
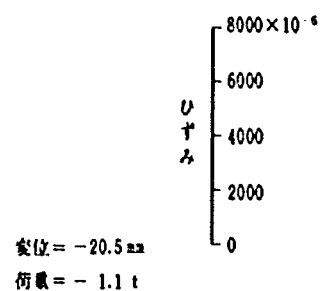
注: () 内は計測不良

図 3-13 動的載荷実験ひずみ分布その 8

終局耐力（正）（最大荷重）後残留ひずみ分布



終局耐力（負）（最大荷重）後残留ひずみ分布



注: () 内は計測不良

図 3-13 動的載荷実験ひずみその 9

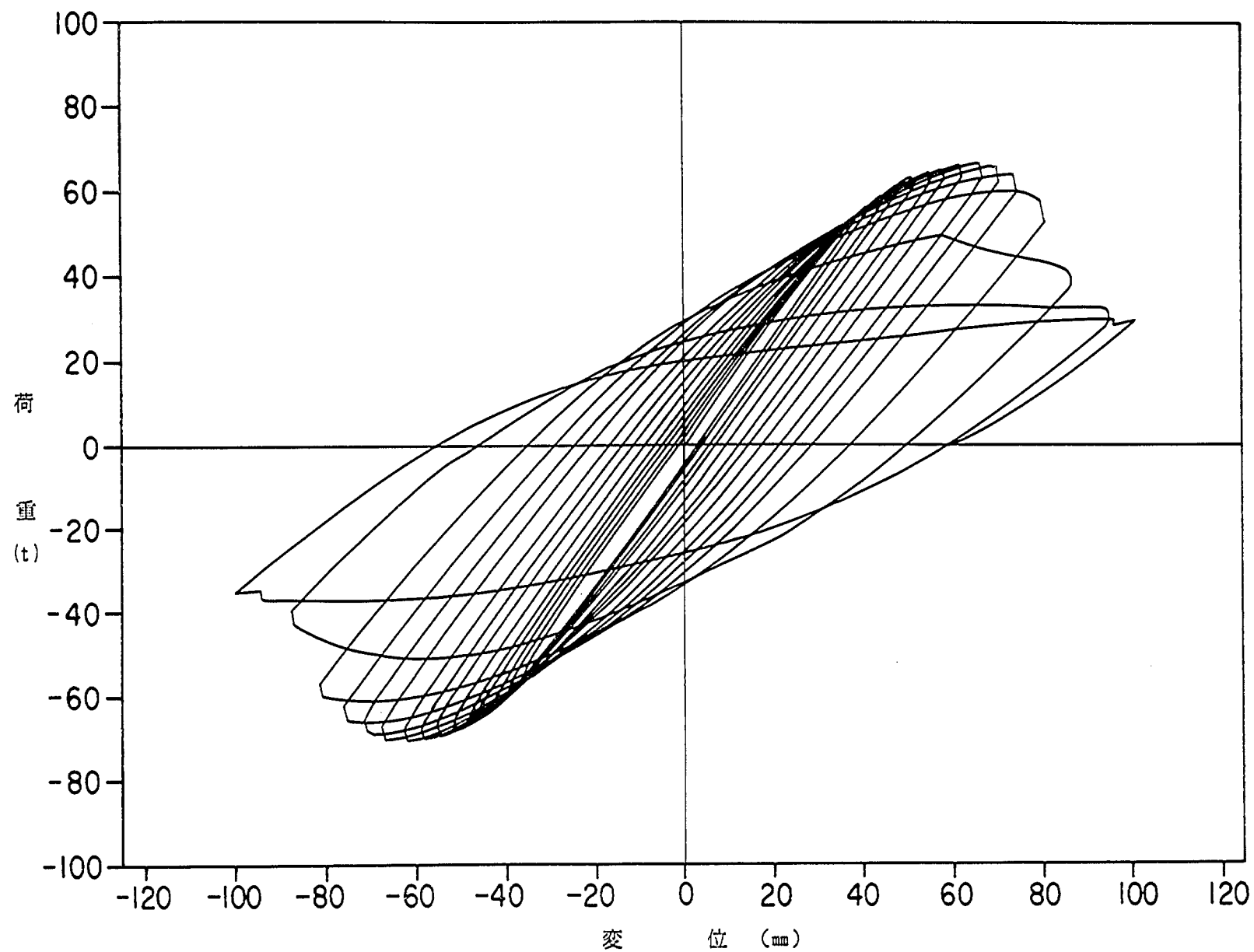


图 3-14 荷重—变位曲线（静的载荷实验）

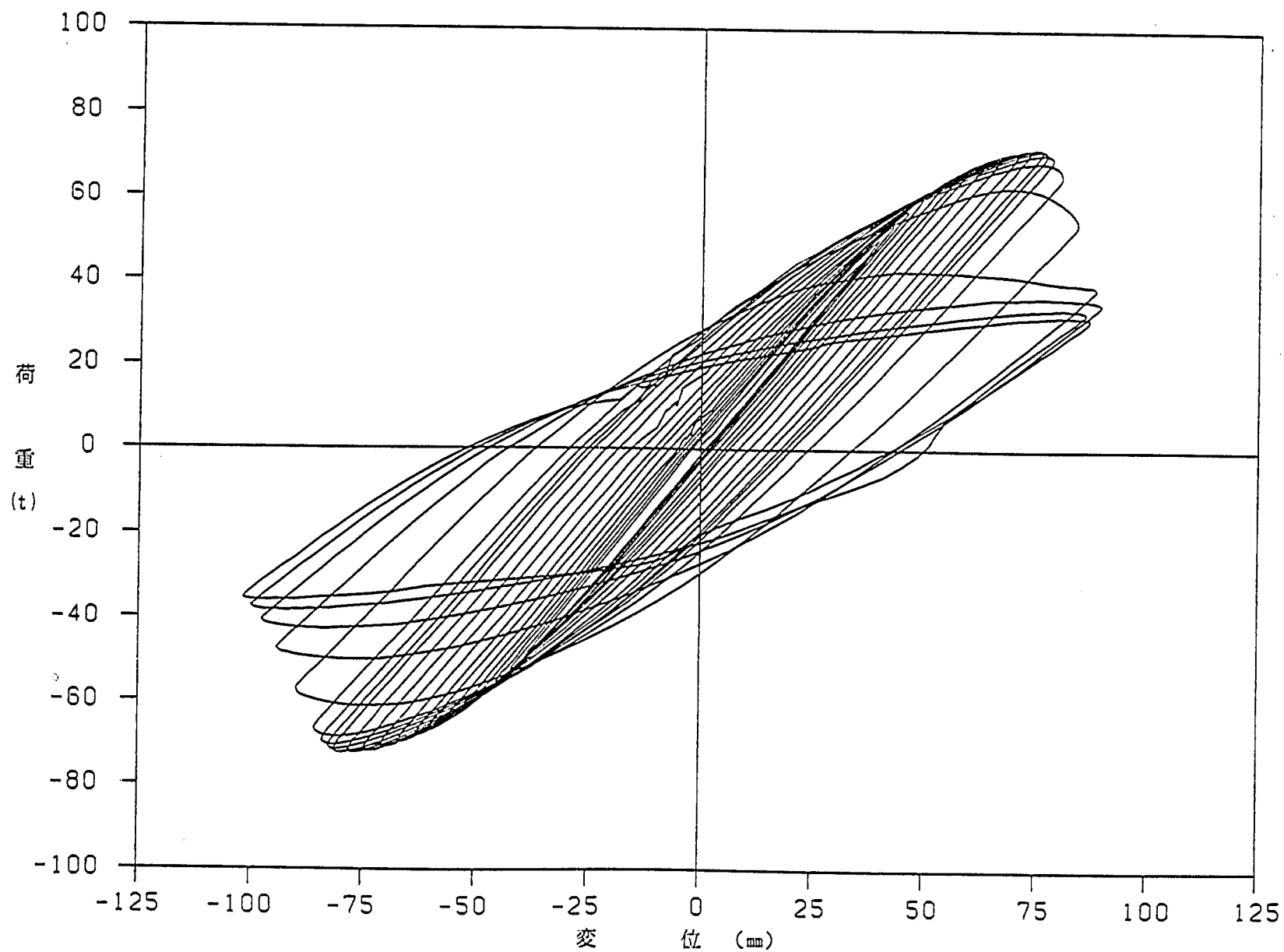


图 3-15 荷重—变位曲线 (動的载荷实验)

表 3 - 3 静的載荷実験による荷重, 変位測定結果

入 力 サイクル	荷 重 (t)	変 位 (mm)	荷 重 (t)	変 位 (mm)	残留変位(mm)
1	4 9. 1	3 4. 1	- 5 4. 2	- 3 4. 9	- 1. 0
2	5 3. 4	3 7. 4	- 5 7. 6	- 3 7. 8	- 2. 0
3	5 6. 7	4 0. 5	- 6 0. 8	- 4 1. 0	- 3. 5
4	5 9. 4	4 4. 0	- 6 3. 9	- 4 4. 3	- 5. 0
5	6 1. 6	4 7. 4	- 6 5. 9	- 4 7. 8	- 6. 0
6	6 3. 6	5 0. 9	- 6 7. 7	- 5 1. 3	- 8. 5
7	6 5. 0	5 6. 0	- 6 9. 1	- 5 5. 2	- 1 1. 0
8	6 6. 1	5 7. 8	- 7 0. 1	- 5 8. 9	- 1 3. 5
9	6 6. 6	6 1. 6	- 7 0. 2	- 6 2. 4	- 1 6. 5
10	6 6. 9	6 6. 1	- 6 9. 7	- 6 7. 1	- 2 0. 5
11	6 6. 4	7 0. 0	- 6 8. 6	- 7 1. 0	- 2 4. 5
12	6 3. 9	7 4. 1	- 6 5. 3	- 7 5. 4	- 2 9. 0
13	5 7. 2	7 9. 8	- 5 9. 3	- 8 0. 9	- 3 5. 5
14	4 1. 2	8 5. 5	- 4 2. 5	- 8 7. 2	-
15	3 1. 9	9 4. 4	- 3 6. 2	- 9 4. 5	- 5 5. 0
16	2 9. 6	9 5. 3	-	-	-

表 3 - 4 動的載荷実験による荷重, 変位測定結果

入 力 サイクル	荷 重 (t)	変 位 (mm)	荷 重 (t)	変 位 (mm)	残留変位 (mm)
1	4 5. 3	3 2. 5	- 4 9. 1	- 3 6. 0	- 2. 0
2	5 0. 2	3 5. 0	- 5 2. 2	- 3 9. 0	- 2. 5
3	5 3. 7	3 8. 0	- 5 5. 7	- 4 2. 0	- 3. 0
4	5 7. 3	4 1. 5	- 5 9. 0	- 4 5. 5	- 4. 0
5	6 0. 1	4 4. 5	- 6 1. 7	- 4 9. 0	- 5. 0
6	6 2. 8	4 8. 0	- 6 4. 3	- 5 1. 5	- 7. 0
7	6 5. 2	5 1. 0	- 6 6. 5	- 5 5. 5	- 8. 5
8	6 6. 7	5 3. 5	- 6 8. 1	- 5 8. 0	- 1 0. 5
9	6 8. 3	5 7. 0	- 6 9. 6	- 6 2. 0	- 1 3. 0
10	7 0. 0	6 1. 0	- 7 0. 7	- 6 6. 0	- 1 5. 5
11	7 0. 4	6 5. 0	- 7 1. 7	- 7 0. 0	- 1 8. 0
12	7 0. 8	6 8. 0	- 7 2. 1	- 7 3. 5	- 2 0. 5
13	7 1. 2	7 0. 5	- 7 2. 1	- 7 6. 5	- 2 3. 5
14	7 0. 6	7 2. 0	- 7 0. 8	- 7 8. 0	- 2 5. 0
15	6 9. 7	7 3. 0	- 6 9. 7	- 7 9. 5	- 2 7. 0
16	6 5. 9	7 5. 5	- 6 6. 4	- 8 1. 5	- 2 9. 0
17	5 4. 0	8 0. 0	- 5 7. 1	- 8 6. 0	- 3 6. 5
18	3 8. 5	8 5. 5	- 4 7. 3	- 9 1. 0	- 4 2. 5
19	3 5. 0	8 7. 0	- 4 0. 7	- 9 5. 0	- 4 7. 0
20	3 2. 3	8 9. 5	- 3 7. 2	- 9 7. 5	- 5 0. 0
21	3 1. 0	9 1. 0	- 3 5. 4	- 9 9. 5	- 5 2. 0

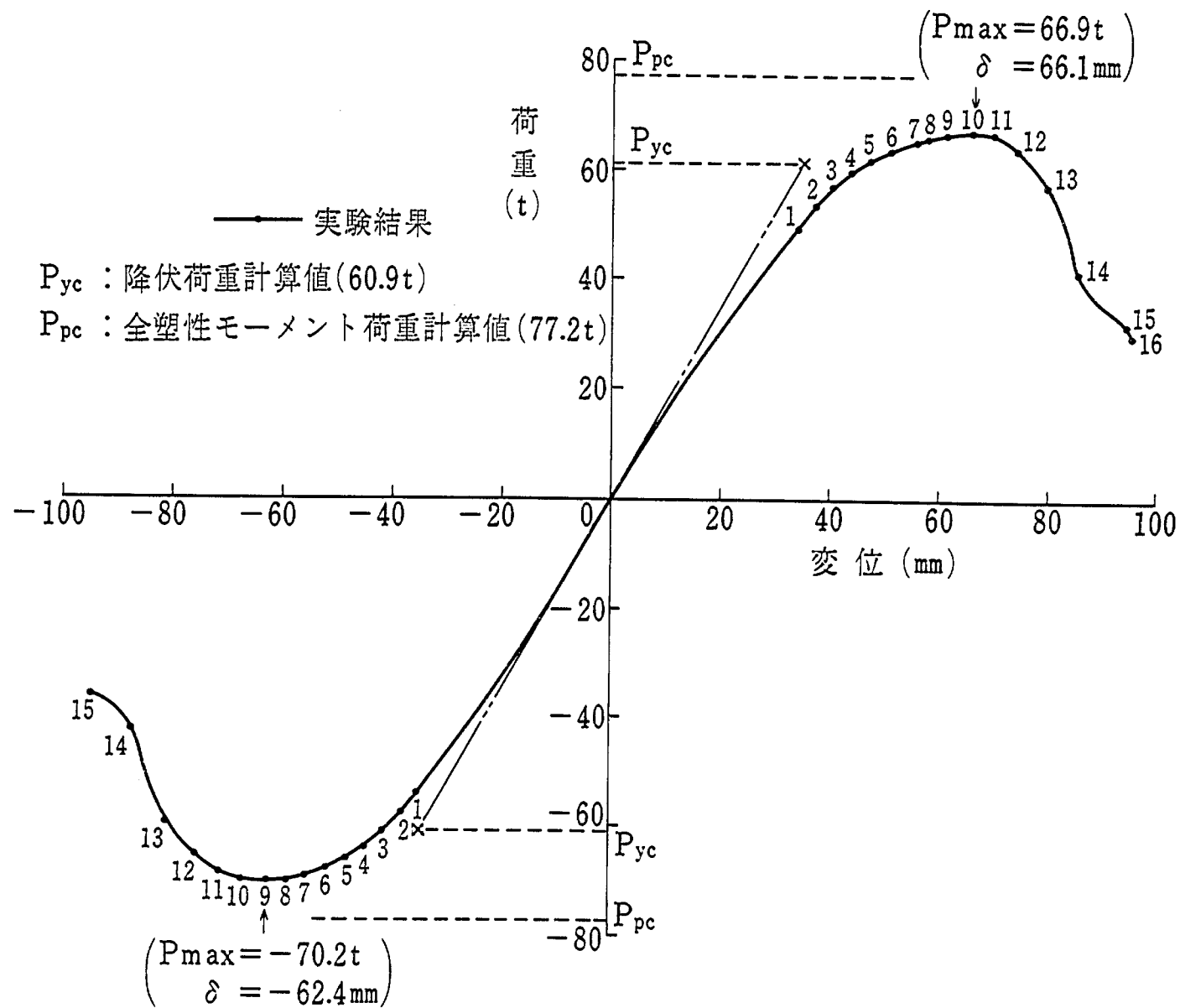


図 3-16 荷重—変位包絡線 (静的載荷実験)

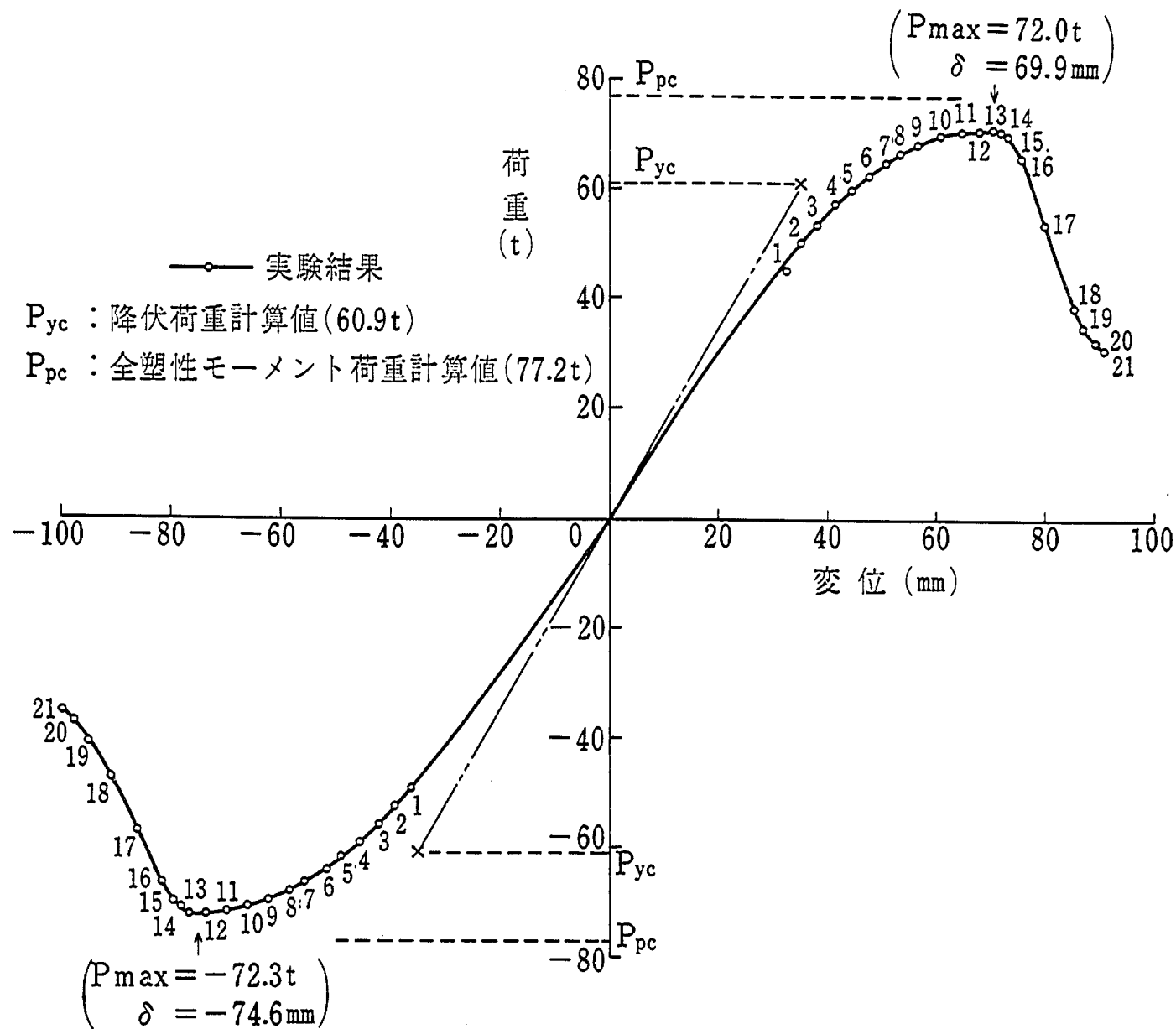


図 3-17 荷重—変位包絡線 (動的載荷実験)

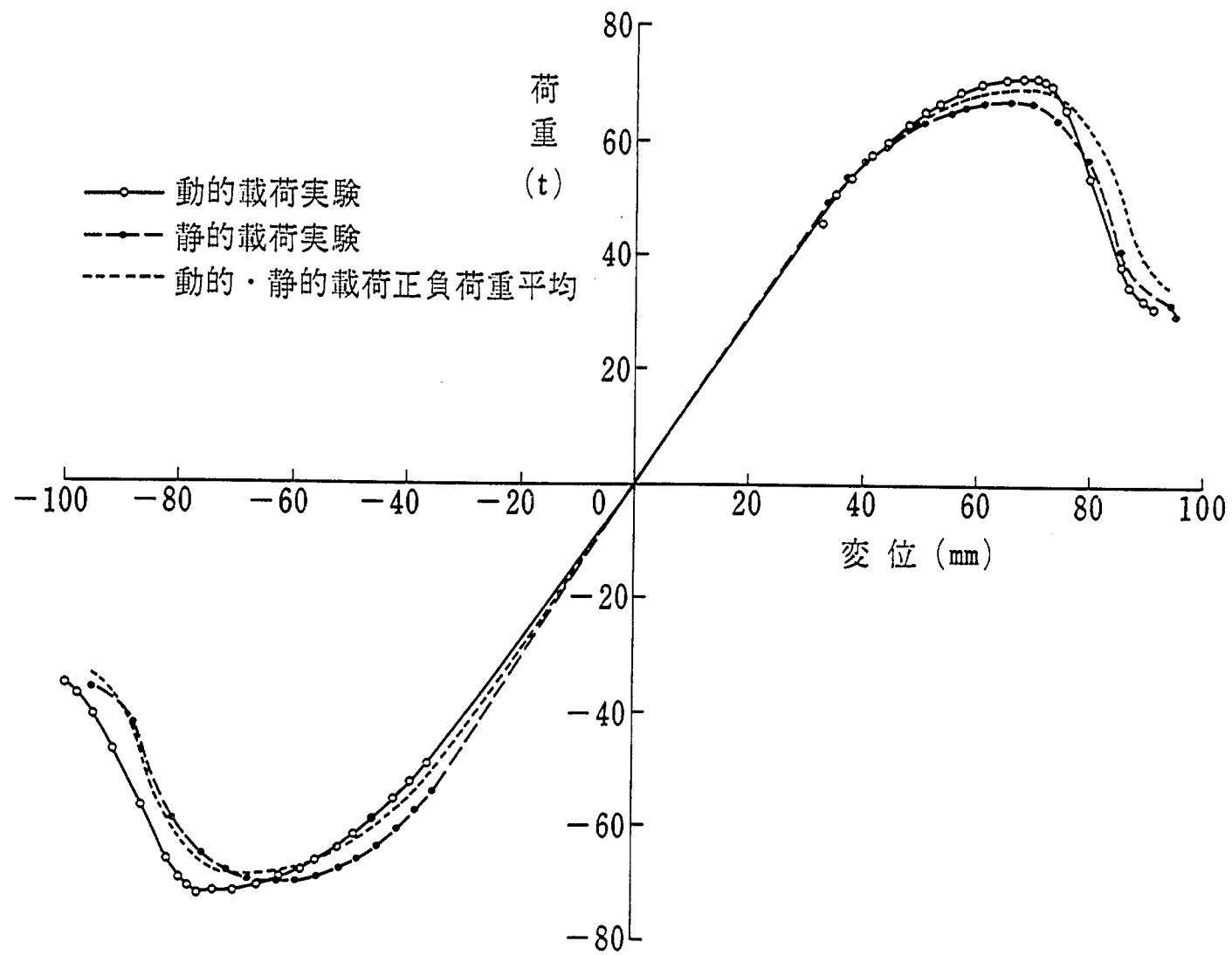


図 3-18 荷重—変位包絡線（静的，動的載荷実験の比較）

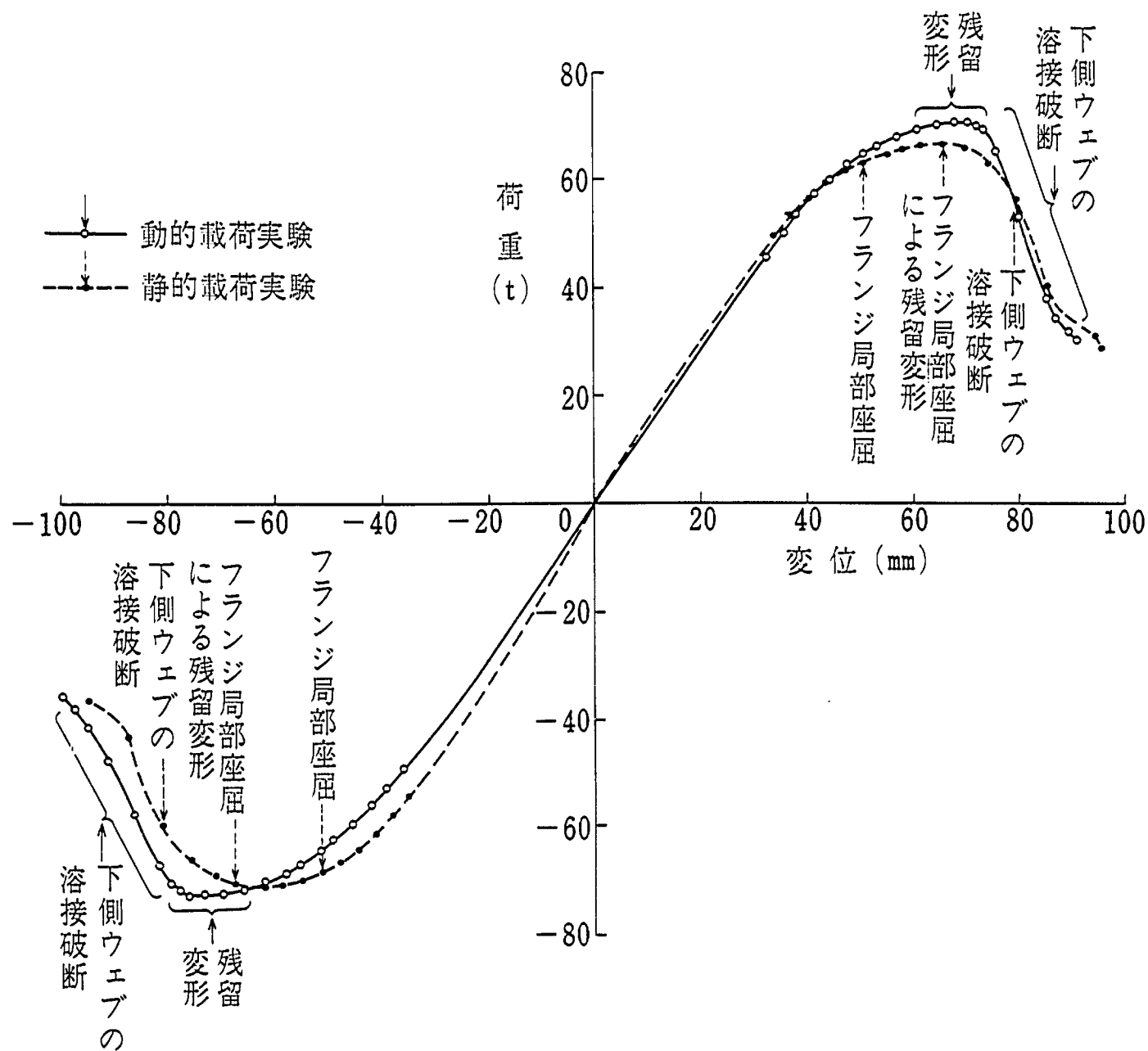


図 3-19 荷重—変位包絡線 (損傷状況と残留耐力)

表 3 - 5 鋼製橋脚模型の耐力, 変形性能
(残留ひずみを考慮した場合)

	静 的 載 荷	動 的 載 荷
降伏耐力 $P_y(t)$	4 1	4 1
終局耐力 $P_u^*(t)$	6 9	7 2
P_u / P_y	1.7	1.8
降伏変位 $\delta_y(mm)$	3 0	3 0
終局変位 $\delta_u^{**}(mm)$	8 7	9 0
じん性率 δ_u / δ_y	2.9	3.0

注: *終局耐力 P_u は実験時の最大荷重

**終局変位 δ_u は耐力が降伏耐力まで低下する時の変位

表 3 - 6 鋼製橋脚模型の耐力, 変形性能
(残留ひずみがなかったものとした場合)

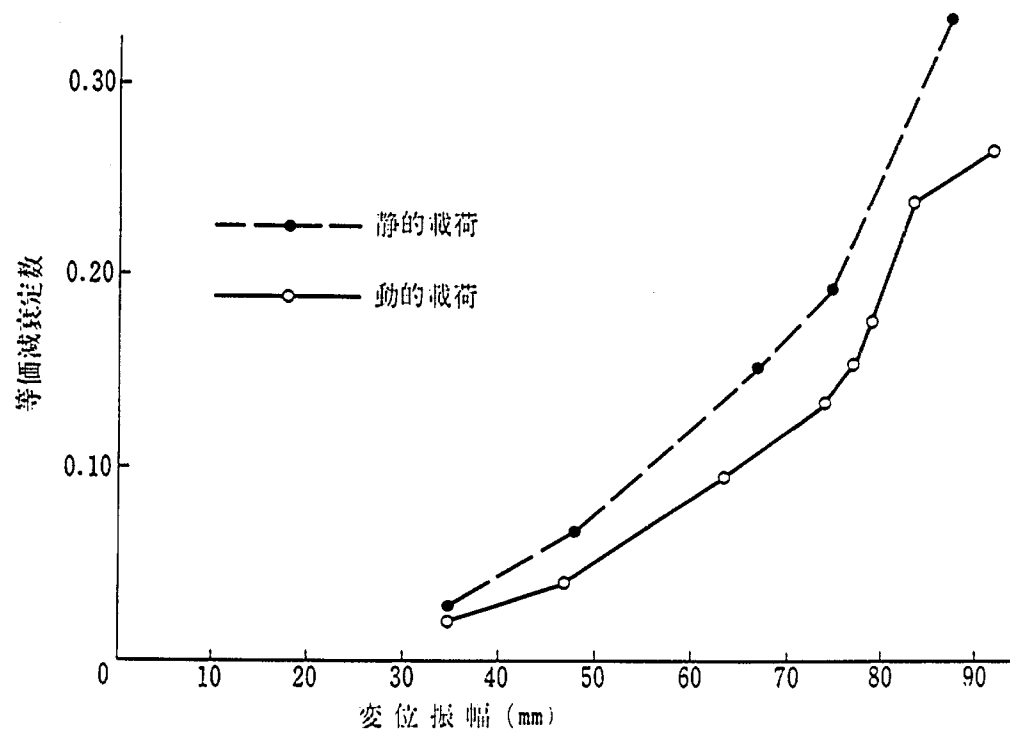
	静 的 載 荷	動 的 載 荷
降伏耐力 $P_y(t)$	5 7	5 7
終局耐力 $P_u^*(t)$	6 9	7 2
P_u / P_y	1.2	1.3
降伏変位 $\delta_y(mm)$	3 9	3 9
終局変位 $\delta_u^{**}(mm)$	8 1	8 2
じん性率 δ_u / δ_y	2.1	2.1

注: *終局耐力 P_u は実験時の最大荷重

**終局変位 δ_u は耐力が降伏耐力まで低下する時の変位

表 3 - 7 履歴曲線から求めた等価減衰定数

載荷条件	入力サイクル	変位振幅 (正負平均) (mm)	等価減衰定数
静的 載荷	1	3 4. 5	0. 0 2 8
	5	4 7. 6	0. 0 6 6
	1 0	6 6. 6	0. 1 5 2
	1 2	7 4. 8	0. 1 9 2
	1 4	8 6. 4	0. 3 3 9
動的 載荷	1	3 4. 3	0. 0 2 0
	5	4 6. 8	0. 0 4 1
	1 0	6 3. 5	0. 0 9 7
	1 3	7 3. 5	0. 1 3 6
	1 5	7 6. 3	0. 1 5 4
	1 6	7 8. 5	0. 1 7 6
	1 7	8 3. 0	0. 2 4 1
	1 9	9 1. 0	0. 2 6 9



$$\text{等価減衰定数 } h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\text{EBFDE (履歴曲線で囲まれた面積)}}{(\angle OBA + \angle ODC)}$$

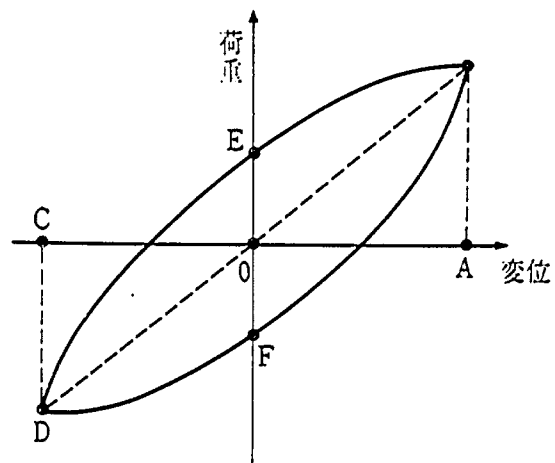


図 3-20 履歴曲線から求めた等価減衰定数

4. ま と め

鋼製橋脚模型の静的および動的正負交番荷重実験により、以下の結論が得られた。

- (1) 鋼製橋脚模型は、柱頭部への正負交番水平力荷重によって、圧縮フランジの降伏、圧縮フランジの局部座屈、引張フランジの降伏および圧縮フランジの局部座屈進行による変形増大、溶接部の破断へと損傷が進展して破壊に至った。静的および動的荷重実験ともに同様の損傷モードを示した。
- (2) 残留変形が現れるまでは耐力の低下はなく、局部座屈による残留変形が目視により確認できる程度（ウェブ間隔の1/100程度の面外たわみ）になると終局耐力まで達して耐力が低下し始め、それ以上の残留変形が現れると耐力が著しく低下した。
- (3) 終局耐力は、局部座屈によって支配されたが、降伏耐力（橋脚製作時の残留ひずみがないものとして推定）に比べて2～3割大きな値であった。
- (4) じん性率（終局変位 δ_u / 降伏変位 δ_y ）は2～3程度の値であった（橋脚製作時の残留ひずみを考慮した場合は3.0、残留ひずみがなかったものとした場合は2.1）。
- (5) 耐力および変形性能に関しては、静的および動的荷重実験ともにほぼ同様の値となったが、動的荷重の方が耐力、じん性率ともにやや大きな値となる傾向が見られた。
- (6) 履歴曲線から求めた等価減衰定数は、降伏時で0.02、終局耐力時で0.13、終局変位時で0.27（それぞれ動的荷重の場合）であり、入力変位が大きくなるにしたがって増加した。等価減衰定数の値は、静的荷重の方が動的荷重の場合よりもやや大きくなる傾向が見られた。

謝

辞

本実験は首都高速道路公団との共同研究「道路橋橋脚の動的耐力に関する研究」の一環として実施したものである。本実験によって鋼製橋脚の地震時挙動に関する貴重なデータが得られ、本資料にまとめて報告することができたのは、首都高速道路公団工務部設計技術課の矢作枢課長をはじめ、秋元泰輔氏、中島拓氏、長谷川和夫氏および桜井順氏の御努力によるところが大きい。最後にこれらの方々に深い感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 首都高速道路公団：鋼構造物設計資料作成（その2）震災時における鋼構造物の検討報告書，昭和57年
- 2) 後藤尚男 他：くり返し曲げ荷重下における構造用鋼材の破壊過程に関する一考察，京大防災研究所年報第17号B，昭和49年4月
- 3) 建設省土木研究所：新耐震設計法（案），土木研究所資料第1185号，昭和52年3月
- 4) 栗林栄一 他：橋脚模型反復載荷実験，土木研究所資料第1730号，昭和56年10月
- 5) 萩原良二，小山達彦：鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に関する交番載荷実験，土木技術資料25-1，昭和58年1月
- 6) 岩崎敏男，萩原良二，小山達彦：鉄筋コンクリート橋脚の動的耐力に関する実験的研究，第6回日本地震工学シンポジウム（1982），1982年10月，pp. 785～792
- 7) 岩崎敏男 他：鉄筋コンクリート橋脚の動的挙動に関する模型実験，日米天然会議，耐風耐震構造専門部会，第16回合同部会，1984年5月
- 8) 太田実：単一柱式鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計法に関する研究，土木研究所資料第1513号，昭和54年7月
- 9) 町田篤彦，睦好宏史：鉄筋コンクリート橋脚モデルの動的特性に関する研究，第6回日本地震工学シンポジウム（1982），1982年10月，pp. 793～800
- 10) 奥村敏恵 他：箱型断面柱の局部座屈強度，土木学会論文報告集第205号，昭和47年9月
- 11) 長谷川彰夫 他：補剛された板要素の座屈強度に関する二，三の考察，土木学会論文報告集第232号，昭和49年12月
- 12) 吉田博：H型钢柱の局部座屈と曲げ座屈の連成座屈強度，土木学会論文報告集243号，昭和50年11月
- 13) 宇佐美勉：補剛材つき板の弾性ならびに非弾性圧縮座屈強度，土木学会論文報告集第228号，昭和49年8月
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，昭和55年2月
- 15) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，昭和54年2月
- 16) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，昭和57年12月

鋼製橋脚模型正負交番載荷実験

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第2147号

マイクロフィルム第 号

昭和59年3月(1984年)

岩崎敏男, 萩原良二, 長谷川金二, 小山達彦, 吉田武史

キーワード: 鋼製橋脚, 耐震性, 模型実験, 高架橋, 変形性能

要 旨

鋼製橋脚模型の正負交番載荷実験を行い, 鋼製橋脚の地震荷重による損傷モード, 地震時の耐力, 変形性能などについて調査した結果をまとめたものである。

○

郵便はがき

305-□□

40円切手
をはって
下さい。

建設省土木研究所
耐震研究室 御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. 036

No. 036

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2147号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

