

土 木 研 究 所 資 料

鋼製橋脚模型正負交番載荷実験

——(その2) 補修方法の検討——

昭和63年 2 月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

Copyright © (1988) 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、複写は、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。

鋼製橋脚模型正負交番載荷実験

——(その2) 補修方法の検討——

耐震研究室 室長 川島 一彦

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採用されている鋼製橋脚には、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少なく、地震荷重に対する鋼製橋脚の耐力、変形性能は十分解明されていない。さらに被災した場合の補修方法に関してもRC橋脚における樹脂注入あるいはRC巻立て等に相当する復旧工法は確立されていない。

本文は、鋼製橋脚の正負交番載荷実験を行い、鋼製橋脚の補修方法ならびに補修効果を中心として、鋼製橋脚の地震荷重による損傷モード、耐力、変形性能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、補修、変形性能

目 次

1. 概 説	1
2. 実験に用いた供試体及び実験方法	2
2.1 鋼製橋脚模型	2
2.2 載荷状況	7
2.3 実験ケース	9
2.4 計 測	12
2.5 補修方法	16
3. 実験結果	20
3.1 実 験 1	20
3.2 実験 2 及び実験 2R	45
3.3 実験 3 及び実験 3R	70
3.4 実験 4 及び実験 4R	93
4. ま と め	111

1. 概 説

鋼製橋脚は都市内高速道路に多数採用されているが、地震による顕著な被害を受けていない。このため、地震時の被災パターンなどに関する実測資料も得られていない。また、鋼材はコンクリートに比べて延性に富んだ材料であるため、鋼製橋脚は鉄筋コンクリート橋脚よりもじん性が大きいと一般に考えられており、鋼製橋脚の地震時の挙動に関する実験例は少ない。鋼製橋脚は常時には主に軸力を受ける柱部材であるが、地震時には、軸力と曲げを同時に受けるはり柱部材となり、さらに曲げは正負交番で載荷されるため、座屈現象は非常に複雑なものになる。したがって、鋼製橋脚の地震時耐力および変形性能を解明するためには、実験に基づく研究が必要とされている。また、地震により被害を受けた場合に鉄筋コンクリート橋脚では樹脂注入あるいは鉄筋コンクリート巻立て等の信頼できる補修方法が確立されているが、鋼製橋脚では未だ十分な調査が行われておらず、補修方法に関するデータは無いに等しい。

そこで本資料では、鋼製橋脚模型4体を用いて行った正負交番載荷実験の結果およびこれより得られた鋼製橋脚の地震時耐力、変形性能および補修方法についての知見を報告する。

なお、本研究の研究体制は以下の通りである。

建設省土木研究所 耐震研究室 室長 川島 一彦

研究員 長谷川金二

小山 達彦（現、関東地方建設局二瀬ダム管理所）

吉田 武史

首都高速道路公団 工務部設計技術課 課長 三橋 晃司（現、工務部工務企画課課長）

中島 拓（現、東京保全部設計課課長）

和田 克哉（現、神奈川建設局特殊設計課課長）

和泉公比古（現、第二建設部設計課班長）

小坂 寛巳（現、第三建設部設計課課長補佐）

桜井 順（現、神奈川建設局横浜港横断橋工事
事務所）

阪神高速道路公団 工務部設計課 課長 江見 晋（現、工務部次長）

水元 義久（現、神戸建設部設計課課長）

北沢 正彦（現、神戸建設部設計課課長補佐）

石崎 浩（現、工務部工務第一課工事企画係長）

川北 司郎（現、大阪第三建設部新淀川工事事務
所）

2. 実験に用いた供試体及び実験方法

2.1 鋼製橋脚模型

実験に用いた模型（原形）は図2-1に示すように3径間連続曲線箱桁橋の固定支承（死荷重反力1.642tf）を有する鋼製門形ラーメン橋脚の柱部分の $\frac{1}{3}$ 縮小模型である。同一寸法の模型を計4体製作し、このうち3体については載荷実験後に補修を行い、その後再載荷を行った。補修方法については2.5に示す。なお、実験での載荷方向は橋軸方向であり、図2-2に示す状態を想定して行った。

模型（原形）は図2-3に示すように柱とベースプレートから構成されており、柱本体は縦リブおよびダイヤフラムで補剛されている。柱下端から載荷中央点までの柱高さは3.62mであり、柱断面は $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ の箱型断面である。柱断面は上部、中間、下部の3区間に分かれており、使用鋼材は実物と同様に上部及び下部区間ではSM58、中間区間ではSM50Yである。また、柱全体に上部工からの死荷重及び橋脚自重に相当する軸力を柱内部に設置したSEEEケーブルにより導入した。

模型の形状、寸法および溶接方法は、できる限り実物との相似性を満足するように配慮したが、実物と模型の相違点を示すと以下ようになる。

- (1) 市販されている鋼材を使用する関係から、板厚は実物の $\frac{1}{3}$ 縮小寸法から要求される厚さに比べて表2-1に示すように若干異なっている。
- (2) すみ肉溶接の脚長は実物の $\frac{1}{3}$ とすると2mmとなるが、施工性を考慮して模型では最小3mmとした。
- (3) 箱形断面を形成する鋼板4枚のうちウェブに相当する1枚は図2-4に示すように最後に溶接することとなるが、実物のように橋脚の内側からの溶接ができないため、外側から溶接した。これに伴ない、以下の処理を行った。
 - a) 最後に溶接する鋼板は図2-4に示したようにダイヤフラムと溶接するために各ダイヤフラム位置で切断されており、ここでも外側からすみ肉溶接されている。
 - b) 外側からの溶接部が実験時に弱点とならないように溶接部には裏当て金を設けて全断面溶け込み溶接とした。
 - c) 最後に溶接される鋼板を補剛している縦リブもダイヤフラムの位置で不連続となっている。
- (4) ベースプレート部の一部では両面すみ肉溶接ができない箇所があった。この場合には全断面溶け込み溶接とした。
- (5) ダイヤフラムのスカラップ部と縦リブは溶接しないものとした。
- (6) 実物では柱下端から5mの高さまで中詰めコンクリートが打設されているが、本実験では打設しなかった。
- (7) 柱頭部の寸法はアンカーボルトにより載荷装置と連結するため $\frac{1}{3}$ 縮小寸法に比べて大きくした。また、アンカーボルトを締め付けた際に柱頭部が変形しないよう、頭部にはコンクリートの中詰めした。

表2-2は模型に使用した鋼材の材料試験から得たヤング係数、降伏応力および降伏ひずみを示

したものである。また、表 2-3 は表 2-2 の値を用いて計算した模型の降伏荷重、降伏変位および最大荷重（全塑性モーメントに達するときの荷重）を示したものである。ただし、補修後の強度等は変状による柱本体の耐力低下を考慮せず全断面有効と考えて計算をした結果を示したものである。

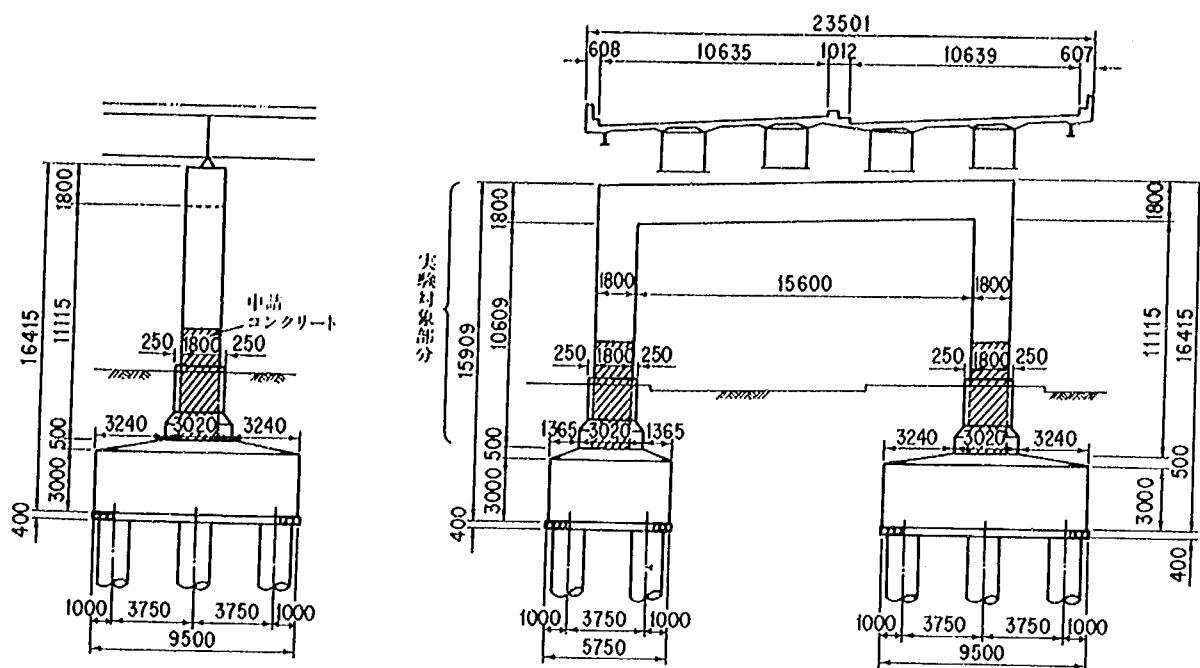


図 2 - 1 実橋鋼製橋脚の諸元

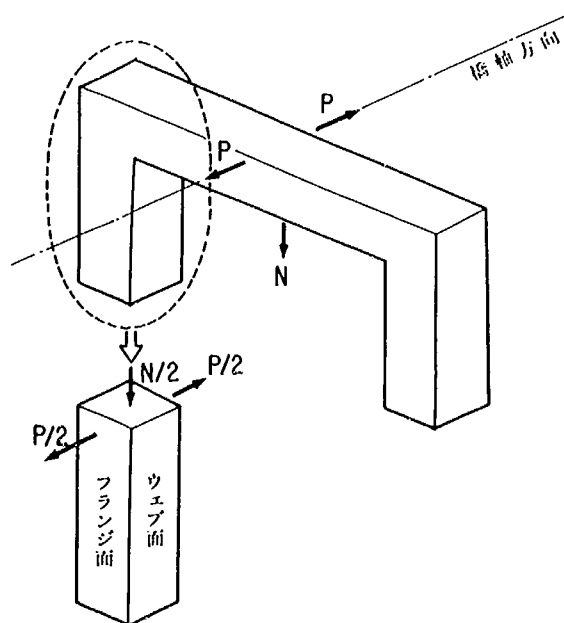


図 2 - 2 想定載荷状況

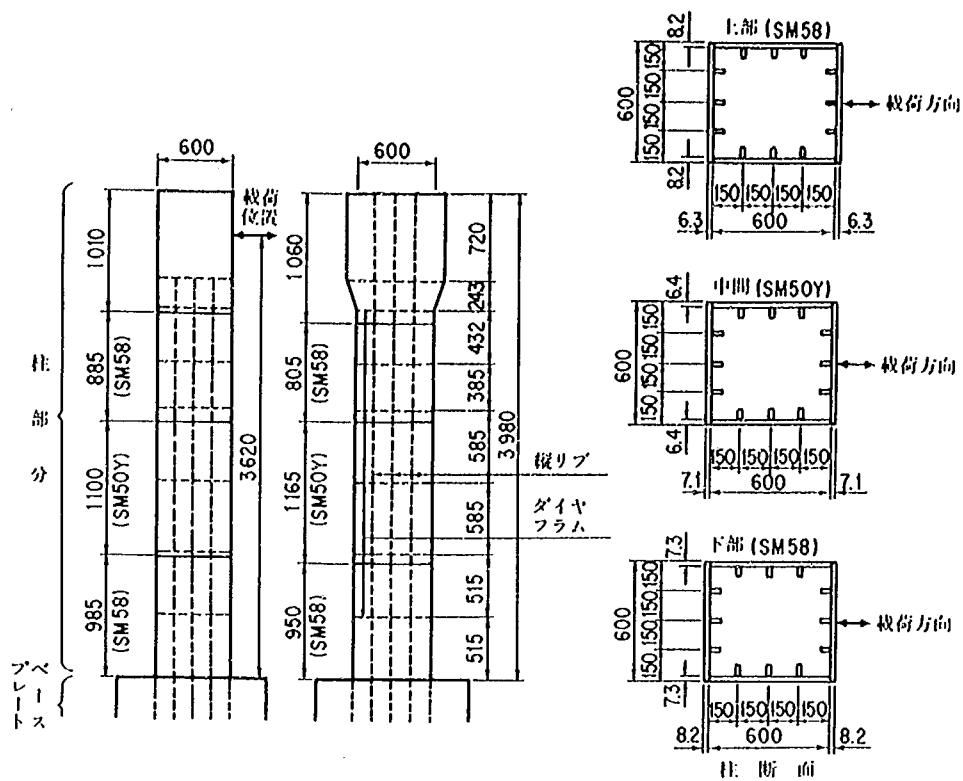


図 2-3 鋼製橋脚模型の諸元

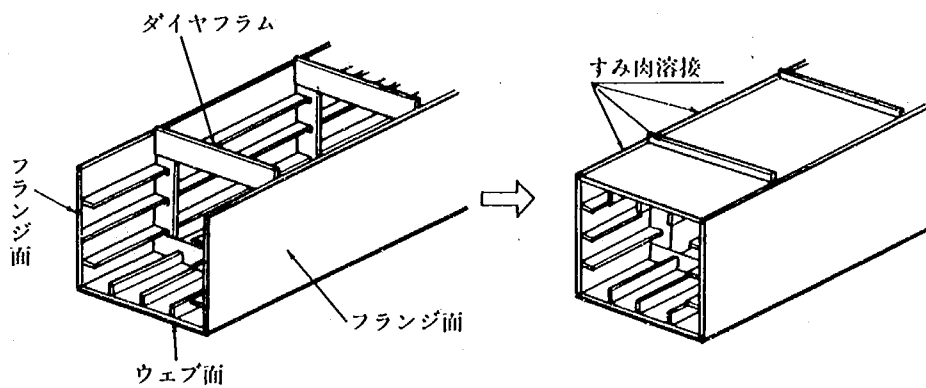


図 2-4 模型製作手順

表 2-1 1/3の縮小率から要求される寸法と供試体寸法 (mm)

		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 × 7.1
	ウェブ寸法 $b_w \times t_w$	600 × 5.0	600 × 6.4
	リブ寸法 $b_r \times t_r$	60 × 5.3	50 × 6.4
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 × 7.3
	リブ寸法 $b_r \times t_r$	60 × 5.3	50 × 6.3

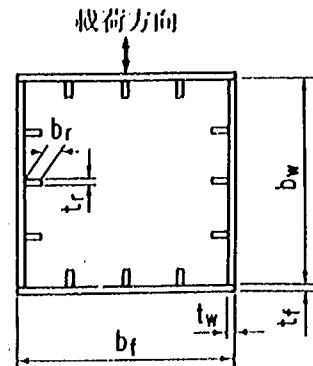


表 2-2 使用材料の特性

鋼 種	板 厚 t (mm)	ヤング係数 E (kg/cm ²)	降伏応力 σ_y (kg/cm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)	使 用 位 置
SM58	8	2.16×10^6	6460	3000	上部断面ウェブおよび下部断面フランジ
	7	2.14×10^6	6050	2830	下部断面ウェブ
	6	2.13×10^6	6340	2980	上部断面フランジ, 上部および下部断面縦リブ
SM50Y	7	2.01×10^6	3700	1840	中間部断面フランジ
	6	2.10×10^6	3710	1770	中間部断面ウェブ, 中間部断面縦リブ
SM58	13	2.12×10^6	5600	2640	補剛板下部断面フランジおよび縦リブ (供試体②)
	13	2.11×10^6	5780	2740	補剛板下部断面フランジおよび縦リブ (供試体③)
SM50Y	7	2.15×10^6	4080	1900	補剛板中間部断面フランジ (供試体②及び③)
	6	2.11×10^6	4150	1970	補剛板中間部断面ウェブおよび縦リブ (供試体②), 当て板 (供試体④)
	6	2.17×10^6	5050	2330	補剛板中間部断面ウェブおよび縦リブ (供試体③)

表 2-3 計算により求めた模型橋脚の降伏耐力, 変位および最大耐力

供 試 体 No	補 修 状 況	降 伏 耐 力 P_y (ton)	降 伏 変 位 δ_y (cm)	最 大 耐 力 P_{max} (ton)
供試体①, ②, ③, ④	—	47	2.8	62
供試体 ②	補剛板による補修後	125	3.4	137
供試体 ③	同 上	126	3.4	144
供試体 ④	当て板による補修後	76	3.6	79

2.2 載荷状況

鋼製橋脚模型は全長が約4mあり、実物のように立ったままの状態では部材耐震強度実験施設で実験を行うことができないため図2-5および写真2-1に示すように実験ピット側壁に横向きに設置して実験を行った。模型はアンカーボルトによってベースプレートが架台に連結され、架台を介して反力壁に水平に固定された。載荷装置は柱頭部に取り付け、橋軸方向（ラーメン面外方向）の地震荷重を想定して水平力を作用させた。橋軸方向の地震時水平力は本来は脊位置（上部構造慣性力作用位置）に作用するが、本実験ではラーメン橋脚の横梁中心位置に作用させることとした。また、上部構造死荷重反力および橋脚自重に相当する軸力（ $N=87.7\text{tf}$ ）を柱内部に設置したSEEケーブルにより与えた。ただし、ラーメン橋脚の柱部分には上部構造の死荷重反力によるラーメン面内の曲げモーメントが作用しているが、本実験では、これを無視している。

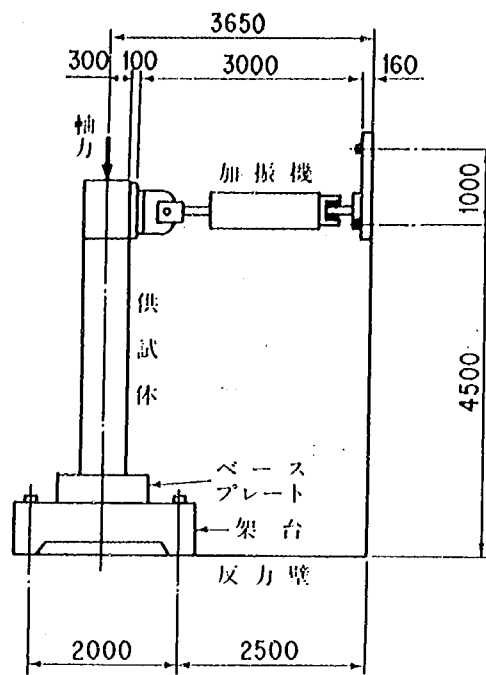


図 2 - 5 実験の状況

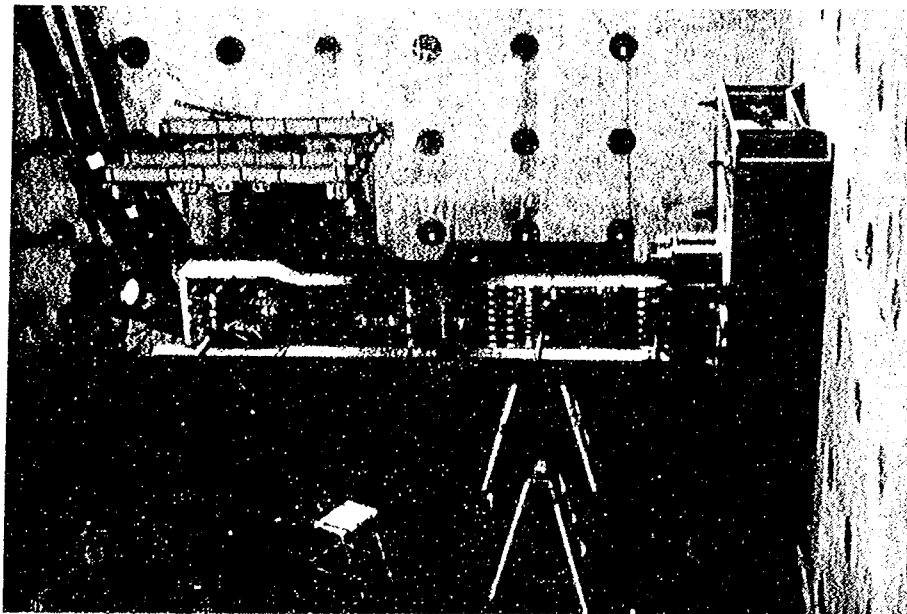


写真 2 - 1 供試体設置状況

2.3 実験ケース

鋼製橋脚の地震時耐力及び変形性能を明らかにするため、および一度これに損傷を与えた後に補修を行う際の補修方法及び補修効果を検討するために4体の鋼製橋脚模型を用いて合計7ケースの実験を行った。表2-4は4体の模型と7種類の実験ケースとの関係を示したものである。以下に各実験ケースの目的及び内容を示す。

1) 実験 1

実験1は、原形模型の最大耐力、変形性能、荷重変位関係の履歴特性、及び変状の発生状況を検討するために供試体①を用いて行った。載荷方法としては、同一変位振幅での繰り返し回数を10回として振幅を δ_y から $0.2\delta_y$ ピッチで増加させ、終局状態まで準静的(2.4 mm/秒)に変位制御で載荷した。ここで δ_y は、模型(原形)の中間区間(SM50Y)の下端で圧縮側フランジが降伏するときの変位を弾性計算により求めた値(30 mm)を用いた。

2) 実験 2

実験2は、本震で被災した後の余震に対する挙動を検討することを目的に供試体②を用いて行った。まず、フランジ面の変状が 10 mm 程度となる振幅を実験1の結果から推定し、この変位振幅で10回繰り返す。ここで変状が小さい場合には繰り返し回数を10回として変位振幅を $0.1\delta_y$ ずつ増加させる。その後、余震に対する挙動を検討するため繰り返し回数を10回として再び振幅を δ_y から $0.2\delta_y$ ピッチで増加させ、フランジ面の変状を 15 mm 程度まで進行させる。

3) 実験 2R

実験2Rは、補剛板添接による補修効果を確認するために実験2で損傷を与え、その後補修を行った供試体②を用いて行った。載荷方法は実験1と同じである。

4) 実験 3

実験3は、補剛板添接による補修が可能であると推定される限界の変状状態を再現するために供試体③を用いて行った。載荷方法は、ウェブ面の変状が 20 mm 程度となる振幅を実験1の結果から推定し、この変位振幅で10回繰り返すものである。ただし、変状が小さい場合には繰り返し回数を10回として変位振幅を $0.1\delta_y$ ずつ増加させる。

5) 実験 3R

実験3Rは、補剛板添接による補修を行った供試体③を用いて行った。実験目的及び載荷方法は実験2Rと同じである。

6) 実験 4

実験4は、当て板添接による補修が可能な小規模な変状状態を再現するために供試体④を用いて行った。載荷方法はフランジ面の変状が 5 mm 程度となる振幅を実験1の結果から推定し、この変位振幅で10回繰り返すものである。ただし、変状が小さい場合には繰り返し回数を10回として変位振幅を $0.1\delta_y$ ずつ増加させる。

7) 実験 4R

実験 4R は、当て板添接による補修効果を確認するために実験 4 で損傷を与え、その後補修を行った供試体④を用いて行われた。載荷方法は実験 1 と同じである。

以上に示した各実験の目的及び実験内容をまとめて示すと表 2-5 のようになる。

表 2 - 4 模型と実験ケースの関係

模 型	実 験 ケ ー ス
模 型 ①	実験 1
模 型 ②	実験 2 → 補剛板による補修 → 実験 2R
模 型 ③	実験 3 → 補剛板による補修 → 実験 3R
模 型 ④	実験 4 → 当て板による補修 → 実験 4R

表 2 - 5 実験目的および内容

供試体	実験 No	目 的	内 容
供試体 ①	実験 1	- 最大耐力, 変形性能等履歴特性の検討 - 載荷荷重に応じた変状の発生状況の検討	変位振幅 δ_y より 10 サイクルずつ $0.2 \delta_y$ ピッチで振幅を増加させ終局状態まで載荷する。
供試体 ②	実験 2	本震で被災した後の余震に対する挙動の検討	フランジの変状 (へこみ量) が 10 mm 程度となるまで変位制御で載荷 (振幅は実験 1 の結果より決定) した後, $1.0 \delta_y$ より 10 サイクルずつ $0.2 \delta_y$ ピッチでフランジの変状 (へこみ量) が 15 mm 程度に進行するまで載荷する。
	実験 2R	補剛板による補修効果の検討	補剛板により補修した後, 実験 1 と同様の載荷を行う。
供試体 ③	実験 3	補剛溶接作業が可能な限界の変状状態を再現する。	ウェブの変状 (へこみ量) が 20 mm 程度となるまで変位制御で載荷する (振幅は実験 1 の結果より決定)。
	実験 3R	補剛板による補修効果の検討	実験 2R と同様の補修を施した後, 実験 1 と同様の載荷を行う。
供試体 ④	実験 4	小規模な変状状態を再現する。	フランジの変状 (へこみ量) が 5 mm 程度となるまで変位制御で載荷する。 (振幅は実験 1 の結果より決定)
	実験 4R	当て板による補修効果の検討	当て板により補修した後, 実験 1 と同様の載荷を行う。

2.4 計 測

計測項目は以下の通りである。

- (1) 加振負荷装置で供試体に与えられた荷重および変位
- (2) SFEケーブルで与えた軸力
- (3) 橋脚の水平変位（載荷中央点および中間部（SM50Y）下端）
- (4) ベースプレートの橋脚軸方向（2点）および載荷方向（1点）の変位
- (5) 橋脚のひずみ（図2-6参照）

橋脚天端で計測された水平変位は橋脚の曲げ変形により生じる他に、ベースプレートと架台あるいは架台と反力壁との間のガタおよびアンカーボルトの伸びによっても生じる。したがって、上記(4)の計測結果をもとに図2-7に示す方法で橋脚の曲げ変形による水平変位を求めた。

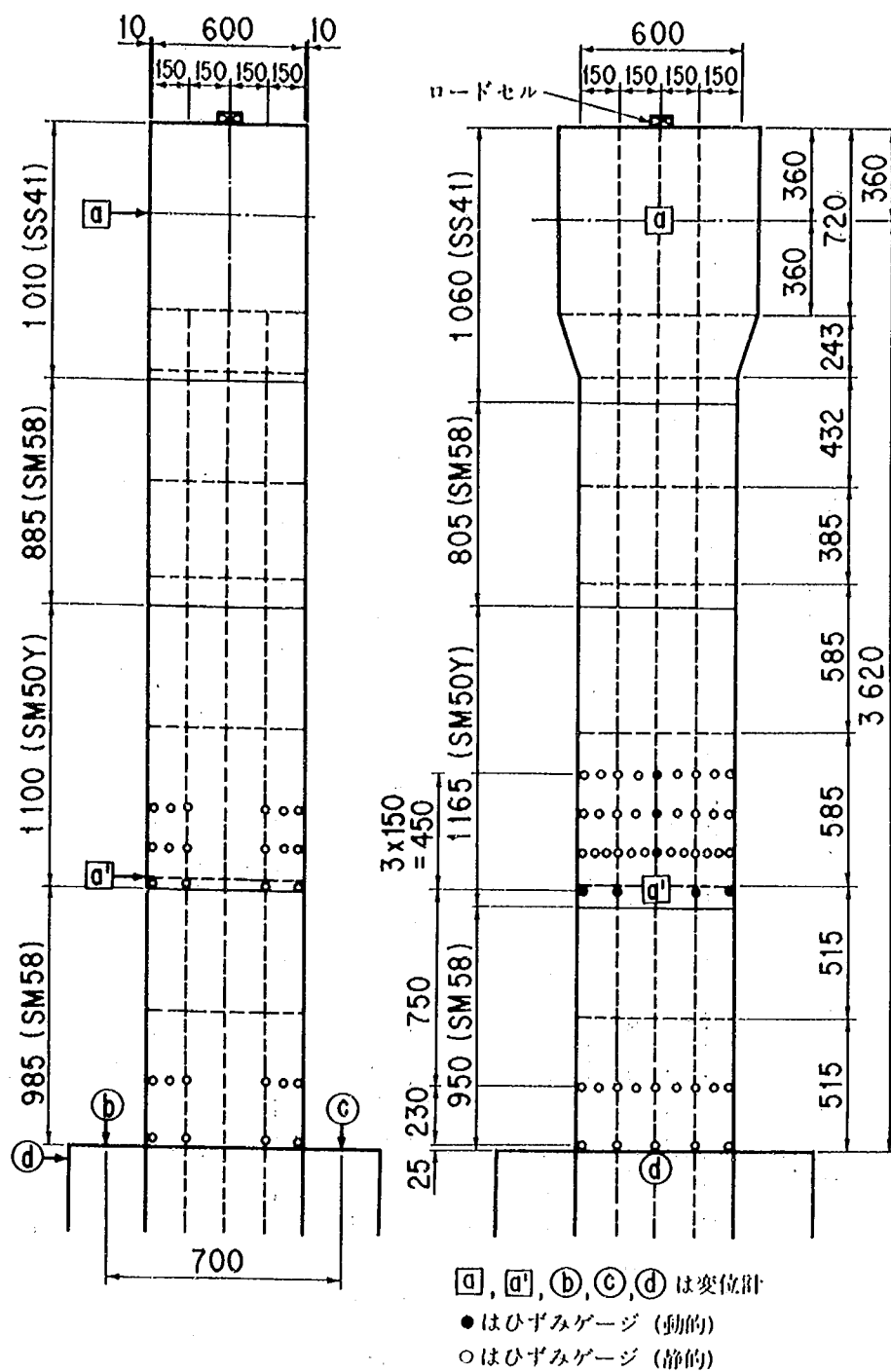


図 2-6(1) 変位計およびひずみゲージ位置 (実験 1~4)

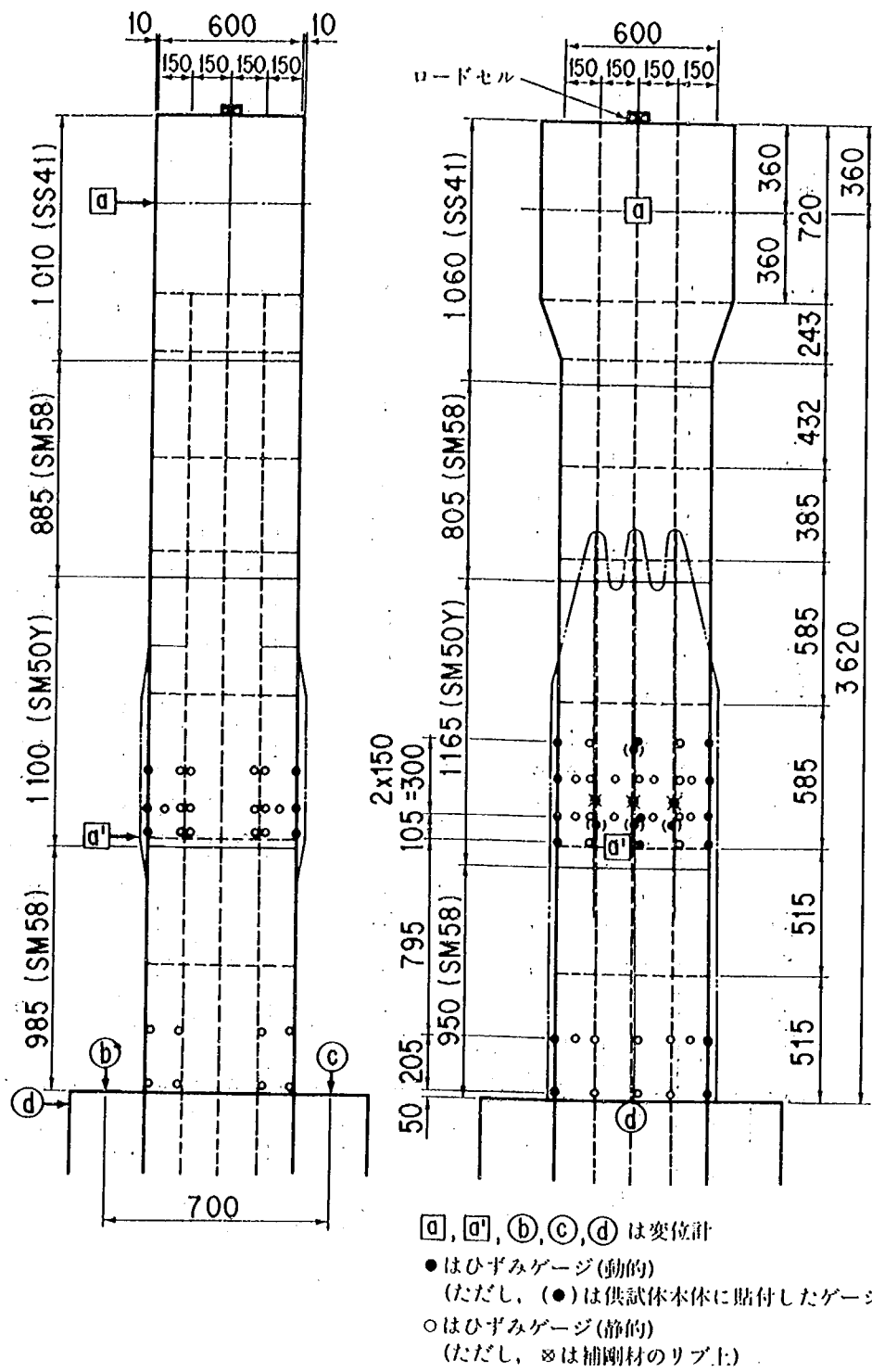


図2-6(2) 変位計およびひずみゲージ位置 (実験2Rおよび3R)

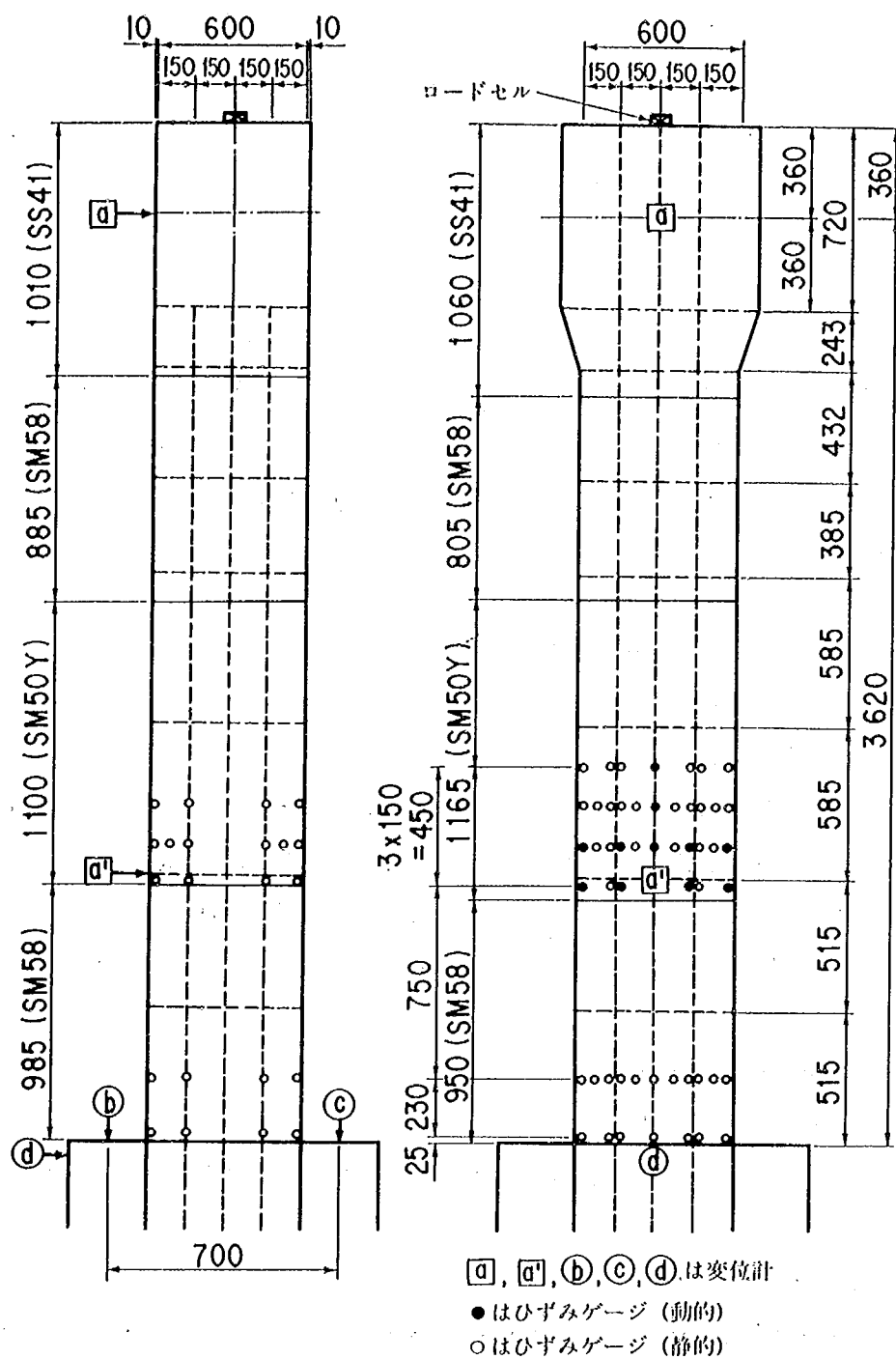


図2-6(3) 変位計およびひずみゲージ位置 (実験4R)

2.5 補修方法

本実験で採用した補修方法は、図2-8に示すように補剛板あるいは当て板を添接するものである。補剛板添接（図2-9参照）は、変状が大きい場合に柱本体のフランジ面（載荷方向に直交する面）の残存耐力を無視し、本体のフランジ面と同等の補剛板を添接するものである。当て板添接（図2-10参照）は、変状が小さい場合にフランジ面の残存耐力を期待し、幅140mm（フランジ幅の $\frac{1}{4}$ ）、板厚6mmの当て板2枚を各フランジ面に添接するものである。各補修方法の詳細は、以下に述べる通りである。

(1) 補剛板添接による補修

柱中間断面（SM50Y）で、本体のフランジと同一寸法の補剛板を当てる構造とした。本体のフランジ面の変状が凸変形となった場合でも補修を行うことができるように補剛板は本体から2cm浮かせてウェブへの当て板を介して本体に接合した（図2-11参照）。また、補剛材を折れ点で本体に固定させるため、本体のダイヤフラム位置に中継ぎ材を設ける構造とした。補修の施工手順は次の通りである。

- i) ①当て板をウェブへ溶接する。
- ii) ダイヤフラム位置に②中継ぎ材を溶接する。
- iii) ③補剛板を①当て板へ溶接する。

(2) 当て板添接による補修

当て板の板厚及び長さは、プレートガーターの重ね合わせフランジに準じて、道路橋示方書Ⅱ鋼橋編「8.3.3 鋼板を重ね合わせたフランジ」の規定に従って設計した。同規定によれば圧縮フランジに用いる外側フランジの板厚 t_1 は、次式を満足しなければならない。

$$1.5 t_2 \geq t_1 \geq b/24 \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

ここに、

t_2 : 内側フランジの板厚

b : 外側フランジの幅

式(2-1)に $t_2 = 7.3\text{mm}$ （中間部SM50Y）、 $b = 140\text{mm}$ （フランジ幅 $\frac{1}{4}$ ）を代入すると次のようになる。

$$11\text{mm} \geq t_1 \geq 5.8\text{mm} \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

ここでは、供試体本体の残存耐力をできるだけ期待するという点から、板厚6mmの鋼板を当て板として用いた。

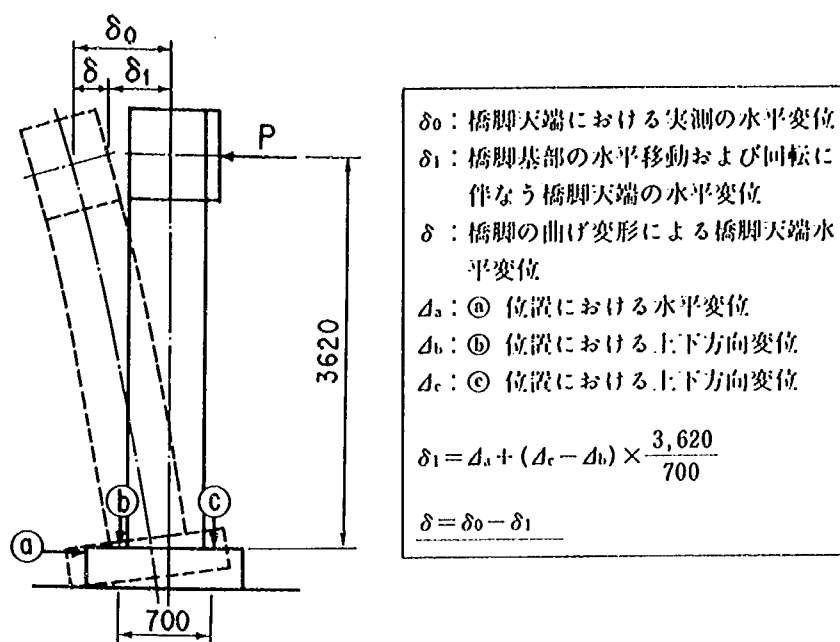
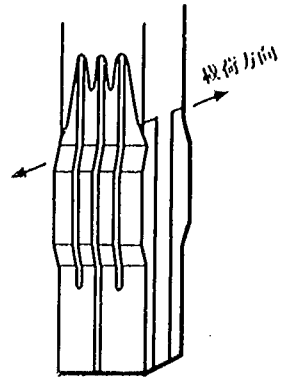
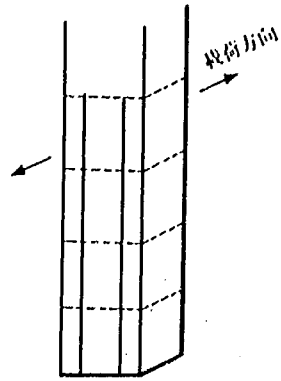


図 2 - 7 橋脚の水平変位の補正



(a) 補剛板添接



(b) 当て板添接

図 2-8 鋼製橋脚の補修方法

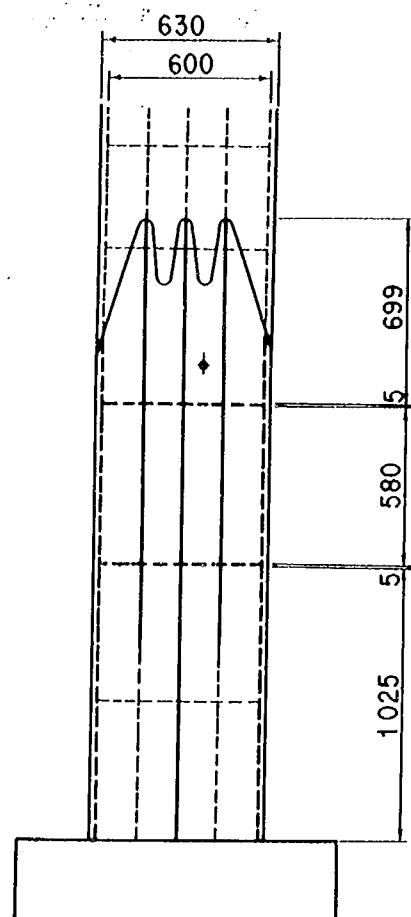
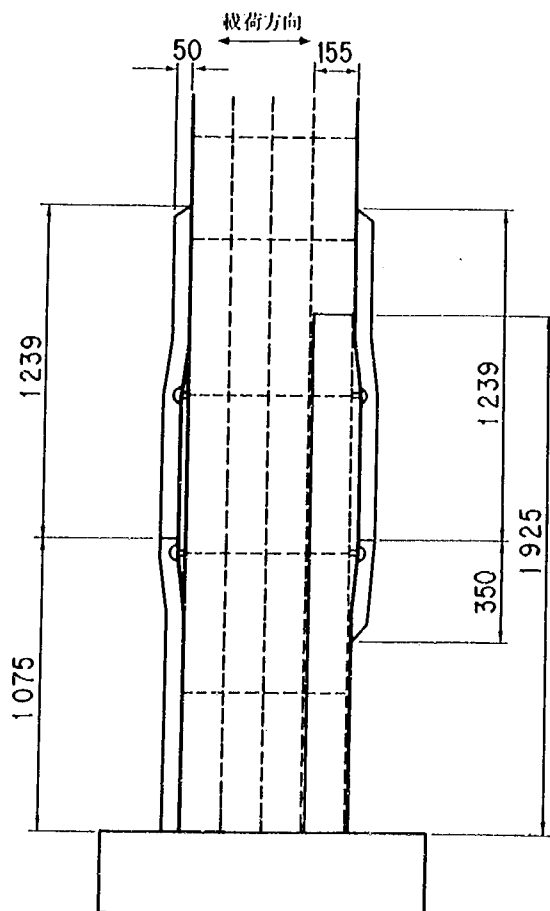


図 2-9 補剛板添接

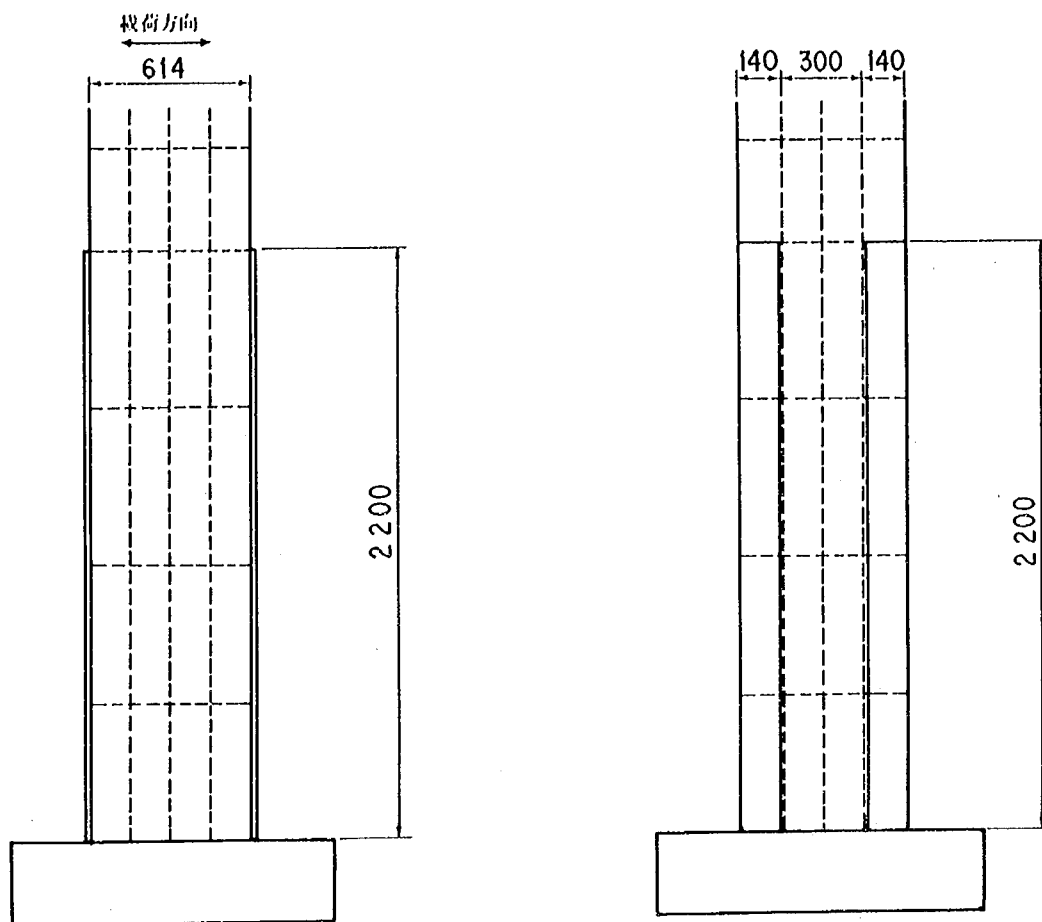


図 2-10 当て板添接

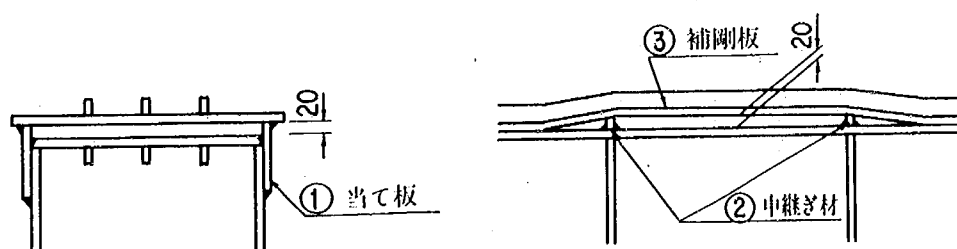


図 2-11 補剛板の添接

3. 実験結果

3.1 実験 1

実験 1 では、図 2-3 に示した供試体を用い図 3-1 に示す加振変位（変位制御）により載荷した。図 3-2 は橋脚天端における荷重～変位の履歴曲線を示したものである。また、表 3-1 は主要な載荷段階における外観からの変状をまとめたものである。これらの結果によれば、供試体①の破壊性状はおおむね以下の通りである。

- 1) 最大耐力は載荷段階 3 ($1.6\delta_y$) で生じた。ただし、載荷段階 3 では $1.6\delta_y$ (48mm) の変位で載荷しようとしたが、急激に耐力の減少を生じ、このため結果的に変位振幅は $1.8\delta_y$ (54mm) まで増加した。これは、図 2-7 に示したように、今回の実験では橋脚基部を取付けたベースプレートの変形を含んだ橋脚天端の水平変位を基本に変位制御で載荷したため、橋脚基部に対する橋脚天端の変位で整理すると、変位制御したにもかかわらず $1.6\delta_y$ から $1.8\delta_y$ に変位振幅が増加したものである。
- 2) 最大耐力に達した載荷段階 3 の第 1 回めの載荷までは、橋脚には著しい変状は認められない。載荷段階 3 の第 1 回の正負交番載荷を行った段階では、橋脚基部から 3 パネルめのフランジ及びウェブが黒みを帯び、また下面ウェブとダイヤフラムとの溶接ビードが赤みを帯びた程度である。
- 3) 最大耐力に達した載荷段階 3 の第 2 回め以後からは急激に各種の変状が生じ、耐力が低下している。すなわち、
 - a) 載荷段階 3 の第 10 回めの載荷後 ($1.8\delta_y$) には、加振機側及び加振機逆側の両フランジと下面のウェブにパネル全体の凹形の面外変形が生じ、また、この全体の面外変形の中にも局部的な変形が生じた。
 - b) 載荷段階 4 ($1.8\delta_y$) では、加振機側及び加振機逆側におけるフランジと下側のウェブの接続部に柱軸直角方向のクラックが発生した。載荷段階 5 ($2.0\delta_y$) には、上面のウェブとフランジとの接続部にもクラックが発生し、載荷段階 6 終了後には、クラックの長さは 40mm に達した。図 3-3 は、載荷段階 6 終了後の最終変状を示したものである。

図 3-4 は、各載荷段階における載荷終了後の残留面外変形量（パネル内の残留変形の最大値）と載荷変位振幅の関係を示したものである。図中には、参考のため図 3-2 に示した履歴曲線の骨格曲線（正側及び負側の骨格曲線の平均値）及び等価粘性減衰定数 h_e を示している。ここで、等価粘性減衰定数 h_e は次式によって求めた値である（図 3-5 参照）。

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \dots\dots\dots (3-1)$$

W : 弾性エネルギー

ΔW : 1 サイクルの間に失われる損失エネルギー

これによれば、面外の残留変位は δ_y 以後に生じ始め、 $1.6\delta_y$ を載荷した段階で急激に大きくなって

いることがわかる。上述したように最大耐力は $1.6\delta_y$ で生じており、これに達した瞬間に大きな残留変形が生じ、耐力の低下をきたしたと考えることができる。

図3-6は、各载荷段階における第1回目の载荷と第10回めの载荷を履歴曲線によって比較したものである。载荷段階1及び2では、第1回めの载荷と第10回めの载荷の履歴曲線は、ほとんど変化しておらず、これらの間には少なくとも10回程度の载荷くり返しによつては、耐力、変形性能とも大きく変化しないことがわかる。これに対して载荷段階3以後では、第10回めの载荷による履歴曲線は第1回めの载荷による履歴曲線に比較して同一変位振幅に対する荷重が低下しており、くり返し载荷に伴ない剛性劣下が生じていることがわかる。特に、最大耐力の直前・直後を含む载荷段階3においてその傾向が顕著である。

また、図3-7は、軸力導入後から载荷段階3終了までに供試体に生じたひずみの分布を示したものである。これにより、以下の事項が指摘される。

- 1) 軸力導入後の軸ひずみは、第3パネルのA～Dの各断面とも 200μ 程度となっている。図3-8に示すように、当該区面の断面積Aから初期軸力 $N=88\text{tf}$ による軸ひずみを計算すると、ヤング係数 $E=2.1\times 10^6\text{kg/cm}^2$ として、

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \frac{N}{AE} \\ &= \frac{88,000}{200.4 \times 2.1 \times 10^6} \\ &= 209\mu \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-2)$$

となり、ほぼ実測ひずみ値は、計算上推定される値を示しており、測定上大きな問題がなかったことを示している。

- 2) 载荷段階1 (δ_y) の第1回めの载荷時のひずみ分布は図3-7(2)及び(3)の通りであり、正負いずれの方向にも圧縮側ひずみは全体として、表2-2に示したSM50Y材の降伏ひずみ 1840μ に達している。ただし、正側の载荷時には、C-C断面及びD-D断面（前述したようにこの付近で最終的に最も大きな面外変形が生じる）において圧縮側軸ひずみ分布は、フランジ上においてはほぼ同様の値をとるのに対して、これに引続く負側の载荷時にはフランジ上でかなりばらつきが出て来っており、すでに部分的にフランジの面外変形が生じ始めていることを意味している。このような面外変形は载荷くり返しとともに徐々に進行し、図3-7(4)及び(5)に示す第10回めの载荷後のひずみ分布をみると、C-C断面及びD-D断面のフランジ応力は場所ごとに大きく異なっている。C-C断面では最大で 3400μ ものひずみが発生している。このことは、振幅 δ_y の载荷においても、くり返しとともに徐々にフランジのひずみが蓄積していくことを示している。図3-7(6)は载荷段階1終了後の除荷時のひずみ分布を示したものであり、図3-7(1)に示した载荷前のひずみ分布と比較することにより、 δ_y による10回载荷の影響を見ることができる。C-C断面に着目すると、载荷後にはフランジに最大 1700μ のひずみが生じており、载荷前の 200μ との差 1500μ が载荷段階1に

おける累積ひずみである。

3) 次に、最大耐力が生じた載荷段階3のひずみ分布を見てみよう。図3-7(7)は載荷段階2終了後の除荷時のひずみ分布を示したものであり、これが載荷段階3を始めるに当たっての初期ひずみと考えることができる。C-C断面に着目するとフランジ残留ひずみの最大値は 4800μ 程度となっている。このような状態から第1回めの載荷を行った際のひずみ分布が図3-7(8)及び(9)であり、C-C断面では圧縮側で約 9000μ に達している。この段階以後、面外変形が急増したのは図3-4に示した通りである。図3-7(10)及び(11)は第10回めの載荷時のひずみ分布であり、この段階ではひずみは $16,000\mu$ 以上となりスケールオーバーしている。図3-7(12)は載荷段階3終了後の除荷時の残留ひずみを示したものである。図3-7(7)と比較すると載荷段階3により $10,000\mu$ 程度の残留ひずみが生じたことを示している。

次に、図3-9は実験により求めた骨格曲線と計算により求めた降伏点（降伏荷重 P_y 及び降伏変位 δ_y ）、全塑性荷重 P_p を比較したものである。ここで、降伏荷重 P_y 及び全塑性荷重 P_p の計算は図3-8に示した通りである。これによれば、実験により求めた最大耐力は、全塑性荷重より4%程度小さくなっているだけであり、全塑性荷重が最大耐力を良く表わしているといえることができる。

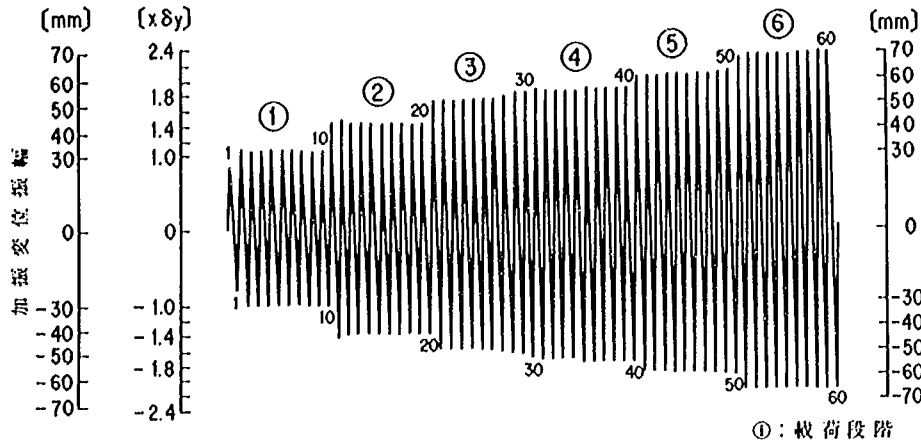
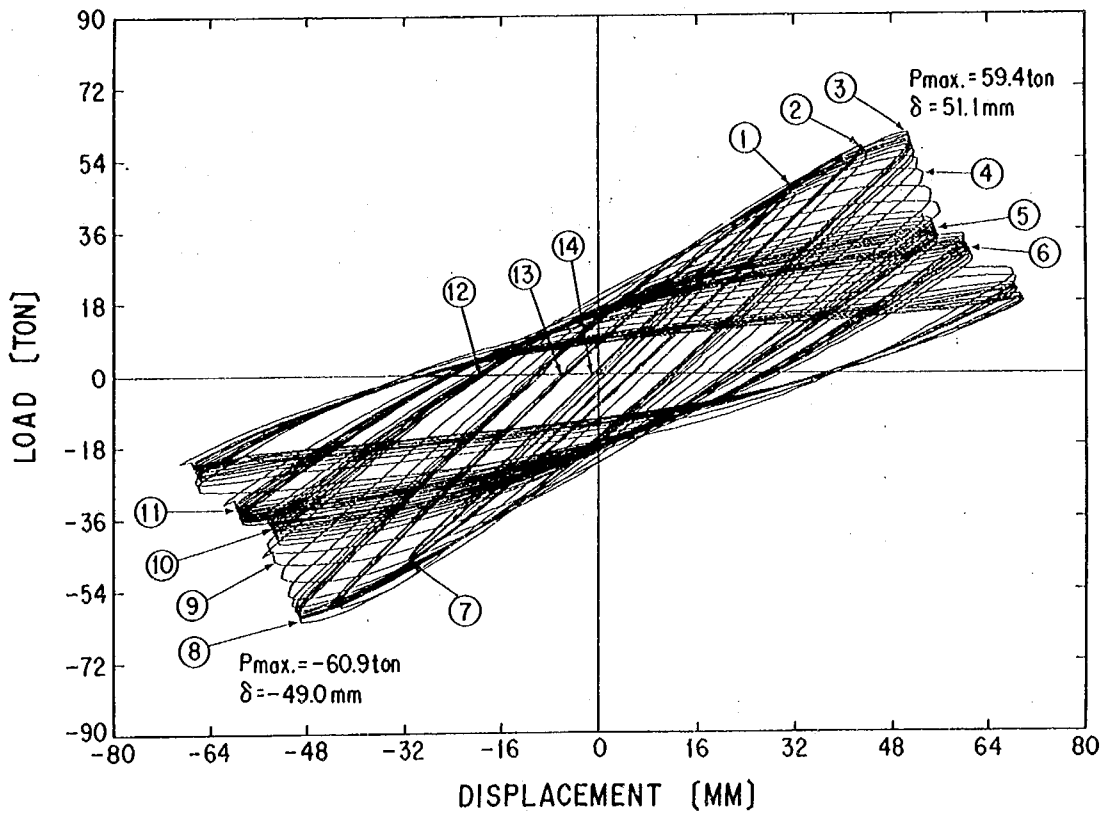


図3-1 加振変位 (実験1)



- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| ① 北面フランジに変形 (凹) | ⑧ 南面フランジ変色 (黒) |
| ② 下面ウェブに変形 (凹) | ⑨ 上面ウェブに変形 (凸) |
| ③ 北面フランジ変色、黒皮はく離 (黒) | ⑩ 北フランジと下フランジのコーナーに柱軸直角方向のクラック |
| ④ 下面ウェブ、黒皮はく離 | ⑪ 北フランジと上ウェブのコーナーに柱軸直角方向のクラック |
| ⑤ 南フランジと下ウェブのコーナーに柱軸直角方向のクラック | ⑫ 上ウェブに残留変形 (凸) |
| ⑥ 南フランジと上ウェブのコーナーに柱軸直角方向のクラック | ⑬ 北フランジ、下ウェブに残留変形 (凹) |
| ⑦ 南面フランジに変形 (凹) | ⑭ 南面フランジに残留変形 (凹) |

図3-2 荷重～変位履歴と変状 (実験1)

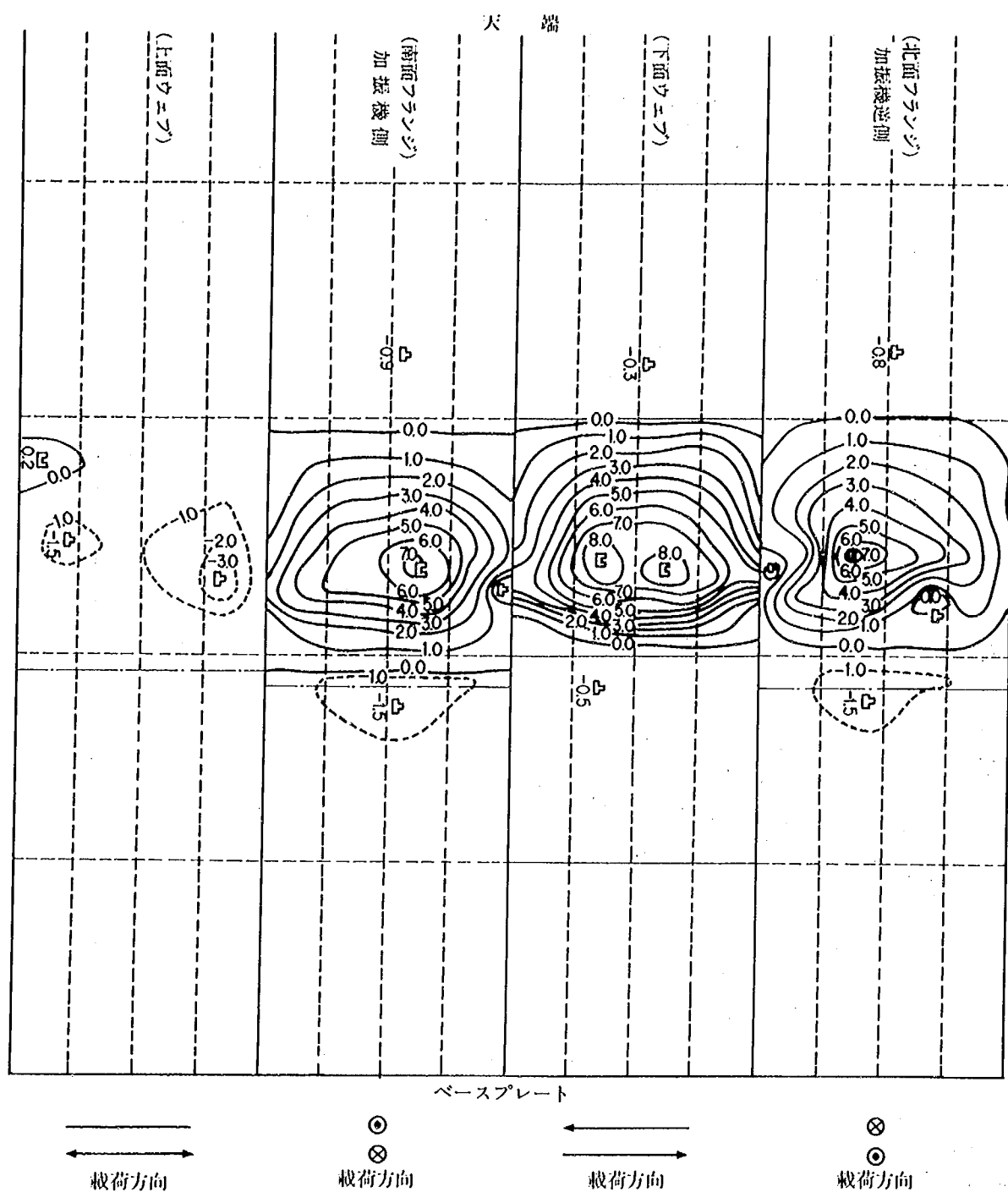


図3-3 実験1の最終変状状態

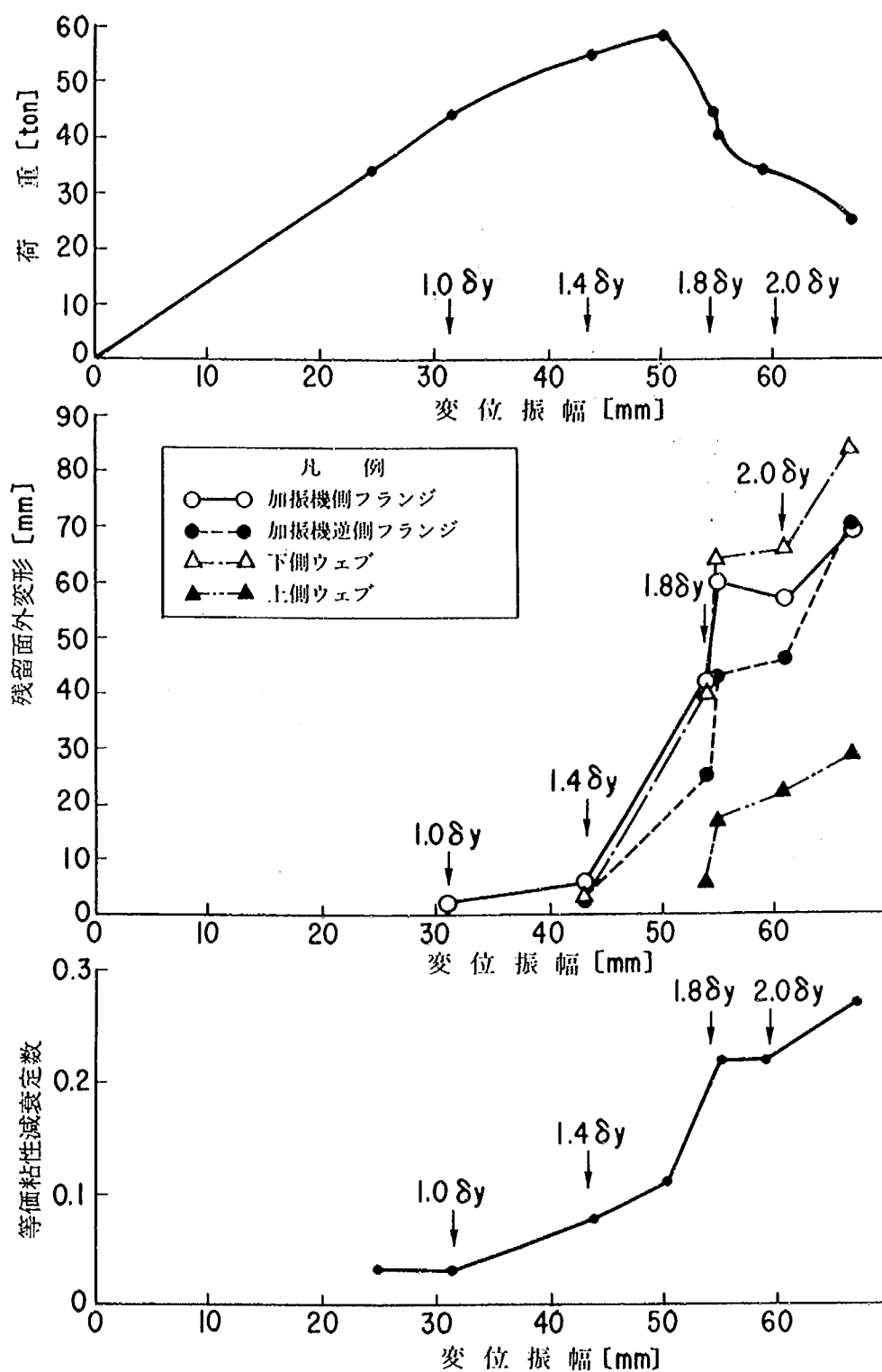


図3-4 実験1の荷重，残留面外変形，等価粘性減衰定数

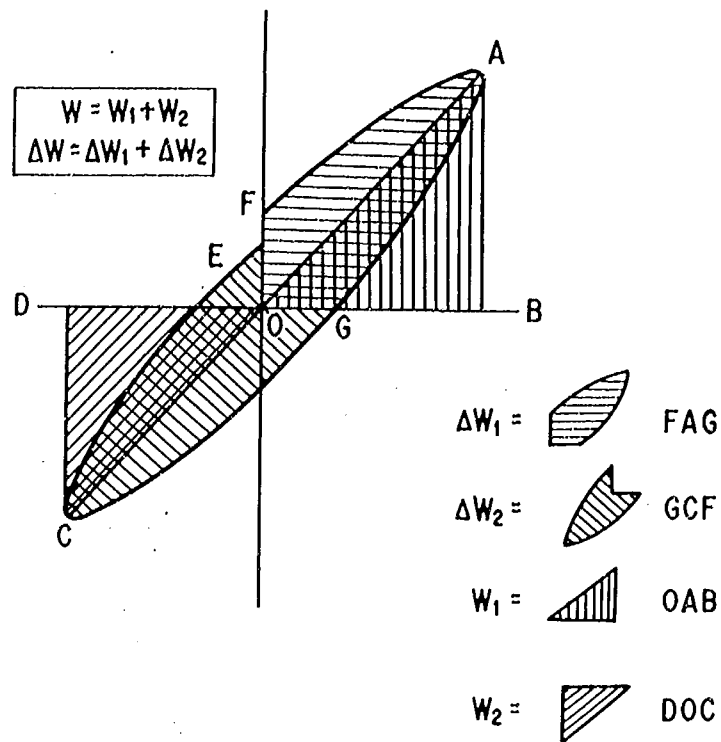
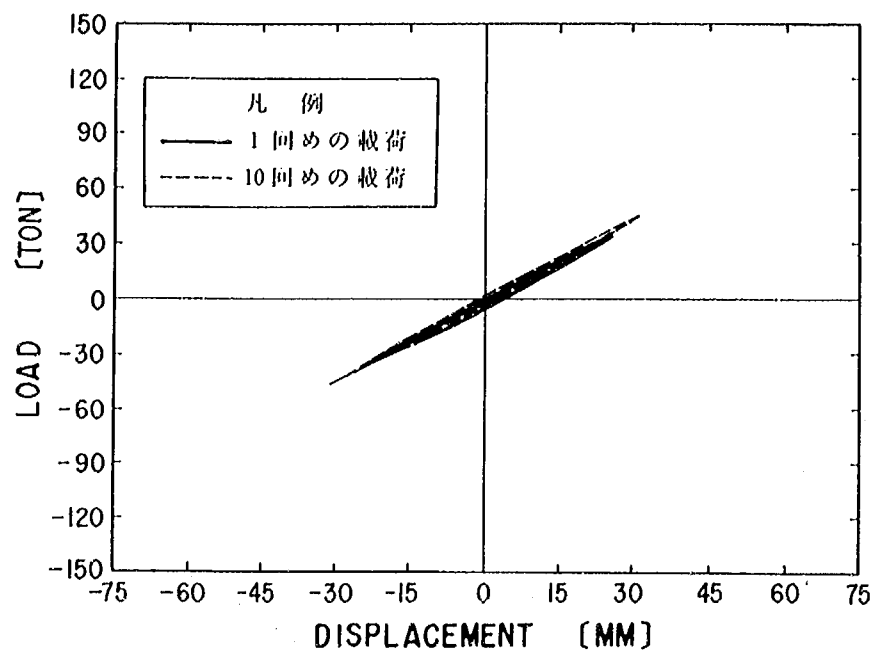
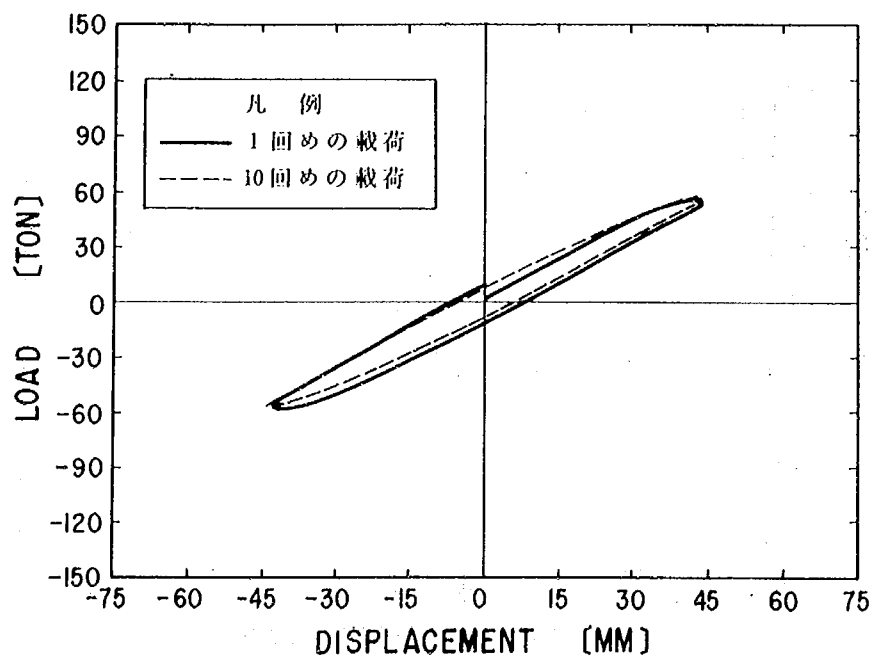


図 3-5 履歴減衰定数 h_c の定義 (一定振幅加振時)

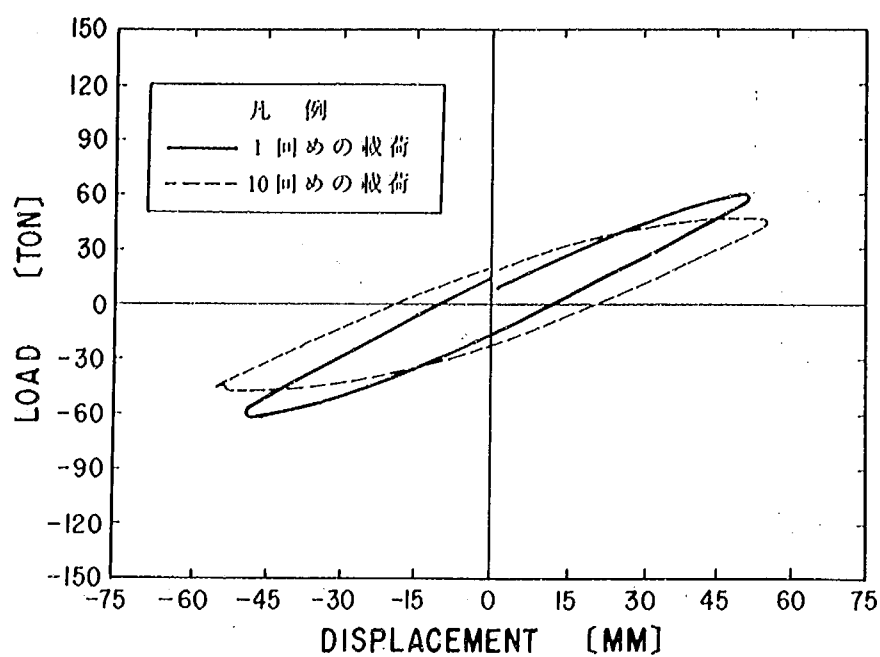


(a) 載荷段階 1 ($1.0 \delta_y$)

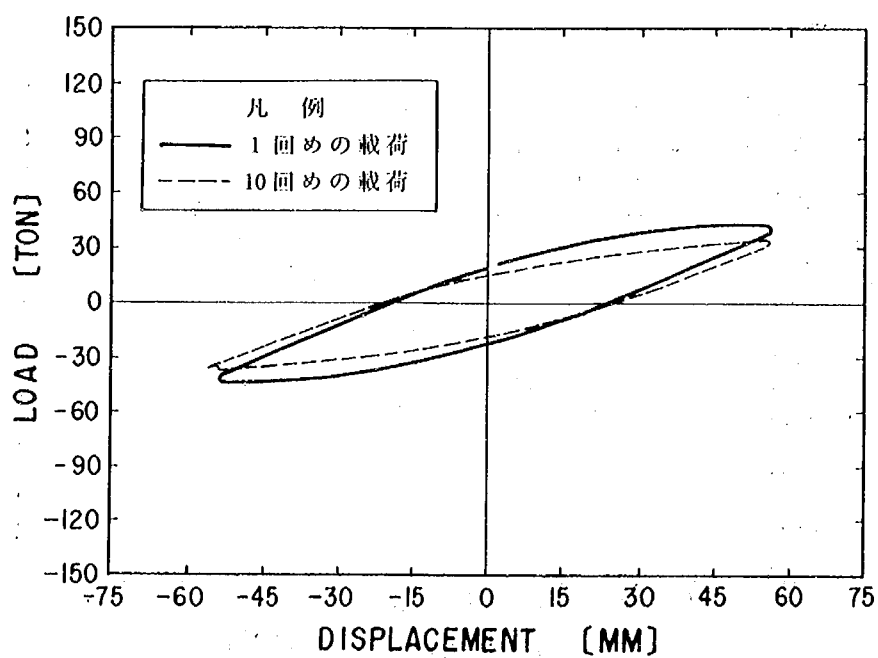


(b) 載荷段階 2 ($1.4 \delta_y$)

図 3 - 6 (1) 実験 1 の荷重～変位履歴曲線

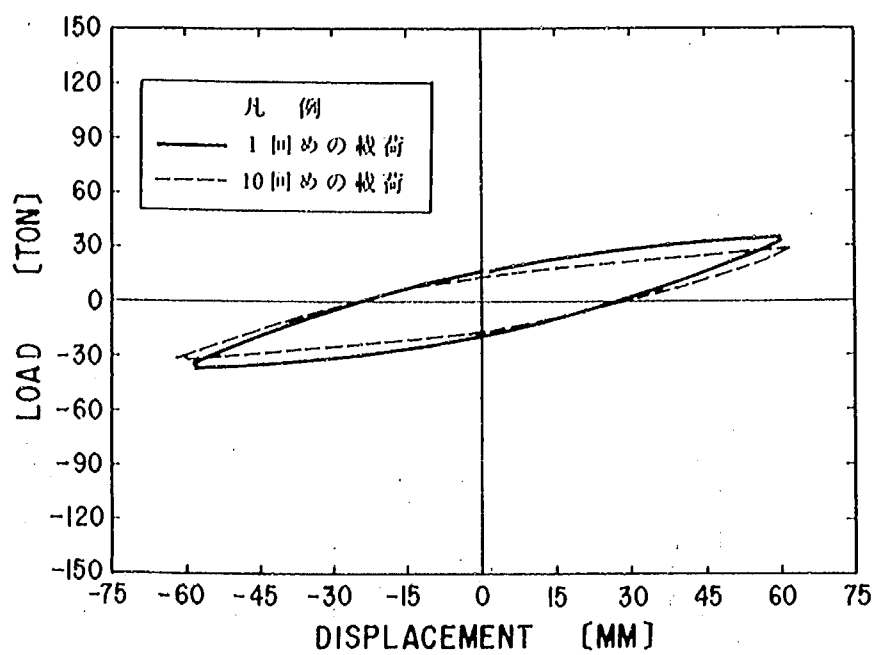


(c) 载荷段階3 ($1.6\delta_y \sim 1.8\delta_y$)

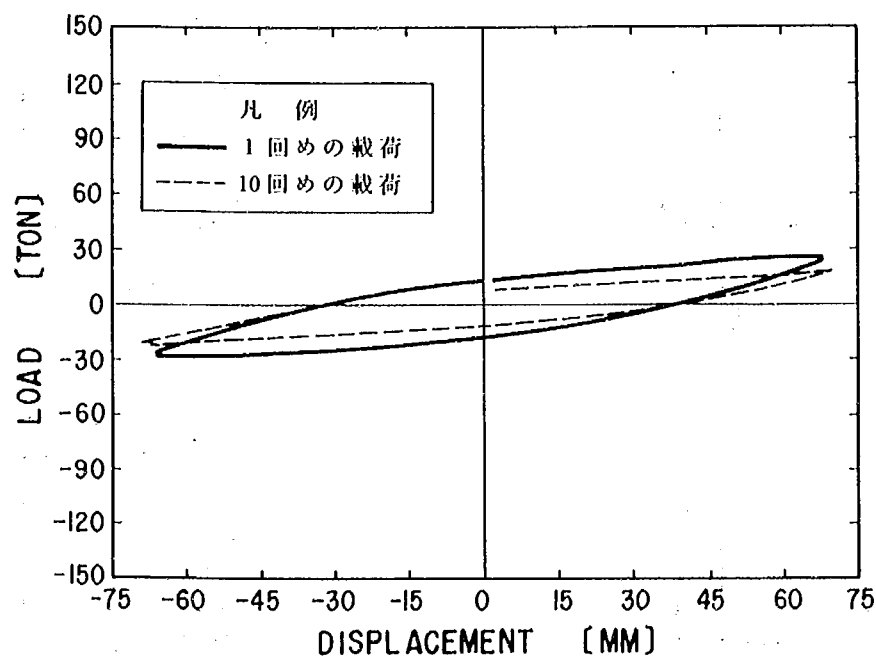


(d) 载荷段階4 ($1.8\delta_y$)

図3-6(2) 実験1の荷重～変位履歴曲線



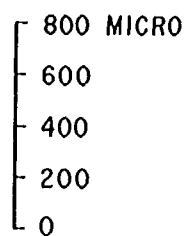
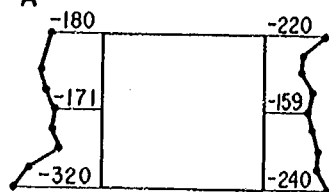
(e) 载荷段階 5 ($2.0\delta_y$)



(f) 载荷段階 6 ($2.2\delta_y$)

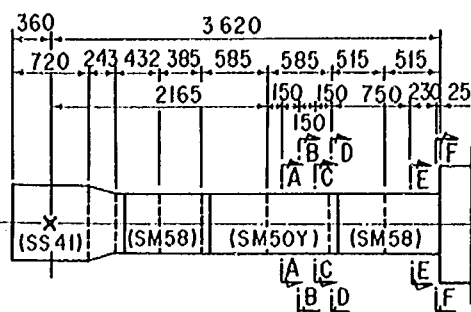
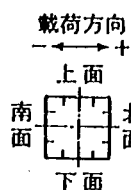
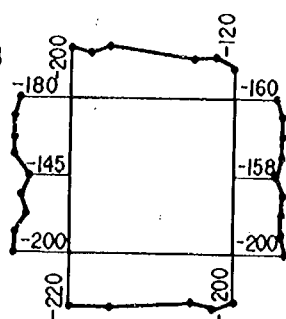
図 3-6(3) 実験 1 の荷重～変位履歴曲線

A - A

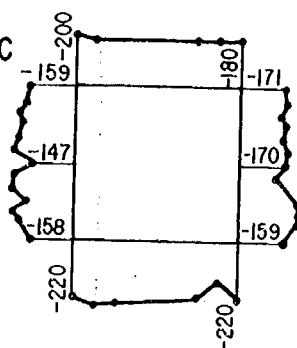


変位 = 0 MM
荷重 = -0 TON
軸力 = -88 TON

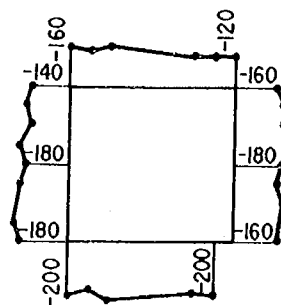
B - B



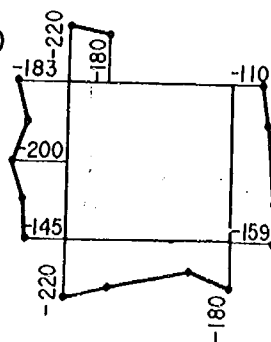
C - C



E - E



D - D



F - F

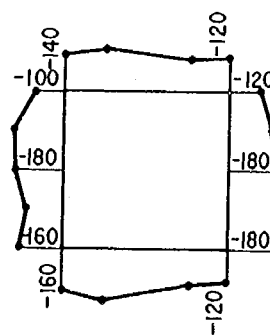
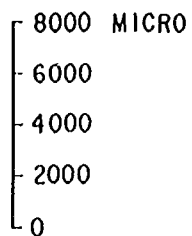
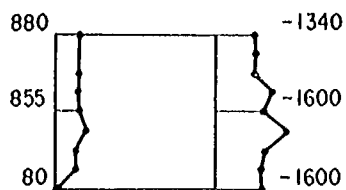


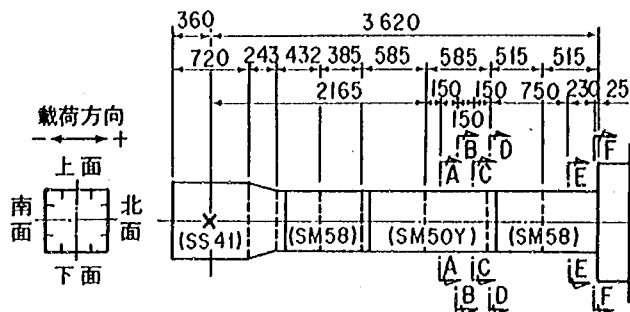
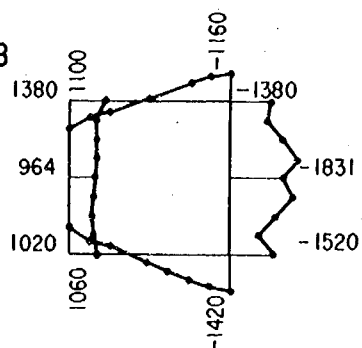
図 3 - 7 (1) 載荷前 (軸力導入後) のひずみ分布 (実験 1)

A - A

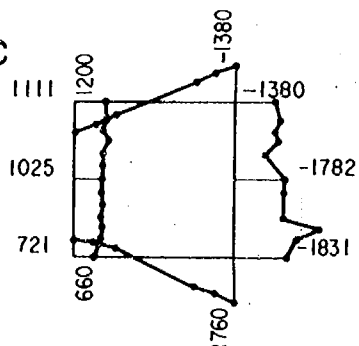


変位 = 25 MM
荷重 = 34 TON
軸力 = -88 TON

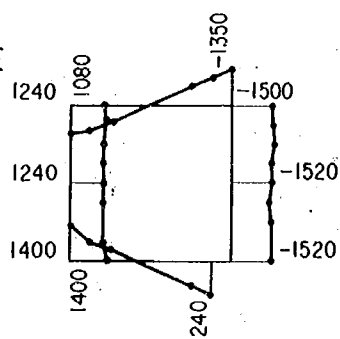
B - B



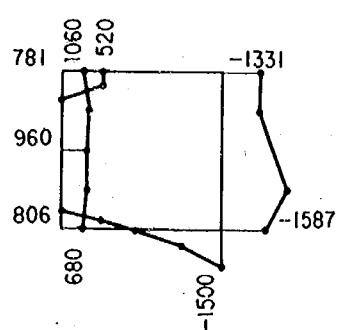
C - C



E - E



D - D



F - F

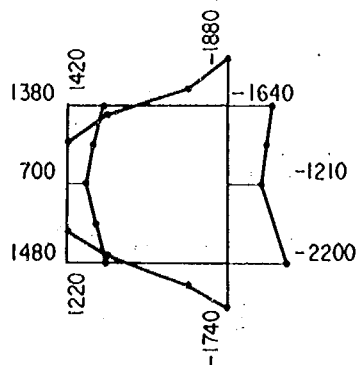
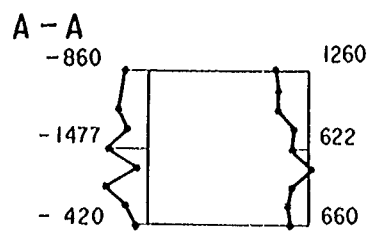


図 3 - 7 (2) 载荷段階 1 第 1 回め (正側) 载荷後のひずみ分布 (実験 1)



変位 = -24 MM
荷重 = -37 TON
軸力 = -87 TON

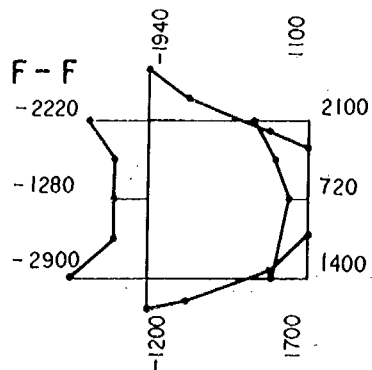
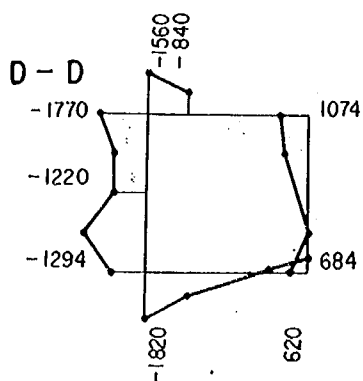
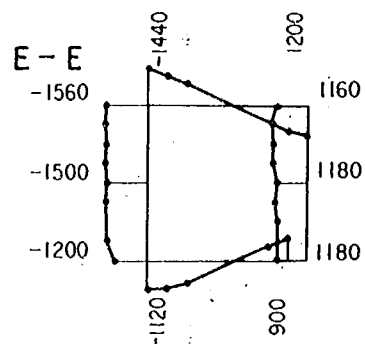
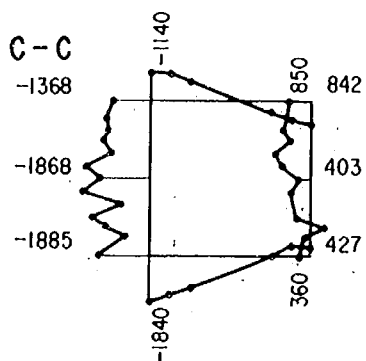
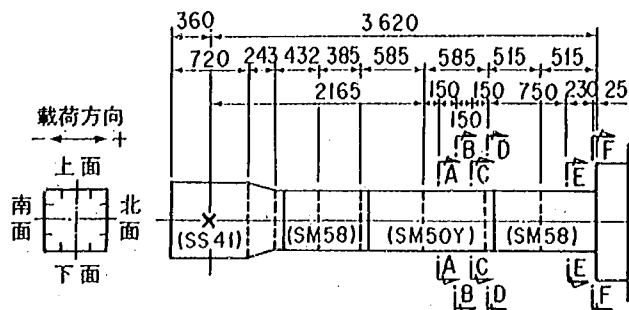
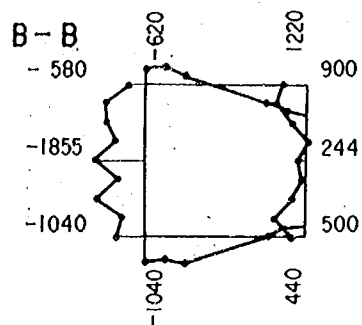
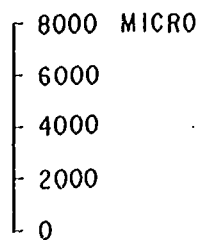
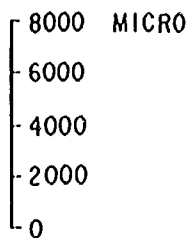
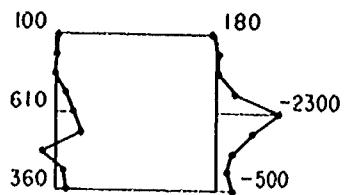


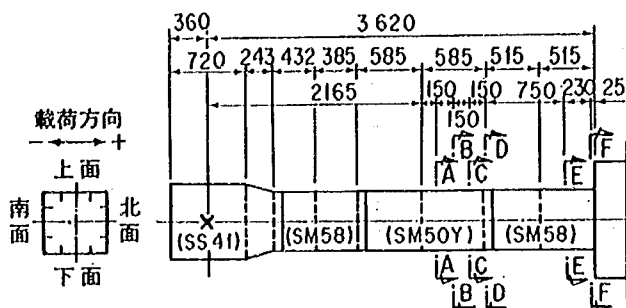
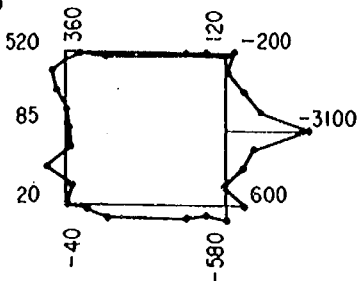
図 3 - 7 (3) 载荷段階 1 第 1 回め (負側) 载荷後のひずみ分布 (実験 1)

A-A

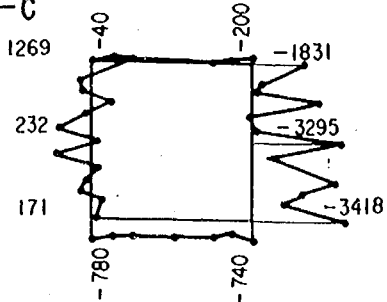


変位 = 31 MM
荷重 = 45 TON
軸力 = -86 TON

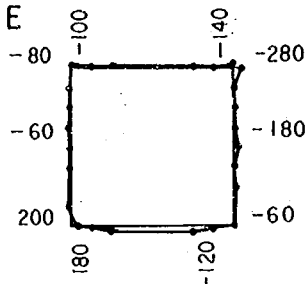
B-B



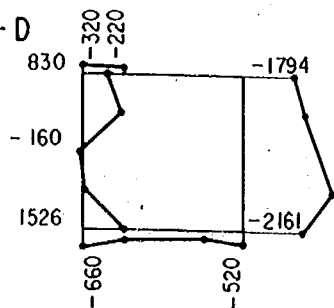
C-C



E-E



D-D



F-F

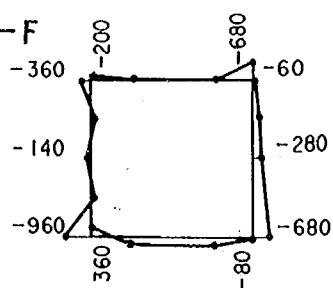
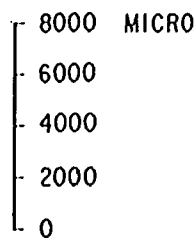
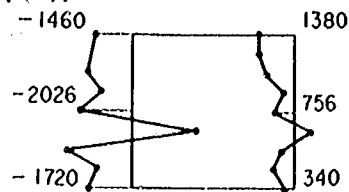


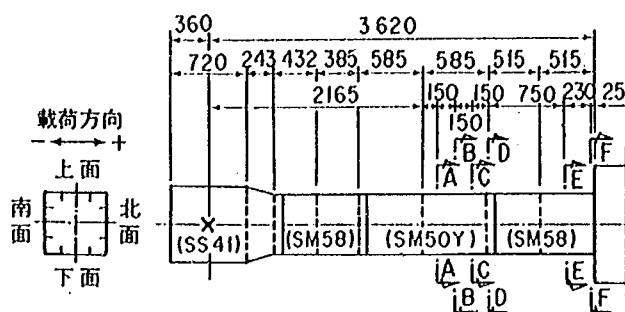
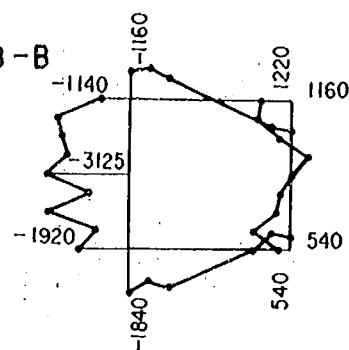
図3-7(4) 載荷段階1 第10回め (正側) 載荷後のひずみ分布 (実験1)

A-A

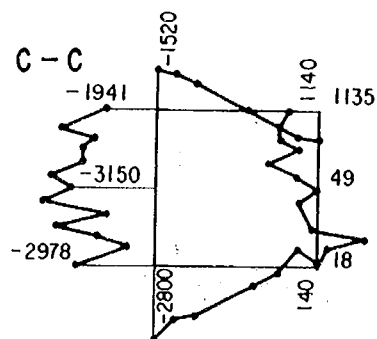


変位 = -30 MM
荷重 = -46 TON
軸力 = -85 TON

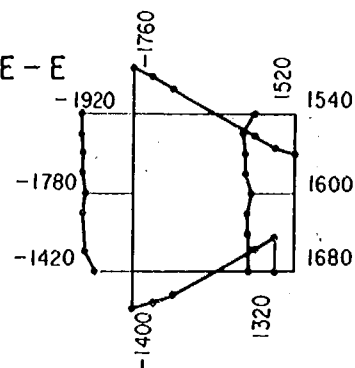
B-B



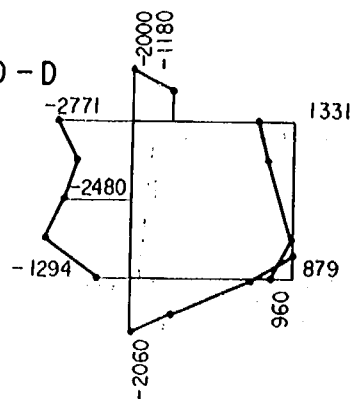
C-C



E-E



D-D



F-F

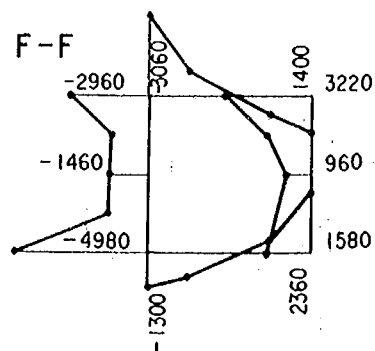
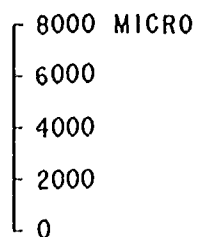
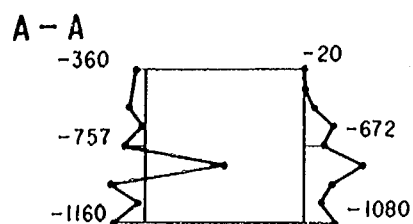


図3-7(5) 載荷段階1第10回め(負側) 載荷後のひずみ分布(実験1)



変位 = -1 MM
荷重 = 0 TON
軸力 = -85 TON

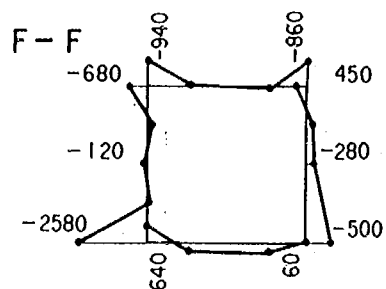
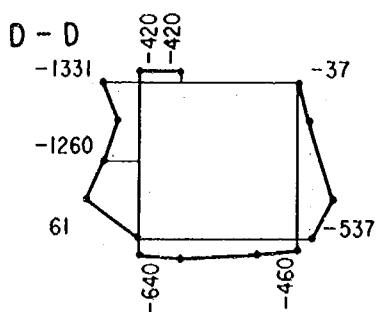
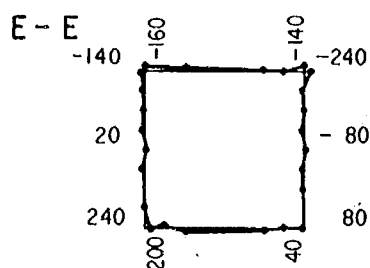
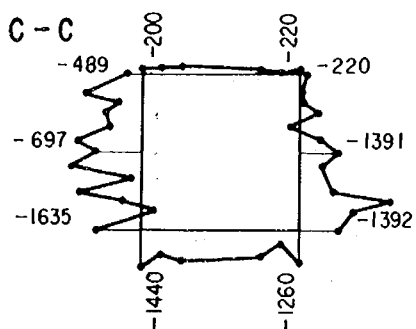
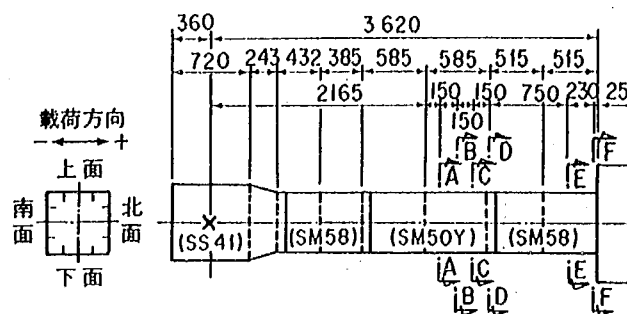
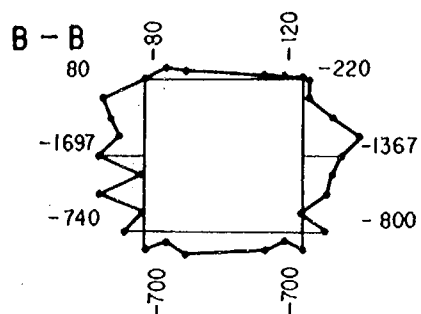
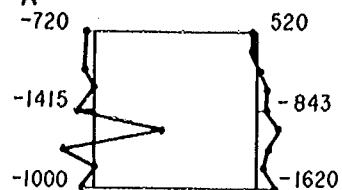


図 3 - 7 (6) 载荷段階 1 終了後に除荷した段階のひずみ分布 (実験 1)

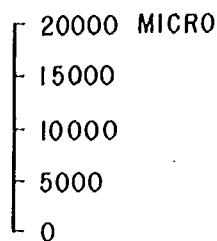
A - A



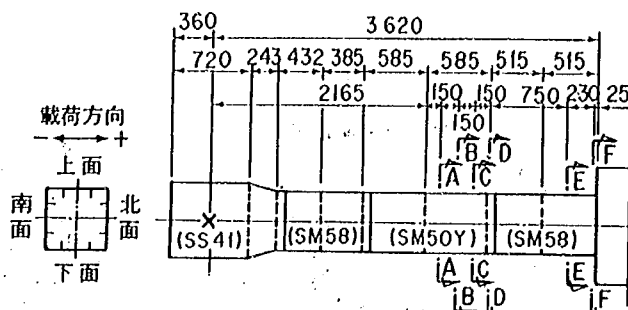
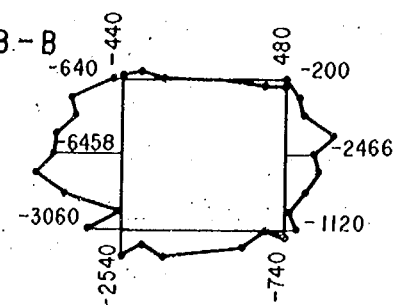
変位 = -6 MM

荷重 = 0 TON

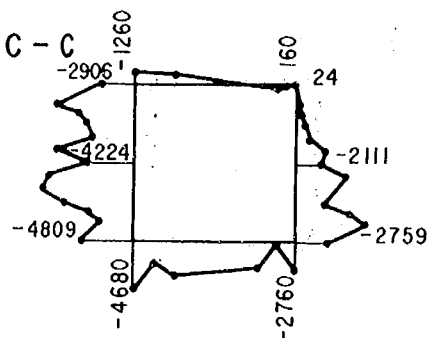
軸力 = -82 TON



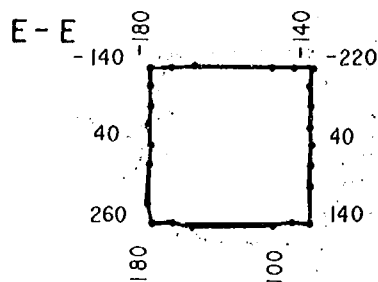
B - B



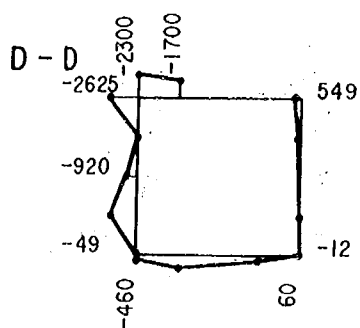
C - C



E - E



D - D



F - F

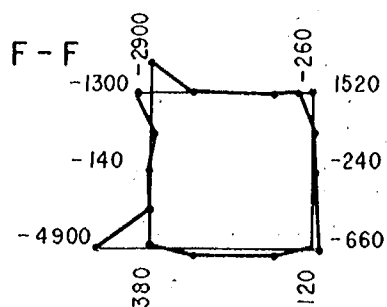


図 3 - 7 (7) 載荷段階 2 終了後に除荷した段階のひずみ分布 (実験 1)

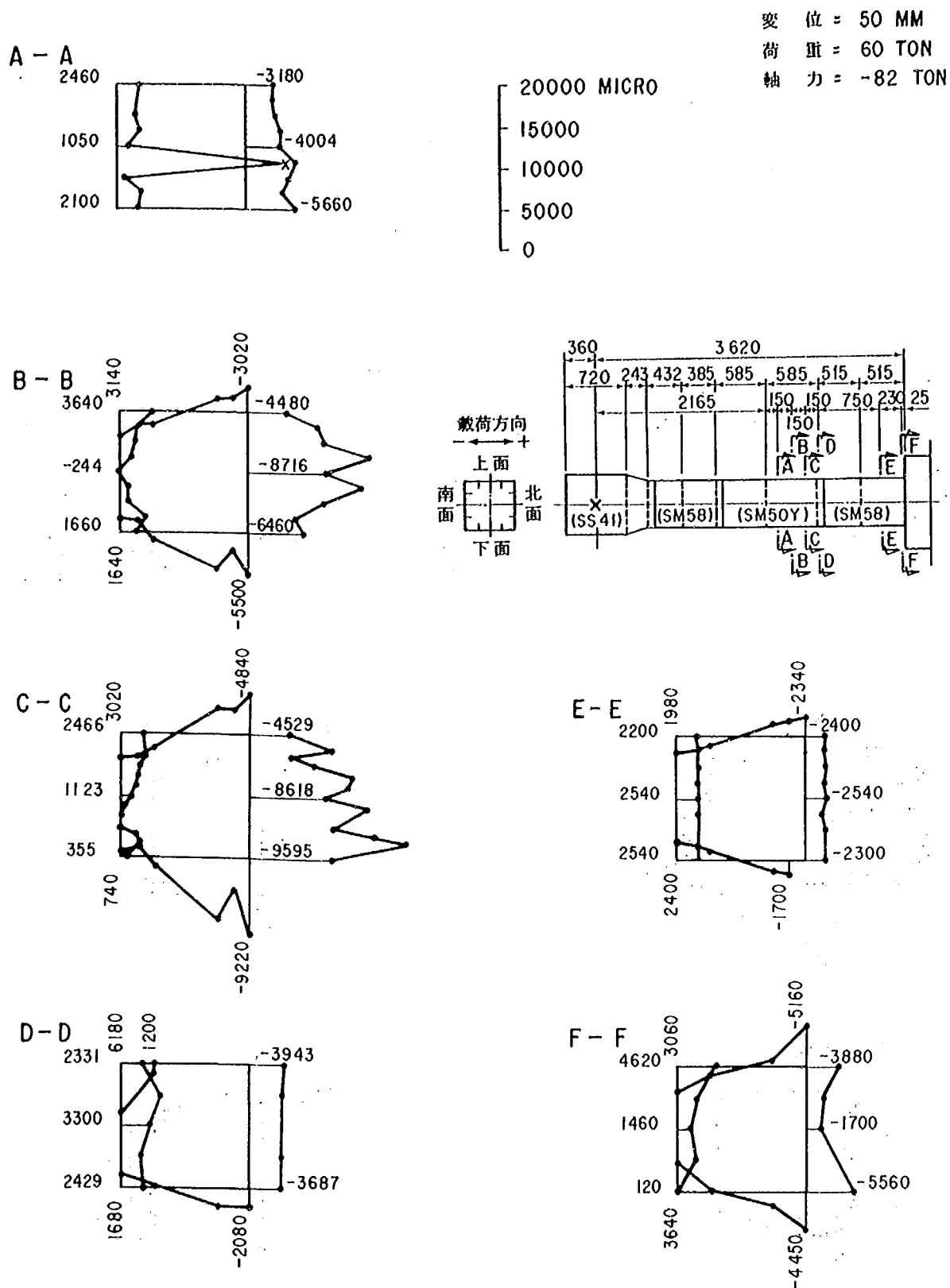
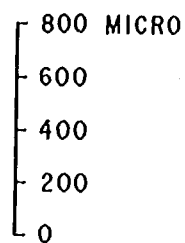
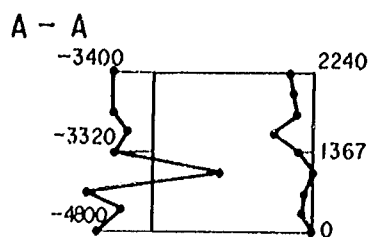


図 3-7(8) 載荷段階 3 第 1 回め (正側) 載荷後のひずみ分布 (実験 1)



変位 = -47 MM
荷重 = -62 TON
軸力 = -82 TON

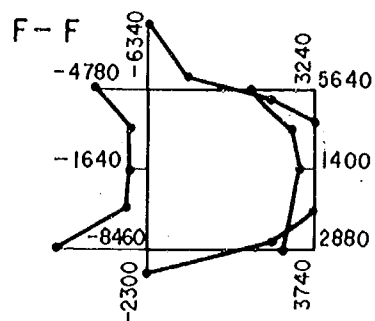
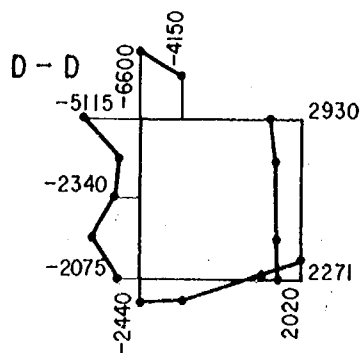
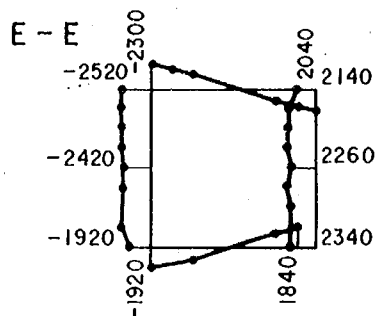
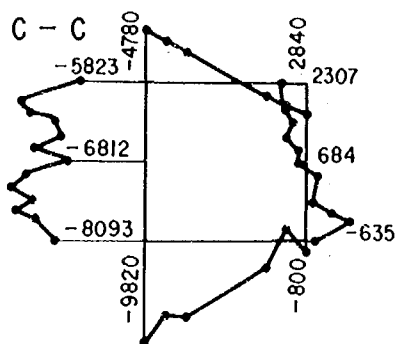
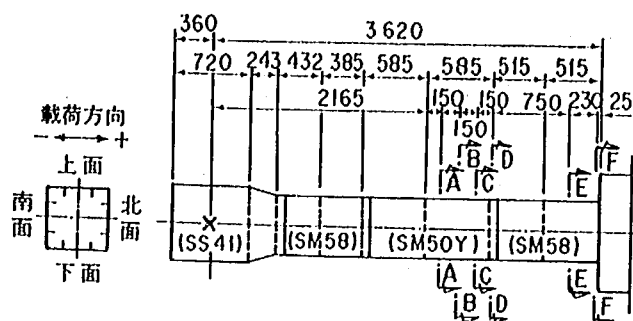
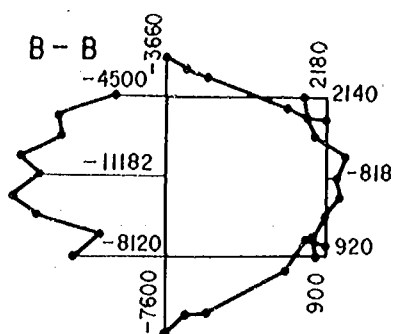


図3-7(9) 載荷段階3第1回め(負側) 載荷後のひずみ分布(実験1)

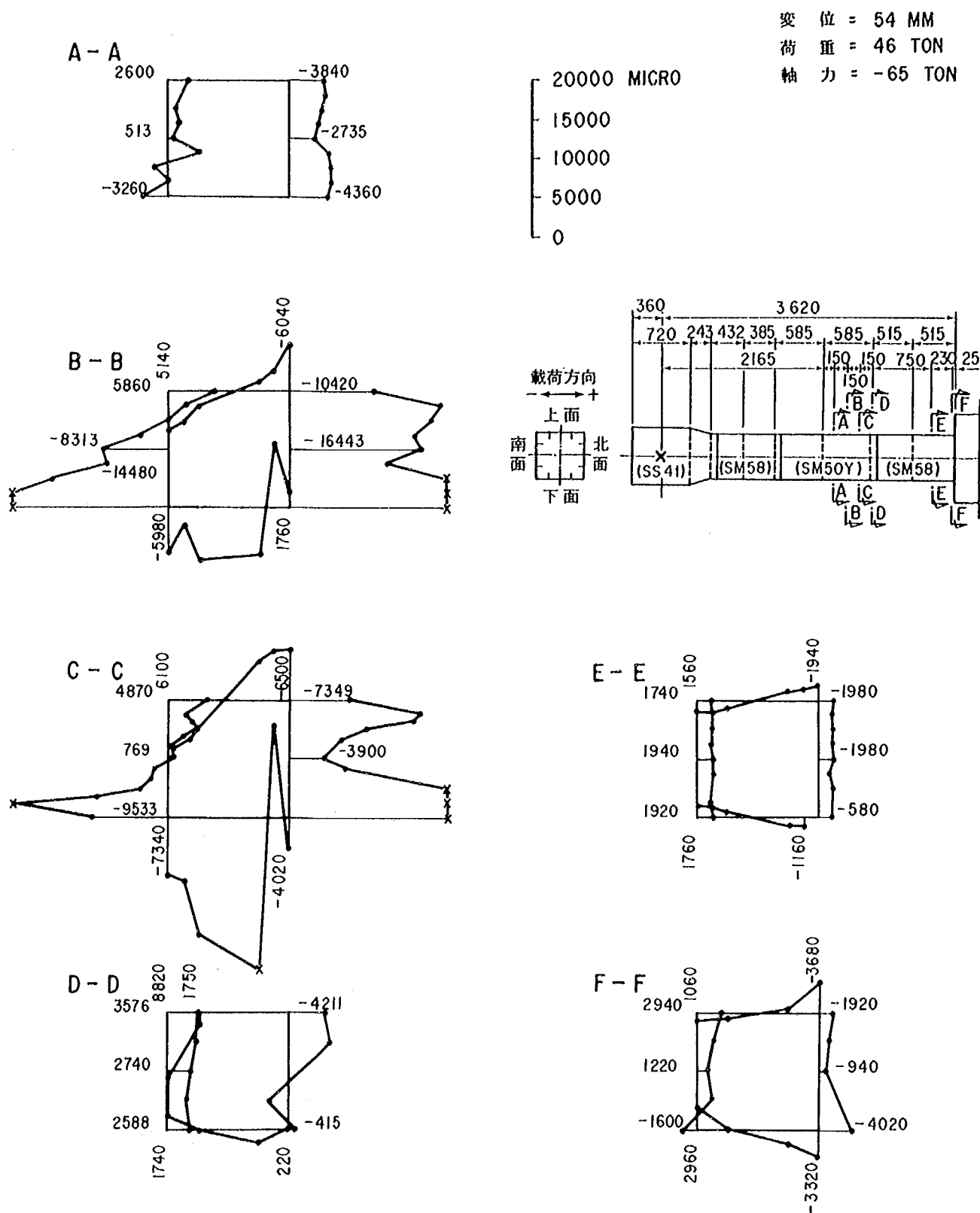
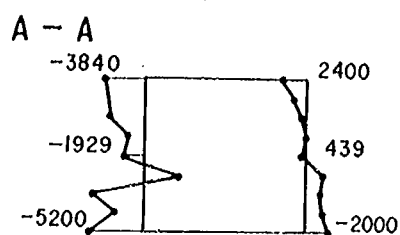


図 3 - 7 (10) 載荷段階 3 第 10 回め (正側) 載荷後のひずみ分布 (実験 1)



変位 = -53 MM
荷重 = -46 TON
軸力 = -60 TON

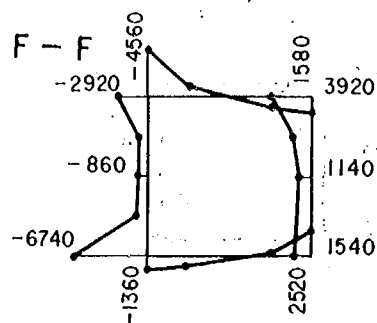
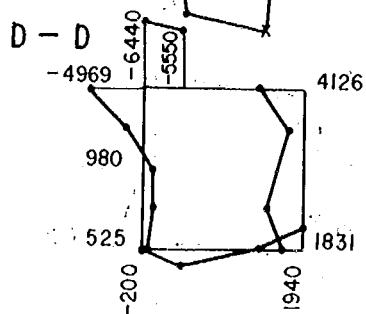
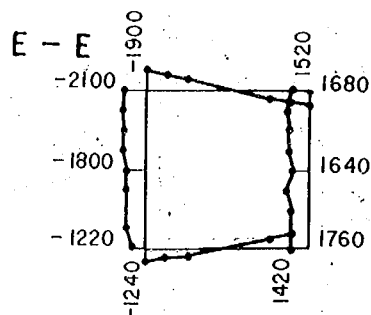
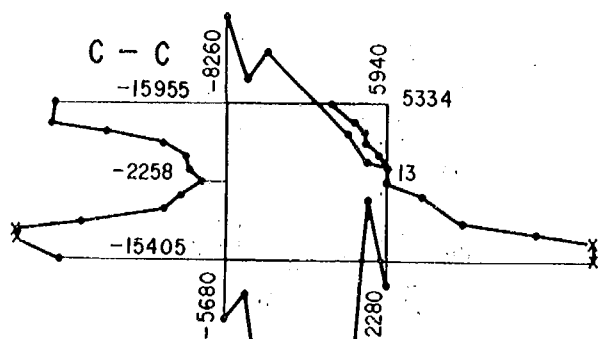
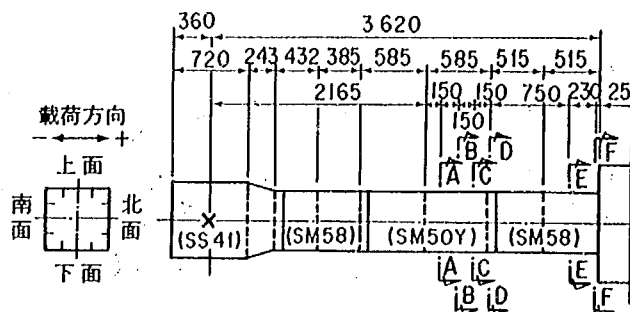
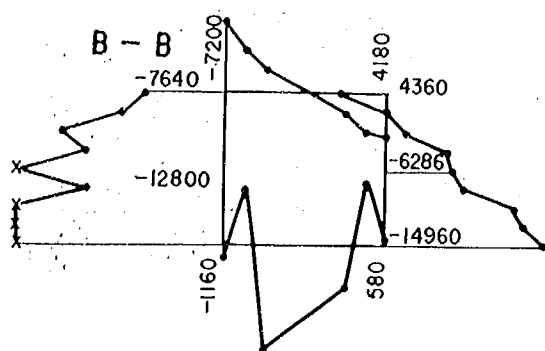
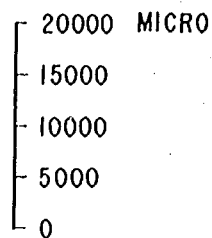
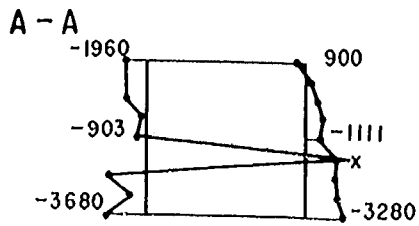


図 3 - 7 (11) 载荷段階 3 第 10 回め (負側) 载荷後のひずみ分布 (実験 1)



変位 = -19 MM
荷重 = 0 TON
軸力 = -60 TON

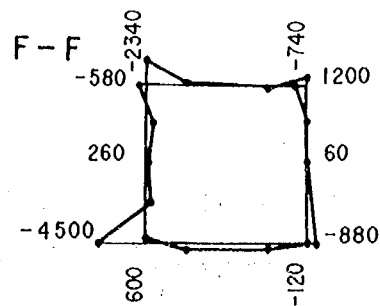
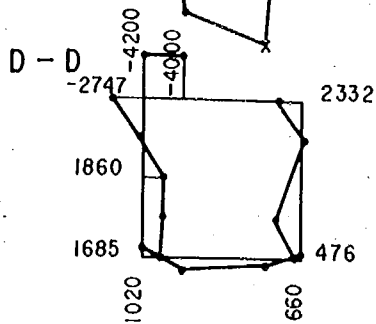
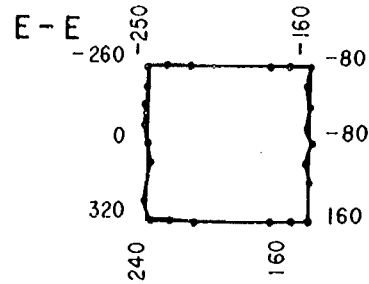
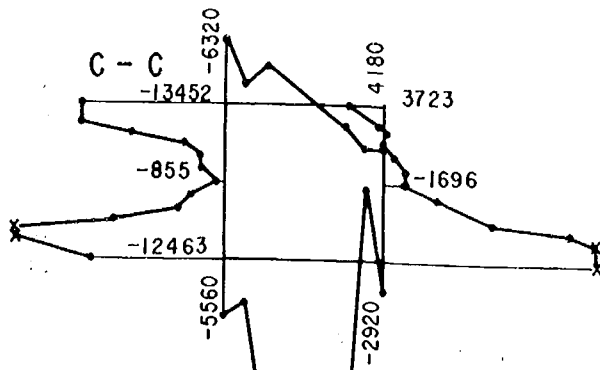
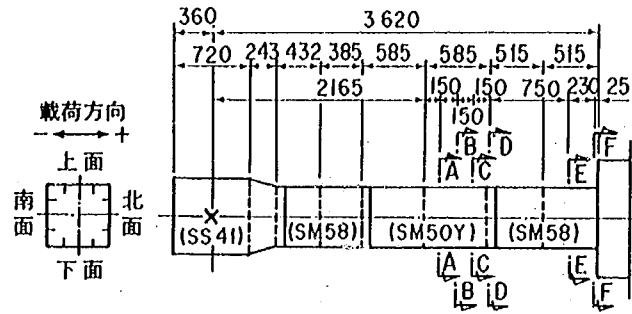
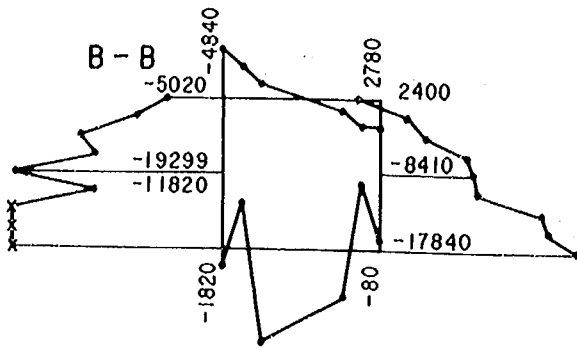
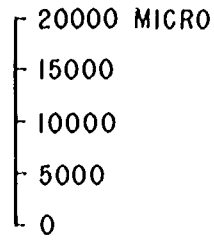
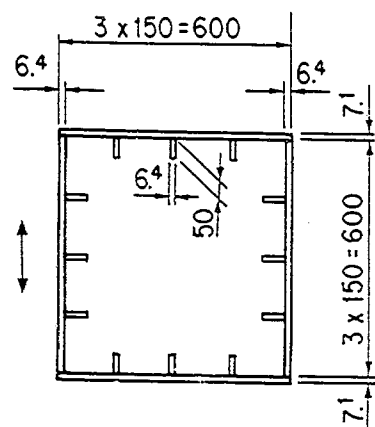


図3-7(12) 载荷段階3終了後に除荷した段階のひずみ分布(実験1)



		A	y	Ay ²	I
2-Flg	7.1×600	85.2	30.4	78480	—
2-web	600×6.4	76.8	—	—	23040
6-Rib	50×6.4	19.2	27.5	14520	40
4-Rib	6.4×50	12.8	15.0	2880	—
2-Rib	6.4×50	6.4	—	—	—
		200.4		118960	

$\sigma_y = 3,700 \text{ kg/cm}^2$ (Flg, web, Rib)

1) 断面積及び断面2次モーメント

$$A = 200.4 \text{ cm}^2 \quad I = 118960 \text{ cm}^4$$

2) 降伏モーメント及び降伏荷重

$$M_y = (3,700 - 87.7 \times 10^3 / 200.4) \times 118960 \times 1 / 30.7 \times 10^{-5} = 126 \text{ tm}$$

$$P_y = 126 / 2.67 = 47 \text{ t}$$

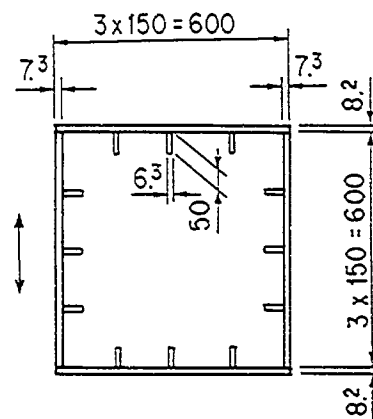
3) 全塑性モーメント及びこれに対する荷重

	A	y	σ_y	$A \cdot y \cdot \sigma_y$
2-Flg	85.2	30.4	3700	9568000
2-web	76.8	15.0	3700	4262000
6-Rib	19.2	27.5	3700	1954000
4-Rib	12.8	15.0	3700	710000
2-Rib	6.4	0.2	3700	5000
				16499000

$$M_p = 165 \text{ tm}$$

$$P_p = 62 \text{ t}$$

(a) 中間部断面 (SM50Y)



		A	y	Ay ²	I
2-Flg	8.2×600	98.4	30.4	90940	—
2-web	600×7.3	87.6	—	—	26280
6-Rib	50×6.3	18.9	27.5	14290	40
4-Rib	6.3×50	12.6	15.0	2840	—
2-Rib	6.3×50	6.3	—	—	—
		223.8		134390	

$\sigma_y = 6500 \text{ kg/cm}^2$ (Flg)

6100 kg/cm^2 (web)

6300 kg/cm^2 (Rib)

1) 断面積及び断面2次モーメント

$$A = 223.8 \text{ cm}^2 \quad I = 134390 \text{ cm}^4$$

2) 降伏モーメント及び降伏荷重

$$M_y = (\sigma_y - \sigma_c) \times I \times 1 / y = (6500 - 87.7 \times 10^3 / 223.8) \times 134390 \times 1 / 30.8 \times 10^{-5} = 267 \text{ tm}$$

$$P_y = M_y / h = 267 / 3.62 = 74 \text{ t}$$

3) 全塑性モーメント及びこれに対する荷重

	A	y	σ_y	$A \cdot y \cdot \sigma_y$
2-Flg	98.4	30.4	6500	19444000
2-web	87.6	15.0	6100	8015000
6-Rib	18.9	27.5	6300	3274000
4-Rib	12.6	15.0	6300	1191000
2-Rib	6.3	0.2	6300	8000
				31932000

$$M_p = 319 \text{ tm}$$

$$P_p = 88 \text{ t}$$

(b) 下部断面 (SM58)

図3-8 供試体断特性

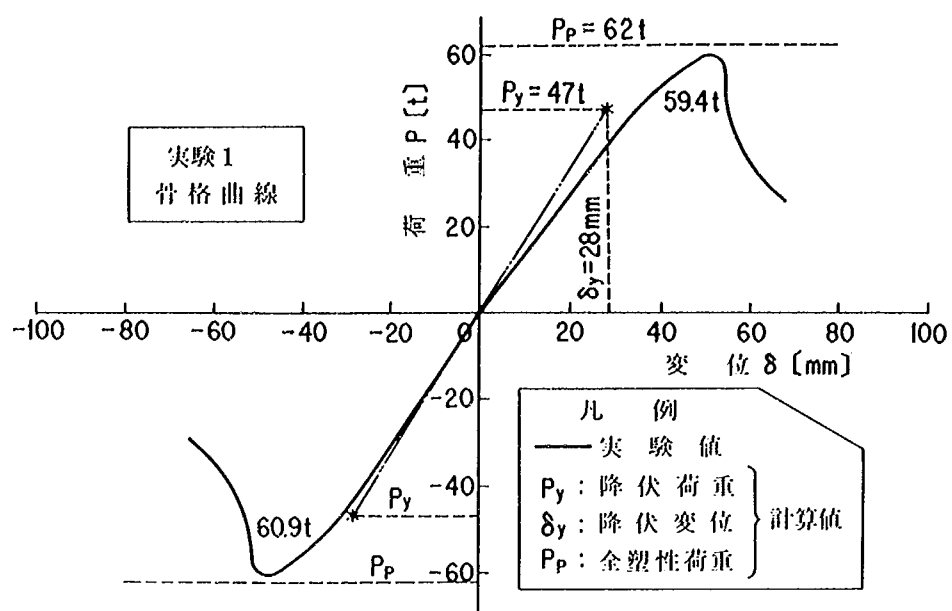


図3-9 実験による骨格曲線と計算値の比較

表 3-1 実験 1 の変状進展経過

载荷段階	CYCLE	変 状
1 ($1.0\delta_y$)		○特に変化なし。
2 ($1.4\delta_y$)	10	○北面, 南面フランジ, 下面ウェブ, 下から 3 パネルめの残留変形 (パネル全体の凹変形) を目視で確認する。
3 ($1.6\sim$ $1.8\delta_y$)	1	○北面, 南面フランジ, 下面ウェブが黒みを帯びる。 ○下面ウェブとダイヤフラムとの溶接ビードは赤みを帯びる。
	10	○北面, 南面フランジ, 下面ウェブのパネル全体の凹変形の中に局部的な変形を生じる。 (フランジと下ウェブとのコーナー付近で凸部を生じ波うつ。下面ウェブの凹, 凸にフランジの凸, 凹が対応する) ○北面フランジ, 下面ウェブのコーナー付近の黒皮が剥離する。 ○下面ウェブのコーナー付近が鉛色に変色する。 ○上部ウェブの南面フランジ側コーナー付近に局部的な凸変形を生じる。
4 ($1.8\delta_y$)	1	○北面, 南面フランジと下面ウェブとのコーナーが大きく波うち黒色の変色, 黒皮剥離が極めて顕著になる。 ○上面ウェブのフランジとの溶接部が黒色に変色し, 黒皮が剥離する。
	2	○下面ウェブのダイヤフラムとの溶接部が赤茶色に変色する。 ○上面ウェブの北面フランジ側コーナー付近に局部的な凸変形を生じる。
	10	○北面フランジが鉛色に変色する。 ○北面, 南面フランジと下面ウェブとのコーナーに柱軸直角方向のクラックを生じる。 (溶接ビード, フランジ母材でそれぞれ別々にクラックを生じ, それらが進行して一連のクラックとなる)
5 ($2.0\delta_y$)	5	○北面, 南面フランジと上ウェブとのコーナーに柱軸直角方向のクラックを生じる。
	10	○コーナーのクラックが進行する。
6 ($2.2\delta_y$)	10	○载荷終了時のクラックの状態は下図のとおり。

l : クラック長 (mm), b : クラック幅 (mm)

3.2 実験2及び実験2R

3.2.1 実験2

実験2では図2-3に示した供試体を用い、図3-10に示す加振変位（変位制御）により載荷した。実験2の目的は、本震により最大耐力直前まで被災した橋脚に対して余震による振動が作用した場合の影響を検討することであり、このため載荷は次のように2ステップに分けて行った。

1) 第1ステップ

実験1の載荷結果（図3-4参考）より、フランジの面外変形が 10mm になるように、 42mm ($1.4\delta_y$)の変位振幅を作用させた（載荷段階1, 10回載荷）。ただし、この段階ではフランジの面外変形が 10mm に達しなかったため、 48mm ($1.6\delta_y$)に変位振幅を上げ5回くり返し載荷した（載荷段階2）。これによってもフランジの面外変形は 7mm 程度であったため、更に載荷変位振幅を 51mm ($1.7\delta_y$)に上げた（載荷段階3, 2回載荷）結果、面外変形が目標の約 10mm となったため、これにより第1ステップの載荷を打ち切った。なお、載荷段階3で載荷くり返し回数を2回としたのは、実験1からこの程度の振幅が最大耐力に対応し、これよりもわずかな振幅の増加が生じると急激な耐力の低下が生じる恐れがあったために、ここで載荷を打ち切ったものである。

2) 第2ステップ

余震の影響を表わすために、変位振幅 30mm ($1.0\delta_y$)から 6mm ($0.2\delta_y$)ピッチで順次載荷変位振幅を上げた。これにより載荷段階7（変位振幅 48mm , $1.6\delta_y$ ）を終了した段階で、フランジの面外変形量が 12mm に達し、当初目標にした 15mm の面外変形量に近づいたこと、また、次に $1.8\delta_y$ で載荷すると実験1の結果より最大耐力点を越して急激に耐力が減少する可能性があったことから、載荷段階8では変位振幅を 51mm ($1.7\delta_y$)とした。ただし、載荷段階8で2回くり返した段階で面外変形量が 15mm となったため、ここで第2ステップの載荷を終了した。図3-11は第2ステップ終了後の最終変状を示した結果である。

図3-12は、上記載荷ステップ1及び2の荷重～変位履歴曲線を示したものである。また、これより骨格曲線を比較すると図3-13のようになる。これによれば、載荷ステップ2の骨格曲線は載荷ステップ1の骨格曲線とほとんど同一と言ってもよく、初期の載荷（載荷ステップ1）において最大耐力を越していなければ、その後の載荷（載荷ステップ2）においては初期の載荷（載荷ステップ1）の影響はほとんど無いといえることができる。図3-14は、軸力導入後から載荷段階8終了後に至るひずみ分布を示したものである。その特徴を検討すると以下の事項が指摘される。

- 1) 軸力導入後の軸力ひずみは 200μ 程度となっている。ただし、図3-7(1)に示した実験1の場合と比較すると、場所ごとのひずみ分布にやや違いが認められる。
- 2) 載荷段階3第2回め載荷（ $\delta=51\text{mm}$, $1.7\delta_y$ ）時のひずみ分布は図3-14(2)及び(3)に示す通りであるが、これは図3-7(8)及び(9)に示した実験1の場合とほぼ同じ特性のひずみ分布となっている。載荷段階3終了後には図3-14(4)に示すようなC-C断面のフランジに $3,600\mu$ 程度の残

留ひずみが生じている。なお実験1の場合には、載荷段階3終了後に図3-7(12)に示したような非常に大きな残留ひずみが生じているが、これは前述したように、実験1では載荷段階3における載荷変位が急に変化し、最終的に最大耐力点における $1.8\delta_y$ に達してしまったことに注意しなければならない。

- 3) 載荷段階3, 第2回めの載荷($\delta=51\text{ mm}$, $1.7\delta_y$)におけるひずみ分布は図3-14(5)及び(6)に示す通りである。これを上述の図3-14(2)及び(3)に示した載荷段階3第2回めの載荷時のひずみ分布と比較すると、両者にはほとんど違いが認められない。更に図3-14(7)に示す載荷段階8終了後の除荷時のひずみ分布と図3-14(4)に示した載荷段階3終了後の除荷時のひずみ分布にもほとんど違いが認められない。このことは、載荷段階3から載荷段階8に至るまでに大きな残留ひずみの蓄積がなかったことを意味している。このことから、上述したように本震により橋脚の最大耐力点付近まで達していても、最大耐力を越していなければその影響は余震時には小さいことを意味している。

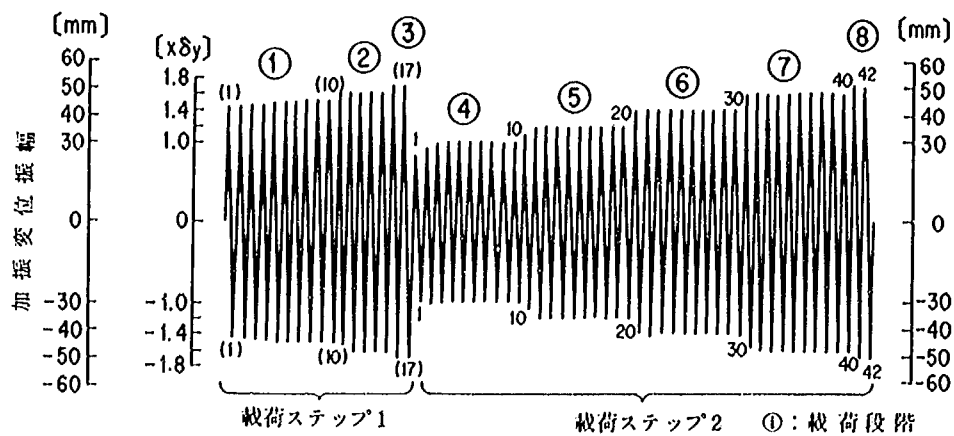


図 3-10 加振変位 (実験 2)

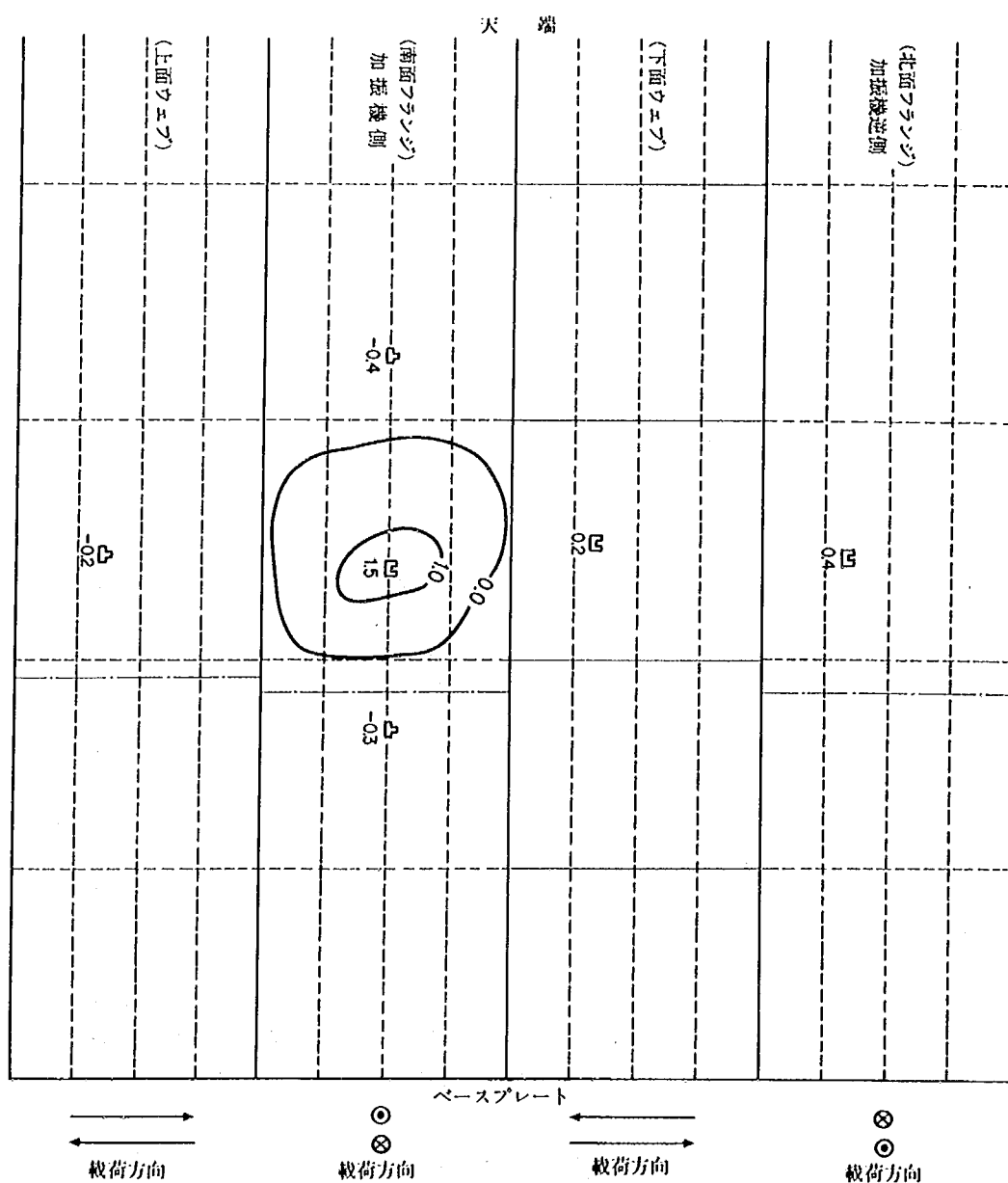
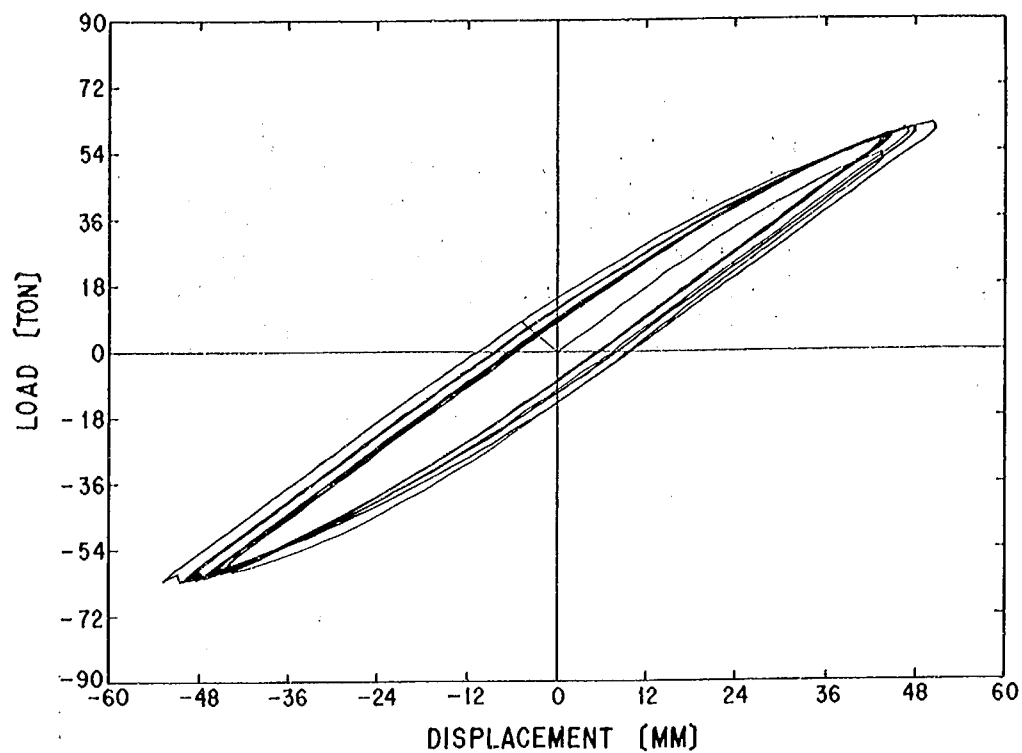
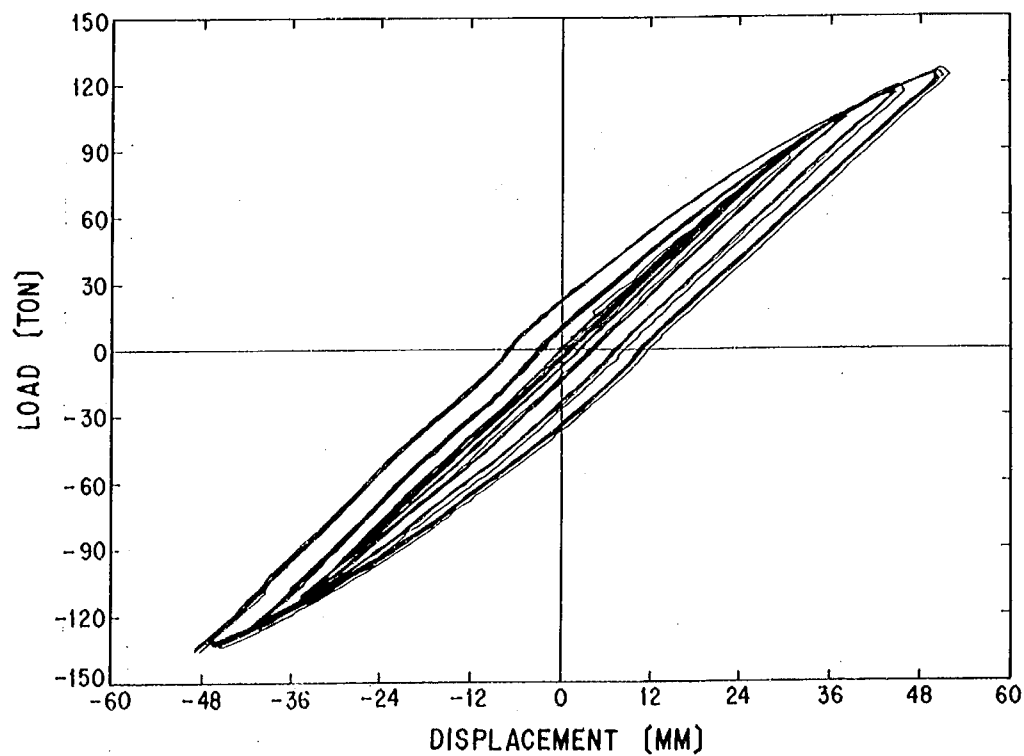


図 3-11 実験 2 の最終変状状態



(a) 載荷ステップ 1



(b) 載荷ステップ 2

図 3-12 荷重～変位履歴 (実験 2)

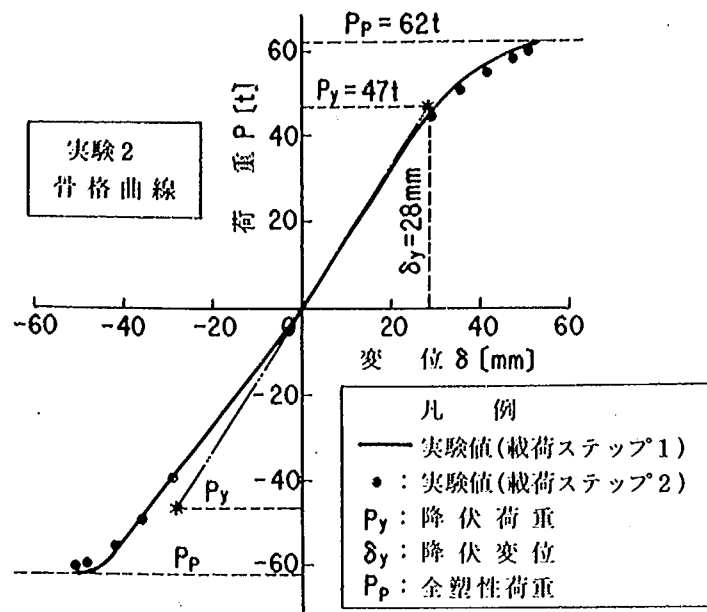
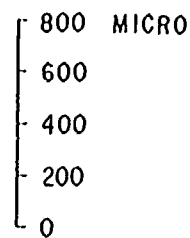
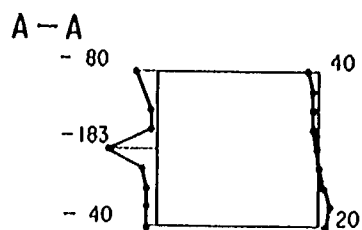


図3-13 実験による骨格曲線と計算値の比較



変位 = 0 MM
荷重 = -0 TON
軸力 = -89 TON

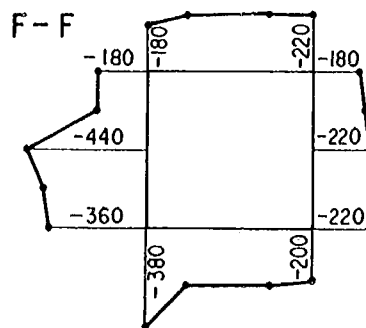
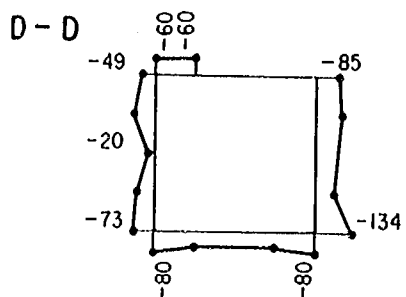
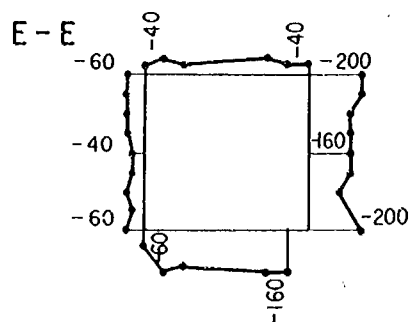
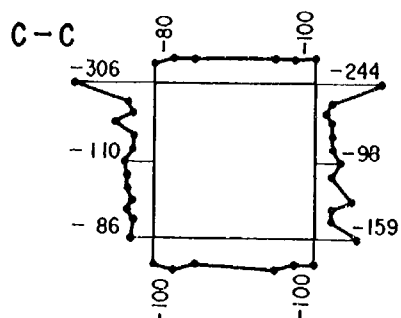
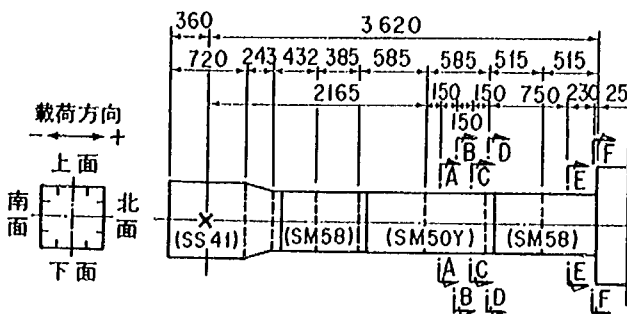
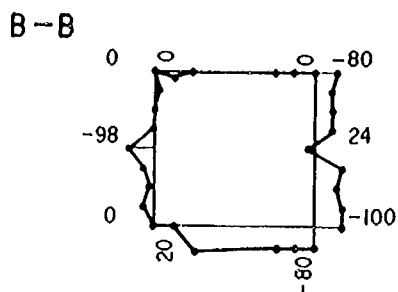


図3-14(1) 載荷前（軸力導入後）のひずみ分布（実験2）

変位 = 51 MM
荷重 = 61 TON
軸力 = -88 TON

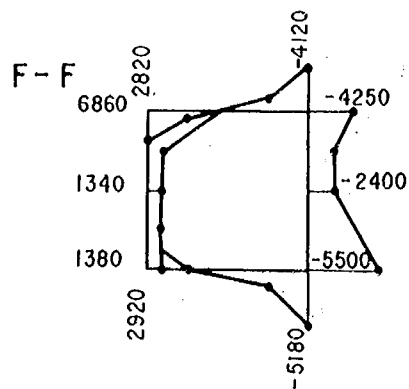
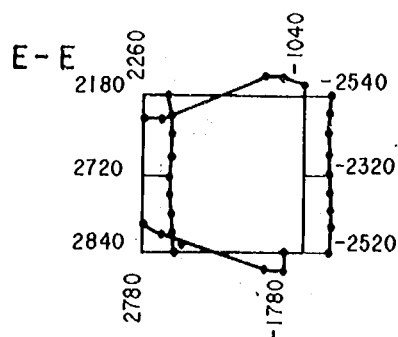
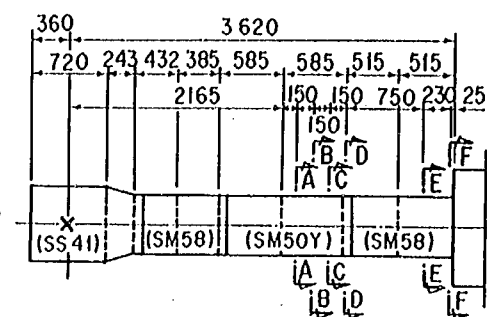
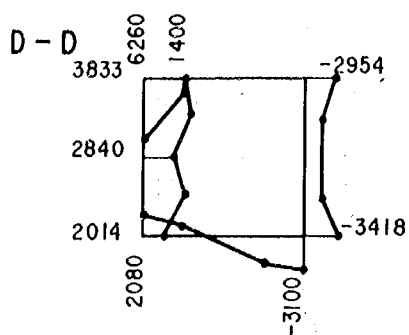
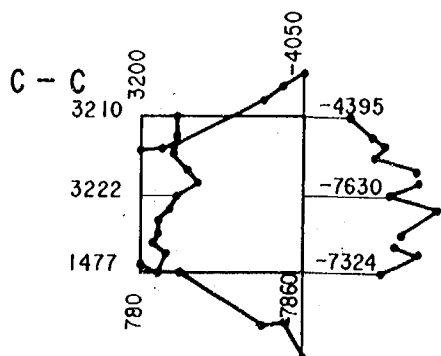
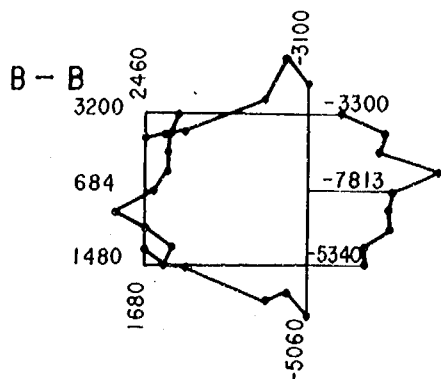
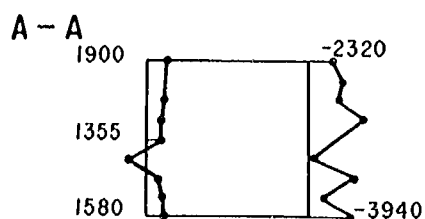
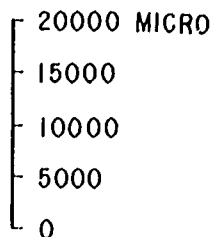


図 3-14(2) 載荷段階 3 第 2 回め (正側) 載荷後のひずみ分布 (実験 2)

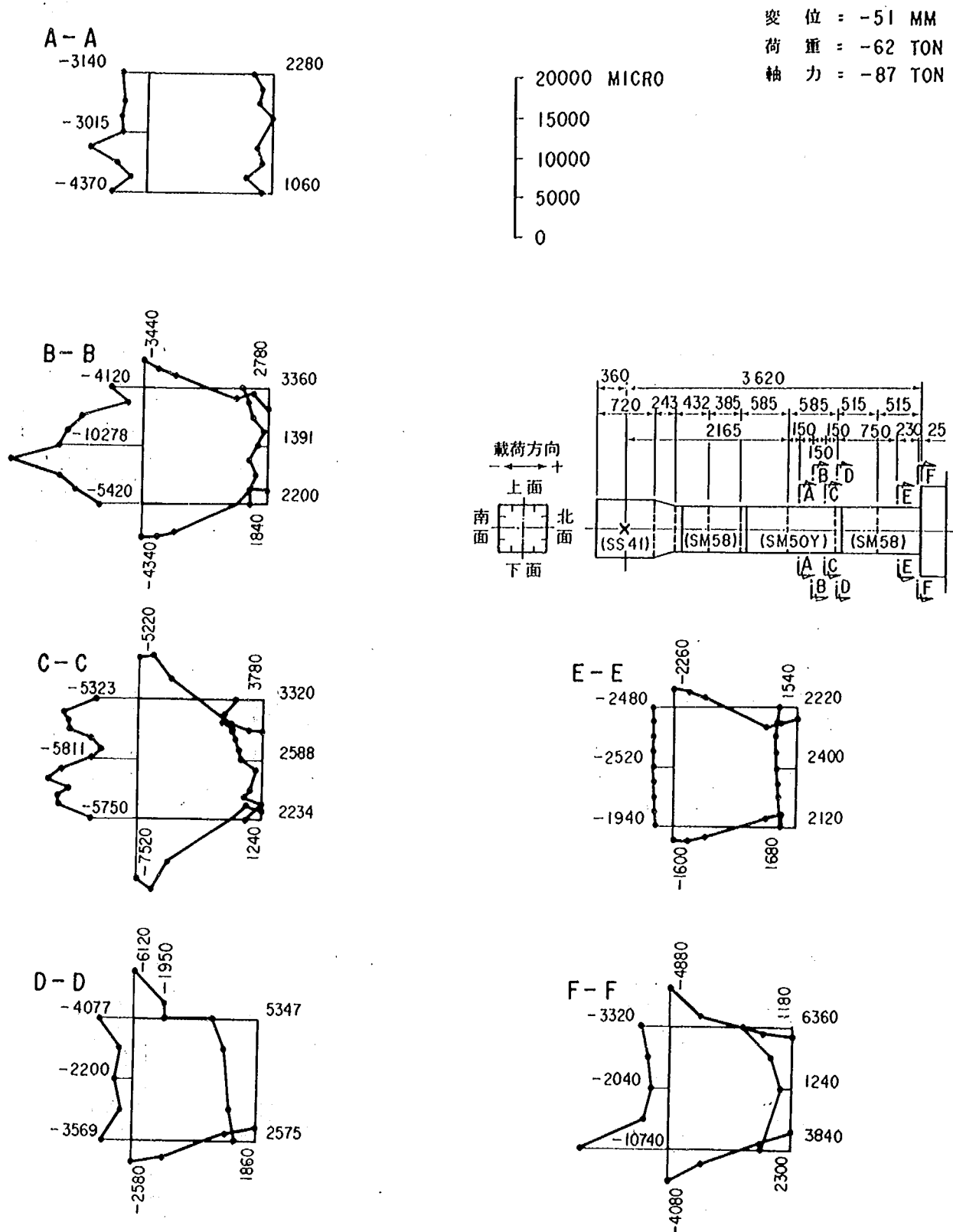


図3-14(3) 載荷段階3第2回め(負側)載荷後のひずみ分布(実験2)

変位 = -11 MM
荷重 = 0 TON
軸力 = -88 TON

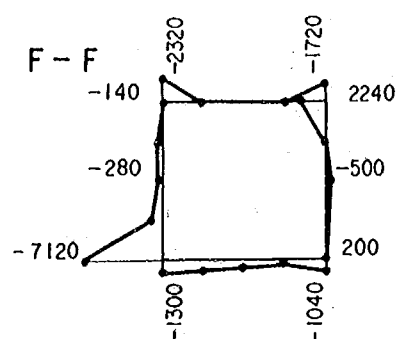
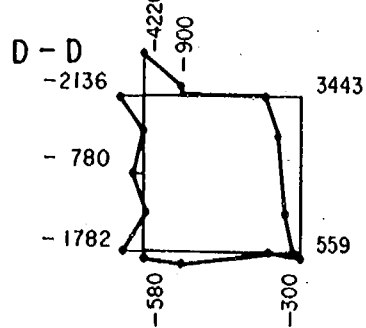
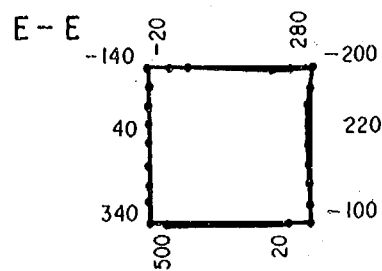
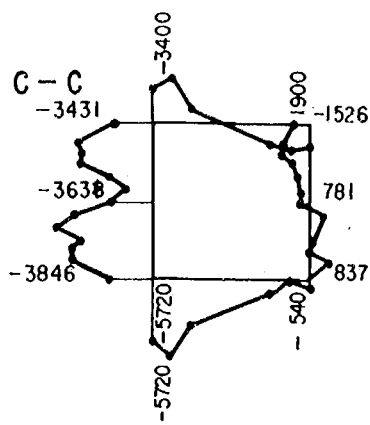
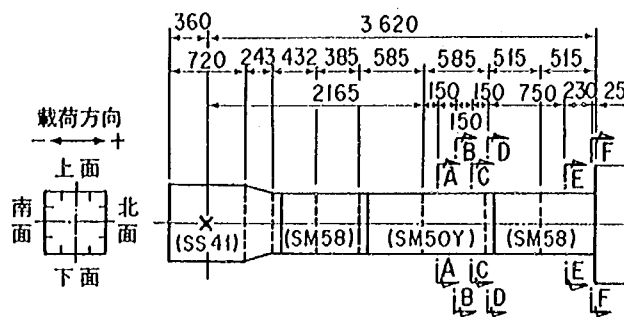
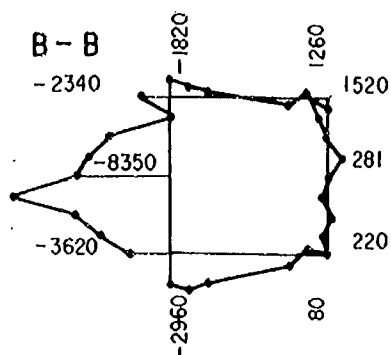
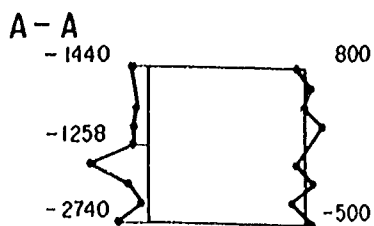
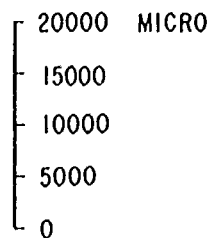
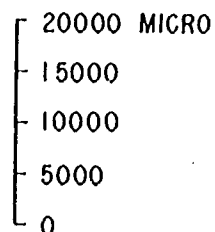
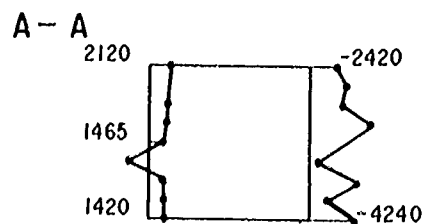


図3-14(4) 載荷段階3終了後に除荷した段階のひずみ分布 (実験2)



変位 = 51 MM
荷重 = 58 TON
軸力 = -87 TON

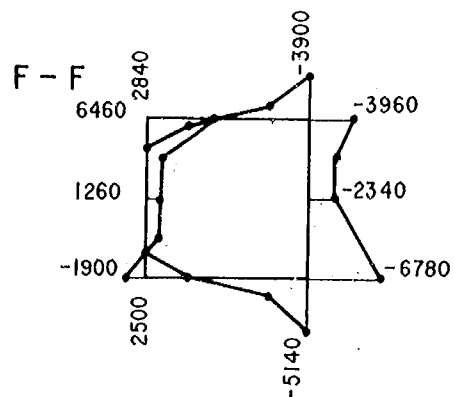
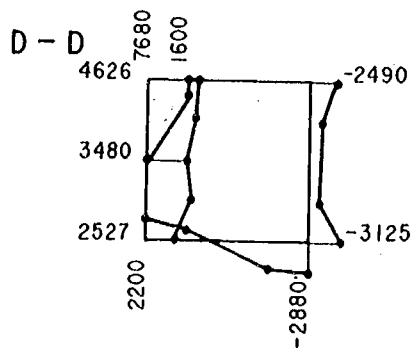
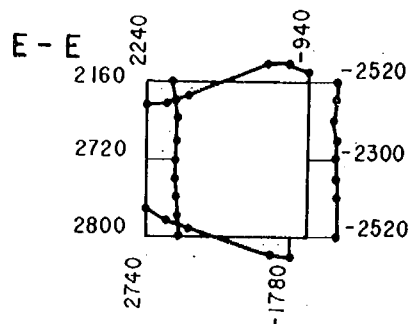
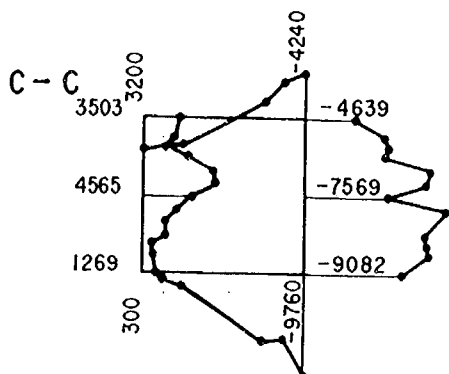
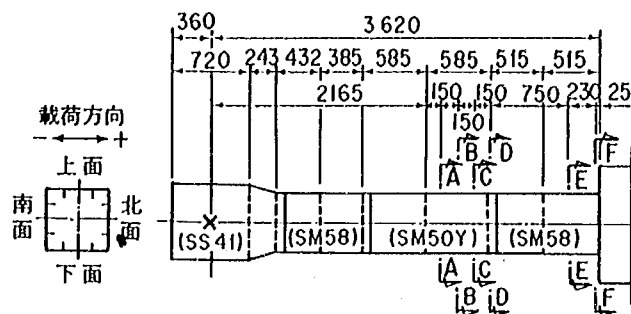
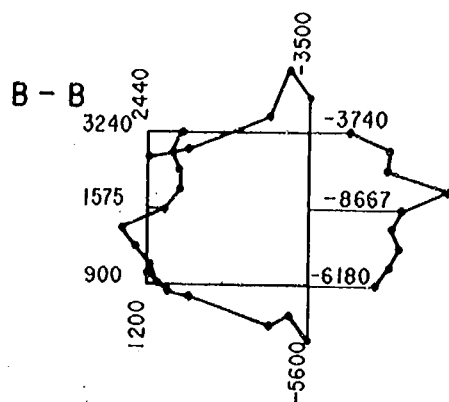


図3-14(5) 載荷段階8第2回め(正側) 載荷後のひずみ分布(実験2)

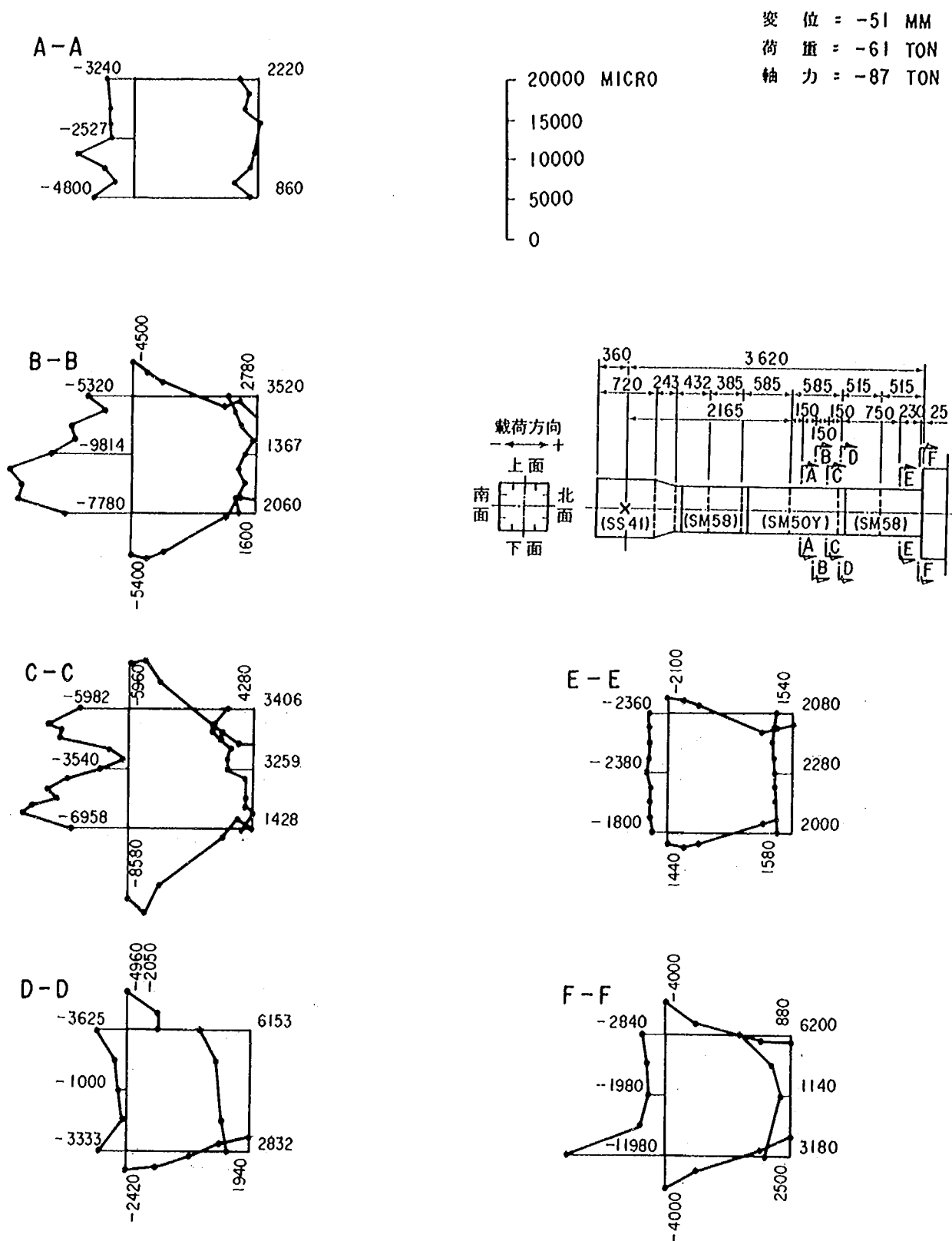
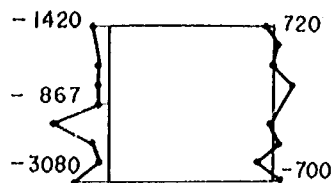


図 3-14(6) 載荷段階 8 第 2 回め (負側) 載荷後のひずみ分布 (実験 2)

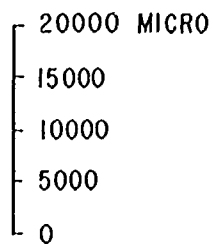
A - A



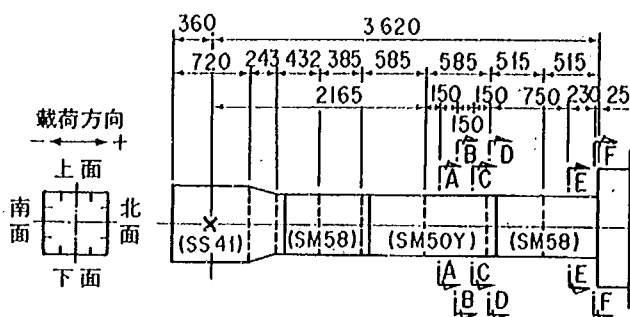
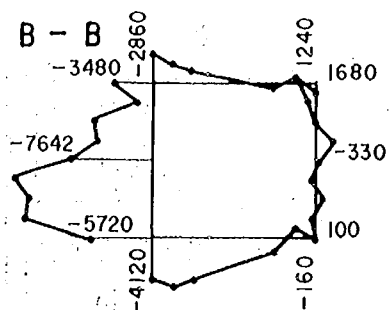
変位 = -11 MM

荷重 = 0 TON

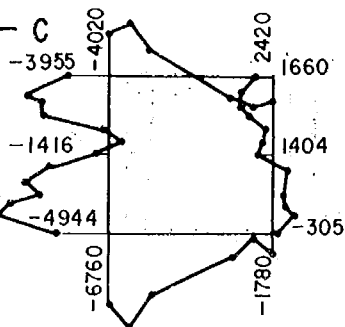
軸力 = -87 TON



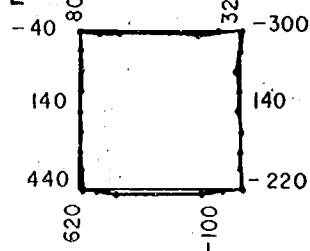
B - B



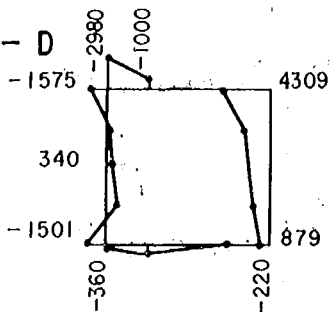
C - C



E - E



D - D



F - F

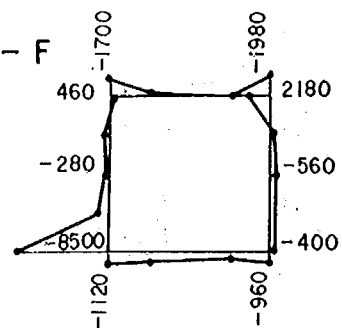


図3-14(7) 载荷段階8終了後に除荷した段階のひずみ分布(実験2)

3.2.2 実験2 R

実験2 Rでは実験2で残留面外変形15 mmの損傷を与えた供試体に図2-9に示した補剛板添接による補修を行い、図3-15に示す加振変位(変位制御)により載荷した。載荷は供試体が終局状態に達するまで行う予定であったが、最大荷重134 tの載荷段階4の載荷終了後に加振機に不調が生じたため、これ以後の載荷を中止した。

図3-16は橋脚天端の荷重～変位履歴曲線を示したものであり、図3-17は図3-16から各載荷段階の第1回目と第10回目の履歴曲線を取り出して比較したものである。また、図3-18は実験終了後、添接していた補剛材を取り除いて調べた供試体本体の最終変状を示したものである。これらから以下の事項を指摘することができる。

- 1) 載荷段階4では、正側に126 t(橋脚天端変位50 mm)、負側に134 t(橋脚天端変位48 mm)までの荷重を載荷したが、添接した補剛材には目視で確認できるような変状は認められなかった。供試体本体には図3-18に示したように最大12 mmの残留面外変形が橋脚下端から3パネルめの加振機側フランジに見られたが、これは図3-11に示した実験2終了時の最終状態を比較すると、実験2終了時に生じていたのと同じ箇所の面外変形が、面外変形量が小さくなる形で残留したものである。他の箇所には、新たな面外残留変形は発生していなかった。
- 2) 各載荷段階とも第1回めの載荷と第10回めの載荷では履歴曲線はほとんど変化しておらず、ここでは少なくとも10回程度の載荷くり返しによって、耐力及び変形性能に大きな変化は生じない。

図3-19は、各載荷段階における載荷終了後の残留面外変形量(パネル内の残留変位の最大値)と載荷変位振幅の関係を示したものである。図中には、図3-16に示した履歴曲線の骨格曲線(正側及び負側の骨格曲線の平均値)及び等価粘性減衰定数 h_e (図3-5参照)も示している。この図からも実験2 Rの載荷では特に顕著な残留面外変形は生じておらず、等価粘性減衰定数も最大9%であり、加振振幅により大きくは変化していない。

図3-20は、軸入導入後から載荷段階4終了までに供試体に生じたひずみの分布を示したものである。また、図3-21は実験2 Rおよび後述する実験3 Rの供試体の降伏荷重 P_y 及び全塑性荷重 P_p を全断面有効と考えて求めたものである。

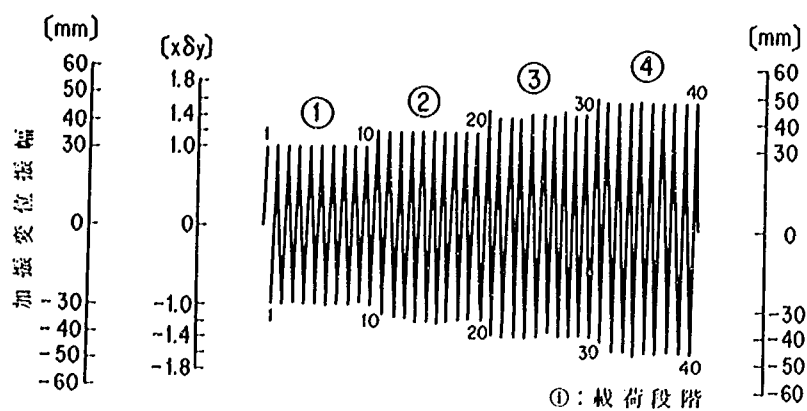


図 3-15 加振変位 (実験 2 R)

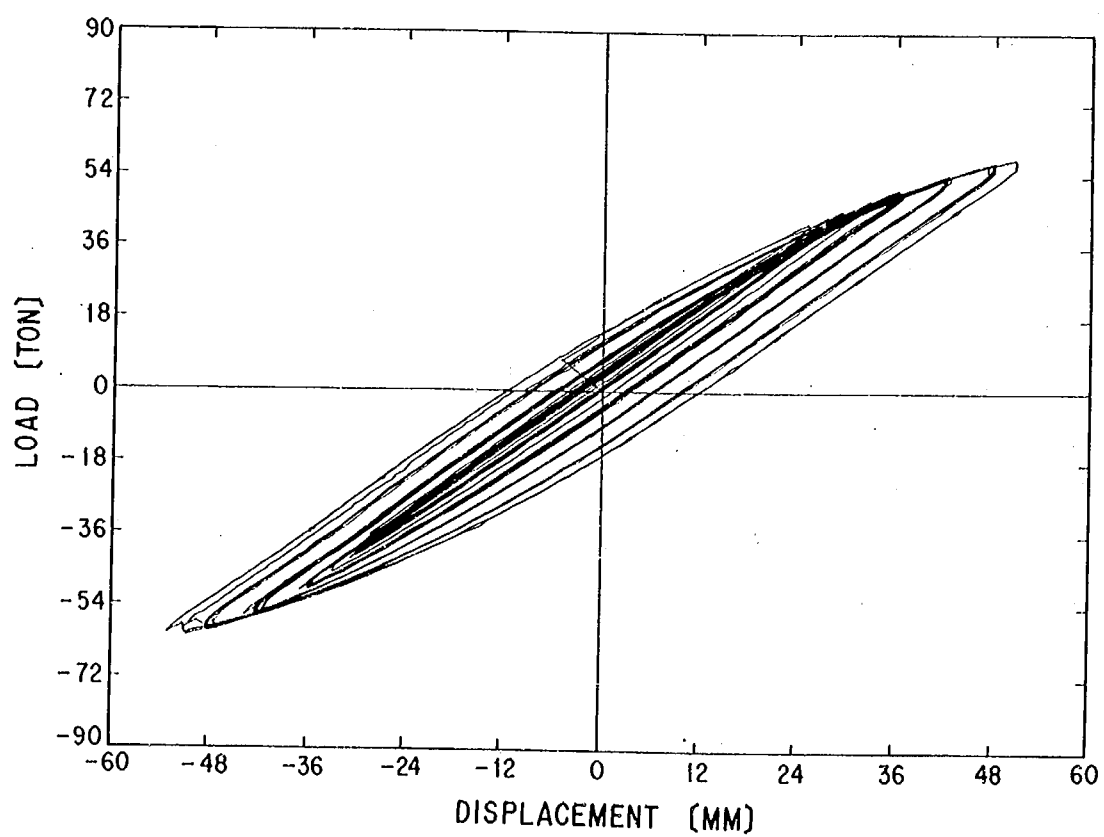
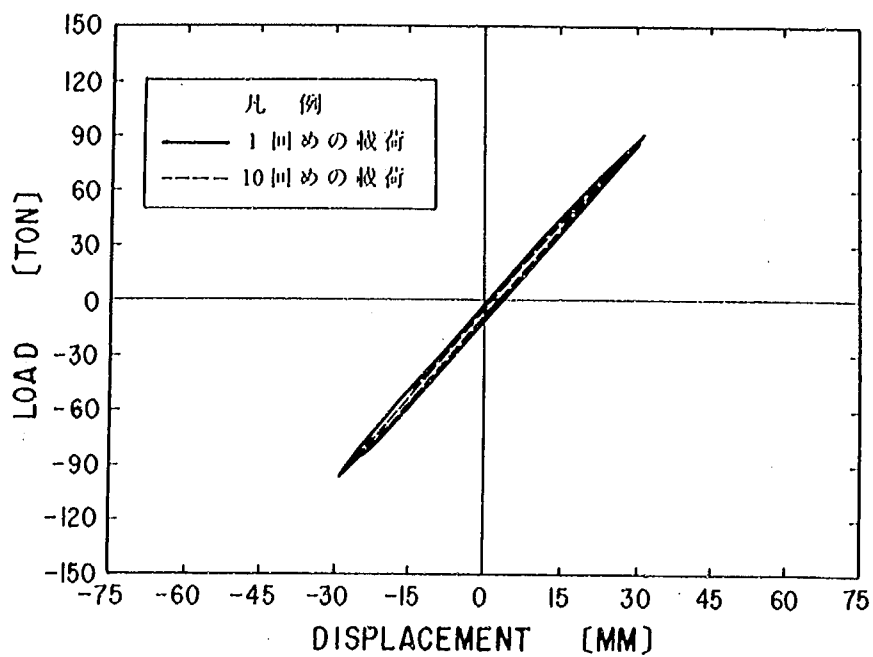
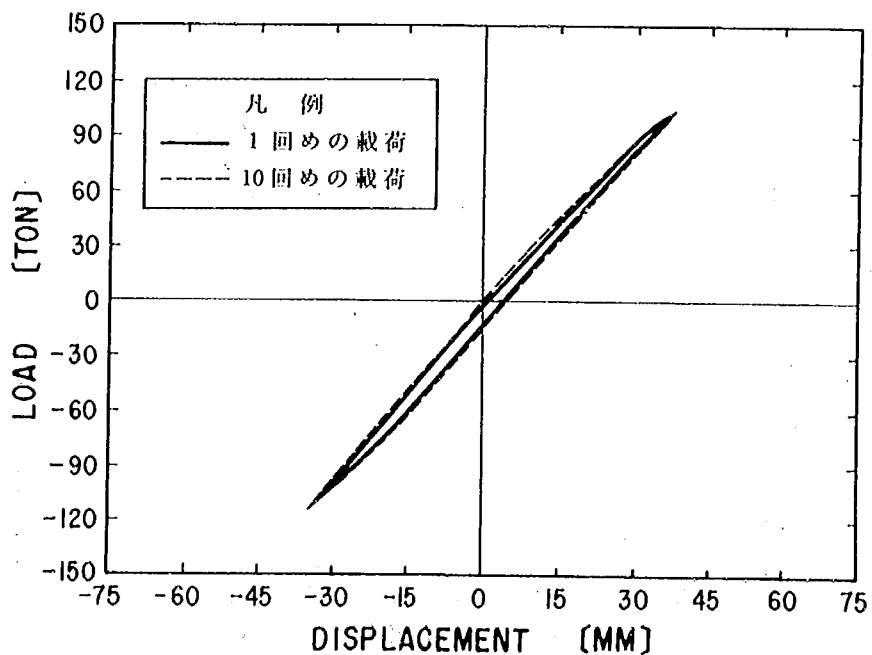


図 3-16 荷重～変位履歴 (実験 2 R)

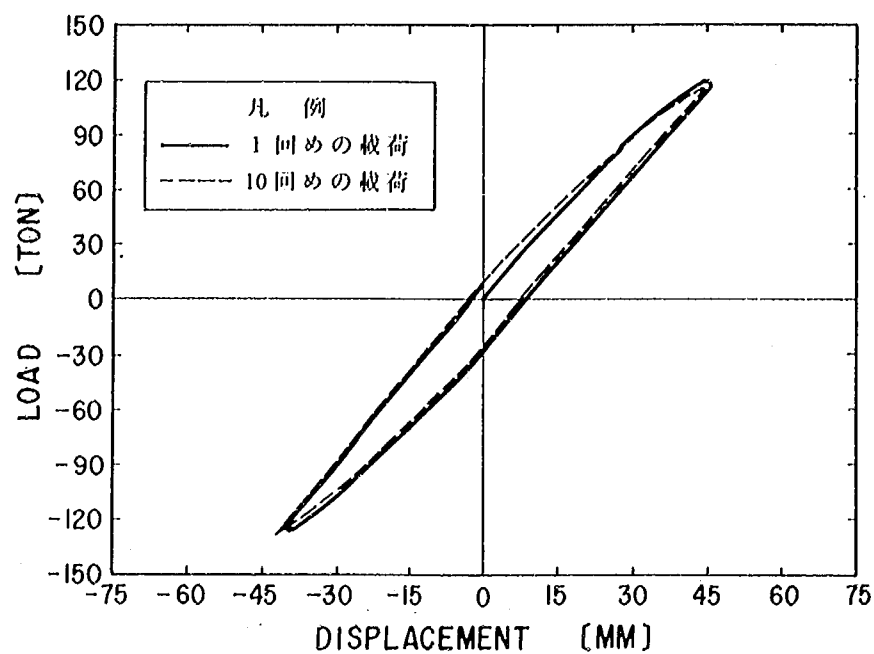


(a) 載荷段階 1

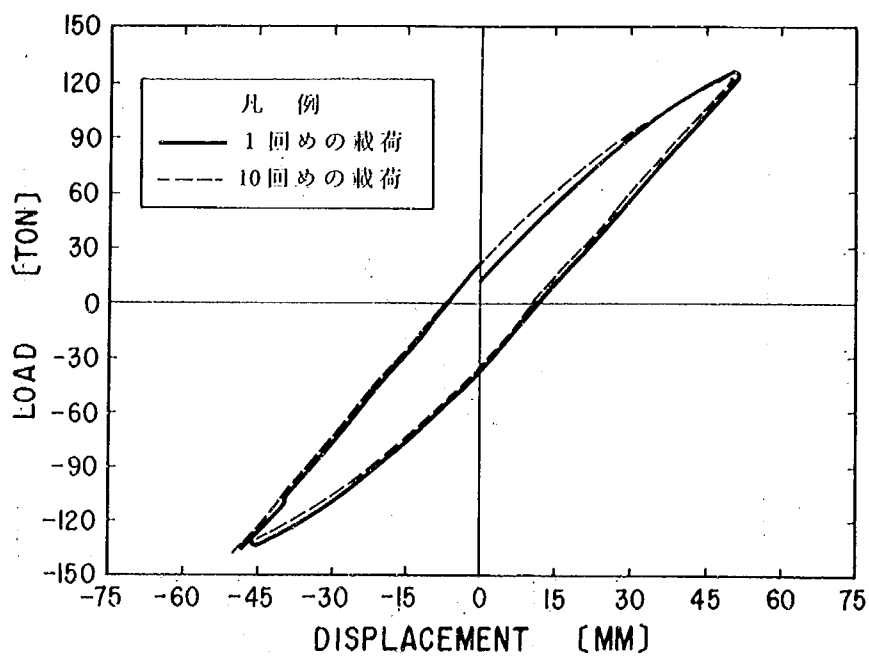


(b) 載荷段階 2

図 3-17(1) 実験 2 R の荷重～変位履歴曲線



(c) 载荷段階 3



(d) 载荷段階 4

図 3-17(2) 実験 2R の荷重～変位履歴曲線

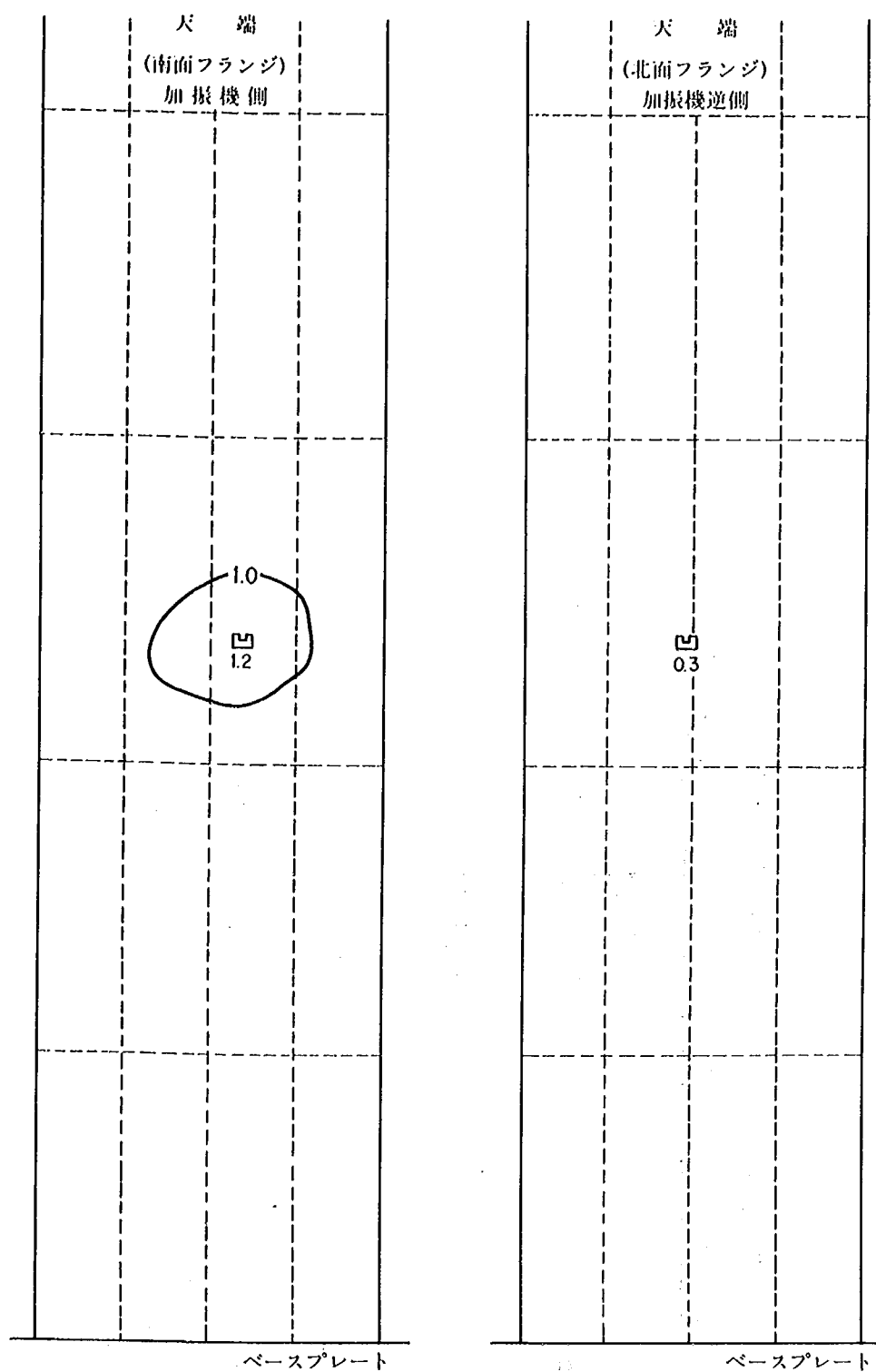


図 3-18 実験 2R の最終変状状態

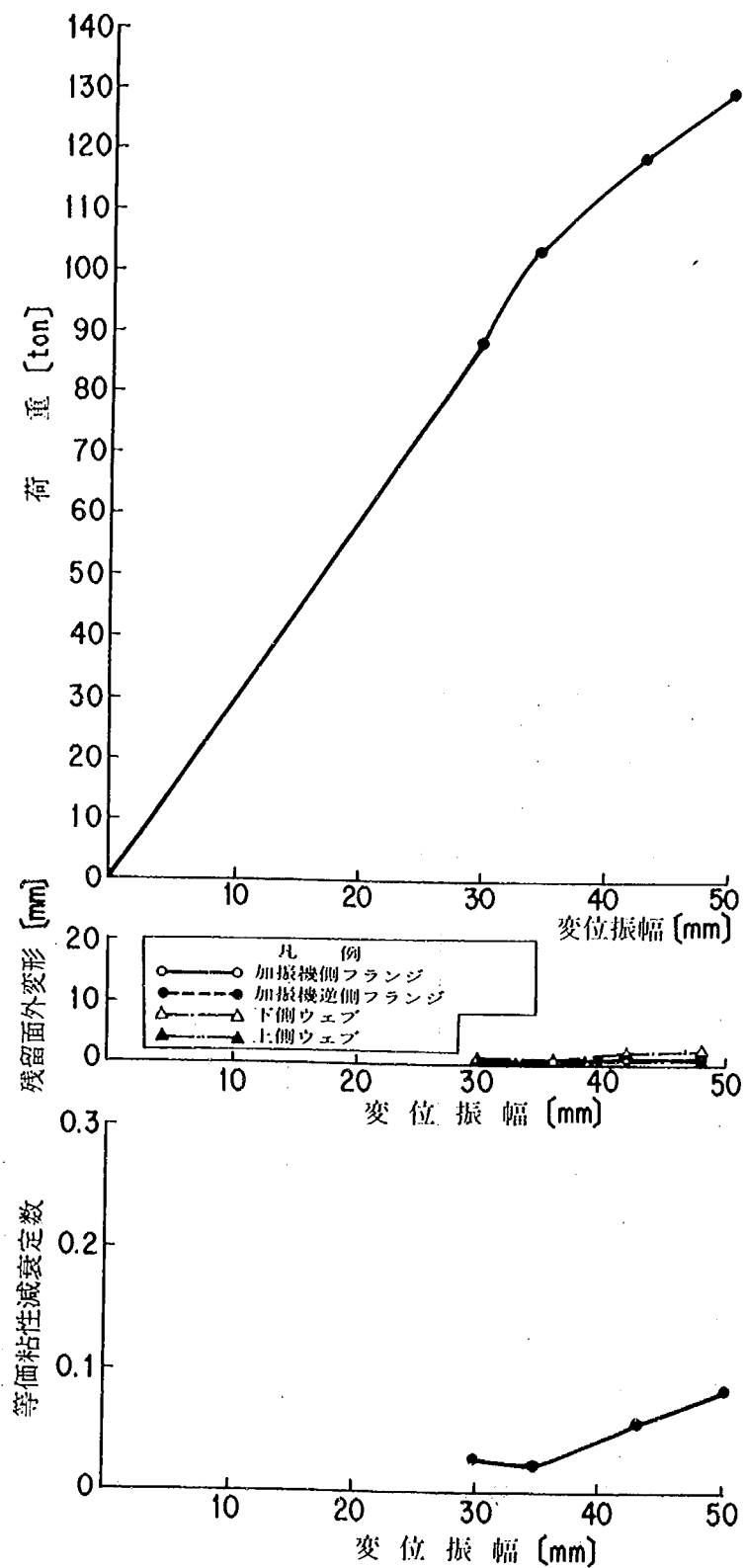
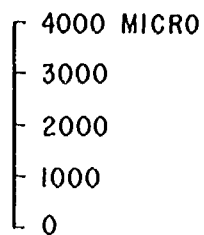
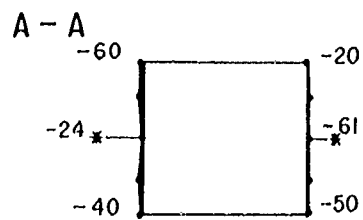


図3-19 実験2Rの荷重, 残留面外変形, 等価粘性減衰定数



変位 = 0 MM
荷重 = 0 TON
軸力 = -88 TON

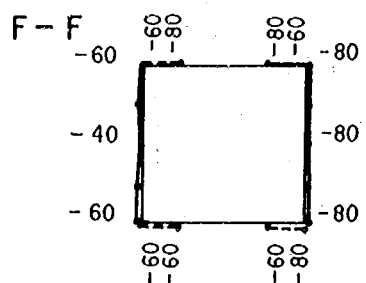
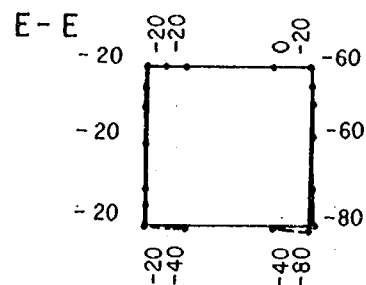
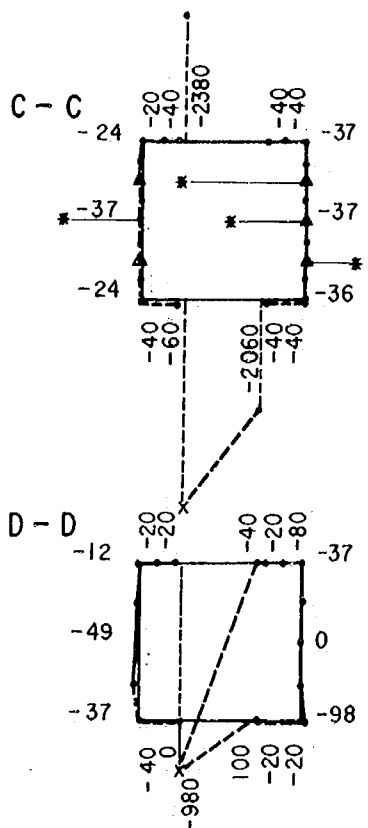
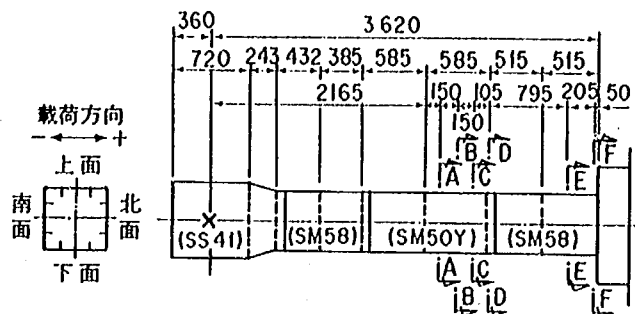
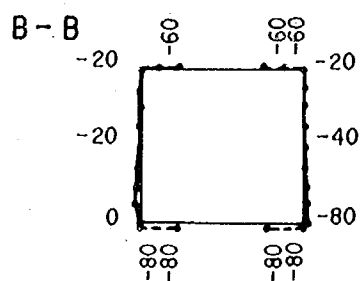
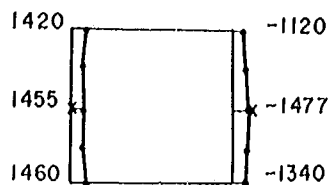
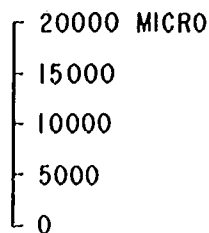


図3-20(1) 載荷前（軸入導入後）のひずみ分布（実験2R）

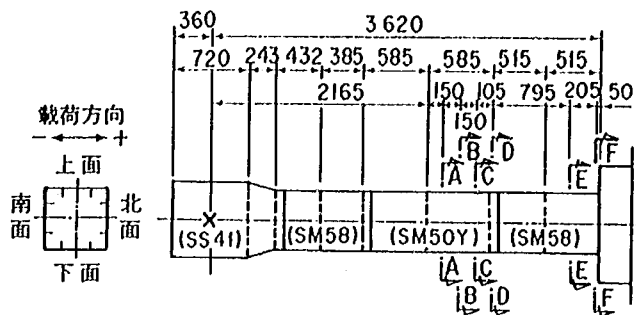
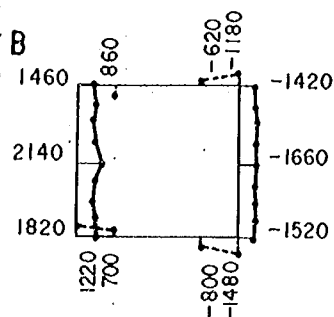
A - A



変位 = 29 MM
荷重 = 87 TON
軸力 = -88 TON

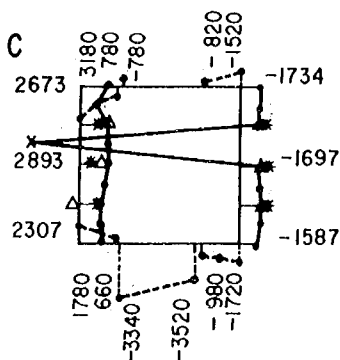


B - B

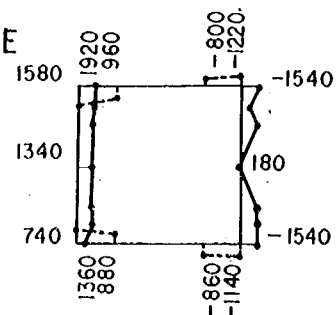


△----- リブ縁端
米----- 本 体

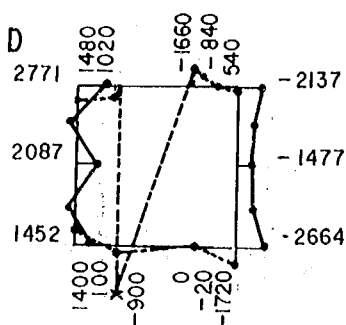
C - C



E - E



D - D



F - F

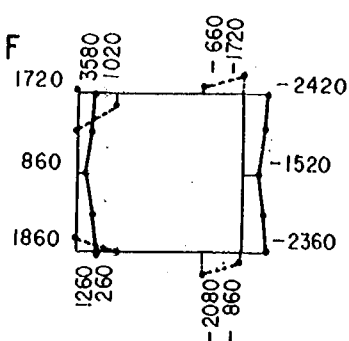
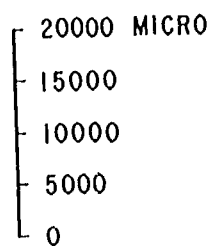
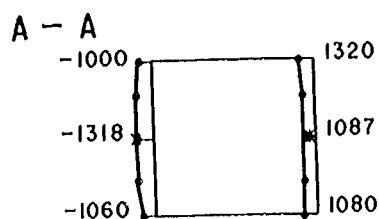


図3-20(2) 載荷段階1第1回め・(正側) 載荷後のひずみ分布 (実験2R)



変位 = -30 MM
荷重 = -95 TON
軸力 = -88 TON

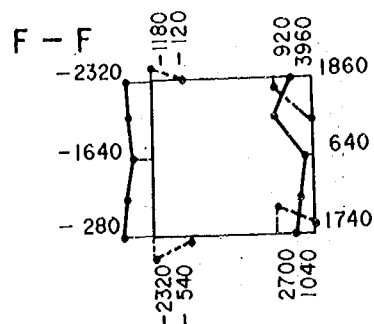
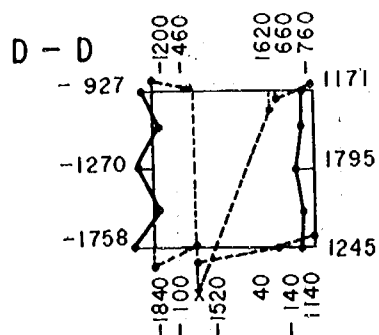
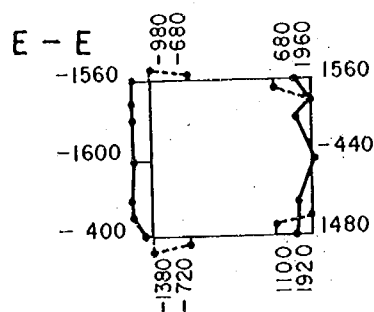
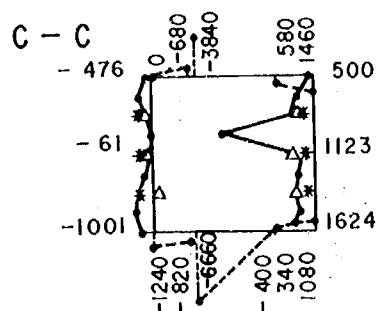
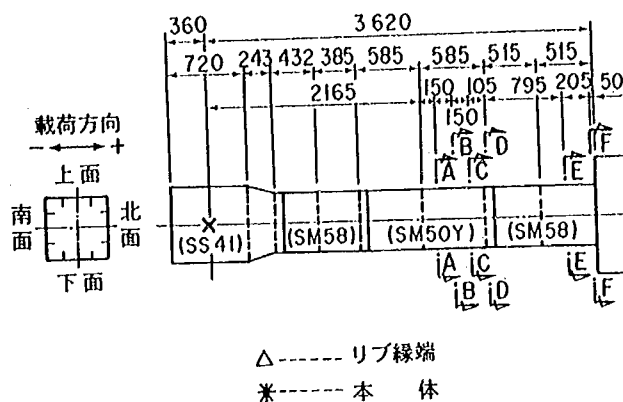
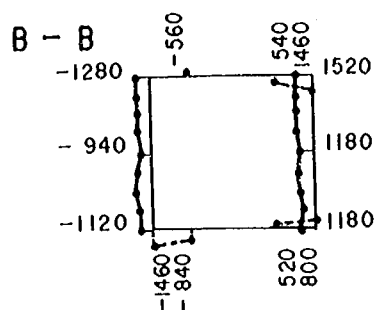
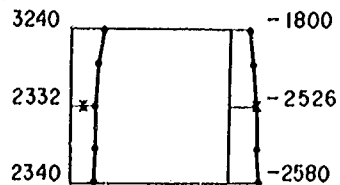
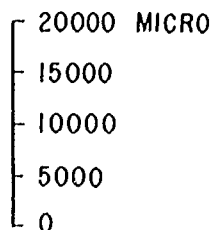


図3-20(3) 荷役段階1第1回め(負側)荷役後のひずみ分布(実験2R)

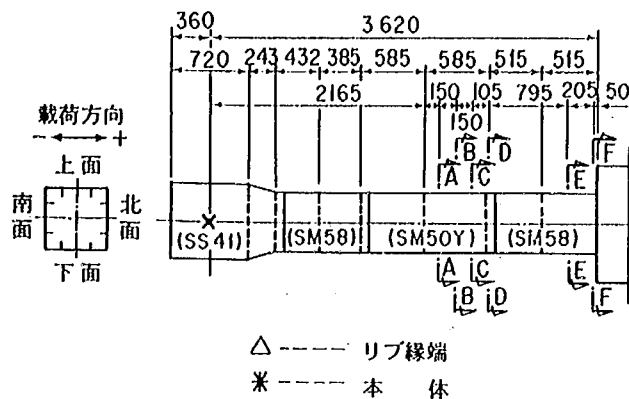
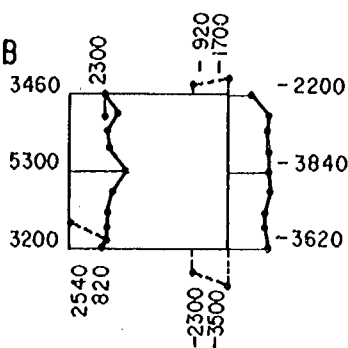
A - A



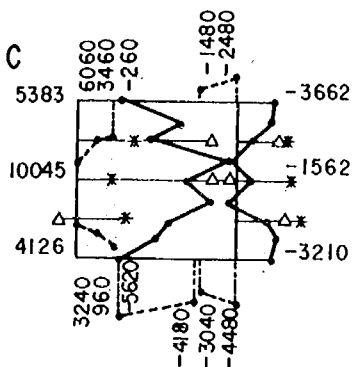
変位 = 48 MM
荷重 = 123 TON
軸力 = -87 TON



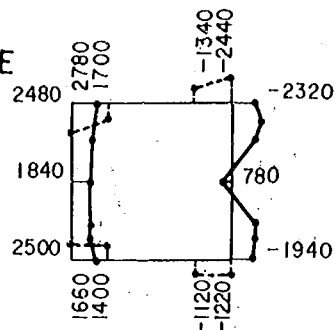
B - B



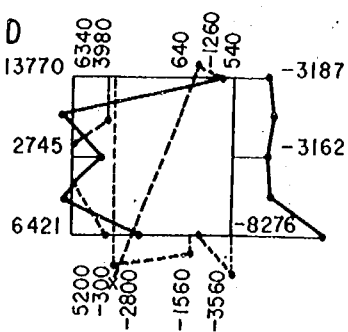
C - C



E - E



D - D



F - F

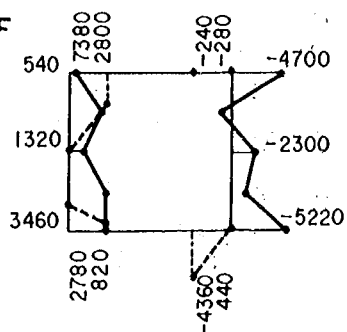
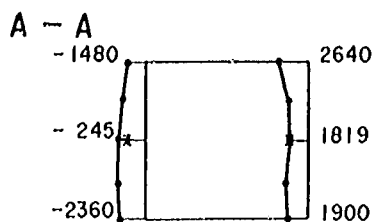
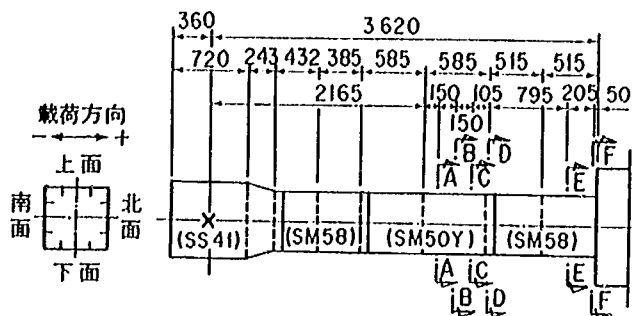
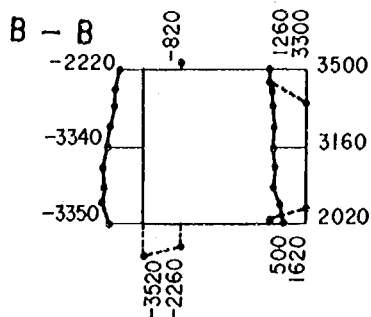
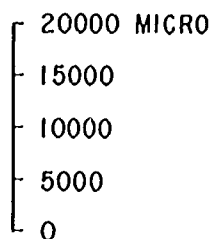


図 3 - 20(4) 载荷段階 4 第 10 回め (正側) 载荷後のひずみ分布 (実験 2 R)



変位 = -48 MM
荷重 = -132 TON
軸力 = -87 TON



△ ---- リブ縁端
* ---- 本体

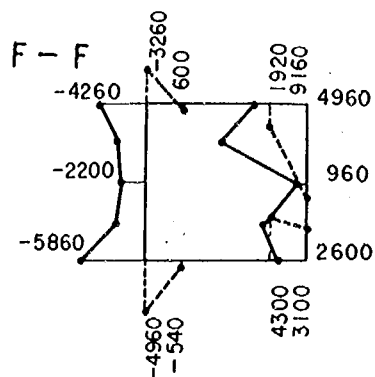
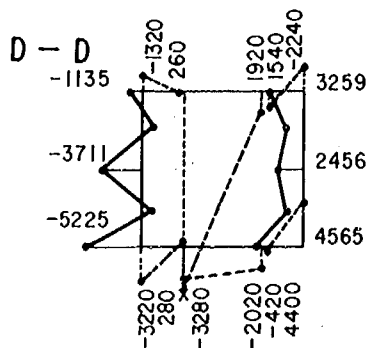
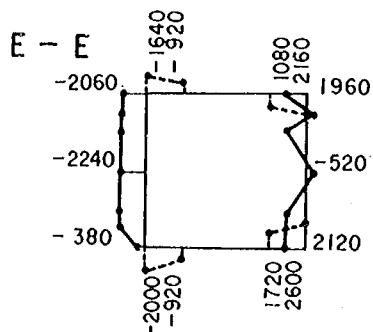
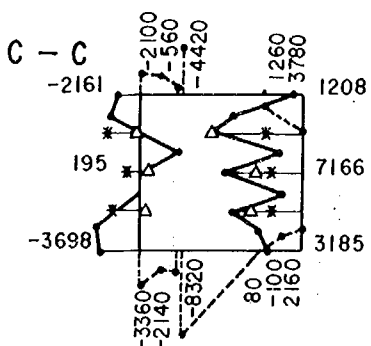
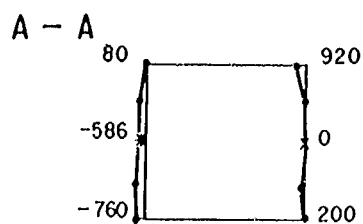


図3-20(5) 載荷段階4 第10回め(負側) 載荷後のひずみ分布(実験2R)



変位 = -9 MM
荷重 = -0 TON
軸力 = -87 TON

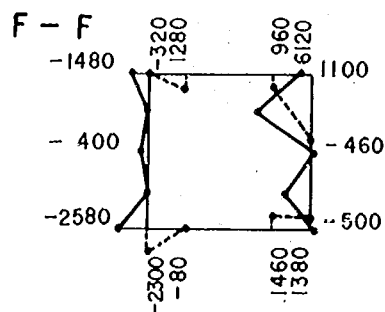
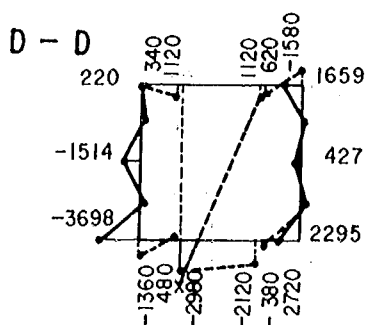
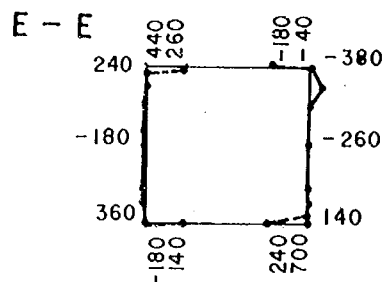
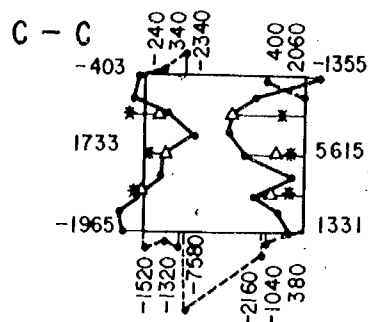
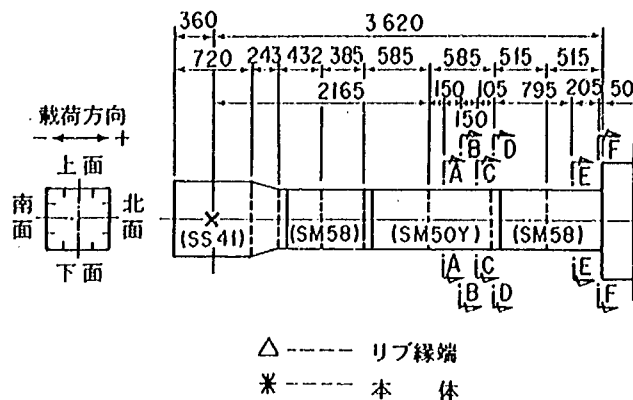
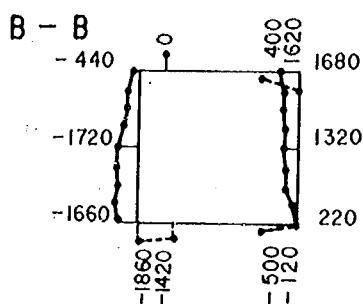
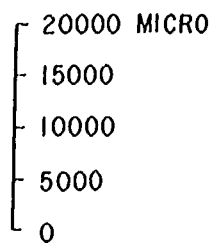
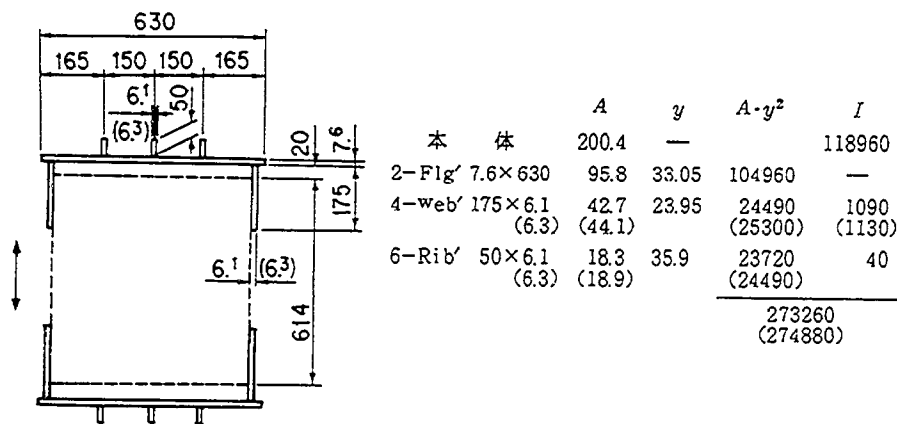


図3-20(6) 載荷段階4終了後に除荷した段階のひずみ分布 (実験2R)



$\sigma_y = 4100 \text{ kg/cm}^2$ (Flg')
4200 (5100)* (web', Rib')

1) 断面2次モーメント
 $I = 273260 \text{ cm}^4$
(274880)

2) 降伏モーメント及び降伏荷重

$$M_y = \sigma_y \cdot I \cdot 1/y$$

$$= 4100 \times 273260 \times 1/33.4 \times 10^{-6}$$

$$= 334 \text{ tm}$$

$$(336)$$

$$P_y = 334/2.67 = 125 \text{ t}$$

$$(126)$$

3) 全塑性モーメント及びこれに対する荷重

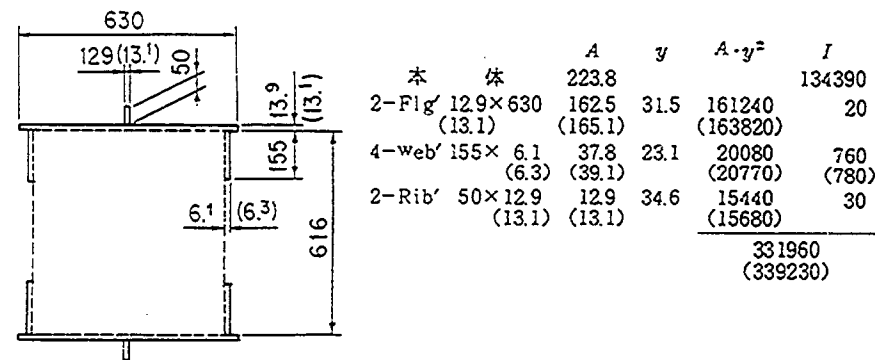
	F	y	σ_y	$A \cdot y \cdot \sigma_y$
本体	200.4	—	—	16500000
2-Flg'	95.8	33.1	4100	13001000
4-web'	42.7	24.0	4200	4295000
	(44.1)		(5100)	(5387000)
6-Rib'	18.3	36.0	4200	2767000
	(18.9)		(5100)	(3470000)
				36560000
				(38360000)

$$M_p = 366 \text{ tm}$$

$$(384)$$

$$P_p = 137 \text{ t}$$

$$(144)$$



$\sigma_y = 5600$ (5800) kg/cm^2 (Flg', Rib') SM58
4200 (5100) kg/cm^2 (web') SM50Y

1) 断面2次モーメント

$$I = 331960 \text{ cm}^4$$

$$(339230)$$

2) 降伏モーメント及び降伏荷重

$$M_y = \sigma_y \cdot I \cdot 1/y$$

$$= 5600 \times 331960 \times 1/32.1 \times 10^{-6}$$

$$= 579 \text{ tm}$$

$$(613)$$

$$(613)$$

$$P_y = 579/3.62 = 160 \text{ t}$$

$$(169)$$

3) 全塑性モーメント及びこれに対する荷重

	A	y	σ_y	$A \cdot y \cdot \sigma_y$
本体	223.8	—	—	31930000
2-Flg'	162.5	31.5	5600	28665000
	(165.1)		(5800)	(30164000)
4-web'	37.8	23.1	4200	3659000
	(39.1)		(5100)	(4596000)
2-Rib'	12.9	34.6	5600	2500000
	(13.1)		(5800)	(2629000)
				66754000
				(69319000)

$$M_p = 668 \text{ tm}$$

$$(693)$$

$$P_p = 185 \text{ t}$$

$$(191)$$

(a) 中間部断面 (SM50Y)

(b) 下部断面 (SM58)

図3-21 実験2Rの供試体の断面特性 (()内の値は実験3Rの供試体)

3.3 実験3及び実験3R

3.3.1 実験3

実験3では、図2-3に示した供試体を用いて図3-22に示す加振変位（変位制御）により載荷した。実験3の目的は補剛材による補修が可能な限界の変状状態（ウェブの残留面外変形が20mm程度）を再現することである。まず、実験1の載荷結果（図3-4参照）より、ウェブの面外変形が20mmになるように48mm（ $1.6\delta_y$ ）の変位振幅を作用させた（載荷段階1、10回載荷）。ただし、この段階ではウェブの面外変形量は7mmであり、20mmに達しなかったため、載荷変位振幅を51mm（ $1.7\delta_y$ ）に上げた（載荷段階2、4回載荷）。この結果、面外変形量が目標の20mmを越えたため載荷を打ち切った。図3-23は載荷段階2終了後の最終変状を示したものである。

図3-24は実験3から得られた荷重～変位履歴曲線を示したものである。また、図3-25は実験により求めた骨格曲線と計算により求めた降伏点（降伏荷重 P_y 及び降伏変位 δ_y ）、全塑性荷重 P_p を比較したものである。これより、以下の事項を指摘することができる。

- 1) 実験3で載荷した最大荷重（正側で58tf、負側で60tf）は、実験3と同一寸法の供試体を用いた実験1から得られた最大耐力（正側で59.4tf、負側で60.9tf）にほぼ相当する。
- 2) 載荷段階1では同一加振変位の10回の繰り返しに対して耐力はほとんど低下していないが、ほぼ最大耐力に相当する載荷段階2では4回の繰り返しに対して耐力が正側で3tf、負側で4tf、それぞれ低下している。

図3-26は軸力導入後から載荷段階2終了後に至るひずみ分布を示したものである。

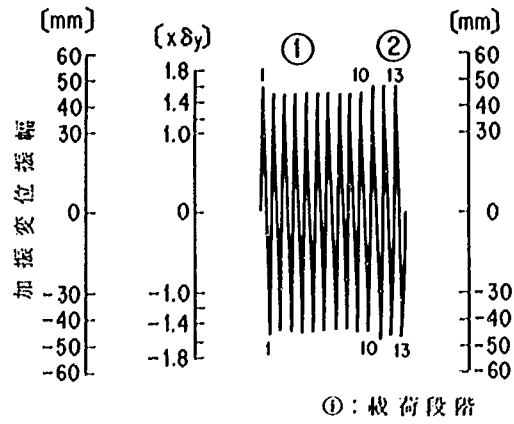


図 3-22 加振変位 (実験 3)

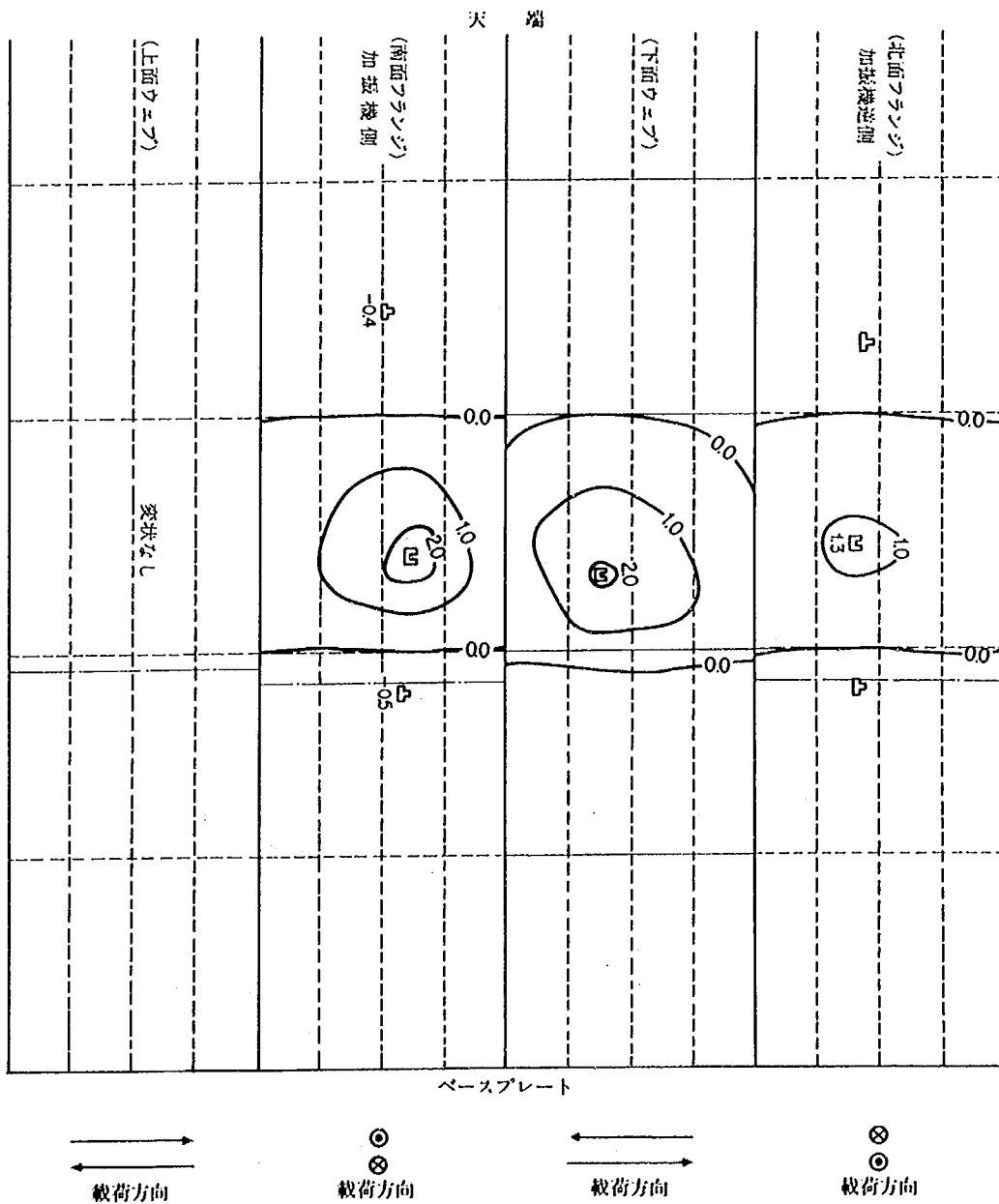


図 3-23 実験 3 の最終変状状態

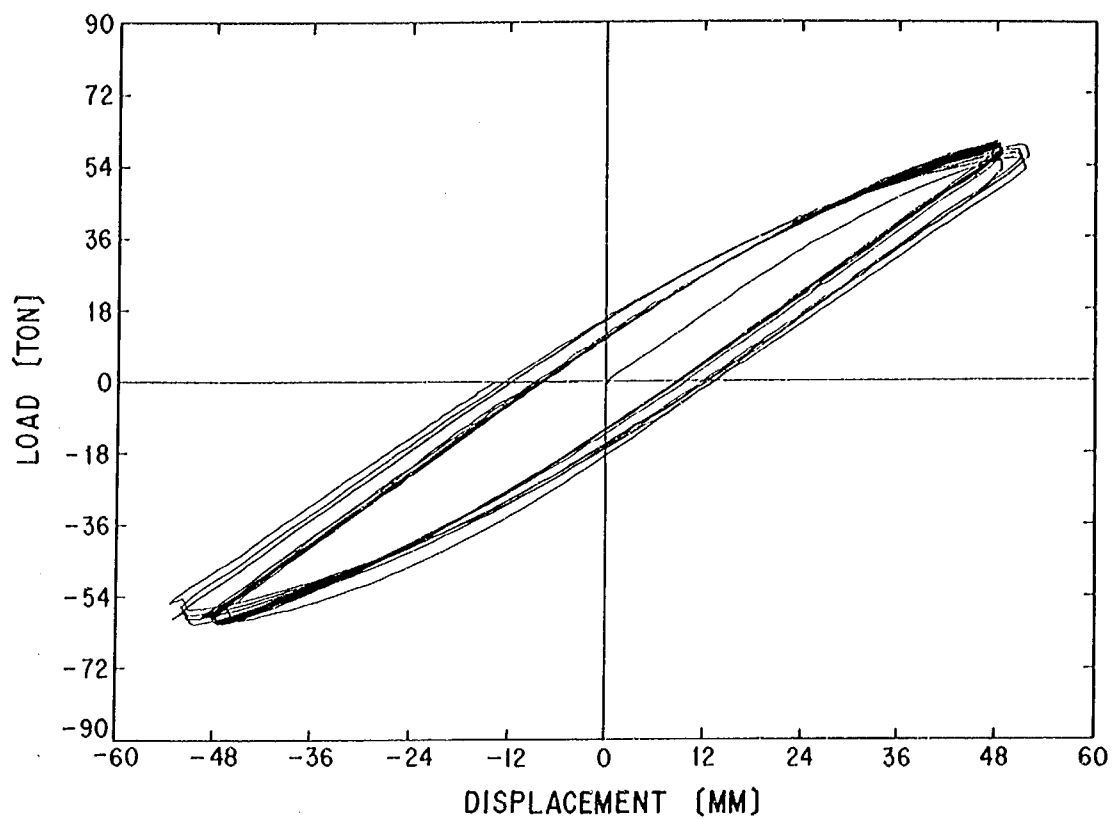


図 3-24 荷重～変位履歴曲線 (実験 3)

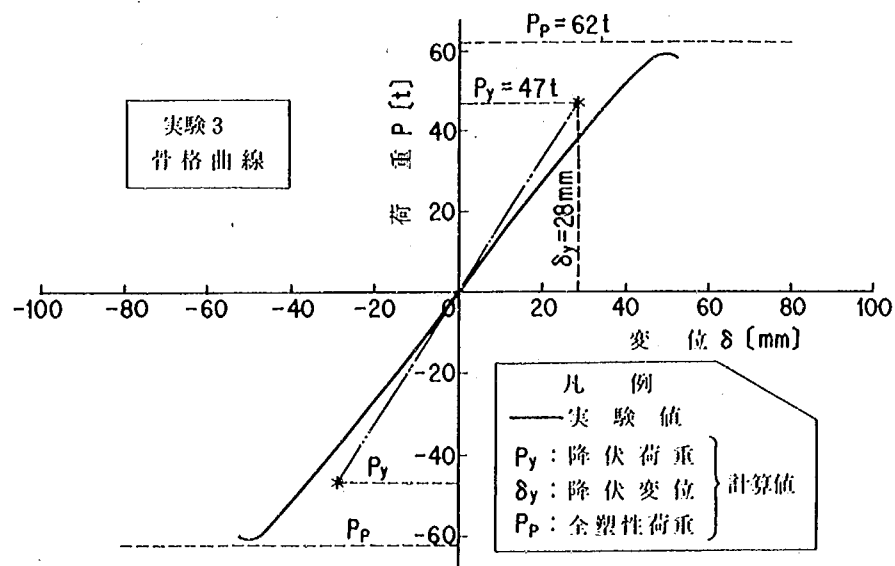
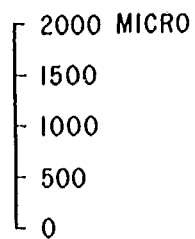
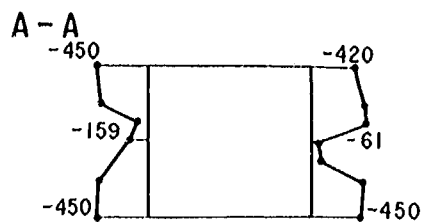


図 3-25 実験による骨格曲線と計算値の比較



変位 = 0 MM
荷重 = -0 TON
軸力 = -88 TON

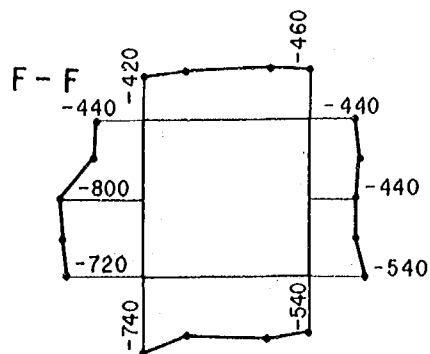
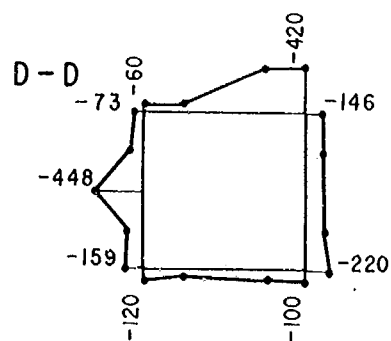
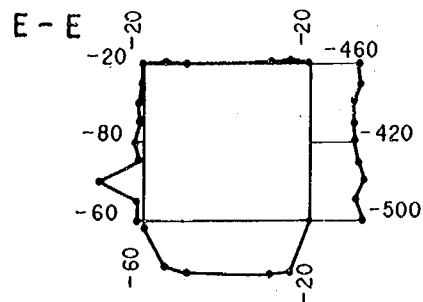
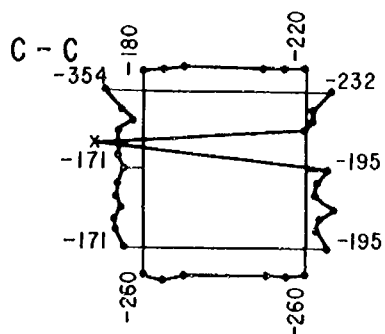
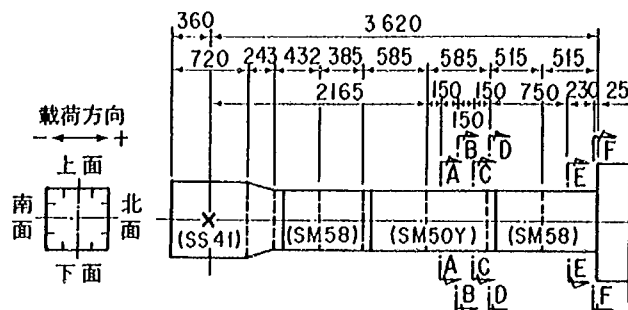
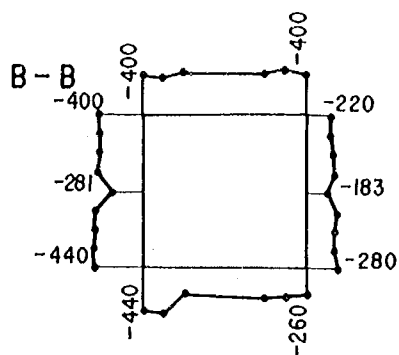


図3-26(1) 載荷前(軸力導入後)のひずみ分布(実験3)

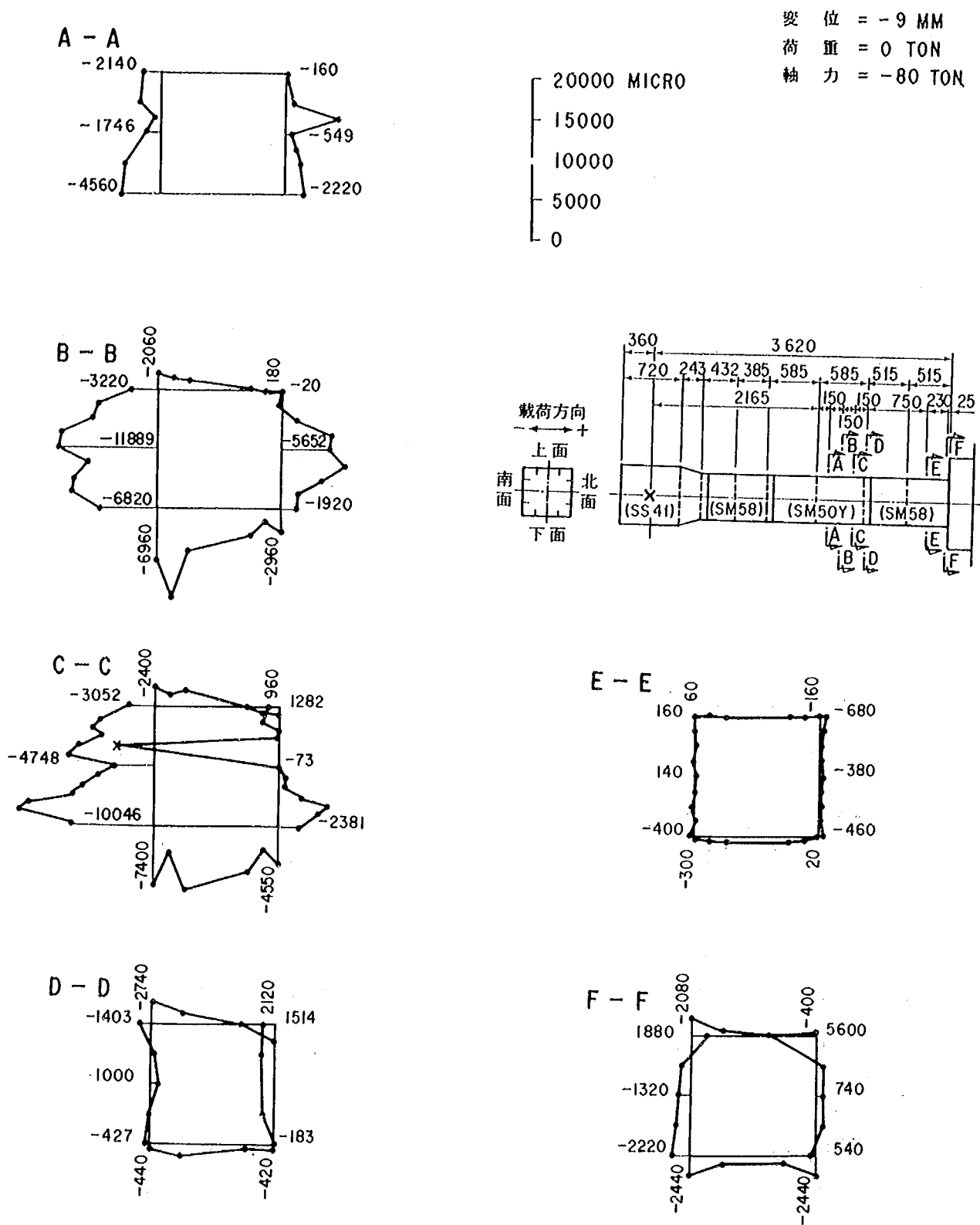
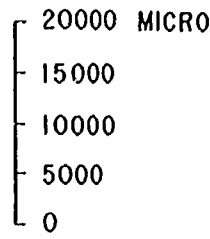
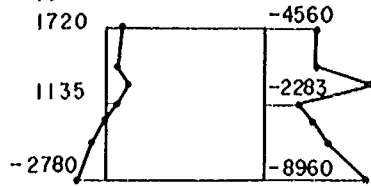


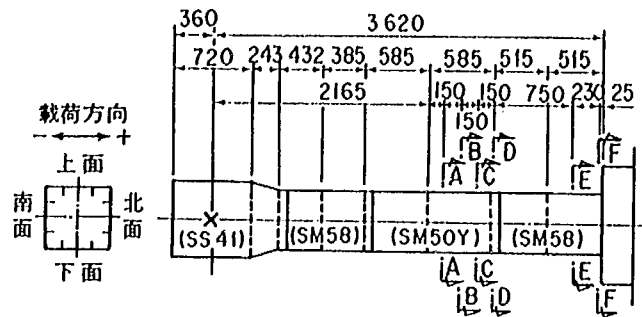
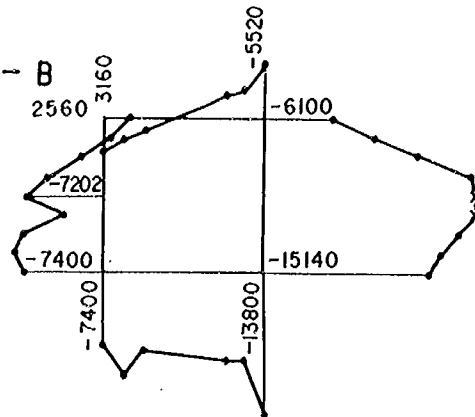
図3-26(2) 載荷段階1終了後に除荷した段階のひずみ分布 (実験3)

変位 = 51 MM
荷重 = 55 TON
軸力 = -81 TON

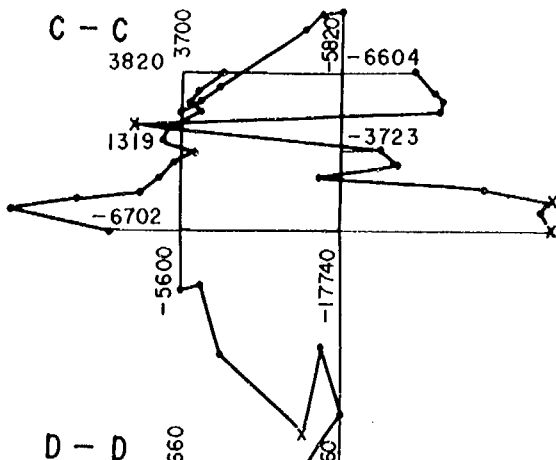
A - A



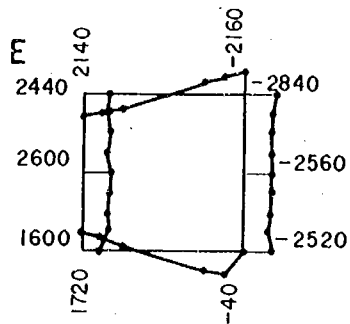
B - B



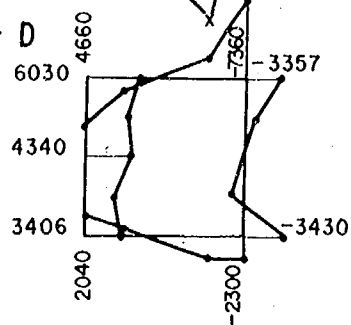
C - C



E - E



D - D



F - F

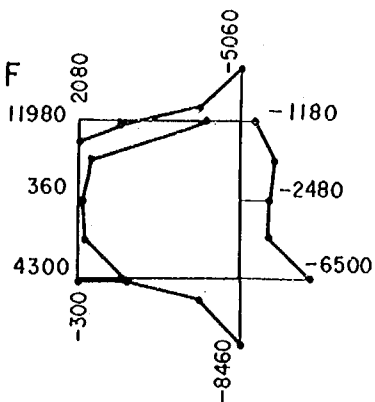
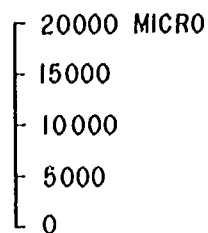
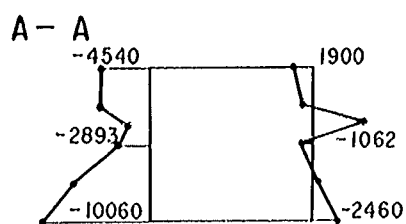


図 3 - 26(3) 載荷段階 2 第 4 回め (正側) 載荷時のひずみ分布 (実験 3)



変位 = -51 MM
荷重 = -56 TON
軸力 = -81 TON

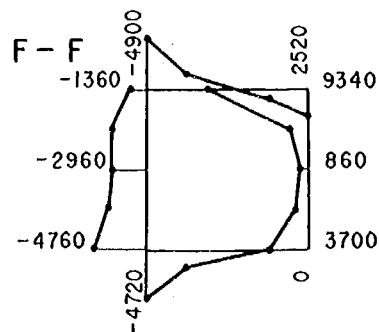
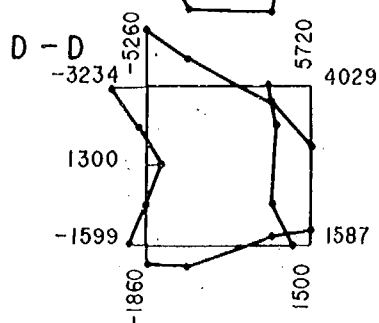
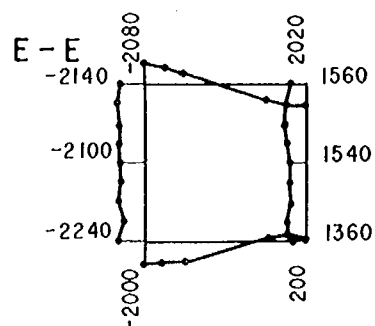
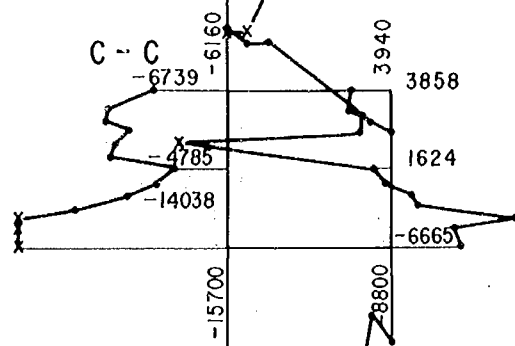
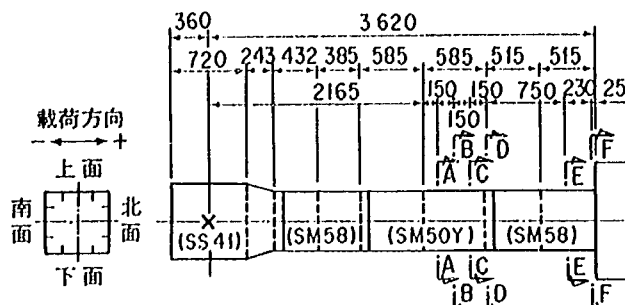
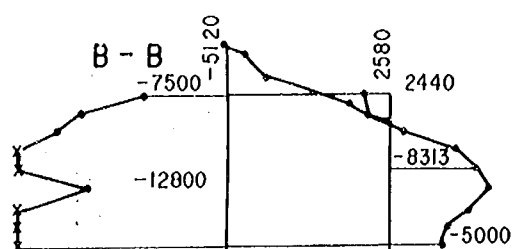
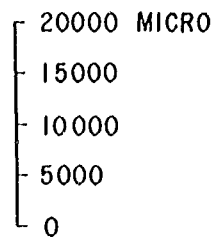
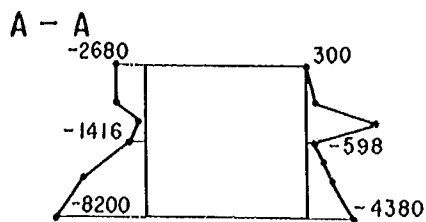


図3-26(4) 荷重段階2第4回め(負側)荷重時のひずみ分布(実験3)



変位 = -14 MM
荷重 = 0 TON
軸力 = -81 TON

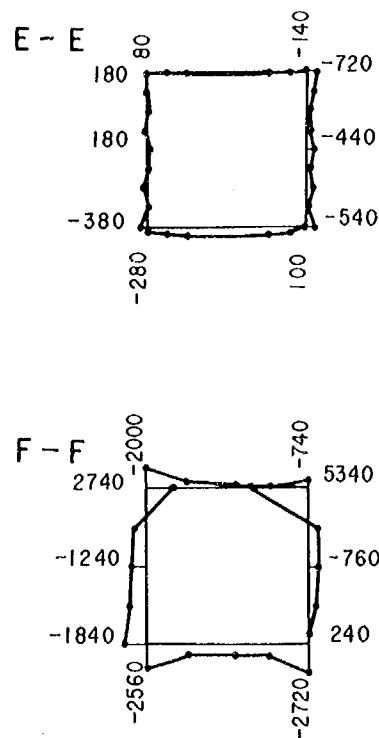
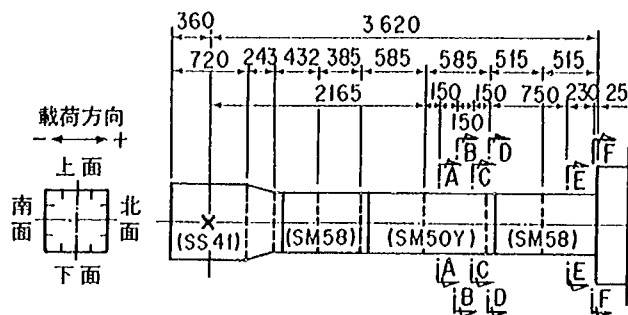
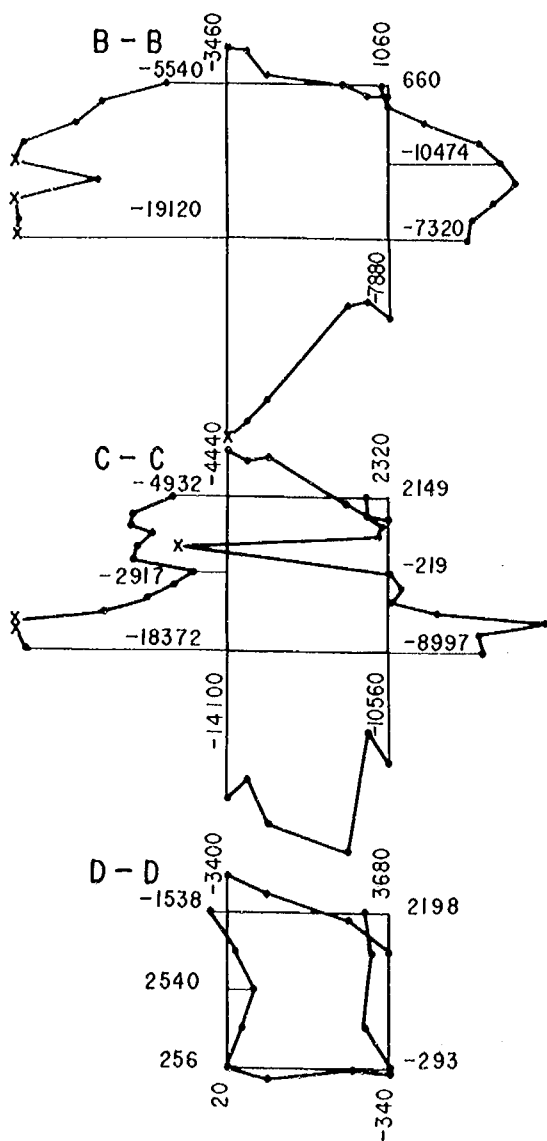


図 3 - 26(5) 载荷段階 2 終了後に除荷した段階のひずみ分布 (実験 3)

3.3.2 実験 3R

実験 3R では、実験 3 でウェブの残留面外変形 20mm の損傷を与えた供試体に図 2-9 に示した補剛板添接による補修を行い、図 3-27 に示す加振変位（変位制御）により載荷した。図 3-28 は橋脚天端における荷重～変位の履歴曲線を示したものである。また、表 3-2 及び図 3-29 は主要な載荷段階における外観からの変状をまとめたものである。これらによれば実験 3R の破壊性状はおおむね以下の通りである。

- 1) 最大耐力は載荷段階 5 ($1.8\delta_y$) の第 1 回目の載荷で生じた。載荷段階 5 までは橋脚には著しい変状は認められず、下面ウェブに 4mm 程度の面外残留変形が生じた程度である。
- 2) 最大耐力に達した載荷段階 5 の第 2 回目以降からは、各種の変状が生じ急激に耐力が低下している。載荷段階 5 以降の変状の進展状況は以下の通りである。
 - a) 載荷段階 5 では補剛材フランジのパネル全体が凹変形するとともにリブ間が局部座屈した。その後、補剛材フランジのリブが座屈し、加振機逆側のフランジ下縁にクラックが発生した。
 - b) 載荷段階 6 ($2.0\delta_y$) では、補剛材フランジのリブの座屈が新たな箇所では生じるとともに、リブ自体にもクラックが発生した。載荷段階 6 終了後にはクラックが最大 60mm まで進展した。図 3-30 は載荷段階 7 ($2.2\delta_y$) の第 1 回目載荷終了後の最終変状を示したものである。また、図 3-31 は実験終了後に補剛材を取り除いて観察した供試体本体の変状を示したものである。

図 3-32 は、各載荷段階における載荷終了後の残留面外変形量（パネル内の残留変位の最大値）と載荷変位振幅の関係を示したものである。図中には参考のため、図 3-28 に示した履歴曲線の骨格曲線（正側及び負側の骨格曲線の平均値）及び等価粘性減衰定数 h_e を示している。ここで、等価粘性減衰定数 h_e は式（3-1）によって求めた値である。この図によれば面外残留変位は $1.0\delta_y$ 以降に生じ始め、載荷段階 5 ($1.8\delta_y$) で急激に大きくなっていることがわかる。上述したように最大耐力は載荷段階 5 で生じており、面外変形が急激に大きくなるとともに耐力が低下しているといえる。

図 3-33 は、各載荷段階における第 1 回目の載荷と第 10 回目の載荷を履歴曲線によって比較したものである。載荷段階 4 までは、第 1 回目の載荷と第 10 回目の載荷の履歴曲線はほとんど変化しておらず、この載荷段階までは少なくとも 10 回程度の載荷くり返しによっては耐力は大きく変化しないことがわかる。これに対して、載荷段階 5 以降では第 1 回目の載荷による履歴曲線と第 10 回目の載荷による履歴曲線を比較すると、同一変位振幅に対する荷重が低下しており、くり返し載荷に伴う劣化が生じている。

図 3-34 は実験により求めた骨格曲線と計算により求めた降伏点（降伏荷重 P_y 及び降伏変位 δ_y ）、全塑性荷重 P_p を比較したものである。ここで降伏荷重 P_y 及び全塑性荷重 P_p は図 3-21 に示した通り、全断面有効と考えて求めた値である。これによれば最大耐力は全塑性荷重より正側で 13%、負側で 7% 程度小さくなっている。これは上にも述べたように計算では損傷を受けているにもかかわらず、供試体本体も全断面有効であると考えたことによるものと考えられる。

図 3-35 は軸力導入後および正側，負側の最大荷重時に供試体に生じたひずみの分布を示したものである。

表 3-2 実験 3R の変状進展経過

載荷段階	CYCLE	変 状
1 ($1.0\delta_y$)		○特に変化なし。
2 ($1.2\delta_y$)		○特に変化なし。
3 ($1.4\delta_y$)		○特に変化なし。
4 ($1.6\delta_y$)	1	○下面ウェブの補剛板の若干の凸変形を目視で確認する。
	10	○北面、南面の補剛フランジの黒皮が剥離する。
5 ($1.8\delta_y$)	1	○下面ウェブの補剛板の波うち変状を目視で確認する。
	2	○北面、南面の補剛フランジにパネル全体の凹変形および、リブ間の局部座屈変形を生じる。
	3	○負荷荷時に南面補剛フランジのリブが座屈する。(a)
	4	○正荷荷時に北面補剛フランジのリブが座屈する。(b)
	6	○負荷荷時に北面補剛フランジ下縁に柱軸直角方向のクラックを生じる。(c)
6 ($2.0\delta_y$)	1	○正荷荷時に北面補剛フランジのリブが新たな箇所で座屈する。(d) ○負荷荷時に南面補剛フランジのリブにクラックを生じる。(e)
	4	○南面補剛フランジの上下縁に柱軸直角方向のクラックを生じる。
	10	○正荷荷時に南面補剛フランジのリブにクラックを生じる。(f) ○負荷荷時に北面補剛フランジのリブにクラックを生じる。(g) ○7段階めの10 cycle 載荷終了時の補剛フランジのクラックの状態は下図のとおり。

()内は南面の値

l : クラック長(mm),
 b : クラック幅(mm)

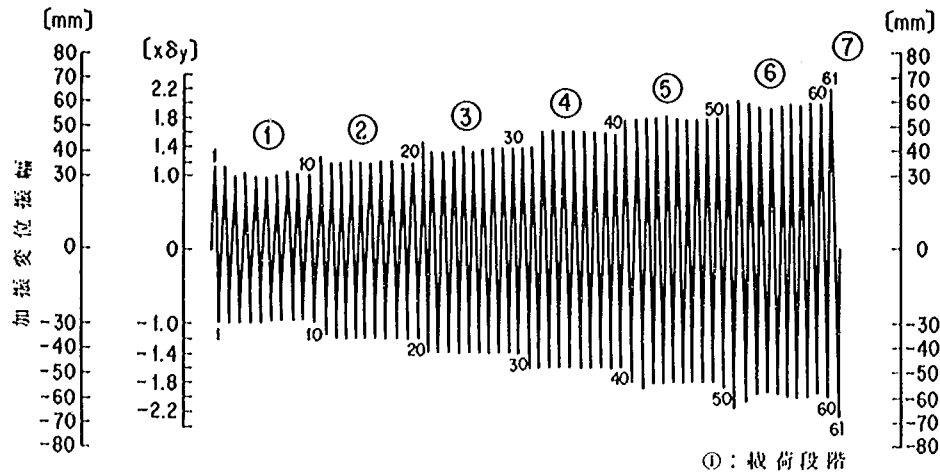
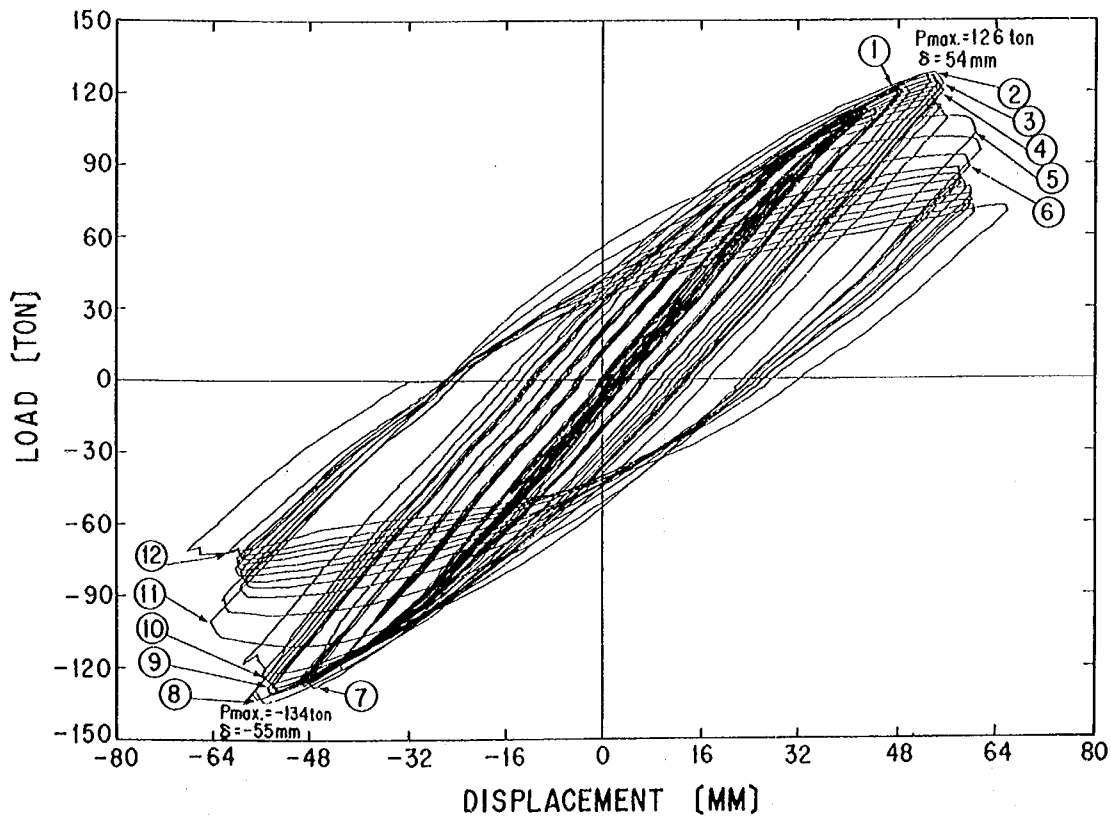


図 3-27 加振変位 (実験 3 R)



- | | |
|---|---------------------------------------|
| ① 下面ウェブの補剛板の若干の凸変形を目視で確認
北面補剛フランジ黒皮剥離 | ⑦ 南面補剛フランジ黒皮剥離 |
| ② 下面ウェブの補剛板の波うち変状を目視で確認 | ⑧ 南面補剛フランジにパネル全体の凹変形およびリブ間の局部座屈発生 |
| ③ 北面補剛フランジにパネル全体の凹変形およびリブ間の局部座屈発生 | ⑨ 南面補剛フランジのリブ座屈 |
| ④ 北面補剛フランジのリブ座屈 | ⑩ 北面補剛フランジの下縁に柱軸直角方向のクラック発生、ウェブまで達する。 |
| ⑤ " (上記と別のカ所) | ⑪ 南面補剛フランジのリブにクラック発生 |
| ⑥ 南面補剛フランジのリブにクラック発生
南面補剛フランジ上下縁に柱軸直角方向のクラック発生、ウェブまで達する。 | ⑫ 北面補剛フランジのリブにクラック発生 |

図 3-28 荷重～変位履歴と変状 (実験 3 R)

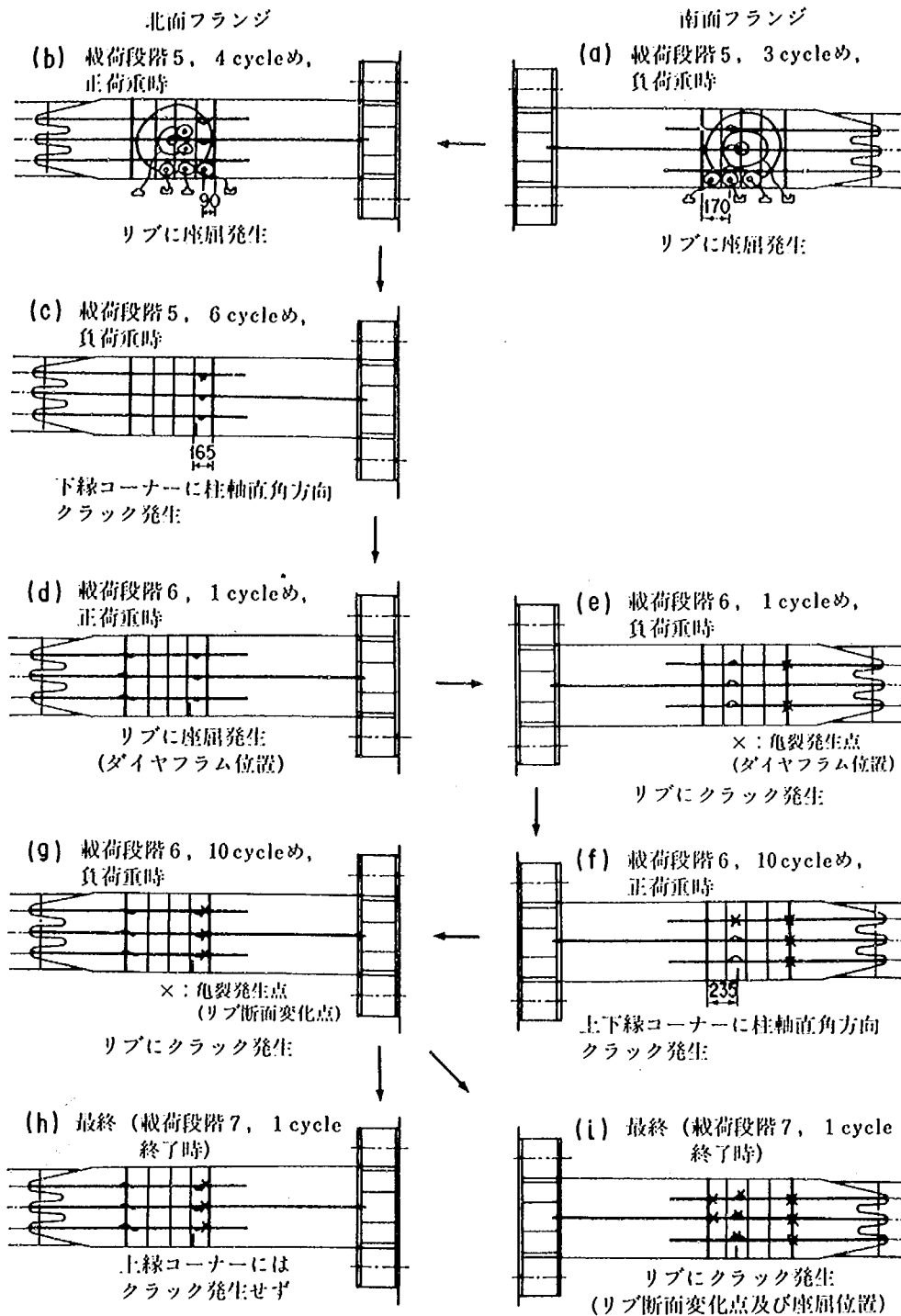


図3-29 実験3Rのフランジの変状進展経過

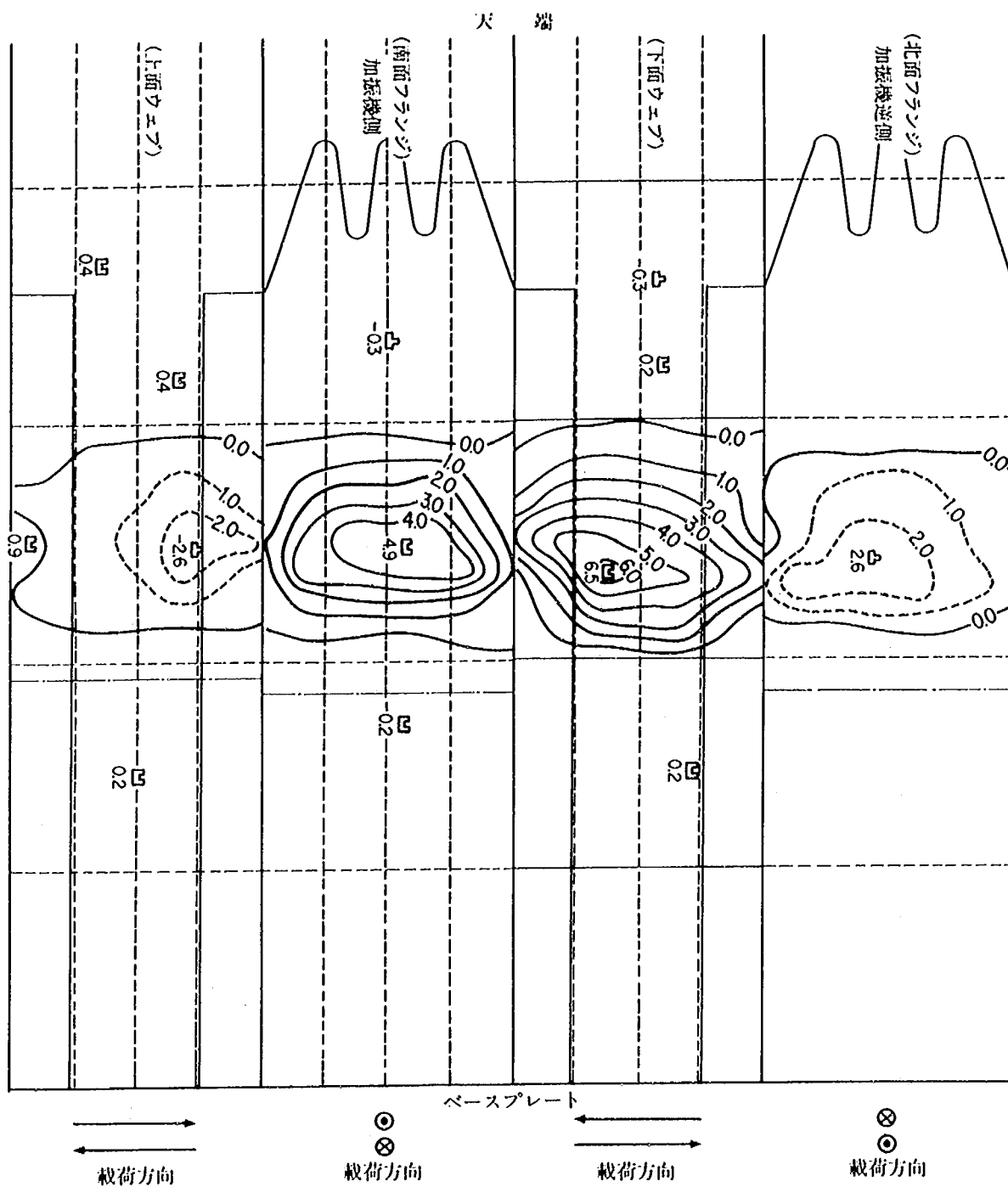


図3-30 実験3Rの最終変状状態

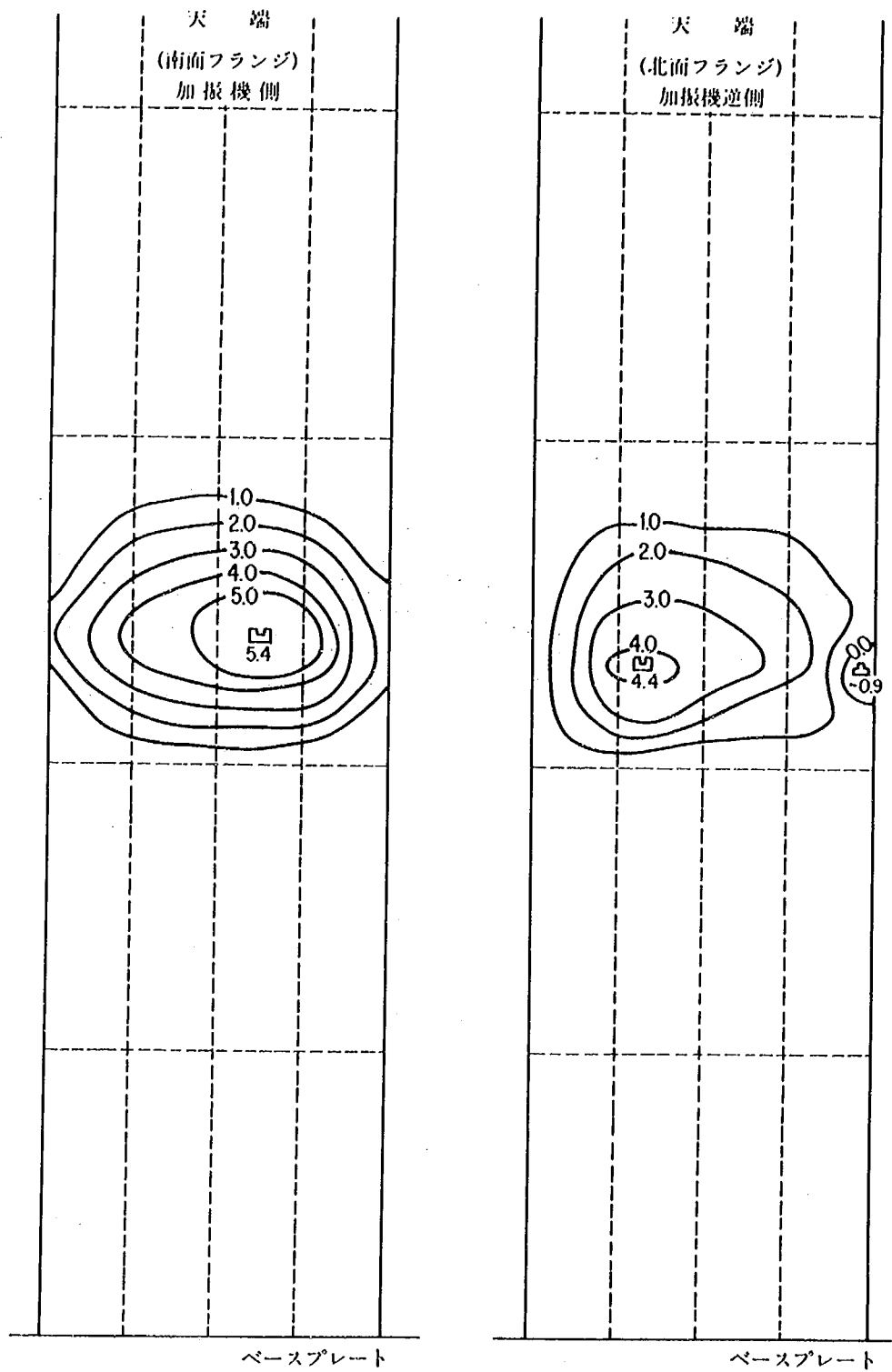


図 3-31 実験 3R の最終変状 (本休) 状態

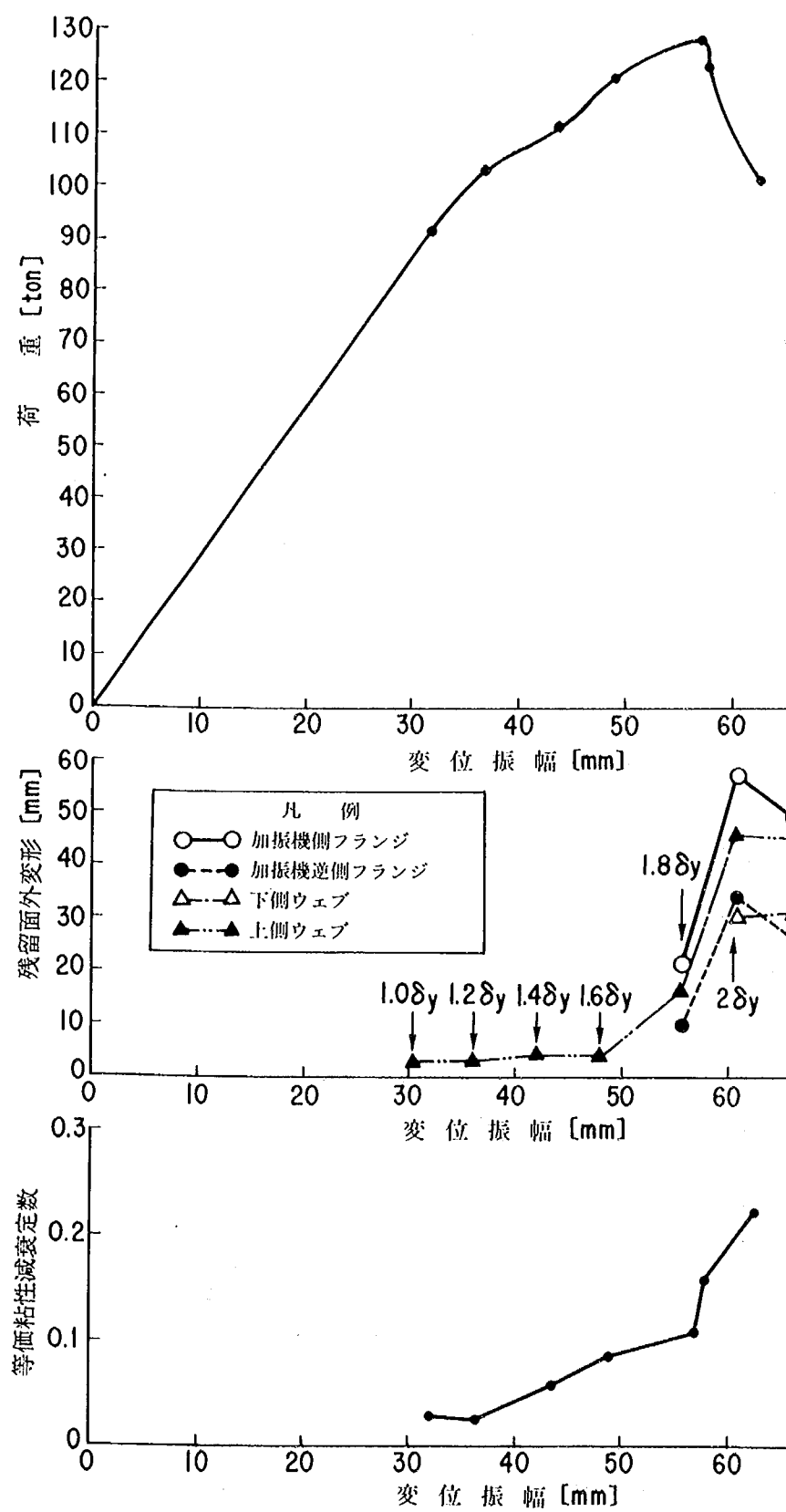
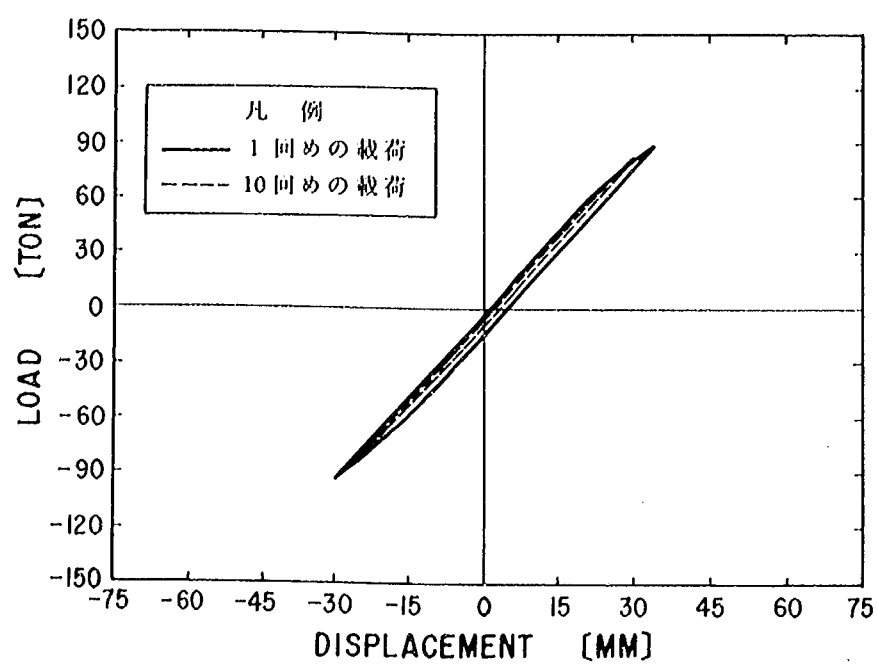
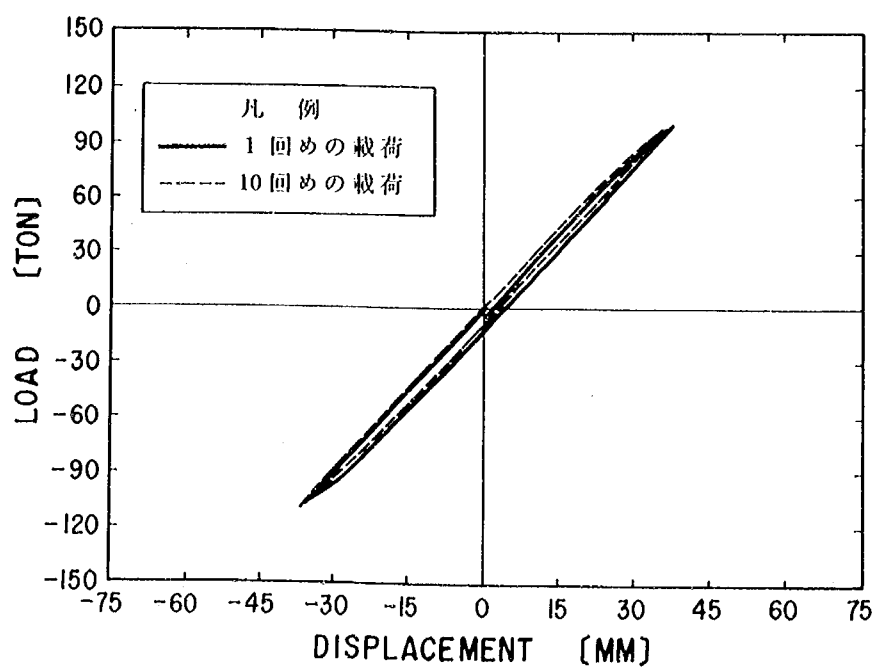


図3-32 実験3Rの荷重，残留面外変形，等価粘性減衰定数

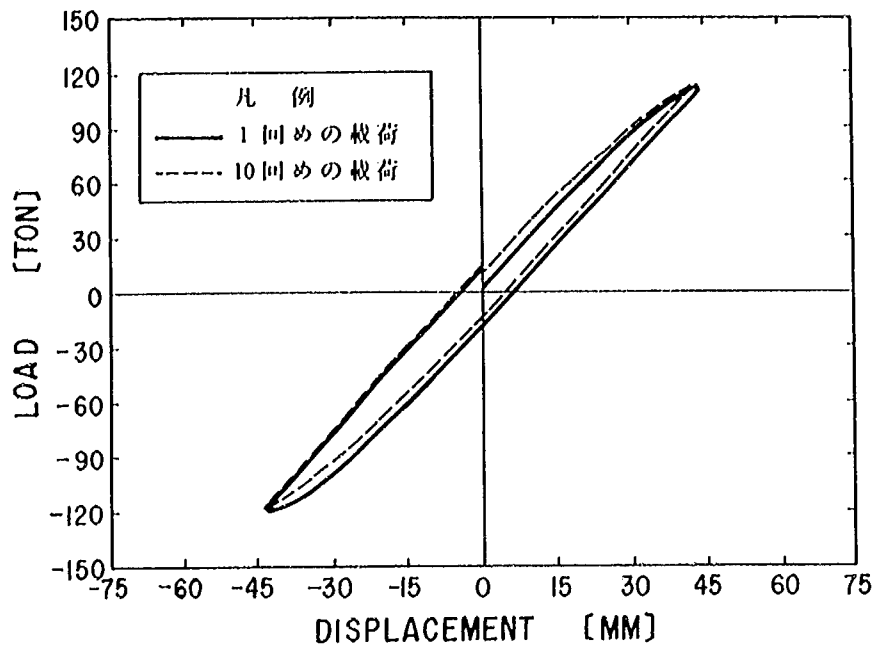


(a) 载荷段階 1

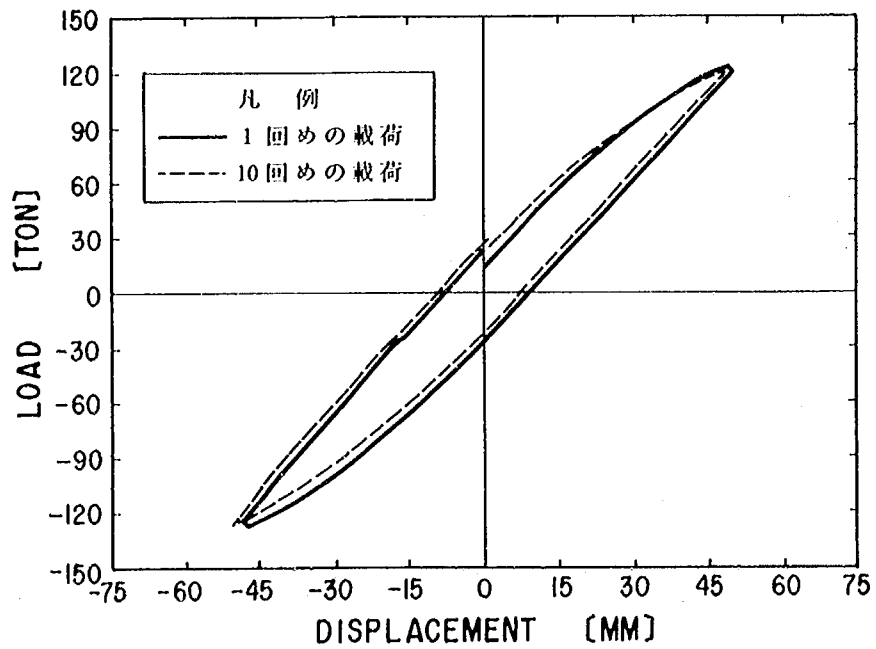


(b) 载荷段階 2

図 3-33(1) 実験 3 R の荷重～変位履歴曲線

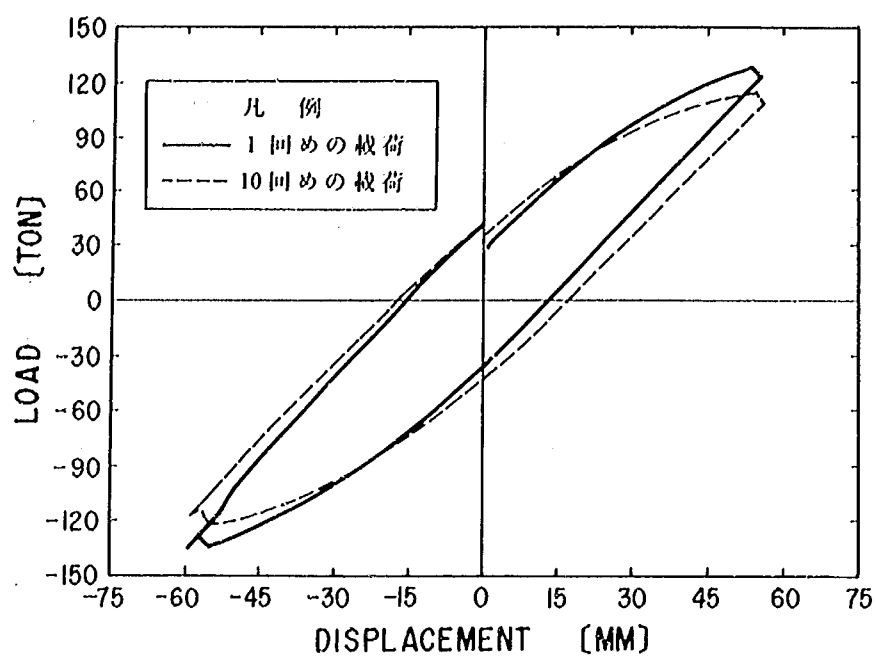


(c) 载荷段階 3

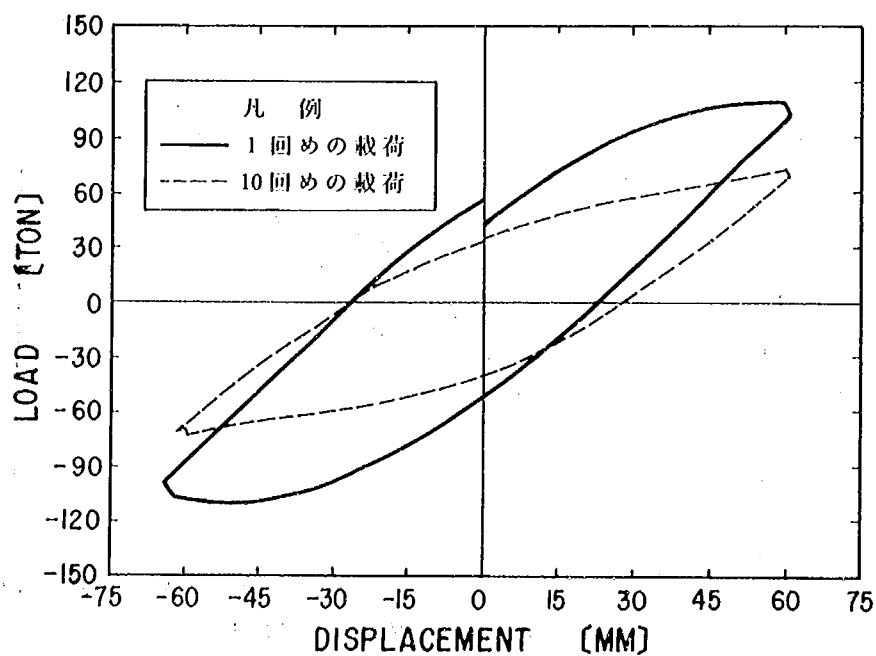


(d) 载荷段階 4

図 3-33(2) 実験 3 R の荷重～変位履歴曲線



(e) 載荷段階 5



(f) 載荷段階 6

図 3-33(3) 実験 3 R の荷重～変位履歴曲線

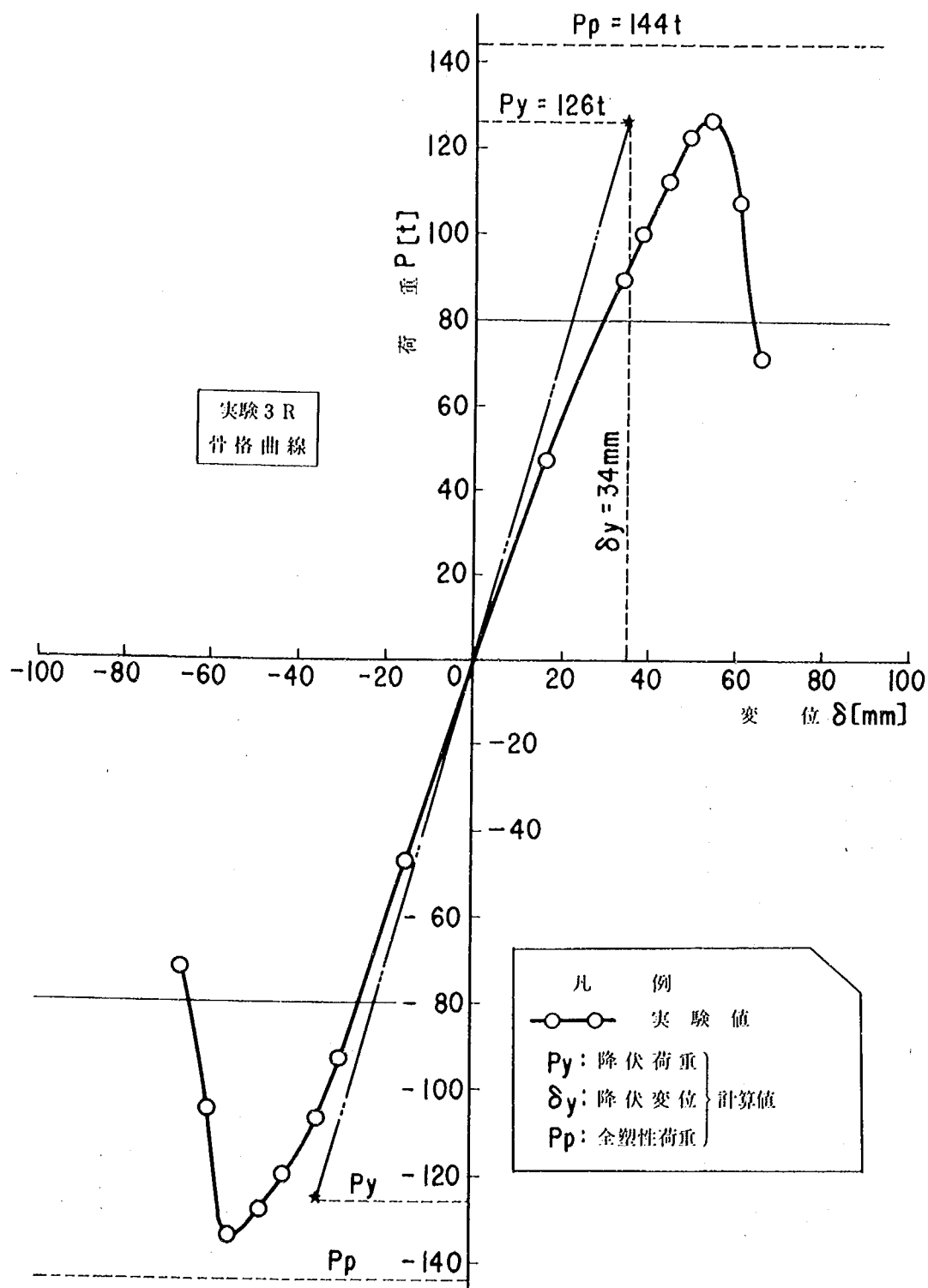
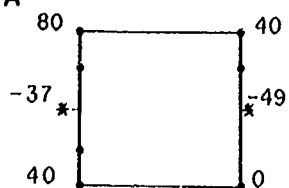
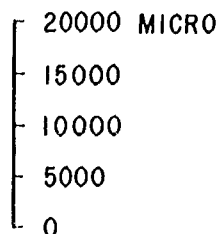


図 3-34 実験による骨格曲線と計算値の比較

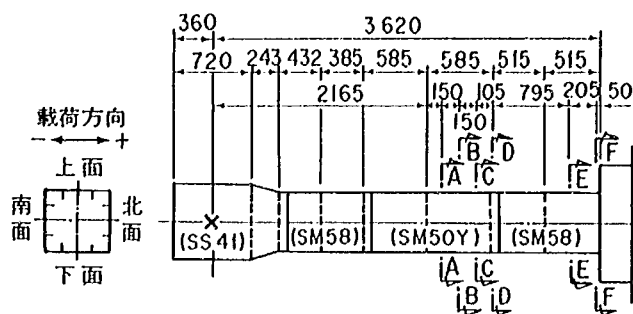
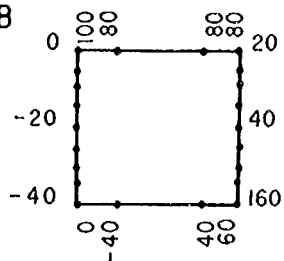
A - A



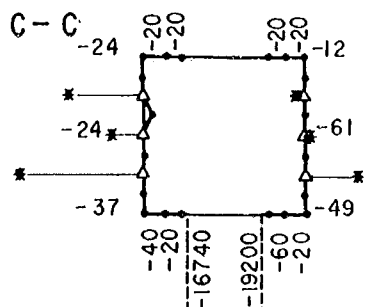
変位 = -0 MM
荷重 = 0 TON
軸力 = -87 TON



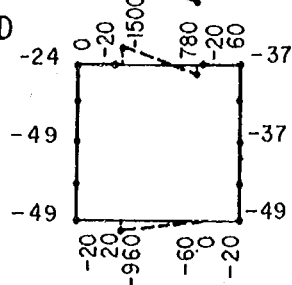
B - B



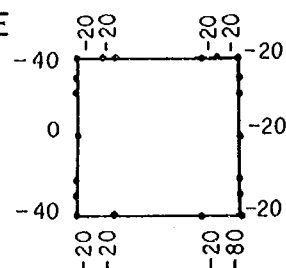
C - C



D - D



E - E



F - F

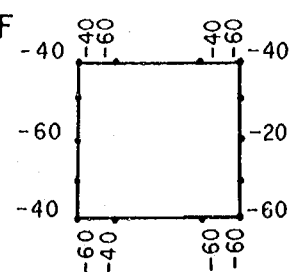


図3-35(1) 載荷前(軸力導入後)のひずみ分布(実験3R)

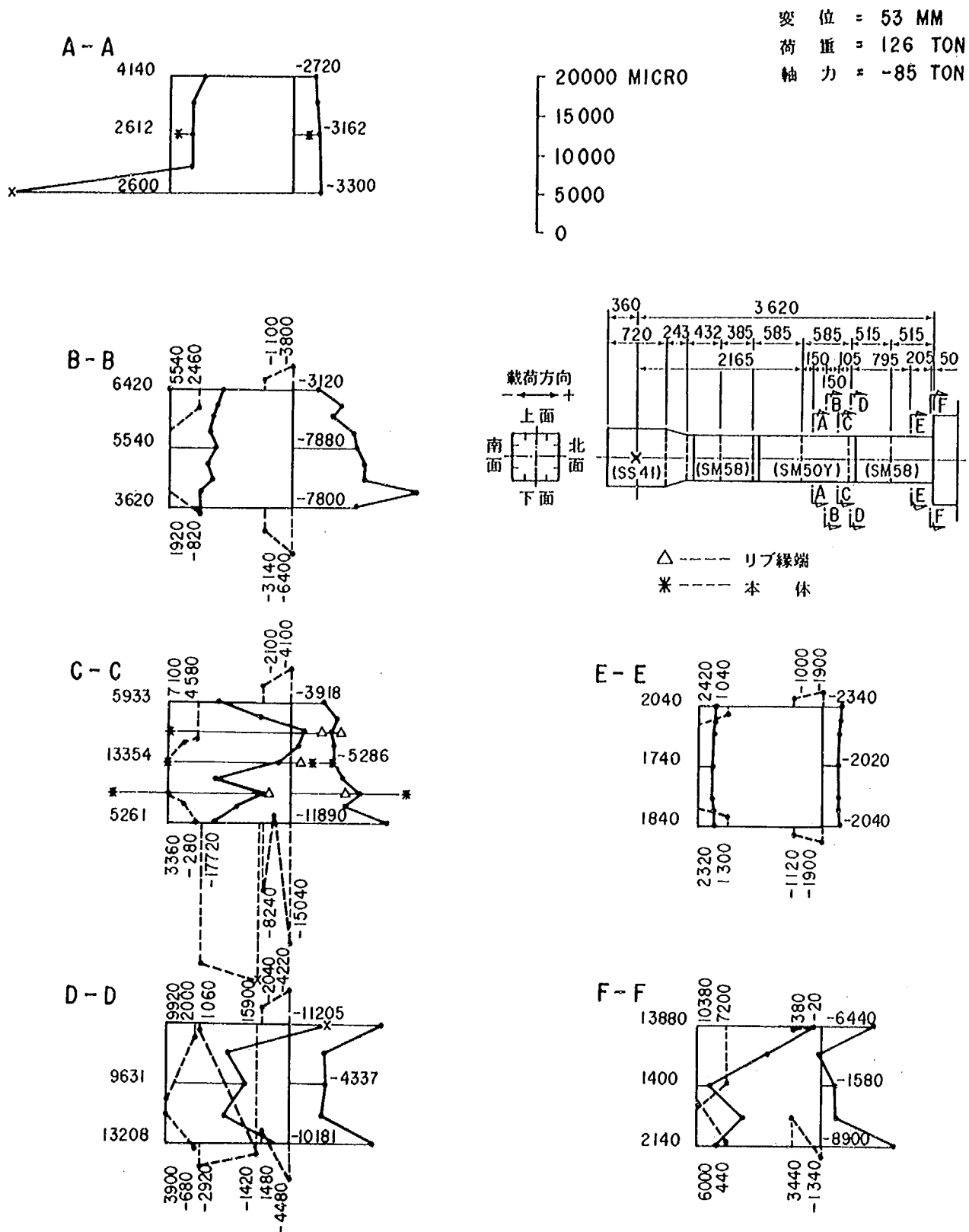


図 3-35(2) 正側最大荷重時のひずみ分布 (実験 3 R)

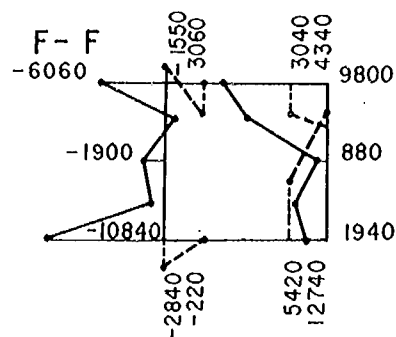
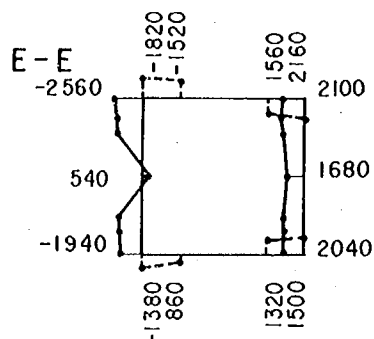
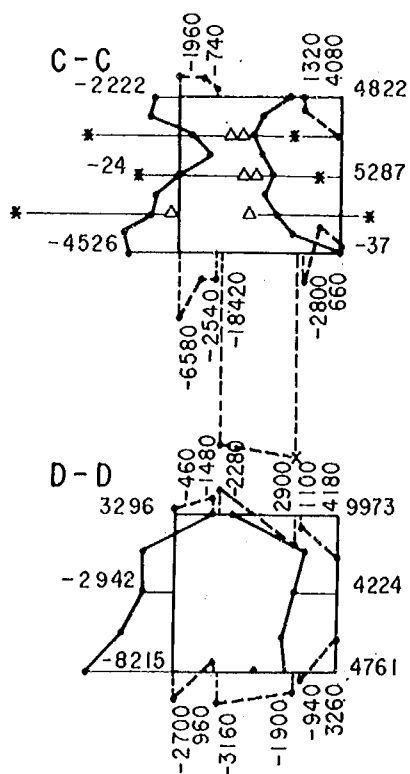
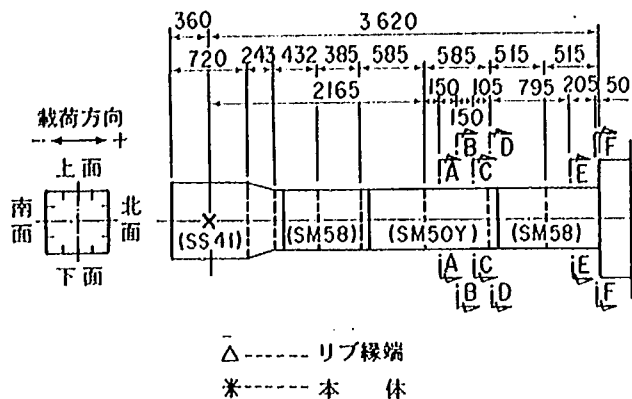
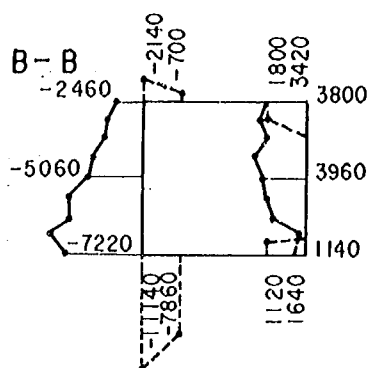
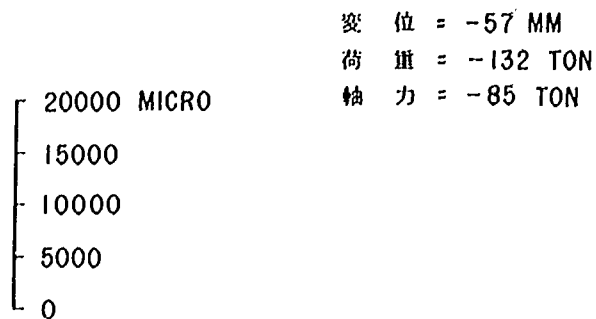
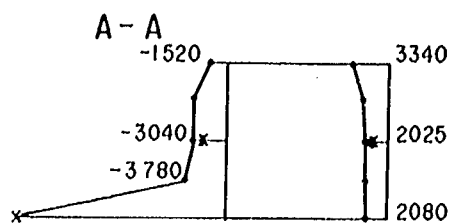


図 3-35(3) 負側最大荷重時のひずみ分布 (実験 3R)

3.4 実験4及び実験4 R

3.4.1 実験4

実験4では図2-3に示した供試体を用い、図3-36に示す加振変位（変位制御）により載荷した。実験4の目的は当て板による補修を行うため小規模な変状状態（フランジの残留面外変形量が 5 mm 程度）を再現することである。まず実験1の結果（図3-4参照）から、フランジの残留面外変形量が 5 mm になるように 45 mm （ $1.5\delta_y$ 相当）の変位振幅を10回作用させた（載荷段階1）。ただし、この段階では加振機側フランジの残留面外変形量が 3 mm しか生じなかったため、変位振幅を 48 mm （ $1.6\delta_y$ ）に上げ、第3回目の載荷が終了したところで、残留面外変形量が 5 mm に達した（載荷段階2）。

図3-37は実験4から得られた荷重～変位履歴曲線を示したものである。また、図3-38は実験により求めた骨格曲線と計算により求めた降伏点（降伏荷重 P_y 及び降伏変位 δ_y ）、全塑性荷重 P_p を比較したものである。実験4で載荷した最大荷重（正側で 60 tf 、負側で 61 tf ）は、実験4と同一寸法の供試体を用いた実験1から得られた最大耐力（正側で 59.4 tf 、負側で 60.9 tf ）にほぼ相当する。図3-39は最終載荷時および載荷終了時に供試体に生じていたひずみの分布を示したものである。

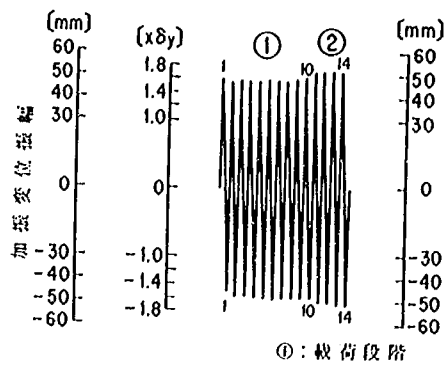


図 3-36 加振変位 (実験 4)

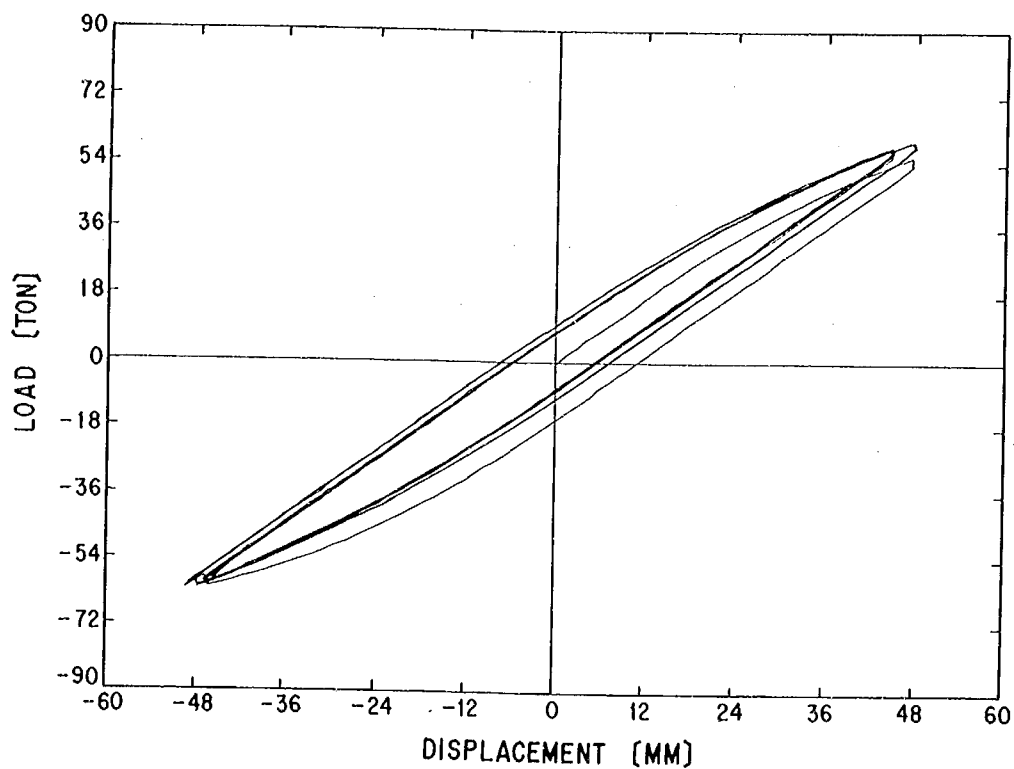


図 3-37 荷重～変位履歴 (実験 4)

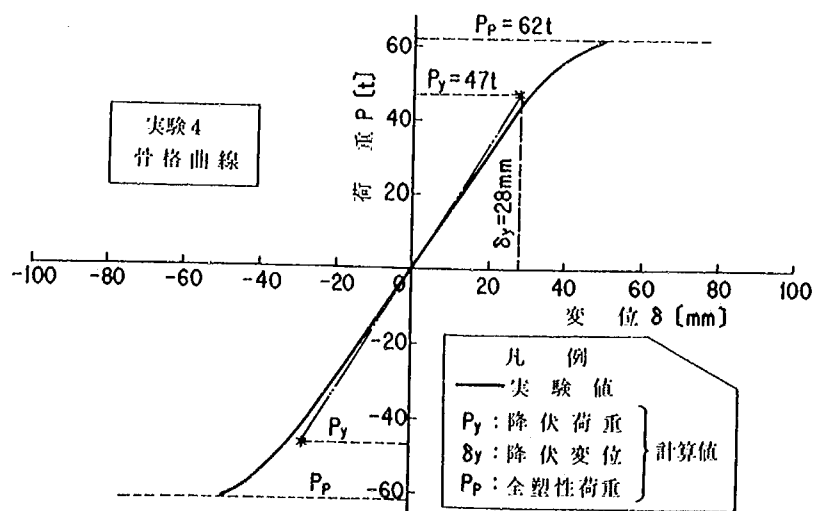
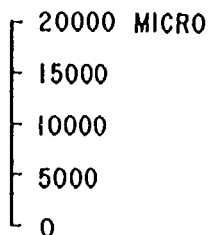
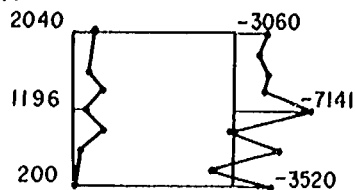


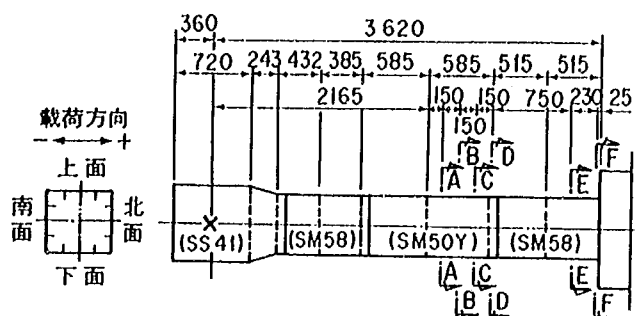
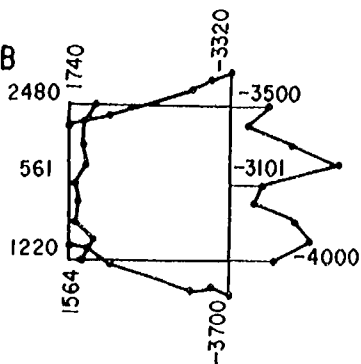
図 3-38 実験による骨格曲線と計算値の比較

A - A

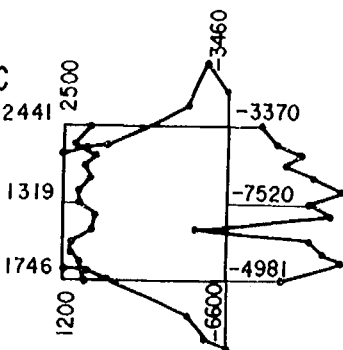


変位 = 48 MM
荷重 = 60 TON
軸力 = -88 TON

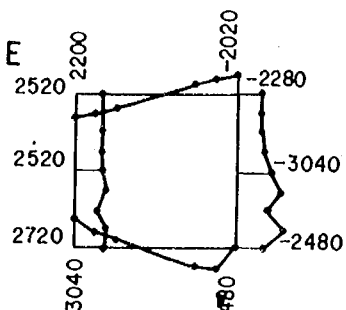
B - B



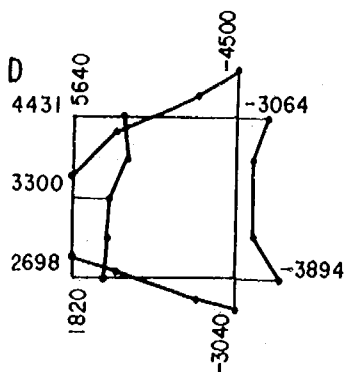
C - C



E - E



D - D



F - F

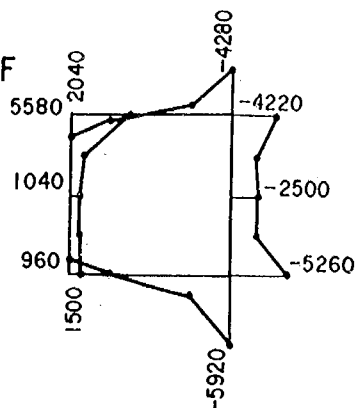
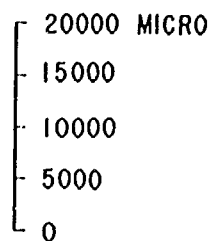
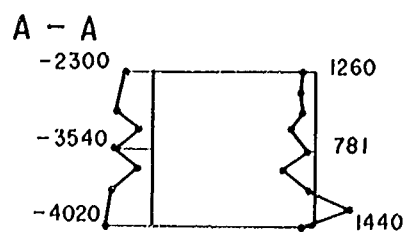


図 3-39(1) 正側最終載荷時のひずみ分布 (実験 4)



変位 = -48 MM
荷重 = -61 TON
軸力 = -88 TON

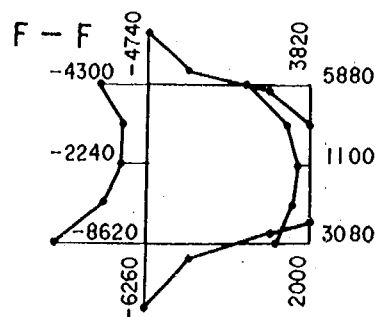
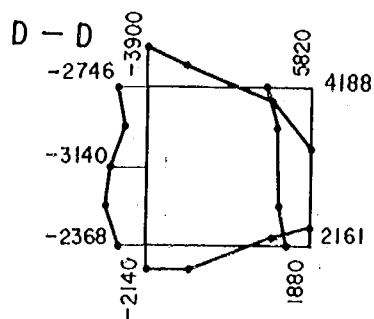
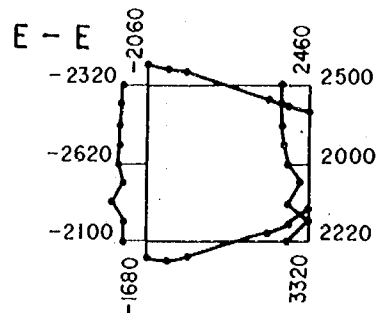
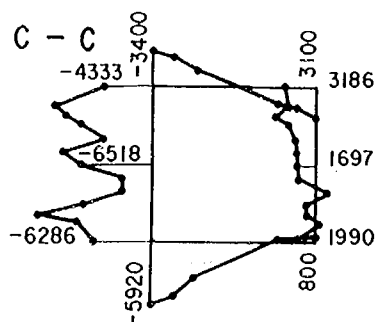
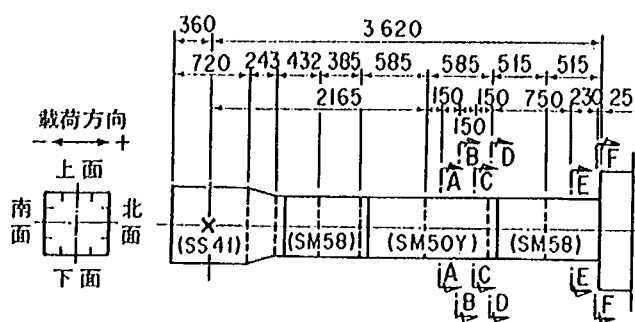
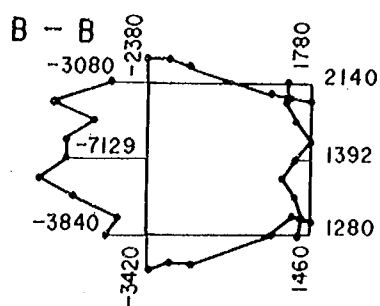


図 3-39(2) 負側最終載荷時のひずみ分布 (実験 4)

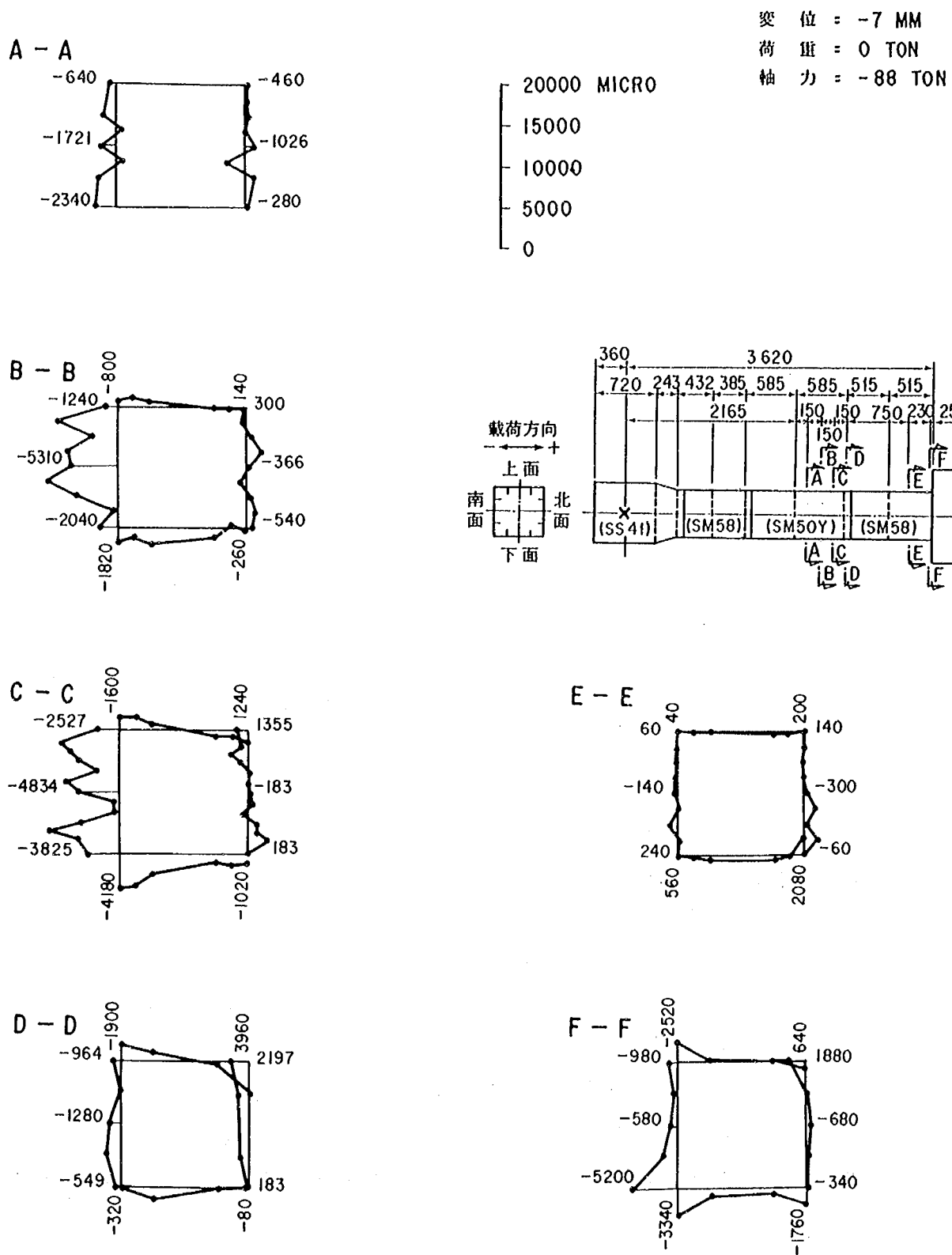


図 3-39(3) 載荷終了時のひずみ分布 (実験 4)

3.4.2 実験 4R

実験 4R では実験 4 で残留面外変形 5 mm の損傷を与えた供試体に図 2-10 に示した当て板添接による補修を行い、図 3-40 に示す加振変位（変位制御）により載荷した。図 3-41 は橋脚天端における荷重～変位の履歴曲線と主な変状を示したものである。また、表 3-3 は主要な載荷段階における外観からの変状をまとめたものである。これらによれば実験 4R の破壊性状はおおむね以下の通りである。

- 1) 載荷段階 3 ($1.4\delta_y$) までは特に変化はなかったが載荷段階 4 ($1.6\delta_y$) では、供試体のベースプレートと当て板との溶接部からクラックが発生し、載荷段階 6 までに最大 7 cm まで進展したが、その後の載荷では進展が止まった。
- 2) 最大耐力は載荷段階 6 ($2\delta_y$) の第 1 回目の載荷で生じた。載荷段階 6 までに生じた変状は上記 1) に示した変状以外にフランジのパネル全体の凹変形が目視により確認される程度の変状である。
- 3) 載荷段階 7 以降ではフランジ下縁にクラックが発生し、本体フランジにまで進展した。また加振機逆側フランジと上面ウェブとの溶接部及び加振機側フランジ上縁からもクラックが発生し、最大 80 mm まで進展し、これらの変状にともない耐力も急激に低下した。図 3-42 は実験 4R の載荷終了時の変状状態を示したものである。

図 3-43 は各載荷段階における載荷終了時の残留面外変形量（パネル内の残留変形の最大値）と載荷変位振幅との関係を示したものである。図中には図 3-41 に示した履歴曲線の骨格曲線（正側及び負側の骨格曲線の平均値）及び等価粘性減衰定数 h_e も示している。これによれば面外残留変形は、 $2\delta_y$ の載荷段階から急激に大きくなっており、耐力の低下と面外残留変形の増加がほぼ対応していると考えられる。

図 3-44 は各載荷段階における第 1 回目の載荷と第 10 回目の載荷を履歴曲線によって比較したものである。載荷段階 1 から載荷段階 6 までは履歴曲線はほとんど変化しておらず、10 回程度の載荷のくり返しによって、耐力、変形性能とも大きくは変化しないことがわかる。これに対して最大耐力以降の載荷段階 7 以降では、同一変位振幅の繰返しによって荷重が低下しており、繰返しによる劣化が生じている。

図 3-45 は実験により求めた骨格曲線と計算により求めた降伏点（降伏荷重 P_y 及び降伏変位 δ_y ）、全塑性荷重 P_p を比較したものである。これによれば、実験により求めた最大耐力は全塑性荷重とほぼ等しいが、5% 程度大きくなっており、実験 4R の実験では全塑性荷重が最大耐力を良く表わしているといえる。

図 3-46 は、軸力導入後および正側、負側の最大荷重時に供試体に生じたひずみの分布を示したものである。

表 3-3 実験 4R の変状進展経過

载荷段階	CYCLE	変 状
1 ($1.0\delta_y$)		○特に変化なし。
2 ($1.2\delta_y$)		○特に変化なし。
3 ($1.4\delta_y$)		○特に変化なし。
4 ($1.6\delta_y$)	10	○ベースプレートと当て板との現場溶接部コーナーにクラックが発生する。
5 ($1.8\delta_y$)	1	○ベースプレート部のクラックが進行する。($\ell = 2 \sim 3$ cm) ○正载荷時に、北面フランジのパネル全体の凹変形を目視で確認する。
	2	○負载荷時に南面フランジのパネル全体の凹変形を目視で確認する。
	10	○ベースプレート部のクラックが進行する。($\ell =$ 最大 5 cm)
6 ($2.0\delta_y$)	4	○当て板の波うち変状を目視で確認する。 ○当て板の黒皮が剝離する。
	10	○ベースプレート部のクラックの進行は止まる。($\ell =$ 最大 7 cm)
7 ($2.2\delta_y$)	6	○南面当て板下縁コーナー付近の局所的な凸部が鉛色に変色する。
	8	○負载荷時に北面フランジ下縁の現場溶接部にクラックが発生する。
	9	○正载荷時に南面フランジ下縁の現場溶接部にクラックが発生する。
	10	○北面フランジ下縁のクラックが補強板に及ぶ。($\ell = 2.5$ cm) ○北面フランジと上面ウェブとの溶接部にクラックが発生する。 ○南面フランジ上縁の補強板現場溶接部にクラックが発生する。
8 ($2.4\delta_y$)	1	○北面フランジ下縁のクラックが本体フランジに及ぶ。
	3	○南面フランジ下縁のクラックが本体フランジに及ぶ。
	10	○ 8 段階めの 10 cycle 载荷終了時のクラックの状態は下図のとおり。 ()内は南面の値 ℓ : クラック長, b : クラック幅 (载荷時)

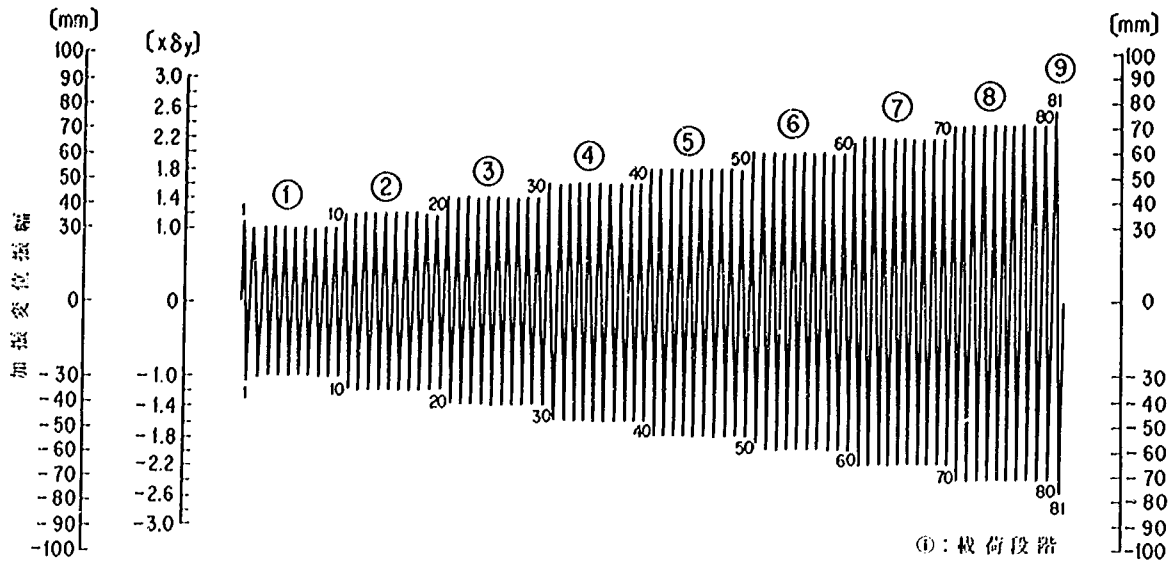
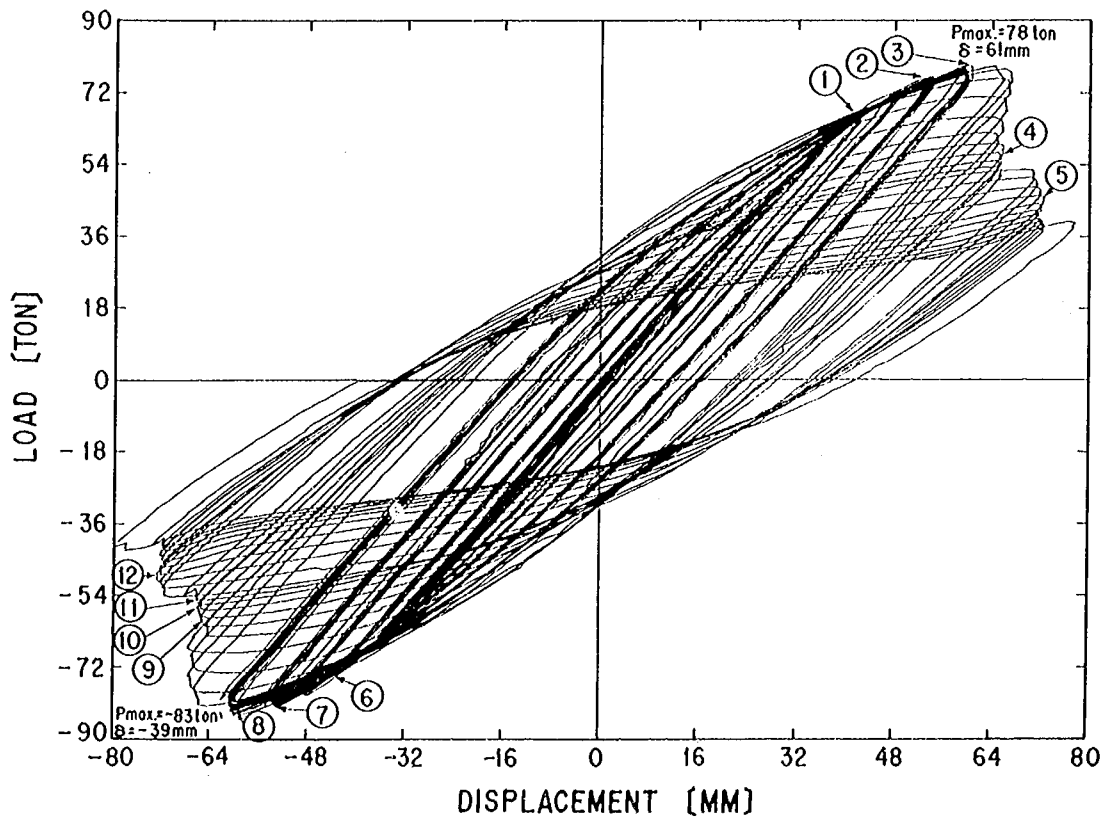


図 3-40 加振変位 (実験 4R)



- | | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| ① ベースプレートと補剛板との現場溶接部コーナーにクラック発生 | ⑦ 南面フランジの座屈変形、目視で確認 |
| ② 北面フランジの座屈変形、目視で確認 | ⑧ 補剛板が波うつ |
| ③ 補剛板を波うつ | ⑨ 南面フランジの局部的ふくらみ部、鉛色に変色 |
| ④ 南面フランジ下縁補剛板の現場溶接部にクラック (柱軸直角方向) | ⑩ 北面フランジ下縁補剛板の現場溶接部にクラック |
| ⑤ 上記のクラック本体に及ぶ (ℓ = 5 ~ 8 cm) | ⑪ 北面フランジ上縁現場溶接部にクラック |
| ⑥ ベースプレートと補剛板との現場溶接部コーナーにクラック発生 | ⑫ 上記のクラック本体に及ぶ |

図 3-41 荷重～変位履歴と変状 (実験 4R)

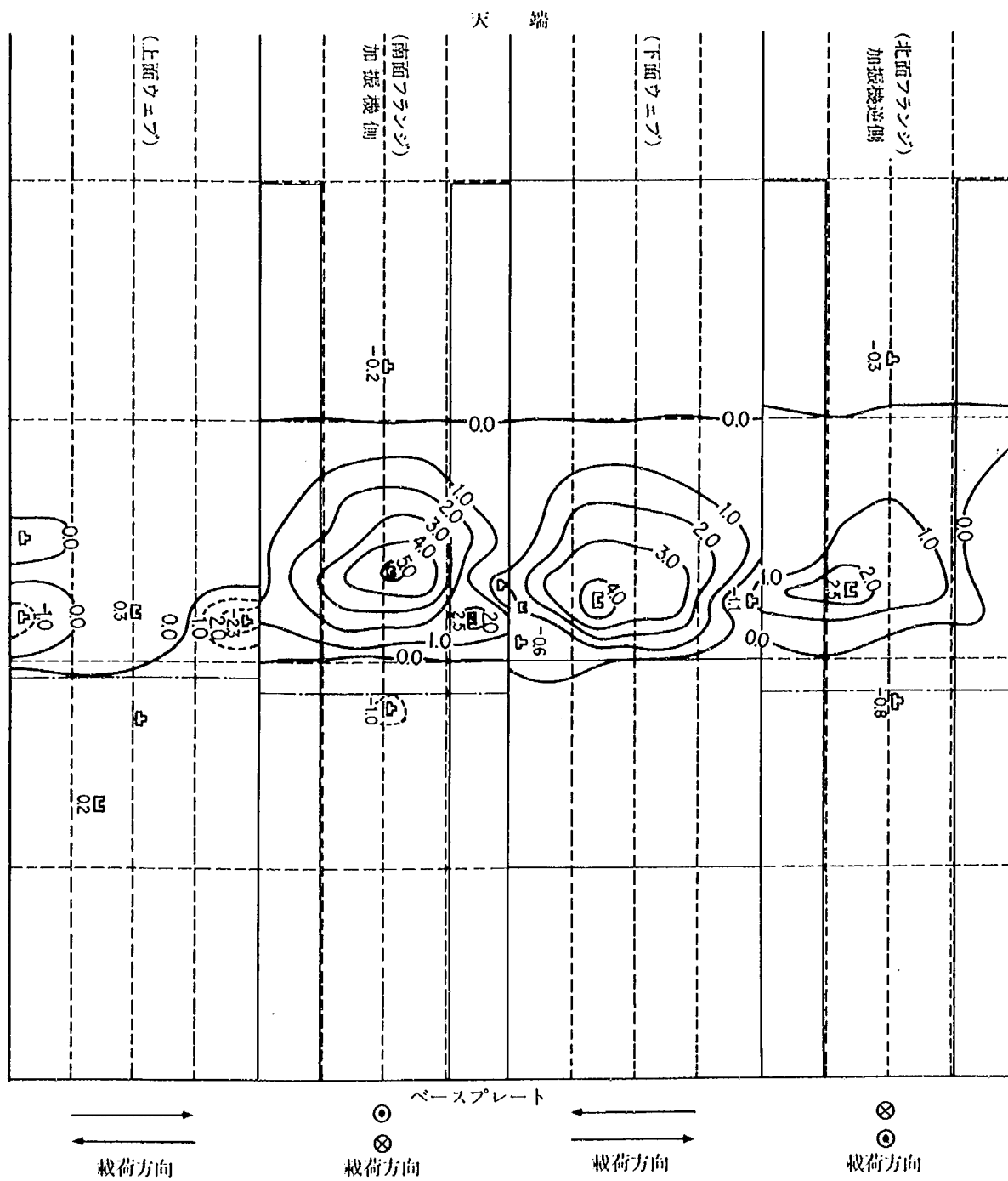


図 3-42 実験 4 R の最終変状状態

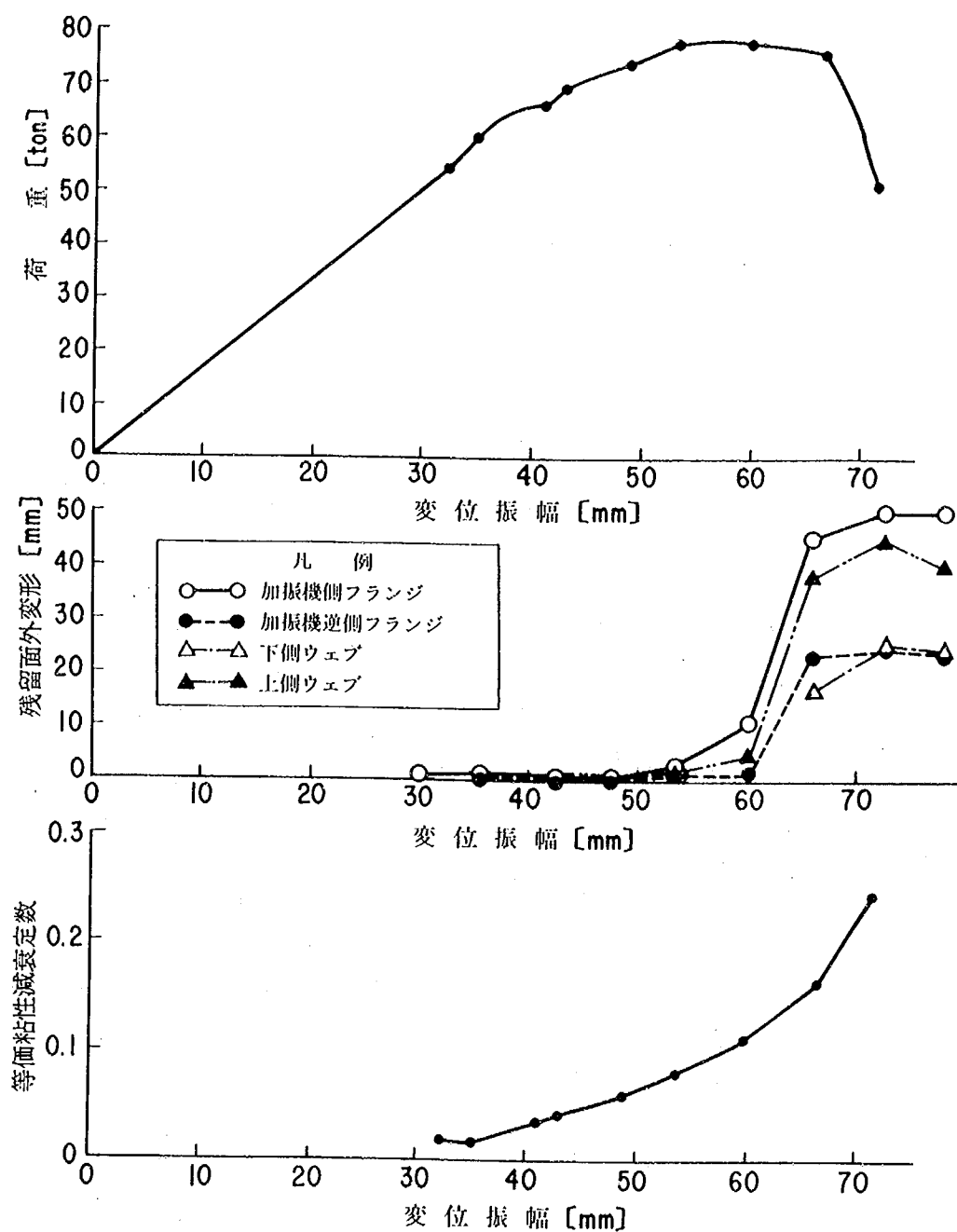
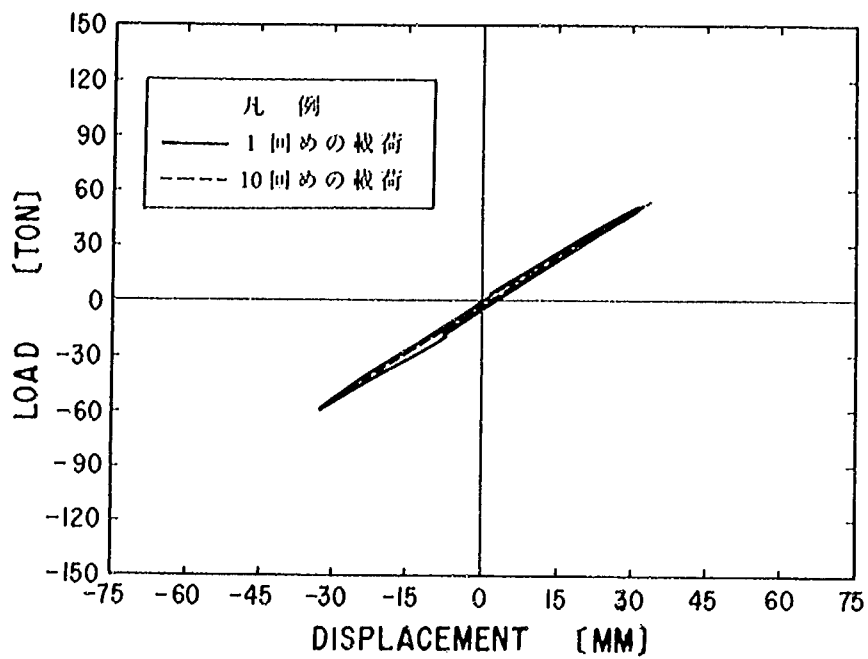
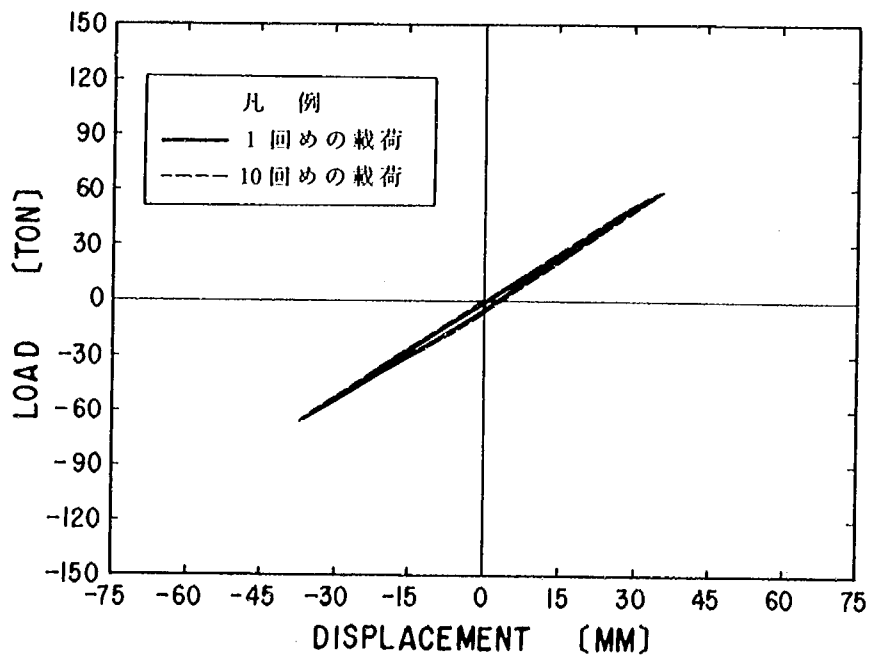


図 3-43 実験 4R の荷重, 残留面外変形, 等価粘性減衰定数

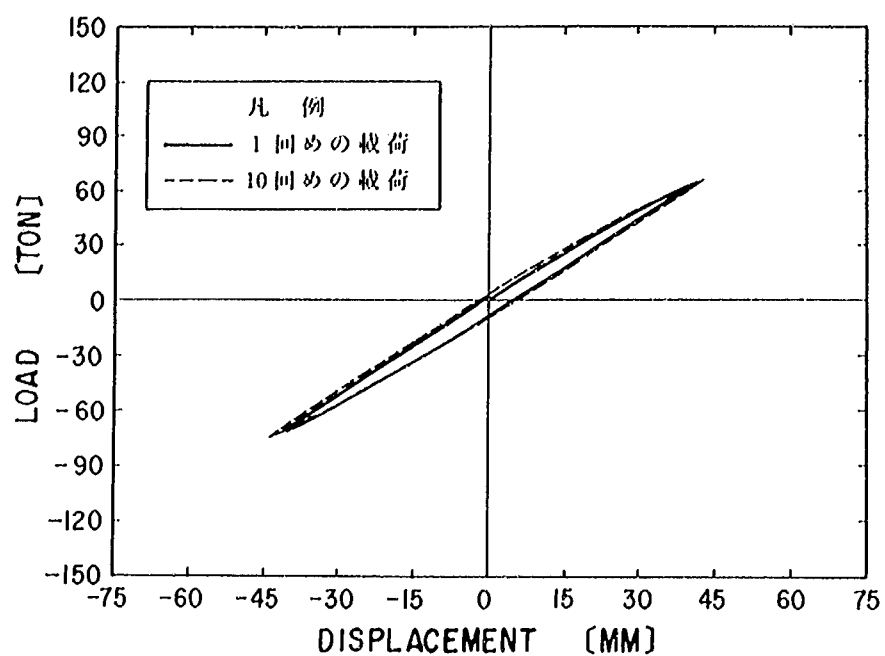


(a) 载荷段階 1

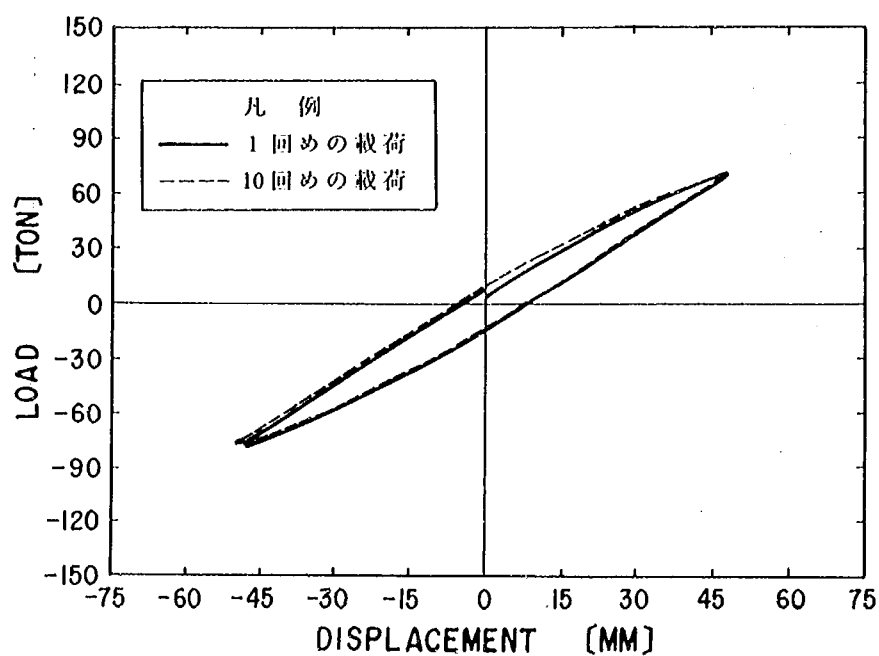


(b) 载荷段階 2

図 3-44(1) 実験 4 R の荷重～変位履歴曲線

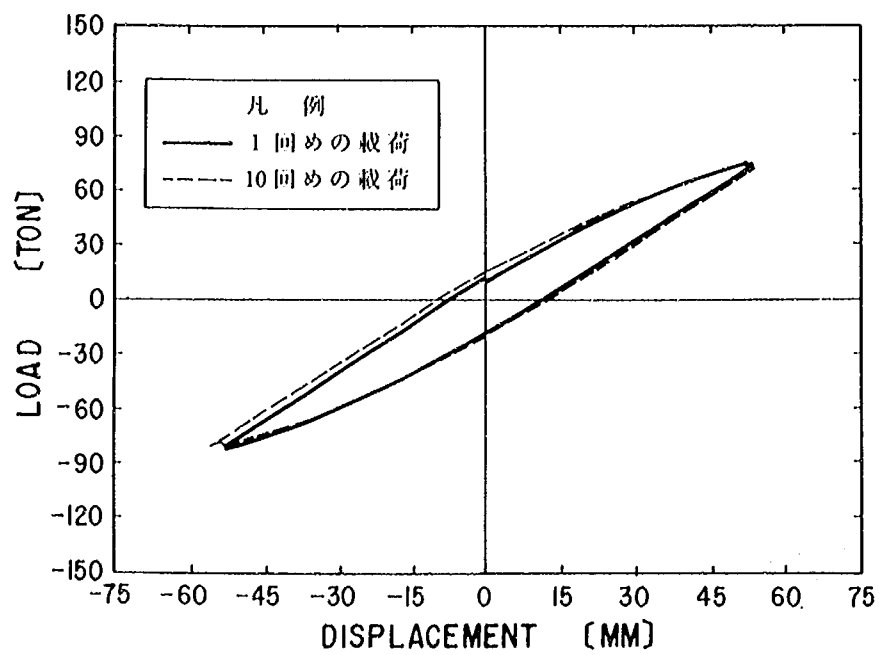


(c) 載荷段階 3

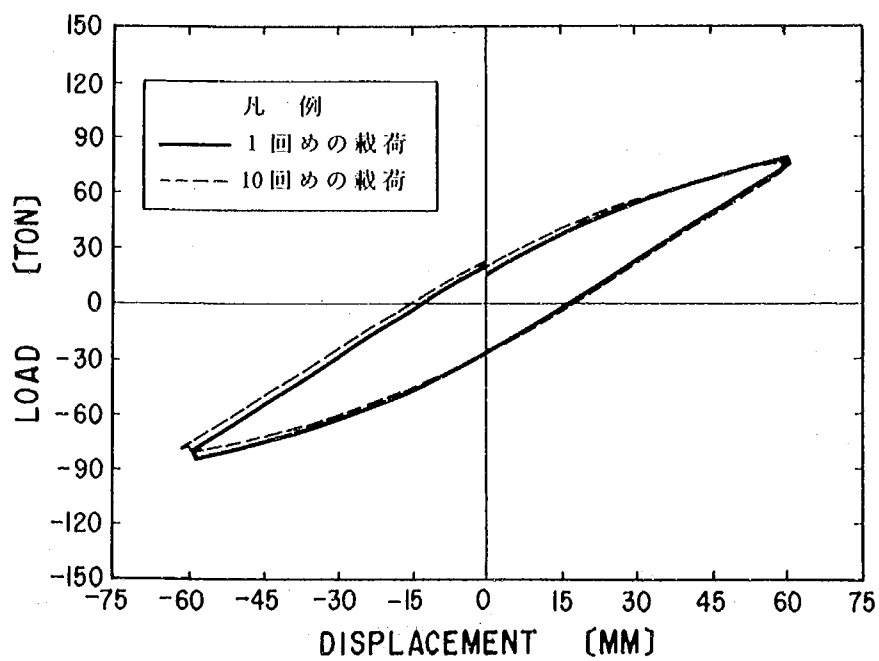


(d) 載荷段階 4

図 3 - 44 (2) 実験 4 R の荷重～変位履歴曲線

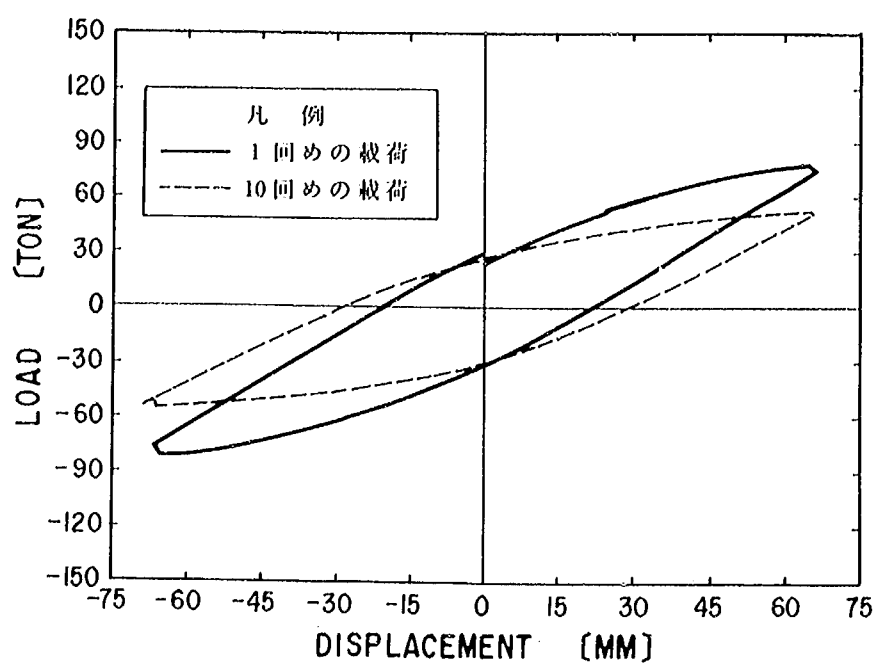


(e) 載荷段階 5

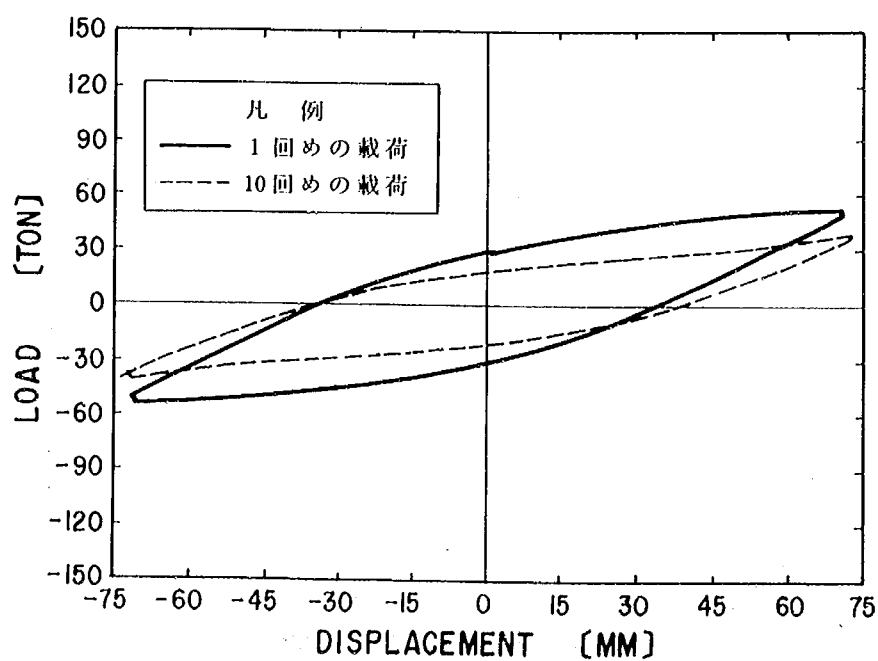


(f) 載荷段階 6

図 3-44(3) 実験 4 R の荷重～変位履歴曲線



(g) 載荷段階 7



(h) 載荷段階 8

図 3-44 (4) 実験 4 R の荷重～変位履歴曲線

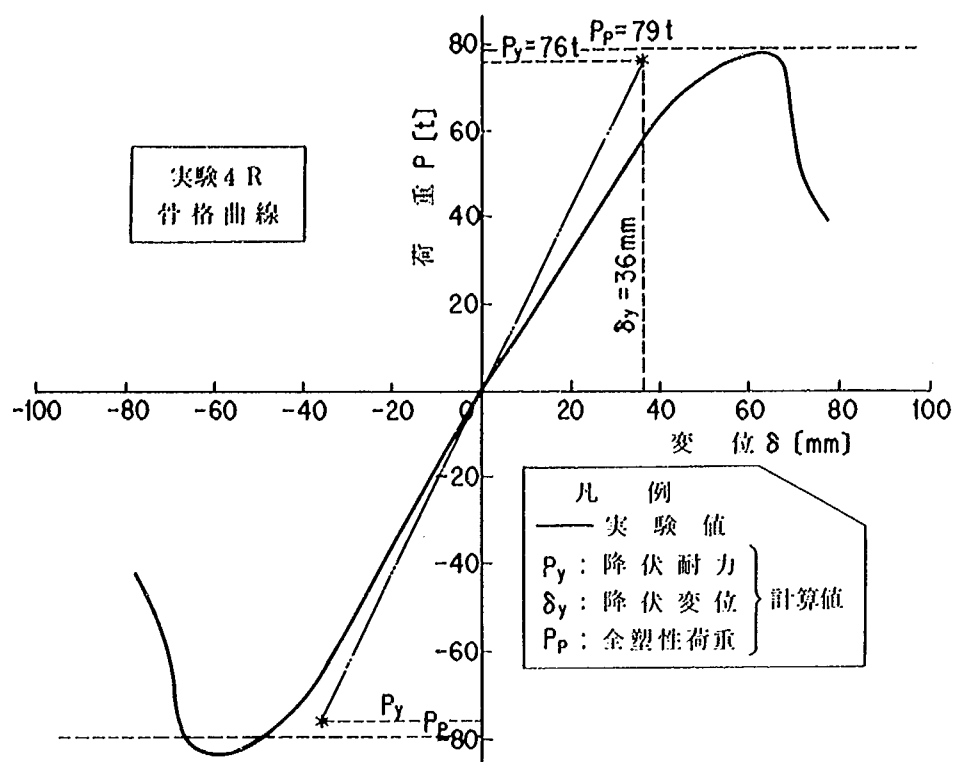


図 3-45 実験による骨格曲線と計算値の比較

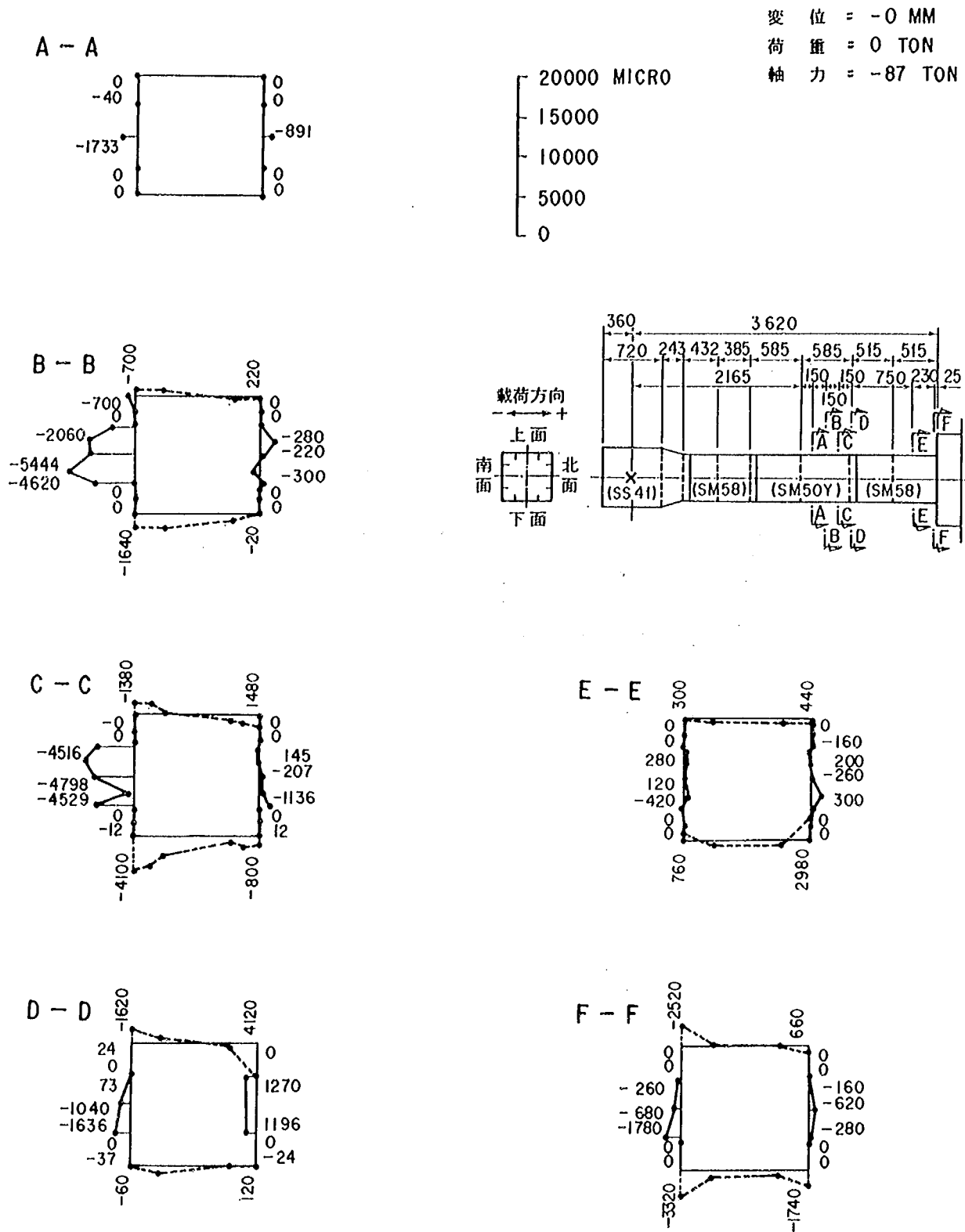
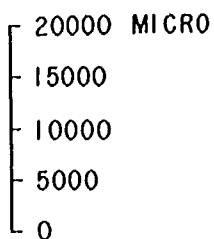
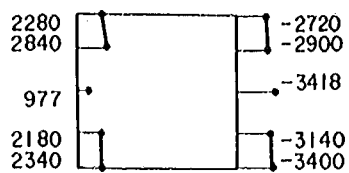


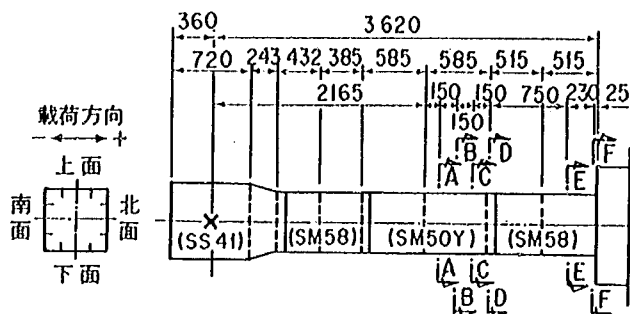
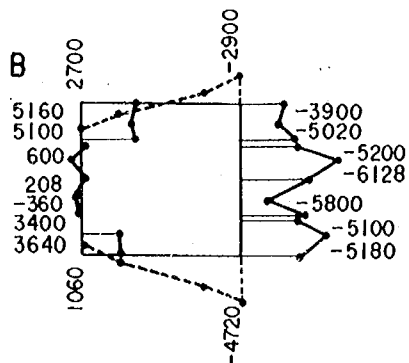
図 3 - 46(1) 載荷前 (軸力導入後) のひずみ分布 (実験 4 R)

A - A

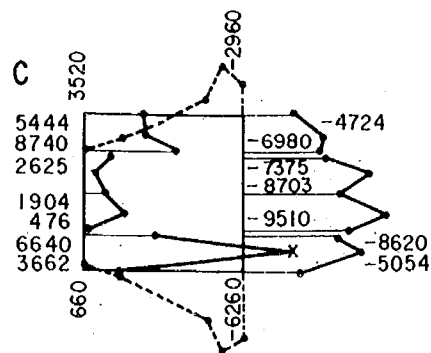


変位 = 61 MM
荷重 = 78 TON
軸力 = -87 TON

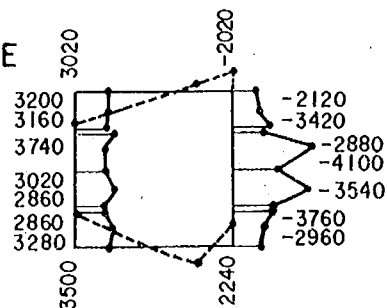
B - B



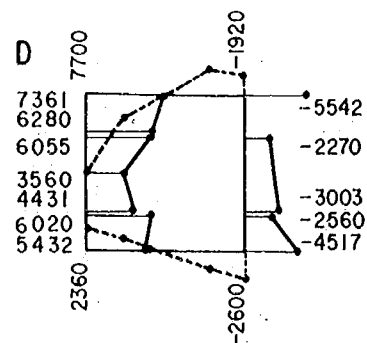
C - C



E - E



D - D



F - F

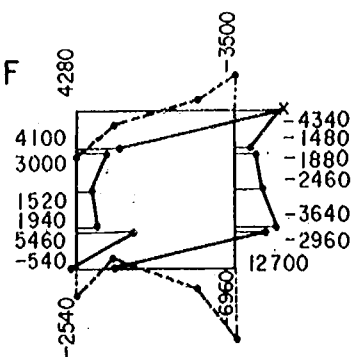
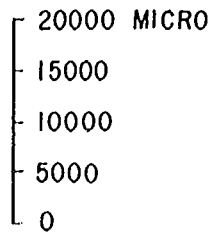
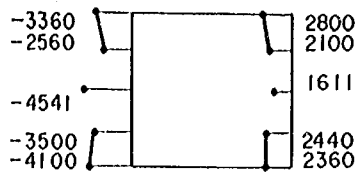


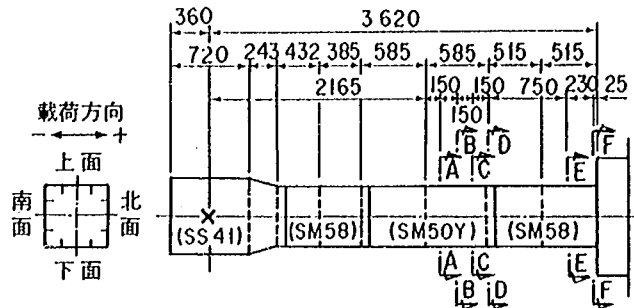
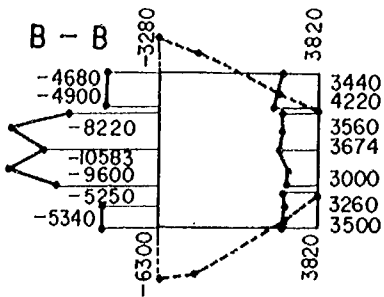
図 3-46(2) 正側最大荷重時のひずみ分布 (実験 4 R)

A - A

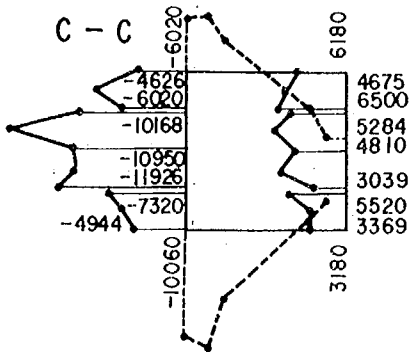


変位 = -59 MM
 荷重 = -83 TON
 軸力 = -87 TON

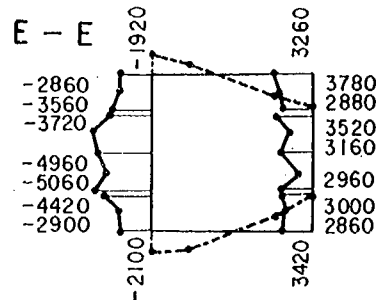
B - B



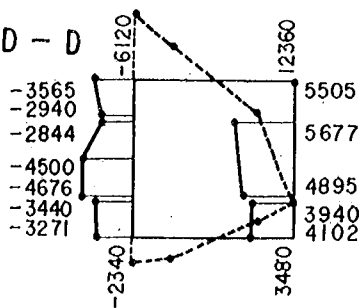
C - C



E - E



D - D



F - F

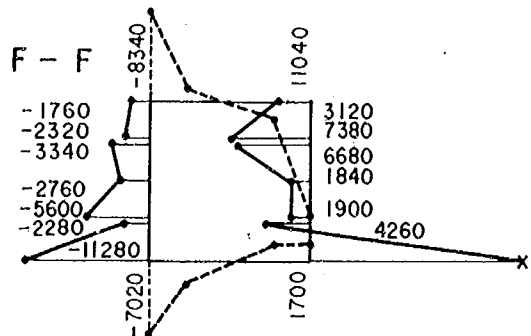


図 3-46(3) 負側最大荷重時のひずみ分布 (実験 4R)

4. ま と め

4.1 鋼製橋脚の耐力及び変形性能

実験1の結果から鋼製橋脚の耐力及び変形性能をまとめると次のようになる。

- 1) 耐力が最大耐力に達するまでは橋脚に著しい変状は認められないが最大耐力に達した以降は、パネルの大きな面外変形、クラック等の変状が生じ、耐力が急激に減少する。
- 2) 耐力が最大耐力に達するまでは10回程度の同一加振振幅の繰り返しに対して、荷重～変位履歴曲線はほとんど変化せず、耐力及び変形性能も大きく変化しない。これに対して最大耐力以降は、繰り返し载荷によって耐力が低下し、剛性劣化が生じる。
- 3) 上記1)及び2)から、耐力が最大耐力に達するまでは、大きな変状は起こらず、繰り返しによる耐力の低下も生じないことが分かったが、供試体のひずみに着目すると最大耐力に達する以前の δ_y の载荷時から同一変位振幅の繰り返しによりひずみが累積しはじめる。
- 4) 計算により求めた全塑性荷重は、実験により求めた最大耐力を良く表わす。

4.2 補剛板及び当て板による補修の効果

実験2R、実験3Rおよび実験4Rの結果から、補剛板及び当て板による補修の効果を検討した。図4-1及び図4-2はそれぞれ橋脚天端における荷重～変位骨格曲線及び等価粘性減衰定数を比較したものである。これから以下の事項をまとめとして指摘することができる。

- 1) 実験2において最大荷重62tfを载荷し、フランジに15mmの残留面外変形を与えた供試体に補剛板添接による補修を行うと、少なくとも最大耐力129tfまで補強された。
- 2) 実験3において最大荷重59tfを载荷し、ウェブに20mmの残留面外変形を与えた供試体に補剛板添接による補修を行うと最大耐力130tfまで補強された。
- 3) 実験4において最大荷重61tfを载荷し、フランジに5mmの残留面外変形を与えた供試体に当て板添接による補修を行うと、最大耐力81tfまで補強された。
- 4) 補剛板あるいは当て板の添接による補修を行うと、等価粘性減衰定数は未補修の供試体(実験1)に比較して多少小さくなる。また、二つの補修方法を比較すると補剛板添接のほうが等価粘性減衰定数は大きくなる。

次に、図4-3は荷重～変位履歴曲線によって囲まれる吸収エネルギーの累積値を示したものである。これより以下の事項をまとめとして指摘することができる。

- 1) 補剛材添接による補修を行うと、未補修の供試体あるいは当て板添接の供試体に比べて累積エネルギーの吸収能力は約1.6倍から約2倍に増加する。
- 2) 当て板添接による補修を行っても、未補修の供試体に比べて加振変位が60mm(2 δ_y 相当)までは累積エネルギーの吸収能力はほとんど変わらないが、加振変位が60mmを越えると、当て板による添接を行った供試体のほうがエネルギー吸収能力は大きくなる。

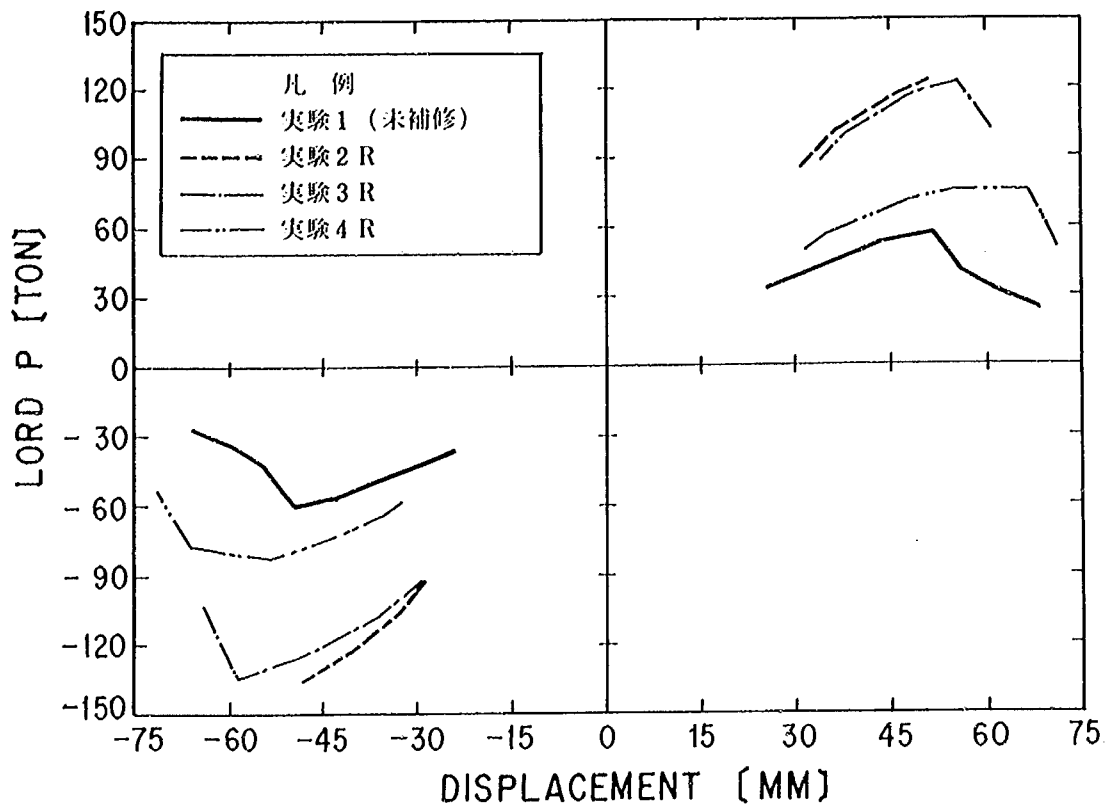


図4-1 荷重-変位骨格曲線の比較

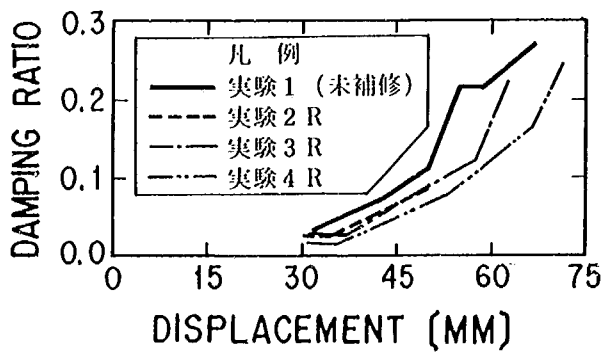


図4-2 等価粘性減衰定数の比較

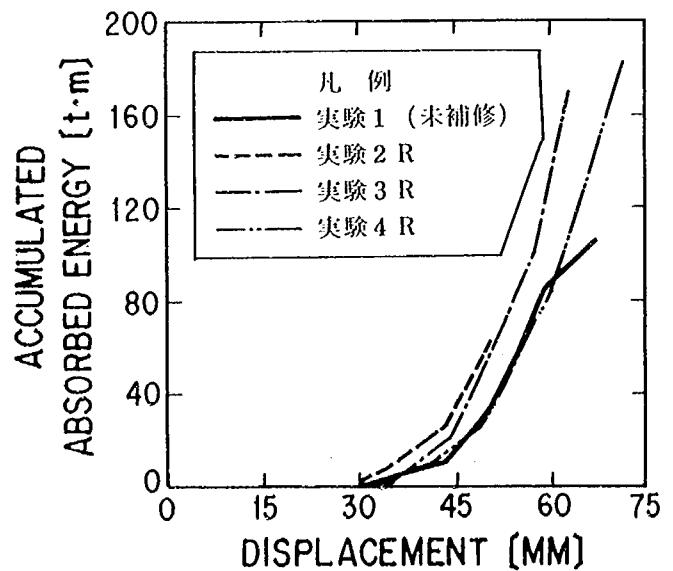


図4-3 累積吸収エネルギーの比較

鋼製橋脚模型正負交番載荷実験
(その2) 補修方法の検討

ISSN 0386-5878

土研資料第2498号

昭和63年2月(1988)

川 島 一 彦 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採用されている鋼製橋脚には、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少なく、地震荷重に対する鋼製橋脚の耐力、変形性能は十分解明されていない。さらに被災した場合の補修方法に関してもRC橋脚における樹脂注入あるいはRC巻立て等に相当する復旧工法は確立されていない。本文は、鋼製橋脚の正負交番載荷実験を行い、鋼製橋脚の補修方法ならびに補修効果を中心として、鋼製橋脚の地震荷重による損傷モード、耐力、変形性能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，補修，変形性能

郵便はがき

四十円切手
をはって下さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

耐震研究室 御中

160

No. _____

No. 160

配布先氏名

○

配布先住所

土木研究所資料第 2498 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印