

土木研究所資料

R C橋脚の動的耐力に関する実験的研究

(その6) 中空円形断面 R C橋脚の動的耐力・変形性能

平成11年6月

建設省土木研究所
耐震技術研究センター耐震研究室

Copyright©(1999) by P.W.R.I.

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

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

R C 橋脚の動的耐力に関する実験的研究

(その6) 中空円形断面 R C 橋脚の動的耐力・変形性能

耐震研究室 室 長 運 上 茂 樹
交流研究員 浅 津 直 樹*

要 旨

山間部に建設される高橋脚などでは、橋脚自体の自重を低減するために、中空断面が採用される場合が多い。中空断面を有する橋脚が大規模地震時に大きな変形を受けた場合には、相対的に断面積が小さいことによりせん断が厳しい条件になるとともに、コンクリートの損傷、剝離が断面の外側と内側の両者で生じることが予想される。

本資料は、中空円形断面を有する鉄筋コンクリート橋脚の損傷メカニズム、動的耐力、変形性能を検討するために行った模型橋脚の動的載荷実験の結果をまとめたものである。

キーワード：鉄筋コンクリート橋脚，中空断面，動的載荷実験，損傷メカニズム，動的耐力，変形性能

* 交流研究員在職期間（平成10年4月から平成12年3月まで）

目 次

1. まえがき	1
2. 実験供試体及び実験方法	2
2. 1 実験供試体	2
2. 2 材料試験結果	5
2. 3 実験方法	6
3. 動的載荷実験結果	8
3. 1 破壊特性（損傷の進展状況）	8
3. 2 動的耐力及び変形性能	10
3. 3 鉄筋ひずみの分析	12
3. 4 塑性ヒンジ領域の考察	29
4. 解析による荷重－変位関係の算出	35
4. 1 解析方法	35
4. 2 軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しの影響	38
4. 3 解析結果及び実験結果との比較	40
5. まとめ	43
参考文献	44
参考資料	
I 損傷図・損傷写真	45
II 荷重、変位、履歴減衰定数及び吸収エネルギー	63
III 材料試験データ	85

1. まえがき

震度法による橋の耐震設計では、0.2～0.3の設計水平震度に相当する地震力に対して橋の各部が弾性域にあるように設計するが、大正12年の関東地震及び平成7年の兵庫県南部地震に代表される大規模地震時には、橋脚に作用する地震力はこれよりもはるかに大きく、弾性応答を仮定した設計水平震度は1.0～2.0にも達する。このため、大地震時には橋脚は損傷を生じ非線形域に入るが、橋脚に十分なねばりがあればかぶりコンクリートの剥離や軸方向鉄筋の座屈等のある程度の損傷は生じても落橋等の大被害を免れることができる。これが平成8年12月の道路橋示方書Ⅴ耐震設計編¹⁾に規定された「地震時保有水平耐力法」の基本的な考え方である。

山間部に建設される高橋脚などでは、橋脚自体の自重を低減するために、中空断面が採用される場合が多い。中空断面を有する橋脚が大規模地震時に大きな変形を受けた場合には、相対的に断面積が小さいことによりせん断が厳しい条件になるとともに、コンクリートの損傷、剥離が断面の外側と内側の両方で生じることが予想される。

本資料は、中空円形断面を有する鉄筋コンクリート橋脚の損傷メカニズム、動的耐力、変形性能を検討するために行った模型橋脚の動的載荷実験の結果をまとめたものである。

2. 実験供試体及び実験方法

2. 1 実験供試体

実験には中間帯鉄筋量が異なる3体の供試体を用いた。これらの供試体の概要を以下に示す。図-2.1に供試体の構造図を、図-2.2に供試体柱の配筋図を示す。

- 1) 断面の直径 : 外径75cm、内径45cm、壁厚さ15cm
- 2) 載荷高さ : 3.0m
- 3) 軸方向鉄筋 : 外側40@D16, 内側20@D16
軸方向鉄筋比 4.2%
- 4) 帯鉄筋 : 外側内側ともにD10c1c10cm
帯鉄筋比 0.95%
(端部は半円形のフックを設け、軸方向鉄筋を囲む。)
- 5) コンクリート : 呼び強度 21N/mm² (早強ポルトランドセメント)
- 6) 実験のパラメータ : 供試体No. 1 : 中間帯鉄筋がない場合 $\rho_s = 1.78\%$
供試体No. 2 : 中間帯鉄筋を1断面あたり10@D6 $\rho_s = 2.12\%$
供試体No. 3 : 中間帯鉄筋を1断面あたり20@D6 $\rho_s = 2.46\%$
(中間帯鉄筋のフック形状としては両側半円形フックとした。)

表-2.1は、設計時に想定した供試体の曲げ耐力とせん断耐力を示したものである。

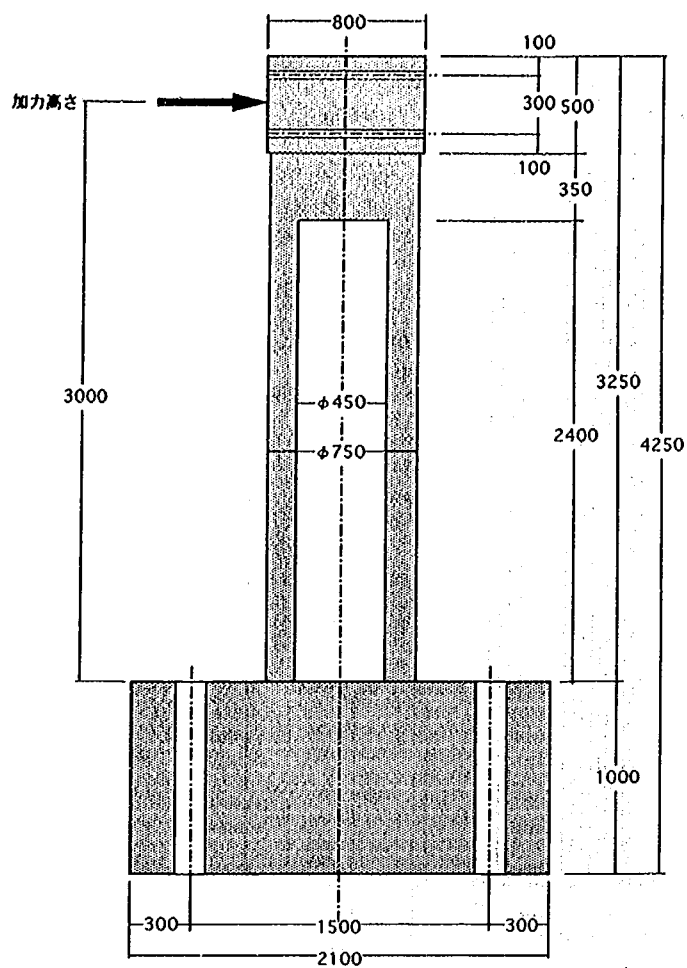
表-2.1 供試体の耐力の計算値 (設計条件)

供試体	曲げ耐力 (kN)		せん断耐力 (kN)
	初降伏時	終局時	
No. 1 ~ 3	309	421	$P_s = 473$ $S_c = 59$ $S_s = 414$

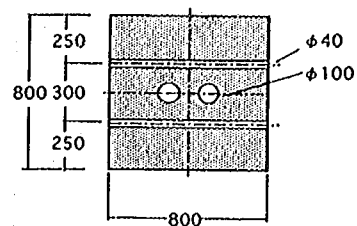
注1) 初降伏時は、最外縁の鉄筋が降伏した点。

2) 終局時は最外縁のコンクリートのひずみが3,500 μ に達した点を仮定。

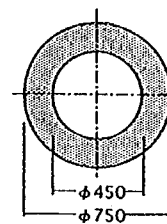
3) せん断耐力は、コンクリートの設計基準強度を21N/mm²とし、中間帯鉄筋の効果を無視して算出。



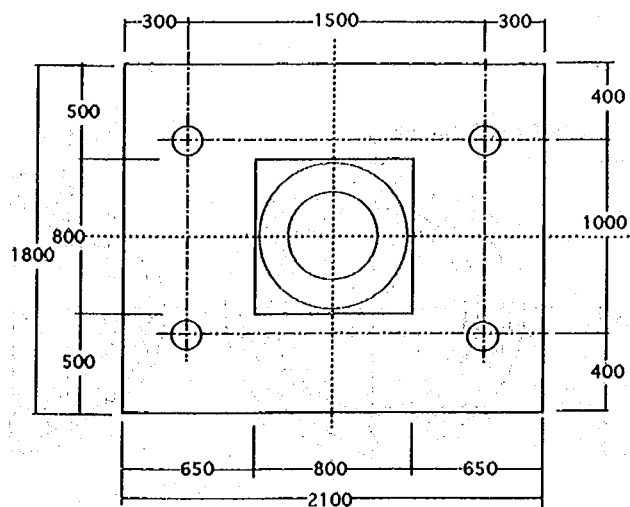
加力部断面



中空部断面

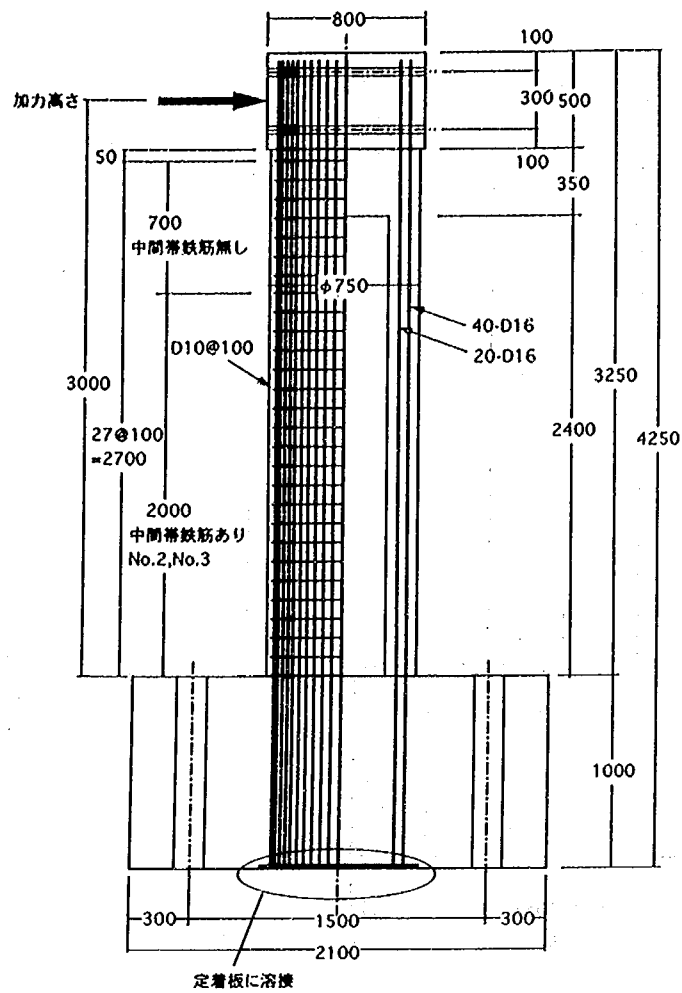


平面図

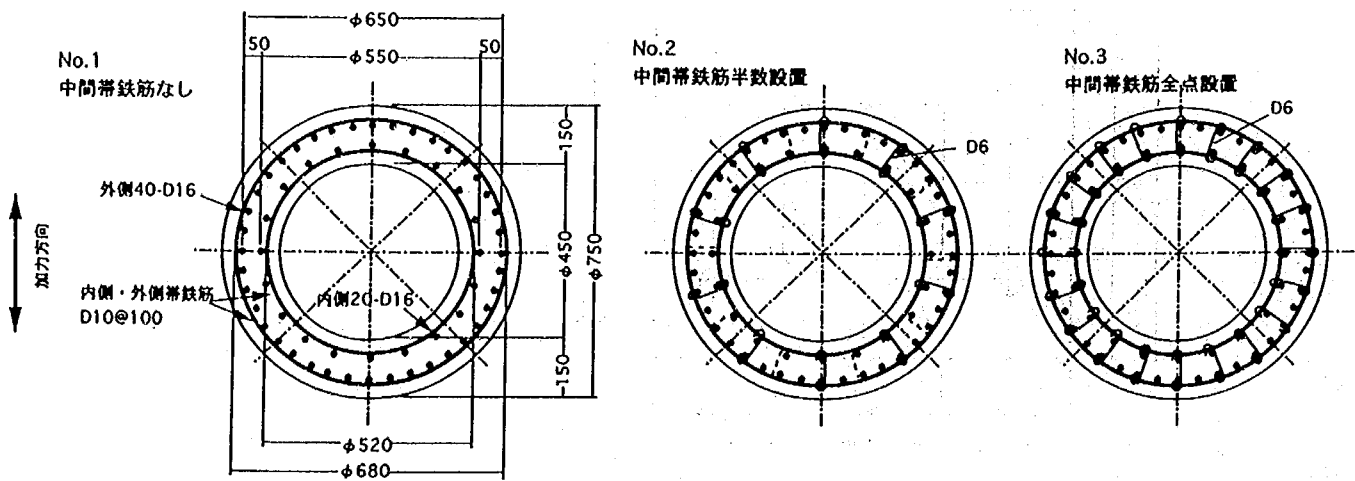


(単位：mm)

図-2.1 供試体構造図



断面の配筋



(単位: mm)

図-2.2 供試体柱配筋図

2. 2 材料試験結果

(1) コンクリート

供試体製作時のテストピースにより、材令14日、27日、43日の圧縮試験を実施し、この結果を線形補間して各供試体の試験日の材令に応じた圧縮強度を算出した。表-2.2に各供試体のコンクリートの圧縮強度を示す。

表-2.2 コンクリート圧縮試験結果

供試体	コンクリート圧縮強度(N/mm ²)
No. 1 (中間帯鉄筋なし)	25.4 (材令16日)
No. 2 (中間帯鉄筋10本)	27.5 (材令24日)
No. 3 (中間帯鉄筋20本)	31.7 (材令42日)

(2) 鉄筋

各径毎に3つの試験片による引張試験を実施し、その平均値をもって引張試験結果とした。表-2.3に降伏強度と弾性係数を示す。

表-2.3 鉄筋の引張試験結果

鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数×10 ⁵ (N/mm ²)
D16	374.3	1.94
D10	335.3	1.89
D6	370.9	2.01

2. 3 実験方法

供試体を反力床にP C鋼棒で固定し、図-2.3に示すように試験体頭部に治具を介して取り付けられた1MN油圧ジャッキにより、正負交番の水平力を加えた。このときの軸力、載荷条件は以下のとおりである。また、載荷パターンを図化したものを、図-2.4に示す。

- 1) 軸力 : 554kN (2.0N/mm²)
 - 2) 載荷繰返し回数 : 3回 (降伏変位を基準とした変位漸増載荷)
 - 3) 載荷基準変位 : 予備載荷実験により、最外縁の軸方向鉄筋が降伏する際の δ_{y0} 、 M_{y0} (水平耐力 P_{y0} から算出)を計測し、これと計算により求めた終局曲げモーメント M_u から式(2.1)により算出した変位を載荷基準変位とした。これは、供試体の荷重～変位関係を完全弾塑性型にモデル化した場合の降伏変位を載荷基準変位とするためである。
- 表-2.4は各供試体の載荷基準変位を示したものである。

$$\delta_y = (M_u / M_{y0}) \delta_{y0} \quad (2.1)$$

ここに、

δ_y : 実験に用いる載荷基準変位

M_u : 終局モーメント (計算値)

M_{y0} : 最外縁鉄筋が降伏するときのモーメント (計測値)

δ_{y0} : 最外縁鉄筋が降伏したときの変位 (計測値)

表-2.4 載荷基準変位 δ_y

供試体	載荷基準変位(cm)
No. 1 (中間帯鉄筋なし)	2.63
No. 2 (中間帯鉄筋10本)	2.55
No. 3 (中間帯鉄筋20本)	2.62

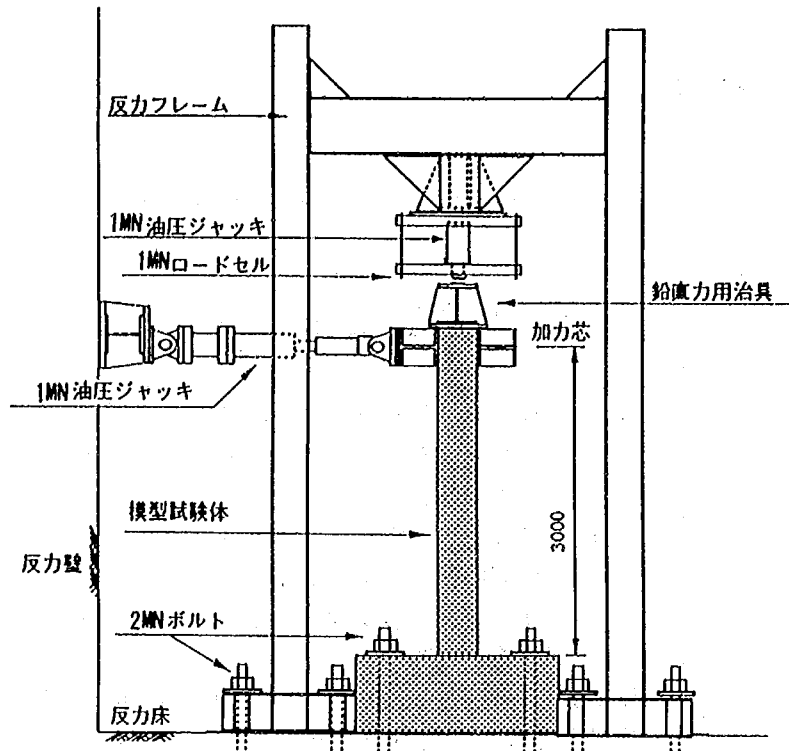


図-2.3 載荷方法

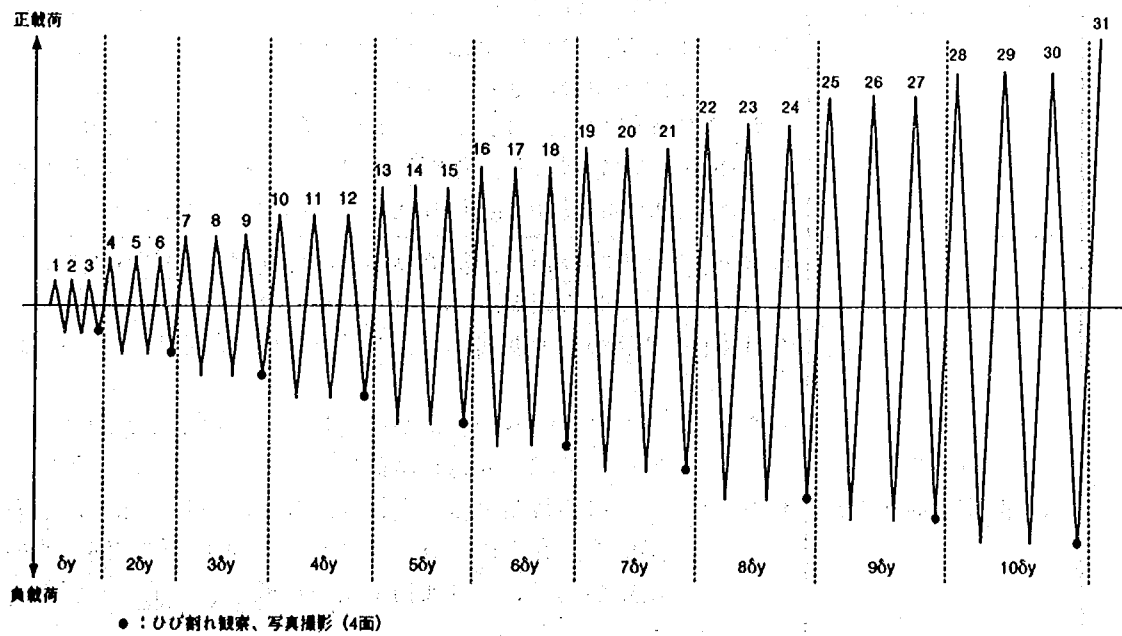


図-2.4 載荷パターン

3. 動的載荷実験結果

3. 1 破壊特性（損傷の進展状況）

表-3.1に各供試体の破壊に至るまでの状況を示す。また、図-3.1(a)～(c)に最大変位時の損傷図を示す。

表-3.1 破壊の進展状況

供 試 体	実 験 結 果
No. 1 (中間帯鉄筋なし)	1) 3 δy : 水平ひびわれ（載荷方向に直角な面）、斜めひびわれ（載荷方向と平行な面）の進展。わずかにコンクリートの剥離。 2) 4 δy : 最外縁軸方向鉄筋の座屈開始、かぶりコンクリート剥離開始。内側でも剥離。載荷の進展とともに軸方向鉄筋の座屈、剥離が進展し、耐力が急激に低下し、最終状態となる。 ・特徴としては、かぶりコンクリートの剥離が始まると急激に損傷が進展し、耐力が低下。
No. 2 (中間帯鉄筋10本)	1) 3 δy : 水平ひびわれ、斜めひびわれの進展。わずかにコンクリートの剥離。 2) 4 δy : ひびわれの進展、コンクリートの剥離がわずかつつ進展。 3) 5 δy : コンクリートの剥離が進展し、3波目で軸方向鉄筋の座屈を確認。繰返し載荷による耐力の低下は小さい。 4) 6 δy : 1波目の載荷で軸方向鉄筋の座屈、コンクリートの剥離が顕著になり、耐力が低下し、最終状態となる。 ・No. 1に比較して、コンクリートの剥離、軸方向鉄筋の顕著な座屈が1 δy分遅れる。ただし、コンクリートの剥離が進展すると、軸方向鉄筋の座屈が進展し、耐力が急激に低下。
No. 3 (中間帯鉄筋20本)	1) 3 δy : 水平ひびわれ、斜めひびわれの進展。わずかにコンクリートの剥離。 2) 4 δy : ひびわれの進展、コンクリートの剥離がわずかつつ進展。 3) 5 δy : コンクリートの剥離が進展し、3波目で軸方向鉄筋の座屈を確認。繰返し載荷による耐力の低下は小さい。 4) 6 δy : 1波目の載荷で軸方向鉄筋が3本破断し、徐々に耐力が低下。さらに、コンクリートの剥離、軸方向鉄筋の座屈が進展し、3波目で耐力が低下して最終状態となる。 ・ほぼNo. 2と同様であるが、6 δyでの耐力の低下度合いが少ないこと、最終的に軸方向鉄筋の破断が先行して最終状態となったことが異なる。

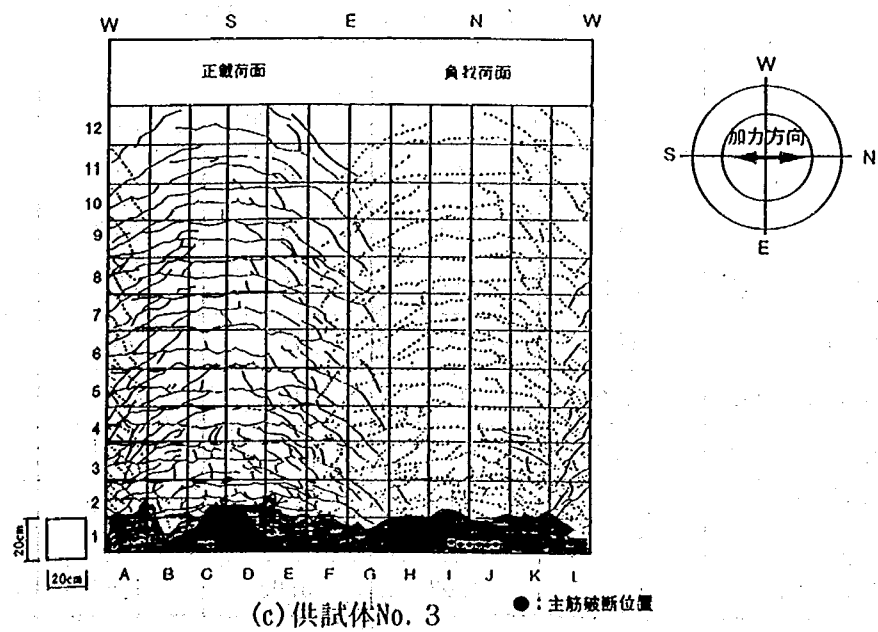
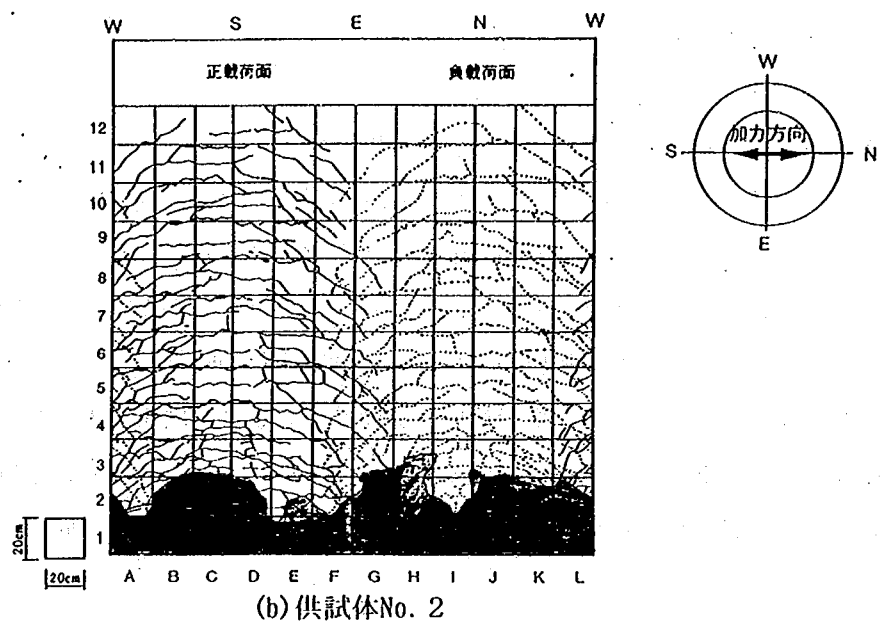
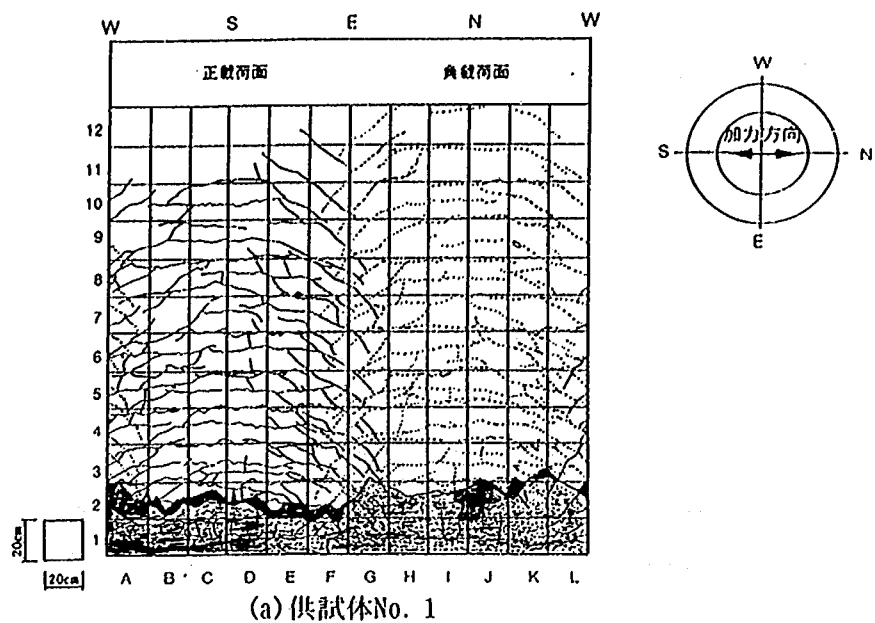


図-3.1 最大変位時損傷図

3. 2 動的耐力及び変形性能

(1) 水平力－水平変位履歴曲線

図－3.2(a)～(c)に各供試体の水平力－水平変位履歴曲線を示す。供試体No. 1 と供試体No. 2、No. 3 の間の変形性能には明確な差があり、中間帯鉄筋の配置によるコンクリートの拘束効果により、変形性能が向上している状況が確認できる。供試体No. 2 と供試体No. 3 では、3. 1 に示したように軸方向鉄筋の座屈が確認されるのは5 δy の3 波目と同一であるが、これ以降の耐力の低下度合いに違いがある。すなわち、供試体No. 2 では軸方向鉄筋座屈直後の6 δy の1 波目で急激に耐力が低下するが、供試体No. 3 では6 δy の1 波目での耐力低下はわずかであり、2 波目、3 波目で徐々に耐力が低下していることから、最終的な破壊に至るまでのじん性としては中間帯鉄筋を密にした供試体No. 3 の方が大きいといえる。

(2) 動的耐力及び変形性能

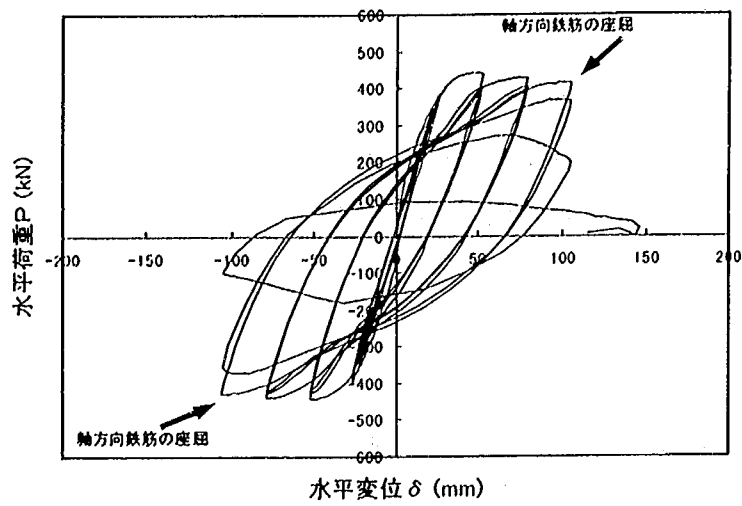
本実験における降伏及び終局は、下記のように定義した。

- 1) 初降伏時：最外縁の鉄筋が降伏する载荷段階。
- 2) 降伏時：式(2.1)で算出した変位（载荷基準変位）における载荷段階。
- 3) 終局時：かぶりコンクリートが剥離する時を終局時とするのが平成8年道路橋示方書の考え方であるが、本実験においてはかぶりコンクリートの剥離時期が明確ではないため、ここでは軸方向鉄筋の座屈が生じる载荷段階を終局時とした。

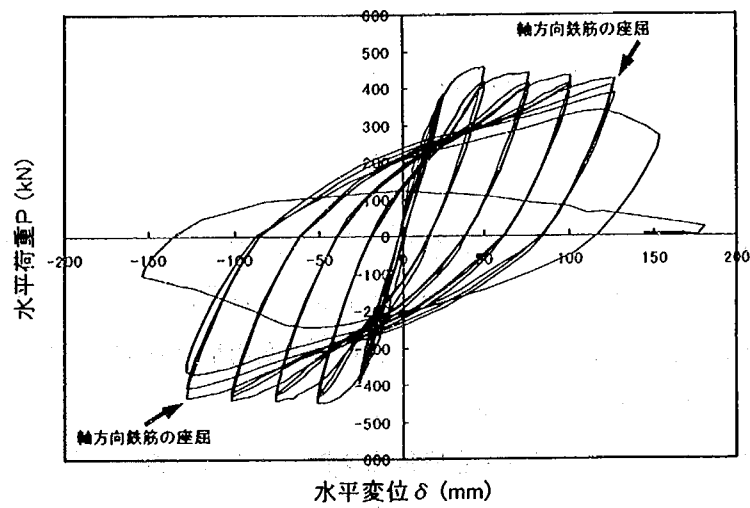
以上より、各供試体の動的耐力及び変形性能を数値的にまとめた結果を表－3.2に示す。ここで、(1)で述べた供試体No. 2 とNo. 3 のじん性の違いは軸方向鉄筋座屈後のねばり強さの違いであり、上記のように終局変位を定義した場合は、供試体No. 2 と供試体No. 3 のじん性率は数値的に同一となる。

表－3.2 動的耐力及び変形性能

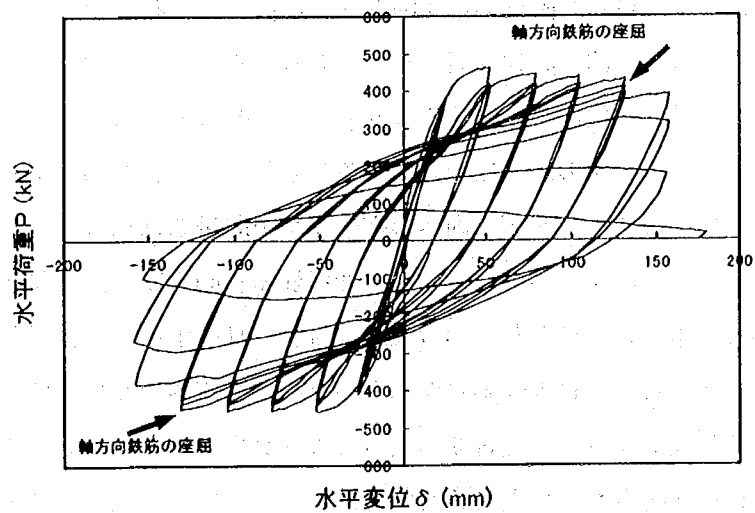
供 試 体	No. 1 (中間帯鉄筋なし)		No. 2 (中間帯鉄筋10本)		No. 3 (中間帯鉄筋20本)	
	正	負	正	負	正	負
初降伏耐力 (kN)	345	351	337	347	356	362
降伏耐力 (kN)	384	396	383	398	384	409
終局耐力 (kN)	413	427	425	435	430	451
初降伏変位 (mm)	21.9	21.5	20.6	20.9	23.3	21.6
降伏変位 (mm)	26.3	26.2	25.4	25.9	26.2	26.2
終局変位 (mm)	105.6 (4 δy)	105.3 (4 δy)	127.4 (5 δy)	128.0 (5 δy)	131.1 (5 δy)	131.0 (5 δy)
じん性率	4.02	4.02	5.02	4.94	5.00	5.00



(a) 供試体No. 1



(b) 供試体No. 2



(c) 供試体No. 3

図-3.2 水平力-水平変位履歴曲線

3. 3 鉄筋ひずみの分析

本実験では、図-3.3～図-3.4に示す位置で軸方向鉄筋、帯鉄筋、中間帯鉄筋のひずみを計測している。図-3.5～図-3.17に各載荷段階の第1波目におけるひずみ分布を示す。ただし、供試体No. 2、3は $6\delta y$ までを表示しているが、供試体No. 1に対しては $4\delta y$ で終局に達したため、ここまでしか表示していない。以下、各鉄筋のひずみ分布の分析を行う。

(1) 軸方向鉄筋のひずみ

各供試体の最外縁の軸方向鉄筋ひずみの鉛直分布を図-3.5に示す。柱基部では、各供試体共に $1\delta y$ で引張り側が降伏ひずみ(約 $2,000\mu$)に達した後、 $2\delta y$ では $10,000\mu\sim 20,000\mu$ の大きなひずみに進展しており、鉄筋が塑性化している状況が確認される。 $3\delta y$ 以降は、計測不能となっているケースもあるが、若干増加傾向にあり、各供試体共 $20,000\mu$ 前後で終局に至っている。柱基部以外でも、基部から $30\text{cm}\sim 60\text{cm}$ で $20,000\mu$ 近くに達している。

各供試体間でひずみ分布を比較すると、顕著な差は見られない。

(2) 帯鉄筋のひずみ

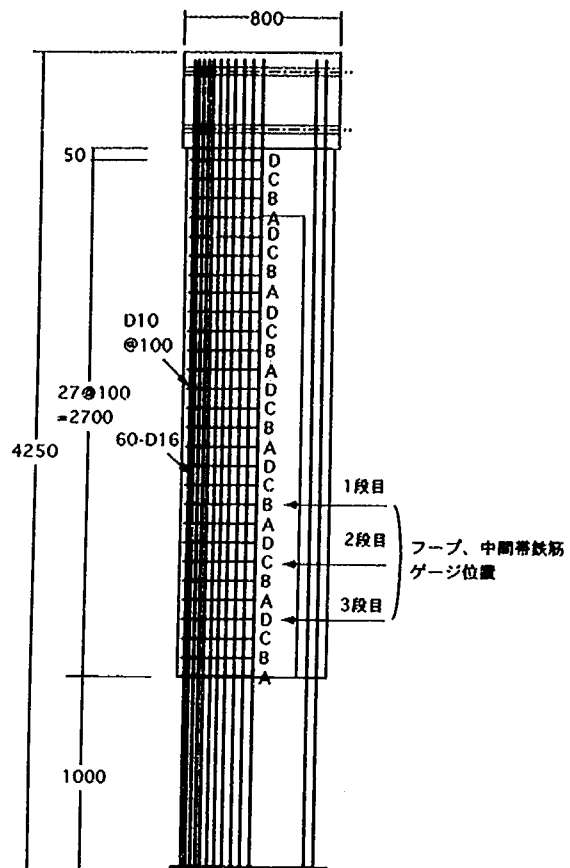
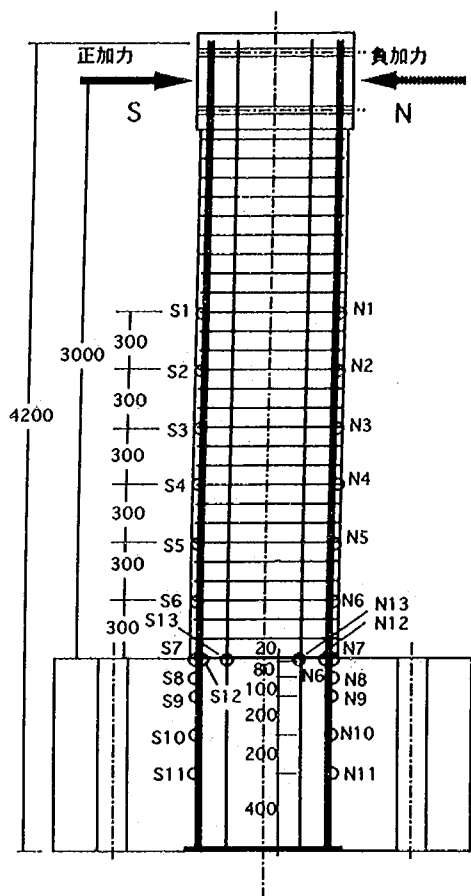
柱基部から 90cm (1段目)、 60cm (2段目)、 30cm (3段目)の帯鉄筋のひずみの平面分布を図-3.6～図-3.11に示す。これらの図では、せん断面の方が拘束面よりも大きくなっている。また、内側の帯鉄筋は外側の帯鉄筋と比較して全体的にひずみが小さくなっており、中空円形断面の場合は、内側と比較して外側の帯鉄筋が果たす役割が大きい結果となっている。

次に、各供試体の外側帯鉄筋の最終ひずみを各段毎に比較してみる。図-3.6に示す1段目では各供試体ともに $2,000\sim 2,500\mu$ 程度と大きな差はない。しかし、塑性ヒンジ領域に相当する図-3.10の3段目においては供試体No. 1が $3,000\mu$ 程度であるのに対し、供試体No. 2、No. 3では $3,000\mu$ 大きく上回るひずみが計測されている。2段目については、1段目と3段目の中間的な傾向にある。これらの傾向は、外側帯鉄筋のせん断面における鉛直方向の分布を示した図-3.12～図-3.13でも確認することができ、供試体No. 2、No. 3の3段目で計測されたひずみは、軸方向鉄筋が座屈する $5\delta y$ で $5,000\sim 10,000\mu$ 、 $6\delta y$ では $10,000\sim 30,000\mu$ 程度にまで達している。この理由は次のように考えられる。すなわち、柱基部の塑性ヒンジ領域ではコンクリートは大きな圧縮力と塑性変形を受けるが、内外の帯鉄筋が中間帯鉄筋によって結束されている場合には拘束力によってコアコンクリートの圧縮強度が上昇し、変形性能も向上する。帯鉄筋のひずみは柱の変形に伴って大きくなる。しかし、中間帯鉄筋がない場合はコアコンクリートの圧縮強度が小さいために、コンクリートの圧壊が先行すると考えられ、柱の変形量が小さいため、ひずみも小さな値に留まる。一方、塑性ヒンジ領域より上部では中間帯鉄筋が効力を発揮するような大きな変形とならないため、帯鉄筋に生じる最終ひずみも中間帯鉄筋の有無に影響されないと考えられる。したがって、これらの結果は塑性ヒンジ領域においてコアコンクリートの大きな拘束力が必要となる場合には中間帯鉄筋が果たす役割が大きいことを意味している。

(3) 中間帯鉄筋のひずみ

中間帯鉄筋のひずみの平面分布にを図-3.14～図-3.15に示す。柱基部に着目すると、供試体No. 2、No. 3 共に圧縮側の拘束面で大きなひずみが生じていることがわかる。このことより、中間帯鉄筋は軸方向鉄筋の座屈を抑制するように作用していることがわかる。

図-3.16～図-3.17には拘束面における中間帯鉄筋ひずみの鉛直分布を示すが、ここでも柱基部の圧縮側で大きなひずみを生じている様子がよくわかる。また、供試体No. 2、No. 3 でひずみレベルに大差はなく、中間帯鉄筋は供試体No. 2、No. 3 共に拘束効果を発揮している。



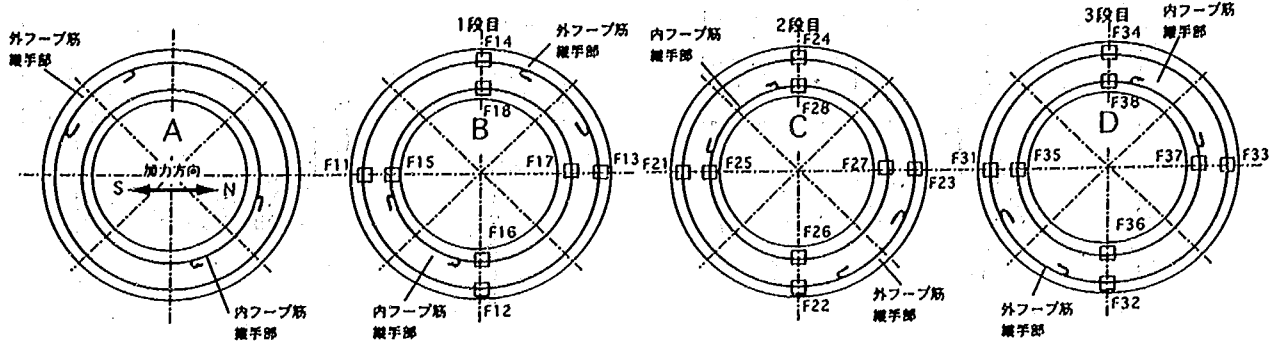
(単位 : mm)

(a) 軸方向鉄筋

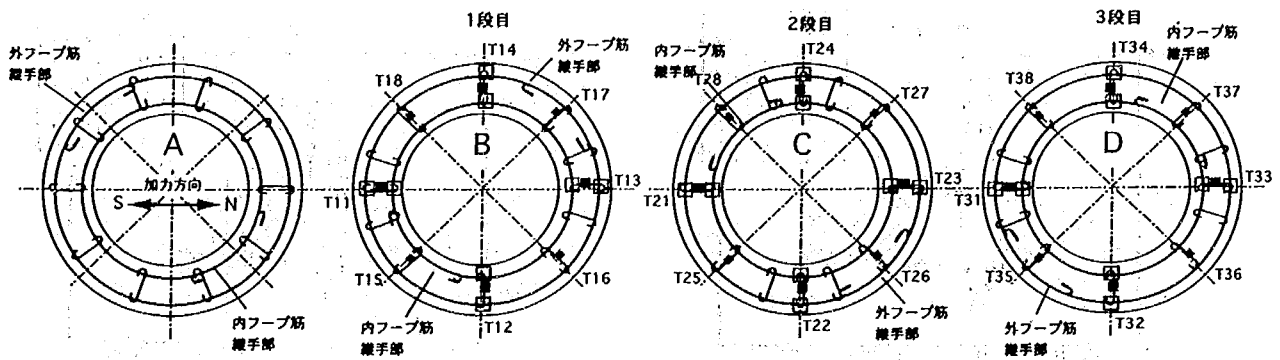
(b) 帯鉄筋・中間帯鉄筋

図-3.3 鉄筋のひずみ計測位置側面図

□帯鉄筋ひずみゲージ
■中間帯鉄筋ひずみゲージ

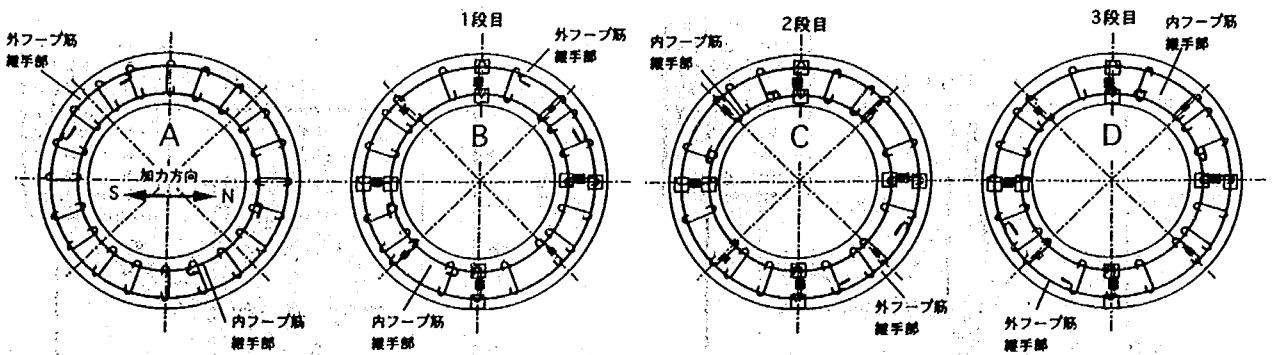


(a) 供試体No. 1



帯鉄筋ゲージ No.は供試体 No. 1 と同じ

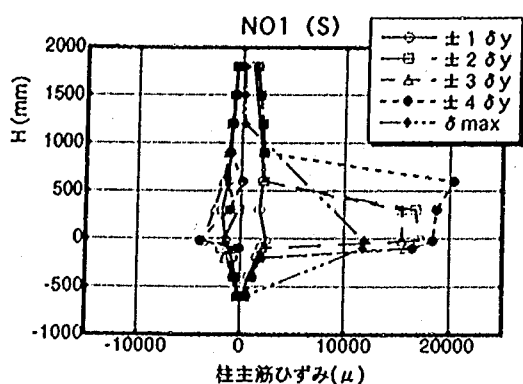
(b) 供試体No. 2



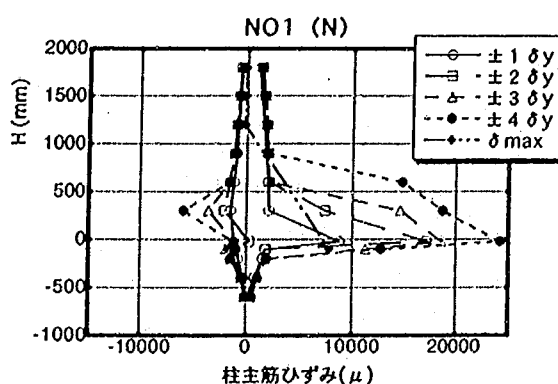
帯鉄筋ゲージ No.は供試体 No. 1 と同じ
中間帯鉄筋ゲージ No.は供試体 No. 2 と同じ

(c) 供試体No. 3

図-3.4 帯鉄筋・中間帯鉄筋のひずみ計測位置平面図

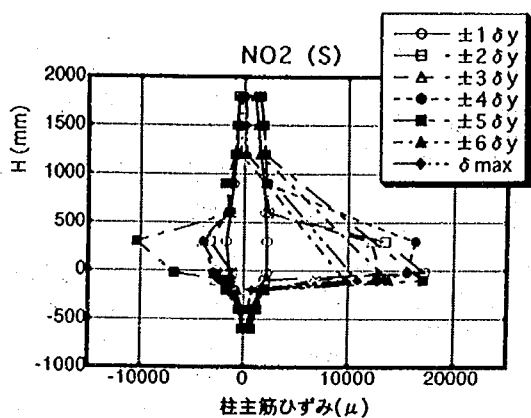


(a) 正載荷

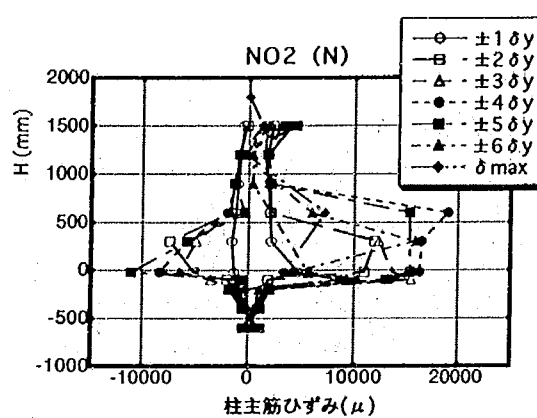


(b) 負載荷

(1) 供試体No. 1

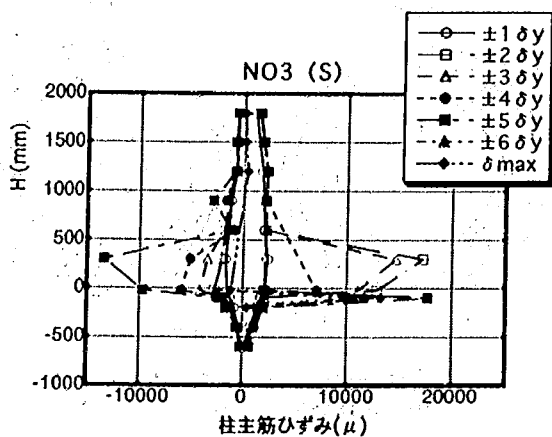


(a) 正載荷

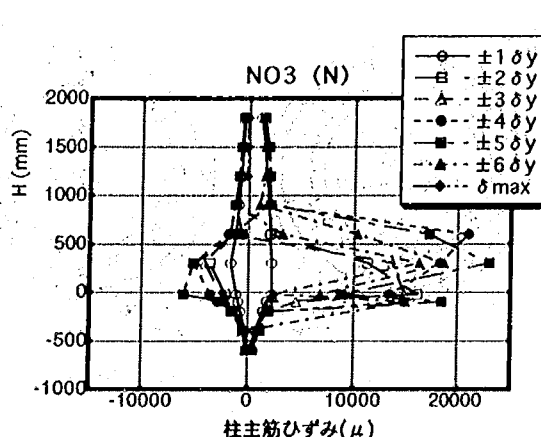


(b) 負載荷

(2) 供試体No. 2



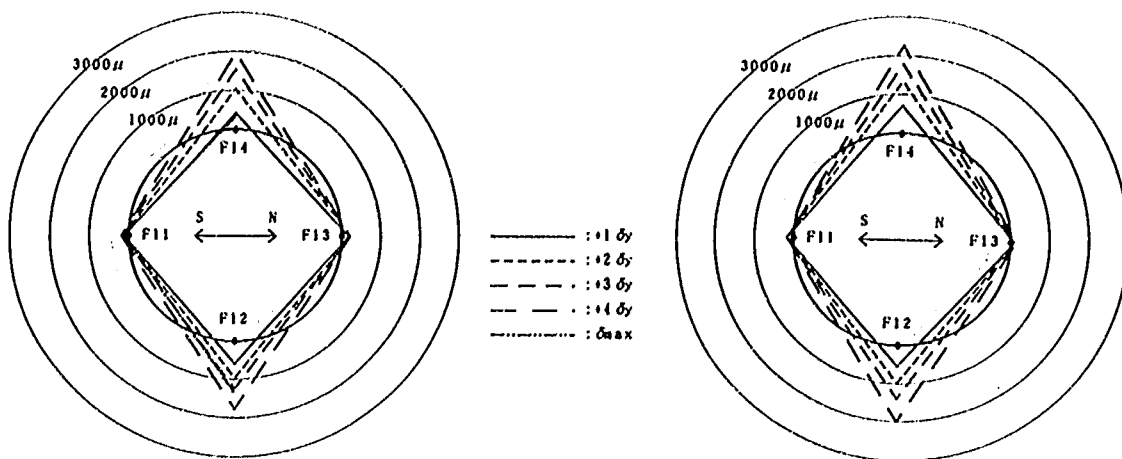
(a) 正載荷



(b) 負載荷

(3) 供試体No. 3

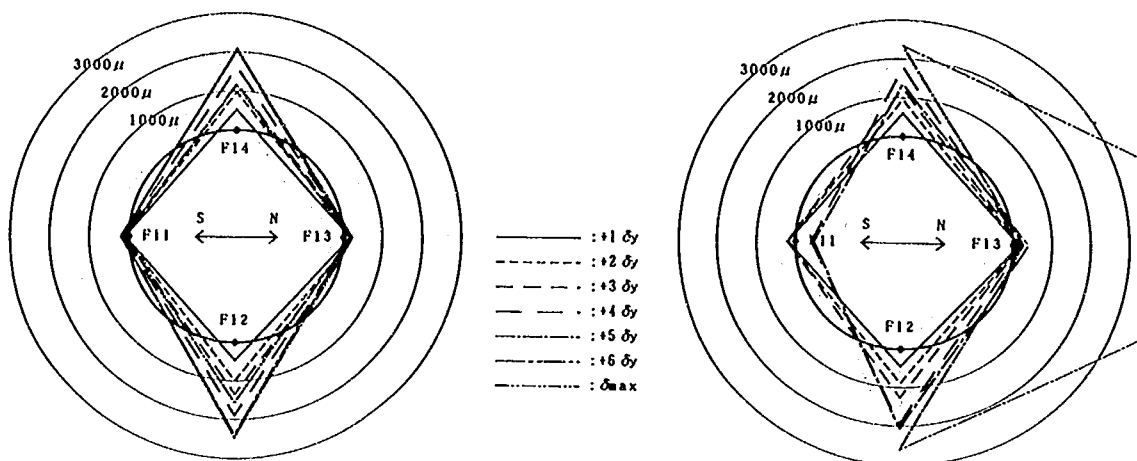
図-3.5 最外縁軸方向鉄筋のひずみの鉛直分布



(a) 正載荷

(b) 負載荷

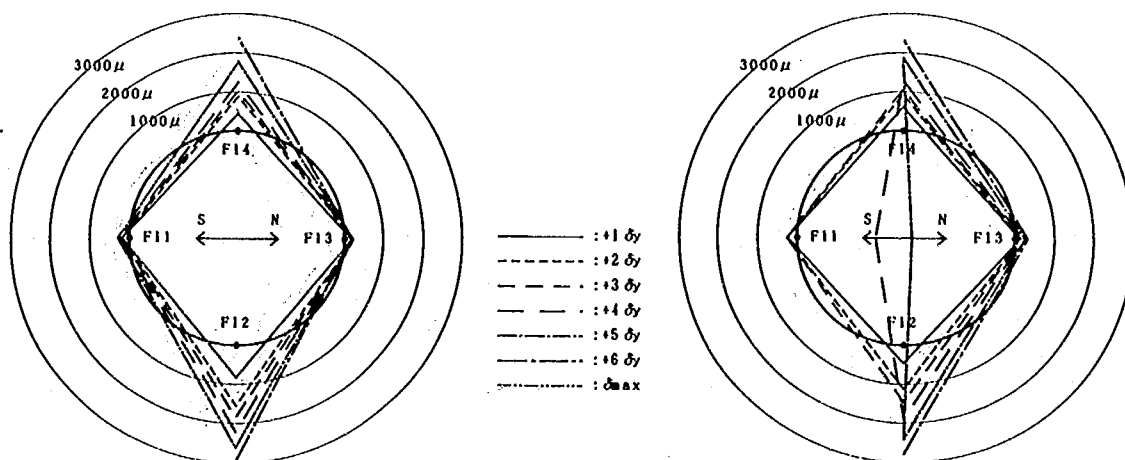
(1) 供試体No. 1



(a) 正載荷

(b) 負載荷

(2) 供試体No. 2

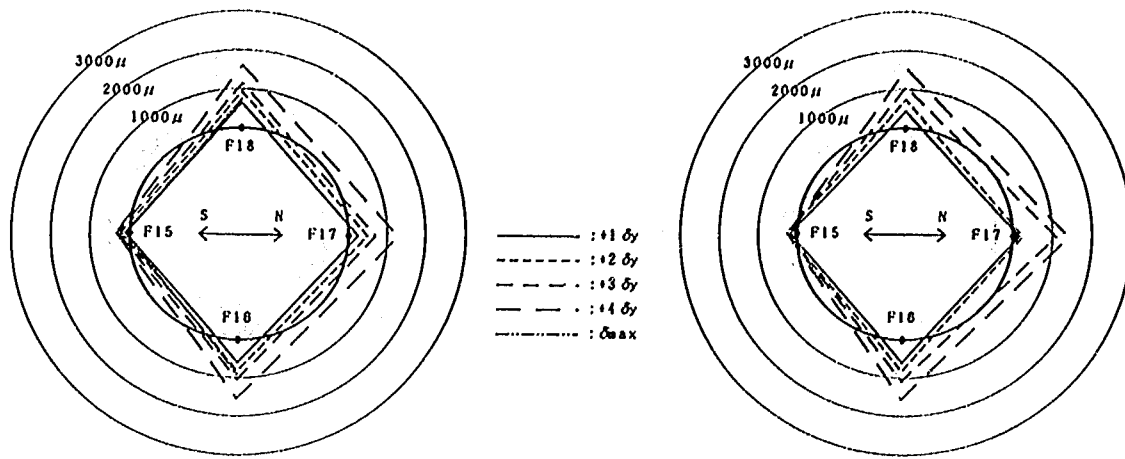


(a) 正載荷

(b) 負載荷

(3) 供試体No. 3

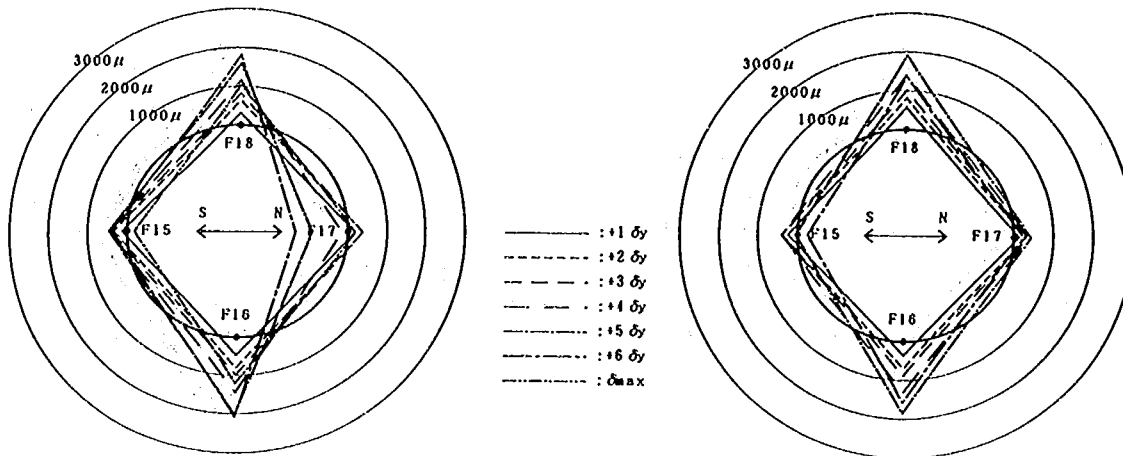
図-3.6 1 段目外側帯鉄筋のひずみの平面分布



(a) 正載荷

(b) 負載荷

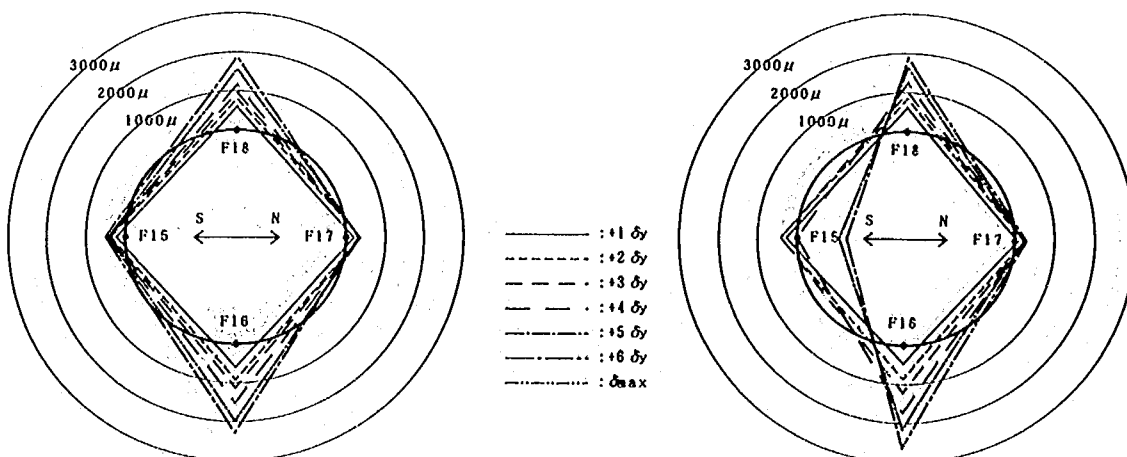
(1) 供試体No. 1



(a) 正載荷

(b) 負載荷

(2) 供試体No. 2

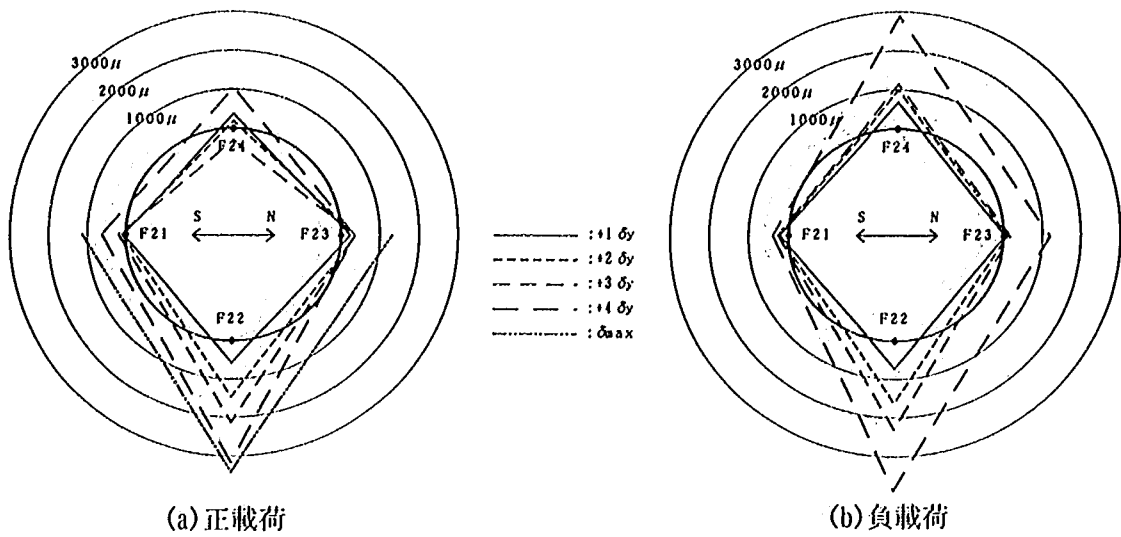


(a) 正載荷

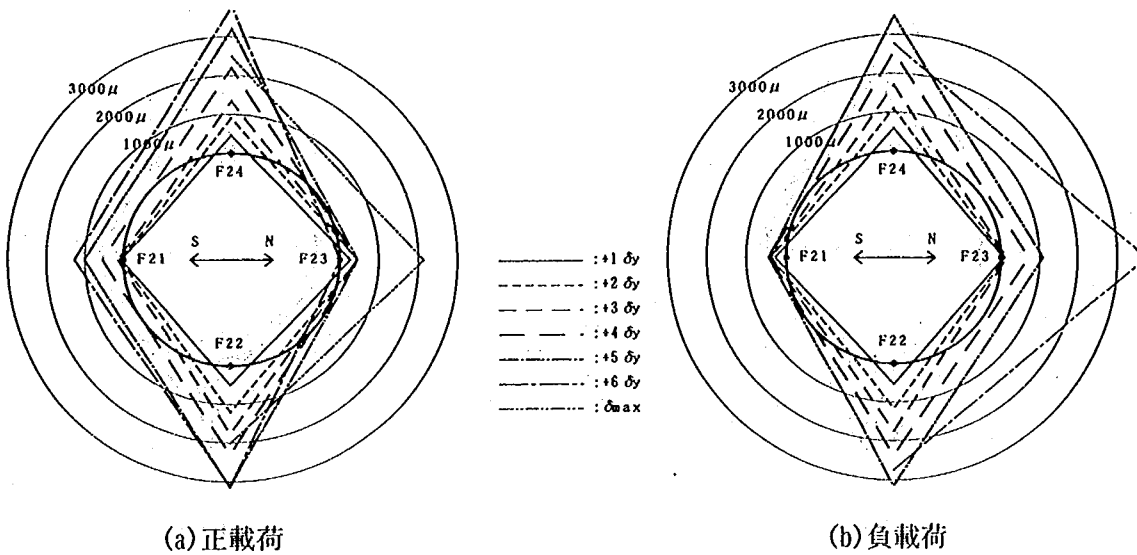
(b) 負載荷

(3) 供試体No. 3

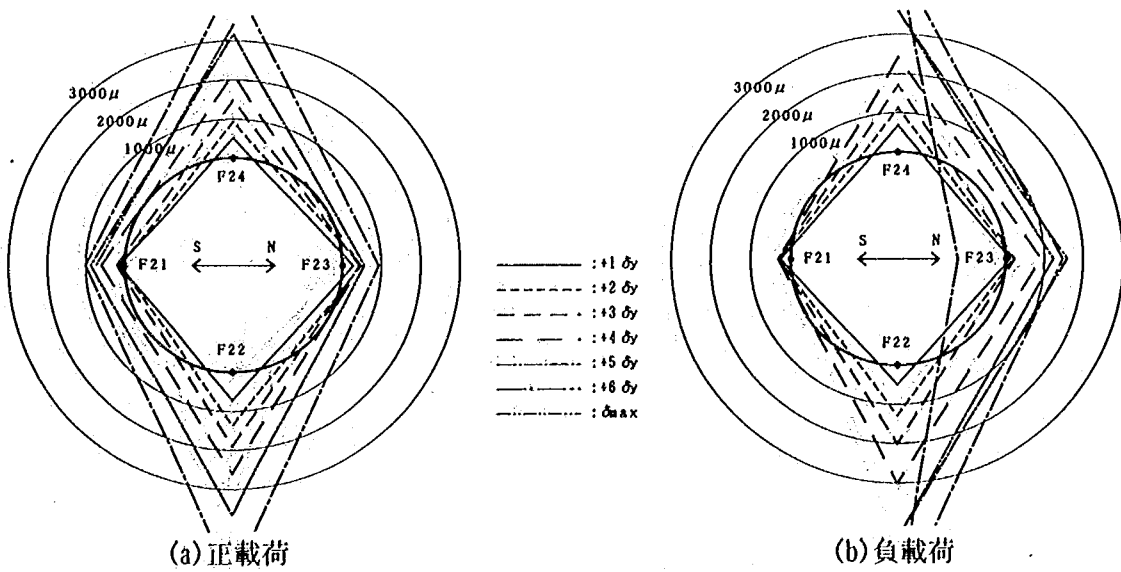
図-3.7 1段目内側帯鉄筋のひずみの平面分布



(I) 供試体No. 1

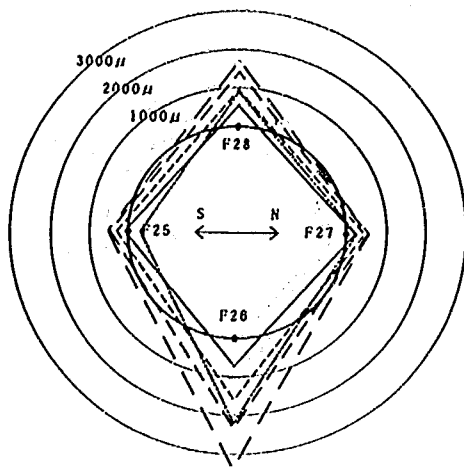


(2) 供試体No. 2



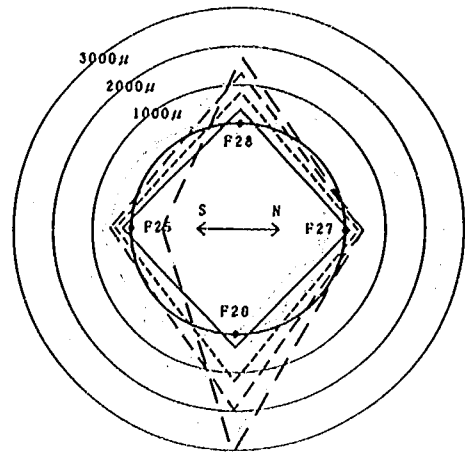
(3) 供試体No. 3

図-3.8 2段目外側帯鉄筋のひずみの平面分布



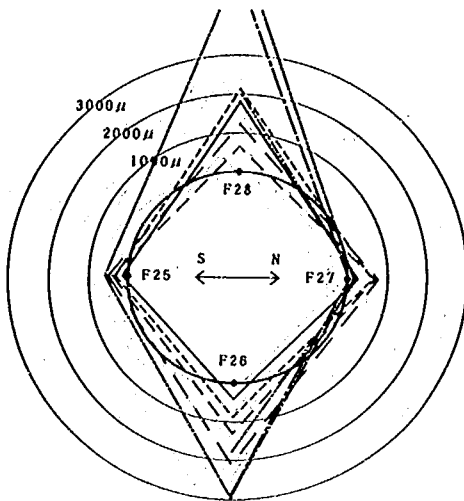
— : $+1 \delta y$
 - - - : $+2 \delta y$
 - - - : $+3 \delta y$
 - - - : $+4 \delta y$
 - - - : δ_{max}

(a) 正載荷



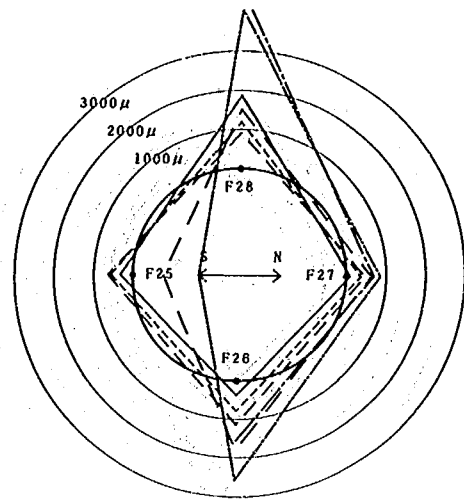
(b) 負載荷

(1) 供試体No. 1



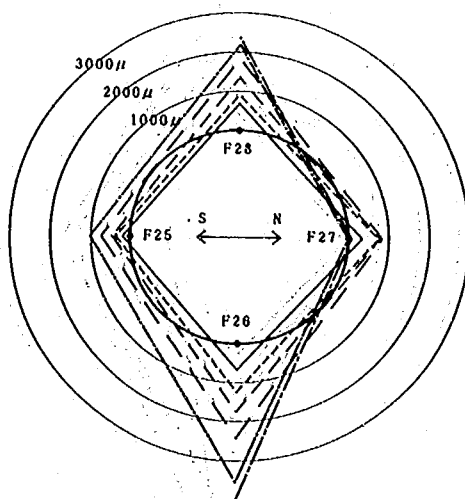
— : $+1 \delta y$
 - - - : $+2 \delta y$
 - - - : $+3 \delta y$
 - - - : $+4 \delta y$
 - - - : $+5 \delta y$
 - - - : $+6 \delta y$
 - - - : δ_{max}

(a) 正載荷



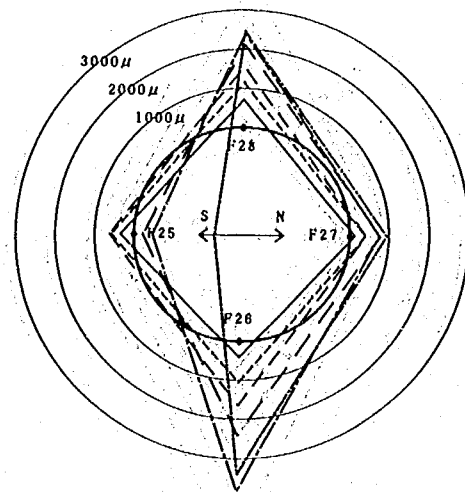
(b) 負載荷

(2) 供試体No. 2



— : $+1 \delta y$
 - - - : $+2 \delta y$
 - - - : $+3 \delta y$
 - - - : $+4 \delta y$
 - - - : $+5 \delta y$
 - - - : $+6 \delta y$
 - - - : δ_{max}

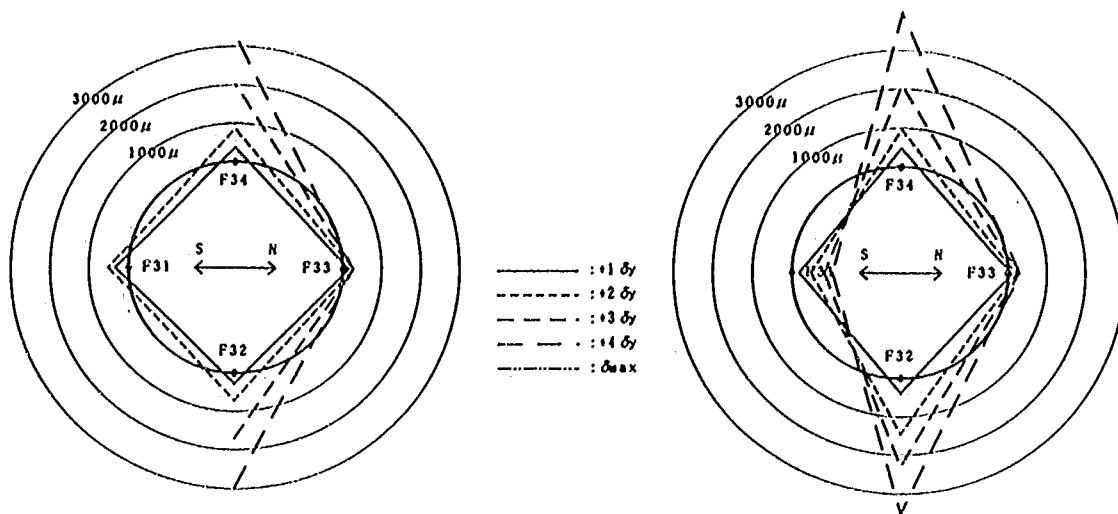
(a) 正載荷



(b) 負載荷

(3) 供試体No. 3

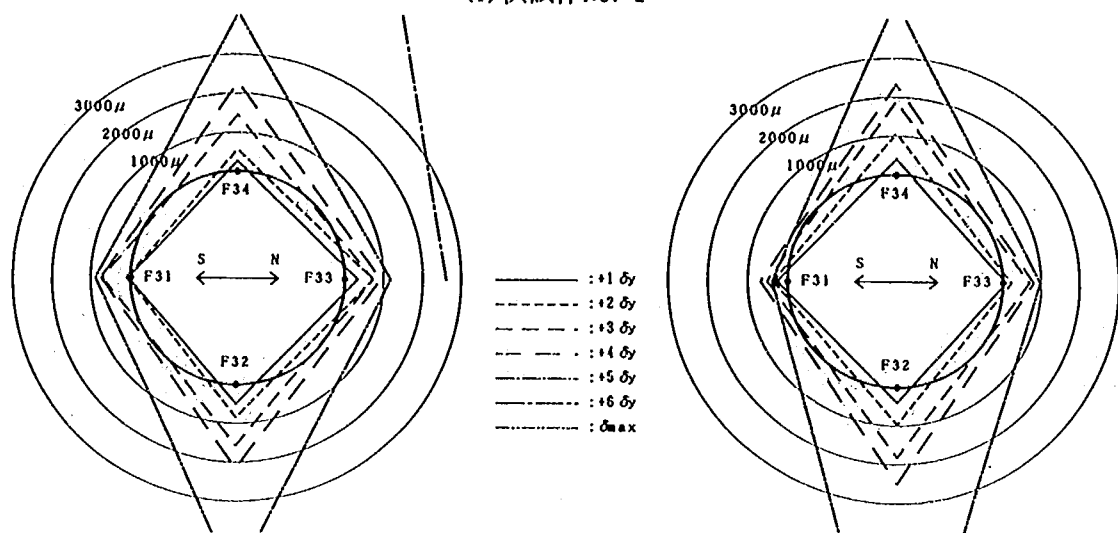
図-3.9 2段目内側帯鉄筋のひずみの平面分布



(a) 正載荷

(b) 負載荷

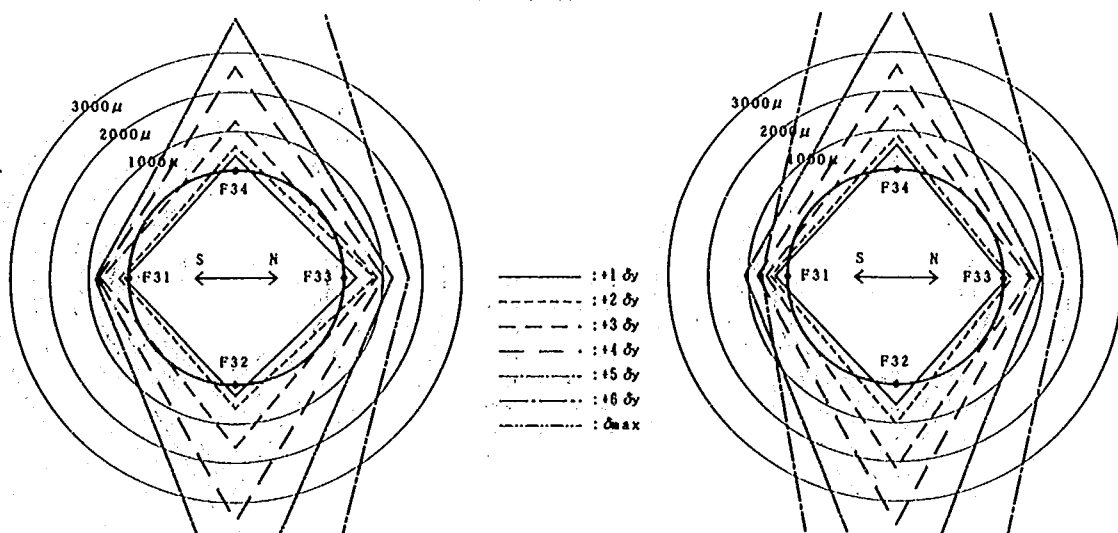
(1) 供試体No. 1



(a) 正載荷

(b) 負載荷

(2) 供試体No. 2

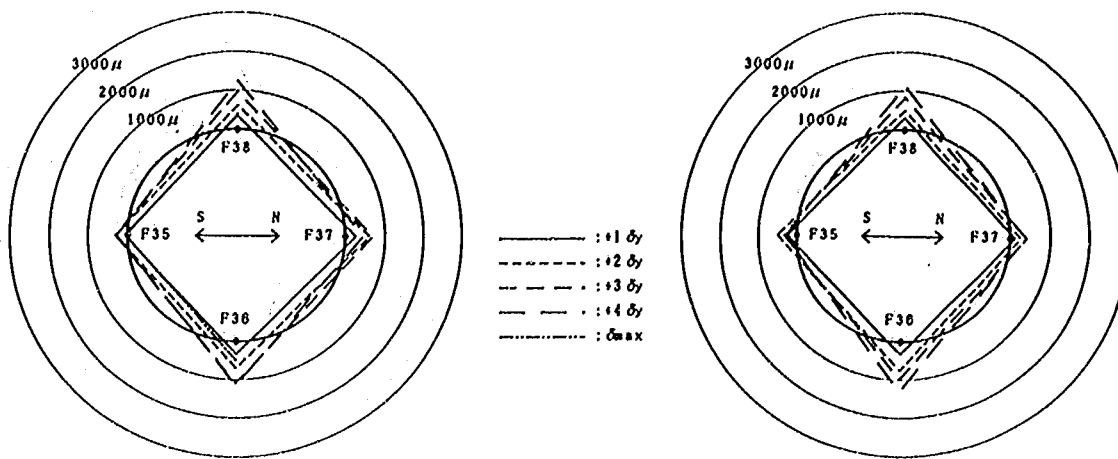


(a) 正載荷

(b) 負載荷

(3) 供試体No. 3

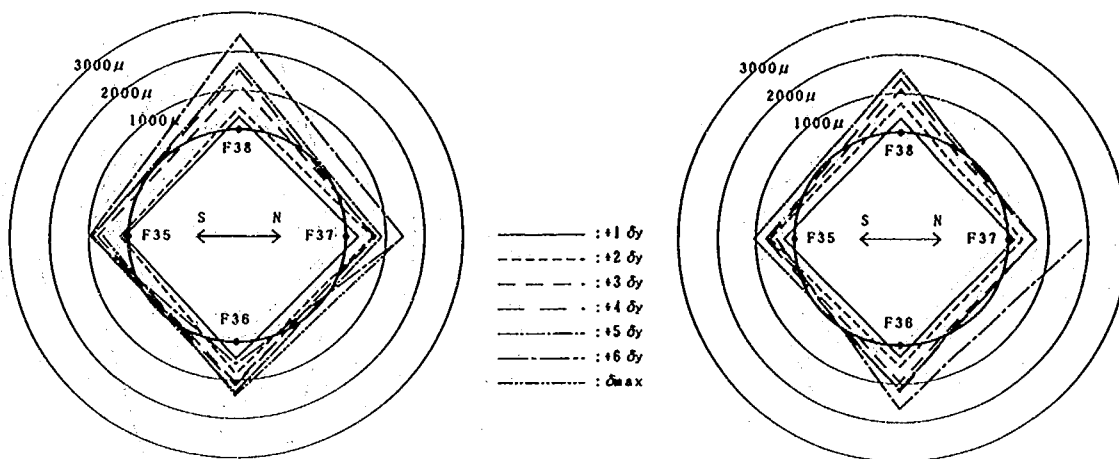
図-3.10 3段目外側帯鉄筋のひずみの平面分布



(a) 正載荷

(b) 負載荷

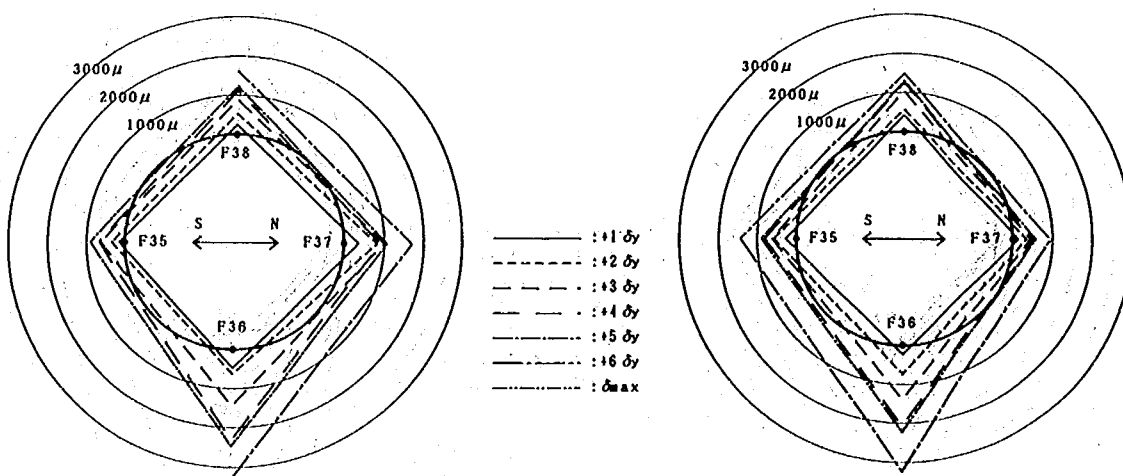
(1) 供試体No. 1



(a) 正載荷

(b) 負載荷

(2) 供試体No. 2

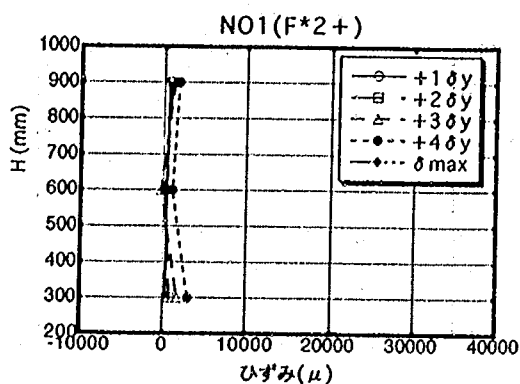


(a) 正載荷

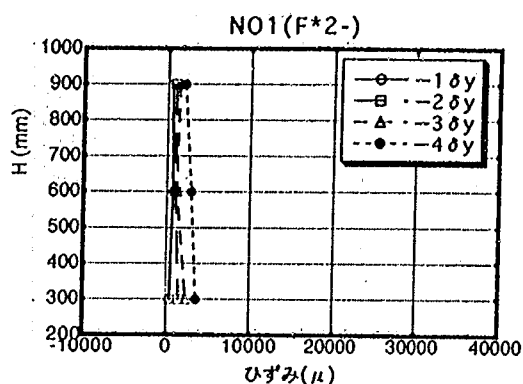
(b) 負載荷

(3) 供試体No. 3

図-3.11 3段目内側帯鉄筋のひずみの平面分布

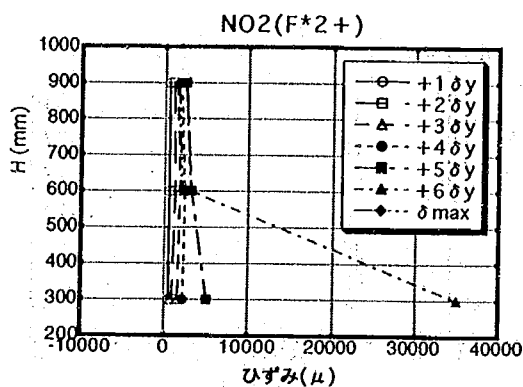


(a) 正載荷

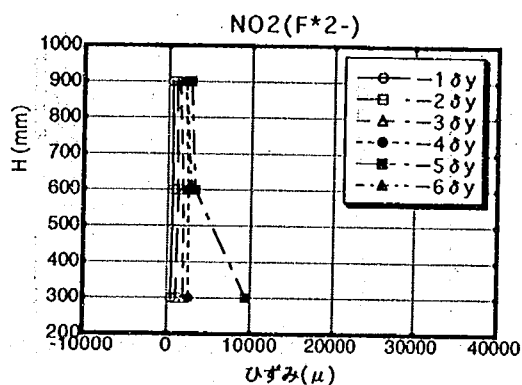


(b) 負載荷

(1) 供試体No. 1

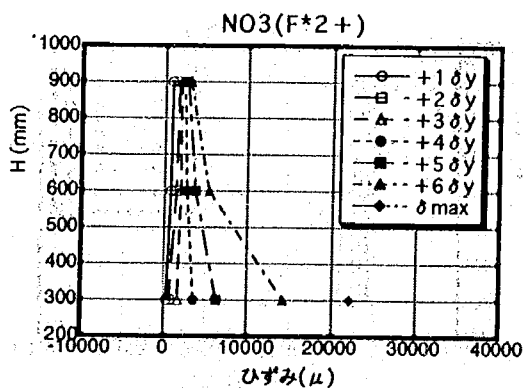


(a) 正載荷

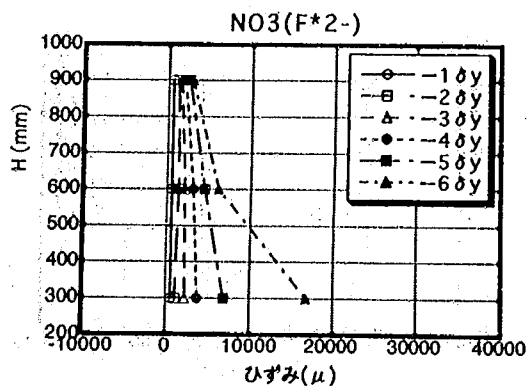


(b) 負載荷

(2) 供試体No. 2



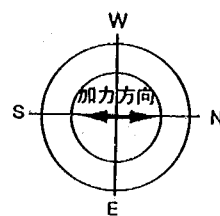
(a) 正載荷

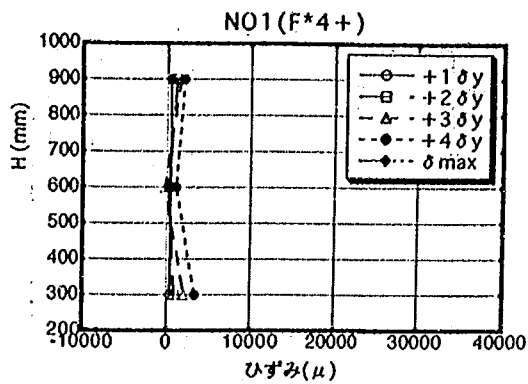


(b) 負載荷

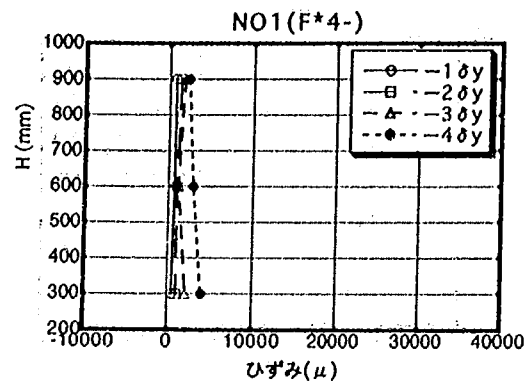
(3) 供試体No. 3

図-3.12 セン断面(E面)における外側帯鉄筋ひずみの鉛直分布



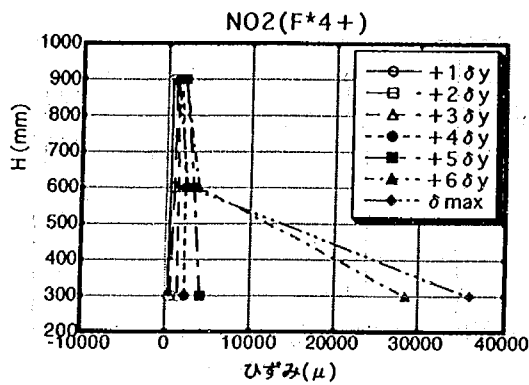


(a) 正載荷

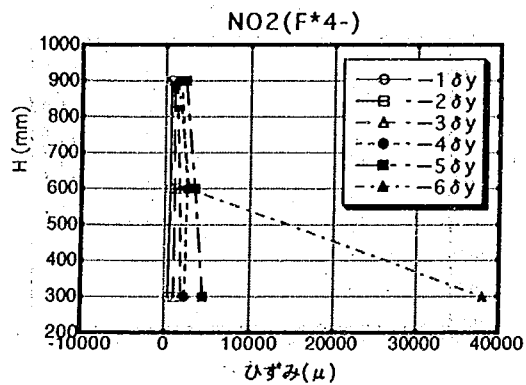


(b) 負載荷

(1) 供試体No. 1

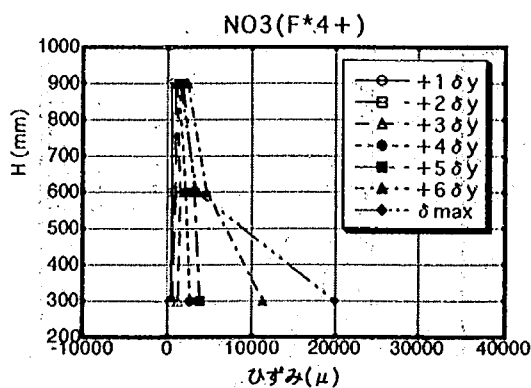


(a) 正載荷

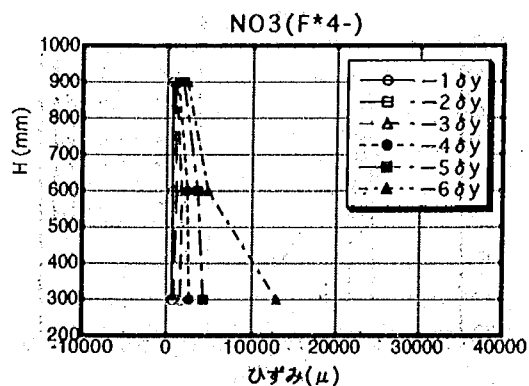


(b) 負載荷

(2) 供試体No. 2



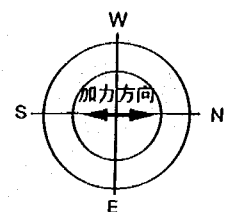
(a) 正載荷

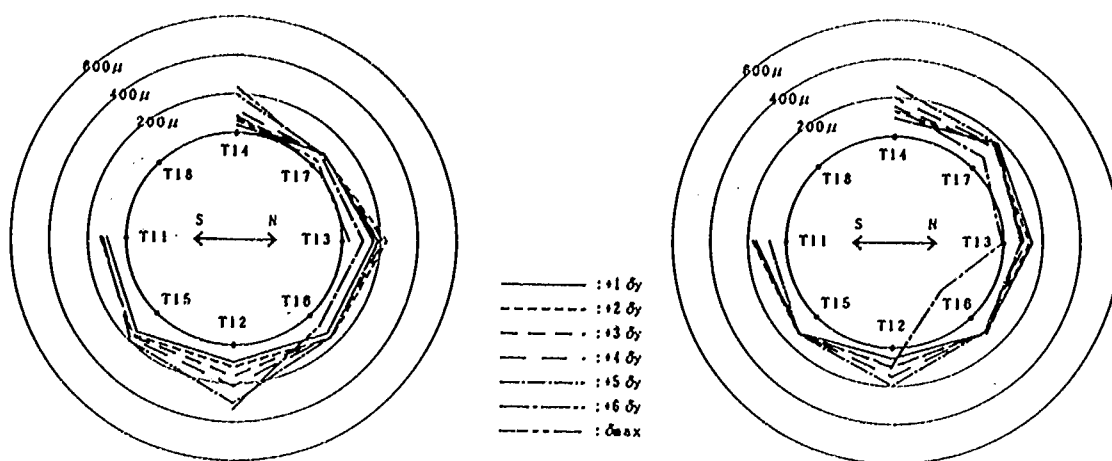


(b) 負載荷

(3) 供試体No. 3

図-3.13 セン断面 (W面) における外側帯鉄筋ひずみの鉛直分布

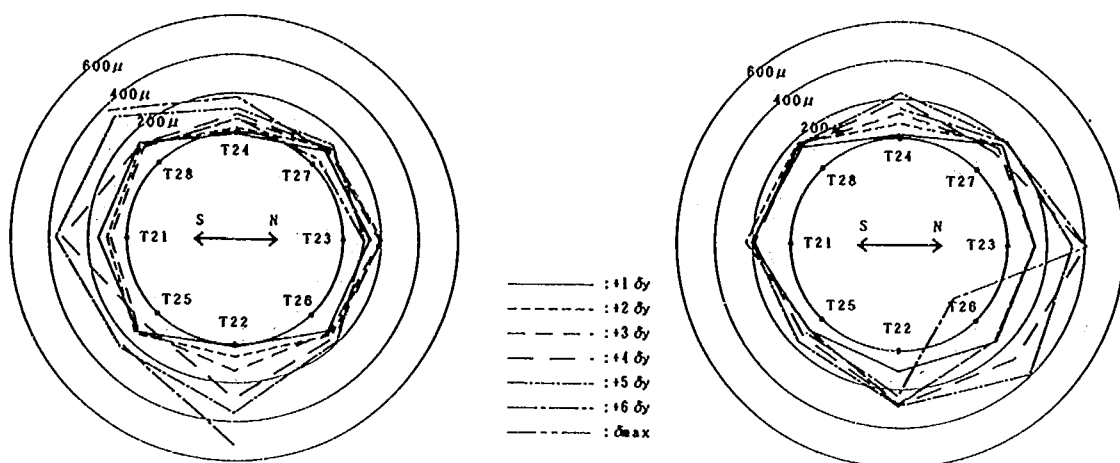




(a) 正載荷

(b) 負載荷

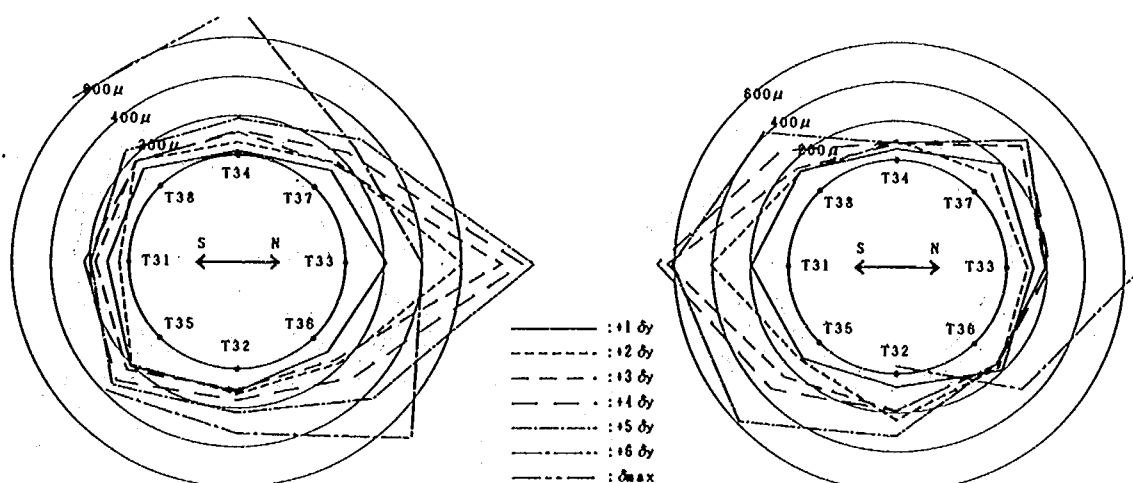
(1) 1 段目



(a) 正載荷

(b) 負載荷

(2) 2 段目

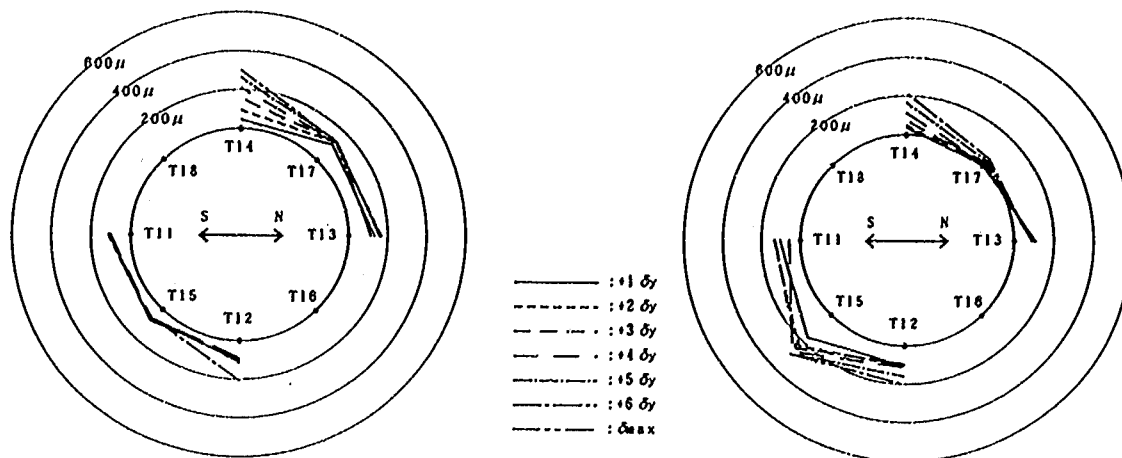


(a) 正載荷

(b) 負載荷

(3) 3 段目

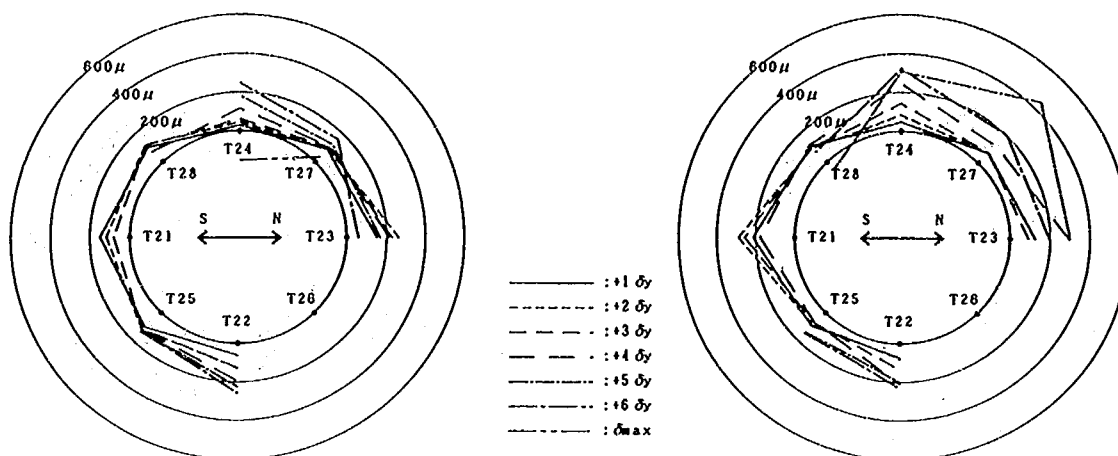
図-3.14 供試体No. 2 の中間帯鉄筋のひずみの平面分布



(a) 正載荷

(b) 負載荷

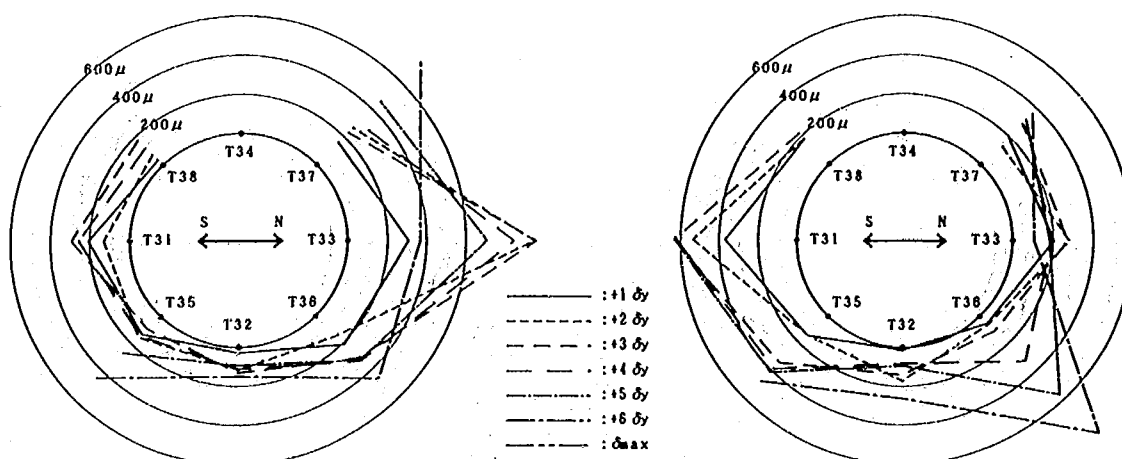
(1) 1 段目



(a) 正載荷

(b) 負載荷

(2) 2 段目

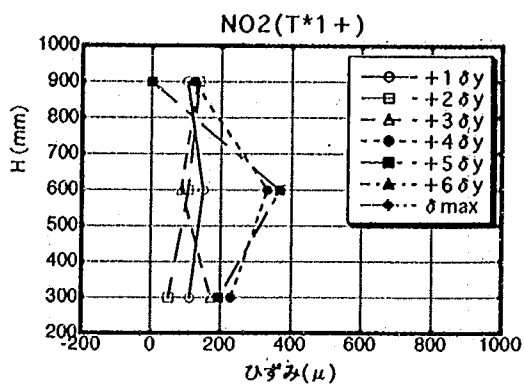


(a) 正載荷

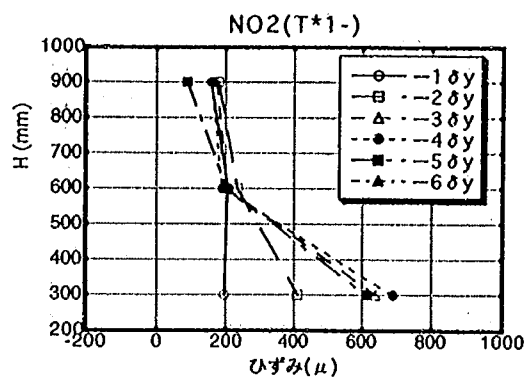
(b) 負載荷

(3) 3 段目

図-3.15 供試体No. 3 の中間帯鉄筋のひずみの平面分布

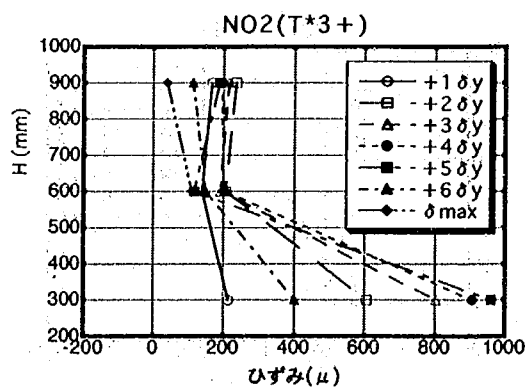


(a) 正載荷

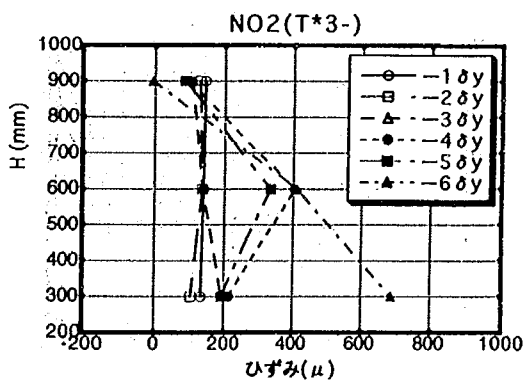


(b) 負載荷

(1) S面



(a) 正載荷



(b) 負載荷

(2) N面

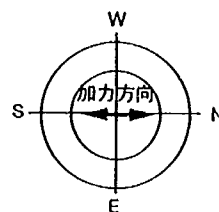
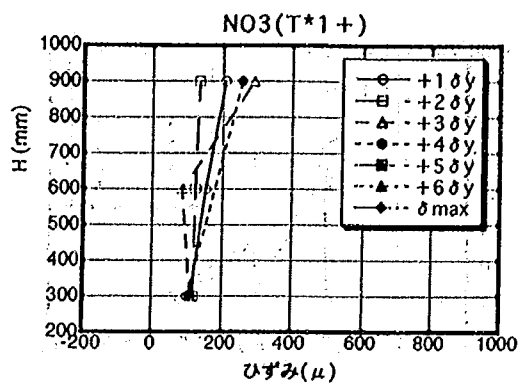
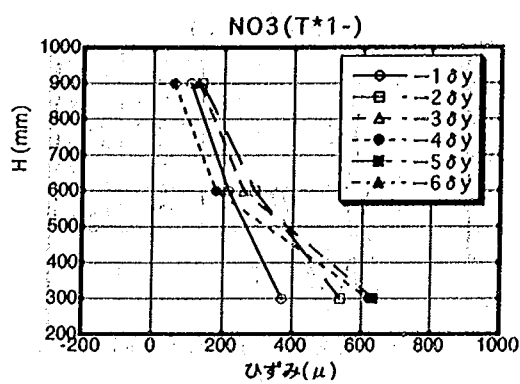


図-3.16 供試体No. 2 の拘束面における中間帯鉄筋ひずみの鉛直分布

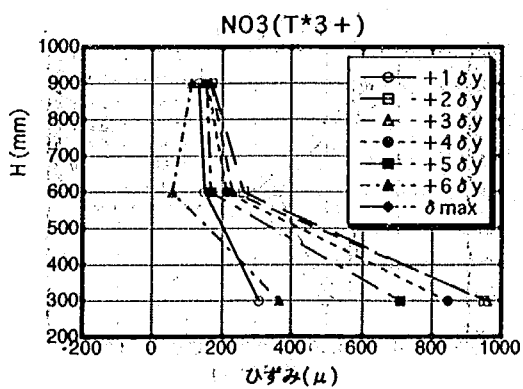


(a) 正載荷

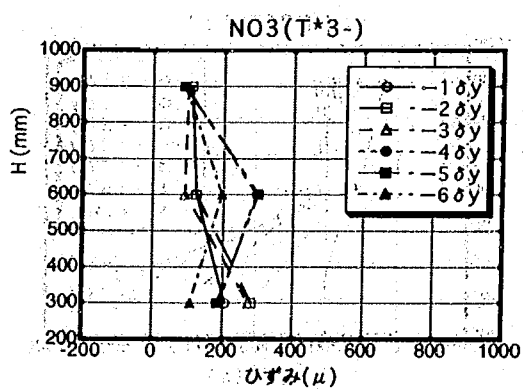


(b) 負載荷

(1) S面



(a) 正載荷



(b) 負載荷

(2) N面

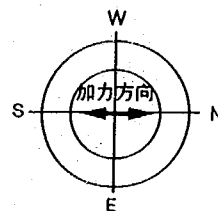


図-3.17 供試体No. 3の拘束面における中間帯鉄筋ひずみの鉛直分布

3. 4 塑性ヒンジ領域の考察

(1) 供試体の損傷状況からみた塑性ヒンジ領域

塑性ヒンジ領域と外見上の損傷領域は必ずしも一致するとは限らないが、塑性ヒンジ領域では曲率が大きくなるため、終局時にはこの領域を中心に軸方向鉄筋の座屈やかぶりコンクリートの剥離が生じる。図-3.1に示した最大変位時の損傷図を見ると、供試体No. 1 及び供試体No. 2 では基部から概ね40cmの範囲でコンクリートが剥離しているのに対し、供試体No. 3 で20~30cm程度と狭くなっており、塑性ヒンジ領域の減少傾向が見受けられる。一般に、コンクリートの拘束力を高めていくと塑性領域が小さくなり、損傷モードはコンクリートの破壊から軸方向鉄筋の破断が生じるモードに移行する。供試体No. 3 でも終局時に軸方向鉄筋の破断が確認されていることから、供試体No. 1 及びNo. 2 とは損傷モードが異なり、塑性領域にも違いが生じていると考えられる。

供試体No. 3 では塑性ヒンジ領域が減少しても、コアコンクリートの拘束力が増大することによって塑性曲率が大きくなるため、変形性能は供試体No. 2 よりも若干向上している。ただし、既に軸方向鉄筋の破断が生じるモードに移行しているため、これ以上中間帯鉄筋量を多くしても拘束効果は限られると考えられる。

(2) 軸方向鉄筋のひずみ分布からみた塑性ヒンジ領域

塑性ヒンジ領域では曲率が大きくなるため軸方向鉄筋のひずみも大きくなると考えられ、軸方向鉄筋のひずみ分布から塑性ヒンジ領域を大まかに推定することができる。軸方向鉄筋ひずみの鉛直分布を示した図-3.5によれば、柱基部及び基部から30cmの位置の全ケースで、最終的なひずみが20,000 μ 近くに達しており、また、基部から60cmの位置でもNo. 2、供試体No. 3 の負方向載荷を除いて、同程度のひずみに達している。したがって、塑性ヒンジ領域は概ね30cm~60cmの範囲であると考えることができ、(1)の範囲を包含している。ただし、軸方向鉄筋ひずみの測定間隔が30cmと粗いこともあり、軸方向鉄筋のひずみ分布からは供試体No. 3 の塑性領域の減少傾向は確認することができない。

(3) 曲率分布よりみた塑性ヒンジ領域

1) 柱基部の曲率分布

本実験では、図-3.18に示すようにD7~D10変位計で、次の2区間の各載荷段階における1波目の変位を計測している。

区間Ⅰ：h=0~37.5cm (変位計D9、D10で計測)

区間Ⅱ：h=37.5cm~75cm (変位計D9、D10で計測)

この変位を用いて、式(3.1)により区間毎の平均曲率 ϕ を算出することができる。

$$\phi = \frac{(|\delta_{D7}(\delta_{D9})| + |\delta_{D8}(\delta_{D10})|)}{B \cdot \Delta h} \quad (3.1)$$

ここに、

$\delta_{D7} \sim \delta_{D10}$: D7~D10変位計で計測される変位

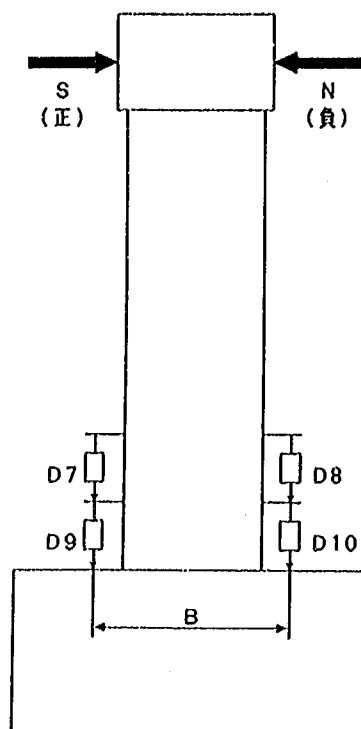


図-3.18 柱基部曲率算出用の変位計測位置

B : 変位計間の水平距離

Δh : 各変位計間の距離 (=375mm)

ただし、区間Ⅰで計測される変位には軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しによる柱の回転変位^{4) 5)}が含まれているため、4. 2で算出する降伏時及び終局時における軸方向鉄筋の伸び出しによる柱の回転角 θ' から逆算される曲率より、各載荷段階の曲率を比例配分により算出し、区間Ⅰの各載荷段階の曲率から除外することとした。

伸び出しの影響を除外した各供試体の曲率分布を図-3.19に示す。ここで、供試体No. 1及び供試体No. 3では終局時に該当する $4\delta y$ 及び $5\delta y$ まで計測しているが、供試体No. 2については終局時の $5\delta y$ の変位を計測できなかったため、 $4\delta y$ までの曲率分布を示している。

2) 塑性ヒンジ長の算出

各載荷段階の曲率から降伏時に相当する $1\delta y$ 時の曲率を差し引くことにより、各載荷段階の塑性曲率を算出することができる。塑性曲率の分布を図-3.14に示す。これらの図より、塑性曲率は区間Ⅰ ($h=0\sim375$ mm) で支配的に生じているが、区間Ⅱ ($h=375\sim750$ mm) でも生じていることから、塑性領域は区間Ⅱの一部にも及んでいると考えられる。したがって、塑性領域内で塑性曲率が一定と考えると、塑性ヒンジ長 L_p は式(3.2)で算出することができる。

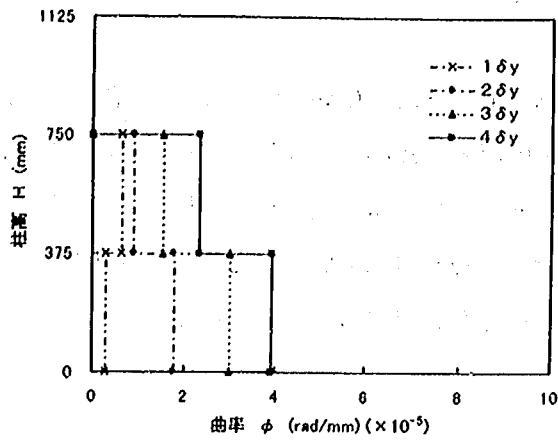
$$L_p = (\phi_{p1} + \phi_{p2}) \cdot \Delta h / \phi_{p1} \quad (3.2)$$

ここに、

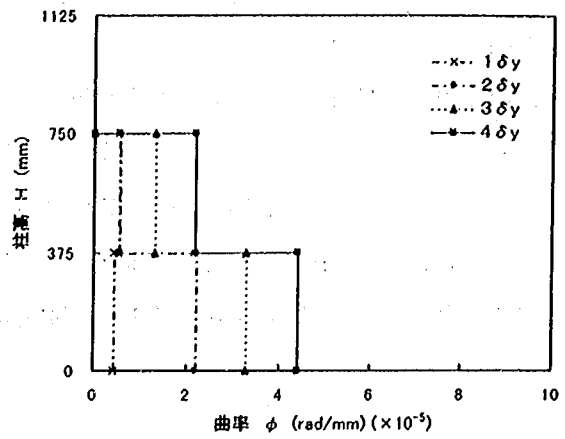
ϕ_{p1} 、 ϕ_{p2} : 区間Ⅰ、区間Ⅱの塑性曲率

算出された各載荷段階の塑性ヒンジ長を図-3.20中に併記する。また、各供試体の塑性ヒンジ長を比較した結果を図-3.21に示す。

図-3.21より、中間帯鉄筋が多い供試体No. 3では、供試体No. 1及び供試体No. 2と比較して塑性ヒンジ長が短くなる傾向が確認できる。このことは、(1)で述べた損傷領域の傾向と一致している。また、全体的に載荷ステップが進むにつれて塑性ヒンジ長は長くなる傾向にある。終局時の塑性ヒンジ長としては供試体No. 1で53～55cm(約0.70D、D:柱の直径)、供試体No. 3で48～49cm(約0.65D)となり、外見上の損傷領域よりも全体的にやや大きい、(2)の軸方向鉄筋のひずみ分布とはほぼ一致している。

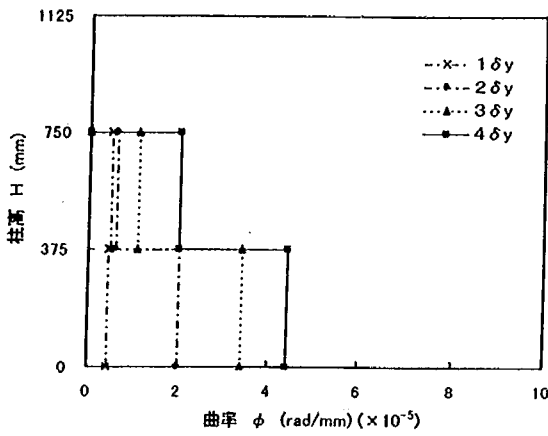


(a) 正載荷

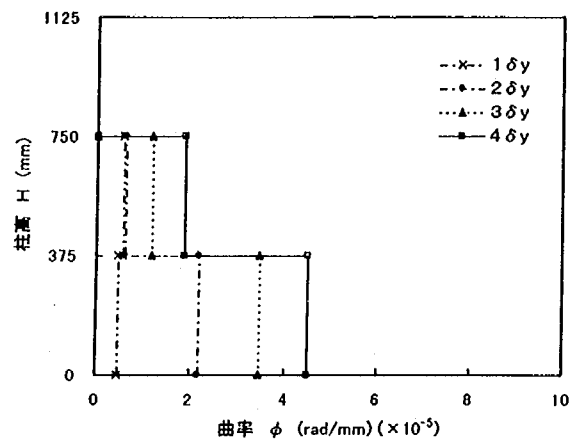


(b) 負載荷

(1) 供試体No. 1

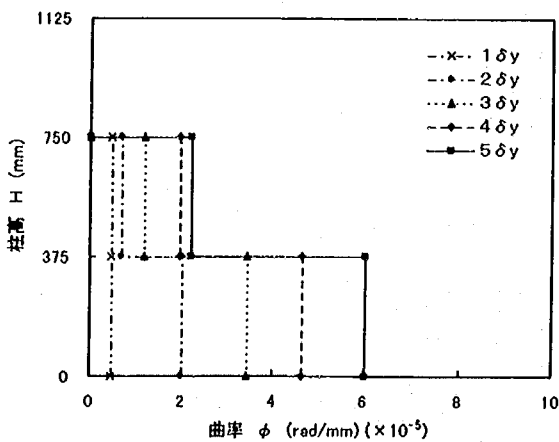


(a) 正載荷

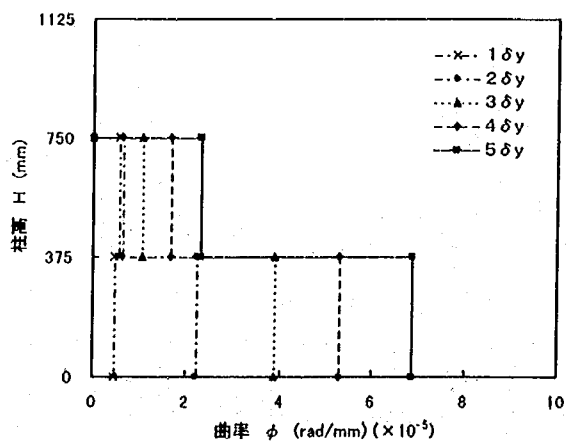


(b) 負載荷

(2) 供試体No. 2



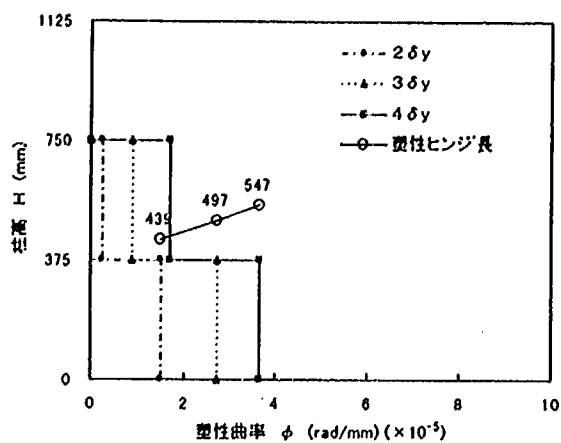
(a) 正載荷



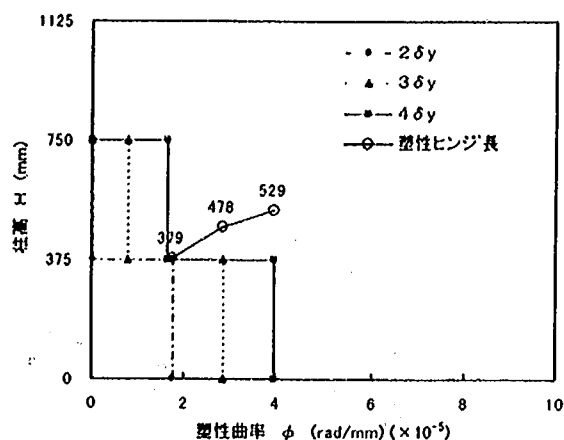
(b) 負載荷

(3) 供試体No. 3

図-3.19 柱基部の曲率

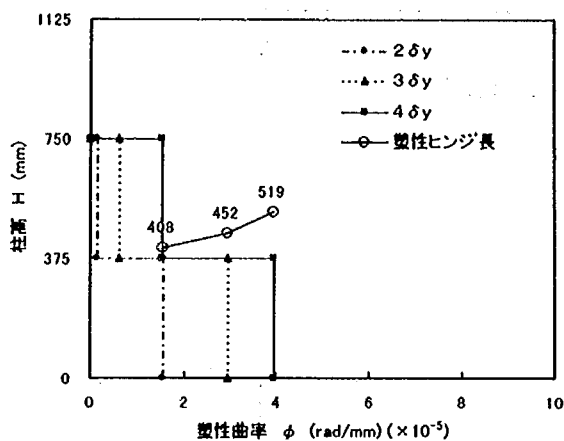


(a) 正載荷

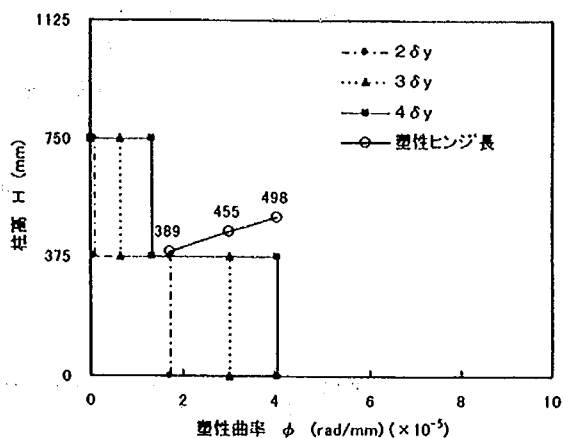


(b) 負載荷

(1) 供試体No. 1

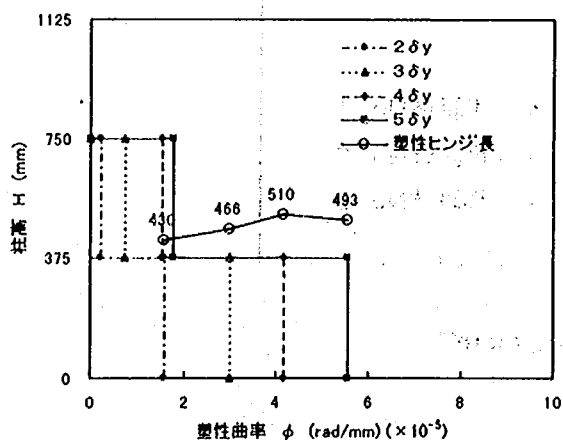


(a) 正載荷

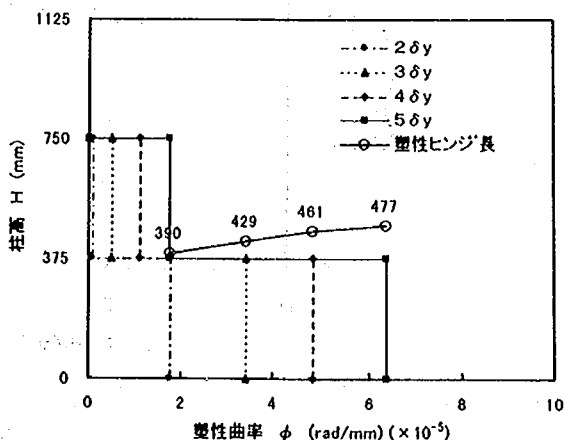


(b) 負載荷

(2) 供試体No. 2



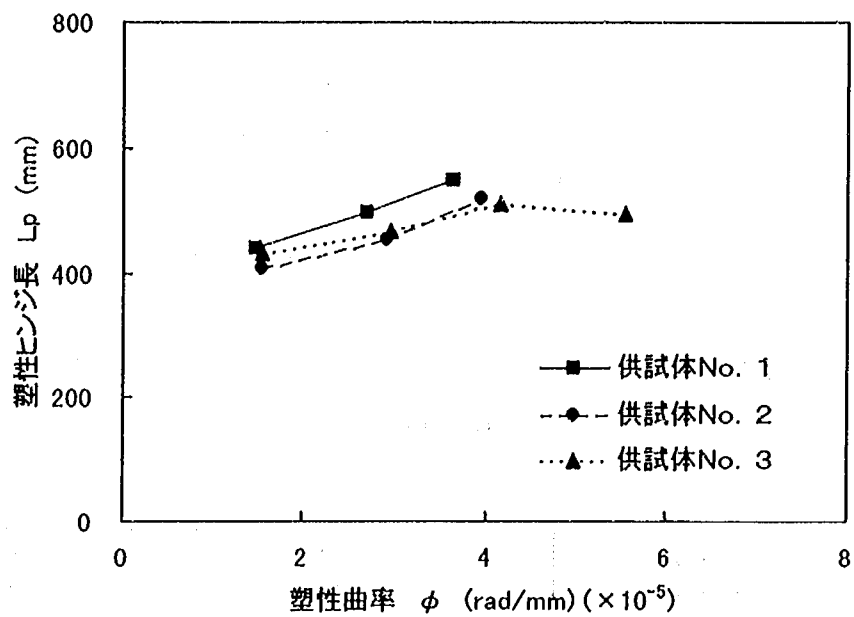
(a) 正載荷



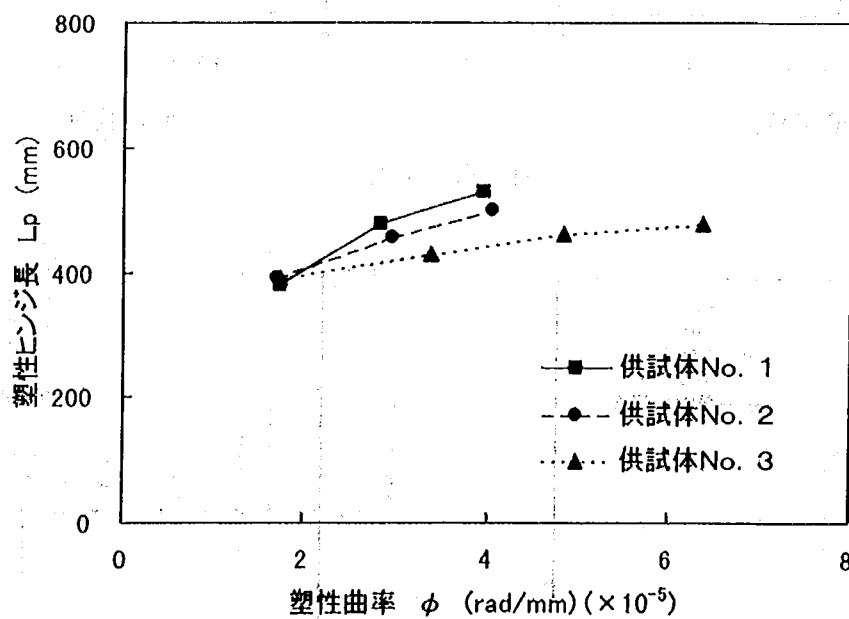
(b) 負載荷

(3) 供試体No. 3

図-3.20 柱基部の塑性曲率



(a) 正載荷



(b) 負載荷

図-3.21 塑性ヒンジ長の比較

4. 解析による荷重－変位関係の算出

4. 1 解析方法

(1) 荷重－変位関係の骨格曲線

解析においては、荷重－変位の骨格曲線は完全弾塑性型としてモデル化するものとした¹⁾。また、水平耐力の低下域については骨格曲線のモデル化の対象には含めないこととした。

(2) 曲げモーメント－曲率関係

ひび割れ時、初降伏時、降伏時の曲げモーメント M_c 、 M_{y0} 、 M_u 及び曲率 ϕ_c 、 ϕ_{y0} 、 ϕ_u は平成8年道路橋示方書に示される方法により算出した。

また、降伏曲率は式(4.1)で算出した。

$$\phi_y = \left(\frac{M_u}{M_{y0}} \right) \phi_{y0} \quad (4.1)$$

(3) コンクリートの応力－ひずみ曲線

平成8年道路橋示方書に示される横拘束筋の拘束効果を考慮したコンクリートの応力－ひずみ曲線を用いる。横拘束筋の拘束効果は、横拘束筋の体積比 ρ_s によってコンクリート強度に反映され、式(4.2)によって ρ_s を算出することができる。

$$\rho_s = \frac{4 A_h}{s d} \quad (4.2)$$

ここに、

A_h : 横拘束筋の断面積(cm^2)

s : 横拘束筋の間隔(cm)

d : 横拘束筋の有効長で、帯鉄筋や中間帯鉄筋により分割拘束されるコアコンクリートの辺長のうち最も長い値とする。

しかし、中空円形断面の場合には式(4.2)の適用が難しいため、今回は帯鉄筋と中間帯鉄筋により分割拘束されるコアコンクリート内の実際の体積比による式(4.3)により、 ρ_s を算出するものとした。

$$\rho_s = \frac{2 \pi (r_1 + r_2) A_{h1} / n + 2 (r_1 - r_2) A_{h2}}{\pi (r_1^2 - r_2^2) s / n} \quad (4.3)$$

ここに、

r_1 : 外側帯鉄筋の半径(cm)

r_2 : 内側帯鉄筋の半径(cm)

A_{h1} : 帯鉄筋の断面積(cm^2)

A_{h2} : 中間帯鉄筋の断面積(cm^2)

n : 中間帯鉄筋の本数

また、今回の実験における応答の繰返し回数が3回であるため、終局ひずみはタイプⅡの地震動の値を用いるものとした。

なお、コンクリート強度、コンクリートのヤング係数は試験値を用い、帯鉄筋・中間帯鉄筋の降伏点はそれぞれの試験値を体積比により、重みづけ平均した値を用いた。

(4) 鉄筋の応力-ひずみ曲線

鉄筋の応力-ひずみ曲線は完全弾塑性型とし、鉄筋の降伏点 σ_{sy} 及びヤング係数 E_s は試験値を用いるものとした。また、鉄筋の降伏ひずみ ε_{sy} は σ_{sy} を E_s で除して求めた。

(5) 終局水平耐力の算出

終局水平耐力は式(4.4)で算出した。

$$P_u = M_u / H \quad (4.4)$$

(6) 降伏変位の算出

実験の載荷基準変位の算出時と同様に、降伏変位 δ_y は初降伏変位 δ_{y0} を用いて式(4.5)より算出した。

$$\delta_y = \left(\frac{M_u}{M_{y0}} \right) \delta_{y0} \quad (4.5)$$

ここで、初降伏変位は断面最外縁に配置される軸方向鉄筋が降伏する時の変位であり、柱天端に初降伏水平荷重 P_{y0} を作用させた時の曲率分布より、式(4.6)で算出した。

$$\begin{aligned} \delta_{y0} &= \int \phi_y dy \\ &= \frac{1}{6} \{ 2H_{c1}^3 a + 2(H^3 - H_{c1}^3) b + 3(H^2 - H_{c1}^2) c \} \\ a &= \phi_c / H_{c1} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$b = \frac{\phi_{y0} - \phi_c}{H - H_{c1}}$$

$$c = \phi_{y0} - bH$$

$$H_{c1} = M_c / P_{y0} \quad (4.7)$$

$$P_{y0} = M_{y0} / H \quad (4.8)$$

ここに、

H_{c1} : 柱天端に初降伏水平荷重が作用する時にひびわれモーメントに達する天端からの鉛直距離

P_{y0} : 初降伏水平耐力

(7) 終局変位の算出

ここでは、下記の2方法により終局変位を算出した。

1) 平成8年道路橋示方書の方法(終局変位[1])

柱の塑性変形が塑性ヒンジの回転によって生じる変位であるという考えに基づくもので、式(4.9)で算出される。

$$\delta_u = \delta_y + (\phi_u - \phi_y) L_p (H - L_p / 2) \quad (4.9)$$

ここに、

L_p : 塑性ヒンジ長

$$L_p = 0.5D \quad (4.10)$$

D : 断面の直径

2) 曲率分布を数値積分する方法(終局変位[2])

式(4.9)は塑性ヒンジ長 L_p の値に大きく左右されるが、中空円形断面のRC橋脚に対する式(4.10)の妥当性は必ずしも確認されていない。

そこで、初降伏変位同様に曲率分布を数値積分して終局変位を算出する式(4.11)によっても終局変位を求め、式(4.9)の結果と比較することとした。なお、この方法は平成2年の道路橋示方書²⁾で用いられていた方法である。

$$\begin{aligned} \delta_u &= \int \phi_y dy \\ &= 1/6 \{ 2H_{c2}^3 a + 2(H_{y0}^3 - H_{c2}^3) b + 3(H_{y0}^2 - H_{c2}^2) c \\ &\quad + 2(H^3 - H_{y0}^3) d + 3(H^2 - H_{y0}^2) e \} \\ a &= \phi_c / H_{c2} \\ b &= \frac{\phi_{y0} - \phi_c}{H_{y0} - H_{c2}} \\ c &= \phi_{y0} - b H_{y0} \\ d &= \frac{\phi_u - R \phi_{y0}}{H - H_{y0}} \\ e &= \phi_u - d H \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$H_{y0} = M_{y0} / P_u \quad (4.12)$$

$$H_{c2} = M_c / P_u \quad (4.13)$$

ここに、

H_{c2} : 柱天端に終局水平荷重が作用する時にひびわれモーメントに達する天端からの鉛直距離

H_{y0} : 柱天端に終局水平荷重が作用する時に初降伏モーメントに達する天端からの鉛直距離

4. 2 軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しの影響

正負交番の繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート橋脚では、軸方向軸方向鉄筋がフーチングから伸び出すことにより、曲げ変形による水平変位よりも大きくなる。すなわち、軸方向軸方向鉄筋の伸び出し量を Δ とすると、柱はフーチング付け根部の中立軸を中心に回転すると考えられることから、伸び出しにともなう柱天端の水平変位 δ' は式(4.14)で算出される。

$$\delta' = \frac{\Delta}{x} H \quad (4.14)$$

ここに、

x : 中立軸から最外縁鉄筋までの距離

軸方向軸方向鉄筋の伸び出し量 Δ については解析的に算出する方法^{1) 5)}も提案されているが、降伏点や終曲点の定義が4. 1で述べた方法と異なり、適用が難しい。そこで、ここでは実験で計測されたフーチング内の軸方向軸方向鉄筋のひずみ分布をもとに、式(4.15)により伸び出し量を算出するものとした。

$$\Delta = \int \varepsilon dy$$

$$\approx \sum_{i=1}^m (\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}) h_i / 2 \quad (4.15)$$

ここに、

ε_i : フーチング上面から数えて i 番目の位置で計測されたひずみ

h_i : i 番目の計測位置と $i+1$ 番目の計測位置の鉛直距離

式(4.14)、(4.15)より算出した鉄筋の伸び出しに伴う水平変位を表-4.1に示す。ここで、初降伏時及び終局時の水平変位 δ'_{y0} 及び δ'_u については3. 2(2)で定義した各載荷段階において計測されたひずみより算出した。また、降伏時の回転角 θ_y 、水平変位 δ'_y については式(4.16)、(4.17)より算出した。なお、中立軸から最外縁鉄筋までの距離は解析によって得られた値を用いた。

$$\theta_y = \left(\frac{M_u}{M_{y0}} \right) \theta_{y0} \quad (4.16)$$

$$\delta'_y = \left(\frac{M_u}{M_{y0}} \right) \delta'_{y0} \quad (4.17)$$

表-4.1 鉄筋の伸び出しに伴う水平変位

供 試 体		No. 1 (中間帯鉄筋なし)	No. 2 (中間帯鉄筋10本)	No. 3 (中間帯鉄筋20本)
初 降 伏 時	鉄筋伸び出し量 Δ_{y0} (mm)	0.561	0.535	0.537
	中立軸～引張鉄筋の距離 X_{y0} (mm)	389.0	392.0	399.0
	伸び出しによる回転角 θ_{y0} (rad)	0.001442	0.001365	0.001346
	伸び出しによる水平変位 δ'_{y0} (mm)	4.3	4.1	4.0
降 伏 時	伸び出しによる回転角 θ_y (rad)	0.002069	0.001975	0.001962
	伸び出しによる水平変位 δ'_y (mm)	6.2	5.9	5.9
終 局 時	鉄筋伸び出し量 Δ_u (mm)	2.708	2.234	2.262
	中立軸～引張鉄筋の距離 X_u (mm)	477.0	487.0	498.0
	伸び出しによる回転角 θ_u (rad)	0.005677	0.004587	0.004542
	伸び出しによる水平変位 δ'_u (mm)	17.0	13.8	13.6

4. 3 解析結果及び実験結果との比較

(1) 解析結果

保有水平耐力および変形性能の計算結果を表-4.2に示す。

表-4.2 保有水平耐力および変形性能の計算結果

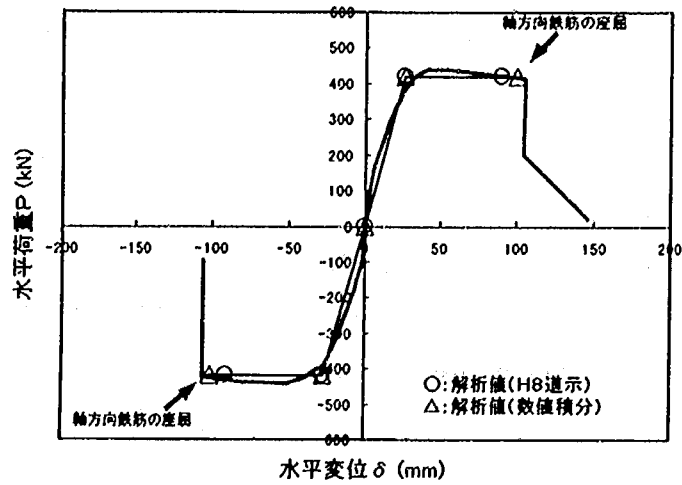
供 試 体		No. 1 (中間帯鉄筋なし)	No. 2 (中間帯鉄筋10本)	No. 3 (中間帯鉄筋20本)
帯鉄筋の体積比 ρ_s (%)		1.78	2.12	2.46
初 降 伏 時	初降伏曲率 ϕ_{y0} (1/m)	4.95×10^{-3}	4.92×10^{-3}	4.83×10^{-3}
	初降伏モーメント M_{y0} (kN・m)	878	882	893
	初降伏水平耐力 P_{y0} (kN)	292	294	298
	初降伏変位 δ_{y0} (mm)	13.9	13.7	13.5
	伸び出しによる変位補正 δ'_{y0} (mm)	4.3	4.1	4.0
	補正後初降伏変位 $\delta_{y0} + \delta'_{y0}$ (mm)	18.2	17.8	17.5
降 伏 時	降伏曲率 ϕ_y (1/m)	7.10×10^{-3}	7.12×10^{-3}	7.04×10^{-3}
	降伏変位 δ_y (mm)	19.9	19.9	19.6
	伸び出しによる変位補正 δ'_y (mm)	6.2	5.9	5.9
	補正後降伏変位 $\delta_y + \delta'_y$ (mm)	26.1	25.8	25.5
終 局 時	圧縮縁終局ひずみ ε_{cu} ($\times 10^{-6}$)	10,059	11,111	11,276
	終局曲率 ϕ_u (1/m)	5.81×10^{-2}	6.81×10^{-2}	7.43×10^{-2}
	終局モーメント M_u (kN・m)	1,259	1,276	1,302
	終局水平耐力 P_u (kN)	420	425	434
	終局変位[1] δ_{u1} (mm)	73.7	84.1	90.6
	終局変位[2] δ_{u2} (mm)	83.4	96.9	105.8
	伸び出しによる変位補正 δ'_u (mm)	17.0	13.8	13.6
	補正後終局変位[1] $\delta_{u1} + \delta'_u$ (mm)	90.7	97.9	104.2
	補正後終局変位[2] $\delta_{u2} + \delta'_u$ (mm)	100.4	110.7	119.4
じん性率	終局変位[1]の場合 μ_1	3.48	3.79	4.09
	終局変位[2]の場合 μ_2	3.85	4.30	4.68

注) $\mu_1 = (\delta_{u1} + \delta'_u) / (\delta_y + \delta'_y)$

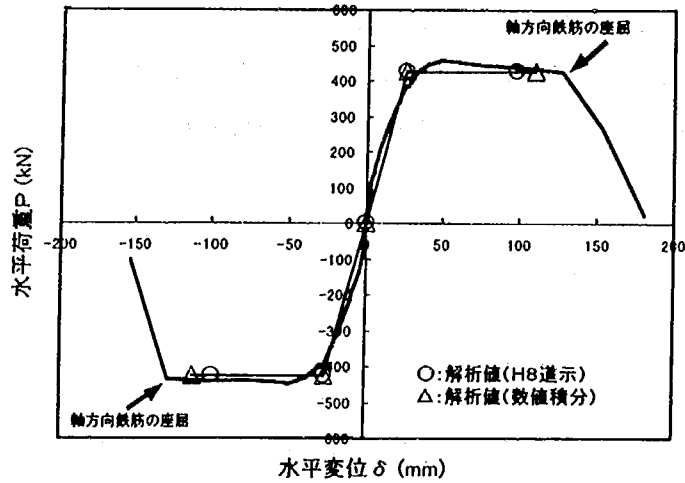
(2) 実験結果と解析結果の比較

図-4.1に実験結果より得られた荷重-変位履歴曲線の包絡線上に4.3(1)の解析値をプロットした結果を示す。まず、水平耐力に着目すると、各供試体ともに解析における終局水平耐力は実験における最大耐力より5~10%程度小さいが、変位が進むにつれて実験では耐力が減少していくためその差は小さくなり、軸方向鉄筋座屈開始時には両者の差はほぼ一致する。これは、解析においてかぶりの面積を無視しているためであり、実際にはかぶり剥離しない間はこの部分の圧縮応力が有効に働くため解析値より高い耐力を示す。

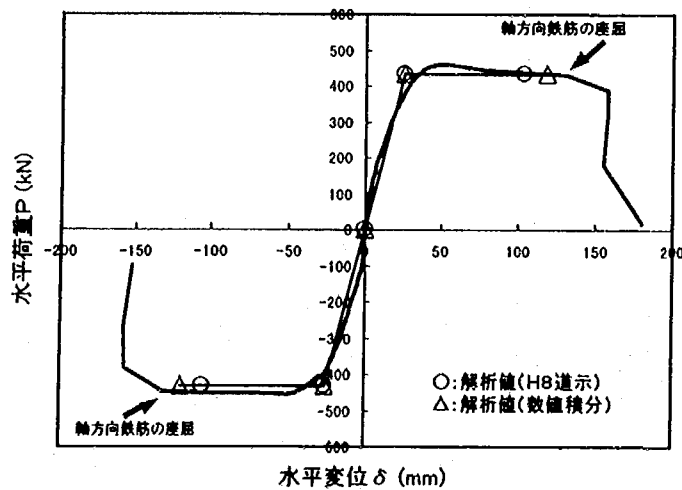
次に、終局変位に着目すると、曲率分布を数値積分した場合(終局変位[2])は実験における軸方向鉄筋座屈開始時と比較的一致している。平成8年道路橋示方書による場合(終局変位[1])は終局変位[2]に比較して10%程度小さく算出されており、3.4の実験結果より得られた塑性ヒンジ長も参考にすると、式(4.10)では塑性ヒンジ長をやや過小評価している可能性がある。しかし、いずれの場合でも供試体間の中間帯鉄筋量の違いが解析においても評価できており、中空円形断面の場合でも帯鉄筋比 ρ_s をパラメータとしたコンクリートの応力-ひずみ曲線の適用が可能であることを示している。ただし、3.4で述べたように供試体No.3では塑性ヒンジ長が短くなる傾向にあるが、終局変位[1]の算出における式(4.10)ではこの点を考慮していない。また、終局変位[2]の場合には元々塑性ヒンジ長の考え方が取り入れられていない。したがって、終局変位をより精度良く解析するためには、塑性ヒンジ長の算出方法を更に検討する必要がある。



(a) 供試体No. 1



(b) 供試体No. 2



(c) 供試体No. 3

図-4.1 水平力-水平変位履歴曲線の包絡線と解析結果の比較

5. まとめ

(1) 中空円形断面橋脚の破壊モードとじん性

1) 破壊モードとしては、かぶりコンクリートの剥離が顕著になると、軸方向鉄筋の座屈が生じ、断面の内側でもコンクリートの剥離が生じて急激に損傷が進展する。今回の実験では、4～6 δy で急激に耐力が低下した。

2) 終局時を軸方向鉄筋の座屈時と定義すると、終局じん性率としては4～5程度となる。

(2) じん性を向上させるための配筋細目

1) コンクリートの壁を拘束するような中間帯鉄筋を入れると、じん性の向上が期待できる。

2) 中間帯鉄筋の量を多くすると、コンクリート破壊のモードから軸方向鉄筋の破断が生じるモードに移行し、ねばり強さが向上する。ただし、あまり入れすぎても塑性ヒンジ領域が減少するため、効果は限られる。

3) 中間帯鉄筋は塑性ヒンジ領域で大きな効果を発揮し、この領域から離れると効果が小さくなる。

4) 中空円形断面においては内側の帯鉄筋よりも、外側帯鉄筋の役割が大きい。

(3) 解析との相関

1) 中空断面においても、実際の帯鉄筋比 ρ_s をパラメータとしたコンクリートの応力-ひずみ曲線を適用することにより、終局水平耐力、終局変位を比較的精度よく推定できる。

2) 解析における終局変位は、実験における軸方向鉄筋座屈開始時とほぼ一致する。

(4) 今後の課題

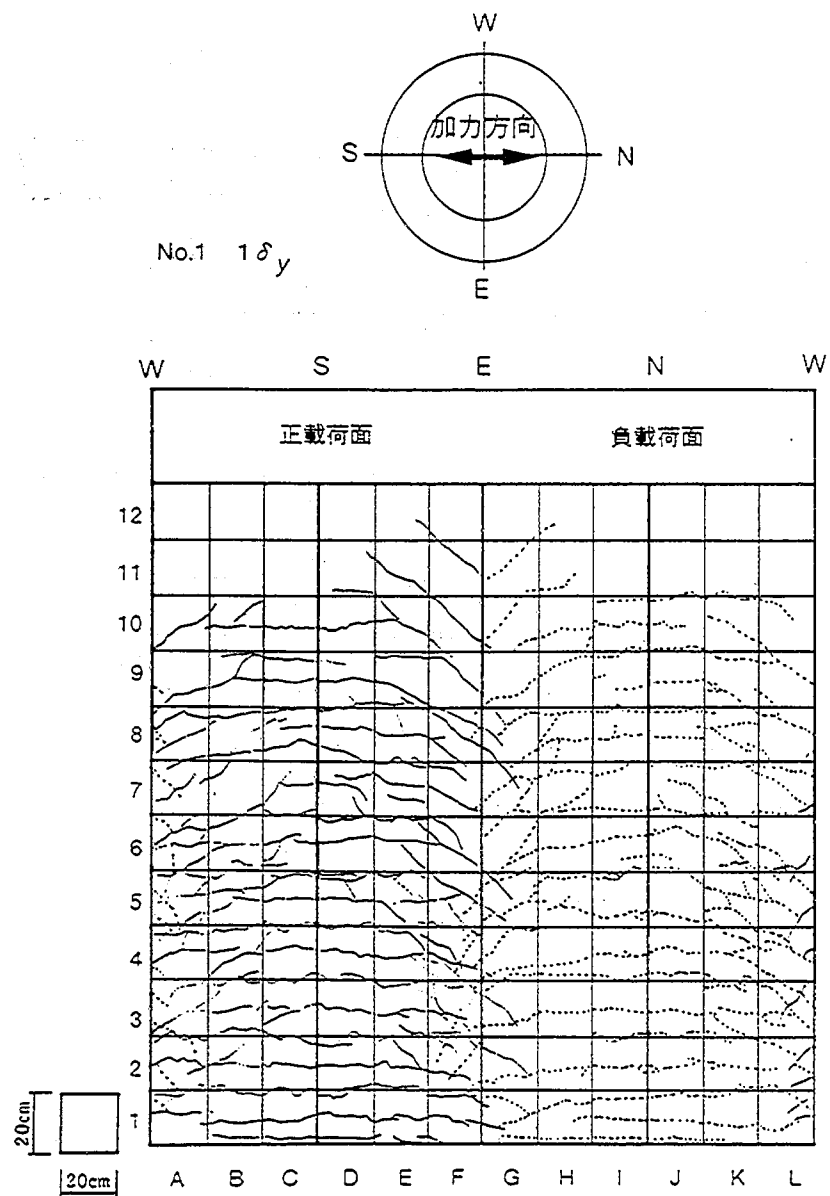
帯鉄筋による拘束効果の影響も含め、中空断面における塑性ヒンジ長の算定方法を検討する必要がある。

参考文献

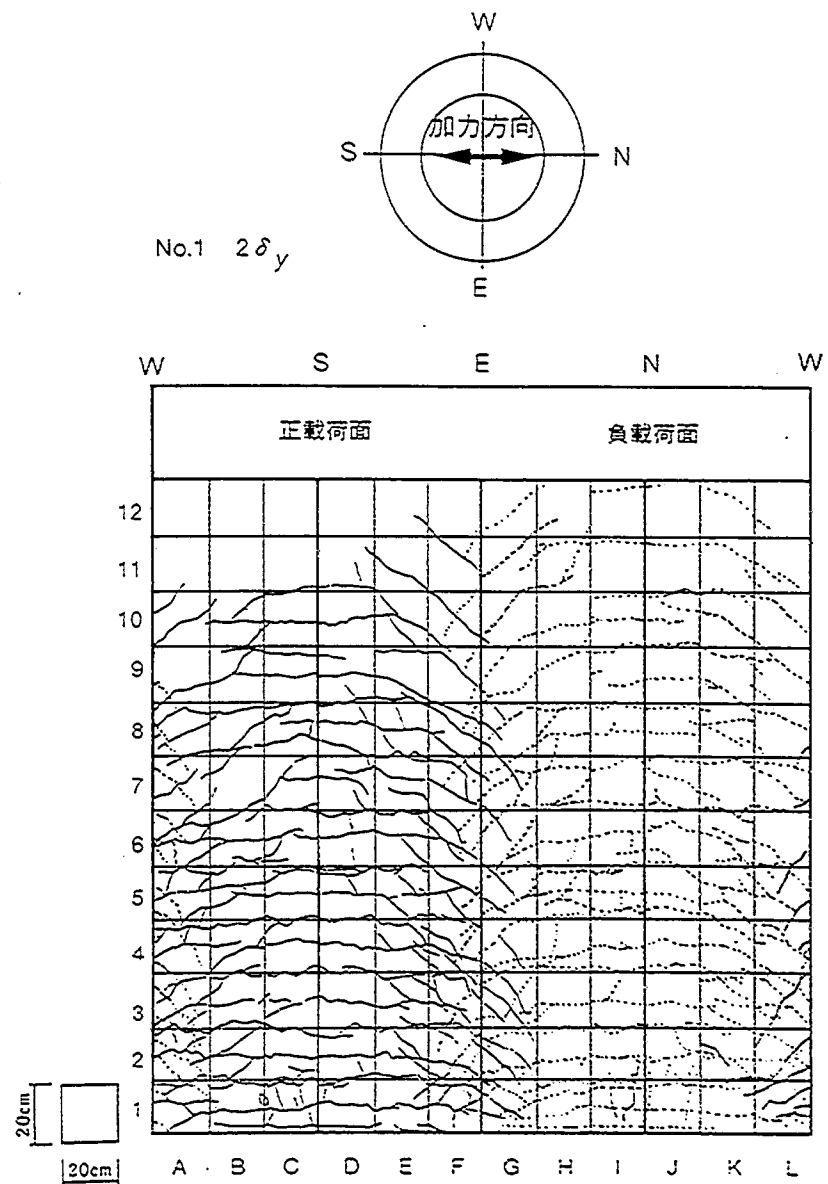
- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、1996年12月
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、1990年2月
- 3) 川島一彦：中空円形RC橋脚の動的耐力及び変形性能、土木技術資料Vol. 34-10、pp. 34-39、1992年10月
- 4) 太田実：繰返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究、土木学会論文集、第292号、pp. 65-74、1979年12月
- 5) 石橋忠良、吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形性能に関する研究、土木学会論文集、第390号／V-8、pp. 57-66、1988年2月
- 6) 池田尚治、山口隆裕、恵谷舜吾：コンクリート円環柱の耐荷挙動に関する研究、第8回コンクリート工学年次学術講演会論文集、1986
- 7) 星隈順一、運上茂樹、川島一彦、長屋和宏：載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法、構造工学論文集、Vol. 44A、pp. 877-888、1998年3月

参 考 資 料

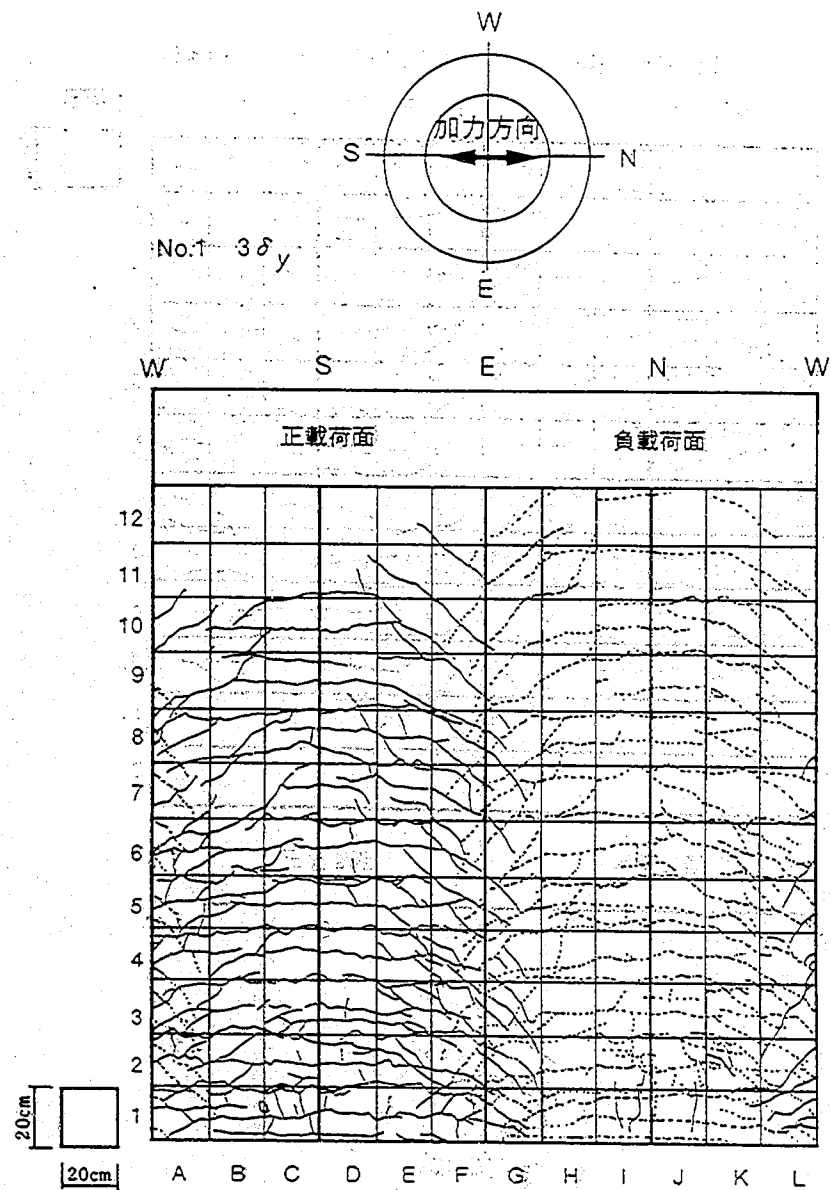
1. 損傷図・損傷写真



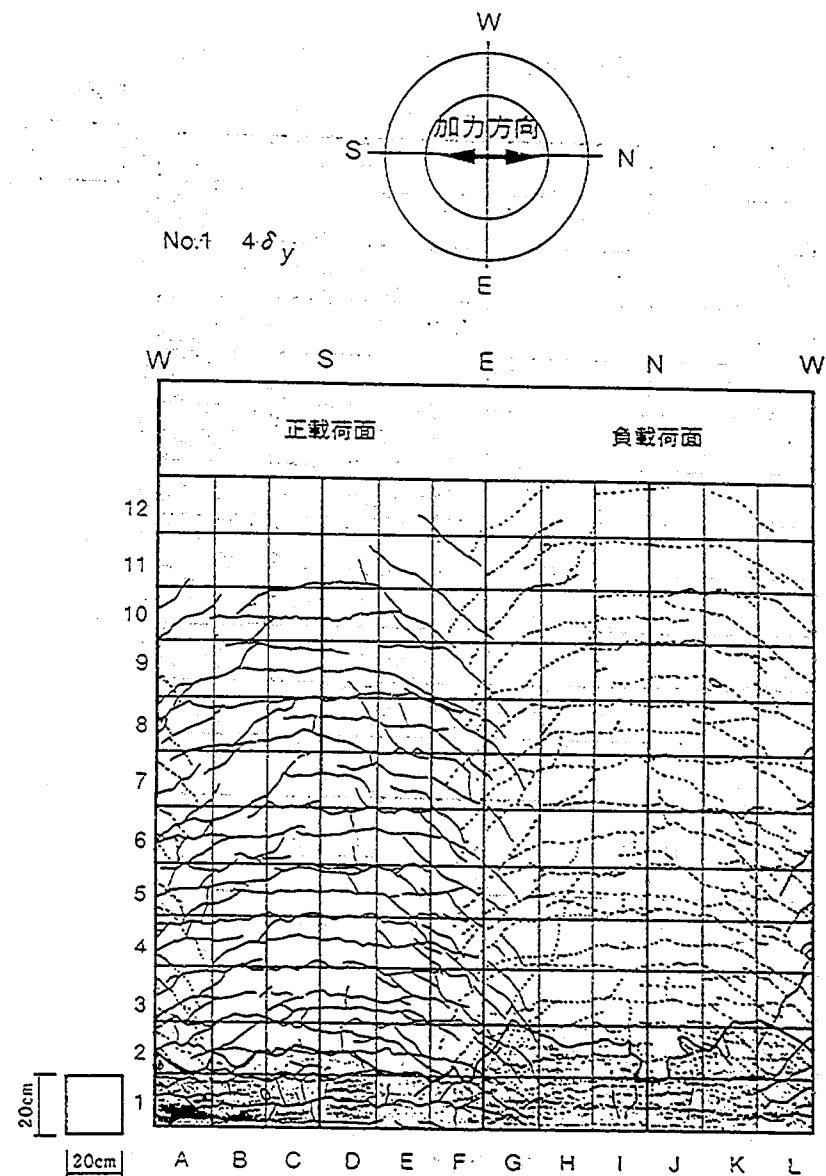
付図1-1(1) 供試体No. 1 $1\delta_y$ 終了時損傷図



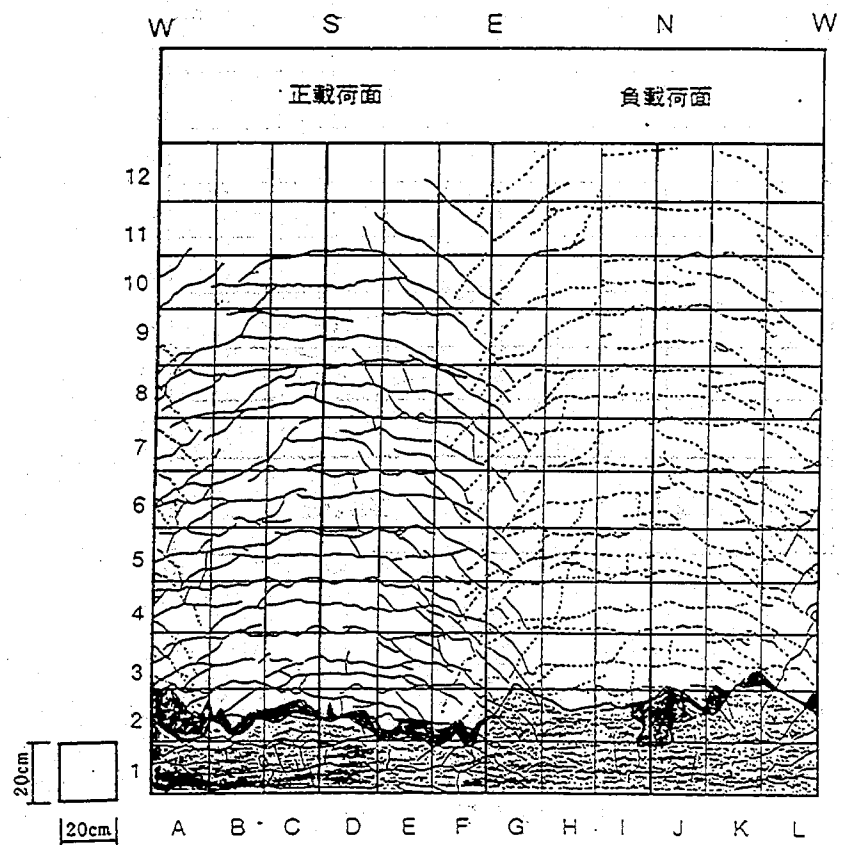
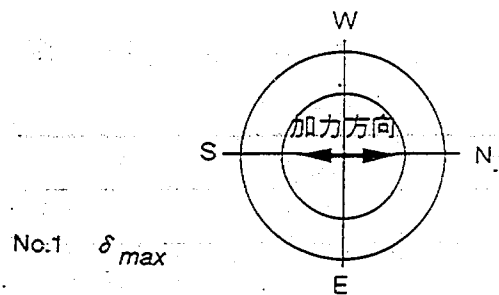
付図1-1(2) 供試体No. 1 $2\delta_y$ 終了時損傷図



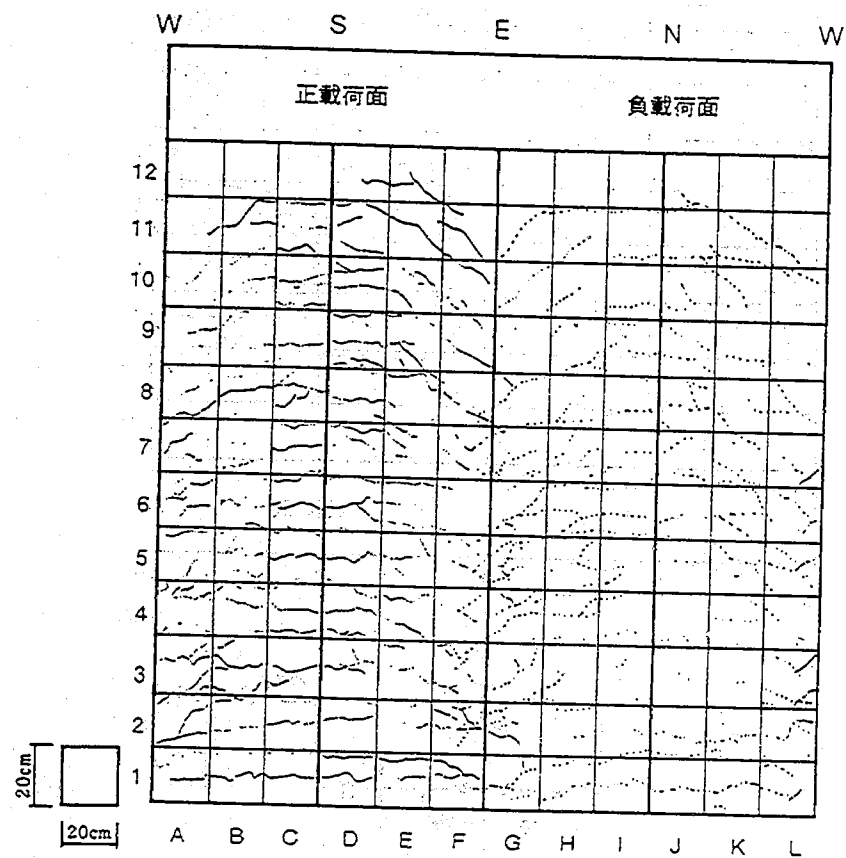
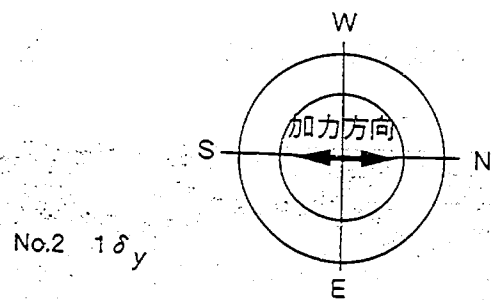
付図1-1(3) 供試体No. 1 $3\delta_y$ 終了時損傷図



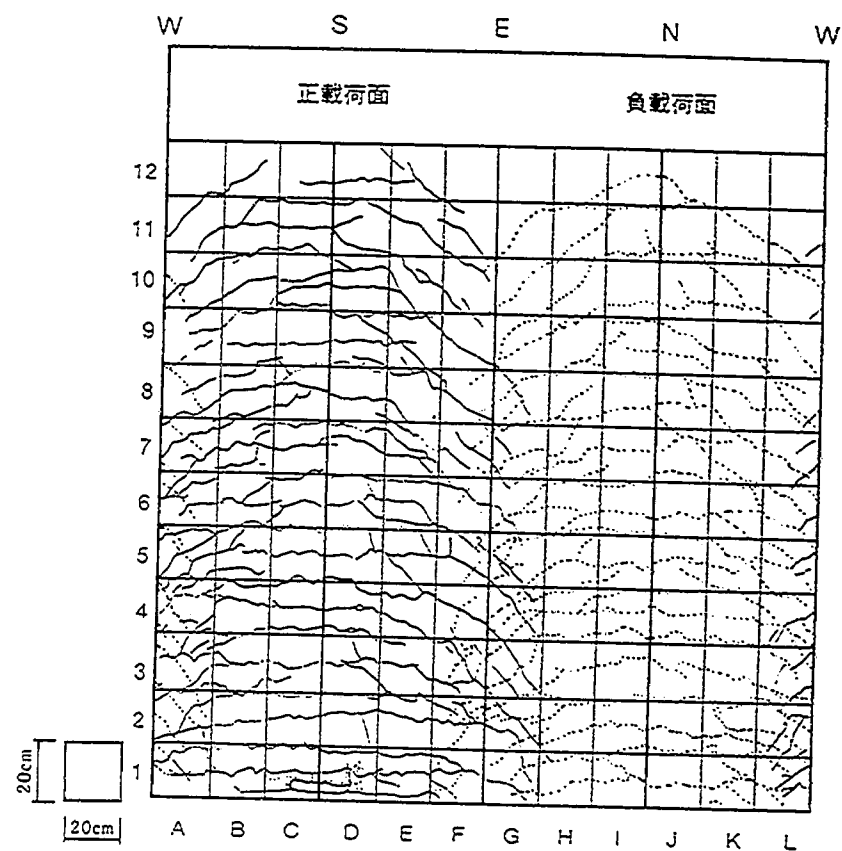
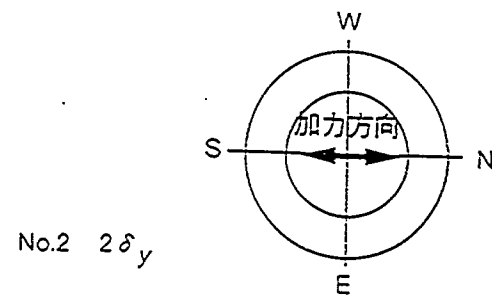
付図1-1(4) 供試体No. 1 $4\delta_y$ 終了時損傷図



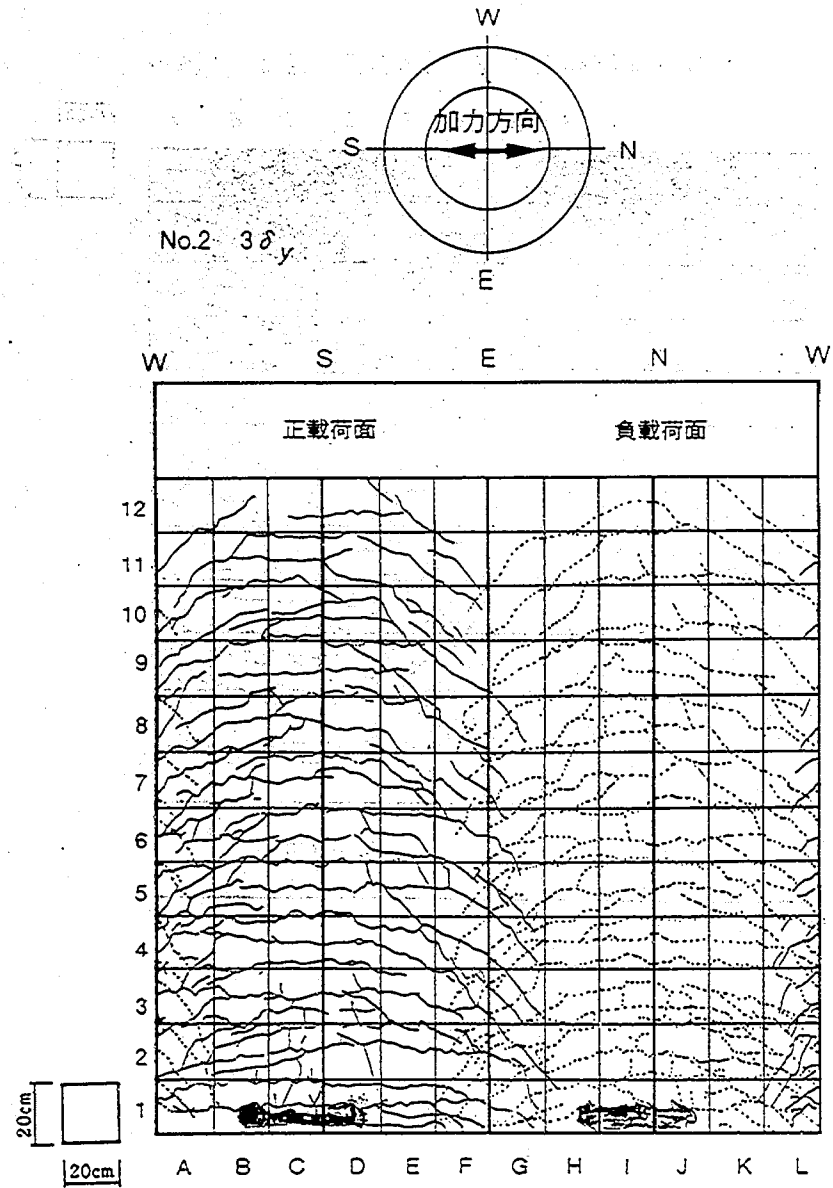
付図 I - 1(5) 供試体 No. 1 最大変位時損傷図



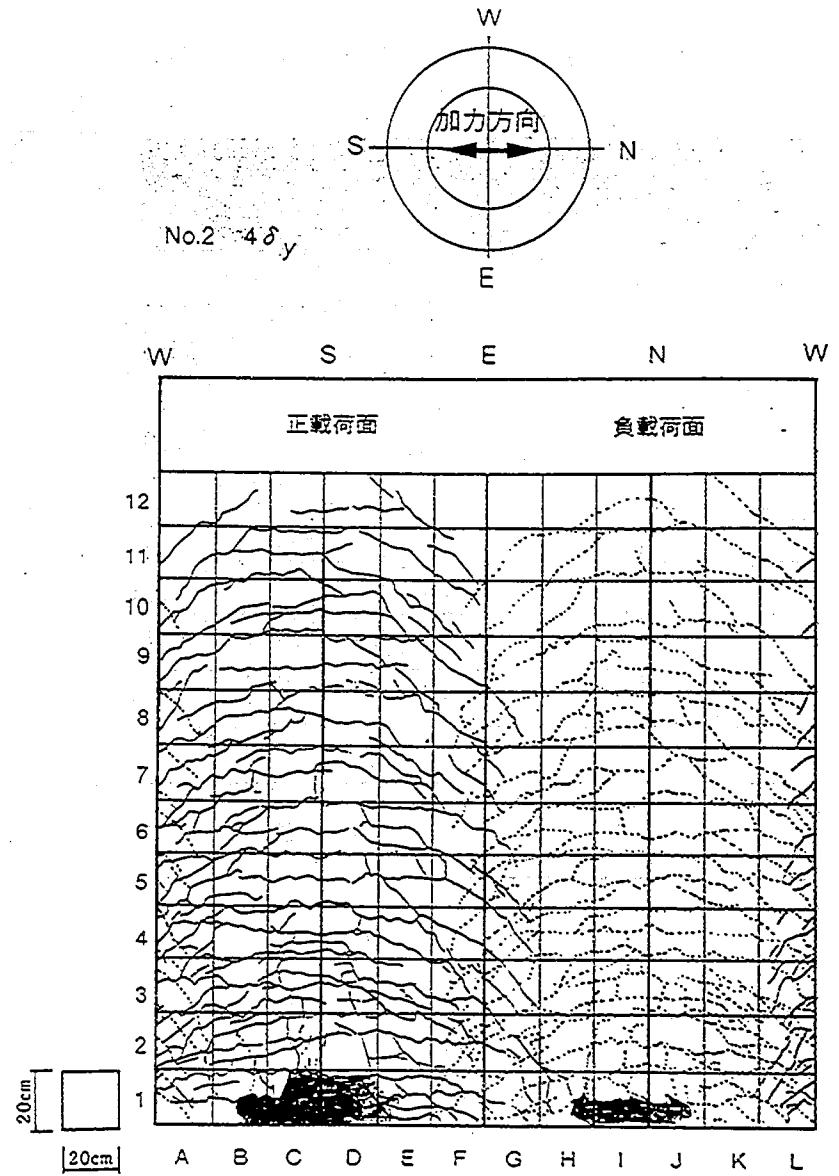
付図1-2(1) 供試体No. 2 $1\delta_y$ 終了時損傷図



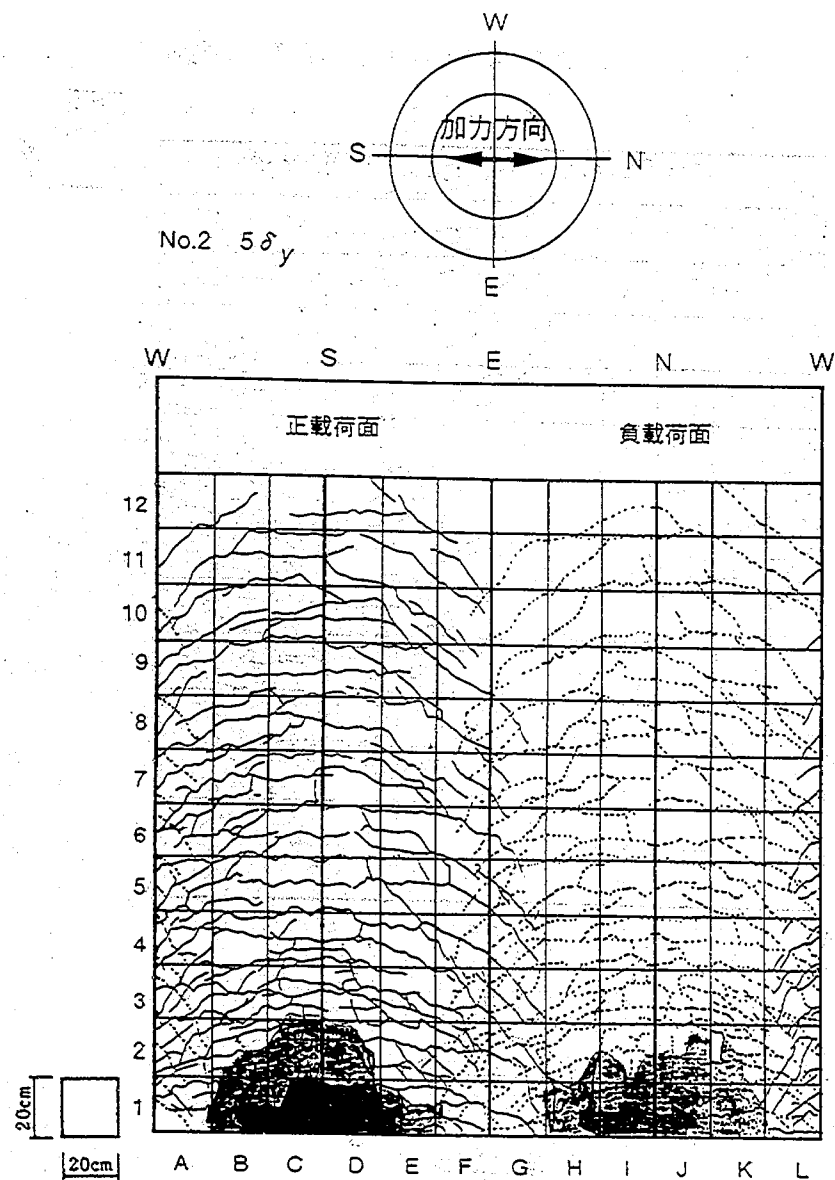
付図1-2(2) 供試体No. 2 $2\delta_y$ 終了時損傷図



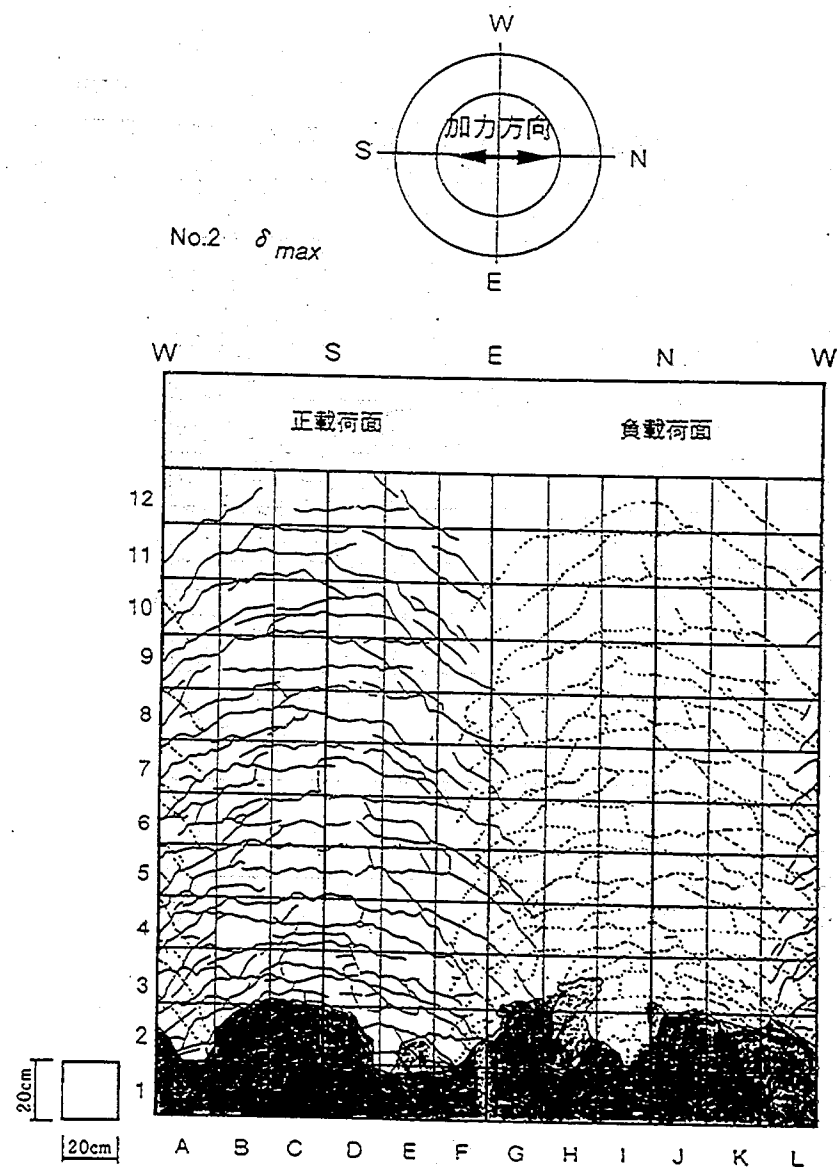
付図1-2(3) 供試体No. 2 $3\delta_y$ 終了時損傷図



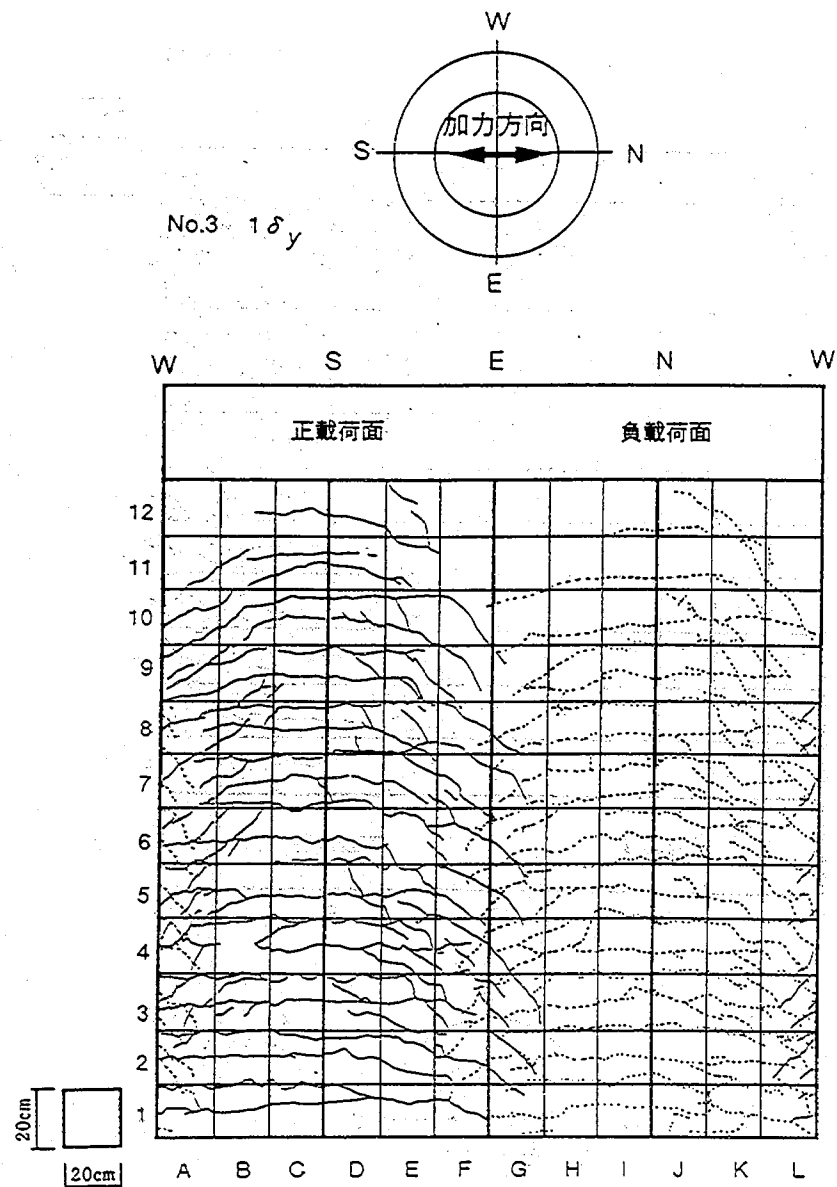
付図1-2(4) 供試体No. 2 $4\delta_y$ 終了時損傷図



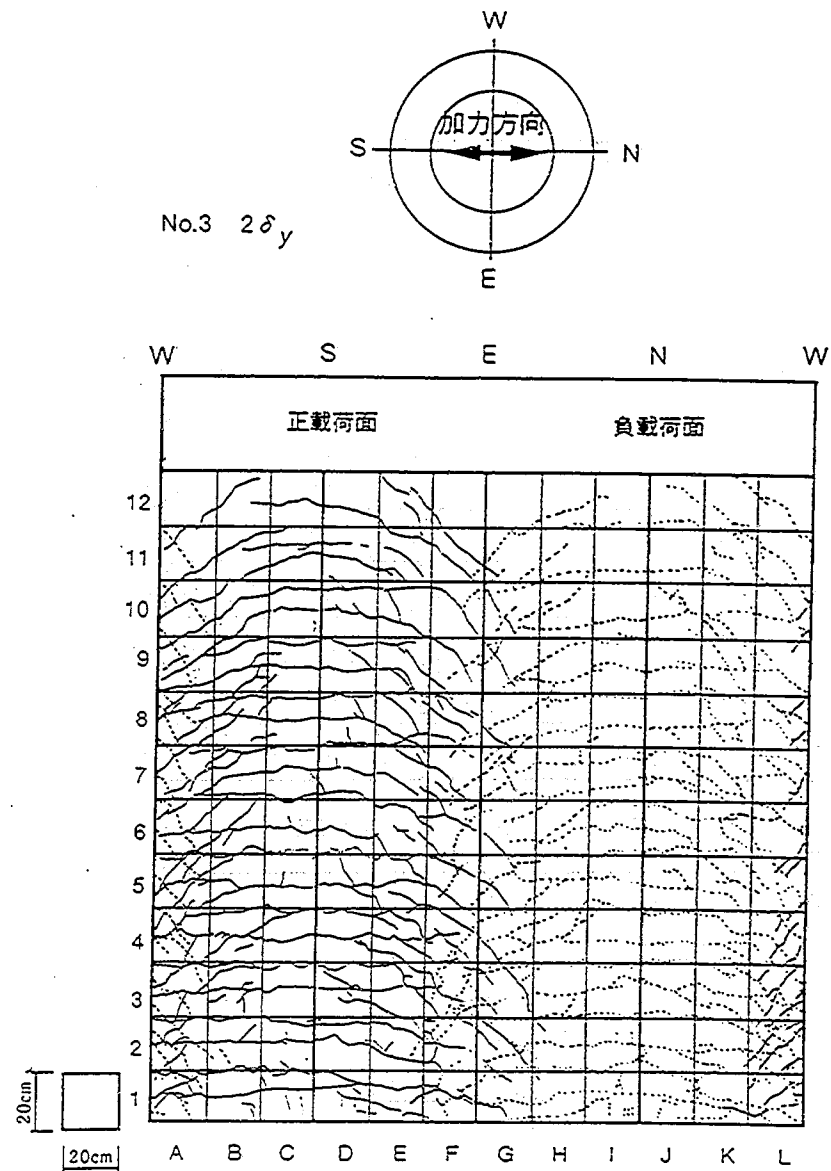
付図1-2(5) 供試体No. 2 $5\delta_y$ 終了時損傷図



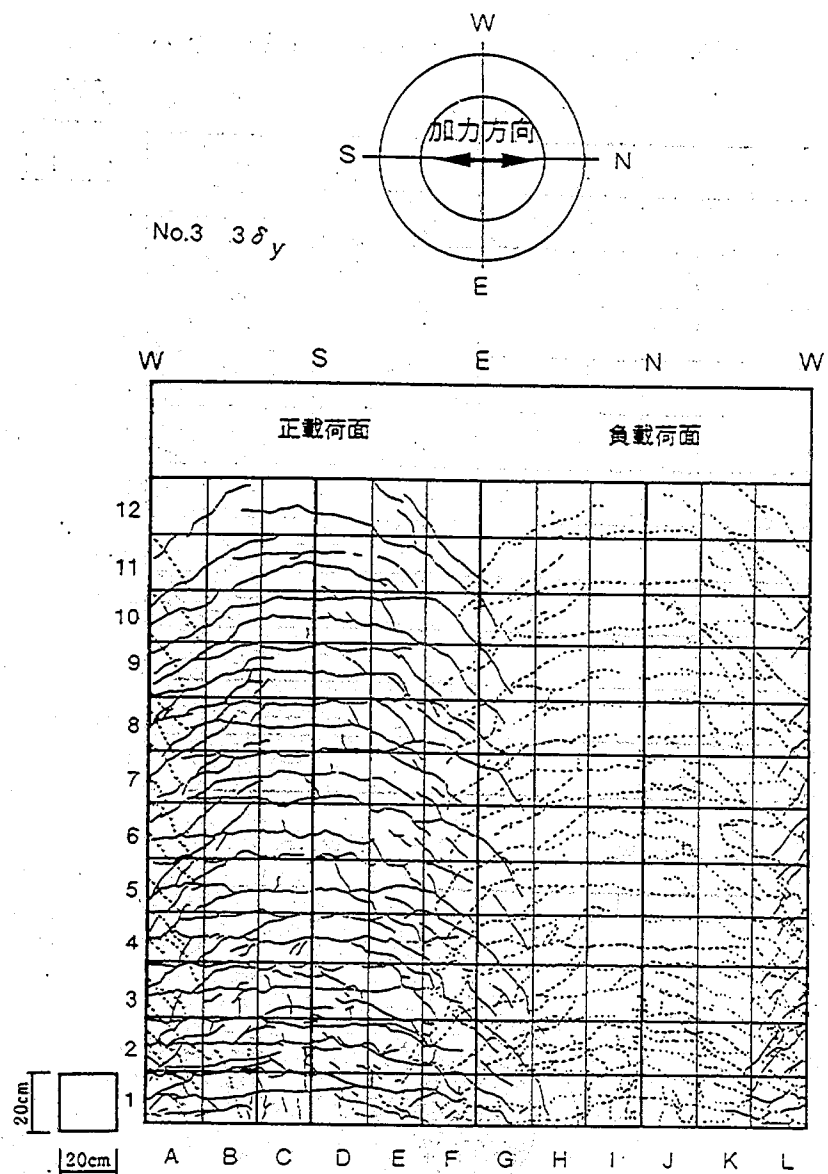
付図1-2(6) 供試体No. 2 最大変位了時損傷図



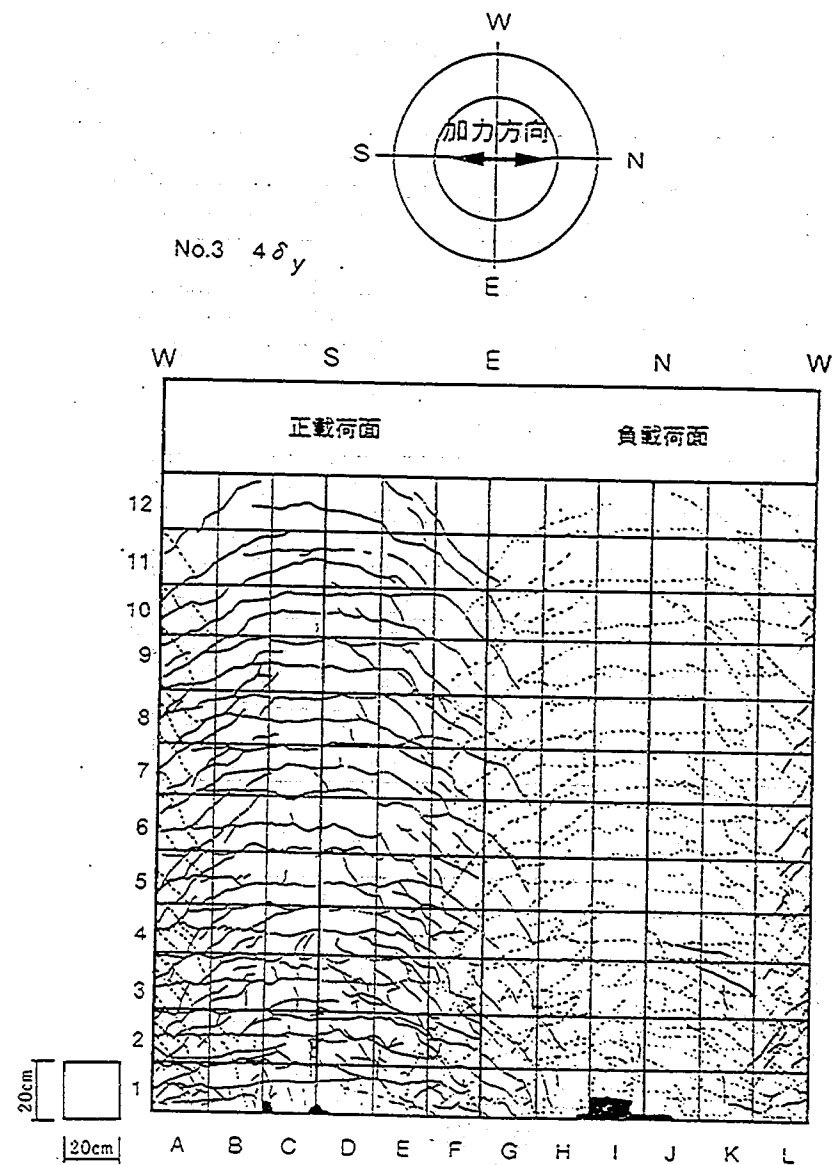
付図1-3(1) 供試体No. 3 $1\delta_y$ 終了時損傷図



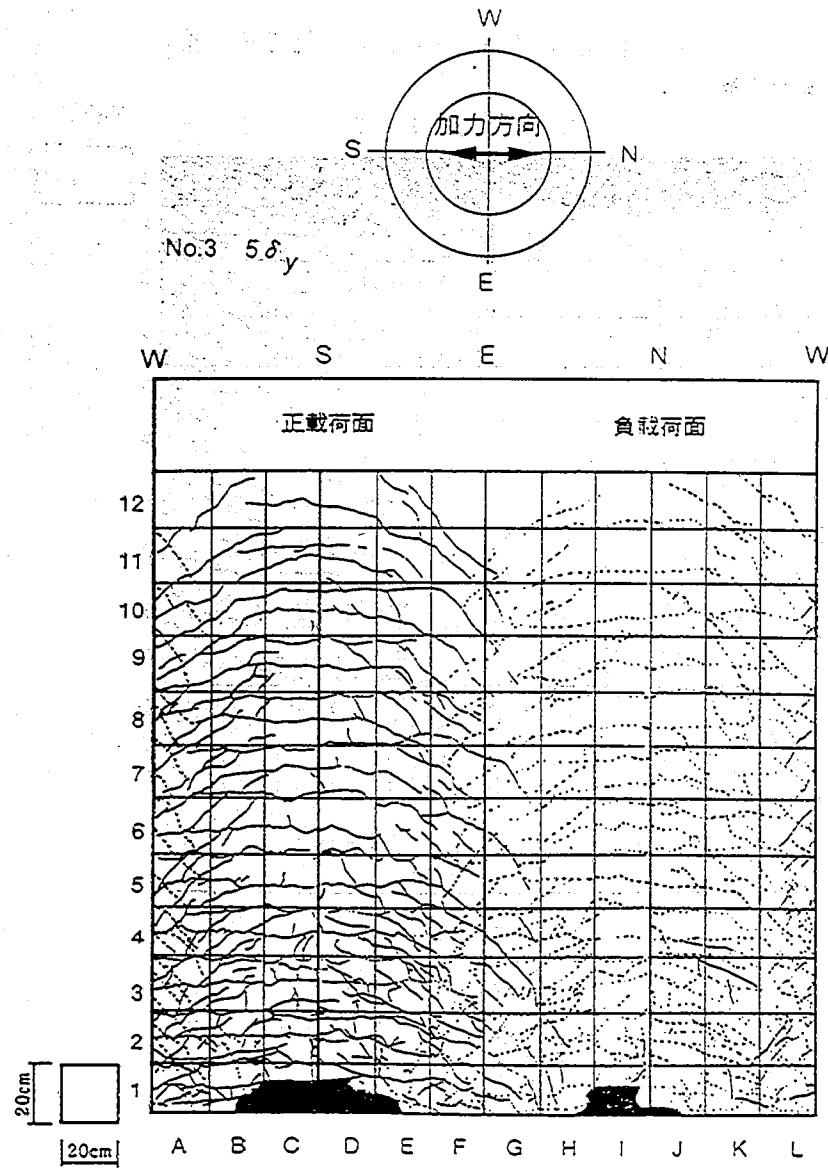
付図1-3(2) 供試体No. 3 $2\delta_y$ 終了時損傷図



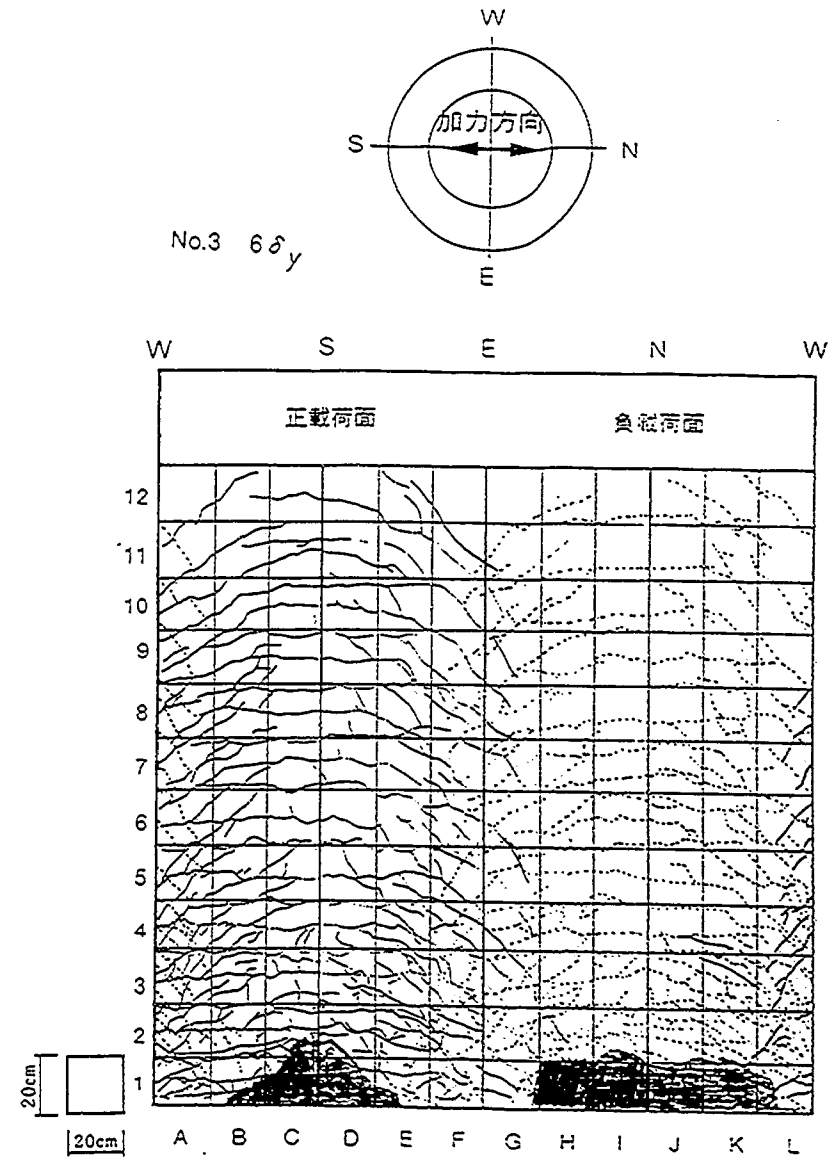
付図 I - 3(3) 供試体No. 3 $3\delta_y$ 終了時損傷図



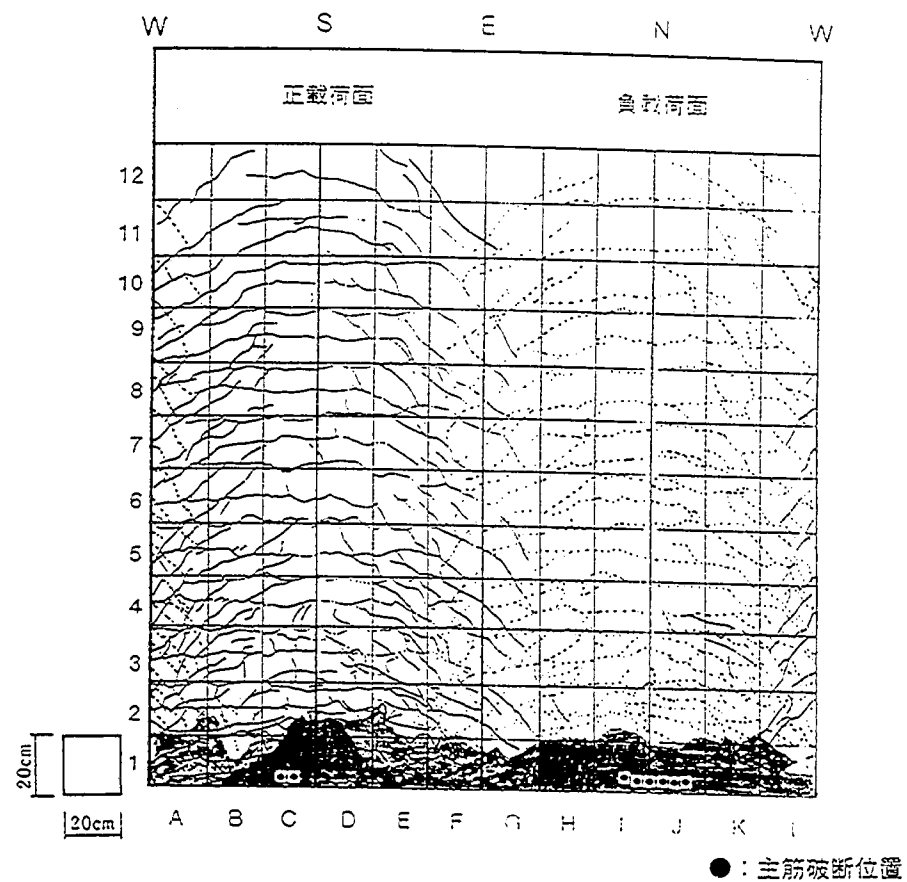
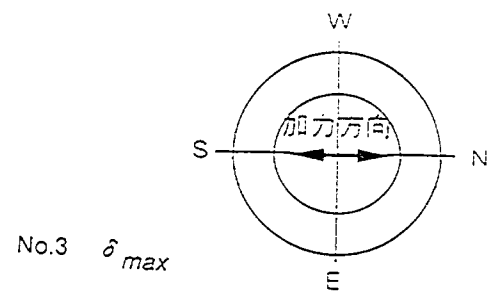
付図 I - 3(4) 供試体No. 3 $4\delta_y$ 終了時損傷図



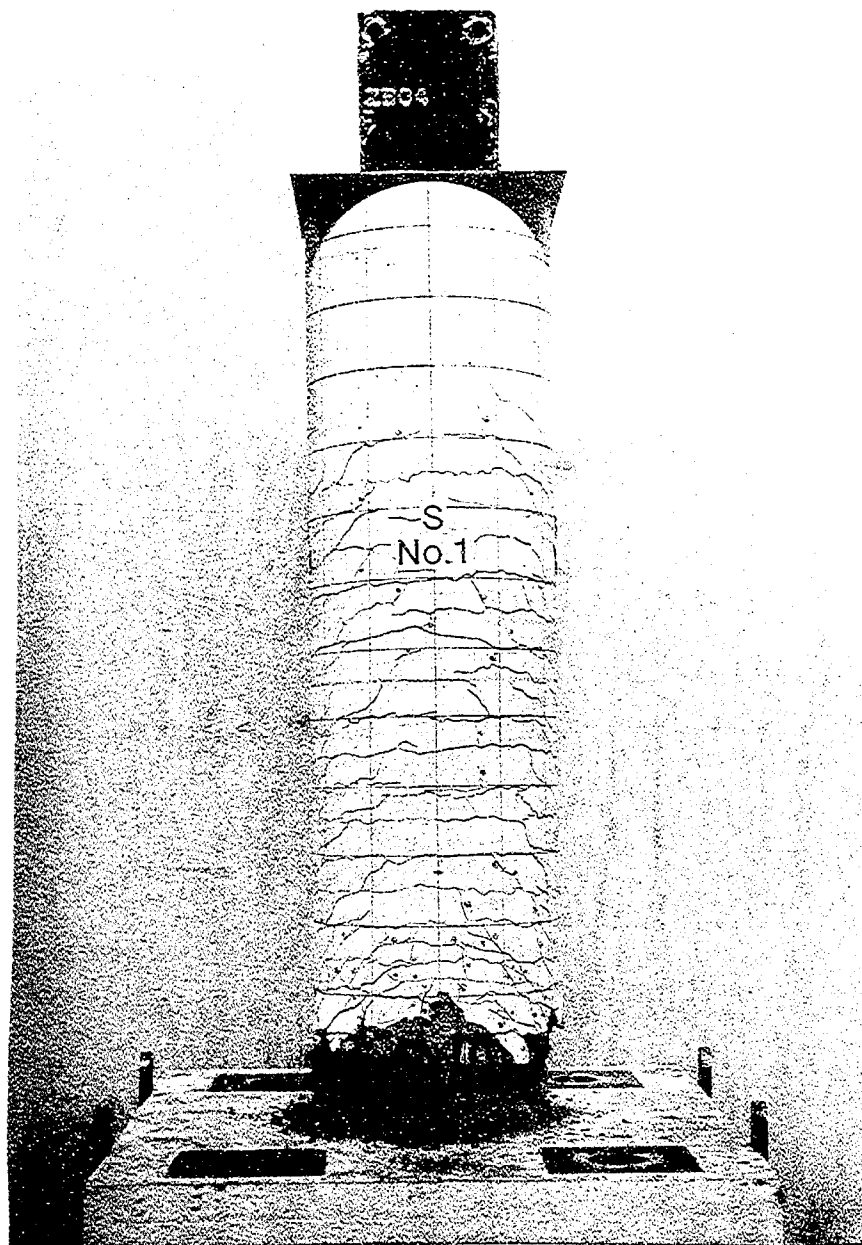
付図1-3(5) 供試体No. 3 $5\delta_y$ 終了時損傷図



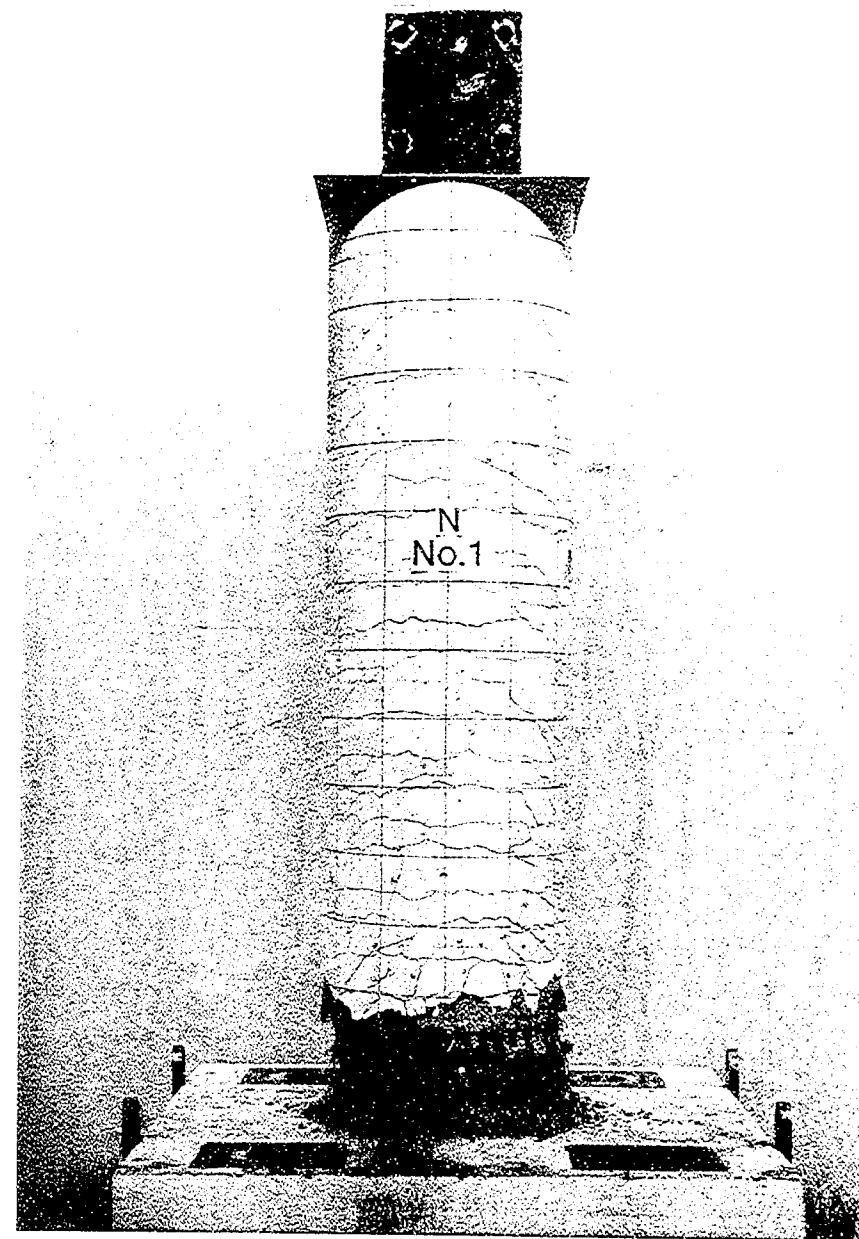
付図1-3(6) 供試体No. 3 $6\delta_y$ 終了時損傷図



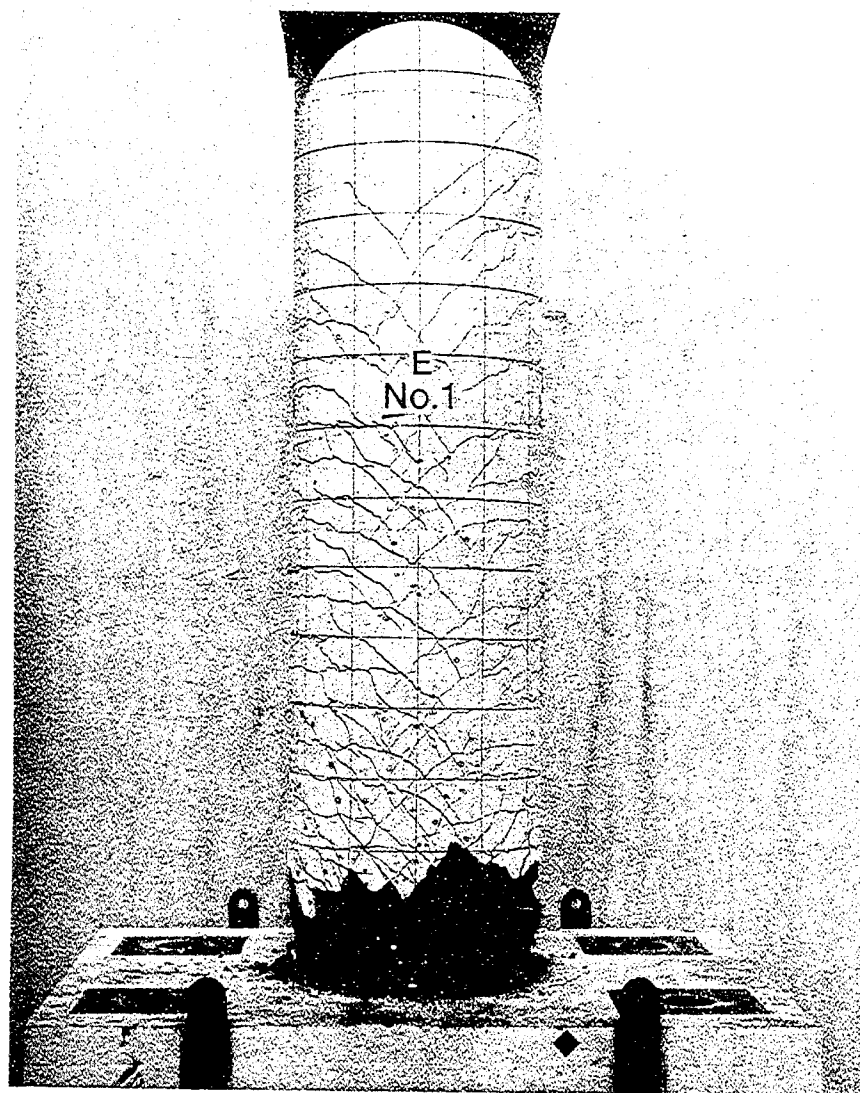
付図 1-3(7) 供試体 No. 3 最大変位時損傷図



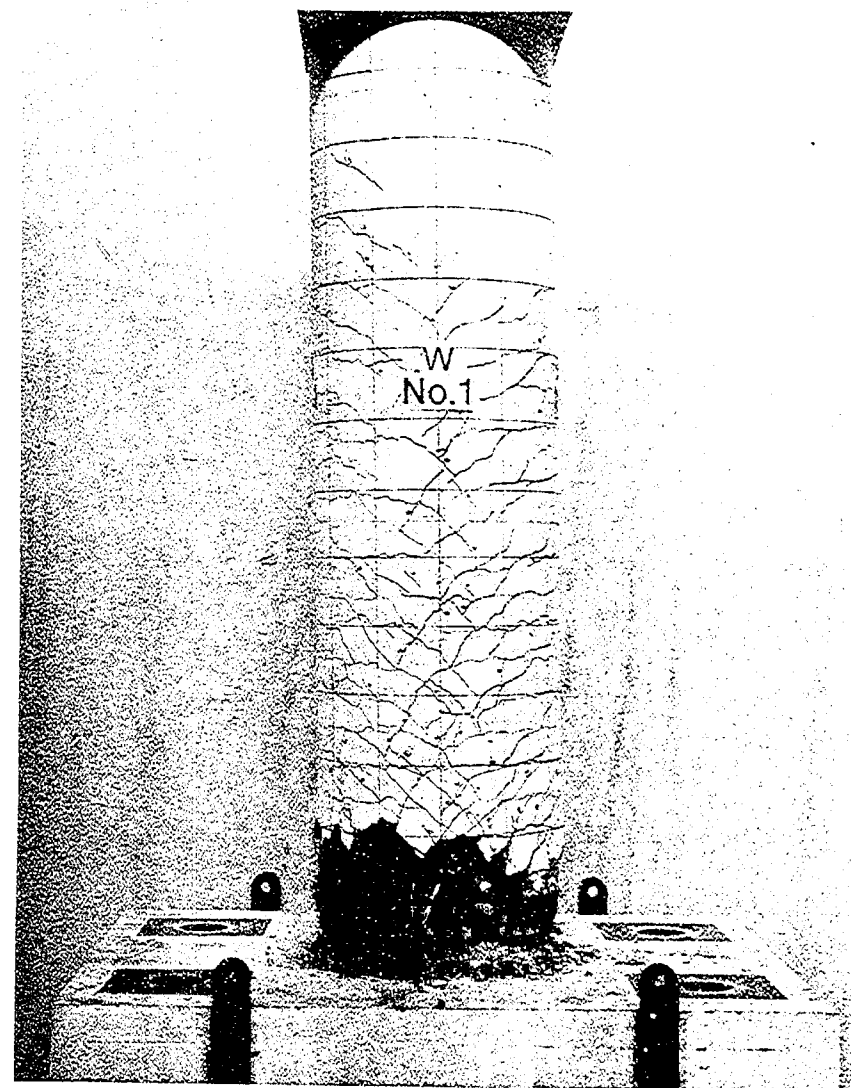
付写真 1-1(1) 供試体No. 1 S側最終損傷状況



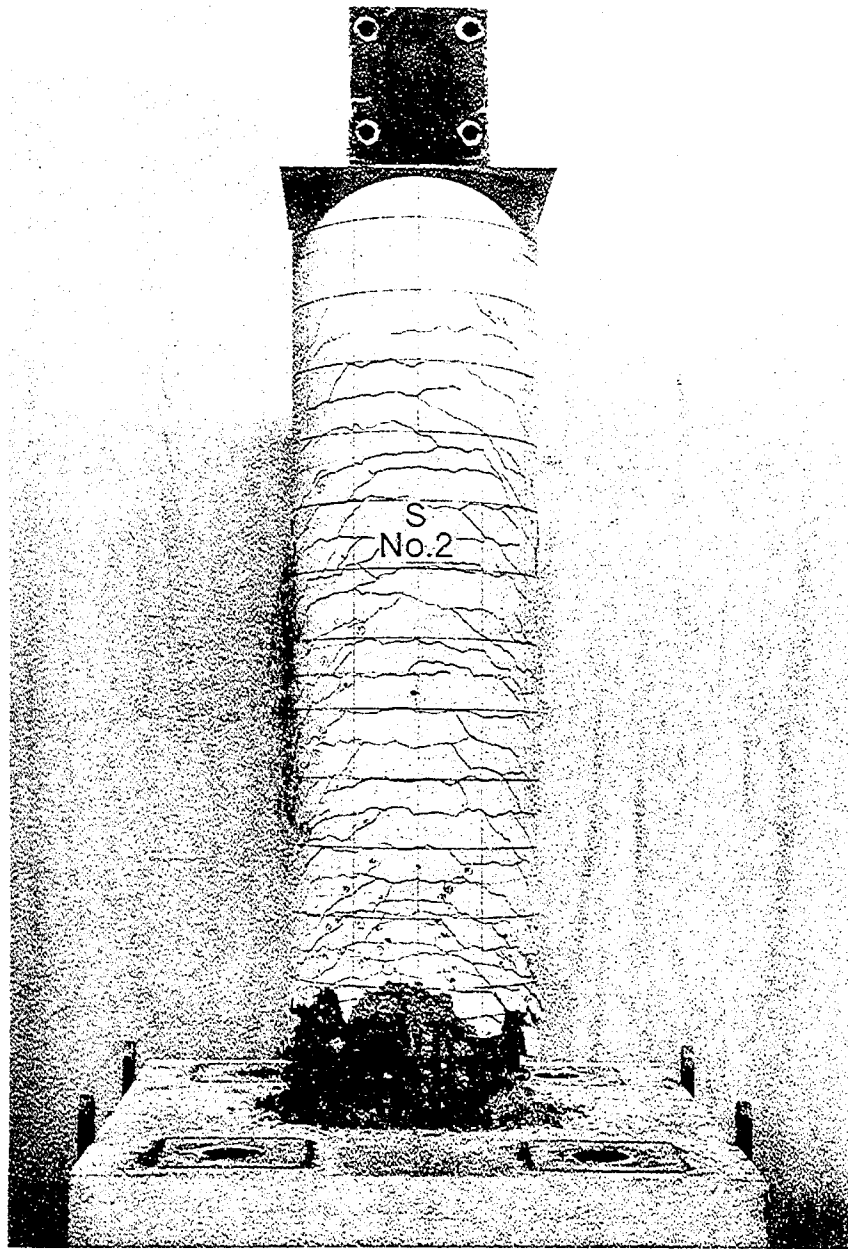
付写真 1-1(2) 供試体No. 1 N側最終損傷状況



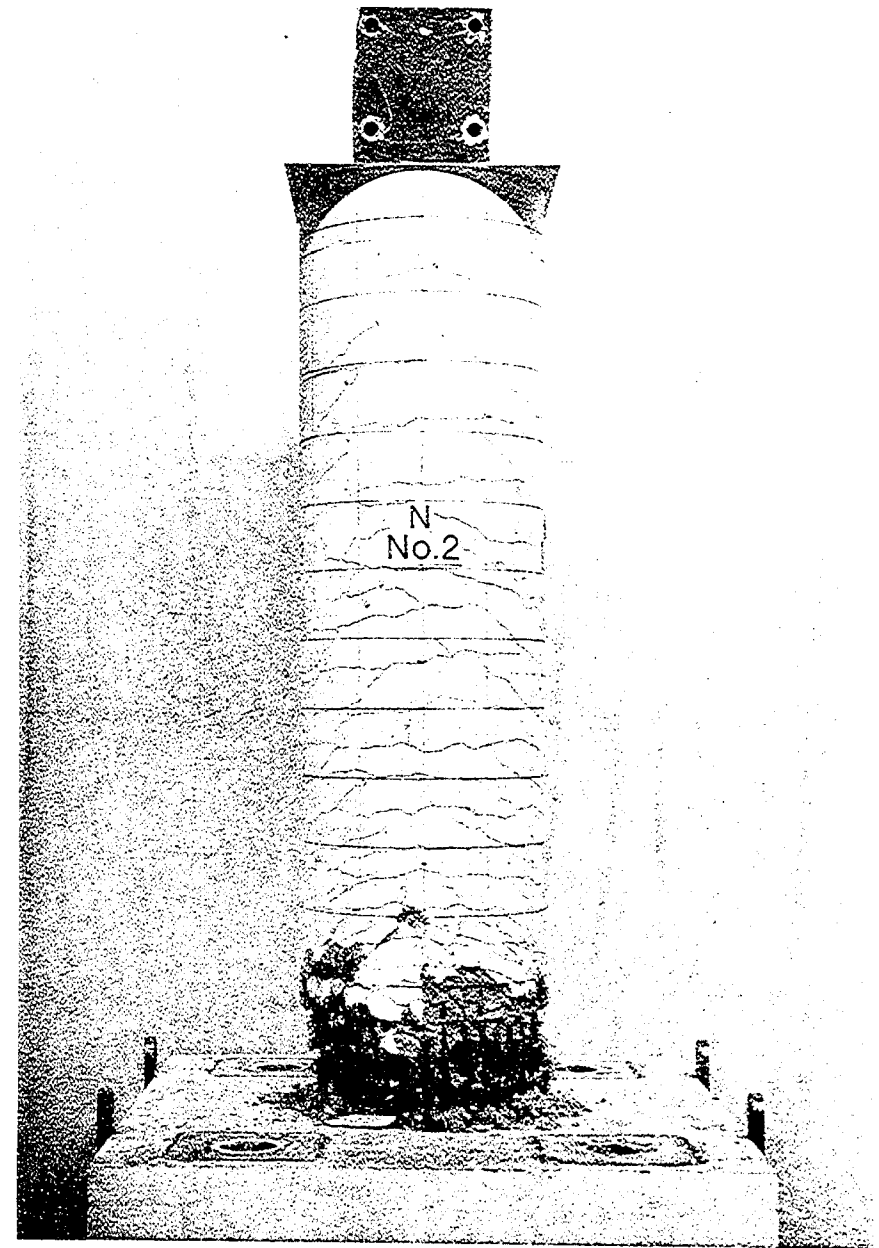
付写真 1-1(3) 供試体No. 1 E側最終損傷状況



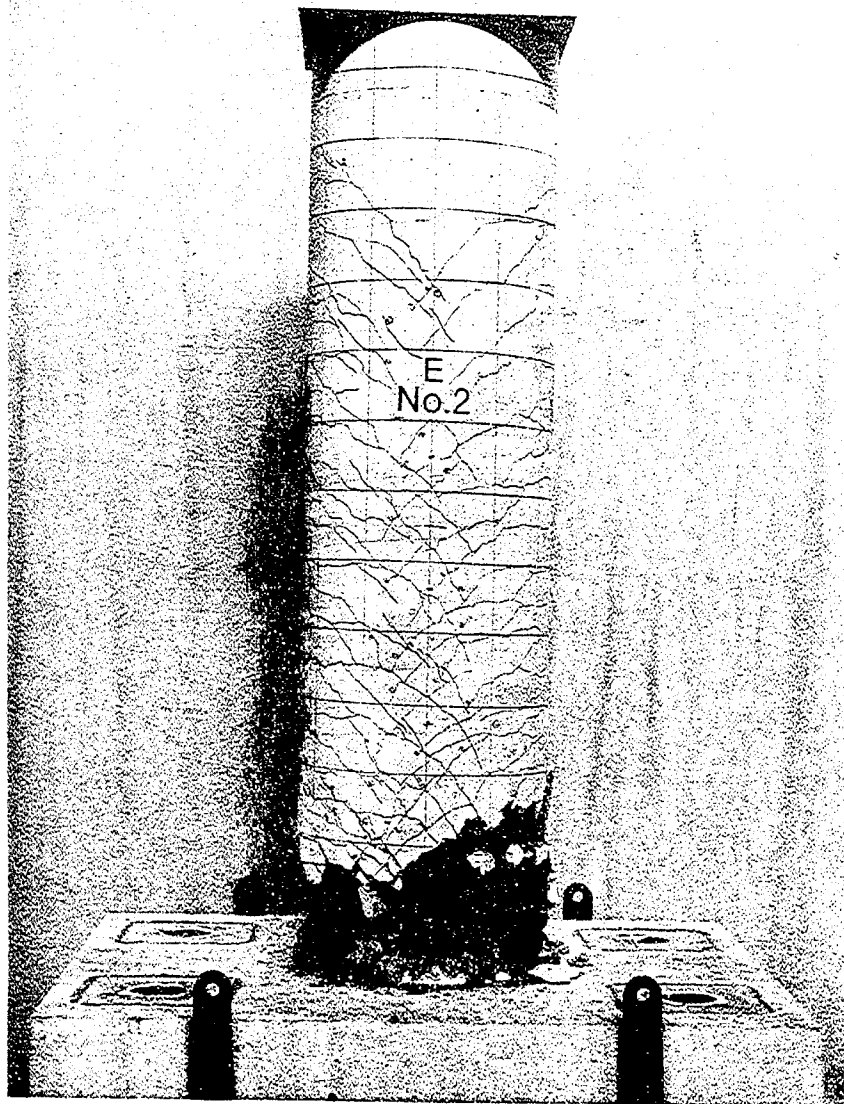
付写真 1-1(4) 供試体No. 1 W側最終損傷状況



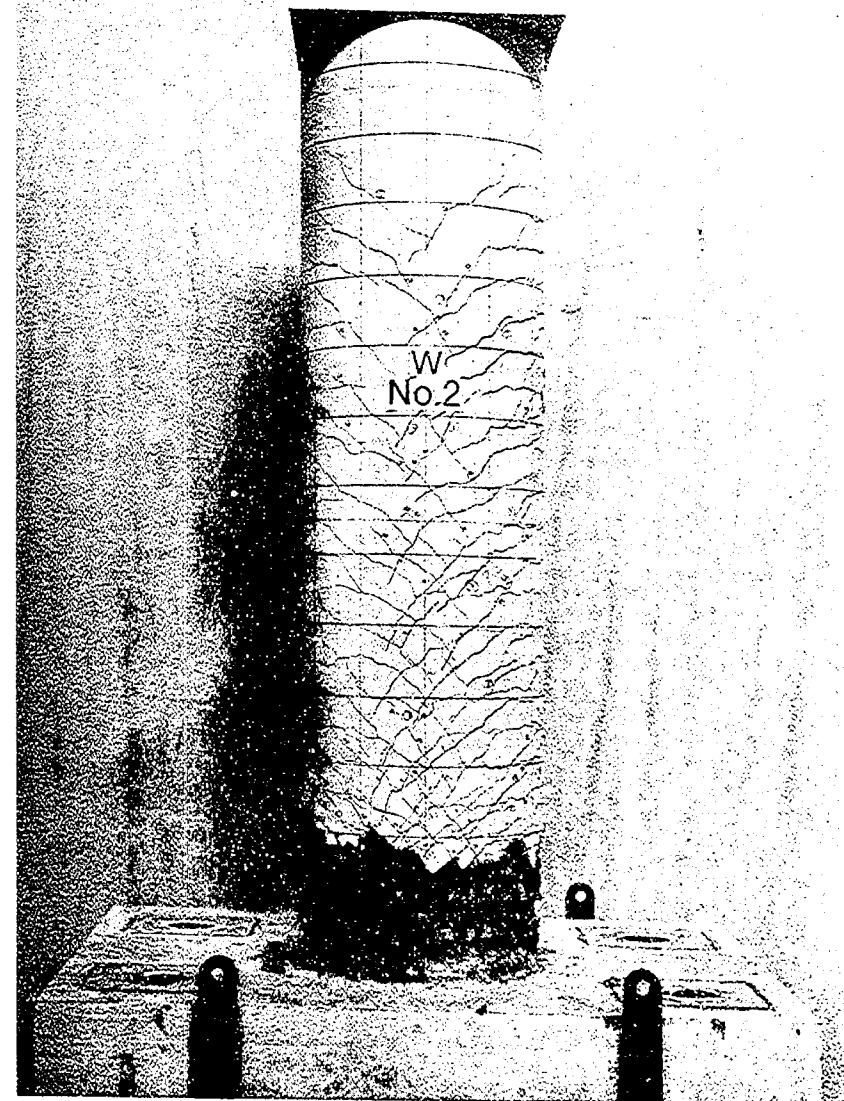
付写真 1-2(1) 供試体No. 2 S側最終損傷状況



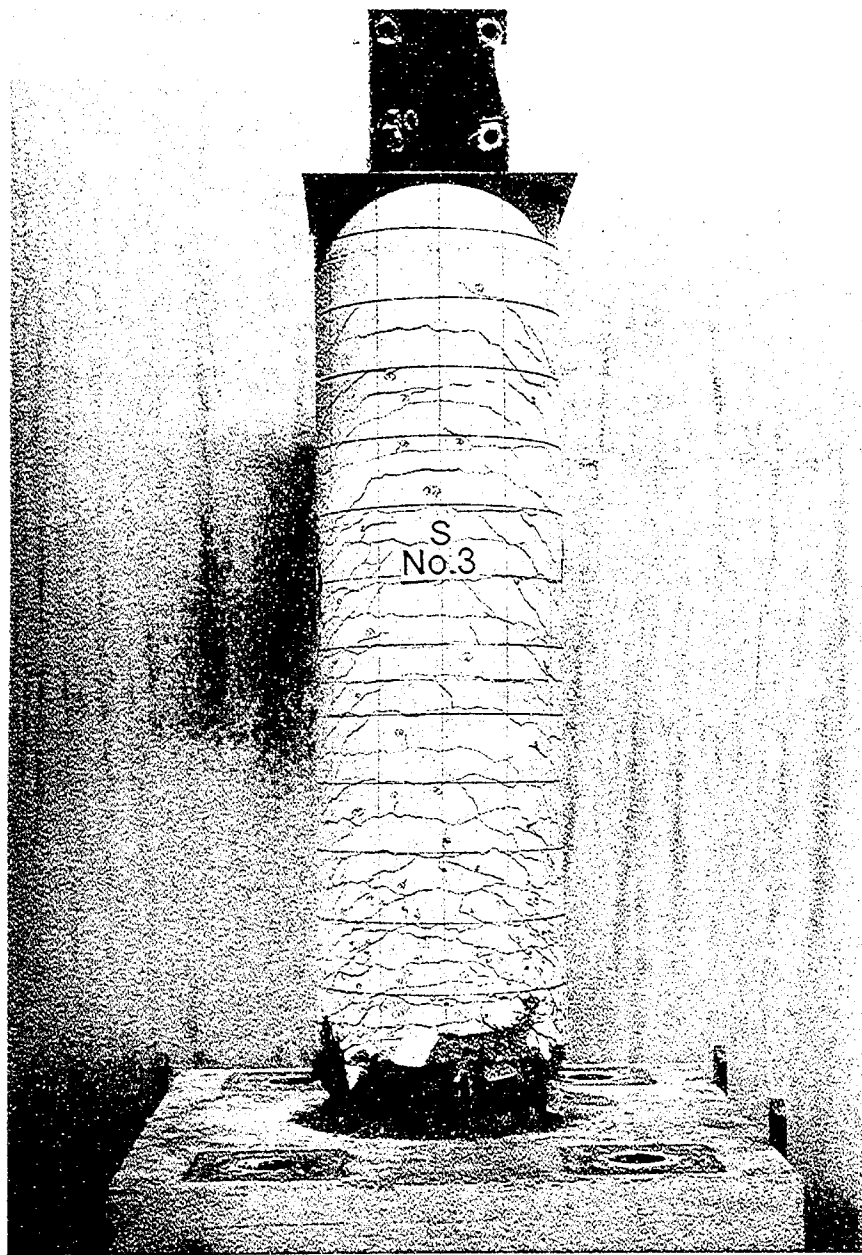
付写真 1-2(2) 供試体No. 2 N側最終損傷状況



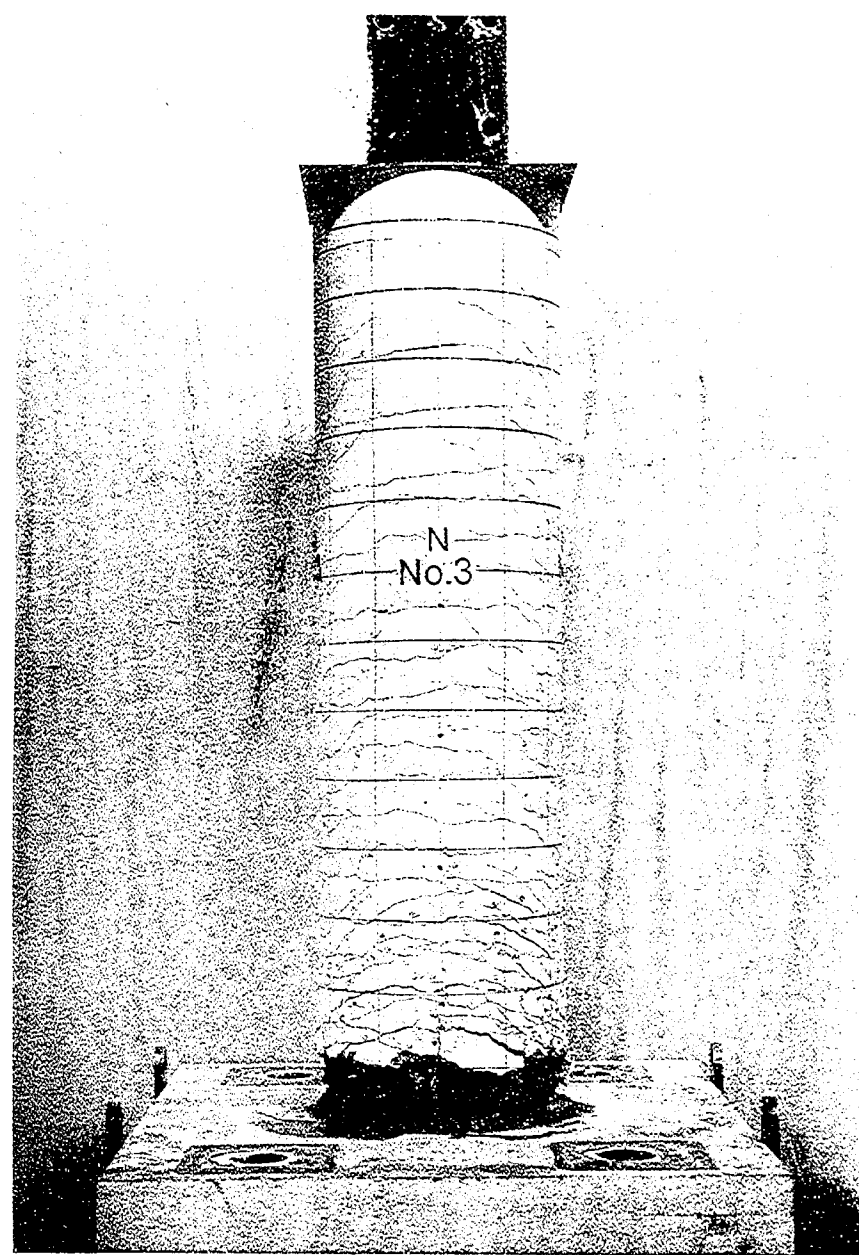
付写真 1-2(3) 供試体No. 2 E側最終損傷状況



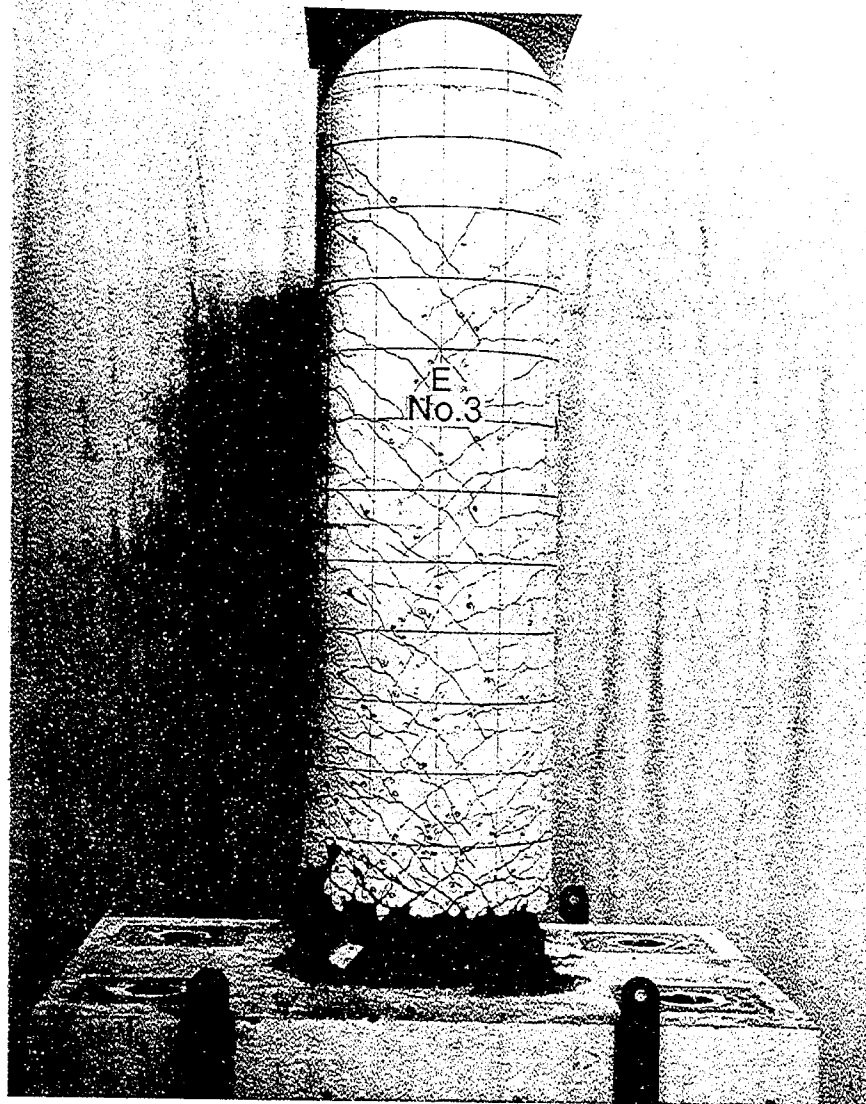
付写真 1-2(4) 供試体No. 2 W側最終損傷状況



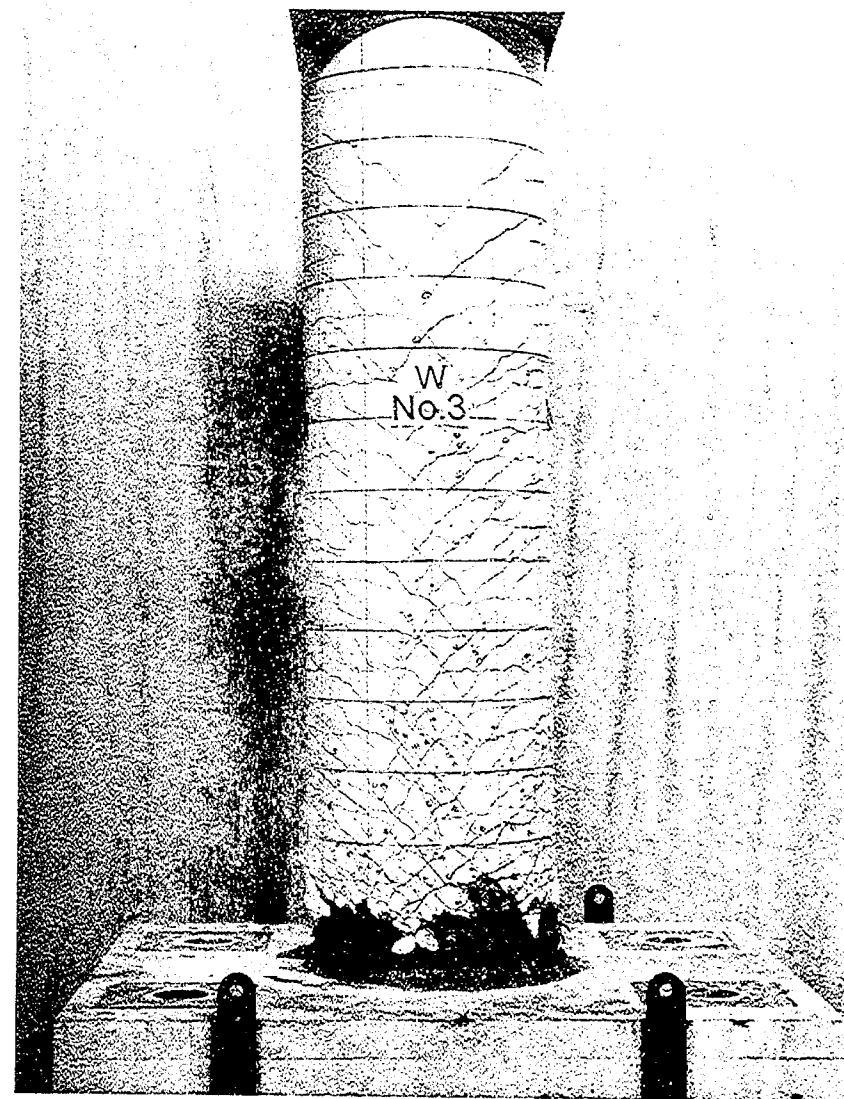
付写真 1-3(1) 供試体No. 3 S側最終損傷状況



付写真 1-3(2) 供試体No. 3 N側最終損傷状況



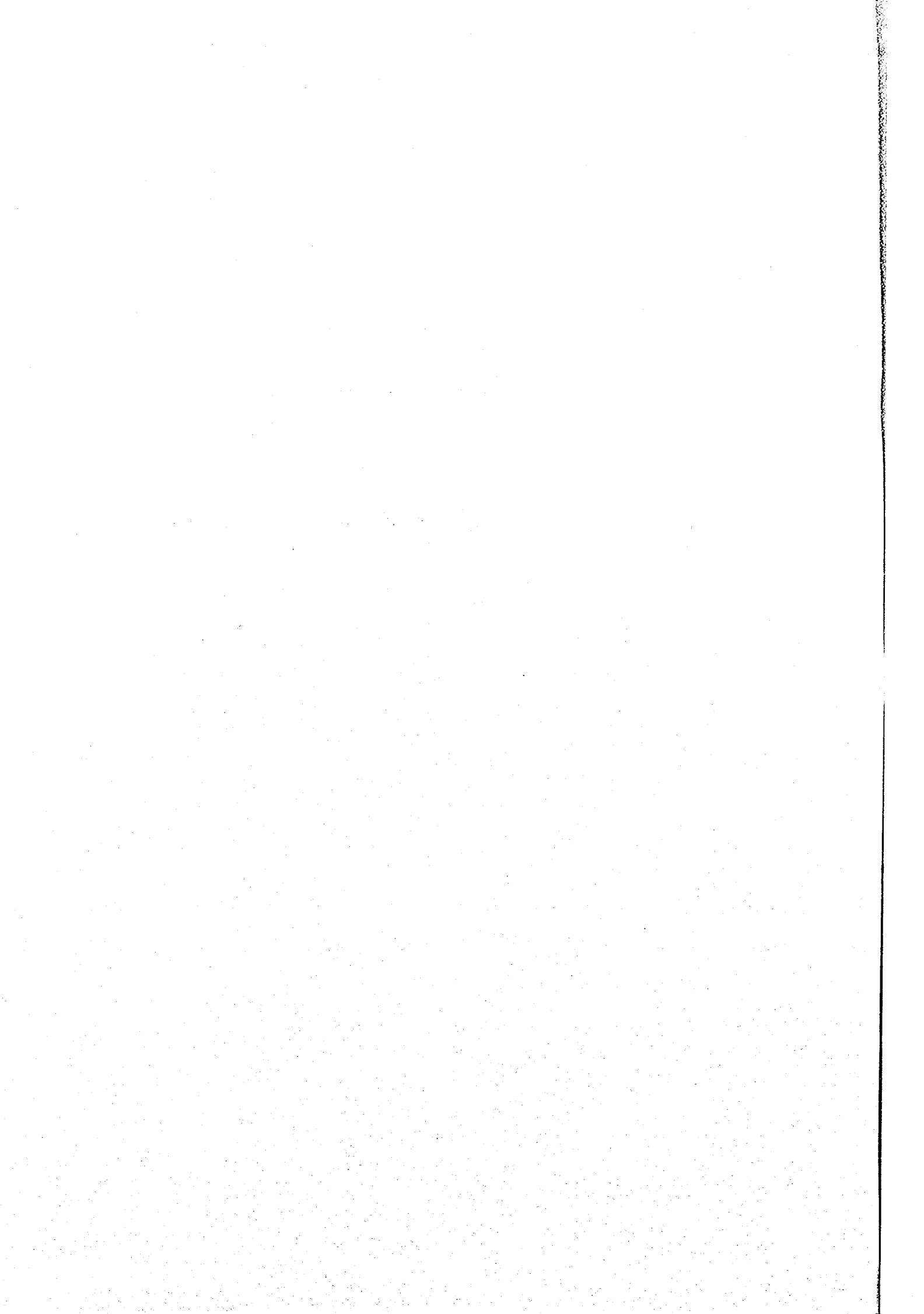
付写真 1-3(3) 供試体No. 3 E側最終損傷状況



付写真 1-3(4) 供試体No. 3 W側最終損傷状況

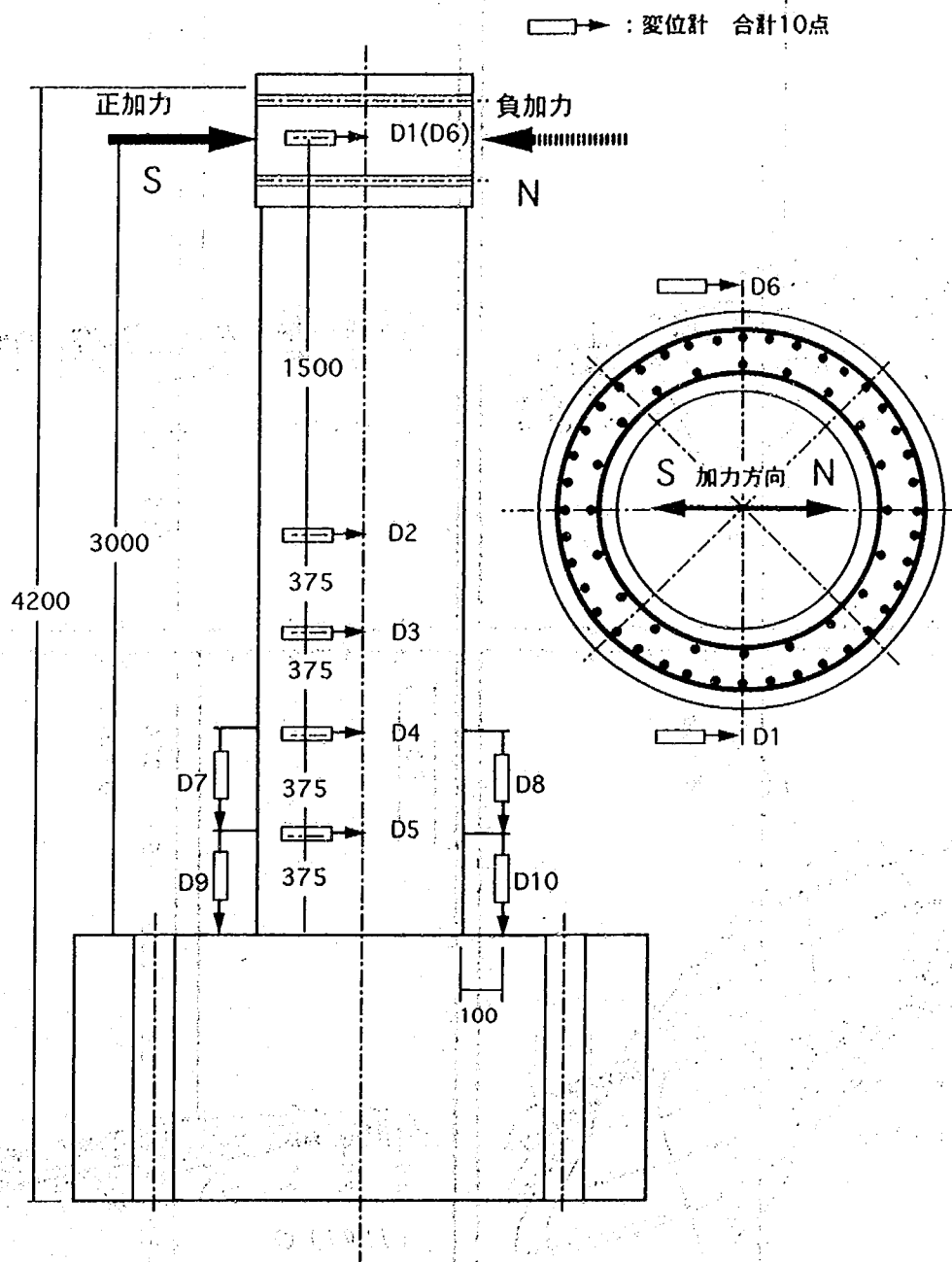
参 考 資 料

II. 荷重、変位、履歴減衰定数及び吸収エネルギー

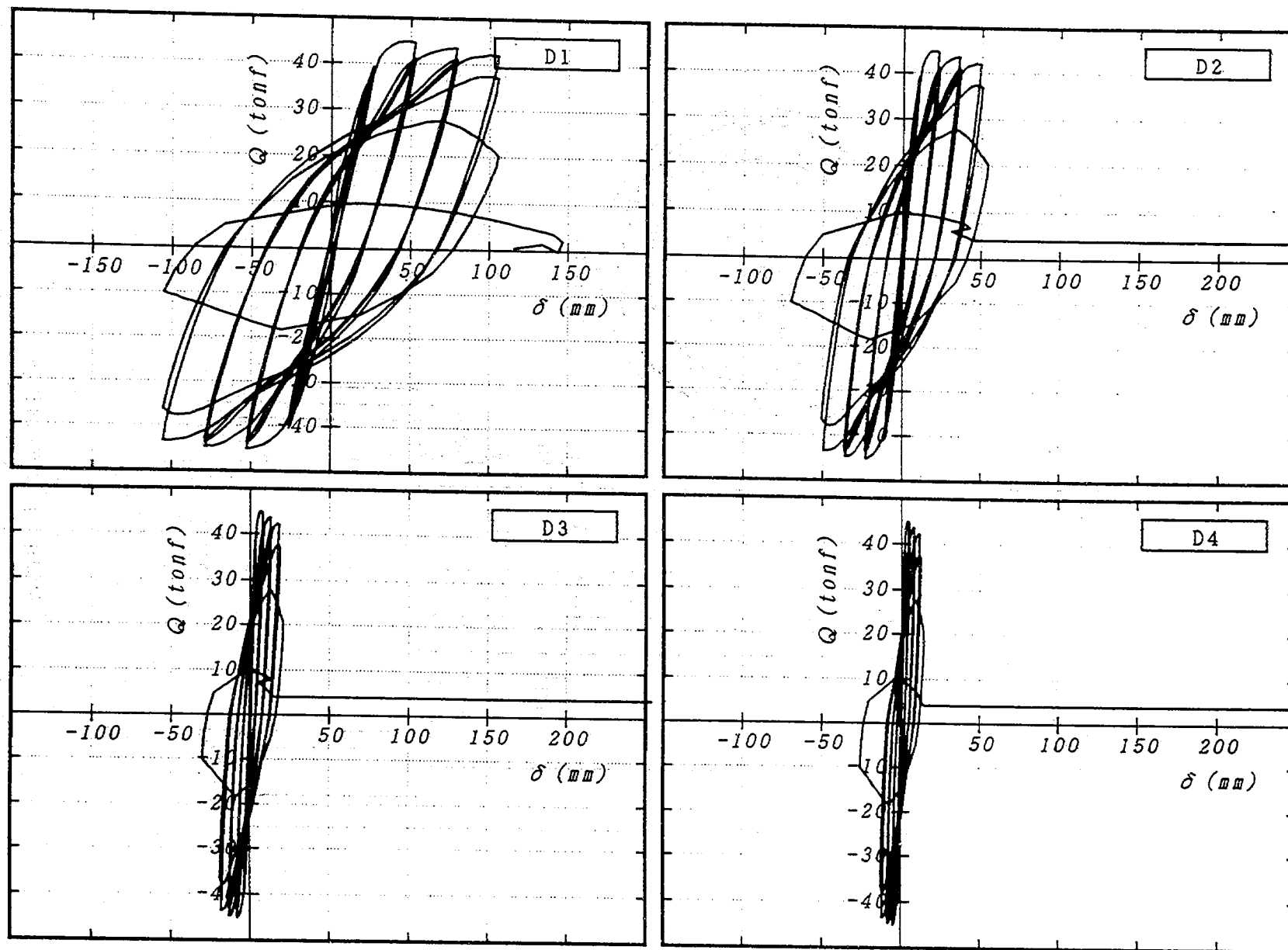


SI単位系への換算率表

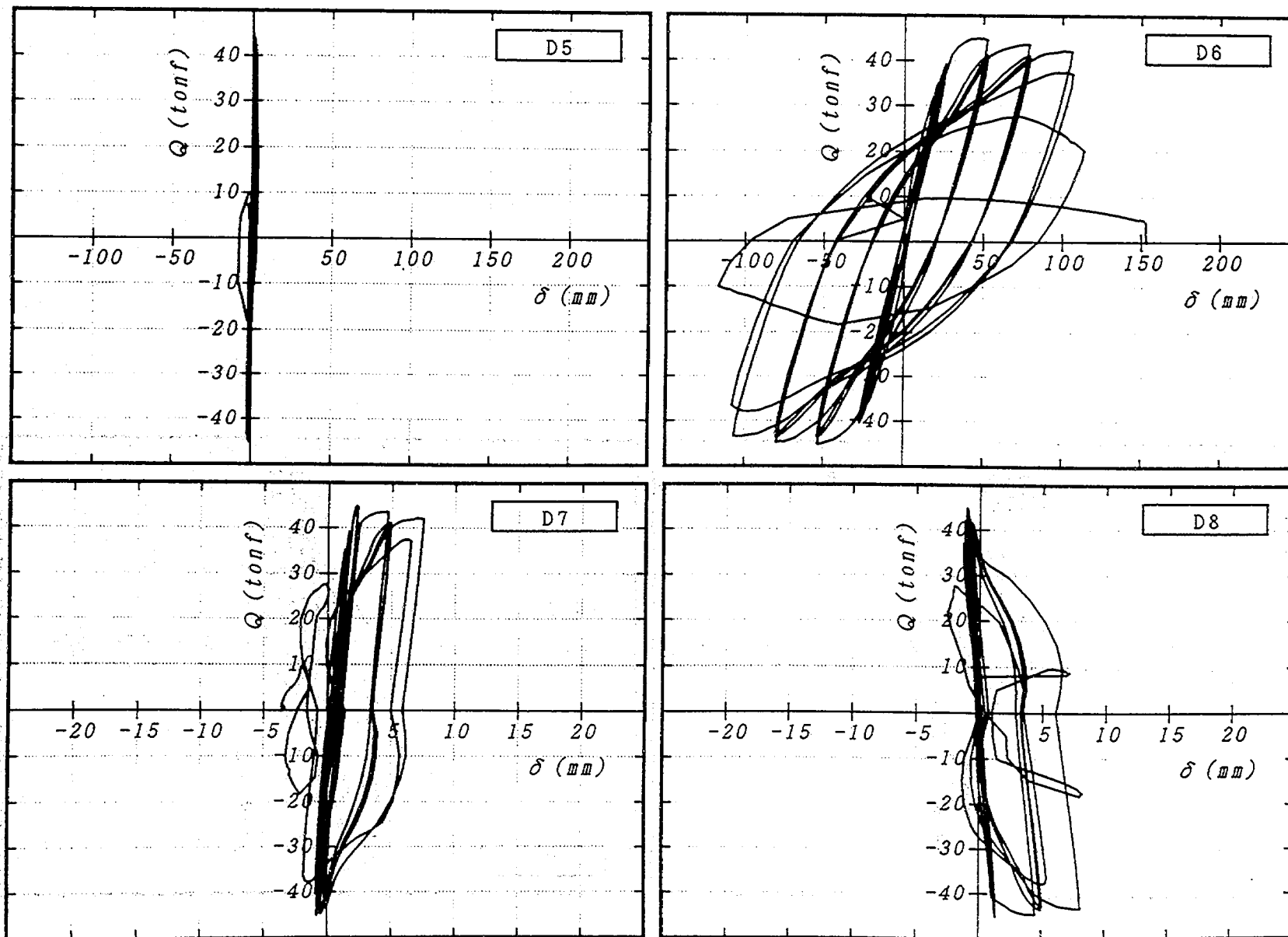
	SI単位以外		SI単位		SI単位への 換算率
	名 称	記 号	名 称	記 号	
力	重量トン	tf	キロ ニュートン	kN	9.80665×10^{-2}
エネルギー	重量トン ×ミメトル	tf・mm	キロニュートン ×ミメトル	kN・mm	9.80665×10^{-2}



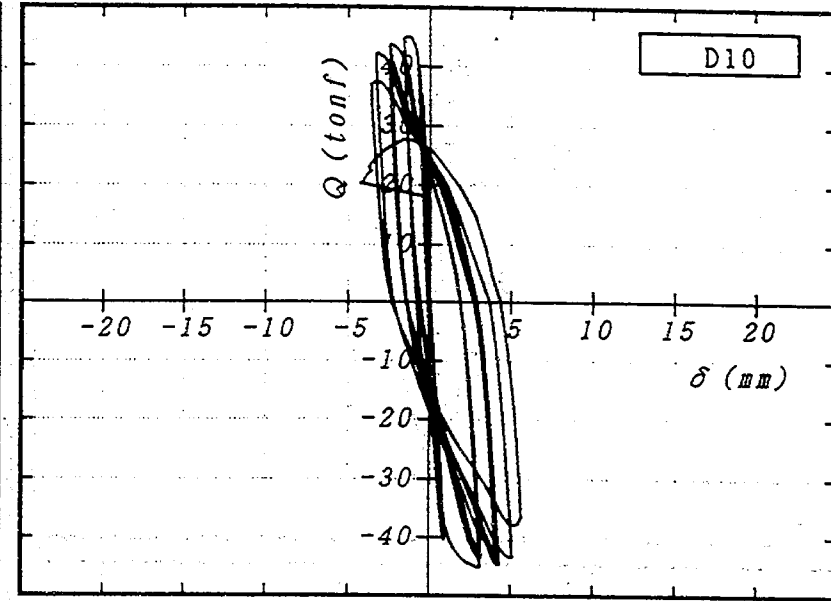
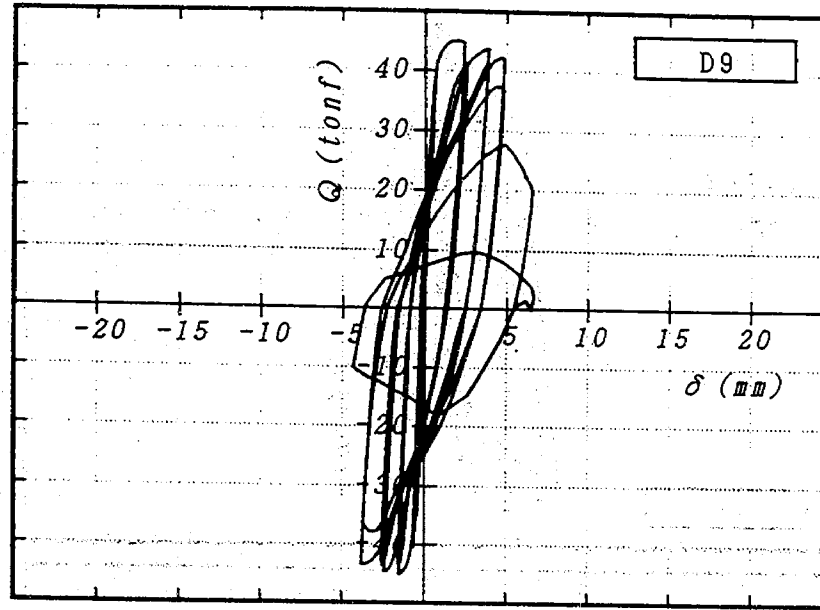
付図Ⅱ-1 変位計測位置



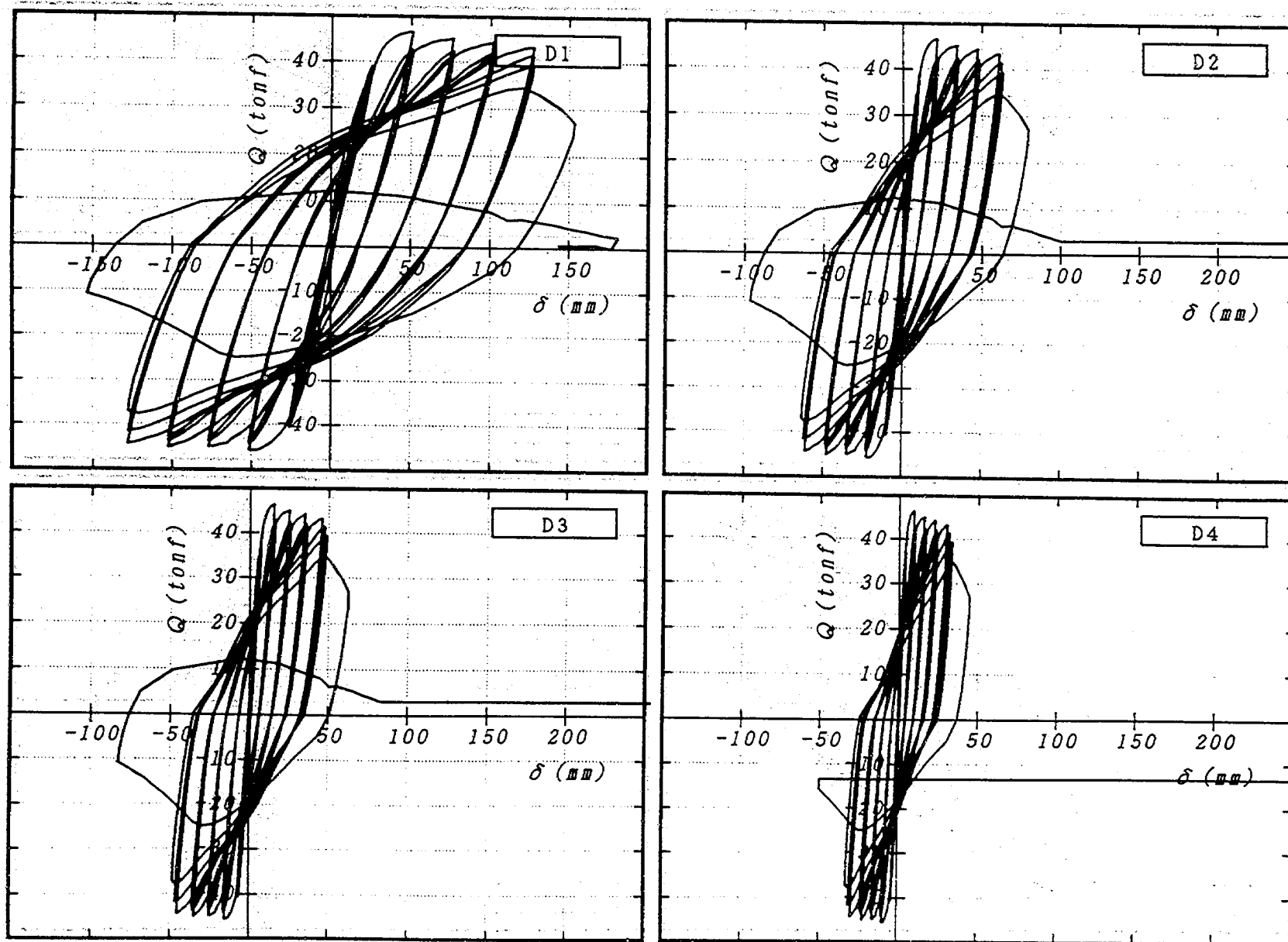
付図II-2(1) 供試体No. 1 水平力--水平変位履歴曲線D1~D4



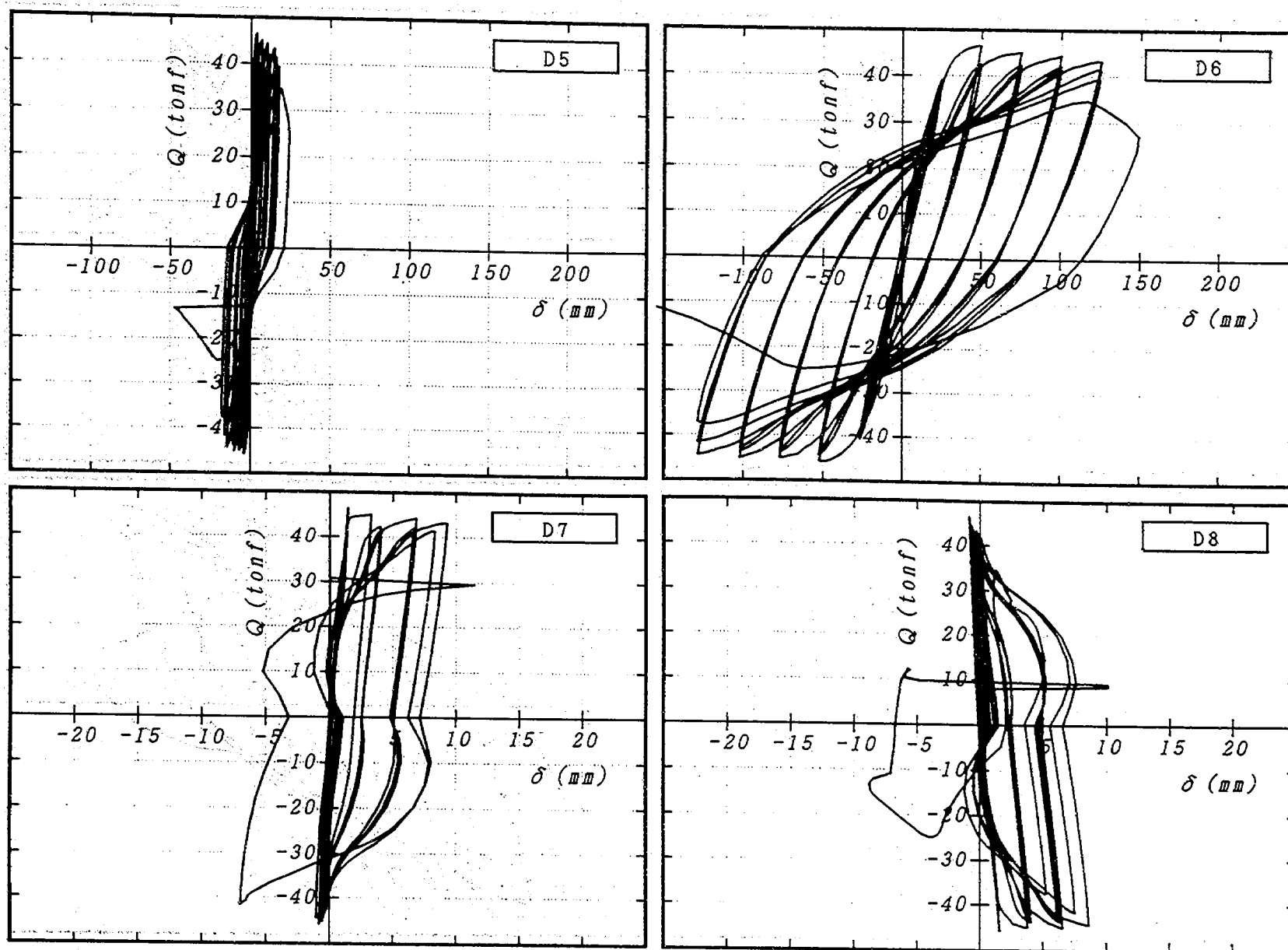
付図II-2(2) 供試体No. 1 水平力-水平変位履歴曲線D5~D8



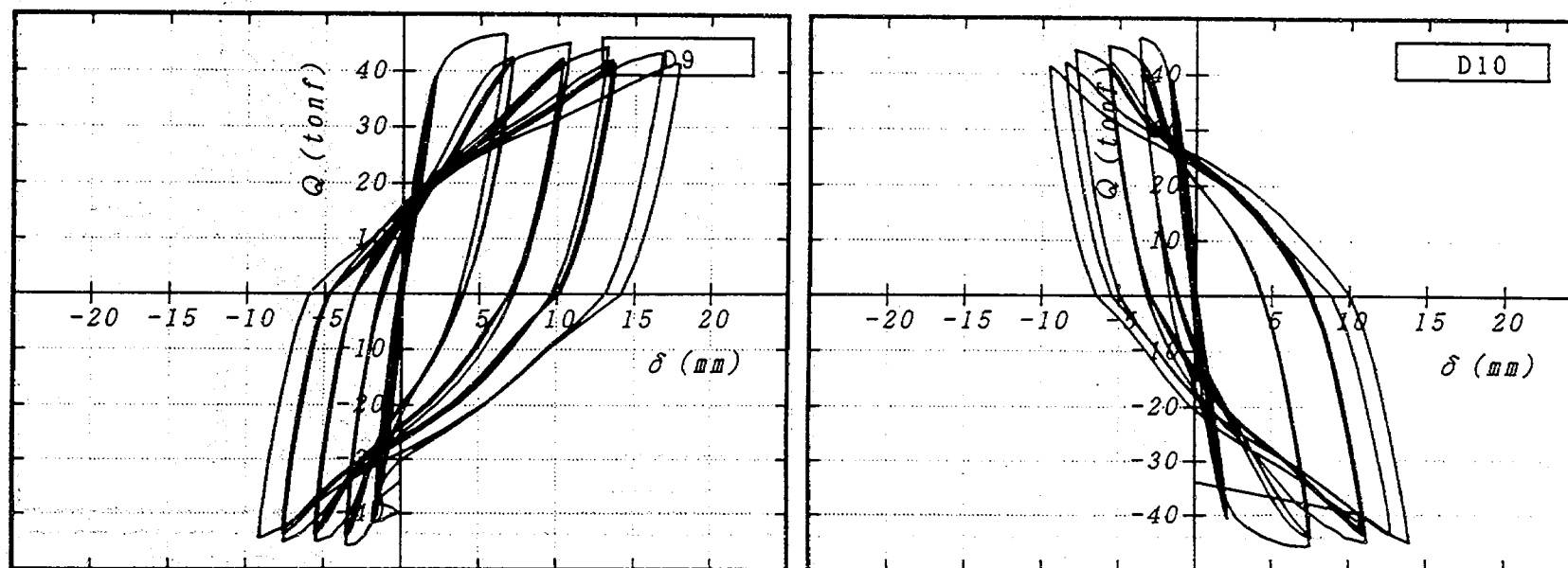
付図II-2(3) 供試体No. 1 水平力-水平変位履歴曲線D9~D10



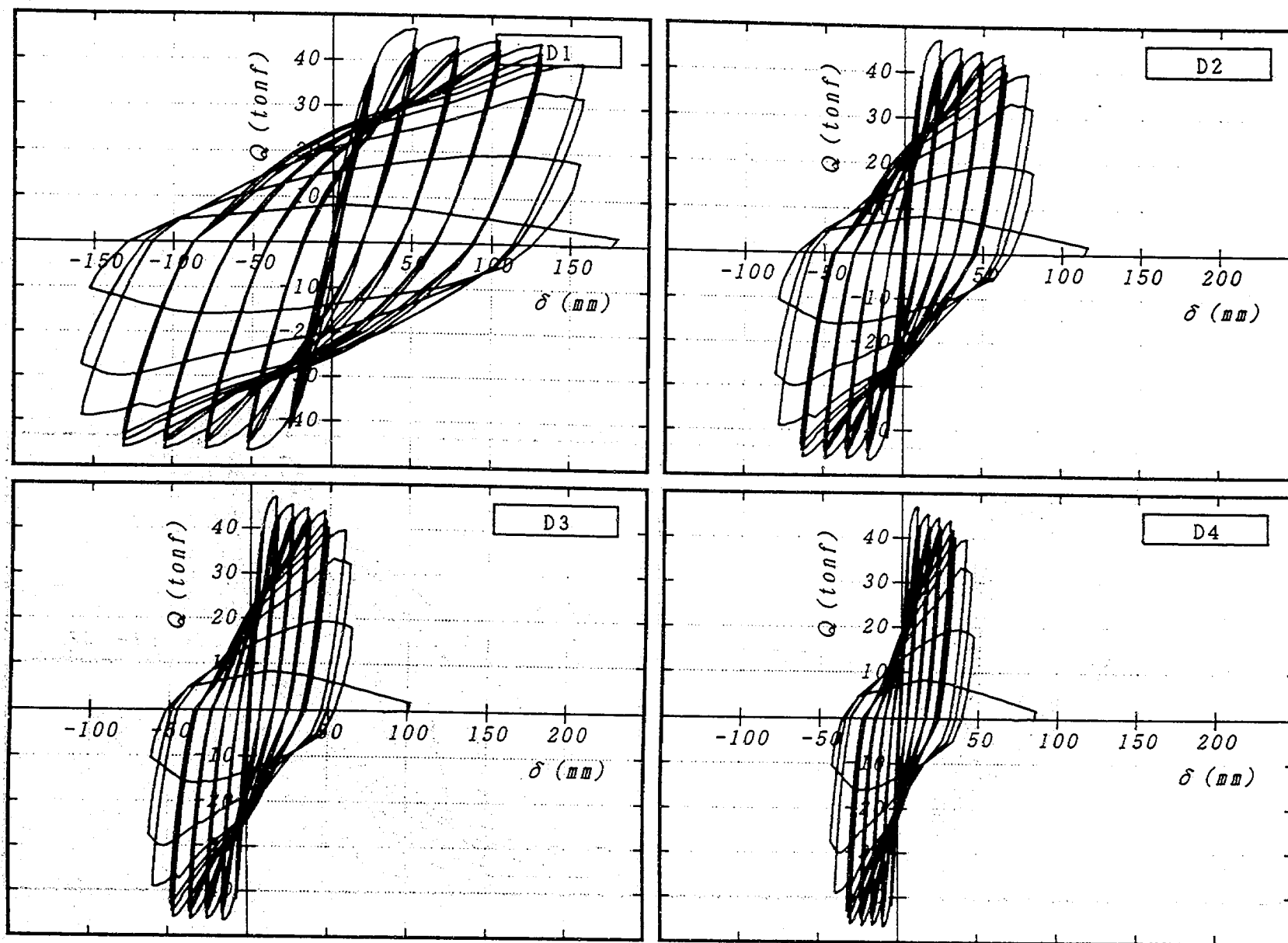
付図 II - 3(1) 供試体 No. 2 水平力 - 水平変位履歴曲線 D1 ~ D4



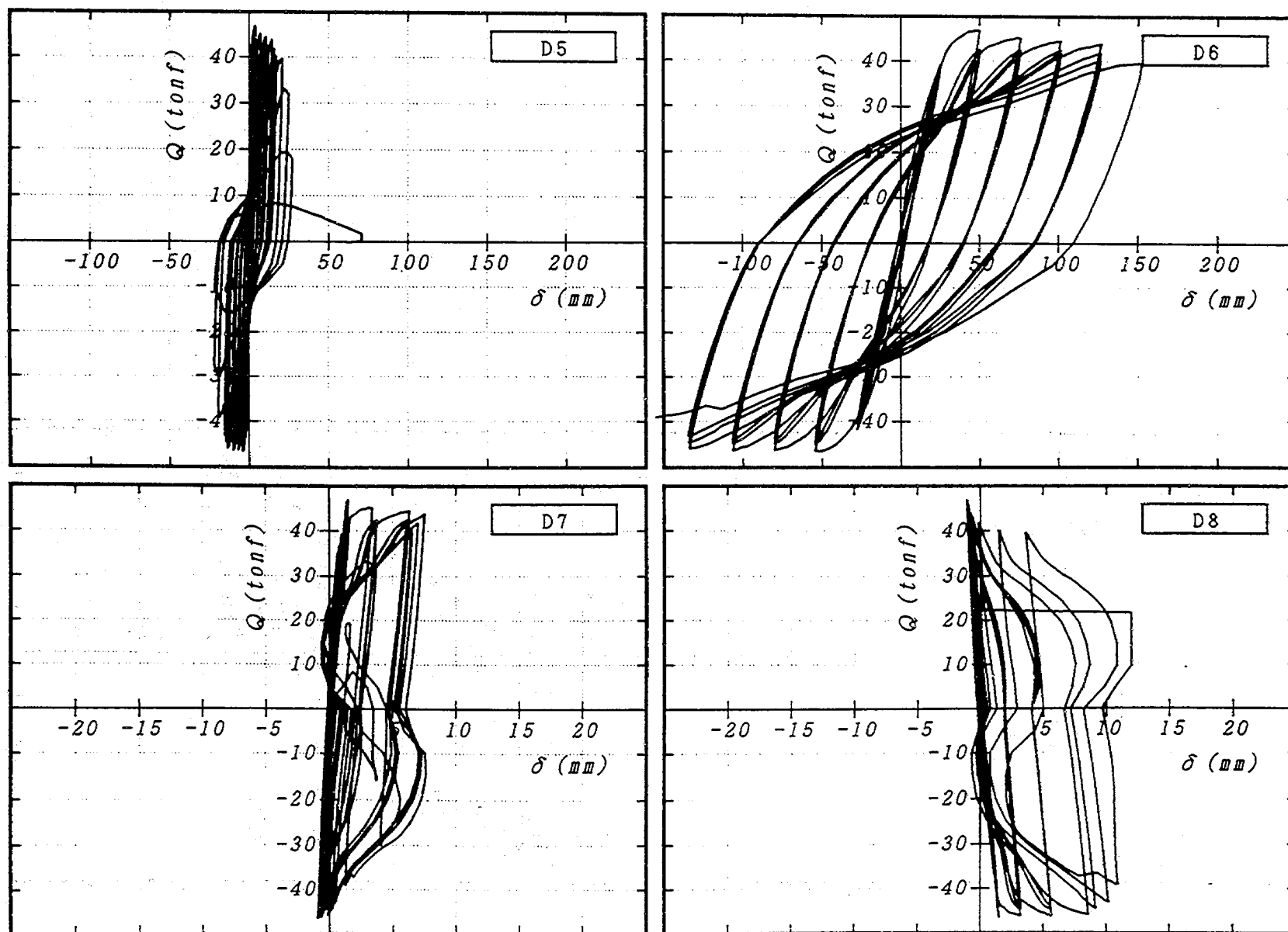
付図II-3(2) 供試体No. 2 水平力-水平変位履歴曲線D5~D8



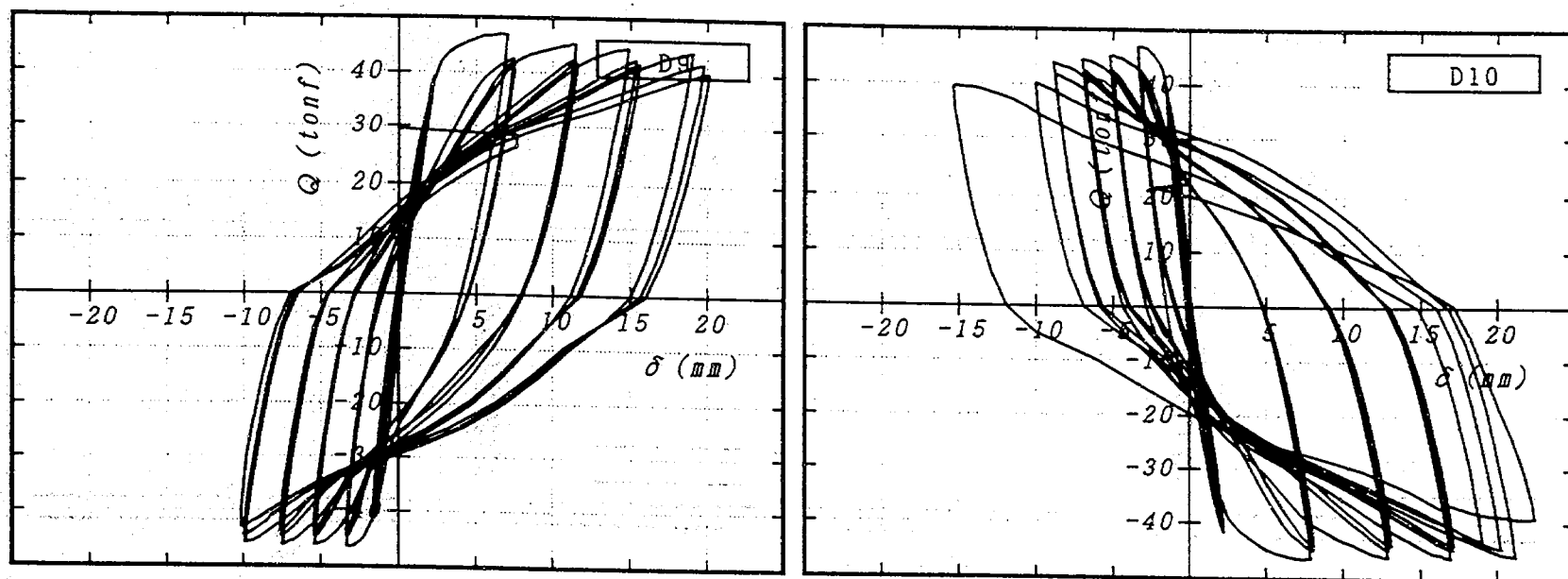
付図 II-3(3) 供試体 No. 2 水平力-水平変位履歴曲線 D9~D10



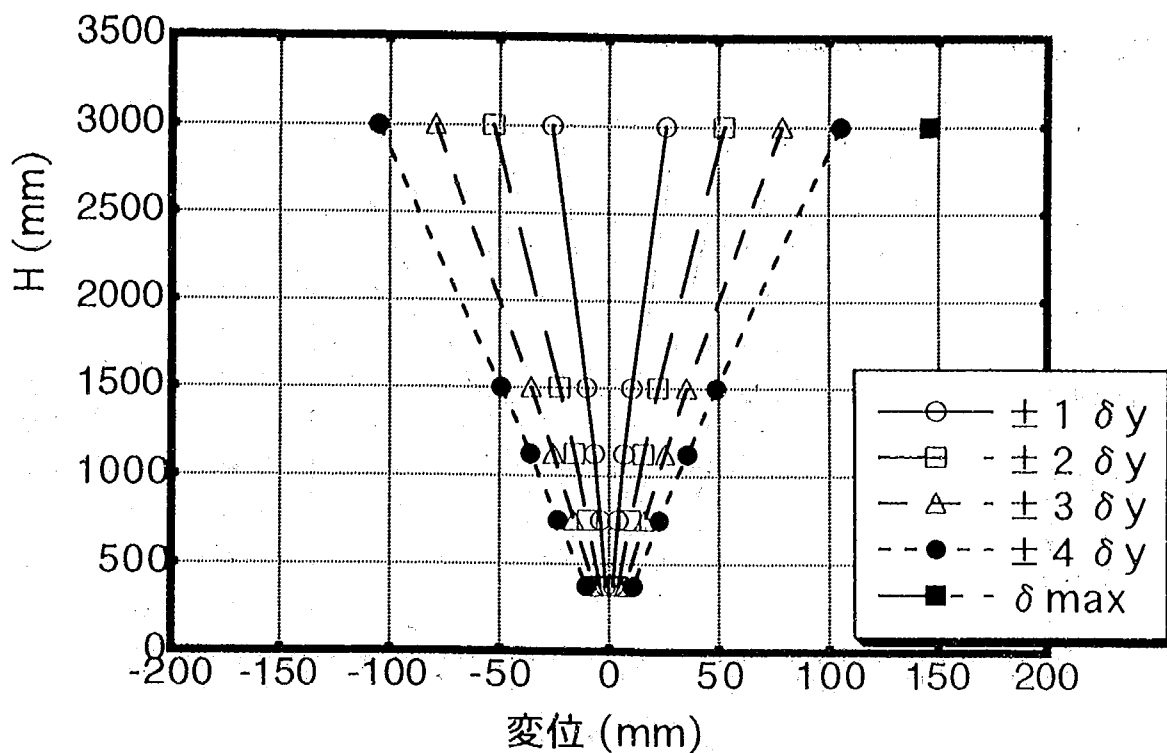
付図II-4(1) 供試体No. 3 水平力—水平変位履歴曲線D1~D4



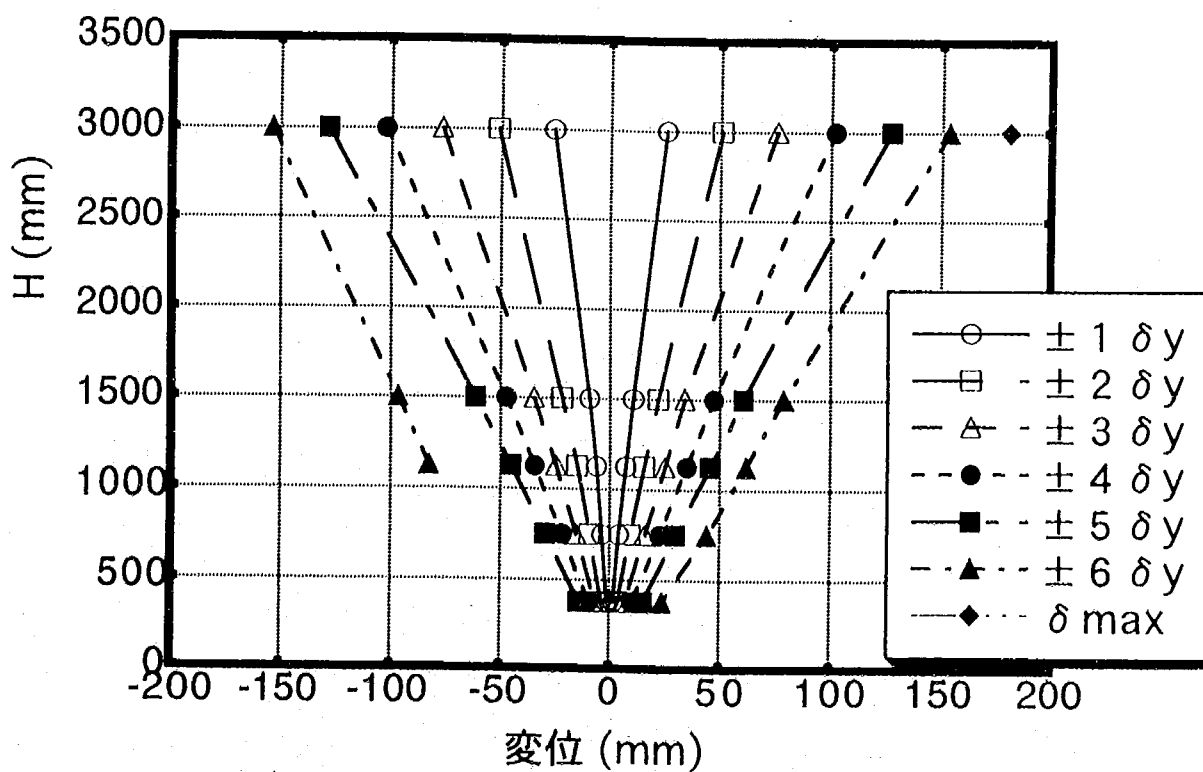
付図II-4(2) 供試体No. 3 水平力-水平変位履歴曲線D5~D8



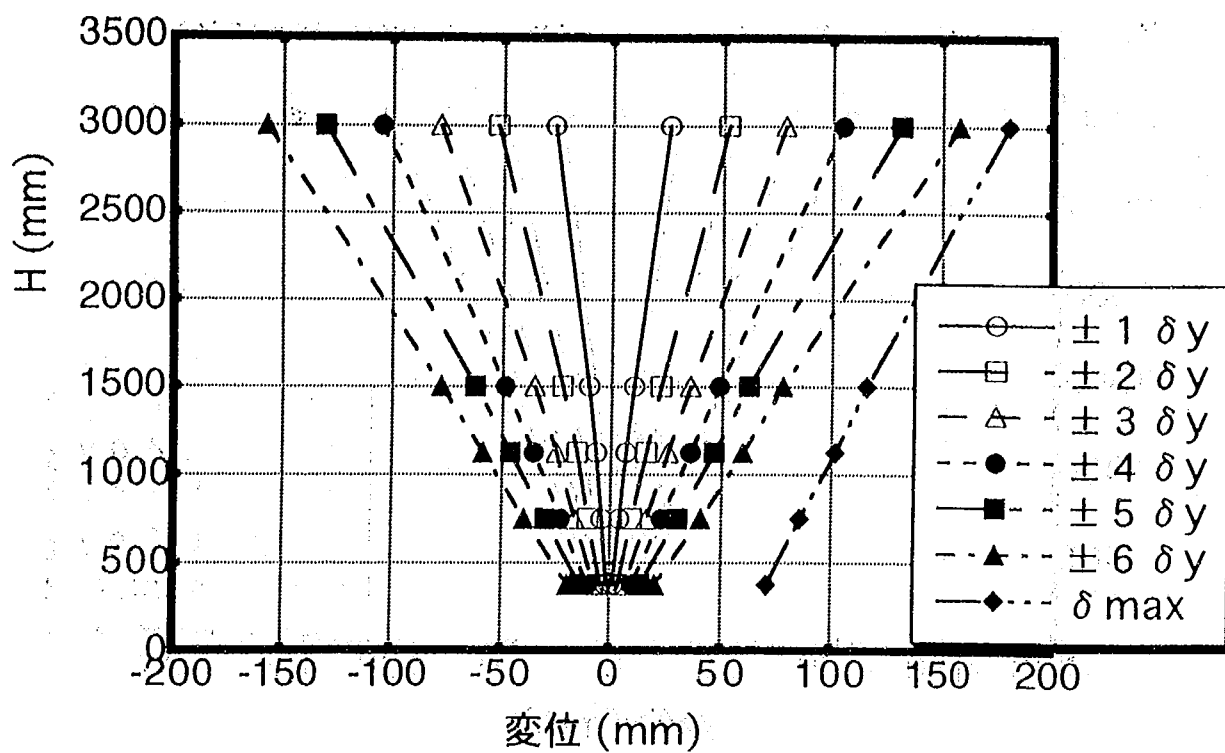
付図II-4(3) 供試体No. 3 水平力-水平変位履歴曲線D9~D10



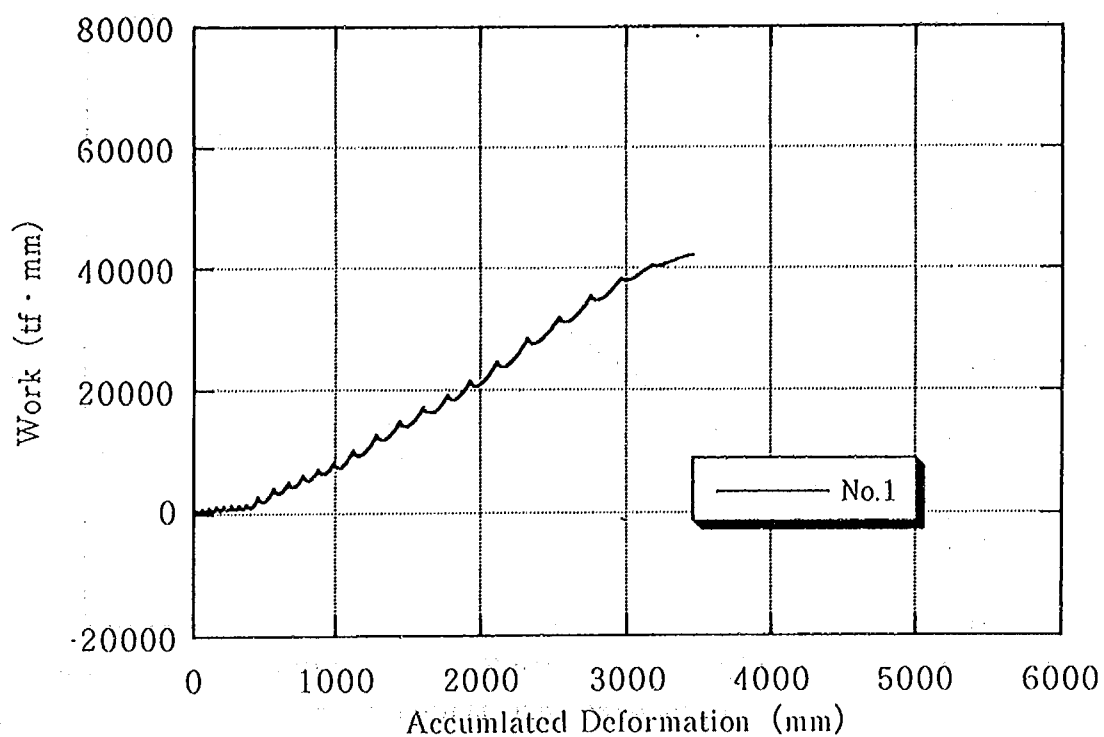
付図 II - 5(1) 供試体 No. 1 変位分布図



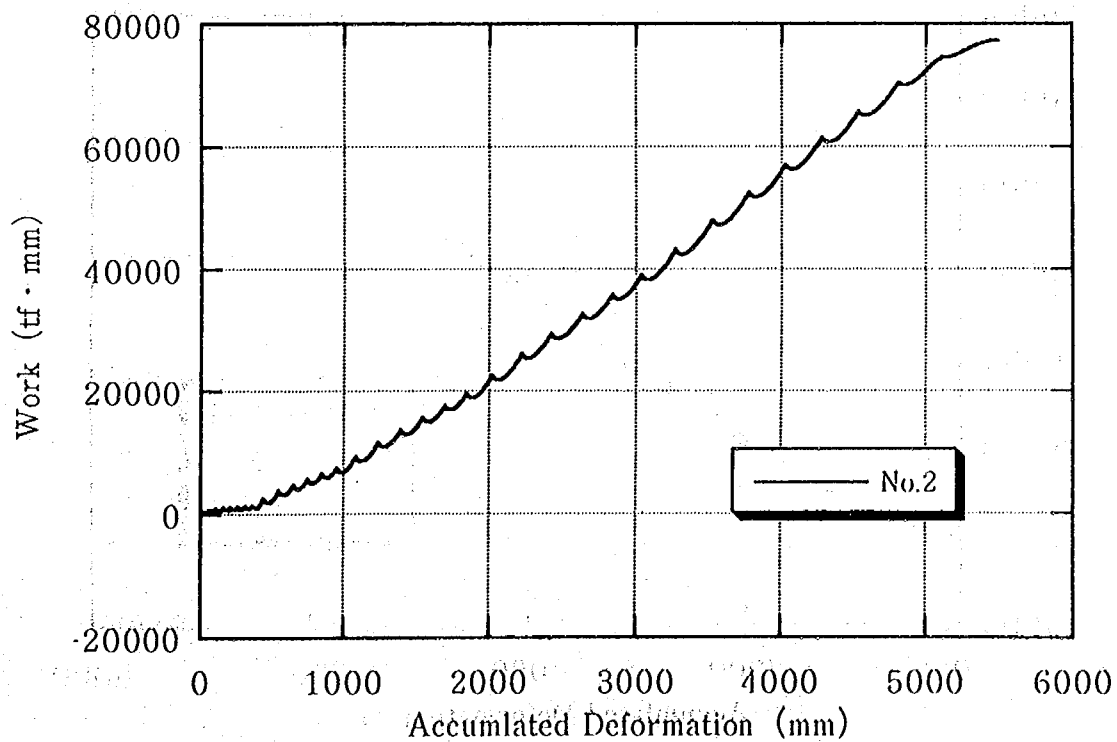
付図 II - 5(2) 供試体 No. 2 変位分布図



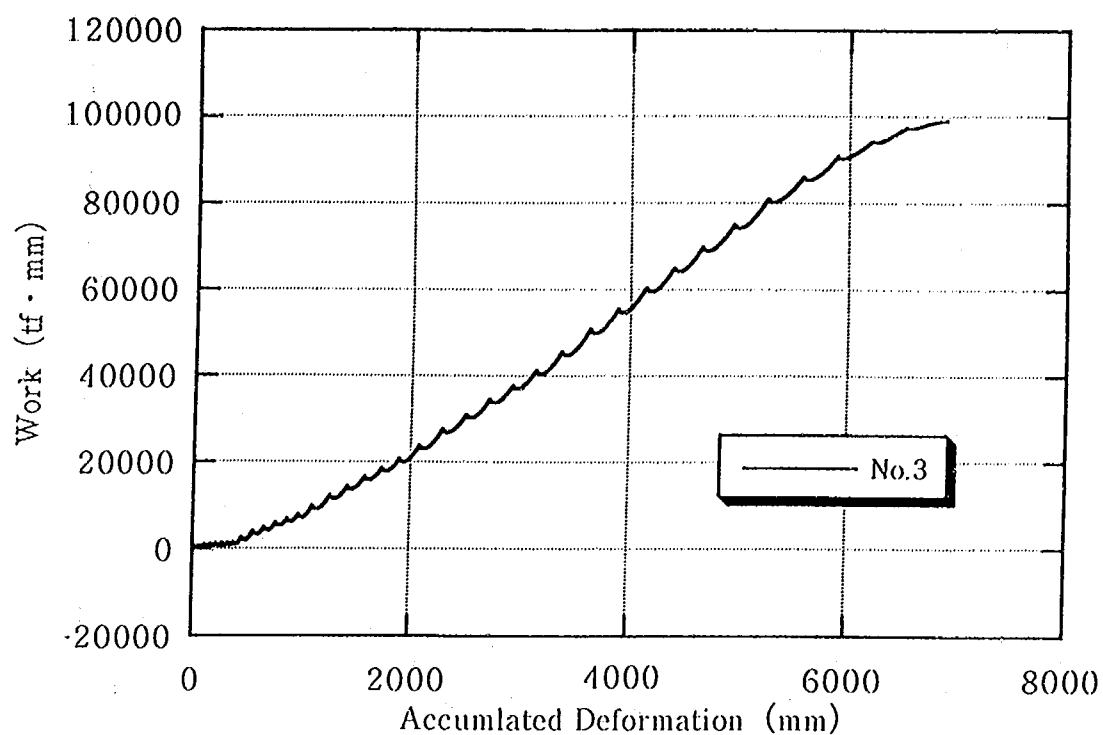
付図II-5(3) 供試体No. 3変位分布図



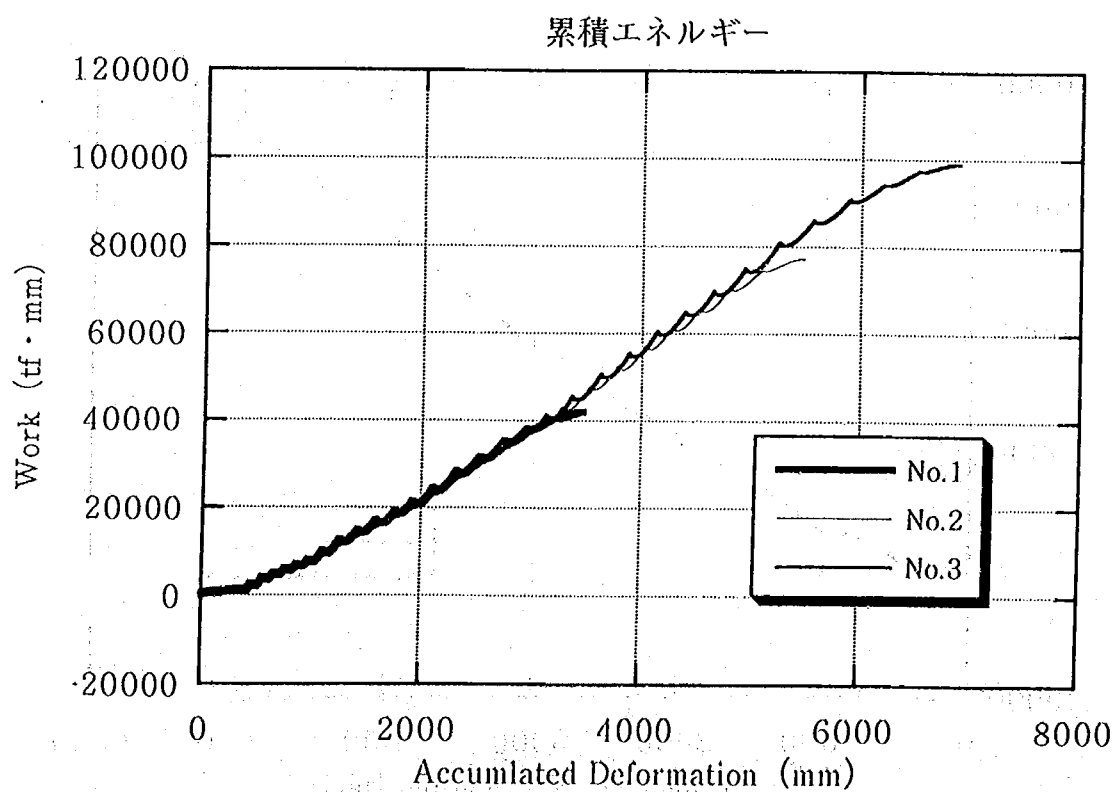
付図II-6(1) 供試体No. 1 累積吸収エネルギー



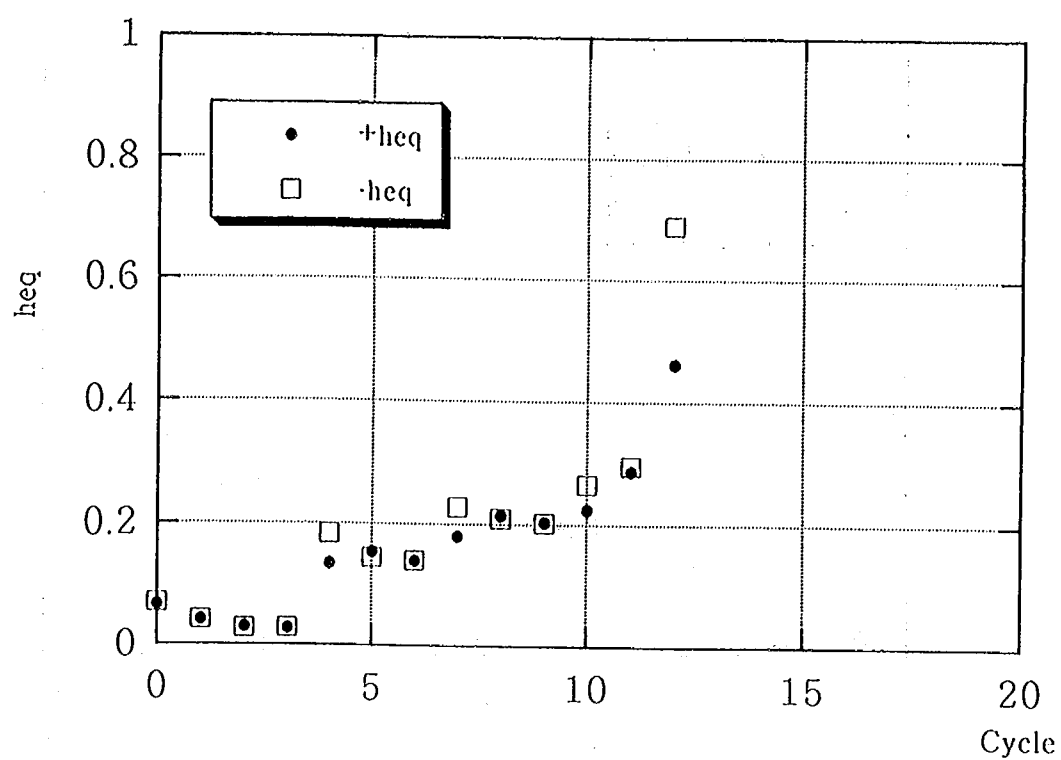
付図II-6(2) 供試体No. 2 累積吸収エネルギー



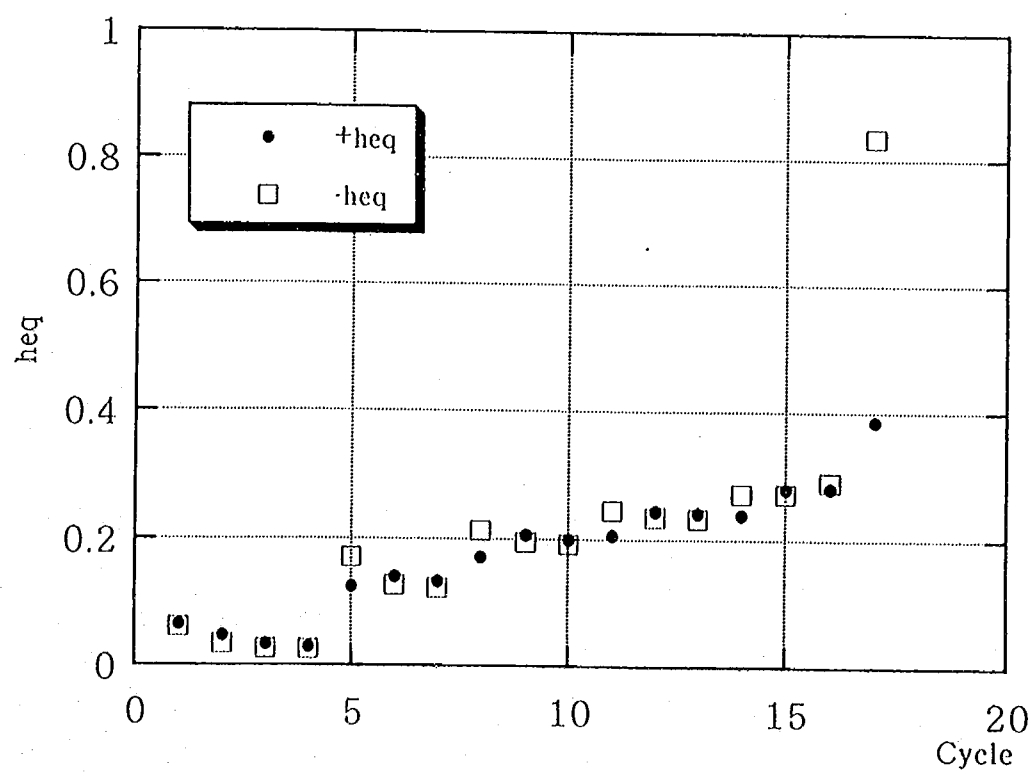
付図II-6(3) 供試体No. 3 累積吸収エネルギー



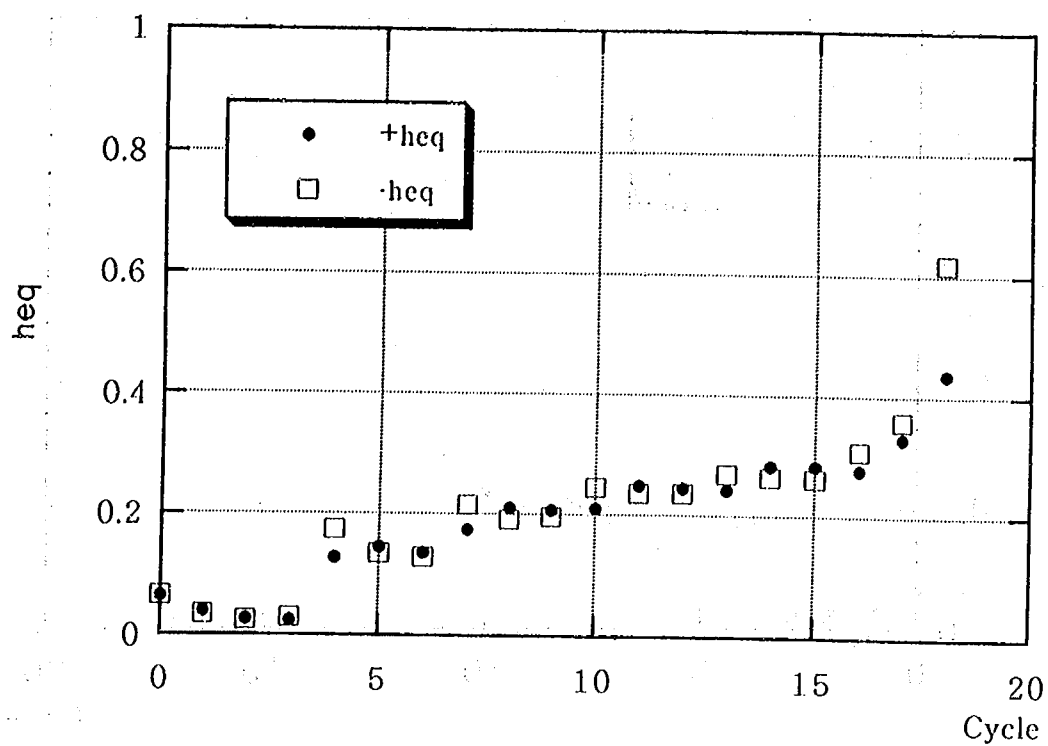
付図II-6(4) 供試体間の累積吸収エネルギーの比較



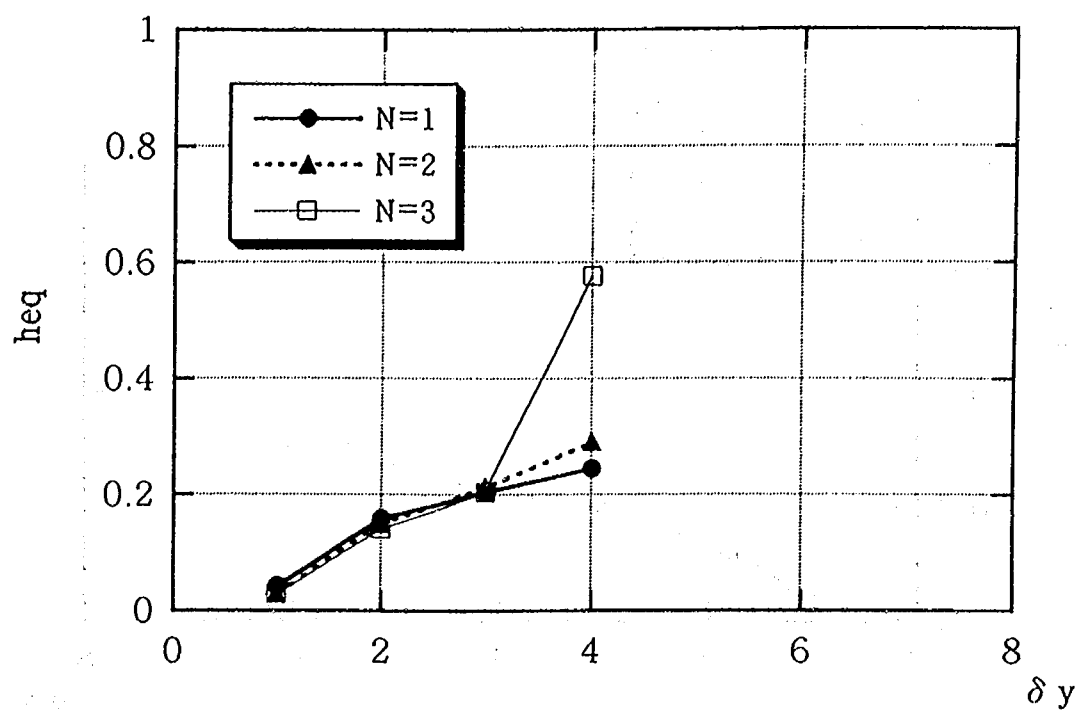
付図Ⅱ-7(1) 供試体No. 1等価粘性減衰定数



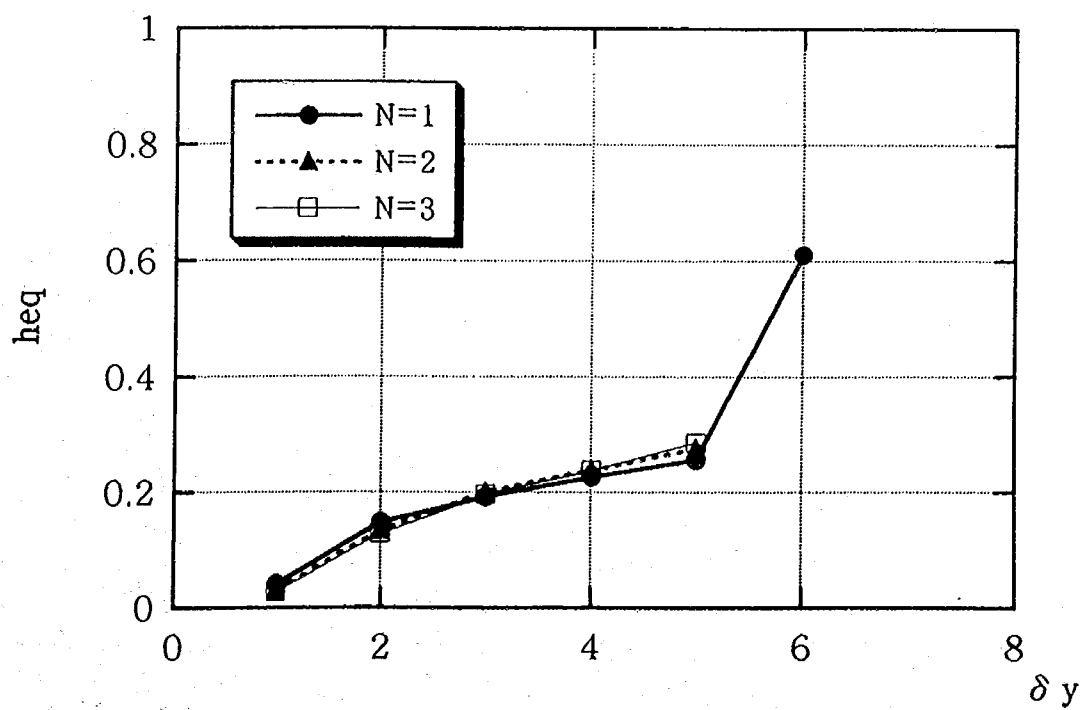
付図Ⅱ-7(2) 供試体No. 2等価粘性減衰定数



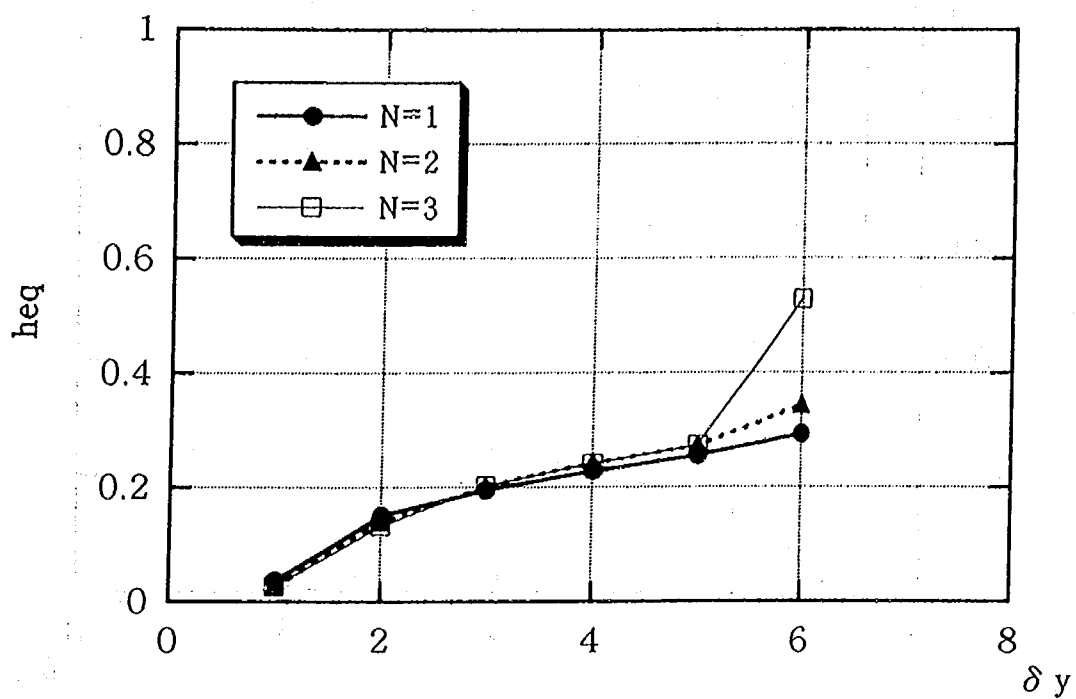
付図II-7(3) 供試体No. 3 等価粘性減衰定数



付図II-8(1) 供試体No. 1 等価粘性減衰定数サイクル間の比較



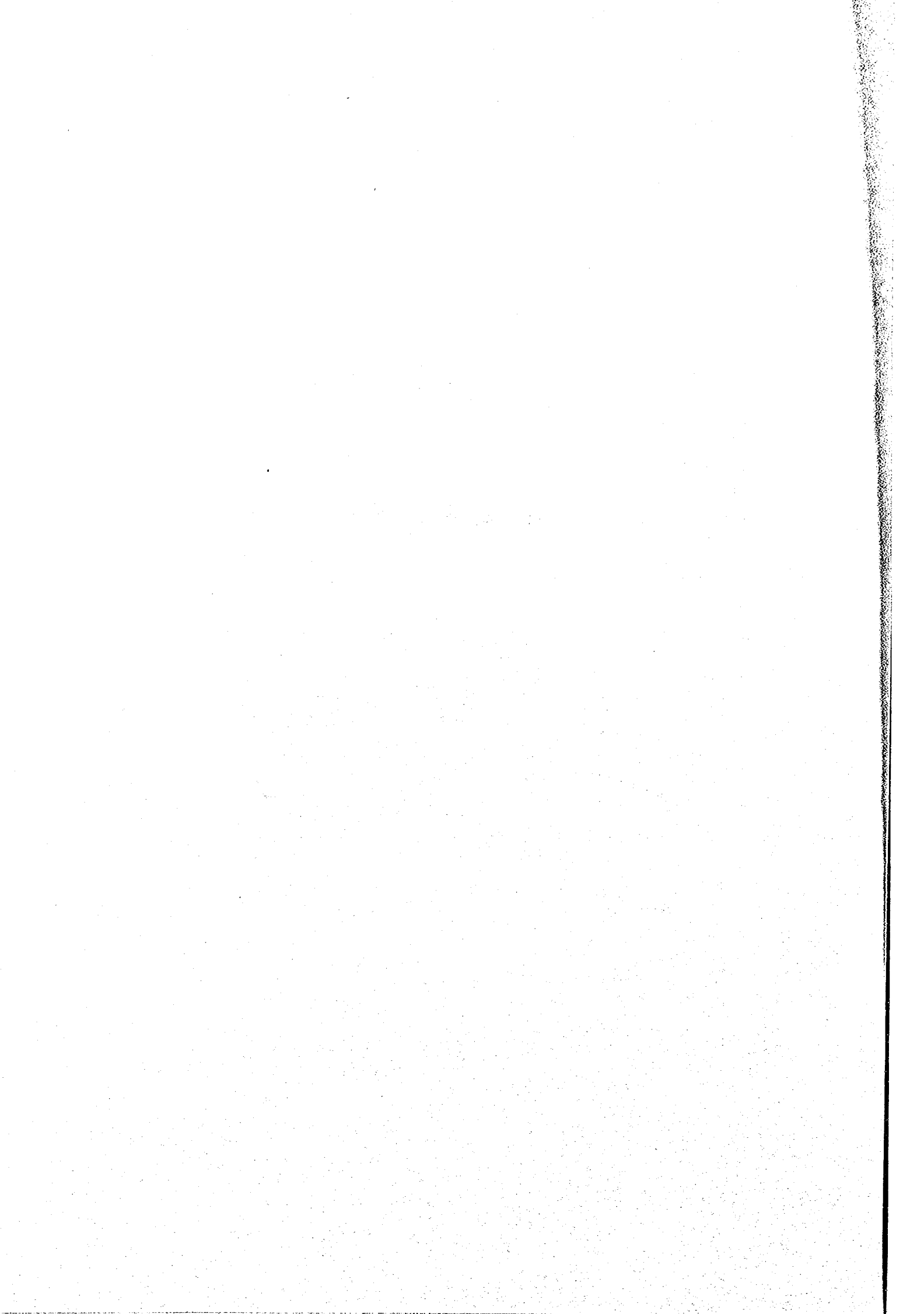
付図II-8(2) 供試体No. 2 等価粘性減衰定数サイクル間の比較



付図II-8(3) 供試体No. 3 等価粘性減衰定数サイクル間の比較

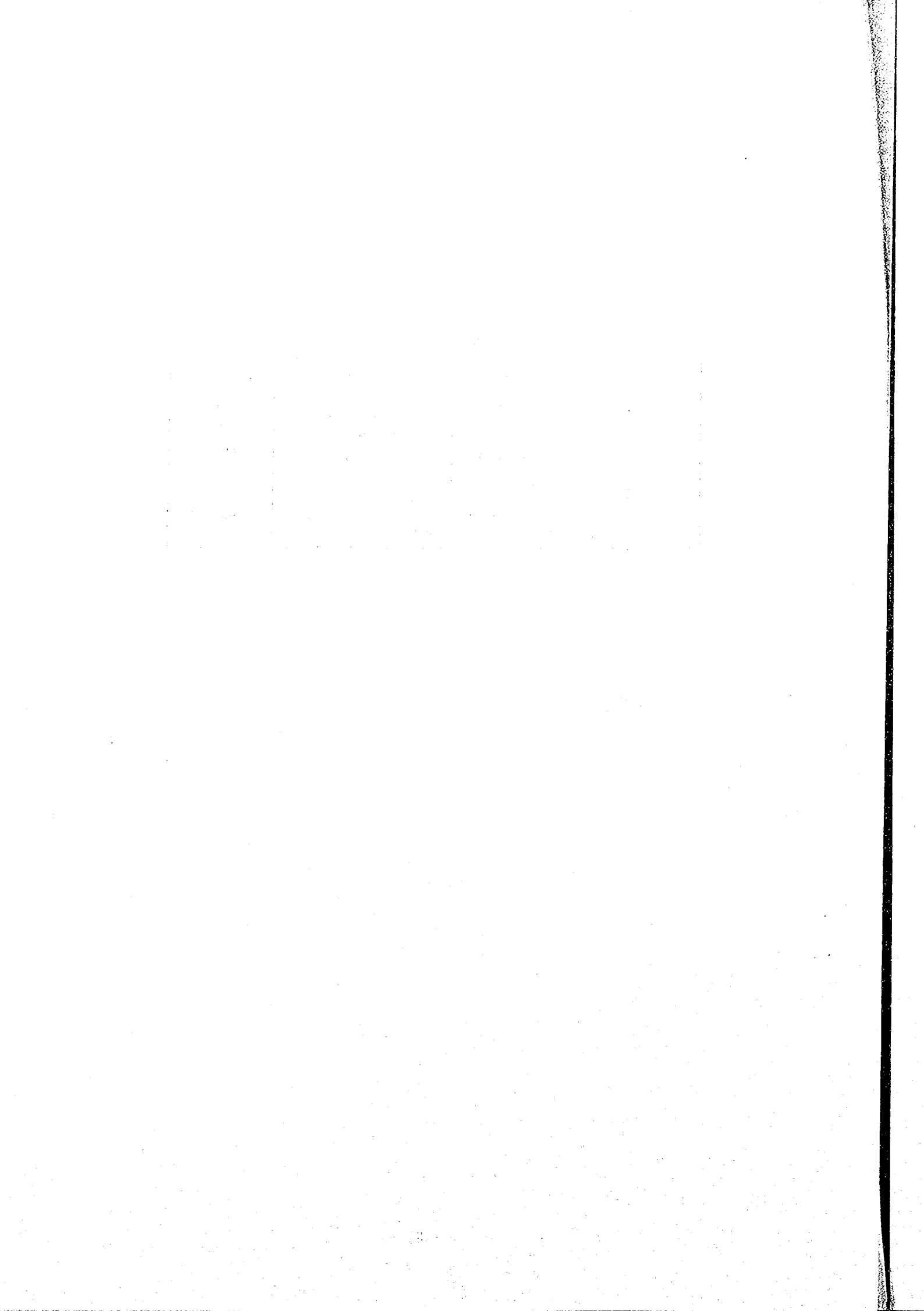
参 考 資 料

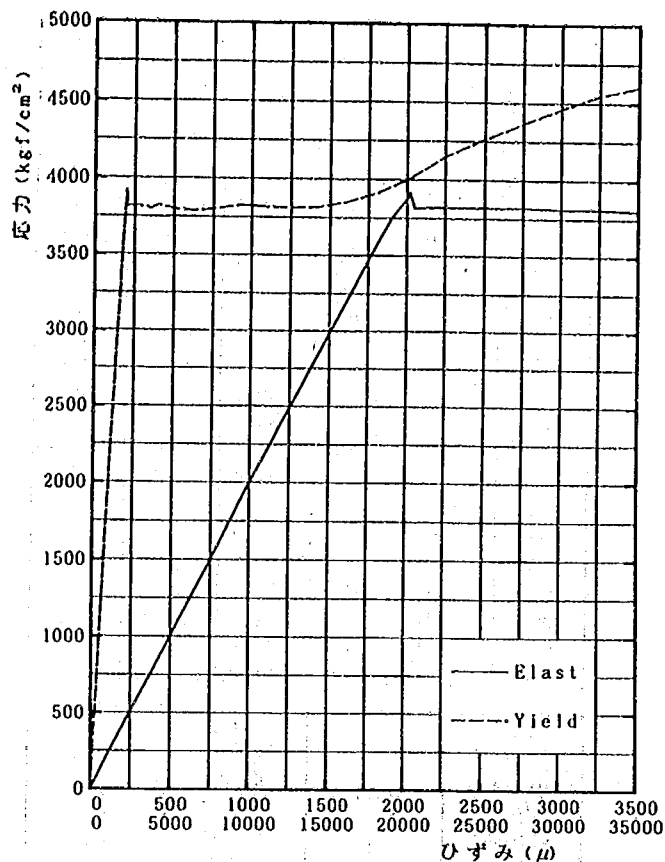
Ⅲ. 材料試験データ



SI単位系への換算率表

	SI単位以外		SI単位		SI単位への 換算率
	名 称	記 号	名 称	記 号	
応 力	重量kgf/cm ² 毎 平方センチメートル	kgf/cm ²	ニュートン毎 平方ミリメートル	N/mm ²	9.80665×10^{-2}
弾性係数	重量kgf/cm ² 毎 平方センチメートル	kgf/cm ²	ニュートン毎 平方ミリメートル	N/mm ²	9.80665×10^{-2}





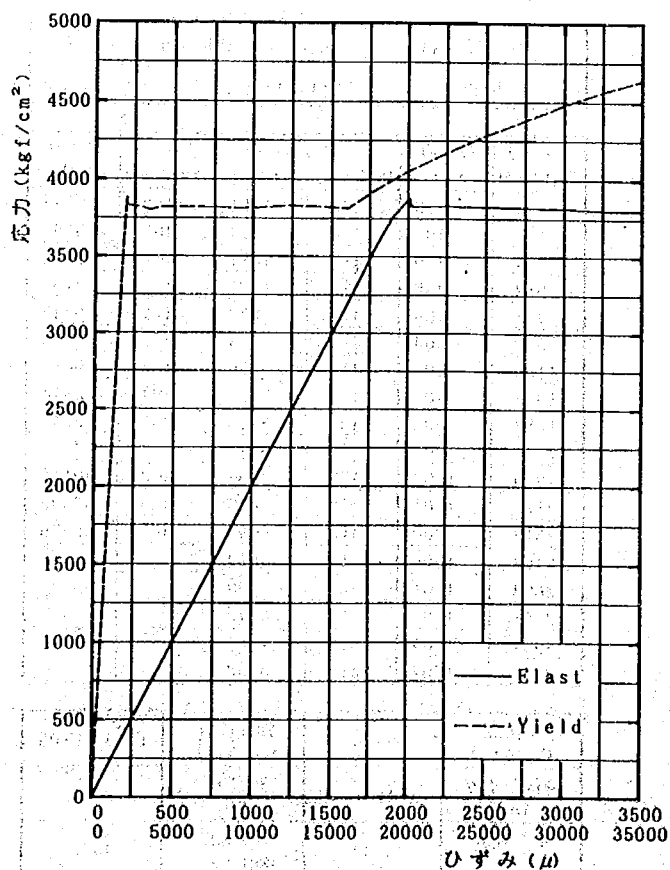
応力-ひずみ曲線

付図Ⅲ-1(1) 鉄筋の応力-ひずみ曲線 (D16-1)

シリーズ NO	試験日	破断位置	備考
D16-1	95/11/11	A	

応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)
0	0	3560	1801	3827	9157
207	101	3749	1901	3823	10235
404	200	3878	2000	3815	12276
608	300	3918	2020	3817	14223
800	400	3818	2048	3854	16134
1008	502	3820	2205	3913	18045
1205	600	3820	2505	4000	20010
1406	700	3823	2773	4152	22543
1605	801	3813	3009	4267	25055
1804	902	3813	3201	4371	27547
2000	1001	3803	3503	4465	30053
2200	1103	3817	3767	4549	32554
2397	1201	3827	4029	4605	35124
2593	1302	3812	4570		
2790	1400	3798	5137		
2988	1502	3790	6228		
3177	1601	3797	7182		
3374	1701	3812	8141		

降伏点 (kgf/cm²)	3818	弾性係数 (kgf/cm²)	2.00 *E+06
降伏ひずみ (μ)	2048	伸び率 (%)	24.9
引張強度 (kgf/cm²)	5716	破断強度 (kgf/cm²)	5137



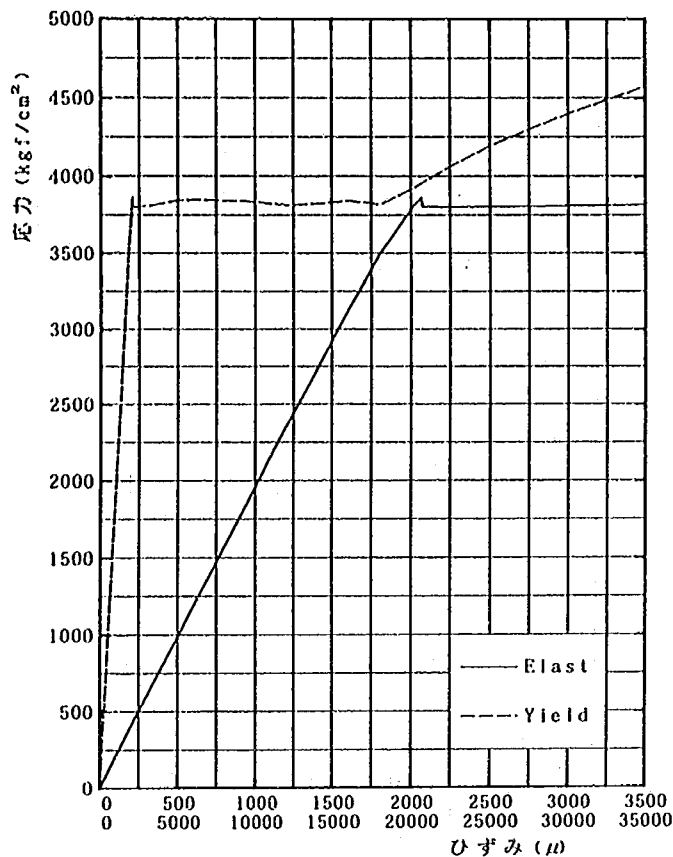
応力-ひずみ曲線

付図Ⅲ-1(2) 鉄筋の応力-ひずみ曲線 (D16-2)

シリーズ NO	試験日	破断位置	備考
D16-2	95/11/11	A	

応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)
0	0	3581	1801	3816	9171
201	101	3764	1903	3819	10155
401	201	3873	2001	3834	12162
601	300	3880	2012	3826	14115
802	400	3829	2017	3817	16045
1003	501	3831	2266	3941	18032
1202	600	3827	2524	4057	20057
1402	701	3822	2777	4176	22547
1601	801	3818	3016	4287	25060
1799	901	3804	3270	4387	27553
1996	1000	3802	3529	4485	30064
2197	1102	3811	3794	4567	32552
2394	1201	3820	4042	4641	35065
2596	1302	3820	4604		
2791	1401	3822	5122		
2991	1502	3823	6126		
3184	1600	3820	7186		
3382	1700	3818	8210		

降伏点 (kgf/cm²)	3829	弾性係数 (kgf/cm²)	1.99 *E+06
降伏ひずみ (μ)	2017	伸び率 (%)	23.4
引張強度 (kgf/cm²)	5736	破断強度 (kgf/cm²)	5187



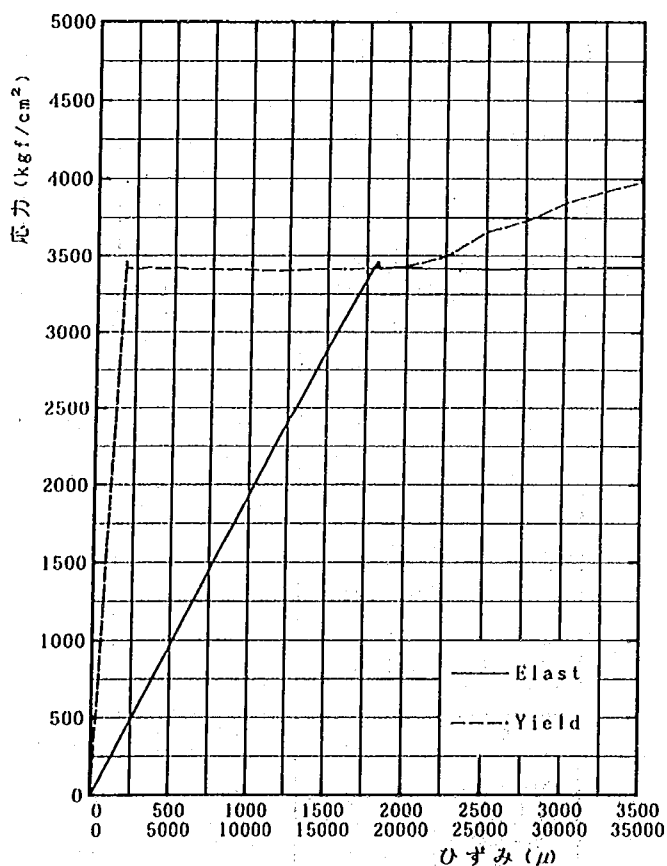
応力-ひずみ曲線

付図Ⅲ-1(3) 鉄筋の応力-ひずみ曲線 (D16-3)

シリーズ NO	試験日	破断位置	備考
D16-3	95/11/11	A	

応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)
0	0	3493	1801	3834	9993
210	101	3807	2013	3814	12066
403	200	3862	2088	3825	14237
600	301	3805	2074	3844	16068
796	400	3803	2261	3819	18027
994	503	3805	2550	3916	20005
1186	600	3807	2781	4062	22515
1382	703	3812	3051	4195	25033
1575	801	3815	3312	4301	27535
1768	902	3819	3575	4399	30021
1960	1001	3823	3820	4489	32580
2155	1102	3826	3983	4574	35066
2346	1201	3838	4570		
2537	1301	3845	5096		
2730	1401	3849	6197		
2922	1502	3848	7157		
3114	1601	3844	8112		
3304	1702	3843	9155		

降伏点 (kgf/cm²)	3805	弾性係数 (kgf/cm²)	1.96 *E+06
降伏ひずみ (μ)	2074	伸び率 (%)	21.9
引張強度 (kgf/cm²)	5716	破断強度 (kgf/cm²)	5087



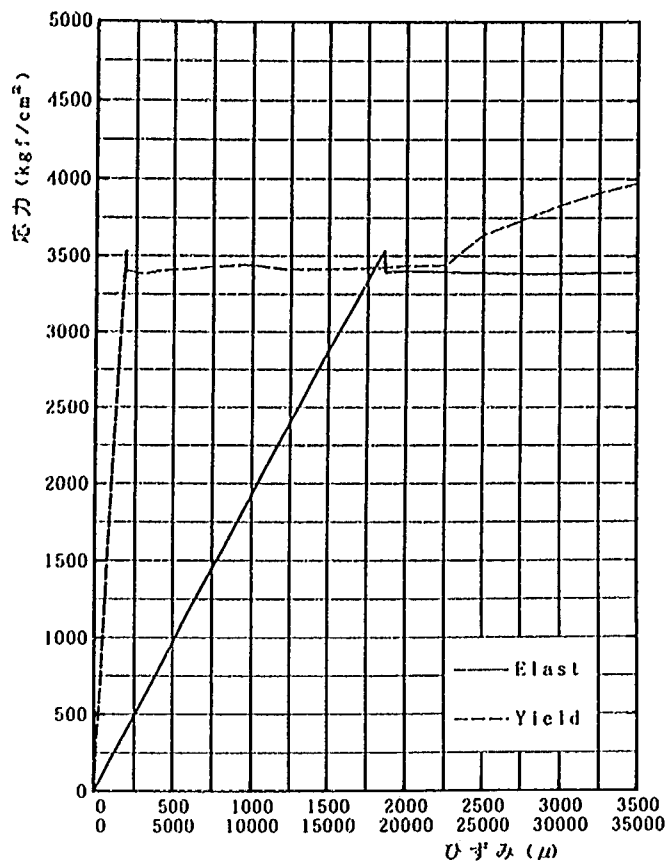
応力-ひずみ曲線

付図Ⅲ-1(4) 鉄筋の応力-ひずみ曲線 (D10-1)

シリーズ NO	試験日	破断位置	備考
D10-1	95/11/11	A	

応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)
0	0	3435	1801	3412	9182
198	101	3460	1818	3407	10168
394	200	3415	1831	3402	12126
582	299	3421	1905	3414	14199
778	400	3419	2030	3412	16247
973	503	3415	2343	3419	18226
1165	601	3414	2596	3432	20081
1357	702	3418	2824	3494	22514
1552	802	3421	3155	3658	25047
1740	902	3424	3371	3728	27526
1935	1002	3422	3597	3848	30115
2121	1101	3418	3870	3920	32599
2312	1200	3415	4093	3983	35089
2498	1300	3416	4612		
2693	1401	3421	5100		
2881	1503	3412	6172		
3067	1603	3412	7120		
3254	1702	3411	8209		

降伏点 (kgf/cm²)	3415	弾性係数 (kgf/cm²)	1.93 *E+06
降伏ひずみ (μ)	1831	伸び率 (%)	24.4
引張強度 (kgf/cm²)	5033	破断強度 (kgf/cm²)	4556



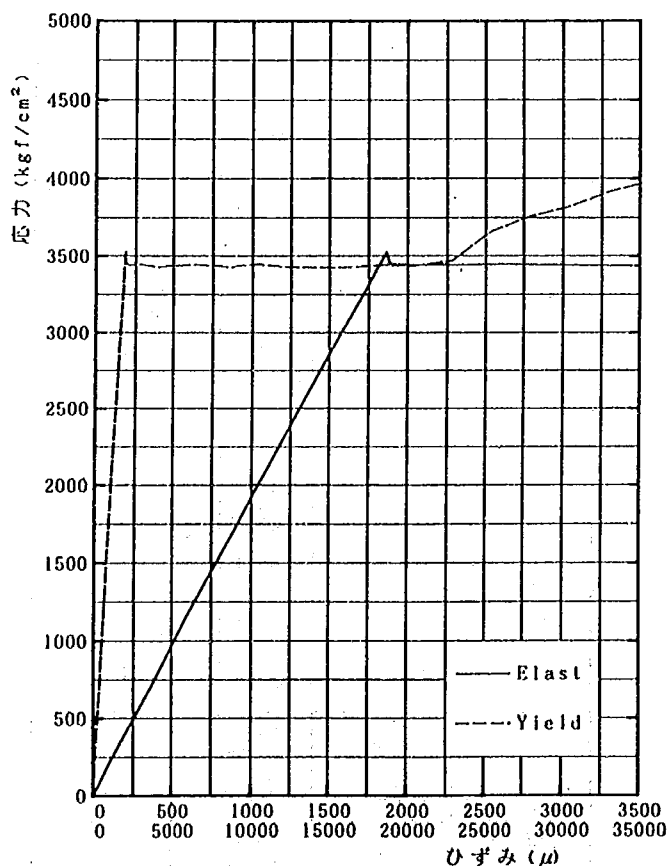
応力-ひずみ曲線

付図Ⅲ-1(5) 鉄筋の応力-ひずみ曲線 (D10-2)

シリーズ NO	試験日	破断位置	備考
D10-2	95/11/11	A	

応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)
0	0	3432	1801	3440	9249
202	100	3533	1857	3436	10232
397	201	3393	1860	3414	12250
589	301	3397	1924	3414	14245
781	401	3400	2010	3416	16188
969	500	3393	2307	3422	18189
1164	600	3386	2657	3433	20102
1356	701	3383	2889	3438	22505
1546	801	3386	3104	3639	25030
1740	901	3390	3386	3735	27543
1932	1002	3394	3647	3834	30103
2120	1100	3400	3911	3913	32603
2310	1200	3402	4203	3973	35068
2500	1302	3409	4695		
2690	1402	3411	5288		
2875	1500	3416	6246		
3066	1602	3428	7221		
3248	1701	3433	8251		

降伏点 (kgf/cm²)	3393	弾性係数 (kgf/cm²)	1.93 *E+06
降伏ひずみ (μ)	1860	伸び率 (%)	24.2
引張強度 (kgf/cm²)	5033	破断強度 (kgf/cm²)	4416



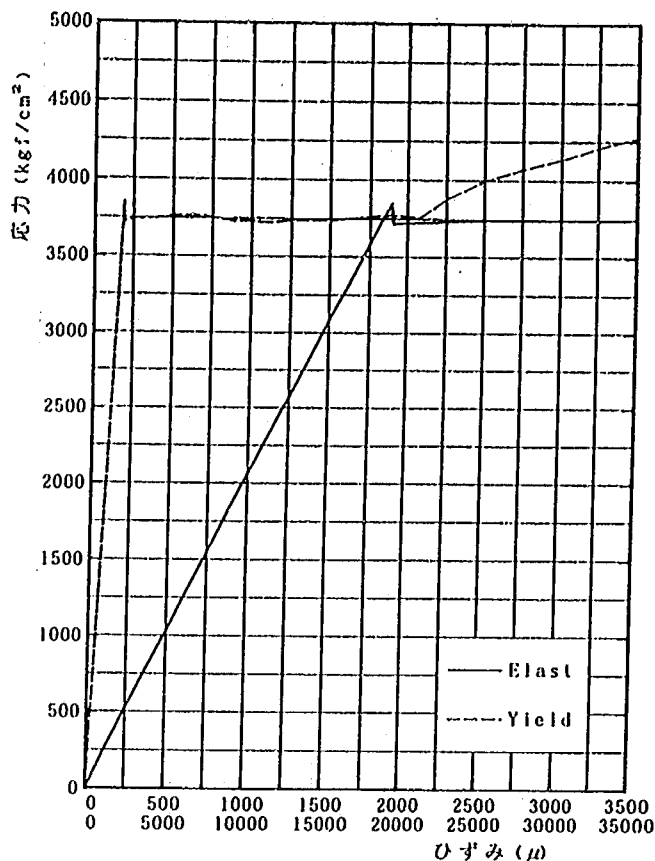
応力-ひずみ曲線

付図Ⅲ-1(6) 鉄筋の応力-ひずみ曲線 (D10-3)

シリーズ NO	試験日	破断位置	備考
D10-3	95/11/11	A	

応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm²)	ひずみ (μ)
0	0	3414	1803	3446	10510
207	100	3523	1865	3428	12457
401	201	3449	1886	3426	14560
592	303	3440	2065	3428	16532
781	402	3440	2325	3442	18462
972	502	3447	2614	3436	20442
1165	602	3443	2902	3468	22821
1354	702	3438	3166	3659	25344
1546	803	3436	3417	3757	27877
1737	905	3432	3757	3819	30327
1928	1003	3429	4121	3913	32893
2114	1103	3432	4408	3976	35389
2308	1204	3436	4945		
2490	1303	3439	5405		
2680	1405	3443	6447		
2864	1504	3438	7491		
3052	1605	3428	8592		
3236	1708	3440	9413		

降伏点 (kgf/cm²)	3449	弾性係数 (kgf/cm²)	1.92 *E+06
降伏ひずみ (μ)	1886	伸び率 (%)	24.2
引張強度 (kgf/cm²)	5033	破断強度 (kgf/cm²)	4416



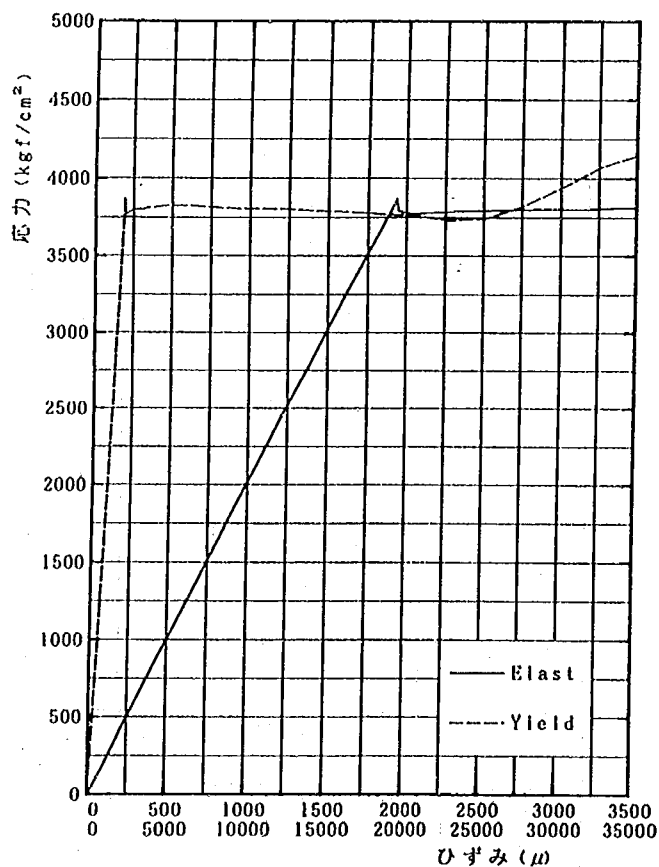
応力-ひずみ曲線

付図Ⅲ-1(7) 鉄筋の応力-ひずみ曲線 (D 6 - 1)

シリーズ NO	試験日	破断位置	備考
D6-1	95/11/11	A	

応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)
0	0	3688	1802	3729	9991
221	101	3773	1852	3723	11010
426	202	3852	1896	3739	12974
628	302	3720	1904	3739	15113
837	403	3723	2012	3761	16905
1039	503	3742	2523	3773	18876
1247	601	3742	2946	3761	20781
1453	702	3742	3242	3881	22523
1658	803	3748	3570	3998	25081
1866	902	3748	3935	4073	27529
2071	1002	3754	4272	4137	30010
2270	1103	3758	4624	4212	32549
2476	1203	3764	4991	4279	35056
2681	1303	3764	5551		
2880	1403	3767	6085		
3088	1502	3764	6966		
3287	1604	3745	7939		
3486	1702	3732	8906		

降伏点 (kgf/cm ²)	3720	弾性係数 (kgf/cm ²)	2.07 *E+06
降伏ひずみ (μ)	1904	伸び率 (%)	24.9
引張強度 (kgf/cm ²)	5210	破断強度 (kgf/cm ²)	4673



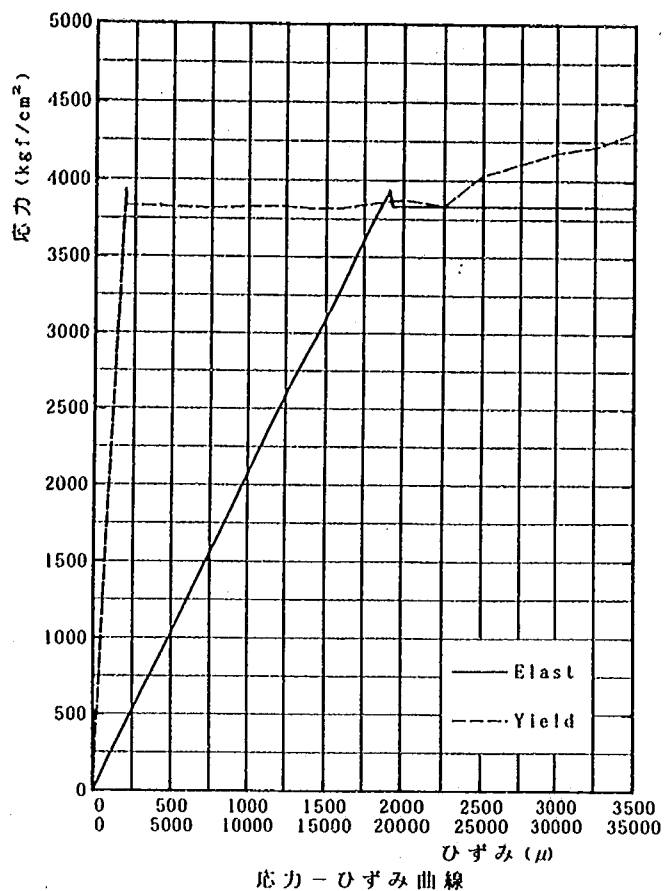
応力-ひずみ曲線

付図Ⅲ-1(8) 鉄筋の応力-ひずみ曲線 (D 6 - 2)

シリーズ NO	試験日	破断位置	備考
D6-2	95/11/11	A	

応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)
0	0	3616	1803	3808	9268
193	102	3808	1901	3808	10346
404	204	3868	1935	3802	12457
609	307	3792	1943	3792	14309
812	406	3773	2033	3786	16353
1017	507	3789	2325	3773	18264
1219	606	3795	2597	3764	20302
1418	706	3802	2867	3729	22760
1626	807	3802	3165	3742	25143
1822	903	3814	3431	3821	27515
2021	1003	3814	3684	3941	30051
2223	1103	3818	3947	4073	32662
2425	1203	3821	4220	4152	35293
2624	1301	3827	4624		
2823	1403	3827	5141		
3025	1503	3827	6177		
3224	1603	3818	7410		
3417	1702	3811	8367		

降伏点 (kgf/cm ²)	3792	弾性係数 (kgf/cm ²)	2.01 *E+06
降伏ひずみ (μ)	1943	伸び率 (%)	27.5
引張強度 (kgf/cm ²)	5204	破断強度 (kgf/cm ²)	4736

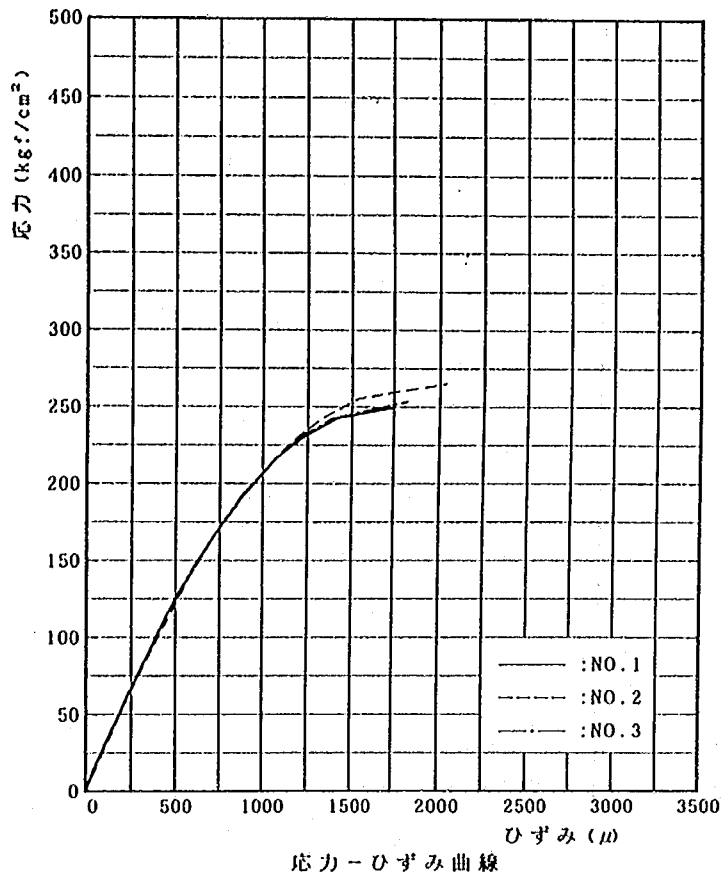


付図Ⅲ-1(9) 鉄筋の応力-ひずみ曲線 (D 6 - 3)

シリーズ NO	試験日	破断位置	備考
D6-3	95/11/11	A	

応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)
0	0	3713	1803	3821	15894
218	100	3843	1870	3849	18044
428	201	3897	1899	3874	20067
632	301	3934	1915	3837	22500
837	402	3833	1935	4032	24900
1039	501	3833	2041	4108	27493
1254	604	3833	3005	4181	30056
1459	701	3830	3577	4215	32480
1661	801	3830	4144	4317	35106
1866	899	3827	4679		
2078	1002	3821	5103		
2280	1101	3824	5575		
2488	1202	3821	7493		
2697	1301	3824	8502		
2899	1403	3827	9218		
3101	1502	3830	10071		
3309	1604	3833	12277		
3511	1701	3818	14320		

降伏点 (kgf/cm ²)	3833	弾性係数 (kgf/cm ²)	2.07 *E+06
降伏ひずみ (μ)	1935	伸び率 (%)	26.0
引張強度 (kgf/cm ²)	5160	破断強度 (kgf/cm ²)	4800

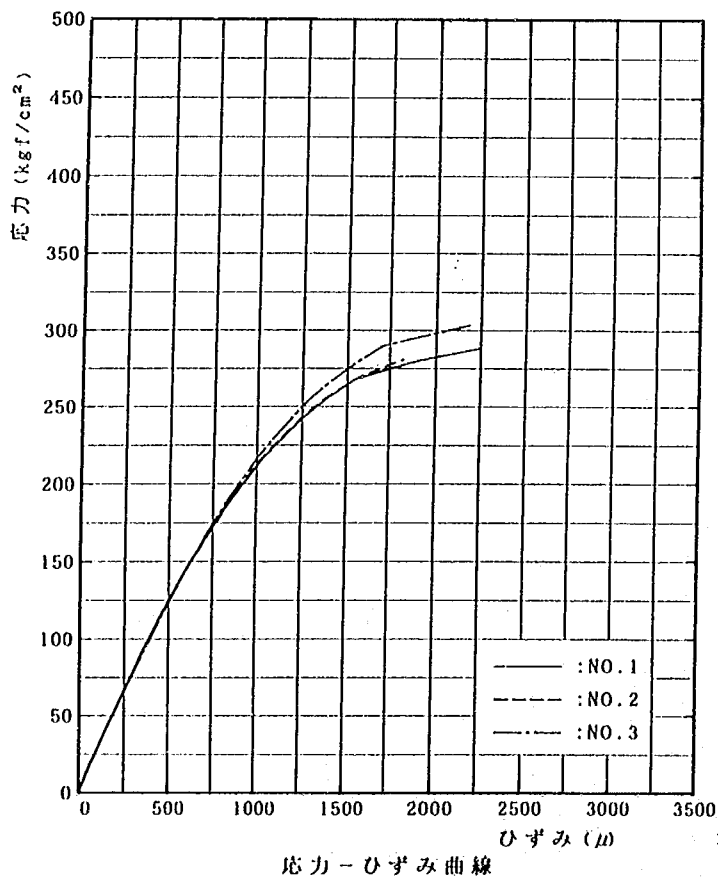


付図Ⅲ-2(1) コンクリートの応力-ひずみ曲線 (材令14日)

シリーズ NO	試験日	材令 (日)	備考
柱	95/12/12	14	

NO. 1		NO. 2		NO. 3	
応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)
0.0	0	0.0	0	0.0	0
13.8	40	13.1	50	13.1	45
26.3	90	26.1	95	26.3	90
39.0	135	38.9	145	38.8	140
51.6	190	51.8	190	51.7	190
64.5	240	64.5	245	64.5	235
77.0	290	77.2	300	77.1	290
89.9	345	89.9	355	89.8	345
102.6	400	102.6	410	102.5	395
115.2	450	115.3	470	115.3	450
127.9	515	140.7	585	127.8	510
140.9	585	166.1	720	140.7	575
166.2	720	191.7	880	166.1	715
191.8	885	217.2	1075	191.8	870
217.0	1085	229.8	1190	217.2	1080
229.7	1220	242.6	1335	229.7	1205
242.6	1415	255.3	1535	242.4	1390
249.6	1755	265.5	2035	253.4	1825

	NO. 1	NO. 2	NO. 3	平均値
圧縮強度 (kgf/cm ²)	249.6	265.5	253.4	256.1
弾性係数 $E=0.05$ (kgf/cm ²)	2.513	2.522	2.578	2.538
単位体積重量 (kg/m ³)	2251	2264	2273	2263

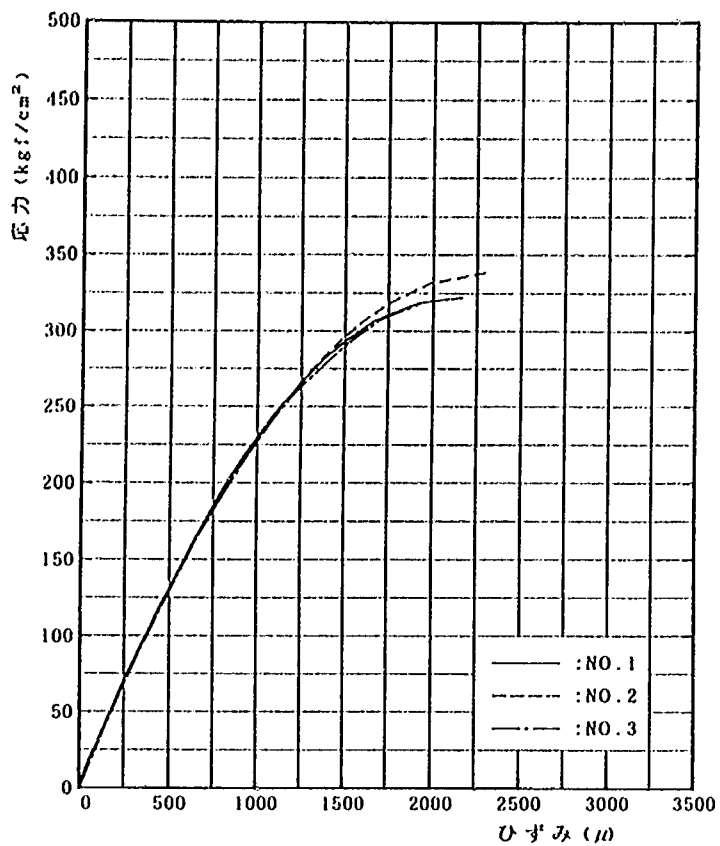


付図Ⅲ-2(2) コンクリートの応力-ひずみ曲線 (材令27日)

シリーズ NO	試験日	材令 (日)	備考
柱	95/12/25	27	

NO. 1		NO. 2		NO. 3	
応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)
0.0	0	0.0	0	0.0	0
13.1	40	13.2	45	13.1	45
38.7	140	39.0	140	38.7	140
64.2	240	64.3	240	64.3	240
89.6	340	89.9	345	89.8	350
115.1	450	115.5	455	115.2	460
140.6	575	140.8	580	140.7	580
166.0	710	153.3	645	166.2	705
178.8	785	166.4	715	191.6	845
191.8	865	179.1	790	204.4	925
204.2	950	191.8	860	217.0	1005
217.2	1040	204.4	945	229.8	1095
229.8	1145	217.1	1030	242.8	1195
242.7	1255	230.1	1135	253.6	1280
255.2	1385	242.7	1245	266.0	1400
267.8	1540	255.4	1375	278.3	1540
280.6	1925	268.1	1545	289.9	1710
288.4	2250	280.9	1825	303.7	2190

	NO. 1	NO. 2	NO. 3	平均値
圧縮強度 (kgf/cm ²)	288.4	280.9	303.7	291.0
弾性係数 $E=0.05$ (kgf/cm ²)	2.531	2.543	2.485	2.520
単位体積重量 (kg/m ³)	2241	2240	2230	2237



付図Ⅲ-2(3) コンクリートの応力-ひずみ曲線 (材令43日)

シリーズ NO	試験日	材令 (日)	備考
柱	96/ 1/10	43	

NO. 1		NO. 2		NO. 3	
応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)	応力 (kgf/cm ²)	ひずみ (μ)
0.0	0	0.0	0	0.0	0
13.5	35	13.1	40	13.5	50
39.2	135	38.9	130	39.1	140
64.6	225	64.6	230	64.4	235
89.8	325	90.1	330	90.1	335
115.6	430	115.5	435	115.4	440
140.8	540	140.9	545	141.0	550
166.5	655	166.3	660	166.3	665
191.8	780	191.8	800	191.8	800
217.4	920	217.4	930	217.3	940
242.9	1080	242.8	1090	242.8	1100
255.6	1170	268.2	1260	255.8	1190
268.4	1270	281.0	1360	268.0	1290
280.9	1375	293.6	1475	281.0	1410
293.5	1505	306.4	1600	293.5	1535
306.4	1660	319.2	1765	306.6	1690
319.2	1920	331.6	1980	319.1	1940
322.1	2165	338.7	2295	322.1	2160

	NO. 1	NO. 2	NO. 3	平均値
圧縮強度 (kgf/cm ²)	322.1	338.7	322.1	327.6
弾性係数 ×10 ⁵ (kgf/cm ²)	2.598	2.597	2.633	2.609
単位体積重量 (kg/m ³)	2244	2230	2217	2230