

鋼構造埋込み式柱脚の弾塑性挙動について

中山 昭夫*・栗田 裕次*

Experimental Study on the Elasto-plastic Behaviors of Embedded
Steel Column Bases in the Reinforced Concrete Footing

Akio NAKAYAMA and Hirotsugu KUWADA

ABSTRACT

Anchor bolts embedded in a reinforced concrete are usually used in order to connect steel columns with reinforced concrete footing rigidly.

In this paper, the authors tried to use expansion bolts instead of anchor bolts to simplify the erection of steel frames and carried out the experiments in order to clarify the rigidity or stiffness of column base.

The test results on the ultimate strength and deformability of this type of column-to-footing connections are described in detail herein.

1. はじめに

地震国である我国において建物を耐震的に設計することは、一番重要な課題といえることができる。建築設計における耐震設計は建築基準法の改正、すなわち新耐震設計法の施行により一応の決着がついたものの、その内容には種々の困難も含んでいるといえよう。

鋼構造の分野において、常に震害として挙げられる例に接合部の問題がある。特に鋼構造の柱脚部は鉄骨から鉄筋コンクリートへと材料が変わるため材料の不連続性と相まって問題が多い。事実これまで我々の経験した震害は筋かい材や組立材のような軽微な被害を除けば、柱脚部の被害が非常に多い。

例えば1978年に発生した宮城県沖地震の被害例のなかで鋼構造物が多数存在すると思われる仙台市東部地区の震害を、鋼構造物の柱脚に関連した被害件数として示せば、以下のようになる。

(i) 主要構造体に何らかの被害が認められた建物は調査戸数の30%である。

(ii) 主要構造体に残留部材角 $1/30$ 以上の被害が生じ

た大破以上の建物のうち、柱脚部で被害が確認されたものは約50%前後である。

(iii) 主要構造物に何らかの被害を認めた小破以上の建物のうち、柱脚部に関連するものは30%前後である。

また、柱脚部の被害状況を大別すれば次のようになる。

(i) ピン柱脚の被害

アンカーボルトの破断・抜け出し・ナット抜け

(ii) 基礎コンクリートの被害

独立基礎の移動・転倒・コンクリートのはく落・圧壊

(iii) 固定柱脚の被害

根巻コンクリートの割裂・柱母材の局部座屈

以上のように柱脚部の損傷は構造計算時の仮定をくつがえす原因にもなり、上部構造物に不測の応力を生じ易く、建物の大破と柱脚の損傷が密接な関係を示す震害例が多い。このなかで被害が多く認められたものは、ベースプレートをアンカーボルトで固着する、いわゆるピン柱脚である。すなわち、構造計算時にアンカーボルトやベースプレートの変形能力に期待して柱脚をピンと設計したのにもかかわらず、実状は期待した変形にこれらの

部分が追従できず、アンカーボルト等に過大な力が作用し、ボルト破断等の被害に至っている。

このような柱脚部の被害の原因はやはり材料の不連続性に起因するものであろう。この柱脚部をピンとするか固定とするかにより設計も施工も相当変わってくる。

この柱脚の固定度に関しては種々の問題がありその定量的な取り扱いはまだ不明な点も多数残されている。柱脚の固定度に関してこれまでの研究から得られた結果を要約すると以下ようになる。

① アンカーボルトを柱のフランジの内側に配した、いわゆるピン固定の柱脚は回転能力に乏しく相当の曲げ応力を受け持つ。すなわち、このような柱脚の場合ピン固定とはいえず、半固定と見なさざるを得ない。⁽²⁾

② アンカーボルトを柱フランジ外側に配し、補強リブを付けた固定柱脚の場合も完全固定とはいえず、ベースプレートおよびアンカーボルトの変形によりかなりの柱脚の回転が生じる。すなわち、この場合も①より固定度は高いが、やはり半固定と見なさざるを得ない。⁽³⁾

③ ベースプレートを露出した柱脚に比較して鉄筋コンクリートで柱脚を補強した、いわゆる根巻き式の柱脚の場合は柱脚の固定度ははるかに改善され、柱成の3倍程度の根巻き高さではほぼ完全固定に近い柱脚の固定度が得られる。⁽⁴⁾

④ 根巻き式柱脚と同様、鉄骨柱脚を地中梁に埋込んだ、いわゆる埋込み式柱脚の場合も固定度は非常に大きく、柱成の2倍程度の埋込み深さで十分な固定度が得られる。⁽⁵⁾

以上のような既往の研究結果^{(2)~(5)}から柱脚の固定度に関しては、ほぼその一般的傾向は明らかになりつつある現状ではあるが、構造力学でいうところの完全固定という概念には至っていない。我々の扱う構造材料においては完全固定を期することは困難であるが、一番重要な問題はどのような観点から固定度を評価するかということであろう。すなわち剛性・強度・耐力あるいは変形等の構造上の主要な問題のどれに焦点をあてて、固定度を評価するかにより固定度は変わってくる。現在の固定度の概念そのものが不明確であり、鋼構造物の固定度の定量的取り扱いが確立されていないところに柱脚の設計のむずかしさも存在しているといえよう。しかしながら実際の建物においてはそのような固定度が問題なのではなく、非常時に安全性が確保されることが重要であって、そのための1手段として固定度が問題とされるに過ぎない。それゆえ、柱脚の固定度の問題は柱脚の安全性の検討・評価という問題に帰着すると考えて差し支えない。

本研究では比較的施工例の少ない埋込み式柱脚の耐震

安全性を実験的に検討したものであり、繰り返し载荷における柱脚の弾塑性挙動が柱脚の補強条件によりどのように変わるかを実験的に確めた結果をここに報告する。

埋込み式柱脚の施工例が少ない理由の一つに施工の困難さが挙げられるが、本研究においては施工の簡便さを計る手段として、アンカーボルトにホールインアンカーを代替使用してみた。露出式柱脚の場合は柱脚の移動および引抜き等に抵抗するためアンカーボルトの役割は大変重要であったが、根巻き式、または埋込み式柱脚の場合、柱脚応力は全て鉄筋コンクリートによって負担されるために理論上、アンカーボルトは不要となる。しかしながら、施工上アンカーボルトは柱の位置決め等のためには必要である。このため比較的施工の簡単なホールインアンカーでアンカーボルトを代替した。アンカーボルトをホールインアンカーに代替できればその施工上のメリットは大きい。すなわち、ホールインアンカーはコンクリート硬化後、比較的自由的な位置に施工でき、現場の施工誤差を吸収し易く、アンカーボルトのような台直しの手間が省ける。ホールインアンカーはこれまで施工による耐力のバラツキ等のため、主要な応力を受ける構造材として扱われなかったが、施工法の改良等のためその安全性も評価できるようになってきた。ホールインアンカーはケミカルアンカーとメカニカルアンカーの2種類があるが、ここでは比較的施工が簡便で経済的なメカニカルアンカーによる施工を用いることとする。

柱脚の補強方法には、鉄骨が鉄筋コンクリート造地中梁から抜け出すことを防止する目的で、埋込み部分鉄骨に穴をあけ、その穴を通して地中梁主筋を配筋する。また、直交方向地中梁による拘束効果も期待して同様に直交方向地中梁主筋を鉄骨に対し串刺すように配筋する。

以上のように、アンカーボルト部分の簡便化および、埋込み部分に補強を行なった埋込み式柱脚の弾塑性域における挙動を明らかにし、その耐震安全性を検討することが本研究の目的である。

2 実験の概要

2.1 試験体

アンカーボルトにホールインアンカーを用いた埋込み式柱脚の水平载荷時における弾塑性挙動を明らかにするため、4種類の試験体を用意した。

基本的な試験体は、地中梁 ($B \times D = 200 \times 550$) にH形鋼柱 ($H - 200 \times 100 \times 5.5 \times 8$) を埋込んだ (埋込み長さ $L = 520$) 形式で直交方向地中梁が取り付いた試験体である。(図-1参照)

このような試験体の強軸载荷および弱軸载荷の2通りの

試験体、および直交方向地中梁の影響を調べるためこれを除いた試験体、さらに一般に推奨されている標準的な埋込み式柱脚（ただしアンカーボルトはホールインアンカー）の4通りの試験体である。

各種類の試験体は2～3体制作り、その傾向を把握することとした。以下に各試験体の説明を加える。

(1) №1試験体（強軸基本型）

この試験体は強軸方向载荷のための基本型試験体で直交方向地中梁が取り付けられた形式となっている。

A, Cが隅柱, Bが側柱である。埋込んだ鉄骨表面にスタッドとして付着効果を上げるため, D10鉄筋が口字形フープのように溶接されている。（写真-1参照）

地中梁主筋は, 上下端とも4-D13の2段配筋でかぶり厚さを確保するためと鉄骨の抜け出しをおさえるために, 鉄骨に穴をあけ鉄骨の内側に配筋を行なっている。

（図-1および図-8参照）

(2) №2試験体

この試験体は弱軸方向载荷のための基本型試験体であるが, №1で側柱が1個しかいないためB柱のみは強軸载荷用とした。

施工法および試験体寸法等は№1と同一である。

（図-2および図-9参照）

(3) №3試験体

この試験体は直交方向地中梁の影響を調べる目的で, 直交方向地中梁をなくした試験体である。（図-3および図-10参照）

(4) №4試験体

この試験体は一般に用いられている埋込み式柱脚である。すなわちH形鋼柱を地中梁に埋込んだ後周囲を4-D13で補強し, さらにこの柱形鉄筋を口字形フープで100mmピッチに補強し一体化した柱脚形式である。

（ただし, アンカーボルトはホールインアンカー4-M20, 図-4および図-11参照）

上記試験体のうち№1～№3は鉄骨に対するコンクリートのかぶり厚さは50mmであり, それゆえ地中梁の幅は200mmである。また, 鉄骨の地中梁への埋込み深さは520mmであり鉄骨に対する特別な補強は何も行っていない。№4試験体は鉄骨の外側に鉄筋を配しているためかぶり厚さは100mmまた鉄骨の埋込み深さは470mmで柱筋は柱形の補強を行なっている。なお, 各試験体とも主筋はD13, あばら筋はD10である。

加力は福山大学8号館構造実験棟の反力台および20tonサーボパルサーによって行なった。図-5に示すように反力台に試験体をセットし, 20tonサーボアクチュエーターにより正負の交番繰り返し荷重を载荷す

SPECIMAN NO.1

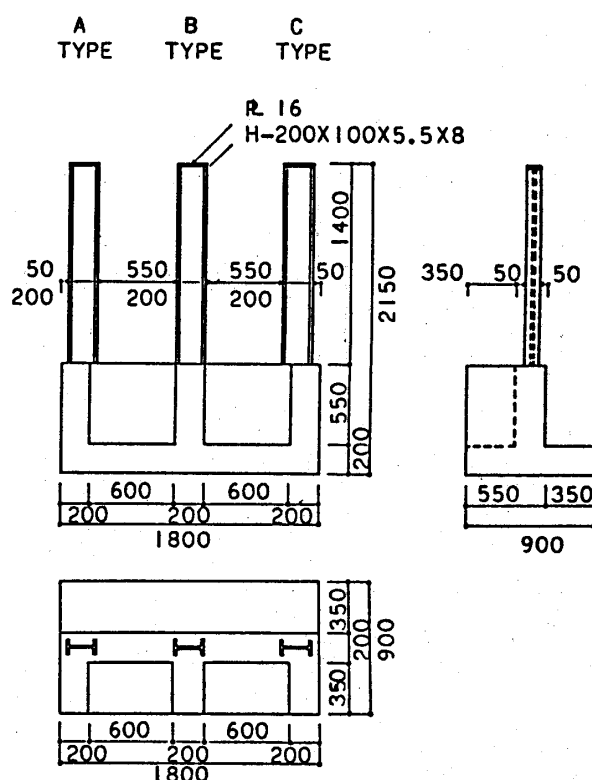


図-1 №1試験体

SPECIMAN NO.2

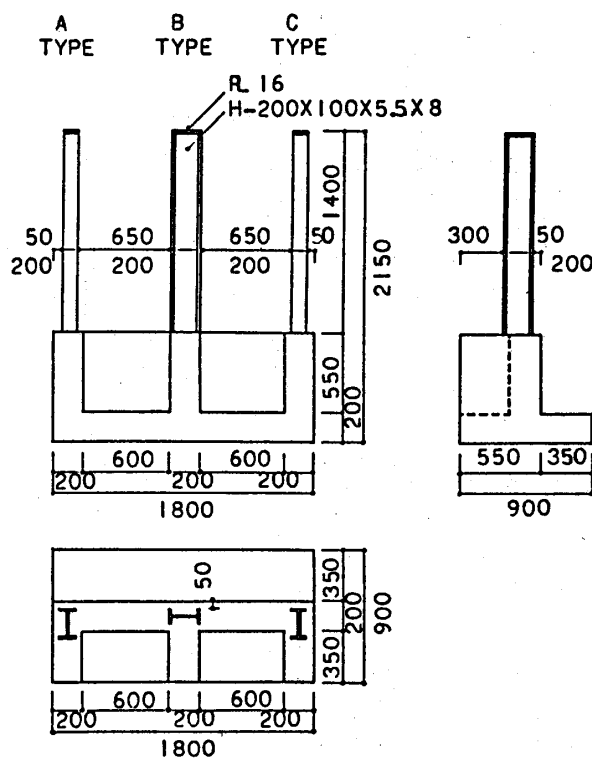


図-2 №2試験体

SPECIMAN NO.3

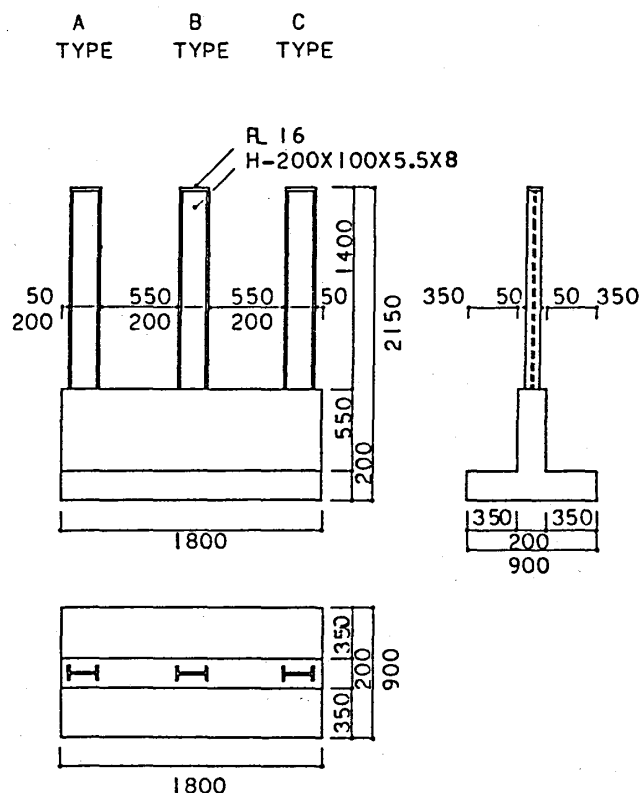


図-3 №.3 試験体

SPECIMAN NO.4

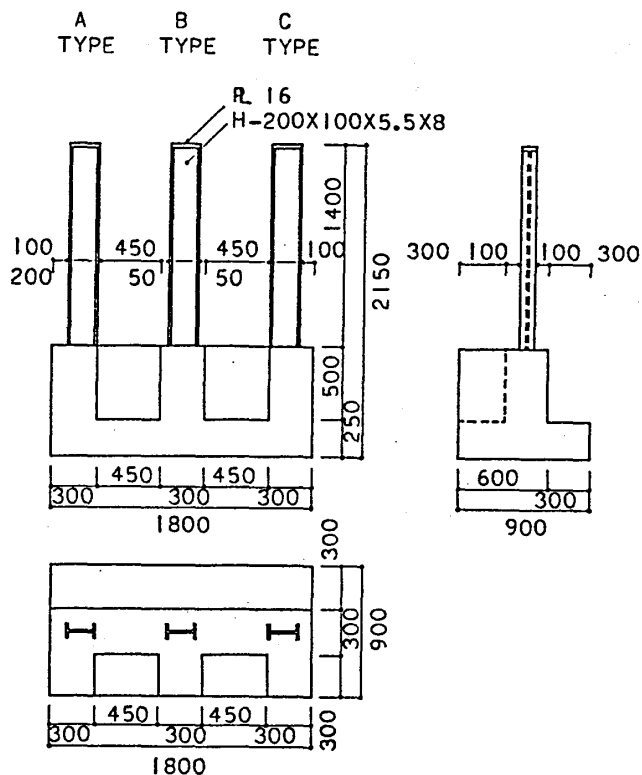


図-4 №.4 試験体

る。荷重はサーボアクチュエーター先端のロードセルにより、また変形はアクチュエーターと反対方向に取り付けた差動トランスにより計測した。柱脚の変形は図-7に示すようにダイヤルゲージで測定した。

鉄骨および鉄筋の応力を測定するため鉄骨のフランジ（露出および埋込み部）および地中梁の鉄筋にワイヤーストレインゲージ（以下W. S. G. と呼ぶ）を点貼し、ひずみを測定した。（図-8～図-11参照）

W. S. G. は絶縁のため図-6に示すように2層のコーティングが施工されている。すなわちゲージの上にハマタイト（合成ゴム系）をコーティングした後、ワックスを5～6mm程度の高さまで溶着させて絶縁を行なった。荷重のかけ方は、荷重たわみ曲線が直線を保つ範囲を弾性域と考え、この荷重を基準として数回の繰り返し加力を行なった後、徐々に荷重を上げながら繰り返し載荷を行ない、最大耐力まで載荷を行なった。

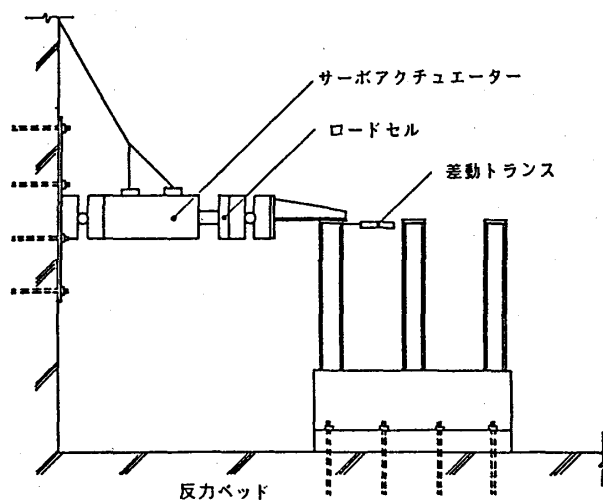


図-5 実験の概要

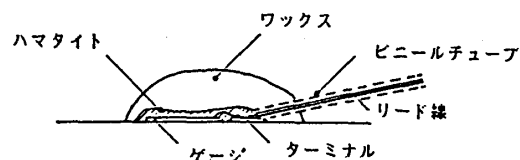


図-6 ゲージのコーティング

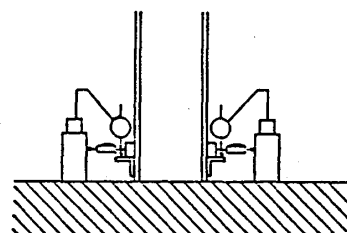


図-7 柱脚の変位

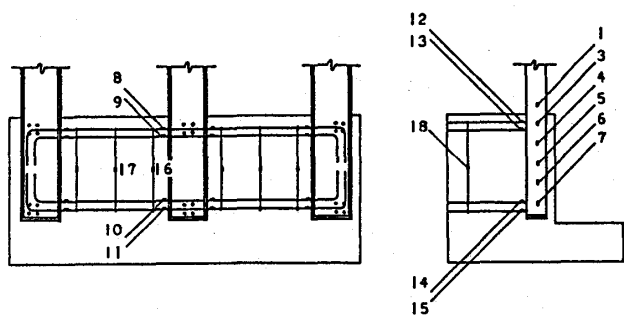


図-8 柱脚の配筋方法およびW. S. G.の点貼位置
(No. 1 試験体)

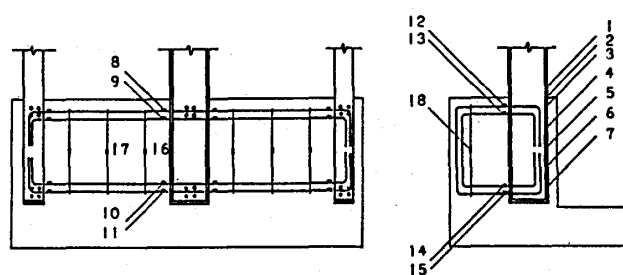


図-9 柱脚の配筋方法およびW. S. G.の点貼位置
(No. 2 試験体)

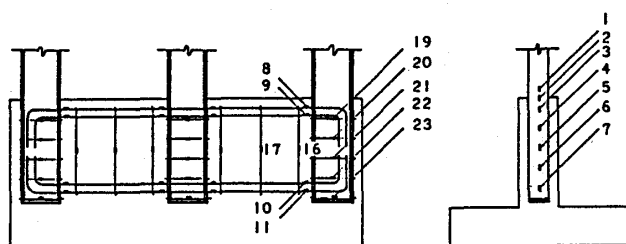


図-10 柱脚の配筋方法およびW. S. G.の点貼位置
(No. 3 試験体)

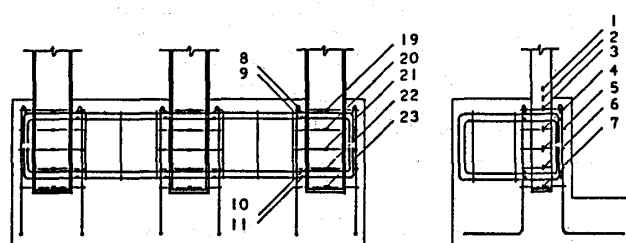


図-11 柱脚の配筋方法およびW. S. G.の点貼位置
(No. 4 試験体)

3 実験結果

載荷実験に先立ち、使用した鉄骨・鉄筋およびコンクリートの材料実験を行なった。

その結果を表-1~2および図-12~13に示す。

表-1 鉄骨及び鉄筋の物理的性質

		降 伏 点 (kg/mm^2)	引 張 強 度 (kg/mm^2)	伸 び (%)
鉄 骨 (SS41)	フランジ	36.9	50.0	20.7
	ウエブ	41.5	51.7	18.7
鉄 筋 (SD30)	D-13	39.8	58.2	23.5
	D-10	44.3	62.6	22.5

表-2 コンクリートの圧縮試験結果

	No. 1 試験体	No. 2 試験体	No. 3 試験体	No. 4 試験体
圧 縮 強 度 (kg/cm^2)	171.1	173.8	194.6	209.1

SS 41
H-200x100 (ウェブ)

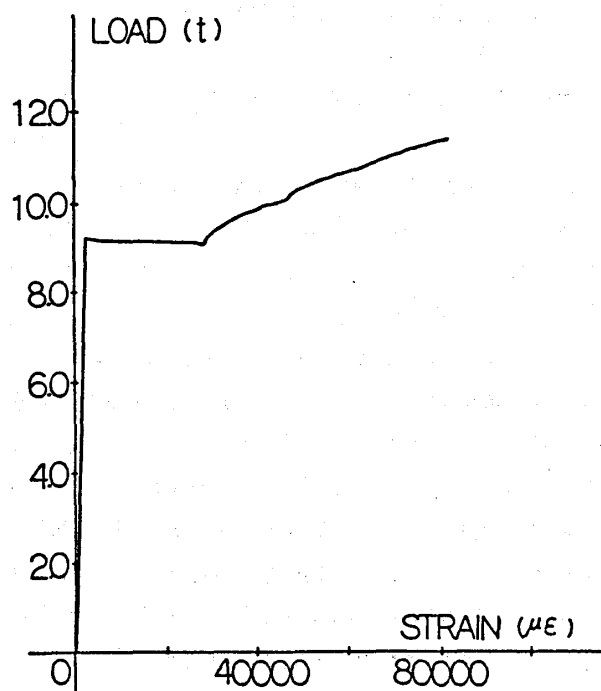


図-12 鉄骨の荷重ひずみ曲線

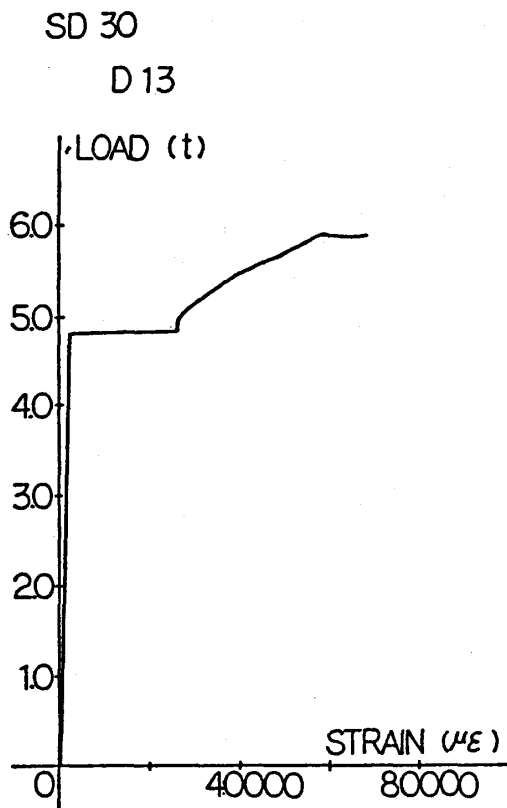


図-13 鉄筋の荷重ひずみ曲線

3.1 強軸基本型試験体の実験結果

(1) 隅柱

強軸基本型試験体の隅柱についてその代表的な実験結果を以下、図-14～21に示す。

図-14は荷重と柱頭変位との結果であるが、荷重変形曲線は安定した紡錘形の履歴ループを描き、塑性変形が徐々に進行していることを示している。この試験体の弾性域は他の測定結果からも、ほぼ3.5 t o n程度と考えられる。弾性域を過ぎると徐々に直線性が失われていくが、主な原因はコンクリートが支圧により地中梁上部から破壊されていくため、コンクリートのクラックは1.5 t o n前後からはいりだす。この地中梁のクラックは鉄骨柱の圧縮フランジの方から生じ、繰り返し载荷とともに大きくなっていく。隅角部のかぶり厚さは、50 mmと小さいが、隅角部の破壊は生じず、耐力は鉄骨の塑性化によって支配された。(写真-2参照)

図-15～16に柱脚部の水平および垂直変位と荷重の関係を示す。柱頭変位の結果と同様、安定した紡錘形の履歴ループを示している。

図-17～20に鉄骨柱脚部に点貼したW. S. G.の

結果を示す。図-17は埋み深さ250 mmにおける鉄骨フランジのひずみ履歴である。この点でのひずみはそれ程大きくなく、ほとんど弾性的な挙動を示す。繰り返し载荷により若干付着の劣化が認められる程度であり、最大ひずみ量も0.1%前後で、鉄骨は弾性域である。

図-18は同様に埋み深さ150 mmでのひずみ履歴でこれも弾性範囲と考えられる。

図-19は埋み深さ50 mmでのひずみ履歴の結果であるが、この点では塑性化が顕著に現われている。すなわち3.5 t o nを過ぎたあたりから塑性化が始まり以後荷重の増加とともに塑性ひずみが増大していく。ひずみ履歴は安定した紡錘形を示し、荷重-変形曲線と同様なループを描く。

図-20は地中梁上部50 mmの点でのひずみ履歴の結果であり、図-18と同様、弾性範囲と考えられる。

これらのひずみ履歴の結果から塑性関節は地中梁と柱との境界部に形成され、上下に塑性域が広がっていくと考えられよう。

図-21は柱脚のひずみ分布の測定結果を弾性域において埋み深さとともに示す。柱脚のひずみは、塑性関節の形成が予想される地中梁との境界部を中心としてそのひずみ量が大きく、埋み深さ50 mmより下部は付着応力のため深さに比例してひずみは減少する。これらのひずみ分布の結果から、アンカーボルトにはほとんど応力が働いていないことが推定される。

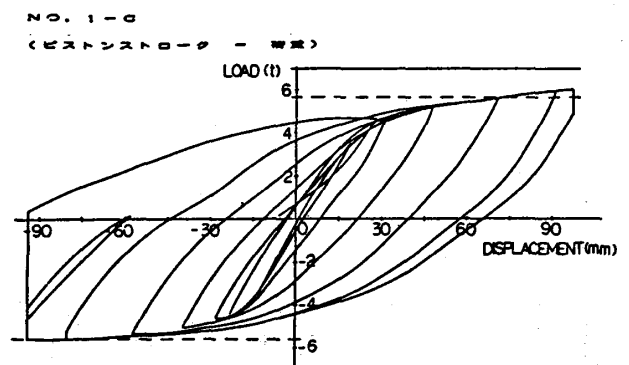


図-14 柱頭の荷重変形曲線 (No. 1-C)

NO.1-C

ダイヤルゲージ (水平)

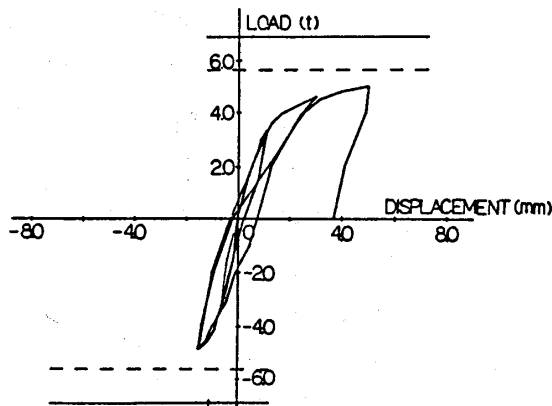


図-15 柱脚の水平変位 (No. 1-C)

NO.1-C

ダイヤルゲージ (垂直)

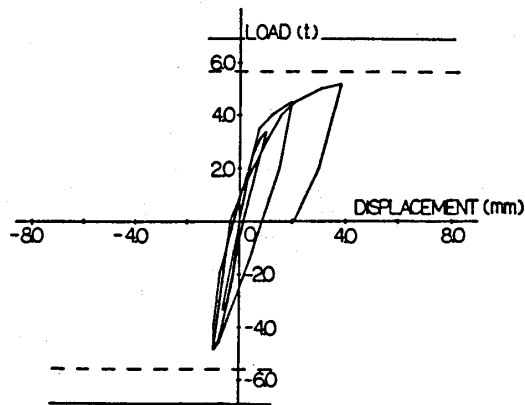


図-16 柱脚の垂直変位 (No. 1-C)

NO.1-C

CI 3

地中梁下部25cm

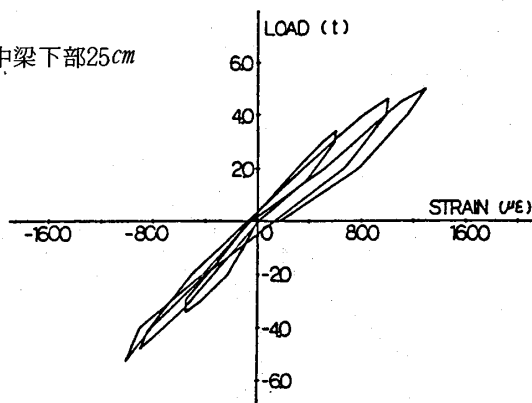


図-17 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴 (No. 1-C, ゲージNo. 5)

NO.1-C

CI 4

地中梁下部15cm

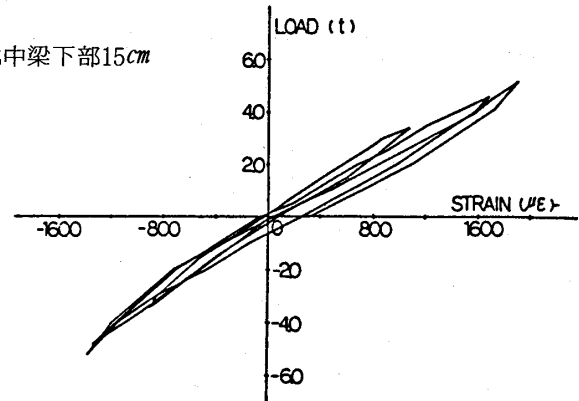


図-18 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴 (No. 1-C, ゲージNo. 4)

NO.1-C

CI 5

地中梁下部5cm

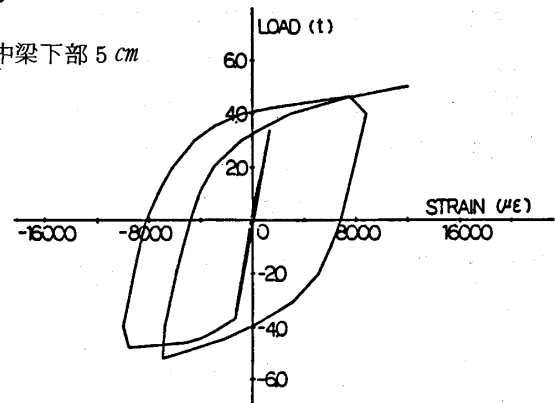


図-19 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴 (No. 1-C, ゲージNo. 3)

NO.1-C

応変 6

地中梁上部5cm

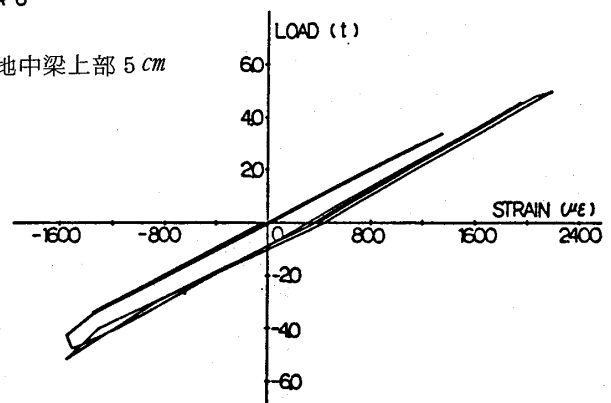


図-20 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴 (No. 1-C, ゲージNo. 1)

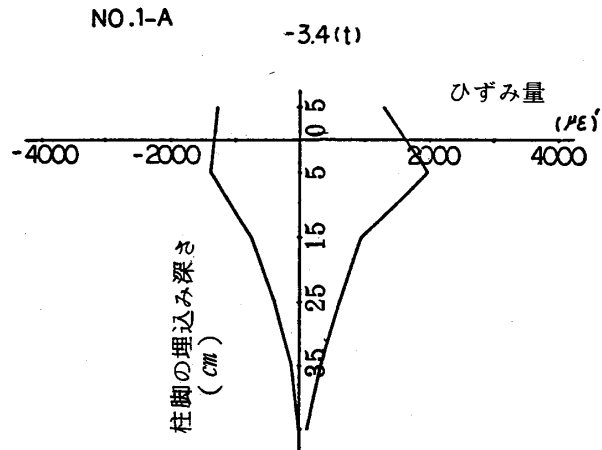


図-21 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ分布
(No.1-A)

(2) 側柱

強軸基本型試験体の側柱について代表的な実験結果を図-22~30に示す。また柱脚の破壊状況を写真-3に示す。

実験結果は隅柱とはほとんど同じ傾向を示す。ただし、柱の両側が地中梁のため柱の剛性は若干高くなる。

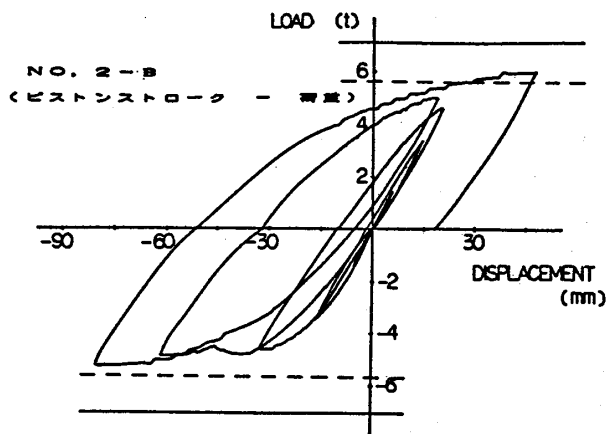


図-22 柱頭の荷重変形曲線 (No.2-B)

NO.2-B

ダイヤルゲージ (水平)

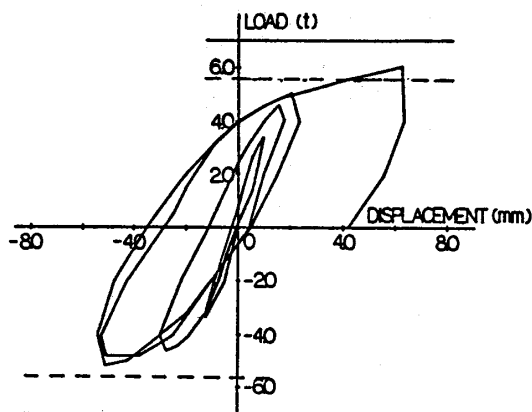


図-23 柱脚の水平変位 (No.2-B)

NO.2-B

ダイヤルゲージ (垂直)

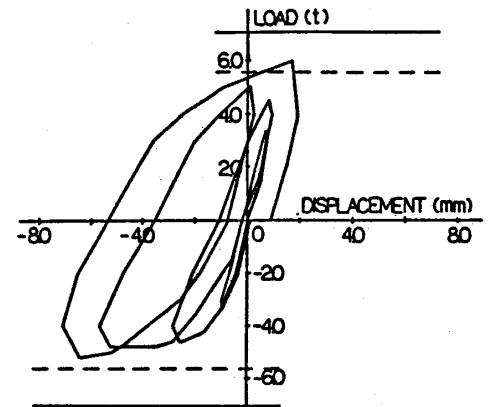


図-24 柱脚の垂直変位 (No.2-B)

NO.2-B

BS 3

地中梁下部25cm

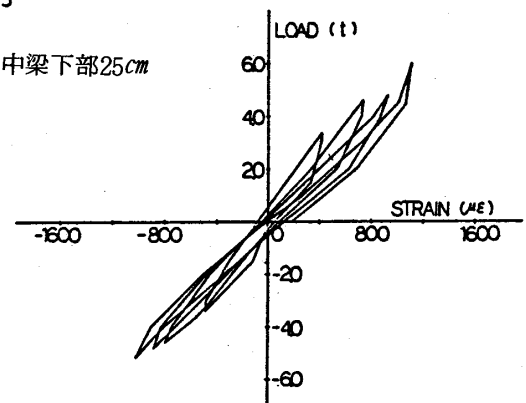


図-25 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴
(No.2-B, ゲージNo.5)

NO.2-B

BS 4

地中梁下部15cm

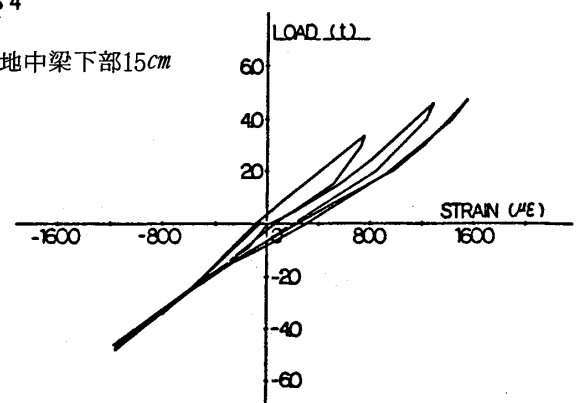


図-26 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴
(No.2-B, ゲージNo.4)

NO.2-B
BN 5

地中梁下部 5 cm

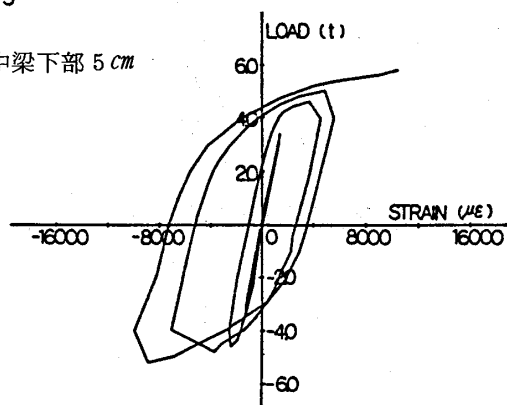


図-27 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴
(No.2-B, ゲージNo.3)

NO.2-B

-3.4 (t)

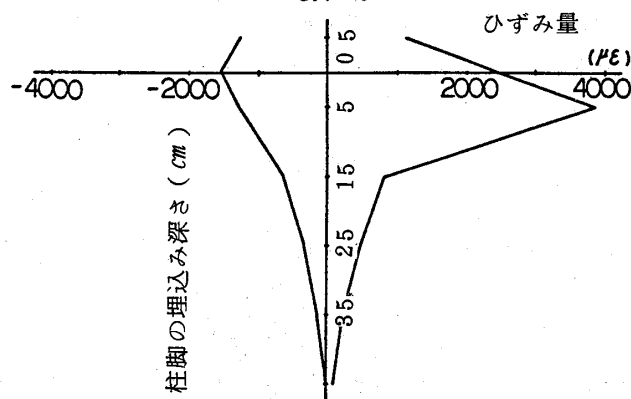


図-30 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ分布
(No.2-B)

NO.2-B
BN 6

地中梁・柱境界部

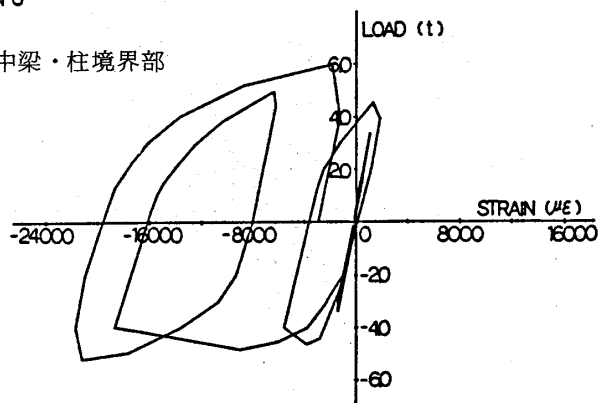


図-28 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴
(No.2-B, ゲージNo.2)

NO.2-B
BS 7

地中梁上部 5 cm

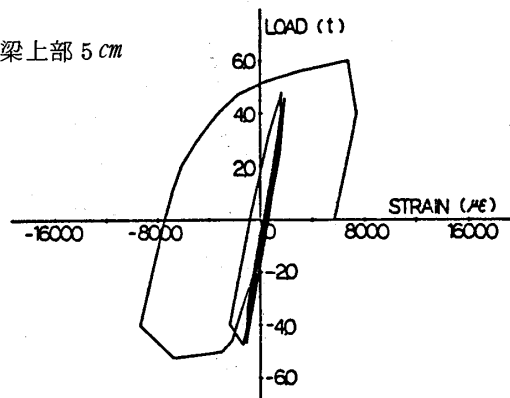


図-29 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴
(No.2-B, ゲージNo.1)

3.2 弱軸基本型試験体の実験結果 (No.2 試験体)

弱軸方向載荷用, 基本型試験体の隅柱について実験結果を, 図-31~39および写真-4に示す。

図-31は柱頭の荷重変形曲線であるが, 安定した紡錘形の履歴ループを描いている。弱軸載荷の場合鉄骨の耐力が小さいためコンクリートの支圧破壊は生じず, 地中梁にクラックはほとんど発生しない。それゆえ耐力は完全に鉄骨の耐力により決定される。

図-32~33は柱脚部の水平および垂直変位の実験結果である。柱頭の荷重変形曲線と同様, この変位も安定した紡錘形の履歴ループを示している。

図-34~38は鉄骨柱脚部に点貼したW. S. G.のひずみ履歴の結果である。これらの結果から埋込み部分の鉄骨はほとんど弾性的な挙動を示し, 柱脚の上部にのみ塑性ひずみが検出され, 塑性関節は地中梁から露出した柱脚部分で形成されていると考えられる。

図-39は柱脚のひずみ分布であるが, 塑性関節の形成が考えられる地中梁上部および境界部でのひずみは, 相当大きい, 埋込み部では極端に減少し, 下部のひずみは非常に小さい。強軸載荷の場合と同様, アンカーボルトはほとんど力を負担していないと考えられる。

3.3 No.3試験体の実験結果

直交方向地中梁の拘束効果を調べるため直交方向地中梁をなくした試験体の実験結果を, 図-40~41, および写真-5~6に示す。

図-40~41は隅柱および側柱における柱頭の荷重と変形の結果である。隅柱の場合, 地中梁は片側のみであり, また鉄骨のかぶりが50mmと小さいため, 直交方向地中梁の補強効果が相当大きいことを示している。すなわち, この試験体の場合, コンクリートの支圧破壊に

より早期から地中梁全体にクラックが進展し、剛性が低下する傾向がある。コンクリートの支圧破壊とともに剛性が低下していき、履歴曲線は逆S字ループを描く。地中梁のひび割れとともに耐力も減少する傾向を示す。
(図-40および写真-5参照)

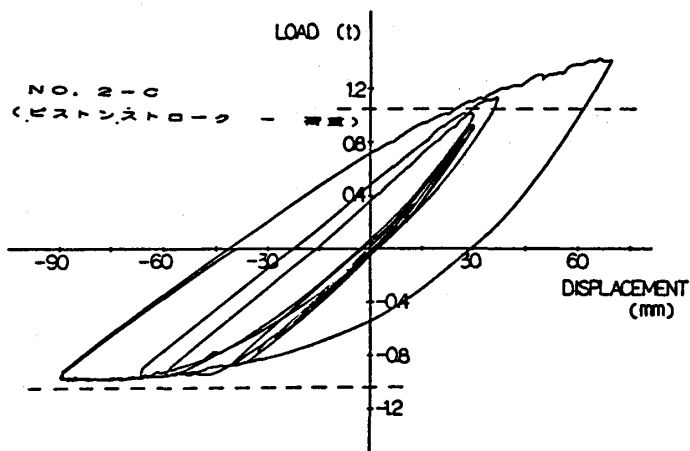


図-31 柱頭の荷重変形曲線 (No. 2-C)

NO.2-C
ダイヤルゲージ (mm)

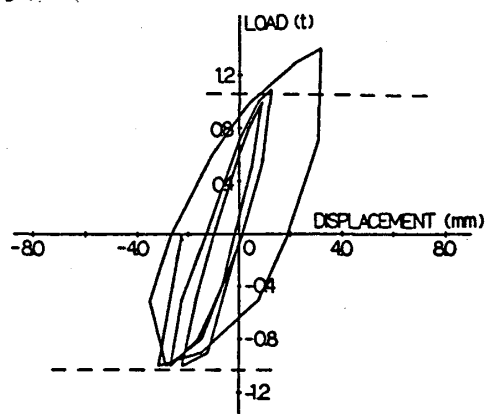


図-32 柱脚の水平変位 (No. 2-C)

NO.2-C
ダイヤルゲージ (mm)

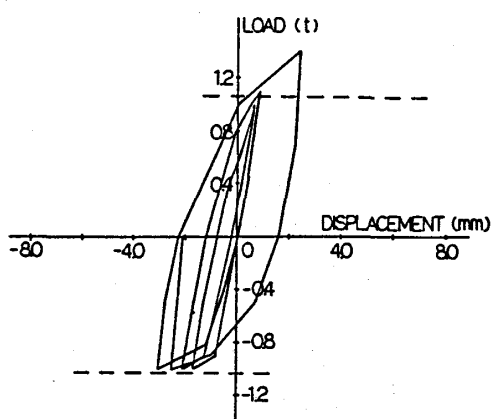


図-33 柱脚の垂直変位 (No. 2-C)

NO.2-C.

AN3

地中梁下部25cm

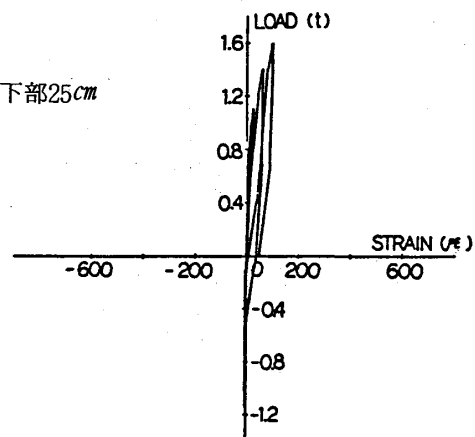


図-34 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴 (No. 2-C, ゲージNo.5)

NO.2-C

AN4

地中梁下部15cm

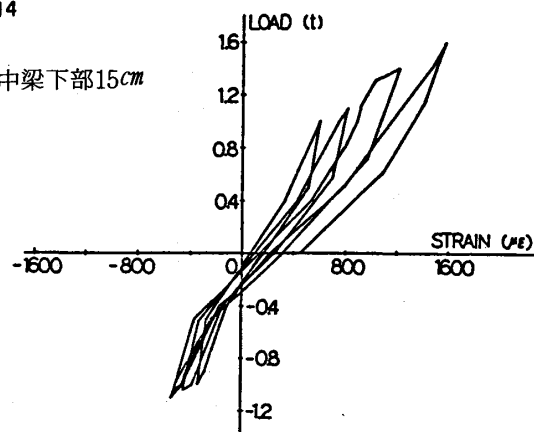


図-35 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴 (No. 2-C, ゲージNo.4)

NO.2-C

AN5

地中梁下部5cm

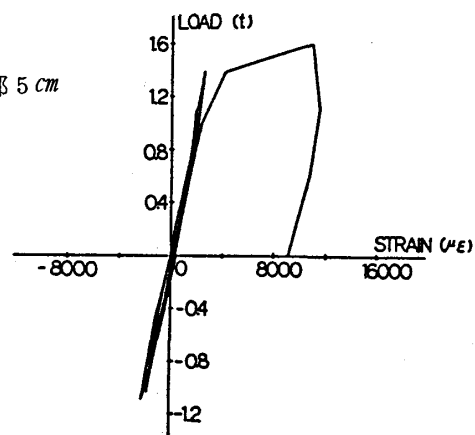


図-36 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴 (No. 2-C, ゲージNo.3)

NO.2-C
AN6

地中梁・柱境界部

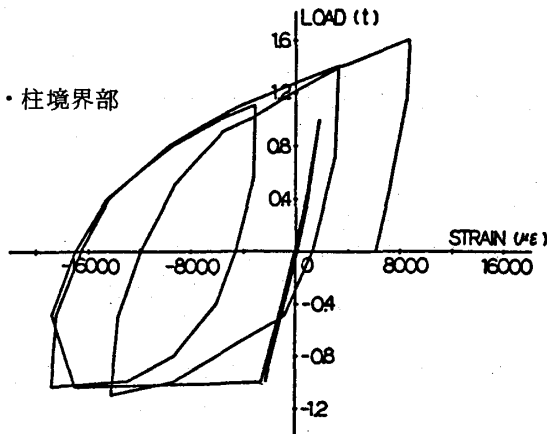


図-37 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴
(No.2-C, ゲージNo.2)

NO.2-C
AN7

地中梁上部5cm

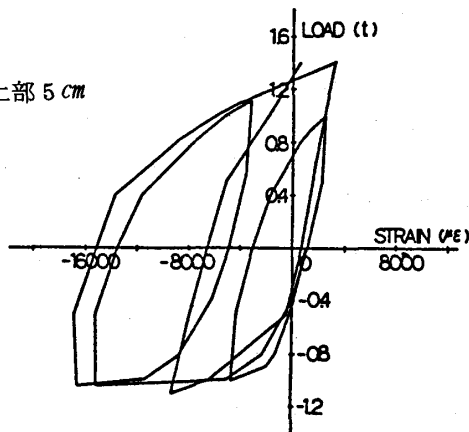


図-38 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ履歴
(No.2-C, ゲージNo.1)

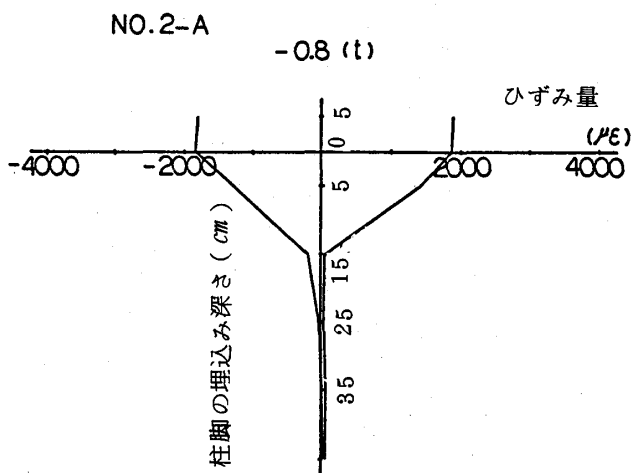


図-39 柱脚部分鉄骨フランジのひずみ分布)
(No.2-A)

隅柱と違って、側柱は両側に地中梁があるため剛性および耐力はNo.1試験体とそれ程変らない。すなわち直交方向地中梁がない場合、鉄骨のかぶりの影響は非常に大きいといえる。(図-41および写真-6参照)

柱脚部の水平・垂直変位および柱脚部鉄骨フランジのひずみ履歴さらに、弾性域における柱脚部鉄骨フランジのひずみ分布と埋み深さの関係は、No.1試験体とはほぼ同じ傾向を示している。すなわち、柱脚部の変位および鉄骨ひずみ量等には地中梁の影響が顕著に現れていない。

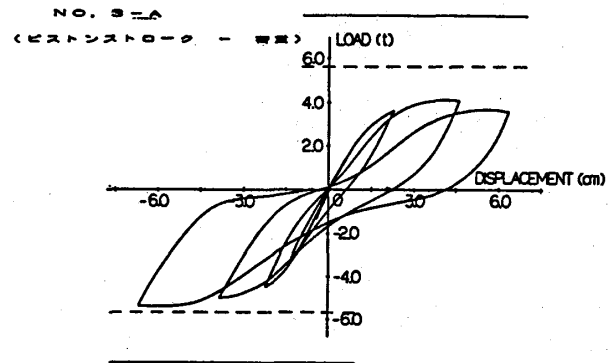


図-40 柱頭の荷重変形曲線 (No.3-A)

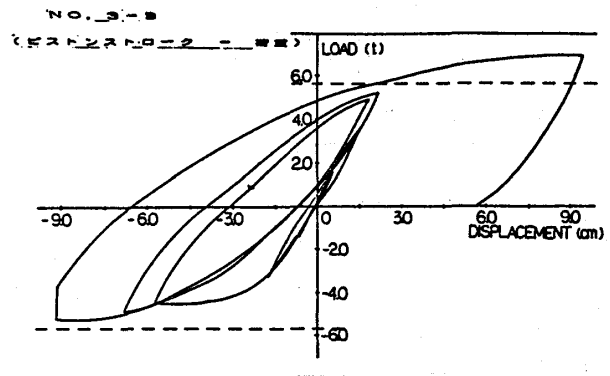


図-41 柱頭の荷重変形曲線 (No.3-B)

3.4 No.4試験体の実験結果

柱脚部分を柱形配筋で補強し、鉄骨に対するコンクリートのかぶり厚さを100mmとした試験体の実験結果を図-42～43および写真-7～8に示す。

この試験体は柱脚部を十分に補強しているため、剛性および耐力とも最も大きい。図-42が隅柱、図-43が側柱の柱頭における荷重-変形曲線であるが、両者とも弾性域は3.5ton前後と思われる、荷重変形曲線は安定した紡錘形の履歴ループを描いており、隅柱と側柱と

の間にあまり大きな相違は認められない。(写真-7～8参照)

また、柱脚部の変位および鉄骨のひずみ履歴の結果は、No.1試験体と同様な傾向を示している。

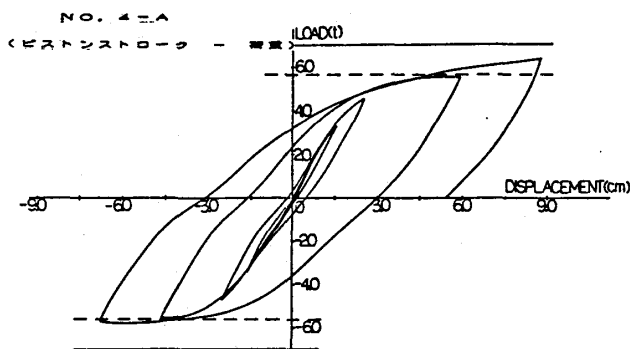


図-4 2 柱頭の荷重変形曲線 (No.4-A)

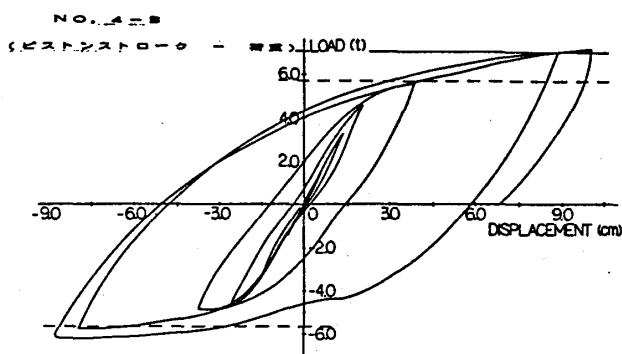


図-4 3 柱頭の荷重変形曲線 (No.4-B)

4. 考察

4.1 耐力の推定式

鉄骨とコンクリートの付着を無視して、コンクリートの支圧耐力が図-4 4のようになると仮定し、支圧力はフランジの幅だけが有効と考えた場合、力の釣り合いおよびモーメントの釣り合いから

$$Q = F_1 - F_2 \quad (1)$$

$$Q \left(h + \frac{X}{2} \right) = F_2 \cdot \frac{1}{2} \quad (2)$$

$$\text{ただし } F_1 = b \cdot \sigma_c \cdot X \quad (3)$$

$$F_2 = b \cdot \sigma_c \cdot (1d - X) \quad (4)$$

(1)および(2)式に(3)、(4)式を代入し、Xについて整理すると

$$2X^2 - 4hX - 2h1d - 1d^2 = 0 \quad (5)$$

これをXについて解き

$$\sqrt{1 + \left(\frac{1d}{2h+1d} \right)^2} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1d}{2h+1d} \right)^2$$

とするとコンクリートの支圧破壊による荷重 Q_u は次式で示される。

$$Q_u = \frac{1}{2} \cdot \frac{b \cdot \sigma_c \cdot 1d^2}{2h+1d} \quad (6)$$

鉄骨の塑性ヒンジ形式による荷重を Q_p とすると

$$Q_p = \frac{\sigma_y \cdot Z_p}{h} \quad (7)$$

となる。実験結果のグラフで実線は(6)式、破線は(7)式の計算結果を示す。

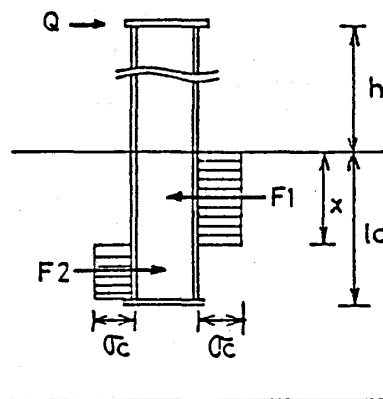


図-4 4 柱脚の耐力機構

4.2 柱脚のひずみ分布

強軸荷重の場合、柱脚の補強の程度にあまり関係なく一定の傾向を示している。すなわち、鉄骨フランジのひずみ履歴の結果から鉄骨の塑性関節は地中梁と柱の境界部に形成され、上下に塑性域が広がっていくと考えられる。また、弾性域における鉄骨フランジのひずみ分布は塑性関節の形成が予想される部分を中心として、地中梁下50mmの埋込み部まではほぼ同じひずみ量を示し、それより下部の埋込み部は付着応力のため深さに比例して減少する。

弱軸荷重の場合、塑性域は埋込み部分には現われず、

塑性関節は強軸の場合より上部に移動すると考えられる。柱脚のひずみ分布は地中梁上部および境界部でのひずみ量は大きい、埋込み部では極端に減少し、下部のひずみは非常に小さくなる。

以上の結果から№1～№4試験体ともアンカーボルトにはほとんど応力が働いていないと推察できる。

4. 3 破壊形式と柱脚の補強効果

鉄骨に鉄筋のための穴をあけ、その穴を通して主筋を配筋した直交方向地中梁の補強効果は、かなり大きいと考えられる。すなわち、№3試験体隅柱のように地中梁が片側のみでありしかも直交方向地中梁がない場合、その柱脚の復元力特性は逆S字のループを示す。その原因はコンクリートの支圧破壊により早期から地中梁全体にクラックが進展することであり、地中梁のひび割れとともに耐力が低下している。(図-40および写真-5参照)

№3試験体と比べ直交方向地中梁で補強した試験体は安定した紡錘形の復元力特性を示している。柱脚隅角部分鉄骨かぶり厚さは50mmであるが、隅角部に著しい破壊は生じず、耐力は鉄骨の塑性化により決定している。これらの原因は、柱脚埋込み部鉄骨を串刺すように配筋してある直交方向地中梁主筋がそのせん断耐力により柱脚を拘束するためと推定される。さらに、直交方向地中梁を含めて、串刺し状に鉄骨を貫通した地中梁主筋は、柱が地中梁から抜け出すことを防止するため、塑性域における柱脚の挙動をより粘り強くさせる効果が大きいと考えられる。(図-14および写真1～2参照)

5. 結論

アンカーボルトの代りにホールインアンカーを用いた埋込み式柱脚に関する以上の実験結果より以下のことが結論づけることができる。

(1) 柱脚の固定度に関しては、柱成の2倍程度の埋込みで十分な固定度が得られ、このような場合アンカーボルトはほとんど応力を受けず、ホールインアンカーで十分代替使用が可能である。

(2) 鉄骨に対する地中梁のかぶり厚さが少ない場合、直交方向地中梁による補強効果は非常に高く、この補強効果により耐力および剛性ともかなり上昇する。

(3) (2)のように補強を行なった試験体の場合、耐力は全て鉄骨の曲げ耐力により決定され、柱脚の安全性は十分保証され则认为てよいであろう。すなわち全ての試験体は付着を無視した支圧耐力の計算式より低い荷重で耐力機構となり、鉄骨の塑性関節の形成により耐力が決定された。

(4) 柱脚の補強には直交方向地中梁の効果が一番大き

く、一般に推奨されている補強方法より直交方向地中梁をつけた方が補強効果が大きいと言えよう。

(参考文献)

- (1) 日本建築学会：1978年宮城県沖地震災害調査報告，日本建築学会，1980
- (2) 田口武一：鋼柱脚の固定度に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集第51号，1955
- (3) 秋山 宏，黒沢 稔，和国信之，西村 功：鋼構造露出型柱脚の強度と変形，日本建築学会論文報告集第342号，1984
- (4) 増田貫志：鉄骨および鉄骨鉄筋コンクリート柱脚部の力学的性状に関する実験的研究，学位論文，1982
- (5) 秋山 宏，黒沢 稔，和国信之，西村 功：埋め込み形式柱脚の強度と変形，日本建築学会大会学術講演梗概集，1981



写真-1 柱脚部分の配筋 (No. 2-B)

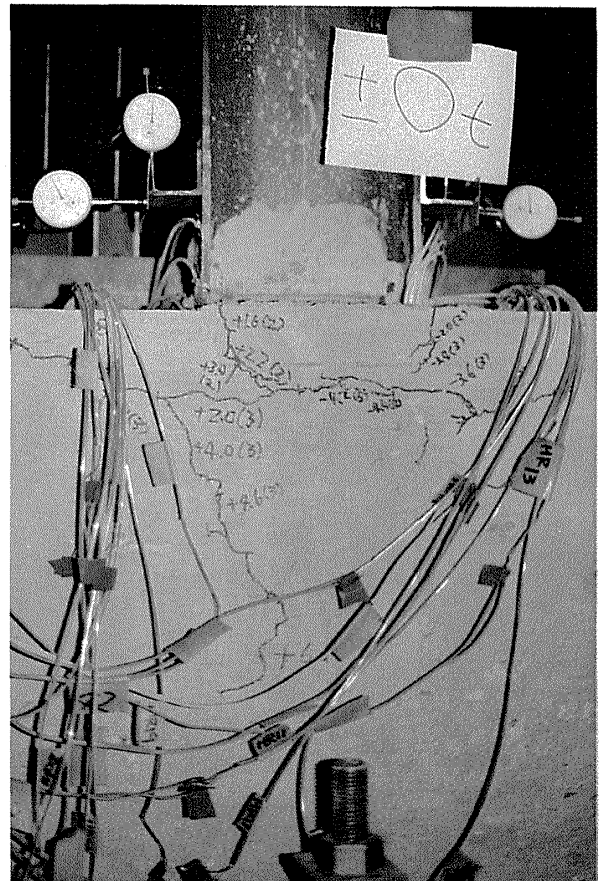


写真-3 柱脚の破壊状況 (No. 2-B)

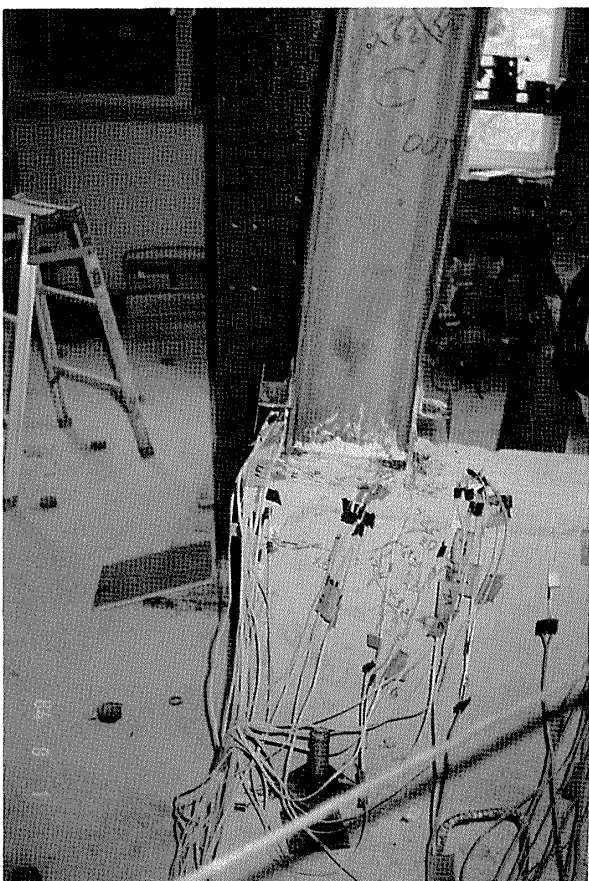


写真-2 柱脚の破壊状況 (No. 1-C)

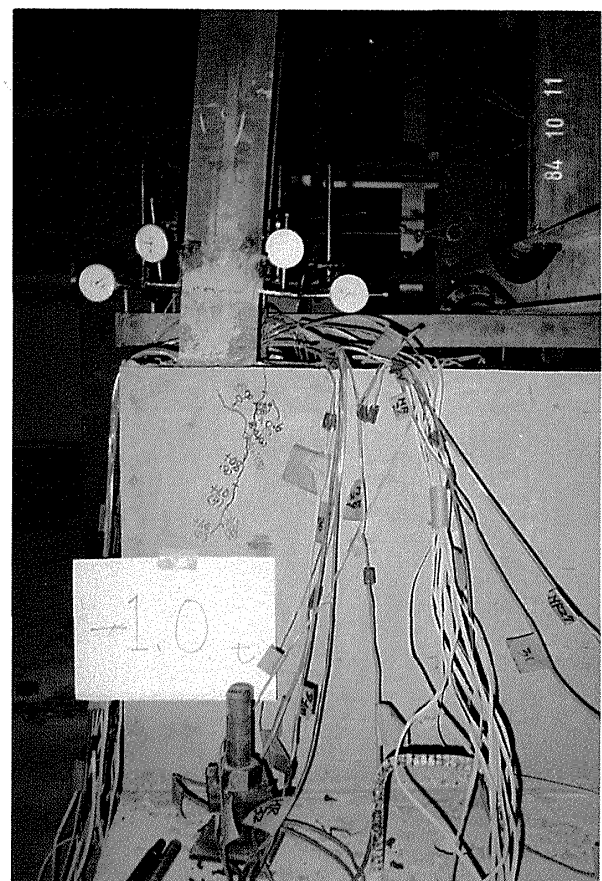


写真-4 柱脚の破壊状況 (No. 2-C)



写真-5 柱脚の破壊状況 (No.3-A)

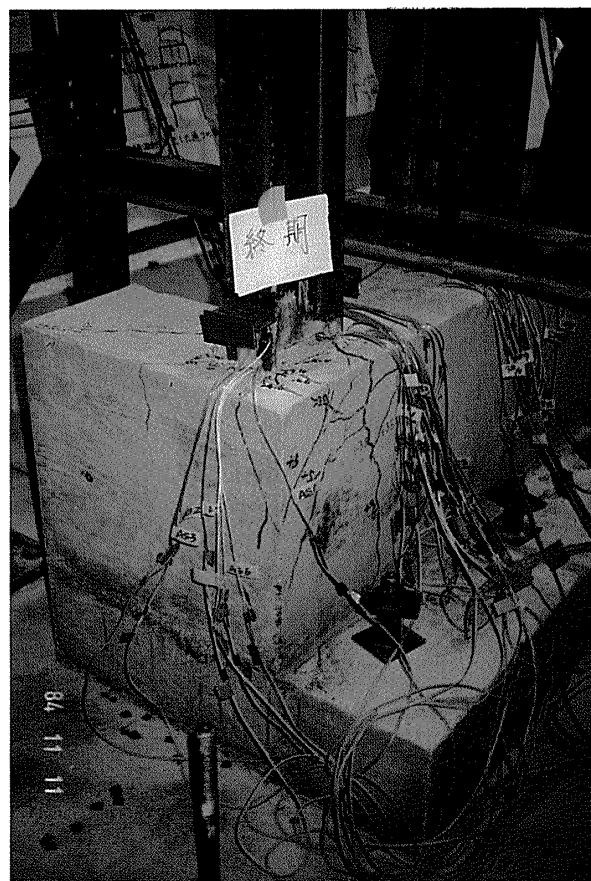


写真-7 柱脚の破壊状況 (No.4-A)

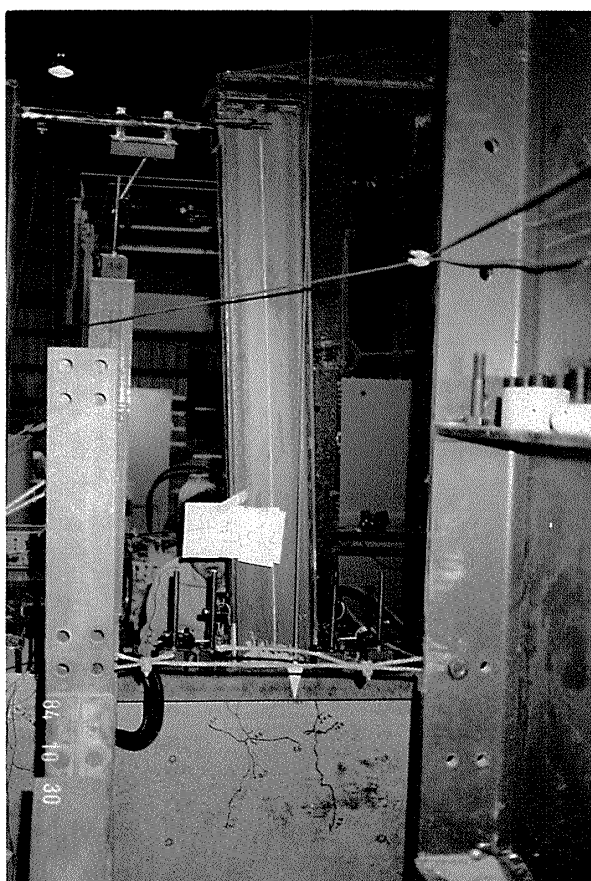


写真-6 柱脚の破壊状況 (No.3-B)

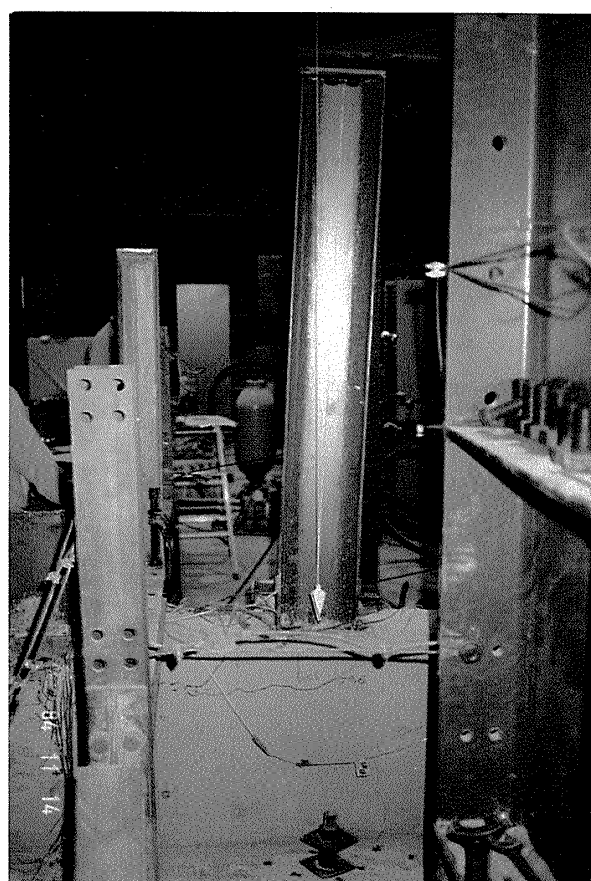


写真-8 柱脚の破壊状況 (No.4-B)