

# 鉄骨露出型柱脚の復元力特性に関する研究

高松 隆夫\*・銅木 弘和\*\*・中村慎太郎\*\*\*

(平成13年10月26日受理)

## A Study on Restoring Force Characteristics of Steel Exposed-Type Column Base

Takao TAKAMATSU, Hirokazu DOUKI and Shintarou NAKAMURA

(Received Oct. 26, 2001)

### Abstract

The restoring force characteristics of the usual column bases are shown to be the slip-type ones, and the plastic deformation of the column base is due to monotonic tensile deformation of the anchor bolts. The experiments of the column base with thin base plate, and of the column base with anchor bolts tightened in time were carried out last year. The restoring force characteristics are modeled and compared with the experimental results. The analytical models are in good agreement with the experimental ones.

**Key Words:** exposed-type column base, anchor bolt, restoring force characteristics, base plate

### 1. はじめに

兵庫県南部地震においては露出型柱脚の被害が多数報告されている<sup>1)2)</sup>。その被害のほとんどは、ねじ部破断や基礎コンクリートからの抜け出し等のアンカーボルトの損傷によるものである。ねじ部破断を改善するために、ねじ部断面を軸部断面よりも大きくした拡径ねじアンカーボルトを用いることにより、安定した復元力特性を得ることができると報告されている<sup>3)</sup>。一般的な露出型柱脚では、ベースプレートの板厚を十分大きくすることにより、アンカーボルトのみを降伏させることが可能となり、その復元力特性はスリップ型となる。

一方、数値解析により柱脚の復元力特性の違いが骨組の地震応答性状に与える影響に関する研究は多数報告されており<sup>4)5)6)7)</sup>、はり降伏型骨組においては、復元力特性の違いは上部骨組、および柱脚自身の応答性状にほとんど影響を与えないこと、そして、第1層の強度を上昇させることにより第1層へのエネルギー集中を緩和できること等が述べられている。しかしながら、第1層の強度が他層に比較

して低い場合には、第1層へのエネルギー集中を起こすことから柱脚に十分なエネルギー吸収が期待されることになる。スリップ型復元力特性をもつ露出型柱脚に大きなエネルギー吸収をさせるためには一層において大きな層間変形角が生じることになる。そのため、前報<sup>8)</sup>において、層間変形角を小さくおさえてスリップ型復元力特性と同等のエネルギー吸収可能な露出型柱脚として途中締めアンカーボルト降伏先行型、およびベースプレート降伏先行型の柱脚の実験を行った。

そこで、本論文においては前報<sup>8)</sup>で報告した露出型柱脚の実験結果を元に、復元力特性の基本形を呈示するとともに、ベースプレート降伏先行型の降伏耐力評価式を誘導することを目的とする。また、途中締めアンカーボルト降伏先行型の復元力特性を実現可能な工法の検討も併せて行う。

### 2. 実 験

前報で詳細を述べているので、本論文では概要を述べる。

#### 2.1 実験概要

従来の露出型柱脚すなわち復元力特性がスリップ型を示

\*広島工業大学工学部建設工学科

\*\*株式会社フジタ

\*\*\*広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻

すアンカーボルト降伏先行型，スリップ現象を改善できる途中締めアンカーボルト降伏先行型，そして，ベースプレート降伏先行型の3type について復元力特性を把握するための実験を行った。ただし，本実験では，アンカーボルトおよびベースプレートの変形性状に着目しているため，鉄骨基礎を使用することにより，ベースモルタルや基礎コンクリートの破壊を無視できる完全弾性体基礎を持つ柱脚と考えることにした。

2.2 載荷方法

本実験では，鉛直・水平二方向に加力できる二軸載荷装置を使用した(図1)。鉛直油圧ジャッキにより所定の軸力を載荷し，水平油圧ジャッキによる正負交番繰返し水平載荷を行った。圧縮軸力としては0(kN)または，軸力比0.15にあたる490(kN)を加えた。

水平載荷方法は，各試験体の降伏耐力 $P_y$ に対応する柱頭部の変位 $\delta_y$ の整数倍の値を選び，各変位に対して1サイクルの定変位繰返し水平載荷を行い，柱脚部の回転角が約0.1(rad)に達すると実験を終了した。

また，途中締めアンカーボルト降伏先行型試験体については，正負交番繰返し水平載荷の途中，柱頭部の変位 $\delta$ が0(mm)になった時点で，アンカーボルトに貼付した歪ゲージにより，歪が増さない程度にアンカーボルトの締め付けを行い，アンカーボルトとベースプレートの遊びをなくしながら正負交番繰返し水平載荷を行い，柱脚部の回転角が約0.05(rad)に達すると実験を終了した。

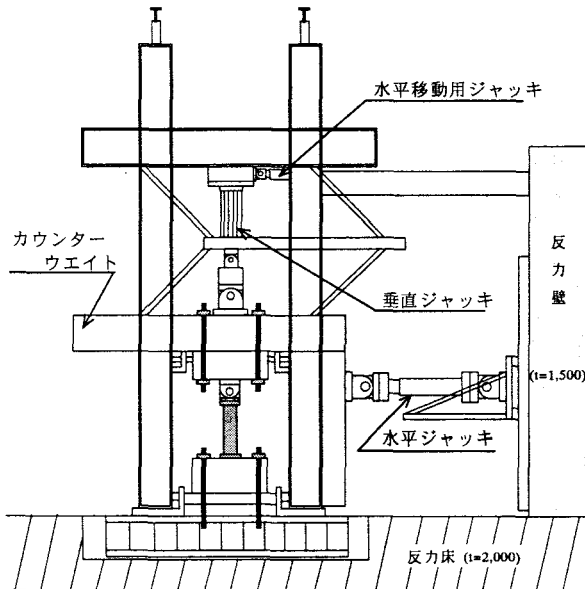


図1 二軸載荷装置

2.3 試験体

試験体の形状，アンカーボルトの形状，そしてベースプレートの形状をそれぞれ図2，3，4に示す。また，使用鋼材の機械的性質および試験体リストと各部主要寸法をそれぞれ表1，2に示す。試験体としては，Type-ABがア

ンカーボルト降伏先行型試験体で軸力0(kN)と490(kN)の2体，Type-HTが途中締めアンカーボルト降伏先行型試験体で軸力0(kN)と490(kN)の2体，Type-BPが薄いベースプレートを使用した，ベースプレート降伏先行型試験体で，2種類の板厚 $t=9(\text{mm})$ ， $t=19(\text{mm})$ そして，軸力0(kN)と490(kN)の4体で計8体である。各試験体の名称の説明を図5に示す。またアンカーボルトには丸鋼をねじ部や軸部を切削加工したものを，そして柱には冷間成形角形鋼管を使用した。

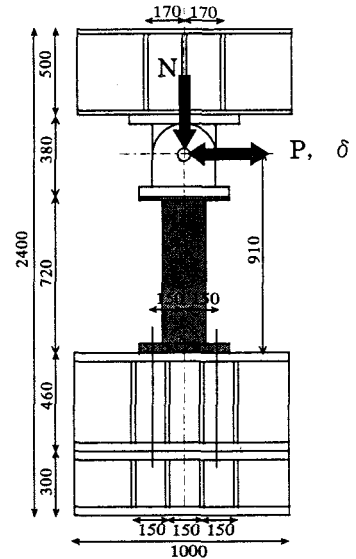


図2 試験体形状

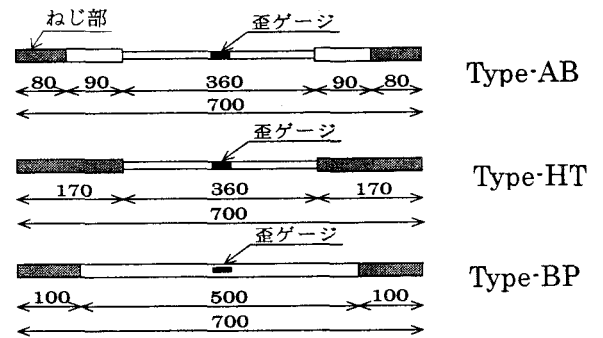


図3 アンカーボルト形状

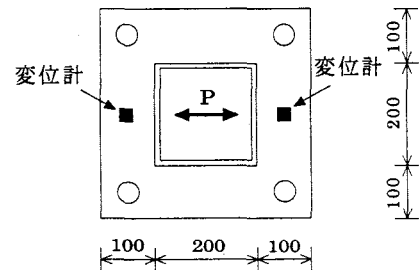


図4-1 ベースプレート形状

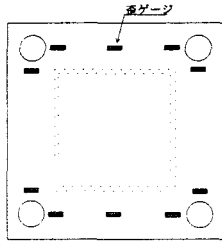


図4-2 Type-AB, Type-HT 歪ゲージ貼付位置

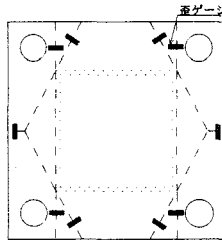


図4-3 Type-BP 歪ゲージ貼付位置

表1 使用鋼材の機械的性質

使用箇所	材質	E (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏比 (%)	伸び (%)	
アンカーボルト	SS400	201000	300	432	69	35	
ベースプレート	t=9	SS400	201000	282	401	73	27
	t=19	SS400	199000	248	415	60	29
	t=50	SS400	206000	261	414	63	37
柱	t=12	STKR400	206000	374	439	85	35

表2 試験体リスト, 各部主要寸法

試験体名	柱サイズ	ベースプレートサイズ	アンカーボルト		
			軸径 (mm)	軸部断面積 (cm <sup>2</sup> )	軸部長さ (cm)
AB50M22-N=0	200×200 ×12	400×400×50	22	3.80	36
AB50M22-N=490					
HT50M22-N=0					
HT50M22-N=490		400×400×19	32	8.03	50
BP19M32-N=0					
BP19M32-N=490					
BP09M32-N=0					
BP09M32-N=490	400×400×9				

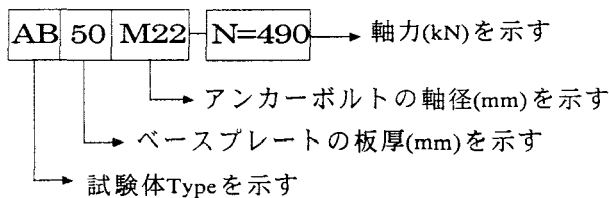


図5 試験体名称の説明

#### 2.4 降伏耐力の計算

アンカーボルト降伏型柱脚の降伏耐力 ${}_{ab}M_y$ は, 秋山等<sup>4)</sup>により提案されている式を改良した次式により求められる。

$${}_{ab}M_y = n_t \cdot {}_{ab}A \cdot {}_{ab}\sigma_y \cdot (d_t + d_c) + Nd_c$$

ここに,  $n_t$ : 引張り側のアンカーボルトの本数,  ${}_{ab}A$ : アンカーボルトの断面積,  ${}_{ab}\sigma_y$ : アンカーボルト材の降伏点,  $N$ : 柱軸力である。

### 3. 塑性解析

ベースプレート降伏先行型露出型柱脚の降伏耐力 ${}_{BP}M_y$ を求めるため, 降伏線理論に基づいて計算式を誘導する<sup>9)10)</sup>。

#### 3.1 解析仮定

##### a) Collapse mechanism 1

ベースプレートに面外曲げ変形が生じるとともに, ベースプレートの曲げ強度がある程度大きい場合, アンカーボルトがベースプレート外縁における反力によって降伏し, 図6に示すような崩壊機構を形成する場合である。すなわち, ベースプレート板厚19mmの場合の崩壊機構である。

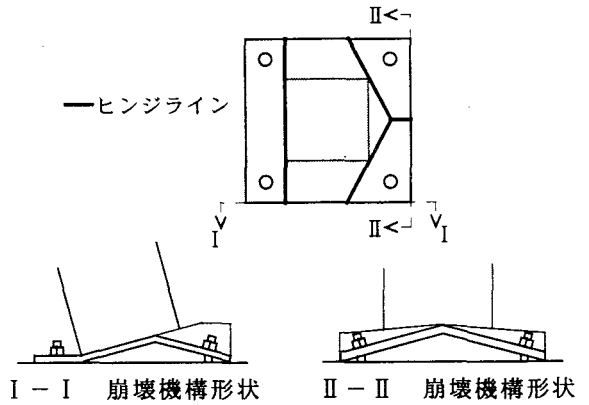


図6 Collapse mechanism 1 崩壊機構

##### b) Collapse mechanism 2

ベースプレートに面外曲げ変形が生じるが, ベースプレートの曲げ強度が小さいため, アンカーボルトを塑性化させるのに十分な反力は得られず, 図7に示すような崩壊機構を形成する場合である。すなわち, ベースプレート板厚9mmの場合の崩壊機構である。

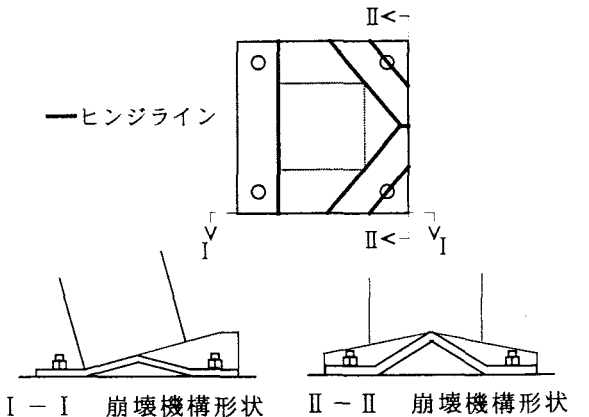


図7 Collapse mechanism 2 崩壊機構

#### 3.2 Type-BPの降伏耐力 ${}_{BP}M_y$

ベースプレート降伏先行型露出型柱脚の降伏耐力

${}_{BP}M_y$  は、次式で予測できる。

Collapse mechanism 1

$${}_{BP}M_y = {}_{BP}M_{0y} \left\{ (D+2H) + \left[ \frac{4(H-x)(D+x)}{D+2H} \right] + \left[ \left( D + \frac{D^2}{H} - 2 \cdot \frac{(\alpha+1)(D+x)}{\alpha(D+2H)} \right) \left( 1 + \frac{2H}{D} \right) \right] + n \cdot {}_{AAe} \cdot {}_A\sigma_y \frac{Dh_b}{H} + N \frac{D}{2} \right\} \quad (1)$$

Collapse mechanism 2

$${}_{BP}M_y = {}_{BP}M_{0y} \left\{ (D+2H) + \left[ \frac{4(H-x)(D+x)}{D+2h_a-2\alpha h_b} \right] + \left[ \frac{4Dh_b \left( \frac{1}{\alpha^2} + 1 \right) (\alpha+1)}{D+h_a-\frac{2h_b}{\alpha}} \right] + \left[ 1 + \frac{2 \left( \frac{D}{\alpha^2} + D \right)}{D+h_a-\frac{2h_b}{\alpha}} \right] (D+2H) \right\} + N \frac{D}{2} \quad (2)$$

ここに、 ${}_{P}\sigma_y$  : ベースプレート材の降伏点、 $t$  : ベースプレートの板厚、 ${}_{BP}M_{0y} = {}_{P}\sigma_y \cdot t^2 / 4$  : ベースプレートの単位長さあたりの全塑性モーメント、 $D$  : 柱の幅、 $h_a$  : 柱断面最外縁からアンカーボルト(中心)までの距離、 $h_b$  : アンカーボルト(中心)からベースプレート外縁までの距離、 $H = h_a + h_b$  : 柱断面最外縁からベースプレート外縁までの距離、 $\alpha$  : ヒンジラインとベースプレート外縁がなす角度、 $x$  : 柱断面最外縁からのベースプレートを剛体と仮定するまでの距離、 $n$  : 引張側のアンカーボルトの本数、 ${}_{AAe}$  : アンカーボルトのネジ部有効断面積、 ${}_A\sigma_y$  : アンカーボルト素材の降伏点、 $N$  : 柱軸力とする。

#### 4. 復元力特性

任意の変形で繰返し曲げモーメントを受ける柱脚の  $M-\theta$  関係の基本型を提示する。

##### 4.1 Type-AB

軸力 0 の場合の復元力特性モデルについて説明する。曲げモーメント  $M$  を載荷すると、弾性勾配  $K_b$  で回転角が生じ、アンカーボルトの降伏耐力  ${}_{AB}M_y$  に達する。その後、二次勾配  $K_{bst}$  で回転角が増大する。一旦塑性化した柱脚に除荷すると勾配  $K_b$  で曲げモーメント  $M$  が 0 になるまで回転角は減少する。曲げモーメント  $M$  が 0 のままで、回転角は減少し原点に到達する。負方向へ載荷すると、同様の履歴曲線となる。再び正方向へ載荷すると前サイクルで曲げモーメント  $M$  が 0 となった点までスリップする。その点に達すると勾配  $K_b$  で回転角が生じ、前サイクルの除荷開始点に達すると勾配  $K_{bst}$  で回転角が増大する(図8)。

次に軸力を受ける場合の復元力特性モデルについて説明

する。曲げモーメント  $M$  が  $M_n = N \cdot d_c$  に達するまでは軸力による曲げ抵抗により回転角は生じない。 $M_n$  に達すると、弾性勾配  $K_b$  で回転角が生じ、アンカーボルトの降伏耐力  ${}_{AB}M_y$  に達すると、二次勾配  $K_{bst}$  で回転角が増大する。一旦塑性化した柱脚を除荷すると勾配  $K_b$  で  $M_n$  に戻る。 $M = M_n$  となるとアンカーボルトに引張力は作用しないため、回転角は  $M_n$  を保持したまま 0 に戻る。負方向に載荷すると同様の履歴曲線となる。再び正方向へ載荷すると  $M_n$  に達するまでは回転角は生じず、 $M_n$  に達すると前サイクルでアンカーボルトの引張力が除荷された点までスリップする。除荷された点まで達すると勾配  $K_b$  で回転角が生じ、前サイクルの除荷開始点に達すると勾配  $K_{bst}$  で回転角が増大する(図9)。

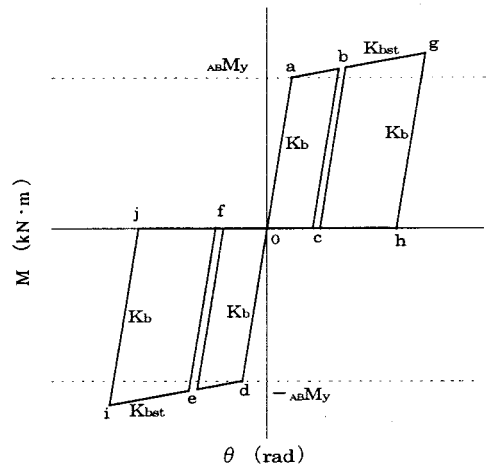


図8 Type-AB,  $M-\theta$  関係 ( $N=0$ )

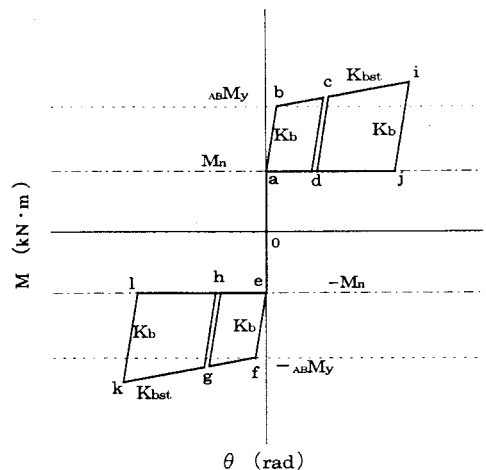


図9 Type-AB,  $M-\theta$  関係 ( $N=490$ )

##### 4.2 Type-HT

軸力 0 の場合の復元力特性モデルについて説明する。曲げモーメント  $M$  を受けると、弾性勾配  $K_b$  で回転角が生じ、アンカーボルトの降伏耐力  ${}_{AB}M_y$  に到達する。その後、二次勾配  $K_{bst}$  で回転角が増大する。一旦塑性化した柱脚を除荷すると勾配  $K_b$  で曲げモーメント 0 の点に戻り、

曲げモーメントが0のままで回転角は減少し原点に到達する。回転角が0になった時点で伸ばされてきた遊びを締め直す。負方向に載荷すると同様の履歴曲線となる。再び正方向へ載荷すると前サイクルと同様に回転角0の状態から  $K_b$  で変形する。加工硬化により前サイクルで除荷を始めた  $M$  に達すると再びアンカーボルトに塑性変形が生じ  $K_{bst}$  の勾配で変形が増大する (図10)。

次に軸力を受ける場合の復元力特性モデルについて説明する。曲げモーメント  $M$  が  $M_n = N \cdot d_c$  に達するまでは軸力による曲げ抵抗により回転角は生じない。 $M_n$  に達すると、弾性勾配  $K_b$  で回転角が生じ、アンカーボルトの降伏耐力  $A_B M_y$  に達すると、二次勾配  $K_{bst}$  で回転角が増大する。一旦塑性化した柱脚を除荷すると勾配  $K_b$  を保持したまま  $M_n$  に戻る。 $M = M_n$  となるとアンカーボルトに引張力は作用しないため、回転角は  $M_n$  を保持したまま0に戻る。 $M = 0$  になった時点で伸ばされてきた遊びを締めなおし、再び正方向へ載荷すると  $M_n$  に達するまでは回転角は生じず、 $M_n$  に達すると前サイクルと同様に回転角0の状態から  $K_b$  で変形する。加工硬化により前サイクルで除荷を始めた  $M$  に達すると再びアンカーボルトに塑性変形が生じ  $K_{bst}$  の勾配で変形が増大する (図11)。

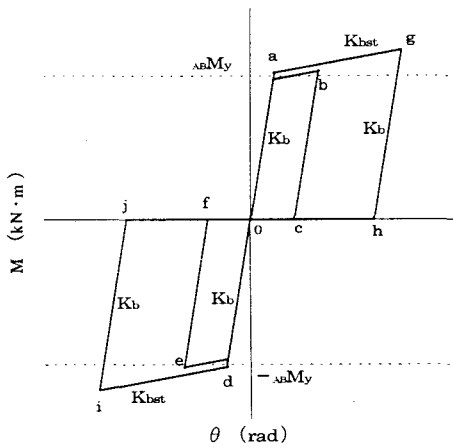


図10 Type-HT,  $M-\theta$  関係 ( $N=0$ )

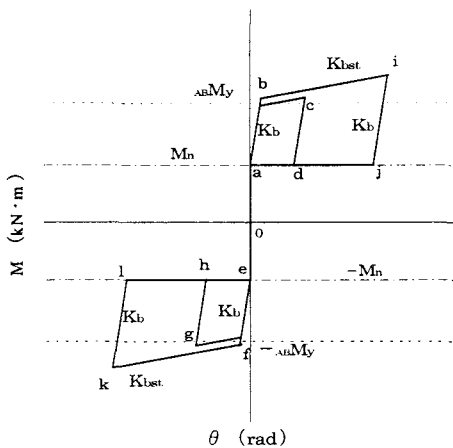


図11 Type-HT,  $M-\theta$  関係 ( $N=490$ )

### 4.3 Type-BP

軸力0の場合の復元力特性モデルについて説明する。曲げモーメント  $M$  を受けると、弾性勾配  $K_p$  で回転角が生じ、ベースプレートの降伏耐力  $B_P M_y$  に達すると、二次勾配  $K_{pst}$  で回転角が増大する。一旦塑性化した柱脚を除荷すると勾配  $K_p$  を保持したまま0に戻る。負方向の曲げモーメントを受けると、正方向における残留変形を元に戻しつつ、負方向における弾性限界点を指向する経路を取る。 $M$  が  $-B_P M_y$  に達すると二次勾配  $K_{pst}$  で回転角が増大する。負方向で塑性化した柱脚を除荷すると勾配  $K_p$  を保持したまま0に戻り、正方向の曲げモーメントを受けると、負方向における残留変形を元に戻しつつ、正方向における前サイクルの除荷開始点を指向する経路をとる (図12)。

次に軸力を受ける場合の復元力特性モデルについて説明する。曲げモーメント  $M$  が  $M_n = N \cdot D/2$  に達するまでは、軸力による曲げ抵抗により回転角は生じない。 $M_n$  に達すると弾性勾配  $K_p$  で回転角が生じ、ベースプレートの降伏耐力  $B_P M_y$  に達すると、二次勾配  $K_{pst}$  で回転角が増大する。一旦塑性化した柱脚を除荷すると、 $K_p$  を保持したまま  $M = M_n$  に戻る。その後勾配は緩やかになる。この勾配は  $M = M_n$  に達すると正方向水平載荷によるベースプレートの残留変形を圧縮軸力により元に戻しつつ、負方向における弾性限界点  $M_n + (-B_P M_y)$  線上へ移行した点を指向する経路をとることから求められる。変形が0になると、軸力による曲げ抵抗の影響で  $M$  が  $-M_n$  に達するまでは回転角は生じず、 $-M_n$  に達すると勾配  $K_p$  で回転角が生じはじめ、 $-B_P M_y$  に達すると、ベースプレートの塑性化により勾配  $K_{pst}$  で回転角が増大する。負方向で塑性化した柱脚を除荷すると、 $K_p$  を保持したまま  $M = -M_n$  に戻る。正方向における前サイクルの除荷開始点を  $(-M_n) + B_P M_y$  だけ移した点を指向する経路をとる。 $\theta = 0$  に達すると、曲げ抵抗の影響で回転角は生じず、 $M$  が  $M_n$  に達すると前サイクルの除荷開始点を指向する (図13)。

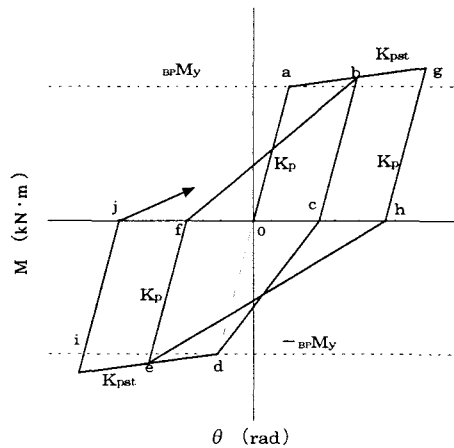


図12 Type-BP,  $M-\theta$  関係 ( $N=0$ )

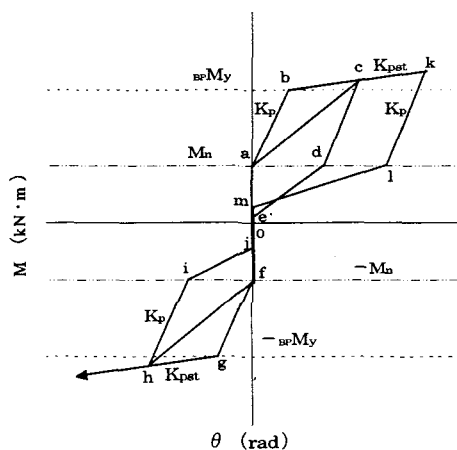


図13 Type-BP, M-θ 関係 (N=490)

### 5. M-θ 関係

表3に実験値と理論値の比較を示す。ここに、 $E M_y$ : 実験より得られた降伏耐力,  $M_y$ : 理論計算より得られた降伏耐力とし、 $E M_y / M_y$  も併せて示す。

$E M_y / M_y$  はBP09M32-N=0を除くと約1.0程度を示し、Collapse mechanism 1と仮定した崩壊機構を形成する降伏耐力の評価は精度よく行えるといえる。Collapse mechanism 2と仮定した崩壊機構を形成する試験体はBP09M32-N=490は $E M_y / M_y$ が0.99を示し、精度よく評価されているが、BP09M32-N=0は $E M_y / M_y$ が0.80を示し実験値より理論値が若干高めの値を推定したが、軸力下においては精度よく評価されていること、無軸力下での実験において復元力特性が安定していないことを考慮すれば、比較的良好な推定値であると考えられる。

表3 実験値・理論値比較

試験体名称	$M_y$ (kN·m)	$E M_y$ (kN·m)	$E M_y / M_y$
BP19M32-N=0	72.62	69.58	0.96
BP19M32-N=490	121.62	118.58	0.98
BP09M32-N=0	18.42	14.70	0.80
BP09M32-N=490	67.42	66.64	0.99

各試験体の M-θ 関係を図14に示し、モデル化した復元力特性を併せて示す。ここにM: 柱脚部モーメント, θ: 柱脚部回転角である。ただし、図中の Type-BP モデルの勾配は、理論的に求めることができなかつたため、実験により得られた勾配を適用している。

履歴特性は、Type-AB がスリップ型に、Type-HT はアンカーボルトの塑性化後も  $\theta=0(\text{rad})$  からモーメントが増加する履歴曲線を描き、復元力特性においてスリップ現象を緩和することができ、効率良くエネルギー吸収を行っているといえる。また、HT50M22-N=0では、履歴モデルは実験結果と比較的良好な対応を示したが、HT50M22-N=490ではベースプレートに塑性変形が生じ、復元力特

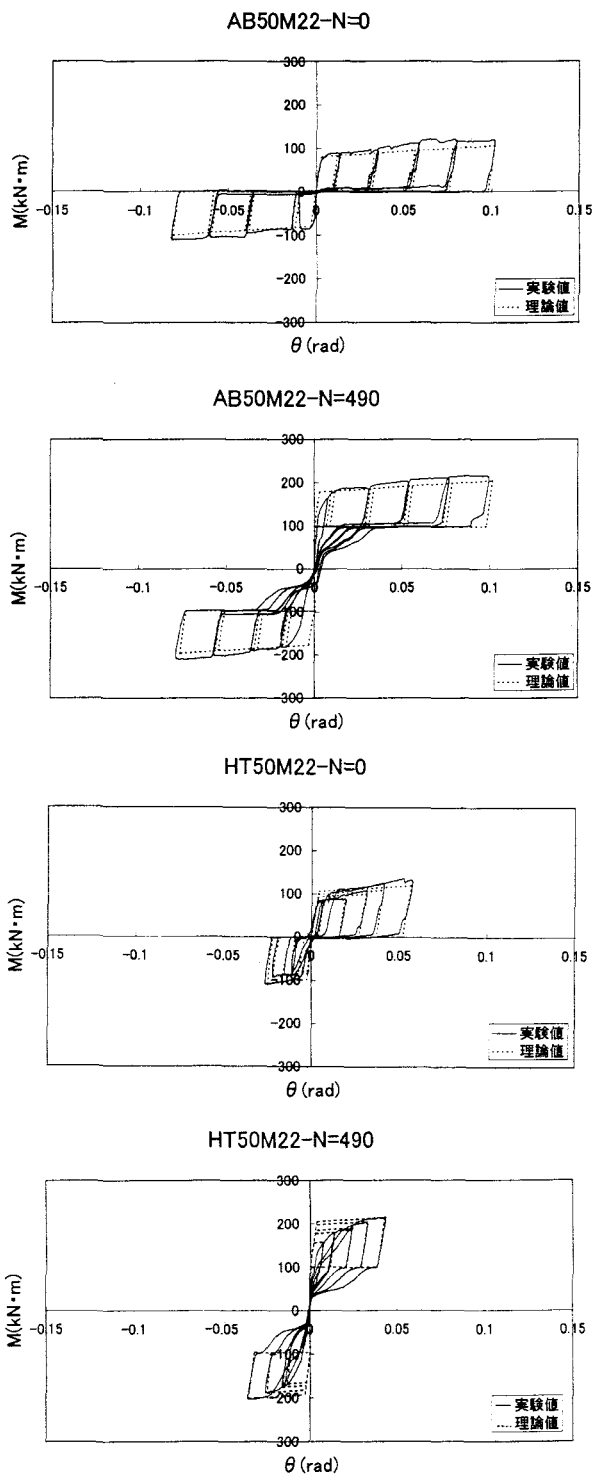


図14-1 Type-AB, Type-HT M-θ 関係

性にその影響がでたので、両者の対応は少し悪くなっている。

Type-BP ではBP19M32-N=0, BP09M32-N=0共に一般的な除荷点指向型を示した。BP19M32-N=490は圧縮軸力による曲げ抵抗の影響を受けたが、ベースプレート板厚が比較的大きかつたために、曲げ耐力が大きくなり原点(0点)付近で抉られるような履歴曲線を描いた。BP09M32-N=490では、軸力による曲げ抵抗の影響を受けて、ベースプレートの曲げ耐力が小さいために、原点(0点)をはさんで履歴ループ部分が上下方向に分離した

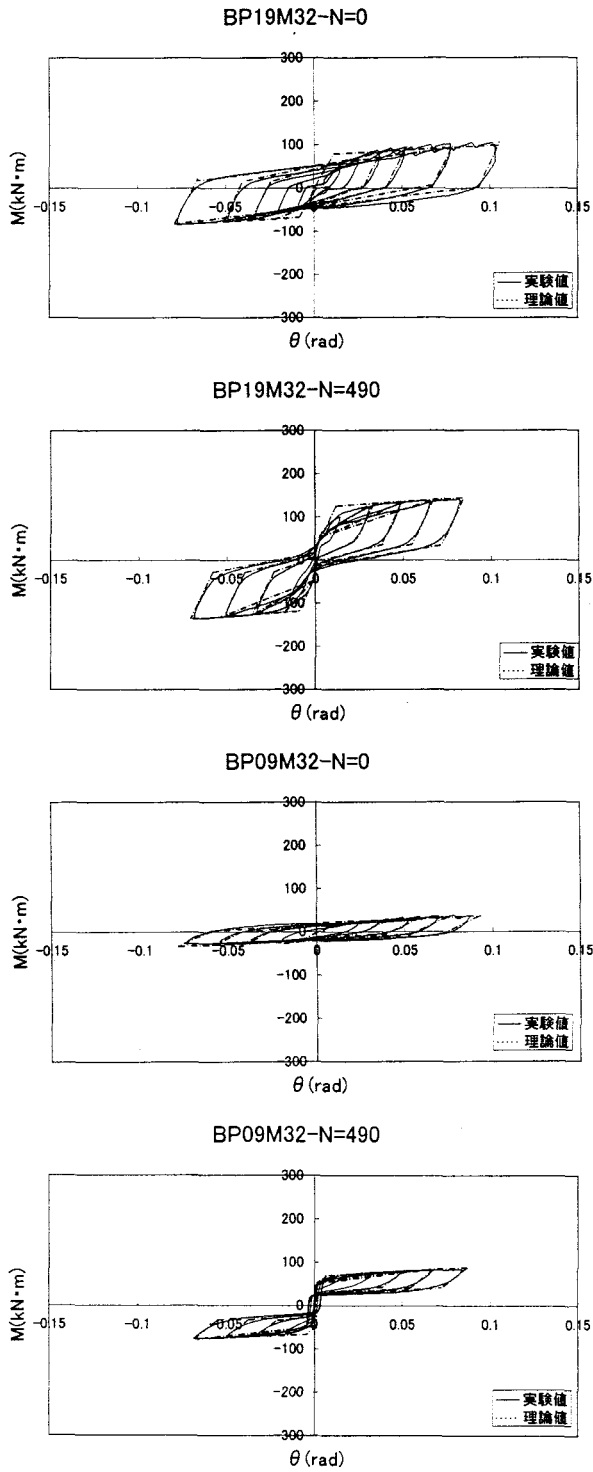


図14-2 Type-BP, M-θ関係

履歴曲線を描いた。しかし、両試験体ともモデル化した復元力特性と良い対応を示したことより、この2つの復元力特性は見かけ上では異なった種類の復元力特性のようであるが、圧縮軸力による曲げ抵抗に対するベースプレートの曲げ耐力の割合によって、復元力特性に違いが現れたと考えられる。

## 6. 途中締め概念

途中締めアンカーボルト降伏先行型試験体の実現可能な工法を提案する。図15に示すようにナットとベースプレート間に楔を打ち込み、常にバネで押込むことで、アンカーボルトが伸ばされることによってできた遊びを無くす方法で実験を行った。その結果のP-δ関係を図16に示す。昨年のType-HTと比較した結果、多少の誤差は見られるものの比較的良好な対応を示している。図17に実験装置の写真を示す。

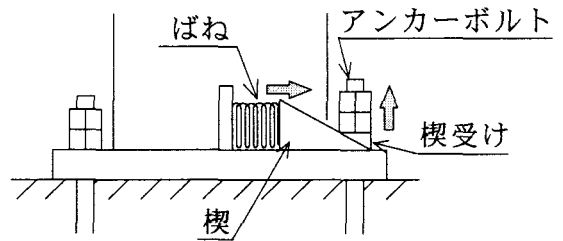


図15-1 途中締め概念図(载荷前)

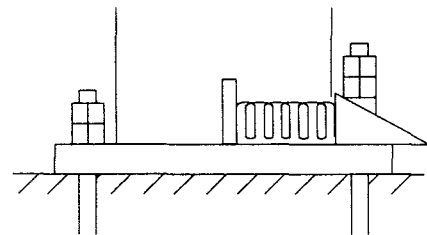


図15-2 途中締め概念図(アンカーボルト降伏後)

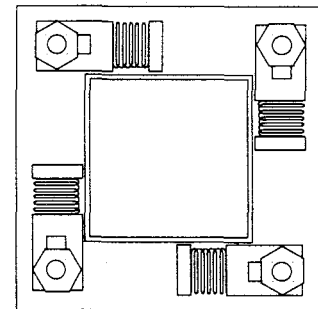


図15-3 途中締め概念図(平面図)

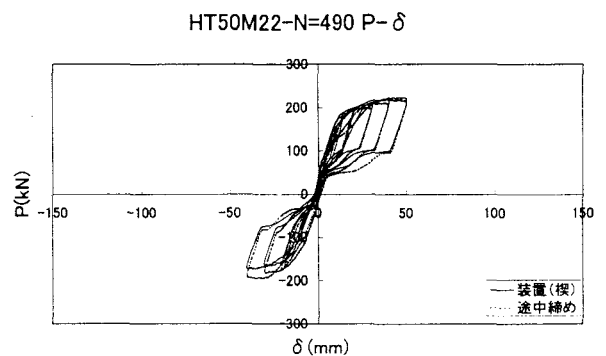


図16 P-δ関係

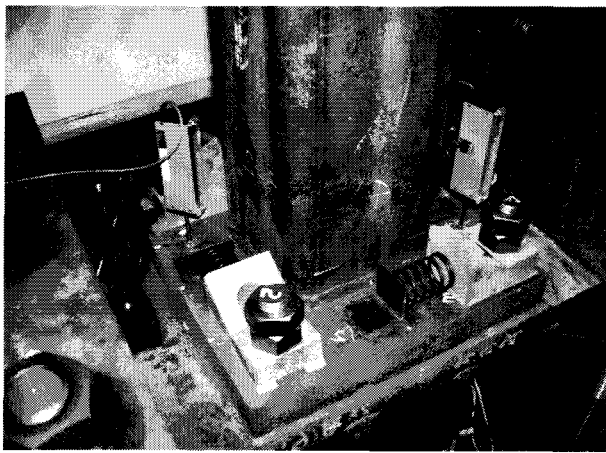
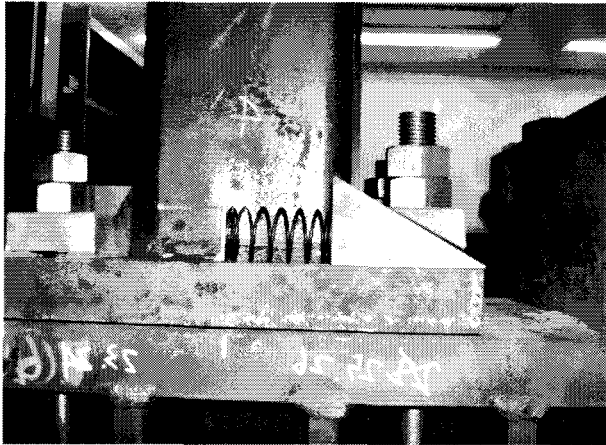


図17 途中締め工法装置写真

## 7. ま と め

以上のことより、次のようなことが言える。

1. ベースプレートの四隅にアンカーボルトが存在する場合のベースプレート降伏先行型露出型柱脚の降伏耐力 $B_F M_V$ はベースプレートに面外曲げ変形が生じるとともに、ベースプレートの曲げ強度がある程度大きいいため、アンカーボルトがベースプレート外縁におけるてこ反力によって降伏するような崩壊機構を形成する場合、ベースプレートに面外曲げ変形が生じるが、ベースプレート

の曲げ強度が小さいため、アンカーボルトを塑性化させるのに十分なたこ反力を得ることができない崩壊機構を形成する場合とも、本報に示した式(1)(2)によりそれぞれ予測可能である。

2. いずれの Type についても復元力特性を比較的良好に推定することができる。
3. 提案した工法を用いれば、途中締めアンカーボルト降伏先行型試験体と同様の復元力特性を得ることができる。

## 文 献

- 1) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会：1995年兵庫県南部地震，鉄骨造建築物被害調査報告書，pp.98-106，1995.5
- 2) 日本建築学会：兵庫県南部地震における鋼構造物の被害と教訓，pp.36-44，1996
- 3) 田中淳夫，増田浩志，元田 徹：アンカーボルト降伏先行型露出柱脚に関する研究，鋼構造論文集 第6巻第24号，pp.103-109，1999
- 4) 秋山 宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985
- 5) 河野昭雄，松井千秋：柱脚の復元力特性の違いがはり降伏型鉄骨ラーメンの地震応答性状に与える影響について，日本建築学会構造系論文集，第507号，pp.139-146，1998
- 6) 田中 尚，高梨晃一，大井謙一，前田祥三：鋼構造露出型柱脚部の弾塑性挙動に関する研究（その3．復元力特性のモデル化と地震応答），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.2049-2050，1981
- 7) 山田 哲，秋山 宏：柱脚の固定度が鋼構造多層骨組の終局耐震性能に与える影響，日本建築学会構造系論文集，第496号，pp.113-118，1997
- 8) 高松隆夫，銅木弘和：露出型柱脚の復元力特性に関する実験的研究，広島工業大学研究紀要，第35号，pp.133-140，2001
- 9) 秋山 宏，山田 哲，高橋 誠，桂 大輔，木村克次，矢幡秀介：露出型柱脚の実大振動台実験，日本建築学会構造系論文集，第514号，pp.185-192，1998
- 10) 田中 尚：建築構造学大系9．構造物の極限解析，彰国社，1969