

露出型柱脚の復元力特性に関する実験的研究

高松 隆夫*・銅木 弘和**

(平成12年9月30日受理)

Experimental Study on Restoring Force Characteristics of Exposed-Type Column Base

Takao TAKAMATSU and Hirokazu DOUKI

(Received Sep. 30, 2000)

Abstract

The experiments of exposed-type column bases with a variety of restoring force characteristics were carried out. Generally, exposed-type column bases consist of pre-yielding and a thick base plate. The restoring force characteristics of the usual column bases are shown to be of slip-type, and the plastic deformation of the column base is brought by 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. The experimental results of improving restoring force characteristics.

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

1. 序 論

鉄骨構造の建築物では、柱脚は鉄骨構造の上部構造と鉄筋コンクリート構造の基礎をつなぐ重要な部位である。阪神・淡路大震災では、鉄骨造建築物における被害のうち、柱脚部位の被害が報告されている¹⁾。特に露出型柱脚に被害が集中している。被害状況はアンカーボルトの破断や基礎コンクリートからの抜け出し、ベースプレートと柱の溶接部分での破断など多種多様である。中には、柱脚部の破損により構造物全体が倒壊ないし大破した構造物もある。それらの被害は必ずしも古い建築物ばかりでなく、比較的建設年代の新しいものにも生じており今後の設計・施工面において残された課題が存在すると考えられる。

近年、構造物の設計をより合理的なものにするために、従来の許容応力設計から終局強度設計への移行が見られる。特に耐震設計においては、構造物の抵抗力は単に強度のみでなく、エネルギー吸収能力としてとらえるべきである。骨組構造において、その構成要素が塑性変形能力に富

むことは、外荷重に対する骨組の抵抗力を高める効果があり、特に地震のような動的外乱に対して、塑性変形によるエネルギー吸収能力は、構造物にとって本質的に重要な抵抗力である。

通常、曲げモーメントを伝達する露出型柱脚においては、曲げモーメントに対してはアンカーボルトで引張り力を負担し、ベースプレートと基礎との間の接触面で圧縮力を負担するものとして設計されている。この場合、変形能力はアンカーボルトの伸び能力に支配されてしまい、復元力特性はいわゆるスリップ型を示す。柱脚部で大きなエネルギー吸収させるためには、大きな層間変形角を必要とすることになる。

そこで、本研究では、スリップ型復元力特性を改善させるために、アンカーボルトの伸びによるベースプレートとナットとの間の遊びを減少させる目的で、ベースプレートとナットの間にはバネを噛ませるという想定のもとに、実験途中でアンカーボルトを締め付け遊びを減少させながら繰返し載荷実験を行う。また、露出型柱脚はアンカーボルトや

* 広島工業大学工学部建設工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻

ベースプレート、柱、基礎コンクリートなどの複数の構成要素からなっているが、塑性変形はアンカーボルトでさせるといった考えが一般的になっている。しかしながら、アンカーボルトの伸びによるスリップをなくすためには、変形能力をアンカーボルトの伸び能力ではなく、ベースプレートの面外変形に支配させる事でも可能である。そのために、ベースプレートを降伏させる繰返し荷重実験も併せて行う。

2. 実験

2-1. 実験概要

本実験は、従来の露出型柱脚はアンカーボルト先行降伏型であり、その復元力特性がスリップ型を示すことより、スリップ現象を改善するために途中締めアンカーボルト降伏先行型、ベースプレート降伏先行型の復元力特性を把握するための実験を行う。

また本実験では、基礎部位を剛性の高い鉄骨基礎を使用することにより、基礎コンクリートの変形を無視できる剛体と考えることにする。

2-2. 荷重方法

本実験では、ハイテクリサーチセンターに設置されている二軸荷重装置(図1)を使用する。垂直油圧ジャッキにより所定の軸力を荷重し、水平油圧ジャッキによる正負交番繰返し水平荷重を行う。垂直荷重は、軸力 0(tf) または、降伏軸力比 0.15 にあたる一定の圧縮軸力 50(tf) を加える。

水平荷重方法は、各試験体の降伏耐力 P_y に対応する柱頭部の変位 δ の整数倍の値を選び、変位制御で各 1 サイクル毎繰返し水平荷重していき、柱脚部の回転角が約 0.1(rad) に達すると実験を終了する。

また、途中締めアンカーボルト先行型試験体については、正負交番繰返し水平荷重の途中、柱頭部の変位 δ が 0

(mm) になった時点で、アンカーボルトに添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荷重を行う。

2-3. 試験体

試験体の形状を図2に、アンカーボルトの形状を図3にベースプレートの形状を図4、使用鋼材の機械的性質を求めたために行った素材試験の結果を表1、試験体リストと各部主要寸法を表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(tf) と 50(tf) 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(tf) と 50(tf) 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、板厚 $t=9(\text{mm})$, $t=19(\text{mm})$ がそれぞれ軸力 0(tf) と 50(tf) で4体の計8体で行う。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のネジ部は切削加工された物を使用し、柱は冷間成形角形鋼管を使用する。

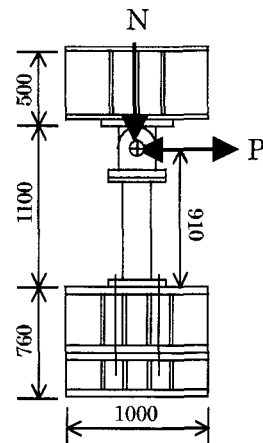


図2 試験体形状

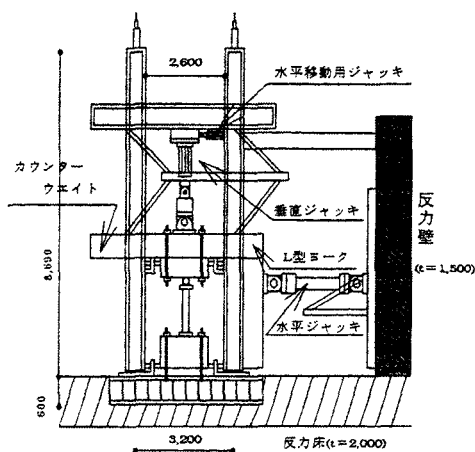


図1 二軸荷重装置

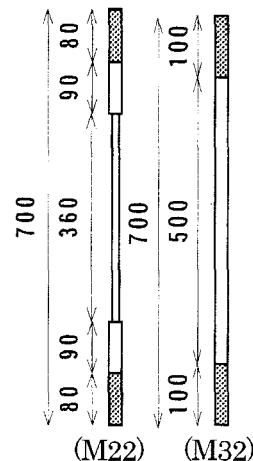


図3 アンカーボルトの形状

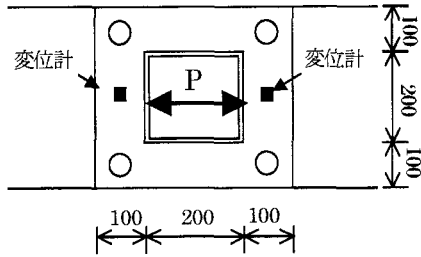


図4 柱脚部の形状

表1 使用鋼材の機械的性質

使用箇所	材質	E (tf/cm ²)	σ_y (tf/cm ²)	σ_u (tf/cm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	
アンカーボルト	SS400	2050	3.06	4.41	69	35	
ベース プレート	t = 9	SS400	2050	2.88	4.09	73	27
	t = 19	SS400	2030	2.53	4.23	60	29
	t = 50	SS400	2100	2.66	4.22	63	37
柱	t = 12	STKR400	2100	3.82	4.48	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 ²)	軸部長さ (cm)	
AB50M22-N = 0	200×200 ×12	400×400 ×50	22	3.80	36	
AB50M22-N = 50						
HT50M22-N = 0						
HT50M22-N = 50		400×400 ×19	32	8.03	50	
BP19M32-N = 0						
BP19M32-N = 50						
BP09M32-N = 0						400×400 ×9
BP09M32-N = 50						

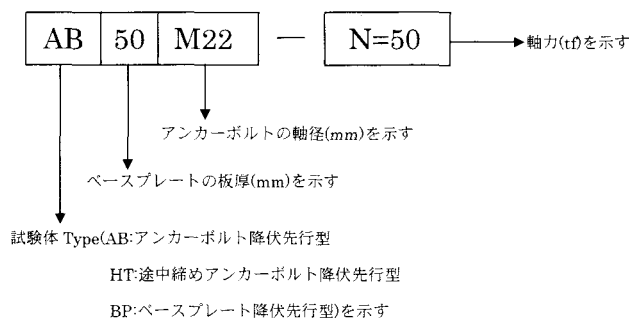


図5 試験体名称の説明

2-4. 降伏耐力の予測

柱材の全塑性モーメント M_p は、次式より予測できる。

$$M_p = \frac{D^3}{4} \cdot \sigma_y - \frac{(D-2t)^3}{4} \cdot \sigma_y \quad (1)$$

ここに、 D ：柱の幅、 t ：柱の厚さ、 σ_y ：柱材の降伏点である。

アンカーボルト降伏型の露出型柱脚の降伏耐力 ${}_{ab}M_y$ は、秋山等²⁾により提案されている式を改良した次式により予測できる。またその時の耐荷機構を図6に示す。

$${}_{ab}M_y = n_t \cdot a_a \cdot \sigma_y \cdot (d_t + d_c) + N \cdot d_c \quad (2)$$

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

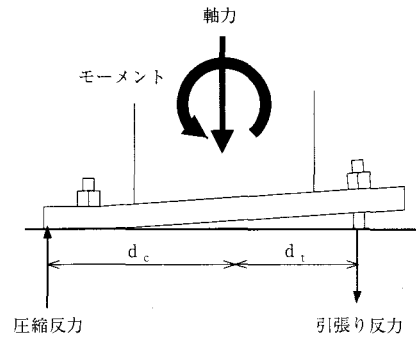


図6 アンカーボルト降伏型の耐荷機構

3. 実験結果と考察

3-1. P- δ 関係

各試験体の $P-\delta$ 関係を図7に示す。縦軸は試験体に加える水平荷重 P 、横軸は試験体上端部の変位 δ である。また、アンカーボルトあるいはベースプレートが降伏した点をそれぞれ ●, ■で図中に示す。表3に実験より得られた、 P_{MAX} ：最大荷重、 ${}_{ab}P_y$ ：アンカーボルト降伏荷重、 ${}_{BP}P_y$ ：ベースプレート降伏荷重、 $P_{MAX}/{}_{ab}P_y$ () 内は $P_{MAX}/{}_{BP}P_y$ 、 δ_{MAX} ：試験体上端部の最大変位、 Δ_b ：実験後に測定した軸部伸び量、 Δ_b/δ_{MAX} を示す。

a) Type-AB, Type-HT

Type-AB は、履歴曲線はアンカーボルトが軸方向に伸びるスリップ型となったが、AB50M22-N=50 はベースプレートに塑性変形を起こし、履歴曲線にわずかではあるが除荷点志向型の挙動を示した。Type-HT では、柱頭部の変位 $\delta = 0$ (mm) で、アンカーボルトの締め付けを行なったため、Type-AB のようなスリップ現象は緩和され、 $\delta = 0$ (mm) から荷重が上がる履歴曲線を描いた。また、HT50M22-N=50 も AB50M22-N=50 と同様にベースプレートが降伏したため、わずかではあるが除荷点志向型の挙

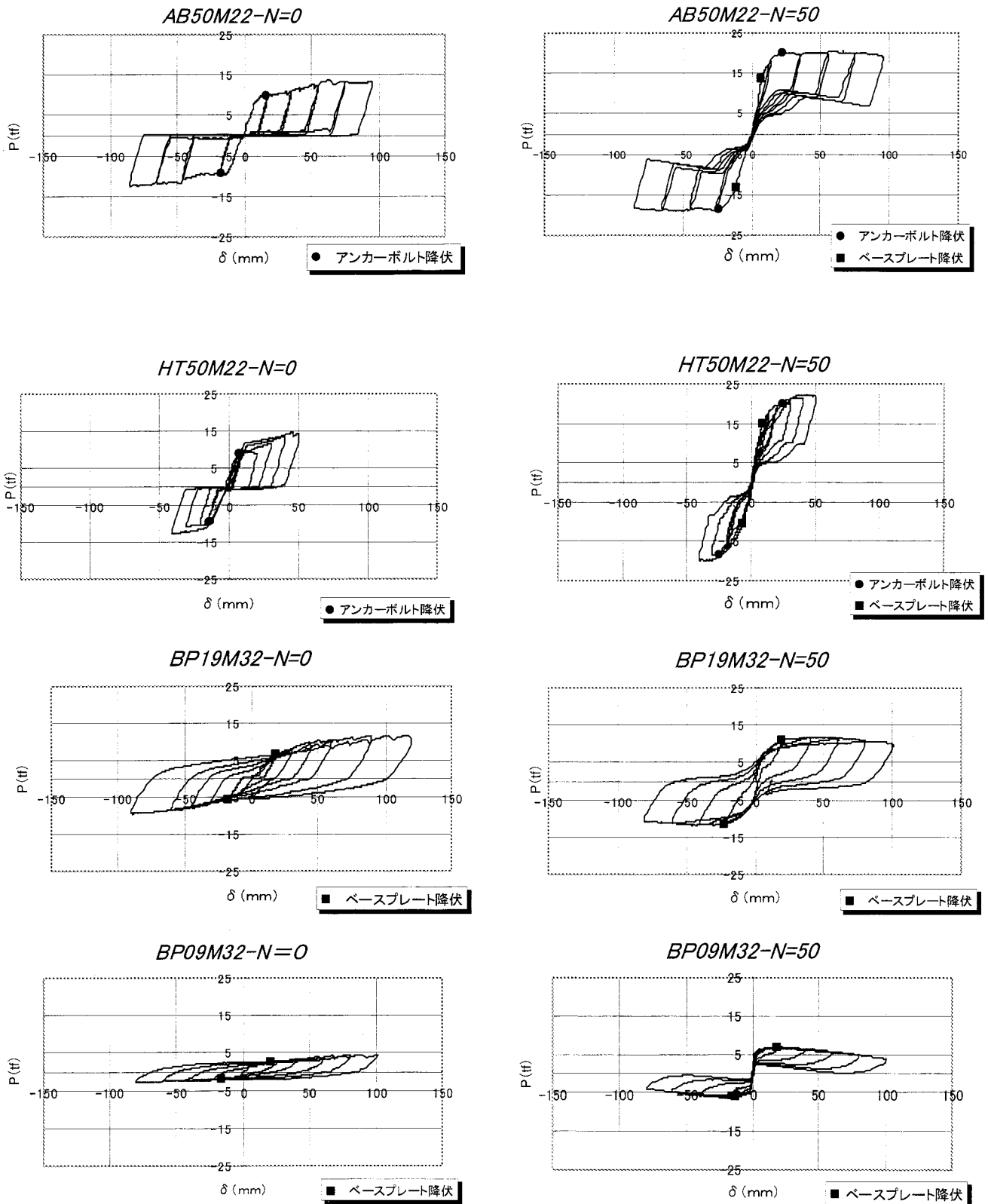


図7 P- δ 関係

表3 実験結果

試験体名	P_{MAX} (tf)	${}_{AB}P_y$ (tf)	${}_{BP}P_y$ (tf)	$P_{MAX}/{}_{AB}P_y$ ($P_{MAX}/{}_{BP}P_y$)	Δ_b (mm)	δ_{MAX} (mm)	Δ_b/δ_{MAX}
AB50M22-N=0	13.05	9.67	—	1.35	31.38	95.04	0.33
AB50M22-N=50	20.64	19.35	13.71	1.07	28.04	95.20	0.29
HT50M22-N=0	15.34	9.60	—	1.58	37.72	50.66	0.74
HT50M22-N=50	21.30	19.18	13.91	1.11	35.04	50.40	0.70
BP19M32-N=0	10.13	—	6.16	(1.64)	—	—	—
BP19M32-N=50	12.13	—	10.80	(1.12)	—	—	—
BP09M32-N=0	3.98	—	2.29	(1.74)	—	—	—
BP09M32-N=50	6.60	—	6.60	(1.00)	—	—	—

動を示した。 $P_{MAX}/{}_{AB}P_y$ より、AB50M22-N=0 と HT50M22-N=0 は、アンカーボルトが降伏後に荷重上昇がみられた。これは、アンカーボルトの歪硬化によるものといえる。しかし、AB50M22-N=50 と HT50M22-N=50 は、 $P_{MAX}/{}_{AB}P_y$ が約1.1になり、歪硬化による荷重上昇が見られなかった。これは、圧縮軸力による負荷曲げの影響によると考えられる。 Δ_b/δ_{MAX} は、表3より Type-AB、Type-HT どちらでも N=50(tf) のほうが小さな値を示した。これは、AB50M22-N=50 と HT50M22-N=50 が上端部の変位 δ と圧縮軸力 N により起こった柱の弾性曲げ変形が δ_{MAX} に加えられ、 δ_{MAX} に対する Δ_b の比率が下がったためと考えられる。ここで、Type-AB と Type-HT の Δ_b/δ_{MAX} を比較してみると、Type-HT の方が δ に対するアンカーボルトの軸部塑性化の依存度が7割を超え、Type-AB の2~2.5倍高くなった。これは、Type-AB は δ が過大でベースプレートの回転によりネジ部が大きく曲げられ、アンカーボルトの軸部が十分に塑性化できなかったためと考えられる。これらより、Type-HT はアンカーボルトの軸部で、効率よくエネルギー吸収を行っているといえる。

b) Type-BP

BP19M32-N=0, BP09M32-N=0 は、ベースプレートが面外方向に塑性変形し、履歴曲線は典型的な除荷点志向型となった。BP19M32-N=50 と BP09M32-N=50 の履歴曲線も除荷点志向型ではあるが、除荷時においては圧縮軸力の影響で耐力の低下がゆるやかとなる部分が存在した。 $P_{MAX}/{}_{BP}P_y$ より、BP19M32-N=0 と BP09M32-N=0 は、ベースプレートが降伏後に荷重上昇がみられた。これは、ベースプレートの歪硬化によるものといえる。しかし、BP19M32-N=50 と BP09M32-N=50 は、 $P_{MAX}/{}_{BP}P_y$ が1.0と1.12になり、歪硬化による荷重上昇がほとんど見られなかった。これは、圧縮軸力による負荷曲げの影響によると考えられる。

3-2. M- θ 関係

各試験体の M- θ 関係を図8に示す。縦軸は水平載荷荷重に柱長を掛けた値に、軸力による負荷曲げを加えた柱脚部に作用するモーメント M、横軸はベースプレートに取り付けた変位計により求めた柱脚部の回転角 θ である。

a) Type-AB, Type-HT

Type-AB, Type-HT の図中に、式(2)より求めた降伏耐力 ${}_{ab}M_y$ を破線で、曲げ抵抗 $M_n = Nd_c$ を一点鎖線で示す。また、表4に実験より得られた ${}_{eab}M_y$: 降伏耐力、 ${}_{eab}M_{MAX}$: 最大耐力、 ${}_{e}M_n$: Type-AB と Type-HT それぞれの軸力による ${}_{eab}M_y$ の耐力の増加より求めた曲げ抵抗、 ${}_{ab}M_y$: 予測耐力、 ${}_{eab}M_y/{}_{ab}M_y$ 、 M_p : 柱の全塑性モーメント、 ${}_{eab}M_y/M_p$ を示す。 ${}_{eab}M_y/{}_{ab}M_y$ は、1.02~1.09を示したことより、式(2)による Type-AB と Type-HT の降伏耐力の評価は、安全側に精度良く評価されるといえる。曲げ抵抗 $M_n = Nd_c$ も実験値と良い対応を示した。柱の全塑性モーメント M_p に対する ${}_{eab}M_y$ の割合は、Type-AB と Type-HT 共に軸力 50(tf) で約0.76、軸力なしで約0.35の値を示した。履歴特性は、P- δ 関係と同様に Type-AB がスリップ型に、Type-HT はスリップ現象が緩和され、アンカーボルトの降伏後も $\delta = 0$ (mm) から荷重が上がる履歴曲線を描いたが、N=50(tf) の場合に P- δ 関係で示さなかった耐力上昇を Type-AB と Type-HT の M- θ 関係では示した。これによって、P- δ 関係においてアンカーボルトの歪効果による荷重上昇が見られなかったのは、軸力による負荷曲げの影響によるものといえる。また、柱脚部の最大回転角は、Type-AB が約 1/10 (rad)、Type-HT が約 1/20 (rad) で、共に柱脚部で十分な塑性回転能力を期待できるといえる。

b) Type-BP

Type-BP の図中に、曲げ抵抗 $M_n = ND/2$ を破線で示す。また、表5に実験より得られた ${}_{ebp}M_y$: 降伏耐力、 ${}_{ebp}M_{MAX}$: 最大耐力、 ${}_{e}M_n$: ベースプレートの板厚 $t=9$ (mm)

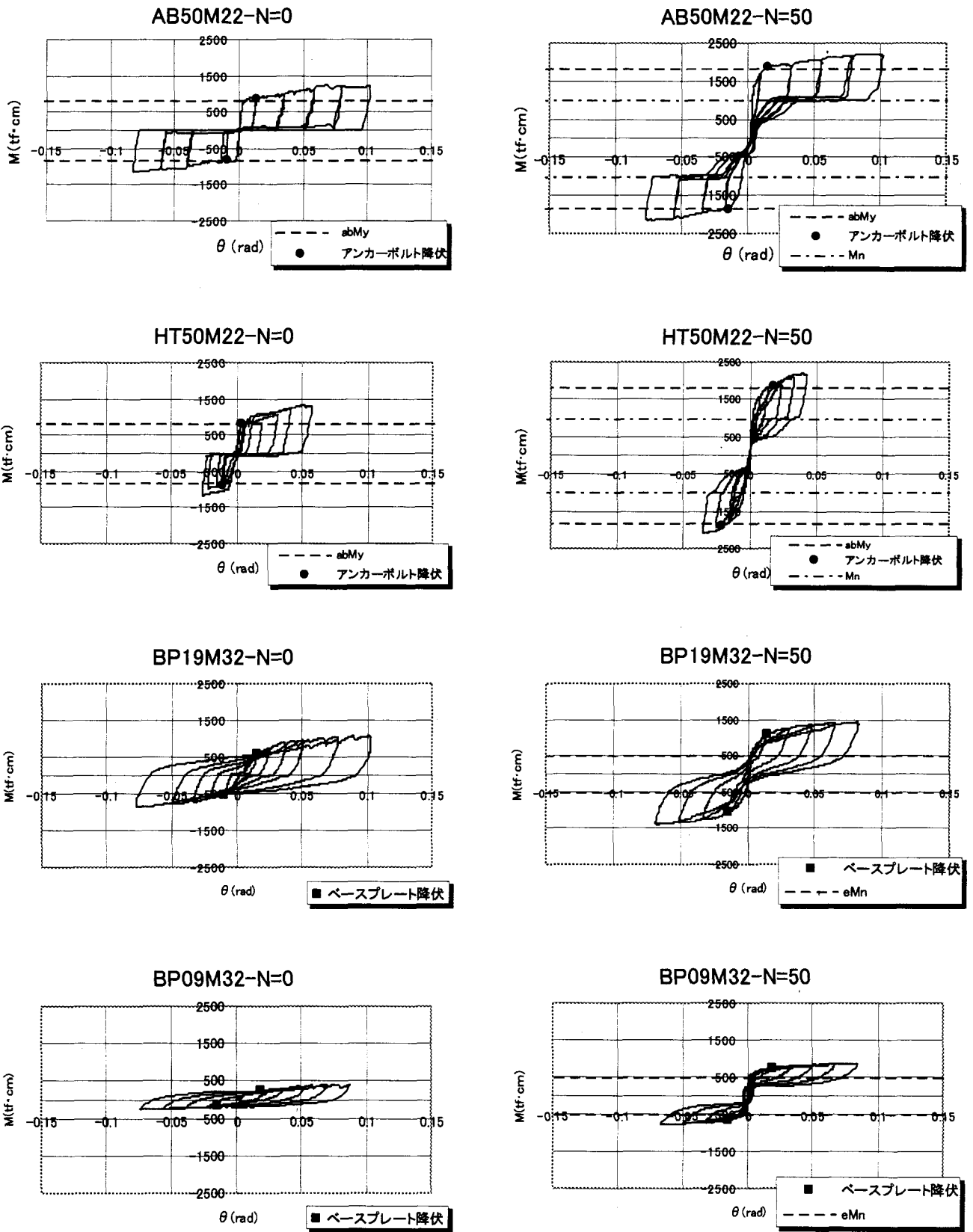


図8 M- θ 関係

表4 Type-AB, Type-HT 実験結果, 耐力計算値

試験体名	${}_{ab}M_y$ (tf·cm)	${}_{eab}M_y$ (tf·cm)	M_n (tf·cm)	${}_eM_n$ (tf·cm)	${}_{eab}M_y/{}_{ab}M_y$	${}_eM_n/M_n$	M_p (tf·cm)	${}_{eab}M_{MAX}$ (tf·cm)	${}_{eab}M_y/M_p$
AB50M22N=0	814	885	—	—	1.09	—	2434	1222	0.36
AB50M22N=50	1814	1852	1000	990	1.02	0.99	2434	2191	0.76
HT50M22N=0	814	847	—	—	1.04	—	2434	1335	0.35
HT50M22N=50	1814	1872	1000	1010	1.03	1.01	2434	2144	0.77

表5 Type-BP 実験結果

試験体名	${}_{ebp}M_y$ (tf·cm)	${}_{ebp}M_{MAX}$ (tf·cm)	M_n (tf·cm)	${}_eM_n$ (tf·cm)	${}_eM_n/M_n$	M_p (tf·cm)	${}_{ebp}M_y/M_p$
BP19M32-N=0	560	907	—	—	—	2434	0.23
BP19M32-N=50	1081	1379	500	521	1.04	2434	0.44
BP09M32-N=0	208	362	—	—	—	2434	0.09
BP09M32-N=50	709	782	500	501	1.00	2434	0.29

と $t=19(\text{mm})$ それぞれの軸力による ${}_{ebp}M_y$ の耐力の増加より求めた曲げ抵抗, ${}_eM_n/M_n$, 柱の全塑性モーメント M_p に対する ${}_{ebp}M_y$ の割合を示す。曲げ抵抗 $M_n=ND/2$ は, ${}_eM_n/M_n$ がほぼ1.0となり実験値と良い対応を示し, Type-AB の曲げ抵抗の1/2になった。柱の全塑性モーメント M_p に対する ${}_{ebp}M_y$ の割合は, 0.09~0.44になった。履歴特性は, BP19M32-N=0 と BP09M32-N=0 が $P-\delta$ 関係と同様な除荷点志向型になったが, BP19M32-N=50 と BP09M32-N=50 は, $P-\delta$ 関係でみられなかったベースプレート塑性化後の耐力上昇を示した。ここでも, $P-\delta$ 関係においてベースプレートの歪効果による荷重上昇が見られなかったのは, 軸力による負荷曲げの影響によるものといえる。また, 柱脚部の最大回転角は, 約 $1/10$ (rad) で, ベースプレート先行降伏型でも柱脚部で十分な塑性回転能力を期待できるといえる。

3-3. ベースプレートの歪性状

図9に BP19M32-N=0 のベースプレートに貼り付けた歪ゲージの位置関係を示す。歪ゲージは, ⁶⁾で報告した実験結果により得たヒンジライン上に配置した。BP19M32-N=0 のベースプレートの荷重歪関係を図10に示す。歪値は, 平均値である。また, 柱頭部の変位 $\delta_{MAX}=100(\text{mm})$ でのベースプレートの変形状況を図11に示す。S-1 と S-6, S-3 と S-4 は, プラス方向だけに過大な歪値を見られる。これは予測した面外へのヒンジライン近辺にヒンジラインが形成されたためだと考えられる。S-2 と S-5 は P の値が大きくなると, $-10000(\mu)$ 程度の歪値が出て, 逆方向に P の値が大きくなると $+500(\mu)$ 程度の歪値が出ている。マイナス方向に歪が出たのは, 予測していた水平荷重方向

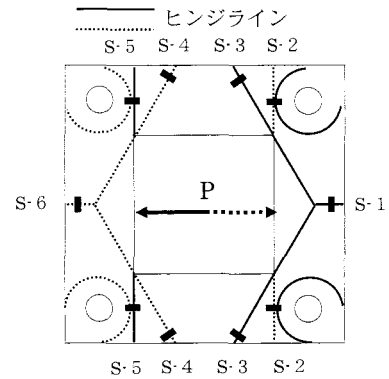


図9 ベースプレート先行降伏型の露出型柱脚の耐荷機構

に垂直な柱面沿いとその延長線上付近にヒンジラインが形成されたため, プラス方向に出た歪は面外変形しようとするベースプレートをナットにより拘束されたため, ナット沿いにヒンジラインが形成されたためだと考えられる。これらより, 予測したヒンジライン上にヒンジラインが形成されたといえる。

4. ま と め

今回の実験結果より次のことがいえる。

- (1) アンカーボルト降伏先行型と途中締めアンカーボルト降伏先行型は, 式(2)により精度良く安全側に耐力評価を行える。
- (2) 途中締めアンカーボルト降伏先行型は, 復元力特性においてスリップ型を改善することができた。さらにアンカーボルト降伏先行型に比べ柱頭部の変位を抑えることができ, 軸力による負荷曲げの影響による耐力低下を軽減することができる。
- (3) ベースプレート降伏先行型は, 復元力特性において, スリップ型を改善することができ, 根巻型柱脚と同様な

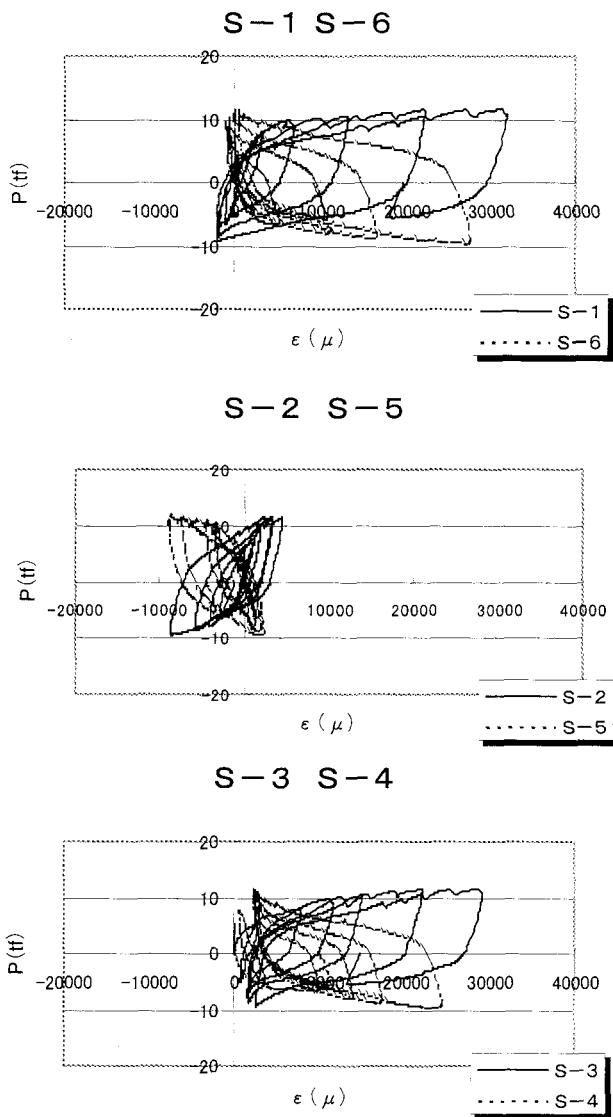


図10 BP19M32-N=0のベースプレートのP-ε関係

除荷点志向型となった。

- (4) ベースプレート降伏先行型においての、ベースプレートの耐荷機構は、図9のようになると考えられる。
- (5) アンカーボルト降伏先行型、途中締めアンカーボルト降伏先行型、ベースプレート降伏先行型すべてで、十分な塑性回転能力を期待できる。

【謝 辞】

本実験は、文部省私立大学ハイテク・リサーチセンターの二軸載荷装置によって行った。ここに、深謝致します。また、この実験を行う際には多くの人に協力頂きました。ここに、感謝致します。

【参 考 文 献】

- 1) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会：1955年兵庫県南部地震鉄骨造建築物被害調査報告書
- 2) 秋山 宏，他：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 p. 185~192, 1998

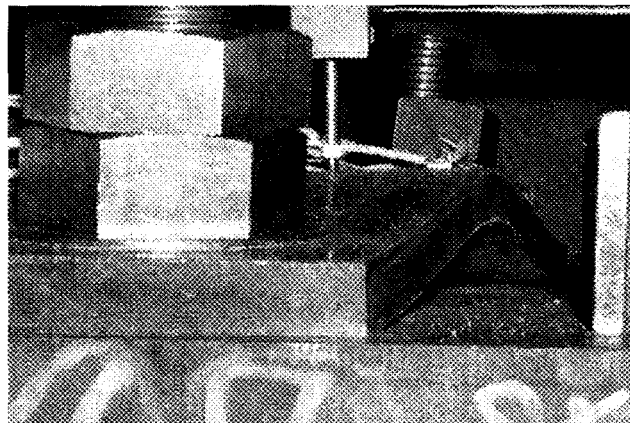
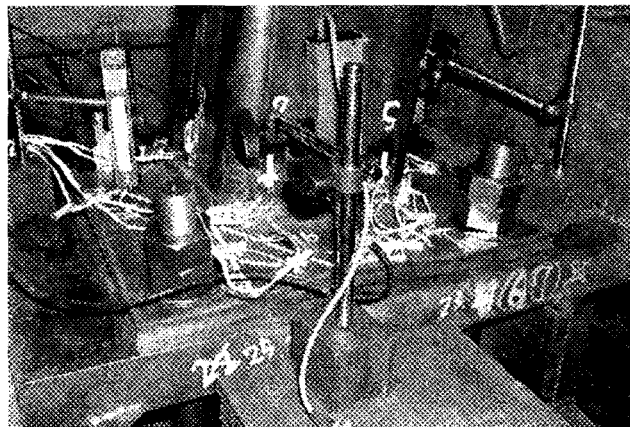


図11 ベースプレートの変形状況

- 3) 田中淳夫，他：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，1999
- 4) 田中淳夫，他：アンカーボルト降伏先行型露出柱脚に関する研究その1実験計画・結果，その2考察，日本建築学会大会学術講演概要集 pp. 617~620, 1999
- 5) 田中淳夫，他：アンカーボルト降伏先行型露出柱脚に関する研究その3軸力負荷実験計画・結果，その4考察，日本建築学会大会学術講演概要集 pp. 755~758, 2000
- 6) 高松隆夫，他：露出型柱脚の復元力特性に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演概要集 pp. 759~760, 2000
- 7) 青木博文，他：露出型柱脚の復元力特性に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演概要集 pp. 989~990, 昭和63
- 8) 中野清司，他：鋼構造露出型柱脚の固定度と評価法 鋼構造露出型柱脚に関する実験的研究 その6，日本建築学会大会学術講演概要集 pp. 649~650, 1995
- 9) 秋山 宏，他：施工性に優れた改良型露出型柱脚の実験的研究 その1実験計画，その2実験結果，日本建築学会大会学術講演概要集 pp. 521~524, 1998
- 10) 増田貴志 他：根巻き形式角形鋼管柱脚部の力学性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演概要集 pp. 533~534, 1998
- 11) 秋山 宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985
- 12) 高梨晃一，他：最新鉄骨構造 第3版，森北出版，1988
- 13) 椋代仁朗，他：鉄骨構造 第3版，森北出版，1983
- 14) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，1975