

# 多数配列アンカーボルトを有するスリップ型露出柱脚の復元力特性

高松 隆夫\*・玉井 宏章\*\*・山西 央朗\*\*\*

(平成17年9月9日受理)

## Restoring Force Characteristics of Slip-Type Exposed Column Base with Multi-Rows of Anchor Bolts

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI and Teruaki YAMANISHI

(Received Sep. 9, 2005)

### Abstract

An anchor-bolt-yield-type exposed column base is generally used in steel buildings. The column base shows slip-type restoring force characteristics, that are of great advantage to residual deformation of the frames subjected to an earthquake. The cyclic behavior of the column base with multi-rows of anchor bolts has not been studied for reasons of complicated manipulations. In this paper, experiments on the column bases with multi-rows of anchor bolts were carried out and the experimental results were compared with analytical models. The following conclusions were drawn. 1) Whole types of the column bases show the slip-type restoring force characteristics. 2) The column bases with multi-rows of the anchor bolts show complicated behavior, especially, with the anchor bolts at a centroid of cross section of the column.

**Key Words:** exposed column base, anchor-bolt-yield-type, restoring force characteristics, slip-type, multi-rows of anchor bolt

### 1. はじめに

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚については、秋山<sup>1)</sup>が柱脚の耐荷機構と耐力・剛性の理論式を示し、復元力特性がスリップ型となることを明らかにしている。これを基に、著者等はこれまでにアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の復元力特性について研究を行ってきている<sup>2~6)</sup>。また同時に、他の研究者も数多くの研究を行っており、柱軸力、基礎コンクリート性状およびアンカーボルトの性能を変数とした実験および解析により、その性状はほぼ明らかになっている<sup>7)</sup>。

これらの研究の多くは単純なアンカーボルト配列を採

用した実験および解析である。アンカーボルトを多数配列した場合の研究は、アンカーボルト以外の要素の損傷や破壊に着目し、各々の耐力および剛性評価をするに留まっている<sup>8)</sup>。これまでに、吉住等<sup>9)</sup>は、アンカーボルトを多数配列した場合の復元力特性モデルを示し、一般的なBi-linear型の復元力特性モデルでは柱脚性能を精確には評価できないことを示している。

また、河野等は、柱脚部にスリップ型の復元力特性とすることで建物の残留変形を低減できるため有利であることを示し<sup>10),11)</sup>、残留変形に効果的な影響を与える要素が最大耐力であることを明らかとしている<sup>10),12)</sup>。

更に、エネルギー法が今年から本格的に建築設計思想に

\* 広島工業大学工学部建設工学科教授

\*\* 広島工業大学工学部建設工学科助教授

\*\*\* 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻大学院生

Table 1 Main dimensions and material properties of Type I and Type II

Type I and Type II	Material	$E$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	Main dimensions (mm)
Column	SS400	205	235	400	Box-200x200x12
Base plate	SS400	205	235	400	PL-35x400x400
Anchor bolt	ABR400	205	305	400	$\phi_g = 14.6, ab = 445$

Table 2 Main dimensions and material properties of Type III

Type III	Material	$E$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	Main dimensions (mm)
Column	SS400	205	235	400	Box-200x200x12
Base plate	SS400	205	235	400	PL-400x400x50
Anchor bolt	ABR400	205	305	400	$\phi_g = 14.6, ab = 460$

$E$ : Young's modulus  $\sigma_y$ : Yield stress  $\sigma_u$ : Tensile strength  $\phi_g$ : Diameter of shank  $ab$ : Effective length

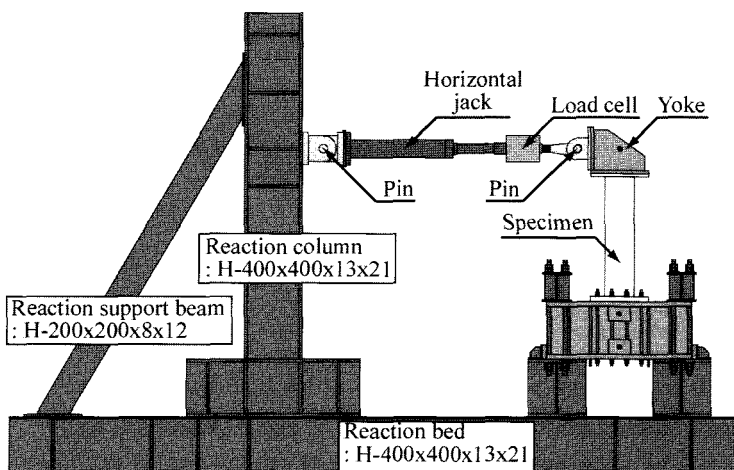


Fig. 1 Test apparatus

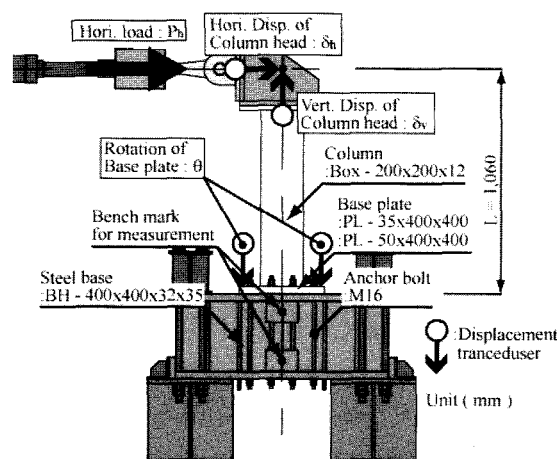


Fig. 2 Specimen setup and measurement system

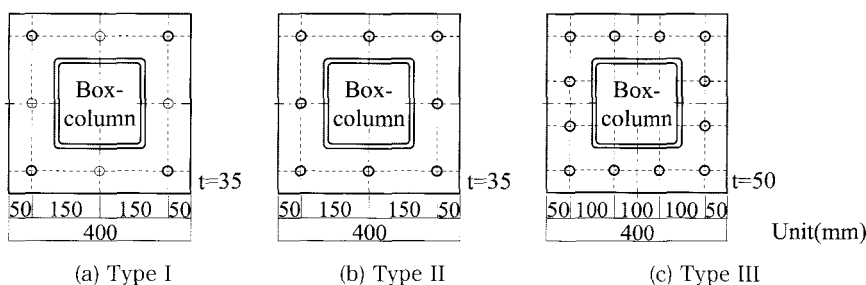


Fig. 3 Base plate

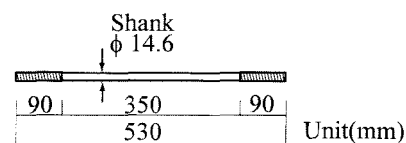


Fig. 4 Anchor bolt

導入された。これにより、以後の設計において、構造物のエネルギー吸収能力を正確に評価するための各要素の復元力特性を把握することが重要になると思われる。

著者等はこのような背景を踏まえて、文献<sup>(13)</sup>においてアンカーボルトを多数配列した場合のスリップ型復元力特性モデルについて検討を行い、既報の実験結果との比較検討により、モデルの整合性を示した。しかしながら、既報の実験には、アンカーボルトを多数配列した試験体は含まれておらず、十分な検討は行っていない。

そこで本論文では、アンカーボルトを多数配列した露出柱脚の載荷実験を行い、著者等の提案している復元力特性モデルの整合性を比較・検討する。

## 2. 実験

本実験では、アンカーボルトを多数配列したアンカー

ボルト降伏先行型露出柱脚の復元力特性を明らかにするため、露出柱脚部分架構試験体を用いて載荷実験を行う。

試験体は、ベースプレート隅角部にアンカーボルトを配置した (Type I) 単純な配列のもの、3列8本均等配列 (Type II) および4列12本均等配列 (Type III) した多数配列のものを採用する。尚、Type IIについては、水平載荷方式により性状が変化するため、2種類の水平載荷方式を入力する。

### 2.1 実験装置

Fig. 1 に実験で用いる載荷装置を示す。試験体柱頭部に設置したヨークに、ピンを介してジャッキを接続し水平載荷を行う。柱脚のベースプレート下面から載荷点までの距離は、およそ 1,060 mm である。

試験体柱頭部に接続されたジャッキにより、ベースプ

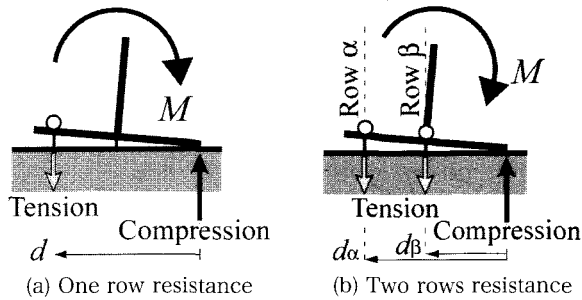


Fig. 5 Resistance mechanism under seismic loading

レートの回転角： $\theta$ を目標値とした回転角制御を行う。いずれの試験体も正負交番漸増繰返し水平荷重を行い、かつ Type II に関しては正負交番時に振幅を増加させる水平荷重 (Type II - 2) を行う。

## 2.2 試験体

Table 1, 2 に各試験体の素材特性と各部主要寸法を示す。また, Fig. 2~4 に試験体設置図, ベースプレート形状およびアンカーボルト形状を示す。尚, 本実験では, アンカーボルト降伏先行型露出柱脚としての性状のみを抽出するために, ベースプレート, 柱および基礎部分には, 各荷重に対して弾性範囲に留まる素材特性・断面性能を採用している。

露出柱脚の柱には, 冷間成形角型鋼管柱: Box-200x200x12 を使用し, ベースプレートは Type I および Type II には PL-35x400x400 を, Type III には PL-50x400x400 を使用する。アンカーボルトは, 軸部の十分な塑性伸び能力を確保できる転造ネジアンカーボルトを使用する。基礎には, 基礎コンクリートやベースモルタルの損傷・崩壊による影響を防ぐために, 完全弾性体と仮定できる断面性能を有する鋼製基礎を使用する。

## 2.3 計測方法

計測ポイントの概念図を Fig. 2 に示す。

全ての変位計は, 治具を介して鋼製基礎に設けられた計測基準点を支持点としている。各変位計は, ベースプレート左右の鉛直変位を測定しベースプレートの回転角： $\theta$ を導出, 試験体柱頭部の鉛直変位： $\delta_v$ および水平変位： $\delta_h$ を測定している。

荷重測定は, 水平ジャッキの先端に設置したロードセルにより水平荷重荷重： $P_h$ を測定する。

## 3. 復元力特性モデルの定式化

本章では, アンカーボルトを多数配列したアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の復元力特性モデルの定式化を行う。

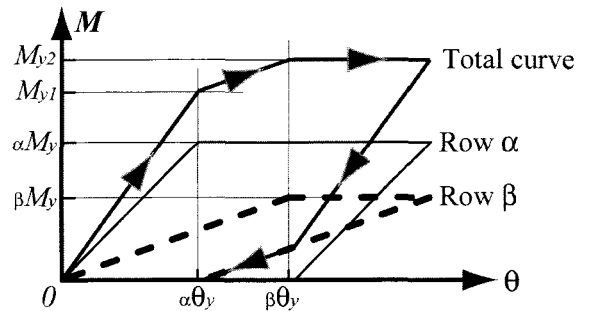


Fig. 6 Models of restoring force characteristics under monotonic loading for two rows resistance

## 3.1 仮定

本論文では, 以下の仮定に基づいて復元力特性モデルの定式化を行う。

i) 柱脚の降伏要素をアンカーボルトに限定する。

定式化において, 柱, ベースプレートおよび基礎コンクリートは弾性範囲に留まるとする。また, 荷重実験においては, 柱, ベースプレートおよびコンクリート基礎の代わりに使用した鋼製基礎は弾性に留まる材料特性および断面性能を採用した。

それ故に, 柱脚の復元力特性モデルは, アンカーボルトの配置, 寸法および材料特性を用いて求められる。但し, 弾性回転剛性にはベースプレートおよび基礎コンクリートの弾性変形を考慮するために低減係数： $R$ を導入する。

ii) 圧縮合力点位置およびベースプレート回転中心位置をベースプレート端部とする。

本論文では, 曲げモーメントに対する柱脚部の応答性状に主眼を置いて定式化を行う。そのため, 柱軸力は導入しない。

iii) 弾塑性繰返し荷重時において, 柱断面図心より引張側に位置するアンカーボルトのみが曲げに抵抗すると考える。

処女荷重時には圧縮側に位置するアンカーボルトも曲げに抵抗するが, 塑性伸びを生じるとほとんど抵抗しない。更に, その抵抗力は引張側の値に比べて小さい。そのため, 圧縮側に位置するアンカーボルトの曲げに対する抵抗を考慮しないものとする。

iv) アンカーボルトの材料特性に完全弾塑性体モデルを採用する。

実際のアンカーボルトは, 歪硬化により降伏後も耐力上昇する。そのため, 実験結果との比較において復元力特性モデルは低目の近似値となる。

v) アンカーボルトを多数配列した露出柱脚の復元力特性は, 各列のアンカーボルトの復元力特性を累加すること

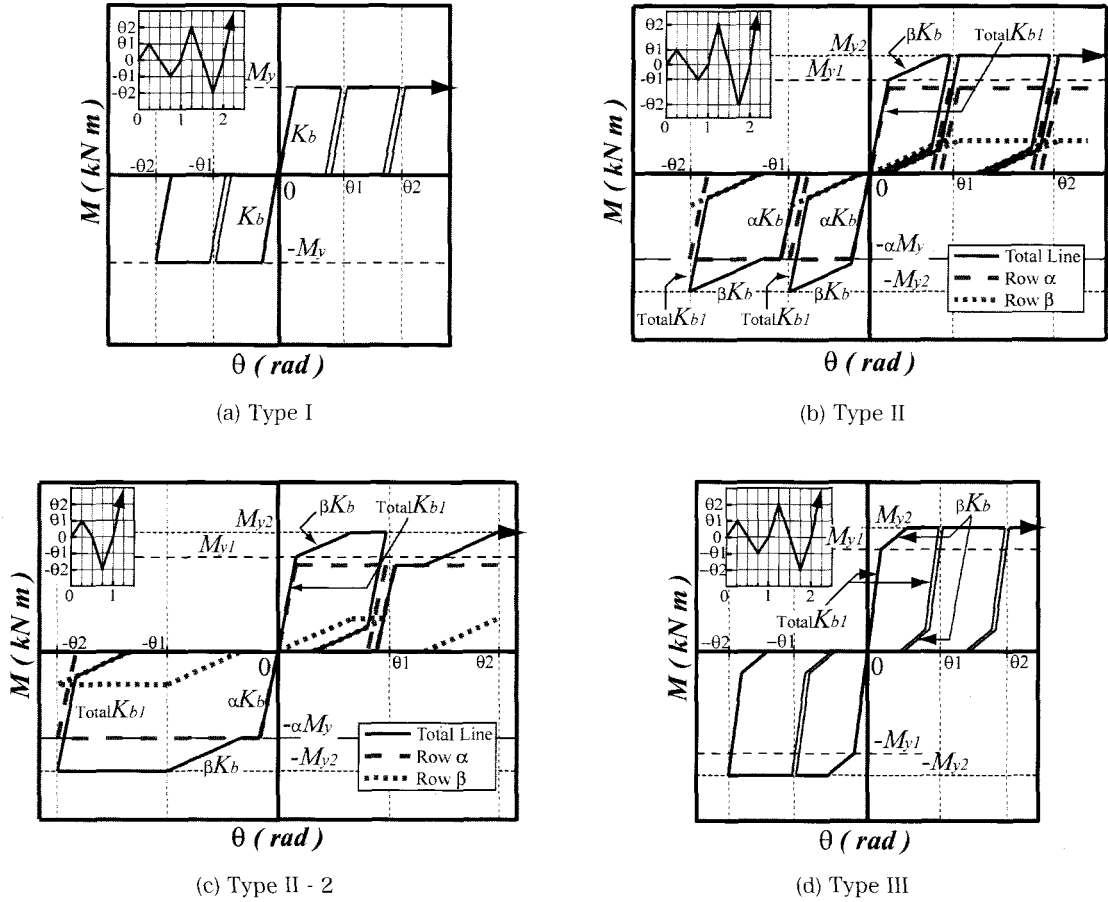


Fig. 7 Numerical model of restoring force characteristics for various kinds of column base

とで求められる。

### 3.2 曲げ降伏耐力

任意のアンカーボルト列における、アンカーボルト降伏時の曲げ降伏耐力： $M_y$  は、次式により求められる。

$$M_y = n \cdot {}_{ab}A \cdot {}_{ab}\sigma_y \cdot d \quad (1)$$

ここに、 $n$ ：アンカーボルト本数、 ${}_{ab}A$ ：アンカーボルト軸部断面積、 ${}_{ab}\sigma_y$ ：アンカーボルト降伏点、 $d$ ：圧縮合力点位置からアンカーボルト中心までの距離である。

アンカーボルトを多数配列した場合、各アンカーボルト列の曲げ耐力を累加した曲線が柱脚の曲げ耐力となる。本論文では、Fig. 5 (b) に示すように、2列のアンカーボルトが曲げに抵抗する場合を取り扱う。

Fig. 6 に多数列のアンカーボルトが曲げに抵抗する場合の、単調載荷時における復元力特性モデルを示す。2列のアンカーボルトが曲げに抵抗する場合、各列名称を引張最外列より Row  $\alpha$ 、 $\beta$  とする。各列のアンカーボルト降伏時の曲げ耐力： $M_{y1}$ 、 $M_{y2}$  は、次式により求められる。

2列のアンカーボルトが曲げに抵抗する場合

$$M_{y1} = \alpha M_y + \left( \frac{d_\beta}{d_\alpha} \right) \cdot \beta M_y \quad (2.a)$$

$$M_{y2} = \alpha M_y + \beta M_y \quad (2.b)$$

ここに、 $M_{y1}$ 、 $M_{y2}$ ：Row  $\alpha$ 、 $\beta$  のアンカーボルト降伏時の柱脚曲げ耐力、 $\alpha M_y$ 、 $\beta M_y$ ：それぞれ Row  $\alpha$ 、 $\beta$  のアンカーボルトの曲げ降伏耐力、 $d_\alpha$ 、 $d_\beta$ ：圧縮合力点位置からそれぞれのアンカーボルト中心までの距離である。

### 3.3 弾性回転剛性

任意のアンカーボルト列における、アンカーボルト弾性伸びから求められる弾性回転剛性： $K_b$  は次式となる。

$$K_b = \frac{{}_{ab}E \cdot n \cdot {}_{ab}A \cdot d^2}{R \cdot {}_{ab}l} \quad (3)$$

ここに、 ${}_{ab}E$ ：アンカーボルトのヤング率、 $R$ ：ベースプレートと基礎コンクリートの弾性変形を考慮した低減係数 ( $R = 1.5$ )<sup>1)</sup>、 ${}_{ab}l$ ：アンカーボルトの有効長さである。

### 3.4 復元力特性モデル

アンカーボルトを多数配列した場合の単調載荷時にお

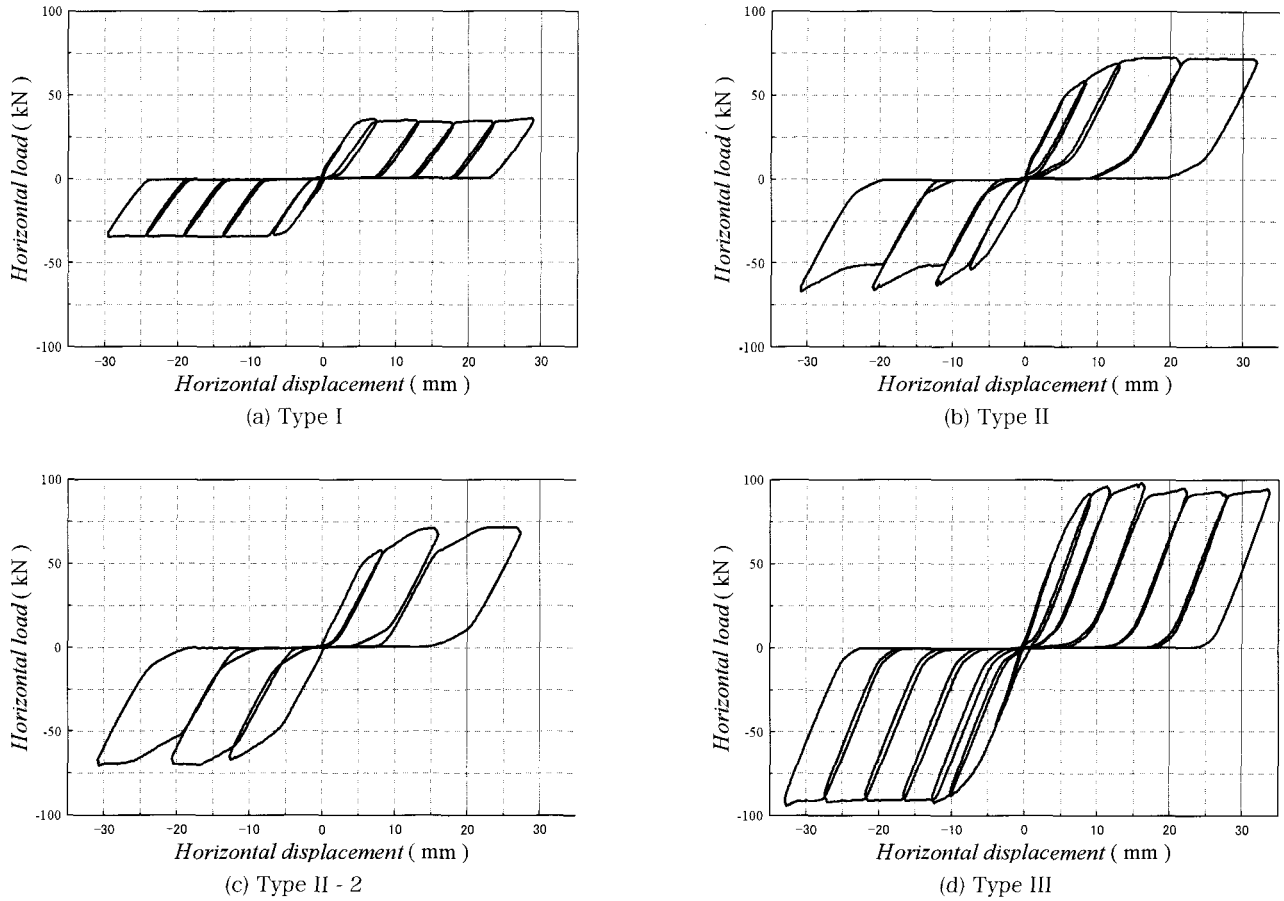


Fig. 8 Horizontal load versus Horizontal displacement for each exposed column base

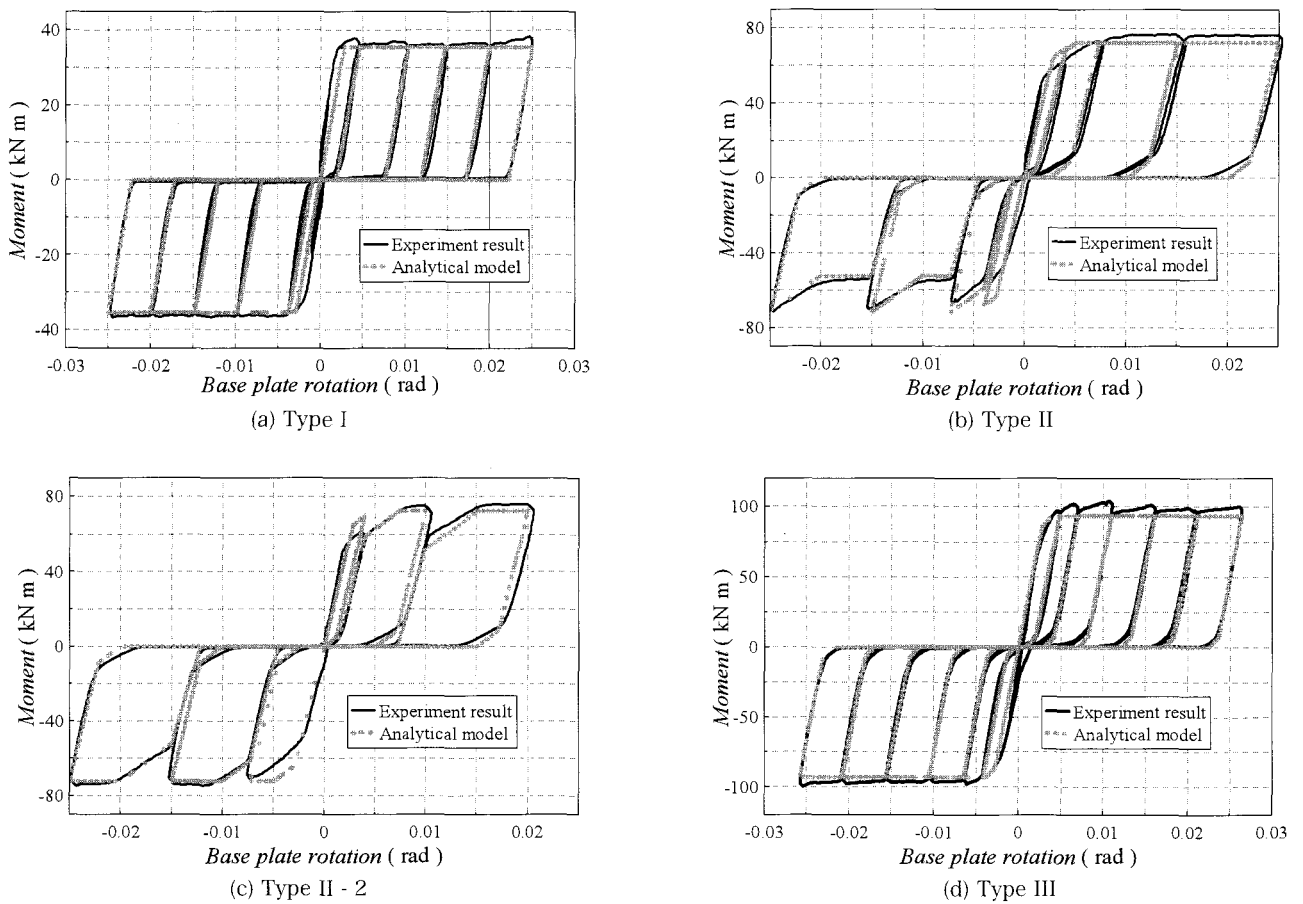


Fig. 9 Restoring force characteristics for each exposed column base

Table 3 Calculated and Experimental observed of bending resist and initial stiffness

Specimen label	Experiment		Analysis		Experiment / Analysis	
	$eM_y$ (kN m)	$eK_b$ (kN m/rad)	$M_y$ (kN m)	$K_b$ (kN m/rad)	$eM_y / M_y$	$eK_b / K_b$
Type I	36.4	13,500	34.9	12,500	1.04	1.08
Type II	53.9	22,000	63.8	22,800	0.84	0.96
Type II-2	54.1	22,500	63.8	22,800	0.85	0.99
Type III	82.8	37,900	87.7	31400.0	0.94	1.21

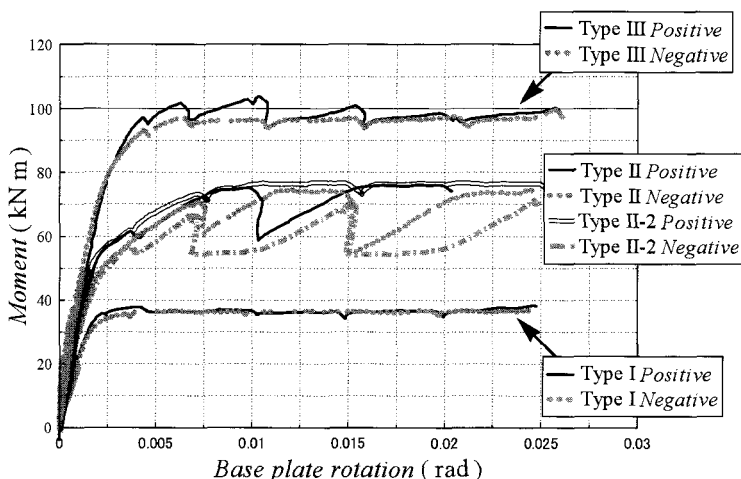


Fig. 12 Skeleton curve

る、復元力特性モデルを Fig. 6 に示す。また、繰返し載荷時における復元力特性モデルを Fig. 7 に示す。尚、各図左上には縦軸を柱脚回転角、横軸をサイクル数とした載荷方式の図を示している。

○単調載荷時の復元力特性モデル

Fig. 5 (b), Fig. 6 に、2列のアンカーボルトが曲げに抵抗する場合における力の釣合状態および復元力特性モデルを示す。復元力特性モデルは Tri-linear 型となり、各アンカーボルト列の降伏時における曲げ耐力は式 (2.a), (2.b) により求められる。Row  $\alpha$  降伏時耐力  $M_{y1}$  までは、Row  $\alpha$  および Row  $\beta$  のアンカーボルト弾性回転剛性を足し合わせた  $_{Total}K_{b1} (= \alpha K_b + \beta K_b)$  で荷重が上昇する。 $M_{y1}$  から Row  $\beta$  降伏時耐力  $M_{y2}$  までは、Row  $\beta$  のアンカーボルト弾性回転剛性  $\beta K_2$  で荷重が上昇する。 $M_{y2}$  以後は、耐力  $M_{y2}$  を保持したまま回転角が増加する。尚、除荷時の曲線は、載荷時の曲線を 180 度回転させた形となる。

○繰返し載荷時の復元力特性モデル

Type I の復元力特性モデルを Fig. 7 (a) に示す。曲げに抵抗するアンカーボルトは 1 列であり、降伏耐力および弾性回転剛性は式 (1), (3) により求められる。復元力特性モデルはスリップ型となる。

Type II では、引張側 (以後、 $\alpha Ab$ ) と、柱断面図心位置 (以後、 $\beta Ab$ ) の 2 列のアンカーボルトが曲げに抵抗する。しかしながら、 $\beta Ab$  が塑性伸びを生じると、塑性

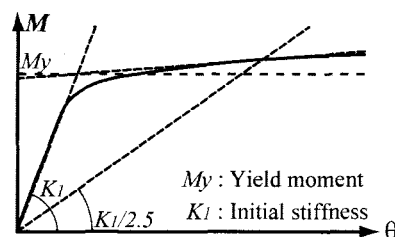


Fig. 10 General yield point method

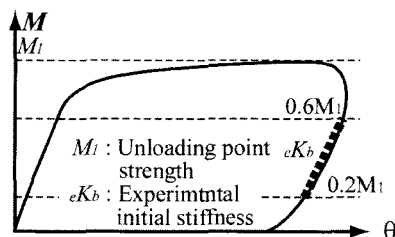


Fig. 11 Experimental initial stiffness

伸びを起こした載荷と逆方向の載荷において  $\alpha Ab$  が単独で曲げに抵抗することがある。載荷方式により履歴性状が複雑に変化する。そこで、正負交番漸増繰返し載荷の復元力特性モデル Type II を Fig. 7 (b) に、正負交番時に振幅を増加させる載荷の復元力特性モデル Type II-2 を Fig. 7 (c) に示す。

Fig. 7 (b) において、正方向処女載荷は Fig. 6 により求められる。負方向処女載荷では、 $\beta Ab$  の塑性伸びによる間隙がなくなるまで  $\alpha Ab$  のみで曲げに抵抗する。2 サイクル目以降においては、正方向載荷では前サイクル除荷時の軌跡をなぞるように荷重が上昇し、負方向載荷ではスリップ発生後に負方向処女載荷と同様の履歴性状となる。

Fig. 7 (c) において、正方向処女載荷は Fig. 6 により求められる。負方向処女載荷では、 $\beta Ab$  の塑性伸びによる間隙がなくなるまで  $\alpha Ab$  のみで曲げに抵抗する。正負載荷で共に  $\beta Ab$  に塑性伸びが生じるので、2 サイクル目以降においては、スリップ発生後に負方向処女載荷と同様の履歴性状となる。

Type III の復元力特性モデルを Fig. 7 (d) に示す。引張側に配置された二列のアンカーボルトが曲げに抵抗し、処女載荷時履歴曲線は Fig. 6 により求められる。アンカーボルト降伏以後は、前サイクル除荷時の軌跡をなぞる様に荷重は上昇し、除荷時履歴性状は処女除荷時のものと同様となる。正負の履歴性状は同様のものとなる。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 水平荷重－水平変位関係

各試験体の水平荷重－水平変位関係を Fig. 8 に示す。縦軸は、試験体柱頭部のヨークに入力した水平載荷荷重： $P_h$  である。横軸は、試験体柱頭部の水平変位： $\delta_h$  である。

各々の実験結果では、アンカーボルト本数を増加させることにより、飛躍的に耐力・剛性が上昇している。

Fig. 8 (a) に示す Type I はアンカーボルトの配置が単純であり、初期から最終サイクルまで正負共に一定のスリップ型を示している。処女サイクル正方向の耐力が多少高目となっているのは、圧縮側のアンカーボルトが抵抗しているためである。また、正方向最終サイクルにおいて、二次勾配が上昇しているが、これはアンカーボルトがひずみ硬化域に入った影響である。

Fig. 8 (b), (c) に示す Type II は柱断面図心上にアンカーボルトを配置しており、実験結果にも表れているように、載荷方向および載荷方式により履歴性状が変化する。これらは、柱断面図心上に配置したアンカーボルトによって引き起こされる。特に、Fig. 8 (b) の負方向載荷では、引張側のアンカーボルトと柱断面図心上のアンカーボルトが抵抗を開始する点が異なるため、正方向と著しく異なった履歴性状を示している。また、Fig. 8 (c) では、正負両方向で柱断面図心上のアンカーボルトを降伏させることで、正負の履歴性状はほぼ類似している。

Fig. 8 (d) に示す Type III はアンカーボルトを4列配置しているが、初期から最終サイクルまでほぼ一定の履歴性状を示している。正方向載荷の耐力が高めで、かつ正負の履歴性状が多少異なるのは、圧縮側の柱フランジ内に配置されたアンカーボルトが抵抗しているためである。負方向においては、圧縮側の柱フランジ内に配置されたアンカーボルトは、正方向載荷で既に塑性伸びをしているおり、ベースプレートと接触しないため、この影響が出ていない。

### 4.2 復元力特性

Fig. 9 に載荷実験により得られた復元力特性および復元力特性モデルを示す。実験結果の柱脚曲げモーメント： $M$  は、水平載荷荷重： $P_h$  に柱長さ： $L$  を乗じた値である。柱脚回転角： $\theta$  は、ベースプレートに設置した変位計により求めた回転角である。また、Table 3 に実験結果、解析より求めた降伏耐力および弾性回転剛性の値を示す。表中、 $M_y$ ：Fig. 10 に示す General yield point method より求めた降伏耐力、 $K_b$ ：1 サイクル目の曲線より Fig. 11 に示す方法で求めた弾性回転剛性、 $M_y$ ：式 (1) および (2.a) より求めた理論値の降伏耐力、 $K_b$ ：式 (3) と Fig. 6 の計算方法により求めた理論値の弾性回転剛性である。

Fig. 9 (a) の Type I において、復元力特性モデルは実験結果と良好に対応している。一般的なスリップ型を示し、降伏耐力・剛性とも一致している。一定の履歴性状を終始保っており、実験結果および復元力特性モデルは非常に単純である。

Fig. 9 (b) の Type II において、復元力特性モデルは実験結果と良好に対応している。Tri-linear 型であり、正負の履歴性状が異なる複雑なスリップ型を示しているが、各部耐力・剛性は一致している。

Fig. 9 (c) の Type II-2 において、復元力特性モデルは実験結果と良好に対応している。Tri-linear 型であるが、正負の履歴側はほぼ類似しており、各部耐力・剛性は一致している。このように、正負の履歴側の均衡を保つためには、正負交番時に変位振幅を増加させる必要がある。

Fig. 9 (d) の Type III において、復元力特性モデルは実験結果とほぼ良好に対応している。Tri-linear 型であり、正方向の耐力・剛性が高目ではあるが、降伏耐力・剛性はほぼ一致している。柱断面図心近傍に圧縮側アンカーボルトが配置してあることで、正負の履歴性状に多少差異が生じるものの、Type II のように大きく変化することなく、ほぼ一定の履歴性状を保っている。

Table 3 に、実験結果と解析結果の降伏耐力・剛性値を示す。実験値 / 解析値が、降伏耐力は 0.84 ~ 1.04、弾性回転剛性は 0.96 ~ 1.21 であり、比較的良好に対応している。Type III の実験剛性が高目の値を示しているのは、初期のサイクルでは圧縮側の柱フランジ内側に配置されたアンカーボルトが抵抗している影響である。また、Type II および Type II-2 の降伏耐力が低目に出ているが、2 サイクル目以降においては耐力も十分に対応している。これらの結果より、アンカーボルト以外の要素を弾性に保てる場合、圧縮合力点位置をベースプレート端部としてモデル化をすることで、履歴性状を良好に評価できる。

### 4.3 骨格曲線

Fig. 12 に全試験体の骨格曲線を示す。骨格曲線は、各試験体の正方向載荷および負方向載荷の曲線を、それぞれで足し合わせたものである。

Type I, Type II から Type III という順に、耐力および剛性は上昇している。また、Type I と Type III は、正負の履歴性状がほぼ一致している。Type II は、正方向載荷は一定の履歴性状を示しているが、負方向載荷はノコギリの刃のような履歴性状である。Type II-2 は、正負共に波を打つような履歴性状である。

## 5. ま と め

アンカーボルトを多数配列した露出柱脚の載荷実験を行

い、得られた知見を以下に示す。

- 1) いずれのアンカーボルト配置においても、スリップ型の復元力特性となる。
- 2) 多数のアンカーボルトを有することにより、復元力特性は複雑になるが、各列のアンカーボルトの履歴性状を累加することにより、比較的容易に復元力特性モデルを作成できる。
- 3) アンカーボルト配置の本数が増加することにより、露出柱脚の耐力・剛性は増加する。
- 4) アンカーボルトが柱断面図心上にある場合、正負の履歴性状が異なる複雑な性状を示す。また、載荷方式によっても履歴性状は変化する。
- 5) 実験結果との比較検討により、本論文で提案している復元力特性モデルの定式化で、アンカーボルトを多数配列した露出柱脚も良好に表現できる。

## 謝 辞

本研究は、広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」(代表者：高松隆夫教授)のプロジェクト研究の一環として実施した。また、フルサト工業株式会社より転造ねじアンカーボルトを提供していただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985. 3.
- 2) 高松隆夫，銅木弘和，中村慎太郎：露出型柱脚の復元力特性に関する実験的研究，鋼構造年次論文報告集，第9巻，pp.415-422，2001. 11.
- 3) 高松隆夫，銅木弘和，中村慎太郎：鉄骨露出型柱脚の復元力特性に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第10巻，pp.499-506，2002. 11.
- 4) 高松隆夫，銅木弘和，中村慎太郎：改良型復元力特性を有する鉄骨露出柱脚に関する研究，鋼構造年次論文

- 報告集，第11巻，pp.563-570，2003. 11. 9.
- 5) 高松隆夫，玉井宏章，山西央朗，石原節夫，松尾彰：既存屋内運動場露出柱脚の復元力特性について，鋼構造年次論文報告集，第12巻，pp.281-288，2004. 11.
- 6) Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI: Non-slip-type restoring force characteristics of exposed-type column base, Journal of Constructional Steel Reserch, Vol.61, pp.942-961, 2005.
- 7) 田中淳夫，増田功司，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. 12.
- 8) 山田哲，秋山宏，高橋誠，桂大輔，水谷美和：施工精度を向上させる改良型露出柱脚に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第574号，pp.205-212，2003. 12.
- 9) 吉住孝志，他：アンカーボルト降伏先行型鉄骨露出柱脚の弾性変形性状に関する研究(その2)繰返し挙動の解析および復元力特性の履歴則，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.951-952，2001. 9.
- 10) 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. 5.
- 11) 河野昭雄：地震動による鋼ラーメン骨組の残留水平変位に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第589号，pp.165-171，2005. 5.
- 12) 河野昭雄：柱軸力を考慮した柱脚の復元力特性が鋼骨組の残留変位に与える影響，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，pp.639-640，2005. 9.
- 13) 高松隆夫，玉井宏章，山西央朗：ノンスリップ型鉄骨露出柱脚の復元力特性モデル，構造工学論文集，Vol.51 B, pp.293-302，2005. 4.