一定引張軸力を受ける露出柱脚の抵抗機構と復元力特性モデル

MODELS OF RESTORING FORCE CHARACTERISTICS & RESISTANT MECHANISMS OF EXPOSED COLUMN-BASE UNDER CONSTANT TENSILE AXIAL-FORCE

山西 央朗*, 高松 隆夫**, 玉井 宏章***, 松村 高良****, 松尾 彰*****
Teruaki YAMANISHI, Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI,
Takayoshi MATSUMURA and Akira MATSUO

An anchor-bolt-yield-type column base shows slip-type restoring force characteristics. The column base subjected to constant axial and cyclic horizontal forces shows more complicated characteristics. An experimental study on the column-bases under constant axial-force and cyclic bending was carried out. The following conclusions were obtained from the loading tests;

- 1) Three types of resistant mechanisms of the column-base under constant axial-force were classified to evaluate the strength and the elastic rotational stiffness.
- 2) In case of tensile axial-force $N = 57$ (kN), the restoring force characteristics of the column-base were obtained combined all types of the resistant mechanisms.
- 3) In case of tensile axial-force $N = 117$ (kN), the restoring force characteristics became perfectly elasto-plastic curves without slip behavior.

Keywords : *Exposed column-base, Anchor-bolt-yield-type, Restoring force characteristics, Constant tensile axial-force, Cyclic loading tests*

露出柱脚, アンカーボルト降伏先行型, 復元力特性, 引張軸力, 繰返し載荷実験

1. はじめに

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚の降伏曲げ耐力, 弾性回転剛性は, 柱軸力の影響を受けて増減する¹⁻²⁾. 柱脚には上部構造物の自重等による圧縮軸力が常時作用しており, 中柱の柱脚においては, 地震時でも一定圧縮軸力が作用すると仮定できる場合が多い. このような, 一定圧縮力を受ける場合の露出柱脚に関する研究としては, アンカーボルト降伏先行型露出柱脚で発生するスリップ現象に着目した研究が, 数多く行われている. また, 著者等は, このスリップ現象を改善する装置として“楔デバイス”を提案・研究しており³⁻¹²⁾, 中柱を想定した一定圧縮軸力下において, スリップ現象を改善した復元力特性を付与できることを示している.“楔デバイス”はナットとベースプレートの間に隙間が生じればその隙間を楔が埋めてスリップ現象の改善が期待でき, 文献 13) において, 圧縮軸力領域の変動軸力を受ける場合でも期待する性能が得られることを示している. しかしながら, 変動軸力が引張領域に達する場合については検討を行っていない.

一方, 側柱においては変動軸力が作用し, 軸力が引張軸力となる可能性もある. 引張軸力領域を含む変動軸力に関する研究は, いくつか報告されている¹⁴⁻²⁰⁾. 伊藤・三谷・田中等は¹⁴⁻¹⁶⁾, 変動軸力を受ける

場合の露出柱脚における要素実験・露出柱脚付き単層多スパンラーメン架構の実験により, 変動軸力を受ける露出柱脚が上部構造物に与える影響を明らかにし, ラーメン架構側柱において変動軸力が発生すること, 軸力の変動が小さい場合, 変動軸力による保有水平耐力や水平剛性に与える影響が小さいことを示している. また, 田沼・橋本¹⁷⁾や宗宮・福知等¹⁸⁾は, 要素実験を行うと共に, 引張軸力領域を含む変動軸力下における抵抗機構および各評価式を検討・提案している. そして, 著者の一人は¹⁹⁻²⁰⁾, 変動軸力を受ける場合の各種抵抗機構, 軸力-曲げ相関降伏耐力式を示すと共に, 引張軸力領域におけるせん断スリップ条件を明らかにしている.

これらの研究は, 特定の変動軸力下における限定的な復元力特性モデルの定式化である点, 抵抗機構と復元力特性モデルとの対応が明解でない点, また, 実験的に検証が不十分である点等で抵抗機構に基づく復元力特性モデルを明らかにしているとは言えない. 著者等は, 今後, “楔デバイス”を用いた側柱柱脚を取扱うにあたり, “楔デバイス”が期待通りの性能を発揮することを実証・検証する上で, 引張軸力領域を含んだ変動軸力を受ける場合の抵抗機構に基づく復元力特性モデルを精確に評価しなければならない. しかしながら, 引張軸力を受ける場合の抵抗機構および復元力特性モデルの提

本論文は, 文献22), 23)の内容を修正・加筆したものである。

* 広島工業大学大学院知的機能科学専攻
大学院生・修士(工学)

** 広島工業大学工学部建築工学科 教授・Ph. D.

*** 広島工業大学工学部建築工学科 准教授・博士(工学)

**** 広島工業大学大学院建設工学専攻 大学院生

***** 広島大学大学院社会環境システム専攻 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Eng., Hiroshima Institute of Technology, M. Eng.

Prof., Faculty of Eng., Hiroshima Institute of Technology, Ph. D.

Assoc. Prof., Faculty of Eng., Hiroshima Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Eng., Hiroshima Institute of Technology

Prof., Graduate School of Eng., Hiroshima University, Dr. Eng.

表 1 素材特性と主要寸法

	材質	E (N / mm ²)	σ_y (N / mm ²)	主要寸法 (mm)
柱	STKR400	205,000	414	Box-200x200x12
ベースプレート	SS400	205,000	274	PL-400x400x50
アンカーボルト: C60, T30	ABR400	205,000	315	$\phi_g = 14.5, \text{ }_{ab}\ell = 590$
: T60	ABR400	205,000	294	$\phi_g = 14.6, \text{ }_{ab}\ell = 445$

E : ヤング率 σ_y : 降伏応力度 ϕ_g : 軸部径 $ab\ell$: 有効長さ

図 2 荷重装置

図 4 計測位置

案もほとんどなされていないため、引張軸力領域を含む変動軸力を受ける場合の抵抗機構に基づく復元力特性モデルを直接的に検討することは困難であると思われる。そこで、引張軸力下の基本的な挙動を明確にするために、まず、一定引張軸力を受ける場合の露出柱脚の復元力特性を検討する。一定圧縮・引張軸力を受ける露出柱脚については、九谷・増田²¹⁾が荷重実験を行っているものの、終局耐力の評価に着目しての研究が行われており、抵抗機構および復元力特性モデルについては検討されていない。

このような背景の下、本論文では、一定圧縮・引張軸力を受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の抵抗機構および復元力特性を明らかにするために、水平繰返し荷重実験を行う。そして、一定軸力を受ける柱脚における抵抗機構、復元力特性、それらの間の対応関係を明らかにして、今後の、変動軸力下の荷重実験、特に、“楔デバイス”を用いた場合の抵抗機構および復元力特性の検討を行うにあたっての基礎資料を得ることを目的とする。

2. 実験

本実験では、露出柱脚付き片持ち柱に一定柱軸力を荷重した後に、水平繰返し荷重実験を行う。試験体変数を、柱軸力: N とする。

2.1 試験体

表 1 に試験体の素材特性と主要寸法を示す。また、図 1 に試験体形状を示す。尚、本実験では、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。

試験体には、柱軸力として一定圧縮軸力 125(kN) (Comp), 一定引張軸力 57(kN) (Ten I), 一定引張軸力 117(kN) (Ten II) を荷重する、合計 3 種類を用意した。(柱軸力の決定方法は、後述の 2.2 節に示す。)

柱には Box-200x200x12, ベースプレートには隅角部にアンカーボルトを 1 本ずつ計 4 本配置する PL-400x400x50 を用い、柱とベース

図 1 試験体形状

図 3 鉛直荷重

図 5 接触・離間の状態と幾何学的条件

プレートとは全周隅肉溶接接合している。アンカーボルトには転造ねじアンカーボルト M16 を使用し、軸部降伏軸力の 30%(15kN) を初期張力として導入する。基礎部には、いずれの荷重に対しても塑性化しない、鋼製基礎: BH-400x400x32x36 を使用する。

2.2 荷重装置と荷重方法

図 2, 3 に荷重装置、各試験体に荷重する鉛直荷重を示す。荷重装置は、試験体柱頭部のヨークへ鉛直・水平ジャッキを取付け、鉛直・水平荷重を行うものである。

水平荷重は、制御値をベースプレート回転角: θ として、0.005(rad) から 0.02(rad) まで 0.005(rad) ずつ振幅を漸増させる正負交番漸増繰返し荷重とする。

鉛直荷重としては、図 3 に示す 3 種類の一定軸力を採用する。尚、本荷重装置では、ヨークの移動・回転による柱軸力の増減が生じると考えられるが、軸力の増減は $\pm 5\%$ 以下であり、本実験における影響はないものとして取扱う。

各柱軸力において、まず、圧縮軸力の場合(圧縮軸力領域)には、常にベースプレートが基礎に接触しており、柱軸力はベースプレートを介して基礎に伝播されるため、柱軸力が増減しても抵抗機構は変化しない。このため、柱軸力による付加曲げ抵抗が確認できる程度の軸力の大きさとして $N=125(\text{kN})$ を採用している。

次いで、引張軸力の場合には、柱軸力をアンカーボルトが負担するので、1) 1 列のアンカーボルト(本試験体は、2 本/列)のみで柱軸力に抵抗できる場合; 2) 1 列のアンカーボルトのみでは降伏するために、全アンカーボルトで抵抗する場合; とがあり、柱脚が降伏する時(アンカーボルト降伏時)の抵抗機構が変化する。すなわち、アンカーボルト降伏軸力: T_y , 引張側アンカーボルト本数: n を用いて、以下のように領域を分ける必要がある。

$0 < N < 4 \cdot T_y$ を満足すると共に、

$$N < n \cdot T_y = 2 \cdot T_y : \text{引張軸力領域 I} \quad (1.a)$$

$$N \geq n \cdot T_y = 2 \cdot T_y : \text{引張軸力領域 II} \quad (1.b)$$

本実験においては、柱軸力がアンカーボルト 2 本分の降伏耐力を超過するかどうかで境となり、柱脚の抵抗機構が変化する。それぞれ、引張軸力領域 I では $N=57(\text{kN})$ 、引張軸力領域 II では $N=117(\text{kN})$ を採用している。

2.3 計測方法と整理方法

図 4、図 5 に計測位置、ベースプレートと基礎との接触・離間時の幾何学的条件を、それぞれ、示す。変位としては、柱下端部の鉛直変位： δ_c 、 δ_R (図 1(a) 参照) を計測してベースプレート回転角： θ 、柱図心位置鉛直変位： w を算出する。荷重としては、各ジャッキ先端に設置したロードセルにより水平荷重： P および鉛直荷重： N を、アンカーボルト下端部に設置したセンターホール型ロードセルによりアンカーボルト軸力： T を計測する。また、ひずみゲージを柱の 2 断面 (1 断面当たり、4 箇所) に貼付して、柱の軸方向直ひずみを計測し、曲率と柱の曲げ剛性から柱脚部に作用する曲げモーメント： M を算出する。尚、ひずみゲージより算出した、曲げモーメント勾配から柱のせん断力を算出し、水平荷重： P と一致することを確認している。

また、引張軸力を受ける場合、ベースプレートが基礎から離間する場合がある。この離間変位： δ_c を、以下のように算出する。

まず、ベースプレートが基礎に接触している状態の柱図心位置鉛直変位： w_c を、図 5(a) に示す変形状態の幾何学的条件より、以下のように表すことができる。

$$w_c = d_c \cdot \sin \theta \quad (2.a)$$

次いで、図 5(b) に示すように離間している状態における離間変位： δ_v を、柱図心位置鉛直変位： w と、 w_c を用いて、以下の式で表すことができる。

$$\delta_v = w - w_c = w - d_c \cdot \sin \theta \quad (2.b)$$

ここに、 θ : ベースプレート回転角、 d_c : 柱図心位置からベースプレート下端部までの距離 (図 5 参照) である。

3. 抵抗機構と復元力特性モデル

一定圧縮・引張軸力を受ける露出柱脚について、図 6 に示す 3 種類の抵抗機構を用いて、付加曲げ抵抗、降伏曲げ耐力、弾性回転剛性の評価式の導出、並びに、復元力特性モデルの定式化を行う。

尚、本論文では繰返し載荷時の挙動に主眼を置いて復元力特性モデルの定式化を行う。単調載荷時には、如何なる柱軸力を受ける場合にも、全てのアンカーボルトのナットがベースプレートに接触しており、本論文で示す内容と異なる部分がある。

図 7 せん断力に対する抵抗機構

図 8 アンカーボルトに作用するせん断力と降伏応力度

3.1 仮定

以下の仮定に基づいて、各評価式の導出、並びに、復元力特性モデルの定式化を行う。

1. 降伏要素をアンカーボルトに限定する。
2. ベースプレートが基礎に接触している場合には、圧縮合力点位置は圧縮側ベースプレート端部とする。
3. 基礎、および、ベースプレートの弾性変形による弾性回転剛性の低減を考慮するため、係数： R を導入する¹⁾。
4. ベースプレートが基礎に接触している場合には、引張側アンカーボルトのみが抵抗する。
5. 柱せん断力には、ベースプレートが基礎に接触している場合には、ベースプレートと基礎との間に発生する摩擦力で抵抗する。しかしながら、摩擦力は基礎からの圧縮反力： C とベースプレートと基礎間の静止摩擦係数： μ により決定するため、柱軸力が引張軸力領域に入る場合、図 7 (b) に示すように摩擦力のみではせん断力を負担できない場合がある。更に、図 7 (c), (d) に示すようにベースプレートと基礎とが離間している場合には、アンカーボルトのせん断力で抵抗する。本論文では、定式化の簡単のために、図 7 (b)-(d) に

示す抵抗機構となる場合、全て、軸力に対して主に抵抗している側のアンカーボルト列が負担するものとして考える。

図 7 (a) より、柱脚部に作用するせん断力 : Q と摩擦力によるせん断力 : Q_f とは以下の式で表すことができる。

$$Q = \frac{M}{L} = \frac{n \cdot T \cdot (d_t + d_c) - N \cdot d_c}{L} \quad (3.a)$$

$$Q_f = C \cdot \mu = (n \cdot T - N) \cdot \mu \quad (3.b)$$

また、これらが釣合っている時の柱軸力 : N は以下の式で表すことができる。

$$N = \frac{n \cdot T \cdot (\mu \cdot L - d_t - d_c)}{\mu \cdot L - d_c} \quad (3.c)$$

この時、柱脚部に作用するせん断力 : Q は、

$$Q = Q_f = (n \cdot T - N) \cdot \mu = \frac{n \cdot T \cdot \mu \cdot d_t}{\mu \cdot L - d_c} \quad (3.d)$$

となる。

ここに、 n : 引張側アンカーボルト本数、 d_t : 柱断面図心位置から引張側アンカーボルト中心までの距離、 d_c : 柱断面図心位置から圧縮合力点位置までの距離、 N : 鉛直荷重 (引張軸力を正 (+) とする)、 L : 柱長さ (=1.5(m))、 μ : ベースプレートと基礎間の静止摩擦係数 (=0.4)²⁴⁾ である。

図 8 に、各軸力下でアンカーボルトが負担するせん断力 $_{ab}Q$ (式 (3.d) および後述の式 (4.b), (5), (6.a) により求めた M から算出した) と、ミーゼスの降伏条件によりせん断力の影響を考慮したアンカーボルト降伏軸方向応力度と降伏応力度の比 σ_y'/σ_y を示す。尚、せん断応力度には平均応力度 ($Q/_{ab}A$) を用い、また、抵抗状態 B, D においては危険側の値を検討するために $Q=Q_1$ ($Q_f=0$, $Q_2=0$) として算出している。図 8 より、柱脚の降伏曲げ耐力については、 σ_y'/σ_y の最小値が 0.97 となり、アンカーボルトがせん断力を負担することによる影響は工学的に見て小さいと言える。このため、せん断力が作用することによる、アンカーボルトの降伏軸耐力の低減はないものとする。

一方、柱の水平弾性剛性については、アンカーボルトがせん断力を負担する場合、柱の曲げ剛性と柱脚の回転による柱頭部水平変位に、アンカーボルトの曲げ剛性による柱頭部水平変位、更に、ベースプレートのアンカーボルト孔とアンカーボルトの間の遊び (ベースプレートには施工上過大孔を加工するため) による柱頭部水平変位を累加する必要がある。このため、せん断抵抗状態 C, D では、柱の水平弾性剛性は著しく低下し、第 1 層柱の性状を検討する上では十分に検討すべきであるが、復元力特性 (曲げモーメント - ベースプレート回転角関係) 上においてこれらの影響が現れないため、本定式化ではこれらの影響を考慮しないものとする。

6. アンカーボルトの材料特性には、完全弾塑性体モデルを用いる。

3.2 抵抗機構と降伏曲げ耐力・弾性回転剛性

図 6 に各抵抗機構を示す。各抵抗機構が発生する軸力の領域、各評価式を以下に示す。

3.2.1 抵抗機構 A (図 6 (a))

抵抗機構 A は、ベースプレートが基礎に接触している場合の抵抗機構である。せん断力に対しては、ベースプレートと基礎との間に発生する摩擦力により抵抗する。尚、抵抗機構 A は、圧縮軸力領域と引張軸力領域 I ($N < 2T_y$) で発生する。柱軸力が引張軸力領域 II に

ある場合には、全てのアンカーボルトが引張抵抗するため、ベースプレートが基礎に接触しない。

次いで、仮定 2) より、圧縮合力点位置は圧縮側ベースプレート端部とすれば、この抵抗機構における付加曲げ抵抗 : M_{An} 、降伏曲げ耐力 : M_{AY} 、および、弾性回転剛性 : K_{ABS} は、以下の式で表される。

$$M_{An} = -N \cdot d_c \quad (4.a)$$

$$M_{AY} = n \cdot _{ab}A \cdot _{ab}\sigma_y \cdot (d_c + d_t) - N \cdot d_c \quad (4.b)$$

$$K_{ABS} = \frac{E \cdot n \cdot _{ab}A \cdot (d_c + d_t)^2}{R \cdot _{ab}\ell} \quad (4.c)$$

ここに、 $_{ab}A$: アンカーボルト軸部断面積、 $_{ab}\sigma_y$: アンカーボルト降伏応力度、 E : アンカーボルトのヤング率、 R : ベースプレートと基礎の弾性変形を考慮した低減係数 (=2.0)¹⁾、 $_{ab}\ell$: アンカーボルトの有効長さである。

3.2.2 抵抗機構 B (図 6 (b))

抵抗機構 B は、ベースプレートが基礎から離間し、片側のアンカーボルト列のナットがベースプレートに接触している場合の抵抗機構である。せん断力に対しては、図 7(a) に示すように、ナットがベースプレートに接触していない側のアンカーボルトがせん断抵抗する。尚、抵抗機構 B は、引張軸力領域 I ($0 < N < 2T_y$) で発生する。柱軸力が引張軸力領域 II にある場合には、全てのアンカーボルトで抵抗する。

この抵抗機構における軸力曲げ抵抗 : M_{Bn} は、以下の式で表される。

$$M_{Bn} = N \cdot d_t \quad (5)$$

3.2.3 抵抗機構 C (図 6 (c))

抵抗機構 C は、ベースプレートが基礎から離間し、全てのアンカーボルトのナットがベースプレートに接触している場合の抵抗機構である。せん断力に対しては、図 7(b) に示すように、片側が降伏している場合、降伏していない側のアンカーボルトがせん断抵抗する。尚、抵抗機構 C は、引張軸力領域 I・II ($0 < N < 4T_y$) で発生する。

次いで、この抵抗機構における降伏曲げ耐力 : M_{CY} 、および、弾性回転剛性 : K_{CBS} は以下の式で表される。

$$M_{CY} = n \cdot _{ab}A \cdot _{ab}\sigma_y \cdot (2d_t) - N \cdot d_t \quad (6.a)$$

$$K_{CBS} = \frac{E \cdot n \cdot _{ab}A \cdot 2 \cdot d_t^2}{R \cdot _{ab}\ell} \quad (6.b)$$

3.3 復元力特性モデル

任意サイクル時の、各一定軸力下における復元力特性モデルと抵抗機構の変化を図 9 に示す。

3.3.1 圧縮軸力領域 (Comp)

柱軸力が圧縮軸力領域 (Comp) である場合については、一般的なスリップ型復元力特性モデルとなる¹⁻⁸⁾。尚、常に抵抗機構 A となり、付加曲げ抵抗、降伏曲げ耐力、弾性回転剛性は、式 (4.a)~(4.c) により求められる。

3.3.2 引張軸力領域 I (Ten I)

柱軸力が引張軸力領域 I (Ten I) である場合の復元力特性モデルと抵抗機構の変化を図 9(a) に示す。用いる理論式は、(4.b), (4.c), (5), (6.b) である。

任意サイクル時において、圧縮側および引張側のアンカーボルトの塑性伸び量が等しければ、回転角が 0 の状態で曲げ抵抗が 0 であり、抵抗機構 C となる。この点 a から、まず、抵抗機構 C でベースプレートが回転し、弾性回転剛性 K_{CBS} で曲げモーメントが増加して行き (a $\Rightarrow$ b)、次いで、圧縮側アンカーボルトのナットがベースプレートから離間して抵抗機構 B となり、付加曲げ抵抗 M_{Bn} で回転角が増大する (b $\Rightarrow$ c)。ベースプレートの圧縮側端部が基礎に接触して、抵抗機構 A となり、弾性回転剛性 K_{ABS} で曲げモーメントが増加した後、降伏曲げ耐力 M_{AY} に達して、降伏曲げ耐力を保持したまま回転角が増大する (c $\Rightarrow$ e)。

そして、除荷を開始すると、弾性回転剛性 K_{ABS} で曲げモーメントが減少し、付加曲げ抵抗 M_{Bn} に達すると抵抗機構 B となり、耐力を保持したまま回転角が減少する (e $\Rightarrow$ g)。

次いで、圧縮側アンカーボルトのナットがベースプレートに接触して抵抗機構 C となり、弾性回転剛性 K_{CBS} で曲げモーメントが減少する (g $\Rightarrow$ h)。最後に、引張側アンカーボルトのナットがベースプレートから離間して、再び、抵抗機構 B となり、負の付加曲げ抵抗 $-M_{Bn}$ を保持しながら回転角が減少する (h $\sim$)。

尚、除荷時の履歴が原点を通らないのは、圧縮側と引張側のアンカーボルトの塑性伸び量が異なるためである。また、圧縮側アンカーボルトのナットがベースプレートに接触する回転角 θ_{con} (図 9 (a) 中の点 g) は、図 10 に示す幾何学的条件より、引張側と圧縮側アンカーボルトの塑性伸び量 δ_e^+ , δ_e^- 、引張軸力 N によるアンカーボルトの弾性伸び量 δ_n を用いて、以下の式で表される。

$$\theta_{con} = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_e^+ + \delta_n - \delta_e^-}{2d_t} \right) \quad (7)$$

$$\doteq \left\{ (d_t + d_c) \cdot (\theta_{max}^+ - |\theta_{max}^-|) + \frac{R \cdot N \cdot ab \ell}{n \cdot ab A \cdot E} \right\} \cdot \frac{1}{2d_t}$$

ここに、 θ_{max}^+ : 任意サイクル時における正方向載荷の最大回転角、 θ_{max}^- : 任意サイクル時における負方向載荷の最大回転角である。

3.3.3 引張軸力領域 II (Ten II)

柱軸力が引張軸力領域 II (Ten II) である場合の復元力特性モデルと抵抗機構の変化を図 9(b) に示す。

任意サイクル時において、ベースプレートが基礎から常に離間し、抵抗機構 C となる。載荷方向により、降伏するアンカーボルトが入れ替わるのみである。このため、復元力特性モデルは、式 (6.a) より求められる降伏曲げ耐力 M_{CY} と、式 (6.b) より求められる弾性回転剛性 K_{CBS} を有する、完全弾塑性型となる。

4. 実験結果

各実験結果を図 11, 図 12, 図 13 に示す。図 11 に曲げモーメント M - ベースプレート回転角 θ の関係を、図 12 にアンカーボルト軸力 T - ベースプレート回転角 θ の関係を、図 13 に離間変位 δ_v - ベースプレート回転角 θ の関係を示す。また、図 11 においては、復元力特性モデルを併せて示す。

尚、図 11 中の右縦軸と上横軸は、式 (4.b), (6.a) より求めた降伏曲げ耐力解析値 M_{AY} , M_{CY} と式 (4.b-c), (6.a-b) より求めた降伏時ベースプレート回転角解析値 θ_Y で無次元化し、図 12 中の右縦軸と上横軸は、アンカーボルト降伏軸力 T_Y と降伏時ベースプレート回転角 θ_Y で無次元化している。

4.1 圧縮軸力領域 (Comp)

柱軸力が圧縮軸力領域 (Comp) である場合、図 11 (a) より、実験結果は一般的なスリップ型となり、復元力特性モデルと良好に対応していることが分かる。図 12 (a) より、アンカーボルトは、降伏後にほぼ耐力が一定となり、仮定 6), 4) の通り、完全弾塑性型履歴性状を示している。また、圧縮側アンカーボルトが抵抗していないこととスリップ現象が生じていることが分かる。但し、1~2 サイクル目においては、アンカーボルトの塑性伸びが僅かであるため、全アンカーボルトのナットがベースプレートに常に接触しており、圧縮側となるアンカーボルト (正方向載荷における右側ボルト) も抵抗している。図 12 より、左右どちらかのベースプレート端部が基礎に常に接触しているため、離間変位 δ_v はほぼ 0 であり、常に抵抗機構 A となることが分かる。

4.2 引張軸力領域 I (Ten I)

柱軸力が引張軸力領域 I (Ten I) である場合、図 11 (b) より、実験結果は、スリップ型で正負非対称な履歴性状を示し、復元力特性モデルと良好に対応していることが分かる。引張軸力領域 I でも、付加曲げ抵抗が発生して、全体の履歴性状は圧縮軸力領域のものと類似している。降伏曲げ耐力は、アンカーボルトが柱軸力を負担するため、Comp と比較して低下している。また、軸力曲げ抵抗する区間におい

図 11 曲げモーメント : M - ベースプレート回転角 : θ 関係

図 12 アンカーボルト軸力 : T - ベースプレート回転角 : θ 関係

図 13 離間変位 : δ_v - ベースプレート回転角 : θ 関係

では、引張側のアンカーボルトのナットがベースプレートに接触しており、回転角と軸力曲げ抵抗は逆向きになる。但し、図 12 (b) より、正方向荷重の除荷時において、0.01(rad) 付近から圧縮側アンカーボルト (右側ボルト) のナットがベースプレートに接触して抵抗機構 C となり、引張アンカーボルト (左側ボルト) の軸力が減少すると共に右側ボルトの軸力が増加し、柱軸力を負担するアンカーボルト列が切り替わる (図 9 (a) 中の $g \Rightarrow h$ 区間に相当)。この影響により、図 11 (b) の i において、負の回転角に達する前に負の曲げ抵抗が発生し、また、この現象が発生する回転角の予測値 θ_{con} を図 11 (b) 中に併せて記すが、式 (7) により予測可能であることが分かる。このような、回転角と曲げ抵抗の向き一致する現象は、両側のアンカーボルトの塑性伸び量が異なる場合に生じる。ベースプレート回転角を制御値とする正負交番繰返し荷重においては、負方向除荷時に両側のアンカーボルトの塑性伸び量が等しくなるため、このような現象は発生しない。

図 13 より、最大の離間変位 : δ_v が 5mm 程度となり、接触と離間とを繰返していることが分かる。これは、付加曲げ抵抗する区間においてはベースプレートが基礎から離間して抵抗機構 B・C となり、それ以外の区間においてはベースプレートが基礎に接触して抵抗機構

A となるためである。

4.3 引張軸力領域 II (Ten II)

柱軸力が引張軸力領域 II (Ten II) である場合、図 11 (c) より、実験結果は完全弾塑性型を示し、復元力特性モデルと良好に対応していることが分かる。降伏曲げ耐力は、アンカーボルトが柱軸力を負担するため、Ten I より大きな一定引張軸力を载荷している Ten II では、Ten I より更に低下している。但し、最終サイクルにおいては、アンカーボルトのひずみ硬化の影響により、曲げ抵抗は増加している。

図 12 (c) より、全てのアンカーボルトに常に軸力が作用していること、そして、図 13 より、最大の離間変位 : δ_v が 20mm 程度となり常に離間変位が生じていることより、常に抵抗機構 C となっていることが分かる。

5. まとめ

一定圧縮・引張軸力を受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の水平繰返し荷重実験結果と抵抗機構に基づく復元力特性モデルとを比較・検討した結果、以下のような知見が得られた。

1. 一定圧縮・引張軸力を受ける柱脚の復元力特性モデルは、図 6 に示す 3 種類の抵抗機構を用いて求められる。
2. 一定圧縮軸力を受ける柱脚の復元力特性モデルは、図 6 (a) の抵抗機構のみを用いて全弾塑性型として求められ、実験結果に良好に対応している。
3. 一定引張軸力を受ける柱脚の場合には、引張軸力の大きさにより復元力特性が異なる。
4. 引張軸力領域 I の一定引張軸力を受ける柱脚の復元力特性モデルは、図 6 の全ての抵抗機構を用いて複雑な曲線として求められる。特に、除荷時において、アンカーボルトの塑性伸び量の差異により、履歴曲線が異なる性状を示す。すなわち、基礎に接触していたベ-

スプレートが、離間し、そして、アンカーボルトのナットに接触することによる抵抗機構 A, B, C の変化に伴う曲線が除荷時に異なる場合がある。この性状を精確に追跡した復元力特性モデルは、実験結果に良好に対応している。

5. 除荷時において、圧縮側アンカーボルトのナットがベースプレートに接触する回転角は、式 (7) を用いて精度良く求められる。
6. 引張軸力領域 II の一定引張軸力を受ける柱脚の復元力特性モデルは、図 6 (c) の抵抗機構のみを用いて完全弾塑性型として求められ、実験結果に良好に対応している。

現在、変動軸力を受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の水平繰返し載荷実験を行っている。その実験結果については、報を改めて報告を行う予定である。本論文で示した、抵抗機構および復元力特性モデルを用いて、引張軸力領域を含む変動軸力を受ける場合の抵抗機構および復元力特性モデルを検討する。更に、“楔デバイス”を設置した柱脚の復元力特性における、変動軸力の影響についても検討する予定である。

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されました。また、試験体の転造ねじアンカーボルトを提供していただきましたフルサト工業株式会社、研究助成をしていただきました古川技術振興財団に対して、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) 山西央朗，玉井宏章，高松隆夫，松尾彰：露出柱脚の弾性回転剛性について - アンカーボルト降伏先行型の場合 -，日本建築学会構造系論文集，第 623 号，pp.155-162, 2008.1.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.

- 8) 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.51B, pp.293-302, 2005.3.
- 9) 高松隆夫，玉井宏章，山西央朗，松尾彰：ノンスリップ型露出柱脚のセルフセンタリング性能に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第 13 巻，pp.173-180, 2005.11.
- 10) T. Takamatsu, H. Tamai, T. Yamanishi & A. Matsuo (2006a), Self-centering performance of non-slip-type exposed column-base, Proceeding of fifth international conference on “Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas(STESSA2006)”, Yokohama, Japan, 357-362.
- 11) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，松尾彰：アンカーボルトを多数配列したノンスリップ型露出柱脚の復元力特性 - 無軸力下の場合のセルフセンタリング性能 -，日本建築学会構造系論文集，第 621 号，pp.155-162, 2007.11.
- 12) 高松隆夫，玉井宏章，山西央朗，松村高良，石原節夫，松尾彰：既存屋内運動場露出柱脚の復元力特性と楔デバイスによる耐震改修工法について，構造工学論文集，Vol.54B, pp.715-722, 2008.3.
- 13) 玉井宏章，高松隆夫，山西央朗，白木剛，多田元秀：統合化評価法を用いた実大ノンスリップ型露出柱脚の仮動的実験，鋼構造年次論文報告集，第 14 巻，pp.269-276, 2006.11.
- 14) 伊藤倫夫，三谷勲，大谷恭弘，藤永隆，田中秀宣：基礎部の配筋を簡略化したアンボンド型アンカーボルトを用いた露出柱脚の構造性能，鋼構造論文集，第 8 巻 第 31 号，pp.43-55, 2001.9.
- 15) 田中秀宣，亀元靖彦，三谷勲，藤永隆，伊藤倫夫：変動軸力を受ける露出型柱脚の曲げ挙動と復元力特性，鋼構造論文集，第 10 巻 第 39 号，pp.39-49, 2003.9.
- 16) 田中秀宣，三谷勲，嶋村洋子，伊藤倫夫：変動軸力を受ける露出柱脚を有する鋼構造骨組の弾塑性挙動，鋼構造論文集，第 12 巻 第 45 号，pp.171-184, 2005.3.
- 17) 田沼吉伸，橋本健一：引張軸力を受ける露出形式柱脚の終局挙動，鋼構造年次論文報告集，第 6 巻，pp.181-188, 1998.11.
- 18) 宗宮由典，福岡保長，陳文慶：変動軸力を受ける露出型鉄骨柱脚の弾塑性挙動及び耐力評価に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 562 号，pp.137-143, 2002.12.
- 19) 玉井宏章：変動軸力と繰返し曲げを受ける露出柱脚の載荷実験 - 変動軸力下の半剛接特性 -，日本建築学会構造系論文集，第 567 号，pp.149-156, 2003.5.
- 20) 玉井宏章：変動軸力の影響を考慮した露出柱脚付骨組の弾塑性解析法，日本建築学会構造系論文集，第 571 号，pp.127-135, 2003.9.
- 21) 九谷和秀，増田貫志：鉄骨構造露出柱脚部終局耐力に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，第 433 号，pp.39-49, 1992.3.
- 22) 松村高良，高松隆夫，玉井宏章，山西央朗，小澤拓雄，松尾彰：一定軸力下の鉄骨露出柱脚の復元力特性モデル，日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州)，構造 III-C1, pp.725-726, 2007.8.
- 23) 高松隆夫，玉井宏章，松村高良，山西央朗，松尾彰：一定軸力下の鉄骨露出柱脚の復元力特性モデル，鋼構造年次論文報告集，第 15 巻，pp.97-104, 2007.11.
- 24) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，第 2 版，2006.3.

(2008年5月10日原稿受理，2008年12月17日採用決定)