

2軸曲げを受けるアンカーボルトを多数配列した 露出柱脚に関する実験的研究

高松 隆夫*・山西 央朗**・玉井 宏章*
竹本 泰聖***・松尾 彰****

(平成21年10月31日受理)

Experimental study on exposed column-base with multi-rows of anchor-bolts subjected to bi-axial bending

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI, Hiroyuki TAMAI,
Yasumasa TAKEMOTO and Akira MATSUO

(Received Oct. 31, 2009)

Abstract

An anchor-bolt-yield-type exposed column base subjected to biaxial bending moment shows complicated restoring force characteristics due to increase of number of anchor-bolts resisting the bending moment. A wedge device proposed by the authors is applied to the exposed column base to simplify the restoring force characteristics and to improve slip phenomena. The non-slip-type exposed column-base with multi-rows of anchor-bolts shows self-centering performance. An experimental study was carried out on both slip-type and non-slip-type exposed column bases to verify advantages of the non-slip-type over the slip-type.

Key Words: *Anchor-bolt-yield-type, Bi-axial bending, Exposed column-base, Restoring force characteristics, Non-slip-type*

1. はじめに

地震等により任意方向の水平外力が作用した場合、実際の構造物では、柱脚に2軸曲げが作用する可能性がある。また、一般的な露出柱脚においては、アンカーボルトを多数配列したもの（1軸曲げを受ける場合も2列以上が抵抗するもの）が多く採用されている。

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚は、2軸曲げを受けることにより、1軸曲げを受ける場合とは異なる挙動を示す^{1, 2)}。更に、アンカーボルトを多数配列することで、復

元力特性は複雑なものになる³⁻⁸⁾。2軸曲げを受けることによる抵抗機構の変化および抵抗機構の変化が復元力特性に及ぼす影響を明確にする必要がある。

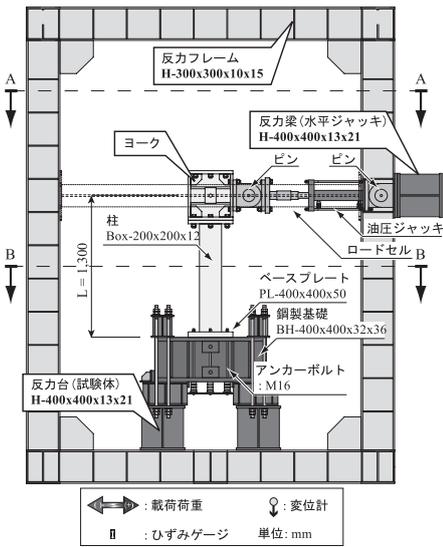
一方、著者等はアンカーボルト降伏先行型露出柱脚のスリップ現象を改善することを目的に”楔デバイス”を開発し、これを設置した柱脚をノンスリップ型露出柱脚と呼び研究してきた^{3-8, 10-13)}。これは、スリップ現象の改善のみではなく、アンカーボルトを多数配列することや、2軸曲げを受けることにより複雑化する復元力特性を単純化できる^{5, 10)}。更に、アンカーボルトを多数配列した場合、弾性

* 広島工業大学工学部建設工学科

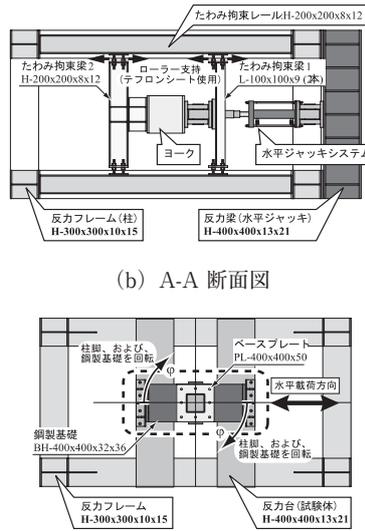
** 広島工業大学高性能構造システム開発研究センター

*** 広島工業大学大学院建設工学専攻

**** 広島大学大学院社会環境システム専攻



(a) 正面図



(b) A-A 断面図

(c) B-B 断面図

図4 荷重装置

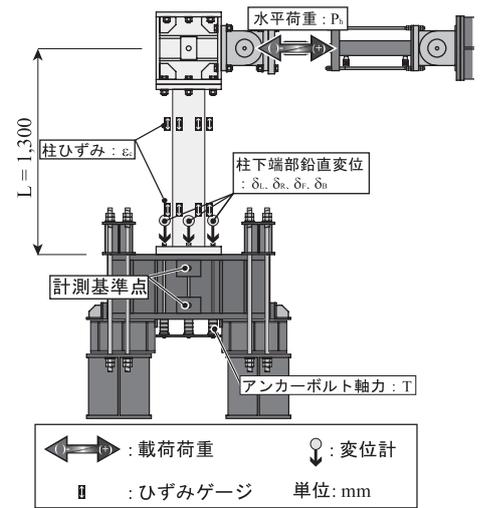


図5 計測装置

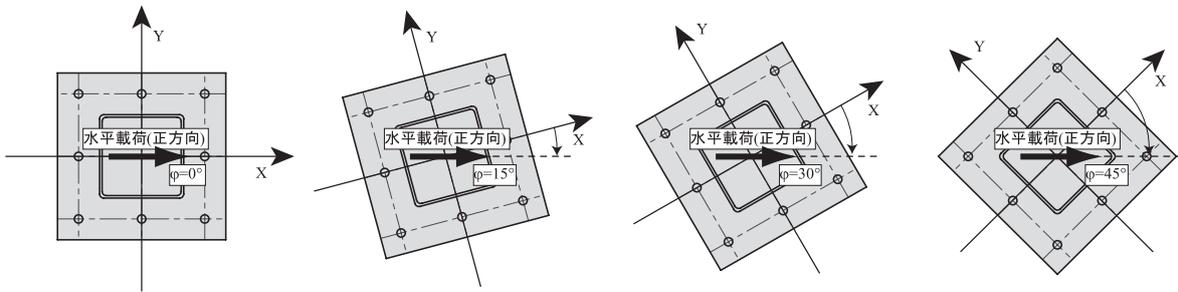


図6 荷重方向とアンカーボルト位置関係

合計8種類を用意した。

柱には Box-200x200x12, ベースプレートには PL-400x400x50 を用いて、柱とベースプレートとを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8本使用し、図1 (b) に示すようにアンカーボルトを均等配置する。また、実験では、軸部降伏軸力の30% (15kN) を初期軸力として導入する。基礎部には、鋼製基礎: BH-400x400x32x36 を使用する。

楔デバイスは、楔、楔受け、バネおよび、バネ反力板から構成されている。楔および、楔受けは、アンカーボルトから伝達される圧縮力の接触面方向力に対して、接触面における摩擦力により抵抗し、滑らないようにする必要があるため、楔と楔受けの接触面には、発錆処理 (塩分濃度5%程度の食塩水により、一週間ほど湿潤状態を保つ) を施して、静止摩擦係数 μ を増大させている。本実験では、静止摩擦係数 $\mu=0.76$ であり、楔が滑らないように貫入角度を30度としている。

2.2 荷重装置と荷重方法

図3, 4, 6 に荷重方法の概念図、本実験で用いる荷重装置および各荷重方向とアンカーボルト位置関係をそれぞれ

に示す。

荷重装置は、図4 (a) に示すように、試験体柱頭部のヨークへ水平ジャッキを接合し、水平荷重を行うものである。図4 (c) に示すように、試験体設置時に水平荷重角度 ϕ だけ試験体を回転させ、図6 に示すように、x 軸回りおよび y 軸回りに同時に曲げを作用させる繰返し荷重実験を行う。荷重方法は、x 軸および、y 軸方向回転角 θ_x, θ_y を用いて求めた水平荷重方向の回転角 θ を制御値とし、0.005 (rad) から 0.025 (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。

尚、水平荷重角度 ϕ を有することで、試験体が荷重方向に対して直交方向にたわむ可能性がある。このため、荷重方向のみに、強制変位を与えられる荷重とするために、図4 (b) に示すように、たわみ拘束部材をヨークおよびロードセルの先端位置に設置して、これらを試験体前後に設置したレールと接触させ (接触面にはテフロンシートを設置)、ヨークを荷重方向に移動自由なローラー支持としている。

2.3 計測方法と整理方法

図5 に計測位置を示す。

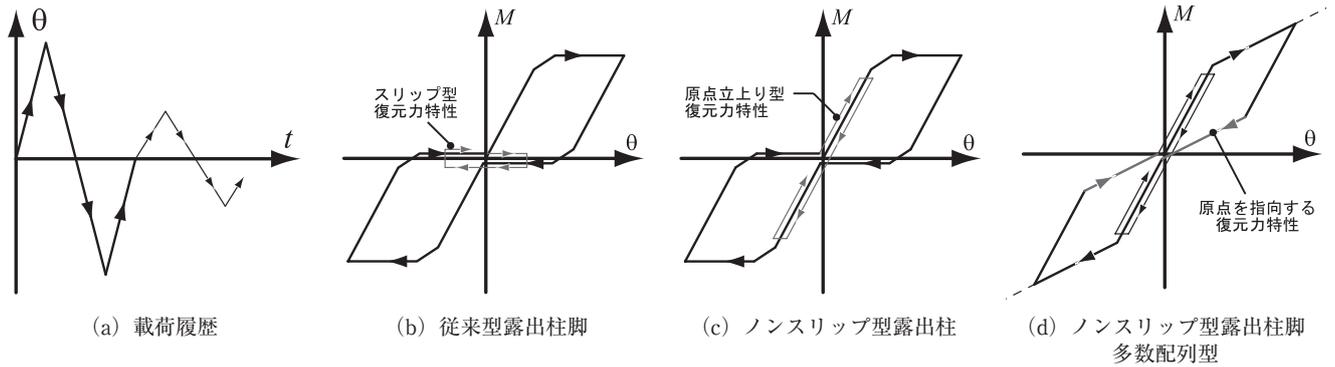


図9 従来型露出柱脚とノンスリップ型露出柱脚の復元力特性およびセルフセンタリング性能

変位としては、柱下端部の鉛直変位 δ_L , δ_R , δ_F , δ_B (図2(a)参照)を計測し、各軸回りのベースプレート回転角 θ_x , θ_y を算出する。荷重としては、水平ジャッキ先端に設置したロードセルにより水平荷重 P_h を、アンカーボルト下端に設置したセンターホール型ロードセルにより、各アンカーボルトの軸力 T を計測する。また、ひずみゲージを柱の2箇所(1箇所あたり8枚)に貼付して軸方向直ひずみを計測し、曲率と柱の曲げ剛性から M_x , M_y を求め、柱脚部曲げモーメント M を算出する。式は以下のものとなる。

$$\theta_x = \frac{\delta_F - \delta_B}{RD}, \quad \theta_y = \frac{\delta_L - \delta_R}{RD}, \quad \theta = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2} \quad (1.a \sim c)$$

$$M = M_y \cdot \cos\phi + M_x \cdot \sin\phi \quad (2)$$

各軸方向の圧縮合力点位置: d_{cx} , d_{cy} は、 M_x , M_y と、各アンカーボルトの軸力: T_i から、以下の式で算出する。

$$d_{cx} = \frac{M_x - \sum_{i=1}^i (T_i \cdot d_{ix})}{\sum_{i=1}^i (T_i)}, \quad d_{cy} = \frac{M_y - \sum_{i=1}^i (T_i \cdot d_{iy})}{\sum_{i=1}^i (T_i)} \quad (3.a, b)$$

$$d_c = \sqrt{d_{cx}^2 + d_{cy}^2} \quad (3.c)$$

ここに、 R : 変位計間距離 (図2(b)参照), d_{ix} : 柱断面図心から各アンカーボルト中心の X 軸方向の距離, d_{iy} : 柱断面図心から各アンカーボルト中心の Y 軸方向の距離である。

3. 従来型露出柱脚とノンスリップ型露出柱脚の復元力特性およびセルフセンタリング性能

図9に正負交番繰返し荷重時の従来型露出柱脚および、ノンスリップ型露出柱脚の復元力特性を模式的にそれぞれ示す。荷重は、図9(a)に示すように、大きな振幅の後に小さな振幅が生じるものとする。

図9(b)に示すように、従来型露出柱脚では、小さな振幅時にスリップ現象が生じるが、ノンスリップ型露出柱脚

では、図9(c)に示すように、最大振幅後の小さな振幅に対して原点から耐力が立上り、更に、最大振幅時において一列でもアンカーボルトが弾性範囲内に留まれば、図9(c)に示すように、除荷時に原点を指向する復元力特性が得られる。

本論文では、荷重時には原点から耐力が立上ると共に、除荷時には原点を指向する復元力特性を、ノンスリップ型露出柱脚におけるセルフセンタリング性能と定義する。

4. 復元力特性モデルおよび柱材の有限要素法解析

図10に、従来型露出柱脚とノンスリップ型露出柱脚の抵抗列数を示し、また、図11に、有限要素法の解析モデルをそれぞれに示す。

本研究では、2種類の異なる復元力特性を持つ柱脚の実験を行っている。それぞれに、従来型露出柱脚では、図9(b)に示すようなスリップ型の復元力特性を、ノンスリップ型露出柱脚では、図9(c)に示すような原点立上りの復元力特性を示すものとし、復元力特性モデルの主な算出方法を文献15)の手法および算出式を拡張して作成する。

4.1 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を作成する。尚、本仮定は断塑性繰返し荷重時の挙動に着目したものであり、単調荷重時には適合しないものもある。

○共通の仮定

1. 柱脚の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、鋼製基礎の弾性変形を考慮するため低減係数: R を使用する。
3. 圧縮合力点位置は、ベースプレート回転角 0.025rad 時の実験値を採用する。
4. アンカーボルトの素材特性は完全弾塑性体モデルを採用する。
5. 2軸曲げ荷重下の抵抗機構は、荷重方向を考えてモデル化する。尚、この場合、アンカーボルト列数の増加を考慮して、各アンカーボルトの復元力特性モデルを算出した後に累加し、これを柱脚の復元力特

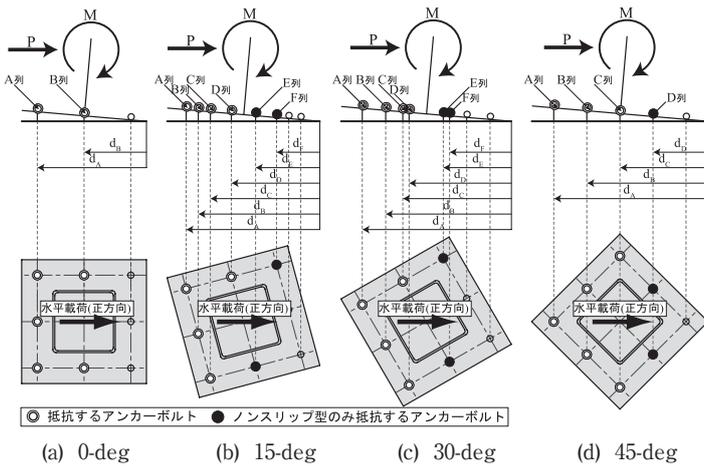


図10 従来型露出柱脚およびノンスリップ型露出柱脚の抵抗列数図

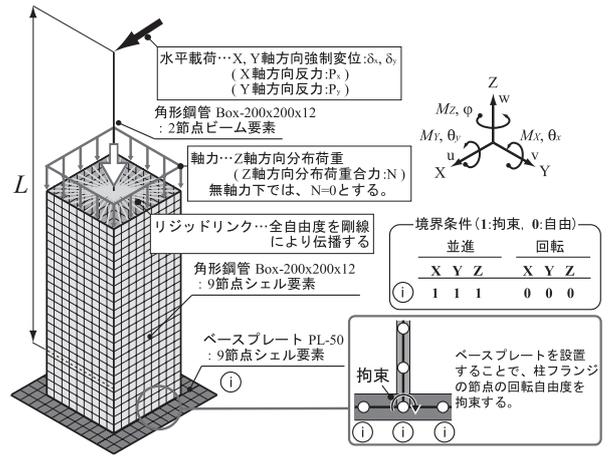


図11 柱降伏型解析のための有限要素法解析のモデル

性モデルとする。

○従来型露出柱脚の仮定

- 6. 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。(図10参照)

○ノンスリップ型露出柱脚の仮定

- 7. 圧縮側柱フランジフェイスより圧縮側にあるアンカーボルトは抵抗しないものとする。(図10参照)
- 8. 楔デバイスは理想的に機能し、原点立上り型の復元力特性を示すものとする。

4.2 降伏曲げ耐力と回転剛性

任意*i*位置のアンカーボルトによる、降伏曲げ耐力 M_y および弾性回転剛性 K_{BS} を以下の式により求める。

$$M_y = n_i \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_i \tag{4}$$

$$K_{BS} = \frac{E \cdot n_{ab} \cdot A_{ab} \cdot d_i^2}{R \cdot \ell_{ab}} \tag{5}$$

ここに、 A_{ab} :アンカーボルト軸部断面積、 σ_y :アンカーボルト降伏応力度、 d_i :*i*位置のアンカーボルト中心から圧縮合力点位置までの距離、 E :アンカーボルトのヤング係数、 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)¹²⁾、 ℓ_{ab} :アンカーボルトの有効長さである。

4.3 2軸曲げを受ける柱材の有限要素法解析概要

図11に、有限要素法解析に用いた、各部分の要素形式、要素分割、境界条件を示す。解析には「ADINA ver. 8.4」を用いる。本解析では、無軸力下での2軸曲げを受ける角形鋼管柱の全塑性曲げ耐力を検討するために、片持ち柱を用い、水平荷重角度を変数として解析を行う。尚、柱断面は完全な矩形断面(R 部分は考慮していない)とし、柱の材料特性は一般的な公証値(降伏応力度235N/mm²、ヤング係数205,000N/mm²、ポアソン比0.3)を用いている。解析変数として、水平荷重角度が0°、15°、30°、45°とした場合の合計4種類の解析を行う。

各要素は、柱の下半分(下端部より2D以上の領域)お

よび、ベースプレートは9節点シェル要素とする。また、柱の上半分は2節点ビーム要素とする。柱のシェル要素とビーム要素は、リジッドリンクにより接合し、全自由度を伝播している。また、境界条件は、ベースプレートの全方向並進を拘束し、ベースプレートを介して柱の下端部を完全な固定端としている。荷重方法としては、柱脚部分に曲げモーメントを作用させるために、柱頭部に水平方向強制変位を単調に与える。

尚、降伏条件は、VonMisesの降伏条件を用い、硬化則は等方硬化則を用いた。

5. 実験結果

図12~14に実験結果を示す。図12には、ゲージから求めた M_x 、 M_y および式(2)から求めた M と式(1.a~c)より求めた θ_x 、 θ_y および θ の関係を、図13には式(3.c)から求めた d_c と θ の関係を、図14には、最大耐力として、 $\theta = 0.015$ (rad)時の M_x 、 M_y の耐力相関関係を、それぞれ、示す。

また、図12には、 $M-\theta$ 関係の最終サイクルを太線で、4章で求めた復元力特性モデルを破線で、図14には、4本のアンカーボルトをベースプレート隅角部に配置した場合(4配置)の値として文献14)の実験結果を、また、併せて4章で求めた柱材のFEM解析結果を示している。

尚、無次元化については、各図で以下のように行っている。図12の右縦軸は式(4)より算出した1軸曲げを受けた場合の降伏曲げ耐力 M_y で、図14では、柱脚は式(4)より算出した1軸曲げを受けた場合の降伏曲げ耐力 M_y で、柱材は柱断面の全塑性曲げ耐力 M_p で、それぞれ、無次元化している。

更に、アンカーボルト降伏先行型として設計する場合、柱脚の降伏曲げ耐力が柱材の全塑性曲げ耐力の8割とするため、柱脚と柱材とを比較する図14(b)では柱脚の耐力に0.8を乗じ検討する。

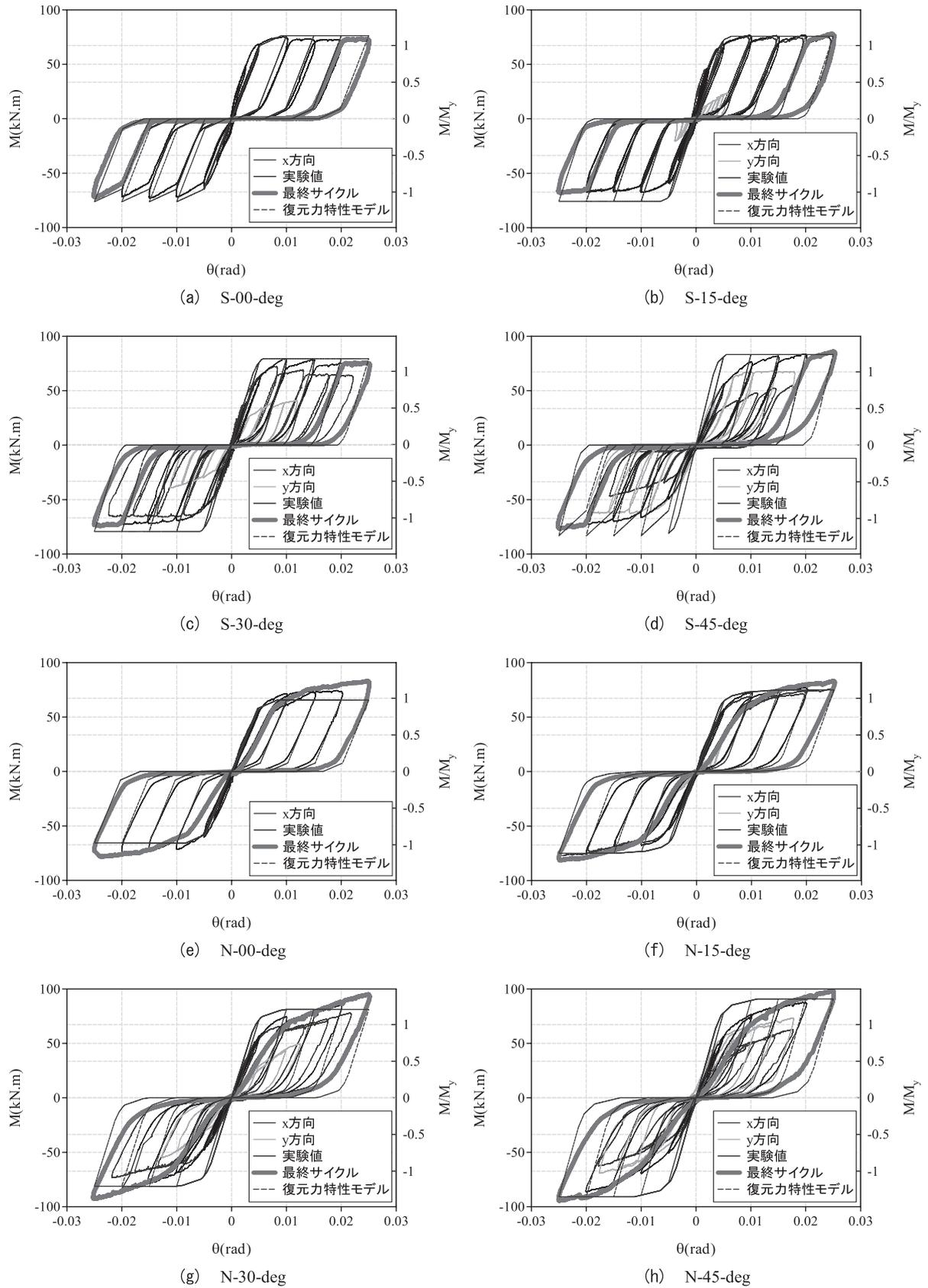


図 12 曲げモーメント M -ベースプレート回転角 θ 関係

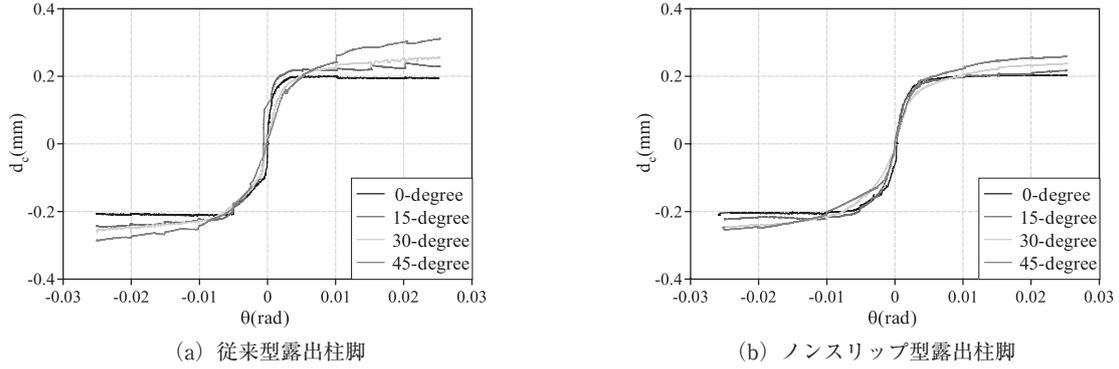


図 13 圧縮合力点位置

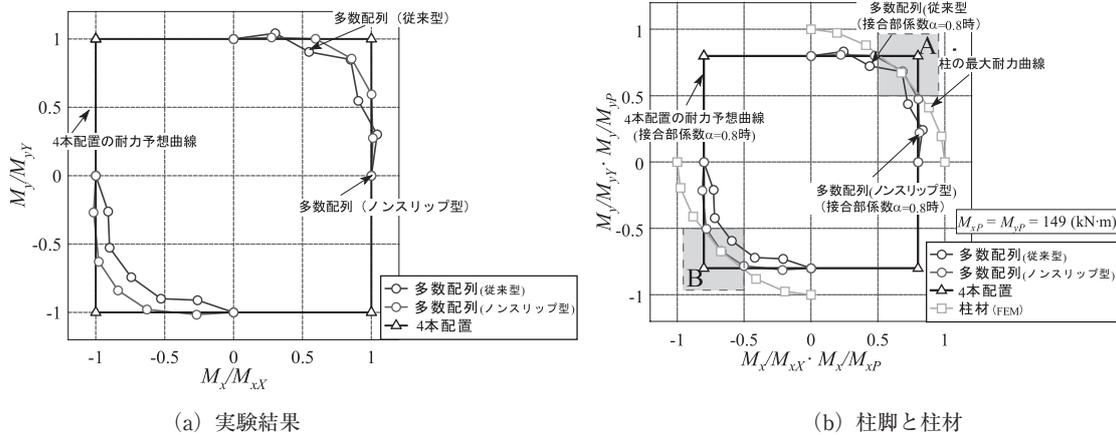


図 14 耐力相関関係

5.1 復元力特性

○従来型露出柱脚の実験結果

図 12(a)～(d)より、従来型露出柱脚では、最終サイクルより、いずれの荷重角度においても、スリップ型の復元力特性を示していることが分かる。また、図 12(a)に示すように0°の場合、正方向および負方向荷重の履歴に差異が生じている。これは、柱断面図心上に配置されているアンカーボルトが、正方向で抵抗した後、負方向で抵抗する際にスリップを起こすため、履歴に不連続なスリップ現象が生じた^{3, 8)}。

○ノンスリップ型露出柱脚の実験結果

図 12(e)～(h)より、ノンスリップ型露出柱脚では、最終サイクルより、いずれの荷重角度においても、原点立上り型復元力特性を示している。また、図 10 に示すように、従来型露出柱脚と比較してアンカーボルトの抵抗列数が多いため、各列が段階的に降伏し、復元力特性が曲線型の履歴を示した。更に、抵抗列数が増加することで、1列でも弾性範囲のアンカーボルトを残すことができれば除荷時に原点を指向する復元力特性が期待でき、2軸曲げを受ける場合もアンカーボルトを多数配列すれば、セルフセンタリング性能が期待できる。

尚、従来型露出柱脚では0°方向荷重時に正方向および、

負方向の復元力特性に差異が生じていたが、楔デバイスの機能によりスリップ現象が改善され、正負の履歴に差異が生じていない。

○実験値と復元力特性モデル

実験値と復元力特性モデルでは、耐力や2次勾配などに差異が見られた。これは、従来型露出柱脚の復元力特性モデルでは、アンカーボルトの抵抗領域を引張側のみと限定しているが、初期のサイクル(0.01rad以下の範囲)では圧縮側の柱断面図心上に近いアンカーボルトも抵抗しているため差異が生じた。一方、ノンスリップ型露出柱脚では、復元力特性モデルの圧縮合力点位置をベースプレート回転角0.025rad時の値としているため、初期サイクルで実験値より高めの耐力となった。更に、2次勾配は、図 13(b)より、実験での圧縮合力点位置の移動は、0.01radから0.025radにかけて、ベースプレート端部に向かって移動しているため各アンカーボルトのモーメントアームが徐々に大きくなり、生じたと考えられる。

実験結果は、1軸曲げでは明確なtri-linear型を示していたが、2軸曲げを受けることで、アンカーボルト数列増加や降伏後も圧縮合力点位置が移動し、明確な折線が表れず、曲線となり、より複雑な挙動を示している。

しかしながら、従来型露出柱脚およびノンスリップ型露

出柱脚でのいずれの載荷角度においても、全体の挙動はほぼ推定できており、実験結果に対応していると言える。

5.2 耐力相関関係

柱脚の耐力相関関係は、図 14(a) よりアンカーボルトを多数配列（8 本配置）の実験値では、どちらも楕円形の履歴を示し、従来型露出柱脚の相関曲線に正負で差異が生じている。これは、初期サイクル（1～2 サイクル）に正方向載荷では、柱断面図心上に近いアンカーボルトが抵抗し、逆に、負載荷時では、正載荷時にこれらのアンカーボルトは塑性伸びして抵抗し難いためである。一方、ノンスリップ型露出柱脚では、楔デバイスの機能によりスリップ現象が改善されるため、上述のような影響が表れず正負に差異が生じなかった。また、従来型露出柱脚とノンスリップ型露出柱脚との耐力の差は、図 10 に示すように、アンカーボルトの抵抗数列がノンスリップ型露出柱脚の方が多いためである。

4 本配置では矩形の相関曲線を示し、4 章で有限要素法解析を行った角形鋼管柱材での耐力相関関係は、図 14(b) に示すように円形の相関曲線を示している。

実構造物では、地震などにより柱脚部に 2 軸曲げが作用する可能性が考えられる。この場合、図 14(b) 中の領域 A および領域 B に表れているように、柱脚（アンカーボルト）と柱（角形鋼管）の耐力相関関係の差異により、1 軸曲げ載荷下でアンカーボルト降伏先行型露出柱脚として設計しても、2 軸曲げを受ける場合に柱が全塑性状態になる可能性があることが分かる。

以上より、1 軸曲げのみで設計する際、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚として設計（柱脚の耐力を、柱材の全塑性耐力の 8 割に設計）しても 2 軸曲げを受けた場合に柱材が全塑性状態になる可能性がある。このため、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚を設計する場合、2 軸曲げを受けた時の耐力相関関係を考慮して、柱脚の耐力を決定する必要があると考えられる。

6. まとめ

2 軸曲げを受けるアンカーボルト多数配列型露出柱脚の繰返し載荷実験を行い、以下の知見が得られた。

- 1) アンカーボルトを多数配列した露出柱脚が 2 軸曲げを受ける場合においても、従来型露出柱脚はスリップ型復元力特性を示し、ノンスリップ型露出柱脚は原点立上り型の復元力特性を示す。
- 2) 従来型露出柱脚、ノンスリップ型露出柱脚共に、1 軸曲げでは、tri-linear 型の復元力特性であったが、2 軸曲げでの復元力特性は、曲線となり複雑なものとなる。

- 3) 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においては、載荷角度に関係なく、セルフセンタリング性能が期待できる。
- 4) 復元力特性モデルは、従来型露出柱脚および、ノンスリップ型露出柱脚の実験結果に比較的良好に対応している。
- 5) 柱材とアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の耐力相関関係の差異を考慮して設計する必要がある。

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。更に、フルサト工業株式会社には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。ここに、感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- 1) 崔宰赫, 大井謙一, 嶋脇興助: 繰返し 2 軸曲げを受ける露出型鉄骨柱脚の載荷実験, 構造工学論文集, Vol. 50B, pp.387-392, 2004.3.
- 2) 崔宰赫, 大井謙一: 2 軸曲げを受ける露出型柱脚部の弾塑性挙動モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II C, pp.727-728, 2004.8.
- 3) 高松隆夫, 玉井宏幸, 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: 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, 鋼構造年次論文報告集, 第13巻, pp.181-188, 2005.11.
- 9) 玉井宏章, 山西央朗, 白木剛, 高松隆夫, 多田元英: 2軸曲げの効果を考慮した立体露出柱脚解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第626号, pp.669-676, 2008.4.
- 10) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松村高良, 松尾彰: 2軸曲げを受ける従来型およびノンスリップ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73巻 第643号 pp.2223-2230, 2008.12.
- 11) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松村高良, 松尾彰: 2軸曲げを受ける従来型およびノンスリップ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73巻 第643号, 2008.12.
- 12) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985.3.
- 13) 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.
- 14) 井上一朗, 吹田啓一郎: 建築鋼構造-その理論と設計-, 鹿島出版会, 2007.12.
- 15) 松村高良, 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: 2軸曲げを受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の復元力特性, 鋼構造年次論文報告集, 第16巻, pp.275 - 282, 2008.11.

