

一定軸力下の露出柱脚に関する実験的研究

高松 隆夫*・玉井 宏章*・山西 央朗**

(平成19年10月31日受理)

Experimental Study on Exposed Column-Base under Constant Column Axial-Force

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI and Teruaki YAMANISHI

(Received Oct. 31, 2007)

Abstract

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 the case of axial-tension $N=0.3N_y$, the restoring force characteristics of the column base were obtained combined all types of the resistant mechanisms.
- 3) In the case of axial-tension $N=0.6N_y$, the restoring force characteristics became perfectly elasto-plastic curves without slip behavior.

Key Words: exposed column-base, restoring force characteristics, axial-force, anchor-bolt-yield-type

1. はじめに

中柱の柱脚においては、地震時でも、一定圧縮力が作用すると仮定できる場合がある。しかしながら、側柱においては、地震時には変動軸力が作用するのが一般的であり、引張力が作用する場合もある。更に、ブレースが取り付け柱脚においては、ブレース軸方向力が作用するために、より大きな変動軸力を考慮しなければならない。変動軸力を考慮した露出柱脚の研究はいくつか報告されている^{1~4)}。しかしながら、引張軸力下における履歴性状について詳しく検討はされていない。一方、九谷・増田⁵⁾は、一定圧縮・引張軸力下の繰返し載荷実験結果を示しているものの、終局耐力の検討を主に行っており、復元力特性の検討及び、

復元力特性モデルの定式化等については行っていない。

これまでに、著者等は、一定圧縮軸力を受ける露出柱脚の実験的研究を行っており、実験結果に良く対応する復元力特性モデルを提案している⁶⁾。また、変動軸力を受ける露出柱脚の復元力特性モデルは圧縮軸力下では一定圧縮軸力を受ける柱脚のモデルにより求められることが報告されている⁴⁾。

そこで、変動軸力を受ける柱脚の復元力特性モデルを提案するために、まず、本報告では、一定軸力下の露出柱脚の繰返し水平力載荷実験を行うことにより、軸力の大きさによる復元力特性の違いを明らかにする。特に、一定引張軸力下における実験結果はほとんど報告されていないので、2つの引張領域における載荷実験を行う。更に、一定

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科知的機能科学専攻

軸力下の復元力特性モデルを提案し、実験結果と比較検討する。

2. 実験

2.1 試験体

本論文で取扱う露出柱脚を図1に、ベースプレート及び、アンカーボルトの詳細を図2、図3に示す。また、材料特性を表1に示す。

柱には、Box-200x200x12を使用し、ベースプレートには、PL-400x400x50を使用する。柱とベースプレートは、全周隅肉溶接で接合する。アンカーボルトには、十分な塑性伸びが期待できる転造ねじアンカーボルトを使用する。

基礎には、塑性化による影響を回避するために、本実験のいずれの荷重に対しても塑性化しない断面を有する鋼製基礎：BH-400x400x32x36を使用する。

2.2 実験方法

実験装置を図4に示す。荷重は、試験体柱頭部に設置したヨークとピンを介して、各ジャッキにより柱軸力と水平力を加える。柱脚回転角による変位制御荷重実験とし、回転角は、1/200, 1/100, 3/200, 1/50をそれぞれ1サイクル行う。回転角は、ベースプレートに設置した変位計により計測した鉛直変位から求める。ベースプレートの柱図心部鉛直変位： w_r も併せて計測する。

また、柱軸力、および水平力はジャッキ端部に設置したロードセルにより測定する。更に、アンカーボルト下端部に、センターホール型ロードセルを設置し、アンカーボルト張力を測定する。尚、アンカーボルトには初期張力として、軸部降伏張力： T_y の30% (15kN)を導入している。

2.3 一定軸力

単調荷重の場合には、全ての軸力作用下において常にベースプレートと基礎が接触するが、引張軸力下の繰返し荷重の場合には、軸力の大きさにより抵抗するアンカーボルト本数が増える。引張軸力の場合には、その境を、全アンカーボルトの降伏耐力の総和： abN_y の半分である $0.5abN_y$ とした。つまり $0.5abN_y$ 以下の場合には、アンカーボルト1列(2本)で抵抗し、 $0.5abN_y$ より大きい場合は、アンカーボルト1列では抵抗できず、最終的にアンカーボルト2列(4本)で抵抗すると考える。一定軸力として、引張軸力の場合には、アンカーボルト2本で抵抗できる範囲($0 < N < 0.5abN_y$)である $0.3abN_y$ 、及び、アンカーボルト4本全てで抵抗する範囲($0.5abN_y \leq N < abN_y$)である $0.6abN_y$ とし、圧縮軸力の場合には、 $0.6abN_y$ とする計3種類を設定する。

表1 材料特性

材質	E	σ_y	主要寸法
	[kN/mm ²]	[N/mm ²]	[mm]
柱	STKR400 205	414	Box-200x200x12
ベースプレート	SS400 205	274	PL-400x400x50
アンカーボルト	ABR400 205	294	$\phi_g=14.6$ 、 $ab_l=445$

E : ヤング係数 ϕ_g : アンカーボルト軸部直径
 σ_y : 降伏応力度 ab_l : アンカーボルト有効長さ

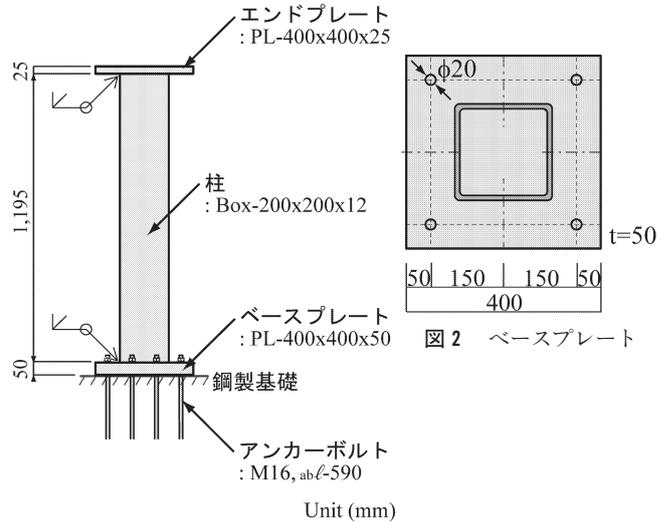


図1 露出柱脚

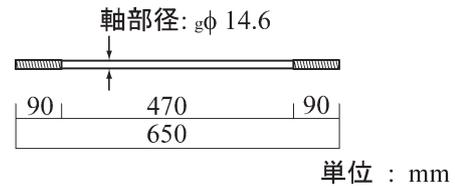


図3 アンカーボルト

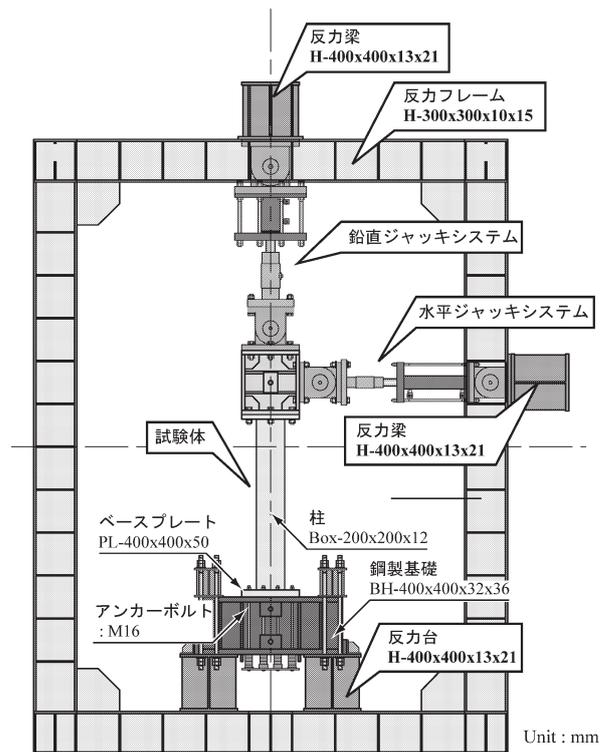


図4 実験装置

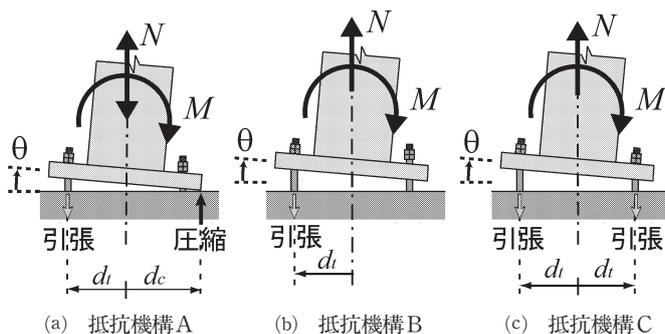


図5 抵抗機構

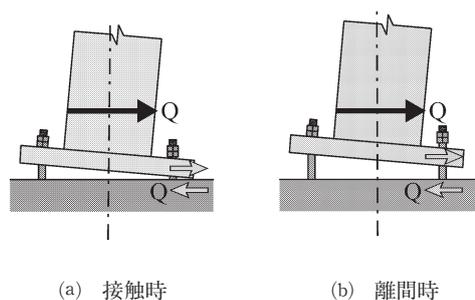


図6 セン断に対する抵抗機構

3. 抵抗機構

3.1 仮定

本論文では、以下の仮定に基づいて、各抵抗機構の提案を行う。

1. 柱脚の降伏要素は、アンカーボルトに限定する。
2. 露出柱脚の構成要素である基礎コンクリート、およびベースプレートは、弾性変形のみを許容し、塑性化はしないものとする。柱脚の弾性回転剛性を求める際に、基礎コンクリート、および、ベースプレートの弾性変形を考慮するための係数：Rを導入する。
3. 圧縮合力点位置は、ベースプレートと基礎が接触している場合は、圧縮側ベースプレート端部に設ける。また、いかなる軸力作用下においても、ベースプレートと基礎が接した場合は、圧縮合力点位置は、移動しないものとする。
4. ベースプレートと基礎が接触している場合には、引張側アンカーボルトの抵抗力のみを考慮する。
5. 柱せん断力は、ベースプレートと基礎コンクリート接触時には、ベースプレートと基礎コンクリート間に発生する摩擦で抵抗し、離間時には、アンカーボルトのせん断力で抵抗するものとする。
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 抵抗機構の種類

軸力と曲げモーメントに対する抵抗機構を図5に、せん断力に対する抵抗機構を図6に示す。それぞれの抵抗機構の特徴とその抵抗機構になるための条件を以下に示す。ただし N ：柱脚に作用する柱軸力とする。

3.2.1 抵抗機構A

抵抗機構Aは、ベースプレートと基礎とが接触している場合の抵抗機構であり、その状態を図5(a)に示す。また、せん断力に対する抵抗機構は、図6(a)に示すものとなり、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ため、アンカーボルトは、曲げモーメントにのみ抵抗

する。このとき、圧縮合力点位置は、圧縮側ベースプレート端部とする。この抵抗機構の曲げ耐力は、アンカーボルトによる曲げ抵抗力と作用する柱軸力による曲げ抵抗力により決定される。

この抵抗機構の場合、抵抗するアンカーボルトは引張側の2本であるため、 $0.5abN_y$ を超える引張軸力が作用した場合、引張側アンカーボルトは2本とも降伏張力に達してしまう。そのため、この抵抗機構は、 $N < 0.5abN_y$ の領域で発生する。

3.2.2 抵抗機構B

抵抗機構Bは、ベースプレートと基礎とが離間し、引張側、もしくは、圧縮側どちらかのアンカーボルトのナットとベースプレートとが接触している場合の抵抗機構であり、その状態を図5(b)に示す。また、せん断力に対する抵抗機構は、図6(b)に示すものとなり、アンカーボルトのせん断力により抵抗する。

この抵抗機構の場合、アンカーボルトの軸方向力は、柱軸力に等しくなる。曲げ耐力は、一定値： $N \cdot d_t$ となる。

この抵抗機構は、アンカーボルトが塑性伸びを生じた後に発生し、載荷を進めていくとベースプレートと基礎とが接触し、抵抗機構Aとなる。

3.2.3 抵抗機構C

抵抗機構Cは、ベースプレートと基礎とが離間し、圧縮側、および引張側両アンカーボルトがベースプレートと接触している場合の抵抗機構であり、その状態を図5(c)に示す。また、せん断力に対する抵抗機構は、図6(b)に示すものとなり、抵抗機構Bと同様にアンカーボルトのせん断力により抵抗する。この抵抗機構の曲げ耐力は、アンカーボルトの曲げ抵抗と柱軸力による曲げ抵抗により決定する。抵抗機構Aに比べ、曲げ耐力は低下する。

4. 評価式の提案

4.1 抵抗機構

各抵抗機構における評価式を以下に示す。

4.1.1 抵抗機構A

抵抗機構Aでは、ベースプレートと基礎が接触している

ため、圧縮合力点位置は圧縮側ベースプレート端部になる。従って、アンカーボルトによる曲げモーメント： ${}_{Aab}M_y$ は、以下ようになる。

$${}_{Aab}M_y = n \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot (d_c + d_t) \dots \dots \dots (1. a)$$

また、軸力による曲げモーメント： M_N は、以下のようになる。

$${}_A M_N = -N \cdot d_c \dots \dots \dots (1. b)$$

以上、式(1. a)、(1. b)より、抵抗機構Aにおける曲げ抵抗： ${}_A M_y$ は、以下のようになる。

$${}_A M_y = n \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot (d_c + d_t) - N \cdot d_c \dots \dots \dots (1. c)$$

さらに、アンカーボルトの弾性伸び変形から求められる弾性回転剛性： ${}_A K_{BS}$ は、以下のようになる。

$${}_A K_{BS} = \frac{n \cdot A_{ab} \cdot E \cdot (d_c + d_t)^2}{R \cdot l_{ab}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 n ：アンカーボルト本数、 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、 d_t ：柱図心からアンカーボルト図心までの距離、 d_c ：柱図心からベースプレート端部までの距離、 N ：柱軸力(引張を正とする)、 E ：アンカーボルトのヤング係数、 l_{ab} ：アンカーボルト有効長さとする。

4.1.2 抵抗機構B

抵抗機構Bでは、ベースプレートと基礎が離間し、片側の列のアンカーボルトのナットがベースプレートと接触している場合の抵抗機構であるため、アンカーボルトは、柱軸力にのみ抵抗する。また、偶力による曲げモーメントが発生するので、抵抗機構Bにおける曲げ抵抗： ${}_B M$ は、以下のようになる。

$${}_B M = -N \cdot d_t \dots \dots \dots (3)$$

4.1.3 抵抗機構C

抵抗機構Cでは、ベースプレートと基礎が離間し、引張側、および圧縮側両アンカーボルトのナットがベースプレートと接触している場合の抵抗機構である。よって、この抵抗機構におけるアンカーボルトの曲げ抵抗： ${}_{cab}M_y$ は、以下のようになる。

$${}_{cab}M_y = n \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot 2d_t \dots \dots \dots (4. a)$$

また、軸力による曲げモーメントは、抵抗機構Bと同様に、以下のようになる。

$${}_B M = -N \cdot d_t \dots \dots \dots (4. b)$$

以上、式(4. a)、(4. b)より、抵抗機構Cにおける曲げ抵抗： ${}_c M_y$ は、以下のようになる。

$${}_c M_y = n \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot 2d_t - N \cdot d_t \dots \dots \dots (4. c)$$

さらに、この抵抗機構におけるアンカーボルトの弾性伸び変形から求められる弾性回転剛性： ${}_c K_{BS}$ を求める式は、以下のようになる。

$${}_c K_{BS} = \frac{n \cdot A_{ab} \cdot E \cdot 4d_t^2}{R \cdot l_{ab}} \dots \dots \dots (5)$$

4.2 復元力特性モデル

各一定軸力下における復元力特性モデルを図6に示す。

4.2.1 圧縮軸力(0.6 abN_y)

圧縮軸力(0.6 abN_y)作用下における復元力特性モデルを図7(a)に示す。

圧縮軸力作用下では、常にベースプレートと基礎が接触しているので抵抗機構Aとなり、圧縮側ベースプレート端部が圧縮合力点位置となる。降伏耐力は、式(1. c)であり、弾性回転剛性は、式(2)となる。

圧縮軸力の場合には、軸力が曲げに対して抵抗するため、初期の段階ではベースプレートは回転せず、軸力による曲げ抵抗を超過すると回転し始める。

4.2.2 引張軸力(0.6 abN_y)

引張軸力(0.6 abN_y)作用下、つまり引張軸力が0.5 $abN_y \leq N < abN_y$ の領域における復元力特性モデルを図7(b)に示す。

引張軸力(0.6 abN_y)の場合には、ベースプレートと基礎が常に離間し、抵抗機構Cとなる。そのため、履歴曲線は、完全弾塑性型となる。

4.2.3 引張軸力(0.3 abN_y)

引張軸力(0.3 abN_y)作用下における復元力特性モデルを図7(c)に示す。正方向載荷の場合は、圧縮側アンカーボルトが常にベースプレートと接触しているが、負方向載荷の場合は、圧縮側アンカーボルトが離間しているため、E～F間、I～F間において、引張側アンカーボルトのみで抵抗している領域が存在する。

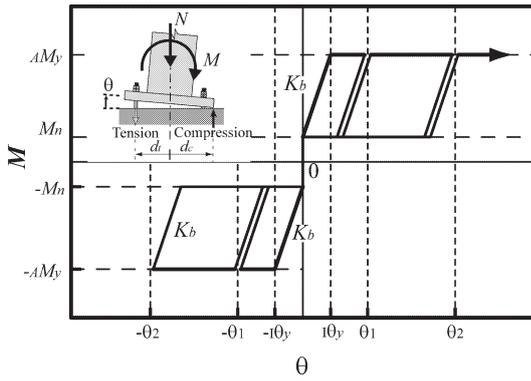
図7(c)の各点における各抵抗機構に対応する点は、以下のようになる。

- 抵抗機構A：ABCD, DCJK, FGHI, IHNP
- 抵抗機構B：AD, EF, KL, MI, IF, PF
- 抵抗機構C：OA, DE, FA, LM

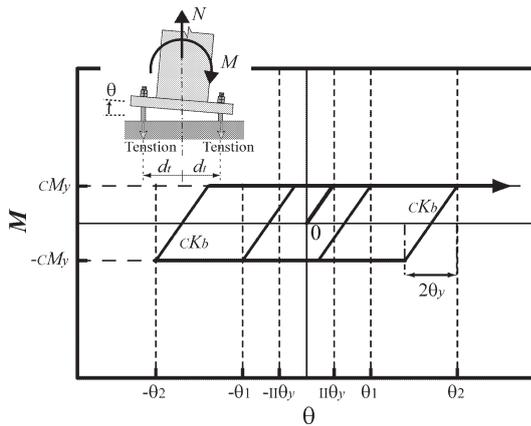
また、各抵抗機構における耐力、および弾性回転剛性は、各抵抗機構において提案したものととなる。

4.3 接触・離間条件

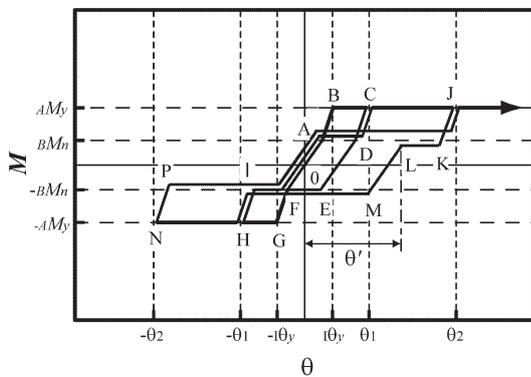
ベースプレートが回転を起こす時、ベースプレート端部と基礎が接触して回転する場合(図5(a)参照)と、ベースプレートが完全に基礎から離間して回転する場合(図5(b)参



(a) 圧縮軸力 (0.6abNy)



(b) 引張軸力 (0.6abNy)



(c) 引張軸力 (0.3abNy)

図7 復元力特性モデル

照)がある。端部が接触している場合と完全に離間した場合を判別するために、ベースプレート端部を回転の中心とした場合におけるベースプレート柱図心位置の鉛直変位： ω_r とベースプレート回転角： θ の関係式を以下に示す。

$$\omega_r = d_c \cdot \tan \theta \dots \dots \dots (6)$$

また、判別式と接触・離間との関係を図8に示す。実験結果が判別式のラインより上にある場合は、ベースプレートと基礎が離間しており、ライン上にある場合は、ベースプレートと基礎が接触している。

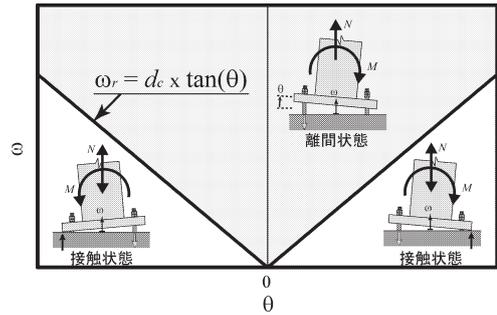


図8 接触・離間条件

5. 実験結果

各一定軸力下における実験結果を図9, 図10, 図11に示す。曲げモーメント： M と回転角： θ との関係を図9に、アンカーボルト張力： T と回転角： θ との関係を図10に、更にベースプレート柱図心部鉛直変位： ω_r とベースプレート回転角： θ との関係を図11に示す。図9においては、復元力特性モデル, 図11においては、判別式との比較を行う。

○圧縮軸力 (0.6abNy)

圧縮軸力 (0.6abNy)作用下の実験結果を、それぞれ、図9(a), 図10(a), 図11(a)に示す。

図9(a)より、実験結果が提案した復元力特性モデルに良好に対応し、一般的なスリップ型を示していることが分かる。図10(a)より、アンカーボルト張力が0になっていることから、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。図11(a)より、圧縮軸力が作用し、ベースプレートと基礎が常に接触しているため、実験結果は判別式のライン上に位置している。

○引張軸力 (0.6abNy)

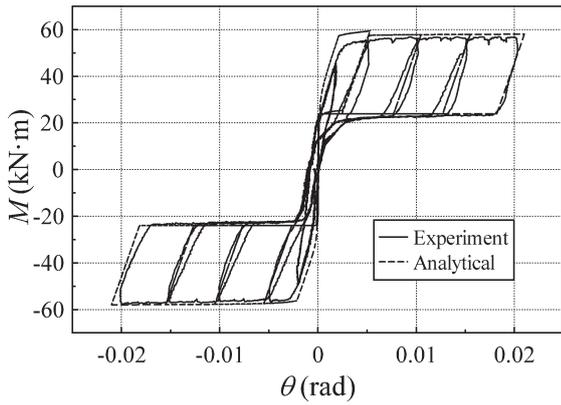
引張軸力 (0.6abNy)作用下の実験結果をそれぞれ、図9(b), 図10(b), 図11(b)に示す。

図9(b)より、実験結果と提案した復元力特性モデルは、良好に対応している。

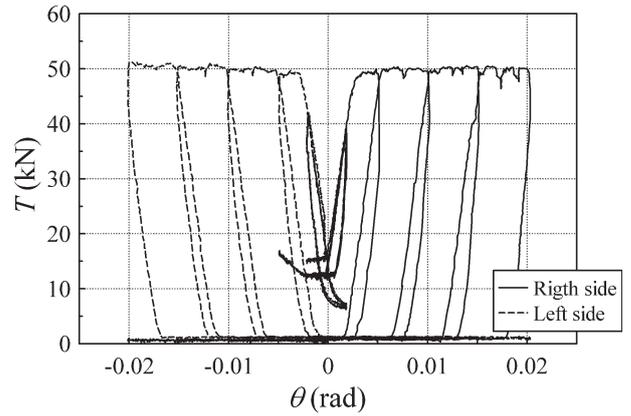
図10(b)より、この引張軸力作用下では引張側及び、圧縮側両アンカーボルトがベースプレートと接触しているため、除荷後、逆方向載荷を開始するとすぐに圧縮側アンカーボルトが抵抗するため、スリップ現象を生じることなく、完全弾塑性型復元力特性モデルになる。また、図11(b)より、実験値が判別式のラインより、常に上にあることから、常にベースプレートと基礎が離間していることが分かる。

○引張軸力 (0.3abNy)

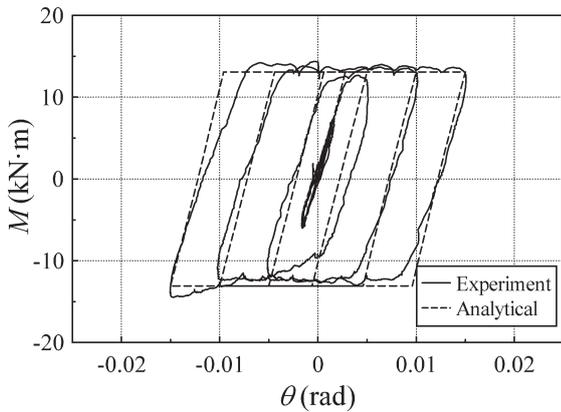
引張軸力 (0.3abNy)の実験結果を、それぞれ、図10(c), 図9(c), 図10(c)に示す。図11(c)より、実験結果は、一般的なスリップ型ではなく、正負非対称な形を示している。実験結果と提案した復元力特性モデルは



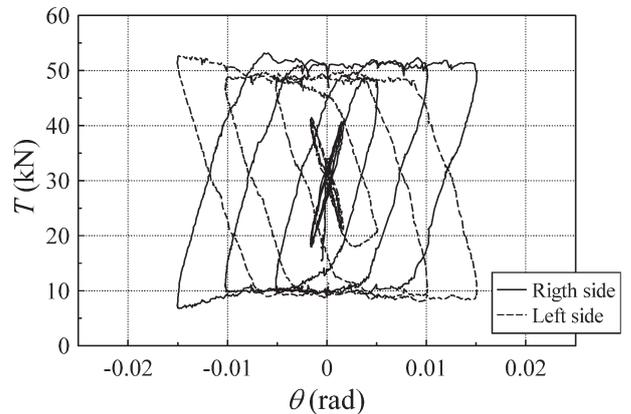
(a) 圧縮軸力 ($0.6abN_y$)



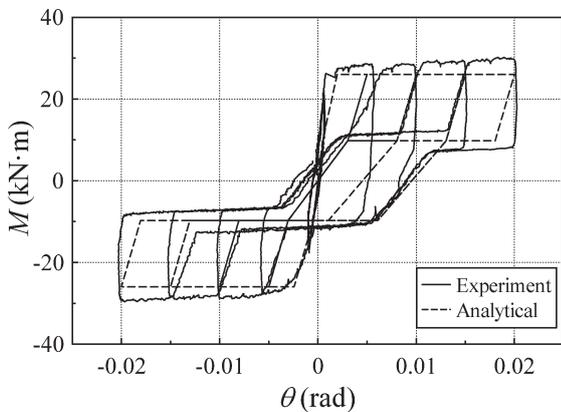
(a) 圧縮軸力 ($0.6abN_y$)



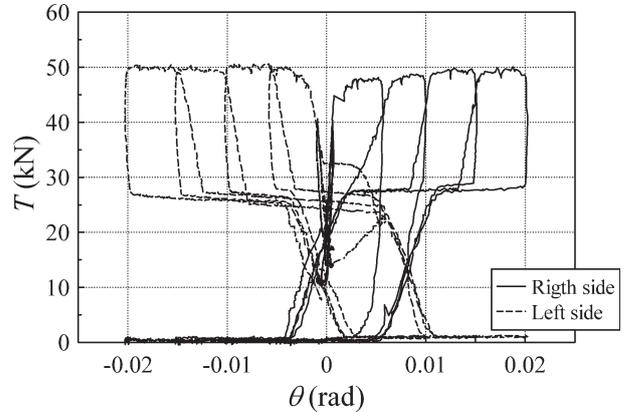
(b) 引張軸力 ($0.6abN_y$)



(b) 引張軸力 ($0.6abN_y$)



(c) 引張軸力 ($0.3abN_y$)



(c) 引張軸力 ($0.3abN_y$)

図9 曲げモーメント-回転角関係

図10 アンカーボルト張力-回転角関

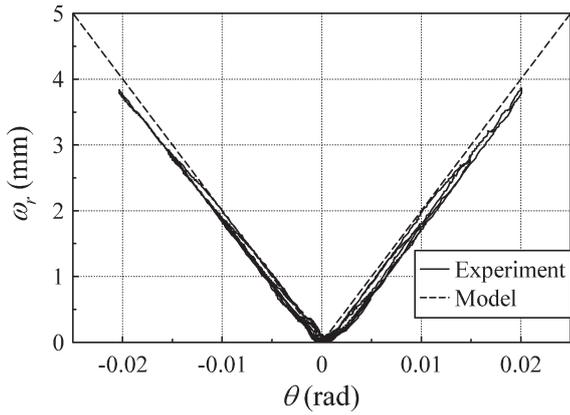
良好に対応しているため、抵抗機構が様々に変化することがいえる。図10(c)より、逆方向載荷する際に反対側のアンカーボルトが抵抗し始める回転角の値が異なることが原因と考えられる。さらに、図11(c)より、実験値が判別式のラインより上になる場合とライン上になる場合が存在することから、ベースプレートと基礎は、接触と離間を繰り返すことが分かる。

以上より、それぞれの軸力作用下において、提案した復元力特性モデルと実験結果とが良好に対応していると考えられることができる。

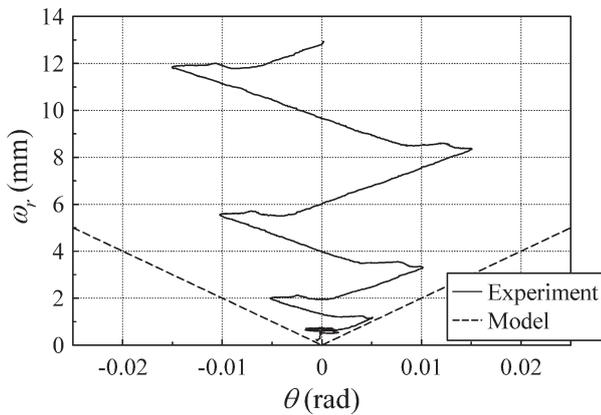
6. 結論

以上のことから、以下のことが明らかになった。

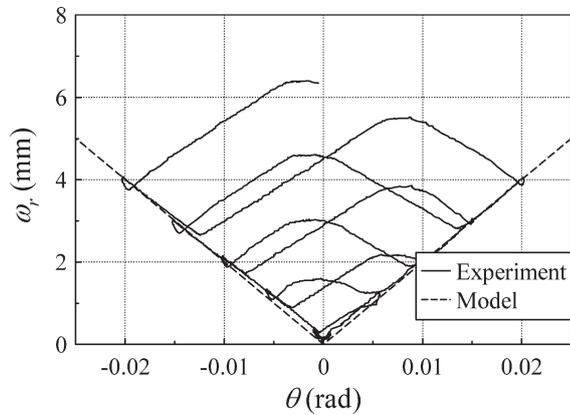
- 1) 柱脚の抵抗機構は、3種類に大別でき、各抵抗機構における耐力および弾性回転剛性を求めることができた。
- 2) 引張軸力が $0 < N < 0.5abN_y$ の範囲では、提案した3つの抵抗機構全てを適用した、復元力特性モデルとなる。
- 3) 引張軸力が $0.5abN_y < N < abN_y$ の範囲では、スリップ



(a) 圧縮軸力 ($0.6abN_y$)



(b) 引張軸力 ($0.6abN_y$)



(c) 引張軸力 ($0.3abN_y$)

図 11 柱心部鉛直変位-回転角関係

現象が生じず、完全弾塑性型の復元力特性モデルとなる。

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)のプロジェクトの一環として実施しました。また、本研究の経費の一部は、社団法人日本鉄鋼連盟「2006年度鋼構造研究・教育助成事業(建築)」の助成金から支出しました。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) 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
- 2) 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
- 3) 宗宮由典, 福地保長, 陳文慶: 変動軸力を受ける露出型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, No.562. pp.137-143, 2002.12
- 4) 玉井宏章: 変動軸力と繰り返し曲げを受ける露出柱脚の載荷実験, 日本建築学会構造系論文集, 第567号, pp.149-156, 2003.5
- 5) 九谷和秀, 増田貫志: 鉄骨構造露出形式の終局耐力に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第433号, 1992.3
- 6) 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
- 7) 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)