

一定軸力下のアンカーボルトを多数配列した鉄骨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**・松村 高良***

(平成19年10月31日受理)

An Experimental Study on the Exposed Column-Base with the Multi-Rows of Anchor Bolts under Constant Column Axial-Force

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Teruaki YAMANISHI, and Takayoshi MATSUMURA

(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 of the specimens.
- 2) In case of axial tension $N=0.2N_y$, the restoring force characteristics are the same curves as non-axial force ones.
- 3) In case of axial tension $N=0.5N_y$, the restoring force characteristics of the column base were obtained by combining all types of the resistant mechanisms.
- 4) In case of axial tension $N=0.7N_y$, the restoring force characteristics perfectly became elasto-plastic curves without slip behavior.

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

1. 序論

柱脚の一般的な崩壊機構は、アンカーボルト降伏先行型であり、その復元力特性がスリップ型となることはよく知られている。また、本論文で取扱うアンカーボルト降伏先行型露出柱脚は、柱脚付片持柱を用いた載荷実験、および解析による研究で^{1)~5)}、以下の2つの特性が明らかにされている。

- 1) アンカーボルトの塑性伸びにより、スリップ現象が発生し、柱脚の固定度が著しく劣化する。
- 2) 構造物の自重が、柱軸力として露出柱脚に伝播し、露出柱脚の抵抗力、および抵抗機構に大きな影響を与える。
一般的な構造物において、構造物に地震外力が作用すると、中柱の柱脚(構造物の内部に配置された柱の柱脚)においては、作用する柱軸力は、一定の圧縮軸力が作用すると

* 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学専攻

*** 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

考えられる。しかしながら、側柱の柱脚(構造物の外周に配置されている柱の柱脚)においては、圧縮軸力の減少や引張軸力の発生など、変動軸力を考慮しなければならない。著者等も、一定圧縮軸力をうける露出柱脚の実験的研究は行っており、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。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⁶⁾。

これまでに、変動軸力を受ける柱脚の復元力特性を明らかにするために、一定圧縮・引張軸力作用下における載荷実験が行われている⁷⁾。また、著者等は、アンカーボルトを4本配置した柱脚の実験結果を検討し、抵抗機構、評価式、そして復元力特性モデルの提案を行った⁸⁾。

一方、露出柱脚では、アンカーボルトを多数配列する場合、柱脚の履歴性状が複雑化する傾向があり、無軸力下の試験体であっても、復元力特性のモデル化は煩雑になる。このため、多数配列型の一定圧縮・引張軸力作用下における性状の検討を行う必要があると考えられる。

そこで、アンカーボルトを8本配置した場合の露出柱脚の一定圧縮・引張軸力作用下の載荷実験を行い、圧縮軸力、および引張軸力の一定軸力作用下における抵抗機構を示し、評価式、および復元力特性モデルの提案を行う。また、昨年度行ったアンカーボルトを4本配置した場合の載荷実験との比較・検討を行う。

2. 実験

本実験では、一定圧縮・引張軸力及び曲げモーメントが作用する、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚の載荷実験を行う。柱軸力の値を、実験の変数とする。

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, 2, 3, 4に試験体設置状況, 試験体形状, ベースプレート詳細図, およびアンカーボルト詳細図を示す。

試験体は、8本のアンカーボルトを3本, 2本, 3本と配置した露出型柱脚を使用した。

柱には、冷間成形角形鋼管：Box-200x200x12(STKR400)を、ベースプレートにはPL-400x400x50(SS400)を使用し、柱とベースプレートは全周隅肉溶接接合する。アンカーボルトには、軸部の十分な塑性伸び能力が確保できる転造ねじアンカーボルトを使用する。なお、アンカーボルトには、軸部降伏張力の30%(15(kN))を初期張力として導入する。基礎部には塑性化による影響を回避するため、いずれの載荷に対しても塑性化しない断面を有した鋼製基礎：BH-400x400x32x36を使用する。

2.2 載荷装置と載荷方法

図1に本実験で用いる載荷装置を示す。試験体柱頭部にヨークを設置する。そのヨークに鉛直ジャッキ及び水平ジャッキをピンを介して設置し、鉛直ジャッキにより柱軸力を想定した一定鉛直載荷を、水平ジャッキにより水平載荷を行う。

鉛直荷重は、引張軸力の場合には、鉛直荷重のみで何列のアンカーボルトが降伏するかに着目して大きさを決定する。また、鉛直荷重は柱脚に配置された全アンカーボルト降伏軸力の総和： abN_y を用いて示す。以下に、載荷する鉛直荷重の大きさを示す。

表1 素材特性

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	$\phi_k=14.6, abl=445$

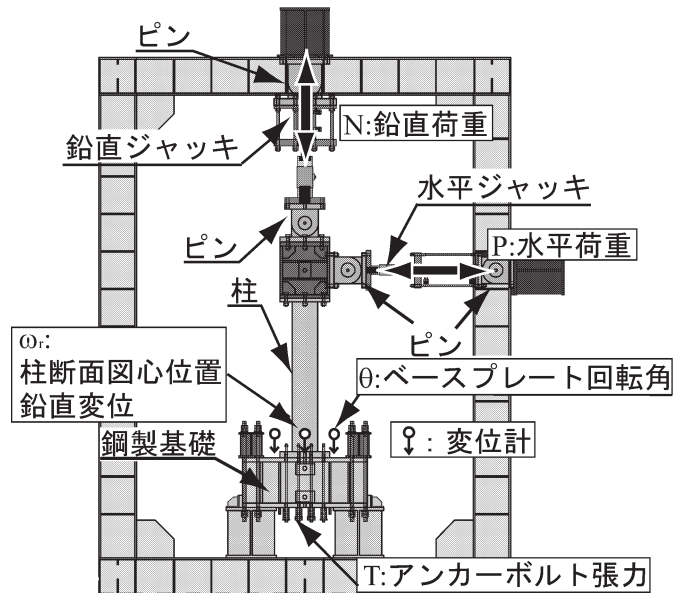


図1 実験装置

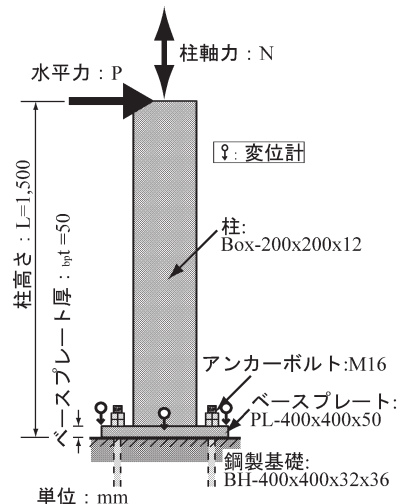


図2 試験体形状

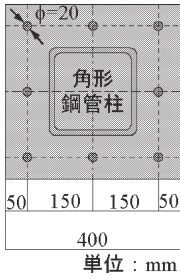


図3 ベースプレート詳細図

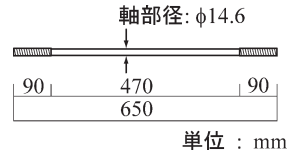


図4 アンカーボルト詳細図

することはない範囲とする。ここで、本実験装置の鉛直ジャッキでは、上述の条件を満たす適切な引張軸力を載荷するには載荷能力が不足している。そこで、アンカーボルト2本を3列に配置して配置条件を変え、合計6本のアンカーボルトで載荷実験を行う。この場合のアンカーボルトの降伏軸力の総和を abN_y とする。そのため、上述の範囲は $0.66abN_y < N < abN_y$ となり、引張軸力 $0.7abN_y$ ($N=210$ (kN)) を載荷する。

水平載荷は、ベースプレートに設置した変位計より算定した回転角による回転角制御とする。載荷は、回転角の値を、 $1/200, 1/100, 3/200, 1/50$ (rad) とする正負交番繰返し載荷を行う。

○圧縮軸力

i. 柱軸力の増減により、柱脚の抵抗機構に変化は生じない（アンカーボルト以外の要素が弾性範囲にあるとした場合）。圧縮軸力 $-0.6abN_y$ ($N=-240$ (kN)) のみを載荷する。

○引張軸力

ii. 柱軸力のみでは、いずれのアンカーボルト列が単列で抵抗しても降伏しない範囲とする。アンカーボルト数が最も少ない列は、柱断面図心上にある列（2本が抵抗）である。この列が降伏しない範囲は $0 < N \leq 0.25abN_y$ なので、引張軸力 $0.2abN_y$ ($N=80$ (kN)) を載荷する。

iii. 柱軸力のみで、1列は降伏するが、2列が同時に降伏することはない範囲とする。この範囲は $0.25abN_y < N \leq 0.625abN_y$ なので、引張軸力 $0.5abN_y$ ($N=200$ (kN)) を載荷する。

iv. 柱軸力のみで、2列は降伏するが、3列が同時に降伏

2.3 計測方法

図1に計測位置も示している。

荷重計測は、鉛直荷重： N および水平荷重： P を各ジャッキに設置したロードセルにより、アンカーボルト張力： T をアンカーボルト下部に設置したセンターホール型ロードセルにより計測する。変位計測は、柱下端部左右の鉛直変位： δ_1, δ_2 、柱図心部鉛直変位： w_r 、柱頭部ピン位置の水平変位： δ_h を変位計により計測する。また、ベースプレート回転角： θ をベースプレート左右に設置した変位計より計測した鉛直変位から算出する。

回転角を求めるための式を以下に示す。

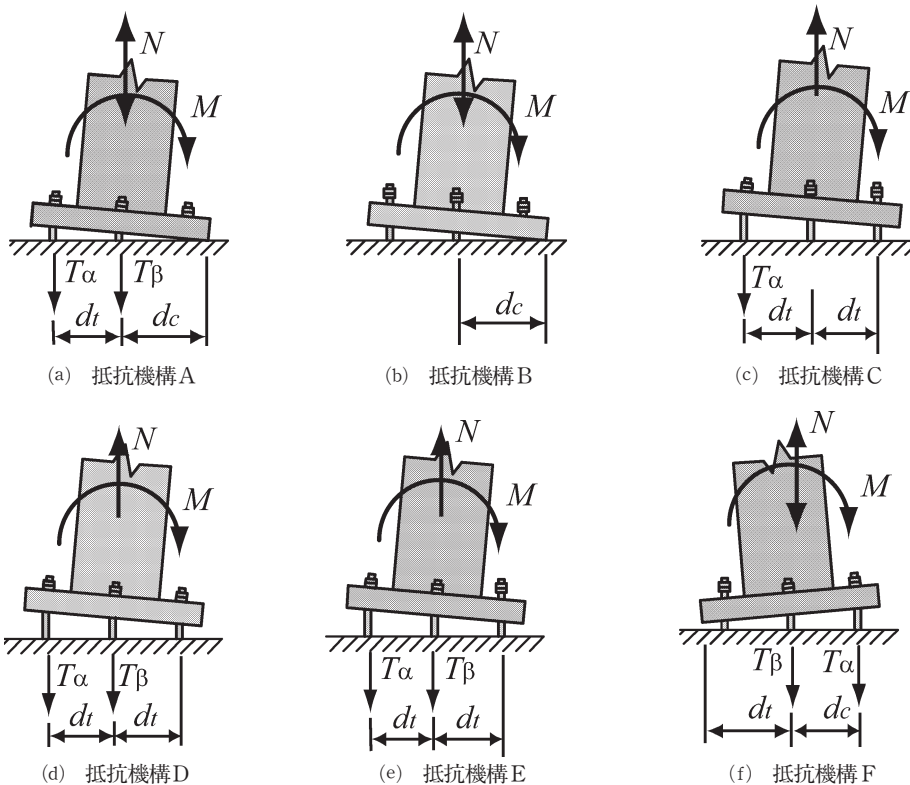


図5 抵抗機構

$$\theta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{D}$$

ここで、D：ベースプレートに設置した変位計の距離（＝450）とする。

3. 抵抗機構

本実験において、ベースプレートと基礎との接触・離間状態、また、アンカーボルトとベースプレートの接触・離間状態から、発生すると考えられる抵抗機構を以下に示す。

また、以下には α 列：引張側最外列、 β 列：中央列として示す。

○抵抗機構A

抵抗機構Aは、ベースプレートと基礎が接触し、引張側、および中央列のアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。この抵抗機構では、曲げモーメントの基点は、ベースプレートと基礎との接触面である圧縮側ベースプレート端部となるため、降伏曲げ耐力は、引張側、および中央列のアンカーボルトによる曲げ抵抗力と、柱軸力による曲げ抵抗力を累加した値となる。

○抵抗機構B

抵抗機構Bは、ベースプレートと基礎が接触し、全てのアンカーボルトのナットとベースプレートが離間している場合の抵抗機構である。この抵抗機構では、曲げモーメントの基点は、抵抗機構A同様、圧縮側ベースプレート端部となる。また、全てのアンカーボルトのナットとベースプレートが離間しているため、この抵抗機構の曲げ耐力は、柱軸力のみによる曲げ抵抗力となる。

○抵抗機構C

抵抗機構Cは、ベースプレートと基礎が離間し、 α 列のアンカーボルトのナットのみ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。この抵抗機構では、曲げモーメントの起点は、 α 列のアンカーボルトのナットとベースプレートの接触面となるため、この抵抗機構の曲げ耐力は、柱軸力のみによる曲げ抵抗力となる。

○抵抗機構D

抵抗機構Dは、ベースプレートと基礎が離間し、全てのアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。この抵抗機構では、曲げモーメントの起点は、圧縮側アンカーボルトのナットとベースプレートの接触面となるため、この抵抗機構の降伏曲げ耐力は、 α 列および β 列のアンカーボルトの曲げ抵抗力と柱軸力による曲げ抵抗力を累加した値となる。

○抵抗機構E

抵抗機構Eは、ベースプレートと基礎が離間し、 α 列、お

よび β 列のアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。この抵抗機構では、曲げモーメントの起点は、中央列のアンカーボルトとのナットとベースプレートの接触面となるため、中央のアンカーボルトは、柱軸力のみ抵抗しているため、曲げ抵抗力としては、考慮しない。よって、この抵抗機構の降伏曲げ耐力は、 α 列のアンカーボルトによる曲げ抵抗力のみの値となる。

○抵抗機構F

抵抗機構Fは、ベースプレートと基礎が離間し、 β 列、および圧縮側アンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。この抵抗機構では、曲げモーメントの起点は、圧縮側アンカーボルトのナットとベースプレートとの接触面となるため、圧縮側アンカーボルトは、柱軸力のみ抵抗する。よってこの抵抗機構の降伏曲げ耐力は、中央列のアンカーボルトによる降伏曲げ耐力により決定される。

4. 評価式の提案

本実験で提案する抵抗機構に対応する評価式を以下に示す。

○抵抗機構A

抵抗機構Aは、ベースプレートと基礎が接触し、中央、および引張側アンカーボルトのナットとベースプレートが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降伏曲げ耐力を求める式は、以下のようになる。

$${}_A M_y = n_\alpha \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot (d_c + d_t) + n_\beta \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_c - N \cdot d_c \quad \dots (1)$$

ここで、 n_α ：引張側アンカーボルト本数、 n_β ：中央部アンカーボルト本数、 A_{ab} ：アンカーボルト断面積、 σ_y ：アンカーボルト降伏応力、 d_c ：ベースプレート端部から柱図心位置までの距離、 d_t ：アンカーボルト図心位置から柱図心位置までの距離、である。

また、弾性回転剛性を求める式は、以下のようになる。

$${}_A K_{BS} = \frac{A_{ab} \cdot E \cdot \{n_\alpha \cdot (d_c + d_t)^2 + n_\beta \cdot d_c^2\}}{abl} \quad \dots (2)$$

○抵抗機構B

抵抗機構Bは、ベースプレートと基礎が接触し、全てのアンカーボルトとベースプレートが離間している場合の抵抗機構である。よって、この抵抗機構の曲げ耐力を求める式は、以下のようになる。

$${}_B M_N = N \cdot d_c \quad \dots (3)$$

○抵抗機構C

抵抗機構Cは、ベースプレートと基礎が離間し、外側の列のアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。よって、この抵抗機構の曲げ耐力を求める式は、以下のようになる。

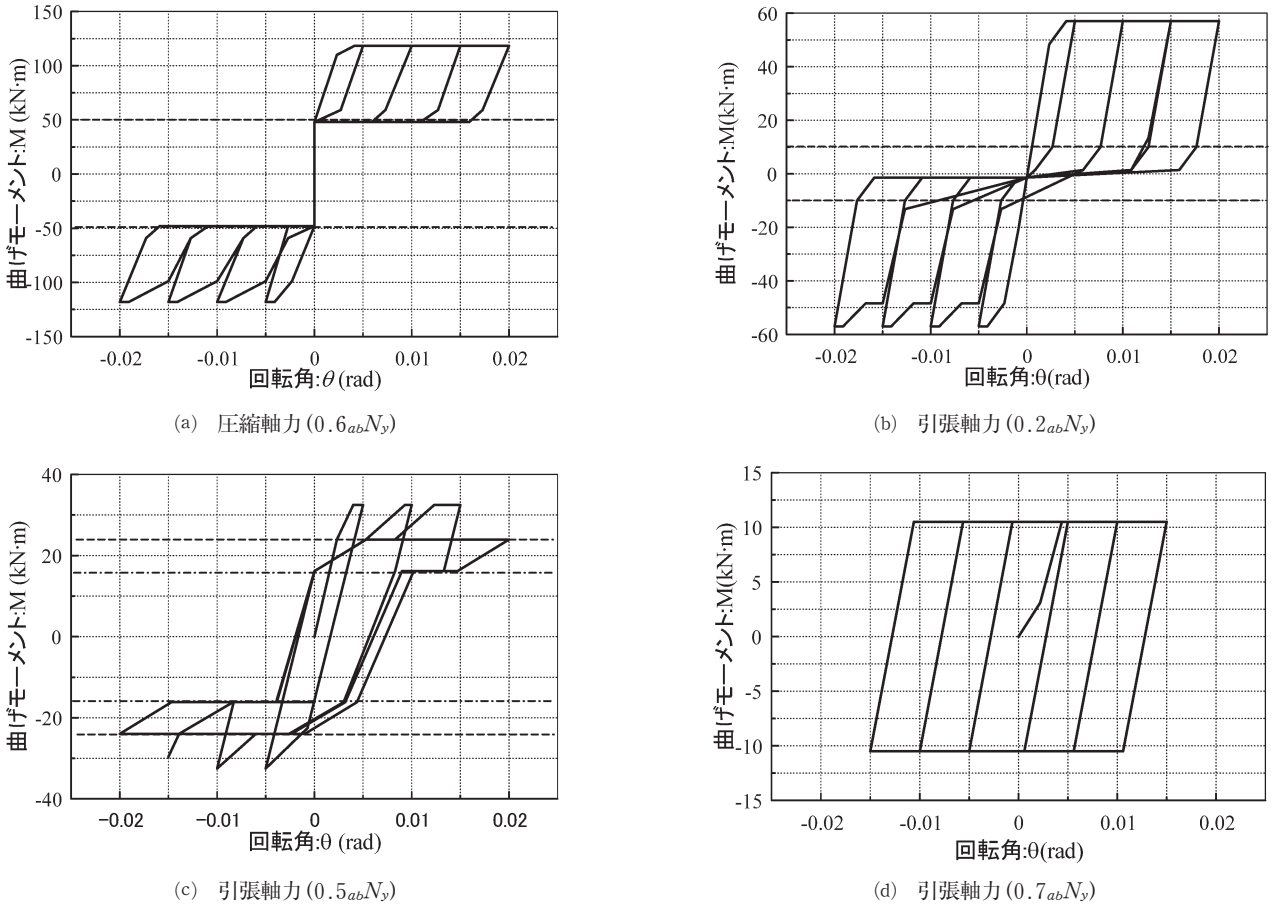


図6 復元力特性モデル

$$cM_N = N \cdot d \quad \dots (4)$$

○抵抗機構D

抵抗機構Dは、ベースプレートと基礎が離間し、全てのアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。よって、この抵抗機構の降伏曲げ耐力を求める式は、以下ようになる。

$$dM_y = n_a \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot 2d_t + n_\beta \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_t - N \cdot d_t \quad \dots (5)$$

○抵抗機構E

抵抗機構Eは、ベースプレートと基礎が離間し、引張側、および中央の列のアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。よって、この抵抗機構の降伏曲げ耐力を求める式は、以下ようになる。

$$eM_y = n_a \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_t \quad \dots (6)$$

また、弾性回転剛性を求める式は、以下ようになる。

$$eK_{Bs} = \frac{n_a \cdot A_{ab} \cdot E \cdot d_t^2}{R \cdot ab l} \quad \dots (7)$$

○抵抗機構F

抵抗機構Fは、ベースプレートと基礎が離間し、圧縮側、および中央の列のアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している場合の抵抗機構である。この抵抗機構では、中央の列のアンカーボルトのナットとベースプレートの接触面を基点として曲げモーメントが発生するため、こ

の抵抗機構の降伏曲げ耐力を求める式は、以下ようになる。

$$fM_y = n_\beta \cdot A_{ab} \cdot \sigma_y \cdot d_t \quad \dots (8)$$

また、弾性回転剛性を求める式は、以下ようになる。

$$fK_{Bs} = \frac{n_\beta \cdot A_{ab} \cdot E \cdot d_t^2}{R \cdot ab l} \quad \dots (9)$$

4. 復元力特性モデル

本実験において、提案する角一定軸力作用下における復元力特性モデルを図6に示す。

○圧縮軸力(0.6abNy)

圧縮軸力(0.6abNy)作用下における復元力特性モデルを図6(a)に示す。

この軸力作用下では、载荷初期の段階では、柱軸力が曲げに対して抵抗するため、ベースプレートには回転が生じず、耐力のみが上昇する。その後、柱軸力による曲げ抵抗力を超過すると回転が生じ始め、抵抗機構Aとなる。また、図6(a)に示す破線を境に抵抗機構が変化し、破線上とその間では、抵抗機構Cとなり、破線より上、もしくは下にある場合は、抵抗機構Aとなる。

○引張軸力(0.2abNy)

引張軸力(0.2abNy)作用下における復元力特性モデルを

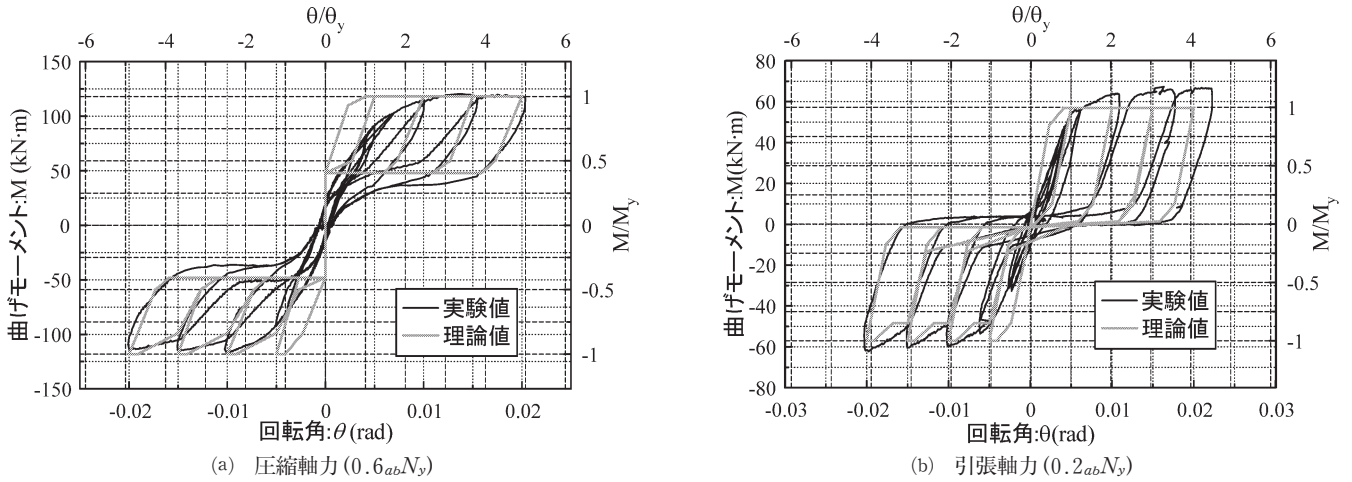


図7 曲げモーメント-回転角関係

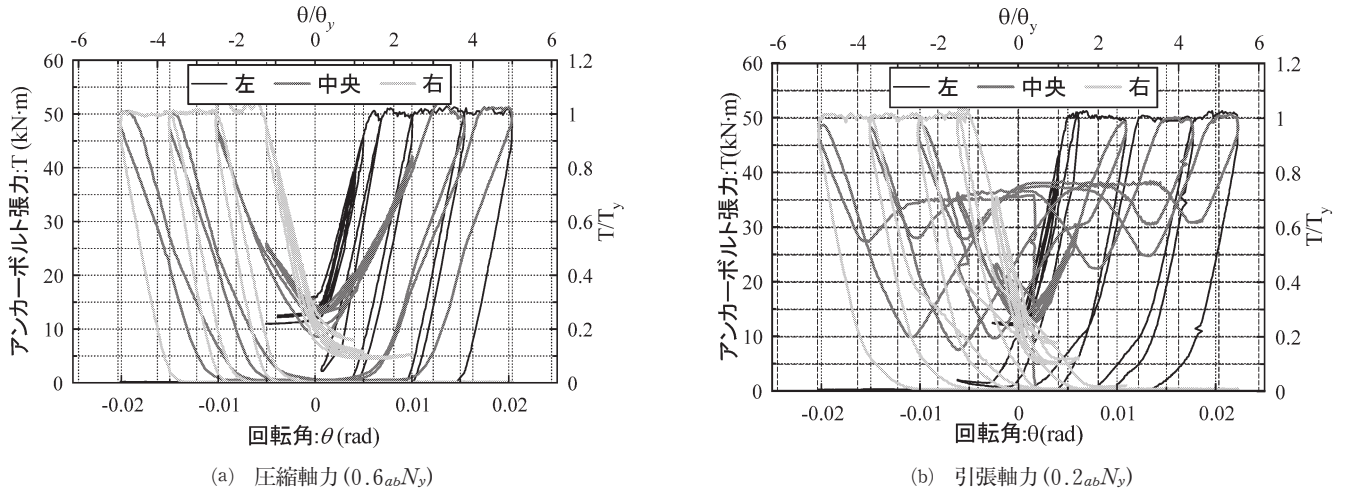


図8 アンカーボルト張力-回転角関係

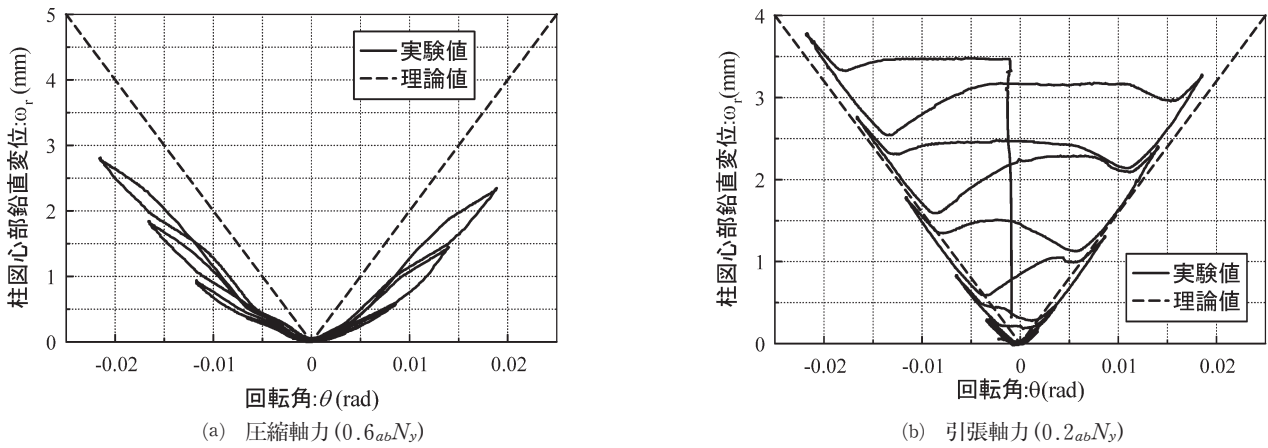


図9 柱図心部鉛直変位-回転角関係

図6(b)に示す。

この軸力作用下では、引張軸力による影響があるため、ベースプレートと基礎は接触と離間を繰り返す。また、この柱軸力のように軸力が小さい場合、1列のアンカーボルト(2本、もしくは3本)で抵抗できるため、曲げモーメント

の基点は、接触しているアンカーボルトのナットとベースプレートの接触メントなる。また、図6(b)に示す破線を境に抵抗器が変化し、破線と破線の間にある場合は、抵抗機構Dとなり、破線より上、もしくは下にある場合は、抵抗機構Aとなる。

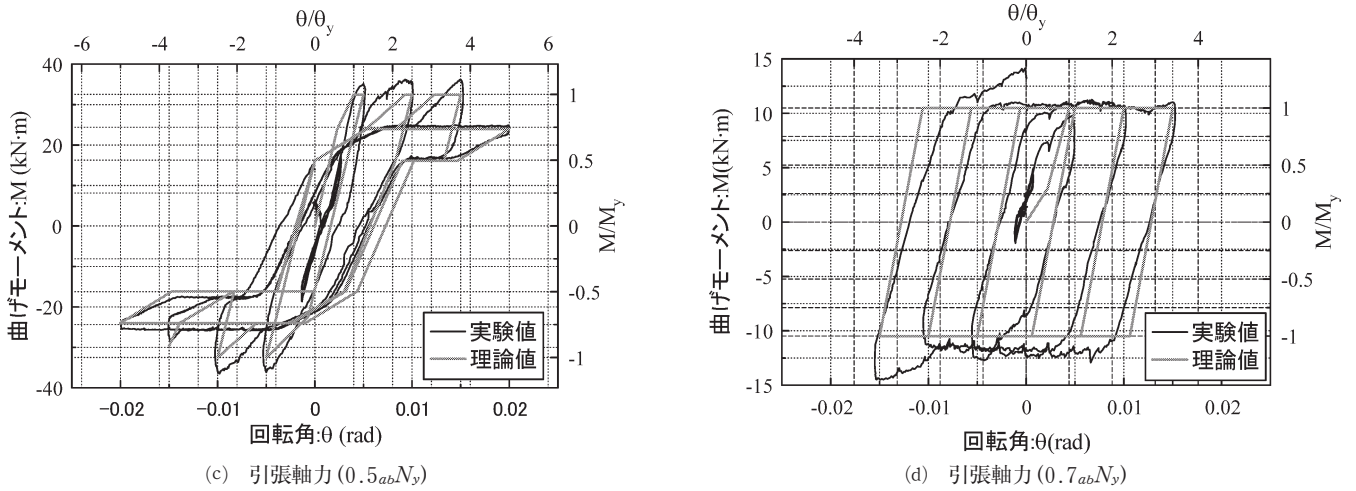


図7 曲げモーメント-回転角関係

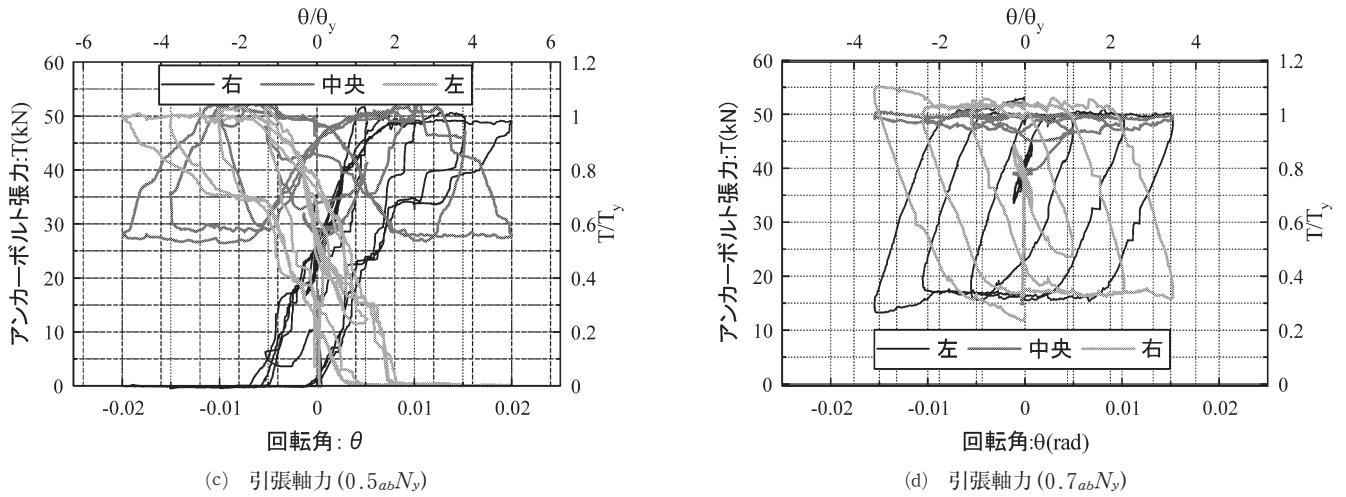


図8 アンカーボルト張力-回転角関係

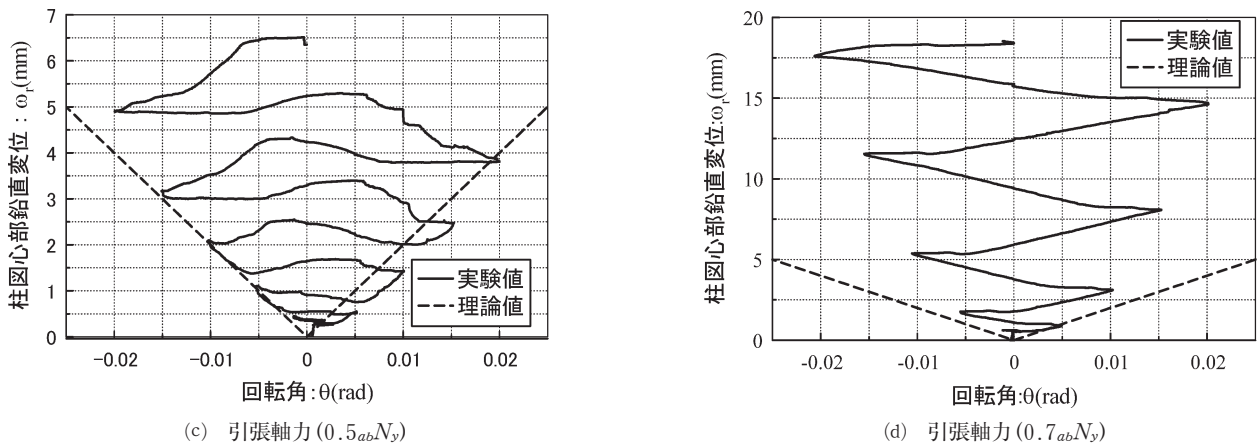


図9 柱図心部鉛直変位-回転角関係

○引張軸力 ($0.5abN_y$)

引張軸力 ($0.5abN_y$) 作用下における復元力特性モデルを図6(c)に示す。

この軸力作用下では、軸力の影響が大きく、ベースプレートと基礎が接触と離間を繰り返し、曲げモーメントの

基点となる点が、ベースプレート端部、中央のアンカーボルトのナットとベースプレート、そして外側の列のアンカーボルトのナットとベースプレートの3点で様々に変化するため、復元力特性モデルはかなり複雑なモデルとなる。また、抵抗機構は、図6(c)に示す破線、および一点鎖

線を境として、変化する。一点鎖線と一点鎖線の間にある場合は、抵抗機構Fとなり、一点鎖線と破線の間にある場合は、抵抗機構Gとなり、そして破線より上、もしくは下にある場合は、抵抗機構Aとなる。

○引張軸力(0.7 abN_y)

引張軸力(0.7 abN_y)作用下における復元力特性モデルを図6(d)に示す。

この軸力作用下では、軸力が大きいと、常にベースプレートと基礎が離間し、全てのアンカーボルトのナットとベースプレートと接触している。そのため、抵抗機構は常に、抵抗機構Eとなり、曲げモーメントの起点は、圧縮側アンカーボルトのナットとベースプレートの接触面となるので、復元力特性モデルは、完全弾塑性型となる。

5. 実験結果と考察

本実験の実験結果である、曲げモーメント-回転角(M- θ)関係、および各軸力作用下における復元力特性モデルを図7に、アンカーボルト張力-回転角(T- θ)関係を図8に、柱断面図心部鉛直変位-回転角(ω_r - θ)関係を図9に示す。また、各軸力における実験結果を以下)に示す。

○圧縮軸力(0.6 abN_y)

圧縮軸力作用下における実験結果、M- θ 関係を図7(a)に、T- θ 関係を図8(a)に、 ω_r - θ 関係を図9(a)にそれぞれ示す。

圧縮軸力作用下の場合、抵抗機構は常に抵抗機構Aとなり、柱軸力が曲げ抵抗として作用するため、初期の段階では、ベースプレートには回転は生じず耐力のみが上昇し、柱軸力による曲げ抵抗力： $N \cdot d_t$ を超過すると回転し始める。また、降伏に達する回転角の実験値の値と理論値の値が異なっているのは、作用させている柱軸力が $N=240$ (kN)と大きいとベースプレートが弾性範囲内で変形したためであると考えられる。

また、図9(a)に示す ω_r - θ 関係のグラフより、実験値が理論値より下にあることから、ベースプレートと基礎常に接触していることが分かる。

○引張軸力(0.2 abN_y)

引張軸力(0.2 abN_y)作用下における実験結果、M- θ 関係を図7(b)に、T- θ 関係を図8(b)に、 ω_r - θ 関係を図9(b)にそれぞれ示す。

この柱軸力作用下では、作用させている軸力が小さいため、載荷後、除荷の段階では、圧縮側アンカーボルト列で抵抗するため抵抗機構Dとなるが、軸力によるアンカーボルトの伸びは、極めて小さい。そのため、除荷後、逆方向載荷に入るとベースプレートと基礎が接触し、抵抗機構Aとなる。よって、復元力特性モデルの履歴曲線は、無軸力下のものと似た履歴となる。

また、図9(b)に示す ω_r - θ 関係のグラフより、実験値が理論値の上にある場合と下にある場合があることから、ベースプレートと基礎が接触と離間を繰り返していることが分かる。

○引張軸力(0.5 abN_y)

引張軸力(0.5 abN_y)作用下における実験結果、M- θ 関係を図7(c)に、T- θ 関係を図8(c)に、 ω_r - θ 関係を図9(c)にそれぞれ示す。

この柱軸力作用下では、引張軸力が0.2 abN_y の場合とは、異なりアンカーボルト1列(2本、もしくは3本)で抵抗した場合、降伏してしまうため、アンカーボルト5本で抵抗する。そのため、載荷の際にベースプレートと基礎が接触している場合は、接触面であるベースプレート端部を基点として、曲げモーメントが生じるが、ベースプレートと基礎が離間している場合は、中央列、もしくは接触している外列のアンカーボルトのナットとベースプレートの接触面を基点として、曲げモーメントが生じるが、載荷方向や回転角により、基点となる列が様々に変化するため、復元力特性の履歴は、他のものに比べ、複雑な履歴となる。また、図9(c)に示す ω_r - θ 関係のグラフより、実験値が理論値より上にある場合と下にある場合があることからベースプレートと基礎が接触と離間を繰り返していることが分かる。更に、中央列のアンカーボルトで抵抗している場合の柱中央部鉛直変位は、一定となっていることが分かる。

○引張軸力(0.7 abN_y)

引張軸力(0.7 abN_y)作用下における実験結果、M- θ 関係を図7(d)に、T- θ 関係を図8(d)に、 ω_r - θ 関係を図9(d)にそれぞれ示す。

この軸力作用下では、作用させている軸力が大きいと、常にベースプレートと基礎が離間し、全てのアンカーボルトのナットとベースプレートが接触している。そのため、除荷後、逆方向載荷に入るとすぐに圧縮側アンカーボルトが抵抗するため、復元力特性の履歴は、完全弾塑性型の復元力特性モデルとなる。また、図9(d)に示す ω_r - θ 関係のグラフから、実験値が常に理論値より上にあることから、ベースプレートと基礎が常に離間していることが分かる。

5. まとめ

以上のことから、以下の知見が得られた。

- 1) アンカーボルトを8本配置した場合の抵抗機構は、6種類に大別でき、各抵抗機構における耐力を求める評価式を求めることができた。
- 2) 引張軸力が $0 < N < 0.25abN_y$ の範囲では、軸力によるアンカーボルトの伸びが小さいので、抵抗機構は、ほぼ抵抗機構Aとなるため、無軸力下のものと同じよう

な復元力特性モデルとなる。

3) 引張軸力が $0.25_{ab}N_y \leq N < 0.625_{ab}N_y <_{ab}N_y$ の範囲では、軸力による影響が大きく、複雑な復元力特性モデルとなる。

4) 引張軸力が $0.625_{ab}N_y \leq N$ の範囲では、スリップ現象が生じず、完全弾塑性型の復元力特性モデルとなる。

なお、本論文で提案するモデルは、コンクリート基礎の場合に対しても適用であると考えられるが、今後、実験により確認する必要がある。

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)

8) 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, 日本建築学会学術講演梗概集(九州), 構造 III-C1, pp.725-726, 2007.8