

# 変動軸力と曲げを受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚

高松 隆夫\*・玉井 宏章\*・山西 央朗\*\*・松村 高良\*\*\*

(平成20年10月31日受理)

## Anchor-Bolt-Yield-Type Exposed Column-Base under Variable Axial-Force and Bending

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Teruaki YAMANISHI and Takayoshi MATSUMURA

(Received Oct. 31, 2008)

### Abstract

An experimental study on non-slip-type exposed column bases proposed by the authors, subjected both to cyclic horizontal loadings and to variable axial forces in the limits of compression, was made to make clear bending moment characteristics of the column bases and to propose models of restoring force characteristics. In addition, the same experiments on conventional exposed column bases were conducted to show the effectiveness of the proposed column bases. The following conclusions were drawn from the experimental results:

- 1) The restoring force characteristics of the non-slip-type column bases become linear-from-origin-type under variable axial forces,
- 2) The column bases sustain the self-centering performance reducing residual deformation of a building after an earthquake.

**Keywords:** variable axial-force, anchor-bolt-yield-type, restoring force characteristics, cyclic loading tests

### 1. はじめに

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚ではスリップ現象が発生するが、著者等は“楔デバイス”を提案し、常に原点立上り型の復元力特性を示すノンスリップ型露出柱脚について開発・研究している<sup>1-10)</sup>。これまでの研究では、中低層の構造物における中柱を想定した、柱軸力を無軸力および一定圧縮軸力とした場合、また、側柱を想定した、変動軸力が圧縮軸力領域に留まる場合の載荷実験を行い<sup>8)</sup>、いずれも、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ことを報告している。

ところで、柱軸力が作用することにより、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚の降伏曲げ耐力および弾性回転剛性に変動することは良く知られている<sup>11)</sup>。そして、柱脚の性能が変動することで、構造物に入力される地震入力エネルギーが変化し、柱脚の性能を精確に評価する必要があることも明らかにされている<sup>8)</sup>。

一方、側柱のように柱軸力が変動する場合、特に、引張軸力に達する場合においても、これまでに提示されてきた理論式で概ね評価できることを、宗宮・福知等<sup>12)</sup>および田沼・橋本<sup>13)</sup>は露出柱脚の要素実験により、伊藤・三谷・田中等<sup>14-16)</sup>は部分架構試験体を用いた実験により、

\* 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

\*\*\* 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

表1 素材特性と主要寸法

材質	$E$ ( $N/mm^2$ )	$\sigma_y$ ( $N/mm^2$ )	主要寸法 (mm)	
柱	STKR400	205,000	349	Box-200x200x12
ベースプレート	SS400	205,000	409	PL-400x400x50
アンカーボルト :S	ABR400	205,000	295	$\phi_g = 14.6, ab = 590$
:N	ABR400	205,000	295	$\phi_g = 14.6, ab = 629$

表2 バネ特性

外径 (mm)	バネ径 (mm)	自由長さ (mm)	最大たわみ (mm)	最大荷重 (N)	バネ定数 (N/mm)
26.1	2.0	94.0	70.3	93.5	1.33

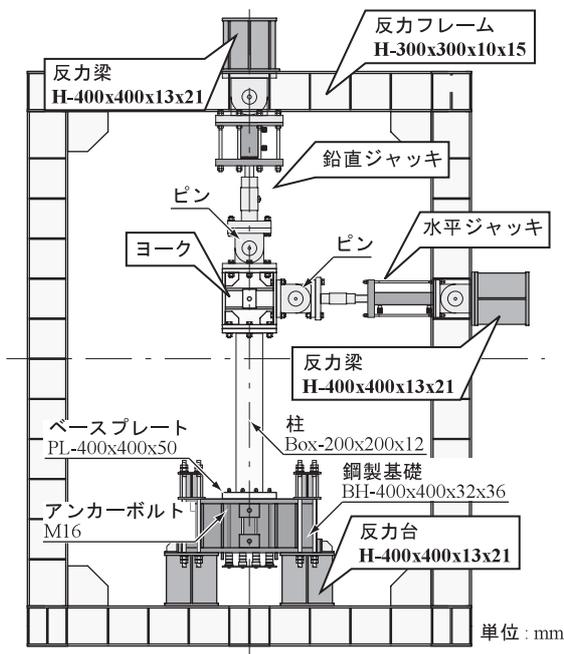


図2 荷重装置

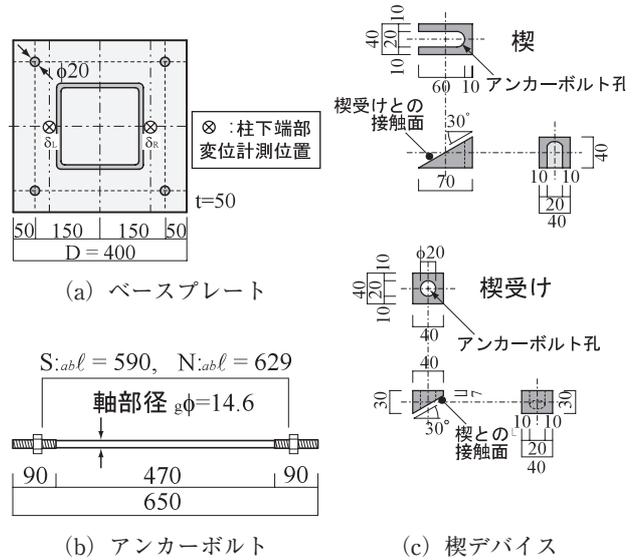


図1 試験体形状

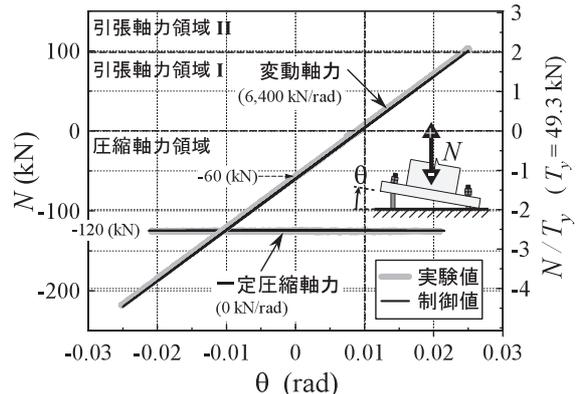


図3 鉛直荷重の制御方法

著者等の一人である玉井<sup>17)</sup>は要素実験と解析により明らかにしている。しかしながら、著者等は、一定引張軸力が作用する場合において、復元力特性が複雑に変化することを明らかにしており<sup>18)</sup>、引張領域を含んだ変動軸力下の復元力特性をより詳細に検討する必要があると考える。

そこで、本論文では、引張軸力領域を含んだ変動軸力を受ける、ノンスリップ型露出柱脚および従来のアンカーボルト降伏先行型露出柱脚（以後、従来型露出柱脚と記す）について荷重実験を行い、それぞれの復元力特性を明らかにすることを目的にする。また、変動軸力に対して適用可能な復元力特性モデルを提案し、これまでの復元力特性モデル定式化手法を拡張して、実験結果との比較検討を行う。

## 2. 実験

本実験では、露出柱脚付き片持ち柱に柱軸力を荷重する

と同時に、水平繰返し荷重実験を行う。試験体変数を、柱軸力 $N$ 、楔デバイスの有無とする。

### 2.1 試験体

表1、表2に試験体の素材特性と主要寸法、楔デバイスに用いるバネのバネ特性を示す。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。

試験体は、従来型柱脚(S)に変動軸力(Var)を荷重したもの(S-Var)、一定圧縮軸力(Con)を荷重したもの(S-Con)、ノンスリップ型柱脚(N)に変動軸力を荷重したもの(N-Var)、一定圧縮軸力を荷重したもの(N-Con)の、合計4種類を用意した。

柱には Box-200x200x12、ベースプレートにはアンカーボルトを隅各部に1本ずつ、計4本配置する PL-

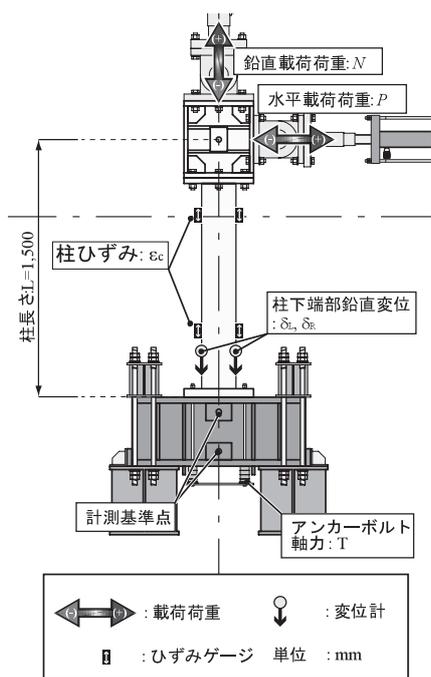


図4 計測位置

400x400x50 を用い、柱とベースプレート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、また、実験時には軸部降伏軸力  $T$  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。

楔デバイスの楔および楔受けは、楔貫入角度を  $30^\circ$  とし、かつ、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、1 週間ほど湿潤状態を保つ）を施して、静止摩擦係数  $\mu$  を増大させている。この発生処理は、アンカーボルトから伝達される圧縮力の接触面方向分力に対して、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ために施している。

## 2.2 載荷装置と載荷方法

図 2, 3 に載荷装置、載荷する鉛直荷重を示す。載荷装置は、試験体柱頭部のヨークへ鉛直・水平ジャッキを接合し、鉛直・水平載荷を行うものである。

水平載荷は、制御値をベースプレート回転角  $\theta$  として、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載荷とする。

また、柱軸力が引張領域となる場合、柱軸力の大きさにより繰返し載荷時の柱脚の抵抗機構、復元力特性が変化する<sup>18)</sup>。本試験体においては、 $N = 2.0T_y$  が境となる。本論文では、側柱を想定した、比較的軸力の大きさが小さい領域（引張軸力領域 I）を対象として、変動軸力を取り扱う。

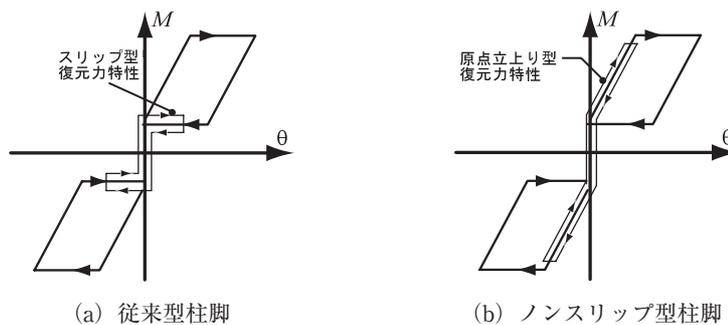


図5 各柱脚の復元力特性概要

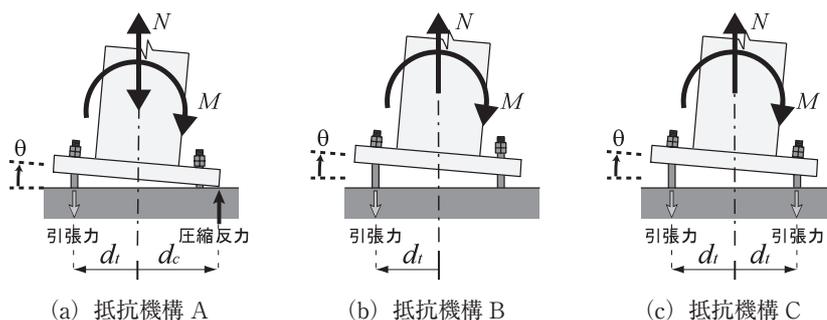


図6 抵抗機構

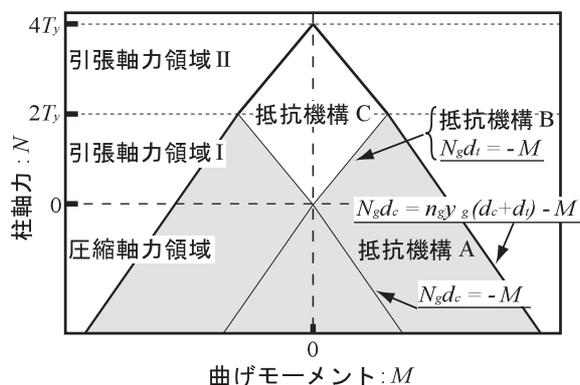


図7 M-N 合力空間と各曲げ耐力式

このため、鉛直荷重は、制御値を鉛直荷重  $N$  として、側柱を想定した変動軸力 (Var)  $N = -220 \sim 100$  (kN)、中柱を想定した一定圧縮軸力 (Con)  $N = -120$  (kN) とを載荷する。尚、変動軸力についてはベースプレート回転角の一次関数となるように制御しながら載荷する。また、本載荷装置では、ヨークの移動・回転により柱軸力の増減が生じるが、実験における柱軸力の増減は  $\pm 3\%$  以下であり、図 3 に示すように、制御値と実験値との間の差異は小さく、本実験における影響はないものとして取り扱う。

## 2.3 計測方法と整理方法

図 4 に計測位置を示す。変位としては、柱下端部の鉛直変位  $\delta_L, \delta_R$  (図 1(a) 参照) を計測してベースプレート回転角  $\theta$  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。

### 3. 抵抗機構と復元力特性モデル

ノンスリップ型柱脚が弾塑性繰返し荷重を受ける場合、図5に示すように原点立上り型の復元力特性を示し、従来型柱脚で発生するスリップ型の復元力特性を改善する。

また、本論文の試験体が圧縮、引張軸力を受ける場合、図6に示す3種類の抵抗機構が発生する。これらの抵抗機構より各曲げ耐力、各回転剛性を、抵抗機構と柱軸力より復元力特性モデルを算出する。

#### 3.1 仮定

各抵抗機構、耐力・剛性評価式、復元力特性は以下の仮定に基づいて定式化を行う。尚、設ける仮定は文献<sup>18)</sup>と同一であるので、簡潔に記す。

1. 降伏要素をアンカーボルトに限定する。
2. 圧縮合力点位置をベースプレート端部に設ける。
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、低減係数 $R$ を導入する。
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抵抗力のみを考慮する。
5. せん断力に対しては、ベースプレートと基礎の間に発生する摩擦力で、ベースプレートと基礎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。尚、これらせん断力の作用による復元力特性への影響は無いものとする。
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 降伏曲げ耐力および回転剛性

##### 3.2.1 抵抗機構 A

図6(a)に示す抵抗機構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。この場合の、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。

$$M_{An} = -N \cdot d_c \quad (2.a)$$

$$M_{AY} = n \cdot ab A \cdot ab \sigma_y \cdot (d_c + d_t) - N \cdot d_c \quad (2.b)$$

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

また、軸力が変動することによる軸力付加剛性 $K_{An}$ は、以下の式で表される。

$$K_{An} = -N_v \cdot d_c \quad (2.d)$$

ここに、 $n$ :引張側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応力度、 $d_t$ :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）、 $E$ :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)<sup>1)</sup>、 $abl$ :アンカーボルトの有効長さ、 $N_v$ :柱軸力の変動率である。

##### 3.2.2 抵抗機構 B

図6(b)に示す抵抗機構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。この場合の、付加曲げ抵抗 $M_{Bn}$ 、軸力付加剛性 $K_{Bn}$ は、以下の式で表される。

$$M_{Bn} = N \cdot d_t \quad (3.a)$$

$$K_{Bn} = -N_v \cdot d_t \quad (3.b)$$

##### 3.2.3 抵抗機構 C

図6(c)に示す抵抗機構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。この場合の、弾性回転剛性 $K_{CBS}$ は、以下の式で表される。

$$K_{CBS} = \frac{E \cdot n \cdot ab A \cdot 2 \cdot d_t^2}{R \cdot ab l} \quad (4)$$

以上の各耐力式を柱軸力 $N$ -曲げモーメント $M$ 合力空間に示したものを図7に示す。圧縮軸力領域では、常に抵抗機構Aとなり、引張軸力領域Iでは、抵抗機構A、B、Cと変化し、最後に、引張軸力領域IIでは、常に抵抗機構Cとなることが分かる。このように、N-M合力空間においても、本試験体は、 $N=0$ 、 $N=2.0T_y$ を境界に、柱脚の抵抗特性が変化することが予想できる。

#### 3.3 復元力特性モデルと抵抗機構の変化

図8、図9にノンスリップ型露出柱脚および従来型露出柱脚の、変動軸力下における任意サイクル時復元力特性モデルと抵抗機構の変化を示す。

変動軸力は、原点では圧縮軸力となり、正方向荷重で圧縮軸力減少の後に引張軸力に達し、負方向荷重では圧縮軸力が増加する（図3参照）。このため、抵抗機構Aの状態において、付加曲げ耐力は、正方向に回転角が増加すると減少し、負方向に回転角が増加すると増加する。

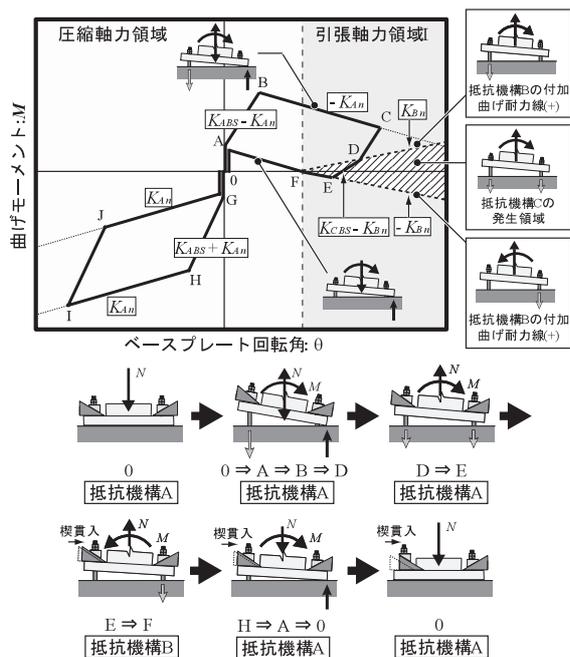


図8 変動軸力を受けるノンスリップ型柱脚の復元力特性モデル、抵抗機構の変動と楔デバイスの作動概念

ノンスリップ型柱脚では、楔デバイスが機能することにより、アンカーボルトが塑性伸びをした後のサイクルにおいても、スリップ現象を起こすことなく、原点立上り型の復元力特性を示すものとする。従来型露出柱脚では、アンカーボルトが塑性伸びをした後のサイクルには、スリップ現象が発生するものとする。

弾性剛性は、アンカーボルトの弾性伸びによる剛性と変動軸力による剛性を合わせたもの（正方向では  $K_{ABS} - K_{An}$ 、負方向では  $K_{ABS} + K_{An}$ ）となり、アンカーボルト降伏後は変動軸力による剛性正方向では  $-K_{An}$ 、負方向では  $+K_{An}$  となる。

図8より、復元力特性は原点立上り型となり、除荷時に引張軸力領域にある場合は、まず、基礎とベースプレートが離間して抵抗機構Cとなり、その後、ベースプレートと引張側のアンカーボルトのナットが離間して抵抗機構Bとなる。この時、回転の向きと曲げ抵抗の向きが等しくなるため、正の回転角で負の曲げ抵抗が発生する (D⇒F)。

図9より、スリップ型の復元力特性を示し、除荷時に引張軸力領域にある場合は、まず、基礎とベースプレートが離間して引張側のアンカーボルトのナットとベースプレートが接触する抵抗機構Bとなる。この時、回転の向きと曲げ抵抗の向きが逆になるため、正の回転角で正の曲げ抵抗が発生する (D⇒F)。尚、荷重のパターンによっては、圧縮側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、負の曲げ抵抗が発生する可能性があるが、繰返し荷重下では、圧縮側のアンカーボルトも塑性伸びをしており、

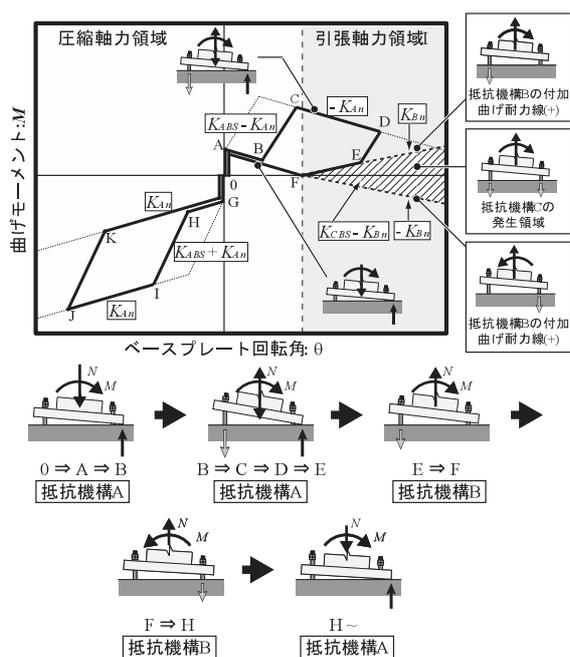


図9 変動軸力を受ける従来型柱脚の復元力特性モデル、抵抗機構の変動

接触し難いので考慮しないものとする。

#### 4. 実験結果と考察

図10, 図11, 図12に実験結果を示す。図10に曲げモーメント  $M$  - ベースプレート回転角  $\theta$  の関係を、図11にアンカーボルト軸力  $T$  -  $\theta$  の関係を、図12に柱軸力  $N$  - 曲げモーメント  $M$  の関係を、それぞれ、示す。

また、図10においては、復元力特性モデルを破線で、ノンスリップ型露出柱脚と従来型露出柱脚との差異を明確にするために最終サイクルの復元力特性を太線で示す。図12においては式(2.a), (2.b), (3.a)の理論曲線を、併せて示す。

尚、図10中の右縦軸と上横軸は、式(2.b)より求めた降伏曲げ耐力解析値  $M_{AY}$  と式(2.b-c)より求めたアンカーボルト降伏時ベースプレート回転角解析値  $\theta_Y$  で無次元化し、図11中の右縦軸と上横軸は、アンカーボルト降伏軸力  $T_Y$  とし、アンカーボルト降伏時ベースプレート回転角解析値  $\theta_Y$  で無次元化し、図12中の右縦軸と上横軸は、 $T_Y$  と柱軸力  $N = 0$  とした時の降伏曲げ耐力解析値  $M_{AY}$  で無次元化している。

##### 4.1 復元力特性

図10(a)より、変動軸力を受ける場合のノンスリップ型露出柱脚においても、楔デバイスが良好に機能して、原点立上り型の復元力特性を示していることが分かる。これは、図8から分かるように、ベースプレート回転角が0の時に、柱軸力が圧縮軸力領域にあれば、アンカーボルトの塑性伸

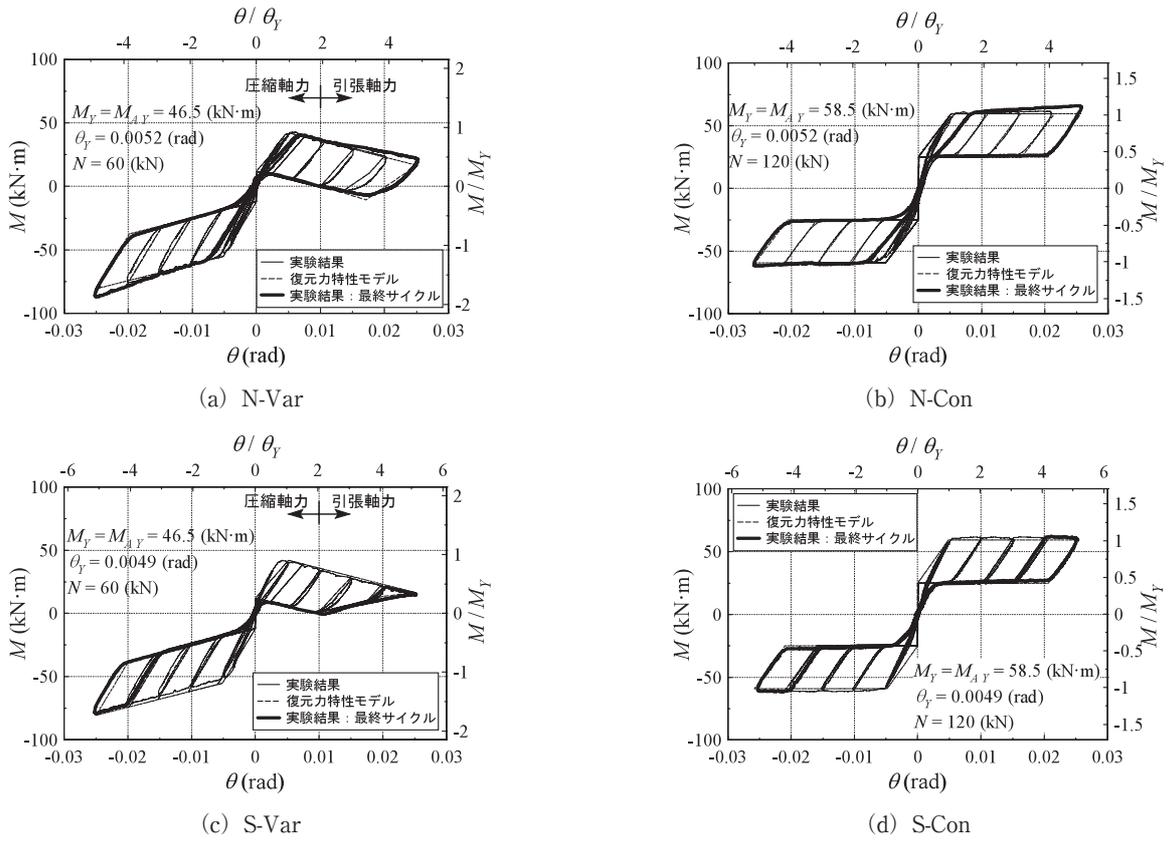


図 10 曲げモーメント  $M$  - ベースプレート回転角  $\theta$  関係

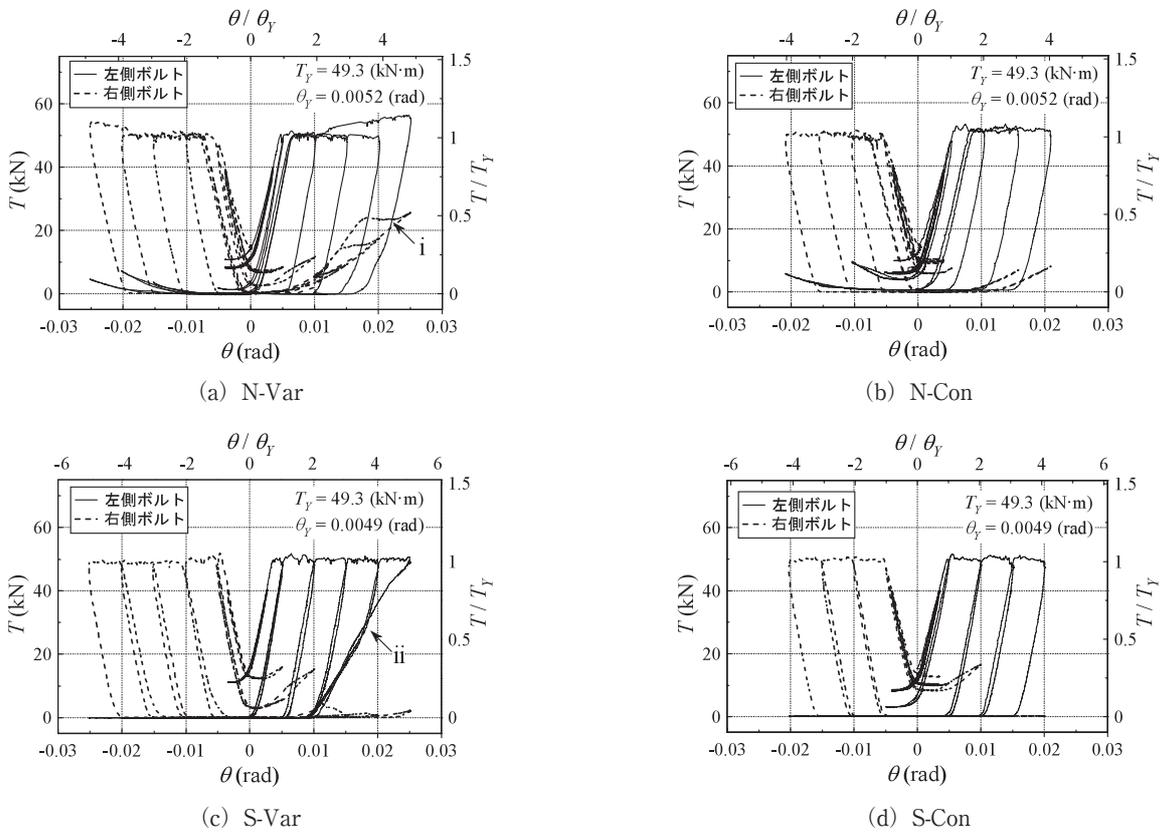


図 11 アンカーボルト軸力  $T$  - ベースプレート回転角  $\theta$  関係

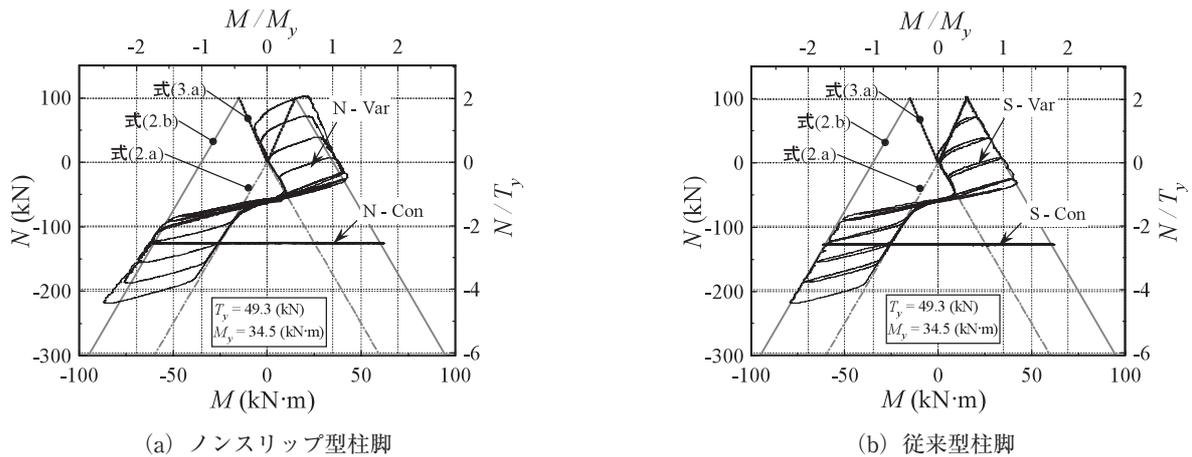


図 12 柱軸力  $N$  - 曲げモーメント  $M$  関係

びによるナットとベースプレートの間の隙間を楔が埋めるからである。通常、側柱の柱脚が変動軸力を受けて、柱軸力が引張軸力領域に入る場合においても、構造物の変形が 0 になる（ベースプレート回転角が 0 になる）と、柱軸力は圧縮軸力領域に戻る。すなわち、ノンスリップ型露出柱脚は変動軸力を受ける側柱においても、期待通りの性能を示すことが期待できると言える。また、付加曲げ耐力は、柱軸力が引張軸力に入る（ $\theta$  が 0.01rad 以上になる）と、負の値となる。これは、楔デバイスの機能で、アンカーボルトのナットとベースプレートの間の隙間が埋められ、図 11(a) からも分かるように、圧縮側のアンカーボルトが抵抗し、除荷時において抵抗機構 B となり、回転と同じ向きの曲げ抵抗が発生するためである。

図 9(c) より、変動軸力を受ける場合の従来型露出柱脚においても、スリップ型の復元力特性を示していることがわかる。また、付加曲げ耐力は、柱軸力が引張軸力に入る（ $\theta$  が 0.01rad 以上になる）と、回転角の値が大きくなるのに比例して大きくなる。これは、引張軸力に対して引張側のアンカーボルトのみが抵抗し、除荷時において抵抗機構 B となり、回転と逆向きの曲げ抵抗が発生するためである。

図 9(b), (d) より、一定圧縮軸力を受けるノンスリップ型・従来型露出柱脚では、それぞれ、原点立上り型、スリップ型の復元力特性を示す、一般的な Bi-linear 型の復元力特性を示し、降伏耐力および付加曲げ耐力共に一定の値となる。

以上より、変動軸力を受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚では、一定圧縮軸力を受ける場合と比較して、復元力特性が変化することが分かる。

各実験結果と復元力特性モデルは、良好に対応しており、変動軸力下においても、本論文で検討した 3 種類の抵抗機構を考慮することで、比較的容易に実験結果を評価できることが分かる。尚、ノンスリップ型露出柱脚の結果におい

て、最終サイクルで実験結果が復元力特性モデルより高目の耐力を示しているのは、図 11(a), (b) からも分かるように、アンカーボルト軸部がひずみ硬化域に入り、降伏軸耐力が増加したためである。

#### 4.2 アンカーボルト軸力-ベースプレート回転角関係

図 11 より、変動軸力下においても、ほぼ、一定圧縮軸力下と同様の抵抗特性となるノンスリップ型露出柱脚では、引張側アンカーボルトと共に僅かではあるが圧縮側も抵抗し、従来型露出柱脚では、引張側アンカーボルトのみが抵抗している。

但し、引張軸力下においては、柱軸力をアンカーボルトが負担するため、柱軸力が引張軸力に入る（ $\theta$  が 0.01rad 以上になる）時の除荷時には、一定圧縮軸力下と異なる履歴性状を示す（図 11(a) の i, (c) の ii）。

#### 4.3 柱軸力-曲げモーメント関係

図 12 より、ノンスリップ型露出柱脚および従来型露出柱脚共に、降伏曲げ耐力と付加曲げ抵抗が解析値の曲線に沿っており、柱軸力の増減に比例、反比例して増減している。

また、3.3 節、4.1 節からも分かるように、柱軸力が引張軸力に入った場合の除荷時には、ノンスリップ型露出柱脚では抵抗機構 B, C を示す一方で、従来型露出柱脚では抵抗機構 B のみしか示さないの、それぞれの履歴性状に差異が生じている。

### 5. まとめ

変動軸力を受けるノンスリップ型露出柱脚の水平繰返し載荷実験を行い、実験結果を考察すると共に、従来型柱脚の実験結果と比較を行った。得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) 変動軸力を受ける場合においても、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し、従来型露

出柱脚はスリップ型の復元力特性を示した。

ノンスリップ型露出柱脚が引張変動軸力下においても、スリップ現象が生じないのは、回転角が0の時に柱軸力が圧縮軸力となる一般的な側柱の変動軸力下であれば、原点において楔がアンカーボルトのナットとベースプレートの間の隙間を埋めるからである。

- 2) 本論文で検討した変動軸力の領域範囲内であれば、従来の一般的な降伏曲げ耐力や弾性回転剛性理論式により、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚を精確に評価できる。
- 3) アンカーボルト列数が2列の露出柱脚においては、変動軸力を受けるノンスリップ型露出柱脚および、従来型露出柱脚共に、3種類の抵抗機構を考慮することで、実験結果を精確に評価できる。

## 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に対して、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Non-slip-type restoring force characteristics of exposed-type column base, Journal of Constructional Steel Research, Vol.61, pp.942-961, 2005.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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権, 鋼構造年次論文報告集, 第14巻, pp.269-276, 2006.11.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985.3.
- 12) 宗宮由典, 福知保長, 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.