

変動軸力と曲げを受けるノンスリップ型露出柱脚に関する研究

山西 央朗*・高松 隆夫**・玉井 宏章**

(平成21年10月31日受理)

A study on non-slip-type exposed column-base subjected to variable axial-force and bending

Teruaki YAMANISHI, Takao TAKAMATSU and Hiroyuki TAMAI

(Received Oct. 31, 2009)

Abstract

An experimental study on non-slip-type exposed column bases proposed by the authors, subjected to both cyclic horizontal loadings and variable axial forces in the limits of compression was carried out to make clear bending moment characteristics of the column bases and to propose models of restoring force characteristics.

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, and the restoring force characteristics show curves similar to those under monotonic loading.

Key Words: *Anchor-bolt-yield-type exposed column-base, Variable axial-force, Multi-rows of anchor-bolt, Models of restoring force characteristics*

1. はじめに

著者等は、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚に楔デバイスを設置した、ノンスリップ型露出柱脚の研究を行っている¹⁻¹⁰⁾。この柱脚は、スリップ現象が改善でき、その性能は、変動軸力下においても期待できることが明らかになっている⁸⁻¹⁰⁾。また、ノンスリップ型露出柱脚では、繰返し载荷下の復元力特性においても、単調载荷時の復元力特性に類似したものとなり、復元力特性の予測が比較的容易である⁶⁻⁷⁾。

一方、一般的なアンカーボルト降伏先行型露出柱脚では、アンカーボルト列数(配置本数)の増加により、各列のアンカーボルトが段階的に降伏して復元力特性の接線数(変曲点)が増加するため、繰返し载荷下の履歴が複雑になる^{7,11-12)}。また、柱脚の降伏曲げ耐力・弾性回転剛性は

柱からの圧縮軸力の大きさに比例して増減する^{13,14)}。更に、柱軸力が引張軸力領域に入る場合、ベースプレートと基礎、および、ベースプレートとアンカーボルトのナットとの接触・離間条件により抵抗機構が変化し、これに伴い、復元力特性(履歴性状)が様々に変化する¹⁵⁻¹⁷⁾。このように、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚は、ボルト配置や柱軸力により復元力特性が大きく変化する。このため、一般的なアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の復元力特性においては、その予測が非常に困難な場合がある。

上述の背景より、本論文では、ノンスリップ型露出柱脚を用いて、一般的なアンカーボルト降伏先行露出柱脚では復元力特性の予測が困難になる引張軸力領域を含む変動軸力下の载荷実験^{8),10),15-17)}を行い、ノンスリップ型露出柱脚の優位性を明らかにする。载荷実験は、アンカーボルト配置、変動軸力の種類を実験変数として行う。

* 広島工業大学高性能構造システム開発研究センター

** 広島工業大学工学部建築工学科

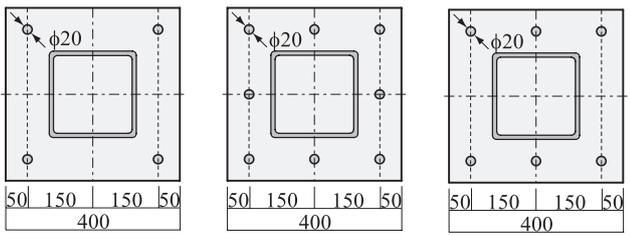
表1 素材特性と主要寸法

材質	E (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	主要寸法 (mm)	
柱	STKR400	205,000	349	□-200x200x12
ベースプレート	SS400	205,000	409	PL-50x400x400
アンカーボルト	ABR400	205,000	273	$\phi_g=14.6$, $abl=629$

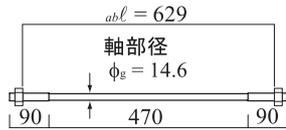
E : ヤング係数 σ_y : 降伏応力度 ϕ_g : 軸部径 abl : 有効長さ

表2 バネの特性

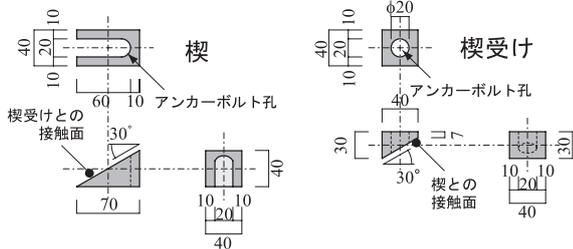
外径 (mm)	バネ径 (mm)	自由長さ (mm)	最大たわみ (mm)	最大荷重 (N)	バネ定数 (N/mm)
26.1	2.0	94.0	70.3	93.5	1.33



(a) ベースプレート (Type 0) (b) ベースプレート (Type I) (c) ベースプレート (Type I')



(d) アンカーボルト



(e) 楔デバイス

図1 試験体

また、通常、復元力特性モデルの定式化を行うには、抵抗機構の変化等を予測して、各抵抗機構毎の評価式（降伏曲げ耐力、弾性回転剛性等）を適用する必要があるが、一般解は非常に煩雑になることが予想される。そこで、抵抗機構の変化等を無視した、簡易復元力特性モデルの定式化を行い、実験結果との整合性を取り、変動軸力下においても、ノンスリップ型露出柱脚の復元力特性は非常に簡便に予測可能であることを示す。尚、変動軸力を受ける柱脚として、本研究では中低層ラーメン構造物の側柱を想定し⁹⁾、主に柱軸力と曲げにより崩壊する柱脚を対象としている。

2. 実験

本実験では、ノンスリップ型露出柱脚付き片持ち柱に、変動軸力と同時に水平繰返し载荷する実験を行う。試験体変数を、アンカーボルト配置、柱軸力 N とする。

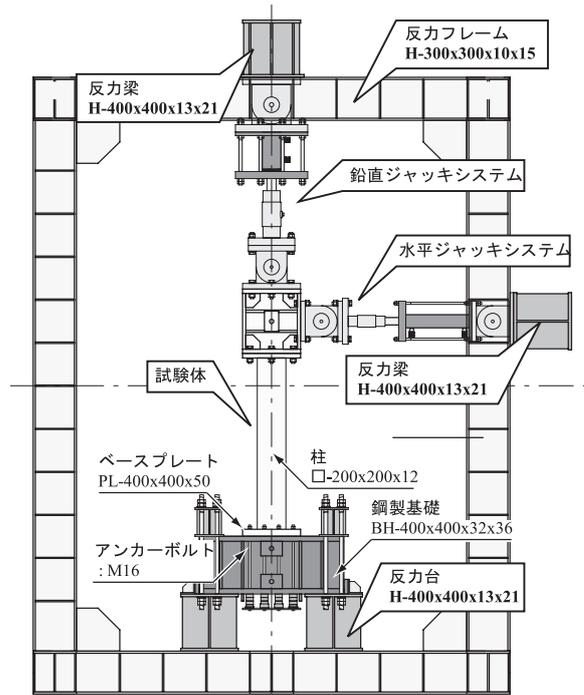


図2 载荷装置

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、各载荷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。更に、ノンスリップ型露出柱脚の装置である楔デバイスが機能するためには、ベースプレートの面外曲げ変形を小さくする必要がある。そのため、各载荷による基礎からの接触反力に対して、圧縮側ベースプレートのヒンジラインを仮定¹⁸⁾し、ベースプレートの曲げ耐力剛性を十分に確保している。

試験体には、ベースプレート隅角部に1本ずつのアンカーボルトを配置したノンスリップ型露出柱脚 (Type0) に1種類の変動軸力を载荷し、また、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 (TypeI, TypeI') に3種類の変動軸力 (Var.I, Var.II, Var.III) を载荷する、合計4種類の試験体を用意した。

柱には□-200x200x12を、ベースプレートには、PL-50x400x400にアンカーボルトをベースプレート隅角部に1本ずつ配置したType0、アンカーボルト8本を3列に均等配置したTypeIおよびアンカーボルト6本を2本ずつ3列に均等配置したTypeI'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の30% (15kN)を初期軸力として導入する。基礎部には、いずれの载荷に対しても塑性化しない、鋼製基礎BH-400x400x32x36を使用する。

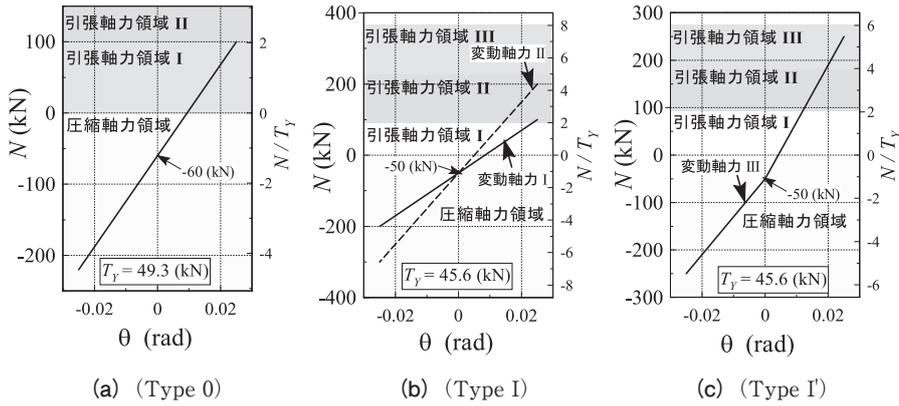


図3 変動軸力の制御方法

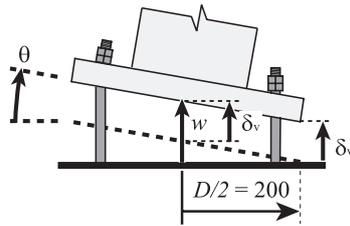


図5 柱脚の変形状態と各種諸量

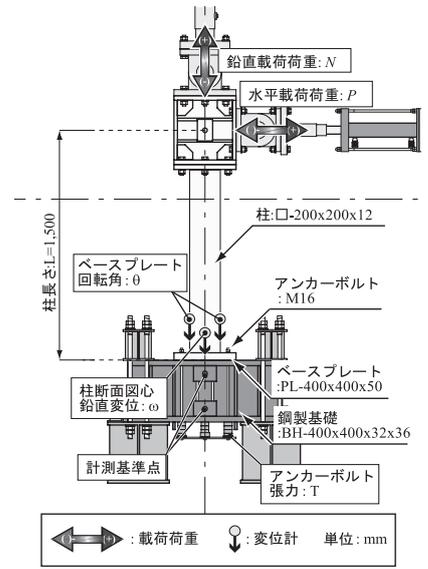


図4 計測位置

楔デバイスの楔および楔受けは、楔貫入角度を 30° 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 μ 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 荷装置と荷方法

図 2, 3 に荷装置、変動軸力を示す。荷は、試験体柱頭部のヨークに接合した鉛直・水平ジャッキにより、柱脚部分に柱軸力 N と曲げモーメント M を作用させるものである。

水平荷は、制御値をベースプレート回転角 θ として、 0.005 (rad) から 0.025 (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を行う。

鉛直荷は、ベースプレート回転角 θ の一次の従属関数となるように変動軸力を荷する。また、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚が引張軸力を受ける場合、引張軸力のみで何列のアンカーボルトが降伏するかにより、発生する抵抗機構が変化する。

このため、Type0 においては、 $N=2.0T_y$ (T_y : アンカーボルト 1 本当たりの降伏軸力) が境となり、以下のように領域を分ける必要がある。

$$0 < N < 4T_y \text{ を満足するとともに,}$$

$$N < 2T_y \quad \text{引張軸力領域 I}$$

$$2T_y \leq N < 4T_y: \quad \text{引張軸力領域 II}$$

このように、1 列のアンカーボルトが降伏するか否かが境となり、2 つの領域に分けられる。

また、TypeI においては、以下のように領域分けを行うことができる。

$$0 < N < 8T_y \text{ を満足するとともに,}$$

$$N < 2T_y: \quad \text{引張軸力領域 I}$$

$$2T_y \leq N < 5T_y: \quad \text{引張軸力領域 II}$$

$$5T_y \leq N < 8T_y: \quad \text{引張軸力領域 III}$$

このように、中央の列に配置された 2 本のアンカーボルトが降伏するか否かと、中央と外側の一列の合計 5 本のアンカーボルトが降伏するか否かが境となり、3 つの領域に分けられる。

本実験では、最大の引張軸力が、それぞれ、Type0 では引張軸力領域 I となるものを、TypeI では引張軸力領域 I, II, III に入る 3 つの変動軸力 Var.I, Var.II, Var.III を荷する。但し、8 本を均等配置した試験体では、引張軸力領域 III の荷を行うのに、 300 (kN) 以上の荷重が必要であり、本実験装置の鉛直ジャッキでは荷能力が不足し、荷できない。このため、外側に配置されたアンカーボルト本数を 2 本に減らした TypeI' で荷実験を行う。このため、引張軸力領域 III の範囲は以下ようになる。

$$0 < N < 6T_y \text{ を満足するとともに,}$$

$$4T_y \leq N < 6T_y: \text{引張軸力領域 III}$$

このため、Var.III は図 3 (c) に示すものを荷する。

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

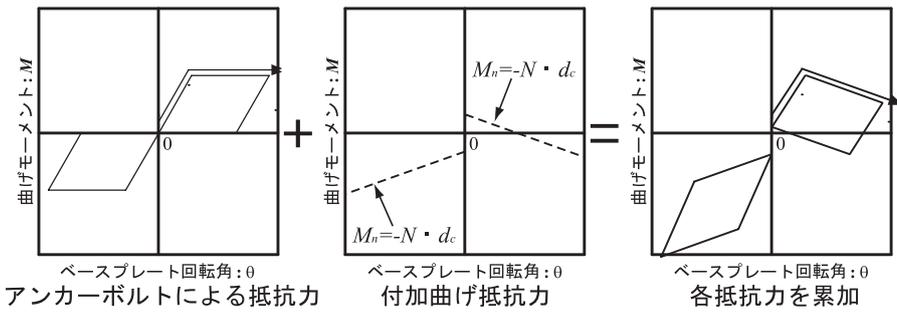


図6 簡易復元力特性モデル

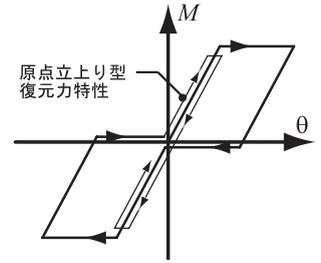


図7 ノンスリップ型露出柱脚の復元力特性モデル

変位 δ_L, δ_R を計測してベースプレート回転角 θ を算出する。また、図5に示す幾何学的条件から求めた以下の式を用いて、ベースプレートと基礎との離間変位 δ_v を算出する。

$$\delta_v = w - \frac{D}{2} \cdot \sin \theta = \frac{\delta_L + \delta_R}{2} - \frac{D}{2} \cdot \sin \theta \quad (1)$$

ここに、 D : ベースプレートの幅である。

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箇所（1箇所当たり、4枚）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. 簡易復元力特性モデル

既報の文献15-17)より、引張軸力・圧縮軸力を受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の場合、複数の抵抗機構が発生することが分かっている。それぞれの抵抗機構における、降伏曲げ耐力、付加曲げ耐力、弾性回転剛性の評価方法は異なり、また、引張軸力領域では軸力の大きさにより、発生する抵抗機構の種類・数が変化するので、抵抗機構の変化を予測して復元力特性をモデル化することは非常に煩雑になる場合もある。更に、変動軸力を受ける場合、時々刻々と引張軸力領域が変化し、発生する抵抗機構を予測すること自体が煩雑であり、一般的な復元力特性モデルの定式化を行うことは容易ではない。

本論文では、簡易復元力特性モデルの定式化手法として、図6に示す、復元力特性モデル定式化手法を用いる。

3.1 仮定

以下の仮定のもと、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. 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. アンカーボルトの抵抗力は、引張側に位置しているボルトのみを考慮する。
5. 柱脚の復元力特性は図7に示すように、原点立上り型の復元力特性とする¹⁻¹⁰⁾。
6. 複数列抵抗する場合は、各アンカーボルト列の復元力特性を累加したものを柱脚の復元力特性とする^{6,7)}。
7. 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 降伏曲げ耐力と弾性回転剛性

任意 i 列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。

$${}_i M_y = {}_i n \cdot {}_{ab} A \cdot {}_{ab} \sigma_y \cdot (d_c + d_t) \quad (2)$$

$${}_i K_{BS} = \frac{E \cdot {}_i n \cdot {}_{ab} A \cdot (d_c + d_t)^2}{R \cdot {}_{ab} \ell} \quad (3)$$

ここに、 n : i 列の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_i : i 列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)¹³⁾、 ${}_{ab} \ell$: アンカーボルトの有効長さである。

3.3 復元力特性モデル

図6に示すように、復元力特性モデルは柱軸力 N による付加曲げの抵抗力を、柱軸力の領域・大きさに関係なく、常に以下の式で評価するものとする。

$$M_n = -N \cdot d_c \quad (4)$$

すなわち、本論文の復元力特性モデルは、アンカーボルトの抵抗力は無軸力下の復元力特性モデルを用い^{6),7)}、柱軸力による付加曲げ抵抗力は軸力の大きさに関係なく圧縮

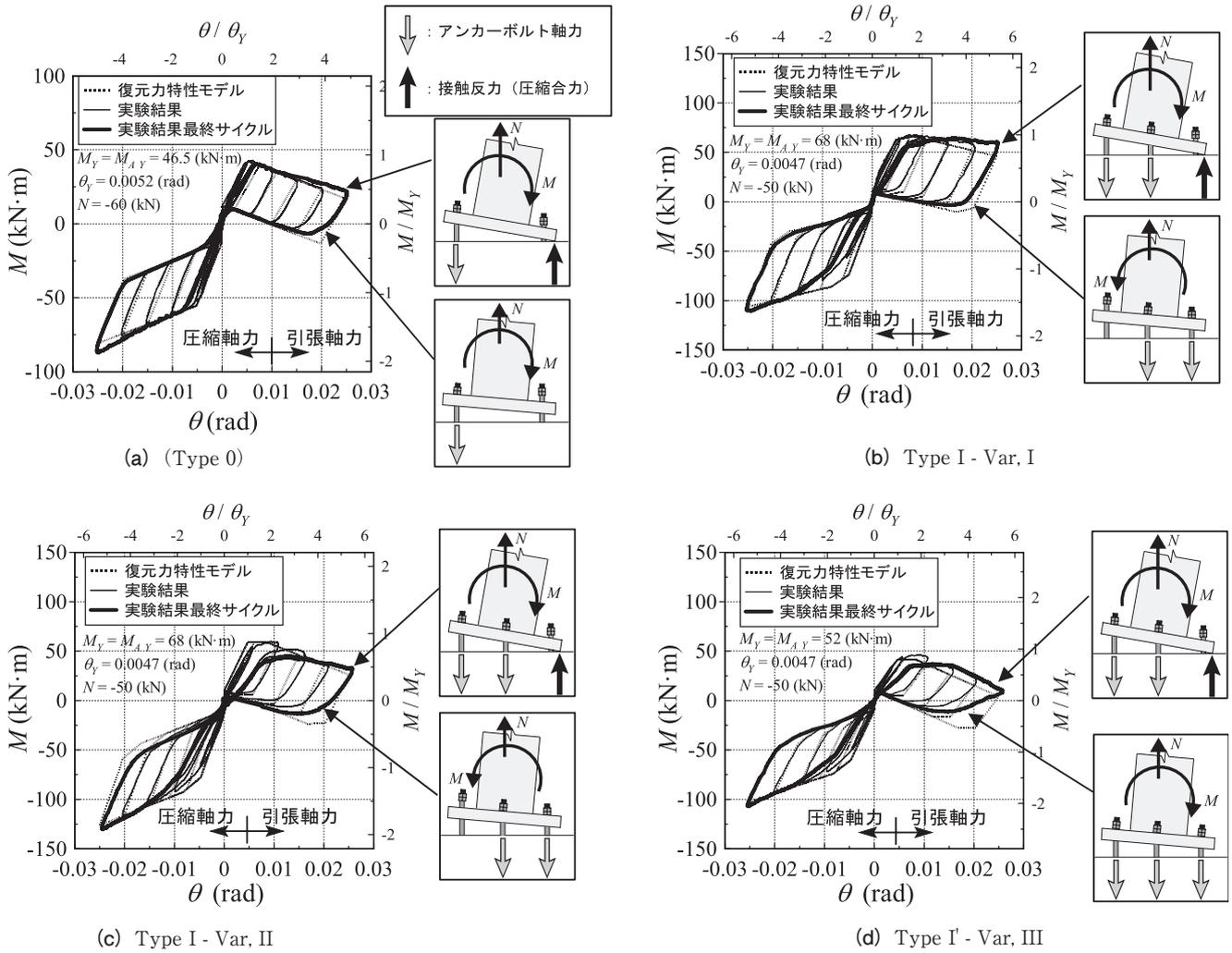


図8 部曲げモーメント M - ベースプレート回転角 θ 関係

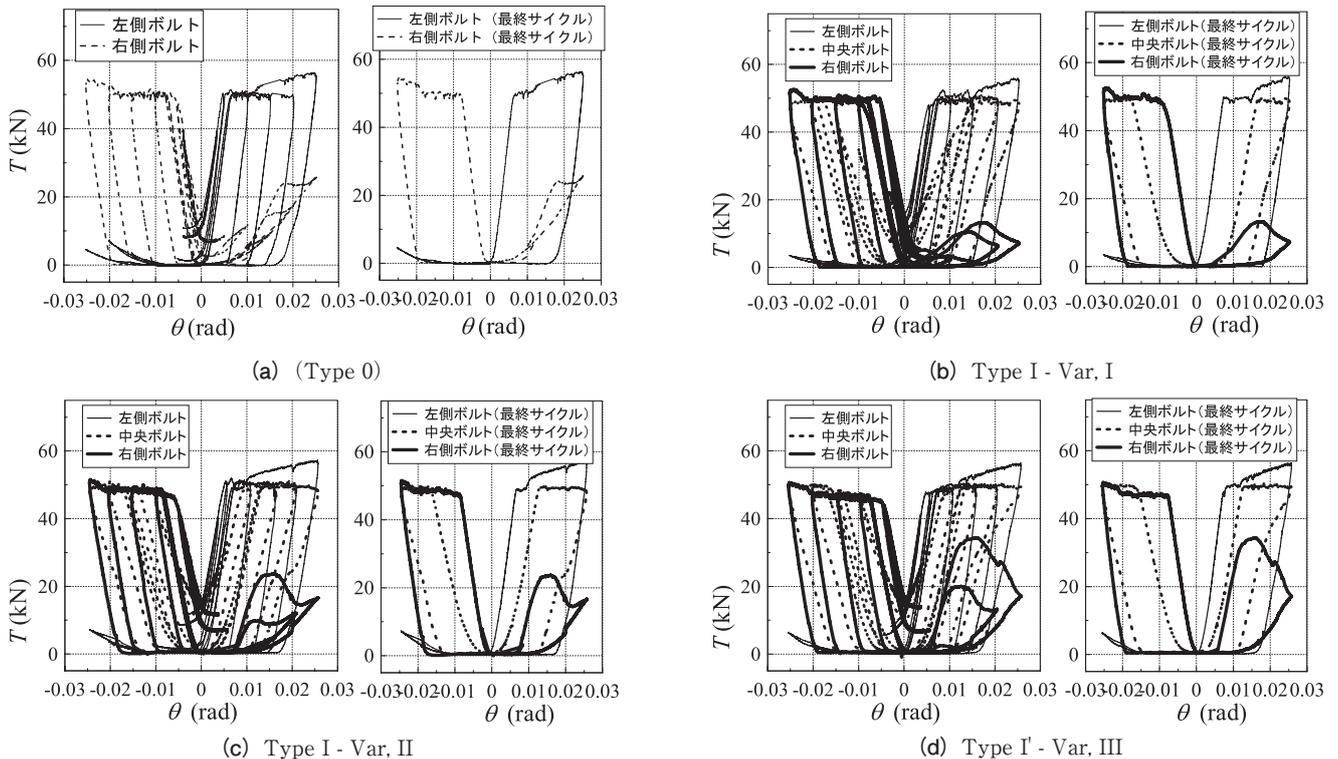


図9 アンカーボルト軸力 T - ベースプレート回転角 θ 関係

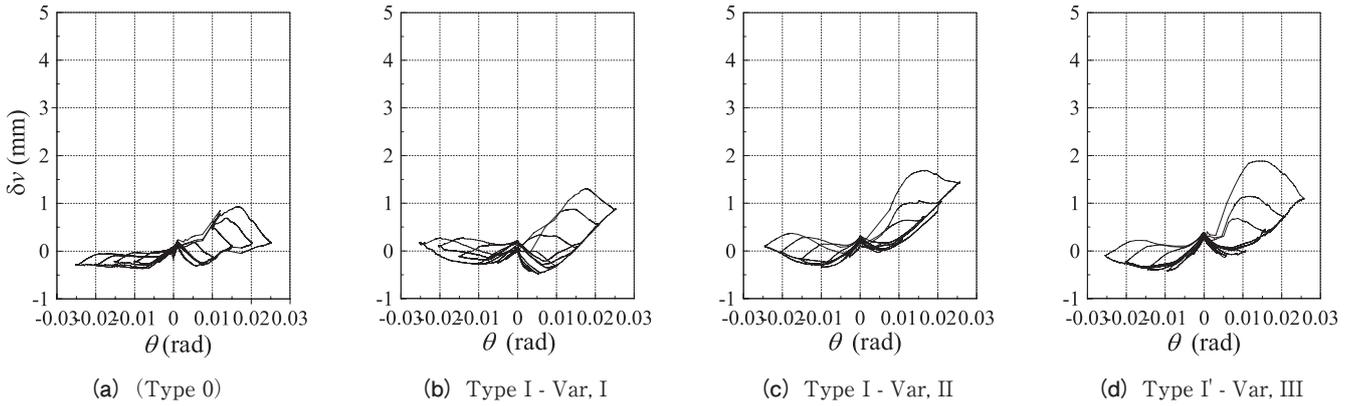


図 10 離間変位 δ_v - ベースプレート回転角 θ 関係

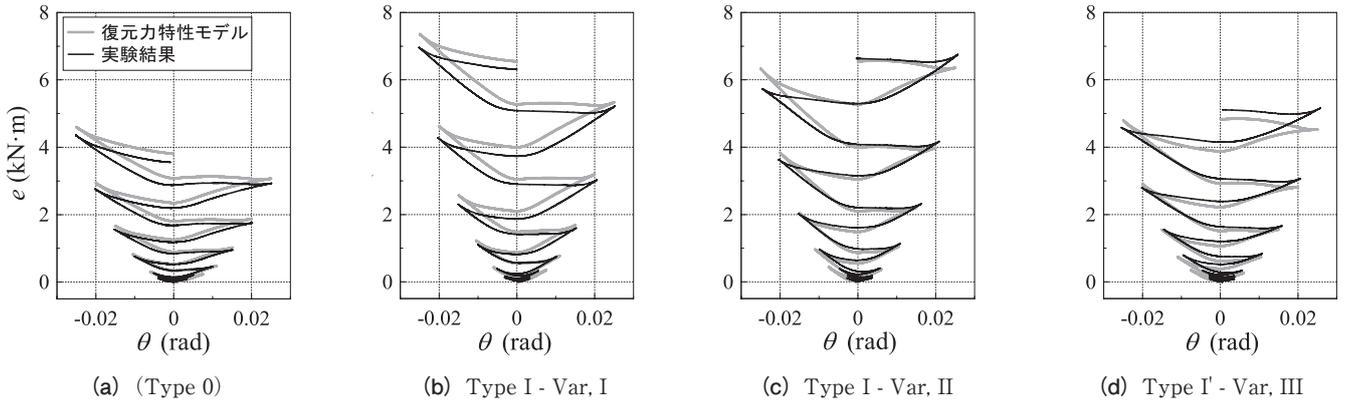


図 11 エネルギー吸収量 e - ベースプレート回転角 θ 関係

軸力下と同様の方法³⁾で算出し、これ等を累加したものと
する。

4. 実験結果と考察

図 8～11 に各試験体の実験結果を、それぞれ、示す。
図 8 に曲げモーメント M - ベースプレート回転角 θ 関係を、
図 9 にアンカーボルト軸力 T - θ 関係を、図 10 にベース
プレート離間変位 δ_v - θ 関係を、図 11 にエネルギー吸収量 e
- θ 関係を、それぞれ、示す。但し、離間変位は式 (1) より
算出し、エネルギー吸収量は図 8 における復元力特性の
履歴を積分して算出している。

また、図 8 においては、本論文に示している簡易復元力
特性モデルを点線で、原点立上り型復元力特性を明確にす
るために最終サイクルの復元力特性を太線で示す。図 9 に
おいては、最終サイクル除荷時のアンカーボルト抵抗状態
を明確に示すために、最終サイクルの履歴を併せて示して
いる。図 11 においては、復元力特性より求めたエネルギー
吸収量を併せて示している。

尚、図 8 中の右縦軸と上横軸は、式 (2) より求めた降
伏曲げ耐力解析値 M_y と、式 (2), (3) 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 θ_y で無次元化
している。

4.1 復元力特性 (M- θ 関係)

図 8 より、ノンスリップ型露出柱脚は、試験体の形状お
よび変動軸力の大きさに関係なく、いずれの場合におい
てもスリップ現象を改善し、原点立上り型復元力特性を示
している。これは、ベースプレート回転角が 0 に戻った時点
で、柱軸力が圧縮軸力領域に入り、楔がナットとベース
プレートとの間の隙間を埋めることができるからである<sup>8-
10)</sup>。また、引張軸力領域においても、本論文の簡易復元力
特性モデル(引張軸力を受けることによる抵抗機構の変
化等を考慮していないモデル)と実験結果とは、ほぼ対
応している。これは、載荷時には、載荷と共に直ぐアン
カーボルトが抵抗するので、ベースプレートの離間変位
が抑制され(図 10 参照)、引張軸力領域においても基礎
とベースプレートが接触しており、次いで、除荷時には
圧縮側のアンカーボルトが抵抗する(図 9 参照)ことで、
ベースプレートの回転と同じ向きの曲げ抵抗が発生する
ためである。

但し、引張軸力領域 III に入る (d) Type I' - Var. III
については、アンカーボルトに対して引張軸力が大きい
ために、圧縮側のみのアンカーボルトでは軸力に抵抗
できず、曲げ抵抗力が小さくなる。このため、実験結
果と復元力特性モデルとが対応していない。このよ
うに、簡易復元力特性モデルと整合性が取れる限界
がある。

4.2 アンカーボルト軸力

図9より、アンカーボルトの履歴も原点立上り型となり、更に、引張軸力領域においては、圧縮側アンカーボルト（正方向載荷時の右側ボルト）が抵抗している。これは、楔デバイスの機能により、圧縮側アンカーボルトの塑性伸びによる隙間も常に埋められており、引張軸力が作用することで、基礎とベースプレートとが接触している状態においても、圧縮軸力下に比較してベースプレートの鉛直変位が高めになる（図10参照）ためと考えられる。また、引張軸力下の除荷時においては、引張側アンカーボルト（左側ボルト）が抵抗しなくなった分の柱軸力を圧縮側アンカーボルト（右側ボルト）が負担して、除荷と共に軸力が増加している。

尚、最終サイクルにおいて外側ボルトの（右および左側ボルト）の耐力が増加しているのは、塑性変形によりひずみ硬化に達して、軸耐力が増加したためである。

4.3 離間変位

図10より、引張軸力下（正方向載荷）においては、圧縮軸力下（負方向載荷）に比べ、離間変位が高目となっている。これは、引張軸力によりアンカーボルトが伸びているためである。

一方、繰返し載荷下で変動軸力Ⅲのような柱脚の全塑性軸力（アンカーボルトの降伏軸力の総和）近くの軸力を受けても、鉛直変位は2mm以下に抑えることができている。これは、楔デバイスを設置することにより、ボルトの塑性伸びによる緩みを解消するためである。このように、楔デバイスを設置することにより、ベースプレートの離間変位を抑えることができることがわかる。

4.4 エネルギー吸収量

図11より、実験結果と復元力特性モデルより求めたエネルギー吸収量は、ほぼ対応している。復元力特性モデルのエネルギー吸収量は無軸力下のエネルギー吸収量に等しく、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のエネルギー吸収量は無軸力下とほぼ同等の値を期待できることがわかる。

以上より、ノンスリップ型露出柱脚では、アンカーボルト配置および引張軸力に関係なく、スリップ現象を改善すると共に、引張軸力が大きい場合を除けば、非常に簡便に復元力特性モデルの定式化が行える。更に、離間変位も抑えることができ、また、柱脚のエネルギー吸収量は無軸力下と同程度の量を期待できることがわかる。

一般的なアンカーボルト降伏先行型露出柱脚では、アンカーボルトを多数配列した場合や、更に、引張軸力を受け

た場合のモデルの定式化は非常に煩雑になることが分かっている¹⁵⁻¹⁷⁾。更に、引張軸力領域を含む変動軸力下では繰返す毎に離間変位が増加し、また、引張軸力下では復元力特性の履歴の減少が生じるためにエネルギー吸収量は無軸力下より減少する。

ノンスリップ型露出柱脚は、上述の一般的なアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の問題点を改善し、性能評価（復元力特性・エネルギー吸収量の予測）が容易であり、設計上においても非常に優位であることは明らかである。

5. まとめ

ノンスリップ型露出柱脚を用い、アンカーボルト配置および軸力の大きさを変数とした、変動軸力下の繰返し載荷実験から以下の知見が得られた。

1. 様々な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、原点立上り型復元力特性を示す。
2. 変動軸力が引張軸力領域に入る場合においても、ノンスリップ型露出柱脚の実験結果は、本論文で示した簡易復元力特性モデルとほぼ対応している。このため、引張軸力領域を含む変動軸力下においても非常に簡便に評価できる。但し、引張軸力が大きい場合においては、ノンスリップ型露出柱脚でも簡易復元力特性モデルと対応しない場合がある。
3. 楔デバイスの機能により、アンカーボルトの塑性伸びによる緩みを解消して、引張軸力が作用しても直ぐにアンカーボルトが抵抗するため、引張軸力を受ける場合においてベースプレートの離間変位を抑えることができる。
4. エネルギー吸収量は、無軸力下とほぼ同等の量が得られる。このため、変動軸力下においても、エネルギー吸収量が容易に予測できる。

本論文で検討したいずれの実験結果においても、一般的なアンカーボルト降伏先行型露出柱脚に比較して優位な性能を有している。また、復元力特性およびエネルギー吸収量等の設計における重要な性能も容易に評価できるため、設計上においても非常に優位であることは明らかである。

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 Reserch, Vol.61, pp.942-961, 2005.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 小澤拓雄, 松尾彰: 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復元力特性, 鋼構造年次論文報告集, 第16巻, pp.283-290, 2008.11.
- 9) 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.
- 10) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松村高良, 松尾彰: 引張領域を含む変動軸力を受けるノンスリップ型露出柱脚の抵抗特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻 第642号, pp.1495-1502, 2007.11.
- 11) 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.
- 12) Teruaki YAMANISHI, Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Akira MATUSO: Restoring force characteristics for anchor-bolt-yield-type exposed column-base, Proceeding of fifth international conference on "Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA2006)", Japan, pp. 363-369., 2006. 8
- 13) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985. 3.
- 14) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 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73巻 第624号 pp.317-324, 2008. 2.
- 15) 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.
- 16) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松村高良, 松尾彰: 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, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻 第637号 pp.561-567, 2009. 3.
- 17) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松村高良, 松尾彰: 一定軸力を受けるアンカーボルト多数配列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.267-274, 2008.11.
- 18) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: 単調載荷下における鉄骨露出柱脚の FEM 解析, 鋼構造年次論文報告集, 第14巻, pp.689-696, 2006.11.