

アンカーボルト多数配列露出柱脚の2軸曲げ載荷実験

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)

Exposed Column-Base with Multi-Rows of Anchor-Bolts under Bi-Axial Bending

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Teruaki YAMANISHI and Takayoshi MATSUMURA

(Received Oct. 31, 2008)

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 moment, Multi-rows of anchor-bolt, Restoring force characteristics*

1. はじめに

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚は、スリップ型復元力特性を示し、また、アンカーボルトの配置により降伏耐力、弾性回転剛性と共に復元力特性も変化する¹⁻⁸⁾。一般的な柱脚においてはアンカーボルトが多数配列されており、この場合、降伏要素であるアンカーボルトが段階的に降伏するため、復元力特性が折線型となる³⁻⁸⁾。

ところで、これまでのアンカーボルト降伏先行型露出柱脚に関する研究では、1軸曲げ載荷下の柱脚に関する研究が主に行われているが、実際の柱脚においては2軸曲げを受ける場合も想定される。2軸曲げを受ける露出柱脚については、崔、大井等⁹⁻¹⁰⁾により、1軸曲げを受ける場合とは異なる復元力特性を示すことが明らかにされている。ま

た、著者等も、単純なアンカーボルト配列の柱脚(固定柱脚と呼ばれる形式)を用いて、柱脚の2軸曲げ載荷実験を行っている^{11), 12)}。2軸曲げを受けることにより、単純なアンカーボルト配列の柱脚においても、アンカーボルトの列数が複数になり、このことに起因して復元力特性が折線型になること、更に、アンカーボルト列が柱断面図心線上に位置する場合は、その列が不連続なスリップ現象を示し^{1), 2), 12)}、復元力特性が複雑になることを明らかにしている。

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“ノンスリップ型柱脚”と呼び研究してきた^{1-8), 12)}。このノンスリップ型柱脚は、スリップ現象の改善のみではなく、多数配列することや2軸曲げ

* 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 アンカーボルト4配置0-degの試験体の素材特性と主要寸法

00-deg	材質	E (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	主要寸法 (mm)
柱	STKR400	205,000	349	447	Box-200x200x12
ベースプレート	SS400	205,000	409	507	PL-400x400x50
アンカーボルト	:S ABR400	205,000	305	445	$\phi = 14.6, l = 446$
	:N ABR400	205,000	307	445	$\phi = 14.6, l = 576$

表2 アンカーボルト4配置15, 30, 45-degの試験体の素材特性と主要寸法

15-deg, 30-deg, 40-deg	材質	E (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	主要寸法 (mm)
柱	STKR400	205,000	440	495	Box-200x200x12
ベースプレート	SS400	205,000	244	425	PL-400x400x50
アンカーボルト	:S ABR400	205,000	315	458	$\phi = 14.6, l = 590$
	:N ABR400	205,000	315	458	$\phi = 14.6, l = 629$

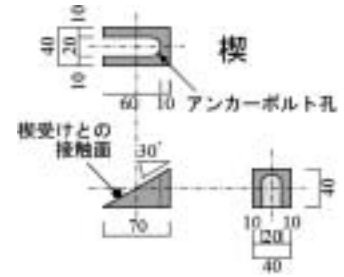
表3 アンカーボルト8配置従来型の試験体の素材特性と主要寸法

S-00-deg S-15-deg S-30-deg S-45-deg	材質	E (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	主要寸法 (mm)
柱	STKR400	205,000	440	495	Box-200x200x12
ベースプレート	SS400	205,000	244	425	PL-400x400x50
アンカーボルト	ABR400	205,000	315	458	$\phi = 14.6, l = 600$

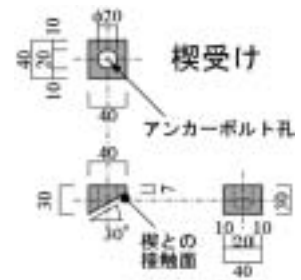
表4 アンカーボルト8配置ノンスリップ型の試験体の素材特性と主要寸法

N-00-deg N-15-deg N-30-deg N-45-deg	材質	E (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	主要寸法 (mm)
柱	STKR400	205,000	305	460	Box-200x200x12
ベースプレート	SS400	205,000	213	417	PL-400x400x50
アンカーボルト	ABR400	205,000	271	434	$\phi = 14.6, l = 600$

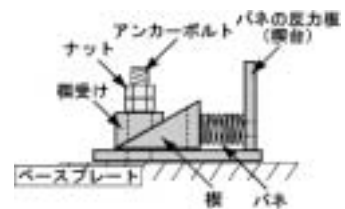
E : ヤング係数 σ_y : 降伏応力度 σ_u : 引張強さ ϕ : 軸部径 l : 有効長さ



(a) 楔



(b) 楔受け

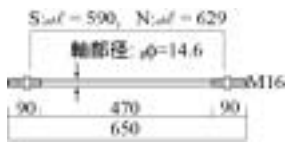


(c) 楔デバイスセットアップ

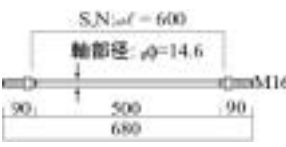
図2 楔デバイス形状



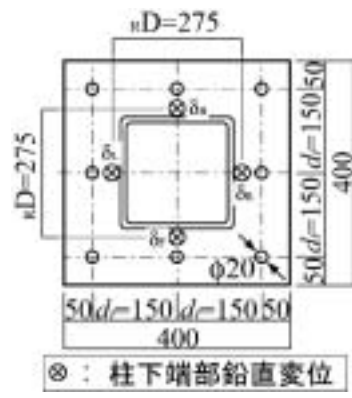
(a) アンカーボルト (S4type)



(b) アンカーボルト (N4type)



(c) アンカーボルト (8type)



(d) ベースプレート

図1 試験体形状

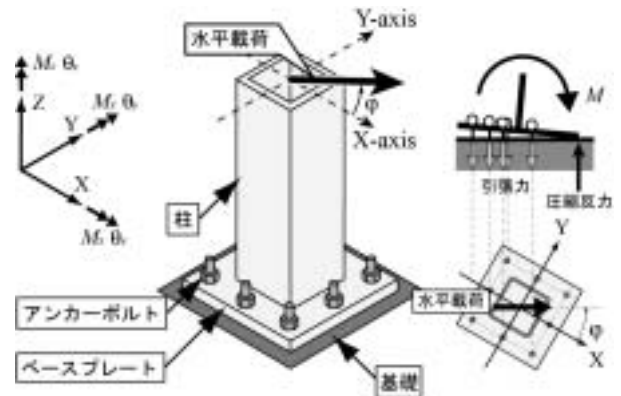


図3 2軸曲げを受ける露出柱脚の抵抗機構

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), 12)}。更に、多数配列した場合においては、弾性範囲のアンカーボルトを残すことで、セルフセンタリング性能が得られることも明らかにしてきた⁵⁾。

これまでの研究では、2軸曲げを受ける場合は、単純なアンカーボルト配列の柱脚についてのみ行っており、多数配列型が2軸曲げを受ける場合において、復元力特性が複雑化すること、ノンスリップ型柱脚がセルフセンタリング

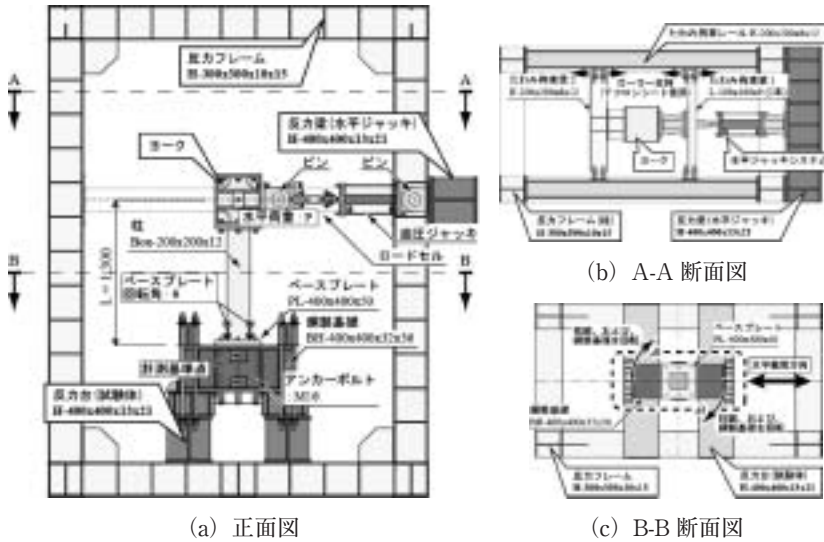


図4 載荷装置

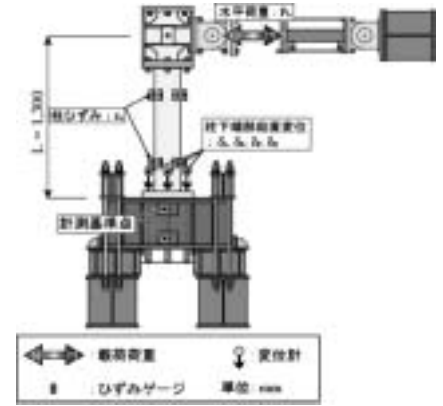


図5 計測装置

表5 バネ特性

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

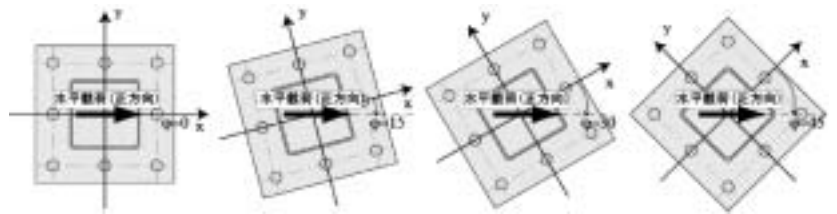


図6 荷重方向とアンカーボルト位置関係

性能を有しているか否かの検証は行っていない。

そこで、本論文では、アンカーボルトを多数配列した露出柱脚の2軸曲げ載荷実験を行い、その実験結果より、2軸曲げ載荷下の復元力特性を明らかにする。また、単純なアンカーボルト配列の柱脚との比較検討を行い、アンカーボルトを多数配列した場合の抵抗特性を明らかにする。

2. 実験概要

本実験では、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚付き片持ち柱を用いて載荷実験を行う。実験変数は、水平荷重角度、および楔デバイスの有無とする。尚、比較のため1軸曲げの載荷実験も行う。

2.1 試験体概要

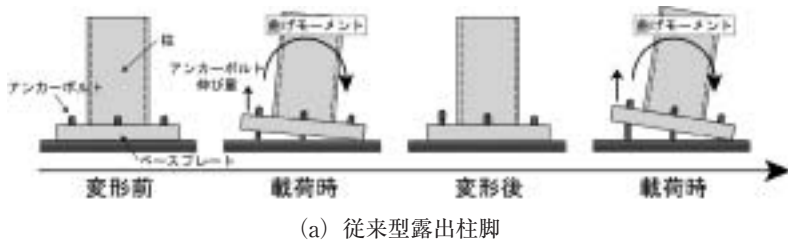
表1, 2, 3, 4, 5に試験体の素材特性と主要寸法、および、楔デバイスに用いるバネの特性を示す。また、図1, 2に試験体形状、および、楔デバイス形状を示す。尚、本実験では、ベースプレート、柱、および、基礎部分には、各載荷に対して弾性範囲に留まる素材特性・断面特性を採用している。

試験体は、従来型露出柱脚(S)の水平荷重角度： ϕ を 0° (S-00-deg)とした1軸曲げ、 15° (S-15-deg)、 30° (S-30-

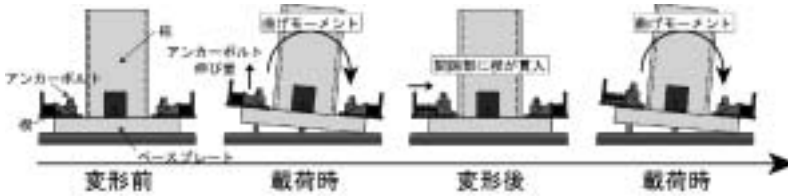
deg)および 45° (S-45-deg)とした2軸曲げの場合と、ノンスリップ型露出柱脚(N)の水平荷重角度を 0° (N-00-deg)とした1軸曲げ、 15° (N-15-deg)、 30° (N-30-deg)および 45° (N-45-deg)とした2軸曲げの場合、合計8種類を用意した。

柱には Box-200x200x12、ベースプレートには PL-400x400x50 を使い、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% (=15(kN))を初期張力として導入する。基礎部には、いずれの載荷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。このため、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。本実験で用いた楔デバイスは、静止摩擦係数： $\mu=0.78$ であり、楔が滑らないように貫入角度を30度としている。また、図2(c)からも解るように、楔デバイスに用いるバネは、

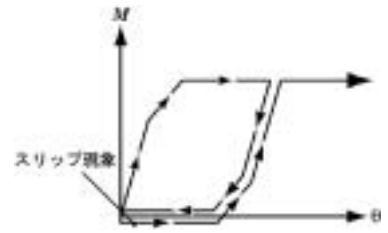


(a) 従来型露出柱脚

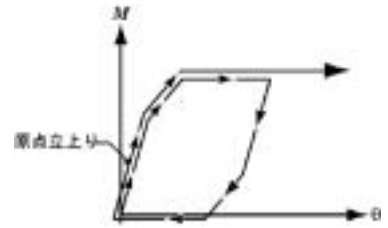


(b) ノンスリップ型露出柱脚

図7 従来型露出柱脚とノンスリップ型露出柱脚の作動概念



(a) 従来型露出柱脚



(b) ノンスリップ型露出柱脚

図8 従来型とノンスリップ型の復元力特性

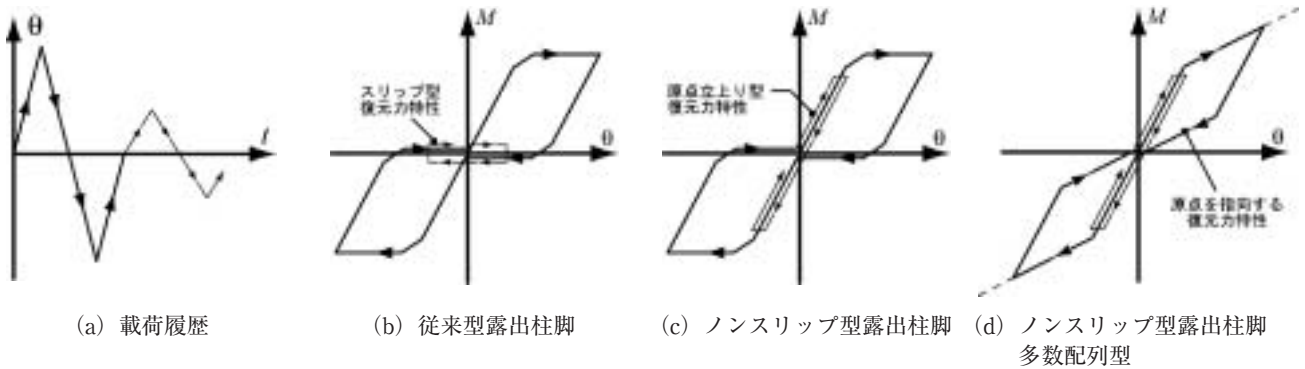


図9 ノンスリップ型露出柱脚のセルフセンタリング性能

楔を水平移動させる程度の復元力を有していれば良いので、表5に示す程度の小さなバネ定数を持つバネを用いている。

2.2 載荷装置と載荷方法

図3, 4, 6に載荷方法の概念図, 本実験で用いる載荷装置, 各載荷方向とアンカーボルト位置関係を示す。載荷装置は, 試験体柱頭部のヨークへ水平ジャッキを接合し, 水平載荷を行うものである。図4(c)に示すように, 試験体設置時に水平載荷角度: φ だけ試験体を回転させて設置し y 軸回りおよび x 軸回りに同時に曲げ載荷する繰返し載荷実験を行う。また, 載荷制御値は4本配置時では, y 軸回りのベースプレート回転角: θ_y を制御値として, 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繰返し載荷とする。そして, 8本配置時では x 軸および y 軸から求めた回転角: θ_x, θ_y を用いて求めた水平載荷方向の回転角を制御値とし, 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繰返し載荷とする。

尚, 水平載荷角度: φ を有することで, 試験体が載荷方向と直交方向にたわむ可能性がある。このため, 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), ヨークを載荷方向に移動自由なローラー支持としている。これにより, 載荷方向のみに, 強制変位を与えられる載荷となる。

2.3 計測方法と整理方法

図5に計測位置を示す。変位としては, 柱下端部の鉛直変位: $\delta_L, \delta_R, \delta_F, \delta_B$ を計測し, 載荷方向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 を計測する。また, ひずみゲージを柱に2断面 (1

断面あたり8箇所)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柱脚部モーメント： M_x 、 M_y を算出する。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_h と一致することを確認して、校正を行っている。

各軸回りの回転角： θ_x 、 θ_y 、直交方向回りの回転角： φ 、直交方向回りの曲げモーメント： M を以下の式より求める。

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

$$M = M_y \cdot \cos\varphi + M_x \cdot \sin\varphi, \quad (2.a, b)$$

ここに、 δ_L 、 δ_R 、 δ_F 、 δ_B ：柱下端部鉛直変位(図3(b)参照)、 $R D$ ：変位計間距離(図3(b)参照)、 φ ：柱脚部に作用する曲げ合力の回転角とy軸との軸角である。

3. 従来型露出柱脚とノンスリップ型露出柱脚の抵抗の違い

図7、8に、各露出柱脚の作動概念と復元力特性を、それぞれ示す。

○従来型露出柱脚の抵抗

従来型の露出柱脚では、地震外力により柱脚に曲げモーメント作用した時、図7(a)のように、アンカーボルトに塑性伸びが起こる。このため、ベースプレートとナットとの間に間隙が生じる。この時、再度曲げモーメントが作用しても、アンカーボルトは抵抗できず、回転角だけ進行する。これにより、スリップ現象が発生する。

○ノンスリップ型露出柱脚の抵抗

ノンスリップ型露出柱脚に地震外力が作用すると、従来型露出柱脚と同様にアンカーボルトが伸ばされ、降伏して塑性伸びが生じる。アンカーボルトの塑性伸びにより、ナットとベースプレートとの間に間隙が発生するが、この間隙にバネの力により楔を貫入させることで間隙が消滅する。このため、再度地震外力が作用した際も、柱脚は緩むことなく直ぐに地震外力に抵抗する。

このような楔デバイスの機能により、弾塑性繰返し載荷下におけるスリップ現象が解消され、図8(b)に示すように、原点立上り型の復元力特性となる。

○繰返し載荷下の抵抗特性

図9に正負交番繰返し載荷時のノンスリップ型と従来型露出柱脚の復元力特性を模式的に示す。載荷は、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とする。

従来型では、小さな振幅時にスリップ現象が生じる。一方、ノンスリップ型では載荷時に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(d)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、これら、載荷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. 実験結果

図10、14(a)、表6(a)にアンカーボルト4本配置在来型露出柱脚の実験結果を、図11、図14(b)、表6(b)にアンカーボルト8本配置在来型露出柱脚の実験結果を示し、図12、15(a)、表7(a)にアンカーボルト4本配置ノンスリップ型露出柱脚の実験結果を、図13、図15(b)、表7(b)にアンカーボルト8本配置ノンスリップ型露出柱脚の実験結果を示す。

図10～15には、柱脚の曲げモーメント： M —ベースプレート回転角： θ の関係を、表6、7には実験結果より求められた曲げモーメント： M の正負の最大値と、その正負の最大値の比を記載した。尚、図10～13中において、実験結果を実線で、最終サイクルの実験結果を太線で示す。

4.1 従来型露出柱脚

○アンカーボルト4本配置の特徴

図10より、従来型露出柱脚のアンカーボルト4本配置時では、いずれの載荷角度においても、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14(a)より、 0° 、 15° 、 30° 、 45° の順に降伏耐力が増加している。更に、 45° の場合は正方向および負方向載荷の復元力特性に差異があり、他の載荷角度に比べて復元力特性が複雑になっている。これは、 45° の場合、柱断面図心上にアンカーボルトが配置されており、正方向および負方向載荷時共に抵抗するため、正方向での塑性伸びの影響が負方向にも現れる不連続なスリップ現象が現れる影響である。

○アンカーボルト8本配置の特徴

図11より、従来型露出柱脚のアンカーボルト8本配置時では、いずれの載荷角度においても、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、 0° の場合、正方向および負方向載荷の復元力特性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による影響である。このため、柱断面図心上にされていない 15° 、 30° では、正負の載荷方向の差異があまり生じていない。次いで、図14(b)、表6(6)より、降伏耐力は載荷角度が上昇するほど増加しているが、その増加率は、4本配置に比較して低い。これは、8本配置では柱を囲うようにアンカーボルトが配置されており、載荷角度が変化するこ

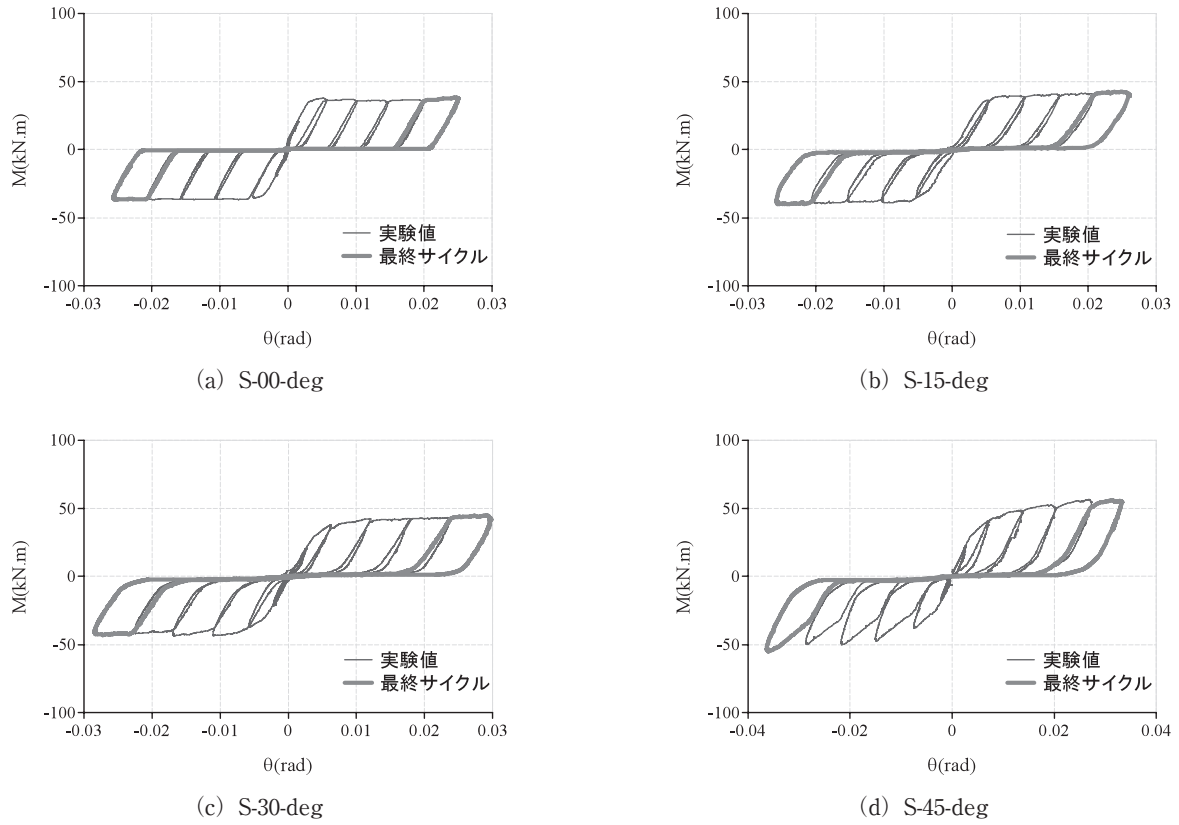


図10 アンカーボルト4本配置従来型露出柱脚

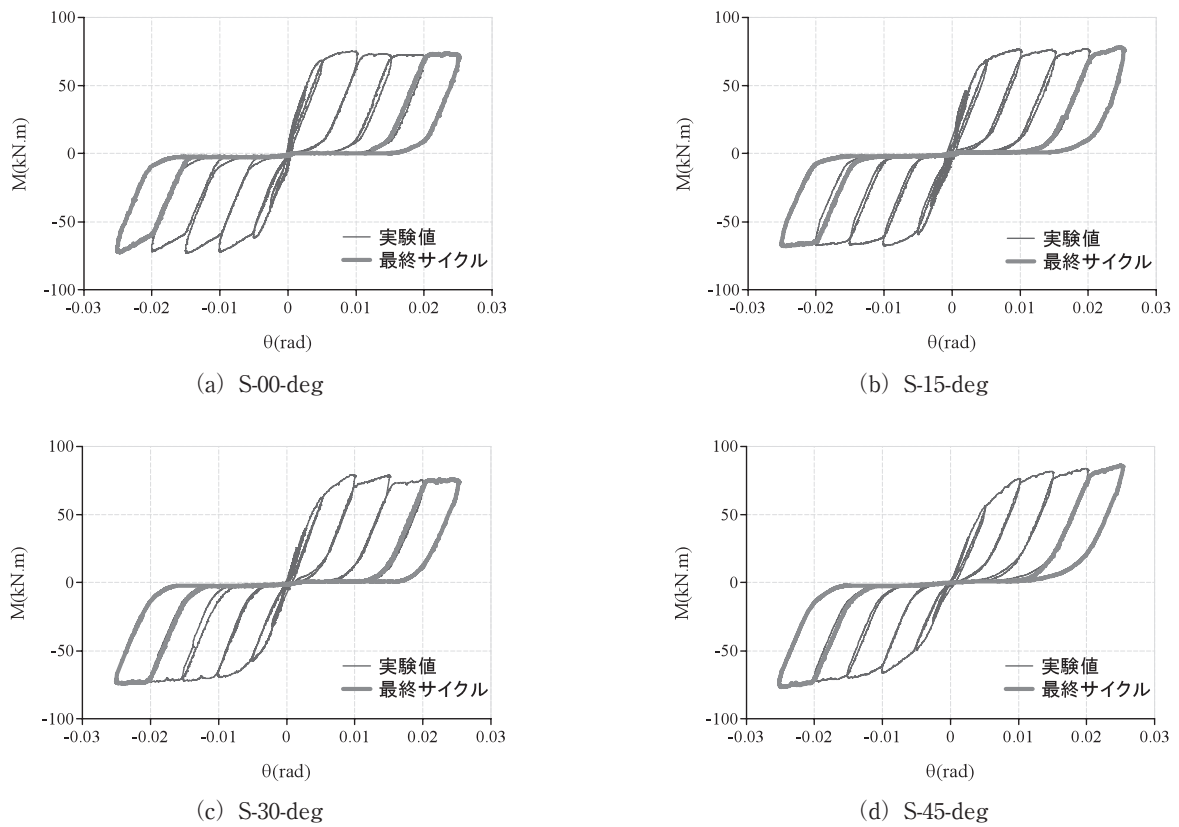


図11 アンカーボルト8本配置従来型露出柱脚

アンカーボルト多数配列露出柱脚の2軸曲げ荷実験

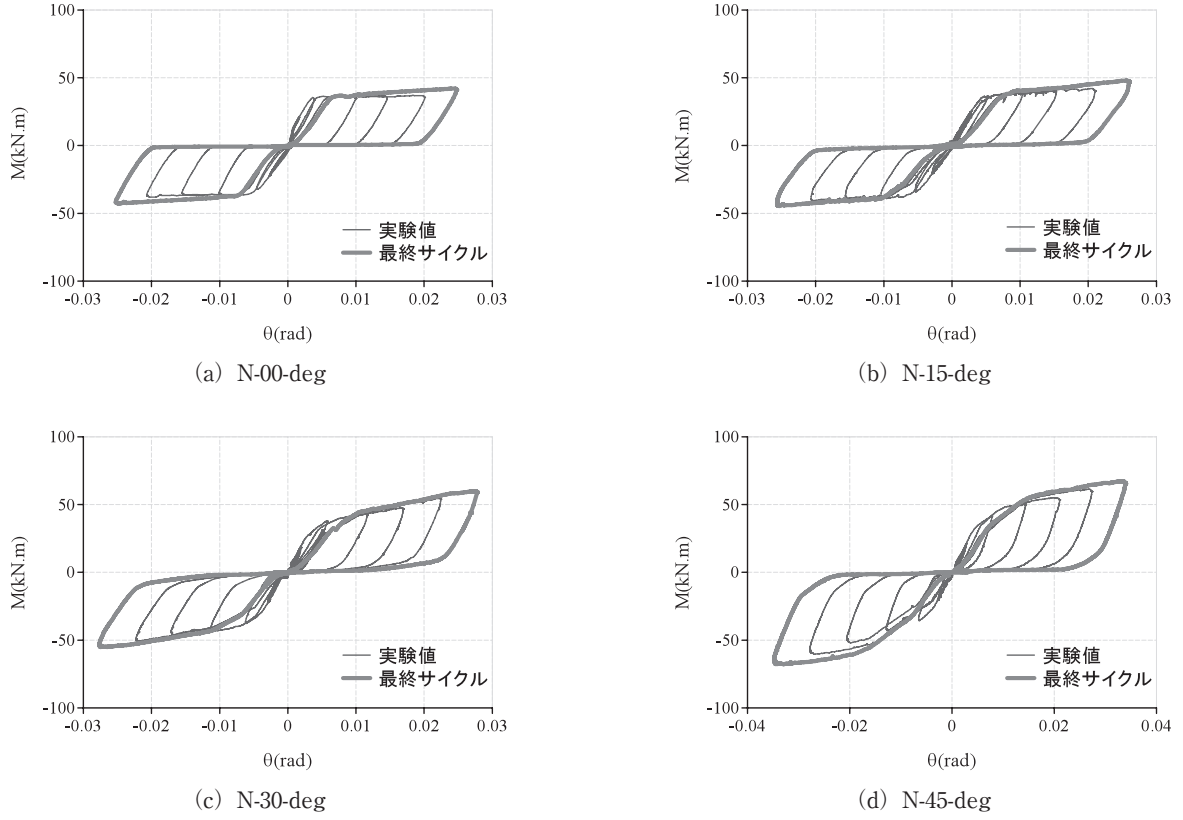


図 12 アンカーボルト 4 本配置ノンスリップ型露出柱脚

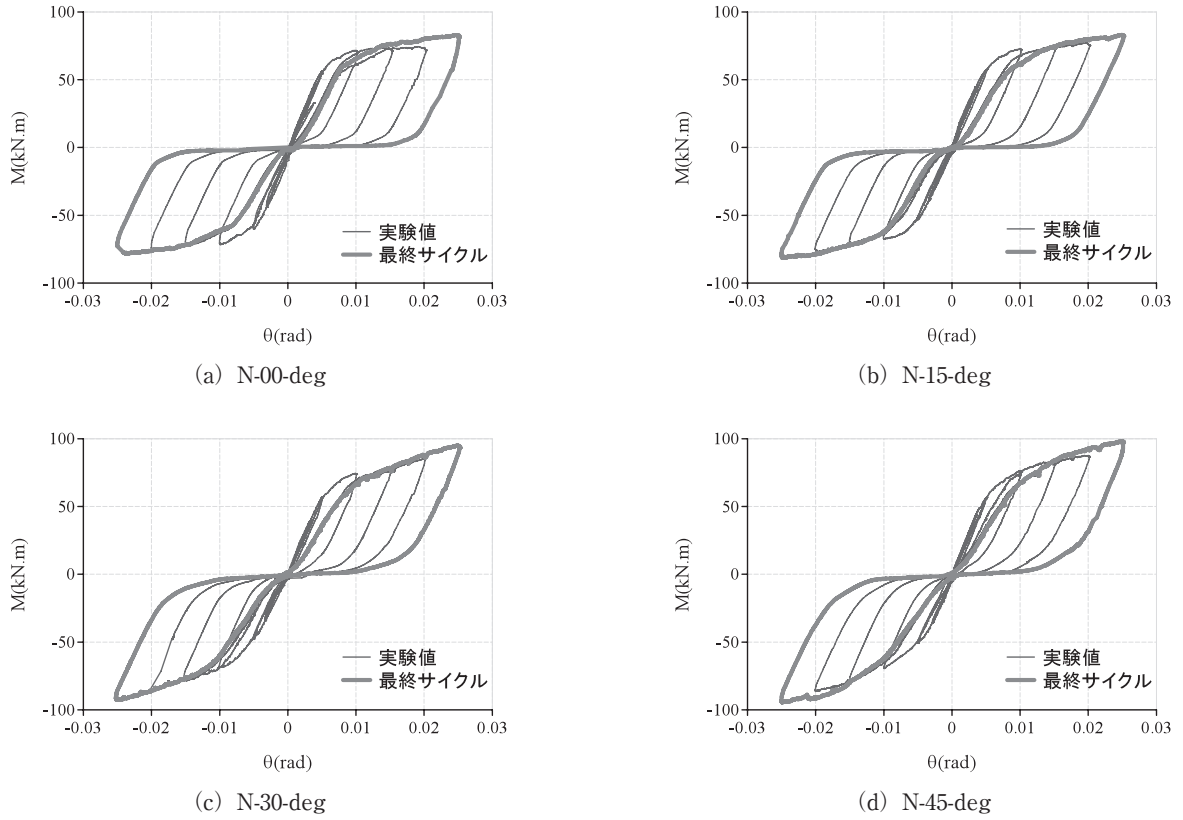
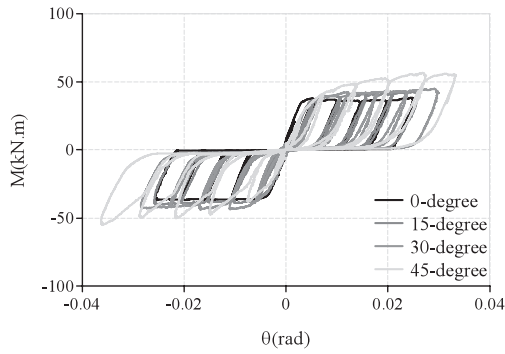
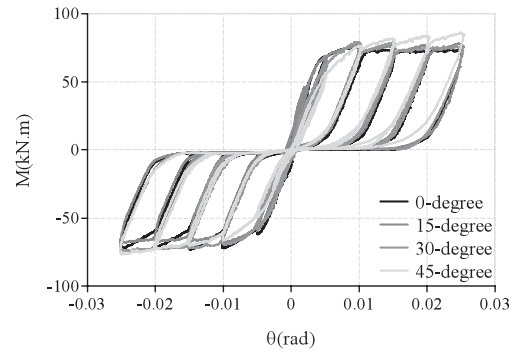


図 13 アンカーボルト 8 本配置ノンスリップ型露出柱脚

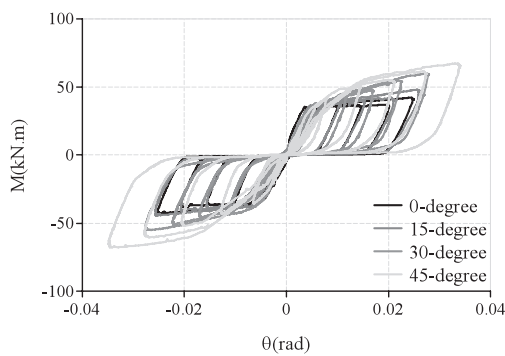


(a) アンカーボルト4本配置従来型露出柱脚

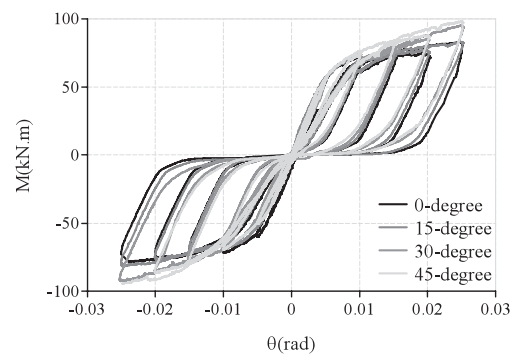


(b) アンカーボルト8本配置従来型露出柱脚

図14 従来型露出柱脚



(a) アンカーボルト4本配置ノンスリップ型露出柱脚



(b) アンカーボルト8本配置ノンスリップ型露出柱脚

図15 ノンスリップ型露出柱脚

表6 従来型露出柱脚の載荷方向における耐力と耐力比

(a) アンカーボルト4本配置従来型露出柱脚

回転角	載荷方向	耐力 (kN・m)	正負耐力比
0-deg	正	38.38	1.04
	負	-36.82	
15-deg	正	42.42	1.06
	負	-40.05	
30-deg	正	45.12	1.03
	負	-43.75	
45-deg	正	56.45	1.03
	負	-54.90	

(b) アンカーボルト8本配置従来型露出柱脚

回転角	載荷方向	耐力 (kN・m)	正負耐力比
0-deg	正	75.30	1.03
	負	-73.05	
15-deg	正	77.96	1.15
	負	-67.86	
30-deg	正	79.26	1.07
	負	-74.24	
45-deg	正	86.13	1.12
	負	-76.65	

表7 ノンスリップ型露出柱脚の載荷方向における耐力と耐力比

(a) アンカーボルト4本配置ノンスリップ型露出柱脚

回転角	載荷方向	耐力 (kN・m)	正負耐力比
0-deg	正	42.14	0.98
	負	-42.81	
15-deg	正	48.03	1.08
	負	-44.58	
30-deg	正	59.92	1.09
	負	-55.10	
45-deg	正	67.16	0.99
	負	-67.80	

(b) アンカーボルト8本配置ノンスリップ型露出柱脚

回転角	載荷方向	耐力 (kN・m)	正負耐力比
0-deg	正	82.88	1.06
	負	-78.21	
15-deg	正	83.07	1.02
	負	-81.34	
30-deg	正	95.09	1.03
	負	-92.49	
45-deg	正	98.12	1.04
	負	-94.53	

とによる、アンカーボルトの配置の変化が少ないためと思われる。

4.2 ノンスリップ型露出柱脚

○アンカーボルト4本配置の特徴

図12より、ノンスリップ型露出柱脚のアンカーボルト4本配置時では、いずれの載荷角度においても、原点立上り型復元力特性を示している。また、図15(a)より、従来型同様に、載荷角度が上昇することにより降伏耐力が増加している。次いで、載荷角度が上昇すると復元力特性が折線型となり、これは、抵抗アンカーボルトの列数が増加する影響である。更に、N-30-degとN-45-degにおいては、除荷時の復元力特性が明確な折線型となっており、セルフセンタリング性能を期待できるといえる。

更に、従来型では、45°方向載荷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アンカーボルトの塑性伸びによるスリップ現象が改善されるため、正方向および負方向の復元力特性に差異が生じない。

○アンカーボルト8本配置の特徴

図13より、ノンスリップ型露出柱脚のアンカーボルト8本配列時では、いずれの載荷角度においても、原点立上り型復元力特性を示している。また、図15(b)より、従来型と同様に、載荷角度が上昇しても降伏耐力が殆ど増加していない。1軸載荷下では、Tri-linear型の復元力特性を示していたが、載荷角度が上昇すると復元力特性が折線型となり、これは、抵抗アンカーボルトの列数が増加する影響である。このように、アンカーボルト多数配列したノンスリップ型露出柱脚の場合、いずれの載荷角度においても、Tri-linear型か折線型の復元力特性を示すので、除荷時にセルフセンタリング性能が期待できると言える。

更に、従来型では0°方向載荷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アンカーボルトの塑性伸びによるスリップ現象が改善されるため、正方向および負方向の復元力特性に差異が生じない。

以上より、アンカーボルトを多数配置した場合においても、復元力特性は折線型になると共に、従来型ではスリップ現象型の復元力特性を、ノンスリップ型では原点立上り型の復元力特性を示している。また、4本配置の場合、載荷角度が上昇することで抵抗力が大きく上昇していたが、8本配置の場合、4本配置ほどの上昇率は見られない。

また、4本配置の載荷角度が30°、45°の場合や8本配置した場合のノンスリップ型露出柱脚であれば、2軸曲げを

受ける場合においても、除荷時に明確な折線型の復元力特性を示すので、セルフセンタリング性能が期待できるといえる。

5. 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、従来型柱脚はスリップ型復元力特性を、ノンスリップ型柱脚は原点立上り型の復元力特性を示す。
2. アンカーボルトを多数配列した場合、2軸曲げを受けると、載荷方向の曲げ降伏耐力は1軸曲げ載荷下のもの耐力と比較して1割程度増加する。
3. アンカーボルトを多数配列したノンスリップ型柱脚においては、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。

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、本研究の経費の一部は、社団法人日本鉄鋼連盟「2008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。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) 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985.3.
- 2) 高松隆夫，鋼木弘和，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.
- 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 卷, pp.181-188, 2005.11.
- 9) 崔宰赫, 大井謙一, 嶋脇興助: 繰り返し 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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 卷 第 643 号, 2008.12.