

2軸曲げを受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の 復元力特性モデル

高松 隆夫*, 玉井 宏章*, 山西 央朗**, 松村 高良***, 山石 健司***

(平成20年10月31日受理)

Models of Restoring Force Characteristics for Anchor-Bolt-Yield-Type Exposed Column-Base under Bi-Axial-Bending

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

(Received Oct. 31, 2008)

Abstract

An experimental study of slip-type and non-slip-type exposed column bases subjected to cyclic bi-axial bending moment was made to investigate restoring force characteristics. Based on the test results the following conclusions were drawn:

- 1) Non-slip-type column bases showed non-slip-type multi-linear cyclic curves, linear from the origin at each loading cycle.
- 2) Slip-type column bases showed complicated slip-type cyclic curves, especially in 45-degree cyclic loading because of plastic elongation of central-row of anchor-bolts.
- 3) Performance of energy absorption of non-slip-type column bases on cyclic loading tests was better than slip-type ones.

Keywords: bi-axial bending, anchor-bolt-yield-type, restoring force characteristics, cyclic test

1. はじめに

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚におけるスリップ現象を改善するために、著者等は、“楔デバイス”を設置することで、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を提案・開発している^{1~9)}。この“楔デバイス”は、非常に単純な動作・機構を有しているため、楔の移動に障害が生じない限り、期待する性能が得られると考えられる。しかしながら、これまでは、無軸力、及び、

一定圧縮軸力下での載荷実験を中心に行っており、未だ、実構造物において想定される様々な載荷下での検証は行っていない。

実際の構造物においては、地震外力が任意方向から作用するため、柱脚には2軸曲げが作用する可能性がある。2軸曲げ載荷下の露出柱脚については、文献^{10), 11)}で実験的研究がなされており、終局耐力は1軸曲げ載荷下の評価方法を拡張することで評価できることを示している。

また、著者等もアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の立

* 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 1 軸曲げ試験体の素材特性と主要寸法

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

表 2 2 軸曲げ試験体の素材特性と主要寸法

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

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

表 3 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

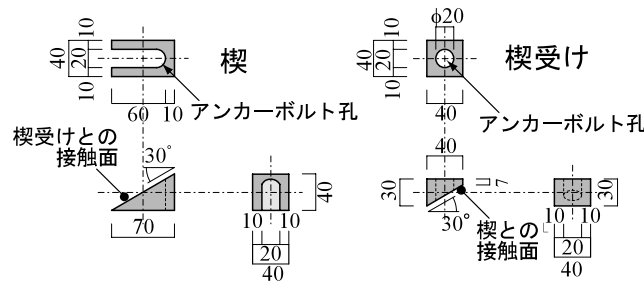
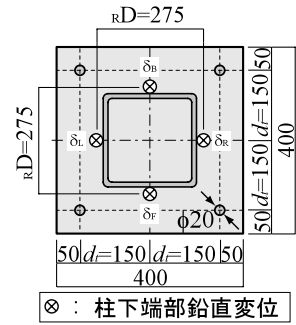
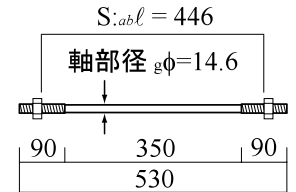


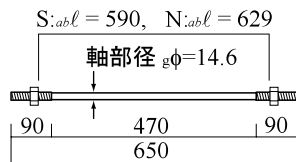
図 2 楔および楔受け形状



(a) ベースプレート



(b) アンカーボルト (S-0)



(c) アンカーボルト

図 1 試験体形状

体解析モデルを検討し、2 軸曲げを受けることで、アンカーボルトを多数配列した露出柱脚^{12~14)}と類似した復元力特性を示すことを明らかにしている。特に、45°方向の荷重では、正負の履歴性状が異なるという結果が得られている。このように、2 軸曲げ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は明らかにされつつあるが、ノンスリップ型露出柱脚が 2 軸曲げを受ける場合、期待通りの挙動（原点立上り型の復元力特性）を示すか否かを検討できていない。

そこで、本論文では、ノンスリップ型露出柱脚の 2 軸曲げ荷重実験を行い、その復元力特性より、2 軸曲げ荷重下の復元力特性を明らかにする。また、比較のために、従来のアンカーボルト降伏先行型（以後、従来型露出柱脚と記す）の荷重実験も併せて行う。更に、抵抗機構を基に、復元力特性モデルの定式化手法についても検討を行う。

2. 荷重実験方法

本実験では、露出柱脚付き片持ち柱に水平繰返し荷重実験を行う。試験体変数は、水平荷重角度 φ と、楔デバイスの有無とする。

2.1 試験体

表 1, 2, 3 に試験体の素材特性、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、ノンスリップ型露出柱脚の水平荷重角度 φ を 0°(N-00)、15°(N-15)、30°(N-30) および 45°(N-45)としたもの、従来型露出柱脚の水平荷重角度 φ を 0°(S-00)、15°(S-15)、30°(S-30) および 45°(S-45)としたものの、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 を用い、柱とベースプレートとは全周隅肉溶接接合している。アンカーボルトには軸部に十分な塑性伸びが期待できる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) を初期張力として導入する。基礎部には、鋼製基礎 BH-400x400x32x36 を使用する。

楔デバイスに使用する楔、楔受けは、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）

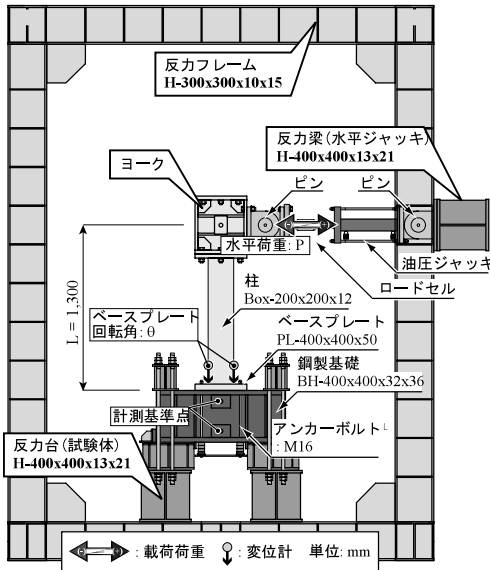


図3 荷重装置と計測位置

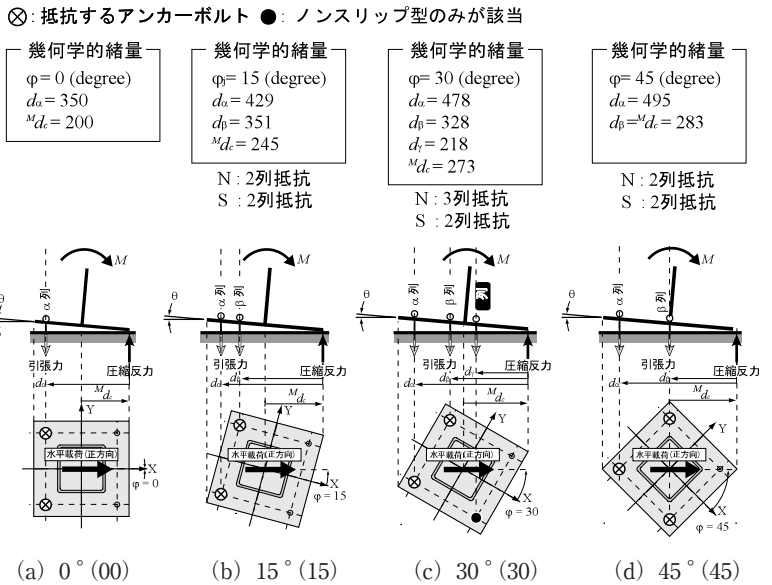


図4 荷重方法と抵抗機構

を施して、静止摩擦係数 μ がおよそ0.78となっている。尚、本実験では、楔の貫入角度を 30° としており、 $\mu = 0.78$ 程度であれば、アンカーボルトから伝達される圧縮力に対して抵抗して滑らない。また、バネは、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3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 荷重装置と荷重方法

図3に荷重装置を示す。荷重装置は、試験体柱頭部のヨークへ水平ジャッキを接合し、試験体柱頭部に水平荷重を行うものである。また、試験体を、設置時に水平荷重角度 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荷重する繰返し荷重実験を行う。尚、試験体柱頭部が荷重方向と荷重方向に直交方向（以後、直交方向と記す）にたわむのを、拘束している。このため、荷重方向のみに強制変位を与える荷重となる。

制御値をy軸回りのベースプレート回転角 θ_y 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、正負交番繰返し荷重する。

2.3 計測方法

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 δ_L 、 δ_R 、 δ_F 、 δ_B を計測し、荷重方向回りのベースプレート回転角 θ 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 を計測し、荷重方向回りの曲げモーメント M を算出する。また、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。以上の、曲げモーメント M とアンカーボルト軸力 T の力の釣合いより、圧縮合力点位置 d_c を算出する。

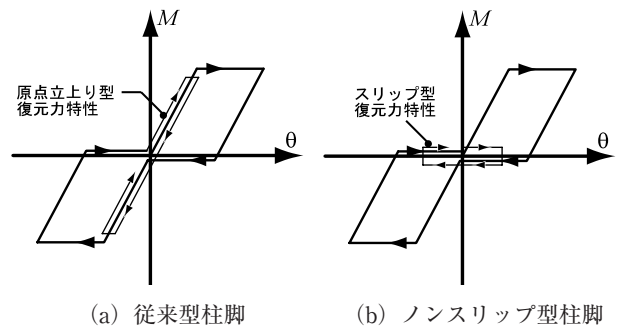


図5 各柱脚の復元力特性

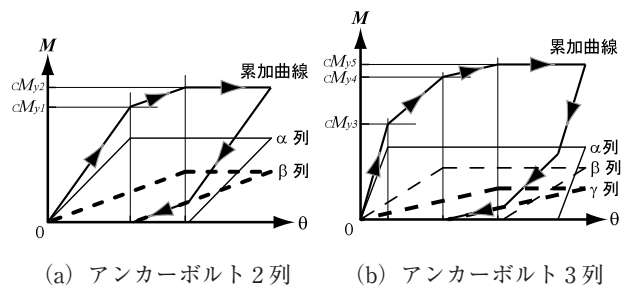


図6 復元力特性モデル

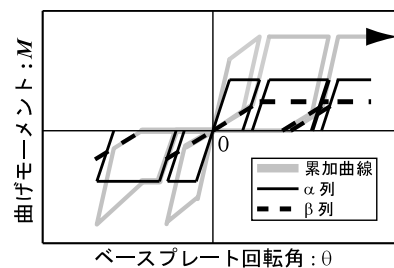


図7 S-45の計算方法

3. 抵抗機構および理論式

図4に各試験体の抵抗機構を示す。各抵抗機構は、以下の仮定に基づいて成立している。

- 1) 従来型柱脚では、柱断面図心より引張側のアンカーボルトが、ノンスリップ型柱脚では柱断面より圧縮側に位置するアンカーボルトは抵抗しないものとする。
- 2) 圧縮合力点位置は、圧縮側ベースプレート隅角部に位置するものとする (図4参照)。

これ以外の仮定については、既に文献で検討しているので、本論文では、記述を省略する^{6), 9)}。

3.1 抵抗機構と復元力特性モデルの計算

図4に示す抵抗機構より、アンカーボルト抵抗本数および抵抗特性を算定・検討する。

図5(a)より、従来型柱脚ではスリップ型の復元力特性を示す。上述の仮定より、各載荷角度での抵抗列数は、S-00が1列、S-15が2列、S-30が2列、そして、S-45が2列となる。また、2列が抵抗する場合、2列の復元力特性を累加したものが柱脚の復元力特性となるので、復元力特性モデルは図6(a)に示すように、tri-linear型となる。

更に、図7に示すようにS-45の場合は、柱図心上にアンカーボルトが配置されているため、正負両方向の載荷で抵抗すると考えられる。その正方向で伸びた塑性伸びの影響が負方向にも現れるため、正負で異なった履歴を示す。

図5(b)より、ノンスリップ型柱脚では、いずれの載荷でも、荷重が原点より上昇する。本論文では、これを原点立上り型復元力特性と記す。上述の仮定より、各載荷角度での抵抗列数は、S-00が1列、S-15が2列、S-30が3列、そして、S-45が2列となる。また、3列が抵抗する場合、3列の復元力特性を累加したものが柱脚の復元力特性となるので、復元力特性モデルは図6(b)に示すように、折線型となる。

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_{iy} 、および、弾性回転剛性： K_{iBS} を以下の式により求める。

$$M_{iy} = i \cdot n \cdot {}_{ab}A \cdot {}_{ab}\sigma_y \cdot d_i \dots\dots\dots (1)$$

$$K_{BSi} = \frac{E \cdot i \cdot n \cdot {}_{ab}A \cdot d_i^2}{R \cdot {}_{ab}l} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $i \cdot n$ ： 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)¹⁵⁾、 ${}_{ab}l$ ：アンカーボルトの有効長さである。

4. 実験結果と考察

図9～11、表4に実験結果を示す。図9には載荷方向曲げモーメント*M*と載荷方向回りのベースプレート回転角*θ*との関係を、図10にはアンカーボルト軸力*T*と*θ*との関係を、図11には圧縮合力点位置*d_c*と*θ*との関係を、表4には降伏曲げ耐力、弾性回転剛性を、それぞれ示す。

各実験値は、載荷方向曲げモーメント*M*については水平載荷荷重*P*に柱高さ*L*を乗じた値、ベースプレート回転角*θ*については柱下端部の鉛直変位 $\delta_L, \delta_R, \delta_F, \delta_B$ より算出している。表4に示す降伏曲げ耐力は、1サイクル目の履歴からGeneral yield point法により、弾性回転剛性は、1サイクル目の除荷時弾性域の履歴より求めたものである。

尚、各図は以下のように無次元化を行っている。図9の右縦軸と上横軸は、式(2.a,b)より算出した、降伏曲げ耐力*M_{iy}*と降伏時ベースプレート回転角*θ_y*で無次元化している。図10の右縦軸と上横軸は、アンカーボルト軸降伏耐力*T_y*と*θ_y*で無次元化している。図11の左縦軸は、モデルに用いた圧縮合力点位置 ${}^M d_c$ (図4参照)で無次元化している。

また、図9中には、実験結果を細線で、復元力特性モデルを破線で、実験結果の最終サイクルを太線で、それぞれ示す。

4.1 従来型露出柱脚

4.1.1 復元力特性

図9(a)～(d)より、従来型露出柱脚は、2軸曲げ載荷下においても、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、2軸曲げ載荷下においては、tri-linear型の復元力特性を示す。これは、1軸曲げ載荷の正方向載荷であればアンカーボルトA1, B1が同時に降伏するが、図10(b)～(d)に示すように2軸曲げ載荷下ではA1とB1が段階的に(B2が先行して)降伏する影響である。更に、S-45は、正方向と負方向で異なる復元力特性を示しているが、これは、B1とA2が正方向では降伏・塑性伸びしているのに対して、負方向では弾性伸びしかしていない影響である。

また、抵抗機構を基に作製した各復元力特性モデルは、実験結果とほぼ対応している。但し、S-45においては回転角0.02(rad)以下の領域において、実験結果に比べて復元力特性が高めの耐力を示している。これは、回転角が低い領域では、圧縮合力点位置が圧縮側ベースプレート隅角部に達しておらず、復元力特性モデルの仮定と差異があるからである。

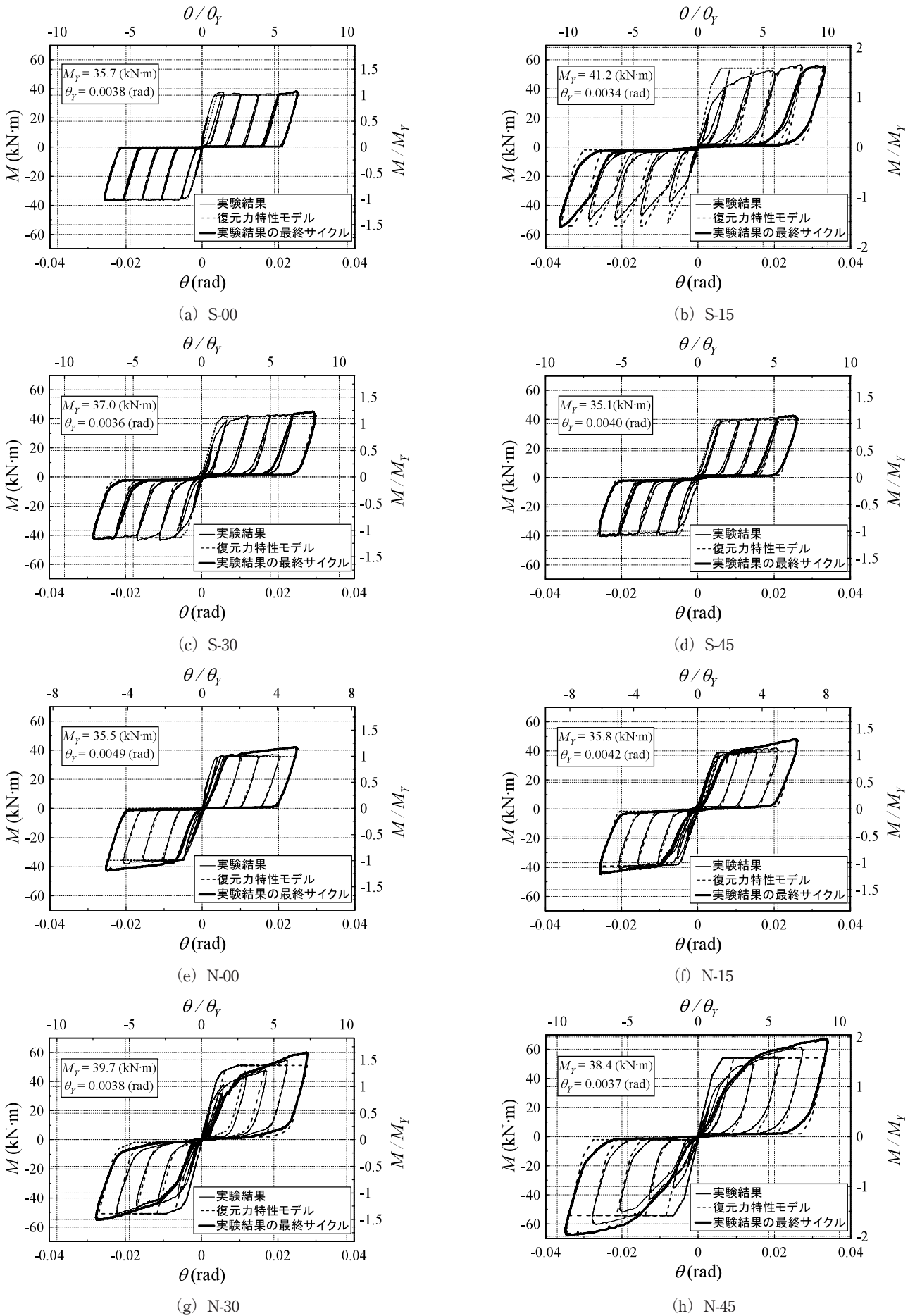


図8 荷重方向曲げモーメント M - 荷重方向回りのベースプレート回転角 θ の関係

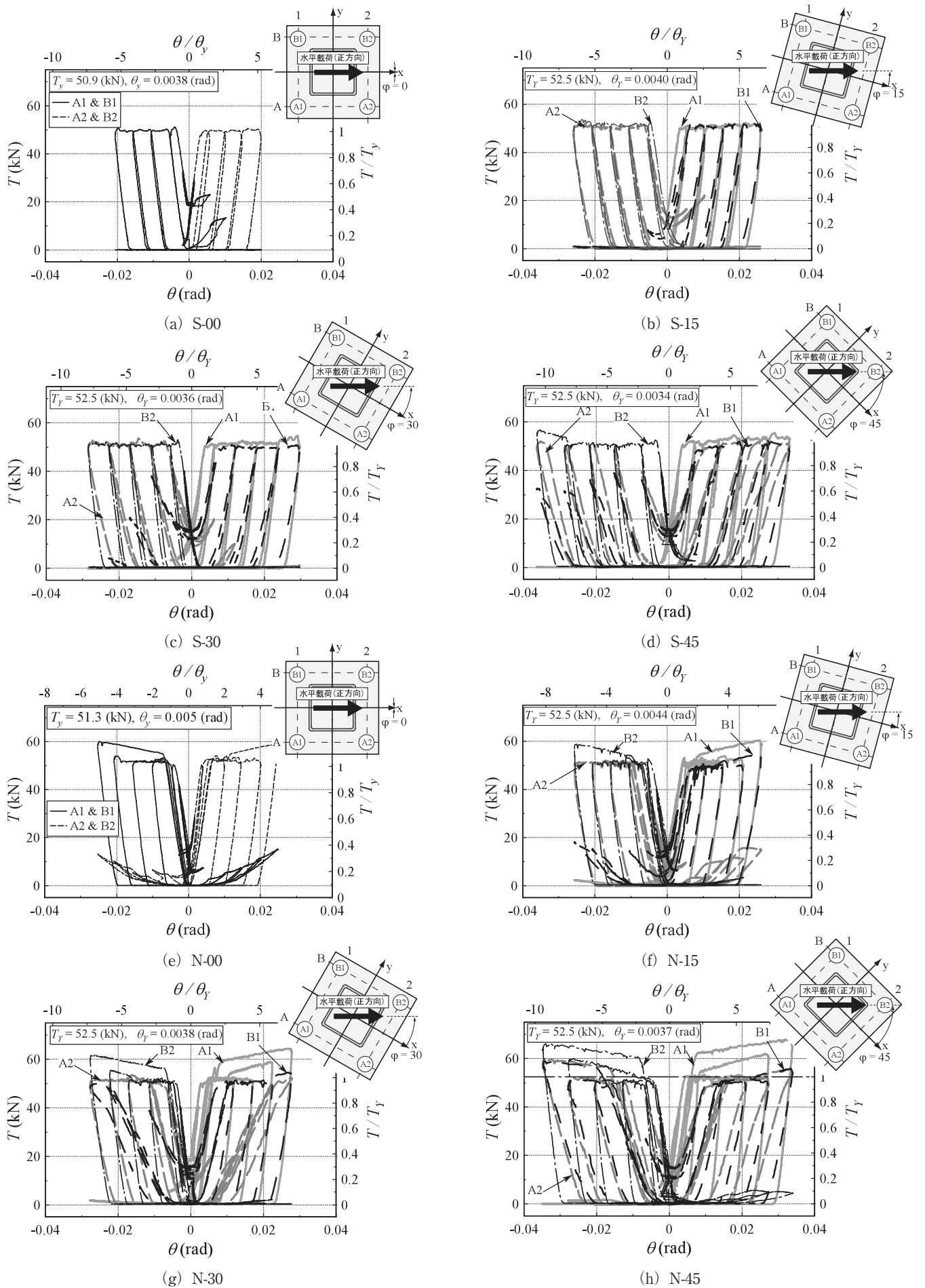
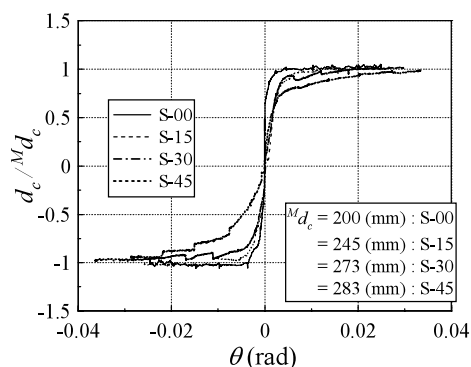


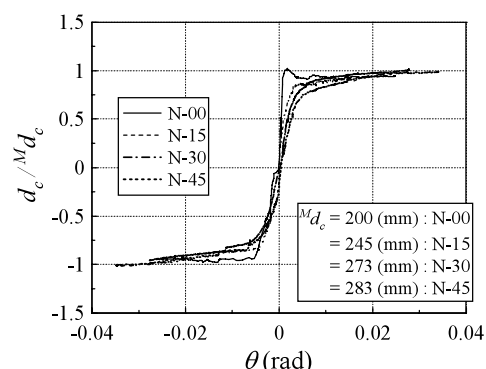
図9 載荷方向曲げモーメント M - 載荷方向回りのベースプレート回転角 θ の関係

表4 実験結果と理論値

試験体名称	実験値		理論値		実験値 / 理論値	
	${}^E M_y$	${}^E K$	${}^A M_y$	${}^A K$	${}^E M_y / {}^A M_y$	${}^E K / {}^A K$
	(kN m)	(kN m / rad)	(kN m)	(kN m / rad)		
NS - 00deg	35.5	8,670	35.9	7,300	0.99	1.19
NS - 15deg	35.8	8,070	39.2	6,700	0.91	1.20
NS - 30deg	39.7	8,500	41.4	6,700	0.96	1.27
NS - 45deg	38.4	7,800	54.2	6,700	0.71	1.16
S - 00deg	36.0	11,600	35.7	9,600	1.01	1.21
S - 15deg	35.1	7,980	39.7	7,100	0.88	1.12
S - 30deg	37.0	7,100	41.6	7,100	0.89	1.00
S - 45deg	44.2	7,300	54.2	7,100	0.82	1.03



(a) 従来型露出柱脚



(b) ノンスリップ型露出柱脚

図10 圧縮合力点位置 d_c -荷重方向回りのベースプレート回転角 θ の関係

4.1.2 アンカーボルト軸力-回転角関係

図10(a)-(c)より、S-00、S-15、S-30は、繰返し荷重を受ける場合、正方向荷重ではA1とB1が、負方向荷重ではA2とB2が抵抗している。また、1軸曲げ荷重下においては、A1とB1がほぼ同時に降伏していたが、2軸曲げ荷重下においては回転中心位置から各アンカーボルト中心までの距離が、それぞれ異なるため、段階的にアンカーボルトが降伏する。

但し、図10(d)より、S-45においては、柱断面図心上にA2とB1が位置しているため、正負の両方向の荷重で抵抗している。このため、正方向で生じた塑性伸びの影響が負方向でも現れる。更に、負方向では不連続なスリップ型となり、また、降伏・塑性伸びを殆どしていない。

4.1.3 圧縮合力点位置

図11(a)より、圧縮合力点位置は、水平荷重角度が45度に近づく程、回転角の増加に伴う移動をし難くなるが、最終的には圧縮側ベースプレート端部の近傍に移動していることがわかる。

4.2 ノンスリップ型露出柱脚

4.2.1 復元力特性

図9(e)-(h)より、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ており、従来型露出柱脚のエネルギー吸収効率や固定度の低下を改善していることが分かる。また、2軸曲げ荷重下においては、ほぼtri-linear型の復元力特性を示している。これは、従来型露出柱脚と同様に、各アンカーボルトが段階的に降伏する影響である。

復元力特性モデルは、各実験結果にほぼ対応しているが、N-30、N-45の回転角が0.02(rad)以下の領域においては、実験結果が低めの耐力を示している。これも、従来型露出柱脚と同様に、仮定と実験結果の圧縮合力点位置に差異があるためである。また、いずれの実験結果においても、最終サイクルでは復元力特性モデルよりも高目の耐力を示しているが、これは、図10(e)-(h)に示すように、アンカーボルトの軸耐力が増加している影響である。

4.2.2 アンカーボルト軸力-回転角関係

図10(e)-(f)より、N-00、N-15は、繰返し荷重を受ける場合、正方向荷重ではA1とB1が、負方向荷重ではA2とB2が抵抗している。

図10(g)-(h)より、N-30、N-45は、繰返し荷重を受ける場合、正方向荷重ではA1、B1とA2が、負方向荷重ではA2、B2とB1が抵抗している。ノンスリップ型露出柱脚では、楔デバイスがアンカーボルトの塑性伸びによる隙

間を埋めるため、SN-30のA2(B1)のように、圧縮側のアンカーボルトでも、柱断面図心線上の近傍に位置するアンカーボルトは抵抗することが分かる。

4.2.3 圧縮合力点位置

図11(b)より、圧縮合力点位置は、従来型露出柱脚と同様に水平載荷角度が45°に近づく程、回転角の増加に伴う移動をし難くなる。

以上より、2軸曲げ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、スリップ型復元力特性によるエネルギー吸収効率や固定度の低下を改善できる。また、復元力特性モデルの圧縮合力点位置を、ベースプレート端部に固定しているため、回転角が0.02(rad)以下の領域では、高めの耐力となるものの、全体の挙動に関しては、アンカーボルト列数を適切に評価することで、アンカーボルトを多数配列した場合の復元力特性モデル定式化手法を適用して、概略評価できる。

5. まとめ

2軸曲げを受ける、従来型露出柱脚とノンスリップ型露出柱脚の載荷実験を行い、各復元力特性を比較・検討した。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 2軸曲げ載荷下においても、復元力特性は、従来型露出柱脚ではスリップ型となり、ノンスリップ型露出柱脚では原点立上り型となる。そのため、楔デバイスを設置することでエネルギー吸収効率、および柱脚の固定度が上昇する。
- 2) 2軸曲げを受けることにより、曲げに抵抗するアンカーボルト列数が増加するため、復元力特性は、multi-linear型となる。
- 3) 2軸曲げを受ける従来型・ノンスリップ型露出柱脚においては、曲げ抵抗するアンカーボルト列数を適切に評価し、多数配列された柱脚の復元力特性モデル定式化法を用いることにより、実験結果によく対応する復元力特性モデルが得られる。

なお、この結果は、コンクリート基礎にいても適用できると考えられるが、今後、確認のための実験、および検討が必要である。

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、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) 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: 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) 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.
- 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) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985.3.