

# スリップ型露出柱脚を有する門型ラーメンの振動特性に関する研究

高松 隆夫\*・玉井 宏章\*・澤田 樹一郎\*\*・岡部 政和\*\*\*

(平成19年10月31日受理)

## A study on Vibration Characteristics of Steel Portal Framed Structures of Slip-Type Exposed Column-Bases

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Kiichirou SAWADA and Masakazu OKABE

(Received Oct.31,2007)

### Abstract

Steel buildings generally use anchor-bolt-yield-type exposed column-base, which shows slip-type restoring force characteristics. Anchor bolts show slip phenomena and fixed rigidity of the column-base deteriorates. The deterioration of the fixed rigidity causes the change of the vibration characteristics of a structure. Shaking table tests on the steel frame with the anchor-bolt-yield-type exposed column-base were conducted to clarify the vibration behavior of the frame.

The following conclusions were drawn from the experimental results.

- 1) Anchor bolts show slip phenomena.
- 2) The deterioration of the fixed rigidity of the column-base affects the natural frequency of the structure

**Key Words:** exposed column-base, anchor-bolt-yield-type, shaking table experiment

### 1. はじめに

鉄骨露出柱脚は、鋼構造における柱脚工法の中で最も簡易な工法であり、中低層の鋼構造物の柱脚部には、鉄骨露出柱脚が多く採用されている。しかし、図1に示すように、露出柱脚に地震外力が作用して、アンカーボルトが先行降伏すると、スリップ現象が発生し<sup>1),2)</sup>、柱脚の固定度が劣化する。柱脚部は、上部構造と基礎構造との接合部で重要な部分である。このため、柱脚の固定度は、構造物の振動性状に大きな影響を与えるとされている。さらに第1層部の層耐力低下による、損傷集中も懸念されている。

実際の地震被害として、1995年の兵庫県南部地震等の大地震では、建物に残留変形が生じ、継続的な使用が困難と

なった建物も多数報告されている。

柱脚の固定度に着目した骨組の地震応答の研究は数多く行われているが<sup>3)~6)</sup>、これらの研究は、静的載荷下における研究成果が多く、動的載荷下における研究は数が少ない。

そこで、本論文では、門型ラーメンの柱脚部を従来型とした時の振動台実験および数値解析を行い、柱脚がスリップ現象を生じた際、架構全体の振動性状にどのような影響を与えるかを確認すること、また、数値解析を行うことで、振動台実験の有効性を確認することを目的とする。

### 2. 実験

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚を有する1層1スバ

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 広島大学大学院社会環境システム専攻

\*\*\* 広島工業大学工学研究科建設工学専攻

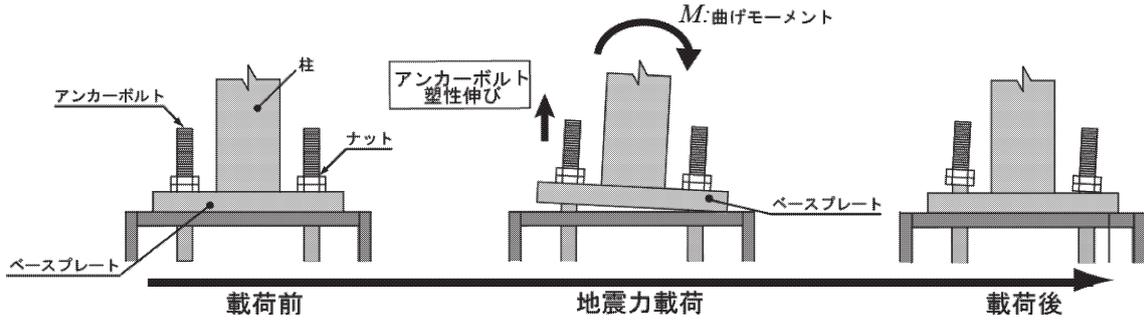


図1 アンカーボルト先行降伏型露出柱脚

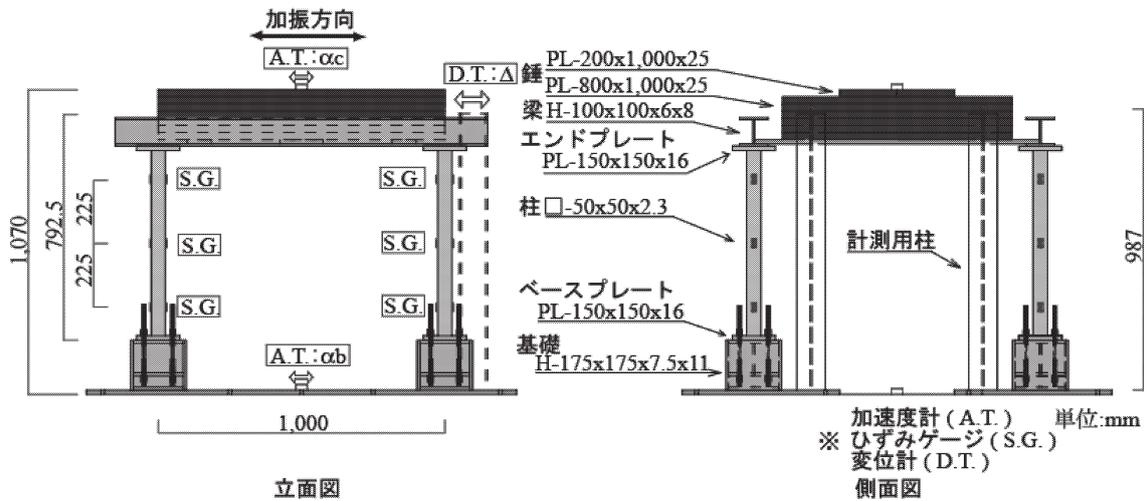


図2 試験体形状および計測点位置

ン門型鉄骨骨組を用いた動的載荷実験を行う。

### 2.1 試験体

図2に試験体形状、図3にアンカーボルトを示す。

柱脚部は、アンカーボルト降伏先行型について、ベースプレート隅各部に1本ずつ、計4本のボルトを配置した2列4本タイプの固定形式を用意する。使用するアンカーボルトには、長さ285mmの無加工アンカーボルト(B0)に、アンカーボルトが先行降伏するように一部を切削したアンカーボルト(B1)を用いる。

柱脚下に設置する鋼性基礎は、いずれの載荷に対しても塑性化しない素材特性・断面性能を有している。

柱には冷間成形角型鋼管材：□-50x50x2.3(STKR400)、エンドプレート及びベースプレートにはPL-150x150x16(SS400)、梁にはH-100x100x6x8(SS400)を使用している。柱の上下にエンドプレート及びベースプレートを全周隅肉溶接接合する。エンドプレートと梁を高力ボルトにより緊結し、ベースプレートと基礎をアンカーボルトにより緊結して構成する。試験体はこの架構を2組並列させ、梁下フランジをPL-85x1,000x15(SS400)とPL-150x1,000x15(SS400)により連結した立体骨組である。そして、試験体に錘(PL-800x1,000x25を6枚、PL-200x1,000x25を2枚)を約10kN積載し、質点としての質量： $m$ は、試験体中央上部

の合計質量約1.15tonとする。アンカーボルトの初期導入軸力は手締め程度に留める。

### 2.5 計測方法

図2に計測位置を示す。

計測には加速度計(A.T.)、ひずみゲージ(S.G.)、変位計(D.T.)を使用した。

加速度の計測は、振動台中心位置と錘上部の中心位置の加速度： $a_b$  および  $a_c$  について行う。質点に作用する層せん断力： $Q$  は、質点の質量： $m$  と  $a_c$  との積として式(1.a)から算定する。

$$Q = m \times a_c \quad (1.a)$$

変位の計測は、錘側面の中心位置の層間変位： $\Delta$  について、計測用柱に取り付けた変位計から行った。

応力の計測は、フレームの負担する層せん断力： $Q_f$ 、アンカーボルトの軸力： $T_L$ 、 $T_R$  について行った。

$T_L$ 、 $T_R$  は表裏構面における2本のアンカーボルト軸部の軸ひずみの平均値と軸剛性から算定した。

$Q_f$  は表裏各構面について、柱16ヶ所に貼付したひずみ値の値から式(1.b)により算定し、柱の任意断面の線ひずみの平均値( $\epsilon_{ri}$ 、 $\epsilon_{bi}$ )から、任意断面*i*の曲げモーメント：

$M_i$  は、式(1.b), (1.c)で算定できる。

$$Q_f = 2 \times \left( \frac{M_a - M_a^*}{l} - \frac{M_b - M_b^*}{l} \right) \quad (1.b)$$

$$M_i = E \times I \times K_i, \quad K_i = \frac{\varepsilon_{ri} - \varepsilon_{bi}}{D} \quad (1.c)$$

ここに、 $(M_a, M_a^*)$ ,  $(M_b, M_b^*)$  は左側柱及び右側柱における上下2点の曲げモーメント、 $l$  は左側及び右側柱における曲げモーメント計測間距離 ( $l=450\text{mm}$ ) である。

また、 $E$  は柱のヤング係数、 $D$  は柱の断面せい、 $I$  は柱の断面2次モーメントであり、各諸量は、表1に示す値を用いる。

インパルス試験における減衰定数： $h$  は式(1.d)から求める<sup>7)</sup>。

$$h = \frac{1}{2m\pi} \ln \frac{X_n}{X_{n+m}} \quad (1.d)$$

$m$ :周期,  $X_n$ :  $t_n$  における振幅,  $X_{n+m}$ :  $t_{n+m}$  における振幅

### 2.4 載荷装置と載荷方法

図4に本実験で用いる加振装置を示す。加振装置は、水平垂直同時2軸振動試験機(水平・垂直の最大振幅： $\pm 50\text{mm}$ , 最大加速度： $3\text{G}$ )を使用した。また、加振には、水平方向のみを入力し、上下方向成分は入力していない。尚、振動台加速度： $a_c$  をフィードバック制御する加速度制御と

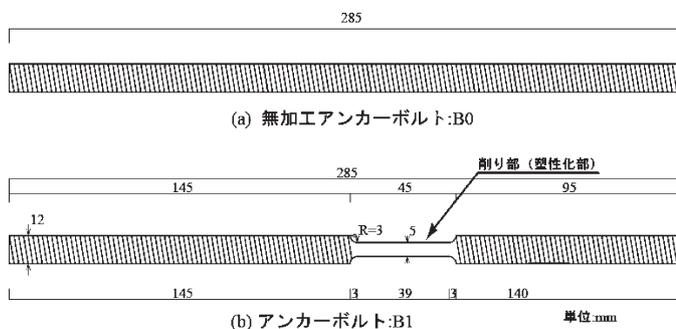


図3 アンカーボルト

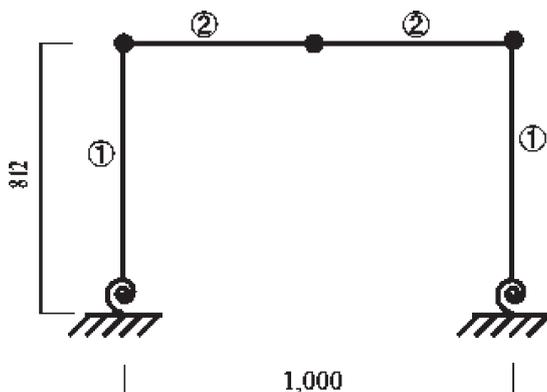


図5 解析モデル

する。

### 2.5 加振プログラム

補助試験として、錘位置に水平打撃力を与え、自由振動させるインパルス試験、および、振動台振動数を1Hzにつき10秒づつ加振し合計210秒間、つまり1~20Hzまで変化させていくSWEEP試験を行う。尚、いずれの場合も、補助試験では塑性化を被らない。本試験は、弾性正弦波加振試験及び弾塑性正弦波加振試験を振動台の振動数を7Hzとして載荷する。

載荷手順としては、i.インパルス試験、ii.SWEEP試験、iii.弾性正弦波加振試験、iv.弾塑性正弦波加振試験、v.インパルス試験、vi.SWEEP試験を一連の流れとする。

### 3. 数値解析

図5に、数値解析に用いる解析モデルを示し、解析に用いる入力データを表1にまとめて示す。

数値解析には任意形平面骨組の複合非線形解析プログラム「Combined non-Linear Analysis for Plane frame (CLAP.f)」を用いる。

解析モデルは、柱は、2節点ビーム要素、梁は、錘の質量を有する2節点ビーム要素とする。柱および梁には、表1に示す断面積、断面2次モーメント、塑性断面係数、せん断有効断面積を入力する。また、柱下端部とベースの間

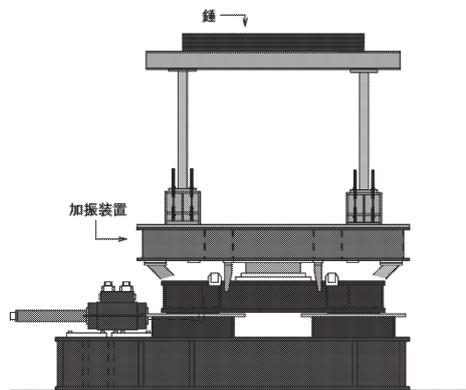


図4 加振装置

表1 解析入力データ

	断面寸法		断面積	塑性断面係数	断面二次モーメント	固有周期
	(mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>3</sup> )	(mm <sup>4</sup> )	(mm <sup>4</sup> )	(s)	
柱	Box-50x50x2.3	423.2	7.86*10 <sup>7</sup>	1.59*10 <sup>5</sup>	0.116	
梁	H-100x100x6x8	2,159	8.64*10 <sup>7</sup>	3.78*10 <sup>6</sup>		
ベースプレート	PL-150x150x16	900	9.60*10 <sup>3</sup>	5.12*10 <sup>4</sup>		
アンカーボルトB1	$\phi_c=5.0$	19.6	-	-		
入力データ	時間間隔 (sec)	減衰定数	ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	柱脚の降伏モーメント (N*mm)	柱脚の初期剛性 (N*mm/rad)	2次剛性 (N/mm <sup>2</sup> )
	0.001	0.02	2.05*10 <sup>5</sup>	1.15*10 <sup>6</sup>	9.21*10 <sup>8</sup>	0

$\phi_c$ :有効直径

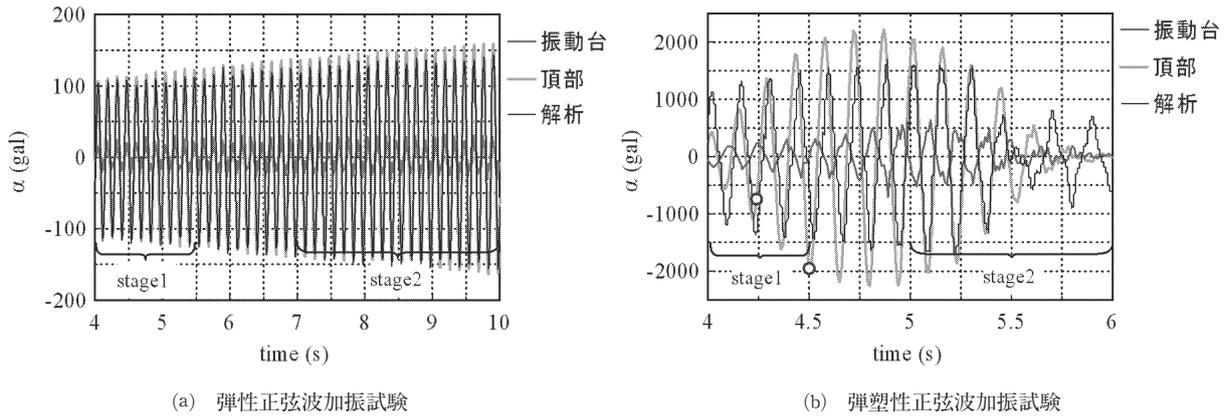


図6 加速度応答時刻歴

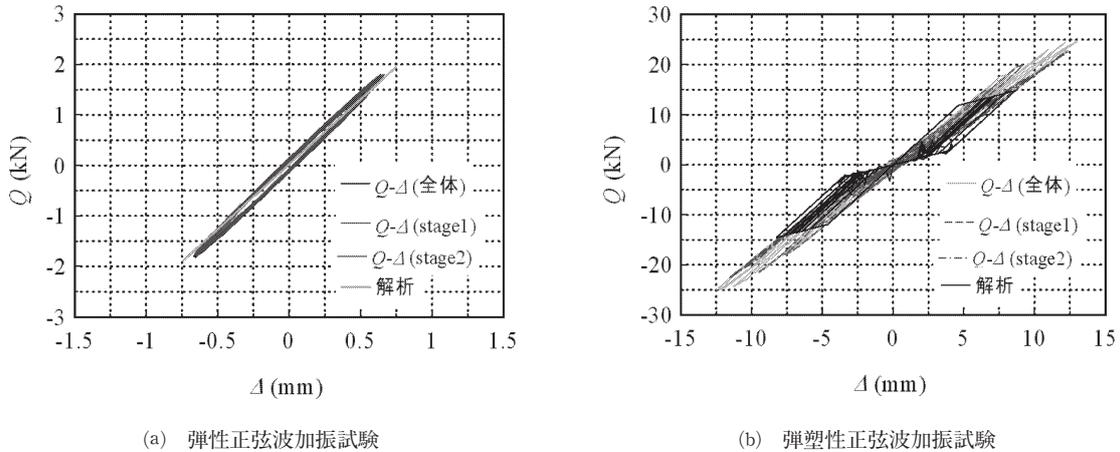


図7 層せん断力：Q-層間変位：Δの関係

には、表1に示す柱脚の降伏モーメントと初期剛性を用いた、Bi-linearのスリップ型復元力特性を有する回転バネを設置する。

#### 4. 試験結果

図6に加速応答時刻歴の結果を、図7に層せん断力：Q-層間変位：Δの関係を、図8にアンカーボルト軸力：Tと層間変位：Δの関係を、図9に柱脚部の曲げモーメント：Mとベースプレート回転角：θの関係を、それぞれ示す。また、図10に弾性、弾塑性正弦波加振試験前後のインパルス試験の結果、図11に弾性、弾塑性正弦波加振試験前後のSWEEP試験の結果を、それぞれ示す。

##### ○振動性状について

図6(a)から、弾性正弦波加振試験において、振動台の最大加速度振幅は約34(gal)となり、頂部の最大加速振幅は約164(gal)となった。

また、図6(b)から、弾塑性正弦波加振試験において、振動台の最大加速度振幅は約720(gal)となり、頂部の最大加速振幅は約2,250(gal)となった。頂部の加速度振幅が4s~4.8sまでは時間の経過に伴って徐々に大きくなり、4.8sで最大加速度振幅を示している。これは、振動台の加

速度振幅が徐々に大きくなっている点も要因の一つとして挙げられる。しかし、主な要因としては、図8、9から、アンカーボルトが塑性伸びを起こし、スリップ現象を生じたことで、固有振動数が8Hzであった試験前の架構が(図11参照)4.8sの時点で、7Hzまで低下し、地動の振動数7Hzと一致し、共振現象を起こしたためと考えられる。さらに、4.8s以降では、架構の剛性低下が進み、固有振動数が最終的に6Hzになるため(図11参照)、地動の振動数7Hzから遠ざかり、頂部の加速度振幅が徐々に小さくなったと考えられる。

解析結果が、実験結果に比べて、低い振幅を示している。これは、解析において柱に作用する軸力を考慮していない点が原因と考えられる。

##### ○復元力特性について

図7(a)から、弾性正弦波加振試験では層せん断力：Q-層間変位：Δの関係は、4s~10s間同じ履歴を示しているため、弾性正弦波加振試験においては、各部材が塑性変形していないことが分かる。なお、解析値も実験値と良好に対応している。また、実験値は、直線にならず紡錘型となっているが、層間変位を測るための変位計を設置した計測用柱も若干ながら振動しているためだと考えられる。

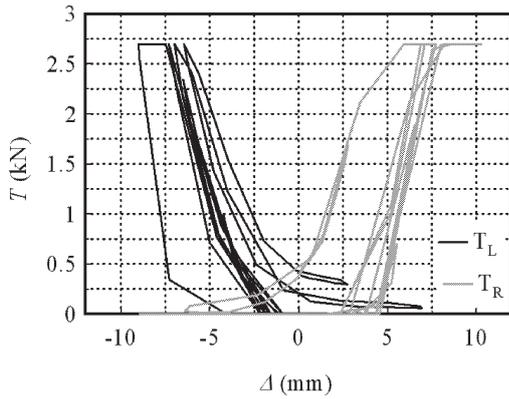


図8 アンカーボルト軸力： $T$ と層間変位： $\Delta$ の関係

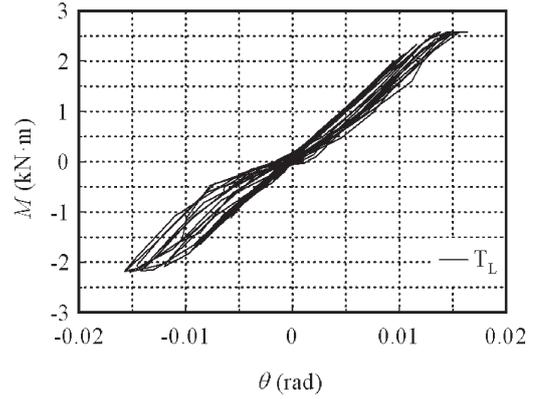


図9 柱脚部の曲げモーメント： $M$ とベースプレート回転角： $\theta$ の関係

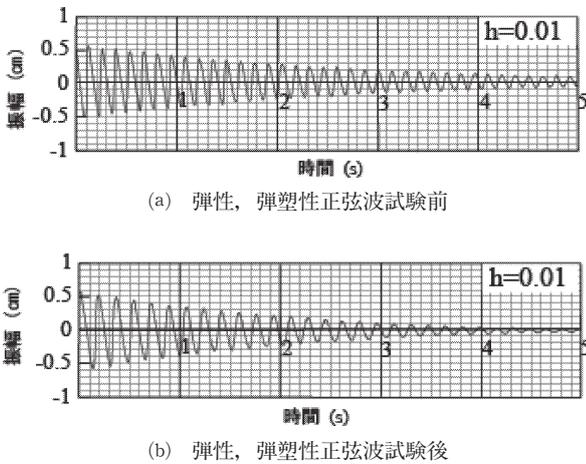


図10 インパルス試験結果

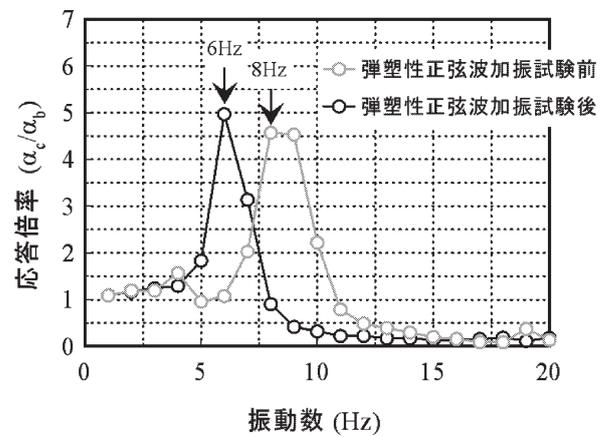


図11 SWEEP 試験結果

図7(b)から、弾塑性正弦波加振試験では、アンカーボルトが塑性伸びを起こし、スリップ現象を生じたことで(図8参照)、架構にもスリップ現象を示している。なお、解析値が実験値に比べて履歴が小さくなっている。これは、解析において、柱に作用する軸力を考慮していないためだと考えられる。

○インパルス試験およびSWEEP試験

SWEEP試験は、1Hzにつき10秒間としているが、振動数が変化した直後の波形は不安定なため、振動数の変化より5秒経過後からの波形を用いて各振動数の加速度を求める。また、倍率は $a_c/a_b$ から求める。

図10(a)から、弾性、弾塑性正弦波加振試験前の固有周期は0.129s、固有振動数は7.75Hz、減衰定数： $h$ は0.01となった。図11から弾性、弾塑性正弦波加振試験前の固有振動数は8Hzである。

図10(b)から、弾性、弾塑性正弦波加振試験後の固有周期は0.173s、固有振動数は5.78Hz、減衰定数： $h$ は0.01となった。図11から弾性、弾塑性正弦波加振試験後の固有振動数は6Hzである。

よって、弾性、弾塑性正弦波加振試験前後のインパルス試験の結果とSWEEP試験の結果は良好に対応している

と考えられる。

5. まとめ

本論文では、スリップ型露出柱脚を有する門型ラーメンに関する振動性状を求めため、柱脚部を2列4本TYPEとした架構の動的载荷試験を行った。得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) アンカーボルトが塑性伸びを起こすことによって、スリップ型復元力特性を示した。
- 2) アンカーボルトがスリップ現象を起こすことで、柱脚の固定度が低下し、架構自体の剛性も低下する。そのため、安定した振動性状を従来型では得ることが出来ない。
- 3) 柱軸力を解析の中で考慮していないため、弾塑性正弦波加振試験において、実験値と解析値とで誤差が生じた。

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、ここに記して感謝の意を

表します。

### 参 考 文 献

- 1) 秋山宏：鉄骨露出柱脚の耐震設計，技報堂，1985.3
- 2) 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.
- 3) 加藤勉，佐藤邦昭，鎌形修一，田上淳：鋼構造露出型柱脚の復元力特性が上部架構に与える影響について（その1）（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.867-870，2001.11.
- 4) 山田哲，秋山宏：柱脚の固定度が鋼構造多層骨組の終局耐震性能に与える影響，日本建築学会構造系論文集，第496号，pp.113-118，1997.6.
- 5) 河野昭雄，松井千秋：柱脚の復元力特性の違いがはり降伏型鉄骨ラーメンの地震応答性状に与える影響について，日本建築学会構造系論文集，第507号，pp.139-146，1998.5.
- 6) 玉井宏章，高松隆夫，山西央朗，白木剛，多田元英：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験，鋼構造年次論文報告集，第14巻，pp.269-276，2006.11.
- 7) 柴田明德：最新建築学シリーズ 最新耐震構造解析，森北出版，pp.14-16，1981.