

ノンスリップ型露出柱脚付門型ラーメン架構の振動台実験

高松 隆夫*, 玉井 宏章*, 山西 央朗**, 澤田樹一郎***, 松尾 彰***

(平成20年10月31日受理)

Shaking Table Tests of Portal Framed with Non-Slip-Type Exposed Column-Base

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Teruaki YAMANISHI,
Kiichiro SAWADA and Akira MATSUO

(Received Oct. 31, 2008)

Abstract

Anchor-bolt-yield-type exposed column bases are generally employed in steel buildings. Vibration characteristics of the building deteriorate because cyclic curves show slip behavior due to anchor-bolts yielding and rigidity of the column base decreases. Non-slip-type column bases were proposed by authors to improve slip behavior. In this paper, shaking table tests were carried out on steel portal frames with either column base to clarify vibration characteristics of the frames. The following conclusions were drawn from the experimental results: 1) The natural frequency of the frame with slip-type column bases decreased due to anchor-bolt yielding. 2) The vibration characteristics of the frame with non-slip-type column bases showed constant.

Keywords: shaking table tests, anchor-bolt-yield-type exposed column-base, natural frequency

1. はじめに

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚では、アンカーボルトの塑性伸びに起因したスリップ現象の発生により、第1層部の層耐力低下や、曲げモーメント反曲点位置の下降による第一層上梁への損傷集中が懸念されている¹⁾。また、柱脚の性能が上部構造物に与える影響について検討した研究も行われている^{2)~5)}。加藤等²⁾は、柱脚の抵抗特性を考慮して上部構造物を設計すべきであることを、山田・秋山³⁾は、柱脚の固定度が構造物の終局状態を決定する重要な要因であることを、更に、河野・松井⁴⁾は、柱脚の

抵抗特性が構造物の残留変形に影響を与えることを明らかにしている。著者等も、仮動的実験により柱脚の性状が応答性状に与える影響を検討し、柱脚の固定度が地震入力エネルギー量に影響を与えることを明らかにしている⁵⁾。すなわち、柱脚の性能が構造物に大きな影響を与えることが明らかにされている。

一方、著者等は、図1に示すように、スリップ現象を改善できる柱脚(以後、ノンスリップ型露出柱脚と記す)についての研究を行っており、その抵抗性状を静的実験により明らかにしている⁶⁻¹⁴⁾。しかしながら、動的載荷下の検証をほとんど行っておらず、ノンスリップ型露出柱脚の抵

* 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

*** 広島大学大学院社会環境システム専攻

表1 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)	主要寸法 (mm)	
柱	STKR400	205	312	Box-50x50x2.3
梁	SS400	205	249	H-100x100x6x8
ベースプレート	SS400	205	-	PL-150x150x16
アンカーボルト:S	--	205	285	$\phi_g = 5.0, ab, l = 175$
:N	--	205	285	$\phi_g = 5.0, ab, l = 200$

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)
26.0	2.30	90.0	49.9	93.5	1.87

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

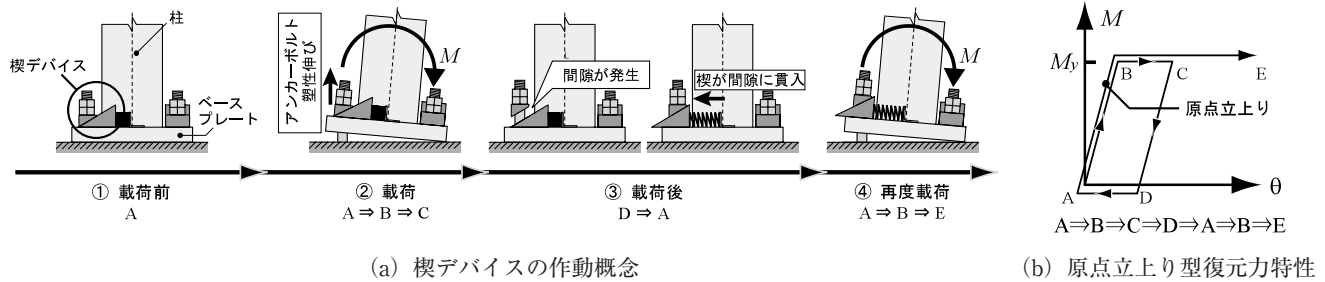


図1 間柱型せん断パネルダンパー

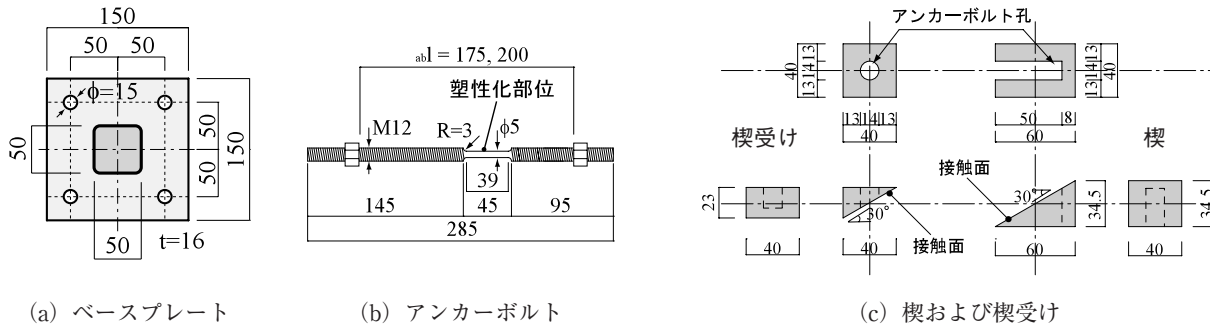


図2 試験体形状

抗特性が振動性状に与える影響についての検討を行っていない。

そこで、本論文では、スリップ現象を改善することで構造物の動的性能にどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的とし、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚付ラーメン架構を用いて、柱脚としてはスリップ現象が生じる従来の露出柱脚（以後、従来型露出柱脚と記す）、あるいは、ノンスリップ型露出柱脚を採用した時の振動台実験を行う。

2. ノンスリップ型露出柱脚の作動概念

ノンスリップ型柱脚は、図1(a)に示すように、楔、楔受けおよび楔台をナットとベースプレートとの間に設置し、バネを楔と反力板との間に設置するのみである。尚、図1(a)中の下部に示したアルファベットは、図1(b)の復元力特性における履歴ルートの記号に対応している。

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は伸ばされ、降伏して塑性伸びを生じる ($A \Rightarrow B \Rightarrow C$)。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は消滅する ($D \Rightarrow A$)。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 ($A \Rightarrow B \Rightarrow E$)。

このような楔デバイスの機能により、弾塑性繰返し载荷下におけるスリップ現象が解消され、図1(b)に示すように、原点立上り型の復元力特性となる。

3. 実験方法

本実験では、露出柱脚付門型ラーメンを用いて振動台実験を行う。試験体変数は、柱脚の種類（楔デバイスの有無）とする。

3.1 試験体

図2に試験体形状を、図3に試験体のセットアップを、表1に試験体の素材特性を、表2にバネのバネ特性を、それぞれ、示す。尚、本実験では、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚を有する門型ラーメンを取扱うために、柱、梁、

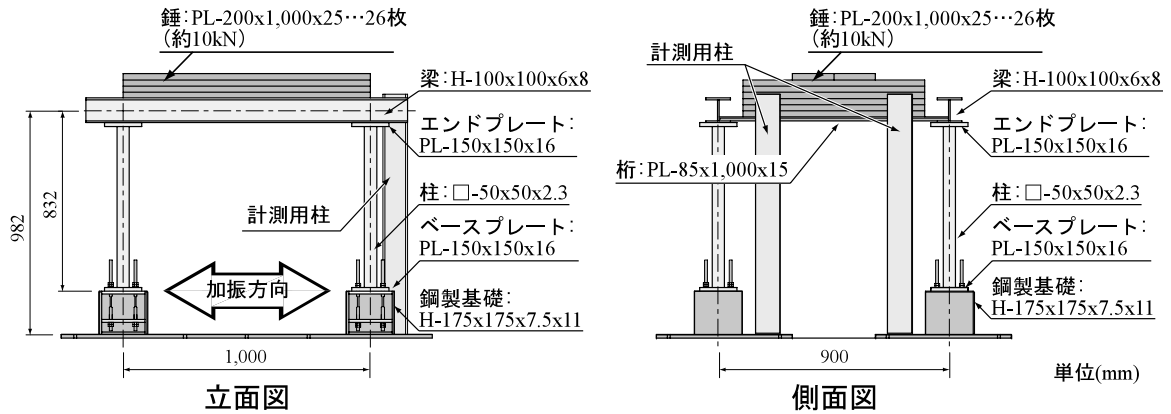


図3 試験体セットアップ

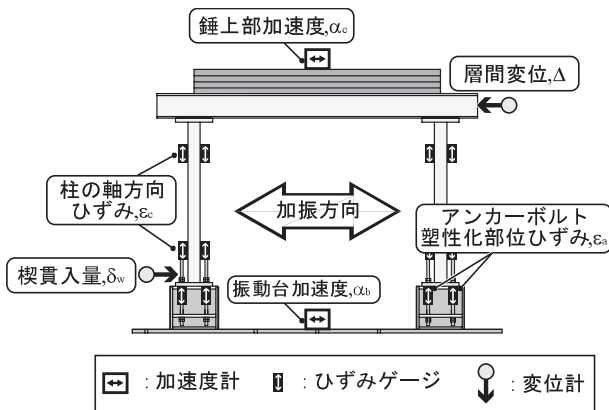


図4 計測位置

ベースプレートおよび基礎には、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。

試験体には、従来のアンカーボルト降伏先行型露出柱脚（従来型露出柱脚を以後S型と記す）、楔デバイスを設置したアンカーボルト降伏先行型露出柱脚（ノンスリップ型露出柱脚を以後N型と記す）の、合計2体を用意した。

柱には冷間成形角形鋼管材 Box-50x50x2.3(STKR400)、梁には H-100x100x6x8(SS400)、そして、エンドプレートおよびベースプレートには PL-150x150x16(SS400)を使用する。柱脚としては、アンカーボルトをベースプレート隅角部に1本ずつ、計4本配置する固定形式を採用している。アンカーボルトには M12 のスタッドボルトを用い、アンカーボルトを降伏させるため、軸部に切削加工を施して塑性化部位を設けている。基礎部には、H-175x175x7.5x11を加工した鋼製基礎を用いており、基礎コンクリートの損傷による実験結果の非線形化を回避している。

柱の上下に、それぞれ、エンドプレートおよ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、ベースプレートと基礎をアンカーボルトにより緊結し、1層1スパンの門型ラーメン架構を構成する。この門型ラーメン架構を2組並列させて、桁 PL-

85x1,000x15により接合した立体架構とし、更に、この桁の上に錘（PL-200x1,000x25を26枚：約10kN）を積載する。試験体柱頭部の質量 m は、およそ 1,152kg である。

楔デバイスは、楔、楔受け、バネ、およびバネの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、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。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¹¹⁾。また、図1(a)からもわかるように、楔デバイスに用いるバネには、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2に示す程度の小さなバネ定数を持つバネを用いている。

3.2 計測方法

図4に計測位置を示す。変位としては、図3に示す計測用柱に設置した変位計により試験体層間変位 Δ を、ベースプレートに設置した変位計により楔貫入量 δ_w を、それぞれ、計測している。加速度としては、振動台中心位置の加速度 α_b 、錘上面の中心位置の加速度 α_c を計測し、応答倍率 $(= \alpha_c / \alpha_b)$ を算出する。また、ひずみとしては、柱の2断面にひずみゲージを貼付して柱軸方向ひずみ $\epsilon_{c1} \sim \epsilon_{c2}$ 、アンカーボルトの塑性化部位にひずみゲージを貼付してアンカーボルト塑性化部位軸方向ひずみ ϵ_a を計測する。柱軸方向ひずみから求めた曲率と柱の曲げ剛性より、架構の層せん断力 Q を、アンカーボルト塑性化部位軸方向ひずみ ϵ_a と、アンカーボルトの軸方向剛性よりアンカーボルト軸力 T_L 、 T_R を算出する。

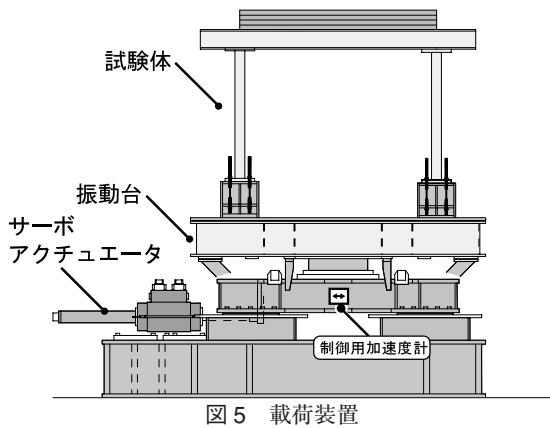


図5 荷重装置

3.3 加振方法

図5に本実験で用いる振動台を示す。振動台に基礎を緊結し、基礎の上に門型ラーメン架構を設置する。加振としては、振動台を水平方向に加速度加振する。振動数と振動台直下に設置した加速度計より得られた加速度を制御値とする。

弾塑性加振試験の前後に、固有振動数を求めるための弾性 SWEEP 試験を行う。SWEEP 試験としては、1Hz から 20Hz まで、1秒に1Hz ずつ振動数を上昇させて行くものである。弾塑性加振試験では、入力する振動数を SWEEP 試験より得られた試験体の固有振動数とし、入力加速度を N 型では 200(gal), S 型では 700(gal)としている。尚、N 型および S 型の入力加速度に相違があるのは、N 型では試験体を共振させて塑性化しているが、S 型においては弾塑性加振試験の前後で固有振動数が変動し（後述の 5.4 節を参照）、N 型と同じ加速度では直ぐに共振現象が治まり塑性化が進行しないため、N 型よりも大きな加速度を入力している。

4. 数値解析方法

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。

図6に解析に用いるモデルを、表3に解析に用いる入力データを、それぞれ、示す。

解析モデルは、5つの節点を2節点ビーム要素で構成したものである。各ビーム要素には、断面諸量として、断面積、断面二次モーメント、塑性断面係数、せん断有効断面積を入力し、軸剛性、曲げ剛性、全塑性耐力、せん断耐力を算定する。①部材に柱の、②部材に梁の断面諸量を入力する。また、節点2, 4には錘の質量を入力している。但し、断面諸量は1架構分の諸量を入力するので、質量は半分を入力する（試験体は2架構を連結している）。

表3 数値解析入力値

部材	主要寸法 (mm)	断面積 (mm ²)	塑性断面 係数 (mm ³)	断面二次 モーメント (mm ⁴)	固有周期 (s)
柱	Box-50x50x2.3	425	7.86 × 10 ³	1.56 × 10 ⁷	0.116
梁	H-100x100x6x8	2,160	8.64 × 10 ⁴	3.78 × 10 ⁶	
ベースプレート	PL-150x150x16	900	9.60 × 10 ³	5.12 × 10 ⁴	
アンカーボルト	φ _s = 5.0	19.6	-	-	
時間間隔 (s)	減衰定数	ヤング係数 (N/mm ²)	柱脚の 降伏曲げ耐力 (N mm)	柱脚の 弾性回転剛性 (N mm / rad)	2次剛性 (N/mm ²)
0.001	0.02	205000	1.15 × 10 ⁶	9.21 × 10 ⁸	0

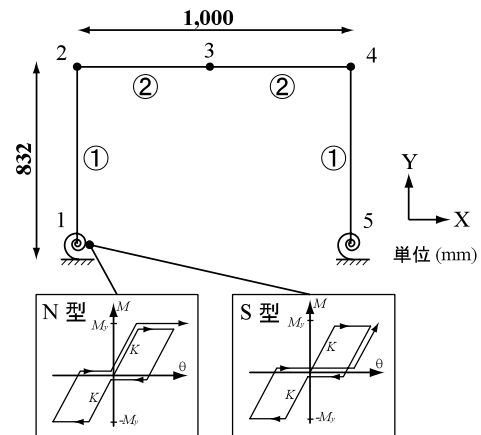


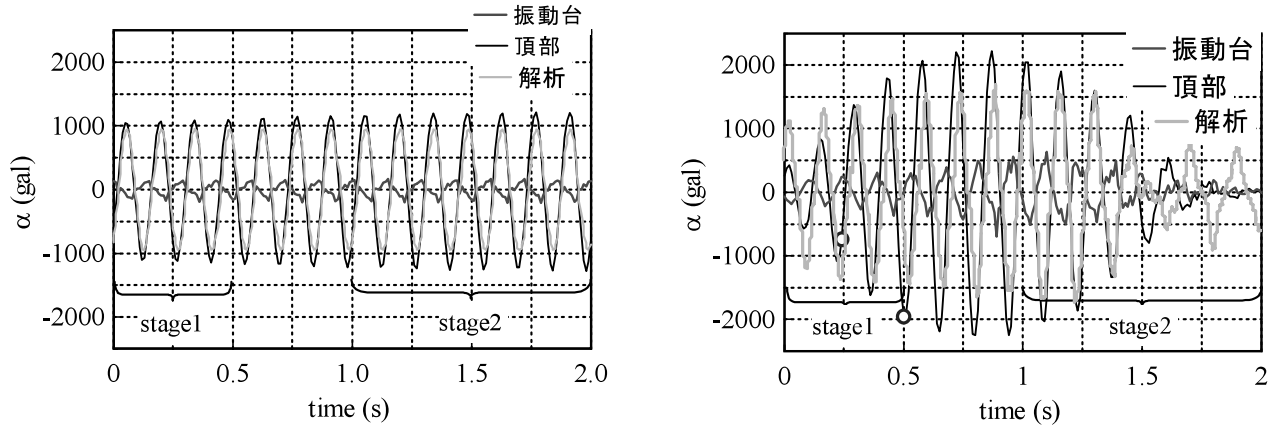
図6 解析モデル

そして、節点2, 3, 4は剛接合とし、節点1, 5は半剛接合として回転バネを設置している。このとき、回転バネの降伏曲げ耐力 M_y と回転剛性 K は、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚の値を用いるため、文献¹²⁾の評価方法を用いて算出している。また、回転バネの復元力特性には、N 型の場合は原点立上り型を、S 型の場合はスリップ型を入力している。

解析には、先ず、固有値解析を行って固有振動数を求めた後に、実験と同じ加速度と固有振動数を入力する。

5. 結果と考察

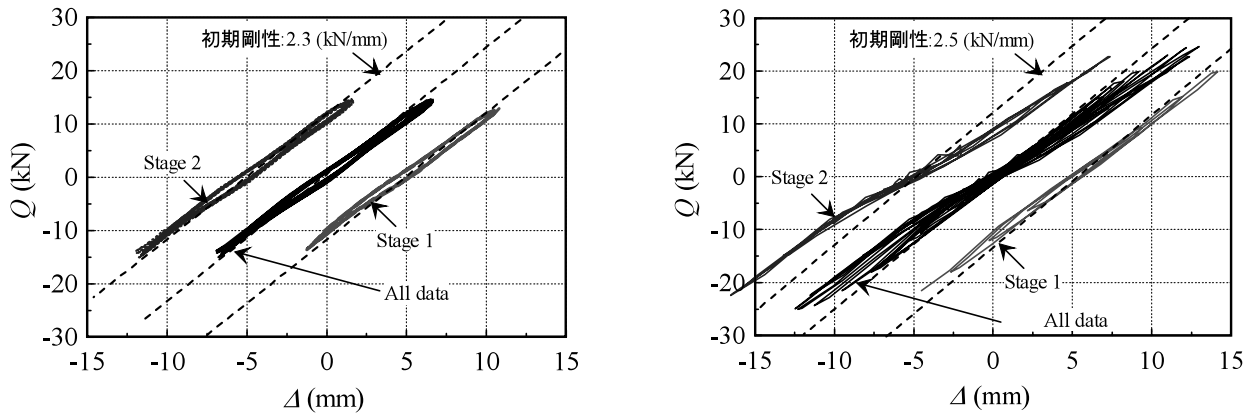
図7～10に弾塑性正弦波加振試験の結果を、図11に SWEEP 試験の結果を、それぞれ、示す。図7には振動台上面および錘上面加速度 a_b , a_c の応答時刻歴を、図8には層せん断力 Q - 層間変位 Δ 関係を、図9にはアンカーボルト軸力 T_L , T_R - 層間変位 Δ 関係を、図10には楔貫入量 δ_w - 層間変位 Δ 関係を、図11には加速度応答倍率 a_c/a_b - 振動数関係を、それぞれ、示す。また、図7には数値解析より得られた値も併せて示す。そして、図8においては、塑性化前後の抵抗特性を比較するため、図7における 0～2.0(s) の曲線、塑性化前 (stage 1) と塑性化後 (stage 2) の曲線を併せて示すが、曲線が重複するため X 方向に1グリッドずつ平行移動して示す。また、図9においては、試験終了時の塑性化部位のひずみ ϵ_a と、アンカ



(a) N型

(b) S型

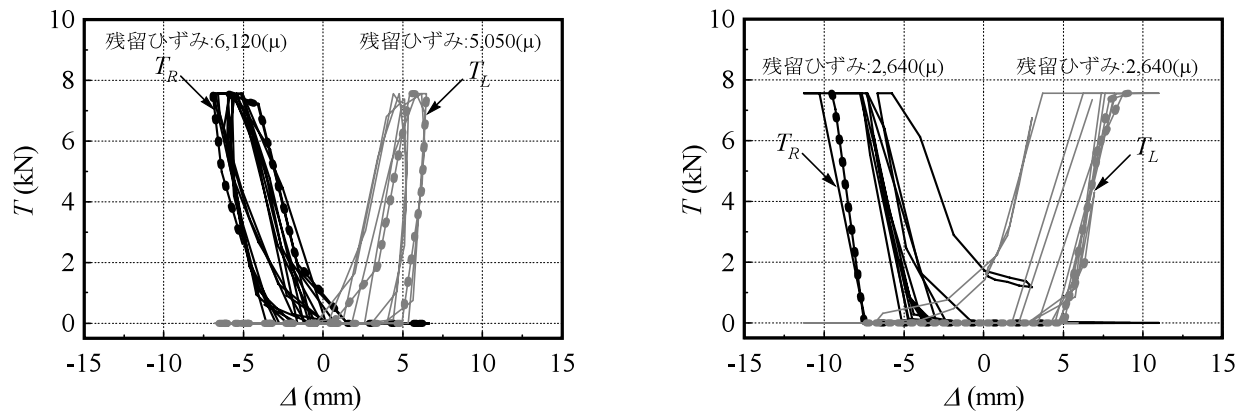
図7 錘上部の加速度応答時刻歴



(a) N型

(b) S型

図8 層せん断力 Q -層間変位 Δ 関係



(a) N型

(b) S型

図9 アンカーボルト軸力 T -層間変位 Δ 関係

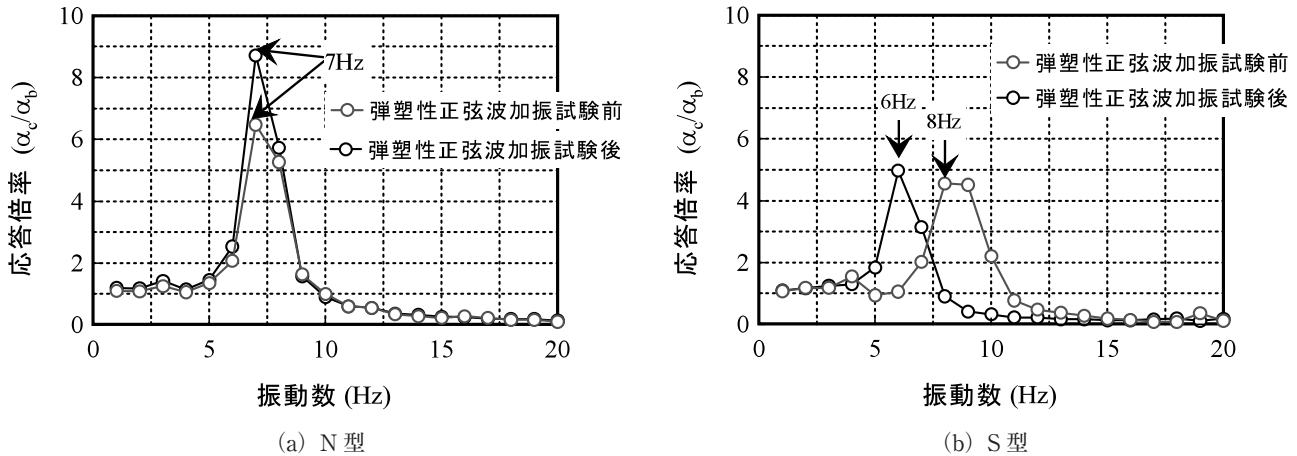


図 11 加速度応答倍率 α_c/α_b -振動数関係

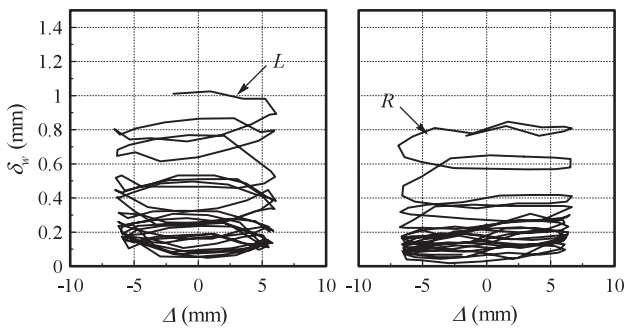


図 10 楔デバイス貫入量 δ_w -層間変位 Δ 関係

一ボルトのスリップ現象の有無を比較するために最終サイクルを太い点線で示している。

層せん断力 Q は試験体柱に貼付したひずみゲージ値より、アンカーボルト軸力 T_L 、 T_R はアンカーボルト塑性化部位のひずみゲージ値より算出している。

5.1 振動性状

図 7(b)から、弾塑性正弦波加振試験において、S型は、振動台の最大加速度振幅は、約 720(gal)となり、頂部の最大加速度振幅は、約 2,250(gal)となった。頂部の加速度振幅が、0s ~ 0.8(sec)までは時間の経過に伴って徐々に大きくなり、0.8(sec)で最大加速度振幅を示し、その後、加速度振幅は低下していく。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が、アンカーボルトのスリップ現象により、入力振動数と固有周期が一致し、更に、固有周期が低下して共振現象が生じなくなったためと考えられる。図 9(b)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、図 11(b)からも分かるように、架構の固有振動数は弾塑性正弦波加振試験の前後で低下しており、固有振動数が 8Hz であった試験前の架構が、0.8s 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。更に、0.8s 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、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。

一方、図 9(a)から、N型は、アンカーボルトが塑性伸びを起こしてもスリップ現象を生じないため、架構の剛性は変化しないことが、図 8(a)より分かる。このため、stage 2 の時点でアンカーボルトに塑性化が生じているものの、stage 1 と stage 2 の復元力特性に殆ど差異がない。また、S型と比較して応答が小さ目となり、更に、弾塑性正弦波加振試験前後の固有振動数も一致しており、常に安定した加速度応答を示していることが分かる。尚、最大層せん断力が、S型とくらべN型が低目なのは、N型の入力加速度が小さく、層間変位量が小さいためである。

また、数値解析の結果においても、図 7(b)より、S型では stage 1 よりも stage 2 における加速度が減少しており、柱脚の塑性化により固有振動数が低下して、加速度が低下したことが分かる。図 7(a)より、N型では stage 1 および stage 2 における加速度はほぼ等しく、柱脚が塑性化しても加速度が低下していないことが分かる。

5.2 復元力特性

図 9(b)から、S型は弾塑性正弦波加振試験において、アンカーボルトが塑性伸びを起こしてスリップ現象を生じており、図 8(b)より、架構の復元力特性もスリップ現象を示していることが分かる。スリップ現象が生じることに伴って、初期剛性と比較して、stage 2 での剛性が大きく低下していることが分かる。一方、図 9(a)から、N型はアンカーボルトが塑性伸びを起こしてもスリップ現象を生じておらず、図 8(a)より、架構の復元力特性にスリップ現象などの劣化が見られない。このため、stage 2 においても、初期剛性とほぼ同等の剛性が得られていることが分かる。

また、図9の試験終了時の塑性化部位ひずみの値より、いずれのアンカーボルトも塑性化しており、更に、S型で約2,600(μ)程度、N型で約5,000(μ)程度塑性化しており、N型の方が塑性変形量が大きいことが分かる。

尚、N型の初期剛性、アンカーボルトの剛性が、S型と比較して、低目に出ているのは、楔デバイスを設置したことによりアンカーボルトの有効長さが長くなったためである。

5.3 楔デバイス

図10より、楔デバイスは動的载荷下でも、アンカーボルトのナットとベースプレート間に貫入して、機能していることが分かる。

5.4 固有振動数の変化

図11より、各試験体の固有振動数は、S型は弾塑性正弦波加振試験の前後で約8Hzから6Hzに低下しているが、N型は弾塑性正弦波加振試験の前後で変化することなく常に7Hzである。

S型では、スリップ現象により門型ラーメン架構の剛性が低下しているために固有振動数が変化したと考えられ、N型ではスリップ現象が改善されることで、S型のような固有振動数の変化が現れなかったと考えられる。

以上より、N型は、図9より試験終了時のアンカーボルト塑性化部位ひずみがS型より高く、更に、試験前後の復元力特性、振動数は殆ど変化なく、S型に比べてエネルギー吸収効率が良く、常に安定した振動性状を示すことがわかる。

6. まとめ

本論文では、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚を有する門型ラーメン架構に関する振動性状を求めため、振動台実験および数値解析を行った。得られた知見は以下のように要約できる。

1. 従来型露出柱脚を有する架構では、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。このため、門型ラーメン架構の剛性が低下して、固有振動数が変化し、安定した振動性状を得ることが出来ない。
2. ノンスリップ型露出柱脚を有する架構では、アンカーボルトが塑性伸びを起こすが、動的载荷下でも楔デバイスが機能し、スリップ型復元力特性を示さない。このため、架構自体の剛性が変化せず、固有振動数が一定となり、安定した振動性状を得ることが出来る。

3. 数値解析により、従来型露出柱脚を有する場合は、架構の剛性の変化により応答が変化すること、ノンスリップ型露出柱脚を有する場合、架構の剛性が変化することなく、安定した応答を示し、実験結果と同様の結果を得ることができた。

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。

本研究の経費の一部は、社団法人日本鉄鋼連盟「2007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。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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
 - 12) 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 卷, pp.173-180, 2005.11.
 - 13) 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.
 - 14) 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.