

露出柱脚を変数としたノンコンプレションブレース架構の 解析的研究

高松 隆夫*・山西 央朗**・中村 友一***

(平成23年10月27日受付)

Analytical study on non-compression braced frame with exposed column-base

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI and Yuuichi NAKAMURA

(Received Oct. 27, 2011)

Abstract

Non-compression braced frames with slip-type exposed column-bases show various resistant mechanisms and lower elastic stiffness because of plastic elongation of anchor-bolts. Restoring force characteristics of the frames obtained from the experimental results can be predicted by suitable resistant mechanisms, though complicated resistant mechanisms need to be introduced. Therefore, non-slip-type exposed column-bases are employed to eliminate slip behavior of the column-bases because of bolt plastic elongation and cyclic curves of the braced frames can be evaluated by easy calculation.

Key Words: exposed column-base, non-compression brace, restoring force characteristics, resistance mechanism

1. はじめに

近年、低層鋼構造建築物の耐震改修には、耐力および剛性の向上が容易に行えることから、ブレースの増設やブレース断面を増大させる工法が多く用いられている。

一般的に、柱脚は既存のブレースからの応力に対して降伏しないように弾性設計されている。また、柱脚には安価で施工が容易なことから露出柱脚形式の接合工法が多く用いられている。露出柱脚は曲げによる抵抗が小さいことに基づいてピン支承として設計される。しかしながら、露出柱脚の曲げ抵抗は小さいものの架構の層間変形角が1/100 (rad) 程度において、ブレース降伏耐力水平成分の1～3割程度の層せん断力を保持する(弾性柱脚とした場合)こととなり、決して無視できるほど小さいものではないことが載荷実験により明らかにされている¹⁾。更に、従来のブレースおよび柱脚は共にスリップ型復元力特性を示すた

め、それぞれ、弾塑性のスリップ型復元力特性を有する軸バネ、回転バネとして架構に組込んで力学モデルを作製する必要がある。

一方、著者等は、完全弾塑性型復元力特性を示すノンコンプレションブレース²⁾⁻⁶⁾(以降NCブレース)を研究・開発しており、従来の引張りブレース¹⁾(細長く、座屈現象に伴いスリップ現象が発生するブレース)と比較して、エネルギー吸収効率が良いこと、また、スリップ型復元力特性を取り扱う必要がないため評価が非常に簡便であることを明らかにしている。

しかしながら、昨年度のスリップ型露出柱脚付きノンコンプレションブレース架構の載荷実験⁶⁾において、架構の層間変形角が1/100 (rad) 程度では、アンカーボルトが降伏・塑性伸びすること、ノンコンプレションブレースの抵抗特性によって、柱脚の抵抗機構が様々に変化し、架構の復元力特性において弾性剛性が低下する現象が確認され

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 東京工業大学都市工学地震センター

*** 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

た。柱脚の抵抗機構を考慮して架構の応答を追跡することは可能だが、非常に複雑になる。

アンカーボルトの降伏・塑性伸びによる影響は大きいいため、柱脚の復元力特性がノンスリップ型の露出柱脚を用いることで、アンカーボルトの降伏・塑性伸びによる影響を解消するのではないかと考えられる。

そこで本論文では、露出柱脚付き NC ブレース架構にノンスリップ型露出柱脚を用いた場合の復元力特性モデルおよび柱脚の抵抗機構を検討し、スリップ型露出柱脚との差異について検討を行う。

2. 実験概要

表 1 に素材特性を、図 1 に試験体を、図 2 にアンカーボルトを、図 3 にベースプレートを、図 4 にブレースを、

図 5 に荷重装置・計測計画を、図 6 にミーゼスの降伏条件を示す。

本実験で用いる露出柱脚付きブレース架構に使用する鋼材は、梁に SS400、その他の部材は SN490B とする。柱は弱軸方向とし H-250×250×9×14 を、梁に H-250×125×6×9 を用いる。柱梁接合部はガセットプレート (PL-25) に梁ウェブのみを高力ボルト (M24) 2 本により摩擦接合する。ベースプレートには荷重時において塑性変形しないよう PL-50 を用いる。柱脚は、ベースプレートの隅角部にアンカーボルト (M16、軸部径 $\phi=14.5$ mm) を 1 本ずつ計 4 本配置した露出柱脚とする。尚、アンカーボルト、ブレースには、それぞれ、降伏軸力の 30% および 50% を初期軸力として導入し、軸部の十分な塑性伸びが期待できる転造ねじ付丸鋼を使用する。

表 1 素材特性

部材名	材種	ヤング係数 $E(N/mm^2)$	降伏応力度 $\sigma_Y(N/mm^2)$	降伏ひずみ $\epsilon_Y(\%)$	ひずみ硬化 開始ひずみ $\epsilon_{ST}(\%)$	引張強さ $\sigma_U(N/mm^2)$
柱フランジ	SN490	205000	395	0.14	2.51	491
柱ウェブ	SN490	205000	399	0.16	2.61	487
梁フランジ	SS400	205000	295	0.15	2.84	412
梁ウェブ	SS400	205000	318	0.17	3.62	434
ベースプレート	SN490	205000	347	0.18	1.94	487
ブレース M24	SNR400	205000	282	0.13	2.38	438
ブレース M30	SNR400	205000	303	0.13	2.24	470
アンカーボルト	ABR400	205000	294	0.14	2.55	435

柱：H-250×250×9×14、梁：H-250×125×6×9、ベースプレート：PL-50
 ブレース：M24 軸部径 $\phi=21.9$ mm, $A_{BR}=377$ mm², M30 軸部径 $\phi=27.6$ mm, $A_{BR}=599$ mm²
 アンカーボルト：M16 軸部径 $\phi=14.5$ mm, $A_{AB}=165$ mm², $l_{AB}=382$ mm

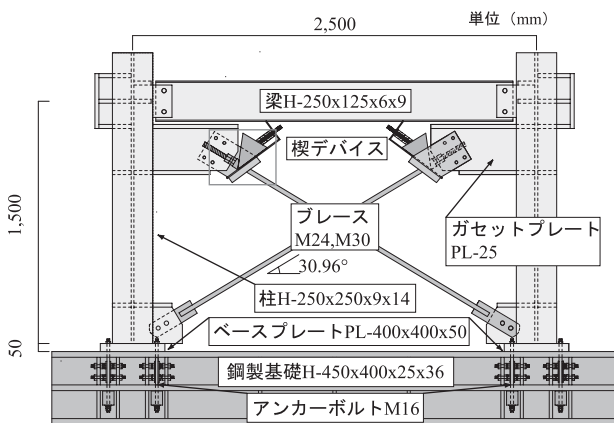


図 1 試験体

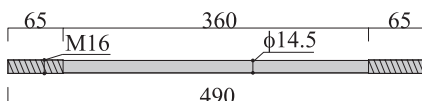


図 2 アンカーボルト

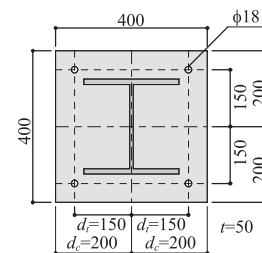
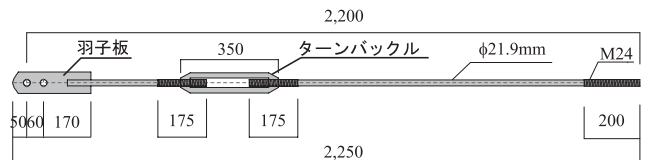
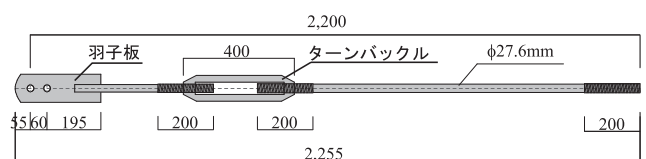


図 3 ベースプレート



(a) M24



(b) M30

図 4 ブレース

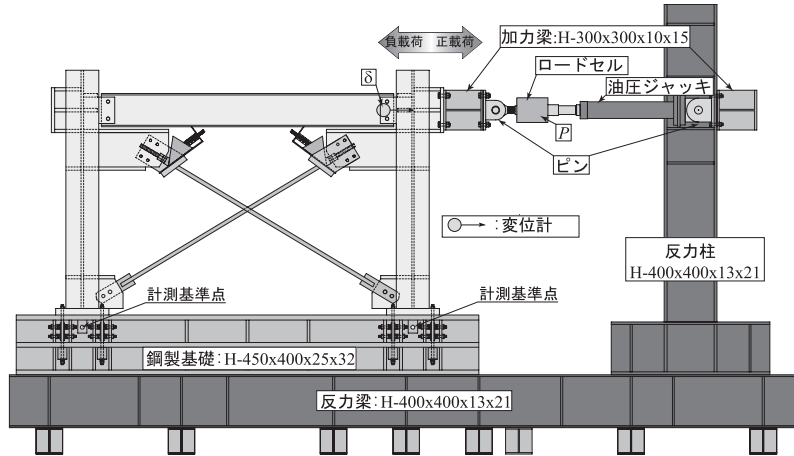


図5 荷重装置・計測計画

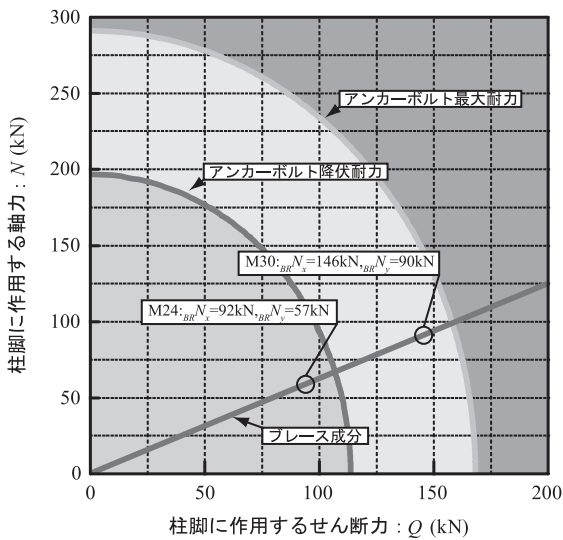


図6 ミーゼスの降伏条件

ブレースが引張抵抗すると、軸力とせん断力が同時にアンカーボルトに作用する。このときアンカーボルトは組合せ応力状態となるため、ミーゼスの降伏条件式を用い降伏耐力および最大耐力を算出する。

荷重装置は、反力梁 H-400×400×13×21、反力柱 H-400×400×13×21 および油圧ジャッキにより構成されており、試験体の鋼製基礎を反力梁に、反力柱に取り付けた水平の油圧ジャッキをピンを介し試験体柱頭部に設置する。

荷重方法は、正負交番漸増繰返し荷重とする。層間変形角を制御値とし、1/1000、1/500、1/250、1/200、1/100 (rad) を各2サイクル行う。

計測には変位計、ロードセルを用いる。尚、変位計は、鋼製基礎に設けた計測基準点に固定した治具へ設置しており、いずれの変位計も、基礎からの相対変位を計測している。

柱の柱頭部に設置した変位計より、層間変位 δ を、ジャッキ先端に設置したロードセルより、水平荷重 P を計測・算出する。

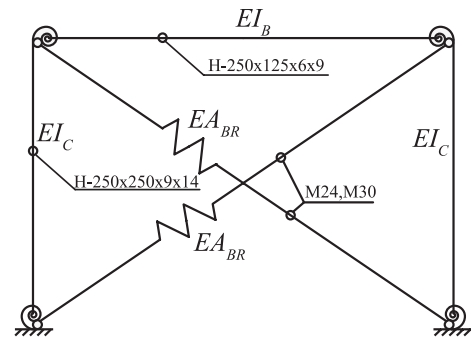


図7 解析モデル

3. 復元力特性モデル

図7に解析モデルを示す。解析モデルは、ブレースに弾塑性の軸バネを、柱脚および柱梁接合部に弾塑性の回転バネを導入する。柱及び梁は弾性体として、曲げ剛性のみを考慮する。

一般的に柱脚はピン支承として設計されるが、実際には曲げによる抵抗が現れるため^{7)・8)}、回転弾性剛性を以下の式で算出する。

$$K_{BS} = \frac{n_{AB} \cdot A_{AB} \cdot E \cdot (d_c + d_t)^2}{R \cdot l_{AB}} \quad (1)$$

ここに、 n_{AB} : アンカーボルト本数、 A_{AB} : アンカーボルト断面積、 E : ヤング係数、 d_c : 柱材軸と圧縮合力間の距離、 d_t : 柱材軸と引張側アンカーボルト間の距離、 l_{AB} : アンカーボルトのナット間距離、 R : 基礎及びベースプレートの弾性変形を考慮した低減係数⁹⁾ (= 2) である。

ノンコンプレションは座屈および塑性伸びによる緩みが生じず、X型に配置することで完全弾塑性型の復元力特性を示す。

本試験体は柱梁接合部をピン接合としているが実際にはピン支承ではなく、摩擦抵抗力が柱に伝播するため、完全弾塑性型の復元力特性を用いる。

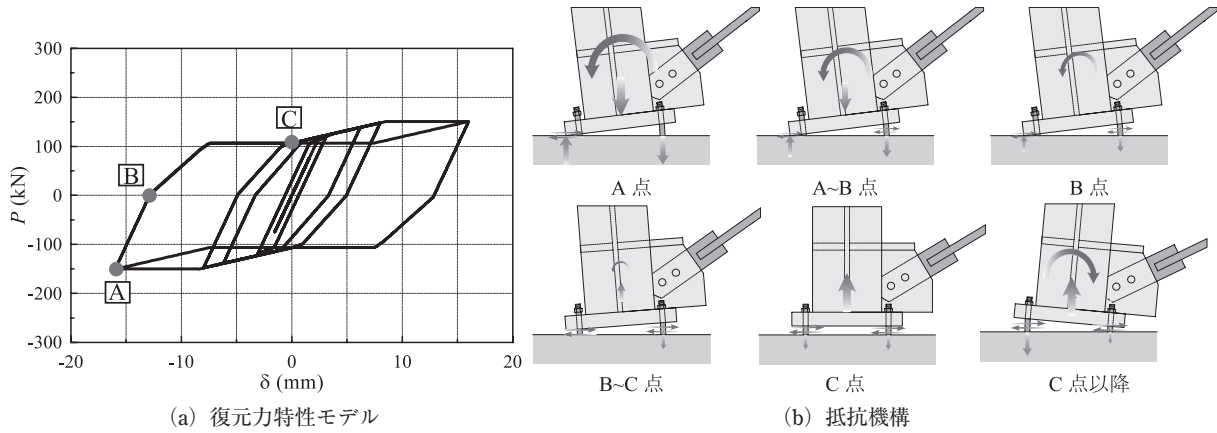


図8 スリップ型露出柱脚の復元力特性と抵抗機構

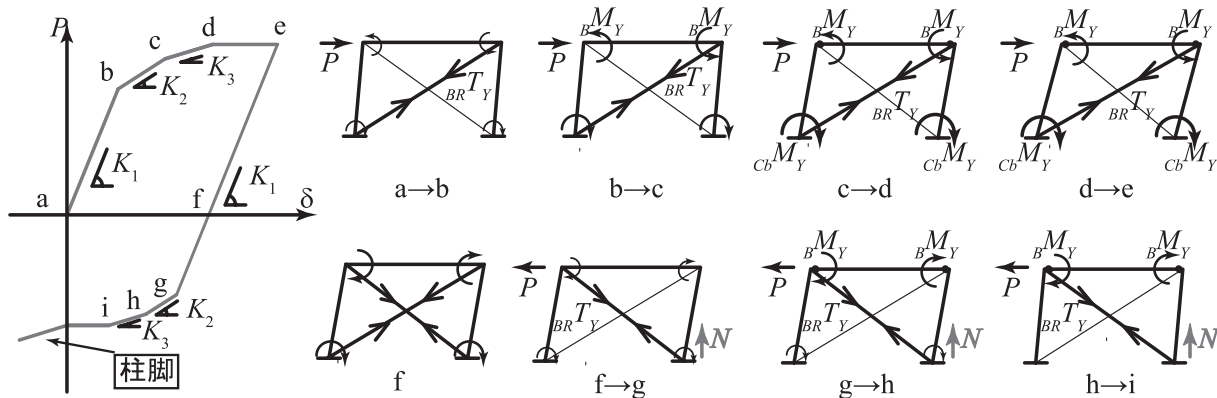


図9 露出柱脚付き NC プレース架構の履歴

4. スリップ型柱脚の抵抗機構と復元力特性モデル

図8にスリップ型露出柱脚の復元力特性モデルと抵抗機構を、図9に露出柱脚付きNCブレース架構の履歴を、それぞれ、示す。

復元力特性モデルは3章で示したモデルに、実験結果で得た柱脚の抵抗機構を考慮して得られるモデルとする。

4.1 柱脚の抵抗機構の変化

今回の試験体は、柱の曲げモーメントの影響でアンカーボルトが降伏・塑性伸びする。更に、NCブレースの影響で柱脚の抵抗機構が複雑に変化する。A点ではブレースからの圧縮力が柱脚に作用するため、柱脚は離間することなくベースプレートが基礎と完全に接触している。A～B点の間では逆方向荷重になり、もう一方のブレースが抵抗し始めるため、柱脚に作用する圧縮軸力は減少していく。B点では、両ブレースの軸力が等しくなるため柱脚には軸力が作用しない。しかしながら、B点以降(図9のf以降参照)から柱脚には引張軸力(図8のB点以降参照)が作用する。アンカーボルトは柱の曲げによって降伏しているためブレースからの引張軸力を受けると、ベースプレートは離間する。更に、アンカーボルトを支点

にしてベースプレートが回転するため、弾性剛性が低下する。

更に荷重が進むと、ベースプレートがアンカーボルト全てと接触する。このように、ブレースからの応力に対して弾性設計した柱脚でも、柱の曲げモーメントの影響により、アンカーボルトは降伏・塑性伸びする。更に、ブレースの応力により、柱脚部に引張軸力が作用すると、複数の抵抗機構が発生するため、評価が煩雑になる。

4.2 実験結果との比較

図10に $P-\delta$ 関係を示す。図10には4章4.1節で示した柱脚の抵抗機構を考慮した復元力特性モデルを、図10(b)にはアンカーボルトの破断位置も併せて示す。

実験結果の抵抗機構の変化(図8(b)参照)を元に算出した復元力特性モデルは、実験結果と良好に対応している。柱脚のベースプレートと基礎間の接触離間による抵抗機構の変化を考慮した弾性回転剛性、曲げ抵抗耐力の評価方法は確立している¹⁰⁻¹²⁾。このように、柱脚の抵抗機構の変化を考慮した詳細モデルを使用することによって、架構の応答を正確に評価することは可能である。しかしながら、このような抵抗機構の変化を考慮することが煩雑であり、また、抵抗機構の変化を予測すること自体が容易では

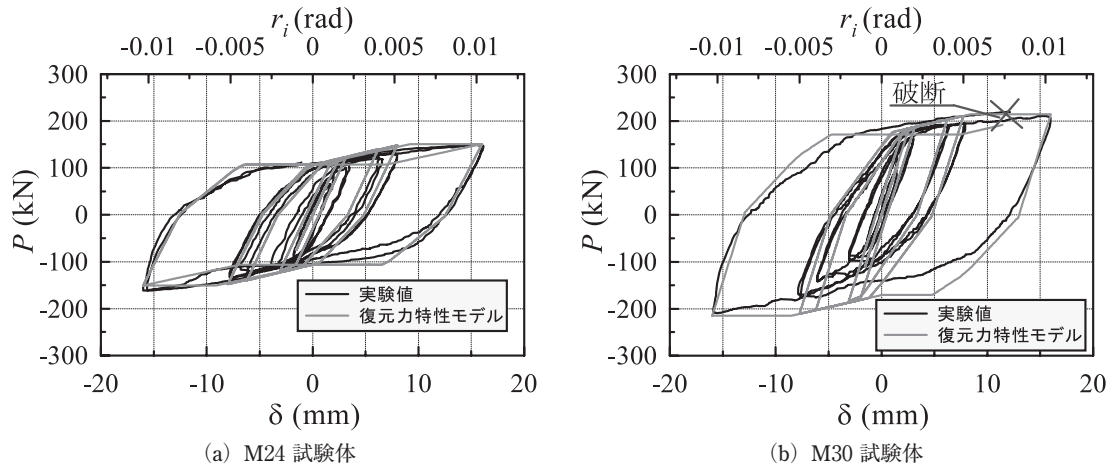


図10 P-δ 関係

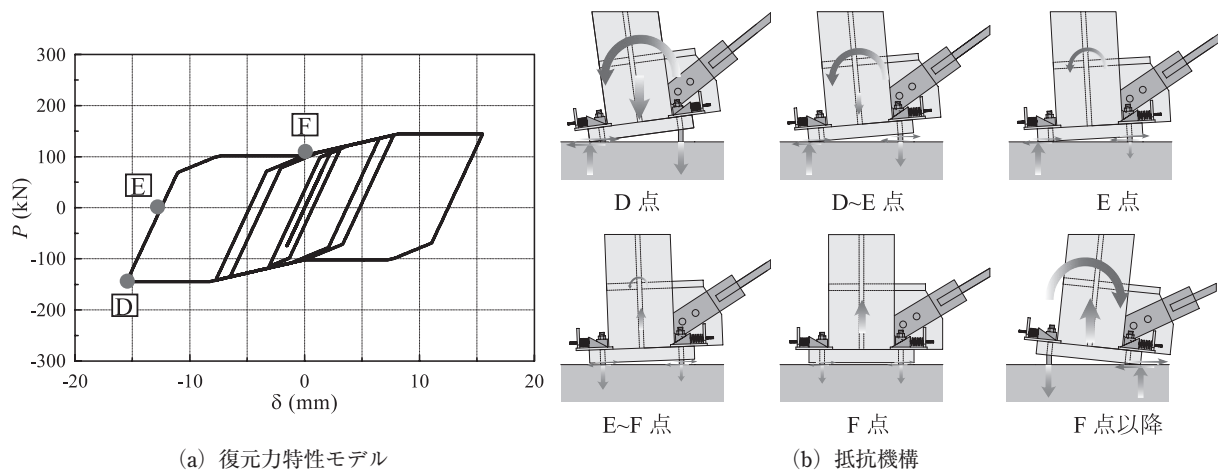


図11 ノンスリップ型露出柱脚の復元力特性と抵抗機構

ない。

さらに、M30 試験体においては、アンカーボルトが正方向載荷の2サイクル目で破断している。これは、ブレースの降伏耐力がアンカーボルトの降伏耐力以上であり、柱脚が離間することによって、アンカーボルトがすべてのせん断力を負担するためである。

5. ノンスリップ型柱脚の抵抗機構と復元力特性モデル

図11にノンスリップ型露出柱脚の復元力特性モデルと抵抗機構を示す。

柱脚をノンスリップ型露出柱脚にした場合には、アンカーボルトの降伏・塑性伸びによる間隙に楔が貫入しスリップ現象を生じない。そのため、スリップ型露出柱脚のような抵抗機構ではなく、図11(b)に示すような抵抗機構を柱脚が示すと考えられる。D点においては、柱脚は圧縮領域で基礎とベースプレート間の摩擦力で抵抗する。E点までは、スリップ型と同様に圧縮軸力は減少していく。しかしながら、E点以降においてスリップ型露出柱脚とは異

なった抵抗機構を示すことになる。E点以降、スリップ型と同様に柱脚には引張軸力が作用するが(図9f点以降参照)、ノンスリップ型露出柱脚は楔デバイスの機能によってアンカーボルトがすぐに引張抵抗する。さらに、アンカーボルト2列で抵抗しながら柱脚は回転する。スリップ型露出柱脚ではアンカーボルト1列を支点にして回転が進んでいくが、ノンスリップ型露出柱脚では、常にアンカーボルトが抵抗することで、柱脚の離間量が低減されるため、早期に基礎とベースプレートが接触していくと考えられる。このような抵抗を示すことで、スリップ型露出柱脚で確認された架構の弾性剛性の低下は解消されることが考えられる。そのため、スリップ型のような柱脚の抵抗機構を考慮した非常に複雑な復元力特性モデルを算出する必要がなくなるため、設計の際に非常に簡単に、架構の応答を評価することが可能になる。

さらに、M30 試験体においては図6に示すようにミーゼスの降伏条件以上であり、アンカーボルトが破断する。しかしながら、ノンスリップ型露出柱脚を用いることで早期に基礎とベースプレートが接触し、接触間の摩擦力でせん

断力に抵抗することによって、ブレースが破断しない可能性がある。

まとめ

2種類の露出柱脚におけるブレース架構の復元力特性モデルの考察から以下の知見を得た。

- 1) ノンスリップ型露出柱脚ではアンカーボルトが柱の曲げモーメントによって降伏塑性伸びする。アンカーボルトの降伏・塑性伸び、ブレースの抵抗特性から柱脚は様々な抵抗機構を示し、架構の弾性剛性が低下する。
- 2) 柱脚をノンスリップ型露出柱脚にすることによって、知見1)による問題点を改善し、架構の復元力特性を、簡便に算出できることが可能になる。
- 3) M30 においてはスリップ型柱脚ではアンカーボルトが破断したが、基礎とベースプレート間の摩擦力でせん断力に抵抗し、ブレースが破断しない可能性がある。

今後、ノンスリップ型露出柱脚付きブレース架構の載荷実験を行うことにより、アンカーボルトが降伏・塑性伸びして以降の架構の復元力特性を今回検討した復元力特性モデルと比較検討をおこなう。さらに、スリップ型柱脚での実験結果との比較検討を行い、ノンスリップ型柱脚の利点および問題点について検討する。

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、試験体作成にあたりフルサト工業株式会社には、転造ねじアンカーボルト、並びに、建築用ターンバックル筋かいを提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 竹本泰聖, 松尾彰: 露出柱脚付ブレース架構の復元力特性と崩壊機構について, 鋼構造年次報告集, 第18巻, pp. 335-342, 2010.11.
- 2) 高松隆夫, 玉井宏章, 小持明宏: ノンコンプレッションブレースの履歴性状とエネルギー吸収性について, 鋼構造年次論文報告集, 第11巻 pp. 129-136:2003.11.
- 3) 玉井宏章, 高松隆夫, 松尾彰: ノンコンプレッションブレースの耐震性能向上について, 日本建築学会構造系論文集, 第595号, pp. 131-138:2005.9.
- 4) 高松隆夫, 玉井宏章, 加藤孝昌, 小畑寛行: ノンコンプレッションブレースで補強した鋼構造骨組の復元力特性, 鋼構造年次論文報告集, 第14巻 pp. 429-436:2006.11.
- 5) 高松隆夫, 玉井宏章, 加藤孝昌: ノンコンプレッションブレースによる耐震補強工法に関する実験的研究, 広島工業大学紀要・研究編, 第42巻, pp. 105-111:2008.2.
- 6) 高松隆夫, 山西央朗, 玉井宏章, 竹本泰聖: 露出柱脚を有するノンコンプレッションブレース付き架構に関する研究, 広島工業大学紀要, 第45巻, pp. 85-92, 2011.2.
- 7) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 松村高良, 石原節夫, 松尾彰: 屋内運動場露出柱脚の復元力特性と楔デバイスによる耐震改修工法, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 54B, pp. 293-300, 2008.4.
- 8) 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, 鋼構造年次報告集, 第12巻, pp. 281-288, 2004.11.
- 9) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985.3.
- 10) 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, 2008.12.
- 11) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松村高良, 松尾彰: 引張軸力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, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻 第642号 pp. 1495-1502, 2009.8.
- 12) 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.