

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚付ブレース架構の繰返し載荷実験

山西 央朗*・高松 隆夫**・玉井 宏章**・竹本 泰聖***
澤田樹一郎****・松尾 彰****

(平成22年10月29日受付)

Loading tests of braced-frame with anchor-bolt-yield-type exposed column-base

Teruaki YAMANISHI, Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI,
Yasumasa TAKEMOTO, Kiichirou SAWADA, Akira MATSUO

(Received Oct. 29, 2010)

Abstract

Column-bases are generally designed to consider a bending moment and an axial force, and it is clear that the axial force affects strength and stiffness of anchor-bolt-yield-type exposed column-bases. The column-base with a brace is acted by a strong axial-force and a strong shearing force, then it can be destroyed by excessive shearing force. Therefore, a cyclic loading test on a braced frame with weak column-base is carried out to clarify shearing fracture behavior of the column-base.

Key Words: *Braced-frame, Anchor-bolt-yield-type exposed column-base, Loading tests*

1. はじめに

近年、耐震補強のために既存鋼構造建築物においては、耐力および剛性の向上が容易に行えることから、ブレースを用いた補強工法（ブレースの取替え、ブレースの追加等）が多く用いられている。また、このような架構においては、弾性設計されたアンカーボルト降伏先行型露出柱脚が用いられていることが多く、一般的に引張軸力およびせん断力に対しての検討はされているが、上述のようにブレースを用いた補強を行うことにより、柱脚に作用する応力は増加し、既存の柱脚を弾性柱脚とするためには補強が必要となる。

露出柱脚に関しては、ラーメン架構を想定しての曲げと軸力を受ける場合について研究しているものが多く¹⁻¹⁰⁾、柱脚付ブレース架構を想定した場合の研究は少なく^{11,12)}、

未だ抵抗機構、崩壊機構および架構の復元力特性は不明な点を多く含んでいる。更に問題として、ブレース架構においては、せん断力の影響が大きくなると共に、引張軸力が作用して基礎とベースプレート離開して、全てのせん断力がアンカーボルトに作用することとなり早期に降伏および破断する可能性がある。このために、弾性柱脚を設計する場合には、ラーメン架構を想定した抵抗機構等は適用できず、また、そのために適切な柱脚の補強工法も確立できていない。

柱脚の引張軸力とせん断力とを同時に受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の抵抗特性については、要素実験・部材実験により明らかにされているが¹³⁻¹⁵⁾、実際の構造物においては、曲げの影響も含まれる。実際の構造物の挙動を検討するには、架構試験体を用いた実験を行うべきであるが、これまでの研究では、柱脚付ブレース架構の架構

* 広島工業大学 高性能構造システム開発研究センター

** 広島工業大学 工学部建築工学科

*** 広島工業大学大学院 建設工学専攻

**** 広島大学大学院 建築学専攻

表1 素材特性

部材名	材種	ヤング係数	降伏応力度	降伏ひずみ	ひずみ硬化 開始ひずみ	引張強さ	主要寸法 (mm)
		$E(N/mm^2)$	$\sigma_y(N/mm^2)$	$\epsilon_y(\%)$	$\epsilon_{ST}(\%)$	$\sigma_u(N/mm^2)$	
柱	フランジ	SN490	205000	395	0.14	2.51	H-250x250x9x14
	ウェブ	SN490	205000	399	0.16	2.61	
梁	フランジ	SS400	205000	295	0.15	2.84	H-250x125x6x9
	ウェブ	SS400	205000	318	0.17	3.62	
ベースプレート	SN490	205000	347	0.18	1.94	487	PL-50
ブレース	M24	SNR400	205000	287	0.14	2.58	M24 軸部径 $\phi = 22.2\text{mm}$
	M30	SNR400	205000	296	0.14	2.14	M30 軸部径 $\phi = 27.7\text{mm}$
	M33	SNR400	205000	280	0.13	2.53	M16 軸部径 $\phi = 31.0\text{mm}$
アンカーボルト	ABR400	205000	294	0.14	2.55	435	M16 軸部径 $\phi = 14.5\text{mm}$

柱：H-250x250x9x14
 梁：H-250x125x6x9
 ベースプレート：PL-50
 ブレース：M24 軸部径 $\phi=22.2\text{mm}$
 $A_{BR}=387\text{mm}^2$
 M30 軸部径 $\phi=27.7\text{mm}$
 $A_{BR}=603\text{mm}^2$
 M33 軸部径 $\phi=31.0\text{mm}$
 $A_{BR}=755\text{mm}^2$
 アンカーボルト：M16
 軸部径 $\phi=14.5\text{mm}$
 $A_{AB}=165\text{mm}^2$

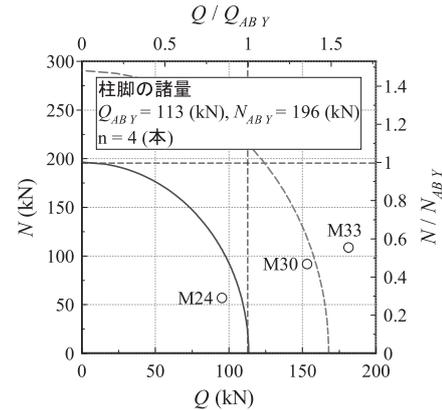
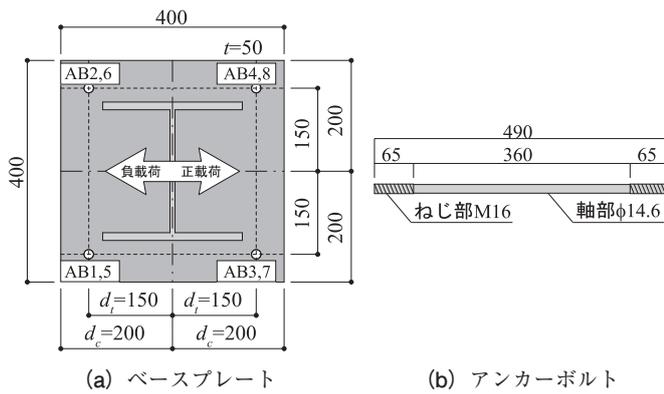
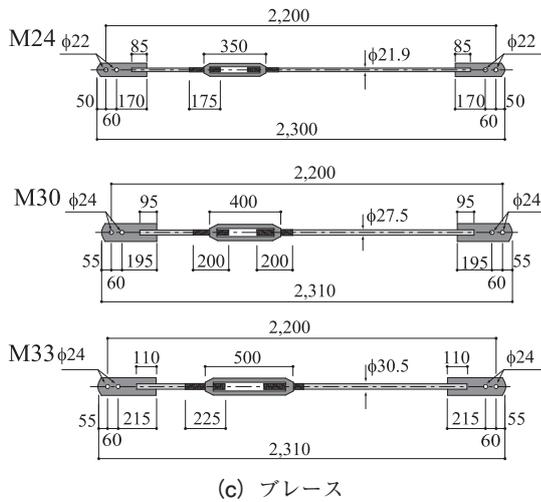
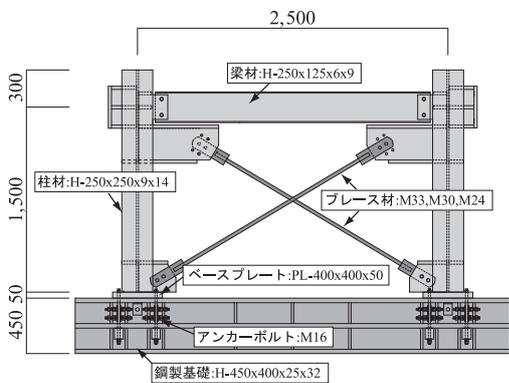


図2 各ブレースの耐力



(c) ブレース



(d) 試験体設置状況
 図1 試験体

実験を行っている研究は数少ない^{11,12)}。

そこで、データの蓄積と、正確な抵抗機構を判断・検討することを目的に、本論文では、軸力とせん断力を同時に受ける柱脚の降伏条件や崩壊機構を明らかにすることと、また、ブレース架構の復元力特性を明らかにすることを目的とする。

方法としては、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚付ブレース架構を用いて、ブレースを変数とした載荷実験を行い、実験結果より崩壊機構を明らかにすると共に、実験結果の復元力特性を検討・考察する。

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ブレース架構を用いて、ブレースの断面を変数とした水平繰返し載荷実験を行う。尚、実験変数であるブレースの断面は、図1 (b) に示す柱脚のアンカーボルトについて、図2のミーゼスの降伏条件より得られる柱脚の降伏耐力以下のもの (M24)、降伏耐力を超過し最大耐力以下のもの (M30)、そして最大耐力を超過するもの (M33) を、それぞれ、選定する。

2.1 試験体概要

表1に試験体の素材特性と主要寸法を、図1に試験体形状を示す。柱にはH-250x250x9x14を、梁にはH-250x125x

6x9を使用し、柱下端部にベースプレートを隅肉溶接接合し、柱を弱軸方向としてガセットプレートと梁のウェブを高力ボルト接合している。柱脚には、ベースプレートの隅角部にアンカーボルトを4本配置したPL-400x400x50を使用し、アンカーボルトには転造ねじアンカーボルトM16を使用する。尚、アンカーボルトには降伏軸力の30% (15kN) を初期軸力として導入する。ブレースには、ターンバックル付転造ねじブレース M24, M30, M33を使用する。ブレースは架構の対角線上に配置しており、設置角度は30.96度である。尚、初期載荷時より直ぐに圧縮軸力がブレースに作用することを防ぐため、ブレース降伏軸力の50% (M24の場合55kN, M30の場合90kN, M33の場合103kN) を初期軸力として導入する。初期軸力導入方法としては、ブレースに取り付けてあるターンバックルを締めて、初期軸力を導入している。

2.2 載荷装置と載荷方法

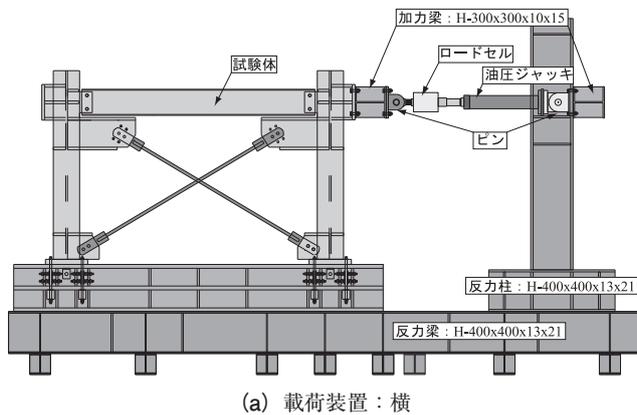
図3に載荷装置を示す。載荷装置は、反力梁 H-400x400x13x21, 反力柱 H-400x400x13x21 および油圧ジャッキにより構成されており、試験体を反力梁に設置し、反力柱に取り付けた油圧ジャッキはピンを介し試験体に設置する。また、載荷時における試験体梁の座屈を防ぐため座屈拘束装置を用いる。座屈拘束装置は、梁の中央部に鋼板を両サイ

ドから当てて挟み込んだものであり、接触面における摩擦力を小さくしてローラー支持とするため、鋼板にテフロンシートを貼り、グリスを塗っている。

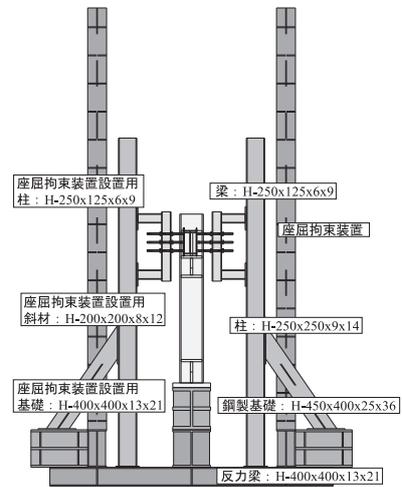
載荷は、試験体柱頭部に水平の油圧ジャッキを設置し、水平変位 δ を制御値とした正負交番漸増繰返し載荷を行う。目標値を、1/1000, 1/500, 1/250, 1/125, 1/75として、それぞれ、2サイクル行う。尚、2台の油圧ジャッキにより載荷を行うが、試験体にねじれや曲げが作用しないようにするために、各油圧ジャッキの伸び量が等しくなるよう制御する。また、アンカーボルトが破断した時点で載荷終了とする。

2.3 計測方法と整理方法

図4に計測位置を示す。変位としては、柱頭部に設置した変位計により柱頭部水平変位 δ を、各柱下端部の鉛直変位 $\delta_{L,R}$ を計測してベースプレート回転角 θ を算出し、柱下端部に設置した変位計により柱脚水平変位 $c_B\delta_H$ を計測する。荷重としては、ジャッキ先端のロードセルにより水平荷重 P を、アンカーボルト下端に設置したセンターホール型ロードセルにより、各アンカーボルトの軸力 $_{AB}T$ を計測する。また、ひずみゲージを柱および梁に貼付して、各ブレース軸力の水平成分 $_{BR}N_x$ を算出する。



(a) 載荷装置：横



(b) 載荷装置：前

図3 載荷装置

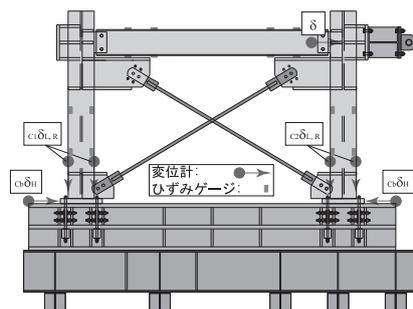
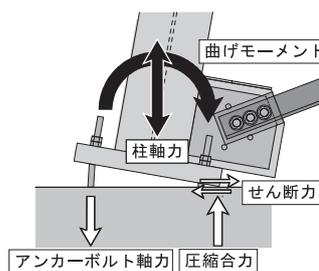
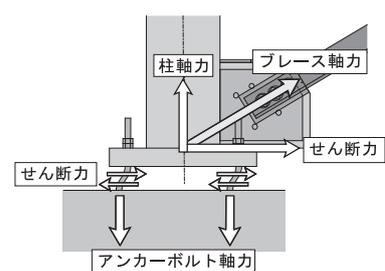


図4 計測位置



(a) 抵抗機構 A



(b) 抵抗機構 B

図5 柱脚の抵抗機構

3. 降伏耐力および抵抗機構

図5に柱脚の抵抗機構を、図6に柱脚が曲げモーメントで崩壊する場合の解析モデルおよび復元力特性モデル（柱脚付架構，ブレース，摩擦抵抗）を、図7にミーゼスの降伏条件を用いて算出したアンカーボルト4本分の $Q-N$ 耐力相関関係上の降伏曲線および最大耐力曲線を、それぞれ、示す。

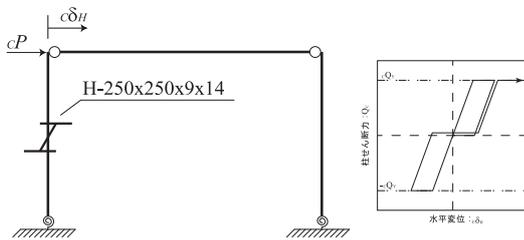
柱脚の抵抗機構としては、抵抗機構 A，抵抗機構 B を以下に示す。

3.1 抵抗機構 A で抵抗する場合¹⁶⁾

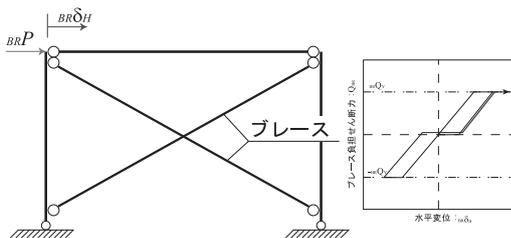
図5 (a) 示すような抵抗機構 A では基礎とベースプレートが接触し、曲げで柱脚が崩壊した抵抗機構であり、柱脚は曲げモーメントにより損傷するものの、基礎とベースプレートとが接触していることにより摩擦力が発生してせん断力に抵抗している。このことにより、トラス架構を形成する上でのピン支持としての機能を有していることとなり、復元力特性は、ブレース架構が成立すると考えて、図6の柱脚付架構モデル，ブレースモデル，摩擦抵抗モデルと3つのモデルに分解し、各モデルで評価した結果を足し合わせたもので復元力特性モデルを算出する。

○柱脚付架構

図6 (a) に解析モデルと復元力特性モデルを示す。柱脚付架構の解析モデルは、柱梁接合部をピン，柱脚部に回転バネを用いたモデルとする。本試験体の柱脚はアンカーボルト降伏先行型露出柱脚であり、スリップ現象を生じるため、回転バネはスリップ型復元力特性モデルとする。柱頭部に水平荷重を与えることで柱には変動軸力が作用するが、左右の柱に作用する変動軸力の影響は相殺しあって、

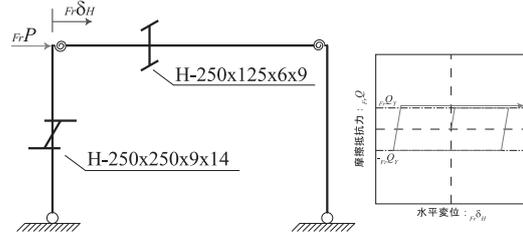


(a) 柱脚モデルおよび復元力特性

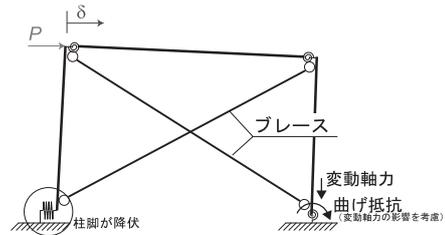


(b) ブレースモデルおよび復元力特性

図6 (a) (b) 解析モデル



(c) 摩擦抵抗モデルおよび復元力特性モデル



(d) 抵抗機構 B による崩壊モデル

図6 (c) (d) 解析モデル

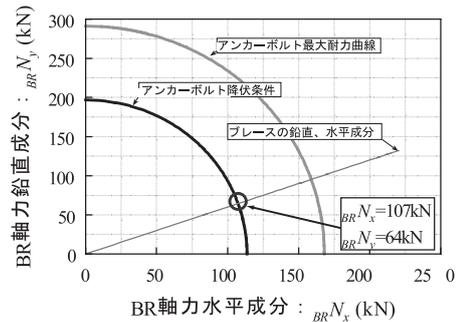


図7 $Q-N$ 耐力相関関係

層せん断力については、変動軸力の影響を無視できる¹⁶⁾(左右の柱脚で、抵抗機構 A が成立している場合に限る)。このため、変動軸力の影響はないとして復元力特性モデルを作成する。

○ブレース

図6 (b) に解析モデルと、ブレースの復元力特性モデルを示す。柱梁接合部をピン接合，柱脚部をピンとしたフレームにブレースを取り付けたトラスフレームのモデルとする。ブレースは圧縮軸力と引張軸力が繰返されていくと座屈と塑性伸びが生じるため、スリップ型復元力特性モデルとする。尚，ブレースは圧縮軸力に抵抗しないものとして評価する。また，トラス架構が成立して，柱梁はブレースに対して十分剛性が高いので，ブレースのみの軸方向変形を考慮して水平剛性を算出する。

○摩擦抵抗

図6 (c) に解析モデルと，復元力特性モデルを示す。本試験体は，柱梁接合部をピン接合としているが，実際は完全なピン接合ではなく摩擦力による抵抗の影響が柱に伝

播するため、摩擦抵抗を考慮した復元力特性モデルを作成して、評価する。柱梁接合部に弾塑性バネを用い、柱脚をピンとする。弾塑性バネの復元力特性モデルは完全弾塑性型とし、摩擦抵抗の最大耐力は、実験値を用い算出する。摩擦抵抗モデルの最大耐力は、解析モデルでの梁端部の曲げモーメントが、実験値で正負での梁端部の曲げモーメントの最大値の平均値に達したときの値としている。

3.2 抵抗機構 B で抵抗する場合

図 5 (b) 示すような抵抗機構 B は引張軸力により基礎とベースプレートとが離間してせん断力で柱脚が崩壊する抵抗機構である。せん断力をアンカーボルトが負担するので、降伏耐力は引張軸力とせん断力の組合せ応力を考慮して、ブレース成分とミーゼスの降伏条件曲線（アンカーボルト降伏）とが交わった点の水平成分とする。この場合の崩壊機構は、図 6 (d) のようになり、耐力は引張側柱脚の耐力で決定する。

4. 結果と考察

図 8～11 および表 2, 3 に実験結果を、写真 1 に試験体の状態を、それぞれ、示す。

図 8 に水平荷重 P - 水平変位 δ 関係を、図 9 にブレースおよび架構が負担する層せん断力 Q - δ 関係を、図 10 にブレース軸力水平成分（柱脚部に作用するせん断力） ${}_{BR}N_x$ - 柱脚の水平変位 $c_H\delta_H$ 関係を、図 11 にアンカーボルト軸力 ${}_{AB}T$ - 柱脚の回転角 θ 関係を、また、表 2, 3 に各実験結果より算出したエネルギー吸収量を各結果と共に記載し、写真 1 に柱脚が曲げにより崩壊する試験体 (M24) とせん断により崩壊する試験体 (M30) の柱脚および実験後のアンカーボルトの写真を、それぞれ、示す。尚、図 8 中には、図 6 の解析モデルから算出した復元力特性モデル

と崩壊荷重を、図 9 中には、ブレース降伏時の軸力水平成分を、併せて示す。また、図 11 のアンカーボルト軸力は各列ごとに累加している。更に、M30 および M33 の試験体は载荷中にアンカーボルトがせん断破断したので、その位置を図 8 中に \times 印で示す。表 2 には、実験値と復元力特性モデルの水平弾性剛性を、表 3 には図 8～10 のグラフの履歴を積分して算出した実験終了時エネルギー吸収量を、それぞれ、示す。

4.1 水平荷重-水平変位およびブレースの状態

○試験体 M24

図 8 および表 2 より、実験値と抵抗機構 A を仮定した（柱脚が曲げにより崩壊すると仮定した）復元力特性モデルは良好に対応している。これは、アンカーボルトの降伏耐力以下のため、ブレース軸力による引張軸力およびせん断力の影響が少なく、図 11 に示すように、回転角が载荷と共に増加し、柱脚の降伏が曲げによるもので、柱脚の降伏後も柱脚がピン支持を維持でき、ブレース架構が維持できているため、3章で求めたモデルと対応していると考えられる。

○試験体 M30

図 8 および表 2 より、実験値と抵抗機構 A を仮定した（柱脚が曲げにより崩壊すると仮定した）復元力特性モデルは良好に対応している。これは、ブレースが降伏軸力に達しているからであり、図 11 に示すように、回転角がアンカーボルト破断まで進んでいるため対応している。しかしながら、ミーゼスの降伏条件を超過しているため、ブレース軸力からのせん断力が柱脚に大きく影響し、図 10 のように、柱脚が水平に大きく変位している。このために、アンカーボルトがせん断降伏し、载荷の途中でアンカーボルトがせん断方向に破断して、実験が終了している。

表 2 実験結果

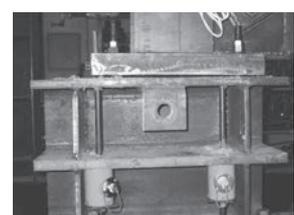
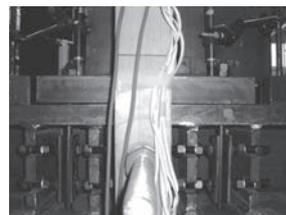
試験体名称	実験値		理論値		実験値 / 理論値	
	$E^E K$ (kN/mm)		$A^A K$ (kN/mm)		$E^E K / A^A K$	
	1 サイクル目	3 サイクル目	1 サイクル目	3 サイクル目	1 サイクル目	3 サイクル目
M24	55.8	29.7	49.1	29.1	1.14	1.02
M30	77.6	40.7	71.6	40.3	1.09	1.01
M33	90.3	53.6	87.0	52.7	1.04	1.02

試験体名称	エネルギー吸収量			
	E (kN·m)			
	全体	ブレース	柱脚	その他
M24	7,000	5,200 (0.74)	1,200 (0.17)	600 (0.09)
M30	8,800	6,800 (0.77)	1,700 (0.19)	300 (0.03)
M33	6,400	4,400 (0.69)	1,800 (0.28)	200 (0.03)



(a) 実験後のアンカーボルト (M24)

(b) 実験後のアンカーボルト (M30)



(c) 最大変位時引張側柱脚 (M24)

(d) 最大変位時引張側柱脚 (M30)

写真 1 試験体

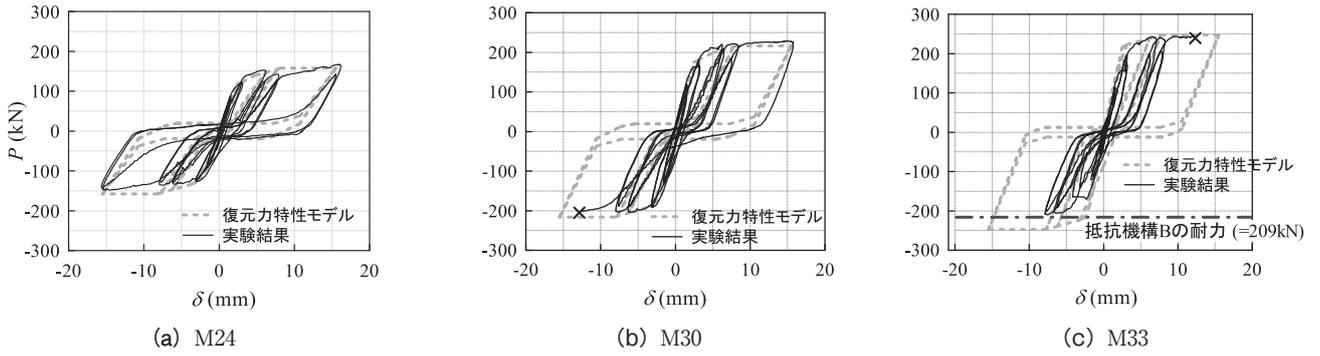


図8 $P - \delta$

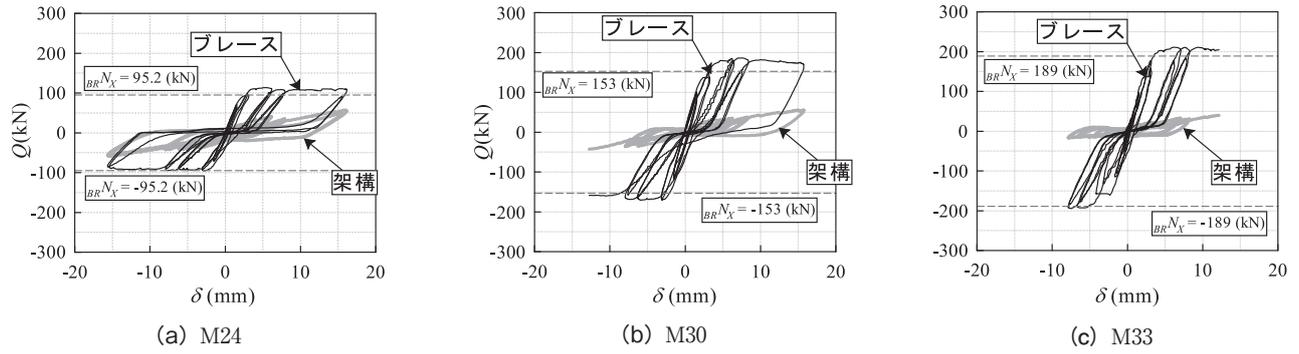


図9 $Q - \delta$

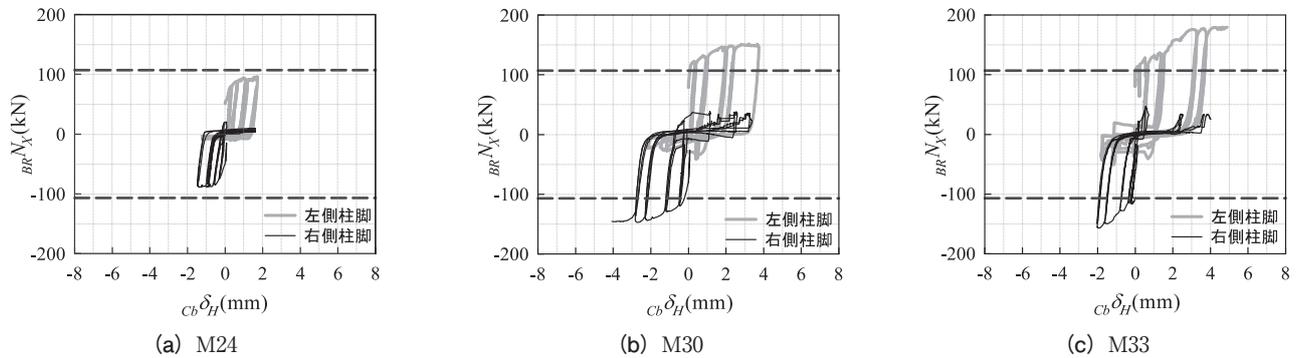


図10 $BRN_X - C_b\delta_H$

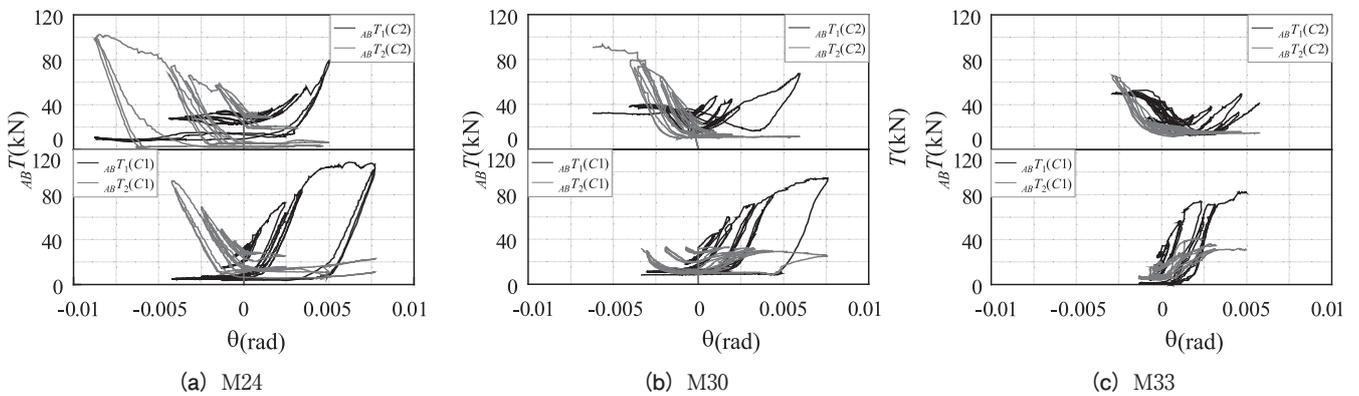


図11 $T - \theta$

○試験体 M33

図8および表2より、実験値と抵抗機構Aを仮定した(柱脚が曲げにより崩壊すると仮定した)復元力特性モデルは良好に対応している。これは、試験体M30と同様の結果であり、また、試験体M30より、ミーゼスの降伏条件を超過しているため、柱脚は水平方向に大きく変位し、また、他の試験体より早期にアンカーボルトがせん断降伏している。

但し、アンカーボルトが鉛直力と曲げにより大きく塑性変形するために、負方向ではベースプレートと基礎とが離間した抵抗機構Bとなり、耐力が正方向より低下している。このため、抵抗機構Bを想定した崩壊機構を想定して求めた耐力と実験結果の最大耐力とが、良好に対応している。

以上より、ミーゼスの降伏条件を超過している場合においても、柱脚部分はベースプレートの回転により曲げ抵抗が作用して、抵抗機構Aを想定した復元力特性モデルで評価できることが分かる。但し、表3の実験終了時エネルギー吸収量からも分かるように、ブレースが大きくなると、柱脚がせん断崩壊して早期にアンカーボルトが破断するため、エネルギー吸収量は低下する。すなわち、塑性変形能力(靱性)を期待する架構として設計する場合においては、ブレースからの応力が、アンカーボルトのミーゼスの降伏条件ラインを超過しないように設計する必要がある。

4.2 柱脚の崩壊機構

○試験体 M24

柱脚の崩壊機構は、M24の場合には柱脚の水平変位は小さく、また、図10、11において、エネルギー吸収量を比較した場合、アンカーボルトに入ってくる力は軸力に比べて、水平成分の方が小さいことが分かる。更に、図11に示すように回転角が載荷と共に進行しているため、柱脚の抵抗機構として曲げによるものが大きく、写真1(a)からわかるように最大変位時においても基礎とベースプレートとが接触して曲げにより崩壊する抵抗機構Aを示していることが分かる。このため、アンカーボルトが破断する等の現象は発生することなく、 $P-\delta$ 関係上においても柱脚が曲げにより崩壊すると仮定した復元力特性モデルと良好に対応している。但し、ブレースからの応力に対して弾性設計していても、架構が変形に伴うベースプレート回転角の増加により、アンカーボルトは曲げ降伏する。露出柱脚付ブレース架構を設計する場合には、せん断力、軸力による影響のみではなく、架構の変形に伴う曲げの影響も考慮して設計する必要がある。

尚、写真1(b)から分かるように、アンカーボルトは僅かにせん断変形しており、更に、軸方向にも伸びて降伏

している。これは、ブレースからの軸力に対して弾性設計していても、架構が変形することにより柱脚に曲げモーメントが作用して、曲げによる回転でアンカーボルトが降伏したためである。

○試験体 M30, M33

M30およびM33の場合には、柱脚の水平変位が大きく、また、図10、11において、エネルギー吸収量を比較した場合、アンカーボルトに作用する力は軸力より水平成分の方が大きい。M24と比べM33では軸力は大きく減少している。更に、図11に示すように試験体M24より回転が進行していないことが分かり、写真1(c)より基礎とベースプレートとが離間しているために、柱脚の崩壊機構においてせん断力が強く支配しており、抵抗機構Bを示していることが分かる。このため、 $P-\delta$ 関係上においても復元力特性モデルとほぼ対応しているものの、アンカーボルトに作用するせん断力が大きくなるにつれ柱脚が水平方向変位し、アンカーボルトが破断して実験を終了している。

5. まとめ

露出柱脚を有するブレース付フレームの実験を行い得られた知見を以下に示す。

1) ミーゼスの条件式より求めた最大耐力の値を超過する場合においても、本実験で使用した試験体の範囲ならば、ブレースが降伏して、抵抗機構Aを想定して算出した復元力特性モデルと実験結果はほぼ対応している。

しかしながら、載荷の途中でアンカーボルトがせん断方向に破断して、実験を終了するため、架構としての靱性は期待できない。

2) 崩壊機構は、ブレースからの応力が、ミーゼスの降伏条件より算出した降伏耐力を超過している場合は、柱脚はせん断力により崩壊する抵抗機構Bを示す。柱脚の耐力を超過していない場合は、曲げモーメントにより崩壊する抵抗機構Aを示す。但し、ブレースからの応力が柱脚の降伏耐力を超過していない場合においても、架構の変形に伴い、柱脚は曲げ降伏する。

本実験で得られた結果のように、ブレースからの応力が、柱脚の降伏耐力を超過する場合においても、柱脚の曲げによって生じる摩擦力(ベースプレートと基礎間の摩擦力)がせん断力を負担するため、見かけ上の耐力が増加する。一方、柱脚の降伏耐力以下の場合においても、ベースプレートの回転に伴い柱脚は降伏する。

このように、露出柱脚付ブレース架構を検討する場合、ブレースからの応力により柱脚が降伏するか否かに着目して検討することが必要であるが、更に、柱脚には架構の変形に伴う曲げ(ベースプレート回転)の影響も含ま

れるので、これらの総合的な判断が必要とされる。

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、試験体の転造ねじアンカーボルトを提供していただきましたフルサト工業株式会社に対して、感謝の意を表します。

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 Research, Vol.61, pp.942-961, 2005.
- 6) 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.
- 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) 玉井宏章, 高松隆夫, 山西央朗, 白木剛, 多田元秀: 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権, 鋼構造年次論文報告集, 第14巻, pp.269-276, 2006.11.
- 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) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 松村高良, 石原節夫, 松尾彰: 既存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について, 構造工学論文集, Vol.54B, pp.715-722, 2008.3.
- 11) 畑中理沙, 田淵基嗣, 田中剛, 益居綾: プレース付き鉄骨造骨組に露出柱脚の耐震補強に関する研究-その1 実験概要-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 構造系(C-1), pp.801-802, 2002.8.
- 12) 益居綾, 田淵基嗣, 田中剛, 畑中理沙: プレース付き鉄骨造骨組に露出柱脚の耐震補強に関する研究-その2 実験結果-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 構造系(C-1), pp.801-802, 2002.8.
- 13) 大橋芳郎, 中島茂壽: 組合せ, 引張, せん断力を受ける鋼柱脚アンカーボルト露出部の力学性状に関する実験的研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 平成9年度, pp.237-240, 1997.
- 14) 河野久夫, 九谷和秀, 増田貫志: 鉄骨構造露出柱脚におけるアンカーボルトのせん断抵抗力に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第567号, pp.141-148, 2003.5.
- 15) 九谷和秀, 増田貫志: 鉄骨構造露出形式柱脚部の耐荷機構に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第440号, pp.113-124, 1992.10.
- 16) 福原章宏, 高松隆夫, 山西央朗, 玉井宏章, 松尾彰: 露出柱脚を有するプレース付きフレームの復元力特性, 鋼構造年次論文報告集, 第17巻, pp.65-72, 2009.11.