

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

高松 隆夫*・山西 央朗**・玉井 宏章*・竹本 泰聖***

(平成22年10月29日受付)

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

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI, Hiroyuki TAMAI and Yasumasa TAKEMOTO

(Received Oct. 29, 2010)

Abstract

Non-compression braces show perfectly elastic-plastic restoring force characteristics without both buckling and slip behavior because of wedge-device function. Those braces possess excellent energy absorption capability and slender members can be chosen as earthquake resistant braces. When strength of column bases is weaker than the braces, it is not clear that behavior of the column bases influences the restoring force characteristics of the braces in cyclic loadings. Experimental study on cyclic loading tests of non-compression-braced frames with exposed-type column bases was carried out to clarify resistant mechanism of the column base and cyclic behavior of the braced frame. The following conclusions were obtained from the experimental results: 1) The braced frames showed bi-linear-type cyclic curves in case of brace-strength less than von Mises yield condition of anchor-bolts; 2) The braces were yielding because of reduction of shear stress of anchor-bolts caused by friction of the base-plate and the foundation in case of brace-strength larger than von Mises yield condition of anchor-bolts.

Key Words: non-compression brace, exposed column-base, anchor-bolt-yield-type, resisting-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の増大をする工法が多く用いられている。このような耐震改修は、ブレース周辺部材への応力増大を招くので、設計の際には留意する必要がある。

一般的に、柱脚はブレース架構とする際に弾性設計されている。しかし、ブレースの増設、又は、ブレース断面を増大することで柱脚に作用する応力が増大して、柱脚が弾性ではなくなり、ブレースが本来の性能を得られない可能

性がある。

鋼構造の柱脚としては、安価で簡便に施工ができることから、露出柱脚が多く用いられている。また、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚ではスリップ現象などの問題点などがあり、多くの研究が行われている。柱脚付ブレース架構とすることで柱脚には、ブレース軸力の鉛直・水平成分が軸力とせん断力として作用するが、せん断力についての研究は数少ない。

一方、ノンコンプレッションブレースは、座屈現象および塑性伸びによるスリップ現象を改善するので、完全弾塑性型の復元力特性を示し、エネルギー吸収性能の良いブレース

* 広島工業大学工学部建築工学科

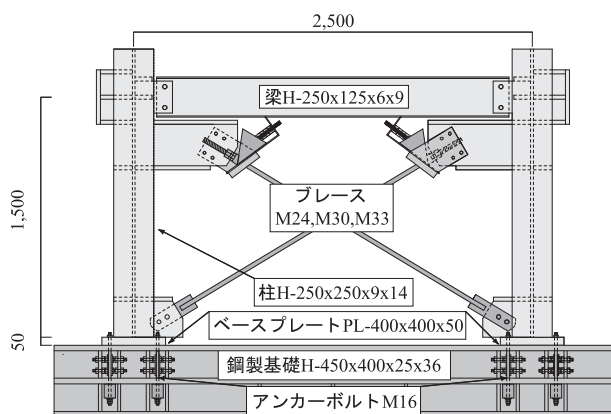
** 広島工業大学高性能構造システム開発研究センター

*** 広島工業大学工学系研究科建設工学専攻

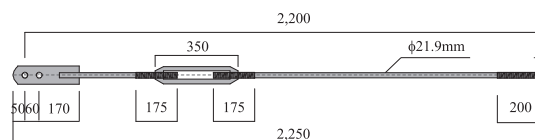
表1 素材特性

部材名	材種	ヤング係数 E (N/mm ²)	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (%)	ひずみ硬化 開始ひずみ ϵ_{ST} (%)	引張強さ σ_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
ブレース M33	SNR400	205000	285	0.14	1.79	437
アンカーボルト	ABR400	205000	294	0.14	2.55	435

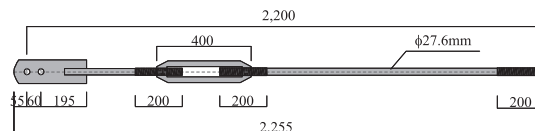
柱：H-250x250x9x14，梁：H-250x125x6x9，ベースプレート：PL-50
 ブレース：M24 軸部径 $\phi=21.9$ mm, $A_{BR}=377$ mm², M30 軸部径 $\phi=27.6$ mm, $A_{BR}=599$ mm²
 M33 軸部径 $\phi=30.9$ mm, $A_{BR}=748$ mm²
 アンカーボルト：M16 軸部径 $\phi=14.5$ mm, $A_{AB}=165$ mm²



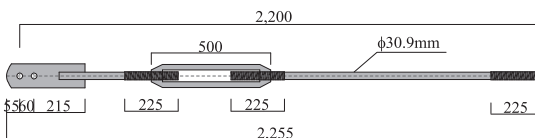
(a) 試験体



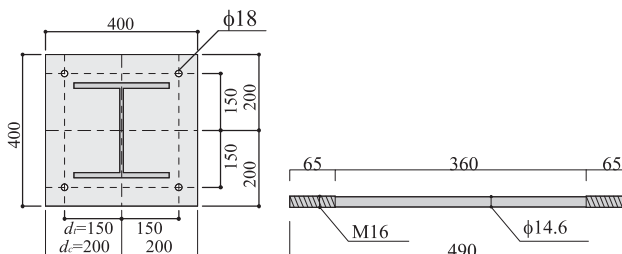
(b) ノンコンプレッションブレース：M24



(c) ノンコンプレッションブレース：M30



(d) ノンコンプレッションブレース：M33



(e) ベースプレート詳細図

(f) アンカーボルト詳細図

図1 試験体概要

ス架構が実現できる。このため、従来型のブレースに比べて地震外力に対するエネルギー吸収性能が良く、耐震改修設計時には、ブレース断面を小さく設計することができる。

しかし、柱脚の耐力に比べて、大きな断面のブレースを設置することによって、柱脚にどのような影響があるか確認されていない。

そこで、ノンコンプレッションブレースから柱脚に作用する応力が、ミーゼスの降伏条件未満の場合、以上の場合、および最大耐力以上となる場合のブレースを選定し、それぞれ、载荷実験を行う。この結果より、ノンコンプレッションブレースが、架構に及ぼす影響、柱脚の抵抗機構を明らかにする。

2. 実験概要

図1に試験体概要を、表1に素材特性を、図2にミーゼスの降伏条件を示す。

本論文では、ブレース付き架構について検討を行う。一般的にブレースは、H型柱の弱軸方向に設置される。そのため、本実験では露出柱脚を有する弱軸方向のブレース付き架構の水平载荷実験を行う。実験変数はブレース径とする。

本実験で用いるブレース架構に使用する鋼材は、梁は

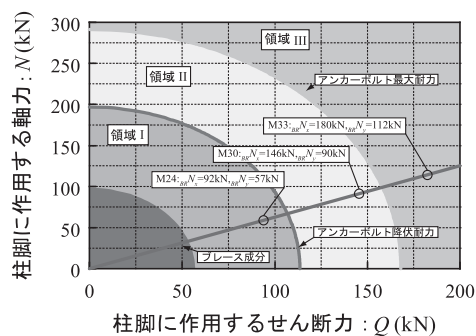


図2 ミーゼスの降伏条件

SS400, その他の部材はSN490Bとする。柱は弱軸方向としH-250x250x9x14を、梁にH-250x125x6x9を用いる。柱梁接合部はガセットプレートに梁ウェブのみを高力ボルト2本により摩擦接合するピン接合である。ベースプレートには载荷時において変形しないよう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を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。

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2軸

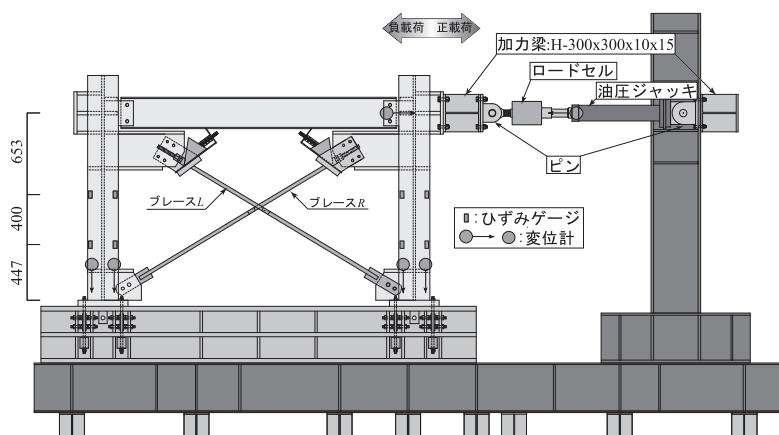


図3 荷重装置・計測計画

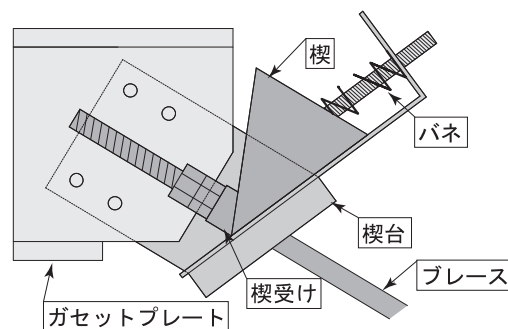
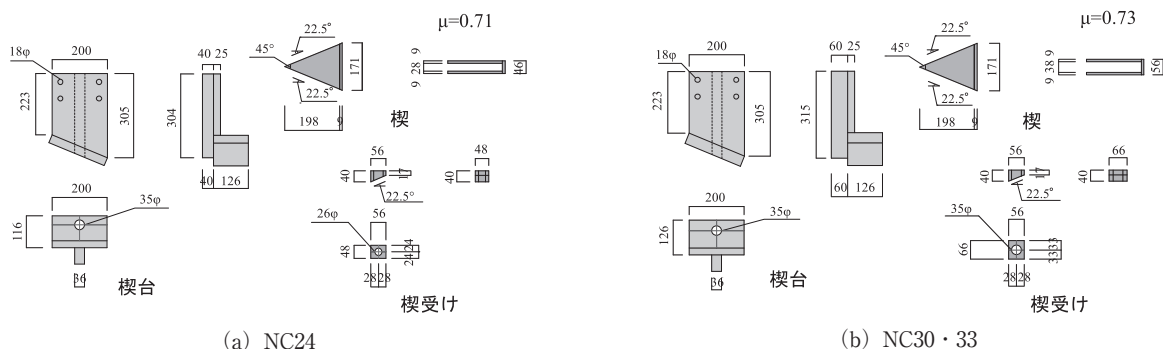


図4 NCブレースの構成



(a) NC24

(b) NC30・33

図5 楔・楔台・楔受け詳細図

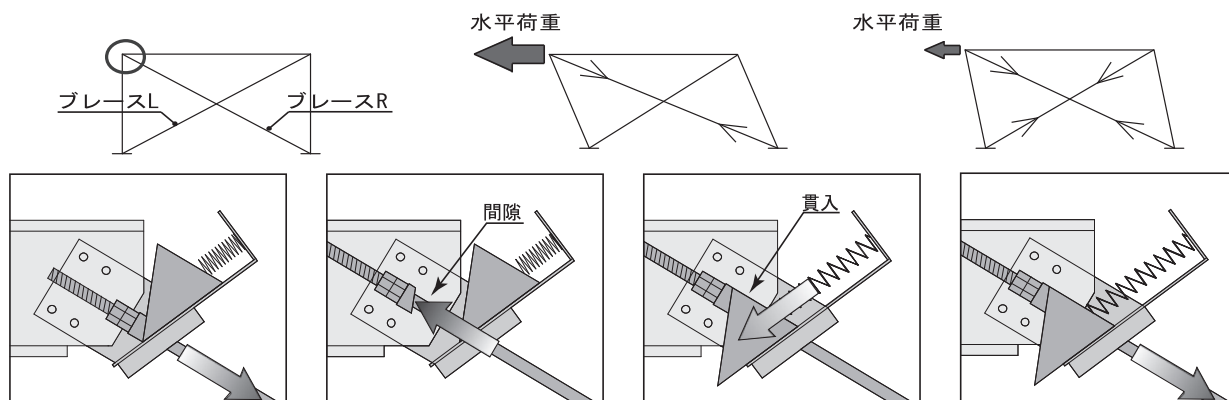


図6 NCブレース作動概念

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。更に、図2に示すように各領域区分をし、ブレースの選定を行う。

2.1 ノンコンプレッションブレース

従来のブレースは、圧縮力により座屈、引張力により塑性伸びが生じるため、ブレースに緩みが生じて、スリップ現象が生じる。一方、NCブレースは、引張力のみで抵抗し、圧縮力には抵抗しないため座屈現象は生じない。また、塑性伸びにより生じた楔受けと楔台との間に楔がバネの復元力により貫入し、ブレースに緩みが生じることなく抵抗するためスリップ現象が生じない。その他の特徴として、

ブレースをX型に配置し、ブレース降伏軸力の50%を初期軸力として導入することで、弾性抵抗時はブレース2本分の弾性剛性を示す。また、弾塑性荷重時においても、ブレース端部に生じた間隙部に楔が貫入することで、弾性抵抗時にはブレースが常に2本で抵抗するため、弾性剛性は常にブレース2本分の値を示し、更に、復元力特性は完全弾塑性型となる。

2.2 荷重装置・荷重方法

荷重装置は、反力床 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、試験体の鋼製基礎を反力床に設置し、反力柱に取り付けた水

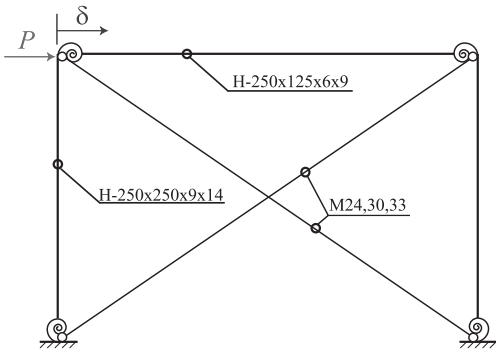
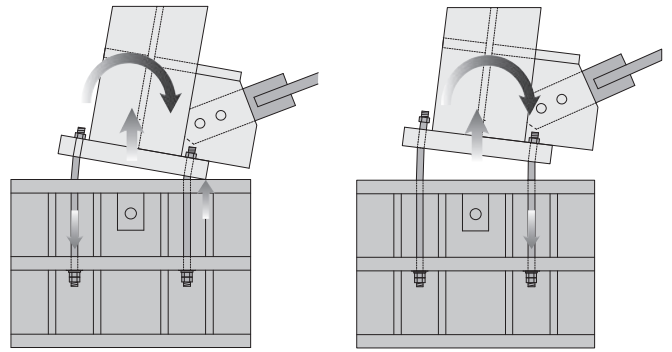


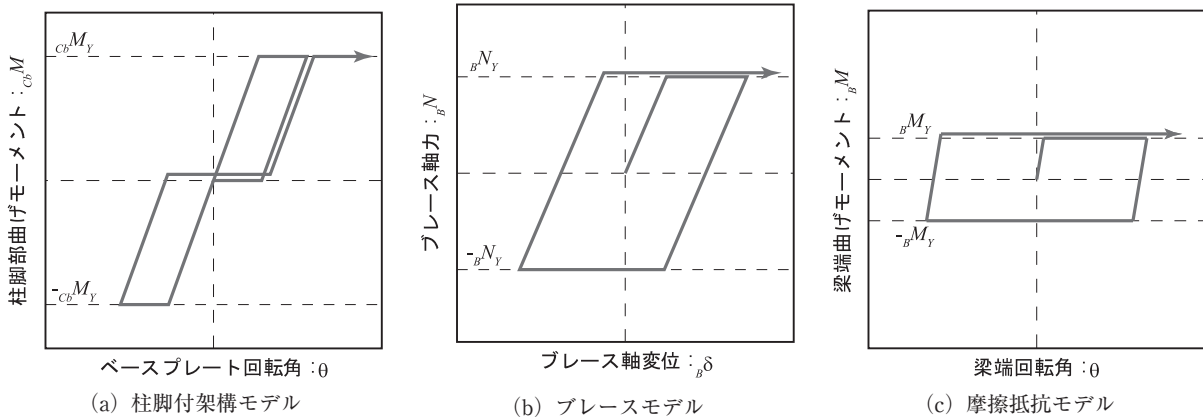
図7 解析モデル



(a) 抵抗機構 1

(b) 抵抗機構 2

図8 剛性変化に伴う柱脚の抵抗機構



ベースプレート回転角： θ

(a) 柱脚付架構モデル

ブレース軸変位： δ

(b) ブレースモデル

梁端回転角： θ

(c) 摩擦抵抗モデル

図9 復元力特性モデル

平の油圧ジャッキは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。

2.3 計測計画

計測には変位計、ひずみゲージおよび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。

変位計により、柱頭部水平変位 δ を、また、柱脚部の鉛直変位からベースプレート回転角 θ 、柱脚部離間変位 $c_b \delta_v$ を、ロードセルから、水平荷重 P を柱に貼付けたひずみゲージから、柱の軸方向直ひずみを、それぞれ、計測する。

また、柱の直ひずみから、各ブレースの負担せん断力 Q_{BR} 、 Q_{BL} を、柱頭部水平変位 δ を柱高さ l_c で除して、層間変形角 r_i を、それぞれ、算出する。

3. 復元力特性モデル

図7に解析モデルを、図8に剛性変化に伴う柱脚の抵抗機構を、図9に復元力特性モデルを、それぞれ、示す。

本試験体を評価するにあたり、柱脚付架構モデル、ブレース

モデル、摩擦抵抗モデルの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としている。更に、柱脚の抵抗機構を考慮したモデルとして、架構の変形から、ベースプレートの回転によって、アンカーボルトの降伏・塑性伸びによる柱脚の鉛直変位をモデルに反映する。

3.1 柱脚付架構モデル

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、スリップ現象が生じるため、回転パ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、軸力の影響は無視して復元力特性モデルを作成する

柱脚付架構モデルの水平弾性剛性 K_c 、降伏耐力 cQ_Y の算出方法を以下に示す。

$$K_c = \frac{cQ}{\delta} = \frac{cQ}{\delta_1 + \delta_2} \quad (1)$$

$$cQ_Y = \frac{M_Y}{l_c} \quad (2)$$

$$\delta_1 = \frac{cQ \cdot l_c^3}{3 \cdot E_c \cdot I_c} \quad (3)$$

$$\delta_2 = \frac{cQ \cdot l_c^2 \cdot 2 \cdot l_{AB}}{A_{AB} \cdot n_{AB} \cdot E_{AB} \cdot (d_c + d_t)} \quad (4)$$

ここに、 c_Q ：柱せん断力、 δ ：水平変位、 δ_1 ：柱の曲げによる水平変位、 δ_2 ：柱脚の回転による水平変位、 M_Y ：柱脚の曲げ耐力、 l_c ：柱材長、 E_c ：柱材のヤング係数、 I_c ：柱の荷重方向の断面2次モーメント、 l_{AB} ：アンカーボルト有効長さ、 E_{AB} ：アンカーボルトのヤング係数、 d_c ：柱図心から圧縮合力点位置までの距離、 d_t ：柱図心からアンカーボルトの中心までの距離とする。

3.2 ブレースモデル

ブレースのみが変形・降伏するトラスフレームのモデルを考える。NCブレースは、座屈およびブレースの緩みが生じないため、スリップ現象が生じない。また、初期軸力としてブレース降伏軸力の50%を導入しているため初期荷重時よりブレース2本分の弾性剛性を示し、弾塑性荷重時における弾性抵抗時でも両ブレースが抵抗するため、常にブレース2本分の弾性剛性を示す完全弾塑性型の復元力特性モデルとする。

ブレースモデルの水平弾性剛性 K_{BR} 、降伏耐力 ${}_{BR}Q_Y$ の算出方法を以下に示す。

$$K_B = \frac{n_B \cdot B \cdot Q}{\delta_B} \quad (5)$$

$${}_{B}Q_Y = {}_B N_Y \cdot \cos \theta_B = {}_B \sigma_Y \cdot A_B \cdot \cos \theta_B \quad (6)$$

$$\delta = \frac{\delta_B}{\cos \theta_B} = \frac{{}_B N \cdot l_B}{E_B \cdot A_B \cdot \cos \theta_B} \quad (7)$$

ここに、 n_B ：ブレース抵抗本数、 ${}_B Q$ ：ブレース負担せん断力、 δ ：水平変位、 θ_B ：ブレース設置角度、 ${}_B N_Y$ ：ブレース軸降伏耐力、 ${}_B \sigma_Y$ ：ブレースの降伏応力度、 A_B ：ブレースの断面積、 δ_B ：ブレース軸方向変位、 l_B ：ブレース有効長さ、 E_{BR} ：ブレースのヤング係数、とする。尚、弾性抵抗時のブレース抵抗本数は、NCブレースなので $n_B=2$ である。但し、降伏耐力算定時はブレース1本分とする。

3.3 摩擦抵抗モデル

本試験体は、柱梁接合部をピン接合としているが、実際は完全なピン支承ではなく摩擦力による抵抗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、評価する。柱梁接合部に弾塑性バネを用い、弾塑性バネの復元力特性モデルは完全弾塑性型とする。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する。

摩擦抵抗力モデルの水平弾性剛性 K_{Fr} 、降伏耐力 ${}_{Fr}Q_Y$ の算出方法を以下に示す。

$$K_{Fr} = \frac{{}_{Fr}Q}{\delta_{Fr}} \quad (8)$$

$${}_{Fr}Q_Y = \frac{{}_B M_{max}}{l_c} \quad (9)$$

ここに、 ${}_{Fr}Q_Y$ ：摩擦抵抗力、 δ_{Fr} ：摩擦抵抗力モデル水平変位、 l_c ：柱材長、 ${}_B M_{max}$ ：梁端部に作用した曲げモーメントの正負での最大値の平均値とする。

3.4 柱脚の回転を考慮したモデル

図8(b)に示すように、柱脚が降伏して以降、アンカーボルトの塑性伸びによって、アンカーボルトとベースプレートが1列しか抵抗しないため、柱脚が弾性のときの剛性に比べ低くなる。

(a)のときの回転弾施剛性 K_{BS1} は

$$K_{BS1} = \frac{n_{AB} \cdot A_{AB} \cdot E \cdot (d_c + d_t)^2}{R \cdot l_{AB}} \quad (10)$$

で表すことができる。

(b)のときの回転弾施剛性 K_{BS2} は

$$K_{BS2} = \frac{n_{AB} \cdot A_{AB} \cdot E \cdot d_t^2}{R \cdot (l_{AB} + c_b \delta_V)} \quad (11)$$

で表すことができる。

ここに、 n_{AB} ：アンカーボルト抵抗本数、 A_{AB} ：アンカーボルト断面積、 E ：ヤング係数、 d_c ：柱図心から圧縮合力点位置までの距離、 d_t ：柱図心からアンカーボルト図心までの距離、 l_{AB} ：アンカーボルトの有効長さ、 $c_b \delta_V$ ：柱脚部離間量、 R ：基礎およびベースプレートの弾性変形を考慮した低減係数（鋼製基礎を用いた場合 $R=2$ ）とする。

4. 実験結果

図10に水平荷重 P -水平変位 δ 関係を、図11にブレース負担せん断力 Q_{BR} 、 Q_{BL} -水平変位 δ 関係を、図12に柱脚部鉛直変位 $c_b \delta_V$ -水平変位 δ 関係を、図13にベースプレート回転角 θ -水平変位 δ 関係を示す。また、図10には復元力特性モデルを併せて示す。

図10には、グラフの右縦軸に水平荷重 P を降伏荷重 P_Y で除し無次元化した値を、上横軸に柱頭の水平変位 δ を柱材長 l_c で除した層間変形角 r_i を示す。

図11には、グラフの右縦軸にブレース負担せん断力 Q_{BR} 、 Q_{BL} を降伏荷重 ${}_{BR}Q_Y$ で除し無次元化した値を、上横軸に柱頭の水平変位 δ を柱材長 l_c で除した層間変形角 r_i を示す。

図13には、グラフ上横軸に柱頭の水平変位 δ を柱材長 l_c で除した層間変形角 r_i を示す。

4.1 水平荷重 - 水平変位関係

図10には柱脚がベースプレートの回転によって降伏する時の変位を、それぞれ、示している。M24試験体は実験値と復元力特性モデルが良好に対応している。NC24試

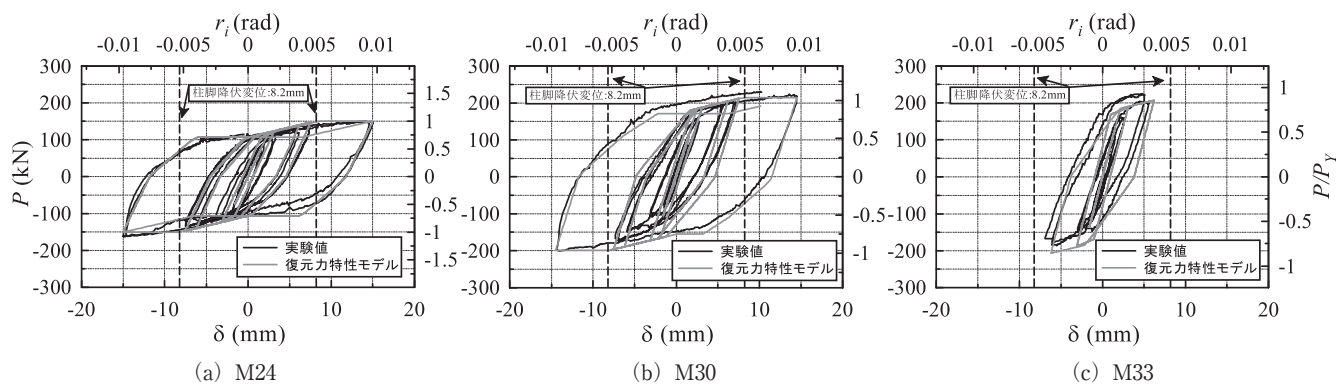


図10 水平荷重 P -水平変位 δ 関係

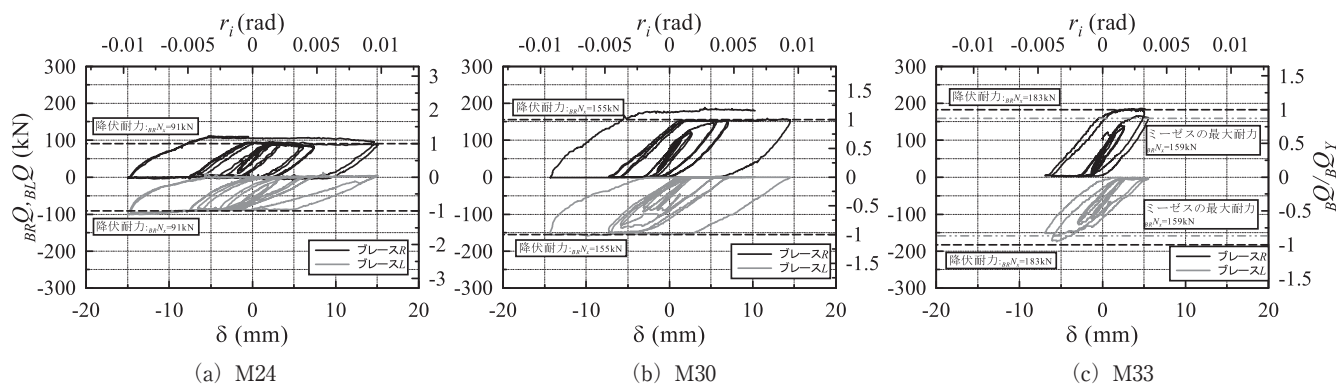


図11 ブレース負担せん断力 Q_{BR} , Q_{BL} -水平変位 δ 関係

験体はミーゼスの降伏条件未満であり、ブレースからの軸力とせん断力では柱脚は降伏しない。しかし、最終サイクルで実験値の架構の弾性剛性が変化している。これは、柱脚が、降伏したためである。柱脚の降伏する点は、ベースプレート回転角を含んだ水平変位から、予測できる。柱脚が降伏するまでは、曲げによってベースプレートが回転し、基礎と接触するため、摩擦力でせん断力に抵抗する。しかし、柱脚が降伏して以降は、アンカーボルトが降伏・塑性伸びするため、1列のみで、抵抗するため、弾性時に比べ剛性が変化する。このため、架構の水平弾性剛性が変化したと考えられる。

M30 試験体はほぼモデルと対応している。M30 試験体はミーゼス降伏条件以上の試験体であり、ブレースは降伏しないはずであるが、降伏したのは、架構の変形によってベースプレートが回転し、基礎と接触して摩擦力でせん断力に抵抗したためである。このため、アンカーボルトに伝わるせん断力が低減したため、ブレースが降伏した。そのため、復元力特性モデルと実験値が対応した。

M33 試験体はモデルと対応していない。M33 試験体はミーゼスの最大耐力を超え、ブレースは、降伏しない。しかし、正載荷時に抵抗するブレースが降伏した。これは、M30 試験体と同様に架構の変形によってベースプレート回転し、基礎と接触するため、摩擦力でせん断力に抵抗し

ためである。

4.2 ブレース負担せん断力-水平変位関係

図11にはそれぞれの試験体の降伏耐力を示している。更に、M33 試験体には、ミーゼスの最大耐力曲線とブレース降伏軸力の交点の値を示している。M24 試験体は降伏し、最大耐力を満足している。これは、ミーゼスの降伏条件未満であり、ブレースからの軸力とせん断力では降伏しないためである。しかし、柱脚が曲げによって降伏するため、紡錘型の復元力特性となる。M30 試験体も M24 と同様に降伏耐力を示している。本来であれば、M30 試験体はミーゼスの降伏耐力曲線以上であり、ブレースは降伏しない。しかし降伏軸力を示した理由は、架構の変形によってベースプレートが回転し、基礎と接触して摩擦力でせん断力に抵抗したためである。このため、ブレースは降伏し、ブレースとしての耐力を満足した。M33 試験体は、正載荷時に抵抗するブレースは降伏し、負載荷時に抵抗するブレースは降伏していない。M33 試験体は、ミーゼスの最大耐力を超えるためブレースは降伏しない。M30 試験体と同様に、架構の変形によってベースプレートが回転し、基礎と接触して摩擦力でせん断力に抵抗したためである。しかし、本来であればブレースは降伏しないため、図11のブレース軸力水平成分 BRN_x -水平変位 δ 関 (c) に示すよ

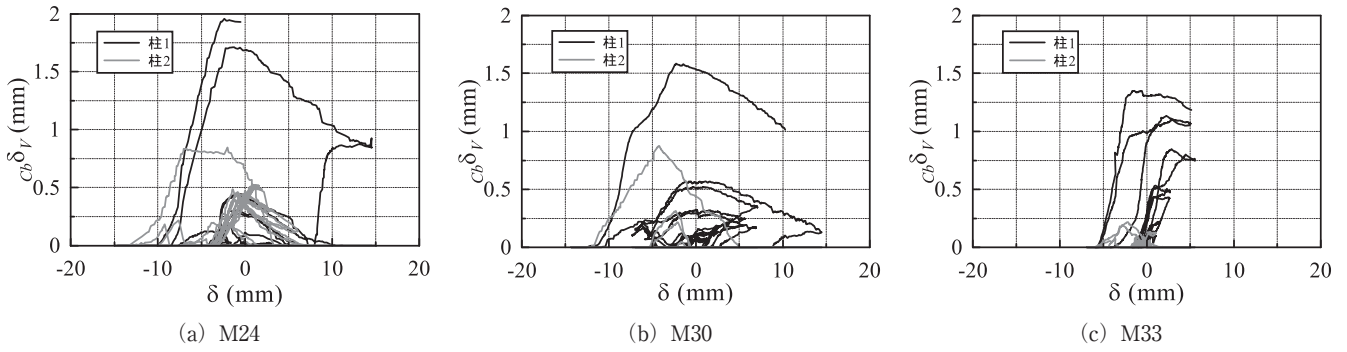


図12 柱脚部鉛直変位 $c_b \delta_v$ - 水平変位 δ 関係

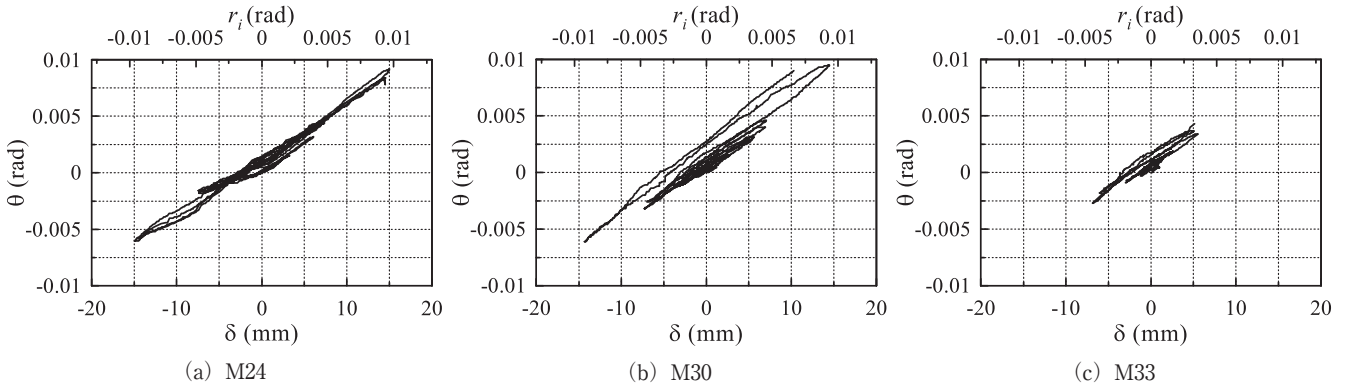


図13 ベースプレート回転角 θ - 水平変位 δ

うにミーゼスの最大耐力曲線とブレース降伏軸力の交点である、 $BRN_x = 159\text{kN}$ を使用し耐力を評価する必要がある。

4.3 柱脚部鉛直変位 - 水平変位関係

図12のM24試験体とM30試験体から、柱脚が降伏するまでは、0.5mm程度の離間量となっている。柱脚が降伏して以降に、柱脚部の離間量が増えている。これは、曲げによってアンカーボルトが降伏し・塑性伸びをするためである。さらに、本来であれば、アンカーボルトが2列抵抗するはずであるが、降伏・塑性伸びによって1列しか抵抗できず、図10のように架構の水平弾性剛性が変化した。M33試験体は、曲げモーメントで柱脚が降伏する点より以前に、柱脚が破断している。しかし、せん断力と軸力による影響が大きいため、柱脚部の離間量が大きくなった。

4.4 ベースプレート回転角 - 水平変位関係

図13から、層間変形角が進むにつれて、ベースプレートの回転角が増加しており、線形関係になっている。つまり、ブレースが設置されている場合の架構においても、ベースプレートの回転角は、架構の層間変形角に依存していることがわかる。そのため、柱脚が降伏する点は、曲げによる変形と、水平荷重による変形から予想し、ブレースが完全弾塑性型の復元力特性を示すまでの変位が予測できる。

5. まとめ

1. NC24試験体では、ブレースが降伏し、ブレース架構として成立するため、完全弾塑性型の復元力特性を示す。
2. ブレース架構とした場合においても、ベースプレートの回転は、架構の変形に依存し、柱脚が弾塑性域あれば、回転によって、アンカーボルトが降伏・塑性伸びするため架構の水平剛性が変化する。ベースプレートの回転角は、架構の層間変形角に依存するため、ブレースが完全弾塑性の応答を示す限界の水平変位は容易に予想できる。
3. 柱脚の抵抗機構の変化を考慮し、実験結果を追跡できる復元力特性モデルを提案できた。
4. NC30試験体では、柱脚が曲げによって、ベースプレートと、基礎が接触し、摩擦力でせん断力に抵抗し、アンカーボルトに伝わるせん断力が低減し、ブレースが降伏した。
5. M33試験体は柱脚が先行して崩壊するため、ブレースが降伏することなく、復元力特性モデルと対応しない。但し、ミーゼスの最大耐力により、最大耐力は評価可能である。

謝 辞

本研究では、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、転造ネジアンカーボルト、並びに、ターンバックル付転造ネジ付ブレースを提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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, pp131-138 : 2005. 9.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 高松隆夫, 玉井宏明, 福原章宏, 山西央朗: ブレース付門型骨組みの復元力特性, 広島工業大学紀要, 研究編, 第 43 巻, pp173-183, 2009. 2.