

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚付きブレース架構の復元力特性

高松 隆夫*・山西 央朗**・玉井 宏章***・中村 友一****

(平成24年10月31日受付)

Restoring force characteristics of braced frame with anchor-bolt-yield-type exposed column-base

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI, Hiroyuki TAMAI and Yuuichi NAKAMURA

(Received Oct. 31, 2012)

Abstract

Anchor-bolts of a column-base subjected to a bending moment are in a plastic region by rotational action of the base-plate. The column-base connected a brace member shows easy prediction of an elastic limit of the anchor-bolt because of linear relationship between the base-plate rotation and the story-displacement of the braced frame. The restoring force characteristics of the slip-type exposed column-base show an elastic stiffness decreasing due to a gap between the base-plate and the foundation. The non-slip-type exposed column-base shows simple restoring force characteristics without the complicated behavior of the slip-type column-base.

Key Words: exposed column-base, braced-frame, base-plate rotation, anchor-bolt-yield-type, restoring force characteristics

1. はじめに

ブレース架構とする場合、柱脚には、ブレースからの応力が引張軸力とせん断力として作用する。柱脚はその応力に対して弾性設計されるが、柱脚には柱からの曲げ（ベースプレートの回転変形）も同時に作用し、架構が変形すると曲げモーメントによってアンカーボルトが降伏する^{1)~3)}。以上、柱脚には、アンカーボルトを降伏または弾塑性性状に影響を与えるレベルの曲げ、引張軸力、せん断力が作用し、弾塑性繰返し载荷下では非常に複雑な応力場・抵抗挙動となる。

一方、一般的な耐震改修では、引張ブレース（以降 T ブレース）が用いられている。しかしながら、T ブレースは座屈・塑性伸びによるスリップ現象が生じるため、効率よく地震外力に抵抗できない。そこで、著者等は細長いブ

レースでも楔デバイスを用いることで完全弾塑性型復元力特性を得られるノンコンプレッションブレース（以降 NC ブレース）を研究している^{4)~7)}。ブレースは架構と比べて早期に降伏するため、NC ブレースのように完全弾塑性型の復元力特性を保持させると、架構の変形とブレース応力とに位相差が生じる。このため、柱脚のベースプレート回転角とブレースからの応力にも位相差が生じ柱脚の変形・応力状態を推定することは容易ではなく⁸⁾、架構の荷重-層間関係も複雑になる。

一方、柱脚においても、アンカーボルト降伏型露出柱脚では、アンカーボルトが先行降伏することで、T ブレースと同様にスリップ現象が生る。そこで、柱脚にも楔デバイスを用いることで、スリップ型復元力特性が解消され、繰返し载荷下の履歴性状が単純になることが明らかになっている（以降この柱脚を“NS 型柱脚”と記す^{9)~12)}。特に、

* 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

*** 長崎大学工学部工学科

**** 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

引張軸力下の場合においては、抵抗機構の変化を単純化でき履歴性状の複雑化を抑制することができる¹²⁾。

このような背景より、完全弾塑性型復元力特性を有するブレースに対してNS型柱脚を設置することで、柱脚が架構の変形により塑性化しても架構の荷重-変形関係の複雑化が回避されることが予想される。本研究では、これまでの実験結果に加え、NCブレースとNS型柱脚とを組み合わせた場合の載荷実験を行い、それぞれの荷重-変形関係お

よび抵抗機構を比較して、耐震性能・設計上有利なシステムを提案する。

2. 実験概要

2.1 試験体

表1に試験体諸量を、図1に試験体を、図2にベースプレートを、図3にアンカーボルトを、図4にブレースを、図5に柱脚（アンカーボルト）の軸力とせん断力に対する

表1 試験体諸量

		材種	E (N/mm ²)	σ_Y (N/mm ²)	主要寸法 (mm)
柱	フランジ	SN490	205000	395	H-250×250×9×14
	ウェブ	SN490	205000	399	
梁	フランジ	SS400	205000	295	H-250×125×6×9
	ウェブ	SS400	205000	318	
ベースプレート		SN490	205000	347	PL-50
T-S type	ブレース M24	SNR400	205000	287	$\phi = 22.2\text{mm}$ $l_{AB} = 382\text{mm}$
	アンカーボルト M16	ABR400	205000	294	
NC-S type	ブレース M24	SNR400	205000	282	$\phi = 21.9\text{mm}$ $l_{AB} = 382\text{mm}$
	アンカーボルト M16	ABR400	205000	294	
NC-NS type	ブレース M24	SNR400	205000	275	$\phi = 21.8\text{mm}$ $l_{AB} = 436\text{mm}$
	アンカーボルト M16	ABR400	205000	292	

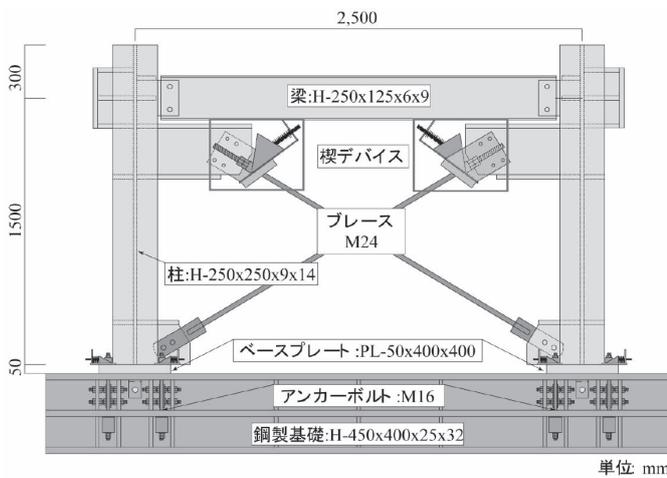


図1 試験体

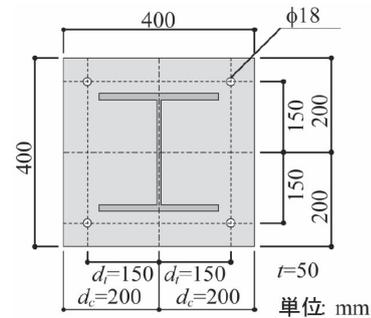
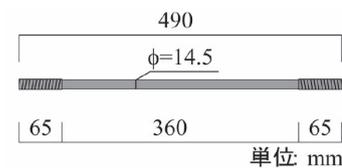
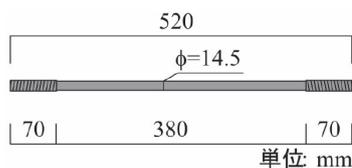


図2 ベースプレート

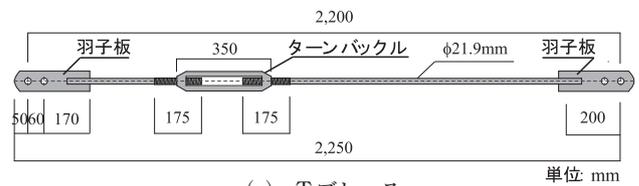


(a) S型柱脚

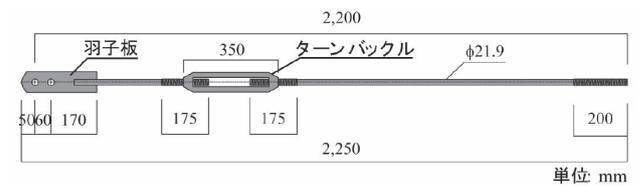


(b) S型柱脚

図3 アンカーボルト



(a) Tブレース



(b) NCブレース

図4 ブレース

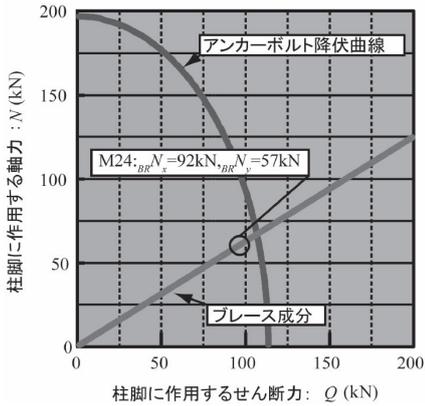


図5 柱脚（アンカーボルト）の軸力とせん断力に対するミーゼスの降伏条件

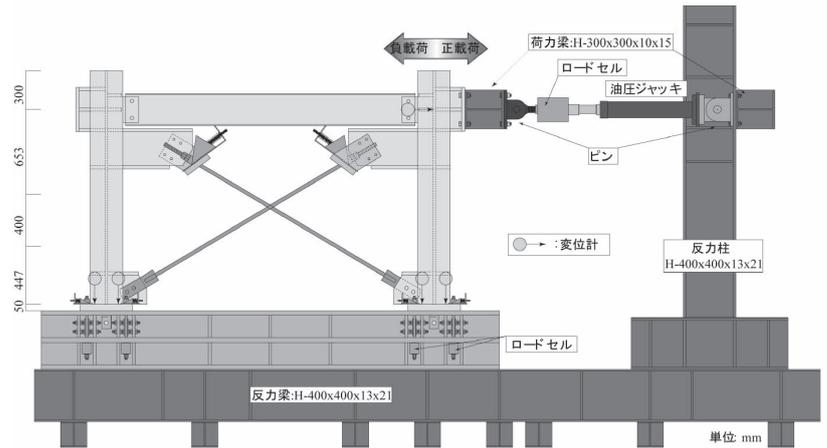


図6 荷重方法・計測計画

ミーゼスの降伏条件を、図6に荷重装置・計測計画をそれぞれ、示す。

本実験で用いる露出柱脚付きブレース架構には、柱は弱軸方向とし H-250×250×9×14 (SN490) を、梁に H-250×125×6×9 (SS400) 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。

露出柱脚付きブレース架構の検討をするために、試験体は以下の条件を満足するように設計する。

- 1) ブレースからの応力を鉛直・水平成分に分解して、それぞれをアンカーボルトに作用する軸力、せん断力と見なす。この組合せ応力による値が、ミーゼス降伏曲線を超過しないようにアンカーボルトを設計する (図5参照)。
- 2) 無軸力下で曲げモーメントが作用する場合、柱脚はアンカーボルト降伏型となるように設計する。

また、ブレースおよびアンカーボルトとしては、それぞれ楔デバイスを用いないもの (図3 (a), 図4 (a)), 楔デバイスを用いたもの (図3 (b), 図4 (b)) を用意し、以下の3種類の組合せを採用する。尚、楔デバイスを用いない柱脚をS型柱脚と記す。

- ・Tブレース-S型柱脚の組合せ (T-S type)
- ・NCブレース-S型柱脚の組合せ (NC-S type)
- ・NCブレース-NS型柱脚の組合せ (NC-NS type)

2.2 荷重方法・計測計画

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、

鋼製基礎を反力梁に、ピンを介して反力柱に取り付けた水平の油圧ジャッキを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。

柱の柱頭部と、柱脚部に設置した変位計より、層間変位 δ , ベースプレート回転角 θ , 柱脚部離間量 $c_B \delta_V$ を、ジャッキ先端および、アンカーボルト端部に設置したロードセルより、水平荷重 P , アンカーボルト軸力 ABT を計測・算出する。

3. 復元力特性モデル

図7に解析モデルを、図8に各要素のモデル化と復元力特性モデルを、それぞれ示す。

試験体は、図7に示すように露出柱脚付き架構にブレースを配置しており、更に、柱梁接合部を摩擦接合としている。このため、層間変位 δ を与えた時、ブレースによるト

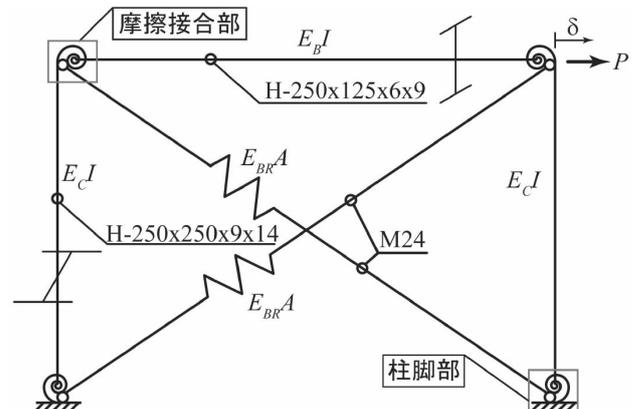


図7 解析モデル

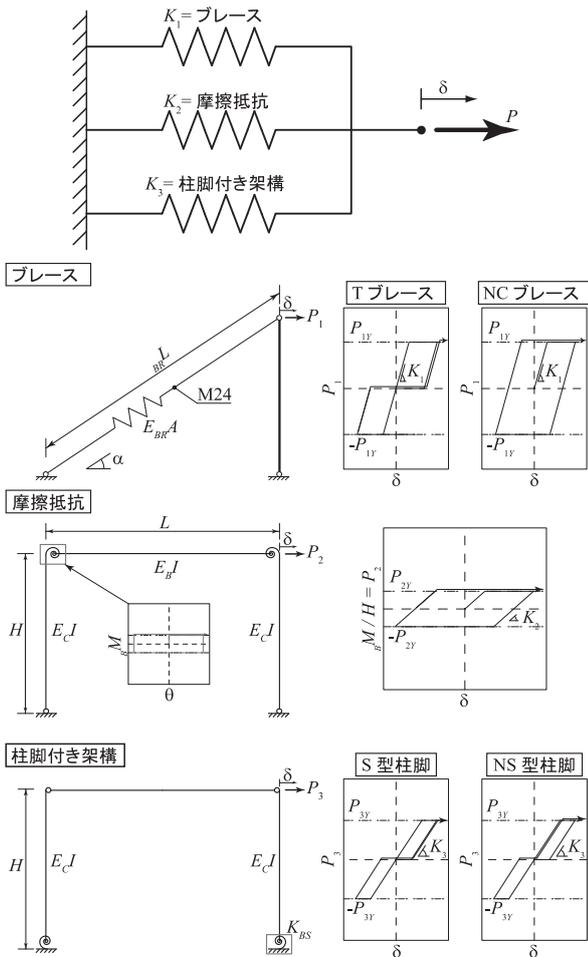


図8 各要素のモデル化と復元力特性モデル

ラス架構の復元力 P_1 、柱梁接合部の摩擦接合（剛塑性体）の抵抗による架構の復元力 P_2 、柱脚の曲げ抵抗による復元力 P_3 が現れ、これらを累加したものが架構全体の復元力 P となる。すなわち、各要素を並列に配置して、それぞれの復元力を算出すれば良い。

本章では、各要素毎のモデル化を行い、剛性および耐力を算出する手法を示す。

3.1 ブレースモデル

ブレースによるトラス架構は、引張側ブレースのみを考えて展開する。但し、ブレース軸部断面積に比較して柱断面は十分に大きいので、柱部分に当たるトラス材は剛とする。Tブレースは、座屈・塑性伸びによる緩みが生じるため、スリップ型復元力特性モデルとする。NCブレースは、ブレース端部に設置した楔デバイスにより、座屈・塑性伸びによる緩みが生じないため、スリップ現象が生じない。更に、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載荷時よりブレース2本分の弾性剛性を示し、弾塑性載荷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^{5)~7)}。

従って、ブレースモデルの水平剛性および降伏耐力は、

$$K_1 = \frac{BRn \cdot E \cdot BR A \cdot \cos^2 \alpha}{BR L} \quad (1)$$

$$P_{1Y} = BR A \cdot BR \sigma_Y \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

ここで、 BRn ：ブレース抵抗本数（NCブレースでは $BRn = 2$ ）、 E ：ヤング係数、 $BR A$ ：ブレース断面積、 α ：ブレース設置角度、 $BR L$ ：ブレース長さ、 $BR \sigma_Y$ ：ブレース降伏応力度、である。

3.2 摩擦抵抗モデル

柱梁接合部は、高力ボルトによる摩擦接合としているので、接合部に一定曲げモーメントが作用しない限り、回転が生じない剛塑性体の挙動を示すと考える。このため、層間変位を与えた時の剛性は、柱脚をピン接合とするラーメン架構の剛性に等しくなる。しかしながら、接合部の滑り耐力を算出するのは容易ではないので、実験結果より得られた柱梁接合部の最大曲げ耐力 $B M_{max}$ を用いて表現する。

従って、摩擦抵抗モデルの、水平剛性および降伏耐力は、

$$K_2 = \frac{3 \cdot E}{\frac{H^3}{cI} + \frac{(L/2)^3}{BI}} \quad (3)$$

$$P_{2Y} = \frac{B M_{max}}{H} \quad (4)$$

ここで、 H ：柱高さ、 L ：梁長さ、 cI ：柱断面2次モーメント、 BI ：梁断面2次モーメント、 $B M_{max}$ ：実験値の正負での梁端部の曲げモーメントの最大値の平均値である。

3.3 柱脚付き架構モデル

柱脚は、アンカーボルト降伏型露出柱脚であり、曲げモーメントが作用するとアンカーボルトが弾塑性伸びをしてベースプレートが回転する。従って、柱脚に回転バネを設置した片持ち柱にモデル化して剛性および降伏耐力を表現する必要がある。

また、アンカーボルト降伏型柱脚ではスリップ現象が生じる（図8中のS型柱脚）が、楔デバイスを設置することでノンスリップ型復元力特性を示す（図8中のNS型柱脚^{9)~12)}。尚、柱頭部に水平荷重を与えることで柱脚には変動軸力が作用するが、柱軸力の影響は無視してモデル化する。

従って、柱脚付き架構モデルの水平剛性と降伏耐力は、

$$K_3 = \frac{2 \cdot E}{H^2 \left(\frac{H}{3 \cdot cI} + \frac{R \cdot AB l}{n \cdot AB A \cdot (d_t + d_c)^2} \right)} \quad (5)$$

$$P_{3Y} = \frac{2 \cdot n \cdot AB A \cdot AB \sigma_Y \cdot (d_t + d_c)}{H} \quad (6)$$

ここで、 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 (=2), $_{AB}l$: アンカーボルト有効長さ, n : 引張側アンカーボルト本数, $_{AB}A$: アンカーボルト断面積, $_{AB}\sigma_Y$: アンカーボルト降伏応力度, d_t : 柱図芯から引張側

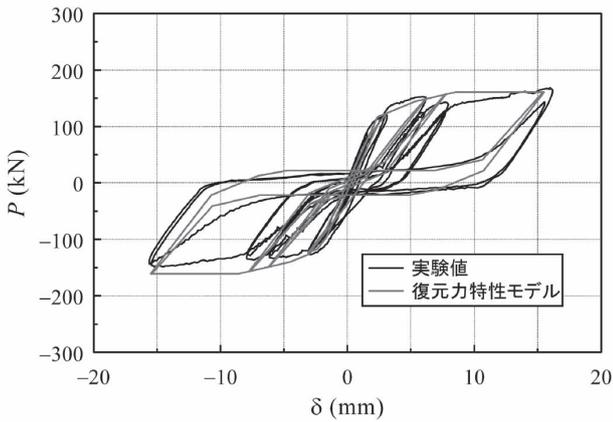
アンカーボルト図芯までの距離, d_c : 柱図芯から圧縮合力点までの距離である。

4. 実験結果と考察

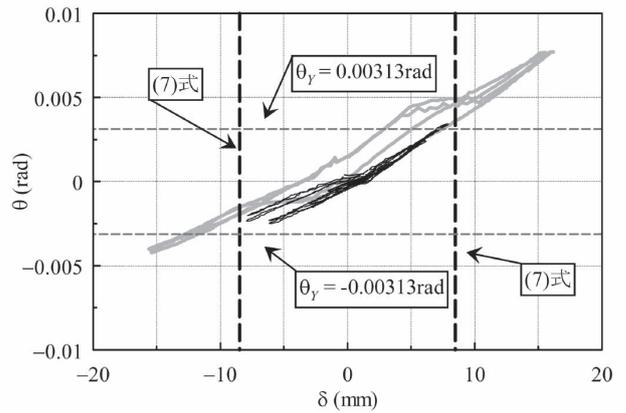
表2にエネルギー吸収量を, 図9に水平荷重 P -層間変位 δ 関係を, 図10にベースプレート回転角 θ -層間変位 δ 関係を, 図11にアンカーボルト軸力 $_{AB}T$ -層間変位 δ 関係を, 図12に柱脚部離間量 $c_b\delta_V$ -層間変位 δ を, 図13に, 柱脚の抵抗機構を, それぞれ, 示す。また, 図9には, 3章で示した復元力特性モデルを, 図10には, 柱脚降伏時の

表2 エネルギー吸収量

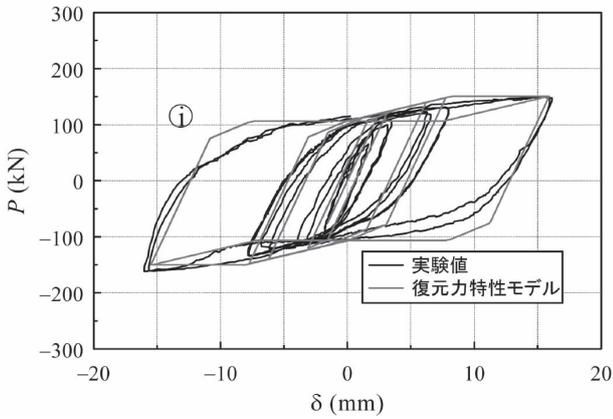
試験体	全体 kNm	ブレース kNm	フレーム kNm
T-S type	7.0	3.8	3.2
NC-S type	19.4	16.0	3.4
NC-NS type	21.9	17.3	4.6



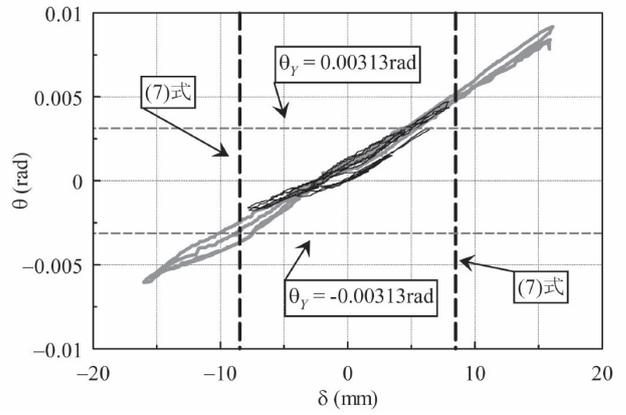
(a) T-S type



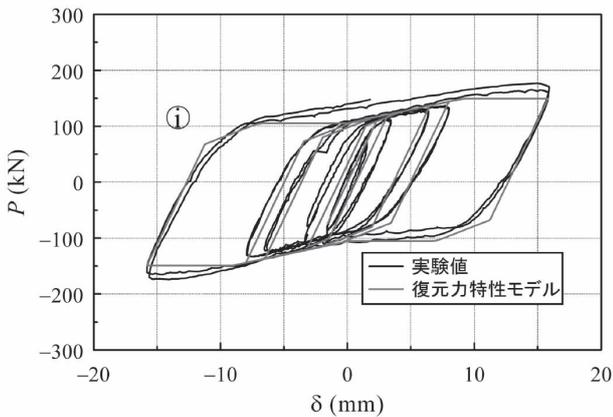
(a) T-S type



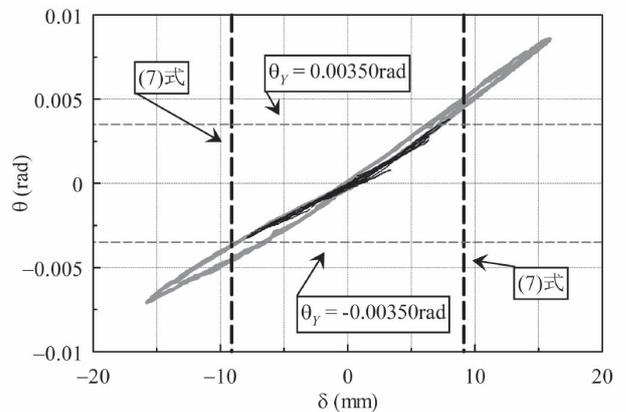
(b) NC-S type



(b) NC-S type



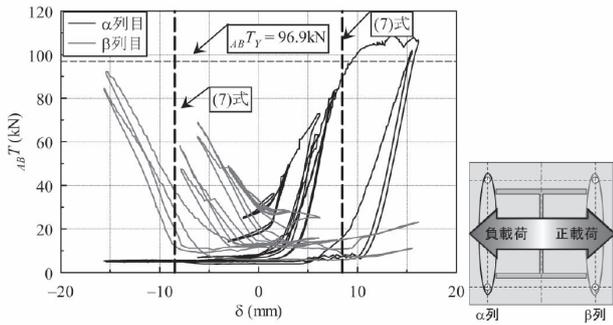
(c) NC-NS type



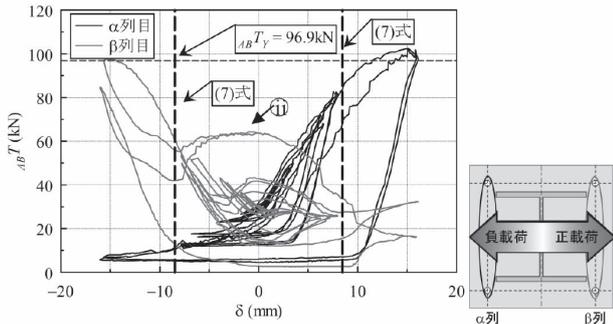
(c) NC-NS type

図9 P - δ 関係

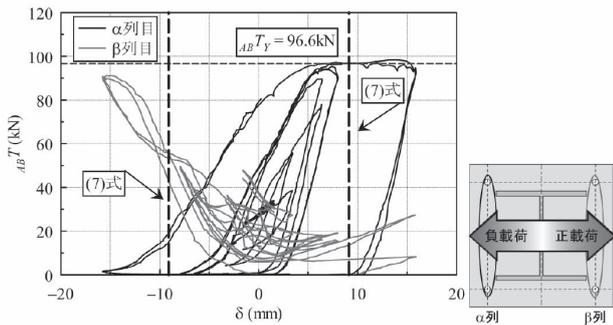
図10 θ - δ 関係



(a) T-S type



(b) NC-S type



(c) NC-NS type

図11 $ABTY$ - δ 関係

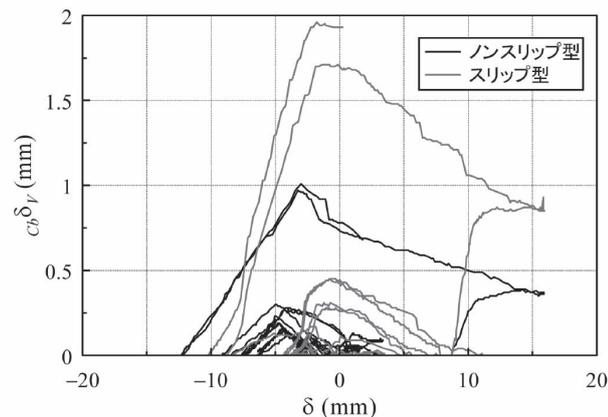


図12 $c_B \delta_Y$

ベースプレート回転角 θ_Y を、図11では、アンカーボルト軸力は列の合計とし、併せて降伏軸力 $ABTY$ を示す。尚、図10、図11および図12は、正方向載荷時に引張軸力が作用する柱脚の履歴である。

図9から、すべての試験体において実験値と復元力特性モデルは良好に対応している。一方、表2に示すように、T-S type は他の2体の試験体と比べてエネルギー吸収量が少ない。これは、ブレースの座屈・塑性伸びによるスリップ現象が生じて繰返し載荷下のエネルギー吸収効果が低下したためである。NCブレースを用いた場合には、完全弾塑性型復元力特性を示すためエネルギー吸収量はT-S type の倍以上となり、かつ弾性剛性も高めであり、優れた耐震性能を有していることがわかる。

また、図10から、層間変位とベースプレートの回転角はほぼ線形関係の履歴を示している。従って、層間変位により柱脚の変形レベルを判断できる。すなわち、アンカーボルトを弾性範囲に留めるためには、ブレースからの応力に対して弾性設計すると共に、層間変位が一定値以上とならないようにしなければならない。図8に示すモデルより、回転バネを有する片持ち柱形式で柱脚の挙動を加味できることが分かっているので、(5) および (6) 式を展開して柱脚の弾性限界となる層間変位は以下の式で表現できる。

$$\begin{aligned} \delta_{3Y} &= \frac{P_{3Y}}{K_3} \\ &= \frac{n \cdot AB A \cdot AB \sigma_Y \cdot (d_t + d_c) \cdot H}{E} \cdot \left(\frac{R \cdot AB l}{n \cdot AB A \cdot (d_t + d_c)^2} + \frac{H}{3 \cdot c I} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

この結果を図10及び図11に示すが、1/200 (rad) までの載荷ではアンカーボルトはほぼ弾性範囲に留まっており（初期軸力を導入している）、NC-NS type の α 列は降伏している、(7) 式による値を下回っている。また、実験値のベースプレート回転角と、柱脚降伏時のベースプレート回転角 θ_Y の交点を実験における柱脚の降伏点の目安となり、ほぼ、(7) 式より算出したライン付近に位置しており、(7) 式により柱脚の弾性限界層間変位を概ね評価できている。さらに、 δ_{3Y} を超過する層間変形を受ける場合は、アンカーボルトが降伏してスリップ現象が生じることとなる（1/100 (rad) の載荷時）。この載荷サイクルでは、NC-S type の実験結果と復元力特性モデルの整合性が取れなくなる部分が現れ、更に、図13の結果から、1/100 (rad) で急激に離間変位が増大している。

以上の結果から、ブレースからの応力に対して柱脚を弾性設計したブレース架構であっても架構の変形により柱脚が降伏することを考慮しなければ、ブレース架構として性能が劣化すること（図9 (b) 中①）、また、その層間変位は(7) 式により評価できている。更に、エネルギー吸収量、履歴性状からNC-NS type では、1/100 (rad) 時の載荷でもブレース架構としての性能の劣化が緩和されていることが分かる。

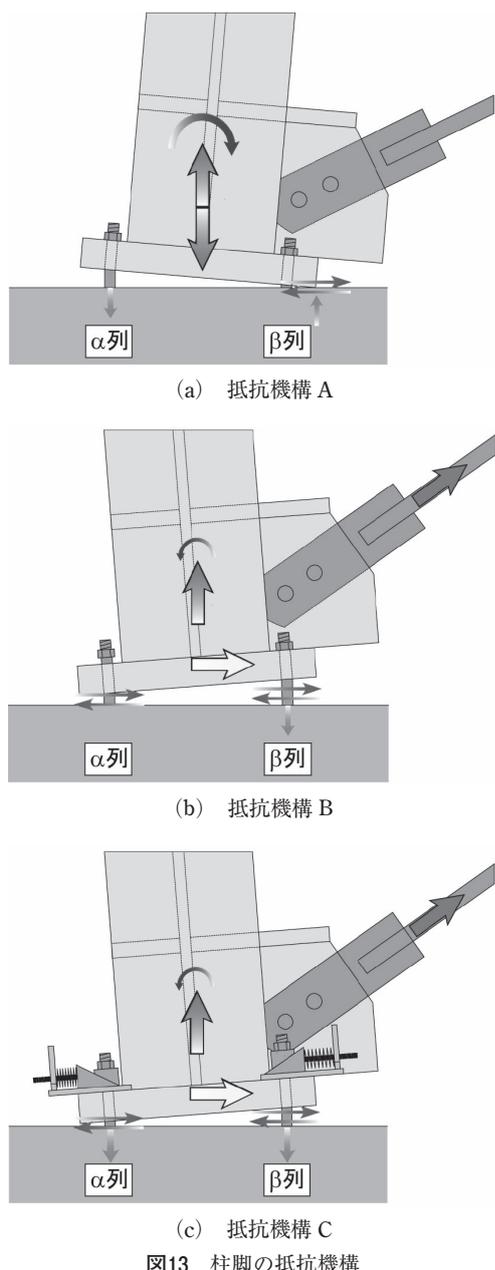


図13 柱脚の抵抗機構

4.1 T-S type

T-S type で、実験値と復元力特性モデルが対応しているのは、柱脚が降伏して以降もピン支承としての機能を失わず、トラス架構として成立したためである。復元力特性モデルでは、柱脚は曲げで評価しており、アンカーボルトが降伏したとしても、基礎とベースプレートの接触による摩擦力の影響でピン支承としての機能を有していると仮定して作成している。柱脚は、図10 (a) からわかるように、ベースプレートの回転変形が作用し、曲げモーメントによって降伏する。また、ブレースからの応力に対しては弾性であり、曲げモーメントによってアンカーボルトが降伏するため (図11 (a) 参照)、復元力特性モデル作成時に仮定した柱脚の抵抗機構 (図13 (a) 参照) で、作成したモデルと良好に対応する。

4.2 NC-S type

NC-S type においては、実験値と復元力特性モデルはほぼ対応しているが、図9 (b) 中① (第2象限を指す。尚、第4象限にも同様の現象が現れている) において弾性剛性が低下し復元力特性モデルと対応していない。これは、柱からの曲げ (ベースプレートの回転変形) が柱脚に作用し、アンカーボルトが降伏 (図11 (b) 参照) すること、さらに、NC ブレースはTブレースとは異なり、除荷と同時に逆方向のブレースが抵抗を開始し、载荷と共にブレースからの応力による引張軸力が柱脚に作用し、柱脚が離間するためである。载荷と共に引張軸力が作用することによって、図9 (b) 中①においては、図13 (b) のような抵抗機構を柱脚が示す。 α 列のアンカーボルトは降伏しているため、接触するまで抵抗しない。また、ブレースからの引張軸力が作用した状態で β 列のアンカーボルトにベースプレートが接触した状態 (β 列アンカーボルトを支点とした状態) で回転する。そのため、本来であれば β 列のアンカーボルト軸力は減少するはずであるが、 β 列のアンカーボルト軸力は図11 (b) 中②のように、わずかに増加する。このように、実験結果より得られた柱脚の抵抗機構を用いて復元力特性モデルを算出すれば、架構の応答を正確に評価することが可能となる。しかしながら、このような抵抗機構の変化を追跡し復元力特性モデルを作成することは非常に煩雑であり、また、抵抗機構の変化を予測すること自体が容易ではない⁸⁾。この架構では、アンカーボルトを曲げモーメントに対しても弾性状態に留めることで、復元力特性を bi-linear 型として評価することが可能となり、簡便に架構の応答を評価できる。

4.3 NC-NS type

NC-NS type においては、NC-S type のような弾性剛性の低下は見られず実験値と復元力特性モデルは良好に対応している。これは、柱脚を NS 型柱脚にしたためである。NC-NS type も NC-S type と同様に、柱からの曲げ (ベースプレートの回転変形) が作用することによってアンカーボルトが降伏する。また、NS 型柱脚においても、NC-S type と同じ領域 (図9 (c) 中①参照) では、引張軸力が柱脚に作用するが、楔デバイスによってアンカーボルトが緩むことがないので、柱脚に引張軸力が作用した場合でも、アンカーボルトが全て抵抗した状態となる。そのため、柱脚の抵抗機構は図13 (c) のようになり、ベースプレートの回転と同時に α 列のアンカーボルトが抵抗する。NC-S type のように β 列のアンカーボルトを支点とした状態で回転することがないので、 α 列のアンカーボルト軸力が増加し、 β 列のアンカーボルト軸力は減少する。さらに、全てのアンカーボルトが抵抗した状態のため、柱脚の離間が NC-S

type に比べ抑えられる。図12からもわかるように、離間量がS型柱脚では約2mmなのに対しNS型柱脚では約1mmとなっており、柱脚の離間量が2分の1程度に抑えられている。このように、NS型柱脚を用いることによって柱脚の離間量を抑えることができ、S型柱脚で生じた弾性剛性の低下といった問題を解消することができる。図9(c)では、抵抗機構の変化がないとしてモデルを作成しているが、モデルと実験結果とは良好に対応しており、複雑な復元力特性モデルを使用することなく架構の応答を簡便に評価することができる。NC-S type のような柱脚を曲げに対しても弾性に留めることが難しい場合には、楔デバイスを用いて、柱脚の復元力特性をノンスリップ型にすることによって、弾性剛性の低下といった問題を解消することができる。

5. まとめ

本研究では、露出柱脚付きブレース架構を用いた荷重実験を行った。用いた試験体は、計3体であり、ブレースからの応力では柱脚が降伏しない条件下において、以下の知見を得ることができた。

1. ブレースからの応力に対してアンカーボルトを弾性設計していても、柱からの曲げ（ベースプレートの回転変形）が作用する。このベースプレートの回転変形は架構の層間変位に依存するので、回転バネ付片持ち柱のモデルから誘導した(7)式により、アンカーボルトが曲げにより降伏する層間変位を概ね評価できる。
2. TS type においては、柱脚が曲げによって降伏しても、柱脚はピン支承としての機能を失うことなく、ブレース架構と成立するため復元力特性モデルと良好に対応する。しかしながら、スリップ現象が生じるためエネルギー吸収量は他2体に比べ小さい。
3. NC-S type では、アンカーボルトが降伏し、ブレースからの引張軸力が柱脚に作用し離間することによって弾性剛性が低下する。抵抗機構を考慮して復元力特性モデルを作成することは可能だが、煩雑なため、柱脚のアンカーボルトは曲げに対しても弾性状態に留めておくことが望ましい。
4. NC-NS type では、柱脚に楔デバイスを用いることによって、スリップ現象が解消されるため、NC-S type のような弾性剛性の低下は見られず、抵抗機構の変化がないとして作成したモデルと良好に対応する。そのため、架構の応答を簡便に評価することが出来る。

以上、露出柱脚を有するブレース架構の抵抗性状について議論を行った。本研究では、比較のためにTブレース、アンカーボルト降伏型柱脚のスリップ現象の現れる領域を

含んだ弾塑性荷重実験も行ったが、エネルギー吸収効率低下の回避、弾塑性領域における架構の安定性を得るためには、スリップ現象が現れない設計を施すことが望ましい。

従って、Tブレースであれば完全な弾性設計（ブレースおよびアンカーボルト共に弾性）が、NCブレース・楔デバイスをを用いない露出柱脚（S型柱脚）を選定するのであれば式(7)から得られる変形応答以下に抑えた設計が必要である。NCブレース・NS型柱脚の組合せを選定すれば、崩壊と判断される程の大きな変形下においても応答の劣化が現れず、常に期待する耐震性能を劣化無く発揮できる。

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、試験体作製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: 露出柱脚付き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, 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.
- 3) 中村友一, 高松隆夫, 山西央朗, 玉井宏章: 露出柱脚を有するノンコンプレッションブレース架構に関する実験的研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第34巻, pp. 149-152, 2011.3.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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, 第42巻, pp. 105-111, 2008.2.

- 8) 高松隆夫, 山西央朗, 玉井宏章, 中村友一: 露出柱脚付きノンコンプレッションブレース架構の復元力特性, 鋼構造年次論文報告集, 第19巻, pp. 749-754, 2011.11.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 澤田樹一郎, 松尾彰: 引張軸力領域を含む変動軸力と曲げを受けるノンスリップ型露出柱脚の復元力特性と簡易履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第681号, pp. 1755-1762, 2012.11.