

せん断力および引張力を受ける露出柱脚の単調載荷実験

高松 隆夫*・山西 央朗**・玉井 宏章***・福原 章宏****・松尾 彰*****

(平成21年10月31日受理)

Monotonic loading experiment on exposed column-bases subjected to shear and tensile force

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI, Hiroyuki TAMAI, Akihiro FUKUHARA and Akira MATSUO

(Received Oct. 31, 2009)

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 monotonic loading test on a braced frame with weak column-bases is carried out to clarify shearing fracture behavior of the column-base.

Key Words: braced frame , exposed column base , anchor-bolt-yield-type , collapse mechanism

1. はじめに

現在、既存建築物の補強工法として、簡便に補強できることから、ブレースが多く利用されている。ブレースを設置した露出柱脚付フレームでは、ブレースの軸力により、柱脚には軸力とせん断力が作用する。

柱脚に軸力を作用させた研究として、中柱を想定した一定軸力作用下における露出柱脚の研究、また、側柱を想定した変動軸力作用下における露出柱脚の研究が行われており、柱脚に軸力が作用した場合、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚では、圧縮軸力作用時には曲げ耐力および弾性剛性が増加、引張軸力作用時には曲げ耐力および弾性剛性が減少することが明らかとなっている^{2)~4)}。また、せん断力に対しては、柱に圧縮軸力が作用する場合、基礎とベースプレートとは常に接触しており、基礎とベースプレートとの間に生じる摩擦力、およびアンカーボルトのせん断力

で抵抗する。しかしながら、柱に引張軸力が作用する場合、基礎とベースプレートが接触していても、引張軸力が大きくなるにつれて基礎からの支圧反力が小さくなるため、基礎とベースプレートとの間に生じる摩擦力は減少し、アンカーボルトが負担するせん断力が増加する。また、同時に引張軸力に対してもアンカーボルトで抵抗して、2軸応力状態になるため、柱脚の早期に降伏することが考えられる。

しかしながら、柱脚に引張軸力とせん断力を同時に作用させた研究、柱脚を有するブレース付フレームの研究はあまり行われていない。^{1), 5)~7)}このため、引張軸力およびせん断力を受ける柱脚の崩壊機構、降伏耐力や水平剛性の算出方法は明らかになっていない。

そこで、柱脚を有するブレース付フレームを用いた単調載荷実験を行い、柱脚に引張軸力とせん断力が同時に作用する場合におけるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の性能を明らかにする。

* 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

*** 広島工業大学工学部建築工学科

**** 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

***** 広島大学大学院社会環境システム専攻

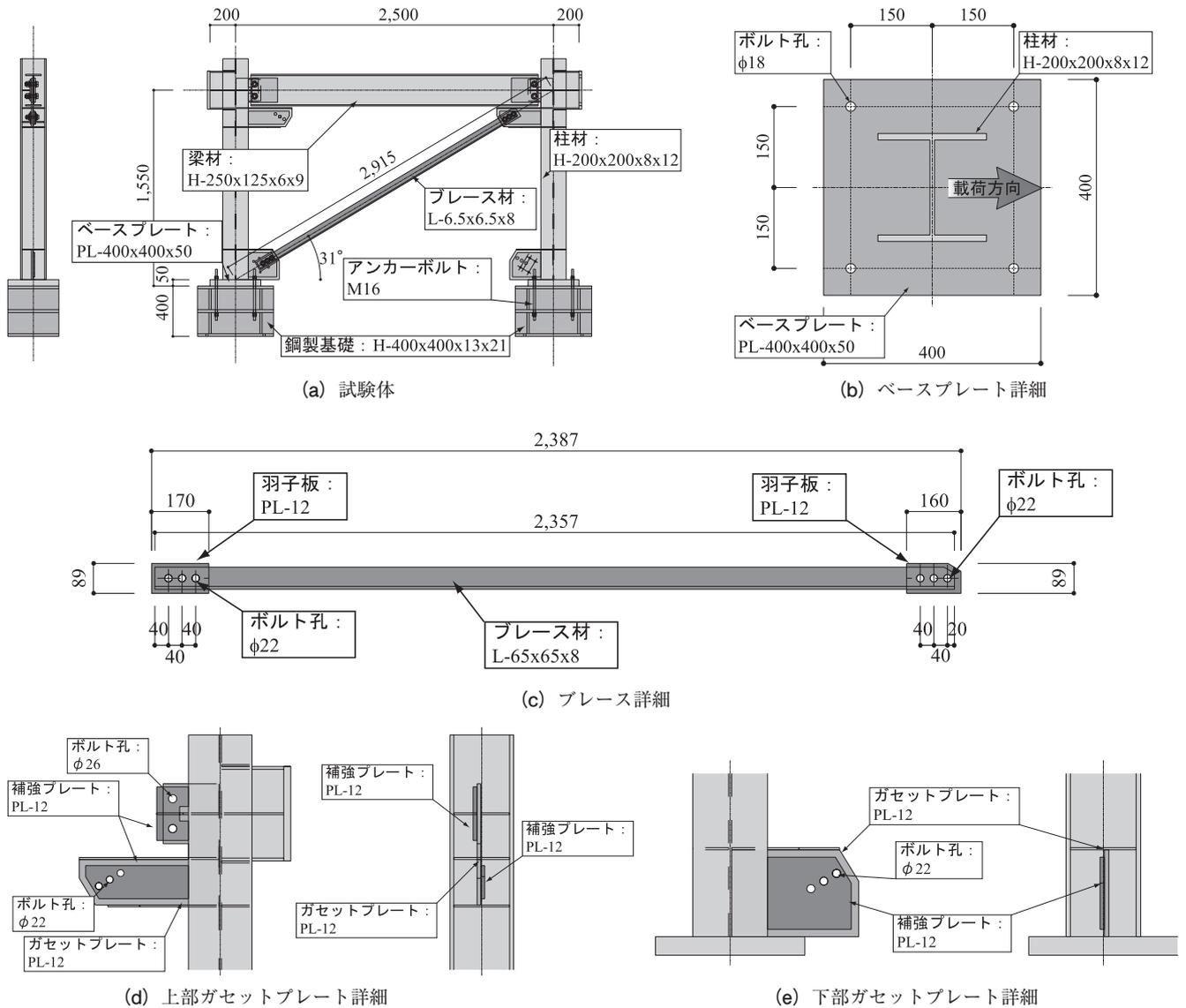


図1 試験体・各部詳細

尚、本研究では、ブレース降伏軸力の鉛直成分が全アンカーボルトの降伏軸力（柱脚に設置してあるアンカーボルトの降伏軸力の合計値）程度のブレースを使用する。

2. 実験概要

本研究では、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚を有するブレース付フレームの単調載荷実験を行う。ブレース架構を想定しているため、柱を弱軸方向にする。尚、アンカーボルトはブレースより先に降伏するものとし、ブレースは、弾性域に留まるものとする。

2.1 試験体概要

図1に試験体および各部詳細を、表1に素材特性を示す。試験体はアンカーボルト降伏先行型露出柱脚、柱梁接合部をピン、柱を弱軸としたブレース付フレームとする。使用している鋼材は全てSS400級とし、柱はH-200x200x8x12

を、梁はH-250x125x6x9を使用する。柱梁接合部は、柱に設けたガセットプレートに梁ウェブのみを高力ボルトM24を2本用いて摩擦接合した、ピン接合とする。ベースプレートはPL-400x400x50とし、隅角部にアンカーボルトM16を各1本ずつ計4本配置する。また、アンカーボルトは軸部の塑性伸びが十分に期待できる転造ネジアンカーボルトを使用している。アンカーボルトには降伏軸力の30%を初期軸力として導入している。

尚、ベースプレートのボルト孔とアンカーボルトとのクリアランス部、および鋼製基礎のボルト孔とアンカーボルトとのクリアランス部をセメントペースト（水セメント比50%程度）で埋めることで、クリアランスによる試験体のせん断スリップを抑制している。

ブレースはL-65x65x8を2本使用し、ガセットプレートを両面から挟み込んで、高力ボルト（M20）3本で摩擦接合している。また、ボルト孔による断面欠損部での破断を

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	柱 H-200×200×8×12 梁 H-250×125×6×9 ブレース L-65×65×8 アンカーボルト M16 軸部径φ=14.5mm
		E (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	ϵ_y (%)	ϵ_{ST} (%)	σ_U (N/mm ²)	
柱フランジ	SS400	205000	282	0.14	2.51	418	
柱ウェブ	SS400	205000	313	0.16	2.61	418	
梁フランジ	SS400	205000	281	0.15	2.84	392	
梁ウェブ	SS400	205000	294	0.15	3.62	401	
ブレース	SS400	205000	302	0.15	2.17	434	
アンカーボルト	ABR400	205000	294	0.14	2.55	435	

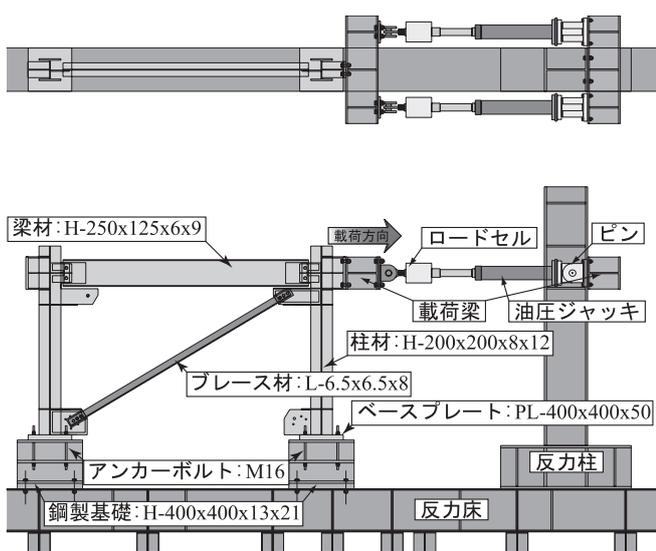


図2 載荷装置

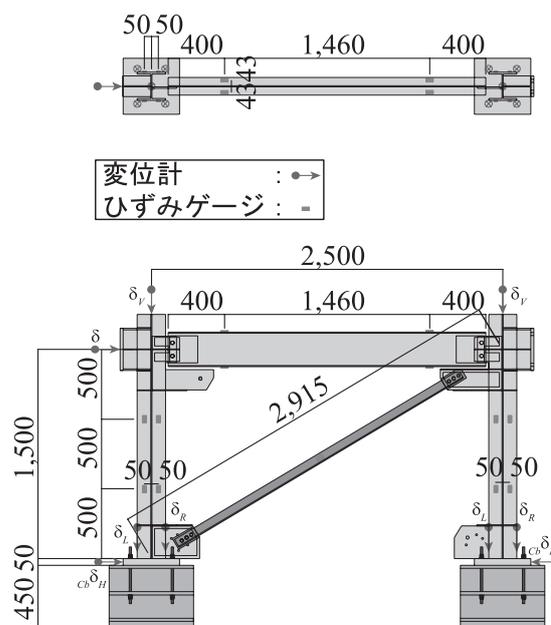


図3 計測位置

防ぐため、ブレース両端部に羽子板 PL-12 を隅肉溶接接合する。ガセットプレートは PL-12 を使用し、ガセットプレートのちぎれ破断を防ぐため、片面に PL-12 のプレートを全周隅肉溶接接合する。

2.2 載荷プログラム

図2に載荷装置を示す。試験体を反力床 H-400x400x13x21 に設置し、反力柱 H-400x400x13x21 および試験体柱頭部に取り付けた載荷梁 (H 形鋼 H-300x300x10x15) を介して油圧ジャッキを接合し、地震外力を想定した水平荷重を加えていく。尚、2 台の油圧ジャッキにより載荷を行うため、各油圧ジャッキの伸び量が等しくなるよう制御する。載荷方法は単調載荷とし、アンカーボルトが破断するまで荷重を加えていき、破断した時点で載荷終了とする。

2.3 計測計画

図3に計測位置を示す。計測には変位計、ロードセルおよびひずみゲージを用いる。

変位計測は、柱頭部に取り付けた変位計により水平変位 δ を、柱頭部天端に取り付けた変位計により柱鉛直変位 δ_v

を、ベースプレート横に取り付けた変位計により柱脚部水平変位 $_{cb}\delta_H$ を、ベースプレート上部に取り付けた変位計よりベースプレートの鉛直変位 δ_L , δ_R を計測する。また、ベースプレートの鉛直変位 δ_L , δ_R を用いベースプレート回転角 θ を、柱鉛直変位 δ_v 、ベースプレート回転角 θ を用い、柱脚部離間変位 $_{cb}\delta_v$ を(1)式、(2)式を用い算出する。

$$\theta = \frac{\delta_L - \delta_R}{D} \dots\dots\dots (1)$$

$$_{cb}\delta_v = \delta_v - d_c \tan \theta \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 D : ベースプレートの鉛直変位 δ_L , δ_R の計測間距離、 d_c : 柱芯芯から圧縮合力点位置までの距離 (本試験体ではベースプレートの変形はないものとし、圧縮合力点位置はベースプレート端部とするため、 $d_c=200\text{mm}$) とする。

荷重計測は油圧ジャッキ先端に取り付けたロードセルにより水平荷重 P を、アンカーボルト下部に取り付けたロードセルによりアンカーボルト軸力 T_{AB} を計測する。

柱の上部および下部に取り付けたひずみゲージにより柱

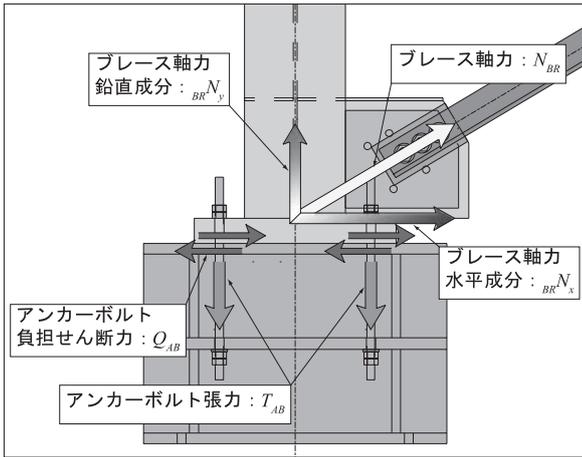


図4 柱脚の抵抗機構

が負担する層せん断力 Q_C を算出する。また、柱の材端モーメント M を算出する。ブレース中央に貼り付けたひずみゲージによりブレース軸力 N_{BR} を算出する。

3. 降伏耐力

図4に柱脚の抵抗機構を、図5にブレース軸力の鉛直成分-ブレース軸力の水平成分 (BR^N_y - BR^N_x) 関係を示す。また、降伏条件、破断条件も併せて示す。尚、本試験体の柱脚にはアンカーボルトを4本配置しているため、降伏条件および破断条件の履歴はアンカーボルト4本分の降伏耐力、破断耐力とする。

ブレースによって柱脚に生じるせん断力（ブレース軸力の水平成分 BR^N_x ）および引張軸力（ブレース軸力の鉛直成分 BR^N_y ）は、アンカーボルトのみが抵抗するものとする。アンカーボルトにはせん断力と引張力軸力が同時に作用するため、ミーゼスの降伏条件式を用いアンカーボルトの降伏耐力を求める。

$$\sigma^2 + 3\tau^2 - \sigma_y^2 = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma^2 + 3\tau^2 - \sigma_v^2 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 σ : 垂直応力度、 τ : せん断応力度、 σ_y : 降伏応力度（表1よりアンカーボルトの降伏応力度は $\sigma_y=294\text{kN/mm}^2$ ）、 σ_v : 引張強さ（表1よりアンカーボルトの引張強さは $\sigma_v=435\text{kN/mm}^2$ ）とする。

図5より、ミーゼスの降伏条件と実験値の交点を降伏耐力とした場合、ブレース軸力の水平成分および鉛直成分は、 $BR^N_x=107\text{kN}$ 、 $BR^N_y=64\text{kN}$ となる。

4. 実験結果

図6に水平荷重-水平変位 (P - δ) 関係を、図7にせん断力-水平変位 (Q - δ) 関係を、図8に柱せん断力-水平変位

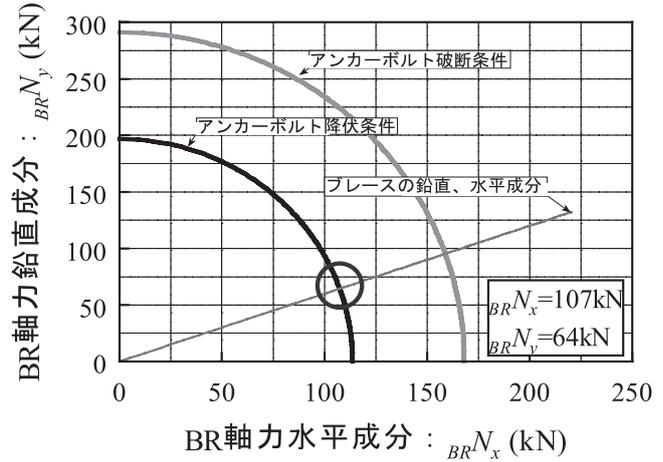


図5 ブレース軸力の水平成分-鉛直成分

(Q_C - δ) 関係を、図9にブレース軸力水平成分-柱脚部水平変位 (BR^N_x - $c_b\delta_H$) 関係を、図10に柱脚曲げモーメント-ベースプレート回転角 (M - θ) 関係を、図11に柱脚部離間変位-ベースプレート回転角 ($c_b\delta_v$ - θ) 関係を、図12にアンカーボルト張力-ベースプレート回転角 (T_{AB} - θ) 関係を示す。

ブレース負担せん断力 Q_{BR} は、ブレースに貼り付けたひずみゲージより算出したブレース軸力の水平成分とする。また、柱せん断力 Q_C は柱上下に貼り付けたひずみゲージより算出したモーメント勾配とする。

また、図6、図7、図9に図5に示したブレース軸力鉛直成分-ブレース軸力水平成分とミーゼスの降伏条件式曲線との交点の値 (BR^N_x) を併せて示す。尚、図6は、ミーゼスの降伏条件式曲線との交点の値 (BR^N_x) と、そのときの柱せん断力との合計値とする。

4.1 水平荷重-水平変位

図6より、ブレース付フレームは、水平荷重が $P=140\text{kN}$ 付近から剛性が大きく減少している。ブレースの降伏耐力は、約 $BR^Q_y=500\text{kN}$ のためブレースは弾性であり、引張側柱のアンカーボルトが降伏したためである。一方、アンカーボルトのミーゼスの降伏条件式曲線とブレースからの応力関係から、 $P_y=120\text{kN}$ となるが、実験結果は、これを大きく上回っている。これは、摩擦力による影響で、柱脚の耐力が増大したためと考えられる。

ブレース付フレームは、降伏後の2次勾配 ($K'=12.5\text{kN/mm}$) が弾性剛性 ($K=70.0\text{kN/mm}$) の約18%程度であり、水平荷重が $P=260\text{kN}$ 付近でアンカーボルトが破断した。アンカーボルトの素材特性としては、降伏棚（ひずみ流れ域）が存在するが実験結果において降伏棚は生じていない。これは、引張側柱脚のアンカーボルトには引張力だけでなく、せん断力も作用しているため、ひずみの増加が大きく、降伏棚が明解に表われないこととひずみ硬化に入ったと考

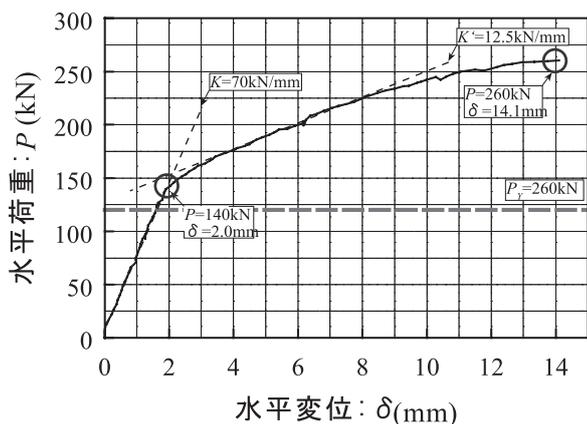


図6 水平荷重-水平変位

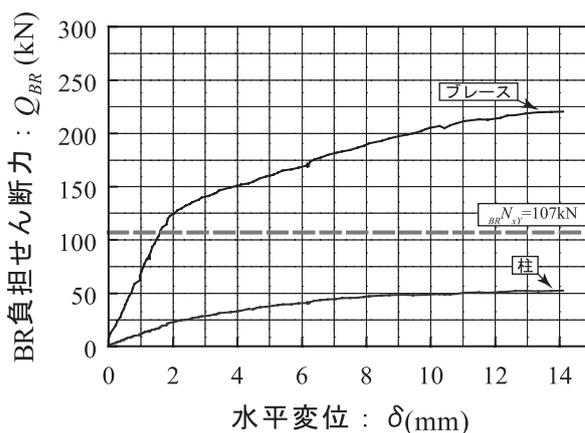


図7 せん断力-水平変位

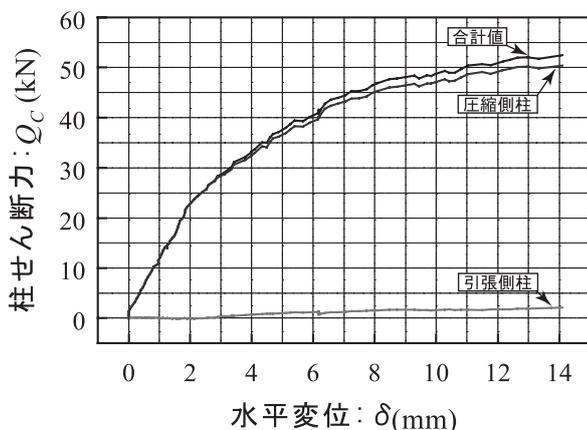


図8 柱せん断力-水平変位

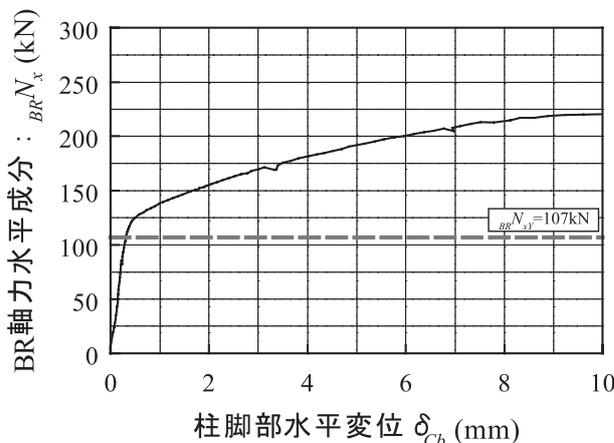


図9 BR軸力水平成分-柱脚部水平変位

えられる。

その後、破断するまで徐々に剛性は減少していったが耐力は増加し続けた。

4.2 せん断力-水平変位

図7よりブレース付フレームの耐力、剛性はブレース負担せん断力と柱せん断力の合計となるため、ブレースの性能が大きく影響することが分かる。引張側柱脚の降伏により、ブレースの剛性が減少した影響が図6に現れている。

柱せん断力も引張側柱のアンカーボルトが降伏した時点で、僅かではあるが剛性が減少している。これは、引張側のアンカーボルトが降伏することでブレースが抵抗できなくなってしまい、柱に作用する圧縮軸力の増加量が減少したためと考えられる。柱に作用する圧縮軸力はアンカーボルトが破断するまで増加し、また、柱梁接合部は高力ボルト2本を用い摩擦接合しており、完全なピン接合でないため摩擦力の影響を受けていることから、圧縮側柱脚が降伏後も耐力は増加する。

4.3 柱せん断力-水平変位

図8より、柱のせん断力は、引張側の柱がほとんど抵抗しないため、圧縮側の柱のせん断力とほぼ等しくなる。本試験体は、柱梁接合部をピン接合に近い状態にしているため、ブレースと圧縮側の柱でトラス架構となるため、引張側の柱と梁にはほとんど応力が作用しない。このため、圧縮側のせん断力のみ抵抗となる。

4.4 BR軸力水平成分-柱脚部水平変位

図9より、実験値では、ブレース軸力水平成分が $BR N_x = 125\text{kN}$ で降伏している。その後、柱脚部水平変位は大きく増加しており、アンカーボルトが大きく塑性変形したことが分かる。また、図5より、破断時の耐力は破断条件式曲線と実験値との交点では、 $BR N_x = 159\text{kN}$ となるが、実際の破断耐力は、 $BR N_x = 220\text{kN}$ となり、条件式の履歴より大きく上回っている。

ミーゼスの降伏条件式から求めた降伏耐力は $BR N_x = 107\text{kN}$ と約 20kN 低い値を示した。これは、アンカーボルトが降伏するまで基礎とベースプレートが接触しており、摩擦力が作用することでブレース軸力の水平成分に対

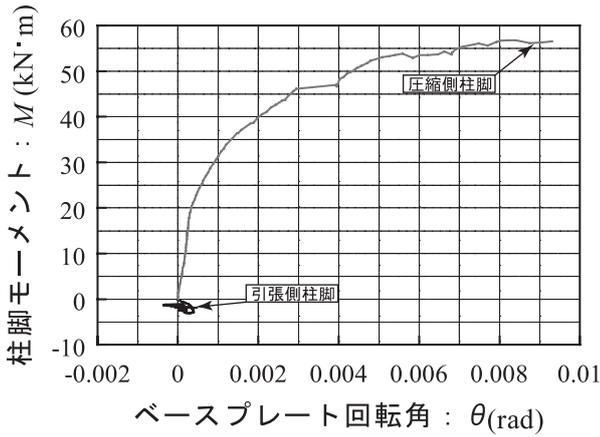


図10 柱脚曲げモーメント-ベースプレート回転角

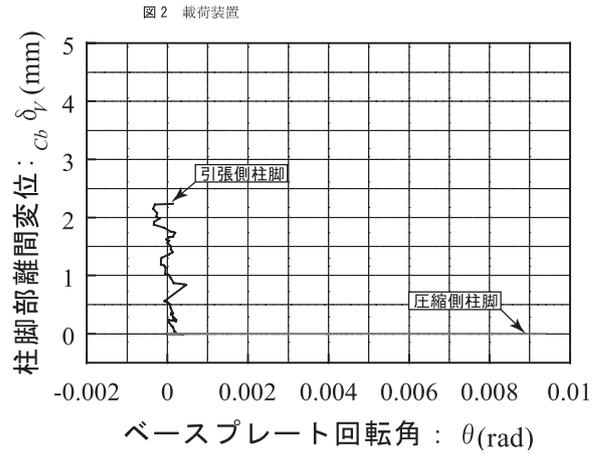
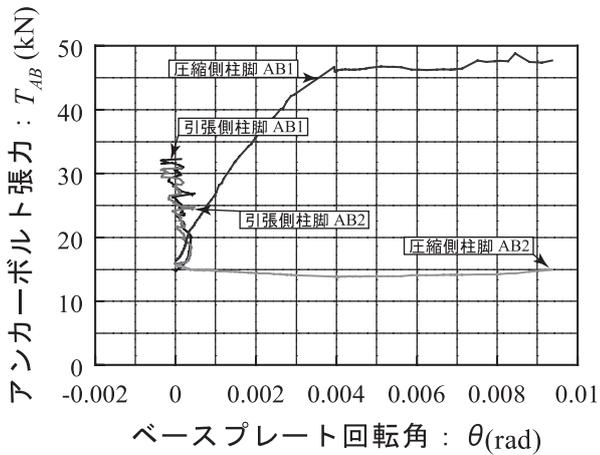
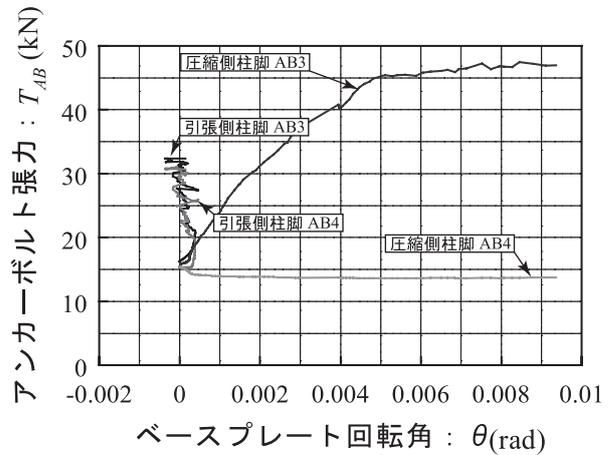


図11 柱脚部鉛直変位-ベースプレート回転角



(a) AB1,2 (手前側)



(b) AB3,4 (奥側)

図12 アンカーボルト張力-ベースプレート回転角

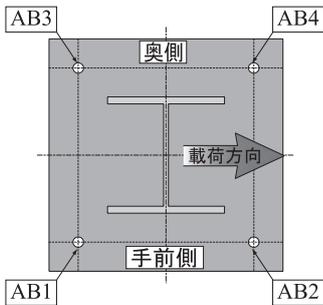


図13 アンカーボルト配置位置

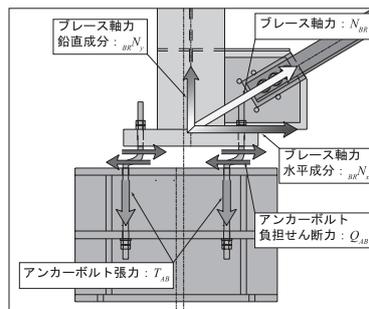


図14 引張側柱脚抵抗機構

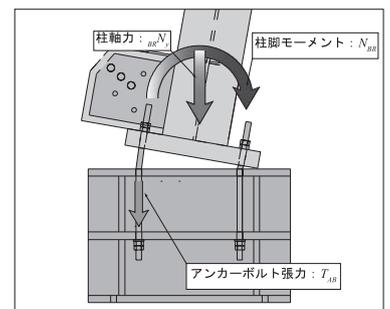


図15 圧縮側柱脚抵抗機構

して、アンカーボルトが負担する力が、僅かではあるが軽減されたと考えられる。

実験値の降伏耐力とミーゼスの降伏条件式の降伏耐力の結果より、柱脚やブレースを設計をする上では、ブレース軸力の鉛直成分とブレース軸力の水平成分に対して、アンカーボルトが全て負担すると仮定しておけば、耐力の評価として安全側の結果になると考えられる。

4.5 柱脚曲げモーメント- BP 回転角

図10より、引張側柱は、圧縮側柱とブレースでトラス

構造を成すため、ほとんど力が作用することがなく、柱脚に曲げモーメントは生じない。また、曲げモーメントが生じないため、ベースプレートの回転角は生じない。

アンカーボルト降伏先行型露出柱脚のため、圧縮軸力が作用することで付加曲げが生じ、耐力、剛性は(無軸力での降伏耐力 $M_y=35\text{kN}\cdot\text{m}$) 増加した。圧縮軸力により柱脚の耐力は増加するが、柱の耐力は減少するため、圧縮側柱では、 $M=45\text{kN}\cdot\text{m}$ 付近でアンカーボルトより先に柱が降伏した。その後、アンカーボルトが降伏し、圧縮軸力は増加し続けているため、耐力は引張側アンカーボルトが破断

するまで増加した。

4.6 柱脚部離間変位－BP 回転角

図 11 より、引張側柱脚は、ベースプレート回転角が生じることなく、鉛直方向に変位していることから、アンカーボルトは 4 本とも均等に塑性伸びを生じていることが分かる。

圧縮側柱脚は、鉛直方向に変位せずにベースプレートが回転していることから、アンカーボルト 1 列のみが塑性伸びしていることが分かる。

4.7 AB 張力－BP 回転角

図 12 (a) に AB 1, 2 (手前側) を、図 12 (b) に AB 3, 4 (奥側) 結果を示す。図 13 には、アンカーボルトの配置位置を示す。尚、引張側および圧縮側のアンカーボルト配置位置は、同じものとする。

引張側柱脚は回転することなく鉛直方向に変位することからアンカーボルト 4 本に同程度の引張軸力が作用していることが分かる。

アンカーボルトの最大引張耐力は、約 ${}_{AB}T_{max}=70\text{kN}$ であるが、実験値の最大引張耐力は、 ${}_{AB}T_{max}=32\text{kN}$ となっている。これは、アンカーボルトがブレース軸力の鉛直成分以外にもブレース軸力の水平成分に対しても抵抗したためである。

圧縮側柱脚は、載荷方向側のベースプレート端部を支点に回転するため、AB 1, AB 3 に引張軸力が作用し、AB 2, AB 4 にはほとんど引張軸力は作用しない。

5. まとめ

せん断力および引張力を受ける露出柱脚の単調載荷実験を行い得られた知見を以下に示す。

- (1) 引張側柱のアンカーボルトが降伏することで、ブレースが抵抗できなくなり剛性が減少した。
- (2) アンカーボルトは引張軸力とせん断力を同時に受けることで、降伏棚を示すことなくひずみ硬化に入ったと考えられ、引張側アンカーボルト降伏後、ブレースは直に 2 次勾配を示し抵抗した。
- (3) 引張側柱脚が降伏後、圧縮側柱のせん断力にはほとんど影響しない。
- (4) 引張側柱脚が降伏後、柱脚は鉛直方向および水平方向に大きく変位する。
- (5) ベースプレートと基礎間で摩擦力が作用すると考えられるため、ミーゼスの降伏条件式を用いた降伏耐力は実験値より低い値を示した。
- (6) ミーゼスの降伏条件式を用いた場合、降伏耐力の評価としては安全側の設計ができると考えられる。

- (7) 引張側柱脚には曲げモーメントがほとんど生じず、ベースプレートが回転することなく鉛直方向に変位するため、アンカーボルトには 4 本とも同程度の引張軸力が作用する。
- (8) 圧縮側柱脚は、基礎とベースプレートが離間することなくベースプレート端部付近を支点とし回転するため、アンカーボルト 2 本のみに引張軸力が作用する。

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、試験体作成に当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.
- 2) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 小澤拓雄, 松尾彰: 変動軸力を受けるアンカーボルト降伏先行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.283-290, 2008. 11.
- 3) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松村高良, 松尾彰: 一定引張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報告集, 第 74 巻, 第 637 号, pp.561-567, 2009. 3.
- 4) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: 露出柱脚の弾性回転剛性について - アンカーボルト降伏先行型の場合 - 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 624 号, pp.317-324, 2008. 2.
- 5) 伊藤倫夫, 三谷勳, 大谷恭弘, 藤永隆, 田中秀宣: 基礎部の配筋を簡略化したアンボンド型アンカーボルトを用いた露出柱脚の構造性能, 鋼構造論文集, 第 8 巻, 第 31 号, pp.43-55, 2001. 9.
- 6) 田中秀宣, 亀元靖彦, 三谷勳, 藤永隆, 伊藤倫夫: 変動軸力を受ける露出型柱脚の曲げ挙動と復元力特性, 鋼構造論文集, 第 10 巻, 第 39 号, pp.39-49, 2003. 9.
- 7) 田中秀宣, 三谷勳, 島村洋子, 伊藤倫夫: 変動軸力を受ける露出柱脚を有する鋼構造骨組の弾塑性挙動, 鋼構造論文集, 第 12 巻, 第 45 号, pp.171-184, 2005. 3.
- 8) 秋山宏, 黒沢稔, 和国信之, 西村功: 鋼構造露出柱脚のせん断耐力 - アンカーボルト, シアープレートのせん断抵抗 -, 日本建築学会論文報告集, 第 338 号, pp.71-76, 1984. 4.

