

ブレース付き露出柱脚の補強工法に関する実験的研究

高松 隆夫*・山西 央朗**・景山 朋定***

(平成23年10月28日受付)

Experimental study on reinforcing method of exposed column-base in braced frame

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI and Tomosada KAGEYAMA

(Received Oct. 28, 2011)

Abstract

Brace strengthening methods are widely applied to seismic retrofit of low-story steel structures. Exposed column-bases are strengthened by increase of the number of anchor-bolts. Hole-in anchor-bolts are usually used, though performance of the bolts is different. A new idea for the method of the hole-in anchor-bolt resisting effectively needs to be proposed.

Therefore, in this paper a new technique is proposed to strengthen the exposed column-base by use of the horizontal-displacement constraint plate. From experimental results, the proposed method can succeed in the rational resistant mechanism that the existing anchor-bolts resist the tensile axial force and the hole-in anchor-bolts resist the shearing force.

Key Words: exposed column-bases, braced frame, hole in anchor-bolts, loading test

1. はじめに

屋内運動場や工場等においては大空間を実現するために、梁間方向をラーメン架構、桁行き方向をブレース架構として設計・施工された低層鋼構造物が多く採用されている。更に、このような構造物では、柱下端部と基礎との接合部に露出柱脚形式を採用しているのが一般的である。

昨今、耐震診断が盛んに行われている中で、屋内運動場等の低層鉄骨架構で、保有水平耐力が不足している事例が多く存在する。この場合、耐力および剛性の向上が容易に行えることから、ブレースの新設や交換による断面増加を行う補強が一般的である^{1,2)}。また、ブレースの軸断面を増加することは、ブレース以外の構造部材(柱、梁、各接合部等)への応力負担が増加するため、構造物全体の改修(補強)を行う必要がある。特に、ブレースが直接設置されている柱脚においては、ブレース軸力の鉛直成分が軸力と

して作用し、ブレース軸力の水平成分がせん断力として柱脚に作用するようになる。この補強として、現在は、ベースプレートの拡張(ベースプレートに鋼板を溶接接合する)を行い、拡張した部位にあと施工アンカーボルトを設置することで柱脚耐力を増加させる工法が行われている^{3,4)}。

しかしながら、あと施工アンカーボルトに引張軸力が作用することによる性能劣化等が指摘されると共にその抵抗機構を正確にとらえることは難しい^{3,4)}。

このような背景の下、本研究では、ブレースからの応力に対して露出柱脚の耐力が不足している場合における補強工法を提案すると共に、載荷実験によりその有効性を検討することを目的とする。方法としては、露出柱脚にブレース軸力を想定した載荷実験を行い、提案する補強工法の抵抗機構、期待できる性能等を議論するものとする。尚、本研究は提案する工法の基礎的な実験研究として位置付けるものとし、損傷・降伏する要素をアンカーボルトに限定し

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 東京工業大学都市地震工学センター

*** 有限会社景山構造設計事務所

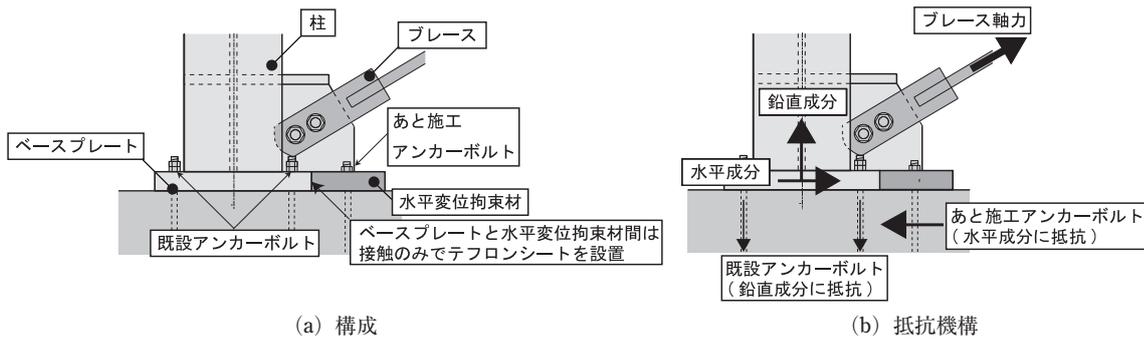


図1 提案する補強工法

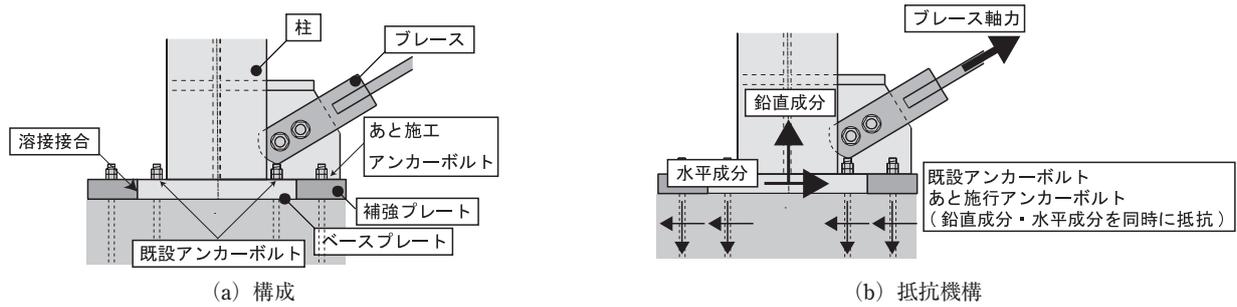


図2 従来の補強工法

て載荷実験および評価を行う。

2. 提案する補強工法

図1に、提案する補強工法、図2に従来の補強工法の構成と性能を、それぞれ、示す。

提案する補強工法は図1 (a) に示すよう、ベースプレートの側部に水平変位拘束材（ベースプレート程度の板厚の鋼板）と呼ぶ部材を設置し、これをあと施工アンカーボルトにより基礎に緊結するものである。この工法の本質的な工程はあと施工アンカーボルトを設置するのみである。図2 (a) の従来の補強工法では、補強プレートを溶接接合で増設して、あと施工アンカーボルトを設置するのに対して、比較的容易に施工することが可能である。このため、既存建造物の耐震改修工法としても十分適用可能である。また、図2 (b) に示すように、従来の補強工法では既設のアンカーボルトとあと施工アンカーボルトに、柱脚軸力 N （ブレース軸力鉛直成分： $BR T \cdot \sin \alpha$ ）と柱脚せん断力 Q （ブレース水平成分： $BR T \cdot \cos \alpha$ ）が同時に作用する抵抗機構になるため、アンカーボルトは組み合わせ応力下になり、早期に破断する可能性がある^{5,6)}。それに対して、図1 (b) に示す提案する補強工法では、あと施工アンカーボルトは柱脚せん断力 Q （ブレース水平成分： $BR T \cdot \cos \alpha$ ）を、既設のアンカーボルトは柱脚軸力 N （ブレース軸力鉛直成分： $BR T \cdot \sin \alpha$ ）を、それぞれ、負担する抵抗機構となる。すなわち、水平変位拘束材とベースプレートとを接触状態とすることで、ベースプレートの水平変位は水平変位拘束材を介してあと施工アンカーボルトのせん断力により抵抗

し、鉛直変位は既設のアンカーボルトの引抜き抵抗により支持するものとなっている。このため、各ボルトに作用する応力が明瞭になると共に、各ボルトには特性に合った応力が作用することとなり、合理的な設計が可能となる。

尚、本工法はアンカーボルト降伏型に適用する工法であり、ベースプレートが大きく面外曲げ変形する場合には、適用できない可能性がある。

3. 実験概要

実験では、露出柱脚にブレースの軸力の影響のみを再現した載荷実験を行う。実際の架構では、ブレース軸力に加えて、架構からの応力も作用するが無視するものとする。

露出柱脚付き片持ち柱の下端部にガセットプレートを溶接接合して、ガセットプレートに設置した油圧ジャッキでブレース軸力を想定した荷重を載荷する。

また、提案する工法の有効性を検討するために、試験体変数として、補強を施さないものと、従来の補強を施したものの実験も併せて行う。尚、本実験ではアンカーボルトのみを降伏・塑性化させるため、鋼製基礎を用いると共に、水平変位拘束材に PL-70 の鋼材を、水平変位拘束材を緊結するボルトに高力ボルト M24 を 5 本用いて、所定の初期軸力を導入する。このため、試験体内、アンカーボルトのみが降伏し、それ以外の部材は弾性範囲に留まるように設計したものを用いている。

尚、本研究は、柱脚の応力状態を明らかにし、著者等が提案する水平変位拘束材の性能を検証することを目的としている。

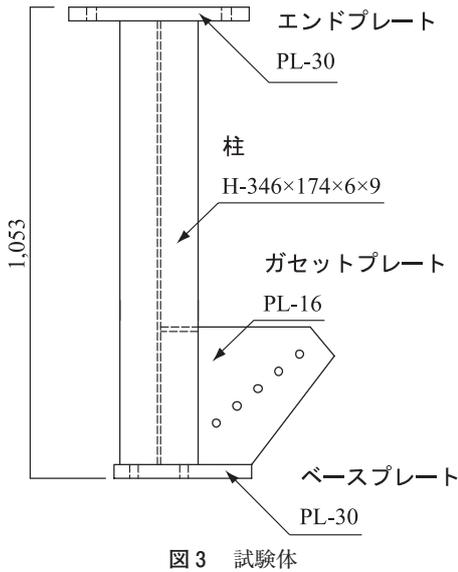


図3 試験体

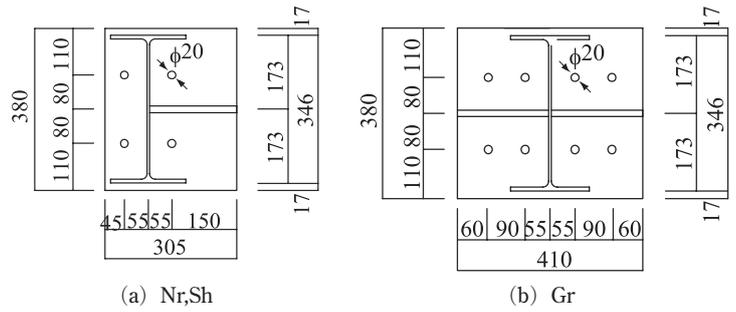


図4 ベースプレート

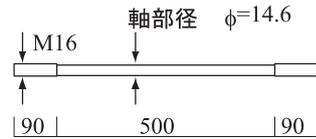


図5 アンカーボルト

3.1 実験の試験体

図3～5に荷重実験の試験体形状を、図6に柱脚（アンカーボルト）のミーゼスの降伏条件を、表1に荷重実験試験体の素材特性を、それぞれ、示す。

試験体は、柱にはH-346×174×6×9を、ベースプレートにはPL-30を、アンカーボルトにはM16の転造ねじアンカーボルトを、ガセットプレートにはPL-16を、ブレースにはPL-19×30を2本用いる。試験体の変数としては、補強を施さないものとしてアンカーボルトを4本配置したNr、提案する補強工法を適用したものとしてアンカーボルトを4本配置して水平変位拘束材を設置したSh、一般的な補強工法を想定した（ベースプレートを拡張し、あと施工アンカーボルトを設置した）ものとして8本のアンカーボルトを配置したGr、以上の計3体を用いる。それぞれ、アンカーボルトには初期導入軸力として、降伏軸力の30%（約15（kN））を導入している。

尚、水平変位拘束材には、ボルトに対して大き目のボルト孔径（ボルト径+3 mm）が掘削している。試験体Shにおいて、ボルトクリアランス分の滑りを防ぐために、高力ボルトF10T-M24を5本配置して締め付け、所定の荷重に対して鋼製基礎と水平変位拘束材間で生じる滑り耐力が超過するように設計している（滑り耐力=本数・静止摩擦係数・導入軸力=5×0.3×236=353（kN））。

3.2 荷重装置

図7に要素実験の荷重装置を示す。荷重装置としては、ガセットプレート・ブレースを介して設置角度を40°とした油圧ジャッキにより、ブレース軸力を想定した応力（柱脚せん断力、柱軸力）を柱脚に与える単調引張荷重とする。

尚、ブレース軸力を想定した油圧ジャッキの最大出力が200 kNのものを2台用いて、Nrはアンカーボルトが

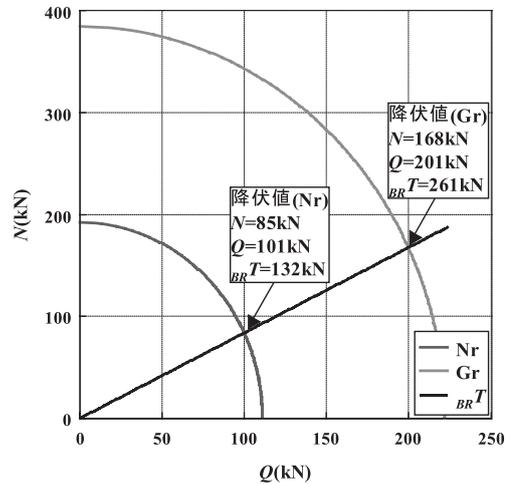


図6 ミーゼスの降伏条件

表1 試験体の素材特性

部材名	材種	ヤング係数 E (N/mm ²)	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_u (N/mm ²)
柱	SS400	205000	276	409
ベースプレート	SS400	205000	257	420
アンカーボルト	ABR400	205000	291	427

破断するまで、ShとGrはアンカーボルトが降伏した後に大きく塑性変形するまで荷重をする。

また、柱脚の回転を回避するために、柱頭部に設置した水平油圧ジャッキにより、片持ち柱の部材角が0になるように柱頭部と柱脚部の水平変位に差異が生じないように調整している。

3.3 計測位置と計測方法

図8に計測位置をそれぞれ、示す。計測は、柱脚部の変位量を計測するために、柱下端部の鉛直変位 $_{CB}\delta_V$ 、ベースプレートの水平変位 $_{CB}\delta_H$ を計測する。

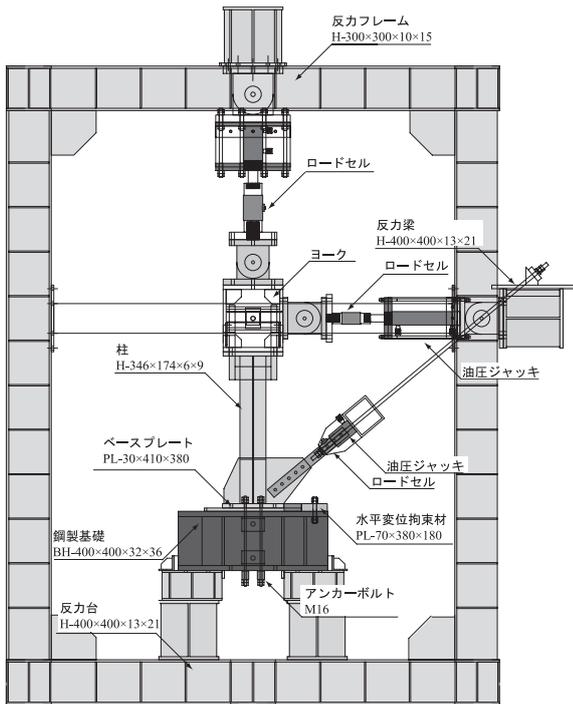


図7 载荷装置

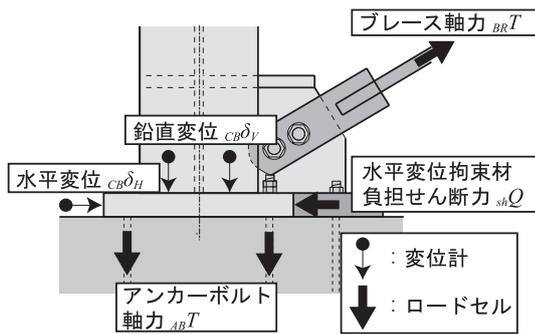


図8 計測位置

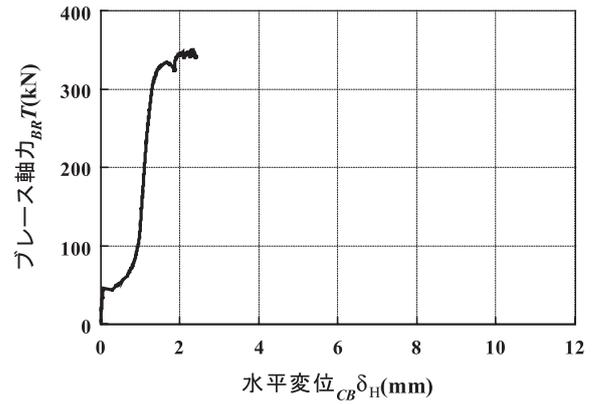
尚、柱頭部の水平変位 $C\delta_H$ を計測し、柱脚の回転を回避するため、ベースプレートの水平変位 $CB\delta_H$ 差異が生じないようにしている。

各部材に作用する応力を計測するために、ブレースとジャッキとの間に設置したロードセルによりブレース軸力 $BR T$ を、アンカーボルト下端に設置したロードセルによりアンカーボルト軸力 $AB T$ を、ベースプレートと水平変位拘束材との間に設置したロードセルにより水平変位拘束材が負担する柱脚せん断力 $sh Q$ を、それぞれ、計測する。

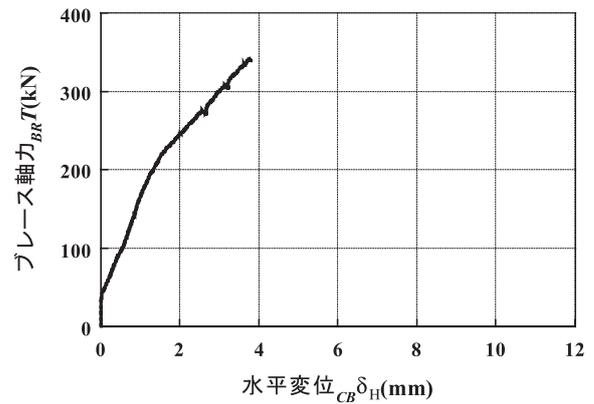
尚、ベースプレートと水平変位拘束材間に作用する摩擦力を軽減するため、水平変位拘束材とベースプレートとの間にテフロンシートを設置（図1 (a) を参照）している。

4. 実験結果と考察

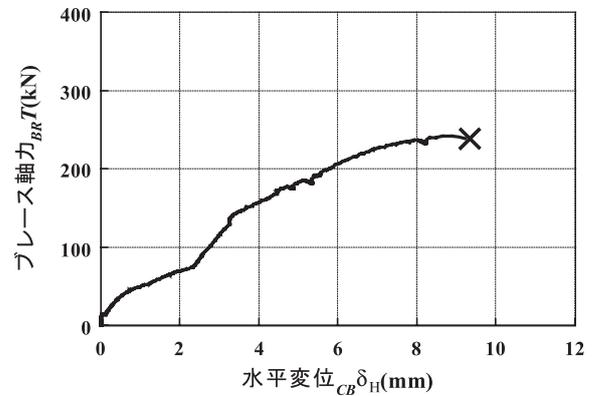
図9 にブレース軸力－柱脚水平変位関係を、図10 にブレース軸力－柱脚鉛直変位関係を、図11 に試験体 Sh の水平変位拘束材負担せん断力－柱脚部水平変位関係を、図12



(a) Sh



(b) Gr



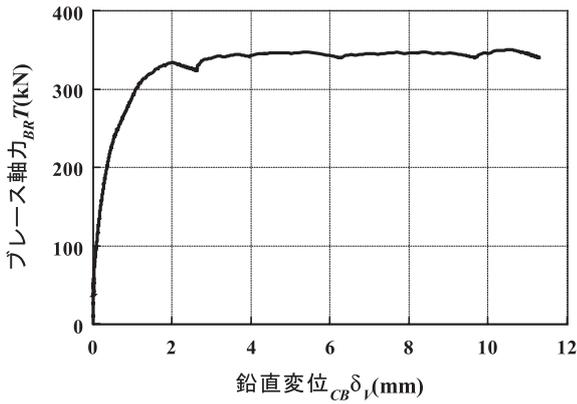
(c) Nr

図9 $BR T$ - $CB\delta_H$

に試験体 Sh のアンカーボルト軸力－柱脚部鉛直変位関係を、それぞれ、示す。

図9, 10より Nr は柱脚が水平方向に 9 mm 程度移動してブレース軸力が 250 kN となった時点でアンカーボルトが破断した。Sh および Gr はブレース軸力が 300 kN を超過してもアンカーボルトは破断することなく、それぞれ、柱脚の補強効果が得られていることが分かる。また、図10 (a), (b) より、Sh は鉛直変位が大きく生じているものの、水平変位は Gr より小さいことが分かる。

図11よりせん断力は水平変位拘束材がほぼ全て負担しているため、既設のアンカーボルトにはせん断力が殆ど作用



(a) Sh

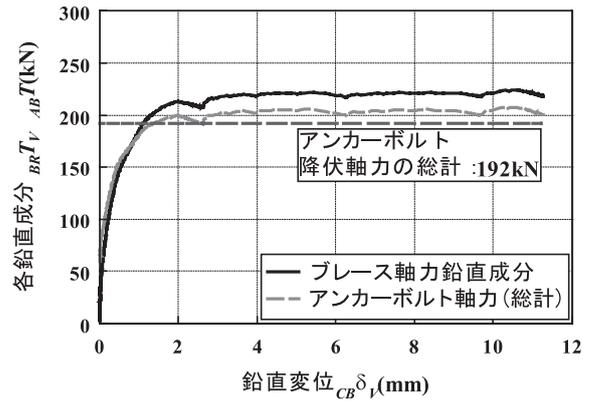
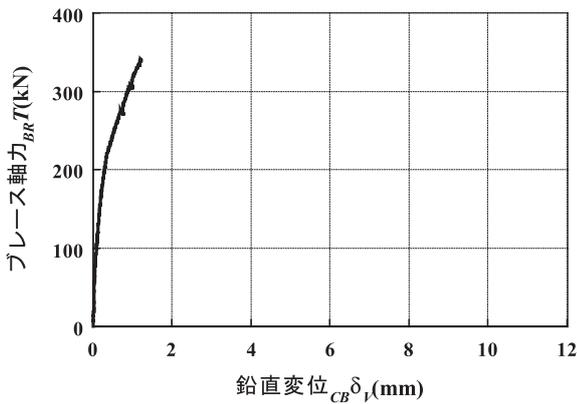
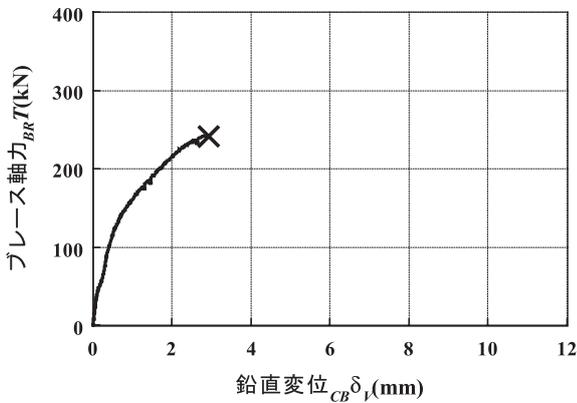


図12 $_{BR} T_{V, CB} \delta_V$



(b) Gr



(c) Nr

図10 $_{BR} T_{CB} \delta_V$

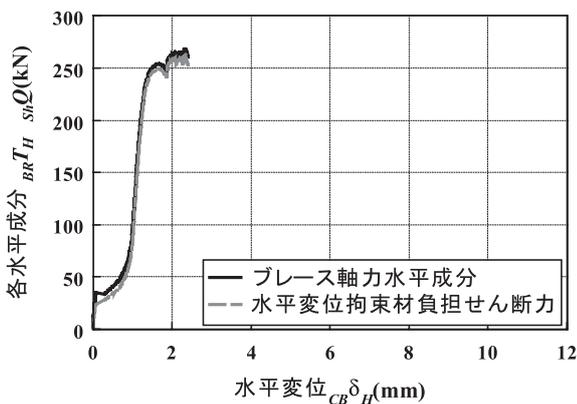


図11 $_{BR} T_{H, CB} \delta_H$

していない。

次いで、図12より、既設のアンカーボルトは降伏軸力の総計 192 kN を超過するまではほぼ全てのブレース軸力の鉛直成分を負担していることが分かる。降伏軸力の総計が 192 kN を超過すると既設のアンカーボルトが全てを負担しておらず、16 kN ほど差が生じている。これは、水平変位拘束材とベースプレート間で摩擦力が発生しているためである。しかしながら、降伏軸力の総計の 8% 程度であるため、あと施工アンカーボルトには鉛直力が作用していないとみなす。

尚、载荷初期は基礎とベースプレート間に発生する摩擦力（初期導入軸力による摩擦力）が水平成分に抵抗するが、摩擦力が減少してくると、水平変位拘束材にせん断力が作用し始める。

以上の結果から、ブレースからの軸力を受ける場合、従来の柱脚ではアンカーボルトに軸力とせん断力が同時に作用するため、組み合わせ応力状態となり早期に破断するが、水平変位拘束材を用いることで、既設のアンカーボルトはブレース軸力の鉛直成分のみを負担し、靱性のある挙動を示している。

このように、水平変位拘束材が期待通りの性能（せん断力のみを負担する）を有していることが分かる。通常、ブレース架構ではアンカーボルトを弾性設計するが、アンカーボルトを降伏させた場合の終局状態における実験結果より、想定外の応力を受ける場合においても脆性的な破壊を回避することができ、また、設置時にナットに緩み等がありベースプレートが離間した場合にも抵抗機構は変化しないことが分かる。

5. まとめ

ブレースからの応力を受ける柱脚の補強工法として、水平変位拘束材による補強工法を提案するとともに、载荷実験を行い、以下の知見が得られた。

1. 水平変位拘束材を設置することで、ブレースからの応

力に対して柱脚を補強することが可能である。

2. 水平変位拘束材を用いた柱脚は、アンカーボルト降伏後では荷重および水平変位はほとんど増加しないが鉛直変位は増加し、靱性のある挙動を示している。
3. 本論文で提案する補強工法によって、あと施工アンカーボルトはせん断力のみを、既設のアンカーボルトは軸力のみを負担する抵抗機構が実現できる。これにより、合理的な改修設計が可能となる。

以上、水平変位拘束材を設置した露出柱脚の載荷実験を行い、水平変位拘束材の有効性を示した。今後は、実構造物を想定した試験体を用いた載荷実験を行い、実用化に向けての課題と解決方法、設計手法を検討する。

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。更に、試験体の転造ねじアンカーボルトをフルサト工業株式会社より提供していただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

文 献

- 1) 文部科学省大臣官房文教施設企画部：屋内運動場等の耐震性能規準(平成18年版)，2006.
- 2) 財団法人日本建築防災協会：耐震改修促進法のための既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説(1996)，1996.9.
- 3) 畑中理沙，田淵基嗣，田中剛，益居綾：ブレース付き鉄骨造骨組における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 III C-1 pp. 801-802，2002.8.
- 4) 益居綾，田淵基嗣，田中剛，畑中理沙：ブレース付き鉄骨造骨組における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 III C-1 pp. 803-804，2002.8.
- 5) 竹本泰聖，山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，福原章宏，松尾彰：引張軸力とせん断力を受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚—その1 単調載荷下の崩壊機構，日本建築学会大会学術講演会(北陸)，pp. 841-842，2010.9.
- 6) 福原章宏，山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，竹本泰聖，松尾彰：引張軸力とせん断力を受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚—その2 繰り返し載荷実験，日本建築学会大会学術講演会(北陸)，pp. 843-844，2010.9.