

水平変位拘束材を用いたブレース付き露出柱脚の補強工法に関する研究

高松 隆夫*・山西 央朗**・玉井 宏章***・嶋本 仁****

(平成24年10月31日受付)

Study on strengthening method of exposed base-column in braced frame by horizontal displacement constraint plate

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI, Hiroyuki TAMAI and Hitoshi SHIMAMOTO

(Received Oct. 31, 2012)

Abstract

Experimental study on the exposed column-base with the horizontal displacement constraint plate subjected to tensile axial force of the brace member was carried out to make resistant stress of each anchor-bolt clear and to examine the design method of the constraint plate. The function of the constraint plate can realize the resistant mechanism that existing anchor-bolts resist the vertical force and hole-in anchor-bolts resist the horizontal force. The strengthening method of the exposed column-base by the constraint plate assists the column-base with the brace member.

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

1. はじめに

著者等はこれまでに、屋内運動場や工場等の低層鋼構造物の耐震改修時に多用されているブレースの増設・新設による補強設計・施工の課題の一つ^{1,2)}である、ブレース付露出柱脚の簡便な補強工法を提案・研究している^{3,4)}。当該

補強工法（以後、補強工法と記す）は、図1に示すように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補強するとともに、既存のアンカーボルトにブレース鉛直成分を、あと施工アンカーボルトにブレース水平成分をそれぞれ負担させる抵抗機構を確保して、各部材負担応力を明瞭化できるという利点を有している。

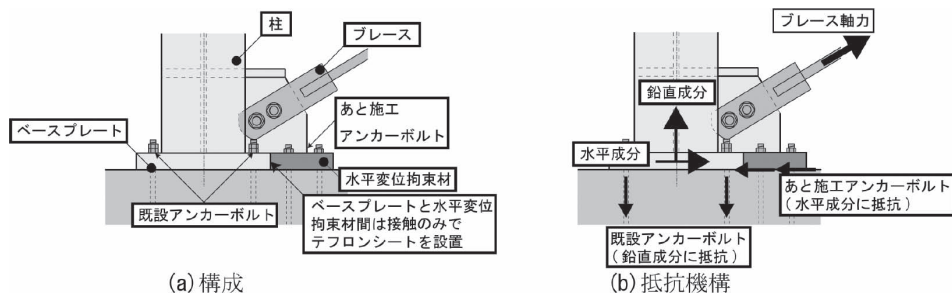


図1 提案する補強工法

* 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

*** 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

本論文では架構実験を行った結果に基づき⁴⁾、実構造物における設計・施工時の設計手法や施工工法の留意点に着目した検討を行う。

先ず、架構実験の概要を2章にて示し、3章にて架構実験試験体のモデル化手法と実験結果との整合性を検討して、補強工法を適用した架構の抵抗機構とその評価方法について議論する。そして、4章においては、3章の架構の抵抗機構とその評価方法に基づいて考察した設計手順を提示する。更に、同章にて層またはスパン方向に連続してブレース架構が配置された場合の設計留意点を提示する。5章にて、実施工時に想定される問題の提起とその解消方法を提案し、6章に各知見をまとめるものとする。

2. 実験概要

本実験では、水平変位拘束材の機能を検討するため、1層1スパン架構に水平変位拘束材を設置した荷重実験を行う。尚、実験を単純化するため単調荷重実験とし、ブレース引張力を負担する側の柱脚のみをアンカーボルト降伏型露出柱脚とし、かつ水平変位拘束材を設置する。

もう一方の柱脚は、モデル化を簡便にするため高力ボルトにより拘束し固定端と見なせるものとしている。

2.1 試験体

表1に試験体の素材特性を、図2に試験体の形状を、それぞれ、示す。

試験体は、柱にH-250×250×9×14を、梁にH-250×125×6×9を、ベースプレートにPL-50を、アンカーボルトにM16の転造ねじアンカーボルトを、ブレースにはM33を用いる。

そして、水平変位拘束材にはPL-50を用いて高力ボルトM24・F10Tを4本用いて2行2列に配置して、摩擦接合する。

また、アンカーボルトのみが引張降伏するとし、ブレース径の選定の際にはブレースおよび他の部材は弾性範囲に留めるため、図2(a)に示すように、アンカーボルトは

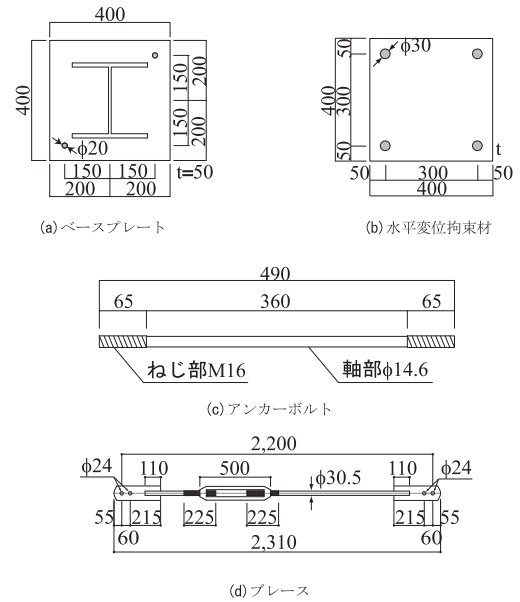


図2 試験体の形状

ベースプレートの隅角部に対角になるように2本配置する。

尚、初期軸力としてアンカーボルトの降伏軸力の15% ($A_B T \approx 7 \text{ kN}$) を、ブレースの降伏軸力の30% ($B_R T \approx 30 \text{ kN}$) を、それぞれ、導入している。

2.2 荷重装置

図3に荷重装置を示す。

柱は弱軸方向に設置し、2本の高力ボルトにより梁ウェブをシヤープレートと摩擦接合している。

尚、ブレースは引張側だけに設置するため、左の柱の柱脚にのみブレースからの引張力が作用するので、ベースプレートが移動する方向に水平変位拘束材を設置する。

荷重は、ブレースが引張状態となる方向に柱頭部の油圧ジャッキにて水平力を加え、層間変形角1/100 (rad) まで単調に加力する。

2.3 計測位置

図4に荷重実験の計測位置を示す。

計測は、層間変位を計測するために柱頭部の水平変位

表1 試験体の素材特性

部材名	材種	ヤング係数 $E(\text{N/mm}^2)$	降伏応力度 $\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	引張強さ $\sigma_u(\text{N/mm}^2)$	主要寸法 (mm)
柱 フランジ	SN490	205000	395	491	H-250×250×9×14
柱 ウェブ	SN490	205000	399	487	
梁 フランジ	SS400	205000	295	412	H-250×125×6×9
梁 ウェブ	SS400	205000	318	434	
ベースプレート	SN490	205000	347	487	PL-50
ブレース	SNR400	205000	280	440	M33 軸部径 $\phi = 30.5 \text{ mm}$
アンカーボルト	ABR400	205000	313	435	M16 軸部径 $\phi = 14.6 \text{ mm}$

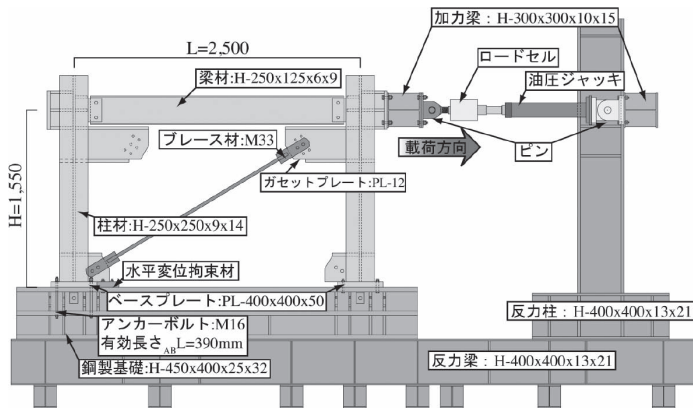


図3 荷重装置

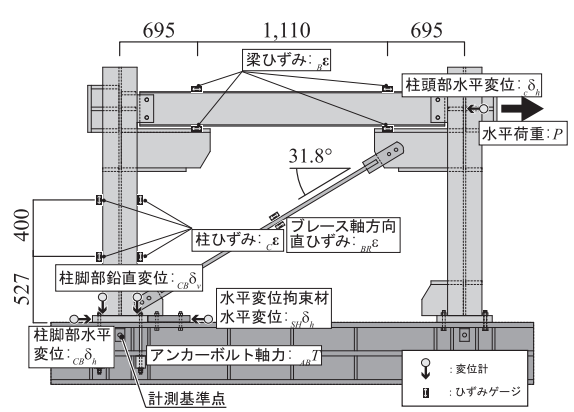


図4 計測位置

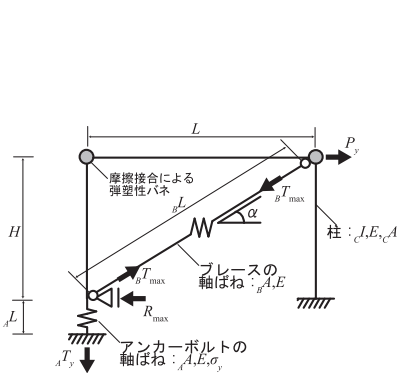


図5 解析モデル

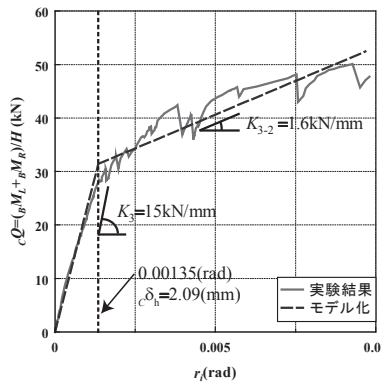
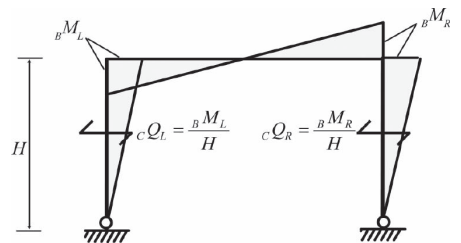


図6 接合部曲げ抵抗による影響



$c\delta_h$, 柱脚部の変位量を計測するために、柱下端部の鉛直変位 $c_B\delta_v$, ベースプレートの水平変位 $c_B\delta_h$, 水平変位拘束材水平変位 $s_H\delta_h$ を、それぞれ、計測する。次いで、各部材に作用する応力を計測・算出するために、油圧ジャッキ先端に設置した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ロードセルによりアンカーボルト軸力 ABT を、ブレース軸部に添付したひずみゲージよりブレース軸方向直ひずみ $BR\epsilon$ を計測してブレース軸力 $BR T$ を算出（ブレース軸部は弾性域である）する。

また、柱梁接合部に作用するモーメント $BM R$, $BM L$ を算出するため、梁フランジに添付したひずみゲージより梁ひずみ $B\epsilon$ も計測を行う。

3. 力学モデルと復元力特性

本章では、2章で行った荷重実験結果を用いて、水平変位拘束材を有するブレース架構のモデル化を行う。まず、力学モデルより架構の剛性、耐力を誘導し、次いで、実験結果との比較により力学モデルの妥当性を検討する。

3.1 力学モデルと理論式

図5に解析モデルを示す。ブレースによるトラス架構に、右柱の下端を固定端、もう一方の下端を鉛直方向に軸ばねを設置したローラ支持としている。また、柱梁接合部

は摩擦接合による弾塑性バネとしている。

すなわち、トラス架構の水平剛性 K_1 に右側柱を片持ち柱として考えた水平剛性 K_2 と、柱梁接合の摩擦接合による抵抗剛性 K_3 を累加したものが、全体の剛性となる。但し、柱梁接合部の摩擦接合による抵抗剛性 K_3 は、モデル化が困難だったので、接合部モーメント $BM L$, $BM R$ から、柱のせん断力 cQ を導出し、図6に実験結果の cQ と層間変形角 r_i 関係より算出している。尚、それぞれの勾配は、降伏前後のデータを分割して最小二乗法で導出している。また、ブレース上端部のブラケットは、架構の変形に追従して剛塑性挙動を示すため、剛性は摩擦接合による抵抗剛性 K_3 としている。

まず、トラス架構のみの水平剛性 K_1 は、ブレースの軸剛性 BK , 全アンカーボルトの軸剛性 AK , 柱の軸剛性 CK を用いて、以下のように表すことができる。

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{B K} + \frac{1}{A K} + \frac{1}{C K}} = \frac{E}{\frac{B L}{B A \cdot (\cos^2 \alpha)} + \frac{A L \cdot (\tan^2 \alpha)}{A A} + \frac{H \cdot (\tan^2 \alpha)}{C A}} \quad (1)$$

そして、トラス架構に対して、右側の柱の曲げ抵抗による水平剛性 K_2 , 接合部の抵抗による水平剛性 K_3 は並列バ

ネとして換算されるので、全体の剛性 K_{1st} は以下のように表すことができる。

$$K_{1st} = K_1 + K_2 + K_3 = K_1 + \frac{3 \cdot E \cdot C \cdot I}{H^3} + 15^{(kN/mm)} \quad (2)$$

ここに、 L ：部材の長さまたは有効長さ、 A ：部材の断面積、 E ：ヤング係数である。各添え字は、 B ：ブレース、 A ：アンカーボルト、 C ：柱を意味している。

次に、アンカーボルト降伏時の水平変位 ${}_C\delta_{hy}$ 、水平力 P_y 、ブレースの最大荷重 ${}_B T_{max}$ および水平変位拘束材に作用する最大荷重 R_{max} は以下の式で算出できる。

$${}_C\delta_{hy} = \frac{{}_A T_y}{K_1 \cdot \tan \alpha} = \frac{n \cdot {}_A A \cdot \sigma_y}{K_1 \cdot \tan \alpha} \quad (3)$$

$$P_y = {}_C\delta_{hy} \cdot K_{1st} = {}_C\delta_{hy} \cdot \left(K_1 + \frac{3 \cdot E \cdot C \cdot I}{H^3} + 15^{(kN/mm)} \right) \quad (4)$$

$${}_B T_{max} = \frac{{}_A T_y}{\sin \alpha} = \frac{n \cdot {}_A A \cdot \sigma_y}{\sin \alpha} \quad (5)$$

$$R_{max} = {}_B T_{max} \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

また、アンカーボルト降伏後の2次勾配 K_{2nd} は、右側の片持ち柱のみが弾性抵抗要素として残存するので、以下の式で算出できる。

$$K_{2nd} = K_2 \quad (7)$$

ここに、 ${}_A \sigma_y$ ：アンカーボルトの降伏応力度である。

3.2 実験結果との整合性

図7に1層1スパン架構試験体の結果を示す。

図7 (a) に水平荷重 P 層間変形角 r_i 関係を (b) に柱脚 (拘束材設置側の柱脚) に作用する軸力 N -柱脚に作用する曲げモーメント M 関係を、(c) に柱脚に作用するせん断力 Q -水平変位 δ_h 関係を、(d) にブレース軸力 ${}_B T$ -層間変形角 r_i 関係を、それぞれ、示す。(a) には、3.1節の解析モデルの解析結果を併せて示している。

また、それぞれの図は、解析モデルより算出した値を用いて、(a) は (4) 式より算出したアンカーボルト軸ばね降伏時の水平荷重 P_y で、(b) はアンカーボルト降伏軸力の総計 $n \cdot {}_A T_y$ と無軸力下の柱脚の降伏曲げ耐力 M_y で、(c) は (6) 式より算出した拘束材に作用する最大せん断力 R_{max} で、(d) は (5) 式より算出したブレースの最大荷重 ${}_B T_{max}$ で、それぞれを無次元化している。

図7 (c) より、1層1スパン試験体を用いた載荷実験においても、アンカーボルトのせん断降伏耐力を超過した耐力を有しており、水平変位拘束材が有効に機能していることが分かる。また、(a) に示す解析モデルと実験結果との曲線が概ね対応している。尚、実験結果の初期剛性が解析モデルより算出した理論値より高い要因としては、初期張力を導入しているためである。

次いで、(d) に示すようにアンカーボルト軸ばね降伏時

のブレース軸力と実験結果が対応している (${}_B T / {}_B T_{max} = 1.0$ で頭打ちとなり) と同時に柱脚にブレースからの応力が大きく作用していることがわかる。さらに、(b) より、柱脚に発生している曲げモーメントは非常に小さく、柱脚に作用する力はブレース軸力からの鉛直成分による影響が支配的であることが分かる。この結果から、架構の変形に伴う曲げモーメントが作用しても、柱脚の鉛直方向軸耐力は影響を受け難いことが分かる。

このように、水平変位拘束材を設置してアンカーボルトのみが降伏する場合、各部材に作用する応力は図5の解析モデルで簡便に評価できることが分かる。

4. 水平変位拘束材とブレース架構の設計

4.1 各アンカーボルトの耐力について

図8に、ブレースおよび水平変位拘束材の設計フローを示す。

各柱設計法に基づき、必要保有水平耐力 Q_{un} を算定し^{1,2)}、改修上適切なブレース設置構面数 m を決定すれば、必要ブレース断面積 ${}_B A$ が定まる。

次に、判定①では、柱脚に作用する鉛直成分 ${}_C B N$ に対して、既設アンカーボルトの降伏軸力 p_{by} の総計が超過していることを (8) 式により判定する。

$${}_C B N < n \cdot p_{by} \rightarrow \frac{{}_C B N}{n \cdot {}_A A \cdot \sigma_y} < 1 \quad (8)$$

最後に、判定②では、あと施工アンカーボルトの降伏せん断耐力 q_{by} 、あと施工アンカーボルト設置本数 n' をそれぞれ決定して、柱脚に作用する水平成分 ${}_C B Q$ に対して、あと施工アンカーボルトの降伏せん断耐力の総計が超過していることを (9) 式により判定する。

$${}_C B Q < n' \cdot q_{by} \rightarrow \frac{{}_C B Q}{n' \cdot {}_A A \cdot \sigma_y / \sqrt{3}} < 1 \quad (9)$$

となる。

原則として、柱脚の水平成分は水平変位拘束材により支持する必要があるため、式 (9) の値に対してあと施工アンカーボルトを設計する。尚、柱脚軸力 ${}_C B N$ が圧縮軸力である場合は、軸力による摩擦力が柱脚のせん断抵抗力として期待できる⁵⁾。従って、コンクリート基礎が圧縮破壊しない限り、圧縮軸力時 (図9右側柱) のせん断補強を検討する必要はない。

4.2 実構造物の柱脚に作用する応力について

4.1 節では、引張ブレースの影響しか検討しておらず、また、構造物自重も考慮していない。実構造物においては、圧縮にもある程度抵抗するブレースを用いることが多く、更に、いかなる構造物でも柱脚には構造物自重が作用する。これらの影響については、図9に示すように既設の

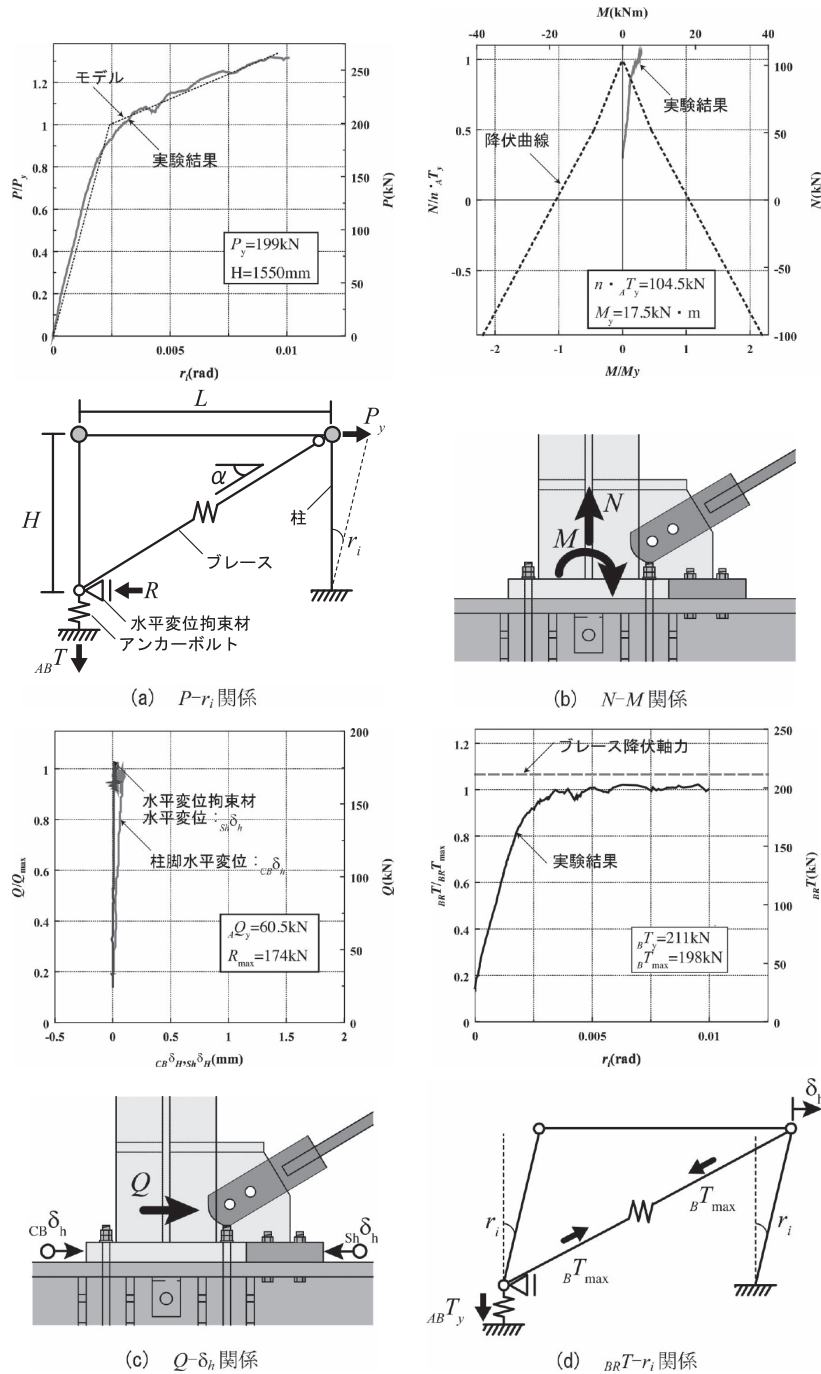


図7 実験結果

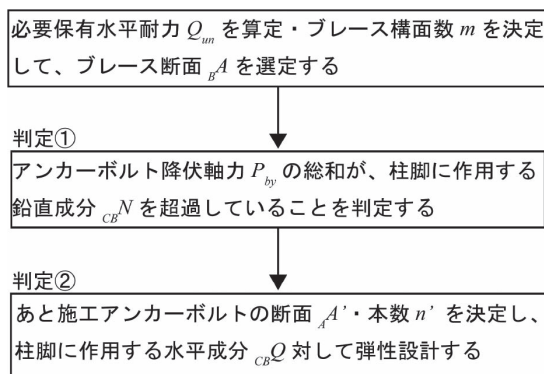


図8 水平変位拘束材を用いた場合の設計フロー

アンカーボルトまたはあと施工アンカーボルトに作用する応力に、構造物自重と圧縮側ブレースの項を追加することで対応できる。

よって、既存アンカーボルトに作用する鉛直成分 ${}_{CB}N$ 、あと施工アンカーボルトに作用する水平成分 ${}_{CB}Q$ については次式で、それぞれ、表すことが出来る。

$${}_{CB}N_1 = ({}_B N_{Ty1} + {}_B N_{cr1}) \cdot \sin \alpha - \frac{W_1 \cdot L_1}{2} \quad (10)$$

$${}_{CB}Q_1 = {}_B N_{Ty1} \cdot \cos \alpha \quad (11)$$

ここに、 ${}_B N_{Ty}$ ：引張耐力、 ${}_B N_{cr}$ ：座屈耐力、 W ：構造物

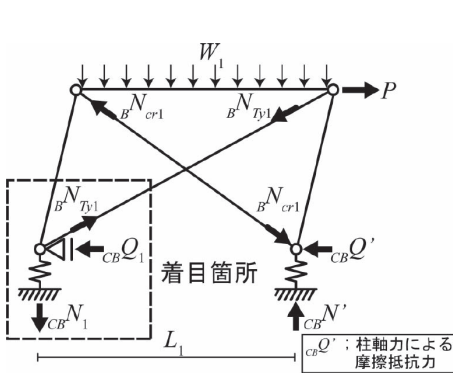


図9 圧縮ブレース及び建物自重の影響

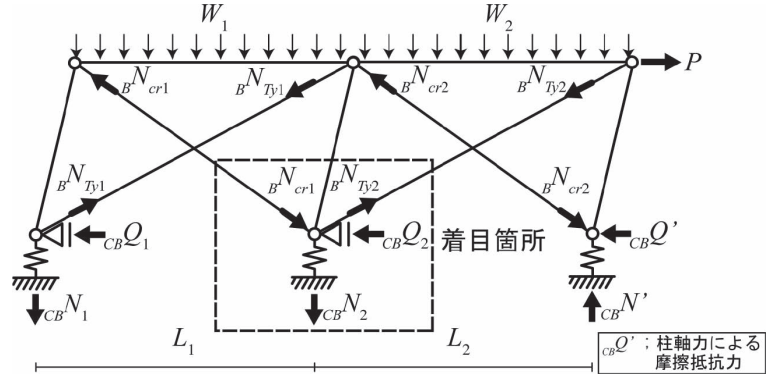


図10 1層2スパン架構の応力状態

の自重である。

以上により、それぞれのアンカーボルトに作用する応力が明快となるため、水平変位拘束材による補強を施せば、簡便かつ合理的に設計できる。

4.3 ブレースのスパン方向連続配置について

図10に1層2スパン架構の応力状態を示す。

左および右側の柱においては、図9に示す左右の柱の状態と同一となるので、4.2節と同様の考えで設計可能である。一方、中柱については、柱上端および下端に、それぞれ圧縮および引張側ブレースが取りつき、柱内部でブレースの鉛直成分がそれぞれ釣り合っているため、柱脚部にブレースの鉛直成分が作用することはない。しかしながら、柱脚部にはブレースの水平成分は作用し、

$${}_{CB}N_2 = -\frac{W_1 \cdot L_1 + W_2 \cdot L_2}{2} \quad (12)$$

$${}_{CB}Q_2 = ({}_B N_{Ty2} + {}_B N_{cr1}) \cdot \cos \alpha \quad (13)$$

となる。

原則として、柱脚の水平成分は水平変位拘束材により支持する必要があるため、式(13)の値に対してあと施工アンカーボルトを設計する。

4.4 ブレースの層方向連続配置について

図11に2層1スパン架構の応力状態を示す。

ブレースを層方向に連続配置する場合においては、柱脚に作用する鉛直成分及び水平成分が増加する。しかし、これらの影響については、2層部分のブレース及び建物自重を4.2節の(10)、(11)式に追加するのみで、簡便に評価することが出来る。

よって、2層にわたってブレースを配置する場合においても、既存アンカーボルトに作用する鉛直成分 ${}_{CB}N$ 、あと施工アンカーボルトに作用する水平成分 ${}_{CB}Q$ については次式で、それぞれ、表すことが出来る。

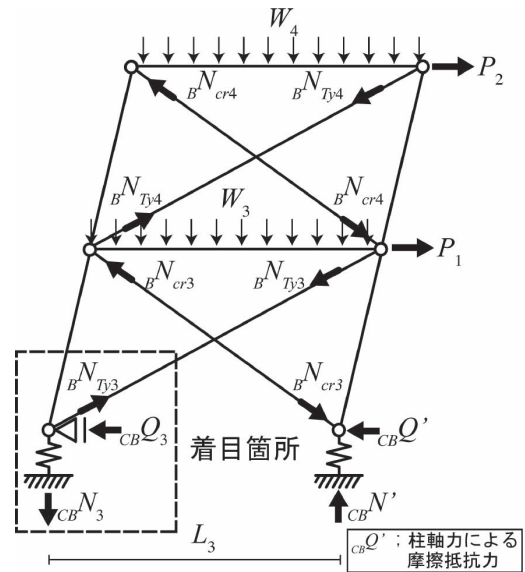


図11 2層1スパン架構の応力状態

$${}_{CB}N_3 = ({}_B N_{Ty3} + {}_B N_{Ty4} + {}_B N_{cr3} + {}_B N_{cr4}) \cdot \sin \alpha - \frac{(W_3 + W_4) \cdot L_3}{2} \quad (14)$$

$${}_{CB}Q_3 = {}_B N_{Ty3} \cdot \cos \alpha \quad (15)$$

5. 実施工における水平変位拘束材

今回の載荷実験に用いた水平変位拘束材は、鋼製基礎に高力ボルトを用いて摩擦接合により固定を行ったが、実構造物においてはコンクリート基礎にあと施工アンカーボルトを用いて支圧接合となる。

あと施工アンカーボルトの施工精度は決して高いものではないため、水平変位拘束材をあと施工アンカーボルトで固定する場合においては、水平変位拘束材のボルト孔はボルトの径に対して過大に設計する必要があり、クリアランスが生じる。このため、水平変位拘束材のボルト孔とあと施工アンカーボルトが直接接触して応力を伝達することが困難となり、既設のアンカーボルトに軸力とせん断力が同時に作用し、早期に降伏および破断をする可能性がある。

そこで、図12に実構造物のコンクリート基礎に水平変位

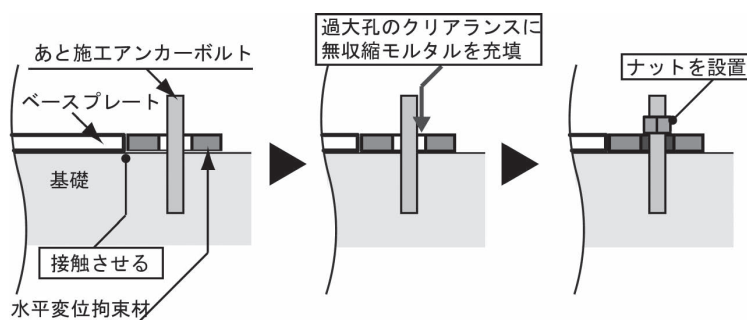


図12 水平変位拘束材の施工方法

拘束材を用いる場合の施工方法を示す。施工方法としては、ベースプレート側部に水平変位拘束材を接触させ、過大孔のクリアランスに無収縮モルタルを充填しナットにより固定する。よって、過大孔のクリアランスが解消され、ブレースからの応力が作用した場合においてもあと施工アンカーボルトがただちに抵抗することができると考えられる。

但し、当該の工法については、今後、別途検証実験を行い、性能を明らかにする必要がある。

6. 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し、架構実験を行い、以下の知見が得られた。

1. 水平変位拘束材による補強工法により、ブレース付露出柱脚の補強が可能である。また、その抵抗機構は明快であるため、合理的な補強設計・工法が可能となる。
2. 架構実験に基づく解析モデルから、水平変位拘束材による補強設計方法を提示し、その手法は非常に簡便である。
3. 実構造物を想定し、層およびスパン方向にブレース架構が連続する場合の柱脚応力に着目し、その設計式を提示した。
4. 水平変位拘束材が機能しない場合、既存のアンカーボルトに水平変位が作用して本研究で期待する抵抗機構が得られない可能性がある。従って、水平変位

拘束材は、柱脚に応力が作用した際に直ぐに抵抗を開始する必要がある。当該事項を実現するための工法を提示した。

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) 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.
- 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，1996.9.
- 3) 高松隆夫，山西央朗，景山朋定：ブレース付き露出柱脚の補強工法に関する実験的研究，広島工業大学紀要，第46巻，pp. 115-120，2012.2.
- 4) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，竹本泰聖，松尾 彰：ブレース軸力を受ける露出柱脚の補強工法に関する実験的研究，鋼構造年次論文報告集，第19巻，pp. 133-140，2011.11.
- 5) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，第3版，2012.3.