

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月13日現在

機関番号：32704

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560575

研究課題名（和文） 着脱可能な方杖部材による鋼構造骨組の耐震補強に関する研究

研究課題名（英文） Study on Seismic Strengthening of Steel Structure Framework with Removable Knee Brace Reinforcement

研究代表者

江波戸 和正（EBATO KAZUMASA）

関東学院大学・工学部・助教

研究者番号：70568766

研究成果の概要（和文）：方杖補強部材付き部分骨組架構実験が遂行され、この実験より方杖補強部材が柱・梁接合部の耐力及び初期剛性を増大させる事が立証された。一方、方杖材は骨組全体の剛性や耐力に対して効果的ではあるが、大地震時には、方杖材の大きな耐力のために、既存の梁や柱に塑性化をまねく。梁や柱を降伏させずに耐震性能を向上させることができれば、より良い耐震改修となる。この研究は、上記を可能とするようにH形鋼のウェブを楕形に加工し、その部分をダンパーとした方杖補強部材を提案し、検討を行った。

研究成果の概要（英文）：An experiment was performed on a subassembly specimen of an interior column joint with knee brace reinforcement, and the experimental results verified the increase in strength and stiffness of the beam-to-column joint due to the knee brace reinforcement. While knee braces are effective for stiffening and strengthening the overall frameworks, the existing beams or columns are assumed to still plastify during strong earthquakes because of the high strength of the knee braces. A better retrofit is possible if the seismic performance could be upgraded without assuming the yielding of beams or columns. A new type of knee brace member with a built-in comb-shaped damper is proposed and discussed in this study.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：鋼構造、柱・梁接合部、半剛接合部、方杖補強、耐震設計

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 耐震補強は既存鋼構造骨組に施す場合が一般的で、現場における後付け施工になる。その場合、方杖補強部材を溶接により鋼構造骨組に取り付ける場合は現場溶接となり梁との取り合う接合箇所では上向き溶接となる場合が多く生じてくる。上向き溶接は非常に高度な熟練した溶接技術を必要とするの

で一般的には安定した溶接結果が得難くなるとされている。

(2) 高力ボルト接合は接合面の処理及び所定の締め付け手順を順守すれば安定した設計張力が得られ高度な熟練技術を必要とせず、比較的容易な技術により接合部の施工が可能となる。

(3) これらの背景により、耐震補強部材の取り付けに際して全ての接合部を高力ボルトで接合し、溶接を一切使用せずに鋼構造骨組に耐震補強を施す工法とその耐震補強効果を保障する設計方法が望まれている(図1)。

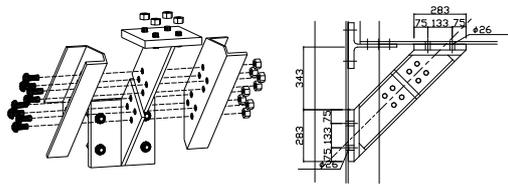


図1 着脱可能な方杖部材

## 2. 研究の目的

(1) 着脱可能な方杖補強部材による鋼構造骨組の耐震補強に関する設計法の確立を目的とする。

(2) 極軟鋼を利用したせん断降伏先行型制震機能付き方杖部材の提案を行い、より合理的な耐震補強効果を探る。この目的は研究を遂行していく過程で極軟鋼に変えて H 形鋼のウェブにスリットを設けたせん断入力型方杖補強部材を提案して研究を行った。

## 3. 研究の方法

(1) 着脱可能な方杖補強部材付部分骨組架構を対象とした有限要素モデルに対して三次元有限要素解析を遂行して、その力学的性能を追求する。

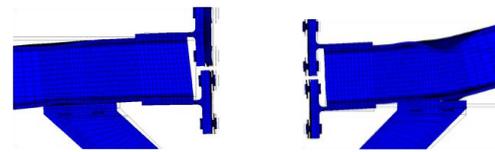
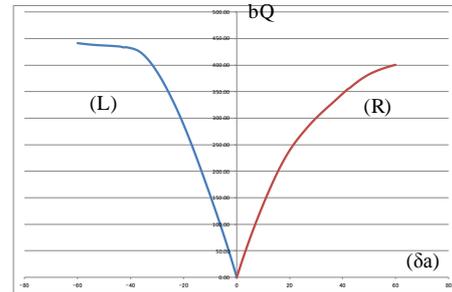
(2) 方杖補強付十字形部分骨組架構試験体の地震時水平加力実験を行い、主架構部材(柱・梁)及び、主架構部材と方杖補強部材の接合部、方杖補強部材本体の挙動を実験的に調査する。

(3) 上記方杖補強部材より合理的な制震機能付方杖補強部材(研究遂行過程でせん断入力型方杖補強部材と記述.)を提案し、引張単調載荷、引張・圧縮繰返し載荷実験を遂行してその力学的性能を実験的に調査する。

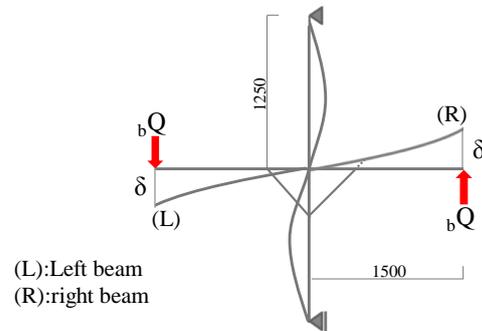
## 4. 研究成果

(1) 鋼構造骨組が着脱可能な方杖部材で補強された場合のト字形架構(すみ柱)及び十字形架構(中柱)を対象とした三次元弾塑性有限要素解析を実行した。ト字形架構は、既往の実験結果と今回の解析結果とを比較検討して柱・梁接合部の半剛接合を表現する局部バネの特性に関する因子を抽出した。また、十字形架構は、柱を挟んで左右の梁の方杖部材が一方は引張り方杖、もう一方は圧縮方杖となる。解析結果は上記方杖部材の状況を反映して、左右各々の梁端荷重( $bQ$ )-全体変形( $\delta a$ )

関係は異なった挙動を示した(図2)。なお、方杖補強部材は軸方向力に対しては弾性挙動の範囲であり、曲げ挙動を生じていない結果となった。(学会発表⑤)



Compressive knee brace Tensile knee brace



(L):Left beam  
(R):right beam

図2 梁端荷重( $bQ$ )-全体変形( $\delta a$ ) 関係

(2) 方杖補強付十字形部分骨組架構試験体に対して実験を遂行した。その結果、既往の研究で遂行された無補強の十字形部分骨組架構実験との結果を比較し初期剛性で 1.9~1.98 全塑性耐力で 2.2~2.5 倍上昇する事が確認された(図3)。左右の梁端荷重( $bQ$ )-全体変形( $\delta a$ ) 関係は有限要素解析で検証した通り異なった挙動を示した(図3)。又、主架構部材と方杖補強部材の接合部、方杖補強部材本体の挙動が実験的に確認された。十字形架構の梁と方杖補強部材の接合部局部変形はト字形架構の実験結果と比べると非常に変形が少ない。又、柱・梁接合部では上部スプリットティ位置の柱ウェブの局部変形が大きく下部スプリットティ位置での局部変形は非常に少ない。柱-方杖補強部材の接合部位置での柱ウェブの局部変形が大きく、上部スプリットティ位置と、この位置で梁からの入力モーメントを主に負担している事が確認された(図4)。(学会発表③、④)

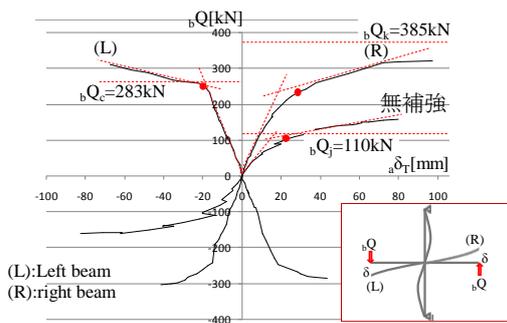
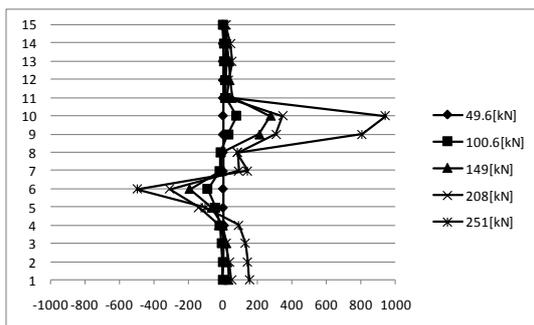


図3 骨格曲線(梁端荷重(bQ)-全体変形(δa)関係)



Positive load

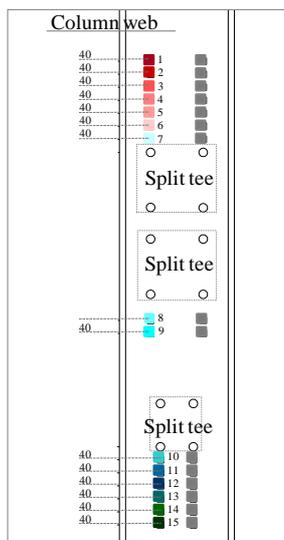


図4 柱接合部歪分布

(3) 上記実験の最終状況は、方杖補強部材の取つかない上部柱端位置での全塑性状態による柱フランジの局部座屈であった。方杖補強を施す場合は、柱崩壊を生じさせないためにも柱耐力と梁耐力のバランスを考慮して適切な方杖補強部材とすることが重要になると考えられる。また、同方杖補強部材を既存建築物の耐震補強へ適用する場合にも同様な事が重要となるので、同方杖補強部材の耐力、軸剛性が適正に設計できるように

なれば、合理的な耐震補強方法となると考えられる。

以上の結果を踏まえ、方杖補強部材の耐力及び軸剛性を調整する事が可能なせん断入力型の方杖補強部材を提案して実験及び有限要素解析により力学的な性能を調査した。方杖補強部材には、本来、引張及び圧縮入力がかえられるが、まずの最初の段階として方杖補強部材に入力される軸入力を引張入力に限定して同方杖補強部材の引張実験を行った。同方杖補強部材の中で引張軸入力がかせん断入力型に変換され想定した挙動となるか検証を行い、ほぼ想定した結果を得た。又、主架鋼部材に取り付ける形式で押し引き繰返し载荷実験を行い、繰返し载荷による仮想柱部分の性状の把握、又、既往の実験<sup>2)</sup>との比較検討を試みた(図5, 6)。

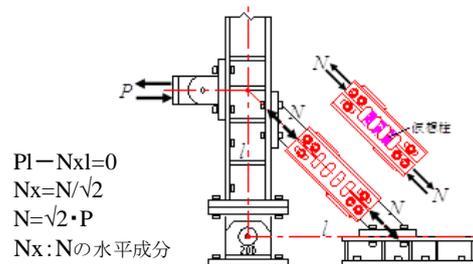


図5 試験体入力概念図

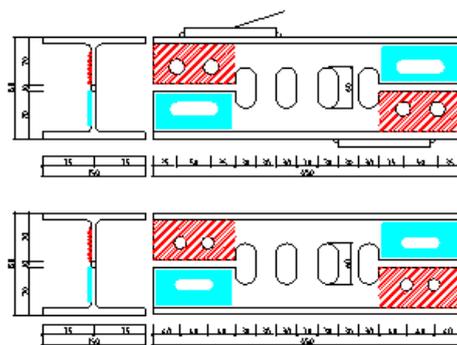


図6 せん断入力形方杖補強部材

・荷重(N)-全体変形(δa)

荷重(N)-全体変形(δa)を図7に示す。载荷履歴は、小振幅時 $\pm \delta_y, \pm 2\delta_y, \pm 3\delta_y, \pm 4\delta_y$ まで安定した履歴曲線を描いている。大振幅時 $\pm 6\delta_y$ を1サイクル経験した後に $\pm 8\delta_y$ の3サイクル目において、仮想柱、柱脚部で破断が目視され実験を終了した。また、既往の実験と比較すると、危険断面となるH形鋼フランジを補強したことと、高力ボルトの耐力を上げたことによる改良効果が現れている。

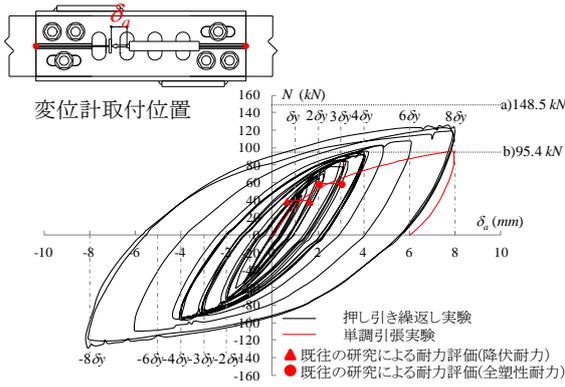


図7 荷重(N)-全体変形(δa)

・荷重(N)-せん断ずれ変形(δs)

荷重(N)-せん断ずれ変形(δs)を図8に示す。標点間距離 L=70mm とし測定した。既往の研究<sup>2)</sup>では、他の因子が荷重(N)-全体変形(δa)に含まれているため、スプリット部分を含まない、試験体本来の挙動を確認した。

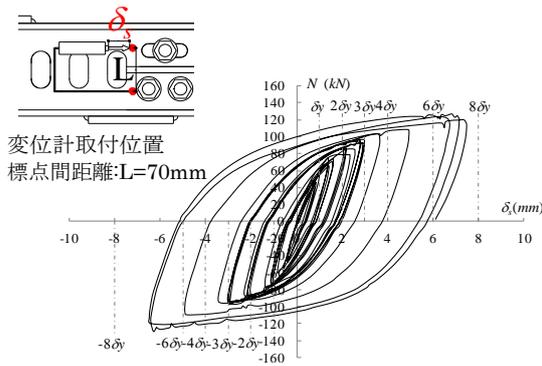


図8 荷重(N)-せん断ずれ変形(δs)

・荷重(N)-仮想柱変形(δl)

荷重(N)-仮想柱変形(δl)を図9に示す。標点間距離を仮想柱の長さである L=60mm とし測定した。高い初期剛性を示し、降伏の後に塑性変形を生じ安定したエネルギー吸収に富んだ履歴を示している。

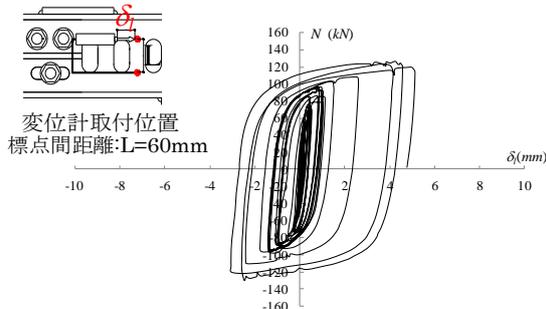


図9 荷重(N)-仮想柱変形(δl)

・最終荷重状況

実験の最終荷重状況は、仮想柱柱脚部の破断によるものであった。尚、危険断面と確認された部分が補強プレートにより改善され、仮想柱部分が曲げせん断変形している事が確認できる(図10)。

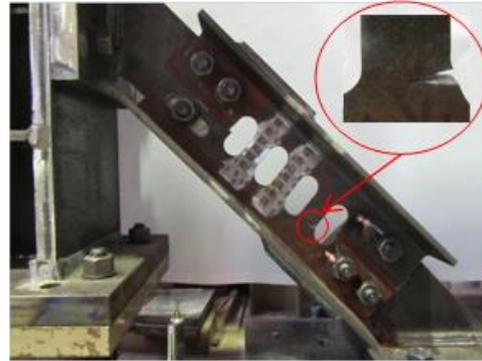


図10 最終荷重状況

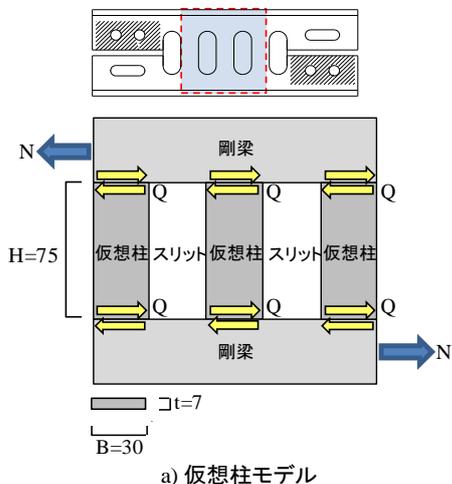
・初期剛性

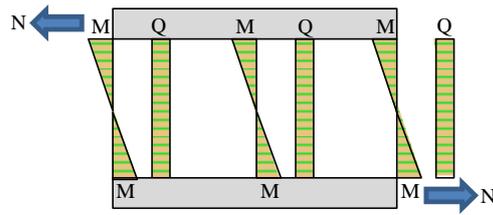
本試験体において、荷重(N)-仮想柱変形(δl)(図9)における初期剛性  $k_l$  と図11の力学モデルによる剛性が良い対応を示した(表1)。又、既往の研究<sup>2)</sup>での荷重(N)-全体変形(δa)での初期剛性と本研究での荷重(N)-全体変形(δa)(図7)の初期剛性は、ほぼ一致している(表1)。図7での初期剛性を  $k_a$ 、図8では  $k_s$ 、図9では  $k_l$  とすると、各変形における初期剛性の大小順序は  $k_l > k_s > k_a$  となる(表1)。

表1 初期剛性の比較

試験体名	繰返し実験値			単調引張実験 <sup>2)</sup>	力学モデル(本研究)
	$k_a$ [kN/mm]	$k_s$ [kN/mm]	$k_l$ [kN/mm]	$k_s$ [kN/mm]	$k_{mj}$ [kN/mm]
H4-60	38.5	149.2	500.0	36.7	564.3

・仮想柱に対する力学モデル





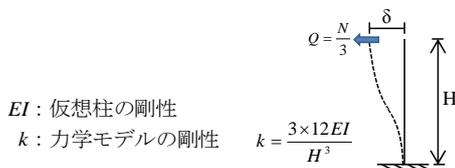
$$Q = \frac{N}{3} \quad \tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad M_y = \frac{B^2 t}{6} \sigma_y, \quad \frac{N}{3} = \frac{2My}{H}$$

$$\tau = \frac{Q}{A} = G\gamma \quad sNy = \frac{3A\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad Q = \frac{2My}{H} \quad mNy = \frac{3 \times 2My}{H}$$

$$A = B \times t \quad mNp = 1.5mNy$$

$\tau_y$ :せん断降伏応力度	$M_y$ :仮想柱の断面( $B \times t$ )に対する降伏モーメント
$sNy$ :せん断降伏耐力	$mNy$ :モーメントに対する降伏耐力
	$mNp$ :モーメントに対する全塑性耐力

b) 仮想柱の曲げ耐力・せん断耐力



$EI$ : 仮想柱の剛性

$k$ : 力学モデルの剛性  $k = \frac{3 \times 12EI}{H^3}$

c) 力学モデルの曲げ剛性

図 1 1 せん断入力による力学的モデル

以上をまとめると、せん断補強部材に対し押し、引き繰返し載荷実験を遂行した結果同方杖補強部材は、押し、引きに対しほぼ同等の挙動を示し安定した履歴曲線を描いた。既往の研究で評価した力学モデルによる初期剛性は、本研究での図 9 による荷重( $N$ )-仮想柱変形( $\delta$ )での初期剛性とほぼ一致する事が確認された。(学会発表①)

(4) 上記せん断入力型方杖補強部材に関する研究は継続中であるが、柱・梁接合部を溶接を一切使用せずスプリットティを介して高力ボルトのみで組み上げた接合部に対して、接合部弱軸方向に図 1 の着脱可能な方杖補強部材を用いた場合の架構の挙動を、線材とバネモデルで表現し、接合部に入力される  $jP_u$ (上部スプリットティ位置)、 $jP_l$ (下部スプリットティ位置)、 $jP_k$ (柱-スプリットティ接合部位置)を算出した(図 12)。(学会発表②)

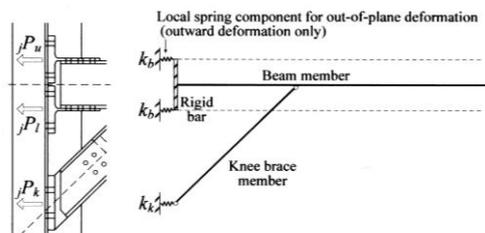


図 1 2 梁端部における局部バネの組み込み

(5) まとめ

・着脱可能な方杖部材を用いて部分骨組架構の実験を行い、方杖部材と梁接合部、方杖部材と柱接合部、柱・梁接合部の挙動を調査した。また、その調査と FEM 解析と合わせて検討して、各接合部の挙動を局部バネにより表現した。

・着脱可能な方杖部材を発展させ、剛性・耐力が調節できるせん断入力型方杖部材を提案し実験を遂行した。剛性・耐力は、ほぼ検討がなされた。尚、せん断入力型方杖部材の楕円形に加工された仮想柱部(抵抗部)の塑性変形能力を利用して制震機能を持たせているので、その機能についての検討をするために現在研究を継続している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

①本間小百合、原田幸博、上村 隆介、江波戸和正: せん断入力型方杖補強部材の実験的研究(繰返し載荷実験)、日本建築学会大会、2013 年、9 月 1 日(北海道) 発表予定

②Y.Harada, K.Ebato & S.Honma, T.Takimoto : Experimental Study on Seismic Retrofit by Using Supplemental Knee Braces Attached to Steel Members with Semi-Rigid Bolted Connections, The 15th WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 2012, 26, September, Lisbon, Portugal

③S.Honma, K.Ebato、Y.Harada : Study on structural behavior of weldless joint in beam-to-column connection of interior column with knee brace reinforcement, STESSA2012, 2012, 9, January, Santiago, Chile

④田所賢裕、岡崎慎吾、本間小百合、江波戸和正: 十字形方杖補強付部分骨組み架構の実験的研究、関東学院大学工学部 研究発表講演会、2011 年 11 月 25 日、(横浜)

⑤本間小百合、江波戸和正、原田幸博: 方杖補強付十字形部分骨組み架構の解析、日本建築学会大会 2011 年 8 月 24 日、(東京)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江波戸 和正 (EBATO KAZUMASA)  
関東学院大学・工学部・助教  
研究者番号：70568766

(2) 研究分担者

原田 幸博 (HARADA YUKIHIRO)  
千葉大学・工学研究科・教授  
研究者番号：10272791

(3) 連携研究者

森田 耕次 (MORITA KOJI)  
東京電機大学・特任教授  
研究者番号：20057227