

## 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 5 月 20 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360221

研究課題名（和文） 既存鉄骨造建築物における耐震改修設計の高度化・合理化

研究課題名（英文） Sophistication of seismic retrofit design of existing steel building structures

## 研究代表者

原田 幸博（HARADA YUKIHIRO）

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10272791

研究成果の概要（和文）：既存鉄骨造建物の「靱性型」耐震改修(構造用軟鋼の塑性変形能力を活かして架構の靱性を確保し耐震性能を向上させる改修)を比較的容易に実現する手法として、(i)耐震補強用後付け施工方杖部材、(ii)部材の変形能力向上のための補剛スチフナ配置、を対象に実験的研究を実施した。(i)については、方杖付き架構の骨組解析の精緻化手法・耐力と剛性の調整可能な靱性方杖部材を提案・実証した。(ii)については、変形能力向上に有効な補剛スチフナの配置法をパラメトリックな載荷実験を通して検証した。

研究成果の概要（英文）：Two typed of ductile seismic retrofitting measures of existing steel building structures are experimentally studied: (i) A post-installed ductile knee brace member, which furnishes a shear-yielding device, is newly proposed. The mechanical performance of the knee brace member is experimentally investigated. The analytical model of the knee brace member are also proposed. (ii) An efficient stiffener placement for improving ductility of structural members are experimentally studied by exhaustive stub column tests.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2012年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
合計	12,300,000	3,690,000	15,990,000

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、耐震補強、方杖、ボルト接合、柱梁接合部

## 1. 研究開始当初の背景

既存鉄骨造建物の耐震改修においては、方杖・筋かいなどの補強部材が後付け施工で取り付けられるのが一般的である。この補強部材と既存鉄骨架構との間の接合部の設計には、現場溶接の多用、引張形式高力ボルト接合の多用、既存架構における非保有耐力接合部の性能評価、現場施工作業可能性による補強方法の制約など、新築鉄骨造建物の設計・施工におけるものとは異なる検討課題が多い。これらへの対応策は、既往の各種耐震補

強マニュアルなどで一部提案されているものの、載荷実験や数値解析などで十分に力学的性能が検証されていない課題も多く、構造設計者・鉄骨製作者の立場からはより合理的な解決策や評価法が望まれている。

一方、研究代表者らは、1995年の兵庫県南部地震において鉄骨造建物の梁端溶接部で多数発生した脆性的破壊の問題を根本的に解決する策として、「(高力ボルト接合+金物による)無溶接接合構法」の実用性に関する研究を近年進めてきた。具体的には、無溶接・無

補強柱梁接合構法、後付け施工方杖部材接合部におけるスチフナ省略構法を対象として、研究を展開してきた。

以上からわかるように、研究代表者らの「無溶接接合構法」に関する研究は、耐震改修設計において問題となる後付け施工補強部材の接合部設計に応用可能であると考えられる。また、近年、研究代表者らはせん断降伏先行鉄骨部材や高強度鋼材の活用に関する研究も実施しており、その知見は補強部材の高性能化という形で耐震改修設計への応用が可能である。

## 2. 研究の目的

既存鋼構造建築物の耐震改修では、筋かいなどの補強部材が後付け施工されるのが一般的である。補強部材と既存架構との接合部の設計には、現場溶接の多用、不可避な偏心、現場施工作業可能性による制約、など新築建物にはない課題が多い。これらへの対応策は既往の各種マニュアル類で提案されているが、構造設計者・鉄骨製作者の立場からはより合理的な解決法も望まれている。以上の背景を踏まえ、本研究では、耐震改修に用いられる後付け施工方杖部材を主対象とし、補強部材の高靱性化・高耐力化の可能性を検証し、単なる補強に留まらない高度かつ多様な耐震改修の方向性を探ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 制震方杖部材による耐震補強手法の提案

#### ① 方杖部材周りの応力評価用簡易力学モデルの構築

既存鋼構造建物の耐震補強に方杖部材を用いる場合、一般的に方杖は既存架構の部材に比べて相対的に剛性・耐力が高いため、強震時には方杖が弾性に留まり既存架構の柱・梁部材が塑性化するメカニズムで架構全体の耐震性が決定されることが多い。しかし、方杖付き架構の終局状態に関する研究は少なく、補強設計時の生起メカニズムの推定精度を高めるための研究が必要だろう。

鋼構造建物に方杖部材を取り付けることで柱梁接合部周辺の応力は取り付け前に比べて大いに変化する。その変化の程度は方杖取り付け位置などの幾何学的構成に左右されるため、個々の建物で状況は異なり、一般的な議論を行うことが難しい。そこで、方杖部材周りの応力を評価するための簡易な力学モデル(図1)を提案し、方杖周りの幾何学的条件などの様々な設計パラメータが方杖部材周りの応力にどのように影響を与えるのかを定量的に把握した。

#### ② 靱性型制震方杖補強部材の開発

耐震改修後の建物をさらに長期間使用することを考えると、強震時に主架構が損傷しないような補強設計がより望ましい。もし、

方杖を先行降伏させて主架構に発生する応力を抑制し無損傷とできれば、理想的な耐震補強となるだろう。そこで、本研究では、補強後に先行降伏が可能となるよう剛性・耐力を調整できる靱性型制震方杖部材の提案と性能検証を行った。

本研究で提案する靱性型制震方杖部材は、H形鋼または溝形鋼のウェブに複数の平行な長孔をあけた形状で(図2)、方杖部材の軸方向に圧縮・引張力が作用する際にウェブ部が早期に曲げせん断降伏するようにしている。

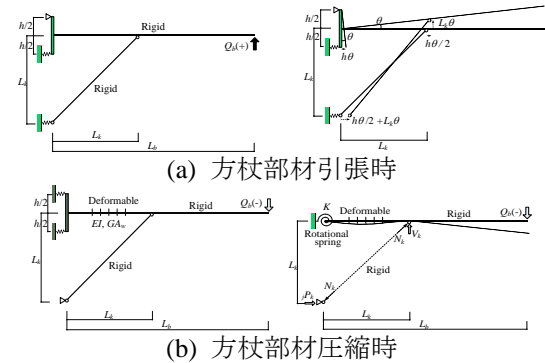


図1 後付方杖部材の精細モデル

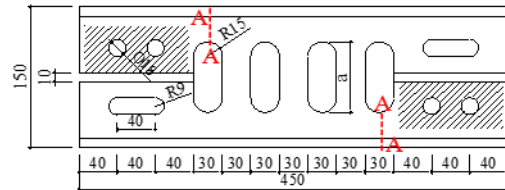


図2 曲げせん断降伏形制震方杖部材

### (2) スチフナ補強設計手法の提案

既存鋼構造建物には、現行の設計ではあまり用いられない幅厚比の大きい部材が用いられている場合があり、そのような部材は早期に局部座屈し塑性変形能力に乏しいため、架構全体の耐震性も低くなって耐震補強が必要となる場合がある。このような場合に、局部座屈発生が想定される箇所の局所的なスチフナ補強のみで部材の塑性変形能力を向上させて架構全体の耐震安全性を確保することができれば、効率的な耐震補強が実現できる。現行の設計規準にはスチフナの検定式が示されているが許容応力度設計用であるため、そのままでは上記の目的に適用できない。そこで、スチフナ補強による塑性変形能力向上効果の実証実験や数値シミュレーションを実施し、その結果に基づいて塑性変形能力向上用スチフナの設計手法を提案したい。

対象とする試験体の諸元を表1に、試験体の例(柱長さ300mmの300シリーズ)を図3にそれぞれ示す。試験体には溶接軽量H形鋼H-250×125×3.2×4.5 (SWH400)を用いた(幅厚比: フランジ13.9, ウェブ75.3)。スチフナは、

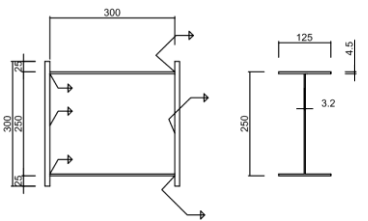
H形鋼ウェブと同厚( $t = 3.2 \text{ mm}$ , SS400)とした。表2に、試験体各部の鋼材の素材試験結果を示す。実験パラメータは、柱長さ(300, 375, 500mm)・材軸直交スチフナ間隔(100, 125mm)・スチフナ配置(なし, 片側, 両側)の3つとし、全9体の短柱圧縮試験を実施した。

表1 試験体諸元

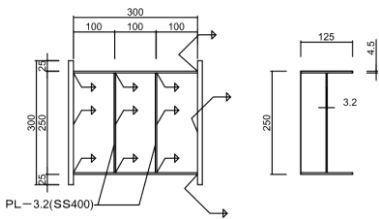
名称	柱長さ (mm)	スチフナ間隔 (mm)	スチフナ有無
500S4	500	100	両側
500S4H			片側
500S0			なし
375S2	375	125	両側
375S2H			片側
375S0			なし
300S2	300	100	両側
300S2H			片側
300S0			なし

表2 素材試験結果

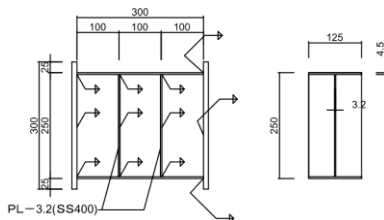
名称	部位	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
375シリーズ 500S4, 500S0	フランジ	320	459	38
	ウェブ	384	485	34
	スチフナ	366	443	35
300シリーズ 500S4H	フランジ	293	464	37
	ウェブ	395	492	34
	スチフナ	300	401	37



(a) 300S0 (スチフナなし)



(b) 300S2H (片側スチフナ補強)



(c) 300S2 (両側スチフナ補強)

図3 試験体の例(300シリーズ)

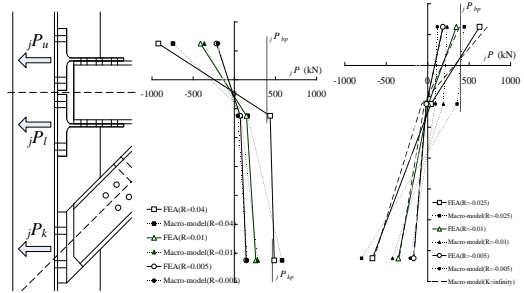
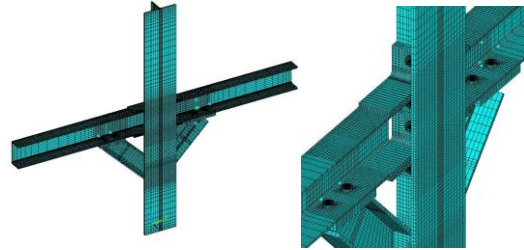
#### 4. 研究成果

##### (1) 制震方杖部材による耐震補強手法の提案

##### ① 方杖部材周りの応力評価用簡易力学モデル

##### ルの構築

提案する骨組解析用方杖部材のモデルの妥当性は、方杖付き部分骨組架構の有限要素解析結果が再現できるかで検証した(図4)。その結果、方杖部材端・梁端の発生応力を概ね再現できることが確かめられた。

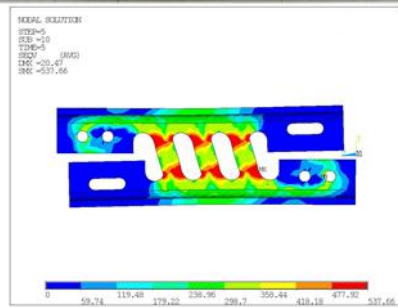


方杖引張時 方杖圧縮時

図4 梁端・方杖端接合部応力における精算解と骨組解析解の比較(T形部分骨組架構)

##### ② 靱性型制震方杖補強部材の開発

提案する靱性型制震方杖補強部材の形状の有効性は、まず予備的な数値シミュレーションと部材単体の引張実験で確認された(図5)。その後、この制震方杖部材を架構に取り付けた場合の性能を繰り返し載荷実験で確認した(図6)。繰り返し載荷実験の結果から、方杖部材が小変形時から降伏して塑性変形能力を發揮しており制震部材として有効に機能することが確かめられた。



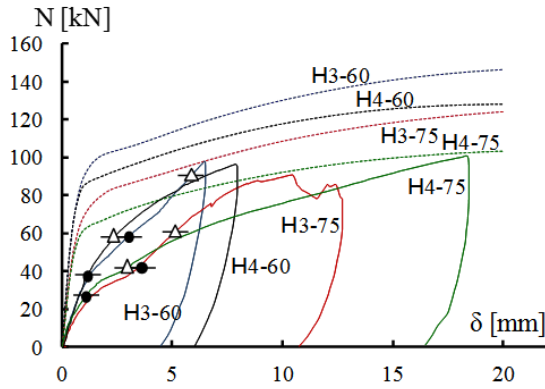


図5 制震方杖部材の引張実験

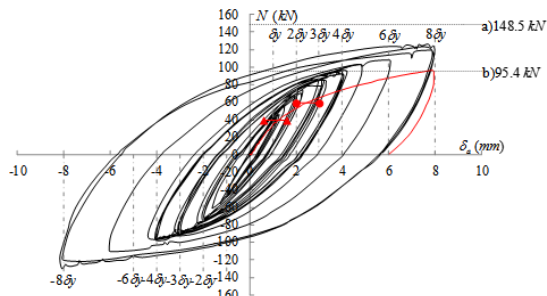
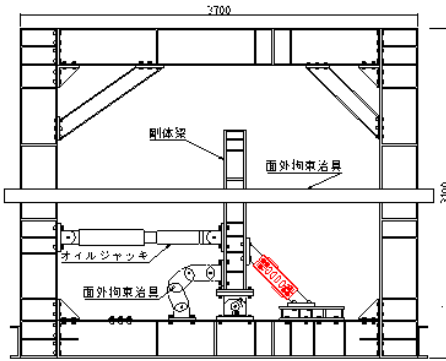


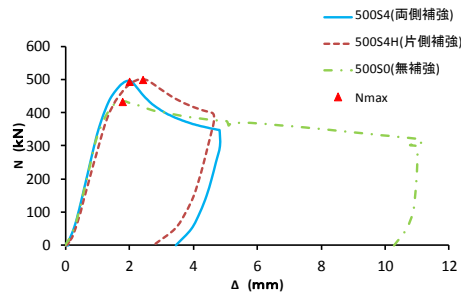
図6 制震方杖部材の繰り返し载荷実験

(2) H形鋼部材の材軸直交スチフナによる補強効果に着目した短柱圧縮試験

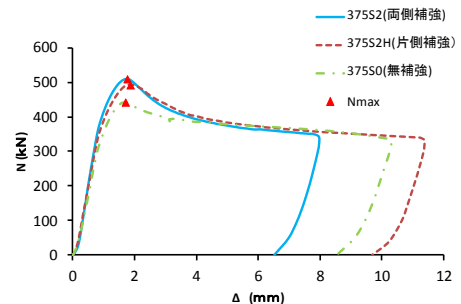
図7に、短柱圧縮試験で得られた各試験体の圧縮荷重(N)-縮み変形( $\Delta$ )変形関係を示す。それぞれの試験体の最大耐力( $N_{max}$ )を見ると、300, 375, 500のどのシリーズの試験体についても、スチフナ補強試験体では無補強試験体の耐力( $0N_{max}$ )の1.10~1.15倍に向上していること、片側・両側補強による耐力の差はほとんどない結果だった(表3)。片側・両側補強時の荷重-変形関係における耐力劣化挙動に着

目すると、500シリーズでは両側補強の方が耐力劣化がやや大きい傾向が見られるものの、300, 375シリーズでは両者の違いは小さい。つまり、材軸直交スチフナ補強が片側のみか両側かという点は、短柱の劣化挙動に大きな影響を与えていないと言える。

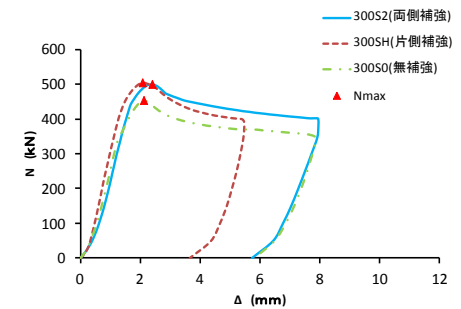
次に、それぞれの試験体の変形能力を見つめる。各試験体の最大耐力( $N_{max}$ )時とその95, 90%まで耐力が低下した時点でのそれぞれの変形 $\Delta_{max}$ ,  $\Delta_{0.95}$ ,  $\Delta_{0.90}$ を全断面圧縮降伏荷重( $N_y$ )に対応する弾性変形( $\Delta_y$ )で除して無次元化した結果を、表3に示す。 $\Delta_{max}/\Delta_y$ を見ると、500シリーズでは片側補強時に無補強時の2.7/2.1=1.29倍と大きく向上したが、300, 375シリーズでは向上率は小さい。そして、片側・両側補強による違いや傾向は明瞭に見られない。耐力劣化後の変形 $\Delta_{0.95}$ ,  $\Delta_{0.90}$ に着目すると、500シリーズの補強試験体で耐力劣化の程度が大きいことに符合して、変形能力の向上が300, 375シリーズに比べて小さい結果となっている(これは、座屈後変形が一つの補強区間内に集中する結果と考えられ(図8)、スチフナ間隔/柱長さ比が小さいほどその影響が大と思われる)。



(a) 500シリーズ



(b) 375シリーズ



(c) 300シリーズ

図7 スチフナ補強短柱圧縮試験で得られた圧縮軸力-軸方向変形関係



表 3 各試験体の最大耐力及び変形能力

名称	$N_{max}$ (kN)	$\frac{N_{max}}{N_y}$	$\frac{N_{max}}{0. N_{max}}$	$\frac{\Delta_{max}}{\Delta_y}$	$\frac{\Delta_{u95}}{\Delta_y}$	$\frac{\Delta_{u90}}{\Delta_y}$
500S4	496	0.78	1.14	2.3	2.7	2.9
500S4H	501	0.79	1.15	2.7	3.3	3.7
500S0	435	0.68	-	2.1	2.9	4.1
375S2	510	0.80	1.15	2.7	3.4	3.8
375S2H	492	0.77	1.11	2.9	3.7	4.4
375S0	442	0.70	-	2.6	3.5	4.7
300S2	500	0.79	1.10	4.4	5.4	7.0
300S2H	504	0.79	1.11	3.9	5.0	5.8
300S0	454	0.71	-	4.0	4.8	5.6



(a) 300S2H (片側スチフナ補強)



(b) 300S2 (両側スチフナ補強)

図 8 スチフナ補強試験体の最終状態(300 シリーズ)

材軸直交スチフナ補強を施した H 形断面鋼部材の短柱圧縮試験を行い、スチフナがウェブの片側・両側に配置された場合に最大耐力・変形能力向上効果にどの程度の違いがあるかを調べた。その結果、最大耐力・変形能力向上効果とも、片側・両側配置で大きな違いが見られないことが確かめられた。ただし、部材断面形状がウェブ面に関して非対称なため部材のねじれ挙動が誘発される可能性については未検討であり、今後の課題とした。

#### 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)

[雑誌論文] (計 2 件)

本間 小百合, 江波戸 和正, 原田 幸博: せん断入力型方杖補強部材の基礎的な研究, 日本鋼構造協会 鋼構造年次論文報告集, 第 20 巻, 195-200, 2012 年 11 月

Yukihiro Harada, Kazumasa Ebato, Sayuri Honma, and Tetsuya Takimoto: Experimental Study on Seismic Retrofit by Using Supplemental Knee Braces Attached to Steel

Members with Semi-Rigid Bolted Connections, Proceedings of 15th World Conference of Earthquake Engineering, Paper No. 665, 2012 年 9 月

[学会発表] (計 1 件)

本間 小百合, 江波戸 和正, 原田 幸博: せん断入力型方杖補強部材の実験的研究, 日本建築学会大会 学術講演梗概集(東海), C-1 構造 III, 1273-1274, 2012 年 9 月, 名古屋大学

瀧本 哲也, 江波戸 和正, 原田 幸博: 方杖補強を用いた H 形鋼柱スプリットティ接合形式を有する架構の接合部挙動, 日本建築学会大会 学術講演梗概集(関東), C-1 構造 III, 1115-1116, 2011 年 8 月, 早稲田大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

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

##### (2) 研究分担者

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

島田 侑子 (SHIMADA YUKO)

千葉大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 90586554

##### (3) 連携研究者

なし

##### (研究協力者)

瀧本 哲也 (TAKIMOTO TETSUYA)  
(株)東京建築研究所

本間 小百合 (HONMA SAYURI)

関東学院大学・大学院工学研究科・大学院生(博士前期課程)