

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560676

研究課題名(和文) 経済性を増進した鋼構造柱梁接合部の開発

研究課題名(英文) Economic beam-to-column moment connections in steel structures

研究代表者

岡崎 太一郎 (OKAZAKI, TAICHIRO)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20414964

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：建築鋼構造の経済性を向上するために、柱にH形鋼を使用した柱梁接合部を考案した。角形鋼でなくH形鋼を柱に使用し、施工手順を簡略化することを期待した。柱フランジへの接合と柱ウェブへの接合の二体の実大試験体について、繰り返し載荷実験を実施したところ、角形鋼管柱への接合と遜色ない性能を示した。ただ、柱ウェブに接合した場合、初期剛性が10%小さく、塑性化後に柱ウェブと水平スチフナの変形が層間変形に大きく寄与した。有限要素法解析で実験結果を精度よく再現することに成功し、実験と解析の両方から、柱ウェブへの接合は、梁フランジと柱スチフナの突合せ溶接部が破断に起点となりやすいことが分かった。

研究成果の概要(英文)：Steel systems using I-shaped columns instead of box-shaped columns was examined to increase the economy of steel building construction. Two full-scale beam-to-column moment connections were tested in the laboratory. One specimen connected the beam to the column flange, while in the second specimen connected the beam to the column web. Both specimens exhibited similar performance to standard connections of a I-shaped beam to a box-shaped column. However, the connections to the web resulted in a 10% loss in stiffness. Out-of-plane deformation of the column web and in-plane deformation of the continuity plates was notable in the post-yield response. The experimental behavior was reproduced successfully by a detailed, nonlinear finite element simulation. Both the experiment and simulation indicated that the connection to the column web is susceptible to fracture in the weld between the beam flange and continuity plate.

研究分野：構造工学

キーワード：鋼構造 接合部 構造実験 有限要素法解析 耐震性能 溶接

1. 研究開始当初の背景

鋼ラーメン構造物の設計思想は、柱梁接合部で破壊することなく、柱や梁が安定的な塑性変形性能を発揮することで地震による入力エネルギーを消費することにある。現在、国内の鋼構造建築は一般に、柱に角形鋼管が、梁に H 形鋼が用いられ、角形鋼管柱と H 形鋼梁の接合部については、詳細な設計情報が蓄積されている<sup>例えば1)</sup>。

角形鋼管が普及する以前は、H 形鋼柱が一般的に使われ、1 方向ラーメン他方向ブレース架構の平面構造計画が主流であった。H 形鋼の柱は、開断面であるために水平補剛材を設ける際に切断する必要がなく、施工性に優れる。しかし、現行の設計法<sup>2)</sup>に準じた H 形鋼柱と梁の接合部についての実験例は圧倒的に少ない。なお、柱に H 形鋼を採用し、柱のウェブ側に梁が接合する場合の接合部形状は大まかに例示されているものの<sup>3)</sup>、H 形鋼柱を活用するための設計、施工法が整備されていない。施工性に優れる H 形鋼柱の利用を推進することは、柱梁接合部の自由度の拡大や鋼構造建築の経済性を向上することにつながるが、2 方向ラーメン架構とする構造計画が一般的な現状においては、梁が H 形鋼柱のフランジ側に接合される場合とウェブ側に接合される場合の双方の構造特性に関する情報の蓄積が求められる。

2. 研究の目的

H 形柱と H 形梁の剛接接合部について、現行の設計法や溶接仕様を採用した形式を考案し、その接合部の耐震性能を構造実験とコンピュータ解析で検証した。H 形柱を使用した鋼構造型式を推進することで、鋼構造建築物の経済性と地震安全性に貢献し、また、数値解析によって鋼構造物の耐震性能を評価する科学的方法を進展することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 接合部形式と試験体

Fig. 1 に荷重装置と試験体を示す。試験体は、支持点間距離 2.4 m の柱と、柱芯から加力点までの長さ 2.3 m の梁で構成され、柱は

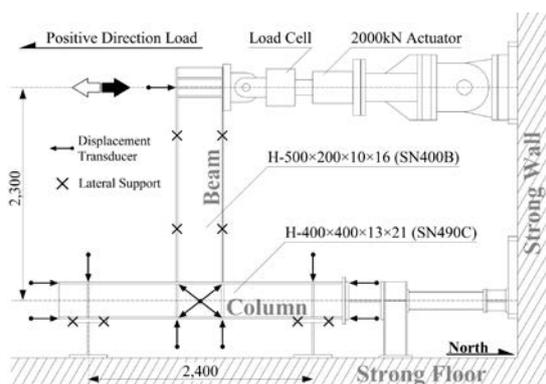


Figure 1 Loading System (Unit : mm)

SN490C 材の H-400×400×13×21、梁は SN400B 材の H-500×200×10×16、柱梁接合部に設けるスチフナは SN400B 材の PL-16 を用いた。梁は柱面から 900 mm の位置で SS400 材の加力梁に高力ボルト摩擦接合した。幅厚比に基づく部材ランクは、柱が FB、梁が FA である。これらの部材を使用し、柱のフランジ側に梁が接合する試験体 1 と、柱のウェブ側に梁が接合する試験体 2 を製作した。いずれの試験体も工場で製作したノンスラップ形式であり、柱パネルにはダブルプレートによる補剛を施さなかった。柱芯間距離を梁せいで除した比は 9.2 とラーメン架構としてはやや小さい分だけ、せん断力が大きく、塑性化部が接合部近傍に限定されるやや条件の厳しい接合部であった。

Fig. 2a に試験体 1 の詳細を示す。梁、柱、柱パネルの全塑性モーメント  $bM_p$ 、 $cM_p$ 、 $pM_p$  を文献<sup>2)</sup>に従い、鋼材の実勢降伏強度を用いて算定すると、部材耐力比は  $2cM_p/bM_p = 4.42$ 、 $pM_p/bM_p = 0.79$  である。柱の曲げ強度は梁に対して十分に大きく、柱パネルのせん断降伏が梁の曲げ降伏に先行する設計であった。梁端接合部の上下フランジは柱フランジに完全溶込み溶接し、梁ウェブは両面隅肉溶接した。柱の水平スチフナは、柱のフランジ内側に接合する 2 辺を完全溶込み溶接、ウェブに接合する 1 辺を両面隅肉溶接した。

Fig. 2b に試験体 2 の詳細を示す。部材耐力比は  $2cM_p/bM_p = 2.06$ 、 $pM_p/bM_p = 1.85$  で、梁のみが降伏するよう設計した。水平スチフナは、一部を切削した梁フランジに完全溶込み突合せ溶接、梁ウェブに両面隅肉溶接した。水平スチフナと柱の接合は試験体 1 にならぬ、梁ウェブは柱ウェブに両面隅肉溶接した。

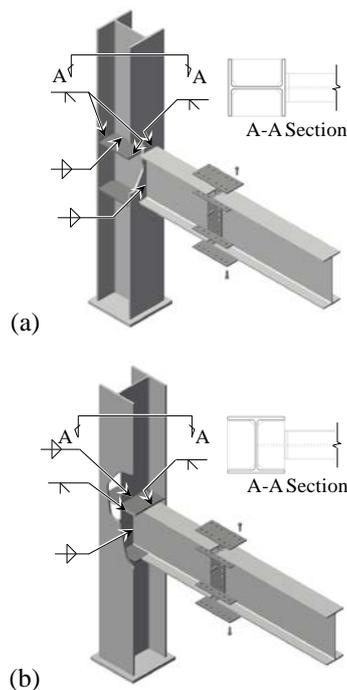


Figure 2 Connection detail: (a) Specimen 1; and (b) Specimen 2

## (2) 載荷・計測計画

Fig. 1 に示すように、柱端を単純支持とするよう、試験体は無補剛 H 形鋼 3 基に固定し、柱と梁を × 印で示す位置において面外拘束した。梁端を容量 ±2,000 kN、ストローク ±150 mm のアクチュエータに接合した。載荷は梁端の水平変位を柱芯から加力点までの距離 2、300 mm で除した層間変形角で制御し、振幅 0.00375、0.005、0.0075 rad で 6 回ずつ、0.01 rad で 4 回、0.015、0.02、0.03、0.04 rad で 2 回ずつ、以降、+0.01 rad で 2 回ずつ正負交番載荷した。荷重は油圧ジャッキに連結したロードセルで検出し、Fig. 1 に示す各点で計測した変位に基づいて、層間変形角、梁の回転角、柱パネルのせん断変形角、柱の回転角を測定した。

## (3) 有限要素解析

実験結果をさらに考察するために、汎用プログラム ADINA (Ver.8.9)<sup>4)</sup> を用いて有限要素解析を実施した。

Fig. 3 に試験体 1 の解析モデルを示す。柱梁接合部近傍は 6 面体 8 節点アイソパラメトリック要素、それ以外は 2 節点梁要素を採用し、境界では立体要素部分の自由度を梁要素の自由度に一致させた。立体要素の積分点はガウス則による 8 点である。解析では、大変形を考慮し、鋼材の応力 - 歪関係には、材料引張試験から得た降伏点と 3% 歪時の応力を元に区分線形に近似し、ミゼスの降伏条件と、移動硬化と等方硬化を 95:5 の割合で付与する複合硬化則を採用した。実験と同じ載荷振幅を与え、初期不整として、加力点を梁端から構面外に梁長の 1/1000 だけずらした。解析結果が実験結果と良く照合することを確認した。

## 4. 研究成果

### (1) 実験結果

Fig. 4a に試験体 1 の梁端モーメントと層間変形角の関係を、梁とパネルの全塑性モーメント  $bM_p$ 、 $pM_p$  と併せて示す。試験体 1 は、誤って層間変形角を目標より 1 割小さい振幅で制御した。振幅 0.007 rad までは弾性応答を示し、振幅 0.009 rad から剛性が低下した。振幅 0.046 rad の 1 回目正加力中に梁の上下フランジに目立ち始めた局部座屈が、2 回目負加力中の ▲ 印で示す時点から大きく進行し、耐力が低下し始めた。振幅 0.055 rad の 2 回目正側最大変位時に最大耐力の 85 % まで耐力低下したので除荷し、実験を終了した。Fig. 5a は実験終了後の試験体 1 の写真で、梁上下フランジの局部座屈とウェブの面外変形が確認できる。実験終了後、北側梁フランジ溶接止端部にごく浅く短い亀裂が確認されたが、他に亀裂はなかった。

Fig. 4b に試験体 2 の梁端モーメントと層間変形角の関係を、Fig. 5b と c に北側フランジの外面と内面の亀裂の進展を段階ごとに番号を付けて示す。振幅 0.0075 rad までは試験

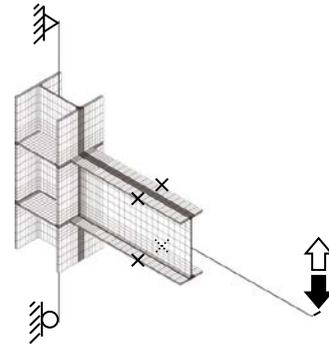


Figure 3 Finite element model

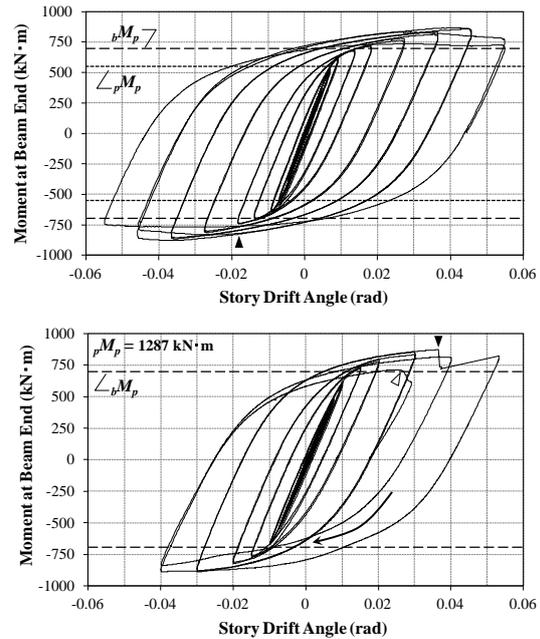


Figure 4 Response of: (a) Specimen 2; and (b) Specimen 2

体 1 の 90 % の剛性で弾性応答を示した後、振幅 0.01 rad から剛性が低下した。振幅 0.03 rad の 1 回目正負加力で、梁の上下フランジ溶接止端部から亀裂が発生し、それぞれ裏当て金に沿って水平スチフナ内側に進展した (Fig. 5b と c の ①)。振幅 0.04 rad の 1 回目正加力中、▲印で示す時点でスチフナ中心に向かって北東亀裂が一気に進展し (②)、急激に耐力が低下した。その後も載荷を続けると一時耐力が回復したが、振幅 0.04 rad の 2 回目負加力中、矢印で示す過程で剛性と耐力の低下が顕著となり、振幅 0.05 rad の 1 回目正加力中、△印で示す時点で亀裂が梁ウェブにまで到達したのち (③) 除荷し、実験を終了した。

### (2) 実験結果の考察

Fig. 6 に、試験体 1 と 2 で計測した、柱パネルモーメントとパネルせん断変形角の関係を示す。試験体 1 の柱パネルは、振幅 0.0025 rad で  $0.8 pM_p$  を超えて剛性が低下し、その後 0.02 rad まで耐力上昇を伴う塑性変形を示した。試験体 2 の柱パネルは弾性域に留まり、その弾性剛性は試験体 1 の 3 倍であった。な

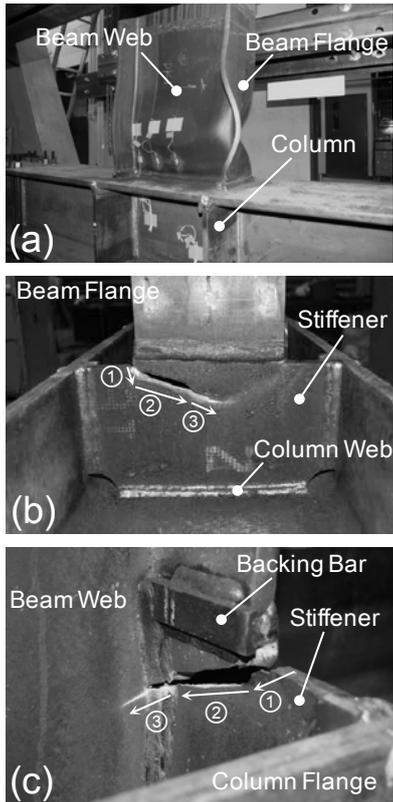


Figure 5 Connection after test: (a) Specimen 1; (b) outer face of flange; and (c) inner face of flange Specimen 2

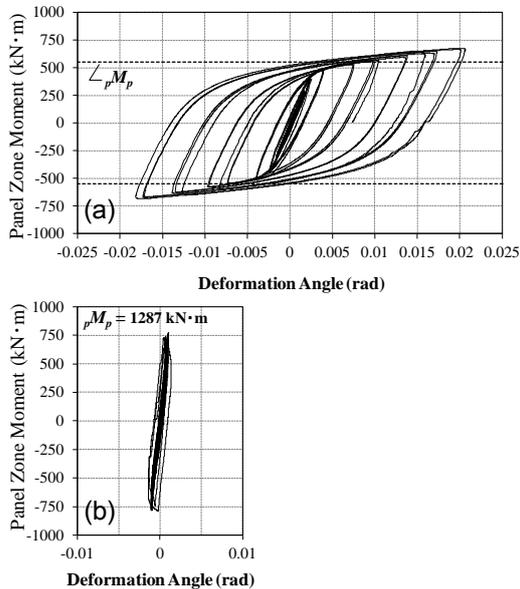


Figure 6 Panel zone response of: (a) Specimen 2; and (b) Specimen 2

お、試験体 2 では、柱ウェブの面外変形と水平スチフナの面外変形が目立ち、柱の曲げや柱パネルの変形よりも層間変形に大きく寄与した。

梁端曲げモーメントを  ${}_bM_p$  で除した梁の耐力上昇率 (実測降伏強度に基づく) は、どちらの試験体も 1.25 であった。また、最大耐力

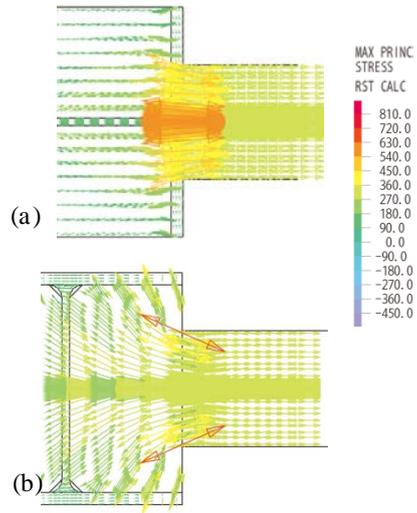


Figure 7 Principal Stress distribution: (a) Specimen 1; (b) Specimen 2

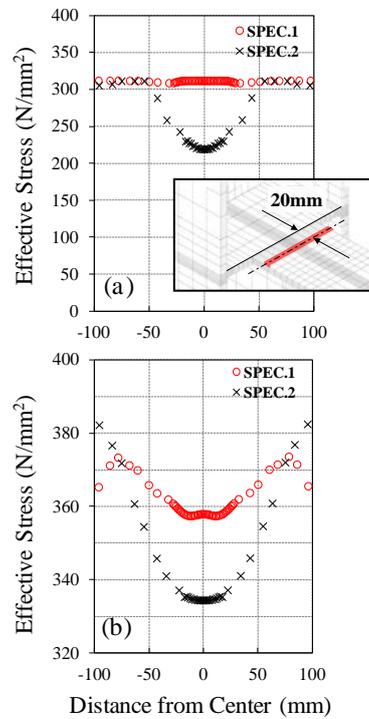


Figure 8 Effective Stress distribution at: (a) 0.0075 rad; (b) 0.03 rad

の 90% を維持する限界の梁の部材回転角を  ${}_bM_p$  に対応する梁の弾性限回転角で除した塑性変形倍率は、試験体 1 が 6.5、試験体 2 が 5.0 であった。試験体 2 に比べて、試験体 1 ではパネルの塑性変形分だけ、層間変形角に占める梁の部材回転角の割合が小さかった。どちらの柱梁接合部も、文献 2) で示される目標値、耐力上昇率 1.2 と塑性変形倍率 5 を満たした。また、角形鋼管柱と H 形鋼梁を用いた文献 3) の試験体のうち、本実験と同サイズの梁を使用した 15 体の梁端耐力上昇率は 1.31 から 1.41、塑性変形倍率は 6 であった。柱に角形鋼管を用いた接合部と比較して、試

験体 1 と 2 の梁端耐力上昇率はやや小さく、塑性変形倍率は同程度であった。

### (3) 解析結果

Fig. 7 に、層間変形角 0.03 rad 時の、梁フランジと水平スチフナの主応力ベクトルを示す。梁フランジの応力は、モデル 1 では材軸とほぼ平行に柱に伝わったが、モデル 2 では、水平スチフナを介して柱フランジに伝わった。溶接止端部に注目すると、試験体 2 で観察した亀裂の進展方向と直交する方向に引張応力が作用した。Fig. 8 に、層間変形角 0.0075, 0.03 rad 時における、フランジ溶接近傍のの有効応力分布を示す。弾性時には、モデル 1 はフランジ幅方向に分布一様したが、モデル 2 ではフランジ中央部の応力が小さい。塑性化後の応力は、フランジ中央部では試験体 1 の方が大きく、フランジ縁端では試験体 2 の方が大きかった。これは、突合せ溶接止端部から亀裂が発生、進展した実験結果と整合する。

### (4) まとめ

H 形鋼柱と梁の梁接合部について、繰り返し載荷実験と有限要素解析を実施した。柱ウェブに接合した場合、初期剛性が 10% 小さく、塑性化後は、柱ウェブと水平スチフナの面外変形が層間変形に寄与した。柱向きに関わらず、角型鋼管柱への接合同程度の梁端耐力上昇率と塑性変形倍率を達成した。柱ウェブへの接合は、梁フランジと柱スチフナの突合せ溶接部が破断に起点となりやすい。

### <引用文献>

- 1) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会: 通しダイアフラム形式で角形鋼管に接合される H 形鋼梁の塑性変形能力に関する実大実験報告書、1997.7
- 2) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針、2012
- 3) 独立行政法人 建築研究所: 建築研究資料 No.143、鉄骨造建築物の接合部ディテール例示資料集 - 複雑な接合部のディテールの設計・製作の要点 -、2013.3
- 4) ADINA R&D, Inc.: Theory and Modeling Guide: Report ARD 12-8、2012.12

### 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 1 件)

- ① 岡崎太一郎、松宮智央、長江拓也、福山國夫、井上貴仁、中島正愛: 超高層鋼構造建物の現場溶接接合部が有する耐震性能を検証する E-ディフェンス振動台実験、日本建築学会構造論文集、78 巻、685 号、569-578、2013 年 3 月《査読有》

[学会発表] (計 4 件)

- ① 岡崎太一郎、小松研介、緑川光正、麻里哲広: H 形鋼柱と梁の接合部に関する実験的研究 その 2 実験結果、日本建築学会学術講演梗概集、2015 年 9 月 5 日 (予定)、東海大学湘南キャンパス、藤沢市
- ② 小松研介、岡崎太一郎、緑川光正、麻里哲広: H 形鋼柱と梁の接合部に関する実験的研究 その 1 実験計画、日本建築学会学術講演梗概集、2014 年 9 月 13 日、神戸大学、神戸市
- ③ 小松研介、岡崎太一郎、緑川光正、麻里哲広: 鋼ラーメン構造の耐震基準及び柱梁接合部設計規定の日米比較、日本建築学会学術講演梗概集、2013 年 8 月 31 日、北海道大学、札幌市
- ④ Okazaki T, Matsumiya T, Nagae T, Fukuyama K, Inoue T, Nakashima M: Shake-table tests to examine the seismic performance of moment frame connections in high-rise buildings. 7th International Symposium on Steel Structures (ISSS-2013)、2013.11.8, Jeju Grand Hotel, Jeju, Korea.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 なし

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

岡崎 太一郎 (OKAZAKI TAICHIRO)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号: 20414964