

種々の鋼構造における柱梁接合部の耐震性能

Experimental Validation of Beam-to-Column Connections in Steel Structures

建築都市空間デザイン専攻 空間防災講座建築構造工学研究室 青柳克弘

Abstract

Five beam-column subassembly specimens were subjected to dynamic cyclic loads to examine the seismic performance of steel beam-to-column moment connections. The specimens adopted field-welded or shop-welded connections. The beam was either bare steel or fully composite with a reinforced concrete slab. The effect of connection details and composite slab was quantified. The effect of dynamic loading over quasi-static loading was found to be minimal, even in the presence of composite slab. Pilot tests were conducted to study the seismic performance of beam-to-columns connections in a cold-formed light-gauge steel system. The inherent torsion, due to large distance between the shear center and loading axis in the beam cross section, dominated the behavior of the specimens.

Keywords: Dynamic loading, Welded connection, Composite floor slab, Light-gauge steel

1. はじめに

鋼構造ラーメンの柱梁接合部の動的載荷実験、ユニットハウス建築における冷間成形軽量形鋼の柱梁接合部の準静的載荷実験、の2種類の実験を実施した。

吹田ら¹⁾は、動的載荷と静的載荷の違いが、柱梁接合部の耐震性能に大きな違いをもたらさないことを実験的に示し、これが現在も定説とされている。ただ、Uangら²⁾は、1970年代の日本の現場溶接式接合部と似た仕様の試験体で、動的載荷は静的載荷よりも、早期に梁端破断をもたらしたと報告している。なお、合成スラブ付の柱梁接合部を動的載荷した実験例は非常に少ない。そこで本研究は、接合部の仕様や、合成スラブの有無が柱梁接合部の耐震性能に及ぼす影響を、大変形までの動的載荷実験によって検証した。

また、2019年12月に実施されたユニットハウスの実大振動台実験に関連して、ユニットハウスの部分架構の静的実験を行い、軽量鋼材で構成された柱梁接合部の耐震性能を検証した。

2. 柱梁接合部の動的載荷実験

表1に示す5体の柱梁試験体を製作した。図1

表1 試験体一覧

	接合部形式	ダイヤフラム形式	スラブ
試験体1	現場・旧	内	無
試験体2	現場	内	無
試験体3	工場	通し	無
試験体4	現場	内	有
試験体5	工場	通し	有

に試験体を、図2に接合部の詳細を示す。試験体は、角形鋼管柱□-400×400×16 (BCR295) と熱間圧延材の梁 H-500×200×10×16 (SN490B) で構成された。全ての試験体が、梁フランジの完

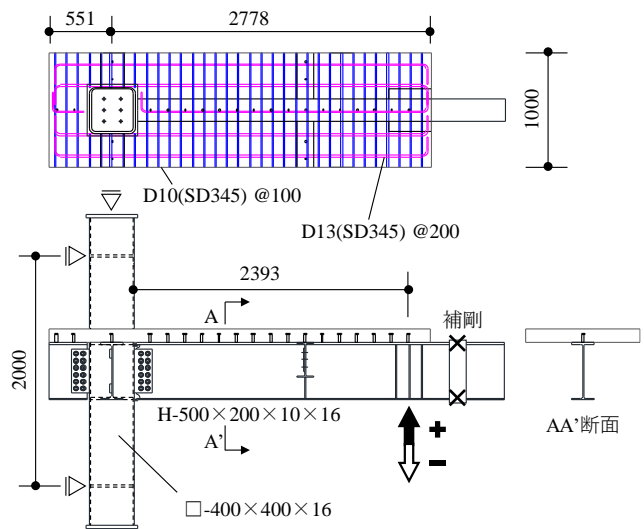


図1 試験体寸法 [寸法 : mm]

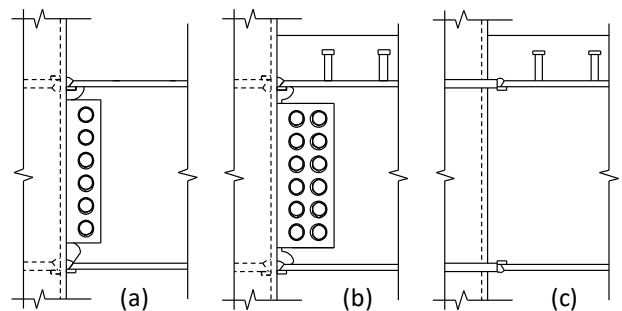


図2 接合部詳細 : (a) 試験体1、(b) 試験体4、(c) 試験体5

全溶込み溶接の非破壊検査に合格した。試験体 1 と 2 と 4 は、フランジを溶接、ウェブを高力ボルト摩擦接合し、柱に内ダイアフラムを設けた現場溶接式であった。試験体 1 は 1970 年代の設計・施工を模倣した接合部、試験体 2 はこんにちの接合部を採用した。試験体 1 と 2 の違いは、高力ボルトの本数、スカラップ形状、溶接ワイヤの種類、溶接詳細であった。試験体 1 は、高力ボルトをせん断抵抗に必要な本数だけ配し、梁下フランジのスカラップ底を、フランジの開先に一致して早期破断を来たしやすいた当時の形状とし、溶接ワイヤに当時から用いられる YGW11 を使い、スチールタブを用いて溶接始末端を切断せずに残し、パス間温度、入熱の管理をしなかった。試験体 2 は、高力ボルトを縦に 6 本ずつ 2 列に配し、梁の上・下フランジに改良型スカラップを採用し、溶接ワイヤに YGW18 を使い、フラックスタブを用いてパス間温度と入熱を管理した。試験体 3 は、工場施工で一般的なノンスカラップの通しダイアフラム形式とし、試験体 2 と同じく溶接ワイヤに YGW18 を使い、入念に溶接を管理した。試験体 4 は試験体 2 と、試験体 5 は試験体 3 と同じ接合部詳細を採用し、合成床スラブを設けた。床スラブは、幅 1000 mm、厚さ 120 mm で、普通コン

クリート ($F_c = 24\text{N/mm}^2$) を用い、長さ方向に D13 (SD345)、直交方向に D10 (SD345) の鉄筋を配した。径 19 mm、高さ 80 mm のスタッドを梁に 150 mm 間隔で 1 列に配置した。スタッドの本数は、完全合成梁とするに必要な本数の 113% だった。

試験体 4 と 5 の荷重条件を、図 1 に示す。柱の両端を振動台に設置し、梁の自由端を振動台の外に設置した反力装置と連結し、振動台が動くとともに梁が強制変形を受ける荷重システムを構築した。層間変形角を制御し、振幅 0.0035、0.005、0.0075 rad を 6 回ずつ、0.01 rad を 4 回、0.015、0.02、0.03、0.04 rad を 2 回ずつ、0.05 rad を試験体が破壊まで、正負交番に振動数 1 Hz の正弦波で繰返した。変位計、ひずみゲージを用いて変形を測定するとともに、ビデオ撮影で荷重中の挙動を詳細に記録した。

図 3 に、梁端モーメントと層間変形角の関係を示す。純鋼梁の全塑性モーメント sM_p と、山田ら⁴⁾ が提案する合成梁の全塑性モーメント cM_p も併せて示す。写真 1 に、実験終了後に撮影した接合部を示す。合成スラブがついた試験体 4 と 5 では、振幅 0.0035 rad からスラブにひび割れが観察され、加振に伴い新しいひび割れが生じた。試験体 1 か

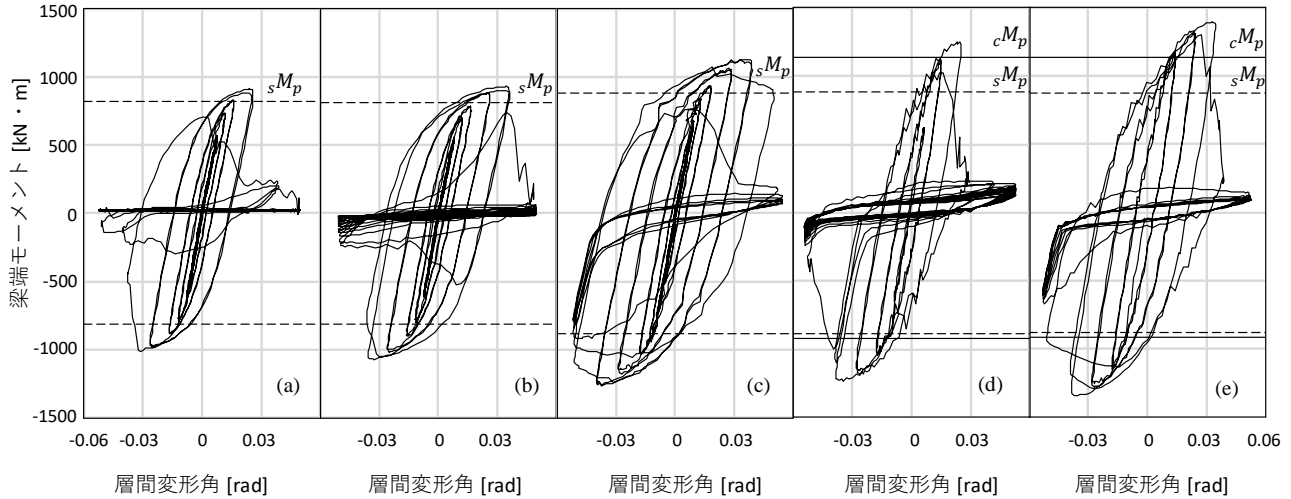


図 3 履歴曲線 : (a) 試験体 1、(b) 試験体 2、(c) 試験体 3、(d) 試験体 4、(e) 試験体 5

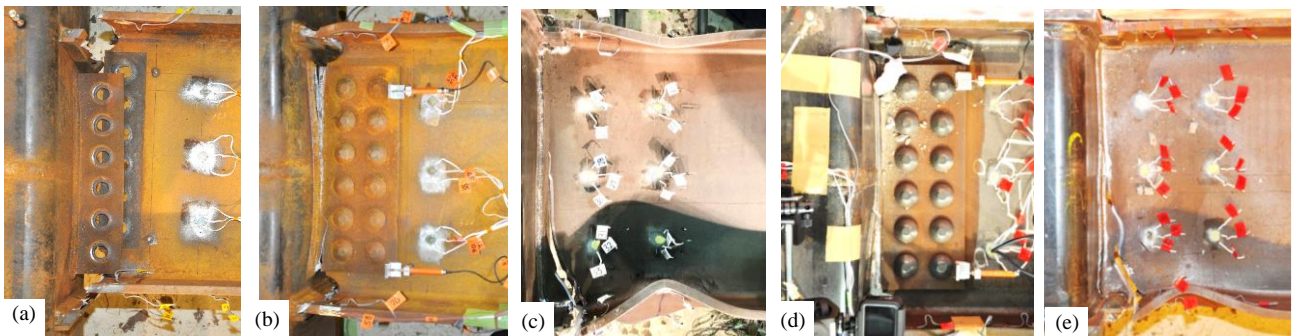


写真 1 実験後の接合部 : (a) 試験体 1、(b) 試験体 2、(c) 試験体 3、(d) 試験体 4、(e) 試験体 5

ら3では、0.015 radでウェブ接合部の滑りを計測した。試験体1、2、4と5では、振幅0.03 radの1回目で、下フランジの溶接部近傍に明瞭な亀裂を確認できた。試験体1は、振幅0.04 radの1回目で上フランジが、試験体2は、振幅0.05 radの1回目で上フランジが、試験体3は、0.05 radの2回目で下フランジが、試験体4は、振幅0.03 radの2回目正曲げで下フランジが、試験体5は、0.04 radの2回目で下フランジが破断した。写真1にみるように、試験体2では上フランジが、試験体3と5ではフランジとウェブが局部変形したが、試験体1と4は、目立った局部変形を生じる前に破断した。フランジ溶接部にスカラップを設けた試験体1、2と4では、スカラップ底の亀裂と完全溶込み溶接の外端の両方で亀裂が進展し、フランジの破断に至った。ノンスカラップの試験体3と5では、完全溶込み溶接の外縁で発生した亀裂が進展し、フランジの破断に至った。柱面から200 mmの位置の梁断面に貼付した歪ゲージによると、振幅0.03 radで試験体2と3はほぼ全断面が降伏したが、合成スラブを付けた試験体4と5は、鋼梁の上半分に、正曲げで降伏しない部位ができ、ボルト本数の少ない試験体1では、ウェブがほとんど降伏しなかった。

『鋼構造接合部設計指針』は、接合部耐力と部材の全塑性耐力の比が大きいほど接合部の性能が良いとの前提で、この比が1以上の一定値を超えることを求めている。現場式接合部を採用した試験体1と2を比較すると、 M_{max}/sM_p が、試験体1では、計算値1.01、正・負の実験値1.12と1.24、試験体2では、計算値1.10、正・負の実験値1.14と1.32、と計算値は実験値の傾向によく一致した。計算上、試験体1と2の違いは、高力ボルトの本数に起因するウェブの曲げ耐力のみであり、応力集中を招くスカラップ形状や、溶接ワイヤなど、その他の仕様の違いは考慮されない。実際、今回の実験では、ウェブ接合部の違いが、性能の差に及ぼした影響が歴然としていた。フランジに亀裂が発生した振幅0.03 radで、試験体1のウェブ接合部が一瞬でボルト孔の遊び分の2 mm滑り、その直後に下フランジの亀裂が急激に進展した。シアタブの高力ボルト摩擦接合の滑りによって、試験体1のウェブは曲げ剛性が低くなり、その分だけフランジがより大きな曲げを負担したと考えられる。試験体2と4のウェブ接合部は、ゆっくりと滑り、滑り量が2 mmに達する前にフランジが破断、もしくはフランジに局部座屈が発生して耐力が低下を来した。

現場式接合部と工場式接合部を比較すると、スラブのなかった試験体2と3では、試験体2が、

M_{max}/sM_p が10%低かった。スラブ付の試験体4と5では、試験体4が、変形能力で荷重振幅2つ劣り、 M_{max} が正曲げで11%、負曲げで8%小さかった。試験体1ほどでなかったが、試験体2と4では高力ボルトが滑り、ウェブ接合部の曲げ剛性が低下したことで、フランジの負担が増えてより早期に破断したと考えられる。

図4に、過去の静的荷重実験⁵⁻¹¹⁾と試験体4と5を合わせて、スラブ付の柱梁接合部実験について、田中ら¹⁰⁾の提案方法による最大耐力の計算値を、実験で測定した最大値と対比する。試験体4と5は、過去の静的荷重実験と同様に、実験値が計算値によく一致した。塑性変形能力を見ても、既往の実験との大きな違いは見られなかった。したがって、合成梁がついた場合も、田中ら¹¹⁾の方法で算定した接合部耐力に基づいて、接合部の性能を保証できると考えられる。

ただ、図3をみると、試験体4と5のみに、低振動数で荷重が増減する、過去の静的荷重実験で見られなかった現象を生じた。この増減はロードセルから検出されたが、変位計や梁に添付したひずみゲージからは、同じ周波数成分は検出されなかった。純鋼梁の実験では、同様の荷重の増減は見られなかった。動画と履歴曲線を検証した結果、梁端近傍のスラブに生じたひび割れ幅が変化する時間帯に、荷重の増減が繰り返された。鉄筋コンクリート構造の動的荷重実験で報告¹²⁾されるように、鉄筋節とコンクリート中の骨材が、ひび割れ幅の変化とともに、噛み合ったり抜けたりすることが原因であったと考えられる。

3. ユニットハウスの柱梁接合部実験

図5に、試験体を設置した荷重装置を、図6に、試験体の梁断面を示す。試験体は、ユニットハウス製品から、短辺方向の下梁と柱の接合部近傍を、柱と梁の断面せいの4倍の長さでとり出した。柱は□-100×100×4.5のSTKR400、梁は3.2 mm厚のSGH400で構成され、梁は柱に全周隅肉溶接

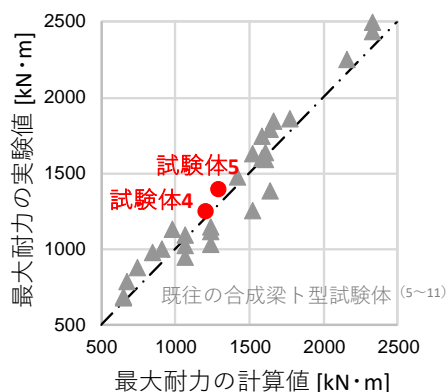


図4 最大耐力の実験値と計算値

された。柱をピン、梁をピンローラーで支持する条件で、2体の試験体を載荷した。図6に示すように、梁断面のせん断中心が、荷重の作用線（柱芯に合致）から、断面幅に匹敵する83 mmも離れたために、曲げモーメントと同時に、振りモーメントを生じる形状であった。接合部近傍は、断面上側が補強され、ドレン孔によって断面下側に断面欠損を有した。

図7に載荷履歴を示す。試験体1は、正側荷重70 kNで、図6に示す梁断面の上板が局部座屈した。さらに載荷を進めると、耐力上昇を伴いながら局部変形が進展した。除荷し、局部変形を鋼板で挟んで矯正し補強したのちに再度載荷したが、補強箇所すぐ隣が局部変形した。補剛装置が大きく変形していたため、補剛装置の剛性不足が試験体の挙動に影響したと考えられる。再度除荷し、鋼板補強を外して負側に載荷すると、接合部付近のドレン孔がつぶれて最大耐力に至った。

補剛装置の剛性を大幅に改善したあと、試験体2を試験したが、試験体1と同様にねじれ、正側80 kNを超えて治具が損傷したため、実験を中断した。試験体の梁のせん断スパンが、実際のユニットハウスの3分の2であったため、同じ曲げモーメントに到達するために、1.5倍のせん断力を与える必要があり、それだけ大きな振りモーメントを生じる試験体形状であった。振りモーメントを伴う梁を用いることで、ユニットハウスの耐震性能が損なわれているかどうか、さらに検討する必要がある。

4. まとめ

鋼構造ラーメンの柱梁接合部について、動的載荷実験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) ウェブ接合部に十分な高力ボルトを使用しなかった1970年代の現場溶接式接合部は、ウェブ接合部が滑ると下フランジの亀裂が急激に進展し、高力ボルトも破断して、接合部の完全破壊に至る可能性がある。
- 2) スラブの有無に関わらず、工場溶接式接合部は、

現場溶接式より優れた耐震能力を示す。

- 3) 動的・静的載荷の違いに関わらず、合成梁の最大耐力は、田中ら¹⁰⁾の提案方法で精度よく予測できる。

ユニットハウスを構成する軽量鋼材の柱梁接合部試験体について、静的載荷実験を実施し、以下の知見を得た。

- 4) せん断中心が載荷軸から大きく外れた断面特性が原因で、梁に大きな振りモーメントが作用する。振りモーメントを伴う梁を用いることで、ユニットハウスの耐震性能が損なわれているかどうか、さらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) Suita et al.: Tests of welded beam-column subassemblies II: Detailed behavior, Journal of Structural Engineering, pp. 1245-1252, 1998.11
- 2) Uang et al.: Cyclic performance of haunch repaired steel moment connections: experimental testing and analytical modeling, Engineering Structures, 20(4-6), pp. 552-561, 1998
- 3) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, 2010.11
- 4) 山田他: 正曲げを受ける完全合成梁の耐力評価, 鋼構造年次論文集, 18, pp. 93-98, 2010.11
- 5) 岡田他: 従来型の柱梁接合部を有する合成梁の変形能力に関する実験的研究 合成梁の変形能力を反映した鋼構造骨組の耐震性評価 その1, 日本建築学会構造系論文集, 547, pp.161-168, 2001.9
- 6) 石井他: 通しダイヤフラム形式・角型鋼管柱一合成梁接合部の破断性状に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 8(31), 2001.9
- 7) 岡田他: 改良型の柱梁接合部を有する合成梁の変形能力に関する実験的研究 合成梁の変形能力を反映した鋼構造骨組の耐震性評価 その2, 日本建築学会構造系論文集, 554, pp.123-130, 2002.4
- 8) 岡田他: 合成梁の塑性変形能力に柱梁接合部における継手効率及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 573, pp. 185-192, 2003.11
- 9) 山田他: 床スラブの付いたト型部分架構パネルゾーンの弾塑性挙動, 日本建築学会構造系論文集, 644, pp. 1841-1849, 2009.10
- 10) 田中他: 床スラブが変形能力に及ぼす影響一塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力 その5一, 日本建築学会構造系論文集, 707, pp. 127-136, 2015.1
- 11) 島田他: 合成梁の接合部係数の算定方法, 日本建築学会構造系論文集, 727, pp.1005-1014, 2016.6
- 12) 秋山他: 鉄筋コンクリート造梁一柱接合部の実大振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 565, pp. 111-118, 2003.3

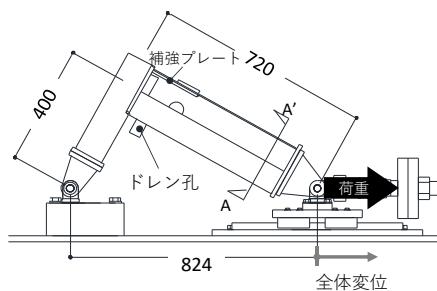


図5 ユニットハウス接合部実験の設置図 [寸法: mm]

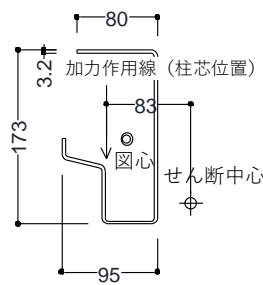


図6 AA'断面 [寸法: mm]

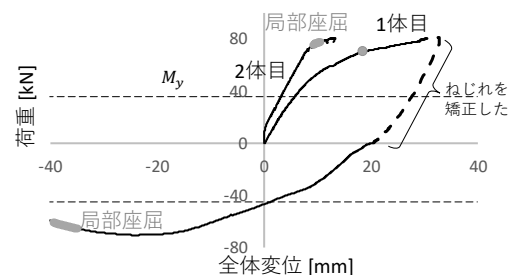


図7 ユニットハウス接合部の履曲線歴