

デッキプレート付合成梁の繰返し載荷性能

Cyclic Loading Performance of Composite Beams with Formed Steel Deck

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 高橋裕人

Abstract

A database of composite beam experiments was developed. Influential factors on maximum strength of composite beams were verified. Four specimens were subjected to cyclic loads to examine the seismic performance of composite beams. Three parameters were analyzed, which include the influence of floor slab, the direction of the formed steel deck, and the number of shear studs (fully composite beam or partially composite beam). The maximum strength was evaluated by comparing with design formula to capture the accurate strength of composite beams. When the direction of the formed steel deck was perpendicular to the beam, the strength was quite lower than design formula.

Keywords: Composite beams, Cyclic loading test, Beam-to-column connections, Shear studs

1. はじめに

鋼構造建築物における鋼梁は、エレベーターコア周りなどを除き、鉄筋コンクリート床スラブが接合された合成梁で構成されることが多い。鋼梁を合成梁として設計できれば、純鋼梁より耐力、剛性が向上するため経済的であり、実情に即しているため合理的である。

福岡¹⁾は、梁端部の破断や梁下フランジの局部座屈で性能が決した合成梁の実験データを収集し、耐力や塑性回転角について評価した。梁せいに対するスラブ厚の寸法比が大きいほど、合成梁の曲げ耐力が大きくなることが示された。

本研究では、福岡¹⁾の検討より多くの実験データを収集し、国内の指針で示された耐力評価式を横断的に参照し、合成梁の最大耐力を分析した。同分析より、デッキプレートの配置方法に着目した合成梁の検証実績が少ないことから、デッキプレートの配置が異なる3種の合成梁の繰返し載荷実験を実施した。

2. 合成梁実験のデータベース

合成梁に関する国内の実験データ¹⁾⁻¹²⁾を収集した。柱梁接合部の性能に着目し、最大耐力を發揮する前に梁が横座屈した試験体は、分析対象から除外した。対象とした試験体数は計105体で、内訳は、文献1)で採用した試験体が62体と、新規追加した試験体²⁾⁻¹²⁾が43体であった。

全105体に着目すると、載荷方法は、単調が12体、繰返しが93体であった。試験体形式は、ト形が63体、十字形が12体、1層の単スパン架構が13体、1層の多スパン架構が16体、2層の多スパン架構が1体であった。床スラブは、等厚スラブ

が33体、フラットデッキが4体、波形デッキが68体であった。波形デッキについては、デッキプレートの溝方向が梁と直交な試験体が59体、平行な試験体が9体であった。

図1に示すように、収集した実験データから得られた、正曲げ側における合成梁の最大耐力を分析した。各指針から算定した耐力の計算値には、材料試験の実測値を用いた。なお、4章にて後述する試験体1~4の実験結果を併記した。

図1(a)に、純鋼梁の全塑性耐力 sM_p ¹³⁾に対する実験で測定した最大耐力 M_{max} の比 M_{max}/sM_p と鋼梁のせい D に対する床スラブの厚さ t の寸法比 t/D の関係を示す。 M_{max}/sM_p は1.09から3.24の範囲に、 t/D は0.13から0.34の範囲に分布した。 t/D が大きいほど、 M_{max}/sM_p が大きい傾向が見られた。図1(b)に、合成梁の全塑性耐力 cM_p ¹⁴⁾に対する実験で測定した最大耐力 M_{max} の比 M_{max}/cM_p と寸法比 t/D の関係を示す。 M_{max}/cM_p は0.85から1.51の範囲に分布した。 t/D との相関関係は見られなかった。図1(c)に、合成梁の最大耐力 cM_u に対する実験で測定した最大耐力 M_{max} の比 M_{max}/cM_u と寸法比 t/D の関係を示す。合成梁の最大耐力 cM_u は、田中⁹⁾が提案した角形鋼管柱の鋼管壁が降伏する崩壊機構に基づき算定した。なお、鋼管壁が降伏しない場合には、床スラブは有効圧縮耐力¹⁴⁾を負担し、鋼梁は下フランジで引張強度、ウェブと上フランジで降伏強度となる応力分布を仮定した。 M_{max}/cM_u は0.68から1.29の範囲に分布した。

3. 実験計画

中層鋼構造建築物の実大の2/3スケールを想定し、柱梁接合部周りを抽出したト型架構の試験体

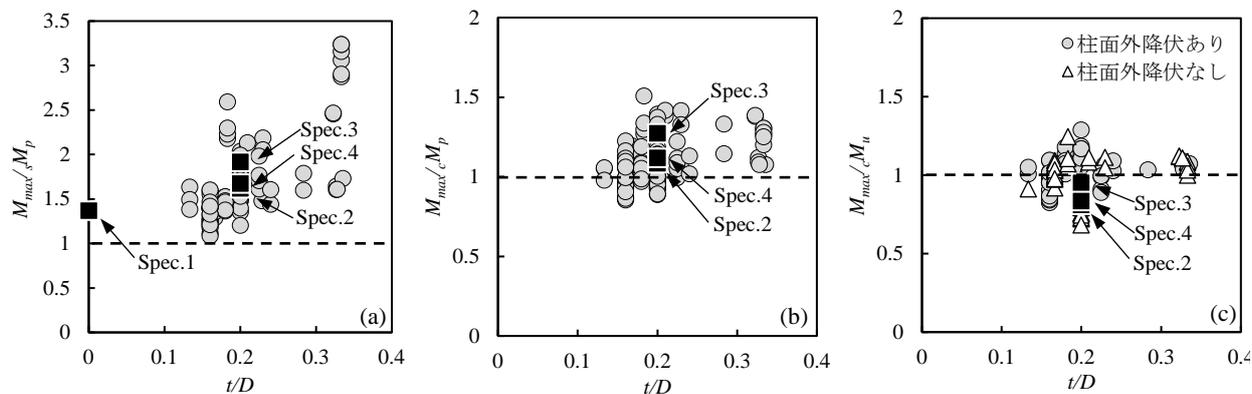


図1 合成梁の耐力の評価: (a) M_{max}/sM_p ; (b) M_{max}/cM_p ; (c) M_{max}/cM_u

を4体用意した。図2に示すように、柱の両端をピン支点、梁の自由端側を容量±2000 kNの油圧ジャッキへと接続し、水平力を受ける架構の曲げ応力分布を模擬した。柱のピン支点間の長さは2,400 mm、梁の柱芯から載荷点までの長さは2,300 mmとした。角形鋼管柱には□-350×350×22 (BCR295)、梁にはH-400×200×8×13 (SN400B)を用いた。接合部は、工場溶接式でノンスラップの通しダイアフラム形式とした。表1に試験体一覧を示す。試験体のパラメータは、スラブの有無、デッキプレートの溝方向、頭付きスタッドの本数による完全/不完全の別とした。試験体1はスラブのつかない純鋼梁、試験体2、3、4は床スラブ付の合成梁とした。試験体2、3、4には、デッキ合成スラブを取り付けた。スラブの幅は1300 mm、有効厚さは80 mmで、普通コンクリートの強度を $F_c = 24$ N/mm²とした。シアコネクタには、軸径16 mm、高さ80 mmの頭付きスタッドを用い、300 mmピッチとした。デッキプレートは溝の高さが50 mm、溝の平均幅が150 mm (QL-99-50-10)で、鉄筋は梁の長さ方向、直交方向ともにD13 (SD295A)を用い、200 mmピッチで配した。

試験体2と4は、デッキプレートの溝方向を梁と直交させた。梁上でデッキプレートを連続させ、頭付きスタッドは、デッキプレートを貫通して梁に溶接した。なお、頭付きスタッドは、デッキプレートの溝のうち、柱側に配置した。試験体3は、デッキプレートの溝方向を梁と平行にさせた。梁上でデッキプレートを切断し、頭付きスタッドは、直接梁に溶接した。各種合成構造設計指針¹⁴⁾により、材料強度に規格値を用いて、試験体2と3を完全合成梁、試験体4を不完全合成梁と設計した。試験体2と3は2列配置で14本、試験体4は1列配置で7本の頭付きスタッドを配置した。表1中に、試験体に配置した頭付きスタッドの本数を指針^{14), 15)}から算定した完全合成梁に必要な本数

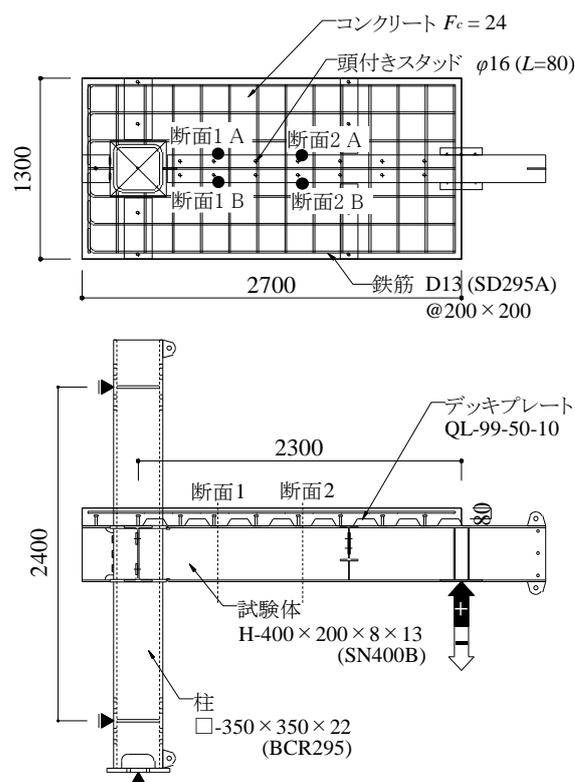


図2 試験体形状

で除した合成率を示す。AISC¹⁵⁾を見ると、試験体2は完全合成梁の規定を満たさず、不完全合成梁と判定された。材料強度の実測値を採用した場合、いずれの指針でも、試験体2と3は完全合成梁として設計したにも関わらず不完全合成梁と判定された。

試験体への加力は、層変形角で制御した。載荷履歴は、米国のAISC¹⁶⁾に規定される正負交番漸増繰返し履歴を採用した。振幅0.00375、0.005、0.0075 radを6回ずつ、0.01 radを4回、0.015、0.02、0.03、0.04、0.05 radを2回ずつ繰返した。合成梁で床スラブが圧縮を受ける方向を、荷重、層変形角ともに正とした。

4. 実験結果

図3(a)に、試験体1の梁端モーメントと層変形角の関係を示す。負側は振幅0.03 radの1回目で最大耐力に達し、梁下フランジが局部座屈し始めた。正側は0.03 radの2回目で最大耐力に達し、0.04 radの1回目で梁上フランジが局部座屈し始めた。図4(a)に示すように、0.05 radでは両側フランジで局部座屈が進展した。

図3(b)に、試験体2の梁端モーメントと層変形角の関係を示す。振幅0.015 radの正曲げ2回目で柱上のコンクリートが圧壊し始めた。正曲げは0.02 radの1回目で最大耐力に達し、デッキプレートが変形して、スラブの内側でコンクリートがデッキプレートから離間した。図4(b)に示すように、0.04 radではコンクリートとデッキプレートの離間が大きくなった。負曲げは0.02 radの1回目で最大耐力に達し、梁下フランジが局部座屈した。試験体2では、0.04 radの負曲げ2回目の载荷途中で計測機器に支障が生じ、実験を終了した。

図3(c)に、試験体3の梁端モーメントと層変形角の関係を示す。負曲げは振幅0.02 radの1回目(0.018 rad)で最大耐力に達し、梁下フランジが局部座屈した。正曲げは0.03 radの1回目(0.025 rad)で最大耐力に達し、柱上のコンクリートが圧壊し、耐力が急激に低下した。図4(c)に示すように、0.05 radでは柱上のコンクリートが大きく圧壊していた。0.04 radの正曲げ1回目で上フラン

ジがわずかに局部座屈した。

図3(d)に、試験体4の梁端モーメントと層変形角の関係を示す。振幅0.02 radの正曲げ1回目で柱上のコンクリートが圧壊し始めた。0.02 radの負曲げ1回目で梁下フランジがわずかに局部座屈した。負曲げは0.03 radの1回目で最大耐力に達した。正曲げは0.04 radの1回目で最大耐力に達し、上フランジが局部座屈した。図4(d)に示すように、0.05 radでは上フランジが大きく局部座屈していた。0.04 radの正曲げ2回目で下フランジに亀裂が入った。試験体4は、大きな層変形角でも試験体2より高い耐力を維持した。

5. 考察

図1に、载荷実験より得られた試験体1~4の正曲げの最大耐力を示す。 M_{max}/sM_p をみると、試験体2、3、4は、いずれも試験体1より1割以上大きな値を示し、スラブの合成効果が確認できた。合成梁の最大耐力は試験体3、4、2の順に大きく、試験体2、4より試験体3が100 kN・m程度上回った。表1に示すように、各種合成構造設計指針による試験体2、3の合成率はほぼ同程度であるが、AISCの指針による試験体2の合成率は試験体3の7割程度となった。これは、AISCでは、図5に示すようなデッキプレートの溝方向が梁と直交する場合に、コンクリートが支圧力を負担する領域が狭まるため、シアコネクタのせん断耐力

表1 試験体一覧

	スラブ	デッキの方向	完全/ 不完全	合成率			
				規格値		実測値	
				各種合成 ¹⁴⁾	AISC ¹⁵⁾	各種合成 ¹⁴⁾	AISC ¹⁵⁾
試験体1	無						
試験体2	有	梁に直交	完全	1.19	0.97	0.97	0.61
試験体3	有	梁に平行	完全	1.19	1.19	0.94	0.86
試験体4	有	梁に直交	不完全	0.59	0.53	0.47	0.35

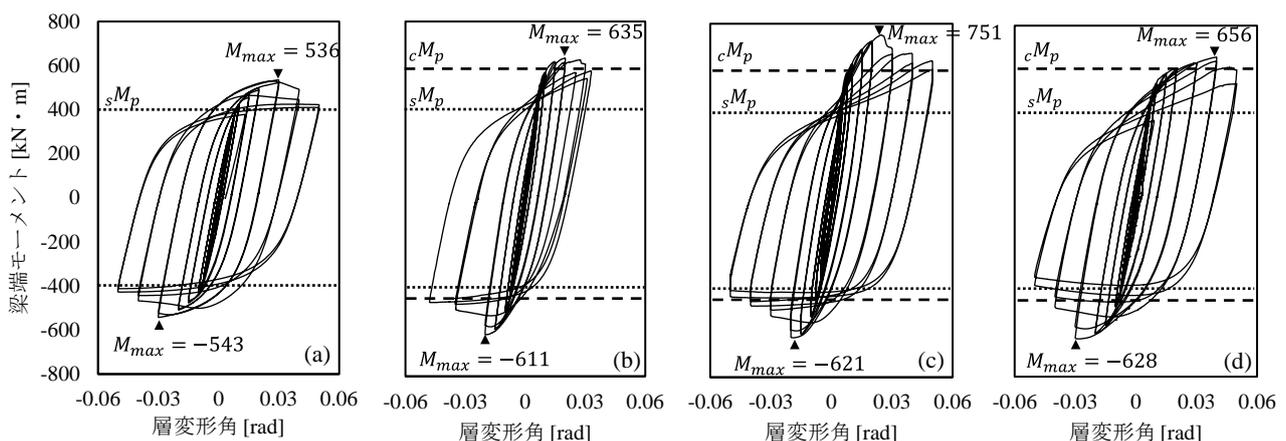


図3 荷重変形関係: (a) 試験体1; (b) 試験体2; (c) 試験体3; (d) 試験体4

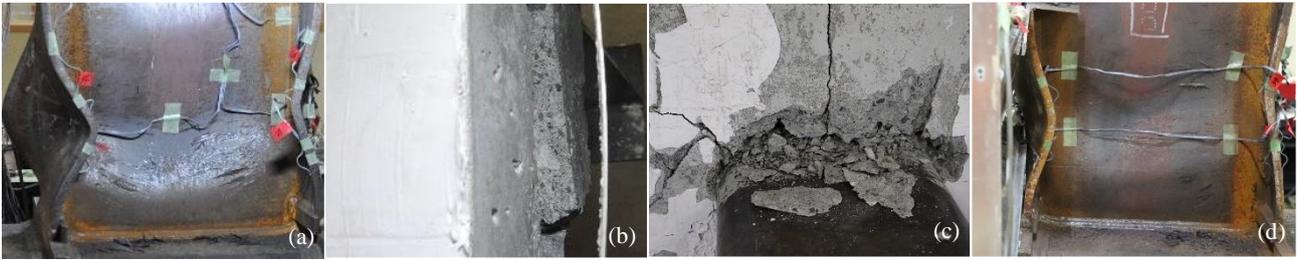


図4 正曲げの破壊モード: (a) 試験体 1; (b) 試験体 2; (c) 試験体 3; (d) 試験体 4

を平行する場合より小さく規定しているためである。 M_{max}/cM_u をみると、合成梁 3 体の最大耐力は cM_u を下回った。これは、本論文で採用したシアコネクタの突出長さが AISC の規定値より短く、完全合成梁としての性能が発揮されなかったためと考えられる。図 6 に、試験体 2~4 の M_{max}/cM_u を表 1 で示した日米両指針による合成率に対して示す。純鋼梁を想定し合成率 0 で $M_{max} = sM_u$ ¹³⁾ とした点と、合成率 1 で $M_{max} = cM_u$ となる点を結び、破線で示す。実測値で算定した AISC の合成率は、概ね破線に近い値を示した。以上より、AISC による合成率は最大耐力と相関関係が見られた。

図 7 に、振幅 0.00375 rad の正曲げ 1 回目ピークにおける、鋼梁と合成スラブのずれ変位の結果を示す。横軸の断面番号は、図 2 中に示した断面 1 および 2 である。試験体 2 のずれは試験体 4 より小さく、頭付きスタッドの本数が多い試験体 2 の方が、合成スラブを強く拘束していた。図 8 に合成梁の中立軸位置を示す。0.02 rad の 2 回目まで、試験体 2 の方が中立軸位置は高いが、それ以降は試験体 4 の方が高く、合成効果が高いことが分かる。以上より、試験体 2 は頭付きスタッドが合成スラブを強く拘束し、0.03 rad の 1 回目でコンクリートがデッキプレートと大きく離間したことから、試験体 4 よりも合成効果が早期に低下したと推測される。

6. まとめ

合成梁に関して、データベースを構築し、繰返し荷重実験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) デッキプレートの溝方向が梁に平行/直交な場合ともに、合成効果が確認でき、合成梁の最大耐力は全塑性耐力 cM_p を上回った。
- 2) デッキプレートの溝方向が梁に直交する場合、頭付きスタッドの本数が多いと、性能が劣化する例が見られた。
- 3) デッキプレートの配置形式を考慮した米国の指針¹⁵⁾による合成率は、合成梁の最大耐力 M_{max} と相関関係が確認された。

【参考文献】

- 1) 福岡ら：日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 III、

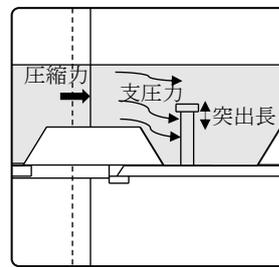


図5 直交な場合の断面

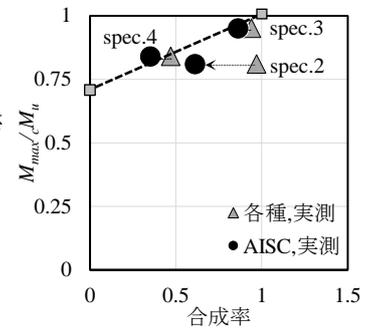


図6 合成率と耐力の関係

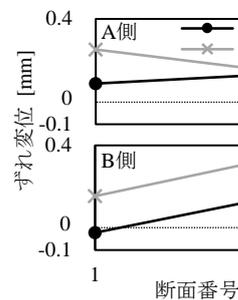


図7 鋼梁とスラブのずれ

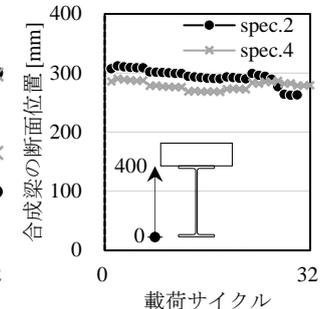


図8 中立軸位置

1371-1372、2014.9

- 2) 加藤ら：日本建築学会関東支部研究報告集、54、293-296、1983.7
- 3) 立山ら：日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、1365-1366、1989.10
- 4) 北園ら：日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 III、535-536、1999.9
- 5) 北園ら：日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 III、735-736、2000.9
- 6) 北園ら：日本建築学会中国支部研究報告集、24、129-132、2001.3
- 7) 石井ら：鋼構造論文集、31、65-79、2001.9
- 8) 岡田ら：日本建築学会構造系論文集、573、185-192、2003.11
- 9) 田中ら：日本建築学会構造系論文集、707、127-136、2015.1
- 10) 中田ら：日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 III、759-760、2015.9
- 11) 島田ら：日本建築学会構造系論文集、724、1005-1014、2016.6
- 12) 青柳ら：日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、837-838、2019.9
- 13) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針、2012.3
- 14) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010.11
- 15) AISC：Specification for Structural Steel Buildings、16.1-105、2016.7
- 16) AISC：Seismic Provisions for Structural Steel Buildings、9.1-148、2016.7