

RC スラブ付き EWECS 柱梁ト形接合部の静的載荷実験

鈴木 卓*, 平松 卓宏**, 田口 孝***

* 大阪大学大学院工学研究科 助教 博士（工学）

** 大阪大学大学院工学研究科 大学院生

*** 矢作建設工業株式会社 エンジニアリングセンター 主席研究員 博士（工学）

本研究では、外殻集成材、内蔵鉄骨およびコンクリートから構成される EWECS 合成構造システムにおけるスラブ付き柱梁ト形接合部の構造性能の把握を目的とした静的載荷実験を実施した。その結果、当該接合部試験体の破壊モードは柱に圧縮軸力の作用する場合に梁曲げ降伏先行型となり、引張軸力の作用する場合に接合部せん断破壊先行型となることが確認された。また柱に引張軸力が作用する加力方向において接合部せん断破壊の発生に伴い耐力低下する傾向が確認された。当該試験体を対象とした終局強度評価では、スラブ付き鉄骨梁の曲げ強度は一般化累加強度理論により、スラブ付き EWECS 柱梁接合部のせん断強度は SRC 規準を基にスラブ厚さの影響を考慮した提案式により評価できることを示した。

キーワード：合成構造，パネルせん断破壊，変動軸力，合成梁，終局強度評価

1. はじめに

筆者らは近年、長期耐用型建築物の需要の高まり、環境負荷の低い建設技術の開発および国産木材の安定供給と流通の促進などの社会の要望を受けて木質ハイブリット合成構造 (Engineering Wood Encased Concrete-Steel, 以下、EWECS) の研究開発を行ってきた。EWECS 構造システムは、内部の鉄骨コンクリート構造により地震力に対して粘り強く抵抗することが可能である。また、鉄骨コンクリートの外側を覆う集成材は、木質構造が持つ触感、温もりおよび香りを期待できる他に、コンクリートの兼用型枠として利用することが可能である。これまでの EWECS 構造に関する研究に触れると、熊谷および瀧野らは EWECS を構成する外殻集成材の樹種およびせん断スパン比を変数とした柱の静的載荷実験を行い、樹種に拘らず EWECS 柱は安定した履歴性状を示すことを示した¹⁾。また、田名部、新藤らは破壊形式および集成材の樹種を変数とした EWECS 柱梁接合部の静的載荷実験を行い、梁曲げ降伏型の試験体では集成材の樹種に拘らず高い靱性能を有することを

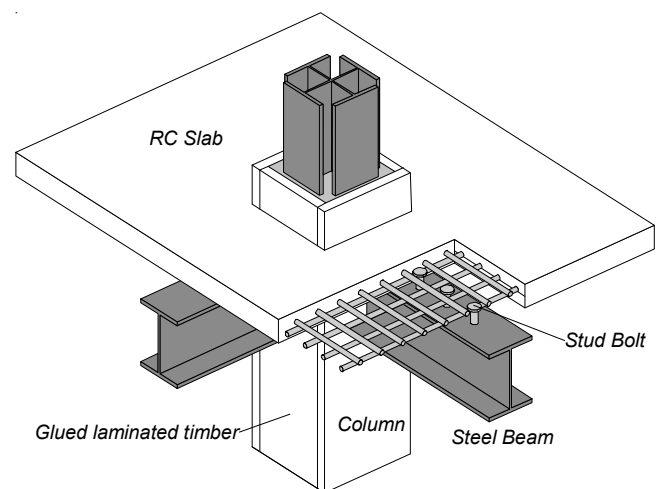


図1 EWECS 合成構造システムのイメージ

示した²⁾。

一方で EWECS 造建物は、図 1 に示すように鉛直部材に EWECS 柱を適用し、水平部材に RC スラブを含む鉄骨梁（合成梁）から構成されるシステムが想定されている。しかしながら、既往の研究では EWECS 柱－合成梁接合部の構造実験は行われおらず、その構造性能は不明なのが現状である。

以上を背景として筆者らの研究グループでは、RC スラブ付き EWECS 柱梁接合部の構造性能の把握を目的として十字形接合部試験体の静的載荷実験を実施した。その結果、十字形接合部試験体は破壊形式に拘わらず大変形時まで耐力低下の少ない安定した復元力特性を示すことを示した。さらに、当該試験体を対象とした三次元 FEM 解析の結果から、接合部パネルを構成する領域にスラブ厚さの影響を考慮したパネルせん断強度式を提案した³⁾。本研究では、文献 3) に引き続いて RC スラブ付き T 形接合部の構造性能の把握を目的とした静的載荷実験を行った。本報では、実験から得られた損傷状況および復元力特性等の構造性能の検討結果を述べるとともに、筆者らの提案する終局強度評価法の評価精度を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図 2 に試験体の概要を、図 3 に床スラブの配筋状況を、表 2 に試験体の概要をそれぞれ示す。試験体は実大の 1/2 スケールである。試験体には、部材反曲点を模擬したピン支承が柱上下端および梁先端に設置されている。柱上下ピン支承間距離は 1,670mm、接合部中心から梁ピン支承までの距離は 1,375mm である。柱のコンクリート断面 $b_c \times D_c$ は 320×320mm とし、柱鉄骨は H-280×200×9×16 (SS400) とした。また、外殻集成材厚さは 40mm で、集成材種類はスギ集成材を使用した。梁鉄骨は H-300×150×10×15 (SS400) とし、厚さ 100mm の RC スラブが設けられている。また、スラブおよび梁鉄骨の一体性を確保するために頭付きスタッド 2-d13@75 (SD295A) が梁鉄骨に溶接されている⁴⁾。パネルゾーンにおける鉄骨ウェブ厚さは 4.5mm である。

表 2 にコンクリートの材料特性を、表 3 に鋼材の材料特性を、表 4 に鋼材の材料特性をそれぞれ示す。

2.2 載荷方法

図 4 に載荷方法および柱の軸力－せん断力相関関係を、図 5 に載荷装置をそれぞれ示す。軸力は載荷フレームに取り付けた 2 台の鉛直オイルジャッキ（各 2,000kN）によって軸力を作用させつつ、反力壁に取り付けた水

表 1 試験体の概要

試験体		JSE
想定破壊形式		正載荷：接合部せん断破壊先行型 負載荷：梁曲げ降伏先行型
柱軸力 (kN)		$N=730+3Q$
集成材	材種	スギ
	厚さ (mm)	40
パネルゾーンウェブ鉄骨厚さ (mm)		4.5
柱	$b_c \times D_c$ (mm)	400×400
	鉄骨	H-280×200×9×16
	h (mm)	1,670
梁	鉄骨	H-300×150×10×15
	l (mm)	1,375
接合部	鉄骨	H-280×200×4.5×16
スラブ	$b \times D$ (mm)	100×800
	鉄筋	2-D6@100 ($p_s=0.32\%$)
	スタッド	頭付きスタッド 2-D13@75 ($L_s=50\text{mm}$)

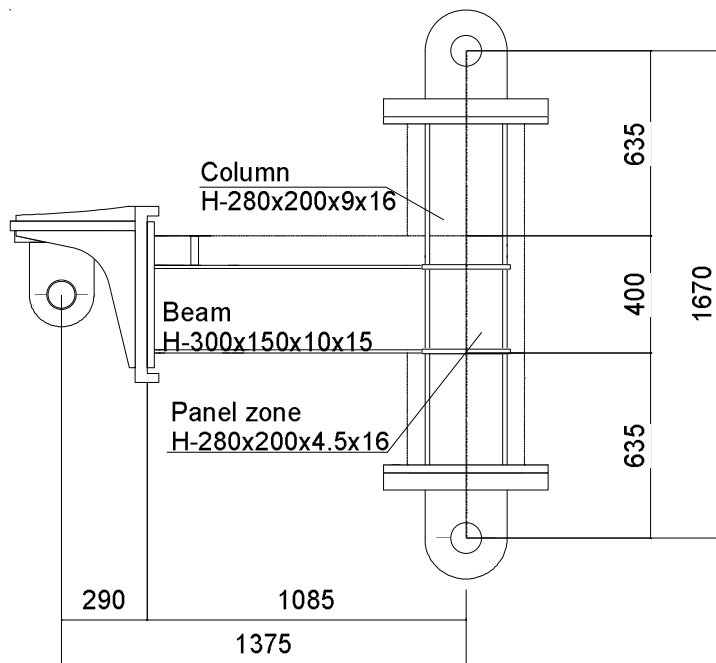


図2 試験体概要

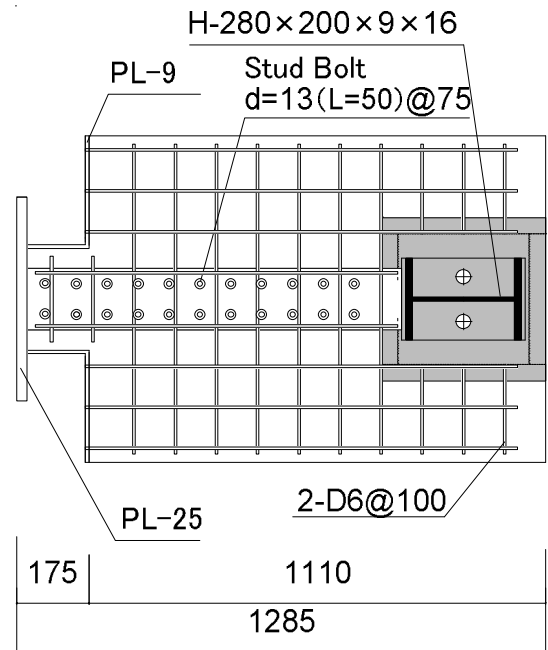


図3 床スラブの配筋状況

表2 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度時ひずみ (μ)
48.7	27.2	2,904

表3 鋼材の材料特性

	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	備考
PL-4.5 (SS400)	295	210	1409	接合部ウェブ
PL-9 (SS400)	289	207	1404	接合部フランジ, 柱ウェブ
PL-10 (SS400)	295	213	1388	梁ウェブ
PL-15 (SS400)	300	213	1411	梁フランジ
PL-16 (SS400)	264	210	1261	柱フランジ, ダイヤフラム
D6 (SD295A)	316	208	1518	スラブ

表4 集成材の材料特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
国産スギ	37.8	7.7

平オイルジャッキ（1,000kN）によって水平力を載荷した。本実験の軸力は、一定軸力 $N=730\text{kN}$ ($=0.15b_cD_c\sigma_B$, σ_B : コンクリート圧縮強度) を作用させた後に、高層建築物を想定して作用せん断力の3倍の変動軸力を作用させた。

水平力載荷は梁端部に取り付けたピン支承間の相対鉛直変位 δ を左右ピン支承間距離 l で除した相対変形角 R ($=\delta/l$) による変位制御とした。加力プログラムは $R=0.25\times 10^{-2}\text{rad}$ が1サイクル, $R=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ および $4.0\times 10^{-2}\text{rad}$ が2サイクルおよび $R=5.0\times 10^{-2}\text{rad}$ が1サイクルである。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

図6に $R=0.5, 1.0, 2.0$ および $4.0\times 10^{-2}\text{rad}$ の載荷サイクルにおける接合部パネルの破壊状況を、図7に実験終

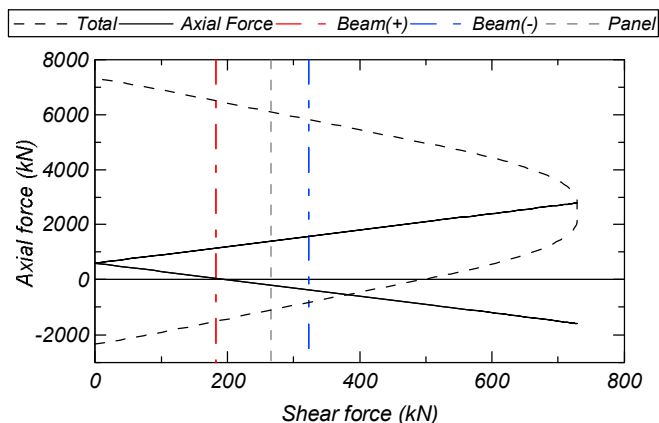


図4 荷重方法および柱軸力ー曲げ終局強度相関関係

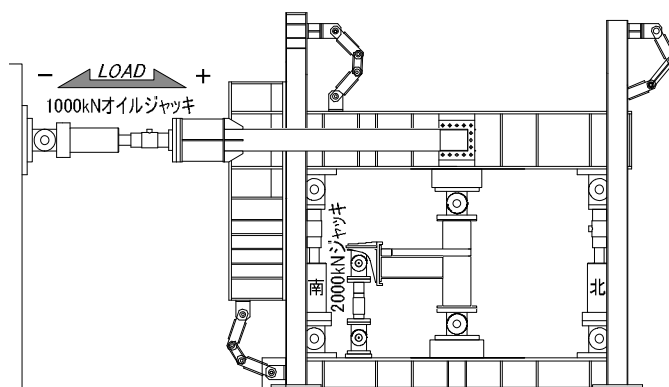


図5 荷重装置



(a) $R=1/200\text{rad}$



(b) $R=100\text{rad}$



(c) $R=1/50\text{rad}$



(d) $R=1/25\text{ rad}$

図6 各荷重サイクルにおける接合部パネルの破壊状況



内部コンクリート



外殻集成材

図7 実験終了後の接合部パネルの破壊状況

了後の内部コンクリートおよび外殻集成材の損傷状況をそれぞれ示す。

$R=0.25 \times 10^{-2} \text{rad}$ の正負荷重サイクルにおいてスラブの曲げひび割れが確認された。 $R=1.5 \times 10^{-2} \text{rad}$ の正荷重においてスラブの曲げひび割れの拡幅が確認され、同荷重サイクルにおいてパネルゾーンの集成材の縦割れの発生が確認された。その後、 $R=3.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ の負荷重において、破裂音を伴いパネルゾーンの集成材の縦割れが拡幅し、内部コンクリートのせん断ひび割れが確認された。

最終破壊状況をみると、せん断ひび割れの拡幅に伴うコンクリートの顕著な剥落が確認できる。また、北側

▽ 梁鉄骨フランジ降伏点 △ パネル鉄骨ウェブ降伏点 ○ 最大耐力点 -- 梁曲げ強度 ---- パネルせん断強度

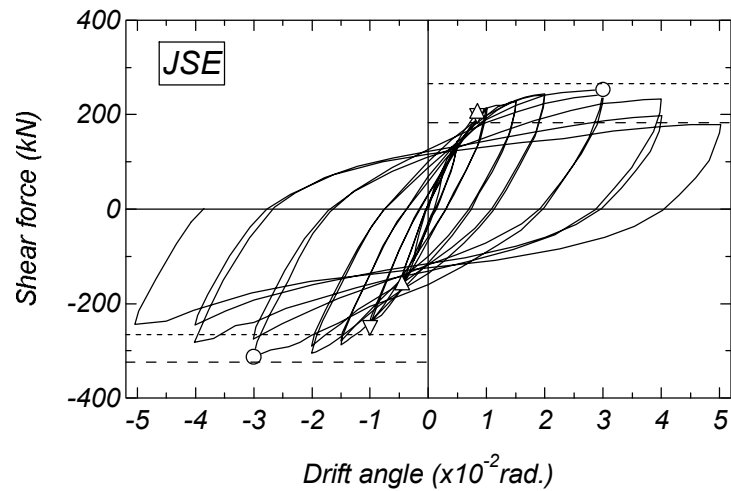


図8 せん断力—変形角関係

表5 特異点の一覧

	梁鉄骨上フランジ降伏		梁鉄骨下フランジ降伏		パネル鉄骨ウェブ降伏		最大耐力	
	R ($\times 10^{-2}$ rad)	Q (kN)	R ($\times 10^{-2}$ rad)	Q (kN)	R ($\times 10^{-2}$ rad)	Q (kN)	R ($\times 10^{-2}$ rad)	Q (kN)
正載荷	0.84	202	1.00	213	0.84	202	3.0	253.0
負載荷	-1.33	-273	-1.00	-247	-0.50	-160	-3.0	-312.5

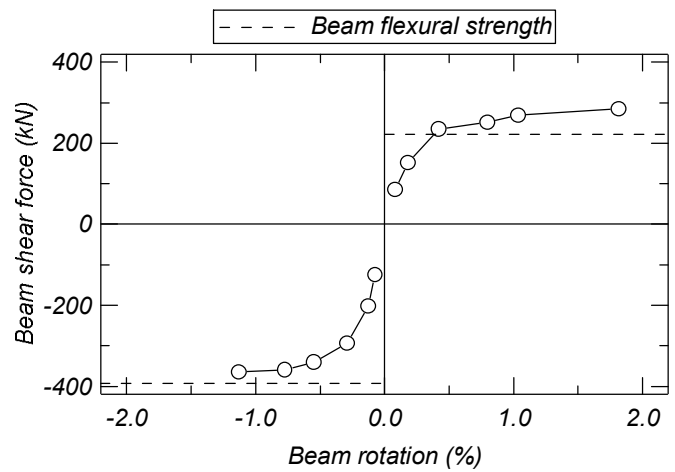
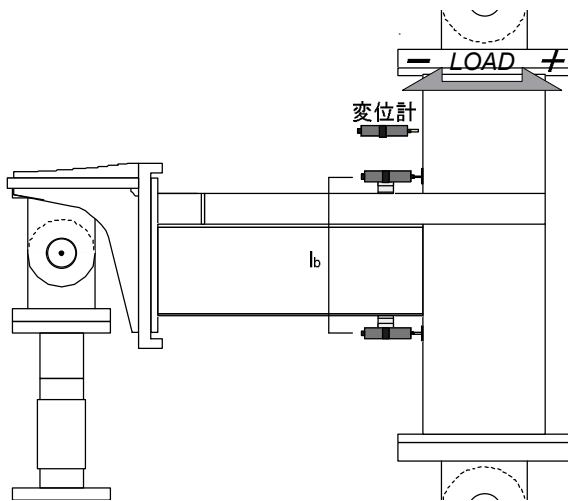


図9 梁せん断力—梁回転角

の側面においてもコンクリートの顕著な剥落がみられた。

3.2 せん断力—変形角関係

図8に柱せん断力—変形角関係を、表5に実験における特異点の一覧をそれぞれ示す。

$R=0.5 \times 10^{-2}$ rad.の負載荷においてパネル鉄骨ウェブの降伏が確認され、それに伴う剛性低下が認められた。また、 $R=1.0 \times 10^{-2}$ rad.の正載荷においてパネル鉄骨ウェブの降伏が確認され、同サイクルにおいて正負載荷ともに梁鉄骨フランジの降伏が確認された。 $R=3.0 \times 10^{-2}$ rad.の載荷サイクルにおいて正載荷の最大耐力253kNが、負載荷の最大耐力313kNが記録された。その後、正負載荷の両側ともに最終載荷サイクルまで耐力低下がみられ、

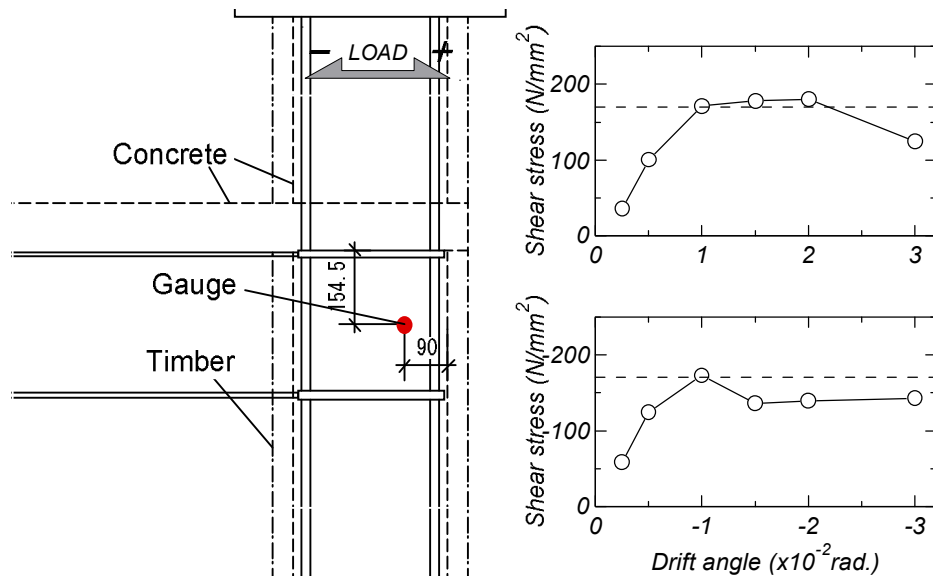


図 10 パネル鉄骨のせん断応力の推移

最大耐力の 70%程度まで耐力が低下した。

3.3 梁せん断力－梁回転角関係

図 9 に $R=3.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ までの各サイクル 1 サイクル目ピーク時の梁せん断力－梁回転角関係を示している。梁せん断力は梁側のピンに取り付けた鉛直ロードセルの値を用いている。梁の回転角は同図に示すようにスラブ上面および梁鉄骨下フランジに取り付けた変位計の計測値を変位計の取り付け距離 l_b (490mm) で除することで算出した。同図には、第 4 章に詳細を示すが累加強度理論により算出した梁の曲げ終局強度の梁せん断力換算値を点線で示している。

梁回転角に着目すると、いずれの変形角においてもスラブ引張側となる正載荷の梁回転角はスラブ圧縮側のものに比べて大きくなっていることが確認された。次に梁せん断力に着目すると、スラブ引張側となる正載荷では、 $R=1.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ において梁せん断力は曲げ終局強度の計算値と比べて高い値を示している。スラブ圧縮側となる負載荷では、最大耐力に到達した $R=3.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ まで梁せん断力は曲げ終局強度の計算値と比べて低い値を示している。以上の実験結果より、ト形試験体の破壊モードはスラブ引張側となる正載荷では梁曲げ降伏先行型と、スラブ圧縮側となる負載荷ではパネルせん断破壊先行型と判断した。

3.4 パネルゾーン鉄骨の応力推移

図 10 に $R=3.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ までの各載荷 1 サイクル目ピーク時におけるパネル鉄骨のせん断応力の推移を示す。せん断応力は同図に示すゲージ貼り付け位置のひずみから Mises の降伏条件を適用したロゼット解析により算出した。

正載荷および負載荷ともに $R=1.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ のピーク時に鉄骨ウェブのせん断応力はせん断降伏強度 ($=\sigma_y/\sqrt{3}$) の値に達していることが確認でき、鉄骨ウェブの応力推移に破壊形式の影響はほぼないものと考えられる。

3.5 梁鉄骨フランジおよびスラブ鉄筋の応力分布

図 11 に $R=0.5, 1.0$ および $1.5 \times 10^{-2} \text{rad.}$ の正載荷 1 サイクル目ピーク時における梁鉄骨フランジおよびスラブ鉄筋の応力分布を示す。鉄骨および鉄筋の応力は鋼材の履歴特性をバイリニア型に仮定し、同図に示すひずみゲージ計測位置におけるひずみ計測値を用いて計算した。

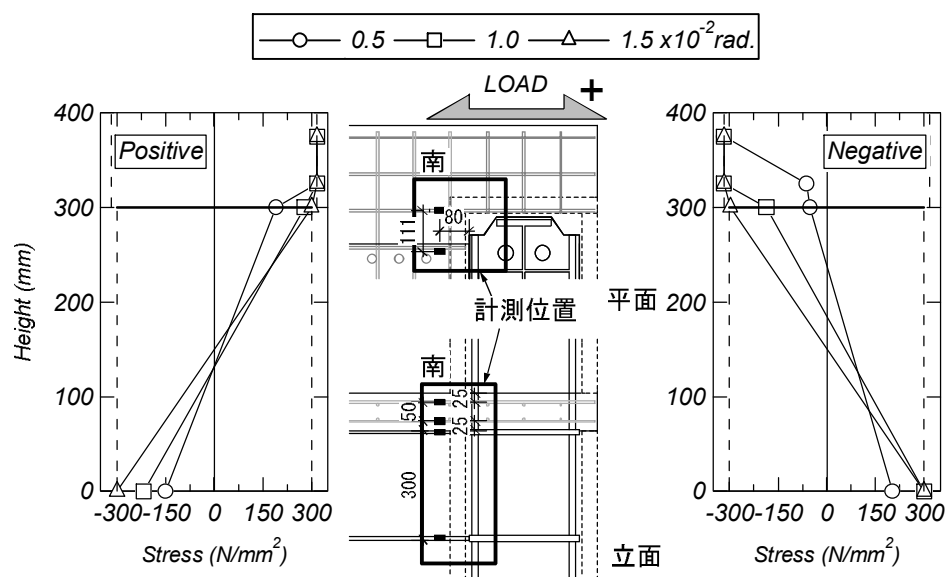


図 11 梁鉄骨フランジおよびスラブ筋の応力分布

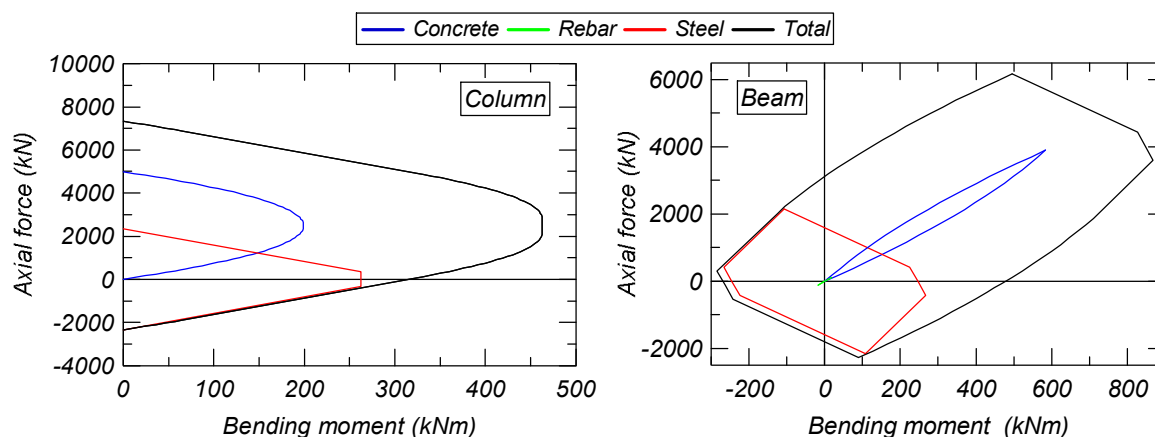


図 12 累加強度理論の概要

スラブ引張となる正載荷およびスラブ引張側となる負載荷ともに $R=1.5 \times 10^{-2} \text{ rad}$ の載荷サイクルまでにおいて梁鉄骨フランジおよびスラブ鉄筋のいずれにおいても降伏強度に達しており，正負載荷において顕著な違いは認められなかった。

4. 終局強度評価

4.1 柱および梁の曲げ終局強度

EWECs 柱および合成梁の曲げ終局強度は SRC 規準⁵⁾に示される累加強度理論によって算出した。ここで，柱集成材はコンクリートと比べてヤング係数が低いことから累加強度理論において考慮していない。EWECs 柱および合成梁の累加強度理論の概要を図 12 に示す。EWECs 柱では，内部コンクリート，鉄骨ウェブおよびフランジに分けて計算を行い，合成梁では，鉄骨ウェブ，鉄骨フランジ，スラブコンクリートおよびスラブ鉄筋に分けて計算を行った。また，梁の危険断面は柱コンクリート面に，柱危険断面はスラブを含む梁の上下端にそれぞれ仮定した。

表6 終局強度計算結果

単位：kN		正載荷	負載荷
実験	破壊形式	梁曲げ降伏 先行	パネル せん断破壊
	最大耐力 Q_{exp}	253.0	-312.5
柱曲げ耐力 Q_c		729	399
梁曲げ強度の柱せん断力換算値 cQ_b		183	324
パネルせん断強度の柱せん断力換算値 ${}_pQ_{c1}$		266	266
パネルせん断余裕度 cQ_{p1} / cQ_b		1.45	0.82
Q_{exp} / cQ_b		1.38	0.96
Q_{exp} / cQ_{p1}		0.95	1.17

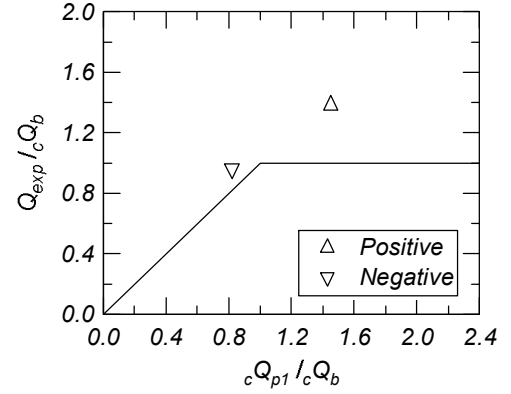


図13 実験値と計算値の比較

4.2 接合部パネルのせん断強度

パネルせん断強度は SRC 規準⁵⁾を基に提案された式(1)から式(3)より算定した²⁾。式(1)中の接合部有効面積 ${}_eA_e$ は柱コンクリート全断面と仮定した。また、パネルせん断強度を柱せん断力に換算する際には文献3)を参考にしてスラブの影響を考慮してコンクリートと梁鉄骨下フランジ重心間距離 j_b (=342.5mm) および柱鉄骨フランジ重心間距離 j_c (=264mm) から構成される領域をパネルゾーンと仮定した (式(3))。

$$Q_{p1} = {}_jF_s \cdot {}_j\delta_c \cdot {}_eA_e + 1.2 {}_{sw}\sigma_y \cdot \frac{{}_{sw}A}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

$${}_jF_s = \min \left(0.12F_c, 1.8 + 3.6 \frac{F_c}{100} \right) \quad (2)$$

$${}_eQ_{p1} = \frac{j_b \cdot l}{(l - {}_sj_c) \cdot h - j_b \cdot l} \cdot Q_{p1} \quad (3)$$

ここで、 F_c ：コンクリートの圧縮強度、 ${}_j\delta_c$ ：接合部形状により決まる係数（ト字形は2）、 ${}_{sw}\sigma_y$ ：パネル強軸方向鉄骨ウェブの降伏強度、 ${}_{sw}A$ ：パネル強軸鉄骨ウェブの断面積である。

4.3 実験結果および計算結果の比較

表6に実験結果と計算結果の柱せん断力換算値の比較を、図13に実験値と計算値の比較をそれぞれ示す。同図の縦軸は実験の最大耐力を梁曲げ強度の柱せん断力の換算値で除した値であり、横軸はパネルせん断強度の柱せん断力換算値を梁曲げ強度の柱せん断力換算値で除した値である。

スラブ引張側となる正載荷においては梁曲げ強度の計算値が柱曲げ強度およびパネルせん断強度の計算値と比べて低くなっており、実験結果により梁曲げ降伏型と判断された実験結果と対応している。また、スラブ圧縮側となる負載荷においてはパネルせん断強度の計算値が梁および柱曲げ強度の計算値と比べて低くなっており実験結果によりパネルせん断破壊型と判断された実験結果と対応している。また、正載荷における実験の最大耐力と梁曲げ強度の比率は1.38、負載荷における実験の最大耐力とパネルせん断強度の比率は1.17となり、実験の結果を概ね評価できている。

5. まとめ

本研究では、スラブ付き EWECS 柱梁ト形接合部の構造性能の把握を目的とした静的載荷実験を行い、当該試験体の履歴特性、破壊性状、鉄骨の応力分布を検討した。併せて、当該試験体を対象とした終局強度評価法

の評価精度を示した。

本報より得られた知見を以下に示す。

- 1) 本論に示すスラブ付き EWECS 柱梁ト形接合部試験体は圧縮軸力の作用する正載荷側では梁曲げ降伏型の様相を、引張軸力の作用する負載荷側ではパネルせん断破壊先行型の様相を示すことが確認された。
- 2) 引張軸力の作用する負載荷側に生じたパネルせん断破壊に伴い正載荷および負載荷の双方において耐力低下する傾向が確認された。
- 3) スラブ付き EWECS 柱梁接合部の梁曲げ強度は累加強度理論により、パネルせん断強度は SRC 規準を基にスラブの影響を考慮した式により評価可能である。

謝辞

本研究は、一般財団法人大畑財団の平成 29 年度研究助成（研究代表：鈴木卓）を受けて実施されたものです。関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 熊谷将吾，瀧野敦夫，松井智哉，岸本一蔵，倉本洋：EWECS 柱の構造性能に及ぼす外殻集成材の材種の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，No.659，pp.195-203，2011.1
- 2) 田名部智，新藤健太，松井智哉，倉本洋：国産スギ集成材を用いた EWECS 柱梁接合部の静的加力実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.1177-1182，2010.7
- 3) 鈴木卓，大塚将人，田口孝：スラブを有する EWECS 柱梁十字形接合部の構造性能，日本建築学会構造系論文集，Vol.83，No.746，pp.637-646，2018.7
- 4) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010.11
- 5) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2014.1