

# 論文 鉄骨断面積比および軸力比が異なる EW ECS 柱の構造性能に関する研究

黒川 洋一\*1・森本 征晃\*1・松井 智哉\*2・田口 孝\*3

**要旨:** 本研究では, EW ECS 柱の構造性能の把握を目的として, 鉄骨断面積比, 軸力比および上下スタブと集成材の間に設けた隙間の有無を変数とした 5 体の試験体の静的載荷実験を実施した。結果として, 基準試験体, 鉄骨断面積比を変数とした試験体および集成材の上下端部の隙間を無しとした試験体は大変形時まで安定した履歴性状を示した。軸力比を 0.3 とした試験体では最大耐力到達後, 軸力を保持できなくなり急激な耐力低下が確認された。また, 当該試験体の曲げ終局強度は一般化累加強度理論により概ね評価できていることを示した。さらに曲げ解析を実施し, 実験結果における終局強度を概ね模擬できることを示した。

**キーワード:** EW ECS 構造, EW ECS 柱, 集成材, 静的載荷実験, 終局強度評価, 曲げ解析

## 1. はじめに

EW ECS(Engineering Wood Encased Concrete-Steel)構造はコンクリート, 鉄骨および集成材から構成される合成構造である。この構造システムは内部に鉄骨コンクリートを有しており, その外周部を集成材で拘束した構造となっている。実際の施工時には, この集成材が型枠の役割を兼用するため, 経済性および施工性に優れている。

既往の EW ECS 柱の開発研究では, 外殻集成材の上下端部に隙間を設けた試験体に対してせん断スパン比, 集成材の樹種, コンクリート強度および集成材の有無を変数とした静的載荷実験が行われてきた<sup>1)</sup>。実験の結果, 曲げ降伏先行型を想定した試験体では, 集成材の縦割れに伴う耐力低下が確認されたものの, 大変形時まで安定した履歴特性を示すことが確認された。また, 集成材を有する柱試験体は有していない柱試験体と比べて最大耐力発現時の変形角の増大が確認された。

本研究では, EW ECS 柱の性能評価手法の構築に向けて, これまでの実験変数には無い鉄骨断面積比, 軸力比および集成材の上下端部の隙間の有無を変数とした EW ECS 柱の静的載荷実験を実施した。各試験体の破壊性状および耐力性能等の基本的な構造性能を把握し, 終局強度評価についての検討を行う。また, MS モデルによる曲げ解析を実施し, 実験結果との比較検討を行う。

## 2. 実験計画

### 2.1 試験体概要

試験体の形状および試験体概要をそれぞれ図-1 および表-1 に示す。試験体は曲げ降伏先行型となるように設計した 5 体の EW ECS 柱であり, 実大の 1/2 スケールである。柱は断面  $b \times D$  が 430mm 角, 内部のコンクリート断面  $b \times cD$  は 350mm 角とし, 外殻集成材の樹種はカラマツで厚さは 40mm とした。

実験変数には鉄骨断面積比, 軸力比および集成材の上下端部の隙間の有無とした。試験体 WCM11 は基準試験

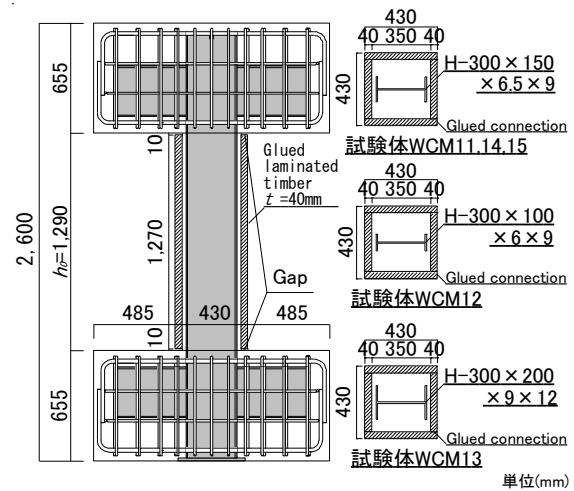


図-1 試験体形状

表-1 試験体概要

試験体	$b \times D$ (mm)	$c \times cD$ (mm)	鉄骨形状 (mm)	鉄骨比 $A_s/b_cD$ (%)	集成材厚さ (mm)	シアスパン比 $M/Q_cD$	導入軸力* $N$ (kN)	軸力比 $N/N_0$
WCM11(基準試験体)	430 × 430	350 × 350	H-300×150×6.5×9	3.70	40	1.84	1041	0.2
WCM12(鉄骨断面積比小)			H-300×100×6×9	2.85			971	
WCM13(鉄骨断面積比大)			H-300×200×9×12	5.95			1138	
WCM14(軸力比大)			H-300×150×6.5×9	3.70			1562	0.3
WCM15(隙間無し)							1041	0.2

※導入軸力は載荷初日の  $\sigma_B = 38.7N/mm^2$  を用いて算出した。

\*1 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建築・都市システム学専攻 大学院生 (学生会員)

\*2 豊橋技術科学大学大学院 建築・都市システム学系 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 矢作建設工業 (株) エンジニアリングセンター 博士(工学) (正会員)

体としており、内蔵鉄骨に H-300×150×6.5×9 を使用し、軸力比は 0.2(2.2 節で後述)である。また、既往の研究りと同様に上下のスタブおよび集成材の間には 10mm の隙間が設けられている。試験体 WCM11 に対して鉄骨断面積比を小さくした試験体を WCM12、鉄骨断面積比を大きくした試験体を WCM13 としている。試験体 WCM14 は軸力比を 0.3 とした試験体である。WCM15 は集成材の上下端部に隙間を設けない試験体であり、図-2 に示すように上下スタブと集成材の間は 25mm とし、隙間は柱躯体コンクリートの打設時に充填されることとなる。

コンクリート、鉄骨および集成材の材料特性を表-2、表-3 および表-4 にそれぞれ示す。コンクリートの材料特性は載荷初日と載荷最終日の平均値を示している。集

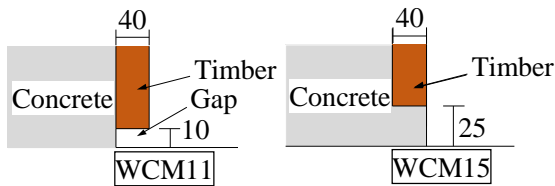


図-2 集成材下端部拡大図

表-2 コンクリートの材料特性

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
WCM11-15	39.8	31.3	3.26

表-3 鉄骨の材料特性

SS400	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	部位
PL-6.5	365	197	468	WCM11 WCM14 WCM15 ウェブ
PL-9	288	196	421	WCM11 WCM14 WCM15 フランジ
PL-6	304	200	441	WCM12 ウェブ
PL-9	282	208	435	WCM12 WCM13 フランジ ウェブ
PL-12	295	201	449	WCM13 フランジ

表-4 集成材の材料特性

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
カラマツ	43.1	10.2

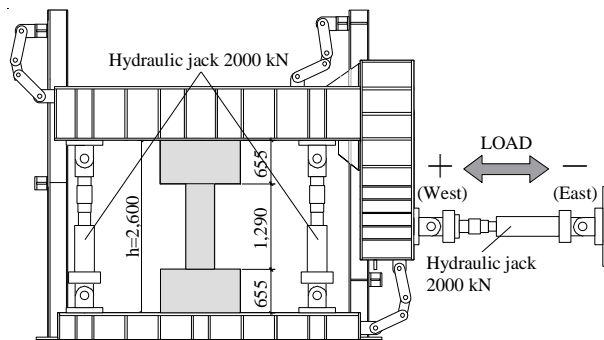


図-3 載荷装置

成材の材料特性は、文献 2) の構造用木材の強度試験法を参考に縦圧縮強度試験を行い、15 体の供試体の平均値とした。

## 2.2 載荷計画

図-3 に載荷装置を示す。試験体は PC 鋼棒を用いて載荷装置に固定した。実験は載荷装置に取り付けた 2 台の鉛直油圧ジャッキによって所定の軸力比(=N/N<sub>0</sub>, N<sub>0</sub>: 柱の軸圧縮耐力で式(1)<sup>3)</sup>より算出)になるよう一定の軸力 N を作用させた後、載荷フレームに取り付けた水平油圧ジャッキにより正負交番逆対称曲げせん断加力とした。

$$N_0 = c_{ru} \cdot \sigma_B \cdot c_A + s\sigma_y \cdot s_A \quad (1)$$

ここで、 $c_{ru}$ : 圧縮側鉄骨比に応じて定まるコンクリートの低減係数、 $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度、 $c_A$ : コンクリートの断面積、 $s\sigma_y$ : 鉄骨の降伏強度、 $s_A$ : 鉄骨の断面積である。

水平力の載荷は、柱上下端部の相対水平変位  $\delta$  と柱の内法高さ  $h_0$  で与えられる相対変形角  $R(= \delta/h_0)$  の変位制御とした。載荷サイクルは  $R=0.1 \times 10^{-2}$ ,  $0.3 \times 10^{-2}$  rad. を 1 サイクル、 $R=0.5 \times 10^{-2}$ ,  $1.0 \times 10^{-2}$ ,  $1.5 \times 10^{-2}$ ,  $2.0 \times 10^{-2}$ ,  $3.0 \times 10^{-2}$  および  $4.0 \times 10^{-2}$  rad. を 2 サイクルずつ繰り返した後  $R=5.0 \times 10^{-2}$  rad. を正載荷のみ行い、実験を終了した。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊性状

図-4 に実験終了時の集成材の最終破壊状況および集成材を剥がした内部コンクリートの最終破壊状況をそれぞれ示す。基準試験体である試験体 WCM11 では  $R=3.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルで集成材に目視による最初の割れが確認され、その後、割れ幅 2,3mm 程度の大きな縦割れまで拡幅した。  $R=5.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルで東面に集成材を分断する縦割れが確認された。

鉄骨断面積比を小さくした試験体 WCM12 では  $R=3.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルで集成材に最初の割れが発生、その後、割れ幅 2,3mm 程度の大きな縦割れが確認され、  $R=5.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルで東面に集成材を分断する縦割れが確認された。

鉄骨断面積比を大きくした試験体 WCM13 では  $R=2.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクル時で集成材に最初の割れが発生、  $R=3.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルで割れ幅 2,3mm 程度の大きな縦割れが確認され、  $R=4.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルで東西面に集成材を分断する縦割れが確認された。

基準試験体の軸力比を 0.3 とした試験体 WCM14 は  $R=1.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクル時で集成材に最初の割れが発生、  $R=2.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルで東西面の集成材に割れ幅 2,3mm 程度の大きな縦割れが確認され、  $R=3.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルでは北面、東西面の集成材を分断する縦割れ

が確認された。

集成材の上下端部に隙間を設けない試験体 WCM15 は  $R=0.5 \times 10^{-2} \text{rad}$  のサイクル時で集成材に最初の割れが発生、 $R=1.5 \times 10^{-2} \text{rad}$  のサイクル時で集成材に割れ幅 2.3mm 程度の大きな縦割れが確認され、その後同载荷サイクルで集成材を分断する縦割れまで拡幅した。

実験終了後の破壊状況では、各試験体ともに上下端部のコンクリートの圧壊と鉄骨フランジの座屈が確認された。試験体 WCM13 の内部コンクリートは、上端部において斜めのひび割れが確認され、せん断破壊の様相を呈した。

### 3.2 せん断力-変形角関係

図-5 に各試験体のせん断力-変形角関係を、図-6 に各試験体の軸変形-変形角関係をそれぞれ示す。図-5 中には実験における最大耐力点、鉄骨フランジ、ウェブに貼付したひずみゲージから確認された正負载荷それぞれの引張降伏点、集成材が大きく分断した点および曲げ強度の計算結果(4章で後述)を破線で併せて示している。

基準試験体である WCM11 では  $R=1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$  のサイクルで鉄骨フランジの降伏、 $R=3.0 \times 10^{-2} \text{rad}$  のサイクルで最大耐力が 527.3kN に達した。

鉄骨断面積比を小さくした試験体 WCM12 では

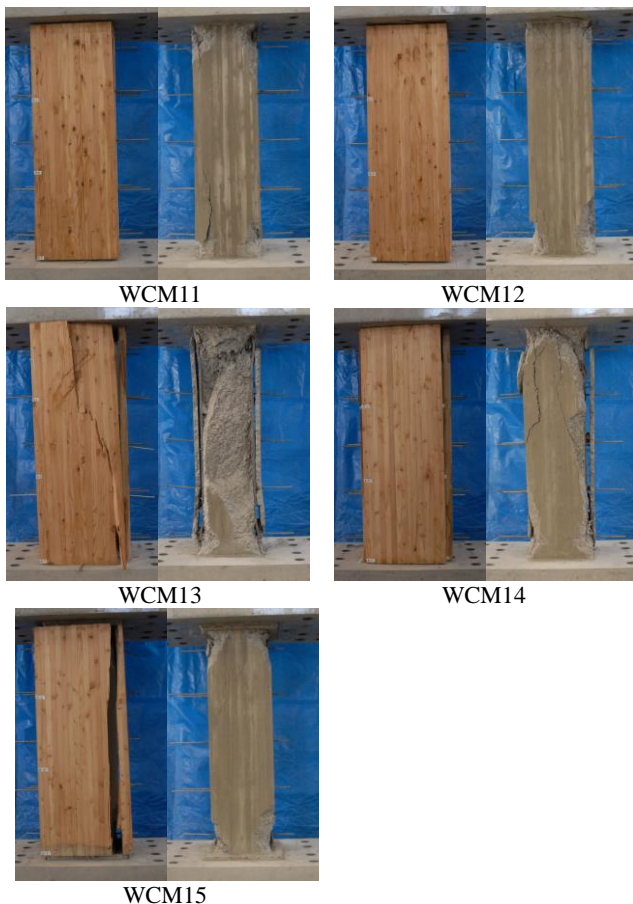


図-4 最終破壊状況

$R=0.5 \times 10^{-2} \text{rad}$  のサイクルで鉄骨フランジの降伏、 $R=3.0 \times 10^{-2} \text{rad}$  のサイクルで最大耐力が  $-468.8 \text{kN}$  に達した。

鉄骨断面積比を大きくした試験体 WCM13 では  $R=1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$  のサイクルで鉄骨フランジの降伏、 $R=3.0 \times 10^{-2} \text{rad}$  のサイクルで最大耐力の  $-678.0 \text{kN}$  に達した。 $R=4.0 \times 10^{-2} \text{rad}$  の 1 サイクル目の負荷側から軸方向変位が増大し、2 サイクル目には急激な軸方向変位の増加とともに耐力低下が確認された。この耐力低下の要因としては、図-4 の試験体 WCM13 の上部に見られる内

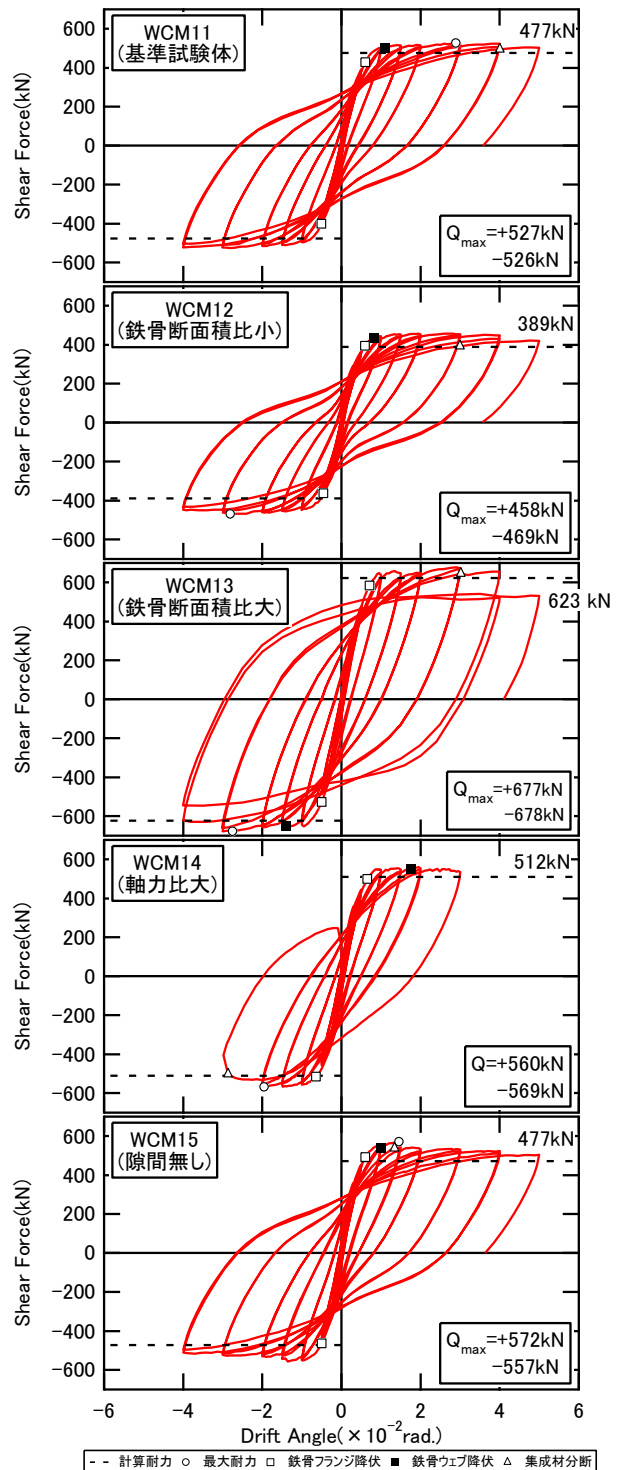


図-5 せん断力-変形角関係

部コンクリートのせん断ひび割れに起因することが考えられる。鉄骨断面積比を大きくすることで基準試験体である試験体 WCM11 より最大耐力の上昇は確認できるが、大変形時の耐力低下が確認された。

軸力比を大きくした試験体 WCM14 では  $R=1.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルで鉄骨フランジの降伏,  $R=2.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルで最大耐力が  $-568.5$  kN に達した。  $R=3.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルにおいて軸方向変位の増大とともに軸力を保持できなくなり載荷を終了した。軸力比を  $0.3$  とした場合、集成材の分断, 耐力低下が他の隙間有り試験体と比べて早期に生じることが確認された。

集成材の上下端部に隙間を設けていない試験体 WCM15 では  $R=1.0 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルで鉄骨フランジの降伏,  $R=1.5 \times 10^{-2}$  rad. のサイクルで最大耐力が  $571.5$  kN に達した。本試験体では集成材がせん断力を負担したと考えられ, 隙間を有した WCM11 と比較しても最大耐力が 1 割ほど大きくなっている。

試験体 WCM11, WCM12 および WCM15 では最終変形角まで耐力低下が小さいが, 試験体 WCM13 および WCM14 では耐力低下, 圧縮軸ひずみの増大が見られ, 鉄骨断面積比, 軸力比による変形性能の違いが確認できた。また, 全試験体ともに最大耐力が計算耐力を上回っていることが確認できた。

### 3.3 曲率分布

基準試験体である試験体 WCM11 の弾性域での高さ方向の曲率分布を図-7 に示す。曲率は鉄骨フランジに取

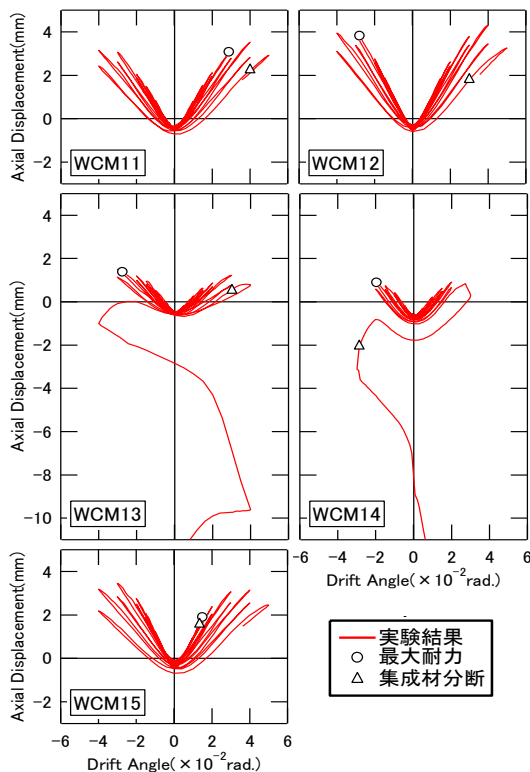


図-6 軸方向変形-変形角関係

り付けた変位計で計測した鉛直変位を用いた場合と, ひずみゲージを用いた場合を算出した。変位計による曲率分布をみると載荷開始から上下端部の領域で曲率が集中して大きくなっていることが確認できる。一方で, ひずみゲージによる曲率分布をみると柱頭から柱脚まで直線的に曲率が生じていることから, 変位計による曲率では上下端部のスタブ内の柱部分の鉄骨の変形分も含まれていることが一因と考えられる。また, 上下端部以外の区間の曲率は両計測方法とも概ね一致している。

### 4. 終局強度評価

EWECs 柱の曲げ強度は一般化累加強度理論により, せん断強度は文献 3) に示される式(2)より算出した。これらの算定法の妥当性については文献 1) で示されている。また, 両終局強度の算出において集成材の影響は考慮していない。

$$Q_{su} = \tan\theta \cdot c_b \cdot \mu \cdot c_D \cdot \sigma_B / 2 + s_{tw} \cdot s_{d_w} \cdot s_{\sigma_{wy}} / \sqrt{3} \quad (2)$$

$$\tan\theta = \sqrt{(h_0/cD)^2 + 1} - h_0/cD \quad (3)$$

$$\mu = 0.5 + c_b'/c_b \leq 1.0 \quad (4)$$

ここで,  $c_b'$ : コンクリートの有効幅 ( $=c_b \cdot b_f$ ),  $s_{bf}$ : 鉄骨フランジ幅,  $s_{d_w}$ : 鉄骨ウェブせい,  $s_{tw}$ : 鉄骨ウェブ厚さ,  $s_{\sigma_{wy}}$ : 鉄骨ウェブの降伏強度である。

表-5 に終局強度の実験値および計算値の比較を示す。各試験体ともに実験値が計算値を上回っていることが確認できる。計算値に対する実験値の比率は試験体 WCM11, WCM13, および WCM14 では  $1.09 \sim 1.11$  と

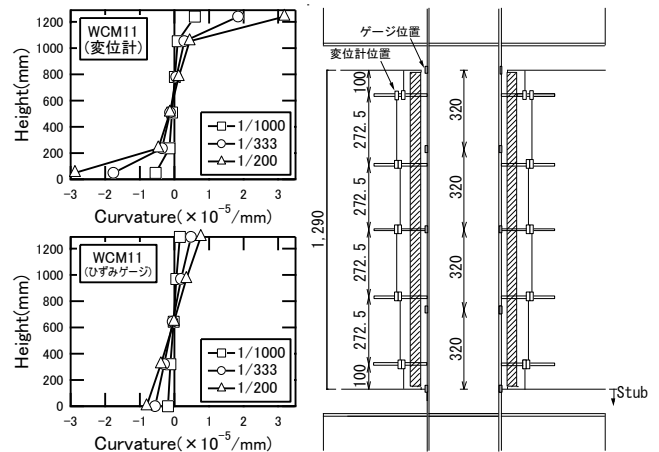


図-7 曲率分布

表-5 終局強度の実験値および計算値

試験体	WCM11	WCM12	WCM13	WCM14	WCM15
実験値 (kN)	527.3	468.8	678.0	568.5	571.5
曲げ強度 (kN)	477.3	389.1	623.4	512.5	477.3
せん断強度 (kN)	711.6	621.6	706.0	711.6	711.6
せん断余裕度 ( $Q_{su}/Q_{mu}$ )	1.49	1.60	1.13	1.39	1.49
実験値 / 曲げ強度	1.10	1.20	1.09	1.11	1.20

り、実験値と計算値の差は概ね1割程度である。鉄骨断面積比を小さくした試験体 WCM12 では、その比率が 1.2 となり、より安全側に評価している。よってこれらの集成材の上下端部に隙間を設けた試験体の曲げ強度は集成材を考慮しない一般化累加強度理論により概ね評価可能である。一方、集成材の上下端部に隙間を設けない WCM15 について実験値が計算値より 2 割程度上回っている。これは集成材の影響を考慮していないことが要因と考えられる。よって今後は集成材を考慮した算出方法の検討が必要であると考察される。

試験体 WCM13 は、せん断余裕度が 1.13 と試験体 WCM11 に比べて 3 割ほど小さい。試験体 WCM13 は  $R=5.0 \times 10^{-2}$  rad. 時の耐力低下が最大耐力の 2 割ほど生じていることから、せん断余裕度が変形性能に影響を及ぼす要因の一つであると考えられる。

### 5. 曲げ解析

本章では、耐力に集成材が影響していると考えられる集成材の上下端部に隙間を設けない試験体 WCM15 を除いた他の 4 体の試験体を対象として、MS モデルによる曲げ解析を行い、実験結果との比較と解析モデルの妥当性について検討を行う。なお、解析には市販の解析ソフト“SNAP ver.6”<sup>4)</sup>を使用した。

#### 5.1 解析手法

解析においては平面保持の仮定の下、柱断面を 40 分割とした。なお、断面はコンクリート要素と鉄骨要素から構成されるものとした。なお、断面はコンクリート要素

と鉄骨要素から構成されるものとした。図-8 にコンクリート要素および鉄骨要素の応力-ひずみ関係を示す。コンクリートの応力上昇域はトリリニアでモデル化し、圧縮強度到達後は応力低下が生じないモデルとした。また、引張応力は無視している。鉄骨フランジ幅内のモデルは拘束効果を考慮しコンクリート強度上昇係数  $K$  を 1.15 とした。鉄骨の要素は鉄鋼剛性低減型モデルを用いた。繰り返し载荷による除荷剛性は式(5)<sup>4)</sup>によって算出し、除荷カーブパラメータ  $\gamma=0.5$  とした。

$$Ku = Es \left( \frac{dsy - d'sy}{dm - d'm} \right)^\gamma \quad (5)$$

ここで、 $Ku$  : 除荷剛性、 $Es$  : 弾性係数、 $dsy$  : 圧縮側降伏歪み、 $d'sy$  : 引張側降伏歪み、 $dm$  : 圧縮側到達した歪み、 $d'm$  : 引張側到達した歪みである。塑性ヒンジ長さは  $0.2ho$  ( $ho$  : 柱内法高さ)とした。

#### 5.2 解析結果

図-9 に各試験体の全サイクルでのせん断力-変形角関係を、図-10 に各試験体の  $R=0.3 \times 10^{-2}$  rad. 時までのせん断力-層間変形角関係を示す。また、表-6 に解析結

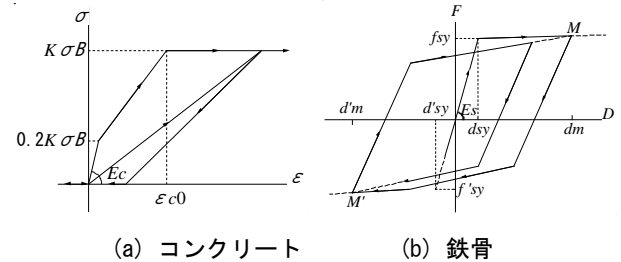


図-8 コンクリートモデルと鉄骨モデル

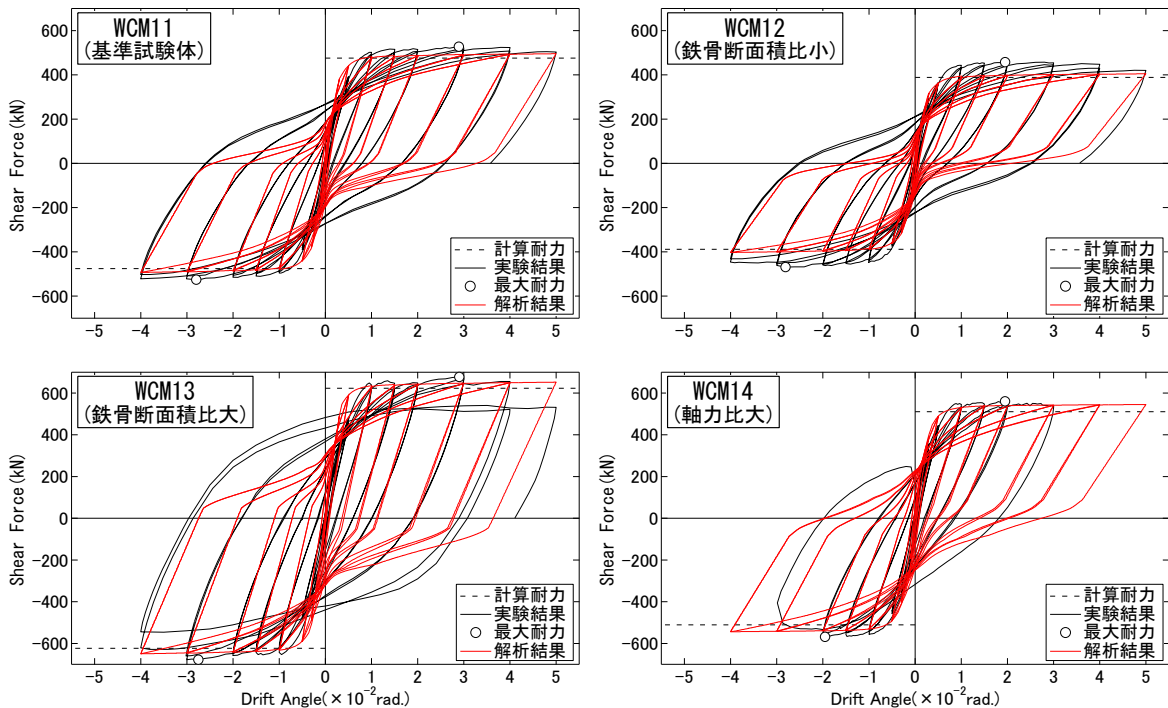


図-9 せん断力-変形角関係の比較

果の最大耐力と4章で示した一般化累加強度理論によって得られた曲げ強度との比較を示す。図-10に示すように各試験体の  $R=0.1 \times 10^{-2} \text{rad}$  時の剛性は解析結果と実験結果で1割程度の差であり概ね一致したが、その後の  $R=0.3 \times 10^{-2} \text{rad}$  以降は解析結果の剛性が実験結果より大きくなる結果が得られた。最大耐力に着目すると解析結果は、一般化累加強度理論で算出した耐力のおよそ5%

表-6 各検討における最大耐力

試験体	WCM11	WCM12	WCM13	WCM14
解析値 (kN)	495.7	404.9	652.6	545.4
曲げ強度 (kN)	477.3	389.1	623.4	512.5
実験値 (kN)	527.3	468.8	678.0	568.5
曲げ強度 / 解析値	0.96	0.96	0.96	0.94
実験値 / 解析値	1.06	1.16	1.04	1.04

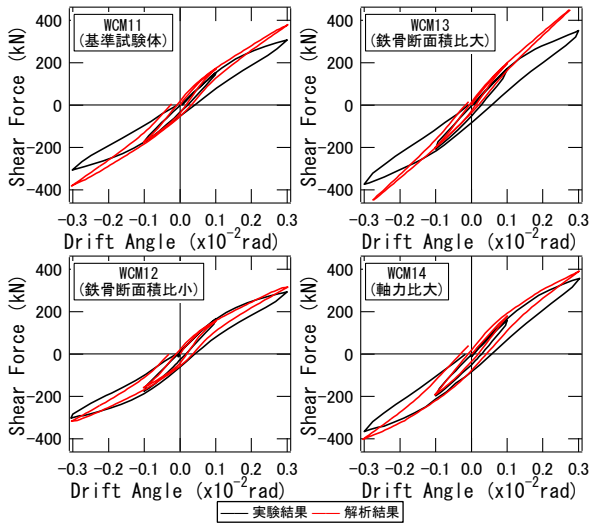


図-10 初期剛性の比較

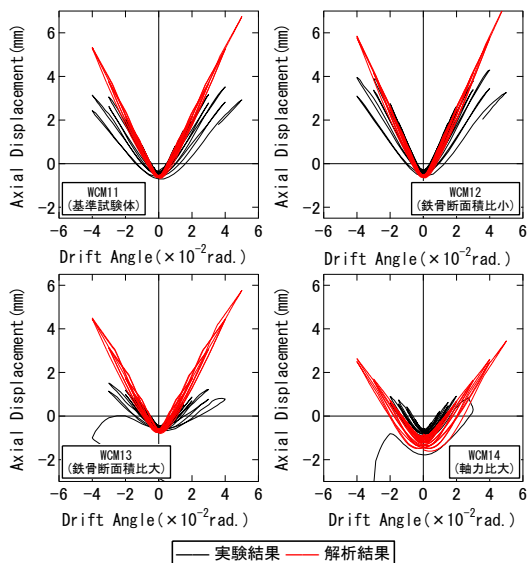


図-11 軸方向変形-変形角関係の比較

上回る程度になっている。実験結果と比較すると試験体 WCM12 では実験値は解析値の16%ほど上回る結果となっているが、他の試験体では実験値が解析結果の5%上回る程度で評価可能である。

図-11に軸方向変形-変形角関係を示す。実験結果の軸方向変位は上スタブと下スタブの相対変位、解析結果の軸方向変形は上スタブの節点から得られた鉛直変位とした。解析結果は、大変形時の試験体 WCM13 および WCM14 の実験結果で確認された急激な圧縮方向への変位を模擬することはできなかったが、小さな変形時では各試験体ともに水平変位の増大に伴い鉛直変位も増大する結果が確認でき、概ね実験結果と同じ挙動を示していることが確認できる。

試験体 WCM13 および試験体 WCM14 の急激な圧縮方向の変形の増大、また水平耐力の低下に関しては、コンクリートモデルで応力低下を考慮していないため再現ができなかったが今後の検討課題としたい。

## 6. まとめ

本研究では以下の知見が得られた。

- 1) 軸力比0.2の試験体では、大変形時まで安定した履歴特性を示すことが確認された。
- 2) 軸力比を0.3とした試験体では、実験値が計算耐力を上回ったが、大変形時において軸力を保持することができなくなり、著しい耐力低下が確認された。
- 3) 集成材の上下端部に隙間を設けた EWECs 柱の曲げ強度は集成材を考慮しない一般化累加強度理論により、概ね評価可能である。
- 4) 一般化累加強度理論による曲げ強度評価では集成材の上下端部に隙間のない試験体では過小評価となるため集成材の影響を考慮した算出方法の検討が必要である。
- 5) 曲げ解析による最大耐力は実験結果を若干下回るが、概ね曲げ耐力を評価可能である。

## 参考文献

- 1) 平松拓宏, 鈴木卓, 吉田浩輝, 田口孝: 外殻集成材の上下端部に隙間を設けた EWECs 柱の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1129-1134, 2018.7
- 2) 日本住宅・木材技術センター: 構造用木材の強度試験マニュアル, 2011.3
- 3) 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
- 4) 任意形状立体フレームの弾塑性解析 SNAP Ver.6 テクニカルマニュアル, 2012