

上下層の開口間高さの異なる CES 造複数開口耐震壁に関する研究

CES 構造
終局強度

FEM 解析
開口低減率

せん断破壊

1210118
指導教員

中 宗汰*1
鈴木 卓

1. はじめに

鉄骨と繊維補強コンクリート（FRC）から構成される CES 合成構造（Concrete Encased Steel）は、SRC 構造と比べて鉄筋工事が不要なため施工性の簡略化に伴う工期短縮およびコスト削減の期待できる新しい構造形式である。本研究において検討対象としている CES 造耐震壁では、施工性の簡略化を目的として壁縦筋の梁への定着が省略されている。また、CES 造有開口耐震壁の研究開発も進められている。開口サイズ、開口位置および開口高さを変数とした CES 造有開口耐震壁の静的載荷実験および三次元有限要素法（以下、FEM）解析の結果から、壁板および側柱に形成される圧縮ストラット形状を基に算定されるせん断終局強度式が提案された¹⁾。

一方、複数開口を有する耐震壁（以下、複数開口耐震壁）では、開口数および開口位置により異なる構造性能を発揮することが周知されており²⁾、CES 構造においても複数開口耐震壁の構造性能の把握は急務の課題と考えられる。筆者らの一人により実施された静的載荷実験の結果、両側柱に開口の隣接する試験体の最大耐力は提案されたせん断終局強度の計算結果と比べて大幅に高い値を示し³⁾、当該開口耐震壁のせん断伝達機構を検討する必要があることを示した。

そこで本研究では、文献 3)に示された CES 造複数開口耐震壁をもとに 1 層と 2 層の開口間高さを変数とした三次元 FEM 解析を実施した。本論文では、実験結果と解析結果からモデル化の妥当性を示すとともに、内部応力状態から 1 層と 2 層の開口間高さが CES 造複数開口耐震壁のせん断伝達機構に及ぼす影響の検討結果を述べる。

2. FEM 解析

2.1 解析モデル

試験体 CWO7 の形状および配筋状況を図 1 に、表 1 試験体概要を、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それぞれ示す。図 2 に試験体 CWO7 の要素分割を示す。検討対象は文献 3)の試験体 CWO7 に加えて、試験体 CWO7 から各層の開口高さ位置を変化させた 3 体のモデルの計 4 体である。図 3 にパラメトリック解析を行ったモデルの形状を示す。解析モデルは、開口が壁板の上端に位置するモデル CWO7-A、開口が 2 層梁から離れたモデル CWO7-B、および開口が 2 層梁に隣接するモデル CWO7-C である。各モデルの解析手法および材料構成則は後述する同一のものを使用する。

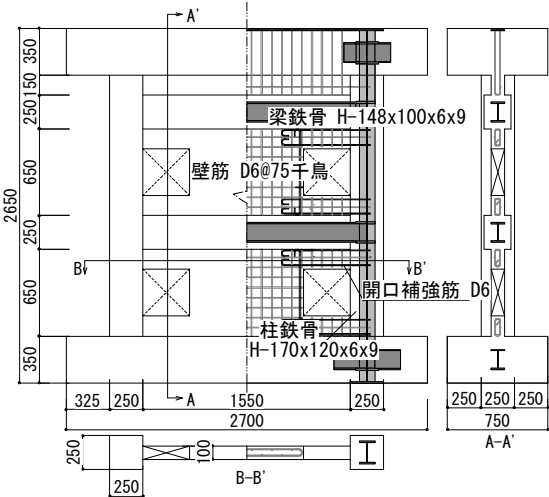


図 1 試験体形状および配筋状況

表 1 試験体概要

柱	$b \times D$	250×250 (mm)
	鉄骨	H-170×120×6×9 ($p_s=4.9\%$)
梁	$b \times D$	200×250 (mm)
	鉄骨	H-148×100×6×9 ($p_s=5.2\%$)
壁板	$t_w \times l_w$	100×1,800 (mm)
	壁筋	D6@75 千鳥 ($p_w=0.42\%$)
その他	せん断スパン比	0.9 (1,845mm)
	軸力比	$N/N_c=0.2$
開口	$h_{op} \times l_{op}$	350×350×2 (mm)
	Y_2	0.6

表 2 繊維補強コンクリートの材料特性

層	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	圧縮強度時ひずみ (μ)
1 層	42.2	29.2	2,424
2 層	32.2	22.9	2,017
3 層	35.1	25.8	2,293

表 3 鋼材の材料特性

種別・使用箇所	降伏点 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
柱 PL-6 (SS400) ウェブ	395.3	208.2	479.4
柱 PL-9 (SS400) フランジ	309.4	211.3	434.9
梁 PL-6 (SS400) ウェブ	383.1	204.6	462.4
梁 PL-9 (SS400) フランジ	314.8	207.8	415.6
D6 (SD295) 壁筋	393.7	186.2	540.3

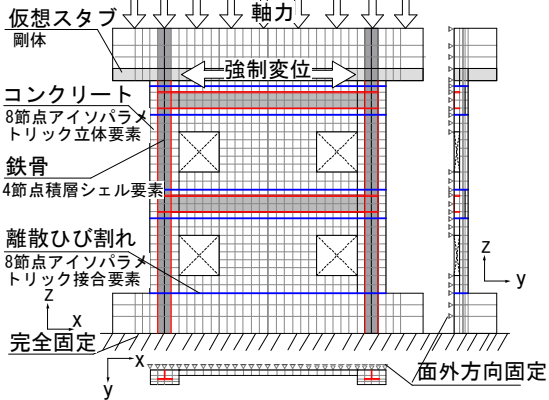


図 2 要素分割

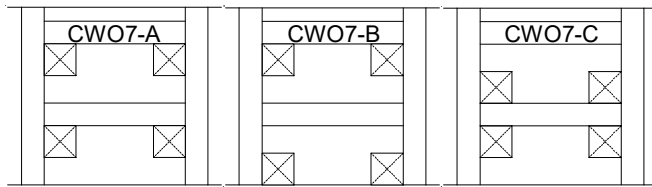


図3 解析モデル

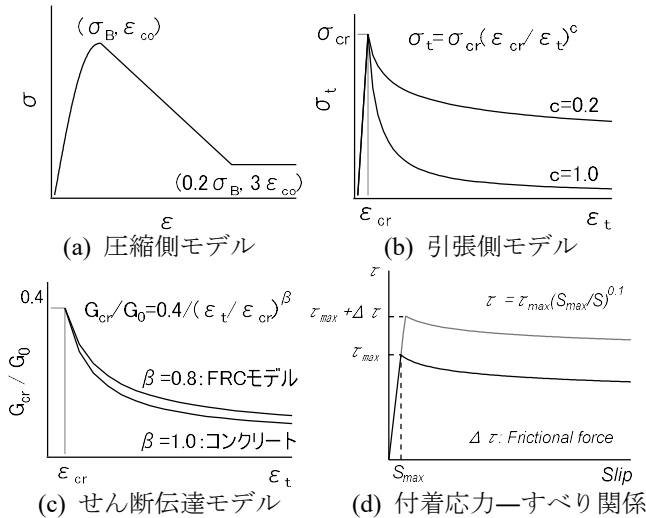


図4 材料構成則

試験体は面外方向の対称性を考慮して片側半分のみをモデル化した。材料特性は表2および表3の値を用いた。また、コンクリートの引張強度は式(1)より算定した。

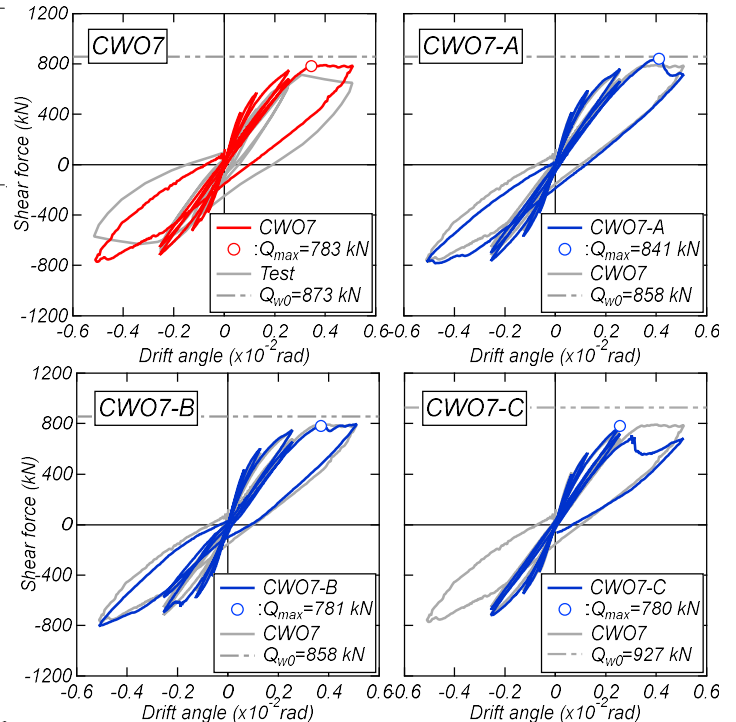
$$\sigma_{cr} = 0.33\sqrt{\sigma_B} \quad (1)$$

コンクリートは8節点アイソパラメトリック立体要素でモデル化し、壁筋はコンクリート要素内に埋め込み鉄筋として定義した。解析試験体は、壁縦筋は梁への定着を省略しているため、8節点アイソパラメトリック接合要素による離散ひび割れを壁板と梁およびスタブの間に仮定した。鉄骨は4節点積層平板シェル要素でモデル化し、鉄骨とコンクリートの節点間に8節点アイソパラメトリック接合要素を定義することで付着の影響を考慮した。本解析では実験と同様のせん断スパン比0.9とするため試験体の加力スタブの上端から実験の想定加力高さまで剛な仮想スタブを定義し、仮想スタブ下端の節点に強制変位を与えた。軸力は加力スタブ上端に分布加重として与えた。

境界条件は基礎スタブにおける下端すべてを固定とし、試験体切断面におけるすべての節点の面外方向変位を固定とした。解析は収束計算が不安定になった時点で終了した。なお、解析に使用したプログラムは市販ソフトの「FINAL」である。

2.2 材料構成則¹⁾

コンクリートの応力-ひずみ構成モデルは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルにより表現した。また、ひび割れは非直交ひび割れモデルにより表現した。三軸応力下の圧縮破壊条件はWillam-Warnkeの5パラメータモデルに大沼らの係数を用いて定義した。応力-ひずみ関



係の応力上昇域は修正 Ahmad モデルとし、軟化域は材料試験を参考に図4(a)に示す多折線モデルとした。引張側におけるひび割れ後のテンションステイニング特性は出雲らの提案モデル（壁： $c=0.2$ 、柱・梁： $c=1.0$ 、 c ：モデル係数）を用いた（図4(b)参照）。履歴モデルは繰り返しの軟化挙動を考慮した曲線モデルとした。ひび割れ後のせん断伝達特性は図4(c)に示す Al-Mahaidi モデル（ $\beta=1.0$ の場合）に対してせん断伝達剛性がわずかに大きくなるように $\beta=0.8$ として多折線でモデル化した。

離散ひび割れの復元力モデルは圧縮側を剛、引張側をひび割れ後の応力を零とした。ひび割れ面のせん断応力-すべり量関係は文献4)を参考にバイリニア型モデルとした。最大せん断応力はコンクリートの引張強度（式(1)）とし、最大せん断応力時すべり量は 0.05mm とした。また、摩擦係数を1.0として面外圧縮力 $\Delta\tau$ に伴うせん断応力の増大を考慮した。

鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルとし、履歴特性は等硬化化則を仮定した。付着応力-すべり関係は最大付着応力までを線形で仮定し、最大付着応力後の軟化域は文献5)を参照した。最大付着応力は $\tau_{max}=0.05C/B\times\sigma_B$ （ C ：かぶり厚、 B ：フランジ幅）とした。また、摩擦係数を0.65として、面外圧縮力 $\Delta\tau$ に伴う付着応力の増大を考慮した（図4(d)参照）。

2.3 実験結果および解析結果の比較

図5に試験体CW07の実験と解析の履歴特性の比較および各モデルの履歴特性をそれぞれ示す。同図では解析における最大耐力点を○印で、せん断終局強度式により

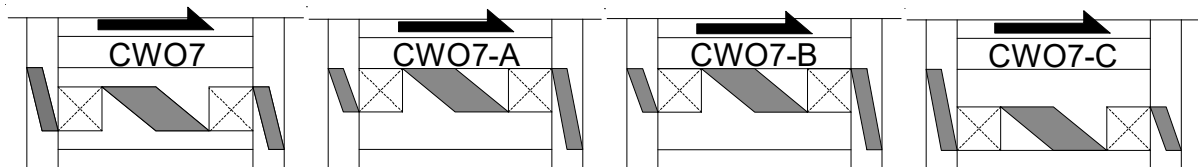


図6 仮定したストラット形状

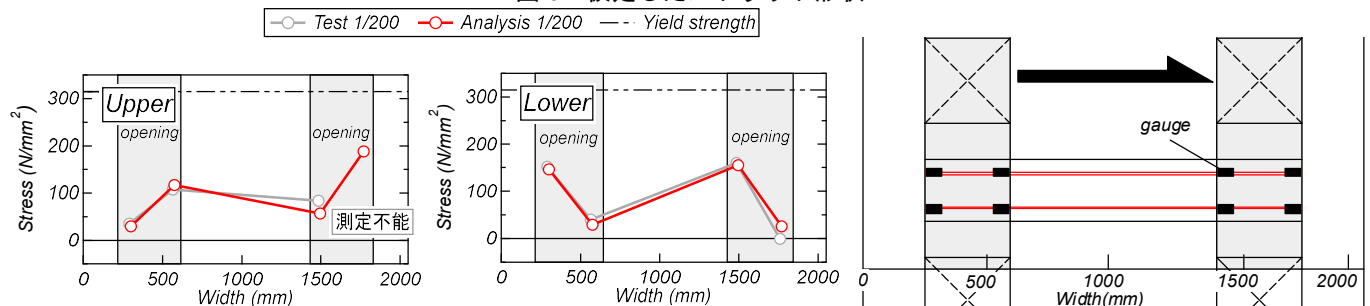


図7 鉄骨フランジの応力分布

求めたせん断終局強度を灰色の破線でそれぞれ示し、仮定した各モデルの圧縮ストラット形状は図6に示す。

試験体 CWO7 では、解析の初期剛性は実験のものとは比べて高い。これは、実験における載荷前のコンクリートの初期ひび割れの影響を解析において考慮出来ていないことが要因のひとつと考えられる。しかしながら、解析では、 $R=1/200\text{rad.}$ の載荷サイクルにおいて2層開口間壁板コンクリートのひずみ軟化に伴う剛性低下が確認され、解析の履歴特性および損傷状況は実験のものと良好に対応した。

パラメトリック解析に着目すると、 $R=1/400\text{rad.}$ の載荷サイクルまでの各モデルの剛性およびせん断力に大きな差異はみられない。その後、 $R=1/200\text{rad.}$ の載荷サイクルにおいて2層開口間の壁板コンクリートのひずみ軟化に伴う剛性低下がみられた。開口が壁板の上端に位置するモデル CWO7-A の最大耐力は試験体 CWO7 と比べて高く、開口の高さ位置の影響が伺える。しかし、上下層の開口間高さの異なる試験体 CWO7、モデル CWO7-B およびモデル CWO7-C の最大耐力に大きな差は認められなかった。

図7に実験および解析結果の $R=1/200\text{rad.}$ の載荷サイクルピーク時における1層梁鉄骨フランジの応力分布を示す。実験における梁鉄骨フランジの応力は同図に示す試験体 CWO7 の1層梁鉄骨の上下フランジに貼り付けたひずみゲージから得られたひずみを用いて計算した。解析における梁鉄骨フランジの応力は実験のひずみ計測位置に該当する鉄骨フランジ要素の値である。

上下フランジともに解析の各計測位置における応力の値は実験のものと比べて測定不能箇所を除き概ね一致する傾向が認められた。

以上の解析結果から、本論に示す解析モデルは実験の履歴特性、破壊性状および梁鉄骨フランジの応力分布を概ね再現したものと判断し、次章では CES 造複数開口耐震壁のせん断伝達機構に及ぼす各層の開口間高さの影響を検討する。

3. 内部応力状態

3.1 コンクリートの面内方向せん断応力分布

図8に各モデルの最大耐力時におけるコンクリートの面内 (XZ 方向、図2参照) 方向せん断応力度分布を示す。せん断応力度は各試験体の面外方向中央となる切断面の値である。

開口が2層梁に隣接するモデル CWO7-C を除く各試験体では、2層開口間の壁板から1層圧縮側柱にかけて、および2層引張側柱から1層開口間の壁板にかけてのせん断伝達を確認できる。一方のモデル CWO7-C では、2層開口間の壁板から1層開口間の壁板にかけてのせん断伝達を確認できる。開口高さ位置の異なる試験体 CWO7 とモデル CWO7-A をみると、両試験体の2層における開口間の壁板に生じるせん断応力分布に顕著な差は認められない。しかし、開口が壁板上端に位置するモデル CWO7-A における1層開口間の壁板に生じるせん断応力のレベルは試験体 CWO7 のものと比べて高くなる傾向が認められた。次に、各層開口間高さの異なる試験体 CWO7、モデル CWO7-B およびモデル CWO7-C をみると、開口が2層梁から離れたモデル CWO7-B のせん断応力のレベルは試験体 CWO7 およびモデル CWO7-C のものと比べて1層開口間の壁板では低く、上下層開口間の壁板では高い。一方で、開口が2層梁に隣接するモデル CWO7-C の2層梁におけるせん断応力のレベルは試験体 CWO7 およびモデル CWO7-B のものと比べて低い。

3.2 負担せん断力の高さ方向分布

図9に各モデルの最大耐力時における負担せん断力の分布 (各層の開口中央部) を示す。負担せん断力は、鉄骨を含む圧縮側の柱、引張側の柱、および開口間の壁板に区別して示した。せん断力はコンクリートと鉄骨に生じる XZ 方向せん断応力に要素面積を乗じて算出した。

開口高さ位置の異なる試験体をみると、開口が壁板の上端に位置するモデル CWO7-A の負担せん断力は開口が

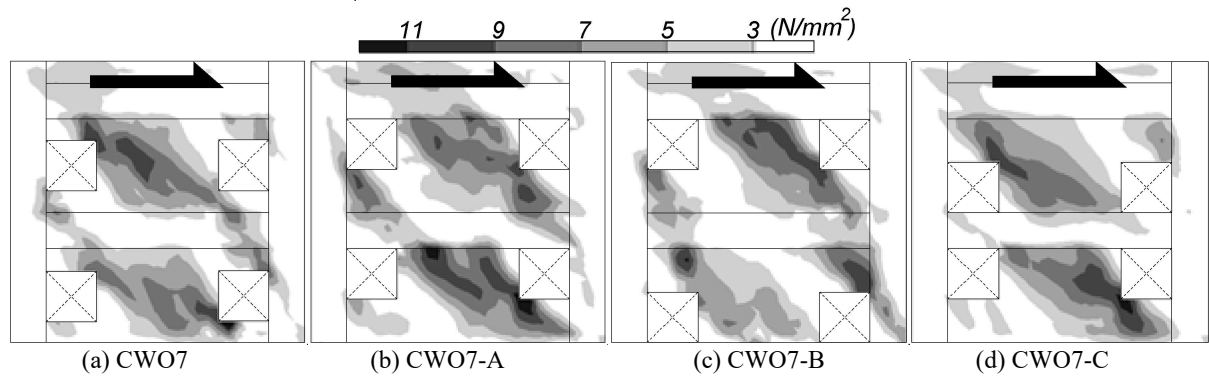


図8 面内方向せん断応力度分布

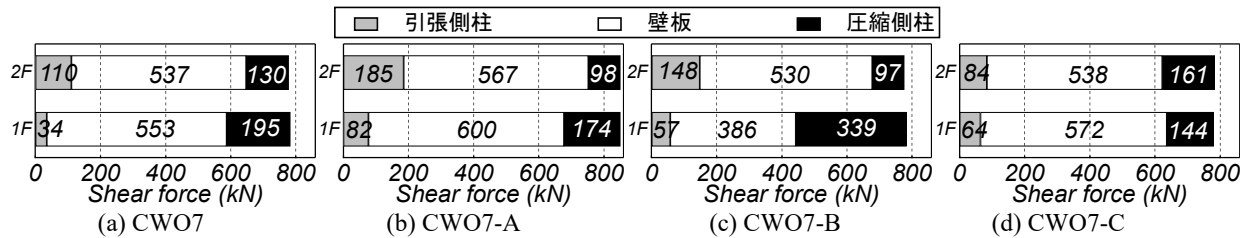


図9 負担せん断力の高さ方向分布

壁板の中央高さに位置する試験体 CWO7 のものと比べて、各層の圧縮側柱では低く、引張側柱と壁板では高い。また、両試験体ともに2層から1層にかけて圧縮側柱と壁板のせん断力の増加および引張側柱のせん断力の減少が認められたものの、その差分に顕著な違いはみられない。

開口間高さの異なる試験体 CWO7, モデル CWO7-B およびモデル CWO7-C をみると、開口間高さの減少に伴い1層圧縮側柱と2層引張側柱のせん断力の減少、および2層圧縮側柱と1層壁板のせん断力の増加が顕著である。また、各試験体の2層壁板のせん断力は同程度の値である。すなわち、上下層の開口間高さの減少に伴い3.1節で述べた2層開口間の壁板から1層圧縮側柱にかけておよび2層引張側柱から1層開口間の壁板にかけてのせん断伝達は2層開口間の壁板から1層開口間の壁板にかけてのせん断伝達に変化したものと判断された。

4. まとめ

本研究では、上下層の開口間高さを変数とした CES 造複数開口耐震壁の FEM 解析を実施し、当該試験体の内部応力状態を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 本論の解析モデルは実験における履歴特性および梁鉄骨フランジの応力分布を概ね再現可能である。
- 2) 開口が壁板の上端に位置するモデルの最大耐力は壁板の中央高さに位置する試験体のものと比べて高くなる傾向が認められた。一方の上下層の開口間高さの異なるモデルの最大耐力に大きな差は認められなかった。

- 3) 開口が壁板の上端に位置するモデルの負担せん断力は壁板の中央高さに位置する試験体と比べて、引張側柱および壁板では高く、圧縮側柱では低くなり、開口高さ位置の影響が確認された。
- 4) 上下層の開口間高さの減少に伴い2層開口間の壁板から1層圧縮側柱にかけておよび2層引張側柱から1層開口間の壁板にかけてのせん断伝達は2層開口間の壁板から1層開口間の壁板にかけてのせん断伝達に変化する傾向が認められた。

参考文献

- 1) 藤谷涼, 鈴木卓, 藤本周, 倉本洋: CES 造有開口耐震壁のせん断終局強度, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, pp. 361-366, 2015.7
- 2) 櫻井真人, 倉本洋, 松井智哉: 複数開口を有する RC 造耐震壁のせん断強度算定法, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 77, No. 679, pp. 1445-1453, 2012.9
- 3) 鈴木卓: CES 造耐震壁の構造性能に関する研究(その17)複数開口耐震壁の構造性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp. 1399-1445, 2019.9
- 4) 日本建築学会: 壁式プレキャスト構造の鉛直接合部の挙動と設計法, 1989.4
- 5) 後藤康明, 穴吹拓也, 城攻: SRC 造内柱梁接合部におけるせん断応力分担に関する非線形有限要素解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp. 1089-1090, 2005.9