

論文 上下層の開口間高さが CES 造複数開口耐震壁のせん断伝達機構に及ぼす影響

中 宗汰^{*1}・鈴木 卓^{*2}

要旨：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三次元 FEM 解析を行った。その結果、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ものの、上下層の開口間の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いことを示した。また、上下層の開口間高さの減少に伴い上層開口間の壁板から下層圧縮側柱にかけて、および上層引張側柱から下層開口間の壁板にかけてのせん断伝達機構は上層開口間の壁板から下層開口間の壁板にかけてのせん断伝達機構に変化することを示した。

キーワード：CES 構造, FEM 解析, せん断破壊, 終局強度, 開口低減率

1. はじめに

鉄骨および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¹⁾。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の結果および三次元有限要素法 (以下, FEM) 解析の結果から, 壁板および側柱において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^{2)~4)}。

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⁵⁾, 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⁶⁾, 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 6) 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, 静的載荷実験の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. 静的載荷実験の概要⁶⁾

2.1 試験体

試験体は, 中高層壁フレーム建築物における連層耐震壁の下部 2 層を想定した実大の 1/3 スケールのものであり, 試験体 CWO7 と呼称する。図-1 に試験体形状と配筋状況を, 表-1 に試験体概要をそれぞれ示す。耐震壁は階高 h が 900mm, 柱中心距離 l_w が 1,800mm, 壁厚 t_w が 100mm, 側柱断面が 250mm 角および壁梁の幅×せいはそれぞれ 200×250mm である。開口は形状 $l_{op} \times h_{op}$ が 350×350 mm が各層に 2 つ配置されており, 文献 7) に示される開口低減率は式(1)に示す見付面積による低減率 γ_2 で決まるように設計された。また, 図-1 に示すように本試験体では, 壁縦筋は梁内およびスタブに定着せず壁板内にフックが設けられており, 壁横筋は側柱ウェブに溶接されている。

$$\gamma_2 = 1 - 1.1 \times \sqrt{\frac{h_{op} l_{op}}{hl}} \quad (1)$$

ここで, h : 当各階壁部材高さ, l : 全せいである。

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それぞれ示す。FRC に使用した繊維は直径が 0.66mm, 長さが 30mm のビニロンファイバー(RF4000)であり, 体積混入率は 1.0% である。

2.2 載荷方法

図-2 に載荷装置を示す。試験体は載荷フレームに PC 鋼棒で固定され, 水平力の正負繰り返し載荷は反力壁に取り付けた水平オイルジャッキ (2,000kN) によって行った。さらに, 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) により柱軸力比 N/N_0 (N : 軸力, N_0 : 鉄骨を含む柱の軸耐力) が 0.2 となる一定軸力 $N=1,370\text{kN}$ を試験体頂部に作用させつつ, せん断スパン比が 0.9 (1,845mm) となるように作用せん断力に対応さ

*1 高知工科大学 システム工学群 建築都市デザイン専攻 (学生会員)

*2 高知工科大学 システム工学群 講師 博士 (工学) (正会員)

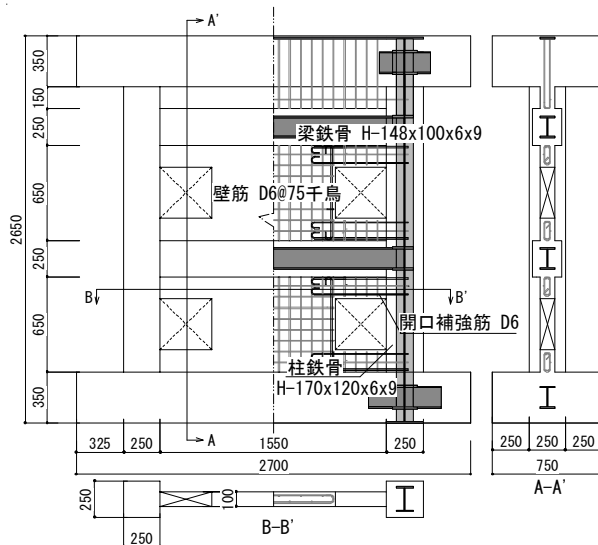


図-1 試験体形状および配筋状況

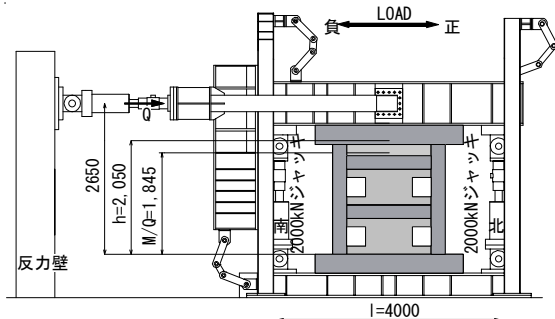


図-2 荷重装置

せて当該鉛直オイルジャッキを制御することで試験体に付加モーメントを作用させた。実験は試験体頂部の水平変位 δ を計測位置の高さ ($h=2,050\text{mm}$) で除した相対部材角 R ($=\delta/h$) で制御された。

2.3 実験結果の概要

図-3 に試験体 CWO7 の履歴特性を示す。同図では最大耐力点を○印で、式(3)および(4)に示すせん断終局強度式²⁾の計算結果を灰色の破線でそれぞれ示している。当該試験体の耐力計算には、後述するように2層の破壊が顕著にみられたため、2層のコンクリート強度の値を用いた。記号の詳細は文献を参照されたい。図-4 に対象試験体に仮定するストラットの形状を示す。

$$Q_{w0} = \sum 0.5 v \cdot \sigma_B \cdot \sin \theta_{pi} \cdot \cos \theta_{pi} \cdot t_{pi} \cdot l_{pi} \quad (3)$$

$$v = -0.016\sigma_B - 0.16 \frac{M}{QL} + 0.36 \frac{N}{bD\sigma_B} + 0.36p_w + 1.23 \quad (4)$$

$R=1/800\text{rad}$ の荷重サイクルにおいて2層壁板中央から1層梁にかけてせん断ひび割れの発生が確認された。 $R=1/400\text{rad}$ の荷重サイクルにおいて1層壁板および両側柱にせん断ひび割れの発生が認められた。 $R=1/200\text{rad}$ の荷重サイクルにおいて、2層開口間の壁板コンクリートのせん断破壊の発生に伴う耐力低下が確認された。その後、 $R=1/133\text{rad}$ の荷重サイクルにおいて、2層両側柱に多数のせん断ひび割れの発生が確認された。

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	$N/N_0=0.2$
開口	$l_{0p} \times l_{0p}$	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

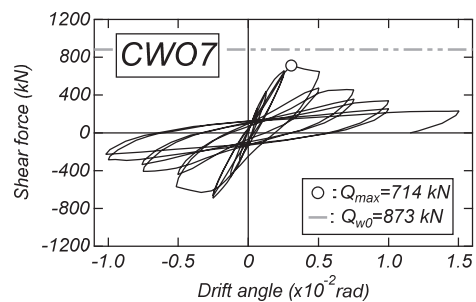


図-3 履歴特性

せん断終局強度式の計算結果 (873kN) は実験の最大耐力 (714kN) と比べて高い値を示した。せん断終局強度式は CES 造単開口耐震壁の実験における最大耐力を精度よく評価することが明らかになっている²⁾⁴⁾。これらから、本せん断終局強度式が開口数および開口位置の影響を適切に考慮できていないことが考えられる。

次章からは当該試験体を対象とした三次元 FEM 解析を実施し、1層と2層の開口間高さがせん断伝達機構に及ぼす影響を検討する。

3. FEM 解析

3.1 解析モデル

図-5 に試験体 CWO7 の要素分割を示す。検討対象は前述の試験体 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-6 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。

試験体は面外方向の対称性を考慮して片側の半分のみ

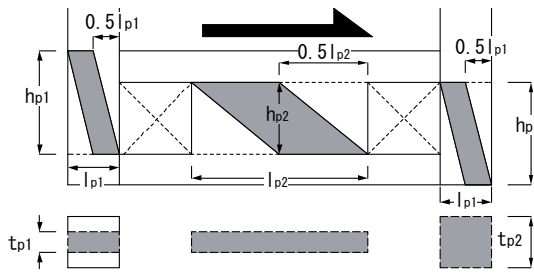


図-4 圧縮ストラットの形状

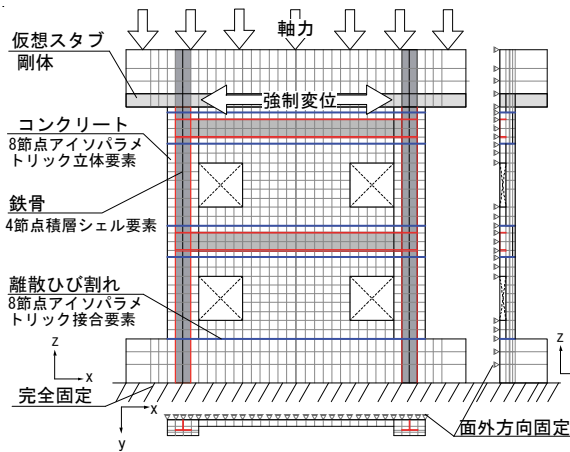


図-5 要素分割

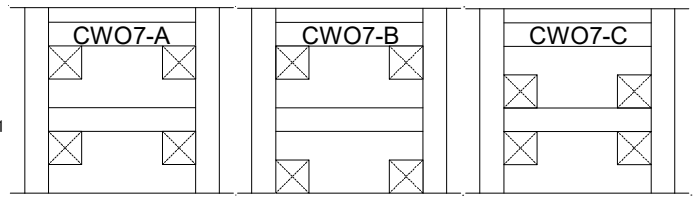


図-6 解析モデル

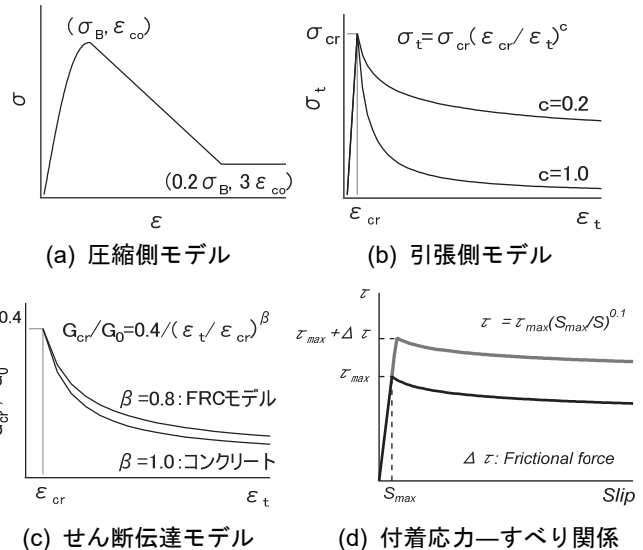


図-7 材料構成則

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(5)により算出した。

$$\sigma_{cr} = 0.33\sqrt{\sigma_B} \quad (5)$$

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。解析対象試験体では、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。

3.2 材料構成則²⁾

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⁸⁾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⁹⁾を用いて定義した。コンクリートの繰返し応力下における履歴モデルは、除荷と再載荷過程における軟化挙動を考慮した曲線モデル¹⁰⁾を使用した。応力—ひずみ関係の応力上昇域は修正 Ahmad モデル⁹⁾とし、軟化域は材料試験を参考に図-7(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ィフ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)¹¹⁾を用いた(図-7(b)参照)。履歴モデルは繰返しによる軟化挙動を考慮した曲線モデル¹²⁾とした。ひび割れ後のせん断伝達特性は図-7(c)に示す Al-Mahaidi モデル¹³⁾ ($\beta=1.0$ 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¹⁴⁾。ひび割れ面のせん断応力—すべり量関係は文献 15)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(5))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、履歴特性は等方硬化則を仮定した。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

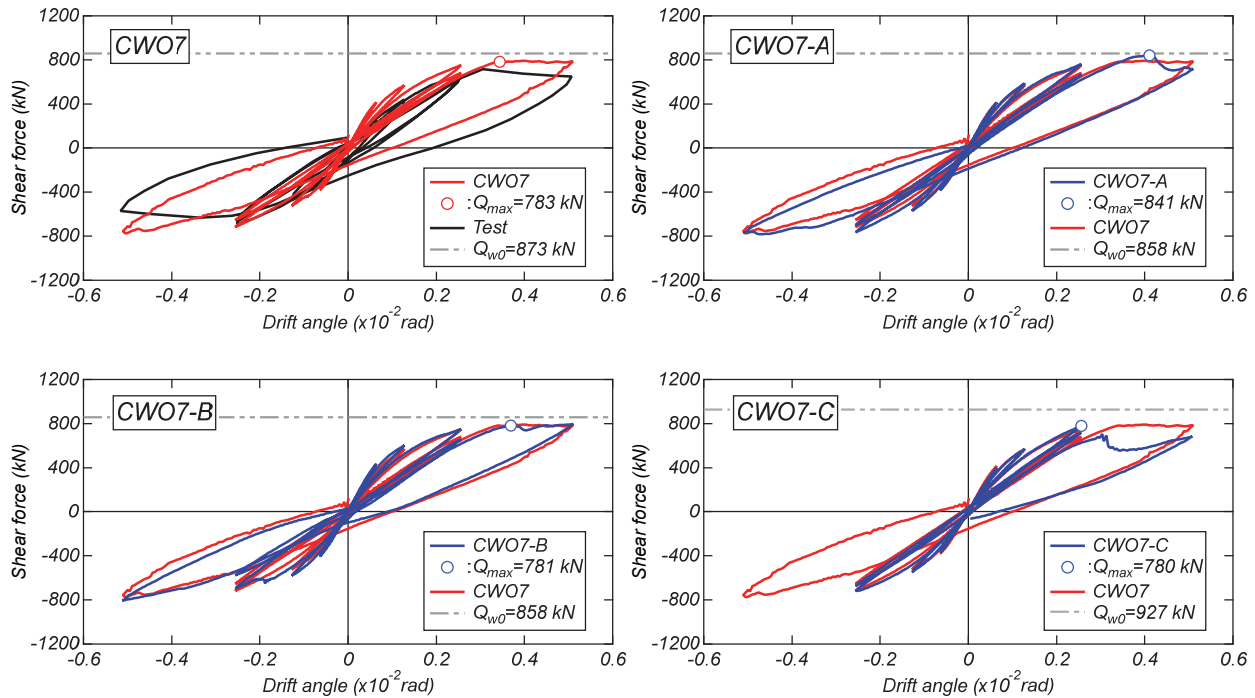


図-8 各モデルの履歴特性

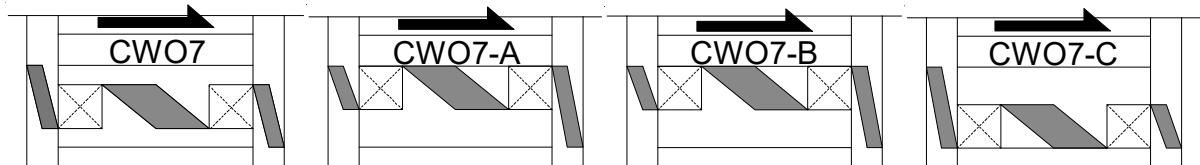


図-9 仮定したストラット形状

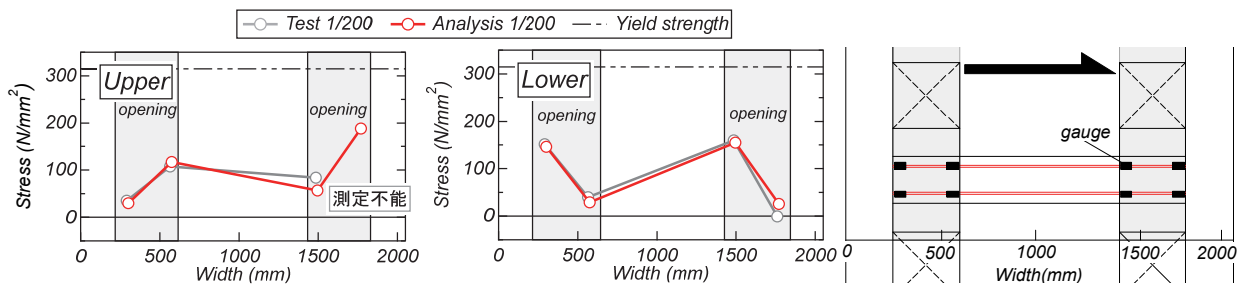


図-10 鉄骨フランジの応力分布

軟化域は文献 16)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¹⁷⁾。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-7(d)参照)。

3.3 実験結果および解析結果の比較

図-8に試験体 CWO7 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、式(3)より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-9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、実験における荷重前のコンクリートの初期ひび割れの影響を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、 $R=1/200$ rad の荷重サイクルにおいて 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、 $R=1/400$ rad の荷重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認められない。その後、 $R=1/200$ rad の荷重サイクルにおいて 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確認された。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

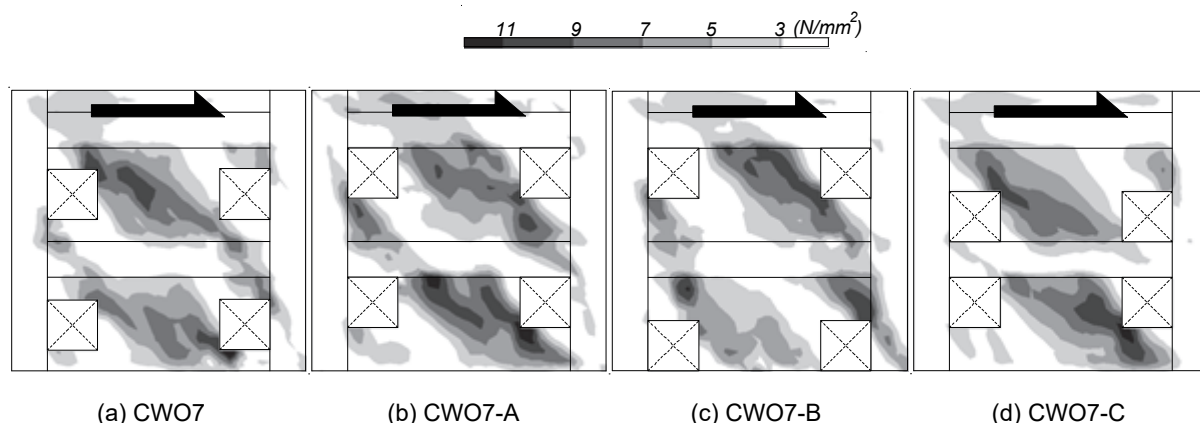


図-11 面内方向せん断応力度分布

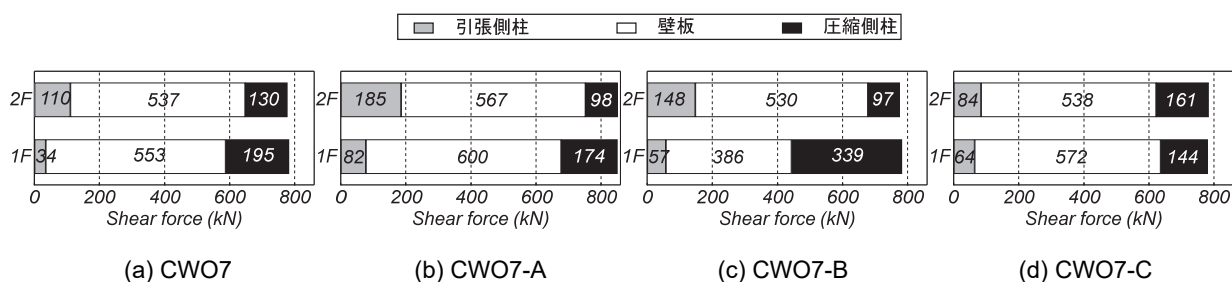


図-12 負担せん断力の高さ方向分布

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-10 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およびひずみゲージ貼り付け位置を示す。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は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および梁鉄骨フランジの応力分布を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。

4. 内部応力状態

4.1 コンクリートの面内方向せん断応力度分布

図-11 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-5 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における中心位置のものである。

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。

4.2 負担せん断力の高さ方向分布

図-12 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の 3 つに区別して示した。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認められない。

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4.1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。

5. 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三次元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) 鈴木卓, 他2名: CES造耐震壁の構造性能に及ぼす壁筋の定着状態の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 1189-1194, 2010.7
- 2) 藤谷涼, 他3名: 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

- 3) 鈴木卓, 他2名: CES有開口耐震壁のせん断伝達に及ぼす上下層開口位置の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No. 731, pp. 135-143, 2017.1
- 4) 神鳥拓也, 鈴木卓: 開口高さが異なるCES造有開口耐震壁の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 2, pp. 301-306, 2017.1
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保障型耐震設計指針・同解説 1997.7
- 8) 米澤健次, 長沼洋一, 江戸宏彰: RC構造物の三次元繰返しFEM解析手法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 77, No. 681, pp. 1801-1807, 2012.11
- 9) 長沼一洋: 三軸圧縮下におけるコンクリートの強度特性, 日本建築学会構造系論文集, No. 474, pp. 163-170, 1995.8
- 10) 長沼一洋, 大久保雅章: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, No. 536, pp. 135-142, 2000.10
- 11) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol. 25, No. 9, pp. 134-147, 1987.9
- 12) 長沼一洋, 栗本修, 江戸宏彰: 鉄筋コンクリート壁体のFEMによる正負繰返し及び動的解析, 日本建築学会構造系論文集, No. 544, pp. 125-132, 2001.6
- 13) Al-Mahaidi, R. S. H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Beam Member, Report 78-1, Dept. of Structural Engineering, Cornell Univ., 1979.1
- 14) 三島徹也, 山田一字, 前川宏一: 正負交番載荷下における鉄筋コンクリートひびわれ面の局所的挙動, 土木学会論文, Vol. 16, No. 442, pp. 161-170, 1992.2
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 佐藤政勝, 田中祐人: 鋼管, H型鋼の付着強度に及ぼすコンクリートの拘束効果について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 15, No. 2, 1993.7