

論文 CES 有開口耐震壁のせん断終局強度

藤谷 涼*1・鈴木 卓*2・藤本 周*3・倉本 洋*4

要旨: 本研究は CES 有開口耐震壁のせん断終局強度式の構築を目的として開口サイズの異なる試験体を用いた静的載荷実験および FEM 解析を実施した。実験を模擬した FEM 解析における負担せん断力の分布から、開口両端に形成される圧縮ストラットの形状を示した。また、上記を考慮して提案したせん断終局強度式は実験結果を精度良く評価できることを示した。

キーワード: CES 構造, 壁筋の定着状態, 開口面積, FEM 解析, せん断終局強度

1. はじめに

鉄骨と繊維補強コンクリートで構成される CES (Concrete Encased Steel) 合成構造システムにおける耐震壁は、CES 周辺フレームが壁板に対して高い拘束効果を有しているため、壁縦筋の梁への定着を省略することが可能である。静的載荷実験の結果および FEM 解析の結果から、せん断破壊型および曲げ破壊型試験体ともに壁縦筋の定着を省略した CES 耐震壁は定着したもの比べて優れた変形性能を有することも明らかになっている¹⁾²⁾。また、静的増分解析を援用する限界耐力計算法に必要となる CES 耐震壁の構造解析モデルについての検討も進めており³⁾、CES 構造の実用化に向けた準備も整いつつある。

一方で、建物の設計の際、意匠のおよび設備的な観点から開口耐震壁を設ける場合が多く、CES 構造においても有開口耐震壁の構造性能評価は喫緊の課題である。現在、有開口耐震壁のせん断強度の算定は日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準⁴⁾に示される開口低減率を用いた手法が一般的である。また、筆者らの一人は有開口耐震壁のせん断強度としてストラット式を提案しており⁵⁾、ストラット式の CES 耐震壁への適用性も把握する必要がある。

そこで、本論の前半では開口面積を変数とし、壁中央に開口を有する CES 耐震壁の静的載荷実験を行い、その構造性能を検討する。後半では、前半において示した試験体を対象とした三次元 FEM 解析を行い、CES 有開口耐震壁のせん断終局強度評価について検討する。

2. 実験概要

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 2.2 層を想定した実大の約 1/3 スケールのもの³⁾

体である。図-1 に試験体の形状を、図-2 に配筋状況を、表-1 に試験体概要をそれぞれ示す。

耐震壁は階高が 1,000mm、柱中心間距離が 1,800mm、壁厚が 100mm、側柱断面が 250mm 角、および壁梁の幅とせいが 200mm および 250mm である。また、図-2 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を設けており、壁横筋は側柱鉄骨ウェブに溶接している。

実験変数は開口面積である。試験体 CWNO は無開口耐震壁とし、試験体 CWO1 および CWO2 は有開口耐震壁とし、文献 4) に示される開口低減率 r_2 に応じて開口面積を変化させた。すなわち、試験体 CWO1 は開口形状 $h_{op} \times l_{op}$ を $175 \times 350 \text{mm}$ とし、試験体 CWO2 は $350 \times 750 \text{mm}$ とした。

$$r_2 = 1 - 1.1 \times \sqrt{\frac{h_{op} l_{op}}{hl}} \quad (1)$$

ここで、 h : 当各階壁部材高さ、 l : 全せいである。

2.2 材料特性

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。コンクリートの打設は、基礎スタブ、1 層、2 層および 3 層と上部スタブの 4 回に分けて行った。また、基礎スタブを除くコンクリートは繊維補強コンクリートを使用している。なお、繊維補強コンクリートに使用した繊維は直径が 0.66mm、長さが 30mm のポリビニルアルコール繊維(RF4000)であり、体積混入率は 1.0% である。

2.3 載荷方法

図-3 に載荷装置を示す。試験体は載荷フレームに PC 鋼棒で固定し、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

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (非会員)

*4 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

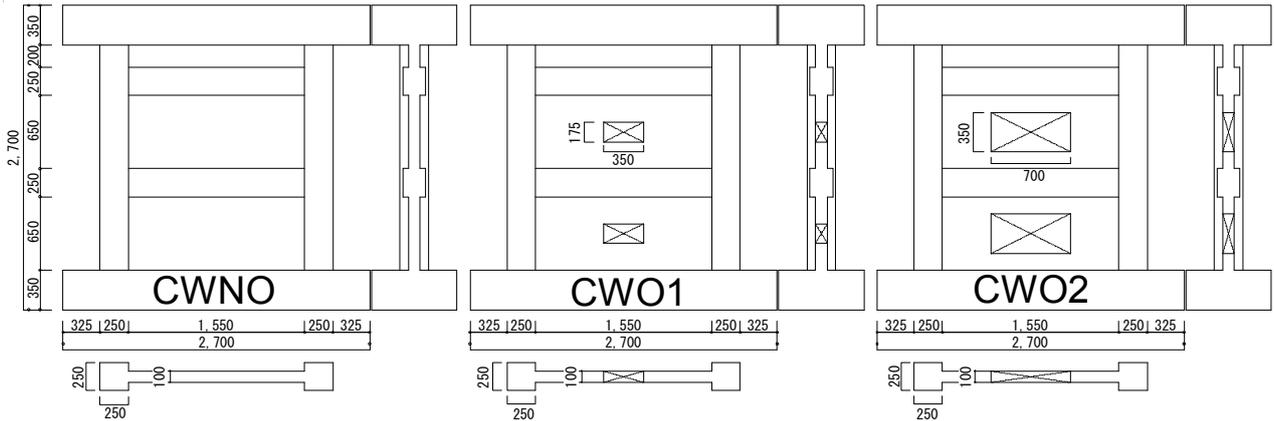


図-1 試験体形状

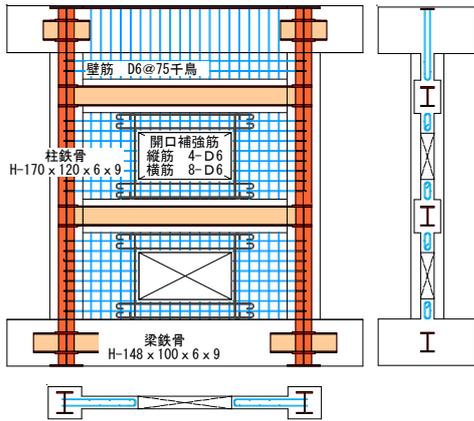


図-2 配筋状況 (CWO2)

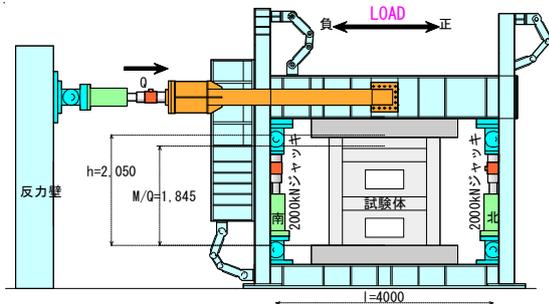


図-3 載荷装置概要

$N=1,300\text{kN}$ を試験体頂部に作用させると同時に、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せて当該鉛直ジャッキを制御することで試験体頂部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 $R=\delta/h$ で北側方向載荷を正載荷として制御した。

3. 実験結果

3.1 履歴特性および破壊性状

図-4 に各試験体の $R=1/33\text{rad}$ のサイクル時の破壊性状を、図-5 に各試験体の履歴特性をそれぞれ示す。また、図-5 では第 4 章に示すせん断終局強度の計算結果

表-1 試験体概要

		CWNO	CWO1	CWO2
柱	$b \times D$	250×250 (mm)		
	鉄骨	H-170×120×6×9 ($p_s=4.9\%$)		
梁	$b \times D$	250×250 (mm)		
	鉄骨	H-148×100×6×9 ($p_g=5.2\%$)		
壁板	$t_w \times l_w$	100×1,800 (mm)		
	壁筋	D6@75 千鳥 ($p_w=0.422\%$)		
その他	せん断スパン	0.9 (1,845mm)		
	軸力	1,300kN ($N/N_0=0.2$)		
開口	$h_{op} \times l_{op}$	-	175×350 (mm)	350×700 (mm)
	r_2	-	0.8	0.6

表-2 繊維補強コンクリートの材料特性

		圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度時ひずみ (μ)
CWNO	1層	37.5	32.7	1,674
	2層	34.7	30.1	1,622
	3層	50.2	33.5	1,386
CWO1	1層	35.3	31.1	1,386
	2層	41.5	32.5	1,874
	3層	47.2	34.9	2,135
CWO2	1層	49.5	36.4	2,152
	2層	47.1	36.3	2,026
	3層	48.5	35.8	1,853

表-3 鉄骨および鉄筋の材料特性

種別・使用箇所		降伏点 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
柱 H-170×120×6×9 (SS400)	PL-6	309	205.0	436
	PL-9	330	207.4	480
梁 H-170×120×6×9 (SS400)	PL-6	311	209.7	443
	PL-9	292	203.8	432
壁筋 (SD295A)	D6	324	186.7	512

を併せて示している。

$R=1/200\text{rad}$ のサイクルにおいて試験体 CWNO および CWO1 では 1 層壁と 2 層梁の境界で、試験体 CWO2 では 2 層壁と 2 層梁の境界でひび割れの発生が顕著となり、水平方向のずれが生じた。

試験体 CWNO では $R=1/200\text{rad}$ のサイクル時に最大耐力に達した後、1 層壁板における上隅角部のコンクリートの圧壊に伴い耐力が徐々に低下した。試験体 CWO1 では、 $R=1/133\text{rad}$ のサイクルにおいて 1 層開口両側の壁板コンクリートの圧壊により最大耐力に達した。 $R=1/67\text{rad}$ のサイクル時に 1 層の両側柱のせん断破壊が生じ、耐力が急激に低下した。試験体 CWO2 では、 $R=1/200\text{rad}$ のサイクルにおいて 2 層の開口両側の壁板コンクリートの圧

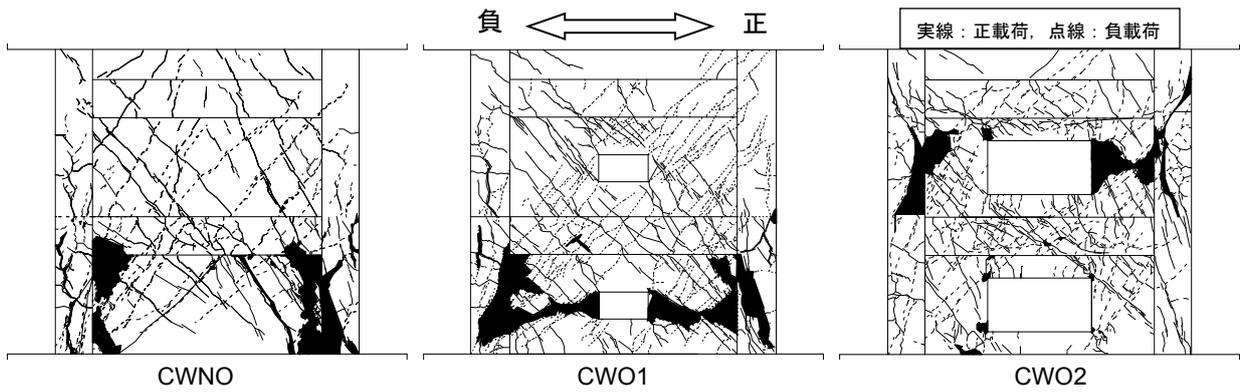


図-4 破壊性状 (R=1/33rad.)

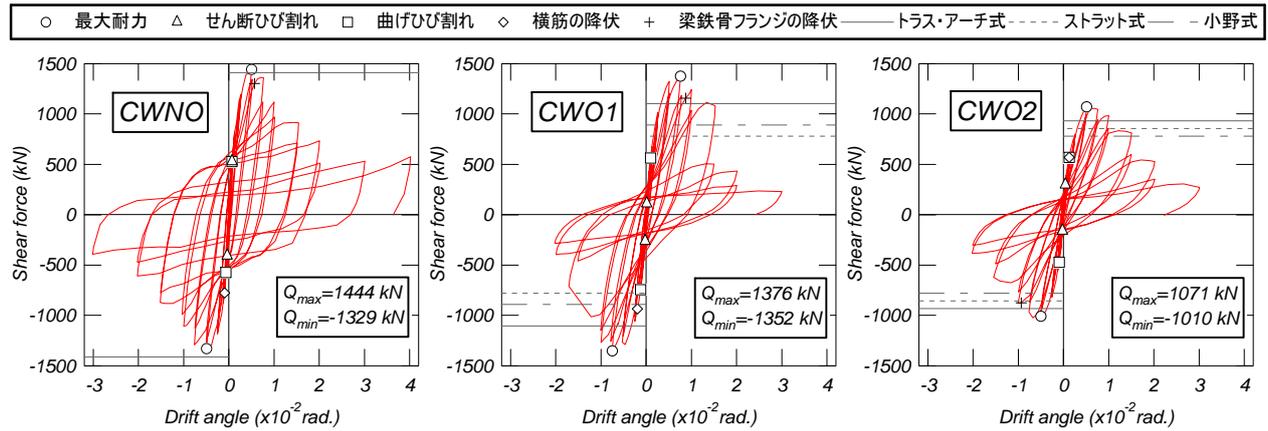


図-5 履歴特性

表-4 強度計算結果

		CWNO	CWO1	CWO2
最大耐力		1,444	1,376	1,071
曲げ終局強度		1,604		
トラス・アーチ式×r ₂	計算値	1,421	1,108	929
	耐力比	1.02	1.24	1.15
ストラット式	計算値	-	906	883
	耐力比	-	1.52	1.21
小野式×スリップ耐力式	計算値	1,082	890	765
	耐力比	1.33	1.55	1.4

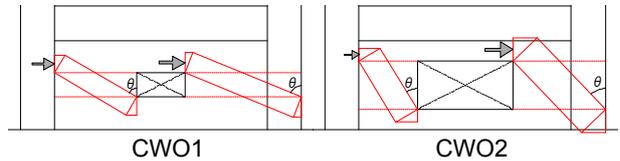


図-6 ストラット式における角度

壊により最大耐力に達した。その後のサイクルにおいてコンクリートの圧壊の進行に伴い、耐力が徐々に低下した。試験体 CWNO および CWO1 では 1 層壁板の破壊が進行したのに対し、試験体 CWO2 では 2 層壁板の破壊が顕著である。これは、いずれの試験体も 2 層壁板の拘束が上下のスタブに隣接する 1 層および 3 層壁板と比べて小さいが、試験体 CWO2 では開口が大きくなることから剛性の差がより顕著となるため、2 層壁板におけるコンクリートの圧壊が 1 層に比べて先行したものと推察される。

各試験体の最大耐力をみると、試験体 CWNO に対して試験体 CWO1 の最大耐力の比は 0.95、試験体 CWO2 の比は 0.74 となり、文献 4) に示される開口低減率 r_2 と比べて大きな値を示すことがわかる。また、無開口試験体 CWNO から開口が大きくなるに伴い、初期剛性の低下および最大耐力後の変形性能の向上が認められ、耐震壁から柱梁フレーム的な挙動に移行しているものと考えられ

る。

4. 耐力計算

以下に CES 造耐震壁の曲げ終局強度およびせん断終局強度の算定式について示す。なお、終局強度計算では、無開口試験体 CWNO と小開口試験体 CWO1 では、表-2 に示す 1 層のコンクリート強度の値を、大開口試験体 CWO2 では 2 層において破壊が顕著に見られたため、2 層のコンクリート強度の値を用いた。無開口耐震壁の曲げ終局強度式 (式(2)) およびトラス・アーチ理論によるせん断終局強度式 (式(3)) は文献 1) に従い算定した。有開口耐震壁のせん断終局強度は、トラス・アーチ式に RC 規準に示される開口低減率 r_2 を乗じたもの (式(3)×式(1))、文献(5)に示されるストラット式 (式(4))、および小野らによる耐力低減率 r_3 にスリップ耐力式 r_4 を乗じたもの (式(5)×式(6)) によりそれぞれ算定した。なお、式中の記号については各文献を参照されたい。

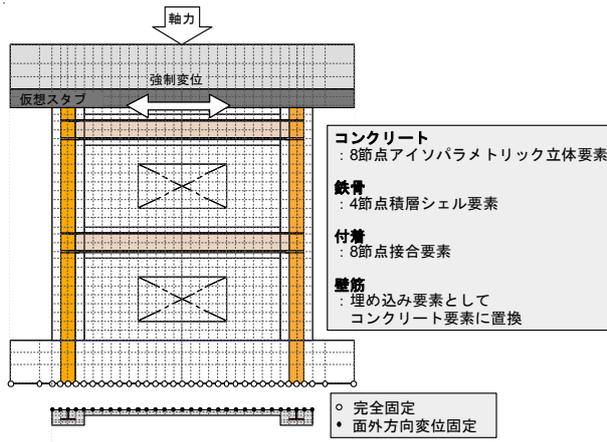


図-7 要素分割図

<曲げ終局強度式¹⁾>

$$Q_{mu} = (0.5N + s_{CS} A_s \sigma_y) l_w / h_w \quad (2)$$

<トラス・アーチ式¹⁾>

$$Q_{su} = w l_p \left\{ w l_p s_e w \sigma_y \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) w l_a v \frac{\sigma_B}{2} \right\} \quad (3)$$

<ストラット式⁵⁾>

$$Q_{wo} = \sum 0.5 v \sigma_B \cos \theta \sin \theta_p l$$

$$v = -0.016 \sigma_B - 0.16 \frac{M}{QD} + 0.36 \frac{N}{bD \sigma_B} + 0.27 p_w + 1.23 \quad (4)$$

<小野らによる耐力低減率⁶⁾>

$$r_u = \sqrt{\frac{\sum Ae}{hl}} \quad (5)$$

<スリップ耐力式⁷⁾>

$$Q_{u0} = (2.4 \sqrt{F_c} + 3400 P_s) \cdot l_w \quad (\text{kgf}) \quad (6)$$

表-4 に強度計算結果および最大耐力と計算値の比（以下、耐力比）を、図-6 にストラット式において仮定しているストラットの角度を示す。

無開口試験体 CWNO の最大耐力はトラス・アーチ式により精度良く評価可能である。小開口試験体 CWO1 および大開口試験体 CWO2 の結果をみると、トラス・アーチ理論式に耐力低減率 r_2 を乗じた計算結果の対応が最も良い結果となった。

次に小野らの耐力低減率 r_u を用いた算定精度は、無開口耐震壁のスリップ耐力式（式(6)）の対応に依存することから、本論に示す試験体では過剰に安全側の評価となった。

最後にストラット式の結果をみると、各試験体の耐力比は安全側の評価となるものの、特に試験体 CWO1 の算定結果が過剰に低くなっている。これは、図-6 に示すストラット式の角度から、試験体 CWO1 では、開口高さ h_{op} がストラット長さ l_p と比べて小さく、特に圧縮側袖壁に形成されるアーチ機構の角度が試験体 CWO2 と比べて大きくなることに起因するものである

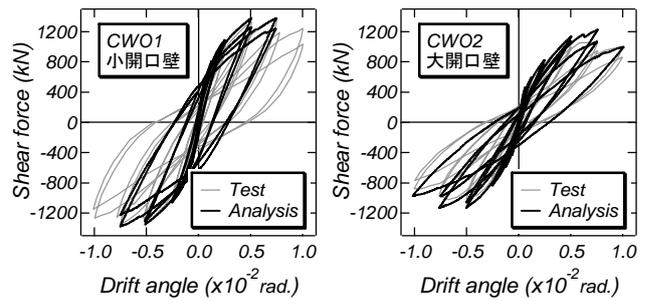


図-8 実験結果および解析結果の履歴特性の比較

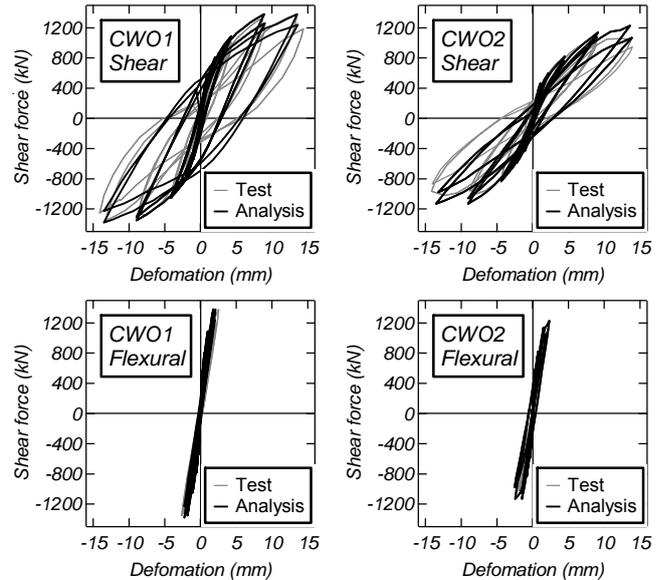


図-9 実験と解析の各変形成分の比較

5. せん断伝達機構

前章において示したせん断終局強度の計算結果は CES 有開口耐震壁の実験結果を過剰に安全側に評価する結果となった。本章では、前述のストラット式⁵⁾を用いて CES 有開口耐震壁のせん断終局強度式の再構築を目的として、三次元 FEM 解析結果を用いて当該部材のせん断伝達機構を検討する。

5.1 FEM 解析概要

図-7 に試験体 CWO2 を例とした要素分割図を示す。試験体は面外方向について対称であるため、面外方向の片側のみをモデル化した。材料特性は表-2 および表-3 の値を用いている。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上スタブから実験の想定加力高さまで仮想スタブを定義し、仮想スタブ下端に実験と同様の部材角となるよう強制変位を与えた。軸力は上スタブ上端において一定軸力を与えた。境界条件は下スタブ下端のすべての節点を完全固定とし、試験体切断面の面外方向変位を固定した。なお、上スタブは変位の拘束を行っていない。解析は収束計算が不安定になった時点で終了した。なお、本論に示す解析モデルおよび材料

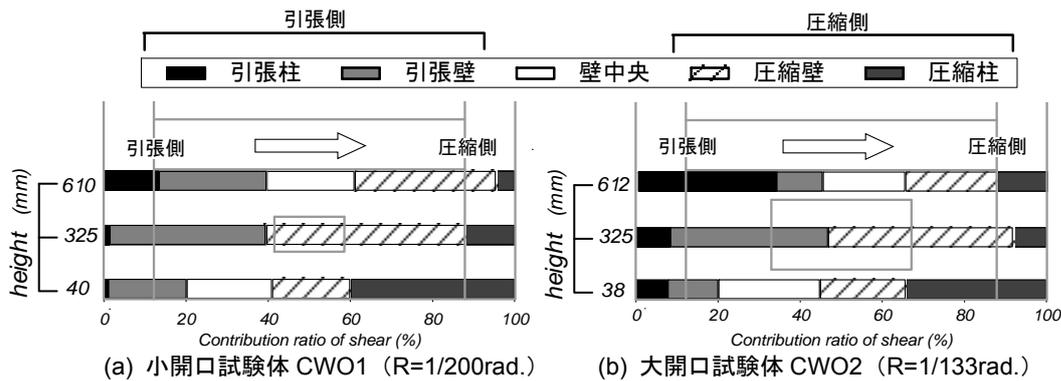


図-10 負担せん断力割合の高さ方向分布

構成則の詳細は文献8)に示す。ただし、文献8)の解析モデルでは、試験体の初期ひび割れの影響を考慮するためにコンクリートのひび割れ強度を低減しているが、本論の解析モデルではひび割れ強度の低減を行っていない。なお、解析は3次元FEM解析ソフト「FINAL⁹⁾」を用いた。

5.2 解析結果

図-8に各試験体の実験結果および解析結果の履歴特性の比較を示す。

大開口試験体CWO2の解析結果は $R=1/133rad.$ のサイクルにおいて最大耐力に達しており、実験結果と比べて僅かに差異がみられる。しかしながら、両試験体において解析のスケルトンカーブは実験結果を精度良く再現していることがわかる。次に履歴性状をみると、小開口試験体CWO1の解析結果は $R=1/200rad.$ のサイクルから紡錘形の履歴性状を示しており、実験結果と比べて履歴面積を過大評価している。一方、大開口試験体CWO2の解析結果は $R=1/200rad.$ のサイクルから除荷剛性が高く、実験結果と比べて履歴面積を過小評価している。

図-9に実験および解析における $R=1/133rad.$ までのせん断力-せん断変形関係および曲げ変形関係をそれぞれ示す。なお、実験および解析ともに曲げ変形は、高さ方向に5分割して測定した側柱の軸方向変形量から求め、せん断変形は全体変位から曲げ変形を差し引いたものである。

両試験体ともにせん断変形は曲げ変形成分と比べて大きく、全体的な挙動は捉えている。また、せん断変形成分の履歴性状をみると、各試験体における $R=1/200rad.$ 以降のサイクルの解析結果は図-8に示す履歴特性と同様に実験結果との相違が認められる。

以上より、本解析モデルはせん断変形成分の履歴性状に課題を残すものの、実験結果のスケルトンカーブを再現するものと判断できる。

5.3 負担せん断力分布

図-10に各部材の負担せん断力の割合の高さ方向上

部、中間部および下部の分布を示す。ここで負担せん断力は、鉄骨を含む圧縮柱と引張柱、圧縮壁、引張壁および中央壁に区別し、各試験体の実験において破壊が顕著となった層のものを示している。せん断力は要素に生じる面内方向せん断応力度から要素面積を乗じて算出している。また、同図は各試験体の解析における最大耐力発揮時のものを示している。

開口のある中間部に着目すると、両試験体の圧縮壁と柱（以後、圧縮側）および引張壁と引張柱（以後、引張側）の割合は、小開口試験体CWO1では $0.61 : 0.39$ 、大開口試験体CWO2では $0.53 : 0.47$ となり、圧縮側のせん断力は引張側のせん断力と比べて大きくなる。

次に、上部から中間部および中間部から下部にかけてのせん断力の伝達に着目すると、圧縮側の負担せん断力の合計割合は中間部および下部においては同程度となり、引張側の負担せん断力の合計割合は中間部および上部の負担せん断力において同程度となる。すなわち、CES有開口耐震壁において圧縮ストラットが形成される高さ h_p は、引張側では壁頂部から開口下端まで、圧縮側では開口上端から壁脚部までに形成されるものと仮定する必要がある。また、上部における引張側柱の負担せん断力は中間部のものと比べて大きく、下部における圧縮側柱の負担せん断力は中間部のものと比べて大きくなる。このことから、付帯柱は、圧縮側および引張側ともにせん断力を負担しているものと判断され、ストラット長さ l_p は付帯柱を含む壁板の長さとして仮定する。

5.4 せん断終局強度式

本節では、5.3節において検討した圧縮ストラットの形状を考慮して式(4)に示すストラット式⁹⁾を再考する（以下、修正ストラット式）。なお、本論では2体のみのCES有開口耐震壁を対象として検討を行っていることから、有効強度係数 ν は検討対象外とする。

図-11に圧縮ストラットの形状を示す。同図に示すように修正ストラット式では、開口左右の壁板においてそれぞれストラット長さ l_p およびストラット高さ h_p を仮定

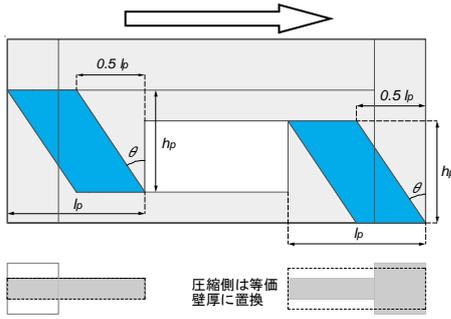


図-11 圧縮ストラットの形状

する。ここで、ストラット長さ l_p は、壁上部および下部における付帯柱が負担するせん断力の影響を考慮して、圧縮側および引張側ともに開口端から柱の外端までとする。ストラット高さ h_p は、引張側では壁頂部から開口下端までを仮定し、圧縮側では開口上端から壁脚部までを仮定する。また、圧縮ストラットの厚さは文献5)に従い、圧縮側の負担せん断力が引張側と比べて大きくなる影響を考慮して、圧縮側では等価壁厚に置換し、引張側では壁板と同じとした。

表-5 に修正ストラット式の計算結果を示す。また、同表に示す FEM 解析の結果は図-11 に示す壁板の中間部のものを示している。

同表をみると、修正ストラット式による計算結果は両試験体の実験結果を精度良く評価していることがわかる。特に、小開口試験体 CWO1 における修正ストラット式の計算結果はストラット高さ h_p の取り方の影響が大きく、文献5)のストラット式と比べて1.5倍となり、大幅な改善が認められた。

以上のように、本章において示した修正ストラット式は、中央に開口を有する CES 有開口耐震壁の最大耐力を精度よく評価可能である。今後は、開口位置を変数とした実験および解析から、さらなる精度の向上を図る予定である。

6. まとめ

本論では、開口サイズを変数とした有開口 CES 造耐震壁を対象とした静的載荷実験および三次元 FEM 解析を行い、当該部材のせん断終局強度について検討した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) CES 有開口耐震壁は、開口サイズの増大に伴い、初期剛性の低下および最大耐力後の変形性能の向上がみられ、耐震壁から柱・梁フレーム的な挙動に移行する傾向が認められた。
- 2) RC 有開口耐震壁に用いられる小野らの手法およびストラット式による算定結果は CES 有開口耐震壁の実験結果を過小評価する。
- 3) 負担せん断力割合の分布から、圧縮側では開口中間

表-5 ストラット式の計算結果

	CWO1				CWO2			
	せん断力 (kN)			耐力比	せん断力 (kN)			耐力比
	引張側	圧縮側	合計		引張側	圧縮側	合計	
実験結果	-	-	1,376	-	-	-	1,071	-
FEM 解析	517	845	1362	1.01	577	657	1234	0.87
ストラット式	342	564	906	1.52	234	650	883	1.21
修正ストラット式	556	801	1,357	1.01	388	603	991	1.08

部の高さから壁脚部までの負担せん断力は同程度となり、引張側では壁頂部から開口中間部までの負担せん断力は同程度となる傾向が認められ、当該位置において圧縮ストラットの形成を仮定する必要がある。

- 4) 圧縮側柱および引張側柱ともにせん断力に寄与していることから、圧縮ストラットの長さには付帯柱せいの影響を考慮する必要がある。
- 5) 上記の仮定に基づいて提案した修正ストラット式は中央に開口を有する CES 有開口耐震壁の最大耐力を精度良く評価することができる。

参考文献

- 1) 鈴木卓, 松井智哉, 倉本洋: 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) 鈴木卓, 松井智哉, 倉本洋: 壁縦筋の定着状態の異なる CES 造連層耐震壁の非線形 FEM 解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.666, pp.1165-1170, 2011.8
- 3) 鈴木卓, 倉本洋, 松井智哉: CES 造耐震壁の復元力モデル, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.693, pp.2027-2034, 2013.11
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010.2
- 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) 小野正行, 徳広育夫: 鉄筋コンクリート造耐震壁の開口の影響による耐力低減率の提案, 日本建築学会構造系論文報告集, No.435, pp.119-129, 1992.5
- 7) 富井政英, 江崎文也: 鉄筋コンクリート耐震壁の水平耐力に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1587-1588, 1981.11
- 8) 鈴木卓, 倉本洋, 松井智哉: CES 造耐震壁のせん断伝達メカニズムに及ぼす壁板位置の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.681, pp.1801-1807, 2012.11
- 9) 伊藤忠テクノソリューションズ(株): FINAL/V11