

(46) 偏在開口を有するCES耐震壁の3次元FEM解析

藤谷 涼¹・鈴木 卓²・倉本 洋³

¹正会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail:fujitani_ryo@arch.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 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)

³正会員 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)

筆者らは開口サイズを変数としたCES造有開口耐震壁の静的載荷実験および三次元FEM解析を行い、開口両側の壁板に形成される圧縮ストラットの形状を考慮したせん断終局強度式を提案した。この提案式は中央に開口を有するCES耐震壁の最大耐力を精度よく評価可能であるが、開口が偏在する場合においてその評価精度は未確認である。そこで本研究は、開口位置を変数とした三次元FEM解析を行い、開口位置が当該部材のせん断伝達機構に及ぼす影響および解析結果と提案したせん断終局強度式の対応を検討する。

Key Words : CES shear walls with opening, FEM analysis, ultimate shear strength, eccentric openings

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おり、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、壁縦筋の定着を省略したCES造耐震壁は定着したものと比べて優れた変形性能を有することが明らかにされている¹⁾²⁾。

一方で、耐震壁は意匠的および設備的な観点から開口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。筆者らはRC有開口耐震壁のせん断強度として提案されたストラット式 (式(1))³⁾のCES有開口耐震壁への適用性を検討するために静的載荷実験および三次元FEM解析を行った⁴⁾。<ストラット式>

$$Q_{wo} = \sum 0.5v\sigma_B \cos \theta \sin \theta l_p t \quad (1)$$

$$v = -0.016\sigma_B - 0.16 \frac{M}{QD} + 0.36 \frac{N}{bD\sigma_B} + 0.27 p_w + 1.23 \quad (2)$$

その結果、既往のストラット式を以下の修正した。すなわち、負担せん断応力の分布から想定する圧縮ストラット形状によって決まるストラット高さ h_p を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とした (図-1下段)。さらに、引張側のストラット長さ l_p を引張側柱せいを含めるものとした。修正した

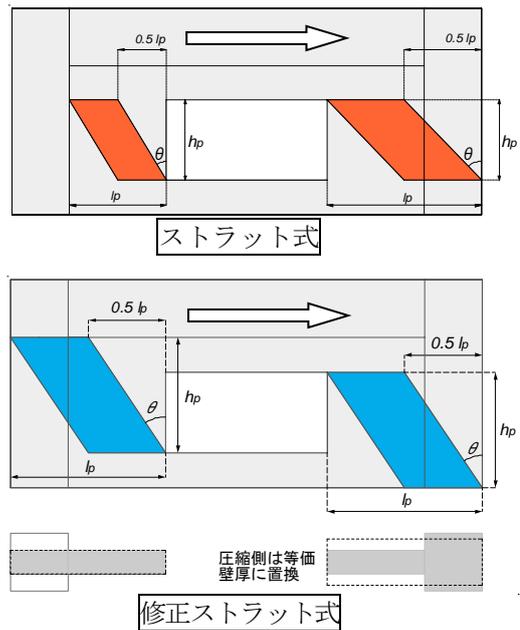


図-1 ストラット式および修正ストラット式

ストラット式 (以下、修正ストラット式) は中央に開口を有するCES耐震壁において実験結果を精度よく評価できることを示した。

しかしながら、開口位置により形成されるストラット形状が変化することが考えられる。修正ストラット式の評価精度の向上のためには開口位置が偏在する場合におけるせん断伝達機構のさらなる検討が必要である。

そこで本研究は、文献4)に示すCES造有開口耐震壁の

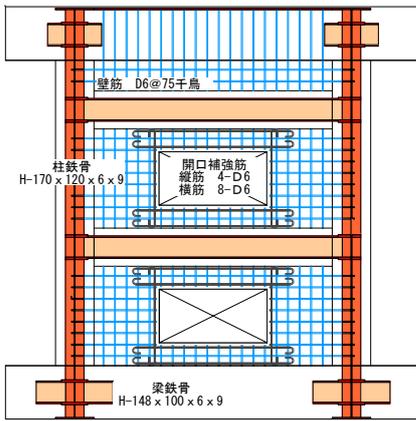


図-2 配筋状況 (大開口試験体)

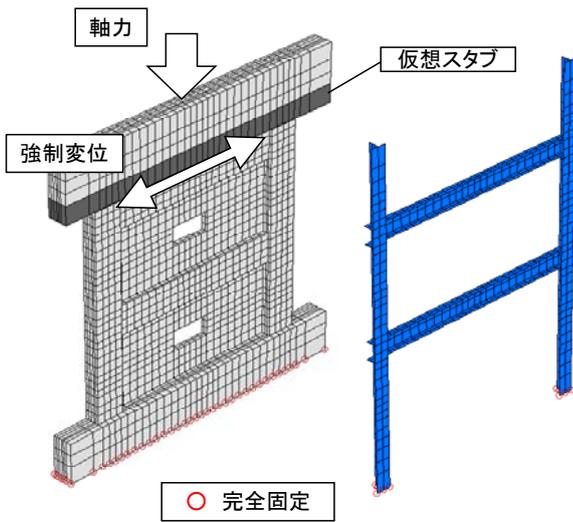


図-3 小開口試験体 CWO1 の要素分割図

解析モデルを用いて開口位置を変数とした三次元FEM解析を行い、開口位置が当該部材のせん断伝達機構に及ぼす影響および解析結果と修正ストラット式の評価精度を検討する。

2. 中央開口壁試験体のFEM解析⁴⁾

(1) FEM解析概要

図-3に中央に開口を有するCES耐震壁の配筋状況を、表-1に試験体概要をそれぞれ示す。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スケールで、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。壁縦筋は梁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。

開口面積は大開口試験体CWO2が350×700mmおよび開口試験体CWO1が175×350mmとし、文献5)に示される

表-1 試験体概要

		CWO1	CWO2
柱	$b \times D$	250×250 (mm)	
	鉄骨	H-170×120×6×9 ($\rho_s=4.9\%$)	
梁	$b \times D$	250×250 (mm)	
	鉄骨	H-148×100×6×9 ($\rho_s=5.2\%$)	
壁板	$t_w \times l_w$	100×1,800 (mm)	
	壁筋	D6@75 千鳥 ($\rho_w=0.422\%$)	
その他	せん断スパン	0.9 (1,845mm)	
	軸力	1,300kN ($N/N_c=0.2$)	
開口	$h_o \times l_o$	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

中央開口試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度時ひずみ (μ)	
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

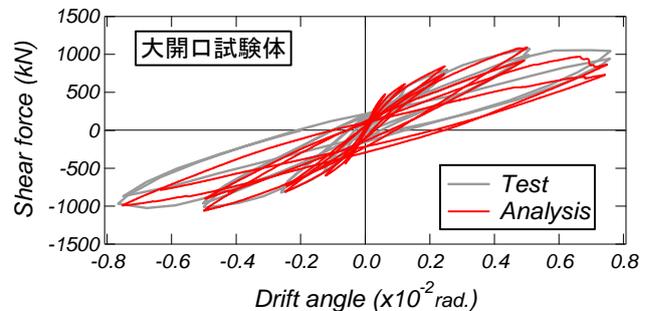
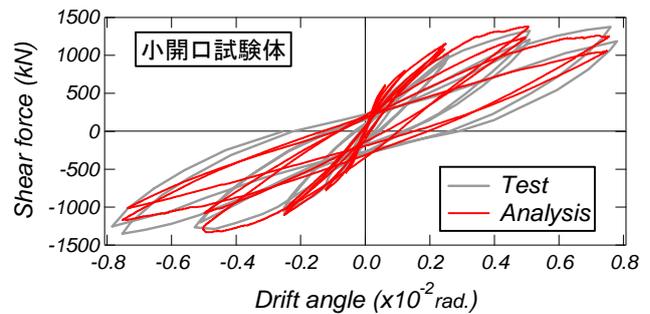


図-4 中央開口試験体の解析結果と実験結果の比較

開口低減率 r_2 (式(3)) で表すとそれぞれ0.6および0.8となる。

$$r_2 = 1 - 1.1 \times \sqrt{\frac{h_{0P} l_{0P}}{hl}} \quad (3)$$

(2) モデル化

図-3にコンクリートおよび鉄骨要素のモデル図を示す。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、応力-ひずみ関係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、壁板のせん

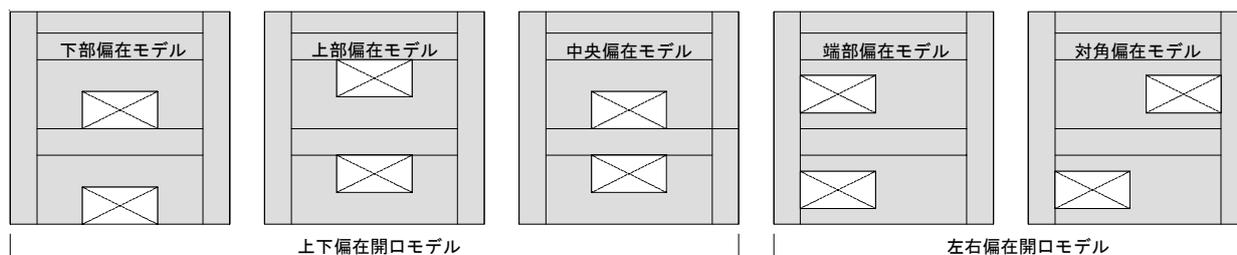


図-5 解析モデル

断補強筋は埋め込み鉄筋として要素内に層状置換し、鉄骨は4節点積層シェル要素で置換した。なお、解析で用いたコンクリートおよび鋼材の材料特性は表-2および表-3の値を用いた。また、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。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構成則の詳細は文献6)に示す。ただし、文献6)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「FINAL⁷⁾」を用いた。

(3) 解析結果

図-4に中央に開口を有する小開口試験体CWO1および大開口試験体CWO2の実験結果と解析結果の履歴特性の比較を示す。

小開口試験体の解析結果は $R=1/200rad$ 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。この他に、本解析モデルはCES造耐震壁全体の曲げ変形およびせん断変形成分の割合の実験結果も精度良く追従していた⁴⁾。

3. 開口位置を変数としたパラメータ解析

(1) 解析モデル

図-5に本論で検討する偏在開口を有するCES耐震壁の解析モデルの形状を示す。解析パラメータは開口位置とし、基準となる試験体を前章に示す大開口試験体CWO2とした。解析は、開口が中央から上下に偏在するモデルを3ケース、開口が左右に偏在するモデルを2ケー

スの計5ケースを実施した。なお、すべてのモデルにおいて解析手法は2章で述べたものと同じものを用い、開口サイズおよび各種材料特性は大開口試験体CWO2のものを用いた。

(2) 開口が上下に偏在する壁試験体

本節では図-5に示す開口が上下に偏在する3ケースの解析モデルを検討する。開口が壁板の中央下端に位置するものを下部偏在モデル、壁板の中央上端に位置するものを上部偏在モデル、1層と2層の開口が2層梁に隣接するものを中央偏在モデルと呼称する。

図-6に上下偏在開口モデルの履歴特性の比較を示す。また、同図では、修正ストラット式による計算値も併せて示している（修正ストラット式において仮定する圧縮ストラットの形状は図-7参照）。各解析モデルは、 $R=1/200rad$ のピーク時に最大耐力に達していることがわかる。また、各解析モデルの最大耐力は下部開口偏在のモデルが最も大きな値となったが、その影響は小さく、開口の高さ位置の差異による顕著な違いは認められない。

図-8に各解析モデルにおいて最大耐力を発揮した $R=1/200rad$ ピーク時における面内方向せん断応力度分布を示す。同図をみると、せん断応力度は、圧縮側壁板では開口上隅角部、引張側壁板では開口下隅角部付近において高くなる傾向が認められる。また、開口の高さ位置によるせん断応力度分布の差異に着目すると、下部偏在モデルの1層と2層および中央偏在モデルの2層では、圧縮側の壁板の広範囲に高い応力が生じている。一方、上部偏在モデルの1層と2層および中央偏在モデルの1層は前述の試験体と比べて圧縮側の壁板に生じた高い応力の領域が小さくなっている。

図-9にCES造耐震壁を構成する各部材の負担するせん断力の割合の高さ方向分布（上部、中部、下部）を示す。ここで図-9の負担せん断力割合は、鉄骨を含む圧縮側の柱と壁、引張の柱と壁、および中央の壁に区別して示しており、負担せん断力は要素に生じる面内方向せん断応力度に要素面積を乗じて算出した。

各モデルの圧縮柱および圧縮壁（以後、圧縮側）と引張柱および引張壁（以後、引張側）の負担せん断力の合

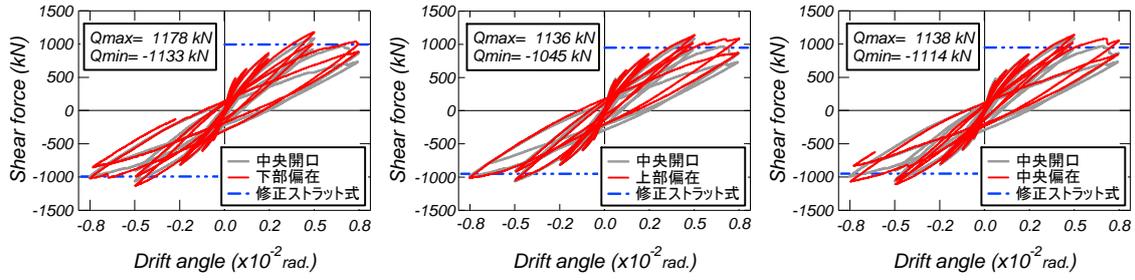


図-6 上下開口偏在モデルの履歴特性

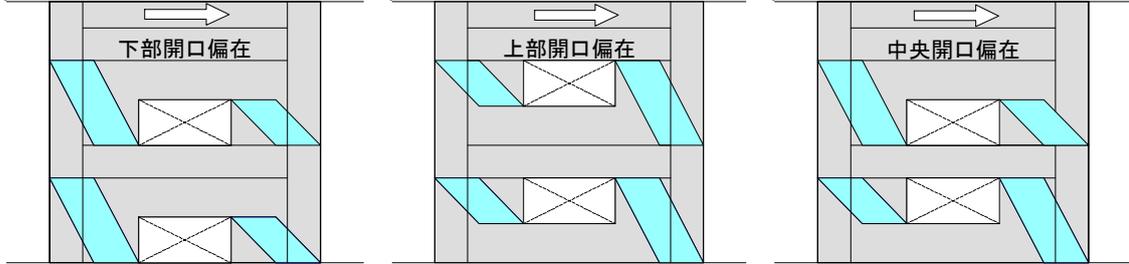


図-7 仮定するストラット形状

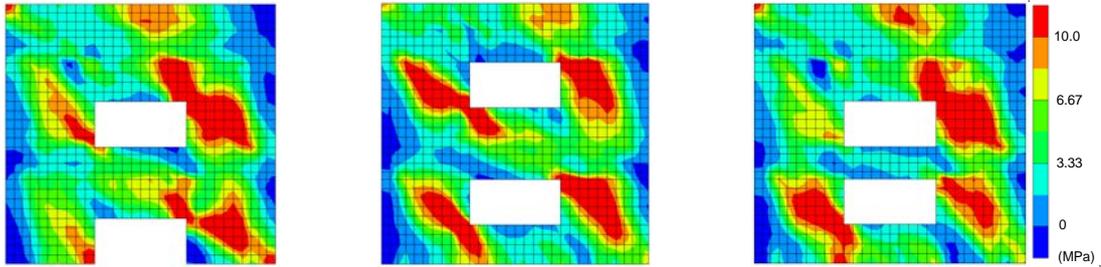


図-8 面内方向せん断応力度分布

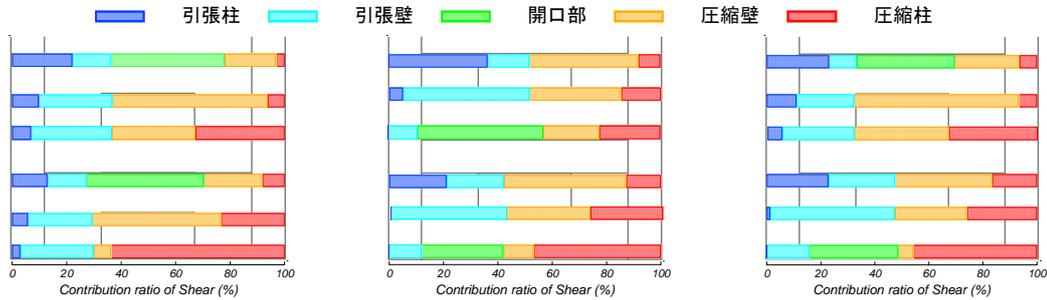


図-9 負担せん断力割合の分布

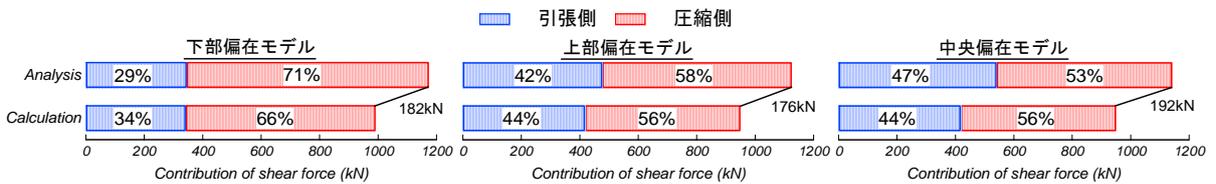


図-10 解析値と修正ストラット式計算結果の比較

割合に着目すると、下部偏在モデルおよび中央偏在モデルの2層は上部偏在モデルおよび中央偏在モデルの1層と比べて圧縮側の負担せん断力割合の合計が大きい。

下部偏在モデルの1層と2層および中央偏在モデルの2層をみると、引張側の負担せん断力割合の合計値は上部から下部にかけて同程度となり、圧縮側の負担せん断力割合の合計は中部から下部にかけて同程度となる傾向が認められる。また、上部偏在モデルの1層と2層および中

央偏在モデルの1層をみると、引張側では上部から中部、圧縮側では上部から下部にかけてそれぞれ負担せん断力割合の合計値は同程度となる傾向が認められる。このことから、開口の高さ位置が偏在する場合においても文献4)に示すように(図-1), 引張側では壁板頂部から開口下端に、圧縮側では開口上端から壁板脚部までに圧縮ストラットの形状を仮定しても良いと判断できる。また、中央偏在モデルの2層下部および1層上部の負担割合をみ

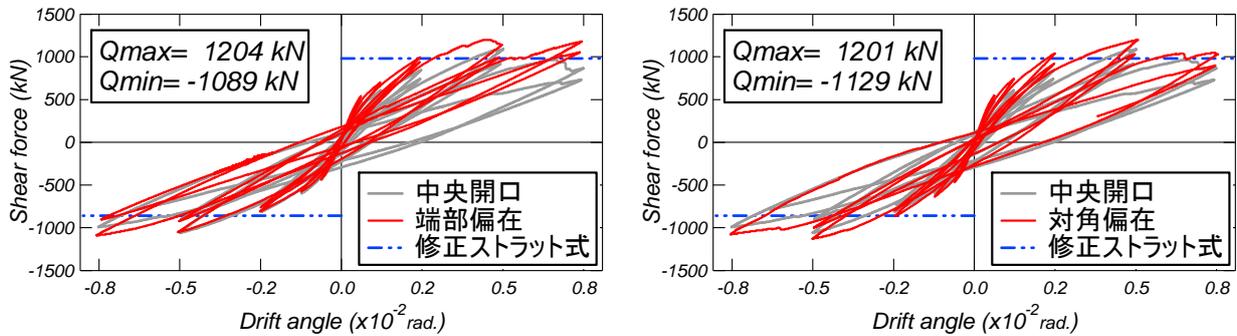


図-11 左右開口偏在モデルの履歴特性

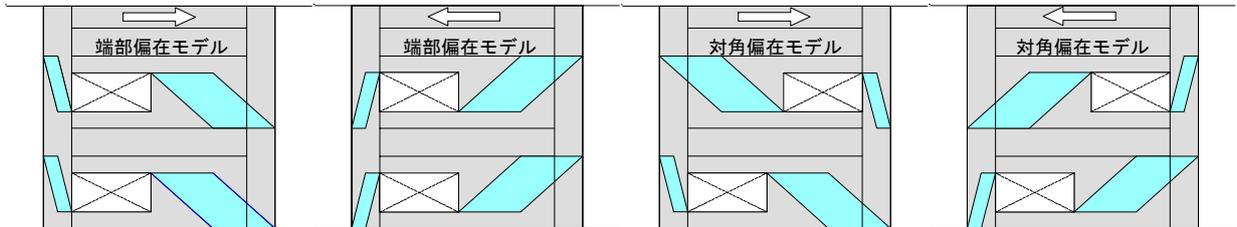


図-12 仮定するストラット形状

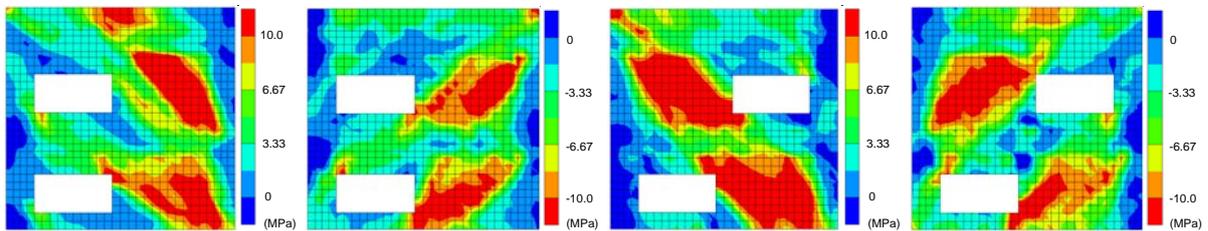


図-13 面内方向せん断応力度分布

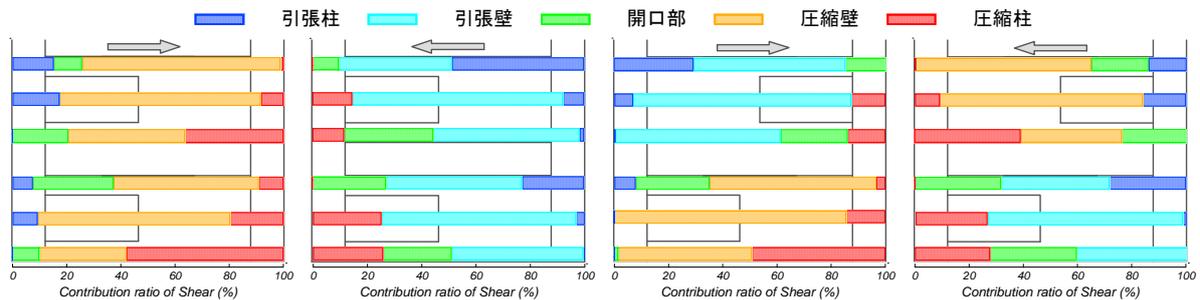


図-14 負担せん断力割合の分布

ると、2層から1層にかけて圧縮側の負担せん断力が小さくなる傾向が確認できる。このことから、周辺フレームに鉄骨を有するCES造有開口耐震壁では、梁鉄骨の引張力の影響が大きく、上下層の開口位置が近い場合においても2層から1層にまたがる形状のストラットを仮定できない可能性がある。

図-10に修正ストラット式の計算結果および解析結果における圧縮側と引張側の負担せん断力の合計の比較を示す。また、修正ストラット式の結果は1層のものを示しており、解析結果は1層中部のものを示している。なお、図中の数値は負担せん断力合計割合の値を示している。

修正ストラット式の結果は解析における圧縮側および引張側の負担せん断力割合の傾向を概ねとらえている。しかしながら、計算結果は解析結果の最大耐力を170～

190kN程度低く評価する結果となった。

(3) 開口が左右に偏在する壁試験体

本節では図-5に示す開口が左右に偏在する2ケースの解析モデルを検討する。解析モデルは開口が1層と2層で同じ側に配置したものを端部偏在モデル、開口が1層と2層で反対側に配置したものを対角偏在モデルと呼称する。なお、载荷方向は図-5に対して左側から右側が正载荷、右側から左側が負载荷である。

図-11に両解析モデルの履歴特性の比較を示す。また、同図では、修正ストラット式による計算値も併せて示している（修正ストラット式において仮定する圧縮ストラットの形状は図-12参照）。両解析モデルともに $R=1/200\text{rad}$ のピーク時に最大耐力を発揮しており、中央開口試験体の解析結果と比較すると、正载荷側の最大耐力

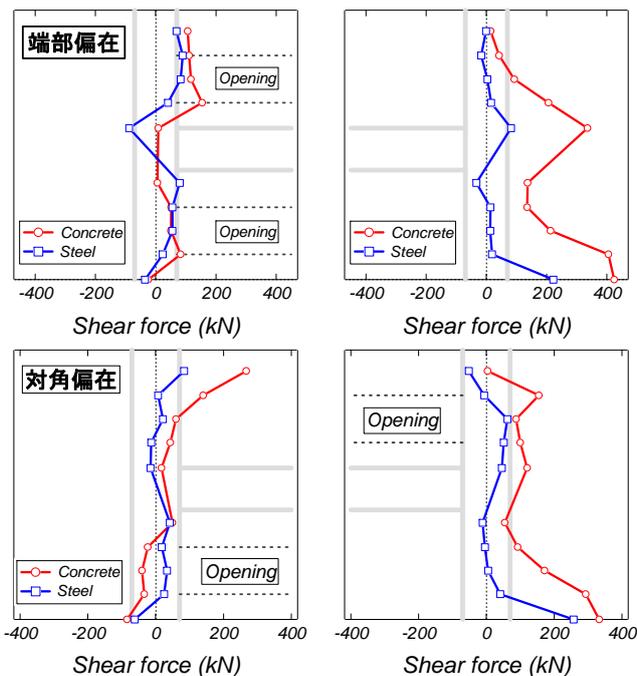


図-15 柱のせん断力分布（正載荷）

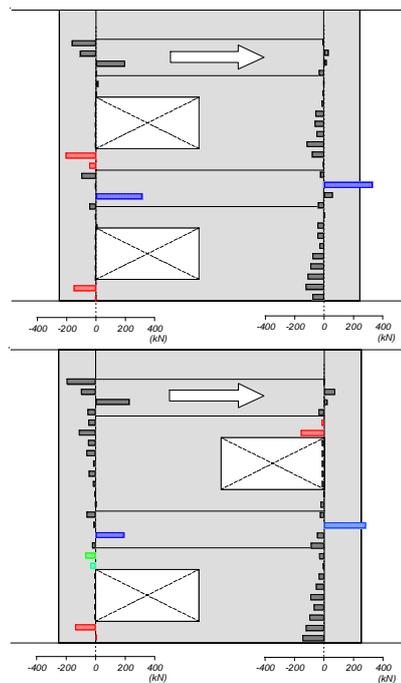


図-16 柱壁境界面のX方向力分布

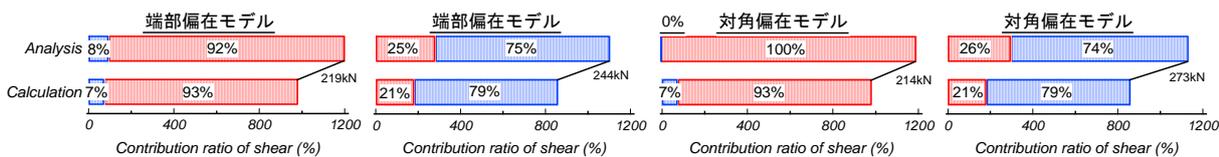


図-17 解析値と計算値の比較

は、いずれのモデルにおいても110kN程度上回り、負荷側側の最大耐力では端部偏在モデルで30kN程度、対角偏在モデルで70kN程度上回った。

図-13に各解析モデルの面内方向せん断応力度分布を示す。

せん断応力は、開口が圧縮側にある場合では開口下隅部付近に、端部偏在モデルの2層を除いて開口が引張側にある場合では開口下隅部付近において高くなる傾向が認められる。

次に、正載荷における2層の開口位置によるせん断力分布の差異に着目すると、対角偏在モデルでは2層から1層にかけて一様な圧縮ストラットが形成されているのに対して、端部偏在モデルでは2層および1層の壁板にそれぞれ圧縮ストラットが形成されている。一方、負荷側に着目すると、対角偏在モデルでは2層の圧縮側壁板および1層の引張側壁板に圧縮ストラットがそれぞれ形成されている。また、端部偏在モデルでは、2層壁板に形成された圧縮ストラットは1層の引張側壁板および圧縮側柱にそれぞれ伝達される傾向がわかる。

図-14に両解析モデルの負担せん断力割合分布を示す。なお、負担せん断力は前節と同じ手法を用いて算出した。

端部開口偏在モデルをみると正載荷および負載荷ともに負担せん断力割合は、引張側では上部から中部、圧縮側では中部から下部にかけて同程度となっている。また、対角偏在モデルの正載荷および負載荷においても、2層の引張側では上部から中部、圧縮側では中部から下部においてそれぞれ同程度の負担せん断力割合を示している。これらのことから、開口が壁板の左右に偏在した場合においても文献4)において仮定した修正ストラット式のストラット形状は妥当だと判断できる。ただし、対角偏在モデルでは、正載荷の1層の引張側および負載荷の2層引張側をみると、それぞれの上部と中部の負担せん断力割合は等しくなっていないことがわかる。

図-15に両解析モデルにおける付帯柱のコンクリートおよび鉄骨の負担せん断力分布を、図-16に壁柱境界面におけるコンクリート、壁横筋および付帯梁鉄骨のX方向力の合計値の分布をそれぞれ示す。

図-15に着目すると、負担せん断力は端部偏在モデルでは1層と2層の圧縮側柱脚部、対角偏在モデルでは1層の圧縮側柱脚部および2層の引張側柱頭部において大きく、壁板から柱にかけてのせん断伝達の影響が確認できる。また、端部偏在モデルでは、負担せん断力は2層脚部から1層頭部にかけて大きく変化している。これは図-

16に示すように、当該位置では2層梁鉄骨による引張力の影響が大きいためである。

次に、対角偏在モデルにおける1層引張側の開口隣接位置付近に着目すると、開口隣接位置では、鉄骨およびコンクリートの負担せん断力の合計はゼロに近い値であることがわかる。しかしながら、開口上部壁板位置では、負担せん断力の合計は垂れ壁からの圧縮力の影響により正側の値を示している。このように開口隣接位置付近による付帯柱のせん断力の不一致は両解析モデルの引張側柱の垂れ壁・腰壁付帯位置において確認され（紙面の都合上割愛した負荷側においても同様の傾向が確認された）、修正ストラット式のストラット形状の仮定と異なっている。しかしながら、全体のせん断力に対する引張側の負担するせん断力は圧縮側と比べて明らかに小さいことから、これらの影響は無視してもよいと考える。

図-17に開口が左右に偏在した解析モデルにおける修正ストラット式の計算結果および解析結果の圧縮側と引張側の負担せん断力の合計の比較を示す。修正ストラット式による圧縮側および引張側の負担割合は解析結果と比べて概ね良い対応を示している。しかしながら、修正ストラット式による計算値は端部偏在モデルおよび対角偏在モデルともに210kNから270kN程度過小評価している。前節の開口が上下に偏在する解析モデルの計算結果と併せて、修正ストラット式はコンクリートの有効強度係数を改善する必要があると考えられる。

6. まとめ

本論では開口位置を変数としたCES有開口耐震壁を対象とした三次元FEM解析を行い、当該部材のせん断伝達機構の検討および文献4)において提案した修正ストラット式の適応性について検討した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

1) 開口が壁板の上下および左右に偏在するCES造耐震

壁における解析モデルの負担せん断力割合の分布から、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の負担せん断力が同程度となることから、文献4)に示されるストラット形状は妥当である。

- 2) 周辺フレームに鉄骨を有するCES造有開口耐震壁では、梁鉄骨の引張力の影響が大きく、上下層の開口位置が近い場合においても2層から1層にまたがる形状のストラットを仮定することができない。
- 3) 文献4)において提案された修正ストラット式は、開口が壁板の上下および左右に偏在したCES造耐震壁の解析モデルの最大耐力を過小評価するものの、圧縮側および引張側の負担せん断力の割合を概ね評価可能である。

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) 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
- 4) 藤谷涼, 鈴木卓, 藤本周, 倉本洋: CES 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
- 5) 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
- 6) 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

FEM ANALYSIS OF CES SHEAR WALLS WITH ECCENTRIC OPENING

Ryo FUJITANI, Suguru SUZUKI and Hiroshi KURAMOTO

A three-dimension FEM analysis for CES shear walls with eccentric opening was conducted to examine shear transferring mechanism and the adaptability of the modified strut formula proposed by the reference 4). From analytical results of CES shear walls with eccentric openings, contribution ratios of shear from top of the wall panel to bottom of the opening subjected to tension or from bottom of the wall panel to top of the opening subjected to compression were almost the same respectively. However, it was found that the calculated results by the modified strut formula underestimated maximum capacities of analytical results in CES shear walls with eccentric openings.