

論文 RC 造有開口耐震壁の開口周比の差異が耐力低下に及ぼす影響

櫻井 真人*1・齊藤 竜也*2・西田 哲也*3・小林 淳*4

要旨：本論文では、RC 造有開口耐震壁の定量的なせん断強度算定手法の構築を目指し、既往研究により筆者らの一人が提案しているストラット式の適用範囲について、開口の大きさを変数とした FEM 解析を用いた検討を行った。その結果、有開口耐震壁では開口周比が小さいと無開口耐震壁に近い抵抗機構を形成するが、開口周比の増大に伴い、やがて開口横の壁板に個々に圧縮ストラットが形成されるようになることを示した。また、FEM 解析結果に対するストラット式のせん断強度算定においては開口周比 0.15 から 0.5 の範囲で FEM 解析結果を精度よく評価できることを示した。

キーワード：有開口耐震壁、複数開口、FEM 解析、開口周比、ストラット式

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC と略記）造建築物における主要な耐震要素の一つである耐震壁は、開口を有する場合において、開口位置および個数の影響によって破壊モードが複雑化し、耐力および変形性能に差異が生じることが報告されている¹⁾²⁾。そのような中で筆者らの一人は、有開口耐震壁の定量的なせん断強度評価手法の構築を目指して、構造実験および有限要素（以下、FEM と略記）解析を用いた検討を継続的に行ってきた。その結果、有開口耐震壁の壁板内で形成される圧縮ストラットに着目した簡便なせん断強度評価手法（以下、ストラット式と呼称）を提案するに至った³⁾。

ストラット式は、開口周比が 0.4 程度の有開口耐震壁の実験および解析結果より壁板内で形成されるストラットの抵抗機構を仮定して導出している。このため、本式による算定では開口の位置および個数に応じて有開口耐震壁のせん断強度を算定することができるものの、式の適用可能範囲に関する詳細な検討はなされていない。一般的には、有開口耐震壁の抵抗機構は開口を大きくしていくと純フレーム、開口を小さくしていくと無開口の耐震壁の挙動に移行していくことが予想され、開口大きさの変化によるそれぞれの抵抗機構への遷移については十分に検討を行う必要があるといえる。一方、日本建築学会・鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説⁴⁾（以下、RC 規準と略記）では有開口耐震壁に設ける開口については当該壁板面積に対する開口面積の比率である開口周比によって基準化されている。ここで、開口周比による強度低減率が 0.6 未満のものについては耐震壁要素でなく、フレーム要素とみなす扱いがなされている。しかしながら、この数字には力学的根拠や説明がないまま慣用

されているのが現状であり、検討の余地がある。

そこで本論文では開口の大きさ、位置、および個数を変数とした FEM パラメトリック解析を行い、それらの差異が有開口耐震壁の構造性能、耐力低下に及ぼす影響および開口周比、特に開口面積について着目したストラット式の適用範囲について検討した。

2. FEM 解析

2.1 解析モデル

図-1 に解析モデルの開口配置の種別を示す。また表-1 および表-2 に解析対象諸元、解析モデルの部材断面詳細および材料特性をそれぞれ示す。

本解析では、開口の大きさが耐震壁内部の応力伝達機構に及ぼす影響を把握することを意図しており、図-1 に示すような開口配置の種別を基準として開口周比を 0.1 から 0.5 程度まで変化させた解析モデル 24 体および比較のための無開口耐震壁の解析モデル 1 体の計 25 体選択した。以降、解析モデル名称は [開口配置の種別] - [開口周比] で示す。例として、Case1 の開口周比 0.4 の解析モデルは Case1-0.4 となる。なお、開口周比は次式により評価する。

$$\sqrt{\frac{\sum h_{op} l_{op}}{hl}} \quad (1)$$

ここで、 h :階高(mm)、 l :側柱含む壁全せい(mm)

h_{op}, l_{op} :開口高さおよび開口長さ(mm)

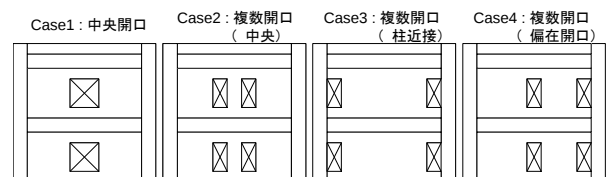


図-1 解析モデルの開口パターン

*1 秋田県立大学 システム科学技術学部 建築環境システム学科 助教 博士（工学）（正会員）

*2 秋田県立大学 システム科学技術学部 建築環境システム学科 卒業生 学士（工学）

*3 秋田県立大学 システム科学技術学部 建築環境システム学科 教授 博士（工学）（正会員）

*4 秋田県立大学 システム科学技術学部 建築環境システム学科 教授 工博（正会員）

なお、上記に示すように開口周比算定において、複数開口の場合は開口面積の総和を用いて算定している。

開口配置の種別のうち、Case1 は壁板の中央に開口を有するもの、Case2 は開口数が2つで同一寸法の開口をそれぞれ壁板中央付近に配置したもので、いずれも開口間隔は200mmとしている。Case3は開口数が2つで同一寸法の開口をそれぞれ両側柱付近に近接させて配置したもの、Case4 は開口数が2つで開口を壁板中央および壁板端部に配置し偏在開口としたものである。また、無開口耐震壁の解析モデルをCase0とする。なお、解析モデルCase0, Case1-0.4, Case2-0.4, Case3-0.4, Case4-0.4は筆者らの既往研究により同形状試験体の構造実験を実施している^{2),3),6)}のものであり、他の解析モデルはこれらの開口形状の相似形としている。

解析モデルは、6層RC造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約1/3スケールの耐震壁である。なお、開口周辺はRC規準に従い、開口補強筋を開口周辺に対して縦、横および斜め方向に配筋している。開口が方立柱に隣接する場合には、横筋および斜め筋は方立壁内で鉄筋の定着を確保し、縦筋は省略している。また、試験体の破壊モードはせん断破壊型としている。

2.2 解析手法

有開口耐震壁のFEM解析手法の妥当性については、文献7)で検討しており、せん断力-変形角関係、破壊性状および鉄筋応力を概ね模擬できることを示してきた。本解析も文献7)と同様の解析手法を採用する。

図-2に解析モデルCase1を1例とした要素分割図を

表-1 解析対象諸元

開口周比	解析モデル			
	Case1		Case2~Case4	
	開口寸法(mm)	開口個数	開口寸法(mm)	開口個数
0.09	100×150	1	100×75	2
0.15	200×200		200×100	
0.2	250×300		250×150	
0.3	400×400		400×200	
0.41	500×600		500×300	
0.48	700×600		700×300	

表-2 部材断面詳細

柱	B×D	200×200
	主筋	12-D13 ($p_r=3.8\%$)
	帯筋	2-D6@60 ($p_w=0.53\%$)
	副帯筋	2-D6@120 ($p_w=0.27\%$)
梁	B×D	150×200
	主筋	4-D10 ($p_r=0.54\%$)
	帯筋	2-D6@100 ($p_w=0.42\%$)
壁	壁厚	80 (mm)
	壁筋	D6@100千鳥 ($p_s=0.4\%$)
	開口補強筋	D10 (縦, 横, 斜め)

* 単位:mm

表-3 材料特性

コンクリート			
σ_B (N/mm ²)	1層	25.0	
	2層	25.0	
鉄筋			
種別	使用部位	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D6(SD295A)	壁筋・柱梁補強筋	325	2.1×10^5
D10(SD345)	梁主筋・開口補強筋	380	2.1×10^5
D13(SD345)	柱主筋	380	2.1×10^5

示す。解析は2次元解析とし、平面応力場を仮定した。コンクリートは4接点四辺形要素を定義し、壁筋、帯筋、副帯筋および開口補強筋は埋め込み鉄筋としてコンクリート要素内に層状置換した。柱および梁主筋はトラス要素にて線材として置換した。なお、主筋については、コンクリートからの抜け出しを考慮するため、コンクリート要素とトラス要素の接点をそれぞれ別に定義し、接合要素を挿入することで鉄筋の抜け出しをモデル化した。

本解析では、下スタブ下端のコンクリートおよび鉄筋要素の接点では水平、鉛直および面外方向の自由度を拘束した。また、上スタブ上端には柱軸力比 $N/bD\sigma_B$ で0.2に相当する一定軸力を等分布荷重で与えた。水平方向は片持ち柱方式によりスタブ上端を変位制御によって $R=1/1600\text{rad.}$ で1サイクル、 $1/800\text{ rad.}$, $1/400\text{ rad.}$, $1/200\text{ rad.}$ および $1/133\text{ rad.}$ で各2サイクルの载荷を実施した。なお、せん断スパン比 M/Qd は1.15とした。解析には非線形コンクリート構造解析ソフト「FINAL」⁹⁾を使用した。

3. 解析結果

3.1 ひび割れ損傷状況および荷重-変形角関係

図-3および図-4に解析モデルCase1からCase4のうち、開口周比0.1, 0.3および0.5におけるひび割れ損傷状況および荷重-変形角関係を示す。なお、図-3内では薄灰色および灰色で示す要素がコンクリートの応力-ひずみ関係で圧縮軟化域下にある要素であり、圧壊が生じる要素であることを示している。

各解析とも $R=1/200\text{rad.}$ もしくは $1/133\text{rad.}$ サイクルで最大耐力に達した後に各要素の損傷増大の影響により解析中の収束計算が不安定となり終了した。

荷重-変形角関係の比較より、いずれの解析モデルにおいても同じ開口配置では開口周比が小さい0.1のものが最も耐力が高くなる傾向を示した。また、このときのひび割れ損傷状況をみると、Case3-0.1では1層開口下部の損傷集中がみられたものの、他の解析モデルにおいては1層圧縮側柱脚部に損傷が集中する傾向を示した。こ

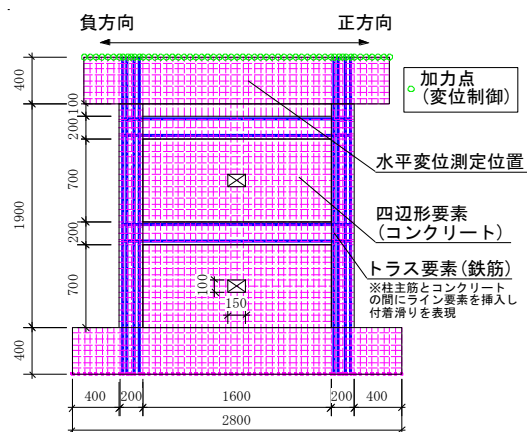


図-2 要素分割 (解析モデル Case1)

れに対して、開口周比が 0.5 となる場合にはいずれの解析モデルにおいても最も耐力が低くなる傾向を示すとともに、1 層壁板下部付近の開口端部や 2 層梁直下の壁板など部材剛性が急変する部位に損傷が集中する傾向がみ

られた。一方、開口周比 0.3 ではいずれも袖壁全体に損傷が認められ、既往研究とほぼ同様の破壊傾向がみられる結果となった。

以上のことより、開口周比の差異によって損傷経過に

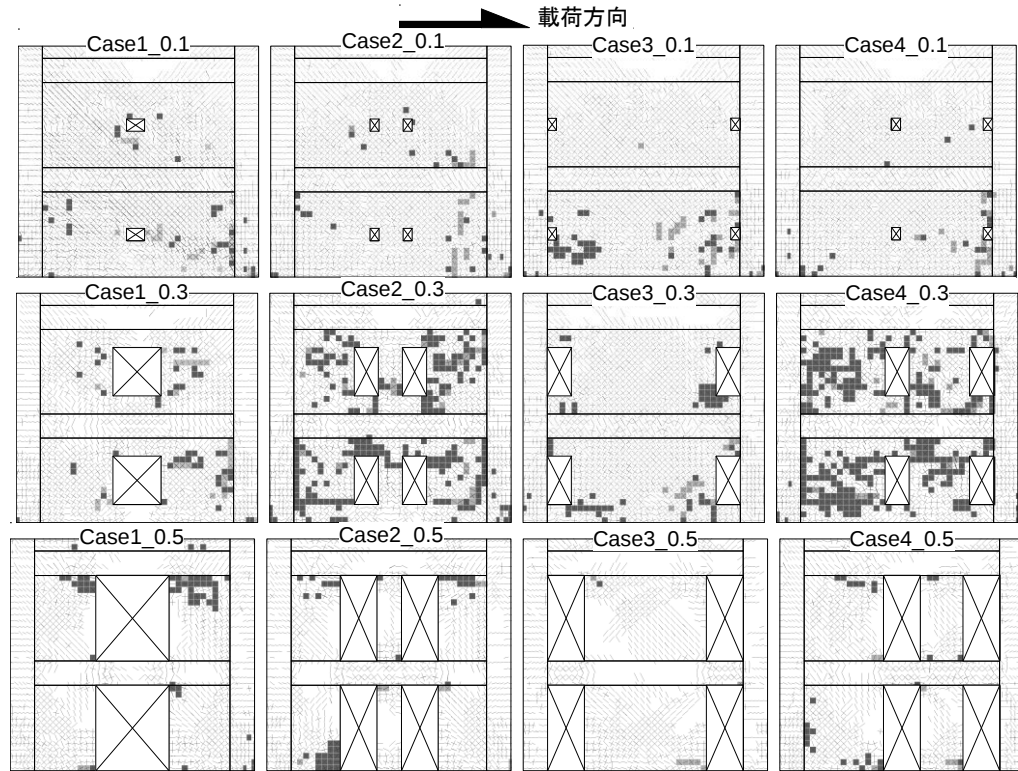


図-3 ひび割れ損傷状況（最大耐力時）

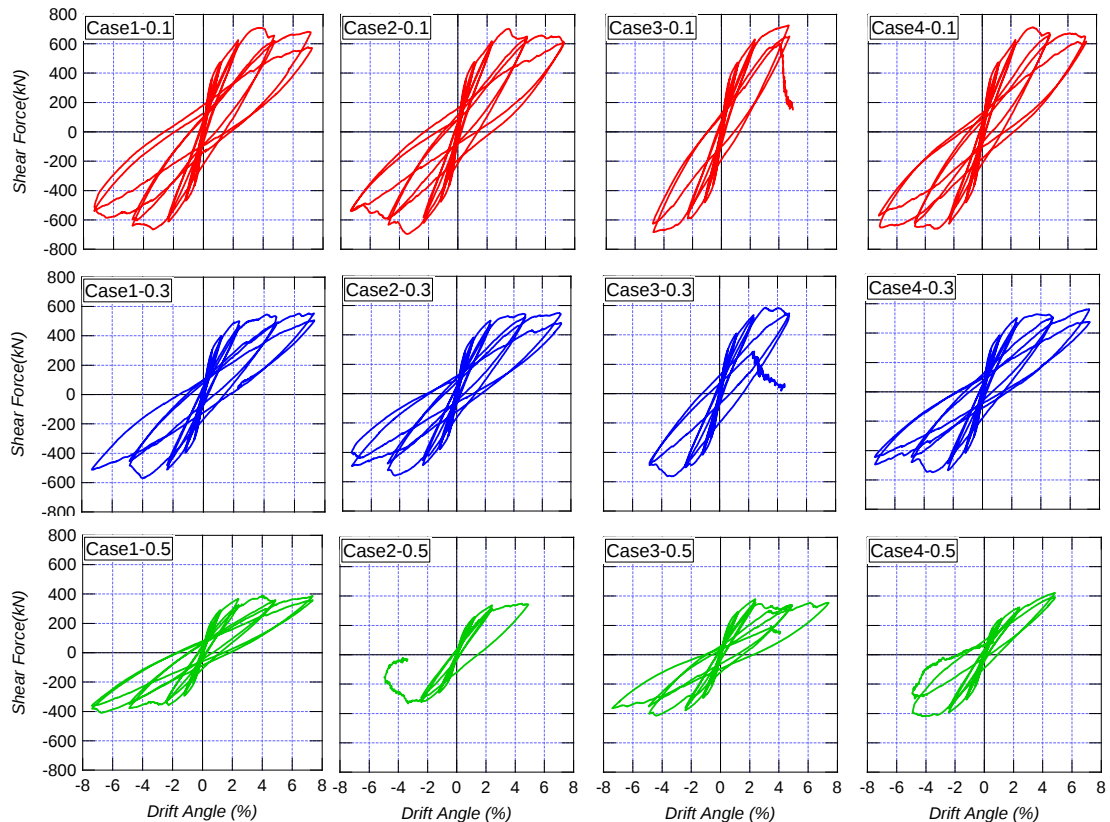
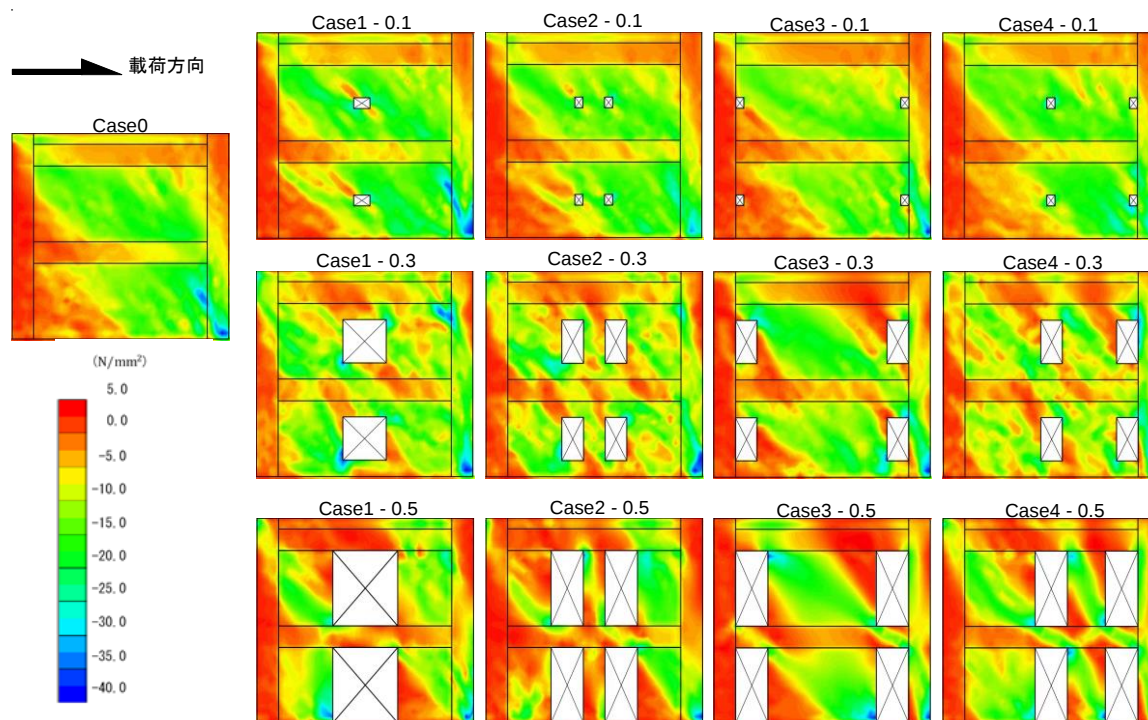


図-4 荷重－変形角関係（開口周比：0.1、0.3および0.5）



図－5 最小主応力分布

変化がみられる傾向を示しており、耐震壁の応力抵抗機構が推移しているものと推察される。

3.2 最小主応力分布

図－5に解析モデル Case0 から Case4 のうち、開口周比 0.1、0.3 および 0.5 におけるコンクリート要素の最小主応力分布（圧縮応力分布）を示す。

最小主応力分布より、開口周比 0.1 の解析モデルではいずれも 2 層引張側柱頭部付近から 1 層圧縮側柱脚部付近へ向かう圧縮ストラットが形成されているのが確認できる。このストラットは開口の存在によってストラットが分断される場合があるものの、同図に併記している無開口耐震壁で形成されるストラットに酷似していることがわかる。これに対して、開口周比 0.3 の場合では既報³⁾どおり開口横の壁板でそれぞれ圧縮ストラットが形成されている傾向がみられた。一方、開口周比 0.5 の場合においては、開口が壁板の大部分を占めるため、2 層から 1 層への圧縮ストラットが壁板や梁の狭い領域に形成されることから、いずれの解析モデルにおいても圧縮ストラットが流れる 1 層梁端部に高い圧縮応力が生じ、開口に隣接する壁板端部にも高い圧縮応力が生じているのがわかる。壁板端部の応力集中部位は前節で述べた損傷箇所とも概ね一致しており、局所的な応力集中によって壁板の圧壊に至り、当該箇所が塑性ヒンジ化することで耐震壁の早期の耐力低下とともにフレーム的な挙動を誘発するものと推察される。

以上のことより、有開口耐震壁では開口周比が小さいと無開口耐震壁のような抵抗機構によって壁板全体で水平力に抵抗しているが、開口周比の増大に伴いやがて開口横の壁板に個々に圧縮ストラットが形成されるように

なることがわかる。また、さらに開口周比を増大させると開口横の壁板端部に局所的な応力集中が生じ、当該箇所の塑性化によってフレーム的な挙動を示すようになるものと推察される。

4. ストラット式による適用範囲の検討

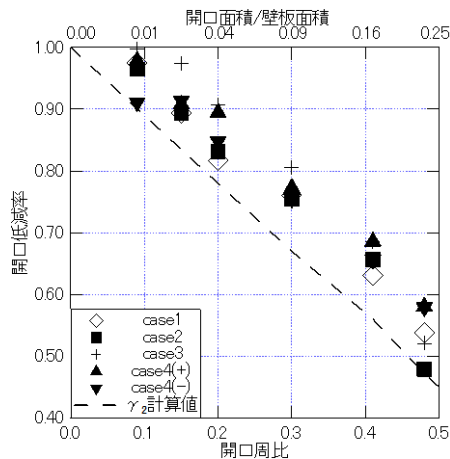
4.1 開口周比が低い耐震壁に対する強度低減率の検証

RC 規準では過去の実験結果に基づいて導出された開口による強度低減率－開口周比関係が示されている⁴⁾が、開口周比が小さい場合には同低減率の適用により安全側に評価することができることを示唆しているのみであり、特に開口周比 0.3 以下のケースについてはデータがなく性状が示されていない。そこで本論文では FEM 解析結果に基づいて開口周比 0.1 から 0.5 までの強度低減率について検証することとした。

図－6に FEM 解析結果より算定した開口による強度低減率－開口周比関係を示す。同図の縦軸である強度低減率は無開口耐震壁である解析モデル Case0 のせん断強度計算値に対する各解析モデルのせん断強度計算値の比率で示されるものである。また同図には上軸に壁板面積に対する開口面積の比率を示すとともに、式(2)に示す RC 規準にある開口面積による強度低減率の計算値も図示する。

$$\gamma_2 = 1 - 1.1 \sqrt{\frac{\sum h_{op} l_{op}}{hl}} \quad (2)$$

図－6をみると、すべての解析モデルで RC 規準の強度低減率計算値を上回っており、それぞれ安全側に評価可



図－6 強度低減率－開口周比関係

能であるといえる。また、偏在開口となる解析モデルにおいては載荷方向によって強度低減率に差異が生じる場合があることがわかる。強度低減率と開口周比の関係をみると、3章で述べた通り開口周比の増大に伴い最大耐力が低下する傾向にあることから、強度低減率も同様に低下する傾向を示している。その一方で、無開口耐震壁に近い応力抵抗機構を示した開口周比 0.1 の解析モデルでは強度低減率が 0.91 から 0.99 となり、無開口耐震壁に対してほとんど耐力低下が認められない結果となった。開口周比 0.15 の場合においても概ね 0.9 前後となっている。このことから、壁板面積に対する開口面積の割合が 2% 未満では開口の影響による強度低減が非常に小さくなると推察される。

4.2 開口周比を変数としたストラット式の妥当性の検証

前節までに、有開口耐震壁では開口周比の増大に伴い耐震壁の内部応力抵抗機構が遷移するとともにせん断耐力が低下する傾向があることを示した。本節では、開口横に形成される圧縮ストラットによって耐力が決定するものと仮定したストラット式を用いて、本解析で用いた解析モデルのせん断強度の算定を行い、その算定精度を検証することで当該評価法の適用範囲の推定を試みる。

図－7 にストラット式算定における壁板のストラットの仮定を、図－8 に側柱および袖壁の取り扱いを示す。せん断終局強度 < ストラット式 >³⁾

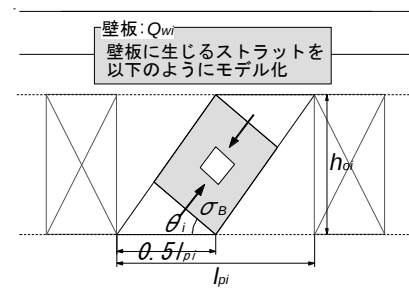
$$Q_{wo} = \sum_{i=1}^{n+1} Q_{wi} \quad (3)$$

$$Q_{wi} = v\sigma_B \cdot \cos\theta_i \sin\theta_i \cdot 0.5l_{pi} \cdot t_i \quad (4)$$

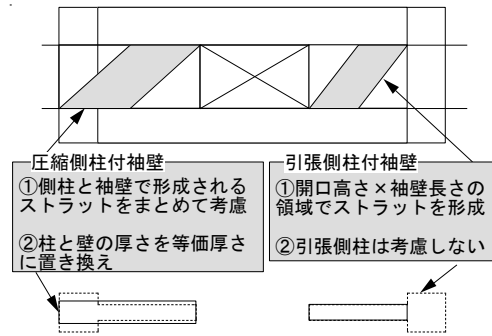
$$v = -0.016\sigma_B - 0.16 \frac{M}{QD} \quad (5)$$

$$+ 0.36 \frac{N}{bD\sigma_B} + 0.27p_w + 1.23$$

n : 開口数, l_{pi} : 壁板長, M/QD : せん断スパン比 (=1.15), $N/bD\sigma_B$: 側柱軸力比 (=0.2), θ_i : 各壁板の形成ストラットの角度 (図－7 を参照), t_i : 壁厚 (袖壁の場合は図－8 に



図－7 壁板におけるストラットの仮定

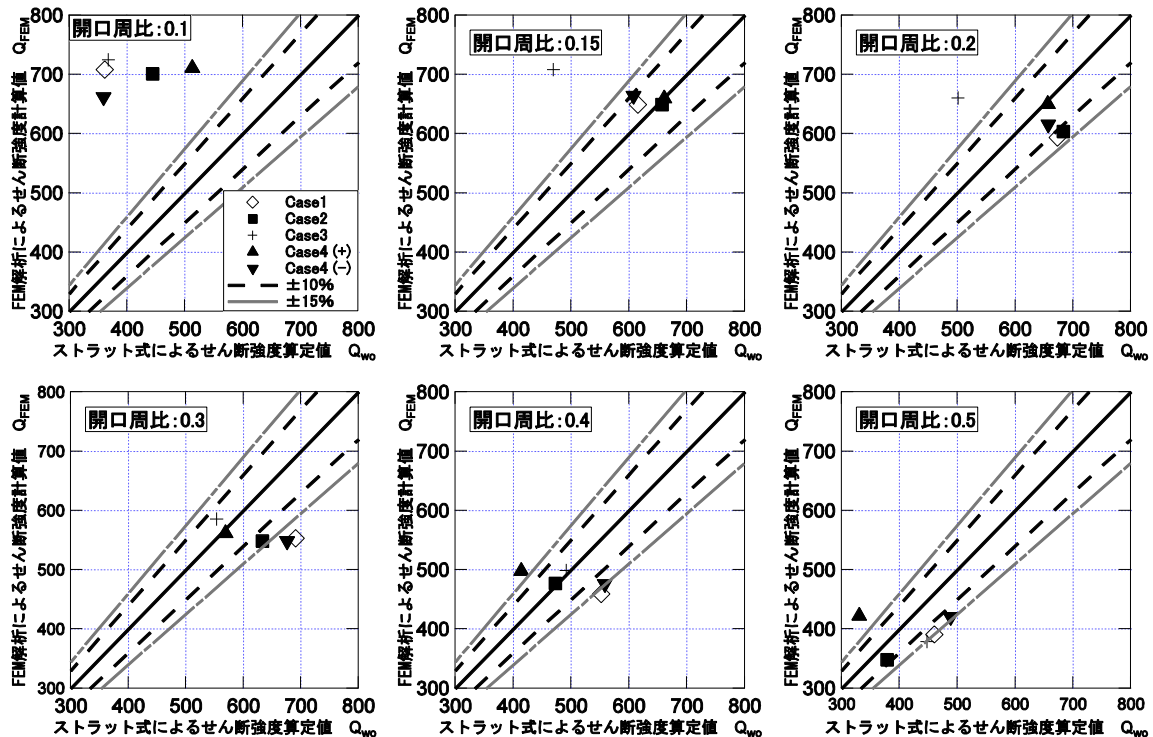


図－8 袖壁および側柱の取り扱い

従い等価壁厚を使用する) (mm), p_w : 壁筋比, σ_B : コンクリートの 1 軸圧縮強度 (N/mm²)

図－9 にそれぞれの開口周比における解析モデルのストラット式を用いたせん断強度算定結果を示す。図中の横軸には式(3)から式(5)により算定したストラット式の算定結果を縦軸には 3 章の FEM 解析による計算結果をそれぞれプロットした。

図－9 をみると、開口周比 0.1 の解析モデルにおいて FEM 解析によるせん断強度計算値に対するストラット式によるせん断強度算定値の比率はおよそ 0.49 から 0.71 となり、いずれの場合もストラット式によるせん断強度算定値が FEM 解析によるせん断強度計算値を過小評価する結果となった。この理由としてはこれまでに述べたように、開口周比 0.1 程度の有開口耐震壁においては応力伝達機構が無開口耐震壁のものに近いと推察される。その一方で、開口周比 0.15 から 0.5 までの解析モデルにおけるせん断強度算定結果はいずれも FEM 解析による計算値に対する誤差 15% 程度で概ね評価することができた。前章において開口周比 0.5 の解析モデルでは壁板端部の局所的な圧壊からフレーム的挙動に移行する可能性があることを指摘したが、せん断耐力自体はいずれの解析モデルにおいても壁板内で形成されるストラットにより決定していたものと推察される。本論文で設定した解析変数は開口周比が 0.5 までであったが、さらなる開口周比の増大や開口の配置の組み合わせによっては、壁板ではな



図ー9 ストラット式を用いたせん断強度算定結果

く梁など損傷が先行する可能性がある。そのような場合においてはストラット式で想定している破壊モードと異なり、せん断強度の算定精度の差異が生じることが予想され、さらに詳細な検討が必要であるといえる。

5. まとめ

本論文では開口の大きさ、位置、および個数を変数とした FEM パラメトリック解析を行い、それらの差異が有開口耐震壁の構造性能、耐力低下に及ぼす影響および開口周比に着目したストラット式の適用範囲について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 開口周比が小さい有開口耐震壁では、無開口耐震壁のような抵抗機構によって壁板全体で水平力に抵抗しているが、開口周比の増大に伴い、開口横の壁板に個々に形成される圧縮ストラットによる抵抗機構に移転する。また、さらに開口周比を増大させると開口横の壁板端部に局所的な応力集中が生じ、当該箇所の塑性化によってフレーム的な挙動を示す。
- (2) 壁板面積に対する開口面積の割合が 2%未満では開口の影響によるせん断強度の低減は非常に小さい。
- (3) 開口周比 0.15 から 0.5 の有開口耐震壁においてはストラット式を用いることでせん断強度を精度よく評価することができる。

なお、本論では開口による強度低減のうち、開口面積に着目して検討している。開口長さの変化による耐震壁の性状に関しては別途検討が必要であり、提案式との対応についても今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 小野正行, 徳広育夫: 鉄筋コンクリート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, Vol.435, pp.119-129, 1992.5.
- 2) 櫻井真人, 松井智哉, 倉本洋: 複数開口を有する RC 造耐震壁の破壊モードに及ぼす開口配置の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, pp.415-420, 2010.7
- 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, No.679, pp.1445-1453, 2012.9
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 2010
- 5) 鈴木健太, 秋田知芳, 松井智哉, 倉本洋: 複数開口を有する RC 造有開口耐震壁の静的載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.325-330, 2007.7.
- 6) 櫻井真人, 鈴木健太, 松井智哉, 倉本洋: 複数開口を有する RC 造耐震壁の耐震性能に及ぼす開口配置の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, pp.421-426, 2008.7
- 7) 櫻井真人, 松井智哉, 倉本洋: 複数開口を有する RC 造耐震壁の非線形 FEM 解析, 日本建築学会構造系論文集, No.639, pp.915-923, 2009.5
- 8) 伊藤忠テクノソリューションズ(株): FINAL/V11 HELP