論文　包絡開口とみなされる有開口 RC 造耐震壁の FEM パラメトリック解析

及川　有也[*1]・櫻井　真人[*2]・西田　哲也[*3]

要旨：各規基準で示される有開口耐震壁における各開口の置換判定法の適用範囲の解明を目的として FEM パラメトリック解析を行った。解析の結果，開口間隔よりも開口形状による耐力低下が支配的であり，本解析の開口条件においては元の開口の投影面積が包絡開口面積と近い場合に包絡開口による算定と良い対応を示した。また包絡開口時の等価開口周比が大きいモデルの場合，開口間隔の増加に伴い最大せん断力も増加し，現行の RC 規準による終局せん断耐力算定手法では，最大せん断力を過小評価することとなった。

キーワード：複数開口耐震壁，包絡開口，対角開口，せん断強度，FEM 解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）造建築物における主要な耐震要素のひとつである耐震壁は，建築計画等の理由から開口を設けた有開口耐震壁となる場合が多い。耐震壁の同一層に複数の開口が設けられている場合，現行の鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説[1)]（以下，RC 規準）には，投影高さと投影長さを考慮した包絡開口に置換して，開口に応じた低減率を無開口耐震壁の終局せん断耐力に乗じて算定する設計手法が記されている。本手法は簡便な方法であるものの，投影長さと投影高さが等しいと開口面積や間隔によらず同等の終局せん断耐力が算定される。しかし既往の研究[2)]によると同一層に開口が複数設けられている場合，開口配置に応じて最大耐力や破壊性状に差異が生じることから，本手法の適用の可否ついては設計者の判断に委ねられている。

このような背景から，筆者らは元の開口形状と開口間隔の差異が終局せん断耐力に及ぼす影響ならびに包絡開口に置換する算定手法の適用条件を明確にすることを目的として研究を行っている。昨年度には包絡開口とみなすと等価な終局せん断耐力が算定される有開口耐震壁を対象に構造実験[3)]を行い，開口間隔と開口形状の差異によって最大耐力が変化することを示すとともに，開口間壁板の最大耐力への寄与状況について考察してきた。

一方，有開口耐震壁を対象とした有限要素解析（以下，FEM 解析）によって実験の履歴特性を再現するモデル化手法[4), 5)]も構築されており，筆者も包絡開口試験体を対象に解析を行い，実験結果を模擬できることを示した[6)]。

以上の成果を基に，本論文では包絡開口に置換することで同一の終局せん断耐力を算定しうる有開口耐震壁のモデルによるパラメトリック解析を行い，開口計画の差異による水平成分のせん断伝達性状の把握を行う。

2. FEM 解析概要[3)]

2.1 パラメトリック解析モデル

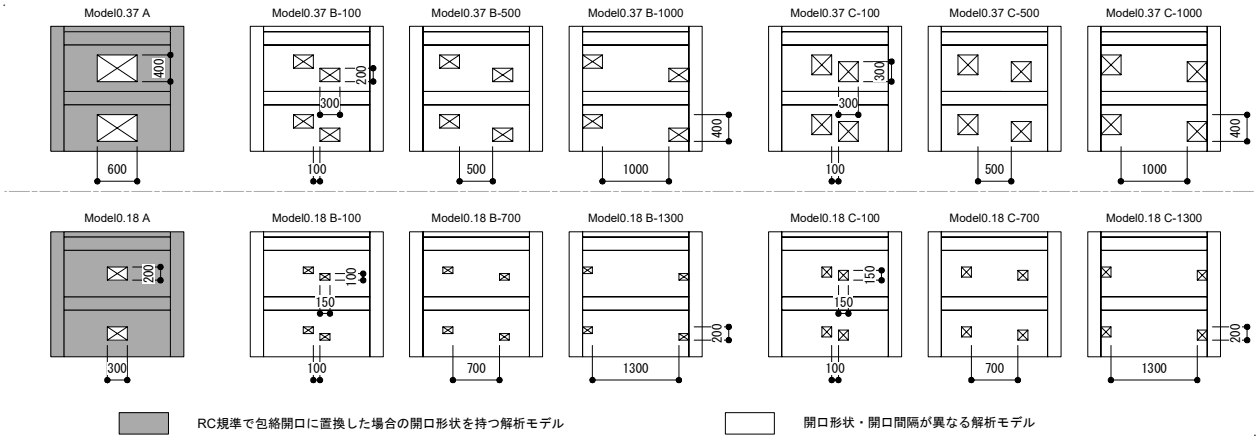
図－1 に開口を変数とした解析モデルの一例を，**図－2** に解析モデル名称を示す。本解析では文献 3）の包絡開口試験体 WEO1，WEO2 の開口計画を基に開口サイズ，開口形状および開口間隔を解析変数とした。開口サイズは，WEO1，WEO2 と同様に包絡開口の等価開口周比が 0.37 となるものを Model0.37，およそ半分の等価開口周比 0.18 となるものを Model0.18 とそれぞれ呼称する。開口形状は元の開口長さに対する開口高さの比が WEO1 の開口形状と同様に 1:2/3 である開口形状のモデルを B，WEO2 の開口形状と同様に 1：1 である開口形状のモデルを C とし，包絡開口に置換した際の開口形状のモデルを A と呼称する。また，開口形状ごとに開口間隔の最小値 100mm，増分値 100mm として解析を行う。解析モデル数は，Model0.37 の場合開口形状シリーズ毎に 10 体，Model0.18 の場合開口形状シリーズ毎に 13 体，各開口サイズの包絡開口を持つ解析モデル A で 2 体の合計で 48 体のモデルを対象に解析を行った。本解析モデルでは，いずれの解析モデルも同一の開口サイズであれば，開口形状 A シリーズに示した包絡開口に置換することで開口間隔や開口形状によらず同一の終局せん断耐力を算定することを意図している。

そのほか解析モデルの詳細について，**表－1** に解析モデル諸元を示す。解析モデルは実物大の約 1/3 スケールで一般的な 6 層程度の RC 造建物の下部を想定した連層耐震壁の試験体を対象としている。実験概要は文献 3）を参照されたい。

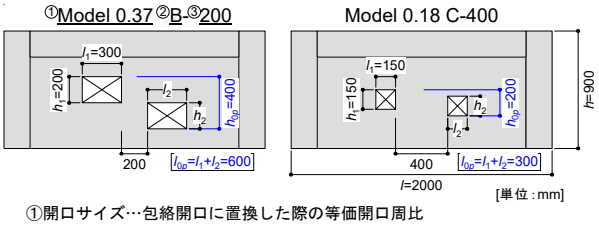
2.2 解析モデル化手法

図－3 に対象とした解析モデルの要素分割図を示す。また**表－2** に材料特性を，**表－3** に載荷サイクルを示す。

*1 秋田県立大学大学院　システム科学技術研究科建築環境システム学専攻　大学院生 学士（工学）　（学生会員）
*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 助教　博士（工学）　（正会員）
*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）

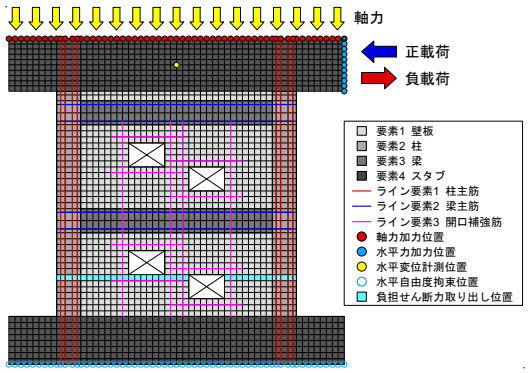


図－1　開口パターン，開口形状および開口間隔を変数とした解析モデル代表例



①開口サイズ…包絡開口に置換した際の等価開口周比
②開口形状…[A]包絡開口と同じ形状
[B]開口長さに対する高さの比が1:2/3
[C]開口長さに対する高さの比が1:1
③開口間隔…最小100mmから増分100mm

図－2　解析モデル名称



図－3　解析モデル要素分割（例:Model0.37 B-200）

解析には非線形コンクリート構造解析ソフト『FINAL』[7]を使用した。解析は二次元解析とし，要素分割は壁 50mm×50mm，柱・梁は主筋間隔に合わせた要素分割とした。コンクリートは四辺形要素でモデル化し，壁筋および補強筋は埋め込み鉄筋として鉄筋層に置換した。柱梁主筋はトラス要素として線材に置換し，接合要素でコンクリート要素と接合することで主筋の付着を再現した。

解析の加力について，実験では鉛直ジャッキでせん断スパン比をコントロールしていることから，解析では上スタブ上端に鉛直荷重 400kN を加えたのちに，上スタブ右から**表－3** の載荷表に従い加力を行った。加力は目標変位までは変位制御とし，その後 0kN まで応力制御で除荷し，再び目標変位まで変位制御を行った。

材料特性値は，コンクリートの一軸圧縮強度 σ_B を 25N/mm^2 とし，一軸圧縮強度をもとに低減したヤング係数 Ec，引張強度 F_T および割増した圧縮ひずみ ε_{C0} を文献 5）と同様の式で算定した値で解析を行ったほか，材料構成則についても文献 5）と同様のものとした。この詳細は文献 5）を参照されたい。

表－1　解析モデル諸元

		Model0.18	Model0.37
柱	B×D	200×200mm	
	主筋	12-D13（P_g=3.8%）	
	帯筋	D6@60（P_s=0.53%）	
	副帯筋	2-D6@120（P_s=0.27%）	
梁	B×D	150mm×200mm	
	主筋	4-D10（P_g=3.8%）	
	帯筋	2-D6@100（P_s=0.42%）	
壁	壁厚	80mm	
	縦筋	D6@100 千鳥（P_s=0.4%）	
	横筋	D6@100 千鳥（P_s=0.4%）	
	開口補強筋	D10	
開口間隔	最小値	100mm	100mm
	最大値	1300mm	1000mm
包絡開口		200×300mm	400×600mm

表－2　材料特性

鉄筋

種別	使用部位	降伏強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)
D6	壁筋・柱梁補強筋	295	2.05×10^5
D10	梁主筋・開口補強筋	345	2.05×10^5
D13	柱主筋	390	2.05×10^5

コンクリート[5]

σ_B (N/mm^2)	F_T (N/mm^2)	E_C (kN/mm^2)	ポアソン比	圧縮ひずみ (μ)
25	1.32	1.19	0.167	4500

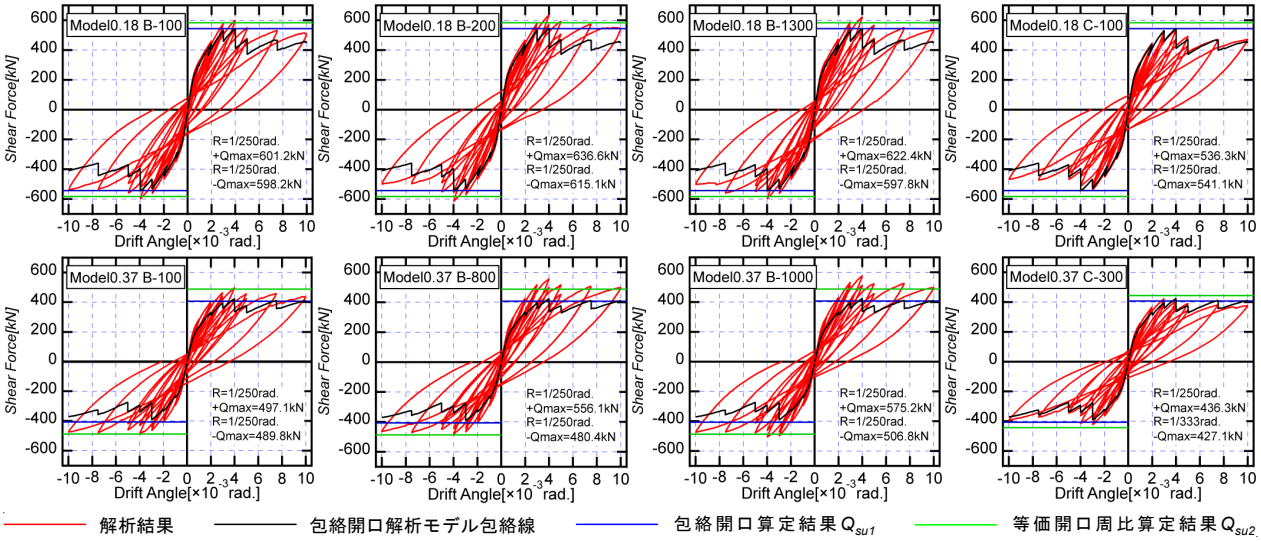
表－3　載荷サイクル

部材角 R（Rad.）	計測変位 δ（mm）	サイクル数
1/1000	2.1	2
1/500	4.2	2
1/333	6.3	2
1/250	8.4	2
1/200	10.5	2
1/133	15.79	1
1/100	21	1

3. 解析結果

3.1 履歴特性

図－4 に各解析モデルのせん断力－部材角関係のうち，特徴的なものをいくつか示す。図中における赤線が開口



図－4　荷重－部材角関係

形状 B シリーズおよび C シリーズの解析から得られたせん断力－部材角関係で，黒線は A シリーズの包絡線である。また，図中には各計算式による終局せん断耐力算定値を青線および緑線で示しているが，算定方法ならびに結果については 3.4 節で後述する。

いずれも開口間隔が小さい場合，載荷方向による最大せん断力の差異はほとんど見られない。これは文献 2）に示される中央開口試験体 WO1 でも載荷方向による最大耐力の差異はほとんどなく，このような開口条件では中央の単一開口とみなして算定することができると言える。特に開口形状 C シリーズの場合， Model0.18 では開口間隔 100mm まで，Model0.37 では開口間隔 300mm まで A シリーズの解析結果と近い履歴ループを示し，包絡開口による算定を適用できると推察される。しかし，開口間隔が増加することで文献 8）に示すような開口が斜め方向に配置された対角開口試験体 WO7 のような載荷方向により最大耐力に差異が生じる特徴が確認できた。

以上のことより，開口間隔が小さい場合には載荷方向による最大せん断力の差異がみられず，現行の計算規基準によるせん断耐力算定法を適用可能である。一方開口間隔が大きい場合，載荷方向による差異を表現できる算定法が必要である。

3.2 せん断応力度分布のコンター図および破壊性状

図－5 に最大せん断力時に形成されたせん断応力度分布のコンター図を，**図－6** に最大せん断力時におけるひび割れを示す。各部材は，図中左の柱を左側柱，右の柱を右側柱とし，各柱に付帯する袖壁をそれぞれ左側袖壁，右側袖壁，開口に挟まれた壁板を開口間壁板とする。

本解析における対角配置された開口条件の場合，載荷方向によって形成されるストラットの角度や幅に差異が生じていた。また負載荷では，開口間隔が小さい場合には 2 層左側袖壁から 1 層右側袖壁にストラットが形成されるのに対し，開口間隔が大きくなることで 2 層左側袖壁から 1 層開口間壁板でストラットが形成されることから，上下層の開口位置によっても部材に伝達されるせん断力に差異が生じると推察される。

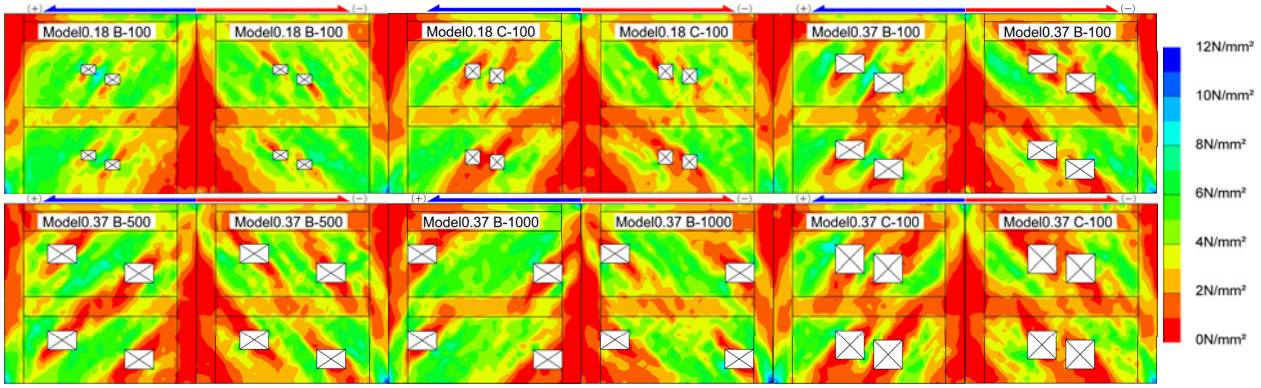
図－6 のひび割れおよびコンクリートの圧縮軟化の結果から，Model0.37 B-100 のように開口間隔が小さい場合，2 層右側袖壁から 1 層開口間壁板に応力が伝達されにくく，2 層の圧縮軟化による破壊が先行することが確認できる。一方，開口間隔が増加すると，Model0.37 B-300 のように 1 層と 2 層で同程度の圧縮軟化の進行がみられた。これは**図－7** に示す文献 3）の包絡開口試験体でも同様の結果を示した。さらに開口間隔が Model0.37 B-500 程度に増加すると，開口周辺部で圧縮軟化がみられ，開口間壁板の圧縮軟化は軽度になる傾向がみられた。

3.3 各部材の負担せん断力

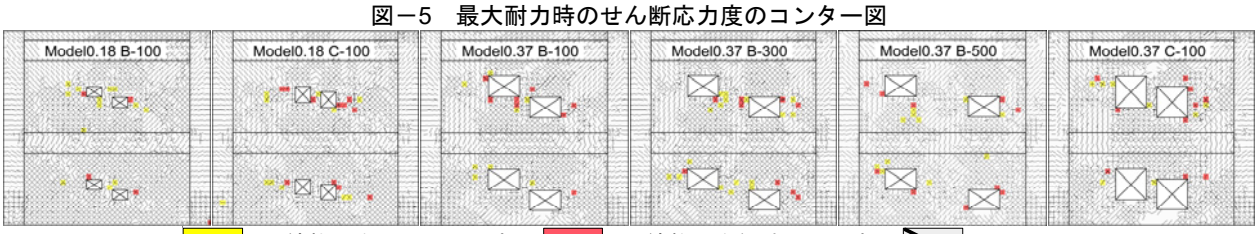
図－8 に各解析モデルの R=1/250rad.時の 1 層における各部材のコンクリート要素が負担するせん断力を示す。なお，同図には各計算式による終局せん断耐力算定値 Q_{sui} に対する解析モデルの最大せん断力 Q_{ana} との比 Q_{ana}/Q_{su1} および Q_{ana}/Q_{su2} を左軸に，各部材の負担せん断力を右軸に示す。負担せん断力は**図－3** に示す 1 層壁板高さの中央位置である，脚部からの高さ 350mm の要素の負担せん断力を各柱，各袖壁，開口間壁板と部位別に示す。なお，開口形状 B シリーズの場合，開口直下にもコンクリート要素が存在するのに対して，C シリーズの開口配置では要素が存在しないことから B シリーズは開口直下の要素から算定した負担せん断力についても示す。

解析結果から，開口間隔の増加に伴い最大せん断力が増加する傾向が全体的に見られたものの， Model0.18 の場合は開口間隔 200mm 以降の増加はわずかであった。それに対し Model0.37 の場合， 開口形状 B シリーズは開口間隔 900mm まで，C シリーズは 800mm まで最大せん断力が増加する傾向が見られた。

各要素の負担せん断力について比較すると，圧縮側柱

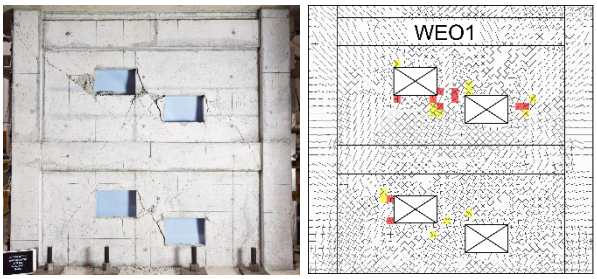


図－5　最大耐力時のせん断応力度のコンター図



圧縮軟化をしている要素　圧縮軟化を経験した要素　ひび割れ

図－6　最大耐力時のひび割れ



図－7　実験結果と解析結果の比較

の負担せん断力は開口間隔によって差異が生じ，最も高い値で Model0.37 B-1000 の負載荷方向時の 200kN 程度であった。これは**図－5** のコンター図を見ると側柱に開口が接することで，開口上部を通るストラットが開口隅角部で集中したことにより側柱の負担せん断力が高くなったと思われる。しかし，開口間隔が異なる場合であっても，100kN から 150kN のおおよそ一定の負担せん断力で推移していた。一方，1 層の引張側柱はいずれの解析モデルでもほとんどせん断力を負担していなかった。

一方袖壁および開口間壁板は部材長さによって負担せん断力に差異が生じているが，袖壁については Model0.18 B シリーズ，C シリーズおよび Model0.37 B シリーズの場合，圧縮側は引張側と比較して 2 倍以上せん断力を負担しているのに対して，Model0.37 C シリーズでは圧縮側と引張側部材の負担状況が同程度となり，圧縮側の負担せん断力が低くなる傾向を示した。また，袖壁や開口間壁板の部材長の差異によって形成されるストラットも形状が変化する傾向があり，袖壁の負担するせん断力の減少に伴い開口間壁板の負担せん断力が増加する。一例として， Model0.37 において，B-500 の正載荷時のように引張側袖壁となる 1 層右側袖壁でのせん断力の伝達がほとんどない場合，開口間隔 600mm 以上で引張側袖壁の負担せん断力の減少が頭打ちとなる一方で，開口間隔の増加に伴う開口間壁板のせん断力の増加が顕著となり，最大せん断力が増加するものと推察される。

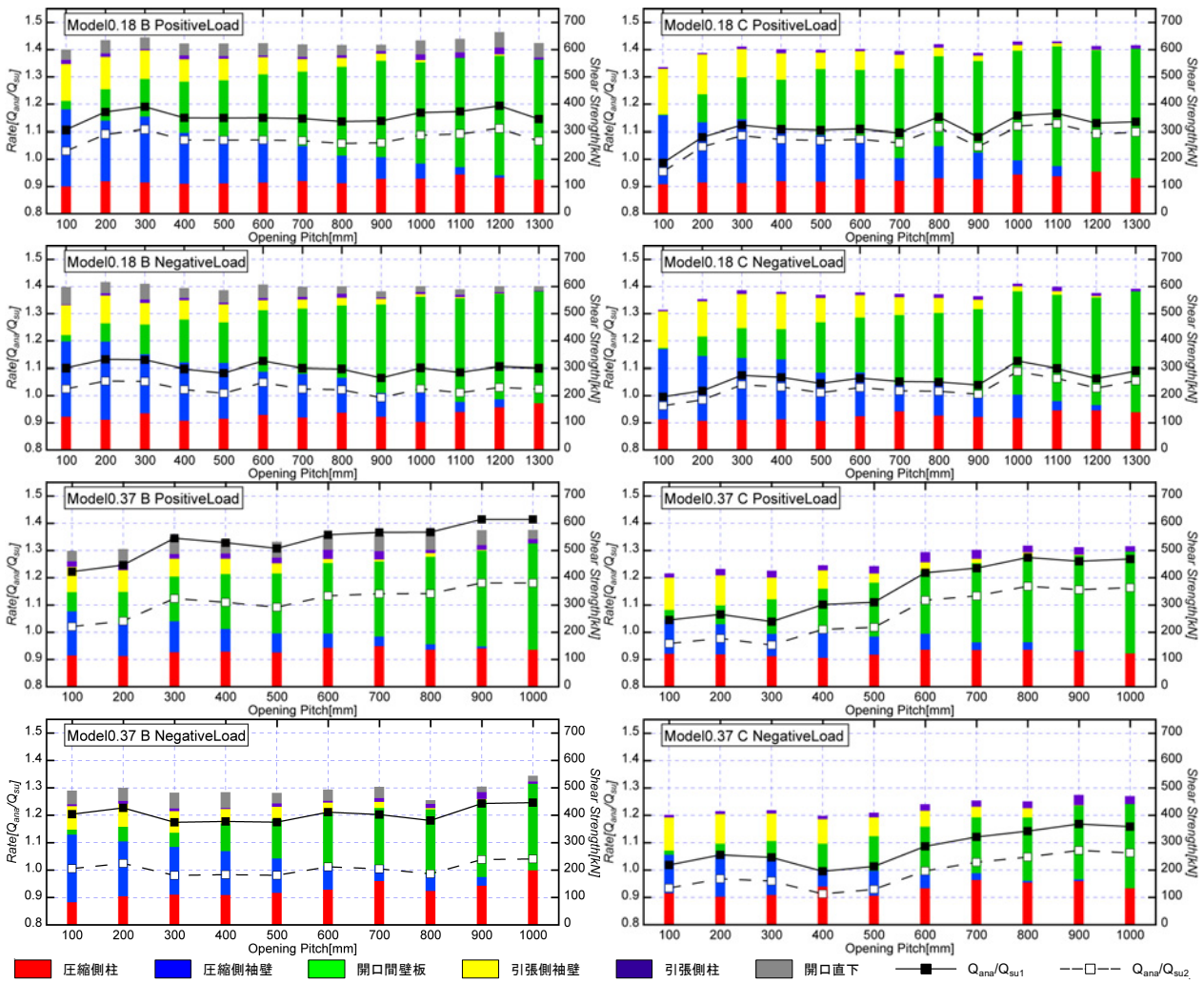
一方，開口直下の部材が負担するせん断力の場合，Model0.18 と Model0.37 では開口長さが 2 倍異なるにもかかわらず，Model0.18 B シリーズと Model0.37 B シリーズの正載荷方向を比較すると，開口間隔が同一であればおおよそ等しい負担せん断力を示した。これは開口隅角部に応力が集中して開口直下に回り込むように応力が伝達されているため，開口長さが増加しても同じ傾向になることが予想できる。

開口間壁板について，Model0.18 の場合， C -100 ではいずれの載荷方向でもストラットが形成されず，開口間壁板が負担するせん断力がわずかであることから，3.1 節のように包絡開口の開口形状 A シリーズの解析結果と近似したと考えられる。また Model0.37 の場合，B-100，C-100 ともに正載荷で 1 層開口間壁板でのストラットは形成されているものの，C-100 は B-100 と比較するとストラットの幅が小さく，載荷方向による最大せん断力の差異がほとんどないことから開口形状 A シリーズのモデルと近似したと推察される。

本解析による開口配置の場合，正載荷ではストラットが形成される方向に向かって開口が配置されているのに対し，負載荷ではストラットが形成される方向にならぶように開口が配置されている。そのため同一載荷方向の開口間せん断力を比較すると，負載荷では伝達されるせん断力が低下し，最大せん断力が低くなる傾向を示した。

3.4 FEM 解析の最大せん断耐力およびせん耐力算定結果

表－4 に各算定式による終局せん断耐力算定値を示す。RC 規準で有開口耐震壁の終局せん断耐力を算定する場



図－8　各解析モデルの負担せん断力

表－4　せん断耐力算定結果

解析モデル	無開口 (kN)	包絡開口 Q_{su1}（kN）		等価開口周比合計 Q_{su2}（kN）			
		低減率	B，C	低減率	B	低減率	C
Model0.18	680.1	0.80	543.4	0.86	583.5	0.83	561.8
Model0.37		0.60	406.7	0.72	487.0	0.65	443.4

合，無開口耐震壁の終局せん断耐力に開口形状に応じた低減率 r を乗じて算定する。本論文では複数の開口を包絡開口に置換して終局せん断耐力を算定する手法の評価を目的としているが，RC 規準には投影面積当たりの欠損率や水平断面の欠損率の合計による低減率から終局せん断耐力を算定する手法についても記されている。そこで開口低減率を算定するにあたり，式（2）に示す複数の開口を包絡開口に置換して得られる低減率から終局せん断耐力を算定する Q_{su1} と，式（3）に示す各開口の等価開口周比を合計して低減する Q_{su2} で比較を行う。開口低減率の算定に用いた諸元は**図－2** に示しており，h_{0p} は左側開口上端部から右側開口下端部までの高さ，l_{0p} は各開口長さの合計である。終局曲げ耐力 Q_{mu} の算定は，終局せん断耐力が終局曲げ耐力より小さくなることを確認し，せん断先行破壊型であったことから省略する。なお，式中のその他記号については文献 1）を参照されたい。

〈終局せん断耐力〉[1)]

$$Q_{sui} = r_i \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23}(F_c+18)}{\sqrt{M/(Q \cdot D)+0.12}} + 0.85\sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh}} + 0.1\sigma_0 \right\} t_e j_e \qquad (1)$$

〈包絡開口による低減率〉[1)]

$$r_1 = 1 - max\left\{ 1.1 \times \frac{l_{0p}}{l}, 1.1 \times \sqrt{\frac{h_{0p} l_{0p}}{hl}}, \frac{h_{0p}}{h} \right\} \qquad (2)$$

〈等価開口周比の合計による低減率〉

$$r_2 = 1 - 1.1 \times \sqrt{\frac{h_1 l_1 + h_2 l_2}{hl}} \qquad (3)$$

各算定式と最大せん断力を比較すると，開口形状 C シリーズの開口間隔が小さい場合，等価開口周比の合計によるせん断耐力算定値 Q_{su2} では最大で 1 割程度耐力を高く算定し，包絡開口による算定値との対応が良くなる可能性を示した。いずれの開口サイズにおいても開口形状が C シリーズで開口間隔が 100mm 程度に小さい場合，包絡開口によるせん断耐力算定が解析の最大せん断力と

の対応がよくなる傾向にあり，B シリーズの場合には等価開口周比の合計による算定値との対応がよくなる結果となった。特に Model0.37 B の場合，包絡開口によるせん断耐力算定値 Q_{su1} と等価開口周比の合計によるせん断耐力算定値 Q_{su2} を比較すると，Q_{su2} は Q_{su1} のおよそ 2 割程度差異があるため，Q_{su1} による算定結果を適用した場合には過小評価することとなる。また，開口間隔 1000mm の場合 Q_{su1} 算定では 4 割耐力を低く評価してしまうことから，開口間隔が大きい場合には包絡開口による算定は不適当である。

Model0.18 については，開口間隔が増大しても最大せん断力はおおよそ一定で推移することから，開口サイズの大きさが最大せん断力へ及ぼす影響が支配的であり，開口間隔による影響はわずかになると推察される。しかし Model0.37 の場合には，開口直下の負担せん断力を全体から差し引いても開口形状 B の負担せん断力の合計が開口形状 C より高く，開口間隔が大きくなることでせん断力が増加することが確認できる。以上より，本解析モデルに示す Model0.18 から Model0.37 のように開口サイズが大きくなることで水平断面の欠損だけでなく，開口配置もせん断力に影響を及ぼすため，耐震壁のせん断耐力を合理的に評価するためには，壁板に対し開口が大きく，開口間隔が大きい場合にはこれらを考慮してせん断耐力を算定することが望ましい。

包絡開口による算定法の適用において，開口間隔が比較的小さく，元の開口の等価開口周比の合計と仮定した包絡開口の等価開口周比の差が小さいことを確認することで，耐震壁の持つせん断耐力を精度良く評価できる。一方，開口間隔が大きい場合には開口間壁板の負担せん断力の増加や載荷方向による最大耐力の差異により包絡開口による算定がそぐわない。

4.まとめ

本論文では RC 規準で包絡開口に置換した場合に等価な終局せん断耐力を算定する開口を有する RC 造耐震壁を対象に，開口サイズ，開口形状，開口間隔を解析変数としたパラメトリック解析を行った。解析より明らかになった知見を以下に示す。

1) せん断力－部材角関係から，対角開口において開口間隔が小さい場合，開口間隔が大きいモデルと比較して最大せん断力は低くなる。
2) 各部材の負担せん断力状況とせん断力－部材角関係から，いずれの開口形状のシリーズにおいても，開口間隔が小さく開口間壁板がせん断力を負担しない場合，載荷方向による最大せん断力の差異はわずかであった。これは中央開口試験体と同様の履歴特性であり，このような開口配置の場合，中央の単一開口による算定手法の適用が可能である。一方，開口間隔が増加する場合，載荷方向により壁板で形成されるストラットの形状や角度に差異が生じるため，最大耐力の差異を考慮した評価法が望ましい。
3) 開口形状 C シリーズのように包絡開口に置換する前の等価開口周比の合計と仮定した包絡開口の等価開口周比の差が小さく，かつ開口間隔が小さい場合，最大せん断力が包絡開口による算定手法と良い対応を示した。しかし，開口形状 B シリーズのように両者に差がある場合，開口間壁板の負担するせん断力により最大せん断力が同じ開口間隔の C シリーズと比較して高くなった。この時，包絡開口による算定では開口間隔によらず最大せん断力を過小評価する傾向を示し，等価開口周比の合計による算定値の方が良い対応を示した。
4) FEM 解析による最大せん断力と終局せん断耐力算定結果の比の推移から，包絡開口に置換した際の等価開口周比が小さい場合，開口間隔の変化が最大耐力に及ぼす影響はわずかになり，等価開口周比が大きくなることで開口配置による影響が大きくなる。

参考文献

1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018
2) 鈴木健太，秋田知芳，松本智哉，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，第 29 巻，第 3 号 pp.325-330，2007.7
3) 及川有也，櫻井真人，西田哲也：包絡開口とみなされる有開口 RC 造耐震壁の静的載荷実験，コンクリート工学年次論文集，第 42 巻，第 2 号 pp.397-402，2019.7
4) 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報告集，第 639 号，pp.915-923,2009.5
5) 三浦翔大，小林淳，櫻井真人，田所麻衣，相澤直之：開口間で応力集中が生じる RC 造有開口耐震壁の FEM 解析，日本建築学会東北支部研究報告集，第 80 号，pp.63-66，2017.6
6) 及川有也，櫻井真人，西田哲也：包絡開口とみなされる RC 造有開口耐震壁の FEM 解析，日本建築学会東北支部研究報告集，第 82 号，pp.25-28，2017.6
7) 伊藤忠テクノソリューションズ（株）：FINAL/V11
8) 櫻井真人，松井智哉，倉本洋：複数開口を有する RC 造耐震壁のせん断強度算定法，日本建築学会構造系論文報告集，第 679 号，pp.1445-1453,2012.9