

# 論文 鉄筋コンクリート造中央有開口耐震壁のせん断変形成分の実用的算定法に関する研究

萩尾 浩也\*1・津田 和明\*1

**要旨:** 本論文では、中央に開口を有する耐震壁の荷重とせん断変形関係を、実用的に算定する方法を提案する。中央有開口耐震壁のせん断強度は、開口横でのせん断破壊となる場合が多く、その破壊部分は開口による断面欠損の影響のための軸力の影響は無視できないと考え、軸力の影響を加味する手法を提案した。またせん断剛性低下率は、せん断変形成分に大きな影響を及ぼす水平方向抵抗バネ剛性と開口低減率を用いる簡便な方法を提案した。提案手法の適合性は、無開口および有開口耐震壁の実験結果をシミュレートする FEM モデルによるパラメトリック・スタディーの結果と比較することで、検証を行った。

**キーワード:** 有開口耐震壁, せん断耐力, せん断変形, せん断剛性低下率, FEM 解析

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造無開口耐震壁の挙動は、せん断変形成分が卓越することが多いため、既往研究において多々提案されている。しかし、有開口耐震壁の場合、せん断変形特性は、無開口耐震壁の研究と比較すると研究例が少ない。その中で、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説」<sup>1)</sup>(以降、性能評価指針と呼ぶ)に示された手法があるが、複雑であり、実務に適用するに当たっては簡略化が望まれている。実務的観点から、無開口耐震壁のせん断剛性低下率の算定には、RC 規準<sup>2)</sup>に示される方法があるが、有開口耐震壁の適用性に関しては、検証されていない。また、性能評価指針のせん断耐力算定法は、軸力の影響が効果的に考慮されていないが、中央有開口耐震壁がせん断破壊する場合、開口横でせん断破壊することが多く、その破壊部分には開口による断面欠損のための軸力の影響が無視できないと考えられる。そのため、せん断耐力の

算定に、軸力の影響を考慮する方法を提案する。

提案手法の適合性は、無開口および有開口耐震壁の実験結果をシミュレートする FEM モデルによるパラメトリック・スタディーの結果と比較することで、検証を行う。

## 2. 実験

### 2.1 試験体

試験体は、無開口耐震壁と有開口耐震壁の各 1 体とした。有開口耐震壁の開口は、RC 規準で耐震壁とみなせるほぼ最大の開口を設けた。その試験体一覧および有開口耐震壁の配筋図を、それぞれ表-1 および図-1 に示す。また、使用したコンクリートおよび鉄筋の材料特性は、それぞれ表-2 および表-3 に示す。

### 2.2 実験方法

加力は図-2 に示すように、一定軸力の荷重をしながら、加力高さ 1,000mm で押し引きによる水平力を載荷した。載荷履歴は、正負交番で部材角  $\pm 1/1000$ ,  $\pm 2/1000$ ,

表-1 試験体一覧

名称	破壊分類	Fc N/mm <sup>2</sup>	軸応力度 N/mm <sup>2</sup>	スパン mm	加力高さ mm	柱	梁	壁
ON	せん断	24.0	3.5	2,000	1,000 (0.50)	断面:200×200 主筋:8-D13 (Pg=2.54%) 帯筋:D6@100 (Pw=0.32%)	断面:500×400 主筋:20-D19 (Pt=1.43%) 帯筋:D10@100 (Pw=0.48%)	断面:60×1,800×800h 壁縦筋:D4@110 (Pv=0.40%) 壁横筋:D4@110 (Ph=0.40%)
O4								断面:60×1,800×800h 開口:800×400(r=0.4) 壁縦筋:D4@110 (Pv=0.40%) 壁横筋:D4@110 (Ph=0.40%)

Pg: 柱主筋比, Pw: せん断補強筋比, Pt: 引張鉄筋比, Pv: 壁縦筋比, Ph: 壁横筋比, r: 等価開口周比, h: 内法高さ

\*1 大林組技術研究所 構造技術研究部 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

±4/1000 で2回繰返しを行い、最後に押し切る方法とした。

### 2.3 実験結果

実験結果である荷重と部材角(%)の関係を図-3に示す。破壊状況は図-3中に示すように、無開口耐震壁および有開口耐震壁は、ともにせん断破壊をした。有開口耐震壁の破壊は、開口横であった。

## 3. 実験結果の解析

### 3.1 解析モデル

解析は、平面応力場で行い、柱および壁板はそれぞれ帯筋および壁筋を埋込み鉄筋として配置した四辺形要素、柱主筋はトラス要素でモデル化した。コンクリート

のテンションスティフニング特性およびひび割れ後のせん断伝達特性は、ともに長沼モデル<sup>3), 4)</sup>を用いた。応力〜ひずみ曲線は、修正 Ahmad モデル<sup>5)</sup>を用いた。鉄筋は、降伏後 1%ひずみ硬化を有するバイリニアモデルとした。鉄筋とコンクリートは、完全付着を仮定した。解析の加力は、実験の加力位置と対応する節点の変位制御で、単調載荷とした。使用プログラムは、FINAL である。

### 3.2 解析結果

解析と実験の比較を、図-3に示す。実験結果の最大耐力に対する解析結果の最大耐力の比は、無開口耐震壁 ON および有開口耐震壁 O4 で、それぞれ 1.00 および 0.99 である。無開口耐震壁 ON の第二勾配は、実験値と解析値は非常に良く近似しているが、有開口試験体 O4 の解

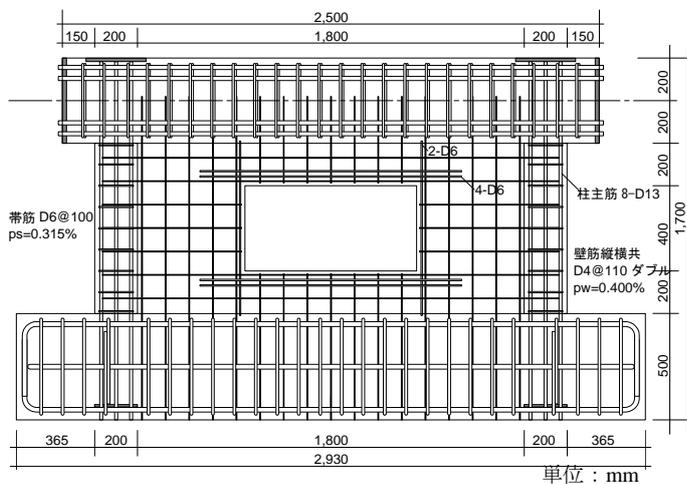


図-1 試験体配筋図(O4)

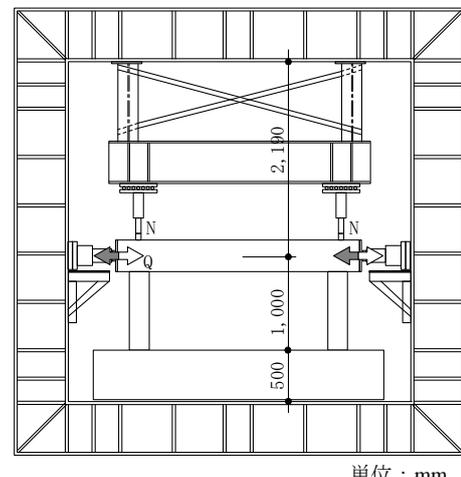


図-2 加力図

表-2 コンクリートの材料特性

	弾性係数 Ec kN/mm <sup>2</sup>	圧縮強度 σ <sub>B</sub> N/mm <sup>2</sup>	割裂強度 σ <sub>t</sub> N/mm <sup>2</sup>
ON	20.4	25.1	2.4
O4	20.3	25.5	2.4

表-3 鉄筋の材料特性

	使用部位	ヤング係数 kN/mm <sup>2</sup>	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	破断強度 N/mm <sup>2</sup>
	D13	186	361	568
	D4	179	387*	561
	D6	195	371	472

\*:0.2%オフセット

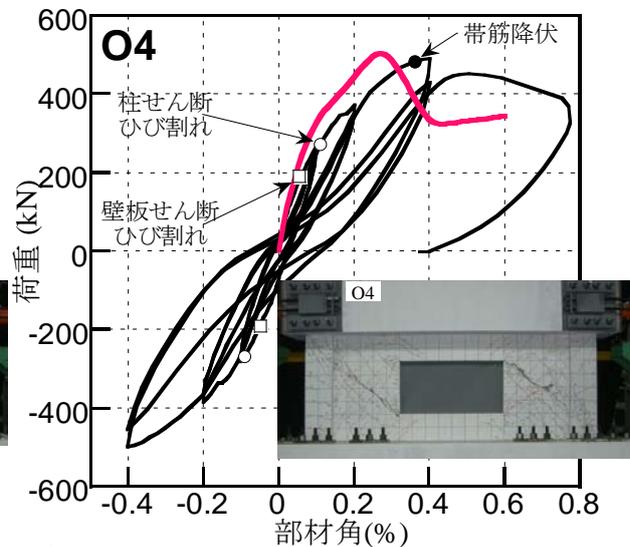
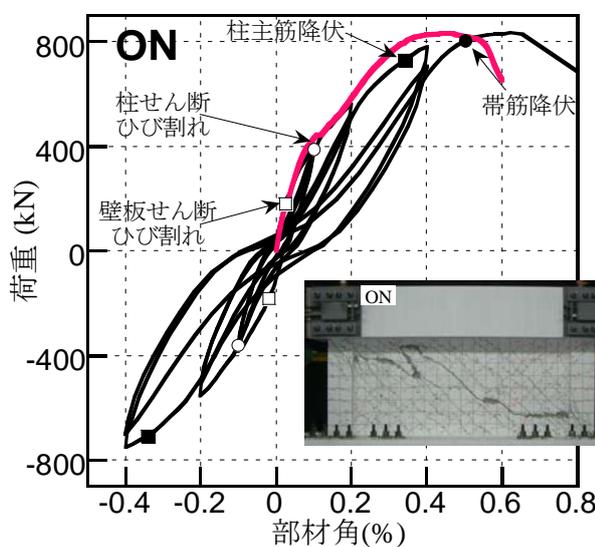


図-3 荷重と変位関係

析値の第二勾配は実験値より若干高くなっている。その理由として、有開口耐震壁は無開口耐震壁よりも曲げ変形の影響を受ける傾向があるが、解析では鉄筋とコンクリートを完全付着と仮定しているのに対して、実験は壁筋が D4 のために壁筋の抜出しによる剛性低下が生じたためと考えられる。D4 は異形鉄筋でリブを有するが、異形鉄筋と感じにくいほどの表面であるため、付着性状が丸鋼に近く、抜出しが生じ易いと考えられる。以上のことから、本解析モデルで、実験結果をほぼシミュレートすることが分かった。本論文で論ずるせん断変形との直接比較となっていないが、荷重と全体変形がよく近似できているので、せん断変形も実験結果をほぼシミュレートしていると判断した。

#### 4. 解析によるパラメトリック・スタディー

##### 4.1 簡略手法の方針

耐震壁に水平力が作用する場合、せん断変形による成分が卓越することが多いため、せん断変形成分を算出する方法が重要である。しかしながら、有開口耐震壁のせん断剛性低下率に関する研究は、無開口耐震壁と比較して少ない。その内、性能評価指針に示された手法があるが、他点折線のため複雑であり、実務に適用するに当たっては簡略化が望まれている。実務的観点から、無開口耐震壁のせん断剛性低下率の算定には、RC 規準<sup>2)</sup>に示される方法（以降、菅野式と呼ぶ）があるが、有開口耐震壁の適用性に関しては、検証されていない。そこで、提案する簡略手法は、有開口耐震壁のせん断力～せん断変形関係をせん断ひびわれ点とせん断強度点から構成される2折れ線で表す方針にする。本論文では、提案する方法 A と、菅野式を適用した手法 B を検討する。

##### (1) せん断ひび割れ点

両方法とも、せん断ひび割れ点は、性能評価指針に示される方法と同じとする。

##### (2) せん断剛性低下率

無開口耐震壁のせん断剛性低下率の要因分析のために、M/QD、柱幅壁厚比、壁筋比、コンクリート強度、軸方向応力度をパラメータとする 384 ケースの FEM 解析を行った。その結果、無開口耐震壁のせん断剛性低下率は、水平方向バネ剛性( $K_X$ )<sup>1)</sup>、軸応力( $\sigma_0$ )およびコンクリート圧縮強度( $\sigma_B$ )の影響が大きいことが分かった。その3つの因子による無開口耐震壁のせん断剛性低下率  $\alpha_{s0}$  は、(1)式による近似式 (log は常用対数) で示される。

$$\alpha_{s0} = a + b \log(K_X) \quad (1)$$

$$K_X = 360E_C I_C \ell_w / t_w h_0^4 + p_{wh} E_S \quad (2)$$

$$a = -0.174 + c \cdot \sigma_0 \quad (3)$$

$$b = 0.088 + d \cdot \sigma_0 \quad (4)$$

$$c = -0.017 + 7.0 \times 10^{-5} \sigma_B \quad (5)$$

$$d = 0.010 - 7.0 \times 10^{-5} \sigma_B \quad (6)$$

方法 A は、この無開口耐震壁の算定方法を準用し、(7)～(12)式と評価できると仮定した。その内、開口の存在による水平抵抗ばね剛性の影響が最も大きいと推察し、水平方向バネ剛性のみを(8)式に示すように変更した。(8)式である有開口耐震壁の水平方向バネ剛性  $K_{XO}$  は、側柱の水平バネ剛性と開口の両側に壁厚と同じせいの柱を仮定した側柱の水平バネ剛性で評価した。開口右側と開口左側の水平バネ剛性は、それぞれ(11)式および(12)式に示すように仮定したが、本論文では開口位置を中央に限定しているため、結果的に開口部の右側と左側の水平方向バネは同じとなる。なお、(7)式の係数は、無開口耐震壁のせん断剛性低下率時と同じ(3)～(6)式とする。

方法 B のせん断剛性低下率は、文献 2) で示された(13)式とする。

・方法 A のせん断剛性低下率： $\alpha_{S1}$

$$\alpha_{S1} = a + b \log(K_{XO}) \quad (7)$$

$$K_{XO} = 1 / (1/K_W + 1/K_O) + p_{wh} E_S \quad (8)$$

$$K_W = 360E_C I_C \ell_w / t_w h_0^4 \quad (9)$$

$$K_O = (K_{OL} + K_{OR}) / 2 \quad (10)$$

$$K_{OL} = 720E_C I_{CL} \ell_{WL} / t_w h_{OP}^4 \quad (11)$$

$$K_{OR} = 720E_C I_{CR} \ell_{WR} / t_w h_{OP}^4 \quad (12)$$

・方法 B のせん断剛性低下率： $\alpha_{S2}$

$$\alpha_{S2} = 0.46 p_{wh} \sigma_{wy} / \sigma_B + 0.14 \quad (13)$$

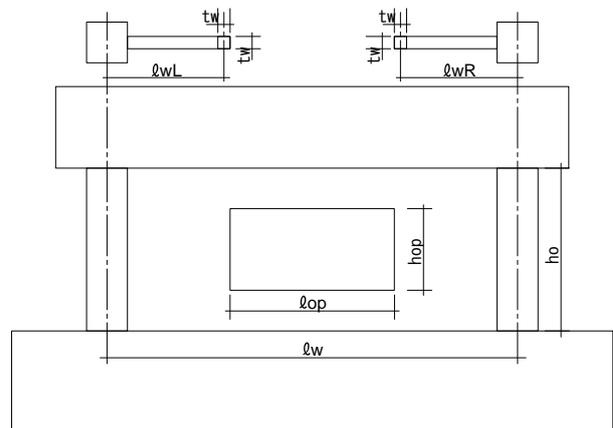


図-4 式の記号

$\sigma_B$ 、 $E_C$  はコンクリートの圧縮強度（正值）とヤング係数、 $I_C$  は側柱の断面 2 次モーメント、 $I_{CL}$  および  $I_{CR}$  は開口の両側に仮定した壁厚と同じ幅を有する柱の各断面 2 次モーメント、 $p_{wh}$  および  $E_S$  は壁板横筋の鉄筋比およびヤング係数、 $\sigma_0$  は開口部がない全水平断面積に対する軸方向応力度（圧縮を正）である。その他の記号は、図-4 および文献 1) による。

### (3) 最大せん断強度点

有開口耐震壁の最大せん断強度算出方法は、両手法とも性能評価指針に示される方法と同様に、無開口耐震壁のせん断耐力に開口周比低減率<sup>2)</sup>を乗じるものとする。ただし、方法 A は、無開口耐震壁の最大せん断強度に、軸力の影響を加味した。なぜならば、有開口耐震壁がせん断破壊する場合は、実験結果からも分かるように開口横で破壊することが多い。その破壊部分は開口による断面欠損のために開口がない部分と比較して、軸力がせん断強度に影響すると考えられるからである。ここでは、せん断強度への軸力の影響を、式(14)に示すせん断強度算出式の有効圧縮強度低減係数に、式(15)を用いることにより加味することとした。式(15)は、文献 4)の提案式に文献 6)の考え方を取り入れて、軸力の効果を付加させたものである。方法 B のせん断強度算出式は、性能評価指針と同じせん断耐力算定方法である式(16)とする。その場合の有効圧縮強度低減係数を、式(17)に示す。ただし、式(15)による有効圧縮強度低減係数は、軸力比 $\eta$ がとて小さい場合には、式(16)による有効圧縮強度低減係数の方が大きくなる。

・方法 A の最大せん断強度： $Q_{s1}$

$$Q_{s1} = r \left\{ t_w l_{wb} \sum (p_s \sigma_{sy}) \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w l_{wa} v_1 \sigma_B / 2 \right\} \quad (14)$$

$$v_1 = 1.907(1 + 2\eta) \sigma_B^{-0.34} \quad (15)$$

・方法 B のせん断最大せん断強度： $Q_{s2}$

$$Q_{s1} = r \left\{ t_w l_{wb} \sum (p_s \sigma_{sy}) \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w l_{wa} v_2 \sigma_B / 2 \right\} \quad (16)$$

$$v_2 = 0.8 - \sigma_B / 200 \quad (17)$$

### 4.2 パラメトリック・スタディーの方針

パラメトリック・スタディーは、2章の試験体形状をベースに行う。変数は、表-4に示す。表-4の中の軸方向応力は、開口がない部分の全断面積に対する応力である。また、形状の例としてせん断スパン比が0.5の場合を、モデル図による図-5で示す。なお、せん断変形特性を把握することを目的とするため、柱主筋は弾性と仮定した。せん断変形の抽出には、柱の軸方向変形から曲げ変形を計算し、全体変形から曲げ成分を減じることですせん断変形とした。

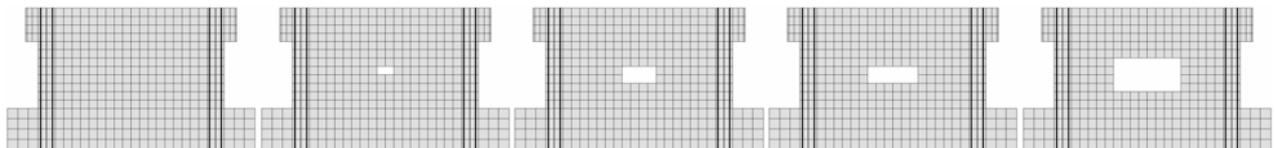


図-5 解析モデル

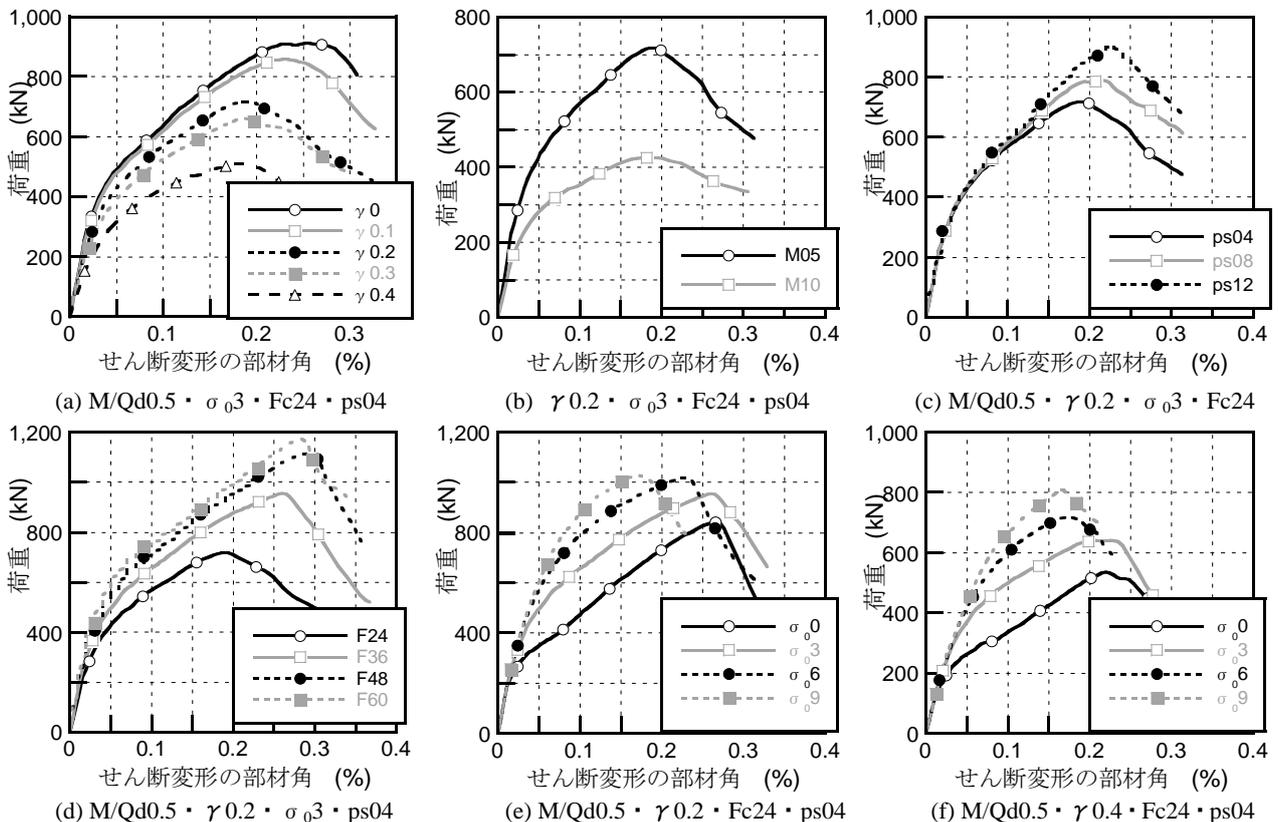


図-6 荷重とせん断変形の部材角 (%) の関係

表-4 パラメトリックスタディーの変数

開口周比	せん断 スパン比	軸方向 応力	コンクリート 強度	壁筋比
$\gamma$	M/QD	$\sigma_0$ N/mm <sup>2</sup>	$F_c$ N/mm <sup>2</sup>	ps %
0		0	24	0.4
0.1		3	36	0.8
0.2	0.5	6	48	1.2
0.3		9	60	
0.4				

### 4.3 パラメトリック・スタディーの結果

パラメトリック・スタディーの結果の例として、以下の(a)~(f)の観点による荷重とせん断変形の部材角(%)の関係を図-6に示す。

- (a) M/Qd0.5・ $\sigma_0$ 3・Fc24・ps04の開口の大きさの違い
- (b)  $\gamma$ 0.2・ $\sigma_0$ 3・Fc24・ps04のM/Qdの違い
- (c) M/Qd0.5・ $\gamma$ 0.2・ $\sigma_0$ 3・Fc24のpsの違い
- (d) M/Qd0.5・ $\gamma$ 0.2・ $\sigma_0$ 3・ps04のFcの違い
- (e) M/Qd0.5・ $\gamma$ 0.2・Fc24・ps04の軸力の違い
- (f) M/Qd0.5・ $\gamma$ 0.4・Fc24・ps04の軸力の違い

本論文で示す方法Aおよび方法Bの有開口耐震壁の最大強度は、無開口耐震壁の最大強度に開口周比低減率を乗じて算出している。その正当性を示すために解析の無開口耐震壁の最大強度に対する解析の有開口耐震壁の最大強度の比と開口周比低減率の関係を図-7に示す。

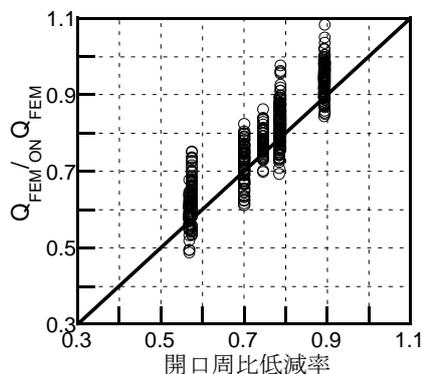


図-7 開口周比低減率と無開口耐震壁の最大強度  $Q_{ON FEM}$  に対する有開口耐震壁の最大強度  $Q_{FEM}$  の比の関係

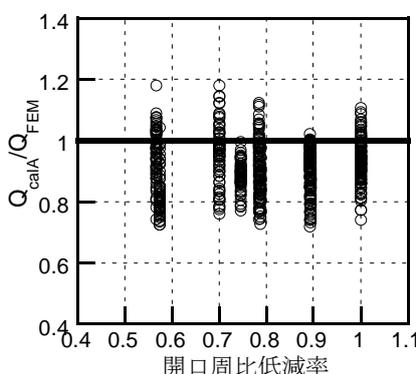


図-9 開口周比低減率と解析値による最大せん断強度に対する方法Aによる計算値最大せん断強度の関係

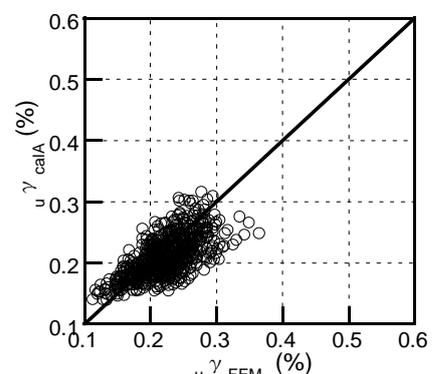


図-11 解析値による最大せん断強度時のひずみと計算値Aによる最大せん断強度時のひずみの関係

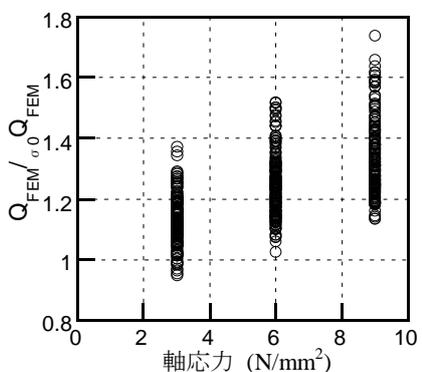


図-8 軸応力と軸力0のせん断耐力  $\sigma_0 Q_{FEM}$  に対する有開口耐震壁の最大強度  $Q_{FEM}$  の比の関係

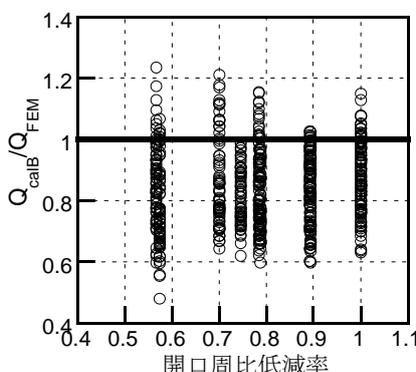


図-10 開口周比低減率と解析値による最大せん断強度に対する方法Bによる計算値最大せん断強度の関係

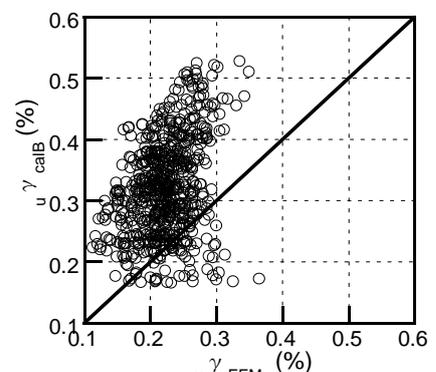


図-12 解析値による最大せん断強度時のひずみと計算値Bによる最大せん断強度時のひずみの関係

これより、開口周比低減率にほぼ比例して最大強度が低下しており、有開口耐震壁の最大耐力は、無開口耐震壁の最大耐力に開口周比低減率を乗じて求めてよいことが分かる。また、軸応力によるせん断耐力の上昇も論点としているので、軸応力と軸力0の最大強度に対する各最大強度のグラフを図-8に示す。これより、軸力が大きくなるにつれて最大せん断強度がほぼ上昇しており、軸力の効果を考慮した方が良いことが分かる。

### 5. パラメトリック・スタディー解析と計算値の比較

#### 5.1 最大強度

各解析結果の最大せん断強度に対する方法Aの計算の比および方法Bの計算値の比を比較した図を、それぞれ図-9および図-10に示す。この図から方法Bよりも方法Aが、解析結果による最大強度をばらつきも少なく良く評価していることが分かる。つまり、最大せん断強度に軸力の効果を考慮した方がより良く評価することが分かる。

#### 5.2 終局ひずみ

解析値による最大せん断強度時のひずみと計算値Aによる最大せん断強度時のひずみの関係および計算値Bによる最大せん断強度時のひずみの関係を、それぞれ図-

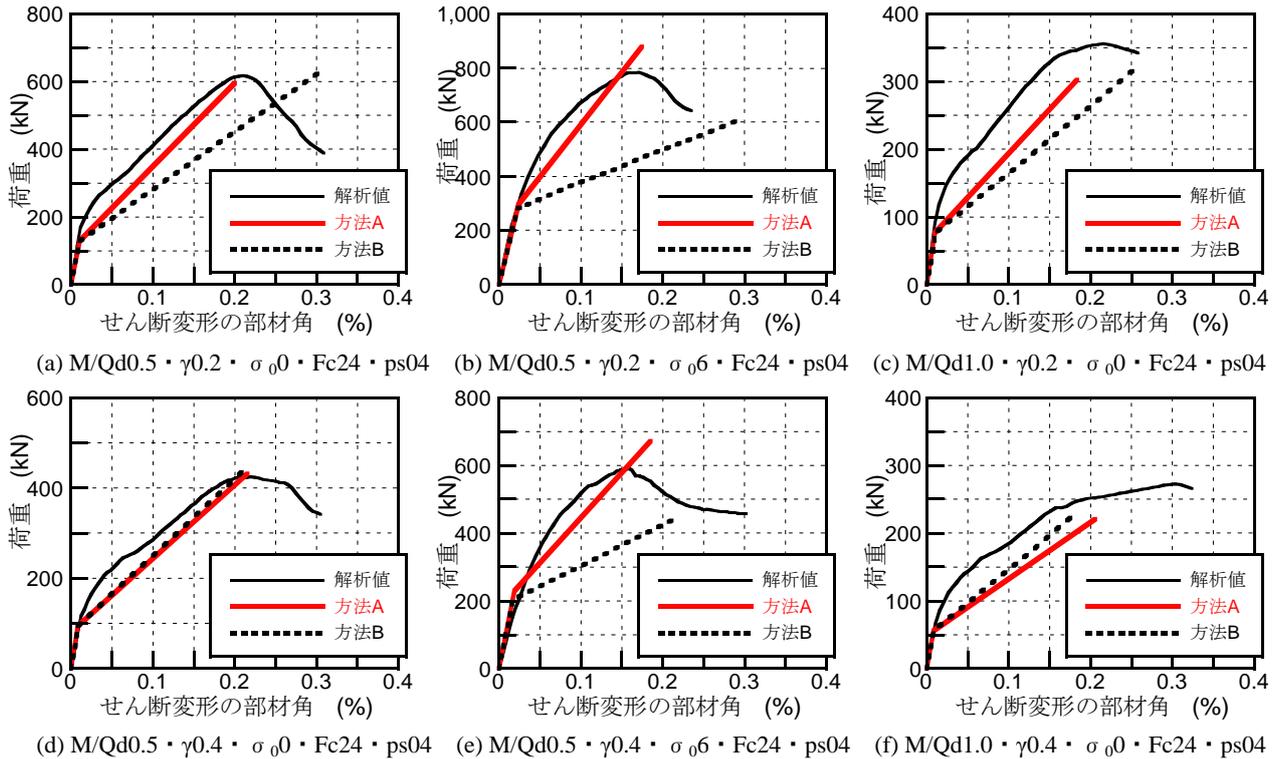


図-13 解析値と提案手法による計算値の荷重とせん断変形の部材角(%)

11 およびに図-12 示す。これらの図から方法 B よりも方法 A が、解析結果による最大強度時のひずみをばらつきも少なく良く評価していることが分かる。

### 5.3 せん断変形特性

以下の(a)~(f)の観点における各解析結果の荷重とせん断変形の部材角(%)の関係と方法 A および方法 B の計算値を比較した結果を、図-13 に例示する。総括的には方法 B よりも方法 A が、設計上で使用する上で適していると思われる。

- (a)  $M/Qd0.5 \cdot \gamma0.2 \cdot \sigma_00 \cdot Fc24 \cdot ps04$
- (b)  $M/Qd0.5 \cdot \gamma0.2 \cdot \sigma_06 \cdot Fc24 \cdot ps04$
- (c)  $M/Qd1.0 \cdot \gamma0.2 \cdot \sigma_00 \cdot Fc24 \cdot ps04$
- (d)  $M/Qd0.5 \cdot \gamma0.4 \cdot \sigma_00 \cdot Fc24 \cdot ps04$
- (e)  $M/Qd0.5 \cdot \gamma0.4 \cdot \sigma_06 \cdot Fc24 \cdot ps04$
- (f)  $M/Qd1.0 \cdot \gamma0.4 \cdot \sigma_00 \cdot Fc24 \cdot ps04$

### 6. まとめ

鉄筋コンクリート造中央有開口耐震壁のせん断力とせん断ひずみ度関係の簡略手法の提案を行い、無開口および有開口耐震壁の実験結果をシミュレートする FEM モデルによるパラメトリック・スタディーによる検証した結果、以下の知見を得た。

- 1) FEM モデルによるパラメトリック・スタディーより、軸力が大きくなるにつれて最大せん断強度がほぼ上昇しており、軸力の効果を考慮した方が良いことが分かった。
- 2) 最大せん断強度は、性能評価指針で提案される

方法よりも、提案する軸力の効果を考慮した方法が、パラメトリック・スタディーの結果をよりよく近似できた。

- 3) 設計で実用的に使用するせん断力とせん断ひずみ度関係は、提案する 2 折れ点の方法で可能である。
- 4) 有開口耐震壁の中でも、ドア開口のような縦長の開口の場合および開口が偏在する場合は、検証されていないので、今後の検討を要する。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説，2004.1
- 2) 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
- 3) 長沼一洋，山口恒雄：面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化，日本建築学会大会 学術講演梗概集，構造 II，pp.649-650,1990.10
- 4) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その1)，日本建築学会構造系論文報告集,第 421 号, pp.39-48, 1991.3
- 5) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第 474 号，pp.163-170,1995.8
- 6) 国土開発技術研究センター：平成 4 年度 NewRC 研究開発概要報告書，平成 5 年 3 月