

論文 開口を有する RC 造袖壁付き柱のせん断強度の評価法

本多 良政^{*1}・坂上 正裕^{*2}・樋熊 利亘^{*3}・加藤 大介^{*4}

要旨: RC 規準による開口低減率を用いると有開口袖壁付き柱のせん断強度をかなり過小評価することが分かっている。本研究では、より合理的な開口低減率として、RC 規準の開口低減率を壁部のみに適用する方法と修正開口低減率を提案した。検討対象は開口周比が 0.2~0.27 の袖壁付き柱 6 体としている。さらに、FEM 解析結果を用いて、開口周比が 0.2 より小さい範囲でも提案した開口低減率が妥当であることを示した。

キーワード: 有開口袖壁付き柱, 終局せん断強度, 開口低減率, 分割累加式

1. はじめに

鉄筋コンクリート造構造計算規準(RC規準)¹⁾が2010年に改訂され、袖壁付き柱の設計法が明記された。これにより、これまで構造スリットを入れて非構造体とみなされることが多かった袖壁が構造部材の一部として合理的に考慮することができるようになった。一方、袖壁には換気口や分電盤等の設置のために開口を設けることがある。RC 規準では両側柱付き耐震壁に用いる開口低減率を袖壁付き柱に準用する方法が示されているが、この適用性については十分に検討されていない。

筆者らは文献 2)3)で有開口袖壁付き柱試験体のせん断加力実験を行い、各試験体の最大耐力は RC 規準の開口低減率を考慮したせん断強度計算値を大きく上回っていることを確認している。RC 規準の開口低減率の準用は安全側であるが、妥当であるとは言い難いのが現状である。

本研究では、より合理的な開口低減率として、RC 規準¹⁾の開口低減率を壁部のみに適用する方法と修正開口低減率を提案した。検討対象は開口周比が 0.2~0.27 の袖壁付き柱 6 体としている。さらに、FEM 解析結果を用いて、開口周比が 0.2 より小さい範囲でも提案した開口低減率の妥当性の検討を行った。

2. 有開口袖壁付き柱のせん断強度評価式

2.1 評価方法の概要

有開口袖壁付き柱のせん断強度は無開口袖壁付き柱のせん断強度に開口低減率を乗じて求める。表-1 に無開口袖壁付き柱のせん断強度評価式と開口低減率の組み合わせを示すが、本論文では表中の(a)~(f)の組合せについて検討している。ここで、開口低減率の欄にある(袖壁柱)という表記は、式(1)に示すように無開口袖壁付き柱のせん断強度に開口低減率を乗じて有開口袖壁付き柱のせん断強度を算定することを意味している。また、(壁のみ)

という表記は式(2)に示すように、柱と袖壁の要素に分割して無開口袖壁付き柱のせん断強度を求める場合に、袖壁要素のせん断強度のみに開口低減率を乗じて有開口袖壁付き柱のせん断強度を算定することを示している。

$$Q_{su} = r \cdot Q_{sucw} \tag{1}$$

$$Q_{su} = r \cdot Q_{suw} + Q_{suc} + 0.1N \tag{2}$$

ここで、 Q_{su} : 有開口袖壁付き柱のせん断強度、 Q_{sucw} : 無開口袖壁付き柱のせん断強度、 Q_{suw} : 袖壁要素のせん断強度、 Q_{suc} : 柱要素のせん断強度、 N : 軸力、 r : 開口低減率である。

次に、2.2 節で詳述するが、無開口袖壁付き柱のせん断強度評価式は、耐震診断基準⁴⁾の耐震診断式、文献 5)による分割累加式及び鉄筋コンクリート構造靱性保証型耐震設計指針⁶⁾(以下、靱性指針)のトラス・アーチ理論を用いた分割累加式(靱性指針)とする。文献 5)による分割累加式は片側袖壁付き柱の場合や両側袖壁付き柱でも壁横筋を柱に通して配筋していない場合、せん断強度を過小評価することがあることから修正分割累加式を提案する。

一方、2.3 節で詳述するが、開口低減率は RC 規準¹⁾の有開口耐震壁に用いる開口低減率の他に、開口部分を部材の全水平面積また全体積の比から低減率を求める修正開口低減率を提案する。

2.2 無開口袖壁付き柱のせん断強度式

(1) 耐震診断式

既存鉄筋コンクリート構造耐震診断基準⁴⁾による袖壁

表-1 せん断強度評価法の検討一覧

せん断強度	開口低減率		修正開口低減率 r' (袖壁柱)
	RC規準開口低減率 r (袖壁柱)	(壁のみ)	
耐震診断式	(a)	—	—
分割累加式	(b)	—	—
修正分割累加式	(c)	(d)	(e)
分割累加式(靱性指針)	—	(f)	—

(袖壁柱)はせん断強度に開口低減率を乗じる
(壁のみ)は柱と袖壁の要素に分けてせん断強度を算定する式で、袖壁のみに開口低減率を乗じる

*1 小山工業高等専門学校 建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 新潟大学大学院 自然科学研究科 博士課程 (正会員)

*3 新潟大学大学院 自然科学研究科 修士課程 (正会員)

*4 新潟大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

付き柱のせん断強度式とする。片側袖壁付き柱は片側袖壁を柱の両側に均等に割り振り、圧縮側のみを考慮する。

(2) 分割累加式

文献 5)では袖壁付き柱を図-1 に示す柱要素と壁要素に分割して各々のせん断強度を累加することで袖壁付き柱のせん断強度を算出する式(式(3)~(5))を提案している。

$$Q_{su} = Q_{suw} + Q_{suc} + 0.1N \quad (3)$$

$$Q_{suw} = \left\{ \frac{0.053p_{twe}^{0.23}(F_c + 18)}{\frac{M}{Qd_w} + 0.12} + 0.85\sqrt{p_{wh}\sigma_{why}} \right\} t_w j_w \quad (4)$$

$$Q_{suc} = \left\{ \frac{0.053p_{tce}^{0.23}(F_c + 18)}{\frac{M}{Qd_{ce}} + 0.12} + 0.85\sqrt{p_{cwe}\sigma_{cwy}} \right\} b_{ce} j_{ce} \quad (5)$$

ここで、 Q_{su} ：無開口袖壁付き柱のせん断強度、 Q_{suw} ：袖壁要素のせん断強度、 Q_{suc} ：柱要素のせん断強度、 $p_{twe} = a_{tw}/t_w d_w$ 、 $d_w = 0.95(D + l_1 + l_2)$ 、 $j_w = 0.8(D + l_1 + l_2)$ 、 $p_{tce} = a_{tc}/(B - t_w)d_{ce}$ 、 $p_{cwe} = (a_w - p_{wh}t_w s)/b_{ce}s$ 、 $d_{ce} = 0.95D$ 、 $j_{ce} = 0.8D$ 、 $b_{ce} = B - t_w$ 、 F_c ：コンクリート強度、 σ_{cwy} ：帯筋降伏強度、 σ_{why} ：壁筋降伏強度、 N ：軸力、 a_{tc} ：柱の引張鉄筋断面積、 a_w ：柱帯筋1組の断面積、 s ：柱帯筋間隔、 a_{tw} ：袖壁の引張鉄筋断面積、 p_{wh} ：袖壁横筋比である。

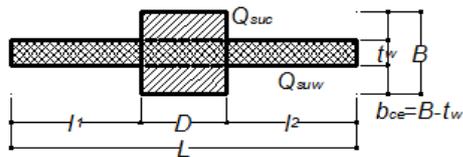


図-1 分割累加モデル概念図⁵⁾

(3) 修正分割累加式

片側袖壁付き柱の場合や両側袖壁付き柱でも壁横筋が柱を通して配筋されていない場合、分割累加式によるせん断強度は過小評価となることがある。それは、柱帯筋の壁筋相当分を壁筋に取り込み Q_{su} を算定することから起きている。また、 Q_{suw} に柱帯筋の影響を含んでいることから、袖壁に開口が存在する場合に単に開口低減率を Q_{suw} に乗じて評価することは難しい。そこで、柱帯筋の壁筋相当分の壁筋への取り込みを止め、そのかわり、壁筋量を全長さに対する袖壁部分の長さで低減することにした。具体的には、式(4)式(5)における袖壁横筋比 p_{wh}

と有効柱帯筋比 p_{cwe} の代わりに、以下の式(6)式(7)で示した修正袖壁筋比 p_{whe} と柱帯筋比 p_{cw} を適用することにした。

$$p_{whe} = p_{wh} \times \frac{(l_1 + l_2)}{(D + l_1 + l_2)} \quad (6)$$

$$p_{cw} = a_w / b_{ce} s \quad (7)$$

(4) 分割累加式(靱性指針)

袖壁付き柱を図-1 に示すように分割累加式の柱要素および壁要素に分割し、各要素のせん断強度を足し合わせることでせん断強度を求める。各要素のせん断強度は靱性指針⁶⁾のトラス・アーチ理論によるせん断強度算定を行う。その際、壁要素はすべてアーチ機構によりせん断力が伝達されるものとし、柱要素はトラス機構とアーチ機構によるものとする。また、アーチ長さは反曲点高さの2倍としている。

2.3 開口低減率

(1) RC 規準開口低減率

RC 規準¹⁾の開口低減率はRC 規準の開口を有する耐震壁の開口低減率とする。開口低減率は式(8)~式(10)の最小値である。式中の記号は図-2 による。

$$r_1 = 1 - 1.1 \cdot \frac{l_{op}}{l} \quad (8)$$

$$r_2 = 1 - 1.1 \cdot \sqrt{\frac{h_{op} \cdot l_{op}}{h \cdot l}} \quad (9)$$

$$r_3 = 1 - \lambda \cdot \frac{\sum h_{op}}{\sum h} \quad \lambda = (1 + \frac{l_o}{l})/2 \quad (10)$$

(2) 修正開口低減率

修正開口低減率はRC 規準¹⁾の開口低減率を基本として部材の全断面積または体積を考慮した低減率とする。袖壁付き柱部材は耐震壁に比べ、壁の体積が小さいので、柱部分の断面積や体積が開口低減率に与える影響が大きいと考えられる。そこで、これらを考慮するために、修正開口低減率は図-2 に示すように開口部の水平断面積と部材の全水平断面積の比と開口部の体積と部材の全体積の比、鉛直断面積比を考え、それらの最小値としている。

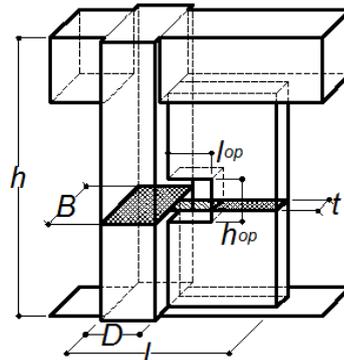


図-2 修正開口低減率(水平断面積比 r_1')の概念図

表-2 試験体諸元²⁾³⁾⁷⁾

試験体名	CSW-H	CSWO-S	CSWO-SC	CSWO-S25-A	CSWO-L	CSWO-L-A	CSWO-L-B
開口(mm) (開口低減率)	—	200×200 (0.71)		250×250 (0.63)	200×350 (0.71)		
開口位置	—	柱際	袖壁中央	柱際			
柱断面(mm)	250×250						
袖壁断面(mm)	75×500						
内法高さ(mm)	1000						
柱	主筋	4-D13					
	帯筋 (帯筋比)	□-D6@100 (0.0026)					□-D4@100 (0.0011)
袖壁	壁筋 (壁筋比)	縦横共D6@100ダブル (0.0085)		縦横共 D4@100ダブル (0.0037)	縦横共 D6@100ダブル (0.0085)	縦横共D4@100ダブル (0.0037)	
	端部筋	1-D10					
コンクリート強度 (N/mm ²)	21.7 [27.3]	21.6 [27.1]		20.2 [25.4]	21.6 [27.1]	20.2 [25.4]	
軸力(kN)	294						
最大耐力(kN)	244	222	230	186	194	183	184

[]はFEM解析で2軸応力状態で決まるコンクリートの最大の圧縮強度を示す

表-3 鉄筋強度²⁾³⁾⁷⁾

	CSW-H		CSWO-S CSWO-SC CSWO-L		CSWO-S25-A CSWO-L-A CSWO-L-B	
	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D4	—	—	318	497	397	531
D6	353	498	318	497	326	495
D10	382	535	374	529	372	529
D13	383	561	396	557	386	503

$$r_1' = 1 - 1.1 \cdot \frac{l_{op} \cdot t}{l \cdot t + (B-t) \cdot D} \quad (11)$$

$$r_2' = 1 - 1.1 \cdot \sqrt{\frac{h_{op} \cdot l_{op} \cdot t}{\{l \cdot t + (B-t) \cdot D\} \cdot h}} \quad (12)$$

$$r_3' = 1 - \lambda \cdot \frac{h_{op} \cdot t}{h \cdot t} \quad \lambda = (1 + \frac{l_o}{l})/2 \quad (13)$$

3. 袖壁付き柱のせん断強度の検討

3.1 検討対象試験体の概要

袖壁付き柱のせん断強度の検討は文献 2)3)7)の無開口袖壁付き柱1体と有開口袖壁付き柱試験体6体に対して行う。表-2に試験体の諸元を、表-3に鉄筋強度を示す。

有開口袖壁付き柱試験体は文献7)で報告された無開口片側袖壁付き柱 CSW-Hを基本形として、開口の大きさと位置、せん断補筋量をパラメータとしている。

3.2 せん断強度検討結果

表-4に検討結果一覧を、図-3(a)~(f)に各試験体の最大耐力とせん断強度の比較を示す。なお、図番号(a)~(f)は表-1の(a)~(f)に対応している。図中の●印は無開口袖壁付き柱を▲印は有開口袖壁付き柱試験体を示している。また、図中の破線は最大耐力とせん断強度の比が1.2を示している。

無開口袖壁付き柱のせん断強度式が違うケース(a)~(c)では、有開口袖壁付き柱試験体の最大耐力とせん断強度の比の平均が、耐震診断式は1.38、分割累加式は1.35、修正分割累加式は1.34となった。一方、各ケースの無開口袖壁付き柱試験体の最大耐力とせん断強度の比は1.08~1.12となった。いずれも袖壁付き柱全体にRC規準¹⁾の開口低減率を乗じているが、無開口試験体の最大耐力とせん断強度の比より有開口試験体の比のほうが大きくなっていることからRC規準¹⁾の開口低減率はかなり過小評価してしまうことがわかる。

次に、修正分割累加式を用い、開口低減率が違うケー

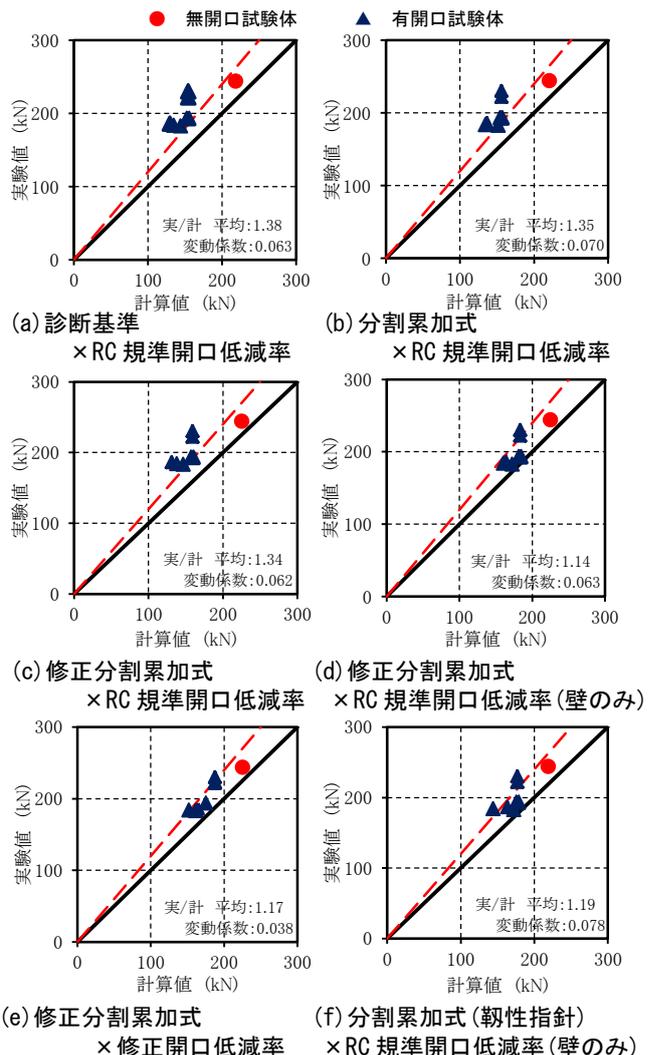


図-3 有開口袖壁付き柱の最大耐力とせん断強度の関係

表-4 セン断強度検討結果一覧

試験体名	RC規準開口低減率 r	修正開口低減率 r'	最大耐力	(a)耐震診断式 × RC規準低減率 (袖壁柱)	(b)分割累加式 × RC規準低減率 (袖壁柱)	(c)修正分割累加式 × RC規準低減率 (袖壁柱)	(d)修正分割累加式 × RC規準低減率 (壁のみ)	(e)修正分割累加式 × 修正低減率 (袖壁柱)	(f)分割累加式 (靱性指針) × RC規準低減率 (壁のみ)
CSW-H	—	—	244	218 (1.12)	221 (1.11)	225 (1.08)	225 (1.08)	225 (1.08)	219 (1.11)
CSWO-S	0.707	0.833	222	154 (1.44)	156 (1.42)	159 (1.39)	183 (1.21)	188 (1.18)	177 (1.25)
CSWO-SC	0.707	0.833	230	154 (1.49)	156 (1.47)	159 (1.44)	183 (1.25)	188 (1.23)	177 (1.30)
CSWO-S25-A	0.633	0.791	186	130 (1.44)	136 (1.36)	131 (1.42)	164 (1.13)	164 (1.13)	163 (1.14)
CSWO-L	0.705	0.779	194	154 (1.26)	156 (1.25)	159 (1.22)	183 (1.06)	175 (1.11)	177 (1.10)
CSWO-L-A	0.705	0.779	183	144 (1.27)	152 (1.20)	146 (1.25)	173 (1.06)	161 (1.13)	172 (1.06)
CSWO-L-B	0.705	0.779	184	135 (1.36)	134 (1.37)	138 (1.34)	160 (1.15)	152 (1.21)	144 (1.28)
平均, 変動係数 (有開口のみ)				(1.38) [0.063]	(1.35) [0.070]	(1.34) [0.062]	(1.14) [0.063]	(1.17) [0.038]	(1.19) [0.078]

最大耐力, セン断強度の単位: kN, ()内は実験値/計算値を示す, []内は変動係数を示す

ス(c)~(e)では, 最大耐力とセン断強度の比の平均が, 全体にRC規準¹⁾の低減率を乗じる場合は1.34なのに対し, 壁のみに乗じる場合は1.14, 修正開口低減率を乗ずる場合は1.17となった。壁のみにRC規準¹⁾の低減率を乗じる, または修正開口低減率を乗ずることで精度が大きく改善されていることがわかる。さらに, 各ケースのばらつきについてはRC規準¹⁾の開口低減率を全体に乗じる場合(c)および壁部に乗じる場合(d)の変動係数が0.062と0.063で, 修正開口低減率を用いる場合(e)は0.038となり, ばらつきが最も小さくなることがわかる。

一方, 壁のみにRC規準¹⁾の開口低減率を乗じた修正分割累加式と分割累加式(靱性指針)を比較すると, 修正分割累加式(d)の最大耐力とセン断強度の比は1.14, 分割累加式(靱性指針)は(f)は1.19といずれも精度がよいが, 修正分割累加式の方が平均値は若干良かった。

4. 袖壁付き柱のFEM解析

4.1 FEM解析の概要

特に開口周比0.2以下の実験データの少なさを補うために, 開口の大きさを変化させたFEM解析を行い, 修正開口低減率を乗じたセン断強度評価法のより広い範囲での妥当性を検討する。そのために, まず試験体の強度及び挙動をFEM解析により検証できるかを確認する。FEM解析は汎用非線形FEM解析プログラムATENA 2D v5⁸⁾を用いて一方向漸増载荷の2次元FEM解析を行った。

図-4に試験体CSWO-Lの解析モデルの要素分割および配筋の様子を示す。要素分割は50mmを基本とする四角形のフリーメッシュとした。

コンクリートの構成則は図-5に示すように2軸応力状態に基づいた等価1軸則を用いたモデルとした。圧縮強度及び引張強度はKupfer⁹⁾の2軸破壊基準により2軸応力状態から評価した。そのため, 2軸から圧縮力を受ける場合に, コンクリート強度よりも圧縮強度が高くなっている。引張側の構成則では引張強度までは線形弾性材料とし, 引張強度に達した後はHordijk¹⁰⁾の指数関数型軟化モデルにより軟化を考慮した。圧縮側の構成則は圧縮強度まではパラボラ型の応力度-ひずみ度関係とした。

圧縮強度に達した後は割線剛性に軟化勾配係数を乗じることで軟化を考慮した。軟化勾配係数は修正 Ahmad 式¹¹⁾の圧縮強度以降の軟化勾配を割線剛性で除することで求めた。柱と袖壁は配筋による拘束効果に差があることから軟化勾配を変えた。ひび割れモデルは回転分散ひび割れモデル¹²⁾¹³⁾を用い, セン断剛性低下係数はKolmar¹⁴⁾による主引張ひずみの関数とした。

鉄筋は付着応力-すべりを考慮した埋め込み式離散モデルとした。応力度-ひずみ度関係は図-6に示すように完全弾塑性モデルとした。鉄筋の降伏強度は実測値とし, 弾性係数は $2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とした。付着の構成則は図-7に示すようにCEB-FIP Model Code 1990¹⁵⁾によった。その際, 柱は帯筋による拘束が若干認められることから良好な付着状態とし, 袖壁は帯筋による拘束がないため付着状態を良好でないと評価した。

解析は解析モデル底辺をピンで固定し, 294kNの試験体に均一な軸応力を与えた後, 上部スタブの側面全体に同一変位を与えるように加力した。これは, 実験時に上部スタブが常に水平にして加力していたことを考慮するためである。

4.2 FEM解析結果

図-8にセン断力-変形角関係を示す。図中の太線は解析結果を示し, 細線は実験結果を示している。また, 図-9に各試験体の正サイクルの実験とFEM解析の最大耐力の関係を示す。

開口が正方形の試験体CSWO-S, CSWO-SC及びCSWO-S25-Aの解析結果と実験値の最大耐力の比は1.15~1.31で, 解析結果の最大耐力は実験値より大きくなった。しかし, 最大耐力以降では実験の繰り返しサイクルの目標変形角のセン断力が解析結果と概ね一致しており, セン断力-変形角関係が良好に対応していた。図-10は試験体CSWO-S25-Aを左から右に加力した時の最大耐力時の圧縮の主応力度分布図を, 図-11は最大耐力時のひび割れ状況を示している。開口の上側と下側に圧縮ストラットが形成され, 応力の伝達されていることが確認できる。また, 最大主応力度が 22.9 N/mm^2 となっており, コンクリートが軟化域に達している箇所があった。

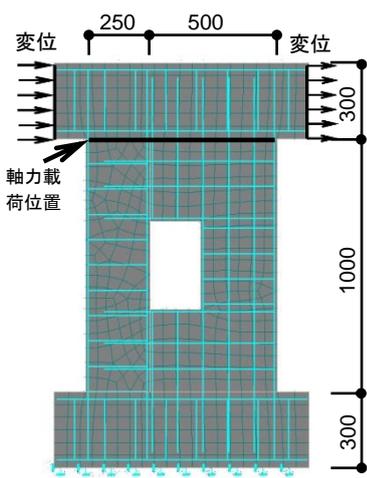


図-4 解析モデル(試験体 CSWO-L)

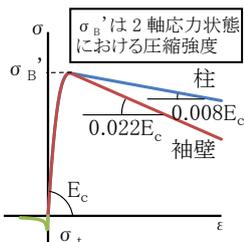


図-5 コンクリートの構成則

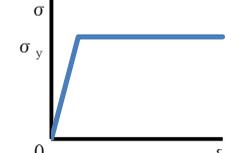


図-6 鉄筋の構成則

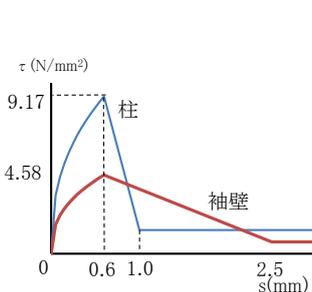


図-7 コンクリートと鉄筋の付着モデル

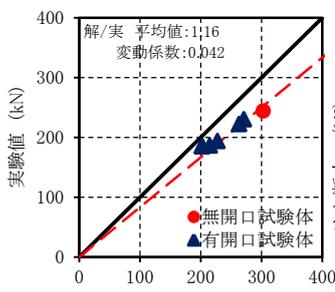


図-9 実験とFEM解析の最大耐力の関係

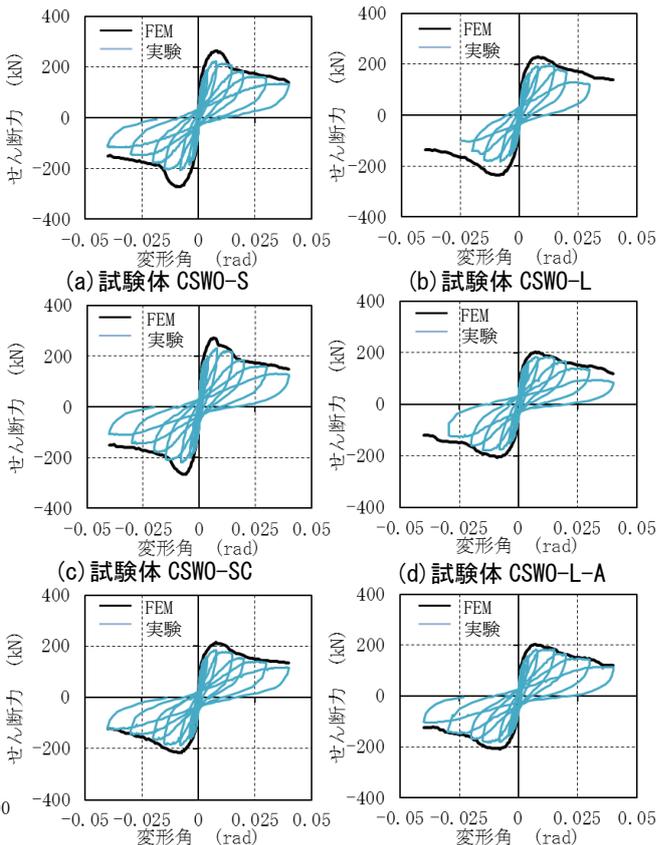


図-8 FEM解析結果

開口が長方形の試験体 CSWO-L, CSWO-L-A 及び CSWO-L-B の解析結果と実験値の最大耐力の比は 1.09~1.30 で、試験体 CSWO-L の負サイクルの解析結果の最大耐力が実験値より大きくなっているが、せん断力-変形角関係が良好に対応していた。

5. せん断強度低下率と修正開口低減率の関係

3 章の検討で修正開口低減率が最もばらつきが少なかったため、本章では修正開口低減率が実験を行った試験体より小さい開口に対して妥当に評価できるかに主に着目し、FEM 解析結果を用いて検討した。また、その際、FEM 解析結果は実験値よりやや高めの値となったことから、最大耐力の絶対値ではなく、無開口袖壁付き柱に対する最大耐力の比、すなわち、開口低減率という形で比較する。

検討したケースを表-5 に示す。3 章で示した 6 体の試験体を基本とし、各試験体の開口の大きさを表に示す開口サイズに変えたケースとした。表中の開口周比は RC 規準¹⁾による値を示している。解析は 4 章で示した方法により行った。

図-12 は耐力低下率または修正開口低減率と開口周比の関係を示す。耐力低下率は実験の有開口袖壁付き柱の最大耐力を実験の無開口袖壁付き柱の最大耐力で除し

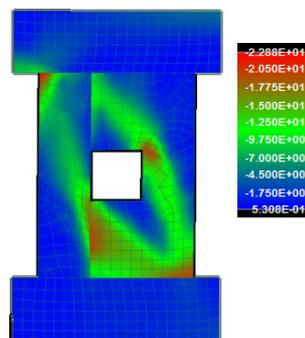


図-10 最大耐力時主応力度分布(試験体 CSWO-S25-A)

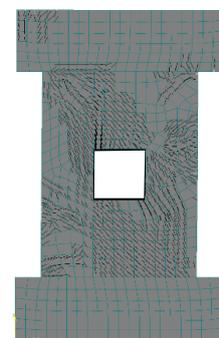


図-11 最大耐力時ひび割れ図(試験体 CSWO-S25-A)

たもの、FEM 解析の有開口袖壁付き柱の最大耐力を FEM 解析の無開口袖壁付き柱の最大耐力で除したものとされている。図中の塗りつぶしマークが実験、白抜きが FEM 解析となっている。修正開口低減率は破線または実線で示しており、破線は式(11)、実線は式(12)で算出したものを示す。また、一点鎖線は RC 規準¹⁾の開口低減率である。

図-12(a) の正方形開口の試験体では修正開口低減率は式(11)と式(12)が概ね同じ値となっている。FEM 解析による耐力低下率は RC 規準¹⁾の開口低減率に比べて大きな値となっており、修正開口低減率により近いことがわかる。なお、FEM 解析結果による耐力低下率で 1.0 となっているものがあるが、小開口モデルでは無開口モデルと壁筋がほとんど変わらないためである。

表-5 解析モデルの開口サイズ一覧

	CSWO-Sシリーズ [*] CSWO-SCシリーズ [*] CSWO-S25シリーズ [*]	CSWO-Lシリーズ [*] CSWO-L-Aシリーズ [*] CSWO-L-Bシリーズ [*]
開口サイズ	50×50 (0.05) 100×100 (0.10) 150×150 (0.15) 200×200 (0.20) 250×250 ^{**3} (0.25)	50×87.5 (0.07) 100×175 (0.13) 150×262.5 (0.20) 200×350 (0.27)

※1 解析モデルは3.1の対象試験体を基本として上記の開口サイズに変更

※2 ()内はRC規準¹⁾の開口周比を示す

※3 S25シリーズのみ検討

一方、図-12(b)の長方形開口の試験体では修正開口低減率は式(12)の値で決まっている。修正開口低減率はFEM解析による耐力低減率のほぼ平均となっている。特に開口周比が0.2より小さい範囲では、FEM解析による耐力低減率はRC規準の開口低減率より大きく、修正開口低減率とほぼ一致していることがわかる。

以上より、修正開口低減率は開口周比が0.2より小さい範囲でも、RC規準¹⁾の開口低減率より妥当であるといえる。

6. まとめ

有開口袖壁付き柱のせん断強度評価法として、RC規準¹⁾の開口低減率を壁部のみに適用する方法と修正開口低減率を提案し、袖壁付き柱6体に対して検討した。さらに、FEM解析結果を用いて開口周比が0.2より小さい範囲でも妥当性の検討を行い、以下のことが得られた。

(1)RC規準¹⁾の開口低減率を袖壁付き柱全体に乗じてせん断強度を評価する場合、その実験値の計算値に対する比の平均は、無開口用のせん断強度式によって異なるが1.34~1.38となりかなり安全側であった。

(2)RC規準¹⁾の開口低減率を壁のみに乗じる場合、修正分割累加式と分割累加式(靱性指針)を比較すると、前者が1.14、後者が1.19といずれも精度が改善された。

(3)修正開口低減率を用いる場合(強度式は修正分割累加式)は1.17であったが、ばらつきは最も少なかった。

(4)開口の大きさを変えたFEM解析の結果と比較すると、開口周比が0.2より小さい範囲でも提案した開口低減率がRC規準¹⁾の開口低減率よりも妥当であった。

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，2010
- 2) 坂上正裕，樋熊利亘，加藤大介，田村良一：RC造有開口袖壁付き柱の曲げせん断加力実験，日本コンクリート工学年次論文集 Vor.35-2, pp361-366, 2013.7
- 3) 樋熊利亘，坂上正裕，加藤大介，田村良一：せん断破壊するRC造有開口袖壁付き柱の曲げせん断加力実験，日本建築学会北陸支部研究報告集，57号，

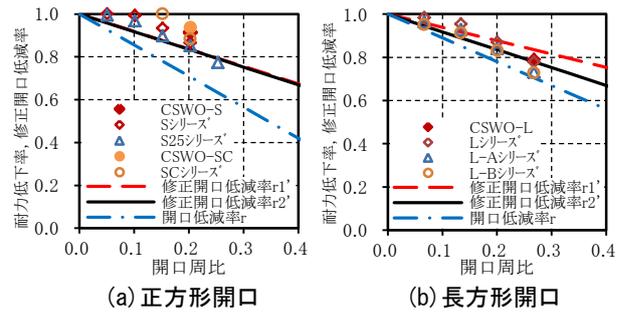


図-12 耐力低下率，修正開口低減率と開口周比の関係

pp17-20, 2014.7

- 4) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造耐震診断指針・同解説，日本建築防災協会，2001
- 5) 壁谷澤 寿成，壁谷澤寿海，東條有希子，壁谷澤 寿一：せん断破壊型そで壁付き柱に関する実験的研究，日本コンクリート工学年次論文集 Vor.30-3, pp115-120, 2008.7
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999
- 7) 本多良政，加藤 大介，本間 敦，南部 昌隆：PCa袖壁で簡略補強された既存RC柱に関する実験，第26回コンクリート工学年次論文報告集，Vor.26-2, pp253-258, 2004.7
- 8) Cervenka Consulting：ATENA V.5
- 9) Kupfer, H., Hilsdorf, H.K., and Rusch, H.：Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal ACI, Proc. V.66, No.8, pp656-666, Aug.1969
- 10) Hordijk, D.A.：Local Approach to Fatigue of Concrete, Doctor dissertation, Delft University of Technology, 1991
- 11) 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，474号，pp.163-170, 1995.8
- 12) Vecchio, F.J., and Collins, M.P.：The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Proc. V.83, No.22, pp219-231, Mar./Apr.1986
- 13) Crisfield M.A., and Wills J.：Analysis Of R/C Panels Using Different Concrete Models, Journal of Engineering Mechanics, V.115-3, pp578-597, Mar.1989
- 14) Kolmar, W.：Beschreibung der Kraftuebertragung uber Risse in nichtlinearen Finite-Element-Berechnungen von Stahlbetontragwerken, Dissertation, T. H. Daemstadt, p.94, 1986
- 15) CEB：CEB-FIP Model Code 1990, First Draft, Committee Euro-International du Beton, d'information No.195,196, 1990