

論文 RC 造有開口袖壁付き柱の曲げせん断加力実験

坂上 正裕^{*1}・樋熊 利亘^{*2}・加藤 大介^{*3}・田村 良一^{*4}

要旨：袖壁等には小開口を含め開口が存在することが多い。日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準¹⁾（以下、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確認されていない。本研究では、開口の形状とその位置の異なる3体のせん断破壊形の有開口袖壁付き柱の静加力実験を行い、原型とした既往の無開口試験体と比較しつつ、終局強度および変形性能を中心にその挙動を確認した。その結果、開口の形状と位置によって終局強度及び変形性能が異なるものの、開口による短柱化は見られず、RC規準の開口低減率は安全側の評価であることが確認できた。

キーワード：有開口袖壁付き柱、せん断破壊、開口低減率、損傷度

1. はじめに

1968年の十勝沖地震では構造設計では無視されていた袖壁・たれ壁・腰壁の存在のために短柱化した柱がせん断破壊を引き起こしRC造建物は大きな被害を受けた。それ以降これらの壁は排除される傾向にあったが、1992年の阪神淡路大震災以降、建築計画上必要とされるこれらの壁の地震被災後の継続使用性能への寄与が改めて認識されることとなった。ところが、袖壁等のとり付いた部材の設計法は整備されていない。

ところで、袖壁等には分電盤等の小開口を含め開口が存在することが多い。そのため2010年に改訂された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ることになった。その力学的な挙動は大きくは変わらないであろうという前提の下ではあるが、この適用性については直接的には全く確認されていないのが現状である。しかも、これがそのまま終局強度にも適用されようとしていることを考えると、袖壁等の取り付く部材に及ぼす開口の影響の評価法の開発は急務と言わざるを得ない。

一方、東日本大震災を含む過去の地震被害では、袖壁等のとり付いた部材はさまざまな被害形態を示している。被災後の復旧活動に欠かせない被災度判定における損傷度の評価法が曖昧である。例えば、ひび割れが袖壁内だけの場合、あるいは柱に進展している場合、それぞれどの程度の残存性能を有しているのか、これは開口がある場合により複雑な問題となる。この曖昧さは学術的なバックデータの不足によるものである。

当研究室では文献2)に示すPCa袖壁補強実験を行っており、その際比較対象としての一体打ち無開口袖壁付き柱CSW-Hの実験も行っている。本研究では、試験

体CSW-Hを原型とし、開口の形状とその位置の異なる有開口袖壁付き柱の3体の静加力実験を行い、終局強度及び変形性能を中心にその挙動を確認した。併せて、各サイクル毎にひび割れ幅の計測を行った。本論文ではこれらの実験結果を報告する。

2. 実験の概要

2.1 試験体

試験体はCSW-Hを原型とし、形状と配筋を同じとした有開口袖壁付き柱試験体3体を作成した。RC規準においては、壁板に開口がある壁部材のせん断耐力は、無開口壁部材のせん断耐力に開口低減率を乗じて算定している。その開口低減率は、開口の幅、開口の見付面積、開口の高さによる低減率の最小値としている。袖壁に設けた開口はRC規準で示されている袖壁開口の適用範囲の限界である開口低減率0.7を共通とし、実験パラメータは開口の形状と大きさおよび位置とした。表-1に試験体の諸元及びコンクリート強度を、表-2に鉄筋材料強度を、図-1に試験体の配筋図を示す。原型試験体CSW-Hの試験体諸元等も併せて記載している。試験体の設計はせん断破壊により耐力が決まるようにした。

柱断面は250×250mm、袖壁断面は厚さ75mm、長さ500mm、試験体内法高さは1000mm（試験体全高さ1600mm）とした。配筋は、柱主筋を4-D13（端部は折曲げ定着、 $p_g=0.81\%$ ）、帯筋を□-D6@100（末端フック形状135°、 $p_w=0.26\%$ ）とし、袖壁の縦横筋をD6@100ダブル（ $p_s=0.85\%$ ）、端部補強筋を1-D13（末端フック付）とした。なお、袖壁の縦横筋については開口の影響により局部的にその間隔を100mmに固定できない場合が生じたが、いずれの試験体とも縦横筋の本数は

*1 新潟大学大学院自然科学研究科 博士課程 (正会員)

*2 新潟大学大学院自然科学研究科 修士課程

*3 新潟大学工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

*4 新潟工科大学建築学科 教授 工博

同じである（縦筋 5 本×2，横筋 10 本×2 で平均的には 100mm 間隔）。

試験体 CSWO-S は開口の大きさを 200×200mm とし柱に接した開口位置とした。開口低減率は開口幅により決定され 0.7 である。試験体 CSWO-L は開口の大きさを幅 200×高さ 350mm とし柱に接した開口位置とした。開口低減率は開口幅及び見付面積によるものが同じで 0.7 である。なお，見付面積による開口低減率には層の高

表-1 試験体諸元及びコンクリート強度

試験体名	CSWO-S	CSWO-L	CSWO-SC	CSW-H ²⁾
開口[mm]	200×200	200×350	200×200	なし
開口位置	柱際面		袖壁中央	-
コンクリート強度 [N/mm ²]	21.6			21.7
柱断面[mm]	250×250			
袖壁断面[mm]	75×500			
柱	内法高さ	1000		
	主筋	4-D13		
	帯筋 (帯筋比)	□-D6@100(0.0026)		
袖壁	縦横筋 (壁筋比)	D6@100ダブル(0.0085)		
	端部筋	1-D10		
軸力[kN]	294			

※ コンクリート強度は、各試験体の加力前に3体の供試体の圧縮試験を行い、それら計9本の平均とした。

表-2 鉄筋材料強度 [N/mm²]

	CSWO-S,L,SC		CSW-H ²⁾	
	降伏強度	最大強度	降伏強度	最大強度
D6	318	497	353	498
D10	374	529	382	535
D13	396	557	383	561

さ h が必要になるが，ここでは壁内法高さと梁の高さの和（1300mm）とした。試験体 CSWO-SC は開口の大きさを 200×200mm とし開口は袖壁の中心位置とした。開口低減率は開口幅により決まり 0.7 である。

開口の高さ位置はいずれの試験体も試験高さの中心位置とした。RC 規準では，開口左右の要素の曲げ強度の和が設計用せん断力を上回るという観点より開口補強を要求している。詳細は後述するが，本試験体の場合，開口左右の要素の軸力を無視した曲げ強度の和（後述する表-4(b)の右端の値）がせん断強度計算値を上回っているため，特別な開口補強筋は配筋しなかった。

コンクリートの圧縮強度は 21.6N/mm² である。鉄筋の種類は，D6 は SD295A，D10 及び D13 は SD345 とした。

2.2 加力方法と測定方法

加力は図-2 に示す加力装置により逆対称変形を与えた。試験体の下基礎部を装置のフレームに，上基礎部を L 型フレームに固定し，L 型フレームに付いている

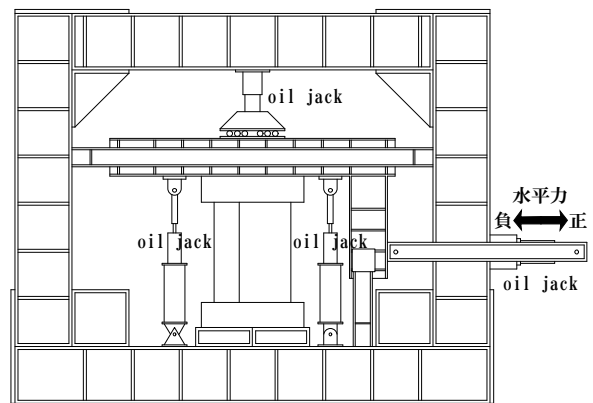


図-2 加力装置図

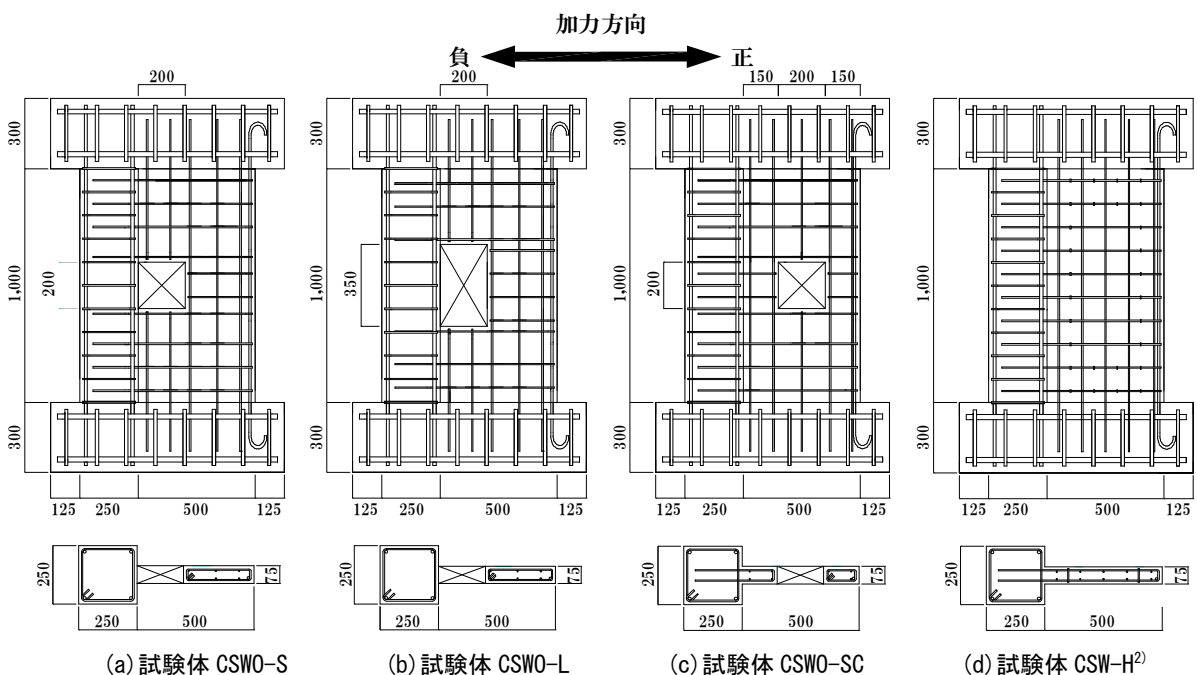


図-1 試験体配筋図

水平力ジャッキによりL型フレームを水平加力する。装置フレームに付いている中央の軸力ジャッキにより鉛直加力し、左右の補助ジャッキによりL型フレームを水平に保っている。なお、中央の軸力ジャッキの位置は試験体の横幅(750mm)の中心線としている。鉛直軸力は一定軸力 294kN を維持し、水平荷重は 1/500, 1/250, 1/125, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25 の水平部材角を正 (+) 負 (-) でそれぞれ1回繰り返す、計7サイクル与えるものを基本とした。

3. 実験結果

3.1 荷重—変形関係

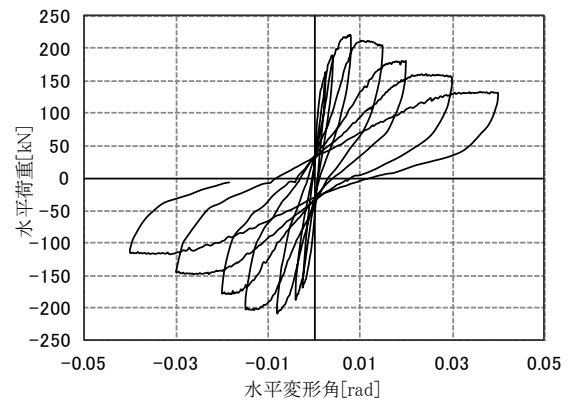
各試験体の水平力—水平変形角関係を図-3 に示す。図-4 に各試験体の最大耐力時及び加力終了時におけるひび割れ図を示す。実線は正加力時に生じたひび割れで点線は負加力時のものである。黒く塗りつぶされた部分はコンクリートの剥離した箇所である。表-3 は最大耐力、使用限界状態、修復限界状態及び安全限界状態に関する試験体の損傷状況をまとめたものである。

試験体 CSWO-S は+1 サイクル (1/500rad) 加力中に袖壁に曲げひび割れが発生し、+2 サイクル (1/250rad) 加力中に柱に曲げひび割れおよび袖壁にせん断ひび割れが生じた。+3 サイクル (1/125rad) で最大耐力 222kN に達し、頂部袖壁曲げ補強筋が降伏し、脚部袖壁コンクリートの圧壊が起こり始めた。+5 サイクル (1/50rad) で試験体の水平耐力は最大耐力の 80%まで低下し、柱の圧壊が起こり始め、柱と袖壁面の滑りも生じている。+7 サイクル (1/25rad) で軸力は保持しているものの、水平耐力は最大耐力の 60%程度まで低下した。負加力時も同様の性状を示し、最大耐力は 208kN であった。

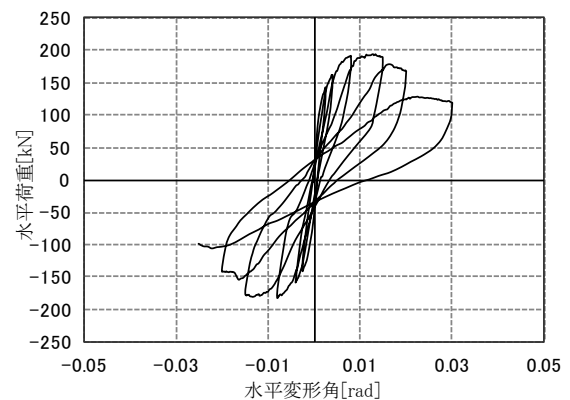
試験体 CSWO-L は+2 サイクルまでは CSWO-S 試験体とほぼ同じ性状であった。+4 サイクル加力中の 1/75rad で最大 194kN に達した。+5 サイクル (1/50rad) で試験体の水平耐力は最大耐力の 80%まで低下した。-6 サイクル加力中 1/38rad で柱のせん断破壊が起こり軸力負担能力を喪失した。その破壊は開口下部隅角部ひび割れ位置で起こっている。負加力時も同様の性状を示し、最大耐力は 182kN であった。

試験体 CSWO-SC は試験体 CSWO-S と開口位置が異なっているが同様な性状を示し、+3 サイクル (1/125rad) で最大耐力 230kN に達した。負加力時も同様の性状を示し、最大耐力は 220kN であった。

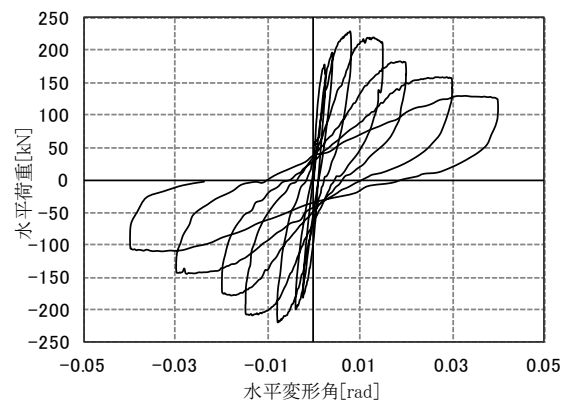
耐震診断³⁾においては、部材の保有する変形性能を表す指標として靱性指標 F を定めている。一般的に袖壁に開口が存在することにより可撓長さを開口高さと同定し、極脆性柱 (F=0.8) として強度及び靱性能を検討することが行われている。実験結果によれば各試験体と



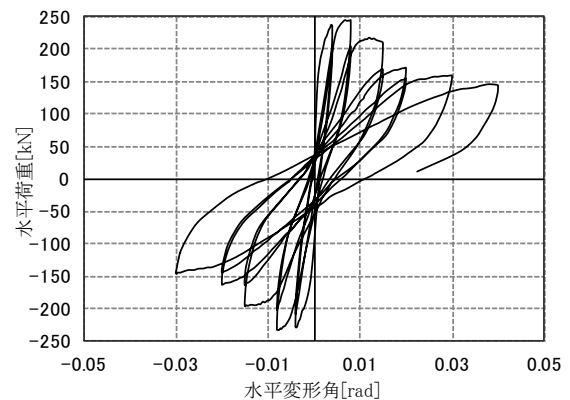
(a) 試験体 CSWO-S



(b) 試験体 CSWO-L



(c) 試験体 CSWO-SC

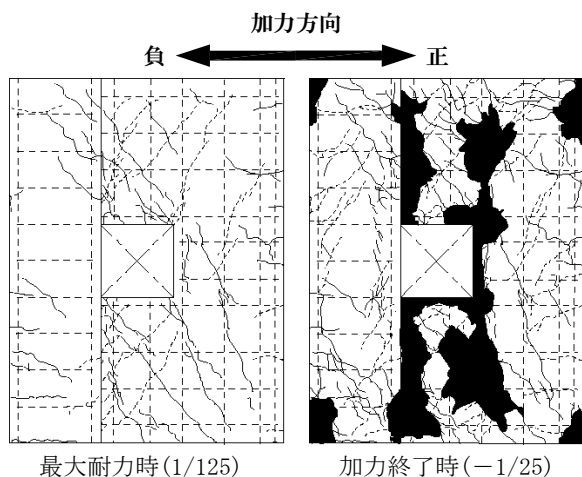


(d) 試験体 CSW-H²⁾

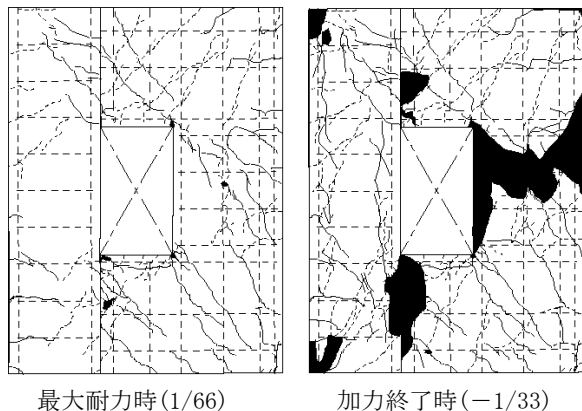
図-3 水平力—水平変形角関係

表-3 実験結果一覧

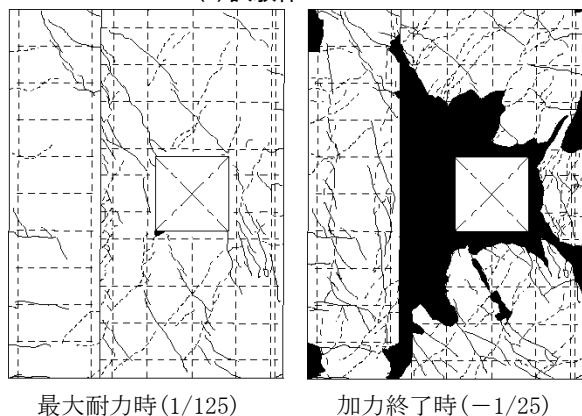
試験体名	最大耐力 [kN]	最大耐力 時変形角 [rad]	使用限界状態 [rad]				修復限界状態 [rad]		安全限界状態 [rad]		
			ひび割れ時変形角		柱主筋 降伏時	袖壁縦筋 降伏時	柱圧壊時	袖壁圧壊時	最大耐力 の80%	軸力負担 能力喪失	
			柱	壁							
CSWO-S	+	222	0.008	0.003	0.001	0.012	0.007	0.021	0.007	0.020	-
	-	-208	-0.008	-0.003	-0.000	-0.012	-0.010	-0.020	-0.007	-0.020	-
CSWO-L	+	194	0.013	0.004	0.001	0.010	0.007	0.003	0.008	0.020	-
	-	-182	-0.008	-0.002	-0.003	-0.012	-0.008	-0.020	-0.008	-0.017	-0.026
CSWO-SC	+	230	0.008	0.002	0.001	0.012	0.007	0.011	0.010	0.015	-
	-	-220	-0.008	-0.000	-0.000	-0.013	-0.012	-0.025	-0.008	-0.018	-
CSW-H	+	244	0.007	0.002		0.007	0.006	0.007	0.008	0.015	-
	-	-234	-0.008	-0.001		-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	0.015	-



(a) 試験体 CSWO-S



(b) 試験体 CSWO-L



(c) 試験体 CSWO-SC

図-4 ひび割れ図

も概ね 1/125rad の変形角 ($F=1.5$) で最大耐力に達し、靱性能は無開口袖壁付き柱と同様な性状であった。

3.2 強度の計算値との比較

表-4(a)(b)に強度の計算値と実験値の比較を示す。せん断ひび割れ強度は文献 4)において耐力係数 $\phi=0.51$ としたものの、曲げ強度は診断基準式³⁾が袖壁を柱の両側に均等に割り振ったのちに圧縮側のみの効果を考慮するもの、全塑性式は文献5)によるもの、である。また、せん断強度は無開口袖壁付き柱の強度に開口低減率(今回は全て 0.7)を乗じるものであるが、無開口袖壁付き柱のせん断強度式としては以下の3通りを検討した。

- ・異形断面式：文献6)で提案した異形断面用の方法で、トラス機構は拘束効果の高い柱断面のみ、アーチ機構は袖壁を考慮した全断面長さ(750mm)とした上で、靱性保証型耐震設計法⁴⁾のせん断強度式を用いるもの。

- ・診断基準式³⁾：袖壁を柱の両側に均等に割り振ったのちに圧縮側のみの効果を考慮するもの。

- ・累加強度式：文献5)による方法で、断面を2つに分解して荒川式のせん断強度式を用いて、その累加をせん断強度とするもの。

また、表-4(b)には参考のために袖壁を無視して柱単独とした場合の計算値も示した。ただし、内法高さには袖壁の拘束の影響を考慮してA, B, Cの3通りの高さを検討している。さらに、表-4(b)の右端には左右の袖壁の軸力の効果は無視した曲げ強度の和を示している。これは前述したように、開口補強筋の有無を検討するためのものである。終局時においては、各試験体ともに終局時耐力は内法長B(表-4参照)における柱単独のせん断強度にほぼ等しく、可撓長さは内法長Bと考えられる。

最大耐力実験値を有開口袖壁付き柱と無開口袖壁付き柱について比較する。CSWO-SおよびCSWO-SCの最大耐力は無開口袖壁付き柱の0.91~0.94と開口低減率0.70を大きく上回っている。CSWO-Lの最大耐力は無開口袖壁付柱の0.80となり開口低減率0.70に近い。

表一4 強度計算値と実験値の比較[kN]

(a) 袖壁付き柱としての強度

試験体名	最大耐力実験値 (〈〉は無開口に 対する比)	曲げひび 割れ強度	せん断 ひび割れ 強度 ⁴⁾	曲げ強度		開口低減率を使用したせん断強度 ([]は実験値/計算値)		
				診断 基準式 ⁵⁾	全塑性 式 ⁶⁾	異形断面式 ³⁾	診断基準式 ⁵⁾	累加強度式 ⁶⁾
CSWO-S	222 〈0.91〉	47	62	262	302	141 [1.57]	137 [1.62]	147 [1.51]
CSWO-L	194 〈0.80〉					141 [1.38]	137 [1.42]	147 [1.32]
CSWO-SC	230 〈0.94〉					141 [1.63]	137 [1.68]	147 [1.56]
CSW-H	244 〈1.0〉	47	89	260	299	203 [1.20]	200 [1.22]	214 [1.14]

(b) 柱単独としての強度及び開口左右の曲げ強度

試験体名	内法長A ^{*)}		内法長B ^{*)}		内法長C ^{*)}		左右の要素の 曲げ強度の和 **)
	曲げ強度	せん断強度	曲げ強度	せん断強度	曲げ強度	せん断強度	
CSWO-S	78	105	129	128	388	155	259
CSWO-L			115	121	222	155	181
CSWO-SC			129	128	388	155	226
CSW-H ²⁾	-						

*) A:開口高さ+腰壁高さ×2(=1000mm)

B:開口高さ+腰壁高さ×1

C:開口高さ

***) 開口の左右の要素に分離した時の曲げ強度の和。軸力の効果は無視し、内法高さは開口の高さとしている。

せん断強度各計算値と実験結果を比較する。無開口袖壁付き柱 CSW-H の実験値最大耐力はせん断強度計算値の1.14~1.22である。有開口袖壁付き柱 CSWO-S および CSWO-SC の実験値最大耐力は開口低減率を考慮したせん断強度計算値の1.51~1.68であり、CSWO-Lは1.32~1.42である。実験値は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。

図-5 は各試験体の水平力-水平変形角関係の包絡線の比較を示す。いずれの試験体も水平変形角 1/125 rad 付近で最大耐力に達している。CSWO-S および CSWO-SC の最大耐力発揮後性状は無開口袖壁付き柱とほぼ同じである。CSWO-Lは開口の影響を反映し、各サ

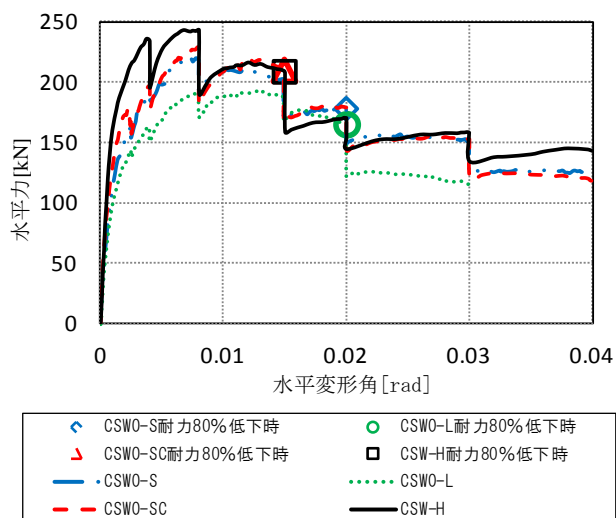


図-5 包絡線の比較 (正方向)

イクル毎に無開口袖壁付き柱に比べ水平荷重は下回っている。今回の3体については可撓長さを開口高さとして極脆性柱扱いすることは適切ではないと判断できる。

3.3 損傷状況

図-6 は各試験体のひび割れ幅と損傷状況を柱と袖壁に分けて示したものである。ひび割れ幅は各サイクルのピーク時、除荷時にクラックスケールにより測定された最大値を示し、参考として除荷時ひび割れ幅として推定されるピーク時の1/2も併せて示す。変形が進むにつれ、ひび割れ幅が低下または0となっているのは最大ひび割れ部分がコンクリート剥離によりその部分の測定が不可能となっていることによる。また、損傷状況はピーク時の1/2のひび割れ幅を用いて文献7)より評価した損傷度である。損傷度とは部材の破壊の程度をいい、レベルI(破壊程度最小)からレベルV(破壊程度最大)までの5段階である。

試験体 CSWO-S の最大耐力時における損傷度は柱及び袖壁ともにIIと判定され、加力終了時には柱と袖壁との境界部に滑りによるひび割れが見られ、柱はIIのままであり袖壁はIVに進んでいる。

試験体 CSWO-L の最大耐力時における損傷度は柱及び袖壁ともにIIと判定された。加力終了時は袖壁のせん断破壊の後に柱のせん断破壊が起こり軸力負担能力を喪失し、柱及び袖壁ともにVと判定される。

試験体 CSWO-SC の最大耐力時における損傷度は柱II、袖壁はIIIと判定され、加力終了時には CSWO-S と同様に柱と袖壁との境界部に滑りによるひび割れが見られ、

柱はⅢに袖壁はⅤに進行した。

因みに無開口袖壁付き柱の CSW-H の実験結果によれば、加力終了時には CSWO-S 及び CSWO-SC と同様に柱と袖壁との境界部に滑りによるひび割れが見られている。

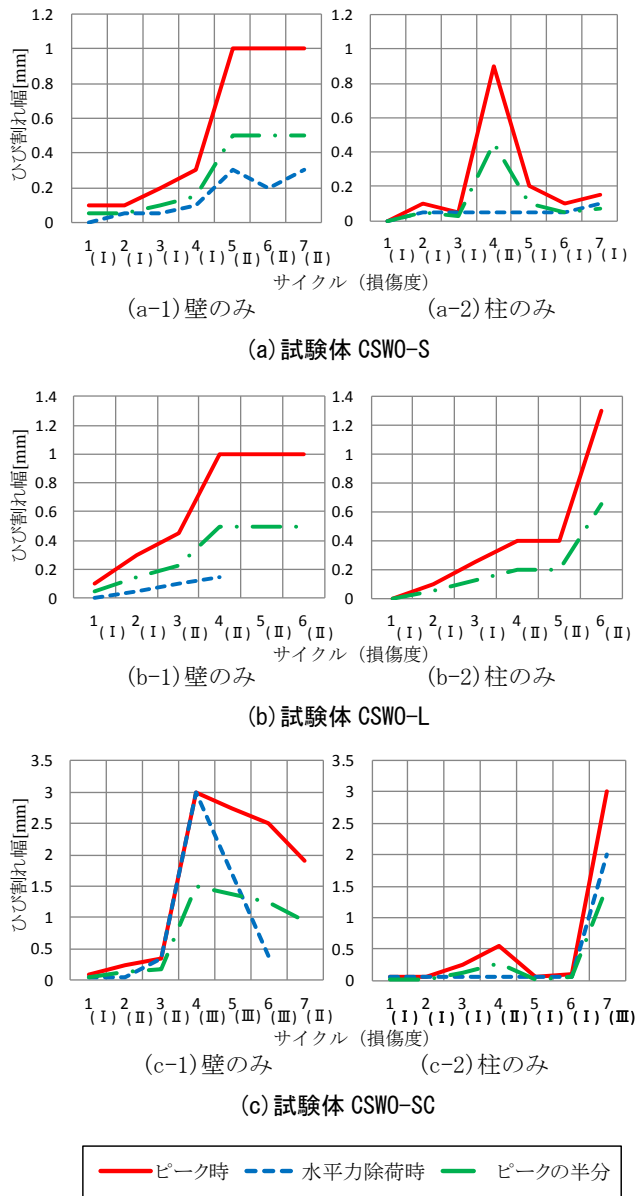


図-6 ひび割れ幅と損傷状況（正方向）

4. まとめ

- (1) 最大耐力実験値を有開口袖壁付き柱と無開口袖壁付き柱について比較したところ、開口が正方形の2体（CSWO-S および CSWO-SC）の最大耐力は無開口袖壁付き柱の0.91~0.94と開口低減率0.70を大きく上回っている。また、開口縦長の CSWO-L はこの2体よりも強度が低かったが、無開口袖壁付き柱の0.80となり開口低減率0.70を上回った。
- (2) せん断強度各計算値と実験結果を比較すると、開口

が正方形の2体（CSWO-S および CSWO-SC）の最大耐力はせん断強度計算値の1.51~1.68であり、縦長開口の CSWO-L は1.32~1.42であった。すなわち、RC 規準による開口低減率とこれらのせん断強度式を併用する方法は安全側といえる。

- (3) 耐震診断において、袖壁に開口が存在することにより可撓長さを開口高さで想定し極脆性柱（ $F=0.8$ ）として強度及び靱性能を検討することが一般的に行われている。実験結果によれば各試験体とも概ね $1/125\text{rad}$ の変形角（ $F=1.5$ ）で最大耐力に達し、靱性能は無開口袖壁付き柱と同様な性状であり、今回の3体については可撓長さを開口高さとして極脆性柱扱いすることは適切ではなく、有開口袖壁付き柱としてモデル化するのが適切であると判断できる。
- (4) 今回は、同じ開口低減率でありながら、正方形開口をもつ2体が縦長の開口をもつ試験体より大きな最大耐力を保有していた。すなわち、RC 規準の開口低減率は安全側ではあるが、開口左右の要素に分離してせん断強度を算出するなどの方法の検討が必要であろう。

謝辞

本研究を行うにあたり新潟大学自然科学研究科前期課程1年の増門健太君、古布宗斗君、新潟工科大学4年生の星野博行君、石塚恵太君の協力をいただきました。ここに謝意を表します。

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），19条壁部材の算定，pp.274-325
- 2) 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26-2，2004年，pp.253-258
- 3) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説（2001）
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性能保証型耐震設計指針・同解説（1999）
- 5) 壁谷澤寿成・壁谷澤寿海・他：せん断破壊型そで壁付き柱に関する実験的研究，第30回コンクリート工学年次論文報告集30-3，2008年，pp.115-120
- 6) 加藤大介，孫浩陽：袖壁つきRC造柱の最大耐力以降の挙動の評価法，日本建築学会構造系論文集，第566号，2003年4月，pp.97-103
- 7) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針（2002）