

論文 せん断破壊型 RC 造有開口袖壁付き柱の曲げせん断加力実験

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

要旨：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のが現状である。本研究では、昨年度の研究に引き続き、開口の大きさと壁筋比、帯筋比を変化させた3体のせん断破壊型の有開口袖壁付き柱の静加力実験を行い、せん断強度に及ぼす開口の影響を検討した。その結果、RC 規準の開口低減率はかなり安全側であった。また、開口による短柱化は見られず、適用範囲を超える開口低減率でも大きな耐力低下に繋がらないことが確認できた。

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

袖壁付き柱の袖壁部には、分電盤等の取り付けのため開口が存在することが多い。2010年に改訂された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し、せん断ひび割れ強度やせん断強度等に乗じる方法が示されている。しかし、この適用性については確認されていないのが現状である。

一方、東日本大震災を含む過去の地震被害では、袖壁等の取り付け部材はさまざまな被害形態を示している。しかし、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は曖昧である。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。

筆者らは文献2)で有開口袖壁付き柱のせん断破壊実験の結果を報告したが、本研究では引き続きせん断破壊型の有開口袖壁付き柱の静加力実験を行い、せん断強度に及ぼす開口の影響を検討した。

2. 実験の概要

2.1 既往の研究

筆者らは、文献3)で報告した無開口袖壁付き柱CSW-Hの試験体諸元を基にして、開口の大きさと位置をパラメータとした有開口袖壁付き柱の静加力実験を行っている²⁾。その結果、RC規準による開口低減率は、開口の大きさと位置により余裕度は異なるものの、大きく安全側であることが分かった。また、開口による柱の短柱化は見られず、水平変位が進むにつれて柱と袖壁の

境界部に滑りが生じていくことが分かっている。一方、文献3)は既存の柱を袖壁で補強する目的で行った研究であったため、袖壁の壁筋比は若干高めで設計されており、昨年度の試験体設計では無開口袖壁付き柱と比較できるように、壁筋比は同様に高いままであった。そこで、本研究では袖壁の壁筋比を低くした実験を計画した。

2.2 試験体

本研究では、文献2)で報告した3体の有開口袖壁付き柱の試験体のうち最も強度が低く、最大耐力後の挙動も

表-1 試験体諸元及びコンクリート強度

試験体名	CSW-S25-A	CSW-L-A	CSW-L-B	CSW-L ²⁾
開口寸法 [mm×mm]	250×250	200×350		
開口低減率 ¹⁾	0.63	0.71		
開口位置	柱際 かつ 試験体高さ中央			
コンクリート強度 [N/mm ²]	20.2			21.6
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 (0.26)	□-D4@100 (0.11)	□-D6@100 (0.26)
袖壁	縦横筋 (壁筋比 [%])	D4ダブル (0.37)		D6ダブル (0.85)
	端部筋	1-D10		
かぶり厚さ [mm]	12.5			
軸力 [kN]	294			

表-2 鉄筋材料強度

		D4 [*] SD295A	D6 [*] SD295A	D10 SD345	D13 SD345
降伏強度 [N/mm ²]	本年度	397	326	372	386
	文献2)	—	318	374	396
最大強度 [N/mm ²]	本年度	531	495	529	503
	文献2)	—	497	529	557
降伏歪度	本年度	4405	3944	2005	2226
	文献2)	—	3900	2007	2422

^{*})引張試験において降伏棚を示さなかったため0.2%耐力を用いた。

*1 新潟大学大学院自然科学研究科 修士課程 (学生会員)

*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 (正会員)

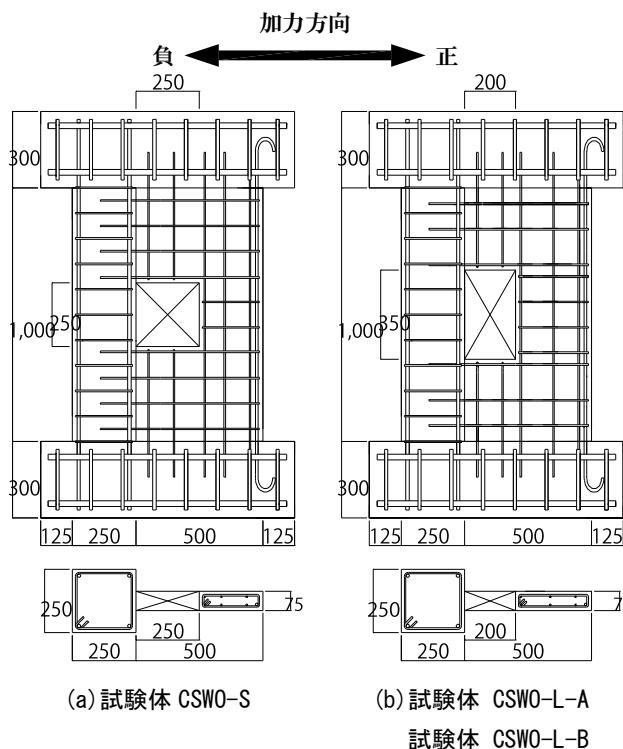


図-1 試験体配筋図 (単位はmm)

最も脆性的であった試験体 CSWO-L との連続性を持つ 3 体の試験体を製作した。表-1 に試験体の諸元及びコンクリート強度、表-2 に文献 2) のものと併せた鉄筋の各強度及び降伏歪度、図-1 に試験体の配筋図を示す。表-1 には文献 2) の試験体 CSWO-L の諸元も示している。試験体はいずれもせん断破壊により耐力が決まるように計画している。

いずれの試験体も柱断面は 250×250mm、袖壁断面は厚さ 75mm、長さ 500mm、試験体内法高さは 1000mm とした。開口は柱際、かつ、試験体中央の高さに開口の中心がくる位置とした。配筋は柱主筋を 4-D13 ($p_g=0.81\%$) で統一し、端部補強筋は共に 1-D10 (末端フック付き) とした。なお、配筋図では表現されていないが、柱主筋は L 字型に折り曲げ、基礎に定着した。

試験体 CSWO-L-A と CSWO-L-B は文献 2) の試験体 CSWO-L と同様に、開口の大きさは幅 200×高さ 350mm とした。試験体 CSWO-L の壁筋比が 0.85% とやや高い値であったことから、袖壁の縦横筋を D4@100 ダブル ($p_s=0.37\%$) とした。この 2 体では柱の帯筋比のみを変えており、試験体 CSWO-L-A は柱帯筋を □-D6@100 ($p_w=0.26\%$) とし、試験体 CSWO-L-B は、建設年の古い建物を意識した柱として □-D4@100 ($p_w=0.11\%$) とした。RC 規準の開口低減率は開口幅により 0.71 となる。

試験体 CSWO-S25-A の開口の大きさは 250×250mm とした。これは、開口低減率の適用範囲の検討を行うためである。文献 2) における 3 体の試験体は、開口低減率を適用限界である 0.7 となるよう開口の大きさを設計して

いた。しかし、終局強度や変形状の大きな低下に繋がらなかったことを受け、試験体 CSWO-S25-A では開口低減率 0.7 を下回る開口を設けた。開口低減率は開口幅により 0.63 となる。

なお、開口補強に関しては、後述する開口左右の要素の曲げ強度の和 (表-4 (b)) がせん断強度計算値を上回ったため、特別な開口補強筋は配筋しないこととした。

コンクリートの圧縮強度は 20.2N/mm² である。鉄筋は、D4 及び D6 は SD295A、D10 及び D13 は SD345 である。

2.3 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 型フレームに固定する。L 型フレームに付いている水平力ジャッキの高さは試験体の試験区間の中央と一致しており、これにより L 型フレームを水平加力する。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、水平載荷は 1/400, 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 回繰り返し、計 7 サイクル与えるものを基本とした。

試験体の測定は、変位計による各種変形と鉄筋各所には歪みゲージを貼り付けて行った。

3. 実験結果

3.1 加力経過

図-3 に各試験体の水平力-水平変形角関係を示す。表-3 には最大耐力、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ており、各限界状態は図-3 にもプロットしている。

試験体 CSWO-S25-A は +1 サイクル (1/400rad) 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、柱に曲げひび割れ及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

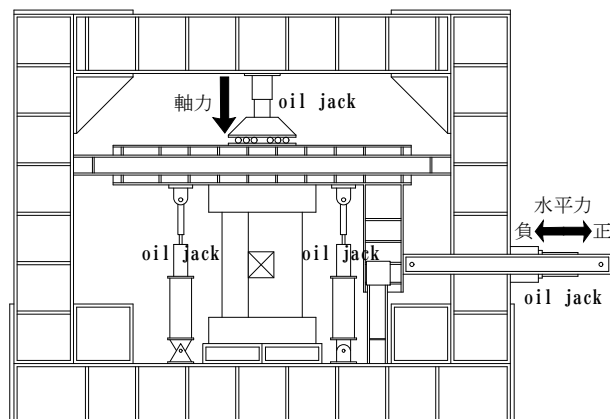


図-2 加力装置図

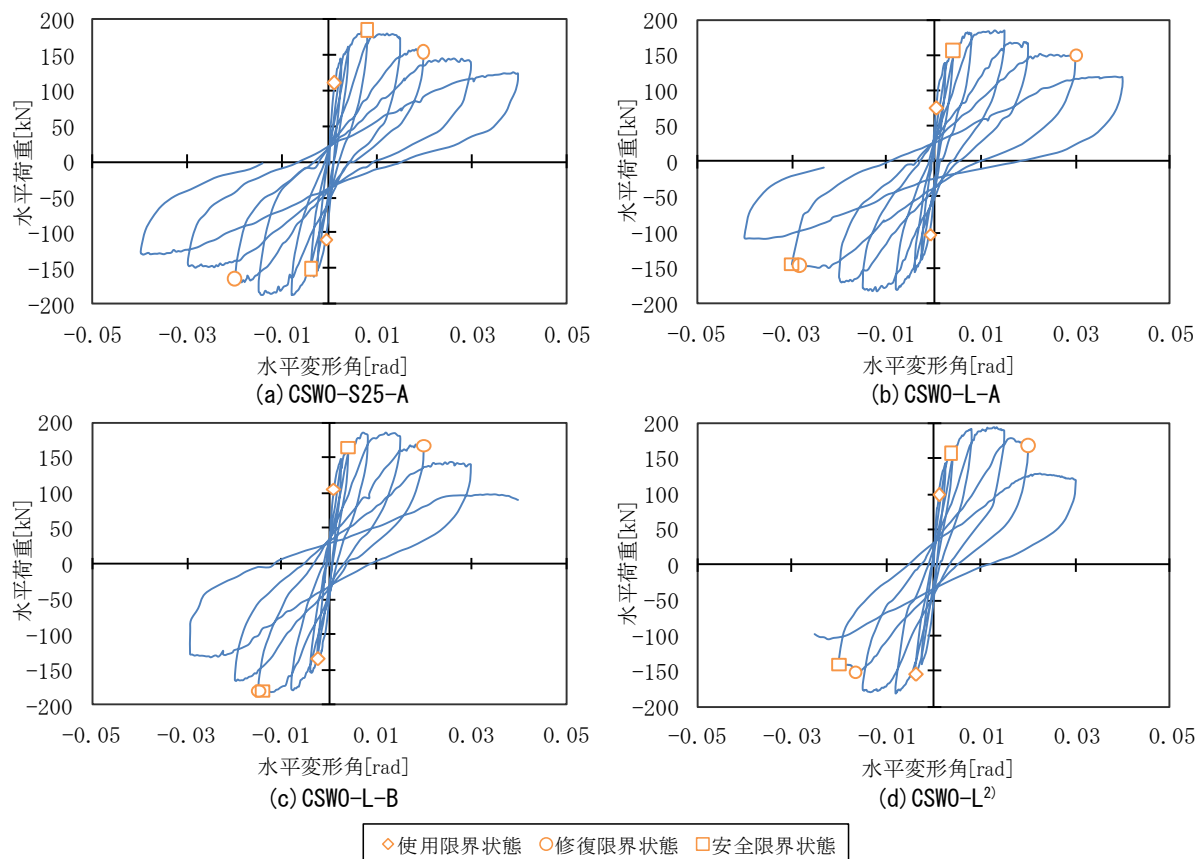


図-3 水平力-水平変形角関係

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		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%時	軸力負担 能力喪失	
			柱	壁							
CSWO-S25-A	+	186	0.007	0.0020	0.0010	0.010	0.006	0.012	0.008	0.020	-
	-	-189	-0.008	-0.0031	-0.0006	-0.009	-0.006	-0.011	-0.004	-0.020	-
CSWO-L-A	+	185	0.013	0.0024	0.0005	0.010	0.005	0.007	0.004	0.030	-
	-	-184	-0.012	-0.0010	-0.0006	-0.010	-0.006	-0.030	-0.008	-0.028	-
CSWO-L-B	+	185	0.012	0.0014	0.0008	0.009	0.003	0.008	0.004	0.020	0.04
	-	-182	-0.014	-0.0022	-0.0002	-0.007	-0.004	-0.020	-0.008	-0.020	-
CSWO-L ²⁾	+	194	0.013	0.0040	0.0010	0.010	0.007	0.003	0.008	0.020	-
	-	-182	-0.008	-0.0020	-0.0030	-0.012	-0.008	-0.020	-0.008	-0.017	-0.026

耐力186kNに達し、この時点で袖壁部の圧壊はすでに起こり始めていた。+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、柱部の圧壊と袖壁部の鉄筋露出が見られ始めた。+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65%程度まで低下した。

試験体CSWO-L-Aは試験体CSWO-Lと比べ、壁筋比のみを約1/2に低下させた試験体であるが、+3サイクルまではCSWO-Lとほぼ同じ性状であった。+4サイクル中の1/76radで最大185kNに達した。+6サイクル(1/33rad)で試験体の水平耐力は最大耐力の80%まで低下し、加力終了時には最大耐力の65%まで低下した。

試験体CSWO-L-Bは試験体CSWO-L-Aと比べ、柱の帯筋比のみを低下させた試験体だが、同様な性状を示し

+4サイクル中の1/88radで最大耐力185kNに達した。+7サイクル中に試験体の水平を保てなくなり、袖壁側から軸崩壊を起こした。

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。表-4(a)は袖壁付き柱としての各強度と短期許容せん断力を示しており、各強度式は文献4)~7)から引用した。なお、開口低減率はせん断ひび割れ強度、せん断強度及び短期許容せん断力に乗じている。表-4(b)は袖壁を無視した柱単独としての強度を示しており、内法高さには、袖壁の拘束の影響を考慮するものとして、A~Cの3通りの高さを検討している。袖壁の軸力の効果は無視し、0kNとした開口左右の要素の曲げ強度の和は、前述したように開口補強筋の必要性の有無を確認するもので

表-4 強度の計算値と実験値の比較

(a) 袖壁付き柱としての強度

試験体名	最大耐力 実験値 [kN]	曲げひび 割れ強度 [kN]	せん断 ひび割れ 強度 ⁵⁾ [kN]	曲げ強度 [kN]		開口低減率を乗じたせん断強度 [kN] ([]は実験値/計算値)			短期許容 せん断力 [kN]
				診断 基準式 ⁶⁾	全塑性式 ⁷⁾	異形 断面式 ⁴⁾	診断 基準式 ⁶⁾	累加 強度式 ⁷⁾	
CSWO-S25-A	188	46	55	257	279	121 [1.56]	129 [1.47]	141 [1.33]	81
CSWO-L-A	185		62			136 [1.36]	145 [1.28]	159 [1.16]	92
CSWO-L-B	185		62			117 [1.58]	136 [1.36]	140 [1.32]	69
CSWO-L ²⁾	194	46	62	262	306	143 [1.36]	155 [1.25]	160 [1.21]	141

(b) 単独柱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 ^{**)} [kN]
	曲げ強度 [kN]	せん断強度 [kN]	曲げ強度 [kN]	せん断強度 [kN]	曲げ強度 [kN]	せん断強度 [kN]	
CSWO-S25-A	88	107	138	127	351	157	202
CSWO-L-A	88	107	130	124	251	157	196
CSWO-L-B	88	96	130	112	251	145	184
CSWO-L ²⁾	78	105	115	121	222	155	181

*) 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0kNとして、内法高さは開口の高さとした。

ある。

表-4 (a) より、各せん断強度計算値と最大耐力実験値を比較する。まず、試験体 CSWO-S25-A は開口の拡大により各せん断強度計算値は他の試験体より低下する。しかし、最大耐力実験値は他の試験体と同程度であったため、せん断強度計算値との比率は 1.39~1.56 倍となり、大きく安全側であった。次に、開口低減率が同じである試験体 CSWO-L-A と CSWO-L-B は、柱帯筋比の違いにより試験体 CSWO-L-B の方のせん断強度計算値が低下するが、これも最大耐力が同程度であったため、試験体 CSWO-L-B の安全率が 1.36~1.58 と大きくなった。いずれにせよ文献1)の開口低減率は大きく安全側と言える。

図-4 は各試験体の正加力時の包絡線である。いずれの試験体も水平変形角 1/125~1/75 rad の付近で最大耐力に達した。これは耐震診断⁹⁾における層間変形角と靱性指標 F との関係によれば、F=1.5 程度に相当する。その

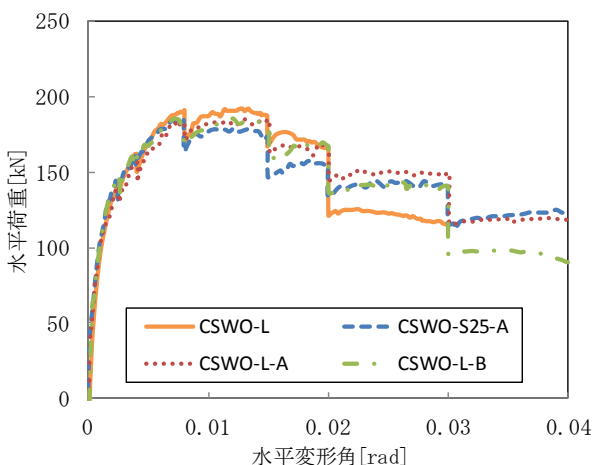


図-4 包絡線の比較 (正加力時)

後は、試験体 CSWO-S25-A と CSWO-L-A がほぼ同様に緩やかな耐力低下を示した。試験体 CSWO-L-B が7サイクル目に他の試験体と比べて耐力低下が著しかったのは、袖壁が軸崩壊を起こしたためである。

3.3 初期剛性の検討

図-5 に初期剛性の実験値と計算値を比較しておく。実験値は、初期ひび割れ時の水平力と水平変形角より算出した。計算値は、曲げ剛性と RC 規準¹⁾による剛性用の開口低減率を用いたせん断剛性を考慮した計算値を示した。実験値は計算値を大きく下回る結果となった。

4 損傷状況

4.1 ひび割れ状態

図-6 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、点線は負加力時に生じたひび割れであり、黒く塗りつぶされた部分はコ

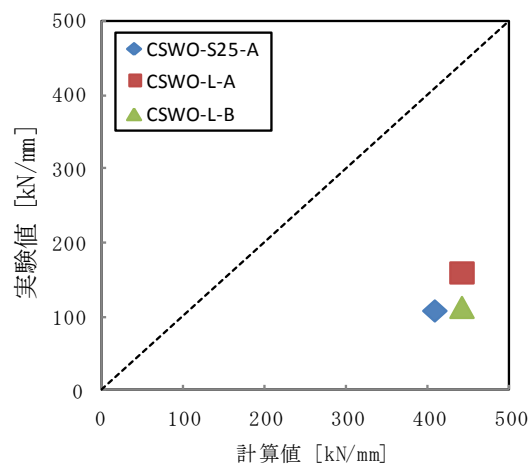


図-5 初期剛性の実験値と計算値の比較 (正加力時)

ンクリートが剥落した箇所である。図-7 は各試験体のひび割れ幅と損傷度を柱と袖壁に分けて示している。ひび割れ幅は各サイクルのピーク時と、水平力除荷時にクラックスケールにより測定された中の最大値を示しており、参考として水平力除荷時のひび割れ幅として推定されるピーク時の1/2も併せて示した。損傷度は文献8)より引用した表-5より、水平力除荷時のひび割れ幅を用いて評価した。

最大耐力時にはいずれの試験体も柱部は、曲げひび割れはほぼなく、損傷度はIと診断された。一方袖壁は幅

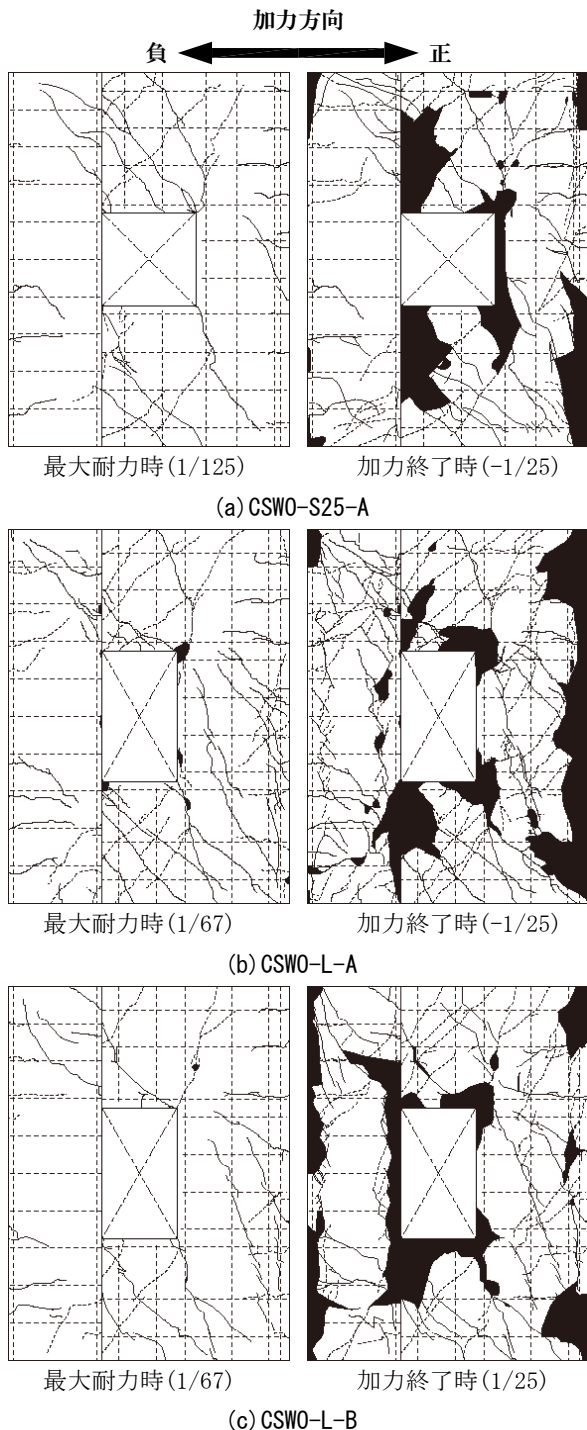


図-6 ひび割れ図

れと開口隅角部からのせん断ひび割れが見られる。剥落2mmを超えるひび割れが多く発生したが、剥落は開口隅角部にて見られる程度で、損傷度は概ねⅢであった。

加力終了時では、柱部は柱頭・柱脚では曲げによる破壊が見られ、鉄筋露出も確認された。柱の剥落は主に付着割裂破壊によるものと思われる、損傷度は概ねⅢである。袖壁部は、柱と袖壁の境界部では滑りによるひび割れ・剥落が発生しており、開口横や端部筋付近で

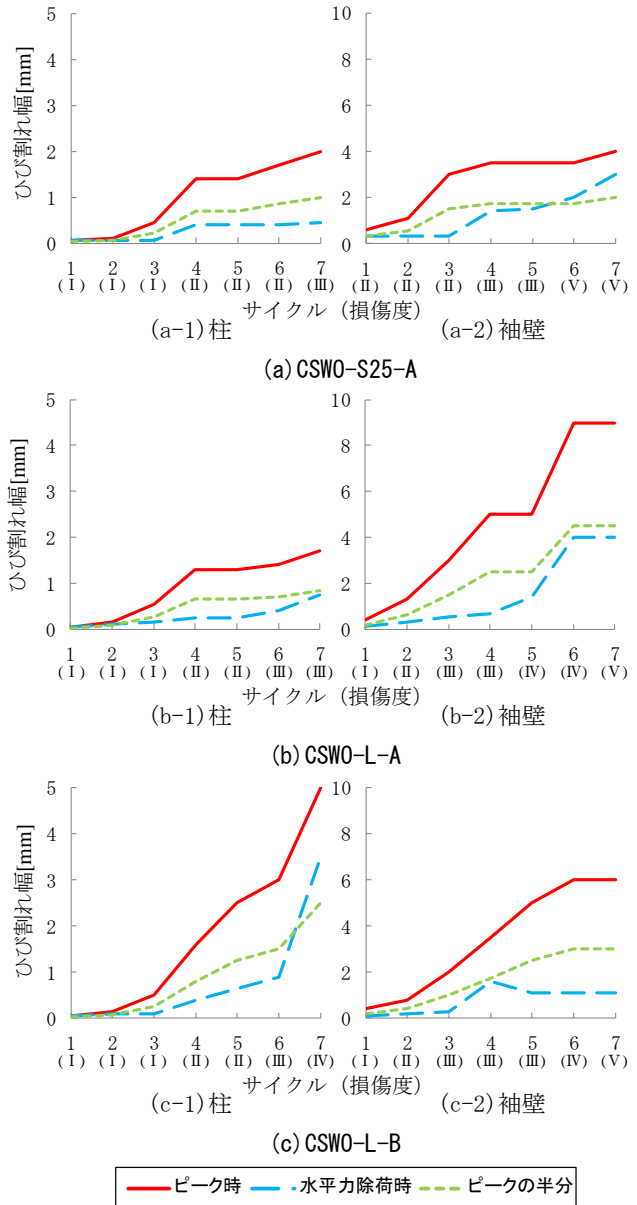


図-7 ひび割れ幅及び損傷度判定

表-5 損傷度分類の基準⁸⁾

程度	損傷の例示
I	近寄らないと見えにくい程度のひび割れ(幅約0.2mm以下)が生じている。
II	肉眼ではっきり分かる程度のひび割れ(幅約0.2mm~1mm)が生じているが、コンクリートの剥落は生じていない。
III	比較的大きなひび割れ(幅約1mm~2mm)が生じているが、コンクリートの剥落はごくわずかで、鉄筋は露出していない。
IV	大きなひび割れ(2mmを超える)が多数生じ、コンクリートの剥落も激しい。鉄筋が露出しているが、鉄筋の変形は見られない。
V	鉄筋が大きく露出しており、鉄筋の曲がり・破断が見られる。内部のコンクリートも崩れ落ち、柱の高さ方向の変形が生じている。

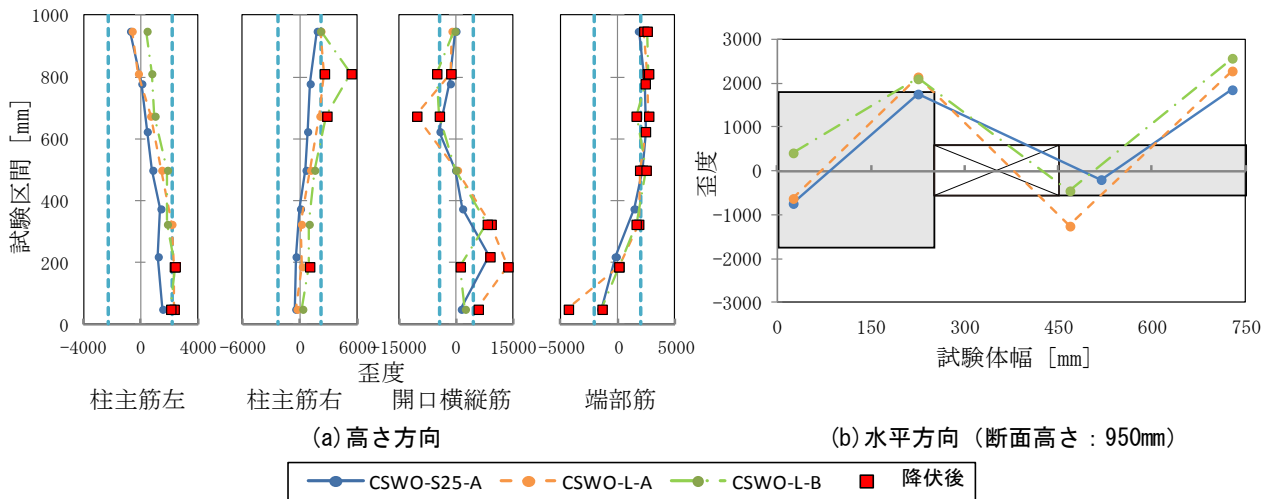


図-8 最大耐力時の鉄筋歪み分布（正加力時）

は鉄筋との付着力がなくなり、コンクリートが外れるように剥落する箇所が多く、また、鉄筋の曲がりも確認でき損傷度はVとなった。

4.2 鉄筋の歪

図-8 (a) (b)に最大耐力時の縦筋の鉄筋歪の分布を示す。図-8 (a) は同鉄筋内の高さ方向の歪みを示し、縦点線は鉄筋の降伏歪度、■は最大耐力時に既に降伏していたことを表している。図-8 (b)は、歪みゲージの張り付け位置の一つである、試験体高さ 950mm の断面での水平方向の歪み分布を示している。

図-8 (a) を見ると、柱部では、柱頭・柱脚にて鉄筋の歪みが大きく、柱単独として曲げ変形を受けていたことを示唆する歪み分布となっている。また、柱帯筋比の低い試験体 CSWO-L-B では、すでに降伏した箇所が多くあった。袖壁部では、まず開口横縦筋では、端部の歪みより腰壁・垂れ壁部内と、開口隅角部の高さに対応する位置の歪みが顕著であった。端部筋では各試験体で多くの箇所鉄筋が降伏しており、最大耐力の時点で袖壁端部筋側での鉛直方向の変形が始まっていることが分かる。また、図-8 (b) より、柱部と袖壁部がそれぞれ圧縮・引張を受けていると見受けられ、袖壁付き柱の断面として平面保持が成り立っていないことを示している。

5. まとめ

[1]各せん断強度計算値と最大耐力実験値の比較では、開口低減率が 0.63 である試験体 CSWO-S25-A は 1.39～1.56 と十分に安全側であった。開口低減率 0.71 の試験体 CSWO-L-A と CSWO-L-B では帯筋比による計算値の差があるが、実験値での差は見られず、それぞれ 1.21～1.36、1.36～1.58 と、共に安全側ではあったがその余裕度は異なった。

[2]損傷度判定と鉄筋歪み分布から、柱頭・柱脚では曲げ破壊、柱中央では付着割裂破壊による圧壊が顕著であ

り、袖壁はせん断破壊によるひび割れ・剥落が顕著で、端部筋側から鉛直方向の変形が見られた。全体の変形として、袖壁付き柱の断面としての平面保持が成り立っていないことが確認できた。

謝辞

本研究を行うにあたり、新潟大学修士 2 年の古布宗斗様、学部 4 年の熊谷和郎様、藤井健史様、新潟工科大学 4 年の佐藤新様、林圭佑様には多大なるご協力を頂きました。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)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, 第 35 回コンクリート工学年次論文報告集 35-2, 2013 年, pp.361-366
- 3)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
- 4)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
- 5)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 年
- 6)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 年
- 7)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, JCI 31-2, 2009, pp.169-174
- 8)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, 2001 年