

報告 シアスパン比を変化させた RC 造有開口袖壁付き柱のせん断破壊実験

坂上 正裕*1・樋熊 利亘*2・加藤 大介*3・田村 良一*4

要旨: 既報において、開口の大きさと壁筋比、帯筋比を変化させたせん断破壊型の RC 造有開口袖壁付き柱の静加力実験の結果を報告した。本報告では、シアスパンを変化させた 3 体の静加力実験結果について報告する。加力は片持ち柱形式としている。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、開口低減率が 0.7 を下回っても、適用範囲内であれば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, シアスパン比, 損傷度

1. はじめに

筆者らは文献 1)2)において、RC 造有開口袖壁付き柱のせん断破壊実験の結果を報告した。そこでは、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³⁾(以下、RC 規準)で示されている両側柱付き耐震壁に用いるせん断強度の開口低減率の袖壁付き柱への適用性について検討している。その結果、RC 規準の開口低減率はかなり安全側となることを示している。

一方、文献 1)2)では上下逆対称変形となる加力方法(建研式)を採用しており、シアスパン比は 0.70 と一般的な袖壁付き柱としては小さめの値であった。そこで、本報告では、試験体寸法は同一のまま加力形式を片持ち柱形式に変え、シアスパン比を 1.12 と 1.82 に変化させた静加力実験を行った。

2. 実験の概要

2.1 既往の研究

文献 1)2)では文献 4)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、配筋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。これまでの結論としては、RC 規準による開口低減率を考慮したせん断強度計算値は、実験値に対する余裕度は大きく、安全側であることが分かった。また、一般に設計で考慮しているような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開口の大きさにより、柱と袖壁境界面に滑りが生じる試験体も見られた。特に柱と袖壁境界面の滑りには、シアスパン比の影響が大きいと考えられる。

2.2 試験体

本報告では、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、配筋が新築される RC 造建物に近く、かつ、実験において柱と袖壁の境界部で滑りが見られた試験体 CSWO-S25-A を原型試験体として、3 体の試験体を計画した。そのうち 2 体(CSWO-S25-A-80,130)は試験体 CSWO-S25-A と同一の緒元とし、シアスパン比のみを 2 通りに変化させた。もう 1 体(CSWO-S-A-80)は、試験体 CSWO-S25-A-80 の開口を 250mm 角(開口低減率³⁾0.63)から 200mm 角(開口低減率³⁾0.71)に変更した。

表-1 に試験体の諸元及びコンクリート強度を、図-1 に試験体の配筋図を示す。これらには原型試験体の

表-1 試験体諸元及びコンクリート強度

試験体名	CSWO-S-A-80	CSWO-S25-A-80	CSWO-S25-A-130	CSWO-S25-A ²⁾
柱断面 [mm]	250×250			
袖壁断面 [mm]	75×500			
内法高さ [mm]	1000			
かぶり厚さ [mm]	12.5			
柱	主筋	4-D13		
	帯筋(帯筋比)	□-D6@100 (0.26%)		
袖壁	縦横筋(壁筋比)	D4ダブル (0.37%)		
	端部筋	1-D10		
シアスパン [mm] (シアスパン比)	800 (1.12)	1300 (1.82)	500 (0.70)	
開口寸法 [mm×mm] (開口低減率 ³⁾)	200×200 (0.71)	250×250 (0.63)		
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]	23.5			20.2

表-2 材料強度

	D4 ^{*)}	D6 ^{*)}	D10	D13	
降伏強度 [N/mm ²]	本年度	399	403	383	374
	文献2)	397	326	372	386
最大強度 [N/mm ²]	本年度	528	540	544	527
	文献2)	531	495	529	503
降伏歪度	本年度	4345	2701	2123	2568
	文献2)	4405	3944	2005	2226

*)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 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 (正会員)

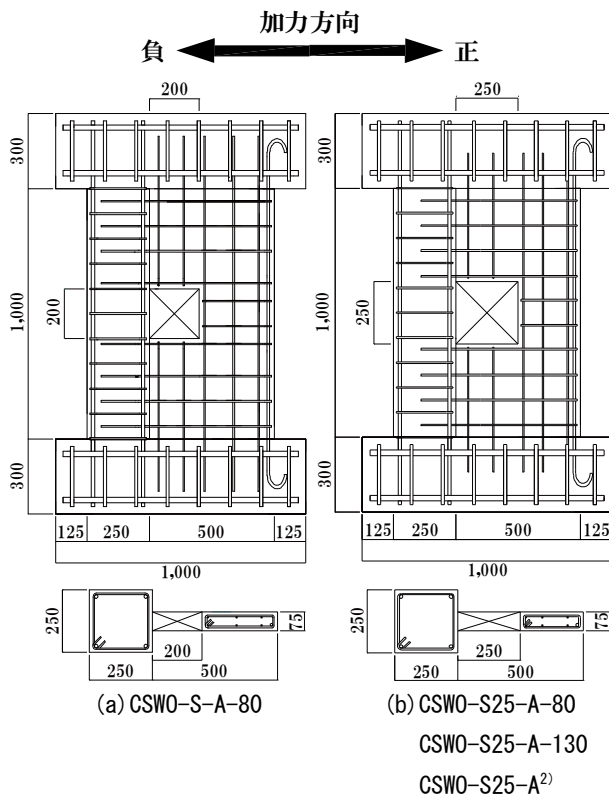


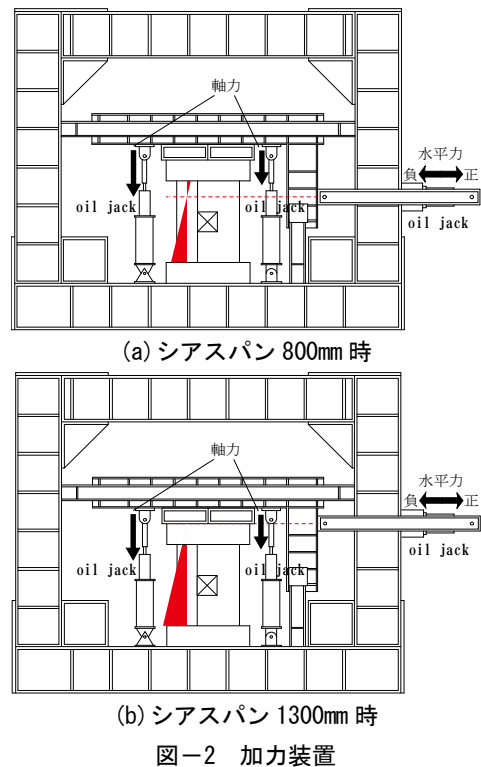
図-1 配筋図 (単位は mm)

CSWO-S25-A も併せて示している。表-2 に文献 2) のものも含めた鉄筋の各強度及び降伏ひずみ度を示す。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、基礎に定着している。

いずれの試験体も袖壁が圧縮側となる加力方向（後述する加力方法において正方向）において、せん断強度が曲げ強度を下回るよう計画している。シアスパンは文献 1)2) が 500mm だったのに対し、800mm と 1300mm とした。シアスパンの設定の際には、せん断強度式の荒川下限式における、柱・袖壁付き柱それぞれに適用されているシアスパン比の範囲を意識した。シアスパン 800mm の場合は、柱のシアスパン比が適用における上限の 3.0 に達するシアスパンである。また、シアスパン 1300mm の場合は、袖壁付き柱のシアスパン比が適用における上限の 2.0 に近いシアスパンである。

2.3 加力方法と測定方法

加力は図-2 (a) (b) に示す加力装置により片持ち柱形式の加力を行った。試験体の下基礎部を装置のフレームに、上基礎部を L 型フレームに固定させ、L 型フレームに付いている水平力ジャッキで载荷を行う。シアスパンの高さは水平力ジャッキの高さを変えて対応した。軸力は、柱心に定軸力 294kN がかかるように、左右のジャッキにより制御している。水平载荷は 1/400, 1/250, 1/125, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25rad の水平変形角を正負 (+-) 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。なお、水平変形角は加力点の水平変形を加力点高さで除して求めた。試験体の測定は、変位計による各種変形と鉄筋に貼り付けたひずみゲージにより行った。

3. 実験結果

3.1 加力経過

図-3 に各試験体の荷重-変形角関係を示す。後述するが、実線で全塑性曲げ強度式、破線で分割累加式によるせん断強度を併せて示した（但し、十分大きい場合には示していない。）。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-S-A-80 では、まず正加力時では +1 サイクル加力中に袖壁にせん断ひび割れ、+2 サイクル加力中に柱脚に曲げひび割れ、+3 サイクル加力中に柱頭にてせん断ひび割れが発生し、かつ、1/125rad で最大耐力 211kN に達した。+4 サイクル加力中に袖壁右脚部でコンクリート剥落が見られ、+5 サイクル加力中には袖壁右脚部で鉄筋露出も見られた。その後は、開口横、袖壁右脚部、柱と袖壁境界面で主なコンクリート剥落が見られた。+6 サイクル加力中に袖壁部分の圧壊が生じ、その後の耐力は柱のみが負担していると思われる。次に負加力時であるが、各サイクルで曲げひび割れが先行して発生した。最大耐力は -132kN であり、耐力低下の程度と損傷状態から曲げ破壊の性状である。しかし加力が進むと、開口上部と柱脚でせん断ひび割れも発生し、コンク

リート剥落は柱脚左側と開口左上で主に見られた。

開口の大きさのみが異なる試験体 CSWO-S25-A-80 では、ひび割れ等の破壊性状は試験体 CSWO-S-A-80 と同様である。開口の拡大により $1/77\text{rad}$ で最大耐力は 194kN となったが、明確な袖壁の軸力負担能力の低下は見られなかった。負加力時では開口の影響は受けず、最大耐力は -132kN となり、曲げ破壊の性状を示した。

シアスパンをより長くした試験体 CSWO-S25-A-130 は、初期ひび割れは柱頭で曲げひび割れ、袖壁ではせん断ひび割れが発生した。シアスパン 800mm の試験体より全体的に曲げひび割れが支配的で、コンクリート剥落も早期に発生した。 $1/143\text{rad}$ で最大耐力は 164kN に達したが、+4 サイクル加力中に大きな耐力低下を引き起こしている。なお、最終の+7 サイクル加力中に水平力の上昇が見られているが、これは負加力中に袖壁の右脚部で剥落したコンクリートが袖壁コア内に留まり、正加力時に圧縮された袖壁に挟まってしまったことが原因である。

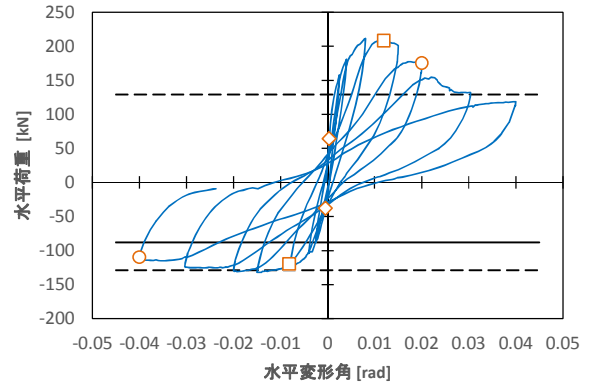
また、いずれの試験体も開口右下よりせん断ひび割れが拡大したことで柱と袖壁の一体性を失っていたため、境界面での滑りは見られなかった。滑りの破壊機構については検討中であり明らかにしていきたい。

図-4 は、原型試験体も含めた各試験体の包絡線である。いずれの試験体も水平変形角 $1/125 \sim 1/67\text{rad}$ で最大耐力に達した。これは耐震診断⁵⁾における袖壁付き柱せん断破壊部材の終局限界変形角 $1/250$ より大きく、F 指標が 1.5 程度に相当する。試験体 CSWO-S-A-80 と CSWO-S25-A-130 においては袖壁圧壊による耐力低下が見られるが、後者の方がその低下は顕著であった。

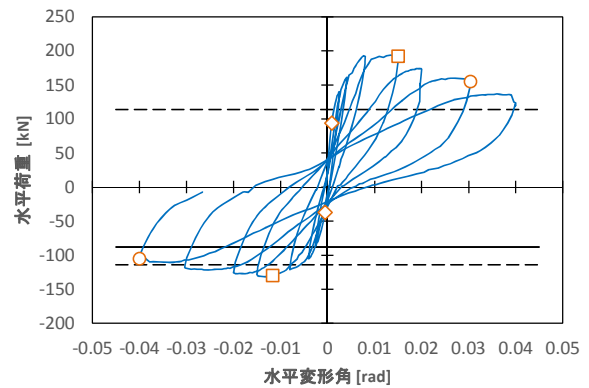
3.2 各種強度の実験値と計算値との比較

表-4(a)(b)に各種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5)~8)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。負加力時の曲げ強度に関しては袖壁の寄与を無視している。

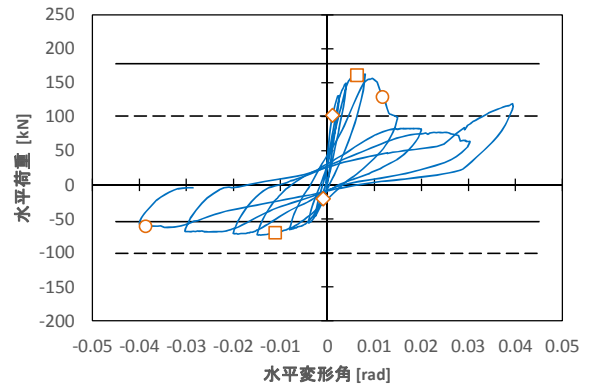
各強度計算値と最大耐力実験値を比較すると、正加力時では、いずれの試験体もせん断強度式に対して $1.45 \sim 1.70$ と大きく安全側といえる。シアスパン 500mm 時では分割累加式⁸⁾の精度が良かったのに対し、本報告の試験体では異形断面式⁶⁾がシアスパンの影響を捉えている。負加力時は曲げ強度式との比較になるが、診断基準式⁵⁾で $2.00 \sim 2.20$ 、全塑性式⁷⁾で $1.37 \sim 1.50$ と全塑性式で精度が比較的良い。精度が多少荒いのは、負加力時の強度計算では袖壁の存在を無視しているが、実際には袖壁横筋の柱への定着などが多少寄与しているためと考えられる。



(a) CSWO-S-A-80



(b) CSWO-S25-A-80



(c) CSWO-S25-A-130

--- 分割累加式×開口低減率 — 全塑性式
 ◇ 使用限界状態 □ 修復限界状態 ○ 安全限界状態

図-3 荷重-変形角関係

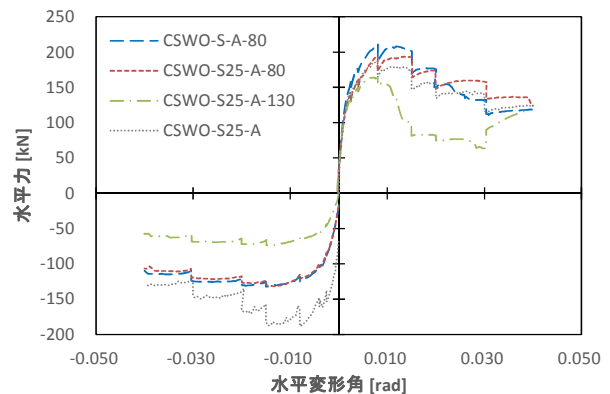


図-4 包絡線の比較

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-S-A-80	+	211	0.008	0.003	0.0003	0.008	0.008	0.007	0.012	0.020	-
	-	-132	-0.015	-0.008	-0.0005	-0.012	-0.003	-0.020	-0.008	-0.040	-
CSWO-S25-A-80	+	194	0.013	0.003	0.0009	0.007	0.008	0.014	0.015	0.030	-
	-	-132	-0.013	-0.005	-0.0005	-0.011	-0.004	-0.019	-0.012	-0.040	-
CSWO-S25-A-130	+	164	0.007	0.002	0.0011	0.006	0.007	0.028	0.006	0.012	-
	-	-74	-0.015	-0.004	-0.0009	-0.014	-0.007	-0.011	-0.014	-0.039	-

表-4 強度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 ⁶⁾ [kN]	曲げ強度 [kN] ([]は実験値/計算値)		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 ³⁾ [kN]	柱-袖壁境界面の最大せん断応力度	
				診断基準式 ⁵⁾	全塑性式 ⁷⁾	異形断面式 ⁶⁾	診断基準式 ⁵⁾	分割累加式 ⁸⁾	実験値 ^{式(1)} [N/mm ²]		計算値 ^{式(2)} [N/mm ²]	
CSWO-S-A-80	+	211	31	65	286	289	146	131	129	111	5.59	3.95
	-	132			60 [2.20]	88 [1.50]					3.50	
CSWO-S25-A-80	+	194	31	58	286	289	129	116	114	99	5.14	3.95
	-	132			60 [2.20]	88 [1.50]					3.50	
CSWO-S25-A-130	+	164	19	58	176	178	110	101	101	99	4.35	3.95
	-	74			37 [2.00]	54 [1.37]					1.96	
CSWO-S25-A ²⁾	+	186	46	55	257	279	121	129	141	95	4.93	3.58
	-	188					121 [1.55]	129 [1.46]	141 [1.32]		4.98	

※ +は袖壁圧縮側, -は袖壁引張側

また、表-4 (a)の右端には、柱と袖壁境界面に作用するせん断応力度の目安を示した。実験値としては最大耐力時に作用するせん断応力度 τ_Q を、弾性を仮定して式(1)により評価した。

$$\tau_Q = \frac{Q_{max}S}{t_w I} \quad (1)$$

ここで、 Q_{max} は最大耐力実験値、 S は境界面から外側にある断面の中立軸に対する断面一次モーメント、 I は全断面の断面二次モーメント、 t_w は袖壁厚さである。また、文献 9) からフランジのせん断面に対するせん断伝達耐力の計算に用いられる式(9.2.20)を引用し、 $\theta = 90^\circ$ 、 $V_k = 0$ 、 $\gamma_b = 1.0$ として式(2)に変換し、滑り応力度 τ_{cwd} を計算値として評価した。記号は文献 9)を参照されたい。

$$V_{cwd} = \{(\tau_c + p\tau_s \sin^2\theta - \alpha p f_{yd} \sin\theta \cos\theta)A_c + V_k\} / \gamma_b \quad (9.2.20)$$

$$\tau_{cwd} = V_{cwd} / A_c = \tau_c + p\tau_s \quad (2)$$

柱と袖壁境界面のせん断応力度を比較すると、いずれの試験体も実験値は計算値を上回っており、柱と袖壁境界面で滑りが発生する評価となった。

一方、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、反曲点高さは開口下の腰壁の拘束の影響を考慮するものとして、AとBの2通りの高さを検討した。実験で柱のみで水平力を負担していると思われる+6、+7 サイクル付近の強度と比較すると、反曲点高さAの場合の曲げ強度に近い値となっている。

(b) 単独柱としての強度

試験体名	反曲点高さA ^{*)}		反曲点高さB ^{*)}	
	曲げ強度	せん断強度	曲げ強度	せん断強度
CSWO-S-A-80	88	104	175	124
CSWO-S25-A-80	88	104	175	122
CSWO-S25-A-130	54	104	78	104

*)A:反曲点高さ B:反曲点高さ-腰壁高さ

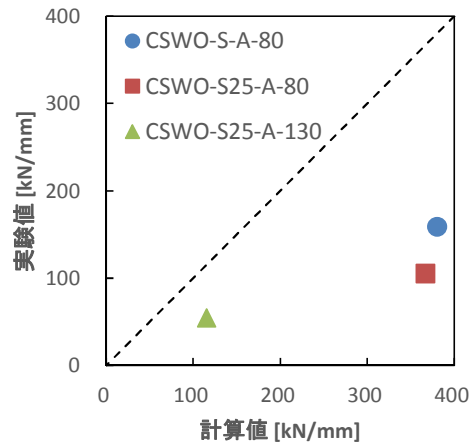


図-5 正加力時の初期剛性

3.3 初期剛性の検討

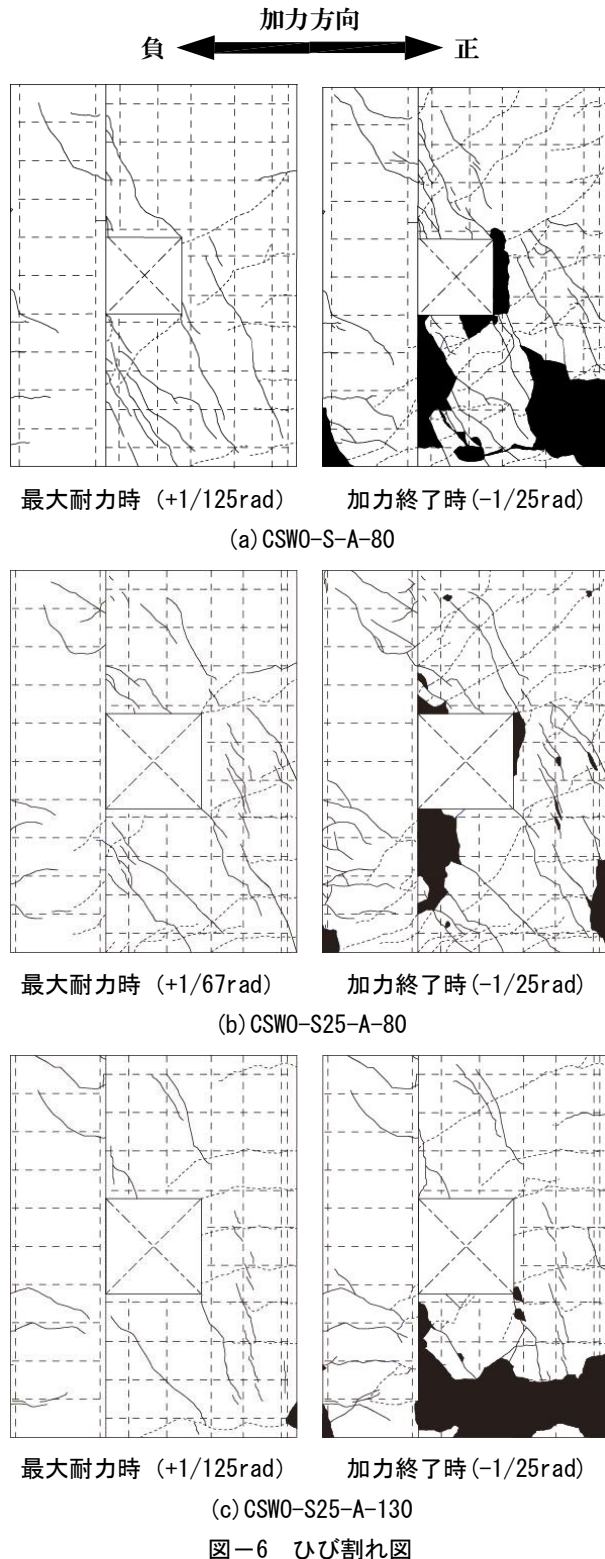
図-5 に正加力時の初期剛性の実験値と計算値を示す。実験値は、初期ひび割れ時の水平力と水平変形角より算出した。計算値では、曲げ剛性と RC 規準による剛性用の開口低減率を用いたせん断剛性を考慮して算出した。

実験値は計算値を大きく下回る結果となったが、シアスパンの長い試験体 CSWO-S25-A-130 では精度が比較的良いことが分かる。

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、破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ンクリートが剥落した箇所である。図-7 では各試験体の正負のひび割れ幅を示しており、表-5 で判定される

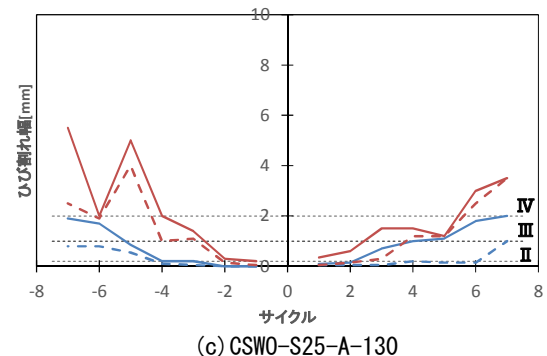
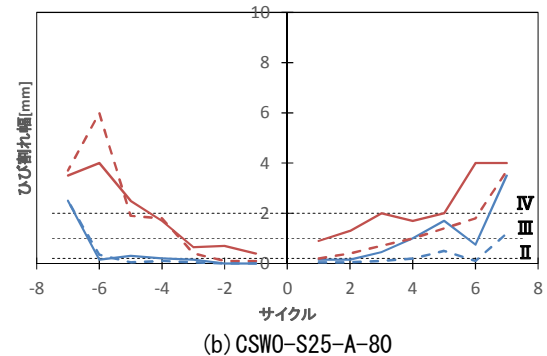
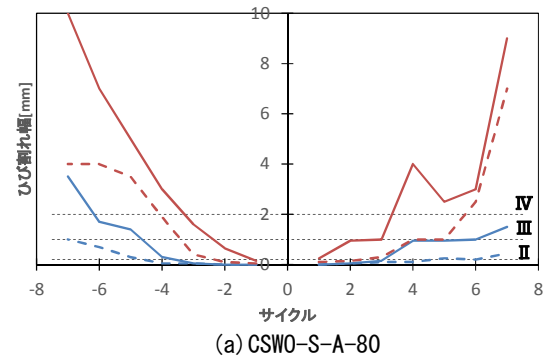


損傷度判定のうち、ひび割れ幅により決まるラインも併せて載せた。ひび割れ幅は各サイクルのピーク時と、水平力除荷時にクラックスケールにより測定された中の最大値を示している。損傷度は文献10)より引用した表-5より、水平力除荷時のひび割れ幅を用いて評価した。

最大耐力時では、いずれの試験体も柱脚で曲げひび割れ、柱頭でせん断ひび割れが見られた。柱部では損傷度はIと診断された。一方袖壁は、正加力時のせん断ひび

表-5 損傷度分類の基準¹⁰⁾

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。



— 柱 ピーク時 - - - 柱 水平力除荷時
— 袖壁 ピーク時 - - - 袖壁 水平力除荷時

図-7 ひび割れ幅

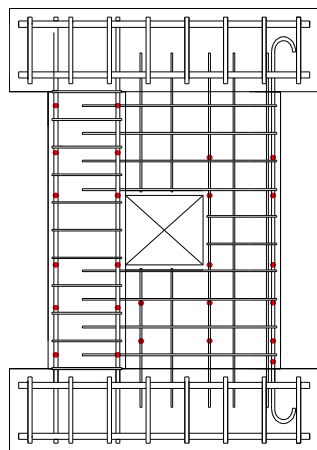


図-8 ひずみゲージ位置
(例：開口 250×250mm 時)

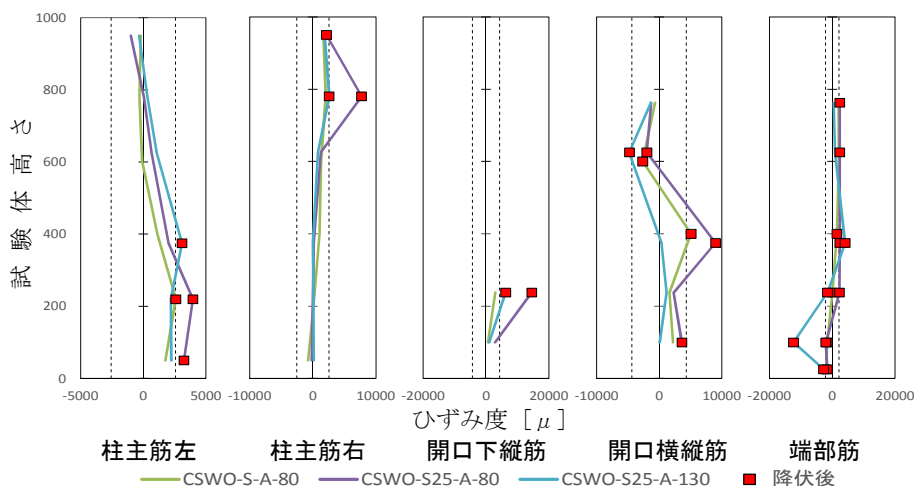


図-9 正加力最大耐力時のひずみ分布

割れ、負加力時の曲げひび割れが顕著である。試験体 CSWO-S25-A-130 のみ袖壁脚部で剥落が見られ、損傷度はⅢ、その他はⅡである。

加力終了時では、柱部は負加力時でも柱脚に曲げひび割れが入り、コンクリートの圧壊も見られている。損傷度は概ねⅢである。袖壁部は、柱と袖壁境界部の剥落は圧壊によるもので、既往研究のような滑りによる損傷は見られなかった。また、試験体 CSWO-S25-A-130 では強度計算上、正加力時ではせん断破壊が予想されたが、袖壁脚部のみが剥落する曲げ破壊のような性状を示した。損傷度はいずれの試験体もⅤである。

4.2 鉄筋のひずみ

図-8 にひずみゲージ位置、図-9 に正加力最大耐力時の縦筋の鉄筋ひずみの分布を鉄筋の引張を正として示す。なお、図-8 のひずみゲージ位置は開口が 250mm 角の試験体の場合であるが、開口が 200mm 角の試験体もほぼ同じ位置に添付してある。また、図-9 の縦点線は鉄筋の降伏ひずみ度を表し、降伏点を越えた場合は■で示している。

図をみると、柱部では柱脚に向けて柱左側で大きく引張を受けていることがわかる。袖壁部では、開口の存在により開口補強筋が上下で圧縮・引張を受けているが、柱部ではこのような挙動は示していない。開口下の縦筋では引張を受けており、柱主筋右と見比べると袖壁付き柱として平面保持が保たれていないことを示唆するひずみ分布である。全体的に開口が大きく、シアスパン比の低い試験体 CSWO-S25-A-80 において鉄筋ひずみが大きくなった。

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、いずれのせん断強度式も 1.45~1.70 の比率で大きく安全側となった。シアスパンを変更した今回の試験

体では、累加強度式よりも異形断面式がその傾向を捉えていた。

[2]滑りせん断応力度から、最大耐力時のせん断応力度ではいずれの試験体も柱と袖壁境界面が滑るという評価であった。一方、実験では境界面での滑りは見られず、滑りの破壊機構については今後の課題である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 樋熊利亘, 坂上正裕, 加藤大介, 田村良一: 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, 第 36 回コンクリート工学年次論文報告集 36-2, 2014 年, pp.277-282
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 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 年
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書, 2007 年
- 10) 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