

論文 袖壁の拘束とシアスパンを変化させた有開口 RC 造袖壁付き柱の曲げ破壊実験

佐藤 大典*1・高松 恭*1・小林 正英*1・加藤 大介*2

要旨: 曲げ強度と変形能に影響を及ぼす袖壁端部の拘束とシアスパンの影響を検討するために、3体の有開口RC造袖壁付き柱の片持ち柱形式による静加力実験を行った。曲げ破壊型の有開口袖壁付き柱シリーズの3年目であり、昨年の1体は開口を柱際脚部に設置しており、曲げ挙動に若干の影響を及ぼす位置となった。本研究の3体はその開口を移動し、曲げ強度には影響しないと想定される位置に設け、2体は曲げ変形能の向上を意図し、袖壁を拘束している。シアスパンは大小2つ(1400mm, 1800mm)とした。その結果、3体とも最大強度は開口を無視した計算値を上回り、終局変形角は拘束の有無とシアスパンの大小で有意な差がみられた。

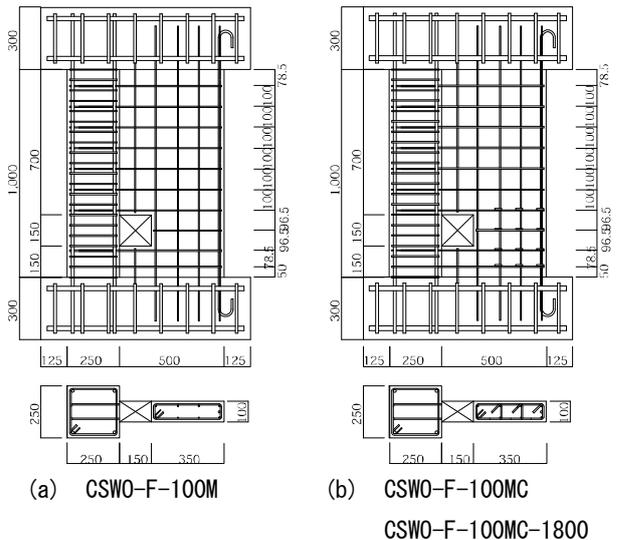
キーワード: RC造, 袖壁付柱, 曲げ破壊, 開口, 変形能

1. はじめに

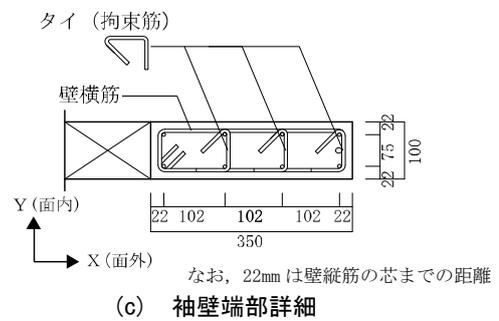
近年袖壁の有効活用が再認識されているが、袖壁には、スイッチボックス等の、強度と変形能の低下が無視できないような大きめの小開口が設けられることが多い。本実験は曲げ破壊型の有開口付き袖壁付き柱シリーズの3年目である。一昨年は、開口が上部にある場合は既往の曲げ強度と変形能の評価式により安全側に適用できるが、開口が基部にある場合は開口を無視した曲げ強度式は適用できず、変形能評価式の安全率が低下することを報告した¹⁾。また昨年は、1体は開口を柱際の基礎面に設置しており、曲げ挙動に若干の影響を及ぼす位置となった²⁾。本研究では、これらの研究に引き続き、拘束筋とシアスパンが有開口袖壁付き柱の曲げ強度と変形能に及ぼす影響を定量的に評価することを目的として、3体の静加力実験を行った。3体はいずれもその開口を基礎面より上部に移動し、曲げ強度には影響しないと想定される位置に設けている。また、作製した3体のうち2体は変形能の向上を意図して、袖壁端部を閉鎖帯筋により拘束している。この2体はシアスパンを変えて載荷を行った。

ている点である。また、RC規準³⁾による開口低減率は袖壁長さに対する開口の長さの比で決まり、0.78である。試験体の強度計算値は後述するが、試験体計画としては、現行の設計法⁴⁾および日本建築学会の提案⁵⁾のいずれでも、せん断強度の曲げ強度に対する比を除いて適用すると、部材種別⁴⁾はFBとなるように設定した。

実験パラメータは袖壁の拘束とシアスパンである。変



(a) CSWO-F-100M (b) CSWO-F-100MC
CSWO-F-100MC-1800



(c) 袖壁端部詳細

図-1 配筋図

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1に試験体諸元、表-2に材料強度、図-1に配筋図を示す。試験体縮尺は1/3である。試験体は文献2)の試験体のうち柱際の基礎面に開口を設置した1体をもとに作製した。開口位置はその開口を上移動し、曲げ終局時にコンクリートが圧壊しないと想定される位置に移動した。袖壁の配筋において特徴的なことは文献1)2)と同様に袖壁横筋を、柱型への定着部分も含め、閉鎖型にし

*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 工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

形能力を増加させることを念頭におき、3 体作製したうちの 2 体は図-1(c)に示すように袖壁端部を閉鎖型帯筋および 3 本のタイによって拘束した。

なお、タイの 1 本は閉鎖型帯筋位置と重なっており、その拘束筋比は、表-1に示したように面内方向で0.64%、面外方向で0.46%となっている。シアスパンは、拘束の有るものと無いものの 1 体ずつの 2 体は 1400mm(シアスパン比 1.87), 他の拘束のあるもの 1 体を 1800mm(シアスパン比 2.4)とした。

2.2 加力方法

図-2 に加力方法を示す。加力は、図-2(a)に示す加力装置で片持ち柱形式での加力とする。左右 2 つの軸力ジャッキにより 400kN の一定軸力を加えながら、加力点位置に水平力を加える。これに加え、反曲点高さを高くするため図-2(b)で示した加力概念図のように、左右の軸力ジャッキを制御することによりモーメントを発生させ、設定した反曲点高さとなるように加力した。図中 N_1 , N_2 は、水平力により変動するため、反曲点高さを一定となるようにその都度変動させた。また、この時の軸力作用位置は、左右 2 つの軸力ジャッキの制御により、柱単体の重心になるようにした。加力サイクルは、1/400, 1/250, 1/125, 1/67, 1/50rad とし、各部材角 2 サイクルずつの载荷を行った。

3. 実験結果

3.1 水平力-変形角関係

試験体の水平力-変形角関係を図-3(a) (b) (c)に示す。ここで、変形角は図-2(b)に示したように、加力点の変形 δ をその高さ ($h=1300\text{mm}$) で除して求めている。また、いずれも袖壁が圧縮側になる加力を正方向加力としている。表-3には、最大耐力、使用限界状態(各方向で、最初にひび割れが発生した点、柱主筋・袖壁縦筋の降伏が起こった点での変形角)、修復限界状態(各方向、コンクリートが一番初めに剥落した点での変形角)及び安全限界状態(最大耐力の 80%まで低下した点、袖壁縦筋の座屈が発生した点、袖壁縦筋が破断した点での変形角)をまとめたものを示した。

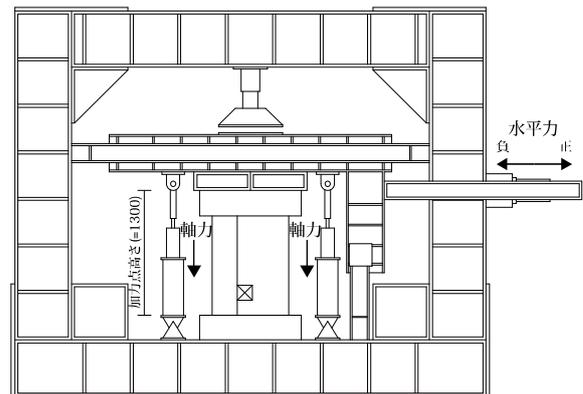
さらに、図-4には包絡線を比較したものを示す。正方向加力時には 3 試験体共に +1 サイクル(1/400)中に柱、袖壁にひび割れが発生した。最大耐力も 3 試験体共に +5 サイクル(1/125)途中で達し、+7 サイクル(1/67)時に袖

表-1 試験体諸元

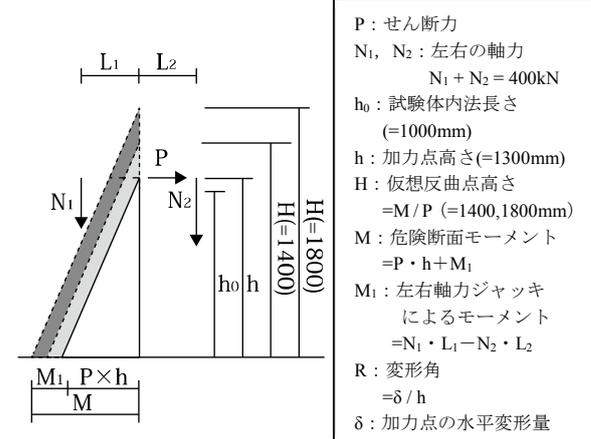
試験体名	CSWO-F-100M	CSWO-F-100MC	CSWO-F-100MC-1800	
柱断面 [mm]	250×250			
袖壁断面 [mm]	100×500			
内法高さ [mm]	1000			
せん断スパン長さ [mm] (せん断スパン比)	1400 (1.86)		1800 (2.4)	
柱配筋	主筋 4-D13 (SD345)			
	帯筋 (帯筋比 [%]) □-D6@50 (0.512)			
袖壁配筋	縦横筋 (壁筋比 [%]) D6 ダブル@約100 (0.64)			
	端部縦筋 1-D10 (SD345)			
配筋	巾止め筋 -		タイ-3-D6@102	
	拘束筋 Awx / (100*100)	-	0.64	0.64
	拘束筋 Awy / (350*100)	-	0.46	0.46
	開口寸法 (位置)	150×150 (柱際中部)		
コンクリート強度 [N/mm ²]	24.8			
軸力 [kN]	400			

表-2 材料強度

	CSWO-F-100M, CSWO-F-100MC, CSWO-F-100MC-1800				
	降伏強度 [N/mm ²]	最大強度 [N/mm ²]	降伏歪 [μ]	歪硬化開始時歪 [μ]	破断歪 [μ]
D6	403	552	2489	—	285590
D10	389	543	2224	20212	282142
D13	371	543	2081	16080	287150



(a) 加力装置



(b) 加力概念図
図-2 加力方法

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	ひび割れ時変形角 壁	柱主筋降伏時変形角	柱剥落時変形角	袖壁剥落時変形角	最大耐力の 80%時変形角	袖壁縦筋座屈時変形角	袖壁縦筋破断時変形角		
CSWO-F-100M	+	212	0.0058	0.0055	0.0024	0.0037	-	0.0118	0.0038	0.0080	0.0045	-
	-	96	0.0128	0.0078	0.0007	0.0149	0.0031	-	0.0034	0.0149	-	0.0011
CSWO-F-100MC	+	214	0.0057	0.0012	0.0016	0.0044	-	-	0.0040	0.0124	0.0032	-
	-	96	0.0146	0.0022	0.0005	0.0168	0.0029	0.0124	0.0075	0.0149	-	0.0086
CSWO-F-100MC-1800	+	177	0.0071	0.0006	0.0020	0.0043	-	0.0197	0.0021	0.0125	0.0097	-
	-	74	0.0149	0.0080	0.0003	0.0144	0.0032	-	0.0026	0.0149	-	0.0118

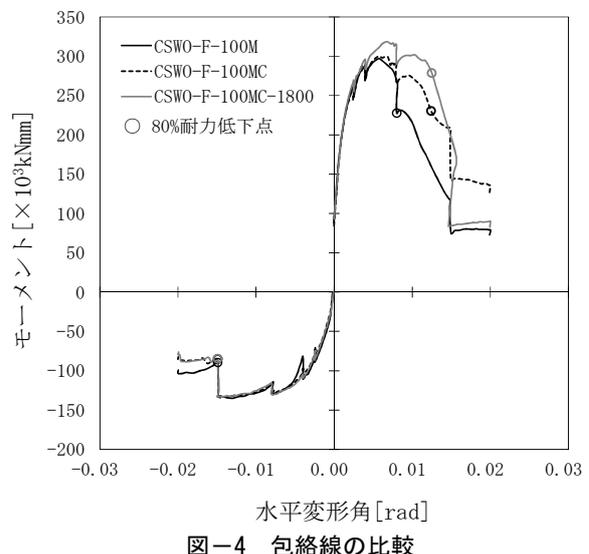
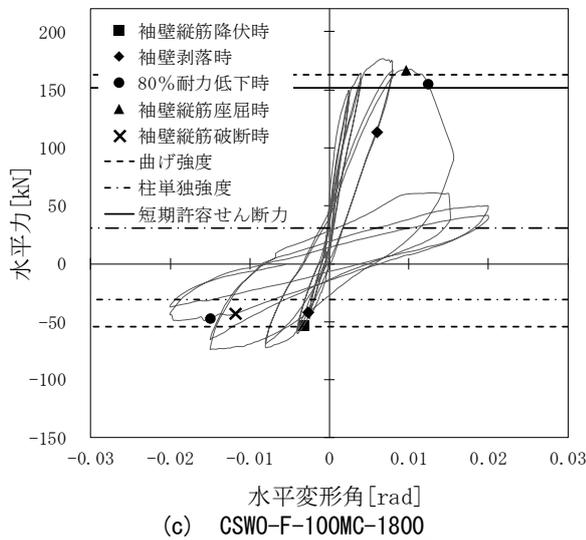
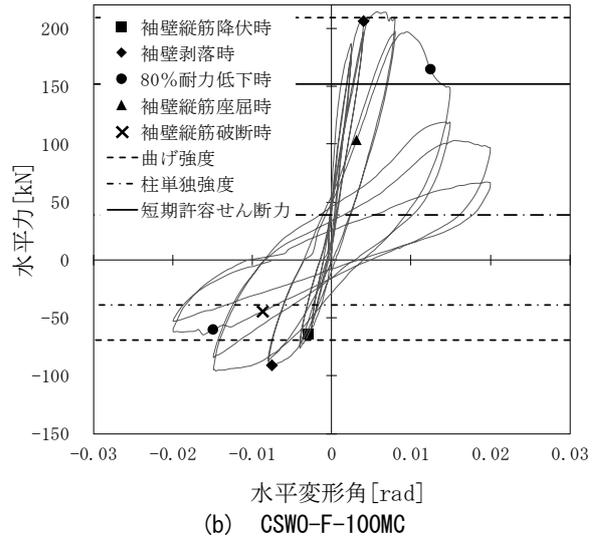
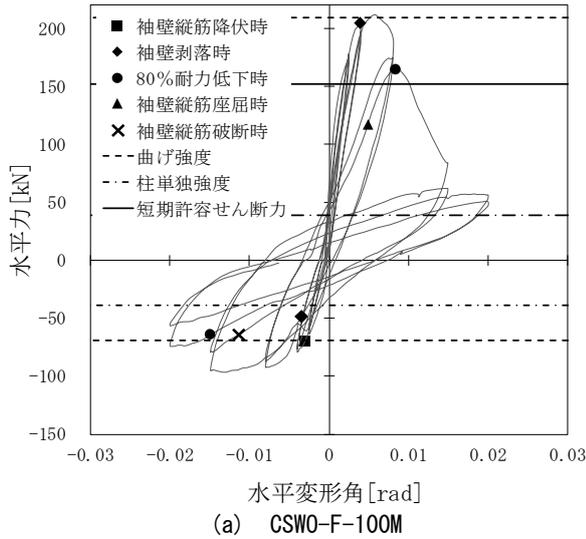


図-3 水平力-変形角関係

図-4 包絡線の比較

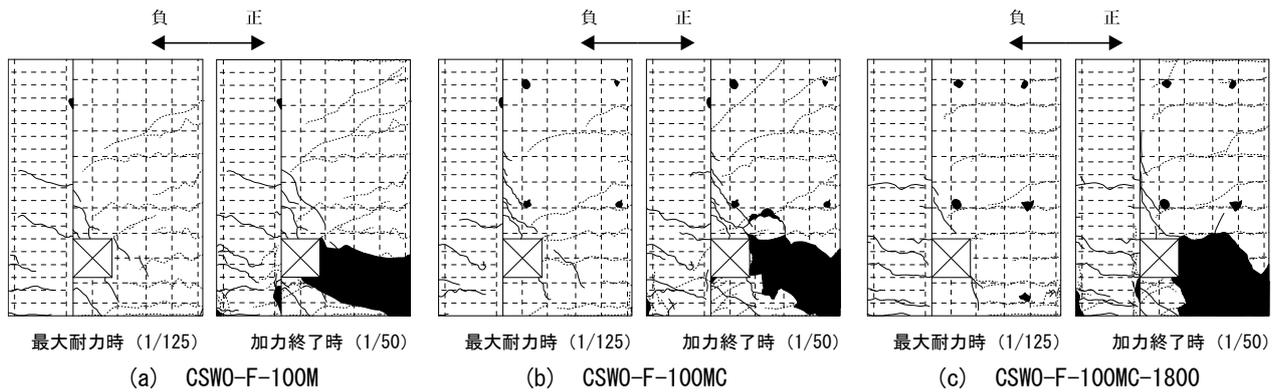


図-5 ひび割れ図

壁下部が圧壊し、CSWO-F-100MC以外の2体は新変位への加力途中で急激に耐力が低下した。一方、CSWO-F-100MCは、繰り返し载荷において、耐力低下がみられた。負方向加力時の水平力-変形角関係は、全試験体共に同様の挙動を示し、-7サイクルでピークを迎え、-8、-9サイクルでは鉄筋の破断が起きた。

3.2 損傷状況

図-5 には最大耐力時と加力終了後のひび割れ図を、

図-6 にひび割れ幅とそのサイクルのピークの部材角の関係を示す。本研究では袖壁付柱の復元力特性とその損傷状況との関係にも注目している。その際、袖壁付柱は袖壁部分と柱部分に分離して評価することを念頭におき、図-6 は柱と袖壁部分を分離して示している。また、文献6)によるひび割れ幅による損傷度も示している。プロットされている点は、ひび割れ幅以外にも、目視による小剥落、鉄筋露出、鉄筋曲げが起こった部材角を示して

いる。この図により、どの部材角で被害が大きくなるかわかる。

本研究では、+1 サイクルピーク時の水平力が短期許容せん断力とほぼ等しい（後述の表-4 参照）。図-6 より、このときの残留ひび割れ幅は 0.2mm を下回っており、短期許容応力度設計をしておけば残留ひび割れ幅を 0.2mm 以下に抑えることができることがわかる。また、図の右側には残留ひび割れ幅によって決定される損傷度を示してあるが、加力終了時の損傷度は、3 試験体とも柱は小剥落が起きたためⅢ、袖壁は脚部鉄筋が破断したため、軸力は柱で負担しているとみなしⅤと判断した。なお、試験体 CSWO-F-100M の+5 サイクルの除荷時のデータはとっていない。

4.各種強度の検討

表-4 に各種強度計算値と実験値の比較を示す。曲げひび割れ強度は、RC 規準³⁾により求めたもの、曲げ強度は、耐震診断基準⁷⁾によるもの、全塑性曲げモーメントは文献⁵⁾によるものとした。また、文献²⁾で示した開口下端で決まる場合の曲げ強度を開口考慮として示している。また、せん断ひび割れ強度は靱性保証式⁸⁾において $\phi=0.51$ としたものの、せん断強度は、異形断面式⁹⁾、耐震診断基準式⁷⁾、累加強度式¹⁰⁾の 3 種類の式を使用し、算出された無開口袖壁付き柱の強度に開口低減率（今回は全て 0.78）を乗じたものとした。なお、累加強度式を適用する際には、袖壁横筋の応力を柱帯筋に伝えるために、その分の柱帯筋が無効になるが、本試験体の場合は袖壁横筋を閉鎖型にしているため柱帯筋は全て有効としている。表-4 には参考のため柱単独の曲げ強度も示した。これは危険断面の柱断面のみを考慮して、それぞれの反曲点高さ 1400mm, 1800mm として計算した曲げ強度であり、袖壁が全く無効とした場合の強度を意味する。

以上示したように表-4 にはいくつかの強度式を挙げたが、ここでは最も信頼できる強度式として文献⁵⁾の全塑性曲げモーメントと文献¹⁰⁾の累加強度式に文献³⁾の開口低減率を乗じたものを主に説明する。拘束の有無で実験値を比較すると、拘束の有無による最大強度への影響はほとんどなかった。シアスパンの大きいものに関しては、計算値に比べ若干大きい結果となった。また、3 試験体いずれもせん断強度は曲げ強度より若干高いだけであるが、文献¹¹⁾でも報告したように、文献³⁾の開口低減率を袖壁付き柱に適用するとかなり安全側に評価されてしまうため、実際にはせん断強度はかなり高く、せん断強度の曲げ強度に対する比は、シアスパンの小さい 2 体は部材ランクが FB の条件の 1.1 倍を、シアスパンの大きいものは部材ランクが FA の条件の 1.25 倍は満たし

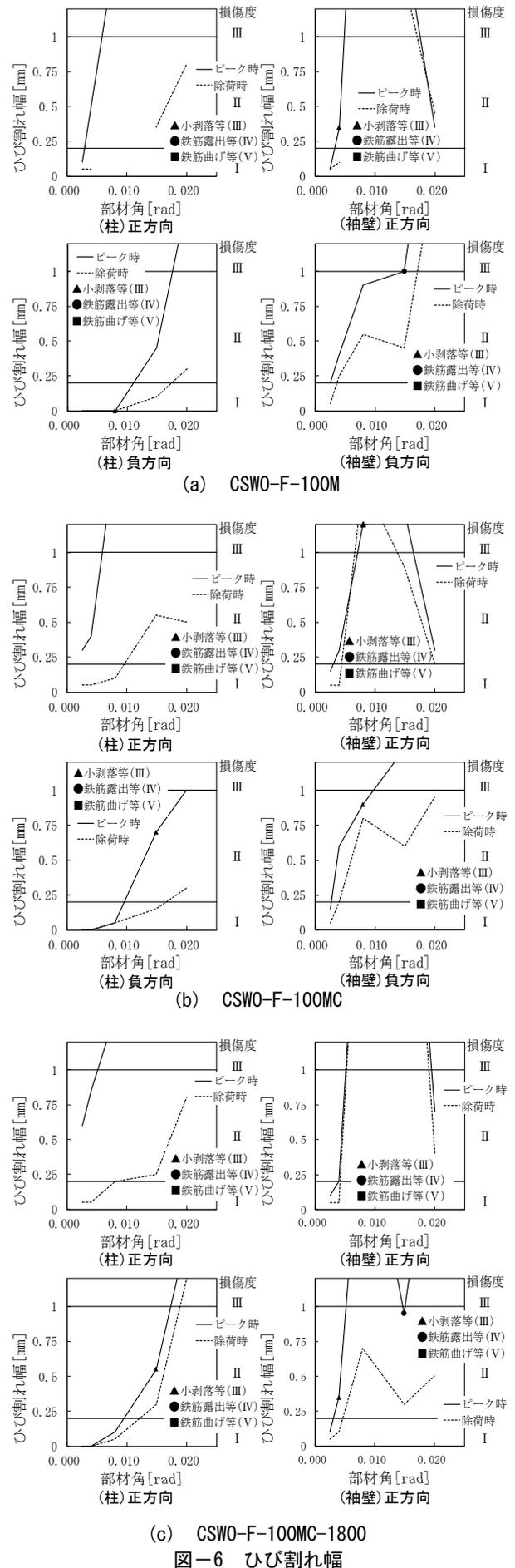


表-4 各種強度の計算値と実験値の比較

試験体名			CSWO-F-100M		CSWO-F-100MC		CSWO-F-100MC-1800		
			+	-	+	-	+	-	
実験値	初期ひび割れ時強度 [kN]	曲げ	110	28	153	19	94	11	
		せん断	175	28	170	49	149	40	
最大耐力 [kN]			212	96	214	96	177	74	
曲げひび割れ強度 ³⁾ [kN]			72	59	72	59	56	46	
開口低減率 ²⁾ を使用したせん断ひび割れ強度 ⁸⁾ [kN]			87						
計算値	曲げ強度 [kN]	診断基準式 ⁷⁾	204	27	204	27	159	21	
		全塑性式 ⁵⁾	209	69	209	69	163	54	
		開口考慮	229	-	229	-	174	-	
	開口低減率を使用したせん断強度 [kN]	異形断面式 ⁹⁾	212				212		
		診断基準式 ⁷⁾	197				181		
		累加強度式 ¹⁰⁾	216				215		
	短期許容曲げモーメント時水平力 ³⁾ [kN]			87	21	87	21	68	20
開口低減率を使用した短期許容せん断力 ³⁾ [kN]			152						
柱単独の曲げ強度 ⁷⁾ [kN]			39				31		

ていると考えられる。

図-3 の水平力-変形角関係には開口の影響を無視した曲げ強度を横線で示してある。最大耐力を見てみると、CSWO-F-100M, CSWO-F-100MC, CSWO-F-100MC-1800 いずれもこの曲げ強度を上回っており、最大強度に対しては開口の影響が少なかったといえる。図-3 には参考として柱単独の強度も横線で示してある。袖壁が圧縮側となる正方向では袖壁圧壊後にこの強度に近づいていくことがわかる。

一方、図-7 には、初期剛性の実験値と計算値を比較したものを示す。縦軸には最初のひび割れ発生時の結果を用いた割線剛性を、横軸には曲げ剛性と RC 規準³⁾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。すべての試験体において、実験値は計算値を下回る結果となっているが、これは初期ひび割れあるいは目視での測定誤差等の影響と考えられる。

5. 変形能の検討

表-5 は、現行の設計法⁴⁾と、日本建築学会の提案⁵⁾による部材種別の評価結果を示したものである。評価結果は、拘束筋の有無、開口位置に左右されないためシアスパンの大小で分けた。表内に本試験体の各項目評価値が示してあるが、前述したように、せん断強度の曲げ強度に対する比を除いて適用すると、部材種別は FB となるように設定していることがわかる。

表-6 は各試験体の正方向の終局変形角の実験値と日本建築学会の提案⁵⁾による計算値を比較したものである。終局変形角は、80%耐力低下時の変形角とした。文献⁵⁾による計算値は、 $c=6$ とした。また、 ϵ_c については、3 体とも 0.006 とできる拘束筋比 0.6%を満足しないので、0.003 として求めた。壁の拘束が無い CSWO-F-100M 以外の実験値は計算値を上回っているが、試験体 CSWO-F-100M では下回る結果となった。また、袖壁の拘束があっ

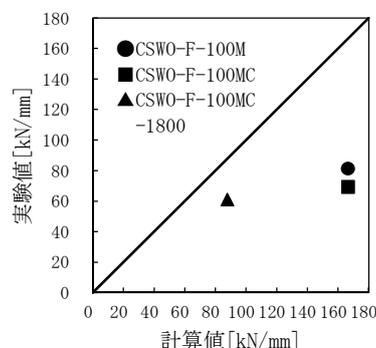


図-7 初期剛性

表-5 部材種別一覧

(a) 現行の袖壁付き柱の部材種別

	FA	FB	FC	FD	F-100M, 100MC	F-100MC-1800
Q_{su}/Q_{mu}	1.25			FA, FB 又は FCの いずれ にも該 当し ない 場合	FC(1.03)	FB(1.17)
h_0/D	2.5以上	2.0以上	-		FB(1.87)	FB(2.40)
σ_0/F_c	0.35以下	0.45以下	0.55以下		FA(0.14)	FA(0.14)
Pt	0.8以下	1.0以下	-		FB(0.41)	FB(0.41)
τ_u/F_c	0.1以下	0.125以下	0.15以下		FA(0.09)	FA(0.07)

注： σ_0 は全断面における軸方向応力度

(b) 2011 日本建築学会 PD で提案されたもの

	FA	FB	FC	FD	F-100M, 100MC	F-100MC-1800
Q_{su}/Q_{mu}	1.25以上	1.1以上	1以上	FA, FB 又は FCの いずれ にも該 当し ない 場合	FC(1.03)	FB(1.17)
h_0/D	2.5以上	2.0以上	-		FA(5.60)	FA(6.00)
σ_0/F_c	0.35以下	0.45以下	0.55以下		FA(0.26)	FA(0.29)
$(p_g \sigma_y + \sigma_{0w})/F_c$	1/3以下	1/2以下	2/3以下		FB(0.38)	FB(0.38)
$\tau_w/\sqrt{A_c}$	4/10以下	3/10以下	2.5/10以下		FA(0.40)	FA(0.40)
τ_u/F_c	0.1以下	0.125以下	0.15以下		FA(0.08)	FA(0.06)

注： σ_0 は全断面における軸方向応力度

表-6 終局変形の計算値

試験体名	開口無視時終局変形角計算値 (rad)	実験値 (rad)	比
CSWO-F-100M	0.0119 (FB)	0.0081 (FC)	0.68
CSWO-F-100MC	0.0119 (FB)	0.0124 (FB)	1.04
CSWO-F-100MC-1800	0.0119 (FB)	0.0125 (FB)	1.05

()内には終局変形角による部材種別

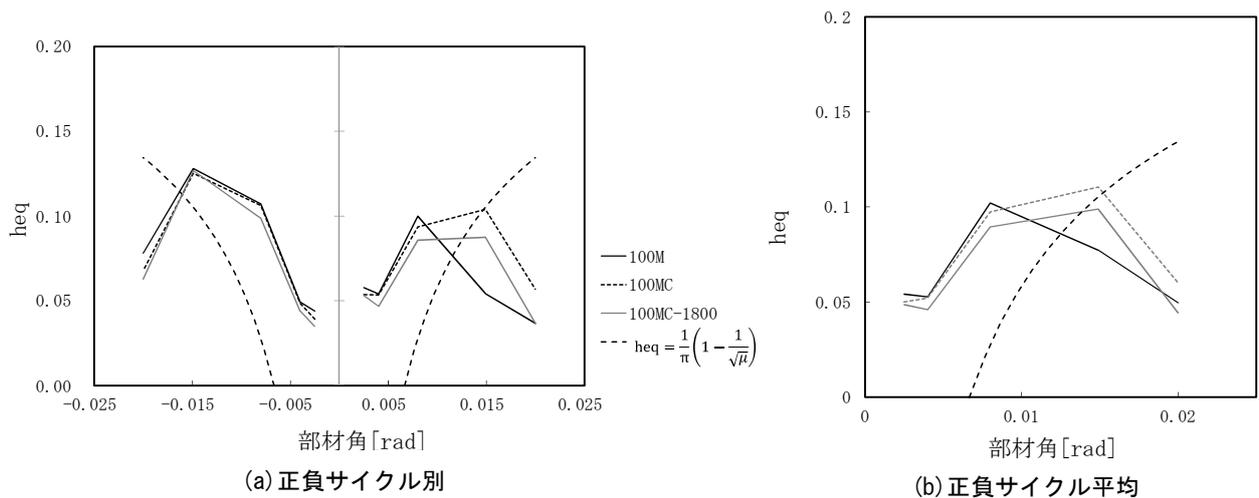


図-8 等価粘性減衰定数

た2つの試験体の値は同等といえるが、80%耐力低下時に近い点を実験値としているため、CSWO-F-100M-1800では80%耐力低下する前の点を実験値としており、実際には実験値よりも変形が進んだ値であるといえ、CSWO-F-100M, CSWO-F-100M-1800の順となり、シアスパンの変化による影響が若干あったと推察できる。

一方、文献5)での袖壁付き柱の部材種別は、終局変形角が0.02以上をFA、0.01以上をFB、0.0067以上をFCと想定している。そこで、表中には終局変形角実験値から想定した部材種別も示してある。その想定値と実験結果を比較すると、袖壁の拘束の無かったCSWO-F-100Mを除き、計算値はいずれも安全側となっている。

6. 等価粘性減衰定数

図-8(a)(b)に各試験体の実験結果から得られた等価粘性減衰定数を横軸に変形角をとって示す。各試験体とも同一変形の繰り返しの2回目のサイクルにおける値とし、正負別にしたものと正負の平均の2つを示した。また、これらの結果は弾性エネルギー W_e を求める際に、それまでのその方向の最大強度を用いた。図中には参考として評価値も示してある。拘束の有無で差がみられたが、いずれも袖壁圧壊後の耐力低下によって評価値を大きく下回っている。

7. まとめ

(1)曲げ強度に関しては、袖壁端部の拘束の有無による影響はほとんどなかった。ただし、シアスパンの大きいものは曲げ強度が若干大きくなった。また、3体とも最大強度実験値は開口を無視した曲げ強度計算値を上回っており、開口の影響は少なかったといえる。

(2)終局変形に関しては、拘束の無いCSWO-F-100M、拘束のあるシアスパンの小さいものCSWO-F-100MC、拘束のあるシアスパンの大きいものCSWO-F-100MC-1800の

順で大きくなり、有意な差がみられる結果であったと推察できる。

参考文献

- 1) 渡邊哲央, 中村孝也, 田村良一, 加藤大介: RC 造有開口袖壁付柱の曲げ破壊実験, コンクリート工学年次論文集, vol.36, No.2, 2014, pp.283-288
- 2) 高松恭, 渡邊哲央, 田村良一, 加藤大介: RC 造袖壁付柱の曲げ挙動に影響を及ぼす開口位置の影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.37, 2015, pp.115-120
- 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) 日本建築センター: 2007年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2008.4
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の保有水平耐力計算と地震被害, 2011年度日本建築学会大会(関東)構造部門(RC構造)PD資料, 2011.8
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説(1999)
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, 2013, pp.361-3667