

論文 RC 造有開口袖壁付柱の曲げ破壊実験

渡邊 哲央^{*1}・中村 孝也^{*2}・田村 良一^{*3}・加藤 大介^{*4}

要旨：開口の曲げ破壊部材への影響を検討する際に、重要な観点はその位置である。本研究では、袖壁の小開口がヒンジゾーン内にある場合を想定し、その位置が曲げ破壊型の袖壁付き柱の強度と変形能に及ぼす影響を検討するために、2体の曲げ破壊型袖壁付き柱の静加力実験を行った。その結果、開口が危険断面にある場合の袖壁圧縮側の最大強度は曲げ強度計算値を大きく下回っており、この場合は曲げ強度に対する開口の影響を考慮する必要がある。また、変形能も開口が危険断面にある場合が上部にあるものより悪くなる結果となった。一方、開口がヒンジゾーンの上部にある場合は現行の強度と変形能の評価式が適用できた。

キーワード：RC 造, 袖壁付柱, 曲げ破壊, 開口

1. はじめに

近年中低層 RC 造建築物における袖壁や腰壁・垂壁の有効活用が再認識されている¹⁾。しかしながら、これらの壁には、換気、スイッチボックスやダストシュート等の目的から、小開口が設けられることが多く、このような場合は、柱は短柱とみなされ、耐震性能を大きく低下させた評価がなされることが多い。筆者らは有開口袖壁付き柱のせん断強度を適正に評価することを目的としたせん断破壊型試験体の静加力実験を行ったが²⁾、本研究では、曲げ破壊型の袖壁付き柱の強度と変形能に及ぼす開口の影響を検討した。

開口の曲げ破壊部材への影響を検討する際に、重要な

観点はその位置である。梁部材のようにヒンジゾーンを避けるのが一般的である場合には、その潜在的なせん断強度の低下がわかれば大きな問題はないと考えられる。しかしながら、両側柱付き耐震壁のようにヒンジゾーンに開口が存在せざるを得ない場合は、その場所によっては曲げ強度や曲げモーメントによる変形能が大きく低下する可能性もある。そこで、本研究では、袖壁の開口がヒンジゾーン内にある場合を想定し、その位置が曲げ破壊型の袖壁付き柱の強度と変形能に及ぼす影響を検討するために、2体の曲げ破壊型袖壁付き柱の静加力実験を行った。本研究では、文献3)の面積による開口周比が0.4~0.3を大開口、0.3~0.2を中開口、0.2~0.05を小開口と想定しており、本試験体は開口周比が約0.15のため、大きめの小開口という位置づけである。

表-1 試験体諸元

試験体名		CSWO-F-U	CSWO-F-D
柱断面 [mm]		250×250	
袖壁断面 [mm]		75×500	
内法高さ [mm]		1000	
せん断スパン長さ [mm] (せん断スパン比)		1500 (2.00)	
柱配筋	主筋	4-D13	
	帯筋(帯筋比 [%])	□-D6@50(0.512)	
袖壁配筋	縦横筋(壁筋比 [%])	D6ダブル(0.85)	
	端部筋	1-D10	
開口	高さ [mm]	150	
	長さ [mm]	150	
	位置	中央	中央脚部
コンクリート強度 [N/mm ²]		20.7	
軸力 [kN]		400	

表-2 材料強度

	CSWO-F-U, CSWO-F-D		
	降伏強度 [N/mm ²]	最大強度 [N/mm ²]	降伏歪度
D6	391	530	2323
D10	373	559	2261
D13	390	552	2188

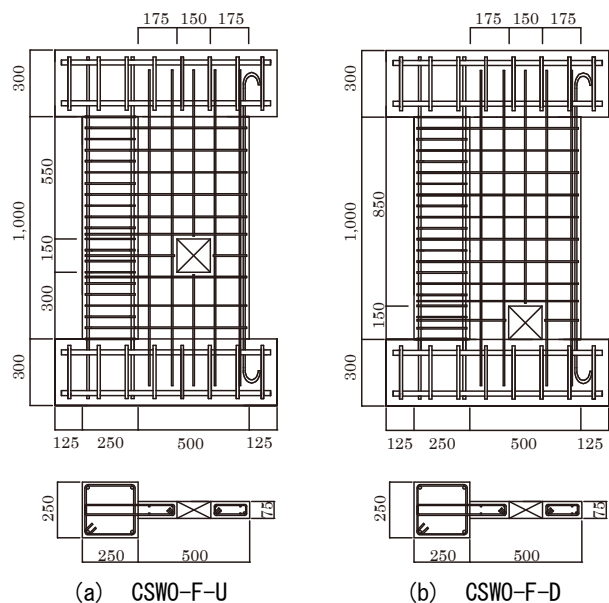


図-1 配筋図

*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 准教授 博士(工学) (正会員)
 *3 新潟工科大学 建築学科 教授 工博 (正会員)
 *4 新潟大学 工学部 建設学科 教授 工博 (正会員)

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。試験体は, 文献2)で実験を行ったせん断破壊型の CSWO シリーズを基本とし, 試験体形状は同一とし, 配筋もほぼ同一としている。変更した部分は, 柱帯筋間隔を半分の 50mm とした点, 袖壁横筋を柱に閉鎖型に定着した点, 加力方法を片持ち梁形式とし反曲点高さを長くした点, および軸力である。これらの変更は試験体を曲げ降伏させることを目的としているが, 袖壁横筋を閉鎖型にした理由は後述する累加強度式において柱の帯筋の効果を最大限に生かすためである。試験体は2体作成し, いずれも同一の正方形の開口を有し, 実験パラメータはその開口位置とした。開口位置は, 試験体 CSWO-F-D はモーメントが最大となる危険断面に配置したもので, 試験体 CSWO-F-U は開口を 300mm 上方へ移動したものとした。試験体 CSWO-F-D の開口位置は最も不利な場所, 試験体 CSWO-F-U の開口位置はヒンジ領域内ではあるが危険断面から遠いところ, という位置づけとした。開口の大きさは, 大きめの小開口を想定し, 文献3)による開口低減率は袖壁長さに対する開口の比で決まり, 0.78 である。柱内法高さは 1000mm であるが, 反曲点高さ(せん断スパン)は 1500mm とした。

試験体の強度計算値は後述するが, 試験体計画としては, 現行の基準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以外は, 部材種別は FB となるよう設定した。

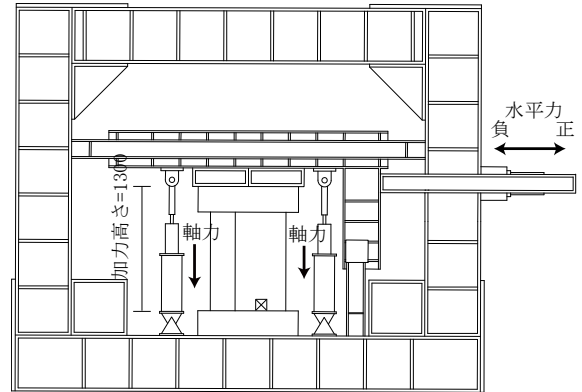
2.2 加力方法

図-2(a)(b)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梁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, 仮定の反曲点高さでの水平力を得られるように加力した。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柱の中心になるようにした。加力サイクルは, 1/400, 1/250, 1/200, 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。

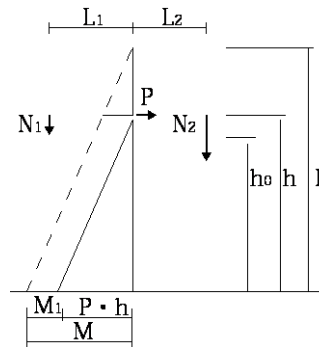
3. 実験結果

3.1 水平力-変形関係

各試験体の水平力-変形角関係を図-3(a)(b)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に各限界状態の最初の項目が生じた点を示したものを, 図-5 には最大耐力時と加力終了後のひび割れ図を示す。



(a) 加力装置



P : せん断力
 N_1, N_2 : 左右の軸力
 $N_1 + N_2 = 400\text{kN}$
 h_0 : 試験体内法長さ (=1000mm)
 h : 加力点高さ (=1300mm)
 H : 仮定反曲点高さ = M/P (=1500mm)
 M : 危険断面モーメント = $P \cdot h + M_1$
 M_1 : 左右軸力ジャッキによるモーメント = $N_1 \cdot L_1 - N_2 \cdot L_2$
 R : 変形角 = δ/h
 δ : 加力点の水平変形量

(b) 加力概念図

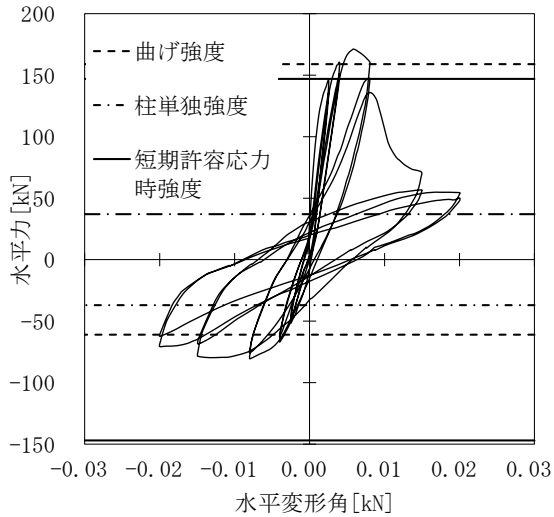
図-2 加力方法

表-3 実験結果一覧

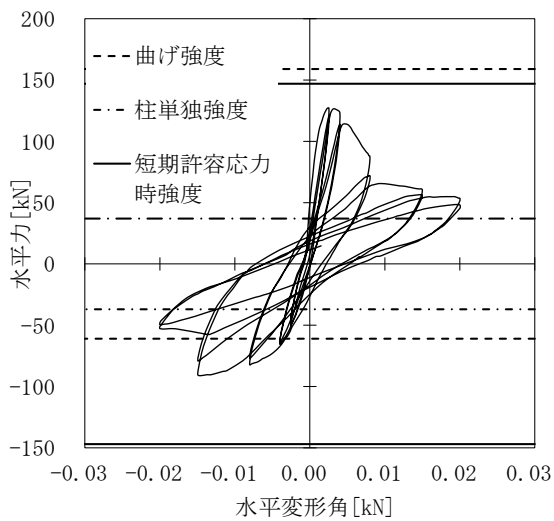
試験体名	最大耐力 [kN]	最大耐力時変形角 [rad]	使用限界状態 [rad]				修復限界状態 [rad]		安全限界状態 [rad]	
			ひび割れ時変形角 柱	壁	柱主筋降伏時変形角	袖壁縦筋降伏時変形角	柱剥落時変形角	袖壁剥落時変形角		
CSWO-F-U	+	171	0.0060	0.0024	0.0025	0.0060	0.0039	0.0200	0.0071	0.0080
	-	80	0.0080	0.0054	0.0002	0.0145	0.0035	0.0150	0.0040	-
CSWO-F-D	+	127	0.0025	0.0020	0.0017	0.0079	0.0023	0.0048	0.0039	0.0066
	-	91	0.0145	0.0080	0.0006	0.0149	0.0027	0.0080	0.0040	0.0149

試験体 CSWO-F-U は、+1 サイクル(1/400)加力中に柱に曲げひび割れ、袖壁にせん断ひび割れが発生した。正方向の最大耐力 171kN には+5 サイクル(1/125)途中に達し、袖壁下部が圧壊、+7 サイクル(1/67)の新しい変位時に最大耐力の 80% (137kN)となり、以後急激に耐力が低下した。負方向では、-1 サイクル(1/400)で袖壁にせん断ひび割れが発生し、-4 サイクル(1/250 の偶数サイクル)中に剥落が起こった。柱は、-5 サイクル(1/125)中に曲げひび割れが発生し、-7 サイクル中に剥落が起こった。最大耐力には、-5 サイクル(1/125)ピーク時に到達し、80%耐力低下は起こらなかった。

試験体 CSWO-F-D は、+1 サイクル(1/400)加力中に柱に曲げひび割れ、袖壁にせん断ひび割れが発生した。この+1 サイクルピーク付近で最大強度へ到達した。+3 サイクルピーク時に袖壁脚部が圧壊し、次サイクルの+5 サイクルでは体力が低下し、80%耐力低下点を迎えた。



(a) 試験体 CSWO-F-U



(b) 試験体 CSWO-F-D

図-3 水平力-変形角関係

負方向袖壁は、-1 サイクルを開始してすぐに曲げひび割れが発生し、-4 サイクル中に崩落が起こった。柱は、-7 サイクル中新しい変位を迎える前にひび割れ発生、ほぼ同時に剥落が起こった。負方向の最大耐力(91kN)には、-7 サイクルピーク付近で到達し、次の-9 サイクルでは 80%耐力(73kN)に到達しなかったため、-7 サイクルピークが 80%耐力となった。

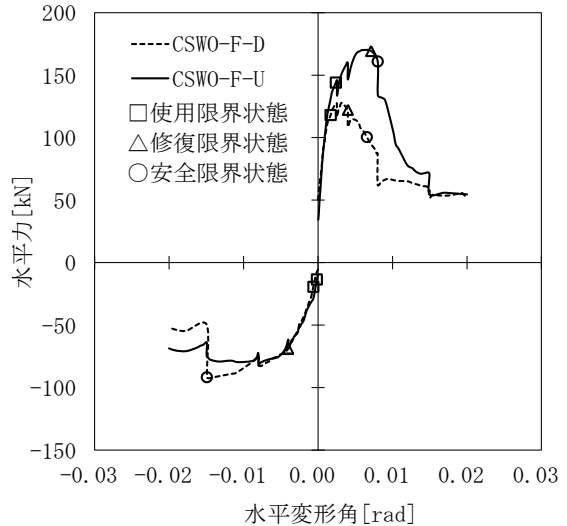
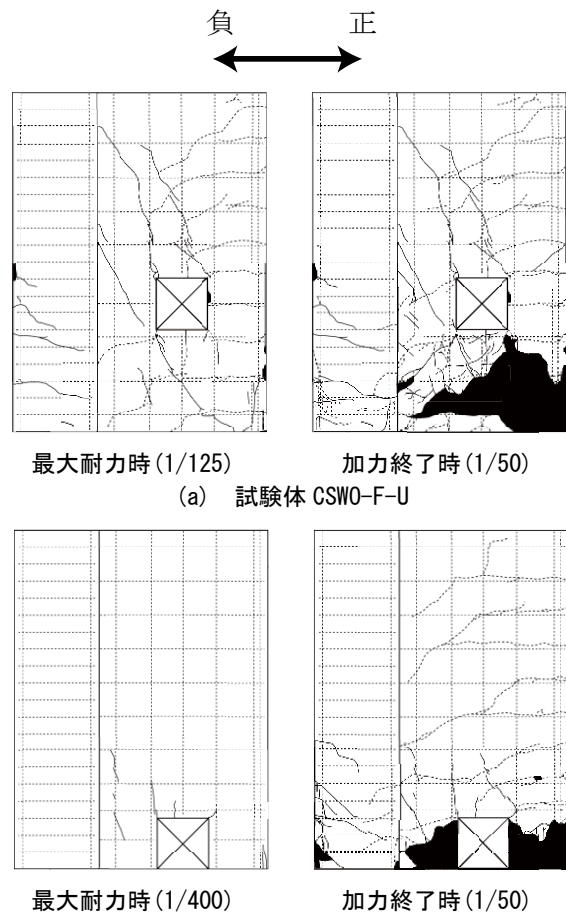


図-4 包絡線の比較



(a) 試験体 CSWO-F-U

(b) 試験体 CSWO-F-D

図-5 ひび割れ図

3.2 損傷状況

図-6, 7にひび割れ幅とそのサイクルのピークの部材角との関係を示す。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, 7は柱と袖壁部分を分離して示している。各奇数サイクルのピーク時および除荷時に、クラックスケールを用いて発生した全てのひび割れの各最大ひび割れ幅を測定し、図には各サイクルで最も大きかったひび割れ幅の値を示している。プロットされている点は、ひび割れ幅以外の被災度判定(文献 9))にかかわる要因として、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。これらの図により、どの部材角で被害が大きくなるかわかる。

本実験の場合+1サイクルピーク時の水平力が短期許容応力度時の水平力とほぼ等しい(表-4参照)。図-6, 7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、両験体とも柱は小剥落が起きたためⅢ、袖壁は脚部鉄筋が大きく湾曲し、CSWO-Dでは破断したため、軸力は柱で負担しているとみなしⅤと判断した。袖壁は、正方向加力時の袖壁脚部の圧壊、負方向加力時の曲げひび割れ幅拡大が、+5サイクル(1/200rad)から顕著に表れ、これが耐力の低下につながっている。

4. 強度の検討

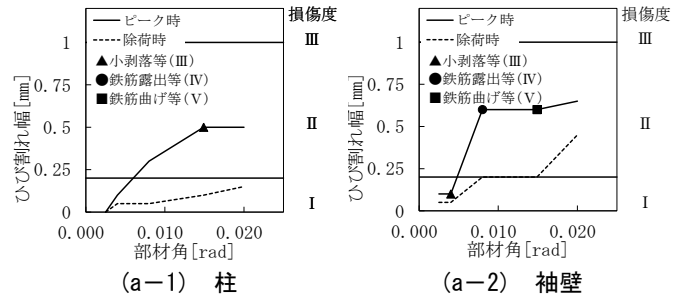
表-4に強度計算値と実験値の比較を示す。曲げひび割れ強度は、RC規準³⁾により求めたもの、曲げ強度は、耐震診断基準⁶⁾によるもの、全塑性モーメントは文献⁷⁾によるものとした。いずれも開口の影響は考慮していな

表-4 強度計算値と実験値の比較

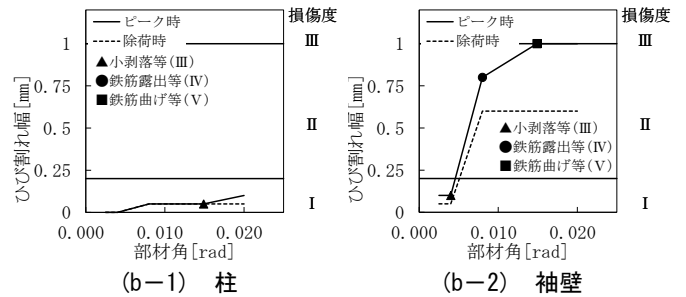
試験体名		CSWO-F-U		CSWO-F-D		
		+	-	+	-	
実験値	初期ひび割れ時強度[kN]	145	12	118	18	
	最大耐力[kN]	171	80	127	91	
計算値	曲げひび割れ強度 ³⁾ [kN]	61	49	61	49	
	開口低減率 ³⁾ を使用したせん断ひび割れ強度 ³⁾ [kN]	76				
	曲げ強度[kN]	診断基準式 ⁶⁾	184	18	184	18
		全塑性式 ¹⁾	159(129)	61	159(129)	61
	開口低減率を使用したせん断強度[kN]	異形断面式 ³⁾	182			
		診断基準式 ⁶⁾	179			
		累加強度式 ⁷⁾	163			
	短期許容曲げモーメント時水平力 ³⁾ [kN]	97	45	97	45	
短期許容せん断力 ³⁾ [kN]	147					
柱単独の曲げ強度 ⁶⁾ [kN]	37					

(): 開口による断面欠損を考慮した場合

い。また、せん断ひび割れ強度は靱性保証式⁵⁾において $\phi=0.51$ としたもの、せん断強度は、異形断面式⁸⁾、耐震診断基準式⁶⁾、累加強度式⁷⁾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³⁾(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、本試験体の場合には袖壁横筋を閉鎖型にしているため柱帯筋は全て有効

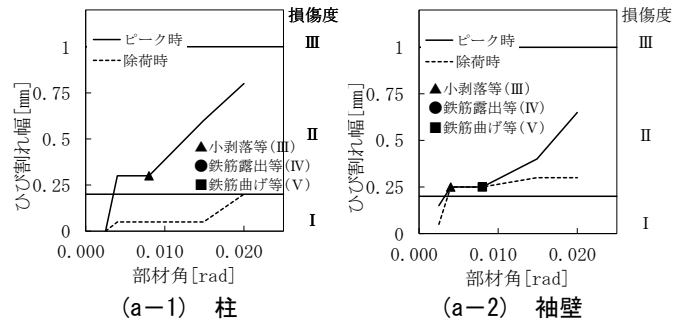


(a) 正方向

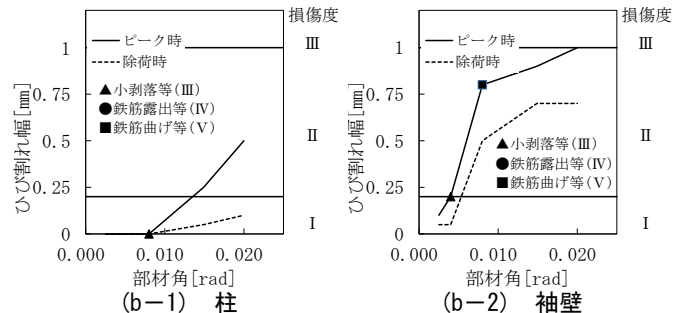


(b) 負方向

図-6 CSWO-F-U ひび割れ幅



(a) 正方向



(b) 負方向

図-7 CSWO-F-D ひび割れ幅

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、反曲点高さ1500mm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1)の全塑性式と文献7)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。また、前述した実験計画ではこの両方で破壊形式を判定していた。この場合、本試験体は曲げ破壊型となるが、せん断強度は曲げ強度をわずかに上回っているだけである。しかしながら、文献2)で明確になったように、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、実際には部材ランクがFBの条件の1.1倍は満たしていると考えられる。

図-3の水平力-変形角関係にはこの曲げ強度を横線で示してある。最大耐力を見てみると、試験体CSWO-F-Uの正方向・負方向および試験体CSWO-F-Dの負方向はこの曲げ強度を上回っており、全塑性強度式は精度よく適用できることがわかる。しかしながら、試験体CSWO-F-Dの正方向はこの曲げ強度を大きく下回っている。表-4の全塑性式による曲げ強度の欄には()内に略算的に開口による断面欠損を考慮した曲げ強度も示している。これは圧縮領域が開口に達した場合に開口をまたいで圧縮領域が形成されるとし、曲げ強度を算出する応力中心間距離を変更したものである。この開口を考慮した曲げ強度は実験とほぼ同じ強度となった。すなわち、試験体CSWO-F-Dの場合は曲げ強度に対する開口の影響を考慮せざるを得ないことがわかる。

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-8には、初期剛性の検討結果を示す。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。実験値は計算値を大きく下回る結果となった。

5. 変形能の検討

表-5(a)(b)に現行の基準⁴⁾と、日本建築学会の提案¹⁾による部材種別評価結果を示す。表内に本試験体の各項目評価値が示してあるが、前述したように本試験体はいずれも、せん断強度の曲げ強度に対する比以外は、部材種別はFBとなるよう設定している。

表-6に各試験体の正方向の終局変形角の実験値と計算値を示す。表中には部材種別も示した。文献1)では袖壁は柱の部材種別は、0.02以上をFA、0.015以上をFB、

0.01以上をFCと想定している。計算値は、文献1)によるものとし、 $c=6$ 、 $\epsilon_e=0.003$ とした。実験結果は試験体CSWO-F-Uが0.008radでFDランク、試験体CSWO-F-Dが0.0066radでFDランクとなった。計算値は両試験体とも、安全側とはいえる。しかし、終局変形の値は、試験体CSWO-F-Dで安全率がない結果となった。終局変形算出の際にも開口の位置の影響を考慮する必要はあろう。

6. 等価粘性減衰定数

図-9(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1回目のサイクルと2回目のサイクルに分けて示してある。また、図には正方向加力のみ対象にした場合、負方向加力のみ対象にした場合、および、正負の両方向を対象にした場合の3種類を示してある。また、これらの結果は W_e を求める際、そのサイクルの最大強度を用いているため、参考としてそれまでの最大強度を用いて

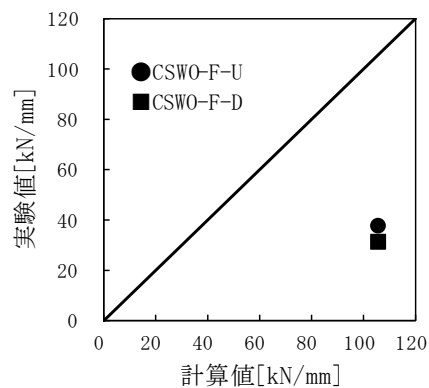


図-8 初期剛性

表-5 部材種別一覧

(a) 現行の袖壁付柱の部材種別

	FA	FB	FC	FD	本試験体: FB
h_0/D	2.5以上	2.0以上	-	FA, FB又はFCのいずれにも該当しない場合	FB(2.0)
σ_0/F_c	0.35以下	0.45以下	0.55以下		FA(0.14)
Pt	1/3以下	1/2以下	2/3以下		FB(0.41)
τ_u/F_c	0.1以下	0.125以下	0.15以下		FA(0.07)

(b) 2011日本建築学会PDで提案された部材種別案

	FA	FB	FC	FD	本試験体: FC
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)
h_0/D	2.5以上	2.0以上	-		FA(6.0)
σ_0/F_c	0.35以下	0.45以下	0.55以下		FA(0.22)
$(\rho_g \sigma_y + \sigma_w)/F_c$	1/3以下	1/2以下	2/3以下		FB(0.37)
tw/\sqrt{Ac}	4/10以下	3/10以下	2/10以下		FB(0.3)
τ_u/F_c	0.1以下	0.125以下	0.15以下		FA(0.06)

表-6 変形能の検討

試験体名	実験値		計算値	
	終局変形角[rad]	部材種別	終局変形角[rad]	部材種別
CSWO-F-U	0.0080	FD	0.0062	FD
CSWO-F-D	0.0066	FD	0.0062	FD

W_e を求めたもの（正負を対象にしたもののみ）も示した。さらに、文献4)の計算値も α を変えて示してある。

図より袖壁付き柱の等価粘性減衰は曲げ強度後に大きく耐力低下するので、 W_e の定義によってその値が大きく変わってしまうことがわかる。文献4)の計算値は小さめであった。

7. まとめ

(1)試験体 CSWO-F-U の正方向・負方向および試験体 CSWO-F-D の負方向の最大強度は曲げ強度計算値を上回っており、全塑性強度式は精度よく適用できた。しかしながら、試験体 CSWO-F-D の正方向はこの曲げ強度を大きく下回っており、この場合は曲げ強度に対する開口の影響を考慮する必要がある。

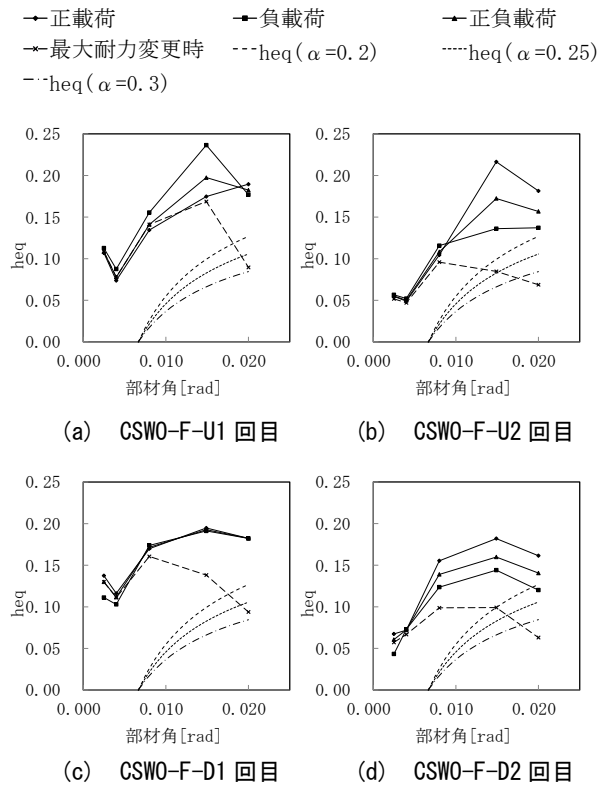
(2)試験体 CSWO-F-U の終局部材角実験値は 0.008rad で FD ランク、試験体 CSWO-F-D が 0.0066rad で同じく FD ランクとなり、開口の影響が表れている。計算値は両試験体とも同じ結果となり、概ね安全側に評価しているが、試験体 CSWO-F-D で安全率がない結果となった。開口の位置の影響を考慮する必要はある。

(3)今回の2体の小開口を有する袖壁付き試験体についてはあるが、開口がヒンジ領域の上部にある場合（試験体 CSWO-F-U）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すると曲げ強度式は適用できず、また変形能評価式の安全率の低下することがわかった。

(4)今後、ヒンジ領域内に開口を設置できる条件を明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 1)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建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
- 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, Vol.35, No.2, 2013, pp.361-366
- 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物の靱性保証型耐震設計指針・同解説(1999)



$$h_{eq}(\text{実験値}) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\Delta W}{W_e} \right)$$

$$h_{eq}(\text{計算値}) = \alpha \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right)$$

図-9 等価粘性減衰定数

- 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)
- 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, 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
- 8)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
- 9)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)