

論文 RC造袖壁付き柱の曲げ挙動に及ぼす開口位置の影響に関する実験的研究

高松 恭*1・渡邊 哲央*2・田村 良一*3・加藤 大介*4

要旨：曲げ強度と変形能に及ぼす開口位置の影響を検討するために、2体のRC造袖壁付き柱の静加力実験を行った。2体は形状・配筋とも同一で、開口位置のみが異なる。開口位置は開口により曲げ強度が低下しない限界の位置を想定し、1体は基礎面に、もう1体は試験体内法長さ中間の高さとした。加力はシアスパン比2.0の片持柱形式とした。その結果、2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。一方、終局変形角は開口が中間の高さにあるものは、無開口用の終局変形角計算値を上回ったが、基部面にあるものは下回り、変形能には影響を与える結果となった。

キーワード：RC造、袖壁付柱、曲げ破壊、開口、危険断面

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、換気、スイッチボックスやダストシュート等の目的から、強度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。筆者らは文献1)において2体の曲げ破壊型の袖壁付き柱の静加力実験を行い、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、また変形能評価式の安全率が低下することを報告した。本研究では、まず開口が曲げ強度に影響を及ぼす領域を定義し、その領域と開口の位置との関係が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、2体の静加力実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体計画

試験体は文献1)の試験体と同一としたが、変形能力を増加させることを念頭におき、袖壁厚さは75mmから100mmに変更した。2体は開口位置以外の条件は同一とし、開口位置を実験パラメータとした。以下に開口位置の検討過程を示す。

図-1は開口を考慮した曲げ強度の算定法を示したものである。図-1(a)は記号を示しているが、開口の右下端部の袖壁右下端部からの水平方向の距離を y 、鉛直方向の距離を z としている。図-1(b)(c)は開口下面位置(図-1(a)において開口下端である z の高さ)での終局曲げモーメントの算定用の応力状態であるが、図-1(b)は圧縮領域が開口にかからない場合、図-1(c)はかかる

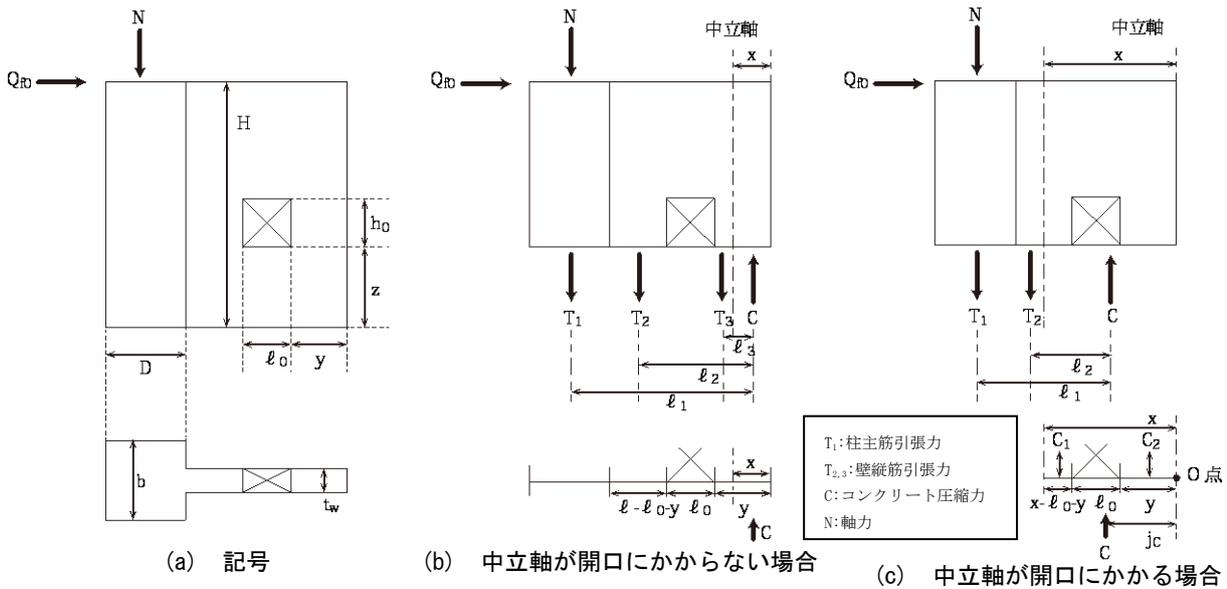


図-1 開口を考慮した曲げ強度の算定

*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 修士課程

*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)

場合である。いずれも、軸方向筋は、柱主筋は柱中心に、壁縦筋は引っ張りを受ける部分の重心位置に集約している。ただし、開口で左右に分かれる場合にはそれぞれで集約している。このとき、開口下端が曲げ降伏するときのせん断力 Q_{f0} は式(1)で表される。

$$Q_{f0} = \frac{M_{f0}}{(H - z)} \quad \dots (1)$$

$$M_{f0} = \begin{cases} (T_1 + N) \cdot l_1 + T_2 \cdot l_2 + T_3 \cdot l_3 (\text{中立軸が開口外}) \\ (T_1 + N) \cdot l_1 + T_2 \cdot l_2 (\text{中立軸が開口内}) \end{cases}$$

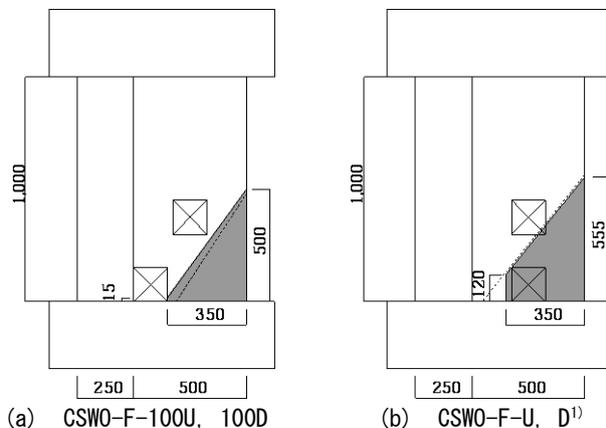
ここで、開口の存在が試験体の曲げ強度を低下させない領域を算出した。具体的には、式(1)で表される開口下端が曲げ降伏するときのせん断力が無開口とした場合の基礎面が曲げ降伏するときのせん断力を上回る領域として算出できる（以降、精算式と呼ぶ）。

一方、壁縦筋の曲げ強度に及ぼす寄与を無視すると、この領域の境界線は直線で表され、その直線と基礎面との交点の y 座標は式(2)、袖壁右端部との交点の z 座標は式(3)により定式化される（以降、略算式と呼ぶ）。

$$y_0 = \frac{(N + T_1)}{(t_w \cdot \sigma_B \cdot k)} \quad \dots (2)$$

$$z_0 = l_0 \left/ \left(\frac{D}{2} + l - \frac{y_0}{2} \right) \right. \cdot H \quad \dots (3)$$

以上を踏まえて試験体の開口位置を決定した。具体的には、開口位置は2体とも開口により曲げ強度が低下しない限界の位置を想定し、1体は基礎面に、もう1体は試験体内法長さ中間の高さとした。結果的に設定された開口位置を図-2(a)に2体まとめて示す。図中の網掛け部分が精算式により評価された開口が曲げ強度を低下させる領域を示している。なお、図中の破線は略算式による領域の境界線を示している。ここで、コンクリート強度の有効係数 k は0.85としている。開口が基礎面にある試験体では若干低下領域に開口がかかった結果となった。



網掛け：曲げ強度が低下する領域
破線：略算法による境界線

図-2 開口により曲げ強度計算値が低下する領域

一方、図-2(b)は文献1)で報告した2体の開口位置であり、影響を受けないと評価される試験体と影響を受ける試験体の実験を行ったことを示している。

2.2 試験体概要

表-1に試験体諸元、表-2に材料強度、図-3に配筋図を示す。試験体縮尺は1/3とした。前述したが壁厚と開口位置以外は文献1)と同じであるが、特徴的なことは文献1)と同様に袖壁横筋を閉鎖型にしている点である。また、RC規準2)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。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³⁾および日本建築学会の提案⁴⁾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

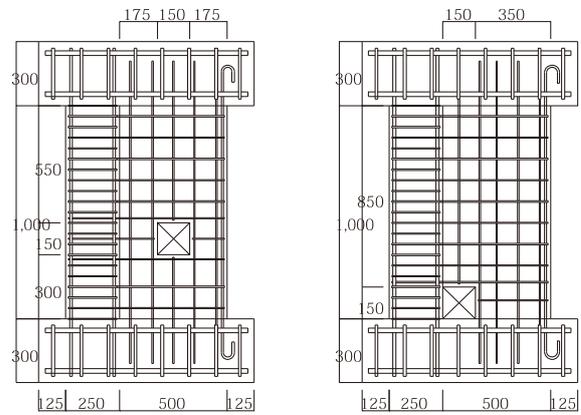
表-1 試験体諸元

試験体名	CSWO-F-U ¹⁾	CSWO-F-D ¹⁾	CSWO-F-100U	CSWO-F-100D
柱断面[mm]	250×250			
袖壁断面[mm]	75×500		100×500	
内法高さ[mm]	1000			
せん断スパン長さ[mm]	1500			
(せん断スパン比)	(2.00)			
柱配筋	主筋 4-D13(SD345)			
	帯筋 □-D6@50(SD295) (帯筋比[%]) (0.512)			
袖壁配筋	縦横筋 D6ダブル(SD295)			
	(壁筋比[%]) (0.85)		(0.64)	
開口	端部筋 1-D10(SD345)			
	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		22.4	
軸力[kN]	400			
	(軸力比[%]) (0.19) (0.16)			

軸力比は全断面の軸方向応力により算定

表-2 材料強度

	CSWO-F-100U, CSWO-F-100D		
	降伏強度[N/mm ²]	最大強度[N/mm ²]	降伏歪度
D6	403	541	2346
D10	383	544	2123
D13	378	528	2079



(a) CSWO-F-100U

(b) CSWO-F-100D

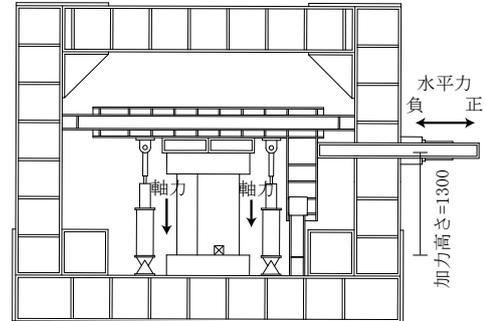
図-3 配筋図

ると、部材種別³⁾はFBとなるように設定した。

2.3 加力方法

図-4に加力方法を示す。加力は、図-4(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-4(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, 1/125, 1/67, 1/50radとし、各部材角2サイクルずつの载荷を行った。

共に+5サイクル(1/125)途中で達し、+7サイクル(1/67)時に袖壁下部が圧壊し、以後急激に耐力が低下した。負方向加力時の水平力-変形角関係は、両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、-9サイクルでは鉄筋の破断が起きた。

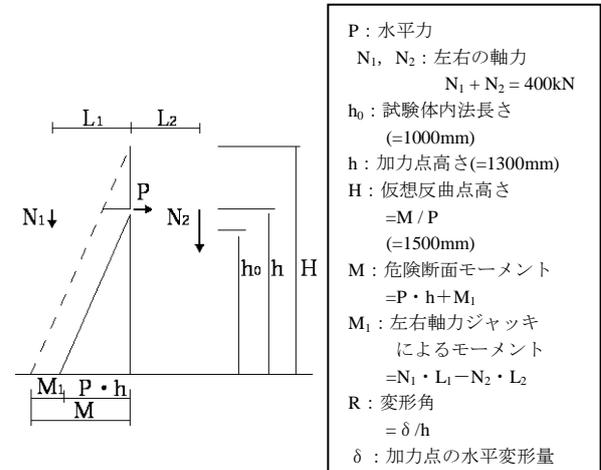


(a) 加力装置

3. 実験結果

3.1 水平力-変形角関係

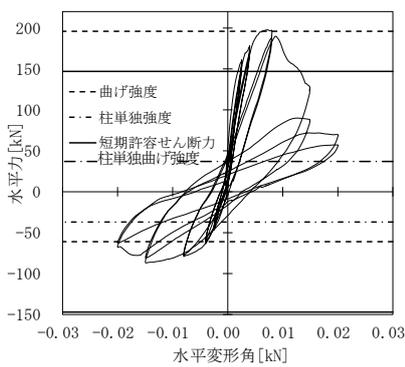
試験体の水平力-変形角関係を図-5(a)(b)に示す。ここで、変形角は図-4(b)に示したように、加力点の変形 δ をその高さで除して求めている。また、いずれも袖壁が圧縮側になる加力を正方向加力としている。表-3には、最大耐力、使用限界状態(各方向で、最初にひび割れが発生した点、柱主筋・袖壁縦筋の降伏が起きた点での変形角)、修復限界状態(各方向、コンクリートが一番初めに剥落した点での変形角)及び安全限界状態(最大耐力の80%まで低下した点での変形角)をまとめたものを示した。さらに、図-6には文献1)の2体を含め包絡線を比較したもの示す。



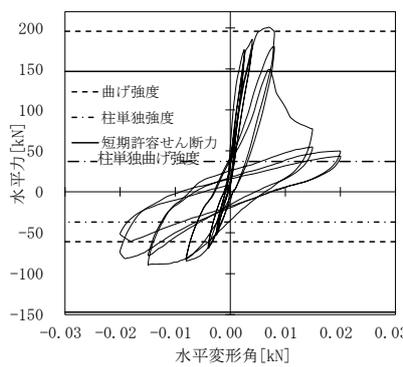
(b) 加力概念図

図-4 加力方法

正方向加力時には両試験体共に+1サイクル(1/400)中



(a) CSWO-F-100U



(b) CSWO-F-100D

図-5 水平力-変形角関係

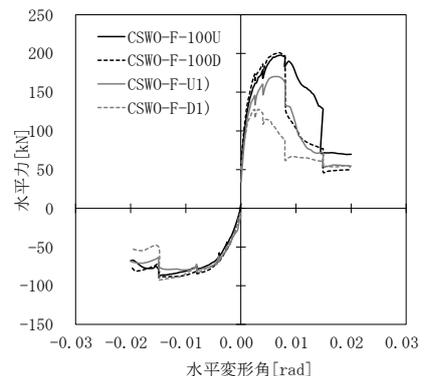


図-6 包絡線の比較

に柱、袖壁にひび割れが発生した。最大耐力も両試験体

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-100U	+	198	0.0080	0.0025	0.0018	0.0058	-	0.0080	0.0080	0.0113
	-	87	0.0149	0.0008	0.0004	0.0194	0.0032	0.0149	-	0.0200
CSWO-F-100D	+	201	0.0071	0.0015	0.0015	0.0055	-	0.0149	0.0071	0.0033
	-	89	0.0149	0.0147	0.0002	0.0172	0.0029	0.0200	0.0080	0.0044

3.2 損傷状況

図-7には最大耐力時と加力終了後のひび割れ図を、図-8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-8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。また、文献5)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。

本実験の場合+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-8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。

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²⁾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、全塑性曲げモーメント

は文献4)によるものとした。また、2.1試験体計画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⁷⁾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⁹⁾、累加強度式⁹⁾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²⁾

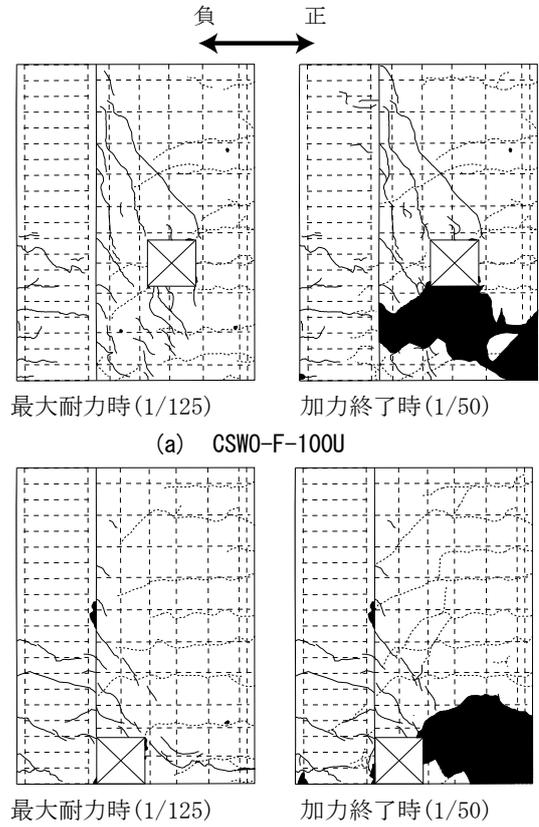


図-7 ひび割れ図

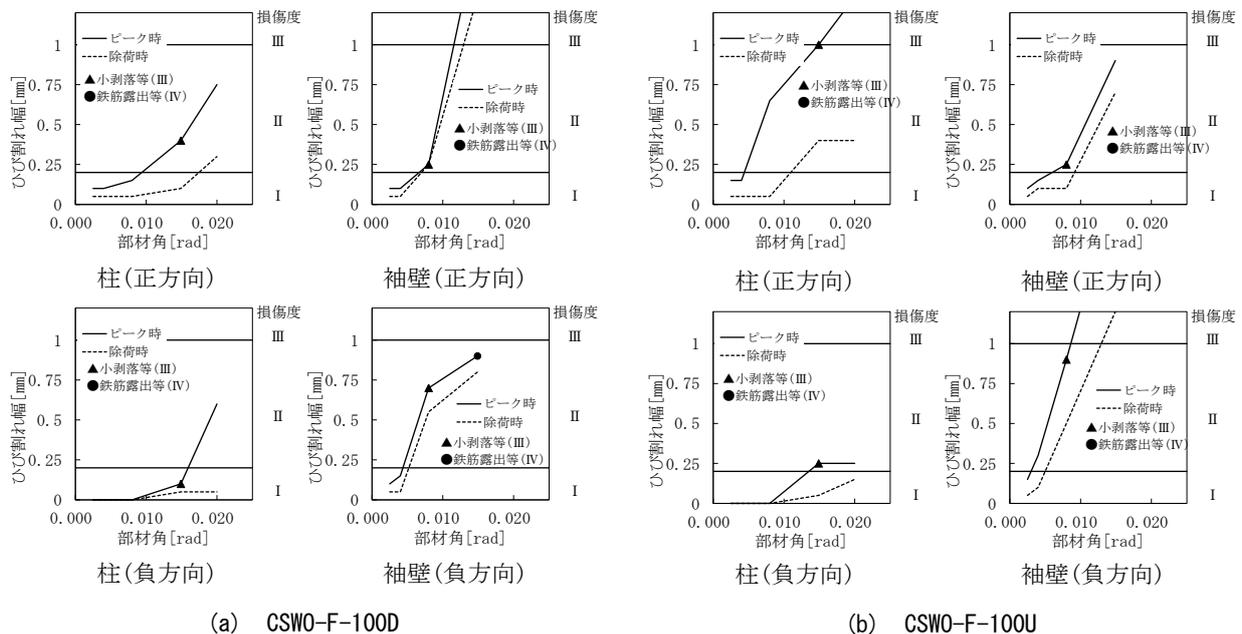


図-8 ひび割れ幅

表-4 各種強度の計算値と実験値の比較

試験体名			CSWO-F-U ¹⁾		CSWO-F-D ¹⁾		CSWO-F-100U		CSWO-F-100D	
			+	-	+	-	+	-	+	-
実験値	初期ひび割れ時強度[kN]	曲げ	145	12	124	18	159	8	146	6
		せん断	146	30	118	50	145	40	146	50
	最大耐力[kN]	171	80	127	91	198	87	201	89	
計算値	曲げひび割れ強度 ²⁾ [kN]		61	49	61	49	64	53	64	53
	開口低減率 ²⁾ を使用したせん断ひび割れ強度 ⁷⁾ [kN]		76				82			
	曲げ強度[kN]	診断基準式 ⁶⁾	184	18	184	18	188	21	188	21
		全塑性式 ⁴⁾	159	61	159	61	196	61	196	61
		開口考慮	154	-	129	-	196	-	185	-
	開口低減率を使用したせん断強度[kN]	異形断面式 ⁸⁾	182				186			
		診断基準式 ⁶⁾	179				218			
		累加強度式 ⁹⁾	163				176			
	短期許容曲げモーメント時水平力 ²⁾ [kN]		66	25	66	25	81	25	81	25
開口低減率を使用した短期許容せん断力 ²⁾ [kN]		137				152				
柱単独の曲げ強度 ⁶⁾ [kN]		37				37				

(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、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4)の全塑性曲げモーメントと文献9)の累加強度式に文献2)の開口低減率を乗じたものを主に説明する。CSWO-F-100Uは開口を無視した曲げ強度(196kN)と考慮した曲げ強度(196kN)は変わらず、CSWO-F-100Dではそれぞれ196kNと185kNとなる。すなわち、曲げ強度はCSWO-F-100Uでは開口の影響を受けず、CSWO-F-100Dでは開口の影響を若干受けていることがわかる。また、いずれも曲げ強度よりもせん断強度の方が小さいため、せん断破壊型と判断されるが、文献10)でも報告したように、文献2)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の方が高くせん断強度の曲げ強度に対する比は、部材ランクがFCの条件の1.0倍は満たしていると考えられる。

図-5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-100U、CSWO-F-100Dともに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-5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-9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

表-5 部材種別一覧
(a) 現行の袖壁付柱の部材種別³⁾

	FA	FB	FC	FD	F-U, D	F-100U, 100D
Qsu/Qmu	1.25			FA, FB又はFCのいずれにも該当しない場合	FC(1.03)	FD(0.90)
h0/D	2.5以上	2.0以上	-		FB(2.0)	FB(2.0)
σ_0/Fc	0.35以下	0.45以下	0.55以下		FA(0.19)	FA(0.16)
Pt	0.8以下	1.0以下	-		FA(0.41)	FA(0.41)
$\tau u/Fc$	0.1以下	0.125以下	0.15以下		FA(0.09)	FA(0.08)

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で提案された部材種別案⁴⁾

	FA	FB	FC	FD	F-U, D	F-100U, 100D
Qsu/Qmu	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)	FD(0.90)
h0/D	2.5以上	2.0以上	-		FA(6.00)	FA(6.00)
σ_0/Fc	0.35以下	0.45以下	0.55以下		FA(0.31)	FA(0.29)
$(pg\sigma_y + \sigma_0w)/Fc$	1/3以下	1/2以下	2/3以下		FB(0.46)	FB(0.42)
tw/ \sqrt{Ac}	4/10以上	3/10以上	2.5/10以上		FB(0.30)	FA(0.40)
$\tau u/Fc$	0.1以下	0.125以下	0.15以下	FA(0.08)	FA(0.06)	

注: σ_0 は柱断面における軸方向応力度

表-6 終局変形の計算値と実験値の比較

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-U ¹⁾	0.0060 (FD)	0.0080 (FC)	1.33
CSWO-F-D ¹⁾	0.0060 (FD)	0.0066 (FD)	1.10
CSWO-F-100U	0.0107 (FB)	0.0113 (FB)	1.06
CSWO-F-100D	0.0107 (FB)	0.0080 (FC)	0.75

()内には終局変形角による部材種別

用いた割線剛性を、横軸には曲げ剛性とRC規準²⁾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。

5. 変形能の検討

表-5は、文献1)の試験体も含め、現行の基準³⁾と、日本建築学会の提案⁴⁾による部材種別の評価結果を示したものである。評価結果は開口位置を反映していないので、文献1)の2体は同じ結果、同様に本論文の2体も同じ評価結果となる。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。

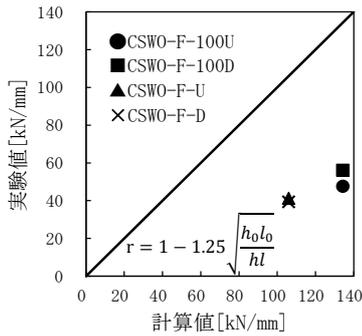
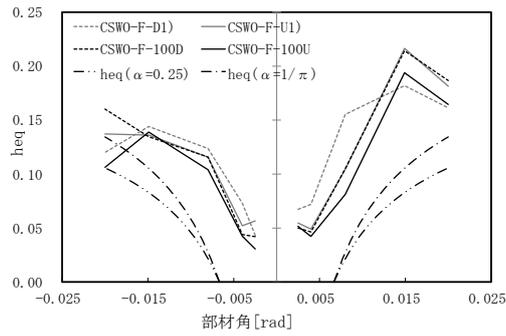
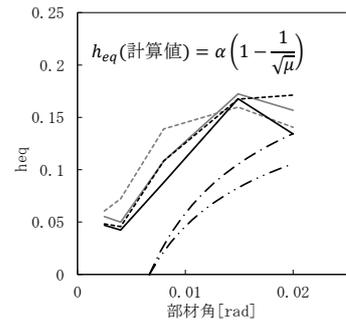


図-9 初期剛性



(a) 正負サイクル別



(b) 正負サイクル平均

図-10 等価粘性減衰定数

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⁴⁾による計算値を比較したものである。文献4)による計算値は、 $c=6$ 、 $\epsilon_c=0.003$ として求めている。試験体 CSWO-F-100D 以外は実験値は計算値を上回っているが、試験体 CSWO-F-100D では大きく下回った結果となった。すなわち、曲げ強度の観点からは開口の影響は少ない範囲の開口位置ではあったが、変形能に関しては大きな影響があったことになる。これは試験体 CSWO-F-100D の場合は、圧縮領域にはあまりかかっていないが、開口が危険断面位置に存在したことが理由と考えられる。すなわち、実際に開口際のコンクリートが圧壊する場合には、せん断力による中立軸深さの増加⁷⁾を考慮する必要があるといえる。

一方、文献4)での袖壁付き柱の部材種別は、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、危険断面高さに開口がある CSWO-F-100D 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-10(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、正負の平均と正負別にしたもののいずれも示した。図中には計算値も参考に示したが、 α が $1/\pi$ のものを大きく上回っていることがわかる。

7. まとめ

(1)曲げ強度に関しては、開口の影響を受けない領域の試験体 CSWO-F-100U とわずかに影響を受ける領域の試験体 CSWO-F-100D とともに実験値は計算値を上回った。すなわち、いずれも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、試験体 CSWO-F-100U は計算値を上回り、開口の影響は少なかった。しかしながら、開口が危険断面高さにある試験体 CSWO-F-100D では、計算値を下回った。すなわち、開口の影響が大きかったといえるが、その理由については今後検討する必要がある。

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,pp283-288
- 2)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
- 3)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
- 4)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
- 5)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)
- 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)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)
- 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)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
- 10)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.361-366