

論文 一定高軸力と二方向加力を受ける面外袖壁つき RC 造柱の軸力負担性能評価実験

大塚 祐二*1・加藤 大介*2

要旨:本研究の目的は面外方向に袖壁がつく RC 造柱の軸力負担能力を実験により定量的に評価することである。昨年は一方向加力による基礎的な実験を行ったが、本報告では直交方向にも加力される場合の静加力実験の結果を報告する。試験体は計2体で、袖壁が中央にとりつく場合と、偏心してとりつく場合である。二方向加力は、面内にプレ載荷をした後に、面外方向に本載荷を行う方法によった。

キーワード: 高軸力、袖壁、偏心袖壁、柱、変形能、静加力実験、二方向加力

1. はじめに

実際の建物には袖壁等の部材が取り付くことが多いが、想定している加力方向に対して面外に袖壁がついた場合、一般的には2次部材として設計上無視して計算される。しかしながら、この面外袖壁は柱の軸力負担能力には寄与していることが認知されており、筆者らは、袖壁を構造部材として考え、この軸力負担能力を検討するために、静加力実験を行った [1]。

ところが、面内方向加力に対しては袖壁は最外端に位置するため、面内方向にも同時に地震力が作用する場合、袖壁の一部が圧壊し軸力負担能力が低減することが予想される。そこで、本研究では、面内方向の加力による袖壁の損傷の影響を検討するために、面外方向に加力する本載荷の前に面内方向に加力(プレ載荷と呼ぶ)する実験を行った。

一方、文献 [1] の試験体は袖壁が中央にとりつくものであり、袖壁による付加断面が繰り返し載荷による中央部分の軸歪度の蓄積を防止し、その結果、変形能が増すと解釈された。したがって、袖壁が偏心してとりつく場合には、袖壁が圧縮側になる場合の中立軸深さが小さくなるので、独立柱よりは変形能がよくなることが予想されるが、中央に付く場合より軸歪度の蓄積防止効果は減少すると考えられる。そこで、袖壁を偏心させた試験体の実験も計画した。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 は本実験の実験計画を示したものである。文献 [1] で報告した2体も比較のために示した。前述したように、新たに袖壁のとりつき位置をパラメータに2体の試験体を計画した。いずれも本載荷の前にプレ載荷を行う。日本建築学会の靱性保証型耐震設計指針 [2] では、壁フレーム構造の設計限界変形として1/150radの層間変形角が想定されている。そこで、本研究では面内方向のプレ載荷ではこの設計限界変形に対応する部材角 1/150rad まで加力を行った。すなわち、面外方向の終局限界状態を検討するにあたり、設計限界状態に達する程度の直交方

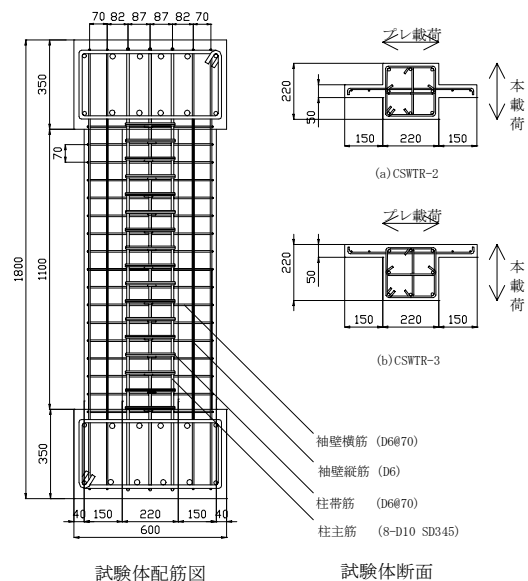


図-1 試験体配筋図

*1 新潟大学自然科学研究科博士課程前期大学院生

*2 新潟大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

表-1 実験計画

試験体名	柱断面	直交袖壁	軸力載荷法	横力載荷法
C-5(I1)	共通	なし	共通 (一定)	本載荷のみ
CSWTR-1(I1)		あり(中心)		
CSWTR-2		あり(偏心)		プレ載荷 +本載荷
CSWTR-3				

表-3 鉄筋強度

	C-5、CSWTR-1		CSWTR-2、3	
	D6	D10	D6	D10
降伏強度 (MPa)	314	378	302	474
破断強度 (MPa)	483	517	389	543

表-2 試験体諸元

試験体名	柱断面	直交袖壁断面 (片側)	高さ	柱部全 主筋	柱部帯 筋(帯筋 比)	袖壁部 端部縦 筋	袖壁部壁筋 (縦・横) (壁筋比)	コンクリ ート圧縮強度 (MPa)	作用軸 力 (kN)
C-5	220× 220mm	なし	1100mm	8-D10	3-D6@ 70 (0.62%)	なし	なし	26.1	778
CSWTR-1		50×150mm				1-D6	1-D6@70 (0.91%)		784
CSWTR-2									
CSWTR-3									

向の入力を考えていることになり、設計上十分安全側の設定と考えられる。表-2に試験体諸元を、図-1に試験体配筋図を示す。試験体CSWTR-2は試験体CSWTR-1と形状と配筋が同じであり、試験体CSWTR-3は試験体CSWTR-1と配筋は同じであるが、袖壁を偏心させたものである。なお、袖壁の配筋は壁筋による拘束効果を期待しないようにシングル配筋とした。作用軸力は文献[1]と同じとした。すなわち、柱型部分のみの軸力比は文献[2]で許容される最大軸力に近い約0.6となる。表-3に鉄筋強度を示す。

2.2 加力方法

加力は、図-2に示す加力装置により逆対称変形を与えた。軸力は試験体上部の鉛直ジャッキで一定軸力を与え、左右の2台の鉛直ジャッキにより試験体上部のL型フレームを水平に保った。柱試験体の載荷は、プレ載荷として面内方

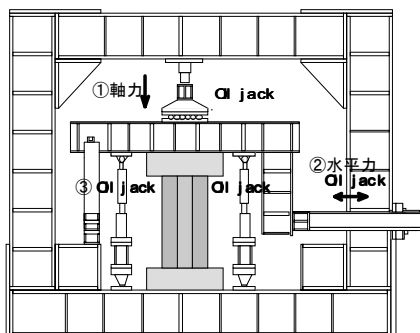


図-2 加力装置図

向に±1/150の部材角を2回繰り返す、その後、試験体を90度回転させ、本載荷として面外方向に±1/200、±2/200、±3/200、±4/200、±6/200、±8/200の部材角をそれぞれ2回ずつ繰り返す、所定の軸力を負担できなくなるまで載荷を続けた。

3. 実験結果

図-3に各試験体の最大耐力時及び加力終了時のひび割れ図を示す。また、図-4(a)(b)には各試験体の水平力-水平部材角関係、及び、軸歪度-水平部材角関係を示す。同図の水平力はP-Δ効果を考慮したもの（部材座標系におけるせん断力）で、水平変形角と軸歪度は上下の基礎間の水平変形と鉛直変形をその内法高さで除したものである（軸歪度は伸びを正）。表-4に使用限界状態、修復限界状態、および終局限界状態に関連する試験体の損傷状態を示す。ここで、最大耐力の80%に低下した点は正負の両方向の包絡線上で求めた。試験体としての変形能はその小さい方としている。また、軸力負担能力喪失点は、軸力が負担できなくなった時点で経験した最大部材角の点を示している（実際に軸力を負担できなくなったのはその直後の繰り返し載荷中）。

試験体CSWTR-2は、面内方向へのプレ載荷時に袖壁の圧壊を確認した。その後面外方向に

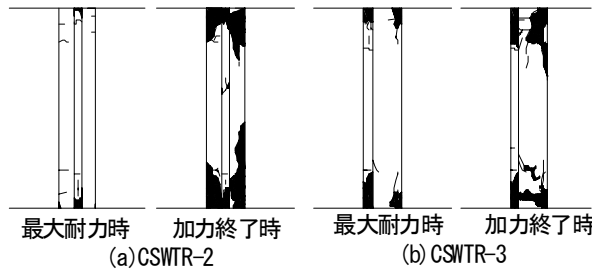


図-3 試験体ひび割れ図

本載荷をはじめると+3 サイクル (1/100rad) で最大耐力を示した。最終的には、+13 サイクル (1/20rad) で軸力が保持できなくなり加力は終了した。

一方試験体 CSWTR-3 は面内方向へのプレ載荷時に袖壁が圧壊し横筋が露出した。その後面外方向に本載荷をはじめると、+5 サイクル (1/67rad) で最大耐力を示した。最大耐力時のひ

び割れ図をみると試験体 CSWTR-2 に比べ圧壊領域が広いことが分かる。試験体 CSWTR-2 は +13 サイクルの途中まで軸力が保持できたのに対し試験体 CSWTR-3 は +10 サイクル (1/33) の途中で軸力が保持できなくなり加力を終了した。

4. 結果の考察

4.1 変形能の比較

図-5 は文献 [1] の試験体を含め、計 4 体の試験体の正方向の包絡線を比較したものである。図中の黒丸はその方向の加力で水平耐力が最大強度の 80% に低下したとして定義した靱性限界点、白丸が軸力負担能力喪失点である。同図より試験体 C-5 が最も変形能が悪く、試験体

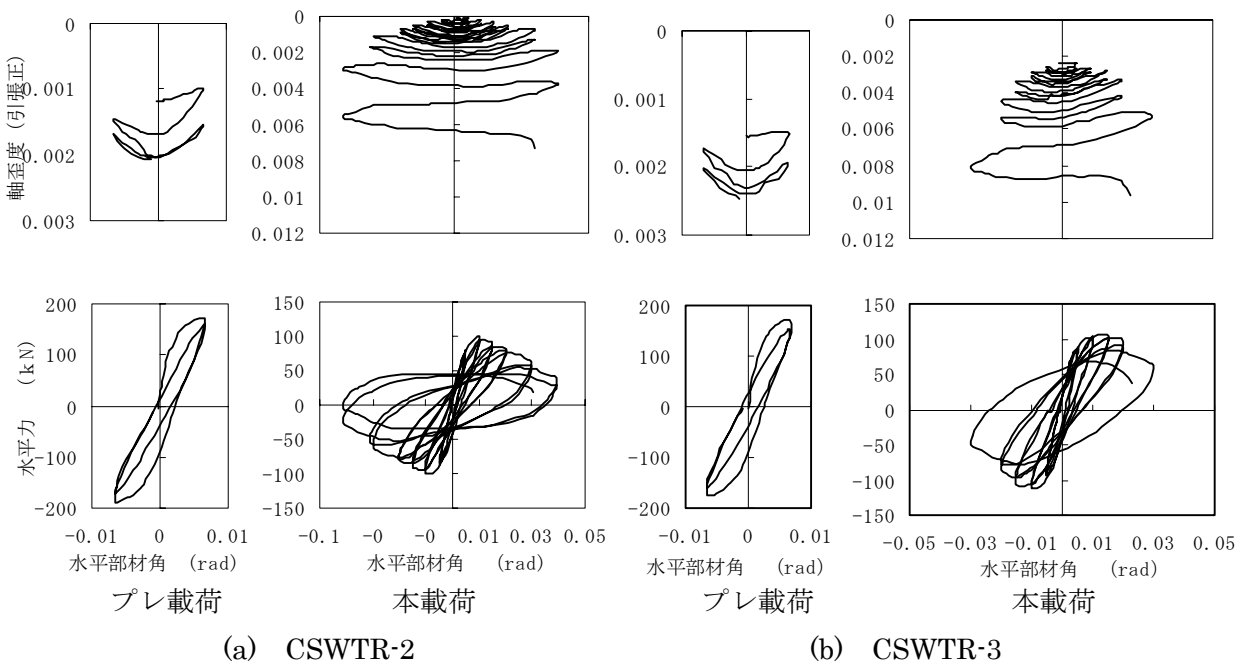


図-4 水平力-水平部材角、軸歪度-水平部材角関係

表-4 限界状態時水平変形角実験値

試験体名	使用限界状態	修復限界状態			終局限界状態		
	柱主筋引張降伏 (rad)	柱部コンクリート圧壊 (rad)		袖壁コンクリート圧壊 (rad)		最大耐力の80%に低下した点	軸力負担能力喪失までの最大部材角
		かぶり	コア	かぶり	かぶり		
C-5	0.0022	-0.001	0.015	-	0.015	0.019	
	-0.0022	-0.002	-0.007		-0.015		
CSWTR-1	0.0064	0.006	0.025	0.025	0.040	0.050	
	-0.0059	-0.004	-0.017	-0.009	-0.031		
CSWTR-2	0.012	0.0066 (p)	0.03	0.0066 (p)	0.021	-0.041	
	-0.013	-0.0066 (p)	-0.03	-0.0067 (p)	-0.019		
CSWTR-3	-	0.005	0.031	0.0067 (p)	0.021	±0.030	
	-0.0013	-0.005	-0.03	-0.0067 (p)	-0.019		

(p) はプレ載荷中に観測された事項のこと

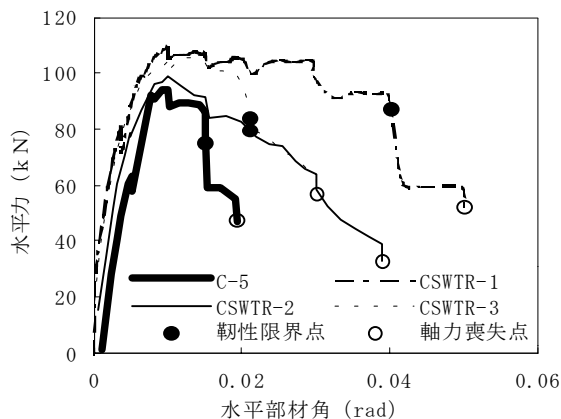


図-5 実験値の包絡線の比較

CSWTR-1 が最も変形能が良いことが分かる。今回実験を行った CSWTR-2、CSWTR-3 はその中間に位置し、水平耐力が最大耐力の 80%に低下した点は 2 体がほぼ同じだったのに対し、軸力負担能力喪失時変形は袖壁が中央にある CSWTR-2 が大きかった。

4.2 曲げ解析による袖壁の効果の検討

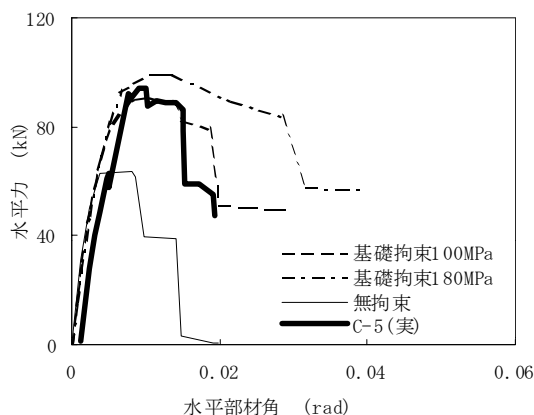
本節では平面保持を仮定した曲げ解析により袖壁の効果を検討する。平面保持解析には剛強な基礎スタブからの拘束を考慮する文献 [3] の手法を用いた。図-6 (a) (b) は、独立柱とプレ載荷を行っていない (すなわち袖壁が健全な) 試験体 CSWTR-1 の荷重-変形関係の実験値と計算値を正方向の包絡線をとって比較したものである。文献 [3] では、同じ配筋であっても純曲げ部材と曲げせん断部材の挙動を同じコンクリートモデルでは説明できないことが示されている。これは基礎および部材内の非破壊領域から破壊領域へ拘束が働くからと説明し、この拘束力をシアスパン比の関数で評価する式を提案し

ている。図-6 ではこの基礎からの拘束応力度 (σ_{tbl}) を変化させて 3 通りの解析例を示した。すなわち、無拘束のもの、文献 [3] で提案されている $\sigma_{tbl}=180\text{MPa}$ のもの、および、 $\sigma_{tbl}=100\text{MPa}$ のものである。なお、基礎からの拘束応力度とは、コンクリートの応力度-歪度関係を求めるときに、帯筋による拘束応力度に加えて考慮するものである。

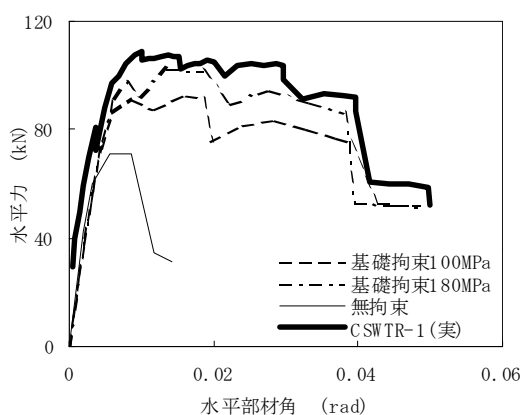
図をみると、無拘束のものは実験結果を著しく過小評価し、文献 [3] の提案式は試験体 CSWTR-1 は精度良く評価されているものの、試験体 C-5 では若干高めの評価となった。

図-7 はプレ載荷を行った (すなわち袖壁が損傷している) 試験体 CSWTR-2 の袖壁の有効な長さを求めることを目的に行った解析結果である。図には比較のため袖壁のない試験体 C-5 と 30cm の袖壁が全て健全な試験体 CSWTR-1 の包絡線も示し、解析は袖壁の長さを 5, 15, 25cm の 3 通りに変化させた。基礎からの拘束は試験体 C-5 と CSWTR-1 を同程度に評価する $\sigma_{tbl}=100\text{MPa}$ を用いた (図-6 参照。また、以降の解析結果はすべてこのモデルである)。図より、袖壁長さの半分の 15cm 程度が有効と判断できる。

次に、図-8 は、袖壁のうち無効と判断された部分がプレ載荷によりどの程度損傷を受けていたのかを、面内方向の平面保持解析により推定してみたものである。解析は全断面かぶりコンクリートとして扱った。ただし基礎の拘束があるので、文献 [3] で報告されているコンクリ



(a) 試験体 C-5



(b) 試験体 CSWTR-1

図-6 曲げ解析(基礎の拘束をパラメータ)

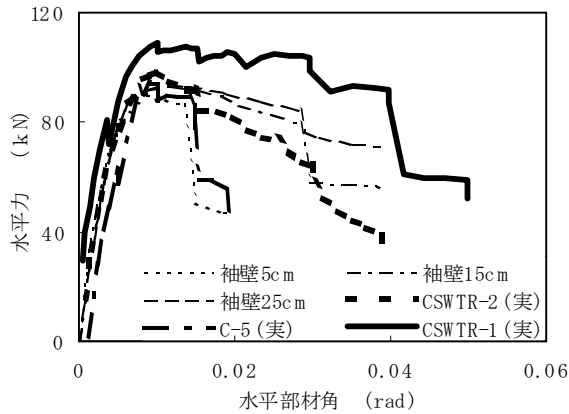


図-7 CSWTR-2 曲げ解析
(有効袖壁長さを変化)

ートモデルを用いた結果、そのコンクリートの応力度-歪度関係は図-8 (b) のようになった。図-8 (a) はプレ載荷直後の断面各部分の最大経験歪(図-8 (b) の ϵ) とそのときの応力度(同図の σ) の分布を示したものである。いずれもコンクリートの最大応力 σ_c あるいはそのときの歪度 ϵ_c で基準化して示してある。同図によると、無効と判定された約半分の領域は最大時歪度の2倍程度以上進んだ領域であることが分かる。

今回は軸力が高く、また、プレ載荷でも 1/150 と大きな変形まで載荷したので、袖壁には大きな損傷があった。それでも最大時歪度の2倍以内のコンクリートは有効に働いたことを考えると、実際の設計や耐震診断等においては、より簡便で安全側の方法として、最大時歪を超えない部分を有効とするなどの方法が考えられる。

図-9 は袖壁が偏心してとりつく試験体 CSWTR-3 の解析結果である。袖壁が全部有効としたもの (30cm) と半分が有効 (15cm) の2ケー

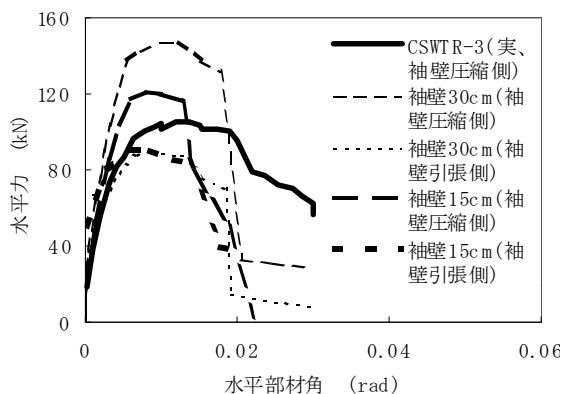


図-9 CSWTR-3 曲げ解析(正負方向)

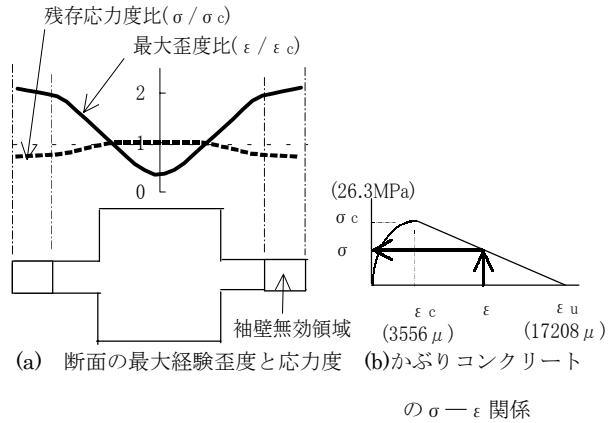


図-8 プレ載荷終了直後の断面の応力状態計算値

スについて示す。この試験体は面外方向加力時には上下で非対称なので、実験結果の荷重変形関係は袖壁部分が曲げ圧縮になる場合と引張になる場合の平均的な挙動が示されていることになる。そこで、解析も袖壁が圧縮になる場合と引張になる場合の両方をそれぞれのケースで示した。結果は、最大強度前後までは袖壁が半分有効としたモデルの平均値が実験にあっているが、軸力保持性能喪失点(最終ステップ)はいずれの解析値も実験を過小評価した。

4.3 袖壁の軸力負担効果の検討

本節では袖壁による軸力負担効果を検討する。軸力負担効果とは柱の軸力保持性能に寄与する袖壁の効果を意味する。これを定量的に把握するために、文献 [4] で提案した軸力保持性能喪失点の評価式を適用してみる。同文献では軸力を保持できなくなる変形を、試験体のコア断面の軸力比 (コア断面の帯筋の拘束効果を考慮した軸耐力に対する作用軸力の比) の関数として評価しており、図-10はこの関数を図示したものである。太い実線が一定軸力試験体用の挙動を平均的に評価する式、細い実線が超過確立 20% の下限式である。縦軸は変形能を表すが、軸力保持性能喪失時の変形を曲率に換算し、さらに ϵ_p/D_c で除して無次元化したものである (ϵ_p は拘束コンクリートの最大応力度時軸歪度、 D_c は柱断面のコア幅)。

図には実験値も示した。この4体はコアコンクリートという観点では同じ試験体なので、横

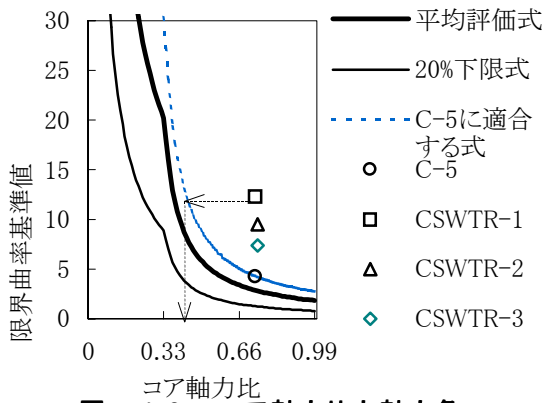


図-10 コア軸力比と軸力負担能力喪失点の変形の関係

軸はほぼ同じ値になる。実験値をみると、独立柱試験体 C-5 は平均評価式のやや上に位置しているが、袖壁がとりつくとも変形能が上昇していく。図中の破線は試験体 C-5 の結果を通る評価式を逆算したものである。この評価式を用い、袖壁が負担している軸力を推定し表-5 に示した。C-5 に適合する評価式を用いた場合、袖壁つき試験体 3 体の変形能（縦軸）と一致する変形能が得られるコア軸力比を算出し、それを表-5 の(3)欄に示した(試験体 CSWTR-1 の場合は図-10 の点線の矢印参照)。この軸力比は計算上柱断面が負担しているはずの軸力比を意味し、従って、実際にかかる軸力との差(表-5 の(4)欄)が袖壁が負担していると考えて良い軸力となる。この袖壁が負担していると考えられる軸力を袖壁部分だけで軸力比にしたものが(5)欄である。すなわち、袖壁が健全である試験体 CSWTR-1 では、袖壁面積×コンクリート強度の 81%分の軸力を袖壁が負担していたと考えて良いことになる。

一方、(5)欄の()内には試験体 CSWTR-1 に対する比が示してあるが、面内加力より袖壁が損傷していた場合にはその効果が低下することがわかる。しかしながら、4.2 節で得られた袖壁長さの低減率である 0.5 よりは効果があり、4.2 節で示した方法を用いて低減率を求め、有効な袖壁長さを用いて袖壁が負担する軸力比を求めれば安全側となる。

袖壁が偏心してとりつく場合にはさらにその

表-5 袖壁が負担している軸力の推定

	(1) 袖壁全断面面積 (cm ²)	(2) コア軸力比	(3) 評価式に適合する コア軸力比	(4) 袖壁が負担した 軸力 (kN)	(5) 袖壁の軸力比 (CSWTR-1に 対する比)
CSWTR-1	150	0.73	0.43	317	0.81 (1.00)
CSWTR-2	150	0.74	0.48	274	0.70 (0.86)
CSWTR-3	150	0.74	0.54	211	0.54 (0.67)

効果が低減するが、それでも袖壁は 0.54 の軸力比を負担している。この効果の評価については今後の検討課題としたい。

5. まとめ

- (1)面内加力により袖壁が損傷している場合、健全な場合に比べ変形能は低下した。また袖壁の位置を比べると、今回の2体の試験体は最大耐力80%に低下した点はほぼ同じだったが、軸力負担能力喪失時変形は袖壁が中央にあるものが大きかった。
- (2)面内加力による袖壁無効領域は最大時歪度の2倍程度以上進んだ領域であった。今後のデータの蓄積が必要であるが、実際の設計や耐震診断では、より簡便で安全側の方法として、最大時歪を超えない部分を有効とするなどの方法が考えられる。
- (3)袖壁が健全な試験体では、袖壁は軸力比で0.81を負担していたと推定できた。袖壁に損傷がある場合は0.70となり、さらに、袖壁が偏心する場合は0.54となった。

参考文献

- [1] 加藤大介、大西幸一、大塚祐二、土井希祐：一定高軸力を受ける面外袖壁つきRC造柱の変形能評価実験、第23回コンクリート工学年次論文報告集23-3、2001年、pp.163-168
- [2] 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
- [3] 加藤大介：配筋法を考慮した鉄筋コンクリート柱の変形能の評価法、日本建築学会構造系論文報告集、第450号、1993年、8月、pp.81-88
- [4] 加藤大介、保坂敦史、大西幸一：曲げとせん断力を受けるRC造柱の軸力保持性能、第一回日本地震工学研究発表会・討論会梗概集、2001年11月、pp.271