# 論文 鉄筋コンクリート造袖壁・腰壁・垂れ壁付き柱梁部分架構の水平加力 実験

田尻 清太郎\*1

要旨:鉄筋コンクリート造袖壁・腰壁・垂れ壁付きラーメン架構の復元力特性に及ぼす袖壁の厚さ,袖壁の 取り付き方,袖壁端部縦筋位置の影響を検討するため,部分架構4体の水平加力実験を実施した。その結果, 腰壁・垂れ壁付き梁について,上柱に袖壁が取り付かない場合,危険断面は袖壁フェースから内側に入り, 特に腰壁圧縮側でその傾向は顕著であること,初期剛性は可撓長さを柱フェースまでとした計算値よりも小 さく,壁が早期にひび割れることによる曲げ剛性の補正を考慮する必要があること,腰壁圧縮側の最大強度 時割線剛性に袖壁の有無,端部縦筋位置が影響すること等が明らかとなった。 キーワード:剛性,剛域,可撓長さ,曲げ強度,危険断面

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下, RC)造建物に構造スリット を介さず袖壁・腰壁・垂れ壁を設置すると,建物の強度 を高めることができる。しかし,これらの壁が取り付く 架構の剛性,強度を精度よく評価することは現状の知見 では困難であり,評価法の確立が望まれている。

壁付架構の構造解析は,腰壁・垂れ壁付き梁,袖壁付 き柱を線材にモデル化し,それらの接合部の挙動を剛域 長さで調整する方法が最も簡便で実用的である。このよ うな架構の剛域の評価法に関してはいくらか先行研究<sup>®</sup> <sup>えば 1), 2) など</sup>があるものの統一的な評価法の確立には至っ ていない。本論では,この評価法の確立に資するため, 袖壁の厚さ,袖壁の取り付き方,袖壁端部鉄筋位置が袖 壁・腰壁・垂れ壁付きラーメンの復元力特性に及ぼす影 響を検討するため,4 体の部分架構試験体の水平加力実 験を行った。

#### 2. 実験概要

# 2.1 試験体

試験体は、文献 3のスリット無し試験体と同様に、梁

間方向1スパン,桁行方向多スパン,ベースシア係数0.6 以上のRC造6階建て共同住宅の廊下側構面を想定し, 梁をスパン中央,柱を窓開口の端部で切り出した袖壁・ 腰壁・垂れ壁付き柱梁部分架構である。

試験体数は4体で,縮尺は1/2である。基準試験体 No.1 に対し,壁厚を60 mm に,壁縦横筋を半分にした No.2 試験体,袖壁フェースから袖壁端部縦筋までの距離を35 mm から135 mm に変更することで危険断面位置が内側 に移動するか確認することを意図した No.3 試験体,上側 の袖壁付き柱から袖壁を取り除いた No.4 試験体である。 試験体一覧を表-1 に,各試験体の形状,配筋詳細を図 -1 に示す。

使用したコンクリートと鉄筋の材料特性をそれぞれ表 -2,表-3に示す。

#### 2.2 加力計画

試験体の加力は図-2 に示すような加力装置を用いた。 試験体の脚部をピン支持,両端部を水平ピンローラー支 持とし,頭部を水平ジャッキ,鉛直ジャッキにより加力 した。水平ジャッキを引く向きを正加力とした。鉛直ジ ャッキの上端は水平スライダーとした。

表-1 試験体一覧

			-								
⇒+#∻/+-	柱			河下	袖	袖壁端部					
武 驶 仲	幅×せい	主筋	帯筋	采	厚さ	縦横筋	端部筋	縦筋位置			
N 1					100	D6@100	D10				
INO.1			幅×せい:		mm	ダブル	ダブル	35			
NL Q		16-D16		$250 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$	60	D6@100	D10	mm			
INO.2	400 mm	(1.99%)	$\Box D10@100(0.30\%)$	主筋:	mm	シングル	シングル				
No 2	×400 mm			4/4-D16 (1.01%)				135			
No.3							あばら筋:	100	D6@100	D10	mm
No.4		16-D22	□D10@100 (0.36%)	□D10@100 (0.57%)	mm	ダブル	ダブル	35			
No.4		(3.87%)	目 D10@50 (1.43%)*					mm			
	3-4-1 A - 7										

\* 単独柱部分のみ

\*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻准教授 博士(工学) (正会員)



図-1 試験体配筋図

表-2 コンクリート材料特性

圧縮強度	圧縮強度時	ヤング係数	割裂強度
(MPa)	歪 (%)	(GPa)	(MPa)
34.8	0.186	27.5	3.05

表-3 鉄筋材料特性								
種類	降伏点*	降伏歪	ヤング係	引張強さ				
	(MPa)	(%)	数 (GPa)	(MPa)				
D6	340	-	184	523				
D10	346	0.195	185	495				
D16	389	0.204	197	566				
D22	457	0.247	194	639				

\*D6は0.2%耐力

水平加力は試験体の層間変形による正負交番漸増載荷 とし、目標変形は1/3200,1/1600,1/800,1/400,1/200, 1%,,2%,3%,4%で,1/200以降は2回繰返し加力とし た。また、鉛直ジャッキにより一定の圧縮力720kN(柱 断面に対する軸力比0.13)を載荷した。

# 2.3 計測計画

水平,鉛直ジャッキ,両端部の水平ピンローラーに取 り付けたロードセルにより軸方向の荷重を計測した。

柱梁接合部に固定した変位計測用フレームを用いて, 腰壁・垂れ壁付き梁,袖壁付き柱のたわみ $\delta_b$ ,  $\delta_c$ を計測 した。これらの計測たわみを用いて,試験体全体の層間 変形角を $R = \Sigma \delta_b / L + \Sigma \delta_c / H$ により算出した。ここで, L: 梁支点間距離(3,500 mm), H: 脚部ピン支点から頭



図-2 加力装置

部加力点までの高さ(2,000 mm)である。

腰壁,垂れ壁横筋の一部と梁主筋には,袖壁フェース 位置に歪ゲージを貼付した。また,袖壁縦筋の一部と柱 主筋にも腰壁フェース位置に貼付した。

# 3. 実験結果

# 3.1 破壊状況

各試験体の水平カー層間変形角関係を図-3 に,最大 耐力を迎えたサイクルである 1/100 ピーク時の損傷状況 を図-4 に示す。各試験体の破壊状況は次の通りであった。



# (1) No.1

1/3200 サイクルでは垂れ壁と袖壁,腰壁と袖壁の交差 部の入隅,梁の下端に曲げひび割れが発生した。1/1600 サイクルでは腰壁の曲げひび割れが梁付近まで伸展し, 梁上端に曲げひび割れが発生した。1/800 サイクルでは 腰壁,垂れ壁,梁の曲げひび割れが袖壁フェース位置よ り内側にも多数発生した。また,腰壁にせん断ひび割れ が発生した。1/200 サイクルでは袖壁フェース位置で圧 縮側腰壁の圧壊が見られた。1/100 サイクルでは最大耐 力 (R = +0.70%で484.5 kN, R = -0.83%で-457.5kN) に達 した後,耐力低下が見られた。腰壁の圧壊は進行し,腰 壁横筋の座屈も確認された。また,圧縮側垂れ壁の圧壊 も見られた。その後のサイクルでは、変形が大きくなる につれ,腰壁,垂れ壁の圧壊の進行,壁横筋の座屈の拡 大とともに緩やかに耐力低下した。

### (2) No.2

1/3200 サイクルでは垂れ壁, 腰壁に袖壁との交差部の 入隅付近に曲げひび割れが発生した。1/1600 サイクルで は腰壁, 垂れ壁の曲げひび割れ数が増大し, 梁にも曲げ ひび割れが発生した。1/800 サイクルでは腰壁, 垂れ壁, 梁の曲げひび割れが袖壁フェース位置より内側にも多数 発生した。正加力では南腰壁にせん断ひび割れが発生し た。1/400 サイクルでは負加力で北腰壁にせん断ひび割 れが発生した。1/200 サイクルでは袖壁フェース位置で 圧縮側腰壁, 垂れ壁の圧壊が見られた。1/100 サイクル では 1/200 サイクルの最大耐力(R = +0.50%で 324.5 kN, R = -0.50%で-319.5kN) を超えることなく耐力低下した。





図-4 1/100 ピーク時損傷状況

腰壁, 垂れ壁の圧壊は進行した。その後のサイクルでは, 変形が大きくなるにつれ, 腰壁, 垂れ壁の圧壊の進行, 壁横筋の座屈の拡大とともに緩やかに耐力低下した。

## (3) No.3

1/3200 サイクルでは垂れ壁と袖壁,腰壁と袖壁の交差 部の入隅,梁の下端に曲げひび割れが発生した。1/1600 サイクルでは腰壁の曲げひび割れが梁付近まで伸展し, 負加力では南梁上端に曲げひび割れが発生した。1/800 サイクルでは腰壁,垂れ壁,梁の曲げひび割れが袖壁フ ェース位置より内側にも多数発生した。1/400 サイクル



では腰壁にせん断ひび割れが発生した。1/200 サイクル では袖壁フェース位置で圧縮側腰壁, 圧縮側垂れ壁の圧 壊が見られた。+1/100 サイクルでは最大耐力(R = +0.85% で 475.0 kN)に達した後, 耐力低下が見られた。-1/100 サイクルでは-1/200 サイクルの最大耐力(R = -0.50%で -453.5 kN)を超えることなく, 耐力低下した。腰壁・垂 れ壁の圧壊は進行し, 腰壁横筋の座屈も確認された。腰 壁の圧壊領域は No.1 に比べ, 袖壁フェース位置より内側 に拡大した。その後のサイクルでは, 変形が大きくなる につれ, 腰壁, 垂れ壁の圧壊の進行, 壁横筋の座屈の拡 大とともに緩やかに耐力低下した。

#### (4) No.4

1/3200 サイクルでは垂れ壁と袖壁の交差部の入隅に曲 げひび割れが発生した。正加力では柱フェース位置で腰 壁の曲げひび割れが発生した。1/1600 サイクルでは,袖 壁フェース位置に腰壁の曲げひび割れが発生した。垂れ 壁には,袖壁フェース位置より内側にも曲げひび割れが 発生した。1/800 サイクルでは腰壁,梁にも袖壁フェー ス位置より内側の曲げひび割れが多数発生した。1/400 サイクルでは腰壁にせん断ひび割れが発生し,腰壁フェ ース位置付近で上柱に曲げひび割れが発生した。1/200 サイクルでは上柱は梁フェース位置まで曲げひび割れ位 置が拡大し,せん断ひび割れも発生した。1/100 サイク ルでは,柱フェース位置で圧縮側腰壁の圧壊,腰壁横筋 の座屈が見られた。正加力では袖壁フェース位置で北垂 れ壁の圧壊が見られた。最大耐力 (R=+0.78%で 423.5 kN, R=-0.78%で-391.5kN) に達した後,耐力低下が見られた。





その後のサイクルでは、変形が大きくなるにつれ、腰壁、 垂れ壁の圧壊の進行、壁横筋の座屈の拡大とともに緩や かに耐力低下した。

#### 3.2 部材の復元力特性

腰壁・垂れ壁付き梁のたわみを L/2 で除して部材角を 求め、支点反力を梁せん断力とし、両梁のせん断力-部 材角関係を図-5 に示す。ここで、せん断力は腰壁が引 張側となる向きを正としている。図-6 には、最大耐力 に到達した 1/100 サイクルまでの正加力ピーク時におい て、梁、柱の変形が全体変形に占める割合を示す。なお、 No.2, No.3 試験体は No.1 試験体とほぼ同様の傾向であ

ったため, No.1, No.4 試験体のみ示している。最大耐力 時には両梁とも最大耐力に達しており,柱に比べ変形も 大きい。また,最大耐力時には一部の袖壁端部縦筋を除 き,袖壁縦筋,柱主筋は降伏していないことから,いず れの試験体も崩壊形は両梁端の曲げ破壊と判断した。 図-5 において,正加力時のせん断力は北梁が正,南梁が負である。各試験体の北梁の正側,南梁の負側の骨格曲線を 1/100 サイクルまで描いたものを図-7 に示す。本図より,1/3200 サイクルの低荷重時から求めた初期剛性,最大強度,最大強度時たわみ,最大強度時割線剛性を表-4 に示す。

#### 4. 考察

## 4.1 腰壁・垂れ壁付き梁の曲げ強度

平面保持を仮定した断面解析により求めた腰壁・垂れ 壁付き梁の曲げ強度を梁支点から袖壁フェースまでの距 離で除したせん断力(袖壁フェースを危険断面と仮定し た場合の曲げ強度時せん断力)を表-5に示す。ここで, コンクリートの圧縮応力歪関係は,表-2に示した圧縮 強度をfc,圧縮強度時歪を $\varepsilon_c$ ,ヤング係数を $E_c$ とし図-8に示す通りモデル化し,引張側は原点における接線を 剛性とし,割裂強度まで線形の応力歪関係を用いた。鉄 筋の応力歪関係は表-3に示す降伏点を $f_y$ ,降伏点を $\varepsilon_y$ , ヤング係数を $E_s$ とし図-8に示す通りモデル化した。な お、D6については,明確な降伏棚がないため,材料試験 による応力歪関係に適合するよう $f_y = 329$  MPa,  $\varepsilon_y =$ 0.178%,  $E_y = 4.97$  GPa としてモデル化した。図-8には, コンクリートおよび D6 の材料試験結果も破線で併せて 示す。

No.3 の曲げ強度時せん断力実験値は, No.1 の 0.98~ 0.99 である。ところで, No.1 と No.3 の梁支点から袖壁端部縦筋までの距離の比は 0.92 であり, 危険断面位置と 袖壁端部縦筋位置は対応していない。

No.4 実験値は No.1 に対し, 腰壁引張側で 0.95, 腰壁 圧縮側で 0.82 となり, いずれも危険断面位置が袖壁内側 となっている。特に, 圧縮側となる壁に袖壁が取り付か ない場合にその傾向が顕著である。なお, 梁支点から柱 フェースまでの距離 1550 mm に対する袖壁フェースま での距離 1150 mm の比は 0.74 であり, 柱フェースを危 険断面位置と考えると小さすぎる。

No.1 について,実験値と断面解析値を比較すると,腰 壁引張側では 1.08,腰壁圧縮側では 0.94 である。また, No.2 については,それぞれ 0.98, 0.87 で,両方向とも基 準試験体に比べ,断面解析値は実験値を過大評価する。 No.1 と No.2 の損傷状況からは危険断面位置に明確な差 は見られず,また,腰壁圧縮側で過大評価することから, 圧縮側の壁が長く,また薄い場合には断面解析値は過大 評価する傾向があるといえる。

# 4.2 腰壁・垂れ壁付き梁の初期剛性

式(1)で計算した腰壁・垂れ壁付き梁の初期剛性を表-



図-7 腰壁・垂れ壁付き梁骨格曲線



表-4 梁復元力特性值一覧

試験体	最大強	度 (kN)	初期剛性 (kN/mm)		最大強度時たわみ (mm)		最大強度時剛性 (kN/mm)	
	腰壁引張	腰壁圧縮	腰壁引張	腰壁圧縮	腰壁引張	腰壁圧縮	腰壁引張	腰壁圧縮
No.1	216	343	175	148	12.8	10.7	16.9	31.9
No.2	140	238	90	89	9.70	7.33	14.4	32.5
No.3	213	337	170	127	15.9	13.4	13.4	25.1
No.4	204	282	170	141	12.3	10.5	16.6	26.9

# 表-5 腰壁・垂れ壁付き梁の曲げ強度時せん断力(実験値・解析値)

試験体	実験値	1 (kN)	実験值/No.1 実験値		断面解机	f值 (kN)	実験値/断面解析値	
	腰壁引張	腰壁圧縮	腰壁引張	腰壁圧縮	腰壁引張	腰壁圧縮	腰壁引張	腰壁圧縮
No.1	216	343	1.00	1.00	199	364	1.08	0.94
No.2	140	238	0.65	0.69	143	273	0.98	0.87
No.3	213	337	0.99	0.98	199	364	1.07	0.92
No.4	204	282	0.95	0.82	199	364	1.02	0.77

	実験値 (kN/mm)				計算値	(kN/mm)	実験値/計算値		実験値/計算値	
試験体			実験値/No	o.1 実験値	袖壁	柱	(袖壁フェース)		(柱フェース)	
	腰壁引張	腰壁圧縮	腰壁引張	腰壁圧縮	フェース	フェース	腰壁引張	腰壁圧縮	腰壁引張	腰壁圧縮
No.1	175	148	1.00	1.00	366	175	0.48	0.40	1.00	0.85
No.2	90	89	0.51	0.60	249	118	0.36	0.36	0.76	0.76
No.3	170	127	0.97	0.86	366	175	0.46	0.35	0.97	0.73
No.4	170	141	0.97	0.95	366	175	0.46	0.38	0.97	0.81

表-6 腰壁・垂れ壁付き梁の初期剛性

**6**に示す。

$$K = \left(\frac{l^3}{3EI} + \frac{\kappa l}{GA}\right)^{-1} \tag{1}$$

ここで, I: 梁支点から袖壁または柱フェースまでの長 さ, E: ヤング係数, I: 断面二次モーメント, G: せん 断弾性係数,  $A/\kappa$ : せん断有効断面積である。

No.1 について,可撓長さを梁支点から袖壁フェースま でとした場合の初期剛性計算値 366 kN/mm に対し,実験 値は非常に小さい。これは袖壁部分を剛域とみなしてい ることが一因である。そこで,可撓長さを梁支点から柱 フェースまでとした場合の初期剛性計算値を求めると 175 kN/mm となる。腰壁引張側では実験値と同程度とな るが,腰壁圧縮側では実験値の比が 0.85 と小さい。No.3, No.4 でも同様の傾向が見られる。

#### 4.3 腰壁・垂れ壁付き梁の最大強度時割線剛性

壁状部材の復元力特性は鉄筋が徐々に降伏した後最大 強度に達し、その後強度低下することが多く、このよう な復元力特性の部材をモデル化する際には最大強度点を 骨格曲線の特性点の一つとすることも考えられる。そこ でここでは最大強度時割線剛性に着目し考察する。

図-7より,腰壁引張側では,No.1,3,4の最大強度 付近の骨格曲線は概ね同じである。最大強度はほぼ同一 であるが,最大強度時たわみの差により最大強度時剛性 の差が生じている。No.3 は No.1 の 0.8 となっており, No.4 は No.1 とほぼ同じである。No.2 は最大強度が小さ いが,最大強度時たわみもやや小さく,結果として No.1 の 0.85 であった。

腰壁圧縮側では,各試験体の骨格曲線は明確に差が見 られる。No.1 に対し, No.2 は最大強度,最大強度時たわ みとも小さく,結果として最大強度時剛性はほぼ同一で あった。また, No.3 は No.1 と最大強度はほぼ同じであ るが,最大強度時たわみが大きく,結果として最大強度 時剛性は 0.79 となった。これは腰壁圧壊領域が袖壁フェ ースより内側に大きく入り込んでいたことが一因と考え られる。No.4 は最大強度時たわみが No.1 とほぼ同じで あるが,最大強度が小さく,最大強度時剛性は No.1 の 0.84 となっている。危険断面,可撓長さとも No.1 に対し 袖壁フェースから内側となったことが要因と考えられる。

# 5. まとめ

袖壁の形状,配筋を変数とした RC 造袖壁・腰壁・垂 れ壁付き柱梁部分架構の水平加力実験を行い,腰壁・垂 れ壁付き梁の復元力特性に関して以下の知見を得た。

- (1) 上柱に袖壁が取り付かない場合、危険断面は袖壁フ ェースから内側に入り、特に腰壁圧縮側でその傾向 は顕著であった。また、袖壁フェースから袖壁端部 縦筋の距離を大きくしても危険断面位置の変化はわ ずかであり、端部縦筋位置と危険断面位置は対応し なかった。
- (2) 初期剛性の実験値は可撓長さを袖壁フェースまでとした計算値に対し 0.35~0.48 と小さかった。また、可撓長さを柱フェースまでとした計算値と比較すると、腰壁引張側では同程度であったが、腰壁圧縮側では 0.8 程度であった。袖壁部分を剛域とみなすと初期剛性を過小評価することとなる。
- (3) 腰壁圧縮側の最大強度時割線剛性について、袖壁フェースから袖壁端部縦筋までの距離が大きい場合、 最大強度時たわみが大きくなるため小さくなった。 また、上柱に袖壁が取り付かない場合、最大強度が 小さくなることで小さくなった。壁厚が小さい場合、 最大強度、最大強度時たわみとも小さくなり、結果 としてほぼ同じ剛性となった。

#### 謝辞

本研究は,科研費(研究課題番号:25709050)による 成果である。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 大久保全陸:腰壁,たれ壁,袖壁付き鉄筋コンクリ ート骨組の剛性,強度,および履歴特性に関する研 究,日本建築学会論文報告集,第186号,pp.19-25, 1971.8
- 野村設郎ほか:腰壁・たれ壁・袖壁付きラーメンの 剛性と耐力,日本建築学会大会学術講演梗概集,構 造系,pp.1441-1442, 1978.9
- 田尻清太郎ほか: RC 造雑壁付き部分架構の水平加 力実験,日本建築学会大会学術講演梗概集,構造 IV, pp.29-30, 2013.8