# 論文 袖壁が低強度コンクリート柱の耐震性能に与える影響

荒木 秀夫\*1·宫原 憲之\*2

要旨:本研究は既存 RC 建物における耐震性能評価に関して丸鋼を主筋とし袖壁を有する低強度コンクリート柱部材の抵抗機構の解明を目的としている。本論文は袖壁の性能が袖壁付柱の耐震性能に与える影響を調べるために実施した壁配筋,壁厚を変動因子とする実験を内容とするものである。ひび割れ性状,荷重変形関係,主筋のひずみ性状を検討し,低強度コンクリート袖壁付柱の抵抗機構を明らかにするとともに,最大耐力について昨年度提案した評価式を適用し,推定可能であることを確認した。

キーワード:既存建物,低強度コンクリート,柱部材,袖壁,丸鋼,付着性能,耐力評価

# 1. はじめに

本研究は既存 RC 建物における耐震性能評価に関して 丸鋼を主筋とし袖壁を有する柱部材の抵抗機構の解明 を目的とするものである。特に診断時にしばしば問題と なる設計基準強度を大幅に下回り, 耐震診断基準 1)適用 下限値13.5N/mm<sup>2</sup>以下の低強度コンクリートを対象とし ている。袖壁は柱部材の強度上昇に寄与する半面, せん 断破壊による靭性能の低下が問題となる。また、丸鋼を 柱主筋とする場合は鉄筋が抜け出す付着割脱破壊<sup>2)</sup>によ り、部材端部におけるコンクリートの圧壊が先行するこ とや、低強度コンリートとなる場合はその傾向が更に顕 著であることも報告されている<sup>3)</sup>。筆者等はこのような 部材の破壊メカニズムを明らかにするためにコンクリ ート強度、軸力比、柱帯筋および壁の取りつき方を変数 とする曲げ・せん断実験を実施した<sup>4)</sup>。その結果,せん 断耐力評価に関し、現行の耐震診断式<sup>1)</sup>は概ね適切な評 価ができる結果となったが、耐震診断式は実際の抵抗機 構を反映したものではないため, 主筋の付着レベルによ って部材のトラス機構を低減する柱のせん断耐力と袖 壁のせん断耐力の累加による耐力評価方法を提案し、適 切に耐力評価できることを確認した。しかしながら、こ の実験では袖壁の条件はすべて同一であり、袖壁の構造 詳細が袖壁付き柱に与える影響が検討できなかった。本 研究では,壁横補強筋量および袖壁の厚さを変数として 袖壁付柱試験体を作製し,曲げ・せん断試験を行い,主 筋に丸鋼を用いた低強度コンクリート柱の耐震性能に 与える影響とともに,既往の評価式の適合性についても 検討した。

#### 2. 実験概要

### 2.1 試験体

柱断面は 300×300mm,内法高さが 900mm (シアスパ ン比 1.5)を共通事項とし、両側袖壁付き柱を 4 体作製 した。試験体一覧を表-1 に示す。同表中に示す昨年度 基準試験体 (LS30-15W2)とは軸力比 (0.3),コンクリー ト強度 (Fc9),柱主筋,帯筋を共通とした。試験体形状 及び配筋,ひずみ測定位置を図-1 に例示する。軸力比 は実圧縮強度を基準に設定した。いずれの試験体も付着 劣化を考慮しない現行の評価式によってせん断破壊先 行型に設計した。昨年度の袖壁断面は 75mm×200mm, 横筋を D6@100 シングル共通としたが,袖壁の破壊性状 はほぼ同様であり,袖壁柱の性能も,壁配置以外は大き な相違はなかった。そこで本論文では袖壁の構造詳細が 袖壁付柱の抵抗機構に与える影響を調べるために壁横

		ᆉᄣᆓ		エノドニフ	柱		袖壁		
試験体	軸力比 <i>η</i>	產動面 b×D [mm]	コンクリー ト強度 F。 [MPa]	せん断入 パン比 M/QD	主筋	帯筋	縦筋	横筋	壁厚 t [mm]
LS30-15W2	0.3	300× 3 300	9	1.5	8-13φ SR235	2-D6 @140 SD295A	D6@100 シングル	D6@100 シングル	75
LS30-15W2-SL								D6@200 シングル	
LS30-15W2-SH								D6@50 シングル	
LS30-15W2-TL								DC@100	50
LS30-15W2-TH								D8@100 92972	100

表-1 試験体一覧

 $\eta:\mathsf{N}$ /(bDF<sub>c</sub>), N:載荷軸力, b:柱幅, D:柱せい

\*1 広島工業大学 工学部教授 工博 (正会員)

\*2 広島大学大学院 工学研究科 大学院生



図-1 試験体形状及び配筋、ひずみ測定位置

補強筋量および壁厚を実験因子とし、壁横筋間隔を 50, 200mmの2種類, 壁厚を50, 75, 150mmの3種類用意 した。試験体名は LS30-15W2 を共通とし、SL: 壁横筋 比が少ないタイプ,SH:壁横筋比が多いタイプ,TL: 壁厚が薄いタイプ,TH:壁厚が厚いタイプである。壁縦 筋は各試験体共通としスタブ内に定着した。壁横筋は柱 内通し配筋とした。

### 2.2 材料特性

使用するコンクリートは目標圧縮強度を 9MPa とし, 水セメント比は 110%とした。圧縮試験による実強度は 9.7MPa であった。なお、昨年度試験体の圧縮強度は幾分 高く 12.2MPa であった。コンクリートの調合計画は前報 <sup>2)</sup>の Fc9 と同様であるため割愛する。なお、打設時の材 料分離を抑制するために、混和剤として高性能 AE 減水 剤を使用している。コンクリート及び鉄筋の材料試験結 果を表-2に示す。

### 2.3 載荷方法·測定項目

載荷方法及び計測項目は前報3)と同様とし、壁補強筋 および柱主筋のひずみをひずみゲージで測定し、局所お

	表一2 材料の力学的特性				
呼び強度	養生条件	圧縮強度 [MPa]	割裂強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]	
Fc9	現場封緘	9.7	1.34	19.17	
鉄筋種類	降伏強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]	引張強度 [MPa]	降伏 ひずみ [µ]	
13 <i>¢</i>	342.22	197.6	444.1	1732	
D6	375.8	171.9	517.9	2199	

材料の力学的特性

よび全体変形を変位計で計測している。

# 3. 実験結果

### 3.1 ひび割れ性状

写真-1 に各試験体の部材角 R=1/33rad.の1回目加力 後のひび割れ性状を示す。いずれの試験体もこの部材角 に至る過程で最大耐力の80%時となる限界変形角を記録





LS30-15W2-SL



LS30-15W2-SH



LS30-15W2-TL

LS30-15W2-TH 写真-1 ひび割れ性状

している。全ての試験体において部材角 R=1/400rad.まで に柱・袖壁とスタブ境界面に曲げひび割れが発生し、部 材角 R=1/200rad.までに柱と袖壁境界付近にせん断ひび 割れが発生した。壁横補強筋の少ない LS30-15W2-SL は 袖壁の上下端部を中心にせん断ひび割れが発生し、その 後, 壁縦筋沿いに付着割裂と思われるひび割れが進展し た。最終的には袖壁が柱と分離し、柱のせん断ひび割れ は拡大することなく袖壁上下端部が圧壊して崩壊形と なった。壁横補強筋の多い LS30-15W2-SH は袖壁の縦壁 筋に沿ったひび割れや柱部分にせん断ひび割れが発生 するが,その後,両側の袖壁上下端部の圧壊が進行して 最終に至る。柱上下端部の圧壊は壁横筋の少ない LS30-15W2-SL ほど著しくなく、むしろせん断ひび割れ 幅が大きくなる傾向にある。この試験体の破壊性状が昨 年度の基準試験体の破壊性状と最も類似している。壁厚 の薄いLS30-15W2-TLは部材角 R=1/50rad.の時点で袖壁, 柱の全断面にせん断ひび割れが多く発生している。しか し、その後それらのせん断ひび割れは拡大することなく 袖壁の上下端部の圧壊が進行して最終に至る。壁の付着 割裂ひび割れは片側の袖壁に見られるものの進展する ことはない。袖壁は最後まで柱部分と分離することはな いが、袖壁上下部分が圧壊により喪失するので最終的に は独立柱の抵抗性状に近づく。壁厚が厚い LS30-15W2-TH は部材角 1/100rad.までに両袖壁および柱 にせん断ひび割れが発生した。袖壁上端部コンクリート の圧壊はそれほど顕著でない。最終的には片側の袖壁が 壁筋によって割り裂かれる形となり、袖壁の損傷が激し い。また、せん断ひび割れ幅は部材角が増大しても拡大 することはない。いずれの試験体とも最終的には袖壁が 圧壊し、柱部分の曲げひび割れが主筋の抜け出しととも

に拡大し, せん断ひび割れは発生するものの進展しない。 崩壊形は付着滑脱破壊後の袖壁圧壊と考えられる。

#### 3.2 せん断カー部材角関係

図-2 に各試験体のせん断力部材角関係を示す。同図 中に昨年度試験体 LS30-15W2 を参考のために再掲する。 また,図中に曲げ耐力計算値および耐震診断基準<sup>1)</sup>によ るせん断耐力を示す。LS30-15W2 の最大耐力は 236.6kN となり,その直後に主筋が降伏し,部材角 R=1/37rad.で 限界変形を迎えた。壁筋の多い LS30-15W2-SH の最大耐 力は 233.6kN であり,壁筋の少ない LS30-15W2-SL の約 1.2 倍となったが,耐力低下は大きく限界変形は部材角 R=1/46rad.で限界変形を迎えた。壁厚の大きい LS30-15W2-TH の最大耐力は 258.2kN となり, LS30-15W2-TH の最大耐力 203.2kN に比べ 1.27 倍となっ た。限界変形は部材角 R=1/41rad.となったが,袖壁の損 傷拡大に伴い部材角 R=1/25rad.で耐力が急激に低下した。

いずれの試験体も最大耐力はせん断耐力計算値を上 回っている。ループ特性はスリップ形状が支配的であり, 柱主筋の抜け出しによるものと考えられる。

図-2の最後に本年度実施した4試験体の包絡線を示す。すべての試験体において部材角R=1/100rad.で最大耐力に達している。壁厚の大きなLS30-15W2-TH以外は同程度の耐力低下度合いを示している。

### 3.3 主筋のひずみ分布

図-3 に各試験体の主筋ひずみゲージにおける正側加 力時のひずみ性状を示す。主筋位置は図-1 に示す Cb におけるひずみ性状で,同図中の破線は主筋の降伏ひず み(1731.6µ),を示している。また,同変形で繰返し加 力した場合は一回目の分布を示している。





図-3 柱主筋のひずみ分布

すべての試験体において部材角 R=1/200rad.までに試 験体全長にわたり主筋は引張状態になり,主筋が抜け出 していることが分かる。また,主筋の降伏は一部を除き 最終変形まで見られない。壁横筋の少ない LS30-15W2-SL のひずみは他の試験体に比べ小さくなっ ている。これは袖壁が早期に分離し,袖壁そのものが圧 壊して,柱の有効せいが独立柱に近くなるため主筋の負 担が小さくなったためと考えられる。逆に壁横筋の多い ものや壁厚の大きな試験体は袖壁端部が損傷を受けに くく圧縮力を負担し続けるため,柱の等価な有効せいが 小さくならず鉄筋に大きな引張力が働くと考えられる。 3.4 変動因子

# ①壁横筋比の影響

図-4.1 に壁厚が同じで壁横筋量を変動因子とする試 験体の包絡線を示す。壁筋の最も少ない LS30-15W2-SL が D6@200, 昨年度の基準試験体 LS30-15W2 が D6@100 であり, LS30-15W2-SH が D6@50 である。壁筋に換算 するとそれぞれ 0.19%, 0.38%, 0.75%である。最大耐力 および剛性低下度合いは LS30-15W2 と LS30-15W2-SH でほぼ同じである。現行の建築学会 RC 規準<sup>5)</sup> に示され る耐力評価にも壁筋比 0.6%の限界値が示されているよ うに, 袖付柱の壁筋量の耐力上昇寄与には上限があるこ とが考えられる。

### ②壁厚の影響

図-4.2 に壁横筋量が同じで壁厚を変動因子とする試 験体の包絡線を示す。壁厚の最も厚いLS30-15W2-THが 100mm で、昨年の基準試験体LS30-15W2 が 75mm,壁 厚の最も薄いLS30-15W2-TL が 50mm となっている。こ の包絡線には壁厚の影響が明瞭に読み取れる。最大耐力 が最も高くなる理由については壁厚が厚いと袖壁先端 部の圧縮領域が広くなり,相対的に部材せいが大きくな ることが考えられることと,柱と袖壁の境界部に発生す る縦せん断に対してコンクリート断面が大きいためせ ん断抵抗力が増大したと考えられる。以上のような抵抗 機構は袖壁長さとも関連していると考えられ,今後の検 討が必要と思われる。



試験体名	実験値		袖壁を考慮した 曲げ略算式		袖壁を考慮した せん断耐力計算値(耐震診断式)	
	最大耐力 [kN]	限界変形角 [×10 <sup>-3</sup> rad.]	計算値[kN]	実/計	計算値[kN]	実/計
LS30-15W2	236.6	2.23(1/45)	284.0	0.83	198.7	1.19
LS30-15W2-SL	195.2	2.67(1/37)	240.1	0.81	150.1	1.30
LS30-15W2-SH	233.6	2.40(1/42)	240.1	0.97	170.3	1.37
LS30-15W2-TL	203.2	2.16(1/46)	230.5	0.88	153.3	1.32
LS30-15W2-TH	258.2	2.46(1/41)	248.2	1.04	161.7	1.60

表-3 最大耐力等一覧

### 4. 考察

### 4.1 最大耐力および限界変形角

表-3 に最大耐力および限界変形角の実験値を示す。 最大耐力については壁筋量や壁厚の変動因子の影響が 明瞭にみられるが,限界変形角についてはそれほど大き な差異は見られない。また,同表中に既往の評価式を用 いて求めた袖壁を考慮した曲げ耐力計算値とせん断耐 力計算値を示す。

これらの推定式は耐震診断基準<sup>1)</sup>に示されるもので袖 壁を有する柱を等価断面に置換して求めたものである。 曲げ耐力計算値は主筋降伏を仮定している。なお,せん 断耐力には低強度コンクリートに対する低減係数とし て式(1)に示す山本らの提案する kr<sup>6</sup>を考慮している。

 $kr = 0.244 + 0.056\sigma_B$ 

(1)

**σ**<sub>B</sub>: コンクリート強度[N/mm<sup>2</sup>]

いずれの試験体もせん断破壊先行型に設計している のも拘わらず最大耐力はせん断耐力計算値を大幅に上 回っている。むしろ曲げ耐力計算値に近くなる傾向にあ る。壁厚の大きい LS30-15W2-TH はせん断耐力計算値を 6割も上回っている。最大耐力が上昇する原因の一つは, 柱,袖壁にせん断ひび割れが発生するものの主筋の抜け 出すことにより抵抗機構がアーチ機構に移行し,柱全体 としてのせん断強度が上昇したものと考えられる。

このように考えると付着滑脱をおこす丸鋼を用いた 部材に対して既往の評価式はこのような部材の抵抗機 構を反映していないと考えられる。本論文では昨年同様、 南<sup>70</sup>らの提案した柱と袖壁を分離し,柱が負担するせん 断力と袖壁が負担するせん断力を累加する式(2)を用い て耐力評価することとする。

 V<sub>u</sub>=V<sub>u1</sub>+V<sub>u2</sub>
 (2)

 V<sub>u1</sub>:柱が負担するせん断力[N]

 V<sub>u2</sub>:袖壁が負担するせん断力[N]

柱が負担するせん断力は付着力を考慮しせん断終局 強度式により耐力を評価する。この式は根ロ等<sup>8)</sup>による 付着力を考慮したアーチ・トラス理論式を基にコンクリ ートの付着力が十分である場合にも対応するよう拡張 した独立柱のせん断耐力評価式である。式(3)にトラスと アーチの累加式を示す。

$$V_{u1} = V_t + V_a \tag{3}$$

$$V_t = \min\left\{\Sigma(\tau_b \cdot \psi) j_t, 2 \cdot b \cdot j_t \cdot p_w \cdot \sigma_{wy}\right\}$$
(3-1)

$$V_a = \left\{ v \cdot \sigma_B - \frac{2.5V_t/j_t}{b} \right\} \frac{b \cdot D}{2} \tan \theta$$
 (3-2)

$$\tan\theta = \sqrt{\left(L/D\right)^2 + 1} - L/D \tag{3-3}$$

$$\nu = 0.7 - \sigma_B / 200 \tag{3-4}$$

σ<sub>B</sub>≦13.5 のとき*v*=1.0

 $j_t$ :引張鉄筋と圧縮鉄筋の中心間距離[mm]

 $L: 柱 クリアスパン長さ[mm] p_w: せん断補強筋比$ 

*V<sub>i</sub>*, *V<sub>a</sub>*: 付着を考慮したトラス,アーチ機構分担分[N]
 *ψ*: 鉄筋周長[mm] *v*: コンクリート圧縮強度の有効係数

 $\sigma_{wy}$ : せん断補強筋の降伏強度[N/mm<sup>2</sup>]

 $\tau_b$ : 丸鋼の許容付着応力度 $[N/mm^2]$ 

 $(=\min(0.09\sigma_B, 1.98))$ 

ただし低強度コンクリート部材に関して最大耐力時 の部材角 R=1/100rad.あたりではせん断ひび割れが微小 であり、コンクリート自体が損傷を受けないことから、 コンクリート圧縮強度の有効係数vを 1.0 としている。 袖壁の耐力については文献<sup>9</sup>に示されるアーチ・トラス 機構に基づいた耐震壁のせん断強度式により算出した。 式(4)に袖壁の耐力評価式を示す。

$$V_{u2} = t_w \cdot l_{wb} \cdot p_s \cdot \sigma_{sy} \cdot \cos\phi + \tan\theta (1 - \beta) \cdot t_w \cdot l_{wa} \cdot v \cdot \sigma_B / 2$$
(4)

$$\tan \theta = \sqrt{\left(h_w/l_{wa}\right)^2 + 1} - h_w/l_{wa}$$
(4-1)

$$\beta = \left(1 + \cos^2 \phi\right) \cdot p_s \cdot \sigma_{sy} / (\nu \cdot \sigma_B)$$
(4-2)

$$v = 0.7 - \sigma_B / 200 \tag{4-3}$$

ここで

*σ<sub>sy</sub>*: 壁板のせん断補強筋強度[N/mm<sup>2</sup>] (≦400N/mm<sup>2</sup>)

 $t_w$ : 壁板の厚さ[mm]  $p_s$ : 壁板のせん断補強筋比  $\phi$ : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度 ( $cos\phi$ =1)  $h_w$ : 壁高さ[mm] v: コンクリート圧縮強度の有効係数  $l_{wb}l_{wg}$ : トラス機構及びアーチ機構の等価壁長さ[mm]

表-4 に提案式との比較を示す。耐震診断基準および 低減係数を考慮した推定式より精度の向上が見られた。 しかし,壁横補強筋の多い,LS30-15W2-SH を除き低め の評価となっている。

		提案式			
試験体名	実験値[kN]	計算値 [kN]	実/計		
LS30-15W2	236.6	210.2	1.13		
LS30-15W2-SL	195.2	153.5	1.27		
LS30-15W2-SH	233.6	234.7	1.00		
LS30-15W2-TL	203.2	168.3	1.21		
LS30-15W2-TH	258.2	194.4	1.33		

表-4 提案式との比較

既往の研究<sup>10-13)</sup>における主筋に丸鋼を用いた袖壁付 き柱の実験値との適合性について検討した。図-5 に袖 壁を考慮した耐震診断式及び提案式について実験値と 計算値の比較を示す。平均値は耐震診断式,提案式とも 1.02 であるが,変動係数はそれぞれ 30%, 18%となる。 本提案により,耐力を比較的適切に評価できていると考 えられる。



#### 5. まとめ

本研究では、実験因子を壁横筋量および壁厚とし、主 筋に丸鋼を用いた袖壁付き低強度コンクリート柱の曲 げ・せん断性能を柱部材実験により検証し、本実験の範 囲において以下のことがわかった。

(1)いずれの試験体も丸鋼の付着滑脱破壊が先行し,水平 変形の増大とともに袖壁上下端部の圧壊が支配的な崩 壊形となる。

(2)袖壁の壁横筋量によって袖壁・柱間のせん断ひび割れ 後もせん断伝達が可能となり最大耐力の上昇に寄与す る。ただし、その影響にも限界値がある。

(3)壁厚さは袖壁と柱の境界部分のせん断ひび割れ発生 を抑制し、袖壁先端部の圧縮領域拡大によって最大耐力 が上昇する。

(4)耐震診断基準のせん断耐力評価式は耐力を低めに評価する。

(5)付着力を考慮した柱のせん断耐力式と、袖壁が負担す るせん断力式の累加により、せん断耐力を適切に評価で きることを明らかにした。

#### 謝辞

本研究は広島大学工学部大型強度試験室で行った。ま た,実験実施にあっては広島大学大学院の学生諸君の協 力を得た。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 日本建築防災協会:2001 年改訂版既存鉄筋コンクリ ート建築物の耐震診断基準・同解説,2001.1
- 2) 広沢雄也:鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究(その49:破壊モードについて),日本建築学会大会学術講演梗概集,構造,pp.1509-1510,1977.10
- 伊木勇人,松井剛ほか:丸鋼を用いた低強度コンク リート柱の耐震性能評価,コンクリート工学年次論 文集,pp.889-894,2010
- 4) 荒木秀夫,家形徹,宮原憲之:丸鋼を用いた袖壁付 き低強度コンクリート柱の耐震性能評価,コンクリ ート工学年次論文集,pp.145-150,2012
- 5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同 解説,2010
- 6) 山本泰稔:低強度コンクリート構造に関する調査・研究,第30回建築士事務所全国大会埼玉大会分科会, 地震と補強ー耐震改修における低強度コンクリートの問題点,pp.77-91,2005.9
- 若林寛,南宏一:袖壁付き柱の終局耐力の評価法に 関する基礎的研究,京大防災研究所年報,第28号B-1, pp.1-15, 1985.4
- 8) 根口百世,南宏一:低強度コンクリート部材の耐震 性能評価に関する基礎的研究(その9),日本建築学 会大会学術講演梗概集,pp.643-644,2010.9
- 9) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度 型耐震設計指針・同解説, 1990
- 10) 芳村学,中村孝也ほか:丸鋼を用いた袖壁付き低強 度コンクリート柱の崩壊実験,日本建築学会大会学 術講演梗概集(九州) 2007,8
- 11) 芳村学,中村孝也ほか:古い鉄筋コンクリート柱の 耐震性に及ぼす袖壁の影響;日本建築学会構造系論 文集 第73巻 第633号,2001-2008,2008,11
- 12)東洋一,大久保全陸:鉄筋コンクリート袖壁付き柱の逆対称繰返し加力実験(その1:せん断補強筋の少ない場合)日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 1972,10
- 13) 東洋一,大久保全陸:鉄筋コンクリート袖壁付き柱の逆対称繰返し加力実験(その1:壁厚の異なる場合,袖壁を付加して補強する場合)日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) 1973,10