

論文 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

荒木 秀夫*1・家形 徹*2・宮原 憲之*3

要旨: 本研究は主筋に丸鋼を用いた袖壁付き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た載荷実験を内容とするものである。袖壁付き普通強度コンクリート柱試験体では付着滑脱は起こすもののその後せん断破壊したが、低強度コンクリート柱は付着滑脱破壊した。得られた最大耐力について現行の耐力評価式及び付着を考慮した終局強度式との適合性を検証し、主筋の付着力のレベルによって部材のトラス機構を低減するせん断耐力式と壁の耐力評価式の累加による耐力評価法を提案した。また既往の研究結果から提案式の検証を行い、良好な結果を得た。

キーワード: 既存建物, 低強度コンクリート, 極短柱, 丸鋼, 付着性能, せん断破壊, 耐力評価

1. はじめに

現在全国的に耐震診断・改修が行われているが、耐震診断の結果によれば、耐震診断基準¹⁾の適用範囲の下限値であるコンクリート圧縮強度13.5MPaを下回るコンクリート（以下、低強度コンクリートと記す）の建物が多く存在することが分かっている²⁾。このような建物については低減係数を考慮して現行の評価式を準用し診断する場合や、個別に検討を加えて診断するなど、汎用性のある評価法の確立に至っていないのが現状である。また、低強度コンクリート建物が多く建設された1970年代前後では、丸鋼が主筋として用いられている場合が多い。そこで筆者らは丸鋼を主筋とする低強度コンクリート柱部材について、その抵抗機構の解明と現行の曲げ・せん断耐力評価式との適合性の検討を目的として、曲げ・せん断実験を実施した^{3),4)}。その結果、低強度コンクリート柱では、主筋が降伏する前に付着劣化を起こし、コンクリートから抜け出す（付着滑脱）ことによって柱の耐力が既往の評価式では適切に推定できないこと、丸鋼とコンクリートとの付着力を考慮することにより耐力を適切に評価できることなどを明らかにした。

しかしながらRC造建物の柱には袖壁や腰壁などの2次壁が取り付けることが多い。袖壁は柱の剛性や強度を上昇させるものの、せん断破壊の発生によって靱性を低下させる恐れがあることが分かっているが、袖壁による柱の耐震性への影響は不明な点が多いのが現状である。これまで主筋に丸鋼を使用した袖壁付き柱部材に関する研究^{5)~8)}では、袖壁が付加する場合においても主筋の付着劣化により付着滑脱破壊に至ることや短柱に関してはせん断破壊することが報告されている。しかし、20~26MPa程度の普通強度コンクリートを対象としたものであり、低強度コンクリート部材に関しては検討が行

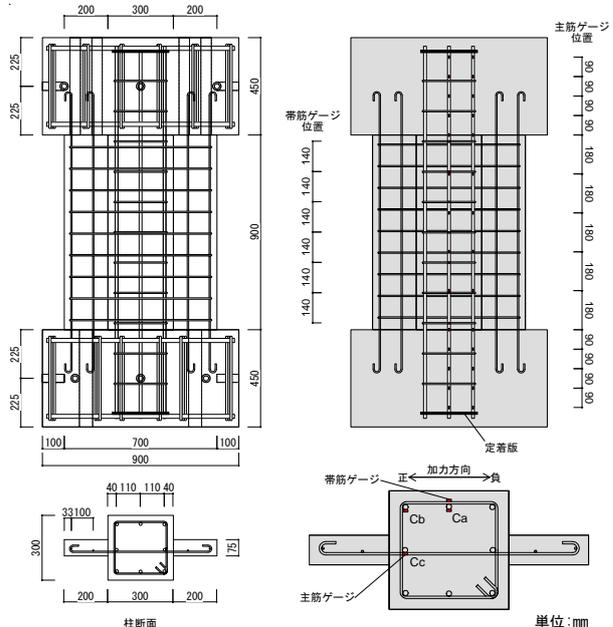
われていない。

そこで本論文はより付着割脱し易い低強度コンクリートを対象として袖壁を有する柱試験体を作製し、曲げせん断試験を行い、丸鋼を用いた低強度コンクリート柱の耐震性能に対して袖壁が与える影響について検討するとともに、既往の評価式の適合性について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、柱断面300×300mm、内法高さが900mm（シアスパン比1.5）の袖壁付き柱を5体作製した。袖壁は袖壁断面75mm×200mmとし、袖壁縦横筋比を0.43%（D6@100）、縦筋はスタブ内に定着し、横筋は柱内通し



NS15-15W2, LS30-15W2, LS15-15W2

図-1 試験体形状及び配筋, ひずみ測定位置

*1 広島大学大学院工学研究院 准教授・工博（正会員）

*2 広島大学大学院工学研究科 大学院生（正会員）

*3 広島大学工学部第四類 学部生

表-1 試験体一覧

試験体名	軸力比 η	柱断面 bxD [mm]	コンクリート 強度 F_c [MPa]	せん断 スパン比 M/QD	主筋	帯筋		壁筋	袖壁断面	袖壁
					SR235	SD295A	p_w [%]	SD295A	t x L [mm]	
NS15-15W2	0.15	300 x 300	18	1.5	8-13φ	2-D6@140	0.15	D6@100 シングル	75 x 200	両側
LS30-15W2	0.3									
LS15-15W2	0.15									
LS30-30W2	0.3		9							
LS30-15W1										

η : $N/(bDF_c)$, N: 載荷軸力, b: 柱幅, D: 柱せい

表-2 材料試験結果

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	12.2	1.46	20.81
Fc18		18.4	2.09	24.22
鉄筋径・ 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]
13φ SR235	345.1	194.0	465.6	1779
D6 SD295A	361.0	187.4	544.6	1927

配筋とした。異形鉄筋を用いているのは柱主筋が丸鋼であることの影響を明確にするためである。試験体形状及び配筋、ひずみ測定位置を図-1 に例示し、試験体一覧を表-1 に示す。主筋の定着はスタブ底部で $t=5\text{mm}$ の鉄板に溶接止めし定着を確保している。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。実験因子はコンクリート強度 (F_c9 , F_c18), 帯筋比 p_w (0.15%, 0.30%), 軸力比 (0.15, 0.30) とし、LS30-15W1 は袖壁を片側のみとした。各軸力比は実圧縮強度を基準に設定した。

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, 18MPa とし水セメント比はそれぞれ 110%, F_c18 は 80% とした。コンクリートの調合計画は前報³⁾⁴⁾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。コンクリートおよび鉄筋の材料試験の結果を表-2 に示す。

2.3 載荷方法・測定項目

各試験体は建研式逆対称モーメント加力によって正負交番繰り返し載荷を行った。測定項目は鉛直荷重、水平荷重、主筋ひずみ、帯筋ひずみ、壁筋ひずみ、局所変形及び層間変位である。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ性状

図-2 に各試験体の限界変形経験サイクルのひび割れ

性状を示す。図の斜線部はコンクリートが剥落した場所である。また筆者らが行った独立柱 (LS30-15, LS30-30) のひび割れ性状⁴⁾を写真-1 に示す。なお写真は限界変形経験サイクル後のものである。柱試験体形状は図-1 に示した試験体に袖壁を付加しないものであり、コンクリートの圧縮強度は 11.5MPa, 主筋・帯筋ともに本論文の試験体と同様ものを使用している。独立柱試験体では載荷終了までせん断ひび割れが発生せず、付着滑脱破壊



LS30-15 (R=1/33rad.) LS30-30 (R=1/33rad.)

写真-1 独立柱のひび割れ性状

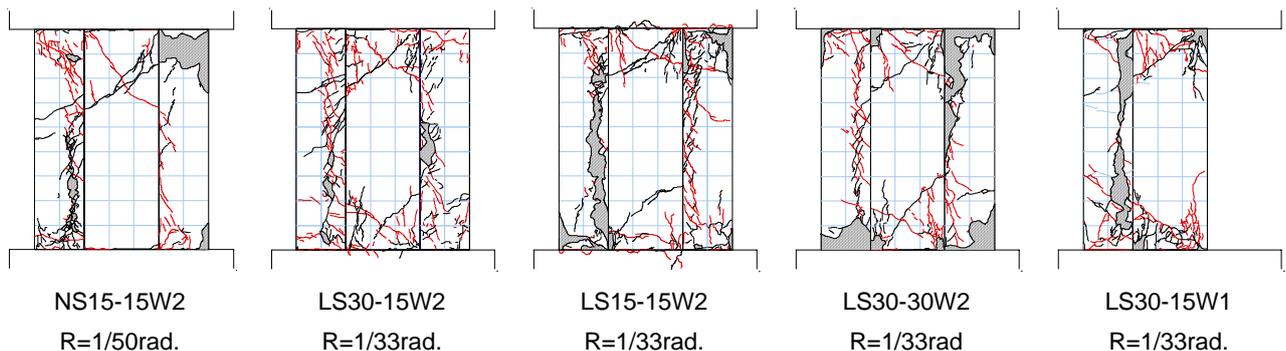


図-2 限界変形経験後のひび割れ性状

したのに対して袖壁付き柱ではすべての試験体において最大耐力までにせん断ひび割れが発生した。袖壁付き柱は $R=1/400\text{rad}$.までに柱・袖壁とスタブ境界面に材軸方向にひび割れが発生し、壁縦筋沿いに付着割裂ひび割れが進展した。その後柱部分のせん断ひび割れが増大・拡大し、 $R=1/33\text{rad}$.程度で壁縦筋が露出した。また変形が進むにつれ袖壁上下の圧壊が進行した。NS15-15W2 は $R=1/200\text{rad}$.において柱上部にせん断ひび割れが発生し、その後変形が進むにつれひび割れが大きく拡大した。柱部材に曲げひび割れは少なく、ひび割れ幅も微小であった。また $R=1/20\text{rad}$.において試験体正面右の袖壁上部付近で大規模なコンクリート剥落の後、壁縦筋が破断した。一方、低強度コンクリート柱試験体ではいずれの試験体も $R=1/200\text{rad}$.でせん断ひび割れが発生したが、NS15-15W2 に比べ柱部分のせん断ひび割れ幅は小さく、最大耐力時は 0.2mm 以下であった。また、柱頭・柱脚の曲げひび割れ及び圧壊が比較的多く見られた。これは低強度コンクリートの場合、普通強度コンクリートに比べ付着劣化が早期に発生し、鉄筋の圧縮抵抗が期待できないためであると考えられる。また片側のみに袖壁が付く LS30-15W1 では袖壁のない側の柱頭・柱脚の圧壊が顕著であり、独立柱同様のコンクリートの剥落が見られた。

3.2 せん断力一部材角関係

図-3 に各試験体のせん断力一部材角関係を示す。なおグラフ中に示した袖壁を考慮した曲げ略算及び耐震診断式では耐震診断基準¹⁾に示される袖壁を含めた断面を等価な長方形断面に置換する方法で求めている。同時に独立柱と比較した包絡線も示す。

いずれの試験体も最大耐力以降は部材角が進行すると耐力が低下する傾向が見られた。普通強度コンクリートの NS15-15W2 は $R=1/100\text{rad}$.で最大耐力 (257.9kN) に達し、主筋及び帯筋が降伏した。その後せん断ひび割れが拡大し急激に耐力が低下し、 $R=1/70\text{rad}$.で限界変形となった。破壊形式は付着滑脱後のせん断破壊である。また $R=1/25\text{rad}$.まで載荷した時点で軸力を保持出来なくなったため実験終了とした。

LS30-15W2 は $R=1/150\text{rad}$.で最大耐力に達し、 $R=1/45\text{rad}$.で限界変形を迎えた。NS15-15W2 に比べ耐力低下は緩やかであり限界変形も大きくなった。軸力比の低い LS15-15W2 では、最大耐力 (214.8kN) は他の試験体に比べ低いものの、最大耐力以降の耐力低下は小さく、限界変形角 ($R=1/36\text{rad}$.)となった。また最大耐力付近で主筋が降伏した。帯筋の多い LS30-30W2 は最大耐力が (243.9kN) となり LS30-15W2 (236.6kN) に比べ最大耐

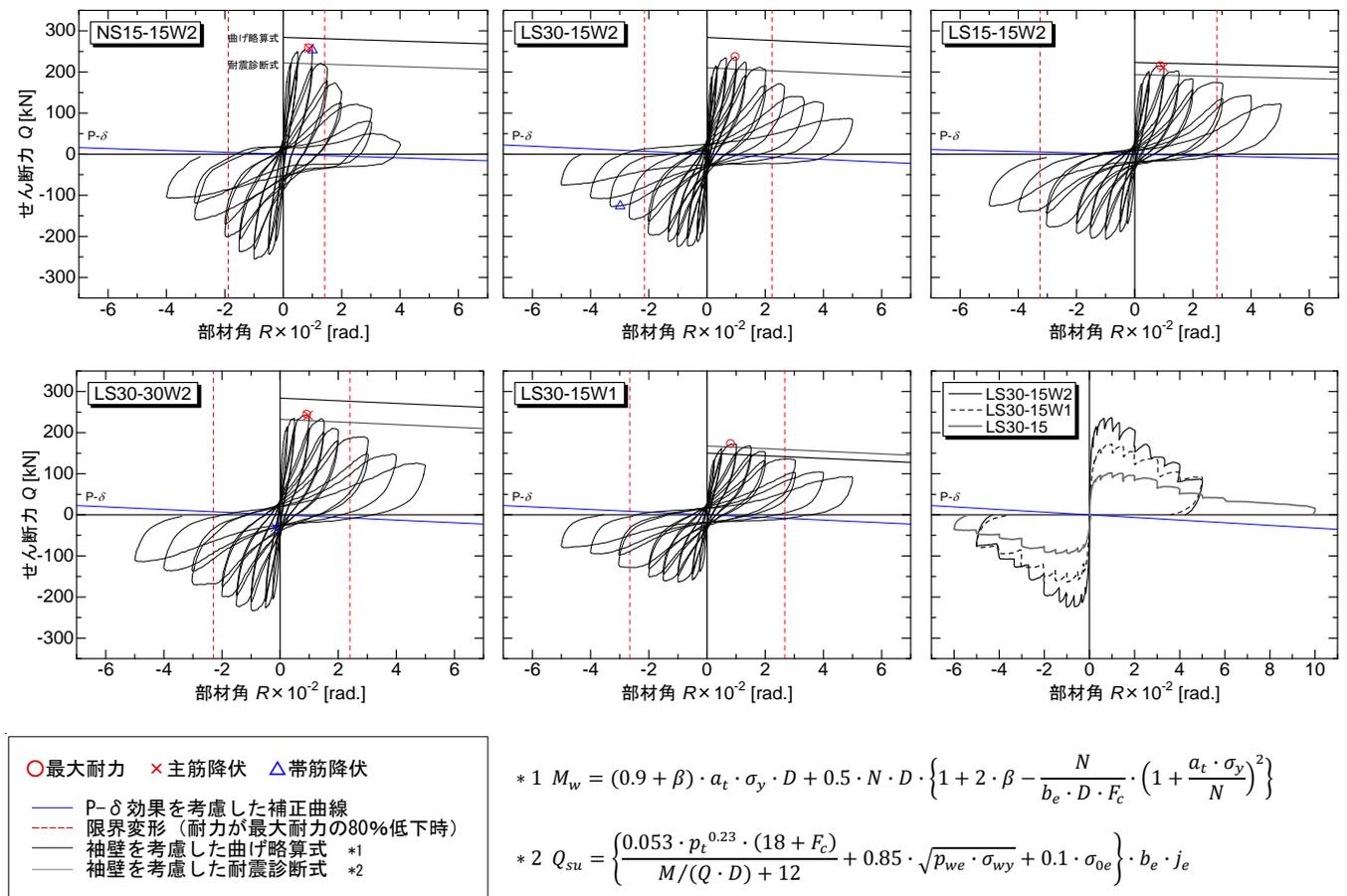


図-3 せん断力一部材角関係、比較包絡線

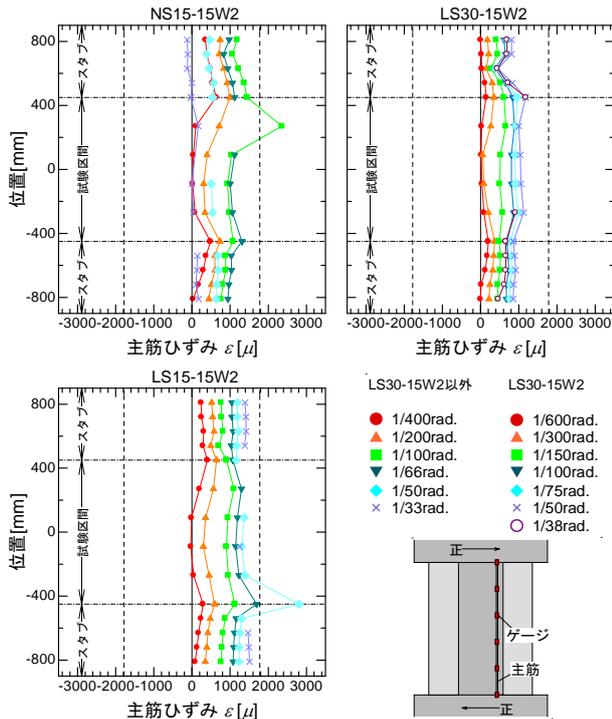


図-4 主筋のひずみ分布例（正側加力時）

力はほぼ同等となったが最大耐力以降の耐力低下は小さかった。限界変形角は $R=1/42\text{rad}$ である。

LS30-15W1 では主筋及び帯筋の降伏は見られず、限界変形角は $R=1/37\text{rad}$ となった。独立柱 LS30-15 の包絡線との比較では両側に袖壁がある場合、独立柱に比べ約 2.4 倍程度まで耐力が上昇する結果となった。片側のみに袖壁を設けた LS30-15W2 においても LS30-15 の約 1.7 倍となった。最大耐力以降は LS30-15W2, LS30-15W1 ともに独立柱に比べ耐力低下は大きく、せん断破壊後は変形の増大とともに独立柱の履歴に近づく傾向が見られる。

3.3 主筋のひずみ分布

図-4 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ある。同図中の破線は主筋の降伏ひずみ (1779 μ)、一点鎖線はスタブと試験区間の境界を示す。また同変形で繰り返し加力した場合は 1 回目の値を示している。

すべての試験体について、 $R=1/200\text{rad}$ 以降試験体全長にわたってひずみは引張状態となった。NS15-15W2, LS30-30W2, LS15-15W2 では最大耐力付近で主筋の降伏が見られたものの、最大耐力まで低強度コンクリート試験体のひずみ分布は概ね均等で勾配は小さく、ひずみ量は大きくないことから、主筋の付着応力度は小さく試験体全長にわたって主筋が滑脱していると考えられる。せん断破壊した NS15-15W2 についても $R=1/100\text{rad}$ で主筋の降伏が見られるもの最大耐力までのひずみ勾配は小さく、主筋の抜け出しが見られる。

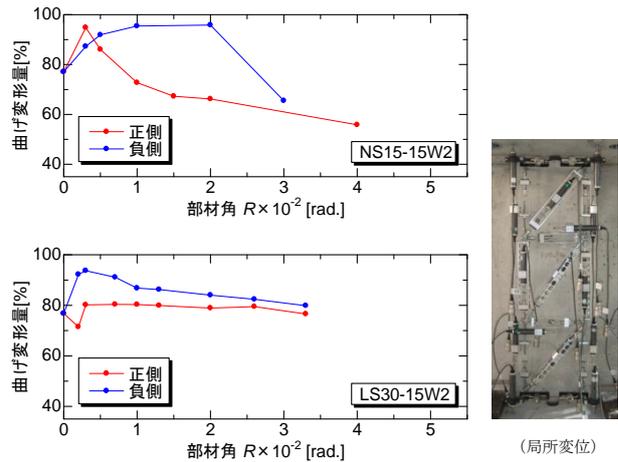


図-5 全体変形に対する曲げ変形割合

3.4 変形割合

図-5 に全体変形に対する曲げ変形の割合を例示する。なお、曲げ変形割合は局所変位計によって曲げ変形を求め、それを全体変形で除したものである。低強度コンクリート試験体 (LS) では曲げ変形が 80~90% を占めており、主筋の抜け出しによる曲げ変形が支配的であった。せん断破壊した普通強度コンクリート試験体では、最大耐力までは曲げ変形が支配的であり、正側でせん断変形割合が急激に増大した。

4. 耐力評価

表-4 に実験値と既往の耐力評価式による計算値との比較を示す。袖壁を考慮した曲げ耐力及びせん断耐力については耐震診断基準に示されている評価式を用いた。また同表中に独立柱の試験体 (LS30-15, LS30-30) の実験結果を示す。実験値は両側に袖壁がつく試験体ではいずれも袖壁を考慮した耐震診断式による計算値を 1.03~1.14 倍上回る結果となった。耐震診断式は引張側の袖壁を無視し、柱と圧縮側袖壁を等価断面に置換して求めた耐力について正負加力の平均値を用いている。両側に同形状の袖壁が付く場合は正負で同一であり、片側袖壁では圧縮側袖壁を考慮した等価断面の耐力と独立柱の耐力の平均となる¹⁾。その結果、LS30-15W1 では実験値が計算値の 1.02 倍となり、最大耐力を適切に評価できる。今回の袖壁付き柱試験結果においては耐震診断式による計算値は最大耐力を概ね適切に評価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ているものではない。

主筋に丸鋼を使用した低強度コンクリート試験体ではいずれも主筋の付着力劣化による付着滑脱が見られたため、耐力評価においては主筋の付着力を考慮することが重要であると考えられる。また低強度コンクリート

表-4 実験値と既往の耐力評価式による計算値との比較

試験体名	実験値 [kN]	曲げ耐力		せん断耐力		破壊形式
		袖壁を考慮した曲げ略算式		袖壁を考慮した耐震診断式		
		計算値[kN]	実/計	計算値[kN]	実/計	
NS15-15W2	257.9	284.3	0.91	226.5	1.14	せん断破壊 附着滑脱後の せん断破壊
LS30-15W2	236.6	284.0	0.83	214.3	1.10	
LS15-15W2	214.8	223.1	0.96	197.9	1.09	
LS30-30W2	243.9	284.0	0.86	235.8	1.03	
LS30-15W1	172.6	150.2*1	1.41	168.7	1.02	
LS30-15	102.5	141.7*1	0.72	117.4*2	0.87	
LS30-30	100.5		0.71	134.8*2	0.75	

*1 独立柱の曲げ略算式 *2 独立柱の耐震診断式

柱では袖壁と柱の境界での分離が見られたものの、最大耐力時では袖壁と柱境界のせん断ひび割れは小さく、袖壁と柱は一体となって抵抗していたと考えられる。これまで袖壁付き RC 柱の耐力評価に関しては若林・南ら⁹⁾、トラス・アーチ理論を用いた理論的評価・耐力評価に関しては磯・松崎ら¹⁰⁾、益尾・神野ら¹¹⁾により評価式が提案されている。南らの提案した式では図-6 に示すような柱と袖壁を分離し、柱が負担するせん断力と袖壁が負担するせん断力の累加により耐力を評価している。本論文においても式(1)に示すように柱および壁の耐力の累加によって袖壁付き柱耐力を評価することとする。

$$V_u = V_{u1} + V_{u2} \quad \dots(1)$$

V_{u1} : 柱が負担するせん断力 [N]
 V_{u2} : 袖壁が負担するせん断力 [N]

また、本実験では主筋が丸鋼であることを考慮し、柱部材においては筆者らが提案している付着力を考慮した

$$V_{u1} = V_t + V_a \quad \dots(2)$$

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

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

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

$$v = 0.7 - \sigma_B / 200 \quad \dots(2-4)$$

$\sigma_B \leq 13.5$ 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_t, V_a : 付着を考慮したトラス、アーチ機構分担 [N]

ψ : 鉄筋周長 [mm] v : コンクリート圧縮強度の有効係数

σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度 [N/mm²]

τ_b : 丸鋼の許容付着応力度 [N/mm²]

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



図-6 柱と袖壁の累加方法

せん断終局強度式により耐力を評価する。この式は文献¹²⁾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主筋に対しても十分である場合に対して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(2)にトラスとアーチの累加式を示す。ただし低強度コンクリート部材に関して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¹³⁾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(3)に袖壁の耐力評価式を示す。

$$V_{u2} = t_w \cdot l_{wb} \cdot p_s \cdot \sigma_{sy} \cdot \cos \phi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot t_w \cdot l_{wa} \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad \dots(3)$$

$$\tan \theta = \left[\sqrt{(h_w / l_{wa})^2 + 1} - h_w / l_{wa} \right] \quad \dots(3-1)$$

$$\beta = (1 + \cos^2 \phi) \cdot p_s \cdot \sigma_{sy} / (v \cdot \sigma_B) \quad \dots(3-2)$$

$$v = 0.7 - \sigma_B / 200 \quad \dots(3-3)$$

ここで、

σ_{sy} : 壁板のせん断補強筋強度 [N/mm²] (≤ 400 N/mm²)

t_w : 壁板の厚さ [mm] p_s : 壁板のせん断補強筋比

h_w : 壁高さ [mm] v : コンクリート圧縮強度の有効係数

ϕ : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度 ($\cos \phi=1$)

l_{wb}, l_{wa} : トラス機構及びアーチ機構の等価壁長さ [mm]

表-5 に実験値と提案式による計算値との比較を示す。提案式ではせん断補強筋比及び軸力比による影響を考慮していないため、LS30-15W2、LS15-15W2 及び LS30-30W2 の計算値は同じ値となるが、その影響は小さく安全側に評価できていることから、計算値は実験値に対して良好な適合性を示した。また、提案式に対する

表一五 実験値と提案式による計算値との比較

試験体名	付着力を考慮した袖壁付き柱のせん断耐力式	
	計算値[kN]	実/計
NS15-15W2	245.2	1.05
LS30-15W2	210.2	1.13
LS15-15W2	210.2	1.02
LS30-30W2	210.2	1.16
LS30-15W1	167.4	1.03

既往の研究^{5)~8)}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を検討した。図-7 に実験値と計算値との比較を、袖壁を考慮した耐震診断式と提案式について示す。ただし、耐震診断式ではシアスパン比 ($M/Q \cdot d_c$) の下限値を 1.0 としているがここでは文献⁶⁾に示されている下限値 0.6 を使用している。耐震診断式ではややばらつきが見られ、大きく危険側の評価となる実験結果も目立つものの提案式では実験値の傾向をよく捉えられている。以上のことから提案式は主筋に丸鋼を用いた袖壁付き柱のせん断性状に関して理論的に評価でき、耐力を適切に評価できる。

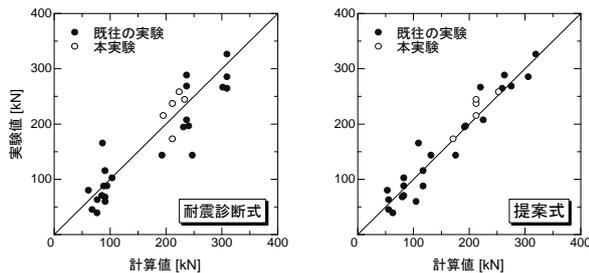


図-7 実験値と計算値の比較

5. まとめ

本研究では、主筋に丸鋼を用いた袖壁付き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)主筋に丸鋼を用いた袖壁付き低強度コンクリート柱試験体では主筋の付着劣化により付着滑脱破壊に至る。普通強度コンクリート試験体では主筋の抜け出しは確認できるものの低強度コンクリートに比べコンクリートの付着力が高いためよりせん断破壊した。
- (2)袖壁が最大耐力に対する寄与率は大きく、両側に袖壁がある場合、独立柱に比べ耐力は約 2.3 倍、片側では 1.7 倍程度上昇する。ただし、最大耐力までにせん断ひび割れが発生し、耐力低下は大きく大変形時には独立柱の性状に近づいていく。
- (3)付着力を考慮したせん断耐力式と、袖壁が負担するせん断耐力式の累加により、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

本研究の実施にあつては平成 23 年度科学研究費補助金(基盤研究(B) 課題番号: 21360268 代表研究者: 広島大学大学院准教授 荒木秀夫)の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

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) 坂巻健太, 広沢雅也ほか: 既存コンクリート造建築物のコンクリート強度に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造IV, pp.801-804, 2001.9
- 3) 荒木秀夫, 伊木勇人ほか: 丸鋼を用いた低強度コンクリート極短柱の耐震性能評価, コンクリート工学年次論文集, pp.145-150, 2011
- 4) 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
- 5) 芳村学, 中村孝也ほか: 丸鋼を用いた袖壁付き鉄筋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
- 6) 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
- 7) 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) 日本建築学会日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 1972.10
- 8) 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) 日本建築学会日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) 1973.10
- 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
- 10) 磯雅人, 松崎育弘ほか: 連続繊維シートによりせん断補強された袖壁付き RC 柱のせん断終局耐力評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 542 号, pp.147-154, 2001.4
- 11) 益尾潔, 神野靖夫: 袖壁貫通アンカーを用いた柱のみの CFRR シート巻きつけ工法による袖壁付き RC 柱の補強効果, 日本建築学会構造系論文集, 第 542 号, pp.121-128, 2000.10
- 12) 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
- 13) 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