論文 破壊モードを変化させた場合の袖壁付 RC 柱の曲げせん断性状に関す る実験的研究

澤井 謙彰*1・磯 雅人*2・田尻 清太郎*3

要旨:本研究は,袖壁付き RC 柱の構造性能を曲げせん断実験により明らかにしたものである。試験体の要因は,柱の帯筋比,袖壁横筋比の2要因である。とくに本研究では,袖壁を無視した独立柱としての破壊モードと袖壁付き RC 柱としての破壊モードの組み合せが与える袖壁付き RC 柱の構造性能への影響について実験的に確認した。試験体は計4体である。実験の結果,破壊モードの組み合わせにより,袖壁付き RC 柱の破壊 性状,変形性状,耐力が大きく異なることが示された。また,最大耐力の実験値と既往のせん断終局強度式および曲げ終局強度式との比較が示され,各評価式の適合性を示した。 キーワード:袖壁付き RC 柱,破壊モード,せん断終局耐力,曲げ終局耐力

1. はじめに

1968年十勝沖地震で袖壁,腰壁あるいは垂れ壁といった非構造壁の影響と思われる構造被害が報告された。以来,二次壁付き部材の挙動および構造性能を把握することの必要性が高まり,それらに関する研究が始まった。しかし,袖壁付き RC柱に関する研究は,RC柱や RC梁に比較して極めて少なく,その構造性能は不明な点が多く残されている。また,2007年8月「2007年版 建築物の構造関係技術基準解説書」¹⁾では袖壁付き RC柱の許容耐力式があらたに示されたが,その耐力式についても今後,十分精査する必要がある。

ところで, 袖壁付き RC 柱は, 袖壁が付加することによ り柱の剛性増加をもたらすため, せん断力がそこに集中 し, 脆性的なせん断破壊を招くばかりでなく, 被害をそ こに集中させ建物全体の耐震性能を著しく低下させる 可能性がある。以上ことから, 現在の構造設計および施 工においては, 柱と袖壁の間にスリットを設けるなどし て, 柱の短柱化を防止し, 設計時のモデルを明確にする 手法がとられている。

しかし,スリットを設けることで施工の複雑化や施工 コストの増大,耐火,止水についての配慮などが必要と なり,問題点も多い。また,1995年に発生した兵庫県南 部地震おいては,二次壁にスリットを設けるなどの配慮 がなされないために地震被害を受けた建物も見られた と同時に,スリットを設けたことにより変形が大きくな り修復が不可能なほどの多大の損傷・被害を受けた事例 も一方で報告された。

ところで袖壁付き RC 柱の構造性能評価が可能であれ ば施工上の諸問題を解決できるだけではなく,積極的に 袖壁付き RC 柱を耐震要素として利用することが可能と なる。そこで本研究では,袖壁付き RC 柱の曲げせん断 実験により,その構造性能(破壊性状,変形性状,耐力) を明らかにすることを大きな目的とした。とくに本研究 で着目した点は,袖壁部分を無視して独立柱として評価 した時の破壊モードと袖壁付き RC 柱として評価した時 の破壊モードの組み合わせにより,その構造性能がどの ように変化するかを明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 試験体

表 - 1 に試験体一覧 表 - 2 に使用材料の力学的特性, 図 - 1 に試験体配筋図,表 - 3 に実験結果および計算結 果一覧,表 - 4 に袖壁付き RC 柱における設定破壊モー ドと計算式による破壊モードの適合性一覧を示す。

共通要因は,柱断面 b×D=300mm×300mm,内法長さ h_0 =900mm, せん断スパン比 a/D=1.5, 主筋 12-D16(SD295A),コンクリート設計基準強度 F_c = $24N/mm^2$ とした。軸力はN=(1/6)・ F_c ・b・D=360kNの一 定軸力とした。また,袖壁の出幅は左右均等とし 1D=300mm,袖壁厚さ t=50mm,柱に対する袖壁の取り 付け位置は,柱断面の芯に袖壁を設けるものとした。変 動要因は,独立柱として評価した場合の破壊モードを強化さ せるために,柱の帯筋比,袖壁の壁横筋比の2要因とし た。柱の帯筋比は, p_w =0.21,0.68%の2水準,袖壁の壁 横筋比を p_{sh} =0.32,1.28%の2水準とした。各試験体の破 壊モードの組み合わせを以下に示す。

・No.1 RC-(R1D+L1D)-C-SS(以下, No.1SS)

*1	福井大学大学院	工学研究	R科建築建設工学専 攻	文 (正会)	員)	
*2	福井大学大学院	工学研究	R科建築建設工学専 攻	女 講師	博士(工学)	(正会員)
*2		A TT 오 FF	捜洗研究ゲⅡ _ プ	피혔음	博士(丁巴)	

*3 独立行政法人建築研究所 構造研究グルーフ 研究員 博士(工学) (正会員)

No.	試験体名	柱 - 帯	筋	袖壁・	設定破壊モード					
		補強筋比p _w ,(p _{we})(%)	仕様	補強筋比p _{sh} (%)	仕様	柱	袖壁付柱			
1	RC-(R1D+L1D)-C-SS	0.21 , (0.26) 1	D6(SD295A)@100	0.32	D6(SD295A)@200	せん断	せん断			
2	RC-(R1D+L1D)-C-FS	0.68 , (0.73) 1	D10(SD295A)@70	0.32	D6(SD295A)@200	曲げ	せん断			
3	RC-(R1D+L1D)-C-FF	0.68 , (0.88) 1	D10(SD295A)@70	1.28	D6(SD295A)@50	曲げ	曲げ			
4	RC-(R1D+L1D)-C-SF	0.21 , (0.42) 1	D6(SD295A)@100	1.28	D6(SD295A)@50	せん断	曲げ			
1:壁横筋を帯筋として考慮した場合の柱の補強筋比										
att with a between state of the state										
柱 (せ (主)	共通要因 断面 : b × D = 300mm × 3 ん断スパン比 : a/D = 1.5 筋 : 12-D16(SD295A)	00mm	設計基準強度∶Fc=24(N/mm ²) 軸力∶N=(1/6)・F _c ・b・D=360(kN)							

独立柱として評価した場合の破壊モードと袖壁付き RC 柱として評価した場合の破壊モードが両者とも に, せん断破壊先行型となる試験体。

- No.2 RC-(R1D+L1D)-C-FS (以下, No.2 FS) 独立柱として評価した場合の破壊モードが曲げ破壊 先行型,袖壁付き RC 柱として評価した場合の破壊 モードがせん断破壊先行型となる試験体。
- No.3 RC-(R1D+L1D)-C-FF (以下, No.3 FF) 独立柱として評価した場合の破壊モードと袖壁付き RC 柱として評価した場合の破壊モードが両者とも に,曲げ破壊先行型となる試験体。
- No.4 RC-(R1D+L1D)-C-SF(以下, No.4 SF) 独立柱として評価した場合の破壊モードがせん断破 壊先行型, 袖壁付き RC 柱として評価した場合の破 壊モードが曲げ破壊先行型となる試験体。

以上,試験体総数は計4体である。

以下,本研究で耐力の検討に使用した計算式を以下 に示す。柱の終局強度式は「2007年版 建築物の構造 関係技術基準解説書」による式(1),式(2)の技術基準式 ¹⁾を, せん断終局強度式は, 式(3)のA法(非靭性)式 ²⁾を使用した。袖壁付き RC 柱の曲げ終局強度式は, 式(4),式(5)の技術基準式¹⁾,式(6),式(7)の精算式³⁾, 式(8),式(9)の累加式4)を使用し,曲げ許容耐力(長期, 短期)は文献1)より平面保持を仮定して,袖壁端部の コンクリートが許容圧縮応力度に達する条件のもと算 出した。次に袖壁付き RC 柱のせん断終局強度式は,式 (10)の技術基準式¹⁾,式(11)の益尾式⁴⁾,式(12)の磯式 ⁵⁾,式(13)のせん断許容耐力式(長期,短期)¹⁾を示す。

$${}_{c}Q_{mu} = {}_{c}M_{u}/a$$
(1)
ここに, a はせん断スパン
0 N 0.4b・D・Fc のとき
$${}_{c}M_{u} = 0.8a_{t} \cdot {}_{y} \cdot D + 0.5N \cdot D \left(1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot F_{c}}\right)$$
(2)



記号は文献1)参照のこと。

$${}_{c}Q_{xu} = b \cdot j_{t} \cdot p_{w} \cdot {}_{wy} \cdot \cot$$

$$+ \tan (1 -)b \cdot D \cdot {}_{B}/2$$
(3)

記号は文献2)参照のこと。

$${}_{w}Q_{mul} = {}_{w}M_{ul}/a$$

$$\tag{4}$$

$${}_{w}M_{u1} = (0.9 +) a_{t} \cdot {}_{y} \cdot D$$

$$+ 0.5N \cdot D \left\{ 1 + 2 - \frac{N}{b_{e} \cdot D \cdot F_{e}} \left(1 + \frac{a_{t} \cdot {}_{y}}{N} \right)^{2} \right\}$$
(5)

記号は文献1)参照のこと。



 $N_{2} < N \qquad N_{3} \mathcal{O} \succeq \mathfrak{E}$ $W_{u_{3}} = 0.8a_{t} \cdot y \cdot D$ $+ 0.5(N + a_{n} \cdot y - N_{wu}) \cdot D \cdot \left\{ 1 - \frac{(N + a_{n} \cdot y - N_{wu})}{(b \cdot D \cdot F_{c})} \right\} + M_{wu} \qquad (9)$

記号は文献4)参照のこと。

$${}_{\rm w} Q_{\rm su1} = \left\{ \frac{0.053 p_{\rm te}^{-0.23} (F_{\rm c} + 18)}{M/(Q \cdot d_{\rm e}) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{\rm we} \cdot \sigma_{\rm wy}} \right\} b_{\rm e} \cdot j_{\rm e} + 0.1N \qquad (10)$$

記号は文献1)参照のこと。

$${}_{w} Q_{su2} = b \cdot j_{t} \cdot {}_{s} \cdot p_{w} \cdot {}_{wy}$$

$$+ tan (1 - {}_{c}) Aar \cdot {}_{c} \cdot {}_{B} / 2$$

$$(11)$$

記号は文献4)参照のこと。

$$_{w} Q_{su_{3}} = _{s} \cdot \left\{ p_{we} \cdot _{wy} \left(\frac{j_{c}}{j_{t}} \right) + p_{she} \cdot _{sy} \left(\frac{j_{w}}{j_{t}} \right) \right\} b_{e} \cdot j_{t}$$

$$+ tan \left(1 - \right) \cdot b_{e} \cdot l_{w} \cdot _{c} \cdot _{B} / 2$$

$$(12)$$

記号は文献5)参照のこと。

記号は文献1)参照のこと。

なお,本研究では帯筋と壁横筋のみを変化させること で4種類の破壊モードが得られるように設計を行った。

なお,袖壁付き RC 柱で比較的に精度良く終局強度を 評価する式で曲げについて2式,せん断について2式に よる組合せについて計算値と破壊モードの適合性につ





いてすべてが不適合とならないように設計を行った。破壊モードの設定に使用した評価式は,独立柱として評価する場合の曲げ終局強度式には,式(1),式(2)による技術基準式¹⁾を,せん断終局強度式は,式(3)によるA法(非靭性)式²⁾を用いて判定した。一方,袖壁付きRC柱として評価する場合の曲げ終局強度式には,式(6),式



No.1 RC-(R1D-L1D)-C-SS R = +1/200 (rad.)



No.2 RC-(R1D-L1D)-C-FS No.3 RC-(R1D-L1D)-C-FF

R = +1/100 (rad.)



No.4 RC-(R1D-L1D)-C-SF R = +1/100 (rad.)

R=1/200(rad.) 以降耐 力の低下が著しいため 実験終了につき R=1/50(rad.)時の写真 無し。

No.1 RC-(R1D-L1D)-C-SS



No.1 RC-(R1D-L1D)-C-SS R = +1/100 (rad.)



R=+1/200 (rad.)

No.2 RC-(R1D-L1D)-C-FS No.3 RC-(R1D-L1D)-C-FF



No.2 RC-(R1D-L1D)-C-FS R = +1/50 (rad.)

写真-3 最終破壊状況

(7)による精算式³⁾,式(8),式(9)による累加式⁴⁾を用い, せん断終局強度式は,式(11)による益尾式⁴⁾,式(12)によ る磯式 5)を用いて判定した。独立柱として評価する場合 の計算式による破壊モードは,壁横筋を帯筋として換算 して計算した値では No. 4 試験体が設定破壊モードに対 して逆の破壊モード(曲げ破壊)となる。一方,壁横筋 を無視して柱のせん断補強筋を帯筋のみで計算した場 合には,全ての試験体が設定した破壊モードとなる。袖 壁付き RC 柱として評価する場合の計算式による破壊モ ードと設定破壊モードとの適合性を表-4に示す。 が 適合,×が不適合である。これより設定破壊モードと計 算値による破壊モードとの適合性に欠ける試験体があ る。とくに, No.2 試験体は設定破壊モードに対して計算 式による破壊モードが大きく異なっている。

2.2 加力方法

図-2 に加力装置,図-3 に加力プログラムを示す。 加力は,建研式加力により行い,正負交番漸増繰り返し 載荷とした。軸力は鉛直方向の4台のアクチュエーター



写真 - 2 R=+1/50 (rad.)時のひび割れ状況



No.3 RC-(R1D-L1D)-C-FF R=+1/33 (rad.)



No.4 RC-(R1D-L1D)-C-SF



No.4 RC-(R1D-L1D)-C-SF R=+1/25 (rad.)

により一定軸力(N=(1/6)・F_c・b・D=360kN)を与え,水 平力は水平方向の2台の油圧ジャッキにより与えた。加 カプログラムは,±2 サイクルまでは荷重制御とし,±1 サイクル目は $2/3 _{w}Q_{su5}$, ±2 サイクル目は $_{w}Q_{su5}$ とした。 その後は,部材角で制御し,1/800(rad.),1/400(rad.)を各 1 サイクル, 1/200(rad.), 1/100(rad.), 1/67(rad.), 1/50(rad.) を各2サイクル行うことを原則とした。その後は耐力が 最大耐力の 80%まで低下するところまで押し切ること とした。また, せん断破壊して途中のサイクルで脆性的 に耐力が低下した場合は,その時点で加力を終了した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

写真 -1 に最大耐力を含むサイクル時のひび割れ状況 を, 写真-2 に+1/50 (rad.)時のひび割れ状況を, 写真 -3 に最終破壊状況を示す。試験体のひび割れ発生順序 は、袖壁の引張側より曲げひび割れが最初に発生する。 その後のひび割れ発生順序は試験体により多少異なる

が,おおむね柱の曲げひび割れ,袖壁のせん断ひび割れ, 柱のせん断ひび割れの順にひび割れが発生した。

短期許容せん断力時のひび割れ状況は,写真には示し ていないが袖壁の引張側端部に曲げひび割れが生じる 程度であり,損傷は軽微なものであった。

内部抵抗から判断される破壊モードの定義を以下に 示す。独立柱の破壊モードは,主筋に対して帯筋が先行 して降伏する場合をせん断破壊型,帯筋に対して主筋が 先行して降伏する場合を曲げ破壊型とした。袖壁付きRC 柱の破壊モードは,主筋が壁横筋に先行して降伏する場 合をせん断破壊型,壁横筋に対して主筋が先行して降伏 する場合を曲げ破壊型とした。なお,袖壁端部の壁縦筋 上下端に関しては,すべての試験体において早い段階で 降伏する現象が見られた。

内部抵抗から判断される破壊モードは,No.1 SS,No.2 FS,No.3 FF に関しては設定破壊モードと同様の結果と なった。一方,No.4 SF の独立柱としての破壊モードは, 主筋の降伏が先行し曲げ破壊型となり,設定破壊モード と異なる結果となった。

次に,ひび割れ性状により判断される破壊モードの定 義を以下に示す。独立柱としては柱端部の曲げひび割れ に対してせん断ひび割れが進展,口開く性状を示す場合 をせん断破壊型,曲げひび割れが進展する場合を曲げ破 壊型とした。袖壁付き RC 柱としては袖壁端部の曲げひ び割れおよび圧壊に対してせん断ひび割れが進展,口開 く性状を示す場合をせん断破壊型,袖壁端部の曲げひび 割れおよび圧壊が進展する場合を曲げ破壊型とした。

No.1 SS, No.3 FF, N o.4 SF では設定破壊モードと同 じ結果を示した。No.2 FS に関しては袖壁付き RC 柱とし ては設定破壊モードと同じ結果を示したが,独立柱とし

ての破壊モードは, せん断破壊型に 近い性状を示し, 設定破壊モードと 異なる性状を示した。

以上,内部のひずみ度および外部 からのひび割れによる破壊性状より, 独立柱では一部,また袖壁付き RC 柱 としてはすべての試験体について計 画時に設定した破壊モードを実現で



きたと考えられる。

3.2 变形性状

図-4 にQ-δ 包絡線の比較,図-5 にせん断力(Q) - 相対変位()関係図を示す。

図-4 より弾性剛性は,配筋の違いによる影響は認め られずほぼ同等であった。せん断ひび割れ発生後の剛性 は,袖壁付き RC柱の設定破壊モードをせん断破壊とし た No.1 SS, No.2 FS に比較して,破壊モードを曲げ破壊 とした No.3 FF, No.4 SF は剛性が高くなる傾向が認めら れた。最大耐力後の変形性状は,全ての試験体で,変形 の増加とともに耐力を徐々に低下させる性状を示す。

以下, 図-5より各試験体の最大耐力後の性状を詳細 に示す。No.1 SS は,耐力の低下が急激であり脆性的な 変形性状を示した。No.2 FS は , R=1/100(rad.)までは耐力 を維持し、その後は緩やかに耐力を低下させる。その後 の耐力は,技術基準式(式(1),式(2))による柱の曲げ終 局強度。Qmuに近付く傾向が認められた。No.3 FFは,緩 やかに耐力を低下させる。その後の耐力は,技術基準式 による柱の曲げ終局強度。Qmu を上回る耐力を維持して おり,最もエネルギー吸収能力が優れた試験体となって いる。No.4 SFは,耐力を低下させ,その低下の割合は, No.2 FS, No.3 FF に比較して大きい。また,技術基準式に よる柱の曲げ終局強度。Qmuを R=1/67(rad.)以降下回り, ややエネルギー吸収能力が乏しい性状となっている。耐 力低下の割合は, No.1 SS が最も大きく, No.3 FF が最も 小さい。また,独立柱としての設定破壊モードを曲げ破 壊とした No.2 FS No.3 FF は、せん断破壊とした No.1 SS, No.4 SF に比較して緩やかに低下する傾向を示した。

同図中に短期許容せん断力のラインを示している。短 期許容せん断力は Q-δ曲線上の曲げひび割れ発生荷重





図 - 7 最大耐力実験値と既往の曲げ終局強度式による計算値との比較

とせん断ひび割れ発生荷重のおおむね間にあり,弾性的 な挙動を示す領域にあるといえる。

3.3 袖壁付き RC 柱の終局耐力

図 - 6 に最大耐力実験値と既往のせん断終局強度式に よる計算値との比較を,図 - 7 に最大耐力実験値と既往 の曲げ終局強度式による計算値との比較を示す。色塗り の試験体は袖壁付き RC 柱として破壊がせん断破壊と判 定した試験体であり,白抜きは曲げ破壊と判定した試験 体である。図 - 6 は,色塗りの試験体の実験値と計算値 との比較を行うもので,白抜きの試験体は参考として見 て頂きたい。同様に,図 - 7 は,白抜きの試験体の実験 値と計算値との比較を行うもので,色塗り試験体は参考 として見て頂きたい。

図 - 6 より, せん断破壊を示した色塗り試験体の実験 値を各せん断終局強度式で除した比較値は, 技術基準式 では 1.28~1.37, 益尾式では 0.71~0.73, 磯式では 0.82 ~0.87 であり, 技術基準式では安全側に, 益尾式, 磯式 では危険側に評価される結果となった。

図 - 7 より,曲げ破壊を示した白抜き試験体の比較値 は,技術基準式では0.82~0.84,精算式では0.92~0.94, 累加式では1.08~1.11 であり,技術基準式では危険側に, 精算式,累加式では実験値を概ね評価できる傾向を示し た。

4.まとめ

袖壁を無視した独立柱としての破壊モードと袖壁付 き RC 柱としての破壊モードの組み合わせにより,袖壁 付き RC 柱の破壊性状,変形性状,耐力が大きく異なる ことを示した。また,最大耐力の実験値と既往のせん断 終局強度式および曲げ終局強度式による計算値との比 較が示され,各評価式の適合性を示した。

謝辞

平成 19 年度福井大学磯研究室卒業研究生:上田有香 さん,市原聡君,鈴木康平君,ラハマンマハブブル君, 独立行政法人建築研究所構造研究グループ:飯場正紀氏, 福山洋氏,諏訪田晴彦氏,向井智久氏に多大な協力を 頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会:
 2007 年版 建築物の構造関係技術基準解説書,全国 官報販売協同組合,pp.641~646,2007.8
- 2)(社)日本建築学会:鉄筋コンクリート造の建物の終 局強度型耐震設計指針・同解説,pp.106~116,1990.11
- 3) (社)日本建築学会:鉄筋コンクリート終局強度設計 に関する資料, pp.56~58, 1987.9
- 4) 益尾潔,神野靖夫:袖壁貫通型アンカーを用いた柱のみのCFRPシート巻き付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 No.536, pp.121~128,2000.10
- 5) 磯雅人,松崎育弘,園部泰寿ほか: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 No.542, pp.147~154,2001.4
- 6)(社)日本建築学会:鉄筋コンクリート構造 計算規
 準・同解説 -許容応力度設計法-,1999.11