

# 論文 鉄筋コンクリート造袖壁・腰壁付き柱の耐震性能

中村 聡宏\*1・今阪 剛\*2・勅使川原 正臣\*3・壁谷澤 寿一\*4

**要旨:** 鉄筋コンクリート造袖壁・腰壁付き柱の強度および破壊性状を明らかにするための実験的検討を行った。せん断破壊型袖壁付き柱の実験では、柱帯筋が多く袖壁横筋の少ない試験体は柱と袖壁の接合部でのずれ変位が支配的な破壊性状を示すことが分かった。ずれ変位を考慮したせん断強度評価式を用いることで、強度を適切に評価できることを示した。曲げ破壊型袖壁・腰壁付き柱の実験では、腰壁の変形拘束効果により袖壁付き柱の危険断面位置が変動することが確認された。腰壁の反力を考慮することで、危険断面位置を適切に評価できることを示した。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート, 非耐力壁, 袖壁付き柱

## 1. はじめに

袖壁・垂れ壁・腰壁（以降、非耐力壁）を有する鉄筋コンクリート造構造物の設計では、非耐力壁付き部材や架構の構造性能に関する知見が乏しいために、構造スリットにより非耐力壁を架構から分離する設計が行われてきた。しかし、非耐力壁を構造要素として積極的に利用することで、部材や架構の強度および剛性が向上し、変形や損傷を制御できることが期待できる。

近年、せん断破壊型や曲げ破壊型袖壁付き柱に関する実験的・解析的検討が盛んに行われている<sup>例えば1)</sup>。磯ら<sup>2)</sup>は、曲げ破壊型袖壁付き柱において、袖壁端部のコンクリートを拘束する補強筋を配することで、袖壁端部での圧壊に伴う袖壁の剥落を抑制し、靱性能を向上させることができると報告している。しかし、袖壁付き柱は複雑な破壊性状を示すことが確認されており、より多くの実験的知見の蓄積が望まれている。

一方、腰壁・垂れ壁の取り付く袖壁付き柱では、腰壁・垂れ壁により部材の変形が拘束されるため、危険断面位置が変動する。平林ら<sup>3)</sup>は、腰壁による拘束効果を評価する手法を提案し、腰壁付き柱の危険断面位置を概ね評価できることを示している。今阪ら<sup>4)</sup>は、非耐力壁付き2層1スパン架構の耐力評価に関する解析的検討を行い、腰壁・垂れ壁による部材の変形拘束効果を考慮して剛域を適切に設定することで、架構の耐力を概ね評価できることを示した。

本研究では、袖壁・腰壁付き柱の強度や破壊性状を把握することを目的とする。特に、せん断破壊型袖壁付き柱における柱と袖壁の接合部でのずれ変位の影響、曲げ破壊型袖壁付き柱における端部拘束筋の影響、曲げ破壊型袖壁・腰壁付き柱における腰壁の変形拘束効果と危険

断面位置について明らかにする。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

試験体は、縮尺 1/2 であり、せん断破壊型袖壁付き柱試験体 2 体、曲げ破壊型袖壁付き柱試験体 2 体、曲げ破壊型袖壁・腰壁付き柱試験体 1 体の計 5 体である。各試験体の配筋図を図-1 に示す。また、試験体の配筋一覧を表-1 に示す。いずれの試験体も、400×400mm の柱断面に対して、壁厚 100mm、張り出し長さ 400mm の袖壁が両側に取り付いている。

せん断破壊型試験体は、柱と袖壁の鉛直接合部でのずれ変位の大きさを制御するため、柱帯筋比および袖壁横筋比をパラメータとし、柱帯筋比が小さく袖壁補強筋比の大きい試験体 S-LH、柱帯筋比が大きく袖壁補強筋比の小さい試験体 S-HL の 2 体とした。

曲げ破壊型試験体は、通常の曲げ破壊型試験体 M-0 と、袖壁端部（柱脚部から 400mm の範囲）の縦横筋交差部に幅止め筋を配して、袖壁端部コンクリートを拘束した試験体 M-C の 2 体とした。また、試験体 M-C に対して、高さ 400mm の腰壁を両側に取り付けた曲げ破壊型袖壁・腰壁付き柱試験体 M-C-Sp も製作した。

各試験体の使用コンクリートおよび鉄筋の材料特性を表-2 および表-3 に示す。

### 2.2 加力方法

せん断破壊型試験体および曲げ破壊型試験体の加力装置セットアップ図を図-2 に示す。せん断破壊型試験体は、反曲点高さを試験体内法高さ中央とした逆対称加力とした。曲げ破壊型試験体は、加力梁を反曲点位置とした片持ち梁形式の加力とした。

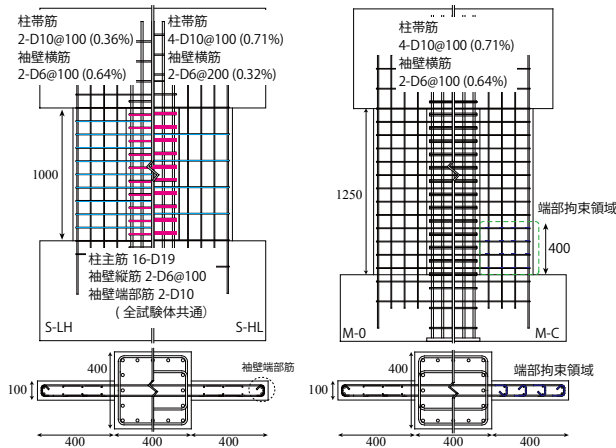
\*1 名古屋大学大学院 環境学研究科 助教・博士（工学）（正会員）

\*2 名古屋大学大学院 環境学研究科 大学院生（正会員）

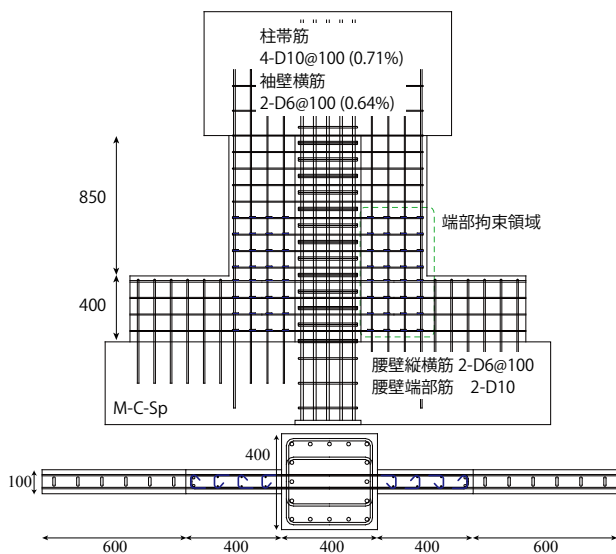
\*3 名古屋大学大学院 環境学研究科 教授・工博（正会員）

（独立行政法人建築研究所 客員研究員）

\*4 国土技術政策総合研究所 建築研究部 主任研究官 博士（工学）（正会員）



(a)せん断破壊型試験体 (b)曲げ破壊型試験体



(c) 曲げ破壊型試験体（腰壁付き）

図-1 試験体配筋図

表-1 配筋一覧

試験体名	柱主筋 (主筋比)	柱帯筋 (帯筋比)	袖壁縦筋 (端部筋)	袖壁横筋 (横筋比)	端部拘束筋
S-LH		2-D10@100 (0.36%)	2-D6@100 (2-D10)	2-D6@100 (0.64%)	無し
S-HL	16-D19 (2.87%)	4-D10@100 (0.71%)		2-D6@200 (0.32%)	
M-0		4-D10@100 (0.71%)		2-D6@100 (0.64%)	4-D6
M-C		4-D10@100 (0.71%)		2-D6@100 (0.64%)	
M-C-Sp					

表-2 使用コンクリートの材料特性

試験体名	スランブ [cm]	空気量 [%]	Co温度 [°C]	ヤング係数 [N/mm <sup>2</sup> ]	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	割裂強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
S-LH,S-HL,M-0	19.5	4.8	15.0	$2.51 \times 10^4$	34.3	2.9
M-C,M-C-Sp	18.0	4.0	15.0	$2.69 \times 10^4$	38.3	2.8

表-3 使用鉄筋の材料特性

呼び径	材質	ヤング係数 [N/mm <sup>2</sup> ]	降伏強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	降伏歪 [μ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
D6	SD295A	$1.94 \times 10^5$	397	2046	533
D10	SD345	$1.91 \times 10^5$	375	1959	511
D19	SD345	$1.95 \times 10^5$	393	2021	584

加力方式は、一定軸力下での正負交番繰返載荷とした。軸力は、346kN（柱断面に対する軸力比  $\eta=0.07$ ）とした。加力サイクルは、変形角制御とし、変形角 R=1/3200, 1/1600, 1/800, 1/400, 1/200, 1/100, 1/50, 1/33, 1/25, 1/20, 1/15 の各サイクルを最大2回繰り返した。なお、変形角としては、せん断破壊型試験体はスタブ間の相対水平変位を内法高さで除した値とし、曲げ破壊型試験体は、下スタブに対する上スタブ中央の相対水平変位を、フェイス位置（腰壁無し試験体は下スタブ界面、腰壁付き試験体は腰壁上端）から計測位置までの高さで除した値とした。

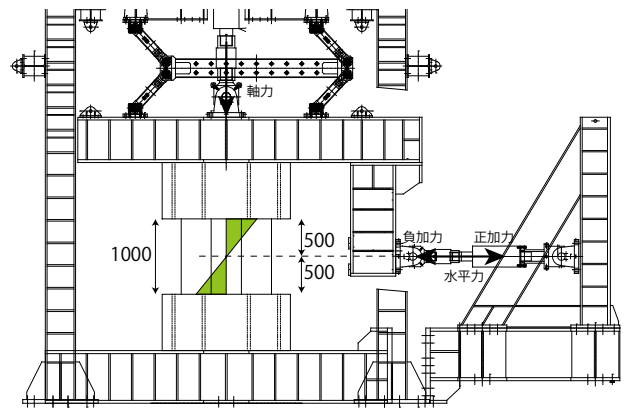
### 3. 実験結果

#### 3.1 せん断破壊型試験体

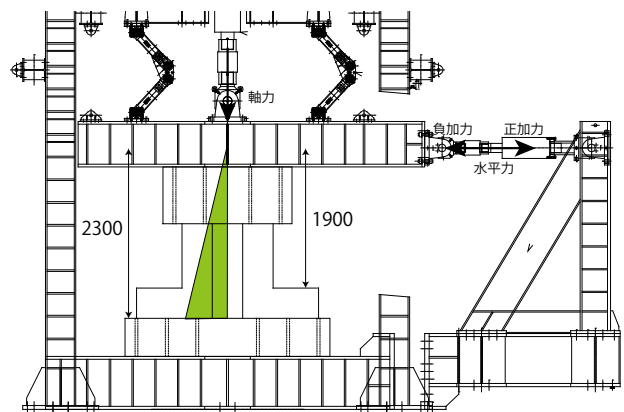
荷重変形関係および最終破壊状況を図-3に示す。

試験体 S-LH は、R=1/800 サイクルで袖壁にせん断ひび割れが生じ、R=1/400 サイクルで柱にせん断ひび割れが生じた。柱と袖壁のせん断ひび割れは貫通している様子が見て取れた。R=1/100 サイクル中に、袖壁から柱にかけて発生したせん断ひび割れが拡幅し、著しく耐力低下するとともに、変形角が 1/100 を超えたため、加力を終了した。

試験体 S-HL は、R=1/800 サイクルで袖壁にせん断ひび割れが生じるとともに、柱と袖壁の接合部付近にずれ

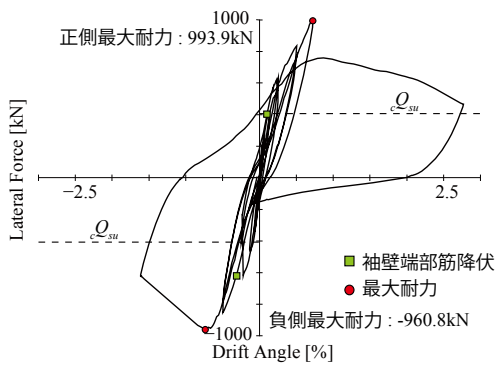


(a) せん断破壊型試験体

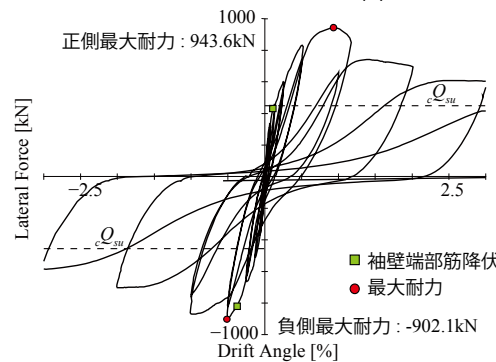


(b) 曲げ破壊型試験体

図-2 加力装置セットアップ図

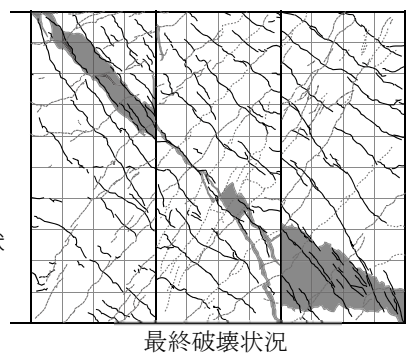


(a) 試験体 S-LH



(b) 試験体 S-HL

図-3 せん断破壊型試験体の荷重変形角関係および最終破壊状況



最終破壊状況

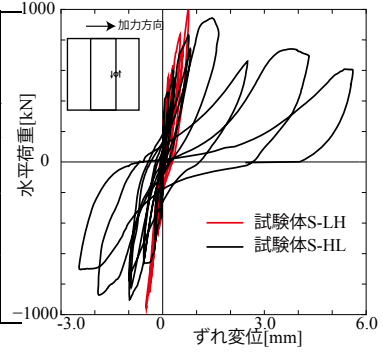


図-4 柱と袖壁の接合部の  
ずれ変位と荷重の関係

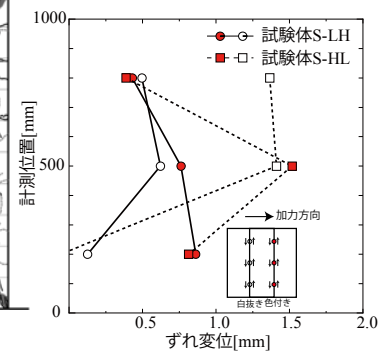


図-5 最大耐力時ずれ変位

変位に伴うひび割れが生じ、 $R=1/400$  サイクルで柱にせん断ひび割れが生じた。 $R=1/100$  サイクルで、柱および袖壁のせん断ひび割れが拡幅し、耐力低下が生じた。それ以降の繰り返したサイクルでは、袖壁のコンクリートの剥落が目立ち、耐力は大幅に低下した。

試験体中央位置での柱と袖壁の接合部のずれ変位と水平荷重の関係を図-4 に示す。図より、最大耐力となる直前まで、試験体 S-LH に比べて、試験体 S-HL の方がずれ変位が大きく出ており、最大耐力以降もずれ変位が顕著に出ていることが確認できる。最大耐力時のずれ変位の高さ方向分布を図-5 に示す。試験体 S-LH に比べて、試験体 S-HL の方がずれ変位が大きくなる傾向が見て取れ、試験体 S-HL は接合部でのずれによる破壊の影響が大きいことが分かる。

### 3.2 曲げ破壊型試験体

荷重変形関係および最大耐力時、加力終了時の破壊状況を図-6 に示す。

試験体 M-0 は、 $R=1/800$  サイクルで袖壁および柱に曲げひび割れが生じ、 $R=1/400$  サイクルで袖壁端部筋に降伏が確認された。 $R=1/200$  サイクルで、袖壁圧縮側端部で圧壊が確認され、 $R=1/100$  サイクルで柱引張主筋が降伏するとともに袖壁の圧壊が進展し、最大耐力を迎えた。最大耐力以降は、袖壁端部筋の座屈、破断に伴い耐力が低下した。 $R=1/33$  サイクルで、柱端部に圧壊が生じた。

試験体 M-C は、試験体 M-0 と同様の破壊性状を示し

た。袖壁端部では、端部拘束筋のピッチ間での袖壁縦筋の引張降伏、それに伴う座屈、破断が見られ、端部拘束筋の効果が見られなかった。原因として、端部拘束筋間隔が大きかったこと、繰り返し加力により引張降伏した端部筋の伸び上がりにより、座屈が生じやすい状態であったことが考えられる。変形性能を向上させるためには、端部拘束筋を密に配置するだけでなく、引張降伏による伸び上がりを抑制する必要があると考えられる。

試験体 M-C-Sp は、 $R=1/1600$  サイクルで袖壁の腰壁上端より上の位置に曲げひび割れが生じ、 $R=1/800$  サイクルでは袖壁腰壁交差部にも曲げひび割れが生じた。 $R=1/200$  サイクルで、腰壁上端高さの袖壁端部筋の降伏が確認され、圧縮側袖壁端部での圧壊も確認された。 $R=1/100$  サイクルで、袖壁端部の圧壊が進行し、腰壁高さ中央位置の柱引張主筋の降伏が確認され、最大耐力を迎えた。最大耐力以降は、袖壁端部筋の降伏、破断が確認され耐力が低下するとともに、腰壁の損傷が柱脚方向に進展し、危険断面位置が柱脚側に移動する様子が確認された。

なお、いずれの試験体も大変形時に正負で耐力が異なるが、これは、図-2(a)に示す加力装置における上部加力梁の回転の影響と考えられる。

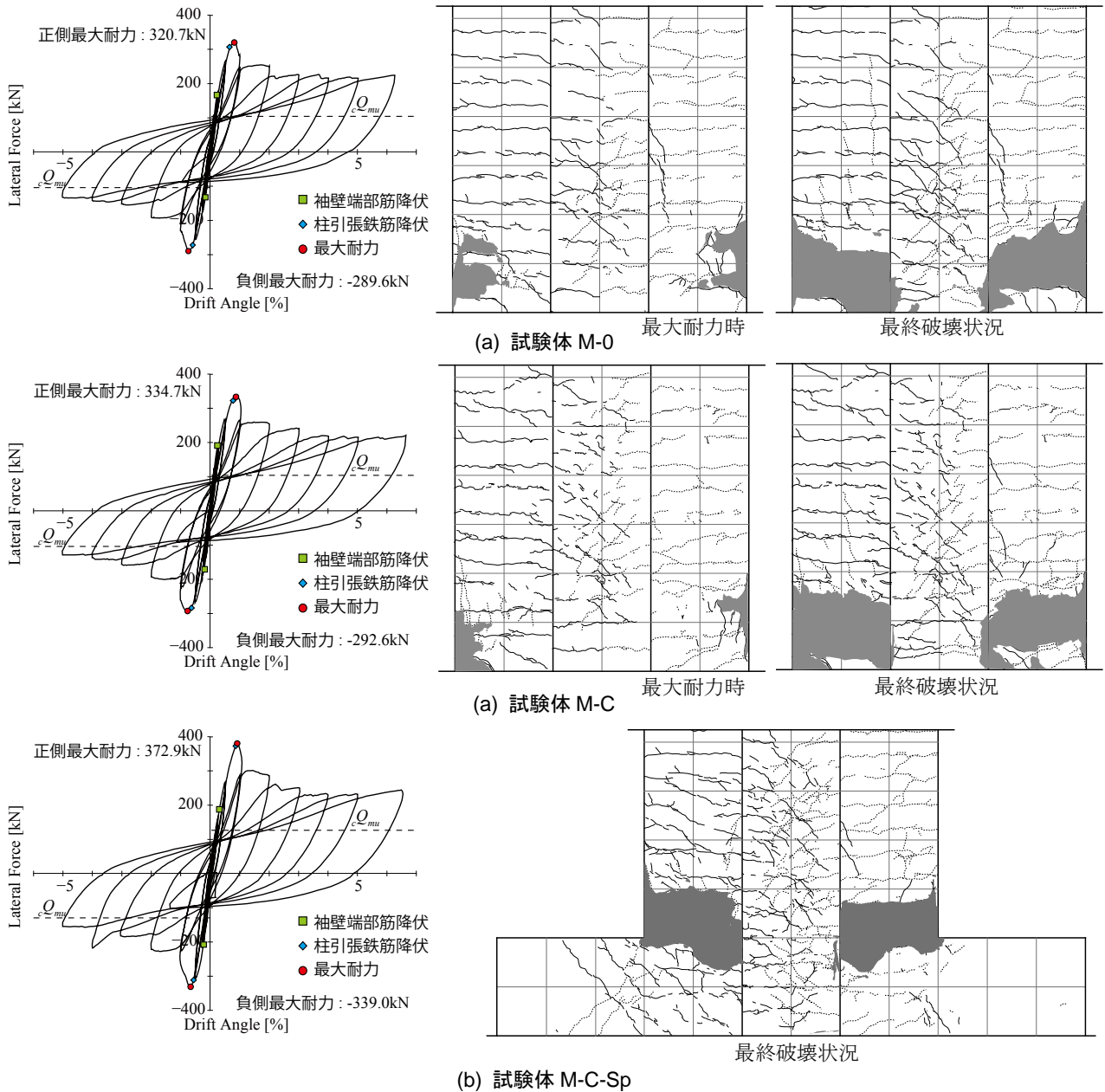


図-6 曲げ破壊型試験体の荷重変形角関係および破壊状況

#### 4. 強度評価

##### 4.1 柱の強度

鉄筋コンクリート構造計算規準<sup>5)</sup>(以降、RC規準)に従い算定した、袖壁を無視した柱のせん断強度 $cQ_{su}$ (荒川min式, 式(1)), 曲げ強度時せん断力(略算式, 式(2))を図-3および図-6中に示す。

$$cQ_{su} = \left\{ \frac{0.053p_i^{2.23}(F_c+18)}{M/Qd+0.12} + 0.85\sqrt{p_w\sigma_{wy}} + 0.1\sigma_0 \right\} bj \quad (1)$$

$$cM_u = 0.8a_t\sigma_y D + 0.5ND \left( 1 - \frac{N}{bDF_c} \right) \quad (2)$$

$$cQ_{mu} = \frac{cM_u}{h_0} \quad (3)$$

ここで、 $p_i$ :引張鉄筋比,  $F_c$ :コンクリート強度,  $M/Qd$ :せん断スパン比,  $p_w$ :帯筋比,  $\sigma_{wy}$ :帯筋降伏強度,  $b$ :柱幅,  $j$ :

応力中心距離,  $a_t$ :引張鉄筋断面積,  $\sigma_y$ :主筋降伏強度,  $N$ :軸力,  $D$ :柱せい,  $h_0$ :反曲点高さである。

せん断破壊型試験体では、柱のせん断強度に対して、袖壁付き柱とすることで2.5倍程度の強度向上が確認できる。また、曲げ破壊型試験体では、柱の曲げ強度時せん断力に対して、3倍程度の強度向上が確認された。

##### 4.2 袖壁付き柱のせん断強度

既往の評価式を用いて、袖壁付き柱のせん断強度を評価し、実験値と比較する。適用するせん断強度式としては、耐震診断指針<sup>6)</sup>に示される等価断面による略算式(耐震診断式)、壁谷澤ら<sup>7)</sup>の提案する分割累加式(壁谷澤式)および筆者ら<sup>8)</sup>の提案する柱と袖壁の接合部でのずれ変位を考慮した強度評価式(提案式)とする。



[耐震診断式]

$$Q_{su} = \max\{Q_{su1}, Q_{su2}, Q_{su3}, Q_{su4}\} \quad (4)$$

$$Q_{su1} = \left\{ \frac{0.053p_{te}^{0.23}(F_c+18)}{M/Qd_e+0.12} + 0.85\sqrt{p_{we}\sigma_{wy}} + 0.1\sigma_0 \right\} b_e j_e \quad (5)$$

$Q_{su2}$ :等価な長方形断面の耐震壁として算定

$Q_{su3}$ :独立柱として算定,  $Q_{su4}$ :雑壁として算定

ここで,  $p_{te}$ :等価断面の引張鉄筋比,  $d_e$ :等価断面せい,  $b_e$ :等価断面幅,  $p_{we}$ :等価補強筋比,  $\sigma_{wy}$ :補強筋等価降伏強度,  $j_e$ :有効せい ( $=7/8d_e$ ) である。

[壁谷澤式]

$$Q_{suk} = Q_{suc} + Q_{suw} + 0.1N \quad (6)$$

$$Q_{suc} = \left\{ \frac{0.053p_{tce}^{0.23}(F_c+18)}{M/Qd_{ce}+0.12} + 0.85\sqrt{p_{cwe}\sigma_{cwy}} \right\} b_{ce} j_{ce} \quad (7)$$

$$Q_{suw} = \left\{ \frac{0.053p_{twh}^{0.23}(F_c+18)}{M/Qd_w+0.12} + 0.85\sqrt{p_{wh}\sigma_{why}} \right\} t_w j_w \quad (8)$$

ここで,  $p_{tce}$ ,  $p_{twh}$ :柱要素および壁要素の引張鉄筋比,  $d_{ce}$ ,  $d_w$ :柱要素および壁要素の有効せい,  $b_{ce}$ :柱要素幅( $=b-t_w$ ),  $t_w$ :壁厚である。

[提案式]

$$Q_u = p_a \sigma_{ay} t h + (C_w + T_w - p_a \sigma_{ay} t h) \tan \theta_w + p_w \sigma_{wy} b j_c + (C_c + T_c - p_w \sigma_{wy} b j_c \cot \phi_c) \tan \theta_c \quad (9)$$

$$C_w = \frac{Q_{const} h_0 - N_{all} k - M_{const}}{K} \quad (10)$$

$$C_c = N_{all} - C_w \quad (11)$$

$$\text{ここで, } N_{all} = N + T_c + T_{c,m} + T_w \quad (12)$$

$$M_{const} = T_c (D/2 - d_{st}) + T_w (D/2 + L_w/2) \quad (13)$$

$$Q_{const} = p_a \sigma_{ay} t h_0 (1 - \tan \theta_w) + T_w \tan \theta_w + p_w \sigma_{wy} b j_c (1 - \cot \phi_c \tan \theta_c) + T_c \tan \theta_c \quad (14)$$

$$k = (D/2 - d_{sc}) - h_0 \tan \theta_c \quad (15)$$

$$K = \frac{2}{3} L_w + d_{sc} - h_0 (\tan \theta_w - \tan \theta_c) \quad (16)$$

ここで,  $p_a$ :鉛直接合筋比( $=a_v/t h$ ),  $a_v$ :鉛直接合筋の総断面積,  $\sigma_{ay}$ :接合筋の降伏強度,  $h$ :内法高さ,  $j_c$ :柱の応力中心距離,  $t$ :壁厚,  $C_w$ :壁板にかかる圧縮反力,  $C_c$ :柱にかかる圧縮反力,  $T_w$ :水平接合筋の引張降伏強度,  $T_c$ :柱引張主筋の引張降伏強度,  $\phi_c$ :柱のトラス機構作用角度( $=45^\circ$ ),  $\theta_w$ :壁板のアーチ機構作用角度,  $\theta_c$ :柱のアーチ機構作用角度,  $T_{c,m}$ :柱中間筋の引張強度,  $d_{sc}$ :柱引張縁から引張鉄筋までの距離,  $D$ :柱せい,  $L_w$ :袖壁長さである。

せん断強度を評価した結果を表-4に示す。表より, いずれの評価式を用いても実験値を安全側に評価することが分かる。全体せん断破壊の様相を示した試験体 S-LH では, いずれの評価式もほぼ同程度の計算値となった。ずれ変位が顕著に確認された試験体 S-HL では, ずれ変位を考慮した提案式が最も評価精度が良い結果となった。しかし, 提案式は評価精度にばらつきが大きく, 今回の

表-4 せん断強度の実験値と計算値の比較

試験体名	実験値 [kN]	計算値		
		耐震診断式 [kN]	壁谷澤式 [kN]	提案式 [kN]
S-LH	994	691	790	699
		(1.44)	(1.26)	(1.42)
S-HL	944	744	798	910
		(1.27)	(1.18)	(1.04)

( )内は実験値/計算値を表す

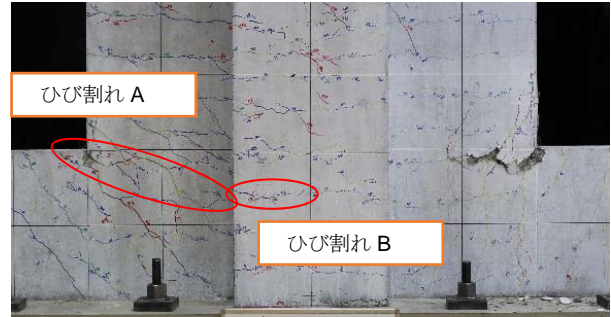


図-7 最大耐力時ひび割れ状況

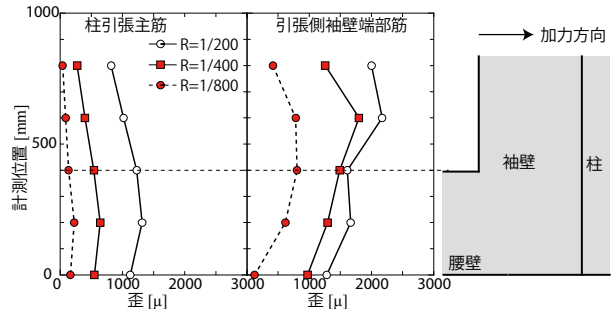


図-8 高さ方向歪分布

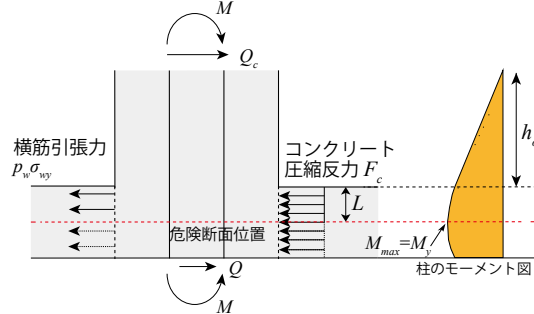


図-9 危険断面位置の評価

試験体においては, ずれ変位の影響が適切に評価できているとは言い難い。

#### 4.3 袖壁・腰壁付き柱曲げ強度および危険断面位置

腰壁が取り付く柱では, 腰壁の上端から柱脚側にやや入った位置が危険断面となると考えられる。腰壁付き柱の剛性や強度を適切に評価するためには, 危険断面位置を適切に推定する必要がある。

試験体 M-C-Sp の最大耐力時のひび割れ状況を図-7に示す。実験では, 最大耐力時に袖壁腰壁隅角部から斜めに生じた曲げひび割れ (図中のひび割れ A) および柱の曲げひび割れ (図中のひび割れ B) が大きく開いていることが確認され, 危険断面位置は腰壁上端から 100mm 程度入った位置に存在すると推察される。

試験体 M-C-Sp の各サイクルピーク時の高さ方向歪分布を図-8 に示す。図より、袖壁端部筋の歪は腰壁上端位置付近でピークとなっているのに対し、柱主筋は柱脚側に入った位置となっており、ひび割れから観測される破壊性状と概ね一致する結果となっている。

危険断面位置の評価方法として、平林ら<sup>3)</sup>の提案する評価式について検討する。提案評価式では、柱のモーメントが最大となる位置を危険断面位置とし、腰壁コンクリートの圧縮反力や横筋の引張反力と、柱の負担せん断力や曲げモーメントを比較することで、腰壁上端から危険断面位置までの長さ  $L$  を導出する式を示している。

$$L = -h_0 + \sqrt{h_0^2 + \frac{2M_y}{(F_c + p_w \sigma_{wy})t}} \quad (17)$$

ここで、 $h_0$ : 反曲点高さ、 $M_y$ : 袖壁付き柱の曲げ強度、 $F_c$ : 腰壁のコンクリート強度、 $p_w$ : 腰壁横筋比、 $\sigma_{wy}$ : 腰壁横筋の降伏強度、 $t$ : 腰壁厚さである。

本実験における試験体 M-C-Sp に対して上式を適用した場合、 $L=93\text{mm}$  となり、実験でひび割れの拡幅が確認された位置と概ね一致する結果となった。試験体 M-C における柱脚での曲げモーメントおよび、試験体 M-C-Sp における式(17)で計算された危険断面位置での曲げモーメントと変形角の関係を比較した結果を図-10 に示す。両試験体の曲げモーメント-変形角関係は概ね一致する結果となり、危険断面位置の評価手法は概ね妥当であると判断される。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 柱帯筋が少なく袖壁横筋の多い試験体 S-LH は、全体が一体となってせん断破壊する全体せん断破壊となり、一方で、柱帯筋が多く袖壁横筋の少ない試験体 S-HL は、柱と袖壁の接合部でのずれ変位が支配的な破壊性状を示した。
- 既往のせん断強度式を用いることで、せん断強度を安全側に評価できることを示した。
- 曲げ破壊型袖壁付き柱試験体では、十分な端部拘束がなされておらず、端部拘束筋による変形性能の向上を確認されなかった。変形性能を向上させるためには、端部拘束筋を密に配置するだけでなく、引張降伏による伸び上がりを抑制する必要があると考えられる。
- 曲げ破壊型袖壁・腰壁付き柱試験体では、腰壁の変形拘束効果により柱の危険断面位置が変動することが確認された。腰壁の圧縮反力および腰壁横筋の引張反力を考慮することで、今回の実験における危険断面位置を適切に評価できることを示した。

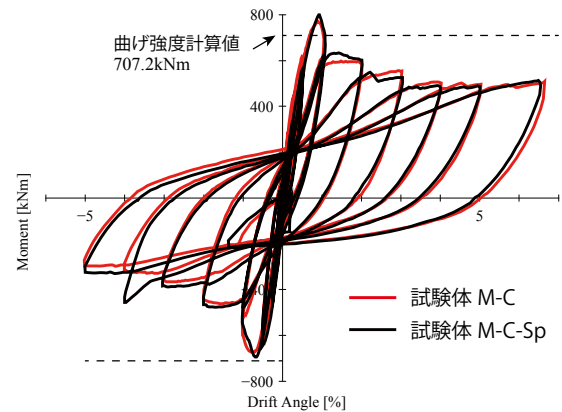


図-10 危険断面位置での曲げモーメントと変形角の関係の比較

## 謝辞

本実験は、国土交通省 総合技術開発プロジェクト「災害拠点建築物の機能継続技術の開発」(H25-H28)の一環で行われた実験である。記してここに謝意を表する。

## 参考文献

- 佐藤充晴, 壁谷澤寿海, 金裕錫, Hwang Hyun Seong: 厚い袖壁を有する RC 造柱の曲げ強度と靱性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33 No.2, pp.127-132, 2011.7
- 磯雅人, 本間礼人, 上原正敬, 小川敦久: 袖壁端部の拘束が袖壁付き RC 柱の靱性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.133-138, 2012.7
- 平林道大, 中村聡宏, 勅使川原正臣: 腰壁・垂壁付柱の危険断面位置および曲げ終局時せん断力の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.97-102, 2014.7
- 今阪剛, 中村聡宏, 勅使川原正臣: 鉄筋コンクリート造二次壁付き架構の耐力と復元力特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.289-294, 2014.7
- 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 日本建築防災協会: 2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 2001
- 衰根國, 壁谷澤寿海, 金裕錫, 壁谷澤寿一: 片側袖壁付き柱と両側袖壁付き柱のせん断耐力算定法の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.31 No.2, pp.169-174, 2009.7
- 中村聡宏, 勅使川原正臣: 袖壁補強柱および一体打の袖壁付き柱の終局強度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1057-1062, 2012.7