

論文 鉄筋コンクリート造袖壁・腰壁付き柱の曲げ性状に関する実験的研究

加藤 周二^{*1}・壁谷澤 寿一^{*2}・壁谷澤 寿海^{*3}・細川 洋治^{*4}

要旨：鉄筋コンクリート造袖壁付き柱 4 体の静的載荷実験を行い、腰壁・垂れ壁が袖壁付き柱の最大耐力や変形能力に与える影響を検討した。2 体は腰壁・垂れ壁が取り付く試験体とし、2 体は腰壁・垂れ壁の内法高さ部分の上下に剛な加力梁が取り付く試験体で、内法高さ部分に対して計算上のせん断余裕度が 1.1 程度になるような同じせん断スパン比の加力方法とした。曲げ終局強度に関して設計式や曲げ理論に基づく略算式等の妥当性を検証するとともに、腰壁・垂れ壁がコンクリート歪み分布や変形能力に与える影響を検討した。

キーワード：袖壁付き柱、静的載荷実験、曲げ強度、曲げ終局変形、剛域

1. はじめに

袖壁付き柱は一般的に変形能力が小さく耐力や剛性の評価も煩雑であるため、実際の設計では柱と雑壁の間にスリットを設けて構造的に切り離されることが少なくない。しかし袖壁を有する柱梁部材は高い剛性・耐力をもつことが既往の研究¹⁾²⁾でわかっている。したがって袖壁付き柱も構造性能を適切に評価することができれば非構造部材を有効に利用した設計が可能になる。

一方で既往の実験的検討は袖壁付き柱の上下端部は剛の梁としたものが多く、腰壁・垂れ壁を有する実験³⁾は少ない。耐震診断等の計算においても腰壁・垂れ壁を剛と仮定して内法高さ部分のみでモデル化して耐力が計算されることが多いが、この仮定は耐力を過大評価する可能性がある。

そこで、本研究では袖壁付き柱に腰壁・垂れ壁が取り付く試験体と内法高さで上下剛とした試験体を比較する実験を行い、腰壁・垂れ壁が耐力と変形能力に与える影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験の試験体は腰壁・垂れ壁・両側袖壁付きの柱試験体 2 体(No.1,2, 以下腰壁垂れ壁試験体と略称)とこれを内法高さで上下の加力梁を剛とした両側袖壁付き柱試験体 2 体(No.3,4, 以下袖壁試験体と略称)の計 4 体である。各試験体の配筋詳細図を図-1 に示す。また試験体の諸元

を表-1 に示す。壁厚さを(No.1,3)では 75mm(No.2,4)では 112.5mm としている。

各試験体は実大スケールの約 1/2 を想定しており、柱断面(300×300mm)、袖壁付き柱の内法長さ(1000mm)、袖壁の張出長さ(300mm)は共通とした。袖壁および腰壁・垂れ壁付き柱試験体における腰壁高さは 400mm、垂れ壁高さは 200mm である。また、袖壁および腰壁・垂れ壁は同一厚さとし、柱幅の中央に接合している。

柱の配筋は全ての試験体で共通しており、主筋は 12-D13($P_s=1.69\%$)、帯筋は D6@40($P_w=0.53\%$)とした。壁筋は全てダブル配筋(No.1,3:D4@100 ダブル, No.2,4:D4@70 ダブル)とし、袖壁の端部補強筋は No.1,3 で 2D10, No.2,4 で 3D10 とした。袖壁と腰壁の交差部分に開口補強筋は配していない。また、袖壁横筋、腰壁縦筋はいずれも壁端部で U 字型に折り曲げ配筋し、袖壁横筋は柱部分で重ね継ぎ手により定着している。材料特性を表-2, 表-3 に示す。コンクリートかぶり厚さは 15mm とした。鉄筋種別は柱主筋(D13)については SD345, その他の鉄筋は SD295 である。柱帯筋(D6)および壁筋(D4)の降伏強度は降伏点の明確でない復元力特性であるため 0.2% オフセット耐力と定義したが、いずれの降伏点耐力も規格降伏点強度(295MPa)を下回った。

コンクリート強度は呼び強度 27N/mm² の調合としたが、シリンダー試験による強度は 45N/mm² と呼び強度をかなり上回った。

表-1 試験体諸元

試験体	柱			壁				軸力(kN) (柱軸力比)	反曲点高さ M/Q(mm)
	断面 B×D (mm)	主筋 P _s	帯筋 P _w	高さ (mm)	厚さ (mm)	縦横筋	端部補強筋		
No.1	300×300	12-D13 (1.69%)	D6@40 (0.53%)	腰壁 400	75	2D4@100	2D10	810 (0.2)	1200
No.2				垂れ壁 200	112.5	2D4@70	3D10		
No.3				なし	75	2D4@100	2D10		
No.4					112.5	2D4@70	3D10		

*1 東京大学 工学系研究科 建築学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 研究官・博士(工学) (正会員)

*3 東京大学 地震研究所 教授 工博 (正会員)

*4 東京大学 地震研究所 特別研究員 博士(工学) (正会員)

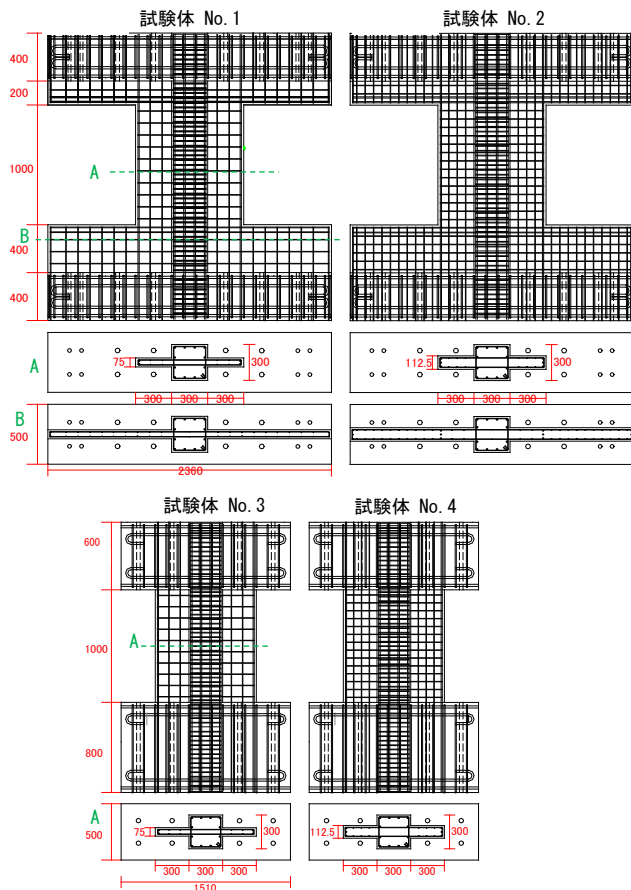


図-1 試験体配筋詳細図

表-2 コンクリート材料特性

試験体	No.1	No.2	No.3	No.4
ヤング係数 (kN/mm ²)	22.3	24.7	21.9	24.9
圧縮強度 (N/mm ²)	45.4	42.7	45.4	44.1
最大耐力時歪み (μ)	2952.5	2745	2792.5	2585

表-3 鉄筋材料特性

種類	D13 (SD345)	D10 (SD295)	D6 (SD295)	D4 (SD295)
ヤング係数 (kN/mm ²)	148.2	155.6	115.5	87.1
降伏強度 (N/mm ²)	369	356	271	215
降伏時歪み (μ)	2490	2290	4344	4464

2.2 計測载荷方法

载荷による試験体の変形は全体水平変形、全体鉛直変形、壁および柱部分曲率変形(壁・柱側端部の鉛直変形を計測し算定)、腰壁端部変形等を計測している。腰壁垂れ壁試験体の全体変形は腰壁・垂れ壁部分も含めている。鉄筋の歪みは柱主筋、壁縦横筋、端部補強筋を中心に計測している。载荷方法は変位制御の正負交番繰り返し载荷とし、ピーク時の部材変形角(全体水平変形/柱内法高さ)は $\pm 1/400(\text{rad})$ 、 $\pm 1/300(\text{rad})$ 、 $\pm 1/200(\text{rad})$ 、 $\pm 1/150(\text{rad})$ 、 $\pm 1/100(\text{rad})$ 、 $\pm 1/75(\text{rad})$ 、 $\pm 1/50(\text{rad})$ 、 $\pm 1/37.5(\text{rad})$ 、 $\pm 1/25(\text{rad})$ としている。载荷装置と方法を図-2に示す。すべての試験体でせん断スパン長さ M/Q は 1200mm とし、

柱断面に対するコンクリート軸力比は 0.2 としている。水平力は両端ピン支承を有する 1000kN ジャッキ 2 台により伝達させ、軸力はピンローラー支承を有する 2000kN ジャッキにより伝達させている。

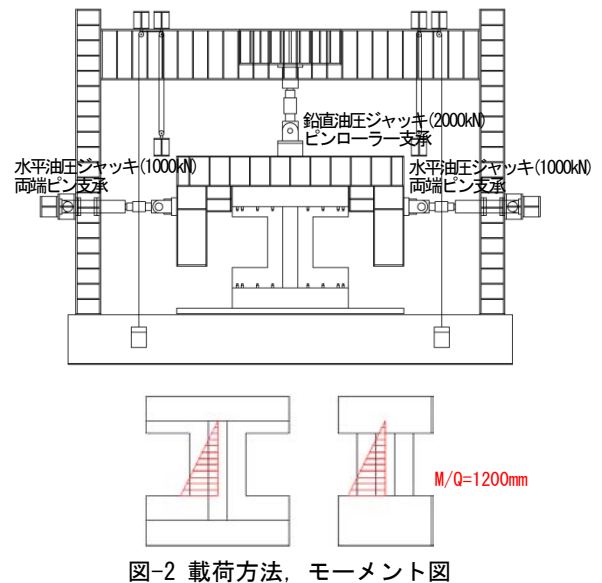


図-2 载荷方法、モーメント図

3. 実験結果および考察

3.1 破壊経過

各試験体の水平加力終了時の破壊状況を写真-1に示す。全ての試験体で曲げ降伏後に圧縮側袖壁端部に圧縮破壊が生じて最大耐力に達し、その後水平変形角の増加に伴い徐々に水平耐力が低下している。

(1) No.1(袖壁・腰壁垂れ壁付き、壁厚：薄い)

1/400rad サイクルに袖壁と腰壁の交差部分で曲げひび割れが、1/200rad サイクルで柱端部に曲げひび割れが発生した。1/150rad サイクルで袖壁端部に圧縮破壊が生じた。1/37.5rad サイクルで柱端部に圧縮破壊が生じた。袖壁端部筋は 1/400rad サイクルで降伏し、柱主筋は 1/75rad サイクルで降伏が確認された。腰壁端部筋が 1/100rad サイクルで降伏した。1/25rad サイクルに袖壁端部筋が引張破断した。柱帯筋と袖壁の横筋は最後まで降伏しなかった。

(2) No.2(袖壁・腰壁垂れ壁付き、壁厚：厚い)

1/400rad サイクルに袖壁と腰壁の交差部分で曲げひび割れが、1/300rad サイクルで柱端部に曲げひび割れが発生した。1/150rad サイクルで袖壁端部に圧縮破壊が生じた。1/37.5rad サイクルで柱端部に圧縮破壊が生じた。袖壁端部筋は 1/400rad サイクルで降伏し、柱主筋は 1/100rad サイクルで降伏が確認された。腰壁端部筋(横筋)が 1/200rad サイクルで降伏し、袖壁横筋は 1/75rad サイクルで降伏した。1/37.5rad サイクルに袖壁端部筋が引張破断した。柱帯筋は最後まで降伏しなかった。

(3) No.3(袖壁のみ、壁厚：薄い)

1/100rad サイクル加力中に袖壁端部の圧縮破壊域が広

がったことで変位が進み、予定していた変位を超えた。
 1/400rad サイクルに袖壁端部に曲げひび割れが生じ、
 1/400rad サイクルに柱端部にも曲げひび割れが発生した。
 1/150rad サイクルで袖壁端部に圧縮破壊が、1/50rad サイクルで柱端部に圧縮破壊が生じた。袖壁端部筋は1/400rad サイクルで降伏した。柱主筋は計測不良により計測できなかった。袖壁横筋は 1/75rad サイクルで降伏した。1/37.5rad サイクルで袖壁端部筋が破断した。柱帯筋は最後まで降伏しなかった。

(4) No. 4(袖壁のみ、壁厚：厚い)

1/400rad サイクルに袖壁端部に曲げひび割れが生じ、
 1/400rad サイクルで柱端部にも曲げひび割れが発生した。
 1/150rad サイクルで袖壁端部に圧縮破壊が、1/50rad サイクルで柱端部に圧縮破壊が生じた。袖壁端部筋は1/400rad サイクルで降伏し、柱主筋は 1/200rad サイクルで降伏した。袖壁横筋は 1/75rad サイクルで降伏が確認された。1/37.5rad サイクルに袖壁端部筋が引張破断した。柱帯筋は最後まで降伏しなかった。

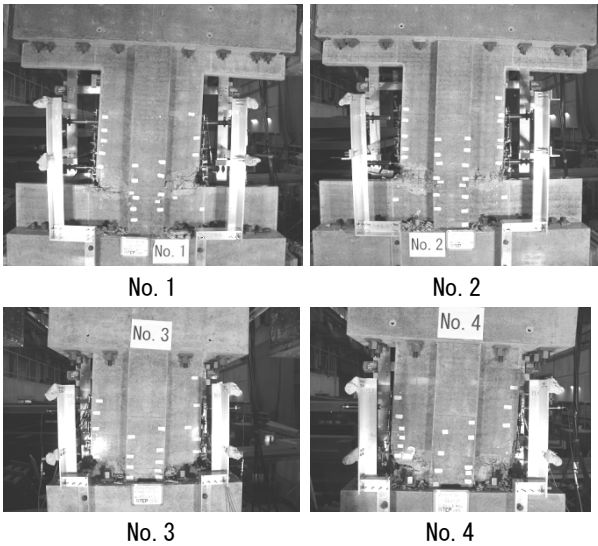


写真-1 最終変形時(1/25rad)の損傷状況

3.2 荷重変形角関係

各試験体の荷重変形角関係を図-3に示す。また各試験体の最大耐力と最大耐力時変形角、曲げ限界変形角を表-4に示す。曲げ限界変形は耐力が最大耐力の95%以上を保つサイクルで、最終のサイクルのピーク時と定義した。腰壁の有無で比較すると、壁厚の薄い試験体(No.1, No.3)では最大耐力で10%程度の違いがあったが、厚い試験体(No.2, No.4)では最大耐力はほぼ同じであった。今回の実験の最大耐力に対しては腰壁による部材の可撓長さの影響はそれほど見られなかった。変形能力については壁厚に関わらず腰壁がある試験体で袖壁のみの試験体より曲げ限界変形角が大きくなるという結果となった。

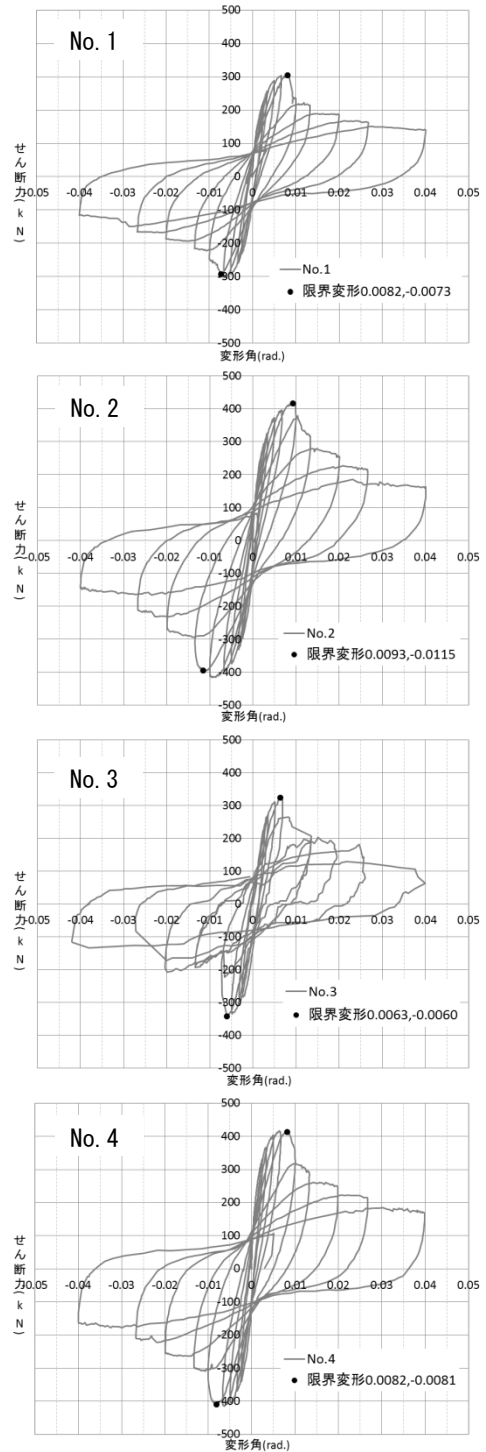


図-3 荷重変形角関係

表-4 最大耐力および変形角

試験体		最大耐力 (kN)	最大耐力時変形角(rad)	曲げ限界変形角(rad)
No.1	+	304.5	1/123	1/123
	-	-302.5	-1/163	-1/138
No.2	+	415.5	1/107	1/107
	-	-416.5	-1/107	-1/87
No.3	+	322.0	1/158	1/158
	-	-344.0	-1/167	-1/167
No.4	+	417.0	1/157	1/122
	-	-414.5	-1/158	-1/123

3.3 最大耐力

4 試験体の結果を既往の袖壁付き柱の強度式と比較する。袖壁、腰壁付き柱も部材長さを腰壁上端から垂れ壁下端までとした内法スパンで計算した。計算式は以下に示した式を使用した。実験値と計算値の比較を表-5に示す。

(1) 曲げ理論に基づいた略算式⁴⁾

$$M_u = \sum(a_i \cdot \sigma_y \cdot j_i) + N \cdot j_N \quad (1)$$

$$j_i = d_i - L_{cc} \quad (2)$$

$$A_{cc} = \frac{\sum(a_i \cdot \sigma_y) + N}{0.85F_c} \quad (3)$$

ただし各変数は図-4 および以下の通り。

a_i : 引張領域にある鉄筋の断面積(圧縮域近辺は無視してよい), σ_y : 引張鉄筋の降伏強度, j_i : 引張鉄筋とコンクリート圧縮域の応力中心間距離, d_t : コンクリート圧縮縁から引張鉄筋までの距離, N : 軸力, j_N : 軸力作用位置(柱芯)と圧縮域の応力中心間距離, A_{cc} : コンクリート圧縮域の面積 L_{cc} : コンクリート圧縮域中心の圧縮縁からの距離で,

$A_{cc} \leq A_{w1} = (t_w \cdot L_{w1})$ の場合は,

$$L_{cc} = A_{cc} / (2t_w) \quad \text{---(1-1)}$$

$A_{cc} > A_{w1} = (t_w \cdot L_{w1})$ の場合は, 柱幅 B_c を考慮して,

$$L_{cc} = \frac{A_{w1} \cdot L_{w1}}{A_{cc}} + (1 - \frac{A_{w1}}{A_{cc}})(L_{w1} + \frac{A_{cc} + A_{w1}}{2B_c}) \quad \text{---(1-2)としてよい。}$$

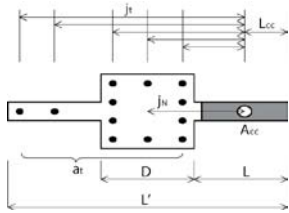


図-4 曲げ略算式概念図

(2) 耐震診断基準の曲げ強度式⁵⁾

$$M = (0.9 + \beta) \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D \left\{ 1 + 2\beta - \frac{N}{b_e \cdot D \cdot F_c} \left(1 + \frac{a_t \cdot \sigma_y}{N} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

β : 張出比, a_t : 柱引張鉄筋断面積(mm²), σ_y : 降伏強度(N/mm²), D : 柱せい(mm), N : 軸力(N), b_e : 等価壁厚(mm), F_c : コンクリート強度(N/mm²)

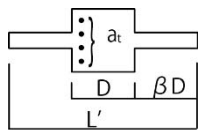


図-6 耐震診断基準式

(3) 分割累加モデルによるせん断終局強度式⁶⁾

$$Q_{su} = Q_{suw} + Q_{suc} + 0.1N \quad (5)$$

$$Q_{suw} = \left\{ \frac{0.053 p_{nve}^{0.23} (F_c + 18)}{\frac{M}{Qd_w} + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \sigma_{why}} \right\} t_w j_w \quad (6)$$

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

$$p_{nve} = \frac{a_{tw}}{t_w d_w} \quad (a_{tw}: \text{引張鉄筋, 所で壁縦筋 2 段目まで})$$

$$\frac{M}{Q}: \text{せん断スパン, ただし, } 0.5 \leq \frac{M}{Qd_w} \leq 2 \text{ とする}$$

$$d_w = 0.95(D + l_1 + l_2), \quad p_{wh} = a_{wh} / t_w s_w: \text{所で壁横筋比}$$

$$\sigma_{why}: \text{壁筋降伏強度, } j_w = \frac{7}{8} d_w$$

$$p_{tce} = \frac{a_{tc}}{(B - t_w) d_{ce}}$$

(両側袖壁付き柱の場合, a_{tc} : 柱引張側主筋1段目まで)

$$p_{cwe} = \frac{a_{tc} - a_{tw}}{(B - t_w) d_{ce}}$$

(片側袖壁付き柱の場合, a_{tw} : 引張側壁縦筋2段目まで)

$$\frac{M}{Q}: \text{せん断力スパン, ただし, } 1 \leq \frac{M}{Qd_{ce}} \leq 3 \text{ とする}$$

$$d_{ce} = 0.95D, a_w: \text{柱帯筋 1 組の断面積,}$$

$$p_{cwe} = \frac{a_w - p_{wh} t_w s}{b_{ce} s} :$$

柱等価帯筋比(壁横筋が柱に定着されている場合)

$$p_{cwe} = \frac{a_w}{b_{ce} s} :$$

柱等価帯筋比(壁横筋が柱を通して配筋されている場合)

s : 柱帯筋間隔, p_{wh} : 所で壁横筋比

$$\sigma_{cwy}: \text{帯筋降伏強度, } B: \text{柱幅, } j_c = \frac{7}{8} d_{ce}, b_{ce} = B - t_w$$

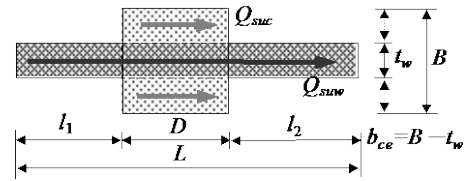


図-7 分割累加モデル

表-5 実験値と計算値の比較

最大耐力	No.1	No.2	No.3	No.4
実験値 (kN)	304	415.5	322	417
	-302.5	-416.5	-344	-414.5
(1)曲げ略算式	275	390	275	396
(2)耐震診断基準式	332	337	332	339
(3)せん断強度(分割累加)	312	359	312	362
せん断余裕度(Qsu/Qmu)	1.13	0.92	1.13	0.91

せん断余裕度の Q_{su} は(5)式による強度, Q_{mu} は(1)式による強度で計算した。No.2, No.4 ではせん断余裕度が 1 以下で計算上せん断破壊先行だが実験では曲げ破壊となった。これはせん断強度算定に使用した式が荒川式を袖

壁付き柱に適用させた式であるため、安全側の算定となったためと思われる。精度については曲げ略算式は全ての試験体で安全側かつ誤差10%程度の範囲に収まっている。耐震診断基準式は壁厚が厚い試験体(No.2,4)で実験値を過小に評価し、比較的精度は良くない結果となった。

3.4 コンクリート歪み

図-8に示す区間に変位計を取り付け、変位を測定区間で除しコンクリート歪みを計算した。図-9に計算した区間毎の平均歪みをピーク時圧縮側鉛直分布として示す。壁厚が等しい試験体で比較すると腰壁垂れ壁試験体が同

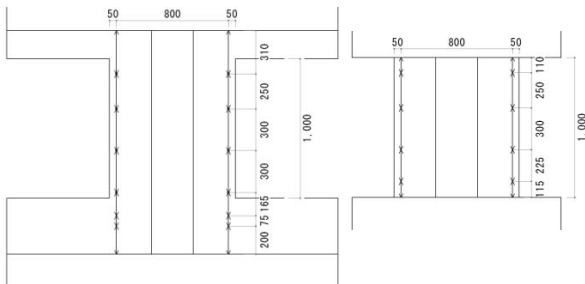


図-8 変位測定位置

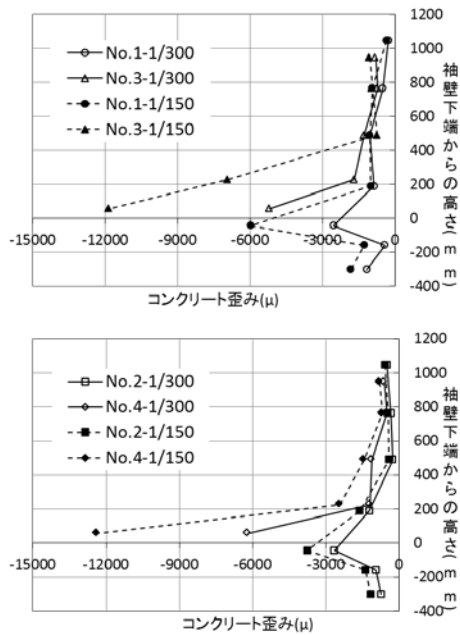


図-9 コンクリート歪みの分布

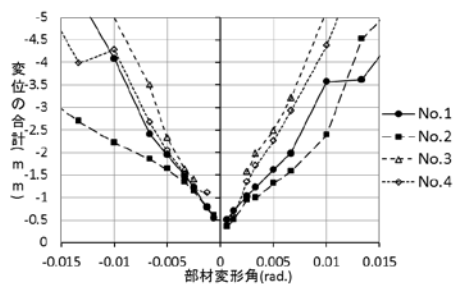


図-10 圧縮側合計変位の推移

変形角で最大歪みが小さいことがわかる。No.3,4は袖壁下端が剛な梁で、歪みは下端に向かって著しく大きくなっている。一方袖壁下端に腰壁が取り付くNo.1,2は袖壁下端で歪み最大となるが、値は比較的小さい。これは腰壁部分もある程度変形し歪みが局所的にならなかったためと考えられる。また上端から下端の変位を合計した値の変形角毎の推移を図-10に示す。同変形角においてNo.3,4の合計変位が大きいことから袖壁試験体は圧縮側の損傷が早期に進んでおり結果としてNo.3,4の曲げ限界変形角が小さい値となったと思われる。

3.5 ひび割れ

図-11に1/75(rad)での各試験体のひび割れ状況を示す。壁が厚い試験体ではひび割れ数が多く見られる。また図-11の範囲(袖壁腰壁端)のひび割れについて図-12に各変形角時の壁部分の最大ひび割れ幅の推移を、図-13に計測した壁部分ひび割れ幅の合計を示す。計測はクラックゲージで行った。図-12から腰壁垂れ壁試験体の方が最大ひび割れ幅が大きくなったことが特に壁厚が等しい試験体を比較するとわかる。一方で図-13より計測したひび割れ幅の合計は袖壁試験体(No.3,4)の方が1/300(rad)以降は大きくなっている。このことから腰壁垂れ壁試験体は少数のひび割れが集中的に開いていたと推定される。

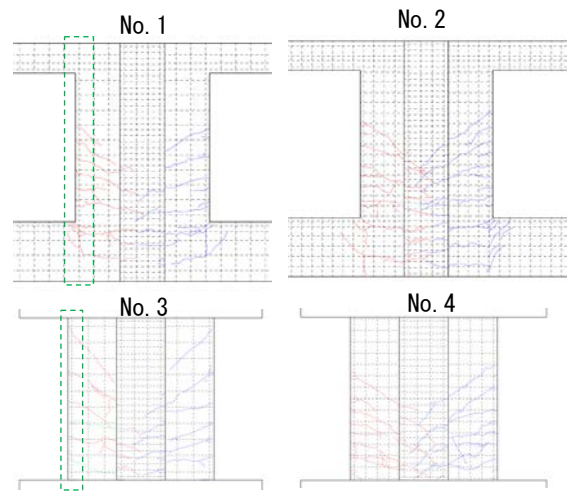


図-11 1/75(rad.)でのひび割れ状況

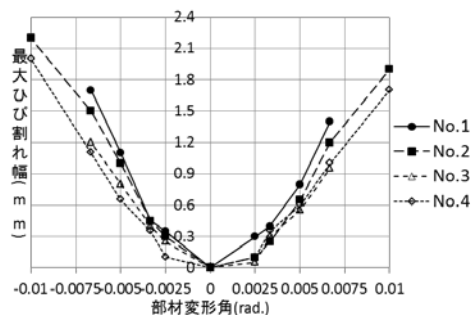


図-12 部材角毎の最大ひび割れ幅

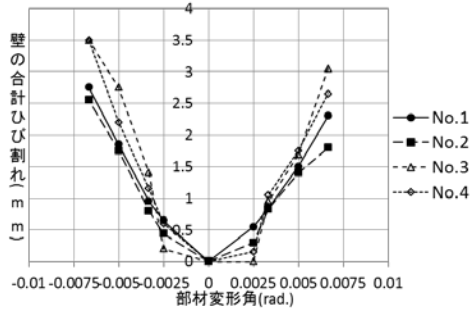


図-13 部材角毎のひび割れ幅の合計

3.6 曲げ限界変形角 R_u

既往の論文¹⁾で袖壁付き柱の曲げ終局時の限界変形角 R_u の簡易評価法が提案されている。以下に式を引用して、今回の実験への適用を検討した。中立軸位置は曲げ略算式時に求めた中立軸を用いた。

$$R_u = c \times l_h \times \phi_u \quad (8)$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{x_n} \quad (9)$$

$$l_h = 2l_w \quad (10)$$

ここで c : 変形係数, l_h : ヒンジ領域長さ(mm), ϕ_u : 曲率 (1/mm), ε_{cu} : 圧縮縁終局コンクリート歪み(0.003 とする), x_n : 圧縮縁-中立軸位置の距離(mm)

図-14 に $c=4.5$ としたときの計算値と実験値の比較を示す。実験値の限界変形角は 3.2 で述べたように最大耐力 95% 低下時とし、正負で小さい方の値を用いた。既往の評価法ではせん断変形成分や弾性変形成分も含めるため $c=6$ 程度にすると適合性がよい結果になっていたが、今回の実験では $c=4\sim 4.5$ 程度に対応している。今回の実験では計算上のせん断余裕度は約 1 だが、結果から曲げ変形成分を計算すると全体変形の約 8 割と大きい比率であった。したがってせん断変形等の成分が小さいため、既往の実験よりも小さい係数で適合していると考えられる。

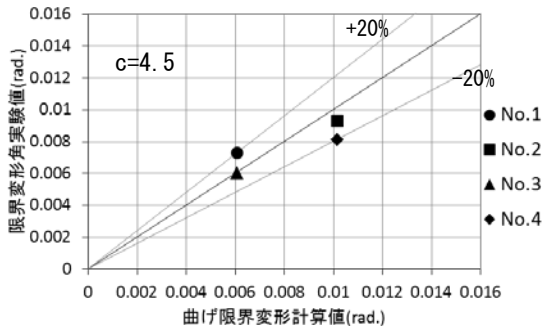


図-14 R_u 計算値と R_u 実験値の比較

4. まとめ

腰壁・垂れ壁・両側袖壁付きの柱試験体 2 体(No.1,2, 腰壁・垂れ壁試験体)とこれを内法高さで上下の加力梁を剛とした両側袖壁付き柱試験体 2 体(No.3,4, 袖壁試験体), 壁厚さを(No.1,3)では 75mm, (No.2,4)では 112.5mm とし て実験を行い、以下の結果を得た。

- (1). 腰壁垂れ壁試験体の最大耐力は、袖壁試験体に比較して、壁厚が薄い試験体では 10% 程度耐力低下したが、厚い試験体ではほぼ同等であった。
- (2). 最大耐力の計算値は、柱内法を部材長さとして、曲げ略算式、完全塑性理論による曲げ強度算定でも式の安全率の範囲で概ね評価可能であった。
- (3). 圧縮側コンクリート歪みは腰壁垂れ壁試験体では袖壁試験体より同じ変形角で明らかに小さい値であった。
- (4). これにより、本実験において変形性能は腰壁垂れ壁試験体の方がやや大きい結果になった。

謝辞

本研究は文部科学省 科学研究費基金(若手(B)) 「袖壁と腰壁が付帯する鉄筋コンクリート柱部材の耐震性能に関する研究」(課題番号 23760540 研究代表者 壁谷澤寿一)により実施された。

参考文献

- 1) 東洋一ほか：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 2：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, pp.1289-1290, 1974
- 2) 東洋一, 大久保全陸：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 9: CW シリーズ 袖壁付き柱の実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1305-1306, 1974
- 3) 野村設郎, 大森茂樹：RC 造垂れ壁・袖壁・腰壁付柱の剛域及び復元力特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1451-1452, 1981
- 4) 壁谷澤寿海ほか：鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の変形性能に関する実験的研究(その 3・曲げ理論による変形性能の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.139-140, 2011.8
- 5) 財団法人日本建築防災協会：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, pp.229-230,235, 2005.2
- 6) 壁谷澤寿海, 壁谷澤寿成：袖壁付き柱の実用せん断強度式, 地震工学会大会梗概集, pp.248-249, 2007