

論文 RC 造柱耐力・破壊性状に及ぼす袖壁形状および袖壁横筋の影響

大宮幸*¹・中村陽介*²・松浦康人*¹・林静雄*³

要旨: 袖壁が柱の破壊性状や終局耐力に与える影響を明確に把握することを目的とし、変動要因を壁張出長さ、壁厚さ、壁横筋、柱帯筋とした袖壁付き柱の逆対称繰返し載荷実験を行なった。結果、袖壁の圧壊に伴う耐力低下は起こるが、袖壁形状に拘らず最大耐力後の繰返し時には柱の挙動に近づき安定した履歴となった。また柱・袖壁境界上でスリップした後に曲げ破壊した試験体の破壊過程と袖壁横筋の効果を明らかにした。

キーワード: 袖壁付き柱、袖壁長さ、袖壁厚さ、破壊性状、ダウエル効果

1. はじめに

袖壁は柱耐力を高めるなど構造体として効果があるにも関わらず、袖壁形状や袖壁横筋比等が柱の破壊性状や終局耐力に与える影響が不明確のため、構造設計の際にはスリット等により周辺部材から絶縁され、骨組崩壊形には影響を及ぼさないように設計されている。

そこで本研究では、両側袖壁付き柱の逆対称載荷実験を行なった。変動要因は壁長さ、壁厚さ、袖壁横筋、柱帯筋とし、これら要因が柱の終局耐力や破壊性状に与える影響を考察している。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体図を図-1に、試験体諸元を表-1に示す。また、試験体に使用した鋼材およびコンクリートの材料特性を表-2に示す。

計画した試験体の柱は、学校施設の耐震補強マニュアル RC校舎偏りの第6章補強計算例にある桁行き方向の中柱を参考に製作し、壁長さ、壁厚さ、壁横筋、柱帯筋を変動要因とした。

共通要因は、柱の形状寸法・柱主筋比 P_g ・袖壁縦筋比 P_{sv} で、柱幅 D と柱せい B は共に 200mm で、主筋は 6-D13 ($P_g=2.0\%$) とした。また、袖壁縦筋は、 $\phi 4 @ 100$ mm で配筋した。

変動要因は、

袖壁厚比 α ($\alpha = t/B$, t : 袖壁厚さ)・袖壁張出比

β ($\beta = d/D$, d :

袖壁張出長さ)

袖壁横筋比 P_{sh} ・

柱帯筋比 P_w と

している。袖壁

形状について

は、袖壁厚比 α

が 0.25 (040-100-

S 以外) と 0.40

(040-100-S) の 2 タイプ、袖壁張出比 β が 0.5 (025-

050-S), 1.0 (025-100-S・040-100-S), 1.5 (025-150-

S・025-150-CS・025-150-WS) の 3 タイプ設定し

た。袖壁横筋は、 $\phi 6 @ 100$ (025-150-WS) で配

筋したものと、 $\phi 4 @ 100$ (025-150-WS 以外) で

配筋したものの 2 タイプ設定した。また、帯筋は、

025-150-CS については柱部分に $\phi 7 @ 100$ を配筋

し、その他の試験体については $\phi 5 @ 100$ で配筋

した。なお、丸鋼は焼きなまし処理を施し降伏強

度 σ_y を低下させたものを使用した。

2.2 加力方法

加力装置図を図-2に示す。図に示す加力装置

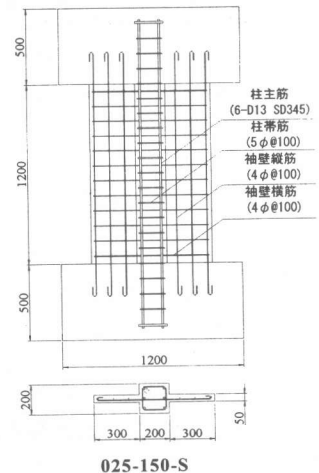


図-1 試験体図

*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境物理工学専攻 工修 (正会員)

*2 神奈川大学 工学部 建築学科

*3 東京工業大学教授 建築物理センター 工博 (正会員)

表-1 試験体諸元

試験体名	変動要因				共通要因			
	袖壁			柱	袖壁	柱		
	壁厚比 α	壁張出比 β	壁横筋比 Psh (%)	柱帯筋比 Pw(%)	壁縦筋比 Psv (%)	柱主筋比 Pg(%)	断面形状 B×D(mm)	軸力比 σ_0/F_c
025-100-S	0.25 (t: 50mm)	1.00 (b: 200mm)	0.26 (ϕ 4@100)	0.20 (ϕ 5@100)	0.26 (4 ϕ -@100)	2.0 (%) (6-D13)	200×200	0.1
025-050-S		0.50 (b: 100mm)						
025-150-S		1.50 (b: 300mm)						
040-100-S	0.40 (t: 80mm)	1.00 (b: 200mm)	0.16 (ϕ 4@100)	0.39 (ϕ 7@100)	0.16 (4 ϕ -@100)			
025-150-WS	0.25 (t: 50mm)	1.50 (b: 300mm)	0.56 (ϕ 6@100)		0.26 (4 ϕ -@100)			
025-150-CS			0.26 (ϕ 4@100)					

試験体名: 0 2 5 - 1 5 0 - C S

α β WS: 袖壁横筋比が多いタイプ CS: 柱帯筋比が多いタイプ S: 標準タイプ

D: 柱幅(mm), B: 柱せい(mm), d: 袖壁張出長さ(mm), t: 袖壁厚さ(mm), α : 袖壁厚比(t/B), β : 袖壁張出長比(d/D), Pt: 柱の引張鉄筋比(%)
Pw: 柱帯筋比(%), Psv: 袖壁縦筋比(%), Psh: 袖壁横筋比(%), σ_0/σ_B : 柱の断面面積に対する軸力比

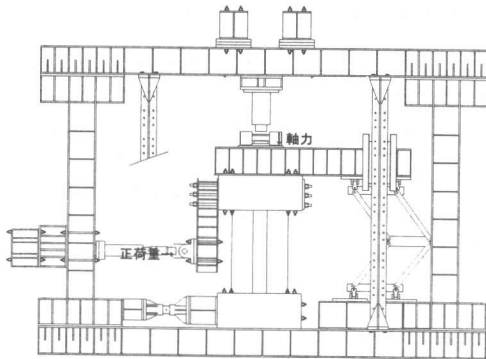


図-2 加力装置図

で試験体中央部が反曲点になるような逆対称正負交番繰返し载荷を行なった。また、上下スタブの相対水平変位を柱高さで除した値を変形角Rとして測定し、荷重9.8kNまで正負方向に荷重制御を1回、その後は変形角による変位制御によって、R=±1/800, ±1/400, ±1/200, ±1/100, ±1/50を各々2回繰り返した。軸力については、柱の長期軸力に相当する軸方向応力度 σ_0 を2.5MPa（軸力比: $\sigma_0/\sigma_B=0.1$, σ_B : コンクリート圧縮強度）として、 $\sigma_0=2.4\sim 2.7\text{Mpa}$ の間に収まるように制御した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

表-3に実験結果一覧を、図-3に荷重-変形角曲線を、図-4に最終破壊状況を示す。 $\beta=0.5$, 1.0の試験体025-050-S, 025-100-S, 040-100-Sは、

コンクリート

試験体名	σ_B (MPa)	E_c (GPa)
025-100-S	26.5	15.8
025-050-S	26.8	15.9
040-100-S	27.3	15.9
025-150-WS	27.5	15.9
025-150-S	27.8	15.9
025-150-CS	27.9	15.9

鋼材

種別	σ_y (MPa)	σ_t (MPa)	E_s (GPa)
D13	382	553	178
ϕ 4	352	384	201
ϕ 5	454	519	202
ϕ 6	455	543	203
ϕ 7	341	394	205

σ_y : 鉄筋降伏強度(MPa), σ_t : 鉄筋引張強度(MPa), E_s : 鉄筋ヤング率(GPa)
(ϕ 4~ ϕ 7: 焼きなましにより σ_y を低下)
 σ_B : コンクリート圧縮強度(MPa), E_c : コンクリートヤング率(GPa)
(σ_B , E_c は各試験体の材齢で線形補完)

表-2 材料特性

柱主筋が降伏したのち圧縮側袖壁縁が圧壊し、曲げ破壊した。 $\beta=1.5$ の試験体025-150-S, 025-150-CS, 025-150-WSは、 $R=1/250\text{ rad}\sim 1/200\text{ rad}$ で袖壁・柱の境界上でスリップを起こした。各試験体の破壊性状は以下の通りである。

025-100-S: $R=1.6\times 10^{-3}\text{ rad}$ で袖壁とスタブの境界に曲げひび割れが発生した。その後 $R=2.7\times 10^{-3}\text{ rad}$ で新たに柱に曲げせん断ひび割れが発生し、進展・開口していった。また、同荷重において、中腹付近では柱と袖壁の境界に細かいひび割れが発生した。その後 $R=3.5\times 10^{-3}\text{ rad}$ で袖壁縦筋が、また、 $R=6.2\times 10^{-3}\text{ rad}$ で柱主筋が降伏し、最終的には $R=9.6\times 10^{-3}\text{ rad}$ で最大耐力となった。それ以降は耐力が若干低下したものの、その後は安定した履歴となった。

025-050-S: まず $R=1.7\times 10^{-3}\text{ rad}$ で袖壁とスタブの境界に曲げひび割れを確認した。 $R=5.0\times 10^{-3}$

表-3 実験結果一覧

試験体名	正負	eQbc (kN)	eQsc (kN)	eQmax (kN)	Rmax ($\times 10^{-3}$ rad)	破壊形式	cQsu (kN)	cQb1 (kN)	cQb2 (kN)
025-100-S	+	47.0	71.5	92.1	9.6	B	104.0	127.2	96.6
	-	50.0	74.5	99.7	5.3				
025-050-S	+	27.4	55.1	67.4	16.4	B	83.7	88.7	66.1
	-	27.4	59.3	66.2	9.3				
025-150-S	+	52.4	117.6	123.0	3.7	SL1	128.9	168.2	139.3
	-	53.9	113.2	135.7	5.4				
040-100-S	+	58.8	100.0	133.5	8.0	B	116.6	131.2	120.1
	-	40.2	100.0	131.3	5.1				
025-150-WS	+	71.5	124.5	139.7	3.6	SL2	139.2	168.2	139.3
	-	50.0	123.5	143.1	3.8				
025-150-CS	+	64.0	117.6	147.5	5.3	SL1	140.1	168.4	139.3
	-	55.4	121.5	140.6	4.3				

cQsu: せん断終局強度式によるせん断耐力計算値(kN), cQb1: 曲げ終局強度式による曲げ耐力計算値(kN), cQb2: e関数法を用いた曲げ解析による曲げ耐力計算値(kN)

eQbc: 曲げひび割れ荷重実験値(kN), eQsc: せん断ひび割れ荷重実験値(kN), eQmax: 最大耐力実験値(kN), Rmax: 最大耐力時の部材角実験値(kN)

B: 曲げ破壊, SL1: 袖壁と柱境界でのスリップ破壊, SL2: 袖壁とスタブ境界でのスリップ破壊

■cQsu: 等価断面に置換して修正荒川式を用いたせん断終局強度²⁾ (kgf: 本論文ではSI単位で統一してあるが、この式は実験式であるためkgf, cm単位を用いる)

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.53p_t^{0.23}(Fc+180)}{M/(Q \cdot de) + 0.12} + 2.7\sqrt{p_{we} \cdot \sigma_{wy}} \right\} b_e \cdot j_e + 0.1N \quad p_{we}\sigma_{wy} = p_w\sigma_w \left(\frac{b}{b_e} \right) + p_s\sigma_s \left(\frac{t}{b_e} \right) \quad \text{ただし } 0.5 \leq M/(Q \cdot d_e) \leq 2$$

■cQb1: 曲げ終局強度式³⁾ (N・mm)

$$M_u = (0.9 + \beta) a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D \left\{ 1 + 2\beta - \frac{N}{b_e \cdot D \cdot F_c} \left(1 + \frac{a_t \cdot \sigma_y}{N} \right)^2 \right\} \quad N \leq \left\{ 0.5 \left(\frac{bc}{b} \right) (0.9 + \beta) - 13pt \right\} bDF_c$$

at: 引張主筋断面積(mm²), ac: 引張主筋断面積(mm²), D: 柱せい(mm), B: 柱幅(mm), β : 袖壁張出比(d/D), d: 袖壁張出長さ, t: 壁厚(mm)

bc: 置換長方形断面柱の幅(mm), Fc: コンクリート圧縮強度(MPa), N: 軸方向力(kN), σ_s : 壁横筋の降伏強度(MPa), $j_e = 7de/8$

de: 袖壁圧縮縁から柱の引張主筋までの距離, Ps: 壁横筋比, Pw: 柱帯筋比, Pt: 100at/(b・d) (%), σ_y : 引張主筋材料強度(MPa)

³radの時に新たに幾つか曲げひび割れが発生し進展・開口していった。その後 $R=4.6 \times 10^{-3}$ radで柱主筋の降伏をしたのち、部材耐力がほとんど上がらず最大耐力を迎えた。最大耐力以降に若干耐力が低下したが、終始安定した履歴となった。

040-100-S: $R=0.8 \times 10^{-3}$ radに袖壁とスタブの境界に曲げひび割れを確認した。その後 $R=2.9 \times 10^{-3}$ radに袖壁中腹部から柱頭・柱脚部を貫通する大きなせん断ひび割れが発生した。その後 $R=3.2 \times 10^{-3}$ radで柱主筋が、また、 $R=4.1 \times 10^{-3}$ radで袖壁縦筋が降伏し、最終的には $R=7.5 \times 10^{-3}$ radで最大耐力となった。それ以降は $R=20.0 \times 10^{-3}$ radにかけて耐力が低下したものの、その後は安定した履歴となった。

025-150-S: $R=0.39 \times 10^{-3}$ radで袖壁とスタブの境界に曲げひび割れが発生し、また $R=2.0 \times 10^{-3}$ radで袖壁にせん断ひび割れが発生した。その後、柱と袖壁の境界付近に細かいひび割れが多数発生し、のちに袖壁の圧縮縁付近に生じたせん断ひび割れと一緒にいった。最大耐力に近づいていくと、特に柱と袖壁との境界のひび割れ

が顕著になっていき、 $R=4.5 \times 10^{-3}$ radの時、試験体中腹部の袖壁横筋は柱と袖壁境界位置で降伏歪に達して最大耐力となり、その境界に沿って軸方向にスリップしながら破壊した。その直後、急激に耐力が低下していき、 $R=7.2 \times 10^{-3}$ radに柱主筋が降伏した。それ以降は袖壁圧縮縁では圧壊が進み、柱頭・柱脚付近では新たに曲げせん断ひび割れが発生し進展・開口していった。大変形時では、袖壁上下端は完全に圧壊し、さらに袖壁と柱境界ではスリップ性状に伴うコンクリートの剥落が見られ、袖壁が柱から切り離された状態となった。

025-150-WS: $R=0.6 \times 10^{-3}$ radで曲げひび割れが、 $R=2.6 \times 10^{-3}$ radでせん断ひび割れが確認された。最大耐力前は025-150-Sとほぼ同様なひび割れ性状を示しており、柱と袖壁との境界付近には多数のひび割れが発生していた。しかし、最終的には $R=3.6 \times 10^{-3}$ radの時、圧縮側袖壁とスタブの境界付近で水平方向にスリップし、急激な耐力低下をおこした。柱主筋は最大耐力後の $R=7.7 \times 10^{-3}$ radに降伏した。

025-150-CS: 025-150-CSは025-150-Sとほぼ同様

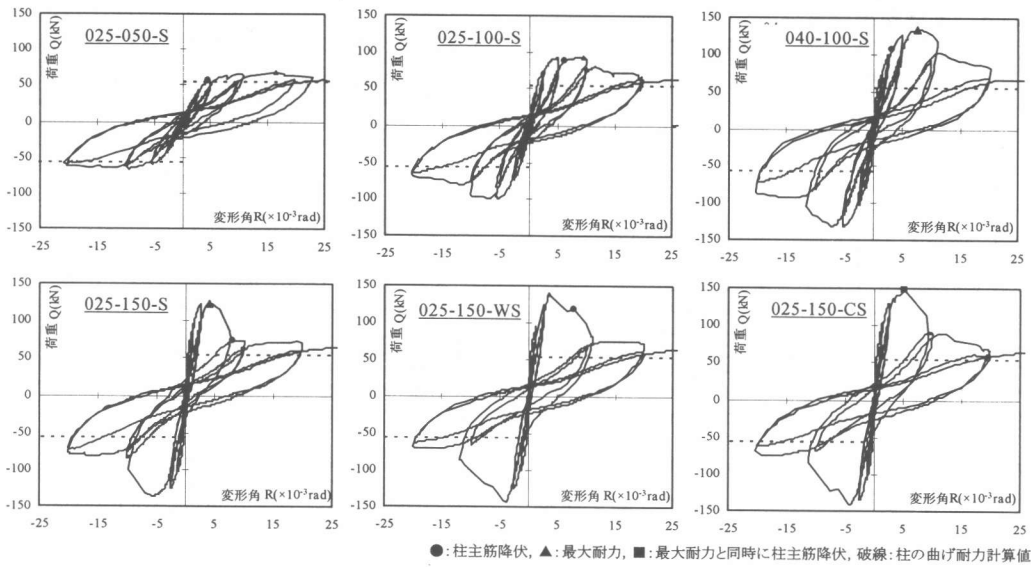


図-3 荷重-変形角曲線

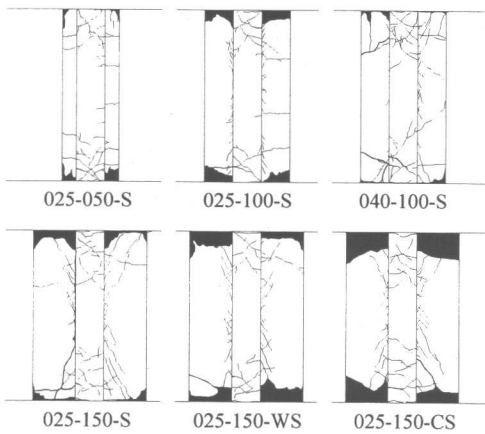


図-4 最終破壊状況

な破壊性状となった。 $R=0.51 \times 10^{-3} \text{rad}$ で袖壁とスタブの境界に曲げひび割れが、 $R=1.9 \times 10^{-3} \text{rad}$ で袖壁にせん断ひび割れが発生した。その後、柱と袖壁との境界に発生したひび割れが顕著になっていき、 $R=4.2 \times 10^{-3} \text{rad}$ の時、試験体中腹部の袖壁横筋は柱と袖壁境界位置で降伏歪に達して最大耐力を迎え、その境界に沿って軸方向にスリップしながら破壊した。その時、同時に柱主筋も降伏している。

3.2 変形性状および最大耐力

図-5に荷重-変形角曲線の包絡線を示す。初期剛性は袖壁厚比や袖壁張出比の増加に伴い初

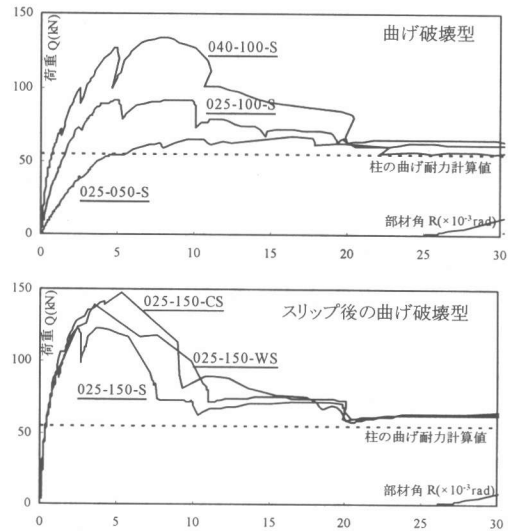


図-5 荷重-変形曲線の包絡線

期剛性および最大耐力が著しく増加する。曲げ破壊した試験体は、最大耐力後、繰返し毎に徐々に耐力低下している。一方、スリップ後に曲げ破壊した試験体には、スリップ直後、急激な耐力低下を起こしている。

また、全ての試験体において、袖壁壁の圧壊によって袖壁上下端のコンクリートは柱の付け根あたりまで剥落しているが、柱自体は耐力を失うほどの破壊に至っておらず、破壊状況や図-5から見て最終的には柱単体の履歴に近づくと考えられ

る。

図-6に各試験体の等価粘性減衰定数 h_e と変形角 R の関係を示す。025-150-Sより壁筋量および帯筋量の多い試験体025-150-WSと025-150-CSの h_e は、最大耐力直後、他の試験体と比べ大きな値を示している。しかし、 $R=20 \times 10^{-3}$ radの大変形時では、各試験体の履歴特性は柱単体のものに近づいていくため、その差は縮まっていく傾向にある。

図-7に曲げ破壊した試験体における最大耐力実験値(eQ_{max})と、現在使われている曲げ終局強度計算値($cQb1$)、 e 関数法を用いた曲げ解析による曲げ耐力計算値($cQb2$)のそれぞれの関係を示す。 $cQb2$ は実験値と良い対応を示したが、 $cQb1$ に関しては対応が悪く、袖壁付き柱の曲げ耐力を危険側に評価する傾向があった。

3.4 危険断面における鉄筋の歪分布

図-8に025-100-Sと040-100-Sの左側袖壁下端と柱脚の危険断面の歪分布を示す。040-100-Sは、袖壁縦筋が降伏している点を除けば、歪が圧縮側から引張側までほぼ直線的に分布している。一方、025-100-Sの歪分布は、圧縮側の袖壁で柱内部より勾配が小さくなる傾向があり、柱-袖壁境界上で乱れが見られる。また、袖壁厚比の大きい040-100-Sは、初期に圧縮鉄筋であった柱主筋にも荷重の増加に伴い引張力が作用し、025-100-Sと比べ中立軸が圧縮側袖壁内部にある。なお、040-100-S以外の他の試験体は、概ね025-100-Sと同様な傾向となり、中立軸は最大耐力時には柱内部に存在していた。

3.5 柱と袖壁の境界における袖壁横筋

図-9に柱と袖壁境界における袖壁横筋の変形角-歪関係を示す。また図-10に袖壁横筋の測定位置を示す。柱頭柱脚付近のDL-A、DL-Dでは袖壁が圧縮側となる時にダウエル効果が作用している。また試験体中腹部のDL-B、DL-Cでは β の増大に伴い袖壁横筋は引張力を負担するようになり、作用するダウエル効果も増大していく。ただ、025-150-WSは、他の試験体と比べ歪が小さく、また、中腹部の袖壁横筋には、ほとん

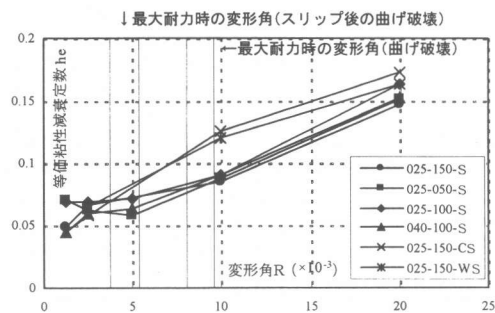


図-6 等価粘性減衰定数 h_e -変形角 R

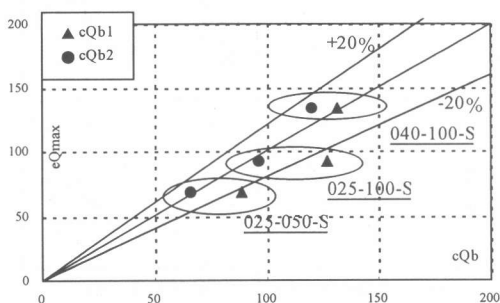


図-7 最大耐力 eQ_{max} -曲げ強度計算値

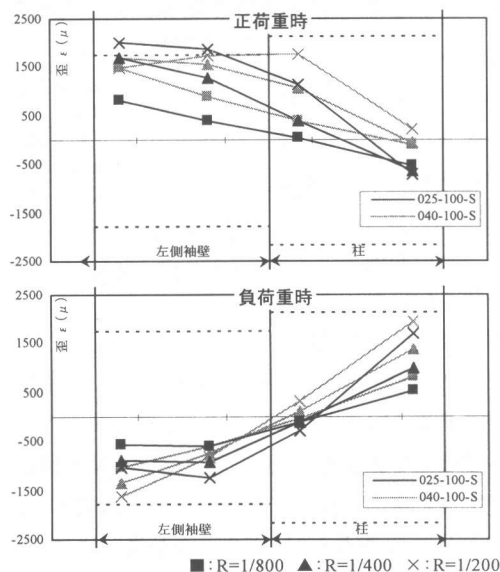


図-8 危険断面の鉄筋の歪分布

どダウエル効果が作用していない。

これら袖壁横筋の変形角-歪関係と各試験体の破壊性状を考慮すると、袖壁と柱境界上にひび割れが発生した後は、柱と袖壁の変形状の相違が顕著になる。すると中腹部では柱と袖壁が水平方向に離散し、その後、柱と袖壁境界で材軸方向

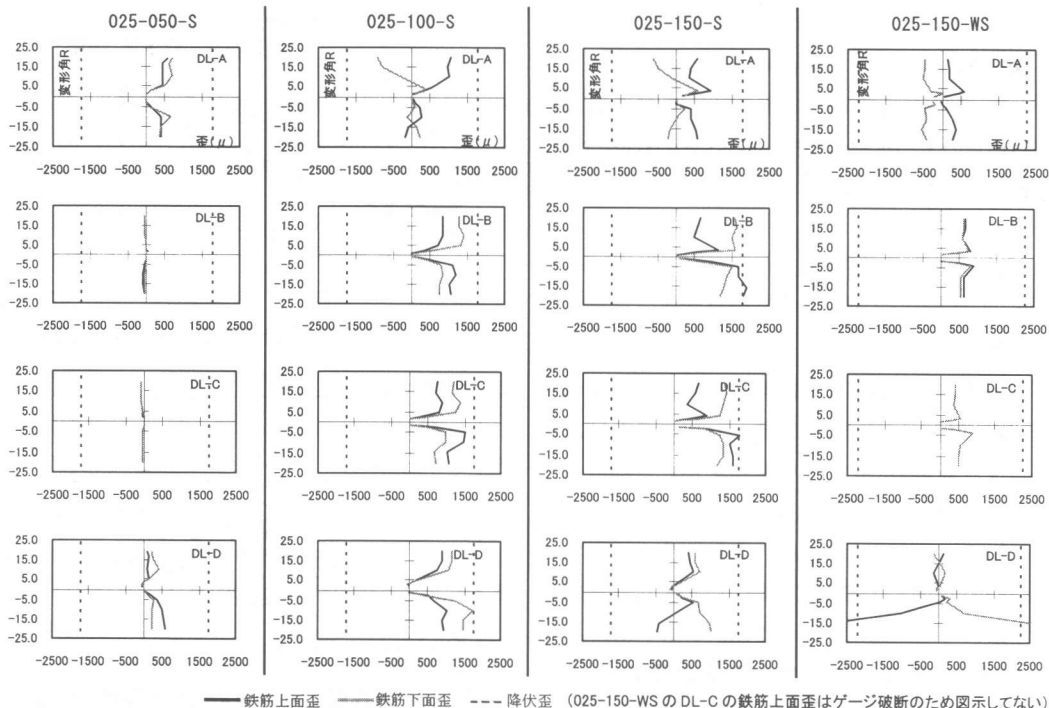


図-9 柱と袖壁の境界における袖壁横筋の変形角(縦軸)ー歪(横軸)関係

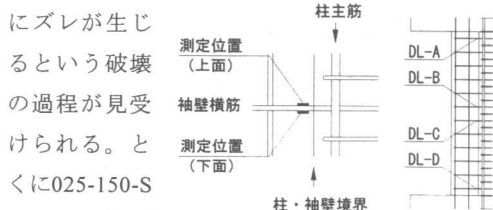


図-10 測定位置

にズレが生じるといふ破壊の過程が見受けられる。とくに025-150-Sは、その傾向が強く柱と袖壁の境界で袖壁横筋が降伏歪に達している。一方、025-150-WSは、袖壁横筋量が多く、柱と袖壁が十分に拘束されていたため、柱と袖壁の境界ではなく圧縮側袖壁縁とスタブとの境界付近で水平方向にスリップしたものと推測できる。以上より、袖壁横筋は、ダウエル効果と柱・袖壁の離散を抑制する効果があり、袖壁と柱境界におけるせん断力伝達に寄与していると考えられる。

4. まとめ

■ 袖壁断面積の増大によって、初期剛性および最大耐力は著しく増加する。曲げ破壊した試験体は、最大耐力後、徐々に耐力が低下するが、ス

リップ後に曲げ破壊した試験体は、最大耐力後急激に耐力が低下する。それ以降は圧縮側の袖壁端のコンクリート圧壊が進み、曲げに対して袖壁が有効でなくなるため、柱単体の挙動に移行していく。

■ 袖壁長さが比較的に長い(袖壁張出比 $\beta=1.5$)タイプの試験体は、袖壁と柱境界にひび割れが発生すると、柱と袖壁の変形性状の相違により、まず、中腹部で柱と袖壁が水平方向に離散していき、その後、材軸方向にズレが生じていく。このとき袖壁・柱境界上のせん断力は、袖壁横筋のダウエル効果と袖壁・柱の離散を拘束する効果により伝達されている。また、袖壁横筋が降伏歪に達し、それらの効果が弱まるとその境界におけるズレが顕著になり、急激に耐力が低下するものと考えられる。

参考文献

- 1) 文部省：学校施設の耐震補強マニュアル RC 校舍編，pp.193-pp278，1990
- 2) 財団法人 日本建築防災協会：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.10，1990
- 3) 財団法人 日本建築防災協会：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.11，1990