

# 論文 曲げ降伏後にせん断破壊を生じる RC 柱部材の変形特性に関する研究

渡辺博志\*<sup>1</sup>・河野広隆\*<sup>2</sup>

**要旨：**曲げ降伏後にせん断破壊を生じる RC 柱部材の変形特性に関する実験的検討を実施した。RC 柱部材の荷重点変位を曲げ変形・せん断変形・主鉄筋の抜け出しによる回転変形の 3 成分に分離し、このうち特にせん断変形に着目して考察を行った。せん断変形は RC 柱部材のせん断耐力に余裕がない場合に大きくなること、同一変位振幅での繰り返しに対し、曲げ変形と異なり徐々に増加することなどが明らかになった。

**キーワード：**せん断変形、曲げ変形、じん性、せん断強度、繰り返し荷重

## 1. はじめに

RC 部材が正負交番荷重を受けた場合の破壊パターンは、しばしば軸方向主鉄筋が降伏した後に、せん断破壊に移行することが知られている。このような破壊形態を示す RC 部材のじん性を適切に評価するためには、曲げに関する変形挙動を追跡するだけでは不十分であり、せん断変形挙動も把握する必要がある。せん断変形挙動の把握はこれまででも試みられ [1~3]、交番荷重を受ける RC 部材の破壊メカニズムとの関連について検討がなされてきた。しかし、帯鉄筋量や部材のせん断/曲げ強度比等を変動要因としたときの、RC 部材の塑性率の増加に伴うせん断変形挙動の変化については、データの蓄積が不足して十分に明らかにされていない。ここでは、帯鉄筋量、主鉄筋量、荷重方法を変化させた 15 体の RC 柱供試体の正負交番荷重試験を実施し、その変形挙動に着目し、曲げ変形やせん断変形の増加状況について検討を行った。

表-1 供試体一覧表

供試体番号	柱断面		荷重位置 (cm)	軸方向主鉄筋			帯鉄筋				荷重方法	コンクリート	
	幅 (cm)	高さ (cm)		鉄筋径	本数	鉄筋比 (%)	鉄筋径	間隔 (cm)	中間帯鉄筋	帯鉄筋比 (%)		圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
1	80	70	260	D25	28	2.53	-	-	-	0	単調	34.3	3.04
2	80	70	260	D25	28	2.53	D6	12	-	0.07	交番	34.8	2.88
3	80	70	260	D25	28	2.53	D6	8	-	0.10	交番	36.1	2.71
4	80	70	260	D25	28	2.53	D6	8	○	0.15	交番	34.9	2.74
5	80	70	260	D25	28	2.53	D10	12	-	0.15	交番	36.6	2.63
6	80	70	260	D25	28	2.53	D10	8	-	0.22	交番	37.0	2.81
7	80	70	260	D25	28	2.53	D10	8	○	0.33	交番	36.3	3.12
8	80	70	260	D25	28	2.53	D16	8	-	0.62	交番	32.4	2.78
9	80	70	260	D25	28	2.53	D16	8	○	0.93	交番	23.8	2.14
10	80	70	260	D19	28	1.43	D10	12	-	0.15	交番	27.1	2.64
11	80	70	260	D13	42	0.95	D10	12	-	0.15	交番	37.7	2.83
12	80	70	160	D19	28	1.43	-	-	-	0	単調	38.1	2.88
13	80	70	160	D19	28	1.43	D10	12	-	0.15	交番	39.2	2.90
14	80	70	160	D13	42	0.95	D10	12	-	0.15	交番	39.4	2.89
301	80	70	260	D25	28	2.53	D6	8	-	0.10	単調	39.8	3.12

\*1 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室主任研究員 (工修)

\*2 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室室長 (工修)

## 2. 実験の概要

実験を行った供試体の諸元を表-1ならびに図-1に示す。荷重は、水平荷重のみとした。なお、供試体1,12はコンクリートの負担するせん断力を明確にするために行ったものであり、帯鉄筋は配置していない。交番荷重を行った供試体の荷重パターンは主鉄筋のひずみの測定結果が降伏点に達したときの変位を $\delta_y$ とし、荷重低下が顕著となるまで振幅を $\delta_y$ づつ増加させ、それぞれ3回づつ繰り返した。なお、供試体301は一方向荷重とした。測定項目は、荷重荷重および荷重点変位、主鉄筋のフーチングからの抜けだし変位、および柱部材のコンクリートの相対変位とした。コンクリートの相対変位の測定方法は、図-2に示すとおりであり、コンクリート中に $\phi 4$ mmの全ねじボルトを埋め込み、このボルト間の変位を測定した。

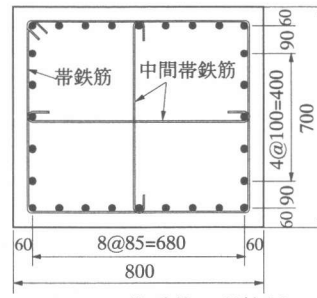


図-1 供試体の配筋例

注1) 中間帯鉄筋は供試体4, 7, 9のみ

注2) 供試体11と14は主鉄筋を2段配置

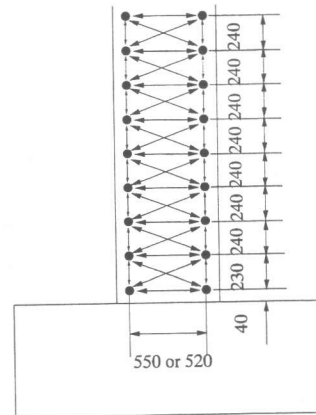


図-2 測定方法(単位mm)

## 3. 荷重試験結果

### 3.1 試験結果の概要

表-2は各供試体で測定されたピーク時荷重( $P_u$ は+側の最大値と-側の最小値の平均)、供試体のせん断耐力の計算値( $V_c$ :コンクリート負担分、 $V_s$ :帯鉄筋負担分、 $V_u = V_c + V_s$ )を示している。 $V_c$ の値は供試体1・12の荷重試験で得られたせん断耐力を基本とし、各供試体に配置されている主鉄筋比および用いたコンクリートの圧縮強度に応じ、土木学会標準示方書のせん断強度式に準じて補正した。 $V_s$ はトラス理論に従って計算した。供試体8,9は帯鉄筋の配置量が非常に多く帯鉄筋のみでもせん断力を負担するものであり、一方供試体10,11,14は主筋量が少なくコンクリートが負担するせん断耐力のみで、供試体

表-2 各供試体の最大荷重およびせん断強度

番号	ピーク荷重 ( $P_u$ )		せん断耐力			$V_c/P_u$	$V_s/P_u$	$V_u/P_u$	Py で 低下	誤差 18% 以下
	最大値 (kN)	最小値 (kN)	$V_c$ (kN)	$V_s$ (kN)	$V_u$ (kN)					
1	510	-	510	0	510	-	0	-		
2	622	-593	512	105	616	0.84	0.17	1.02	2 $\delta$ +1	2 $\delta$ +1
3	650	-622	518	157	675	0.81	0.25	1.06	3 $\delta$ +3	3 $\delta$ -3
4	640	-624	512	235	748	0.81	0.37	1.18	4 $\delta$ +3	4 $\delta$ +3
5	639	-623	521	235	756	0.83	0.37	1.2	4 $\delta$ +1	4 $\delta$ -1
6	644	-638	522	353	876	0.81	0.55	1.37	4 $\delta$ -3	4 $\delta$ +3
7	665	-664	519	530	1,049	0.78	0.8	1.58	5 $\delta$ +3	5 $\delta$ +1
8	653	-685	500	977	1,477	0.75	1.51	2.25	7 $\delta$ +1	6 $\delta$ +3
9	675	-711	451	1,466	1,917	0.65	2.18	2.83	9 $\delta$ +1	8 $\delta$ +2
10	376	-366	390	235	625	1.05	0.63	1.68	6 $\delta$ -1	6 $\delta$ -1
11	236	-236	379	235	615	1.61	1.00	2.6	7 $\delta$ +2	8 $\delta$ -2
12	481	-	481	0	481	-	0	-		
13	616	-609	489	235	724	0.8	0.38	1.18	4 $\delta$ -2	5 $\delta$ -2
14	383	-374	431	235	662	1.14	0.62	1.76	9 $\delta$ -1	9 $\delta$ -1
301	654	-	535	157	692	0.82	0.24	1.06	118mm	144mm

に作用するせん断力を負担する( $V_c/P_v > 1$ )ものとなっている。供試体1, 12は主鉄筋降伏前にせん断破壊を生じた。供試体2は主鉄筋が降伏したが、降伏後の曲げ耐力増加によりせん断耐力が不足しせん断破壊を生じた。供試体301はちょうど $\delta_y$ 時に、柱基部付近の断面圧縮縁においてせん断圧縮破壊を生じるとともに、斜めひび割れ幅が急激に増大し、帯鉄筋の破断が認められた。それ以外の供試体はX字状のひび割れが顕著となり、帯鉄筋の降伏・かぶりコンクリートの剥離・主鉄筋のはらみだしを伴い耐力が低下した。なお、供試体9では主鉄筋の一部が、断面内側に屈曲していた。供試体11は損傷領域が他の供試体に比べ狭い領域に集中しており、主鉄筋が少なくとも2本破断していた。また供試体11の一部の主鉄筋はかぶりコンクリートが剥離した領域で、帯鉄筋間隔を半波長とした座屈の発生も認められた。図-3, 4は各供試体の荷重変位関係の包絡線を示したものである。供試体2~9を比較すると帯鉄筋量が多いほど変形性能は優れていることが分かる。一方、帯鉄筋量は同じで主鉄筋量が異なる供試体10, 11ならびに13, 14をそれぞれ比較すると、いずれも場合も、主鉄筋量の少ない11, 14の方がじん性率としては大きかったが、主鉄筋量が少ない場合、 $\delta_y$ も小さくなるので絶対的な変形量そのものはわずかの増加にとどまった。

3. 2 曲げ・せん断・主筋のフーチングからの抜け出しに伴う回転変形について

柱部材の載荷点での変位( $\delta$ )は、一般に曲げ変形( $\delta_b$ )、せん断変形( $\delta_s$ )、主鉄筋のフーチングからの抜け出しによる柱本体の回転変形( $\delta_r$ )の3つの成分に分離できるものと考えられる。ここでは、コンクリートに埋め込んだボルト間変位の測定結果、ならびに柱基部で測定したフーチングからの浮き上がり変位の測定結果から上記3成分の変位の

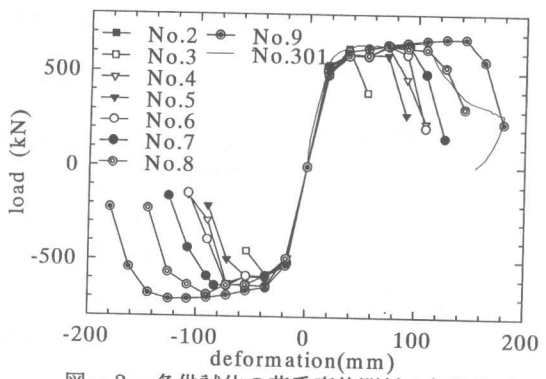


図-3 各供試体の荷重変位関係の包絡線

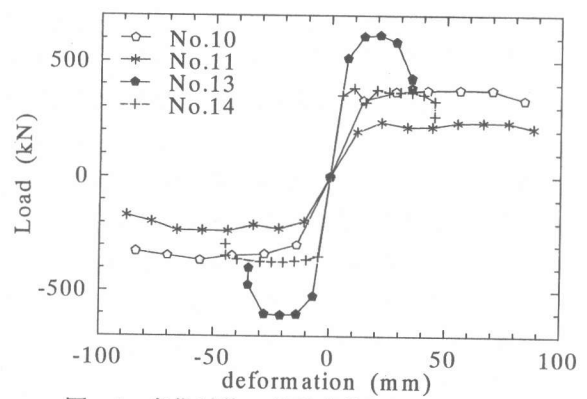


図-4 各供試体の荷重変位関係の包絡線

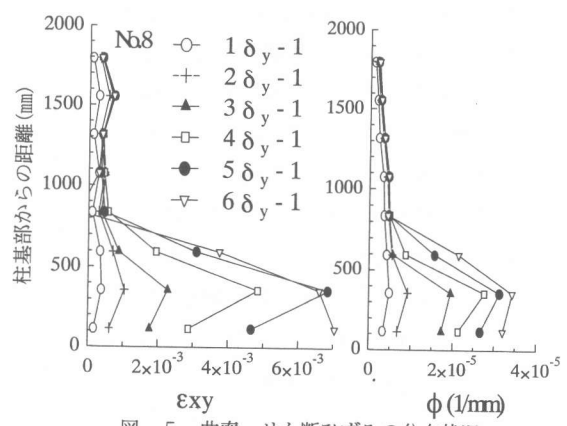


図-5 曲率・せん断ひずみの分布状況

分離を試みた。測定区間*i*における曲率( $\phi_i$ )および平均せん断ひずみ( $\overline{\epsilon}_{xyi}$ )、および基部での主鉄筋抜け出しによる回転角( $\theta$ )から、各変位成分は次のように単純な積分で求めた。

$$\delta = \delta_b + \delta_s + \delta_r = \sum \phi_i(H - y_i)\Delta y + \sum 2\overline{\epsilon}_{xyi}\Delta y + H\theta \quad (1)$$

図-5は供試体8について、各*n*  $\delta y$  1回目の载荷における $\phi_i \cdot \overline{\epsilon}_{xyi}$ の測定結果を示す。 $\overline{\epsilon}_{xyi}$ は $\phi_i$ が大きくなる領域、すなわち塑性ヒンジ区間で大きくなっていて、曲げ変形とせん断変形の連成が認められる。他の供試体についてもおおむね同様の傾向が認められ、せん断変形に寄与するのは柱基部のみであることがわかる。せん断変形と曲げ変形の連成の問題については、今後さらに検討が必要である。図-6は変位の分離が適切に行われていることを確認するため、3成分の変位の計算結果の和と载荷点変位( $\delta_m$ )の測定結果を比較した結果を示すものである。 $(\delta_b + \delta_s + \delta_r)$ と $\delta_m$ の比をとると、それぞれ0.89:1でおおむね正確に変形の分離が可能であるといえる。なお、耐力低下が著しくなるほど部材の損傷が進んだ状況では、埋め込みボルトのぐらつきが生じるため、変位の分離精度は低下した。表-2に変位分離誤差が18%以下であった範囲および、

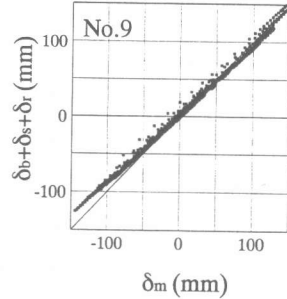


図-6 変位分離精度の検証結果

最大耐力力を生じた後降伏時まで耐力力が低下したときの载荷サイクルを示す(例えば表中4 $\delta$ -3とは4 $\delta y$ の3サイクル目の負の荷重のピーク時を示す)。以下の議論では、分離誤差が18%以下と良好であった範囲のデータのみを用いた。

### 3. 3 帯鉄筋量の影響

次に载荷点変位の増加に対する、 $\delta_b$ 、 $\delta_s$ 、 $\delta_r$ それぞれの変化状況について検討を行う。図-7~9は各変位成分の推移を示したものである。 $\delta_b$ は同一の载荷サイクルでは供試体ごとの差はあまり生じていない。これに対し $\delta_s$ の増加割合は供試体ごとに相当変化していることがわかる。また、 $\delta_m$ が同じで荷重の繰り返し回数が1、2、3と増えるにつれて、 $\delta_b$ はわずかに低下する傾向があるのに対し、 $\delta_s$ は単調に増加していることがわかる。すなわち、同一振幅での荷重の繰り返しにより、変形の内訳が曲げ変形からせん断変形に徐々に移行している。このことは、RC部材の変形性能に及ぼす荷重の繰り返し回数の影響を検討する場合、

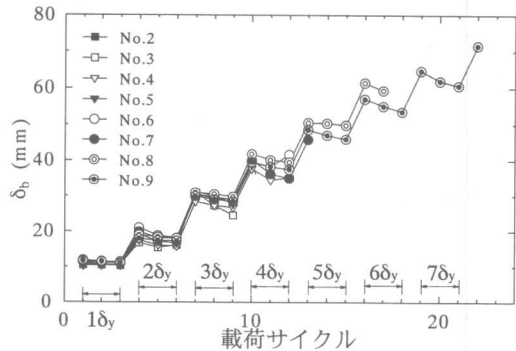


図-7  $\delta_b$ の増加状況

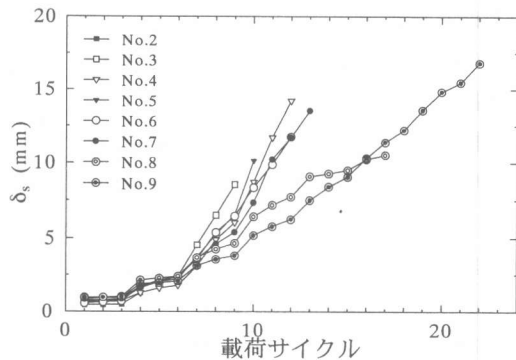


図-8  $\delta_s$ の増加状況

せん断変形挙動に着目する必要があることを示している。 $\delta_r$ も同一の $\delta_m$ での繰り返しによる増大はあまり認められないが、供試体9で载荷サイクルがおおよそ16回目（6  $\delta_y$ の1回目载荷）以降で増加傾向が顕著になる。これは、荷重の繰り返しによる主鉄筋のフーチングへの定着部分に損傷が出始めていることを示すものと考えられる。図-10は単調载荷の供試体301と供試体3, 8, 9について $\delta_s$ を比較した結果を示したものである。供試体3, 301はそれぞれ同一の配筋で载荷方法のみ異なるものであるが、 $\delta_s$ の急増する時点は供試体3のほうがかなり早い。また、供試体9と301を比較すると供試体301の耐力低下が生じる以前では同一の $\delta_m$ に対する $\delta_s$ はほぼ同じ値となっている。ただし、供試体301では、荷重低下が生じるとともに急激に $\delta_s$ が増大し、 $\delta_s$ は供試体9の値よりも大きくなる。表-2に示したように、供試体301の計算上のせん断耐力は、供試体に作用するせん断力に対しわずかに大きい程度(1.06倍)であるが、交番载荷時において、これと同等のせん断変形に対する剛性および変形性能を保つためには、供試体8~9程度のせん断補強が必要であり、これを耐力比で表現するとせん断耐力比は曲げ耐力の2.2~2.8倍程度のせん断補強が必要になるといえる。

### 3. 4 主鉄筋量を変化させた場合の変形特性

主鉄筋量を減少させることにより曲げ強度に対するせん断耐力比を増加させた供試体について検討する。供試体4, 5, 13はそれぞれ曲げ耐力とせん断耐力の比が1.18~1.2とほぼ同一であり、せん断耐力についていえば、コンクリートの負担分と帯鉄筋による負担分の内訳もほぼ同一となっている。図-11は载荷サイクルの進展に伴う $\delta_s$ の増加を比較したものであり、11サイクル目あたりで多少差が生じ供試体13でわずかに $\delta_s$ の増加が緩慢になっているが、おおむね同等のせん断変形量が生じていることがわかる。一方、供試体7, 10, 14は曲げ耐力とせん断耐力の比が1.57~1.75でありほぼ同様のせん断耐力比であり、せん断耐力のうちのコンクリート負担分と帯鉄筋負担分の内訳が異なっているものである。この三者について载荷サイクルの進展に伴う $\delta_s$ の増加を比較した結果が図-12であり、同等のせん断耐力比であるにも関わらず $\delta_s$ の増加は異なったものとなっている。この3供試体の違いは、計算上コンクリートの負担するせん断耐力が異なっていること、特に供試体10, 14

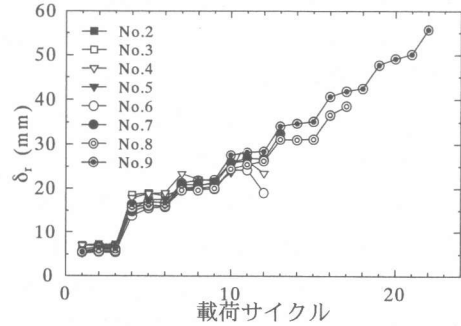


図-9  $\delta_r$ の変化状況

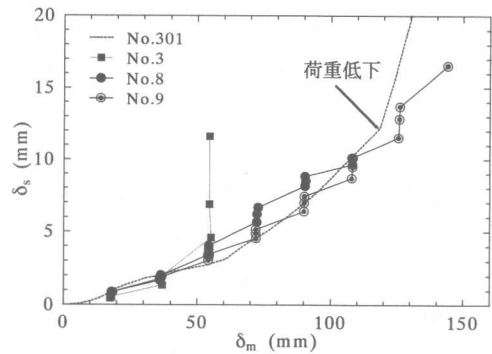


図-10 载荷方法による $\delta_s$ の比較

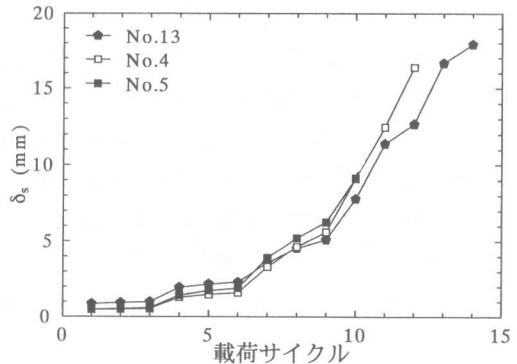


図-11  $\delta_s$ の増加状況  
(せん断耐力比約1.2)

と同一となっている。図-11は载荷サイクルの進展に伴う $\delta_s$ の増加を比較したものであり、11サイクル目あたりで多少差が生じ供試体13でわずかに $\delta_s$ の増加が緩慢になっているが、おおむね同等のせん断変形量が生じていることがわかる。一方、供試体7, 10, 14は曲げ耐力とせん断耐力の比が1.57~1.75でありほぼ同様のせん断耐力比であり、せん断耐力のうちのコンクリート負担分と帯鉄筋負担分の内訳が異なっているものである。この三者について载荷サイクルの進展に伴う $\delta_s$ の増加を比較した結果が図-12であり、同等のせん断耐力比であるにも関わらず $\delta_s$ の増加は異なったものとなっている。この3供試体の違いは、計算上コンクリートの負担するせん断耐力が異なっていること、特に供試体10, 14

はコンクリートの負担するせん断耐力が部材に作用するせん断力を上回っていること、および主鉄筋径が異なっていることの2点である。特に鉄筋径の違いは付着割裂破壊に対する抵抗を左右するパラメータであり、これが主たる要因であった可能性が高い。図-13は同一の鉄筋径で、作用する曲げモーメントとせん断力との比が異なる供試体11, 14を比較した結果である。载荷サイクルが20サイクルまではほぼ同様の増加傾向を示している。なお、20サイクル以降で供試体11のせん断変形の増加が止まっているが、これは主鉄筋の局部座屈が生じ、座屈長が変形の測定区画長さ以下であったために、曲げ変形としてとらえられてためである。

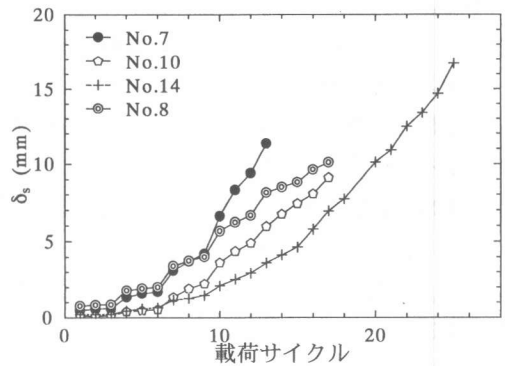


図-12  $\delta_s$ の増加状況 (せん断耐力比約1.7)

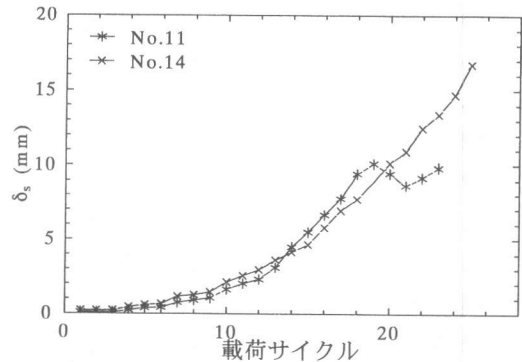


図-13  $\delta_s$ の増加状況 (主鉄筋径D13)

#### 4. まとめ

- 1) せん断変形は部材の変形が大きくなり耐力低下が生じ始めるあたりで増加し始める。せん断ひずみの分布は部材で一様ではなく塑性ヒンジ区間で大きくなる。この点については今後の検討が必要である。
- 2) RC部材の曲げ降伏変位を越えた、あるいは一定の変位振幅で载荷が繰り返された場合、変形成分の内訳について、曲げ変形からせん断変形への移行が認められる。
- 3) 主鉄筋量が同一で帯鉄筋量を増加させた場合、部材に生じるせん断変形は帯鉄筋量の影響を受け、帯鉄筋が増加するほど、せん断変形が増加し始める時点を遅らせることができる。
- 4) 繰り返し荷重を受ける場合に生じるせん断変形を、単調载荷の場合と同じ程度に押さえるためには、相当多くの帯鉄筋量が必要となる。
- 5) 部材の曲げ耐力とせん断耐力の比が同じであっても、せん断耐力の負担割合が異なるか、もしくは主鉄筋の径が異なっていれば、必ずしもせん断変形の進展状況は同一であるとは限らない。

#### 参考文献

- [1] 衣笠秀行、野村設郎：正負繰り返し履歴破壊とせん断破壊の破壊メカニズムの相違の検証、コンクリート工学論文集、Vol. 6, No. 2, pp. 85-97, 1995.
- [2] 島 弘、上田多門：RC橋脚の躯体変形における曲げ変形とせん断変形との分離、コンクリート工学年次論文集、Vol. 8, pp. 525-528, 1986.
- [3] 豊田和彦、睦好宏史、町田篤彦：RC部材の終局変位定量化に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 8, pp. 529-532, 1986.