

論文 超高強度コンクリートの平滑なひび割れ面が柱部材の復元力特性に及ぼす影響

久保田 透^{*1}・篠原 保二^{*2}・林 静雄^{*3}

要旨：超高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱部材ではせん断力 - 部材角関係において正負の骨格曲線の非対称化が生じる場合がある。その要因と考えられる超高強度コンクリートの平滑なひび割れ面性状とせん断補強筋量，軸力が柱部材の復元力特性に及ぼす影響を明らかにするため，せん断破壊先行型柱部材の曲げせん断実験を行った。その結果，正負の骨格曲線の非対称化は，せん断補強筋量が少なく，高軸力が作用するときに生じること，平滑なひび割れ面においては滑りが大きく，部材の一体性を失い，せん断剛性が低下することに起因することがわかった。

キーワード：高強度コンクリート，平滑なひび割れ面，せん断補強筋比，軸力比，復元力特性

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材（以下，RC 部材）のひび割れ面は，鉄筋等により垂直拘束力が作用するため，せん断伝達が可能であることが示されている¹⁾。しかし， $F_c=100\text{N/mm}^2$ を超える超高強度コンクリートでは，ひび割れ発生時にモルタルと粗骨材が一体となって割裂し，ひび割れ面が平滑になるため，普通強度コンクリートに比べてせん断伝達能力が低下することが報告されている²⁾。これは，超高強度コンクリートのひび割れ面が平滑になることで骨材のかみ合い作用によるせん断伝達能力が低下するためと考えられる。

本研究では，これまでに超高強度コンクリートを使用した RC 部材の曲げせん断実験を行い，超高強度コンクリートの平滑なひび割れ面性状が RC 部材の力学性状に及ぼす影響を明らかにしてきた³⁾。しかし，軸力を導入しない曲げ破壊先行型試験体を対象としていたため，

超高強度コンクリートを使用した RC 部材の問題点の一つであるせん断力 - 部材角関係において正負の骨格曲線の非対称化が生じる現象について検討できなかった。

本研究では，超高強度コンクリートを使用したせん断破壊先行型 RC 柱部材の曲げせん断実験を行い，超高強度コンクリートの平滑なひび割れ面性状とせん断補強筋量，軸力が RC 柱部材の復元力特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体一覧を表 - 1，試験体配筋図および断面図を図 - 1，使用したコンクリート，鉄筋の力学特性を表 - 2，表 - 3 に示す。試験体は全 8 体とした。試験体の共通要因は，断面寸法，せん断スパン比，主筋とした。変動要因は，実験目的からコンクリート強度，軸力比を各 2 水

表 - 1 試験体一覧

試験体名	コンクリート	主筋			せん断補強筋			軸力
	F_c (N/mm^2)	σ_y (N/mm^2)	配筋	p_g (%)	$w\sigma_y$ (N/mm^2)	配筋	p_w (%)	η_0
HRC-0.39-0.10	120	1000	8-D16	3.62	1400	$\phi 5.0@100$	0.39	0.10
HRC-0.39-0.28					600			0.28
HRC-0.39L-0.28					1400	$\phi 7.0@100$	0.78	0.10
HRC-0.78-0.10					600			0.28
HRC-0.78-0.28	30	1000	8-D16	3.62	800	$\phi 5.0@100$	0.39	0.28
NRC-0.39-0.28					600			
NRC-0.39L-0.28					800	$\phi 7.0@100$	0.78	
NRC-0.78-0.28					600			

F_c ：コンクリート設計基準強度， σ_y ：主筋降伏強度， p_g ：主筋比
 $w\sigma_y$ ：せん断補強筋降伏強度， p_w ：せん断補強筋比， η_0 ：軸力比

*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境理工学創造専攻 (正会員)
 *2 東京工業大学 建築物理研究センター准教授 工博 (正会員)
 *3 東京工業大学 セキュアマテリアル研究センター教授 工博 (正会員)

準とした。また、ひび割れ挙動と密接な関係があると考えられる要因としてせん断補強筋比を2水準、せん断補強筋降伏後のひび割れ挙動を把握するためせん断補強筋降伏強度を2水準設けた。

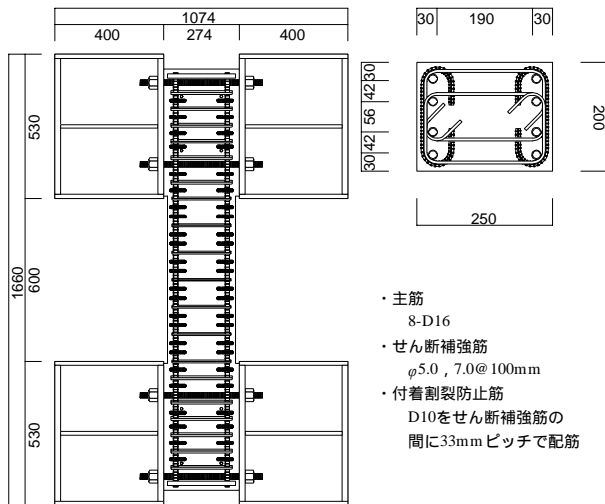


図 - 1 試験体配筋図および断面図

表 - 2 コンクリートの力学特性

試験体名	σ_B (N/mm^2)	E_c^{*1} (N/mm^2)
HRC-0.39-0.10	98.0	3.98×10^4
HRC-0.39-0.28	121	4.15×10^4
HRC-0.39L-0.28	109	4.02×10^4
HRC-0.78-0.10	98.0	4.00×10^4
HRC-0.78-0.28	122	4.27×10^4
NRC-0.39-0.28	36.8	2.78×10^4
NRC-0.39L-0.28	43.0	2.99×10^4
NRC-0.78-0.28	43.9	3.23×10^4

σ_B : 圧縮強度, E_c : ヤング係数

*1 50μ 時と $1/3\sigma_B$ 時の割線剛性から算出

表 - 3 鉄筋の力学特性

鉄筋 ^{*1} 種類	σ_y^{*2} (N/mm^2)	ϵ_y (μ)	σ_{max} (N/mm^2)	E_s^{*3} (N/mm^2)
D16(1000)	1034	8008	1146	1.74×10^5
$\phi 5.0(1400)$	1425	7347	1499	2.08×10^5
$\phi 5.0(800)$	912	4616	961	2.07×10^5
$\phi 5.0(600)$	596	4854	650	2.10×10^5
$\phi 7.0(1400)$	1342	7267	1441	1.99×10^5
$\phi 7.0(800)$	809	4856	936	2.03×10^5

σ_y : 降伏強度, ϵ_y : 降伏歪み, σ_{max} : 引張強度

E_s : ヤング係数

*1 焼き入れ加工を施している

*2 0.2% オフセット法により算出

*3 $1/4\sigma_y$ 時と $3/4\sigma_y$ 時の割線剛性から算出

2.2 加力方法

加力装置図を図 - 2 に示す。加力は、軸力導入後、2 台のサーボコントロールジャッキを用いて試験体上側スタブが回転しないように変位制御し、逆対称正負交番载荷を行った。加力スケジュールは、部材角 $R = \pm 1/400rad.$ を 1 サイクル, $\pm 1/200rad.$, $\pm 1/133rad.$, $\pm 1/100rad.$, $\pm 1/66rad.$ を各 2 サイクル繰り返した後、押し切りとした。

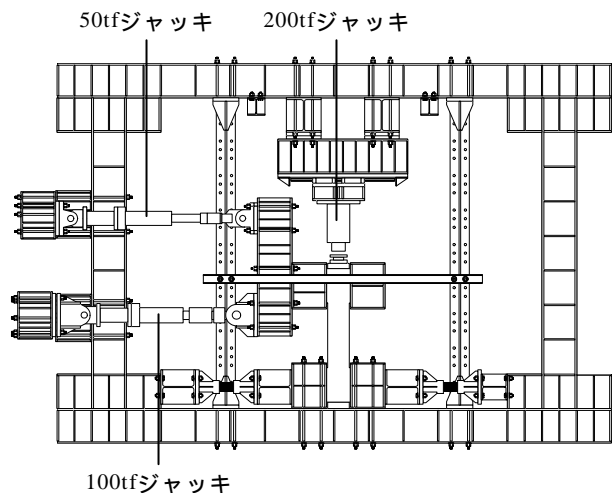


図 - 2 加力装置図

2.3 ひび割れ測定方法

ひび割れ測定方法を図 - 3 に示す。せん断ひび割れ発生以降、せん断ひび割れと試験体の表面に引いた縦の罫線の交点を測定対象とし、試験体のせい方向(x)、高さ方向(y)の変位とひび割れ角度(θ)を分解能 0.01mm のデジタルマイクロスコープを用いて測定した。

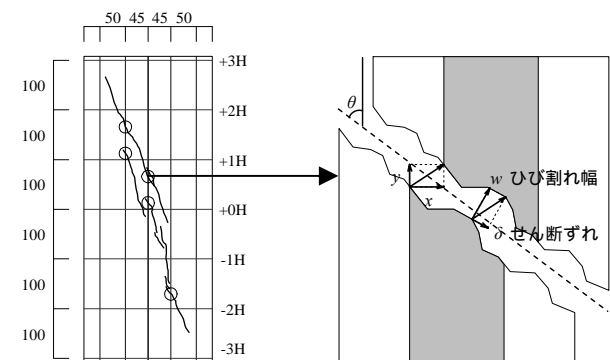


図 - 3 ひび割れ測定方法

3. 実験結果

実験結果一覧を表 - 4、全試験体のせん断力(Q) - 部材角(R)関係を図 - 4、最終状況のひび割れ図を図 - 5 に示す。

表 - 4 実験結果一覧

試験体名	載荷方向	cal Q_{sc}	cal Q_{su1}	cal Q_{su2}	cal Q_{mu}	cal Q_{bu}	exp Q_{sc}	exp Q_{max}
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
HRC-0.39-0.10	正	221	379	364	697	425	284	491
	負	-	-	-	-	-	-323	-
HRC-0.39-0.28	正	394	423	453	718	457	513	577
	負	-	-	-	-	-	-391	-496
HRC-0.39L-0.28	正	365	295	379	718	440	302	394
	負	-	-	-	-	-	-444	-447
HRC-0.78-0.10	正	221	456	503	697	473	181	514
	負	-	-	-	-	-	-160	-
HRC-0.78-0.28	正	399	504	580	718	508	284	547
	負	-	-	-	-	-	-275	-
NRC-0.39-0.28	正	168	208	233	323	319	142	258
	負	-	-	-	-	-	-199	-
NRC-0.39L-0.28	正	188	205	239	323	331	236	248
	負	-	-	-	-	-	-154	-
NRC-0.78-0.28	正	190	266	344	323	379	263	247
	負	-	-	-	-	-	-260	-

計算値： cal Q_{sc} ：せん断ひび割れ強度（靱性指針式）
 cal Q_{su1} ：せん断終局強度（靱性指針式）
 cal Q_{su2} ：せん断終局強度（New RC式）
 cal Q_{mu} ：曲げ終局強度（等価ストレスブロック法）
 cal Q_{bu} ：付着強度（靱性指針式）
 実験値： exp Q_{sc} ：せん断ひび割れ発生荷重
 exp Q_{max} ：最大せん断力

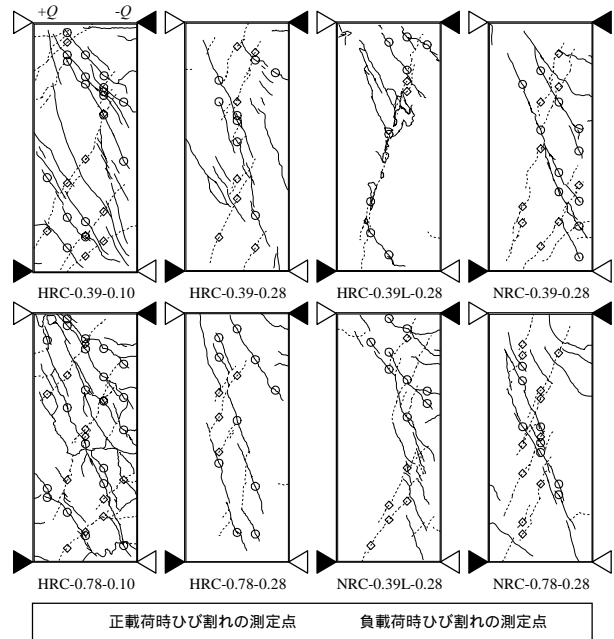


図 - 5 ひび割れ図（最終状況）

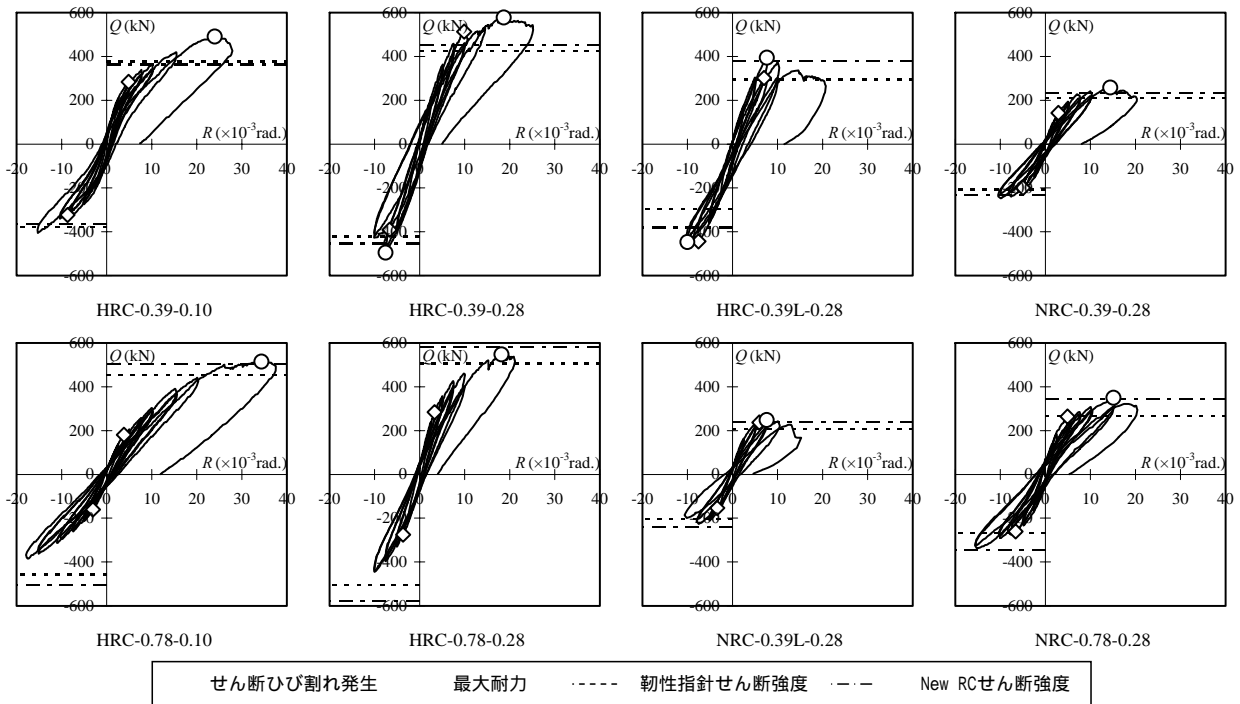


図 - 4 せん断力(Q) - 部材角(R)関係

3.1 破壊性状

(1) 超高強度コンクリートシリーズ（HRC）

せん断補強筋量が少なく、高軸力が作用する試験体（HRC-0.39-0.28, HRC-0.39L-0.28）ではせん断ひび割れ発生後、正側と負側の復元力特性が大きく異なる結果が得られた。HRC-0.39-0.28 は $R=+1/100\text{rad}$ 、HRC-0.39L-0.28 は $R=-1/133\text{rad}$ において大きな割裂音とともに試験区間を対角に結ぶせん断ひび割れが発生した。その後、逆方向の荷重（HRC-0.39-0.28 は負荷荷、

HRC-0.39L-0.28 は正荷重）において急激な剛性低下が生じ、荷重が上昇しなくなり、順方向荷重時から2割程度減少した。最終的にはせん断ひび割れの拡幅に伴い耐力が低下した。なお、最大耐力時にはHRC-0.39L-0.28の試験区間中央部のせん断補強筋が降伏していた。

他の試験体は $R=\pm 1/200\text{rad}$ に向かうサイクルにおいてせん断ひび割れが発生し、その後徐々にせん断ひび割れが拡幅、増加していった。HRC-0.39-0.10 は

$R=+1/40rad$.前後, HRC-0.78-0.10 は $R=+1/30rad$.前後, HRC-0.78-0.28 は $R=+1/50rad$.前後で最大耐力を示した。最終的にはせん断ひび割れの拡幅と部材端部圧縮領域の被りコンクリートの剥離により耐力が低下した。

(2) 普通強度コンクリートシリーズ (NRC)

普通強度コンクリートを使用した試験体 3 体はともに $R=\pm 1/40rad$.に向かうサイクルにおいてせん断ひび割れが発生した。その後, NRC-0.39-0.28, NRC-0.78-0.28 は $R=+1/66rad$.前後, NRC-0.39L-0.28 は $R=+1/133rad$.で最大耐力を示した。最終的にはせん断ひび割れの拡幅と部材端部圧縮領域の被りコンクリートの剥離により耐力が低下した。

3.2 ひび割れ性状

せん断補強筋量が少ないほど, 高軸力が作用するほどひび割れは局所化し, 高軸力が作用するほどせん断ひび割れの角度が急勾配になる傾向が見られた。また, 超高強度コンクリートのせん断ひび割れは, 普通強度コンクリートに比べ, 直線的で平滑であった。

ひび割れ性状と密接な関係にあるせん断補強筋の歪み分布を図 - 6 に示す。低軸力が作用する試験体 (HRC-0.39-0.10) は部材端近傍で歪みが大きくなるのに対し, 高軸力が作用する試験体は試験区間中央部の歪みが大きくなった。これは, 前述したように軸力の影響によりせん断ひび割れの角度が急勾配になることで試験区間中央部のせん断ひび割れが拡幅したひび割れ性状に対応している。また, せん断補強筋が多いほどせん断補強筋の歪みが小さくなる傾向があり, ひび割れが抑制されていることがわかる。

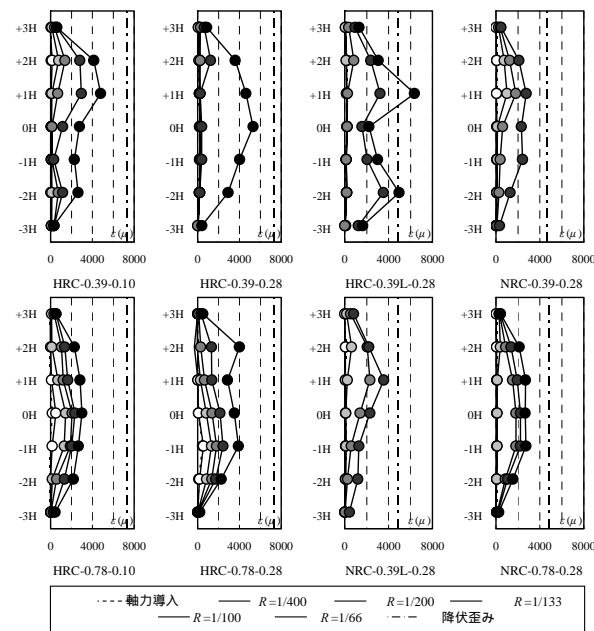


図 - 6 せん断補強筋の歪み分布

4. 実験結果の検討

4.1 ひび割れ挙動

本研究では, せん断力 - 部材角関係において正負の骨格曲線が非対称化する主たる原因を超高強度コンクリート特有の平滑なひび割れ面性状にあると考えている。ここでは, 任意の載荷時において載荷方向と同じ方向の載荷時のひび割れ (以下, 開いて挙動するひび割れ) と載荷方向と逆方向の載荷時のひび割れ (以下, 閉じて挙動するひび割れ) の 2 種類のせん断ひび割れの挙動について検討を行う。

(1) 開いて挙動するひび割れ

各サイクルの 1 回目のピーク時におけるひび割れ幅 (w) とせん断ずれ (δ) の関係を, 正負の骨格曲線の非対称化が生じた HRC-0.39-0.28 を基準として軸力比, せん断補強筋量, コンクリート強度が変動要因となる 4 体の試験体について図 - 7 に示す。各ひび割れのデータはひび割れ図 (図 - 5) に示した箇所において測定したものである。

開いて挙動するひび割れの挙動については, 既報の軸力を導入しない実験³⁾において, ひび割れ幅はせん断補強筋量と相関性があり, せん断ずれはひび割れ面性状とせん断補強筋量に相関性があることが報告されているが, 本実験ではそれらの因子による明確な傾向は得られなかった。ただし, ひび割れ幅は高軸力が作用するほど小さくなる傾向が得られた。

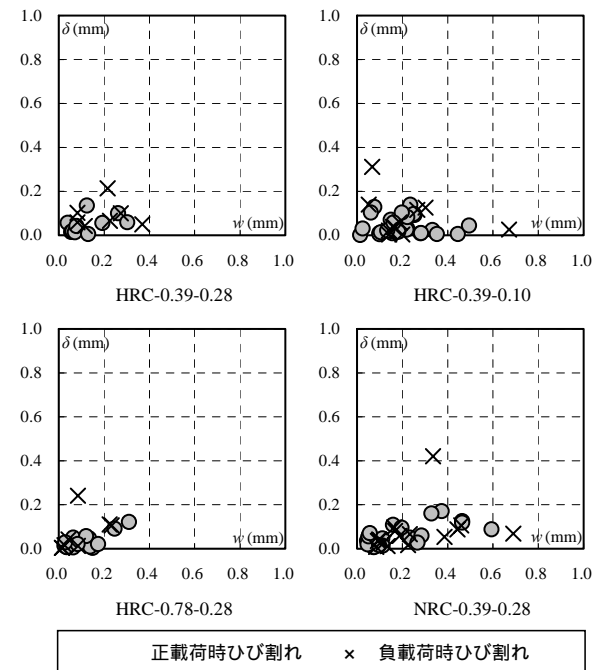


図 - 7 開いて挙動するひび割れの挙動

(2) 閉じて挙動するひび割れ

ひび割れ幅とせん断ずれの関係を図 - 8 に示す。せん断補強筋量が少なく、高軸力が作用する試験体 (HRC-0.39-0.28) はひび割れ幅、せん断ずれとも最も大きくなった。軸力比、せん断補強筋量が変動要因となる試験体 (HRC-0.39-0.10, HRC-0.78-0.28) と比較すると、軸力比が小さいほど、せん断補強筋量が多いほどひび割れ幅が小さくなっている。また、高軸力が作用するほどせん断ずれが大きくなっている。普通強度コンクリートを使用した試験体 (NRC-0.39-0.28) はひび割れ幅が増加してもせん断ずれはほとんど増加せず、超高強度コンクリートを使用したせん断補強筋量が多い試験体 (HRC-0.78-0.28) よりもせん断ずれが小さい。以上のことから、ひび割れ幅は軸力とせん断補強筋量の影響を受け、せん断ずれは軸力とコンクリート強度の影響を受けることがわかる。

結果として、凹凸の大きい普通強度コンクリートのひび割れ面は骨材のかみ合い作用によりせん断ずれを抑制することができるが、ひび割れ面が平滑である場合は軸力の増加に伴いせん断ずれが大きくなる。また、せん断補強筋量を多くすることによってひび割れ幅、せん断ずれを抑制できることがわかった。

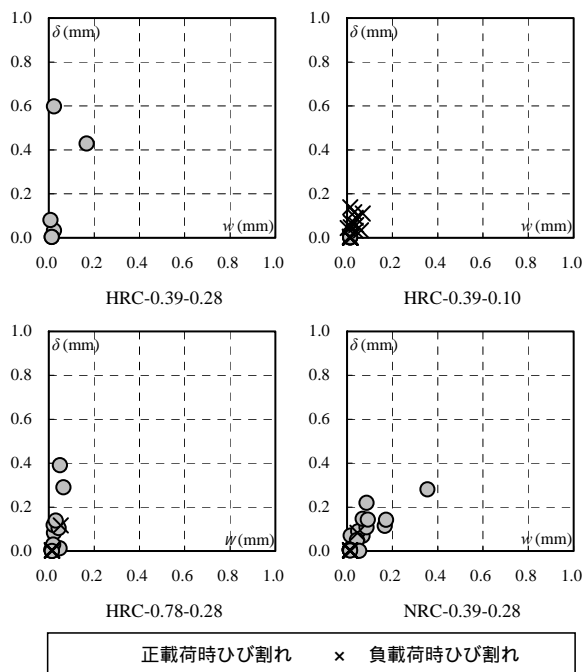


図 - 8 閉じて挙動するひび割れの挙動

4.2 ひび割れ挙動と正負耐力差の関係

同一部材角における骨格曲線の正荷重と負荷重の比 ($Q_{負}/Q_{正}$) と閉じて挙動するひび割れにおける平均せん断ずれの関係を図 - 9 に示す。HRC-0.39-0.28 より、ひび割れ面が平滑であると、せん断ずれが大きくなるに

つれて負荷重が小さくなる傾向にあることがわかる。この傾向は、大きな割裂音とともにせん断ひび割れが発生した ($R=+1/100rad.$) 以降顕著になっている。

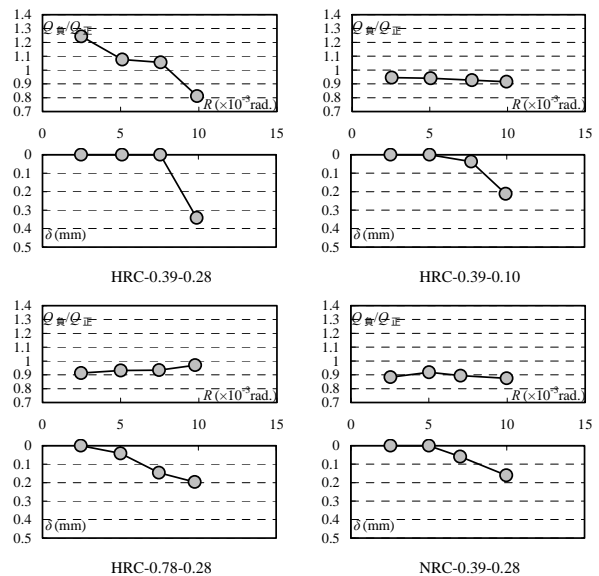


図 - 9 正負耐力差と平均せん断ずれの関係

HRC-0.39-0.28 と NRC-0.39-0.28 のせん断ひび割れが発生したサイクル (HRC-0.39-0.28 は $R=+1/100rad.$, NRC-0.39-0.28 は $R=+1/400rad.$) におけるひび割れ挙動の経過を図 - 10 に示す。HRC-0.39-0.28 ではひび割れは正荷重の除荷から負荷重にかけてひび割れ面を滑り、せん断ずれが大きく生じているが、負荷重の除荷時においてもせん断ずれはほとんど戻らず残留した。これは、せん断ひび割れの発生により部材の一体性が失われていることを示している。

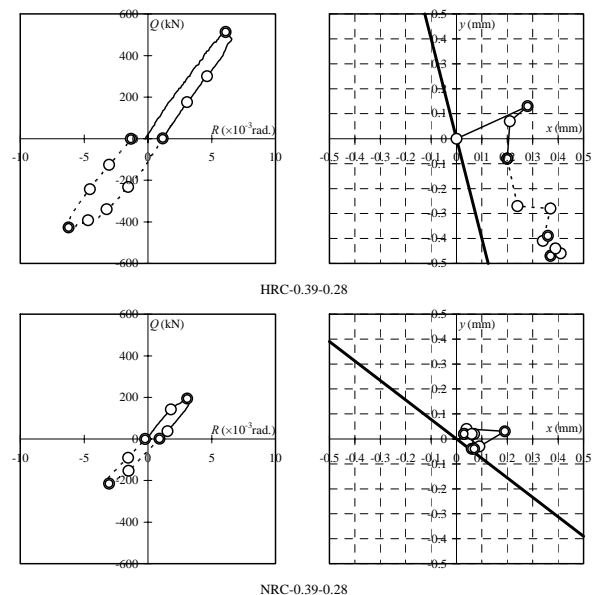


図 - 10 ひび割れ挙動の経過

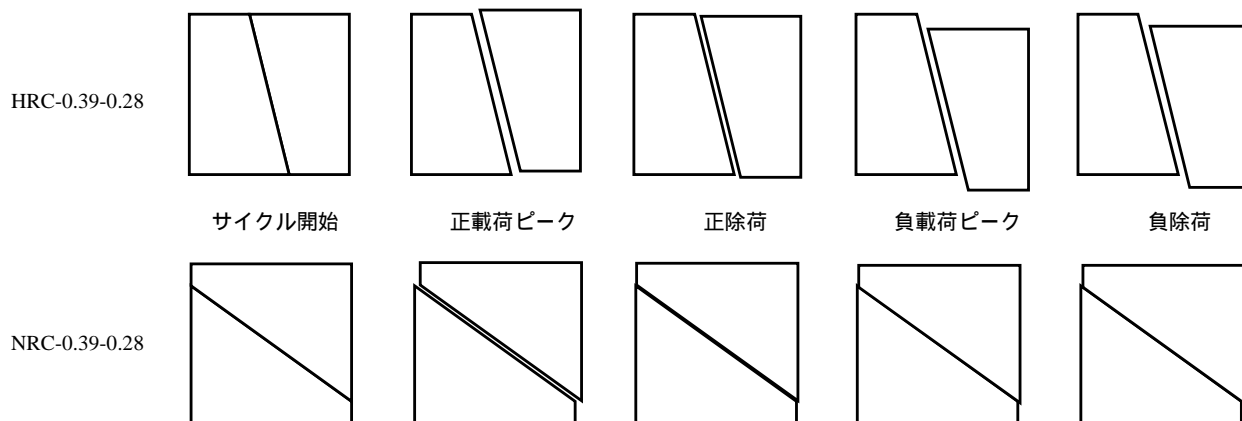


図 - 11 ひび割れ面の挙動

図 - 10 の正載荷で開くひび割れ面の挙動を模式的に描いた図を図 - 11 に示す。HRC-0.39-0.28 では負載荷時に閉じたひび割れ面が滑り、部材の一体性が失われているのに対し、NRC-0.39-0.28 では閉じたひび割れ面の滑りが小さく、部材の一体性が保たれていることがわかる。

5. まとめ

超高強度コンクリートを使用した RC 柱部材において超高強度コンクリートの平滑なひび割れ面性状とせん断補強筋量、軸力が柱部材の復元力特性に及ぼす影響について以下の知見が得られた。

- (1) せん断補強筋量が少なく、高軸力が作用するとき、正負の骨格曲線の非対称化が生じる。
- (2) 正負の骨格曲線の非対称化は、せん断ひび割れ発生後の閉じて挙動するひび割れにおいて滑りが生じるにより部材の一体性を失い、せん断剛性が低下することに起因する。
- (3) 閉じて挙動するひび割れにおけるせん断ずれは、ひび割れ面が平滑なほど、高軸力が作用するほど大きくなるが、せん断補強筋量を多くすることにより抑制できる。

謝辞

本研究は、平成 19 年度日本学術振興会科学研究費補助金（研究代表者：篠原保二）によりました。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 川道克祥, 篠原保二, 宮城哲矢, 宮蔭和人: ひび割れたコンクリートのせん断挙動に及ぼす拘束力の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.49-54, 2001
- 2) 長谷川了一, 香取慶一, 篠原保二, 林静雄: 100N/mm²を超える高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.91-96, 2004
- 3) 川野翔平, 齊藤弘幸, 香取慶一, 林静雄: 超高強度コンクリートを使用した RC 部材のせん断伝達メカニズムに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.643-648, 2006
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999