

論文 軸方向鉄筋の破断防止に主眼を置いた鉄筋コンクリート柱の繰り返し二軸曲げ耐荷特性に関する実験的研究

亀田 好洋*1・水野 英二*2

要旨: 本研究では、「横拘束筋間隔」、「柱塑性ヒンジ部の軸方向鉄筋とコンクリート間の付着の有無」および「載荷経路」を水準とした鉄筋コンクリート (RC) 柱の繰り返し二軸曲げ実験を実施し、特に RC 柱破壊領域の軸方向鉄筋とコンクリート間の付着の有無が軸方向鉄筋の座屈・破断性状および内部コンクリートの破壊進展に与える影響を検討した。結果として、1) 二軸曲げ載荷の下では、アンボンド型 SFRC 柱は横拘束筋間隔に関係なく RC 柱よりも高い耐力を大変位領域まで発揮する、2) アンボンド型 SFRC 柱は、SFRC 柱の場合と比較して、軸方向鉄筋の破断個所が少なくなる、など多くの知見を得た。
キーワード: RC 柱, SFRC 柱, 付着, 繰り返し二軸曲げ, 耐荷特性, 横拘束筋間隔, 軸方向鉄筋の破断

1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート (RC) 柱の最大耐力以降の領域 (以下、ポストピーク領域) での耐震性能を高める一対策として、材料的ならびに構造的な観点から柱の塑性ヒンジ化領域での、1) かぶりコンクリートの剥落および内部コンクリートへの破壊進展を抑え軸方向鉄筋の座屈発生を遅延させることにより、さらに 2) 軸方向鉄筋の破断を防止することにより、エネルギー吸収能の高い安全な RC 柱を開発することが考えられる^{1),2)}。

既往の研究では、これらのことを踏まえて橋脚の塑性ヒンジ化領域の高強度・高性能化に関する研究も行われている^{例えば、3)~5)}。また、筆者らは、繰り返し二軸曲げ力を受ける鉄筋コンクリート (RC) 柱、鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 柱および中間補強筋付き RC 柱の耐荷特性ならびに軸方向鉄筋の座屈に関する研究^{6)~8)}を通して、横拘束筋間隔が比較的に長い場合には SFRC 柱の方が RC 柱よりも軸方向鉄筋の座屈発生を抑え耐震性能の向上には有効であるが、軸方向鉄筋の破断が生じ易く最終的には耐力低下を招くことを実験的に検証した。

本研究では、既往の研究^{6)~8)}で扱った「横拘束筋間隔」および「載荷経路」に加えて、「柱塑性ヒンジ部の軸方向鉄筋とコンクリート間の付着の有無」も水準とし、一定軸力下での繰り返し二軸曲げ載荷実験を実施した。ここでは、従来の「付着を有する RC 供試体」と軸方向鉄筋の破断防止を目指した「付着の無い鋼繊維補強鉄筋コンクリート (アンボンド型 SFRC) 供試体」を採用し、「載荷経路」としては、斜め載荷および矩形載荷⁹⁾を採用した。これまで筆者らが実施した、RC 柱および SFRC 柱の二軸曲げ載荷実験結果^{9),10)}と本実験結果とを比較することにより、アンボンド型 SFRC 柱 (以降、UN-SFRC 柱) のポストピーク領域での耐荷特性ならびに軸方向鉄筋の破断防止効果について検証した。

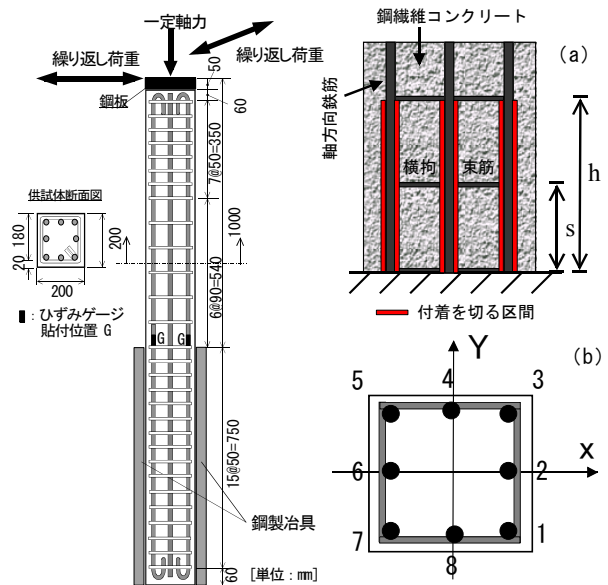


図-1 RC 柱配筋図 図-2 アンボンド型 SFRC 柱基部と軸方向鉄筋番号

2. 実験供試体および材料定数

本研究で使用した供試体の形状ならびに配筋 (軸方向鉄筋および横拘束筋) の一例を図-1 に示す。実験には、断面 200×200 mm、柱有効高さ 1000 mm、せん断スパン比 5 を有する柱供試体を用いた。本供試体は、軸方向鉄筋比 1.3%、横拘束鉄筋体積比 1.10%~0.60% の範囲にある、曲げ破壊先行型の実大 RC 柱をモデル化したものである。供試体作製の関係上、軸方向鉄筋には D10 (SD295A) を 8 本、横拘束筋には D6 (SD295A) を柱基部からおよそ 3D 区間 (D: 柱幅) まで間隔 $s = 65, 90, 105$ および 120 mm (4 水準) でそれぞれ配筋した。これに加え、軸方向鉄筋の破断を防止するため、柱の塑性ヒンジ部分 (柱基部より 0.5D 前後の区間) の軸方向鉄筋とコンクリートとの間の付着を切った UN-SFRC 柱を作製した。ここでは、図-2 (a) に示すように、UN-SFRC 柱基部よ

*1 岡崎市 土木建設部 道路維持課 修士 (工学) (正会員)

*2 中部大学 工学部都市建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)

表-1 材料定数および軸力一覧

供試体	横拘束筋 間隔 s [mm]	コンクリート 圧縮強度 (引張強度) [MPa]		軸方向鉄筋 D10 (SD295A) 降伏強度 引張強度 [MPa] [MPa]		横拘束筋 D6 (SD295A) 降伏強度 引張強度 [MPa] [MPa]		軸力 [kN]
		斜め	矩形	降伏強度	引張強度	降伏強度	引張強度	
UN-SFRC 柱	65,90, 105,120	斜め	52.0 (7.8)	401	598	443	591	112
		矩形	48.8 (9.5)					106
RC 柱	65,90, 105,120	斜め	49.3 (5.5)					107
		矩形	48.0 (3.9)					105

注：せん断耐力/曲げ耐力比は、 $s=65$ mm: 3.05, $s=90$ mm: 2.46, $s=105$ mm: 2.24, $s=120$ mm: 2.08

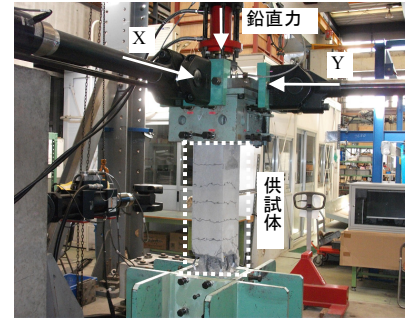


写真-1 二方向荷重装置

り高さ h (0.5D 前後) の範囲に亘って軸方向鉄筋に塩化ビニールホース (外径 14mm, 厚さ 1mm) を巻くことにより付着を切る工夫をした。そのため、横拘束筋間隔 $s=65$ mm の場合、 $h=2s$ 、それ以外の場合には $h=s$ と設定した (図-2 (a) 参照)。なお、図-2 (b) に軸方向鉄筋の番号を示す。打設コンクリートには、設計基準強度 $f_{ck}=40$ MPa を有する普通コンクリートおよび鋼繊維コンクリート (直径 0.62 mm, 長さ 30 mm, 断面積 0.302 mm² の鋼繊維を体積比率 1.5%混入) を用いた。本実験では、横拘束筋間隔 (4 種類)、RC 柱・UN-SFRC 柱 (2 種類) および荷重経路 (3.2 節に説明する 2 種類の荷重経路) を水準として、計 16 体の供試体を作製した。供試体の鉄筋およびコンクリートの材料定数などを表-1 に示す。

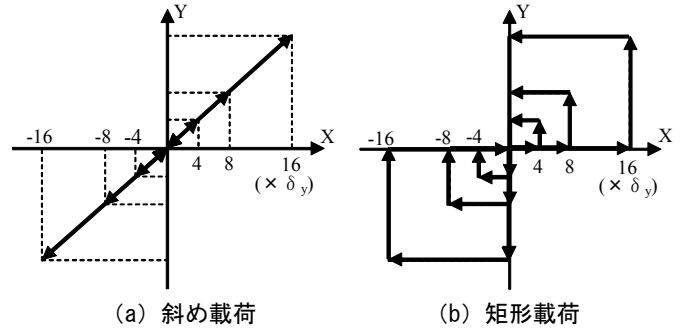


図-3 荷重経路

3. 荷重実験

3.1 荷重方法

RC 柱 (図-1) を鋼製治具に固定し、鉛直ジャッキにより軸力を柱頂部に作用させると同時に、写真-1 に示す二方向荷重装置を用いて二方向 (X 方向および Y 方向) からの水平変位を柱頂部に与えることにより、繰り返し二軸曲げ荷重実験を実施した。鉛直軸力の大きさは累加軸耐力の 5% (105 kN~112 kN の範囲) とし、次節の荷重経路に基づいて変位制御により水平荷重を作用させた。

3.2 荷重経路

これまでの一連の実験^{6),7)}と同様、図-3 に示す、2 種類の荷重経路として、1) 45° 斜め荷重、2) 矩形 (正方形) 荷重を設定した。斜め荷重 (図-3 (a)) では、X 方向および Y 方向に同時に同一変位を $0 \rightarrow +4\delta_y \rightarrow -4\delta_y \rightarrow +8\delta_y \rightarrow -8\delta_y \rightarrow +8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rightarrow +16\delta_y \rightarrow -16\delta_y$ の順に柱頂部に与えた。また、矩形荷重 (図-3 (b)) においては、X 方向および Y 方向に交互に変位を $0 \rightarrow +4\delta_y \rightarrow -4\delta_y \rightarrow +8\delta_y \rightarrow -8\delta_y \rightarrow +8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rightarrow +16\delta_y \rightarrow 0$ の順に柱頂部に与えた。ここで、図中の「 δ_y 」は初期荷重での引張側軸方向鉄筋の初期降伏時における柱頭での水平変位 δ (ここでは、軸方向鉄筋のひずみが 2,000 μ に達した時の降伏水平変位) を意味する。本実験では、文献⁷⁾にある RC 柱および SFRC 柱の実験結果との比較を通して耐荷特性を検討するため、

便宜上、斜め荷重では $\delta_y=5.35$ mm, 矩形荷重では $\delta_y=6.0$ mm を採用した。

4. アンボンド型 SFRC 柱の実験結果および考察

4.1 繰り返し変形特性

(1) 斜め荷重

一例として、最短、中間および最長の横拘束筋間隔 $s=65$ mm, 90 mm および 120 mm を有する UN-SFRC 柱および RC 柱に対する斜め荷重実験から得た、水平荷重-水平変位関係 (斜め 45° 方向) を図-4 (a) ~ (c) に示す。X 方向成分の水平荷重-水平変位関係は、Y 方向成分のそれと概ね一致していたことを付記する。図中、実線は UN-SFRC 柱の実験結果、破線は RC 柱の実験結果を示す。横拘束筋間隔が大きくなるにしたがい、UN-SFRC 柱および RC 柱の最大耐力 (斜め 45° 方向) は小さくなる傾向にあるが、29 kN~32 kN の範囲にある。

「UN-SFRC 柱」、「RC 柱」および「横拘束筋間隔」の違いによる主な特徴として、以下のことが挙げられる。

- i) $\pm 8\delta_y$ までの荷重では、「UN-SFRC 柱」、「RC 柱」および「横拘束筋間隔」に関係なく変形挙動 (耐力の低下も含む) には大きな差異は認められないが、それ以降の大変位ポストピーク領域において生ずるかぶりコンクリートの剥落および軸方向鉄筋の座屈進展・破断の発生などにより違いが確認できる。
- ii) 横拘束筋間隔が短い場合 ($s=65$ mm および 90 mm) には、両 RC 柱とも軸方向鉄筋が破断することにより、それ以降の耐力の低下を招く。ただし、RC 柱の方が UN-SFRC 柱よりも耐力の低下が大きいこと

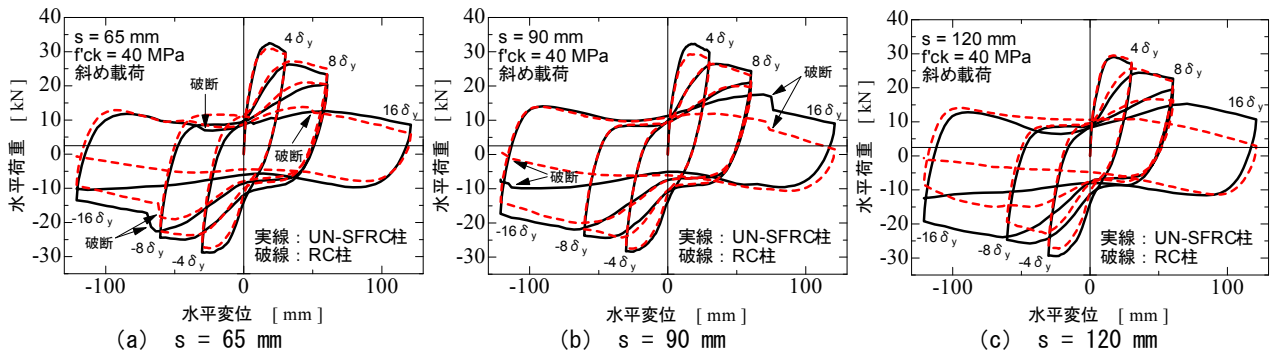


図-4 水平荷重－水平変位関係（斜め載荷：斜め45°方向）

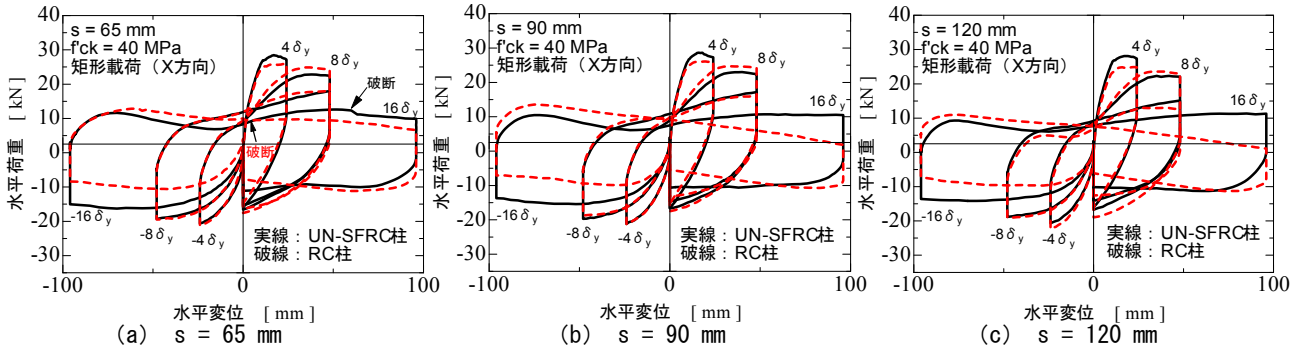


図-5 水平荷重－水平変位関係（矩形載荷：X方向成分）

が図-4より分かる。

- iii) 横拘束筋間隔が 65 mm の場合には、荷重区間 $<+8\delta_y \rightarrow -16\delta_y>$ にて隅角部の軸方向鉄筋 3、つづいて荷重区間 $<-16\delta_y \rightarrow +16\delta_y>$ にて隅角部の軸方向鉄筋 7 が破断する。一方、横拘束筋間隔が 90 mm と大きくなると、軸方向鉄筋の破断は遅れるものの、荷重区間 $<-16\delta_y \rightarrow +16\delta_y>$ にて軸方向鉄筋 7、つづいて荷重区間 $<+16\delta_y \rightarrow -16\delta_y>$ にて軸方向鉄筋 3 が破断する。
- iv) さらに横拘束筋間隔が大きくなる（105 mm および 120 mm）と、両 RC 柱とも軸方向鉄筋の破断はなくなるが、RC 柱では、かぶりコンクリートの剥落進展およびそれに伴う軸方向鉄筋の座屈進展により耐力の低下は UN-SFRC 柱よりも大きくなる。
- v) これまでの RC 柱、SFRC 柱、X 字型および+字型中間補強筋付き RC 柱の荷重実験結果^{6),7)}より得られた軸方向鉄筋の破断本数と本実験結果とを比較した結果を表-2 に示す。SFRC 柱の場合と比較して、UN-SFRC 柱の方が軸方向鉄筋破断防止に効果的であることが分かる。

表-2 軸方向鉄筋の破断本数の比較（斜め載荷）

供試体名	斜め載荷			
	横拘束筋間隔 (mm)			
	65	90	105	120
UN-SFRC 柱	2	2	0	0
RC 柱	2	2	0	0
RC 柱 (60MPa)	2	1	0	0
SFRC 柱 (60MPa)	4	2	1	1
X 字中間補強筋付き RC 柱	2	0	2	1
+ 字中間補強筋付き RC 柱	3	2	2	0

- vi) 横拘束筋間隔が大きい場合（本研究では、105 mm および 120 mm）に UN-SFRC 柱を採用することは、軸方向鉄筋に対して鋼繊維補強により座屈の遅延、アンボンド化により破断防止を図ることができ、大変位領域にまで至る耐力の低下を抑えるには有効であることを確認した。

(2) 矩形載荷

ここでも、横拘束筋間隔 $s = 65\text{ mm}$ 、 90 mm および 120 mm を有する RC 柱に対する矩形載荷実験から得た、水平荷重－水平変位関係（X 方向）を図-5 (a) ~ (c) に一例として示す。X 方向の初期荷重区間 $<0 \rightarrow +4\delta_y>$ にて、UN-SFRC 柱の最大耐力は 28 kN~29 kN となり、RC 柱の 25 kN~26 kN と比較して多少高い耐力を呈した。「UN-SFRC 柱」、「RC 柱」および「横拘束筋間隔」の違いによる主な特徴として、以下のことが挙げられる。

- i) $\pm 8\delta_y$ までの荷重では、UN-SFRC 柱および RC 柱とも横拘束筋間隔に関係なく変形挙動には大きな差異は認められないが、それ以降の大変位領域での荷重では RC 柱において耐力の顕著な低下が確認できる。この傾向は、横拘束筋間隔が大きくなるにしたがい、大きくなる。一方、UN-SFRC 柱では荷重区間 $<+8\delta_y \rightarrow -16\delta_y>$ 以降においても、横拘束筋間隔に関係なく高い耐力を保つ。
- ii) 斜め載荷の場合と同様、横拘束筋間隔が短い場合には、両 RC 柱とも軸方向鉄筋の破断が荷重区間 $<+8\delta_y \rightarrow -16\delta_y>$ 以降の早い段階で生ずるが、その発生は RC 柱の方が UN-SFRC 柱よりも早いことが確認できた。本実験では横拘束筋間隔が大きくなる

表-3 軸方向鉄筋の破断本数の比較 (矩形載荷)

供試体名	矩形載荷 横拘束筋間隔 (mm)			
	65	90	105	120
UN-SFRC 柱	1	1	1	0
RC 柱	2	1	1	0
RC 柱 (60MPa)	2	0	0	0
SFRC 柱 (60MPa)	6	5	5	4
X 字中間補強筋付き RC 柱	3	2	2	1
+ 字中間補強筋付き RC 柱	2	2	0	0

(120 mm) と、両 RC 柱とも軸方向鉄筋の破断は生じなかった。軸方向鉄筋の破断本数に関して、これまでの実験結果と本実験結果との比較を表-3 に示す。アンボンド化により SFRC 柱の軸方向鉄筋の破断本数が大きく減少することが分かる。

- iii) 矩形載荷下での UN-SFRC 柱の軸方向鉄筋の破断によるそれ以降の耐力の低下は、斜め載荷下でのそれと比較して小さいことを実験より確認した。
- iv) UN-SFRC 柱では、鋼繊維補強によりコンクリートの剥落が抑制されるため、斜め載荷および矩形載荷ともに、大変位ポストピーク領域に至るまで内部コンクリートの耐力が発揮されていることが荷重-変位関係 (図-4 および図-5) から分かる。また、斜め載荷と同様、「座屈の遅延」および「破断防止」の観点より、UN-SFRC 柱は大変位領域までの耐力の低下を抑えるには有効であることが確認できる。

4.2 除荷および再載荷点を基準とした耐力特性

本節では、水平荷重-水平変位関係 (例えば、図-4 および図-5) を構成する除荷・再載荷曲線の開始点を基準として整理した「耐力-変位曲線」の概念⁸⁾を用いて、

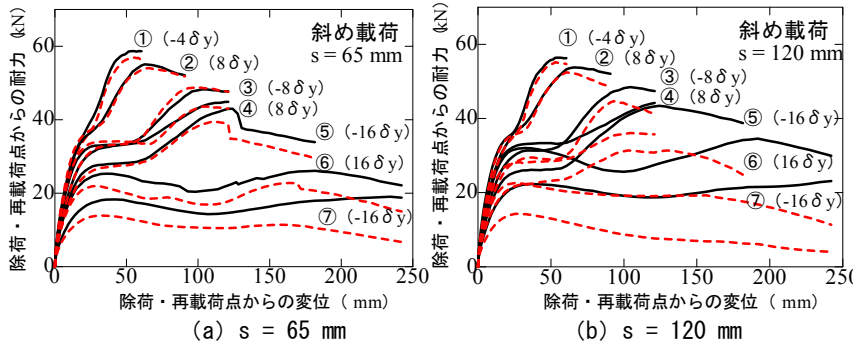


図-6 耐力-変位曲線

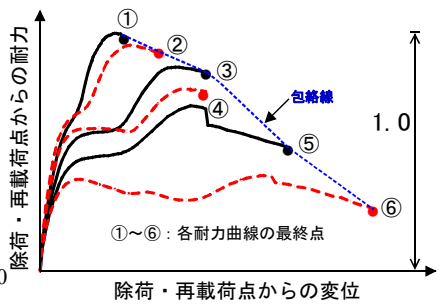


図-7 耐力-変位曲線の包絡線

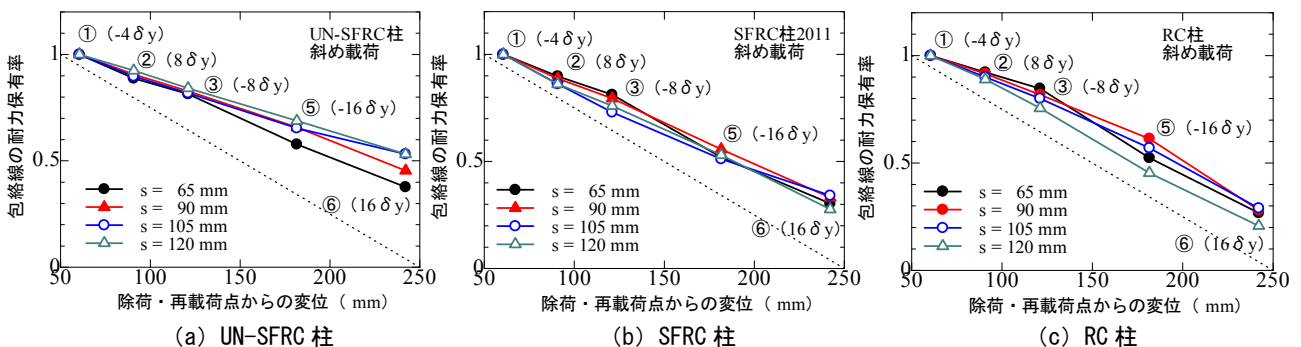


図-8 包絡線の耐力特性 (斜め載荷)

大変位ポストピーク領域に至るまでの UN-SFRC 柱の耐力特性を RC 柱ならびに SFRC 柱の耐力特性⁷⁾と比較し検討する。

(1) 斜め載荷下での耐力特性

一例として、UN-SFRC 柱および RC 柱の斜め載荷下での耐力-変位曲線をそれぞれ横拘束筋間隔 ($s = 65 \text{ mm}$ および $s = 120 \text{ mm}$) ごとに比較した結果を図-6 (a) および (b) に示す。ここで、実線は UN-SFRC 柱、破線は RC 柱の結果を示し、耐力および変位は、X および Y 方向成分を合成した量である。なお、図中の数字 (①~⑦) の奇数は除荷曲線、偶数は再載荷曲線を意味する。図から分かるように、繰り返し変位幅が増えるに従い、耐力-変位曲線は、1) 耐力が上昇・下降する挙動 (曲線①~④)、2) 一旦、耐力が一定または減少した後に、再度上昇し、下降する挙動 (曲線⑥)、3) 軸方向鉄筋の座屈とコンクリートの強度劣化とにより塑性ヒンジ化した挙動 (曲線⑦)へと変化する。RC 柱かつ横拘束筋間隔が大きくなれば、この進行が早くなる。これら耐力-変位曲線の終点を結んだ線を包絡線 (図-7 を参照) として、UN-SFRC 柱、SFRC 柱および RC 柱の耐力低下特性を図-8 (a) ~ (c) に示す。なお、図-8 の耐力保有率は、それぞれの曲線①の最終点の耐力により無次元化してある。

斜め載荷下での耐力特性として、1) UN-SFRC 柱の耐力低下は横拘束筋間隔が 120 mm と大きい場合に一番低いが、全体的に SFRC 柱および RC 柱の耐力低下と比較して小さい、2) SFRC 柱をアンボンド化することにより、大変位ポストピーク領域に至るまで軸方向鉄筋の破断防止をするとともに高い耐力保有率 (0.5 以上) となること

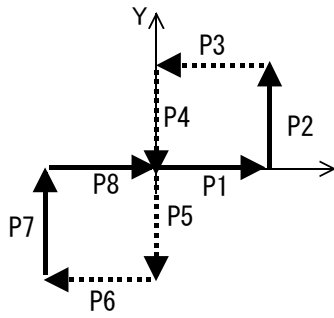


図-9 矩形荷経路の構成

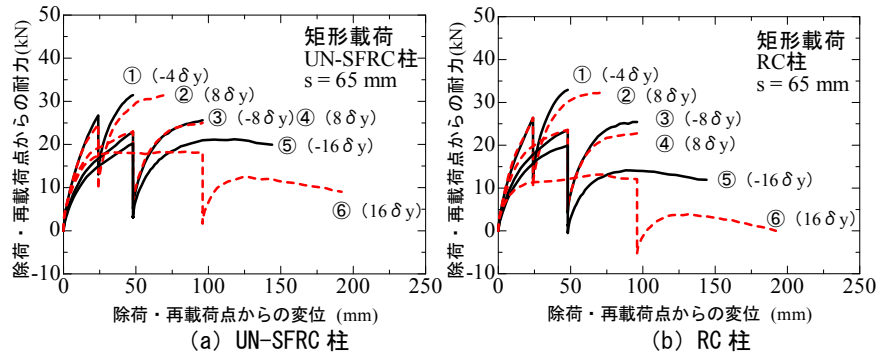


図-10 耐力-変位曲線 (s = 65 mm)

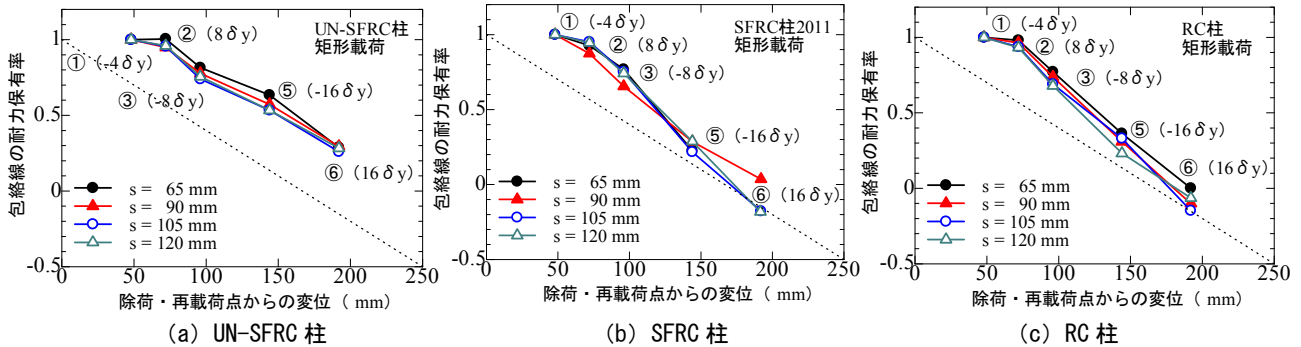


図-11 包絡線の耐力特性 (矩形荷)

が図-8 から分かる。

(2) 矩形荷下での耐力特性

図-9 に示すように、矩形荷の 1 サイクルは 4 種類の荷経路 (1) 経路 A (P3→P4→P5→P6), (2) 経路 B (P7→P8→P1→P2), (3) 経路 C (P4→P5) および (4) 経路 D (P8→P1) の組み合わせである^{9),7)}。

以下では、斜め荷と等価である、経路 A の耐力曲線 (X 方向成分) および経路 B の耐力曲線 (Y 方向成分) を比較する。一例として、横拘束筋間隔 (s = 65 mm) を有する UN-SFRC 柱および RC 柱の耐力-変位曲線 (経路 A : 実線および経路 B : 破線) をそれぞれ整理した結果を図-10 (a) および図-10 (b) に示す。図より、曲線③の荷経路 A までは UN-SFRC 柱と RC 柱は同様の耐力特性を呈するが、それ以降は UN-SFRC 柱の方が高い耐力を保有することが分かる。

斜め荷の場合と同様に、UN-SFRC 柱、SFRC 柱および RC 柱の包絡線を無次元化した耐力特性をそれぞれ図-11 (a)~(c) に示す。矩形荷下での耐力特性として、1) 横拘束筋間隔に関係なく UN-SFRC 柱は SFRC 柱および RC 柱よりも高い耐力を大変位領域にまで保有する、2) その保有率 (0.3 程度) は斜め荷の場合と比べて小さいが、SFRC 柱および RC 柱の耐力保有率がゼロとなることを考慮すれば、UN-SFRC 柱の耐力特性にはアンボンド化の効果が現れている、ことなどが挙げられる。

4.3 破壊性状

コンクリート剥落および軸方向鉄筋の座屈・破断などにより破壊性状が異なり始める荷区間 $< 8\delta_y \rightarrow -16\delta_y >$ の $-16\delta_y$ 時点での斜め荷および矩形荷下の柱

基部の破壊状況 (+X 方向からの状況) を写真-2 および写真-3 に示す。ここでは、一例として、s = 120 mm を有する UN-SFRC 柱、SFRC 柱⁷⁾ および RC 柱⁷⁾ の破壊状況を比較してある。また、写真中の数字 (1, 2 および 3) は図-2 (b) に示す軸方向鉄筋番号である。以下、破壊性状に関する考察を述べる。

- 1) これまでの斜め荷実験結果^{9),7)}と同様、UN-SFRC 柱および RC 柱では、コンクリートの破壊領域は斜め 45° 荷方向に沿った隅角部に集中した (写真-2 (a) および (c))。また、RC 柱の矩形荷実験では、荷が X 方向および Y 方向に交互に行われるため 4 面のかぶりコンクリートが剥落した (写真-3 (c))。
- 2) 斜め荷および矩形荷とも、UN-SFRC 柱と SFRC 柱の破壊域は基部に集中している (写真-2 (a), (b) および写真-3 (a), (b)) が、UN-SFRC 柱では、SFRC 柱と違い、基部から 130 mm 程度の領域に表面ひび割れが生じない。これは、基部から 120 mm の範囲に亘って 8 本の軸方向鉄筋に対してアンボンド化が施してあることが理由と考えられる。
- 3) 斜め荷では、4 種類の RC 柱とも $-16\delta_y$ 時点では軸方向鉄筋の破断は生じておらず、最終的には SFRC 柱の軸方向鉄筋 3 が破断した。
- 4) 矩形荷では、 $-16\delta_y$ 時点で SFRC 柱の軸方向鉄筋 3 および 7 を含む 4 箇所にて破断しているが、UN-SFRC 柱では荷の最終段階まで破断は生じなかった。
- 5) UN-SFRC 柱および SFRC 柱では隅角部の軸方向鉄筋 3 および 7 にのみ座屈長さの短い座屈性状、RC 柱では座屈長さの長い座屈性状を確認した。

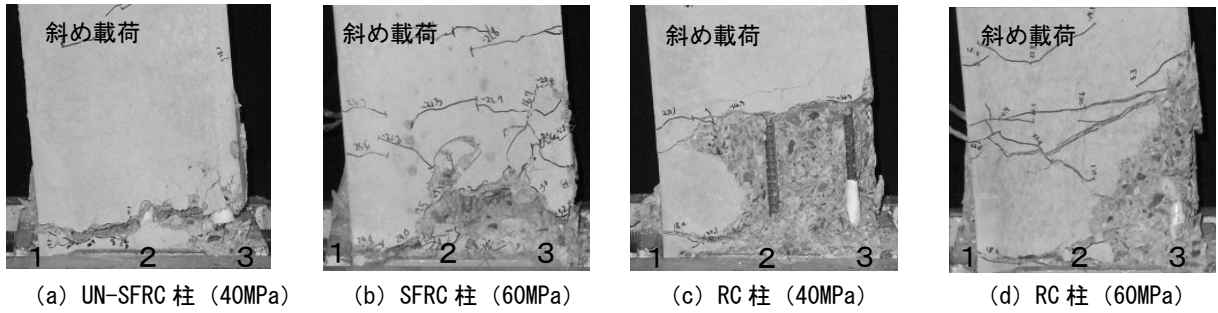


写真-2 斜め載荷での破壊状況 ($s = 120 \text{ mm}$; $-16 \delta_y$)

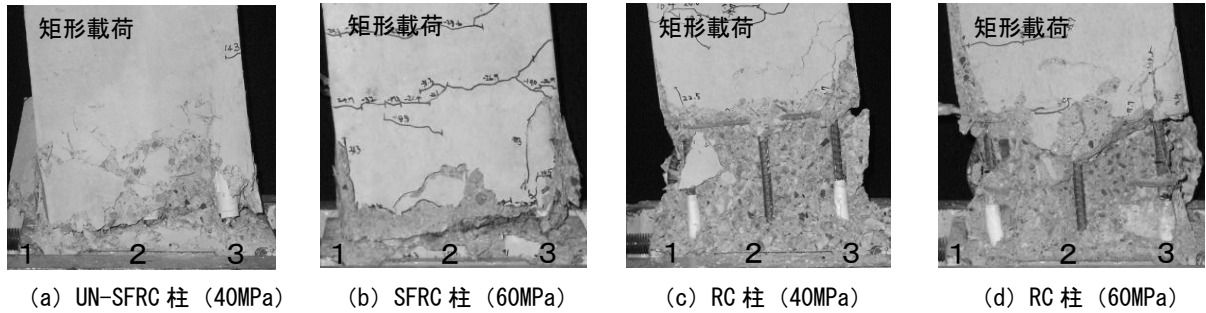


写真-3 矩形載荷での破壊状況 ($s = 120 \text{ mm}$; $-16 \delta_y$)

5. まとめ

- 1) UN-SFRC 柱は軸方向鉄筋と周辺コンクリートとの付着が切つてあるため、SFRC 柱と同じような高い初期耐力を保有することはできないが、RC 柱の初期耐力と同程度かそれ以上の耐力を発揮する (4.1 節)。
- 2) SFRC 柱基部から高さ $0.5D$ 前後の区間のアンボンド化は軸方向鉄筋のひずみを分散させるため、大変位領域での軸方向鉄筋の破断を防止することが可能である。とくに、矩形載荷下でその効果は大きい (4.1 節)。
- 3) 軸方向鉄筋の破断またはコンクリートの強度劣化が生じ塑性ヒンジ化するような大変位領域 $< +16 \delta_y \rightarrow -16 \delta_y >$ まで耐力を保有するためには、SFRC 柱基部から高さ $0.5D$ 前後 (本研究では、 $90 \text{ mm} \sim 120 \text{ mm}$) の区間をアンボンド化することが有効である (4.2 節)。
- 4) UN-SFRC 柱は他の RC 柱よりも高い残存耐力を大変位領域にても保有することが可能であり、斜め載荷では 0.5 以上、矩形載荷では 0.3 程度の耐力保有率を有することが包絡線の耐力特性から分かった (4.2 節)。
- 5) UN-SFRC 柱のコンクリート破壊域は基部に集中しているが、SFRC 柱と違い、基部から 130 mm 程度の領域には表面ひび割れが殆ど生じなかった。この理由としてアンボンド化が考えられる (4.3 節)。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、平成 25 年度文部科学省科学研究費補助金 (基盤研究 (C) 25420493) および中部大学特別研究費 A の研究助成を得た。また、供試体作製ならびに実験に際し、日本コンクリート (株) の山下公正氏およびレックスサポート (株) の近藤貴紀氏より貴重な助言をいただいた。さらに、中部大学学部生:

山口拓也君および前口剛治君には、実験遂行にて多大な協力をいただいた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献:

- 1) 山野辺慎一ら: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた RC 橋脚の二方向地震動に対する耐震性能, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.3, pp.435-450, 2010.7.
- 2) 川島一彦ら: 塑性ヒンジ区間で主鉄筋をアンボンドした鉄筋コンクリート橋脚の履歴特性, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.45-64, 2001.10.
- 3) 日本コンクリート工学協会編: コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用, 2003.
- 4) 木村秀樹ら: 鋼繊維を混入した高強度コンクリート RC 柱に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.235-240, 2003.7.
- 5) 吉武謙二, 小川晃, 樋口義弘, 前之園司: 中間帯鉄筋の定着体が RC 柱の変形性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.139-144, 2009.7.
- 6) 鈴木森晶, 水野英二: 繰り返し二軸曲げを受ける中間補強筋付き鉄筋コンクリート柱の耐荷特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35.No.2, pp.139-144, 2013.7.
- 7) 鈴木森晶, 水野英二: 載荷履歴の異なる二方向曲げ力を受ける鋼繊維補強コンクリート柱の変形性状に関する研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2 (応用力学論文集 Vol.15), I_393-I_402, 2012.9.
- 8) 亀田好洋・鈴木森晶・水野英二: ポストピーク領域における鉄筋コンクリート柱の繰り返し耐荷特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.199-204, 2011.7.