

論文 材料特性の異なるアンボンド型鋼繊維補強コンクリート柱の繰返し二軸曲げ耐荷特性に関する実験的研究

近藤 貴紀*1・亀田 好洋*2・水野 英二*3

要旨: 本研究では、「横拘束筋間隔」、「載荷経路」および「軸方向鉄筋ならびにコンクリートの材料特性」を水準として、軸方向鉄筋とコンクリート間の付着を切った鋼繊維補強コンクリート柱（アンボンド型 SFRC 柱）の繰返し二軸曲げ実験を実施し、材料特性がアンボンド型 SFRC 柱の耐荷特性に与える影響を検討した。結果として、1) 軸方向鉄筋に伸び率の高い SUS304 鉄筋およびコンクリートに靱性の高い 70 MPa 級の鋼繊維補強コンクリートを使用したアンボンド型 SFRC 柱は横拘束筋間隔に関係なく高い耐力を大変位領域まで発揮する、2) 軸方向鉄筋の破断がほとんどなくなる、など多くの知見を得た。

キーワード: アンボンド型 SFRC 柱, 繰返し二軸曲げ, 耐荷特性, SUS304 鉄筋, 軸方向鉄筋の破断

1. はじめに

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) から大変位領域に至るまでの急激な強度低下を抑え, 耐震性能の高い RC 柱を開発することは重要な課題の一つである。一般に, 鉄筋コンクリート (RC) 柱のポストピーク領域での耐震性能を高めるためには, 材料的ならびに構造的な観点から柱基部の塑性ヒンジ領域にて, 1) 靱性の高いコンクリートを使用することにより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, ひいては軸方向鉄筋の座屈の発生を遅延させる, 2) 伸び率の高い鉄筋を用いて軸方向鉄筋の破断を防止することが肝要と思われる。

これらのことを踏まえて既往の研究では, 中間補強筋などを配筋することにより直接的に軸方向鉄筋の座屈を抑制しコンクリートの損傷・剥落を防止する方策^{2), 3)}, また鋼繊維補強コンクリートを利用した塑性ヒンジ領域の高強度・高性能化^(例えば, 4), 5)に関する課題も行われている。よって, RC 柱の塑性ヒンジ領域で, 1) 鋼繊維補強によりコンクリートを高靱性化しコンクリートの繰返し劣化・軸方向鉄筋の座屈発生を抑え, 2) 延性の高い軸方向鉄筋を用いてコンクリートとの付着を切ること (アンボンド化) により軸方向鉄筋の破断を防止することは, RC 柱の耐震性能向上策の一つと考える^{4)~6)}。

それゆえ, 本研究では, 既往の研究^{7), 8)}で扱った「横拘束筋間隔」および「載荷経路」に加えて, 軸方向鉄筋およびコンクリートの「材料特性」も水準とし, 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) 柱」の一定軸力下での繰返し二軸曲げ載荷実験を実施した。ここでは, 「材料特性」の異なる軸方向鉄筋 (SUS304 および SD345) および鋼繊維補強コンクリートを採用し, 「載荷経路」と

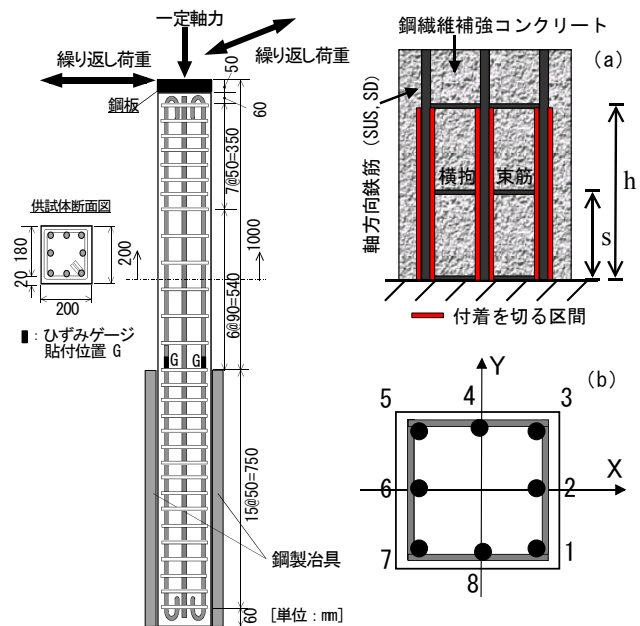


図-1 RC 柱配筋図

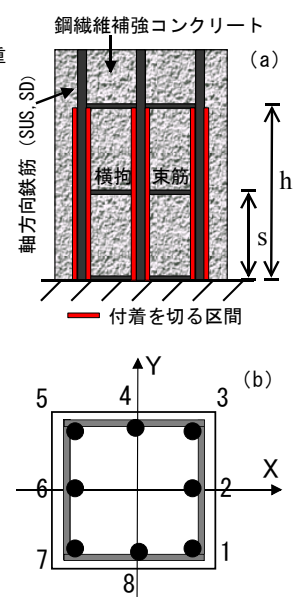


図-2 アンボンド型 SFRC 柱基部と軸方向鉄筋番号

しては, 斜め載荷および矩形載荷^{7), 8)}を採用した。これまで筆者らが実施した, SD295A 鉄筋を軸方向鉄筋に用いたアンボンド型 SFRC 柱の二軸曲げ載荷実験結果⁸⁾と本実験結果とを比較することにより, 材料特性の異なるアンボンド型 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。

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 1,000 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 (1/4~1/5 の縮

*1 中部大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*2 豊橋市役所 都市計画部区画整理課 修士 (工学) (正会員)

*3 中部大学 工学部都市建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)

表-1 アンボンド型供試体の材料定数、耐力および軸力一覧

供試体	横拘束筋 間隔 s [mm]	鋼繊維補強コンクリート		軸方向鉄筋 D10				横拘束筋 D6		耐力		軸力 [kN]	
		圧縮強度 (曲げ強度) [MPa]	靱性率 $\epsilon_{80s}/\epsilon_{80h}$	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	ヤング係数 [GPa]	伸び率 [%]	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	曲げ 耐力 [kN]	せん断 耐力 [kN]		
SUS304 柱	65,90, 105,120	斜め 載荷	69 (9.7)	2.9	SUS304				SD345		39	59~84	146
		矩形 載荷	73 (9.9)	3.4	455 (0.2%オフ セット)	836	168	35	395 (0.2%オフ セット)	630	37	60~85	154
SD345 柱	65,90, 105,120	斜め 載荷	54 (13.3)	< 2.1	SD345				SD345		29~35	57~82	149
		矩形 載荷	74 (10.2)	2.7	453	696	194	23	395 (0.2%オフ セット)	630	36	60~85	144
			59 (11.5)	2.9							34	58~82	130
SD295A 柱 (文献 8)	65,90, 105,120	斜め 載荷	52 (7.8)	5.6	SD295A				SD295A		31	60~88	112
		矩形 載荷	49 (9.5)	4.1	401	598	204	32	443	591	29	59~87	106

注：靱性率：図-3(b)に示す、圧縮強度の80%レベルでのひずみ比 $\epsilon_{80s}/\epsilon_{80h}$ 、伸び率：標点間距離 50mm に対する破断ひずみ。

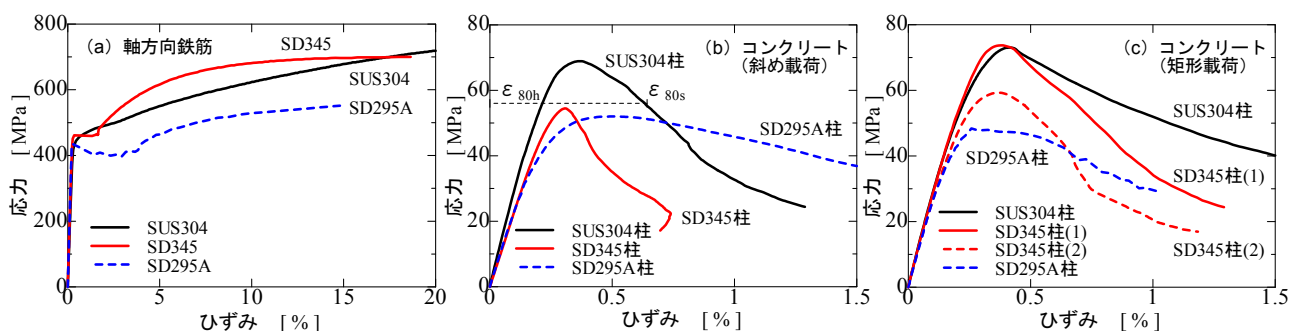


図-3 材料の応力-ひずみ曲線

小率) したものである。供試体作製の関係上、軸方向鉄筋には D10 (SUS304 または SD345 の 2 水準) を 8 本、横拘束筋には D6 (SD345) 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、図-2 (a) に示すように、柱の塑性ヒンジ部分 (柱基部より 0.5D 前後の区間) の軸方向鉄筋に塩化ビニールホース (外径 14mm, 厚さ 1mm) を巻くことによりコンクリートとの間の付着を切ったアンボンド型 SFRC 柱を作製した⁸⁾。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、軟化特性の異なる設計基準強度 $f_{ck} = 50, 60$ および 70 MPa を有する鋼繊維補強コンクリート (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)、軸方向鉄筋 (2 種類) および載荷経路 (3.2 節に説明する 2 種類の載荷経路) 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鋼繊維補強コンクリートの材料定数などを表-1、それら材料の応力-ひずみ曲線を図-3 に文献 8) のデータと併せて示す。

3. 載荷実験

3.1 載荷方法

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 に示す二方向載荷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、繰り返しの二軸曲げ載荷実験を実施した。鉛直軸力の大きさは累加軸耐力の 5% (130 kN~154 kN の範囲) とし、次節の載

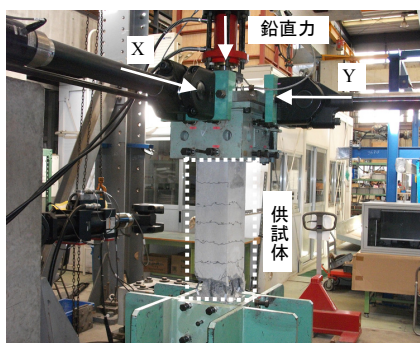
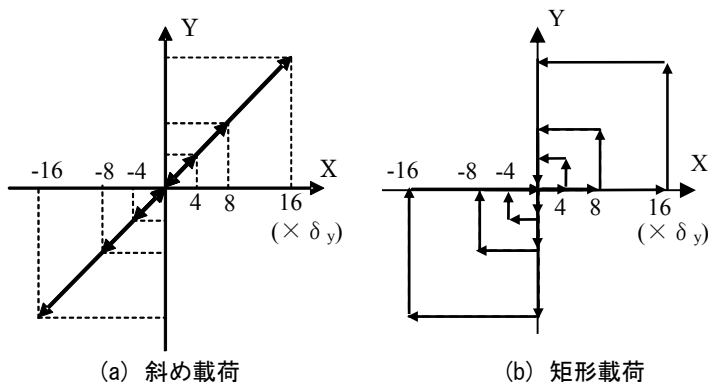


写真-1 二方向載荷装置



(a) 斜め載荷

(b) 矩形載荷

図-4 載荷経路

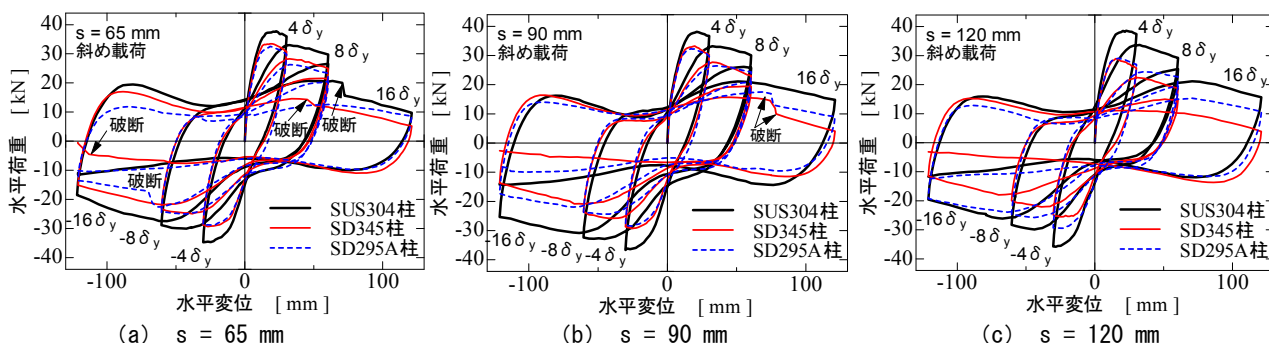


図-5 水平荷重-水平変位関係 (斜め載荷: 斜め45° 方向成分)

荷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 載荷経路

これまでの一連の実験^{7,8)}と同様、図-4に示す、2種類の載荷経路として、1) 45° 斜め載荷、2) 矩形(正方形)載荷を設定した。斜め載荷(図-4(a))では、X方向およびY方向に同時に同一変位を(0 → +4 δ_y → -4 δ_y → +8 δ_y → -8 δ_y → +8 δ_y → -16 δ_y → +16 δ_y)の順に柱頂部に与えた。一方、矩形載荷(図-4(b)参照)では、第1象限と第3象限にて順に大きさ4 δ_y 、8 δ_y および16 δ_y の矩形により8の字を描くようにX方向およびY方向の変位を変化させて実験を実施した。ここで、図中の「 δ_y 」は一方方向載荷(X方向またはY方向載荷)下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_y を意味する。本実験では、文献8)にある、軸方向鉄筋にSD295Aを用いたアンボンド型SFRC柱の実験結果と比較するため、斜め載荷では $\delta_y = 5.35$ mm、矩形載荷では $\delta_y = 6.0$ 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) 斜め載荷

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を有する二種類のアンボンド型SFRC柱に対する斜め載荷実験から得た、水平荷重-水平変位関係(斜め45° 方向成分)を図-5(a)~(c)に示す。図中、黒実線はSUS304鉄筋を用いたアンボンド型SFRC柱(SUS304柱)、赤実線はSD345柱および青破線はSD295A柱の実験結果⁸⁾をそれぞれ示す。

本実験では、主にコンクリートの圧縮強度と靱性率に着目した。よって、「材料特性」および「横拘束筋間隔」の違いによる変形特性として、以下のことが挙げられる。

- i) 表-1および図-3に示すように、SUS304柱のコンクリートの圧縮強度および軸方向鉄筋の降伏強度が一番大きく、「横拘束筋間隔」に関係なく、高い初期耐力(40 kN)および荷重-変位関係を呈する。
- ii) 一方、SD345柱の軸方向鉄筋の降伏強度(453 MPa)はSUS304柱のそれ(455 MPa)と概ね同じであるが、SUS304柱と比べてコンクリートの圧縮強度が低い

表-2 軸方向鉄筋の破断本数の比較 (斜め載荷)

		斜め載荷			
		横拘束筋間隔 (mm)			
供試体名		65	90	105	120
アンボンド	SUS304柱 (70MPa)	1	0	0	0
	SD345柱 (50MPa)	2	2	0	0
	SD295A柱 (50MPa)	2	2	0	0
ボンド	RC柱 (50MPa)	2	2	0	0
	RC柱 (60MPa)	2	1	0	0
	SFRC柱 (60MPa)	4	2	1	1

- ため初期耐力が小さく、かつ靱性率(表-1にて定義)も2.1と小さいため繰り返し載荷中の荷重の低下も横拘束筋間隔が大きくなるに従い大きくなる。
- iii) SD345柱とSD295A柱のコンクリート強度はほぼ同じ(52 MPa~54 MPa)であり、初期耐力は概ね同じであるが、SD295A柱のコンクリートの靱性率(5.6)と比べてSD345柱のコンクリートの靱性率(2.1)は小さいため、「載荷区間」および「横拘束筋間隔」が大きくなるに従い、耐力の差異が大きくなる。
- iv) 横拘束筋間隔が65 mmの場合には、載荷区間(+8 δ_y → -16 δ_y)にて、まずSD295A柱隅角部の軸方向鉄筋3、つづいて載荷区間(-16 δ_y → +16 δ_y)にてSUS304柱を含む3つの柱隅角部の軸方向鉄筋7、さらに最終載荷区間(+16 δ_y → -16 δ_y)にてSD345柱隅角部の軸方向鉄筋3が大きな音を伴い破断する。
- v) 一方、横拘束筋間隔が90 mmと大きくなると、SD345柱およびSD295A柱では、載荷区間(-16 δ_y → +16 δ_y)にて軸方向鉄筋7、つづいて最終載荷区間(+16 δ_y → -16 δ_y)にて軸方向鉄筋3が破断する。さらに、横拘束筋間隔が大きくなる(105 mmおよび120 mm)と、3つの柱とも軸方向鉄筋の破断はなくなる。
- vi) これまでのRC柱、SFRC柱およびアンボンド型SFRC柱の実験結果^{7,8)}を含めても、SUS304柱の軸方向鉄筋の破断本数が1本と一番少ない(表-2参照)。

(2) 矩形載荷

一例として、横拘束筋間隔 $s = 65$ mm、90 mm および120 mmを有するアンボンド型SFRC柱の矩形載荷実験から得た、水平荷重-水平変位関係(X方向: 煩雑さを避けるためSD345柱(2)柱を除く)を図-6(a)~(c)に示す。主な特徴として、以下のことが挙げられる。

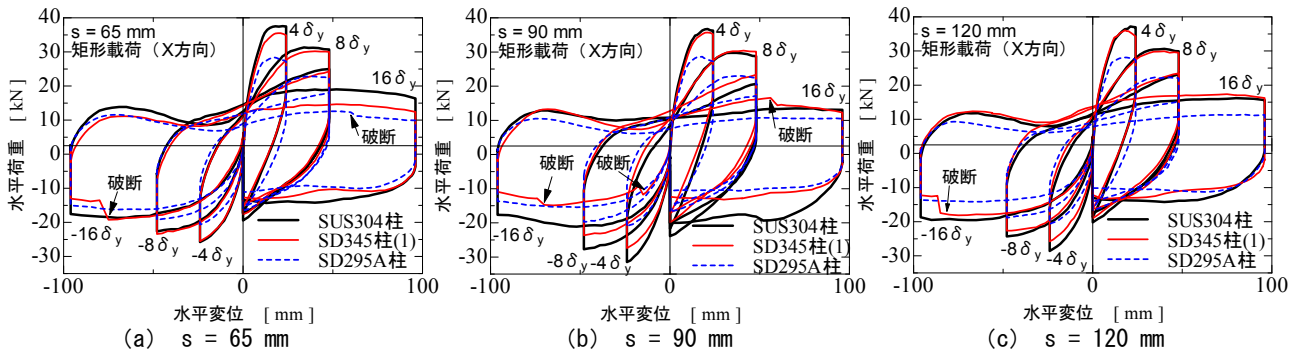


図-6 水平荷重-水平変位関係 (矩形載荷 : X 方向成分)

- i) 軸方向鉄筋の降伏強度およびコンクリート強度がほぼ同じである SUS304 柱 (靱性率: 3.4) および SD345 柱 (1) (靱性率: 2.7) は初期耐力を含めて $\pm 8\delta_y$ までの載荷では横拘束筋間隔に関係なく変形挙動に大きな差異はないが、それ以降の大変位領域での載荷において SD345 柱 (1) の軸方向鉄筋 3 および 7 が破断するため耐力の低下が確認できる。これは、SD345 鉄筋の破断ひずみ (23%) が SUS304 鉄筋のそれ (35%) よりも小さいことに主に起因する。
- ii) SD295A 柱 (コンクリートの強度: 49 MPa, 靱性率: 4.1) の初期耐力は SUS304 柱および SD345 柱 (1) と比べて低いが、コンクリートの靱性率が一番大きくかつ軸方向鉄筋の破断ひずみも大きいため大変位領域まで SUS304 柱と同程度の耐荷性能を呈する。
- iii) 軸方向鉄筋の破断本数に関して、これまでの実験結果^{7,8)}と本実験結果との比較を表-3 に示す。SUS304 柱では破断本数が大きく減少することが分かる。

4.2 載荷方向の変化点を基準とした強度-変位曲線

本節では、載荷区間ごとの荷重-変位曲線の開始点 (載荷方向の変化点) を基準として整理・分類した「抵抗強度 (以降、強度と称す) -変位曲線」⁸⁾を用いて、SUS304 柱および SD345 柱の耐荷特性を SD295A 柱の耐荷特性⁸⁾と比較する。ここで、強度とは変化点以降の荷重と載荷方向の変化点での荷重との差である。

(1) 斜め載荷下での耐荷特性

一例として、横拘束筋間隔 ($s = 65 \text{ mm}$) を有する 3 種類のアンボンド型 SFRC 柱の斜め載荷下での強度-変位曲線を比較した結果を図-7 に示す。ここで、黒実線は SUS304 柱、赤破線は SD345 柱および青破線は SD295A

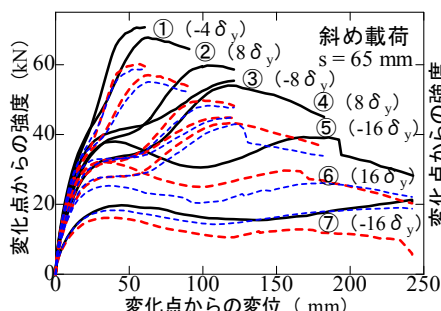


図-7 強度-変位曲線 ($s = 65 \text{ mm}$)

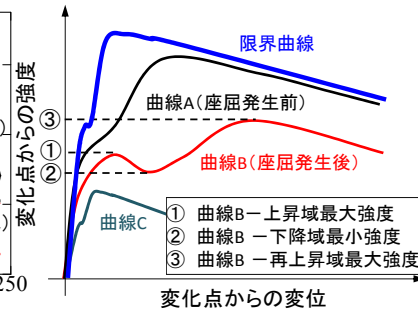


図-8 強度-変位曲線の分類⁸⁾

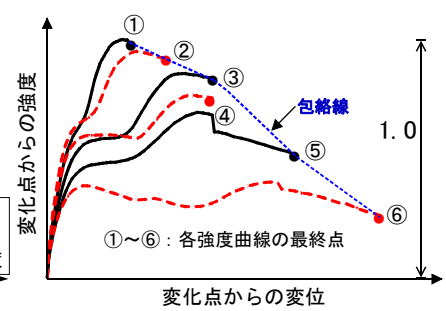


図-9 強度-変位曲線の包絡線

表-3 軸方向鉄筋の破断本数の比較 (矩形載荷)

		矩形載荷			
		横拘束筋間隔 (mm)			
供試体名		65	90	105	120
アンボンド	SUS304 柱 (70MPa)	1	0	0	0
	SD345 柱 (1) (70MPa)	2	2	2	2
	SD345 柱 (2) (60MPa)	2	1	1	1
	SD295A 柱 (50MPa)	1	1	1	0
ボンド	RC 柱 (50MPa)	2	1	1	0
	RC 柱 (60MPa)	2	0	0	0
	SFRC 柱 (60MPa)	6	5	5	4

柱の結果を示し、強度および変位は、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) の奇数および偶数は変位がそれぞれマイナス側およびプラス側に漸増する強度-変位曲線を意味する。図-7 の強度-変位曲線は、繰り返し変位幅が増えるに従い、図-8 の分類に示すように、1) 強度が上昇・下降する曲線 A (図-7 の曲線①~④に対応)、2) 一旦、強度が一定または減少した後に、再度上昇し、下降する曲線 B (図-7 の曲線⑤、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曲線 C (図-7 の曲線⑦)へと変化する。これら曲線の終点を結んだ包絡線 (図-9 参照) により、3 種類の柱の強度低下を整理した結果を図-10 (a)~(c) に示す。なお、図中の強度保有率は、それぞれの曲線①の最終点の強度で無次元化してある。一例として、図-7 に示すアンボンド型 SFRC 柱の強度-変位曲線 (①~⑥) ごとに比較した結果も図-11 に示す。

斜め載荷下での耐荷特性として、1) SUS304 柱および SD295A 柱の強度は曲線⑥の最終点において 45%~60% 程度、SD345 柱では 65%~70% 程度低下する、2) コンクリートの靱性率 (2.1 以下) が低い SD345 柱では、コ

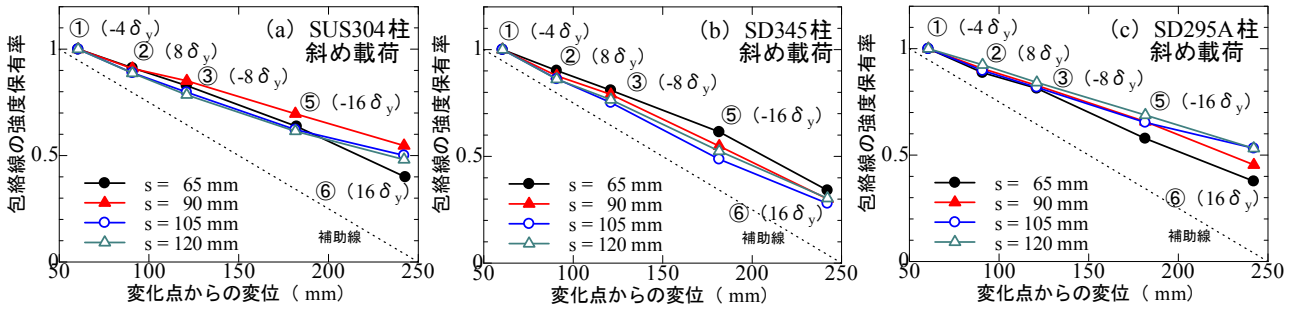


図-10 包絡線の強度特性 (斜め載荷)

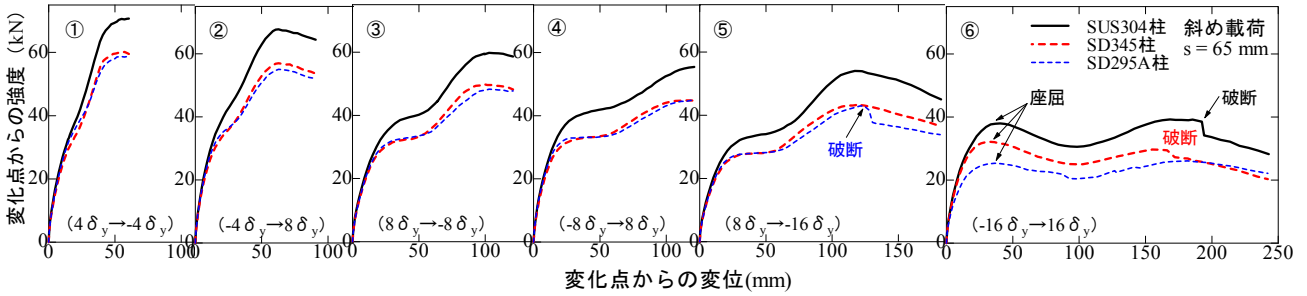


図-11 強度-変位曲線の比較 (斜め載荷 : $s = 65 \text{ mm}$)

アコンクリートの劣化進展が早く強度保有率が低い, 3) コンクリートの強度および靱性率が高い SUS304 柱では, 図-11 より分かるように軸方向鉄筋の破断が発生するまで高い強度を維持できる, などが挙げられる。

図-8 に示すように, 曲線 A (座屈発生前) から曲線 B (座屈発生後) に移行する軸方向鉄筋の座屈発生時点での強度を表-4 に整理して示す。本研究では, 座屈の発生は, 軸方向鉄筋のはらみ出しによるコンクリート表面の盛り上がりを実験時に観察するとともに, 曲線 B への移行に注目して決定する。座屈の発生強度の大きさは, コンクリート強度, 靱性率, 破断状況および横拘束筋間隔の順で影響を受けると考えられる。ここでは, SUS304 柱, SD295A 柱, SD345 柱の順で座屈の発生強度が高い。

(2) 矩形載荷下での耐荷特性

図-12 に示すように, 矩形載荷の 1 サイクルは 4 種類の載荷経路 (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^{7),8)}。

以下では, 斜め載荷と等価である, 経路 A の耐荷曲線 (X 方向成分) および経路 B の耐荷曲線 (Y 方向成分) を比較する。一例として, 横拘束筋間隔 ($s = 65 \text{ mm}$) を

表-4 軸方向鉄筋の座屈発生強度 (kN) の比較

		横拘束筋間隔 (mm)			
		65	90	105	120
斜め載荷	SUS304 柱 (70MPa)	38-41	42-43	37-38	36-37
	SD345 柱 (50MPa)	32	30	26	27
	SD295A 柱 (50MPa)	26-33	32	31	32-33
矩形載荷	SUS304 柱 (70MPa)	13-17	12-19	12-18	13-16
	SD345 柱 (1) (70MPa)	13-17	15-18	13-15	12-17
	SD345 柱 (2) (60MPa)	12-17	11-15	13-15	13-16
	SD295A 柱 (50MPa)	11-14	10-13	10-13	10-13

有する SUS304 柱の強度-変位曲線 (経路 A: 実線および経路 B: 破線) を整理した結果を図-13 に示す。図中, 曲線⑤の載荷経路 A 以降, コンクリート (靱性率 3.4) の圧縮軟化に伴う剥落および軸方向鉄筋の座屈が明確となり SUS304 柱の強度-変位曲線は低い様相を呈する。

斜め載荷の場合と同様に, SUS304 柱, SD345 柱 (1), SD345 柱 (2) および SD295A 柱の包絡線を無次元化した強度特性をそれぞれ図-14 (a)~(d) に示す。また, 一例として, 横拘束筋間隔 ($s = 65 \text{ mm}$) を有するアンボンド型 SFRC 柱の強度-変位曲線 (①~⑥) ごとに挙動を比較した結果を図-15 に示す。矩形載荷下での耐荷特性として, 1) コンクリート強度および破断ひずみの高い SUS304 柱, 靱性率および破断ひずみの高い SD295A 柱

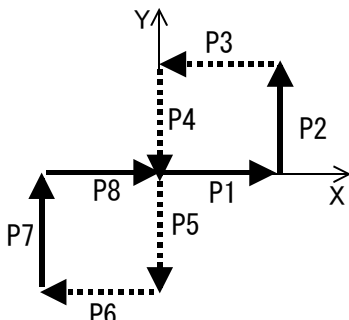


図-12 矩形載荷経路の構成

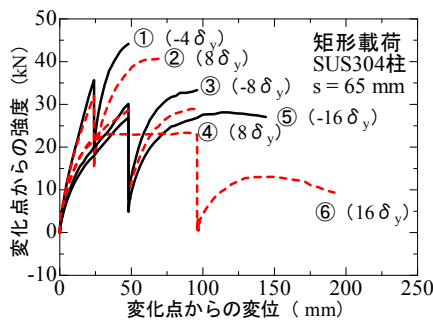


図-13 強度-変位曲線 ($s = 65 \text{ mm}$)

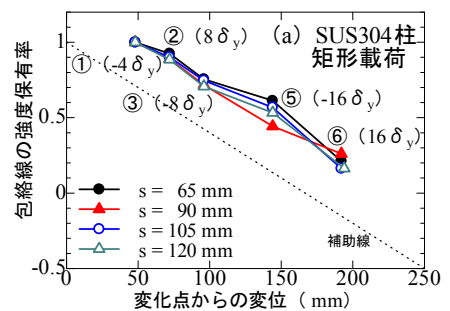


図-14 包絡線の強度特性 (矩形載荷)

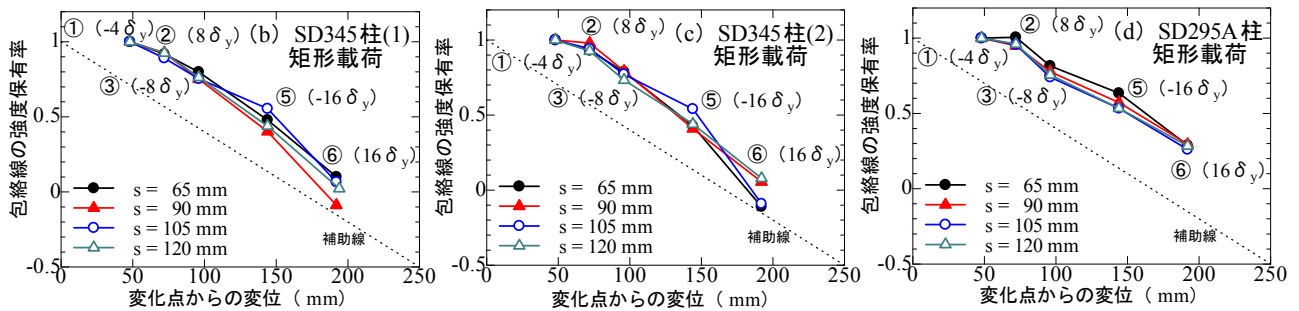


図-14 包絡線の強度特性 (矩形載荷)

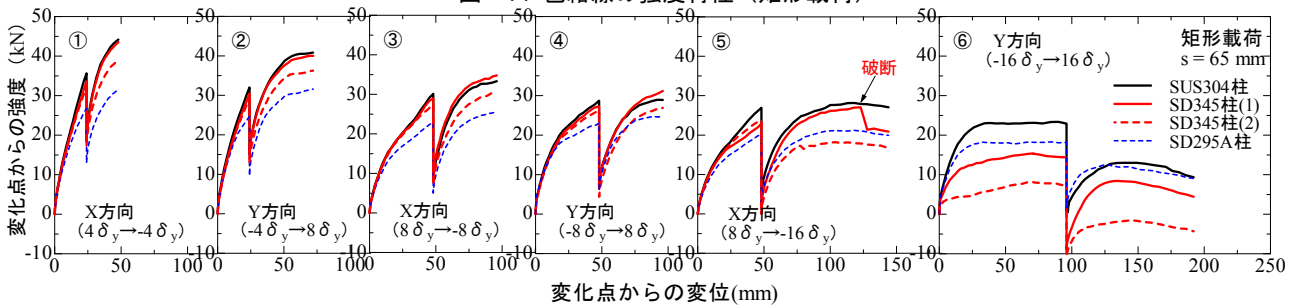


図-15 強度-変位曲線の比較 (矩形載荷 : s = 65 mm)

は横拘束筋間隔に関係なく強度を大変位領域にまで保有する、2) コンクリート強度および破断ひずみの小さいSD345柱(2体)は変位幅が大きくなると強度保有率がゼロとなる、3) 図-12の経路CおよびD上の座屈発生強度は、コンクリート強度に準じて変動すると考えられるが大きな差異はない(表-4)、などが挙げられる。

5. まとめ

- 1) SUS304, SD345 および SD295A 鉄筋を軸方向鉄筋に用いたアンボンド型 SFRC 柱の初期耐力は、降伏強度の違いよりもコンクリート強度に影響される(4.1節)。
- 2) SUS304 柱は斜め載荷および矩形載荷ともに軸方向鉄筋の破断本数が一番少ない。これは、コンクリートの靱性率の大きさの他に軸方向鉄筋の破断ひずみが大きいことも一因であると考え(4.1節および4.2節)。
- 3) SUS304 柱(強度:70MPa, 靱性率:2.9~3.4)とSD295A柱⁸⁾(強度:50MPa, 靱性率:4.1~5.6)は両載荷下で同程度の耐荷性能を呈する(4.1節および4.2節)。
- 4) 圧縮強度が同じでも靱性率が2.1と小さいSD345柱は靱性率が大きいSD295A柱と比べ、斜め載荷下の大変位領域にて耐荷性能が低い(4.1節および4.2節)。
- 5) 過鉄筋状態とならない範囲内で、ヒンジ領域に対して、圧縮強度が高く、靱性率の大きい鋼繊維補強コンクリートおよび破断ひずみが大きい軸方向鉄筋を用いて、初期耐力が高い、大变位領域までも耐荷性能の高いアンボンド型 SFRC 柱とすることが望ましい(4.2節)。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、平成26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

作製に際し、日本コンクリート(株)の山下公正氏ならびに(株)丸治コンクリート工業所の川合修司氏より貴重な助言をいただいた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献:

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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) 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.
- 6) 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.
- 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, 水野英二: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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.36, No.2, pp.121-126, 2014年7月.