

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

A study on the deformation properties of SFRC columns subjected to different types of bi-axial cyclic loadings

鈴木森晶*・水野英二**
Moriaki SUZUKI and Eiji MIZUNO

* 正会員 博士(工学) 愛知工業大学教授 工学部都市環境学科 (〒470-0392 豊田市八草町八千草1247)

** 正会員 Ph.D. 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 春日井市松本町1200)

In this paper, the bi-axial cyclic loading tests of RC and SFRC columns under the different loading histories have been performed. The influence of loading-path on the deformational performance, such as the flexural strength and ductility of RC and SFRC columns, and on the buckling behavior of re-bar has been examined in details in the post-peak loading area. Furthermore, the energy absorption capacities have been discussed in relation to the buckling behavior of re-bar and the deterioration of core concrete during cyclic loading. It has been found that SFC may be effective to make the plastic hinged zone of column more ductile, particularly for the column with rough interval of hoop tie, i.e., the interval of 120 mm in the present study.

Key Words: SFRC column, bi-axial cyclic loading test, re-bar, buckling properties, loading hysteresis, deformation properties, energy absorption capacity

キーワード: 繊維補強鉄筋コンクリート柱, 二方向繰り返し載荷, 軸方向筋, 座屈特性, 載荷履歴, 変形特性, エネルギー吸収性能

1. はじめに

一般に、適切な安全余裕度を有する鉄筋コンクリート(RC)橋脚を設計する場合、地震動などによる過大かつ多方向からの外力に対して、RC橋脚が保有する最大耐力に達した後(以下、ポストピーク領域)にも急激な耐力の低下を生じないように配慮を行うのが望ましい^{1)~3)}。ポストピーク領域での急激な耐力低下を抑制する一対策として、軸方向筋の座屈発生を出来るだけ抑えることが可能なエネルギー吸収性能の高い構造を採用することが考えられる。そのため、1)一軸方向のみならず多方向からの外力による繰り返し劣化などの破壊進展がRC部材の耐荷特性に影響を及ぼすメカニズムを解明すること、2)材料的ならびに構造的な観点から、繰り返し力による内部コンクリートの強度劣化特性ならびに軸方向筋の座屈発生前後の耐荷特性を明確にすることは重要な課題と考える。

鋼繊維補強コンクリート(以下、SFC)は、従来のコンクリートの脆性を改善する材料として注目されており、曲げやせん断力に対する強度が強くなり、ひび割れへの抵抗力などが向上する^{4),5)}。これらの

特性を活かしたSFCは、多くのコンクリート構造物に用いられている。特に、SFCを用いた鋼繊維補強鉄筋コンクリート(SFRC)柱のポストピーク領域にまで及ぶ変形特性および軸方向筋の座屈挙動は、RC柱のそれらとは異なると考えられる。従って、RC柱と同様、SFRC柱のポストピーク領域における力学的挙動の検討は、安全余裕度を持たせたSFRC柱の設計を行うためにも重要な課題である。これまで、RC柱の軸方向筋の座屈に関する研究⁶⁾、SFRC柱の耐荷特性に関する研究⁷⁾など多くの研究が行われているが、二方向載荷の条件下でのSFRC柱の繰り返し耐荷特性の研究については、多くは見られない^{例えば、8)}。

従って、本研究では、既往の研究^{9)~13)}で扱った「横拘束筋間隔」、「コンクリート材料特性」および、「載荷パターン」も要因とすることにより、一定軸力下での二軸繰り返し曲げ載荷実験を実施した。ここでは、「コンクリート材料特性」として、普通コンクリート(RC)に加え鋼繊維補強コンクリート(SFC)を、「載荷経路」としては、斜め載荷および矩形載荷を採用した。

これらの条件下で、二軸載荷下でのコンクリートの繰り返し劣化性状および軸方向筋の座屈性状がRC柱およびSFRC柱のポストピーク領域での耐荷特

性に与える影響について検証した。また、RC 柱と SFRC 柱の実験結果を比較することにより、スチールファイバーの有無、載荷経路の違いが、軸方向筋の座屈性状やコンクリートの破壊領域に与える影響を考察した。さらに、載荷経路とエネルギー吸収量の関係についても考察を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究で使用した供試体の形状ならびに配筋の一例を図-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 RC 柱供試体 8 本と SFRC 柱供試体 8 本の計 16 本を用いた。供試体は曲げ破壊先行型（曲げ耐力/せん断耐力=2 倍～3 倍弱）となるように、軸方向筋には D10 (SD295A) を 8 本、横拘束筋には D6 (SD295A) を柱基部 2D 区間 (D: 柱幅) において間隔 (s) = 65, 90, 105 および 120 mm (4 水準) でそれぞれ配筋した。打設コンクリートは、柱基部周辺の塑性ヒンジ部分の高機能化を検証するために、設計基準強度 60 MPa のコンクリートを採用した。供試体には、(1) 普通コンクリートと (2) 鋼繊維（直径 0.62 mm, 長さ 30 mm, 断面積 0.302 mm^2 ）を 1.5% (体積比率) 混入させた鋼繊維補強コンクリート（引張強度 10～15 MPa）を用いた。実験では、これに載荷パターン（斜め載荷と矩形載荷）を要因に加えた。鉄筋およびコンクリートの材料定数を JIS 規格で定められる材料試験法により求め、それら材料定数などを表-1 に示す。

2.2 載荷装置

実験に用いた載荷装置と供試体の全景を写真-1 に示す。供試体を鋼製治具に挿入し、高力ボルトにより完全固定の条件となるように、供試体を固定した後、供試体頂部に鉛直ジャッキにより軸力を作用させた。同時に、写真-1 に示す二方向載荷装置を用いて二方向 (X 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、繰り返し二軸曲げ載荷実験を実施した。上部構造からの上載荷重を想定して、軸力の大きさは累加軸耐力の 5% ($130 \text{ kN} \sim 138 \text{ kN}$) とし、次節の載荷パターンに基づき変位制御により水平荷重を作用させた。

2.3 載荷経路

本研究では、図-2 および 3 に示すように 1) 45° 方向の斜め載荷、2) 矩形 (正方形) 載荷の 2 種類の異なる載荷パターンを設定し、柱頂部を二方向 (X および Y 方向) からの水平変位により制御した¹³⁾。

斜め載荷 (図-2) では、X-Y 方向に同時に同一

表-1 材料定数および実験諸量

載荷履歴	横拘束筋間隔 s [mm]	コンクリート		軸方向筋 D10 (SD295A)		横拘束筋 D6 (SD295A)		載荷軸力 [kN]	
		設計基準強度 60 [MPa]		降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	RC	SFRC
斜め載荷	65	62.6	64.0	342	519	373	583	RC	130
	90	64.5	61.8						136
	105	64.0	61.7						131
矩形載荷	65	61.6	61.7	342	519	373	583	RC	131
	90	65.3	63.8						138
	120	61.6	61.7						131

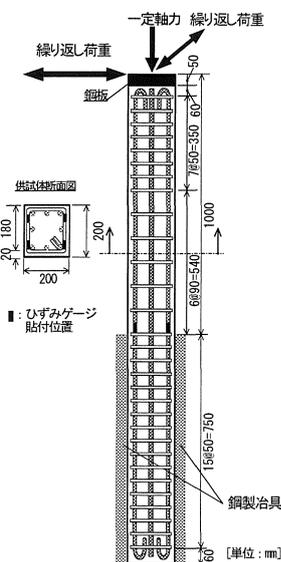


図-1 供試体配筋図

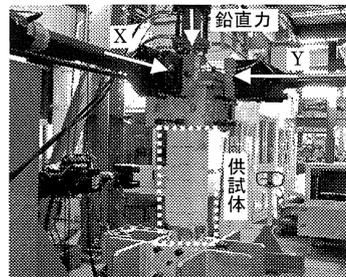


写真-1 載荷装置と供試体

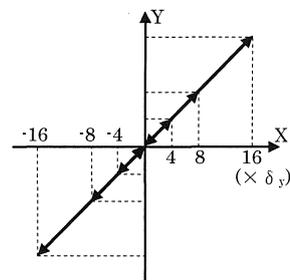


図-2 斜め載荷 (45°)

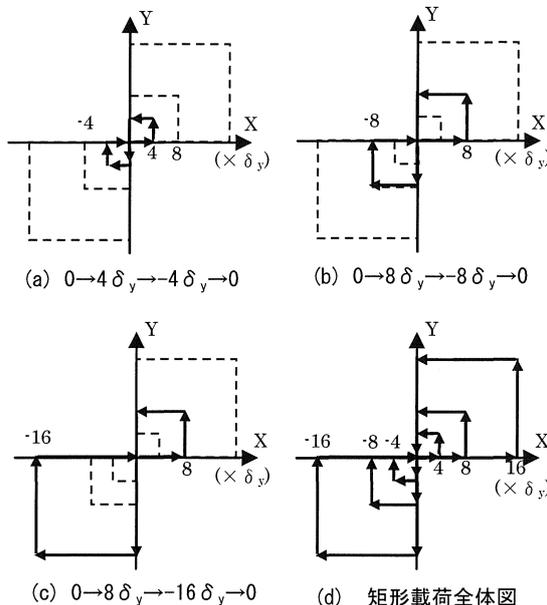
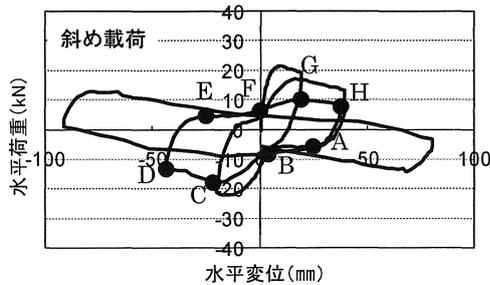
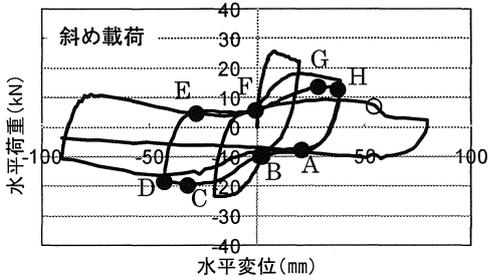


図-3 矩形載荷

変位を与えることにより、 $\langle 0 \rightarrow +4 \delta_y \rightarrow -4 \delta_y \rightarrow +8 \delta_y \rightarrow -8 \delta_y \rightarrow +8 \delta_y \rightarrow -16 \delta_y \rightarrow +16 \delta_y \rangle$ の順に実験を実施した。また、矩形載荷 (図-3) においても、X 方向および Y 方向の変位を、それぞれ $\langle 0 \rightarrow +4 \delta_y \rightarrow -4 \delta_y \rightarrow +8 \delta_y \rightarrow -8 \delta_y \rightarrow +8 \delta_y \rightarrow -16 \delta_y \rightarrow +16 \delta_y \rangle$ の順に変化させることにより実験を



(a) RC 柱 (X 軸成分)



(b) SFRC 柱 (X 軸成分)

図-4 水平荷重-水平変位関係 (s=120 mm : X 軸)

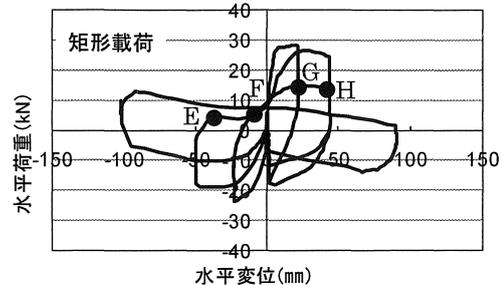
実施した. ここで, 図中の「 δ_y 」は初期荷重での引張側軸方向筋の初期降伏時における柱頭での水平変位 δ (すなわち, 本実験では, 軸方向筋のひずみが $2,000\mu$ に達した時の降伏水平変位) を意味する. なお, 斜め荷重用の RC 供試体の一方向荷重予備実験により, $\delta_y = 5.35$ mm を得た. 矩形荷重用の RC 供試体の一方向荷重予備実験により, $\delta_y = 6.0$ mm を得た. よって, 本実験では, 斜め荷重では $\delta_y = 5.35$ mm, 矩形荷重では $\delta_y = 6.0$ mm を採用した. ただし, SFRC 柱では, 実際の δ_y はそれよりも大きな値 (およそ 8 mm) となったことを付記する.

3. RC 柱と SFRC 柱の比較

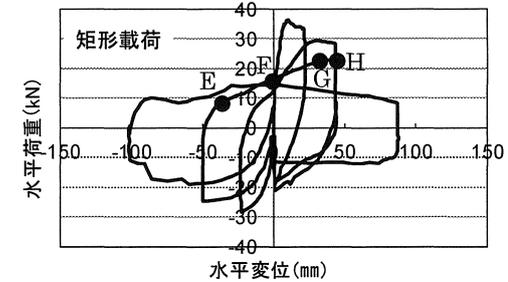
3.1 水平荷重-水平変位関係と軸方向筋の座屈

斜め荷重および矩形荷重下での RC 柱供試体と SFRC 柱供試体の変形挙動を比較するため, 横拘束筋間隔 $s = 120$ mm での水平荷重-水平変位関係を図-4~6 に示す. 図-4 は斜め荷重の X 軸方向成分, 図-5 は矩形荷重の X 軸方向成分, 図-6 は矩形荷重の Y 軸方向成分をそれぞれ示している. これら図の縦軸は水平荷重, 横軸は水平変位を採っている.

図-4 より, SFRC 柱供試体と RC 柱供試体の履歴曲線を比較すると, 最大耐力は RC 柱より SFRC 柱の方が高く, また, 最大耐力以降の耐力の低下率が小さい. これは, 普通コンクリートと比べ, 鋼繊維補強コンクリートの引張強度が 2~3 倍程度高いため, SFRC 柱の方が, かぶりコンクリートの剥落する量が少なく, 軸方向筋の座屈に対して抑制効果が発揮さ

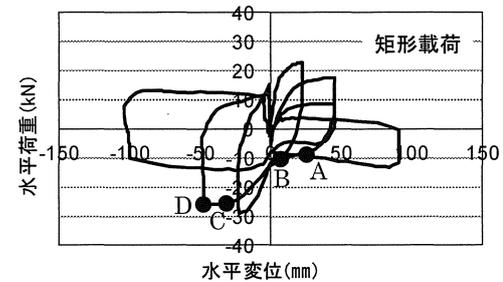


(a) RC 柱 (X 軸成分)

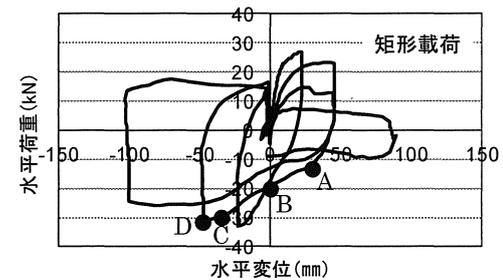


(b) SFRC 柱 (X 軸成分)

図-5 水平荷重-水平変位関係 (s=120 mm : X 軸)



(a) RC 柱 (Y 軸成分)



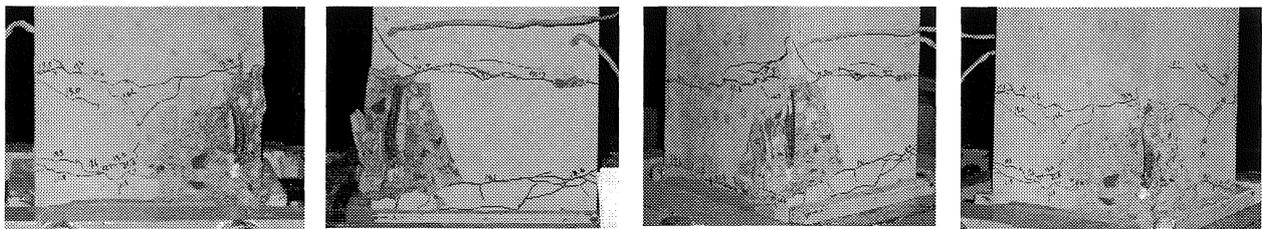
(b) SFRC 柱 (Y 軸成分)

図-6 水平荷重-水平変位関係 (s=120 mm : Y 軸)

れたと考えられる. 同様の傾向は横拘束筋間隔 $s = 65, 90$ および 105 mm の場合にも確認された.

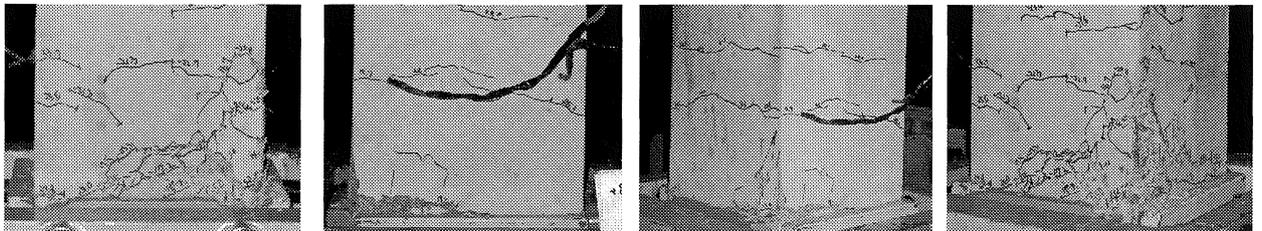
図-5 および 6 に示す矩形荷重に関しても, 最大耐力および最大耐力以降の耐力低下に関しては, 斜め荷重の場合と同様の傾向を示した.

特に, 図-4~6 に示す, 斜め荷重および矩形荷重下での $\langle 8\delta_y \rightarrow 8\delta_y \rightarrow 8\delta_y \rangle$ 区間の変形挙動を考察する. 図-4 中の記号 B を付した部分に対応する破壊状況を写真-2 および 3 に, 図-5 中の記号 F を



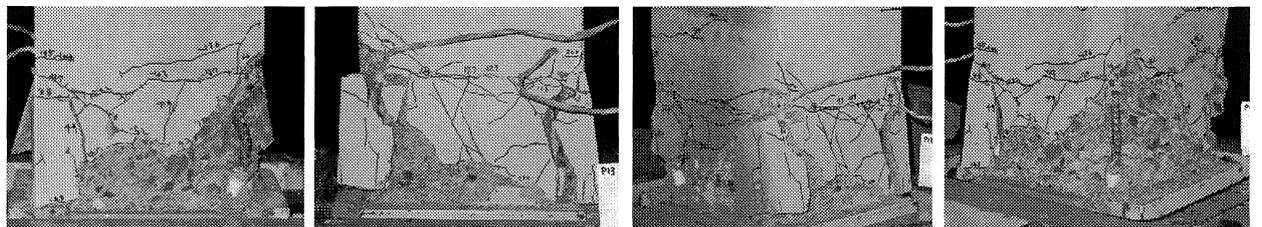
(a) 北面(+X面) (b) 東面(-Y面) (c) 南東角(-X-Y面) (d) 北西角(+X+Y面)

写真-2 RC柱：斜め載荷 $\langle 8\delta_y \rightarrow -8\delta_y \rangle$ のB点(5mm)での破壊状況



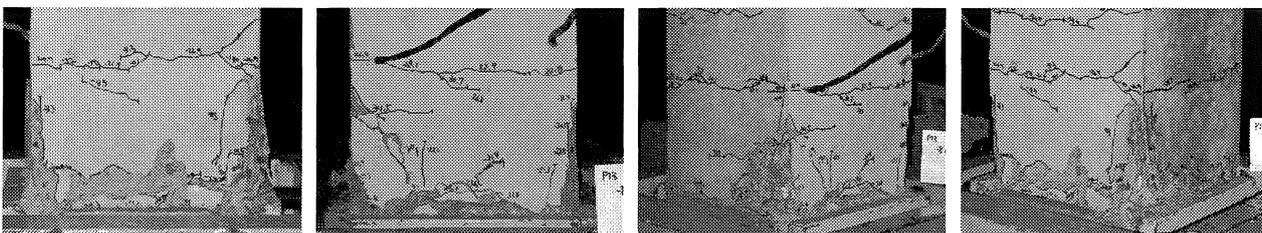
(a) 北面(+X面) (b) 東面(-Y面) (c) 南東角(-X-Y面) (d) 北西角(+X+Y面)

写真-3 SFRC柱：斜め載荷 $\langle 8\delta_y \rightarrow -8\delta_y \rangle$ のB点(5mm)での破壊状況



(a) 北面(+X面) (b) 東面(-Y面) (c) 南東角(-X-Y面) (d) 北西角(+X+Y面)

写真-4 RC柱：矩形載荷 $\langle -8\delta_y \rightarrow 8\delta_y \rangle$ のF点(-10mm)での破壊状況



(a) 北面(+X面) (b) 東面(-Y面) (c) 南東角(-X-Y面) (d) 北西角(+X+Y面)

写真-5 SFRC柱：矩形載荷 $\langle -8\delta_y \rightarrow 8\delta_y \rangle$ のF点(0mm)での破壊状況

付した部分に対応する破壊状況を写真-4 および 5 に示す。曲げ破壊が先行し、最終的には曲げせん断破壊が生ずるような破壊形式が RC 柱では観察された。なお、図中の A(E) 点は除荷域(載荷域)において軸方向筋の座屈が生じた点¹²⁾、B(F) 点は水平変位 0mm 近傍における荷重が若干低下した点、C(G) 点は荷重反転直前での最大耐力点、D(H) 点は荷重反転点である。

(1) 除荷域の挙動について

斜め載荷：柱基部付近の損傷状況に着目すると、除荷域における A 点において、RC 柱では、文献 13) にあるように、 $+8\delta_y$ の時点で生じた北西角(X, Y とともに正の隅角部)において既に生じた軸方向筋のほらみ出しが観察できる。また、反対側の南東角(X, Y とともに負の隅角部)では、軸方向筋の座屈が生じ始めたことがうかがえるようなかぶりコンクリートの剥

離が見られる。一方、SFRC 柱の場合、北西角のかぶりコンクリートにわずかに損傷が生じている程度である。南東角のかぶりコンクリートにはこの時点では明確な損傷が見られない。

B 点に達すると、RC 柱においては、南東角のかぶりコンクリートが剥落し、軸方向筋の明確な座屈が確認できる。SFRC 柱ではこの時点でも、大きな変化は見られない。

C 点に達すると、RC 柱では、さらに軸方向筋のほらみ出しが大きくなることが認められた。SFRC 柱では、南東角のかぶりコンクリートにひび割れの進展が確認でき、北西角のかぶりコンクリートの剥落が目立つようになった。ただし、この時点でも、鉄筋の明確な座屈は観察できない。

矩形載荷：水平荷重-水平変位の載荷履歴と軸方向筋の座屈挙動についても、斜め載荷と同様の傾向を示した(図-5, 6 および写真-4 および 5 参照)。

(2) 再載荷域の挙動について

斜め載荷 (図-4 および写真-2, 3) : 載荷方向を反転させた後の再載荷経路において, E 点に達した時点で, RC 柱においては, 北西角の座屈した軸方向筋が大きくはらみ出すようになり, 北西角と南東角の座屈が同程度となった. SFRC 柱に関しては, 両隅角部のかぶりコンクリートにおける損傷の進展は確認できるものの, この時点でも軸方向筋が露出しておらず, 座屈の確認はできない.

F 点に達した時, RC 柱においては, 北西角の軸方向筋のはらみ出し量が南東角と比較して大きくなった. SFRC 柱では, E 点の状況とほとんど変化はない.

さらに, G 点に達した際において, RC 柱では, 南東角の軸方向筋は延ばされ, 北西角の軸方向筋の座屈はさらに進行していた. SFRC 柱については, 明らかにかぶりコンクリートの剥落やクラックの進展は認められなかった.

上述のように, RC 柱と SFRC 柱のかぶりコンクリートの剥落状況や軸方向筋の座屈進展性状には明確な差が認められた.

矩形載荷 : RC 柱では, $\langle 8\delta_y \rightarrow -8\delta_y \rangle$ の再載荷パス過程で軸方向筋が座屈し, 大きくはらみ出す挙動を示していた. また, $\langle -8\delta_y \rightarrow 8\delta_y \rangle$ のパスに至る過程で4隅すべてに於いてかぶりコンクリートが剥落し, 軸方向筋の座屈が確認された. 一方, SFRC 柱は斜め載荷と同様, 隅角部にひび割れの進展は確認できるものの, 4隅ともに, かぶりコンクリートの剥離および軸方向筋の明確な座屈は確認できなかった (図-5 および写真-4, 5 参照).

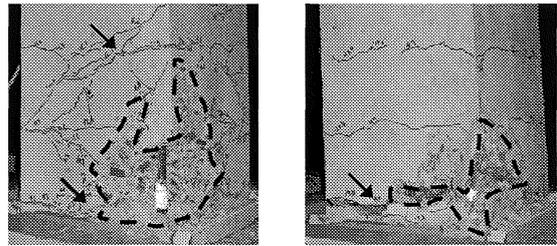
SFRC 柱供試体の方が, $8\delta_y$ 以降の除荷曲線と再載荷曲線において耐力の増加幅が大きい. また, 変位区間 $\langle 8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rightarrow 16\delta_y \rangle$ の大変位レベルの部分に着目すると, 載荷方向が反転した後に水平変位 0 mm 付近で見られるピンチング挙動が, SFRC 柱供試体の方で顕著に起きている. これは, RC 柱供試体ではかぶりコンクリートがほとんど剥落しているのに比べ, SFRC 柱供試体では一部のかぶりコンクリートが剥落するのに留まるため, 大変位レベルでもコンクリートの耐力が残留していると考えられる. 横拘束筋間隔に関係なく同様な結果を確認したが, 横拘束筋間隔が大きいとその差が顕著に現れた. なお, これらの傾向は横拘束筋間隔 $s = 65, 90, 105$ mm の場合にも確認された (写真-6~9 参照, 詳細は後述する).

(3) 軸方向筋の破断について

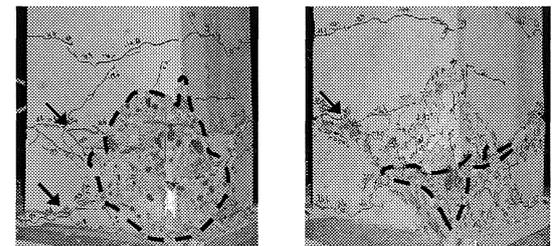
軸方向筋の破断は, 斜め載荷も矩形載荷の場合も SFRC 柱供試体の方が, RC 柱供試体より早い段階で発生し, 横拘束筋間隔に関係なく多くの破断が生じた (図-4 中の●印). また, SFRC 柱供試体では, 軸方向筋の座屈を確認する前に破断が発生する場合が多



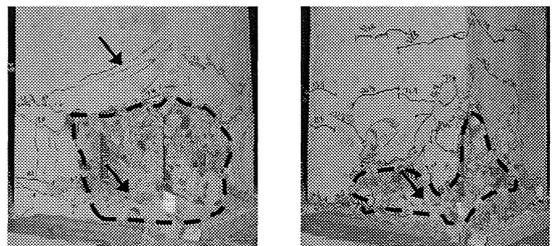
(a) RC 柱
s=65 mm
(b) SFRC 柱
s=65 mm
写真-6 載荷パス $\langle 8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rangle$ 履歴の
- $16\delta_y$ 時の破壊状況 (s=65 mm)



(a) RC 柱
s=90 mm
(b) SFRC 柱
s=90 mm
写真-7 載荷パス $\langle 8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rangle$ 履歴の
- $16\delta_y$ 時の破壊状況 (s=90 mm)



(a) RC 柱
s=105 mm
(b) SFRC 柱
s=105 mm
写真-8 載荷パス $\langle 8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rangle$ 履歴の
- $16\delta_y$ 時の破壊状況 (s=105 mm)



(a) RC 柱
s=120 mm
(b) SFRC 柱
s=120 mm
写真-9 載荷パス $\langle 8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rangle$ 履歴の
- $16\delta_y$ 時の破壊状況 (s=120 mm)

かった. これは, かぶりコンクリートが大きく剥離する RC 柱では, 軸方向筋が容易に座屈することで柱基部の塑性ヒンジ部分が回転するが, かぶりコンクリートがそれ程剥離しない SFRC 柱では, 同一の大きな回転角の下では, 鉄筋の破断が生ずる程のひずみが集中して発生するためと考える. すなわち, 損傷の進展の違いから SFRC 柱供試体の方が RC 柱供試体より軸方向筋の露出量が少なく, より大きなひずみ

が生ずることになる。

3.2 荷経路の違いによる比較

前述したように、SFC の引張強度が普通コンクリートより高く、コンクリートの損傷が少ないため、最大耐力は SFRC 柱供試体の方が RC 柱供試体より高く、耐力の低下率が小さい傾向がある。

そこで、斜め荷重と矩形荷重の水平荷重-水平変位関係を X 軸方向成分で比較すると、矩形荷重の方が斜め荷重より最大耐力が高く、 $8\delta_y$ 以降の耐力の低下率が小さい。これは、荷重方向が異なることで断面 2 次モーメント（曲げ剛性）に差が生じ、供試体の圧縮側および引張側で抵抗する鉄筋の数とコンクリートの量が矩形荷重の方が多いためと考える。なお、水平荷重-水平変位曲線において、全体的に斜め荷重も矩形荷重も同様な履歴挙動を示しており、荷経路の違いによる影響は小さいと考えられる。

斜め荷重における荷重パス $\langle 8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rangle$ 中の $-16\delta_y$ 時におけるコンクリートの破壊状況を写真-6~9 に示す。写真-6~9 において RC 柱供試体と SFRC 柱供試体とを比較すると、SFRC 柱供試体の方がかぶりコンクリートの剥落の量が少ないことが分かる。また、ひび割れは、RC 柱供試体と SFRC 柱供試体に関わらず横拘束筋の位置を中心に発生しているが、ひび割れの進展には違いが見られた。変位が大きくなるに従い、写真-6~9 の (a) に示す RC 柱供試体は、基部だけでなく基部から 1 段目や 2 段目の横拘束筋付近にまでひび割れが進展し、開口していく（→を参照）。一方、SFRC 柱供試体では、基部に発生する初期ひび割れのみが開口していく結果となった。これは、SFC の引張強度が普通コンクリートのそれよりも 2~3 倍程度高いことから推察できる。

3.3 鉄筋の座屈性状および最終破壊形状の比較

横拘束筋間隔 $s = 120 \text{ mm}$ の場合の最終的なコンクリートの破壊状況を写真-10~13 に示す。写真-10 は斜め荷重、写真-11 は矩形荷重、写真-12 および 13 は南東角 (X, Y とともに負の隅角部) の最終破壊状況である。図-7~10 には、横拘束筋間隔 $s = 65, 90, 105$ および 120 mm の全供試体について、荷重最終時における、柱基部周辺のかぶりコンクリートが大きく剥落している領域（破壊領域）の大きさをまとめた。図中の横軸には横拘束筋間隔をとり、縦軸には最大の破壊領域（塗りつぶしシンボル）と最小の破壊領域（白抜きシンボル）をプロットした。

写真-10 に示す最終破壊状況を比較すると、写真-10 (b) の SFRC 柱供試体の方が写真-10 (a) の RC 柱供試体より曲率の大きい座屈が生じている。SFRC 柱供試体は、RC 柱供試体と比べ引張強度が 2~3 倍程度あることから、コンクリートの破壊が一部に集中的に生じており、剥落していないかぶりコンクリー

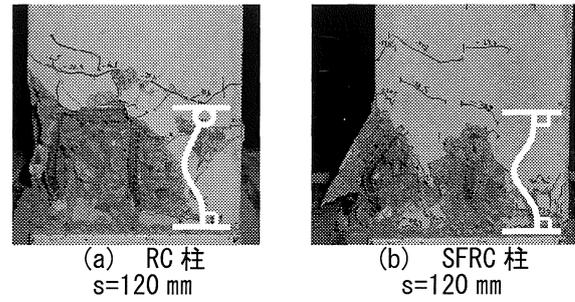


写真-10 最終破壊状況 (斜め荷重)

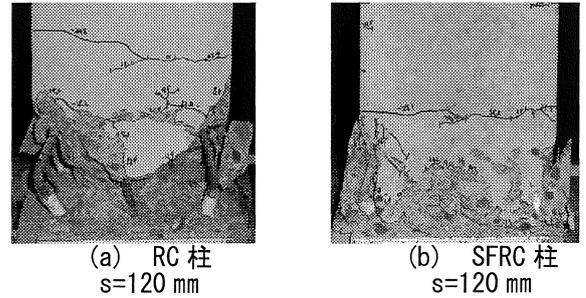


写真-11 最終破壊状況 (矩形荷重)

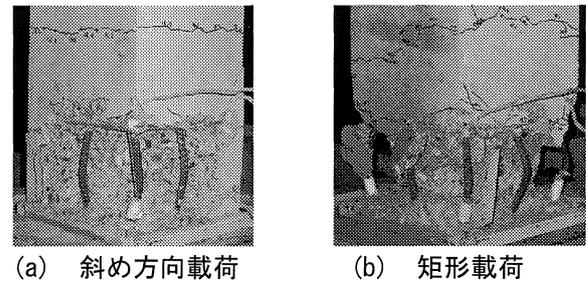


写真-12 最終破壊状況 (RC 柱供試体 : $s=120 \text{ mm}$)

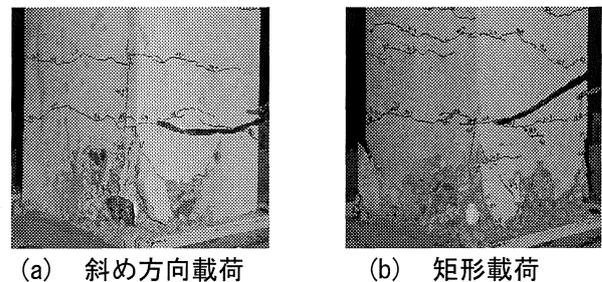


写真-13 最終破壊状況 (SFRC 柱供試体 : $s=120 \text{ mm}$)

トが多く残存しているためにより健全である。そのため、基部から 1 段目の横拘束筋までの部分は、境界条件が固定端に近い状態になっていると考えられる (写真-10 (b) 参照)。それに対し、RC 柱供試体はかぶりコンクリートが横拘束筋の上部に達するまで剥落し、また、内部コンクリートの一部も破壊しているため、基部から 1 段目の横拘束筋位置での境界条件がヒンジに近い状態であると考えられる (写真-10 (a) 参照)。よって、RC 柱供試体と SFRC 柱供試体は、座屈長が異なり、座屈形状に違いが見られた。従って、SFRC 柱供試体では曲率の大きい座屈が生じると考えられる。横拘束筋間隔に関係なく同様な結果を確認したが、横拘束筋間隔が大きい方が RC 柱供

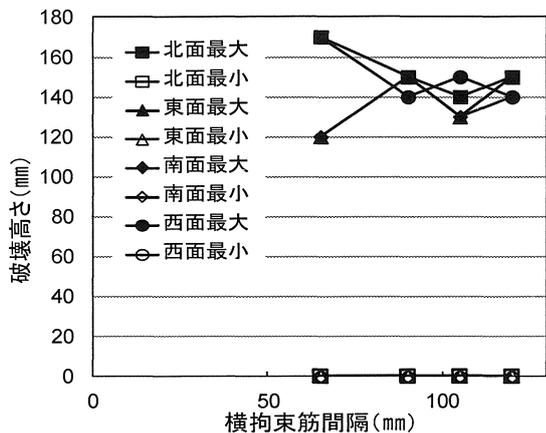


図-7 破壊高さ(斜め載荷: RC 柱)

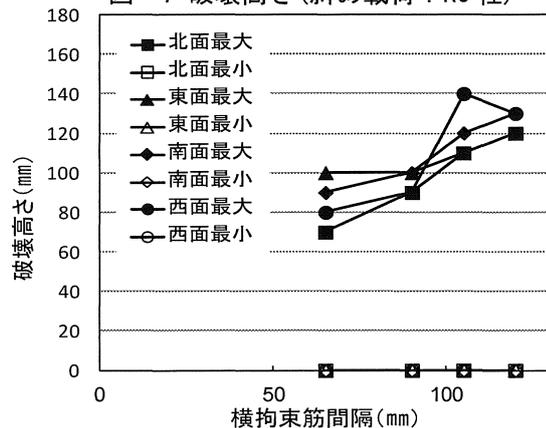


図-9 破壊高さ(斜め載荷: SFRC 柱)

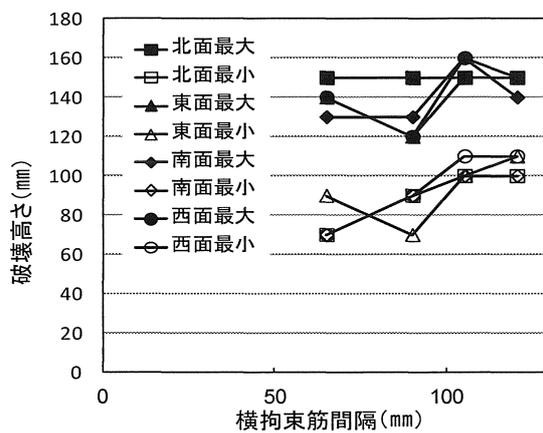


図-8 破壊高さ(矩形載荷: RC 柱)

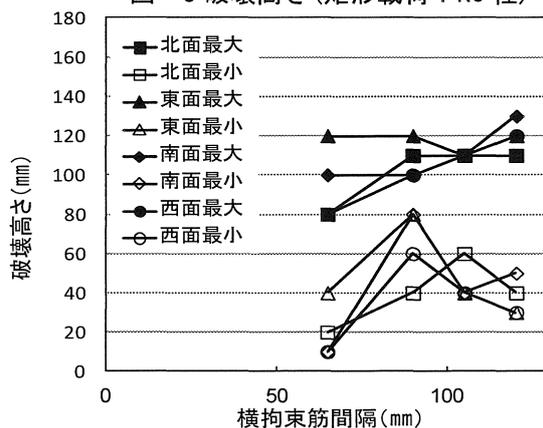


図-10 破壊高さ(矩形載荷: SFRC 柱)

試体と SFRC 柱供試体との違いが顕著に現れた。

矩形載荷での最終的なコンクリートの破壊状況を写真-11 に示す。RC 柱供試体と SFRC 柱供試体とを比較すると、斜め載荷の場合と同様、RC 柱供試体は基部から 140 mm 程度の範囲で破壊が生じている。SFRC 柱供試体は、かぶりコンクリートが 1 段目の横拘束筋の下部のみで剥落が生じ、破壊が基部付近に集中している。これは、斜め載荷の場合と同様な結果となった。

また、斜め載荷での最終破壊状況と比較すると、斜め載荷は破壊領域が載荷方向に集中している。しかし、矩形載荷の場合は、載荷方向が 360° の範囲で変化するため全面のかぶりコンクリートが剥落し、斜め載荷に比べ破壊領域が大きい結果となった。なお、RC 柱供試体では、矩形載荷の方がコアコンクリートの損傷が大きくなり、SFRC 柱供試体では、斜め載荷と矩形載荷とも一部の破壊に留まり、載荷経路による影響は、RC 柱供試体ほど顕著に現れなかった。

写真-11 (a) および (b) に示す最終破壊状況を比較すると、載荷履歴が異なっても斜め載荷の結果と同様、SFRC 柱供試体の方が RC 柱供試体より座屈部の曲率が大きな座屈を生じることを確認した。

載荷経路の違いによる軸方向筋のはらみ出す方向を比較するため、横拘束筋間隔 $s = 120$ mm の場合の RC 柱供試体と SFRC 柱供試体の最終的なコンクリ

ート側面の破壊状況を写真-12 および 13 に示す。

斜め載荷および矩形載荷下での RC 柱供試体の座屈形状を比較すると、斜め載荷では、載荷方向に沿うように軸方向筋の座屈の向きが揃っている。しかし、矩形載荷では載荷方向が様々であるため、座屈発生後は軸方向筋のはらみ出す方向は一定ではなく、それぞれが様々な方向に座屈している。これは、載荷経路による依存性が影響していると考えられる。SFRC 柱供試体は、かぶりコンクリートの剥落が少ないため、RC 柱供試体に比べてこの傾向は顕著ではなかった。

RC 柱供試体と SFRC 柱供試体の最終的な破壊領域(柱基部 4 面)の違いについて図-7~10 を参照して比較・考察する。図-7 および 8 に示すように、RC 柱では最大の破壊領域にややばらつきはあるものの、文献(10)、(12)および(13)で筆者らが観測した破壊高さ 130 mm 前後と同程度の 140 mm 前後の高さに生じている。すなわち、RC 柱の場合は、横拘束筋間隔および載荷経路の違いに関係なく、最終的なコンクリートの破壊領域はほぼ同じ大きさとなることを示している。一方、図-9 および 10 の SFRC 柱については、横拘束筋間隔 s が大きくなるに従い、破壊領域の拡大傾向が見られる。また、その大きさは、横拘束筋間隔 $s = 105$ mm までは、横拘束筋間隔 s の大きさよりもやや大きい程度となっている。

最小の破壊領域について考察すると、斜め載荷の

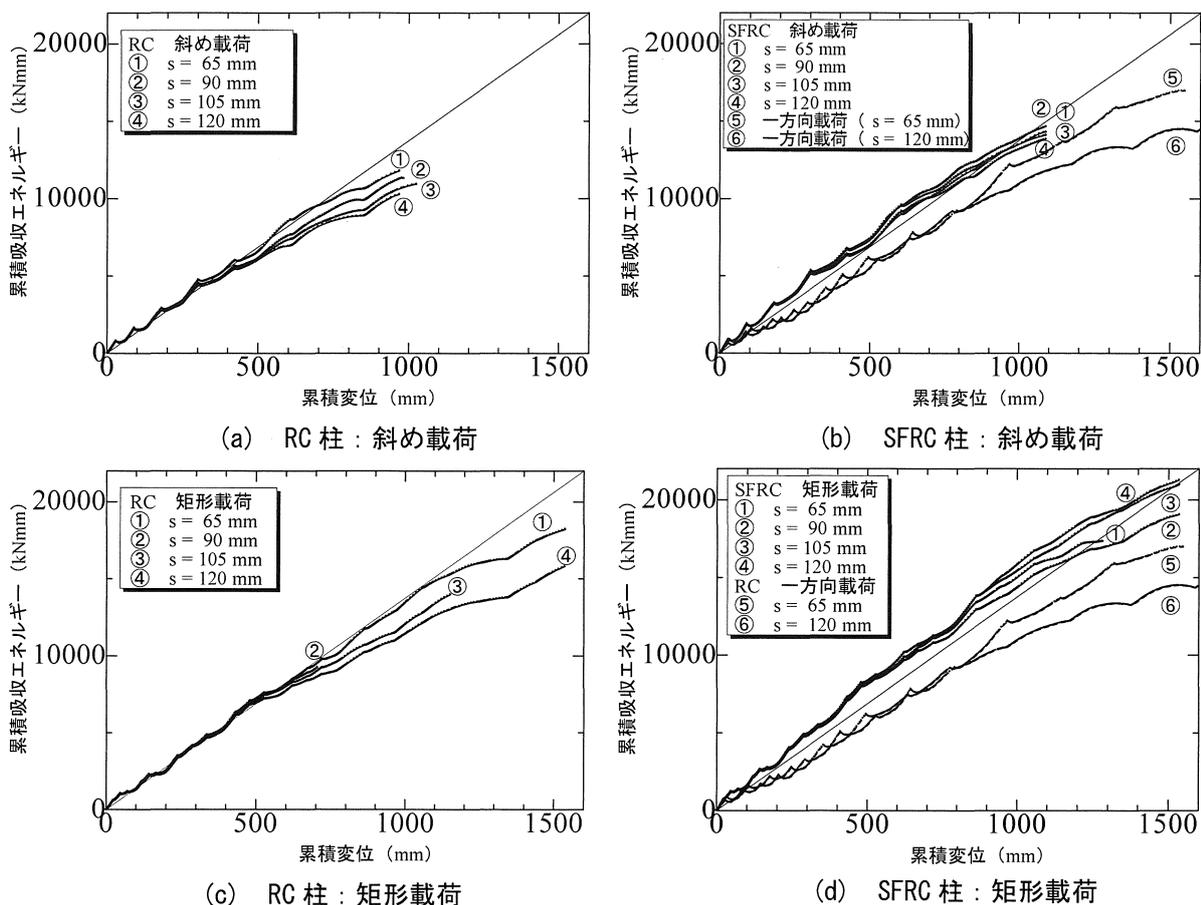


図-11 累積吸収エネルギー—累積変位関係

場合は、荷重方向と直交する向きのコンクリートはほぼ無損傷のため、全てに於いて0 mmという結果となった。矩形荷重の場合は、RC柱では、横拘束筋間隔 s が大きくなるに従い、最小の破壊領域が大きくなり、横拘束筋間隔 s の大きさと同程度となっている。SFRC柱では、20 mm~80 mm程度とばらつきが大きく、明確な傾向は見られなかった。

以上をまとめると、1) SFRC柱供試体の方がRC柱供試体より破壊領域が小さい、2) RC柱供試体は、横拘束筋間隔の長さに関係なく破壊高さは、140 mm程度であった、3) SFRC柱供試体は、ほぼ横拘束筋1段分の高さで破壊が生じる結果となった。

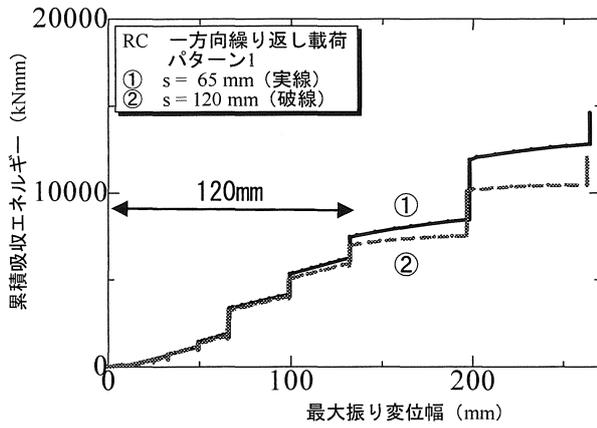
4. エネルギー吸収量について

斜め荷重ならびに矩形荷重下でのRC柱とSFRC柱に対する実験結果から得た、累積吸収エネルギー—累積変位関係を図-11 (a) ~ (d) に示す。ここで、累積吸収エネルギーとは柱頂部に作用する荷重により柱に入力される外力エネルギーの総和であり、一方、累積変位とは柱頂部の変位量 (X-Y面内での変位量) の軌跡である。また、図面の理解を助けるために、図中には補助線が示してある。さらに、文献11)にて示した同一のコンクリート圧縮強度(設計強

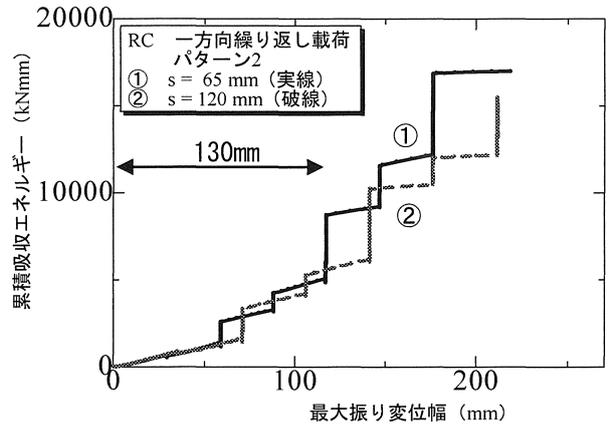
度 60 MPa) を有するRC柱に対する一方向繰り返し荷重実験結果より得られた累積吸収エネルギー—累積変位関係も図-11 (b) および図-11 (d) に参考データとして示してある。なお、一方向繰り返し荷重は高変位レベルのみでの繰り返し荷重であり、その履歴は変位 $0 \text{ mm} \rightarrow \pm 4 \delta_y$ (2 サイクル) $\rightarrow \pm 8 \delta_y$ (2 サイクル) $\rightarrow \pm 12 \delta_y$ (2 サイクル) である。

以下のことが考察できる。

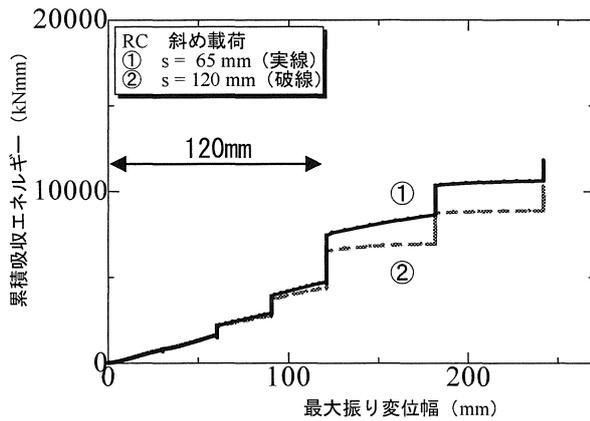
- (1) RC柱：斜め荷重 (図-11 (a)) では累積変位量 400 mm、矩形荷重 (図-11 (c)) では累積変位量 700 mm 前後までの挙動は概ね一致しており、横拘束筋間隔の違いによる影響は少ない。それ以降の大変位レベルにおいて、横拘束筋間隔の違いにより徐々に吸収エネルギーに差異が生じ始める。すなわち、横拘束筋間隔が短いものほど累積吸収エネルギー量が多い。
- (2) SFRC柱：RC柱 (図-11 (a) および (c)) よりも全体的に高いエネルギー吸収量 (図-11 (b) および (d)) を示しており (図中の補助線を参照)、横拘束筋間隔の違いによる差異がそれほど見受けられない。
- (3) 共通事項として、矩形荷重の方が、累積変位量が多い (補助線よりも上側にある) ため、累積吸収エネルギー量も大きいことが分かる。
- (4) 一方向繰り返し荷重下のRC柱の累積吸収エネ



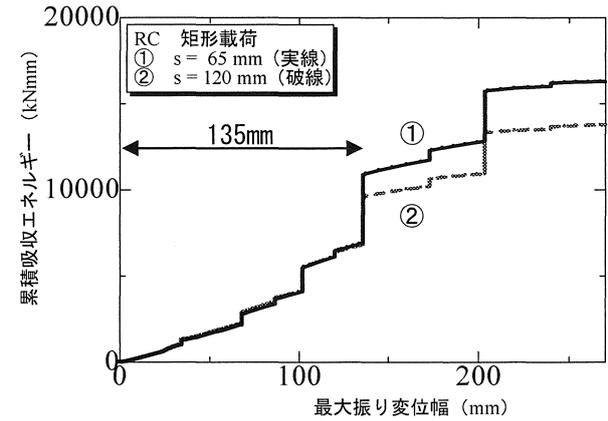
(a) RC 柱：一方向繰り返し載荷（パターン1）



(b) RC 柱：一方向繰り返し載荷（パターン2）



(c) RC 柱：斜め載荷



(d) RC 柱：矩形載荷

図-12 累積吸収エネルギー—最大振り変位幅関係

ルギー—累積変位関係と比較して、斜め載荷下での RC 柱のそれは概ね一致した傾向を示した。一方、矩形載荷下での RC 柱、斜め載荷および矩形載荷下での SFRC 柱の累積吸収エネルギー—累積変位関係は、一方向繰り返し載荷下の RC 柱のそれよりも高くなる傾向を示した。

(5) 斜め載荷下での RC 柱の累積吸収エネルギー—累積変位関係（図-11 (a) の②～④）は、おおよそ累積吸収エネルギー5,000 kNmm から分岐し始めている。これは、横拘束筋間隔の違いにより、柱基部の軸方向筋が座屈を始めると考えられる。横拘束筋間隔 $s = 65$ mm では、それよりは大きな累積吸収エネルギー量にて座屈を始めると考えられる。一方、矩形載荷下での RC 柱の累積吸収エネルギー—累積変位関係（図-11 (c) の②～④）は、おおよそ累積吸収エネルギー10,000 kNmm から分岐している。横拘束筋間隔 $s = 65$ mm では、RC 柱と同様、それよりは大きな累積吸収エネルギー量にて座屈を始めると考えられる。

(6) 斜め載荷下での SFRC 柱の累積吸収エネルギー—累積変位関係（図-11 (b) の①～④）は、概ね同じ傾向を示す。これは、横拘束筋間隔に関係なく、柱基部の軸方向筋は RC 柱と比較

して顕著な座屈を生じていないことを示している。矩形載荷下での SFRC 柱の累積吸収エネルギー—累積変位関係（図-11 (d) の①～④）は、斜め載荷下でのそれよりも大きめの累積吸収エネルギーを示すが、横拘束筋間隔に関係なく同様の傾向を示す。

上述したように、横拘束筋間隔および載荷履歴の違いによりポストピーク領域でのコンクリート劣化進展および軸方向筋の座屈挙動が異なり、それらが生ずる時点での吸収エネルギー量の大きさにも差異が見られる。よって、RC 柱のポストピーク挙動解析を行う場合には、累積吸収エネルギー量および累積変位は統一的な指標として用いることは困難であると考えられる。

横拘束筋間隔 $s = 65$ mm および $s = 120$ mm に対して、各種繰り返し載荷（一方向繰り返し載荷パターン1 および 2、二方向繰り返し斜め載荷および矩形載荷）の下での累積吸収エネルギーと履歴載荷中における RC 柱頭部の最大振り変位幅との関係を図-12 (a) ~ (d) に示す。ここで、一方向繰り返し載荷パターン1 とは、低変位レベル δ_y から高変位レベル $12\delta_y$ にかけての繰り返し載荷、載荷パターン2 とは、図-11 にて説明した高変位レベルのみでの繰り返し載荷である¹¹⁾。SFRC 柱では、横拘束筋間隔 s

= 65 mm および $s = 120$ mm では大きな差異が見られなかったので割愛する。図-12 より分かるように、最大振り変位幅 120 mm~135 mm にてポストピーク挙動に違いが生じ始める。このことは、本 RC 供試体では 0.6~0.67 程度の部材回転角で座屈挙動が生じ始めると推測することが出来る。このような指標を採用することにより、コンクリートの劣化および軸方向筋の座屈の開始などを考慮した RC 柱(実寸大の柱も含む)の有限要素ファイバー解析を実施することも可能と考える。

5. まとめ

- 1) SFCには軸方向筋の座屈を抑制する効果があり、そのため RC 柱と SFRC 柱のかぶりコンクリートの剥落状況や軸方向筋の座屈進展性状には差が生じた。しかし、SFRC 柱供試体では、軸方向筋の座屈を確認する前に破断するが多かった。
- 2) 両載荷とも、水平荷重-水平変位関係および軸方向筋の座屈挙動は、同様の傾向を示した。
- 3) SFRC 柱供試体では、SFC の引張強度が普通コンクリートのそれよりも 2~3 倍程度高いため、基部付近にのみ損傷が集中した。また、載荷経路による破壊状況への影響は RC 柱供試体ほど顕著に現れなかった。
- 4) SFRC 柱供試体の方が RC 柱供試体より破壊領域が小さい。RC 柱供試体は、横拘束筋間隔の大きさに関係なく破壊領域の高さは、140 mm 程度であった。一方、SFRC 柱供試体では、横拘束筋 1 段分の領域内で破壊が生じた。
- 5) RC 柱では、横拘束筋間隔が狭いものほど累積吸収エネルギー量が大きい。SFRC 柱では、それほど大きな差が見られない。
- 6) SFRC 柱では、ポストピーク領域にまで至る、コンクリートの劣化特性および軸方向筋の座屈特性は横補強筋間隔にそれ程影響されないため、横補強筋間隔が大きな柱の塑性ヒンジ化する部分の補強には有効である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、平成 22-24 年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C) 22560488 代表:水野英二)、中部大学特別研究費 A(代表:水野英二)および愛知工業大学耐震実験センターの研究助成を得た。また、愛知工業大学の大学院生:水野憲司君、学部生:永谷勇樹君には、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) 水野英二・神戸篤士・畑中重光:各種構成モデルを用いた RC 構造部材の繰り返し変形挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 19-24, 2001.
- 2) 中村光・野口博・田辺忠顕:コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会報告, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 61-66, 2001.
- 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) 西垣太郎・水畑耕治:鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱の低サイクル疲労に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第 399 号, pp. 20-32, 1984. 5
- 5) 社団法人, 鋼材倶楽部, スチールファイバー委員会:スチールファイバーコンクリートの手引(第 3 版), 1998. 10
- 6) 例えば, 須田久美子ら:交番繰返し荷重下における柱筋の座屈挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp. 467-472, 1994.
- 7) 例えば, 木村秀樹・高津比呂人・石川裕次・武田浩: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集, Vol. 25, No. 2, pp. 235-240, 2003.
- 8) 例えば, 山野辺慎一・曾我部直樹・河野哲也: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.
- 9) 亀田好洋・水野英二・鈴木森晶・梅原秀哲:一方向繰返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の変形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. 31, No. 2, pp. 139-144, 2009. 7.
- 10) 鈴木森晶・水野英二:繰返し力を受ける RC 柱の破壊領域での軸方向筋座屈性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 151-156, 2010. 7.
- 11) 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.
- 12) 鈴木森晶・水野英二:繰返し曲げを受ける RC 柱の鉄筋座屈特性に関する実験的ならびに解析的研究, 応用力学論文集, Vol. 13, pp. 331-342, 2010. 8.
- 13) 鈴木森晶・水野英二:二方向繰返し力を受ける RC 柱の載荷履歴が変形性状に及ぼす影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 67, No. 2, I_313-I_320, 2011. 9.

(2012年3月8日 受付)