

論文 鋼繊維と帯鉄筋の併用による RC 柱のせん断補強効果

木村 利秀^{*1}・渡辺 健^{*2}・二羽 淳一郎^{*3}

要旨：鋼繊維および帯鉄筋の併用による，鉄筋コンクリート（RC）柱に対するせん断補強効果を評価することを目的に，RC 柱の正負交番繰返し載荷試験を行った。鋼繊維および帯鉄筋によるせん断補強効果は，重ねの原理に基づいた修正トラス理論を用いて検討した。実験結果から，せん断耐力が同等である RC 柱の吸収エネルギーの増加には，帯鉄筋比より鋼繊維混入率の高い設計が有効であることを確認した。また，鋼繊維混入率を 1.0 %とした鋼繊維補強コンクリートに対し，帯鉄筋比を増加させることで，補強効果が最大となる割合を確認した。

キーワード：せん断，鋼繊維，帯鉄筋，正負交番載荷，併用効果，RC 柱

1. はじめに

兵庫県南部地震以降，土木構造物に対する耐震基準の改訂とともに過密な配筋が要求され，その結果，施工時においてコンクリートの充填性が問題となっている。そこで，鉄筋量を適切に軽減しつつも，鋼繊維補強することで要求された設計耐力を満足できる RC 部材の挙動に関して検討を行う。

鋼繊維補強鉄筋コンクリート（以下，RSF）は，ひび割れ面における鋼繊維の架橋効果により RC 部材のせん断耐力および靱性を向上できるなどの利点が報告されている^{1,2)}。特に，鋼繊維によるせん断耐力貢献分の算定式が，鋼繊維をコンクリート体積の 1.0～1.5 %混入した RSF を対象に提案されている¹⁾。しかしながら，算定値の精度に関して，さらに検討を蓄積する必要がある。児玉ら³⁾は，鋼繊維混入率を 1.0, 1.5, 3.0 %とした RSF はりを対象に，せん断載荷実験を行い，いずれの混入率においても，指針（案）¹⁾に記載された鋼繊維による補強効果が得られることを確認した。しかしながら，鋼繊維によるせん断補強効果は，混入率に関わらず，ほぼ一定であった。このことは，鋼繊維によるせん断補強効果は，混入率が 1.0 %において頭打ちになることを示唆している。

一般に，RC 部材のせん断耐力は，修正トラス理論に基づき，コンクリートの貢献分とせん断補強鉄筋の貢献分の和により算定される。筆者ら⁴⁾は，この考えを基に，

スターラップを有する RSF はりを対象とし，実験的検討を行った。その結果，RSF はり部材において，鋼繊維によるせん断補強効果が，スターラップと鋼繊維を併用することで，さらに向上することを確認した。

鋼繊維をより多くの構造部材に普及させるには，鋼繊維を様々な構造部材に適用し，構造照査していく必要があると考える。そこで，本研究では，帯鉄筋を有する RSF 柱のせん断破壊性状の把握を目的とした。既往の研究³⁾を考慮し，合理的なせん断補強を行うため，鋼繊維混入率 1.0 %以下において帯鉄筋を併用した RSF 柱を対象に，正負交番載荷試験を行い，両者の補強効果の変化を実験的に捉えることとした。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの示方配合および実験ケース

表-1 にコンクリートの示方配合を，表-2 に鋼繊維の物性を示す。高性能 AE 減水剤の添加量は，コンクリートのスランプが 8 ± 2 cm となるよう鋼繊維の混入率に応じて変化させた。

表-3 に実験ケースを示す。実験では，鋼繊維と帯鉄筋の併用補強効果を確認するとして本研究の目的に従い，実験パラメータを鋼繊維の混入率と帯鉄筋比とした。供試体は，鋼繊維の混入率を外割計算で体積比に換算して 0.3, 1.0 %，帯鉄筋比を 0, 0.21, 0.42 %と変化させ，

表-1 示方配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 A_d (%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
			W	C	S	G	
20	55	47	172	314	838	950	繊維混入率に応じ 単位セメント量に対し 0.1～0.3

表-2 鋼繊維の物性

繊維形状	両端フック加工
繊維長	30 mm
直径	0.6 mm
アスペクト比	50
密度	7.85 g/cm ³
引張強度	1000 N/mm ²
弾性係数	210 kN/mm ²

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 Ph.D.（正会員）

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博（正会員）

計5体作製した。なお、供試体は、これらのパラメータを反映した名称となっている。

2.2 供試体概要

図-1 に供試体概要図を、表-4 に供試体諸元をそれぞれ示す。また、鉄筋の強度特性を表-5 に示す。全ての実験ケースにおいてせん断破壊が先行するように、軸方向鉄筋には、引張強度が高い総ネジ PC 鋼棒 (D22SPBD1070) を使用した。帯鉄筋には D6SD295 を使用し、JIS Z 2241 に規定される「金属材料引張試験方法」により降伏強度を測定した。

RSF 柱のせん断耐力 V_{cal} の算定には、式(1)~(3)¹⁾⁵⁾を使用した。式(1)~(3)における記号は、表-4 に示す通りであるの V_c 項には、土木学会「鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針 (案)」¹⁾に規定される、鋼繊維によるせん断強度の増加を考慮する係数 κ ($=1.0$) を乗じて算出した。鋼繊維無混入の場合は、 $\kappa=0$ となる。

$$V_{cal} = (I + \kappa) \cdot V_c + V_s \quad (1)$$

ただし、

$$V_c = 0.2 \cdot \sqrt[3]{f'_c} \cdot \sqrt[3]{\frac{1000}{d}} \cdot \sqrt[3]{100 p_w} \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

$$V_s = A_w \cdot f_{wy} \cdot (z/s) \quad (3)$$

2.3 載荷試験および測定概要

載荷試験には、油圧式 200kN 水平サーボアクチュエータを用い、変位制御による静的正負交番載荷試験を行った。載荷は、同一振幅を正負3回行い、載荷点における水平変位が 0 mm から 10 mm までは振幅を 2 mm ずつ漸増させた。それ以降、振幅を 1 mm ずつ漸増させ、載荷点における水平変位が 30 mm に達した時点で試験終了とした。載荷点における荷重および変位は、アクチュエータに付属したロードセルおよび変位計を用いて計測した。さらに、図-1 に示すとおり、軸方向鉄筋の降伏の有無を確認するため、柱とフーチングの継目部における軸方向鉄筋のひずみを計測した。同様に、せん断スパン内に配置した各帯鉄筋の中央部のひずみを測定した。

3. 実験結果

3.1 ひび割れの進展状況および破壊モード

すべての供試体において、振幅が 4 mm に達した際、斜めひび割れが形成され、帯鉄筋のひずみが急激に増加を開始した。荷重が最大に達した際 (以下、ピーク荷重時) において、斜めひび割れの幅の拡大が顕著となった。しかしながら、ピーク荷重から振幅 30 mm の領域 (以下、ポストピーク領域) において、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが進展した。本供試体は、軸方向鉄筋の断面積が、柱の断面積と比較して大きい。そのため、斜めひび割れは、圧縮側軸方向鉄筋の影響を受け、圧縮部コンクリー

表-3 実験ケース

供試体名	鋼繊維混入率(%)	帯鉄筋比(%)
SF03-r21	0.30	0.21
SF03-r42		0.42
SF10-r00	1.00	0.00
SF10-r21		0.21
SF10-r42		0.42

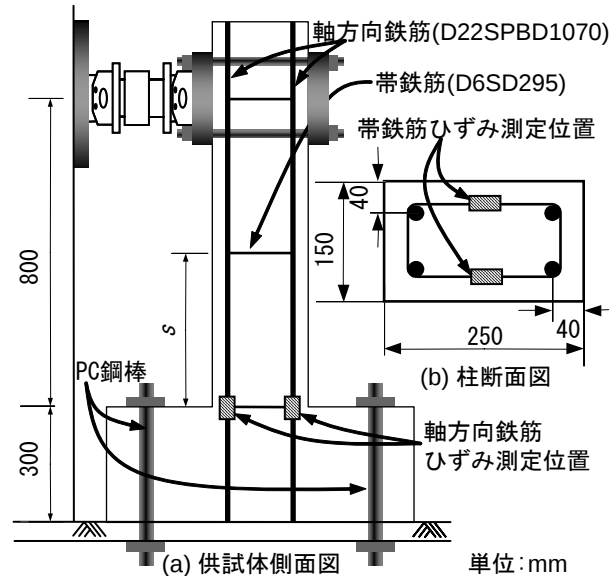


図-1 供試体概要図

表-4 試験体諸元

項目	記号	単位	値
軸方向鉄筋断面積	A_s	mm ²	1548.4
引張鉄筋比	p_w	%	2.46
幅	b	mm	150
有効高さ	d	mm	210
せん断スパン長	a	mm	800
せん断スパン有効高さ比	a/d	-	3.08
帯鉄筋間隔	s	mm	100, 200
帯鉄筋比	r_w	%	0.21, 0.42
鋼繊維によるせん断耐力増加係数	κ	-	1.0

表-5 鉄筋の強度特性

項目	種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
組立鉄筋	D16SD295	326	537
帯鉄筋	D6SD345	364*	521
軸方向鉄筋	D22SPBD1070	1198*	1299

*0.2%オフセット値

トまで進展せず、軸方向鉄筋に沿って進展したと考えられる。ピーク荷重時において、顕著なひび割れ幅を有する斜めひび割れが観察されたこと、軸方向鉄筋は降伏していなかったこと、さらにピーク荷重後に耐力が、急激に低下したことを踏まえ、全ての供試体は、せん断破壊を示したと判断した。

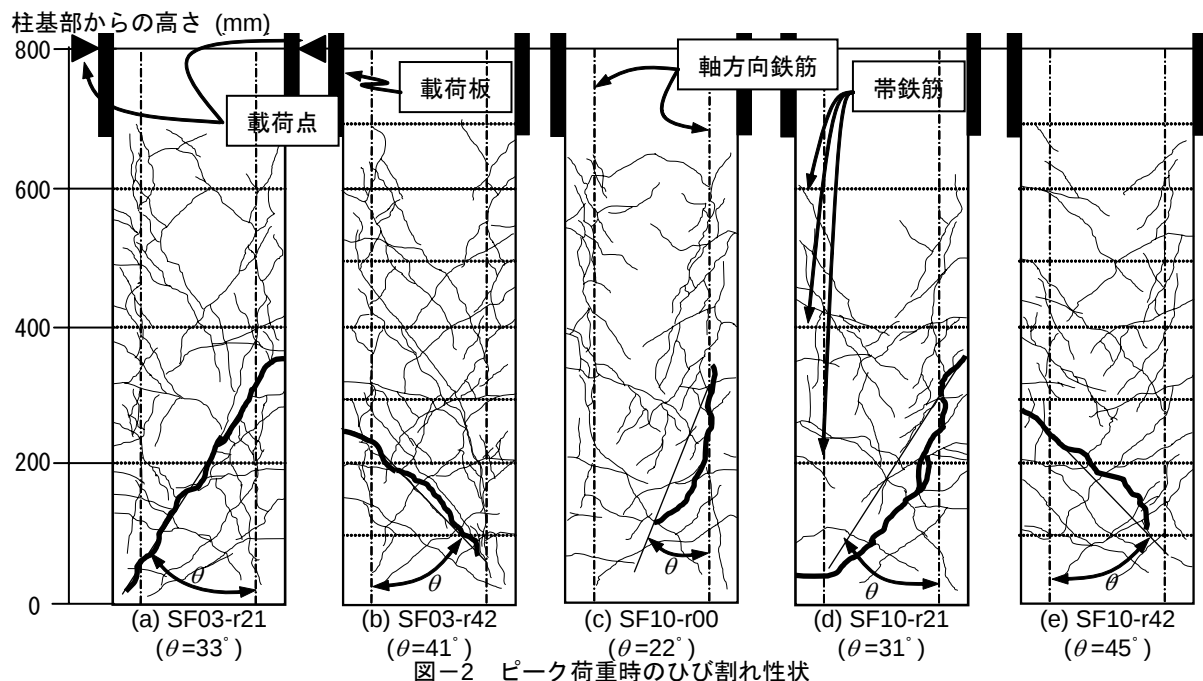


図-2 ピーク荷重時のひび割れ性状

図-2 に、各供試体のピーク荷重時のひび割れ性状を示す。本供試体には、正負交番荷重を与えたため、せん断スパン内に多数のひび割れが発生した。図-2 における太線が、ピーク荷重時に目視観察された最も広い幅を有する斜めひび割れを、点線が帯鉄筋の位置を示している。斜めひび割れの角度は、この太線の先端と、太線が軸方向鉄筋と交わる点を結ぶ直線の鉛直軸に対する角度とし、 θ と表記する。

(a)と(b)および(d)と(e)を比較すると、帯鉄筋比の増加に伴い、 θ が増加した。帯鉄筋比を0.42%まで増加することで、せん断耐力と曲げ耐力が近づくことにより、耐荷機構が移行していく現象を示している。

(c)では、軸方向鉄筋に沿った割裂ひび割れの数が多い。SF10-r00は、帯鉄筋が配置されていないため、軸方向鉄筋とコンクリートとの付着力が小さい。そのため、柱基部から発生した斜めひび割れが、縦方向に進展したと考えられる。

図-3 に試験終了時の鋼繊維混入率0.3%および1.0%の供試体のひび割れ状況を示す。(a)ではポストピーク領域において、割裂ひび割れの進展に伴い、かぶりコンクリートが軸方向鉄筋から剥離する様子が観察されたが、(b)においては、鋼繊維混入率を1.0%とすることにより、剥離の程度は小さくなった。また、鋼繊維混入率0.3%の供試体では、剥離が生じたものの、鋼繊維の架橋効果により、剥落は生じなかった。剥落防止抵抗性の改善は、鋼繊維の特徴として挙げることができる。

3.2 荷重－水平変位関係の包絡線および載荷試験結果

図-4 に、荷重－水平変位関係の包絡線を、帯鉄筋比および繊維混入率ごとに整理して示す。全体の荷重－水平変位関係において、振幅が4 mm 付近で曲げひび割れ

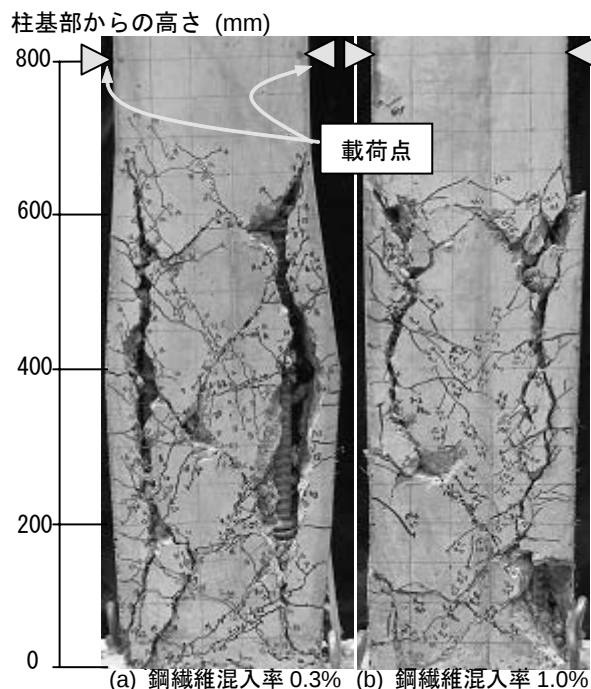


図-3 鋼繊維混入率の違いによるひび割れ状況

が進展し、剛性が変化する点が共通して観察された。SF10-r00およびSF03-r21は、グラフの第1象限において、2つの凸部が存在する。この原因は、第1ピーク荷重に達した後、耐荷機構が変化することにより、再度荷重が上昇した現象であると考えられる。

表-6 に、コンクリートの材料特性および載荷試験結果を示す。ここで、式(4)、(5)から、実験より得られたせん断耐力に対する鋼繊維による貢献分 $V_{\kappa exp}$ 、および実験より得られた鋼繊維による強度増加係数 κ_{exp} を算出した。

$$V_{\kappa exp} = V_{exp} - V_c - V_s \quad (4)$$

$$\kappa_{exp} = V_{\kappa exp} / V_c \quad (5)$$

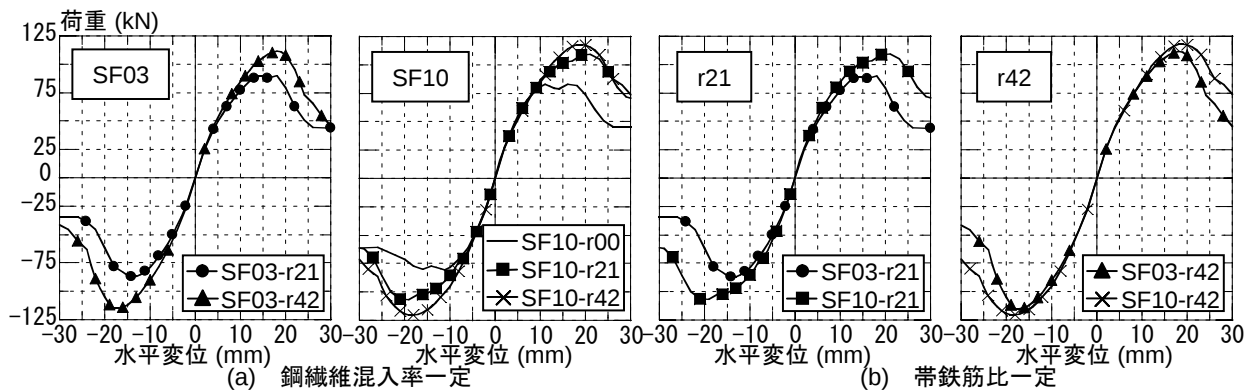


図-4 荷重－水平変位の包絡線

表-6 コンクリートの材料特性および載荷試験結果

供試体名	コンクリートの材料特性			RC 柱の載荷試験結果および式(1)～(3)による算出値							
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	δ (mm)	V_{exp} (kN)	V_{cal} (kN)	V_s (kN)	V_c (kN)	V_k (kN)	κ_{exp}	V_{exp}/V_{cal}
SF03-r21	37.5	3.6	27.9	18.1	89.7	105.3	21.2	42.0	26.5	0.63	0.85
SF03-r42	36.6	2.6	27.8	17.0	115.0	125.7	42.3	41.7	31.0	0.74	0.91
SF10-r00	36.1	3.5	28.6	16.1	83.1	83.0	0.0	41.5	41.6	1.00	1.00
SF10-r21	36.6	3.2	28.1	21.1	109.3	104.6	21.2	41.7	46.4	1.11	1.05
SF10-r42	38.7	3.2	28.1	19.0	120.5	127.3	42.3	42.5	35.7	0.84	0.95

δ : 最大荷重時の変位, V_{exp} : 実験より得られたせん断耐力, V_{cal} : 計算せん断耐力, V_s : 帯鉄筋の貢献分

V_c : コンクリートの貢献分, V_k : 鋼繊維の貢献分, κ_{exp} : 実験より得られた鋼繊維によるせん断強度増加係数

(1) 鋼繊維混入率一定の供試体（帯鉄筋比の影響）

図-4(a)に示すとおり、ピーク荷重は、帯鉄筋比の増加に伴い上昇した。しかし、SF10-r21 および SF10-r42 の荷重－水平変位の包絡線は、ほぼ同様の形状となった。表-6を参照すると、鋼繊維の混入率が 0.3 % の供試体の κ_{exp} は 1.0 を下回るものの、帯鉄筋比を増加に伴い、 κ_{exp} が高まる傾向にあった。同様に、繊維混入率 1.0 % の供試体において、帯鉄筋比を 0 % から 0.21 % に増すことにより、 κ_{exp} は増加した。この結果は、鋼繊維と帯鉄筋の併用による補強効果と考えられる。しかし、帯鉄筋比を 0.21 % から 0.42 % まで高めると、 κ_{exp} は増加しなかった。このことから、ピーク荷重および κ_{exp} を増減させるという点で、帯鉄筋および鋼繊維の使用割合には、ある限界値があり、その限界値を超えると補強効果が頭打ちになる可能性があると予想される。

(2) 帯鉄筋比一定の供試体（鋼繊維混入率の影響）

図-4(b)に示すとおり、ピーク荷重は、鋼繊維混入率の増加に伴い上昇した。ここで、鋼繊維混入率の増加に伴うピーク荷重の増加量は、帯鉄筋比が 0.42 % の供試体に比べて、帯鉄筋比が 0.21 % の供試体で顕著であった。

ポストピーク領域において、鋼繊維混入率の増加に伴い、同一水平変位における耐荷力が増加した。特に、帯鉄筋比が 0.21 % の供試体において、耐荷力の増加が顕著であった。

(3) 全ての供試体を通して（まとめ）

V_{exp}/V_{cal} は、0.85～1.05 となっており、修正トラス理論から求まる計算値は、実験値を概ね予測できているといえる。

指針（案）¹⁾では、鋼繊維混入率が 1.0～1.5 % である RSF 柱部材を対象としている。しかし、本研究において、指針（案）¹⁾適用外の鋼繊維混入率 0.3 % においても、 V_{exp}/V_{cal} は 0.85, 0.91 となった。繊維混入率が低い場合においても、 V_{exp}/V_{cal} が 1.0 に近くなった原因は、斜めひび割れ発生後、帯鉄筋により、斜めひび割れの開口がある程度抑制されたためと考えられる。そのため、急激に斜めひび割れが開口しないことで、斜めひび割れ面に対して、鋼繊維の架橋効果が有効に作用したものと考えられる。

帯鉄筋の補強効果は、鋼繊維混入率の低い 0.3 % の供試体で顕著であり、同様に、 κ_{exp} は帯鉄筋比の低い 0.21 % の供試体において顕著であった。

3.3 正負交番載荷による各ピーク荷重の低下率

図-5に、鋼繊維と帯鉄筋を併用した供試体において、繰返し載荷 1 回目のピーク荷重に対する、繰返し 2, 3 回目のピーク荷重の低下率を示す。ピーク荷重の低下率は、繰返し 2 回目から 3 回目になるに従い増加し、さらにピーク荷重直前からポストピーク領域にかけて急激に増大した。また、帯鉄筋比が同一である供試体を比較すると、荷重の低下率は、鋼繊維混入率の増加に従い減少し、かつ緩やかになった。斜めひび割れ面は、正負交番載荷により損傷を受け、特にピーク荷重直前からポストピーク領域において、斜めひび割れ幅の拡大に伴い、損傷が大きくなることで、荷重の低下割合は高くなる。しかしながら、鋼繊維混入率を増すに従い、ひび割れ面において、架橋する鋼繊維の割合が増え、荷重の低下率

を軽減したと考える。

3.4 帯鉄筋のひずみ分布

図-6 に帯鉄筋のひずみ分布履歴を示す。各折れ線は、水平変位が 6 mm, 10 mm, 15 mm およびピーク時の振幅のひずみ分布を示している。ここで、(a)では、柱基部から 400 mm に位置する帯鉄筋に対して、水平変位 15 mm およびピーク時のひずみを測定することができなかった。そのため、水平変位 15 mm 以降のひずみ分布は、柱基部から 600 mm および 200 mm の帯鉄筋のひずみを直線的に結んだ形状とした。また、(c)、(d)において、基部から 700 mm の位置にある帯鉄筋は、載荷板上に挟み込まれているため、ひび割れの発生が抑制され、いずれも降伏していない。

帯鉄筋のひずみが、 2000μ 付近（帯鉄筋の降伏ひずみ）における、各グラフの分布に着目する。(a)では、水平変位 10 mm において帯鉄筋が降伏し、基部から 200 mm に位置する帯鉄筋のひずみは、約 3500μ まで増大している。しかし、(a)以外のケースにおいて、一部の帯鉄筋を除き、帯鉄筋のひずみは、 2000μ 以下に抑えられている。さらに、水平変位 15 mm およびピーク荷重時において、繊維混入率を 1.0%とした SF10-r21 の帯鉄筋のひずみは、SF03-r21 の帯鉄筋のひずみの 1/2 程度に低減されている。つまり、繊維混入率を増やすことによって、多くの鋼繊維が、ひび割れ面において架橋し、その結果、帯鉄筋のひずみを低減させたと考えられる。

帯鉄筋のひずみ分布は、(a)、(b)において、柱基部に近づくにつれて増加する傾向であった。一方、(c)における帯鉄筋のひずみ分布は、柱の高さ方向に分散して増加した。つまり、ひび割れが、せん断スパンを全域に進展したと

考えられる。しかし、(d)において、柱基部から 200 mm の帯鉄筋のひずみが、局所的に大きい。つまり、柱基部から 200 mm の帯鉄筋の位置において、ひび割れが集中したことが確認できる。

3.5 累積吸収エネルギー

図-7 に、累積吸収エネルギーを示す。せん断破壊型である本研究の供試体における吸収エネルギーを、各振幅における、荷重-水平変位関係の履歴曲線で囲まれた面積として算出した。各吸収エネルギーの合計を、累積吸収エネルギーと定義した。

SF03-r21, SF03-r42, および SF10-r00 のエネルギー吸収性能は同程度となった。また、SF10-r42 の累積吸収エネルギーは、SF10-r21 よりも 1 割小さく、帯鉄筋比の増加によるエネルギー吸収性能の改善はみられなかった。

SF03-r21 を基準として考えると、帯鉄筋比を増やした SF03-r42 のエネルギー吸収性能は、SF03-r21 とほぼ等しいが、繊維混入率を増やした SF10-r42 のエネルギー吸収性能は、3 割程増加した。表-6 を参照すると、SF03-r42 と SF10-r21 のピーク荷重は、ほぼ等しいが、エネルギー吸収性能の観点からは、SF10-r21 が有効であると言える。すなわち、帯鉄筋と鋼繊維を併用した場合、エネルギー吸収性能は、帯鉄筋による補強よりも鋼繊維補強の方が、効率が高いと考えられる。

3.6 支点条件および載荷方法の違いによる補強効果

図-8 に、正負交番繰返し載荷を行った RSF 柱および静的単調載荷を行った RSF はりを用いて得た κ_{exp} を示す。

RSF はりの κ_{exp} は、筆者ら⁴⁾の行った実験結果を使用した。RSF はりの κ_{exp} は、ほとんどの供試体で 1.0 を上回り、鋼繊維

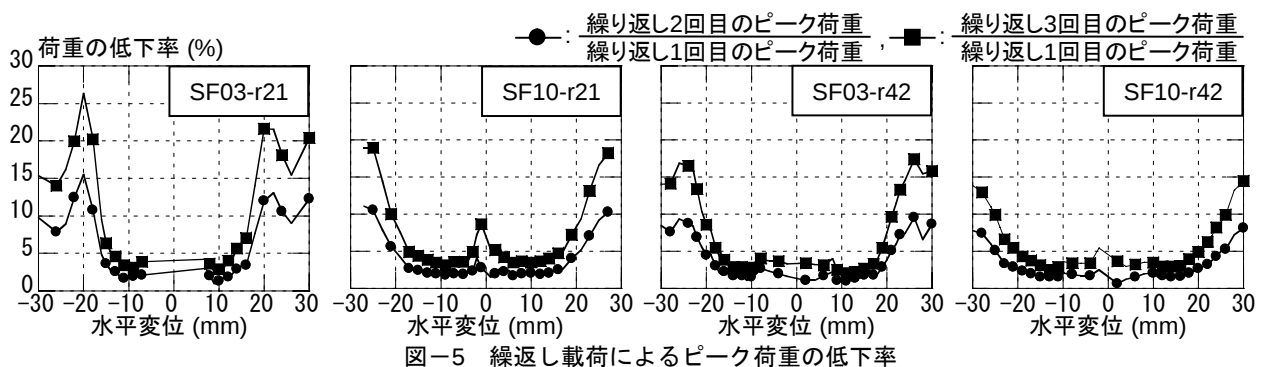


図-5 繰返し載荷によるピーク荷重の低下率

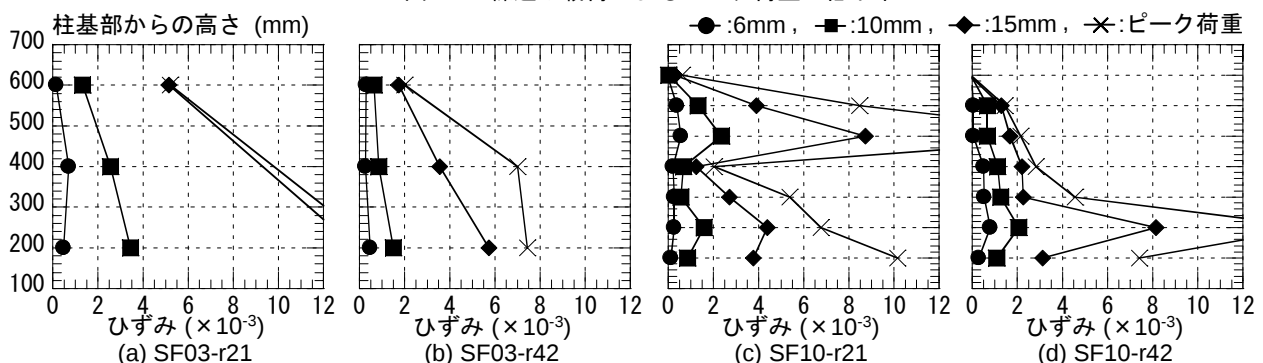


図-6 帯鉄筋の柱高さ方向のひずみ分布履歴

維混入率 0.3 % である供試体においても、 κ_{exp} が 1.0 以上を示す結果を得た。さらに、繊維混入率 1.0 % のケースにおいて κ_{exp} は、1.43~1.98 ととなり、1.0 を大きく上回る値を示した。一方、RSF 柱において、繊維混入率 1.0 % の κ_{exp} は、ほぼ 1.0 であるが、繊維混入率 0.3 % の κ_{exp} は、0.63, 0.74 となった。この、RSF 柱の κ_{exp} が、RSF はりの κ_{exp} を下回った原因は、以下に述べるように、ひび割れの進展の相違に関連しているものと予想される。

(1) κ とはり部材の斜めひび割れ性状

図-9 に、筆者ら⁴⁾の行ったスターラップを有する RSF はりの典型的なひび割れ状況を示す。RSF はりでは、一方単調載荷を受けるため、ひび割れは、曲げ引張側からのみ発生し、かつ破壊に支配的に作用する斜めひび割れは 1 本である。また、斜めひび割れの長さは、せん断スパン全域を対角に横切るように進展するため、RSF 柱部材の斜めひび割れの長さと比較すると長い。つまり、鋼繊維の架橋面が拡大すると考えられる。

(2) κ と柱部材の斜めひび割れ性状

正負交番載荷が作用する RSF 柱では、3.1 に示すとおり、ひび割れが、柱の両側面から発生した。さらに、3.4 において、帯鉄筋ひずみ分布からも分かるように、斜めひび割れの位置は、柱基部において集中して発生している。特に、鋼繊維ならびに帯鉄筋により補強を施すと、せん断耐力が向上し、曲げ破壊に近づくため、基部での損傷が顕著になり、斜めひび割れを跨ぐ帯鉄筋本数が減少すると考えられる。さらに、斜めひび割れの角度が、小さくなることにより、斜めひび割れの長さも短縮され、その結果、ひび割れ面に架橋する鋼繊維量が低下すると考える。

以上により、RSF 柱部材において帯鉄筋および鋼繊維の補強効果が頭打ちになり、RSF はり部材よりも補強効果が低下する傾向となったと考えられるのである。

4. まとめ

- 1) 帯鉄筋の補強効果は、鋼繊維の混入率が 0.3 % である供試体において、また、鋼繊維の補強効果は、帯鉄筋比が低い供試体においてより顕著となることを確認できた。
- 2) 鋼繊維と帯鉄筋を併用し、かつせん断耐力がほぼ等しい供試体において、エネルギー吸収性能の向上には、帯鉄筋よりも鋼繊維混入率の増加が効率的であることが分かった。
- 3) 鋼繊維混入率 1.0 % の RSF 柱部材においては、帯鉄筋比を変化させた供試体の結果から、0.21 % の配筋により、 κ_{exp} が最大値を示し、最適な併用であることを確認した。
- 4) ひび割れ性状の違いから、RSF 柱の κ_{exp} は、RSF はりの κ_{exp} よりも低下することを確認した。

累積吸収エネルギー (kN・m)

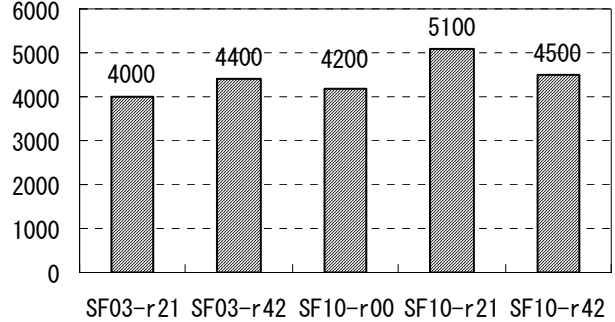


図-7 累積吸収エネルギー

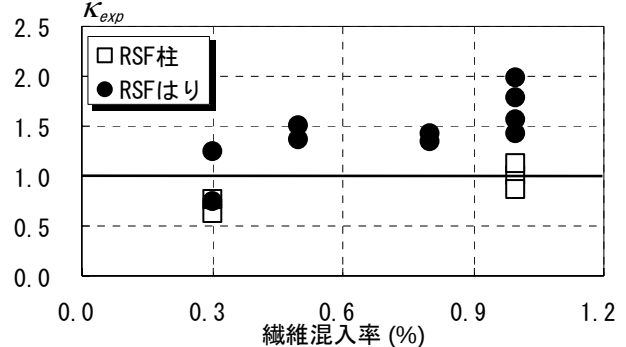


図-8 RSF 柱および RSF はりの κ_{exp}

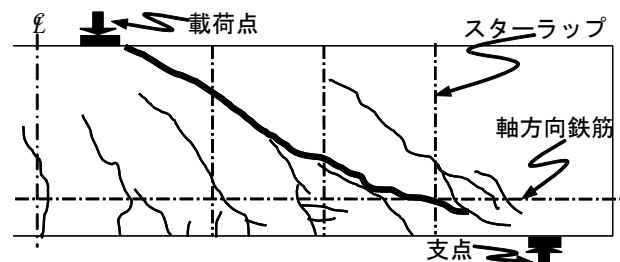


図-9 RSF はりのひび割れ図 (SF10-r24)⁴⁾

謝辞

最後に、本研究を実施するにあたり、鋼繊維を提供して頂きました、(株)ブリヂストン社に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針 (案), 1999.11
- 2) 柳 博文ほか：鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散効果に対する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.3, pp.1225-1230, 1998.6
- 3) 児玉 亘ほか：短繊維補強された RC はりのせん断耐力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1501-1506, 2004.6
- 4) 木村利秀ほか：鋼繊維とスターラップによりせん断補強された RC はりのせん断耐力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1417-1422, 2007.6
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 (構造性能照査編), pp.67-72, 2002.3