

[91] 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱のせん断挙動における動的効果

正会員 ○榎谷栄次（関東学院大学工学部）
 正会員 町田恭一（関東学院大学大学院）
 郡嶋宏治（関東学院大学大学院）
 萩原 勲（三栄設計）

1. 緒言

通常の鉄筋コンクリート柱の中に鋼繊維を含ませたSFRC柱の小型または準実大モデルに対して静的一方向あるいは繰返し加力実験が行われ¹⁾そのせん断挙動において、SFRC柱がRC柱に比して、ひび割れおよび最大強度が増加すると共に、最大荷重到達後のエネルギー吸収能力が著しく向上することなどが報告されている。本研究は、これらの静的加力実験の結果を踏まえ、SFRC柱の小型モデルに対して、繰返し荷重による動的水平加力実験を行い、せん断挙動における動的効果を調べたものである。動的加力に関しては、地震波のようなランダムな荷重を加える前に、多段定振幅の正弦波による荷重を与えた。繰返し速度および鋼繊維の混入率を変化させることによって、SFRC柱のせん断挙動における剛性低下、最大強度、変形能力、エネルギー吸収能力がどのように影響を受けるかを調べたので以下に報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、図1に示すように、断面が15cm×15cm、クリアスパンが45cm(シアースパン比 $a/d=1.5$)の柱と断面が15cm×20cm、長さ45cmのはりが結合した半門形フレームを構成している。柱には、主筋に4-D13(引張鉄筋比 $P_t=1.13\%$)、帯筋に3φ-45@(帯筋比 $P_w=0.2\%$)を配筋した。これに鋼繊維を体積率で0%(RC柱に相当)、1%、1.5%混入し、各繊維体積率ごとに3体計9体を作成した。試験体一覧を表2に示す。

使用材料は、セメント：普通ポルトランドセメント、粗骨材：碎石(最大粒径15mm)、細骨材：川砂(粒径 2.5mm)、鋼繊維：ストレートファイバー(0.5×0.5×30mm、引張強度=76.5kg/cm²、伸び=1.0%)を用いた。調合は、 $V_f=1.5\%$ の場合、水セメント比 $w/c=55\%$ 、細骨材率 $S/a=63\%$ 、スランブ=15cm、空気量=5%の条件のもとに可傾式ミキサーを使用して行い、鋼繊維はコンクリート練り上がり後に混入した。また使用した鉄筋の機械的性質を表1に示す。

2.2 荷重および測定方法

垂直方向には、ローラー式治具を持つ油圧ジャッキ(20t)によって定軸力(軸応力度 $\sigma_o=45\text{kg/cm}^2$)を加え、水平方向にはピストン型アクチュエータ(加振力：動的最大±10t、変位：動的最大±30mm)によって、繰返しが0.01(準静的)、0.1、1 cycle/sec (H_2)の3タイプの正弦波を試験体に与え、その応答を測定した。変位振幅は図2の加力スケジュールに示すように、第一、第二を部材角で $R_1=3.3 \times 10^{-3}$ 、 $R_2=6.6 \times 10^{-3}$ とし、それ以後は、 6.6×10^{-3} づつ増分し、各5サイクルの変位を与え、最大が $R_{max}=59.4 \times 10^{-3}$ までの変位振幅について行った。

荷重は、マイクロコンピュータのプログラムシステムによってアクチュエータを制御し、試験機に内蔵された荷重アンプより検出した。変位は、変位計と動ひずみアンプにより検出し、双方をX-Yレコーダに入力した。ひずみの測定は、主筋、帯筋およびコンクリートの表面に貼り付けたワイヤストレインゲージと動ひ

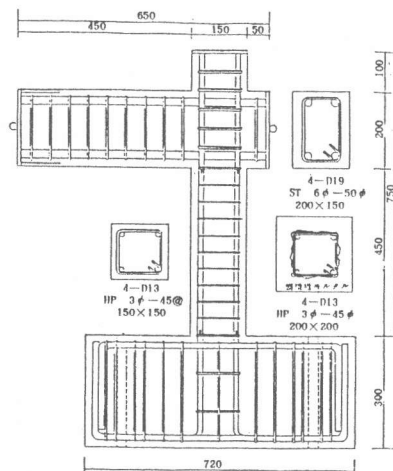


図1. 試験体寸法と配筋詳細図

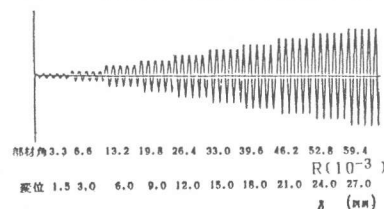


図2. 加力スケジュール

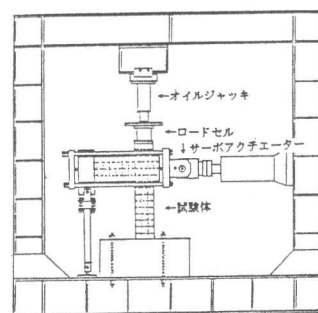


図3. 加力装置の概要

ずみアンプを用いて、リニアコードによって出力を行い、これよ各部位のひずみを求めた。加力方法の概要を図3に示す。

3. 実験結果と考察

繰返し速度を変化させた動的水平加力実験によって得られたひび割れ強度、最大荷重時変位、最大強度、破壊モード等の結果を表3に示す。

3.1 せん断強度スペクトル

鋼繊維の体積率をパラメータとして、荷重の繰返し速度と最大せん断強度スペクトルとの関係を図4に描いた。この図より $V_f=0$ 、1.5%の場合、繰返し速度 $f=0.1c/s$ において強度スペクトルがピークとなり、 $f=1c/s$ に繰返し速度を増加させると、強度スペクトルは、準静的と見なされる $f=0.01c/s$ 時の強度スペクトルより減少する傾向を示していることがわかる。また、 $V_f=1\%$ の場合は、繰返し速度を増加させると強度スペクトルは、 $f=0.01c/s$ をピークとして減少する傾向を示している。したがって、RC柱($V_f=0\%$)とSFRC柱($V_f=1, 1.5\%$)を比較すると、 $V_f=1.0\%$ で繰返し速度 $f=0.1c/s$ を除いては、SFRC柱の強度スペクトルは、RC柱の強度スペクトルより大きくなっている。また、 $V_f=1.5\%$ の場合は、 $f=1c/s$ を除いては、 $V_f=1.0\%$ の場合より増加する傾向を示している。

3.2 荷重-変位性状

各試験体の荷重-水平変位に関する履歴曲線を図5に示した。これより得られた包絡線に対して、各繊維体積率別に図6に描いた。これらの図より、最大荷重到達後、鋼繊維を混入したSFRC柱は、RC柱に比して耐力の劣化が少なくなる傾向を示している。繰返し速度との関連において見ると、RC柱では、繰返し速度 $f=1c/s$ の場合、最大荷重到達後の劣化が著しいが、 $V_f=1.0\%$ のSFRC柱では、 $f=1c/s$ の場合、特に劣化が少なく、鋼繊維のひび割れ拘束効果が認められる。SFRC柱の他の場合では、繰返し速度の変化による鋼繊維のひび割れ拘束効果に対する耐力劣化の有意差は余り認められない。

履歴曲線において、繰返し速度 $f=0.1, 1c/s$ の場合、柱の頭部および脚部に生じた斜めせん断ひび割れが特に大きく成長したために最大荷重到達以降、繰返し荷重を与えても、履歴曲線は、正側および負側において対称にならず、せん断伝達がいずれかの方向に卓越する傾向が見受けられる。DSFC15-10が顕著にその挙動を呈している。

3.3 ひび割れ・破壊性状

RC柱(DRC-100)およびSFRC柱(DSC10-1, DSFC15-10)の3タイプの試験体の最大荷重時ひび割れ状況を図7に描いた。これより、RC柱では、1本のせん断ひび割れの幅が大きく成長し、ひび割れ本数が少ない。変位が大きくなると、主筋に沿ってじぐざぐ状に付着割裂ひび割れが入り、更に変位が増加すると、かぶりコンクリートが大きく剝離して最終破壊に至る付着割裂破壊モードとなる。一方、SFRC柱は、せん断ひび割れが入っても、鋼繊維のひび割れ拘束によって大きく成長しない。したがって、付着割裂ひび割れが発生しても、かぶりコンクリートの

表1. 鉄筋の機械的性質

鉄筋の種類	降伏点応力度 (kg/mm ²)	引張強度 (kg/mm ²)	伸び(%)	ヤング係数 ($\times 10^4$)
D13	36.6	55.7	22.8	2.13
3.2φ	26.7	40.7	28.5	2.45

表2. 試験体一覧

試験体記号	試験体寸法 b×D (cm)	繊維体積率 V _f (%)	繰返し速度 f (c/s)	コンクリート 圧縮強度 (kg/cm ²)
DRC-1	15.1×15.2	0.	1.	366
DRC-10	15.3×15.2	0.	0.1	243
DRC-100	15.2×15.1	0.	0.01	354
DSFC10-1	15.2×15.0	1.	1.	451
DSFC10-10	15.2×15.0	1.	0.1	331
DSFC10-100	15.1×14.9	1.	0.01	331
DSFC15-1	15.2×15.2	1.5	1.	335
DSFC15-10	15.2×15.2	1.5	0.1	383
DSFC15-100	15.1×15.1	1.5	0.01	335

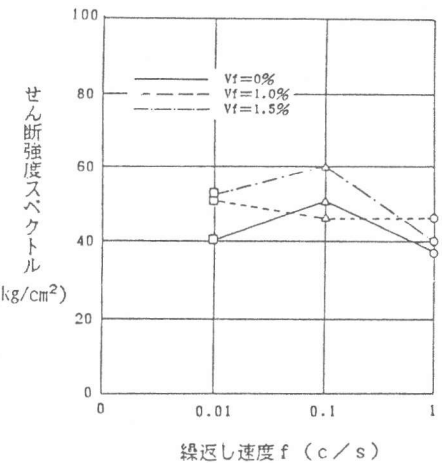


図4. 最大せん断強度スペクトル

表3. 実験結果一覧

試験体	ひび割れ強度				最大強度		最大荷重 時変位 (R) $\times 10^{-3}$	破壊 モード
	せん断		曲げ		Q _{max} (t)	τ (kg/cm ²)		
	s Q _{cr} (t)	τ _{cr} (kg/cm ²)	m Q _{cr} (t)	τ _{cr} (kg/cm ²)				
DRC-1	5.6	33.0	5.5	32.5	6.3	36.5	8.9	S
DRC-10	5.1	30.0	5.2	30.5	8.8	50.2	18.5	S
DRC-100	6.1	35.5	4.4	26.0	6.9	40.1	13.3	S
DSFC10-1	5.0	28.5	4.9	28.5	7.9	46.1	21.9	S
DSFC10-10	5.4	31.5	7.1	41.5	7.9	46.1	12.6	S
DSFC10-100	7.3	43.0	5.9	34.5	8.6	51.0	20.0	S
DSFC15-1	3.8	22.0	2.0	12.0	6.9	39.8	26.3	S
DSFC15-10	7.8	46.0	5.5	32.5	10.4	60.1	25.9	S
DSFC15-100	5.5	32.0	3.3	19.5	5.0	52.2	23.0	S

※S: 付着割裂破壊

剝離は妨げられる。繰返し速度とひび割れの関係については、最大荷重時では $f=0.01c/s$ の場合（静的荷重に近い）、ひび割れが少なく、速度 $f=0.1, 1c/s$ の場合、ひび割れが多数発生する傾向を示している。

3.4 エネルギー吸収能力

履歴曲線より得られた累積吸収エネルギーと部材角との関係を図8に示す。これより、累積吸収エネルギーの高い柱と低い柱の2つのグループにほぼ大別されているのが観察される。その中でもSFRC柱の $V_f=1.5\%$ 、 $f=0.1c/s$ および $V_f=1.0\%$ 、 $f=1c/s$ の場合、エネルギー吸収能力が優れていることがわかる。また、 $V_f=1.5\%$ 、 $f=1c/s$ の柱が低い値を示しているが、これは、鋼繊維の配向、分散性が良くない施行不良による事が考えられる。

3.5 変形能力

水平荷重を受けた柱が最大荷重に達するまでの累積履歴吸収エネルギー(A)と完全弾性タイプの復元力を持つ柱の吸収エネルギー(A')とが等しくなる塑性変位を等価塑性変形能力 η と定義する²⁾ η を定義する図9において、 Q_{UB} は、SFRC柱の剛塑性崩壊荷重で、RC柱の終局曲げ強度に鋼繊維コンクリートによる曲げ強度を累加したSFRC柱の終局曲げ強度 M_u を用いて次式より計算される³⁾

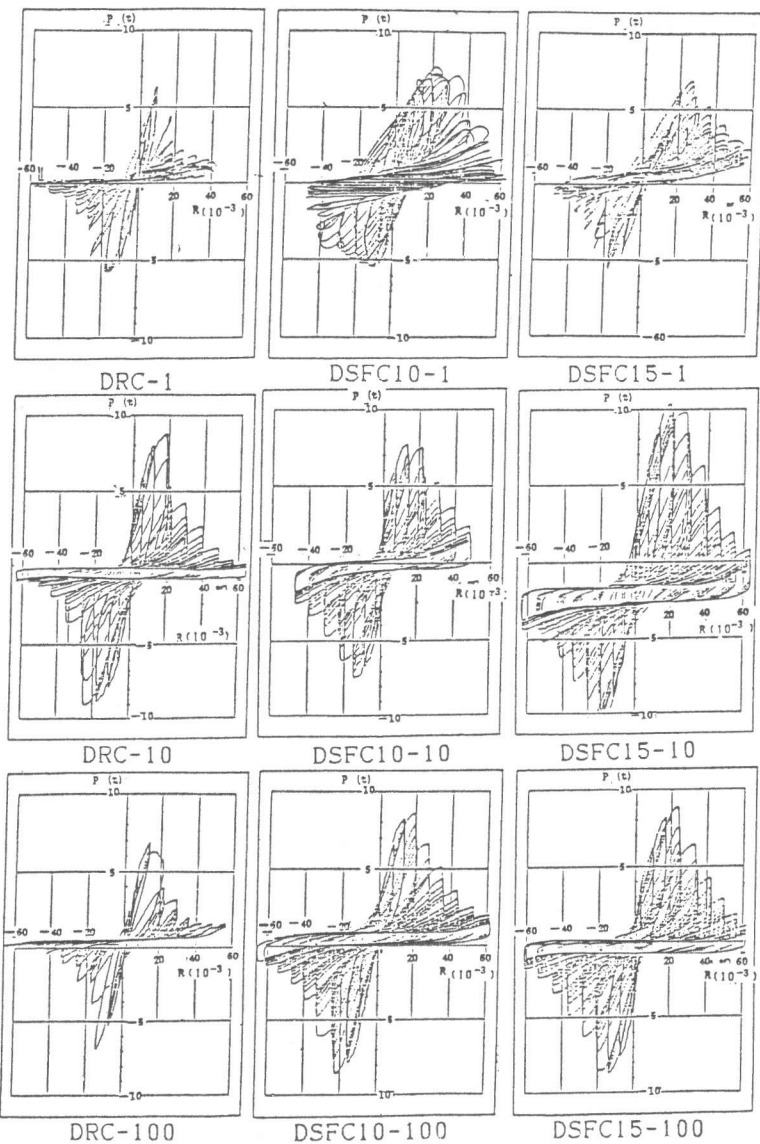


図5. 荷重-水平変位履歴曲線

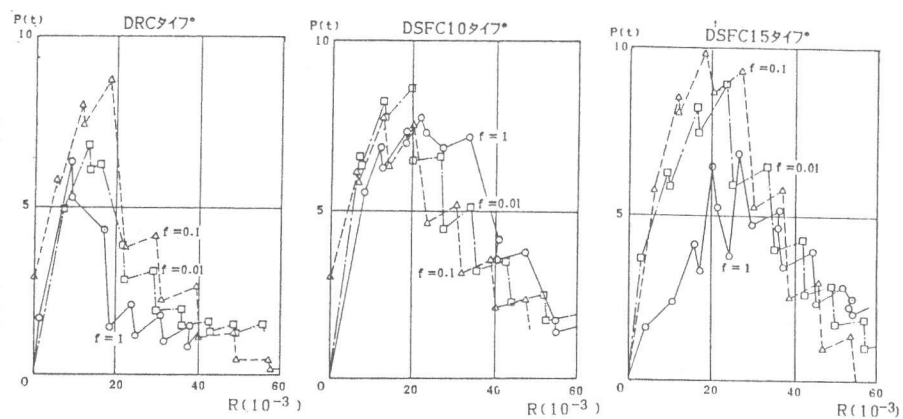


図6. 繊維体積率別包絡線

$$Q_{UB} = 2M_u/h = 2/h[0.8at \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D(1 - N/(b \cdot D \cdot F_c)) + k_f \cdot b \cdot D^2 \cdot \sigma_f]$$

$$k_f = k_1' \cdot k_2' \cdot k_3' = 1/2(0.65 + 15Vf) \cdot (0.20 + Vf)$$

ここに、 k_f は、引張応力分布係数、 σ_f は鋼繊維コンクリートの引張強度を示す。また、図9に示すように、 Δp は弾性曲線と崩壊荷重との交点の水平変位、 Δ_{max} は最大荷重時の水平変位を意味する。したがって、実験より得られた荷重-履歴曲線の包絡線から計算した η と繰返し速度 f との関係を図10にプロットした。 η に関しては、正側および負側について算出されるが、ここでは、いずれか大きい値に対してプロットした。この図より、 $Vf=1.5\%$ 、 $f=1c/s$ の場合を除いて、SFRC柱がRC柱に比して、 η の値はるかに大きくなり、優れた変形能力を有していることを示している。

4. 結論

(1).せん断強度スペクトルは、 $Vf=0, 1.5\%$ の場合、繰返し速度が $1c/s$ で低下する傾向を示している。SFRC柱の強度スペクトルはRC柱に比して、 $Vf=1\%$ 、 $f=0.1c/s$ を除いては、増加している。

(2).繰返し速度のもっとも大きい $1c/s$ において、RC柱は最大荷重後の劣化が著しいが、 $Vf=1\%$ のSFRC柱では、繊維のひび割れ拘束によって劣化が極めて少ない。

(3).SFRC柱はRC柱に比して、エネルギー吸収能力が優れているが、特に、 $Vf=1.5\%$ 、 $f=0.1c/s$ および $Vf=1.0\%$ 、 $f=1c/s$ において、その吸収能力が、顕著に現われている。

(4).SFRC柱の等価塑性変形能力値 η は、 $Vf=1.5\%$ 、 $f=1c/s$ を除いて、RC柱に比して大きく、変形能力に優れている。

(5).最大荷重時のひび割れは、 $f=0.01c/s$ (準静的)の場合、少ないが、 $f=0.1, 1c/s$ になると、多数発生する傾向が見受けられる。

本研究は、鋼材倶楽部から日本建築学会への委託研究“スチールファイバーの実用化に関する調査研究(委員長小倉弘一郎)”の一部として行ったものである。

参考文献

(1).日本建築学会スチールファイバーの実用化に関する調査委員会編，“スチールファイバーの実用化に関する調査研究(昭和57,58年度)”，1983・1984

(2).松井千秋他，“鉄骨ラーメンの弾塑性変形性状に及ぼす局部坐屈の影響”，日本建築学会論文報告集，第345号，1984

(3).榎谷栄次、郡嶋宏治，“SFRC短柱のせん断挙動に関する研究”，関東学院大学工学部研究報告vol.29-1,1985

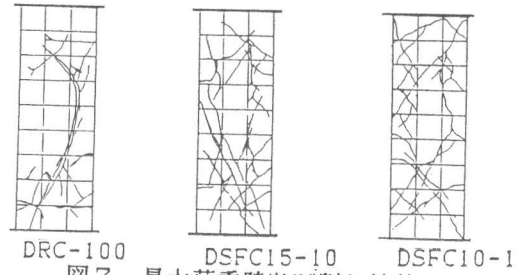


図7. 最大荷重時ひび割れ性状

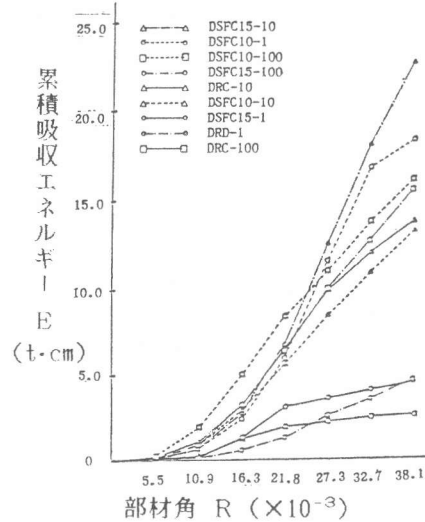


図8. 累積履歴吸収エネルギーと部材角の関係

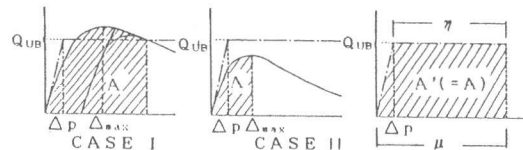


図9. 等価塑性変形能力の決定法

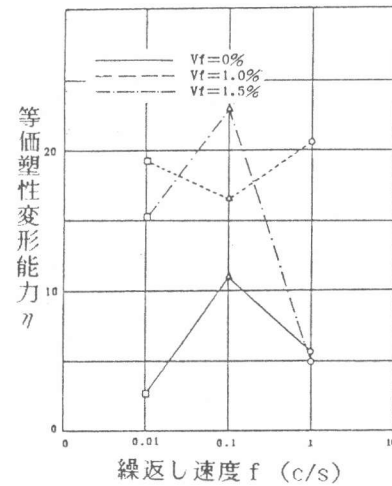


図10. 等価塑性変形能力と繰返し速度の関係