

3. 鋼繊維補強コンクリートの諸物性に関する実験研究

立 松 和 彦

要 旨

本研究は、鋼繊維補強コンクリートの諸物性（強度・じん性・耐久性）について、従来あまり報告されていない高強度コンクリート域を含めて実験を行ったものである。

実験の結果、繊維の混入による圧縮強度の低下は W/C 30 %では見られず、曲げ強度・せん断強度は高強度になっても繊維の混入量に応じて増大することがわかった。じん性については、荷重－変位曲線を正規化することにより、ひびわれ発生後の挙動の比較が容易になること、タフネス係数のような耐力の低下領域に着目した評価方法の方が高強度コンクリートには望ましいことを示した。耐久性に関しては、凍結融解作用を受けてもじん性は低下しないこと、鋼繊維が混入しても耐久性に悪影響を及ぼさないことを示した。

キーワード

繊維補強／鋼繊維補強コンクリート／じん性／正規化／高強度コンクリート／耐久性／換算曲げ強度／タフネス係数

目 次

1. はじめに
2. 実験の構成
3. 室内実験
4. 打設実験
5. おわりに

3. INVESTIGATION OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE CHARACTERISTICS

Kazuhiko Tatematsu

Abstract

We have conducted research into the characteristics of steel fiber reinforced concrete, including its strength, toughness and durability. We also studied a high-strength concrete whose characteristics have not been reported very frequently in the past.

During the experiments, no reduction in compressive strength was detected at W/C 30 % as a result of mixing the steel fiber. This indicates that the bending strength and shear strength characteristics of mixed concrete increase in proportion to the amount of mixed steel fiber, even when the concrete is highly reinforced. With regard to toughness, we found that normalized load-deflection curves facilitate behavioral assessment after the development of cracks. Moreover, evaluation methods that focus on the degradation of the concrete's toughness, such as modulus of toughness, are more suitable for evaluating the condition of high-strength concrete. The toughness of the concrete showed no degradation after the freezing/thawing test, verifying that durability was unaffected by the mixing of steel fiber.

1. はじめに

本来、脆性的な材料であるコンクリートに、鋼繊維・炭素繊維・ガラス繊維などの繊維を様々な手法で混合させることにより、じん性を付与してセメントコンクリート系材料の新たな可能性を探る試みが各方面でなされている。これら繊維補強コンクリートは、吹付けコンクリートや土間コンクリート、コンクリート舗装、外装材として普及し始めている。

今回行った、鋼繊維補強コンクリート（以下、SFR Cと呼ぶ）に関する一連の実験は、SFR Cの強度、じん性および耐久性に関する基礎的な実験と、鋼繊維（以下、SFと呼ぶ）の現場投入実験を行い、種々のデータを収集し蓄積することを目的として実施したものである。

2. 実験の構成

実験は、室内実験・打設実験の2段階に分けて行った。それぞれの実験における主なテーマを表－1に示す。

表－1 各実験における主なテーマ

名 称	主 な テ ー マ
室内実験	・繊維混入量、W/Cをパラメータとした、SFR Cの強度とじん性に関する基礎的な物性試験
打設実験	・鋼繊維の現場投入に当たっての施工性 ・洗い分析試験 ・耐久性に関する試験

以下、本報告では室内実験と打設実験に分けて、それぞれの実験の概要、結果および考察を述べる。

3. 室内実験

3.1 実験の目的、要因および水準

本実験（室内実験）は、高強度コンクリートを用いたSFR Cについて、その強度（圧縮・せん断・曲げ）とじん性について検討することを目的とした。既往の研究には、高強度コンクリートではアスペクト比が小さなSFでも十分な補強効果があることや、マトリックスを高強度化することによりSFの使用量を低減することが可能であるとの報告¹⁾がなされているが、一般強度との関連を広範囲にとらえた研究は少ない。

本実験は、水セメント比(W/C) および繊維混入量(Vf)を要因とし、その水準を30%～60% (W/C)、

0%～2.0% (Vf) とした。表－2に示す14のシリーズについて実験を行った。

表－2 室内実験の計画

記 号	W/C (%)	SFの種類	SF混入量 (%)	記 号	W/C (%)	SFの種類	SF混入量 (%)
3000	30	A	0	4015	40	A	1.5
3010	30	A	1.0	4020	40	A	2.0
3020	30	A	2.0	5000	50	A	0
4000	40	A	0	5010	50	A	1.0
4005	40	A	0.5	5020	50	A	2.0
4010	40	A	1.0	6000	60	A	0
S4010	40	B	1.0	6010	60	A	1.0

3.2 使用材料、コンクリートの調合および試料の練り混ぜ

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。粗骨材は碎石（最大寸法20mm、表乾比重2.68、F.M 6.77）を、細骨材は山砂と砕砂を70：30で混合したもの（混合後の表乾比重2.59、F.M 2.84）を使用した。混和剤はナフタリン系の高性能AE減水剤を使用した。SFは、伸線カットファイバー（インデント付）を使用した。その材質はJIS G 3532に規定する SWM-Bに適合し、引張強度は100kgf/mm²以上である。使用したSFの形状、寸法を表－3に示す。

表－3 実験に用いたSFの形状および寸法

SFの種類	直径 d (mm)	長さ ℓ (mm)	断面積 (mm ²)	アスペクト比 ℓ/d
A	0.7	40	0.385	57
B	0.6	40	0.283	67

コンクリートはSF混入後の目標スランプを15cm、目標空気量を4%とした(s/aについては文献³⁾を参考にした値を採用した)。単位水量は、SFが0%の場合で165kg/m³、SFが1.0%の場合で200kg/m³を目安にした。コンクリートの調合を表－4に示す。

試料(SFR C)の練り混ぜは、JCI 標準「試験室における繊維補強コンクリートの作り方」に準じて行った。練り混ぜは20℃、60%RH の室内において容量100ℓの強制練りミキサを使用し、1 バッチの練り混ぜ量を50ℓとして行った。材料の投入は、細骨材½、粗骨材全量、セメント全量、細骨材½の順に投入して約10秒間空練りを行った後、練り混ぜ水を投入して1分程度マトリックスコンクリートの練り混ぜを行い、ミキサを回転させたままSFを分散投入し、練り混ぜ開始から 3.5～4 分間練り混ぜて行った。

表-4 コンクリートの調合

記 号	SFの種類	水セメント比 (%)	SF混入 量 (vol %)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤 (C×%)	SF
3000	A	30	0	37.4	165	550	594	1057	1.65	0
3010			1.0	46.3	200	667	638	787	1.65	78.5
3020			2.0	62.3	225	750	761	490	1.65	157
4000	A	40	0	43.0	165	413	731	1030	1.50	0
4005	A		0.5	45.0	185	463	718	933	1.50	39.3
4010	A		1.0	48.3	200	500	731	832	1.50	78.5
S4010	B		1.0	48.3	200	500	731	832	1.40	78.5
4015	A		1.5	56.3	208	520	824	680	1.50	117.8
4020	A		2.0	64.3	210	525	927	548	1.50	157
5000	A	50	0	45.9	165	330	821	1002	1.50	0
5010			1.0	50.3	200	400	802	843	1.50	78.5
5020			2.0	66.3	220	440	985	532	1.50	157
6000	A	60	0	46.6	165	275	843	1028	1.00	0
6010			1.0	52.3	200	333	862	836	1.00	78.5

3.3 試験項目および試験方法

本実験で実施した試験項目は、圧縮強度（材令7日、28日）、静弾性係数（材令28日）、せん断強度（材令28日）、曲げ強度および曲げじん性（材令28日）である。供試体はすべて標準養生とした。試験は、それぞれ該当する JCI 規準に準じて行った。圧縮強度試験・静弾性係数試験は $\phi 10 \times 20$ cm の供試体を3体作成した。せん断試験は $10 \times 10 \times 40$ cm の供試体を3体作成し、直接2面せん断とした。曲げ試験は $10 \times 10 \times 40$ cm の供試体を5体作成して3等分点载荷により行い、内1本は繰返し载荷とした。

3.4 曲げじん性の評価

曲げじん性の評価方法は、換算曲げ強度（Equivalent Flexural Strength [kgf/cm²]）とタフネス係数（Modulus of Toughness [無次元]）の2種類を用いた。換算曲げ強度は、基準とした限界変位（スパンの $1/150$; 2 mm）までの全エネルギー量を平均的な強度に換算したものであり、タフネス係数は、基準荷重（本実験では最大荷重とした）以後のエネルギー量の変化からじん性を評価したものである。図-1 にその概略を示す。また、正規化した荷重-変位曲線¹⁾

を用いて実験結果の比較検討を行ったが、ここでいう正規化とは、個々の供試体の曲げじん性試験における初ひびわれ発生時の荷重を1に、その時の変位を1として、荷重-変位曲線を描き直したものである。このように描き直すことにより、初ひびわれ発生時の荷重や変位量にこだわらずに試験結果を比較することができる（打設実験でも同様の評価方法を用いている）。

3.5 試験結果および考察

表-5 に、強度・じん性に関する試験結果の一覧を示す。

3.5.1 フレッシュコンクリートの状態

W/C の小さな（30%，40%）シリーズではセメント量が多くなるため、混和剤に対して敏感になり、セメントペーストと骨材，SF が分離するケースも見られた。スランプ値は（SF 混入後で）12～15 cm が限度と考えられる。分離をなくすためには、分離低減剤などを別途添加するのも一つの方法であろう。また、ブリージングについては今回の実験では定量的な測定は行っていないが、いずれのシリーズでもブリージン

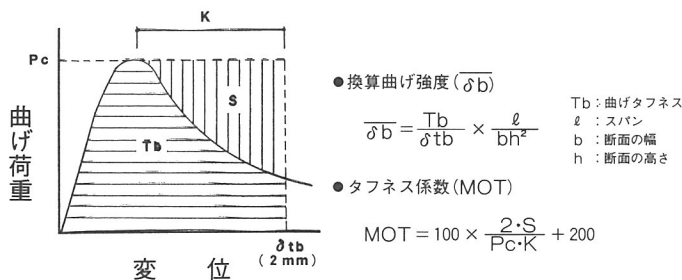


図-1 じん性の評価方法

表-5 試験結果の一覧

記 号	圧 縮 試 験			せん断試験	曲 げ 試 験		
	圧縮強度 (kgf/cm ²)		静弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	せん断強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	換算曲げ強度 (kgf/cm ²)	タフネス係数 (無次元)
	7 日	28 日	28 日	28 日	28 日		
3 0 0 0	609	757	3.89	110	76	6	0
3 0 1 0	592	760	3.64	166	89	49	112
3 0 2 0	634	762	3.53	194	116	76	145
4 0 0 0	446	619	3.67	96	66	7	0
4 0 0 5	374	511	3.22	106	66	38	122
4 0 1 0	423	562	3.21	137	83	57	150
S 4 0 1 0	371	517	3.33	124	69	54	150
4 0 1 5	392	531	3.16	137	75	55	164
4 0 2 0	454	596	3.67	159	102	69	156
5 0 0 0	286	441	3.35	69	60	7	14
5 0 1 0	275	393	2.96	103	66	51	164
5 0 2 0	282	436	2.83	123	92	80	185
6 0 0 0	190	303	3.01	55	44	6	13
6 0 1 0	138	239	2.40	79	52	42	174

全て20℃水中養生

グはあまり目立たなかった。高性能AE減水剤を用い、単位水量を低めに設定したためと考えられる。

3.5.2 圧縮強度

図-2に、セメント水比と圧縮強度の関係を示す。W/C60%～40%の範囲では、SFを混入したものは圧縮強度が少し低くなっているが、W/C30%ではほとんどその差は見られない。通常、SFの混入による圧縮強度の増加はごくわずかであり、SF量を著しく増加させると締固めが不十分となり強度が低下することもある²⁾とされているが、高強度になってもセメントペーストの流動性が十分であればSFとの付着も良好になり、そのためSFが増加しても前述のような強度低下を引き起こす原因とならないのではないかと考えられる。

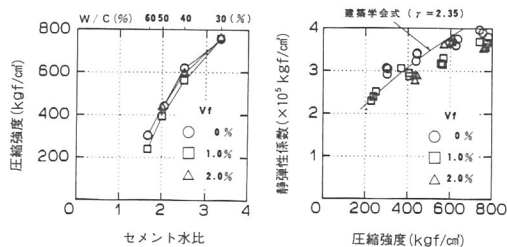


図-2 セメント水比と圧縮強度の関係
図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.5.3 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-3に示す。圧縮強度が大きくなるにつれ静弾性係数は大きくなっているが、SFを混入したものの方がやや低い値を示した。SFの混入により圧縮強度が若干低下したことや、限界ひずみがSFの混入により大きくなったことなどがその一因として考えられる。

3.5.4 セン断強度、曲げ強度

繊維混入量(Vf)と曲げ強度、せん断強度との関係を図-4、図-5に示す。Vfが2%のものは、0%に比べ曲げ強度で1.53～1.55倍、せん断強度で1.66～1.78倍と飛躍的に増加している。低水セメント比になってもこの傾向はほとんど変わっていない。

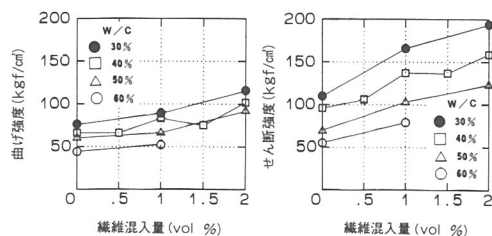


図-4 繊維混入量と曲げ強度の関係
図-5 繊維混入量とせん断強度の関係

3.5.5 曲げじん性

曲げじん性試験における荷重-変位曲線を図-6 (W/Cごと)、図-7 (Vfごと)に示す。図-8に

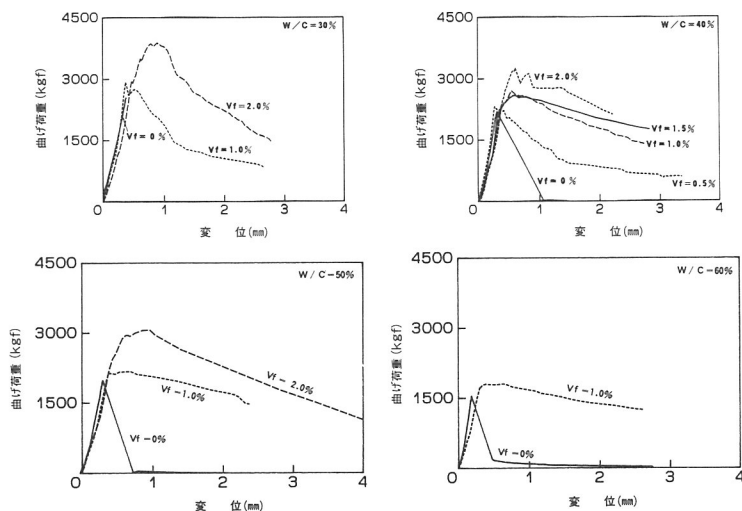


図-6 荷重-変位曲線 (W/C ごと)

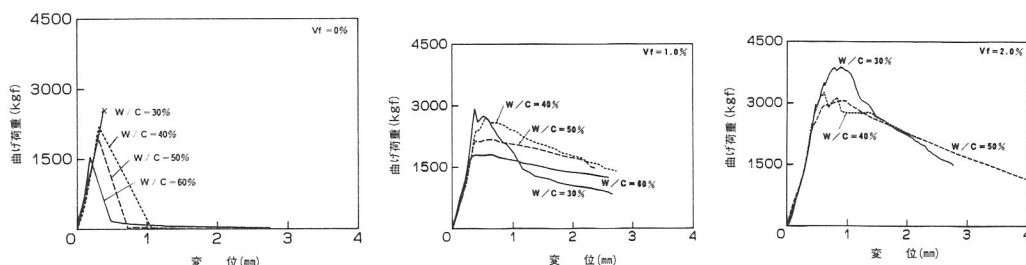


図-7 荷重-変位曲線 (Vf ごと)

繊維混入量と換算曲げ強度の関係を、図-9に繊維混入量とタフネス係数の関係を示す。2種類の方法でじん性を評価しているが、換算曲げ強度による評価(図-8)ではW/Cの影響はほとんど見られない。一般的には強度が大きくなれば脆性的になることから、この結果はある程度考えられることである⁵⁾。一方、タフネス係数による評価(図-9)ではW/C 30%のものが最も小さく、W/Cの影響をある程度反映していると言える。これは、荷重-変位曲線が示すように、最大荷重以後の推移においてW/Cの小さいSFRCでは、W/Cの大きいものに比べその脆的な挙動の改善の度合いは小さいという結果を表したもののといえる。高強度の場合にはタフネス係数のような、耐力の低下領域に着目した評価方法が望ましいと考える。

また、正規化した荷重-変位曲線を図-10 (W/C ごと)、図-11 (Vf ごと) に示す。図-10および図-11では、初ひびわれ発生までの荷重-変位曲線は繊維量(図-10)、水セメント比(図-11)にかかわらず

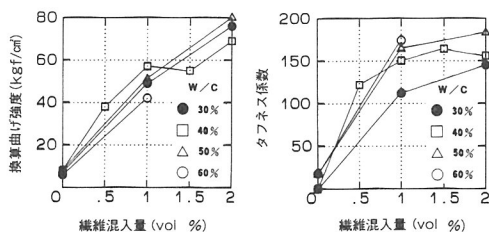


図-8 繊維混入量と換算曲げ強度の関係
図-9 繊維混入量とタフネス係数の関係

ほぼ一致していることがわかる。そして、正規化することにより、ひびわれ発生後の挙動に対する一般的な傾向の比較が、図-6、図-7におけるよりも容易であることがわかる。

3.5.6 繰り返し載荷

図-12に、繰り返し載荷で得られた荷重-変位曲線を示す。図中の破線は、単調載荷の供試体の荷重-変

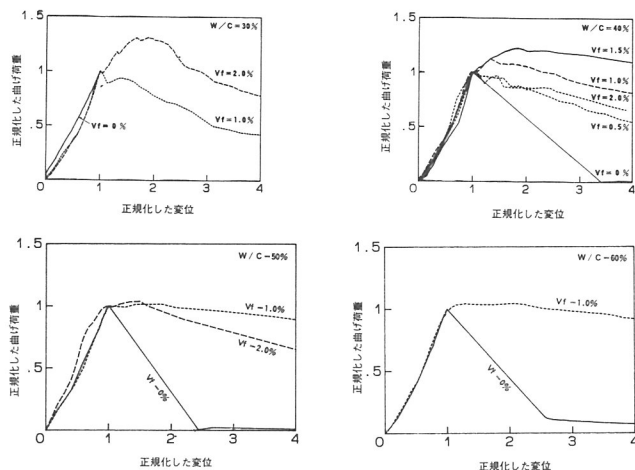


図-10 正規化した荷重-変位曲線 (W/C ごと)

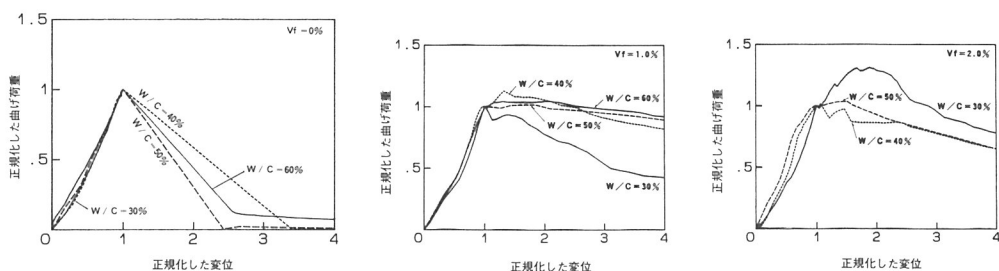


図-11 正規化した荷重-変位曲線 (Vf ごと)

位曲線を示している。図-12において、繰り返し載荷の場合の包絡線は、単調載荷の場合の荷重-変位曲線とはほぼ一致している。また、2回目、3回目等の繰り返し載荷開始直後の曲線の立上がりの勾配は初期載荷時の立上がりの勾配にほぼ一致しているようであるが、サイクルが進むにつれ、少し緩やかな勾配になっている。この傾向は、繊維量、水セメント比にかかわらず同様の傾向を示している。繰り返し載荷によりひびわれおよび繊維とマトリックスとの間の付着切れが進行

し、全体の剛性が低下するためと考えられる。

3.6 まとめ

鋼繊維補強コンクリートの強度とじん性に関して、室内実験の結果を整理すると以下のようになる。

- (1) 水セメント比が30%程度の高強度コンクリートになると、鋼繊維が混入しても圧縮強度はほとんど低下しない。
- (2) せん断強度および曲げ強度は、鋼繊維の混入量を

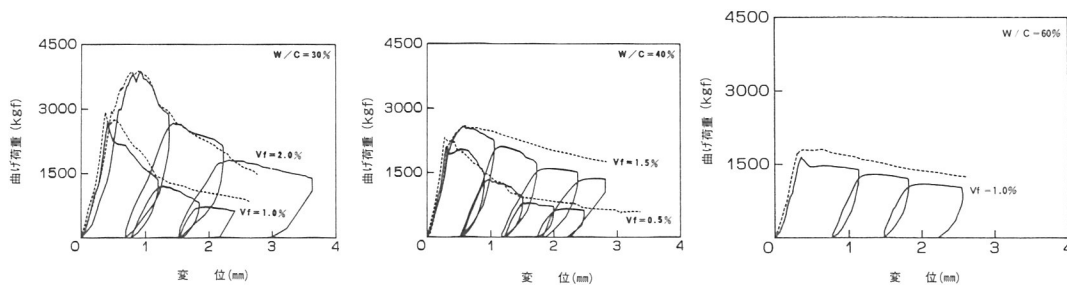


図-12 繰り返し載荷による荷重-変位曲線

増すにつれて増加するが、その増加する割合は水セメント比が30%～60%の範囲ではほぼ一定である。

(3) じん性を評価する方法は種々提案されており、それぞれ着眼点異なるため、結果も異なってくる。今回行った高強度コンクリートの場合、タフネス係数のような耐力の低下領域に着目した評価方法が望ましい。

(4) 初びわれ発生荷重が異なるものであっても、荷重－変位曲線を正規化することにより、びわれ発生後における挙動の比較が容易になる。

(5) 繰り返し載荷では、びわれや付着切れの進行により全体剛性が徐々に低下する。



写真－1 SF投入足場

4. 打設実験

4.1 実験の概要

本実験（打設実験）は、SFRCの現場施工を想定して、SFの投入作業時の施工性、高スランプ時のSFの分散性、およびSFRCの耐久性（中性化、塩分浸透、凍結融解）について検討することを目的として行った。生コンプラントで練り混ぜ、搬入したベースコンクリートに、現場でSFを投入、攪拌（高速回転）したSFRCを構造実験用の支持台2台（計2.5㎡）に打設した。

4.2 使用材料およびコンクリートの調合

コンクリートの使用材料およびSF（インデント付伸線カットファイバー、径0.7mm×長さ40mm）は、3.2に示したものと同一である。コンクリートは、SF混入後の目標スランプを15cm、目標空気量を4%とした。繊維混入量（Vf）は1%とした。表－6にその調合を示す。

表－6 コンクリートの調合

(kg/㎡)						
C	W	S1	S2	G	Ad	SF
500	200	512	229	820	7.50	78.5

W/C 40.0%, s/a 48.3%, Vf 1.0%, 骨材寸法 20mm,
セメントNP, スランプ SF混入後 15cm, 空気量 SF混入後 4%

4.3 SFの投入

SFの投入は、写真－1のような投入足場を組み立て、そこから行った。投入作業はすべて人力で行った。作業員4名で、ファイバーボールができないようにSFをほぐしながら順次コンクリートに投入した。その間、アジテータ車は高速回転を行った。

表－7 試験項目

試験項目	試験材令	試験方法	その他
SFの洗い分析試験	SF混入後	土木学会基準（案）Ⅲ-2-7「鋼繊維補強コンクリートの鋼繊維混入率試験方法」の内、洗い分析試験方法による	2回実施
中性化深さ	促進試験：4,8,13週 屋外暴露試験：6カ月、1年	促進試験：20℃、60%RH、CO ₂ 5% 所定の材令で供試体を切断し、1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定	
塩分浸透性	塩水浸せき、乾燥繰り返し6サイクル終了後	塩水浸せき：20℃、3%NaCl水溶液 3日 乾燥：50℃ 4日 の計7日を1サイクルとした塩分の分析は、JCI規準案「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法（案）」による	
凍結融解抵抗性	300サイクル	JIS-A 6204 付属書2に準じた	300サイクル終了後の供試体で曲げ試験を実施

4.4 試験項目および試験方法

本実験で実施した主な試験項目を表－7に示す。表中の項目それぞれについて、SF混入前と混入後の試料を採取して試験を行った。また、強度関係の試験は圧縮試験、静弾性係数試験、曲げ試験などをそれぞれ実施した。じん性の評価方法は、「室内実験」と同様、換算曲げ強度とタフネス係数を用いた。

4.5 試験結果および考察

4.5.1 SFの投入作業

今回の実験は打設量が2.5㎡と少量であるため、SFの投入はすべて足場の上から人力で投入した。投入量は12.7箱（191kg;投入時の飛散分を1kg見込んだ）であり、投入に要した時間は4分10秒（約20秒/箱）であった。アジテータ車の高速回転は、投入時間＋1

分間行った。打設量が多くなれば、S F投入の効率化を図るためベルトコンベアなどを使用することが必要となろう。

4.5.2 フレッシュコンクリートの状態

洗い分析試験などの、フレッシュコンクリートの試験結果を表－8に示す。打設した支持台の方は、やや分離傾向を示しブリージングも見られたが、テストピースの方はさほど気にならない程度であった。

表－8 フレッシュコンクリートの試験結果

試験項目	S F混入前 採取13:35	S F混入後			
		前半；① 採取13：57		後半；② 採取14：15	
スランブ（cm）	24.0	17.5		15.3	
フロー（cm）	55.5×55.5	43.5×39.0		35.0×33.5	
空気量（％）	3.4	3.1		3.5	
コンクリート温度(℃)	25.0	25.0		25.0	
単位容積重量(kg/m³)	2307	2374		2353	
鋼繊維混入量の洗い分 析試験	混入量（％）	---	1.11	平均	1.16
			1.16	1.13	1.29
	単位容積重量	---	2371	平均	2397
			2381	2376	2385
				2385	2391

4.5.3 圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度、曲げじん性

圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度、曲げじん性の試験結果を表－9に示す。実機のため、「室内実験」の結果と比べると、同一水セメント比では圧縮強度は低くなっているが、曲げ強度、曲げじん性ではほぼ同じ値であった。S Fの混入前後に関しては、室内実験と同様に曲げ強度、曲げじん性の増大が見られた。

表－9 強度関係の試験結果

	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm²)	静弾性 係数 (×10⁵ kgf/cm²)	曲げ強度 (kgf/cm²)	換算 曲げ強度 (kgf/cm²)	タフネス 係数 (無次元)
S F 混入前	28	480	3.06	61	6	10
S F 混入後	28	471	3.19	75	55	149
	91	520	3.59	84	62	149
W/C 40.0% Vf 1.0% 全て20℃水中養生						

4.5.4 中性化深さ

表－10に中性化深さの試験結果を示す。促進試験の材令13週で、S F混入後の試料が若干小さな値になった。

表－10 中性化深さの試験結果

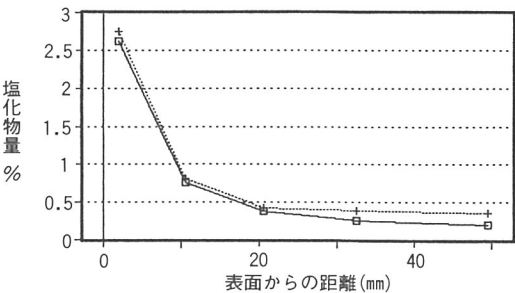
	中性化深さ（mm）				
	促進試験			屋外暴露	
	4 週	8 週	13週	6 カ月	1 年
S F混入前	8.1	9.7	13.8	0	0
混入後	8.2	9.9	12.3	0	0

4.5.5 塩分浸透性

表－11および図－13に塩分浸透性の試験結果を示す。S Fを混入したものの方が若干大きな値となった。S Fの混入によって、水分のコンクリート内部への浸透が若干容易になったのではないと思われる。

表－11 塩分浸透性の試験結果

	塩化物量（％）	
	S F混入前	S F混入後
（表層）	2.62	2.74
↓	0.75	0.81
↓	0.38	0.42
↓	0.26	0.39
（内部）	0.20	0.35

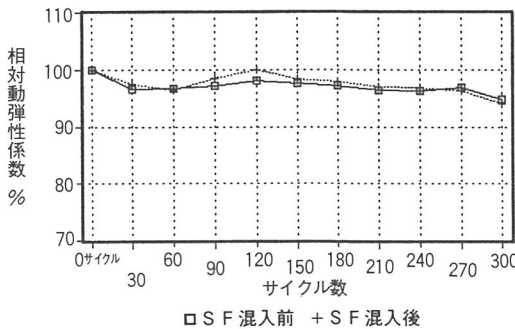


□ S F混入前 + S F混入後

図－13 塩分浸透性の試験結果

4.5.6 凍結融解抵抗性

図－14および図－15に凍結融解試験の結果を示す。相対動弾性係数、質量変化率とも、S Fを混入したものとしないうとで、ほとんどその差は認められなかつた。



□ S F混入前 + S F混入後

図－14 凍結融解試験結果（相対動弾性係数）

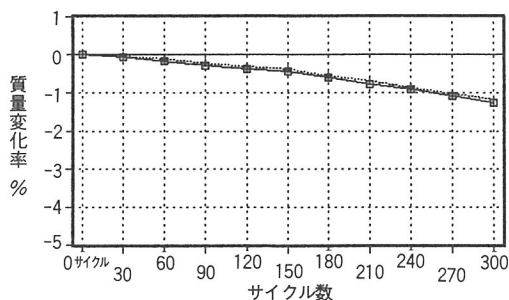


図-15 凍結融解試験結果（質量変化率）
表-12 凍結融解試験後の曲げじん性

	養生条件等	曲げ強度 (kgf/cm ²)	換算曲げ強度 (kgf/cm ²)	タフネス係数 (無次元)
S F 混入前	20℃水中 28日	61	6	10
	300サイクル 後	53	10	24
S F 混入後	20℃水中 28日	75	55	149
	300サイクル 後	77	57	167

た。また、凍結融解試験後の供試体で曲げじん性試験を行った結果を表-12に示す。300サイクルの凍結融解後でも、S F R Cの曲げじん性（換算曲げ強度、タフネス係数）はほとんど変化していない。

4.6 まとめ

今回の打設実験で得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) S Fの投入作業では、打設量に応じて機械（ベルトコンベア）を利用した方が効率的と考えられる。S Fの飛散、ファイバーボールについては、投入時に注意すれば別に問題は起こらない。
- (2) 洗い分析試験では、調合計画の値を若干上回ったが、分散性に関してはほぼ問題はなかった。
- (3) 耐久性に関しては、塩分浸透性ではS Fを混入したものがやや低い値となったが、それ以外の項目（中性化深さ、凍結融解）については両者ともほぼ同等であった。

5. おわりに

室内実験では、S F R Cの強度、じん性について、打設実験では施工性および耐久性等について実験を行った。強度、じん性については、予想通り曲げ強度、せ

ん断強度およびじん性の大幅な増加が見られた。若干懸念された耐久性については、S Fを用いない通常のコンクリートとほぼ同様であり、凍結融解作用を受けてもじん性はほとんど低下しないこと等がわかった。

なお、曲げ強度やじん性に優れたS F R Cの効率的な利用および経年変化等について引き続き検討するため、当社の機材部において土間の一部にS F R Cを打設し、実験を継続中である。

〔謝辞〕

本実験を行うにあたり、ご指導いただきました大阪市立大学 眞嶋光保先生をはじめ、実験に御協力いただいた関係各位の皆様に感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) 六郷 他；鋼繊維を混入したレジンコンクリートならびに高強度コンクリート，繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集，コンクリート工学協会（1984）
- 2) 小林一輔；繊維補強コンクリート，オーム社（1981）
- 3) 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案），土木学会（1983）
- 4) G.Chanvillard et al；Normalized Load-Deflection Curves for Fibre Reinforced Concrete under Flexure, Cement & Concrete Composites 12(1990)
- 5) 魚本 他；鋼繊維補強コンクリートのタフネス評価方法，セメント技術年報 36,セメント協会（1982）