

鋼繊維補強コンクリート (SFRC) の基礎的研究

— 建築の現場打設を対象としたスランプ 15 cm の SFRC の場合 —

高木 隼二
中西 正俊
奈良 禧徳

§ 1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete, 以下 SFRC と略す) は、従来のプレーンコンクリートと比べ、靱性、耐衝撃性、曲げ強度、せん断強度などが改善される。それらの特性を生かして、これまでは道路舗装やトンネルライニングなどの土木関係やコンクリート管などの工場製品に、硬練りコンクリート (スランプ 5 cm 程度) として用いられる例が多かった。しかし、今後は SFRC の持つ長所を利用するために、建築などの現場打設コンクリートとして用いられて行くことが望まれている。

SFRC を建築現場で打設できるようにするためには、SFRC のコンシステンシーを従来の土木用や工場製品用のものより改善したものにする必要がある。建築現場で打設できる SFRC のコンシステンシー (ここではスランプで表わす) を考える上で考慮すべきものとして次の各項があげられる。

- i) 収縮ひびわれ防止のため、単位水量、単位セメント量をなるべく少なくするのが望ましい。
- ii) 事前に行なった予備的検討によれば、繊維混入率を 1.5~2.0% とした SFRC のスランプを 18~20 cm 程度以上にすると、バイブレータによる締固め時に分離 (繊維の沈降) を生じやすい傾向がある。
- iii) 一般の建築現場で打設できるコンクリートのスランプの限度は 15 cm 程度である¹⁾。

以上の各項を考慮すると、建築現場で打設できる SFRC のスランプとしては 15 cm 程度が適当と考えられる。

SFRC の調合や物性、さらには SFRC を部材として用いたときの性状などに関する研究報告は、これまで数多く公表されている。しかし、それらはほとんど硬練り (スランプ 5~8 cm 内外) の SFRC に関するものであり、スランプ 15 cm 程度のものについての検討は極めてまれである。さらにまた、SFRC を施工性の面からとらえ、SFRC のコンシステンシーに主眼を置いてその調合

・物性・部材としての性能などを総合的に検討した例は、これまでのところ見当らない。

以上のような背景を考慮し、ここでは建築現場に打設できる SFRC の基礎データを得ることを目的にして、スランプを 15 cm とした SFRC についてその調合や基礎的物性などを総合的に検討することにした。

実験は 3 つのシリーズに分かれている。シリーズ I では SFRC の調合とその基礎物性 (特に機械的物性) について検討した。シリーズ II では SFRC の収縮ひびわれ抵抗性を大型の "2 辺拘束ひびわれ発生試験装置" などを用いて検討した。そして、シリーズ III では SFRC を梁材に用いたときの諸性能 (特にせん断耐力など) について検討した。

§ 2. SFRC の調合と基礎的物性の検討
(シリーズ I)

2.1 実験の目的

SFRC の調合と物性に関する検討には次のようなものがある。小林他²⁾ は、スランプ 5~8 cm 程度の SFRC について "スランプと単位セメント量", "スランプと細骨材率の関係" などについて検討し、SFRC の調合設計のための資料を示している。太田他³⁾ はスランプ 10 cm 内外の鋼繊維補強 AE コンクリートの調合と物性 (空気量、スランプ、圧縮強度など) の関係について検討し、AE 剤を用いた SFRC の調合設計についての資料を示している。Hughes 他⁴⁾ はスランプ 5 cm 内外の SFRC のワーカビリティ (スランプと Vebe 値) に影響を与える要因 (繊維の形状寸法、繊維混入率、水セメント比など) について検討している。Swamy 他⁵⁾ はフライアッシュと減水剤を用いたスランプ 8 cm 程度の SFRC について骨材寸法、供試体寸法、打込み方法などと強度 (圧縮、曲げ) との関係について検討している。

以上の他にもいくつかの報告があるが、いずれの場合

シリーズ	I	II	III
材料	N社製普通ポルトランドセメント		
セメント	N社製普通ポルトランドセメント		
細骨材 ^{*1)}	川砂 (5mm以下, $\rho=2.58$, $FM=2.69$)	川砂 (2.5mm以下, $\rho=2.58$, $FM=2.69$)	川砂 (5mm以下, $\rho=2.60$, $FM=2.75$)
粗骨材 ^{*1)}	碎石 (15mm以下, $\rho=2.68$, $FM=6.17$)	碎石 (15mm以下, $\rho=2.62$, $FM=6.20$)	碎石 (20mm以下, $\rho=2.66$, $FM=6.68$)
鋼繊維 ^{*2)}	0.5×0.5×30mm (A繊維) 0.3×0.3×30mm (B繊維)	0.5×0.5×30mm (B繊維)	0.5×0.5×30mm (B繊維)
混和剤	AE減水剤 (リグニン系)		

*1) ρ は比重を表わす

*2) S社製のせん断繊維 SS41 使用

A繊維の細長比 (1/d) は 100, B繊維の場合は 53

表一 使用した材料

も土木工事への適用を対象とした硬練りの SFRC についての検討が主となっている。そこで、ここではスランブを 15cm とした SFRC について検討する。

2.2 実験方法

1) 使用した材料と SFRC の調査条件

表一に使用した材料を、表二に SFRC の調査条件を示す。

2) SFRC の練り混ぜ

この実験では、所定のスランブを有する調査を決定するのが実験の目的の一つであるので次の方法によった。すなわち、あらかじめ所定の細骨材率を有する骨材を強制練りミキサ (容量 0.1 m³) に投入し、それに所定の水セメント比を有するセメントペーストと所定量の鋼繊維を混入し、スランブを 15±1 cm とした。

3) 試験項目とその方法

表三に試験項目とその方法について示す。なお、硬化後の試験に用いる供試体寸法は全て 10×10×40 cm の角柱とした。また、耐衝撃性能試験は次の方法によった。すなわち、10×10×40 cm 供試体 (2点支持, スパン 30 cm) の中央部に 2.5 kg の鋼球を 0.5 m の高さから繰り返し落下させ、一定の幅を持つひびわれが発生するまでの落下回数を測定した。供試体は乾燥収縮の測定を完了した供試体を用いた。試験時の材令は約 180~200 日である。

4) 供試体の製作と養生方法

供試体 (10×10×40 cm) は 2層に分けて SFRC を打ち、締め固めは台状パイプレータにより合計 20 秒とした。成形後 1 日で脱型し、強度試験用供試体は 20℃ 水中で試験材令まで養生した。長さ変化供試体は、材令 7 日まで水中養生した後、20±1℃, 60±5% R.H. で養生した。

シリーズ	I	II	III
項目			
スランブ (cm)	15±1		
水セメント比	0.50		
細骨材率	0.5, 0.7, 0.9	0.7	0.7
繊維混入率 (% vol.)	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0, 0.75, 1.5	1.28

表二 SFRC の調査条件

シリーズ	I	II	III
硬化前	スランブ (JIS A 1101) 空気量 (JIS A 1128) 単位容積重量 (JIS A 1116)		
硬化後	圧縮強度 (JIS A 1106) 曲げ強度 (JIS A 1114)		梁の耐力等 [*]
	長さ変化 (JIS A 1129: コンタクトゲージ法) 耐衝撃性能 [*]	長さ変化 (JIS A 1129: コンタクトゲージ法) 純引張強度 [*] 収縮ひびわれ抵抗性 [*]	

*) 本文中に詳述

表三 試験項目とその方法

2.3 実験結果とその検討

表四に、得られた調査および硬化前のコンクリートの物性についての例 (細骨材率=0.7) を示す。

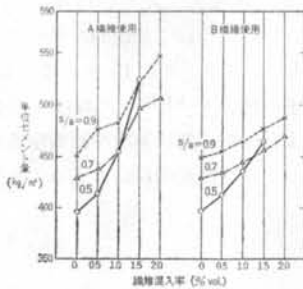
1) 調査

図一には、繊維混入率と単位セメント量の関係を示す。この図から、繊維混入率と単位セメント量はほぼ比例関係にあること、および A 繊維に用いた場合の単位セメント量は B 繊維に用いた場合に比べ大きくなり、その傾向は繊維混入率が大きいほど顕著になることが分かる。また、細骨材率については次のような傾向が見られる。すなわち、細骨材率が 0.7 と 0.9 の場合は、繊維混

調 合 No.	W /C	s /a	纖 維 混 入 率 (%)	単 位 水 量 (kg/m ³)	重 量(kg/m ³)			ス ラ ン プ (cm)	空 気 量 (%)	単 重 (kg/ℓ)	
					セ メ ン ト	砂	鋼 纖 維				
I-1			0	214	428	1108	493	0	15.0	3.4	2.20
I-2			0.5	219	437	1066	474	41	16.0	5.2	2.23
I-3	0.5	0.7	1.0	228	456	1041	464	71	15.0	5.0	2.27
I-4			1.5	249	497	985	441	118	15.5	3.5	2.32
I-5			2.0	253	507	977	436	145	14.5	3.0	2.33

注) A E減水剤をセメント重量に対して0.25%用いた

表一四 得られた調合および硬化前のコンクリートの物性 (A繊維使用)



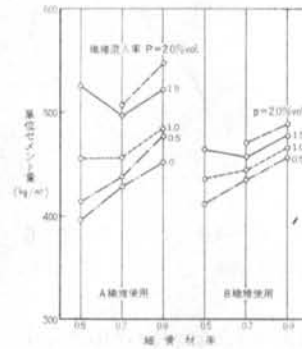
図一 纖維混入率と単位セメント量の関係

入率が増大するとき単位セメント量が大きくなる傾向がほぼ似かよっており、同じ纖維混入率についてみれば0.9の場合の方が0.7の場合より大きな単位セメント量になっている。これに対して、細骨材率が0.5の場合の纖維混入率と単位セメント量の関係は、0.9および0.7の場合とは幾分異なり、その勾配が急になっている。そして、細骨材率0.7と0.5の線が纖維混入率1%位のところで交叉していることから、纖維混入率が1%を越えた場合には細骨材率を大きくした方が、使用するセメント量は少なくなる傾向のあることが分かる。

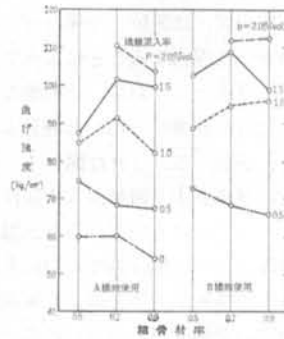
図二には、細骨材率と単位セメント量の関係を示す。この図は図一を細骨材率の面から見直したものである。図二から、纖維混入率が1%程度までの場合には、細骨材率を0.5とすると単位セメント量を最も小さくすることができ、纖維混入率を1.5%以上にした場合には、細骨材率を0.7程度にすることが単位セメント量を小さく抑える上で効果的であることが分かる。

図三には、細骨材率と曲げ強度の関係を示す。この図から、細骨材率は曲げ強度にそれ程大きな影響を与えないことが分かる。また、圧縮強度についても同様な傾向が得られている。

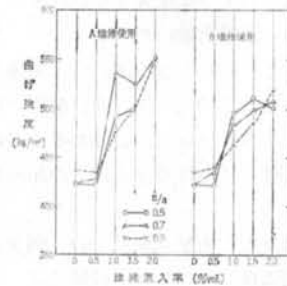
以上の検討の結果、スランプを15cmとしたSFRCの



図二 細骨材率と単位セメント量の関係



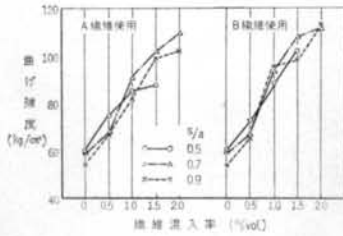
図三 細骨材率と曲げ強度(材令28日)の関係



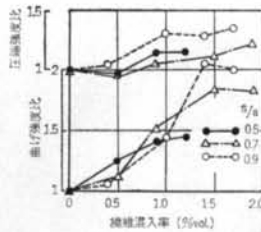
図四 纖維混入率と圧縮強度(材令24日)の関係

細骨材率の最適値は纖維混入率によって異なり、纖維混入率が1%程度の場合には0.5、1.5%以上の場合には0.7とすれば良いことが分かった。なお、このような細骨材率の最適値については小林²⁾もスランプ5cmおよび8cmのSFRCについて検討しており、スランプ8cmの場合、纖維混入率が1.0%のときには0.6、2.0%のときには0.8が最適であるとしている。今回のスランプ15cmの場合と比較検討してみると、スランプを大きくする方が最適細骨材率は小さくなる可能性のあることがうかがわれる。

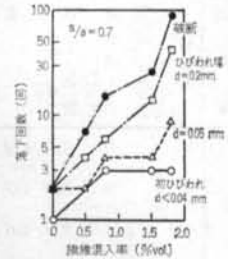
2) 物性



図一五 繊維混入率と曲げ強度
(材令28日)の関係



図一六 曲げ、圧縮強度(材令28日)
の繊維無混入コンクリートに対
する強度比(A繊維使用)



図一七 繰り返し衝撃試験結果
(A繊維使用)

図一四に繊維混入率と圧縮強度の関係を示す。この図から、繊維の種類にかかわらず繊維混入率と圧縮強度とは比例する関係にあること、および前節で述べたように細骨材率と圧縮強度の間には明瞭な関係はないことが分かる。また、繊維を2%混入することによって、圧縮強度は約100 kg/cm²大きくなっており、その強度増加の程度はA繊維を用いた方がB繊維を用いた場合より幾分大きい傾向のあることが分かる。これは図一で示したように、A繊維の方がB繊維より繊維混入率に伴うセメント量の増加量が大きいことにも関係があると思われる。

図一五には、繊維混入率と曲げ強度の関係を示す。この図から、曲げ強度は繊維混入率とほぼ直線関係のあること、繊維種類の違いや細骨材率の違いは曲げ強度にほとんど影響を与えていないことが分かる。

図一六には、曲げおよび圧縮強度の繊維無混入コンクリート(SFRCから繊維を除いたコンクリート)に対するSFRCの強度比を示す。この図から、繊維を加えることにより圧縮強度では最大3割、曲げ強度では最大10割程度の強度増大が得られることが分かる。この傾向は従来の硬練りSFRCにおける強度増大の傾向とほぼ等しいといえよう。

図一七には、繰り返し衝撃試験結果の一例を示す。この図から、繊維混入は初ひびわれの段階では、そのひびわれ抑制効果は余り顕著ではないが、ひびわれ幅が大きくなるに従って繊維混入率が大きいほどその効果が顕著になる傾向のあることが分かる。このような傾向は、細骨材率を変えてもほぼ同様であった。

なお、上記の図一四、五、七の各結果に対しては、直接比較検討のできる既往の研究は見当たらない。これは、SFRCのコンシステンシーを主体とした研究がまだ行われていないことによる。

3) 調合および物性からみた繊維形状の優劣

この実験で用いたA繊維とB繊維を比較すると、両者を用いた場合の強度(曲げ、圧縮)上の差はほとんどないが、所要スランブを15cmとするときに必要となる単

位セメント量は、A繊維の方がB繊維よりかなり大きくなる。このことから、B繊維(直径の大きいもの)の方がA繊維より実用上、優れているといえよう。

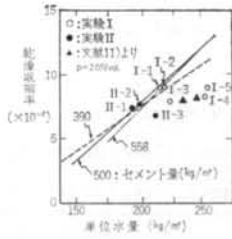
以上の検討により、所要スランブを15cmとしたSFRCの調合、および物性について基礎的なデータを得ることができた。そして、スランブを15cm程度にしても、繊維補強効果は従来の硬練りSFRCにおける場合とほぼ等しいこと、および圧縮・曲げ強度や耐衝撃性能は、繊維混入率と比例してほぼ直線的に向上することがわかった。

§ 3. 容積変化による収縮ひびわれ抵抗性(シリーズII)

3.1 実験の目的

SFRCの乾燥収縮については、これまで比較的多くの検討が行なわれているが、収縮ひびわれ抵抗性についての検討はそれ程多くない。森島他⁶⁾はスランブ8cm、水セメント比38%、繊維混入率0~2%のSFRCを用いたリング拘束乾燥収縮ひびわれ実験を行ない、鋼繊維のひびわれ制御効果は極めて大きいとしている。Elvery他⁷⁾は水セメント比60%、繊維混入率0~2%のSFRCで実験し、鋼繊維混入により著しく収縮ひびわれが低減すると報告している。Swamy他⁸⁾は水セメント比42%繊維混入率0.5~1.0%のSFRCについてリング拘束乾燥収縮ひびわれ実験を行ない、鋼繊維混入によりひびわれが分散し、貫通するようなひびわれを抑えることができるとしている。小林他⁹⁾は水セメント比53%、繊維混入率1~2%、膨張材添加量0~47 kg/m³のSFRCの拘束条件下(一軸拘束)における収縮性状を検討し、鋼繊維混入はひびわれを抑える上で効果があるが、膨張材を添加することによりその効果は大巾に改善されるとしている。

以上の研究のほとんどは、スランブが5~8cmの比較



図—10 セメント量、単位水量と乾燥収縮率の関係
(直線は Concrete Manual, 7th ed.¹⁰⁾ より)

れ、見掛け上は小さくなっていることが分かる。また、**図—10**にはスランプ 10 cm 程度の SFRC (繊維混入率 2%) の場合の結果¹¹⁾も示すが、今回得られた結果と同じ傾向にあることが分かる。

以下に、鋼繊維による乾燥収縮の拘束効果と、鉄筋によるそれとの簡単な比較検討を行なう。鉄筋の拘束により、見掛け上の乾燥収縮が減少する事実はすでに明らかになっており、コンクリートの応力を C (引張り \oplus)、鉄筋の応力を S (同)、コンクリートの弾性係数を E_c 、弾性係数比を n 、コンクリートの自由収縮を ϵ_0 、鉄筋比を p とし、弾性法則に従うとすれば、

$$C = pnE_c\epsilon_0 / (1 + pn) \quad S = -C$$

となる¹²⁾。

コンクリートの弾性ひずみを ϵ とすれば $\epsilon = C/E_c$ となり、鉄筋の存在するときの見掛け上の収縮ひずみを ϵ_R とすれば、 $\epsilon_R = \epsilon_0 - \epsilon$ となる。かりに、今回用いた供試体と同じ 10×10 cm の断面を有するコンクリートの中央に鉄筋 (1-D13) がある場合を想定すると、 $p = 1.27\%$ となる。一方、 $n = 10$ 、 $E_c = 2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ と仮定すれば、

$$C = 0.225 \times 10^5 \times \epsilon_0, \quad \epsilon = C/E_c = 0.1125 \epsilon_0$$

$$\therefore \epsilon_R = \epsilon_0 - \epsilon = 0.8875 \epsilon_0$$

となる。

クリープを考慮してクリープ係数を 2 とすると、引張弾性ひずみの倍は伸び得ることになるから、

$$\epsilon'_R = 3\epsilon \quad \therefore \epsilon'_R = \epsilon_0 - 3\epsilon = 0.6625 \epsilon_0$$

となる。

過去の実験結果によると、鉄筋による拘束についてはクリープ係数を 2 とした計算結果とほぼ一致している¹³⁾。

以上は、鉄筋による拘束の場合の検討結果であるが、鋼繊維による場合については**図—10**により検討してみる。**図—10** (シリーズ I では A 繊維, シリーズ II では B 繊維使用, 繊維混入率などについては表—5, 6 参照) で、調査 No I—4, I—5 の繊維混入による見掛け上の収縮ひずみ ϵ_R と自由収縮 ϵ_0 (文献 10) による値: **図—10** の直線で示される値とする) との比は $\epsilon_R = 0.63 \sim 0.68 \epsilon_0$ であり、調査 No I—3, II—3 は $\epsilon_R = 0.76 \sim 0.78 \epsilon_0$ である。繊維が 3 次元にランダムに分散されている場合の任意の一方方向に対する繊維配向係数を 0.41 とすると¹⁴⁾、繊維混入率が 2% のときでも一方方向に対する補強筋比 (鉄筋比) は $2\% \times 0.41 = 0.82\%$ 、1.5% のときは 0.62%、1% で 0.41% となる。すなわち、調査 No I—4, I—5 などの場合には $p = 0.82\%$ で $\epsilon_R = 0.63 \sim 0.68 \epsilon_0$ となっている。これを上記の鉄筋による拘束の場合 ($p = 1.33\%$ で $\epsilon'_R = 0.6625 \epsilon_0$) と比較してみると、一方方向に対する収縮拘束効果は、鋼繊維の方が鉄筋の場合より大きい傾向のあることが分かる。

以上の検討結果を活用する方法として、鋼繊維を任意の方向に配列させる工法¹⁵⁾などを採用すれば、少ない繊維混入率 (鉄筋比 p) でコンクリートの乾燥収縮を鉄筋による場合よりも効果的に低減させることが可能になる。なお、**図—10**でシリーズ I の結果の方が II の場合より同じ単位水量に対する乾燥収縮率が小さい傾向が見られるのは、繊維種類の違いによるものと思われる。すな

調査No	繊維混入率 (%)	鉄筋の有無	供試体 No	発生したひびわれ			参考図				
				幅 (mm)	長さ (mm)	(平均)	備考	±mm	$C_c (\times 10^{-4})$	$A_c (\times 10^{-4})$	$C_c/A_c (\times 10^{-1})$
II-1	0	無	1	0.15-0.30	79.5	(49.8)	貫通	84	4.9	1.5	3.4
			2	0.20-0.35	110	貫通	56	4.6	2.0	2.6	
		有	1	0.04-0.10	32	(31.5)	ほぼ貫通	56	4.6	1.4	3.2
			2	0.04-0.15	31	貫通	42	3.7	1.4	2.3	
II-2	0.75	無	1	0.04-0.10	23	(49.0)	貫通していない	—	—	—	—
			2	0.10-0.25	75	貫通	41	3.7	1.5	2.2	
		有	1	0.04-0.06	12	(14.0)	ほぼ貫通	28	3.5	1.4	2.1
			2	0.04-0.06	16	貫通していない	50	4.3	1.4	2.9	
II-3	1.50	無	1	0.04-0.25	55	(49.5)	貫通していない	28	3.2	1.7	1.5
			2	0.04-0.20	44	貫通していない	—	—	—	—	
		有	1	0.04-0.10	15	(11.5)	貫通	—	—	—	—
			2	0.04以下	8	表面のみ	—	—	—	—	

*1) N は鉄筋無し, S は有りを表わす。

表—7 一軸拘束収縮ひびわれ試験結果

る。SFRCを梁に用いた検討結果は、これまで幾つか公表されている。

山川他¹⁶⁾は梁せいの低いSFRC梁供試体の曲げ試験を行っており、繊維混入率が高いほどひびわれ発生荷重が大きいことや、設計荷重時の鉄筋応力やひびわれ幅は、繊維混入率が高いほど小さいことを示している。また、小林他¹⁷⁾はせん断スパン比を変えたSFRC梁の実験を行っており、鋼繊維を0.3%混入すればスタラップと同等のせん断補強効果が得られるとしている。一方、Williamson他¹⁸⁾は実物大の梁よりSFRCのせん断補強効果を検討しており、その結果によれば“鋼繊維を1.5%混入したスタラップのない梁は、通常スタラップを有し、鋼繊維を混入しない梁よりもせん断耐力が劣る”としている。その他にもいくつかの研究^{19)~23)}があるが、それらはどれも比較的硬練りのSFRC（一般にスランプ5~8cm程度）についてのものが多い。そこで、ここでは比較的軟練りのSFRCを用いた梁について曲げ試験を行ない、SFRCの曲げおよびせん断耐力への効果について検討することにした。

4.2 実験結果

1) 使用した材料とコンクリートの調合

使用した材料を表一1に示す。なお、鉄筋は引張主筋にSD30-D16を、スタラップにはSR30-φ19を用いた。

また、コンクリートはブレンコンクリートとSFRCの各1種類とした。なお、この実験では梁における繊維補強効果を主に検討するために、ブレンコンクリートはSFRCから繊維を除いた調合とした。そのため、ブレンコンクリートのスランプは15cmにはなっていない。調合を表一9に示す。

2) SFRCの練り混ぜ

この実験においては、シリーズI、IIと異なり、SFRCの調合を事前に決めておいたので、練り混ぜは次の方法で行なった。すなわち、まず所定の水セメント比を有するブレンコンクリートを練り、それに所定量の鋼繊維を混入する方法をとった。なお、この実験で用いたミキサは、シリーズIで用いたものと同じである。

3) 試験項目とその方法

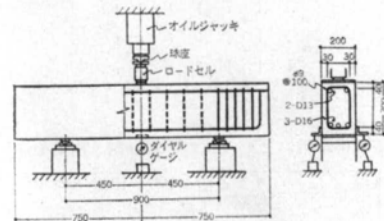
表一3に試験項目とその方法を示す。梁の耐力試験の詳細を以下に述べる。

供試体の形状・寸法および配筋方法を図一14に示す。荷重方法は、せん断力に対するSFRCの効果を知るところを第一の目的として、図一14に示すようにスパン90cmの中央集中荷重とした。供試体の種類は表一10に示す4

コンクリート種類	スランプ(cm)	水セメント比	細骨材率(% vol.)	繊維混入率(% vol.)	単位水量(kg/m ³)	重量(kg/m ³)			
						セメント	砂	砂利	鋼繊維
ブレン	21	0.5	0.7	0	220	440	1105	485	0
SFRC	15	0.5	0.7	1.28	216	432	1080	475	100

注) AE減水剤をセメント重量に対して0.25%用いた

表一9 コンクリートの調合

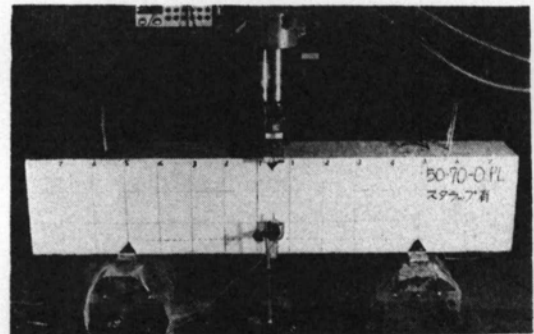


図一14 梁供試体の形状・寸法と荷重方法

供試体記号*	補強材	繊維混入率(% vol.)	スタラップ
PL-NOST		0	無
PL-ST		0	有
SFRC-NOST		1.28	無
SFRC-ST		1.28	有

*) PL: ブレンコンクリート
SFRC: 鋼繊維補強コンクリート
NOST: スタラップなし
ST: スタラップあり

表一10 梁供試体の種類



写真一1 供試体をセットした状態

種類とし、1種類につき2供試体を試験した。引張鉄筋比は全て1.24%とした。あばら筋比は、スタラップを用いたときには斜張力破壊を生じないように設計として0.64%とした。加力試験時における測定項目と測定方法は次のとおりである(写真一1参照)。

i) 供試体中央点のたわみ量: 電動式ダイヤルゲージ(精度1/100mm, ストローク20mm)を使用し、図一

物 性 コンクリート種類	まだ硬まらないコンクリートの物性			材令28日強度 (kg/cm ²)	
	スランプ (cm)	空気量 (%)	単 重 (kg/ℓ)	圧縮強度	引張強度
プレーン	20.5	5.6	2.19	331.58	7.36.1
SFRC	16.0	7.0	2.21	283.82	1.41.5

注) 強度は供試体3本の平均値を示す

表-11 コンクリートの物性

鉄 筋 種 類	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)
主筋 (SD30-D16)	36	54	27
スターラップ (SR30-φ9)	35	51	33

表-12 鉄筋の引張試験結果

14に示す位置で測定しX-Yレコーダに記録した。

- ii) 引張鉄筋のひずみ; 3本の引張鉄筋のうち、真ん中に位置する鉄筋の中央点にストレインゲージを貼りつけ、ひずみをX-Yレコーダで記録した。
- iii) ひびわれ発生状況; ひびわれ発生状況の測定は加力スパン内に限定した。また、引張鉄筋の側面位置を通った全てのひびわれ幅を、クラックスケールで各荷重段階ごとに測定した。なお、ひびわれ発生が肉眼で認められたときの荷重を、可視ひびわれ発生荷重とした。

なお、梁供試体の載荷試験は材令28日で行なった。

供試体 記号	実 験 値 (t)						破 壊 形 態	計 算 値 (t)			
	可視ひびわれ発生荷重		終局荷重		平均	曲 げ 耐 力		せん断耐力			
	平均	平均	平均	平均		ひびわれ荷重		終局荷重	ひびわれ荷重	終局荷重	
PL-NOST-1	4	9	21.9	21.9	斜張力破壊	7.2 ^{*3)}	21.5 ^{*4)}	13.0 ^{*6)}	19.7 ^{*7)}		
PL-NOST-2	5	9	22.0	21.9	同上						
PL-ST-1	5	9	23.2	24.1	曲げ破壊	7.9 ^{*3)}	24.6~26.2 ^{*5)}	14.8 ^{*8)}	30.9 ^{*7)}		
PL-ST-2	3	8	25.0	24.1	同上						
SFRC-NOST-1	9	12	26.4	23.7	曲げ破壊	7.9 ^{*3)}	24.6~26.2 ^{*5)}	14.8 ^{*8)}	20.5 ^{*9)}		
SFRC-NOST-2	6	14	21.0	23.7	斜張力破壊						
SFRC-ST-1	9	16	28.0	27.6	曲げ破壊	7.9 ^{*3)}	24.6~26.2 ^{*5)}	14.8 ^{*8)}	31.8 ^{*9)}		
SFRC-ST-2	8	16	27.1	27.6	同上						

注: *1) “曲げひびわれ”は、加力点近傍の供試体下端面から生じるひびわれを指す

*2) “斜めひびわれ”は、斜張力によって供試体側面に斜めに発生するひびわれを指す

*3) 式(1)により求めた。 *4) 式(6)により求めた。 *5) 式(2)により求めた。 *6) 式(7)により求めた。

*7) 式(8)により求めた。 *8) 式(9)により求めた。 *9) 式(10)により求めた

表-13 梁供試体に関する実験値と計算値

4) 供試体の製作と養生方法

梁供試体の製作および養生方法は、シリーズIIの拘束収縮ひびわれ発生試験用供試体と同じ方法によった。ただし、強度測定用のシリンダ(φ10×20cm)は型枠を脱型しないまま、試験材令まで梁供試体と同じ室内に放置した。

4.3 実験結果とその検討

1) コンクリートおよび鉄筋の物性

表-11に得られたコンクリートの物性を、表-12に鉄筋の引張試験結果を示す。SFRCの圧縮強度がプレーンコンクリートの場合よりやや小さいのは、SFRCの空気量が大きくなったことが一因と考えられる。

2) 可視ひびわれ発生荷重および終局荷重

表-13に実験結果を示す。この表から次の知見が得られた。可視ひびわれ発生荷重については曲げひびわれ、斜めひびわれともにスターラップの効果はほとんど認められないが、繊維の効果は顕著であり、曲げひびわれにおいては約90%、斜めひびわれにおいては約70%の荷重増大がみられた。終局荷重についてはスターラップと繊維の両方の補強効果が認められ、両方用いていない場合(PL-NOST)は21.9tであった終局荷重が、両方用いた場合(SFRC-ST)には27.6tになっている。しかし、この場合の荷重増大の割合は最大で25%程度であ

り、可視ひびわれ発生荷重時ほどの補強効果はみられなかった。これは可視ひびわれ発生荷重が、曲げ強度やせん断強度など繊維補強効果が反映されやすいコンクリート物性によって左右されるのに対し、終局荷重は繊維補強の効果の余り出ないコンクリートの圧縮強度や鉄筋の耐力などに左右されるためと考えられる。

3) 荷重-たわみ曲線

図一15に荷重 P と梁中央点のたわみ δ の関係を示す。この図から、梁の剛性（弾性域における勾配）は繊維混入により大きくなるのが分かる。これは、繊維を混入することにより一般にコンクリート（SFRC）の弾性係数が幾分大きくなることと、梁の引張側の繊維が梁の剛性に大きく寄与しているためと考えられる。

4) 荷重-引張鉄筋のひずみ

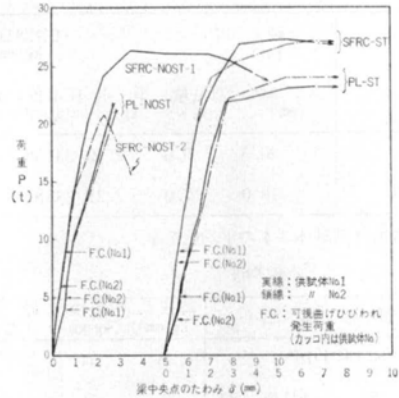
図一16に荷重とスパン中央点での引張鉄筋のひずみの関係を示す。この図から、鉄筋のひずみはプレーンコンクリート梁の可視ひびわれ発生荷重（3~5 t）まではいずれの梁もほぼ似かよっているが、それ以降になるとSFRCを用いた方がプレーンコンクリートを用いた梁より小さい。これは、すでに述べたように梁の引張側の繊維が寄与しているために、鉄筋に生じるひずみが小さくなっているものと考えられる。また、同様の理由から鉄筋が降伏する荷重も、SFRC梁の方がプレーンを用いた場合より大きくなっている。

5) ひびわれ性状

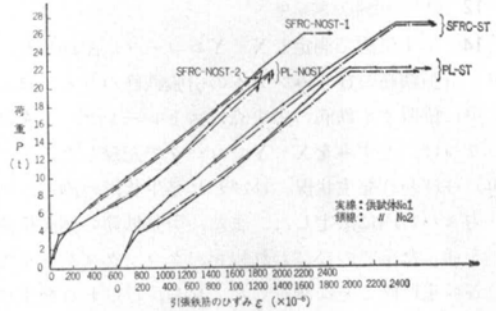
図一17に荷重と最大ひびわれ幅（2供試体の平均値）の関係を、図一18に荷重とひびわれ幅総計（同平均値）の関係を示す。これらのひびわれ幅は、全て引張鉄筋位置で測定したものである。図一17, 18から、繊維を混入すると最大ひびわれ幅、およびひびわれ幅総計がかなり減少することがわかる。ひびわれ幅は本来、引張鉄筋のひずみと相関関係があると思われるが、図一16と図一17、および図一18を比べてみると、繊維の混入によって生じるひびわれ幅の低減の方が、引張鉄筋のひずみの減少よりかなり大きいことが分かる。このような差異が生じた理由としては、繊維の混入によってSFRC梁のひびわれが分散し、多くの微細なひびわれが目視観察ではとらえられなかったことが考えられる。

6) 破壊形態

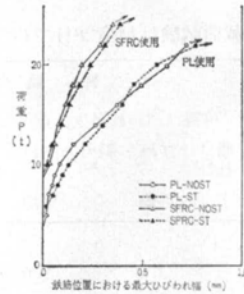
表一13に破壊形態を、図一19に試験終了後の供試体の状態を示す。プレーンコンクリートでスターラップを用いない供試体（PL-NOST）では、まず曲げひびわれが入り（ $P=3\sim 5$ t）、ついで斜めひびわれが入って（ $P=8\sim 9$ t）、その後、荷重の増大に伴ってそれぞれのひびわれが伸展し、最終的には斜めひびわれが大きく口を開く



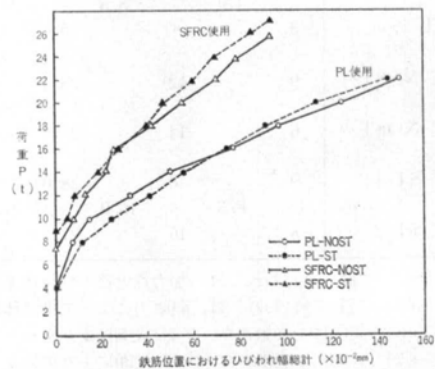
図一15 荷重-たわみ曲線



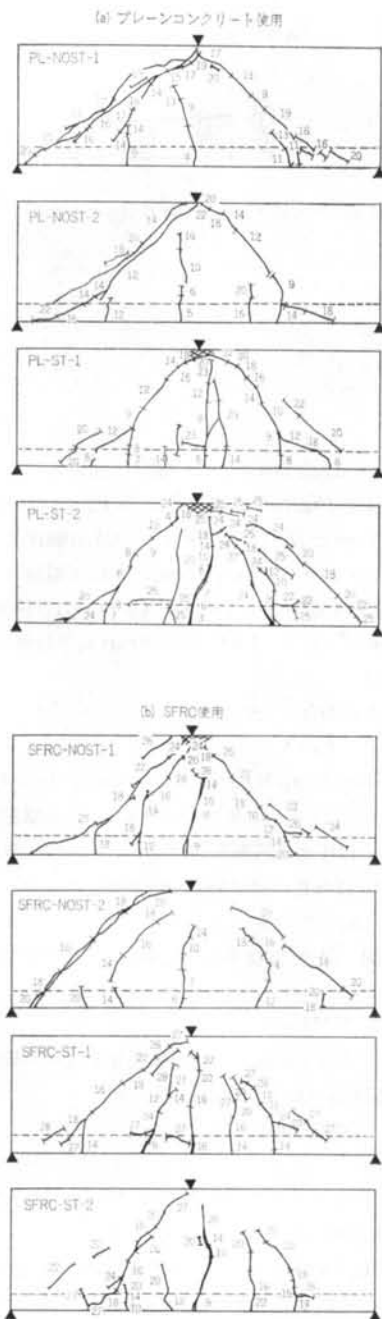
図一16 荷重と引張鉄筋のひずみの関係



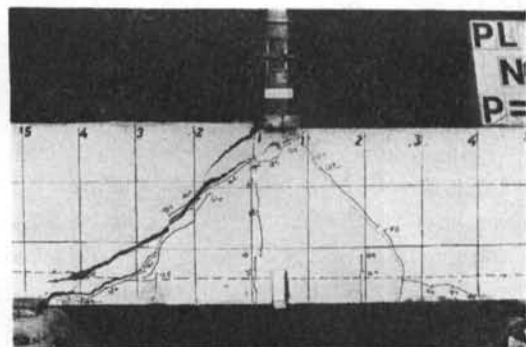
図一17 荷重と最大ひびわれ幅の関係



図一18 荷重とひびわれ幅総計の関係



図一19 試験終了後の供試体の状態
斜張力破壊の形態を示した(写真一2)。これに対し、プレーンコンクリートにスターラップを用いた場合(PL-ST)には、可視斜めひびわれはPL-NOSTの場合とほぼ同じ荷重で入ってもその後ほとんど伸展せず、曲げひびわれだけが伸展して曲げ破壊の形態を示した。



写真一2 斜張力破壊の例

一方、スターラップの代りに繊維を用いた SFRC-NOST では、PL-ST に比べて可視ひびわれ発生荷重が曲げひびわれ、斜めひびわれともに大幅に向上し、繊維補強の効果が明瞭であった。また、終局荷重においては、2 供試体のうちの 1 体 (SFRC-NOST-1) はスターラップを有する PL-ST と同じ曲げ破壊となり、終局荷重も PL-ST を上回って繊維がスターラップを代替しうる可能性を示している。しかし、これに対してもう 1 体 (SFRC-NOST-2) は斜張力破壊を示し、終局荷重もかなり小さくなった。このような事態が生じた原因は、繊維の分散の不均一にあると思われる。

繊維とスターラップの両方を用いた SFRC-ST においては、両者の相乗効果により可視ひびわれ発生荷重や終局荷重が大きくなっただけでなく、終局荷重到達後も圧縮域のコンクリートが繊維補強効果により崩壊・剝落しないために、他の供試体とは異なり終局荷重到達後も急激な耐力低下は起らず、極めて大きな靱性を有することが確認できた。

以上の検討の結果、スランブ 15 cm の SFRC を用いた梁の基礎的性状を把握することができた。ここで得られた結果は、比較的硬練りの SFRC を用いた既往の実験結果¹⁶⁾²⁰⁾²²⁾ とほぼ同様の傾向を示している。

4.4 曲げひびわれモーメントなどの推定式の検討

SFRC を用いた梁の曲げやせん断の終局耐力の推定式については、これまで二、三の提案²¹⁾²²⁾²³⁾があるが、それらは計算が複雑であったりして、まだ確立されたものは存在しないようである。そこで、ここでは前節で得られた結果を用いて終局耐力だけでなく、ひびわれ耐力についても比較的簡単に計算できる推定式を検討する。

1) 曲げひびわれモーメント

SFRC 梁の曲げひびわれモーメント $sFM_c(\text{kg/cm}^2)$ は式(1)²⁴⁾によって求めることができる。その理由は、式の

中にコンクリートの引張強度 f_{ct} (kg/cm²) が入っており、SFRCの特長である引張強度の向上が計算結果に反映しうるのである。

$$s_{F}M_c = 1.5f_{ct} \frac{I_g}{(h-g)} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 I_g は鉄筋コンクリート断面の等価断面 2 次モーメント (cm⁴)、 h は断面の全せい (cm)、 g は重心から圧縮縁までの距離 (cm) である。式(1)を用いて計算した曲げひびわれ荷重を表-13に示す。実験値と比較すると、SFRCの場合は比較的良く一致している。ただ、一般にひび割れ荷重の計算値と実験値の一致は、あまり期待できないとされている²⁴⁾。それは、コンクリートの収縮により荷重以前にコンクリートに引張りの元応力が存在するなどの理由による。

2) 曲げ終局モーメント

ブレンコンクリートを用いた梁では、引張ゾーンのコンクリートは曲げモーメントを計算する上では無視している。しかし、SFRCを用いた梁においては、ひびわれ発生後の SFRC の引張強度をいかに見込むかが、曲げ終局モーメントを求める上でのポイントになる。

SFRC の純引張試験を剛性の高い試験機を用いて行なうと、図-20に示すような引張応力-変位関係が得られることはすでに明らかになっている²⁵⁾。また、図-20の“ひびわれ発生後強度 σ_{pc} ” は、筆者の研究²⁶⁾により繊維の引抜き試験を行えば簡単に求められることが分かっている。

図-20に示すように、変位Aでマトリックスが破断した後、繊維の引抜きによって負担される引張応力は、変位が大きくなるに従って徐々に低下する。そして、変位がある程度まで大きくなると、図-20に示すように、“引張応力-変位の曲線とx軸に囲まれる面積”と“ $y = \sigma_{pc}$ とx軸に囲まれる面積(図-20の斜線部分)”は等しくなることが考えられる。以上の状況を考慮して、SFRC 梁の曲げ終局モーメント $s_{F}M_u$ を求めてみる。まず、“SFRC 梁の引張ゾーンで、SFRC に生じる応力は一様に σ_{pc} になる”と仮定する。そうすると、梁の断面に生じる応力は図-21の“◎等価合力”に示すように考えることができる。この◎図より、 $s_{F}M_u$ は式(2)によって求められる。なお、モーメント算定においては、図-21に示すように平面保持の仮定が成立するものとし、またコンクリートの圧縮応力のストレスブロックはACI 規準²⁷⁾によるものとする。

$$s_{F}M_u = A_{st}\sigma_{sy}(d-\alpha) + \sigma_{pc}b(h-c) \left(\frac{h+c-2\alpha}{2} \right) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 A_{st} は引張鉄筋断面積 (cm²)、 σ_{sy} は引張鉄

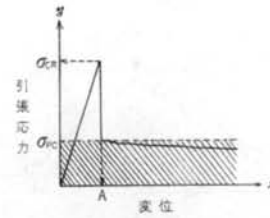


図-20 SFRC の純引張試験における引張応力と変位の関係

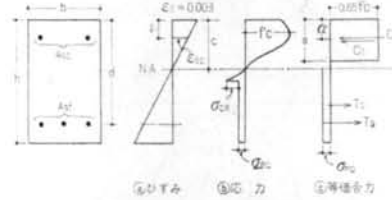


図-21 終局状態におけるひずみと応力の状態

筋の降伏強度 (kg/cm²)、 h 、 d は梁の全せい (cm) および有効高さ (cm)、 b は梁幅 (cm)、 c は中立軸深さ (cm)、 σ はストレスブロックの深さ (cm)、 α は圧縮縁から圧縮鉄筋力 C_s と圧縮コンクリート力 C_c の合力の位置までの距離 (cm)、 σ_{pc} は SFRC のひびわれ発生後強度 (kg/cm²) を表わす。

一方、力の釣合い条件から、

$$T_s + T_c = C_s + C_c$$

$$\therefore A_{st}\sigma_{sy} + \sigma_{pc}b(h-c) = 0.85f'_c ab + A_{sc}^2 s_{sc} E_s \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 f'_c はコンクリート (SFRC) の圧縮強度 (kg/cm²)、 A_{sc} は圧縮鉄筋断面積 (cm²)、 s_{sc} は圧縮鉄筋のひずみ、 E_s は鉄筋の弾性係数 (kg/cm²) を表わし、その他は式(2)と同じである。

また、図-21の“◎ひずみ”の図から次式が成り立つ、

$$\frac{c-l}{c} = \frac{\epsilon_{sc}}{0.003} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 l は圧縮縁から圧縮鉄筋重心までの距離 (cm)、 ϵ_{sc} は圧縮鉄筋のひずみを表わす。

さらに、ACI 規準²⁷⁾から、

$$a = \beta_1 c \quad \dots\dots(5)$$

なお、 β_1 はコンクリートの強度 f'_c が 280 kg/cm² < $f'_c \leq 350$ kg/cm² のとき、 $\beta_1 = 0.80$ となる。

式(3)、(4)、(5)から a 、 c 、 α を求め、それらを式(2)に代入することによって $s_{F}M_u$ を求めることができる。

今回の実験条件について $s_{F}M_u$ を計算してみる。なお、今回は繊維の引抜き試験を行っていないので筆者の研究²⁶⁾で得られた値を参考にする。文献²⁶⁾の実験条件と得られた結果の概要を表-14に示す。表-14の値と今回の実験条件を比較すると、水セメント比、繊維混入率、繊維形状などが幾分異なり、もし今回の調合の SFRC について σ_{pc} を求めれば、表-14の値より幾分小さな値

実験条件	用いた繊維	せん断繊維 (SS41, 0.3×0.6×25.4mm)
	SFRCの割合 (kg/m ³)	水: 224, セメント: 495, 砂: 1040, 砂利: 569 (水セメント比0.45, 繊維混入率1.5% vol.)
実験結果	引張強度 σ_{CR}	=45.7 kg/cm ² , ひびわれ発生後強度 σ_{pc}
		=15.2 kg/cm ² (σ_{pc} の計算値は 16.0 kg/cm ²)

表一14 文献26)におけるSFRCの純引張試験の概要

になることが考えられる。そこで、今回のSFRCによる σ_{pc} の最大値を15.0 kg/cm²、最小値を10.0 kg/cm²と仮定して $s_f M_u$ を計算し、その値を用いて曲げ終局荷重を求めると、各々26.2 kg/cm² ($\sigma_{pc}=15.0$ kg/cm²のとき)および24.6 kg/cm² ($\sigma_{pc}=10.0$ kg/cm²のとき)となった(表一13)。この計算結果は、曲げ破壊を生じたSFRC梁の実験値の90~95%程度の値となっている。一方、従来のプレーンコンクリート梁の曲げ終局モーメント M_u は次式によって求められる。

$$M_u = 0.9 A_{st} \sigma_{sy} d \quad \dots\dots(6)$$

(記号は式(2)と同じ)

式(6)を用いて計算した曲げ終局荷重は21.5 kg/cm²となった。これは実験値の80%程度となっており、上記の結果に比べて推定精度の悪いことが分かる。

以上の検討から、SFRCのひびわれ発生後強度を考慮に入れた式(2)を用いることによって、比較的精度良く、SFRC梁の曲げ終局モーメントを推定できる可能性のあることが分かった。今後はデータの蓄積を待って、さらに簡便で、しかも精度の良い推定式に改良して行く必要がある。

3) せん断ひびわれ耐力およびせん断終局耐力

プレーンコンクリートを用いた梁のせん断ひびわれ耐力 Q_c (kg)は式(7)によって、また、せん断終局耐力 Q_u (kg)は式(8)によって計算できる²⁹⁾。これらの式はともに実験式である。

$$Q_c = k_c \frac{0.074(f_c' + 500)}{M/Qd + 1.70} bd \quad \dots\dots(7)$$

$$Q_u = \left\{ k_u \cdot k_p \frac{0.10(f_c' + 180)}{M/Qd + 0.12} + 2.4\sqrt{p_w \cdot \sigma_y} \right\} bd \quad \dots\dots(8)$$

ここで、 k_c 、 k_u は梁せい寸法による補正係数、 k_p は引張鉄筋比による補正係数、 M/Qd はせん断スパン比、 b は梁の幅(cm)、 p_w はせん断補強筋比、 σ_y はせん断補強筋の降伏強度(kg/cm²)、 f_c' はコンクリートの圧縮強度(kg/cm²)を表わす。

式(7)、(8)には、コンクリートの物性としては圧縮強度しか入っていない。そのため“圧縮強度より、曲げ、せ

ん断、引張強度などに繊維補強の効果が著しいSFRC”を用いた梁のせん断耐力を式(7)、(8)によって計算すると、実験値より小さい計算結果を得る。(試みに、SFRC—NOST—2の終局荷重について検討してみると実験値は21.0 kg/cm²であるのに対し、式(7)を用いた計算値は17.8 kg/cm²である。)

SFRCを用いた梁のせん断耐力を推定するために、式(7)、(8)のコンクリート強度を表わす部分に、“SFRCの強度上の特長を適切に反映する係数 k_f ”を掛けた式を用いることが考えられる。式(7)を書き直すと、

$$Q_c = k_c \frac{7.4 \left(\frac{f_c'}{100} + 5 \right)}{M/Qd + 1.70} bd$$

上式の $\left(\frac{f_c'}{100} + 5 \right)$ の部分は、建築学会RC計算規準²⁹⁾で規定するコンクリートの長期許容せん断力である。コンクリートに繊維を混入してSFRCとすると、せん断強度(2面せん断強度)はかなり向上する(曲げ強度における強度向上の程度とほぼ等しい³⁰⁾)。そこで、 k_f として“繊維混入によって得られるせん断強度増加倍率=(SFRCのせん断強度)/(SFRCから繊維を除いたベースコンクリートのせん断強度)”をとり、それを $\left(\frac{f_c'}{100} + 5 \right)$ の部分に係数として掛けることが考えられる。しかし、梁に生じる斜めひびわれはせん断力そのものによって生ずるのではなく“部材に働く直応力とせん断応力の合力である主引張応力”によって生じるとされている。このことからみると、 k_f をせん断強度増加倍率とするよりも、“SFRCとすることによって得られる引張強度増加率”とした方が適切と思われる。

以上の検討から、SFRC梁のせん断ひびわれ耐力 $s_f Q_c$ (kg)、およびせん断終局耐力 $s_f Q_u$ (kg)は次式で推定できると考えられる。

$$s_f Q_c = k_f \cdot Q_c = k_f \cdot k_c \frac{0.074(f_c' + 500)}{M/Qd + 1.70} bd \quad \dots\dots(9)$$

$$s_f Q_u = \left\{ k_f \cdot k_u \cdot k_p \frac{0.10(f_c' + 180)}{M/Qd + 0.12} + 2.4\sqrt{p_w \cdot \sigma_y} \right\} bd \quad \dots\dots(10)$$

ここで、 k_f はSFRCとすることによって得られる引張強度増加倍率で次式で表わされる。その他は式(7)、(8)と同じである。

$$k_f = s_f \sigma_t / \sigma_{st}$$

ここで、 $s_f \sigma_t$ はSFRCの純引張強度、 σ_{st} はベースコンクリート(SFRCから繊維を除いたコンクリート)の引張強度を表わす。

式(9)、(10)を用い、今回の実験条件について計算したひびわれ荷重および終局荷重の結果を表一13に示す。ひび

われ荷重、終局荷重（斜張力破壊を示した SFRC—NOST—2 のみ適用可能）はともに実験値と比較的良好一致している。

上記の検討は、実験式を基にした一つの試みであり、今後データの集積をまわって、さらに検討を進めることが望まれる。

§ 5. まとめ

スランブを 15 cm とした SFRC について総合的に検討した結果、以下の知見が得られた。

1) 調合および基礎的物性について

i) スランブを 15cm と一定にした場合、繊維混入率を増やすと、それにほぼ比例してセメント量も増やす必要がある。また、繊維混入率を一定にした場合、単位セメント量は細骨材率によって変動し、単位セメント量を最小にする細骨材率が存在する。

ii) 繊維混入率は圧縮、曲げ強度とほぼ比例関係にある。細骨材率は強度にほとんど影響を与えない。

iii) 圧縮、曲げ強度に対する繊維補強効果は、硬練りの SFRC の場合と変わらない。

iv) 繰り返し衝撃試験の結果、初ひびわれの段階では繊維によるひびわれ抑制の効果は余り顕著ではないが、ひびわれ幅が大きくなるに従って効果が明らかになる傾向が認められた。

v) 繊維の細長比が調合や強度性状に与える影響について検討したところ、細長比の小さなもの (0.5×0.5×30 mm, 細長比 53) の方が、大きなもの (0.3×0.3×30 mm, 細長比 100) より総合的にみて優れていることが分かった。

2) 容積変化による収縮ひびわれ抵抗性について

i) 繊維混入率が 1% vol. を越えると、乾燥収縮は繊維によって拘束され、見掛け上小さくなる。鉄筋と繊維の拘束効果を比較すると、繊維が 3 次元ランダムに分散している場合は鉄筋の方が拘束効果は大きい。繊維を一方に配向させる工法をとった場合は繊維の方が大きくなる。

ii) 一軸拘束収縮ひびわれ試験を行なった結果、鉄筋の有無にかかわらず、繊維混入率が増大するにつれて、

ひびわれ幅、ひびわれ面積、貫通ひびわれの発生率が小さくなる傾向のあることが分かった。また、鉄筋と繊維の両方を用いると、ひびわれ拘束効果は大幅に向上する。

iii) 2 辺拘束収縮ひびわれ試験を行なった結果、繊維無混入の場合は比較的幅の大きなひびわれ (0.1~0.3 mm) が入ったのに対し、繊維混入率が 1.5% vol. の場合には幅の小さい (0.06 mm 以下) 多数のひびわれが入ったことから、繊維混入によるひびわれ分散効果のあることがわかった。

3) 梁への適用について

i) 可視ひびわれ発生荷重および終局荷重は、ともに SFRC を用いることによって向上するが、特に可視ひびわれ発生荷重における向上の程度が著しかった。

ii) 梁の剛性 (弾性域における勾配) は、SFRC を用いることによって大きくなった。また、引張鉄筋のひずみは、荷重を同一とした場合、プレーンコンクリートを用いた場合より SFRC を用いた場合の方が小さくなった。

iii) 梁に生じる“最大ひびわれ幅”および“ひびわれ幅の総計”は、SFRC を用いることによって低減した。

iv) SFRC (繊維混入率 1.28% vol.) を用いたスターラップなしの梁を 2 体試験したところ、1 体は“プレーンコンクリートにスターラップ (補強筋比 0.64%) を用いた供試体”とほぼ同じ性状を示し、繊維がスターラップに代替しうる可能性を示した。しかし、もう 1 体は斜張力破壊を生じ終局荷重も低い結果で終わった。このような違いが生じたのは、繊維の分散が不均一であるためと考えられる。

v) SFRC を用いた梁の耐力推定式について検討し、曲げひびわれモーメントについては式(1)、終局曲げモーメントについては式(2)、せん断ひびわれ耐力については式(9)、せん断終局耐力については式(10)を提案した。

以上の検討の結果、建築現場に打設可能な SFRC について、その調合、物性、部材としての性能などに関する基礎的な知見を得ることができた。今後は、同程度のスランブを有する一般的なコンクリート (細骨材率 45% 内外、粗骨材粒径 20~25 mm のコンクリート) との性能の比較などを行ない、建築用コンクリートの中での SFRC の位置づけを明確にして行くことが望まれる。

<参考文献>

- 1) 熊谷敏男他：“スランプ15cmコンクリートの打設施工” 清水建設研究所報 第23号（1974年10月）
- 2) 小林一輔他：“鋼繊維補強コンクリートのコンシステンシーに関する実験的研究” 生産研究 28巻2号（1976年2月）
- 3) 太田実，小林保他：“鋼繊維補強AEコンクリートの配合に関する若干の実験” コンクリート工学 Vol.16, No.10（1978年10月）
- 4) B.P. Hughes 他：“The Workability of Steel Fiber Reinforced Concrete” Magazine of Concrete Research, Vol.28, No.96（Sept.1976）
- 5) R.N. Swamy 他：“Some Properties of High Workability Steel Fiber Concrete (RILEM Symposium 1975, Fiber Reinforced Cement & Concrete)” Construction Press
- 6) 森島 清他：“スチールファイバーを混入した高強度コンクリートの性状” セメント技術年報（1974）
- 7) R.H. Elvery 他：“Reduction of Shrinkage Cracking in Reinforced Concrete due the Inclusion of Steel Fibers” (RILEM Symposium 1975, Fiber Reinforced Cement & Concrete)”
- 8) R.N. Swamy 他：“Influence of Fiber Reinforced Cement on Restrained Shrinkage and Cracking” ACI Journal (Mar. 1979)
- 9) 小林一輔他：“鋼繊維補強コンクリートの乾燥収縮に関する研究(2)——拘束条件下における 収縮性状——” 生産速報 31巻12号（1979年12月）
- 10) U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation: “Concrete Manual (7th edition)” (1963)
- 11) 大浜嘉彦他：“鋼繊維補強コンクリートの基礎性状” 日本建築学会大会梗概集（昭和53年9月）
- 12) 横尾他：“鉄筋コンクリート構造の収縮亀裂の類型とそれに対する若干の考察（その2；考察）” 日本建築学会近畿支部研究報告集（昭和31年2月）
- 13) 中西正俊：“鉄筋コンクリートの収縮ときれつ（その1）” 清水建設研究所報 第10号（昭和42年10月）
- 14) J.P. Romualdi: “Mechanics of Crack Arrest in Concrete” J. of Eng. Mechanics Div., ASCE (June 1963)
- 15) D.J. Hannant: “Steel Fiber Reinforced Mortar; a Technique for Producing Composites with Uniaxial Fiber Alignment” Mag. of Conc. Res., Vol. 26, No.86 (Mar.1974)
- 16) 山川純雄他：“スチールファイバー入り鉄筋コンクリート梁の力学特性” 第29回土木学会大会梗概集（昭和49年10月）
- 17) 小林一輔他：“鋼繊維による鉄筋コンクリート梁のせん断補強効果” 第33回土木学会大会梗概集（昭和50年10月）
- 18) G.R. Williamson: “Full Scale Fiber Beam Tests” [出典は5)と同じ]
- 19) H.A. Kormeling 他：“Static and Fatigue Properties of Concrete Beams Reinforced with Continuous Bars and with Fibers” ACI Journal (Jan.-Feb. 1980)
- 20) 穴戸 薫他：“鋼繊維補強鉄筋コンクリート梁の曲げ性状” 日本コンクリート工学協会大会梗概集（第1回）（昭和52年）
- 21) 南荘 淳他：“鋼繊維補強コンクリートを用いた RC デープビームの力学的挙動について” 第33回土木学会大会梗概集（昭和53年）
- 22) O.H. Henager 他：“Ultimate Strength of Reinforced Steel Fibrous Concrete Beams (Fiber Reinforced Materials)” Institutions of Civil Engineers (1977)
- 23) 関口幹夫他：“鋼繊維補強鉄筋コンクリート梁の曲げ性状” 東京都土木技術研究所年報（昭和52年）
- 24) 小阪義夫他：“鉄筋コンクリート構造” 丸善（昭和50年） p.110, p.130
- 25) K.E. Kesler 他：“Concrete for Tunnel Liners; Evaluation of Fiber Reinforced Quick Setting Cement Concrete” Dept. of Transportation Report, No. FRA-ORDD-75-3
- 26) 高木隼二：“Strength Prediction of Steel Fiber Reinforced Concrete” Trans. of AIJ, No. 251 (Jan, 1977)
- 27) ACI Standard: “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71)”
- 28) 柴田拓二：“鉄筋コンクリート部材の脆性破壊時耐力推算式の検討” コンクリート工学 Vol.18, No. 1 (1980)
- 29) 日本建築学会：“鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説” (1975)
- 30) 高木隼二他：“超早強ポルトランドセメントを用いた鋼繊維補強吹付けコンクリートの物性と施工性” 清水建設研究所研究報告書RP-78-2917（昭和53年10月）

