

## 論文

# 鋼繊維補強コンクリートの力学的特性に及ぼす アスペクト比, 繊維体積率, セメント水比の 相互作用の定量化

村上 聖\* ・浦野 登志雄\*\*  
三井 宜之\*\*\* ・西澤 輝美\*\*\*\*

Quantification of Interaction of Aspect Ratio,  
Fiber Volume Fraction and Cement-Water Ratio  
on Mechanical Characteristics of Steel  
Fiber Reinforced Concrete

Kiyoshi MURAKAMI, Toshio URANO, Yoshiyuki MITSUI  
and Terumi NISHIZAWA

## 1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート(SFRC)が主として土木分野を中心に実用化されて、既に約20年を経過している。SFRCの調合設計に関しては、初期の小林らによる精力的な実験的研究<sup>1)</sup>を通じて、既に土木学会では、調合設計指針が刊行されている。しかし、SFRCの材料設計(用途に応じた所要の力学的特性を得るための調合設計)あるいは構造設計に関しては、いまだ容認される方法論は確立されていない。

材料設計に関しては、SFRCの力学的特性に及ぼす

調合因子(例えば、繊維素材の性質・形状寸法、繊維体積率、コンクリートマトリックスの性質など)の相互作用の定量化に基づく最適調合設計手法、また構造設計に関しては、SFRCの力学的特性、特に引張特性とその寸法効果を考慮した、部材の断面設計手法等の体系化が期待されている。

断面設計に関しては、前報<sup>2)</sup>において、SFRCの引張応力-ひずみ関係の推定手法と、引張応力-ひずみ関係の寸法効果を考慮した、梁部材の曲げ解析手法を提示し、その適用性を実験的に検討した。本報では、材料設計手法の確立に資するための基礎的データを得るために、SFRCの力学的特性に及ぼすアスペクト比、繊維体積率、セメント水比の相互作用の定量分析を行った結果について報告する。

平成5年9月6日受付

\* 助教授 工博 建築学教室

\*\* 助手 工修 八代工業高等専門学校

\*\*\* 教授 工博 建築学教室

\*\*\*\* 大学院生 建築学専攻

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランド
細骨材	川砂 表乾比重=2.53 吸水率=3.50% 最大寸法=1.2mm 粗粒率=1.70 実積率=60.7%
粗骨材	川砂利 表乾比重=2.68 吸水率=1.42% 最大寸法=20mm 粗粒率=6.97 実積率=61.4%
鋼繊維	異形カットワイヤー d×l <sub>r</sub> (mm) 0.5×20 0.6×30 0.7×50

\* d : 繊維公称直径,

l<sub>r</sub> : 繊維長さ

## 2. 実験方法

### 2.1 調合設計

SFRCの使用材料および調合を表-1, 2に示す。鋼繊維には、繊維公称直径(d)×繊維長さ(l<sub>r</sub>)が0.5×20mm, 0.6×30mm, 0.7×50mmの3種類の異形カットワイヤーを使用した。なお、アスペクト比(l<sub>r</sub>/d)は、それぞれ40, 50, 71である。それぞれのアスペクト比に対して、アスペクト比×繊維体積率が0.5, 1.0の2水準について一定となるように、繊維体積率(V<sub>f</sub>)を選定した。これは、アスペクト比が大きくなると、繊維分散性の面から混入可能な繊維体積率が小さくなるためである。また、セメント水比(C/W)は、アスペクト比と繊維体積率のそれぞれの組み合わせに対して、1.5, 2.0, 2.5, 3.0の4水準で変化させた。調合は、スランブ18cmを目標に、試し練りにより定めた。

### 2.2 試験および測定

圧縮試験には、直径×高さが10×20cmの円柱供試体を用いて、圧縮応力-ひずみ関係を測定し、圧縮強度、ヤング係数(1/3割線弾性係数)、強度時のひずみを求めた。なお、ひずみの測定には、コンプレッ

表-2 使用調合

l <sub>r</sub> /d	V <sub>f</sub> (%)	C/W	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	スランブ (cm)
40	1.25	3	39	242	17.4
		2.5	40	242	16.1
		2	42	226	17.5
		1.5	46	224	15.3
	2.5	3	42	269	18.8
		2.5	44	269	17.1
50	1	2	46	251	20.1
		1.5	50	249	16.7
		3	38	252	16.9
		2.5	38	252	16.9
	2	2	43	236	19.1
		1.5	47	233	15.0
	2	3	48	288	16.3
		2.5	50	288	15.5
		2	53	271	17.0
		1.5	57	267	17.6
71	0.7	3	45	262	17.9
		2.5	47	262	17.6
		2	49	245	18.2
		1.5	54	243	17.4
	1.4	3	55	310	16.9
		2.5	57	310	16.5
		2	60	289	18.7
		1.5	65	287	18.1

\* l<sub>r</sub>/d : アスペクト比, V<sub>f</sub> : 繊維体積率, C/W : セメント水比, s/a : 細骨材率, W : 単位水量

メータを使用した。引張試験には、圧縮試験と同一寸法の円柱供試体を用いて、割裂引張強度を測定した。なお、引張強度の算定には最大荷重を用いた。

破壊靱性試験には、幅×せい×長さが10×10×40cmのノッチつき梁試験体を用いて、荷重-ノッチ肩口開口変位(crack mouth opening displacement, CMOD)関係を測定し、前報<sup>9)</sup>のJ等価Dugdaleモデルの逆解析手法により、J積分値を求めた。なお、ノッチは試験前にダイヤモンドバンドソーにより切断し、その深さは3cmとした。また、CMODは、ノッチ肩口にナイフエッジを介して取り付けられたクリップゲージにより測定した。

以上の試験体は、同一調合に対してそれぞれ3個ずつ作製し、材令28日まで水中養生を行った。

表-3 実験結果

$l_r/d$	$V_r$ (%)	C/W	$f_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E(\times 10^3)$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_{co}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$f_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	J (kgf/cm)
40	1.25	3	582	3.01	2.56	64.3	1.320
		2.5	523	2.95	2.39	59.6	1.085
		2	436	2.92	2.47	54.4	0.873
		1.5	278	2.48	3.20	35.0	0.518
	2.5	3	555	3.00	2.50	81.5	1.950
		2.5	549	2.96	2.87	76.7	1.590
		2	420	2.73	2.86	56.6	1.254
		1.5	278	2.26	3.80	40.0	1.262
50	1	3	564	2.98	2.75	55.5	0.926
		2.5	499	2.72	3.03	53.2	0.954
		2	404	2.71	2.70	47.3	1.151
		1.5	312	2.20	3.58	40.1	0.680
	2	3	571	2.77	2.77	66.5	1.465
		2.5	570	2.82	3.09	67.2	1.479
		2	471	2.57	3.04	68.4	1.291
		1.5	298	2.00	4.82	44.1	0.771
71	0.7	3	584	2.68	2.82	57.3	1.613
		2.5	514	2.67	2.83	59.6	1.554
		2	424	2.48	3.20	51.7	1.306
		1.5	291	1.91	3.38	47.2	1.348
	1.4	3	663	2.55	3.46	81.9	2.620
		2.5	563	2.49	3.82	80.0	2.556
		2	447	2.03	4.27	72.4	2.109
		1.5	321	1.76	5.21	65.2	1.900

\*  $f_c$ : 圧縮強度,  $E$ : ヤング係数(1/3割線弾性係数),  $\varepsilon_{co}$ : 強度時のひずみ,  $f_t$ : 割裂引張強度,  $J$ : CODが0.5mmにおけるJ積分値

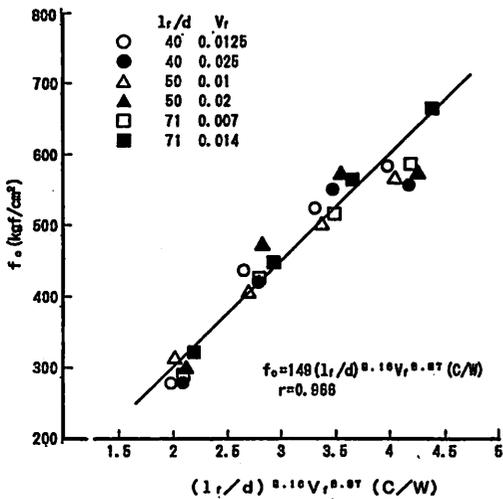


図-1 圧縮強度に及ぼす  $l_r/d$ ,  $V_r$ ,  $C/W$  の相互作用

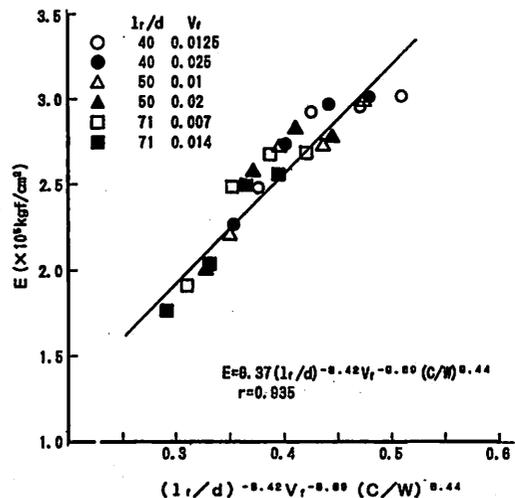


図-2 ヤング係数に及ぼす  $l_r/d$ ,  $V_r$ ,  $C/W$  の相互作用

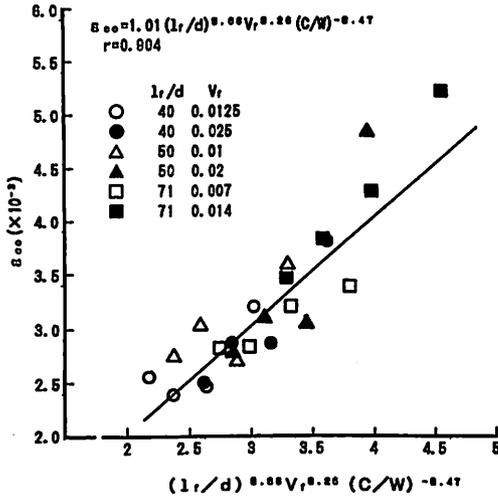


図-3 強度時のひずみに及ぼす  $l_r/d$ ,  $V_f$ ,  $C/W$  の相互作用

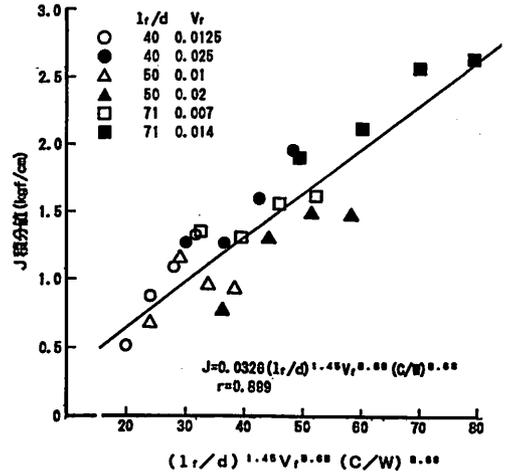


図-5 J積分値に及ぼす  $l_r/d$ ,  $V_f$ ,  $C/W$  の相互作用

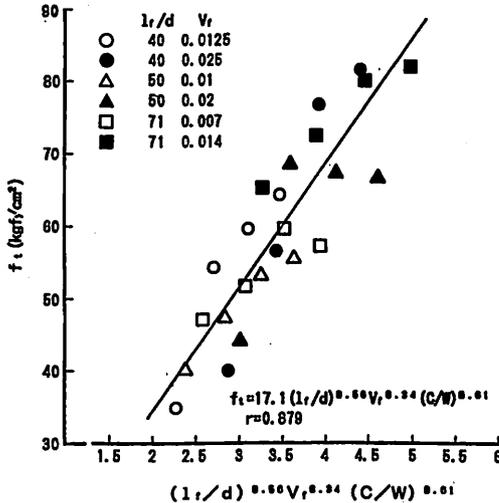


図-4 割裂引張強度に及ぼす  $l_r/d$ ,  $V_f$ ,  $C/W$  の相互作用

### 3. 実験結果および考察

表-3 に実験結果を示す。また、SFRC の力学的特性に及ぼす調合因子の相互作用を定量化するために、測定値を次式に当てはめて、非線形回帰を行った。

$$F = (l_r/d)^{\alpha} V_f^{\beta} (C/W)^{\gamma}$$

ここに、 $F$ : 力学的特性、 $A$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ : 回帰係数。

図-1, 2, 3, 4, 5 はそれぞれ圧縮強度 ( $f_c$ )、ヤング係数 ( $E$ )、強度時のひずみ ( $\epsilon_{0.05}$ )、割裂引張強度 ( $f_t$ )、COD が 0.5mm における J 積分値 ( $J$ ) に及ぼす  $l_r/d$ ,  $V_f$ ,  $C/W$  の相互作用の定量化分析結果を示す。相関係数 ( $r$ ) は、すべてについてほぼ 0.9 以上であり、上式により高い相関で相互作用を定量化表示できるものと考えられる。

図-1 より、圧縮強度は、 $l_r/d$ ,  $V_f$ ,  $C/W$  が大きくなるほど増加し、その寄与は  $C/W$  が最大で、次いで  $l_r/d$  の寄与が大きい、 $V_f$  の寄与は小さいことが分かる。プレーンコンクリートと同様に、SFRC の圧縮強度も  $C/W$  にほぼ比例して増加し (いわゆるセメント水比脱が成り立つ)、アスペクト比の大きい繊維を用いれば、多少の圧縮の補強効果が期待される。

図-2 より、ヤング係数は、 $C/W$  が大きくなるほど増加するが、 $l_r/d$ ,  $V_f$  が大きくなると減少することが分かる。また、 $C/W$  のプラス効果と  $l_r/d$  のマイナスの効果はほぼ同程度であり、 $V_f$  のマイナスの効果は小さい。一般に言われるように、繊維の混入はヤング係数を低下させるが、その程度はアスペクト比の大きい繊維ほど大きくなる。

図-3 より、強度時のひずみは、 $l_r/d$ ,  $V_f$  が大きくなるほど増加するが、 $C/W$  が大きくなると減少し、ヤング係数と逆の傾向を示している。これに関して、例えば鋼管コンクリート柱のように、鋼材とコンクリートの複合効果を期待するならば、アスペクト比の大きい繊維を用いて、強度時のひずみを増加させるのが有

効である。

図-4より、引張強度は、 $l_f/d$ 、 $V_f$ 、 $C/W$ が大きくなるほど増加し、その寄与は $C/W$ が最大で、次いで $l_f/d$ 、 $V_f$ の順となり、圧縮強度の場合と傾向は同じであるが、圧縮強度に比べ、 $C/W$ の寄与が小さくなる一方で、 $l_f/d$ 、 $V_f$ の寄与が大きくなっていることが分かる。引張強度の改善には、 $C/W$ と同程度に $l_f/d$ が重要な因子となる。

図-5より、J積分値は、 $l_f/d$ 、 $V_f$ 、 $C/W$ が大きくなるほど増加し、その寄与は $l_f/d$ が最大で、次いで $C/W$ 、 $V_f$ の順であるが、 $C/W$ と $V_f$ の寄与はほぼ同程度であることが分かる。ひびわれ抵抗性の改善には、 $l_f/d$ がもっとも重要な因子となる。

以上のように、それぞれの力学的特性の改善に対して効果的な因子を定量化することにより、SFRCの用途に応じた最適な調合設計を確立することができるように思われる。

#### 4. ま と め

本研究では、SFRCの力学的特性に及ぼす調合因子の相互作用の定量分析が行われ、アスペクト比、繊維体積率、セメント水比の力学的特性の改善への寄与について、材料設計手法の確立に資するための有用な知見が得られた。

最後に、本研究にあたって、熊本大学甲斐定夫技官の協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 1) 小林一穂著：繊維補強コンクリート—特性と応用—，オーム社，1981
- 2) 村上 聖，三井宜之，沼野登志雄：繊維補強コンクリートの靱性評価に関する研究—鋼繊維補強鉄筋コンクリートはりの曲げ特性—，熊本大学工学部研究報告，第39巻，第2号，pp.215-222，1990，9
- 3) 村上 聖，沼野登志雄，三井宜之：繊維補強コンクリートの破壊力学特性に関する研究，熊本大学工学部研究報告，第41巻，第3号，pp.199-213，1992，11