

論文

[2158] 鋼繊維補強コンクリートの破壊靱性に及ぼす調合因子の影響

正会員○村上 聖 (熊本大学建築学科)

正会員 浦野登志雄 (八代高専土木建築工学科)

三井 宜之 (熊本大学建築学科)

1. はじめに

繊維補強コンクリートのひびわれ抵抗性能を評価するために、破壊力学の適用が期待されている。これまでも、初期のRomualdiらによる線形弾性破壊力学の適用[1]から、現在の非線形破壊力学の適用に至るまで、多数の研究結果が報告されている。非線形破壊力学の適用には、金属と同様の手法により実験的にJ積分(J)を評価し繊維補強効果の定量化を試みたもの[2]、また繊維のブリッジングなどによるひびわれ面に介在する引張抵抗を、結合力モデル解析により、結合応力( $\sigma$ )—ひびわれ開口変位(COD)関係として定量化し、その曲線下の面積で表されるJを評価したもの[3]などがある。前者の場合には、Jの評価点の選定が重要な課題であり、従来最大荷重点、任意に定められる荷重低下点あるいは変位が採用されているが、その根拠については不明確である。一方、後者の場合には、前者においてブラックボックスとして扱われている破壊進行域内部の構成法則を評価の対象としているので、その領域の損傷レベルに応じてJの評価点を合理的に選定できる特長を有する。

本研究では、結合力モデルを用いて、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)における繊維体積率( $V_f$ )、繊維長さ( $l_f$ )及びマトリックス強度が繊維補強効果に及ぼす相互作用について解析及び実験的に検討を行い、繊維補強効果の改善因子に関して考察を試みる。

2. 実験方法

SFRCの使用材料及び調合をそれぞれ表1,2に示す。使用した鋼繊維は、異形カットワイヤーで、 $l_f$ は20,30,50mmの3種類とした。調合は、水セメント比(W/C)が40,50,60,70%のプレーンコンクリート及び $l_f=20\text{mm}$  &  $V_f=1\%$ 、 $l_f=30\text{mm}$  &  $V_f=1.2\%$ 、 $l_f=50\text{mm}$  &  $V_f=1\%$ のSFRCについて、スランプ18cmを目標に試し練りにより定めた。細骨材率(s/a)は単位水量(W)が一定でスランプが最大となる最適s/aとした。試験は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体を用いて圧縮応力—ひずみ関係(圧縮強度、ヤング係数の測定結果は表-2中に併記)を、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ ノッチつきはり試験体の3点曲げ(スパン・高さ比=3)により荷重—ノッチ肩口開口変位(CMD)関係をそれぞれ測定した。ここで、ノッチはダイヤモンド帯鋸(厚1mm)によりスパン中央の引張側にはりせいに対する比で0.3の深さまで入れた。また、CMDはノッチ肩口にナイフエッジを介して取り付けたクリップゲージにより測定した。試験体は、それぞれ4個ずつ作製し、材令は28日(水中養生)とし、試験時まで気中に放置した。

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=2.70% 最大寸法=5mm 粗粒率=2.49 実積率=64.4%
粗骨材	川砂利 表乾比重=2.68 吸水率=1.72% 最大寸法=20mm 粗粒率=6.52 実積率=64.3%
鋼繊維	異形カットワイヤー $\phi \times l_f$ (mm) 0.5 × 20 0.6 × 30 0.7 × 50

表-2 使用調査

$l_r$ (mm)	$V_r$ (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/ m <sup>3</sup> )	slump (cm)	$f_c$ (kgf/ cm <sup>2</sup> )	E ( $\times 10^5$ kgf/cm <sup>2</sup> )
	0	40	31	211	19.1	488	3.33
		50	37	196	19.3	400	3.10
		60	39	195	18.4	307	2.96
		70	42	195	18.4	234	2.70
30	1	40	55	232	16.3	493	3.28
		50	59	229	16.0	433	3.15
		60	61	232	18.1	365	2.87
		70	64	236	18.1	282	2.58
	2	40	79	261	17.0	521	3.02
		50	81	263	18.5	428	2.73
		60	83	269	18.3	366	2.62
		70	85	277	18.4	273	2.29
20	1	40	49	224	16.8	541	3.12
		50	52	221	17.2	478	2.86
		60	54	224	17.4	378	2.51
		70	56	228	18.3	288	2.16
50	1	40	73	262	16.5	585	3.03
		50	75	251	16.0	485	2.78
		60	77	257	17.9	420	2.65
		70	79	263	17.9	322	2.42

### 3. 解析方法

結合力モデルの基礎概念を図1に示す。一般に、 $\sigma$ はCODの関数として与えられるので、その解析には一種の移動境界値問題として非線形解析が要求される。ここでは、任意の $\sigma$ -COD関係を、与えられたCOD ( $\phi_1$ )に至るまでの曲線下の面積で表されるJが等価になるように一定の結合応力が仮想ひびわれ面に作用するDugdaleモデルに逐次置換することにより、非線形解析を線形化する手法（以下、J等価Dugdale手法と呼ぶ）を用いた。この手法によれば、その逆解法により、 $\sigma$ -COD関係が一意的に求められる。

#### 3.1 Dugdaleモデル解析

Dugdaleモデルは、 $\sigma$ をCODによらず一定の降伏強度 ( $\sigma_0$ )、即ち塑性域内部で完全弾塑性構成法則を仮定しているのので、線形弾性破壊力学で扱える。本実験で利用した片側にノッチをもつはりの3点曲げ（スパン・高さ比=3）について解析結果を表3に示す。ただし、解析には間接境界要素法（線形要素使用）を利用し、ノッチ長さは、はりせいに対する比で0.1, 0.3, 0.5の3種類、公称曲げ応力 ( $\sigma_b$ )、COD ( $\phi$ )、CMD ( $\psi$ ) はそれぞれ次式に示す無次元パラメータで表示している。

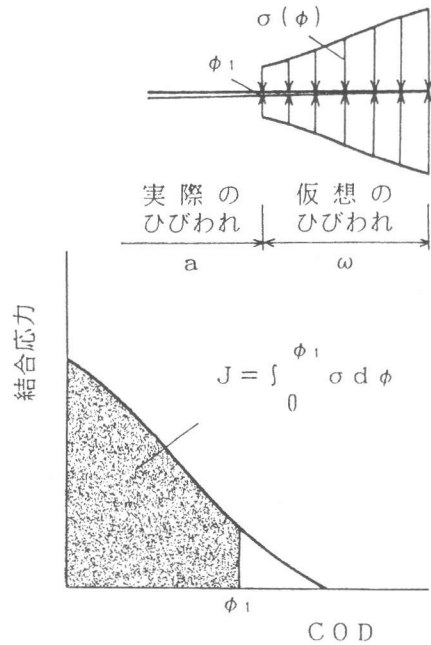


図-1 結合力モデルの基礎概念

表-3 Dugdaleモデル解析結果

a/W	$\omega/W$	$\Sigma$	$\Phi$	$\Psi$
0.10	0.05	0.616	0.114	0.387
	0.10	0.835	0.239	0.602
	0.15	0.988	0.388	0.810
	0.20	1.119	0.564	1.043
	0.25	1.237	0.779	1.316
	0.30	1.349	1.049	1.649
	0.35	1.452	1.379	2.049
	0.40	1.553	1.809	2.561
	0.45	1.649	2.354	3.203
	0.50	1.747	3.078	4.047
	0.55	1.844	4.062	5.180
	0.60	1.926	5.442	6.755
0.30	0.05	0.362	0.126	0.805
	0.10	0.513	0.280	1.253
	0.15	0.629	0.480	1.700
	0.20	0.729	0.733	2.206
	0.25	0.818	1.053	2.802
	0.30	0.902	1.478	3.549
	0.35	0.981	2.054	4.523
	0.40	1.057	2.866	5.851
	0.45	1.141	4.064	7.743
	0.50	1.203	5.950	10.68
	0.55	1.273	9.344	15.82
	0.60	1.342	16.49	26.46
0.50	0.05	0.210	0.133	1.330
	0.10	0.301	0.314	2.130
	0.15	0.373	0.578	3.008
	0.20	0.436	0.956	4.107
	0.25	0.494	1.523	5.612
	0.30	0.550	2.440	7.880
	0.35	0.603	4.104	11.74
	0.40	0.655	7.716	19.72

$$\Sigma = \sigma_b / \sigma_y, \quad \Phi = E \phi / (\sigma_y W), \quad \Psi = E \psi / (\sigma_y W) \quad (1)$$

ここに、E：ヤング係数、W：はりせい。

### 3. 2 J等価Dugdale手法による $\sigma - \text{COD}$ 関係の推定

図2に、J等価Dugdaleモデルの基礎概念を示す。以下にその逆解法による $\sigma - \text{COD}$ 関係の推定手法について述べる。

(1)  $\omega$ を与え、表3に示すDugdaleモデル解析結果から対応する無次元パラメータ $\Sigma$ 、 $\Phi$ 、 $\Psi$ の値を求める。

(2) ここで、スパン・高さ比=3の3点曲げに関する $\sigma_b$ は、次式で示される。

$$\begin{aligned} \sigma_b &= 9P / (2BW) \\ \therefore P &= 2BW\sigma_b / 9 = 2BW\Sigma\sigma_y / 9 \quad (2) \end{aligned}$$

ここに、P：荷重、B：はり幅、 $\sigma_y$ ：等価降伏強度。

上式に、 $\sigma_y = E\psi / (\Psi W)$ を代入して

$$P = \{2BE\Sigma / (9\Psi)\} \psi \quad (3)$$

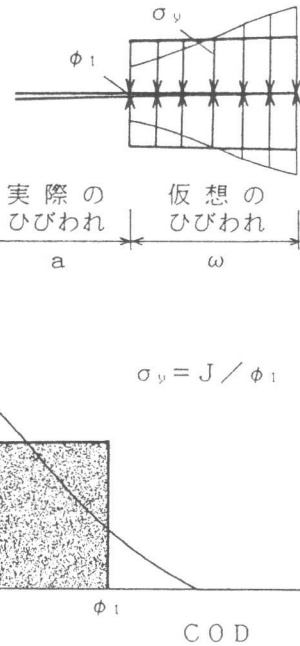


図-2 J等価Dugdaleモデル

上式においてB、E、 $\Sigma$ 、 $\Psi$ は既知量だから、与えられた $\omega$ に対してPとCMDの間にモデル解析上直線関係が成り立つ。

(3) 図3に示すように、測定されたP-CMD曲線と上記の直線の交点に対応する解を与え、その交点でのPから、以下に示すように $\sigma_y$ 、 $\phi$ 、Jが求められる。

$$\sigma_y = 9P / (2BW\Sigma), \quad \phi = \Phi\sigma_y W / E, \quad J = \sigma_y \phi \quad (4)$$

(4) 以上のステップを $\omega$ について反復すれば、図4に示すようにJ-COD関係が得られるので、その回帰曲線の接線勾配から、図5に示すように $\sigma - \text{COD}$ 関係が求められる。

### 4. 結果及び考察

図6に、 $1r=30\text{mm}$ 、 $V_f=0.1, 2\%$ 、 $W/C=40, 50, 60, 70\%$ のSFRCに関して本手法により推定された $\sigma - \text{COD}$ 関係を示す。図より、プレーンコンクリートに関しては、 $W/C$ が小さくなるほど（高強度化に伴い）同一CODに対して $\sigma$ は高くなるが、全体として引張軟化挙動を示す。一方、SFRCに関しては、CODの大きい範囲でも高い $\sigma$ を保持し、その傾向は $V_f$ が大きくなるほ

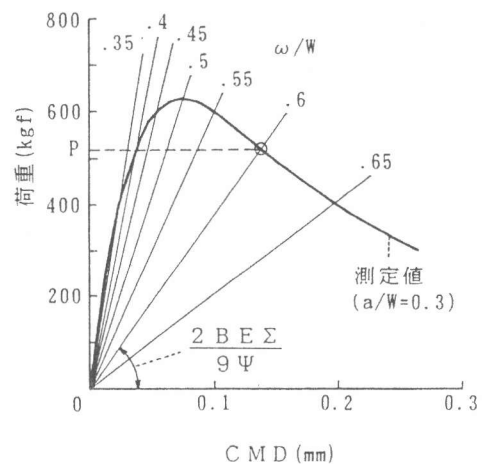


図-3 P-CMD関係

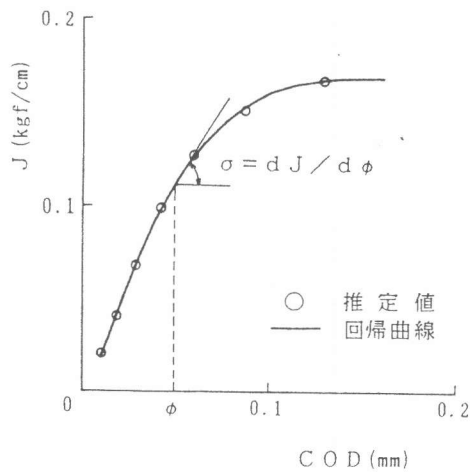


図-4 J-COD関係

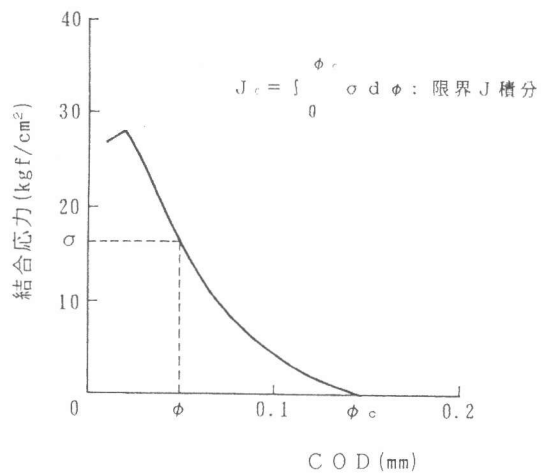


図-5  $\sigma$ -COD関係

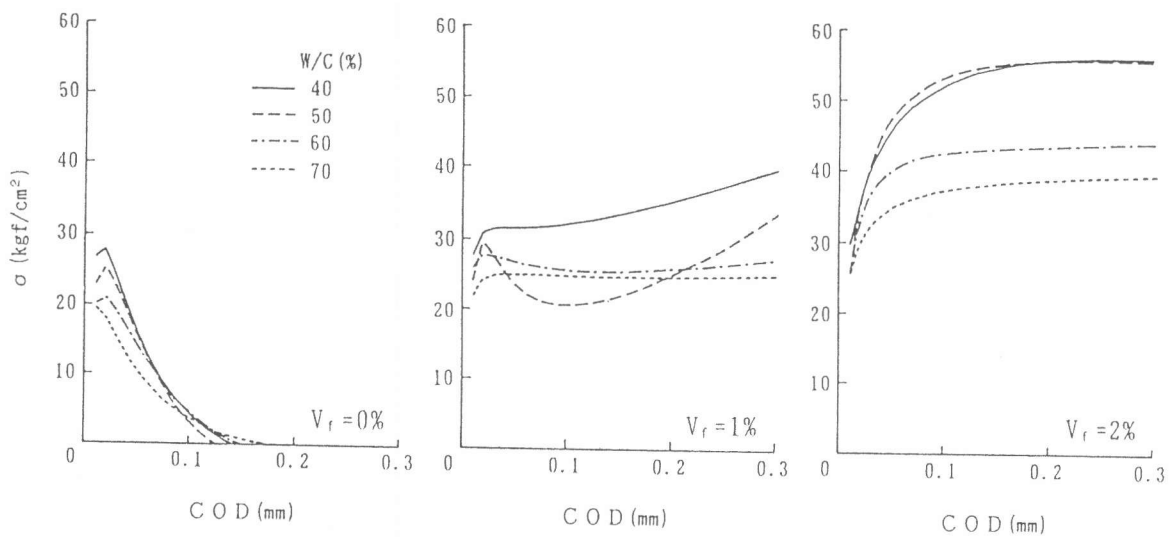


図-6 推定された  $V_f$  別の  $\sigma$ -COD関係

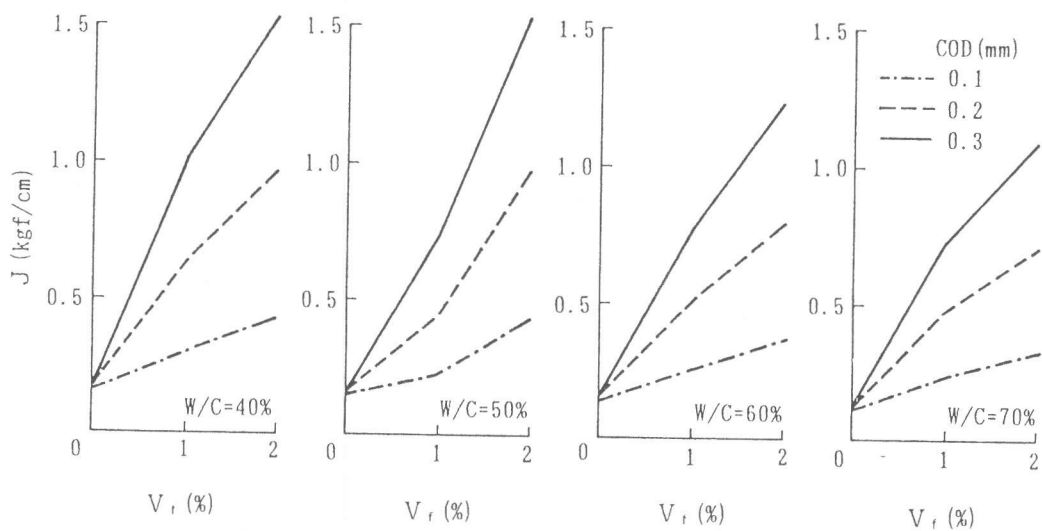


図-7  $V_f$  に対する W/C 別の J の変化

と顕著である。図7は、 $V_f$ に対する $J$ の変化を $W/C$ 別に示す。図より、 $V_f$ の増加に伴って、同一 $COD$ に対する $J$ はほぼ比例的に増大することが分かる。図8に、 $V_f=1\%$ 、 $l_f=20, 30, 50\text{mm}$ 、 $W/C=40, 50, 60, 70\%$ のSFRCに関して推定された $\sigma-COD$ 関係を示す。図より、 $l_f$ が大きくなるほど、同一 $COD$ に対してより高い $\sigma$ を保持し、繊維のブリッジングによるひびわれ開口抵抗が大きくなることが分かる。図9は、 $l_f$ に対する $J$ の変化を $W/C$ 別に示す。図より、 $l_f$ の増加に伴い、同一 $COD$ に対する $J$ はほぼ比例的に増大することが分かる。

いま、マトリックス強度がセメント水比 ( $C/W$ ) とほぼ直線的な関係があることから、 $C/W$ に対する $J$ の変化を $V_f$ 及び $l_f$ 別に示すと図10のようになる。ただし、プレーンコンクリートについては $J$ として $J_0$ を、SFRCについては $COD$ が $0.3\text{mm}$  (その根拠として、耐久性の面からひびわれ幅の限界値として $0.2\sim 0.3\text{mm}$ が示されている) での $J$ を採用した。図より、 $C/W$ 即ちマトリックス強度が大きくなるほど $J$ はほぼ比例的に増大し、その程度は $V_f, l_f$ が大きくなるほど顕著になることが分かる。ただし、 $V_f=2\%$ の場合には $W/C=40\%$ と $50\%$ で $J$ に差がなく、 $V_f$ が大きくなるほ

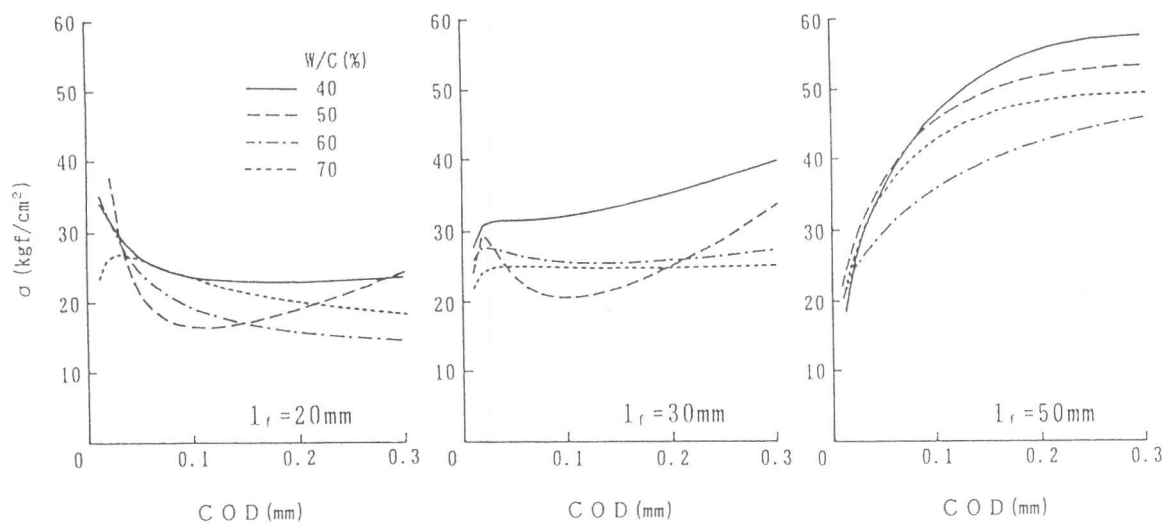


図-8 推定された $l_f$ 別の $\sigma-COD$ 関係

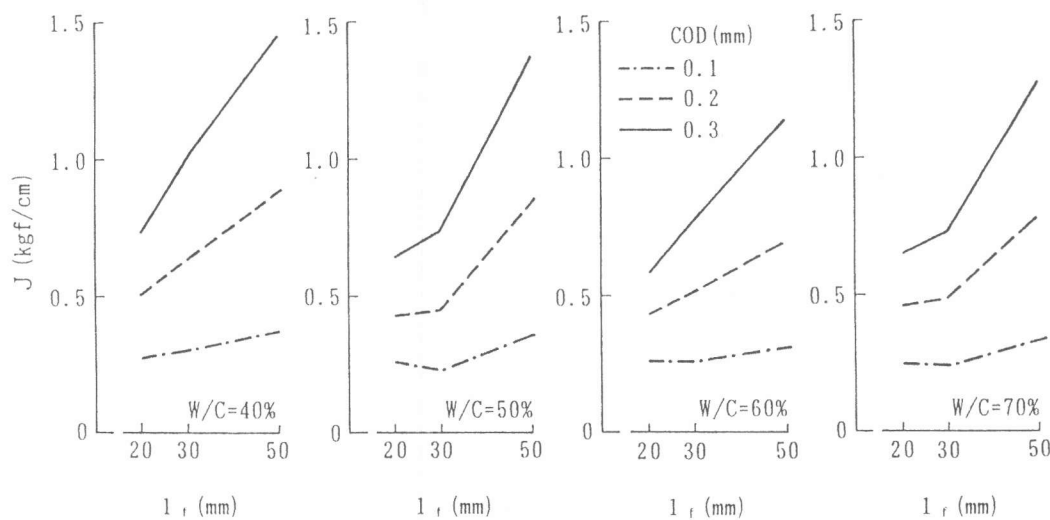


図-9  $l_f$ に対する $W/C$ 別の $J$ の変化

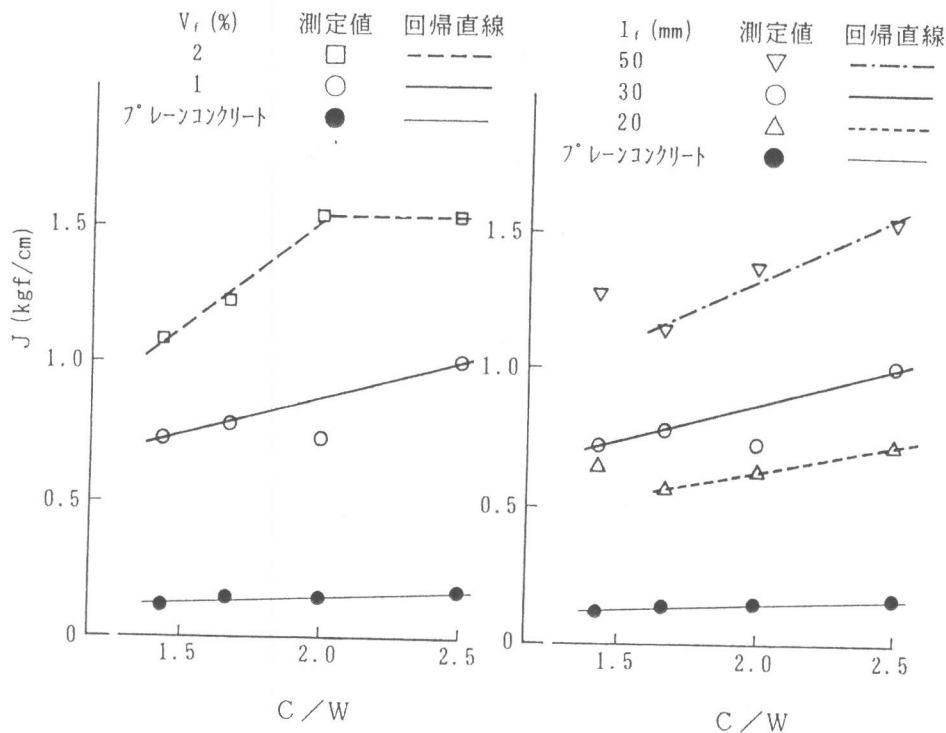


図-10  $V_f$ 、 $l_f$ 及びマトリックス強度が破壊靱性に及ぼす相互作用

どより低強度側で繊維補強効果が頭打ちになることが予想される。このことは、SFRCの調査設計における $V_f$ と $l_f$ の選定は、施工性だけでなく、繊維補強効果の面でも重要な因子となり、その最適な組合せはマトリックス強度に依存することを示唆している。

## 5. 結論

本実験の範囲内で次のような知見が得られた；繊維体積率、繊維長さ、マトリックス強度が鋼繊維補強コンクリートの繊維補強効果に及ぼす相互作用について解析及び実験的検討を行った結果から、繊維体積率あるいは繊維長さが大きくなるほど、J積分で表される破壊靱性はほぼ比例的に増大するが、その程度はマトリックス強度に依存し、マトリックスが高強度になるほどその傾向が顕著となる。ただし、繊維体積率が大きくなると、より低強度側で繊維補強効果が頭打ちとなる傾向が見られる。今後、繊維の補強効率の面で繊維の素材特性、繊維体積率、繊維長さ、マトリックス強度の間の最適な関係を定量化することにより、ひびわれ抵抗性能に照らして鋼繊維補強コンクリートの合理的な調査設計を確立することが可能になるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) Romualdi, J.P. and Batson, G.B.: Mechanics of Crack Arrest in Concrete, Proc. of ASCE, Vol. 89, No. EM3, pp. 147-168, June, 1963
- 2) 六郷恵哲ほか：J積分によるコンクリートの破壊靱性の評価、第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp.125-128、1980.6
- 3) 村上 聖ほか：繊維補強コンクリートの破壊力学に関する研究—その1 各種繊維による補強効果—、日本建築学会構造系論文報告集、第404号、pp.1-6、1989.10