

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—

正会員 村 上 聖*
 正会員 三 井 宜 之**
 正会員 岸 谷 孝 一***
 正会員 平 居 孝 之****
 正会員 鹿 毛 忠 継*****

1. 序 論

コンクリート中への短繊維の分散混入は、靱性に乏しいコンクリートの脆性的性質を材料レベルで改善するものとして、現在各種の素材、例えば金属、炭素、ガラス、セラミックス、有機高分子材料などを短繊維として利用する試みが盛んに行われている。しかしながら、コンクリートのような脆性マトリックスに対する繊維強化機構に関しては、その理論的背景が欠如しているために、繊維補強コンクリートの適用は特殊な用途に限られ、繊維素材のもつ特性を十分に生かした用途の開発は、試行錯誤の状態にあるのが現状である。

これまでに、繊維強化理論として Romualdy らによる線形弾性破壊力学による考察に基づいた繊維間隔理論があり¹⁾、繊維補強コンクリートの実用化のための理論的根拠を与えたとされている。しかし、その理論では、繊維素材のもつ特性やマトリックスの性質が繊維補強効果に及ぼす影響やマトリックスひび割れ発生後の繊維の引き抜けによる靱性の増大などの繊維強化機構における本質的部分が考慮されず、また繊維間隔を狭くすれば、それだけ補強効果が大きくなることは定性的に理解されるところであり、その理論により新しい知見を得ることは困難であるなどの限界がある。

そこで、本研究では、各種繊維による補強効果を非線形破壊力学の適用によって定量化し、繊維素材のもつ特性と繊維補強効果との関係について考察を試みる。

2. 解析方法

ここで利用した破壊力学モデルについては既報のとおり

本研究は、平成元年度日本建築学会九州支部研究報告において発表した。

- * 熊本大学 講師・工博
- ** 熊本大学 教授・工博
- *** 日本大学 教授・工博 (東京大学名誉教授)
- **** 大分大学 教授・工博
- ***** 熊本大学 大学院生・工修

(1989年3月17日原稿受理, 1989年7月27日採用決定)

りである²⁾。本モデルは、き裂先端前方の幅の狭い破壊過程域の進展を、仮想のき裂面にその開口に抵抗する力(その力として繊維の引き抜け抵抗力、マトリックスの残余断面での応力伝達、ひび割れ面での骨材の橋かけによるひび割れ開口抵抗力などが考えられるが、ここでは総称して結合力と呼ぶ)が作用するものとして近似した結合力モデルであり、任意の結合力-き裂開口変位関係をその曲線下の面積(J積分を表す)が等価になるように、一定の結合力が作用するモデル(Dugdaleモデルと呼ばれる)に置き換えて、非線形問題を線形化する手法である(図-1に本手法の基礎概念を、表-1に本解析の基礎となるDugdaleモデル解析結果をそれぞれ示す)。したがって、本手法の逆解法により、測定される荷重-変位曲線から結合力-き裂開口変位関係を一意的に求めることができる。以下に、その方法について述べる。

1) 仮想き裂長さ ω の値を仮定し、表-1からそれに対応する無次元パラメーター X, Y, Z の値を求める。いま、その値をそれぞれ α, β, γ とすると、

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{E\phi}{\sigma_y W} = \alpha \\ Y &= \frac{\sigma_b}{\sigma_y} = \beta \\ Z &= \frac{E\psi}{\sigma_y W} = \gamma \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

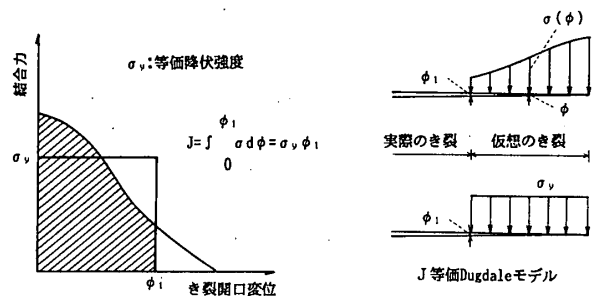
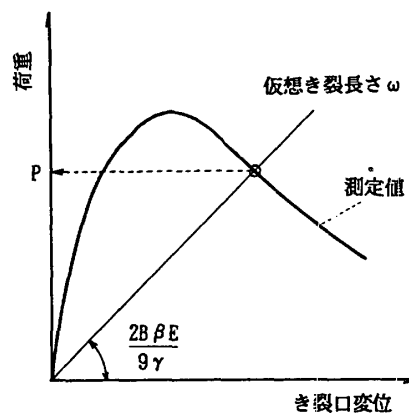
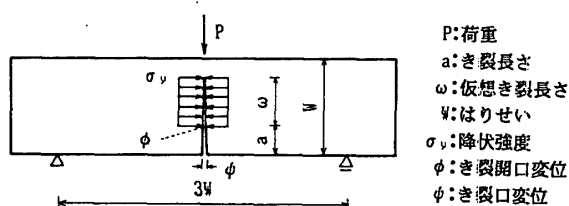


図-1 J等価Dugdaleモデルの基礎概念

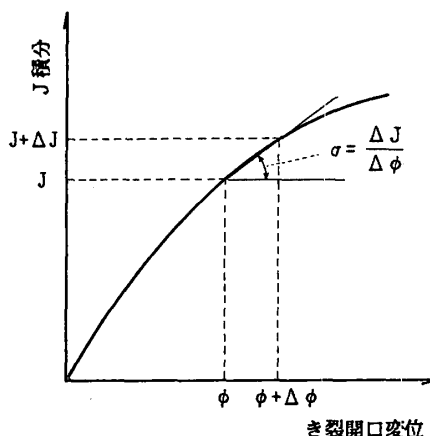
表一 Dugdale モデル解析結果

a/W	ω/W	Y	X	Z
0.1	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	1.740	2.968	4.051
	0.55	1.817	3.717	5.098
	0.60	1.899	4.650	6.576
	0.65	1.967	5.897	8.709
	0.70	2.030	7.850	11.99
0.75	2.077	10.90	17.52	
0.80	2.135	17.18	28.41	
0.85	2.175	35.38	61.50	
0.3	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	1.128	3.950	7.621
	0.50	1.198	5.711	10.24
0.55	1.268	8.524	14.87	
0.60	1.326	14.39	24.00	
0.65	1.381	33.48	54.56	
0.5	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	0.600	4.000	11.35
0.40	0.645	7.333	18.23	
0.45	0.681	16.86	39.00	

$Y = \sigma_b / \sigma_y, X = (E\phi) / (\sigma_y W), Z = (E\phi) / (\sigma_y W)$



図一 逆解法による結合力-き裂開口変位関係の推定 (I)



図三 逆解法による結合力-き裂開口変位関係の推定 (II)

2) ここで、スパン、高さ比=3の3点曲げについて公称曲げ応力は、 $\sigma_b = 9P/2BW$ 、ただし P:荷重、B:はり幅、W:はりせいだから、

$$P = \frac{2BW\sigma_b}{9} = \frac{2BW\beta\sigma_y}{9} \dots\dots\dots (2)$$

上式に $\sigma_y = E\phi/\gamma W$ を代入して、

$$P = \frac{2B\beta E}{9\gamma} \phi \dots\dots\dots (3)$$

上式において B、E、β、γ は既知であるから、仮定した ω の値に対して、荷重 P と き裂口変位 φ との間にモデル解析上直線関係が成り立つ。

3) 図一に示すように、測定された荷重-き裂口変位曲線と、上述の直線との交点に対応する解を与え、そのときの荷重 P から、以下のように J 積分とき裂開口変位 φ が求められる。

表—2 使用材料

SFRC, PFRC

セメント	普通ポルトランド
細骨材	川砂 表乾比重=2.57 吸水率 =3.34% 最大寸法=5mm 粗粒率 =2.78
粗骨材	川砂利 表乾比重=2.66 吸水率 =2.00% 最大寸法=20mm 粗粒率 =6.65 実積率 =65.5%
鋼繊維	異形カットワイヤー 寸法 0.5φX30mm
合成繊維	ポリプロピレン 寸法 1.0φX30mm

CFRC

セメント	早強ポルトランド
骨材	砕砂:石灰:ポル=3:1 (重量比)
分散剤	メチルセルロース
炭素繊維	ピッチ系 寸法 14μmφX18mm

表—3 使用調合

SFRC 材令4週 (水中) + 気中乾燥

V _r %	s ₁ cm	W/C %	s/a %	重量(kg/m ³)				f _c kg/cm ²	E(X10 ⁵) kg/cm ²
				C	W	S	G		
0	19.5	50	38	394	197	655	1099	400	2.69
0.5	16.2		49	428	214	794	854	408	2.57
1.0	15.8		60	460	230	931	644	448	2.70
1.5	18.2		71	494	247	1051	444	480	2.57
2.0	16.3		82	528	264	1156	281	511	2.51

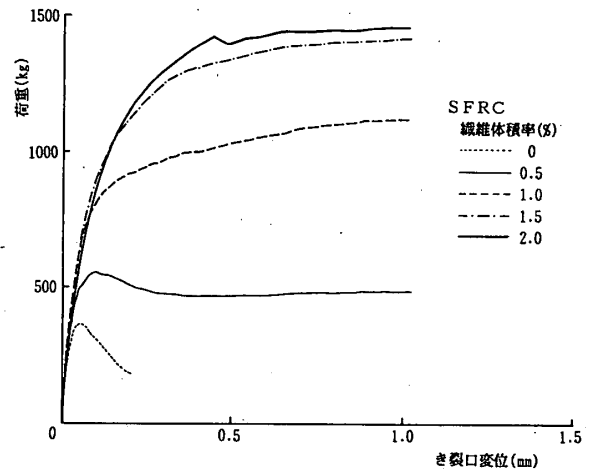
PFRC 材令4週 (水中) + 気中乾燥

V _r %	s ₁ cm	W/C %	s/a %	重量(kg/m ³)				f _c kg/cm ²	E(X10 ⁵) kg/cm ²
				C	W	S	G		
0	17.6	50	38	394	197	655	1099	350	2.66
0.5	16.5		45	420	210	736	932	344	2.75
1.0	15.6		52	446	223	822	786	343	2.47
1.5	14.7		60	472	236	916	632	387	2.56
2.0	20.2		67	498	248	989	504	446	2.57

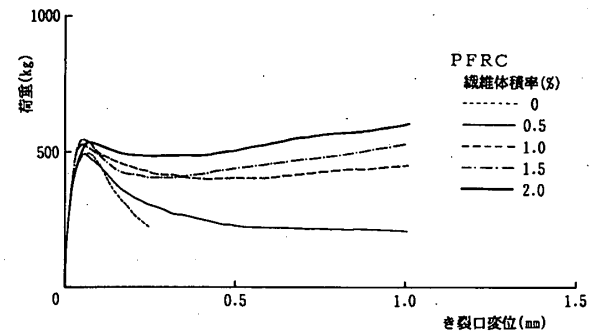
V_r: 繊維体積率, s₁: s/a, f_c: 圧縮強度, E: ヤング係数, 骨材は表乾状態
CFRC 材令2週 (水中) + 気中乾燥

V _r %	f ₁ mm	W/C %	S/C %	分散剤 (XC)%	f _c kg/cm ²	E(X10 ⁵) kg/cm ²
0	—	60	60	0.25	283	1.21
1.0	157				315	1.30
2.0	141				261	1.19
3.0	124				283	1.26

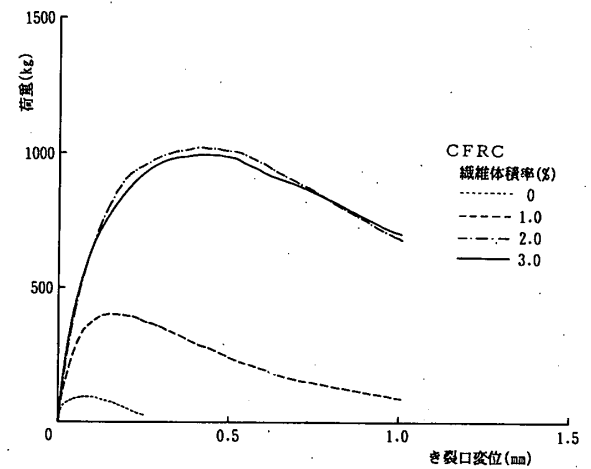
f₁: 7φ-値, 骨材は絶乾状態



図—4(a) 荷重-き裂口変位曲線



図—4(b) 荷重-き裂口変位曲線



図—4(c) 荷重-き裂口変位曲線

$$\sigma_y = \frac{9P}{2B\beta W}$$

$$\phi = \frac{\alpha\sigma_y W}{E}$$

$$J = \sigma_y \phi \quad (4)$$

4) 以上のステップを反復すれば、図—3に示すように J 積分とき裂開口変位との関係が得られるので、結合力 σ はその曲線のこう配、すなわち dJ/dφ として求められる。

3. 実験方法

使用材料および調合については表—2, 3 に示すとおり

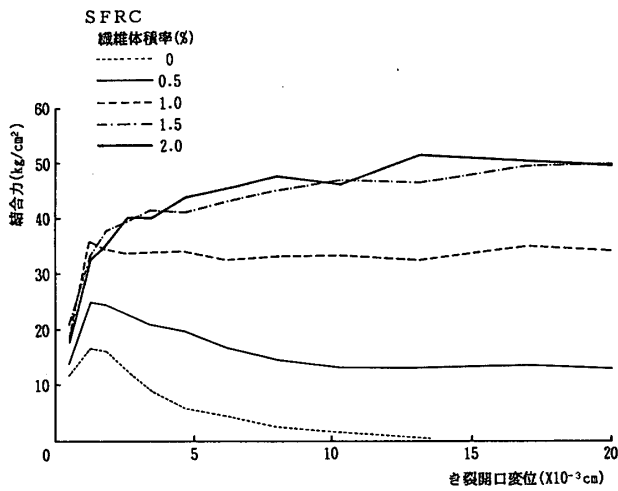


図-5(a) 結合力-き裂開口変位関係

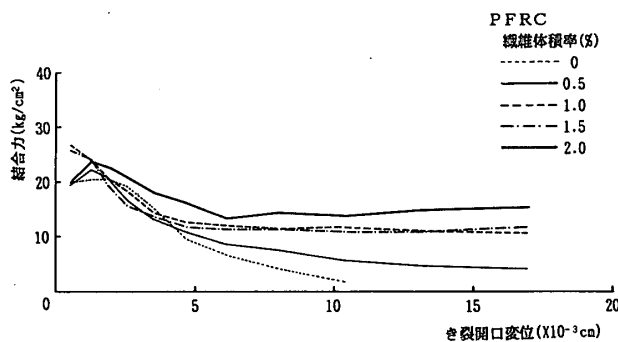


図-5(b) 結合力-き裂開口変位関係

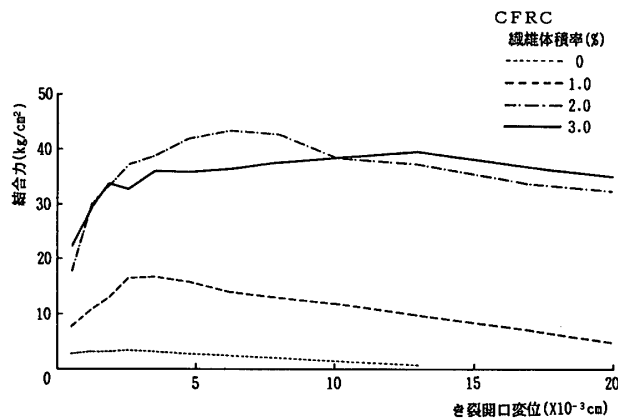


図-5(c) 結合力-き裂開口変位関係

である。鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRCと称する）およびポリプロピレン繊維補強コンクリート（以下、PFRCと称する）については、水セメント比を50%と一定にし、スランプ=18cmを目標に試し練りにより調合を定めた。また、炭素繊維補強コンクリート（以下、CFRCと称する）に関しては、繊維体積率=2.0%を基準に水セメント比および砂セメント比を変化させて、打設可能な軟度の範囲、ここではフロー値=130mm以上のうちから最も曲げ強度の値が大きい調合を選定した。ただし、曲げ強度試験はセメントの物理試験方法 JIS R 5201 に準じ、材令は1週（水中養生）とした。

また、CFRCの混練には、容量30lのオムニミキサーを使用した。

破壊靱性試験は、寸法10×10×40cmのノッチつきはり（ノッチ深さは3cm）の3点曲げ（スパン・高さ比=3）で行い、供試体は各シリーズについて3個ずつ作製し、材令=4週（ただし、CFRCについては材令=2週）まで水中養生した後、試験時まで気中に放置した。また、荷重と、ノッチ肩口にナイフエッジを介して取りつけたクリップゲージの変位（き裂開口変位）との関係は、X-Yレコーダにより自動記録した。また、本解析に必要なヤング係数の値は、φ10×20cm円柱供試体を用いてコンプレッソメーターにより計測した圧縮応力-ひずみ関係から1/3割線係数として求めた。

4. 結果および考察

SFRC, PFRC および CFRC に関して、荷重-き裂開口変位曲線（測定値の平均）を図-4(a), (b), (c) に、また本手法により推定された結合力-き裂開口変位関係を図-5(a), (b), (c) にそれぞれ示す。また、繊維補強効果を表示するために、ブレンマトリックスに対するJ積分の相対比のき裂開口変位の増加に伴う変化を図-6(a), (b), (c) に示す。

特に図-6から、繊維素材の違いによる繊維補強効果の差異をみる事ができる。すなわち、ヤング係数がマトリックスのそれよりも大きい鋼繊維および炭素繊維（ヤング係数はともに約 2×10^6 kg/cm²）の場合には、マトリックスに対する繊維補強効果が非常に大きく、また繊維体積率が増加するほど、き裂開口変位の増加に伴う繊維補強効果の増大も大きくなること、さらにき裂開口変位の小さいうちから繊維補強効果が現れることがわ

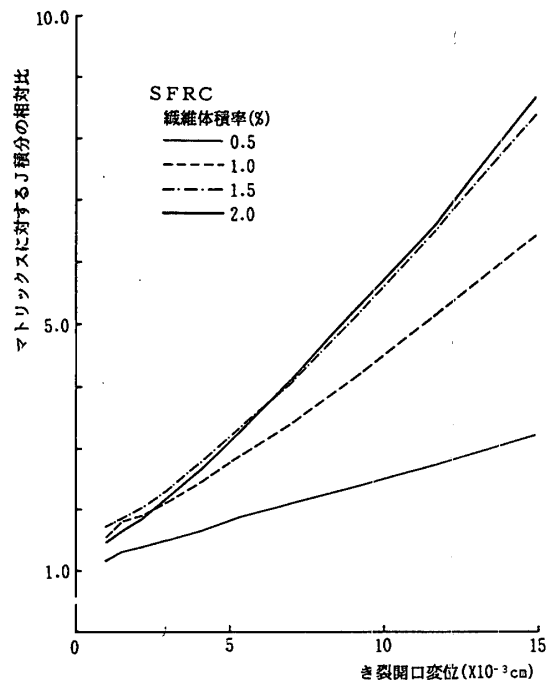


図-6(a) 繊維補強効果

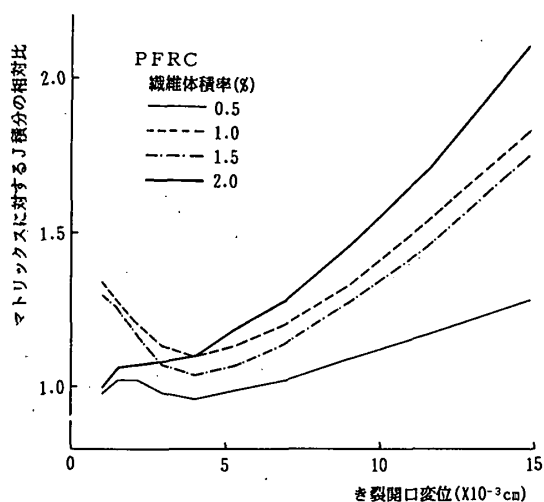


図-6(b) 繊維補強効果

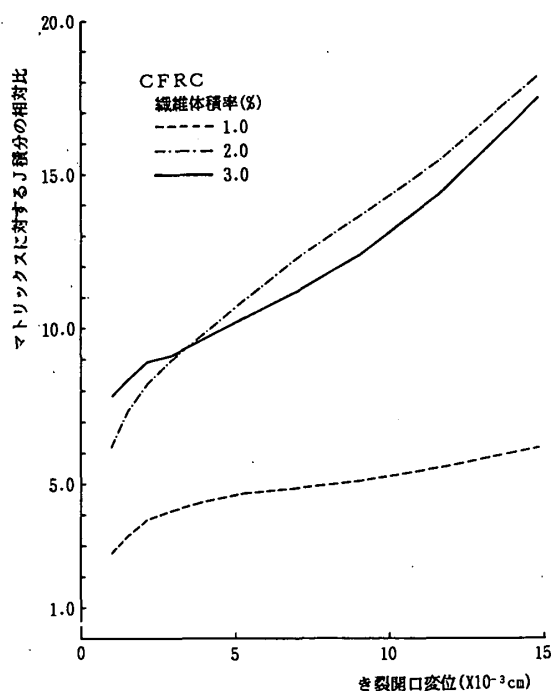


図-6(c) 繊維補強効果

かる。また、マトリックスに対する繊維のヤング係数の比が大きくなるほど、すなわち SFRC よりも CFRC の方が (CFRC の場合、炭素繊維自体のヤング係数は鋼繊維とほとんど変わらないものの、マトリックスが軽量モルタルであるために、マトリックスのヤング係数は SFRC のコンクリートマトリックスのそれよりもかなり小さい、表-3 参照)、その傾向が顕著となっている。

一方、繊維のヤング係数がマトリックスのそれよりも小さいポリプロピレン繊維 (ヤング係数は約 $5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$) では、鋼繊維および炭素繊維に比べて繊維補強効果はかなり劣り、また合成繊維に特有の鎖状分子構造に起因する初期のゆるみによって、き裂開口変位があ

る程度大きくなるまで、本実験では約 $4 \times 10^{-3} \text{ cm}$ 、繊維補強効果がほとんど現れないことがわかる。

ところで、繊維補強効果は繊維体積率が増加するほど大きくなるが、SFRC および CFRC の場合には、前者について繊維体積率が 1.5% 以上で、後者については 2.0% 以上で、繊維補強効果の増大が頭打ちとなっている。これが繊維の分散の影響か、あるいは本質的なものかについてはさらに実験的検討を積み重ねる必要があるが、仮に本質的なものであるとすれば、次のような理由が考えられる：繊維体積率が増加すると、塑性拘束と類似の現象により繊維-マトリックス界面の付着応力が増大するので限界繊維長さが減少し、破壊の様相も繊維の引き抜けから破断に移行するために、それに伴う靱性の減少によって、繊維体積率の増加に伴う靱性の増大が相殺されることになる。もしそうであれば、繊維体積率の大きい範囲では、繊維素材の引張強さも繊維補強効果に影響を及ぼすことが予想される。

5. 結論

本実験の範囲内で次のような知見が得られた；繊維素材の特性のうちヤング係数がマトリックスのそれよりも大きいものと小さいものに大別して繊維補強効果の差異をみると、前者の方が後者の場合よりも繊維補強効果はずっと大きく、き裂開口変位の小さいうちから補強効果が現れはじめる。特に、マトリックスに対する繊維のヤング係数の比が大きくなるほど、その傾向が顕著となるように思われる。また、補強効果の増大を示す繊維体積率には限界があり、その限界は繊維素材の特性や繊維長さなどの因子に影響されるのではないかと思われる。これに関しては、さらに実験的検討を行う予定である。

謝 辞

本実験を行うに当たって、熊本大学大学院生浦野登志雄、昭和 63 年度熊本大学卒論生後藤省一、松田雄二、熊本大学甲斐定夫技官諸氏の協力をいただきました。また、三菱化成 (株) から炭素繊維の提供を受けました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) J. P. Romualdi, G. B. Batson : Mechanics of Crack Arrest in Concrete, Proc. ASCE, Vol. 89, No. EM3, pp. 147~168, 1963. 6
- 2) 岸谷孝一, 村上 聖, 平居孝之 : コンクリートの破壊力学に関する研究—その 1 破壊過程域の損傷解析—, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 368 号, pp. 11~17, 昭和 61 年 10 月
- 3) 浦野登志雄, 村上 聖, 三井宜之 : 繊維補強コンクリートの破壊靱性に関する研究—各種繊維による補強効果—, 日本建築学会九州支部研究報告集, pp. 101~104, 平成元年 3 月

SYNOPSIS

UDC : 691.32 : 666.982

STUDY ON FRACTURE MECHANICS OF FIBER REINFORCED CONCRETE

Part 1. Effect of reinforcement by various fibers

by Dr. **KIYOSHI MURAKAMI**, Lecturer of Kumamoto University, Dr. **YOSHIYUKI MITSUI**, Professor of Kumamoto University, Dr. **KOICHI KISHITANI**, Professor of Nihon University, Dr. **TAKAYUKI HIRAI**, Professor of Oita University, **TADATSUGU KAGE**, Graduate Student of Kumamoto University, Members of A. I. J.

In this study quantitative analyses of fiber reinforcement to concrete are performed using a cohesive force model. As the result it is shown that the fibers with larger Young's modulus than that of the matrix give very large reinforcement and generate fiber reinforcement within smaller crack opening displacement.