

V-17 鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの破壊じん性について

北海道工業大学 正員 堀口 敬

学生員 安藤 哲章

学生員 黒瀬 俊政

1. 目的

普通コンクリートに対して鋼繊維補強コンクリート（以後 S F R C と略す）の一つの特徴は、ひび割れを生じてもお耐力を保持しすぐれたじん性を発揮するという点である。そのため破壊力学の発展により強度の高い低いということのみではなく、じん性というものを考慮しなければ議論できなくなつたのが現状である。このじん性を評価するのにいろいろな方法が行われてきたがコンクリート工学の分野においてはまだ適切に評価する方法は確立されていない。現在、提案されているコンクリートの破壊じん性の評価の方法としては A C I 544 委員会による Toughness Index¹⁾、小林らによる Modulus of Toughness²⁾、Rice³⁾、Begley⁴⁾ による J 積分値⁵⁾ 等がある。

本報告は上述したそれぞれの評価方法の有意性を検討し、かつ各々の相関々係について検討することを目的としている。さらに動的な、じん性値を把握するために落重試験によるエネルギーを測定した、さらに最近、J C I 規準案として提案された残存曲げ強度比及び曲げタフネスをも加えて検討を行った⁶⁾。またコンクリートのたわみ性を有効に引き出すため、ポリマーディスパージョンを混入した鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリート（以後 S F R P C C と略す）についても同様の試験を行ないじん性評価について比較検討した。

2. 実験概要

◇配合

本実験は L / 6 直交表を用い、4 因子 2 水準を取り上げ使用した。L / 6 直交表による割りつけは、表-1 に、因子及び水準については、表-2 に示す。

◇使用材料

鋼繊維はアスペクト比 53、2、寸法 0.5 × 0.5 × 30 (mm)、セメントは普通ポルトランドセメント、ポリマーディスパージョンは S A R ラテックス、粗骨材は、川砂利で最大粒径 / 5 mm、細骨材率は 60% として使用した。

◆打設方法

ミキサーは、強制練りミキサー（オムニミキサー）を用い、骨材、セメントを各 30 秒練り混ぜ後、鋼繊維をファイバーボールができないように手で均等になるように投入し / 20 秒練り混ぜた。その後、水、あるいは水とポリマーディスパージョンをあらかじめ混ぜたものを投入し、低速で 30 秒高速で 90 秒練り混ぜを行った。

練り混ぜたコンクリートはスランプ、フロー等の試験をした後、7.5 × 7.5 × 40 (

Table-1

No	Kf	Kr	Kw	Kf
1	1	1	1	1
2	1	2	1	1
3	1	1	2	1
4	1	2	2	1
5	1	1	1	2
6	1	2	1	2
7	1	1	2	2
8	1	2	2	2
9	2	1	1	1
10	2	2	1	1
11	2	1	2	1
12	2	2	2	1
13	2	1	1	2
14	2	2	1	2
15	2	1	2	2
16	2	2	2	2

Table-2

Factor		
Kf	1	Hooked
	2	Straight
Kr*1	1	0 (kg/m ³)
	2	50 (kg/m ³)
Kw	1	40.0 %
	2	45.0 %
Vf*2	1	1.0 %
	2	1.5 %

*1 Polymer Content

*2 Volume Fraction of Fibre

cm) の型枠に2層に分け打設し、棒状バイブレーターにより外側から締め固め、表面をコテで入念に仕上げた。打設時において、鋼繊維と水が分離しないように、また鋼繊維が一部にかたまらないように十分注意を払った。

打設終了後のSFR C供試体は材令1日で脱型し、材令2日まで水中養生し、その後恒温温室で気乾養生し材令28日で実験を行った。SFR P C C供試体においては、水中養生を7日まで行い、その後気乾養生し材令28日で実験を行った。水中養生は、脱型後20℃±2℃の水槽に入れ気乾養生は20℃の恒温温室で行った。

荷重スパン30cmで、3等分点荷重試験を行った。

Toughness Index (T. I) は、図-1に示すように、中央たわみが所定値(1.9mm)に達するまでの吸収エネルギーと、初期ひびわれまでの吸収エネルギーとの比で表わす。¹⁾

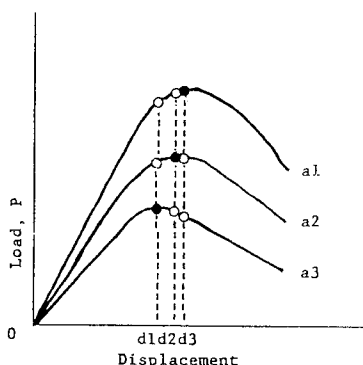
Modulus of Toughness (M. O. T) は、図-2に示すように、 P_c は基準荷重で、最大荷重とする。 K は基準荷重からのたわみの増加分で、1.5mmとする。 S は斜線部分の面積で負の値である。²⁾

J積分値に使用する供試体には、極薄岩石切断機により、1/1mm、1/8mm、2.5mmの入口切欠きを入れた。J積分値はBegley等の方法(B法と略す)とRice等の方法(R法と略す)の2種類を用いた。B法はRiceが提案した式-(1)より供試体のあるたわみ d まで、変位させるのに必要なポテンシャルエネルギー W_t と切欠き深さ a との関係により図-3(1)のようになり、J積分値は図-3(2)の直線の勾配により求めた。⁴⁾

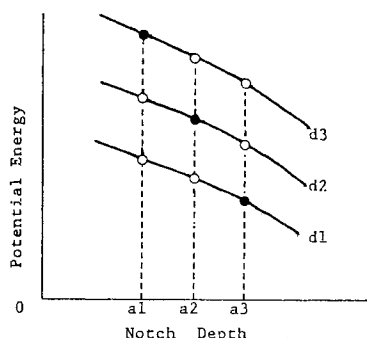
R法は、式-(2)を用いてJ積分値を求めた。 W_n は無切欠き供試体のポテンシャルエネルギー W_t から切欠きのある供試体のポテンシャルエネルギー W_u の差である。 b は供試体高さから切欠き深さを引いたものである。³⁾

$$J = \frac{-1}{B} \frac{\partial W_t}{\partial a} \text{------(1)}$$

$$J = \frac{2W_n}{Bb} = \frac{2(W_t - W_u)}{Bb} \text{------(2)}$$



(1)



(2)

Fig.-3

◇落重試験 落重試験は、重量2、775kgの鋼球を高さ25cmから落下させる試験である。じん性値として、ひびわれ発生（肉眼視による）までの回数及び、破壊時（たわみ3、3cmと定義した）までの回数をとつた。

◇残存曲げ強度比 残存曲げ強度比は、図-4のように、最大荷重のPと荷重が降下を始めた後、最大荷重の90%まで下がった時に載荷するのをやめ、再び載荷した時の残存強度P_oの比で表わされる。

◇曲げタフネス 曲げタフネスT_bは、中央点たわみが、2mmとなるまでの、荷重-たわみ曲線の面積より求めた。また換算曲げ強度 $\bar{\sigma}_b$ を次式より求めた。

$$\bar{\sigma}_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bd^2}$$

$\bar{\sigma}_b$: 平均曲げ強度 (Kg/cm²)
T_b : 曲げタフネス (Kg・cm)
 δ_{tb} : たわみ (2 mm)
l : スパン (30 cm)

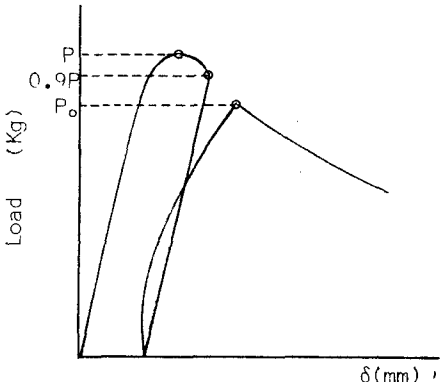


Fig.-4 P-δ curve

3. 実験結果 及び考察 今回の実験結果を各試験別にまとめてみると表-3のようになる。表中でP_cは、鋼繊維混入率が0%のポリマーセメントコンクリートであり、その配合はNo. 2の供試体から鋼繊維を徐いた配合とした。

Table-3

No.	T.I	MOT ×10	Jc ×10 ⁻¹ (Kg/cm)						I.P (n)		Po/P ×10 ²	Tb (Kg·cm) ×10	σb (Kg/cm ²)
			Jcb			Jcr			Nc	Nf			
			d1	d2	d3	a1	a2	a3					
1	9.28	10.97	7.75	9.55	11.35	—	16.63	33.10	2.5	6.5	78.40	12.50	44.48
2	18.24	11.91	1.69	10.22	10.41	10.40	9.30	32.87	2.5	8.5	81.79	12.31	43.75
3	10.18	12.05	6.28	10.46	8.75	10.58	24.50	32.01	2.0	9.5	83.06	12.48	44.39
4	15.18	14.91	5.91	6.67	9.28	—	9.24	26.07	3.0	9.5	84.23	10.52	37.49
5	10.44	15.37	13.43	16.31	17.50	15.91	29.41	35.63	2.0	8.0	82.87	15.63	55.58
6	11.40	14.19	11.12	7.75	12.98	12.99	18.44	32.22	4.0	20.5	86.16	14.94	53.13
7	17.44	11.01	14.18	11.14	11.85	6.84	10.54	14.87	2.0	8.0	82.58	10.71	38.08
8	14.79	15.22	9.01	17.42	11.35	0.33	9.08	28.01	4.0	15.0	85.30	14.15	50.32
9	9.89	12.70	5.44	7.04	4.09	4.58	17.60	20.80	2.0	7.0	82.05	11.17	39.71
10	13.28	14.36	3.22	5.44	5.32	19.26	23.39	40.87	1.5	6.0	82.44	14.39	51.15
11	14.83	10.95	3.66	3.50	3.73	16.65	33.62	39.93	1.5	7.5	83.42	13.78	48.99
12	11.02	13.33	1.16	0.81	4.16	13.92	20.64	26.68	2.0	8.5	73.78	11.83	42.08
13	12.82	12.06	10.59	6.73	5.36	4.16	2.54	17.04	3.5	14.0	80.82	13.83	49.16
14	12.69	12.89	7.15	15.38	15.13	—	11.62	25.02	5.0	21.0	86.83	14.34	50.98
15	9.37	14.93	6.36	4.73	6.09	—	1.73	15.30	2.5	11.5	84.68	9.82	34.93
16	17.01	17.32	28.95	10.24	15.82	3.35	28.00	38.38	2.5	15.0	84.07	17.27	61.40
PC	2.20	—	0.90	0.80	1.00	—	—	—	1.0	1.0	—	—	—

◇分散分析 表-3の結果を用いて分散分析を行ない、各因子ごとにF値についてまとめると、次頁の表-4のようになる。表中の★印は、F検定を行なった結果/%危険率有意水準を満足する因子に★印、5%危険率有意水準を満足するものに★印をそれぞれ記したものである。

Table-4

Factor	Tl	MOT	Jc						FB(N)		P ₀ /P	T _b	σ _b
			Jcb			Jcr							
			d1	d2	d3	a1	a2	a3	Nc	Nf			
Kf	—	—	—	8.63 [*]	80.53 ^{**}	—	—	—	—	—	—	—	—
Vf	—	—	11.58 ^{**}	8.74 [*]	107.35 ^{**}	—	2.69	2.50	12.57 ^{**}	30.32 ^{**}	11.14 [*]	2.46	2.46
Kr	4.10	5.70 [*]	—	—	17.47 [*]	—	—	2.04	7.35 [*]	12.42 ^{**}	—	—	—
Kw	—	—	—	—	8.72 [*]	—	—	—	2.13	—	—	—	—
Kf:Vf	—	—	—	—	8.87 [*]	—	4.94	—	3.52	2.73	—	—	—
Kf:Kw	—	—	—	1.99	8.41 [*]	—	3.33	2.90	2.13	—	2.82	—	—
Kf:Kr	—	—	2.16	1.59	49.93 ^{**}	—	5.63 [*]	—	2.13	—	3.97	—	—

◇ Toughness Index

T. I.の値は Henager の報告によれば、試験方法（荷重制御あるいはたわみ制御、試験機の種類、供試体寸法など）により変化し、繊維の種類等にも大きく影響される。今回の実験では弾性係数の大きく異なる（F 検定で 1% 危険率有意）SFRPCG を用いたためひび割れ発生までの面積 Ta が T. I. の値に大きく影響された。しかしながらポリマーセメントコンクリート（PC）と比較すると 5~9 倍の増加がみられる。

◇ Modulus of Toughness

分散分析の結果有意となった因子はポリマーデイスパージョンの混入量（Kr）であつた。その因子寄与率は 19% で、MOT の値がポリマーデイスパージョンの混入により 14% 程度増加する（図-5）。小林らの報告によると SFRPC で MOT の値は今回の実験条件（K = 1.5 mm, P_c = P_{max} で Vf = 1.0~1.5%）で比較すると 1/5~1/40 程度であり⁸⁾、ポリマーデイスパージョンを混入した場合と大きな差異がなかつた。

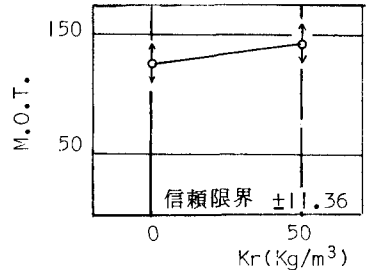


Fig.-5

◇ J 積分値

● B 法

B 法により計算した J 値を分散分析し有意となった因子は、設定したたわみ量（d）により異なつた。有意となった因子の効果グラフを図-6、7に示す。鋼繊維のフックの有無による影響は d2 及び d3 の場合に有意となり、フックによりそのじん性がそれぞれ 1.66 倍及び 1.60 倍となつた（図-6）。Vf に関しては、d1, d2, d3 すべてに関して有意で、それぞれ 2.9 倍、1.67 倍、1.69 倍と

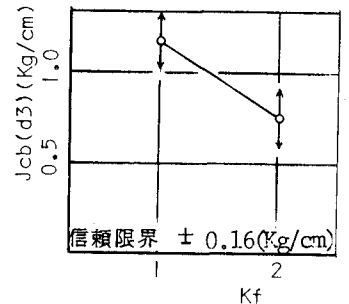


Fig.-6

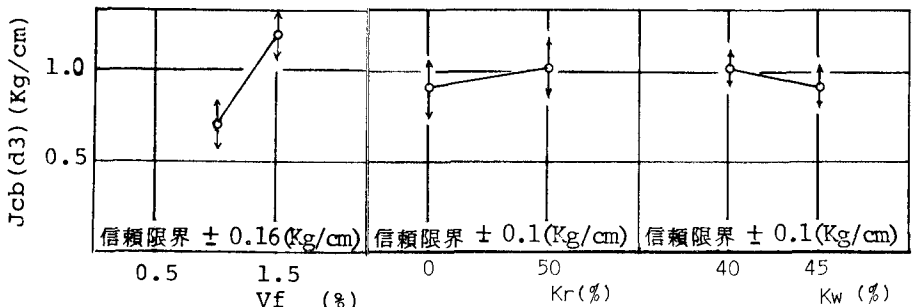


Fig.-7

なつた(図-7)。またd3の場合はKr, Kwも有意となり、ポリマーディスパージョンの混入により、23%増加し、W/Cを0.4から0.45に変化すると約16%じん性が增加する(図-7)。KfとKrとの交互作用が1%危険率有意水準を満足した。その効果グラフが図-8である。フック加工された繊維を用いたSFRPCCにおいては、ポリマーディスパージョンの混入がJ値に影響を与えない。これは繊維とマトリックスとの付着力を改善する為にポリマーディスパージョンは、ストレート繊維に対しては、非常に有効であることを示している。

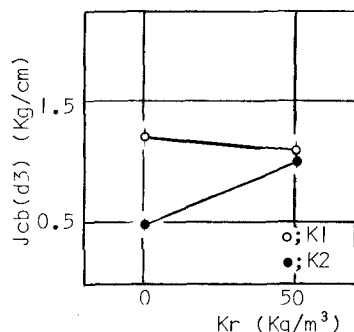


Fig.-8

◇J値分値

● R法

R法によるJ値を分散分析した結果、独立因子の有意が得られなかつた。これはPeter-ssonの報告⁹⁾にあるように、供試体の形状及び人工切欠きの深さ(a)に大きく影響する為と考えられる。

◇衝撃試験

衝撃試験の結果、有意となつた因子は、ひび割れ発生時(Nc)及び破壊時(Nf)ともVfとKrであつた。

Ncに関しては、鋼繊維混入率の増加に伴い1.5倍となり、ポリマーディスパージョンの混入により1.36倍となつた(図-9)。

Nfに関しては、鋼繊維混入率の増加により1.79倍となり、ポリマーディスパージョンの混入により1.44倍となつた(図-10)。交互作用及び鋼繊維のフックの有無、水セメント比等の因子は有意とはならなかつた。

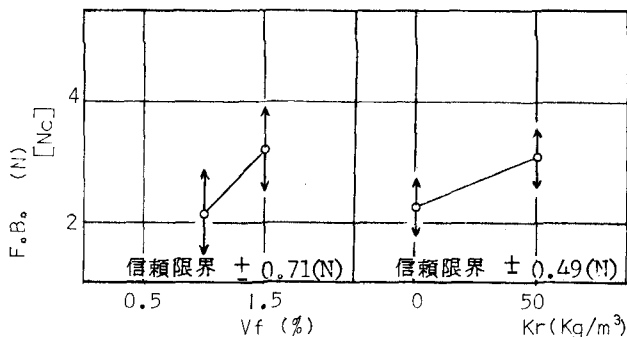


Fig.-9

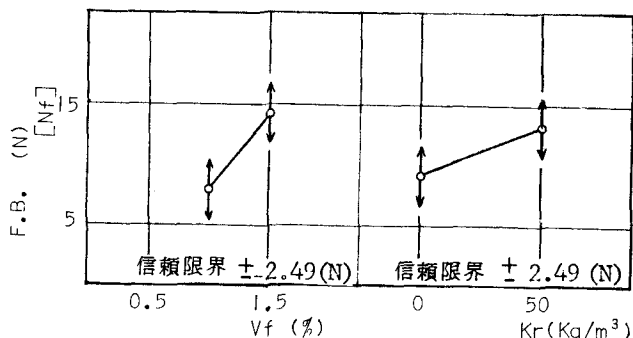


Fig.10

◇残存曲げ強度比

鋼繊維混入率の増加に伴い残存曲げ強度比は8%から84%へ増加する(図-11)。鋼繊維のフックの有無により1%程度、ポリマーディスパージョンの混入により0.8%程度それぞれ残存曲げ強度比は増加するが、いずれも有意因子とはならなかつた。その他、交互作用はすべて有意とはならなかつた。

◇曲げタフネス

JCIの規準案により曲げタフネス及び換算曲げ強度を求め、その結果を分散分析したが、有意となつた因子は、今回の実験の範囲ではなかつた。

◇まとめ

以上の結果をまとめてみると、今回の実験の範囲では次のことが言える。

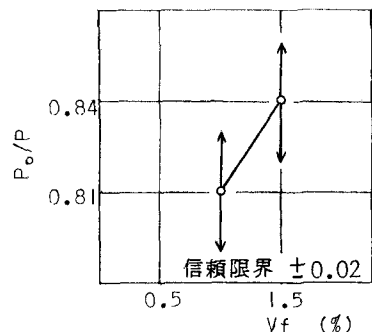


Fig.-11

1) SFRPCCの静的破壊じん性値を評価する場合、有効な手段はJ積分値をBegleyらの方法により求めるのが適している。この場合設定するたわみ量は、最大曲げ荷重における値が最も適している。

2) 動的な破壊じん性値を求める場合は、衝撃試験法が簡易で有効な方法である。

3) SFRPCCの静的及び動的な破壊じん性値の関係は図-12のようになり、高じん性のSFRPCCではJcb値で評価できなくなる傾向を示している。

4) SFRPCCのように弾性係数がSFRGに比べ小さくかつ可とう性に秀れた材料に関しては、Toughness Indexによるじん性の比較はSFRGと同列で考慮できない。

5) RiceによるJ値の推定法は、人工切欠きの深さ(a)が0.3h程度では有意が得られず、今後0.6h或いは0.8h程度まで検討する必要がある。

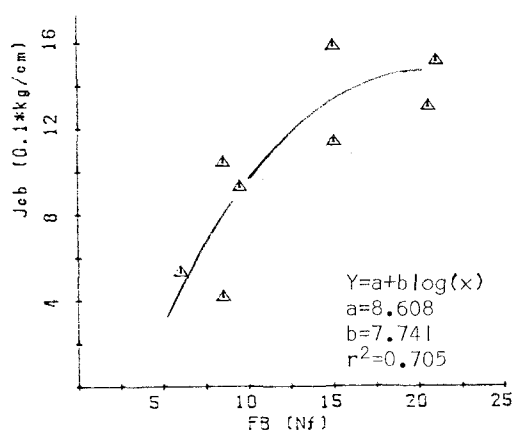


Fig.-12 Jcb vs. FB (Nf)

◇参考文献

- 1) ACI Committee 544; Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete; ACI Journal, July 1978
- 2) 小林ら; 繊維補強コンクリートの引張じん性の一評価方法, コンクリート工学, vol. 20, No. 8 Aug. 1982.
- 3) J. R. Rice, et al; Some Further Aspects of J-integral Analysis and Estimates, Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM, STP. 536, 1973
- 4) J. A. Begley, et al; The J-integral as a Fracture Criterion, Fracture Toughness, ASTM, STP. 514, 1972
- 5) 六郷ら; J積分によるコンクリートの破壊じん性の評価、第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集 1980
- 6) 繊維補強コンクリート研究小委員会; 繊維補強コンクリートに関する試験方法のJIC規準案 (その3) 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法 (案); コンクリート工学 Vol. 20, No. 10, Oct. 1982
- 7) C. H. Henager; Steel Fibrous Concrete - a review of testing procedures, Concret International, Fibrous Concrete, 1980.
- 8) 小林ら; 鋼繊維補強コンクリートの曲げじん性の評価方法, 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1980.
- 9) P. E. Petersson; Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete Similar Materials, Report TVBM Lund I. T. Sweden 1981.