

V-24 繊維補強コンクリートの破壊靱性について

北海道工業大学 正員 堀口 敬
 原田 茂
 平川 治
 及川 克浩

1. はじめに 普通コンクリートは、ひび割れを生じるとそのまま破壊してしまうが、それに対して繊維補強コンクリートには、ひび割れを生じてもお耐力を保持して優れた靱性を発揮するという特徴がある。このような靱性、或いは破壊特性を評価する方法として、破壊力学の手法を適用した応力拡大係数(K_I)¹⁾²⁾やJ-積分値などが提案されており³⁾、エネルギーバランス理論からは、Toughness Index⁴⁾、Modulus of Toughness、曲げタフネス、さらにはアコースティックエミッション法⁵⁾⁶⁾を利用した方法等が近年報告されている。

本報告は、上述したそれぞれの評価方法の有意性や相関関係を検討することを目的としている。さらに、応力拡大係数及びJ-積分値をもとめるのに用いる切り欠き深さ(a)を、供試体にひび割れ発生時まで荷重載荷し、このひび割れ深さを a として実験を行なった。

2. 実験概要

(1) 使用材料

鋼繊維は、アスペクト比が 53.2 で寸法が $0.5 \times 0.5 \times 30$ mm の直線状のものと、異形のものを使用した。また、ポリエチレン繊維は市販されている長さ 40 mm の異形繊維を使用した。セメントは、普通ポルトランドセメント、粗骨材は最大粒径 15 mm の川砂利で、細骨材は最大粒径が 5 mm のものを用いた。また、水セメント比を 45 %、細骨材率を 60 % と一定とした。表-1 及び表-2 に今回の実験で用いた供試体の配合を示した。

表-1 供試体の配合

No	Vsf	Vsf'	Vpf
1	4	1	1
2	5	1	1
3	1	1	3
4	1	1	4
5	1	1	5
6	2	1	3
7	3	1	3
8	3	1	2
9	1	3	1
10	1	4	1
11	1	5	1
12	1	2	3
13	1	3	3
14	1	3	2

(2) 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 秒間練り混ぜ後、繊維をファイバーストールが出来な

表-2 因子と水準

因 子	水 準 (%)				
	1	2	3	4	5
鋼繊維混入率 (直線状) Vsf	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
鋼繊維混入率 (異形) Vsf'	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
ポリエチレン繊維 混入率 Vpf	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0

いように手で均等になるように投入し 120秒練り混ぜを行った。練り混ぜたコンクリートは $10 \times 10 \times 40$ (cm) の3連角柱型枠に打設した。

表-3 試験結果

No	曲げ強度 (N/mm ²)	M. O. T	T. I	曲げタフネス (N・mm)	換算曲げ強度 (N/mm ²)	銅繊維数	ポリエチレン 繊維数	合計繊維数
1	8.197	137.446	4.412	32732.0	4.9098	116		
	8.673	135.910	3.841	37063.6	5.5595	116		
	6.468	106.545	3.802	23569.0	3.5354	88		
2	7.115	123.085	3.781	28086.8	4.2130	116		
	7.203	113.469	4.704	27802.6	4.1704	111		
	7.776	112.086	5.233	27185.2	4.0778	93		
3	4.742	67.907	24.975	10103.8	1.5156		36	
	5.145	95.771	36.364	16238.6	2.4358		50	
4	6.433	253.417	70.302	38014.2	5.7021		54	
	7.644	257.319	113.676	42610.4	6.3916		61	
	6.065	184.123	123.111	34437.2	5.1656		69.5	
5	4.522	121.110	11.326	16669.8	2.5005		77	
	4.395	133.645	7.816	17904.6	2.6857		79	
	4.081	152.642	9.970	16728.6	2.5093		76	
6	6.139	144.955	7.938	27753.6	4.1630	35.5	37.5	73
	5.880	126.467	5.753	23520.0	3.5280	37	32.5	69.5
	5.513	125.547	7.141	22843.8	3.4270	42	47.5	89.5
7	4.925	156.139	8.199	21746.2	3.2619	58.5	30.5	89
	5.292	153.630	8.013	24941.0	3.7412	61	31	92
	4.116	162.762	11.392	21128.8	3.1693	62	32.5	94.5
8	7.203	118.912	7.441	27146.0	4.0719	67.5	22	89.5
	7.791	91.170	10.296	28380.8	4.2571	58	25	83
	5.880	144.200	11.155	26636.4	3.9955	69	18.5	87.5
9	6.542	76.015	4.190	17355.8	2.6034	60		
	5.036	51.956	4.876	12867.4	1.9301	41		
	5.551	57.345	5.220	14896.0	2.2344	48		
10	9.114	57.548	5.847	22216.6	3.3325	94		
	8.232	85.524	5.756	27577.2	4.1366	87		
	6.850	79.428	6.164	22001.0	3.3002	87		
11	9.637	90.543	5.684	37073.4	5.5610	123.5		
	8.682	90.823	5.704	30056.6	4.5085	106.5		
	8.747	111.081	5.546	34270.6	5.1406	132.5		
12	4.522	137.495	8.285	19325.6	2.8988	32.5	53.5	86
	4.778	102.687	6.534	15552.6	2.3329	24.5	36.5	61
	5.571	120.141	7.550	21638.4	3.2458	34	48.5	82.5
13	6.836	130.896	10.627	28410.2	4.2615	54	52	106
	6.306	104.522	7.827	22001.0	3.3002	51.5	41	92.5
	5.513	118.933	10.914	20923.0	3.1385	36	33.5	69.5
14	8.820	95.200	7.573	28772.8	4.3159	65.5	20	85.5
	5.807	75.983	8.893	15660.4	2.3491	56.5	19	75.5
	6.021	107.813	5.433	17796.8	2.6695	62	19.5	81.5

(3) 試験方法 荷重スパンは、30 cm で荷重速度はクロスヘッドが 0.0125 mm/sec で一定として3等分点曲げ試験を行なった。

表-4 試験結果

a. 応力拡大係数 (K_{Ic})

K_{Ic} は a を切り欠き深さ、 d を破壊断面の高さ、 σ を曲げ強度、 $f(a/d)$ を補正係数 (または形状係数) とし次式より求めた。

$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a/d)$
 $f(a/d) = 1.99 - 2.47(a/d) + 12.97(a/d)^2 - 23.17(a/d)^3 + 24.80(a/d)^4$ (数値は、W.F.Brown と J.E.Srawley の提案による⁷⁾。)

b. J 積分値 (J_{Ic})

J 積分値は Rice などの方法 (R 法) を用いた。 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 を引いたものである。また B は供試体の幅、 b は供試体高さから切欠き深さを引いたものである。

$$J_{Ic} = 2W_n / Bb$$

$$= 2(W_t - W_u) / Bb$$

3. 実験結果及び考察

今回の実験結果を各試験別に整理すると表-3 及び表-4 のようになる。

1) 繊維混入率と実際の繊維本数
 配合設計における繊維混入率と破壊断面の繊維数との関係を示すと図-1 及び図-2 のようになる。鋼繊維

に関しては、2種類に形状の異なる繊維を用いたが、繊維の分散の度合は両繊維とも同程度であった。

2) 曲げ強度

鋼繊維混入率と曲げ強度との関係を図-3 及び図-4 に示した。この図から、鋼繊維の混入率の増加に伴い曲げ強度の値が大きくなっているのがわかる。また、図-3 から直線状と異形状の鋼繊維とで比較してみると直線状の鋼繊維よりも異形状の鋼繊維のほうが、曲げ強度の値は大きくなった。図-4 は、切欠きをつけた供試体と切欠きなしの供試体の曲げ強度を比較したものであるが、切欠きによる強度の低下が見受けられる。

No	K_{Ic} ($N/mm^{3/2}$)	J_{Ic} log(N/m)	鋼繊維数	ポリエチレン繊維数	合計繊維数
1	191.652	2.440	102		
	149.927	2.323	81		
	154.615	3.278	117		
2	476.354	2.635	97		
	556.409	1.792	97		
	510.074		107		
6	83.863	2.413	39.5	36	75.5
	157.434	3.224	36.5	38	74.5
	331.251	3.381	42	40	82
7	163.665	2.511	69	52.5	121.5
	311.612	2.113	59.5	37	96.5
	187.229	1.645	59	40	99
8	194.002	2.433	66.5	24.5	91
	195.627	2.003	62.5	20	82.5
	250.752	3.035	68.5	19	87.5
9	631.443	3.355	70		
	434.156	3.116	43		
	188.047	2.972	51		
10	607.517	2.310	82		
	308.930	3.241	77		
	584.511	3.344	79		
11	204.286	2.747	103.5		
	205.406	2.665	136		
	362.550	2.304	129.5		
12	108.952	2.781	31		
	121.506	2.746	32		
	172.771	3.390	38.5		
13	144.591	2.869	45		
	691.701	3.205	44		
	630.722	3.182	59.5		
14	480.519	3.528	64.5		
	633.431	2.919	62.5		
	166.026	2.837	64		

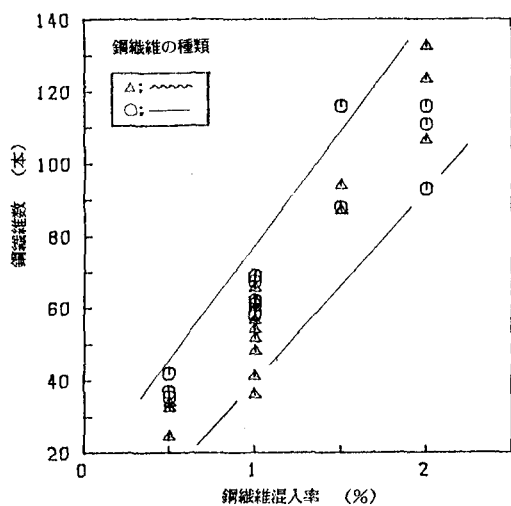


図-1

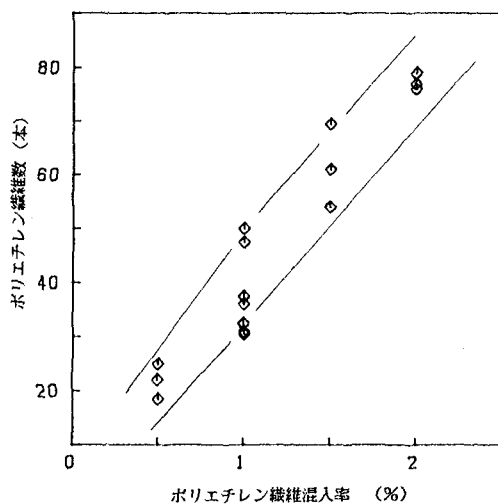


図-2

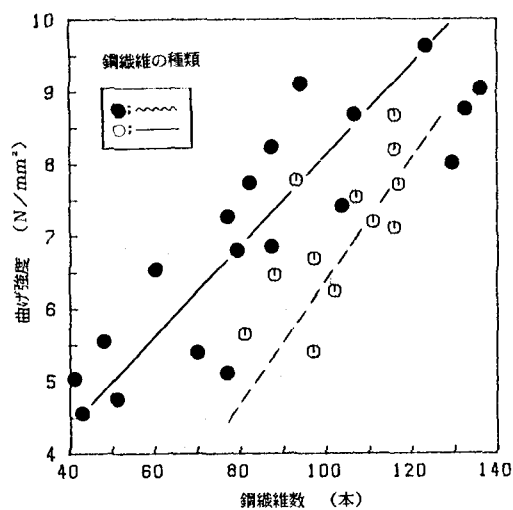


図-3

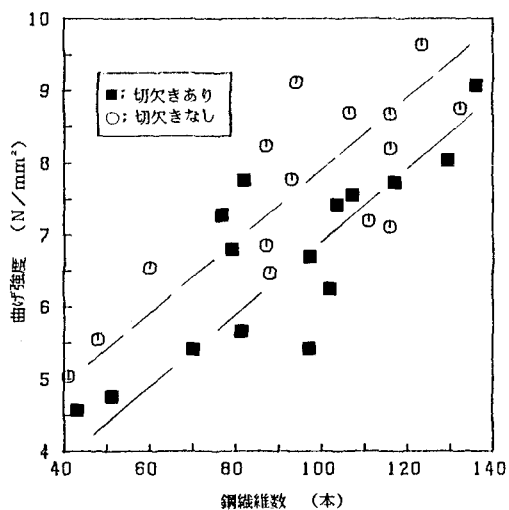


図-4

3) 曲げタフネス

鋼繊維の本数と曲げタフネスとの関係を図-5に示した。この図から鋼繊維の本数の増加に伴い曲げタフネスの値も増加する傾向となった。直線状と異形状の鋼繊維を比較してみると曲げタフネスの値にあまり差はなかった。

4) AEのエネルギーと曲げタフネス

AEのエネルギーと曲げタフネスとの関係を図-6に示した。この図から直線状の鋼繊維の場合、曲げタフネスの増加に伴いAEのエネルギーも増加したが、異形状の鋼繊維の場合には、特定の傾向は示さなかった。このことは、この2種類の鋼繊維補強コンクリートの破壊時の特性が大きく異なることに関係すると思われる。即ち、破壊時に異形状繊維の場合には繊維が破断するのに対し、直線状の繊維の場合には引き抜けを生じる。

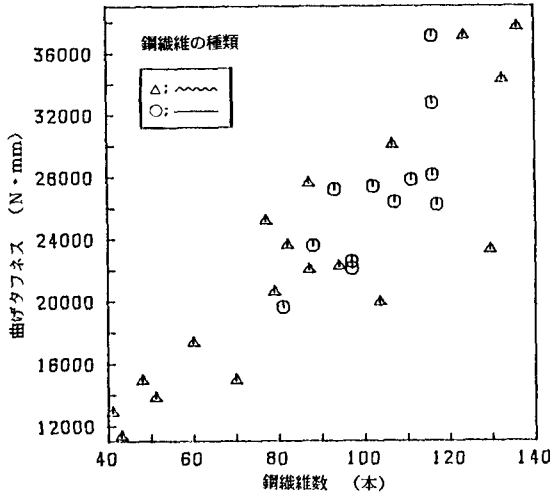


図-5

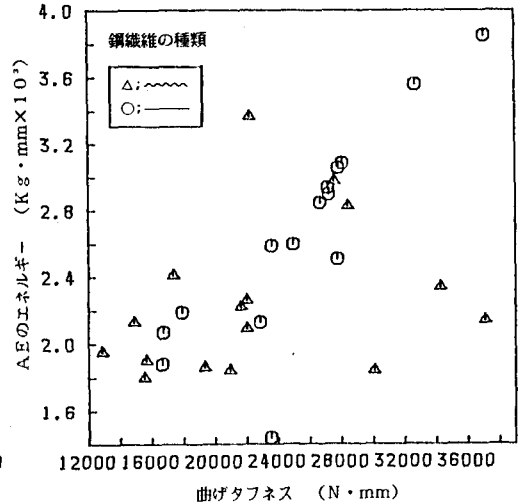


図-6

5) Modulus of Toughness

M.O.T.と鋼繊維混入率と関係を図-7に示した。この図から、異形の鋼繊維については、鋼繊維混入率の増加に伴いM.O.T.も増加したが、直線状の鋼繊維に関してはその関係は顕著ではなかった。

4. 結論

- (1) 直線状と異形状の鋼繊維の混入率と実際の繊維本数の分散の度合は、両繊維とも同程度であった。またポリエチレン繊維の場合には、大きなばらつきはなかった
- (2) 曲げ強度は、鋼繊維の混入率の増加に伴い大きくなり、同じ混入率では、直線状よりも異形状の鋼繊維の方が値が大きくなった。

また切欠きを有する供試体による破壊靱性試験の結果、本研究のような切欠きの作製方法を行えば切欠き敏感性が繊維補強コンクリートでも見られた。

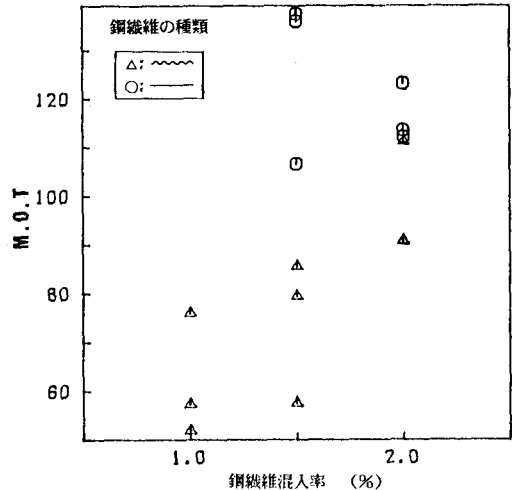


図-7

(3) 曲げタフネスは、鋼繊維の形状にかかわらず本数の増加に伴い大きくなった。ポリエチレン繊維で補強した場合の曲げタフネスの改善効果は見られなかった。

(4) 破壊時に異形状の鋼繊維の場合は、繊維が破断するのに対し直線状の鋼繊維の場合は引き抜けを生じた。

5. 参考文献

- 1) 石田：『破壊力学と材料強度講座2，亀裂の弾性解析と応力拡大係数』，培風館，1976
- 2) 小林ら：『鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性の評価方法』，第2回コンクリート工学年時講演会講演論文集，1980．
- 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) C.H.Henager: 『Steel fibrous concrete a review of testing procedures』, Concrete International, Fibrous Concrete 1980.
- 5) 丹羽ら：『アコースティック・エミッションの発生機構に関する考察』，土木学会論文報告集 第 314 号，1981．
- 6) 丹羽ら：『アコースティック・エミッションによる破壊源探査』，土木学会論文報告集 第 276 号，1978．
- 7) W.F.Brown, and J.Srawley Jr.: 『Plane strain crack toughness testing of high strength metallic materials』，ASTM, STP-410, 1966.