

V-19 鋼繊維補強コンクリートの破壊じん性に関する基礎的実験 (その2)

北海道工業大学	正員	犬塚 雅生
北海道工業大学	正員	堀口 敬
北海道工業大学	学生員	堀本 満
北海道工業大学	学生員	福井 誠

1. 目的

本報告はコンクリートの破壊靱性値の改善を目的とし、鋼繊維補強コンクリート(以下SFRCと略す)の適用を考え、主としてSFRCの破壊靱性値を実験的に求めたものである。コンクリートの破壊靱性試験に関しては、国内においては未だ確立された規格試験はないが、今回の試験においてはACI 544委員会の提唱する¹⁾ Taghness Index (以下T.Iと略す)及び破壊力学の分野においてしばしば利用されている亀裂先端の開口変位量(COD)と荷重(P)との関係を求め、COD-P曲線の面積(A_{cod})を破壊靱性値として求め²⁾³⁾⁴⁾その有効性を検討した。

2. 実験概要

本実験は実験計画法に基づき⁵⁾ 4因子2水準を取り上げ直交表L₁₆を使用して分散分析を行った。

表-1はL₁₆直交表による各因子及び水準のわりつけ表とそれぞれの結果を示したものである。

4因子2水準については表-2の通りである。

表-1 L₁₆直交表による各因子及び水準のわりつけ表と結果

L ₁₆ 直交表					応力拡大 係数 (kg/cm^2)	曲げ 強度 (kg/cm^2)	圧縮 強度 (kg/cm^2)	衝撃回数(回)		T. I		A _{cod} (kg·cm)	
No.	V _F	C	E	Gr				ひび割れ 発生時	破壊 時	C点	D点	E点	F点
1	1	1	1	1	37.2	42.3	318.7	2	3	3.2	4.9	43.4	37.1
2	1	1	1	2	39.9	39.8	325.2	1	2	5.1	2.6	95.4	95.8
3	1	2	1	1	46.5	43.5	376.9	1	2	3.4	2.5	81.3	78.6
4	1	2	1	2	47.0	43.6	349.2	1	2	2.0	2.7	113.4	109.8
5	1	1	2	1	35.7	35.7	219.8	1	2	2.1	5.6	46.5	46.5
6	1	1	2	2	29.5	23.1	194.4	2	3	2.1	9.1	90.4	92.6
7	1	2	2	1	28.5	38.0	243.7	1	2	3.5	7.6	45.6	43.4
8	1	2	2	2	47.0	28.4	262.8	1	2	3.2	2.5	129.7	112.1
9	2	1	1	1	51.7	52.1	396.9	5	47	24.4	66.5	4486.9	4399.7
10	2	1	1	2	67.4	52.0	387.7	6	16	12.1	13.1	2596.2	2537.0
11	2	2	1	1	60.8	43.6	433.2	4	30	5.6	5.1	2242.3	1088.6
12	2	2	1	2	35.6	52.8	453.8	4	21	27.1	29.8	2333.2	1132.0
13	2	1	2	1	48.5	34.8	253.3	8	20	22.3	17.3	1741.6	1891.7
14	2	1	2	2	44.9	35.9	268.9	3	16	18.4	22.4	5343.3	4783.4
15	2	2	2	1	46.3	33.0	297.9	4	20	17.3	43.9	1329.9	1322.3
16	2	2	2	2	76.2	43.1	317.3	3	24	23.9	12.7	2867.8	2450.7

因子Ⅴについては 市販のカットワイヤー(φ26×32mm)を用い、混入量は容積比で示し 今回は0%、1%とした。

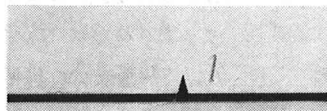
因子Ⅵについては、水中標準養生(+20℃±2℃)、冷凍庫養生(14日間20℃の恒温室中気乾養生の後、-20℃で12時間±0℃で12時間のサイフル養生)の2つを設定した。

因子Ⅶについて、 a は切欠きの深さを表わし α は切欠きの角度を表わすもので 図-1、及び 写真-1に示す。

表-2 因子及び水準

因子	水準	
	1	2
鋼繊維混入量 V_F	$V_{F1}=0\%$	$V_{F2}=1.0\%$
単位セメント量 C	$C_1=350$ (kg/m^3)	$C_2=400$ (kg/m^3)
養生条件 E	E_1 水中養生	E_2 冷凍庫養生
人工切欠き C_r	$a=1.5cm$ $\alpha=30^\circ$	$a=2.25cm$ $\alpha=30^\circ$

人工切欠き-1の供試体



人工切欠き-2の供試体

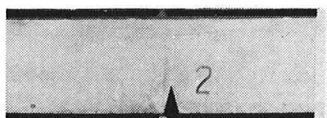


写真-1 (人工切欠き)

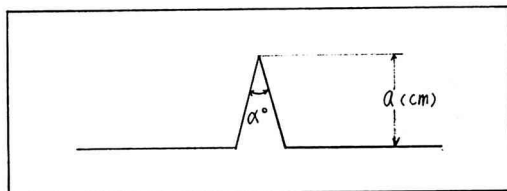


図-1 人工切欠きの形状

因子Ⅷは単位セメント量で350 kg/m^3 と400 kg/m^3 とした。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材の最大粒径10mm、細骨材率60%、AE剤(セメント量の0.04%)を用い 全供試体とも単位水量は175 kg/m^3 とした。コンクリートの練りまぜは 強制練りミキサーを用い、粗骨材、細骨材、セメント、水(AE剤入り)の順で 各回1分間の攪拌、その後 鋼繊維を20mmのふるいを通してファイバーボールのできないように、投入し 2分間の攪拌とした。打込み後 材令1日で脱型した。

曲げ試験は3等分点載荷とし、T、I測定においては図-2のように試験を行った。支点間距離を30cmとし A_{COD} の測定に関しては 切欠き開口部に2個のクリップゲージをセットし(E点、F点)その変位量(初期開口変位をすべて8mmとし12mm迄の開口変位量)と荷重との関係を X-Yレコーダーにより測定した。(図-3)

T、Iの測定においては下辺中心の点C、下辺中心より5cmの点D及び支点の沈下量の測定のため支点2ヶ所にそれぞれダイヤルゲージを設置し 下辺のダイヤルゲージは荷重とともにX-Yレコーダーに連結させた。

衝撃試験は上辺より2m上から鋼球(径:4.6cm 重量411g)を落下させた。この試験に際して同一落下地点になるように プラスチック円管により落下方向を制御した。衝撃回数については肉眼で確認できる亀裂が供試体に発生した時をひび割れ発生時とし 最大たわみが28mmの時を破壊時と定義した。

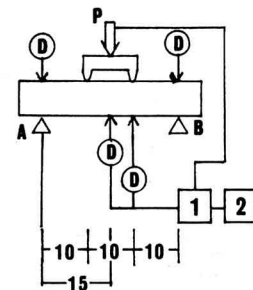


図-2 T、Iの測定方法

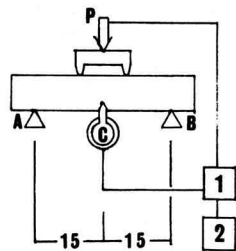


図-3 A_{COD} の測定方法

C: クリップゲージ D: ダイヤルゲージ
I: 動ひずみ測定器 2: X-Yレコーダー

人工切欠きを有する供試体においては応力拡大係数及び A_{COD} を、人工切欠きを有しない供試体においては曲げ強度及び T, I 及び衝撃破壊強さ（初期ひび割れ回数及び破壊回数）をそれぞれ求めた。以上すべての供試体は $75 \times 75 \times 40$ (cm) の角柱供試体を用いた。

3. 実験結果

3-1 応力拡大係数(K)

人工切欠きのある供試体を用いて4点曲げ試験を行い 応力拡大係数を(1)式を用いて求めた。

$$K = Y \cdot \frac{6 M \sqrt{a}}{B \cdot W} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{ここで } Y = 1.99 - 2.47 (a/W) + 12.97 (a/W)^2 - 23.17 (a/W)^3 + 24.80 (a/W)^4$$

a : 切欠きの深さ (2.25 及び 1.50 cm)

W : 供試体の高さ (7.50 cm) B : 供試体の幅 (7.50 cm) M : モーメント $M = PL/6$

(1)式より得られた K 値を用いて分散分析すると表-3のようになる。表中の*印は F 検定において5%危険率有意水準を満足したものを **印は同じく1%危険率有意水準を満足したものを表わすが 表-3においては1%危険率有意水準を満足したものはなく ~~鋼繊維~~混入量の因子が5%危険率有意水準を満足しその寄与率は21.1%となった。

表-3 応力拡大係数の分散分析表

因子	平方和	自由度	平均平方和	F 値	寄与率(%)
V_F	3027.200	1	3027.200	7.047*	21.1
E	1050.279	1	1050.279	2.445	5.0
$V_F \times C$	905.740	1	905.740	2.109	3.9
$E \times C$	1325.807	1	1325.807	3.086	7.3
$E \times C_r$	1312.153	1	1312.153	3.054	7.2
$C \times C_r$	829.438	1	829.438	1.931	3.2
e'	3866.048	9	429.561	1.000	52.3

3-2 曲げ強度

応力拡大係数と同様に分散分析を行うと表-4のようになる。表-4では~~鋼繊維~~混入量、養生条件の因子が1%危険率有意水準を満足し その寄与率は それぞれ19.5%、57.0%となった。しかし単位セメント量及びその他の交互作用では有意性は見られなかった。

表-4 曲げ強度の分散分析表

因子	平方和	自由度	平均平方和	F 値	寄与率(%)
V_F	273.636	1	273.636	18.860**	19.5
C	34.270	1	34.270	2.362	1.5
E	771.728	1	771.728	53.190**	57.0
$V_F \times C$	50.143	1	50.143	3.456	2.7
$E \times C$	52.450	1	52.450	3.615	2.9
e'	145.087	10	14.509	1.000	16.4

3-3 圧縮強度

4本の供試体(T, I, A_{COD} , 曲げ, 衝撃)を用いて計8本の圧縮強度を平均して分散分析すると表-5のようになる。表-5において~~鋼繊維~~混入量、単位セメント量、養生条件の因子において1%危険率有意水準を満足しその寄与率は それぞれ17.8%、8.8%、65.3%となる。

表-5 圧縮強度の分散分析表

因子	平方和	自由度	平均平方和	F 値	寄与率(%)
V_F	16795.641	1	16795.641	33.645**	17.8
C	8548.112	1	8548.112	17.123**	8.8
E	60468.776	1	60468.776	121.130**	65.3
e'	5990.471	12	5990.471	1.000	8.1

3-4 衝撃試験

衝撃試験を ひび割れ発生時の落下回数
及び破壊時の落下回数で分散分析すると
表-6、表-7 のようになる。表-6 にお
いて鋼繊維混入量の因子が1%危険率有意
水準を満足しており単位セメント量の因子
が5%危険率有意水準を満足している。寄
与率はそれぞれ66.2% 5.7%である。
また表-7 において鋼繊維混入量の因子が
1%危険率有意水準を満足しており その
寄与率は70.6%である。

表-6 ひび割れ発生時の落下回数の分散分析表

因子	平方和	自由度	平均平方和	F 値	寄与率(%)
V _F	45.563	1	45.563	36.330**	66.2
C	5.073	1	5.073	4.045*	5.7
e'	16.304	13	1.254	1.000	28.1

表-7 破壊時の落下回数の分散分析表

因子	平方和	自由度	平均平方和	F 値	寄与率(%)
V _F	1936.000	1	1936.000	39.342**	70.6
E	72.250	1	72.250	1.468	0.9
V _F ×E	72.250	1	72.250	1.468	0.9
e'	590.508	12	49.209	1.000	27.6

3-5 T, I

実験概要でふれたように X-Yレコーダ
ーにより書かれたグラフをもとに (2)式を
用いて T, I を求めた。

$$T, I = (A_1 + A_2) / A_1 \dots\dots (2)$$

A₁: 初期ひびわれ時までの面積

(A₁+A₂): ひずみが1.0mmになるまでの面積

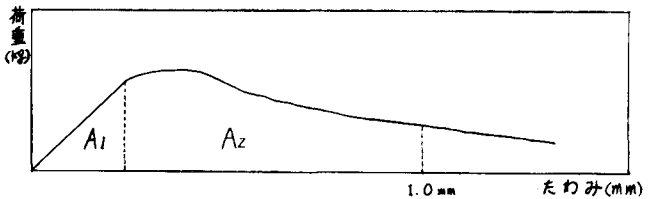


図-4 X-Yレコーダーによる荷重-たわみ曲線

表-8 C点及びD点における T, I の分散分析表

因子	C 点					D 点				
	平方和	自由度	平均平方和	F 値	寄与率(%)	平方和	自由度	平均平方和	F 値	寄与率(%)
V _F	1001.090	1	1001.090	26.620**	70.4	1880.090	1	1880.090	6.740*	33.6
C	0.884	1	0.884	0.023	—	74.650	1	74.650	0.270	—
E	6.250	1	6.250	0.166	—	2.310	1	2.310	0.008	—
V _F ×C	14.862	1	14.862	0.395	—	57.150	1	57.150	0.205	—
V _F ×E	0.518	1	0.518	0.014	—	26.540	1	26.540	0.095	—
C×E	5.798	1	5.798	0.154	—	220.230	1	220.230	0.794	—
e'	338.470	9	37.608	1.000	29.6	2510.650	9	278.960	1.000	66.4

T, I の分散分析の結果、C点に関するものは 鋼繊維混入量が1%危険率有意水準を満足しその因子寄与率は71.3%となった。D点に関しても同様に鋼繊維混入量が5%危険率有意水準を満足しており その因子寄与率は33.6%となった。

3-6 A_{cod}

A_{cod}を荷重曲線において開口変位量4mm増分したところまでの面積を各供試体について測定し分散分析すると表-9 のようになる。表-9 のE点に関する A_{cod} において鋼繊維混入量が1%危険率有意水準を満足しており養生条件と入工切欠きの交互作用で5%危険率有意水準を満足した。寄与率はそれぞれ69.6%、5.7%であった。またF点においても同様に 鋼繊維混入量が1%危険率有意水準を満足している。その寄与率は52.4%であった。

表-9 E点及びF点における Acoodの分散分析表

因子	E 点					F 点				
	平方和($\times 10^3$)	自由度	平均平方和($\times 10^3$)	F 値	寄与率(%)	平方和($\times 10^3$)	自由度	平均平方和($\times 10^3$)	F 値	寄与率(%)
V_F	31.067	1	31.067	56.340**	69.6	22.541	1	22.541	29.190**	52.4
C	1.758	1	1.758	3.190	2.8	3.557	1	3.557	4.610	6.7
$V_F \times C$	1.879	1	1.879	3.410	3.0	3.690	1	3.690	4.780	7.0
$V_F \times C \times r$	—	—	—	—	—	1.905	1	1.905	2.470	2.7
$E \times C \times r$	3.047	1	3.047	5.530*	5.7	2.150	1	2.150	2.780	3.3
E'	6.071	11	0.552	1.000	18.9	7.728	10	0.773	1.000	27.9

4. 考 察

4-1 応力拡大係数 分散分析の結果から主効果のグラフを図-5に示す。鋼繊維の有無は極めて顕著に差が表われている。0%と1%では ほぼ100%の増加が見られた。

4-2 曲げ強度 分散分析の結果から主効果のグラフを図-6に示す。曲げ強度の場合、鋼繊維混入量、養生条件がともに1%危険率有意水準を満足しており鋼繊維1%混入時における増加率及び水中養生における増加率は23.5%、43.0%であった。

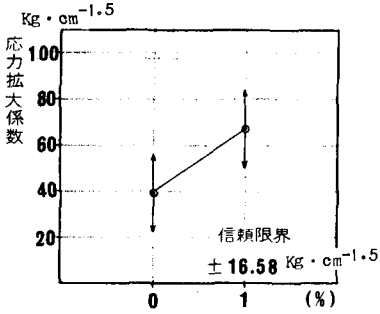


図-5 応力拡大係数と鋼繊維混入量との関係

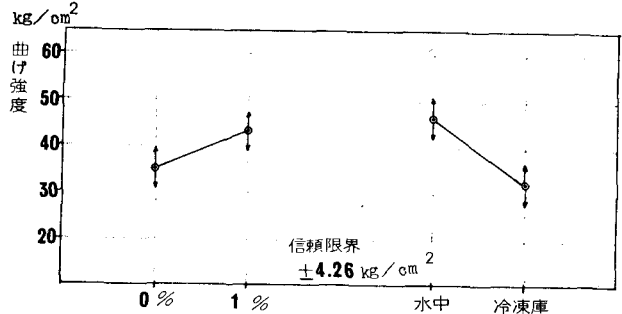


図-6 曲げ強度と鋼繊維混入量及び養生条件との関係

4-3 圧縮強度

分散分析の結果から主効果グラフを図-7に示す。これらのグラフはともに1%危険率有意水準を満足しており各水準の変化による増加率はそれぞれ22.6%、47.8%、15.6%であった。

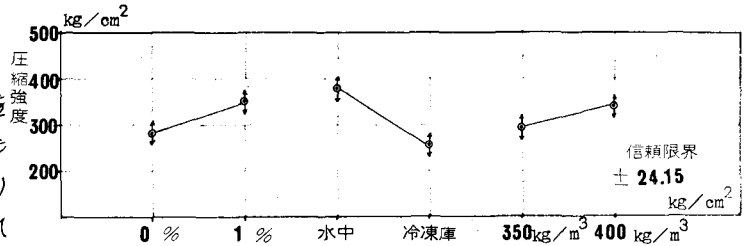


図-7 圧縮強度と鋼繊維混入量及び養生条件及び単位セメント量との関係

4-4 衝撃試験

分散分析の結果から主効果グラフを図-8、9に示す。図-8ではひび割れ時において鋼繊維1%混入及び単位セメント量減少によりそれぞれ約3倍及び1.5倍の増加となった。また破壊時においては鋼繊維の1%混入により10倍の値を示した。

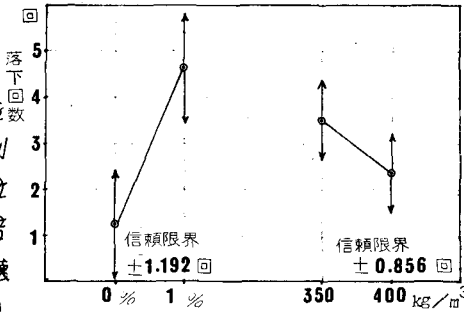


図-8 ひび割れ発生時における落下回数と鋼繊維混入量及び単位セメント量との関係

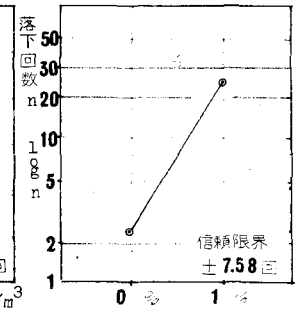


図-9 破壊時における落下回数と鋼繊維混入量との関係

4-5. T, I

分散分析の結果から T, I と鋼繊維混入量との関係を主効果グラフに示すと図-10, 図-11 になる。C 点は 1% 危険率有意水準を、D 点は 5% 危険率有意水準をそれぞれ満足したものであるが C, D 点ともに鋼繊維を 1% 混入することにより T, I は約 5 倍に増加した。

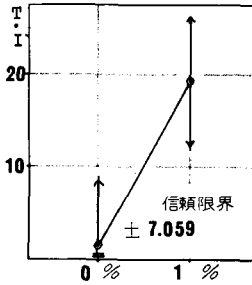


図-10 T, I. (C点)

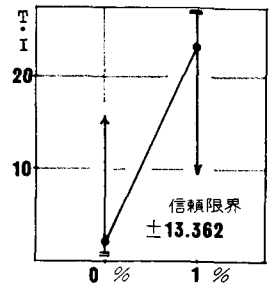


図-11 T, I. (D点)

と鋼繊維混入量との関係

と鋼繊維混入量との関係

4-6 A_{cod}

分散分析の結果から主効果グラフを図-12, 13に示す。E 点において鋼繊維を 1% 混入すると 0% 時の約 35 倍となり F 点においても約 31 倍の値となった。また E 点では養生条件と切欠きの交互作用について 切欠きの形状により養生条件と A_{cod} の関係は全く逆の関係を示した。

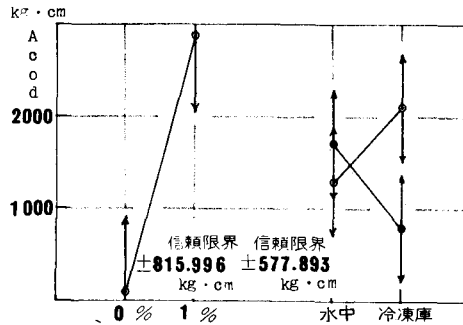


図-12 A_{cod} (E点) と鋼繊維混入量
及び 養生条件との関係

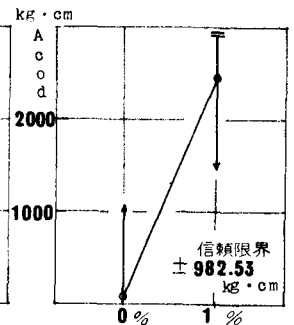


図-13 A_{cod} (F点)
と鋼繊維混入量との関係

5. まとめ

- 1) 応力拡大係数値に関しては鋼繊維の混入による影響が最も著しく 1% 混入すると約 100% の増加が得られる。
- 2) 曲げ強度に関しては鋼繊維混入量と養生条件によりその値は大きく左右される。
- 3) 圧縮強度は鋼繊維混入量、単位セメント量、養生条件が有意となり因子寄与率として養生条件が 65.3% と最も高い値を示した。
- 4) ひび割れ発生時までの平衡値は鋼繊維混入量及び単位セメント量の影響を受けるが 破壊時までの平衡値においては鋼繊維混入量のみが有意となった。
- 5) T, I に関しては鋼繊維混入量のみが 2 点の測定において有意となったが 中心点 C に関する測定値の方が有意性が高かった。
- 6) A_{cod} に関しても T, I と同様の結果が得られたが誤差の因子寄与率を計算した場合 A_{cod} 値の方が小さい値となり、より精度の高い靱性値に関する測定が可能だと思われる。

(参考文献)

1) ACI 544 委員会報告

2) 犬塚 雅生, 堀口 敬ら 鋼繊維補強コンクリートの破壊靱性について

土木学会 北海道支部 論文報告集第 36 号 昭和 55 年

3) 森田, 加藤 亀裂開口変位量を用いたコンクリートの破壊靱性評価に関する基礎的研究

土木学会 第 34 回 年講

4) 石田 誠 さ裂の弾性解析と応力拡大係 倍風館 昭和 51 年 6 月

5) 田口 玄一 実験計画法 上下 丸善 昭和 45 年 7 月

6) 小林 一輔 鋼繊維補強コンクリート 土木施工 1978 年

7) R. N. Swamy and P. S. Mangat : Properties of Fiber Reinforced Concrete 1974 年