

V-4 鋼繊維補強コンクリートの破壊靱性に関する基礎的実験(その1)

北海道工業大学 正員 犬塚 雅生

" 正員 堀口 敬

" 学生員・佐藤 祐一

1 はじめに

コンクリートの力学的諸性質の改善の目的で、近年鋼繊維補強コンクリート(以下SFRCと略す)の研究が非常に活発に行われている。しかしながらSFRCの主要な特性として考えられる破壊靱性値等を算出す為の定まった試験方法は未だ確立されていない。

本報告は主として金属材料試験等に用いられる人工切り欠きを有する供試体を用い破壊力率の手法を用いてSFRCの破壊靱性値を求め、それらの特性値に関する鋼繊維の種類、容積混入率等の因子の有意性を中心に検討したものである。

2 実験概要

本実験は実験計画法に基づき、6因子3水準を取り上げ直交表L₂₇(表2-1)を組み解析を行った。

6因子3水準については次の通りである。

因子	水準
鋼繊維種類 SF	1. カットワイヤー 2. せん断品A 3. " B
鋼繊維混入率 VF	1. 容積混入率 1 % 2. " 1.5 % 3. " 2 %
単位セメント量 C	1. 350 kg/m ³ 2. 400 kg/m ³ 3. 450 kg/m ³
養生条件 E	1. 水中養生 2. 気乾養生 3. 冷凍庫養生
鋼繊維寸法 S	1. φ 0.5 × 20 mm 2. φ 0.5 × 25 mm 3. φ 0.5 × 32 mm
人工切り欠き Ct	1. Q = 1.50 cm α = 30° 2. Q = 2.27 cm α = 30° 3. Q = 1.50 cm α = 60°

因子SFについて、1はシンユーファバー伸線軟鋼

2はシンユーファバー薄板軟鋼

3はスティバー である。

因子Eについては、1は恒温水槽20℃±2

2は乾燥室内20℃±2

3は12時間0℃、12時間

-20℃の1サイクル

以上の条件において養生を行った。

供試体NO	SF	VF	C	E	S	Ct
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	2
5	1	2	3	3	2	3
6	1	2	1	1	3	1
7	1	3	3	3	1	3
8	1	3	1	1	2	1
9	1	3	2	2	3	2
10	2	1	2	3	1	1
11	2	1	3	1	2	2
12	2	1	1	2	3	3
13	2	2	3	1	1	2
14	2	2	1	2	2	3
15	2	2	2	3	3	1
16	2	3	1	2	1	3
17	2	3	2	3	2	1
18	2	3	3	1	3	2
19	3	1	3	2	1	1
20	3	1	1	3	2	2
21	3	1	2	1	3	3
22	3	2	1	3	1	2
23	3	2	2	1	2	3
24	3	2	3	2	3	1
25	3	3	2	1	1	3
26	3	3	3	2	2	1
27	3	3	1	3	3	2

表2-1 直交表L₂₇

因子 α について、 α 及び a は図2-1の通りである。

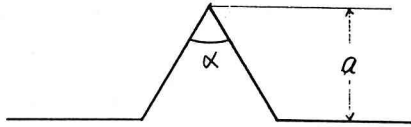


図 2-1

また、人工切り欠きの状態について写真2-1を補足する。

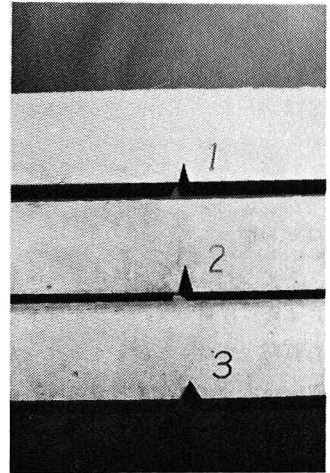


写真 2-1

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、細骨材率を60%とし、市販の減水剤(セメント量の1.2%) AE剤(セメント量の0.04%)を用いた。

コンクリートの練り混ぜは、強制練りミキサーを用い粗骨材、細骨材、セメント、水(減水剤、AE剤入り) 鋼繊維の順で、鋼繊維の前までは各回、1分間のかくはんを行ない、鋼繊維投入時は2分間とした。また、フアイバーボールができないように1.5cmのふるいを用いて、均等になるようミキサーに投入した。

打込み後、供試体は材令1日で脱型し、水中養生は実験の前日に水中より出し、恒温室で養生した。気乾養生は恒温室で養生させた。冷凍庫養生については、14日間冷凍庫、その後14日間恒温室で養生した。

曲げ試験は図2-2のように3等分点荷重とした。

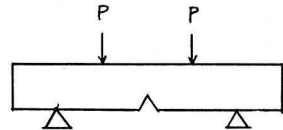


図 2-2

本実験はSFRCの破壊力学上で1つのパラメータとなる応力拡大係数 K を求めることに主眼を置いた。その他の測定値としては、破壊荷重及び、圧縮強度を求めた。

3 実験結果

(3-1) 応力拡大係数 K

各実験番号の供試体それぞれ3本の製作し、4点曲げ試験を行い応力拡大係数を以下の式を用い算出した。

$$K = Y \cdot \frac{6M}{B W^2} \quad Y = 1.99 - 2.47(\alpha_w) + 12.97(\alpha_w)^2 - 23.17(\alpha_w)^3 + 24.80(\alpha_w)^4$$

M : き裂部の曲げモーメント B : 供試体の幅 a : 切り欠き深さ W : 供試体の高さ

上式より得られた K 値を用い分散分析すると表のようになる。

表中の*印はF検定において、1%危険率有意水準を満足したものを**印、5%危険率有意水準のものを*印で示している。

表3-1では、鋼繊維混入量及び鋼繊維寸法の因子が1%危険率有意水準を満足し、その寄与率は、それぞれ21.58%、22.55%である。

因子	平均和 S^2	自由度	平均平方和	F'	寄与率
VF	3679.01	2	1839.51	7.28**	21.58%
E	1763.79	2	881.90	3.49	8.55%
S	3969.67	2	1984.84	7.85**	22.55%
CT	684.29	2	342.15	1.35	1.22%
e	4549.85	18	252.77		45.10%

表 3-1

(3-2) 破壊荷重

応力拡大係数と同様に分散分析を行うと表3-2 のようになる。

表3-2では、鋼繊維混入量、鋼繊維寸法、人工切り欠きの因子が1%危険率有意水準を満足し、その寄与率はそれぞれ18.73%、20.59%、21.83%となった。また養生条件は5%危険率有意水準を満足し、その寄与率は7.35%となった。

因子	平方和 S^2	自由度	平均平方和	F'	寄与率
VF	596.52	2	298.26	8.73**	18.73%
E	275.67	2	137.84	4.03*	7.35%
S	649.22	2	324.61	9.50**	20.59%
Cr	684.13	2	342.07	10.01**	21.83%
e	615.08	18	34.17		31.51%

表3-2

(3-3) 圧縮強度

曲げ試験体の切片による圧縮強度をデータにして、分散分析を行い、結果表3-3が得られた。

表3-3では、鋼繊維種類、セメント量の因子が1%危険率有意水準を満足し、その寄与率はそれぞれ12.98%、32.34%となった。また、鋼繊維寸法は5%危険率有意水準を満足し、その寄与率は2.96%となった。

因子	平方和 S^2	自由度	平均平方和	F'	寄与率
SF	20335.53	2	10167.77	11.50**	12.98%
C	48039.95	2	24019.98	27.19**	32.34%
E	6537.04	2	3268.52	3.97	3.23%
S	17440.94	2	8720.47	4.21*	2.96%
SF×VF	32197.48	4	8049.37	9.10**	20.03%
SF×S	4503.26	4	1125.82	1.27	0.68%
e	8841.59	10	884.16		27.35%

表3-3

4 考察

(4-1) 応力拡大係数の考察

分散分析の結果から主効果グラフを図4-1、図4-2に示した。

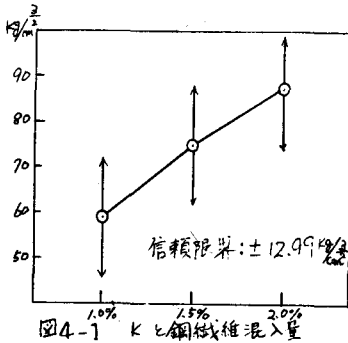


図4-1 k と鋼繊維混入量

① 鋼繊維混入量

鋼繊維混入量が増加するにしたがい応力拡大係数の値も増加し直線性を示している。

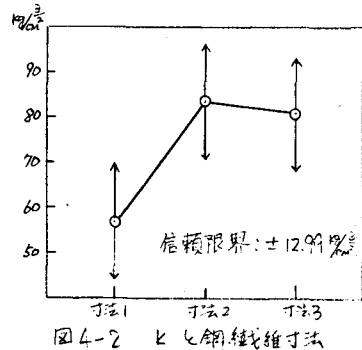


図4-2 k と鋼繊維寸法

② 鋼繊維寸法

寸法2, 3は寸法1の約1.5倍となり大きな差異が見られた。寸法2と寸法3とは大きな差が見られない。

(4-2) 破壊荷重の考察

分散分析の結果から主効果グラフを制作すると、図4-3、図4-4、図4-5、図4-6となった。

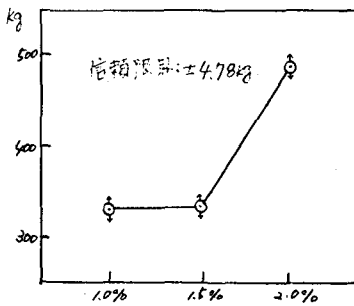


図4-3 破壊荷重と鋼繊維混入量

① 鋼繊維混入量

鋼繊維混入量においては1.0%と1.5%では差が生じないが、2.0%になると約1.5倍となり破壊荷重に関し、約7割の増分が得られる。

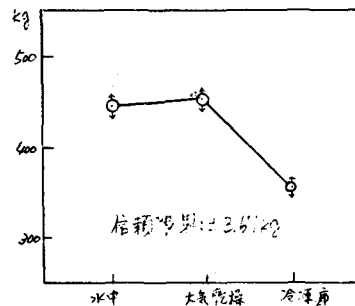


図4-4 破壊荷重と養生条件

② 養生条件

養生条件では5%危険有意水準を満足している。水中養生と気乾養生では差がないが、冷凍庫養生では破壊荷重が大きく低下している。

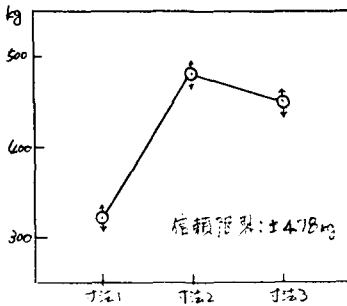


図4-5 破壊荷重と鋼繊維寸法

③ 鋼繊維寸法

鋼繊維寸法に関しては応力拡大係数と同じようなグラフが求められる。寸法1は他の寸法2及び寸法3と比較し破壊荷重の値は著しく低下した。

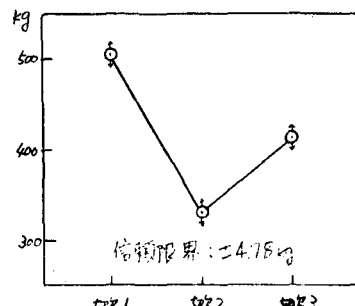


図4-6 破壊荷重と人工切り欠き

④ 人工切り欠き

人工切り欠きについては破壊荷重の強さはNO1、NO3、NO2の順になり、有効断面の減少はもちろんのこと、切り欠き性状によっても影響される。

(4-3) 圧縮強度の考察

分散分析の結果から主効果グラフ 図4-7 図4-8 図4-9 を示した。

① 鋼繊維種類

鋼繊維種類ではせん断面のNO2、NO3は差がなく、カットワイヤーのNO1が大きな値を示した。

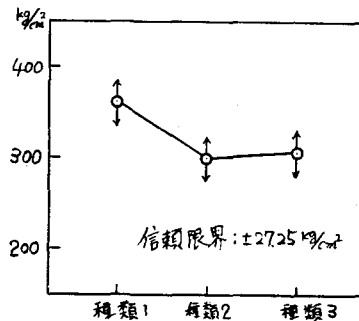


図4-7 圧縮強度と鋼繊維種類

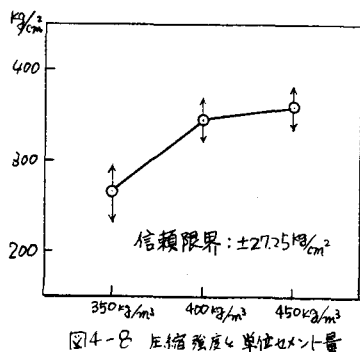


図4-8 圧縮強度と単位セメント量

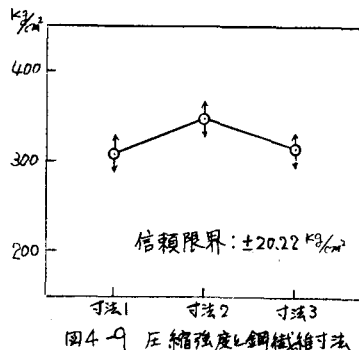


図4-9 圧縮強度と鋼繊維寸法

② 単位セメント量

単位セメント量については、その増加にて強度が増すという直線性が出ているが400kg/m³から450kg/m³では大きな上昇を示していない。単位セメント量の増加に伴う圧縮強度の増加は400kg/m³以降については、大きな効果が得られないようである。

③ 鋼繊維寸法

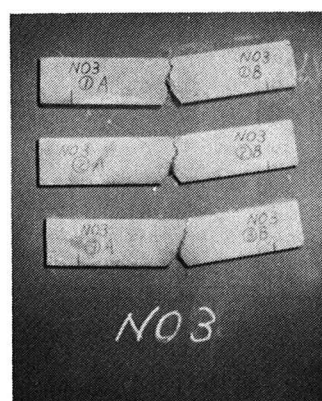
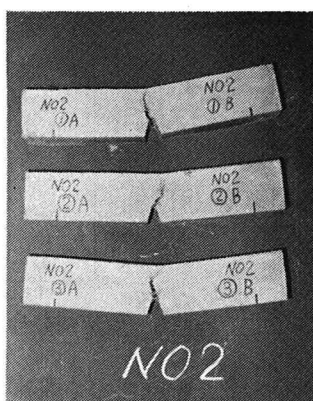
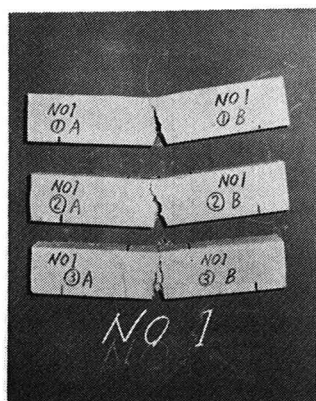
鋼繊維寸法では、寸法2だけが約50%強くなっているが大きな差は見られない。しかし、すべての実験に關し寸法2が最も強い値を示しており、寸法2の付近において最適値が生じると思われる。

5 まとめ

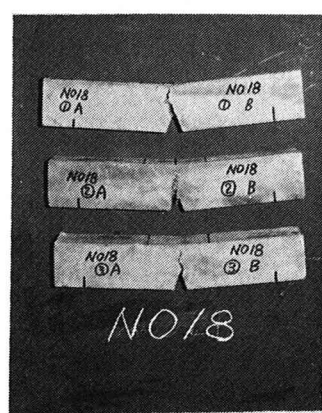
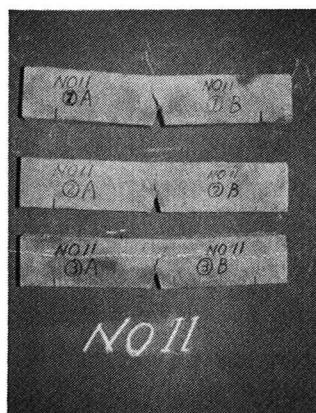
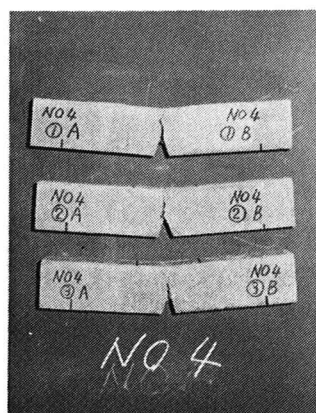
- ① 鋼繊維混入量に關しては、応力拡大係数と独立の相関關係を示し、混入量の1%の増加により応力拡大係数は約50%程度増加が得られるものと推定される。(図4-1) 曲げ試験における破壊荷重は混入量2%になると著しい強度の増加が得られ、曲げ強度を目的として配合設計する場合には混入量2%程度の混入量が必要であろう。(図4-3)
- ② 鋼繊維の種類に關しては、圧縮強度に關し有意性が認められ、カットワイヤー品はせん断品に比較し約20%程度大きな値を示したが(図4-7)、応力拡大係数及び曲げ破壊荷重には大きな影響を及ぼさない。
- ③ 鋼繊維の寸法を3種類設定し、 $l/d = 40, 50, 64$ と変化させたわけであるが、 l/d の増加に伴い応力拡大係数の値も増加するが $l/d = 50$ 以降では、その効果も極めて少く、 $l/d = 50$ 付近で最適値をとった(図4-2) 同様な傾向は破壊荷重及び圧縮強度に關しても言える。(図4-5, 図4-9)
- ④ 単位セメント量の増加に伴い応力拡大係数、曲げ破壊強度、圧縮強度とも増加の傾向を示したが、その影響力は今回の実験の範囲に關しては小さく、圧縮強度のみが有意となった。(図4-8)
- ⑤ 養生条件に關しては、3種の諸強度に關し共に冷蔵庫養生の水準において最も小さい値をとり、その傾向は破壊荷重との關係が最も著しい結果をとった。(図4-4)

(参考文献)

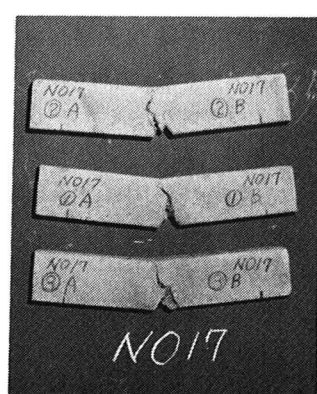
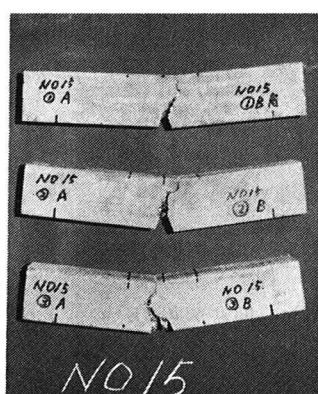
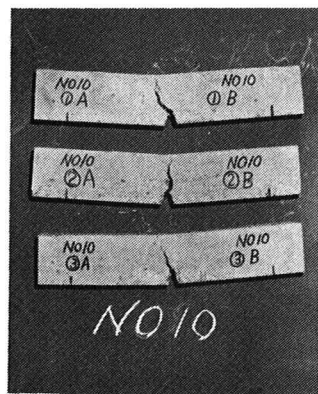
- ・横堀 材料強度学 技報堂 昭和51年12月
- ・石田 き裂の弾性解析と応力拡大係数 培風館 昭和53年9月
- ・田口 実験新画法上、下 丸善 昭和45年7月
- ・犬塚・堀口ら 鋼繊維補強コンクリートの基礎的性状 土木学会北海道支部論報 35号



NO1. NO2 NO3 は 人工切り欠きの水準 1. 2. 3 を示す。



NO4 NO11 NO18は 同一人工切り欠きにおける鋼繊維寸法



NO10 NO15 NO17は 同一人工切り欠きにおける鋼繊維混入量