

論文

[1109] 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ後の引張挙動に関する実験的研究

正会員 楳谷 栄次(関東学院大学)

同 ○町田 恭一(関東学院大学)

1. まえがき

コンクリートマトリックスに鋼繊維を混入するいわゆる鋼繊維補強コンクリート(SFRC)に関して、多くの実験、研究がなされ、建築、土木分野で実用化されつつある。この実用化に際して、曲げおよびせん断に対する強度推定式が必要である。これらを得るためには、引張強度とひずみの関係を明らかにすることが肝要であり、最大強度は素より、特に最大強度到達後の挙動が重要である。従って、本研究は直接引張実験を行い、繊維混入率によるひび割れ後の強度-ひずみ関係、および付着強度、破断面に於ける繊維本数、長さ等を明らかにした。尚、引張に於けるひび割れ後のひずみに関しては、ひび割れ幅を載荷点間で除したひび割れひずみと定義した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材は最大粒径2.5mmの川砂を、また鋼繊維はストレートタイプ(0.5×0.5×30mm)のものを使用した。調査は水セメント比を50%、セメントと砂の割合C:S=1:2とし、鋼繊維量を体積率で1%、1.5%、2%とし、オムニミキサーで混練を行った。

2.2 供試体

試験体は、図1に示すように直径100mm長さ400mmの円筒形とし、中央に幅、深さ共10mmの欠き込みを入れ、中央部で破断するようにした。加力部は、直径18mm、長さ250mmのPC鋼棒を用い、その先端にナットを取り付け、100mm試験体に埋め込んだ。

2.3 実験方法および装置

直接引張実験は、万能試験機により引張力を与え、5tのロードセルを試験体と万能試験機の間に取り付け荷重を測定し、ひび割れ幅は測定範囲5mmのバイゲージを試験体中央の欠き込み部をまたぐように左右対称に取り付け、荷重-ひび割れ幅をX-Yおよびデータレコーダーに記録した。

3. 結果および考察

図3は、直接引張実験による強度-ひずみの結果であり、代表的なひび割れ後の挙動を示した3体を選び、混入率別に表したものである。この結果を見ると、最大強度に達した後、コンクリートにひび割れが生じ耐力は急激に低下し、その後繊維の付着滑り、いわゆる引き抜き抵抗によって徐々に耐力低下していくことがわかる。ここで繊維の引き抜き抵抗が始まる点(丸印)

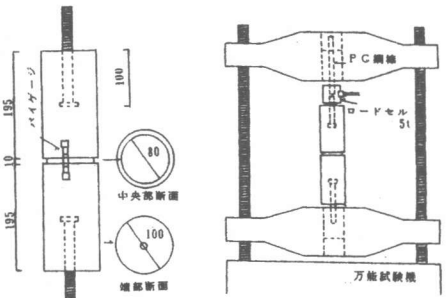


図1 試験体形状

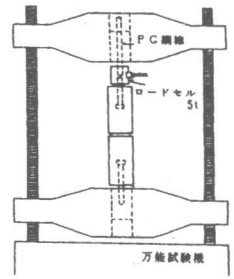


図2 試験装置

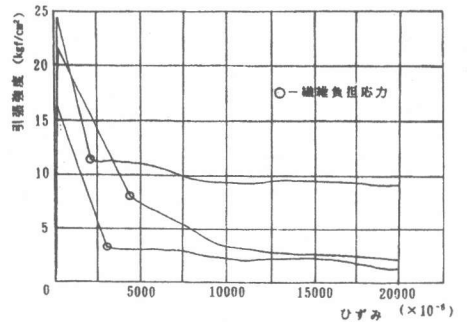


図3-a 引張強度-ひずみ Vf=1%

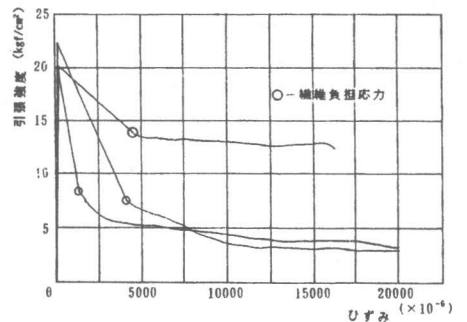


図3-b 引張強度-ひずみ Vf=1.5%

を、繊維負担強度と定義する。この繊維負担強度はバラツキはあるが、全体的に混入率の増加と共に大きくなっている。このことをより明らかにするために、最大強度に対する繊維負担強度の割合を示したのが図4である。この結果を見ると、明かに繊維量を増やすことによって、ひび割れ後の耐力低下が小さくなるのがわかる。尚、参考までに $v_f=1, 1.5\%$ に関して文献(4)の結果をプロットしたが本研究の平均値より下回っている。また、図5は最大強度に対する終局強度の割合を示したものである。ここで終局強度は、終局ひずみ(ひび割れひずみ)を 20000×10^{-6} と定義し、そのときの強度である。この結果を見ると、平均値および回帰直線とも混入率にほとんど影響なく、ほぼ同様な傾向を示している。しかし、これは最大強度の比で表現しているため、実際には繊維量が増加することにより、終局強度はかなりバラツキはあるが増加する傾向にある。このことは、後述するが繊維一本当りの引き抜き長さは、混入率に関係なくほぼ一定であるという結果から、破断面の繊維本数に依存するためと考えられる。

図6は、破断面に於ける繊維本数と繊維混入率の関係をプロットしたものである。平均値および実験値回帰直線を見ると判るように、混入率の増加と共に繊維本数は増しているが、混入率の増加の割合に比べ、繊維本数増加率は低くなっている。また、ひび割れ面を横切る繊維本数を繊維の配向に関する確率分布によって求めた値を、理論値としてグラフに示した。このグラフと回帰直線を比べると、混入率が増すと理論値と実験値の繊維本数の差が開き、混入率2%では実験の平均値が理論値の6割となっている。これらは繊維混入率が増加することによって、混練中繊維がからまり合いファイバーボールを形成し、局部的に多量の繊維が混入する結果と思われる。

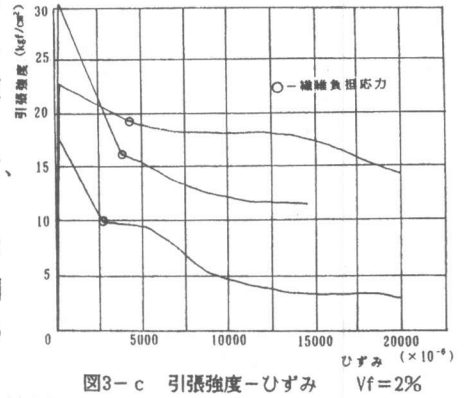


図3-c 引張強度-ひずみ Vf=2%

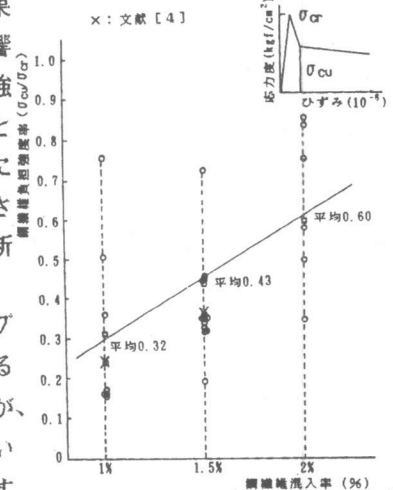


図4 繊維負担強度率-繊維混入率
×: 文献[4]

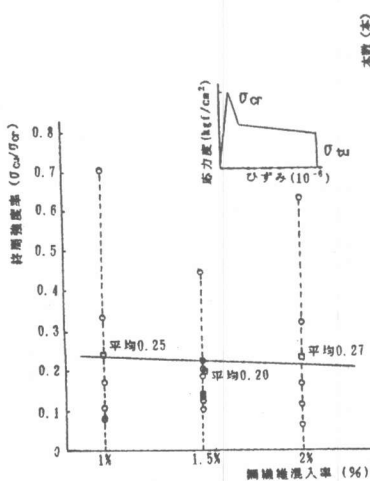


図5 終局強度率-繊維混入率

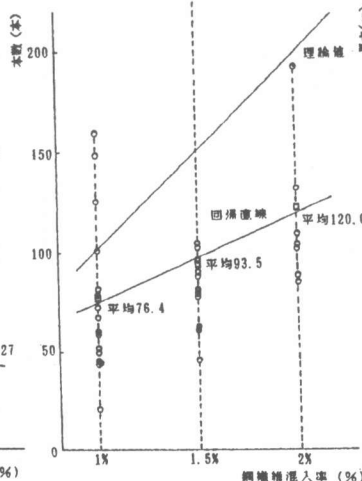


図6 繊維本数-繊維混入率

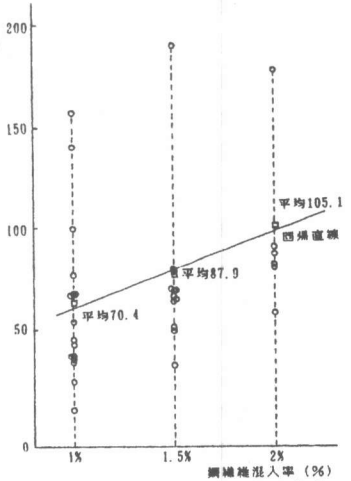


図7 繊維長さ-繊維混入率

図7は、破断面において引き抜かれた繊維の全長さ l と繊維混入率の関係をプロットしたものである。この回帰直線を見ると、図6のそれとほぼ同様な傾向を示している。従って、繊維長さを本数で除した繊維一本当りの引き抜き長さを図8に示した。この結果から、繊維一本当りの引き抜き長さは、混入率にほとんど影響されないことがわかる。尚、各混入率に於ける平均値は0.9cm前後で、一般に引き抜き長さは繊維の長さの1/4と言われており、本実験の場合0.75cmであり、この値を多少上回っているが、誤差は繊維長さの1/20と比較的よく一致している。以上の事から、繊維一本当りの引き抜き長さは、混入率に関係なくほぼ一定となり、全引き抜き長さは繊維本数に対して線形関係となる。

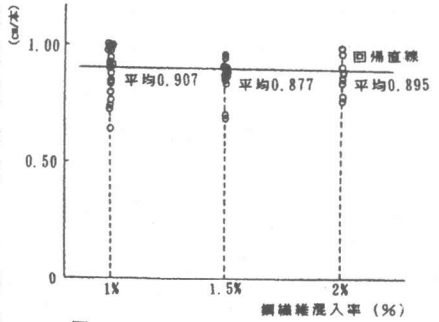


図8 鋼繊維一本当りの長さ-鋼繊維混入率

図9は、付着強度と混入率の関係をプロットしたものである。この付着強度とは、繊維が付着すべりを生じ出す繊維負担強度を、破断面で引き抜かれた繊維の全表面積で除したものである。この結果を見ると、繊維量の増加と共に付着強度も大きくなっている。これは、一般に言われる混入率が少ないと、繊維一本当りに占めるコンクリートマトリックスが多くなり、付着強度が大きくなるということと逆の結果となった。その理由として、一般に付着強度は最大強度に対して求めており、繊維量の増加の割に最大強度は大きくならないが、本報告では繊維量の増加と共に増加する負担強度に対して求めた事と、繊維量が増すことにより繊維がからまり合い引き抜き抵抗が大きくなったためではないかと思われる。

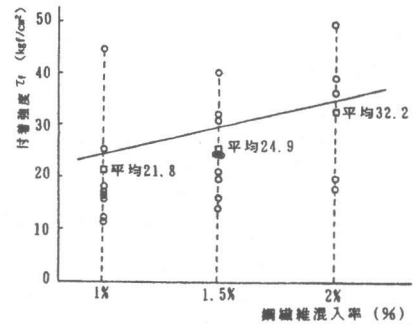


図9 付着強度-鋼繊維混入率

表1 実験結果一覧

試験体	直径 (mm)	本数 N (本)	全長 (cm)	引き抜き長さ (cm/本)	付着力 τ_b (kgf/cm ²)	強度 (kgf/cm ²)				試験体	直径 (mm)	本数 N (本)	全長 (cm)	引き抜き長さ (cm/本)	付着力 τ_b (kgf/cm ²)	強度 (kgf/cm ²)				試験体	直径 (mm)	本数 N (本)	全長 (cm)	引き抜き長さ (cm/本)	付着力 τ_b (kgf/cm ²)	強度 (kgf/cm ²)						
						最大 σ_{cr}	繊維負担 σ_{cu}	終局 σ_{tu}	負担 終局							最大 σ_{cr}	繊維負担 σ_{cu}	終局 σ_{tu}	負担 終局							最大 σ_{cr}	繊維負担 σ_{cu}	終局 σ_{tu}	負担 終局			
T10-01	80.3	50	40.0	0.920	15.76	18.12	2.86	0.92	15.8	8.71	T15-06	80.4	104	74.2	0.714	30.66	24.26	8.97	-	37.0	-	T20-01	105	105	89.5	0.852	-	27.92	-	-	-	-
-02	80.3	43	46.3	1.080	16.74	19.57	3.06	1.38	15.7	7.76	-07	80.6	96	88.4	0.910	20.64	21.84	7.18	-	32.9	-	-02	89	89	91.3	1.026	49.18	23.58	17.14	14.3	72.7	60.8
-03	80.4	78	77.8	0.997	11.89	22.68	3.65	-	16.1	-	-08	80.5	91	79.2	0.921	24.62	16.88	7.65	-	45.4	-	-03	194	194	189	0.975	17.47	16.97	13.15	5.17	77.5	30.5
-04	80.4	60	45.4	0.757	17.07	17.68	3.06	-	17.2	-	-09	80.3	104	74.2	0.714	25.44	24.57	7.51	7.50	30.6	20.6	-04	111	111	96.5	0.869	38.78	30.79	14.89	5.00	48.8	16.4
-05	80.3	161	167	1.041	25.69	20.86	15.08	14.9	72.2	71.5	-10	80.2	232	211	0.910	17.96	20.91	15.10	8.95	72.2	42.8	-05	83	83	67.8	0.816	35.78	16.08	9.37	2.61	58.3	16.2
-06	80.4	78	77.8	0.987	12.44	22.70	3.85	3.85	17.0	17.0	-11	80.2	96	88.4	0.921	14.16	21.81	6.18	4.98	28.3	22.8	-06	101	101	96.3	0.953	19.99	22.88	7.59	2.76	33.2	12.1
-07	80.1	60	45.4	0.757	18.43	17.79	3.33	2.11	18.7	11.9	*T10: $V_f=1\%$, T15: $V_f=1.5\%$, T20: $V_f=2\%$																					
-08	80.4	82	62.8	0.778	46.58	24.56	11.90	8.74	48.5	35.6																						
T15-01	80.3	80	72.5	0.906	19.60	18.13	5.63	2.87	31.1	11.4																						
-02	80.3	81	74.3	0.917	24.23	20.39	7.13	2.97	34.1	14.6																						
-03	80.4	58	51.0	0.879	32.35	17.64	6.54	2.18	38.0	12.4																						
-04	80.3	88	87.5	0.994	24.57	22.14	8.50	2.97	38.4	13.4																						
-05	80.3	57	49.8	0.873	40.16	16.61	7.91	3.16	47.6	19.1																						

4. 引張強度-ひずみのモデル化

SFRC部材の曲げ及びせん断の強度推定式を得るためには、引張ブロックの仮定が必要となる。そこで、本実験結果を用いて、引張ブロックのモデル化を行った。

1つの方法として、最大強度、繊維負担強度、終局強度及びそのときの個々のひずみの平均値を混入率別に求め、引張強度-ひずみのモデル化を行った。その結果を図10に示した。

次に、汎用性をもたせる意味から、鋼繊維混入率とコンクリート圧縮強度をパラメーターとして、引張強度を $\sigma = (A + BV_f)\sqrt{F_c}$ で表現する。尚、 V_f を指数関数で表す方法も試みたが、本実験に関してよい結果が得られなかったため本報では V_f をそのまま用いた。ここで、係数 A、B に関しては $\sigma/\sqrt{F_c}$ と V_f の回帰直線より得られる。その結果、

最大強度 $\sigma_{cr} = (1.075 + 0.062V_f)\sqrt{F_c}$

繊維負担強度 $\sigma_{cu} = (-0.006 + 0.309V_f)\sqrt{F_c}$

終局強度 $\sigma_{tu} = (0.006 + 0.094V_f)\sqrt{F_c}$ となった。

この式の F_c に引張試験体作成時に同一試料によって打設したシリンダーによる圧縮強度の混入率別平均値を用いて計算すると、 V_f が

1%で $\sigma_{cr} = 20.90$ 、 $\sigma_{cu} = 5.75$ 、 $\sigma_{tu} = 1.84$ (kg/cm²)、

1.5%で $\sigma_{cr} = 20.93$ 、 $\sigma_{cu} = 8.20$ 、 $\sigma_{tu} = 2.63$ (kg/cm²)、

2%で $\sigma_{cr} = 22.17$ 、 $\sigma_{cu} = 11.32$ 、 $\sigma_{tu} = 3.59$ (kg/cm²)

となる。参考までに F_c の平均値は1%で338、1.5%で321、2%で342 (kg/cm²) であった。

以上の結果を、ひずみに関しては実験による平均値を用いて図10へプロットすると、前者の平均値によるモデル化と、最大強度、繊維負担強度に関してはかなりよく一致し、終局については過小評価となっている。最後に、付着滑り理論(3)により得られた上界値および下界値を、合わせて図10に破線で示した。この結果を見ると、終局強度を除き上界値と下界値の間にモデル化した両者が存在していることがわかる。このことから付着滑り理論は、上限、下限の目安になると思われる。

5. まとめ

- (1) 繊維負担強度率は、 V_f が1、1.5、2%の順に0.32、0.43、0.60とほぼ繊維量に比例して増加する。
- (2) 繊維負担強度に対する付着強度は、21.85、24.85、32.23 (kg/cm²) と繊維量の増加とともに大きくなる。
- (3) 繊維一本当りの引き抜き長さは、繊維量に関係なくほぼ一定の0.9 (cm) 前後であった。
本実験により以上の結果が得られたが、試験体数が少なく繊維コンクリート特有のバラツキもあり、今後多くの実験を行い、より正確なものを得る所存である。

参考文献

1. 小林 一輔: "鋼繊維コンクリートの引張強度について"、複合材料シンポジウム論文集、1976
2. 藤野 秀夫・小林 一輔・魚本 健人: "鋼繊維補強コンクリートを用いたRC梁のせん断特性に関する基礎的研究"、第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集 1981
3. 槇谷栄次・町田恭一: "鋼繊維補強コンクリートのひび割れ後引張挙動に関する研究"、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.9 1987
4. T.Y.Lim, P.Paramasivam, and S.L.Lee: "Analytical Model for Tensile Behavior of Steel-Fiber Concrete" ACI MATERIALS JOURNAL/July-August 1987

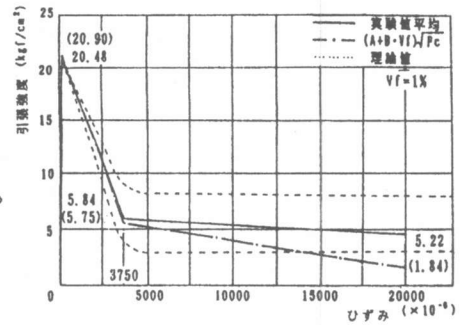


図10-a 応力度-ひずみモデル

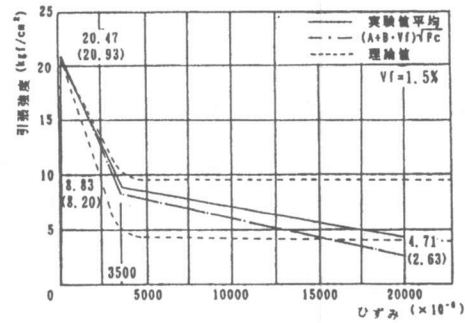


図10-b 応力度-ひずみモデル

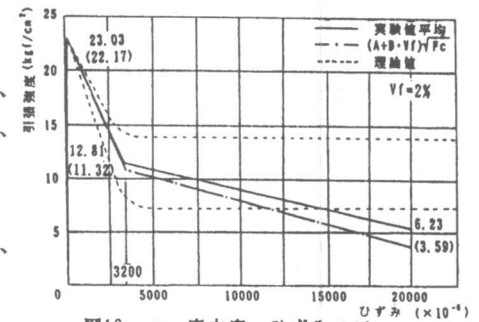


図10-c 応力度-ひずみモデル