

# 論文 引張軟化曲線による鋼繊維補強コンクリートの性能評価

荒川 健\*1・尾崎公則\*2・栗原哲彦\*3・六郷恵哲\*4

**要旨：**数種類の鋼繊維を対象とし、鋼繊維補強コンクリートの性能評価を強度特性に加え、引張軟化曲線や破壊エネルギーなどの破壊力学パラメータを用いて行った。また、引張軟化曲線を推定する際に用いる仮想ひび割れモデルの適用性についても検討した。その結果、繊維の種類により引張軟化曲線の応力低下の度合いの差が明確に現れ、鋼繊維補強コンクリートの性能評価に引張軟化曲線を用いることの有効性を確認した。また仮想ひび割れモデルは、繊維混入率が2%以下である通常の鋼繊維補強コンクリートの場合、適用可能であることを明らかにした。

**キーワード：**鋼繊維補強コンクリート、引張軟化曲線、破壊エネルギー、ひび割れ

## 1. はじめに

短繊維補強コンクリートは、繊維の補強効果により、ひび割れ発生後も荷重が急激に低下することなく変形が増大し、普通コンクリートよりも高靱性・高強度化が期待できる材料である。しかしながら、その性能は、繊維自身の特性、混入率、マトリックスの特性などの組み合わせにより様々に異なってくる。また、繊維混入による性能改善の評価については、従来から用いられてきた曲げ強度に加え、破壊エネルギーや引張軟化曲線などの破壊力学パラメータが有効である [1]。

本研究では、市販されている鋼繊維の中から6種類を選び鋼繊維補強コンクリートを作製し、相対的な性能評価を行った。その際の指標としては、実験により得られた荷重-変位曲線や、引張軟化曲線を用いた。仮想ひび割れを供試体中央に一本配置したモデル（仮想ひび割れモデル）を用いた多直線近似解析手法 [2, 3] により推定した。

軟化曲線の推定に用いる仮想ひび割れモデルは、普通コンクリート曲げ供試体のように一本の主ひび割れにより供試体全体の挙動が支配される場合に対して有効である。しかし、繊維補強コンクリートのように複数ひび割れが発生する可能性がある場合へのモデルの適用性については必ずしも十分には検討されていない。そこで、繊維補強コンクリートの引張軟化曲線の形状の相違をもとに、モデルの適用性について検討した。

## 2. 実験概要

形状や製造方法の異なる6種類の鋼繊維を用いて、鋼繊維補強コンクリートを作製した。使用した鋼繊維の諸特性を表-1、形状を図-1に示す。供試体のシリーズ

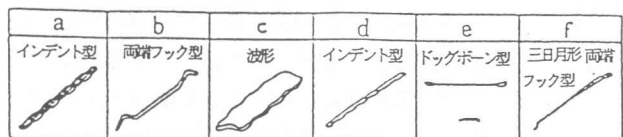


図-1 鋼繊維の形状

- \* 1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）
- \* 2 岐阜大学 工学部土木工学科
- \* 3 岐阜大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）
- \* 4 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

名は、表-1に示した繊維の種類(a, b等)と繊維混入率(1,2等)によって示す。コンクリートの示方配合を表-2に示す。セメントには比重3.12の早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には最大骨材寸法15mmの玉砕石を使用した。b~fシリーズでは、繊維混入率は容積比で1%とし、供試体寸法は、幅10×高さ20×長さ70(スパン60)cmとした。aシリーズについては、仮想ひび割れモデルの適用性を検討するため2%、4%および6%混入した供試体も作製した。表-3に示すような異なる寸法の供試体も作製した。載荷方法は、三等分点曲げ載荷とし、荷重および載荷点変位をそれぞれロードセル(容量10tonfまたは30tonf)、高感度変位計(感度1/500mm)により計測した。

### 3. 解析概要

曲げ載荷試験から引張軟化曲線を推定する橋高ら[2]の提案した多直線近似解析手法に基づき、供試体中央に一本の仮想ひび割れを配置したモデルを組み込んだ引張軟化曲線の自動推定プログラム[3]を用いて、実験で得られた荷重-変位曲線の平均曲線(同一変位における各実験データの荷重を平均し算出したもの)からそれぞれの引張軟化曲線を推定した。この推定方法は、ひび割れ発生後、ひび割れが1節点ずつ進展するごとに逐次引張軟化曲線を仮定し、荷重-変位曲線の解析値と実験値とが一致するように引張軟化曲線を推定するものである。コンクリートは線形弾性体(ポアソン比:0.2)とし、弾性係数は圧縮強度試験時の実測値を用いた。

## 4. 実験および解析結果

### 4. 1 性能評価

試験時材齢における強度試験結果を表-4に示す。実験により得られた荷重-変位曲線を図-2に、解析により推定された引張軟化曲線を図-3に示す。また、荷重変位曲線図における細線

表-1 鋼繊維の諸特性

種類	製造方法	寸法(mm)			アスペクト比	比重
		厚さ	幅	長さ		
a	鋼線切断法	φ0.6	30	50	7.85	
b		φ0.6	30	50	7.85	
c	薄板切断法	0.2	1.3	30	52	7.85
d		0.5	0.5	30	53	7.85
e	溶解抽出法	φ0.5	30	60	7.70	
f	厚板切削法	φ0.6	30	50	7.85	

表-2 コンクリートの示方配合

混入率(%)	W/C(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	G	F	Ad
1.0	49.0	180	378	931	755	78.5	4.2
2.0	49.0	180	378	915	749	157	6.3
4.0	25.0	180	825	1183	—	314	29
6.0	24.0	196	1004	1004	—	468	40.2

表-3 供試体寸法および実験結果

シリーズ	供試体名	供試体寸法(cm)		実験結果	
		幅×高さ×供試体長 [スパン]	切欠き 深さ	最大荷重 (kN)	曲り強度 (MPa)
a1	a1-10	10×10×40[30]	—	20.9	6.28
	a1-20	10×20×70[60]	—	37.8	5.70
	a1-30	10×30×105[90]	—	55.1	5.56
a2	a2-10	10×10×40[30]	—	26.1	7.82
	a2-20	10×20×70[60]	—	47.1	7.10
	a2-30	10×30×105[90]	—	67.9	6.84
a4	a4-10	10×10×40[30]	—	71.4	21.5
	a4-20	10×20×70[60]	—	116	17.4
	a4-30	10×30×105[90]	—	151	15.2
a6	a6-10	10×10×40[30]	—	74.3	22.1
	a6-20	10×20×70[60]	—	112	16.4
	an6-10	10×10×40[30]	5	24.2	28.8
	an6-20	10×20×70[60]	10	39.7	23.3

は各供試体の実験データを、太線は平均曲線を示す。各シリーズの実験による曲げ強度および引張軟化曲線から得られた破壊エネルギー（ひび割れ幅 1.5mm までの引張軟化曲線下の面積）を表-5に示す。また、aシリーズに対する各シリーズの破壊エネルギーの比および曲げ強度比を併せて表-5に示す。表-4に示すように圧縮強度はばらつきがほとんどなく、いずれのシリーズも 50MPa 程度となった。曲げ強度および引張強度についても引張強度で多少のばらつきがあるものの繊維の種類による影響は、明確には認められなかった。

表-4 強度試験結果(1)

シリーズ	強度(MPa)			弾性係数 (GPa)
	圧縮	引張	曲げ	
a	52.2	4.60	6.34	30.3
b	49.3	4.40	6.54	29.4
c	49.2	4.40	6.28	29.8
d	48.6	3.87	6.01	29.2
e	48.5	3.78	5.85	29.2
f	45.5	3.68	5.76	31.1

表-5 破壊エネルギーおよび曲げ強度比

シリーズ	破壊エネルギー(N/mm)*1	破壊エネルギー比	曲げ強度比1*2	曲げ強度比2*3
a	2.47	1.00	1.00	1.00
b	2.28	0.92	1.03	0.92
c	2.15	0.87	0.99	1.00
d	1.53	0.62	0.95	0.91
e	1.51	0.61	0.92	0.87
f	1.33	0.54	0.91	0.84

\*破壊エネルギー比、曲げ強度比の値は、aシリーズを基準としたもの

\*1 ひび割れ幅 1.5mm までの破壊エネルギー

\*2 強度試験による曲げ強度から算出したもの

\*3 実験による曲げ強度から算出したもの

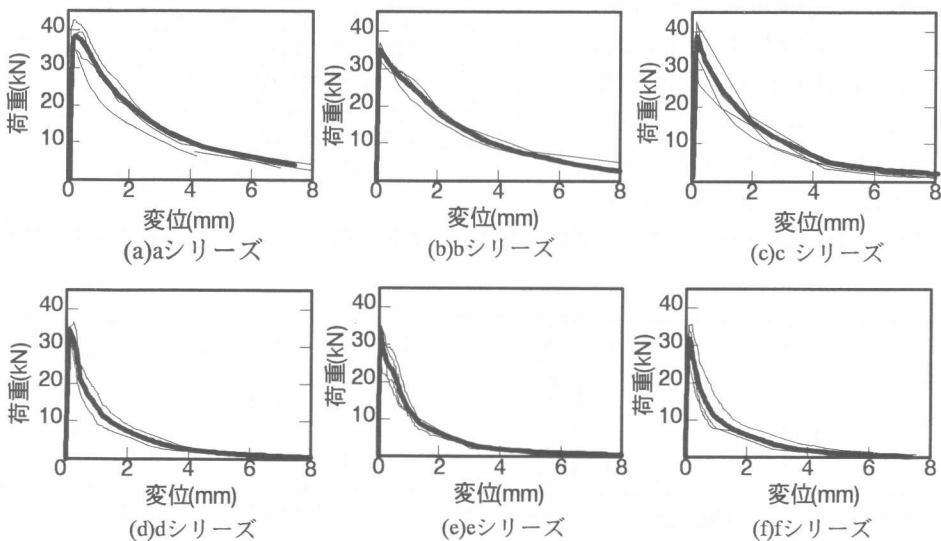


図-2 荷重-変位曲線

しかしながら、破壊エネルギーについては表-5に示すようにa、b、cシリーズに比べてd、e、fシリーズでは比較的小さい値となり、引張強度や曲げ強度では明確に現れなかった差が生じた。また、推定された引張軟化曲線についても破壊エネルギーと同様に、その形状に差が確認された。a、b、cシリーズに対してd、e、fシリーズでは、ひび割れ幅が小さい領域においては大きな差が認められないものの、ひび割れ幅の大きな領域（およそ0.2mm以降）では応力低下の程度に差が生じた。これより、コンクリートにa、b、またはcの繊維を使用した場合、d、e、またはfの繊維を使用した場合に比べて、靱性に優れたコンクリートを作製できることが確認された。さらに、本研究による供試体寸法では鋼繊維の種類

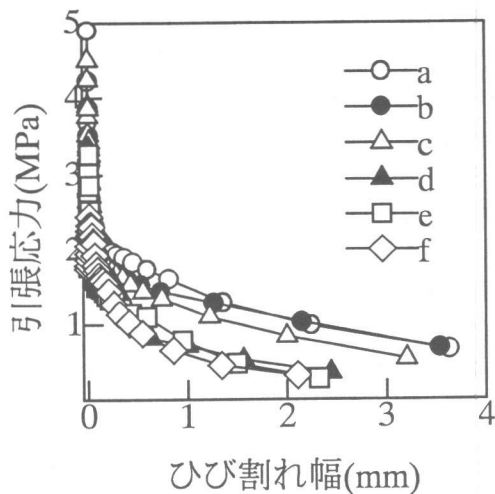


図-3 引張軟化曲線

による影響が曲げ強度に確認されなかったが、破壊エネルギーおよび引張軟化曲線の形状から供試体寸法が大きい場合にはその影響が現れることが予測される。また、引張軟化曲線および破壊エネルギーに差が生じた理由の一つとして、繊維の形状による付着強度の違いが考えられる。以上より、鋼繊維補強コンクリートの性能評価に従来から用いられている曲げ強度に加え、引張軟化曲線や破壊エネルギー等の破壊力学パラメータを用いることが有効なことがわかる。

#### 4. 2 モデルの適用性

試験時材齢におけるaシリーズの強度試験結果を表-6に示す。はり側面におけるひび割れ図の例を図-4に示す。また図における破線は荷重中には確認できたが除荷後に閉じたひび割れである（以下、微細ひび割れとする）。実験により得られた荷重-変位曲線の例を図-5に、実験結果を表-3に示す。図中の細線は各実験データを、太線は平均曲線を表す。繊維混入率の増加と共に最大荷重が

表-6 強度試験結果(2)

シリーズ	強度(MPa)			弾性係数 (GPa)
	圧縮	引張	曲げ	
a1	52.2	4.60[3.66]	6.34	30.3
a2	51.9	6.19[4.70]	8.24	30.1
a4	97.5	13.2[6.86]	20.5	37.8
a6	87.6	14.0[6.52]	22.2	37.6

[ ]内はひび割れ発生荷重時の強度

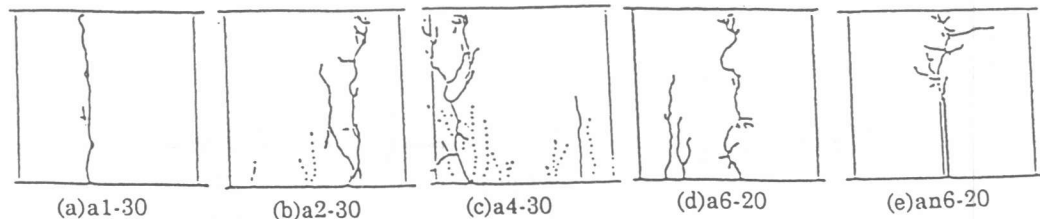


図-4 ひび割れ図

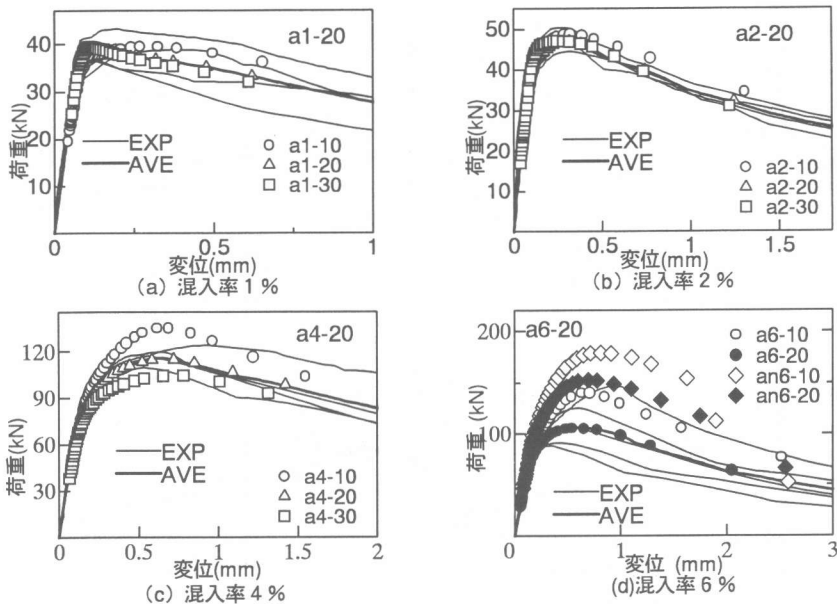


図-5 荷重-変位曲線

大きくなり、a 4 および a 6 シリーズでは曲げ強度が 20MPa を越えるものもあった。

発生した主ひび割れは図-4 に示すように、混入率の増加と共に複雑になり、その本数は a 1、a 2 シリーズでは 1 本、a 4、a 6 シリーズでは 2 本ないし 3 本であった。また a 2 シリーズにおいては微細ひび割れが 2 本ないし 3 本発生していた。さらに切り欠きのある a 6 シリーズでは、スパン方向にもひび割れが進展し、他とは異なるひび割れ性状を示した。

各平均曲線から推定された引張軟化曲線を図-6 に示す。a 1 および a 2 シリーズから推定された引張軟化曲線はおおよそ同一形状のものが得られた。これより、a 1 および a 2 シリーズにおいては、供試体の寸法や形状によらず同一の引張軟化曲線を推定できることが確認された。しかしながら、a 4 および a 6 シリーズでは、同一配合のコンクリートであるにも関わらず、推定された引張軟化曲線の形状に大きな差が生じた。よって、繊維混入率が高い場合は本解析モデルによる引張軟化曲線の推定が困難であると考えられる。また、推定された引張軟化曲線を用いて荷重-変位曲線を解析した結果を図-5 に併記する(○, △, □等の記号で示す)。a 1、a 2 シリーズの解析値はいずれも実験値のばらつきの範囲内にあり、荷重-変位曲線を良好に再現することができた。しかし、a 4、a 6 シリーズの解析による荷重-変位曲線は、実験値のばらつきの範囲内にはなく大きな差が生じた。引張軟化曲線の形状の差の要因として、a 1、a 2 シリーズではおよそ 1 本の主ひび割れで破壊挙動が支配されているが、a 4、a 6 シリーズでは繊維の補強効果により複数のひび割れが発生しており、特に a 6 シリーズの切り欠きのあるはりでは他とは異なるひび割れ分岐性状が見られたことが考えられる。よって、本解析で用いた仮想ひび割れモデルは、繊維混入率が高く複数ひび割れやひび割れの複雑な分岐を生じる場合には適用できないと考えられる。しかしながら、a 2 シリーズのように主ひび割れの他、多少の微細ひび割れが生じる場合では適用可能である。なお、通常の鋼繊維補強コンクリートは、繊維混入率が 2% 以下であるため本モデルは適用可能であると考えられる。

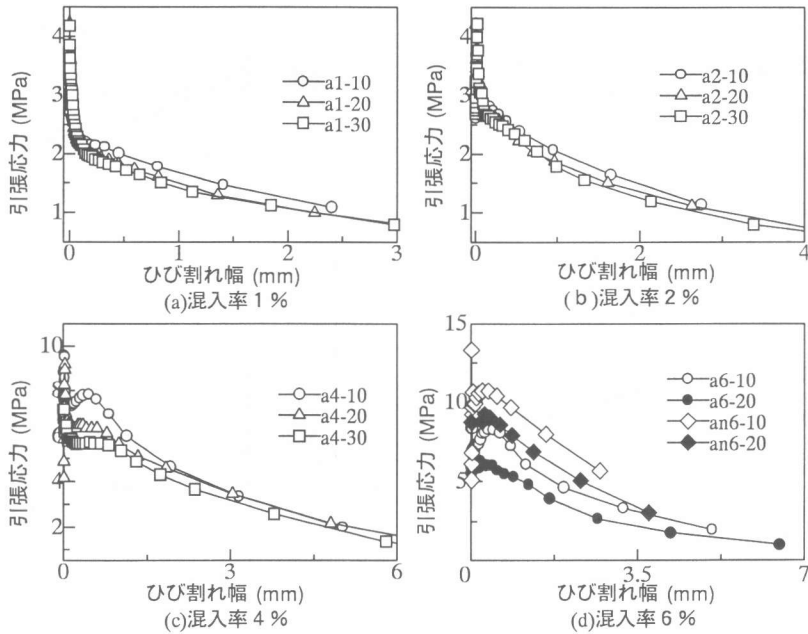


図-6 引張軟化曲線

## 5. まとめ

引張軟化曲線を用いた鋼繊維補強コンクリートの性能評価、および引張軟化曲線を推定する際に用いるモデルの適用性について検討を行った。以下に、本研究で得られた結果をまとめる。

(1) 形状や製造方法の異なる繊維を混入した鋼繊維補強コンクリートの性能評価において、強度特性に大きな影響がない場合でも、引張軟化曲線および破壊エネルギーは差が生じることが確認された。これより、鋼繊維補強コンクリートの性能評価に引張軟化曲線や破壊エネルギーなどの破壊力学パラメータを用いることの有効性が確認された。

(2) 鋼繊維補強コンクリートの引張軟化曲線を、仮想ひび割れをはり中央に一本のみ配置したモデルを組み込んだ多直線近似解析手法により解析した結果、破壊挙動がほぼ1本の主ひび割れにより支配される場合には仮想ひび割れモデルの適用は有効である。なお、主ひび割れの他1、2本の微細ひび割れが生じる場合でも適用可能であることが確認された。しかしながら、複数のひび割れが発生し、それがさらに分岐するような場合には、その適当が困難であることが明らかとなった。なお、通常の鋼繊維補強コンクリートは、繊維混入率が2%以下であるため仮想ひび割れモデルは適用可能であると考えられる。

## 参考文献

- [1] 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書、1993. 10.
- [2] 橋高義典、上村克郎、中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析、日本建築学会構造系論文集、第453号、pp. 15-25、1993.
- [3] 栗原哲彦、安藤貴宏、国枝 稔、内田裕市、六郷恵哲：多直線近似方による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状、土木学会論文集、No. 532/V-30、pp. 119-129、1996. 2.