

多直線近似法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

栗原哲彦¹・安藤貴宏²・国枝 稔³・内田裕市⁴・六郷恵哲⁵

¹正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

²学生員 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

³学生員 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

⁴正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

⁵正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

実験で得られた荷重-変位曲線から、その荷重-変位曲線を良好に再現できる引張軟化曲線を多直線近似法により高精度で客観的に推定する方法について検討した。本推定法を用いることにより、途中に硬化する区間を含む形状が複雑な引張軟化曲線についても、精度良く推定できることが明らかとなった。また、アラミド、ビニロン、鋼の3種類の短繊維を混入した強靱な短繊維補強コンクリートを対象とし、引張軟化曲線を推定し、曲げ破壊性状の評価を行った。

Key Words : fiber reinforced concrete, tension softening diagram, fiber contents, back analysis, flexural failure behavior

1. はじめに

ひびわれの進展によりコンクリートが破壊する場合、ひびわれの先端には破壊進行領域が存在し、ひびわれの進展に伴い引張軟化現象が起こる¹⁾。こうしたコンクリートの破壊現象を解析するに当たり、引張軟化特性(破壊エネルギー、引張軟化曲線の形状)をコンクリートの材料特性の1つとして捉え考慮する必要がある。引張軟化特性(破壊エネルギー、引張軟化曲線)を組み込んだ数値解析手法は、コンクリートの破壊現象を説明するのに有用である。

引張軟化曲線を推定する方法は、従来から様々な方法が提案されている。例えば、①J積分に基づく方法、②実験と数値解析を併用する方法、等を挙げることができる。①に関しては、LiらによるJ積分法²⁾、内田らによる修正J積分法³⁾等を挙げることができる。しかし、②については、最近では橋高らの逆解析を用いた多曲線近似による推定法⁴⁾等を挙げることができる。しかし、いずれも試験法や精度の点で問題がないわけではない。

一方、コンクリートの脆性的な性質を材料レベルで改善した短繊維補強コンクリートは、ひびわれ発生後も急激に荷重が低下することなく変形が増大し、

靱性(破壊時のエネルギー吸収能)に優れた複合材料である。しかし、繊維素材、繊維長さ、混入率、マトリックスコンクリートの特性等の組合せにより、短繊維補強コンクリートの破壊性状は様々に異なってくる。

本論文では、はりの曲げ載荷試験で得られた荷重-変位曲線から、その荷重-変位曲線を良好に再現できる引張軟化曲線を有限要素法(FEM)を用いた多直線近似法により推定する方法について検討した。さらに、実際に3種類の短繊維(アラミド、ビニロン、鋼)を用いた短繊維補強コンクリートを対象とし、その引張軟化曲線を推定し、曲げ破壊性状について検討した。

2. 引張軟化曲線の推定法

本論文では、引張軟化曲線を、供試体中央に仮想ひびわれモデル⁵⁾を組み込んだFEMを用い、橋高らの提案した多直線近似法⁴⁾により推定した。仮想ひびわれモデルとは、ひびわれの進展を節点の分離で表現し、分離した節点間にその節点間距離(ひびわれ幅)に応じて引張軟化曲線から定まる結合力を

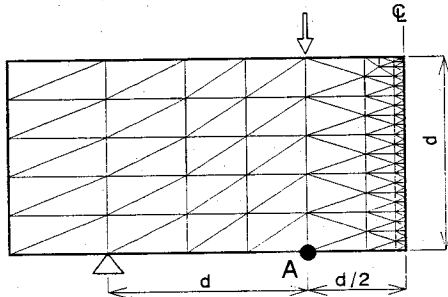


図-1 要素分割図

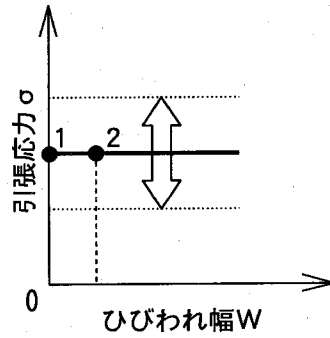


図-2 完全塑性型の引張軟化曲線

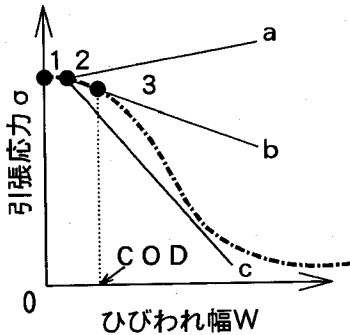


図-3 3点目推定時の引張軟化曲線

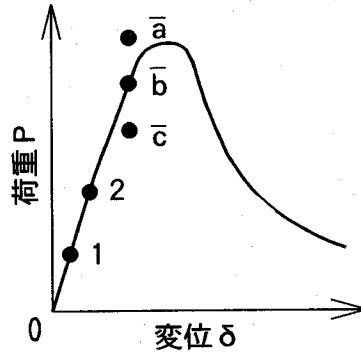


図-4 3点目推定時の荷重-変位曲線

作用させるものである。解析に用いた要素分割図を図-1に示す。ここでは、はり供試体の左半分のみを対象とし、コンクリートは線形弾性体（ポアソン比0.2）とした。

本論文で用いた引張軟化曲線の推定法は、実験で求めた荷重-変位曲線を用い、引張軟化曲線を2段階に分けて推定するものである。すなわち、軟化開始点応力（引張強度）の推定とそれ以降（3点目以降）の推定である。以下にそれぞれの段階における具体的な推定方法を概説する。

(1) 軟化開始点応力の推定

まず、図-2に示すような完全塑性型の引張軟化曲線を仮定し、引張応力を変化させてFEM解析を行う。その解析で得られる荷重-変位（図-1中の点Aでの変位）曲線が実験の荷重-変位曲線と、ある一定の許容誤差（同一変位における荷重の実験値と解析値との差）の範囲内で一致するものの中で、ひびわれ進展長さが最も長くなる場合の引張応力を軟化開始点応力とした。完全塑性型の引張軟化曲線の終点（図-2中の第2点目）については、ひびわれ進展長さが最長となった時の解析により得られるひびわれ開口変位をひびわれ幅とした。

(2) 3点目以降の推定

図-3に示すように第2点目から引張軟化曲線として例えばa, b, cのような直線を仮定し、それぞれの場合についてひびわれが1節点分のみ進展した時の荷重-変位曲線を求める。図-4に解析によって求められた点 \bar{a} , \bar{b} , \bar{c} を示す。図-4において、点 \bar{b} のように解析値と実験値とが一定の許容誤差内（軟化開始点応力推定時と必ずしも同値ではない）で一致した場合、点 \bar{b} におけるひびわれ開口変位を、仮定した引張軟化曲線のb上にとったものを引張軟化曲線の第3点目とした。以下、同様の手順により4点目以降を推定した。図-5に本解析のフローチャートを示す。

ここで本推定法の橋高らが提案した方法⁴⁾との相違点は、本研究ではFEMを用いていること、および軟化開始点応力の決定法の相違の2点である。橋高ら⁴⁾は、ひびわれ方程式を組み立てる場合にFEMでなく線形破壊力学の関数解を用いている。線形破壊力学の関数解を用いる場合、供試体の形状や荷重条件等の境界条件の変化に対する対応は、FEMを用いる場合に比べ煩雑になると考えられる。また、軟化開始点応力については、最大荷重の一致性から求めている。

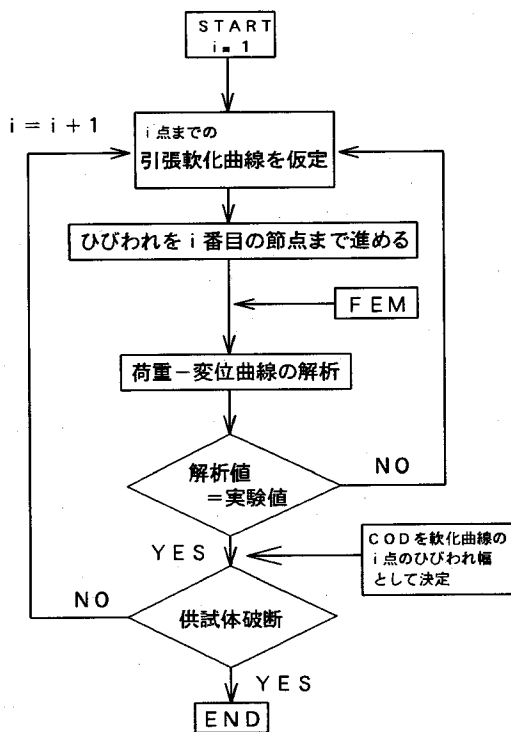


図-5 本推定法のフローチャート

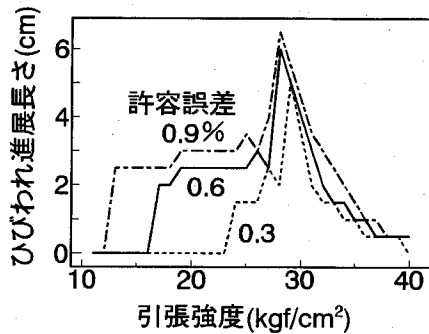


図-6 軟化開始点応力とひびわれ進展長さとの関係

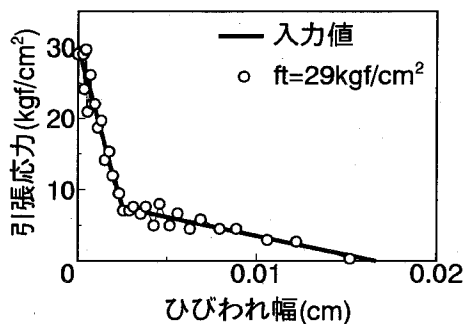


図-7 1/4モデルの推定結果

3. 本推定法の妥当性の確認

本推定法の妥当性を確認するために事前に引張軟化曲線を仮定してFEM解析を行い、得られた荷重-変位曲線を実験値として引張軟化曲線を推定した。ここでは、普通コンクリートを想定し、引張軟化曲線として1/4モデル⁶⁾($f_t=30\text{kgf/cm}^2$, $G_f=0.1\text{kgf/cm}$)を仮定した(以下、入力値と呼ぶ)。また、供試体としては、寸法 $10\times 10\times 40\text{cm}$ の曲げ供試体を想定し、載荷スパン 30cm の3等分点載荷とした。

(1) 軟化開始点応力

軟化開始点応力を推定するに当たり、許容誤差を0.3%、0.6%、0.9%とした場合の3ケースについて解析を行った。図-6に軟化開始点応力(引張強度)とひびわれ進展長さの関係を示す。いずれのケースにおいても軟化開始点応力は入力値である 30kgf/cm^2 に近い値が推定されたが、許容誤差を大きくするとひびわれ進展長さが最長となるとき軟化開始点応力が小さくなる傾向が見られた。

(2) 解の振動防止

前節の許容誤差0.3%とした場合に推定された軟化開始点応力 $f_t=29\text{kgf/cm}^2$ (ひびわれ進展長さ 5cm)から引張軟化曲線を推定した結果を図-7に示す。推定された引張軟化曲線は、入力値を中心として上下に同じ程度の振幅で振動している。そこで、図-8のように引張軟化曲線の3点目以降の推定において、推定された点3と点2の中点を新たに点3'とし、その点から次点を推定するように修正し、以後この操作を繰り返した(以下、修正法と呼ぶ)。これにより推定された引張軟化曲線(軟化開始点、3点目以降の許容誤差ともに0.3%)を図-9に示す。図より、推定された引張軟化曲線は、入力値とよく一致し、上下の振動も解消されていることがわかる。

(3) 軟化開始点応力の引張軟化曲線への影響

軟化開始点応力推定時の許容誤差により軟化開始点応力が変化することが明らかとなったため、その許容誤差が、後の引張軟化曲線全体を推定する場合にどのような影響を与えるのかを検討した。軟化開始点応力を $35, 29, 25\text{kgf/cm}^2$ の3ケースとし、そ

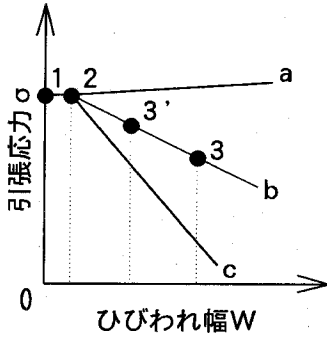


図-8 中点近似による修正法

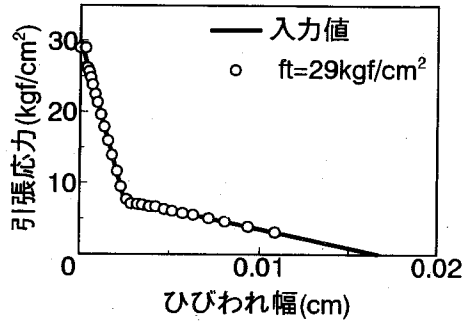


図-9 修正法による1/4モデルの推定結果

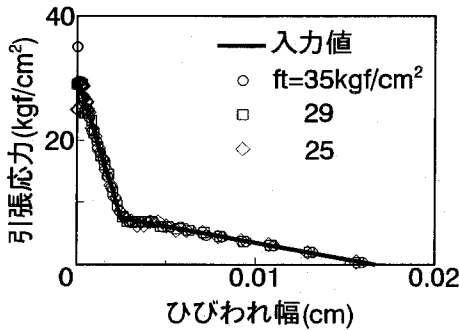


図-10 異なる軟化開始点応力からの推定

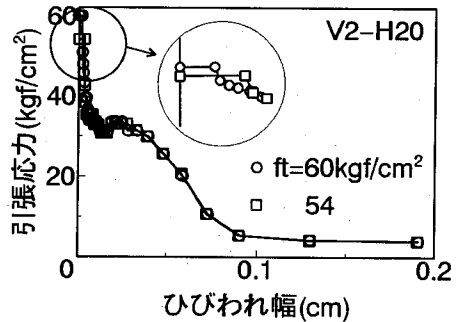


図-11 推定時の許容誤差の影響

それぞれ引張軟化曲線を修正法により推定した。その結果を図-10に示す。推定された引張軟化曲線の形状は、軟化開始点付近では異なるが、それ以降の部分では、どのケースも入力値によく一致し、およそ同一な引張軟化曲線が推定されている。このことから軟化開始点応力は厳密に推定しなくても引張軟化曲線の概形はほぼ推定されることがわかる。

4. 許容誤差の設定

引張軟化曲線の推定における許容誤差の影響を確認するために、ビニロン繊維を容積比で2%混入した高強度モルタル(5章のV2シリーズの供試体、詳細は後述する)を取り上げ、許容誤差を変化させて修正法により引張軟化曲線を推定した。

まず、軟化開始点応力推定時の許容誤差を1.0%、3.0%の2つのケースで推定した。寸法10×20×70cmの供試体(V2-H20)では、許容誤差1.0%で、軟化開始点応力 $ft=60\text{kgf/cm}^2$ 、ひびわれ進展長さ $CL=6.0\text{cm}$ となり、許容誤差3.0%で、 $ft=54\text{kgf/cm}^2$ 、 $CL=8.0\text{cm}$ となった。また、寸法10×10×40cmの供試体(V2-H10)では、許容誤差1.0%で、

$ft=58\text{kgf/cm}^2$ 、 $CL=0.5\text{cm}$ となり、許容誤差3.0%で、 $ft=55\text{kgf/cm}^2$ 、 $CL=9.5\text{cm}$ となった。すなわち、許容誤差を変えれば、軟化開始点応力(引張強度)、ひびわれ進展長さとも変化した。

V2-H20について、推定された2つの軟化開始点応力からスタートして引張軟化曲線を推定し、その結果を図-11に示す。なお、いずれのケースとも3点目以降の推定時の許容誤差を1.0%とした。軟化開始点の近くで推定された引張軟化曲線に違いがあるものの全体の概形は、ほぼ同一な引張軟化曲線が推定された。

V2-H10についても、同様に引張軟化曲線の推定を行ったが、許容誤差1.0%で推定された軟化開始点応力からスタートした場合には、解析の初期の段階から解が収束せず、引張軟化曲線は推定できなかった。

このことは、軟化開始点応力推定時にある程度のひびわれが進展していなければ(引張軟化曲線の初期の完全塑性の領域をある程度長くとならなければ)、それ以降の推定が困難となることを示している。したがって、軟化開始点応力を推定する場合にひびわれ進展長さが短い場合は、許容誤差を大きくして推定する必要がある。また、3点目以降の推定時にお

表-1 示方配合

シリーズ名	単位量(kg/m ³)					
	W	C	S	G	F	Ad
A1	163	582	1456	-	13.4	23.3
A2	189	674	1348	-	28.0	27.0
A4	263	943	943	-	58.0	38.0
V2	203	726	1276	-	26.0	29.0
V4	298	1066	746	-	54.0	42.0
F2	140	500	889	774	156	15.0

混和剤 Ad : 高性能 AE 減水剤

表-3 強度試験結果

シリーズ名	強度(kgf/cm ²)			弾性係数(kgf/cm ²)
	圧縮	引張*	曲げ	
A1	835	69.5	96.0	3.46×10 ⁵
A2	859	109.0	134	3.27×10 ⁵
A4	693	95.7	205	2.77×10 ⁵
V2	827	66.6	109	3.40×10 ⁵
V4	671	88.7	140	2.58×10 ⁵
F2	945	70.1	137	3.92×10 ⁵
SF1[2]	390	31.1	51.5	3.20×10 ⁵

*: 割裂引張強度試験時の最大荷重から算出

表-2 供試体

シリーズ名	供試体名	供試体寸法(cm) 幅×高さ×スパン [供試体長]	本数
A1	A1-H10 A1-H20	10×10×30 [40] 10×20×60 [70]	4 4
A2	A2-H10 A2-H20	10×10×30 [40] 10×20×60 [70]	3 4
A4	A4-H10 A4-H20	10×10×30 [40] 10×20×60 [70]	4 4
V2	V2-H10 V2-H20	10×10×30 [40] 10×20×60 [70]	3 4
V4	V4-H10 V4-H20	10×10×30 [40] 10×20×60 [70]	3 4
F2	F2-H20	10×20×60 [70]	4

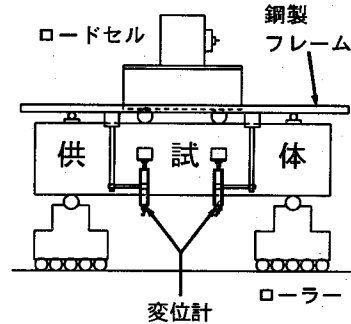


図-12 3等分点曲げ載荷方法

いても許容誤差を小さくしすぎると、解が収束しなくなる場合がある。そのときは、許容誤差を大きくして推定する必要がある。

5. 短繊維補強コンクリートへの適用

(1) 実験概要

a) 供試体の種類

アラミド繊維(φ0.4×30mm)⁷⁾、ビニロン繊維(φ0.38×30mm)、インデント付きストレート鋼繊維(φ0.6×30mm)の3種類の繊維を用いて下記の6種類の繊維補強高強度コンクリート(あるいはモルタル)を作製した。

- ①アラミド繊維を1%混入した高強度モルタル(A1シリーズ)⁷⁾
- ②アラミド繊維を2%混入した高強度モルタル(A2シリーズ)⁷⁾
- ③アラミド繊維を4%混入した高強度モルタル(A4シリーズ)⁷⁾

- ④ビニロン繊維を2%混入した高強度モルタル(V2シリーズ)
- ⑤ビニロン繊維を4%混入した高強度モルタル(V4シリーズ)
- ⑥鋼繊維を2%混入した高強度コンクリート(F2シリーズ)

表-1に各シリーズのコンクリートの示方配合を、表-2に作製した供試体のシリーズ名および供試体名、供試体寸法、本数を示す。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、細骨材には比重2.63、粗粒率2.94のものを、粗骨材には比重2.60、粗粒率6.56、最大寸法15mmのものをを使用した。各短繊維とマトリックスとの付着を高めるため、水セメント比を28%とし、マトリックスを高強度とした。ベースモルタルを良く練り混ぜた後に、粗骨材(F2シリーズ)、繊維の順にミキサに投入してコンクリートを作製した。各シリーズの試験時材齢におけるコンクリートの強度試験結果を表-3に示す。なお、表-3には、比較のため、鋼繊維を1%混入した通常の鋼繊維補強コンクリート(SF1シリー

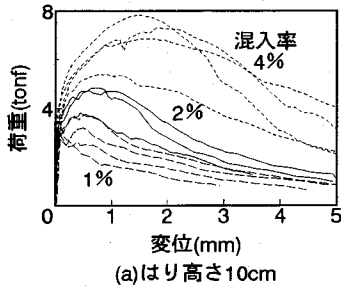


図-13 荷重-変位曲線(A1, A2, A4)

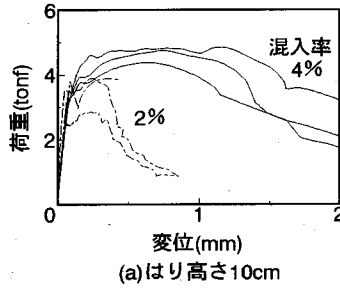


図-14 荷重-変位曲線(V2, V4)

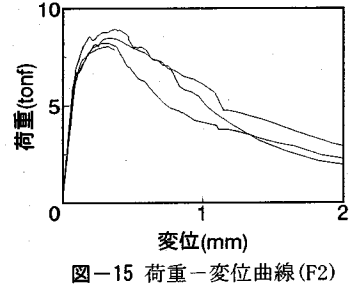


図-15 荷重-変位曲線(F2)

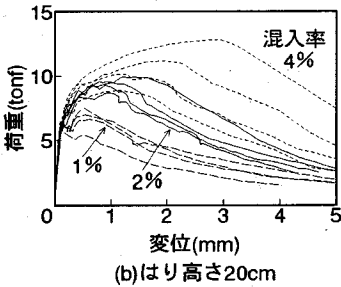


図-13 荷重-変位曲線(A1, A2, A4)

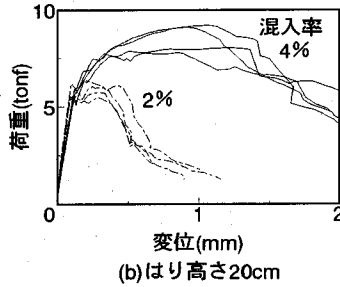


図-14 荷重-変位曲線(V2, V4)

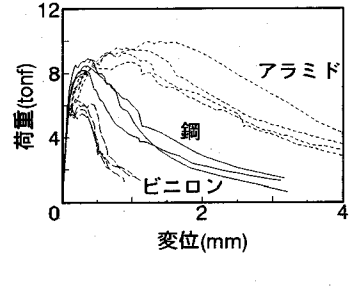


図-16 混入率2%の場合の比較

ズ)の結果⁸⁾も併せて示す。

b) 曲げ載荷試験方法

載荷方法は、3等分点曲げ載荷とした。載荷方法の概略図を図-12に示す。載荷スパンは、はり高さの3倍とし、いずれの供試体も打設方法に垂直に載荷した。支点沈下の影響を排除するために、図-12に示すような鋼製フレームを設置し、そのフレームに変位計を取り付けて変位の計測を行った。載荷試験は供試体が湿潤状態の下で、F2シリーズは材齢約7週、その他のシリーズは材齢約3週で行った。

(2) 実験結果

a) 荷重-変位曲線

実験より得られた各シリーズの荷重-変位曲線を繊維別に図-13~15に示す。実験結果を表-4に示す。アラミド繊維を1% (A1シリーズ)、ピニロン繊維を2%混入した場合 (V2シリーズ)、荷重-変位曲線に明確な2つのピーク荷重が現れた。第1ピーク荷重 (マトリックスのひびわれ発生荷重に相当) を P_1 、第2ピーク荷重 (繊維の補強効果が発揮された後の最大荷重に相当) を P_2 とすると、 P_2 の方が P_1 に比べて同等あるいは少し上回る結果となった。その他のシリーズにおいては、1つしかピーク荷重は現れなかった。これは、繊維混入率の増加に伴う繊維の補強効果の増大により P_1 に比べ P_2 が十分大きくなり、 P_1 が明確に現れなかったためと考えられる。

アラミド繊維を4%混入することにより (A4シリーズ)、 200kgf/cm^2 を越える曲げ強度を有する強靱な繊維補強モルタルが得られた。しかし、アラミド繊維を4%混入したものは、混入率1%、2%と比較して曲線の形状のばらつきが大きくなる傾向にあった。

混入率を増加させることにより、最大荷重および最大荷重点変位が増大し、靱性が著しく増大した。特に、ピニロン繊維の場合に顕著であった。

図-16に寸法 $10 \times 20 \times 70\text{cm}$ の供試体で繊維混入率2%の場合の荷重-変位曲線をまとめて示す。ピニロン、鋼、アラミドの順に最大荷重および最大荷重点変位が増大し、靱性が大きくなった。

b) ひびわれ性状

アラミド繊維を2%および4%混入した供試体において曲げひびわれが分散する傾向にあった。これらの供試体では、表-4からわかるようにひびわれ荷重 P_{cr} に対する最大荷重 P_{max} の比 P_{max}/P_{cr} は1.50以上であった。また、繊維混入率が増加するに伴い主ひびわれ付近に細かいひびわれが発生する傾向にあった。図-17に一例としてアラミド繊維を混入したはり高さ20cmの供試体の側面におけるひびわれ図を示す。図からアラミド繊維の混入率が増加するに伴い主ひびわれ付近に非常に細かいひびわれが多数発生しているのがわかる。これは、アラミド繊維がマトリックスとの付着に優れているためであると考えられる。

表-4 実験結果

供試体名	ひびわれ荷重 Pcr (tonf)	最大荷重 Pmax (tonf)	Pmax/Pcr	曲げ強度 σ_b (kgf/cm ²)
A1-H20	6.26	6.77	1.08	100
A1-H10	3.00	3.20	1.07	96.1
A2-H20	6.10	9.36	1.53	136
A2-H10	2.89	4.45	1.54	134
A4-H20	6.04	10.8	1.79	155
A4-H10	3.74	6.84	1.83	205
V2-H20	5.72	6.00	1.05	88.0
V2-H10	3.49	3.64	1.04	109
V4-H20	5.66	8.58	1.52	126
V4-H10	3.31	4.65	1.40	140
F2-H20	6.57	8.41	1.28	123

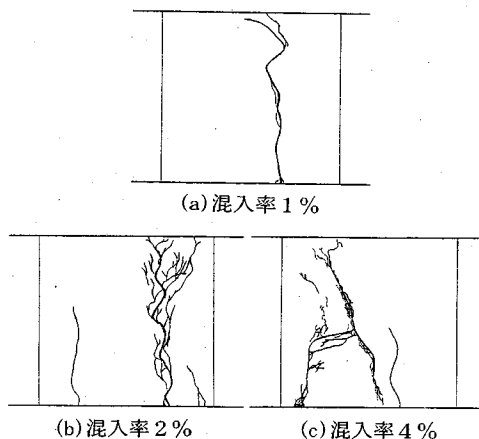


図-17 ひびわれ図(アラミド繊維)

(3) 繊維補強コンクリートの引張軟化曲線

各シリーズのより高さ10cmならびに20cmの供試体の平均の荷重-変位曲線から修正法により引張軟化曲線を推定した。

a) アラミド繊維補強高強度モルタル(A1, A2, A4)

推定されたアラミド繊維補強高強度モルタルの引張軟化曲線を図-18~20に示す。軟化開始点応力推定時の許容誤差は、A1-H10で3.5%、そのほかは3.0%とした。3日目以降の推定時では、すべて1.0%とした。

A1シリーズについては、軟化開始点応力は、A1-H10, A1-H20でそれぞれ、56kgf/cm², 64kgf/cm²であり、異なる値となった。しかし、推定された引張軟化曲線の形状については、軟化後再び引張応力が回復する現象が両者とも見られた。また、A1-H20の方がひびわれ幅の大きい領域まで引張軟化曲線が推定された。

A2シリーズについては、軟化開始点応力は、A2-H10, A2-H20それぞれ、51kgf/cm², 57kgf/cm²であった。引張軟化曲線の形状は、どちらも引張応力の回復後に引張応力が一定になる領域が存在することが確認できた。また、A2-H20の方がひびわれ幅の大きい領域まで引張軟化曲線が推定された。

A4シリーズについては、軟化開始点応力は、A4-H10, A4-H20でそれぞれ、69kgf/cm², 57kgf/cm²で、異なる値となった。引張軟化曲線は、A4-H10については、引張応力が軟化後に引張強度を越えており、大幅な引張応力の回復が見られたが、A4-H20については、A4-H10ほどの引張応力の回復は見られなかった。また、繊維混入率が高くなるにつれ破壊エネルギーが著しく大きくなっていることがわかる。

図-21~23に、実験値の荷重-変位曲線と異なる

る寸法の供試体から推定された引張軟化曲線(それぞれ図-18~20に対応)を用いて解析した荷重-変位曲線を示す。なお、図中には同一の供試体から推定された引張軟化曲線を用いて解析した荷重-変位曲線も示す。異なる寸法の供試体から得られた引張軟化曲線を用いて解析した荷重-変位曲線については、A1, A2シリーズでは、高さ20cmの供試体から推定された引張軟化曲線を用いた方が最大荷重が若干高くなる結果となった。一方、A4シリーズでは、高さ10cmの供試体から推定された引張軟化曲線を用いた方が最大荷重が高くなった。しかし、実験値のバラツキが大きいA4シリーズを除けば、異なる寸法の供試体から得られた引張軟化曲線を用いても実験値の荷重-変位曲線はほぼ再現されている。このことから、A4シリーズを除けば推定された引張軟化曲線には寸法効果はないと考えられる。

b) ビニロン繊維補強高強度モルタル(V2, V4)

推定されたビニロン繊維補強高強度モルタルの引張軟化曲線を図-24, 25に示す。推定時の許容誤差は、V2-H10以外では軟化開始点応力推定時およびそれ以降の推定とも1.0%とした。V2-H10については、軟化開始点応力推定時の許容誤差を1.0%とした場合、引張軟化曲線の推定ができなかったために軟化開始点応力推定時は3.0%、それ以降の推定では1.0%とした。

V2シリーズでは、軟化開始点応力は、V2-H10, V2-H20でそれぞれ、55kgf/cm², 60kgf/cm²であり、異なる結果となった。引張軟化曲線の形状は、どちらも軟化後に引張応力が回復する形状を示し、ほぼ同一な形状を示した。

V4シリーズについては、軟化開始点応力は、V4-H10, V4-H20でそれぞれ、60kgf/cm², 59kgf/cm²と推

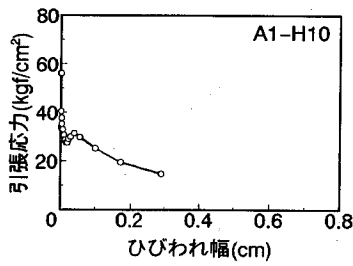


図-18 引張軟化曲線(A1)

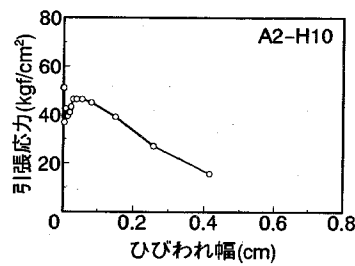


図-19 引張軟化曲線(A2)

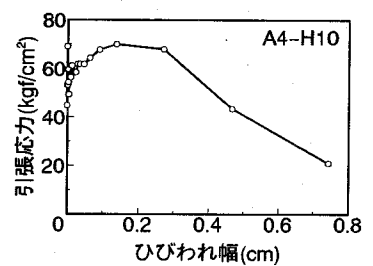


図-20 引張軟化曲線(A4)

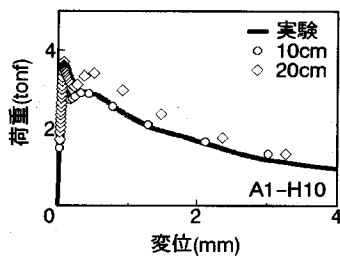
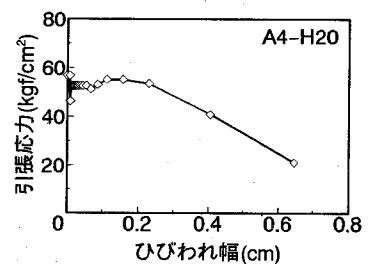
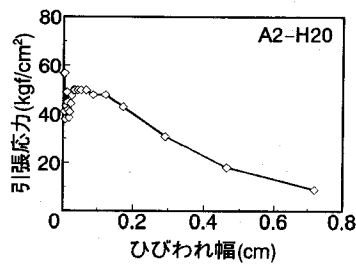
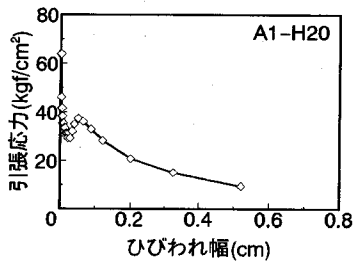


図-21 荷重-変位曲線(A1)

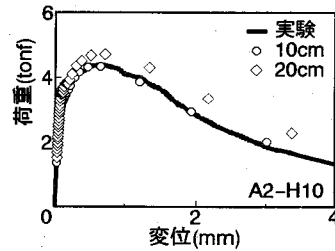


図-22 荷重-変位曲線(A2)

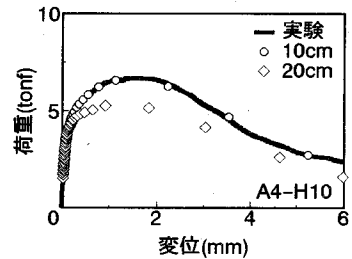
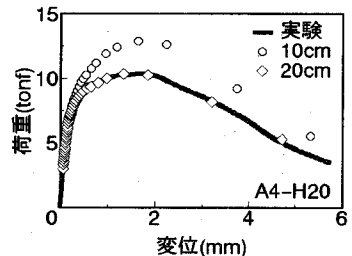
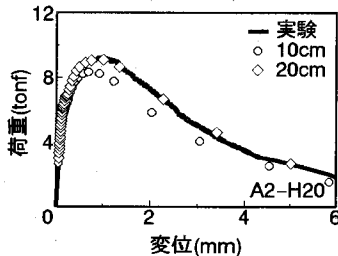
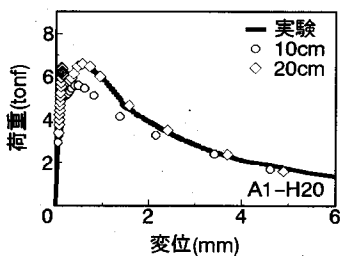


図-23 荷重-変位曲線(A4)



定され、ほぼ同じ値であった。引張軟化曲線は、V2シリーズほどの引張応力の回復は示さなかったが、軟化後に引張応力が、一定となる領域がどちらにもあり、全体の形状もほぼ同じであることがわかる。また、V2シリーズに比べるとV4シリーズは、繊維混入率が高いため推定された引張軟化曲線下の面積、すなわち破壊エネルギーが著しく大きくなっていることがわかる。

図-26、27に、実験値の荷重-変位曲線と異なる寸法の供試体から推定された引張軟化曲線（それぞ

れ図-24、25に対応）を用いて求めた荷重-変位曲線を示す。異なる寸法の供試体から得られた引張軟化曲線を用いて解析した荷重-変位曲線はそれぞれ実験値にほぼ一致しており、推定された引張軟化曲線には寸法効果はないと考えられる。

c) 鋼繊維補強高強度コンクリート(F2)

推定された鋼繊維補強高強度コンクリートの引張軟化曲線を図-28に示す。推定された軟化開始点応力は58kgf/cm²であった。図よりF2シリーズにおいても軟化後、引張応力が一定となる領域があること

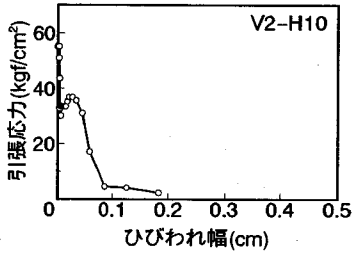


図-24 引張軟化曲線 (V2)

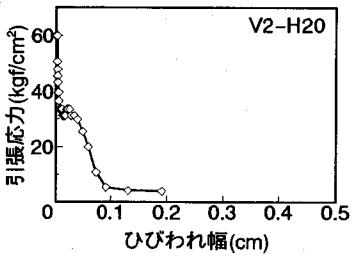


図-24 引張軟化曲線 (V2)

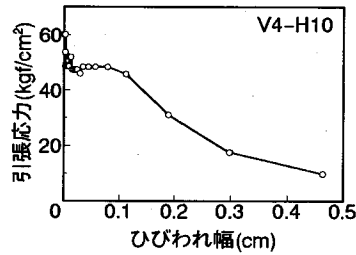


図-25 引張軟化曲線 (V4)

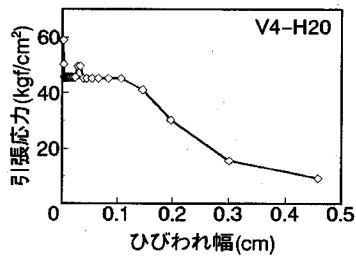


図-25 引張軟化曲線 (V4)

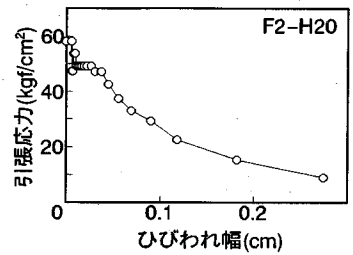


図-28 引張軟化曲線 (F2)

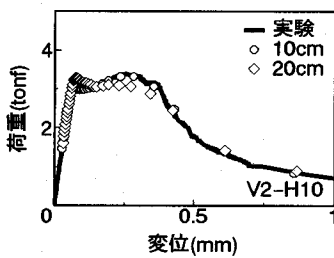


図-26 荷重-変位曲線 (V2)

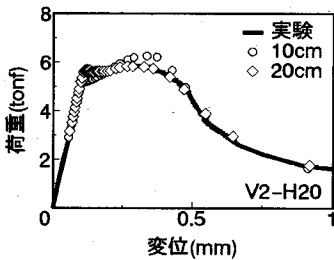


図-26 荷重-変位曲線 (V2)

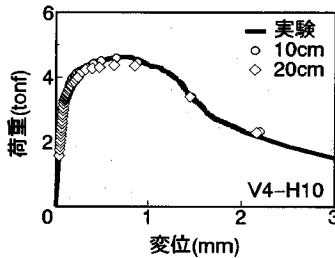


図-27 荷重-変位曲線 (V4)

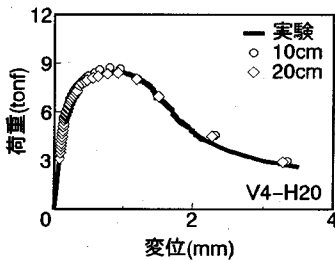


図-27 荷重-変位曲線 (V4)

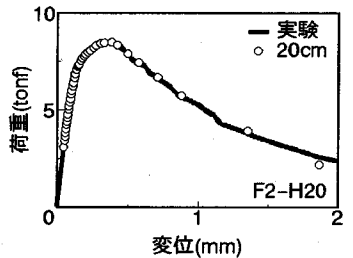


図-29 荷重-変位曲線 (F2)

がわかる。

d) 通常の鋼繊維補強コンクリート (SF1) ⁷⁾

さらに、ここでは比較のため通常の鋼繊維補強コンクリートの実験結果を用いて、引張軟化曲線を推定した。推定された鋼繊維補強コンクリートの引張軟化曲線を図-30 に示す。許容誤差については、いずれの供試体ともすべて1.0%とした。

推定された軟化開始点応力は、SF1-H10、SF1-H20、SF1-H40 それぞれ、30kgf/cm²、25kgf/cm²、29kgf/cm²であった。推定された引張軟化曲線の形

状については、SF1-H10 がなだらかな曲線で軟化しているのに対して、SF1-H20 は軟化後に引張応力の回復が見られ、SF1-H40 は軟化後に引張応力がほぼ一定となる区間が見られた。

また、図-31に、実験値の荷重-変位曲線と異なる寸法の供試体から推定された引張軟化曲線(図-30に対応)を用いて求めた荷重-変位曲線を示す。SF1-H40から推定された引張軟化曲線を用いた場合が最も最大荷重が高くなった。しかし、SF1-H10はA4シリーズ同様バラツキが大きかったことを考慮す

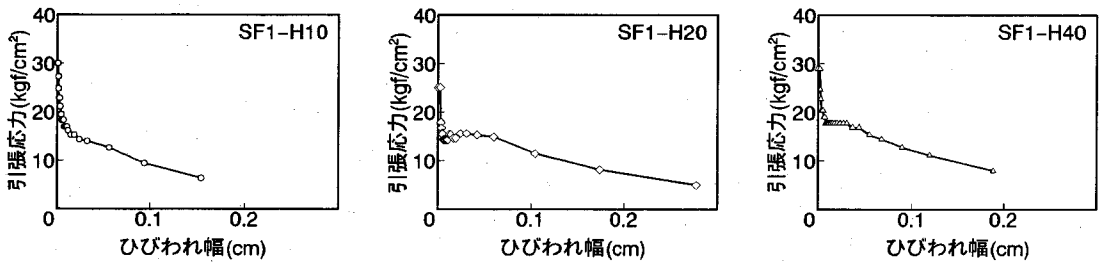


図-30 引張軟化曲線(SF1)

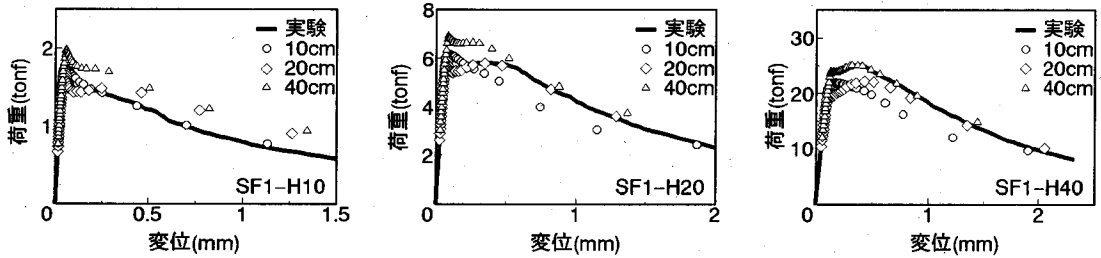


図-31 荷重-変位曲線(SF1)

れば、SF1-H20およびSF2-H40から求められた引張軟化曲線には、特徴的な相違は認められなかった。

6. 引張軟化曲線を推定する際のはり高さ

本推定法により推定された軟化開始点応力(引張強度)は、同一コンクリートであっても供試体寸法が異なると必ずしも同値の応力を推定することはできなかった。推定された軟化開始点応力には、繊維混入率や供試体寸法の増大による影響は明確には認められなかった。また、推定された引張軟化曲線は、いずれも軟化終了点(引張応力がゼロとなる点)が推定されず、そのため、正確な破壊エネルギーの推定が不可能であった。これは、軟化後の荷重-変位曲線、特に荷重がゼロ付近まで低下した領域を安定して解析することが困難であること、さらに解の振動防止のために図-8中の点3と点2の中点を新たな解(点3')としているためにひびわれ幅の大きい領域まで推定されなかった。また、はり高さが大きい方が、軟化後の荷重-変位曲線(ひびわれ幅が大きくなった領域)の計測が比較的容易であることからひびわれ幅の大きい領域まで引張軟化曲線が推定されることがわかった。

以上の結果から、実験値のバラツキ、軟化終了点までの推定等を考慮すると、引張軟化曲線を推定する際のはり高さは、10cmより20cmの方が適当であると考えられる。しかしながら、引張軟化曲線は、対

象とする部材と同程度のはり高さを有する供試体から求めることが望ましく、20cmより小さい部材が対象であれば、供試体もそれに応じて小さくするのが良いと考える。

7. まとめ

多曲線近似法により高精度で客観的に引張軟化曲線を推定する方法について検討し、さらに、実際に3種類の短繊維を用いた短繊維補強コンクリートを対象とし、引張軟化曲線を推定した。以下に得られた結果をまとめる。

(1) 本論文で用いた推定法により曲げ載荷試験で得られた荷重-変位曲線から高精度で客観的な引張軟化曲線を推定することが可能であった。特に、途中に硬化する区間を含むような複雑な形状を有する場合についても引張軟化曲線を精度良く推定できることが明らかとなった。

(2) 軟化開始点応力(引張強度)は、推定時の許容誤差により若干変動するが、この変動は引張軟化曲線全体を推定する上では、特に影響しないことが明らかとなった。

(3) 軟化後の荷重-変位曲線を安定して解析することが困難であること、さらに解の振動防止のために修正法を用いたことにより、いずれの供試体についても軟化終了点(引張応力がゼロになる点)まで引張軟化曲線を推定することはできなかったが、供試

体寸法が大きくなるほどひびわれ幅の大きな領域の引張軟化曲線を推定できるようになることが明らかとなった。

(4) 本論文で対象とした短繊維補強コンクリートにおいては、推定された引張軟化曲線に明確な寸法効果は認められなかった。また、推定された短繊維補強コンクリートの引張軟化曲線は、軟化後、応力が一定あるいは回復する傾向にあった。

(5) 本推定法からは破壊エネルギーの正確な値は推定されなかったが、繊維混入率が高くなるに伴い、引張軟化曲線下の面積は著しく増加した。

(6) 本解析結果から、引張軟化曲線を推定する際のりり高さは、20cm程度が良いことを示した。

(7) マトリックスを高強度にしアラミド繊維を4%混入することにより、200kgf/cm²を越える曲げ強度を有する強靱な繊維補強モルタルが得られた。

(8) 同じ繊維混入率(2%)の場合、本研究の条件の範囲内では、靱性(荷重-変位曲線下の面積で表される破壊時のエネルギー吸収能)は、ビニロン(V2シリーズ)、鋼(F2シリーズ)、アラミド(A2シリーズ)の順に大きくなった。

(9) 最初のひびわれ荷重以降に50%以上の荷重増加が認められたアラミド繊維補強モルタル(A2, A4シリーズ)の場合、曲げひびわれが分散する傾向にあった。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費補助金一般研究Cならびに財団法人鹿島学術振興財団研究助成金により行われたことを付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) コンクリートの破壊力学研究委員会：コンクリート構造の破壊力学コロキウム委員会報告・論文集，JCI-C 19，日本コンクリート工学協会，1990。
- 2) Li, V.C. and Ward, R.J.: A Novel Testing Technique for Post-peak Tensile Behavior of Cementitious Materials, *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Balkema, pp.183-195, 1989.
- 3) 内田裕市，六郷恵哲，小柳 洽：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測，土木学会論文集，No.426/V-14，pp.203-212，1991。
- 4) 橘高義典，上村克郎，中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多曲線近似解析，日本建築学会構造系論文報告集，第453号，pp.15-25，1993。
- 5) Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P. E.: Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, *Cement and Concrete Research*, Vol.6, pp.773-782, 1976.
- 6) Rokugo, K., Iwasa, M., Suzuki, T. and Koyanagi, W.: Testing Methods to Determine Tensile Strain Softening Curve and Fracture Energy of Concrete, *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Mihashi et al. ed., Balkema, pp.153-163, 1989.
- 7) 六郷恵哲，内田裕市，栗原哲彦，安藤貴宏：アラミド短繊維補強高強度モルタルの曲げ破壊挙動，セメント・コンクリート論文集，No.48，pp.624-629，1994。
- 8) 六郷恵哲，内田裕市，加藤英徳，小柳 洽：鋼繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状と引張軟化曲線，土木学会論文集，No.460/V-18，pp.57-64，1993。

(1995. 5. 30 受付)

DETERMINATION OF TENSION SOFTENING DIAGRAM OF CONCRETE BY POLY-LINEAR APPROXIMATION ANALYSIS AND FLEXURAL FAILURE BEHAVIOR OF FIBER REINFORCED CONCRETE

Norihiko KURIHARA, Takahiro ANDO, Minoru KUNIEDA, Yuichi UCHIDA and Keitetsu ROKUGO

In this paper, the method based on the poly-linear approximation analysis is investigated to determine tension softening diagrams of concrete. This method belongs to the back analysis through the finite element method using the fictitious crack model and needs only load-displacement curves of concrete from experiments. By this method, complicated poly-linear tension softening diagrams can be determined from test results on load-displacement curves. The tension softening diagrams of three kinds of fiber reinforced concretes (fiber: aramid, vinylon and steel) are determined by this method. The flexural failure behavior of these fiber reinforced concretes is discussed.