

論文 高強度繊維補強コンクリートの力学特性と破壊パラメータに及ぼす配合要因の影響

高田 和法*¹・信田 佳延*²・高尾 洋平*³・梅原 秀哲*⁴

要旨：圧縮強度800kgf/cm²程度の高強度FRCを対象に、その力学特性と破壊力学パラメータに及ぼす繊維の種類と混入率および粗骨材混入量の影響を実験的に検討した。圧縮強度、引張強度はこれらの要因にほとんど影響を受けず、また静弾性係数は粗骨材の混入により増加し、ビニロン繊維の混入により低下した。曲げ強度、曲げ靱性係数、破壊エネルギーは繊維の混入により大幅に増大し、その効果はビニロン繊維よりも鋼繊維の方が大きかった。引張軟化曲線におけるひび割れ発生直後の結合応力は繊維混入率の増加に伴って大きくなり、軟化勾配は繊維の種類で決定されることが分かった。

キーワード：高強度コンクリート、短繊維、破壊力学、破壊エネルギー、引張軟化曲線

1. はじめに

高強度繊維補強コンクリート（高強度FRC）は高い強度と靱性を合わせ持った高機能コンクリートであるが、繊維補強コンクリートの設計においては、繊維素材の性質、形状、混入率やコンクリートマトリクスの性質の選定などが、その最適な組み合わせに対する理論的根拠を欠いたまま試行錯誤的に行われているのが現状であり、FRCの有効利用を拡大するためにはその合理的な材料設計法の確立が不可欠である。

以上のような背景のもと、本研究は高強度FRCの力学的特性及び、近年コンクリートの破壊数値解析に積極的に用いられている破壊力学パラメータ、特に引張軟化曲線に及ぼす配合要因の影響を検討することにより、800kgf/cm²程度以上の圧縮強度と設計上必要な靱性を兼ね備えた高強度FRCの材料設計法の確立を目指すものである。本報告では、繊維補強コンクリートの曲げ特性に特に大きな影響を与えると考えられる繊維の種類と混入率、及び繊維の配向に影響するであろう粗骨材の混入量を要因に取り上げ、高強度FRCの力学的特性と破壊力学パラメータに及ぼす影響について実験的に検討した。

2. 実験概要

本研究ではモルタルを均質な脆性マトリクス、粗骨材および短繊維をマトリクスに混入された介在物質（インクルージョン）と捉え、同一マトリクスに質・量の異なる短繊維・粗骨材を混入した場合の圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数、さらに切欠き梁の3点曲げ試験における曲げ強度、曲げ靱性係数、破壊エネルギーおよび引張軟化曲線の違いについて調べた。

実験に供した20の異なる配合を表-1に示す。各配合は同一のマトリクスモルタルに、短繊維・粗骨材を異なる割合で混入したものである。繊維および粗骨材の混入量はコンクリート全体に対する容積比で示しており、それぞれ0~1.8%、0~30%の範囲で変化させた。使用材料を表-2

*1 鹿島建設(株)技術研究所 第二研究部研究員, 工修(正会員)

*2 鹿島建設(株)技術研究所 企画室担当課長, 工修(正会員)

*3 鹿島建設(株)技術研究所 第二研究部研究員

*4 名古屋工業大学助教授 社会開発工学科, Ph. D. (正会員)

に示す。

切欠き梁供試体の寸法は10×10×84（スパン80）cmとし、切欠き深さは供試体高さの半分の5cmとした。切欠きは供試体作製時に型枠底部中央に厚さ1mmのステンレス板を配置する事により形成した。この時同時に圧縮試験、割裂試験用の円柱供試体（φ10×20cmおよびφ15×20cm）も作製し、梁供試体と共に脱型後から試験前日まで20℃の水の中にて養生した。

切欠き梁3点曲げ試験の概要を図-1に示す。試験は材令28日に行った。載荷は0.1mm/minの荷重点変位制御で行い、荷重が最大時の半分以下になった後は最大2mm/minまで載荷速度を増加させて行った。測定項目は荷重、荷重点変位、支点変位および切欠き先端の開口変位であり、切欠き先端の開口変位は高感度のパイ型もしくはクリップ型変位計を用いて測定した。各供試体の重量、長さ、幅、高さおよびリガメント長さは試験前日に詳細に計測した。この曲げ試験は1配合ケースにつき3～5体行い、ばらつきの少ない3体のデータを実験データとした。圧縮試験、割裂試験は曲げ試験と同日に行った。

3. 実験結果

(1) 圧縮強度

図-2に圧縮強度を示す。一部のデータを除き、本実験の範囲では繊維混入率や粗骨材混入量にかかわらず圧縮強度は700～800kgf/cm²の範囲でほぼ一定の傾向を示した。

(2) 引張強度

図-3に割裂引張強度を示す。鋼繊維をモルタル（粗骨材混入率0%）に混入すると引張強度は増大し、繊維混入率0%と1.8%で引張強度はそれぞれ約45kgf/cm²、約75kgf/cm²であった。しかし、最大寸法20mmの粗骨材が混入された系（粗骨材混入率10～30%）においては、繊維混入率にかかわ

表-1 高強度繊維補強コンクリートの配合

	粗骨材混入率(%)			繊維添加率(%)			
	粗骨材混入率(%)	鋼	ビニロン	粗骨材混入率(%)	鋼	ビニロン	
CASE 1	0	0	0	CASE11	2.0	1.5	—
CASE 2	1.0	0	0	CASE12	2.0	1.8	—
CASE 3	2.0	0	0	CASE13	3.0	1.2	—
CASE 4	3.0	0	0	CASE14	3.0	1.8	—
CASE 5	0	0.6	—	CASE15	0	—	0.6
CASE 6	0	1.2	—	CASE16	0	—	1.2
CASE 7	0	1.5	—	CASE17	0	—	1.8
CASE 8	1.0	1.2	—	CASE18	1.0	—	1.2
CASE 9	2.0	0.6	—	CASE19	2.0	—	1.2
CASE10	2.0	1.2	—	CASE20	3.0	—	1.2

*マトリクスモルタルの配合条件
水セメント比=3.0%, 細骨材容積比=4.2%, 空気量=2%以下
高性能AE減水剤添加率=1.1% (×セメント重量)

表-2 使用材料

使用材料	摘要
セメント	普通ポルトランドセメント 比重3.16 比表面積3260cm ² /g
細骨材	千葉県君津産山砂 表乾比重2.63 吸水率1.33% 実積率68.5% 粗粒率2.65
粗骨材	東京都八王子産 硬質砂岩碎石 表乾比重2.66 吸水率0.90% 実積率60.7%
短繊維	鋼繊維 比重7.85 繊維径0.6mm 繊維長30mm 引張強度 120kgf/mm ² ストレート両面インデント付き ビニロン繊維 比重1.30 繊維径0.4mm 繊維長30mm ヤング率 2900kg/mm ² 引張強度 90kgf/mm ² ストレート
混和剤	高性能AE減水剤 ホリカルボン酸エーテル系の複合体 比重1.05

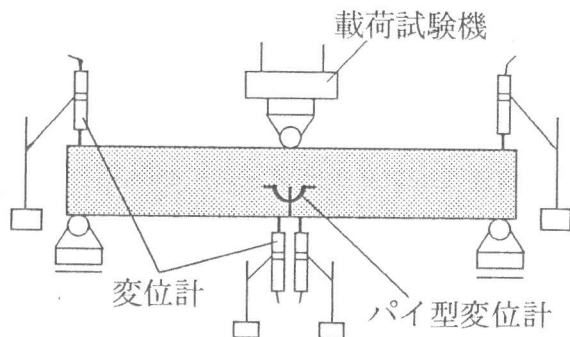


図-1 曲げ試験の概要

らず引張強度は40~50kgf/cm²の範囲でほぼ一定の傾向を示した。ビニロン繊維では鋼繊維の場合と若干傾向が異なり、粗骨材および繊維の混入率にかかわらず引張強度はほぼ一定であった。

(3) 静弾性係数

図-4に静弾性係数を示す。鋼繊維ではその混入により静弾性係数はほとんど変化しなかったが、ビニロン繊維では混入率が大きいほど静弾性係数は低下した。これはビニロン繊維の静弾性係数がマトリクスモルタルよりも小さい(2.9×10⁵kgf/cm²)ことが原因と考えられる。

一方、繊維混入率が同一の場合、粗骨材量の増加に伴って静弾性係数は増加し、粗骨材が10~30%混入されたものに比べてモルタル(粗骨材混入率0%)の静弾性係数は特に小さかった。

(4) 曲げ強度

図-5に曲げ強度と繊維混入率の関係を示す。ここで、曲げ強度は切欠き梁の曲げ試験で測定された最大荷重から切欠き上部の断面のみを有効として算定した。

鋼繊維では、混入率の増加に伴って曲げ強度は増大し、1.8%の混入率では繊維無混入の場合に比して約4倍の曲げ強度となった。一方ビニロン繊維では混入率1.2%までは曲げ強度の顕著な増加は見られないが、1.8%では繊維無混入の場合の2倍程度の曲げ強度が得られた。曲げ強度としてはビニロン繊維混入率1.8%のものと鋼繊維混入率1.2%のものがほぼ同等であった。また、粗骨材混入率は曲げ強度にほとんど影響しないという結果であった。

(5) 曲げ靱性係数(曲げタフネス)

図-6に曲げ靱性係数と繊維混入率の関係を示す。曲げ靱性係数は土木学会規準「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法(JSCE-G552-1983)」に準じて算定した。

鋼繊維、ビニロン繊維とも混入率の増加に伴って曲げタフネスは増大し、その程度は鋼繊維の方が大きかった。また、粗骨材混入率は曲げ靱性係数にほとんど影響しないという結果であった。

(6) 破壊エネルギー

破壊エネルギーとはひび割れが単位面積進展するのに必要な平均エネルギーとして評価され、破壊エネル

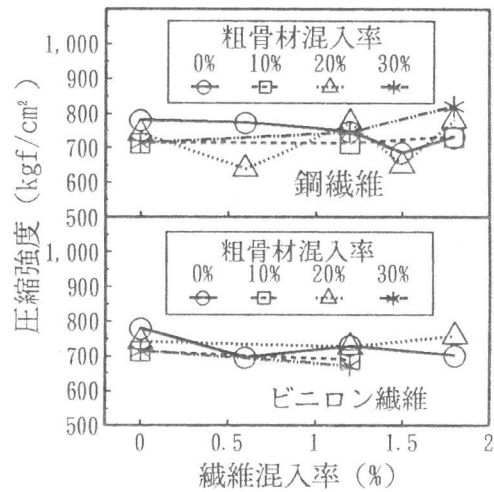


図-2 圧縮強度

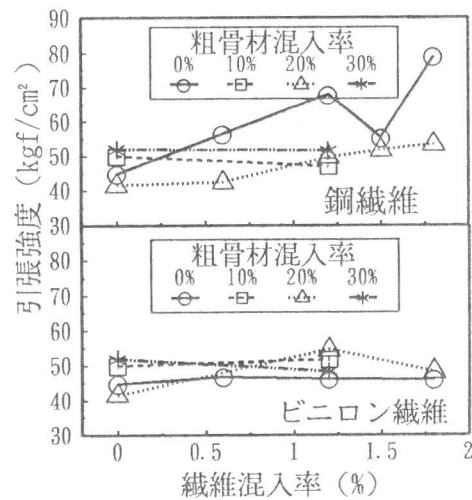


図-3 割裂引張強度

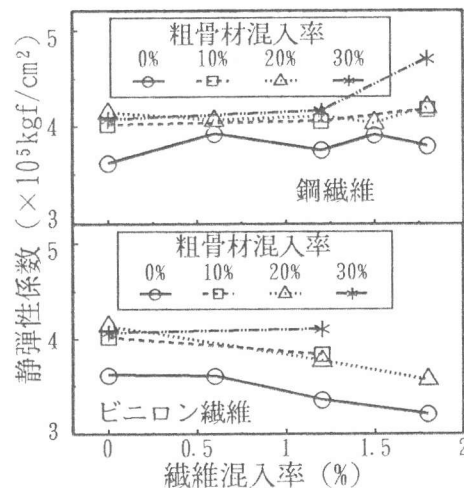


図-4 静弾性係数

ギーが大きいほどエネルギー吸収能の大きな高靱性材料であると評価できる。本実験ではRILEMの方法によって破壊エネルギーを求めた[1]。図-7に破壊エネルギーと繊維混入率の関係を示す。同図より、破壊エネルギーは曲げ靱性係数と同様の傾向で繊維の種類と混入率の影響を大きく受けていることが分かる。曲げ靱性係数がごく初期のたわみ（スパンの1/150）までしか評価していないのに対し、破壊エネルギーは梁供試体が完全破断に至るまでを評価の対象としているため、より正確に材料の特性を表していると言える。

また図-7より、破壊エネルギーと繊維混入率の間には粗骨材量とほぼ無関係に線形関係が存在すると考えることができる。そこで、鋼・ビニロン両繊維についてそれぞれ回帰直線を求めると次の2式が得られた。

$$G_F = 5.42 S_F - 0.12 \quad (\text{相関係数} 0.982) \quad (1)$$

$$G_F = 2.07 V_F - 0.03 \quad (\text{相関係数} 0.973) \quad (2)$$

ここで、 G_F ：破壊エネルギー(kgf/cm)

S_F , V_F ：鋼繊維およびビニロン繊維の混入率(%)

上記の回帰直線の傾きが、それぞれの繊維の破壊エネルギー（靱性）に対する改善効果の違いを表していると言える。このような違いは、繊維自体の引張強度やマトリクスとの付着強度の違いによって起こるものと考えられる。実際、曲げ荷重によってひび割れが進展する際に鋼繊維はマトリクスからの抜けを起こすのに対し、ビニロン繊維は自身が破断を起こすことが観察により確認された。

4. 繊維の混入が引張軟化曲線に及ぼす影響

引張軟化曲線は一軸引張応力下におけるひび割れ幅とひび割れを伝達する結合応力との関係を表したもので、コンクリートの破壊力学では最も重要な破壊パラメータと言える。また、この引張軟化曲線下の面積は上述の破壊エネルギーに対応している。本研究では高強度繊維補強コンクリートの材料設計において引張軟化曲線が重要な設計パラメータになると考え、特に注目した。なお、引張軟化曲線の推定には内田らの提案する修正J積分法を用いた[2]。

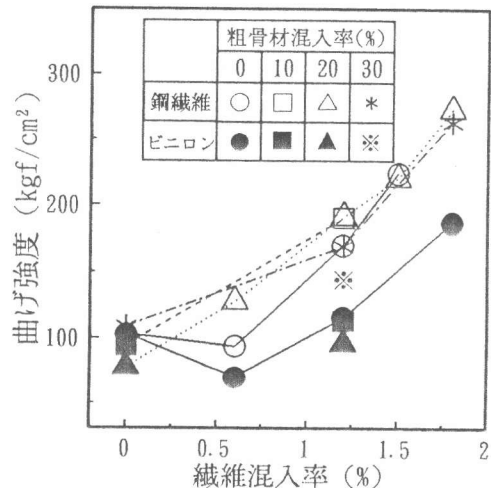


図-5 曲げ強度と繊維混入率の関係

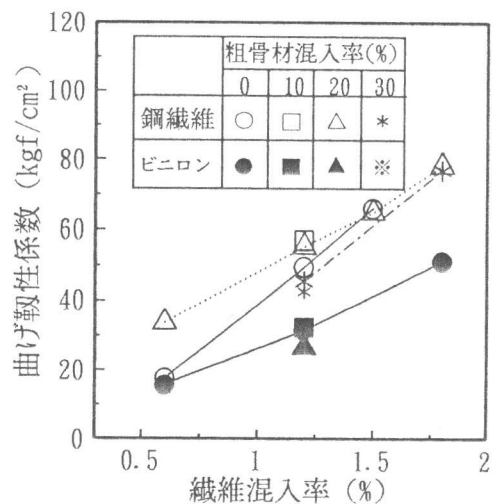


図-6 曲げ靱性係数と繊維混入率の関係

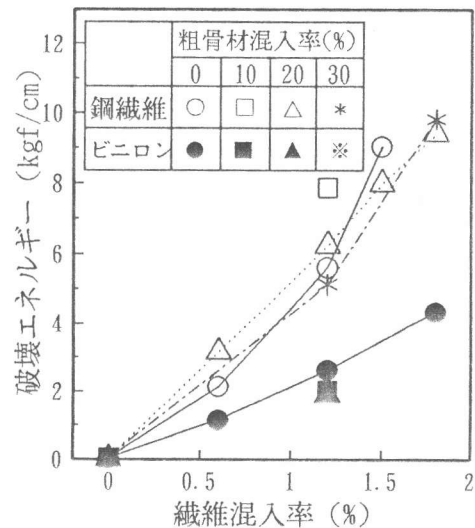


図-7 破壊エネルギーと繊維混入率の関係

図-8, 9に実験により得られた荷重-たわみ-開口変位関係から推定した引張軟化曲線を示す。これらは各供試体毎に修正J積分法を用いて推定した1ケース3本の引張軟化曲線を, 同じひび割れ幅に対する結合応力を平均する事により一本化し, 多直線近似したものである。ただし, 修正J積分法では引張軟化の開始結合応力 f_t と結合応力が0になる完全ひび割れ幅 w_c を推定できないため, f_t にはマトリクスモルタル(CASE1)の割裂引張強度を適用し, w_c には引張軟化曲線の2直線1/4モデル[3]で提案されている次の関係を用いた。

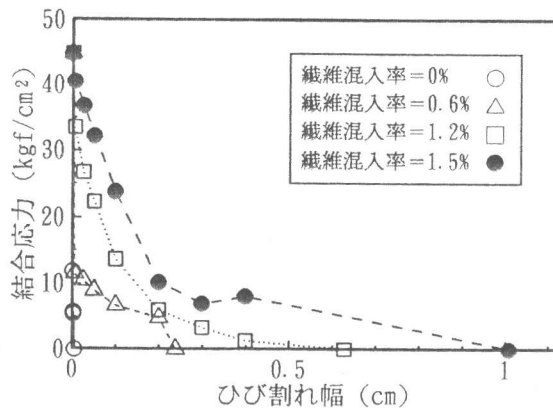
$$w_c = 5.0 G_F / f_t \quad (3)$$

(1) 繊維混入率の影響

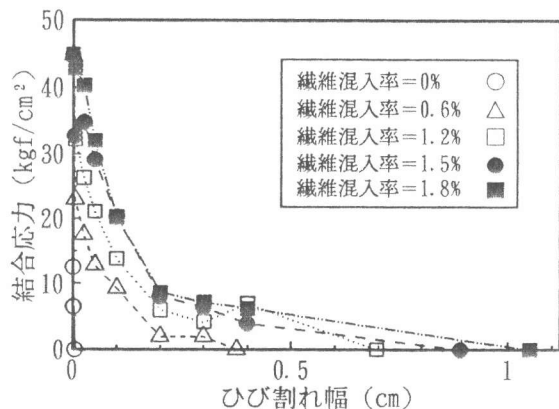
図-8は, 繊維の混入率が異なる配合の引張軟化曲線を比較したグラフである。(a)(b)(c)の3つのグラフはそれぞれ粗骨材の混入率や繊維の種類等の条件が異なる場合のものであるが, いずれの場合も繊維混入率の増加に伴う引張軟化曲線の変化は以下に述べるような傾向を示した。第一に, ひび割れ発生直後(ひび割れ幅 $w = 0.005\text{cm}$)に残留する結合応力は繊維混入率の増加に伴い大きくなり, 引張強度に近づいた。第二に, 引張軟化曲線下の面積および完全ひび割れ幅 w_c が繊維混入率の増加に伴って大きくなった。これは破壊エネルギーの増加と等価である。さらに, 繊維の種類が同じ場合その混入率が異なっても軟化の勾配はほぼ同じになることが確かめられた。

(2) 繊維種類の影響

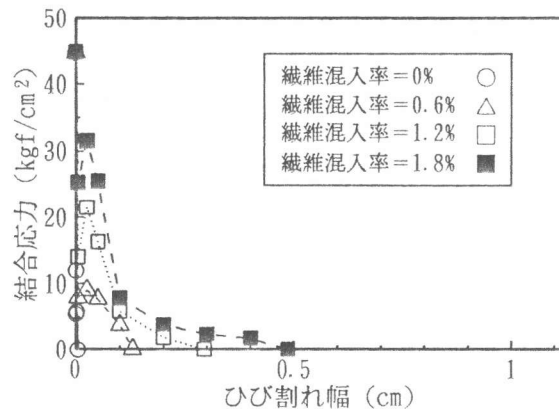
図-8(a)(c)はそれぞれモルタル(粗骨材混入率0%)に鋼繊維とビニロン繊維を混入した場合の引張軟化曲線を表しているが, 繊維素材の違いによって大きな違いが認められる。まず, 繊維混入率が同程度の場合, 引張軟化曲線下の面積と完全ひび割れ幅 w_c は鋼繊維の方が大きい。これは破壊エネルギーの大きさが異なっていることと等価であり, 回帰式(1)(2)からも明らかである。また, ひび割れ発生直後(ひび割れ幅 $w = 0.005\text{cm}$)の残留結合応力も鋼繊維の方が大きい。さらに特徴的なこととして, ビニロン繊維ではひび割れ発生直後に結合応力が急激に減少した後に再び増加する傾向があり, その後再び結合応力が低下を始めた後の軟化勾配は鋼繊維の場合よりもビニロン繊維の方が急であった。これも繊維の強度や剛性が影響しているものと考えられる。



(a) 鋼繊維, 粗骨材混入率 = 0%



(b) 鋼繊維, 粗骨材混入率 = 20%

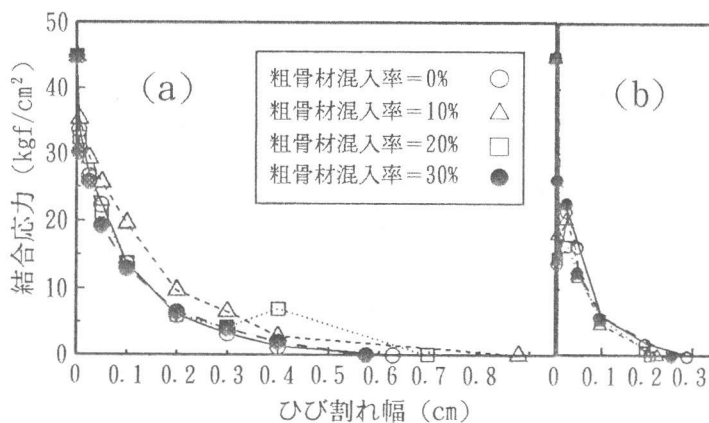


(c) ビニロン繊維, 粗骨材混入率 = 0%

図-8 繊維混入率の異なる配合の引張軟化曲線の比較

(3)粗骨材混入量の影響

図-9に鋼、ビニロン両繊維について、繊維混入率が同じ1.2%で粗骨材混入量の異なる配合の引張軟化曲線を比較した。どちらの繊維の場合にも、粗骨材の混入量の違いによって引張軟化曲線に大きな変化は見られず、同一曲線とみなせると判断された。



5. まとめ

高強度繊維補強コンクリートを対象に、力学的特性および破壊力学パラメータに及ぼす配合要因の影響を実験的に検討した結果、以下のことが明らかとなった。

(1)圧縮強度、割裂引張強度には繊維混入率、粗骨材混入率の影響は認められなかった。

(2)静弾性係数は粗骨材量の増加に伴って増大し、ビニロン繊維の混入によって低下する傾向が見られた。

(3)曲げ強度、曲げ靱性係数および破壊エネルギーは繊維の混入によって大幅に増大し、その程度はビニロン繊維よりも鋼繊維の方が大きかった。破壊エネルギーと繊維添加率の間にはそれぞれの繊維についてほぼ直線関係が成り立つことが確かめられ、回帰式を提示した。

(4)引張軟化曲線は繊維の種類および混入率に大きく影響を受け、混入率が高いほどひび割れ発生直後に残留する結合応力が大きくなった。また、ひび割れ発生後の軟化勾配は繊維の種類によって決定され、混入率が異なってもほぼ同じになった。粗骨材の混入量の違いは引張軟化曲線にほとんど影響を及ぼさず、繊維種類と混入率が同じであれば引張軟化曲線はほぼ同一曲線となった。

本実験では評価できなかったが、粗骨材は繊維の配向や架橋構造に影響することが予想されるため、今後は繊維および粗骨材の寸法の影響についても検討し、さらに、本実験で推定された引張軟化曲線のFEM解析における適用性の検証と、FEM解析で材料設計を行う場合に必要と思われる破壊エネルギーや引張軟化曲線のマトリクス性状も含めた材料特性によるモデル化について研究を進め、高強度FRCの材料設計法の確立を目指す予定である。

【参考文献】

- [1]RILEM Draft Recommendation (50-FMC): Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of Three-point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, 1985, pp285-290
- [2]内田裕市ほか：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，第426号/V-14, 1991.2
- [3]Rokugo, K. et al.: Testing Methods to Determine Tensile Strain Softening Curve and fracture Energy, ed. H. Mihashi et al., Balkema, 1989, pp153-163