

論文 高靱性セメント複合材料に生じる引張ひずみとひび割れ幅の関係に関する実験的検討

福田一郎^{*1}・平石剛紀^{*1}・閑田徹志^{*2}・須田久美子^{*3}

要旨：本研究では、高靱性セメント複合材料である ECC を対象に、一軸直接引張試験をもとにしたひび割れ幅測定のための試験方法を提案し、提案方法に基づく検証実験を実施した。その結果、ひび割れ幅を直接観察する方法のほか、ひび割れ本数を数える簡易法によっても比較的精度よく平均値が得られることがわかった。また、ECC の引張ひずみが 0.2% から 1.0% の範囲で ECC に生じるひび割れ幅について、ばらつきを考慮して設定した最大値は、引張ひずみによらず安定した値となることが明らかとなった。

キーワード：繊維補強, 短繊維, ひび割れ幅, 引張ひずみ

1. はじめに

高靱性セメント複合材料である ECC (Engineered Cementitious Composite) は、鋼材に匹敵する引張ひずみ能力を有する新しい材料である。ECC は、繊維の架橋効果により、ひび割れ発生後も引張応力を伝達して複数の微細ひび割れを生じるため、高い引張ひずみ性能を発揮し、各々のひび割れ幅は小さく抑制されることが特徴である (図-1 参照)。通常の RC 部材では、荷重や収縮等により発生したひび割れが部材耐久性に与える影響が大きいですが、ECC 部材ではひび割れ幅を部材耐久性上、影響の小さい範囲に抑制することが可能なことから、ひび割れを生じた場合でも、高い部材耐久性を確保することが期待される¹⁾。

上記の高い耐久性を考慮した設計を実部材に適用するためには、ECC のひび割れ幅を定量的に把握する必要がある。しかし、ひび割れ幅を測定する材料試験法に関する検討は少なく、安定的かつできるだけ簡便にひび割れ幅を測定する試験方法の確立が課題である。

本研究では、一軸直接引張試験をもとにした ECC のひび割れ幅測定のための試験方法を提案し、提案方法に基づく検証実験を実施する。次に、この検証実験により得られたひび割れ幅

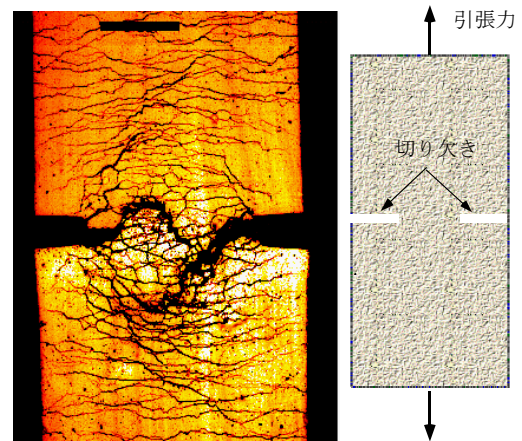


図-1 ECC の優れたひび割れ分散性能

の統計データをもとに、ひび割れ幅計測を簡易に行う方法の妥当性を確認するとともに、工学的に期待される ECC の最大ひび割れ幅について検討を行う。さらには、ECC に生じた引張ひずみがひび割れ幅に与える影響を把握し、部材設計へ反映するための基礎データとすることを目指す。

2. 実験概要

2.1 実験の位置付けと目的

通常のコンクリートは、単体ではいわゆる引張軟化材料であり、引張や曲げの载荷でひび割れが生じた場合、荷重抵抗力が急減し、ひび割

*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木構造・材料グループ 研究員 (正会員)

*2 鹿島建設 (株) 技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 Ph.D. (正会員)

*3 鹿島建設 (株) 土木設計本部 設計長 博士 (工学) (正会員)

れ幅は急激に拡大する。一般に、RC 構造としたときのコンクリートのひび割れ幅は部材性能であり、鉄筋比や鉄筋径などの部材断面設計と荷重が大きな影響を与える。これに対して ECC は材料単体で引張硬化性を有しており、ひび割れが生じた後も荷重抵抗性能は低下せず、ひび割れ幅は安定的に推移する。このとき、ひび割れ幅は繊維の性能、繊維とマトリクス間の付着性能、および荷重により大きな影響を受け、前記のコンクリートと異なり、ECC のひび割れ幅は材料性能と捉えることが可能とも考えられる。本実験では、ECC の引張荷重作用下のひび割れ幅を計測し、ひび割れ幅の平均値、ひび割れ幅の最大値およびひび割れ幅と引張ひずみの関係を把握する。

2.2 実験方法

(1) 引張試験方法

実験は図-2 の一軸直接引張試験方法²⁾を用いて実施する。写真-1 に試験状況を示す。図-2 には供試体の形状・寸法を併記した。供試体は、ダンベル型の平面を有する平板で、鋼製型枠に平打ちし、上面をこて仕上げして成型する。供試体寸法の詳細と許容誤差範囲を表-1 に示す。

図-2 に模式的に示すように、把持装置は試験片の中心軸上に沿って引張荷重を載荷可能な構造となるよう空気圧による圧着装置（写真-2）を用いる。載荷時の境界条件は、写真-2 にあるように一端を固定、他端はピン（ヒンジ）での載荷とする。載荷は変位制御により実施し、載荷ヘッドの変位速度を 0.5mm/min とする。

(2) ひび割れ幅の計測方法

載荷状態におけるコンクリートのひび割れ幅の計測方法として確立した方法はないが、ここでは CCD カメラによるデジタルマイクروسコープを用いた直接観察によりひび割れ幅の計測を行う。その手順として、まずひずみ測定区間のひずみが一定の値 ϵ_m に到達した点で変位を保持する。次に、変位計などを取り外した後、供試体の中心線に沿って、175 倍率の接触型マ

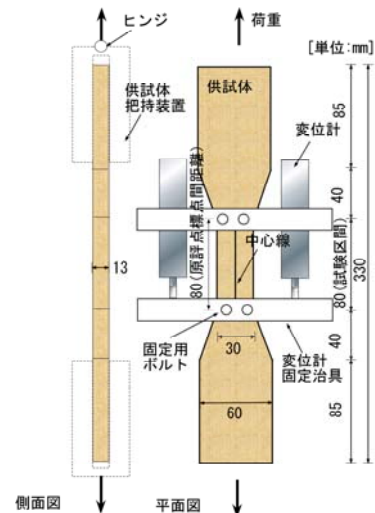


図-2 引張試験方法

表-1 引張供試体寸法の詳細と許容誤差

	平行部幅	原標点距離	平行部の長さ	厚さ
寸法	30	80	80	13
許容誤差	±1	±1	±1	±1



写真-1 引張試験の実施状況



(a) 固定条件

(b) ピン条件

写真-2 引張試験の把持装置と境界条件

イクロスコープを用いて、すべてのひび割れについて画像を電子記録する。最後に、画像処理によりひび割れ幅を判定するものとする。ひび割れの測定は、供試体の型枠面とこて仕上げ面（以下、こて面）についてそれぞれ実施する。また、参考のため、上記のひび割れ計測のほか、除荷後の残留ひび割れについても同様の直接観察によるひび割れ計測を行う。

(3) 実験パラメータおよび供試体の準備

実験パラメータは試験区間のひずみ ϵ_m とし、0.2、0.5、1.0%の3水準に設定する。対象材料は、長さ12mm、直径0.04mmのポリビニルアルコール(PVA)繊維を体積率で2%混入したECCである。詳細は文献³⁾を参照されたい。実験では、 ϵ_m の各水準に関し、それぞれ8体の供試体を用いる。さらに、破断まで载荷する通常の引張試験についても同一バッチの材料にて実施する。これら試験における材齢を8週で行い、試験までの養生条件を20℃水中とする。

3. 実験結果

3.1 ECCの引張性能

図-3に、破断まで载荷した時の応力-ひずみ曲線の一例を示す。この図にあるように、本実験で対象としたECCは、ひずみで1%以上のレベルまで、荷重を保持して擬似ひずみ硬化の性状を示すとともに、引張ひずみの増加に伴い鋸歯状の応力ピークが現れているが、このピークがひび割れの生成に対応しており、複数のひび割れが生じていることがわかる。

3.2 ひび割れ幅計測結果

図-4は、 $\epsilon_m = 0.2, 0.5, 1.0\%$ の各水準において、ひび割れ幅計測までの応力-ひずみ曲線の実測値の例を表している。 ϵ_m の各水準とも、鋸歯状の応力ピークが現れており、ひび割れが複数生成されていることを示している。写真-3は、ひび割れ幅計測のための画像データの例であり、写真中央にひび割れが明確に認識できる。写真-3のように計測したひび割れ幅のデータについて、図-5中にある3つの供試体から得られ

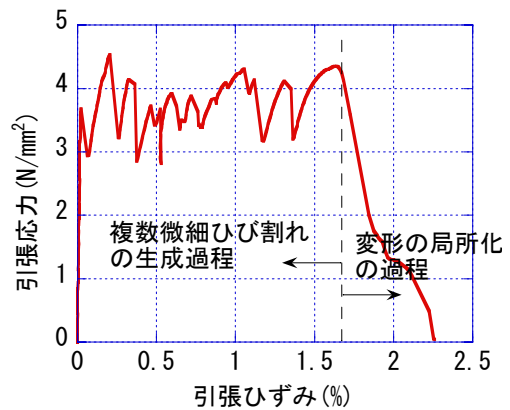


図-3 引張応力-ひずみ曲線の測定例

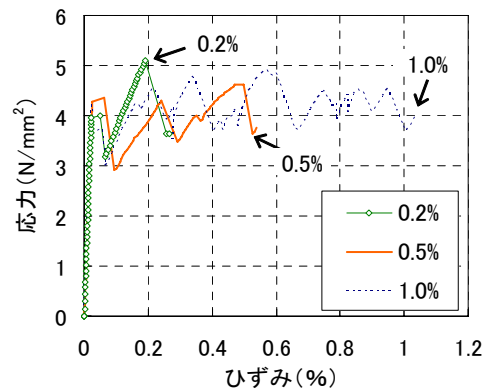


図-4 ひび割れ幅計測までの引張応力-ひずみ関係

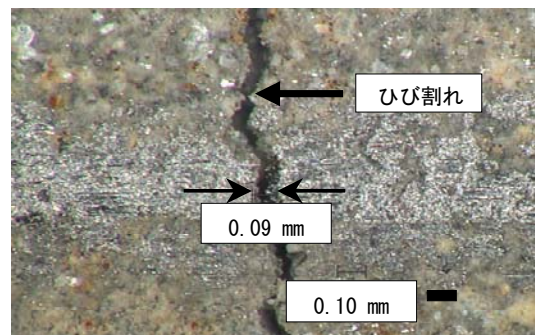


写真-3 ひび割れ計測画像の例

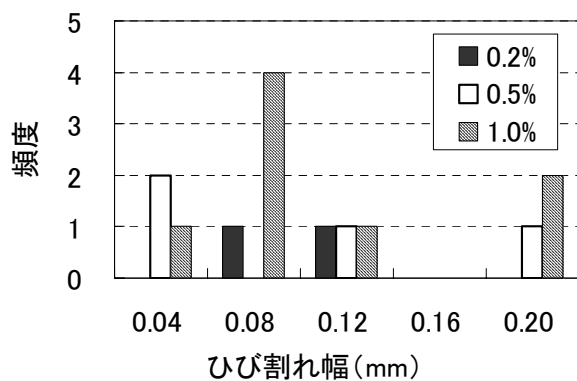


図-5 供試体別のひび割れ幅分布

たひび割れ幅の分布を示したものが図-5 である。この図から、 $\varepsilon_m = 0.2\%$ では 0.04mm から 0.12mm とやや狭い範囲に分布しているが、 $\varepsilon_m = 0.5\%$, 1.0%水準の供試体ではひび割れ幅は 0.04mm を下回る小さな範囲から、比較的大きな 0.2mm に近い値まで広く分布していることがわかる。

図-6 は、ひび割れ幅の全測定値の頻度分布について、 ε_m ごとに示したものである。同図(a)は型枠面、(b)はこて面での計測結果である。この図から、各供試体について示したひび割れ幅は図-4 と同様に 0.04mm を下回る小さな範囲から、比較的大きな 0.2mm に近い値まで分布しているが、0.4mm を超え 0.12mm 以下の範囲に最も多く、分布の傾向は型枠面とこて面で大きな違いはないことがわかる。

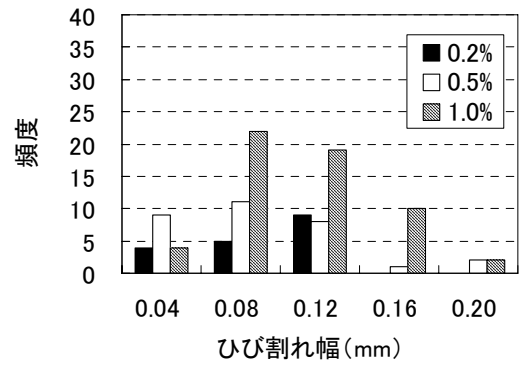
図-7 は、同じ供試体を用いて除荷した後に計測した残留ひび割れ幅の分布である。図-6 と同様に、(a)型枠面、(b)こて面について示した。これらの図から、分布の傾向は型枠面とこて面で大きな相違はないが、全体にひび割れ幅が載荷時と比べて小さく、除荷によりひび割れ幅が減少している傾向が顕著である。この結果から、供用中の実構造物に生じるひび割れ幅として残留ひび割れによる計測値を用いることは、ひび割れ幅を過小評価し、危険側となることに留意が必要である。

4. ひび割れ幅の確率的検討

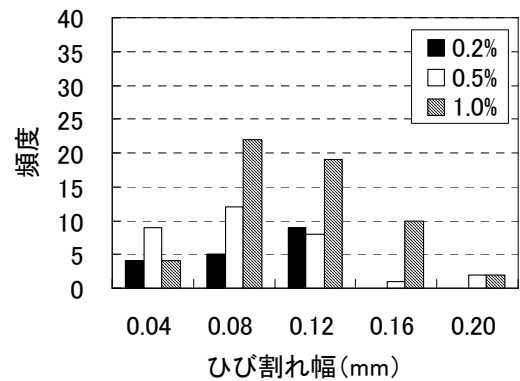
4.1 ひび割れ幅統計値の算定方法

図-6 で明らかとなったように、ひび割れ幅のばらつきは非常に大きく、ひび割れ幅を評価するにあたり確率的な取り扱いが不可欠である。この確率的な検討を実施するため、ひび割れ幅の統計値を次のようにして求める。まず、ひび割れ幅の期待値である平均ひび割れ幅 μ_w については、式(1)により求める。

$$\mu_w = \frac{1}{N_{sp}} \sum_{i=1}^{N_{sp}} \mu_w^i \quad (1)$$

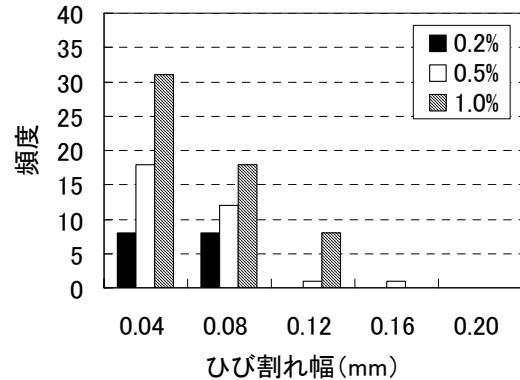


(a) 型枠面での計測結果

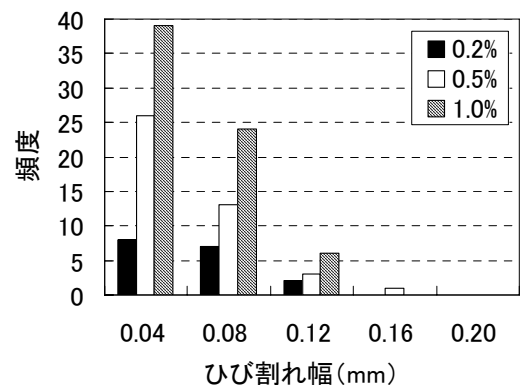


(b) こて面での計測結果

図-6 ひび割れ幅の分布 (全供試体)



(a) 型枠面での計測結果



(b) こて面での計測結果

図-7 残留ひび割れ幅の分布 (全供試体)

表-2 ひび割れ幅の統計値と最大ひび割れ幅

引張ひずみ ε_m (%)	型枠面			こて面			平均		
	0.2	0.5	1.0	0.2	0.5	1.0	0.2	0.5	1.0
平均ひび割れ幅 μ_w (mm)	0.07	0.07	0.09	0.09	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08
平均ひび割れ本数 (mm)	2.3	4.4	7.1	2.1	5.5	8.9	2.2	5.0	8.0
ひび割れ幅変動係数 δ_w	0.40	0.63	0.42	0.49	0.69	0.63	-	-	-
最大ひび割れ幅 w_{lim} (mm)	0.12	0.15	0.15	0.16	0.12	0.15	0.14	0.14	0.15
平均ひび割れ幅の推定値 ${}_c\mu_w$ (mm)	0.07	0.09	0.11	0.08	0.07	0.09	0.07	0.08	0.10

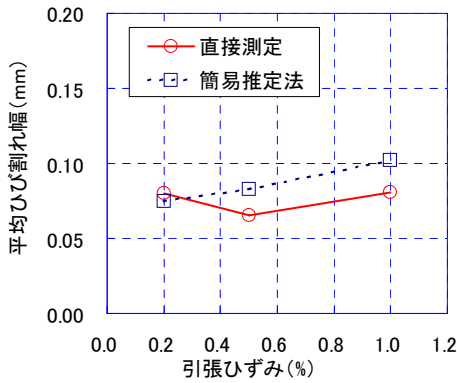


図-8 平均ひび割れ幅の推定値の精度

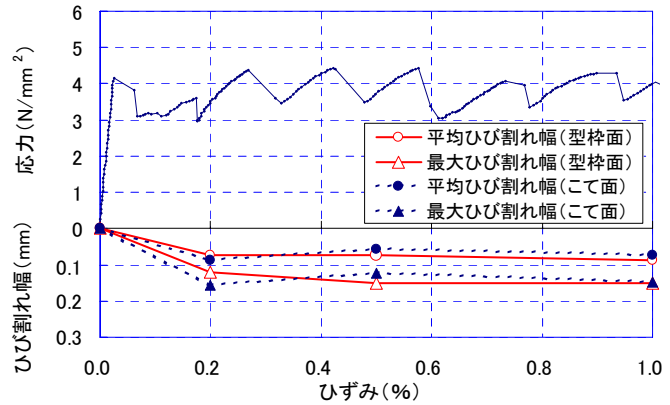


図-9 引張ひずみレベルがひび割れ幅に与える影響

ここに、 $\mu_w^i = \frac{1}{N_{cr}^i} \sum_{j=1}^{N_{cr}^i} w_j^i$, w_j^i : ε_m における供試体 i のひび割れ幅の計測値サンプル, N_{sp} , N_{cr}^i : ε_m における供試体サンプル数, および ε_m での供試体 i のひび割れ幅計測値のサンプル数である。次に変動係数 δ_w は式(2)で求める。

$$\delta_w = \frac{\sigma_w}{\mu_w} \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^{N_{sp}} \sum_{j=1}^{N_{cr}^i} (w_j^i - \mu_w)^2}$, $N = \sum_{i=1}^{N_{sp}} N_{cr}^i$

4.2 統計値の算定結果

表-2 は、ひび割れ幅測定データの統計値の算定結果である。この表で、右端の3つの列にある平均とは、型枠面とこて面の値を単純平均した値である。また、表中で平均ひび割れ本数とは、各供試体に発生したひび割れ本数について供試体8体で平均した値である。平均ひび割れ本数は、 ε_m が増加すると大きくなる傾向にあるが、 μ_w は ε_m によらず0.08mm程度で安定している。また、ひび割れ幅変動係数 δ_w は最大で0.6程度と非常に大きくなっていることがわかる。

5. 平均ひび割れ幅の簡易推定法の提案

5.1 平均ひび割れ幅の簡易推定法

2.2 節(2)項のひび割れ幅測定方法は、全てのひび割れについて直接観察してひび割れ幅を計測することから、精度の高い方法であるが、デジタルマイクロスコープなどの特殊機器が必要であり、汎用的に用いることが難しい場合も想定される。そこで、平均ひび割れ幅を簡易に把握するため、ひび割れ本数による方法を以下に検討する。

引張荷重を受ける ECC のひずみは、平均ひび割れ幅により式(3)で表される。

$$\varepsilon_m = \frac{\mu_w^i \cdot N_{cr}^i}{L_m} + \frac{\sigma_m}{E_c} \quad (3)$$

ここに、 σ_m : ε_m に対応する載荷応力, L_m : 原標点間距離, E_c : 弾性係数である。(3)式の右辺第1項はひび割れによるひずみ寄与分, 第2項は弾性ひずみである。したがって、ひび割れ本数 N_{cr}^i が引張試験から得られれば、 ε_m , σ_m , L_m が既知であるとき、平均ひび割れ幅の推定値 ${}_c\mu_w$ は式(4)で表される。すなわち、次式によれば、

ひび割れ本数のみを数えることで平均ひび割れを簡易に推定することが可能となる。

$${}_c\mu_w = \frac{1}{N_{sp}} \sum_{i=1}^{N_{sp}} {}_c\mu_w^i \quad (4)$$

ここに,
$${}_c\mu_w^i = \frac{L_m \left(\varepsilon_m - \frac{\sigma_m}{E_c} \right)}{N_{cr}^i}$$

5.2 簡易推定法の精度

表-2 に ${}_c\mu_w$ の算定結果を, また図-8 に μ_w との比較を表す。算定にあたっては, E_c として実績に基づく値である 16 kN/mm^2 , L_m には図-1 から 80mm を用いた。表-2 および図-8 の結果から, ${}_c\mu_w$ は μ_w を比較的精度よく再現しており, ひび割れ本数を数えることで, 簡易に平均ひび割れ幅を精度よく簡易に推定可能であると考えられる。

6. 最大ひび割れ幅に関する検討

表-2 の統計値をもとに, ひび割れ幅について危険率 5% の信頼区間上限値を算出し, 最大ひび割れ幅 w_{lim} と定義する。 w_{lim} は ECC に生じるひび割れ幅について, 工学的に期待される上限値ということができ, 式(5)で得られる。

$$w_{lim} = \frac{1}{N_{sp}} \sum_{i=1}^{N_{sp}} w_{lim}^i \quad (5)$$

ここに, $w_{lim}^i = \mu_w^i (1 + 1.645\delta_w)$

図-9 に w_{lim} の算定値を表す。参考のため, 引張試験で得られた応力-ひずみ曲線の一例, および平均ひび割れ幅 μ_w についても併せて示した。この図から, w_{lim} および μ_w は, 0.2% 以上の範囲ではひずみに関わらずほぼ一定の値を示し, 安定して推移していることがわかる。また, この区間では, w_{lim} は 0.15mm 程度となっている。これらのことから, 本研究で対象とした ECC では, ひずみレベル 1.0% 以下の範囲において, 発生するひび割れの幅として, 平均的には 0.08mm 程度, また最大でも 0.15mm 程度を想定しておけばよいと考えられる。

7. まとめ

本研究では, ECC のひび割れ幅を把握するため, ひび割れの直接観察による計測方法を提案し, 提案方法に基づく検証実験を実施した。その結果を以下にまとめる。

- (1) ECC のひび割れ幅のばらつきは非常に大きく, 変動係数にして最大で 0.6 に達するため, 確率的な取り扱いが適当である。
- (2) 載荷状態でのひび割れ幅は, 除荷後に計測した残留ひび割れ幅と比較して大きい。
- (3) 平均ひび割れ幅は, 直接観察による方法のほか, ひび割れ本数を数えるだけの簡易な方法によっても比較的精度よく求めることが可能である。
- (4) 5% 危険率の信頼区間上限値による最大ひび割れ幅は, 引張ひずみのレベルによらずほぼ一定となり, 本研究で提案した試験方法において, 引張ひずみ 1% 以下の範囲では, 対象とした ECC で 0.15mm 程度の値となる。

謝辞 本研究を遂行するにあたり土木学会複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) 指針作成委員会の委員各位には貴重なご助言を賜った。ここに記して深謝する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料に関する技術の現状と将来, 2002.1
- 2) Kanda, T. and V. C. Li: A New Micromechanics Design Theory for Pseudo Strain Hardening Cementitious Composite, J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 125, No. 4, pp.373-381, 1999
- 3) 閑田徹志ほか：曲げ試験を用いた高靱性複合材料 ECC の引張力学性能管理に関する実験的検討, 鹿島技術研究所年報、第 52 号, pp.131-138, 200