

# 論文 高靱性セメント複合材料のひび割れ分散性に関する基礎実験

平石 剛紀<sup>\*1</sup>・坂田 昇<sup>\*2</sup>・渡嘉敷 勝<sup>\*3</sup>・長束 勇<sup>\*4</sup>

**要旨**：農業水路の補修材料には、補修後の水密性を確保するため、目地部やひび割れ部の開口幅の変動に伴うひび割れ追従性が必要となる。本研究では、この目地部およびひび割れ部の開口幅の変動を模擬したゼロスパン引張試験を考案し、ひび割れ分散性に優れる高靱性セメント複合材料（ECC）の適用性について検討した。その結果、ECCは、ゼロスパンにおける引張応力下においても、複数微細ひび割れを形成することがわかった。また、ひび割れ部に無付着領域を設けることで、ECCのひび割れ幅を抑制できることを明らかにした。

**キーワード**：補修，ゼロスパン，繊維補強，ひび割れ幅，目地，漏水

## 1. はじめに

農業水利施設のストックは膨大であり、水路構造物に限定しても、現在までに総延長40,000km程度の水路が構築されている。しかし、近年では、建設後の時間経過に伴い徐々に老朽化し、補修・補強を必要とする構造物も多い<sup>1)</sup>。特に、老朽化した農業用水路においては、構造物の性質上、写真-1に示すような目地部やひび割れ部からの漏水防止対策が重要となる。

従来、これら農業用水路の補修には、一般に耐久性に優れるとされるセメント系補修材料が用いられている。しかしながら、補修後早期に、既設コンクリートの目地部またはひび割れ部に大きなひび割れが発生し（写真-2）、ひび割れからの漏水により水路の機能が低下するケースが多い。これは、温度変化などによって生じる目地部やひび割れ部の開口幅の変動に、補修材料が追従できないためと考えられる。したがって、農業用水路の補修材料には、目地部やひび割れ部の開口幅の変動に追従する、いわゆるゼロスパンでのひび割れ追従性が求められると考えられる。

一方、近年、研究が進められている高靱性セメント複合材料（以下、ECC）<sup>2)</sup>は、優れた変形性能とひび割れ分散性を有する材料である（写真-3）。したがって、ECCは、ゼロスパンでの引張応力が作用する環境においても、ひび割れ分散性が期待できると考えられるが、ECCを用いたゼロスパンにおけるひび割れ分散性を検討した研究は少ないのが現状である。

そこで、本研究では、農業用水路の目地部およびひび割れ部の開口幅の変動を模擬したゼロ

スパンでの引張応力が作用する環境においても、ひび割れ分散性が期待できると考えられるが、ECCを用いたゼロスパンにおけるひび割れ分散性を検討した研究は少ないのが現状である。



写真-1 目地損傷部からの漏水



写真-2 目地補修部に発生したひび割れ

\*1 鹿島建設（株） 技術研究所土木構造・材料グループ（正会員）

\*2 鹿島建設（株） 技術研究所土木構造・材料グループチーフ兼上席研究員 工博（正会員）

\*3（独）農業工学研究所 造構部 施設機能研究室主任研究員（正会員）

\*4 島根大学 生物資源科学部地域開発科学科教授 農博

スパン引張試験を考案し、ECC のゼロスパン引張応力下でのひび割れ分散性について検討した。なお、実験は、ECC とポリマーセメントモルタル (以下、PCM) との比較を行った実験 (以下、シリーズ 1)、試験方法に改良を加え ECC のみを対象とした実験 (以下、シリーズ 2) の 2 段階に分けて実施した。

## 2. シリーズ 1

### 2.1 実験概要

#### (1) 使用材料

母材には、水セメント比 50%、セメント砂比 1 : 3 のモルタルを使用した。補修材料には、表 1 に示す吹付けタイプの ECC および PCM の 2 種類を使用した。なお、ECC、PCM ともに市販されているプレミックス材料である。ここで、ECC に使用されている繊維は長さ 12mm、径 0.04mm、引張強度 1600Mpa の PVA 繊維である。

#### (2) 試験体形状および作製方法

図 1 にシリーズ 1 で実施したゼロスパン引張試験の概要を示す。母材モルタルは、打設後 7 日間 20°C 水中の条件で養生を行い、表面をワイヤブラシにて目粗しした。補修材料は、厚さを 10mm とし、母材モルタルの片面の半分に吹付けた。補修材料吹付け後、20°C 水中で養生を行い、既設コンクリートのひび割れを模擬し、補修材料未施工部にコンクリートカッターを用いて切り欠きを導入した。試験は、補修材料の材齢が 23 日において実施した。

#### (3) 試験方法および測定項目

シリーズ 1 では、モルタル板をピン-固定の支持条件で治具に固定し、図 1 に示す矢印方向に 0.5mm/分の変位制御で引張力を作用することで、母材モルタルに設けた模擬ひび割れを開口させた。载荷中、図 1 に示す計 4 箇所、検長 60mm のパイ型変位計によりひずみを計測するとともに、補修材料表面でひび割れの観察を行った。

### 2.2 実験結果および考察

荷重と模擬ひび割れ開口部で計測した開口変

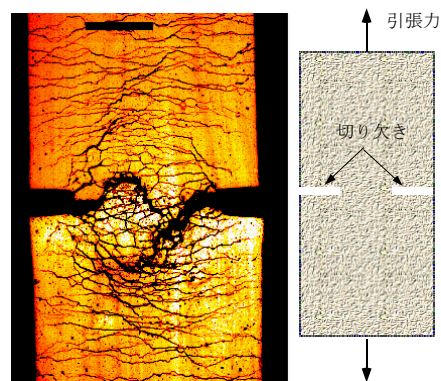


写真 3 ECC の優れたひび割れ分散性

表 1 使用材料 (吹付け補修材料)

補修材料	水プレミックス材料比 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	使用繊維
ECC	20.5	330	PVA繊維; 2.0vol%
PCM	14.5	247	PVA繊維; 0.15vol%

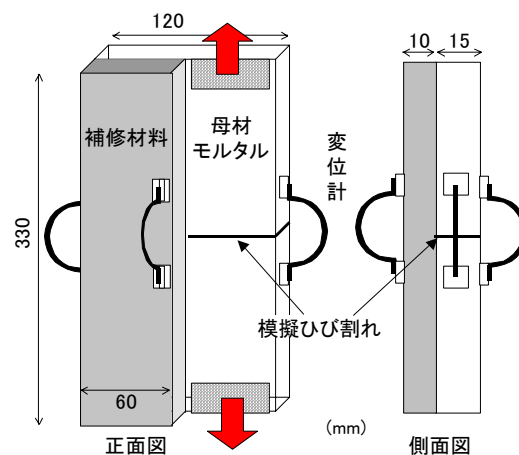


図 1 シリーズ 1 の試験概要

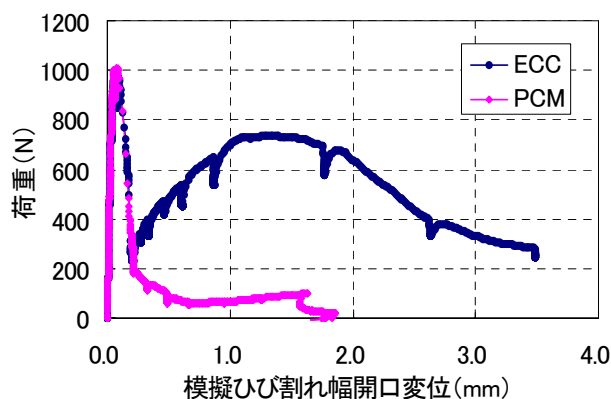


図 2 荷重-模擬ひび割れ幅開口変位の関係

位の関係を図 2 に示す。PCM のケースでは、初期ひび割れ発生後に応力が低下し、そのまま破断した。一方、ECC のケースでは、初期ひび割れ発生後、一旦応力が低下したものの、その後再度荷重が増加する傾向を示した。目視観察

の結果、PCM では破断箇所以外のひび割れは確認されなかったが、ECC では模擬ひび割れ付近において、目視できるひび割れが破断箇所以外に3本発生していた。これより、ECC はゼロスパン条件においてもひび割れ分散効果が得られることが確認された。

しかし、シリーズ1では、補修材を片面にのみ施工したため、表面と裏面で断面の剛性が異なり、ひび割れの開口に伴い試験体に曲げが生じた。水路構造物におけるひび割れの開口は、引張作用によるものと考えられる。そこで、シリーズ2では、ECCのみを対象とし、母材モルタル両面にECCを配置するとともに、試験体中心に載荷するよう試験方法を改良し実験を実施することとした。

### 3. シリーズ2

#### 3.1 実験概要

##### (1) 使用材料

シリーズ1と同様に、母材には水セメント比50%、セメント砂比1:3のモルタルを使用した。なお、母材はD4鉄筋を配置して補強した。補修材料には、表-1に示すECCを使用した。

##### (2) 試験体形状および作製方法

図-3にシリーズ2で実施したゼロスパン引張試験の概要を示す。母材モルタルは、打設後7日間20℃水中の条件で養生を行い、表面をアルミナブラストにて目粗しした。その後、母材モルタル2体を隙間がないよう突合せて固定することで、既設コンクリートのひび割れ部を模擬し、2日間に渡り片面ずつECCをダンベル型に吹付けた。ECCの厚さは、実構造物への適用を想定して30mmとした。作製した試験体は、湿潤封緘養生にて20℃の室内で養生を行った。試験材齢は、A面のECCの材齢で30日である。なお、ECC両端部は、模擬ひび割れ近傍の付着に影響のない位置でボルトにより固定した。

シリーズ2では、母材とECCの付着がECCのひび割れ分散性に及ぼす影響について検討するため、模擬ひび割れ部近傍の無付着領域を0、

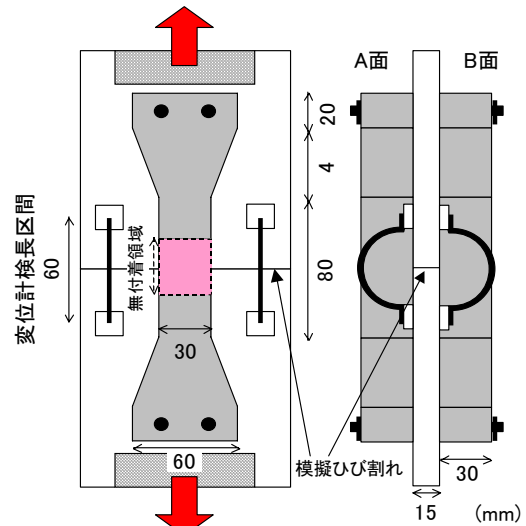


図-3 シリーズ2の試験概要

25, 50mm (以下, case0, case25, case50) とした3ケースについて各2体試験体を作製し実験を行った。なお、ECC施工前にモルタル面にフィルムを貼ることで、無付着領域を設けた。

##### (3) 試験方法および測定項目

シリーズ2では、モルタル板をピン-ピンの支持条件で治具に固定し、図-3に示す矢印方向に0.5mm/分の変位制御で引張力を作用することで、母材モルタル間の模擬ひび割れを開口させた。載荷中、図-3に示す計4箇所、検長60mmのパイ型変位計によりひずみを計測するとともに、補修材料表面でひび割れの観察を行った。

また、両面のそれぞれ左右に設置した2つの変位計の平均値が、1.0%(模擬ひび割れ開口幅で0.6mm)となった時点で、ECC表面に生じたひび割れ本数およびひび割れ幅を計測した。なお、ひび割れ本数および幅の計測は、載荷装置の変位を1.0%で保持したままの状態、顕微鏡を用いて画像処理により測定した。さらに、AB面いずれかのECCが破断するまで載荷を続け、破断後速やかに荷重を除荷し、再度顕微鏡を用いてひび割れ発生状況を観察した。

#### 3.2 実験結果および考察

##### (1) 材料試験

シリーズ2で使用したECCおよびECCと母材モルタルの界面の基礎物性を表-2に示す。こ

ここで、ダンベル型直接引張試験は、図-4に示すようにECC単体を、シリーズ1と同じ载荷条件で試験した結果である。なお、ひずみ計測区間は80mmで、ひび割れ幅の計測は、計測区間のひずみが1.0%となった時点で行った。

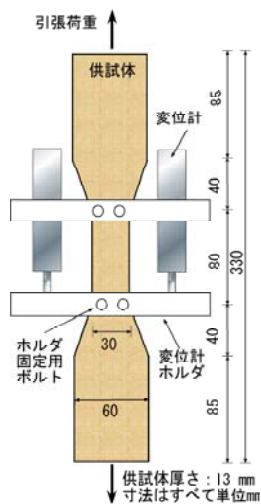


図-4 直接引張試験方法 (ECC 単体)

ECC 単体の引張試験における引張応力

-ひずみ曲線の一例を図-5に、1.0%ひずみ時に計測したひび割れの幅の計測結果を図-6に示す。シリーズ2に供したECCは、図-5に示すようにECC特有の擬似ひずみ硬化挙動を示し、引張応力下で複数の微細ひび割れを生じた。なお、終局時のひずみは2.0~3.5%程度であり、1.0%のひずみ時における平均ひび割れ幅は0.058mmであった。

### (2) ゼロスパン引張試験

試験方法を改良したシリーズ2においても、曲げが作用し試験体両面で変位計のひずみに差が生じるケースが確認された。したがって、一方のECCが破断した際の両面のひずみを比較し、大きなひずみを示した面に対し、他方のひずみが1/2以下の値を示したケースについては、有効な試験結果として扱わないこととした。なお、有効な試験結果が得られたのは各ケース1体 (ECCとしてはA面およびB面の2体)であり、以下その結果について示す。

#### a. 引張応力-ひずみ曲線

各ケースのうち先に破断した面の引張応力-ひずみ曲線を図-7に示す。なお、データは破断直前までのデータである。全てのケースで、ECC特有の擬似ひずみ硬化型の挙動を示した。また、各ケースにおける破断時のひずみは、case0で1.29%、case25で1.58%、case50で2.18%であり、

表-2 ECCの硬化物性

試験項目	試験方法	A面	B面
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	JIS A 1108	46.5	38.0
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ダンベル型	5.3	5.7
引張終局ひずみ (%)	直接引張試験	3.5	2.1
ひび割れ幅試験 (mm)	(図-4, 本文参照)	0.1	-
せん断試験 (N/mm <sup>2</sup> )	二面せん断 (4×4×16mm)	2.3	-
付着強度試験 (N/mm <sup>2</sup> )	建研式引張試験	2.12	-

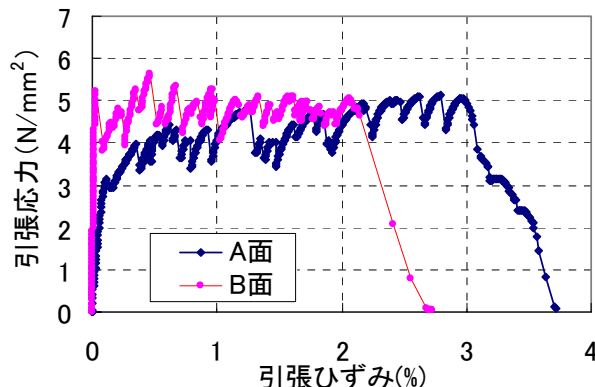


図-5 引張応力-ひずみ曲線 (ECC 単体)

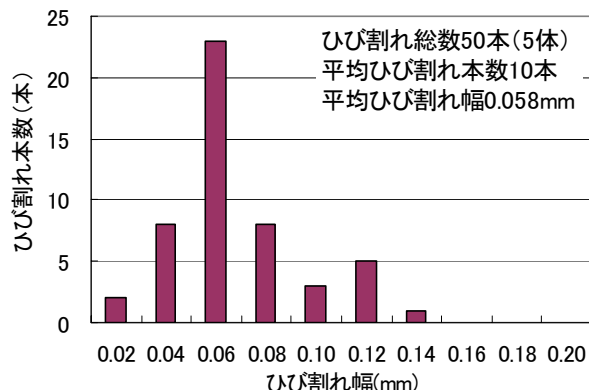


図-6 1.0%ひずみ時のひび割れ幅 (ECC 単体)

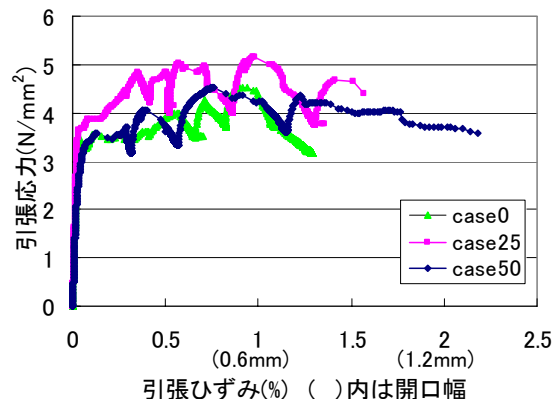


図-7 引張応力-ひずみ曲線 (シリーズ2)

無付着領域の増加に伴い、破断時ひずみが大きくなる傾向を示した。これより、無付着領域を設けることは、目地部やひび割れ部の開口幅の

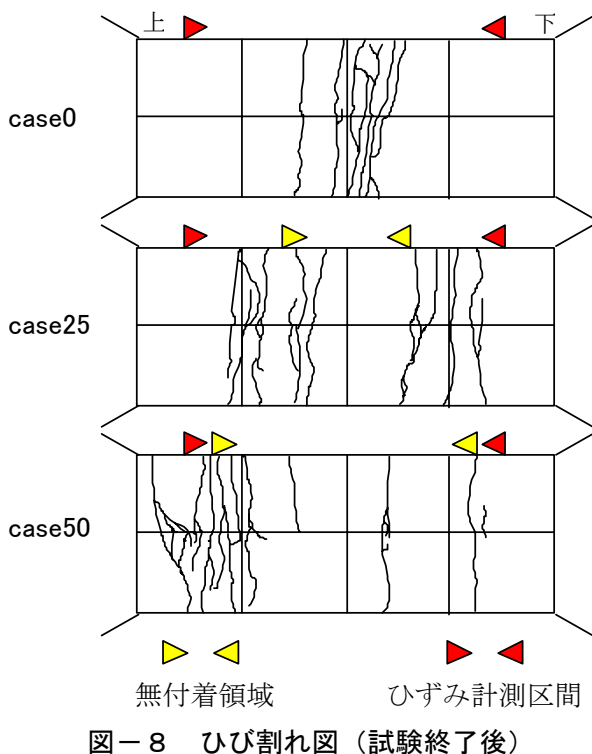


図-8 ひび割れ図 (試験終了後)

変動に対する追従性を改善する方法として有効であると考えられた。

### b. ひび割れ状況とひび割れ発生範囲

試験終了後のひび割れ発生状況の一例を図-8に、AB両面で計測したECC表面のひび割れ発生範囲を図-9に示す。シリーズ1と同様に、ゼロスパン条件であるcase0においても、模擬ひび割れ近傍でECC特有のひび割れ分散効果が確認された。また、無付着領域を設けたケースにおけるひび割れは、無付着領域と付着領域の境界部に比較的多く発生する傾向が認められた。これは、他の領域に比べ、この境界部分に大きな応力が生じたためと考えられた。

ひび割れ発生範囲は、無付着領域なしのcase0で20mm程度であった。case25, case50においても、無付着領域より広い範囲でひび割れが発生した。図-10にcase0におけるECCの側面のひび割れ図を示すが、ECCのひび割れは、模擬ひび割れを頂点としたおよそ60°の角度の三角形状にひび割れが分散して発生しており、厚さ30mmのECC表面では、無付着領域から両側に約10mm程度の範囲でひび割れが発生したものと考えられた。

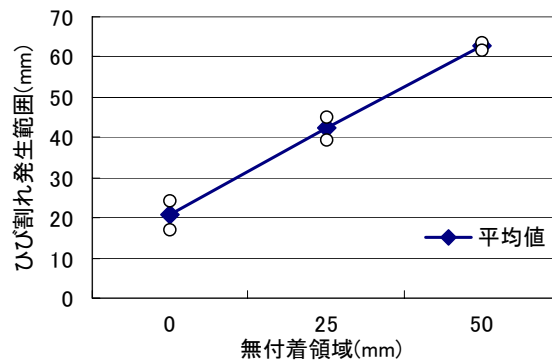


図-9 ひび割れ発生範囲 (試験終了後)

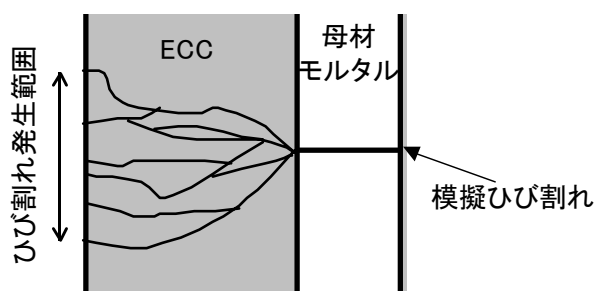


図-10 ECC側面のひび割れ図 (case0 終了後)

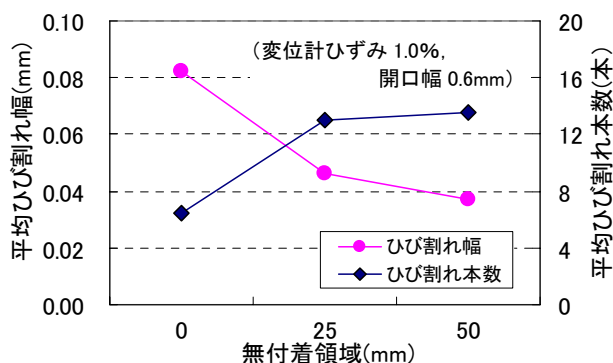


図-11 ひび割れ本数と平均ひび割れ幅

### c. ひび割れ幅および本数

パイ型変位計が1.0%ひずみに達した時点(模擬ひび割れ開口幅0.6mm)でのECCに発生したひび割れ幅とひび割れ本数を図-11に、ひび割れ幅の分布を図-12に示す。なお、図-11, 図-12ともにAB両面のデータを用いた。図-11に示すとおり、無付着領域の増加に伴いひび割れ本数は増加し、ひび割れ幅は小さくなる傾向を示した。また、図-12より、ゼロスパン条件であるcase0では、0.2mm以上のひび割れ幅が2本(AB面で各1本)確認されており、この時点でcase0については、1本のひび割れが局所的に大きくなる状況であったと考えられる。一方、

case25, case50 のケースでは, 最大ひび割れ幅が 0.14mm 以下であり, そのほとんどが一般の水密性を確保する場合の許容ひび割れ幅とされる 0.1mm<sup>3)</sup> 以下の微細なひび割れであった。

なお, poiseuille の法則から導かれた漏水量とひび割れ幅の関係より, 漏水量はひび割れ幅の 3 乗に比例することが知られている<sup>3)</sup>。そこで, 表-3 に, 各ケースで発生したひび割れ幅の 3 乗の値を示す。なお, ECC に生じた, 個々のひび割れ幅の 3 乗の総和に対し, ひび割れが 1 本に集中したと仮定して求めたひび割れ幅の 3 乗の値とを比較した。ECC のひび割れ分散効果により, ひび割れ幅の 3 乗の値は大幅に小さくなっており (1/15~1/82 程度), ECC を用いることでひび割れ部の漏水量が低減できることがわかる。

#### 4. まとめ

本実験で得られた結果を以下に示す。

- (1) ゼロスパン条件下での引張試験においても, ECC の特徴であるひび割れ分散効果が得られる。この時, ひび割れは, 母材のひび割れ位置からおよそ 60° の角度で三角形形状に分散する。
- (2) 目地部やひび割れ部の開口幅の変動に対する ECC の追従性を改善する方法として, 無付着領域を設けることが有効である。無付着領域を設けることで, より大きな開口幅の変動に対し追従することが可能となり, ひび割れ開口に伴い生じる ECC のひび割れ幅を抑制できる。
- (3) 補修後, 目地部またはひび割れ部が開口した場合でも, ECC を用いることでひび割れが分散するため, その部分からの漏水量を大幅に低減することができる。

今後は, 試験方法の改良を図るとともに, 微細ひび割れを生じた ECC の水密性について, 自己治癒効果を含め検討を行う予定である。また, 著者らは, 写真-4 に示すように供用中の農業用水路において, 目地部を対象とした検証実験も実施している。これについても, 継続して性能

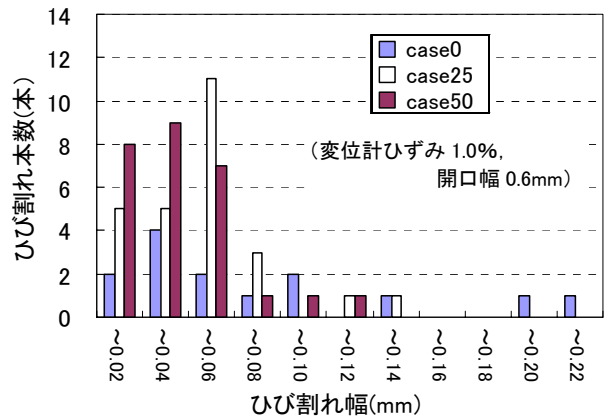


図-12 ひび割れ幅の分布

表-3 ひび割れ幅の 3 乗の値 (AB 面平均値)

	case0	case25	case50
①ECCに生じたひび割れから算出	0.010	0.003	0.002
②集中ひび割れとして算出	0.147	0.235	0.115
②に対する①の比	1/15	1/82	1/62

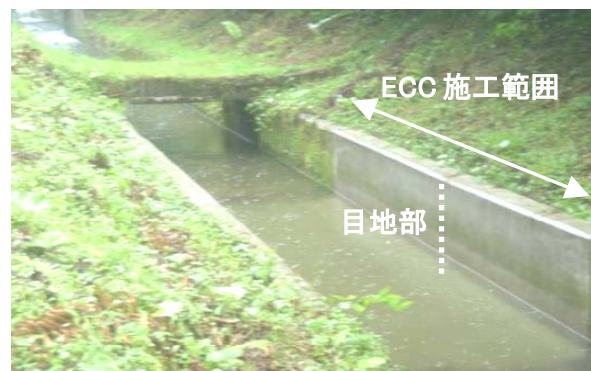


写真-4 試験施工写真

を検証していく予定である。

**謝辞** 本実験の実施にあたり, 金沢工業大学平石陽一氏, 長岡技術科学大学松崎裕亮氏には, 多大なる協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 長東ほか: 農業水利コンクリート構造物の更新と維持管理, 農業土木学会誌, Vol.70, No.12, pp.3-6, 2002.12
- 2) 坂田ほか: 高靱性繊維補強セメント複合材料の吹付け施工システムの開発, 鹿島技術研究所年報, Vol.50, pp.187-190, 2002.9
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 2002 年制定[構造性能照査編], 2002.03