

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^{*1}・坂田 昇^{*2}・渡嘉敷 勝^{*3}・長束 勇^{*4}

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。そのほとんどが高度経済成長期以降に建設されており、農業用水路の標準耐用年数が30年であることから、近年では、老朽化して補修・補強を必要とする構造物も多い¹⁾。老朽化した農業用水路においては、構造物の性質上、特に、**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セメント系補修材料が使用されている。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生じ(**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、躯体コンクリートが温度変化などによって伸縮することで、目地部やひび割れ部の開

口幅が変動し、補修材料がその変形に追従できないためである。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。

一方で、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）²⁾は、優れた変形性能とひび割れ分散性能を有する材料である(**写真-3**)。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。



写真-1 目地損傷部からの漏水

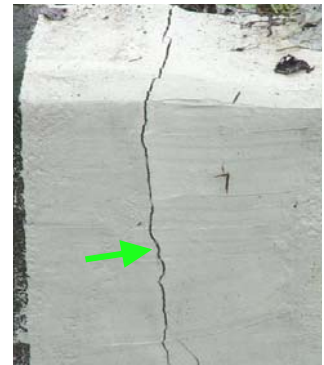


写真-2 目地補修部に発生したひび割れ

*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

本研究では、農業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。

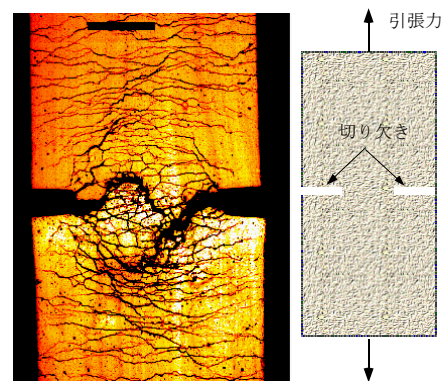


写真-3 ECCの優れたひび割れ分散性

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%、砂セメント比 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。

(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、補修材料未施工部に、既設コンクリートのひび割れ部を模擬し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

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 ³)	使用繊維
ECC	20.5	330	ビニロン繊維; 20.vol%
PCM	14.5	247	ビニロン繊維; 0.15vol%

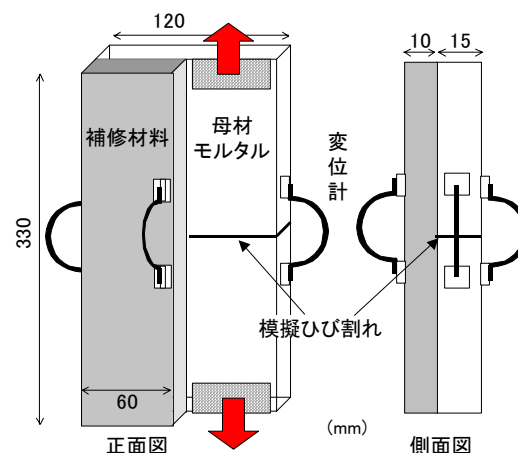


図-1 シリーズ1の試験概要

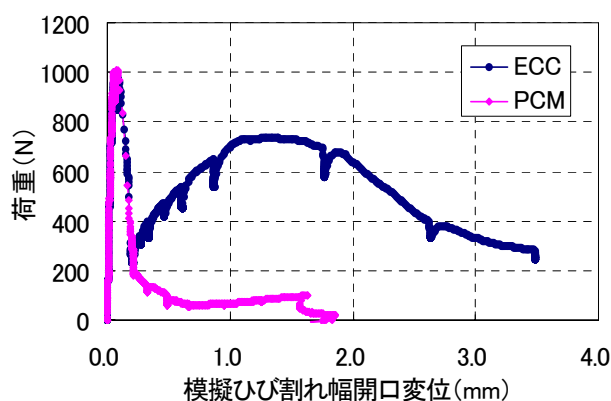


図-2 荷重-模擬ひび割れ幅開口変位の関係

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。また、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。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 本確認された。これより、ゼロスパン条件においても、ECC の特徴であるひび割れ分散効果が得られることがわかった。

ただし、シリーズ 1 では、母材モルタルの表面と裏面で断面の剛性が異なること、部材軸中心で荷重していないことなどから、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、試験体中心に荷重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%，砂セメント比 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, 25, 50mm (以下, case0, case25, case50) とした 3 ケースについて実験を行った。なお、ECC

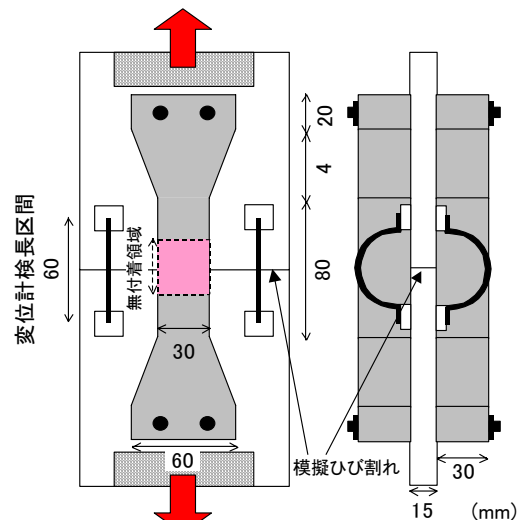


図-3 シリーズ 2 の試験概要

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。荷重中、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、荷重装置の変位を 1.0%で保持したままの状態、マイクروسコープ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 が破断するまで荷重を続け、破断後速やかに荷重を除荷し、再度マイクروسコープ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 と同じ荷重条件で

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。

ECC 単体の引張試験における応力-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、試験体両面に変位計のひずみに差が生じるケースが確認された。これは、試験体の製作精度や AB 面の材料物性のばらつきなどの影響で、試験体に曲げが作用したためと考えられた。したがって、これらのデータは有効な試験結果として扱わないこととした。なお、AB 面のひずみが同程度の値を示した有効なデータは、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。図-7 より全てのケースで、ECC 特有の擬似ひずみ硬化型の挙動を示した。また、図-7 より、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% であった。無付着領域が増加することで、破断時ひずみが大きくなる傾向にあった。これより、無付着領域を設けることは、

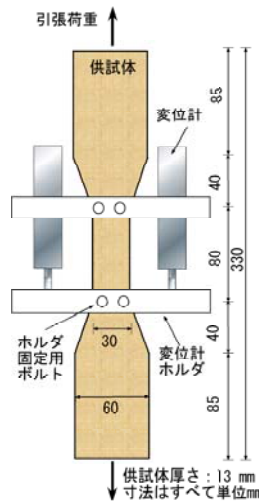


図-4 直接引張試験方法 (ECC 単体)

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 ²)	JIS A 1108	46.5	38.0
引張強度 (N/mm ²)	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 ²)	二面せん断 (4×4×16mm)	2.3	-
付着強度試験 (N/mm ²)	建研式引張試験	2.12	-

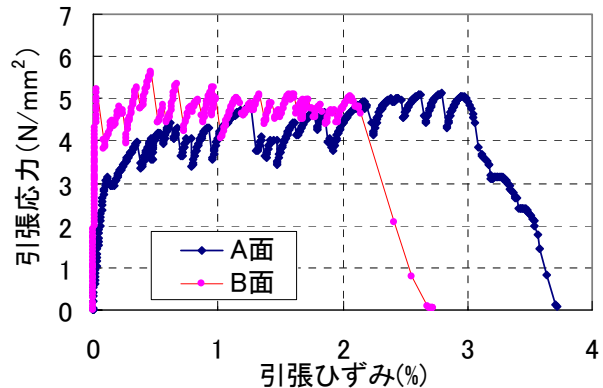


図-5 引張応力-ひずみ曲線 (ECC 単体)

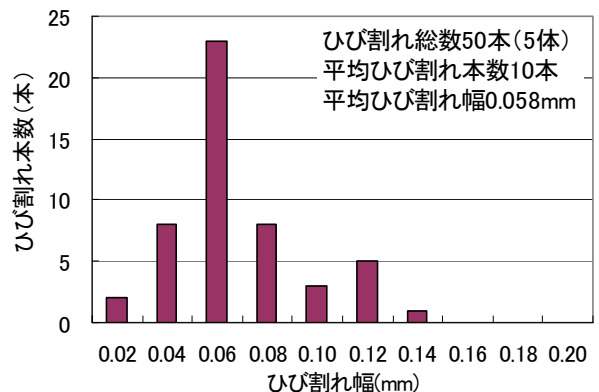


図-6 1.0% ひずみ時のひび割れ幅 (ECC 単体)

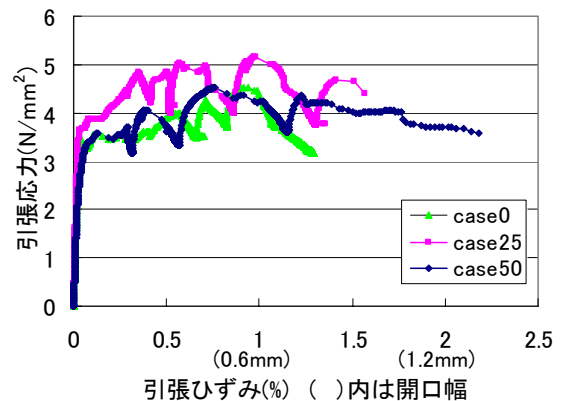


図-7 引張応力-ひずみ曲線 (シリーズ 2)

目地部やひび割れ部の開口幅の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。

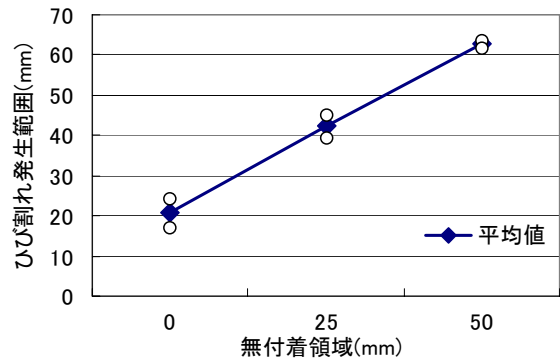
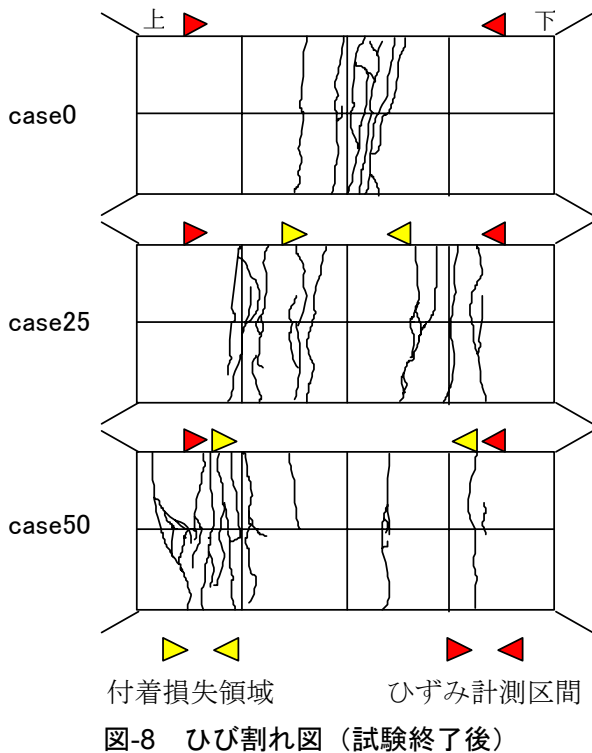


図-9 ひび割れ発生範囲（試験終了後）

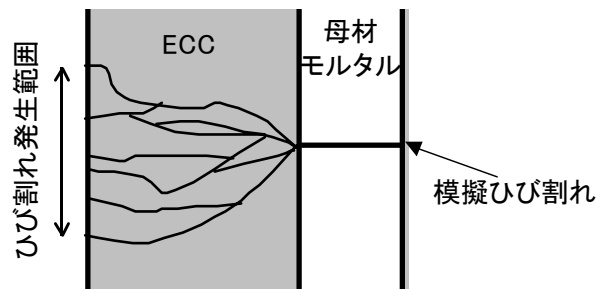


図-10 ECC 側面のひび割れ図（case0 終了後）

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得られることがわかった。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。無付着領域を設けた 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する傾向を示した。これは、以下のように説明できる。case0 の試験終了後における模擬ひび割れ近傍の ECC 側面のひびわれ状況を図-10 に示す。ECC のひび割れは、模擬ひび割れを頂点とし、およそ 60° の角度で三角形状に発生していた。これより、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。

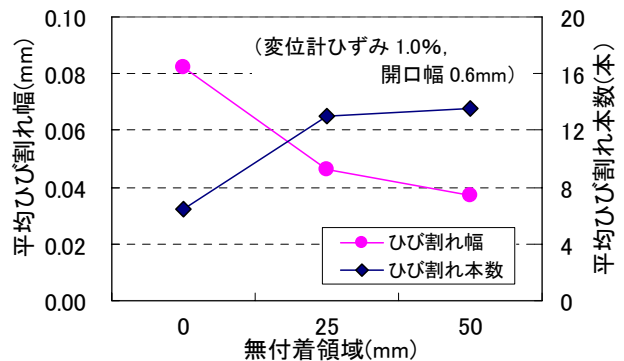


図-11 ひび割れ本数と平均ひび割れ幅

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 では、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）確認された。これより、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 0.1mm³⁾ 以下の微細なひび割れであった。

また, 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³⁾。そこで表-3に図-12からそれぞれのひび割れ幅の3乗の値を求めた結果を示す。なお, AB面それぞれで算出し, 各面のひび割れが1本に集中して発生した場合に対する割合を示した。表-3より, ひび割れ面の粗度などその他の条件を一定とした場合, ECCのひび割れ分散効果により, ひび割れ部の漏水量が大幅(1/15~1/82程度)に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, 継続して性能を検証していく予定である。

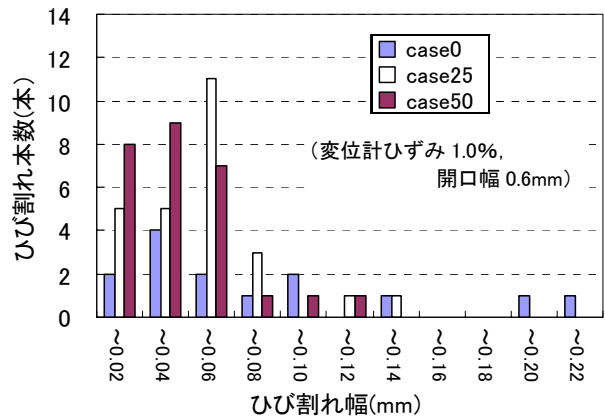


図-12 ひび割れ幅の分布

表-3 ひび割れ幅の3乗根 (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

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祐亮氏には, 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) 長束ほか: 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