

# 論文 吹付け ECC による水路補修に関する研究

前山 篤史\*1・林 大介\*2・渡嘉敷 勝\*3・長束 勇\*4

**要旨:** ECC は、微細なひび割れを発生させながら大きく変形する性能を有し、かつセメント系材料としての高い耐久性を併せ持つ材料である。農業用水路の目地およびひび割れからの漏水や、摩耗による通水性能の低下に対して ECC が有効と考え、適用性を検討した。その結果、ECC に微細ひび割れが発生しても止水性が保持されることや、ECC が高い凍結融解抵抗性を有すること、ECC を補強材で補強することによって目地の開閉挙動に対する高い疲労耐久性を付与できること、ECC が従来のポリマーセメントモルタルやコンクリートと同等の耐摩耗性を有すること、実施工から5年間にわたって止水性を保持していることなどを確認した。

**キーワード:** ECC, 農業用水路, 補修, 吹付け工法, ひび割れ分散, 止水, 漏水

## 1. はじめに

老朽化した農業用水路において、摩耗による通水性能の低下や、目地およびひび割れからの漏水が問題となり、これまでに各種の補修工法が適用されてきた。しかし、従来のセメント系材料による補修では、ひび割れや目地の開閉挙動に対する追従性に劣り、樹脂系材料による補修では、紫外線劣化を生じて追従性が損なわれやすいため、いずれを適用した場合でも、補修後の早期にひび割れが発生し、漏水することが問題となっている。

一方、近年、高靱性セメント複合材料 ECC (Engineered Cementitious Composite) と呼ばれる新材料が開発され、実用化されつつある<sup>1)</sup>。これは、モルタルと補強用短繊維によって構成される複合材料であり、引張力に対して微細なひび割れを発生させながら、大きく変形するという特徴を有する材料である。結果として、優れた変形性能と、セメント系材料としての高い耐久性を併せ持つという従来の材料では達成できなかった性能を実現している。この ECC の適用により、農業用水路における高耐久な補修工法が実現できるものと考え、ECC の吹付け工法の適用性に関する検討を行った。

本報では、ECC の性能確認試験結果、水路補修工法の概要、実構造物における長期耐久性評価の経過について述べる。

## 2. ECC の性能確認試験

### 2.1 性能確認試験の項目

吹付け用の ECC の配合は、表-1 に示すとおりであり、本検討では、粉体および繊維がブレミックスされた製品を使用した。この ECC について、表-2 に示す室内試験結果を得た。また、ひび割れ発生状態における止水性、

凍結融解抵抗性、耐摩耗性および疲労耐久性の4項目を、以下のとおり評価した。

### 2.2 ひび割れ発生状態における ECC の止水性

水路補修では、ECC にひび割れが発生した状態で供用することを想定しているため、ひび割れ発生状態における ECC の止水性を評価した。

ECC と、水セメント比が 50% で、セメントと細骨材の比が 1 : 3 のモルタルの 2 種類の材料について  $\phi$  100mm×厚さ 15mm の供試体を作製し、割裂試験でひび割れを発生させた。ここで、割裂試験の際、ECC 供試体についてはパイ型ゲージを取り付け、ひずみが 1000 $\mu$ 、2000 $\mu$  および 5000 $\mu$  に達するまでの 3 通りの载荷を行った。その結果、これらの供試体には複数の微細ひび割れが発生し、マイクロ스코プによって確認された平均ひび割れ幅は、それぞれ 0.023mm、0.033mm および 0.054mm であった。また、モルタル供試体については、割裂後、

表-1 吹付け用 ECC の配合

補強用繊維				マトリックス		
繊維種類	繊維直径 (mm)	繊維長 (mm)	繊維混入率 (vol%)	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材結合材容積比
PVA	0.04	12	2.0	32.0	360	0.45

表-2 室内試験結果 (材齢 28 日)

項目	実験値	試験方法
圧縮強度	40.3N/mm <sup>2</sup>	JIS A 1108
引張降伏強度	3.3N/mm <sup>2</sup>	土木学会 HPFRCC 設計 施工指針 (案)
引張終局ひずみ	3.9%	
付着強度	2.5N/mm <sup>2</sup>	建研式引張試験
粗度係数	0.010	50m 水路での計測

\*1 カジマ・リノベイト (株) 技術部 課長代理 工修 (正会員)

\*2 鹿島技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

\*3 農研機構 農村工学研究所 施設資源部 水利施設機能研究室 主任研究員 園修 (正会員)

\*4 島根大学 生物資源科学部 地域開発科学科 教授 博士 (農学) (正会員)

上記の 1000 $\mu$ , 2000 $\mu$  および 5000 $\mu$  の各ひずみに相当する幅 0.04mm, 0.08mm および 0.20mm のひび割れが確保されるように供試体を作製した。その後、農業用水路における水深を 1.5m と想定して設定した 15kPa の圧力を作用させて透水試験を行った。

透水試験では、アウトプット法を採用し、試験時間を 24 時間以上として、時間当たりの透水量が安定するまで試験を継続した。

ECC 供試体およびモルタル供試体の時間当たりの透水量と経過時間の関係を、それぞれ図-1 および図-2 に示す。ここで、図-2 では、供試体間の透水量の差が大きいため、縦軸を対数で表示した。これらの図より、モルタルに比べて ECC の透水量は、微量であった。これは、同一ひずみで生じる ECC のひび割れ幅が微細な範囲に制御されたためと考えられる。また、ECC の場合、全ての供試体において透水量が開始直後から減少し、24 時間後にほぼ一定となった。写真-1 に、ひずみを 5000 $\mu$  まで導入した ECC 供試体における試験終了後のひび割れ拡大状況を示す。同写真に示すように、ECC の場合、全ての供試体において、ひび割れが白色の析出物で充てんされている状態であった。このことより、ECC 供試体では、微細なひび割れが析出物で充てんされたことにより、透水量が経時に伴って減少したものと考えられる。なお、析出物については詳細な分析を行っていないが、セメント中の可溶成分に由来するものと推察される。一方、モルタル供試体の場合は、ひび割れ幅が、ECC と同等の 0.04mm の供試体以外、透水量の減少が認められなかった。

以上の試験結果より、ECC に複数の微細ひび割れが発生した場合でも、水路の止水性は保持されるものと考えられる。

### 2.3 ECC の凍結融解抵抗性

JIS A 1148 A 法に準じて、ECC の凍結融解試験を実施した。試験結果を図-3 に示す。本試験は、通常、300 サイクルにおける相対動弾性係数によって評価されるものであるが、寒冷地の水路が厳しい凍害条件となることを考慮して、より長期間の試験を行うこととした。

同図より、ECC は、3400 サイクル程度まで相対動弾性係数が 85% 以上となり、極めて高い凍結融解抵抗性を有していることが確認された。これは、水結合材比が 32% と低いために細孔中の凍結水量が少ないこと、凍結による圧力を緩和する役割を果たす空気が 10% 程度と多いこと、さらには高強度の短繊維の架橋による補強効果によるものと考えられる。

### 2.4 ECC の耐摩耗性

ECC の耐摩耗性について、ウォータージェットによる水流摩耗試験を実施した。

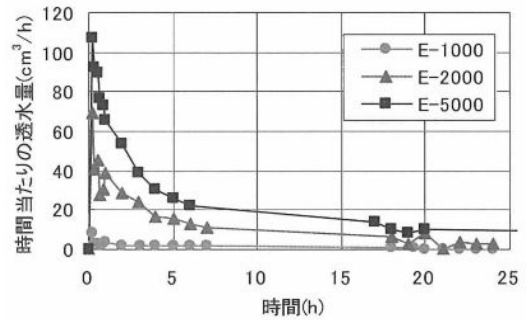


図-1 ECC の時間あたりの透水量と経過時間

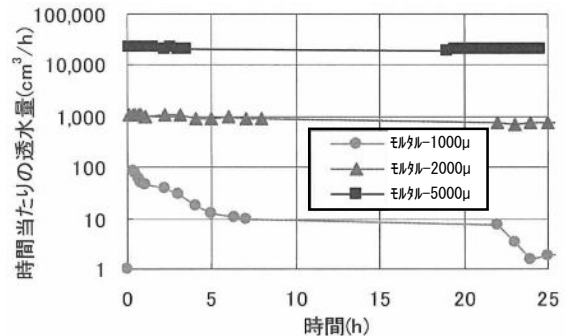


図-2 モルタルの時間あたりの透水量と経過時間

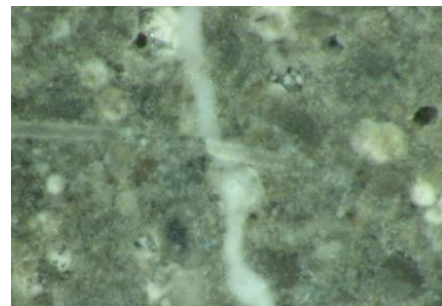


写真-1 ECC の試験終了後のひび割れ状況

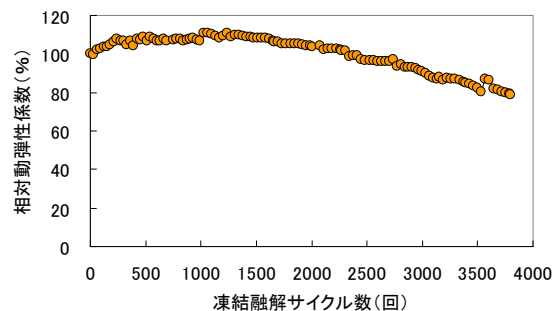


図-3 ECC の凍結融解試験結果

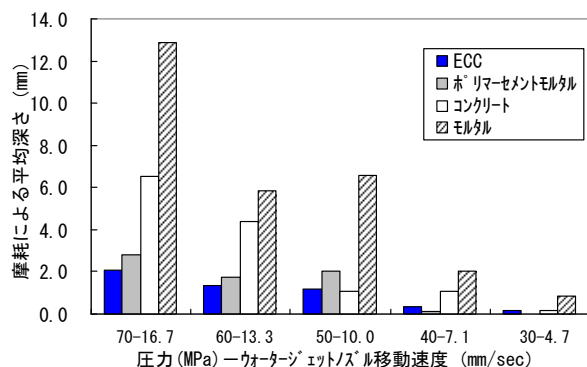


図-4 水流摩耗試験結果

ECC, ポリマーセメントモルタル, コンクリート (水セメント比が 65%) およびモルタル (水セメント比が 65%) の 4 種類の材料を用いて, 300×300×600mm の供試体を作製した。ここで, コンクリートは用水路を想定した圧縮強度 24 N/mm<sup>2</sup> を目標とし, ポリマーセメントモルタルは 40N/mm<sup>2</sup> を目標とした。本試験では, ウォータージェットの高圧を 30, 40, 50, 60 および 70MPa とし, 幅 100mm のノズルを, それぞれ 4.7, 7.1, 10.0, 13.3 および 16.7mm/sec の速度で移動させて摩耗深さを評価した。

水流摩耗性試験の結果を, 図-4 に示す。同図より, ECC の平均深さは, 圧力が 60 および 70MPa の場合, コンクリートおよびモルタルよりも浅く, ポリマーセメントモルタルと同等であった。また, 50MPa 以下の場合, モルタルよりも浅く, コンクリートおよびポリマーセメントモルタルと同程度であった。ECC には粗骨材が含まれていないが, 水結合材比が低く, また短繊維の架橋があるため, コンクリートと同等の平均深さになったものと考えられる。なお, ECC の場合には, コンクリートのような粗骨材の露出がなく, 表面の凹凸が小さいため, 同等の平均深さであっても, より高い通水性能を保持していることが考えられる。

## 2.5 ECC の疲労耐久性

ECC は水路の目地やひび割れの幅が温度変化に伴って開閉するため, ECC には圧縮側および引張側の両方の変位が発生する。既往の研究<sup>2)</sup>により, ECC 自体が, 疲労に対して高い耐久性を有する材料であることが確認されているが, エキスパンドメタルなどの補強材を配置することによって, より高い疲労耐久性を確保できるものと考えられる。この効果について, 圧縮および引張の一軸正負交番疲労荷重試験により確認した。なお, この試験は, 通常の引張荷重のみによる疲労荷重試験よりも厳しい条件となる。

ECC により, 図-5 に示す試験体を作製した。図中の補強材について, エキスパンドメタルを配置する供試体と配置しない供試体の 2 通りを作製した。

その後, 実構造物の測定結果を基に設定した表-3 に示す荷重方法によって正負交番疲労荷重を行った。変位量は, 実構造物の測定結果より圧縮および引張のひずみをそれぞれ-0.05%と+0.10%とした。また, 荷重速度については, 静的荷重を 0.005mm/sec とし, 動的荷重の周波数を 1Hz とした。

引張応力と疲労サイクルの関係を図-6 に示す。同図に示すように, ECC に補強材を配置しない場合, 1000 回程度で応力が低下したが, 補強材を配置した場合には, 8000 回程度まで応力が低下しなかった。これは, ECC のような短繊維で補強された材料の場合, 引張側から圧

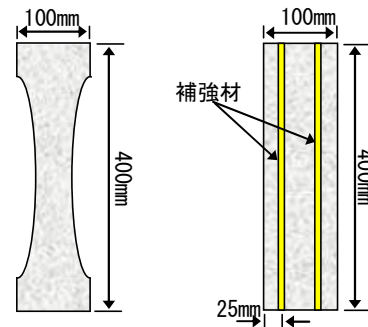


図-5 試験体 (左: 平面図, 右: 断面図)

表-3 一軸正負交番疲労荷重試験の荷重方法

ステップ	サイクル	荷重方法	変位量(mm)	
			圧縮側	引張側
1	1~5	静的荷重	-0.075 <sup>*1</sup>	+0.150 <sup>*2</sup>
2	6~破断まで	動的荷重	-0.075 <sup>*1</sup>	+0.150 <sup>*2</sup>

※1: 実構造物の目地の圧縮ひずみ-0.05%より算出

※2: 実構造物の目地の引張ひずみ+0.10%より算出

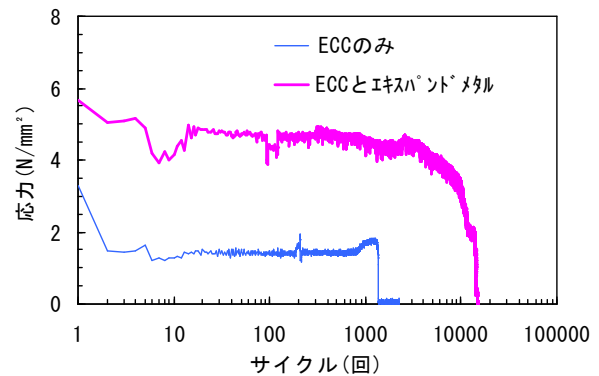


図-6 引張応力とサイクル数

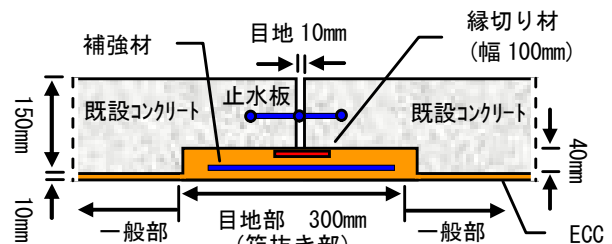


図-7 ECCによる水路補修工法の断面図

縮側への荷重によってひび割れが閉じる際に, ひび割れを架橋する短繊維が折り曲げられ, さらには潰されて損傷する可能性があるが, 補強材で補強することによって, この損傷が軽減されるためと考えられる。

以上の結果より, ECC をエキスパンドメタルなどの補強材で補強することにより, 目地部における疲労耐久性を著しく向上させることができるものと考えられる。

## 3. ECCによる水路補修工法

### 3.1 工法の概要

ECCによる水路補修工法の概要を図-7に示す。こ

こで、目地を挟む 300mm の範囲を「目地部」とし、それ以外の範囲を「一般部」とする。本工法で意図している効果については、以下に示すとおりである。

一般部については、厚さ 10mm の ECC で被覆し、表面を平滑にして通水性能の回復を図る。また、一般部にひび割れが発生している場合には、ECC のひび割れ分散性によって開閉に追従させ、止水性を保持する。

目地部については、深さ 50mm の箱抜き区間を設けて ECC による断面修復を施し、さらにエキスパンドメタルなどの補強材を配置することにより、剛性を向上させて疲労耐久性を確保する。また、目地を挟んだ 100mm の区間には、グリスの塗布などによって、ECC と既設コンクリートとの無付着区間を設け、より確実に ECC のひび割れ分散性を確保する。

この方法により、一般部および目地部を同一の材料で連続させた改修を行うことができる。

### 3.2 施工手順

施工手順を図-8 に示す。

事前処理として、まず目地部を深さ 50mm まではずる。次に、ECC の反上りを防止するためにアンカーを設置した後、高圧水によって施工面を洗浄し、劣化部を除去する。このアンカーについては、φ100mm で深さ 50mm の孔を空け、その中心に芯棒打込み式のステンレスアンカーを設置する方法とする。

はつった目地部に縁切りシートを貼り付け、グリスを塗布して無付着区間を設けた後、既設コンクリートへの吸水を防止するために水を散布する。以上の処理の後、現場で ECC を練り混ぜて湿式吹付け施工を行う。目地部については、施工厚さが 40mm となった段階で、補強材を設置し、その上から残りの 10mm の吹付けを行う。ECC の吹付け状況例を写真-2 に示す。

## 4. 実構造物における長期耐久性評価

### 4.1 長期耐久性評価の概要

関東地方の 2 箇所（茨城県つくばみらい市、茨城県水戸市）、東北地方（岩手県花巻市）および近畿地方（和歌山県紀の川市）の合計 4 箇所において実施工を行い、経過調査を実施している。

### 4.2 茨城県つくばみらい市における長期耐久性評価<sup>3)</sup>

#### (1) 対象構造物

対象とした水路は、内寸の幅および高さが、それぞれ 1910mm および 970mm の開水路であり、昭和 40 年代に建設されたものである。この水路のうち、3 カ所の目地を連続化する延長約 26m の範囲を施工対象としている。補修前後の状況を写真-3 に示す。

補修前に目視観察を行ったところ、施工対象の範囲で

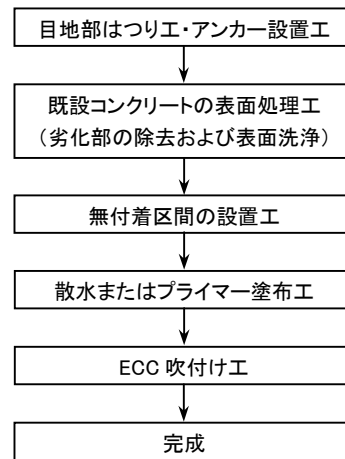


図-8 ECC による水路補修工法の施工手順



写真-2 ECC の吹付け状況



写真-3 つくばみらい市（左：補修前、右：補修後）



写真-4 水路の損傷状況（左：目地、右：側面）

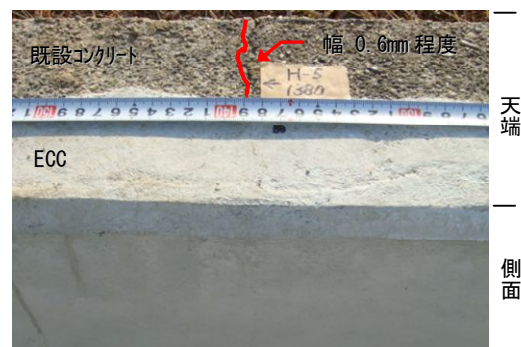


写真-5 補修より 2 年後の状況



は、写真-4 に示すように、目地の損傷、表面の摩耗および側面における縦方向のひび割れが確認された。ひび割れについては、幅 0.20mm 以上のものが 30 本以上発生しており、中には、幅 1.30mm に達するものもあった。また、目地については、0.30mm から 0.90mm 程度の範囲で開いている状況であった。

### (2) 経過調査方法

補修後、ECC の表面観察および目地幅の変動の計測を行った。目地幅の計測では、パイ型ゲージを既設コンクリートに直接設置した。また、比較のため、本工法による補修が行われていない目地でも計測を行った。経過観察の実施時期は、施工から約 3 ヶ月後、約 9 ヶ月後および約 2 年後とした

### (3) 経過調査結果

一般部の目視観察を行った結果、補修後の 2 年間にわたり、ECC 表面に、既設コンクリートのひび割れに沿ったひび割れは確認されなかった。その状況の一例を写真-5 に示す。これらの箇所には、アセトンを噴霧したところ、幅 0.04mm から 0.06mm 程度の微細なひび割れが発生していた。前述の透水試験により、この範囲であれば、止水性が保持されることが確認されていることから、ECC は、既設コンクリートのひび割れの開閉に対し、止水性を確保しながら追従しているものと考えられる。

目地部について、南に面した目地幅の変動計測結果を、図-9 に示す。ここで、同図では、引張側を正、圧縮側を負としており、測定開始時期は、施工完了から 20 日後である。同図より、本工法の補修が行われていない箇所の目地では、幅の変動が 3.0mm 程度であったのに対し、本工法の適用箇所は、幅の変動が 0.2mm 程度に抑制された。これは、目地を跨いで ECC を連続的に施工したことにより、目地の開閉の際に生じる圧縮力および引張力を ECC が負担したためと考えられる。また、目地部では、補修後の 2 年間にわたり、目視で確認できるひび割れが発生せず、アセトンの噴霧によって無付着区間に 1 本および天端に 2 本の微細ひび割れが確認された。これらのひび割れについても、一般部と同様、止水性が確保される範囲であることから、ECC は、目地幅の変動に対して、止水性を確保しつつ追従しているものと考えられる。

以上の結果より、本工法の適用後の 2 年間にわたって水路の健全性が保持され、止水性が確保されていることが確認されている。

#### 4.3 茨城県水戸市における長期耐久性評価<sup>4)</sup>

対象とした水路は、内寸の幅および高さが、いずれも 1000mm の開水路であり、昭和 54 年に建設されたものである。この水路のうち、2 ヶ所の目地を連続化する延長約 15m の範囲を対象としている。

補修前に目視観察を行ったところ、側面が摩耗によ

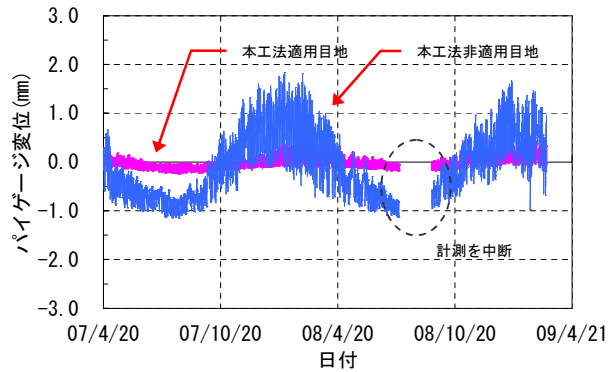


図-9 目地幅の計測結果



写真-6 水戸市 (左:補修前, 右:補修後)



写真-7 花巻市 (左:補修前, 右:補修後)



写真-8 紀の川市 (左:補修前, 右:補修後)

て 10~20mm 程度喪失し、粗骨材が露出している状況であった。また、一部の目地に損傷が認められた。

補修前後の状況を写真-6 に示す。補修後の約 3 年間にわたって目視による経過観察を行った結果、数本の微細ひび割れが確認されたのみであり、止水性を確保している状況が確認されている。

#### 4.4 岩手県花巻市における長期耐久性評価

対象とした水路は、内寸の幅および高さが、それぞれ

1500mm および 950mm の開水路であり，昭和 41 年に建設されたものである。この水路のうち，1 ヶ所の目地を連続化する延長約 5m の範囲を対象としている。

補修前に目視観察を行ったところ，底面および側面が摩耗と凍結融解作用によって 10～20mm 程度喪失し，粗骨材が露出している状況であった。

補修前後の状況を写真-7 に示す。補修より約 5 年後に，目視による経過観察を行った結果，ひび割れは確認されず，止水性を確保している状況が確認されている。

#### 4.5 和歌山県紀の川市における長期耐久性評価<sup>5)</sup>

対象とした水路は，内寸の幅および高さが，それぞれ 2780mm および 1400mm の開水路であり，昭和 20 年代に建設されたものである。この水路のうち，延長約 20m の範囲を対象としている。

補修前に目視観察を行ったところ，施工対象の範囲では，表面の摩耗および側面における縦方向のひび割れが確認された。ひび割れについては，幅 0.60mm 以上のものが 10 本以上発生しており，中には，幅 1.80mm に達するものもあった。

補修前後の状況を写真-8 に示す。補修より 2 ヶ月後に実施した目視観察では，数本の微細ひび割れが確認されたのみであり，止水性を確保している状況が確認されている。

#### 5. まとめ

農業用水路の補修工法として，ECC の吹付け工法の適用性を検討した結果，以下のことが明らかとなった。

- (1) ECC に微細ひび割れが発生した場合でも，析出物によってひび割れが閉塞することから，止水性が保持される。
- (2) ECC は，水結合材比が低く，また高強度の短繊維の架橋があるために高い凍結融解抵抗性を有しており，凍結融解試験の 3500 サイクルにおける相対動弾性係

数が 80%以上である。

- (3) ECC は，ポリマーセメントモルタルおよびコンクリートと同等の耐摩耗性を有している。
- (4) ECC は疲労耐久性が確認された材料であるが，さらにエキスパンドメタルなどの補強材で補強することによって，疲労耐久性が約 8 倍に向上する。
- (5) 実際の水路における経過調査の結果，補修から 3 年間にわたり，ECC が，既設コンクリートのひび割れおよび目地の開閉に対して，微細ひび割れを発生させながら追従し，止水性を保持していることが確認された。このことより，本工法は，水路の補修工法として有効であるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 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設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，2007.3
- 2) 湯室貴章，平城弘一，福田一郎：一軸引張試験における高靱性セメント系複合材料（ECC）の耐疲労評価，土木学会第 62 回年次学術講演会概要集，第 V 部，pp.447-448，2007.9
- 3) 内田雄士，平石剛紀，坂田昇，渡嘉敷勝，森丈久：高靱性セメント複合材料を用いた吹付け補修工法の農業用水路への適用，H20 農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.472-473，2008.8
- 4) 平石剛紀，坂田昇，閑田徹志，渡嘉敷勝，長束勇：農業用水路の補修における高靱性セメント複合材料の適用性検討，コンクリート建造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，No.6，pp.179-185，2006.10
- 5) 井上公輔：老朽化した農業用水路における表面補修工法の実施事例，農業農村工学会京都支部大会，2008.11