

高靱性セメント系複合材料 ECC

橋本 学・坂田 昇・長谷川 裕介

高靱性セメント系複合材料 (Engineered Cementitious Composite, 以下, ECC) の優れた曲げ変形性能およびセメント系材料としての高い耐久性を生かして, 様々な用途への展開が期待されており, 補修・補強分野を中心に実施工へ適用されつつある¹⁾。実施工への適用にあたり, これまでに実施した ECC の性能試験の結果を示すとともに, 実施工の適用事例として, 道路橋床版連結部の補修工法やトンネルの補強工法および農業用水路の補修工法を挙げ, 施工方法の検証および施工後の経過観察を行った。その結果, 施工後数年が経過した現在でも, それぞれの補修・補強工法は機能を維持しており, ECC の特長である高い耐久性が確認された。

キーワード: ECC, 変形性能, 耐久性, 遮水性能, 道路橋床版, トンネル補強, 農業用水路

1. はじめに

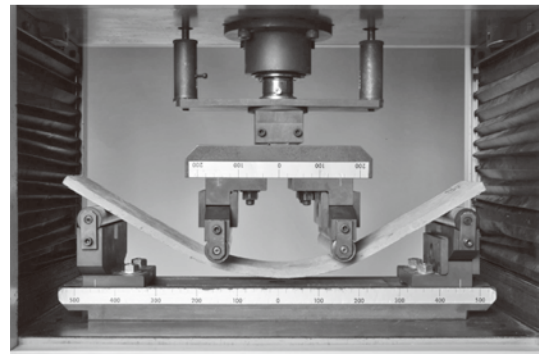
ECC は, セメント, 水, 砂などの通常のもルタル材料に, 高強度の有機繊維を混合したセメント系の材料であり, ひび割れ発生後も繊維が引張力を負担し, 数パーセント程度の引張ひずみが作用しても引張力を保持できる性能を有している。従来のセメント系材料にはない優れた性能から, ECC は様々な用途への展開が期待されており, 筆者らは ECC の適用拡大に向けての一策として, 道路橋床版連結部の埋設型枠, ECC を汎用的な機械で吹付け施工を行うトンネル補修・補強工法を考案した。また, 農業土木分野においても, 農業用水路の高耐久な補修工法として適用した。本報では, ECC の各種の性能試験の結果を示すとともに ECC を適用した施工事例について紹介する。

2. ECC の概要

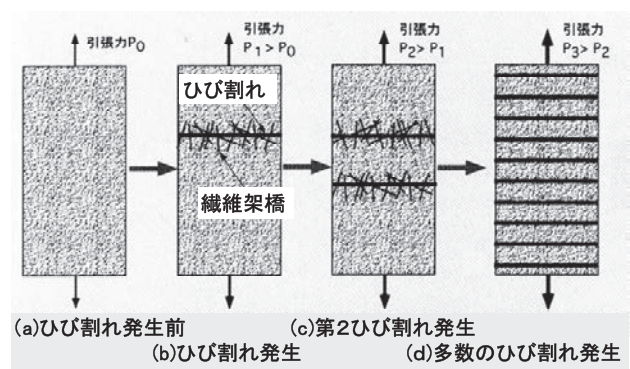
ECC はセメント系材料でありながら, 複合体に含まれる有機繊維の補強効果により, 引張力が作用しても脆性的に破壊することなく, 微細で高密度の複数ひび割れを発生させながら, 金属のように変形するという優れたひび割れ分散性能を有する高靱性材料である。この優れた曲げ変形性能, ひび割れ分散のメカニズムおよびひび割れ分散の状況例を写真—1, 図—1, 2 にそれぞれ示す。

従来のセメント系材料では初期ひび割れが発生する

と, このひび割れが拡大して破壊してしまう。それに対し, ECC では, 繊維によるひび割れの拘束能力が高く, ひび割れ幅の拡大が抑制され次のひび割れが生じる。そして次々と新たな微細ひび割れが多数発生し, 見掛け上, 非常に大きな引張ひずみが生じても荷重に耐え得る特長を有している。



写真—1 優れた曲げ性能



図—1 ひび割れ分散のメカニズム

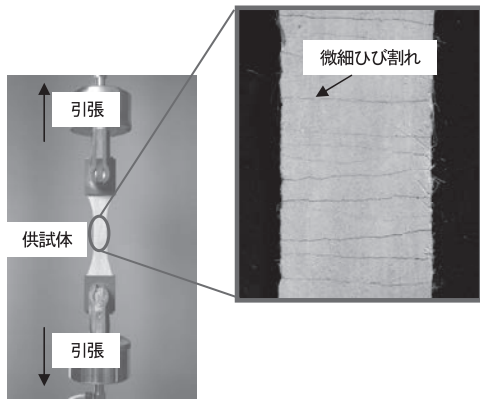


図-2 ひび割れ分散のメカニズム

3. ECC の性能に関する検討

ECC は表-1 に示す配合で構成されており、材料特性値としては、表-2 に示すように既往の研究²⁾より確認されている。以下に、ECC の変形性能、耐久性および遮水性能について示す。

表-1 ECC の配合

水結合材比 W/B (%)	砂結合材比 S/B (%)	単位水量 W (kg/m ³)	繊維体積率 V _f (%)
42.0	41.3	360	2.0

表-2 ECC の材料特性値¹⁾

項目	単位	値
引張降伏強度	N/mm ²	2.0
引張強度	N/mm ²	3.0
引張終局ひずみ	%	0.8
圧縮強度	N/mm ²	30.0
ヤング係数	N/mm ²	16000
ポアソン比	-	0.23
熱伝導係数	W/(m・k)	0.463
比熱	J/(g・k)	1.49
収縮特性	-	-0.046%

(1) 変形性能について

ECC の変形に対する追従性能を確認するために、土木学会発刊の「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)」²⁾に従い、図-3 に示す一軸直接引張試験を実施した。応力-ひずみ関係を図-4 に示す。同図より、一般的な繊維補強モルタルの場合には初期ひび割れの発生と同時に荷重の低下が認められることが多いが、ECC の場合、初期ひび割れの発生後も、引張ひずみの増加に伴って応力が徐々に増加する傾向を示し、多数の微細ひび割れを発生させながら3%以上の引張ひずみに達することが

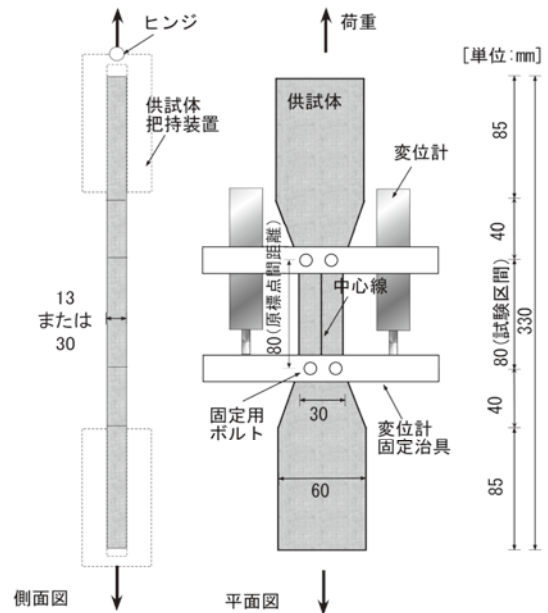


図-3 一軸直接引張試験概要図

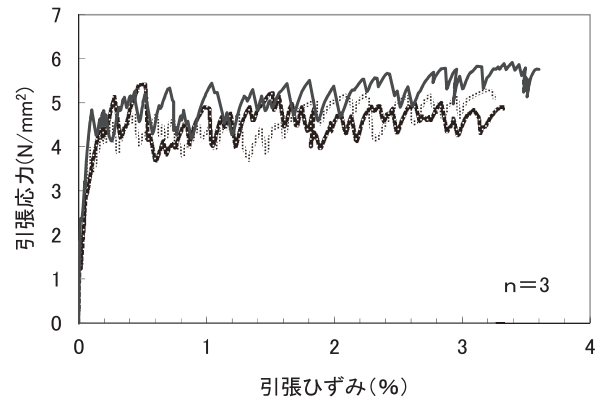


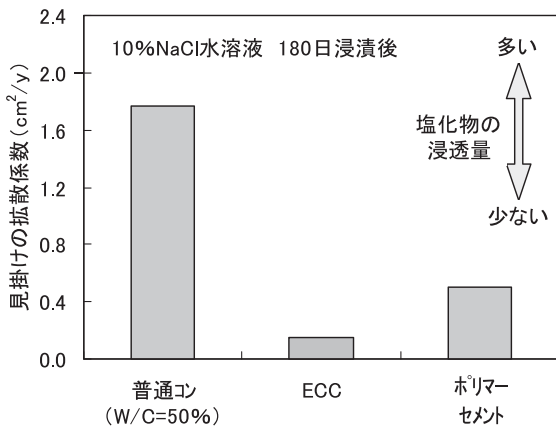
図-4 一軸直接引張試験結果

確認された。

(2) 耐久性および遮水性能について

ECC は、水結合材比が低く、さらに特殊な混和材が使用された緻密な材料であるため、高い耐久性を有している。また、通常のコンクリートなどと違い、ひび割れを非常に微細な範囲に制御できることから、ひび割れを弱点として劣化因子が内部に侵入していきことがない。例えば、塩化物の浸透抑制については、室内で塩化物溶液に浸漬して分析した結果、図-5 に示すように、見掛けの拡散係数が水セメント比50%の普通コンクリートの1/10となり、塩害の補修で一般的に使用されるポリマーセメントモルタルと比較しても、さらに低い値となった。

中性化の抑制については、水セメント比が40%程度のコンクリートと同等の高い性能を有している。荷重などによってひび割れが発生する条件で使用すると、ECC に発生するひび割れが微細な範囲に制御さ



図一五 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

したところ、一般的なポリマーセメントモルタルが、800 サイクルに達する前に相対動弾性係数が 60% 以下となったのに対し、ECC は、4500 サイクルを超えても相対動弾性係数が 60% 以上を保持する結果であった。

遮水性能については、予めひび割れを導入した供試体を用いた ECC とモルタルの透水試験により、ECC の透水量がモルタルのそれと比較して 1/10 以下となることを確認している。また、ECC に複数の微細ひび割れが発生した場合でも、高い遮水性は保持されるものと考えられる。

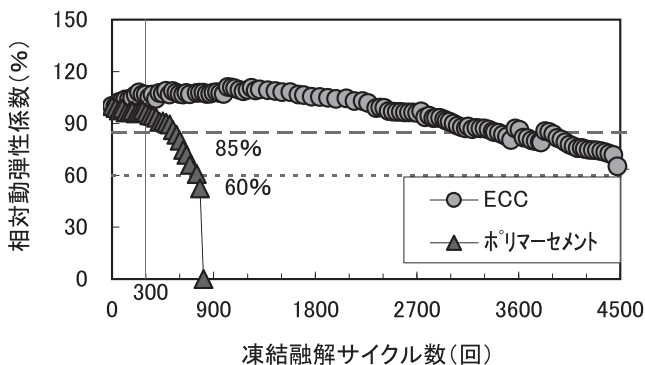
れるために、より有効である。

耐凍害性については、ECC が緻密であることや、化学混和剤によって連行された良質な AE を多量に含むこと、高強度の短繊維の架橋によって劣化を防ぐこと、ポップアウトの原因となる粗骨材を含んでいないことなどにより、極めて高い抵抗性を有している。例えば、一般に、コンクリートは凍結融解試験の 300 サイクルにおける相対動弾性係数が 60% 以上であれば、凍結融解抵抗性を有するものと評価されるが、ECC の場合、図一六に示すように、300 サイクルにおける相対動弾性係数が 100% であった。さらに試験を継続

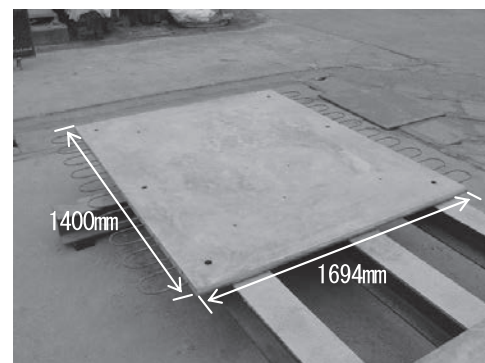
4. ECC を適用した施工事例

(1) ECC 連結板による道路橋ジョイント部の補修工法

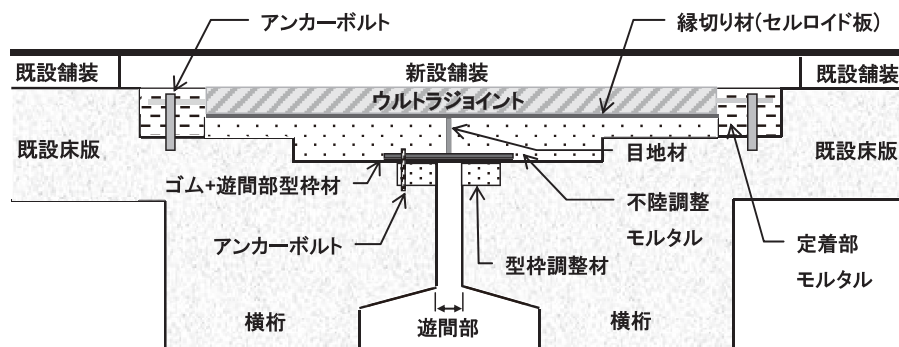
ECC を用いた道路橋床版のノージョイント化工法である「ウルトラジョイント工法」について紹介する。ウルトラジョイント工法による補修断面の構成を図一七に示す。ウルトラジョイント工法は、ECC を用いて作製したプレキャスト版 (写真一2, 以下、ウルトラジョイント) により床版端部を連結する工法である。ECC の特長である優れた変形性能により、温度変化



図一六 凍結融解試験結果



写真一2 ECC のプレキャスト版 (ウルトラジョイント)



図一七 ウルトラジョイント工法による補修断面

および輪荷重で生じる桁端遊間部の伸縮に追従することができ、構造系を変化させることなく、比較的短時間で施工できるという特長を有している。ウルトラジョイントは、桁端遊間部の伸縮を吸収するために必要な自由長、車線幅員、引張応力を床版に伝達させる両端固定などの条件を基に設計される。なお、遊間変位に対して、自由長部分の伸縮が拘束されないように、既設床版とウルトラジョイントの境界面にセルロイド板を貼付け、縁を切った構造としてある。

工事に適用したウルトラジョイントは、1枚当り橋軸方向1,400mm（自由長1,050mm）、板厚30mm、幅1,694mmとし、1レーン（1車線）2枚設置した。施工フローを図-8に、代表的な各工程の作業状況を写真-3に示す。

本工事では、厳しい時間規制（夜間規制8時間）の中で施工する必要があったが、規制時間内で十分に施工できることを確認した。今後、床版はつり範囲の明確化や充填材料または定着構造の改良を行うことで、さらに施工時間の短縮を図ることが可能であると考えられる。

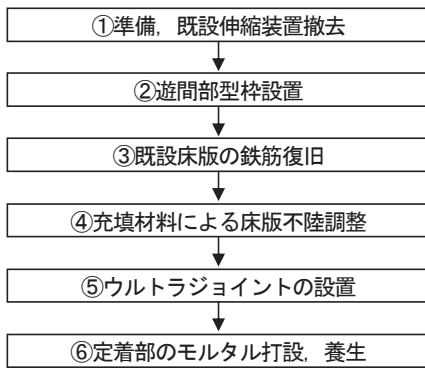


図-8 施工フロー



写真-3 各工程の作業状況

(2) ECCを用いたトンネル内面補強工法

地震などで大きな変状が発生したトンネルの補強対策には、できる限り薄肉で、圧縮・引張耐力ともに向上が期待でき、かつ安全性・経済性に優れた内面補強工法が適している。地震により被災したトンネルの災害応急工事にECCを用いて、トンネル内面補強を行った事例について紹介する³⁾。対象としたトンネル（内空：約4.8m×5.8m）は1965年に竣工した延長285mの単線鉄道トンネルで、導坑先進上部半断面工法により施工された。新潟県中越地震の影響で覆工コンクリートに変状が生じ、写真-4に示すようにSL付近のコンクリート片の剥落が生じたため、計37m（施工面積約500m²）にわたって本工法により補修することとなった。

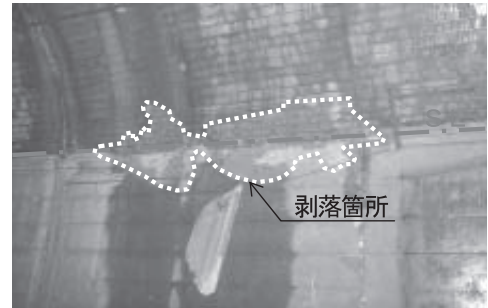


写真-4 側壁部の剥落状況

トンネル断面図および補強断面を図-9に示す。事前に、漏水対策としてひび割れ注入を行い、大きく剥落した部分については、ポリマーセメントモルタルにて断面修復を行った。次に、既設覆工にアンカーを設置し、ECCの充填性に配慮してエキスパンドメタルを覆工背面から10mm離れた位置で取り付けた。ECCはプレミックスされた材料（25kg/袋）を用いて、練混ぜには小型ミキサ（容量100ℓ）を使用し、練り上がったECCを4～5層に分けて厚さ50mm（10mm/層程度）で吹付けを行った（写真-5）。本工法によって施工日数が10日間という短期間（昼夜連続作業）で完了することができた。本工法は特殊な大型機械を必要とせず、練混ぜ用のミキサについても汎用品でか

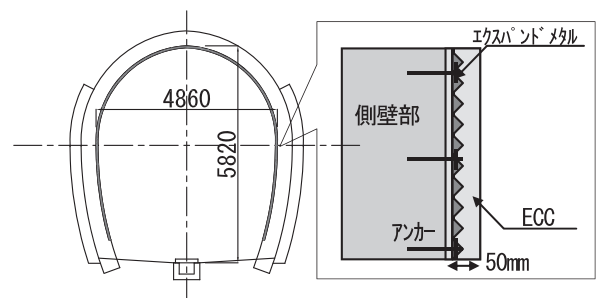


図-9 トンネルの補強断面図

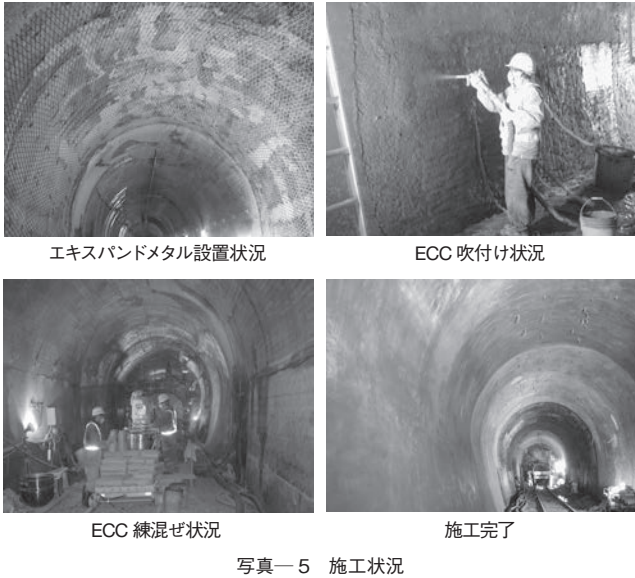


写真-5 施工状況

つ小型であるため、今回施工したような小断面トンネルでも十分に施工が可能である。また、震災復旧工事のように、早期復旧・早期開通が求められる場合には、工場製作が必要なプレキャスト部材などを使用する工法と比較して、迅速な対応が可能である。

本工法は施工後6年が経過した現在でもこの機能が維持されており、目立った変状が生じていないことを確認している。

(3) 農業用水路の補修工法

ECCの高い耐久性、優れた変形性能および遮水性を活かして開発した「水路補修ECCショット工法」⁴⁾について紹介する。農業土木分野における用水路などの水利構造物の大部分は、長期間にわたって供用されているため、補修・補強が必要になっているものが多数存在する。このような水利構造物に用いられる補修材料には、耐久性と遮水性に加え、外気温の変化などによって生じる既設構造物の動きに追従することができる性能が求められる。しかし、従来のセメント系材料では、変形性能に乏しいため動きに追従できず、また、樹脂系材料では、紫外線により早期に劣化を生じてしまうという課題がある。これらの課題を本工法によって解決することができ、さらに、薄層で施工できるため通水断面を縮小することがなく、所定の通水性能を確保できる。

本工法の補修工法の概要を図-10に、施工手順を図-11に示す。はじめに、既設コンクリート表面の埃などを高圧洗浄機によって取り除き、目地部の施工を行う。目地部は、はつり後にエキスパンドメタル等で補強する。次にプレミックスされたECC(25kg/袋)を現場で小型ミキサ(容量100ℓ)を用いて練り

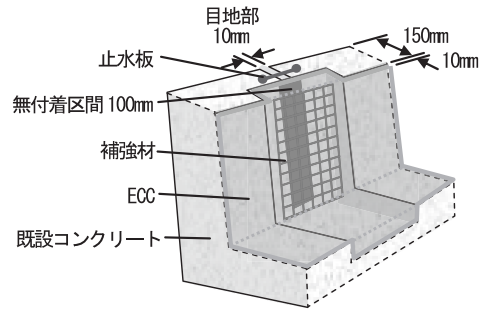


図-10 ECCによる水路補修工法の概要

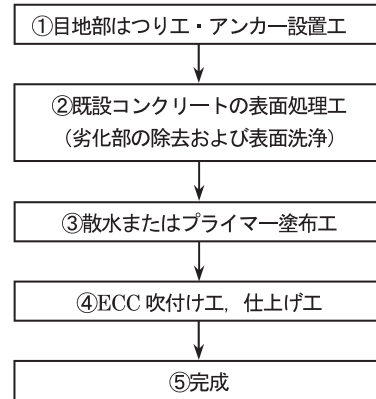


図-11 ECCによる水路補修工法の施工手順



写真-6 ECC吹付け状況



写真-7 施工前および施工後の状況

混ぜ、水路表面に厚さ10mmとなるようにECCの吹付けを行う(写真-6)。吹付け終了後、コテなどによって表面が平滑になるように仕上げを行い、2日間以上表面が乾燥しないようにシートにて養生を行った。

本工法は、ECCと既設水路との付着性が高く、目地の伸縮による損傷が生じないため、写真-7に示

すように、施工後の2年間の目視による経過観察の結果、数本の微細ひび割れが確認されたのみであり、遮水性を確保している状況が確認された。

5. おわりに

本報では優れた変形性能と高い耐久性を併せ持ったECC高靱性セメント系複合材料を、道路橋床版連結部やトンネル内面および農業用水路の補修・補強工法として適用した事例について紹介した。

実施工に際しては、ECCはプレミックス材料として粉体に水を加えるだけで簡単に製造することができ、特殊な装置を使用しなくても施工可能である。

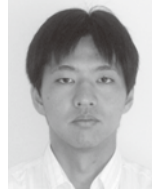
今後、これらの工法が広く適用され、ライフサイクルコストを低減した合理的かつ経済的な維持管理の実現に貢献できることを期待している。

JCMA

《参考文献》

- 1) 児島ほか；高靱性セメント複合材料を用いた吹付け補修工法の適用，コンクリート工学，Vol.42，No.5，pp.135-139，2004.5
- 2) 土木学会コンクリート委員会；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），土木学会，資料—1，2007
- 3) 山本ほか；高靱性セメント複合材料を用いたトンネル補修技術，土木学会第60回年次学術講演会，pp.483-139，2005
- 4) 前山ほか；吹付けECCによる水路補修に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，pp.1643-1648，2010

【筆者紹介】



橋本 学（はしもと まなぶ）
鹿島建設㈱
技術研究所 土木材料グループ
主任研究員



坂田 昇（さかた のぼる）
鹿島建設㈱
技術研究所 土木材料グループ
グループ長



長谷川 裕介（はせがわ ゆうすけ）
カジマ・リノベイト㈱
技術部
課長代理