

セメント系新材料 (HPFRCC) の 水利施設機能保全対策への適用

高根大学 教授 長 東 勇

1. はじめに

老朽化した農業用水路において、摩耗による水理性能の低下、目地やひび割れからの漏水による水利機能の低下などが問題となり、これまでに各種の補修工法が適用されてきている。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が期待できず、補修後の早期にひび割れが発生することが問題となっている。一方、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く、また、コンクリート中の水分の移動を遮断してしまうために膨れが生じることや、外気温の変化に対して躯体との伸縮挙動が異なるために剥れが生じてしまうことなどの問題発生懸念がある。しかし、既設コンクリートと同様の性質を持ちつつ、目地やひび割れの開閉に追従することができ、かつ、長期にわたって止水性を確保することができる補修工法というのは、現実的には実現が難しい。

一方、近年、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC : High Performance Fiber Reinforced Cement Composite) と呼ばれる新材料が開発され、橋梁などの分野において実用化されつつある。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長 (疑似ひずみ硬化特性 : 図-1を参照) を有する材料である。結果として、

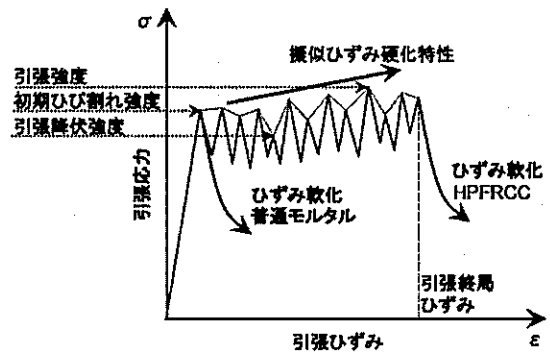


図-1 HPFRCCの疑似ひずみ硬化特性

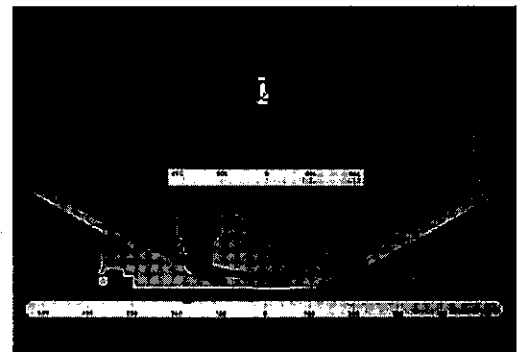


写真-1 HPFRCCの優れた変形性能

優れた変形性能 (写真-1を参照) 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。なお、HPFRCCの代表的な材料としては、マイクロメカニクスと破壊力学を設計原理とした高韌性セメント複合材料 (ECC : Engineered Cementitious Composite) と呼ばれているものがある。

本稿では主として、このHPFRCCの水利施設機能保全対策への適応技術について紹介する。

2. HPFRCC の水利施設への適用例

(1) ダム補修への適用

HPFRCC が初めて水利施設分野に適用されたのは、広島県沖美地区畑地帯総合整備事業の一環として行われた三高ダムリニューアル工事（平成15年）である。この工事では、既設堤体の下流側に新堤コンクリートを増打ちして嵩上げを行うが、上流側では既設コンクリート面がそのまま露出することになっていた。ところが、既設コンクリートの上流面には、ダムの止水性に影響を及ぼすと考えられる著しい変状が多く確認された（写真-2を参照）ため、この変状に対処する補修を行うことになった。

ここで適用される補修材料には、①止水性を改善できること、②紫外線に対する耐候性を有していること、③乾湿繰返しや凍結融解に対して抵抗性を有していること、④薄い層として施工しても、ひび割れや浮きなどが生じないこと、が要求された。従来のセメント系材料では、③や④に対して課題があり、一方、樹脂系材料では、②に対して課題があることから、これらの要求全てを満足できる材料は水利施設の補修分野には存在しなかったことから、当時、橋梁などの分野で実用化されつつあったHPFRCCが採用されることになった。

この工事では、既設コンクリートの変状が著しく止水性の低下が懸念された500m²に対して、約15m³のHPFRCCが吹付け工法によって施工

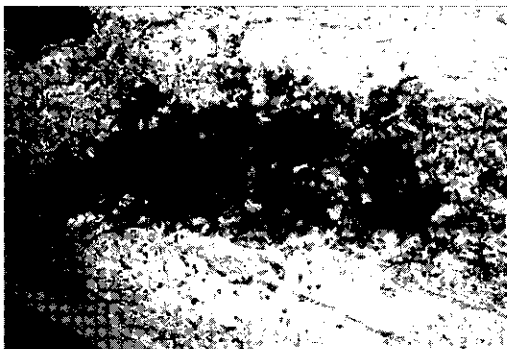


写真-2 三高ダム上流面の状況

された。その後、初期ひび割れなどは確認されておらず、施工から数年が経過した現時点においても、不具合を生じることなく供用されている。

(2) 水路補修への適用

このように、三高ダム工事において、従来の材料では達成できなかった特長を活かした適用がなされ、その後も不具合が生じることなく供用されていることから、このHPFRCCの活用によって、かねてから農業用水路の課題とされていた長期耐久性を期待できる補修工法が実現できる可能性が見い出された。そこで、筆者の発案により、農林水産省の官民連携新技術研究開発事業（農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所と、鹿島建設、クラレおよび二瀬窯業の民間3社による共同研究）として、水路補修工法「水路補修ECCショット工法」の開発に着手することになった。本事業では、水路補修へのHPFRCCの適用性の確認をはじめ、その特長を活かした目地の構造形式や施工方法の詳細について開発が行われた。

図-2に概要を示す本工法について、表-1に示す配合のHPFRCCによる吹付け施工の検討を行った結果、以下のように、開水路の補修工法として有効であるとの結論が得られた。

- ① HPFRCC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

表-1 吹付け用HPFRCCの配合

繊維種類	補強用繊維			マトリックス		
	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 ³)	細骨材結合材容積比
PVA	0.04	12	2	32	360	0.45

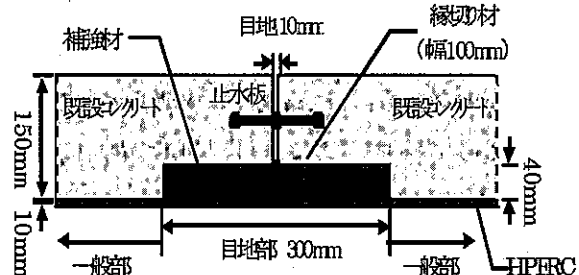


図-2 HPFRCCによる水路補修工法

から、止水性が保持される（詳細は後述する）。

- ② HPFRCC は、水結合材比が低く、また高強度の短繊維の架橋があることから高い凍結融解抵抗性を有し、凍結融解試験の 3,500 サイクルにおける相対動弾性係数は 80% 以上である。
- ③ HPFRCC は疲労耐久性が確認された材料である¹⁾。その疲労耐久性は、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、さらにその約 8 倍まで向上する。
- ④ 現地水路での HPFRCC による補修について、施工後 3 年間に渡って経過観察調査をした結果、既設コンクリートのひび割れや目地の開閉に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。

なお、④の目地の開閉に微細ひび割れを発生させながら追従していることについては、図-3に示した南面した目地幅の変動計測結果から明らかである。すなわち、本工法の補修が行われていない箇所のみでは、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 程度に抑制されている。これは、目地を跨いで HPFRCC 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や引張力を HPFRCC が負担したためと考えられる。

ところで、本補修工法「水路補修 ECC ショット工法」の性能、施工方法および積算方法については、社団法人農業農村整備情報総合センター発

行の施工・積算指針（案）²⁾に詳しい。

(3) ため池補修への適用

HPFRCC の優れた力学特性と遮水性能に着目し、ため池の上流側の遮水層と下流側の流下部の被覆材として HPFRCC を適用することで、ため池堤体の安定性と維持管理性を改善・向上させるとともに、オーバートッピングによる決壊の防止にも寄与できるものと考え、その適用に関する検討・開発を官民連携新技術研究開発事業（鳥取大学、島根大学、高知大学、鹿島道路、鹿島建設、三祐コンサルタント、クラレの共同研究）として行っている。HPFRCC を活用したため池改修工法の概要を図-4に示す。本工法では、水位の急激な変動に伴う堤体内部の水圧を緩和するためにポーラスコンクリートを設置し、その下面には堤体盛土によるポーラスコンクリートの空隙詰まりを抑制するために吸出し防止材を敷設している³⁾。

HPFRCC の遮水性に関して、図-5は、表-1に示した配合を流し込み用の配合に変えた HPFRCC（水結合材比 42.0%、細骨材結合材容積

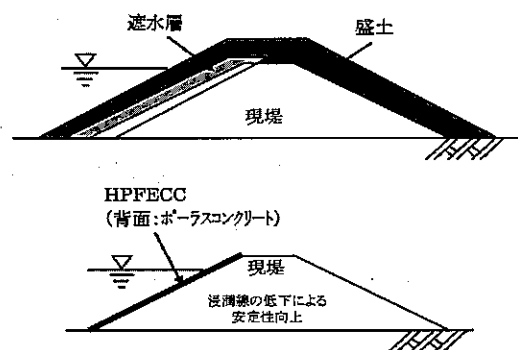


図-4 HPFRCC を活用したため池改修工法の概要
(上：従来の一般的な工法，下：開発された工法)

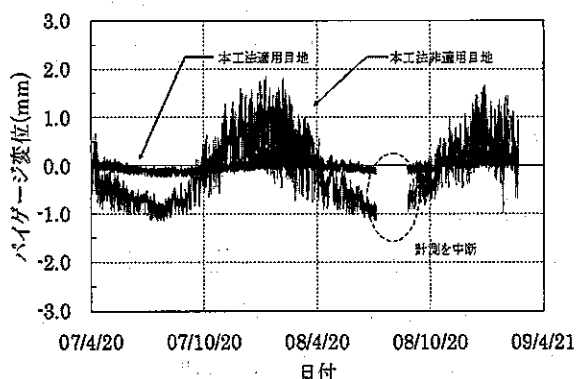


図-3 目地幅の計測結果

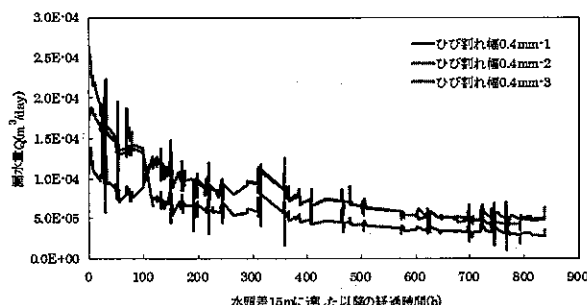


図-5 水頭差 15m 到達以降の漏水量の経時変化

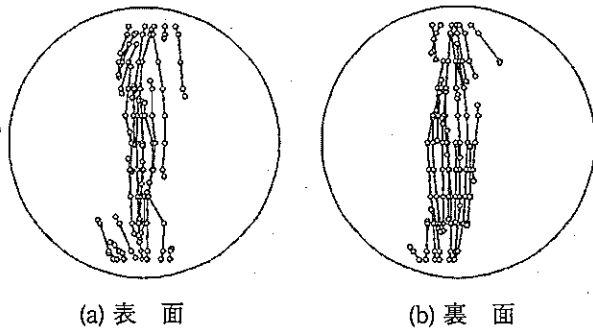


図-6 割裂によりひび割れを発生させた一例

比41.3%)で $\phi 100\text{mm} \times 20\text{mm}$ の円盤型供試体を作製し、割裂によって図-6のようにひび割れを導入した供試体(割裂時に発生した多数のひび割れの合計幅は0.4mm)を用いた透水試験において、順次昇圧して水頭差15m到達以降の漏水量の経時変化を示したものである。水頭差15mで一定とした以降、全ての供試体において漏水量は遞減傾向にあり、水密性の回復が見られる。試験開始800時間以上経過した後においても水密性は回復傾向にあり、HPFRCCはひび割れ分散性による漏水量低減効果に加えて、長期的な水密性の回復も期待できることから、ため池の表面遮水材料としての適用は極めて有効であると判断される。

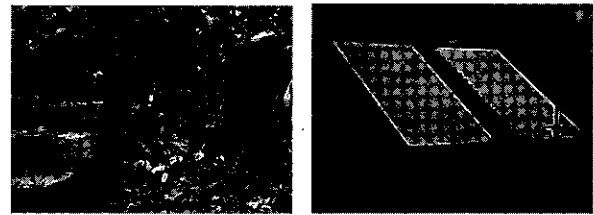
また、ため池堤体の補修については、表面遮水以外の適用として、越流対策としての下流側流下部への適用や、写真-3に示す部分的な断面変形対策への適用が考えられる。

(4) 水利施設の部分補修への適用

2009年に試験施工を行った向の池ため池(高知県)では、写真-4(上)に示すように、斜樋のコンクリート躯体に多くの貫通ひび割れが見られ、斜樋としての機能を喪失する直前の状況であった。そこで、写真-4(下)のように、斜樋全体を包み込むように厚さ約1cmのHPFRCCで被覆補修し、機能回復を図った。

(5) 水利施設以外への適用

写真-5の左は、自動車道と歩道・自転車道との段差解消のため、モルタルが打設された後の様



斜樋周辺の断面変形の例 断面変形の対策例
写真-3 部分的な断面変形対策にHPFRCCを適用

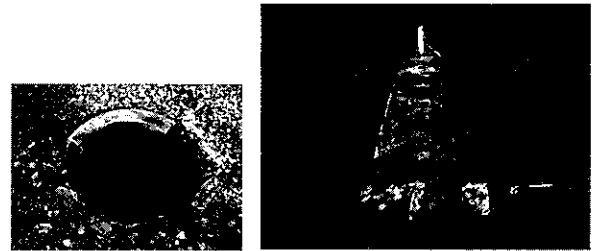
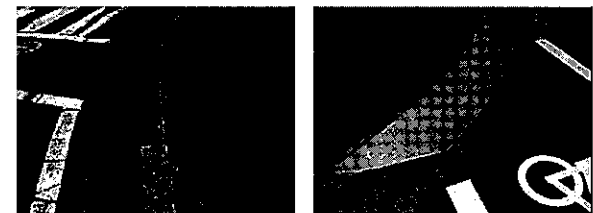


写真-4 ため池斜樋の補修にHPFRCCを適用



モルタルの割れ・剥離 HPFRCCの適用例
写真-5 HPFRCCの段差解消対策としての適用

子である。縁石コンクリート上に施工された部分は、施工後間もなく割れ、剥離が発生している。これに対し、同じ条件でHPFRCCを打設したところ、写真-5の右のように、5年経過した現在も段差解消機能を損なう損傷は全くみられない。

3. HPFRCCの簡易補修

(1) 簡易補修の方法

HPFRCCは優れた遮水性能を有するものの、万一、局所的に集中したひび割れが発生した場合には、漏水の問題が発生し、水利施設に求められる性能を満足できなくなる可能性がある。そのた

め、HPFRCCを表面被覆材料として使用することを考える以上、局所的なひび割れが発生するケースを想定して、その場合に施す合理的な補修工法を事前に検討しておく必要がある。そこで、ひび割れ簡易補修工法であるコンクリート改質剤塗布による効果を検討した。

本稿で検討した改質材はケイ酸塩系に分類されるCS21である。ケイ酸塩系の改質メカニズムの基本となる反応プロセスは、水が存在する条件下で、改質剤の成分とコンクリートのカルシウム成分が反応して、ケイ酸カルシウムを主体としたカルシウムシリケート水和物(C-S-H)が生成され、これがコンクリートのひび割れや空隙に充填されることで表層を緻密にしていくことである。なお、CS21を選んだ主な理由は、CS21に含まれる水和反応促進剤に注目したことによる。これは、未水和部分のセメントに作用して水和反応を促し、C-S-H系結晶を生成させる作用や、空隙内に沈積しているカルシウムの溶解を促進する働きがある。前述したように、ひび割れが発生したHPFRCCの長期透水試験を実施すると、時間の進行と共に透水量が減少していく。これは割裂によって生じた供試体片による目詰まりや、透水試験条件そのものがHPFRCC供試体の養生状態となったことでセメント系材料特有の自己修復性が働くことが理由であると考えられている。すなわち、HPFRCCにはまだ未水和部分のセメントが残っていると予想されるため、CS21により水和反応を促すことで効果的にひび割れを補修することができると考えられる。さらには、空隙内に沈積しているカルシウムの溶解を促進することで、溶解した水酸化カルシウムがイオン化したシリカと反応してさらにC-S-H系結晶が生成されるため、ひび割れを埋めるだけでなく、ひびわれが生じた表層を緻密にできると考えられる。以上のようなCS21の反応メカニズムの概要を図-7に示す。

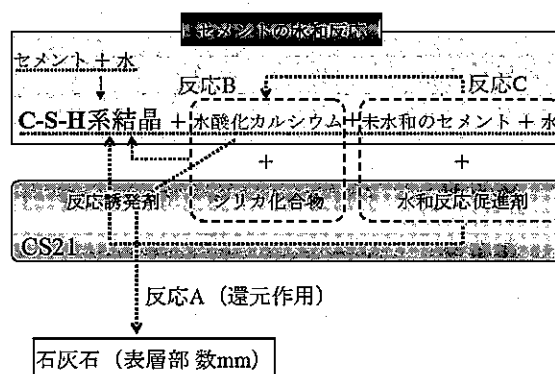


図-7 CS21の反応メカニズムの概要

(2) 遮水性改善効果

改質剤塗布による遮水性改善効果を明らかにするために、以下の手順で透水試験を実施した。①直径100mm、厚さ20mmの円盤型供試体に割裂によってひび割れを導入する。厚さは、HPFRCCの試験施工厚さと一致させた。②改質剤未塗布の状態而定水位透水試験を実施する。③図-5に示した試験結果を参考として透水量の変動推移が予測できた時点で透水試験を中断し、改質剤を塗布する。④再度透水試験を実施する。⑤予測した未塗布の透水量の変動推移と塗布後の透水量の変動推移を比較する。なお、改質剤の塗布については、改質剤の施工方法の相違が遮水性改善効果に与える影響を調べるために、No.1はメーカーが推奨している基本的な施工方法である2回塗りの養生2週間、No.2は2回塗りの養生1週間、No.3は1回塗りの養生1週間、と施工方法を変化させた。また、改質剤を塗布する面については、実際に補修を実施する状況を考慮して、片面のみとした。

改質剤塗布前および塗布後の透水量、そして塗布前に対する塗布後の透水量比を表-2に示す。改質剤塗布後の透水量は、塗布前の4~24%となり、透水量が大きく減少した。これは、改質剤を塗布したことによって、ひび割れの中にC-S-H結晶が生成され、ひび割れが微細であるために効果が得やすいと考えられる。また、施工方法の相

表-2 改質剤塗布前後の透水量, 透水量比

供試体 No.	1	2	3
施工回数	2	2	1
方法	養生 2週間	1週間	1週間
塗布前透水量(cm ³ /s)	1.73.E-02	1.33.E-02	3.56.E-03
塗布後透水量(cm ³ /s)	6.98.E-04	1.93.E-03	8.51.E-04
透水量比	0.04	0.14	0.24

表-3 改質剤塗布透水試験の換算透水係数

供試体 No.	1	2	3
48時間経過時点透水係数(cm/s)	1.98E-08	5.69E-08	2.35E-08
2,160時間経過時点透水係数(cm/s)	1.55E-09	7.27E-10	4.61E-09

違による改質剤塗布の遮水性改善効果は、基本的な施工方法である塗布回数2回養生2週間で透水量比0.04と一番高い効果が得られた。これは塗布と養生を十分に行うことで、セメント未反応部分と水の反応が進行して、C-S-H結晶がより緻密に生成され、ひび割れが閉塞したためと考えられる。

さらに、改質剤塗布による長期遮水性効果を検討するために、改質剤塗布後48時間および2,160時間(3ヵ月)経過した時点の透水量に基づいて、ひび割れが集中している中央幅5cm×直径10cmの50cm²を透水面積と見なして疑似的に透水係数(換算透水係数)を求めた。得られた結果を表-3に示す。換算透水係数は改質剤を塗布後48時間経過した時点で $1.98 \times 10^{-8} \sim 5.69 \times 10^{-8}$ cm/s、2,160時間(3ヵ月)経過した時点で $7.27 \times 10^{-10} \sim 4.61 \times 10^{-9}$ cm/sとなった。3ヵ月経過後の値は、アスファルト系の材料と同程度かそれ以上の遮水性を有していることを示しており、ひび割れが生じたHPFRCCに改質剤を塗布することで、長期遮水効果を発揮することが明らかとなった。

4. おわりに

東日本大震災を踏まえた平成24年度からの新たな政策の展開に資するため、新たな土地改良長期計画が年内を目途に策定され、閣議決定される予定である。その長期計画には地域の特性を反映させることが重要であることから、各地方の実情を把握し、今後の農業農村整備のあり方について地方の意見を聞く必要があるとの趣旨から、新たな土地改良長期計画の検討に関する地方懇談会が過日開催された。その懇談会でも、多くの委員からストックマネジメントに係る新技術開発の重要性が述べられたところである。新技術は、現場適用性や性能の安定性に対する分析や評価を適正に受け、現場技術者の諾が得られて初めて定着していくものと考えられる。本新技術に対する忌憚のない意見をお願いする次第である。

なお、本稿で紹介したHPFRCCは、巷で韌性モルタル、あるいは韌性モルタルライニング工法と称せられている材料、工法とは全く異なる材料、工法であることを付記する。

引用文献

- 1) 湯室貴章・平城弘一・福田一郎(2007):一軸引張試験における高韌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
- 2) 農林水産省官民連携新技術研究開発事業(2010):高韌性セメント複合材料を用いた水路構造物等の補修・補強工法の開発、水路補修ECCショット工法施工・積算指針(案)、社団法人農業農村整備情報総合センター
- 3) 芳賀潤一・坂本康文・坂田昇・林 大介・竹内 国雄・緒方英彦・服部九二雄・長東 勇(2010):HPFRCCを表面遮水壁および下流法面保護層に用いた「ため池更新技術」の開発(その1)、水と土、pp.39-49