

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 15 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25292142

研究課題名(和文)セメント系材料による農業用水路トンネルの合理的な補強工法の開発

研究課題名(英文)Studies on reasonable reinforcement of Irrigation Canal Tunnels with Cementitious Material

研究代表者

長束 勇(Natsuka, Isamu)

島根大学・生物資源科学部・教授

研究者番号：90379694

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：セメント系材料による農業用水路トンネルの合理的補強工法として、カーボン、ガラス等の強化繊維の格子状配筋(FRP格子筋)を用いたポリマーセメントモルタル(PCM)工法や、モルタルと補強用短繊維によって構成される複合材料(HPFRCC)を用いた工法が考えられた。これらの工法設計に当たっては、補強レベルと付着強度のバランスを考慮することが重要であり、トンネルに許容される変位量やひび割れ幅を設定することにより、補強レベルを決定できることを明らかにした。また、付着強度を調べる新試験法を提案し、付着強度を高めることができる含浸工法は、含浸材とPCMとの組合せに注意する必要があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Polymer cement mortar (PCM) method that uses lattices of the reinforced fibers such as the carbon and the glass bar arrangements (FRP lattice muscle) and composite materials (HPFRCC) method composed by mortar and the short fiber for reinforcement were thought as a reasonable reinforcement of the irrigation canal tunnel with the cementitious material. It was important to consider the balance of the reinforcement level and the bond strength when these methods were designed, and it was clarified to be able to decide the reinforcement level by setting the allowed amount of displacement and the width of the crack. Moreover, it proposed the new examination method that examined the bond strength, and the impregnation method that was able to improve the bond strength clarified that it was important to note the combination of the impregnation material and PCM.

研究分野：地域環境工学

キーワード：農業用水路トンネル ストックマネジメント 補強工法 セメント系材料

## 1. 研究開始当初の背景

農業水利施設における建設材料の大部分はコンクリートであり、もちろん、道路、鉄道、下水道などの農業水利以外の分野においては、各施設を構成するコンクリート構造物に対して実用の域にある補修・補強技術が存在していた。しかし、農業水利施設に発生している変状は農業水利施設特有の変状であり、他分野の補修・補強工法を適用するのは不合理・不経済となる場合が多いと考えられた。一般に、農業水利施設の補修・補強材料に要求される性能は、止水性の改善、紫外線に対する耐候性の付与、乾湿繰返しや凍結融解に対する抵抗性、薄層施工におけるひび割れや浮きなどの防止、である。従来の樹脂系材料では、に課題があり、一方、セメント系材料では、やに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存在しなかった。しかし、セメント系材料に樹脂系材料を配合あるいは樹脂系材料と複合することにより、やに対する課題を克服しようとする試みが見られ、セメント系補修・補強工法の合理化・高機能化に向けた動きが始まっていた。

一方、それまで進展してきたストックマネジメントの考え方を基本として、さらには研究代表者らの研究成果をも踏まえ、食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会検討部会(部会委員:研究代表者ら)において、平成 18 年度に「農業水利施設の機能保全の手引き」が、以降、工種別に平成 20 年度:農業用パイプライン、平成 21 年度:開水路と頭首工の機能保全に関する「手引き」が作成されてきた。しかし、農業用水路トンネルについては、これに係る研究成果が十分でなかったこともあって、当時は未だ作成されていなかった。とはいえ、農業用水路トンネルには、周辺地山の膨張土圧などが原因でひび割れなどの変状が発生しているものが数多く見られ、鋼板内巻きなどによる補強対策が実施されていた。しかしながら、旧躯体コンクリートの強度をどこまで見込めばよいのか、作用している荷重はどの程度か、と

いう条件が不明のまま設計、施工されるため、補強工法は一般的にオーバースペックにならざるを得なかった。また、農業用水路トンネルでセメント系の材料による補強対策を採用しようとする増し厚工法になり、相当の通水断面減少が発生することから、盤下げ工法を除いて補強対策としてセメント系の材料は選定されていなかった。一方、上述したように、繊維補強セメントモルタルや樹脂系材料を複合した表面被覆工法などによる補強工法が開発されつつあったことから、これらの工法は、従来の増し厚工法に比較して、通水断面の減少を抑えることが可能であり、しかも特殊な技能を要することなく施工できると考えられた。したがって、これらを農業用水路トンネルの補強対策として活用できれば、従来工法よりも低コストで、しかも施工性の高い、高機能な工法としての活用が期待できた。

## 2. 研究の目的

合理化・高機能化のために、鉄筋に替えてカーボン、ガラスなどの強化繊維の格子状配筋(FRP 格子筋)を用いたポリマーセメントモルタル(PCM 工法)や、モルタルと補強用短繊維によって構成される複合材料(HPRCC)を用いた工法を検討対象とし、水路トンネルの補強への適用方法を開発することを目的とした。具体的には、室内実験や破壊解析により、ほろ形の変状発生メカニズムを明らかにすること、そのメカニズムを踏まえた合理的な水路トンネルの補強工法を開発するため、樹脂系材料の物性、PCM や HPRCC の物性、およびこれら複合材料の物性、旧躯体との付着強度など、補強工法に関連する多様な物性パラメータが補強効果にどのような影響を及ぼすのか、要因をひとつずつ分離して照査すること、であった。

これは、研究代表者らが平成 23 年度まで実施した科研の研究成果により、標準馬蹄形が採用された比較的断面が大きい水路トンネルについては、試作した分割エアバック載荷装置を用いた室内実験と破壊解析により、その変状メカニズムを解明し、裏込め充填工法が合理的な

補修・補強工法であることを明らかにしたものの、標準馬蹄形が採用できなかった小断面の水路トンネル(主に、ほろ形)に発生している変状メカニズムは標準馬蹄形と異なっており、内面補強工法が必要と考えられたからである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 分割エアバック載荷装置によるほろ形トンネルの補強効果

まず、JIS モルタルにより実物の 1/4 程度のほろ形トンネル覆工コンクリートを模した供試体を作製した。この無補強供試体を天端背面空洞の有無・大小の異なる条件設定ができる分割エアバック載荷装置にセットし、破壊試験を行った。なお、レーザー変位計にて、左右スプリングライン、覆工天端、インバートの変位を計測した。また、初期ひび割れ荷重、ひび割れ位置、破壊荷重、変位量を求め、ひび割れ発生メカニズムを検討した。

次に、無補強供試体のひび割れ発生メカニズムの検討結果を踏まえて補強範囲を設定した、補強供試体を作製した。具体的には、FRP 格子筋を用いた PCM 工法については、実構造物との相似比を考え JIS モルタル供試体に現場施工仕様として想定されているものの 1/4 の断面積の FRP 格子筋を張り付け、PCM で被覆して補強した。また、HPFRCC を用いた工法については、JIS モルタル供試体に現場施工仕様の 1/4 厚さの HPFRCC を吹き付け補強した。養生後、無補強供試体と同様に分割エアバック載荷装置による破壊試験を行い、補強効果を調べた。さらに、JIS モルタルよりも物性値の劣るモルタルにて作製した供試体(実際のトンネルの物性値に近い供試体)や、既にひび割れが生じている供試体を補強し、上記と同様の方法にて補強効果を調べた。

一方、こうした破壊試験の結果、補強材のトンネル躯体との付着強さが補強効果に大きく影響を与えることが明らかになったことから、付着強さを高める研究(含浸工法)、付着強さを調べる研究(新付着力試験法)へと発展させた。なお、補

強材の摩耗特性を向上させる観点から最適配合を求めるとともに、水砂噴流摩耗試験に代替できる簡便な試験法(サンドブラスト法)にも着手した。

#### (2) 数値解析による最適な補強工法を選択する手法の提案

じん性と耐久性を兼ね備えた HPFRCC は、表面被覆工法などに用いる高性能な材料として期待されており、その特性も明らかになりつつある。しかし、引張側でじん性を持つというモルタル系としては特異な材料であり、引張応力と引張強度を無視する従来の設計理論ではその特質を考慮することができない。そこで引張域を中心に HPFRCC の材料試験を実施し、その結果に基づいて破壊解析と限界状態設計法における HPFRCC の材料モデルを構築した。

FRP 格子筋は非常に高い強度と剛性を有しており、構造物の補強に有用である。しかし補強された部材の破壊モードが補強部の剥離となる場合があり、FRP 格子筋の強度が十分には発揮されない、視点を変えれば FRP 格子筋の断面積が過大となっている事例も多い。そこで FRP 格子筋と PCM によって補強したはり供試体を作製し曲げ試験を実施することによって、剥離が生じやすい状況と剥離のメカニズムを調べた。

HPFRCC については、初年度に開発した材料モデルに基づき、これを用いて補強を行った構造のモデル化を行った。対象とする構造物は水路トンネルとし、鉄筋コンクリート構造と無筋コンクリートの両方に関する検討を行った。また解析手法は有限要素法による破壊解析、フレーム解析による弾性解析、終局強度理論による曲げ耐力算出手法の 3 つとし、それぞれにおいて HPFRCC 強度部材の特性を表現できる手法の開発を目指した。

FRP 格子筋を用いた PCM 工法において、一体性を失うことによる補強構造物の破壊については、破壊解析のような数値解析法を用いなければその再現は困難である。また界面の剥離やせん断破壊を生じさせる引張応力やせん断応

力の値は、特殊な実験でも正確な値は求めにくい。そこで、初年度に行った補強はり部材の曲げ試験結果に破壊解析の結果を一致させることによって、FRP 格子筋とPCM 補強材の剥離パラメータ(界面の引張強度とせん断強度)を求めた。次に、決定した剥離パラメータに基づき、FRP 格子と PCM で補強した部材の構造モデルを破壊解析で作成した。このモデルでは FRP 格子の破断と補強部材の剥離の両方を考慮することで、補強部材に起こりうる破壊モードのすべてを再現することが可能となる。すなわち、FRP 格子筋の破断より剥離が先行して起こるならば、FRP 格子筋の断面積は過大であり、破壊荷重を下げることなく断面積を減らすことが可能である。そして破断と剥離がほぼ同時に生じるような断面量、つまり必要最小限の断面量は、破断と剥離の両方を再現できる計算手法がなければ計算することができない。本研究で作成した補強部材のモデルに基づき、FRP の断面積を必要最小限としてコストを抑えた補強設計を行う手法を検討した。

FRP 格子筋と PCM による補強や HPFRCC による補強は、ともに躯体の剛性と強度を高めることが可能である。しかし変状の状態、要求性能や使用環境に応じて、どちらの工法を用いるべきか、またどのような設計をすべきかを工法の枠にとらわれずに判断しなければ、最適な補強を最小限のコストで実現することはできない。そこで、まず両工法のモデルに基づき、工法の選択から補強断面の設計までを一貫して行う手法を開発した。これは本研究で対象とした 2 工法に特化したものではなく、両工法が持つ様々な特性を単純に比較して工法を選び、そのうえで必要な性能を実現させる設計を行うものである。つまり、評価手法の作成過程で洗い出された工法の評価パラメータを用いれば、他の工法の評価に加え、多種多様な工法から最適なものを選び出すことを可能とする。この結果に基づいて、セメント系材料による表面被覆工法等全体を対象とした工法選択手法と、それに必要な材料試験

の内容を検討した。

#### 4. 研究成果

次の各項目に分類した場合の主要な成果は、以下のとおりである。

##### (1) 総論

「補修・補強工事に関するマニュアル[開水路補修編](案)」(研究代表者:策定委員会委員長)の策定において議論になった技術的論点を整理する中で、付着強度の規格値問題を取り上げた。この問題意識が、後述する付着強さを高める研究(含浸工法)、付着強さを調べる研究(新付着力試験法)へと発展する起点となった。

##### (2) トンネル補強問題

載荷試験によるほろ形トンネルの補強効果については、JIS モルタルにより作製した実物の 1/4 程度のトンネル覆工コンクリートを模した無補強供試体を分割エアバック載荷装置にセットし、天端背面空洞の有無・大小の異なる条件下で破壊試験を行った。その結果、第一ひび割れ発生荷重は、天端背面空洞が無の場合は 0.288MPa、空洞小(天端から左右に 18°の範囲に空洞が存在)の場合は 0.168MPa、空洞大(同様に左右に 54°の範囲)の場合は 0.126MPa、破壊荷重は、空洞が無の場合は 0.320MPa、空洞小の場合は 0.190MPa、空洞大の場合は 0.126MPa と、空洞が大きい場合は第一ひび割れ発生後の耐荷力は期待できず、補強が必要であることが明らかになった。そこで以降は、補強による効果が大きいと考えられる空洞が大きい場合の補強について実験を行った。

トンネル躯体の圧縮強度の影響は、グリッド補強を施したことで、最大荷重は、高強度供試体で 2.5 倍、中強度供試体で 2.0 倍、低強度供試体で 2.3 倍に向上した。また、残留耐荷倍率は、高強度供試体は 1.3 倍、中強度供試体と低強度供試体は 1.4 倍となり、概ね等しい効果が得られた。これらのことから、どのような圧縮強度であってもグリッド補強は概ね等しく効果を発揮し、脆性的な破壊を防ぐことができると考えられる。ひび割れの影響は、グリッド補強を施すことで、最

大荷重は3.7倍、残留耐荷倍率は1.7倍となり、トンネル躯体にひび割れが存在していても、グリッド補強は効果を発揮し、脆性的な破壊を防ぐことができると考えられる。付着強度の影響は、ほとんどの補強供試体で、補強部材の剥離と同時に供試体が破壊に至ったことから、グリッド補強の効果には補強部材の付着強度が大きく関係していると考えられる。そのため、付着強度が高くなれば、グリッド補強の効果がより得られることが示唆された。

一方、一般的なPCMと繊維補強セメントを各々補強材とした供試体を用いた曲げ試験におけるAE計測の結果、補強材部分にAEの発生が見られ、補強材にも微小破壊が生じていることが確認された。また、デジタル画像相関法により画像解析した結果得られた供試体のひずみ分布から、補強材と母材の付着界面付近におけるひずみの集中が確認された。このことから、補強材が母材から剥離する可能性が示唆された。

以上のように、FRP格子筋を用いたPCM工法やHPRCC工法は、補強された部材の破壊モードが補強部の剥離となるという課題が明らかになった。そこで、耐アルカリガラス繊維ネット(ARGネット)伏せ込み工法により、補強レベルと一体化の最適バランスの検討を行った。この補強工法はARGネットとPCMの複合材料によるものであり、TD5×5(引張強度400N/25mm以上)、LW220S(引張強度800N/25mm以上)、LW400(引張強度1,600N/25mm以上)の3種のARGネットを用いて供試体を作製した。分割アーバック載荷試験の結果、試験終了荷重は無補強のものと比較すると2倍以上の耐荷力が得られる、いずれのケースも試験終了荷重まで補強部材は剥離を起こすことなく一体化しており、補強レベルと付着強度のバランスがとれていたと考えられる、LW400は昇圧に伴う変位量の増加やひび割れ幅の拡大を抑制しており、今回使用したARGネットの中では最も補強効果が大きい、ということが明らかになった。すなわち、合理的な補強工法は、許容される変位量やひ

び割れ幅を設定することにより決定できると考えられた。

数値解析による最適な補強工法を選択する手法の提案については、損傷を受けた水路トンネルを内面から補強した場合、その効果は剛性と強度の二つの面に現れる。載荷試験で損傷を与えた後にもう一度載荷した管の変形をフレーム解析で評価して、管の剛性がどれくらい低下しているかを調べた。その結果、構造全体の耐力や剛性があまり低下していない場合でも、ひび割れが生じた部位において曲げ剛性が局所的に大きく低下することがある、という結果が得られ、強度と同時に剛性を回復させるような設計の重要性が明らかになった。また同時に、補強部材が局所的に大きい変形をうける可能性が示唆され、大きい変形を受けても剥離しないような設計とすることが重要であることもわかった。HPRCCやFRP格子筋による補強は、適切に使えばトンネルの剛性を回復させるうえでも有効であると考えられるが、FRP格子筋が曲げ剛性の回復に寄与できるのは格子筋が曲げの引張側に位置する場合に限られる。すなわち、HPRCCやPCMを適切に併用することの重要性が明らかになった。

さらに、躯体と補強材の付着強度を考慮した解析をフレーム解析で実施する方法についてさまざまな検討を行った。中空部分を補強するトンネル補強、特に剛性の高い補強材を用いる場合においては、一般のフレーム解析ソフトでは、剥離後の変形によって躯体と補強材が接触、干渉する状況を考慮することができないことが重大な障害になり得ることがわかった。

なお、これらの検討の過程において、構造躯体と補強部材の間の付着強度を正確に求める実験的手法の重要性が明らかになった。本研究の初期においては、補強した梁の曲げ耐力の実測値に基づき、パラメータフィッティング的に付着強度を求めたが、これは理想的な手法とはいえない。付着強度には付着面に対して法線方向と接線方向のものがおり、法線方向の強度

は建研式接着力試験で求めることが可能と考えられる。しかしコンクリートやモルタル系材料に対して接線方向の付着強度を求める有効な手法は存在していないため、新しい付着力試験法の開発と精度の検証を実施することとした。

### (3) 耐摩耗性問題

補修・補強モルタルの耐摩耗性の要因として、水セメント比、砂セメント比、ポリマーセメント比、骨材粒度分布、セメント種、表面強化材の有無を取り上げ、その影響度合いを明らかにした。また、水砂噴流摩耗試験に代替できる簡便な試験法としてサンドブラスト法を取り上げ、すりへり抵抗性を評価可能であることを明らかにした。

### (4) 新付着力試験法問題

現在、補修・補強モルタルの付着性は、建研式付着力強度試験によって評価されている。しかし、現場で発生している補修・補強モルタルの剥離は躯体表面に対して接線方向のせん断が原因で発生している場合が多いとされ、この建研式試験が付着強度を測定する適切な試験とはいえない。そこで、Coulomb則に基づいた補修・補強モルタルの粘着力と摩擦角の評価が可能な三軸圧縮試験による界面剥離強度を求める新たな試験方法を提案した。

### (5) 含浸工法問題

けい酸塩系含浸工法は、表面に含浸材を塗布・含浸させることで、ひび割れ深部を含む表層部の空隙を緻密化できる工法である。したがって、トンネル躯体に適用した場合、補修・補強材との付着性を向上できる可能性が期待できる。そこで、各種の含浸材とPCMの組み合わせによる複合工法における表層引張強度を調べたところ、含浸材とPCMとの複合工法の組合せには、材料の種類によって、両材料の特長が良い方向に発揮される場合と、そうでない場合があるものと推察された。

## 5. 主な発表論文等

「研究期間中(平成 25～28 年度)の研究発表」に示したとおりである。

(論文) 計 7 件  
(口頭発表・報告) 計 25 件  
(特許) 取得 1 件, 公開 1 件

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長束 勇(NATSUKA ISAMU)  
島根大学・生物資源科学部・教授  
研究者番号：90379694

### (2) 研究分担者

石井 将幸(ISHII MASAYUKI)  
島根大学・生物資源科学部・准教授  
研究者番号：50293965

森 丈久(MORI TAKEHISA)

石川県立大学・生物資源環境学部・准教授  
研究者番号：10502841

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし

### その他

本科研と並行して実施した官民連携新技術研究開発事業概要は、以下のとおりである。

(1) 研究開発課題名 表面改質複合工法による農業用水路の長寿命型新補修技術の開発

(2) 期間 平成 27 年度～平成 29 年度

(3) 事業費 42,552 千円

### (4) セクターB

高知大学 佐藤周之・長谷川雄基

島根大学 長束 勇・石井将幸

### (5) 民間企業

株式会社アストン 安藤 尚ほか

株式会社総合開発 高橋慶吉ほか

### (6) 個別研究テーマ

含浸材塗布の劣化因子侵入抑制性能

含浸材による補修可能なひび割れ幅

含浸材による表面被覆材との接着安定

性への影響と摩耗に対する抵抗性の検証

複合工法による表面被覆材の薄肉化