

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07648

研究課題名(和文) ロックボルト補修による水路トンネル・地盤の相互作用評価と補修の方法論の確立

研究課題名(英文) Methodology for rockbolt reinforcement and evaluation of interrelation between irrigation tunnels and grounds

研究代表者

柴田 俊文 (Shibata, Toshifumi)

岡山大学・環境生命科学研究所・准教授

研究者番号：30342546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：老朽化した農業用水路トンネルの維持管理は社会的懸案となっており、トンネルの損傷を正確に把握することが重要である。矢板工法で施工されたトンネルでは覆工の背面に空洞が施工中・施工後に発生することがあり、この空洞が破壊の主要因となる。そのためトンネルの維持管理には、地山と背面空洞がある覆工との相互挙動の把握が必要となる。また背面空洞の充填前後の相互挙動を把握することも、補強のためには重要である。本研究では、模型実験と数値解析により相互挙動を確認した。その際、局所変形と破壊性状を把握するため、実験結果と解析結果との比較を行った。またロックボルトの効果を把握するため数値解析により内空変位の比較を行った。

研究成果の概要(英文)：The maintenance of damaged irrigation tunnels has become a major social concern, and thus the evaluation of damage behavior of the current tunnels is important. Voids behind the tunnel lining may be created during or after construction by the conventional method, and the voids are the main factors for the failure. For the maintenance of the tunnel structure, the understanding of the interaction behavior between the ground and the tunnel lining with the void is required. The comprehension of the interaction after backfilling of the void is also needed because of the design of the reinforcement.

This study presents the interaction behaviors in the model test and the numerical analysis. To investigate the local deformation and the damage pattern, the comparison of the model test results and numerical results is carried out. The comparison of the convergence in the analysis is shown for better understanding of the reinforcement effect of the lockbolts.

研究分野：地盤工学

キーワード：農業用水路トンネル 背面空洞 個別要素法 ロックボルト

1. 研究開始当初の背景

我が国の農業用排水水路は約40万kmにおよび、そのうち農業用水路トンネルは2千km以上に達する。農業用水路トンネルは大正・昭和時代以前に施工されており、老朽化の問題が指摘されている。そのような中、トンネルで散見される極小断面でのロックボルトによる補強技術が新たに開発され、施工事例も報告されてきている。極小断面のトンネルは道路や鉄道のトンネルとは寸法が異なるため、ロックボルトの最適な本数・間隔が異なる可能性が高い。また、在来工法で施工されたトンネルに補強工法としてロックボルトを施工する場合、NATM工法で用いる場合とは地山/ロックボルトのそれぞれの挙動が相違することが考えられる。例えば、在来工法では施工中あるいは施工後に、トンネル覆工の天端付近に背面空洞が生じることがあり、この背面空洞によりトンネルの損傷が進展する。そのため、地山・トンネル覆工・背面空洞とロックボルトとの相互挙動を明白にすることが重要となる。

2. 研究の目的

塑性圧作用時の地山・トンネル覆工・背面空洞の相互挙動を明らかにする。大型模型実験と数値解析を実施し、実験と数値解析との比較により、局所変形や破壊性状といった変状を示す。また、ロックボルトの補強効果を数値解析により明らかにする。

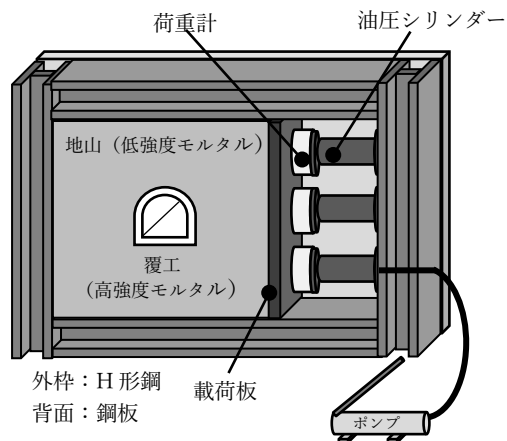


図-1 模型実験装置

3. 研究の方法

(1) 実験の概要

図-1に模型実験の概略図を示す。1/10スケールの農業用水路トンネルを模擬するため、960mm×960mm×400mmの地山を模した供試体の中央に、巻厚20mm、幅員240mm、高さ240mmの幌形のトンネルを配置する。ここで、地山は背面の鋼板とH形鋼で作製された実験装置の内側に設置し、地山と背面の鋼板の間にはPTFEシートを挿入して、載荷時の摩擦を軽減する。ただし、地山の上部・下部と実験装置との間には2cm程度の隙間があり、地山の上下の変形は拘束されていない。次に、地山に作用する塑性圧を表すため右側面か

ら載荷板を介して油圧シリンダーにより荷重を作用させる。油圧シリンダーと載荷板の間には荷重計を据え付け、載荷板変位(接触式変位計による)と覆工の縦/横方向内空変位(非接触式変位計による)とともに測定する。なお、地山および覆工は低強度モルタル(w/c=200%)と高強度モルタル(w/c=45%)を用い、早強ポルトランドセメントにより作製した。ここで、矢板工法で施工したトンネル覆工上部の背面空洞を模擬するため、空洞がない場合と、図-2に示すように背面空洞の角度 θ が45°、90°の場合を想定して載荷実験を行う。

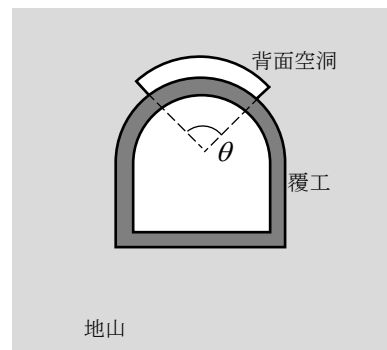


図-2 背面空洞の角度

(2) 解析の概要

本論文では、三次元の個別要素法(DEM)を適用して解析を行う。DEMでは、各要素を剛体と仮定し、要素間の法線方向と接線方向にばねを考慮する。本論文ではDEMのオープンソースソフトウェアであるYADEを用いて解析を行う。本論文では球の要素を用い、計算のアルゴリズムにはVerlet近接リスト法を用いている。また、構成式にはConcrete Particle Method(CPM)を用いる。本研究では要素半径は5mm(地山)および3mm(覆工)とし、約36万個の要素を用いる。実験では最大値に至るまでに荷重が一定の割合で増加しているため、解析では2,500kN/m²の荷重制御により右側面より載荷し、左側面の水平方向の変位を拘束する。なお、地山と覆工に用いたモルタルについては圧縮試験と割裂試験を実施しており(表-1)、この結果からDEMの各パラメータの値を決定する。具体的には、地山の相対延性を $\epsilon_f/\epsilon_0 = 1.92$ 、 $\tan\phi = 0.577$ とする。覆工は同様に、 $\epsilon_f/\epsilon_0 = 3.57$ 、 $\tan\phi = 0.577$ として解析を行う。なお、引張の

表-1 室内試験結果

	地山	覆工
割線静弾性係数	1.21 kN/mm ²	21.5 kN/mm ²
圧縮強度	8.56N/mm ²	140.5 N/mm ²
引張強度	1.37 N/mm ²	33.2 N/mm ²
限界ひずみ	1.13×10 ⁻³	1.54×10 ⁻³
ポアソン比	0.20	0.20

軟化部は線形とし、要素間粘着力は $c_T = 2.74 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ (地山) および $6.63 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ (覆工) とした。なお、ロックボルトの値は使用した鋼材の物性値より $E=210 \text{ kN/mm}^2$ 、 $\nu=0.30$ とし解析を行った。

4. 研究成果

図-3 に応力とひずみの関係を示す。ここで、応力は、載荷板に作用する荷重を載荷板の断面積で除した値、ひずみは載荷板変位を模擬地山の長さで除した値、すなわち地山全体のひずみを表す。また、図中の a-1~c-2 は図-4 の実験値と表-2 のひび割れとの対応を示している。実験結果より、全ての実験ケースでほぼ同じ傾きになっているが、背面空洞が 90° の場合は、ひずみが 0.002 程度まで勾配が緩やかである。これは、模擬地山を実験装置に設置した際、若干の隙間が生じていたことが原因であると考えられる。一方、3 ケースでの解析結果はほぼ同じ値を示し、ひずみが 0.002 程度までは実験値よりも勾配をやや過大に評価していることが確認できる。

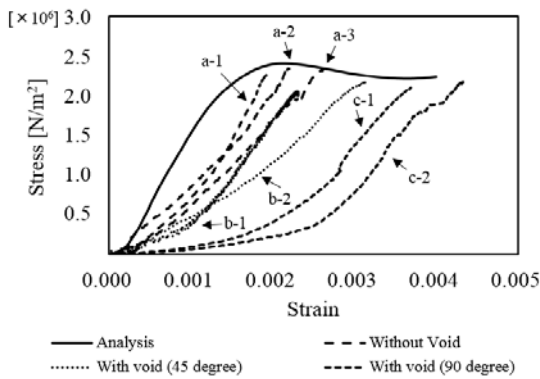
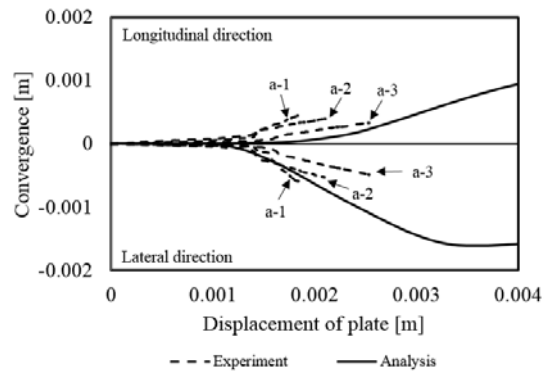
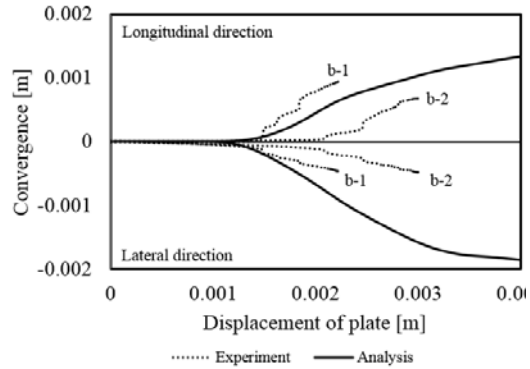


図-3 応力-ひずみ関係

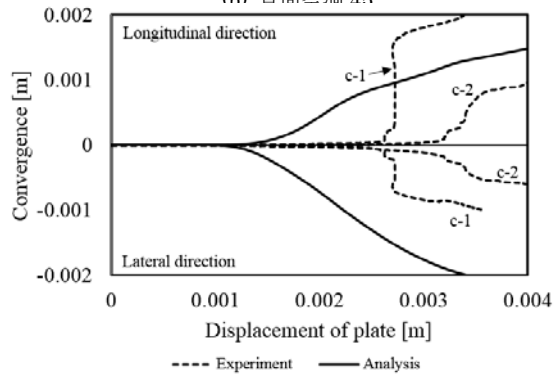
図-4 に内空変位を比較した図を示す。縦軸が縦方向と横方向の内空変位で、それぞれ正と負の値を示しており、横軸が載荷板変位を表している。右側面から荷重を作用させることで、覆工が縦に伸張するように変形し、それにより縦方向の内空変位は増加している。また、横方向には押しつぶされるように変形するため、内空変位が減少していることになる。実験では、背面空洞 90° のケースで、ひずみが 0.0028 程度のときに急激に内空変位が増加しているが、これは、地山と覆工にひび割れが発生することで急激に変化したことが原因と考えられる。総じて、背面空洞が大きいほど、内空変位も大きいことが確認できる。また(a)-(c)をそれぞれ比較すると、解析結果においても、背面空洞の増加とともに内空変位が大きくなっていることが確認できる。さらに、背面空洞を有していない結果と背面空洞 45° の結果では、 45° の一方の結果でやや差が認められるものの、実験値を良好に再現できている。しかしながら、背面空洞 90° のケースでは内空変位の急増するタイミングと、増加の傾向は著しく異なっている。これは、DEM の解析で、ひび割れの発生する時期ま



(a) 背面空洞なし



(b) 背面空洞 45°



(c) 背面空洞 90°

図-4 内空変位の実験結果と解析結果の比較

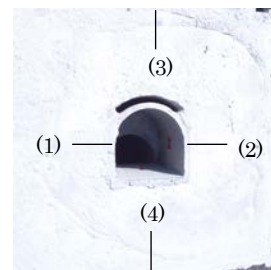


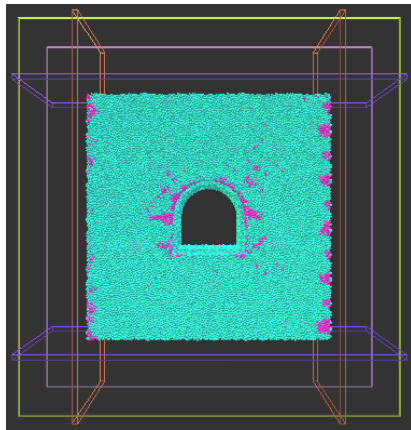
図-5 ひび割れ性状

では再現できていないことに起因する。

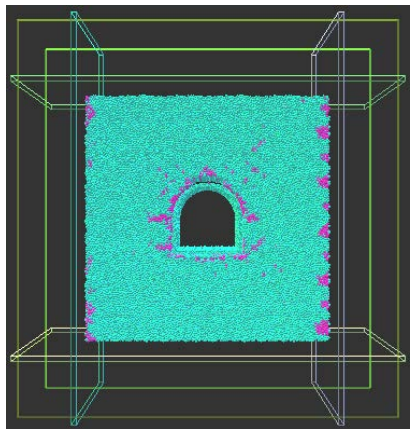
図-5 には実験終了後のひび割れ性状を太線で示している。ここで実験のすべてのケースにおいて、ひび割れの進展は、覆工の左右スプリングライン近傍から地山両端部に向

表-2 ひび割れの長さとしび割れ発生時の載荷板変位

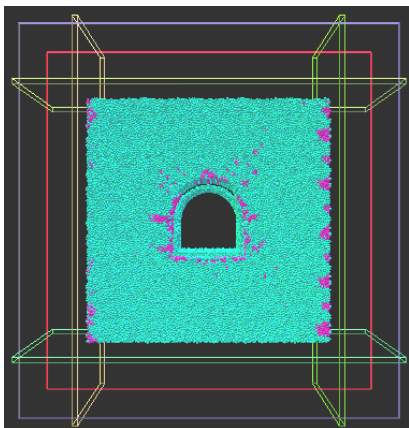
背面 空洞	Case	ひび割れの長さ [mm]				D_p [mm]
		(1)	(2)	(3)	(4)	
なし	a-1	90	150	-	-	1.56
なし	a-2	86	143	-	-	1.23
なし	a-3	82	-	-	-	1.69
45°	b-1	227	214	-	-	1.60
45°	b-2	-	-	-	-	-
90°	c-1	259	292	253	71	2.72
90°	c-2	215	154	-	-	3.37



(a) 背面空洞なし



(b) 背面空洞 45°



(c) 背面空洞 90°

図-6 損傷状態

かうもの(図中の(1)、(2))と、地山中央の上下端部から覆工に向かうもの(図中の(3)、(4))の計4パターンのみで分類できた。表-2にひび割れ発生時の載荷板変位の値と各パターンの実験終了時のひび割れ長さを示す。ただし、表中の D_p は載荷板変位を示す。ここで、すべてのケースで(1)~(4)のひび割れはほぼ同時期に発生しているため、載荷板変位の発生時刻も共通した値を示している。

図-6に数値解析における各ケースの損傷状態を示す。ここで色が異なって表示されている部分は、引張により結合が切れている状態を表しており、載荷板変位が0.004mのときの結果である。いずれのケースでも覆工のスプリングライン近傍に損傷が確認でき、これは図-5のひび割れ性状とも一致している。さらに、表-2より、ひび割れ発生のタイミングと図-4の内空変位が急増する時期はほぼ同一であることがわかる。

表-3と表-4に、ロックボルト補強の有無による内空変位の変化を示す。なお表中の半径と長さは、ロックボルトの値を示している。ここでは解析による比較を行っており、荷重2.5Mpaの際の結果を用いている。なお、ロックボルトは補強を主目的とするものであるため、解析途中で挿入することとしている。下表より、縦方向および横方向のいずれのケースでも、ロックボルトを配置することで内空変位が減少しているのがわかる。

表-3 縦方向内空変位の比較

ロック ボルト	半径 [m]	長さ [m]	
		0.1	0.2
なし		8.665×10^{-4}	
4本	0.0015	7.745×10^{-4}	7.690×10^{-4}
	0.003	8.181×10^{-4}	7.563×10^{-4}
12本	0.0015	7.005×10^{-4}	7.264×10^{-4}
	0.003	7.719×10^{-4}	8.000×10^{-4}

表-4 横方向内空変位の比較

ロック ボルト	半径 [m]	長さ [m]	
		0.1	0.2
なし		-1.946×10^{-3}	
4本	0.0015	-1.833×10^{-3}	-1.842×10^{-3}
	0.003	-1.893×10^{-3}	-1.839×10^{-3}
12本	0.0015	-1.750×10^{-3}	-1.837×10^{-3}
	0.003	-1.804×10^{-3}	-1.875×10^{-3}

以上示したように、模型実験と数値解析を用いて、地山と背面空洞を有するトンネル覆工の相互作用とロックボルトの効果について検討を加えた。既往の国内外の研究では、

トンネル覆工のみを対象とし地山の挙動は考慮していないものや、覆工と地山の両者を考慮していても、実験と解析の両方で十分にひび割れ等の破壊性状を追跡していないものなどが報告されていた。農業用水路トンネルの状態を判断する場合、地山と覆工の相互作用を考慮し、破壊性状を定性的・定量的に評価することが重要であり、本研究により相互作用を明白にする実験と、不連続な挙動をシミュレートする数値の適用性を示すことができた。また、これまでに報告が少なかったロックボルトの補強としての効果について、定量的に示すことができた。

本研究の今後の展望として、以下の点が挙げられる。

- 1) トンネルの健全度は、ひび割れの状態から定性的に評価することが多い。実験と解析により、ひび割れと地山、トンネル覆工、背面空洞の関係を詳細に検討し、トンネルの健全度を定量的に評価できるよう発展させる。
- 2) 背面空洞のあるトンネルをロックボルトで補強する場合、トンネルの天端に穴を穿ち、そこからグラウト等で空洞を充填する。しかし、施工条件や地山と覆工の状態、背面空洞の条件により充填に過不足が生じることがある。充填の条件によるトンネルの相互挙動の変化やその後の補強の効果を明らかにすることで、より効率的な維持管理へと発展させることが可能となる。
- 3) ロックボルトを少ない本数で施工する「spot bolting」の効果を明白にし、経済的・効率的な補修方法を提案する。
- 4) 農業用水路トンネルは、建設された時期が古く、現時点の情報のみで施工時の情報がない場合も多い。そのため、限られた情報から地山とトンネルの状態を推定する方法を提示する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 柴田俊文、塑性圧作用時の農業用水路トンネルの変状解析、平成 30 年度農業農村工学会大会講演会、2018 年 9 月、京都大学 (京都市)。
- ② 柴田俊文、背面空洞を有する農業用水路トンネルの個別要素法による解析、第 21 回応用力学シンポジウム、2018 年 5 月 20 日、名城大学 (名古屋)。
- ③ 田本敏之 (柴田俊文)、塑性圧作用時の背面空洞を考慮した地山・覆工の挙動、第 72 回農業農村工学会中国四国支部講演会、2017 年 10 月 26 日、とくぎんトモニプラザ (徳島市)。

- ④ 村上椋 (柴田俊文)、農業用水路トンネルに対する個別要素法を用いた変形挙動解析、第 72 回農業農村工学会中国四国支部講演会、2017 年 10 月 26 日、とくぎんトモニプラザ (徳島市)。
- ⑤ 柴田俊文、背面空洞を有する農業用水路トンネルと地山の変状解析、土木学会第 72 回年次学術講演会、2017 年 9 月 11 日、九州大学 (福岡市)。
- ⑥ 村上椋 (柴田俊文)、農業用水路トンネルに対する個別要素法を用いた変形挙動解析、平成 29 年度農業農村工学会大会講演会、2017 年 8 月 31 日、日本大学 (藤沢市)。
- ⑦ 村上椋 (柴田俊文)、地山・覆工・空隙とロックボルトとの相互作用、第 71 回農業農村工学会中国四国支部講演会講演、2016 年 10 月 27 日、松山市総合コミュニティセンター (松山市)。
- ⑧ 村上椋 (柴田俊文)、農業用水路トンネルのロックボルトによる補修に関する基礎的研究、土木学会第 71 回年次学術講演会、2016 年 9 月 9 日、東北大学 (仙台市)。
- ⑨ 村上椋 (柴田俊文)、農業用水路トンネルにおける地山とロックボルトの相互挙動、平成 28 年度農業農村工学会大会講演会、2016 年 9 月 1 日、ホテル法華クラブ仙台 (仙台市)。
- ⑩ 村上椋 (柴田俊文)、矢板工法のトンネルに対するロックボルト補強の基礎実験、平成 28 年度地盤工学セミナー報告会、2016 年 7 月 22 日、くにびきメッセ (松江市)。
- ⑪ 村上椋 (柴田俊文)、農業用水路トンネルに対するロックボルトの補強の効果、土木学会中国支部研究発表会、2016 年 5 月 21 日、広島工業大学 (広島市)。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 俊文 (Toshifumi, Shibata)
岡山大学大学院・環境生命科学研究科・准
教授
研究者番号：30342546

(2) 研究分担者

西村 伸一 (Shin-ichi, Nishimura)
岡山大学大学院・環境生命科学研究科・教
授
研究者番号：30198501

珠玖 隆行 (Takayuki, Shuku)
岡山大学大学院・環境生命科学研究科・准
教授
研究者番号：70625053

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()