

塗膜防水材料を用いた吹付けリニューアル工法の開発 その3 トンネル全体構造系の解析的検討

大成建設 (株)

正会員 ○澤田 幸平 大塚 勇 橋本 貴之

成和リニューアルワークス (株)

正会員 菅野 道昭 池山 正一

BASF ジャパン (株)

栗原 靖幸 大矢 夏帆

ポゾリスソリューションズ (株)

今野 清之朗

1. はじめに

本報告は、塗膜防水材料を覆工コンクリート（以下、覆工）と保護モルタルの間に塗布したトンネル全体の構造安定性を数値解析により検討するものである。具体的には、塗膜防水材料を用いた吹付けリニューアル工法がトンネルの変形、覆工に発生する応力などのトンネルの挙動に与える影響について報告する。

2. 塗膜防水材料のモデル化

トンネル全体構造系の検討に先立ち、塗膜防水材料のモデル化の検討を実施した。具体的には図1に示すように、角度を変えた塗膜防水材料を介在する供試体 ($\theta=45^\circ$ 、 55° 、 70°)、保護モルタルのみで作成した供試体の一軸圧縮試験の再現解析を行い、変位-荷重曲線を再現できる解析モデル、および物性値を検討した。

(1) 塗膜防水材料のモデル化

写真1に一軸圧縮試験後の供試体の状況を示す。写真1から塗膜防水材料と保護モルタルの境界で滑りが発生していることが確認できた。このため、塗膜防水材料と保護モルタルの境界を Mohr-Coulomb の破壊基準に従うインターフェース要素（以下、IF 要素）でモデル化することで、境界での滑りを再現することとした（図2）。保護モルタル、塗膜防水材料は弾性体としてモデル化した。

(2) 保護モルタルおよび塗膜防水材料の解析用物性値

一軸圧縮試験結果より保護モルタルの弾性係数は 8.01GPa、塗膜防水材料の弾性係数は既往文献¹⁾より 350MPa とした。また、要素同士の食込み防止のため、塗膜防水材料と保護モルタルの境界に設置する IF 要素の k_n は非常に大きな値を設定した。Mohr-Coulomb の破壊基準においては、 S_s は粘着力 c 、内部摩擦角 φ の関数となる。 φ は既往文献¹⁾より 12.1° とし、 k_s と c は一軸圧縮試験の荷重-変位曲線を再現できるように同定した。一例として図3に試験と解析により得られた荷重-変位関係 ($\theta=45^\circ$)、および k_s と c の同定方法を示す。試験における弾性限界は最大荷重の 1/2 までの範囲とし、弾性限界内での試験値と解析値の傾きの誤差の 2 乗和が最小となるように k_s を同定した。また、試験および解析における弾性限界の変位差の 2 乗和が最小となるよう c を同定した。再現解析の結果、 k_s は 1.16GN/m^3 、 c は 1.92MPa となった。

3. トンネル全体構造系の挙動

トンネル全体構造系の数値解析を実施し、塗膜防水材料の有無がトンネルの安定性に与える影響を検討する。本検討では常時、L1 地震時（水平震度 0.3）、L2 地震時（水平震度 2.0）の検討を行う。地震時荷重は水平震度による慣性力を全要素に作用させる。

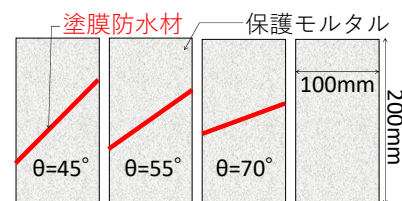


図1 一軸圧縮試験供試体



写真1 供試体状況

図2 再現解析のモデル

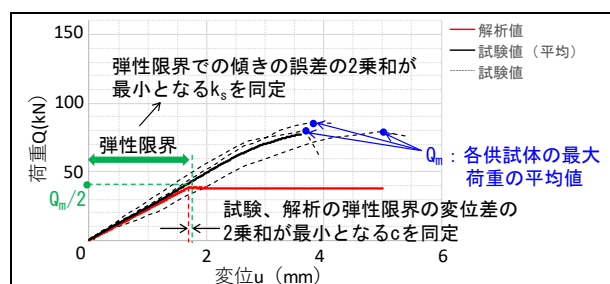


図3 荷重-変位関係 ($\theta=45^\circ$)

キーワード 吹付けリニューアル, 塗膜防水材料, 有限差分法

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株)土木本部土木設計部 TEL 03-5381-5296

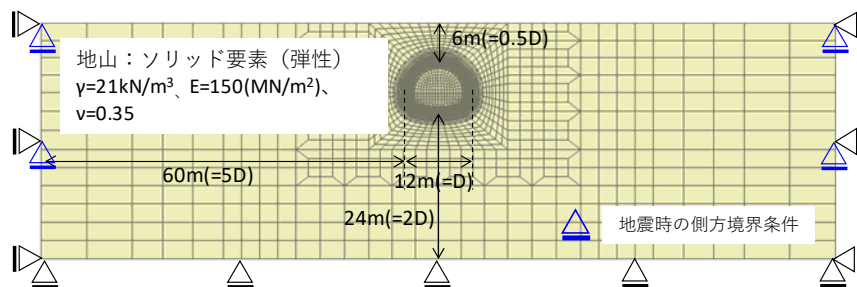


図4 解析モデル

- 一次支保、覆工：ソリッド要素（弾性）
 $\gamma=23\text{kN/m}^3$ 、 $E=22(\text{GN/m}^2)$ 、 $\nu=0.20$
- 保護モルタル：ソリッド要素（弾性）
 $\gamma=23\text{kN/m}^3$ 、 $E=8.01(\text{GN/m}^2)$ 、 $\nu=0.20$
- 塗膜防水材：ソリッド要素（弾性）
 $\gamma=23\text{kN/m}^3$ 、 $E=350(\text{MN/m}^2)$ 、 $\nu=0.20$

表1 検討ケース

CASE	覆工厚 (mm)	保護モルタル厚 (mm)	塗膜防水材厚 (mm)	インターフェース要素の物性値				
				k_n (GN/m³)	k_s (GN/m³)	c (MPa)	ϕ (°)	T_t (kN/m²)
CASE1	300	—	—	—				
CASE2	270	30	3	10000	1.16	1.92	12.1	10000

(1) 検討ケース

本検討では表1に示すように、「覆工のみ」のCASE1、「塗膜防水材を用いた吹付けリニューアル工法を適用した覆工」のCASE2で検討を行う。

(2) 解析モデル

図4に解析モデルを示す。解析は覆工構築後（常時）に地震時荷重を載荷した（地震時）。常時における境界条件は、底面境界は水平・鉛直方向を固定し、側方境界は水平方向のみ固定する。地震時における境界条件は、底面境界については常時と同じとし、側方境界については鉛直方向のみ固定の水平ローラーとする。また、保護モルタルによる補修は覆工の全周に実施するものとしてモデル化する。

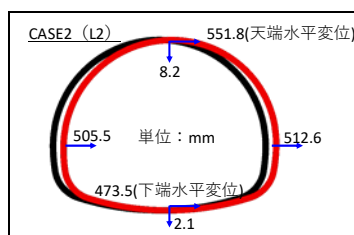


図5 変形図

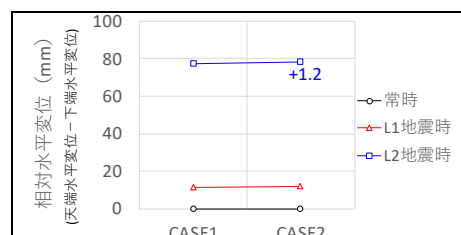


図6 相対水平変位

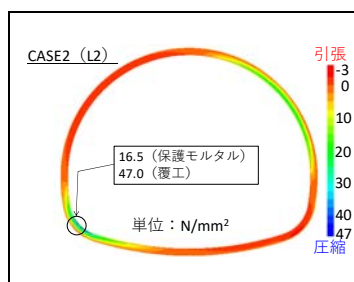


図7 応力図

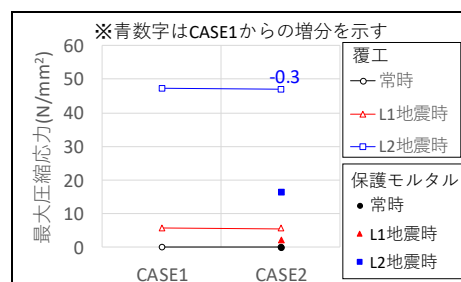


図8 最大圧縮応力

(3) 解析結果

図5にCASE2のL2地震時におけるトンネル変形図を示す。また、各ケースの下端に対する天端の相対水平変位を図6に示す。CASE1とCASE2で水平変位は同程度であることが確認できる。図7にCASE2のL2地震時における覆工、保護モルタルの応力図を示す。また、各ケースの覆工、保護モルタルの最大圧縮応力を図8に示す。CASE1とCASE2では覆工に発生する圧縮応力は同程度となった。覆工、保護モルタルともにリング状に閉合しており、CASE1とCASE2でトンネル全体としての剛性に違いがないため、相対水平変位、最大圧縮応力ともに同程度になったものと考えられる。保護モルタルの最大圧縮応力は覆工に発生する応力の3分の1程度であり、覆工と比較して裕度がある結果となった。保護モルタルの弾性係数または厚さを増加（剛性を増加）させた場合、覆工の圧縮応力は減少し、保護モルタルの圧縮応力は増加することが想定される。本検討では保護モルタルの弾性係数は8.01GPa、厚さを30mmとして検討しているが、保護モルタルの剛性を増加させることで、覆工、保護モルタルにとってより最適な仕様を提案できることを示唆している。

4. まとめ

数値解析により覆工の全周を補修するという条件下で、「覆工のみ」のケースと「塗膜防水材を用いた吹付けリニューアル工法を適用した覆工」のケースで比較検討を行った。検討の結果、トンネルの変形、覆工の圧縮応力に大きな違いがないことが確認できた。今後は、覆工の一部にのみ補修を適用した場合の検討や、保護モルタルの諸元を変化させた検討を実施したい。

参考文献

- Hyuk-il Jung Associate, UKMEA Tunnel Skills Leader, Arup: LOAD SHEARING ANALYSIS AND RESULTS, Design of Composite Tunnel Linings Workshop, September 2017