

## トンネル覆工巻厚が薄い箇所における有効的な補修・補強設計の検討

基礎地盤コンサルタンツ株式会社 嶋田 諭

## 1. はじめに

在来工法のトンネルにおいて、覆工コンクリートの巻厚不足箇所や覆工背面に空洞が確認された場合は、地山から落下した岩塊が覆工コンクリートを破壊し、岩塊と共にトンネル内に落下する「突発性の崩壊」の発生が懸念される。

本稿では、巻厚不足箇所や懸念される「突発性の崩壊」に対する補修・補強対策工検討事例を記す。

## 2. 対象トンネルと設計方針

## (1) 対象トンネル

対象トンネルは、鹿児島県内の市町村が管理するトンネルである。本トンネルは、完成から90年以上経過したトンネルで、素掘りのトンネルに覆工コンクリートを内巻きした記録が残されている。

トンネル周辺の地質は、デイサイト・流紋岩・大規模火砕流とされている<sup>1)</sup>。

本トンネルの特徴として、内空断面が非常に小さいトンネルである(写真-1)。



写真-1 起点側坑口

トンネルの主な変状として、広範囲の豆板（写真-2）や覆工コンクリートの欠損が確認されている。



写真-2 覆工表面状況

電磁波レーダー探査機を用いた覆工背面空洞調査では、巻厚不足及び覆工背面空洞が確認され、過年度の簡易覆工強度試験では、設計強度が不明な場合に用いる設計基準強度 $15\text{N/mm}^2$ を下回る箇所が確認された。

## (2) 覆工背面空洞対策の方針

確認された覆工背面空洞高さの規模は小さいものの、覆工コンクリートの強度不足を考慮し、覆工巻厚が薄くかつ覆工背面空洞に広がりのある区間を要対策区間とした。

なお、現状ではトンネルアーチ部に縦断方向のひび割れや放射状のひび割れが見られないことから、地山は安定し、覆工コンクリートに外力は作用していないと判断した。

設計方針として、覆工背面空洞を充填することで突発性の崩壊を防止する「裏込め注入工」による対策とし、注入材料を検討した。

注入材料の検討方針を以下に示す。

①外力に起因する変状が確認されず、「突発性の崩壊」のみを対象とした対策となるため、剛性の低い非セメント系注入材（発泡ウレタン）の40倍発泡が使用可能である。

②巻厚不足箇所の適用性について、「道路トンネル維持管理便覧【本体工編】」に記載されており、セメント系注入材は補強工の検討を要するのに対し、非セメント系注入材はセメント系注入材に比べ覆工コンクリートに係る荷重増加の影響が小さいため、補強工の検討は特段求められていない<sup>3)</sup>。しかし、覆工コンクリートの強度不足に関する記載がないため、当該トンネルでは強度不足を考慮した検討を行う。

③内空断面が小さいトンネルであるが、車両が通行するトンネルのため、原則内空断面を縮小させない。

## 3. 注入材料の選定

検討方針の②では、非セメント系注入材は注入圧と発泡圧を検討することで裏込め注入実施前の事前補強を行わず施工できるとされているが、覆工の強度不足が生じている場合は、裏込め注入時に覆工コンクリートに変状が発生する可能性がある。変状の発生が懸念される場合は、別途解析等により事前補強の必要性を判断する。

本トンネルにおいても覆工巻厚不足箇所では裏込め注入時に変状の発生が懸念されたため、骨組み解析により裏込め注入時の応力照査を行い、事前補強の必要性を検討した。

## (1) 骨組み解析条件

骨組み解析は、対策区間で最も覆工巻厚の薄い箇所モデルを作成し、各種条件を設定した（表-1）。

表-1 骨組み解析条件

項目		入力値	単位
注入材単位 体積重量	可塑性エアモルタル	12	kN/m <sup>3</sup>
	発泡ウレタン	0.3	kN/m <sup>3</sup>
覆工コンクリート 物性値 (無筋コンクリート)	覆工コンクリート単位体積重量	23	kN/m <sup>3</sup>
	弾性係数	$2.0 \times 10^4$	N/mm <sup>2</sup>
	設計基準強度	15	N/mm <sup>2</sup>
	圧縮応力度	3.75	N/mm <sup>2</sup>
	曲げ引張応力度	0.19	N/mm <sup>2</sup>
作用応力	せん断応力度	0.3	N/mm <sup>2</sup>
	注入圧(可塑性エアモルタル)	200	kN/m <sup>2</sup>
	発泡圧(発泡ウレタン)	20	kN/m <sup>2</sup>

本トンネルのアーチ部における覆工強度が不明であったため、国土交通省が定める道路トンネル定期点検要領を参考に15N/mm<sup>2</sup>を採用した。

また、弾性係数については文献<sup>4)</sup>に記載されている各設計基準強度における弾性係数をもとに比例配分し設定した。

その他の骨組み解析条件は、各種基準や公表値を基に設定した。

#### (2) 骨組み解析結果

フレーム計算の結果を表-2及び表-3に示す。

表-2 骨組み解析結果（セメント系）

		(N/mm <sup>2</sup> )						
		圧縮		引張		せん断		
①注入圧 200kN/m <sup>2</sup>	S008	4部材	7.84 > 5.63	OUT	2.87 > 0.29	OUT	0.480 > 0.45	OUT
	S008	7部材	4.84 < 5.63	OK	1.33 > 0.29	OUT	0.346 < 0.45	OK

表-3 骨組み解析結果（非セメント系）

		(N/mm <sup>2</sup> )						
		圧縮		引張		せん断		
①発泡圧 20kN/m <sup>2</sup>	S008	4部材	0.83 < 5.63	OK	0.28 < 0.29	OK	0.051 < 0.45	OK
	S008	7部材	0.56 < 5.63	OK	0.17 < 0.29	OK	0.039 < 0.45	OK

セメント系注入材は、引張・圧縮・せん断の全てで許容応力度を超える解析結果となった。この場合は、事前補強として内空断面を縮小させる内巻補強が必要となるため、セメント系注入材の適用は困難と判断した。

非セメント系注入材は、引張に対する余裕は小さいものの、引張・圧縮・せん断の全てで許容応力度内に収まり、事前補強なしでの施工が可能となったため、裏込め注入材は非セメント系注入材に限定される結果となった。

#### 4. 施工時の課題と対応

施工時の課題として、削孔調査時に事前補強が望ましいと判断された場合の対応が挙げられる。

一般的に、引張に対する補強として繊維シート補強工が用いられるが、覆工コンクリート表面に豆板の多い本トンネルでは、シートの接着不良やリークしたウレタンによるシートのはく離が懸念される。繊維シート補強工は、繊維シートと覆工コンクリートを確実に接着させる

必要があり、接着不良やウレタン注入時にはく離が生じる場合は、想定された補強効果が得られない。

代替案として、覆工コンクリートに重量物を懸垂させず、豆板部でも適用可能な案が必要となる。採用実績と適用性を考慮し、路面からパイプで覆工コンクリートを押さえるパイプサポートを仮設補強案として申し送ることとした。

#### 5. おわりに

巻厚不足及び強度不足等が確認された場合において、事前補強なしで覆工背面空洞対策を計画する場合は、施工時の変状発生リスクを見逃す可能性がある。本トンネルでは、既往の調査結果を参考に物性値を設定して骨組み解析を行い、事前補強の必要性を判断した。

今後、類似条件のトンネル補修設計における課題として、骨組み解析の条件設定の精度向上が挙げられる。特に覆工巻厚が著しく不足している場合は、解析条件の僅かな差が結果に大きく影響する。必要に応じて追加の事前調査を行い、調査結果を基にした各種条件設定を行うことが望ましいと考える。

#### 《引用・参考文献》

- 1) 地質図Navi, (最終閲覧日 2023年5月15日), <https://gbank.gsj.jp/geonavi/>
- 2) 道路トンネル定期点検要領(2019): 国土交通省 道路局 国道・技術課, p. 58
- 3) 道路トンネル維持管理便覧【本体工編】令和2年版(2020): 公益財団法人日本道路協会, p. 325
- 4) コンクリート標準示方書【設計編】(2018): 公益財団法人土木学会, p. 43