

土木遺産のレンガ積み覆工からなる山岳トンネルの補修補強計画

(株)第一コンサルタンツ 正会員 ○公文海斗、正会員 西川 徹、非会員 芝田和仁

1. はじめに

高知県黒潮町が管理する熊井隧道は、明治 38 年（1905 年）に竣工したレンガと石材の覆工からなる美しく魅力的な山岳トンネルであり、平成 26 年（2014 年）に土木学会選奨土木遺産に選出されている。本トンネルは、町道の一部として現在も地域交通を支えているが、トンネル本体工にひび割れ、漏水、うき・はく離が認められ、道路利用者への影響が懸念されている。本稿は、トンネルの構造と変状要因を把握するための詳細調査と、土木遺産の維持・保全に配慮した補修補強計画について報告するものである。

2. 熊井隧道の概要

熊井隧道は、延長 96.0m、幅員 3.4m であり、地山の地質は四万十帯の泥岩優勢砂岩泥岩互層からなる。覆工は、上半がレンガ積み（長手積み）、下半が地域でも産出される砂岩の石材積みからなる。坑門はレンガ積み（イギリス積み）からなり、笠石、帯石、要石、題額が配置され土木遺産として魅力的なものとなっている。定期点検でのトンネル健全度は、うき・はく離を主な損傷としたⅢ（早期措置段階）と評価されている。



写真 1 熊井隧道の坑門

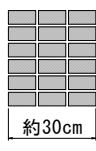
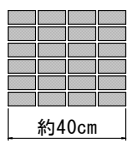
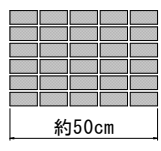
レンガ 構造	 約20cm 2層	 約30cm 3層	 約40cm 4層	 約50cm 5層
	レンガ 支保構造	A	B	C

図 1 熊井隧道のレンガ支保構造パターン（詳細調査結果による）

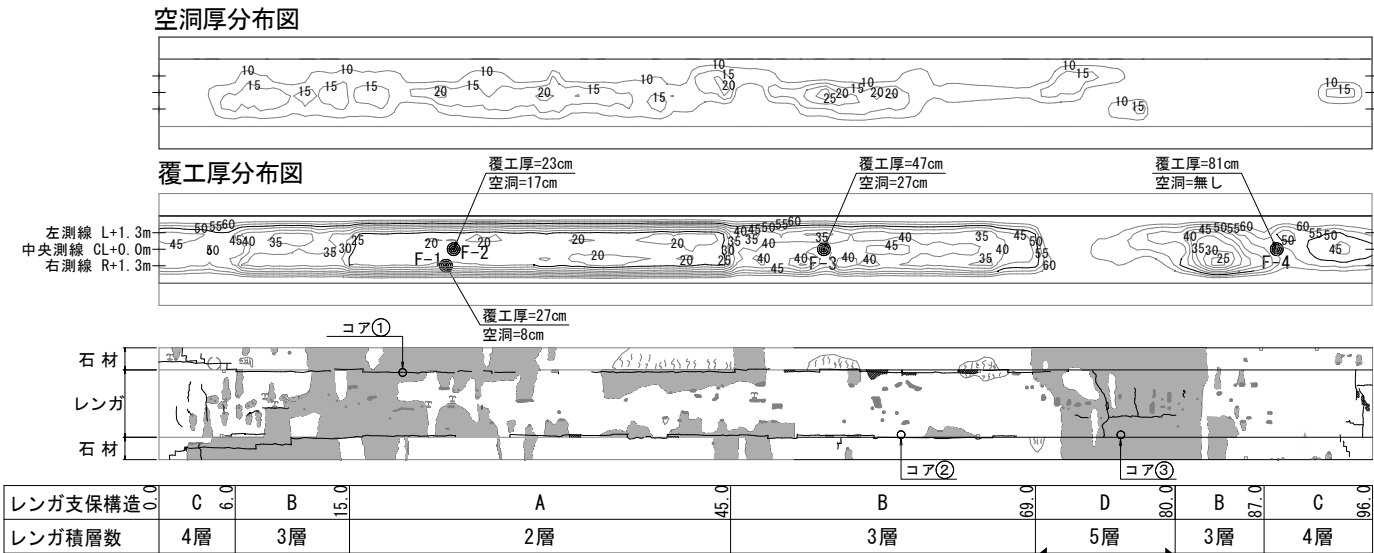
3. トンネルの変状と詳細調査

詳細調査は、外力性のひび割れが認められることから、土木遺産としてのトンネル構造（覆工巻厚≒レンガ積層数や強度など）と変状要因を把握することを目的とし、電磁波探査・覆工ドリル削孔（覆工巻厚・背面空洞調査）、レンガ積み覆工の一軸圧縮強度試験、レンガ自体の点載荷試験を実施した。

電磁波探査の結果、上半レンガ積み覆工は 2～5 積層からなり、掘削当時の地山状況に応じて A～D パターンの 4 つのレンガ支保構造（積層数）とその境界が明瞭に確認された。このレンガ積層数は、上下半境界部に約 10m 間隔で設置されている水抜き孔で確認されたものと一致した。この支保構造は、坑口部は 4 層の C パターン、一般部は掘削時の地質状況に応じて、良好な区間は 2 層の A パターン、地山が最も悪かった区間は 5 層の D パターンとして施工されていた。この D パターン区間の覆工には天端縦断方向の外力性ひび割れが認められることから、掘削時から地山が悪く長期的な緩み土圧が作用しているものと考えられる。また、覆工背面には 5～30cm 程度の空洞が広く分布しており、裏込め注入に相当する空洞充填の痕跡は認められなかった。この空洞は、レンガを内空側から積み上げることから、人手が入る程度の空間が必然的に残ったものと考えられる。なお、覆工ドリル削孔のキャリブレーションから求められたレンガ積み覆工の比誘電率 ϵ_r は、11.6 であった。

レンガ積み覆工の一軸圧縮強度は 9.9～15.9N/mm² であり、レンガ単体の一軸圧縮強度は 42.0～74.5N/mm²（点載荷強度からの換算値）であった。現在の覆工コンクリートの設計基準強度が 18～24N/mm² であることから、このレンガ積み覆工の強度は相対的に小さな値となっている。しかし、当時の土木技術や材料の品質を考慮すると、現状でも当時の設計思想を継承したトンネル構造物として、十分に機能しているものと評価した。

漏水はトンネル全区間で認められ、その多くはレンガ積み目地モルタル部からの線状の漏水が面的に広がっている。これは目地モルタルの経年的な劣化・流失により、背面地下水がにじみ出しているものと考えられる。



※施工時の地質が悪くDパターンで施工し、長期的な緩み土圧により天端縦断方向にひび割れが発生している区間

図2 熊井隧道 詳細調査結果総括図

4. トンネルの補修補強計画

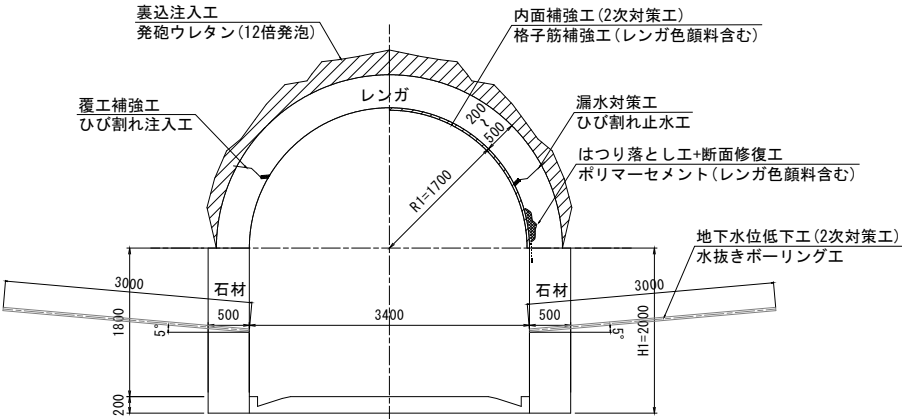
補修補強計画の基本方針として、1)健全度Ⅲ（早期措置段階）からⅠ（健全）へ向上させる、2)土木遺産として可能な限り現状を維持することとした。特に 2)については道路利用者の安全確保を最優先にしながらも、①レンガ・石材の切削・削孔は必要最低限とする、②景観維持から構造物を覆う工法は避けることとした。

覆工に外力性のひび割れがあるとともに、全線にわたって小規模ながら空洞が分布することから、外力対策及び土木遺産としての耐荷力向上を目的として裏込め注入工を計画した。注入材は、漏水が多く空洞が小規模であることから発泡ウレタンとし、その発砲倍率は一軸圧縮強度 1.0N/mm² 以上となる 12 倍発砲とした。

対策区分Ⅲとなるうき・はく離箇所については、完全に本体と分離していることから、はつり落とし後にレンガ色顔料を混和させたポリマーセメントモルタルによる断面修復工とした。ひび割れについては、覆工に作用する応力の適切な伝達・分散を目的として、ひび割れ注入工を計画した。

漏水は劣化した目地モルタルからの線状の漏水であることから、細かな作業となるが漏水範囲の全ての目地モルタルに対しひび割れ止水工（機械式高圧注入）を計画した。

上記の一次対策完了後、外力性ひび割れの進展や漏水の増加が確認された場合は、二次対策として内面補強工の格子筋補強工（レンガ色顔料含むポリマーセメント）、地下水低下工の水抜きボーリング工を施す計画とした。



※2 次対策は将来変状が進行した場合に施工

図3 熊井隧道 補修補強計画標準断面図

レンガ積み覆工での電磁波探査は、レンガ積層数とその変更境界が明瞭に確認できたとともに、Dパターン区間のトンネル構造・地山状況・変状状況が良く一致しており、その適応性と有効性が確認された。補修補強計画では、土木遺産として可能な限りレンガ・石材を切削・削孔を避け、現状を保全し後世に引き継ぐ計画とした。

熊井隧道は竣工から 116 年（令和 3 年現在）が経過する山岳トンネルであり、地山状況に応じた丁寧な施工により、現在も良好な状態で供用され続けている。我々、現在の土木技術者はこの先人の叡智と努力に敬意を表し、国民共有の財産とし保全・活用する責務があり、本稿がその一例として参考になれば幸いである。