

山岳トンネル裏込注入工に関する検討

東海旅客鉄道（株）
（公財）鉄道総合技術研究所

正会員 ○水谷 真基 大木 基裕 河上 洋輝
正会員 野城 一栄 今泉 光智哲 三輪 陽彦

1. はじめに

矢板工法にて建設された山岳トンネルでは、覆工の実巻厚が非常に小さく、覆工と地山の間で空洞が生じている場合が多い。実巻厚が小さく、覆工背面に空洞が存在すると、覆工裏地山の崩落により、覆工に押抜きせん断破壊が生じることがある。また、塑性圧や偏圧が作用するトンネルでは、覆工にて地山からの反力を確保できないため、変状の進行を助長させやすい。このような変状への対策として裏込注入工が一般的であるが、実巻厚が小さい箇所では注入により覆工自体がはく落する可能性がある。そこで、実巻厚が小さいトンネルに対して裏込め注入工を安全に施工する方法を3次元FEM解析により検討したので報告する。

2. 実トンネルの巻厚および背面空洞調査結果

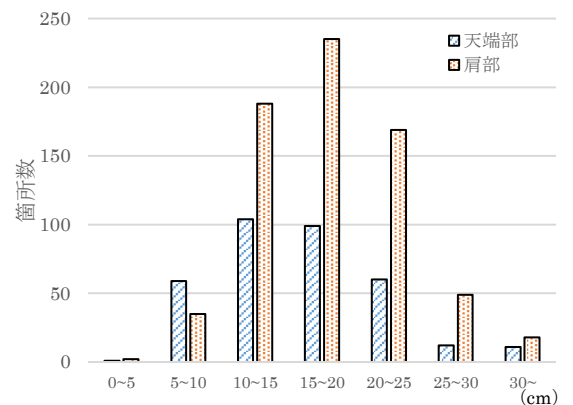
在来線3トンネルにて実施した覆工巻厚および背面空洞の調査結果を図-1に示す。調査結果は、天端部と肩部の巻厚と背面空洞厚を、電磁波探査の結果より、線路方向50cmごと計348断面を対象に整理した。なお、3トンネルとも矢板工法により建設され、昭和初期に供用開始したトンネルである。調査結果より、巻厚は天端部にて5~25cm、肩部にて10~25cmの範囲に主に分布しており、平均巻厚はそれぞれ16cm、19cmであった。空洞厚は天端部にて0~80cm以上の範囲内に満遍なく分布しており、肩部の空洞は0~10cmが全体の4割を超えていた。平均空洞厚はそれぞれ47cmと29cmであり、天端部と比較して肩部の空洞が小さかった。

3. 裏込注入が覆工に与える影響に関するパラメータ解析

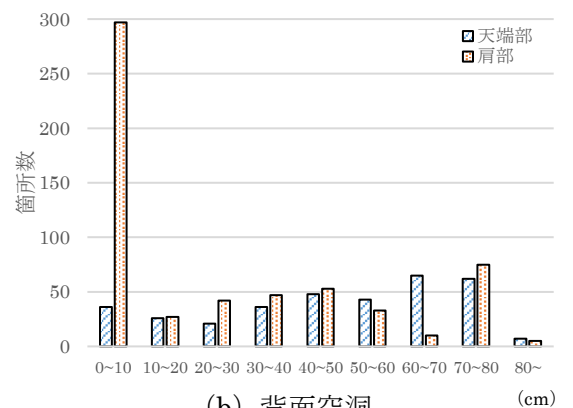
解析断面は巻厚調査結果より、巻厚が薄い箇所を含む延長5m間または10m間を選び覆工の凹凸状況を再現した3次元解析モデルを作成した(図-2)。解析メッシュは地山25,999要素、覆工28,720要素、背面空洞1,320要素とした。また、トンネル断面方向および延長方向は対象性を考慮して、解析範囲を高さ方向12m×水平方向6.25m×延長方向5mとし、境界条件は各面に対してローラー支持とした。覆工は無筋コンクリートとし、設計基準強度18N/mm²相当の弾性係数を与えた。地山は軟岩想定(弾性係数:200MPa)とし、予備解析より、天端部から横断方向に左右30°間、注入延長1m間に注入圧(100kPa)および注入材と材料の自重を作用させた。解析では、注入圧が作用する箇所を延長方向に25cmずつ移動させて解析し、荷重位置付近の巻厚分布の変化による発生応力の変化を整理した。

キーワード 山岳トンネル 裏込注入工 背面空洞 過少巻厚

連絡先 〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33 総合技術本部技術開発部 TEL 0568-47-5375



(a) 覆工巻厚



(b) 背面空洞

図-1 覆工巻厚および背面空洞調査結果

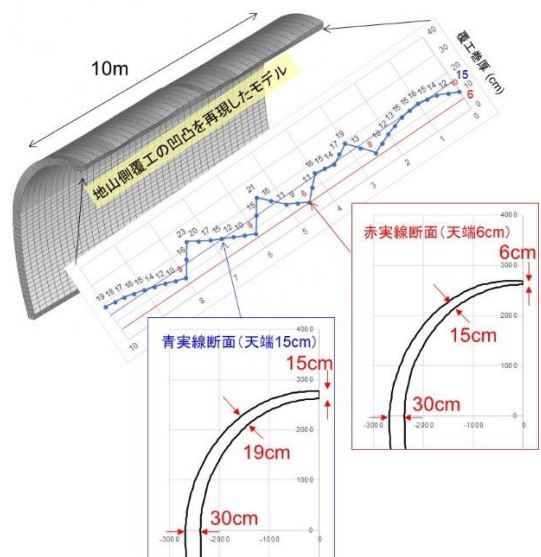


図-2 解析モデル例

4. 解析結果

(1) 注入圧 (100kPa) のみ作用させたケース

注入材料の自重を考慮せず、注入圧のみ覆工へ作用させた場合に発生する最大主応力 (引張) を整理した。解析より求めた発生応力増分コンターの一例を図-3 に示す。この場合の変形は、延長方向に卓越しており、延長方向の断面にて引張応力が最大となっている。このため、線路方向に巻厚が変化する場合、巻厚が極小となる断面が弱点箇所となり、ここで最大主応力 (引張) が発生する。なお、発生応力に対する評価は「既設トンネル近接施工マニュアル」¹⁾ に基づき、1.0MPa を許容値とし、許容値を超過した場合、注入不可と判定した。

(2) 注入圧 (100kPa) と材料の自重を作用させたケース

図-4 に注入圧と材料 (モルタル) の自重を作用させた場合における載荷範囲内の天端巻厚と最大主応力 (引張) の関係を示す。また、図-4 より巻厚 15cm 付近および 20cm 付近における最大主応力 (引張) の平均値 μ と標準偏差 σ を算出したものを表-1 に示す。解析結果より、背面空洞が 40cm の場合は、天端巻厚が 15cm 程度あれば、ばらつきを考慮した最大主応力 (引張) ($\mu+3\sigma$) が許容値 (1MPa) 以下となることが分かった。また、背面空洞高さが 80cm の場合は、天端巻厚が 20cm 程度あれば、ばらつきを考慮した最大主応力 (引張) $\mu+3\sigma$ (0.77MPa) が許容値 (1MPa) 以下となることが分かった。つまり今回調査した範囲内であれば覆工巻厚が概ね 20cm 程度あれば注入圧が作用するまで充填することが可能である。

(3) 補強工をモデル化したケース

許容値を超過する条件下で裏込注入工を施工する際は、トンネル内面に補強工が必要となる。そこで、覆工内面をアラミド繊維シート、バサルト帯板、ポリウレア樹脂を用いてそれぞれ補強した場合の覆工の応力緩和効果を検証した。解析は、覆工巻厚を 5cm として実施した。検証結果を図-5 (a) に示す。どの補強工でも、覆工の応力緩和効果はほとんど見られなかった。ただし、各補強材にかかる最大主応力 (引張) については、各材料の引張強度以下であるため、補強材の効果により注入により覆工が剥落することはないと考える。図-5 (b)

5. まとめ

在来線トンネルの覆工調査結果より、解析モデルを作成し、3次元 FEM 解析にて安全な裏込め注入工法を検証した。所定の巻厚が確保可能であれば、安全に施工可能であることが分かった。一方で、許容値を超過する条件下においても、内面補強工を併用することで覆工の剥落を防止できることが分かった。

参考文献

1) 鉄道総合技術研究所：既設トンネル近接施工対策マニュアル，1995。

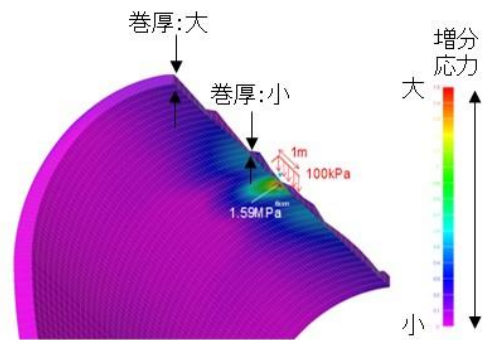


図-3 発生増分応力コンター

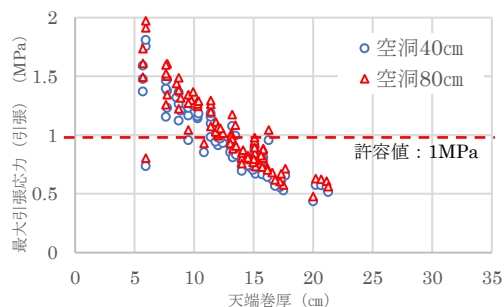
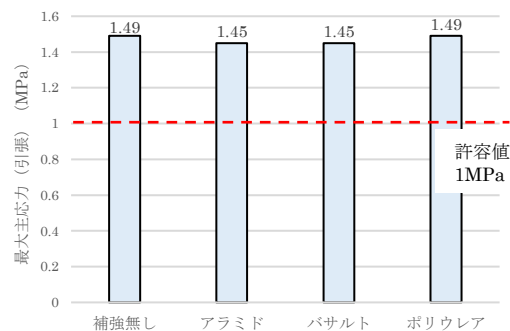


図-4 最大主応力 (引張) と天端巻厚の関係

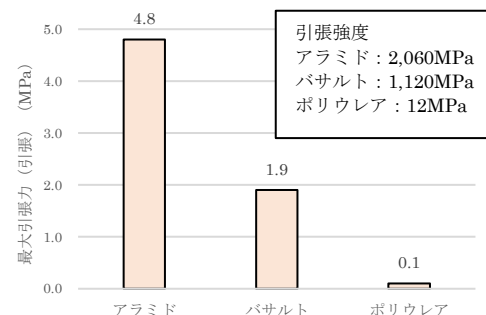
表-1 主応力の平均値 μ ，標準偏差 σ

空洞 40 cm	巻厚 15cm 程度	巻厚 20cm 程度
巻厚範囲	13.5~16.5cm	20.0~21.1cm
最大主応力平均値 μ	0.76MPa	0.54MPa
標準偏差 σ	0.07MPa	0.06MPa
$\mu+3\sigma$	0.96MPa	0.71MPa

空洞 80 cm	巻厚 15cm 程度	巻厚 20cm 程度
巻厚範囲	13.5~16.5cm	20.0~21.1cm
最大主応力平均値 μ	0.82MPa	0.58MPa
標準偏差 σ	0.08MPa	0.06MPa
$\mu+3\sigma$	1.05MPa	0.77MPa



(a) 覆工の最大主応力 (引張)



(b) 補強材の最大主応力 (引張)

図-5 補強工施工時の各主応力