

地山強度の経時的低下を考慮したトンネルの変状予測と補強工種による変位抑制効果の評価

長崎大学工学部 学生員 杉本奈菜 学生員 川田晶仁
 長崎大学工学部 フェロー会員 棚橋由彦 正会員 蔣 宇静

1. はじめに

わが国の国土に建設されている道路トンネルや鉄道トンネルといった岩盤構造物は、少なからず覆工に地圧を受けるような地質条件に立地されている。覆工に作用する地圧には、作用する地圧そのものが長期にわたるため突発的な損傷は少なく、変状が時間とともに進展していくという特徴を有する塑性圧というものがある。また、覆工自体の劣化もトンネル安定にダメージを与える。このような状況から、変状発生 の程度、補修の必要性、その部位などを維持管理段階で精度よく予測することが重要であるといえる。

本研究は、時間の経過に伴い地山強度が低下する挙動モデルを用いたトンネル変状解析を行い、得られた結果に基づいて補強工の効果を明らかにする。

2. 地山の強度低下モデル

トンネルに見られる大変形は、岩盤の骨格構造の劣化（応力腐食）に伴う進行性破壊に起因すると考え、里・亀村ら¹⁾は、時間の経過に伴い岩石強度が低下する地山の強度低下モデルを式(1)のように表した。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dc}{dt} &= -\lambda R \quad (R < 1.0) \\ \frac{dc}{dt} &= -\lambda \quad (R = 1.0) \end{aligned} \right\} (1)$$

ただし、 $R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \cos \phi + \sin \phi (\sigma_1 + \sigma_3)}$

ここで、 R は Mohr-Coulomb 降伏条件に対する応力状態の接近度を、 λ は強度低下速度を表している。強度低下速度に関しては、強度が 50 年後に初期強度の 3 割程度に低下するように 0.014MPa/year と仮定した。

3. 解析モデルの概要および解析ケース

図 - 1 に本研究に用いた解析モデルを示す。これは、一般的な軟岩に施工された土被り 100m の道路トンネルを想定したものである。ここで、掘削による切羽付近の 3 次元効果を考慮するため、無支保で 95% 応力解放した後に覆工・インバートコンクリート（弾性係数 2.35×10^4 MPa、厚さ 60cm）を施し、残り 100% まで応力解放した。地山は日本道路公団の D クラス程度の軟岩を想定してモデル化している。解析ケースの一覧を表 - 1 に示す。

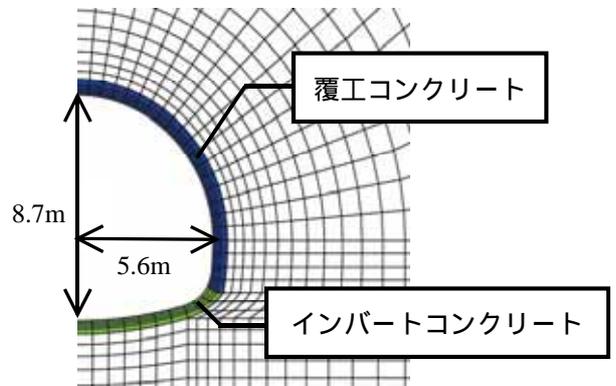


図 - 1 解析モデル（掘削時）

表 - 1 解析ケースの一覧

補強工	供用後補強時期	解析ケース
無し		N
内巻工	10年後	L10
	20年後	L20
	30年後	L30
ロックボルト補強工	10年後	R10
炭素繊維シート工法	10年後	C10
鋼板接着工法	10年後	S10

4. 強度低下を考慮したトンネル変状解析

4.1 経年変化に伴う塑性領域の進展

経年変化に伴う塑性領域の進展の様子を図 - 2 に示す。(a) のケース N の場合、時間の経過と共に塑性領域は徐々に進展している。塑性領域の進展に伴い、トンネルに変状が生じ、覆工表面における変位も増加する。(b) において各補強工を施した際の塑性領域の進展を比較すると、ケース R10 については塑性領域の進展が抑制されたが他の 3 ケースでは、ほぼ塑性領域の変化は見られなかった。これは、ロックボルト補強工が地山に打設する工法であるのに対し、他の 3 工法は覆工表面にのみ打設するため、塑性領域に対する抑制効果があ

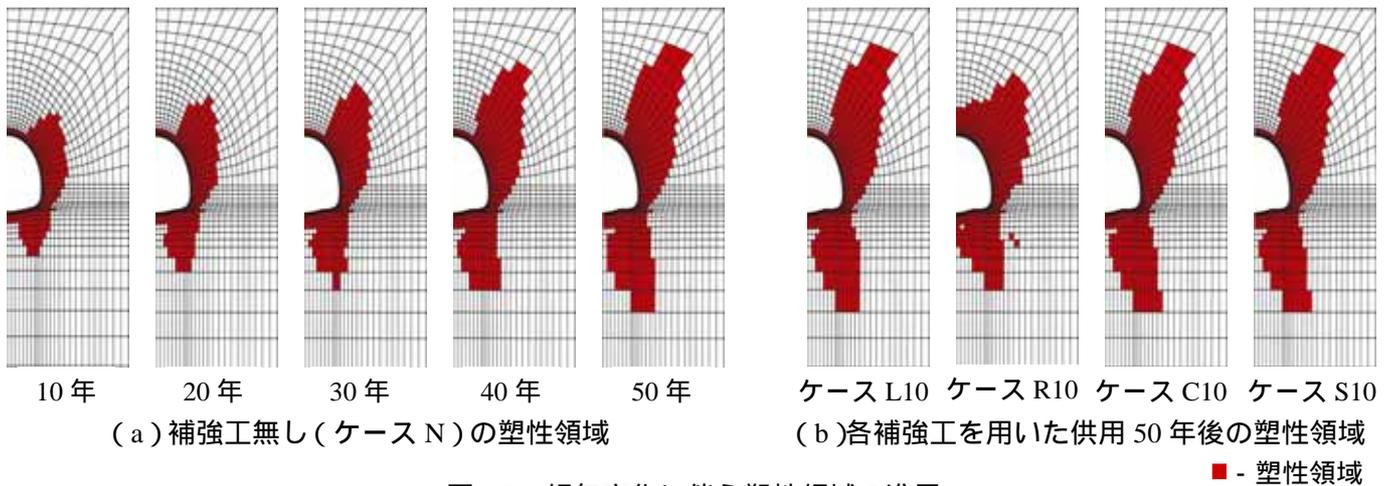


図 - 2 経年変化に伴う塑性領域の進展

まり顕著でなかったと考えられる。

4.2 各補強工における変状解析の結果

補強時期の相違による補強効果の把握を目的として、補強時期が異なる場合の覆工表面における変位の相違を比較する。まず、図 - 3 に内巻工（厚さ 20cm）の補強時期の相違による内空変位の比較を示す。図の縦軸は、無次元化した内空変位 $U (=u/(D^2/E))$ である。ここで、 u は内空変位、 E は地山の变形係数、 γ は単位体積重量、 D はトンネルの内空幅を表す。補強無しの場合 50 年後には無次元化内空変位が約 2.0 生じるのに対し、10 年後に内巻工を施すことで無次元化内空変位を約 2 割抑制している。

他の工法においても、補強時期の相違による補強効果（図 - 4）は、変位の抑制の程度に違いはあるものの、内巻工と同じ傾向が見られた。よって、今回選定した 4 種の工法において、より早い時期に施工することで変位を効果的に抑制することを今回利用したモデルにより再現できたと考えられる。

図 - 4 より、最も変位の抑制効果が明らかなのは内巻工であることが分かる。次いで、ロックボルト補強工²⁾に関しては、内巻工より塑性領域の進展が抑制されているにもかかわらず、ロックボルトに主として引張応力が作用しているため、変位に対する抑制効果が内巻工より劣っている。鋼板接着工法（厚さ 1cm）について、塑性領域の進展は内巻工の場合と大きな違いは見られなかったが、内巻工と鋼板補強工との基本的性質の違いにより、補強効果が内巻工ほど表れなかった。炭素繊維シート工法（厚さ 0.2cm）に関しては補強無しのケースとほぼ同じ変位が生じてしまうため変位抑制効果は期待できないことが分かった。

5. おわりに

本解析では、取り上げた 4 種の補強工法とも補強時期が早いほど塑性領域の広がりを抑制することができるため、内空変位も抑制できることが分かった。今後は、裏込め注入工による補強効果も検証する。また、コスト面にも着目することでより有効な補強工について検討していく。

[参考文献] 1) 里優, 竹田直樹, 亀村勝美: 強度の時間依存性に着目した岩盤の解析, 第 18 回土質工学研究発表論文概要集, pp.817-820, 1983; 2) (財) 鉄道総合技術研究所: 変状トンネル対策工設計マニュアル, pp.89-96, 1988

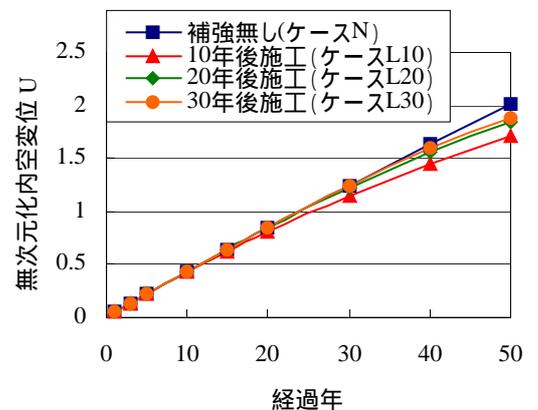


図 - 3 内巻工による内空変位の比較

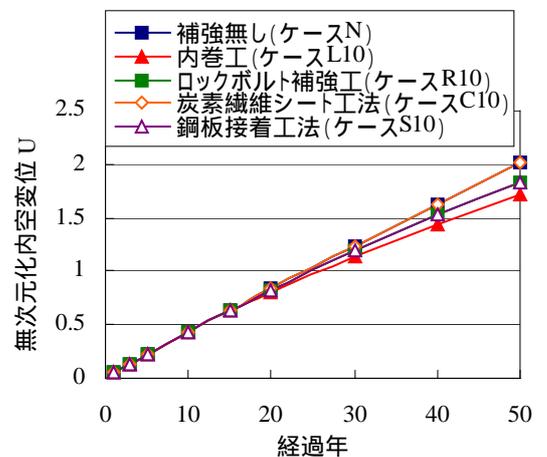


図 - 4 各補強工の内空変位の比較