

二次覆工の建設順序を考慮したシールドトンネルの劣化時挙動に関する一考察

日本電信電話株式会社	正会員	○ 松本安弘
日本電信電話株式会社	正会員	石川琢也
日本電信電話株式会社	非会員	出口大志

1. はじめに

一般的にシールドトンネルの設計では、初期の土圧・水圧はすべて一次覆工が受け持つと仮定し、二次覆工には構造性能を期待しない。これは、建設時の構造計算としては合理的だと考えられるが、その後の維持管理における構造性能評価時には、二次覆工も一次覆工と共同で荷重に抵抗すると考える方が自然である。このような考え方にに基づき、RC セグメントのトンネルを対象とした研究が、村上、小泉¹⁾や高松²⁾などにより、また鋼製セグメントのトンネルを対象とした研究が、柳瀬ら³⁾、松本ら⁴⁾などにより行われた結果、二次覆工完成後にトンネルに作用する近接施工による荷重や、地下水位の上昇などによる経年的な外力の変化に対しては、二次覆工を有するシールドトンネルの挙動が明らかになりつつある。

一方で、一次覆工の構造性能が劣化により低下し、完成時に比較してトンネルの変形が進行した場合にも、二次覆工は一次覆工と共同で荷重に抵抗すると考えられる。従って合理的な維持管理のためには、一次覆工劣化時の二次覆工の構造性能への寄与の考慮が重要となる。これまでに、その寄与の評価は行われているが⁵⁾、すべての外力に対して一次覆工と二次覆工とで共同で抵抗するとして構造計算しており、二次覆工の寄与を過大評価している恐れがある。なぜなら、外力が変化していないと仮定すれば、シールドトンネルの建設順序を考慮すると、図1のように、二次覆工にははじめ応力は生じず、一次覆工の構造劣化に伴うトンネルの変形により一次覆工から伝達される荷重によってのみ二次覆工に応力が生じると考えられるためである。

本稿では、セグメントの構造性能劣化による二次覆工の構造性能への寄与の変化の定量化を目的とした、単純な仮定のもとで実行可能な一次覆工の劣化時の横断方向の挙動のシミュレーション方法を提案する。また、提案手法を用いた、通信用のトンネルとして用いられている構造形式を例とした数値計算結果を報告する。

2. 提案手法

本提案手法で用いた仮定を列挙すると、次の通りとなる。

1. トンネルに生じる変形は微小とし、トンネルの変形には、荷重に関する重ね合わせの原理が成り立つ。
2. 一次覆工は天井部、インバート部など場所によらず、一様に構造性能が低下する。
3. 一次覆工が劣化したときトンネルの変位量は、構造性能が低下した一次覆工のみで外力の一部に抵抗して生じる変位量と、構造性能が低下した一次覆工と二次覆工とで共同して残りの外力に抵抗して生じる変位量との和である。
4. 二次覆工には、ひび割れ等の構造性能を低下させる劣化は生じない。

このとき、地中のトンネルに作用する外力 f を、構造性能が低下した一次覆工のみで負担する割合 p ($p \geq 0$) と、構造性能が低下した一次覆工と二次覆工とで共同して負担する割合 $(1-p)$ とを用いて、 $f = pf + (1-p)f$ と分布形状はそのままに分割する。

この割合 p は、外力 f によって生じる、完成時のトンネルの代表変位量 $U_{S_0}(f)$ と、一次覆工の構造性能が n % 低下した状態の代表変位 $U_{S_n}(pf)$ とが等しくなるように、重ね合わせの原理を用いて、 $p = \frac{U_{S_0}(f)}{U_{S_n}(f)}$ と定めた。ここに、代表変位量 U には、トンネルの鉛直方向と水平方向との直径変位量の和を用いた。

この割合 p と仮定3を用いると、一次覆工の構造性能が n % 低下した際のトンネルの任意箇所の変位 u_n は、

$$u_n = u_{S_n}(pf) + u_{S_n+C}((1-p)f) = pu_{S_n}(f) + (1-p)u_{S_n+C}(f) \quad (1)$$

と計算できる。注意として、下付き文字の S_n は、構造性能が n % 低下した一次覆工で、 $S_n + C$ はそれに二次覆工を含めた構造で外力に抵抗することを表している。

キーワード：シールドトンネル、二次覆工、劣化

連絡先：〒305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1 Tel 029-868-6240 Fax 029-868-6259

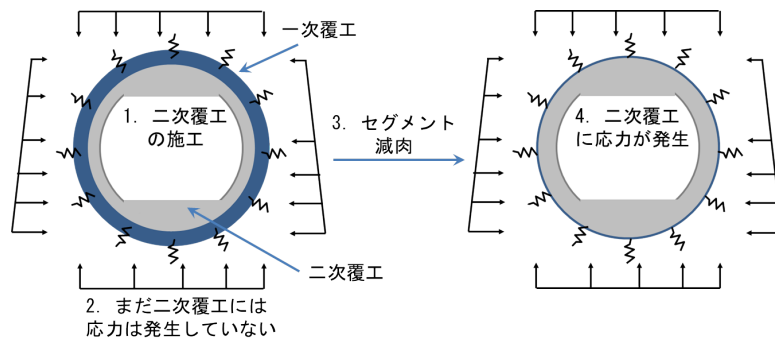


図-1 劣化により二次覆工に応力が生じるタイミング

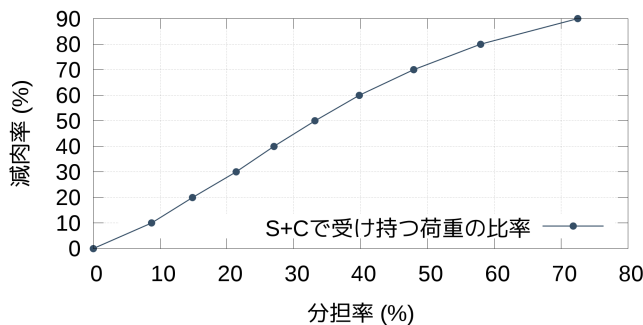


図-2 一次覆工減肉時の荷重分担率

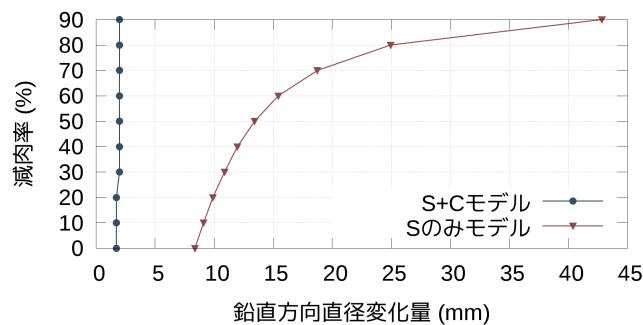


図-3 一次覆工減肉時の鉛直方向直径変化量

3. 数値計算結果

土被り約 27 m，地下水位が地表面から -2.5 m，外径約 3 m の，通信用を想定した鋼製セグメントに無筋コンクリートの二次覆工が施された形式のシールドトンネルに，式 (1) を適用した結果を図 2，図 3 に示す．なお，数値計算にははりばね計算法を用い，モデル化にあたっては，セグメントリングは千鳥組による隣り合うリングからの影響を考慮した．また外力は全土圧，側方土圧係数は 0.4，地盤反力は Winkler の仮定に従う地盤ばねでモデル化し，その地盤反力係数は $4 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ とした．

鋼製セグメントの減肉率に対する，二次覆工を含めた構造 (S+C) を示した図 2 より，セグメントが 40 % 減肉した際には，二次覆工を含めた構造は 3 割以下の外力しか負担しないことがわかる．ただし，図 3 に示した減肉率ごとの直径変化量からは，二次覆工を含めた構造は，一次覆工のみの構造に比較して，ほとんど変位が生じていないことがわかるが，これは二次覆工の断面剛性の高さが原因と考えられる．

4. おわりに

本稿では二次覆工を有するシールドトンネルについて，その一次覆工の構造性能が劣化により低下した際に，重ね合わせの原理に基いて二次覆工の構造性能への寄与を定量的に評価する方法を提案した．提案手法を用いることで，鋼製セグメントが単純に減肉する際の二次覆工の荷重分担率を評価し，一例ではあるが数値計算により，一次覆工の構造性能が 40 % 低下したときでも，二次覆工は 3 割以下の外力にしか抵抗しないことを示した．本手法の利点として，二次覆工のひび割れなどの構造的な変化への対応が容易であることが挙げられる．ただし本稿では二次覆工ひび割れを考慮した検討は未実施であり，また本手法による評価結果の妥当性の検討が不十分であることに課題を残しているため，今後これらの未実施事項や課題の解決に取り組む予定である．

参考文献

- 1) 村上傳智，小泉淳．二次覆工で補強されたシールドセグメントリングの挙動について．土木学会論文集，1987.
- 2) 高松伸行．二次覆工されたシールドトンネルの軸方向解析モデルに関する研究．早稲田大学博士学位論文，1994.
- 3) 柳瀬辰彦，児玉守広，斉藤正幸，加藤教吉．シールド洞道二次覆工の評価手法に関する実験について (その 3)．土木学会第 45 回年次学術講演会論文集，1990.
- 4) 松本安弘，出口大志，川端一嘉．二次覆工を有するシールドトンネルのひび割れのモデル化に関する実験および数値的考察．土木学会第 71 回年次学術講演会論文集，2016.
- 5) T.Sudo, T.Ishikawa, R.Hirasawa, H.Hoshino and A.Koizumi. An Experimental Study on the Maintenance and Repair of Communication Cable Tunnels Constructed by Shield Tunneling Method. Proceedings of the 2014 IALCCE Conference, Japan, 2014.