

トンネル周辺の水圧分布の変化を考慮した 海底トンネルの健全度評価に関する研究

京都大学大学院 学生会員 ○丹生和宏
京都大学大学院 正会員 西藤潤
京都大学大学院 フェロー会員 田村武

1. 目的

本研究の対象となる青函トンネルは、海面下 240m に位置し、最大 $240 \times 9.8 [\text{kN/m}^2]$ の水圧が作用する。さらに、自由に湧き出る浸透水もあるため、そのまま掘削することは不可能に近かった。そこで、施工前には、薬液注入により地山の透水性を低下させ、湧水量を軽減する方法がとられた。

一方、トンネル完成後においては、透水環境の変化によるトンネル周辺の力学諸量の推移の把握が重要となる。実際に、坑内湧水量は、供用開始から 2, 3 割減少しており、トンネル周辺の透水係数の低下が原因と考えられる。透水性の低下により、トンネル周辺の水圧分布が変化し、場合によっては大きな水圧がトンネル覆工に直接作用する状態も想定される。

本研究では、簡単なモデルを用いた数値解析により、トンネル周辺で起こる現象の予測を試みた。具体的には、弾性有限要素法を用いて種々の間隙水圧分布を設定して解析を行い、トンネル周辺での有効応力分布を求め、力学的な健全性評価を行った。

2. 二次元弾性有限要素法による定式化

本研究では、二次元平面ひずみ問題を扱い、4 節点アイソパラメトリック要素を用いる。

(1) 浸透流解析

間隙水圧分布を求めるため、連続式 (1) を支配方程式とする。ここで v_i は流速を表している。

$$v_{i,i} = 0 \quad (1)$$

式 (1) に仮想全水頭 $\tilde{h}$ を乗じて面積分すると式 (2) が得られる。

$$\int_s v_{i,i} \tilde{h} dS = 0 \quad (2)$$

式 (2) を Gauss の発散定理を用いて整理すると式 (3) が得られる。

$$\int_c v_i n_i \tilde{h} dc = \int_s v_i \tilde{h}_{,i} dS \quad (3)$$

式 (3) をもとに定式化を行う。

(2) 浸透流のある問題の変形解析

浸透流の影響のみを考慮した二次元有限要素法による変形解析の定式化について説明する。この場合のつりあい式は以下の式 (4) で表すことができる。

$$\sigma'_{ij,j} + p_{,i} = 0 \quad (4)$$

式 (4) を支配方程式として、仮想変位 $\tilde{u}_i$ を乗じて面積分すると、式 (5) が得られる。

$$\int_s (\sigma'_{ij,j} + p_{,i}) \tilde{u}_i dS = 0 \quad (5)$$

Gauss の発散定理を用いて整理すると、以下の式 (6) が得られる。

$$\int_s (\sigma'_{ij} + p \delta_{ij}) \tilde{\varepsilon}_{ij} dS = \int_c \sigma_{ij} n_j \tilde{u}_i dc \quad (6)$$

ここで、 $\tilde{\varepsilon}_{ij}$ は体積ひずみである。式 (6) をもとに定式化を行う。

3. 解析手法

本研究で用いる係数について説明する。

- 応力解放率 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$: 地盤応力のうち、掘削直後に解放される分の割合
- 水圧解放率 $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$: 静水圧のうち、掘削直後に解放される分の割合
- 覆工背面水圧係数 $\gamma (0 \leq \gamma \leq 1)$: トンネル完成後から長期間経過後に覆工背面に作用する水圧の大きさを表す係数。静水圧 p_0 に乗じて用いる。

解析は (i) 掘削時、(ii) 覆工完成直後、(iii) 覆工完成後長期間経過した状態及び (iv) 剥離が発生した状態の四段階に分けて行う。各段階において浸透流解析、変形解析の両方を行う。二つの解析は非連成であるが、浸透流解析の結果は変形解析に用いる。本研究では、 $\alpha=0.5$, $\beta=0.5$ の場合及び $\alpha=1.0$, $\beta=1.0$ の場合について考える。

覆工は不透水性弾性体とし、覆工の Young 率は地山の 100 倍とした。また、問題の簡易化のため、地山の透水係数を一定にし、注入域は設けていない。

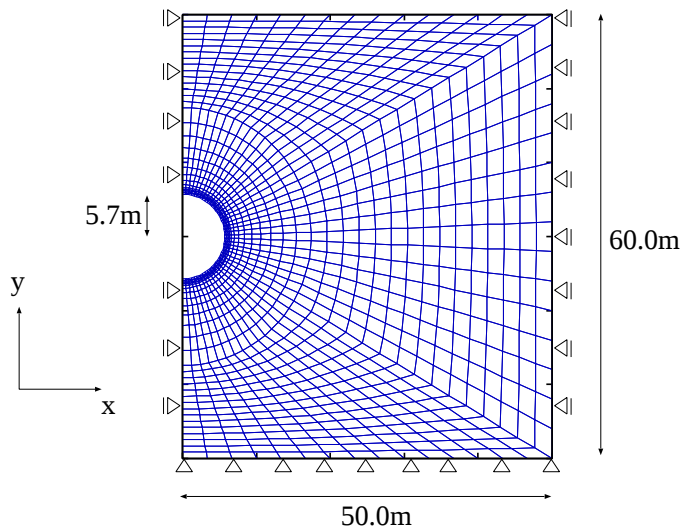


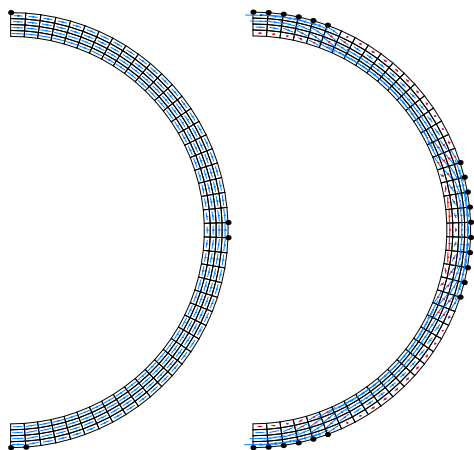
図-1 解析モデル

4. 解析結果と考察

本研究では、図1のようなモデルを用いて解析を行った。覆工の厚さは70cmである。

(1) $\alpha = 0.5, \beta = 0.5$ の場合

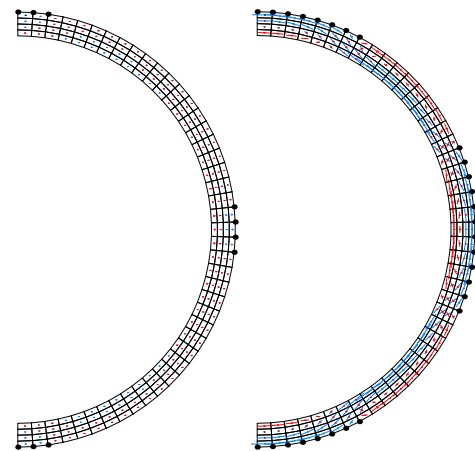
掘削時に地盤応力及び初期水圧が50%ずつ解放された場合、覆工完成後長期間経過時において $\gamma = 0.7$ 、つまり覆工背面での水圧が静水圧の約70%を越えると剥離が生じるおそれがあることが明らかとなった。また覆工背面での水圧が大きくなるほど剥離箇所が増え、その箇所から水圧が覆工に直接作用し、曲げによって大きな引張り応力が生じる。(図2参照、黒点：剥離箇所)

図-2 覆工の主応力図 (左： $\gamma=0.7$ ，右： $\gamma=1.0$)

(2) $\alpha = 1.0, \beta = 1.0$ の場合

掘削時に地盤応力及び初期水圧が完全に解放された場合、覆工完成後長期間経過時において $\gamma = 0.1$ のとき、つまり覆工背面での水圧が静水圧の約10%ほどで剥離を生じるおそれがあることが判明した。また覆工

背面での水圧が大きくなると、 $\alpha = 0.5, \beta = 0.5$ の場合と比して剥離箇所が増え、水圧が直接作用する範囲が広まった分、覆工により大きな引張り応力が広範囲に生じている。(図3参照、黒点：剥離箇所)

図-3 覆工の主応力図 (左： $\gamma=0.1$ ，右： $\gamma=1.0$)

5. 結言

本研究は応力解放率、水圧解放率及び覆工背面水圧係数を用いて算出した覆工に発生する有効応力から、トンネルの健全度を評価しようと試みたものである。具体的には、覆工に引張り応力が生じるか否かを基準とし、引張りが生じる場合を危険側として判断した。以下に本研究で得られた結論について記す。

- 覆工背面での水圧が大きくなるにつれて剥離が起こるおそれが高まる。現在の状況を的確に把握するため、覆工背面での水圧を測定する必要がある。
- 掘削時に初期応力及び静水圧が解放される割合が大きいほど覆工に引張り応力が生じやすくなる。ただし、解放率の真の値は不明であるため、幾通りかの場合に分けて検討する必要がある。
- 剥離が生じ、その部分に大きな水圧が作用すると、曲げの影響により覆工に大きな引張り応力が生じ、トンネルは不安定な状態になる。覆工背面での水圧上昇を防ぐため、覆工背面での導水機能低下を防ぐ必要がある。

参考文献

- 1) 足立紀尚，田村武．高圧湧水下のトンネル工における水抜孔の効果と注入域の適正規模．土木学会論文報告集，第280号，pp.87-98，12 1978.
- 2) 日本鉄道建設公団，(財)防災研究協会．青函トンネル海底部のトンネル内空断面測定結果の解析及び評価(その2)報告書．3 1995．
- 3) 土谷幸彦，倉川哲志，工藤健，小西真治，小島芳之，東畑郁生．海底トンネルの覆工の長期挙動と評価に関する研究海底トンネルの付句稿の長期挙動と氷害に関する研究．土木学会論文集 C，Vol.63, No.3, pp.825-834, 9 2004