

I-533

シールドトンネルの耐震解析手法に関する提案

大成建設(株)	正員	志波由紀夫
建設省土木研究所	正員	川島 一彦
同 上	正員	大日方尚巳
同 上	正員	加納 尚史

1. まえがき

シールドトンネルの設計に際しては、地震による影響について十分な検討を加えることが要求されるが、現在のところシールドトンネルが大規模な地震を経験した事例は少なく、また、地震の影響に関する経験的な知見が十分に得られていないことなどから、具体的な耐震設計法は未だ整備されていないのが実情である。

本文は、このような観点から、シールドトンネルの力学的特性を考慮した合理的で実用性のある耐震設計法を確立することを目的として、シールドトンネルの長手方向の耐震性を評価するための簡便な解析手法を提案するものである。

2. シールドトンネルの耐震解析手法の概要

シールドトンネルの長手方向の耐震解析を行うに際し、以下に示すような解析手法を用いた。^{1), 2)}

① シールドトンネルは口径が数 m ～10数 m の円環断面を有する線状地中構造物であり、周辺地山は比較的軟弱な場合が多い。このような形態の特徴は、一般の埋設管や沈埋トンネル等に共通するところであり、シールドトンネルの地震時の挙動も基本的にはこれらの構造物の挙動に類似していると考えられる。そこで、地震時の挙動を解析するための手法としては、応答変位法の考え方を基本とした。

② シールドトンネルの本体である覆工は、多数のセグメントをボルト等で組立てた不連続な構造である。これをモデル化するために、まず、図-1および図-2に示すように、セグメントリング・リング継手系の覆工構造(本検討では2次覆工を考慮していない)について、トンネル長手方向の荷重～変形関係を導いた。次に、これと同一の関係となるような梁の剛性を等価剛性と定義して、シールドトンネル覆工を、等価剛性を有する一様連続な梁に置換した。ここで定義された等価軸圧縮剛性 $(EA)_{eq}^c$ 、等価軸引張剛性 $(EA)_{eq}^T$ および等価曲げ剛性 $(EI)_{eq}$ は、覆工諸元より、以下のように表わされる。

$$(EA)_{eq}^c = Es \cdot As \quad \text{----- (1)}$$

$$(EA)_{eq}^T = \frac{Es \cdot As}{Es \cdot As / \ell_s / K_J + 1} \quad \text{----- (2)}$$

$$(EI)_{eq} = \frac{\cos^3 \varphi}{\cos \varphi + (\pi / 2 + \varphi) \cdot \sin \varphi} \cdot Es \cdot Is \quad \text{--- (3)}$$

ここに、 Es , As , Is ; ℓ_s : セグメントリングのヤング率、断面積、断面2次モーメント, リング長

K_J : 断面内リング継手全体の引張バネ定数

φ : 中立軸位置を x 、セグメントリングの図心半径を r とすると、 $\varphi = \sin^{-1}(x/r)$ で、次の方程式の解である。

$$\varphi + \cot \varphi = \pi \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{K_J}{Es \cdot As / \ell_s} \right) \quad \text{----- (4)}$$

上に示した等価曲げ剛性は、リング継手の存在により、セグメントリング単体の曲げ剛性 $Es \cdot Is$ よりも小さくなる。その低減率は、リング継手とセグメントリングの剛性比

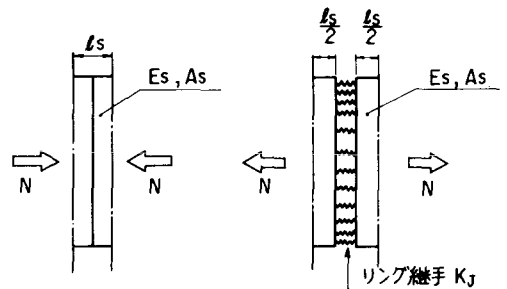


図-1 覆工の軸剛性の評価

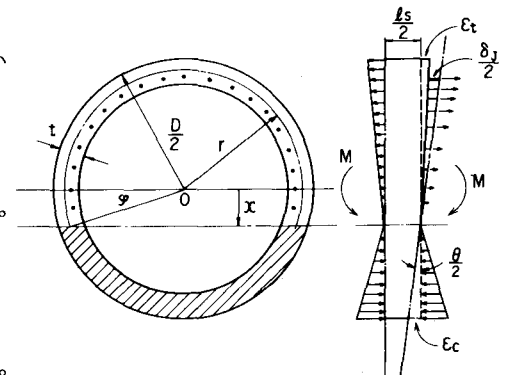


図-2 覆工の曲げ剛性の評価

$K_J / (E_s \cdot A_s / l_s)$ によって決まり、図-3に示すような関係となる。なお、同図には比較のため、既往の曲げ剛性の算定法^{3),4)}による結果も併記した。

3. 地震時断面力の算定

地震時にシールドトンネル覆工に生ずる断面力の大きさは、弾性床土上の梁に正弦波状の地盤変位が作用する場合に生ずる応力として求めることとした。

まず、軸力の算定に際しては、覆工の等価軸剛性が引張と圧縮とで異なることを考慮して、弾性床土上の梁に関する微分方程式を解いた。その結果、軸力の大きさも引張と圧縮とで異なり、それぞれを N_T, N_c と記すと、一般の線状地中構造物の場合の断面力算定式⁵⁾と同様に、次式で算定することができる。

$$\left. \begin{matrix} N_T \\ N_c \end{matrix} \right\} = \alpha_N \cdot \frac{\pi \cdot (EA)_{eq}^c}{L} \cdot U_h \cdot \begin{cases} \beta_T \\ \beta_c \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{ただし、} \alpha_N = \frac{1}{1 + (2\pi/L'\lambda_c)^2}, \quad \lambda_c = \sqrt{\frac{k_1}{(EA)_{eq}^c}}$$

ここに、 L ：地震動の波長、 $L' = \sqrt{2} \cdot L$

U_h ：トンネル位置における地盤の水平変位

k_1 ：トンネル軸方向の地盤バネ定数

β_T, β_c ：引張力、圧縮力に対する係数であり、覆工の引張剛性と圧縮剛性の比 $(EA)_{eq}^T / (EA)_{eq}^c$ および特性値 $L' \cdot \lambda_c$ によって、図-4に示すような値をとる。

次に、等価曲げ剛性は曲げモーメントの作用方向によらないため、曲げに対するトンネルの挙動は一般の線状地中構造物の場合と変わらないことになる。したがって、地震時にシールドトンネルに生ずる曲げモーメントの大きさは、覆工の等価曲げ剛性を用いることにより、次式で算定することができる⁵⁾。

$$M = \alpha_M \cdot \frac{4\pi^2 \cdot (EI)_{eq}}{L^2} \cdot U_h \quad (6) \quad \text{ただし、} \alpha_M = \frac{1}{1 + (2\pi/L\lambda_M)^4}, \quad \lambda_M = \sqrt[4]{\frac{k_2}{(EI)_{eq}}}$$

ここに、 k_2 はトンネル軸直角方向の地盤バネ定数である。

4. あとがき

シールドトンネルの長手方向の耐震性を評価するための実用的な解析手法を提案した。本解析手法は、一般の線状地中構造物の耐震設計に広く用いられている解析手法において、シールドトンネル覆工の力学特性を加味したものであり、地震時の断面力の大きさを簡便に算出することができることに特長がある。また、トンネルのモデル化手法を動的応答解析に応用する場合には、解析上の要素数を節約できる利点もある。

今後は、2次覆工が有る場合の解析手法等について、検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 川島、大日方、志波、加納：応答変位法によるシールドトンネルの耐震解析法，土木技術資料，Vol.28，No.5，昭和61年5月
- 2) 川島、大日方、志波、加納：シールドトンネルの耐震性に関する研究——（その1）シールドセグメントの等価剛性の評価および応答変位法の適用——，土木研究所資料，第2262号，昭和60年10月
- 3) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，昭和54年
- 4) 国土開発技術研究センター：トンネル耐震継手技術基準（案），昭和54年
- 5) 建設省：新耐震設計法（案），昭和52年

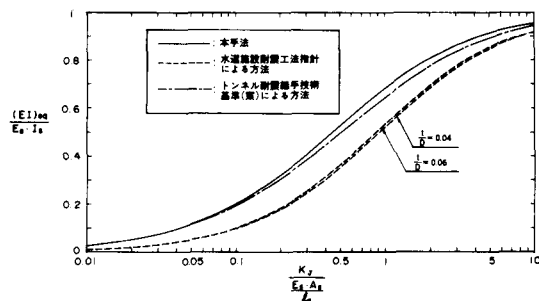


図-3 覆工の等価曲げ剛性

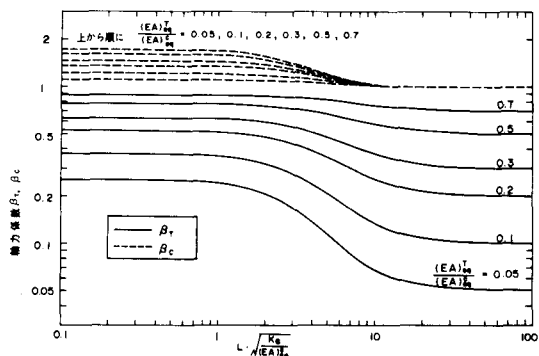


図-4 軸力係数