

I-595

応答変位法によるシールドトンネル横断面の耐震計算法

大成建設(株) 正会員 志波由紀夫
同上 正会員 岡本 晋

1. はじめに

均質地盤中にあるシールドトンネルの横断面内に生ずる地震時応力の簡便な計算法を提案する。この計算法は応答変位法の手法に基づいており、トンネル横断面を弾性床土上のリングにモデル化し、これに地盤の地震動変位およびせん断応力を作用させた場合に発生する地震時応力の厳密解を求めた。さらに、厳密解の中の高次の微小項を除き、地震時応力の近似計算式を導いた。

2. シールドトンネル横断面の耐震計算法

図-1に示すように、シールドトンネルが均質な単層地盤中にある場合を対象とした。耐震計算手法としては、応答変位法の手法を適用してトンネル横断面を図-2に示す「弾性床土上のリング」にモデル化し、覆工に生ずる地震時応力の解析解を求めることとした。ここで仮定した条件等は、以下のとおりである。

- ①覆工を剛性一様なリングとみなし単位奥行きで考える。
- ②リングの挙動は「曲がりばり」の理論に従うものとする。
- ③リングには地盤の変位および地盤内に生ずるせん断応力を作用させる。
- ④地盤と覆工との間の相互作用は、リングの円周に沿って Winkler 型のばねを法線方向および接線方向に分布させて考慮する。
- ⑤地盤の震動変位は、基本固有振動モードで深さ方向に正弦分布すると仮定する。
- ⑥トンネルの存在による地盤震動の乱れは考慮しない。
- ⑦地盤およびリングの非弾性的挙動は考慮しない。

トンネル横断面に生ずる変位と応力は、弾性床土上のリングに関する6階の常微分方程式を解くことにより求まる^{1),2)}。この微分方程式の厳密解は、第1種ベッセル関数の級数を含むやや複雑な式となる²⁾。

3. 地震時応力の近似計算式

厳密解における高次の微小項を除くと、以下に示す地震時応力の近似計算式が得られる。

$$M_{max} = \frac{3\pi \cdot E \cdot I}{2R \cdot H_g} \cdot U_h \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_g}\right) \cdot C \quad Q_{max} = \frac{3\pi \cdot E \cdot I}{R^2 \cdot H_g} \cdot U_h \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_g}\right) \cdot C$$

$$N_{max} = \frac{\pi \cdot E \cdot I}{2R^2 \cdot H_g} \cdot U_h \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_g}\right) \cdot \left\{ (12 + B_n) \cdot C - \frac{B_n}{2} - B_G \right\}$$

$$\text{ただし、} C = \frac{2B_n + B_s + 6B_G}{36 + 4B_n + B_s}, \quad B_n = \frac{k_n \cdot R^4}{E \cdot I}, \quad B_s = \frac{k_s \cdot R^4}{E \cdot I}, \quad B_G = \frac{G \cdot R^3}{E \cdot I}$$

ここに、 M_{max} 、 Q_{max} 、 N_{max} は覆工の曲げモーメント、せん断力、および軸力の最大値である。また、 H_g :地盤の層厚、 H :トンネル中心の深度、 R :覆工リングの図心半径、 E :覆工の弾性係数、 I :覆工の断面2次モーメント、 G :地盤のせん断弾性係数、 k_n 、 k_s :リング~地盤間の法線方向および接線方向の相互作用ばね定数、 U_h :地表面での変位振幅。

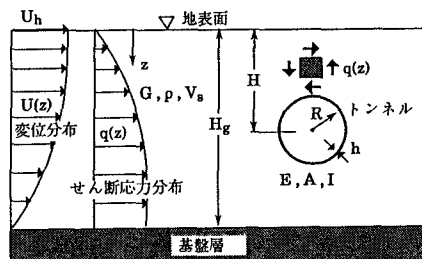


図-1 検討対象(均質地盤中のシールドトンネル)

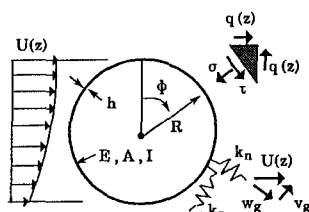


図-2 解析モデル(弾性床土上のリング)

表-1 計算条件

固定した パラメーター	$E = 31 \text{ GPa}$ ($3.2 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)
	$\rho = 1.7 \text{ t/m}^3$
	$h/2R = 0.05$
変化させた パラメーター	$2R/H_g$
	H/H_g
	$V_s \text{ (m/s)}$
従属させた パラメーター	$A = h \cdot l$
	$I = h^3 \cdot l/12$
	$G = \rho \cdot V_s^2$
	$k_n = 2G/R$
	$k_s = G/R$
	$U_h = 2/\pi^2 \cdot S_v \cdot T_s$
	$T_s = 4H_g/V_s$

h : 覆工厚, A : はりの断面積 (単位幅)

地盤のせん断弾性係数 G は、地盤の密度 ρ とせん断波速度 V_s とから、 $G = \rho \cdot V_s^2$ で算定できる。また、地表面変位 U_h は新耐震設計法 (案)・共同溝設計指針等、各種の地中構造物の耐震計算法に示されている次式を用いて算定すればよい。

$$U_h = 2/\pi^2 \cdot S_v \cdot T_s$$

ここに、 T_s は地盤の基本固有周期 $= 4H_g/V_s$ 、 S_v は地震動の速度応答スペクトル値である。

図-3 は厳密解によるトンネル横断面の変形・応力分布の一例である。図-4～図-6 は、表-1 に示す条件で応力の最大値を厳密解と近似解とで比較した結果の一部である。全般に近似解は厳密解に対して小さめの値となっており、両者の比率はほぼ80～100%の値である。傾向としては、地盤が硬質なほど、トンネル深度が浅いほど、トンネル口径が大きいほど、近似解の精度が悪くなる。しかし、地震時応力の概略値を知るには十分有用と思われる。

4. あとがき

本研究は、建設省総合技術開発プロジェクト「地下空間の建設技術の開発 (地下構造物の耐震設計技術の開発) に関する共同研究」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 白木恒雄: 円弧の組合せよりなる中空断面をもつ地中埋設物の解析, 土木学会論文報告集, 第322号, pp. 1～14, 1982年6月
- 2) 志波由紀夫・岡本 晋: シールドトンネル横断面内に生ずる地震時応力に関する考察, 第8回日本地震工学シンポジウム, 1990年12月、投稿中

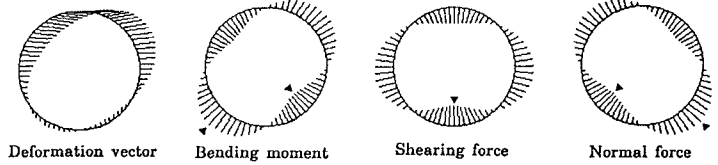


図-3 トンネル横断面の変形と応力 (厳密解)
($2R/H_g = 0.2$, $H/H_g = 0.5$, $V_s = 150 \text{ m/s}$)

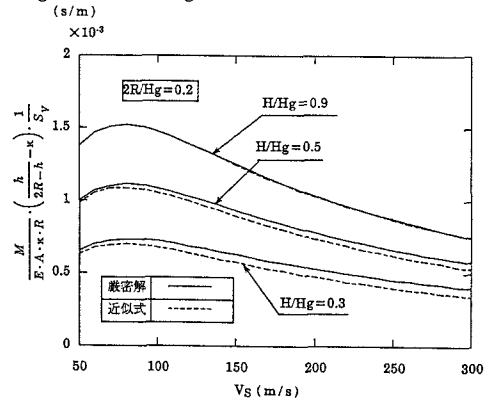


図-4 厳密解と近似解の比較 (曲げモーメント)

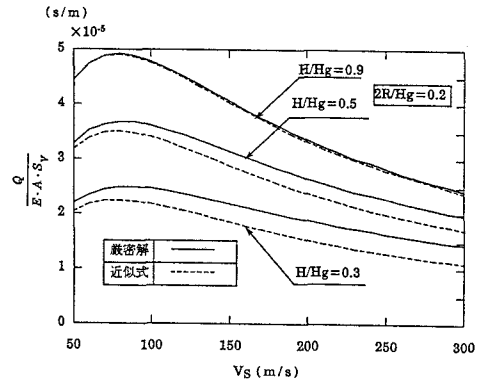


図-5 厳密解と近似解の比較 (せん断力)

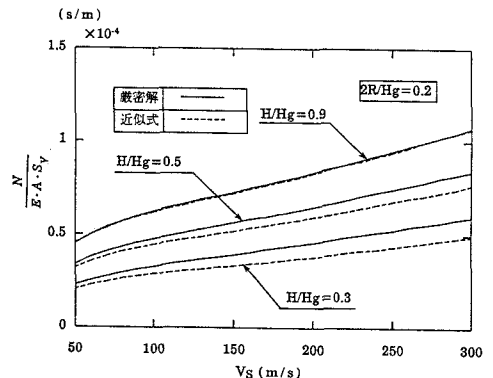


図-6 厳密解と近似解の比較 (軸力)