

円筒殻理論を用いたトンネル支保工曲線について

北海道大学大学院工学研究科 フェロー ○三上 隆
 （独）北海道開発土木研究所 正 員 佐藤 京
 （株）ドーコン 正 員 小池明夫

1. はじめに

NA TMによる支保パターンはおもに経験的な判断から設計されている．支保規模を設定する方法の1つとして特性曲線法があり，そこで用いられる一般的な支保工特性曲線は，吹付けコンクリートによる支保は長手方向に円筒シェルとしての強度を期待できるが，その影響を無視した薄肉円筒理論等から求められている．本研究では，トンネル支保構造のうち，トンネル壁面に直接作用する内圧として取り扱うことができる吹付けコンクリートおよび鋼アーチ支保工を対象とし，両者の相互作用を考慮した支保工特性曲線の検討を行ったものである．

2. 解析モデルと理論式

本研究では以下の仮定を用いる．

- ① 地山は等方均質で，初期応力状態は静水圧状態にある．
- ② トンネルの形状は円形とする．
- ③ 鋼アーチ支保の建て込間隔は一定である．
- ④ 地山と支保工の間には空隙がない．

解析モデルを図-1に示す．吹付けコンクリートによる支保は長手（トンネル軸）方向に円筒シェルとしての強度を持つものとし，等間隔（ L ）に断面積 A_s ，弾性係数 E_s なるH型鋼（幅= b ）のアーチ支保で補強された半径 r の円筒殻が内圧 P_r を受ける場合について考える．

鋼アーチ支保工部分は図-2に示す状態とし，鋼アーチ（面積= A_s ）と吹付けコンクリート部分（面積= bh_c-A_s ）でアーチ部に生じる軸力を分担するものとする．

吹付けコンクリート部分の基礎方程式は次式となる．

$$\frac{d^4 w_c}{dx^4} + 4\beta^4 w_c = \frac{P_r}{D_c} \quad (1)$$

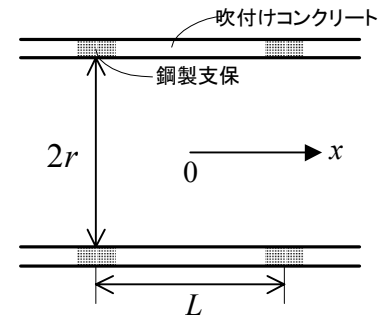


図-1 解析モデル

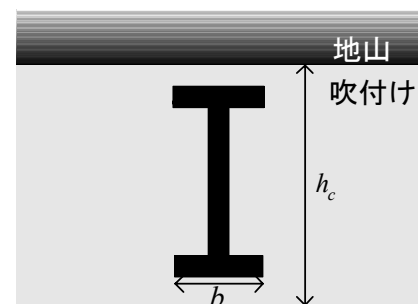


図-2 鋼製支保

ただし， w_c は半径方向変位，

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1-\nu_c^2)} \quad (2)$$

$$\beta^4 = \frac{3(1-\nu_c^2)}{(r h_c)^2} \quad (3)$$

ここで， E_c は吹付けコンクリートの弾性係数， ν_c はポアソン比， h_c は厚さである．

独立変数 x の原点を図-1に示すように中央にとると，式(1)の解は次式となる．

$$w_c = C_1 \cos \beta x \cosh \beta x + C_2 \sin \beta x \sinh \beta x + \frac{P_r r^2}{E_c h_c} \quad (4)$$

ここで， C_1 と C_2 は未定係数．

鋼アーチ支保に作用する荷重は，隣接する2つの円筒シェルからのせん断力 Q_x と支保圧 P_r である．したがってアーチ支保の半径方向変位 w_s は次式となる．

キーワード：トンネル，特性曲線，支保工曲線，支保剛性，円筒殻理論

連絡先：〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 TEL/FAX 011-706-6174

$$w_s = \frac{(2\theta_x + bP_r)r^2}{EA} \quad (5)$$

ただし,

$$\overline{EA} = (bh_c - A_s)E_c + E_s A_s \quad (6)$$

である. 境界条件は以下で与えられる.

$$\left. \frac{dw_c}{dx} \right|_{x=L/2} = 0 \quad (7.a)$$

$$w_c|_{x=L/2} = w_s \quad (7.b)$$

上式より得られる C_1 , C_2 を用いれば, 吹付けコンクリート部分 (円筒殻) の半径方向変位 w_c は次式となる.

$$w_c = \frac{rP_r}{k(x)} \quad (8)$$

ここで, 支保剛性 $k(x)$ は次式で与えられる.

$$k(x) = \frac{(E_c h_c / r)}{1 + gf(x)} \quad (9)$$

$$g = 1 - \frac{E_c h_c b}{\{E_s A_s (1 + \delta)\}} \quad (10)$$

$$\delta = \frac{(bh_c - A_s)E_c}{E_s A_s} \quad (11)$$

$$f(x) = \{(\sinh \alpha \cos \alpha - \cosh \alpha \sin \alpha) \sinh \beta x \sin \beta x - (\sinh \alpha \cos \alpha + \cosh \alpha \sin \alpha) \cosh \beta x \cos \beta x\} / d \quad (12)$$

$$d = \frac{(E_c h_c L / E_s A_s)(\cosh^2 \alpha - \cos^2 \alpha)}{\alpha(1 + \delta)} + \cosh \alpha \sinh \alpha + \cos \alpha \sin \alpha \quad (13)$$

$$\alpha = \beta L / 2 \quad (14)$$

3. 数値計算例

計算に用いた基本諸元は, H-150 ($A_s=40.14\text{cm}^2$), $E_s=2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$, $h_c=20\text{cm}$, $r=500\text{cm}$, $L=100\text{cm}$, $E_c=5.0 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ とする. なお, 特定のパラメータの影響をみるときは, そのパラメータのみを変化させ, 他は基本諸元を用いた.

図-3は, 吹付けコンクリートの弾性係数 E_c の半径方向変位 w_r に与える影響をみたものである. これによれば, w_r は E_c によらず $0 \leq x \leq L/2$ でほぼ一定値をとる. 図-4は, 支保剛性 $k(x)$ を示したものである. なお, 図には従来の算定法 ($k=E_c h_c / r + E_s A_s / (rL)$) による結果を参考のために併記した. 従来法による結果は, 本解析の結果より大きめの評価をし, E_c が大きいほど著しい. 図-5は, 図-2と同様に, E_c の吹付けコン

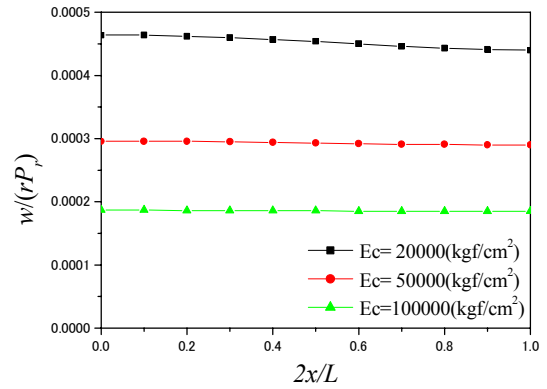


図-3 E_c の w/rP_r に与える影響

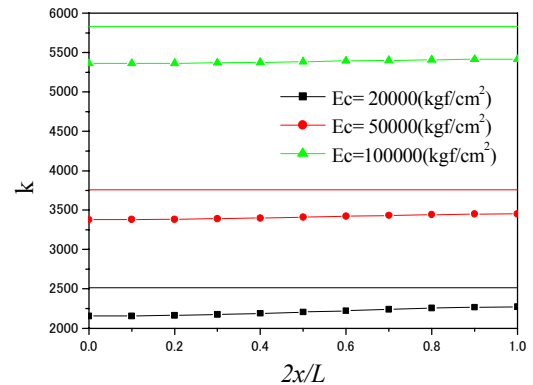


図-4 E_c の k に与える影響

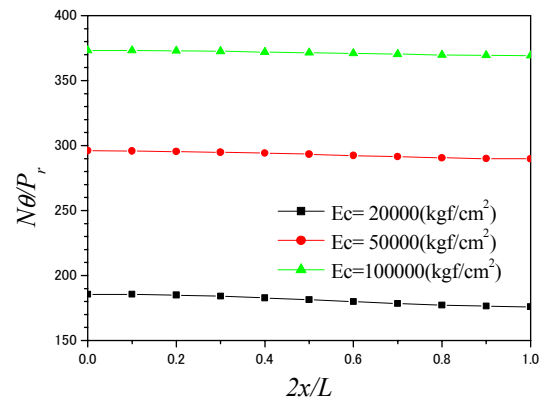


図-5 E_c の N_θ/P_r に与える影響

クリートに生じる N_θ (周方向力) に与える影響をみたもので, $0 \leq x \leq L/2$ でほぼ一定値をとっている.

4. まとめ

本研究は, トンネル支保設計における支保工特性曲線を, 吹付けコンクリートおよび鋼製支保工の連成を考慮し求めたものである. 今後は, より詳細な数値計算を行い, トンネル支保効果の検討を進める予定である.