

円筒殻理論に基づくトンネル支保効果について

パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 藤田 佳彦
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三上 隆
 北海道開発土木研究所 正会員 佐藤 京
 (株)ドーコン 正会員 小池 明夫

1. はじめに

現在のところ、必要な支保規模を設定する代表的な方法として、トンネル変形量とトンネル壁面に作用する内圧との関係を示す「地山特性曲線」に支保工変形量と支保に作用する荷重(支保圧)との関係を示す「支保工特性曲線」を重ねる方法、いわゆる「地山特性曲線法」が用いられている。本研究では、円筒殻理論から求めた支保剛性と従来の方法で求めた支保剛性に基づく支保圧の比較を行い、さらに鋼製支保の効果を検討する。

2. 解析モデルと理論式

本研究では以下の仮定を用いる。

地山は等方均質の弾性体で、初期応力状態は静水圧状態にある

トンネルの形状は円形である

鋼アーチ支保の建て込み間隔は一定である

円筒殻理論による吹付けコンクリート部分の半径方向変位 w_c は、式(1)の微分方程式より、式(2)として得られる。

$$d^4 w_c / dx^4 + 4\beta^4 w_c = p_i / K \tag{1}$$

$$w_c = A \cosh \beta x \cos \beta x + B \sinh \beta x \sin \beta x + p_i a^2 / E_c h_c \tag{2}$$

リング理論によるH形鋼製支保工の変位 w_s は、式(3)で与えられる。

$$w_s = \frac{(p_i b - 2Q_x) a^2}{A_s \cdot E_s + E_c (bh_c - A_s)} \tag{3}$$

境界条件： $\begin{cases} dw_c / dx|_{x=L/2} = 0 \\ w_c|_{x=L/2} = w_s \end{cases}$ (4)

ここで、 $\beta = \sqrt[4]{3(1-\nu_c^2) / h_c^2 a^2}$ 、 $K = E_c h_c^3 / 12(1-\nu_c^2)$ 、 $Q_x = -K d^3 w_c / dx^3|_{x=L/2}$

E_c 、 ν_c 、 h_c は吹付けコンクリートの弾性係数、ポアソン比、厚さであり、 b 、 A_s はH形鋼製支保の幅と断面積である。式(2)に含まれる未定係数 A 、 B は式(4)の境界条件によって決定され、次のようになる。

$$A = \frac{\cosh \beta \frac{L}{2} \sin \beta \frac{L}{2} + \sinh \beta \frac{L}{2} \cos \beta \frac{L}{2}}{I(\cosh \beta L - \cos \beta L) + \frac{1}{2}(\sinh \beta L + \sin \beta L)} F, \quad B = \frac{\cosh \beta \frac{L}{2} \sin \beta \frac{L}{2} - \sinh \beta \frac{L}{2} \cos \beta \frac{L}{2}}{I(\cosh \beta L - \cos \beta L) + \frac{1}{2}(\sinh \beta L + \sin \beta L)} F \tag{5-a, b}$$

ここで、 $I = \frac{E_c h_c^2 a \beta}{\{E_s A_s + E_c (bh_c - A_s)\} \sqrt{3(1-\nu_c^2)}}$ 、 $F = \frac{p_i b a^2}{E_s A_s + E_c (bh_c - A_s)} - \frac{p_i a^2}{E_c h_c}$

式(5)を用いれば、式(2)より支保圧 p_i は $p_i = k w_c$ と整理でき、 k は独立変数 x (図-1)に依存する支保剛性を表す。

3. 支保圧

弾性地山内での変位 u_a と支保工の反力 p_i の関係(地山特性曲線)は次式である。

$$u_a = a(1+\nu)(p_o - p_i) / E \tag{6}$$

E は弾性地山の弾性係数、ポアソン比、 $p_o = H$ は初期地圧(地山の単位体積重量、 H :土かぶり)である。

支保圧 p_i と支保変位 w_c の関係(支保工特性曲線)は次式となる。

$$p_i = k \{u_c - \alpha a(1+\nu)p_o / E\} \tag{7}$$

は応力解放率、 k は支保剛性である。支保圧 p_i は、式(6)、(7)より $u_a = w_c$ の条件より求められる。なお、従来理論による支保剛性 k は吹付けコンクリート部分と鋼製支保工部分の支保剛性の和として次式で与えられる。

$$k = \frac{E_c h_c}{a^2} + \frac{E_s A_s}{a^2 L} \tag{8}$$

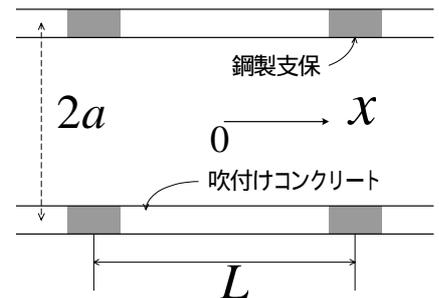


図-1 解析モデル

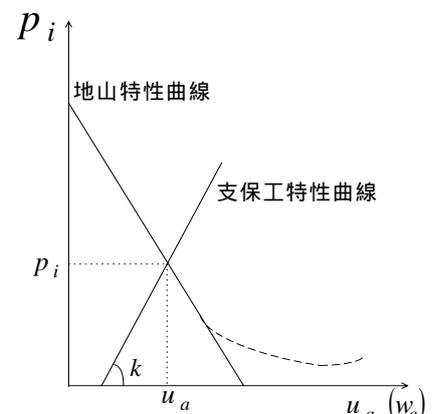


図-2 地山特性曲線法

キーワード 山岳トンネル、支保工特性曲線、円筒殻理論、吹付けコンクリート、鋼製支保

連絡先 〒060 8628 札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学大学院工学研究科 TEL011 706 6174

4. 鋼製支保の有効範囲

従来理論によれば，鋼製支保工が分担する支保圧 p_s は次式で表される．

$$p_s = \frac{E_s A_s}{a^2 L} w_s \tag{9}$$

円筒殻理論によれば，鋼製支保工位置における支保変位は既出の式(3)で与えられる．式(3)で同じ位置におけるせん断力 Q_x を $Q_x = \overline{Q}_x p_i$ と表すと，式(3)は次式となる．

$$w_s = \frac{(b - 2\overline{Q}_x) p_i a^2}{A_s \cdot E_s + E_c (bh_c - A_s)} \tag{10}$$

さらに，支保圧 p_i を鋼製支保とそのまわりの吹付けコンクリート部分で分担するものとし，また両者のひずみが等しいとすれば， p_s は以下ようになる．

$$p_s = \frac{E_s A_s w_s}{a^2 (b - 2\overline{Q}_x)} = \frac{E_s A_s w_s}{a^2 L^*} \tag{11}$$

ここで，式(9)と(11)を比較すれば， L^* は有効な支保間隔に相当する．ここで，支保間隔 L に対する換算係数を δ と表せば， $L^* = \delta L$ は式(3)より次式で与えられる．

$$\delta = \frac{b - 2\overline{Q}_x}{L} \tag{12}$$

5. 数値計算例

基本的な諸元は， $a=500(\text{cm})$ ， $h_c=20(\text{cm})$ ， $L=100(\text{cm})$ ， $\nu=0.3$ ， $\nu_c=0.2$ ， $E=1.0 \times 10^4(\text{kgf/cm}^2)$ ， $E_c=5.0 \times 10^4(\text{kgf/cm}^2)$ ， $E_s=2.1 \times 10^6(\text{kgf/cm}^2)$ ， $H=150[A_s=39.65(\text{cm}^2), b=15(\text{cm})]$ である．パラメータの影響を検討するときは，注目したパラメータのみを変化させ，他のパラメータは上記の諸元を用いるものとする．

図-3 は，吹付けコンクリートの弾性係数 E_c の支保圧 p_i 与える影響をみたものである．図中の \square は従来の方法による支保剛性を用いた結果を， \circ 印および \triangle 印はそれぞれ，円筒殻理論による $x=0$ および $x=L/2$ (図-1)における支保剛性を用いた結果である．これによれば，従来の方法による支保圧は円筒殻理論に基づくそれより常に大きく，その差は最大で 10% 程度である．図-4 は同様に鋼製支保の建て込み間隔 L と支保圧 p_i の関係を示したものである．支保圧は L の増加とともに小さくなり，円筒殻理論による結果は，支保剛性の算定位置の影響を受け，その影響は建て込み間隔 L の増加とともに大きくなる．図-5 は支保工の建て込み間隔の換算係数 ($L^* = \delta L$) を示したものである．これによれば支保工の建て込み間隔 L が大きくなるにつれ， δ が小さく(有効な建て込み間隔長が小さく)なることがわかり，ここで扱った諸元では $0.30 < \delta < 0.65$ の範囲である．

6. まとめ

本研究では，支保剛性の評価を円筒殻理論に基づき行い，支保圧および鋼製支保の有効範囲の検討を行ったものである．今後は塑性地山に対する支保圧の検討を進めていく予定である．

参考文献

- 1) 三上隆，佐藤京，小池明夫，蟹江俊仁：トンネルにおける吹付けコンクリートと鋼製アーチ支保の役割について，平成 13 年度土木学会北海道支部論文報告集第 58 号，pp.100 - 101，2002．

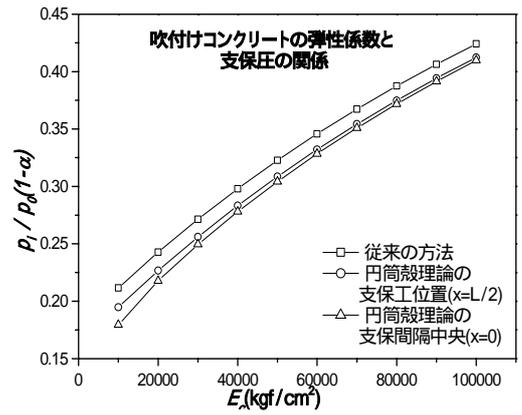


図-3 E_c の p_i に与える影響

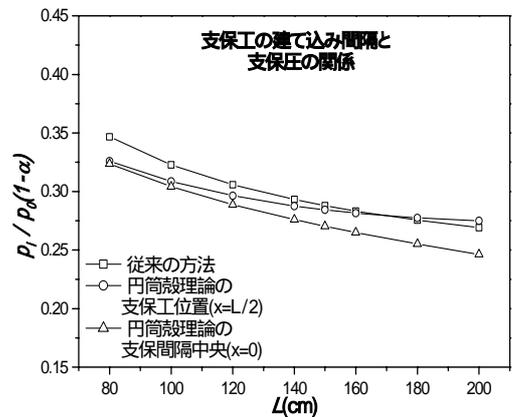


図-4 L の p_i に与える影響

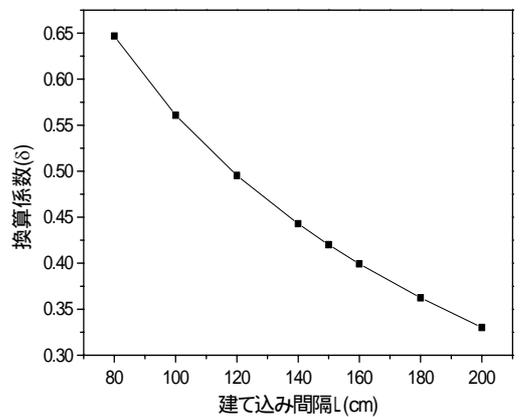


図-5 鋼製支保工の有効範囲($L^* = \delta L$)