

トンネル支保構造物の剛性算定式の提案

An equation for estimating stiffness of tunnel support structure

北海道大学工学部環境社会工学科 学生会員 ○岩城恭子 (Kyoko Iwaki)
北海道大学大学院工学研究院 フェロー 三上 隆 (Takashi Mikami)

1. はじめに

トンネルの支保構造には、吹付けコンクリートや鋼アーチ支保工が用いられている。しかし、従来の支保剛性の算定式は、十分に力学的な検討がなされていない¹⁾。そこで、円形トンネルを対象として、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工からなる支保剛性 k について、前者には円筒殻理論²⁾、後者にはリング理論を採用して定式化を行い、両者の影響を考慮した新しい剛性算定式を提案する。

2. 解析モデルと支保剛性算定式

解析モデルを図-1に示す。鋼アーチ支保工にはH形鋼を用い、鋼アーチ支保工の間隔は一定とする。

従来の支保剛性 k は次式で与えられている。

$$k = \frac{E_c h_c}{a} + \frac{E_s A_s}{aL} \quad (1)$$

ここで、 E_c は吹付けコンクリートの弾性係数、 h_c は厚さ、 E_s はH形鋼の弾性係数、 A_s は断面積、 L は鋼アーチ支保工の建て込み間隔、 a はトンネルの半径である。

式(1)は、例えば鋼アーチ支保工の剛性分(右辺の第2項目)において L で均等化するなど、その妥当性は十分に検討されていない。

吹付けコンクリートの基礎方程式は次式で表わされる。

$$\frac{d^4 w_c}{dx^4} + 4\beta^4 w_c = \frac{P}{D} \quad (2)$$

ここで、 P は地山から受ける圧力であり、 w_c は吹付けコンクリートの半径方向の変位である。また、

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

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

ただし、 ν_c は吹付けコンクリートのポアソン比である。

独立変数 x の原点を図-1のように支保間隔の中央にとると、式(2)の解は次式で表わされる。

$$w_c = C_1 \sinh \beta x \sin \beta x + C_2 \cosh \beta x \cos \beta x + \frac{Pa^2}{E_c h_c} \quad (5)$$

ここで、 C_1 と C_2 は未定係数である。

H形鋼には、隣接する吹付けコンクリートからのせん断

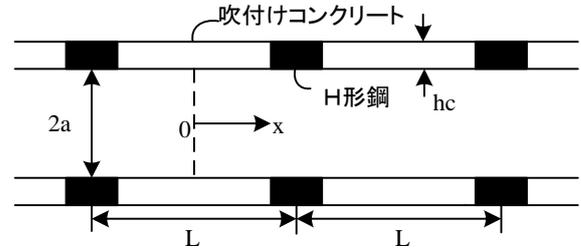


図-1 解析モデル

力 $2Q_x$ が作用する。したがって、リング理論によれば、H形鋼の半径方向の変位 w_s は次式で表わされる。

$$w_s = \frac{2Q_x a^2}{E_s A_s} \quad (6)$$

$$\text{ただし} \quad Q_x = -D \frac{d^3 w_c}{dx^3} \quad (7)$$

境界条件は次の2つである。

$$w_c \Big|_{x=L/2} = w_s \quad (8)$$

$$\frac{dw_c}{dx} \Big|_{x=L/2} = 0 \quad (9)$$

この2式を解いて得られる C_1 、 C_2 より、 w_c は

$$w_c = \frac{Pa^2}{E_c h_c} \left[1 + \frac{f(x)}{\det} \right] \quad (10)$$

と表わされる。ただし、

$$f(x) = \sinh \beta x \sin \beta x (\sinh \alpha \cos \alpha - \cosh \alpha \sin \alpha) - \cosh \beta x \cos \beta x (\sinh \alpha \cos \alpha + \cosh \alpha \sin \alpha) \quad (11)$$

$$\det = \sinh \alpha \cosh \alpha + \sin \alpha \cos \alpha + \frac{\lambda}{\alpha} (\cos^2 \alpha - \cos^2 \alpha) \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{\beta L}{2}, \quad \lambda = \frac{E_c h_c L}{E_s A_s} \quad (13)$$

H形鋼の建て込み位置($x = L/2$)の剛性を考えることにする。

支保剛性 $k(x)$ は式(10)を P について解くことにより得られ、特に、鋼アーチ支保工設置位置($x = L/2$)における剛性を求めると以下となる。

$$P = k_* \frac{w_c}{a} \quad (14)$$

$$k_* = \frac{E_c h_c}{a} + \frac{E_s A_s}{aL_*} \quad (15)$$

式(1)と式(15)を比較すると、右辺第1項の吹付けコンクリートによる剛性に変化はないが、第2項の鋼アーチ支保工による剛性において、従来は L で表わされているところが、提案する式は L_* で表わされているという違いがみられる。 L_* は次の式で表わされる。

$$L_* = \Phi L \quad (16)$$

ただし、 $\Phi = \frac{\cosh^2 \alpha - \cos^2 \alpha}{\alpha(\sinh \alpha \cosh \alpha + \sin \alpha \cos \alpha)}$ (17)

であり、この Φ を L の補正係数とよぶことにする。

また、新しく提案した支保剛性 k_* の式(15)について $k_* = k_{c*} + k_{s*}$ とおく。 k_{c*} は吹付けコンクリートの剛性、 k_{s*} は鋼アーチ支保工の剛性である。すなわち、

$$k_{c*} = \frac{E_c h_c}{a}, \quad k_{s*} = \frac{E_s A_s}{aL_*} \quad (18)$$

である。

3. 解析例

計算には、 $a = 400$ cm, $L = 100$ cm, $h_c = 20$ cm, $\nu_c = 0.2$, $E_c = 3.6 \times 10^4$ kgf/cm², $E_s = 2.1 \times 10^6$ kgf/cm², H-150 を基準値として採用する。

図-2は、鋼アーチ支保工の間隔 L を75~150 cmまで変化させたときの L_* の変化を表わしたものである。 L_* の値は L より小さく、 L が増加するにつれて L と L_* との差は大きくなる。つまり、 L が大きくなるほど従来の算定式とのずれが大きくなることがわかる。

図-3は、 L を75~150 cmまで変化させたときの、 k_* における k_{c*} と k_{s*} の分担の変化を表したものである。 L が大きくなるにつれて k_* における k_{c*} の割合が大きくなる。これは、アーチ支保工の建て込み間隔 L が大きくなるほど、支保剛性 k_* の吹付けコンクリートの剛性 k_{c*} による影響も大きくなる、ということの意味する。 $k_{c*} = k_{s*}$ となるのは、およそ $L = 122$ cmのときである。

図-4は、 E_c を $(1.0 \sim 10.0) \times 10^4$ kgf/cm²まで変化させたときの、 k_* における k_{c*} と k_{s*} の分担の変化を表したものである。 E_c が大きくなるにつれて k_* における k_{c*} の割合が大きくなる。これは、吹付けコンクリートの弾性係数が大きくなるほど、支保剛性 k_* の吹付けコンクリートの剛性 k_{c*} による影響も大きくなる、ということの意味する。 E_c が 1.0×10^4 kgf/cm²のときには k_{c*} の割合は20%程度であるが、 10.0×10^4 kgf/cm²のときには70%まで増加していることがわかる。また、 $k_{c*} = k_{s*}$ となるのは、およそ $E_c = 4.3 \times 10^4$ kgf/cm²のときである。

4. まとめ

本研究では、円筒殻理論とリング理論を用いて新しい支保剛性の算定式を提案した。その結果、 L が大きくなるにつれて、 L と L_* の差が大きくなる、すなわち従来の支

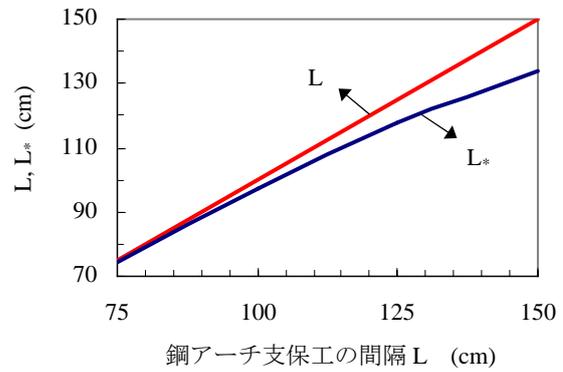


図-2 L と L_* の関係

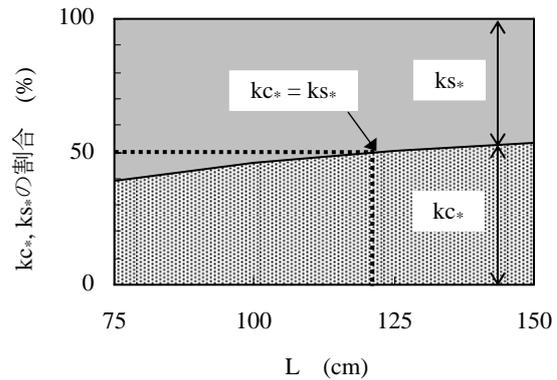


図-3 L が k_{c*} , k_{s*} の分担に与える影響

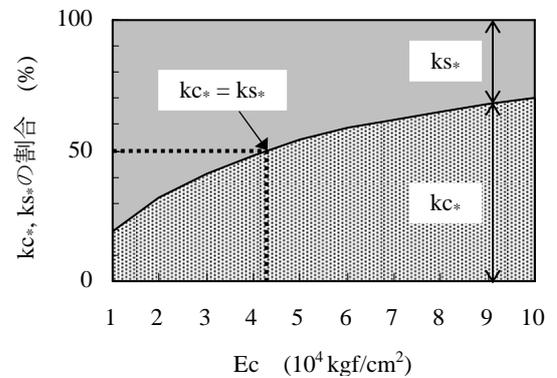


図-4 E_c が k_{c*} , k_{s*} の分担に与える影響

保剛性とのずれが大きくなることがわかった。今後は、さらに他のパラメータを変化させたときの数値を計算し、新しい剛性算定式の妥当性を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：山岳トンネル覆工の現状と課題、トンネル、ライブラリー第12号、2002。
- 2) 福島啓一：わかりやすいトンネルの力学、土木工学社、1994。