

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

A consideration on support structure for tunnel design

北海道大学大学院工学研究科	○フェロー	三上 隆 (Takashi MIKAMI)
北海道開発土木研究所	正 員	佐藤 京 (Takashi SATO)
北海道大学大学院工学研究科	正 員	小池明夫 (Akio KOIKE)
北海道大学大学院工学研究科	正 員	蟹江俊仁 (Shunji KANIE)

1. はじめに

わが国のトンネル支保構造物の標準設計は、ヨーロッパの使用例を参考に改良が加えられてきたものであり、「吹付けコンクリート」、「ロックボルト」、「鋼アーチ支保工」、「コンクリート覆工」の各支保工を地山分類(地山特性)に応じて、これらを適宜組み合わせられて用いられているが、各支保工の役割分担まで踏み込んだ分析は行われていない。そのため、過去の支保構造データに基づく経験的な手法や施工中の計測によって設計を確定していくなど特殊な方法が用いられている。一方、近年の土地利用上の制限や環境問題および建設の経済性などの社会的ニーズによって、厳しい条件下における工事が増加している。このような条件のもとでは、経験に基づく判断だけでは対処が難しく、トンネル全体の安全性に影響を及ぼす支保設計は、地上の構造物のように解析的、定量的評価に基づいて行うことが望まれている。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」が用いられているが、支保工特性曲線は、各支保工の役割は各々独立に作用するとの考え方に基づいて求められている。本研究では、吹き付けコンクリートと鋼アーチ支保工の共同作用に焦点をあて、その作用効果の検討を行う。

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

吹き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、図-1 に示すように等間隔(L)に断面積 A_c 、弾性係数 E_c なるH型鋼のアーチ支保で補強された半径 r の円筒殻が内圧 p を受ける場合について考える。

また、鋼製アーチ支保の存在によって、図-2 に示すように支保工背面(裏側)や吹付けフランジとウェブの間に空隙が生じやすいことから、空隙の影響も考慮に入れることにする。

円筒殻理論に Flügge 理論¹⁾を用いるものとするれば、

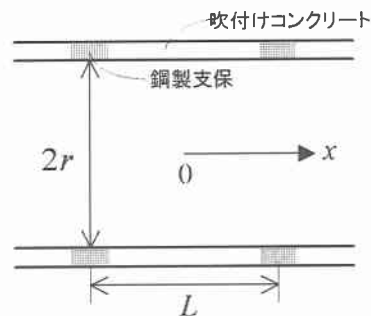


図-1 解析モデル



図-2 空隙の状況

吹き付けコンクリート部分の基礎方程式は次式となる。

$$d^4 w_c / dx^4 + 4\beta^4 w_c = p / D_c \quad (1)$$

ただし、 w_c は半径方向変位、

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

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

ここで、 E_c は吹き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。

$$w_c = C_1 \cos \beta x \cosh \beta x + C_2 \sin \beta x \sinh \beta x + p r^2 / (E_c h_c) \quad (4)$$

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 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。

$$w_s = 2r^2 Q_x / (E_s A_s + E_c A_c'' + \gamma E_c A_c''' + \delta E_c A_c'''') \quad (5)$$

$$Q_x = D_c d^3 w_c / dx^3 \quad (6)$$

ここで、 γ と δ はアーチ支保背面およびフランジ・ウェブ間の空隙の状況に応じて0または1の値をとる。

$\gamma = 0$; アーチ支保背面と地山間に空隙がある

$\gamma = 1$; アーチ支保背面と地山間に空隙がない

$\delta = 0$; フランジ・ウェブ間に空隙がある

$\delta=1$; フランジ・ウェブ間に空隙がない

また、 A_c^* , A_c^{**} および A_c^{***} はそれぞれアーチ支保表面側の吹付けコンクリート面積、アーチ支保背面と地山間の吹付けコンクリート面積およびフランジ・ウェブ間のコンクリート面積である。

式(4)に現れる係数 C_1 , C_2 は以下の条件より求められる。

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

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

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 、曲げモーメント $M_x^c (= D d^2 w_c / dx^2)$ 、周方向応力 $N_\theta^c (= E_c h_c w_c / r)$ および鋼製アーチ支保に生じる軸力 N は以下のようになる。

$$w_c = r^2 p / (E_c h_c) - f \{ (\cosh \alpha \sin \alpha + \sinh \alpha \cos \alpha) \cosh \beta x \cos \beta x + (\cosh \alpha \sin \alpha - \sinh \alpha \cos \alpha) \sinh \beta x \sin \beta x \} / g \quad (8.a)$$

$$M_x^c = L^2 E_c h_c f \{ (\cosh \alpha \sin \alpha + \sinh \alpha \cos \alpha) \sinh \beta x \sin \beta x - (\cosh \alpha \sin \alpha - \sinh \alpha \cos \alpha) \cosh \beta x \cos \beta x \} / (8 \alpha^2 r^2 g) \quad (8.b)$$

$$N_\theta^c = E_c h_c w_c / r \quad (8.c)$$

$$N = EA w_c|_{x=L/2} / r \quad (8.d)$$

ただし、

$$\alpha = \beta L / 2 \quad (9.a)$$

$$\overline{EA} = E_s A_s + E_c A_c^* + \gamma E_c A_c^{**} + \beta E_c A_c^{***} \quad (9.b)$$

$$f = r^2 p / (E_c h_c) - \gamma r^2 B p / \overline{EA} \quad (9.c)$$

$$g = E_c h_c L (\cosh^2 \alpha - \cos^2 \alpha) / (\alpha \overline{EA}) + \cosh \alpha \sinh \alpha + \cos \alpha \sin \alpha \quad (9.d)$$

ここで、鋼製アーチ支保工が完全に剛な特別な場合 ($E_c h_c L / \overline{EA} \rightarrow 0$) について、支保工の建て込み間隔 L の吹付けコンクリート部分(円筒殻)の半径方向変位、断面力に与える影響を検討してみる。

1) $L / \sqrt{r h_c}$ が大きく、 $\alpha \rightarrow \infty$ とみなせる場合

$$w_c(x=0) = pr^2 / E_c h_c \quad (10.a)$$

$$M_x^c(x=0) = 0 \quad (10.b)$$

$$M_x^c(x=L/2) = pr h_c / \sqrt{12(1-\nu_c^2)} \quad (10.c)$$

$$N_\theta^c(x=0) = pr \quad (10.d)$$

すなわち、 L が長い場合に、鋼製アーチ支保工近くを除いては、アーチ支保がない場合の挙動と同じ挙動を示すことになる。

2) $L / \sqrt{r h_c}$ が小さく、 $\alpha \rightarrow 0$ とみなせる場合

$$w_c(x=0) = pL^4 / (384D) \quad (11.a)$$

$$M_x^c(x=0) = pL^2 / 24 \quad (11.b)$$

$$M_x^c(x=L/2) = -pL^2 / 12 \quad (11.c)$$

$$N_\theta^c(x=0) = E_c h_c w_c(x=0) / r \quad (11.d)$$

すなわち、結果は P なる分布荷重を受ける両端固定梁の場合と同じであり、 $L / \sqrt{r h_c}$ が短いと吹付けコンクリートに働く力はほとんど殻の曲げによってアーチ支保工に伝えられている。

3. 数値計算例

数値計算に用いた諸元は、 $r = 400\text{cm}$ 、 $L = 100\text{cm}$ 、 $E_c = 5 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ 、 $\nu_c = 1/6$ 、 $h_c = 20\text{cm}$ であり、鋼製アーチ支保は H-150 である。

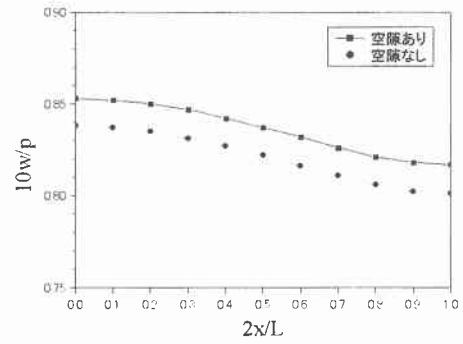


図-3 半径方向変位における空隙の影響

図-3 は鋼アーチ支保工背面に空隙がない場合 ($\gamma=1$) と空隙がある場合 ($\gamma=0$) について、半径方向変位 (w_c/p) を示したものである。これによれば、空隙の有無は半径方向変位に大きな影響を与えていない。また、支保工剛性を K と記せば、 $\gamma=1$ のとき $K = 11.9 \sim 12.5 (\text{kgf/cm}^3)$ 、 $\gamma=0$ では $K = 11.7 \sim 12.2$ である。なお、吹付けコンクリートには平面ひずみ状態を仮定し、鋼製支保にはトンネル単位長さあたりの断面積 ($= A_s/L$) を用いて剛性を算定する従来の方法によれば $K = 11.7$ となる。このことは、支保間隔をより大きく施工できる可能性を示唆している。

4. まとめ

本研究では、トンネル支保工における吹き付けコンクリートおよび鋼製アーチ支保工の役割の検討が可能となる変形・断面力に関する理論式を導いた。今後は、より詳細な数値計算を行い、トンネル支保効果について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) W. Flügge : Stress in Shells, Springer-Verlag, 1960