

# III-270 トンネルの地山支保力の定量的評価法

- Fenner-Pacher型特性曲線へのアプローチ, その1 -

鳥取大学工学部 木山英郎 ○西村 強 藤村 尚 池添保雄

## 1. はじめに

トンネル断面の掘削に伴い、空洞維持のために周辺地盤が発揮する支保工相当力を地山支保力と呼ぶことにする。地山支保力とライニング支保力(支保工、覆工などによる支保力を代表する)は常に連動し、両者を合わせたものがトンネルの総支保力であって、通常の内空変位等で評価されているのはこの総支保力に他ならない。本研究では、これらの支保力の定量的指標として、地山支保剛性、ライニング支保剛性およびトンネル総支保剛性を提案し、2次元弾性論を用いた簡単なトンネル解析によって、3者間の基本的関係と地盤やライニング条件による支保剛性の変化を考察する。

## 2. 支保剛性の定義と算式

図-1に示すように、ヤング率E, ポアソン比νの地山に半径r<sub>0</sub>のトンネルを掘削し、外半径r<sub>0</sub>, 内半径r<sub>i</sub>, ヤング率E', ポアソン比ν'のライニングを施したとする。初期応力-p<sub>x</sub>, -p<sub>y</sub>(引張りを正とする)に、ここでは基本的な例として、p<sub>x</sub>=p<sub>y</sub>=-pの等方圧縮状態を用いれば、ライニング外周(r=r<sub>0</sub>)に作用するr方向の応力σ<sub>r0</sub>, 変位u<sub>0</sub>は、式(1)で与えられる(平面ひずみ状態)。

$$\left(\frac{\sigma_{r0}}{-p}\right) = \frac{2(1-\nu)(1-t^2)}{(1-t^2)+(t^2+1-2\nu')E\nu} \quad (1-a), \quad \left(\frac{-u_0}{r_0}\right) = p \frac{1+\nu'}{E'} \frac{2(1-\nu)(t^2+1-2\nu')}{(1-t^2)+(t^2+1-2\nu')E\nu} \quad (1-b)$$

ここに、 $t = r_i/r_0$ ,  $E\nu = E(1+\nu')/E'(1+\nu)$ 。

(a)ライニング支保剛性K<sub>L</sub>をK<sub>L</sub>=σ<sub>r0</sub>・r<sub>0</sub>・1/u<sub>0</sub>(単位奥行き当り、以下同じ)と定義すれば、式(1-a),(1-b)より、 $K_L = (1-t^2)E' / \{(t^2+1-2\nu')(1+\nu)\}$ となり、これは等方圧縮下のライニングの剛性そのものである。断面初期剛性K<sub>0</sub>\*は上式でE'=E, ν'=ν, t=0とおいて、 $K_0^* = E / \{(1-2\nu)(1+\nu)\}$  (2)

これは、平面ひずみ状態での体積弾性率である。K<sub>L</sub>をK<sub>0</sub>\*で相対化したものを、新たにライニング支保剛性 $\bar{K}_L$ と記せば、式(3)が成立し、当然のことながら、t=1(ライニングなし)のとき $\bar{K}_L=0$ となる。

$$\bar{K}_L = \frac{(1-t^2)(1-2\nu)}{(t^2+1-2\nu')E\nu} \quad (3)$$

(b)一方、K<sub>0</sub>\*で相対化したトンネル総支保剛性 $\bar{K}_T$ は、変位u<sub>0</sub>(初期変位+掘削変位)を初期変位u<sub>0</sub>\* (初期応力による変位)で除した値の逆数、 $\bar{K}_T = u_0^*/u_0$ と定義すれば、式(1-b)より次式が求まる。

$$\bar{K}_T = \frac{(1-2\nu) \{ (1-t^2) + (t^2+1-2\nu')E\nu \}}{2(1-\nu)(t^2+1-2\nu')E\nu} \quad (4)$$

初期地山応力σ<sub>r∞</sub>=-p下で掘削部が分担していた荷重を、周辺地山とライニングですべて分担していると考えた場合の総支保剛性を表す。内空変位計測等で実感されるトンネルの見掛けの剛性はこれであり、t=1(ライニングなし)のときにも $\bar{K}_T(>0)$ が残存する。

(c)冒頭に定義した地山支保剛性 $\bar{K}_E$ (K<sub>0</sub>\*で相対化したもの)は式(3), (4)より次式で計算できる。

$\bar{K}_E = \bar{K}_T - \bar{K}_L$  (5) 式(3), (4)から明らかなように、ライニングの存在する場合の $\bar{K}_E$ は地山の物性のみならずライニングの物性の影響を受けることに注意する必要がある。

## 3. 支保剛性の特徴

図-2は、ライニングの厚さ指標であるtと $\bar{K}_T$ ,  $\bar{K}_L$ ,  $\bar{K}_E$ の関係を示す図である。同図a~dは、地山とラ

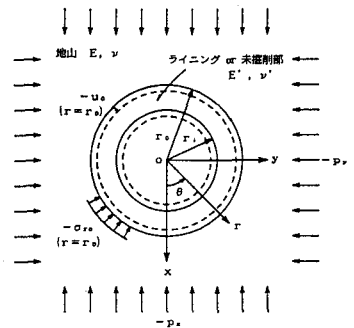


図-1

ライニングのポアソン比  $\nu=0.2, 0.4$  と  $\nu'=0.2, 0.4$  の4種の組み合わせに対応し、パラメータとして  $E/E'=1.0, 0.5, 0.2$  および  $t=0$  で  $\bar{K}_T=1$  となる  $E/E'$  の値の場合を示す。

掘削断面が有していた初期剛性  $K_0^*$  の式(2)から明らかのように、ライニング支保剛性や地山支保剛性は基本的にそれぞれの体積弾性率に依存する。したがって両者の体積弾性率比  $\bar{\kappa}$  (平面ひずみ状態)、 $\bar{\kappa} = E'(1-2\nu)(1+\nu)/E(1-2\nu')(1+\nu')$  が、 $\nu, \nu', E, E'$  の組み合わせを代表する有力な指標となる。ちなみに図-2で、 $t=0$  の時  $\bar{K}_T = \bar{K}_L = 1, \bar{K}_E = 0$  となるのは  $\bar{\kappa} = 1.0$  の時である。

図において、縦軸の  $\bar{K}_T = 1.0$  は、トンネル総剛性が断面初期剛性  $K_0^*$  に等しい場合を示し、 $\bar{K}_T < 1.0$  は、トンネル掘削によって周辺地山の剛性がそれだけ減少したことを、逆に、 $\bar{K}_T > 1.0$  ( $\bar{K}_L > 1, \bar{K}_E < 0$ ) は元の掘削断面よりライニングが強すぎる場合を示すが、いずれにしる  $\bar{K}_T$  曲線上にあれば、掘削断面の分担していた力をすべて地山とライニングが協同して分担していることを表す。

地山支保剛性  $\bar{K}_E$  は、 $\bar{K}_T$  曲線を  $\bar{K}_L$  曲線の縦距の差であり、見やすいように改めて  $\bar{K}_E$  曲線として図示してある。一般に  $t = r_i/r_o$  の増加、つまりライニング厚さ  $(1-t)$  の減少とともに、ライニング支保剛性  $\bar{K}_L$  は0へと減少し、逆に地山支保剛性  $\bar{K}_E$  は増加する。 $t=1$  は素堀り状態で、 $\bar{K}_L = 0, \bar{K}_T = \bar{K}_E = (1-2\nu)/(1-\nu)$  で表され、地山支保力が最大限に発揮され、それが地山のポアソン比  $\nu$  のみに支配されることが重要である。

地山のポアソン比  $\nu$  が小さいほど地山支保剛性  $\bar{K}_E$  (したがって地山支保力) が大きくなり、さらにライニングのポアソン比  $\nu'$  が大きいほどその傾向をわずかながら促進する。この点で従来無関心であった地山のポアソン比の観察にもっと意を注ぐべきかと思われる。

ライニングのヤング率  $E'$  を大きくすれば、より正確にはライニングの体積弾性率比  $\bar{\kappa}$  を大きくすれば、ライ

ニング厚さ  $(1-t)$  に対するライニング支保剛性  $\bar{K}_L$  および総剛性  $\bar{K}_T$  は増加し、内空変位等の地盤変形を抑制できる。しかし、それによって地山支保剛性  $\bar{K}_E$  は減少し、地山支保力を有効に利用する観点からはマイナスに作用することに注意する必要がある。

最後に、ここで提案した支保剛性  $\bar{K}_T, \bar{K}_L, \bar{K}_E$  の利用法をまとめると；①与えられた地山に対し、掘削断面の初期剛性  $K_0^*$  に対する比率となっているため、直感的に各支保剛性(したがって各支保力)の量的理解ができること、②同じ理由で、土砂地盤から硬地盤までを通じて、一貫した支保剛性の相対的比較が可能であること、③一方、具体的な支保工等の絶対値を必要とする場合には、与えられた地山の初期剛性  $K_0^*$  を  $\bar{K}_T, \bar{K}_L, \bar{K}_E$  に乗ずることによって求められる。

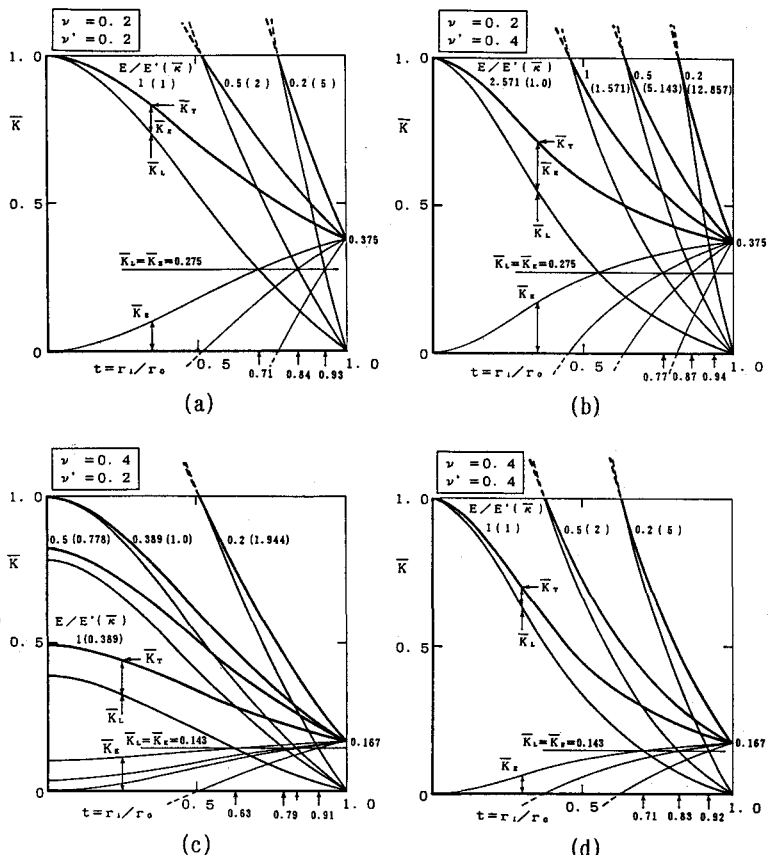


図-2