

III-271

トンネルの支保特性曲線の構成

- Fenner-Pacher型特性曲線へのアプローチ, その2 -

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

前報(その1)において、地山支保力とライニング支保力およびそれらの和であるトンネル総支保力について、支保剛性を用いて定量的に評価する方法を論じた。本報では、これら3つの支保剛性を用いて、Fenner-Pacher曲線に代表される支保特性曲線を理論的に構成する方法について述べる。さらに、この方法を非線形な応力～ひずみ関係を持つ実地盤に適用するとき、様々な支保特性曲線の出現が地盤強度に対する初期応力レベル(いわゆる地山強度比)の違いによるものであることを明らかにする。

2. 弾性地盤の特性曲線

前報に述べた、等方圧縮応力下の弾性地盤中に設けた円形トンネル、円形ライニングの平面ひずみ状態の解、式(1)を継続して用いる。図-1に示すように、ライニング外周($r=r_0$)上に作用するr方向圧縮応力 $\sigma_{r_0}/-p$ を縦軸に、r方向収縮変位 u_0/u_0^* を横軸にとり、前報式(1)の $\sigma_{r_0}/-p$ と式(4)の $u_0/u_0^*=1/\bar{\kappa}_r$ の関係(共通変数 t)を描けば、トンネル支保特性曲線が得られる。さらに、地山とライニングの物性(E, ν, E', ν')を一定にするには、ライニングのポアソン比 ν' と体積弾性率比 $\bar{\kappa}$ が一定の時、地山のポアソン比 ν (あるいは E/E')のみが変数となるので、 $\nu', \bar{\kappa}$ 一定の図で ν をパラメータにすれば良く、すべての特性曲線が定点($u_0/u_0^*=1.0, \sigma_{r_0}/-p=1.0$)を通る直線となる。

前報式(4)では、 $\sigma_{r_0}/-p=1.0$ を不変とした u_0/u_0^* から総剛性 $\bar{\kappa}_r$ を定めたが、ここでは u_0/u_0^* を実応力 $\sigma_{r_0}/-p$ に対応させることによって、特性曲線は次のような意味を持つ。 $\sigma_{r_0}/-p=1.0$ がトンネル掘削によって生じる必要支保力の全量であって、上記の支保特性曲線より下方がライニングの負担分、上方が地山の負担分となるように、支保力の分担を区分する線となる。

一方、同図に原点0を通り、前報式(3)のライニング支保剛性 $\bar{\kappa}_l$ を勾配とする直線を描けば、ライニングの支保曲線が得られる。 $\bar{\kappa}_l$ は ν' と $\bar{\kappa}$ が一定の時、 t のみの関数となるので、 t をパラメータにすれば良い。ただし、原点を通るライニング支保曲線は、無応力状態でライニングをはめ込んでおいてから、初期応力を負荷した場合に対応している。以上の結果、地山とライニングがともに弾性体であれば図-1における両者の交点が平衡点となる。図-1の特性曲線を弾性特性曲線と呼ぶことにする。

3. 弾性特性曲線の特徴

図-1は、 $\nu'=0.2$ で一定とし、 $\bar{\kappa}$ を $a:1.0, b:2.0$ と変化させた場合であるが、特性曲線群はすべて同じであって、地山のポアソン比 ν のみの関数となる(後出の図-2で明らかのように ν' にも無関係)。 ν が大きくなるにつれて収縮変位 u_0/u_0^* が大きくなり、必要なライニング支保圧も大きくなる。一方、ライニング支保特性曲線は $\bar{\kappa}$ が大きくなるほど($a \rightarrow b$)、同一 t に対し急勾配(高剛性)になる。

図-2は、 $t=0.9$ (ライニング厚0.1)の場合について、 $\nu'=0.2, 0.3, 0.4$; $\bar{\kappa}=0.389, 1.0, 2.0$ と変化させたときの特性曲線(不変)とライニング支保曲線の関係を描いたものである。同じライニング厚さを有するライニング支保剛性が、 $\bar{\kappa}$ の増加について、 ν' の減少によっても大きく増加することがわかる。

4. 実地山の特性曲線の特徴

実地山の応力～変位(またはひずみ)曲線が図-3のように与えられたとする。これは与えられた地山で拘束応力 σ を0から破壊または降伏点近傍まで増加させたときの、トンネル掘削断面における内空変位 u を表すが、実用上はトンネル規模での地盤ブロックの応力～変位(またはひずみ)曲線をイメージすればよい。

さて、この地山の $\sigma-u$ 曲線から特性曲線を作成する手順は次のようになる。初期応力 p がたとえば 0.4σ

。の時には、 σ - u 曲線上のその対応点($\sigma/\sigma_c=0.4$, $u_0=u_0^*$)を特性曲線の始点[($\sigma_{ro}/-p$) $_E=1.0$, $u_0/u_0^*=1.0$]とする。ついで σ - u 曲線の縦軸と横軸をそれぞれ $0.4\sigma_c$ と u_0 で相対化すれば、図-3に示すようにトンネル掘削に伴う($\sigma_{ro}/-p$) $_E=1.0\sim 2.0$ 間の地山の支保能力を表すところの($\sigma_{ro}/-p$) $_E\sim u_0/u_0^*$ 曲線が得られる。なお、トンネル掘削前の初期地山が負担している($\sigma_{ro}/-p$) $_E=0\sim 1.0$ 間の曲線は省略している。 $p=0.6\sigma_c$ の場合も同様に求められる。与えられた地山の σ - u 曲線に対し、初期応力レベル p/σ_c による両者の差の大きいことが注目される。

このようにして得られた($\sigma_{ro}/-p$) $_E\sim u_0/u_0^*$ 曲線を、 $\bar{\kappa}=1.0$, $\nu'=0.2$ と仮定して(図-1aの特性曲線図に対応する)、 $t=0.85$, $t=0.9$ の支保曲線と合わせて描いたのが図-4である。ここにはトンネル掘削以前から地山が負担している($\sigma_{ro}/-p$) $_E=0\sim 1.0$ の間の曲線も示してある。トンネルの特性曲線が掘削前からの負担分($\sigma_{ro}/-p$) $_E=1.0$ をベースにトンネル掘削による地山の負担力の増分(これを地山支保力と定義した)で構成されていることが理解できよう。図-4において、支保工の遅速、剛性の過不足等については一目瞭然なので説明を割愛するが、トンネルの支保特性曲線が地山の支保能力を表すものとして、初期応力レベル(いわゆる地山強度比)に強く依存することおよびその定量的評価のシナリオも見えてきたことを強調して結論とする。

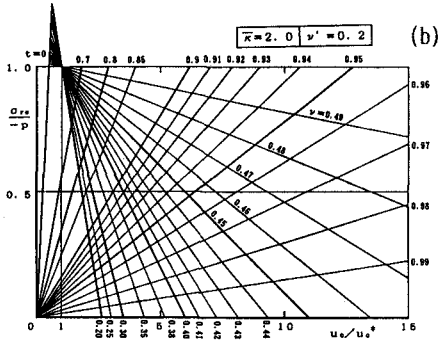
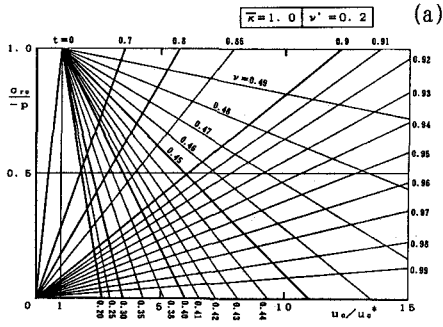


図-1

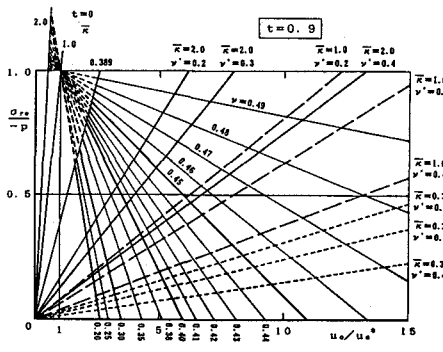


図-2

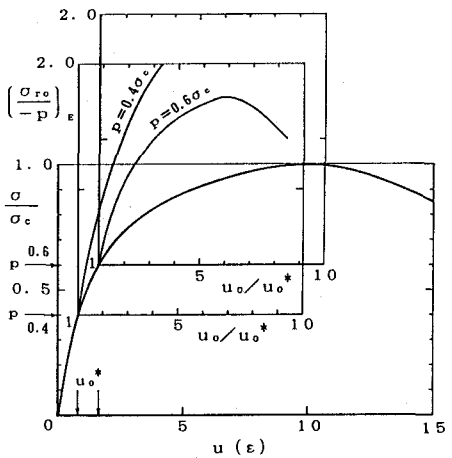


図-3

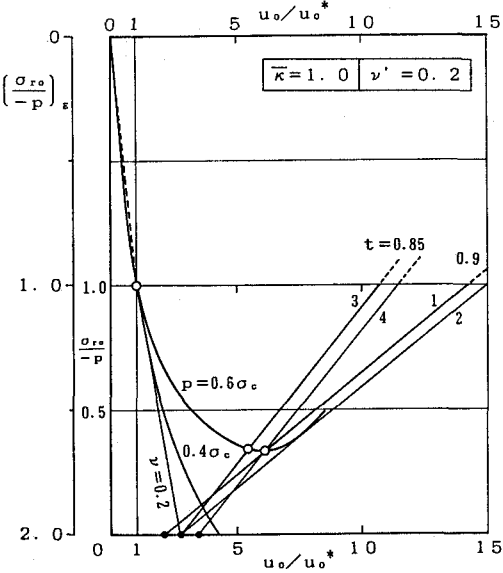


図-4