

市販のトンネル解析ソフトによる設計用地山特性曲線 (Fenner-Pacher 曲線) の作成

鳥取大学 木山英郎・西村 強
大林組 畑 浩二・中岡健一

1. NATM の地山特性曲線の再考

図 1(a)は, NATM の地山特性曲線 (Fenner-Pacher 曲線) G と支保工特性曲線 $S1$ および時期を遅らせた $S2$ を示す模式図である. 支保工 $S1$ は p_{min} 近くで G と交わり「適切な支保工」の例と言い, 一方, $S2$ は G と交わらないで内空変位が増大し続ける「駄目な支保工」の例と言う. ところが, これでは, 交点以外で支保工 $S1$ や $S2$ が地山支保力をどのように高め, 内空変位をどのように抑えたかといった重要な情報が全く表されていないので, 利用の仕様がでない.

最適の表示法をと考えたのが, 次に示す図 1 (b)の方法である. 上図(a)の G と $S1$ あるいは $S2$ から, 地山と支保工の支保力を合算した, 「支保工合成地山特性曲線; $G+S1$ 曲線(実線)と $G+S2$ 曲線(破線)」として表示する方法である. 結果は「適切な支保工」 $S1$ は $p=0$ の横軸に達して安定し, 横軸に達しない「駄目な支保工」 $S2$ にも, p_{min} を大きく減少させ, かつその時期を相当遅らせる等, 地山支保力発揮にかなりの役割を果たしていることが分かる. 新しい合成特性曲線は, NATM の原理解説に必要な「支保工と地山の合成效果または連成効果を定量的に」表現できる優れた表示法と考えている.

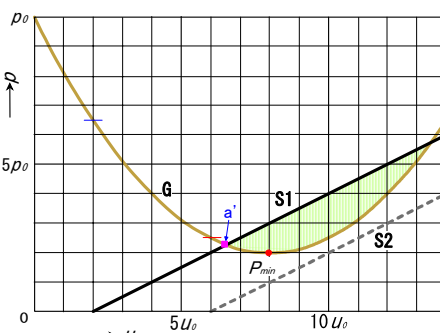


図 1(a) 地山特性曲線と支保工特性曲線表示(従来)

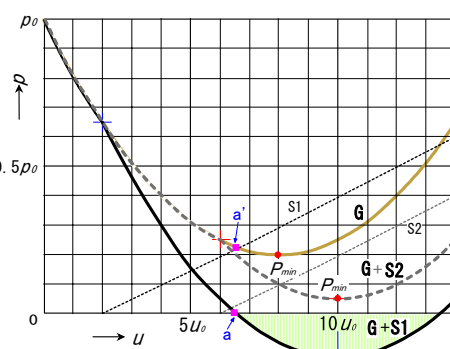


図 1(b) 支保工を合成した地山特性曲線表示(提案)

2. 2次元平面ひずみの解析モデルと多ステップ解析法

2次元平面ひずみの解析モデル: 一般に市販されているトンネル解析用ソフトを用い, 通常的设计解析と同様 2次元平面ひずみの弾塑性解析とする. トンネル地山は D 級相当とし, $E=500\text{MPa}$, $\nu=0.3$, $c=1\text{MPa}$, $\phi=27^\circ$ ($\rightarrow \sigma_c=3.26\text{MPa}$)で, モーラー・クーロン規準に従う弾完全塑性体とした.

トンネルの掘削断面は土木学会標準示方書(2006)¹⁾に倣って高さ $H=9.1\text{m}$ ×幅 $W=11.2\text{m}$ の馬てい形・全断面掘削とし, D 級地山の標準支保パターンに従い吹付けコンクリート(吹付け厚 20cm), ロックボルト(4m×19 本)および鋼製支保工(H-150)の仕様を決定した. 概略は図 2 の解析モデルに見るようである. なお, 支保工は全て強度を考えず弾性体と仮定し, 支保剛性一定に保っている. 一方, 初期地圧 p_0 (側圧係数は 1.0) は多重支保までの一貫した特性曲線解析を視野に入れて, 4 段階; 土被り 100m(2.1MPa)で弾性的, 200m(4.2MPa)で通常の弾塑性的, 300m(6.3MPa)から 400m(8.4MPa)で塑性化が著しく, いわゆる大変形地山のモデルとなるように設定した.

特性曲線のための多ステップ解析法: トンネル解析ソフトは, 地盤の解析領域全域に初期地圧(p_0)を与えた状態からスタートし, 掘削に応じてトンネル壁面に内圧として作用する支保圧 (p)を 0 に向けて解放するため, いわゆる掘削相当解放応力 ($-p$)を作用させて解く形になっている. したがって, その時々支保圧 (p)に対応する内空変位(u)を解析できれば Fenner-Pacher 型の地山特性曲線($p-u$)を直に描くことができる. そこで考

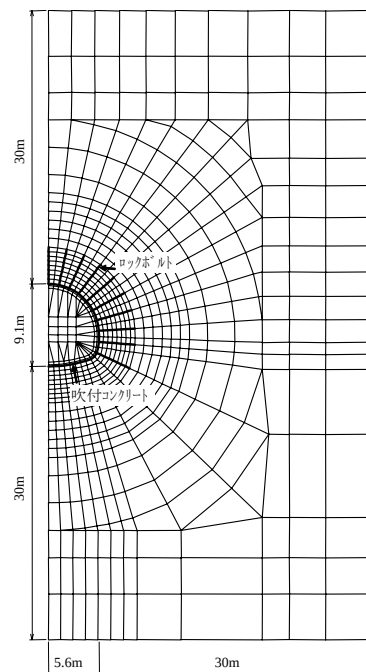


図 2 解析モデル

キーワード: トンネル標準示方書, NATM, 地山特性曲線, 支保工特性曲線, 解析ソフト.

連絡先: 680-8552, 鳥取市湖山町南 4-101, Tel:0857-31-6093, Fax:0857-28-7899.

たのが、通常の設計計算では行わない、掘削解放応力($0 \sim p_0$)を必要な段数 n で p_0/n に区切って順次解を出すという方法(多ステップ解析と呼ぶ)である。それに対し、1ステップで解析する通常解析では、100%解放時の1点の情報だけ得られるだけである。

3. 解析結果

以下、横軸は内空変位に代え、掘削断面の天端と底盤の間の収縮変位 u を断面高さ H で除した値を鉛直方向の空洞ひずみ $\varepsilon(\%)$ と呼び、地山特性曲線を $(p-\varepsilon)$ で表現する。

その1：地山特性曲線は同一地山でも初期地圧 p_0 によって変化する。

図3は地山特性曲線の特徴を一括して示すため、100m から 400m まで4段の初期地圧 p_0 のものを、全て p_0 を始点にして、掘削解放応力($-p$)を等しく重ね書きした図である。4本の特性曲線が解放応力各70%付近までは弾性的で一直線上に重なるが、それ以降100%解放に向かって急激に空洞ひずみを増加する塑性挙動を示している。

同図でいまいち重要なことは、地山特性曲線の100%解放点を結ぶ曲線(紫破線)が通常的设计解析で得られるので、こちらを唯一不変の地山特性曲線と考えて、切羽距離・内空変位曲線などを考察すると大きな間違いとなるので注意が肝要である。

その2：地山特性曲線に支保工特性を加えた合成特性曲線が有効。

それぞれの初期地圧ごとに、先ず上記した素掘り(無支保状態)の地山特性曲線を求め、次にこれを基準とし3段階の支保工；吹付けをした場合(Sc)、吹付けと同時にロックボルトをした場合(Sc+RB)、さらに同時に鋼製支保工を施した場合(Sc+RB+SS)について合成特性曲線を求めた。支保工設置は解放率が0%、30%、70%の3種とした。特性曲線を初期地圧ごとにまとめて示す図として、代表的に図4(a)土被り厚300mの場合と(b)400mの場合を示す。(a)には鋼製支保工まですべてを施した場合のみについて、設置時期の違いを見ている。(b)では、3種の支保工段階の順に全てを描いている。現在、この程度の地山特性曲線や支保工合成特性曲線の作成・利用が可能である。

4. 結 語

論文表題が示すように、通常的设计解析と同じ解析結果を用いて描く地山特性曲線であれば、実用上設計解析と同程度の信頼性が保証され、設計のみならず施工管理面での活用が大いに期待される。

参考文献 1) 土木学会：トンネル標準示方書「山岳工法編」・同解説(2006)，pp.11, 68, 267, 丸善，2006.7.

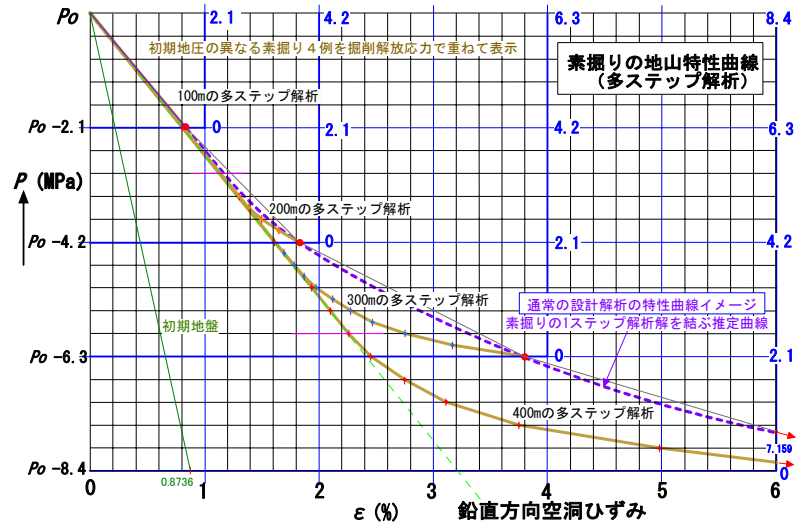


図3 素掘りトンネルの地山特性曲線

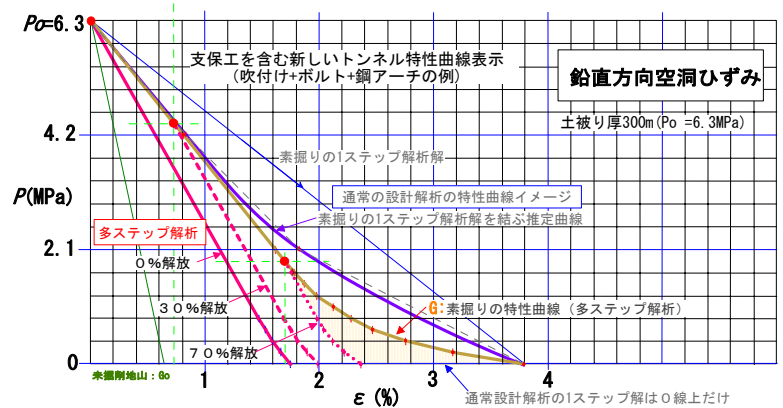


図4(a) 土被り厚300mのトンネルの地山特性曲線

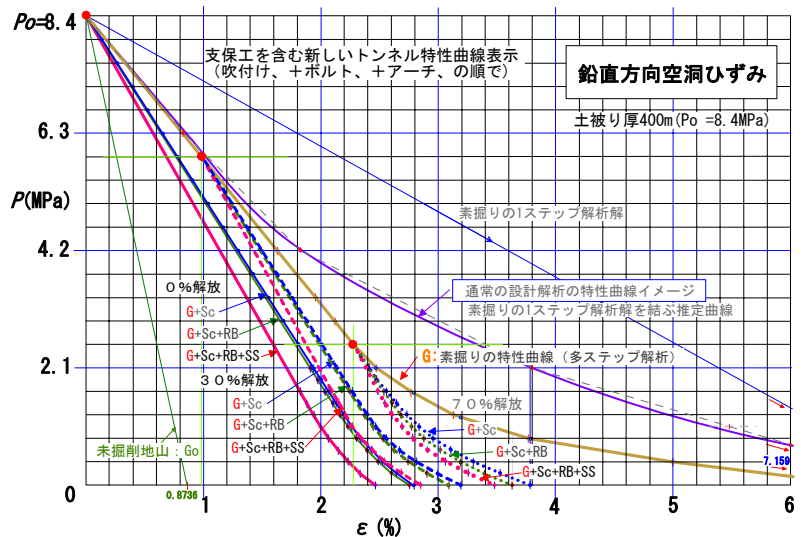


図4(b) 土被り厚400mのトンネルの地山特性曲線