

トンネル用ソフトで通常の設計解析と同時に 描く地山特性曲線と内空変位曲線

木山 英郎¹・西村 強^{1*}・畑 浩二²・中岡 健一²

¹鳥取大学 工学部 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

*E-mail: tnishi@cv.tottori-u.ac.jp

NATMの基本原理を成すFenner-Pacher型地山特性曲線は、トンネル用ソフトで設計解析する際に、掘削相当解放力の増分過程に多ステップ解析を行えば求められる。最初に、D級岩盤の素掘りトンネルが土被りの増加に伴って、弾性的から塑性的な特性曲線に至る解析例を示す。ついで、吹付けコンクリート、ロックボルト、および鋼製支保工を建込む場合について、上記地山特性曲線から分岐する各支保工-地山合成特性曲線を順に描き、支保効果を定量的に評価できることを示す。最後に、これら2次元解析のFenner-Pacher型特性曲線から、3次元の切羽距離-内空変位曲線に変換する簡便法を示す。かくして、日常の変位計測Aによって、この内空変位曲線や元になった地山特性曲線の検証も可能となる。

Key Words : NATM, characteristic curve, convergence curve, design analysis of tunnel support, FEM

1. NATMの地山特性曲線

図-1はFenner-Pacherらの解析解をもとにNATMの創始者Rabcewicz(1969)¹⁾が描いた地山特性曲線を示す。縦軸に掘削断面に内圧として作用する支保圧 p_i 、横軸に鉛直あるいは水平方向の内空変位 Δr を取り、トンネル掘削とともに p_i が初期地圧 p_0 から減少し、それに応じて Δr の増加する様子を表わす地山依存の曲線となる。これに断面閉合効果を考慮した支保工特性曲線を組み合わせ、NATM原理の説明図としている。当初は、これを基に特性曲線の定量化が直ぐにも進むものと想われたが、残念ながらその後も久しくこれといった成果が見られなかった。

最近では例えば図-2の土木学会トンネル標準示方書(2006)解説図²⁾のように、専門家の間でもNATM原理を説明するための単なる概念図となりつつある。そのまゝに、先人達が基本原理として特性曲線に託した夢を確かめたい、というのが定量化を急ぐ第一の理由である。

第二に、これらの図がNATMの原理図として適切とは言えないことである。それはNATM原理の根本である「地山の支保力を有効に利用するのに、支保工がどのように役立つか」についての情報を十分に表現できていないからである。地山特性曲線と支保工特性曲線を対峙させ、釣り合い位置としての交点を求めるだけの従来形

の概念図では無理なのである。つまり、支保工によって増強された地山の特性曲線を表現できてこそ、NATMの原理図となり、定量化の目標となるのである。

そこで本研究では、まずはRabcewiczが望んだFenner-Pacher型の地山特性曲線を定量的に得る解析手法を確立すること、同様に、この地山特性曲線を基に吹付けコンクリート、ロックボルト、および鋼製支保工を順に施した場合の支保工-地山合成特性曲線を順次描くことによって、各支保工による地山支保力の増強効果を定量的に評価できるようにすることを目標とした。

さらにいま一つの目標は、通常のトンネル解析に使用されている市販ソフトを用いて、設計解析の結果と同時に、その地山条件、掘削条件が表わす特性曲線を提示すること³⁾である。それによって、特性曲線が単なる概念図としてではなく、設計施工の現場にも有用な原理図として活用されるであろう。ただし、設計解析すらあくまでも一つの予測値としてしか扱われていない現状から、本研究をもう一歩進めて、特性曲線を切羽距離-内空変位曲線に変換して日常的な変位計測と直接照合できるようにすれば、格段に信憑性が増すであろうと考えた。Rabcewiczが特性曲線で目指していたのもこの辺りのことと思えてならない。

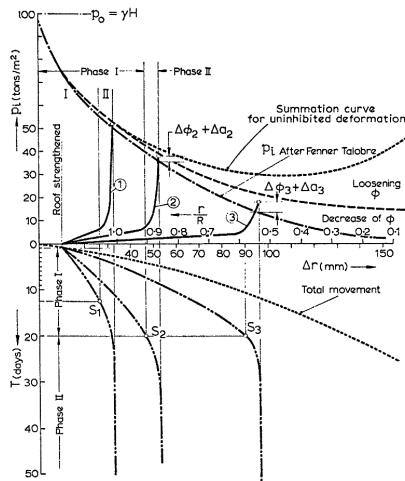
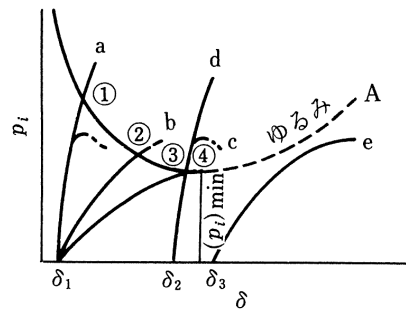


Fig. 2. Schematic representation of reciprocal relationship between p_i , δ , T , and r/R for linings of different yield (after Pacher). Key: S_1, S_2, S_3 =Application of invert, 1=slight yield of lining, 2=medium, 3=large, δr =Amount of radial deformation

図 - 1 Rabcewicz(1969)の Fenner-Pacher 型地山特性曲線¹⁾



p_i : 支持構造物に対する土圧
 δ : トンネル掘削面の変位
 (注) 曲線 A は、地山固有の性質から決まる
 曲線 a~e は支保構造物の荷重-変位
 曲線である

図 - 2 地山特性曲線および支保工特性曲線の概念図 (トンネル標準示方書 2006 の解説図 3.2)²⁾

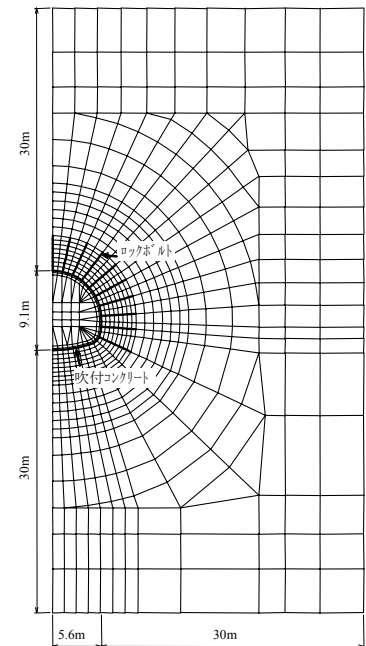


図 - 3 標準道路トンネルの解析モデル

2. 解析モデルと多ステップ解析法

(1) 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、通常の設計解析と同様 2次元平面ひずみの弾塑性解析とする。表-1 に示すようにトンネル地山は D 級相当とし、モール・クーロン規準に従う弾完全塑性体とした。初期地圧 (側圧係数は 1.0) は多重支保までの一貫した特性曲線の解析を視野に入れて、4 段階; 土被り 100m($p_0 = 2.1\text{MPa}$)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。

トンネルの掘削断面は土木学会標準示方書(2006)²⁾に倣って道路トンネル高さ 9.1m×幅 11.2m の馬蹄形、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、ロックボルトおよび鋼製支保工の仕様を表-2 ~表-4 に示すように決定した。その概略は図-3 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線形弾性体と仮定し、支保剛性一定に保っている。

(2) 特性曲線のための多ステップ解析法³⁾

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)が 0 になるように、いわゆる掘削相当解放応力を最終値 $-p_0$ (解放率 100%) まで逐次増分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。トンネルソフトに基本的に備わっ

表-1 解析用 D 級岩盤の物性

変形係数	ポアソン比	単位体積重量	粘着力	内部摩擦角
500MPa	0.3	21 kN/m ³	1 MPa	27°

注)一軸圧縮強度 $\alpha=3.26\text{MPa}$

表-2 吹付けコンクリートの物性および仕様

弾性係数	ポアソン比	単位体積重量	厚さ
4000MPa	0.2	23.5 kN/m ³	20 cm

表-3 ロックボルトの物性および仕様

弾性係数	直径	周方向打設間隔	奥行方向打設間
206 GPa	24 mm	1.2 m	1 m

注)1 断面 4.0m×19 本

表-4 鋼支保工の物性および仕様

弾性係数	断面	断面二次モーメント	断面積
206 GPa	H150	1620 cm ⁴	39.7 cm ²

注)建込間隔 1.0m

ているこの機能を活かし、掘削解放応力($-p_0$)を必要な段数 n で($-p_0/n$)に区切って逐次解析する手法に実用化したのが本法 (多ステップ解析と呼ぶ) である。これに対し 1 ステップで解を求める通常解析では、特性曲線をたどる途中経過に注目することも無く、すべて計算機内の自動処理に任せ、特性曲線としては終点の 100%解放時 ($p=0$) の 1 点だけを解くことになる。

3. Fenner-Pacher 型地山特性曲線の解析結果

著者らは横軸の内空変位に鉛直方向や水平方向の空洞ひずみ ϵ (%)を用い、地山特性曲線を ($p - \epsilon$) 関係で表現する。ここに、掘削断面の天端と底盤の間の収縮変位を

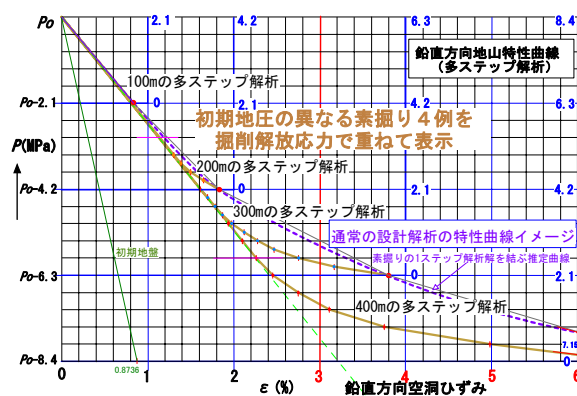


図-4 土被り厚と4本の地山特性曲線(多ステップ解析)と設計解析(1ステップ解析)解の曲線【鉛直方向】

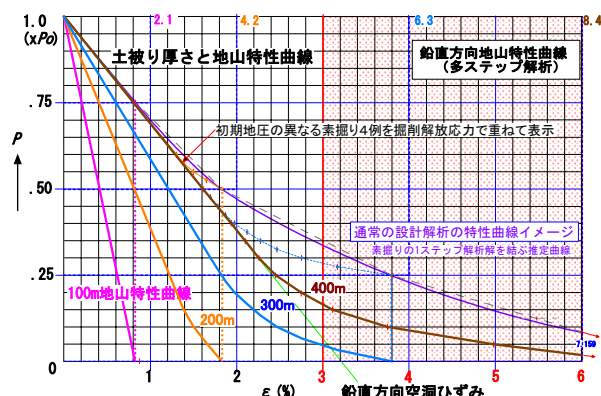


図-6 土被り厚 p_0 で相対化した地山特性曲線【鉛直方向】

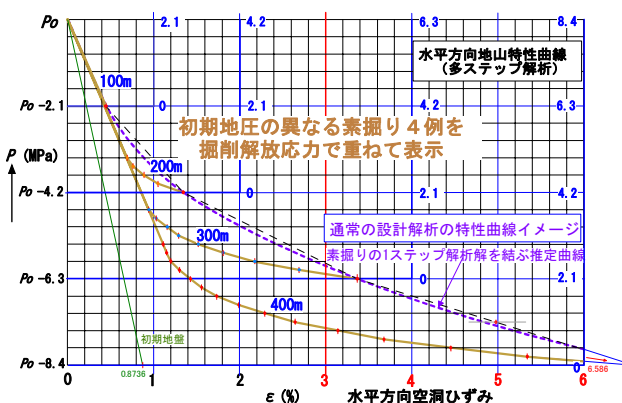


図-5 同上【水平方向】

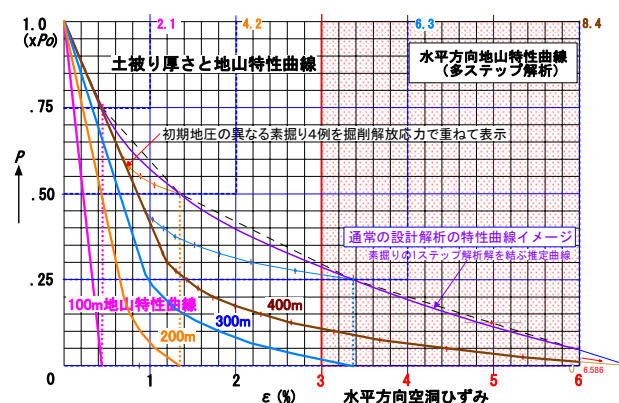


図-7 同上【水平方向】

掘削断面高さで除して相対化した値を鉛直方向の空洞ひずみ ε (%)と呼び、同様に、掘削断面のスプリングライン上の左右2点の収縮変位を掘削断面幅で除した値を水平方向空洞ひずみ ε (%)と呼ぶ。

(1) 初期地圧 p_0 によって変化する地山特性曲線

図-4(鉛直方向空洞ひずみ)は地山特性曲線の最も基本的な特徴を示すため、100mから400mまで4種の初期地圧 p_0 に対する曲線を、全て $p=p_0$ (掘削解放率0%)を始点にして、掘削解放応力(Δp)を等しく重ね描きした図である。4本の特性曲線は解放応力が少なくとも70%付近(詳しくは、100mから400mへ順に100%, 80%, 75%, 70%付近)までは弾性的で一つの直線上に重なる。これは同一地山の特性曲線であることの証である。しかし、それ以降の地盤の塑性化とともに解放率100%に向かって急激に空洞ひずみを増加させるところの塑性挙動を示し、それぞれが異なった曲線となる。すなわち、地山の特性曲線は初期地圧 p_0 によって変化する、異なった曲線となる。

最後に、各特性曲線の解放率100%の点を結ぶ線が紫色の破線の曲線で、つまりは初期地圧を変えて行った通常的设计解析(1ステップ解析)の解を結ぶ線である。これが地山特性曲線でないことは明白である。正しい地

山特性曲線の存在を知らずに、こちらを唯一普遍的な地山特性曲線と考えて、切羽距離一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。

図-5は同様に横軸が水平方向の空洞ひずみの場合の地山特性曲線である。全般的な特性は上記したのと同じである。相違点は、図-4(鉛直方向空洞ひずみ)に比べると、弾性部分の直線の空洞ひずみが小さくて地山剛性が高く出ることと反対に塑性化してからの空洞ひずみの増加の著しいことが目につく。その結果、最終的な解放率100%の空洞ひずみは水平方向が僅かに小さい程度である。等方応力下の素掘りトンネルで、やや水平方向に広い標準的な馬蹄形(高さ9.1m×幅11.2m)において、縦・横でこれくらいの地山特性曲線の特徴差(最終の空洞ひずみの差は僅かとなるが、途中の空洞ひずみの差、つまり見掛けの地山剛性の差は大きい)を生じることが知れる。

図-4、図-5で重ね描きした4つの特性曲線の縦軸を、それぞれの初期地圧で相対化して0~1.0 p_0 に揃え、初期地圧(土被り厚)ごとに独立した通常的地山特性曲線の形に描き直したのが図-6、図-7である。鉛直、水平方向とも、初期地圧によって、弾性的な特性曲線から塑性的な特性曲線まで変化する様子が明瞭に認められる。

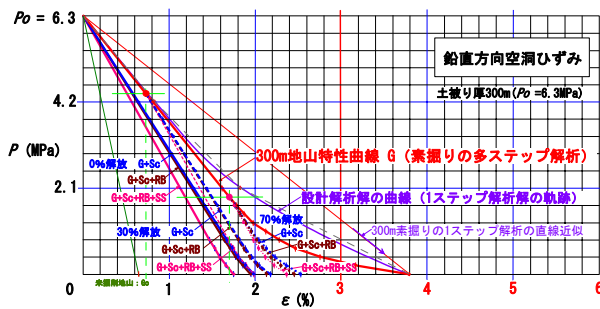


図-8 土被り 300m 地山特性曲線をもとに設置時期 3 種で各種の支保工を加えた合成特性曲線【鉛直方向】

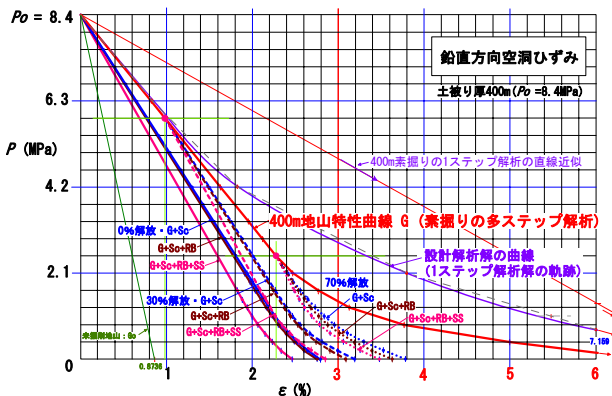


図-9 同上 土被り 400m【鉛直方向】

(2) 地山特性と支保工特性を加えた合成特性曲線

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)のトンネルの地山特性曲線(G)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(G+Sc, など)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-8 に土被り厚 300m の場合、図-9 に 400m の場合を示す。支保工合成特性曲線は、地山特性曲線を基にして、その曲線上の解放率が 0%, 30%, 70% の 3 つの支保工設置点で分岐してスタートする。地山と 3 種の支保工が組み合わされて、(G+Sc)から、(G+Sc+RB)へ、そして(G+Sc+RB+SS)へと 3 段階を順に支保工合成特性曲線の形で全てを描いている。

これら支保工合成特性曲線の結果で重要な知見を一、二記しておく。先ずは、これら合成特性曲線から元の地山特性曲線を、横軸を揃えて上下に差し引けば、0%, 30%, 70% スタートの各支保工特性曲線が得られる。そこで、0% スタートの支保工特性曲線を不変と仮定し、これを 30% スタート点や、70% スタート点に平行移動したものと、上記で求めた 30% スタートや、70% スタートの支保工特性曲線の正解とを比べると、両者は相当異なっている。従来の原理説明のように、支保工特性曲線を

設置時期に応じて平行移動させればよいといった単純なものではないことがわかる。

つぎに、支保効果の点で、吹付けコンクリートや鋼製支保工に比べてロックボルトの効果が極めて小さいが目立っている(今回は支保工の強度特性を無視してどこまでも当初の弾性状態を維持するとしての解析結果なので、支保効果の中の剛性効果のみを見たものであることを断っておく)。通常のトンネルソフトを用いたこれまでの設計解析でも少なからず同様な印象を与えているに違いない。ところがこれも、ロックボルト単独で支保した場合の合成特性曲線を描けばロックボルトの効果がずっと大きくなることが分かる。すなわち上図ではロックボルトの効果が吹付けコンクリートの効果の中に隠されてしまったことになる。普通 2~3 種の支保工を重ねて用いるが、それらの合成特性曲線から支保力分担割合を読み取るのは簡単ではない。そもそも、合成特性曲線中の地山支保力の占める割合(そのときの地山特性曲線相当)が同様に不明であって、当初(無支保)の地山特性曲線から変化しているのは確かである。支保工の評価はまだまだこれからだと言わざるを得ない。

4. 特性曲線から内空変位曲線への変換

(1) 素掘りトンネルの内空変位曲線

前出図-6 の地山特性曲線の縦軸 p を横軸に、横軸 ε を縦軸になるように右 90 度回転した後、水平方向にフリップしたのが図-10(a)である。フリップ操作は左側縦軸を切羽面として、横軸右方向に切羽距離を展開するためである。縦軸の内空変位には特性曲線の時と同じ空洞ひずみ ε (%) を用い、現場で馴染みの切羽距離 - 内空変位曲線(あるいは天端沈下曲線)相当を表現する。

したがって問題は、図で上辺横軸 p で表わしたこれまでの掘削解放率を、新しい下辺横軸に示す切羽距離(空洞直径 D で相対化)にどのように対応させるかである。一つは、切羽距離 $3D$ においては解放率 100% が期待できるので、横軸右端を切羽距離 $3D$ とし、掘削解放率 100% ($p=0$) を充てればよいであろう。

上に引用した図-10(a)の切羽距離-内空変位曲線は、両軸が元の特性曲線そのままであるので、横軸は上辺の掘削解放率 (0~100%) が下辺の切羽距離 (0~ $3D$) に正比例した場合となる。4 本の空洞ひずみ曲線の中、1 本が直線で他の 3 本が上に凸な曲線となり、切羽距離 $3D$ に至るも空洞ひずみ ε が収斂する気配がない。少なくともこの形から、通常の内空変位曲線に見られる下に凸で、切羽距離 $3D$ で変位の収斂する形に修正する必要がある。

そこで、次に掘削解放率を切羽距離に対し前詰めする

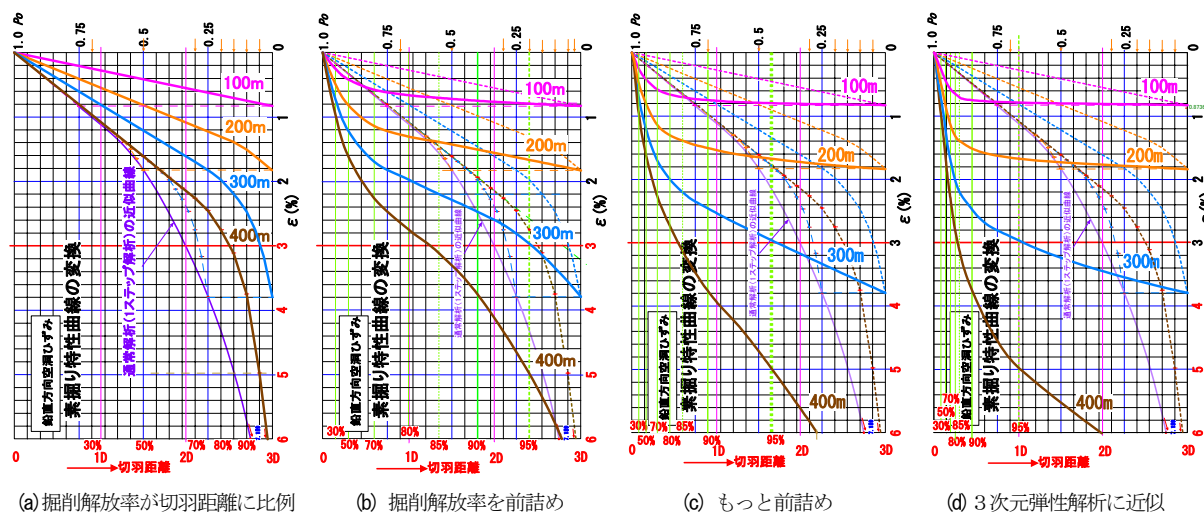


図-10 図-6の鉛直方向地山特性曲線(破線)から、内空変位曲線(切羽距離-鉛直方向の空洞ひずみ曲線)への変換方法：掘削解放率と切羽距離の対応の検討

方向に修正した3枚の図-10(b), (c), (d)を示す(参考に、いずれも元の特性曲線を破線で示す)。これらにおいては、まずは実際の内空変位曲線が示す「切羽面での先行沈下が約30%」であることを満たすように(一方で、解析解としては、掘削解放率0%で空洞ひずみ $\varepsilon = 0$ の初期値を切羽面に統一するのがいいことに配慮し)、切羽面極く近傍で掘削解放率30%となるようにしている。その他の条件と併せ結果の要点をまとめると以下のようである。

図-10(b)においては切羽距離1D内に掘削解放率80%を対応させたが、掘削解放率100%の切羽距離3D位置において、安定性の目安といわれる空洞ひずみが3%を越える土被り400mや300mのケースのみならず、空洞ひずみ2%以内に収まる土被り200mの地山特性曲線までもが、なお上に凸の発散傾向を残しているのが不満足である。4本の曲線全体に、さらに下に凸な収束傾向を強めるため、切羽距離に対し掘削解放率を前詰めする必要がある。

図-10(c)においては切羽距離1D内に掘削解放率90%を対応させた。土被り400m曲線が後半部に上に凸な曲線、土被り300m曲線が後半部で直線状を示し、土被り200m曲線も3D点でもう少し収束性の欲しいところである。

図-10(d)においては切羽距離1D内に掘削解放率95%を対応させたもので、これはまた、円形トンネルの3次元弾性FEM解析による側圧係数1.0の切羽距離と掘削解放率の関係に似せている。この図(d)における4本の空洞ひずみ曲線が全て下に凸の収束型の曲線となり、4枚の中では、実測される空洞ひずみ曲線に最も近いものと考えられるので、以後この掘削解放率-切羽距離の対応を用いて地山あるいは合成特性曲線から空洞ひずみ曲線

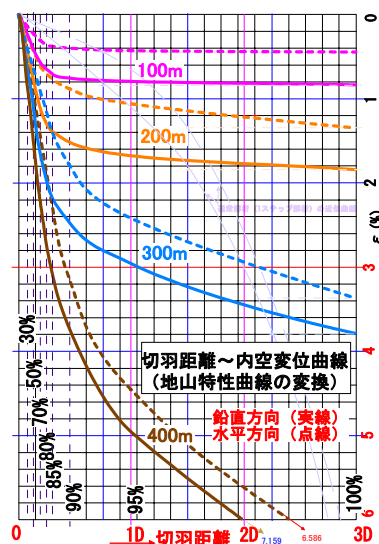


図-11 図-10(d)方式で描いた切羽距離-空洞ひずみ曲線の鉛直方向と水平方向の比較

へ変換することにする。なお、これでも土被り200mの曲線が切羽距離3Dで空洞ひずみがやや収束性を欠いているようにも見えるので、詳細は今後の検討課題とする。

最後に、同様にして水平方向の地山特性曲線図-7から変換した切羽距離-空洞ひずみ曲線(水平方向)を、比較のため上記の鉛直方向のそれと合わせて1枚の図にして図-11に示す。いずれの土被り厚においても、水平方向空洞ひずみが最終で約0.4%小さい、ほぼ平行な2本の曲線になっているといえる。特性曲線では初期の弾性域で生じた0.4%~0.8%の差が、塑性域を経て100%解放時に約0.4%となり、大変形のもとでは僅かの差と看做した両者であるが、この図で見ると0.4%の差は決して少なくなく、かつ弾性域から塑性域全般を通じての

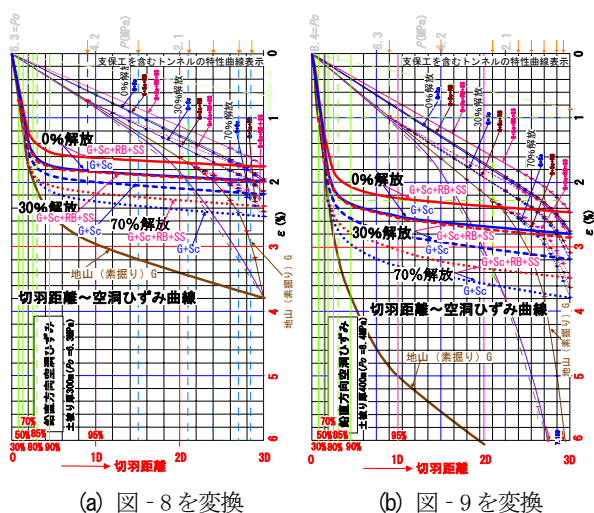


図-12 支保工合成特性曲線から変換した切羽距離 - 鉛直方向空洞ひずみ曲線

本質的な差と看做すべきことが明らかになった。特性曲線から内空変位曲線への変換を通じて得られた重要な知見といえる。

(2) 支保されたトンネルの内空変位曲線

土被り 300m と 400m の場合の支保工合成特性曲線、前出図-8 と図-9 を上記と同じ方法で切羽距離 - 空洞ひずみ曲線に変換した結果を図-12 に示す(元の合成特性曲線を細線で示す)。素掘りトンネルでは空洞ひずみの安定限界 3% を 1% 弱超過する土被り 300m の場合には、支保工設置時期が掘削解放率 30% 時のみならず 70% 時であっても、すべての支保工段階(極端に言えば吹付けコンクリートだけでも)が、切羽距離 3D で空洞ひずみ 3% 以内に収まる内空変位曲線となる。

素掘りトンネルで 3% を大きく超過する土被り 400m の場合には、掘削解放率 30% までに吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工の全てを設置完了したケ

ースのみが空洞ひずみ 3% 以内に収まる内空変位曲線となる。掘削解放率 70% で設置した場合には、鋼製支保工まで全て施しても空洞ひずみの安定限界 3% を切羽距離 1D 付近で早々と突破する内空変位曲線となる。これは p_{min} を想定する NATM 理論に従えば、差し詰め「 p_{min} を逃した駄目な支保工」と判定されるであろう一例である。

以上のように、地山特性曲線を元に、支保工を合成した特性曲線を示すことにより、最終的にはこの切羽距離 - 空洞ひずみ曲線に変換された段階で、支保工を含む現状トンネルの内空変位曲線として、最も日常的な計測値と比較しての実務的な検討・評価が可能となると言える。

5. 結 語

NATM の基本原理である Fenner-Pacher 型特性曲線の実用的な解析は今始まったばかりである。トンネル空洞の変位・変形は将にこの地山と支保工の合成特性曲線の現れそのものであり、NATM において一番大事な支保工効果の正しい評価のために早急に取り組むべき研究課題である。本編がそのための些かなりとも参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) L.V. Rabcewicz : Stability of tunnels under rock load (Part I), Water Power, p.226, June 1969.
- 2) 土木学会 : トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説 (2006), p.62, 丸善, 2006.7.
- 3) 木山英郎, 西村 強, 畑 浩二, 中岡健一 : 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, 土木学会平成 19 年度年次学術講演会, III-140, 2007.9.

SIMULTANEOUS ANALYSIS OF DESIGN OF TUNNEL SUPPORT WITH ITS CHARACTERISTIC CURVE AND CONVERGENCE CURVE USING AN ORDINARY TUNNEL SOFTWARE

Hideo KIYAMA, Tsuyoshi NISHIMURA, Koji HATA and Kenichi NAKAOKA

A support strategy should be designed to develop the self-supporting capacity of ground. The ground-support pressure interaction can be approximated by an equivalent plane strain problem with a sequential decreasing in a fictive stress at tunnel wall. An idealized tunnel problem is analyzed with a FEM software which can introduce support placements. The results, summation characteristic curves of ground and supports, present the activation of supports. We advance the curves to explain the relations between radial displacement and distance to the face of excavation. The comparison of the numerical relations with the measurement will give us better understandings of the support design not only at then but also in the later stage of the excavation.