

トンネル特性曲線による 支保効果の定量的評価に向けて — 共通効果と断面閉合効果について —

木山 英郎¹・西村 強^{1*}・畑 浩二²・中岡 健一²

¹鳥取大学 大学院工学研究科 (〒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

トンネル掘削を表わす素掘りトンネルの地山特性曲線から、支保工設置後の地山と支保工の合成特性曲線につながる特性曲線の全体を、トンネル特性曲線と呼ぶことにする。トンネル特性曲線の基本的特徴や、3次元的な表現が切羽距離-内空変位曲線であることなどはすでに報告した。問題はトンネル特性曲線で支保効果を何処まで説明できるかであり、本報では先ず、各支保工の組合せによる特性曲線上の「共通効果」の種々の現れ方とその特徴、および支保工それぞれの全周支保による見事な「断面閉合効果」の事例を示す。特性曲線単独ではそこまで、これに同時解析の支保工力や地山支保力を結合して、初めて各支保工の特性や効果の定量的評価が可能となることを手法の紹介と結果の一例をもって示す。

Key Words : NATM, characteristic curve, quantitative evaluation of tunnel supports, FEM.

1. はじめに

Rabcewicz¹⁾が提唱した地山特性曲線や支保工を合成した特性曲線が、一般的なトンネルソフトの基本的機能「掘削解放力の増分過程」を利用して設計解析と同時に比較的簡単に算出できることを報告^{2),3),4)}した。両者が一つの曲線として連続的に得られることからトンネル特性曲線と呼ぶことにした。

関心はトンネル特性曲線の実現で支保効果の評価が何処まで進むかである。従来の設計解析の内空変位が点のデータでしかなかったのに比べ、特性曲線が刻々の掘削解放率と空洞ひずみの関係として、内空変位を線のデータで与えた意義は大きい。特性曲線から切羽距離-内空変位曲線への変換が可能なのもそのためである。

特性曲線にはまだまだ課題も残されている。中でも、組合せ支保工における「共通効果」の存在である。特性曲線の描き順によって効果が大きく見えたり、小さく見えたりする。種々の支保工の組み合わせについて、特性曲線上の共通効果のパターン化が必要である。共通効果が地山や支保工の支保機構に係わる場合には特性曲線で説明できない。特性曲線と設計解析の支保工力や地山支保力を結び付けて、初めて各支保工の役割と効果の定量的評価が可能となり共通効果も解けると考えている。

2. 解析モデル

(1) 2次元平面ひずみの解析モデル

通常的设计解析と同様に、2次元平面ひずみの弾塑性解析とする。地山は表-1のD級相当で、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 P_0 (側圧係数は1.0)は大変形地山の解析も視野に入れて、4段階;土被り100m, 200m, 300m, 400m($P_0=8.4\text{MPa}$)に設定した。

トンネル断面は土木学会標準示方書(2006)⁵⁾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表-2~表-4とした。吹付けコンクリートは全周吹付け、ロックボルトと鋼製支保工は底盤側なしを基本とするが、今回は底盤側ありの全周支保も用いる。なお、支保工は全て強度を考えず線形弾性体と仮定し、支保剛性を一定に保っている。

(2) 解析領域を拡張した10Dモデルへの切換え

図-1に新、旧モデルの解析領域を示す。前報まではトンネル中心から約3D位置に境界設定していたが、解の再現性を保証するために中心からの距離10Dに改めた。

図-2は新、旧解析結果の比較の一例で、鉛直、水平両方向について;土被り400mのトンネル特性曲線と、土被り0~400m間の素掘りトンネル解析解の軌跡とを示す。

色付き実線が新 10D モデル、寄添う形の黒色点線が旧 3D モデルの解である。両者の形状は類似し、旧モデルの相対誤差は鉛直方向の合成特性曲線で最大 10%（空洞ひずみで 0.2%以下）、水平方向では殆ど差がない。

3. 組合せ支保工の「共通効果」

(1) 合成特性曲線における共通効果の定義

たとえば前出図-2 は、吹付けコンクリート (Sc)、ロックボルト (RB)、鋼製支保工(SS)の 3 種の支保工を、掘削解放率 70%で同時設置した場合の鉛直、水平双方のトンネル特性曲線の図である。本来、赤線(G+Sc+RB+SS)だけが求まるが、これに、Sc 単独 (G+Sc) の青線と、Sc と RB 組合せ (G+Sc+RB) の茶色線を追加解析している。この順に各支保工の効果が発揮されたと考えると、最初の Sc の効果が極端に大きくて、後に続く RB や SS の効果が極めて小さいということになるが事実だろうか。

この部分を抜き出したのが図-3 である。Sc 単独(G+Sc) から Sc, RB 組合せ(G+Sc+RB)への図(左)と、逆に RB 単独 (G+RB)から Sc, RB 組合せ(G+Sc+RB)の順にした図(右)である。Sc も RB も単独支保の効果 a1, b1 の方が組合せ時の効果 a2, b2 よりも大きく、しかも各支保工の効果の差は $a1 - a2 = b1 - b2$ となり、両者で等しいことが分かる。

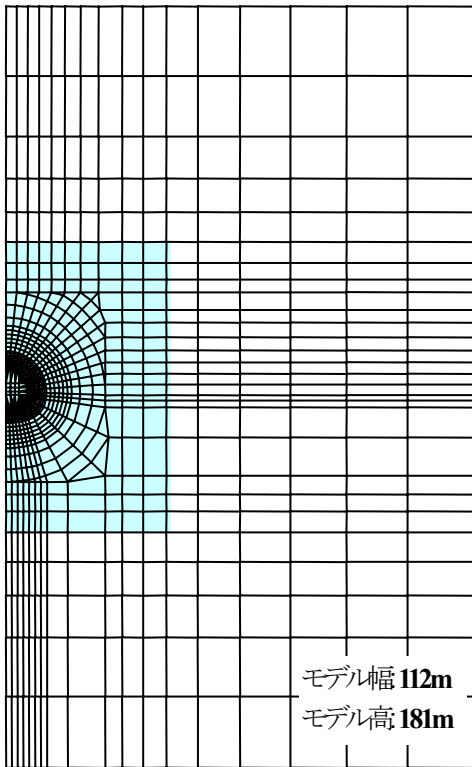


図-1 無限境界対応の 10D 解析モデル（青色の領域が前報までの 3D 解析モデル）

表-1 解析用 D 級岩盤の物性 注)軸圧縮強度 $\alpha=3.26\text{MPa}$

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

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
4000 MPa	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	奥行方向打設間隔
206 GPa	24 mm	1.2 m	1 m

注)1断面 4.0m×19本 (+インバート部9本)

表-4 鋼支保工の物性および仕様 注)建込間隔 1m

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

これを両支保工の組合せ時の「共通効果」と名付けた。共通効果と考えれば、最初に描いた支保工の特性曲線に現れて、後に描いた特性曲線にはその分を除く効果しか現れないと解釈できる。

(2) 共通効果の事例検討

図-4 上半分には標準とした Sc のみ全周吹付け、RB と SS は底盤側なしの支保工で、2 種の支保工の組合せ時の共通効果を示す。上段に Sc と RB の組合せ (Sc+RB)、下段に Sc と SS の組合せ (Sc+SS) の場合を示す。同様にして、下半分には全ての支保工が底盤側有りの全周支保とした場合を示す。○数字は空洞ひずみの小さい順を示

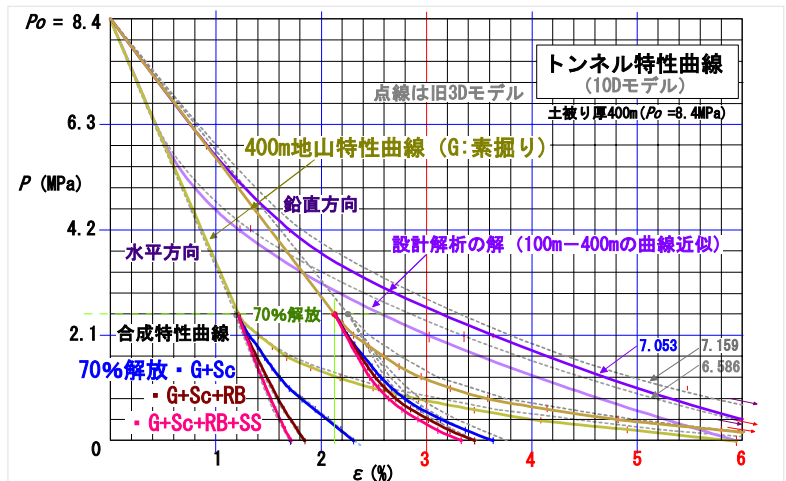


図-2 必要支保圧一空洞ひずみ座標のトンネル特性曲線と解析解の軌跡：実線が新しい 10D モデルの解、点線が従来の 3D モデルの解

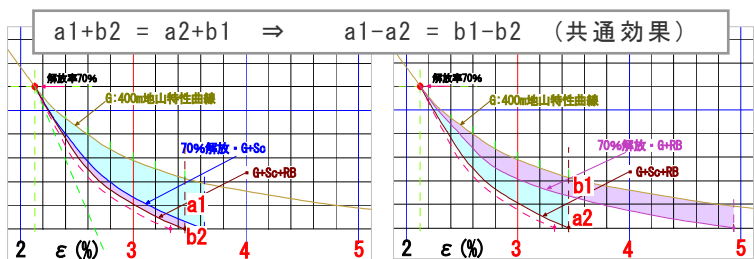


図-3 合成特性曲線における「共通効果」の定義

し、水平方向①～④が揃って鉛直方向⑤～⑧より順位が上なのは、素掘り時の大差による。

底盤側なしで、SS⑦が鉛直方向空洞ひずみの抑制に効き、RB③が水平方向空洞ひずみの抑制に効く特性を示す。それが全周支保になれば鉛直方向でRB⑤がSc、SSを押さえて第1位になり、水平方向ではSS②の単独効果が予想通り大きく伸びる。このように各支保工は全周支保になれば、それぞれが見事な全方位の支保効果を発揮するので「断面閉合効果」としての機構面の説明が待たれる。

本題の「共通効果」について見ると、鉛直方向空洞ひずみは、図-4の4例⑤～⑧とも図-3に例示したとおり、先に描いた、単独支保工の方に共通効果が含まれて、後に描く組合せ時の効果が小さく見える例となる。

ところが水平方向空洞ひずみは違っている。RBを含む(Sc+RB)の場合は底盤側なし③、あり①いずれも、図-3とは逆に、単独時よりも後に描く組合せ時の方に共通効果が現れて大きく見える例となる。SSを含む(Sc+SS)の場合には、底盤側なし④で単独時も組合せ時も効果が等し

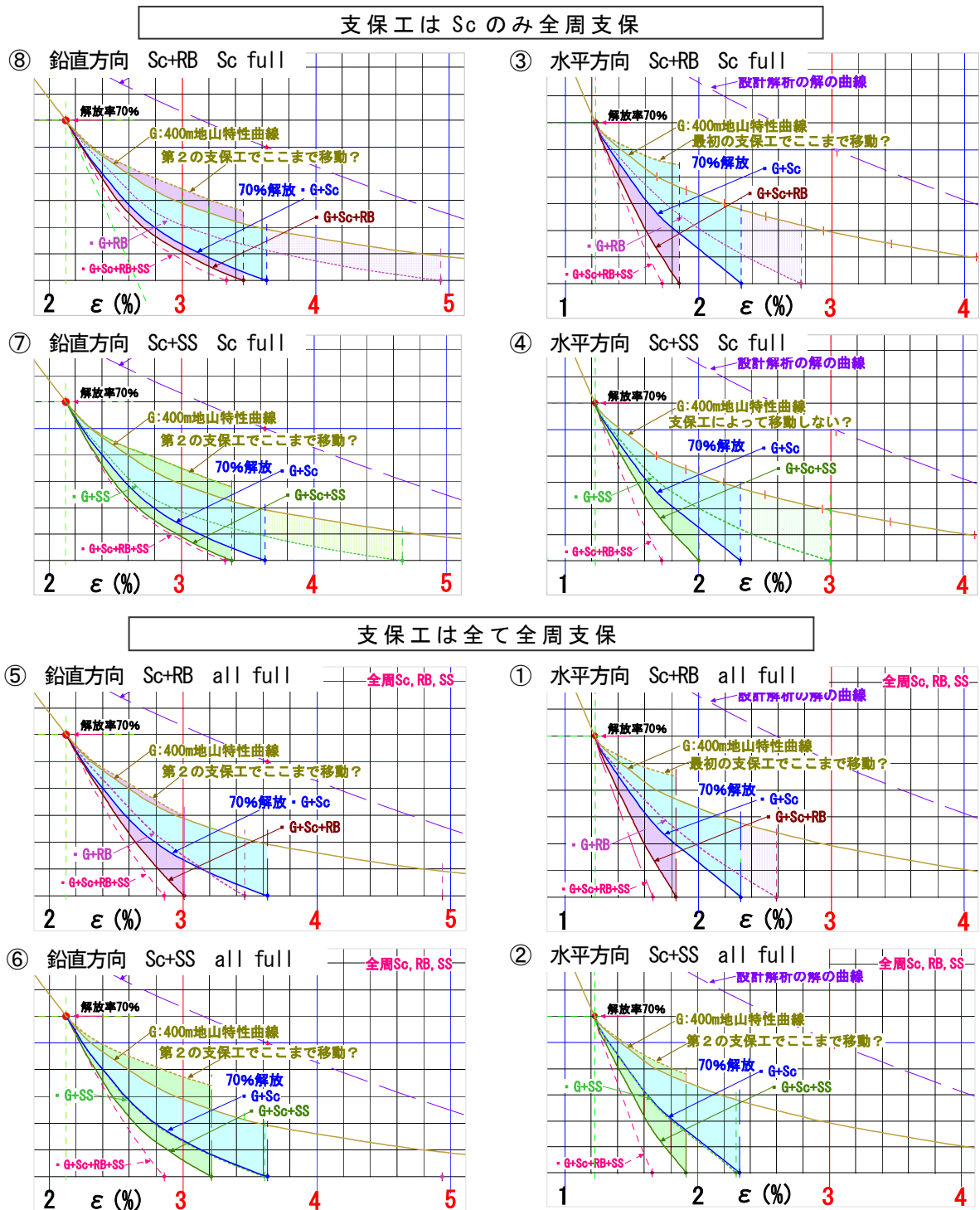


図-4 組合せ支保工の合成特性曲線に現れる種々の「共通効果」(共通効果を地山特性曲線の移動量で表示)

く、共通効果=0の例となり、全周支保②では単独時に共通効果が現れる例となる。すなわち、水平方向には共通効果の3通りの現れ方すべてが現れたわけである。このような複雑な現れ方は、支保工や地山の刻々の支保力状況が特性曲線に深く関わっていることを予測させる。

4. 特性曲線と地山支保力、支保工力の結合

(1) 特性曲線を支配する地山支保力と支保工力の指標化

特性曲線を左右する地山支保力の指標としては、地山支持リング^{1),6)}形成の有無にも配慮し、トンネル壁面要素の接線応力 (σ_θ) を用いる。各支保工が發揮している支保力の指標としては各軸力 (Sc) , (RB) , (SS) を用いる。指標は出来るだけ単純化するため、図-5に示すように、鉛直方向と水平方向それぞれの空洞ひずみに、直接関与する位置の地山や支保工のFEM要素の値とした。

鉛直方向空洞ひずみに対しては左右SL位置の鉛直方向支保成分となる要素 $(\sigma_\theta)_{90}$, $(Sc)_{90}$, $(SS)_{90}$ がそれぞれであるが、ロックボルトだけは天端と底盤センター位置の鉛直方向支保成分 $(RB)_0$ である。吹付けと鋼製支保工は奥行方向1m当りの全軸力となるが、ロックボルトは奥行方向1m当りにセンター位置の1本のみの値を用いた(全軸力としては打設本数からしてその3~4倍と考えられる)。

同様に水平方向に対しては、天端と底盤センター位置の水平方向支保成分となる $(\sigma_\theta)_0$, $(Sc)_0$, $(SS)_0$ およびロックボルトについては左右SL位置の水平方向支保成分となる $(RB)_{90}$ である。なお、支保工の各軸力は天端と底盤センター位置、あるいは左と右SL位置の平均値を用いる。

(2) 特性曲線 - 支保力指標の連成図の構成

支保工の支保効果を表わす合成特性曲線と、支保工の作用状況を示す支保工力や地山応力の指標とを結びつける図として図-6を示す。図-6全体で図-4の上半分の「Scのみ全周支保」の特性曲線に対応するもので、図-6の上半分がSc+RBに対応し、下半分がSc+SSに対応する(各図に付した○数字を参照)。各図の構成は、上から順に支

保工力、地山応力、特性曲線の図からなっている。これらの横軸は特性曲線の空洞ひずみに揃えられている。

Sc+RB 組合せ支保工の鉛直方向の1段目左の図⑧を例にとると、下の特性曲線がSc単独、Sc+RB組合せの順で描かれた場合であり、上の支保工力もScの軸力をSc単独時(空色べた塗り)とSc+RB組合せ時(空色+縦線パターン)の重ね描きでScの働き具合の差を表わす。

中程の地山応力の鉛直方向の支保指標 $(\sigma_\theta)_{90}$ は、地山特性曲線と同様に素掘りトンネルの初期応力 P_0 からの掘削解放経路(黄土色)を基準に、設置時に分岐する支保工関与の経路として描かれる。ほぼ分岐点付近から減少過程に入っているのは掘削解放による σ_r の減少で塑性化が始まるためである。これもSc単独とSc+RB組合せ時の順に重ね描きとし、素掘りの黄土線より増加分は「べた塗り」、減少分は「白地+縦線パターン」で区別し、地山支持リング形成の有無にも注目する。

同図右には対応する水平方向の図③が同様に描かれている。鉛直方向と対比しながら読むとともに、支保工の作用効果は双方向に及ぶ場合があるので、時にはその点の注意も必要であろう。

同じくSc+RB組合せ支保工の2段目の図、(左⑧鉛直と右③水平)であるが、これは特性曲線が上記とは逆に、RB単独、Sc+RB組合せの順に描かれたものである。支保工力の図がRBに関する図となることと、地山応力の図でRBの単独効果が読めることなど、RB主体の図となっている。上記のSc主体の図と一対になってSc+RB組合せ支保工の理解に欠かせない図である。

下半分はSc+SS組合せ支保工(⑦と④)の図で、上記と同様にSc単独支保工で開始する場合(3段目)とSS単独支保工で開始する場合(4段目)を示している。以上でもって、図-4の「Scのみ全周支保」の特性曲線に関する支保工の作用状況を踏まえた考察が可能となる。

(3) 地山や支保の働きと特性曲線(図-6の考察)

a) Sc+RBの鉛直方向の場合⑧: 支保工力の図よりScの働きは単独よりも組合せ時に減少する。RBの働きは単独時も組合せ時も変わらない。地山応力の図から、Scも

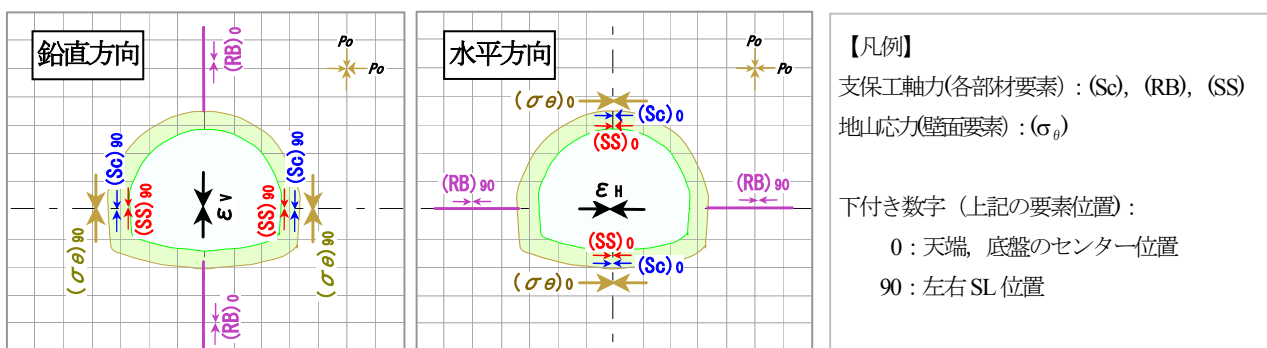


図-5 各支保工と地山の支保力發揮状況の指標化(鉛直と水平各方向の空洞ひずみの支配因子を選定)

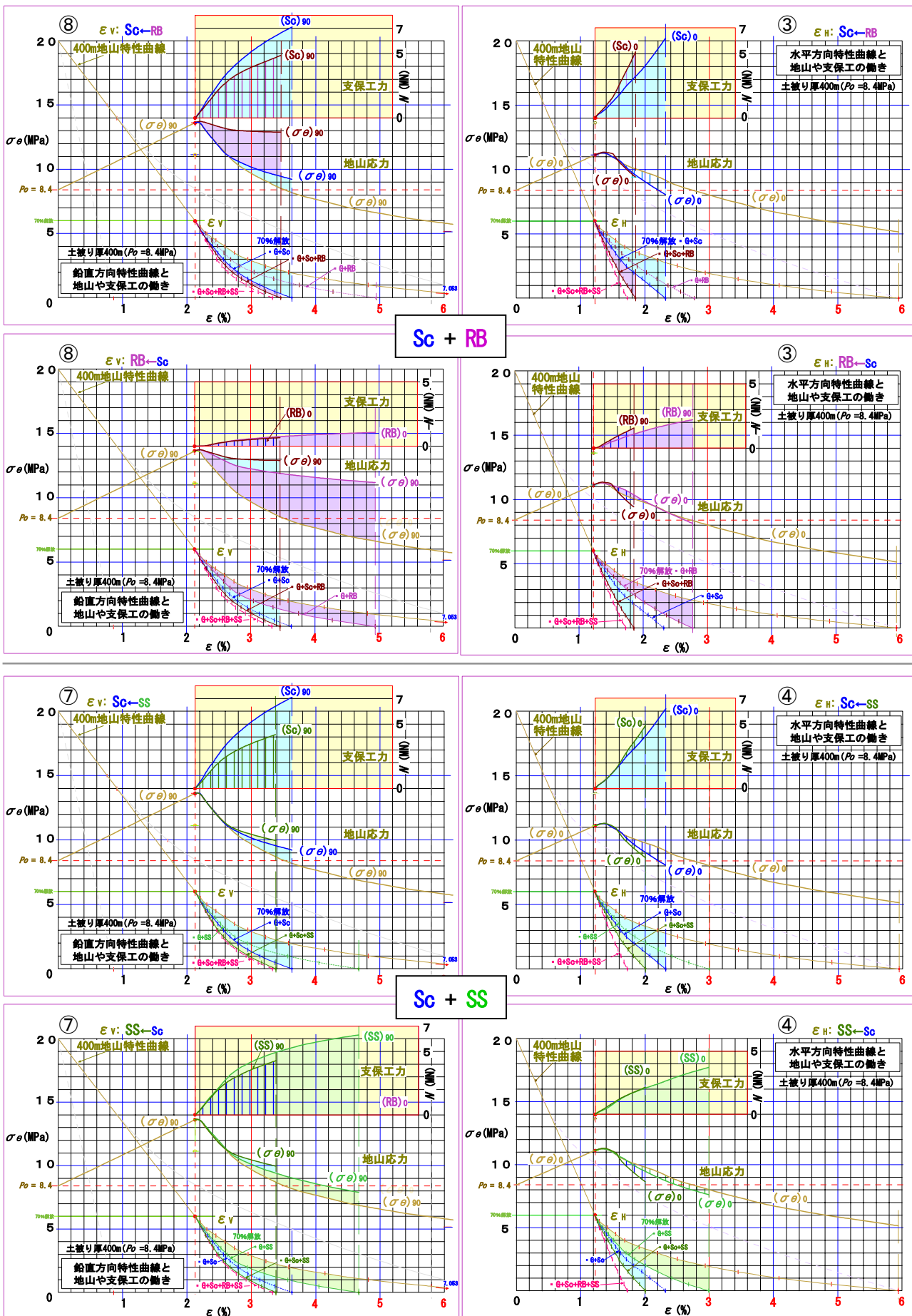


図-6 2種類の組合せ支保工の「共通効果」時の地山と支保工の挙動

RB も単独時と組合せ時とで変わらない。地山応力(σ_{θ})₉₀ の増加はRB が断然大きく、Sc は小さい。

これらの事実から、特性曲線はRB 単独を先に描いた2 段目の図に近く、Sc は組合せ時に力を抜いており、実の共通効果は生じていない。また掘削進行につれて、Sc は掘削解放力を直接軸力として分担し、一方 RB は大きな引張り軸力を地山に圧縮反力 σ_r として戻し(σ_{θ})₉₀ の減少をくい止めるといった両者の支保機構の違いが見える。

b) Sc+RB の水平方向の場合③：支保工力の図より Sc も RB も軸力は単独よりも組合せ時に増加させる。地山応力の図から、Sc も RB も単独時と組合せ時とで作用は殆ど変わらない。RB が地山応力(σ_{θ})₀ を僅かに増加傾向だが底盤側が無いため効かない。Sc は唯一全周支保だが底盤側を支えきれないためか素掘りの(σ_{θ})₀ より減少させる。

これらの事実から、特性曲線は Sc を先に描いた一段目の図に近く、地山支保力の減少分を Sc が補っている。この場合も実の共通効果は生じていない。

また、Sc による地山支持リング形成は多くを望めないようで、RB も底盤側が無いために天端と底盤側を合わせた水平方向地山応力(σ_{θ})₀ の大きな増加が見られない。

c) Sc+SS の鉛直方向の場合⑦：支保工力の図より Sc も SS も働きは単独よりも組合せ時に減少する。地山応力の図から、Sc も SS も単独時と組合せ時とで作用は殆ど変わらずに、ともに(σ_{θ})₉₀ をわずかに増加させる。

これらの事実から、Sc も、SS も単独時より組合せ時に支保力を下げて、各支保工の特性曲線は単独時よりも上方に移動している。この場合も実の共通効果は生じない。

d) Sc+SS の水平方向の場合④：支保工力の図より Sc は単独よりも組合せ時に僅かに働きを増加させる。SS は単独と組合せ時とで変わらない。地山応力の図から、Sc も SS も単独時と組合せ時とで作用は殆ど変わらず、ともに素掘りの(σ_{θ})₀ より減少させている。

これらの事実から、特性曲線は Sc, SS どちらを先に描いた図も正解で、Sc は組合せ時に僅かに大きな支保力を

発揮しているが、地山支保力の減少補填のためである。この場合は珍しく特性曲線での評価も一致して、実の共通効果が生じていないとし得る例である。

5. 結 語

NATM 理論の基本となるトンネル特性曲線が与えられた設計条件で簡単に解析できることから、特性曲線で実用的に何ができるかを見出してゆくことこそ重要となる。

本報では特性曲線で常に問題となる「共通効果」を採り上げ、解析事例をパターン化して考察するとともに、特性曲線と支保工力、地山応力の解析結果を結合することによって、特性曲線に見掛けの「共通効果」が生ずる理由を説明した。ロックボルトを始めとした各支保工の見事な断面閉合効果と地山支持リングの形成についても、同様の手法で説明すべく解析をすすめている。

参考文献

- 1) L.V. Rabcewicz : Stability of tunnels under rock load (Part I), *Water Power*, p.226, June, 1969
- 2) 木山, 西村, 畑, 中岡 : 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, pp.279-280, 2007
- 3) 木山, 西村, 畑, 中岡 : トンネル用ソフトで通常的设计解析と同時に描く地山特性曲線と内空変位曲線, 土木学会第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム, 21, pp. 119-124, 2008
- 4) 木山, 西村, 畑, 中岡 : NATM の地山特性曲線で得られた支保効果に関する知見, 第 12 回岩の力学に関する国内シンポジウム, pp.759-765, 2008
- 5) 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, 丸善, 2006
- 6) L.Müller : Removing misconceptions on the New Austrian Tunnelling Method, *ITA Symposium '78*, Tokyo, 1978

ESTIMATION OF THE SUPPORT ACTIVATION IN NATM BY MEANS OF THE TUNNEL CHARACTERISTIC CURVE - SHARE OF SUPPORT LOAD AND EFFECT OF THE LINING CLOSING -

Hideo KIYAMA, Tsuyoshi NISHIMURA, Koji HATA and Kenichi NAKAOKA

In this paper, the tunnel characteristic curve is defined as the whole lines, the main ground reaction line under the non-supported condition and its branch lines representing effects of artificial linings on radial displacement reduction. We got an example of the curve by using a FEM software with a fictive stress release at the tunnel wall and with possible combinations of the lining members. The example curve explains coordination of the lining members for the reduction and the promotion by the lining closing. Referring to values of stresses and forces acting in the ground and in/on the lining elements with the fictive stress release, we will show a methodology of estimation for the contribution of each lining member in terms of the share of load by the members to the necessary support load.