

支保工が塑性化する場合のトンネル特性 曲線の考察 —D級岩盤標準支保工の 地山強度比1以下への対応—

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

地山強度比 1 以下では支保工の塑性化は避け難いので、現実的に少々の塑性化を許す形で、「地山を弾性体と仮定した場合の地山特性直線よりも、空洞ひずみの小さいトンネル特性曲線の確保を支保工設計の目標とする」とした試案を提示する。支保工の働きによって、地山がマクロに弾性的であることの保証であり、この釣合い状態で迅速に覆工を施工して地山を固定できれば、支保工のさらなる塑性化も防げるとする考え方である。何よりも「支保の主体は地山である」とする NATM の原理に適っている。逆に、「支保の主体である地山岩盤の塑性化を許しながら、補助である支保工の塑性化を許さない」とする現行の一般的な設計方法の方が NATM の原理に外れていないだろうか。本報が再考への一助になればと願っている。

Key Words : NATM, tunnel characteristic curve, elasto-plastic behavior of support, poor competence factor, FEM

1. はじめに

表-1 に示すD級岩盤を用い、地山が塑性化する地山強度比 $G_n = 1.55, 0.78, 0.52, 0.39$ (土被り $h = 100m, 200m, 300m, 400m$ で対応) の4水準を採り上げて、標準支保工を基本に、インバート支保工を加えた支保工の全周化によって、実用的な対応が可能かどうかを検討している^{1),2),3),4),5)}。

トンネルは高さ $9.1m \times$ 幅 $11.2m$ の道路用標準断面で、表-1 に示した「標準支保工」と、その吹付けのみを全周化した「Scのみ全周」、3支保工すべてを全周化した「全周支保工」の3パターンを採用した。

表-1 岩盤と支保工の物性と仕様

(a) 解析用D級岩盤		一軸圧縮強さ $\sigma_c = 3.26MPa$		
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°

(b) 吹付コンクリート		一軸圧縮強さ $\sigma_c = 18MPa$	
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

(c) ロックボルト		降伏点 $\sigma_t = 510MPa$	
弾性係数	直径	周方向打設間隔	軸方向打設間隔
206 GPa	24 mm	1.2 m	1 m

注) 1 断面 4.0m \times 19本 (+インバート部9本)

(d) 鋼製支保工		降伏点 $\sigma_t = 245MPa$		
弾性係数	断面	断面二次モーメント	断面積	建込間隔
206 GPa	H150	1620 cm ⁴	39.7 cm ²	1m

まずは支保剛性の適否の見当をつけるため、降伏点を無視した弾性支保工として、最も厳しい $G_n = 0.39$ に用いた場合のトンネル特性曲線を図-1 に例示する。

無支保の地山特性曲線(黄線)の70%から支保工設置によって分岐した、吹付け(Sc;青線)、吹付け+ロックボルト(Sc+RB;茶線)、吹付け+ボルト+鋼製支保工(Sc+RB+SS;赤線)の順に描いている。いずれも支保工で補強された地山の鉛直空洞ひずみと水平空洞ひずみを示しており、 $G_n = 0.39$ では地山の大きな塑性変形に引かれて、弾性支保工といえどもトンネル特性曲線の曲線化は避けられないことがわかる。なお、以下において特に断らない限り、空洞ひずみの大きい鉛直方向の特性曲線について、かつ全支保工設置の赤線に注目して論を進めることにする。

$G_n = 0.39$ の場合、この結果からは「標準支保工」や「Scのみ全周」では限界ひずみの目安3%を満たせず、「全周支保工」の場合のみがやっと3%限界を満たしている。この状況からさらに支保工の降伏を加えることを考えると、 $G_n = 0.39$ におけるこれら標準支保工の全周化パターンでの3%限界の達成は相当困難と予測される。

その他の地山強度比の場合も併せて、弾性支保工の空洞ひずみの値を表-2a にまとめておく。以下の本論では、実際的な弾塑性支保工とした場合に話しを進める。

2. 弾塑性支保工の場合のトンネル特性曲線

弾塑性支保工とした場合のトンネル特性曲線を図-2 に示す。左列の3枚が $G_n=0.39$ ($h=400m$) の場合である。地山特性曲線が大変形する部分では、支保工も降伏して大変形を余儀なくされるので、トンネル特性曲線もまた空洞ひずみの急増する大変形曲線になり易いことがわかる。かくして $G_n=0.39$ の場合は、先の推測通り標準支保工の全周化パターンでは3%限界を満足することはできなかった。

つぎに、右列の3枚が $G_n=0.52$ ($h=300m$) の場合である。 $G_n=0.39$ に比べると、初期地圧の減少に伴って地山特性曲線の大変形が相当小さくなることから、支保工の降伏も少なく、トンネル特性曲線は標準支保工をはじめ3パターンすべてが空洞ひずみ3%限界を満足することがわかる。

表-2b に示すように、これより大きな地山強度比 $G_n=0.78$ ($h=200m$) や $G_n=1.55$ ($h=100m$) の場合には、地山特性曲線自身が弾性的な直線に近づき、空洞ひずみも15%以下であるので、支保工で補強されたトンネル特性曲線はより直線的となり、当然3%限界も楽に満足している。

以上のことから結論として、表-2b の $G_n=1.55$ から 0.52 までにおいて、標準支保工を始め3パターン全てで鋼製支保工 SS 有りはもちろん、SS 無しでも空洞ひずみに大差なく、いずれも3%限界を満足することが重要である。

表-2a 地山強度比と支保工種別による空洞ひずみの変化(弾性支保工)

		地山強度比 土被り厚				
		1.55 100m	0.78 200m	0.52 300m	0.39 400m	
地山	(弾性)*	ϵv (%)	0.76	1.52	2.28	3.04
		ϵh (%)	0.44	0.87	1.31	1.75
(弾塑性)		ϵv (%)	0.76	1.70	3.63	7.05
		ϵh (%)	0.44	1.24	3.04	5.95
標準支保工		ϵv (%)	0.70	1.42	2.52	4.35
		ϵh (%)	0.40	0.84	1.39	2.03
標準支保工の Sc全周		ϵv (%)	0.69	1.39	2.24	3.33
		ϵh (%)	0.39	0.79	1.25	1.73
標準支保工の Sc, RB, SS全周		ϵv (%)	0.69	1.37	2.09	2.86
		ϵh (%)	0.38	0.77	1.20	1.66

表-2b 地山強度比と支保工種別による空洞ひずみの変化(弾塑性支保工)

		地山強度比 土被り厚				
		1.55 100m	0.78 200m	0.52 300m	0.39 400m	
地山	(弾性)*	ϵv (%)	0.76	1.52	2.28	3.04
		ϵh (%)	0.44	0.87	1.31	1.75
(弾塑性)		ϵv (%)	0.76	1.70	3.63	7.05
		ϵh (%)	0.44	1.24	3.04	5.95
標準支保工		ϵv (%)	0.70	1.43	2.62	5.01
		ϵh (%)	0.40	0.86	1.58	2.99
全上、SSなし		ϵv (%)	0.72	1.46	2.71	5.24
		ϵh (%)	0.42	0.89	1.70	3.29
標準支保工の Scのみ全周		ϵv (%)	0.69	1.40	2.34	4.23
		ϵh (%)	0.39	0.81	1.46	2.85
全上、SSなし		ϵv (%)	0.71	1.43	2.41	4.42
		ϵh (%)	0.40	0.85	1.61	3.20
標準支保工の Sc, RB, SS全周		ϵv (%)	0.69	1.39	2.23	3.78
		ϵh (%)	0.38	0.79	1.44	2.81
全上、SSなし		ϵv (%)	0.71	1.42	2.31	4.09
		ϵh (%)	0.40	0.84	1.60	3.18

*は地山を弾性と仮定した場合の参考値、緑地色は空洞ひずみがそれ以下に収まるケース、赤字は空洞ひずみが3%限界を超えるケースを示す。

3. 支保工の降伏状況

$G_n=0.39$ 以外は3%限界を満足しているのに、残された問題は支保工の降伏である。現実には支保工の降伏を許さない設計が求められているが、問題となる地山は地山強度比が小さく塑性変形する場合で、支保工の降伏が避けられないのもまた現実である。解析結果を示そう。

今回解析したすべての支保パターンについて、掘削解放率70%で設置した3種の支保工;吹付け(Sc), ロックボルト(RB), 鋼製支保工(SS)の降伏状況を図示すれば図-3 のようである。図は2段ずつ3組が「標準支保工」, 「Scのみ全周」, 「全周支保工」であり、それぞれ上段がSc+RB, 下段がそれにSSを加えたSc+RB+SSである。地山強度比は $G_n=1.55$ から 0.39 まで左から右へ4列である。

最小の $G_n=0.39$ の場合には全ての支保パターンにおいて、全支保工が全体に降伏しており、このことと先の特性曲線の3%限界超過とを併せて、標準支保工の全周化といった増強では $G_n=0.4$ 以下への対応は不可能と結論した。

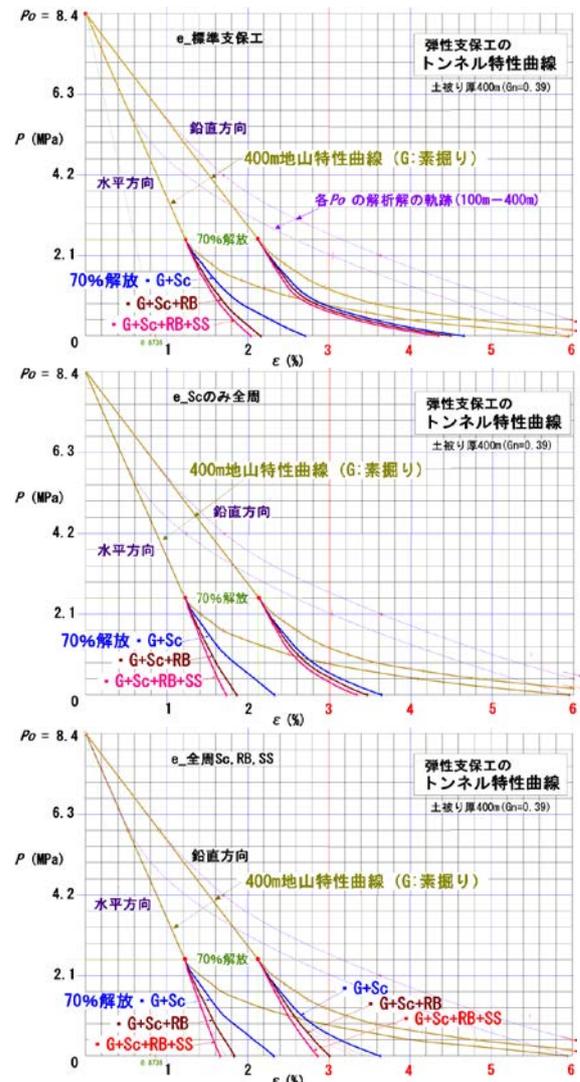


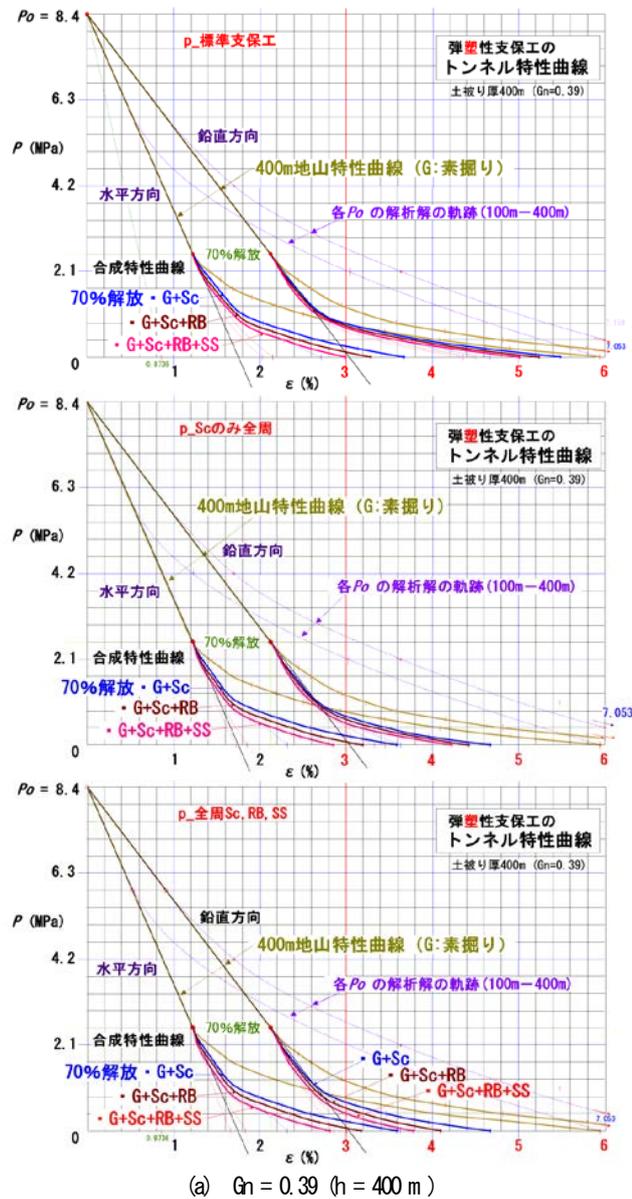
図-1 弾性支保工とした支保剛性評価: 標準支保工の全周化によるトンネル特性曲線の変化 ($h=400m$, $G_n=0.39$)

反対に最大の $Gn=1.55$ の場合にはどの支保パターンでも、支保工が降伏することなく健全性を保っており、標準支保工で十分対応可能と判断される。

その半分の $Gn=0.78$ の場合、鋼製支保工 SS の全般的な降伏が気になる程度で Sc や RB はほとんど降伏しない。他の要件が満たされるなら SS を使用するなどとなる。

さらに小さい $Gn=0.52$ の場合、いずれのパターンも支保工の降伏が少なからず見受けられ、特に鋼製支保工 SS を用いると必ず全般降伏し、だからと言って SS を省くと Sc が全般降伏するといった状況が認められる。

このように鋼製支保工 SS は、地山強度比 $Gn=1$ 以下で用いれば殆ど必ず全般降伏するので、 $Gn=1$ 以下では用いないことと言うのは容易であるが、地山が悪い場合にこそ SS をと考えるのが現場であり、上述のように Sc の全般的な降伏を代替するなど、実際には重要な役割を果たしている可能性も考えられるので更なる検討が必要となる。



4. 岩盤の降伏状況と地山支持リング

図-4 は、前出図-2 の特性曲線や図-3 の支保工の降伏状況に対応する、 $Gn=0.52$ の場合の地山岩盤の降伏要素(赤地)、要素数 n と地山支持リング(茶線)の変化を示す。地山支持リングは空洞を取り囲む地山の接線応力(第 1 主応力)の最大点を結ぶほぼ円形状を成し、天端のアーチと底盤のインバート(逆さアーチ)が連結したものと解される。

図の上段が「標準支保工」、中段に「Scのみ全周」、下段に「全周支保工」の場合で；各段は左から順に Sc 図、Sc+RB 図、Sc+RB+SS 図である。下段左、Sc full の図のダブル位置に、基本となる「素掘り」の場合を挿入している。

馬蹄形トンネル断面の地山支持リングは、掘削解放率約 70%までの弾性域においては、緑線で示すように天端のアーチが天端と側壁の壁面を通る円弧状に対して、底盤の逆さアーチは上記の円弧を延長したほぼ円形状に底盤深く潜っている。にもかかわらず、地山岩盤の降伏(赤地)は底盤側もすべて空洞壁面から発生し、そこから岩盤内部へと進展するといった 2 面性が極めて特徴的である。

100%解放時の降伏領域(赤地)と地山支持リング(茶線)は、素掘りトンネルの場合に比べるとすべての支保パタ

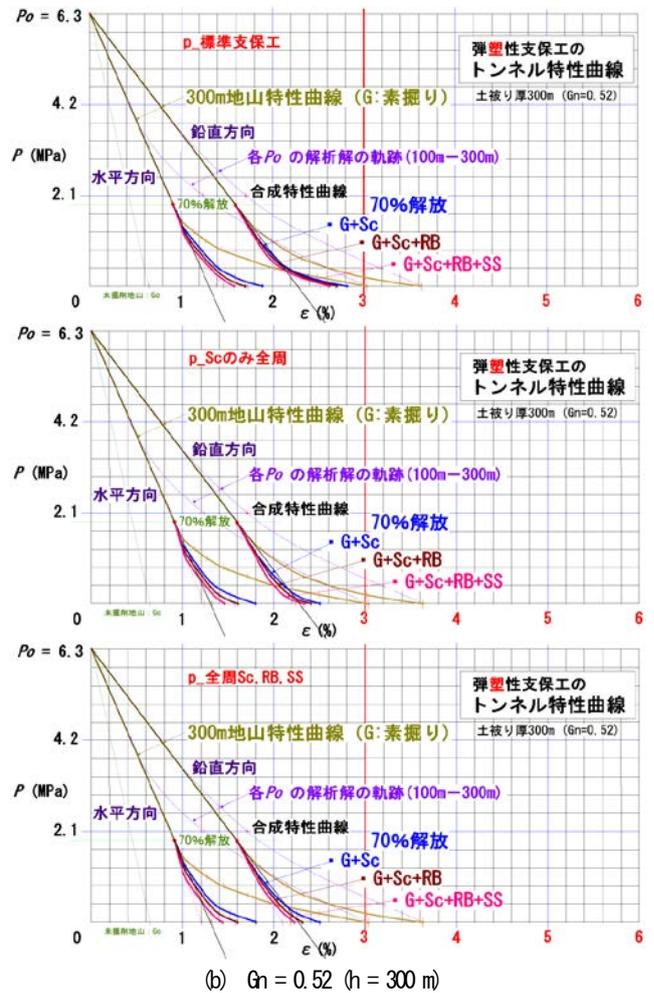


図-2 弾塑性支保工：標準支保工とその全周化によるトンネル特性曲線の変化

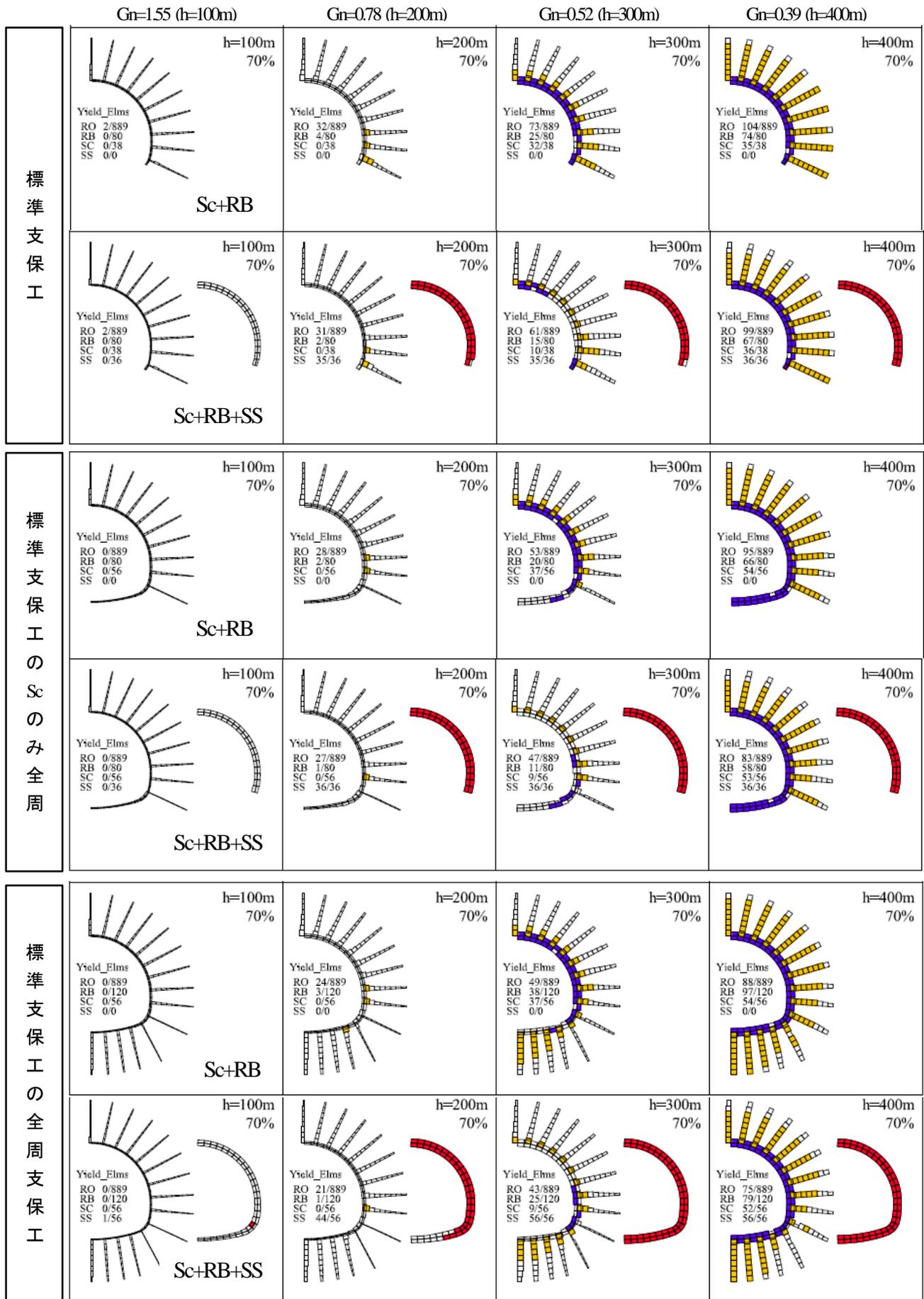


図-3 標準支保工とその全周化による各支保工の降伏状況の変化：降伏要素に彩色，青 (Sc)，黄 (RB)，赤 (SS)

ーンで縮小する。ただし、標準支保工の場合のインバート部の降伏領域は素掘りの場合と変わらず、インバート支保を加えた支保工の全周化によってはじめてインバート部の降伏領域を縮小できる。それもあって、上段の標準支保工と中段・下段の全周化した支保工との間で、降伏領域図および支持リング図が大きく2分化されている。

降伏要素数 n も概数的でありながら有効な支保効果指標となる。この図にRBのデータ $n=93$ とRB fullの $n=88$ を加えて、各小図を上下、左右に比較すれば、Sc, RB, SSの共通効果、連成効果を含むそれぞれの降伏領域の削減効果を詳細に評価できる(紙面の都合で割愛する)。

このことから、降伏領域の進展が鉛直・水平空洞ひずみの主たる支配因子であるとすれば、前出図-2(b)トンネル特性曲線の各支保工の青、茶、赤の線に対応する具体的な地山のイメージは、下図のそれぞれ対応する支保パターンでの地山降伏図ということになる。

5. 地山の巨視的弾性挙動を目指す支保工指針

上記した図4の降伏領域図から $Gn=0.52$ においては、下段、全周支保工の Sc+RB+SS の場合が弾性地山に最も近い。この場合のトンネル特性曲線は前出図-2(b)の下段、全周支保工の赤線である。 $Gn=0.52$ で唯一弾性地山の空洞ひずみ以下に収まっている。これをヒントに、図-2のトンネル特性曲線の全てに当たって確信を得たのが以下に述べる「支保工の設計目標値の設定法」である。

「地山を弾性体と仮定した場合の地山特性直線よりも、空洞ひずみの小さいトンネル特性曲線の確保を支保工設計の目標とする」がそれであって、図-2の各小図に引いた黒線より小さな空洞ひずみに、トンネル特性曲線が収まるように支保工を設計することを求めている。

弾性地山の特性直線は、すべての地山で掘削解放過程の初期に現れる地山特性曲線の直線部分がそれであるか

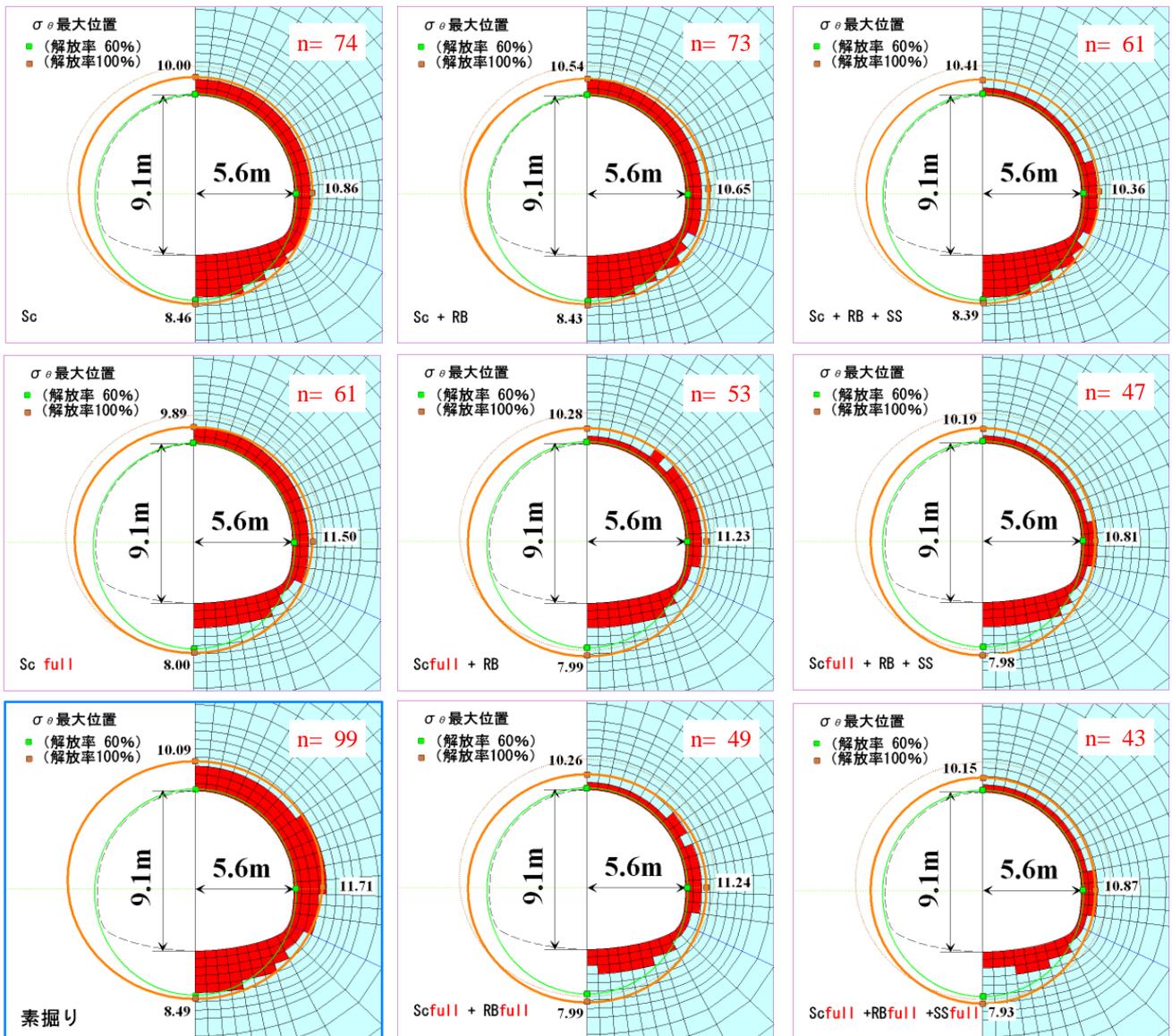


図-4 支保工による岩盤降伏要素(赤地)と降伏要素数 n および地山支持リング(茶線。ただし、緑線は弾性時で共通)の変化: 地山強度比 $Gn=0.52$, 上段は標準支保工, 中段はScのみ全周, 下段は全周支保工(左端に素掘りトンネルの場合を挿入)を示す。

ら、これを延長したのが図の黒線である。地山の弾性係数とトンネル形状によって1本に定まり、土被りや地山強度比等には左右されず汎用性のあることは、地山特性曲線の表示法として文献1)~5)で繰り返し紹介してきた。

上記の支保工目標は、地山強度比が小さくなれば地山の少々の塑性化も認めざるを得ないと考えている。それでも支保工で補強された地山が描くトンネル特性曲線が、弾性地山の特性曲線に見られる空洞ひずみ以内に抑えることができれば、地山の巨視的な弾性挙動は満たされていると考えられる。

当然のことながら、地山をできるだけ弾性的に保つために、支保工の少々の塑性化はやむを得ないと考えるべきである。NATMの基本原則⁶⁾「支保の主体は地山岩盤であり、支保工は岩盤がその役目を果たすように適切に支援する」を考えれば、主体となる岩盤が塑性化する状況で、補助となる支保工に降伏を許さないとするのは道理が通らないであろう。

この支保工設計目標を今回の全解析結果に適用した結果を前出表-2(b)に示す。緑地が目標達成の支保工パターンである。Gn=0.39の場合は3%限界超過の赤字が大部分なうえに、すべての支保工パターンが上記目標達成からもほど遠い。元々の弾性地山の目標値が3%限界超過の赤字である場合にはこの目標達成は到底無理だと判る。

Gn=0.52の場合は全周支保工の1パターンだけが緑地で目標達成である。ただし、その周辺には図-2や図-4からも予想された通り、設計目標に近い支保工パターンが存在するので、今後の検討課題となる。さらに、SSを入れればすべて全般降伏し、入れなければScが全般降伏するという、両者の折り合いの問題も残されている。

Gn=0.78とGn=1.55はほぼ全てのパターンが設計目標達成となる。ただし、Gn=1.55では、SSを入れても降伏しないが、入れなくてもScやRBに全く余裕があるので、入れない方が標準となる。一方、Gn=0.78ではSSを入れるとすべて全般降伏し、入れなくてもRBの要素数個が降伏する程度であるから、入れない方が良いとなりそうである。

6. おわりに

大きく塑性変形する地山強度比1以下を対象に、弾塑性支保工としてのトンネル特性曲線と支保工や地山の降伏状況を考察し、ここに提案した支保工の設計目標は塑性変形する地山をできるだけ弾性挙動に留めるためには支保工の降伏はやむを得ないとする考えに拠っている。

この設計目標値はこれまでの岩級区分ごとだけでなく、さらに地山強度比ごとに具体的に示される利点がある。しかし前述したように、支保工の塑性化をどこまで許すのか、あるいは目標値に対する許容範囲をどうするのか、等々、多くの課題も残している。先ずは大枠として実用化に沿うものかどうかご批判をお願いする次第である。

参考文献

- 1) 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 (Ferner-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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 木山, 西村, 畑, 中岡: 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—, 土木学会, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム, 43, pp.239-244, 2009
- 5) 木山, 西村, 畑, 中岡: NATMにおけるインバート支保工の必要性—特性曲線と地山支持リング図の検討—, 土木学会, 第39回岩盤力学に関するシンポジウム, 67, pp.369-374, 2010
- 6) L.V.Rabcewicz: Stability of tunnels under rock load (Part I), *Water Power*, pp.225-229, June, 1969
- 7) L.Müller: Removing misconceptions on the New Austrian Tunneling Method, *ITA Symposium '78*, Tokyo, 1978

TUNNEL CHARACTERISTIC CURVE WITH ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF SUPPORT —MEASURES OF THE STANDARD SUPPORT DESIGN AGAINST POOR VALUE OF THE COMPETENCE FACTOR —

Hideo KIYAMA, Tsuyoshi NISHIMURA, Koji HATA and Kenichi NAKAOKA

Most of normal tunnel characteristic curves under poor competence factor have been observed with yielding support through its helping the ground out of gross yielding. It proposes a new basis for tunnel support design especially in case of that yielding of the lining elements must be recognized. It is the point of the basis that the convergence of a supported tunnel should be confined below the elastic convergence of the same tunnel without support and that the confinement at a given competence factor is easily shown by two characteristic curves of the ground and the tunnel. A tunnel characteristic curve under this confinement secures that the tunnel ground is macroscopically in an elastic state although yielding of support occurs. The result accords with the claim of the NATM that the ground acts as the main load bearing component.