# 地山と支保の連動を表現する

# 地山—支保特性曲線の作成に関する研究

藤井翔平1\*・西村強1・河野勝宣1・小川金時1

<sup>1</sup>鳥取大学大学院(〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101) \*E-mail: m20j6018z@edu.tottori-u.ac.jp

山岳トンネルの標準工法であるNATMにおいて、支保圧一内空変位曲線を地山と支保の力学特性に基づいて描いたのちに地山と支保工の効果を具象化することを目指している.本文では、まず、吹付けコンクリート(SC)と鋼製支保工(SS)の複合体(シェル構造体)の荷重変位関係と、地山の変形特性や強度特性を既知として描いた地山特性曲線(GRC)の交点により地山と支保工の荷重負担分を表現する試みを記している.ついで、切羽の進行を応力解放で表現するトンネル掘削解析の結果として、支保工設置後にGRCから分岐する地山-支保特性曲線を示している.

Key Words :NATM, Tunnel Reaction Curve, Support

#### 1. 緒言

NATM はトンネル周辺地盤が空洞掘削に伴う応力解 放分を負担しながら,支保との協働により空洞が保持さ れているという考え方に基づいている. 図-1は、地山 の寄与分を支持構造物に対する土圧とトンネル周辺地盤 の変位の関係として示している ). しかしながら, NATM における設計概念は存在するが、それを具体化 するための理論的検証が完了していない状況にあると思 われる. そこで、本研究では、地山の変形特性や強度定 数など,既知量に基づいた地山と支保の連動を表現する 地山--支保特性曲線を作成することを目指している.本 文では、地山-支保特性曲線の作成のシナリオを示した のちに、2次元弾塑性解に基づく地山特性曲線(GRC) の作成について記述する. 続いて, 吹付けコンクリート (SC) と鋼製支保工(SS) を複合材として一体化した モデルと、一体モデルの剛性や厚さを算出する手順を記 述する. さらに、トンネル切羽の進行を模擬した2次元 有限要素解析に,前述の一体モデルをトンネル壁面に, はり要素として導入することにより、弾塑性解による GRC から分岐する地山-支保特性曲線の作成例につい て報告する.

## 2. 地山—支保特性曲線の作成のシナリオ

図-2は、トンネル掘削過程を2次元円孔問題に置き換 え,空洞部の応力解放で表現した地山特性曲線 (GRC) を示している. 弾塑性解を用いた式により、横軸を半径 方向変位 μ,縦軸を円孔表面にかかるσ として地山の 応力負担を表現する. ここで, GRC を与えるものとし て円孔周りの弾塑性解(カスナー解)を利用する. GRC の作成に必要な量は地山の弾性係数 E, ポアソン比v, 強度定数(c, Ø) であり、トンネルは円形と仮定する. 次に、支保と地盤との連動として特性曲線の構成を行う. 支保工はロックボルト(RB), 吹付けコンクリート (SC) そして鋼製支保工 (SS) で構成されるが、この シナリオでは、吹付コンクリート(SC)と鋼製支保工 (SS)を複合材としてモデル化した部材の剛性 Earで表 現する. 複合材の剛性の決定は、シェル構造体としてモ デル化する. 図-2 では、Eacを有する支保工に、Chを載 荷開始とする荷重変位関係を描いている(赤太実線). C<sup>im</sup>, C<sup>i</sup>など上添え字は支保工の設置時期の違いを示す ためのものである. 図-2 において支保設置開始時期を  $C^{\text{in}}$  (< $C^{\text{im}}$ ) 点とすれば, GRC 線との交点が  $B^{\text{st}}$  点であり, 地山と支保工それぞれの荷重負担分の読み取りが可能で ある. 支保工は、地山との接触面を介して荷重を負担し ながら、地山-支保系はつり合い状態に至る. この過程 は、GRC上の Bin点から分岐して最終変位 C<sup>4</sup>に向かう経





図-2 地山-支保特性曲線の具体化

路(図-2中の青線)として表現される.

#### 3. 弾塑性解を用いた地山特性曲線の作成

GRC の弾塑性解に基づく簡便な作成方法を記述する. 本文では、地山特性曲線、支保特性曲線を個別に求めた のちに、地山と支保が共存する時点で地山のみの特性で 描かれる GRC から分岐する地山-支保の関係を描いて いる. GRC については多くの研究例があるが<sup>2,3</sup>,地山 を弾完全塑性体とする一般的なものを用いている<sup>4</sup>. 地 盤モデルは均質地盤、等方応力状態を仮定し、地山は弾 性係数 *E*、ポアソン比v、強度定数 (*c*、  $\phi$ ) を有する材 料とする. 半径 *a* の円孔の周りに図-3 のように塑性域が 進展するとして、塑性域内の微小領域の力のつり合い式 は次式となる.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{(1-\zeta)\sigma_r - S_c}{r} = 0 \tag{1}$$

この式を解けば、内空圧のは次式のように求められる.



図-3均質,等方応力状態を仮定した地盤モデル

$$\sigma_{ra} = \left(\sigma_{rR} + \frac{S_c}{\zeta - 1}\right) \left(\frac{R}{a}\right)^{1-\zeta} - \frac{S_c}{\zeta - 1}$$
(2)

ここに、 $\sigma_{R}$ は弾塑性境界 r=Rにおける半径方向応力、  $\zeta=(1+\sin\phi)/(1-\sin\phi), S_{c}=2\cos\phi(1-\sin\phi)$ である.これを図-2の 縦軸を表現する量として用いる.図-2の横軸の半径方 向変位の計算には、塑性域では体積ひずみが一定とする、 塑性化後の塑性域の弾性係数を低下させる、二つの仮定 を用いる.塑性化後での体積ひずみの変化が0であると して、円孔表面 r=aにおける変位  $u_{a}$ は次式となる.誘導 課程は省き主要な式のみ示す<sup>4</sup>.

$$u_a = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_0 - \sigma_{rR}) \frac{R^2}{a}$$
(3)

しかしながら、塑性域内の体積ひずみの変化がない とするには、非圧縮性材料あるいは平均主応力一定 の条件が必要であるので、塑性領域のヤング率 Eを 低減させる簡易式も求めた.これは、内半径 a、外半 径 R の円筒が内圧 Ga、外圧 Ga を受けるときに、内半 径と外半径に生じる変位の解をもとにしており、次 式である.

$$u_{a} = \frac{1}{E^{*}} \left\{ \left( 1 - v^{*} \right) \frac{\sigma_{ra} a^{2} - \sigma_{rR} R^{2}}{R + a} + \left( 1 + v^{*} \right) \frac{aR(\sigma_{rR} - \sigma_{ra})}{R + a} \right\}$$

$$+ \frac{1 + v}{E} \left( \sigma_{0} - \sigma_{rR} \right) R$$
(4)

塑性領域の弾性係数,ポアソン比には上付き\*をつけて 区別している.なお,後出の例では,塑性化に伴うポア ソン比の低下はなく,弾性状態の値を保持するとしてい る.



(a) 円形ライニング (b) 微小物体に作用する力

図-4 ライニングのモデル化と微小物体に作用する力



図-5 圧縮と曲げに関する係数 と 円筒 (ライニング)の 相対厚さ tR.に関する計算例

# 4.吹付けコンクリートと鋼製支保工の複合体の剛 性

支保工を一体化させた複合体として剛性  $E_{q}$  と厚さ  $t_{q}$ の算出法を検討する.支保工のうち SC と SS を,半径  $R_{c}$ ,厚さ tの円筒形にモデル化する. 図-4(a)は 1/4 断面を 示したものである.そして,図-4(b)に中心角  $d\theta$ の微小 物体を示す.ここに, $p_{t}$ (半径方向応力), $p_{0}$ (周方向 応力), $u_{0}$ (周方向変位), $u_{t}$ (半径方向変位)とし, この物体に作用している力を図-4(b)中のように記述する とき,力とモーメントのつり合い式は次のようになる<sup>9</sup>.

$$\frac{dQ}{d\theta} - N + p_r R_c = 0, \quad \frac{dN}{d\theta} + Q + p_{\theta} R_c = 0,$$

$$\frac{dM}{d\theta} + Q R_c = 0$$
(5)

ここに、軸方向力 N、せん断力 Q、モーメント M であり、次式で示される.

$$N = -\frac{D}{R_c} \cdot \left( u_r + \frac{du_{\theta}}{d\theta} \right) - \frac{K}{R_c^3} \cdot \left( u_r + \frac{d^2 u_r}{d\theta^2} \right),$$

$$M = -\frac{K}{R_c^2} \cdot \left( u_r + \frac{d^2 u_r}{d\theta^2} \right)$$
(6)



図-6 SSとSCの複合体へのモデル化

なお、平面応力では D=EA, K=EI であり、平面ひずみで は  $D=EA/(1-v^2)$ ,  $K=EI/(1-v^2)$ である.式(6)の右辺の係数に 注目すると、 $\xi = DR^2/K$  が求まり、圧縮の剛性 D と曲げ の剛性 K に注目して、複合体の力学的特徴を示すこと ができる.つまり、 $\xi$ が大きくなれば、式(6)の第一式の 右辺において、N に対する第二項の影響は(第一項に比 較して)小さくなると言える.式(6)は式(7)とすること ができる.

$$N = -\frac{D}{R_c} \cdot \left( u_r + \frac{du_\theta}{d\theta} \right), \quad M = -\frac{K}{R_c^2} \cdot \frac{d^2 u_r}{d\theta^2}$$
(7)

幅 b の矩形断面を例に挙げると、 $I=bt^3/12$  であるので、 $\xi$ =12/( $tR_0$ )<sup>2</sup> となる. この場合の計算例を図-5 に示す. 図-6 は、材料 2 (例えば, SC) 内に材料 1 (例えば, SS) が 間隔 s で配置された様子を表している. ここに、s で示 された区間に注目すれば、この部分の右隣にも同一の区 間があるので、この部分を基本の単位として取り扱うこ とにする. この図における基本区間の数は n=b/s=2 とな る. 材料の特性を  $D_1$ ,  $D_2$ ならびに  $K_1$ ,  $K_2$ と表記すれば、 複合材の特性  $t_{eq}$ ,  $E_{eq}$  は次のようになる. 誘導過程の記 載は省略する.

$$t_{eq} = \sqrt{\frac{12(K_1 + K_2)}{D_1 + D_2}}, \quad E_{eq} = \frac{n(D_1 + D_2)}{t_{eq} \cdot b}$$
(8)

# 5. 地山と支保の連動を表現する地山—支保特性曲線

本章では、支保が設置されたのちに初期応力を基準と する荷重を地山と支保が連動して負担する過程を有限要 素解析により示す.図-7に有限要素解析で用いるモデル、 図-8には図-7での円孔付近でトンネル壁面に、複合材を はり要素(黒太実線)として設置した場合の解析モデル を示す.トンネル(半径a=5m)は円形とし、土被り(h



=100m)を仮定し、初期応力の(=2.4MPa)を与え、等方 応力状態(側圧係数k=1)としている.また、地盤は、 地山強度比Sc/h =0.59, トンネル標準示方書での地山等 級DII以下を想定し<sup>1</sup>,弾性係数E=500MPa,ポアソン比v =0.49, 粘着力成分c=400kPa, せん断抵抗角 = 30°と設定し た. 平面ひずみの下で完全弾塑性体としている. トンネ ルの掘削過程は空洞部となる部分の応力解放により模擬 し、応力解放率λ=(α-σ<sub>a</sub>)/α×100(%) で解放量を示すこ とにする. 吹付けコンクリート(SC), 鋼製支保工(SS)の 物性値は、道路トンネルにおける支保パターンで地山等 級 DⅡの岩盤に用いたと想定し<sup>1)</sup>, SS には H-150 を基に, E=206GPa, v=0.3 等を, SC には E=4000MPa, v=0.2, 厚 さ t=20 (cm) 等の数値を与えて Eag, tagを求めた. 図-9 の横軸は、円孔表面(a=5m)における半径方向変位 ua をトンネル半径 a で除したもので, 弾塑性理論解式(2)と 式(3)による GRC は青色で、有限要素解析結果は橙色で 示している. この図では、弾塑性理論解と有限要素解析 による GRC に差がみられる. そこで,式(4)を用いた例



図-10 主応力図 (Case1, λ=100%)



図-8 円孔付近における有限要素解析モデル



図-9地山-支保特性曲線

を二点鎖線で示しているが、塑性域の弾性係数を10%程 度低下させると有限要素解析を表現できそうである.同 図には、吹付けコンクリート(SC)と鋼製支保工(SS) を一体化した、荷重変位関係(赤色)も書き加えている. これと GRC との交点に対する縦軸を読めば、地山と支



図-11 主応力図 (Case2, λ=100%)

保工の荷重負担割合を算定することができる.一体化さ せた支保工をはり要素として、 2=80%において設置し たときの関係も示しているが、GRC から分岐する様子 を見ることができる.素掘り状態で有限要素解析を行っ た場合, λ=100%での u/a は 1.632 (%) となる. これに 対して, GRC と支保特性曲線の交点(図-2 における点 B\*) では u<sub>a</sub>/a=0.769(%),有限要素解析により、はり要 素を設置し、GRCから分岐した線のλ=100% (図-2にお ける点 C<sup>4</sup>) は u<sub>4</sub>/a=0.765 (%) となり, 差が見られた. 支保の設置時には地盤-支保の接触面を介した力の伝達 があり、地盤、支保は単独ではなく、連成した系として 掘削解放応力を負担していくことになる. これを表現す るものが, B<sup>m</sup>から分岐する線である. B<sup>s</sup>, C<sup>s</sup>に対応す る変位量にわずかではあるが差が生じていることになる. その差を有意な差とするか?どのようなメカニズムによ り説明できるのか?今後の考察事項とする.

次に,図-10,図-11 はλ=100%時の主応力図を示して おり,Casel は素掘り状態,Case2 は複合材を設置した場 合の図である.円孔付近の主応力図を拡大すれば, Case2 では半径方向応力が残存していることがわかる. 空洞部分の応力解放に対して,Case1 では地山内のみ再 配分が行われているのに対して,Case2 では支保工と連 動しながら配分が生じていることを示す図となっている.

第6章 結言

本報告では、吹付けコンクリート(SC)と鋼製支保 工(SS)の複合体(シェル構造体)の荷重変位関係と、 地山の変形特性や強度特性を既知として描いた地山特性 曲線(GRC)の交点により地山と支保工の荷重負担分を 表現した.得られた結果を列記としてまとめとする.

(1)地盤を弾完全塑性体と仮定する地山特性曲線 (GRC)と、吹付けコンクリートと鋼製支保工をシェル 構造体とする支保特性曲線を一枚の図に描いた上で、こ れらの交点を利用して初期地山応力に対する地山負担分、 支保工負担分を明示する手法を考察した.

(2)支保が設置された時点より地山と支保が協働して 掘削解放応力を負担する過程を,地山特性曲線から分岐 する地山—支保特性曲線とし,それを有限要素解析によ り例示した.

(3) (2) の例では, GRC と支保特性曲線の交点に 対する変位量と,有限要素解析における応力解放率 100%に対する変位量に僅かながら差がみられた.この ことについて記述した.

ここに記した例では、支保工は吹付コンクリートと鋼 製支保工のみ取り扱っており、ロックボルトは考慮して いない.また、支保工と地盤の境界面の接触条件にも検 討が必要である.今後も研究を進める予定である.

### 参考文献

- 1)土木学会:トンネル標準示方書[共通編]・同解説/山岳工法 編・同解説,pp.66-79,2016.
- 瀬崎満弘, Omer A., 川本眺万:特性曲線法に関する考察, 土木学会論文集, No.499/III-28, pp.77~85, 1994.
- 3)西村正夫:トンネル掘削に伴う周辺岩盤のゆるみ領域と安定 性評価に関する研究,京都大学博士学請求論文,pp.19-62, 1992.

4)日本材料学会:岩の力学-基礎から応用まで,pp.569-573,1993. 5)Flügge, W.: Stresses in Shells, Springer-Verlag Inc., New York, 1967.

# MECHANICAL ANALYSIS AND NUMERICAL SIMULATION FOR THE INTERACTION BETWEEN GROUND AND LINER

### Shohei FUJII, Tsuyoshi NISHIMURA, Masanori KOHNO, Kintoki OGAWA,

This paper describes a methodology for describing the ground response curve (GRC) based on mechanical analysis and numerical simulation. The GRC is presented as an analytical solution for the problem of stress-displacement around the tunnel in an elasto-perfectly-plastic medium. The SRC (Support Response Curve) is also analytically expressed with the force – displacement relation of circular liner modeling shotcrete and steel sets. The modeling consists in treating the composite section of a straight beam as a homogenized section of equivalent mechanical properties of different materials, based on a structural technique. These two curves give a preliminary estimation for the load shared by the ground and the liner. A series of FEM simulation, in which the tunnel excavation is modeled with releasing of stress in tunnel cross section, is conducted to represent installation of the liner. The numerical result shows that the curve of the support load – wall displacement branches off from the analytical GRC and presents the effect of the liner, i.e. confinement of the convergence.