

# トンネルの2次元掘削解析における 応力解放率に関する一考察

市田 雄行<sup>1</sup>・小原 伸高<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)  
E-mail:itdtky00@pub.taisei.co.jp

<sup>2</sup>正会員 大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)  
E-mail:ohara@ce.taisei.co.jp

トンネルの変形予測や支保構造等の設計に用いられる2次元数値解析は、応力解放率をもとに切羽進行に伴い解放される地山応力をトンネル掘削予定面に対して施工手順に応じた解析ステップごとに増分作用させることで、トンネル掘削に伴う地山の3次元的な挙動を再現する。従来より、この応力解放率は、切羽進行に伴い生じる変位と解放される地山の応力の関係が比例するとの仮定にもとづき設定される。しかし、支保工を考慮した3次元掘削解析を実施した結果、トンネル掘削過程において必ずしもこの仮定が成立するものではないことが確認された。そこで、3次元解析よりトンネル掘削時の地山と支保工の相互作用について分析し、地山と支保工の剛性の影響を考慮した応力解放率に関する検討を行った。本稿は、この検討結果および考察を報告するものである。

**Key Words :** numerical analysis, stress release rate, ground deformation, lining pressure, stress path

## 1. はじめに

トンネルの変形予測や支保構造等の設計にて解析的手法を用いる場合では、一般的に有限要素法 (FEM) や有限差分法 (FDM) 等による2次元数値解析を行う事例が多い。2次元解析では、トンネル掘削に伴う地山の3次元的な挙動を2次元問題 (平面ひずみ) として扱うため、切羽進行に伴う掘削相当外力をトンネル掘削予定面に施工ステップごとに増分作用させ、この過程で掘削順序に応じて支保工等をモデルする。この掘削相当外力とは、トンネル掘削以前から地山に作用していた地圧が切羽進行に伴い解放された力 (以下「掘削解放力」という) であり、施工ステップごとに作用させる掘削解放力は、掘削完了までに解放される全応力 (地圧) に対する割合をもとに決定される。この割合を一般的に応力解放率と言い、2次元解析では特性曲線法<sup>1)</sup>等の方法により求まるトンネル切羽進行に応じたトンネル変形量をもとに応力解放率を設定する。一方で、応力解放率は施工実績から経験的に定めていることも多く、地山特性や支保工の影響を考慮した適切な値であるかどうかについて、十分に評価を行っているとは言い難い面もある<sup>2)</sup>。

そこで、3次元数値解析を実施し、トンネル掘削に伴う地山の3次元的な挙動について分析し、分析結果をもとに従来の特性曲線法<sup>1)</sup>による方法とは異なる応力解放

率の設定方法について検討を行った。本稿は、この検討結果および考察を報告するものである。

## 2. 応力解放率の設定方法と問題点

トンネル掘削解析に用いる2次元解析では、応力解放率を用いることで、トンネル掘削に伴う地山の3次元的な挙動を近似的に再現する。本章では、特性曲線法<sup>1)</sup>による応力解放率の設定手法と、その課題について述べる。

### (1) 2次元解析と解析ステップ

トンネルの掘削解析では、掘削部分を囲む節点において、掘削する要素に作用している節点力を掘削解放力として作用させる<sup>2)</sup>。掘削手順に応じて解析を数ステップに分け、各ステップにて掘削解放力を分割して作用させることで、掘削に伴う地山の3次元的な挙動を再現しており、この掘削解放力の分割割合を、応力解放率と言う。実際の解析では、掘削解放力全体のうち、例えば支保工の設置前に  $\alpha\%$ 、支保工の設置後に  $\beta\%$  だけ掘削予定面に作用させる手順である。ここで、 $\alpha + \beta = 100\%$  となる。これにより、支保工設置後に実際に計測できるトンネル変形量や支保工に生じる応力を把握することができる。

## (2) 特性曲線法による応力解放率設定手法

2次元解析にて解析ステップごとに設定する応力解放率は、掘削進行に伴い生じるトンネル壁面の変位量と掘削解放力が比例するという仮定にもとづき算出する。すなわち、着目する断面を切羽がある距離まで通過した時点において生じたトンネルの壁面変位量を $U$ 、また変位収束時の全変位量を $U_f$ とすれば、両者から求まる変位割合 $U/U_f$ より、この掘削状態までに解放された地山応力（掘削解放力）は $P_0 \times U/U_f$ （ $P_0$ ：初期地圧）と表される。したがって、この変位割合 $U/U_f$ が応力解放率である。

また、この変位割合 $U/U_f$ の関係は、素掘り掘削かつ地山を弾性体であると仮定し、軸対称解析等により求められる<sup>1)</sup>。ここで、切羽からの距離と変位割合 $U/U_f$ の関係の一例を、図-1に示す。本図の横軸は、切羽からの距離をトンネル掘削径 $D$ にて無次元化したものである。この図をもとに応力解放率の設定例を以下に示す。

トンネル掘削径 $D$ が10m、支保工を切羽から1m後方に設置する場合は、切羽からの距離は0.1Dとなる。この場合、図-1の曲線から求まる変位割合は56%となることから、支保工設置前の変位割合は56%、設置後は100-55=44%となる。よって、支保工設置前後の応力解放率は、上記の変位割合と等しいことからそれぞれ56%、44%となる。

## (3) 応力解放率設定に関わる課題

前述において、2次元解析にてトンネル掘削に伴う地山の3次元的な挙動を再現する応力解放率の設定方法について述べた。ここでは、参考文献<sup>2)</sup>に示されている留意すべき点を含め、現状の応力解放率の設定手法で用いられている仮定に対する課題点を挙げる。

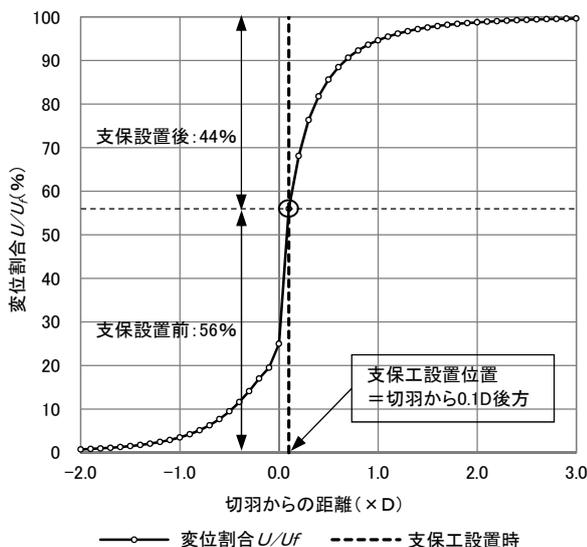


図-1 トンネル変形量と切羽からの距離の関係例

- ①実際のトンネル掘削過程においても、トンネル壁面の変形量と壁面近傍の地山の応力状態には、比例関係が認められるか。
- ②特性曲線法による応力解放率の設定では、素掘り掘削を仮定しており、支保工による変位抑制等の効果を考慮していない。
- ③支保工の設置後では、掘削解放力を支保工および支保工周辺の地山の両者にて分担するため、両者の剛性比の違いにより、最終的な変形量および釣り合いの応力状態は異なることが予想される。

上記の課題を整理すると、切羽進行に伴う地山の応力履歴や、支保工と地山の剛性比を総合的に判断した上で、応力解放率を適切に設定する必要がある。したがって、次章よりこれらの課題について分析および考察するとともに、新しい応力解放率の設定方法について検討する。

## 3. トンネル掘削過程における地山の応力履歴

トンネル掘削過程における支保工背面の地山の応力履歴に関する解析的な検討では、等方等圧の初期応力状態にてトンネル周方向応力 $\sigma_t$ と半径方向応力 $\sigma_r$ は、表-1に示す経路を辿ることが指摘されている<sup>3-5)</sup>。

つまり、切羽通過後に掘削壁面は自由面となることから、地山の半径方向応力は解放され0となる。一方で、支保工設置後は支保工による拘束を受け、再び応力が増加する傾向が示されている。

本章では、トンネル壁面の変形量と壁面近傍の地山の応力状態を把握すべく、また、地山の応力が掘削に伴い表-1のような変化を示すかどうかを検証するために、3次元解析を実施した。解析コードは、FLAC3D（有限差分法解析）を用いた。

表-1 掘削過程における地山の応力変化

	掘削過程			
	切羽前方	切羽直近	切羽～支保工設置前	支保工設置後
周方向応力 $\sigma_t$	一定値 (初期応力)	減少	一定値	増加した後 に両者は異なる一定値 に収束
半径方向応力 $\sigma_r$			0	

## (1) 解析条件

はじめに、本稿全体における解析的検討のうち、統一的な条件を以下に示す。

- ・地山は連続体かつ単一地層とする。
- ・支保工は吹付けコンクリートのみとし、材齢による弾性係数の変化は考慮せず弾性体とする。
- ・トンネルの断面形状は円形とする。
- ・一掘進長1mの全断面掘削とし、支保工は切羽から1m後方に設置し、解析ステップは掘削と支保工設置のサイクルを繰り返すものとする。

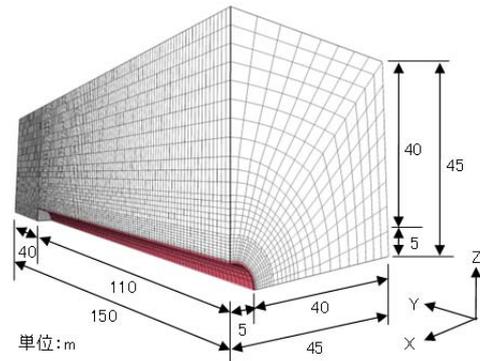


図-2 解析モデル図

図-2に解析モデルを示す。上記以外の解析条件として、本章ではトンネル掘削半径を5m、土被りを400mとし、地山はMohr-Coulombの破壊基準に従う完全弾塑性体とした。解析領域は掘削の対象性を考慮した1/4断面とし、境界条件は、トンネルが含まれない外周面を固定、含まれる側面をローラー境界とした。初期応力は側圧係数を1.0として、各地山要素に土被り相当の自重を作用させた。表-2に解析に用いた地山物性値を示す。本解析では、中硬岩程度の地山を想定し、地山物性値は参考文献<sup>2)</sup>における地山等級R<sub>4</sub>に相当する値を採用する。表-2に示す一軸圧縮強度と土被り圧から地山強度比を算出すれば0.173であり、掘削後に地山が塑性化する条件となる。表-3に解析に用いた支保部材として吹付けコンクリートの仕様を示す。吹付けコンクリートの弾性係数は、参考文献<sup>2)</sup>に示される値を採用した。解析は、支保工がない場合とある場合の2ケースを実施した。

表-2 地山物性値

単位体積重量	$\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )	0.025
変形係数	E (MN/m <sup>2</sup> )	500
内部摩擦角	$\phi$ (°)	30
粘着力	c (MN/m <sup>2</sup> )	0.500
引張強度	$\sigma_t$ (MN/m <sup>2</sup> )	0.100
ポアソン比	$\nu$	0.3
一軸圧縮強度	$q_u^{**}$ (MN/m <sup>2</sup> )	1.73

$$**q_u = 2 \times c \times \tan(45^\circ + \phi/2)$$

表-3 支保部材仕様 (吹付けコンクリート)

要素	厚さ (mm)	弾性係数 (MN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比
モデル			
ソリッド	300	3400	0.2

## (2) 解析結果と考察

### a) 地山の応力履歴

解析結果のうち、図-3に示す支保工背面の地山要素の半径方向応力 $\sigma_r$ および周方向応力 $\sigma_t$ に着目し、これらの値と切羽からの距離の関係を、図-4に示す。

支保工の有無に関わらず、切羽直近では $\sigma_r$ および $\sigma_t$ ともに、表-1に示されるとおり減少傾向にあることが認められる。また、支保工なしの場合では、切羽到達後より $\sigma_r$ は0を、 $\sigma_t$ は一定値を示す(図-4は要素中心の応力を示しており $\sigma_r \neq 0$ )。これは、素掘りゆえに支保工内圧が得られず、掘削壁面近傍の地山が、周方向応力 $\sigma_t$ を最大主応力 $\sigma_1$ 、半径方向応力 $\sigma_r$ を最小主応力 $\sigma_3 (=0)$ とする一軸圧縮状態にあることを示している。

一方で、支保工がある場合では、切羽到達時から支保工設置までの期間に限定すれば、無支保区間であることから $\sigma_r$ および $\sigma_t$ の値は支保工なしの場合と等しい。

しかし、支保工設置後からは、 $\sigma_r$ および $\sigma_t$ ともに増加傾向を示し、切羽から十分離れた位置にて一定値に収束することが認められる。この応力増加は、支保工により掘削壁面が拘束され内圧効果が得られたことから、支

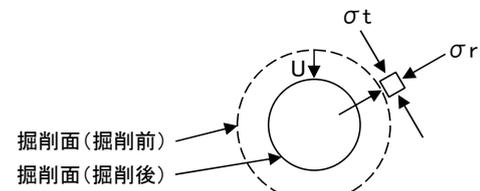


図-3 地山の半径および周方向応力

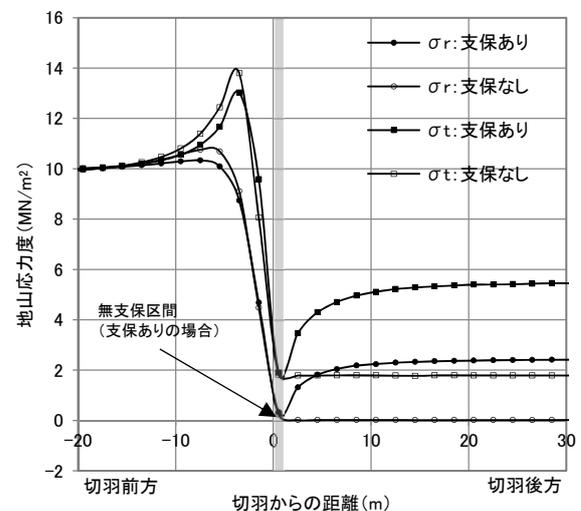


図-4 地山の応力履歴

保工背面の地山が再び二軸圧縮状態に戻ったことを示している。

#### b) 地山応力と壁面変位量

支保工背面の地山の半径方向応力  $\sigma_r$  とトンネルの壁面変位量  $U$  の関係を、図-5に示す。

この結果によれば、2章(3)で示した課題①と比較して、支保工の有無に関わらず、掘削過程におけるトンネルの壁面変位量と地山の応力状態には、比例関係が認められない。また、支保工の有無により、両曲線は異なる軌跡を示しており、支保工ありの場合では支保工設置後に地山応力は再び上昇していることが確認できる。変位収束時に着目すると、支保工なしの場合で変位量は0.16m、支保工ありの場合で0.5m程度であることから、支保工なしの場合はある場合と比べて、3倍以上の変位が生じている。この結果より、2章(3)の課題②および③にて示したとおり、支保工の有無（あるいは支保工の剛性の違い）によりトンネルの変位量および地山の応力履歴は大きく異なることが分かる。

したがって、2次元解析にて、必ずしも特性曲線法<sup>1)</sup>から求まる支保設置前後の変位割合（応力解放率）から掘削解放力を適切に設定することはできないことが確認できた。

### 4. 応力解放率の設定手法に関する検討

本章では、2次元解析にて支保工の影響を考慮し、トンネル掘削に伴う地山の3次元的な挙動を再現するための応力解放率の適切な設定方法について検討する。

#### (1) 応力解放率の設定手法

支保工背面の地山の半径方向応力  $\sigma_r$  および吹付けコンクリートによってトンネル壁面に均一な半径方向圧力として作用する支保工内圧  $P_i$  は、フック、ブラウンら<sup>9)</sup>により理論的に式(1)および(2)にて示される。ただし、これらの式は、地山および支保工が弾性的挙動を示す場合に限定され、等方等圧の応力場にて円形トンネルに支保工内圧  $P_i$  が作用し平面ひずみ状態である条件下にて解かれたものである。また、吹付けコンクリート厚さ  $t$  がトンネル掘削半径  $R$  に比べて十分に小さい場合は、式(2)の  $K_B$  は式(3)となる。

$$\begin{aligned} \sigma_r &= P_0 - P_i = \frac{E}{1+\nu} \times \frac{U_i}{R} \\ &= K_A \times \frac{U_i}{R} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{E_c \{R^2 - (R-t)^2\}}{(1+\nu_c) \{ (1-2\nu_c)R^2 + (R-t)^2 \}} \times \frac{(U_i - U_{i0})}{R} \\ &= K_B \times \frac{(U_i - U_{i0})}{R} \end{aligned} \quad (2)$$

$$K_B = \frac{E_c t}{(1-\nu_c^2)R} \quad (3)$$

ここに、

- $R$  : トンネル掘削半径(m)
- $U_i$  : トンネル壁面の最終変位量(m)
- $U_{i0}$  : 支保工設置前までの壁面変位量(m)
- $E$  : 地山の变形係数(MN/m<sup>2</sup>)
- $\nu$  : 地山のポアソン比
- $E_c$  : 吹付けコンクリート弾性係数(MN/m<sup>2</sup>)
- $\nu_c$  : 吹付けコンクリートポアソン比
- $t$  : 吹付けコンクリート厚さ(m)

また、2次元解析における支保工設置前後の応力解放率をそれぞれ  $\alpha$ 、 $\beta$ % とすれば、各解析ステップにて掘削解放力は図-6に示すとおりである。支保工設置後では、掘削解放力を地山と支保工にて分担して支持することから、地山と支保工が弾性体であると仮定すれば、分担する応力割合は両者の剛性比によるものと考えられる。式

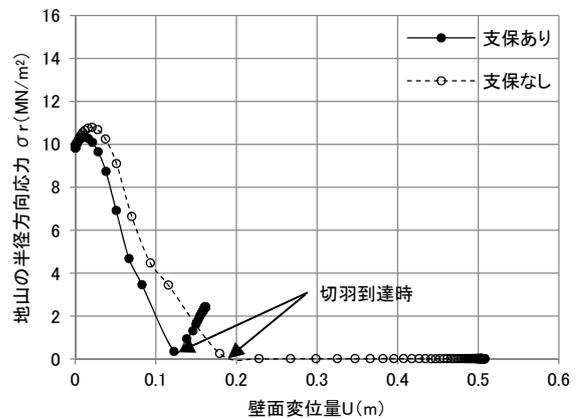


図-5 地山の半径方向応力と壁面変位量

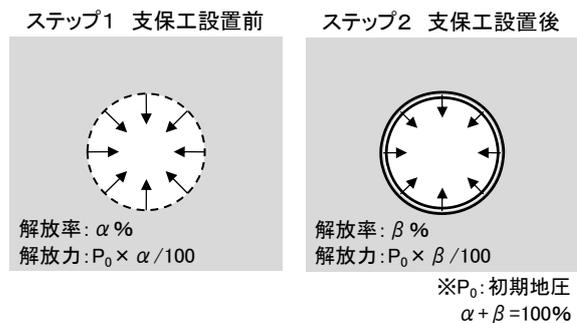


図-6 2次元解析における解放力

(1)および(3)の $K_A$ ,  $K_B$ は、それぞれ地山と支保工の剛性<sup>9)</sup>を表すことから、掘削完了時に地山と支保工が分担する応力は、両者の剛性の比率をもとに次式にて求められる。

・地山が分担する応力

$$\sigma_r = P_0 \times \frac{\alpha}{100} + P_0 \times \frac{\beta}{100} \times \frac{K_A}{K_A + K_B} \quad (4)$$

・支保工が分担する応力

$$P_i = P_0 \times \frac{\beta}{100} \times \frac{K_B}{K_A + K_B} \quad (5)$$

ここで、図4および5に示すとおり、地山の半径方向応力 $\sigma_r$ は、支保工設置後から支保工による内圧効果の影響を受け0の状態から再び増加し、やがて支保工内圧 $P_i$ と等しい応力値に収束する。したがって、式(5)を $\beta$ について解けば、支保工設置後の応力解放率 $\beta$ は式(6)となり、支保工内圧 $P_i$ が既知であれば応力解放率 $\beta$ が求まることになる。

$$\beta = \frac{K_A + K_B}{K_B} \times \frac{P_i}{P_0} \times 100 \quad (6)$$

ただし、支保工内圧 $P_i$ は地山と支保工の剛性の比率の影響を受けることから、一意に定まるものではない。そこで、地山と支保工の剛性をパラメーターとして、3次元解析によるケーススタディを実施し、地山と支保工の剛性の組合せに応じた応力解放率 $\alpha$ ,  $\beta$ を求める。

## (2) 解析条件

解析条件は基本的に3章と同様とするが、一部変更および追加した点について以下に示す。

式(1)および(3)から地山と支保工の剛性比 ( $K_A/K_B$ ) を考えると、剛性比は式(7)で表せる。

$$\frac{K_A}{K_B} = \frac{E \times R}{E_c \times t} \times \frac{(1 - \nu_c)^2}{1 + \nu} \quad (7)$$

ここで、本稿では式(7)の地山と支保工のポアソン比を含む項を省略することで、地山と支保工の剛性比を簡易的に式(8)にて表すこととする。よって、解析では、これらの値のうち地山の変形係数 $E$ 、掘削半径 $R$ 、吹付けコンクリート厚さ $t$ を変数とした解析を行う。

$$\frac{K_A}{K_B} = \frac{E \times R}{E_c \times t} \quad (8)$$

トンネルの掘削半径は4, 5および6mの3パターンとした。軟岩～硬岩の地山を想定し、解析に用いた地山物性値は、地山等級 $R_2 \sim R_6$ に相当する値<sup>2)</sup>を採用し、表4に示す5パターンとした。解析に用いた支保部材である吹付けコンクリートの仕様は表5に示すとおりであり、吹付け厚が100と200mmの2パターンを設定した。土被りについては、地山強度比が2.5および1.0の2パターンを考え、表4に示す一軸圧縮強度をもとに上記の地山強度比となる値を設定した。なお、地山強度比2.5の場合は、掘削

後においてもトンネル周辺の地山が弾性状態であることを想定している。以上より、掘削半径、地山物性値、吹付けコンクリート厚さ、および地山強度比の組合せにより、全60ケースの解析を行った。

## (3) 解析結果と考察

解析結果として得られる支保部材の周方向に生じる軸力 $N$ から、次式を用いて支保工内圧 $P_i$ を算出する。

$$P_i = \frac{N}{R} \quad (9)$$

ここに、 $N$ : 支保工に生じる軸力

$R$ : トンネル掘削半径

図7に解析結果を示す。図7の縦軸は $P_i/P_0 \times 100$ 、横軸は $(K_A + K_B)/K_B$ であり、支保工設置後の応力解放率 $\beta$ は式(6)にて求められることから、プロットした点の「縦軸×横軸」の値が応力解放率 $\beta$ となる。

表-4 地山物性値

	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$
単位体積重量 $\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
変形係数 $E$ (MN/m <sup>2</sup> )	100	200	500	1000	2000
内部摩擦角 $\phi$ (°)	30	35	40	45	50
粘着力 $c$ (MN/m <sup>2</sup> )	0.150	0.300	0.500	1.000	2.000
引張強度 $\sigma_t$ (MN/m <sup>2</sup> )	0.030	0.060	0.100	0.200	0.400
ポアソン比 $\nu$	0.30	0.30	0.30	0.30	0.25
一軸圧縮強度 $q_u$ (MN/m <sup>2</sup> )	0.52	1.15	2.14	4.83	10.99

※ $q_u = 2 \times c \times \tan(45^\circ + \phi/2)$

表-5 支保部材仕様 (吹付けコンクリート)

要素	厚さ (mm)	弾性係数 (MN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比
モデル			
シェル	100または200	3400	0.2

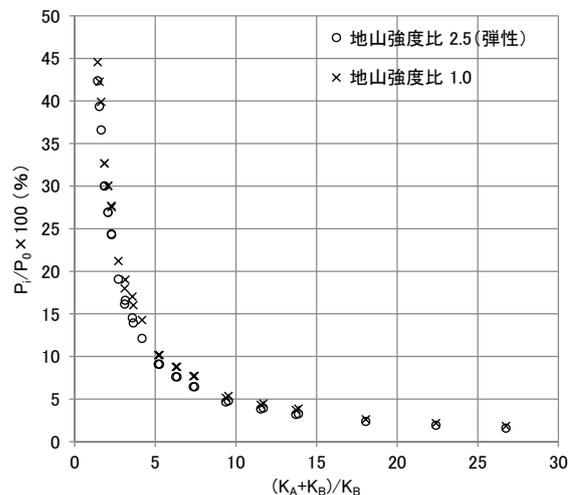


図-7 地山の応力履歴

たとえば、図中の縦軸および横軸の値が、(30.0, 1.84)である場合、支保工設置後の応力解放率 $\beta$ は、 $30.0 \times 1.84 = 55.2\%$ となる。また、支保工設置前の応力解放率 $\alpha$ は、 $100 - \beta = 44.8\%$ となる。

この結果をもとに算出した応力解放率 $\alpha$ および $\beta$ を、図-8および図-9に示す。図中の横軸は前述した地山と支保工の剛性比を簡易的に表す指標(式(8)参照)であり、横軸の値が大きいくほど、地山性状が良い場合、あるいは支保工が軽い構造である条件を表している。

これらの結果より、地山強度比の大小に関わらず、地山と支保工の剛性比が大きくなるほど、支保工設置前の応力解放率 $\alpha$ は増加傾向を示している。

また、地山強度比が1.0の場合では、強度比2.5の場合と比べて、剛性比の大小に関わらず、支保工設置後の応力解放率 $\beta$ は、総じて5%程度高いことが認められる。これは、地山強度比が2.0を下回る条件下では、掘削後に地山が塑性化し負担できる掘削解放力に上限があることで、その結果支保工が負担する割合が一律に増加したものと考えられる。

次に図に示すとおり対数による近似曲線を求める。地山が弾性体(地山強度比2.5の場合)である場合に限れば、相関係数 $R$ の2乗値が0.952であることから、解析結果に対するこの曲線の適合度は比較的高い。これにより、2次元解析を実施するにあたり、地山と支保工の剛性比をあらかじめ決定することで、地山と支保工の剛性による影響とトンネル掘削過程における地山の3次元挙動を考慮した応力解放率を、図-8(図-9)により求めることができる(以降、本近似曲線を応力解放率曲線と呼ぶ)。

## 5. 検証解析

4章の検討にて得られた応力解放率曲線(図-8および9)により定めた応力解放率 $\alpha$ 、 $\beta$ を用いた2次元解析にて、トンネルの掘削過程を再現可能であるかどうかについて、その妥当性を検証するにあたり、4章で実施した3次元解析結果との比較を行う。

### (1) 解析条件

2次元解析においても、3次元解析と同様に有限差分法(解析コード:FLAC3D)を用いて、支保工設置前と後の2ステップによる解析を実施した。図-10に解析モデルを示す。モデルはトンネル軸方向に1mの厚さを持っていることから、境界条件としてモデルの4辺は完全固定、トンネル横断面と平行である面は、トンネル軸方向のみを固定することで、平面ひずみ状態を模擬している。解析条件(掘削半径、地山物性値、吹付けコンクリート厚さ、および地山強度比の組合せ)は、4章の3次元解析

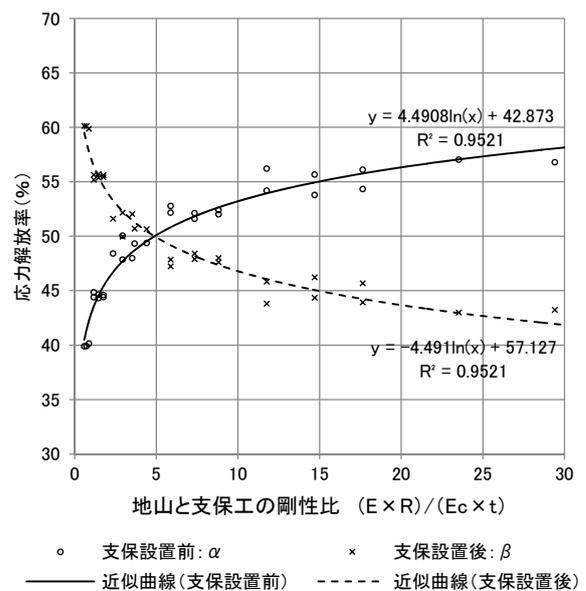


図-8 応力解放率曲線(地山強度比:2.5)

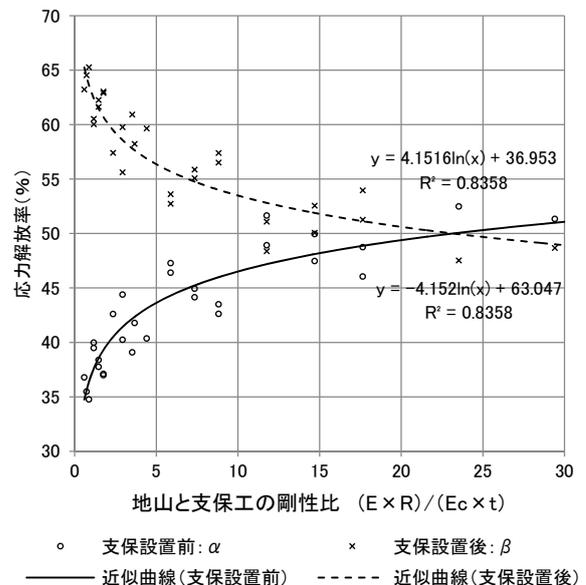


図-9 応力解放率曲線(地山強度比:1.0)

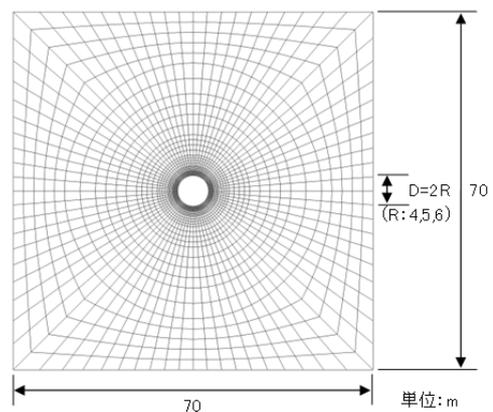


図-10 解析モデル図

と同様とし、全60ケースの解析を実施した。応力解放率  $\alpha$ 、 $\beta$ は、図-8および9の応力解放率曲線を用いて、各解析ケースにおいて該当する地山と支保工の剛性比に対応する値を採用した。

## (2) 解析結果と考察

2次元および3次元解析で得られた支保工（吹付けコンクリート）の周方向応力の比較結果を、図-11に示す。2次元および3次元解析結果が等しい場合は、図中の点線上にプロットされることになる。

地山強度比2.5すなわち地山が弾性体である場合では、3次元解析結果に対する2次元解析の誤差率〔(2次元-3次元)/3次元×100%〕は、全解析ケースの平均で-2.1%であり、3次元解析結果を基準に考えると、2次元解析は支保工応力を過小評価する傾向が認められる。ただし、その誤差は僅かであり、近似曲線の傾きを見ると、ほぼ点線に平行、かつ切片の値は0に等しいことから、本稿にて検討した応力解放率曲線にもとづき求めた応力解放率による2次元解析においても、支保工の影響を考慮し、かつトンネル掘削に伴う地山の3次元的挙動を十分に再現できていると言える。

一方で、地山強度比が1.0すなわち掘削後にトンネル周辺の地山が塑性化する場合では、3次元解析結果に対する2次元解析の誤差率は、全解析ケースの平均で+7.9%であり、3次元解析結果を基準に考えると、2次元解析は支保工応力を過大評価する傾向が認められる。また、地山強度比2.5（弾性）の場合と比べると、2次元解析と3次元解析との整合性は低いものの、近似曲線の傾きは点線と概ね平行であることから、上記の誤差率を考慮すれば、2次元解析により、3次元解析結果を推定することは可能であると考えられる。

ここで、地山を弾性体とし、掘削幅10m（掘削半径5m）のトンネルを対象として、各種支保パターン適用時における応力解放率の概略値を求める。この結果を表-6に示す。

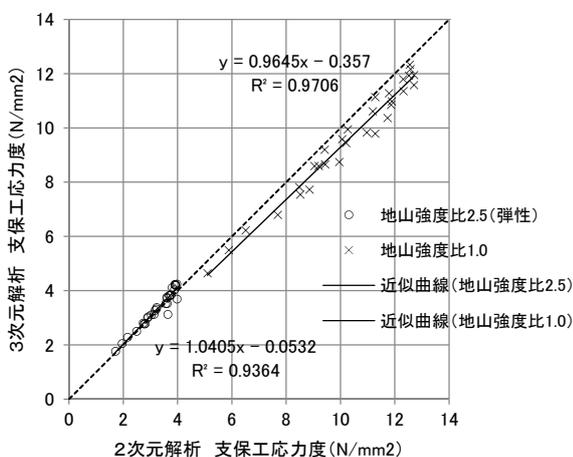


図-11 2次元および3次元解析結果の比較

す。なお、表中の地山等級に対応する各標準支保パターンの吹付けコンクリート厚さ、地山の変形係数の代表値等は、参考文献<sup>2),7)~9)</sup>をもとに設定した。この結果によると、硬岩とされる地山等級IV<sub>N</sub>（CI）から軟岩とされる地山等級I<sub>L</sub>（DII）程度の地山条件下では、支保工設置後の応力解放率 $\beta$ は40~60%の範囲で設定することが妥当であるものと考えられる。

## 6. まとめ

本検討にて、支保工を考慮し逐次掘削を模擬した3次元解析により、掘削面の地山の半径方向応力の履歴は、地山の変形に応じて地山の応力が単調に減少するものではなく、切羽通過時に解放され0となり、支保工設置後に再び増加することを示した。これにより、実際の掘削過程では、地山の応力は複雑な履歴を示すことから、掘削進行に応じて生じる変位と地山から解放される応力が比例するという仮定にもとづいた従来の応力解放率の設定手法に代わる、新しい応力解放率設定手法の検討を行った。そこで、支保工設置後の釣り合い状態では、支保工背面の地山の半径方向応力と支保工内圧は等しい値にて収束すること、また、支保工設置時の応力状態から地山と支保工が分担する掘削解放力の割合は、両者の剛性の比率によるものと仮定し、地山と支保工の剛性をパラメーターとした3次元解析を実施し、応力解放率曲線を求めた。支保工（吹付けコンクリート）に生じる応力度に着目した場合、本曲線から求めた応力解放率を用いた2次元解析は、最大で数%の誤差はあるものの、3次元解析結果と同等の結果が得られることを確認した。この応力解放率曲線を用いて、地山等級に応じて代表される地山物性値と適用される標準支保パターンを整理し、これらの組合せに対応する応力解放率を求めた。ただし、本結果は、地山を弾性体、1掘進長を1mとして円形断面のトンネルを全断面掘削した場合の結果であることに留意されたい。しかし、上記の掘削条件を限りなく満足する

表-6 地山等級および標準支保パターンに対する応力解放率の概略値

地山等級		地山 変形係数 E (MN/m <sup>2</sup> )	吹付け 厚さ t (m)	剛性比 ER/Et	応力解放率 (%)	
鉄道	道路				支保工 設置前 $\alpha$	支保工 設置後 $\beta$
IV <sub>N</sub>	CI	2000	0.10	29.4	58	42
III <sub>N</sub> II <sub>N</sub>	CII	1000	0.10	14.7	55	45
I <sub>N</sub> I <sub>S</sub>	DI	500	0.15	4.9	50	50
I <sub>L</sub>	DII	150	0.20	1.1	43	57

※R=50m, E<sub>c</sub>=3400MN/m<sup>2</sup>  
地山が弾性体の場合に限る

場合では、2次元解析と3次元解析の比較結果に示される  
とおり、両解析結果の違いは $1\text{N/mm}^2$ 以下ときわめて小  
さい。したがって、数値解析によるトンネルの変形予測  
や支保構造の設計を行う際に、3次元解析を実施せずと  
も、本応力解放率曲線を用いれば、2次元解析において  
も実務的に十分汎用性はあるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 泉博允, 木村洋行, 平野逸雄: 切羽の進行を考慮したトンネルの解析, 第34回土木学会年次講演会, III-248, 1979.
- 2) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008.4
- 3) 熊坂博夫: 切羽と吹付けコンクリート支保の距離が支保特性曲線に及ぼす影響について, トンネル工学研究論文集, 第18巻, pp.11-20, 2008.11
- 4) F.Amberg: For a correct interpretation of ground of reaction curves, 12th Congress of ISRM, Beijing China, pp16-21, 2011.

- 5) L.Cantieni, G.Anagnostou: The Effect of the Stress Path on Squeezing Behavior in Tunneling, *Rock Mechanics and Rock Engineering* 42, pp.289-318, 2009.
- 6) E. フック, E.T.ブラウン (小野寺透, 吉中龍之進, 齊藤正忠, 北川隆 共訳): 岩盤地下空洞の設計と施工, pp.179-191, 土木工学社, 1985.2.
- 7) 社団法人 土木学会: トンネル標準示方書 [山岳工法]・同解説, pp.67-68, 2006.
- 8) 日本トンネル技術協会: TBM ハンドブック, p.65, 2000.2
- 9) 日本道路公団: トンネル数値解析マニュアル, pp.3-26, 1998.10

(2015. 8. 7受付)

## A STUDY ON STRESS RELEASE RATE BY TWO DIMENSIONAL TUNNEL EXCAVATION ANALYSIS

Takeyuki ICHIDA and Nobutaka OHARA

Two-dimensional numerical analysis to be used for a prediction of ground deformation and a design of tunnel support structure can express three-dimensional ground behavior by applying stress release rate. Conventionally, this ratio of stress released from the ground at each step of analysis, is set based on an assumption that relationship between the stress and displacement of the ground is proportional. However, in this study, a result of three-dimensional excavation analysis considering an effect of support stiffness, shows that this assumption is not necessarily satisfied in tunneling process. Therefore, in this paper, by using three-dimensional analysis, an interaction between the ground and the tunnel support during tunnel excavation is investigated and the stress release rate considering an effect on the stiffness of the ground and the tunnel support is estimated.