

トンネル周辺の広域応力状態の 推定に関する基礎的検討

澁谷 啓太¹・福田 大祐²・池田 奈央³・村山 秀幸⁴・児玉 淳一⁵

¹ 北海道大学大学院工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
E-mail: keita.shibuya@frontier.hokudai.ac.jp

² 正会員 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
E-mail: d-fukuda@frontier.hokudai.ac.jp

³ 正会員 株式会社フジタ 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1)
E-mail: nao.ikeda@fujita.co.jp

⁴ 正会員 株式会社フジタ 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1)
E-mail: murayama@fujita.co.jp

⁵ 正会員 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
E-mail: kodama@eng.hokudai.ac.jp

近年, トンネルの設計・施工・維持管理を目的として, 有限要素法等の数値解析が用いられている. この際, 数値解析に入力する岩盤の広域応力状態に依存して得られる結果が異なってくることから, 広域応力を正確に把握することが極めて重要となる. そこで, 本稿では, 応力解放法を用いてトンネル周囲の岩盤初期応力を測定し, 応力測定結果および 3 次元有限要素解析に基づいて, トンネル周辺に作用する広域応力場を推定した. その結果, 推定された広域応力の最大および最小主応力はそれぞれ 5.6~8.6 MPa および 4.2~6.8 MPa 程度で, その作用方向は, それぞれトンネル軸方向にほぼ平行および垂直となることを明らかにした. さらに, 応力計測点において数値解析および測定から得られる岩盤応力を比較した結果, 数値解析結果が測定値を合理的に表現できることを示した.

Key Words: initial stress, regional stress, 3D finite element analysis

1. はじめに

近年, 有限要素法 (Finite element method, 以下 FEM) 等の数値解析が, トンネルの設計・施工・維持管理に積極的に利用されるようになってきている. この際, トンネル周辺の地形の影響を受けた被り圧やトンネル周辺地域に作用する広域的な応力場 (以下, 広域応力) を解析に入力する必要がある, この広域応力状態に依存して得られる解析結果は当然異なってくることから, 正確な広域応力の把握が重要となる. このための一つの方法としては, 例えば, トンネル周辺岩盤の初期応力 (以下, 単に初期応力) を測定し, その情報を基に, トンネル周辺の広域応力状態を評価する方法が考えられる. そして, 広域応力状態を合理的に推定することができれば, 変形予測を含むトンネルの設計・施工・維持管理に役立つと考えられる. しかしながら, こうした応力測定や広域応力推定結果を, トンネルの設計・施工・維持管理に積極

的に活用する試みはあまり例がないと思われる. こうした背景から, 著者らは, 最近, 応力解放法の一つである, 計測の実施が比較的容易な孔径変化法¹⁾に基づいて, これを実現するための一連の研究²⁾を実施してきている.

本報告では, トンネル周辺の広域応力状態の推定に関する基礎的検討として, 廃坑となった道路トンネル A (以下 A トンネル) を対象とし, 初期応力測定および FEM による数値解析に基づいた広域応力状態の推定結果について報告する.

2. 広域応力場の推定法

本研究では, 金子ら³⁾が提案した広域応力場の推定法を採用した. 本推定法では, ある地域の広域応力 σ_{ij}^0 の水平方向 (x, y 方向) 成分は, 『(i)対象となる地域を含む十分広い領域に対して, 地表面以外のすべての領域境界

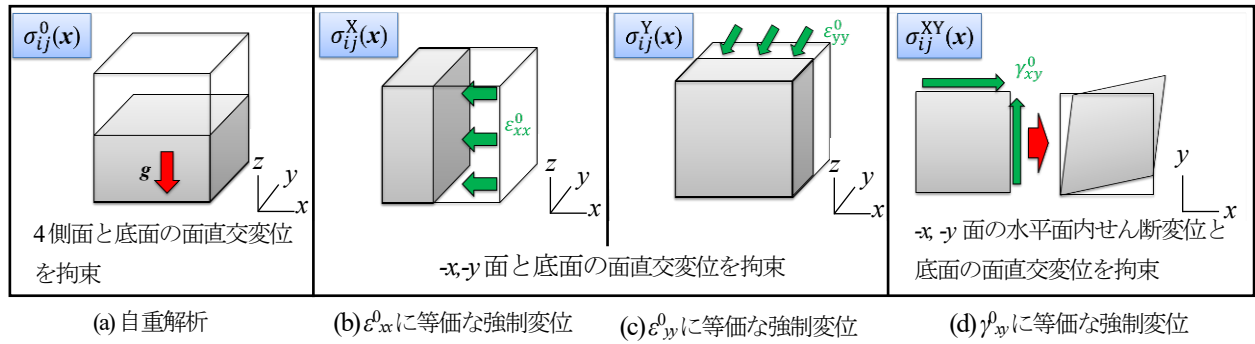


図-1 (2)式右辺の各応力成分を求めるために必要な解析手順の概要

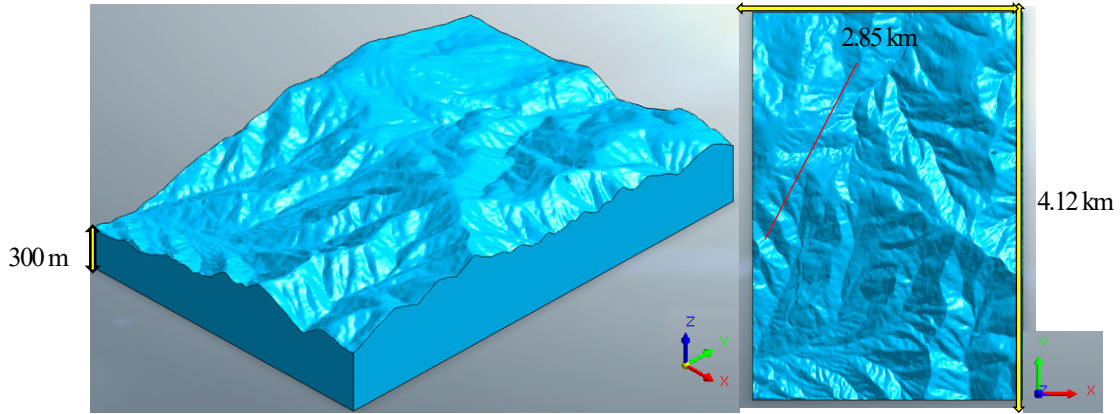


図-2 (左) A トンネル周辺の地形を詳細に考慮した3次元解析モデルの外観と (右) A トンネルの位置 (赤線部)

面に直交する方向の変位を拘束した状態で、岩盤の自重のみを作用させることにより評価される重力に起因する広域応力』と『(ii)プレート運動などによる地殻の水平方向運動に起因する広域応力』の線形結合で表現する。この際、(ii)に起因する広域応力は、対象とする領域が十分広い場合を想定すると、その領域に作用する広域直ひずみ ε_{xx}^G 、 ε_{yy}^G および広域せん断ひずみ γ_{xy}^G を作用させることで表現する。この場合、岩盤を均質な等方線形弾性体と仮定すると、広域応力により岩盤内の任意点 $\mathbf{x}$ に作用する局所応力 $\sigma_{ij}^L(\mathbf{x})$ は、次式³⁾で表現される。

$$\sigma_{ij}^L(\mathbf{x}) = \sigma_{ij}^0(\mathbf{x}, \rho g) + \sigma_{ij}^X(\mathbf{x}, \varepsilon_{xx}^G) + \sigma_{ij}^Y(\mathbf{x}, \varepsilon_{yy}^G) + \sigma_{ij}^{XY}(\mathbf{x}, \gamma_{xy}^G) \quad (1)$$

ここで、 ρ は岩盤密度、 g は重力加速度であり、 σ_{ij}^0 は上記(i)に起因する岩盤の自重により生じる局所応力 (図-1(a)) である。 σ_{ij}^X 、 σ_{ij}^Y 、 σ_{ij}^{XY} は、上記(ii)に起因する局所応力であり、対象となるトンネルを含む十分広い領域に対して、その周囲境界に ε_{xx}^G 、 ε_{yy}^G 、 γ_{xy}^G に相当する強制変位がそれぞれ与えた場合の局所応力である。ここで、広域応力 σ_{ij}^G を推定するためには、初期応力測定点 $\mathbf{x}_M$ における局所応力 $\sigma_{ij}^M(\mathbf{x}_M)$ に対して (1) 式を満足させる ε_{xx}^G 、 ε_{yy}^G 、 γ_{xy}^G を求める必要がある。そこで、(1) 式右辺の σ_{ij}^0 以外の項を、未知定数 c_x 、 c_y 、 c_{xy} を用いて次式³⁾で表現する。

$$\sigma_{ij}^L(\mathbf{x}) = \sigma_{ij}^0(\mathbf{x}_M, \rho g) + c_x \sigma_{ij}^X(\mathbf{x}_M, \varepsilon_{xx}^0) + c_y \sigma_{ij}^Y(\mathbf{x}_M, \varepsilon_{yy}^0) + c_{xy} \sigma_{ij}^{XY}(\mathbf{x}_M, \gamma_{xy}^0) \quad (2)$$

ここで、 $c_x = \varepsilon_{xx}^G / \varepsilon_{xx}^0$ 、 $c_y = \varepsilon_{yy}^G / \varepsilon_{yy}^0$ 、 $c_{xy} = \gamma_{xy}^G / \gamma_{xy}^0$ であり、 ε_{xx}^0 、 ε_{yy}^0 、 γ_{xy}^0 は、それぞれ解析時に適当に設定する各種広域ひずみ成分 (図-1(b)~(d)) である。(2) 式右辺の各応力成分については、後述する方法で FEM から求める。

他方、点 $\mathbf{x}_M$ で測定される初期応力を $\sigma_{ij}^M(\mathbf{x}_M)$ と表すと、 $\sigma_{ij}^M(\mathbf{x}_M) = \sigma_{ij}^L(\mathbf{x}_M)$ の関係が成り立つ必要がある。ここで、後述するように岩盤の見かけのヤング率 E_G の値を仮定し、本等式の右辺に FEM の結果 (2 式) を代入することで、未知数が c_x 、 c_y 、 c_{xy} と岩盤の見かけのポアソン比 ν_G の 4 つからなる観測方程式³⁾が得られる。そこで、 ν_G をパラメトリックに変化させ、各 ν_G において観測方程式を最小自乗法で解くことで定数 c_x 、 c_y 、 c_{xy} を決定し、広域ひずみ ε_{xx}^G 、 ε_{yy}^G 、 γ_{xy}^G が求まる。広域応力 σ_{ij}^G は、 E_G と ν_G を用いて等方線形弾性体を仮定して求めた³⁾。

3. 数値解析と初期応力測定の概要

(1) 数値解析の概要

本節では (2) 式右辺の各応力成分を求めるために必要な解析手順について説明する。3次元 FEM モデル作成及

表-1 岩石コアの採取深度と各種物性値

採取深度(cm)	ヤング率 E_M (GPa)	ポアソン比 ν_M
1011.0	3.80	0.35
934.0	6.88	0.31

表-2 $\sigma_{ij}^M(x_M)$ (圧縮応力：正、応力の単位：MPa)

σ_{xx}^M	σ_{yy}^M	σ_{zz}^M	σ_{xy}^M	σ_{yz}^M	σ_{zx}^M
2.7	2.5	2.6	-4.8×10^{-3}	1.03	-9.7×10^{-2}

び解析には、GTS NX⁴⁾ソフトウェアを用いた。

まず、FEM解析に必要な3次元モデルの地表面データの作成には、国土地理院の基盤地図情報⁵⁾を使用した。

図-2に、解析モデルを示す。本モデルにおける x , y , z 軸の正方向は、それぞれ E 方向、N 方向および鉛直上方向に一致する。モデルサイズは、図中に示してあり、 z 方向モデルサイズは、地表面の起伏に依存して約 300 m ～ 800 m であり、A トンネル（進行方向：N23.6°E、NW 側孔口から NE 東側孔口に渡って 0.147°鉛直下向き）を含む十分広域なモデルとなっている。図中、A トンネルの位置は赤線で示しており、本トンネルの土被りは最大で 165 m 程度である。本研究では、図-2 の解析モデルを 4 節点の四面体要素を用いて離散化した。この際、計算機のメモリの制約および解析時間低減の観点から、トンネル近傍部では要素寸法が 1 m 程度、また、トンネルから離れるに伴い要素寸法が最大で 100 m 程度となるように変化させた。作成した FEM メッシュの総要素数および総節点数は、それぞれ 2,093,672 および 358,181 である。

次に、この FEM メッシュを用いて、(2)式右辺の計算手順を説明する。 σ_{ij}^0 については、均質岩盤を仮定し、図-1(a)に示すように、単位体積重量 $\gamma (= \rho g)$ を解析メッシュ全域に鉛直下向きに作用させ、図中に記した変位拘束条件を与えた。(2)式の σ_{xx}^0 , σ_{yy}^0 については、図-1(b)(c)で示されるように、それぞれ ε_{xx}^0 または ε_{yy}^0 が -0.001 (負値：収縮)に相当する強制変位を xy 面または ty 面に与えると同時に、各図中に記した変位拘束条件を与えた。 σ_{xy}^0 については、図-1(d)で示されるように、 tx 面および ty 面に、 γ_{xy}^0 が 0.001 に相当する強制変位および図中の変位拘束条件を用いた。 ε_{xx}^0 , ε_{yy}^0 , γ_{xy}^0 は、深度によらず一定と仮定した。なお、(2)式右辺の各応力成分の値は、 ν_0 に依存することから、 $\nu_0 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ の 4 ケースを考えることにした。各 ν_0 値に関して、3 次元 FEM 解析を実施し、それぞれの場合について σ_x , σ_y , σ_{xy} を評価し、 ε_{xx}^0 , ε_{yy}^0 , γ_{xy}^0 を求めることで、広域応力 σ_{ij}^0 を各 ν_0 に対して評価した。なお、 E_0 は 1 GPa、 γ については岩石密度の一般的な値を参考に 25 kN/m³ と仮定した。

表-3 被り圧 σ_v を基に補正した $\sigma_{ij}^M(x)$ (圧縮応力：正、応力の単位：MPa)

σ_{xx}^M	σ_{yy}^M	σ_{zz}^M	σ_{xy}^M	σ_{yz}^M	σ_{zx}^M
4.4	3.9	4.1	-7.6×10^{-3}	1.63	-0.155

(2) 初期応力測定の概要

本研究では、最終的に孔径変化法による応力計測結果を有効活用することを目指しているが²⁾、現在、計測システムは改良段階にあり、原位置測定を行うための検証が完了していない。そこで、本稿では、孔径変化法から測定される結果との比較・検証目的で実施した円錐孔底ひずみ法⁷⁾を採用した。本手法の測定原理については、例えば参考文献⁷⁾を参照されたい。

応力測定は、A トンネルにおいて、トンネル内の他の地点と比べて土被りが約 165 m と大きく、湧水がない比較的健全と考えられる地点で実施した。なお、測定地点の岩種は、塊状安山岩～デイサイトであった。試験のためのボーリング孔はトンネル長軸と直交し、水平から上向き 3° の方向に 10 m 掘削し、ボーリング孔口から 960.5 cm および 999.5 cm において、応力測定を実施した。これら 2 か所で実施した試験を、以下では、それぞれ試験 A、B と呼ぶ。さらに、表-1 の 2 か所の採取深度から得られた岩石コアを用いて繰返し一軸載荷試験を行い、岩石コアの除荷時の変形特性を用いて岩石のヤング率 E_M やポアソン比 ν_M を評価した。最終サイクル（第 5 サイクル目）の載荷における最大応力が 7.4 MPa になるように行なった繰返し一軸載荷試験から得られた岩石コアの各種物性値を表-1 に示す。本稿では、 E_M と ν_M を測定した表-1 中の 2 供試体の弾性率の平均値 ($E_M = 5.34$ GPa, $\nu_M = 0.33$) を円錐孔底ひずみ法による応力評価⁷⁾に用いる弾性率として採用した。

以上で求めた弾性率を基に、試験 A および B から推定された岩盤の初期応力 $\sigma_{ij}^M(x_M)$ の平均値を表-2 に示す。ここで、表-2 の被り圧成分 $\sigma_{zz}^M (= 2.6$ MPa) に注目する。当該測定箇所の土被りは約 165 m であり、一般的な岩石の単位体積重量 γ を大略 25 kN/m³ と仮定すると、この場合の推定被り圧 σ_v は 4.13 MPa 程度と見積もられ、試験結果の 2.6 MPa とは大きく乖離する。これに対して、これまでの多くの初期応力計測事例^{例えば 6)}を踏まえると、 σ_{zz}^M の値は σ_v の大略 1 倍程度になると考えられている。ここで、円錐孔底ひずみ法を含む応力解放法で用いられる理論では、応力値とヤング率は比例関係にあり、岩石コアの E_M や ν_M の高精度評価が重要である。しかし、表-1 から明らかのように、2 供試体の E_M の差異は大きく、これが上記の σ_{zz}^M の評価値と推定被り圧 σ_v の乖離の一つの原因と考えられる。また、今回実施した試験では E_M の追

表-4 各ポアソン比 ν_G ごとに決定された定数 c_x , c_y , c_{xy}

	c_x	c_y	c_{xy}
$\nu_G=0.1$	3.7	4.9	-1.00
$\nu_G=0.2$	3.1	4.4	-1.18
$\nu_G=0.3$	2.3	3.9	-1.40
$\nu_G=0.4$	1.28	3.0	-1.69

表-5 トンネル周辺地域の水平広域主応力

※角度 α : σ_1 の作用方向と x 軸 (E 方向) の成す角

	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	角度 α°
$\nu_G=0.1$	5.6	4.2	69
$\nu_G=0.2$	6.0	4.5	70
$\nu_G=0.3$	6.7	5.1	69
$\nu_G=0.4$	8.6	6.8	68

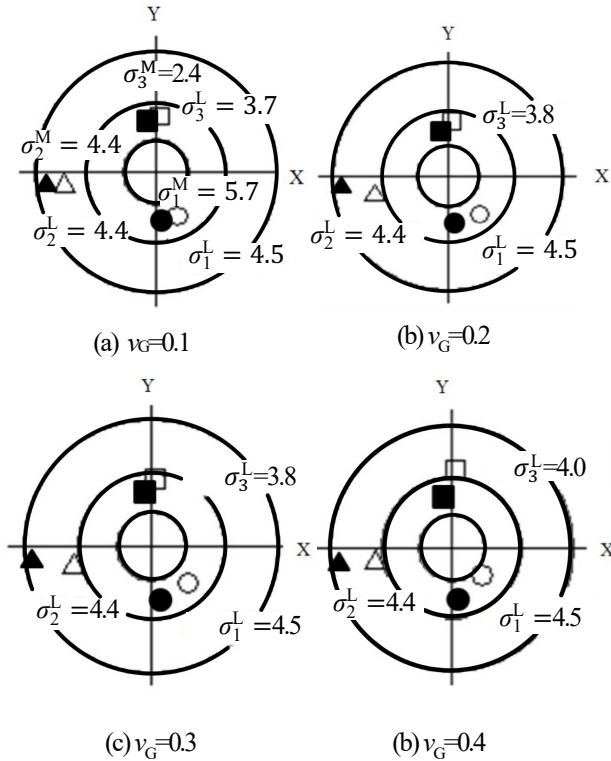


図-3 下半球投影図を用いた各ポアソン比 ν_G ごとの σ_p と σ_p^M ($p=1,2,3$) の比較 (圧縮応力: 正, 単位: MPa)

加データが得られなかったことから、本稿では、 σ_p^M 値が推定被り圧 σ_c となるように、表-2 の σ_{ij}^M の全成分を σ_c/σ_p^M 倍することで補正した (表-3)。なお、広域応力推定のための観測方程式³⁾における σ_{ij}^M 値には、表-3の補正後の値を使用した。

4. 広域応力状態の推定結果と考察

(1) 広域応力状態の推定

表-4に、FEM解析および岩盤初期応力測定結果に基づいて評価した各ポアソン比 ν_G に対応する c_x , c_y , c_{xy} の値を示す。さらに、 c_x , c_y , c_{xy} の値を基に推定した水平広域応力 σ_{ij}^G を、主応力表示した結果を表-5に示す。なお、本稿では、最大・最小主応力 σ_1 及び σ_2 は、それぞれ最も圧縮側 (正值) および引張側の主応力に相当する。表-5から明らかなように、 ν_G と σ_1 及び σ_2 の値には正の相関が

ある。また、 σ_1 の作用方向は、どの ν_G においてもトンネル長軸方向 (表-5 で $\alpha=66.4^\circ$ に相当) とほぼ一致していることがわかる。

次に、各 ν_G ごとに推定した広域応力作用下において、応力測定点 x_M における局所応力 $\sigma_{ij}^L(x_M)$ と計測応力 $\sigma_{ij}^M(x_M)$ を比較した。図-3に、各 ν_G ごとの $\sigma_{ij}^L(x_M)$ の主応力 σ_p^L ($p=1,2,3$) と $\sigma_{ij}^M(x_M)$ の主応力 σ_p^M ($p=1,2,3$) の下半球投影図を示す。なお、 $p=1,2,3$ は、それぞれ最大、中間、最小主応力である。図において、○, △, □および●, ▲, ■は、それぞれ σ_1 , σ_2 , σ_3 および σ_1^M , σ_2^M , σ_3^M の作用方向を示しており、図中には各主応力値を併せて示した。 σ_p^M 値は図-3(a)~(d)で共通であり、(a)のみで示した。 σ_p^L ($p=1,2,3$) の値については、 ν_G が変化した場合、 σ_3 値以外は変化がほとんど見られない一方で、作用方向についてはどの成分もわずかに変化していることがわかる。また、 σ_p^M と σ_p^L の値について比較すると、まず、 ν_G によらず σ_1 が σ_1^M より 1.2 MPa 大きい一方で、 σ_2 と σ_2^M の差は見られない。さらに、どの ν_G においても σ_3^L の方が σ_3^M より大きく、 $\nu_G=0.4$ のとき、 σ_3^L と σ_3^M の差が最大の 1.6 MPa となった。他方、 σ_p^M と σ_p^L の作用方向について比較すると、 σ_1^M が鉛直上向き方向から北側に約 44° 傾斜しているのに対して、 σ_1^L は鉛直上向きの方向から北西方向に約 45° 傾斜している。また、 σ_2^M がほぼ水平に東西方向を示す一方で、 σ_2^L は鉛直上向きの方向からほぼ東方向に約 60° 傾斜している。さらに、 σ_3^M が鉛直上向き方向から南側に約 46° 傾斜しているのに対して、 σ_3^L は鉛直上向きの方向から南方向に約 60° 傾斜している。以上のように、表-5に示した広域応力作用下において、点 x_M に関して FEM 解析から推定された局所応力 σ_{ij}^L によって、計測応力 σ_{ij}^M をある程度合理的に表現できることがわかった。

(2) 考察

金子ら³⁾により定義された次式で表される推定誤差 e を評価することにより ν_G の最確値の推定を試みた。

$$e = \sqrt{(1/6) \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\sigma_{ij}^M(x_M) - \sigma_{ij}^L(x_M))^2} \quad (3)$$

本式に、表-3の $\sigma_{ij}^M(x_M)$ と図-3の FEM 数値解析結果に相

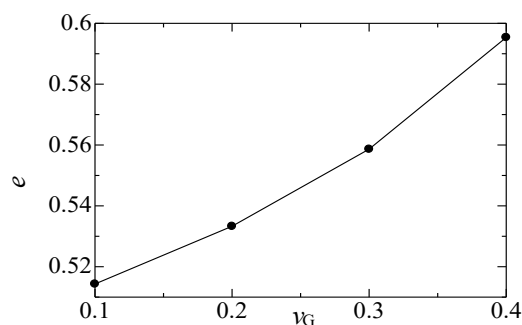


図4 局所応力の推定誤差 e とポアソン比 ν_g の関係

当する $\sigma_p^M(x_M)$ の値を代入し、横軸 ν_g 、縦軸 e としてプロットした関係を示すと図-4のようになる。本図のみから考えると、 e が最小となる $\nu_g=0.1$ が最確値となる。しかし、計測誤差や岩盤の不均質性も加味すると、どの ν_g においても、表-5の広域主応力の作用方向や、表-5に示される広域主応力が作用している場合の測定点における局所応力の主応力 σ_p の値および作用方向（図-3）に有意な差は見られない。つまり、本稿の広域応力推定においては e のみから ν_g の最確値を推定することは妥当ではないと考えられる。また、金子ら³⁾によると、 ν_g の推定には、例えば、海拔高度の異なる複数の測点における初期応力測定が必要であると述べている。さらに、図-3に示した σ_p^M ($p=1, 2, 3$) と σ_p ($p=1, 2, 3$) の作用方向や応力値の差異に関しては、本報告において測定点が1点のみであったため、測定点における不均質性や測定誤差の影響が存在すると考えられる。これは、表-1で2つの採取箇所から得られた岩石コアを用いた求めたヤング率 E_M に無視できない差異が認めれたことから裏付けられる。以上より、Aトンネルの初期応力測定においても、今後複数の異なる点での応力測定データを増やし、より詳細な評価・分析を通して、今回評価した広域応力場の妥当性評価を行うことが不可欠である。

5. おわりに

本報告では、トンネル周辺の広域応力推定に関する基礎的検討として、Aトンネル南西側坑口から約600m地点のトンネル側壁から距離10mにおいて実施した初期応力測定および3次元FEMに基づき、広域応力状態を推定した。その結果、考慮した岩盤の見かけポアソン比

の範囲(0.1-0.4)においては、Aトンネル周辺地域に作用している水平広域応力の最大主応力の作用方向は、トンネル長軸方向とほぼ一致し、最小主応力がトンネル軸方向に対して垂直に作用していると推定された。また、これら広域応力の最大・最小主応力の値の範囲は、 ν_g に依存して、それぞれ5.6~8.6 MPaおよび4.2~6.8 MPa程度であると推定された。さらに、推定した広域応力作用下において、初期応力計測点に相当する位置において、計測応力とFEMから得られる局所応力とを比較したところ、両者は多少の差異はあるものの良好な対応関係を示した。

今後の課題としては、本報告では、応力を1か所のみで測定したため、異なる複数の測定点において応力測定を実施することが必須となる。また、多点計測の実現に加えて、各測定点における応力測定精度を向上させることも必要となる。その上で、本稿で採用したアプローチの妥当性について、より詳細な分析を行い、トンネルの設計・施工・維持管理に適用していきたいと考えている。

参考文献

- 1) H. N. GHIMIRE, Yoji ISHIIJIMA, Takayuki SUGAWARA, Shigeo NAKAMA : Development of Stress Measuring System by Overcoring Method Suitable for Soft Rocks, 資源と素材, Vol.120, pp. 32-38, 2004
- 2) 村山秀幸, 新井智之, 児玉淳一, 菅原隆之, 岡崎健治, 山崎秀策, 釣賀雅人: 変状トンネルにおける初期応力測定の活用に関する考察, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会, VI-550, 2019.9
- 3) 金子勝比古, 中村直昭, 尾原祐三, 伊藤耕介, 米田哲朗, 加藤昌治: 鳥形山地域の広域応力状態の推定, 資源と素材, Vol.116, pp. 572-576, 2000
- 4) MIDAS Information Technology : GTS NX Analysis Manual Ver.200
- 5) 国土交通省国土地理院, 基盤地図情報サイト <https://www.gsi.go.jp/kiban/index.html> (アクセス日時: 2020.1)
- 6) 長秋雄, 国松直, 金川忠, 藤井真希, 横山幸也, 小川浩司, 田仲正弘: 我が国における地下岩盤内の初期地圧状態ー応力解放法による実測データに基づくー, 地質調査研究報告, 第60巻, 第7-8号, pp. 413-447, 2009
- 7) 坂口清敏, 尾原祐三, 中山智晴, 菅原 勝彦: 円錐孔底ひずみ法の応力測定精度, 資源と素材, Vol.108, pp. 455-460, 1991

(2021.8.6 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON ESTIMATION OF REGIONAL STRESS AROUND A TUNNEL

Keita SHIBUYA, Nao IKEDA, Hideyuki MURAYAMA,
Daisuke FUKUDA and Jun-ichi KODAMA

Numerical simulations such as finite element method (FEM) has frequently been applied for the purpose of design, construction and maintenance of tunnels. Since the tunnel deformation is affected by regional stress of rock mass around a tunnel, regional stress state must be reasonably determined as an important input to such numerical simulations. In this report, the initial rock stress around a tunnel was measured using the stress release method by over coring, and the regional stress around the tunnel was estimated based on the results of both the stress measurement and FEM. The direction of maximum principal stress (σ_1) for the estimated regional stress was estimated to act almost along the longitudinal direction of the tunnel while that of the minimum principal stress (σ_2) is almost perpendicular to the longitudinal direction of the tunnel. Depending on the value of Poisson's ratio of regional rock mass, the ranges of σ_1 and σ_2 were estimated as 5.6~8.6 MPa and 4.2~6.8 MPa, respectively. Furthermore, in order to validate the estimated regional stress, the local rock stresses obtained from the FEM and stress measurement were compared at the stress measurement points. The local rock stresses obtained from FEM reasonably agreed well with the measured ones.