

モデル実験によるトンネル周囲地山の応力分布の逆解析

西日本旅客鉄道(株) 正員 山根 寛史
筑波大学 正員 亀田 敏弘

1. はじめに

トンネルの周囲地山の応力状態を知ることは、トンネルの維持管理上その健全性を計る1つの指標となり得ると考えられる。しかしながら、応力の直接計測は困難であり、また地山を構成する地盤材料が不均一・非弾性な材料であることから、その構成則を正確に算出することも困難である。このため、これまで行われてきた材料パラメータ固定を目的とした逆解析¹⁾では応力状態を正しく予測できていない可能性がある。等価介在物法を応用した応力逆解析手法²⁾を適用することにより、構成則を用いることなく地山の変位場と境界上での応力分布を詳細に知ることによってその応力場の取得が可能となる。そこで、本研究ではトンネルおよびその周囲地山のモデル実験から画像解析によりその変位場を取得し、さらに応力逆解析を適用してトンネルモデル周囲の応力場取得を試みることでトンネル地山の変位場から地山の応力場取得に向けた基礎研究を行った。

2. 等価介在物法による応力逆解析の定式化

等価介在物法によると一般には応力ひずみ関係は以下の式で表すことができる。

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}(\epsilon_{kl} - \epsilon_{kl}^*) \quad (1)$$

式(1)において、 C_{ijkl} は弾性テンソルであり σ_{ij} 、 ϵ_{ij} 、 σ_{ij}^* 、 ϵ_{ij}^* は応力、ひずみ、非弾性応力、非弾性ひずみを表す。ここで、二次元の応力釣合式 $\sigma_{ij,j} = 0$ を考慮して次式を得ることができる。

$$\sigma_{ij,j}^* = \sigma_{ij,j}^v \quad (2)$$

式(2)において、 $\sigma_{ij}^v = C_{ijkl}\epsilon_{kl}$ 、 $\sigma_{ij}^* = C_{ijkl}\epsilon_{kl}^*$ である。地盤材料にはせん断変形に伴い体積変化が生じるものが多く存在するため、平面ひずみ状態では非弾性ひずみによる体積変化はせん断ひずみと比例関係にあると仮定し、定数 k を用いることにより $k\epsilon_{12} = \epsilon_{11}^* + \epsilon_{22}^*$ として以下の方程式を得る。

$$\sigma_{11,11}^* + \sigma_{11,22}^* = \sigma_{11,11}^v - \sigma_{22,22}^v + k\sigma_{12,22}^v \quad (3)$$

$$\sigma_{12,11}^* + \sigma_{12,22}^* = \sigma_{11,12}^v + \sigma_{12,11}^v + \sigma_{22,12}^v + \sigma_{12,22}^v - k\sigma_{12,12}^v \quad (4)$$

式(3)、(4)の右辺は観測されたひずみより求められるため、それぞれ σ_{11}^* 、 σ_{12}^* に関するPoisson's方程式として解くことが可能となる。

3. モデル実験

実験装置を図1に示す。内寸、縦240×横320×奥行75(単位mm)のステンレス製フレーム内部に豊浦標準砂を用いて作成した地山モデル(縦160×横220×奥行75(単位mm))を設置し、前面を厚さ10mmのガラス板で固定することで外部からの観察を可能にする。土質実験用メンブレンを円筒のバルーン状に加工したものに空気圧を与えることで地山モデルを周囲から保持している。トンネルモデルは地山モデル中心に埋設されており、空気圧により地山を支える。標点を記したメンブレンを使用し、地山モデルの変形を観察する。また、メンブレンにシリコングリスを塗付することでガラスとの摩擦の低下を図る。トンネルモデルの空気圧を減圧し、地山モデルに対する支保力を低下させる。これをデジタルビデオカメラで撮影する。

キーワード：等価介在物法, 応力逆解析, 弾塑性, 構成則

連絡先 〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1 筑波大学機能工学系 TEL/FAX : 0298-53-5114

この動画情報から静止画情報を抽出した後、標点の移動を画像解析により追跡して変位場を取得する。各標点の変位データを時間軸に対して平滑化し、連続した変位データとすることで疑似的に測定精度を向上させる。また動画情報を用いることにより、経時的な変化を知ることができる。境界の応力はメンブレンの剛性がせん断方向に力を及ぼさないものとして、空気圧と直応力のつりあいから取得することが可能となる。以上の実験から得た変位場と境界条件から、式(3),(4)を解き、式(1)を用いることで地山全体の応力場を取得することができる。

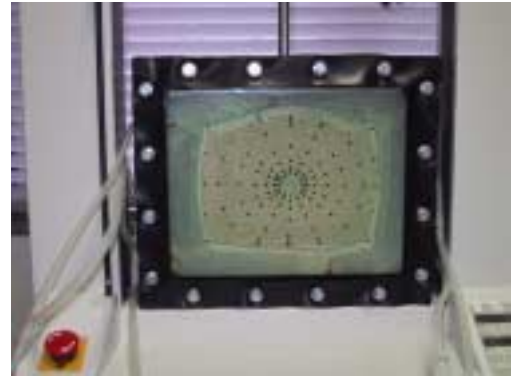


図 1. 実験設備

4. 解析結果

モデル実験から得られたひずみ場の一例を図2に、変位場に応力逆解析を適用して応力場を取得した結果の一例を図3に示す(内圧0.006MPaは地山が破壊される直前の状態である)。最大せん断応力図に注目すると、トンネルの支保力の低下に伴いトンネル天端部、トンネル左右両上側部において最大せん断応力が最大となることが観測された。またトンネル下部に応力の集中が見られるのは、標準砂がモデル下部で密に詰まっているためと考えられる。このため、ひずみが大きく観測されていない箇所に応力が大きく作用しているものと考えられる。このように不均一な材料に対して応力解析が可能であることも本手法の特徴である。

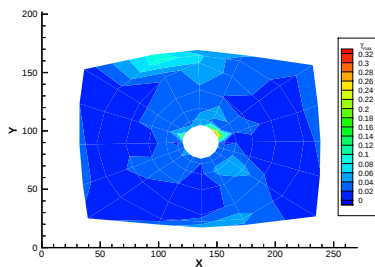


図 2. 最大せん断ひずみ図 $\gamma_{\max}$ (内圧 0.006MPa)

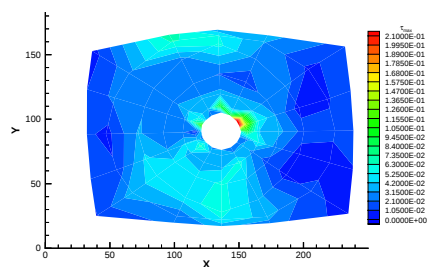


図 3. 最大せん断応力図 $\tau_{\max}$ (内圧 0.006MPa)

5. おわりに

境界上の応力分布と変位場から応力場の取得が可能であることを示した。トンネルの支保力低下に対する地山モデルの応力場の経時的変化を取得することが可能であることからトンネル健全性評価のための新たなモニタリング手法の1つとして有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 桜井春輔, 武内邦文: トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析, 土木学会論文報告集, 第337号, 1983年9月
- 2) Muneo HORI, Toshihiro KAMEDA and Naoyuki HOSOKAWA: FORMULATION OF IDENTIFYING MATERIAL PROPERTY DISTRIBUTION BASED ON EQUIVALENT INCLUSION METHOD, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, No.619/I-47