

地表面変位情報を用いたインバージョンのトンネル掘削への適用

京都大学工学研究科 学生会員 ○並川 卓矢
 京都大学工学研究科 正会員 岸田 潔
 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 若公 雅敏
 京都大学工学研究科 正会員 木村 亮

1. はじめに

地盤内の変状や物性を特定する技術には、ボーリング調査や弾性波探査などがあるが、広範囲の地盤情報をより経済的に得られる可能性のある技術として地表面変位量を用いたインバージョン手法がある。Vascoら^{1),2)}によって構築された本手法は、地表面変位量から地盤内体積変化を推定するものである。比較的計測が容易な地表面変位量を用いるため弾性波探査よりも経済的であり、また、継続的な計測によって地盤内の時系列的な分析が可能となる。著者らは、本手法をトンネル掘削現場に適用し、掘削進行のモニタリングを試みた。さらに、掘削に伴う地盤内の変化から周辺地盤の応力状態を推定することで、未掘削部分の地盤の性状を推定することが可能となり、安全な掘削進行のために利用することができると考えられる。本報告は、応力状態を推定する前段階として、計測された地表面変位量を用いたトンネル掘削における地盤内体積変化の予測について報告するものである。

2. インバージョン手法

Vascoら^{1),2)}は、地盤内の間隙の変化を多孔質半無限弾性体と仮定し、Rice&Cleary³⁾の構成式を用いて間隙流体の変動によるひずみを微小要素に生じる一様な体積ひずみとして以下の様に表した。

$$\varepsilon_{kk}^r = \frac{B\Delta m}{\rho_0} \quad (1)$$

ここで、 B は間隙圧係数、 $\Delta m (= \rho_0 \Delta V)$ は微小要素の質量変化量である。この体積ひずみによる応力が伝播することで地表面に変位が生じると考え、最終的に、地点 x の地表面変位 $u_n(x)$ は全ての要素 s の影響を考慮することで、以下の様に表される。

$$u_n(x) = \frac{B}{\rho_0} \int_V \Delta m(s) G_m(x, s) dV \quad (2)$$

ここで、 G_m は弾性応答関数である。式(2)を最小二乗法で解くことで地盤内体積変化を算出することが可能である。

3. 解析概要

対象とするトンネルの掘削位置と地表面変位の計測点の関係をFig.1に示す。同図で、トンネル天端は $z = 40$ mに位置し、土被りは浅いところでおおよそ2~3 mほどで、掘削進行に伴い徐々に土被りは大きくなっていく。地表面変位の計測点は同図に示す60点で、トンネル横断方向に対して掘削位置直上の3点と、掘削位置から8 m前後離れた2点を取っており、変位は測量により計測されている。解析で体積変化の要因となるセルは、Fig.2に示すように厚さ0.5 m、幅と奥行きが2 mの直方体とし、天端上($z = 40 \sim 40.5$ m)に設定した。地盤は飽和状態の一様なシルト岩と仮定

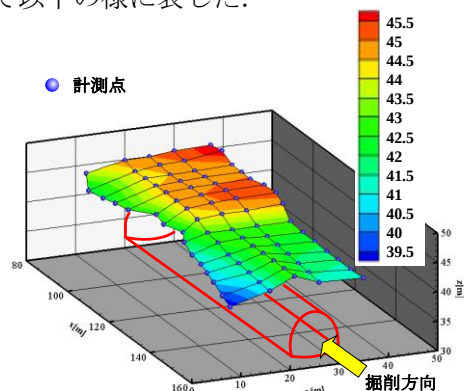


Fig.1. Arrangement of measuring points and the location of an objective tunnel

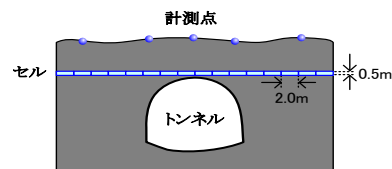


Fig.2. Location of installed cells

Table 1. Input Parameters of inversion

間隙流体密度 ρ	$10^3 [\text{kg/m}^3]$
ポアソン比 ν	0.35
間隙圧係数 B	0.8

キーワード インバージョン, トンネル, 地表面変位, 地盤内体積変化

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-4-291 TEL 075-383-3136

し、インバージョンには **Table.1** に示す物性を用いた。なお、間隙圧係数 B は、飽和度や有効拘束圧によって大きく変化する⁴⁾。式(2)に示すように、間隙圧係数は体積変化量に大きく関わってくる係数であり、実地盤では一定でない。しかしながら、 B 値の地盤内の分布を捉えることは困難であり、ここでは地盤は一定の飽和状態として $B = 0.8$ とした。計測された地表面変位データの分布を **Fig.3** に示す。それぞれ、掘削位置に沿って地表面の沈下が見られ、その周辺では若干の隆起が計測されている。Phase1, 2 は、それぞれ図中に示す切羽到達時の地表面変位データであり、それぞれ 60 点での計測データを用いてインバージョンにより地盤内体積変化を推定する。

4. 解析結果

本解析では、未知数が既知数よりも多いため、情報不足を補う実験情報として体積変化の平滑化制約条件を用いている。平滑化制約条件の重みを増せば、解である体積変化予測は滑らかになるが、一方で、そこから求められる地表面変位量と計測値の誤差は大きくなる。本研究では解の粗さと解の誤差の和を最小にするように、平滑化制約条件の重みを決定した。**Fig.4** にその際の地表面変位の計測値と予測値をプロットしたものを示す。全ての点がほぼ 45 度線上に位置し、計測値が予測値と近い値となっていることがわかる。つづいて、**Fig.5** にインバージョンにより求められた地盤内の体積変化分布を示す。トンネルの掘削位置と比較すると、掘削位置に対して不連続な予測となってしまうものの、掘削位置とその周辺に体積圧縮が見られ、トンネルの掘削位置及び切羽の進行をおおよそ予測できている。体積変化の結果を **Fig.3** の地表面変位量と比較すると、計測点直下のセルでの体積変化量が明瞭に表れていることになる。Phase 1 で切羽前方に表れた体積変化点は、Phase 2 でも継続して大きな体積変化を示しており、地質の弱部が存在していたものと考えられる。

5. まとめ

本稿では、地表面変位量を用いたインバージョンによるトンネル掘削時の地盤内体積変化の予測を示した。実際のトンネル掘削位置とインバージョンによる体積変化予測の位置を比較した結果、おおよそ掘削位置や切羽の進行を予測できることが確認できた。また、切羽前方の地質の差異を感知できる可能性を示した。

【参考文献】 1) Vasco, D. W. et al.: Monitoring of fluid injection and soil consolidation using surface tilt measurements, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.1, pp.29-37, 1998. 2) Vasco, D. W. et al.: A coupled inversion of pressure and surface displacement, *WRR*, Vol.37, No.12, pp.3071-3089, 2001. 3) Rice, J. R. and Cleary, M. C.: Some Basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents, *Reviews of . Geophysics*, Vol.14, pp.277-241, 1976. 4) 松村信一郎ら：軟岩の間隙圧係数 B と飽和度の関係、土と基礎、Vol.35, No.3, pp.41-46, 1987.

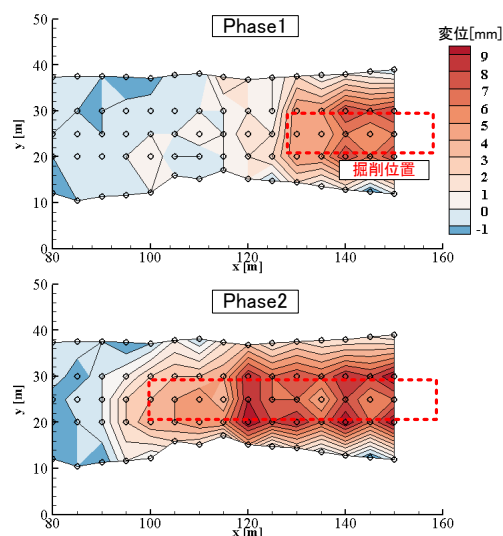


Fig.3. Contour map of observed settlement

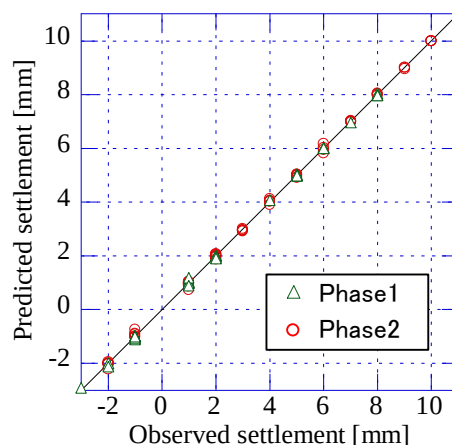


Fig.4. Comparison of the observed settlement and the predicted settlement

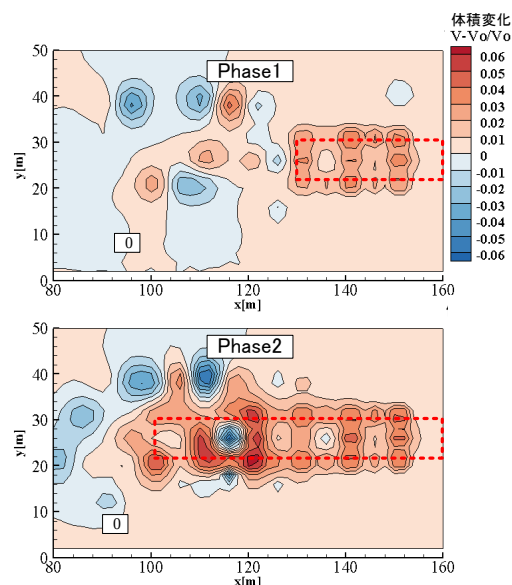


Fig.5. Contour map of predicted volume change