

孔径変化法による初期応力測定結果を用いた応力推定の信頼度評価

池田 奈央 荒井 靖仁
長江 優介 村山 秀幸

概 要

近年、山岳トンネル設計に数値解析が用いられることがあり、解析結果はトンネル周辺岩盤の初期応力に大きく依存することが知られている。しかし、初期応力を実測し設計に反映した事例は少ない。本研究では、著者らが開発中の孔径変化法に基づく初期応力測定装置を用い、廃道トンネルにおいて複数回の現場測定を実施した。得られた変位に対してベイズ推定を適用し、1測定から推定した応力と、複数測定を統合して推定した応力について、平均値と95% HDIを比較した。その結果、応力の平均値は両者で概ね一致し、複数測定を統合した推定結果では95% HDIが縮小することで、応力推定の信頼度が向上することを確認した。

Reliability Evaluation of Stress Estimation Based on Initial Stress Measurement Results Using the Borehole Deformation Method

Abstract

In recent years, numerical analysis has been used in the design of mountain tunnels, and it is well known that the analysis results depend heavily on the initial stress of the rock mass surrounding the tunnel. However, few cases have incorporated field-measured initial stress into actual designs. In this study, multiple field measurements were conducted in a disused tunnel using an initial stress measurement device based on the borehole diameter variation method, which is currently under development. Bayesian estimation was applied to the obtained displacements, and the mean values and 95% HDI were compared for stresses estimated from a single measurement and those estimated by integrating multiple measurements. The results confirmed that the mean stress values were generally consistent between both approaches, and that the 95% HDI narrowed in the estimates derived from integrating multiple measurements, thereby improving the reliability of the stress estimates.

キーワード：山岳トンネル、初期応力測定、孔径変化法、
ベイズ推定

§1. はじめに

近年、山岳トンネルにおいて、特殊な設計条件を採用する場合や、施工中あるいは供用後に変状が発生した場合の検討に、有限要素法などの3次元数値解析が用いられることが多くなっている。これらの数値解析にはトンネル周辺岩盤に作用する応力（初期応力）の設定が必要であり、この値は解析結果に大きく影響する。トンネル周辺の初期応力の設定方法として、一般的には地形効果を考慮した自重解析や、側圧係数をパラメータとした応力状態の推定などが行われている¹⁾。トンネル掘削以前あるいは施工中にトンネル周辺の初期応力を実測できれば、その値を数値解析に適用するのが最も合理的であると考えられるが、測定難易度の高さ等の理由で、山岳トンネル周辺の初期応力を実測して数値解析に適用した事例は少ない。

初期応力測定には様々な方法が提案されているが、著者らは、「応力測定装置を繰り返し使用可能なこと」、「短時間で連続して測定可能なこと」、「多少の湧水があっても測定可能なこと」等の利点に着目し、応力解放法の一つである孔径変化法²⁾を用いた初期応力測定装置の開発と3次元数値解析への適用に関する一連の研究を進めている³⁾。

以上の背景から、著者らは開発中の初期応力測定装置を用いて、複数年にわたって廃道となったトンネルで初期応力測定を行っている。既報⁴⁾ではベイズ推定を用いて単一測定の解放変位から応力推定を行ったが、本報告では単一測定および全測定の解放変位から

応力推定を行い、その結果を比較することで、応力推定の信頼度に対する使用データ数の影響を検討した結果について報告する。

§2. 初期応力測定法

(1) 孔径変化法の原理

孔径変化法は、Ghimire et al.²⁾により提唱された手法で、初期応力測定法の中でも応力解放法の一つである。測定原理を図1に示す。まず、対象岩盤にボーリング孔を掘削し、その先端にテーパ部を掘削する（図1(a)）。次に、テーパ部の先端により小さい直径の測定孔を掘削する（図1(b)）。続いて、応力推定用の装置を測定孔内に設置する（図1(c)）。この状態で、図1(d)のように、測定孔の外側を同心円状に削孔し、測定孔を周囲の岩盤から切り離す（オーバーコアリング）ことによる応力解放で生じた岩盤変位を応力推定用の装置により測定する。この際、岩盤を等方の線形弾性体と仮定し、測定変位を孔径変化法の幾何学を反映した変位－応力ひずみ関係を用いて応力を評価する。

(2) 初期応力測定装置

著者らが開発中の応力推定用の測定装置（以下、初期応力測定装置）（図2）について説明する。本装置は全長約350mmで、 $\phi 40$ mmの計測孔に装置を挿入し、 $\phi 86$ mmの径でオーバーコアリングをする際に測定される解放変位から岩盤応力を推定する。図3におけるch.1～ch.4は、向かい合うセンサの相対変位から孔壁

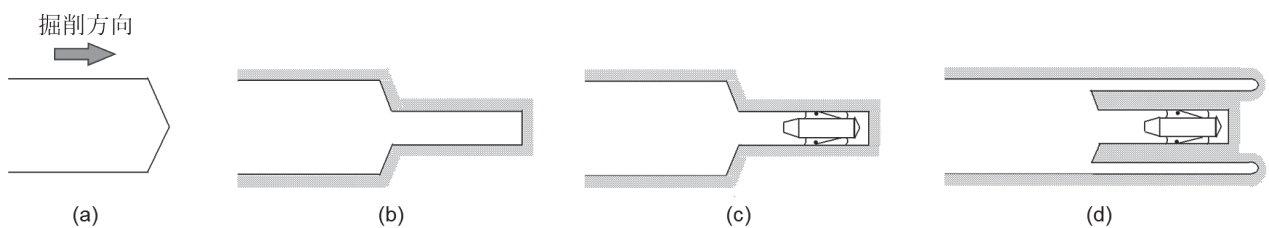


図1 孔径変化法概念図

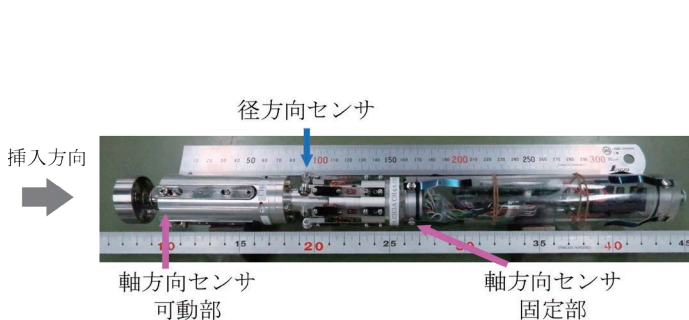


図2 孔径変化法に基づいた開発中の初期応力測定装置

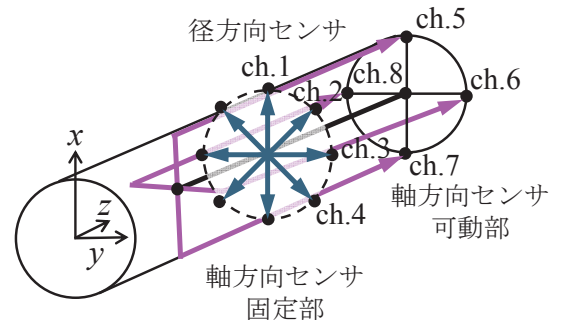


図3 センサ位置と各変位成分

径方向変位を測定し、ch.5～ch.8は、固定部と可動部の相対変位から孔壁軸方向の変位を測定する。本装置による測定は、他の初期応力測定法と比較して測定時間が短く（1日1～2回測定可能）、装置を繰り返し使用可能という利点を持つ。

§3. 初期応力測定の概要

初期応力測定を行った現場は廃道となったトンネル⁵⁾であり、周辺岩盤は安山岩溶岩や火砕岩から構成される。測点は、最大土被り（約165m）付近で湧水が少なく岩盤が健全な地点とし、トンネル側壁からほぼ水平にボーリングを実施した。孔径変化法による測定は2孔で実施し、第1孔（2024年実施）はボーリング深度3.0～9.0mの間で1m毎に7回、第2孔（2025年実施）は3.0～21.0mの間で最低離隔1mで6回、合計13回の測定を行った（図4（a））。2孔の離隔は孔中心で4mである。また、第1孔から第2孔と逆向きに2m離れた地点（第3孔、2021年実施）のボーリング深度10m付近で、円錐孔底ひずみ法による初期応力測定を行っている（図4（b））。3孔の高さは同一である。測定結果を整理する際には、これら3孔を広域的に同一地点と扱い、推定応力を比較した。

§4. 測定結果の整理

応力推定にはベイズ推定を用いた。ベイズ推定の本測定への適用方法については既報⁴⁾を参照されたい。応力推定は、比較的良好と考えられる1回の解放変位から推定した場合と、13回すべての解放変位から推定した場合の2ケース実施した。この際、事前に行った3次元数値解析の結果を参考にして、その傾向と異なる傾向を示す等の明らかに測定不良と考えられる変位は除外した。また、測定途中でスパイクやジャンプがあると認められる一部の変位については、それらの前後のデータを繋ぎ合わせて補正した。ベイズ推定に用いる応力の事前分布は、円錐孔底ひずみ法による測定変位から最小二乗法を用いて推定された応力を、ヤング率とポアソン比の事前分布は、対象地点で採取された岩石の一軸圧縮試験から得られた平均値と標準偏差を用いた（表1）。

図5は、赤の点が円錐孔底ひずみ法による推定応力値、青の点が孔径変化法による推定応力の平均値、そして青の実線で示される範囲が95% HDI（Highest Density Interval）を示す。まず、孔径変化法による解放変位から推定した応力の平均値同士を比較すると、6成分の傾向に大きな差はない。このことから、良好な単一測定の解放変位による推定応力は全解放変位か

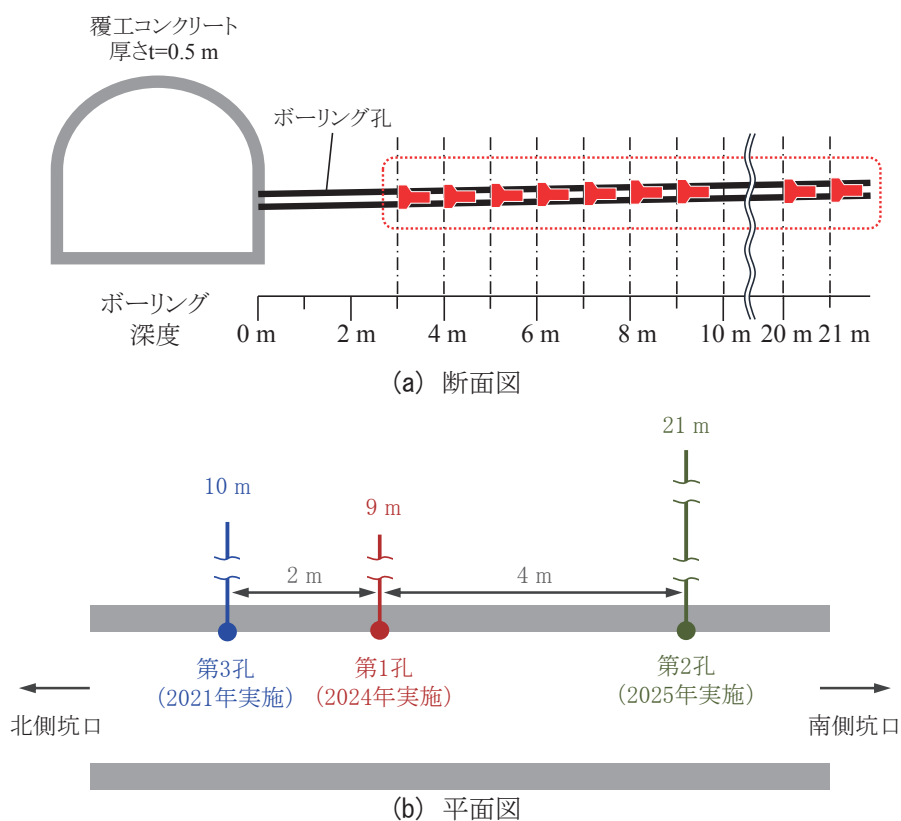
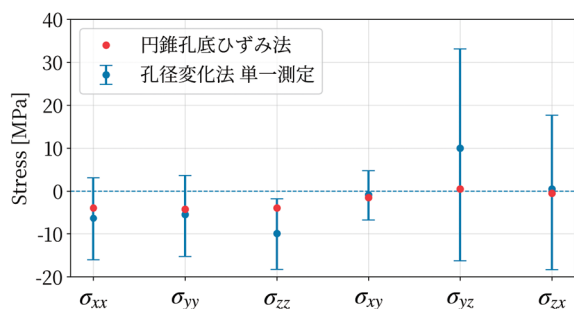


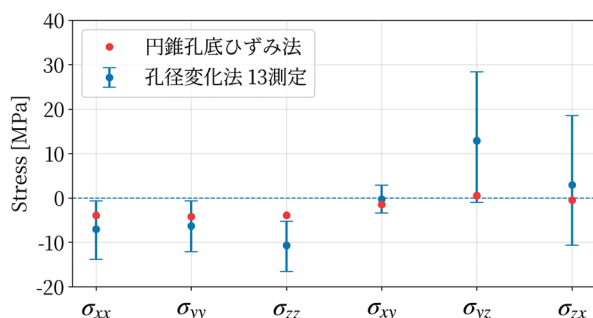
図4 現場測定模式図

表1 ベイズ推定に用いた事前分布（引張が正）

	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	σ_{zz} (MPa)	σ_{xy} (MPa)	σ_{yz} (MPa)	σ_{zx} (MPa)	E (MPa)	ν
平均値	-3.9	-4.2	-3.9	-1.5	0.5	-0.5	8930	0.17
標準偏差	20	20	20	20	20	20	2140	0.01



(a) 単一測定の解放変位から推定した応力



(b) 全測定（13回）の解放変位から推定した応力

図5 孔径変化法から推定される応力（引張が正）

ら推定される応力を代表していると言え、データ選定は妥当と判断できる。次に、円錐孔底ひずみ法、孔径変化法による推定応力の平均値を比較すると、どちらの平均値も円錐孔底ひずみ法とおおむねよい一致を示しているが、 σ_{zz} と σ_{yz} は他成分と比較して推定応力の差が大きい。

次に95% HDIに着目する。95% HDIはその範囲が小さいほど推定の確からしさが高いことを示す指標である。単一測定の解放変位による応力推定結果では、95% HDIの範囲が最も小さい σ_{xy} でも11MPa以上と広く、 σ_{xx} 、 σ_{yy} における95% HDIの範囲も正負に跨っている。一方、全解放変位から推定した95% HDIの範囲は単一測定の解放変位から推定した場合と比較して小さくなっており、直応力3成分の範囲が圧縮応力のみ収まっている。このことから、本装置の測定には一定の再現性が認められ、応力推定に使用するデータ数を増やすことで推定の信頼度を向上させられると考える。また、どちらの推定結果においても、95% HDIの範囲は σ_{xy} で比較的小さく σ_{yz} 、 σ_{zx} で他成分と比

較して明らかに大きい。ここで、 σ_{yz} 、 σ_{zx} は z 方向（孔軸方向）成分を含むことから、本装置は径方向センサよりも軸方向センサの精度が低く、特に軸センサの精度向上が必要と考えられる。平均値に着目した際、 σ_{zz} や σ_{yz} で孔径変化法による推定応力と円錐孔底ひずみ法による推定応力の差が大きいことも、上記と整合する。

§5. まとめと今後の展望

本報告では、廃道となったトンネルで開発中の初期応力測定装置を用いて、孔径変化法による初期応力測定を行い、ベイズ推定を用いて測定地点の応力を推定した。その結果、孔径変化法の良い単一測定の解放変位による推定応力、全測定の解放変位による推定応力、円錐孔底ひずみ法による推定応力（最小二乗法）の大まかな傾向は一致した。また、孔径変化法的全測定の解放変位を用いた推定では95% HDIが小さくなった。以上より、今回の孔径変化法による初期応力測定には再現性があり、複数測定の解放変位を用いることで応力推定の信頼度を向上できると考えられる。また、孔軸方向成分を含む応力値の95% HDIおよび各条件における平均値のばらつきが他の成分と比較して大きいことから、本装置の課題として、軸方向センサの精度向上が挙げられる。上記の結果を踏まえ、今後は軸方向センサの精度を向上させることを目標に装置改良を行い、さらなる測定信頼度の向上を目指す。

謝辞

本報告は北海道大学工学部との共同研究の成果であり、孔径変化法のノウハウ、数値解析、理論解等に関して、福田大祐先生、Min Gyeongjo先生、児玉淳一先生など多数の方々にご教授、ご尽力をいただいています。ここに関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 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、p311、2008.
- 2) H. Ghimire, Y. Ishijima, T. Sugawara and S. Nakama: Development of Stress Measuring System by Overcoring Method Suitable for Soft Rocks,

Journal of MMIJ, Vol.120, pp. 32-38., 2004.

- 3) 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
- 4) 工藤瑠偉、福田大祐、ミンギョンジョ、児玉淳一、池田奈央、荒井靖仁、長江優介、村山秀幸：孔径変化法に基づいた岩盤応力測定装置の開発とそのトンネル施工への適用に関する基礎的検討、Proc. MMIJ Fall Meeting (2025)、Vol.12、No.2、[P014A].
- 5) 岡崎健治、伊東佳彦、丹羽廣海、村山秀幸、笹谷勝輝、大日向昭彦、倉橋稔幸：供用トンネルにおける時間依存性を有する変状と診断技術の研究、応用地質、第56巻、第6号、pp.308-315、2016.

ひとこと

ベイズ推定を用いた応力評価の有用性を確認できたこと、現場測定における装置の再現性が確認できたことは有用であった。今後は、よりよい精度で現場測定が行えることを目指していく。



池田 奈央