

変状トンネルにおける初期応力測定の利用に関する考察

フジタ技術センター 正会員 ○村山 秀幸, 新井 智之
北海道大学大学院 正会員 児玉 淳一, 菅原 隆之
土木研究所寒地土木研究所 正会員 岡崎 健治, 山崎 秀策
エーティック 釣賀 雅人

1. はじめに

山岳トンネルの施工では、地質不良箇所等において予期せぬ様々な変状に遭遇する。一方、施工時に顕著な変状が発生していない場合であっても、供用後に時間遅れの変状が発生するトンネルも少なくない¹⁾。従来から、比較的規模の大きな変状に対しては、FEM等の数値解析を用いて補助工法や支保工の設計を行い、覆工やインバートについては、各種計測や試験結果からトンネルに長期的に作用する荷重を想定し、骨組構造解析(はりばねモデル)により設計している²⁾。これらの検討では、例えばFEMの自重解析で得られる地山の初期応力状態、地山や支保部材の計測結果から想定されるゆるみ荷重等の設定によって、結果が大きく異なることが知られているものの、適切な設計荷重を設定する方法は一般化されていない。本稿では、変状が発生したトンネルにおいて初期応力測定を活用し、設計で用いる荷重条件を適切に設定する方法について考察した。

2. トンネル設計の現状と初期応力測定手法の概要

2-1) トンネル設計の現状

一般に、トンネル周辺の応力に対して地圧、土圧、荷重など類似する用語が用いられていることから、本稿では、トンネル掘削前の地山の応力を初期応力、掘削による応力解放によってトンネルに作用する応力を荷重と称することで統一した。現状の山岳トンネルの設計において、例えば、盤ぶくれが発生した場合、トンネルに作用する水平成分の荷重が鉛直より大きいことが容易に想定されるが、地山の初期応力や側圧係数に着目した議論がなされることはほとんどない。その要因は、トンネルで初期応力測定がほとんど実施されていないこともさることながら、一般に変状発生を要因を一義的に確定することが困難であり、発生した変状現象に見合う設計モデル(荷重-変位モデル)を逆解析的に類推することに、合理性があるとの考え方に基づくと思われる。一方、地山変状は、初期の応力状態と地山の様々な地質特性(割れ目や地下水など)や力学特性(強度や物性、塑性化、膨張性、吸水率など)に依存して発生するとの立場からは、初期の応力状態とその変化を適時把握することは非常に重要となるといえる。すなわち、FEM等による変状の再現解析において、地山の初期応力状態を適切に設定し、トンネルに作用する荷重を想定することが合理的であり、そのためにはトンネルで簡便に初期応力を測定可能となることが望まれているといえる。

2-2) 初期応力測定手法の概要

初期応力の測定原理は、岩盤の破碎、応力解放、坑壁やコアの自然破壊、岩石コアの利用に区分³⁾される。応力解放のうち国内で普及している手法は円錐ひずみ孔底法と埋設ひずみ法であるが、測定装置を岩盤に密着させるためグラウトや接着を伴い養生期間が必要であること、地下水があると測定が困難となること、センサー部とデータロガーが分離されておりケーブルで接続する必要があることなどがデメリットである。応力解放のうち孔径変化法は、小口径の計測孔において応力解放前後の孔径変化量を測定する手法であり、一般的には孔軸に直交する二次元応力を推定する。図-1に示す測定装置は、孔周方向3成分、孔軸方向4成分の変位を測定し三次元応力を推定することが可能である⁴⁾。本装置は、センサー部とデータロガーが一体化しており小型で取扱いが容易であること、計測孔に装置を挿入した直後からオーバーコアリングによる応力解放が可能であり即時性が高く測定が簡便であること、同一孔で連続的に複数個所の測定ができること、多少の地下水があっても測定できることから水平孔でも鉛直孔でも適用が可能であることなどにメリットがある。

キーワード 山岳トンネル, 変状, 初期応力測定, 設計荷重

連絡先 〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1 (株)フジタ 技術センター TEL:046-250-7095

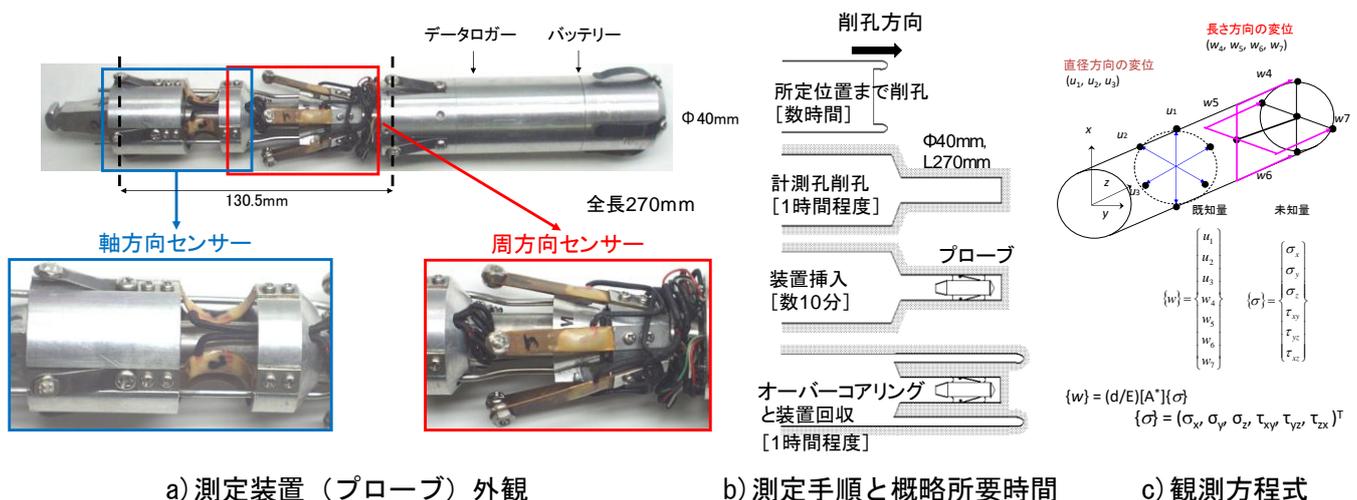
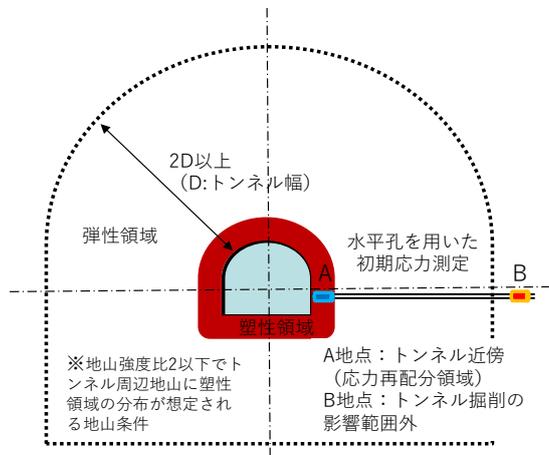


図-1 孔径変化法測定装置（北大式）の外観，測定手順，観測方程式

表-1 初期応力測定結果（短尺孔，長尺孔の複数個所）



	A地点		B地点		
	60894-1	60894-2	60884-2	60884-4	60884-5
ヤング率(GPa)	6.01		6.57		
ポアソン比	0.214		0.233		
最大主応力 σ_1 (MPa)	6.04	4.55	5.00	3.69	4.69
最小主応力 σ_2 (MPa)	2.68	2.34	2.60	1.32	3.51
$\theta_1(^{\circ})$	-9.4	-3.4	9.3	-3.1	2.1

※₁計測孔口から30cmオーバーコアリング時のひずみ値を採用
 ※₂ σ_1, σ_2 は圧縮正， θ は時計回りを正
 ※₃ヤング率とポアソン比は，試験位置で採取したコア試料の一軸圧縮試験で算定

図-2 水平孔を用いた初期応力測定箇所

3. 初期応力測定事例

図-2に，水平孔を用いた初期応力測定箇所を示す。弾性地山の場合，A地点は掘削に伴う応力再配分により一軸圧縮状態（いわゆる地山アーチ）に近い応力場が想定され，塑性地山では塑性圧の発生が想定される位置である。B地点は，トンネル掘削の影響範囲外（弾性地山で2D以上の離隔）でありバージンの初期応力の測定が期待できる。表-1に，短尺孔と長尺孔の複数個所で初期応力測定した結果を示す。本装置は，現状で孔軸方向変位の測定精度に課題があり，表-1には，孔周方向の変位から得られた最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 のみを示した。また，今回の測定は，非変状区間で実施しておりA，B地点共に弾性地山内である。測定結果は，ややばらつくもののほぼ鉛直成分に相当する最大主応力 σ_1 が大きく，最小主応力 σ_2 の3倍程度である。最大主応力 σ_1 はトンネル近傍のA地点の方がB地点より若干大きな傾向を示し，応力再配分の影響が示唆される。

4. おわりに

本稿では，変状トンネルにおける対策工の設計において，初期応力測定を活用する考え方を測定事例と共に考察した。山岳トンネルの設計において特に変状がない区間では，標準設計の適用で十分であるが，変状が発生したトンネルの設計では，トンネルに作用する荷重の設定方法を一般化することが望まれており，簡便に現場で初期応力測定しその結果をトンネル設計に反映することが有益と考えられる。最後に，初期応力測定におけるデータの精度や再現性および測定結果の解釈には課題が多く十分な検討が必要となる。

[参考文献] 1)例えば，トンネルの変状メカニズム，土木学会岩盤力学委員会 2)佐々木隆ら：熱水変質自破碎溶岩地山におけるトンネル変状の挙動解析と施工実績，土木学会トンネル工学報告集第23巻，pp.231-238，2013. 3)横山幸也：初期地圧測定法の現状と基準化，応用地質技術年報No.36，2017. 4)菅原隆之ら：孔径変化法のための測定器の開発，資源・素材学会春季大会講演集，pp.127-128，1999.