

軟岩からなる素掘りトンネル天端に形成された 開口亀裂の温度依存性挙動

長田 昌彦^{1*}, 細川 一樹², 宮本 翔太³

¹埼玉大学大学院理工学研究科 環境科学・社会基盤部門 (〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

*E-mail: osada@mail.saitama-u.ac.jp

²埼玉大学大学院理工学研究科 環境社会基盤国際コース

³元・埼玉大学工学部建設工学科

本稿では、構築したリアルタイムモニタリングシステムにより得られた開口亀裂の開閉挙動を報告する。亀裂は更新世の軟岩に掘られた素掘りトンネル（隧道）の天端に見られる。亀裂の開閉挙動は、隧道内の気温変化と主に相関し、気温低下時に亀裂は開口し、上昇時に閉じる傾向にあった。また同じ温度では亀裂幅がほぼ同じであることが観察された。これらの観測に基づいて、この挙動はインタクトな岩石の温度依存性に起因するものと考えられた。そこで対象軟岩の線膨張係数を実験的に求め、単純なモデルを用いて熱伝達と変形の二次元連成解析を行った。その結果、このモデルによって観測された亀裂の開閉挙動を概略再現することができた。最後に同じ解析コードを用いて、温度依存性挙動に及ぼす亀裂の深さの影響を評価した。

Key Words : open crack, temperature dependent behavior, soft rock, old dugged tunnel

1. はじめに

日本には多くの素掘りトンネルが現存している。特に軟岩からなる素掘りトンネルでは掘削から五十年以上が経過しており、物理的および化学的に風化が進み、安全性の担保が課題となっている箇所が多い。特に、史跡として認定されている箇所では、通常の土木工学的な対策が適用できない場合が多く、劣化状況を注視し続けているのが現状である。

そこで近年目覚ましい進歩を遂げている IoT 技術を用いて安価なリアルタイムモニタリングシステムを構築し、危険度をいち早く検知することができれば、通行を止めるなどの措置により人的被害を未然に防ぐことが可能となることが期待される。

本稿では、素掘りトンネル（隧道）の天端に形成された開口亀裂を対象として、リアルタイムモニタリングシステムを構築して亀裂の開閉挙動を観測し、その観測結果を数値解析的に再現することを試みた。

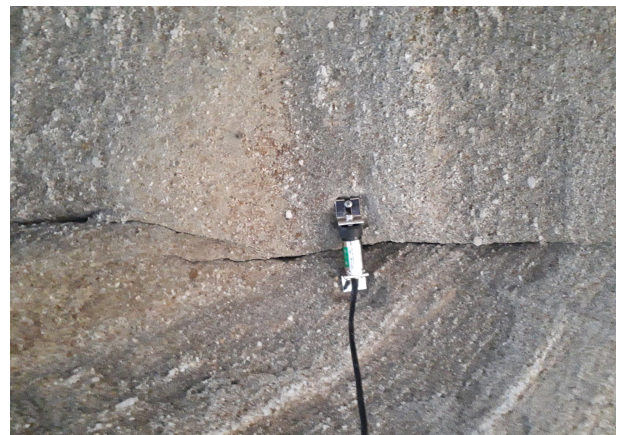


図-1 測定対象とした亀裂と変位計の設置状況

る単斜構造となっており、断層や褶曲による変形構造は認められない。単層の中に斜交層理が見られる浅海性の堆積物である。いずれも土木工学上では軟岩に分類される堆積岩である。

2. 開口亀裂の状況

(1) 地質概要

対象とした隧道は、新生代第四紀更新世の上総層群浦郷層からなるやせ尾根を貫いている。地質は凝灰質砂岩と軽石凝灰岩の互層で構成され、20～24 傾斜す

(2) 設置箇所の選定

隧道の天端には、雁行状に形成された亀裂が 1 条のみ発達している (図-1)。この亀裂を対象とし、開口幅の大きい箇所を選んで市販の亀裂変位計 (東京測器製 KG-5A, 計測範囲: ±5mm, 分解能: 0.00141mm/μ) を



図-2 クラウド上に表示された亀裂変位の経時変化

設置した。変位計は岩盤実質部分に直接ビス止めし、固定区間長は 10cm である。

3. リアルタイム・モニタリングシステムの構築

亀裂変位計からのデータ収集とネット上へのアップロードのために、安価で実績のあるマイコンボード (Arduino) に 3G 通信拡張ボードを取り付けたものを利用した¹⁾。

構築したシステムの概要は次の通りである。

- 隧道に設置した亀裂変位計からの出力を取得
- 取得したデータを 3G 回線を用いて、無料のクラウドサービス (M2X) にアップロード
- アップロードしたデータは PC またはスマートフォンにて任意の計測間隔でグラフィカルに表示・閲覧可能 (図-2)

なお、ここでは気温・湿度・気圧・振動データを別の環境ロガー (A& D 社製 AD-1687) を用いて現地で記録し、データ回収後にリアルタイムで観測している亀裂変位計データと比較検討した。

4. モニタリング結果の一例

亀裂変位計からの出力と環境ロガーから得られたデータ (気温、湿度) を比較したグラフを図-3 に示す。

図から亀裂の変位は気温と逆相関、相対湿度と正の相関があるように見受けられる。ここで亀裂変位は値が大きくなると開口することを示す。図中 4 段目に気温と相対湿度から計算した絶対湿度の変化を掲載している。岩石の変形は相対湿度ではなく、絶対湿度に依存する²⁾。図より 1 月 27 日の正午付近以外は、絶対湿度は比較的安定した値を示しており、亀裂の開閉挙動とは相関がないように見える。ただしこのとき、環境ロガーは現地のコンテナボックスの中に入れてしまっ

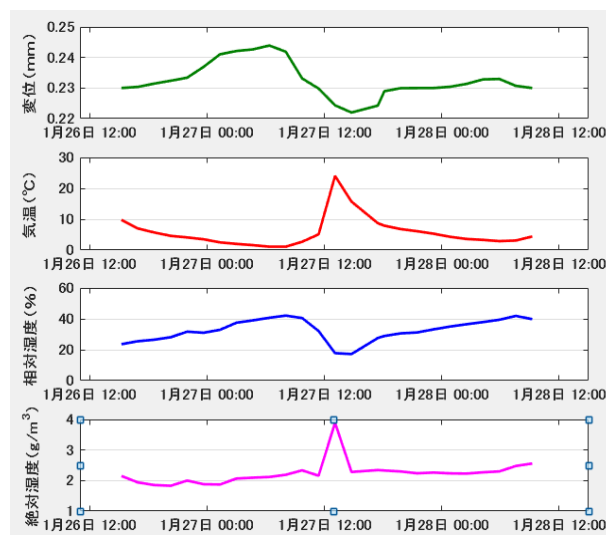


図-3 対象期間の亀裂開閉挙動と隧道内環境 (2018 年 1 月 26 日から 1 月 28 日)

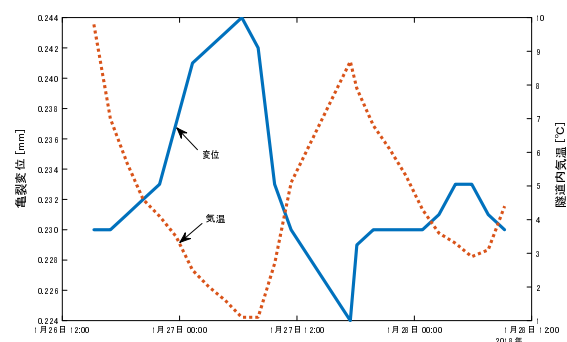


図-4 気温と亀裂変位の経時変化

いたため、不具合が生じたものと考えられる (現在はボックス外に設置している)。従って温度と相対湿度の絶対値も実際の隧道内環境とは若干異なった値になっていると考えられるが、その変化傾向は同様であると解釈して以降の検討を進める。

1 月 27 日の正午付近のデータは、絶対湿度が倍に跳ね上がっており、このとき、気温も 20℃を超えている。したがって、現地周辺 (鎌倉市) の当日の最高気温が 9℃であったことも踏まえ、異常値と考えられる。そこでこの区間のデータは棄却したうえで、気温と亀裂変位の経時変化を図-4 に示した。図では良好な逆相関関係が認められ、気温が低くなると亀裂は開き、上昇すると閉じる傾向があることがわかる。本稿後半の数値解析的検討では、このデータを用いて検討することとした。

図-5 にこのときの亀裂変位と気温との相関を示した。ばらつきはあるものの、概ね 0.0018mm/℃で亀裂開口幅は変化する。

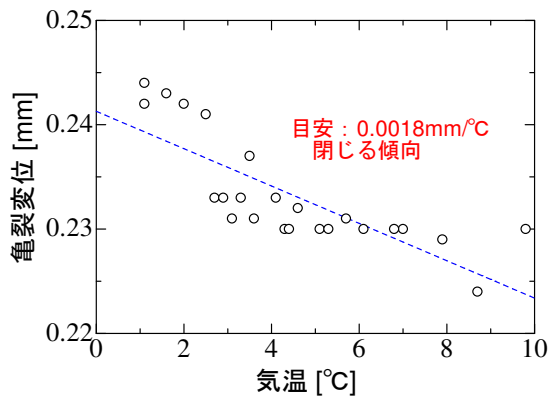


図-5 気温と亀裂変位の相関

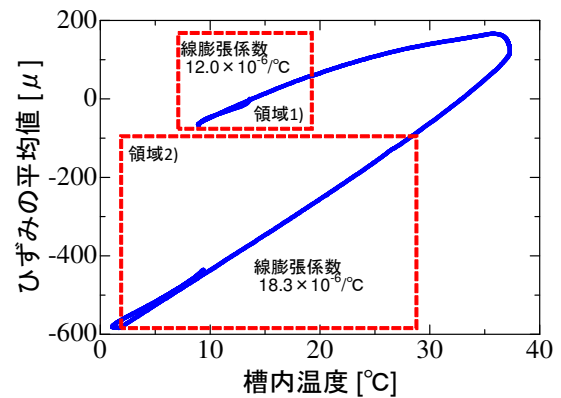


図-6 線膨張係数を求めるための試験結果

5. 軟岩試料の熱膨張特性

軟岩試料を用いて、線膨張係数を室内実験で求めた。不定形試料の一部を平滑にし、ロゼットゲージを貼り付け、恒温恒湿槽のなかで設定温度を常温→10→40→0→10℃と変化させた。昇降温速度は1時間あたり10℃(0.167℃/min)に設定している。

このときの結果を図-6に示す。なお横軸の温度には、槽内に置いた環境ロガー(A&D社製AD-1687)からの出力を採用しており、上記の設定温度とは若干ずれている。また、45度の交差角をもつロゼットゲージからの3つの出力は同様の傾向を示したため、ここではそれらの平均値のみを示している。

実験開始点を含む図中の領域1)から40℃に槽内温度を上昇させた段階で変形挙動が変化しており、その後は異なる線上を推移している。40℃まで加温したことによって、試料の水分量が変化したことが大きな要因であると推定しており、原位置での線膨張係数は領域1)から求められる値に近いと考えられた。

図中の領域1)および2)において推定した線膨張係数は、図中に示した通り、それぞれ $12.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $18.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。後述する数値解析的検討では、領域1)の値を用いることとした。

6. 温度依存性挙動の数値解析的検討

上述のような亀裂の温度依存性挙動を計測したとして、そのようなデータを隧道の今後の防災管理に繋げるためには、亀裂の進展に伴って、計測値がどのように変化する可能性があるのかを知っておくことは重要である。

ここでは、まず上述の亀裂の温度依存性挙動を表現しうるモデル(物性値の推定を含む)を設定し、その後亀裂の奥行き方向の深さを変化させたときにどのよ

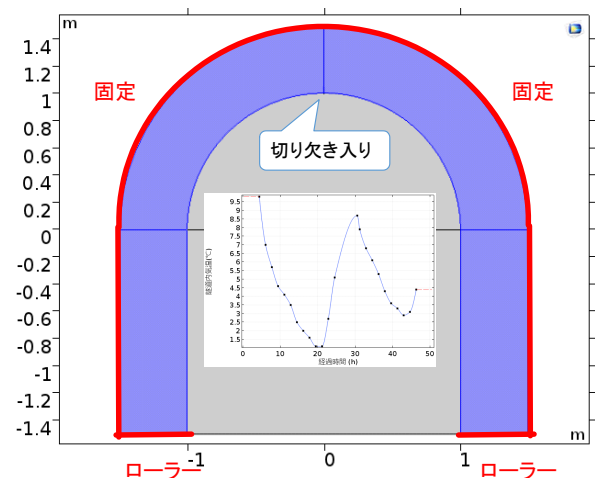


図-7 解析モデルと境界条件

うに挙動が変化して観測されるかを検討した。

(1) 温度依存性挙動を表現するモデルの設定

対象の隧道は、やせ尾根の末端部に掘削されており、土被りは数メートルで、偏圧を受けている状態にある。天端に形成された雁行型の亀裂の奥行き方向への深さは未知であるが、表層まで連続していないことは確認されている。

ここでは、隧道そのものの安定性は議論せず、隧道内の気温の変化に伴う亀裂の開閉挙動のみを評価するために、図-7に示す簡便なモデルを採用した。

岩盤は50cmの厚さをもつドーム型で表現し、天頂部に切り欠きを設けて亀裂を表現した。岩盤の外側境界は変位を固定し、側壁下部はローラー支持とした。岩盤は線形等方弾性体を仮定し、隧道の壁面に図中に示した気温の変化を時刻歴で与えた。各解析ステップごとに伝熱による岩盤の温度変化を計算しつつ、岩盤の力学的な応答を計算する連成解析とした。なお以下で

表-1 解析に用いた物性値

物性	記号	値	単位
密度	ρ	1800	kg/m ³
ヤング率	E	60	MPa
ポアソン比	ν	0.35	-
線膨張係数	α	12.0×10^{-6}	1/K
熱伝導率	k	0.1	W/(m・K)
定圧比熱容量	C_p	2000	J/(kg・K)

は亀裂表面を断熱条件とした結果を示すが、気温の時刻歴をディレクレ条件として与えても開閉挙動に大きな変化はなかった。解析メッシュには三角形要素を用い、3,482 要素、自由度 27,441 点である。

解析に用いた物性値を表-1 に示す。これらの値のうち、密度・ヤング率・ポアソン比は別途実験により推定・報告された値を用いている³⁾。線膨張係数は上述の室内試験から得られた値であるが、熱伝導率と定圧比熱容量は妥当な範囲内で変化させたときに実測値と解析結果の差が小さくなるように定めている。

解析結果の一例として、ある時刻における応力分布(図-8)と温度分布(図-9)を示す。応力分布では、亀裂先端に応力集中が生じていることがわかる。温度分布では、隧道の内壁から奥行き方向に温度勾配がついていることがわかる。

図-10 に、実測値と解析結果の比較を示す。隧道内の気温変化に対して、解析結果は概ね実測値の傾向を表現している。絶対値は倍半分の関係にあるが、今回解析では気温の変化を隧道の内壁に直接与えており、熱伝達係数を考慮していない。熱伝達特性の重要性については、山辺・市川(2019)⁴⁾に詳しく考察されており、隧道内の気温変化を岩盤に伝達させる方法を今後検討していく予定である。

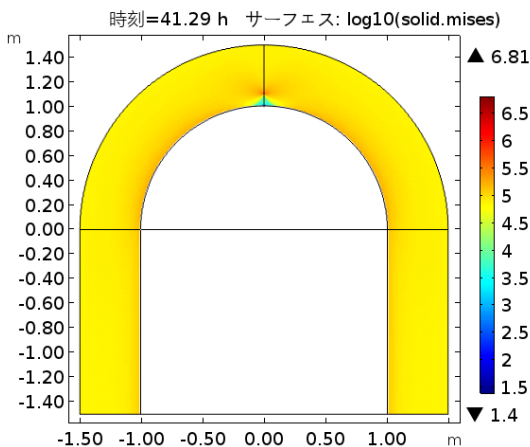


図-8 応力分布と変位状況

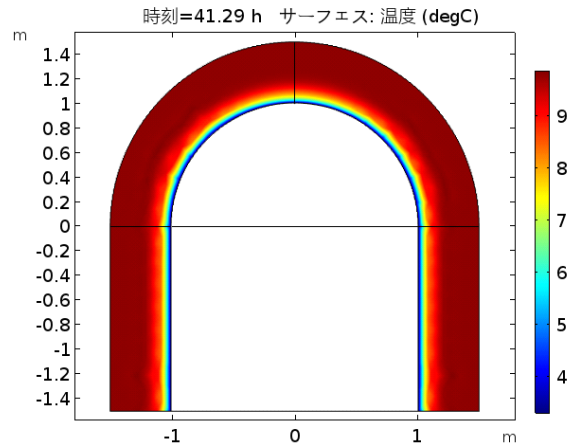


図-9 温度分布

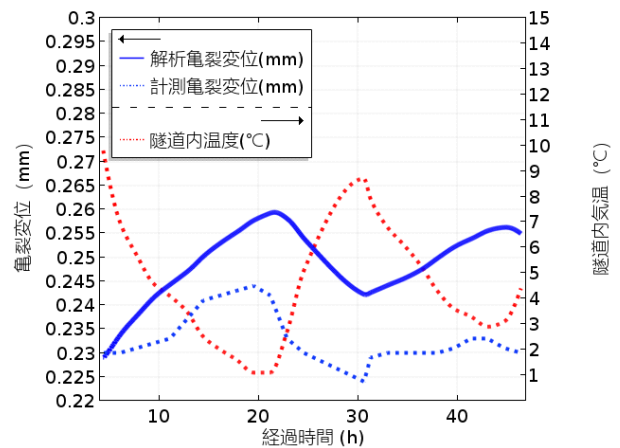


図-10 実測値と解析結果の比較

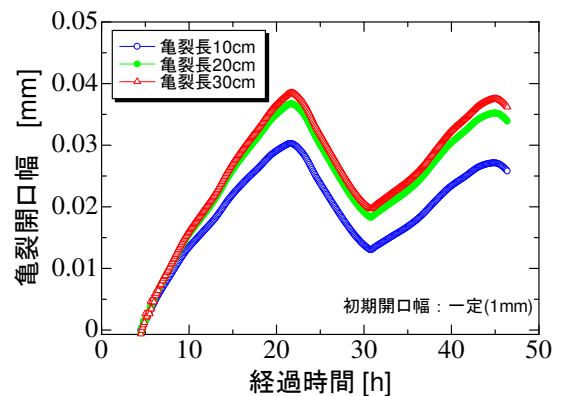


図-11 初期亀裂長を変化させた場合の解析結果

(2) 亀裂の深さを变化させた場合

次に亀裂が進展し、奥行き方向の深さ（図では亀裂長と表現している）が長くなった場合、気温の変化に伴う隧道表面での亀裂変位がどのように変化するかを

検討した。ここでは、上述のモデル(奥行き 10cm)を基準として、亀裂長を 20cm, 30cm と変化させた場合の結果を図-11 に示す。

図より、亀裂長が 10cm の場合と比較して、亀裂長が 20cm の場合、若干ではあるが、亀裂の開閉挙動が大きくなる傾向が読み取れる。一方で、30cm まで長くなると、その増加傾向はなくなり、20cm の場合とほぼ同じ大きさの振れ幅となっている。このことは、昼夜の気温変化が奥行き方向に 30cm まで届いていないことが主な要因と考えられる。

一方で、解析モデル上では初期開口幅を 1mm に設定して解析を開始しているが、自重などの構造的な影響により、第 1 ステップでの開口幅は、亀裂長 10cm, 20cm, 30cm の順にそれぞれ 0.089mm, 0.147mm, 0.180mm と大きくなる。このことは、亀裂が奥行き方向に進展した場合、開口幅が大きくなることを示しており、0.1mm 以下の精度でモニタリングすれば、亀裂の進展を把握できる可能性を示している。

以上より、この岩盤に対しては、気温の変化に対する亀裂の開閉挙動からは、亀裂の進展に関する情報を取得することは難しいかもしれないが、一方で、長期にわたって亀裂開口幅の変化を計測すれば亀裂の進展、すなわち隧道の危険度を定量的に評価できると考えられる。

7. おわりに

本稿では、更新統の軟岩よりなる素掘りトンネル(隧道)の天端に形成された開口亀裂を対象として、リアルタイムモニタリングシステムを構築し、気温の変化

に伴う亀裂の開閉挙動について数値解析を含めて検討した。その結果、亀裂の開閉挙動は隧道内の気温変化と主に相関しており、この挙動は岩石の熱膨張特性でほぼ説明できることがわかった。また数値解析的な検討により、亀裂が進展した場合、気温変化に対する開閉挙動からはあまり情報が得られない可能性が高いが、0.1mm 以下の精度で亀裂開口幅を長期的に観測することにより、亀裂進展の情報が得られる可能性が示された。本計測は現在も続けられており、データが着実に蓄積されつつある。現在対象隧道は通行止めとなっているが、対策工の実施期間中、さらには隧道の再供用に向けて、蓄積されつつあるデータが有意義に活用されることを期待したい。

謝辞： 隧道の管理機関には現場計測の便宜を図っていただきました。数値解析コードについては、計測エンジニアリングシステム株式会社の橋口真宜氏並びに米大海氏にご教示いただきました。また本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人: JST)によって支援いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高本孝頼: みんなの Arduino 入門, レックテレコム, 2014.
- 2) M. Osada: Drying-induced deformation characteristics of rocks, Proc. of 8th Asian Rock Mechanics Symposium, FL-01, 2014.
- 3) 北鎌倉隧道安全対策検討委員会資料.
- 4) 山辺正, 市川敦也: 乾燥来待砂岩の伝熱特性と厳密解による検討, 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, 2019(発表予定).

TEMPERATURE DEPENDENT BEHAVIOR OF AN OPEN CRACK FOUND AT THE TOP OF THE TUNNEL DIGGED IN PLEISTOCENE SOFT ROCK

Masahiko OSADA, Kazuki HOSOKAWA and Shouta MIYAMOTO

The opening and closing behavior of an open crack found in soft rock, which was captured by the real-time monitoring system that we constructed, is reported. The behavior of the crack mainly correlated with temperature change of air. On the basis of the observations, the mechanism of this behavior is considered to be due to the temperature dependence of the intact rock. Therefore, the coefficient of linear expansion of the rock was experimentally determined, and two-dimensional coupled analysis of heat transfer and deformation was carried out on a simple model. This model roughly expressed its behavior. Using the same code, we evaluated the effect of various depths of the crack on its temperature dependent behavior.