

トンネル掘削に伴う応力変化計測手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令2～令4

担当チーム：防災地質チーム

研究担当者：倉橋稔幸、岡崎健治、
川又基人

【要旨】

トンネル工事等では岩盤掘削に伴う緩みや応力状態の変化によって崩落や変状が発生することがあり、施工の安全性を脅かすだけでなくコスト上昇の要因となっている。本研究では、岩盤に生じる変位とひずみを簡易かつ連続的に捉えることを目的として、ボーリング孔内で変位とひずみをサンプリングモアレ法で計測する装置を開発した。岩石ブロックによる室内載荷実験を行い荷重の作用による孔壁面のひずみをモアレ画像と従来のひずみゲージで計測し比較した。その結果、モアレ画像によるひずみは載荷荷重に応じて変化し、ひずみゲージのひずみと傾向が一致した。これにより岩盤内の荷重の変化によるひずみをモアレ画像で計測できる可能性を示した。
キーワード：トンネル、応力変化、サンプリングモアレ法、ひずみ

1. はじめに

トンネルの拡幅や新設の掘削に伴い、切羽の崩落、変状が発生することがある。切羽の崩落は、施工の安全性を脅かすだけでなく、コスト上昇の要因となる。

トンネル建設工事では、岩種、弾性波速度、岩質や水による影響、不連続面の間隔、不連続面の状態等をもとに地山分類による地山評価が行われるが崩落事故が起こることもある。また、切羽の安定性は土被り厚さや地すべり等の地山条件のほか、拡幅等の工法に応じて切羽に作用する応力が異なると考えられ、従来の方法では地山の応力条件を評価できていないことが課題となっている。

岩盤の掘削に伴う孔内の変化を把握するには、現状ではアンカーボルト等に点状に貼り付けたひずみゲージによる計測や応力計での計測によって挙動を評価している。しかし、これらの計測ではひずみゲージや応力計の設置箇所におけるデータを十分得ることはできないが、任意の箇所ですべて計測したい、また、連続的な深さ方向への変化や、比較的短期間で挙動を把握したい場合は適用が難しい場合がある。

近年、橋梁の桁のたわみ¹⁾や、コンクリート構造物のひび割れ幅の計測²⁾にサンプリングモアレ法³⁾が適用されている。サンプリングモアレ法はトンネル内の任意の箇所ですべて連続的に岩盤内の変化を捉えられると考えた。

そこで本研究では、岩盤掘削に伴う応力変化計測手法の開発を目的として、まず既存資料や現地調査の結

果をもとに地質に応じたコアの物理強度特性とひずみとの相関を分析した。次に岩石ブロックによる室内載荷実験を行い荷重の作用による孔壁面のひずみをモアレ画像と従来のひずみゲージで計測し比較した。

2. 地質に応じたコアの物理強度特性と歪量の分析

2.1 トンネルの力学試験データ

これまで北海道で建設された国道トンネル 23 本で実施された先進ボーリング調査によるコアの力学試験のデータを収集し一軸圧縮強さと破壊ひずみの関係を地質別に分析した。その内訳は、火成岩としたトンネルで 11 本、堆積岩で 9 本及び変成岩で 3 本である。また、力学試験の総数は 1,603 試料であり、火成岩で 854 試料、堆積岩で 396 試料及び変成岩で 353 試料である。

2.2 地質別コアの物理強度特性と歪量の関係

図-1 の a) ～c) に地質別のコアの一軸圧縮強さと破壊ひずみの関係を示す。火成岩の一軸圧縮強さは 0.06 ～235 MPa (平均 25.6 MPa) で、破壊ひずみは 0.13 ～2.26 % (平均 0.50 %) であった。堆積岩の一軸圧縮強さは 0.16 ～167 MPa (平均 21.6 MPa) で、破壊ひずみは 0.04 ～7.24 % (平均 0.65 %) であった。変成岩の一軸圧縮強さは 0.06 ～375 MPa (平均 36.1 MPa) で、破壊ひずみは 0.06 ～5.9 0% (平均 0.49 %) であった。

以上のように地質別の一軸圧縮強さの平均値は堆積岩 < 火成岩 < 変成岩の順に小さく、破壊ひずみの平均値は変成岩 < 火成岩 < 堆積岩の順に小さかった。

ここで、力学試験における供試体の高さを 10 cm と

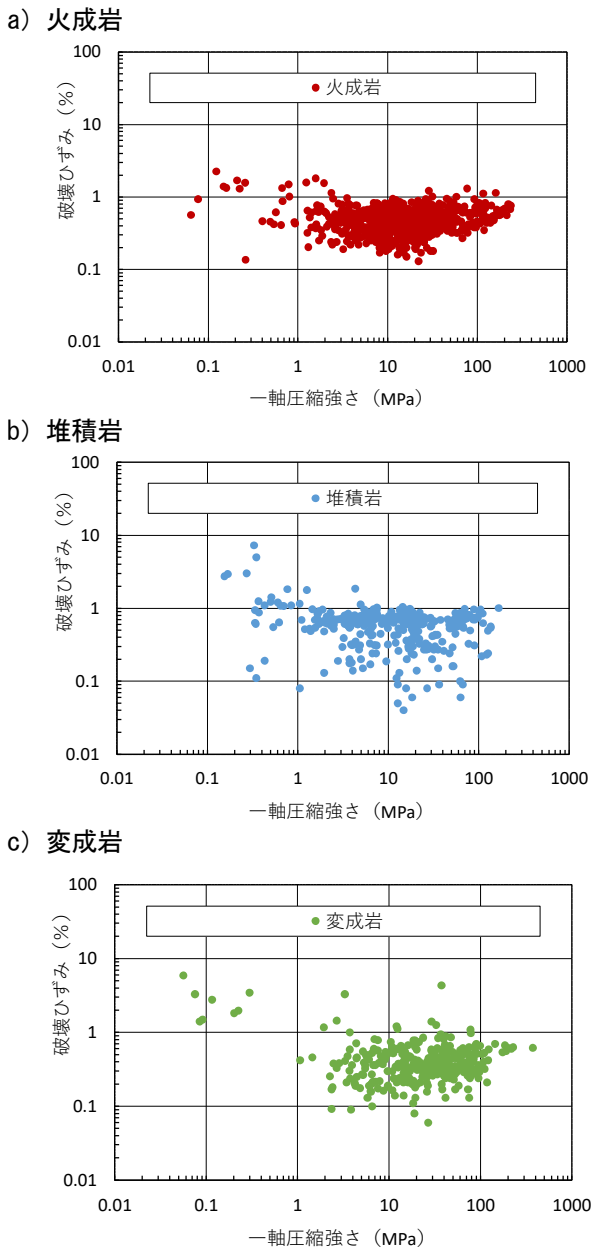


図-1 岩石コアの一軸圧縮強さと破壊ひずみの関係

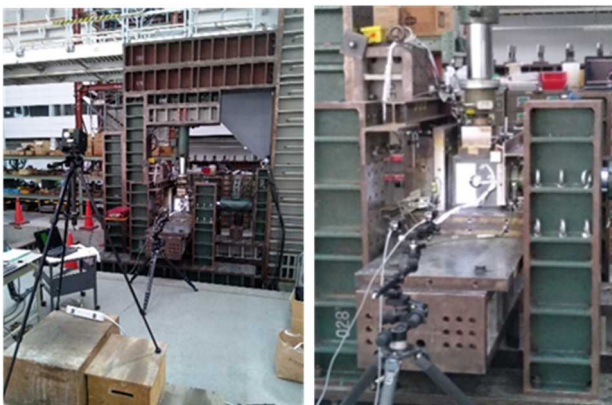


写真-1 荷重装置 (左) と供試体 (右)

する場合、火成岩の例では平均 0.50 % のひずみが生じて破壊する。その破壊ひずみに相当する変位量は 0.5 mm である。同様に堆積岩では 0.7 mm、変成岩では 0.5 mm である。このように岩石コアの破壊時に 0.5~0.7 mm の変位量が発生することが分かった。また、このような変位量が生じる前に、岩石に作用する荷重に応じた状態の変化をモアレ画像による変位量やひずみ値として計測することができれば、岩石に作用している応力を推定できると考えられる。

3. モアレ縞等を用いた応力変化計測手法の検討

3.1 モアレ縞等の計測概要

サンプリングモアレ法³⁾は、格子状のパターンを有する画像に荷重の作用で変化が生じた同様な格子状のパターンの画像を重ねた際に生じるモアレ縞 (モアレ画像) の位相差から変位とひずみを求める方法である。

モアレ画像の位相差から求めた変位とひずみは撮影画像内の任意の位置で求めることができ、PC 内で荷重時間に伴う撮影画像の変化から配列位置が同じとなる格子状のパターンの荷重時間に伴う位相差の変化から変位を求めた。また、ひずみは撮影範囲内の 2 点間の距離 (ひずみゲージの長さとおわせた 5 mm) の荷重時間に伴う撮影画像の変化から求め、ひずみゲージによるひずみと比較分析した^{4, 5)}。

3.2 荷重実験と供試体

写真-1 に二軸荷重装置と岩石ブロック供試体の設置状況を示す。実験では水平と鉛直方向に荷重できる門型フレーム式の装置 (高さ 4.0 m、幅 6.4 m、最大荷重 2,000 kN) を使用した。また、岩石ブロック供試体は 1 辺 250 mm の正方形の来待砂岩を使用した。供試体の中央に 50 mm の円孔を掘削貫通させ、その孔内に格子状のターゲットとひずみゲージを貼り付けた。格子状のターゲットは伸縮性のあるシート状の材質に 1.5 mm の正方形を印刷したシートである。この格子状のターゲットを供試体の孔内の天端部に幅 7 cm、長さ 10 cm の範囲で貼り付けた (写真-2、図-2)。

一方、孔内のひずみは、天端の端部から内側へ 5 cm の位置を中心として長さ 5 mm のひずみゲージを格子状のターゲットと対象となる位置に貼り付けた。なお、ひずみゲージは樹脂ベースに取り付けられた金属箔の変形に伴う電気抵抗の変化から求める一般的なものを使用した。

実験時の荷重は、水平方向 (X 方向) に 500 kN で荷重後、鉛直方向 (Y 方向) に 250 kN、500 kN、750 kN、1,000 kN で荷重した。奥行方向 (Z 方向) は拘束して

いない。鉛直荷重の各荷重は5分間継続させた。1,000 kNの載荷後、同様なステップで徐荷した。この載荷パターンを2回繰り返した。

3.3 モアレ縞等の計測方法

計測では供試体の正面から1.5 m離れた位置にカメラを設置し(図-2)、荷重の載荷時に1秒毎に孔内の格子状のターゲットを撮影した。また、孔内は曲面のため、45度の角度を持たせた反射鏡を挿入し、反射鏡に

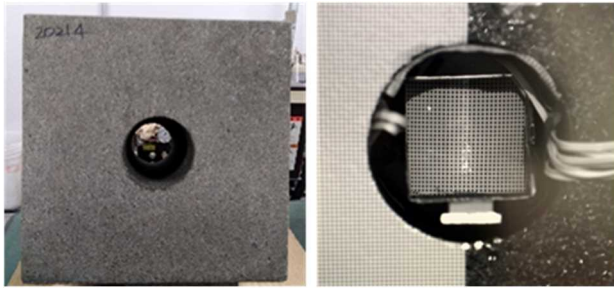


写真-2 載荷装置(左)と供試体(右)

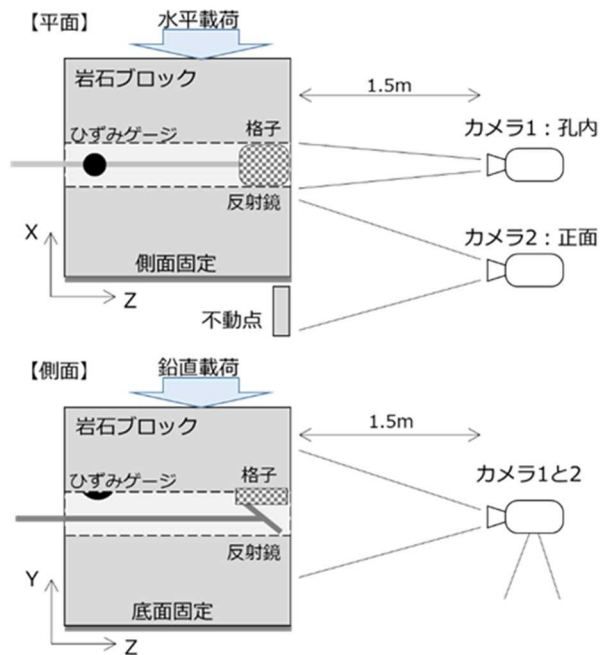


図-2 計測の概要図

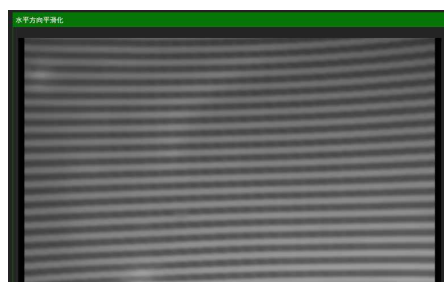


写真-3 モアレ画像の撮影例(PC画像)

映る格子状のターゲットの画像を平面状態として撮影した。ただし、曲面に対する補正は行わなかった。

3.4 計測結果及び考察

3.4.1 モアレ画像による変位

写真-3にモアレ画像の撮影例を示す。画像は水平方向(X方向)の配列であり、次の撮影画像と差分することで変化を求める。なお、光源によるハレーションが撮影される場合、その範囲は解析から除外した。

図-3に荷重の載荷履歴とモアレ画像から求めた変位を示す。変位の極性はプラス側が圧縮を示し、マイナス側は引張を示す。また、X方向は供試体が水平方向に変形する方向である。Y方向は載荷による供試体の鉛直方向への変形に応じて、孔内の反射鏡に映る格子状のターゲットが孔の軸方向に変形する方向を示す。なお、モアレ画像の4秒毎の記録した計測データを、ひずみゲージによる記録時間とあわせた。

計測の結果、まず、X方向の変位は水平荷重を500 kN載荷させた状態で概ね一定となり、除荷にあわせて0となった。載荷による最大の変位は955 μm であった。次に、Y方向の変位は鉛直荷重に応じて階段状に発生した。載荷1回目の鉛直荷重1,000 kNによる変位は861 μm 、載荷2回目の載荷時の変位は908 μm であった。また、載荷1回目と2回目の中間時の鉛直荷重は10 kNとしたが変位は240 μm であった。この理由は水平荷重の影響による変位と考えられる。また、載荷終了時には161 μm の残留変位が生じた。この理由は載荷によって供試体が動いて再配置された影響によると考えられる。なお、解析でのY方向は孔の軸方向で拘束されていない。そのため、供試体の変形に応じた孔内の軸方向の変位をモアレ画像の変化で捉えたと考えられる。

以上のことから、モアレ画像の計測によって、荷重の載荷に応じて孔内で発生する変位を捉えることが可能であることを確認した。

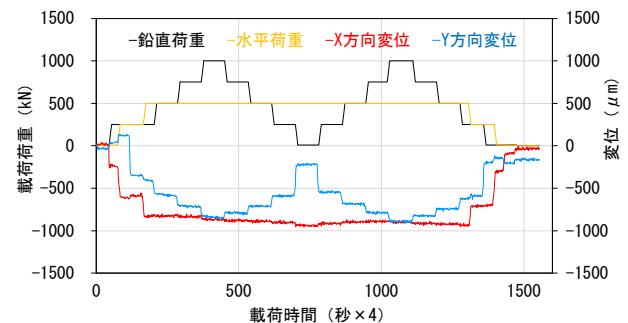


図-3 モアレ画像による孔内の変位

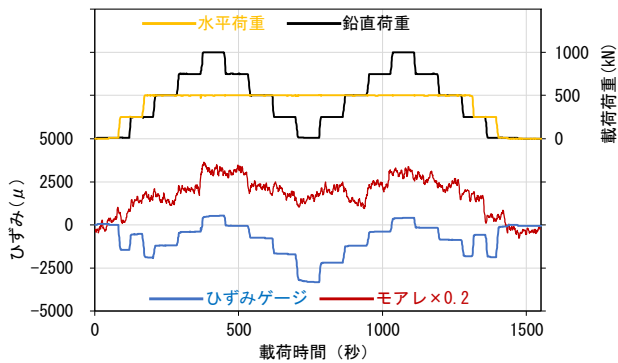


図-4 モアレ画像とひずみゲージによる孔内のひずみ

3.4.2 モアレ画像とひずみゲージによるひずみの比較

図-4 に孔内で計測したモアレ画像及びひずみゲージにより求めたひずみ並びに荷重の載荷履歴を示す。ひずみの極性はプラス側が引張を示し、マイナス側は収縮を示す。

計測の結果、まず、ひずみゲージによるひずみは最大値が 532μ 、最小値が $-3,330\mu$ であり、変化幅は $3,862$ であった。載荷開始時に水平荷重の作用によって一度マイナス側に変化するが、その後の鉛直荷重の作用によってプラス側に変化した。載荷終了時にひずみは 0 となり、荷重の載荷に応じて変化することがわかった。

次に、モアレ画像によるひずみは最大値が 725μ 、最小値が -156μ であり、変化幅は 881 であった。載荷開始時からプラス側に変化しており、その後の鉛直荷重の作用に応じた変化を示した。また、載荷終了時にはひずみは 0 となり、荷重の載荷に応じて変化することがわかった。

ここで、両ひずみの計測履歴は載荷開始から極性は異なるが、最大荷重が作用したときに、ともに最大値を示すこと、また、載荷 1 回目の後に荷重が 0 となる状況にあわせて、両計測データは一度低下し、載荷 2 回目の荷重に応じて増加した。このことから、計測方法は異なるが載荷荷重に応じた違いを計測したと考えられる。さらに、両者のひずみ値を比べるとモアレ画像による値は、ひずみゲージによる値の 1.4 倍程度マイナス側であった。また、モアレ画像によるひずみの変化幅は、ひずみゲージによるひずみの変化幅の 0.23 倍（5 分の 1 程度）であった。

以上のことから、モアレ画像によるひずみは、ひずみゲージの値より、ひずみレベルは小さかったが、載荷した荷重に反応する傾向を確認できた。しかし、モアレ画像によるひずみは、ひずみゲージによるひずみ

よりもノイズが多く、載荷した荷重に応じて計測されていない状況も確認された。この理由は、格子状のターゲットの材質が伸縮性を有しており、ひずみゲージの値と異なる挙動を示すものと考えられる。また、ひずみゲージは孔壁面の直接的な挙動を計測するのに対し、モアレ画像によるひずみの計測では反射鏡の画像とカメラの撮影位置が離れており間接的な計測となることから、その区間内での揺らぎによる影響を含んでいることも考えられる。このように、ひずみレベルが小さい状況と、さらに揺らぎの影響が加味された可能性が考えられる。なお、今回の実験では揺らぎの影響について判断できるデータを計測していないが、直接的に計測する場合と異なる影響を含むものと推察される。

4. まとめ

本研究の結果、以下の知見を得た。

- 1) 北海道の国道トンネル建設時に実施されたボーリングコアの一軸圧縮強さと破壊ひずみの関係を分析した結果、破壊ひずみは $0.49\sim 0.65\%$ であった。
- 2) 岩石ブロックに掘削した孔内のモアレ画像及びひずみゲージによるひずみを比較した結果、載荷荷重に対応するひずみの変化を得て、従来のひずみゲージのひずみと載荷に伴う挙動が一致した。ただし、モアレ画像によるひずみは、ひずみゲージによる値よりもひずみレベルが小さい場合があった。

参考文献

- 1) 津田 浩、李志遠、王 慶華：サンプリングモアレ法を用いた橋梁の変形分布計測、精密工学会誌、Vol.83、No.12、pp.1071-1075、2017年12月
- 2) 西崎 到：見えないひび割れ・塩分を見えるようにする技術－近接目視が困難な部位等のための点検診断技術の開発一、令和2年度土木研究所講演会講演集、pp.29-36、2020年10月
- 3) 森本吉春、藤垣元治、梶谷明大：サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測、Journal of the Vacuum Society of Japan、Vol.54、No.1、pp.32-38、2011年3月
- 4) 岡崎健治、川又基人、倉橋稔幸：室内載荷実験における削孔内でのモアレ画像の計測によるひずみの分析について、令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会講演概要集、III-82、2022年9月
- 5) 岡崎健治、川又基人、倉橋稔幸：二軸載荷実験における岩石ブロックの削孔内でのモアレ画像計測による変位とひずみについて、動的画像処理実用化ワークショップ2023講演論文集、pp.54-57、2023年3月

RESEARCH ON STRESS MEASUREMENT METHOD USING THE SAMPLING MOIRE DURING TUNNEL EXCAVATION

Research Period: FY2020-2022

Research Team: Geological Hazards Research Team, Cold-Region
Construction Engineering Research Group

Author: KURAHASHI Toshiyuki

OKAZAKI Kenji

KAWAMATA Moto

Abstract: In tunnel construction, collapse and deformation may occur due to loosening and changes in stress conditions, which not only threatens the safety of construction but also increases costs. In this study, we developed a device for measuring displacement and strain in a borehole using the sampling moire method occurring in the rock mass. As a result of indoor loading experiment, the tendency of strain in the moire image changed according to the applied load was consistent with the strain in the strain gauge.

Keywords: Tunnel, Stress change, Sampling moire method, Strain.