

## 研究助成実施報告書

助成実施年度	2020 年度
研究課題（タイトル）	地山の経時劣化に起因するトンネルの盤ぶくれの発生メカニズムの解明
研究者名※	崔 瑛
所属組織※	横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院 准教授
研究種別	研究助成
研究分野	都市環境工学
助成金額	120 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

( ) は、報告書提出時所属先。

# 大林財団2020年度研究助成実施報告書

所属機関名 横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院  
申請者氏名 崔 瑛

研究課題	地山の経時劣化に起因するトンネルの盤ぶくれの発生メカニズムの解明
<p>(概要) ※最大10行まで</p> <p>本研究では、膨潤性地山を原因として、盤ぶくれなど供用中に時間遅れの変状が発生するトンネルを対象とし、その発生メカニズムの解明を目的とする。具体的には、膨潤圧の発生による荷重の再配分および膨潤に伴う地山の強度低下を同時に考慮するため、実膨潤性材料を用いたモデル実験を通じ、膨潤性地山へ地下水の流入に起因する、盤ぶくれなどトンネル変状の発生メカニズムの明確化を目指す。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>高速道路3社が管理する道路トンネルの2割は建設から30年以上経過しており(土木学会, 2019), 経年とともに覆工のひび割れや盤ぶくれなど, 補修を必要とする変状が増加している。その中, 盤ぶくれの9割は風化によって長期的に強度が低下する岩種や膨張性を示す岩種で発生すると報告されている。特に膨張性地山の場合は, 膨潤に伴う膨張圧のほかに地山の力学特性も変化すると考えられ, 盤ぶくれを引き起こす主な理由となっている。盤ぶくれが発現した場合は, 主にインバートの追加設置や部分的な舗装補修などの対策を実施しているのが現状である。しかしながら, 風化や膨潤によって周辺地山の力学特性が変化した(以下, 地山の劣化)場合は, 地山の強度変化に加えて覆工周辺の荷重分布が設計時から大きく変化し, 上記に示す部分的な補修のみでは変状を抑えられず, 繰返し変状が発生し, 内空が確保できなくなる可能性が大きい。</p> <p>そこで本研究では, 膨潤に起因する地山の経時劣化に着目し, 地山の経時劣化に起因する盤ぶくれの発生メカニズムの明確化を目指す。</p> <p>【参考文献】土木学会: トンネルライブラリー第30号 トンネルの維持管理の実態と課題, 2019</p>	

2. 研究の経過	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>I. 事例調査: 土被りやインバートの有無といったトンネルの各種情報や室内岩石試験の結果などと, 盤ぶくれやひび割れといった変状発生との関連性を把握するため, 日本国内の道路・鉄道トンネルにおけるこれまでの変状発生事例に関する報告や論文をから計49トンネルに関する情報を収集・調査し, まとめた。</p>	

Ⅱ. 膨潤性地山への長期浸透をモデル化した模型実験：Ⅰの情報を参考に、トンネルの浸透実験を実施し、地山の膨潤がトンネルの長期安定性に及ぼす影響について検討する。ここでは、水の流入による地山の経時劣化に伴うトンネル覆工の力学挙動について検討した。

### 3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

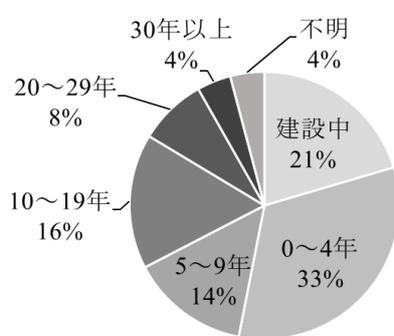


図1 変状発生までの年数

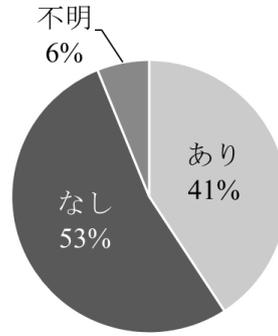


図2 インバートの有無

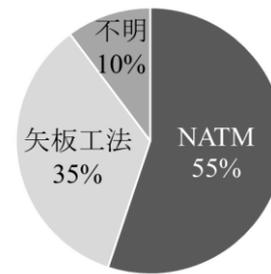


図3 施工方法

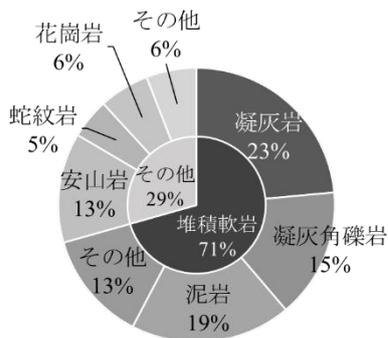


図4 岩種状況

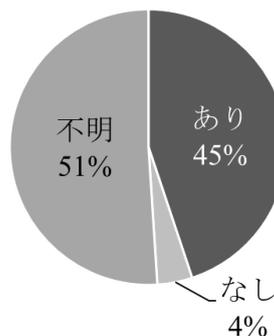


図5 膨潤性粘土鉱物の有無

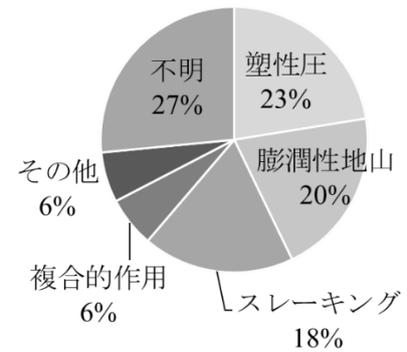


図6 変状原因

#### Ⅰ. 事例調査：

図1に供用（一部は竣工）してから変状が発生・発見されるまでの期間，図2にインバートの有無の割合をそれぞれ示す。これらの図からわかるように，全体の半数近くのトンネルで供用から5年以上経ってから何らかの変状が発生しており，また，約4割のトンネルではインバートが施工されていても変状を起こしていることから，建設時に対策をしていたとしても供用後に変状が発生してしまうという実情が改めて浮き彫りとなっている。

図3に施工方法の割合，図4に変状区間周辺で見られた岩種についてそれぞれ示す。これらの図からわかるように，変状トンネルの半数以上がNATM工法で建設されたトンネルであった。また，第1章でも紹介した，堆積軟岩に分類される凝灰岩や泥岩などが全体の7割を超えており，盤ぶくれなどの変状を起こしやすい地質・岩種として，堆積軟岩が大きく関係していることが示唆される。

図5にトンネル周辺地山における膨潤性粘土鉱物の有無，図6には文献内に記載されていた変状原因についてまとめたものをそれぞれ示す。これらの図からわかるように，有無がはっきりと判明しているトンネルのほとんどにおいて膨潤性粘土鉱物の存在が認められている。また，変状原因は塑性圧，膨潤性地山，スレーキングのいずれも同じくらいの割合であり，特に，膨潤性地山およびスレーキングが原因で変状を起こしたトンネルについては，膨潤性粘土鉱物の含有が大きな要因となっていることが考えられる。

以上のことをまとめると、インバートの有無にかかわらず、トンネル周辺地山に堆積軟岩が存在して膨潤性粘土鉱物含有している場合に、膨潤性地山やスレーキングを主な原因とした盤ぶくれなどの変状がトンネルに生じやすいことが言える。本研究では、主に膨潤性地盤の浸水膨張に伴うトンネルおよび周辺地山の力学挙動について検討した。

## II. 膨潤性地山への長期浸透をモデル化した模型実験

### ① 模型実験の概要

図 7, 8 に模型実験の概要と様子を示す。本実験では、トンネル建設後の水の浸入をモデル化するため、定水位浸水実験を行った。膨潤性地山の下部地盤を作製後、所定位置に膨潤性地層とトンネルを設置した後、土被り部分の地山を作製する。その後、地山の下部につなげた定水位給水タンクのパルブを開き、給水を開始する。水はトンネルの下部から上部に浸透し、膨潤性地山を膨潤させる。いずれのケースにおいても、約 1 時間で地盤への浸透が終了する。

膨潤性地山材料は膨潤性地盤材料であるベントナイトと珪砂を 1:3 の重量比で混合したものを使用した。図-9, 10 に、同材料の膨潤率試験結果を示す。図 9 より  $\sigma_v=9.8 \text{ kPa}$  における膨潤率は 22%、図 10 より膨潤圧は 161.72kPa であることが分かる。

浸潤実験中においては、覆工模型の天端、肩部、スプリングライン(SL)、脚部、インバート両端と中央に荷重計を設置し、覆工に作用する荷重の変化を観察した。さらに、1 時間おきに前面から高画素写真撮影を行い、写真を用いた PIV 解析によって周辺地山の変位を検討した。

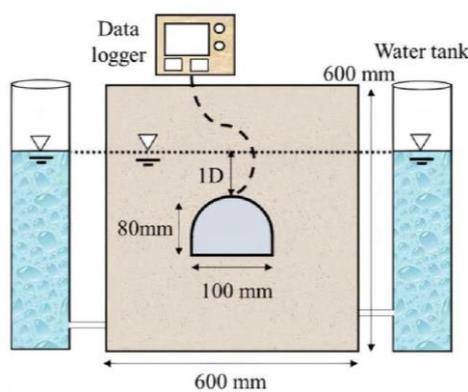


図 7 浸水模型実験の概要



図 8 土槽の様子

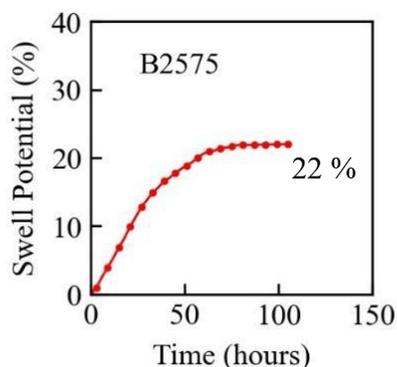


図 9 膨潤率の推移( $\sigma_v=9.8 \text{ kPa}$ )

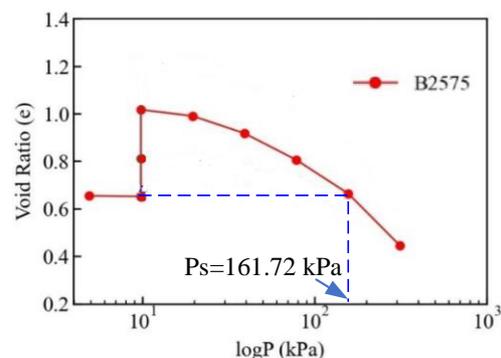


図 10 膨潤率試験((ASTM, 2013))

### ② 膨潤性地山に建設したトンネルの長期挙動

図 11 に、土砂地山のみ(S6)の場合と、トンネル下部に膨潤性地山が存在する場合(S6-B)における浸水に伴う覆工荷重の推移を示す。図 11a)に示す砂地盤のみのケースにおいては、浸水後覆工荷重はほぼ変化しない結果が見られる。一方、図 11b)に示すトンネル下部に膨潤性地山が位置する場合は、浸水後長時間に渡ってインバートに作用する荷重が徐々に増え続ける現象が見られる。時間の都合上 250 時間で実験を打ち切っているが、インバート両端に作用する土圧はさらに増加すると考えられる。膨潤に伴うトンネルの長期挙動をさらに詳しく検討するため、荷重計付近の変位を PIV 解析結果から抽出し、荷重の変化と併せて図 12 に示す。図より、膨潤性地山がとトンネル下部に位置する場合、長期的な応答は概ね図 12 に示すように以下の 4 段階に分類することができると考えられる。

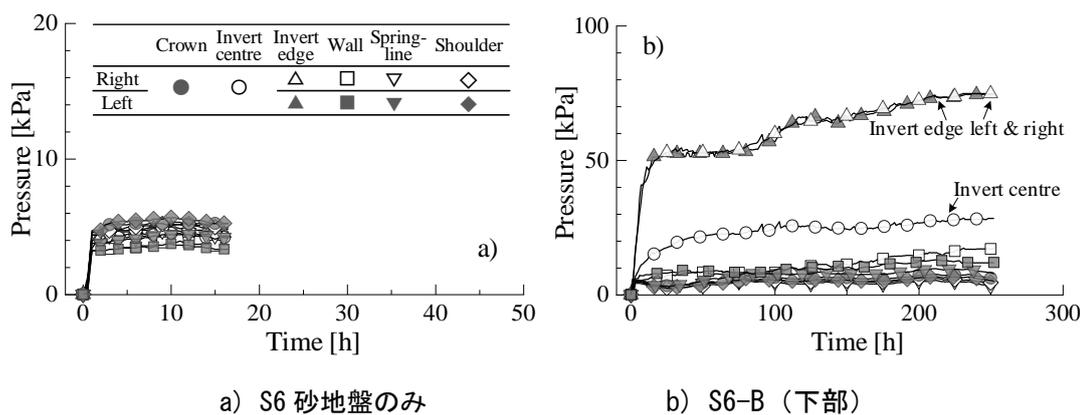


図 11 覆工荷重の経時変化図

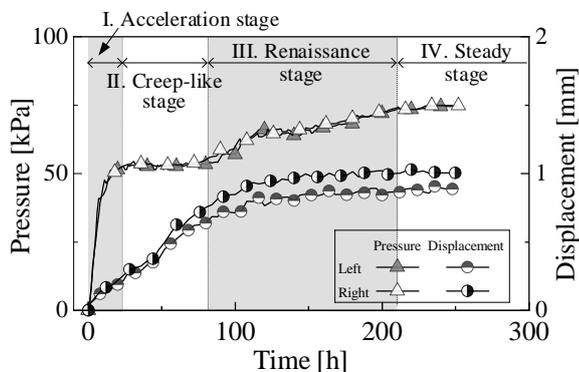


図 12 長期挙動の分類 S6-B (下部)

**I Acceleration stage (加速段階) :** 荷重と変位がともに急速に増加する。膨潤性地盤の変位は周辺地山の拘束圧に大きく依存することが分かっている。浸水の初期段階では膨潤圧が小さく拘束圧が小さいため膨潤速度が速い。

**II Creep-like stage (疑似クリープ段階) :** 荷重はほぼ変化しないのに対し、変位の速度を落とさず進行し続けている。この現象は粘土のクリープに似た現象を示しているが、原理的には全く異なる現象である。この段階においては膨潤に伴って周辺地山の変位が発生するため、膨潤圧が増加しなくなる、すなわち膨潤圧が増加した分、周辺地山の変位により緩和されていると考えられる。

**III Renaissance stage (再変形段階)** : 変位の増加は若干緩やかになるが荷重が再度増加し始める段階である。周辺地山の剛性や強度などによって変位が拘束されることで、膨潤圧が再度増加すると考えられる。

**IV Steady stage (安定段階)** : 荷重および変位いずれも安定した段階である。この段階においては膨潤性地山の膨潤がほぼ終息したため、周辺地山に大きな変化が発生しなくなると考えられる。

本結果について、特筆すべき点は **Creep-like stage** と **Renaissance stage** が観察できた点である。実トンネルにおいて周辺地山の変位の計測は難しいため、覆工に作用する荷重や変状によりトンネルが安定したと判断した場合でも、**Creep-like stage** である可能性があることを示唆している。すなわち、いったん安定したと判断される場合でも、長期間経過後に **Renaissance stage** に発展し急激に変状が進む可能性がある。以上から、**Renaissance stage** は、安定していた供用中のトンネルが急に変状を引き起こす一因になると考えられる。

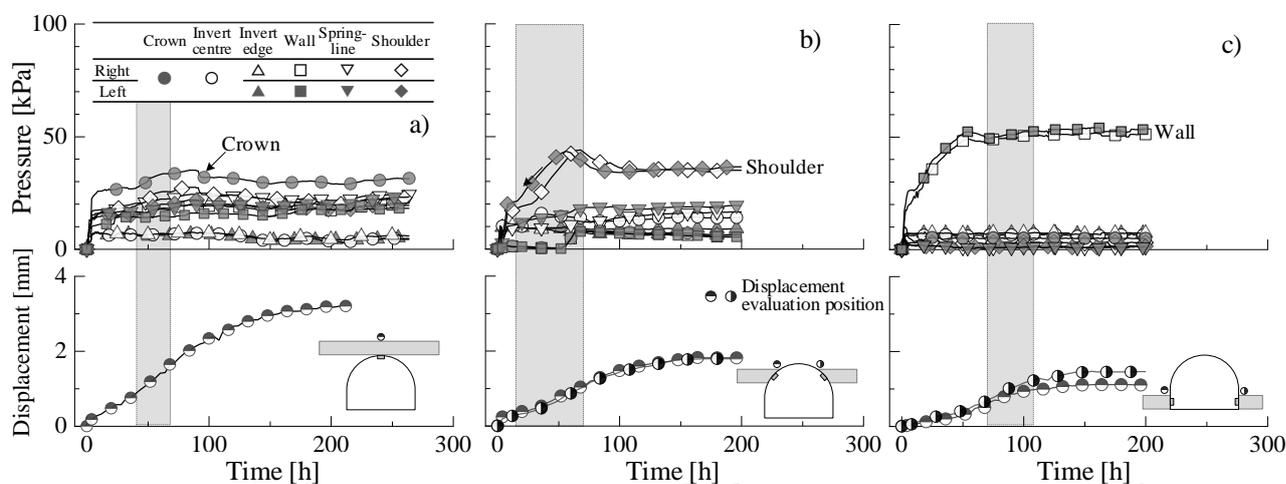


図 13 覆工荷重の経時変化 a) S6-T(脚部), b) S6-S(肩部), c) S6-W(側壁)

### ③ 膨潤性地山の位置の影響

さらに本研究では、膨潤性地山の位置を天端、肩部、脚部に变化させた浸潤模型実験を実施し、各地層構成におけるトンネルの長期挙動について検討した。図 13 に、覆工荷重の経時変化と、最も覆工荷重の変化が顕著な位置における周辺地山の変位を示す。

図より、覆工荷重は、膨潤性地山との接触位置で最も増加が大きい結果が見られる。膨潤性地山の位置が深いほど、覆工荷重が大きく、周辺地山の変位が小さい傾向が見られる。膨潤により発生する膨潤圧は膨潤率に反比例することが既往の研究により報告されている。すなわち、膨潤性地山の位置が深い場合は、周辺地山の変位がより拘束されているため、自由に膨潤できず結果的に大きい膨潤圧が発生すると考えられる。

さらに、いずれの位置においても、**Creep-like stage** と **Renaissance stage** が見られ、膨潤性地山の位置に依らず長期間後に急激に変状が進む可能性があることを示唆している。膨潤性地山に隣接した箇所では浸潤開始直後から荷重の変化が見られるが、離れた位置においては遅れて荷重の変化が発生する可能性がある。本現象は肩部周辺に膨潤性地山が位置するケース S6-S で顕著に表れている。同理由については、肩部における膨潤圧の作用方向に起因すると考えられるが、詳細については数値解析などを用いたさらなる検討が必要である。

#### ④ まとめ

以上から、本研究は膨潤性地山の膨潤に伴うトンネルの長期挙動について実験的に検討し、トンネルは一旦安定したように見え場合でも、長期間後さらに変状する可能性があることが分かった。真の安定か否かについては覆工荷重のみでは判断ができず、合わせて周辺地山の観察も重要であり、長期安定性の評価には長期的かつ定期的な周辺地山変位と覆工荷重計測の重要性を見出した。周辺地山および覆工両方の挙動から長期の視点から真の安定もしくは疑似クリープ段階を見分け、それぞれに適した変状対策を講じる必要がある。

【参考文献】 ASTM, 2013. D4546 – 08 Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils 1. ASTM Int. 1–9. <https://doi.org/10.1520/D4546-14>.

#### 4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究では、模型実験により膨潤性地盤への浸水に伴い、時間遅れのトンネル変状が発生する可能性が見られた。しかしながら、膨潤性地盤の力学・膨潤特性に基づく同現象のメカニズムの解釈や、同解釈に基づく膨潤性地盤に起因するトンネル変状対策の提案までは至っていない。以下に今後解決すべき課題と予定を示す。

##### ① 膨潤性地山の膨潤・力学特性の経時変化を忠実に反映させた数値解析

膨潤性地山の膨潤・力学特性の経時変化を忠実に反映させた有限要素解析を実施し、模型実験には計測が難しかった地盤内部の力学挙動の変化および地山とトンネルの相互作用について詳しく検討する。さらに、模型実験結果との比較検討により、数値解析手法の妥当性について検討を行う。

##### ② 盤ぶくれと地山劣化度合いの関連性の体系化

ここでは、①で示した数値解析をさらに発展させ、劣化地山の劣化特性や位置、範囲の他、地下水の分布等についてパラメトリックスタディを実施し、それぞれのパラメータによる影響を調べる。解析より得られたトンネルの変状と地山の劣化度合いの関連について体系的にまとめる。これらの結果により、トンネルの変状状況、特に盤ぶくれやひび割れの発生状況から、劣化地山の種類や領域、および劣化度合いを推定できると考えられる。

##### ③ 地山の劣化状況に応じた補修プランの提案

供用中であるトンネルの補修においては、部分的な補修だけでなく、劣化領域による影響をしっかりと評価した上、地圧に加えて地山の強度特性の変化を取入れた補修を実施する必要がある。研究成果全体をまとめ、地山の経時劣化の影響を取入れたトンネル健全度の評価方法を提案する。最後に上述の研究をまとめ、劣化地山の影響を考慮した補修プランの選定方法を提案すし、収集した現場データと照らし合わせ、提案方法の適用性について検証を行う。