

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04594

研究課題名(和文) 地盤材料の経時劣化に起因するトンネル変状機構の解明と設計への反映方法の提案

研究課題名(英文) Deformation mechanism of the tunnel lining due to the deterioration of surrounding ground and the reflection on the tunnel design

研究代表者

崔 瑛 (CUI, Ying)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授

研究者番号：60583797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、膨潤や土砂化といった地盤材料の経時劣化に起因するトンネルの長期安定性、および劣化領域がトンネルの地震時挙動に及ぼす影響について検討し、以下の知見を得た。

トンネル周辺地盤の膨潤性・地山の膨潤に伴い、覆工に作用する応力が大幅に増加し、さらにその分布形態も大きく変化することが分かった。トンネルの地震時挙動については、地山劣化に伴う局所的な強度低下により、地盤とトンネル覆工の力学挙動が大きく変化する結果が見られた。トンネル～土境界における内部侵食の発生について、トンネル～土境界では流速が早く、内部侵食が発生しやすい環境にあり、その主な理由は間隙のほか、流路が短いとの知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、地山の経時劣化がトンネルの常時、地震時の安定性に及ぼす影響について明らかにした。特に劣化過程を再現した浸透模型実験および二次元振動台実験により得られた知見は、劣化に伴う地盤材料の変化を忠実に反映できている。

一方、本研究はトンネルのマネジメントにおいて、覆工コンクリートの劣化だけでなく、地山の劣化について着目し、それらの影響を反映するものである。地山の劣化からトンネルの安定性までの一連の繊細な検討、および地盤劣化の観点をトンネルの設計・補修に取り入れることにより、トンネルの安全な運用に大きく貢献できると考える。

研究成果の概要(英文)：In this study, the long-term stability of tunnels caused by the deterioration of ground materials and the impacts of deteriorated areas on the seismic behavior of tunnels were investigated, and the following findings were obtained.

(1) The stress acting on the tunnel lining increased significantly with swelling of the ground, and the distribution is also changing significantly. (2) The seismic behavior of the tunnel during earthquakes was found to change significantly due to the local strength loss associated with the deterioration of the ground. (3) The internal erosion, as well as high velocity, is easy to happen at the soil-lining boundary, which is mainly caused by the short flow path and the gap.

研究分野：地盤工学

キーワード：劣化 長期安定性 地震時挙動 膨潤性 内部侵食

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

供用から数年～数十年経過したトンネルにおいて、周辺地山の強度の低下や透水性の変化といった地山の劣化によって、覆工の剥落や盤ぶくれ等が発生する事例がしばしば報告されている。その多くは、膨潤性地山や土砂化といった経年劣化が発生する可能性のある地山で発生しており、トンネル周辺地山の劣化はトンネル覆工の力学挙動に大きく影響を与え、その劣化の蓄積はトンネルの安全性を脅かす可能性がある。さらに、浸透に伴いトンネル～地山境界においては、水の流れが卓越し、内部侵食を引き起こす可能性がある。このような劣化の可能性のある地山にトンネルを建設する際には、地盤材料劣化によるせん断・浸透特性の変化、および地山の劣化がトンネルの安定性に及ぼす影響を明らかにした上、劣化の影響を考慮したトンネル覆工の設計を行う必要がある。さらに、既設トンネルの補修においても、覆工コンクリートだけでなく地山劣化による影響を考慮する必要がある。

2. 研究の目的

以上の背景より本研究では、a.劣化に伴うトンネル力学挙動の変化とそのメカニズムの解明、b. 劣化領域がトンネルの地震時挙動に及ぼす影響の明確化、c.トンネル～地山境界における内部侵食の発生とそのメカニズムの解明の3つのゴールを掲げる。

3. 研究の方法

以下に、3つのゴールそれぞれの研究方法を示す。

a. 劣化に伴うトンネル力学挙動の変化とそのメカニズムの解明

トンネル浸水模型実験を実施し、膨潤性地盤の膨潤に伴うトンネルと周辺地山の力学挙動について検討し、さらに膨潤性地山の位置や周辺地山の強度などによる影響について検討した。

b. 劣化領域がトンネルの地震時挙動に及ぼす影響の明確化

二次元せん断模型実験装置を製作し、劣化領域の位置、劣化の程度などがトンネルの地震時挙動に及ぼす影響について検討した。

c.トンネル～地山境界における内部侵食の発生とそのメカニズムの解明

地盤のみ、トンネル～地山境界における透水状況をそれぞれ計測できる装置を製作し、境界地盤における流速や内部侵食の発生状況等について検討した。

4. 研究成果

a. 劣化に伴うトンネル力学挙動の変化とそのメカニズムの解明

図-1 に、浸透に伴うトンネル覆工に作用する荷重の経時変化を示す。図-1a)に示す膨潤性地山がない場合、トンネルに作用する荷重は時間の経過に伴う明確な変化はない。一方、インバート下部に膨潤性地山が存在する場合は、図-1b)に示すように、時間とともに徐々に増加していく傾向が見られる。長期間における変状をより詳しく説明するため、図-2 に最も荷重の変化が大きかったインバートの両端とその付近での変位の推移を示す。図より、トンネルに作用する荷重の長期的な変遷過程は、以下のような4つのステージに分けることができる。

Acceleration stage：膨潤に伴う地山の変位と荷重がともに急激に増加する段階で、膨潤性地山の飽和度の増加に伴う膨潤と膨潤圧が発現する段階であり、その増加度合は膨潤性地山の膨潤特性によってことなると考えられる。

Creep stage：覆工に作用する荷重はほぼ一定を保つが変位が大きくなる、いわゆる見かけ上のクリープ段階である。既往の研究により平衡段階において膨潤圧は地山の膨潤率と反比例の関係となるが、この段階では地山の膨潤が卓越するため、膨潤率が見かけ上増加しなくなっている。

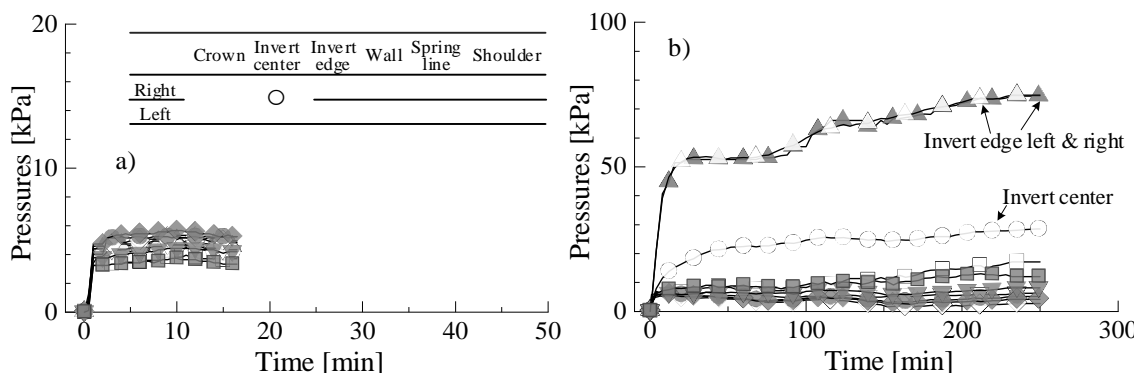


図-1 膨潤に伴うトンネル覆工荷重の経時 a:膨潤なし, b:インバート下部

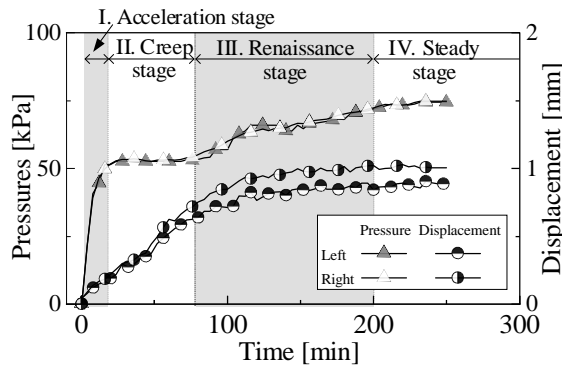


図-2 変状 stage の定義

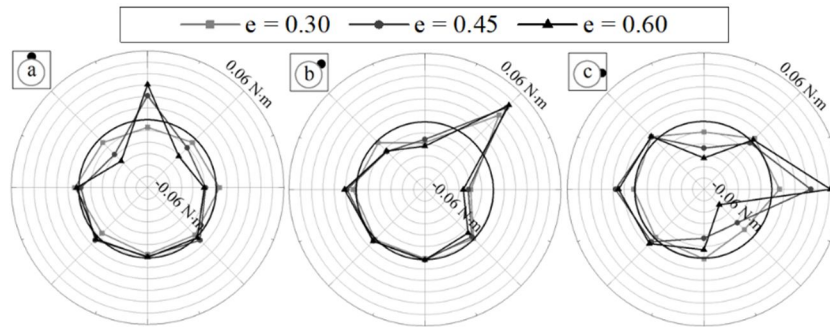
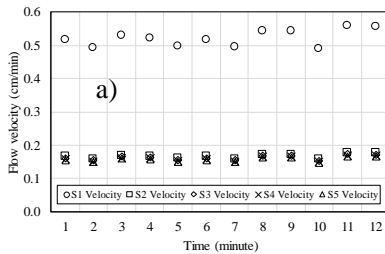


図-3 トンネル覆工に発生した曲げモーメント分布（最大右側せん断変位時）



|    | b)S1 | S2   | S3   | S4   | S5   |
|----|------|------|------|------|------|
| L1 | 0.93 | 1.00 | 0.99 | 1.01 | 0.98 |
| L2 | 0.92 | 0.97 | 1.00 | 0.97 | 0.99 |
| L3 | 0.91 | 0.98 | 1.01 | 1.02 | 1.02 |

図-4 トンネル～地盤境界における流速と内部侵食の発生状況 (a)流速, b)内部侵食率(Dc60%) (S1 は, トンネル～地山境界地盤, S2, 3, 4, 5 の順で境界から遠くなる)

Renaissance stage: 覆工に作用する荷重が再び増加する段階で,ここでは周辺地山の変状がある程度まで進むと変状が拘束され,膨潤圧が大きく発現する段階である.

Steady stage: 荷重,変位ともに安定した段階

上述のように,本研究では長時間経過後荷重が再び増加する Renaissance stage が確認でき,これは供用中におけるトンネルの変状のメカニズムを説明できる一因であると考えられる.

#### b. 劣化領域がトンネルの地震時挙動に及ぼす影響の明確化

図-3 に,周辺地山のせん断変位が最大時の曲げモーメント分布を示す.地盤材料はアルミ積層体で再現し,劣化領域はアルミ積層体の間隙率 ( $e=0.30, 0.45, 0.60$ ) を相対的に増やすことで異なる劣化度合いをモデル化した.図により,局所的な地盤強度の低下により,トンネル覆工に発生する曲げモーメント曲げモーメントは劣化地山もしくはその逆方向で最大値が発生する結果が見られた.さらに,劣化の度合いが進むにつれ,これらの傾向はより顕著になることが分かる.さらに同結果より,トンネル覆工に発生する曲げモーメントの発生状況によっては,地山の劣化箇所や度合いも推察できる可能性があると考えられる.

#### c. トンネル～地山境界における内部侵食の発生とそのメカニズムの解明

図-4a)に,トンネル～地山境界からの距離が異なる5区間の流速の推移を示す.ここでは,相対密度60%の,比較的緩い地盤条件における結果を示す.図より,土内部(S2~S5)においては流速がほぼ均等であることにに対し,境界S1では2倍以上の流速が確認できる.図-4b)に示す,内部侵食率は,透水前後の土試料の粒径加積曲線とX軸間の面積の割合であり,同値が1より小さい場合は細粒分が流出し,さらに値が小さいほど内部侵食が進んだことを示す.図より,境界から離れた箇所ではほぼ粒度の変化が発生していないことにに対し,トンネル～地山境界では大きい粒度の変化が発生してした.以上から,本実験ではトンネル～地山境界では水みちが形成されやすく,内部侵食が卓越する可能性があることが分かった.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>池田慧生、崔瑛、菊本統                  |
| 2. 発表標題<br>盤ぶくれを生じたトンネルの周辺地山の膨潤特性に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>第55回地盤工学研究発表会                |
| 4. 発表年<br>2020年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Min-koan Kim, Qian He and Ying Cui  |
| 2. 発表標題<br>An Experimental Study on the Effect of Soil-Structure Interface on the Occurrence of Internal Erosion |
| 3. 学会等名<br>The First International Conference on Embankment Dams (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Saddy Ahmed, Takuya Kobata, Ying Cui  |
| 2. 発表標題<br>Experimental study on the effect of localized weak zones on the seismic behavior of shallow tunnels |
| 3. 学会等名<br>ITA-AITES World Tunnel Congress 2020 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Saddy Ahmed   |
| 2. 発表標題<br>Experimental study on the effect of localized weak zones on the seismic behavior of shallow tunnels |
| 3. 学会等名<br>ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC) 2020 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Min-koan Kim,   |
| 2. 発表標題<br>An Experimental Study on the Effect of Soil-Structure Interface on the Occurrence of Internal Erosion |
| 3. 学会等名<br>First International Conference on Embankment Dams (ICED 2020) (国際学会)                                  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>池田 慧生                        |
| 2. 発表標題<br>盤ぶくれを生じたトンネルの周辺地山の膨潤特性に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>第55回地盤工学研究発表会                |
| 4. 発表年<br>2020年                         |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>加藤 開                    |
| 2. 発表標題<br>内部侵食に伴う砂質土の保水性の変化に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>第55回地盤工学研究発表会           |
| 4. 発表年<br>2020年                    |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|