

# ウレタンの地山改良効果の評価試験

水谷 真基<sup>1\*</sup>・嶋本 敬介<sup>1</sup>・中根 利貴<sup>1</sup>・野城 一栄<sup>1</sup>

<sup>1</sup>公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

\*E-mail: mizutani.masaki.05@rtri.or.jp

山岳トンネルの変形対策として、筆者らは、確実に地山に定着するとともに緩んだ地山の物性値を向上させることを目的とし、ウレタンを用いた地山改良型ロックボルトを開発した。そこで、ウレタンによる地山改良効果を確認するために、物性試験および室内実験を実施した。その結果、亀裂が多く強度が低下した地山においても、ウレタンを注入することにより強度が回復し、耐スレーキング性が向上すること、ロックボルトの定着材としてウレタンを用いることにより、モルタルと比べ内空縮小が緩やかになることがわかった。

**Key Words :** mountain tunnels, rock bolt, urethane, compression test, model experiment

## 1. はじめに

山岳トンネルでは、経年による地山の劣化や地圧の作用等により、トンネル完成後に塑性圧や偏圧といった外力が作用することがある。これにより、トンネルに変形が生じ、内空断面が縮小する場合がある。トンネル完成後に作用する塑性圧とは、経年に伴い地山の強度が低下し、それに伴い、地山の塑性化が進行してトンネル覆工に外力として作用するものである。また、地山強度比が小さいとともに、膨張性粘土鉱物を多量に含み、吸水劣化の影響を受けやすい岩石からなる地質で発生しやすい特徴がある。

塑性圧により発生する変状として、トンネルの形状と側圧比にもよるが、一般に水平方向の荷重(側圧)が卓越することが多く、側壁あるいはアーチ肩部のトンネル延長方向のひび割れ、内空の縮小が変状として現れることが多い。これらの変状が進行すると、天端内面には圧縮ひずみが蓄積することにより、圧縮が発生し、トンネル覆工の剥離・剥落事象に繋がりがかねない。そのため、早急に対策を実施することにより、変状の進行を抑制する必要がある。

文献1)によると、外力により変状が生じたトンネルには背面空洞が存在することが多いため、変状進行の抑制には、裏込注入工が最も効果的とされている。そのため、トンネルの塑性圧対策としては、裏込注入工が第一に選択されるが、裏込注入工実施後も内空の縮小や変状の進行が抑制されない場合は、ロックボルト工や内巻工を追加する。ただし、内巻工については、必要な内巻厚さが70~100mm以上であり、施工にあたり建築限界余裕

が確保できないトンネルについては、盤下げや中心線変更の可否を検討しなければならないなど、建築限界外の余裕が少ない単線鉄道トンネルには、適用しにくい場合もある。そのため、変状トンネルの補強工として、ロックボルトを適用する機会が多い。

しかし、ロックボルトについては適用される事例が多いものの、文献1)によると、その効果を発揮するためには、十分な定着力を得ることのできる地山でなければ適用できないとされている。

そこで、筆者らは新たなロックボルト補強工として、地山改良型ロックボルト工を開発し、実トンネルにおいて実用化に向けた試験施工および室内実験によりその性能を確認した<sup>(例えば2)</sup>。本工法では、経年劣化および強度低下したトンネル近傍の地山にウレタンを注入することにより改良を行うが、これまでの研究においてウレタンにより改良された地山の物性や耐スレーキング性能の向上効果が不明であった。そこで本研究では、①亀裂を有する泥岩に対してウレタンを注入し、一軸圧縮試験により強度向上効果を確認する試験、②泥岩と珪砂の混合物にウレタンを注入し、三軸圧縮試験により耐スレーキング性を評価する試験、③1/30サイズの単線鉄道トンネル模型でロックボルトの注入材としてウレタンを用いた効果を確認する模型実験を実施し、ウレタンの地山改良効果を確認したので結果について報告する。

## 2. 強度向上効果の評価<sup>3)</sup>

地山改良型ロックボルトでは、緩んだ地山部にウレタ

ンを注入し地山の改良を行うが、ウレタンによる強度向上効果についてはあまり明らかにされていない。そこで、ウレタンによる強度向上効果を評価するために、新設トンネル掘削時に採取された泥岩材料を用いて一軸圧縮試験を実施した。本章ではこれらの試験方法および試験結果について述べる。

### (1) 試験方法

試験に使用した泥岩材料は、新設トンネル掘削時に採取された新第三紀層の塊状泥岩を使用し、圧縮強度が2Mpa程度、スレーキング指数が「4」であり、水の影響により容易に泥状化するものである。

一軸圧縮試験は、JIS A1216「土の一軸圧縮試験」に準拠し、φ50mm×100mmの供試体を使用した。なお、図-1に示すように、成型した供試体の中央部にウレタンを注入することを目的とした穴を削孔後、24時間以上風乾燥させ、40℃±5℃で48時間以上の炉乾燥させた供試体を用いて試験を実施した。試験手順を以下に示す。

- ①ウレタンが浸透する亀裂を発生させることを目的として、供試体が破壊するまで一軸荷重を行い、その後除荷する。この過程を荷重1回目の圧縮応力より低減するまで実施する。
- ②供試体をφ50mm×100mm程度の鋼製モールドで固定し、削孔した箇所へウレタンを注入する。なお、注入するウレタンの量は削孔した穴の体積(φ10mm×80mm)と同量とし、注射器を用いて注入する。また、養生時間は24時間とする。
- ③養生後、再度一軸圧縮試験を行い、ピーク荷重を確認後に除荷する。これらの試験を3供試体にて実施する。

図-2にウレタン注入前後の供試体の状況を示す。一軸荷重により模擬した亀裂にウレタンが浸透していることが確認できる。

### (2) 試験結果

試験結果を図-3に示す。荷重により供試体を破壊したため、荷重3回目と1回目を比較すると大きく圧縮応力が低減していることがわかる。しかし、荷重により発生させた亀裂へウレタンを注入することにより、一軸圧縮強さが荷重3回目より向上することが確認された。また、変形形態は、圧縮応力がピークを超えても脆性的に破壊するのではなく、延性的に荷重が低下することがわかった。

全供試体の各荷重時における一軸圧縮強さを図-4に示す。供試体による個体差があるものの、全ての供試体において荷重1回目と3回目を比較すると一軸圧縮強さが低下しているが、ウレタン改良を行うことにより、荷重3回目より一軸圧縮強さが回復していることがわかる。このことから、亀裂を有する泥岩にウレタンを注入することにより、亀裂にウレタンが進展し、泥岩が一体となることで、強度を回復させることがわかった。

## 3. 耐スレーキング性能向上効果の評価<sup>4)</sup>

ウレタン改良による耐スレーキング性能向上効果を評価するために、2. で使用した泥岩および6号珪砂を用いて供試体を作成し、三軸圧縮試験(UU)により確認した。本章では試験方法、試験結果について以下に述べる。

### (1) 試験方法

泥岩材料およびウレタンにより改良した泥岩材料の三軸試験については、JGS0521「土の非圧密非排水(UU)三軸試験」およびJGS2531「岩石の非圧密非排水(UU)三軸試験」に準拠して行った。試験に使用した供試体は、表-1の配合条件に基づきφ50mm×100mmのモールド管を使用して作製した。使用した泥岩材料および改良体を図-5に示す。供試体作製の際は、モールド管内の粒度分布が不均質とならないように、3層に分けて敷き詰めた。また、改良時のウレタン注入量については、表-1に示す配合にてモールド管に敷き詰めた際の間隙率が18%であったことから、その空隙内をウレタンが等倍で発泡・充

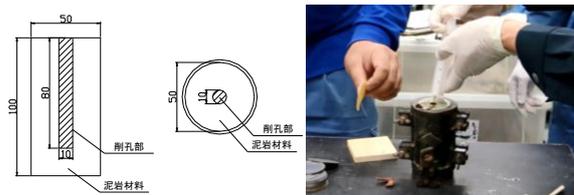
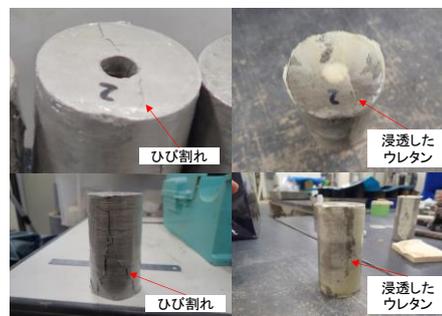


図-1 供試体作成状況



(a) 注入前 (b) 注入後

図-2 ウレタン注入前後の状況

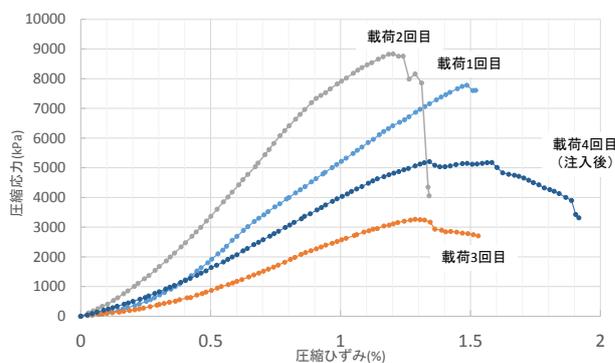


図-3 試験結果 (供試体 No.1)

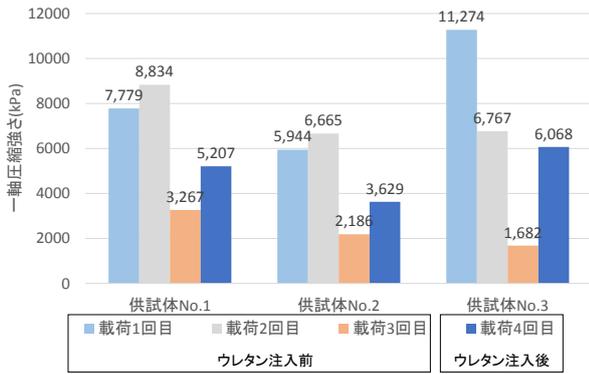


図-4 各供試体の一軸圧縮強さ

填できる量を注入した。なお、本章では表-1の配合にて作製した供試体を泥岩材料と表記する。試験ケースを表-2に示す。Case1を標準ケースとし、Case2はCase1の乾燥泥岩材料を使用し、24時間の吸水飽和後に試験を実施した。Case3～Case7はCase1の乾燥泥岩材料をウレタンにより改良したものを使用した。その中でも、Case4については、ウレタンにより改良した乾燥泥岩材料をCase2と同様に24時間の吸水飽和後に試験を実施した。また、Case5～Case7はJGS2124「岩石のスレーキング試験」を参考に24時間以上風乾燥させた後に、40°C±5°Cで48時間炉乾燥させ、その後に、24時間浸水させることを1サイクルとし、表-2に示すサイクル数の温冷繰返しを実施後に試験を実施した。

(2) 試験結果

試験後の状況 (Case2およびCase4) を図-6に、Case1～Case4における試験結果を図-7に示す。Case1とCase2を比較すると、Case2についてはc, φとも大幅に低下していることがわかる。これは、試験に使用した泥岩材料は水の影響によりスレーキングしやすいため、吸水を行ったことにより、細粒化が進んだことで強度定数が低下したものと考えられる。また、Case1では各側圧において、軸ひずみが約4%時に最大軸差応力が発生するのに対し、Case2は試験終了時まで応力が増加し続ける傾向を示し、明瞭なせん断面が現れることはなかった (図-6)。一方、Case3とCase4を比較すると、c, φとも大きな低下はみられなかった (図-7)。これは、乾燥泥岩材料の空隙がウ

表-1 泥岩材料の配合

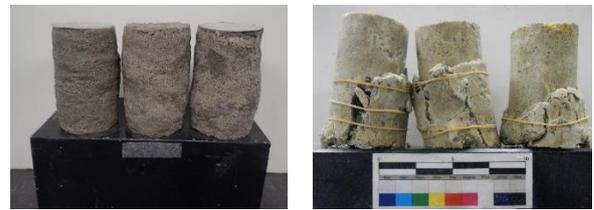
	粒径 (mm)	割合 (重量%)
6号硅砂	0.07~0.6	40.0
極小	1.7~5	15
小	5~9.5	7.5
中小	9.5~16	15
中大	16~19	15
大	19~26	7.5
計		100



図-5 使用した泥岩材料およびウレタン改良体

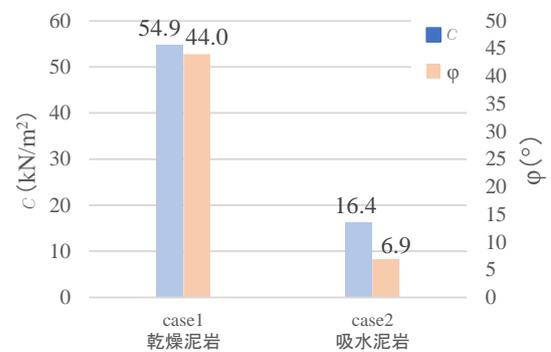
表-2 試験実施ケース

	ウレタン改良	吸水飽和	乾湿繰返し
Case1	なし	なし	なし
Case2	なし	あり	なし
Case3	あり	なし	なし
Case4	あり	あり	なし
Case5	あり	なし	1サイクル
Case6	あり	なし	5サイクル
Case7	あり	なし	10サイクル

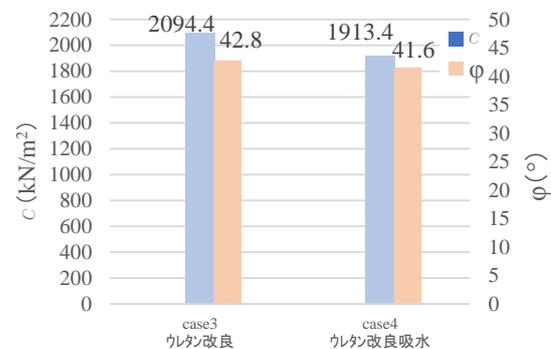


(a) Case2 (b) Case4

図-6 試験後の状況



(a) Case1およびCase2



(b) Case3およびCase4

図-7 三軸試験 (UU) 結果 (Case1～Case4)

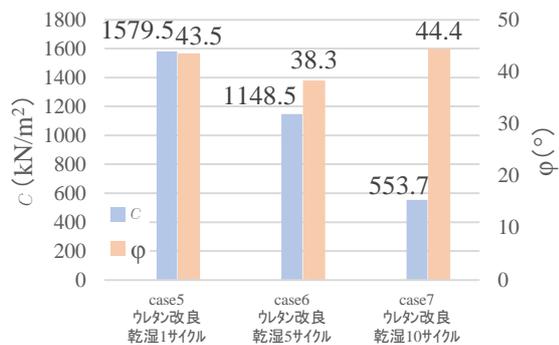


図-8 三軸試験 (UU) 結果 (Case5~Case7)

レタンにて充填されたことにより、吸水飽和の影響が小さくなったためと考えられる。

Case5~Case7の試験結果を図-8に示す。各ケースともCase3と比較し、乾湿を繰り返すことにより、cは低下傾向にあるものの、Case1からCase2の低下傾向と比較すると緩やかであることがわかる。これらの結果から、未改良の状態では水と接触すると自立できずに崩壊するような岩が、ウレタンにて改良を行うことで、乾湿繰返しによる強制劣化を行っても強度低下が緩やかとなる結果となった。また、耐スレーキング性能が向上することを確認できた。

#### 4. 模型実験によるウレタン改良効果の評価<sup>5)</sup>

実地山とトンネル模型およびロックボルトを模擬し、ウレタンをロックボルトの定着材として用いた場合の地山改良効果を模型実験により確認した。本章では実験方法、実験結果について以下に述べる。

##### (1) 実験方法

模型実験は、図-9に示す二軸載荷模型実験装置を使用した。本装置は、縦600mm×横600mm×高さ300mmの土槽に対して、200kNジャッキにて縦方向および横方向に載荷できる。図-10にトンネル模型の寸法を示す。トンネルの模型は単線非電化トンネル断面の1/30スケールとし作製した。覆工巻厚は40cmを想定して13mmとし、天端部から左右60°の範囲には、背面に75cmの空洞があることを想定し25mm厚さ分のスポンジシートを設置した。ロックボルトは6本/1断面とし、延長方向に50mmピッチで6断面設置した。ロックボルトの長さは、4.0mを想定して133mmに設定した。実験ケースは表-3に示す通りとし、ロックボルトの定着材の違いによる効果を評価した。実験手順を以下に示す。

①発泡スチロール製の型枠を使用し、剥離剤を適量塗布した型枠を用いて、型枠内にモルタルを投入後に鋼棒を用いて締め固めることにて供試体を作製する。なお、

Case2, Case3は、打設後にロックボルトを挿入するため、型枠の内部のロックボルト設置箇所にあらかじめスペーサーを固定して打設を行う。(図-11)

②脱型後、スペーサーを設置した部分にボアホールを模擬したφ9mmのポリプロピレン製のストローを設置する。ストローの側面部には定着材が地山に漏出しやすいように長穴を設け、ストロー先端部から定着材が漏出することを防止するために、先端部には粘土を用いて栓を行う。

③図-9に示す土槽内にトンネル模型をトンネル軸方向が

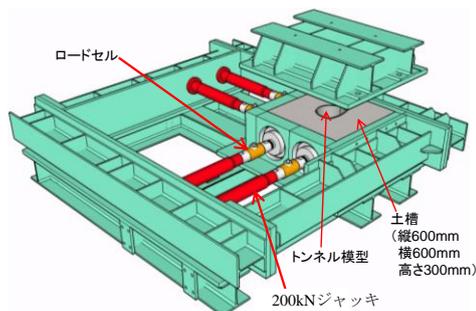


図-9 二軸載荷模型実験装置

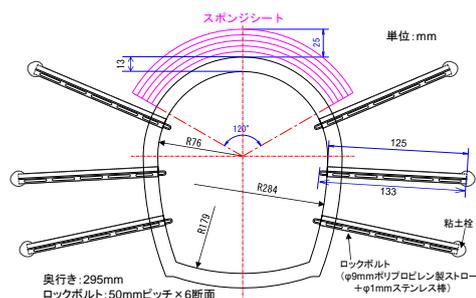


図-10 トンネル模型の寸法

表-3 模型実験ケース

ケース	ロックボルト	定着材
Case1	なし	—
Case2	あり	モルタル
Case3	あり	ウレタン

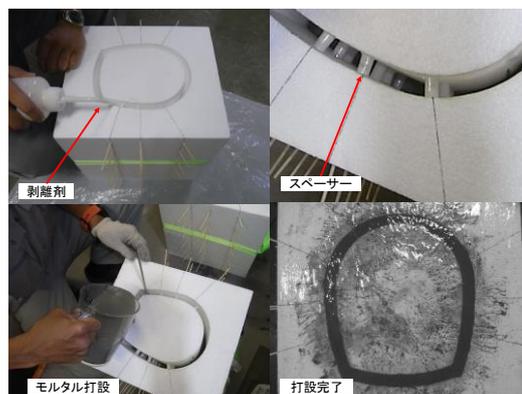


図-11 トンネル模型打設状況

鉛直方向となるように設置後、2. および3. にて使用した泥岩を砕いて表-1に示す配合条件に基づき材料を作成し、トンネル模型の周囲に敷き詰める。

④敷詰め完了後に、泥岩中に埋まったストローに定着材を充填させるための注射器およびホースを連結する。連結後に注射器内に所定の定着材を充填させ、ストローおよび地山内部に注入する。注入後は、ロックボルトを模擬したφ1mmのステンレス棒にエポキシ樹脂を塗布したものに、珪砂をまぶし、トンネル内空側にはプレートを設け、ストローの内部に挿入する。

⑤定着材充填後に、土槽の蓋およびトンネル内部に変位計を設置し、トンネル天端側と左側からジャッキにより载荷を行う。この際、天端側のジャッキは1mm/minの変位制御で载荷を行い、左側からの载荷ジャッキは、常に上方のジャッキ荷重の半分となるように制御する。荷重载荷を行い、トンネル内の水平内空縮小が1.7mm（実スケール50mm相当）に到達した時点で鉛直ジャッキを変位制御から荷重制御に切り替えて、一定の荷重を保持した。

⑥荷重制御に切り替えてから、24時間後に土槽の底部から注水して、模擬地山上部まで水位が上昇したことを確認後に、注水孔から自然排水し、排水終了から24時間後までの内空変位量を測定する。

本実験では、鉛直圧が側圧よりも大きい状態で、トンネル周辺の模擬地盤を給水により強度低下をさせることで、トンネル側壁近傍の地盤を塑性化させる。これにより、元々地盤が保持していた応力が解放され、トンネルに側圧として作用する塑性圧の現象を再現している。給水前後のトンネル周辺地盤の応力状態の推移と側圧の作用メカニズムを図-12にまとめる。なお、本章における内空縮小とは、水平方向の内空縮小を意味している。

## (2) 実験結果

各ケースの内空変位の推移を図-13に示す。载荷後に1.7mmの内空変位が発生した後に、24時間の荷重保持を行ったところ、わずかではあるが内空縮小が見られた。その後、給水過程に移ると、全てのケースにおいて内空縮小が確認された。ロックボルトの定着材による内空縮小の違いについては、定着材をウレタンにて地山を改良したものが、定着材にモルタルを使用したものより小さくなることを確認することができた。図-14に実験終了後に土槽から取り出したトンネル模型を示す。Case3（ウレタン）では、注入したウレタンによりトンネル周辺の地山が改良されており、給水過程後においても良好な改良体が形成されているのがわかる。つまり、ウレタンを地山に注入することにより、トンネル周辺の地山が改良され、水の影響を受けやすい泥岩においても、耐スレーキング性が向上し、強度低下を抑制することが

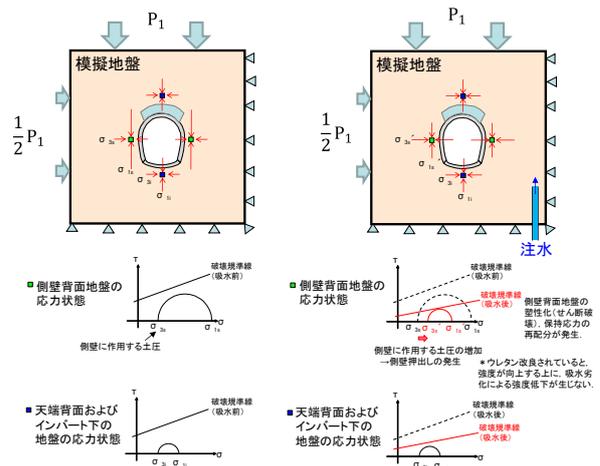


図-12 応力状態の推移と側圧の作用メカニズム

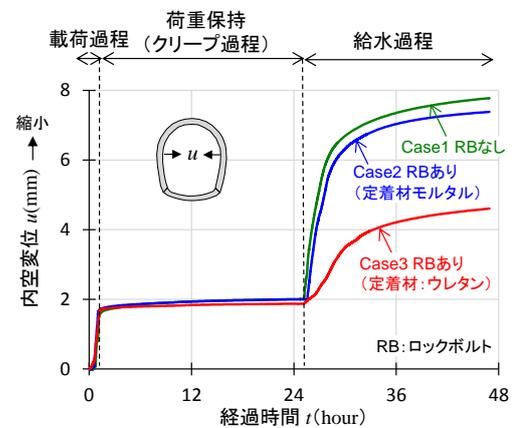


図-13 内空変位の推移



(a) Case2 (b) Case3

図-14 試験終了時の状況

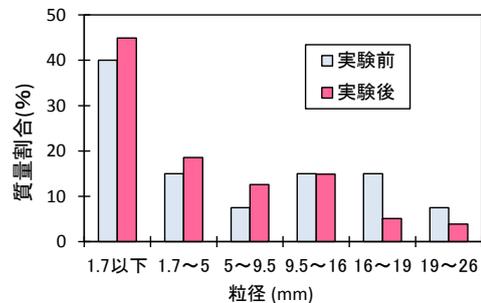


図-15 実験前後の粒度分布の比較

可能ということがわかった。一方、Case2（モルタル）については、ストローの周辺にモルタルが漏出することはなかった。これは、ストローの外にモルタル

が漏出した際に、周辺の珪砂によりモルタル内の水分が吸収され、流動性が失われたことが影響していると考えられる。そのため、Case2では内空縮小を抑制するための効果が小さくなった。ただし、本実験ではモルタルを注入した際に、地山とモルタルの間にボアホールを模擬したストローが存在するため、側面部には定着材が漏出しやすいように長孔を設けてあるものの、実際のロックボルトと比べ、モルタルが地山に直接定着しにくい状況である。このことから、実際のロックボルトについては今回の室内実験より内空縮小の抑制効果は期待できると考える。

図-15に実験前後のトンネルから離れた部分の地盤における粒径分布を示す。今回、試験で用いた泥岩は応力が解放された状態では、浸水によるスレーキングにて粉々になる岩であるが、三軸応力状態では浸水の影響により粉々になることがなく、やや割れるような状況であった。そのため、試験前後の粒径分布は若干小さくなる程度であった。ただし、解体後に泥岩は、指圧にて変形する程度に軟質となっていた。一方、ウレタン改良部については、軟質な部分はなく、ウレタン改良により、地山劣化が抑制されたと考えられる。

## 5. 結論

本研究では、ウレタンによる地山改良効果についてウレタン改良体を用いた一軸圧縮試験、三軸圧縮試験にて強度および耐スレーキング性の向上効果を評価、整理した。また、室内模型実験にてロックボルトの定着材としてウレタンを用いた場合の効果についても同様に評価した。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

### 1) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験により供試体に亀裂を発生させ、強度低下を行った供試体に、ウレタンを注入し、再度

一軸圧縮試験を実施したところ、一軸圧縮強さが回復することを確認した。つまり、亀裂を有する泥岩にウレタンを注入することで、ウレタンが亀裂に進展し、供試体が一体化となることで、強度向上を図ることが出来ると考える。

### 2) 三軸圧縮試験

水により、自立できず容易に崩壊してしまうな岩でも、ウレタンを注入し、改良を行うことで給水および乾湿の繰返しによる強度低下が緩やかとなる結果となった。また、耐スレーキング性能が向上することが確認できた。

### 3) 室内模型実験

ロックボルトの定着材としてウレタンを用いることで、モルタルを用いた場合と比べ、内空縮小が緩やかになることを確認した。また、ウレタンにてトンネル周辺を改良することで、給水により軟質になる泥岩の劣化を抑制することを確認した。

## 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：トンネル補修・補強マニュアル，pp. IV-15-IV-23, 2007.1
- 2) 森瀬喬士，嶋本敬介，野城一栄：地山改良型ロックボルト補強工の施工性と定着性能に関する基礎的研究，第14回岩の力学国内シンポジウム 講演集講演番号090, 2017.1
- 3) 岡野法之，中根利貴，嶋本敬介，水谷真基，野城一栄，石田良二：泥岩スレーキングによる強度低下とウレタン改良に関する基礎的研究，土木学会第73回年次学術講演会，III-560, 2018.8
- 4) 水谷真基，嶋本敬介，野城一栄：ウレタン改良体の強度および耐スレーキング性能の確認試験，第53回地盤工学研究発表会，pp.1587-1588, 2018.7
- 5) 中根利貴，嶋本敬介，水谷真基，野城一栄：岩石の吸水劣化による塑性圧に対するロックボルトの効果に関する模型実験，第53回地盤工学研究発表会，pp.1599-1600, 2018.7

## EVALUATION TEST OF GROUND IMPROVEMENT EFFECT OF URETHANE

Masaki MIZUTANI and Keisuke SHIMAMOTO,  
Kazuhide YASHIRO and Toshiki NAKANE

As a countermeasure against the deformation of the mountain tunnel under service, the authors developed the rock bolt using urethane with the function of ground improved and fixation to the ground. Physical properties evaluation and model experiment were conducted to validation the function of ground improved with urethane. As a result, even in the mountain with the many cracks and the reduced strength, the strength is recovered by injecting the urethane and the slaking performance is improved, by using urethane as the fixing of the rock bolt, it was confirmed the contraction of the inner cross section become gentle as compared with the mortar