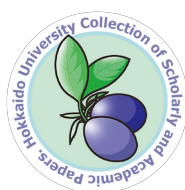




# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                  |                                                                                   |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | 在来工法と NATM工法で建設されたトンネルの時間依存性挙動の三次元数値解析                                            |
| Author(s)        | 山本, 寛朗; 池田, 奈央; 児玉, 淳一 他                                                          |
| Description      | 2020年度資源・素材関係学協会合同秋季大会（仙台）. 2020年9月8日～10日. オンライン開催, 宮城県.                          |
| Citation         | 資源・素材学会秋季大会講演集, 7(2), 3K0201-06-05                                                |
| Issue Date       | 2020-09-08                                                                        |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/79280">https://hdl.handle.net/2115/79280</a> |
| Type             | conference paper                                                                  |
| File Information | 03_Yamamoto2020.pdf                                                               |



一般講演

開発機械／岩盤工学／資源経済と社会システム／資源開発技術

2020年9月10日(木) 09:00 ～ 11:30 第2会場

**[3K0201-06-05] 在来工法と NATM工法で建設されたトンネルの時間依存性挙動の三次元数値解析****Three-dimensional numerical analysis of time-dependent behavior of tunnels constructed by conventional method and NATM**

○山本 寛朗<sup>1</sup>、池田 奈央<sup>2</sup>、児玉 淳一<sup>1</sup>、オノ木 敦士<sup>3</sup>、村山 秀幸<sup>2</sup>、新井 智之<sup>2</sup>、福田 大祐<sup>1</sup>、藤井 義明<sup>1</sup> (1. 北海道大学、2. 株式会社フジタ、3. 熊本大学)

○Hiroaki Yamamoto<sup>1</sup>, Nao Ikeda<sup>2</sup>, Junichi Kodama<sup>1</sup>, Atsushi Sainoki<sup>3</sup>, Hideyuki Murayama<sup>2</sup>, Tomoyuki Arai<sup>2</sup>, Daisuke Fukuda<sup>1</sup>, Yoshiaki Fujii<sup>1</sup> (1. Hokaido University, 2. Fujita Corporation, 3. Kumamoto University)

キーワード：トンネル、時間依存性、三次元数値解析、在来工法、NATM

Tunnel, Time-dependent, Three-dimensional numerical analysis, Conventional method, NATM

現在、日本の山岳トンネルの建設は主にNATMが用いられているが、在来工法が用いられたトンネルも数多く存在している。NATMは掘削部分にコンクリートを吹き付けて迅速に硬化させ、岩盤とコンクリートとを固定するロックボルトを岩盤奥深くまで打ち込み、地山自体の保持力（アーチ効果）を利用してトンネルを保持する工法である。よって、土圧に対してトンネル覆工のみで地下空間を支える在来工法よりも、支保の変形や沈下量が小さいとされている。しかし、両者の力学的な状態の違いはあまり解明されておらず、建設中や供用後の長期的な挙動の違いは不明である。そこで、本研究では、在来工法とNATMで建設された同一の形状・寸法を有するトンネルの3次元モデルを製作し、コンプライアンス可変型構成方程式を用いて非線形粘弾性解析を行い、トンネル周辺の岩盤中の劣化ゾーンの大きさ・形状、内空変位の経時変化、支保工の軸力の分布とその経時変化を比較した。その結果、時間依存性の強い岩盤では、建設中は矢板工法でより損傷が進行し、内空変位の値も大きくなった。しかし、供用後にNATMで損傷が進行して内空変位の値が大きくなり、両者で10年後の損傷に違いはあまり見られなかった。

## 1. はじめに

現在、日本の山岳トンネルの建設において NATM の採用割合は 100% 近い値となっており、特殊な工事を除いてほとんどの山岳トンネルに採用されている<sup>1)</sup>。しかし、北海道内には矢板工法（在来工法）で施工されたトンネルが数多く存在し、これらのトンネルの多くは施工から数十年が経過している。北海道の旧 O トンネル（以下、旧トンネル）は、道内初の鋼製支保工を用いる矢板工法で施工されたトンネルであり、施工途中に支保工の変形・覆工の崩落等の変状が発生した。さらに、トンネルの供用が開始してから覆工にクラックなどが生じ、トンネルの中央区間で急激な断面変形が確認された<sup>2)</sup>。この旧トンネルでは様々な対策工が施工されたが、変状を抑制することができず、供用が中止され、その横に新たなトンネル（以下、新トンネル）が施工された。新トンネルでは NATM が用いられているものの、上述した旧トンネルの激しい変状の履歴を踏まえると、その長期安定性の評価は喫緊の課題である。

NATM は掘削部分にコンクリートを吹き付けて迅速に硬化させ、岩盤とコンクリートとを固定するロックボルトを岩盤奥深くまで打ち込み、地山自体の保持力（アーチ効果）を利用してトンネルを保持する工法である。よって、土圧に対してトンネル覆工のみで地下空間を支える在来工法よりも、支保の変形や沈下量が小さいが、両者の力学的な状態の違いはあまり解明されていない。新トンネルの長期的な安定性の評価には、三次元数値解析により時間に依存する変状の分析を行い、在来工法と NATM の、建設中や供用後の長期的な挙動の違いを解明することが重要である。また、嶋本ら<sup>3)</sup>は、トンネルの掘削から完成後の変状発生までを一貫してモデル化することにより、施工時および完成後のそれぞれについて、地山の初期応力状態がトンネルの変形や地山の塑性領域等に与える影響を整理している。このように、数値解析に施工過程をモデル化し、施工時および完成後のトンネルの変形を分析することが重要である。

上記の背景を元に、本研究では、在来工法と NATM で建設された同一の形状・寸法を有するトンネルの 3 次元モデルを製作し、段階的なトンネル掘削に伴う周辺応力場の変化が岩盤の時間依存性変状に与える影響を評価することとした。具体的には、岩盤の時間に依存する性質と地山強度比をパラメータとした非線形粘弾性解析を行い、トンネル周辺の岩盤中の劣化ゾーンの大きさ・形状、内空変位の経時変化、支保工の軸力の分布とその経時変化を在来工法と NATM で比較した。

## 2. 解析手法

### 2.1 岩盤の構成方程式

一般的に、岩盤は、弾性、塑性、粘性の挙動を示し<sup>4)</sup>、また、岩やコンクリートなどの材料から成る構造物の応力解析においては、それらの材料の応力-ひずみ関係がほとんど非線形性を示すため、非線形解析を行わなければ実際の応力、変形状態が求められない<sup>5)</sup>。これらの性質を表現するために種々の構成方程式が提案されている。例えば、時間依存性を考慮する場合には、粘弾性や粘弾塑性の構成方程式が用いられる。そこで、本研究の粘弾性解析の構成方程式には次式に示すコンプライアンス可変型構成方程式<sup>6) 7)</sup>を用いることとした。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a(\lambda^*)^m (\dot{\sigma}^*)^n \quad (1)$$

$$a = \frac{1}{t_0} \left( \frac{m}{n+1} \right)^{\frac{m}{n-m+1}} \quad (2)$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\Delta \sigma_c} \quad (3)$$

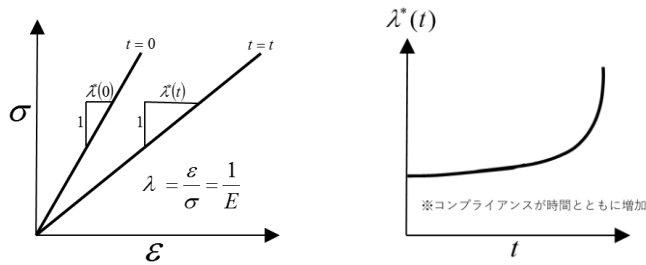
ここで、 $\lambda^*$  はひずみ  $\varepsilon$  と応力  $\sigma$  の比であるコンプライアンス  $\lambda (= \varepsilon / \sigma)$  をその初期値  $\lambda_0$ （初期ヤング率  $E_0$  の逆数）で正規化した値（ $= E_0 / E$ ）であり（図 1(a)）、 $a$  は強度を表すパラメータ、 $\sigma^*$  は破壊限接近度、 $n$  は時間依存性の程度を表すパラメータ、 $m$  は延性の程度を表すパラメータ、 $t$  は時間である。また、 $t_0$  は代表時間であり、定ひずみ速度試験を行ったとき、ピーク強度に達するまでの時間（載荷速度  $d\varepsilon/dt$  に反比例する）である。図 1(b) は  $\lambda^*$  の値が (1) 式に従って時間とともに増加していくことを示しており、これによりクリープ挙動に代表される岩盤の経時的劣化が表現可能となる。なお、(1) 式に従って反復計算を続けると、 $\lambda^*$  は無限大に発散し、計算が収束しなくなる。このため、本研究では Sainoki et al.<sup>8)</sup> に従い、計算の安定化のために  $\lambda^*$  の上限値を 10.0 に設定した。

破壊限接近度  $\sigma^*$  は現在の岩盤の応力状態が破壊条件にどれだけ近いかを示す値であり、ここではせん断破壊のみを考慮して  $\sigma^*$  を求めることにし、破壊条件として図 2 に示すようにクーロンの破壊規準を用いた。

計算の時間増分は、岩盤の時間依存変形挙動は初期に大きい、時間が経過することにより小さくなることが予測されることから (4) 式のように設定した。ここで  $N$  は解析の step 数である。

$$\Delta t = 1.05^N$$

(4)



(a)コンプライアンスの定義 (b)  $\lambda^*$ の時間経過による変化の様子

図1 コンプライアンス可変型構成方程式の概念

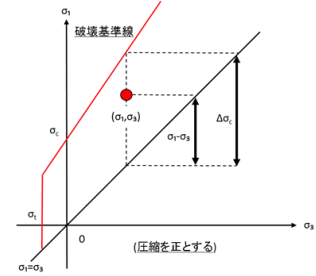


図2 破壊基準線と破壊限接近度

## 2.2 解析モデルと物性値

本解析で使用する3次元モデルの概略を図3に示す。トンネルの幅  $D=10\text{m}$  に対して、トンネル走向方向に  $50\text{m}$  ( $5D$ )、鉛直方向と水平方向に  $150\text{m}$  ( $15D$ ) とし、モデルの境界が十分遠方にあるものとした。モデル上部の土被りは  $75\text{m}$  とし、 $x$  軸に関する対称性を考慮し、トンネルと周辺岩盤の右半分のみを解析の対象としている。また、解析に使用した支保パターンを図4に示す。在来工法では鋼製支保工 ( $1\text{m}$  間隔) を上半に、覆工コンクリートを上半・下半・インバートに設置した。一方、NATM では鋼製支保工 ( $1\text{m}$  間隔) を上半、下半、吹付けコンクリートを上半、下半、インバート、ロックボルト ( $1\text{m}$  間隔) は長さ  $4\text{m}$  のものを上半から下半にかけて図4(b)のように計12本設置した。鋼柵・ロックボルトにはビーム要素を、覆工コンクリートと吹付けコンクリートにはシェル要素を用いた。また本解析で使用した岩盤と支保工の物性値は表1～3に示すとおりである。地山強度比が1.2以下である軟弱な岩盤を想定し、支保部材は旧トンネル、新トンネルに用いられている値とした。時間依存性のパラメータ  $n=20$  は時間依存性が大きい岩盤に対する値であり、 $n=40$  は一般的な岩盤の値である<sup>9)</sup>。鋼柵設置部を避けるために、解析結果の分析を行う断面は  $y=25.5\text{m}$  とした。なお解析コードは汎用有限差分コードであるFLAC3Dを用いた。

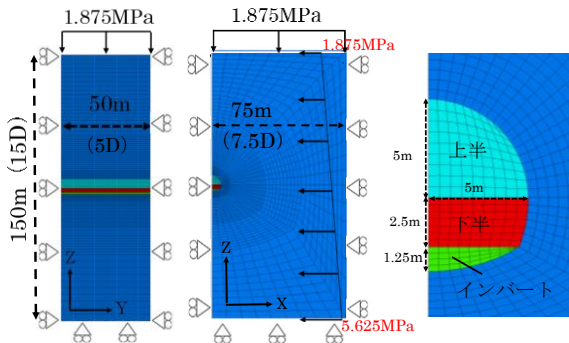
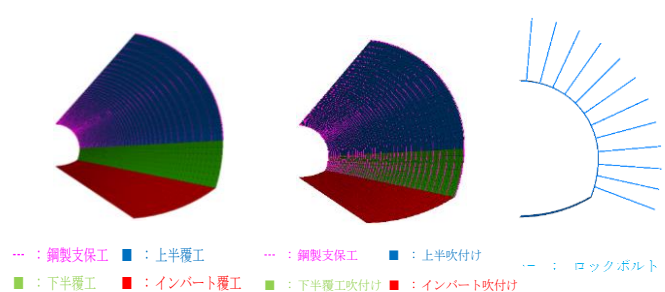


図3 解析モデルの概略図



(a)在来工法の支保パターン (b) NATMの支保パターン

図4 解析モデルの支保パターン

表1 岩盤の物性値

| 岩盤                          |      |
|-----------------------------|------|
| ヤング率 (GPa)                  | 1.0  |
| ポアソン比                       | 0.25 |
| 単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> ) | 25   |
| 内部摩擦角 (°)                   | 30   |
| ダイラタンシー角 (°)                | 3.75 |

表2 支保の物性値

| 支保部材                         | 在来工法       |          | NATM      |           |           |
|------------------------------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                              | 鋼製支保工      | 覆工コンクリート | 鋼製支保工     | 吹付けコンクリート | ロックボルト    |
| ヤング率 (GPa)                   | 200        | 18       | 200       | 22        | 200       |
| ポアソン比                        | 0.3        | 0.2      | 0.3       | 0.2       | 0.3       |
| 断面積 (m <sup>2</sup> )        | 1.185.E-02 | ---      | 6.35.E-03 | ---       | 4.66.E-04 |
| 断面二次モーメント強 (m <sup>4</sup> ) | 2.020.E-04 | ---      | 4.72.E-05 | ---       | 1.58.E-08 |
| 断面二次モーメント強 (m <sup>4</sup> ) | 6.750.E-05 | ---      | 1.60.E-05 | ---       | 1.58.E-08 |
| 厚さ (m)                       | ---        | 0.6      | ---       | 0.35      | ---       |

表3 岩盤の時間依存パラメータと一軸圧縮強度

|                   | CaseA-①                                         | CaseA-② | CaseB-①                                         | CaseB-② |
|-------------------|-------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------|---------|
| UCS (MPa)         | 1.5<br>(地山強度比=0.4, 粘着力=0.433MN/m <sup>2</sup> ) |         | 4.5<br>(地山強度比=1.2, 粘着力=1.299MN/m <sup>2</sup> ) |         |
| $n$ ( $m/n=0.5$ ) | 20.0                                            | 40.0    | 20.0                                            | 40.0    |

## 2.3 解析手順

- (1) 初期応力解析：鉛直方向は自重を考慮し、水平方向応力は側圧係数を 1.0 とした。境界条件としては図 5 に示すように、初期地圧相当の分布荷重を与えて各要素の初期応力を設定した。
- (2) 掘削解析：在来工法と NATM のそれぞれの段階的な施工工程は以下に記すとおりである。施工日数は在来工法が約 67 日、NATM が 18 日である。また、施工工程の概要は図 5 に示すとおりである。

在来工法（200step+10 年供用）

- ① 8 時間毎に上半掘削を 1m 実施し、掘削の度に鋼製支保工を設置する(50step)。
- ② 上半掘削終了後に上半覆工の施工を開始、8 時間毎に 1m の前進施工する(50step)。
- ③ 上半覆工設置終了後に下半とインバートを同時に掘削し、8 時間毎に 1m の前進施工をする(50step)。
- ④ 下半とインバートの掘削終了後に下半とインバートの覆工を同時に施工し、8 時間毎に 1m の前進施工をする(50step)。
- ⑤ 下半とインバートの覆工の設置終了から 10 年経過時に解析を終了する。

NATM（54step+10 年供用）

- ① 8 時間毎に上半掘削を 1m 実施し、掘削の度に上半支保(鋼製支保工,ロックボルト,吹付)を設置する(50step)。
- ② 上半の掘削が 3m 進んだら下半の掘削を開始し、掘削の度に下半支保(鋼製支保工,ロックボルト,吹付)を設置する(50step)。
- ③ 下半の掘削が 1m 進んだらインバートの掘削を開始し、掘削の度にインバート支保(吹付)を設置する(50step)。
- ④ インバートの掘削と支保の設置終了から 10 年経過時に解析を終了する。

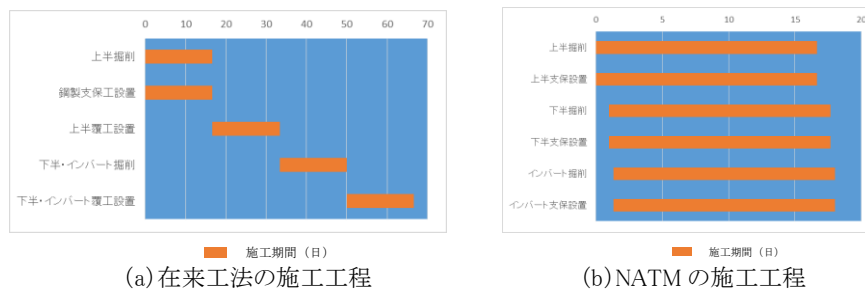


図 5 施工工程の概要図

## 3. 解析結果

### 3.1 コンプライアンス分布

図 6 は各ケースの施工完了時点、図 7 は施工完了後 10 年経過時のコンプライアンスの分布（ $y=25\text{m}$  の断面）を在来工法と NATM で比較したものである。CaseA-①の在来工法では、NATM に比べ岩盤の劣化が下方と側壁方向に大きく進行し、その領域も広がっている。また、施工完了時点と 10 年経過時を比較すると、両者とも時間依存性の影響を受け、劣化が進行している。CaseA-②でも NATM に比べ在来工法で側壁部の劣化が大きく進行しているが、施工完了時点と 10 年経過時を比較すると CaseA-①より、時間依存性の影響は小さい。CaseB-①,②でも同様に、在来工法でより劣化が進むが、時間依存性の影響は CaseA-①,②と比べると小さい。また両者ともトンネル天端部では岩盤の劣化がほとんど進行していない。CaseB-②の NATM ではほとんど劣化は進行しておらず、時間依存性の影響についても両者の間でほとんど違いは見られない。

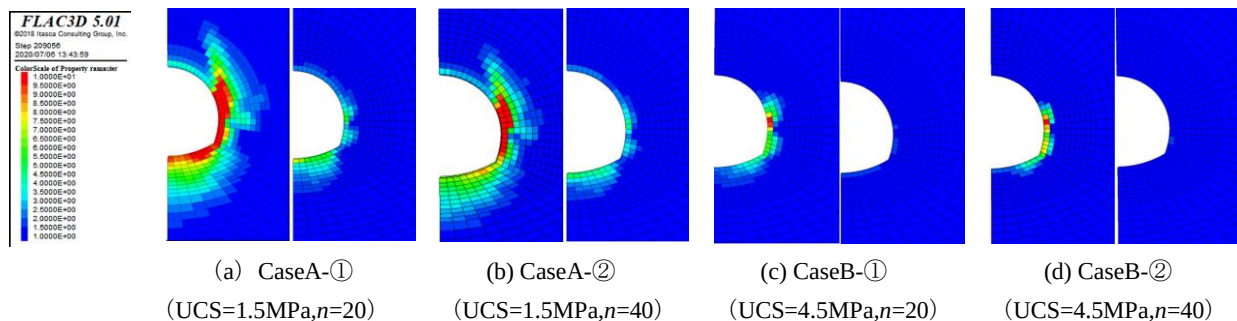


図 6 施工完了時点のコンプライアンス分布（左：在来工法、右：NATM）

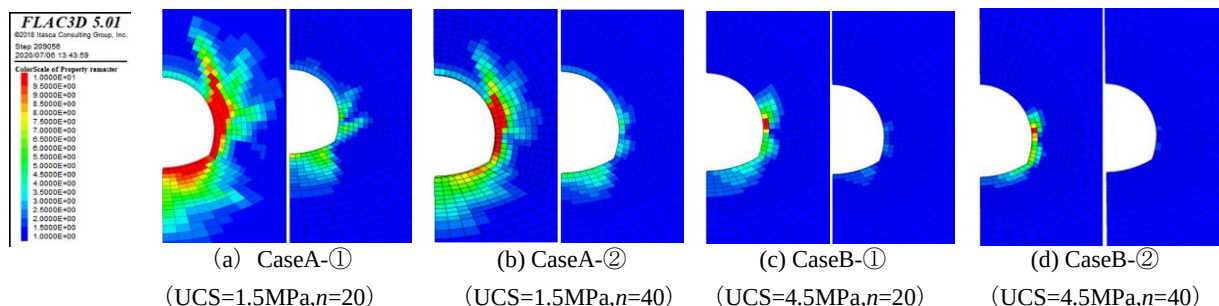


図7 施工完了後10年経過時のコンプライアンス分布（左：在来工法，右：NATM）

### 3・2 内空変位

各 Case の施工完了時の変位を図8と図9に示す。図8と図9はそれぞれ、掘削が25mに達するまでの先行変位を含まない場合と含む場合である。天端沈下と水平内空縮小（SL+1.5m位置）は、上半切羽がy=25m時点、水平内空縮小（SL-1.0m位置）は下半切羽がy=25m時点、盤ぶくれはインバート切羽がy=25m時点をゼロとして、それ以前に発生した変位は計測を開始する前に発生した先行変位として整理している。図8より、天端沈下と水平内空縮小（SL+1.5m位置）はいずれのケースにおいても在来工法の値が大きくなっていることが分かる。在来工法の CaseA-①、②で比較すると、時間依存性の大きいA-①でいずれも変位が大きくなっている。しかし CaseB では時間依存性の大きいB-①の方が、変位が小さくなっている。これは図9より、B-①の方が、先行変位が大きく、切羽が到達する前にすでに変位しているためだと考えられる。水平内空縮小（SL-1.0m位置）と盤ぶくれを見ると、在来工法でほとんど変位が発生していない。これは、在来工法では計測地点の下半掘削までに先行変位として変位がほとんど発生しているためだと考えられる。先行変位を含む結果で比較すると、こちらでも在来工法で変位の値が大きい。また、NATM では一軸圧縮強度や時間依存パラメータが与える変位量への影響は小さい。

施工完了後の経過年数と発生変位量の関係を図10に示す。いずれのケースにおいても在来工法の方が各計測点の供用後の変位量が多い傾向が見られる。また、 $n=40$ と比べて $n=20$ でより大きな変位が発生しており、一軸圧縮強度が小さいほどその差が顕著にみられる。CaseB-②のNATMでは、完成後に変位がほとんど発生しない。

次に、先行変位を含む施工中の在来工法とNATMの変位量比（在来工法を1）を表4に、供用後10年間の在来工法とNATMの変位量比（在来工法を1）を表5に示す。表4より、NATMではいずれのケースにおいても、各計測点で在来工法の45～80%と変位を小さく抑えることができている。さらに、地山強度比が小さく時間依存性の影響が大きい岩盤ほど、在来工法に対するNATMの変位を抑えることができる。また、表5より、NATMではいずれのケースにおいても、在来工法に対する天端沈下の変位量は小さい。しかし、地山強度比が小さく岩盤が強い時間依存性を示す場合は、水平内空縮小で在来工法に対するNATMの内空変位の比が大きい。

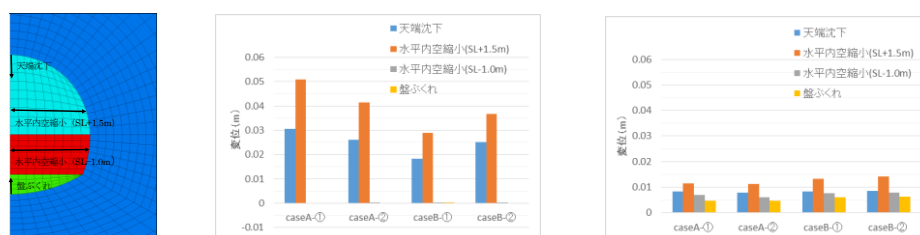


図8 各 Case の施工完了時の先行変位を含まない最終変位（左：在来工法，右：NATM）

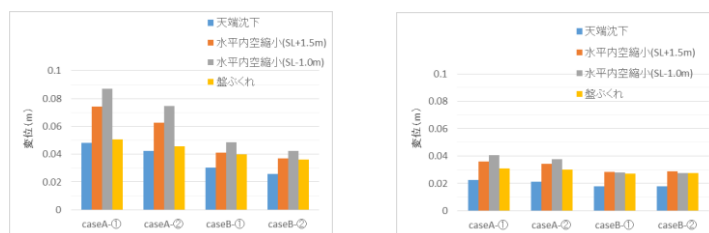


図9 各 Case の施工完了時の先行変位を含む最終変位（左：在来工法，右：NATM）

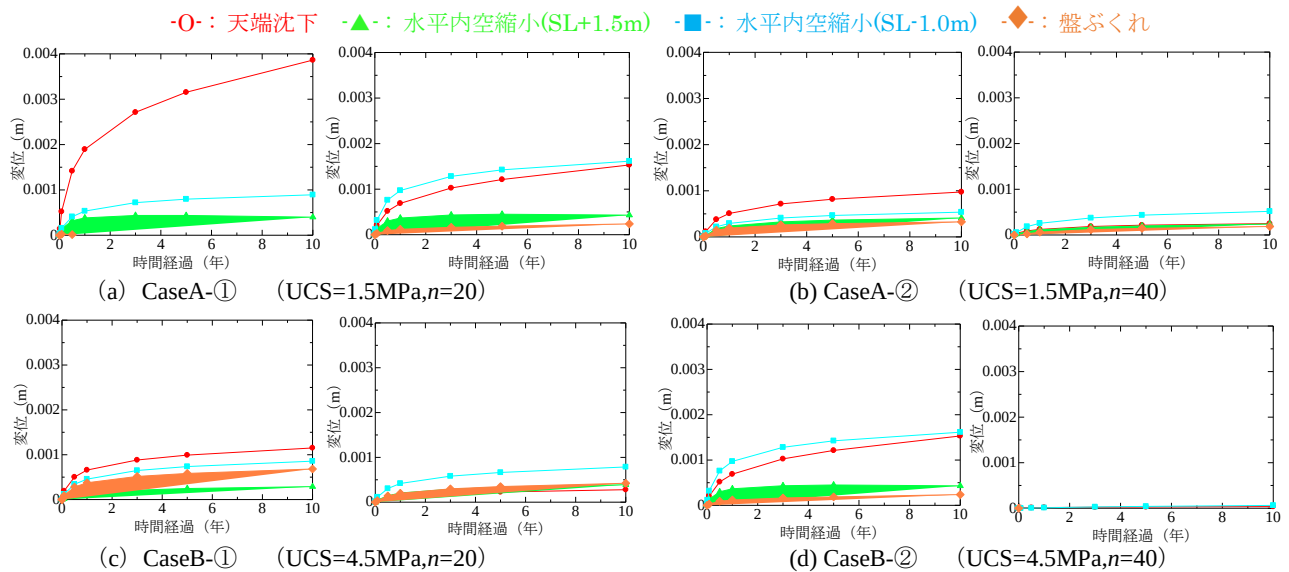


図 10 施工完了後の変位 (左：在来工法, 右：NATM)

表 4 施工中の在来工法と NATM の変位量比

|                  | 在来工法 | NATM                          |                               |                               |                               |
|------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                  |      | caseA-①<br>(UCS=1.5MPa, n=20) | caseA-②<br>(UCS=1.5MPa, n=40) | caseB-①<br>(UCS=4.5MPa, n=20) | caseB-②<br>(UCS=4.5MPa, n=40) |
| 天端沈下             | 1    | 0.470                         | 0.505                         | 0.591                         | 0.689                         |
| 水平内空縮小 (SL+1.5m) |      | 0.484                         | 0.548                         | 0.693                         | 0.784                         |
| 水平内空縮小 (SL-1.5m) |      | 0.488                         | 0.502                         | 0.574                         | 0.651                         |
| 盤膨れ              |      | 0.606                         | 0.658                         | 0.678                         | 0.761                         |

表 5 供用後 10 年間の在来工法と NATM の変位量比

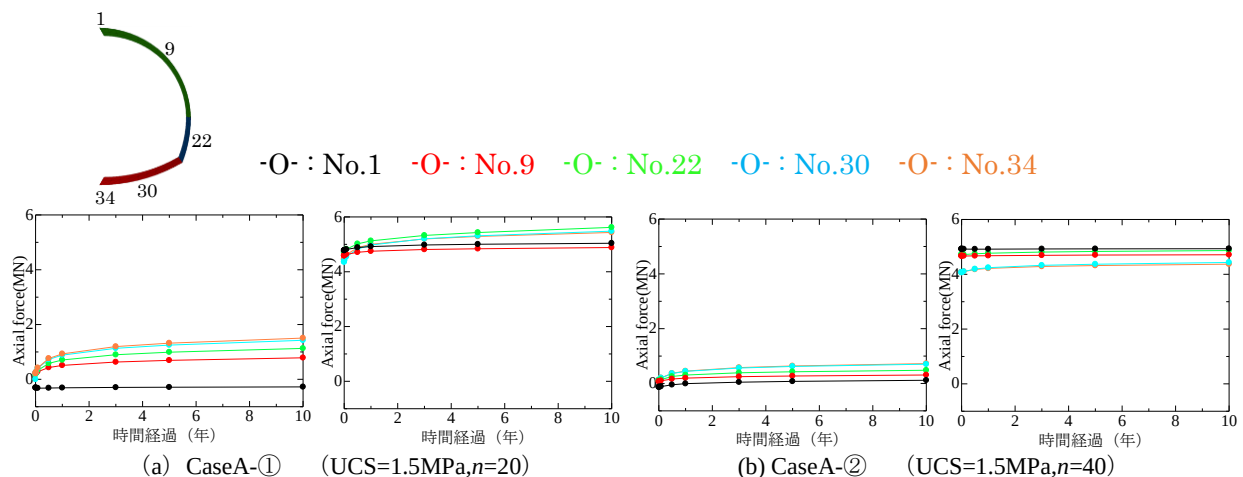
|                  | 在来工法 | NATM                          |                               |                               |                               |
|------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                  |      | caseA-①<br>(UCS=1.5MPa, n=20) | caseA-②<br>(UCS=1.5MPa, n=40) | caseB-①<br>(UCS=4.5MPa, n=20) | caseB-②<br>(UCS=4.5MPa, n=40) |
| 天端沈下             | 1    | 0.398                         | 0.274                         | 0.251                         | 0.130                         |
| 水平内空縮小 (SL+1.5m) |      | 1.105                         | 0.591                         | 1.365                         | -0.472 *2                     |
| 水平内空縮小 (SL-1.5m) |      | 1.824                         | 0.977                         | 0.924                         | 0.182                         |
| 盤膨れ              |      | -0.642 *1                     | 0.564                         | 0.620                         | -0.114 *2                     |

\*1 在来工法の値が負 \*2 NATM の値が負

### 3・3 覆工・吹付けコンクリートの軸力

支保工に生じる断面力を調べるため、上半からインバートにかけて 1~34 の番号をふり、覆工・吹付けコンクリートに生じる軸力を分析した。図 11 は No.1,9,22,30,34 の施工完了後の経過年数と軸力の変化の関係を示したものである。時間依存性の大きい CaseA-①, CaseB-①では在来工法, NATM とともに時間経過による軸力の増加が見られ、増加の程度は下半, インバート部にあたる No.22,30,34 で大きい。在来工法と NATM を比較すると、在来工法の方が軸力の変化率は大きい。CaseA-②, CaseB-②では在来工法, NATM どちらも大きな軸力の変化は見られず、時間依存性の影響はあまりないことが分かる。また、軸力の値は在来工法より NATM で大きな値となっている。これは掘削後すぐに吹付けコンクリートを設置 (早期閉合) しているためだと考えられる。

表 6 は供用後 10 年間の在来工法と NATM の軸力変化量比 (在来工法を 1) である。同じ地山強度比の場合、n=40 で、より在来工法に対する比が小さい傾向が見られる。また、同じ時間依存性の岩盤では、地山強度比が大きい場合で、より在来工法に対する比が小さい傾向が見られる。



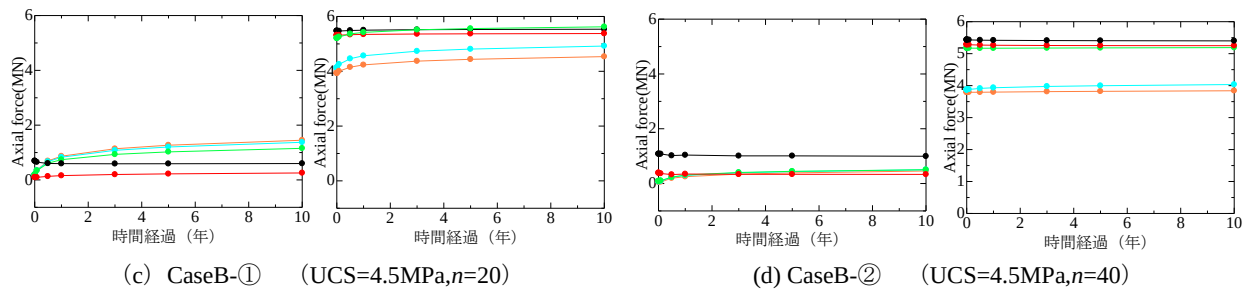


図 11 施工完了後の軸力（左：在来工法，右：NATM）

表 6 供用後 10 年間の在来工法と NATM の軸力変化量比

|       | 在来工法 | NATM                          |                               |                               |                               |
|-------|------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|       |      | caseA-①<br>(UCS=1.5MPa, n=20) | caseA-②<br>(UCS=1.5MPa, n=40) | caseB-①<br>(UCS=4.5MPa, n=20) | caseB-②<br>(UCS=4.5MPa, n=40) |
| No.1  | 1    | 1.070                         | 0.445                         | -0.666 *1                     | 0.365 *1*2                    |
| No.9  |      | 0.512                         | 0.195                         | 0.408                         | 0.628 *1*2                    |
| No.22 |      | 0.994                         | 0.375                         | 0.432                         | 0.028                         |
| No.30 |      | 0.929                         | 0.634                         | 0.670                         | 0.383                         |
| No.34 |      | 0.765                         | 0.501                         | 0.478                         | 0.117                         |

\*1 在来工法の値が負 \*2 NATM の値が負

#### 4. まとめ

本研究では、地山強度比と岩盤の時間依存性をパラメータとし、在来工法と NATM における掘削と支保工をモデル化した 3 次元粘弾性解析を実施した。そして、両工法におけるトンネル周辺の岩盤中の劣化ゾーンの大きさや形状、内空変位と支保工の軸力の経時変化について比較した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 両工法ともに劣化領域は側壁と下盤部分であるが、在来工法の方が劣化領域の広がり大きい
- 2) NATM では在来工法と比べて内空変位が小さい。
- 3) 施工時においては、地山強度比が小さく岩盤の時間依存性が強いほど、在来工法に対する NATM の内空変位の比は小さい。
- 4) 施工完了後においては、地山強度比が小さく岩盤が強い時間依存性を示す場合、水平内空縮小で在来工法に対する NATM の内空変位の比が大きくなり、支保効果の優位性は小さい。

#### 引用文献

- 1) 社団法人日本トンネル協会（2008），トンネル工事の推移と災害発生状況
- 2) MURAYAMA H, NIWA H, ITO Y, : Project study of tunnels with time-dependent behavior - Records of planning and construction, ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly, May 2015
- 3) 嶋本敬介・野城一栄・小島芳之・井浦 智実・上野 光（2015）地山の初期応力状態が施工時および 完成後の山岳トンネルの変形に与える影響，トンネル工学報告集，第 25 巻，1-12
- 4) 山口梅太郎・西松裕一（1967），岩石力学入門第 3 版，pp23
- 5) 大久保誠介・金豊年（1993），非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーション，資源と素材，Vol.109，pp.209-214
- 6) 大久保誠介・福井勝則（2001），岩石のコンプライアンス可変型構成方程式とそのパラメータの取得法，資源と素材，Vol.117，pp.13-20
- 7) 福井勝則・大久保誠介・西松裕一（1989），一軸圧縮荷重下での岩石のクリープ特性，資源素材学会誌，Vol.105, No.7, pp521-526
- 8) SAINOKI A, TABATA S, HANI S, MITRI, FUKUDA D, KODAMA J. Time-dependent tunnel deformations in homogeneous and heterogeneous weak rock formations, Computers and Geotechnics, 2017;92:186-200
- 9) 大久保誠介・福井勝則（1997），コンプライアンス可変型構成の定数について，資源と素材，Vol.113 p.561-564