

# 垂直縫地の力学的挙動に関する考察

雨宮 智久<sup>1</sup>・永田 哲也<sup>2</sup>・砂金 伸治<sup>3</sup>・河田 皓介<sup>4</sup>・城間 博通<sup>5</sup>・西村 和夫<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: amemiya-tomohisa@ed.tmu.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 西日本高速道路株式会社 (〒783-0056 高知県南国市領石 924-34)

E-mail: t.nagata.ac@w-nexco.co.jp

<sup>3</sup> 正会員 東京都立大学 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: nisago@tmu.ac.jp

<sup>4</sup> 正会員 東京都立大学 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: k\_kawata@tmu.ac.jp

<sup>5</sup> 正会員 西日本高速道路総合サービス沖縄株式会社 (〒901-2127 沖縄県浦添市屋富祖 2-6-15)

E-mail: h.shiroma@w-ss-okinawa.co.jp

<sup>6</sup> 正会員 東京都立大学 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: knishi@tmu.ac.jp

垂直縫地工法は、トンネルの地表面沈下対策や斜面の安定化対策など土被りの小さいトンネル上部の地山安定対策として採用される。しかし垂直縫地工法の設計手法としては類似の施工事例を参考にした経験的手法が主となっており、その適用範囲の拡大も含めて定量的な設計手法が確立されていない面も見受けられる。本報告では、垂直縫地工法の定量的で合理的な設計手法の確立のため、小型模型実験装置を用いた模型実験とその再現解析から、土被り、斜面角度、打設間隔や打設幅、根入れ深さをパラメータとして垂直縫地工法の力学的挙動について考察する。

**Key Words :** *mountain tunnel, auxiliary method, vertical pre-reinforcement, ground behavior*

## 1. はじめに

現在、山岳トンネルの施工の主流である NATM では吹付けコンクリートや鋼アーチ支保工及びロックボルトを主要な支保とするとともに、周辺地山を支保として活用することで、トンネル構造の安定性を確保することを基本としている。しかしトンネル坑口部や土被りが小さい箇所では、切羽やトンネル上部の地山が不安定となり地表面沈下や斜面の挙動に影響を及ぼしやすくなり、このような場所では、補助工法を採用する場合がある。補助工法とは、トンネル掘削にあたり、主として切羽を安定させるための何らかの手段、ならびに周辺環境の保全を目的とした対応手段の総称である<sup>1)</sup>。この補助工法により都市部や小土被りといった地山強度が十分ではない条件での NATM での施工を可能にしていると考えられる。現在、このような状況から補助工法の研究・開発が進められているが、補助工法について力学的に不明確な点もあるなど、課題も明らかになってきている。

その補助工法の一つとして「垂直縫地工法」が挙げられる。垂直縫地工法は、トンネル掘削に先立ち、トンネル上方の地表面から垂直に鉄筋等を挿入・定着させることで周辺地山を補強する工法である。これにより切羽の安定や地表面沈下対策、斜面の安定化等が期待できる<sup>2)</sup>。しかし、垂直縫地工法による切羽の安定への寄与、トンネルに作用する土圧の軽減、地表面沈下の抑制、斜面の安定化といった点での有効性は、これまでの施工実績による経験に基づき定性的に示されているものが多く、また、その適用範囲の拡大も含めて、設計方法について確立されているとは言い難い面も見受けられる。そこで著者らは、垂直縫地工法の合理的、定量的な設計の確立のため、垂直縫地工法を適用したトンネル掘削を模擬した室内模型実験により土被り、地表面の斜面角度の違いによる補強効果の検討、また、その実験の再現解析から垂直縫地ボルトの打設間隔、打設幅、根入れ深さの違いによる影響を把握し、垂直縫地工法の力学的挙動を明らかにする検討を行った。

## 2. 室内模型実験

### (1) 実験装置・実験材料

室内模型実験の概略を図-1 に示す。装置は実験土槽、トンネル模型、荷重の計測システム（ロードセルおよびデータロガー）、変位の計測システム（高解像度カメラおよび画像処理用パソコン）から構成されている。また地山材料として後述するアルミ棒の積層体、垂直縫地ボルトを模擬した補強材としてボールチェーンを使用している。

#### a) 実験土槽

実験土槽は、土槽部分を含めて鋼材で枠組されたもので、土槽内に詰め込むアルミ棒の荷重により変形が生じないように十分な剛性を持たせている。土槽底部には50mm 毎に荷重計が設置されている。

#### b) トンネル模型

トンネル模型はトンネル上半の半円部と下半の矩形が一体となったアクリル製の模型に厚さ0.2mm のテフロンシートを5枚と、厚さ0.3mm のテフロンシートを17枚、合計22枚を巻き付け、トンネル模型の高さおよび幅が約100mm とし、トンネル径  $D=100\text{mm}$  となるようにした。アルミ棒を積み上げて模擬地山を作成した後に、そのテフロンシートを一枚毎に引き抜くことで、模型に見かけ上の内空変位（図-2）が発生し、トンネル掘削を模擬している。

#### c) 地山材料

地山材料は、実際のトンネル坑口部付近の未固結な崖錘などを想定して、粒状体の地山モデルを仮定することが望ましいと考え、本研究では、円形で長さが100mm のアルミ棒を用いた。これまでアルミ棒は扱いやすく、繰り返し使用しても物性変化がないため模型実験上の再現性が高いと考えられ、多くの実績を有している。なお、本実験においてはアルミ棒自体の特性に加え、実験土槽やトンネル模型の特徴を併せて考慮すると以下の点が挙げられる。

- ① アルミ棒積層体は自立するため、前後面を壁体で支える必要がない。したがって地山材料と前後の壁面間の摩擦が皆無である
- ② 積み上げられた棒の端面に直接標点や標線を描くことにより、地山材料の変形状態を明確に観察することができる

アルミ棒の直径については、アルミ棒を地山材料とする既往の研究<sup>2)</sup>から、直径1.6mm と3.0mm の組み合わせで重量混合比3:2 とすることで、アルミ棒の積層体のせん断試験から、その内部摩擦角がほぼ $30^\circ$  となり、一般的な砂の内部摩擦角に近くなること示されている。同様のアルミ棒混合地山を用いた実験も数多く行われているため、同様の直径、混合比を用いることとした。表

-1 に材料の諸物性値を示す。

#### d) 補強材

図-3 に補強材モデル図を示す。直径3.0mm の球を連結したボールチェーン2本に黄銅管を連結したのを使用した。補強材は以下に示す4点を考慮し、選定した。

- ① 補強材の曲げ剛性が大きすぎると、棒状の地山材料を水平に積み重ねて模擬した完全な二次元実験では、地山の自然な変形挙動の再現を阻害してしまう
- ② 現場での補強材の計測結果から、垂直縫地ボルトには補強材の曲げ剛性やせん断抵抗力よりも、軸力によってその補強効果を発揮していると考えられる<sup>3)</sup>。したがって、地山内での補強材の設置方法によって、補強材に軸力が発揮されるようなモデルで補強することが合理的と考えられる
- ③ アルミ棒地山とのかみ合いを考慮して、地山との十分な摩擦を有する
- ④ 扱いやすく、繰り返し使用しても物性変化がないため再現性が高い

以上より、ボールチェーンは、曲げ剛性が小さく地山の变形挙動に十分追随できる軸力モデルとして作用し、引張力はもちろん、補強材の側方地山周辺の拘束により圧縮力にも十分支持が可能なモデルであると考えられる。

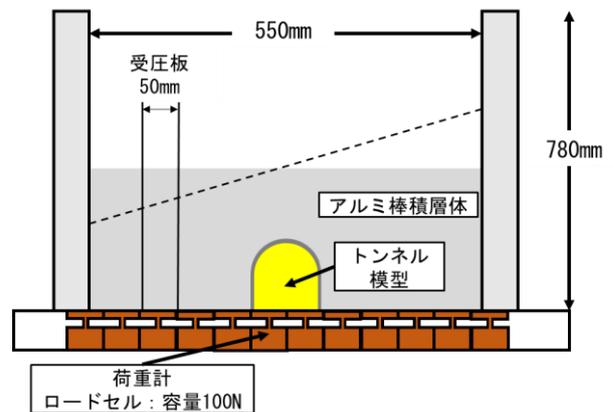


図-1 室内模型実験の全体概略

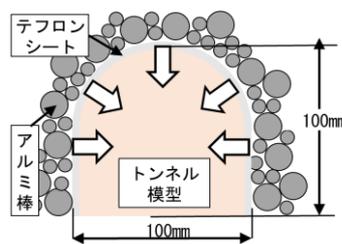


図-2 トンネル模型及び内空変位

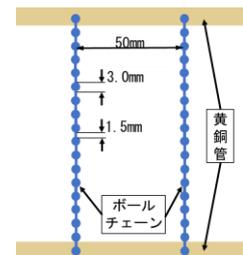


図-3 補強材モデル図

表-1 地山材料物性値

材質	アルミ合金
長さ[mm]	100
径[mm]	$\phi_1=1.6, \phi_2=3.0$
重量混合比	$\phi_1:\phi_2=3:2$
単位体積重量[kN/m <sup>3</sup> ]	21.4
粘着力[kN/m <sup>2</sup> ]	0.00
内部摩擦角[°]	30

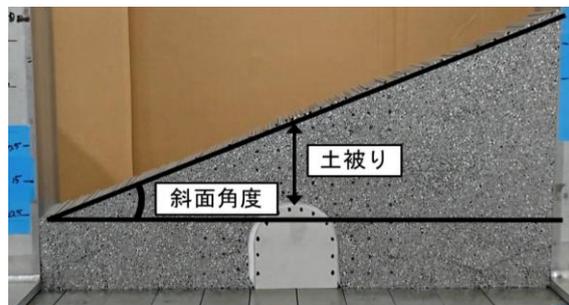


図-4 室内模型実験 斜面角度・土被りの定義

## (2) 実験手順

実験は以下の手順で行った。

### ① 実験土槽の準備

実験土槽の可動式壁面を十分に固定する。ロードセルに正確な錘を載せ、荷重を正常に計測されるか確認し、ロードセルをインシャライズする。トンネル模型にテフロンシートを巻き付け、実験土槽に設置する。

### ② 補強材をアクリル板を用いて実験土槽に設置

ボールチェーンに張力を持たせるため、固定用アクリル板に開けた穴からネジを通し、そのネジに補強材モデルを噛み合わせる。

### ③ 地山材料を均一に実験土槽に配置

地山材料であるアルミ棒を実験土槽の底から厚さ1cm弱ごとに敷き詰めていく。平らな板で地山を2~3回叩き、地山を締め固める。この際にアルミ棒の軸線をトンネル軸線方向と平行に並べる。所定の土被り・斜面角度(図-4)になるまで繰り返す。

### ④ アクリル板を実験土槽から除去

固定用のネジを板から抜き、ボルトモデルと固定用アクリル板が連結されていない状態にし、アクリル板を地山からゆっくりと離す。

### ⑤ 画像解析の標点を設置

端面を黒く着色したアルミ棒を地山正面から挿入。トンネル中央を中心として、幅20cm、高さは地表面まで、2cm×2cmの格子状に設置する。また、地表面については2cmごとに設置する。

### ⑥ 高解像度カメラで地山材料断面を撮影

### ⑦ ロードセルでトンネル模型に作用する荷重を計測

### ⑧ テフロンシートを一枚引抜き

### ⑨ テフロンシートを全て引き抜くまで手順⑥~⑨の繰り返し

## (3) 実験ケース

室内模型実験では、補強の有無、土被り、地表面傾斜角をパラメーターとして実験を行った。実験では補強材モデルを打設間隔15mm、打設幅2.1Dに配置し、補強を行った。実験ケースを表-2に示す。

表-2 実験ケース

実験ケース	土被り[D]	斜面角度[°]	補強の有無
caseA	1.0	水平	補強なし
caseB			補強あり
caseC	1.5		補強なし
caseD			補強あり
caseE	2.0		補強なし
caseF			補強あり
caseG	1.0	75	補強なし
caseH			補強あり
caseI	1.0	15	補強なし
caseJ			補強あり
caseK	1.0	22.5	補強なし
caseL			補強あり

## 3. 再現解析

### (1) 解析モデル

再現解析では斜面全体の挙動の検討への展開も考慮に入れ、FLAC3Dを用いた3次元数値解析を行った。

#### a) 地山モデル

実験装置と同様の寸法で作成した解析モデルを図-5に示す。トンネル掘削径はD=100mm、土被り1D、解析領域はトンネル中央から左右に275mm、奥行方向は100mmとした。地山、アクリル模型、テフロンシートはsolid要素でモデル化した。

本研究の解析において用いた地山モデルの物性値を表-3に示す。アルミ棒積層体の内部摩擦角、粘着力は表-1に示した物性値を参考にした。アルミ棒積層体の弾性係数とポアソン比についてはアルミ棒積層体の2軸試験結果<sup>4)</sup>から得られた物性値を参考に用いた。アルミ棒積層体の弾性係数Eについては試験結果から算定式(1)から得られた値を用いた<sup>4)</sup>。

$$E = 0.05 + 10^2 \sigma_m \text{ MPa} \quad (1)$$

ここで $\sigma_m$ は平均主応力である。地表面からの距離を $h$ 、単位体積重量を $\gamma$ 、側圧係数を $K_0$ とすると、 $\sigma_m = \sigma_v + 2\sigma_h / 3$ 、 $\sigma_v = \gamma \cdot h$ 、 $\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$ となる。すなわち(1)式は地表面からの距離 $h$ をパラメータとする

算定式となっている。本研究モデルはアルミ棒積層体の弾性係数は地山全体で一様と考え、 $h = 200 \text{ mm}$ として計算を行い得られた、 $E = 0.35 \text{ MPa}$ をアルミ棒積層体の弾性係数として数値解析に用いた。アルミ棒積層体から成る地山材料については破壊についても考慮しモール・クーロンの破壊基準を用いた弾塑性体とした。テフロンシートとアクリル模型については弾性体とし、アクリル模型は変形が生じないよう剛性を高めた。

### b) 補強材モデル

実験では垂直縫地ボルトを模擬したボールチェーンを用いて実験を行っているが、再現解析では垂直縫地ボルトについてはボールチェーンを鋼製の棒として扱い、構造要素としては beam 要素を用いて、鋼材の弾性係数、ポアソン比、密度を解析物性値 (表-4) として用いた。

## (2) 解析フロー

実験でのトンネル掘削模擬を再現した解析フロー (図-6) で解析を行った。実験ではテフロンシートを22枚引

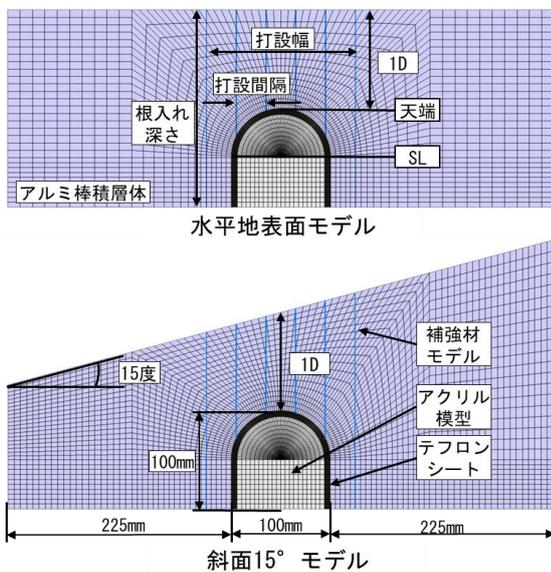


図-5 解析モデル

表-3 解析物性値 (地山モデル)

	弾性係数 [MPa]	ポアソン比	内部摩擦角 [°]	粘着力 [kN/m <sup>2</sup> ]
アルミ棒積層体	0.35	0.30	30	0.00
テフロンシート	0.35	0.30		
アクリル模型	$0.35 \times 10^6$	0.30		

表-4 解析物性値 (補強材モデル)

	弾性係数 [MPa]	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	ポアソン比	断面積 [mm <sup>2</sup> ]	断面二次モーメント [mm <sup>4</sup> ]
補強材モデル	$2.05 \times 10^6$	7.09	0.30	7.07	3.97

き抜き、各引抜時にテフロンシートの厚み分の約 6mm の内空変位を地山に与えることで掘削を模擬している。解析上のテフロンシートは 22 枚作成し、合計の厚さが 6mm となっている。実験同様、解析モデル上のテフロンシートの要素を 1 枚ずつ削除して掘削を模擬する。実験では各引抜後は静止状態にあることから解析上でも各引抜後収束状態まで計算を行うこととした。しかし解析上ではテフロンシートの削除後、地山モデルとアクリル模型のモデルの間に解析上の離隔が生まれ応力伝達ができず、反力を得られないため解が収束しない。そのためアクリル模型からの反力を再現するために shell 要素 (図-7) を配置し解を収束させた。また、実験と同様の内空変位になるように step 数を調整し、内空変位の発生後、shell 要素を巻き付け、収束状態まで計算を行うことで実験の再現を図った。

## (3) 解析ケース

再現解析では、補強の有無、打設間隔、打設幅、根入れ深さ、地表面の傾斜の有無をパラメータとして解析を行った。解析ケースを表-5 に示す。

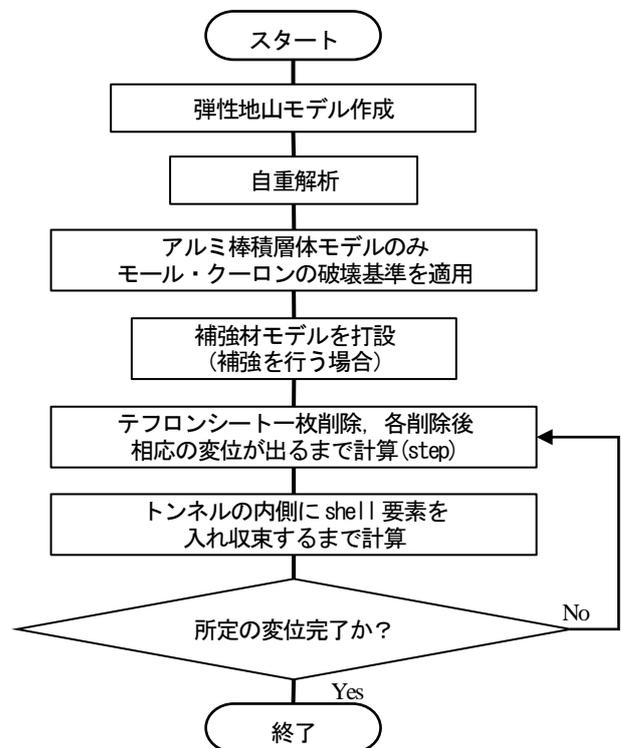


図-6 解析の流れ

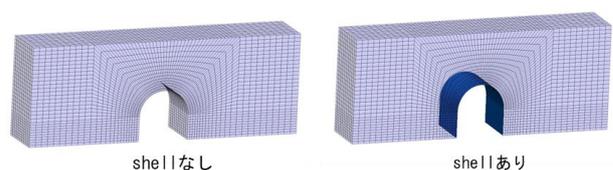


図-7 shell 要素

表-5 解析ケース

解析ケース	土被り[D]	斜面角度 [°]	打設幅 [D]	打設間隔 [mm]	根入れ深さ	
case1	1.0	水平	補強無		実験と同一	
case2			1.5	15		
case3				30		
case4			2.1	15		
case5		斜面 15度	補強無		実験と同一	
case6			1.5	15		
case7				30		
case8			2.1	15		
case9		水平	1.5	1.5	15	天端
case10						SL

#### 4. 実験結果

##### (1) 地表面沈下量と形状

土被りと補強の有無が異なる caseA~caseF までのトンネル中央からの距離と最終沈下量の関係を図-8, 斜面角度と補強の有無が異なる caseA, caseB, caseG~caseL までの同様の関係を図-9に示す. トンネル中央からの距離の符号は斜面上方を正, 斜面下方を負とした.

##### a) 土被りの違い

図-8 より各ケースの沈下量の最大値はトンネル上部の地表面で生じており, 土被り, 補強の有無によらず, 与えた内空変位と同等の沈下量であることがわかる. グラフの形状に着目すると, 各土被りの補強を行っていないケースではトンネル上部で鋭い凹状の形状となっており, 沈下勾配が大きくなっている. しかし補強を行ったケースではトンネル上部では平らな形状をしており, 沈下勾配が小さくなっている. これは補強を行うことで地山の連続性が向上し, 地山が一体化して挙動するようになったためと考えられる.

##### b) 斜面角度の違い

図-9 より斜面下方では地表面の沈下が生じていない区間が存在している. またその区間は斜面角度が大きくなるにつれトンネル中央へと近づいている. 斜面上方では斜面角度が大きくなるにつれ, 地表面沈下量が増加しているのがわかる. なお, 実験からは補強の有無による地表面沈下量の明確な抑制は顕著にみられない. しかしトンネル上部のグラフの形状に着目すると, 各斜面角度において補強を行っていないケースに比べ, 補強を行ったケースでは沈下勾配の変化が緩やかになっている.

##### (2) 地山内変位

土被りと補強の有無が異なる caseA~caseF までのトンネル中心からの左右 200mm までの距離の地山内変位ベクトル図を図-10, 斜面角度と補強の有無が異なる caseG~caseL までを図-11に示す.

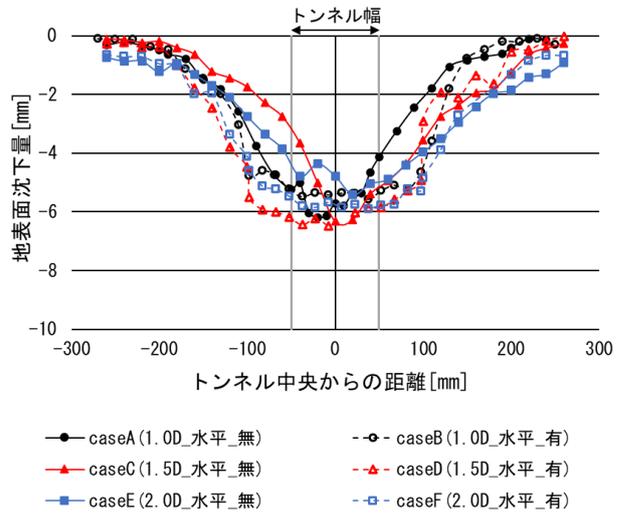


図-8 トンネル中央からの距離と最終沈下量(土被りの違い)

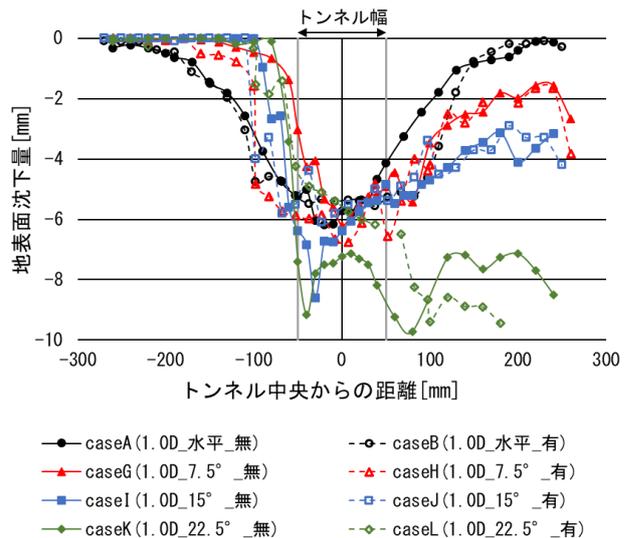


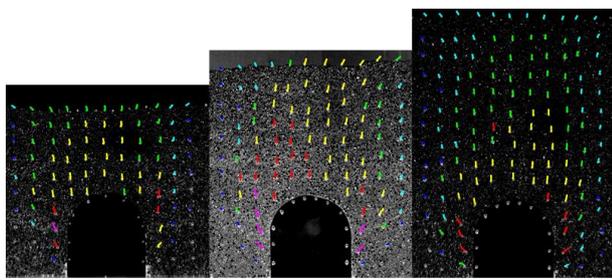
図-9 トンネル中央からの距離と最終沈下量(斜面角度の違い)

##### a) 土被りの違い

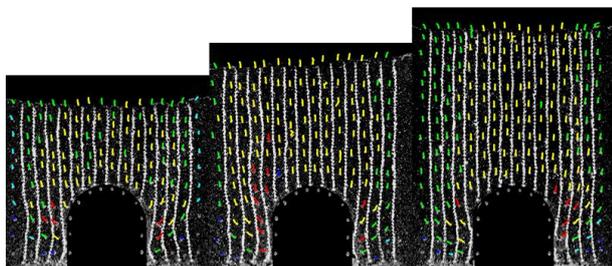
図-10 より土被りによらず補強を行っていないケースではトンネル周辺において大きな変位が生じているが, 補強を行っているケースではトンネル周辺より小さい変位がより広い範囲で生じている. さらにその変位はトンネル付近から地表まで分布している. また, トンネル模型の左右に着目すると, 変位ベクトルの方向が補強によって鉛直成分が減少し, 水平方向成分が卓越している. これらは補強により地山内変位が均一化し, 地山が一体となって挙動することで, より広い範囲の地山自体が変形を支持しているためと考えられる.

##### b) 斜面角度の違い

図-11 より斜面角度が大きくなるにつれ, 変位量が大きくなっている. 補強を行っているケースではより広い範囲で変位が生じている. トンネル模型の左右に着目すると, 変位ベクトルの方向が補強によって鉛直成分が減少し, 水平方向成分が卓越している. これらのことから



caseA(1.0D\_水平\_無) caseC(1.5D\_水平\_無) caseE(2.0D\_水平\_無)



caseB(1.0D\_水平\_有) caseD(1.5D\_水平\_有) caseF(2.0D\_水平\_有)

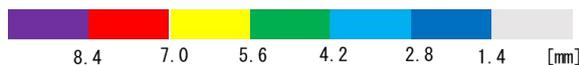
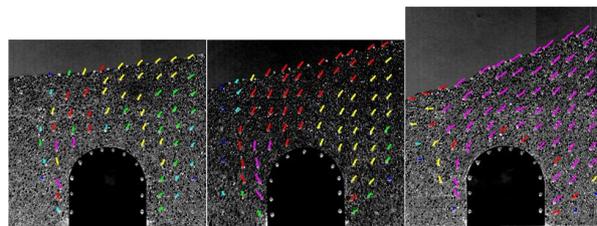
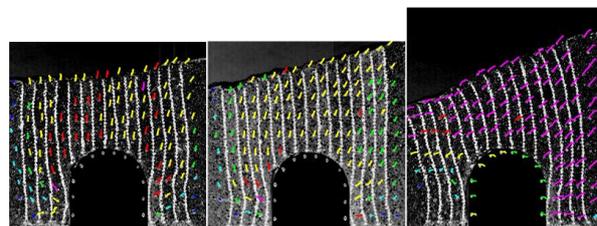


図-10 地山内変位ベクトル(土被りの違い)



caseG(1.0D\_7.5°\_無) caseI(1.0D\_15°\_無) caseK(1.0D\_22.5°\_無)



caseH(1.0D\_7.5°\_有) caseJ(1.0D\_15°\_有) caseL(1.0D\_22.5°\_有)

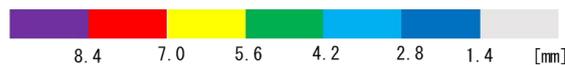


図-11 地山内変位ベクトル(斜面角度の違い)

地表面に傾斜を有している場合においても、補強によりトンネル掘削による変形を支える地山の範囲が拡大し、地山が一体化して挙動していると考えられる。しかし傾斜角度 22.5° の補強ケースでは、トンネル模型が左に動いており、補強により左向きの荷重が増大している可能性がある。ゆえに、本実験における斜面角度 22.5° では、補強規模が不十分であった場合が示唆されている可能性があると考えられる。

### (3) 内空変位とトンネル作用荷重

土被りと補強の有無が異なる caseA~caseF までの内空変位率とトンネル作用荷重比の関係を図-12 に示す。ここで、内空変位率とは内空変位量をトンネル幅で除した値であり、トンネル作用荷重比とは、引き抜き時にトンネル模型の脚部が設置されている箇所のロードセルに作用している荷重をその初期の荷重で除した値である。これらの基準化により、作成した地山に生じる初期荷重分布の多少のばらつきが補正、および無次元化されることで比較が容易になっている。

図-12 より、内空変位の増加に伴いトンネル作用荷重は、初期の内空変位が発生した時に大きく減少し、その後減少が継続した後、無補強の土被り 1.0D と 1.5D のケースでは増加に転じるが、その他のケースは減少を続けることがわかる。ゆえに、土被り 2.0D では補強によるトンネル作用荷重の減少効果は確認できず、土被り 1.0D と 1.5D のケースは、補強によりトンネル作用荷重を減少させる効果があると考えられる。

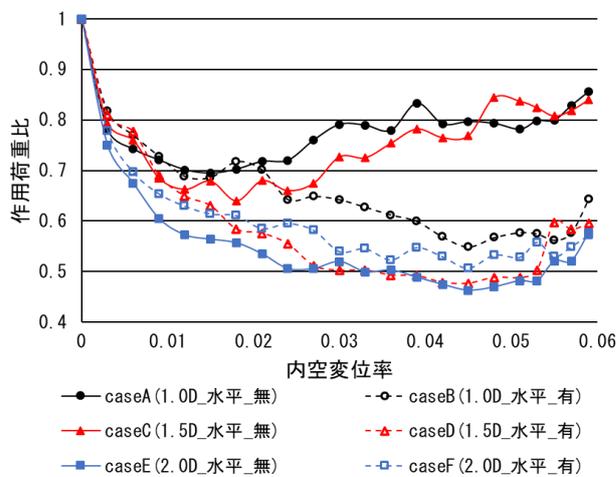


図-12 内空変位率とトンネル作用荷重比

## 5. 解析結果

実験の再現解析では 3 次元モデルで実験を再現している。模型実験と同様に 2 次元の結果を取り出すために解析モデルの奥行方向の中央の断面（奥行 50mm 地点）を解析上の検討断面とした。

### (1) 水平地表面モデル

地表面が水平であると仮定したモデル（以下、水平地表面モデル）を用いて行った case1~case4 までのトンネル中央からの距離と最終沈下量の間を関係を図-13、トンネル中央からの左右 200mm までの距離の地山内変位分布を図-14 に示す。

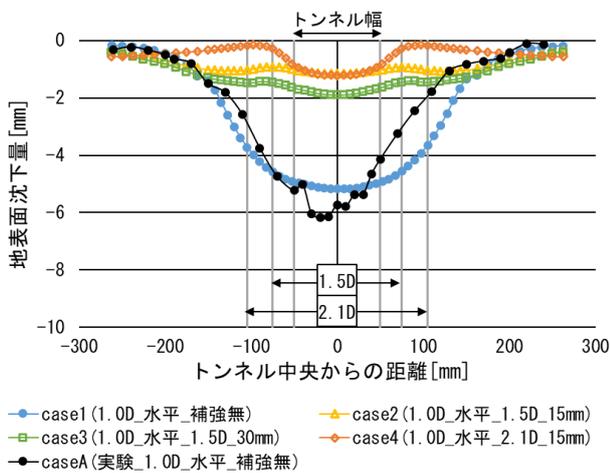


図-13 トンネル中央からの距離と最終沈下量(水平地表面)

### a) 実験に対する解析の再現性

図-13より caseA (実験\_1.0D\_水平\_補強無) と case1 (解析\_1.0D\_水平\_補強無) のトンネル中央からの距離と最終沈下量のグラフを比較すると、どちらのケースにおいてもトンネル直上の地表面の沈下量が大きく出ている。またトンネル直上から離れるにつれ、沈下量が小さくなるグラフとなっている。

図-10 と図-14 より、caseA と case1 の地山内変位分布図を比較すると、どちらのケースにおいてもトンネルの側部とトンネル直上の地山に大きな変位が分布する図になっている。さらにトンネルから離れるほど変位が小さい。これらから解析結果が実験結果と類似した結果を示していることが分かり、本再現解析は実験結果に対して十分な再現性を有していると言える。

### b) 地表面沈下量と形状

図-13 より、補強の有無に関して比較をすると、補強を行ったすべてのケースで沈下量の抑制効果がみられる。

打設間隔の違い (case2, case3) に関して比較をすると、グラフの概形は類似しており沈下の抑制が表れる範囲も等しいが、打設間隔の狭い case2 では case3 に比べ最大沈下量が 1mm 程度小さく、地表面沈下の抑制効果がより大きく現れていると考えられる。また、その効果の差はトンネル上部付近で大きくなっている。

打設幅の違い (case2, case4) を比較するとトンネル上部の沈下量に対しては沈下の抑制に差が見られないものの、case4 では case2 に比べ沈下量が抑制されている範囲が広がっていることから、トンネルから±100mm 程度離れた位置で沈下量が 1mm 程度小さく、地表面沈下の抑制効果が大きい。

図-13 のグラフにおいて、トンネル中央から±250mm 以降の case4 のグラフが他のケースと異なった傾向を示しており、境界条件の影響が存在すると考えられる。実験結果から垂直縫地ボルトによる補強により地山が一体と

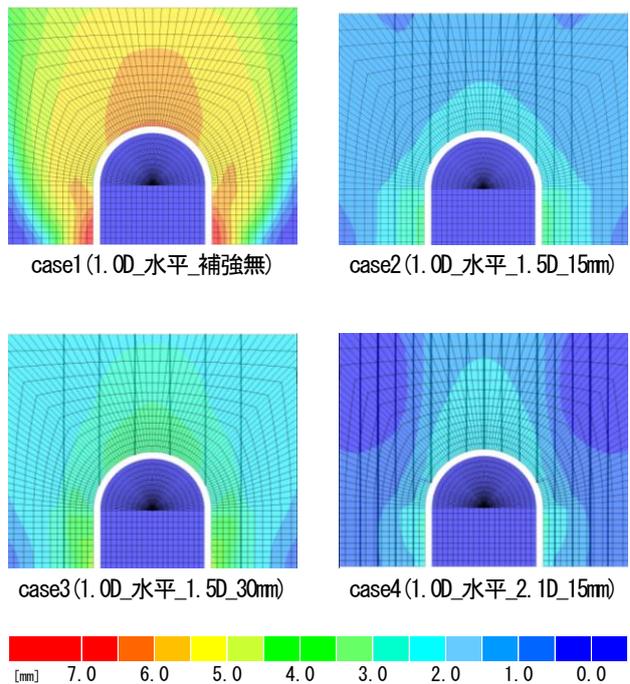


図-14 地山内変位分布(水平地表面)

なって挙動していることがわかり、解析においても同様に考えられる。補強を行ったケースの中で最も打設幅が大きい case4 は他のケースに比較して、より広範囲の地山が一体となって挙動していると考えられるため、側方の境界条件を受けやすくなっていると推測される。

### c) 地山内変位

図-14 より、補強の有無に関して比較をすると、補強を行ったすべてのケースで地山内の変位の抑制効果がみられる。

打設間隔の違い (case2, case3) に関して比較をすると、両ケースともにトンネル直上部とトンネル側部で変位が大きく出ている。変位が広がる範囲についても大きな差はない。しかし打設間隔の狭い case2 の方が変位量の大きさが小さくなっており、特にトンネル周辺の地山の変位量の抑制効果が大きい。前述の地表面沈下量と形状の結果を踏まえて、垂直縫地ボルトの打設間隔がトンネル周辺の地山の変位量の抑制効果の大きさに寄与していることが考えられる。

打設幅の違い (case2, case4) を比較すると、両ケースともにトンネル直上部とトンネル側部で変位が大きく出ている。変位量の大きさについても大きな差はない。しかし地山全体の変位量は、打設幅の広い case4 の方が小さくなっており、地山全体の変位量の抑制効果が大きい。また前述の地表面沈下量と形状の結果を踏まえて、垂直縫地ボルトの打設幅はトンネルから離れた地山の変位の抑制に寄与していることが考えられる。

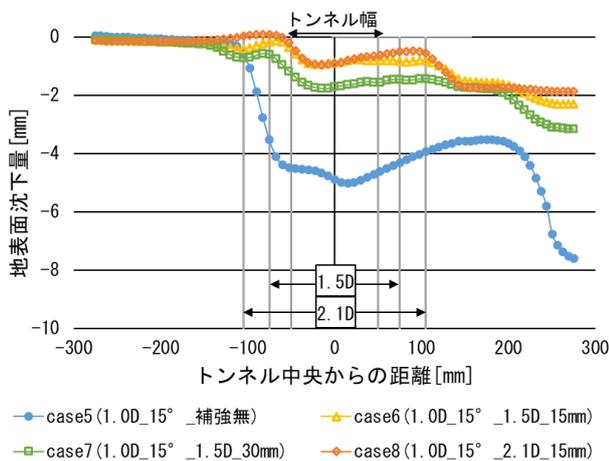


図-15 トンネル中央からの距離と最終沈下量(斜面角度 15°)

## (2) 斜面 15° モデル

地表面の斜面を 15° としたモデル (以下、斜面 15° モデル) を用いて行った case5~case8 までのトンネル中央からの距離と最終沈下量の関係を図-15, トンネル中央からの左右 200mm までの距離の地山内変位を図-16 に示す。

### a) 地表面沈下量と形状

図-15 より, 補強の有無に関して比較をすると, 補強を行ったすべてのケースで沈下量の抑制効果がみられる。

打設間隔の違い (case6, case7) に関して比較をすると, グラフの概形は類似しており沈下の抑制が表れる範囲も等しいが, 打設間隔の狭い case6 では case7 に比べ最大沈下量が 1mm 程度小さい。水平地表面モデルと同様に, 打設間隔の違いからはグラフの概形の類似, 地表面沈下の抑制効果の大きさに違いが見られた。

打設幅の違い (case6, case8) を比較すると, 水平地表面モデルと同様に, トンネル上部の沈下量に対する沈下の抑制に差が見られないが, トンネルから±100mm 程度離れた位置で沈下の抑制に差が生じた。しかし水平地表面モデルと比較すると打設幅の違いから生じる沈下の抑制の差が小さい。

### b) 地山内変位

図-16 より, 補強の有無に関して比較をすると, 補強を行ったすべてのケースで地山内の変位の抑制効果がみられる。

打設間隔の違い (case6, case7) に関して比較をすると, 水平地表面モデルと同様に, 変位が広がる範囲についても大きな差はなく, 打設間隔の狭い case6 の方が変位量の大きさが小さい。地表面に傾斜がある場合においても垂直縫地ボルトの打設間隔がトンネル周辺の地山の変位量の抑制効果の大きさに寄与していることが考えられる。

打設幅の違い (case6, case8) を比較すると, 水平地表面モデルと同様に, 変位量の大きさについても大きな差

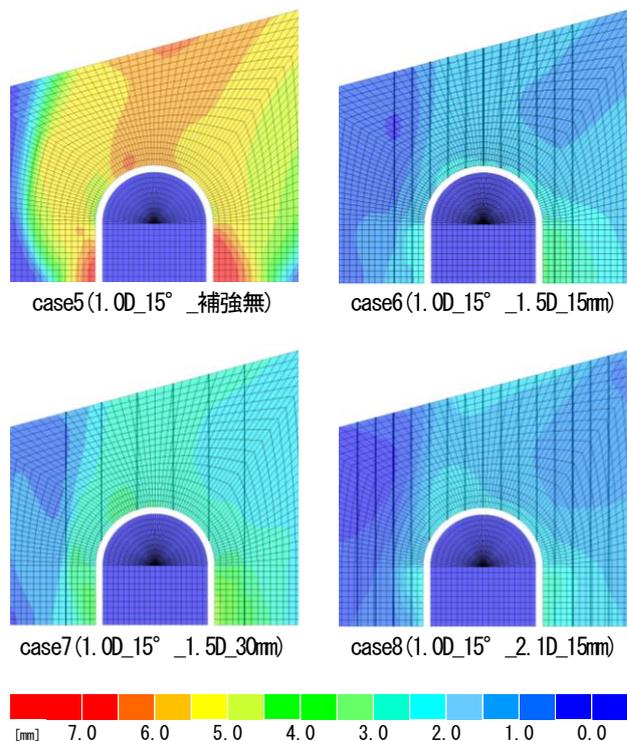


図-16 地山内変位分布(斜面角度 15°)

はなく, 地山全体の変位量は, 打設幅の広い case8 の方が小さくなっており, 地山全体の変位量の抑制効果が大きい。地表面に傾斜がある場合においても, 垂直縫地ボルトの打設幅はトンネルから離れた地山の変位量の抑制効果の大きさに寄与していることが考えられる。

## (3) 根入れ深さの違い

根入れ深さの異なる case9, case10 のトンネル中央からの距離と最終沈下量の関係を図-17, トンネル中央からの左右 200mm までの距離の地山内変位を図-18 に示す。

### a) 地表面沈下量と形状

図-17 より, 補強の有無に関して比較をすると, 根入れ深さに関わらず, 補強を行ったケースで沈下量の抑制効果がみられる。

根入れ深さの違い (case9, case10) に関して比較をすると, 沈下抑制効果が表れる範囲に差は見られないが, 根入れ深さが大きい case10 は case9 に比べ最大沈下量が 1mm 程度小さく, 沈下抑制効果がより大きいと考えられる。また実験と異なり, ボルトの長さを一定にした場合, トンネル直上より離れた位置で最大沈下量が発生している。

### b) 地山内変位

図-14 の case1, 図-18 より, 補強の有無に関して比較をすると, 根入れ深さに関わらず, 補強を行ったケースで地山内変位の抑制効果がみられる。

根入れ深さの違い (case9, case10) に関して比較をす

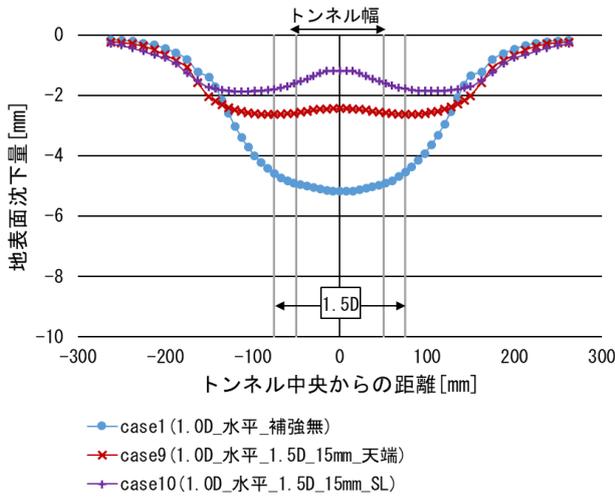


図-17 トンネル中央からの距離と最終沈下量  
(根入れ深さの違い)

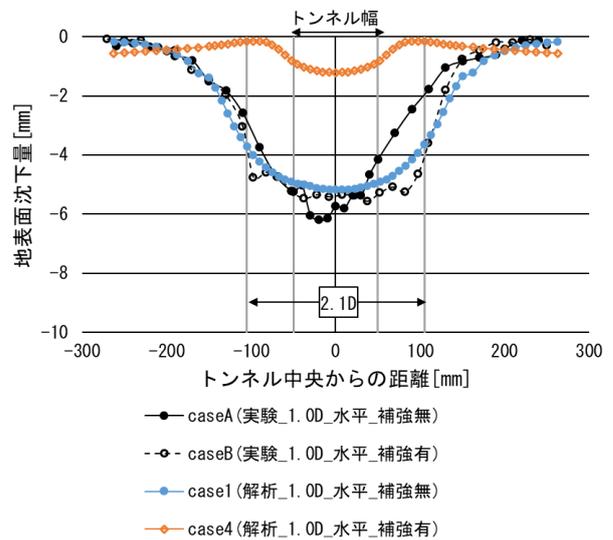


図-19 トンネル中央からの距離と最終沈下量  
(実験・解析比較)

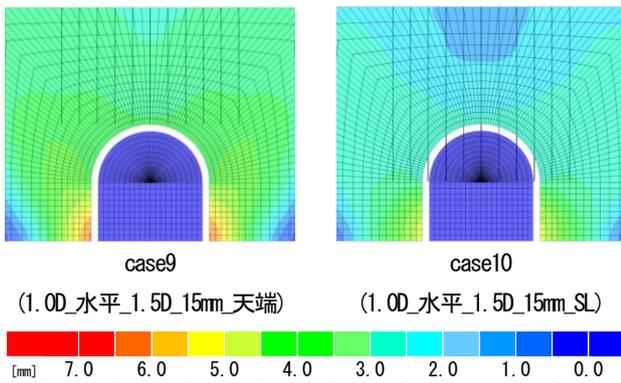


図-18 地山内変位分布(根入れ深さ)

ると、地山内の変位の広がり方は変化がないが、根入れが深い case10 の方が case9 に比べ変位量が小さくなっている。

case9, case10 と同様の打設間隔, 打設幅の case2 と比較すると、case2 に比べ、case9, case10 ではトンネル側方の地山の変位が大きくなっている。これは case9, case10 ではトンネル側方までボルトが挿入されていないためと考えられる。case9, case10 の地山内変位はトンネル側部の変位が地山に広がったような分布になっており、地山がトンネル側部に生じた変位を支えていると考えられる。トンネル周辺地山の強度も補強効果に関係があると言える。

#### (4) 実験結果との比較

室内模型実験と再現解析において同様の地山条件であり、補強条件のトンネル中央からの距離と最終沈下量のグラフを重ねた図を図-19 に示す。

図-19 より、室内模型実験において補強を行っていない caseA に比べ、補強を行った caseB の方が、解析結果

の case1 に類似したグラフとなっている。室内模型実験において、地山モデルはアルミ積層層体を用いた粒状体である。一方、再現解析における地山モデルは有限差分法を用いた連続体のモデルである。室内模型実験において補強を行うことにより、地山の連続性が向上し、再現解析の連続体の地山モデルにより類似した挙動を示したと考えられる。3. に示した実験結果からは、地表面沈下勾配の減少やトンネル掘削による変形を支える地山の範囲の拡大から、土被りや斜面角度によらず、補強を行うことによる地山の連続性の向上が見られることがわかった。実験結果と解析結果の比較からも、垂直縫地ボルトの打設により、地山の連続性が向上していることが確認できる。

しかし室内模型実験においては、垂直縫地ボルトの打設による地表面沈下量の抑制や地山内変位量の抑制は顕著には見られなかった。一方、解析結果からは補強を行ったすべてのケースにおいて、地表面沈下量の抑制や地山内変位量の減少がみられた。これらの補強効果の差異の要因の一つにボルトの剛性の違いによる影響が考えられる。

室内模型実験において垂直縫地ボルトを再現した補強材モデルとして直径 3mm のボールチェーンを用いた。曲げ剛性の小さいボールチェーンは地山の自然な挙動に追従することができる。一方、再現解析においては垂直縫地ボルトを再現した補強材モデルとして直径 3mm の鋼製の棒を想定した beam 要素を用いた。室内模型実験ではボールチェーンに軸力を持たせようとして実験を行っているが、鋼製の棒と同等の剛性を有しているとは考えにくい。これらを踏まえて、再現解析において補強材モデルの剛性(弾性係数)を低下させた、以下の表-6 のケースを実施した。

表-6 追加解析ケース(補強材の弾性係数の違い)

解析ケース	土被り [D]	斜面角度 [°]	打設幅 [D]	打設間隔 [mm]	根入れ深さ	補強材弾性係数 [MPa]
case11	1.0	水平	1.5	15	実験同様	2.05×10 <sup>3</sup>
case12	1.0	水平	1.5	15	実験同様	2.05×10

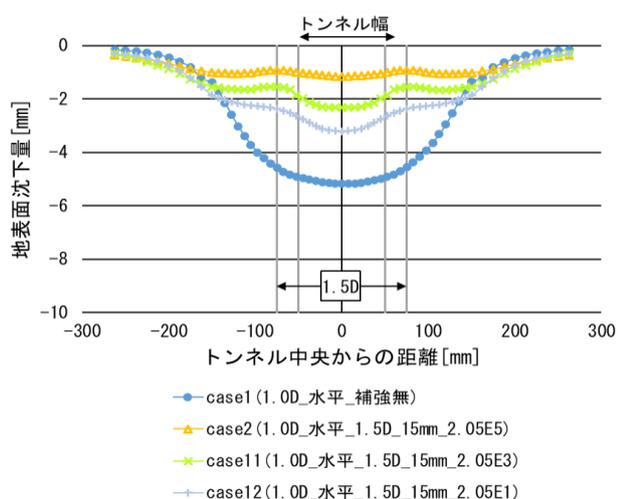


図-20 トンネル中央からの距離と最終沈下量  
(補強材の弾性係数の違い)

case1 及び補強材モデルの弾性係数の異なる case2, case11, case12 のトンネル中央からの距離と最終沈下量の関係を図-20 に示す。

図-20 より補強材モデルの弾性係数が小さくなるにつれ、沈下量が増加している。このことから垂直縫地ボルトの剛性の違いからも補強効果の違いが生じると考えられる。垂直縫地ボルトの剛性が小さいと沈下量の抑制効果が小さくなる傾向がみられ、実験結果と解析結果の垂直縫地ボルトの剛性と補強効果の大きさの関係性が同じである。このことから垂直縫地ボルトの変位抑制の大きさについて、実験と解析の間で見られた違いは垂直縫地ボルトの物性が関わっていると考えられる。また垂直縫地ボルトの剛性の違いからも補強効果の違いが生じることから、垂直縫地ボルトの物性についても補強効果に影響があることが考えられ、垂直縫地ボルトが有すべき仕様等についても今後検討が必要であると言える。

また室内模型実験と再現解析の補強効果の差異について、地山の変形挙動や地山と垂直縫地ボルトの接合の違いにおいても影響があると考えられる。室内模型実験におけるアルミ棒積層体は再現解析における地山モデルに比べ、局所的な変形が生じやすい。また室内模型実験ではアルミ棒とボールチェーンとの摩擦と噛み合いによる接合であり、再現解析における solid 要素と beam 要素の剛な接合と異なる。室内模型実験での地山の挙動をより再現できる地山の構成則の適用やアルミ棒積層体とボールチェーンの接合を再現できるジョイントモデル等についても検討の必要がある。

## 6. 結論および今後の課題

### (1) 結論

アルミ棒積層体を用いた室内模型実験とその再現解析から以下のことが分かった。

- ① 室内模型実験の結果から、土被りや地表面の傾斜の角度によらず、垂直縫地ボルトの打設により地表面沈下勾配が減少し、トンネル掘削による変形を支持する地山の範囲を拡大することができる。
- ② 粒状体であるアルミ棒積層体の挙動が垂直縫地ボルトの補強により連続体の挙動に近くなることから垂直縫地ボルトの打設により地山の連続性を向上させることができる。
- ③ 垂直縫地ボルトによる補強でトンネル作用荷重を減少させる効果が確認できたが、土被りによっては補強によるトンネル作用荷重の減少効果は見られなかった。
- ④ 実験の再現解析の結果から垂直縫地ボルトの打設間隔がトンネル周辺の地山の変位量の抑制効果の大きさに寄与し、垂直縫地ボルトの打設幅はトンネルから離れた地山の変位量の抑制効果の大きさに寄与している。
- ⑤ 垂直縫地ボルトが持つ効果は傾斜を持つ地山においても同様の効果を期待できる。しかし斜面での適用において、補強効果が明確に表れない場合や補強規模の違いから生じる補強効果の差が小さい場合があることが見られた。
- ⑥ 垂直縫地ボルトの根入れが深い方の補強効果が大きくなる。ボルトの長さを変化させた場合、周りの地山の変形に対する支持に変化が生じており、地山の強度なども垂直縫地ボルトの補強の効果に影響があると考えられる。
- ⑦ 実験結果と解析結果における補強による変位の抑制効果の差異は補強材モデルの剛性の違いによるものと考えられる。このことから垂直縫地ボルトの物性についても補強効果に影響があり、垂直縫地ボルトの仕様等についても検討が必要である。

### (2) 今後の課題

近年では斜面の安定効果を含めた垂直縫地工法の採用の検討がなされているのに対し、解析結果、実験結果両者から傾斜がある地山において垂直縫地工法を適用する場合は傾斜の無い場合に比べ補強の効果が小さくなる場合がみられた。また、垂直縫地ボルトの物性の違いから補強効果に対する影響が確認され、垂直縫地ボルトの斜面における適用や使用材料の仕様についても検討が必要である。

本研究では室内模型実験のスケールにおいて垂直縫地

工法の検討を行っているが、今後斜面に対する垂直縫地ボルトの補強効果について、実施工規模に解析を展開していき、現場計測結果との関連性も含めて垂直縫地ボルトの力学的挙動の解明をするとともに、根入れの深さや地山強度の影響も含めてボルトの仕様の差異の影響を検討する必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 社団法人 土木学会，トンネルライブラリー第 20 号，山岳トンネルの補助工法—2009 年版—，社団法人 土木学会，pp1, pp232-235, 2009.
- 2) 村山朔朗，松岡元：粒状土地盤の局部沈下現象につ

いて，土木学会論文報告集，第 172 号，pp31-41，1969.

- 3) 城間博通，益田光雄，進士正人，松井幹雄，西村和夫：現場計測に基づく垂直縫地ボルトのトンネル周辺地山補強に関する一考察，土木学会論文集 F，Vol.62 No.1, pp.117-127, 2006.
- 4) YASHIMA Atsushi, SHIBATA Toru, SEKIGUCHI Hideo, KOHNO Mitsuyosi : Soil Movements Associated with Tunneling and Their Effects on an Adjacent Pile Foundation, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute Kyoto Univ*, Vol.35, Part4, No.316, 1985.
- 5) 足立紀尚，京都大学，木村亮，岸田潔，川内啓輔：ヒンジアーチカルバート模型実験の骨組み構造解析，地盤工学研究発表会 発表講演集，JGS38 巻，2003.

(2021. 8. 6 受付)

## CONSIDERATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF VERTICAL PRE-RE-INFORCEMENT

Tomohisa AMEMIYA, Tetsuya NAGATA, Nobuharu ISAGO, Kosuke KAWATA,  
Hiromichi SHIROMA and Kazuo NISHIMURA

The vertical pre-reinforcement bolt method is used to stabilize the ground at the top of tunnels with small overburden to prevent ground surface subsidence and to stabilize slopes. However, the design method of the vertical pre-reinforcement bolt method is mainly empirical, based on similar construction cases, and a quantitative design method has not been established. In order to establish a quantitative and rational design method for the vertical pre-reinforcement bolt method, this paper discusses the mechanical behavior of the vertical pre-reinforcement bolt using parameters such as overburden, slope angle, spacing and width of reinforcement, and insertion depth.