

令和 5 年度

一般社団法人日本トンネル技術協会研究助成報告書

助成番号：JTA-R5-助 1

掘削時の地山補強を目的とした補助工法の
選定手法に関する研究

令和 8 年 6 月 1 日

砂金 伸治
東京都立大学 都市環境学部

研究概要

目的

山岳トンネルの施工において、切羽安定や地表面沈下等への対策として補助工法が採用されている。補助工法の具体の選定は求められる効果に応じて行われているが、種々存在するそれぞれの工法の選定を行うことに関しては技術者の経験に委ねられるところが多い。本研究では、地山補強に資すると考えられる様々な補助工法に着目し、力学的なメカニズムに関する考察を様々な観点からの検討を通じ、補助工法の定量的で合理的な設計手法の提案のための検討を行った。

研究方法

室内模型実験により、垂直縫地の適用による地山の基礎的な挙動の変化を検討するとともに、数値解析による垂直縫地を適用する場合の基本的なメカニズムの再現について検討を行った。さらに、現場における現地計測を行い、これらの結果をもとに数値解析により実施工での適用やトンネル構造に与える影響に関する検討を行い、補強効果や地山挙動への影響について現象的な解明を試みた。

調査、実験等の結果および結論

垂直縫地と汎用的に採用される先受けを模擬した室内模型実験を通じて、地山に対する補強効果に関してその差異を再現できる可能性があることを示した。また、3次元数値解析による現象の再現をもとに、応力解放率の評価によってそれと近い結果が得られることを示した。さらにトンネル施工現場における現地計測とその再現解析からトンネル掘削による地山の挙動を一定程度の精度で再現できることがわかった。

今後の課題

実験や解析を通じて、支保工の挙動に及ぼす影響や、掘削や切羽進行の影響などを加味するなど、挙動に大きく影響を及ぼすと考えられる事象に対する検討の深度化が必要であるとともに、実際の適用事例のさらなる分析を踏まえ、望ましい仕様の提案を図っていく必要がある。

助成研究者所属・氏名：東京都立大学都市環境学部 教授 砂金 伸治

共同研究者所属・氏名：東京都立大学都市環境学部 助教 河田 皓介

東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 博士後期課程 田村 夏海

東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 博士前期課程 高山 雄矢

目 次

1. はじめに	1
2. 研究方法	2
2.1 室内模型実験	
2.2 数値解析	
2.3 現地計測と再現解析	
3. 研究結果	8
3.1 室内模型実験結果	
3.2 数値解析結果	
3.3 現地計測と再現解析結果	
4. おわりに	15
本報告書の内容に関する参考文献	16

1. はじめに

現在、山岳トンネルの建設で採用されている山岳工法（NATM）は、地山が空間を保持する能力を有効活用するとともに、吹付けコンクリートやロックボルト、鋼製支保工などにより地山の安定化を確保して掘削する工法である。近年は、経済性や施工の自由度などの利点から都市部や小土被りといった地山強度が十分でない条件での採用例が増加している。こういった山岳工法では不利な条件下での施工の安全性や効率性の向上を図るために「補助工法」を採用する事例も増加している。「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。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ない条件での山岳工法による施工を可能にしている。

補助工法には様々な種類があり、それぞれが有する効果が示されてきている。その一つとして垂直縫地工法（以下：垂直縫地）が挙げられる。垂直縫地は、トンネル掘削に先立ち、掘削予定位置およびその周辺に、地表面から垂直にボルトを挿入し、地山を補強するものである。これにより切羽の安定や地表面沈下対策、斜面の安定化等が図られる。当工法の設計にあたっては、規模は大きくない斜面の挙動に対し、補強部材のせん断力を必要抑止力としてその安定を保つという考え方が見受けられる。一方で、既往の研究や他の施工事例からは、補強部材は軸抵抗により効果を発揮する場合も見受けられ、トンネル掘削によるゆるみを抑制し、地山が一体化するという作用機構が示されている場合がある。また、垂直縫地工法が対象とする軟岩や土砂系の地山においては、天端の安定化を目的として、掘削に先立ち切羽前方のアーチ天端部に鋼管等を打設する先受け工法が単独または垂直縫地工法と併用して用いられる場合もある。しかし、両工法間の補強効果や地山挙動への影響に関する同一条件下での比較は限定的であると考えられる。以上のように垂直縫地に関しては、設計に対する考え方が様々であることから、設計手法が確立されているとは言い難い。

本研究では、垂直縫地工法と先受け工法といった掘削時の地山補強を目的とした補助工法の選定手法に関する研究を行うことにより、当工法の力学的なメカニズムに関する考察を様々な観点からの検討を通じ、補助工法の定量的で合理的な設計手法の提案のための検討を行った。具体的には、室内模型実験により、垂直縫地の適用による地山の基礎的な実挙動の変化を検討するとともに、先受け工法を模した実験を行い、補強のメカニズムに関する検討を行った。また、数値解析による垂直縫地を適用する場合の基本的なメカニズムの再現について検討を行った。さらに、現場における現地計測を行い、これらの結果をもとに数値解析により実施工での適用やトンネル構造に与える影響に関する検討を行い、補強効果や地山挙動への影響について現象的な解明を試みた。

2. 研究手法

2.1 室内模型実験

模型実験では、図-1 に示すような装置を用い、土槽底部に荷重計を設置し、脚部に作用する土圧を計測した。また、地山材料には、砂質地山を模擬できることなどから表-1 に示す諸元のアルミ棒積層体を使用した（以下、アルミ棒地山と称する）。さらに、垂直縫地の模擬には、曲げ剛性や軸力、地山材料との摩擦等を考慮し図-2 に示す直径 3mm の球が連結したボールチェーンを補強材として使用した。一方、本検討では比較のために先受け工法の検討も併せて行うこととし、先受けの模擬として、二次元実験において地山の自然な変形挙動を阻害せずに地山の改良効果を再現するため、図-3 に示すようにアルミ棒よりも内部摩擦角が大きい材料である竹串を養生テープで巻き、厚さを 8mm、補強範囲をトンネル中心から 120° としたものを補強材として使用した。

トンネル掘削の模擬に関しては、アクリル製のトンネル模型にテフロンシート（厚さ 0.2mm を 5 枚、0.3mm を 17 枚）を巻き付け、合計で幅 100mm、高さ 100mm、奥行き 100mm とした。最初に実験土槽にトンネル装置と補強材を配置し、地山材料をトンネル軸線と平行になるように所定の土被りまで敷き詰めた。次に補強材の固定を外し、地表面や地山内の挙動を確認するため地山材料の端面を着色した標点を地表面およびトンネル中心から左右に各 180mm の幅で 20mm 間隔の格子状に地表面まで設置した。実験ではテフロンシートを一枚毎に引き抜くことで、トンネル掘削による内空変位を模擬した。また、シートを一枚引き抜く毎に模型地山の断面を撮影し、その画像を解析し各標点の変位量を計測した。表-2 に実験ケースを示す。表中における D はトンネル幅（=100mm）である。実験ケースは、アルミ棒地山を用いて、補強をしないケース、垂直縫地工法を模擬したケース、先受け工法を模擬したケースの 3 ケースを各 2 回実施した。なお、垂直縫地工法のケースでは、チェーンの打設幅を $2.1D$ 、打設間隔を 15mm とした。

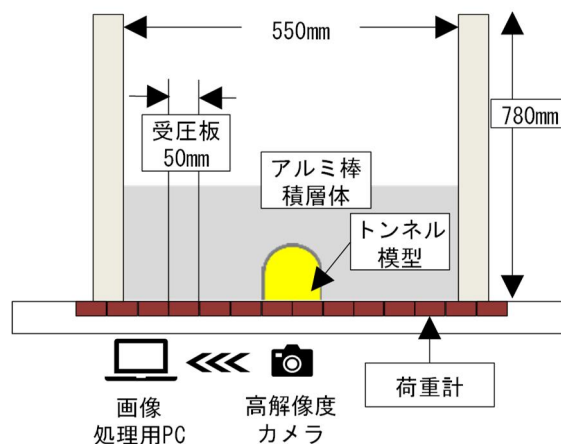


図-1 模型実験装置概要

表-1 地山材料概要

材質	アルミ合金
長さ [mm]	100
径 [mm]	1.6 : 3.0
重量混合比	3 : 2
単位体積重量 [kN/m ³]	21.4
内部摩擦角 [°]	30
粘着力 [kN/m ²]	0

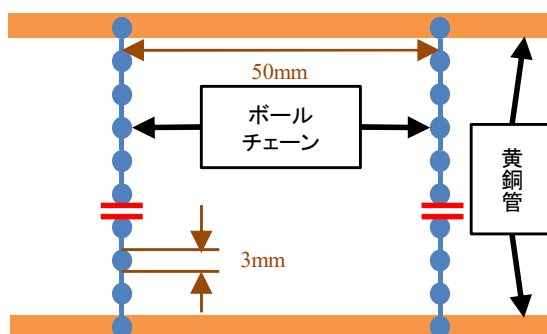


図-2 垂直縫地補強材のモデル図

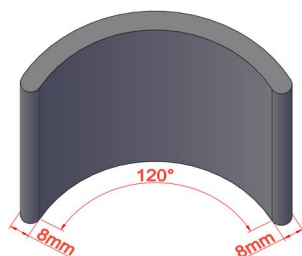


図-3 先受け工補強材のモデル図

表-2 実験ケース

ケース名	地山材料	土被り	適用工法
A	アルミ棒	1.0D	補強なし
B			垂直縫地工法
C			先受け工法

2.2 数値解析

補助工法の効果の再現にあたっては、実際には掘削の進行に伴う影響を加味できることが望ましい。本研究では、大変形挙動を再現できる3次元有限差分法（解析コード：FLAC3D）による数値解析を主に実施し、比較としてこれまで実施されることが多い2次元数値解析による結果と

の比較を行った。

図-4 に 3 次元解析モデルのイメージを示す。なお、本解析では垂直縫地に関する検討を対象とすることとした。図-5 に垂直縫地の打設条件、表-3 に解析物性値を示す。地山等級は、坑口部を想定して E 等級とし、地山のモデル化はモール・クーロンの破壊規準を用いた弾塑性体とし、内部摩擦角を 30 度、粘着力を 20kPa とした。また、土被りは坑口部を念頭に置くことから 1D (D=掘削幅, 11.3m) と仮定した。トンネルは、高速道路の二車線断面の標準坑口パターンを参考とし、補助ベンチ付き全断面工法による掘削を模擬した。トンネル支保工は、ロックボルトはモデル化せず、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の合成部材として Shell 要素によりモデル化した。ボルトは Beam 要素によりモデル化し、D32 の鉄筋相当の物性を設定した。なお、トンネル縦断方向の地山全域にボルトを等間隔に打設した。

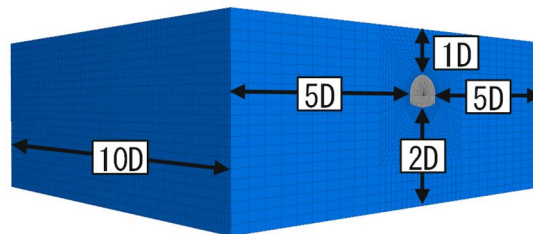


図-4 3次元解析モデル

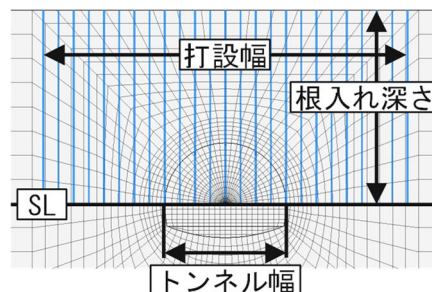


図-5 垂直縫地の打設条件

表-3 解析物性値

モデル	構造要素	弾性係数 [MPa]	ポアソン比
地山	solid	5.00×10	0.4
垂直縫地ボルト	beam	2.05×10^5	0.3
トンネル支保工	shell	8.90×10^3	0.2
インバート	shell	4.00×10^3	0.2

続いて、2次元解析では、地山の奥行き方向を1mの1要素で作成した。ボルトの断面積と断面二次モーメントは単位奥行きあたりの剛性に変換し、その他の土被り、解析領域、境界条件、トンネル形状、物性値等の条件は3次元と同様に設定した。2次元解析では3次元解析における切羽の進行を再現するため、図-6に示すように解析ステップを分けて実行した。本研究では、掘削時に応力解放率 α を設定しており、上半掘削、下半掘削、インバート掘削で同一の応力解放率を設定した。解析ケースは、3次元解析をボルト無とボルト有の2ケース、2次元解析をボルト無とボルト有、それぞれで応力解放率 α を10ずつ変化させた10~60%のケースを実施した。ボルトの打設条件は、1m²あたりのボルトの本数（打設密度）を0.3本/m²、横断面に対してボルトを挿入する範囲（打設幅）を3.0D、ボルトを挿入する地表面からの深さ（根入れ深さ）をSLまでとした。

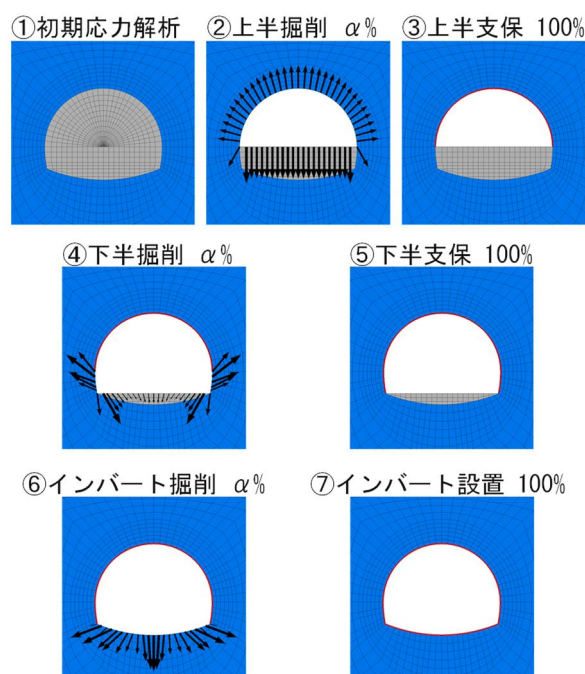


図-6 応力解放ステップ

2.3 現地計測と再現解析

斜面安定対策として坑口部に垂直縫地が適用された山岳トンネルの施工現場において、坑内変位および地表面変位の計測を実施した。図-7に対象区間の地質縦断図、図-8に垂直縫地と計測点の配置図を示す。

計測対象は、道路トンネルのⅡ期線であり、供用中のⅠ期線とのトンネル中心の最小離隔距離は約25mである。対象区間の地山は砂岩と泥岩から構成され、Ⅰ期線に沿うように断層が分布していた。また、坑口部は急崖を成し、表層部において段差地形が確認された。これらの状況から、Ⅱ期線トンネルの掘削による地すべり挙動の誘発およびⅠ期線トンネルへの影響を低減するため、垂直縫地工法が適用された。図-8に示すように、垂直縫地ボルトは、トンネル掘削幅外に192本

の D51 が想定すべり面より 5.0m 以上の深度まで打設され、掘削幅上部には 123 本の D22 が深度 3.0m まで打設された。打設間隔は縦横 1.5m である。

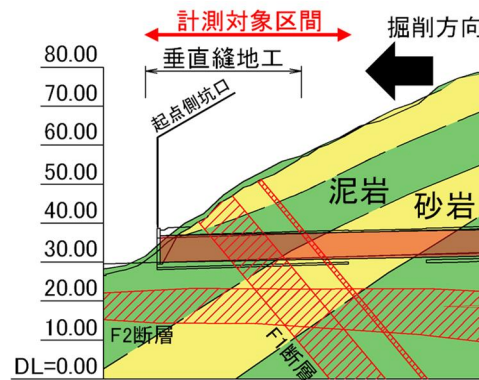


図-7 地質縦断図

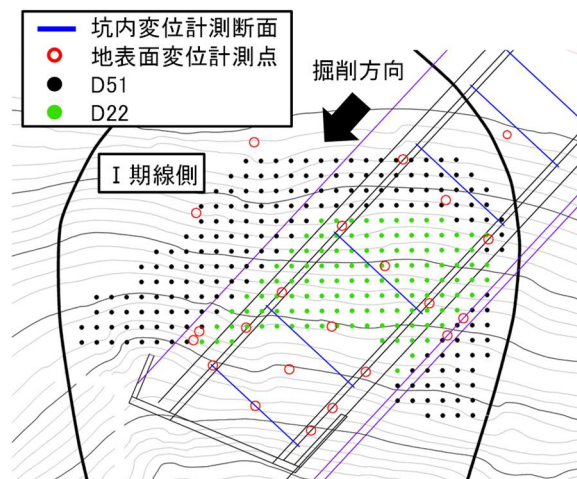


図-8 垂直縫地と計測点の配置図

また、現地計測結果に基づき、前項で述べた手法と同様の 3 次元有限差分法によりトンネル挙動を再現することを試みた。図-9 に解析モデル、表-4 に解析物性値、表-5 に解析ケースを示す。地山モデルは、計測対象区間の地形を再現したうえで、十分な解析領域を確保するため、トンネル側面から 3D~10D (D はトンネル掘削幅 11.6m) の範囲に、対象区間の端部の地形を延長した仮想地山を設けて作成した。本検討では、垂直縫地工法を適用したトンネル掘削における、3 次元有限差分解析の妥当性を併せて検討するため、2 種類の地山条件 (G1, G2) で解析を行った。G1 は地山全体を同じ物性とした 1 層構造である。また、G2 には計測現場での地質試験の結果を反映しており、地表から深度 10m 程度までとそれ以深とで異なる物性を適用した 2 層構造としている。いずれのケースも、地山はモール・クーロンの破壊基準に基づく弾完全塑性体としてモデル化した。

なお，Ⅰ期線および断層はモデル化していない．トンネルの形状は，現場で採用された支保パターンDⅢa-2とし，支保工は，吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の合成部材としてShell要素によりモデル化した．縫地ボルトはBeam要素によりモデル化し，物性値はD22とD51のものを用いた．また，本検討で計測対象とした現場では，注入式長尺鋼管先受け工が施工されていた．本工法が施工時の地山挙動に与える影響は大きいと考え，先受けは鋼管のみをBeam要素によりモデル化した．地山条件の異なる2ケース（G1-VPB-FP，G2-VPB-FP）に加え，垂直縫地工法の影響を確認するため，G2地山モデルを用いて垂直縫地を施工しないケース（G2-FP）についても解析を行った．

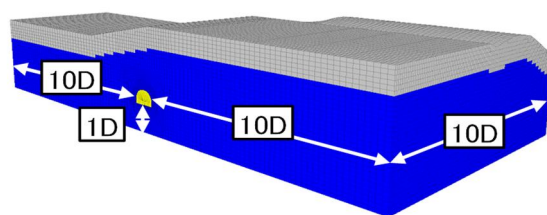


図-9 解析モデル（G2）

表-4 解析物性値

モデル	構造要素	弾性係数 [MPa]	ポアソン比
地山(G1)	Solid	1.50×10^2	0.35
地山(G2 上層)		2.00×10	0.4
地山(G2 下層)		2.00×10^2	0.35
トンネル支保工	Shell	1.03×10^7	0.2
垂直縫地ボルト	Beam	2.05×10^5	0.3
先受け鋼管		2.05×10^5	0.3

表-5 解析ケース

ケース名	地山	垂直縫地	先受け
G1-VPB-FP	1層	○	○
G2-VPB-FP	2層	○	○
G2-FP		×	○

3. 研究結果

3.1 室内模型実験結果

図-10 に地山内変位ベクトル図を示す。補強をしないケース A では、トンネル直上部からトンネル側方部の広範囲に地山内変位量の大きい範囲が広がった。また、地山全体を通して変位分布にばらつきが見られた。垂直縫地を模擬したケース B では、トンネル直上部の変位が広い範囲に均一に分布し、トンネル側方部でも変位分布が均一化された。また、トンネル直上部とトンネル側方部の変位が同程度となった。先受けを模擬したケース C では、トンネル直上部の変位分布が均一化された。

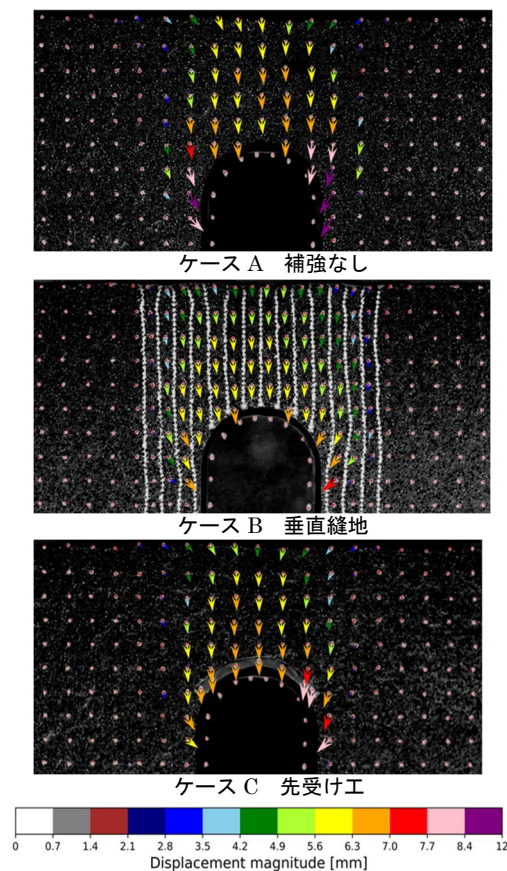


図-10 地山内変位ベクトル図

図-11 に地山内最大せん断ひずみ分布図を示す。ケース A では、トンネル側方に大きな最大せん断ひずみが集中し、そこからトンネル上部へと最大せん断ひずみが広がり、トンネル上部を包括するような分布となった。また、ケース B では、トンネル側方に大きな最大せん断ひずみが集中し、そこから最大せん断ひずみが鉛直上方向に広がる分布となるとともに、トンネル上部の地表面付近における最大せん断ひずみが抑制された。さらに、ケース C では、ケース A と同様の最大せん断ひずみの分布となったものの、トンネル天端部付近に発生するひずみの広がりが抑制さ

れた。

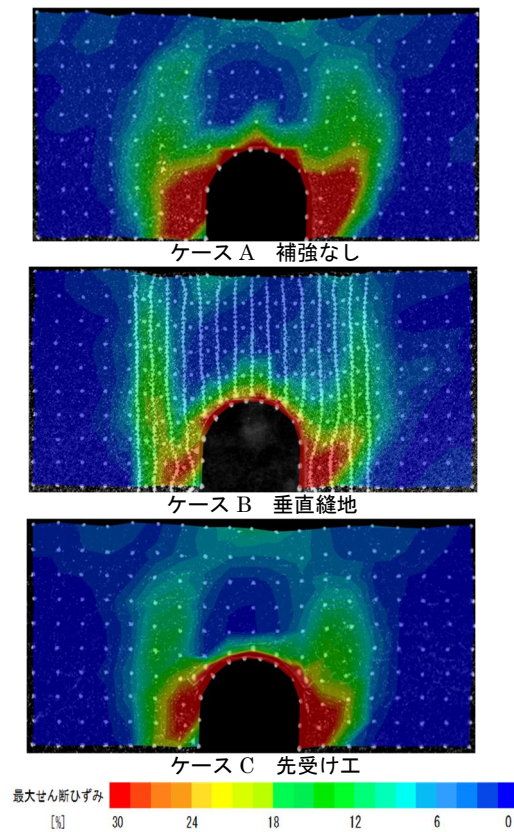


図-11 地山内最大せん断ひずみ分布図

以上より本研究で行った垂直縫地と先受け工法を模擬した実験では、垂直縫地に対してはトンネル上部の地山全体に、また、先受け工法に対してトンネル直上部が補強されたことによりトンネル天端部付近に補強効果が現れたといえる。したがって、両工法の補強に関するメカニズムに関して一定程度再現できたと考えられる。また、今回採用した模擬方法により、アルミ棒地山における垂直縫地工法と先受け工法について、変位分布を均一化する範囲、最大せん断ひずみの分布およびその抑制箇所の違いが見られた。そのため、両工法の補強範囲の違いを実験的に再現できたと考えられる。

3.2 数値解析結果

図-12 に天端沈下量、水平内空変位量、地表面沈下量とそれぞれ着目した断面の切羽までの距離との関係を示す。縦軸が各変位量、横軸が切羽からの距離を示している。なお、ここに示す各変位量と切羽までの距離の関係は、実施工では計測できない先行変位と掘削から支保設置までの変位も含まれており、実施工データとは解釈が異なる点に留意する必要がある。また、3次元解析では単位掘削長を1mとし、上半切羽から1m後方で上半の支保建込み、3m後方で下半掘削、4m後方で下半の支保建込み、36m後方でインバート掘削、37m後方でインバート設置を行う。その

ため、2次元解析の結果と切羽からの距離の関係は、②上半掘削による変位を 1m、③上半支保建込み後の変位を 3m、④下半掘削による変位を 4m、⑤下半支保建込み後の変位を 36m、⑥インバート掘削による変位を 37m、⑦インバート設置後の変位を最終変位として切羽からの距離 56m の位置にプロットしている。ボルト無のケースでは、応力解放率が大きいほど生じる変位が大きくなり、3次元解析との比較が難しくなるため、一部の応力解放率の結果をグラフに示していない。

ボルト無の最終変位に着目すると、天端沈下量と地表面沈下量は応力解放率 30%で 3次元解析と近い結果が得られ、実務上考えられている値¹⁾と概ね一致していることが分かる。一方で、水平内空変位は応力解放率 10%で 3次元解析よりも大きな変位が生じた。またボルト有のケースでは、天端沈下量と地表面沈下量は応力解放率 50~60%、水平内空変位は 10%で 3次元解析と近い結果が得られた。

天端沈下量と地表面沈下量の結果では 3次元解析と近い値が得られる応力解放率に、ボルト無とボルト有で大きな差があることが分かる。これはボルトを打設することで、地山全体の見かけの物性が変化するためであると考えられ、垂直縫地を適用した 2次元解析を行う際には留意する必要がある。また、ボルトの有無に関わらず、天端沈下量および地表面沈下量と水平内空変位では 3次元解析と近い結果が得られる応力解放率が異なっている。また、切羽の進行と変位量の関係について、3次元解析で天端沈下量と地表面沈下量は上半切羽の後方 30m 程度で最終変位の大部分の変位が生じるのに対し、2次元解析では下半掘削後に生じるなど、切羽の進行に伴う変位量を再現できていない。これらの要因としては各掘削段階で同一の応力解放率としていることや各支保工設置後の応力解放率をつねに 100%としていること、加背割りの考え方等が原因でトンネル周辺の応力変化を再現できていないためと考えられる。例えば、3次元解析では支保工設置から次の掘削までに変位が収束していないため、支保工設置後の応力解放率が 100%にならないなど、3次元挙動を把握するためには解放率の考え方等を再検討する必要がある。

以上より、垂直縫地工法を適用したトンネル掘削を再現した 2次元数値解析は、応力解放率の評価によっては、3次元数値解析と近い結果が得られることが分かった。垂直縫地工法を適用した場合に 3次元解析と近い値が得られる応力解放率は、垂直縫地が無い場合よりも大きくなり、垂直縫地工法による地山の一体化にともなう掘削時の応力解放が大きく評価される可能性があることが分かった。今後は、多くの結果が一致する手法の検討とともに、垂直縫地工法の適用などで地山の多くの性状が変わると考えられる場合の応力解放率の設定方法などの検討が必要である。

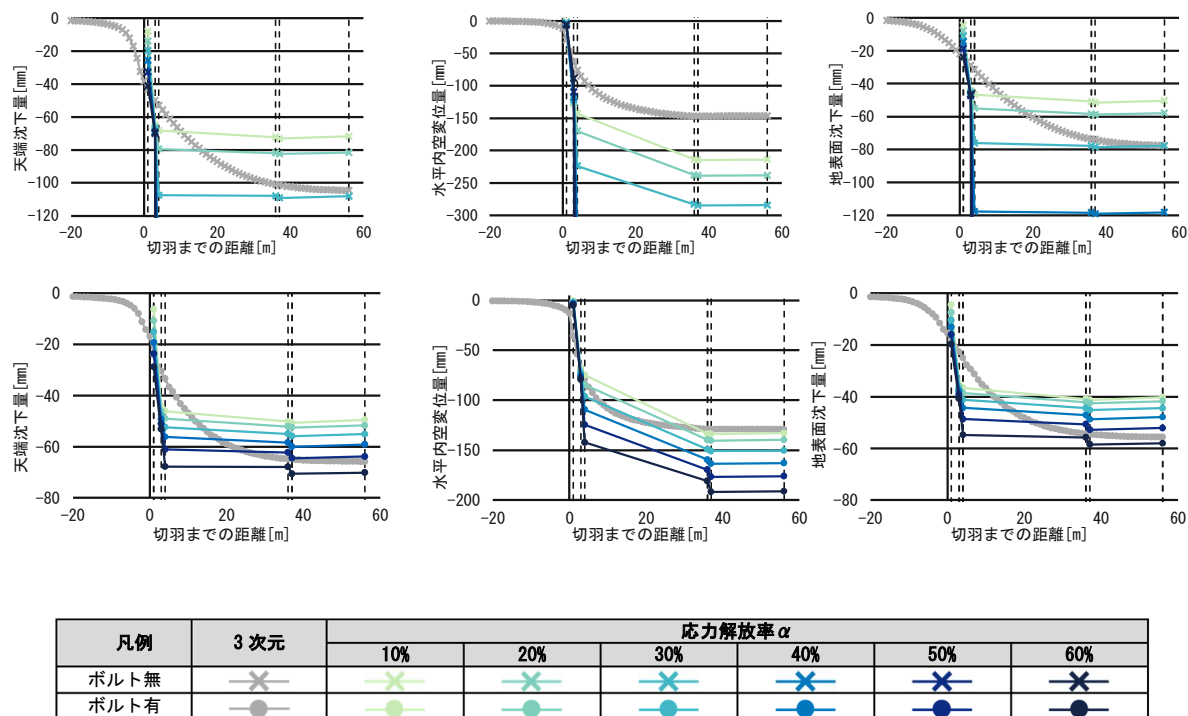


図-12 3次元解析と2次元解析の各応力解放率の変位量

3.3 現地計測と再現解析結果

図-13に天端・脚部沈下と切羽進行の関係を計測とG1-VPB-FP (G1と略記), G2-VPB-FP (G2と略記)との比較で示す。図-13から, G1およびG2のいずれのケースにおいても, 切羽到達によって大きく沈下が生じ, その後, 切羽離れが大きくなるにつれて, 沈下の増分は小さくなる傾向を示した。同様の傾向は計測においても見られ, 切羽進行に伴う変位挙動を数値解析において概ね再現できていると考えられる。G1では上半および下半の右測点で比較的計測と近い沈下量となっている。また, G2では上下半の右測点だけでなく, 天端についても計測と近い沈下量である。

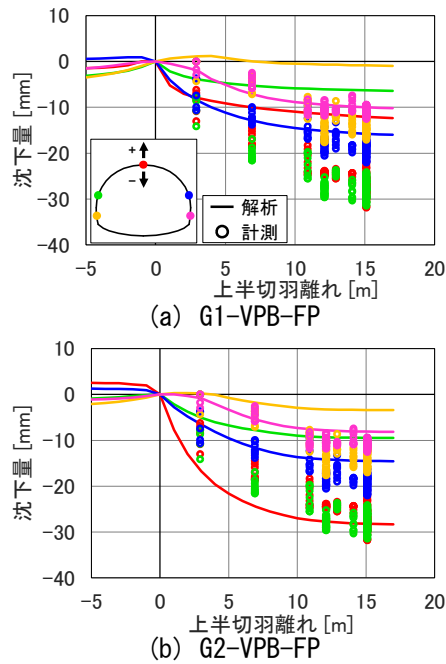


図-13 天端・脚部沈下の比較

図-14 に地表面沈下と切羽進行の関係を計測と G1, G2 との比較で示す. G1 では各点の沈下量が同程度であり, 計測とは大きな差がある. G2 では G1 よりも各点の沈下量が増加し, より計測と近い値となる. また, G2 ではトンネル中心で最も沈下が生じ, トンネル中心から離れるほど沈下量は小さくなっており, これは計測においても見られる地表面の変位挙動である. 変位の絶対量および分布の結果から, G2 の方が実際の地山挙動を捉えることができていると考えられる.

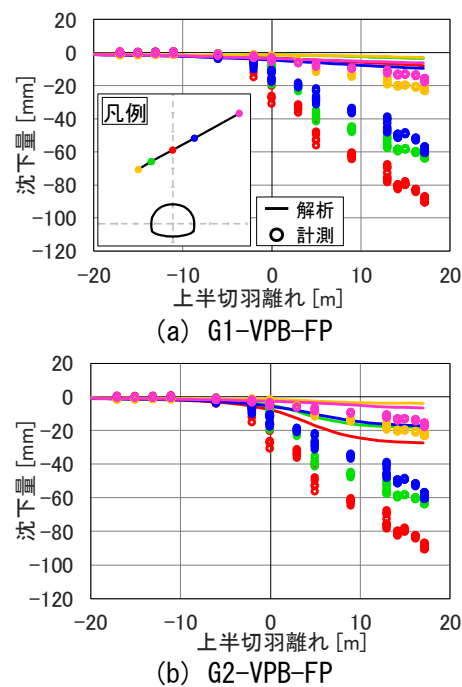


図-14 地表面沈下の比較

計測と G1, G2 の比較から, G2 の方が計測における変位挙動を再現できていると考えられたため, G2 の地山モデルを用いて垂直縫地の影響を検討した. 図-15 に G2-VPB-FP と G2-FP の天端・脚部沈下の結果を示す. 垂直縫地の有無でトンネルの変形に顕著な違いは見られない. 図-16 に G2-VPB-FP と G2-FP の地表面沈下分布を示す. 図から, トンネル中心では垂直縫地を打設した場合の沈下量の方が大きい, その他の測点においては, 垂直縫地を打設しない場合よりも沈下量が低減されていることがわかる. これらのことから, 本検討で計測を行った現場における垂直縫地の打設条件では, トンネルの内空変位よりも, 掘削幅外の地表面沈下を低減する傾向を示し, 地山の変位の分布に影響を与えた可能性が考えられる. I 期線トンネルは II 期線トンネルの中心から約 25m の位置にあることから, この結果は垂直縫地が既設トンネル周辺地盤の変位抑制に寄与した可能性を示唆するものである. また, I 期線において実施された内空変位計測においても, II 期線トンネル掘削に伴う影響は小さかったことが報告されている. 以上より, 垂直縫地の適用は I 期線トンネルへの影響低減に寄与したと考えられるが, その寄与の程度については地山が有するばらつきや, 掘削進行にともなう変形メカニズムを含め, 今後さらなる検討が必要である.

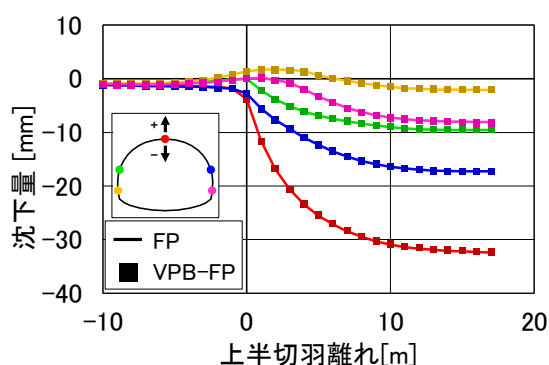


図-15 天端・脚部沈下

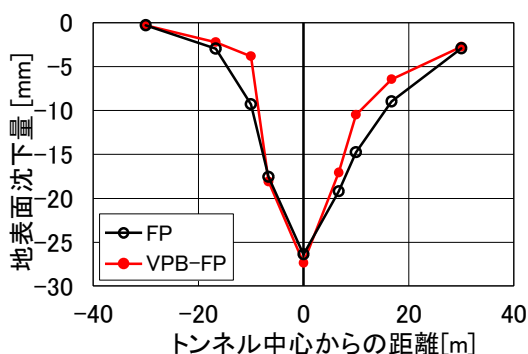


図-16 地表面沈下分布

以上より, 垂直縫地工法が適用されたトンネル施工現場において現地計測を行い, 計測で得られた地山等の挙動を数値解析により再現することを試みた. その結果, 垂直縫地を適用したトン

ネル掘削を再現した 3 次元有限差分解析では、実際の施工における地形やトンネル形状、支保パターン、3 次元的な掘削過程を再現することで、複雑な地山条件においてもトンネル掘削による地山の挙動を一定程度の精度で再現できることがわかった。さらに、現場の地質条件等、より詳細な条件についても適切に解析モデルに反映することで精度が向上し、トンネル掘削による地山の挙動を力学的なメカニズムから検討できる可能性があると考えられた。今後は、異なる地山条件および施工条件下の複数現場における現地計測などを行い、本数値解析の精度向上および結果の再現性や 2 次元解析との比較などの検証が必要である。

4. おわりに

本研究では、掘削時の地山補強を目的とした補助工法の選定手法に資する目的で、主として垂直縫地工法を題材に力学的なメカニズムに関する考察を様々な観点からの検討を通じて実施し、合理的な設計手法の提案のための検討を行った。具体的には、室内模型実験、数値解析および現地計測とその再現解析をもとに現象の解明を試みた。得られた結果については以下のとおりである。

1) 垂直縫地と汎用的に採用される先受けを模擬した室内模型実験を通じて、地山に対する補強効果に関してその差異を再現できる可能性があることを示した。

2) 3次元数値解析による現象の再現をもとに、応力解放率の評価によってそれと近い結果が得られることを示した。

3) 垂直縫地工法が適用されたトンネル施工現場における現地計測とその再現解析から地形やトンネル形状、支保パターン、3次元的な掘削過程を再現することで、複雑な地山条件においてもトンネル掘削による地山の挙動を一定程度の精度で再現できることがわかった。

また、本検討を通じて明らかとなった課題については以下のとおりである。

1) 室内模型実験については、簡易なモデル化で代表的な補助工法のメカニズムの再現が可能になりうることを示したが、支保工の挙動に及ぼす影響や、掘削や切羽進行の影響などを加味するなど、挙動に大きく影響を及ぼすと考えられる事象に対する検討の深度化が必要である。

2) 上述でも示したように、特に垂直縫地や先受けに関しては実際の補強効果の発揮を考えるためには掘削進行のメカニズムを考慮することでより合理的な設計が可能になると考えられる。近年では補助ベンチ付き全断面工法を採用する事例が増えてきているが、この場合のベンチ長の影響なども経験に基づいて決定される場合も多い。また、補助工法によって支保の設計に影響があると考えられるが、その点も未解明であることから、緩み領域やアーチ効果の発現と併せて検討を行う必要がある。

3) 垂直縫地が適用されている現場は必ずしも多いとはいえないが、近年は斜面对策など、本来のトンネル掘削に付随させた効果を期待する場面が増えていると考えられる。現場の条件が種々に渡ることから、必ずしも同一の物性での比較が出来るとは限らないが、地中変位や支保工応力に関する検討など、設計に関する観点からの分析が必要である。

本報告書の内容に関する参考文献

- ・垂直縫地における 2 次元数値解析の適用性の検討：田村夏海，舘林祐人，河田皓介，砂金伸治，土木学会令和 6 年度全国大会第 79 回年次学術講演会，2024.9
- ・垂直縫地工法を適用したトンネル坑口部における現地計測と 3 次元数値解析：田村夏海，高山雄矢，河田皓介，砂金伸治，熊谷幸樹，土木学会令和 8 年度全国大会第 81 回年次学術講演会，投稿中
- ・垂直縫地工法と先受け工法の補強効果の違いに関する基礎的考察：高山雄矢，田村夏海，河田皓介，砂金伸治，土木学会令和 8 年度全国大会第 81 回年次学術講演会，投稿中