

垂直縫地の力学的挙動に基づく現場適用性に関する実験的考察

東京都立大学 学生会員 ○ 舘林祐人 雨宮智久

東京都立大学 正会員 河田皓介 砂金伸治 西村和夫

西日本高速道路総合サービス沖縄株式会社 正会員 城間博通

1. はじめに

グラウンドアーチの形成が難しいトンネル坑口部や土被りが小さい箇所では、トンネル周辺地山が不安定となり、地表面沈下や斜面の不安定化が生じ易い。このような場所にトンネルの補助工法として、地表面から鉄筋等を垂直に挿入定着する垂直縫地工法が用いられる場合がある。垂直縫地工法は、これまでの施工実績から、トンネル掘削で誘発されるすべり面に対するせん断抵抗力の増加や、地表面沈下の抑制、トンネルに作用する土圧の軽減など効果があると現場計測や模型実験等から確認されている。しかし、設計法としては類似の施工事例による経験的方法が主であり、定量的な設計手法が確立されているとは言い難いのが現状である。そこで本研究では、垂直縫地工法を適用するトンネルの掘削過程を模擬した室内小型模型実験を実施し、縫地の打設範囲に着目し、地山等の補強効果の差異と力学的挙動の検討、そしてその結果に基づいた現場への適用性に関する検討を行った。

2. 研究手法

模型実験では、図1に示す装置を用いた。土槽底部には50mm毎に荷重計を設置しており、区間毎に分けられた部分の土圧を計測することができる。模型地山には、物性の変化がなく再現性が高いことや一般の砂の内部摩擦角に近いことなどから表1に示す諸元のアルミ棒積層体を使用した。補強材には、曲げ剛性や軸力、地山材料のアルミ棒積層体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使用した。トンネル掘削を模擬する（以降、トンネル装置と称する）装置には、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。

最初に装置にトンネル装置と補強材を配置し、地山材料であるアルミ棒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、地表面沈下量や地山内の挙動を画像解析により確認するため、アルミ棒の端部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200mmの幅で20mm間隔の格子状に地表面まで設置した。テフロンシートを一枚毎引き抜くことで、トンネル掘削による内空変位を模擬した。実験ではシートを一枚引き抜く毎にトンネル直下の土槽底部に作用する荷重（以降、トンネル作用荷重と称する）の計測と模型地山の断面を撮影し、地山内変位と地表面沈下量を計測した。表2に実験ケースを示す。表中のDはトンネル掘削径(=100mm)である。実験ケースは補強なしと打設間隔を15mmと一定にし打設幅2.1D、0.9Dの範囲と2.1Dの範囲で打設はするものの、トンネル直上部分には補強材を設置しないケースとした。

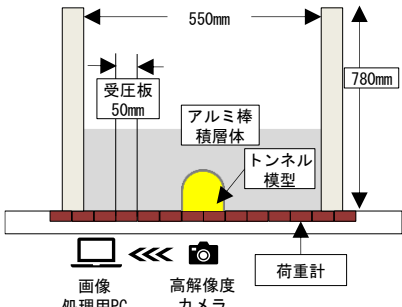


図1 模型実験装置概要

表1 模型地山材料概要

材質	アルミ合金
長さ (mm)	100
直径 (mm)	1.6 : 3.0
重量比	3 : 2
単位体積重量 (kN/m³)	21.4
粘着力 (N/mm²)	0
内部摩擦角 (°)	30

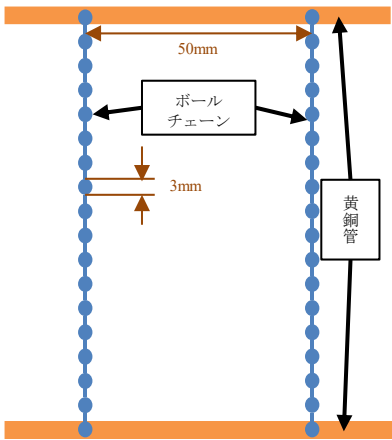


図2 補強材モデル図

表2 実験ケース

	土被り	打設幅	打設間隔
A	1D	補強なし	
B		2.1D	15mm
C		0.9D	
D		2.1Dのトンネル上なし	

キーワード 山岳トンネル, 補助工法, 垂直縫地工法, 室内小型模型実験

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 TEL 042-677-2785

3. 研究結果

図3に、内空変位率とトンネル作用荷重比の関係を示す。ここで縦軸に示したトンネル作用荷重比とは、各内空変位の発生時における地山の部分を計測したトンネル作用荷重を初期荷重で除したトンネル作用荷重比、横軸に内空変位をトンネル幅で除することで無次元化した値である。垂直縫地を広く適用したケースBでは、内空変位率の増加に従ってトンネル作用荷重比が減少していることが分かる。これは工法の適用により、トンネル上部の地山が一体化されることにより、地山の応力が安定的に側方へ再分配され、トンネルの地山の安定性が向上することを示唆していると考えられる。しかし、ボルトの打設間隔が狭く、トンネル上部にのみ打設したケースCやトンネルの上方を補強しないケースDは、打設しないケースAよりも作用荷重比が大きくなっている。このことから、打設範囲によってトンネル上部の地山の応力が安定的に側方へ再分配されず、トンネルに作用する荷重が大きいままの状態であることが推測される。

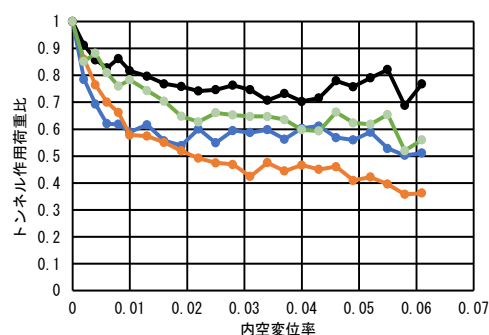
図4に地山内の断面の最大せん断ひずみの分布図を示す。ケースBでは、補強によりせん断ひずみがトンネル側方から鉛直方向へひずみが大きい箇所の変化し、トンネル上部のせん断ひずみが小さくなっている。このことから、地山が一体となって挙動することにより地山の变形が抑制されていることが推測される。また、ケースCでは、打設範囲より外側にひずみの大きい箇所が存在するが、地山の中において、トンネルに荷重が作用しやすいトンネル直上の箇所のひずみを抑制している。しかし、ケースDは、ケースAと比較して側方のせん断ひずみは抑制されているものの、ケースBやケースCに比べてトンネル上部の地表面付近にせん断ひずみの大きい箇所が存在している。

図5に地山内の変位ベクトル図を示す。ケースBでは、トンネルから地表面にかけての変位量の分布が一様になっている。補強により、周辺地山を一体化させ、地山が安定的な挙動を示すことでトンネルの地山の安定性の向上につながるという。一方でケースCでは、変位分布が一様な部分は存在しているものの、ケースBと比較するとその部分が少なくなっている。一方で、ケースDは、トンネル上部の変位量が一様になっていないことから、上部の地山を一体化させる効果が見込めない可能性があることが考えられる。

4. 結論および今後の課題

垂直縫地をトンネル上部のみに縫地を打設した場合、掘削により影響を受けるトンネル上部の地山に対する一体化の効果を確認できた。また、トンネル上部の地山の応力を安定的に再配分し、トンネルの安定性を向上させるにはトンネル側方のボルトも同時に必要となることが実験的に明らかとなった。その適切な幅の設定は地山の条件に応じて異なることが推測され、現場への適用にあたって重要であると考えられる。

今後は、垂直縫地工法の設計手法の確立において、各地山条件が変化した場合の打設条件の提案に加え、現地計測等のデータを踏まえた比較等、種々の検討が必要である。



	土被り	打設幅	打設間隔
A	●	補強なし	
B	●	2.1D	15mm
C	●	0.9D	15mm
D	●	2.1Dのトンネル上なし	15mm

図3 トンネル作用荷重比

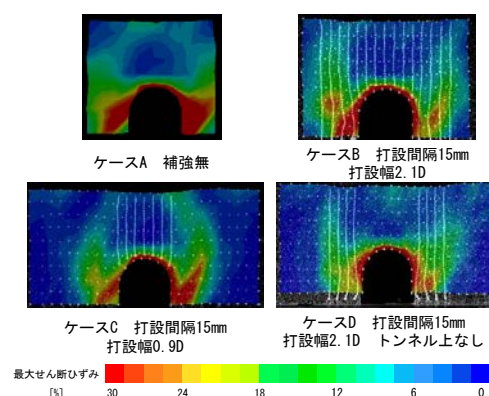


図4 地山内最大せん断ひずみ分布図

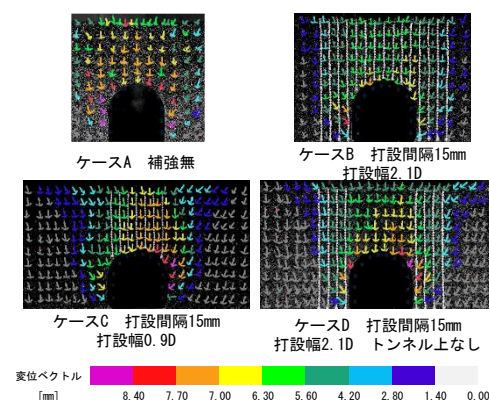


図5 地山内変位ベクトル図