

垂直縫地工法の力学的効果と適用性に関する実験的研究

東京都立大学 ○永田 哲也 雨宮 智久
砂金 伸治 西村 和夫
西日本高速道路株式会社 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、トンネル上方の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、地表面沈下の抑制、トンネルに作用する土圧の軽減に加え、トンネル掘削で誘発される地滑りに対するせん断抵抗力の増加に対しても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。そこで本研究では、垂直縫地工法を適用したトンネル掘削を模擬した室内小型模型実験を実施し、補強の規模といった工法の条件や、土被りや斜面角度といった地山の条件に着目し、補強効果の差異と力学的効果の検討とともに、その適用性に関する考察を行った。

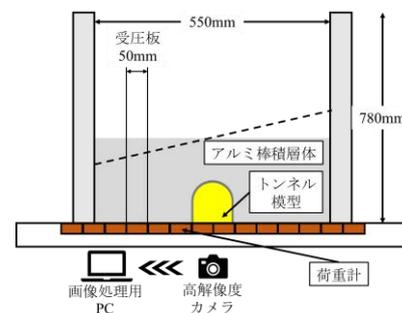


図-1 模型実験装置概要

表-1 模擬地山の諸元

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/m ³)	21.4
粘着力 (N/mm ²)	0
内部摩擦角 (°)	30

2. 実験装置および実験材料

模型実験では図-1 に示す装置を用いた。土槽底部には 50mm 毎に荷重計が設置されており、それぞれ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、地山材料である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。また、実際の写真を写真-1 に示す。

トンネル装置には、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、厚さ 0.3mm を 17 枚) を巻き付け、幅 100mm、高さ 100mm、奥行き 100mm とした。

3. 実験方法

最初に、実験槽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確認するため、アルミ棒の端部を黒に着色した標点を地表面、およびトンネル中心から左右に 200mm の幅で 20mm 間隔の格子状に地表面まで設置した。そして、トンネル模型の周りに巻き付けたテフロンシートを一枚毎引き抜いていき、内空変位が生じる場合のトンネル掘削を模擬した。実験ではシートを一枚引き抜く毎に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、模型地山断面を撮影し、地山内変位と地表面沈下量を計測した。また、表-2 に実験ケースを示す。表中における補強有は、補強幅 2.1D、補強間隔 15mm において実施したケースである。(D : トンネル幅=100mm)

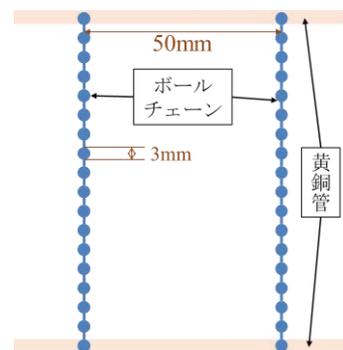


図-2 補強材モデル図



写真-1 補強材

キーワード トンネル, 補助工法, 垂直縫地工法, 地山挙動

連絡先 〒192-0364 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域

4. 実験結果

土被りの違いによる補強効果として、図-3, 4 に内空変位率（内空変位をトンネル幅で除した値）と作用荷重比（各内空変位時におけるトンネル作用荷重を初期荷重で除した値）の関係、およびトンネル中心からの距離と最終地表面沈下量との関係をそれぞれ示す。図-3 より、土被り 1.0D, 1.5D のケースは無補強では内空変位の増加に従って、一度トンネル作用荷重が減少した後、増加に転じているが、土被り 2.0D のケースと各土被りの有補強のケースでは、増加に転じず、減少し続けていることがわかる。ゆえに、垂直縫地ボルトは土被り 1.5D 以下の地山においてトンネル作用荷重を減少させる効果

が考えられる。図-4 より最大地表面沈下量は土被り 1.0D~2.0D では、与えた内空変位である 6.0mm と同等の沈下量であることがわかる。また、補強により地表面沈下勾配の減少が考えられるが、土被り 1.0~2.0D では、いずれの土被りにおいても地表面沈下勾配の減少効果がある、ということが考えられる。ゆえに、本実験で実施した、土被り 1.0D~2.0D の条件では、補強による最大地表面沈下量に大きな影響はなかったが、地表面沈下勾配は補強により減少させる効果が考えられる。

斜面角度の違いによる補強効果として、図-5, 6 に内空変位率と作用荷重比の関係、およびトンネル中心からの距離と最終地表面沈下量との関係をそれぞれ示す。図-5 より、地表面が斜面の場合であっても、水平地表面と同様にトンネル作用荷重を減少させる効果が考えられる。図-6 より、補強の有無に関わらず、それぞれの斜面角度において地表面沈下が始まる境界があることがわかる。また、その境界は斜面角度が増加するほど、トンネル中心へ近づくことがわかる。また、地表面沈下量は斜面角度が増加するほど増加することがわかる。補強の有無による地表面沈下量の変化は顕著に確認できないが、特にトンネル上部に着目すると、地表面沈下勾配が補強により小さくなっていることがわかる。これは、補強により地山が一体化して挙動しており、斜面角度を有する場合において、このような効果を期待する際の適用が考えられることを示している。

また、補強規模に関しては、土被り 1.0D, 水平地表面の条件において、補強間隔を小さくすることでトンネルに作用する荷重を減少させる効果が確認できたが、他の地山条件では明確な補強規模の違いによる補強効果の違いは確認できなかった。

5. まとめ

本研究では、垂直縫地ボルトの補強幅、補強間隔といった補強の規模や、土被り、斜面角度といった地山条件によって、地表面への影響や地山内部の影響が異なることがわかった。いずれの実験条件においても、補強によって、地山が連続的に挙動すると帰着できる可能性があることを確認した。しかし、一部の実験では、補強による効果が発現しているとは言い難い場合があったことも確認できたため、さらなる再現性の確認や、地山条件に応じた補強方法を提案するために、数値解析を用いた検証も必要である。

表-2 実験ケース

ケース名	土被り	斜面角度	補強	
A	1.0D	水平	無	
B			有	
C			無	
D	有			
E	2.0D		7.5度	無
F				有
G	1.0D	15度		無
H				有
I				無
J	22.5度	22.5度		有
K			無	
L			有	

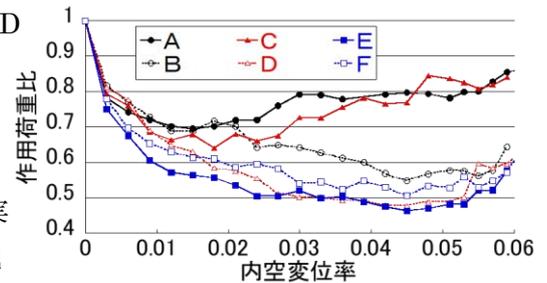


図-3 トンネル作用荷重比(土被りの影響)

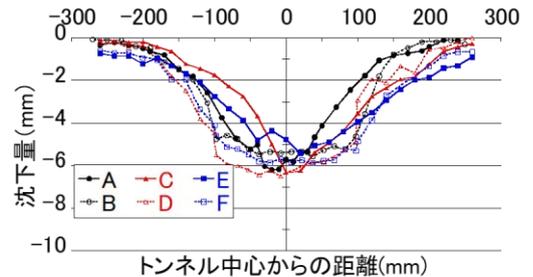


図-4 最終地表面沈下量(土被りの影響)

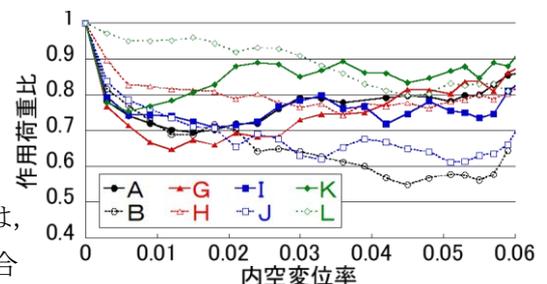


図-5 トンネル作用荷重比(斜面の影響)

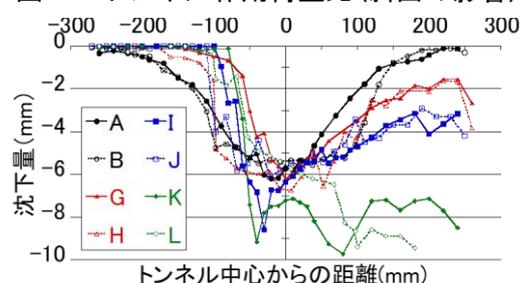


図-6 最終地表面沈下量(斜面の影響)