

垂直縫地の力学的挙動に関する解析的考察

東京都立大学 学生会員 ○雨宮智久 永田哲也
正会員 砂金伸治 河田皓介

1. はじめに

NATM のトンネル施工において安全性や効率性の向上を図るために、補助工法が採用される場合がある。その一つである垂直縫地工法について、近年では本工法を斜面の安定効果を含めて採用する事例が散見されている。本研究では、斜面に対する補強効果の検討も含めた室内模型実験結果¹⁾の再現解析を行い、垂直縫地ボルトの打設間隔や幅、地表面の傾斜、ボルトの根入れ深さの違いから垂直縫地工法の力学的挙動について基礎的な考察を行った。

2. 解析方法

本研究では斜面の動的な挙動の検討への展開を考慮に入れ、FLAC3D を用いた有限差分法による数値解析を行った。図1に実験¹⁾を再現した解析モデルを示す。トンネル径 $D=100\text{mm}$ 、土被りは $1D$ 、斜面角度は 15 度とした。解析フローを図2に示す。模型実験ではアルミ棒積層体に22枚のテフロンシートを巻きつけたトンネル模型を設置し、シートを順次引き抜き地山に計約 6mm の内空変位を生じさせることでトンネルの掘削を模擬している。そのため解析においてもテフロンシートの厚み分となる計約 6mm の内空変位を与える解析を行った。解析に用いた物性値を表1に示す。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²⁾から得られた値を用いた。他のアルミ棒積層体の物性値は模型実験と同様の値を用いた。アルミ棒積層体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に剛性を仮定した。補強材として模型実験ではボールチェーンを用いたが、解析上では $\phi=3\text{mm}$ の鉄の棒としての物性値を用いた。表2に解析ケースについて地表面の傾斜の有無、補強の有無、打設幅、打設間隔、根入れ深さが異なる10ケースを示す。

3. 解析結果

地表面が水平であるモデル（以下、水平モデル）のテフロンシート引抜後における各ケースの地表面沈下量を図3に示す。初めに解析の再現性の検討として、実験と解析の補強無のケースの地表面沈下量を比較する。両ケースでトンネル上部の地表面沈下量が大きくなっており、グラフの概形も類似している。このことから実験結果に対し、解析結果は十分な再現性を有していることが確認できる。

補強の有無に関しては全ての補強ケースで沈下量の抑制効果がみられる。打設間隔の違いに関してはグラフの概形は類似しており補強効果が表れる範囲も等しいが、case2ではcase3に比べ最大沈下量が 1mm 程度小さく、

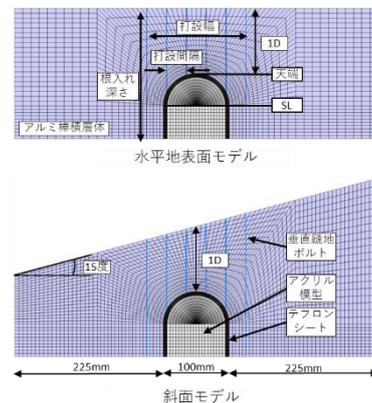


図1 解析モデル

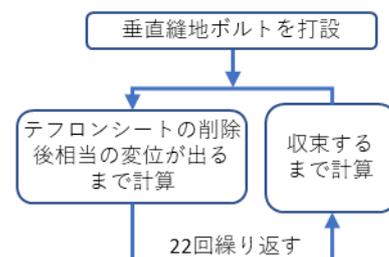


図2 解析フロー

表1 解析物性値

モデル	弾性係数 [MPa]	ポアソン比	内部摩擦角 [度]	粘着力 [kPa]
アルミ棒積層体	0.35	0.3	30	0
テフロンシート	0.35	0.3		
アクリル模型	0.35E5	0.3		
垂直縫地ボルト	2.05E5	0.3		

表2 解析ケース

No	地表傾斜	打設幅	打設間隔	根入れ深さ
case1	水平	補強無		
case2		1.5D	15mm	実験同様の打設
case3		1.5D	30mm	
case4		2.1D	15mm	
case5	斜面	補強無		
case6		1.5D	15mm	実験同様の打設
case7		1.5D	30mm	
case8		2.1D	15mm	
case9	水平	1.5D	15mm	
case10		1.5D	15mm	SL

キーワード 山岳トンネル, 補助工法, 垂直縫地工法, 数値解析

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 TEL042-677-2785

補強効果がより大きいと考えられる。また、補強効果の差はトンネル上部付近で大きくなっている。

打設幅の違いを比較するとトンネル上部の沈下量に対する補強効果に差が見られないが、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 $\pm 100\text{mm}$ 程度離れた位置で沈下量が 1mm 程度小さく、補強効果が大きいことが分かる。

地表面が斜面となっているモデル（以下、斜面モデル）のテフロンシート引抜後における各ケースの地表面沈下量を図4に示す。補強の有無から斜面の場合においても全ての補強ケースで沈下量の抑制効果がみられる。また、水平モデルと同様に、打設間隔の違いからはグラフ概形の類似、補強効果の大きさに違いが見られ、打設幅の違いからはトンネル上部の補強効果には差が見られず、トンネルから $\pm 100\text{mm}$ 程度離れた位置で補強効果に差が生じた。しかし水平モデルと比較すると打設間隔や打設幅の違いから生じる補強効果の差が小さいと考えられる。

根入れ深さが異なるケースのテフロンシート引抜後の地表面沈下量を図5に示す。根入れ深さの違いに関しては、補強効果が表れる範囲に差は見られないが、case10はcase9に比べ最大沈下量が 1mm 程度小さく、補強効果がより大きいと考えられる。また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。このことからトンネル掘削の変形を周辺地山が支えていると考えられ、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. 結論及び今後の課題

水平モデル、斜面モデルどちらにおいても、打設間隔を小さくすることでトンネル周辺の地山の補強効果を大きくでき、打設幅を広くすることでトンネルから離れた位置での補強効果を大きくすることが可能であることが分かった。地山の傾斜の有無に関わらず、垂直縫地ボルトの打設間隔と打設幅が補強効果に関係があると考えられる。一方、本解析結果から傾斜がある場合では打設間隔や打設幅の違いから生じる補強効果の差が傾斜のない場合に比較して明確に発現しているとはいい難かったことから、地山の物性も含めてさらなる検討が必要であると考えられる。またボルトの根入れを深くすることでより大きい補強効果が期待できると考えられるが、この場合においても周辺地山の地耐力が影響する可能性が考えられる。今後は垂直縫地ボルトの補強効果について、実施工規模への解析の展開や、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、地山の強度や最適な根入れ深さといった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) 永田ら, 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, 土木学会第76回年次学術講演会(投稿中)
- 2) 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(1985)35(4):115-135

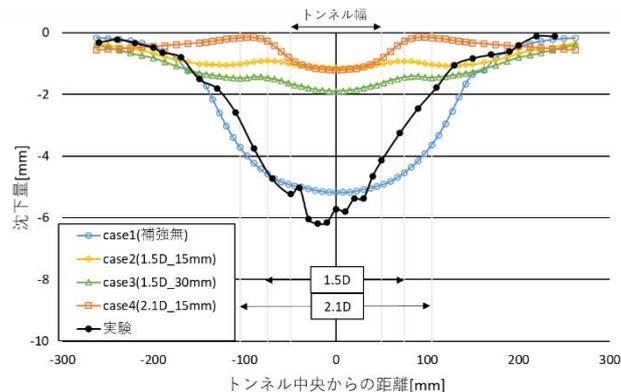


図3 地表面沈下量(水平モデル)

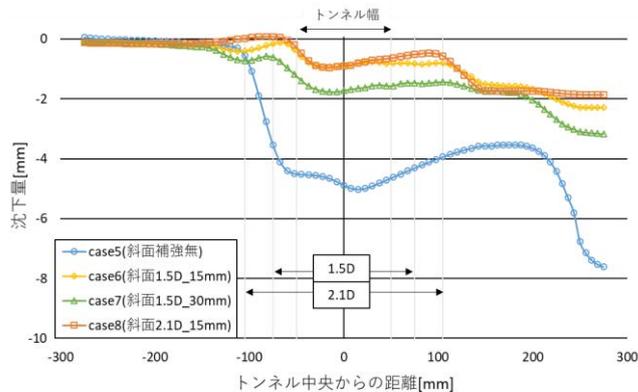


図4 地表面沈下量(斜面モデル)

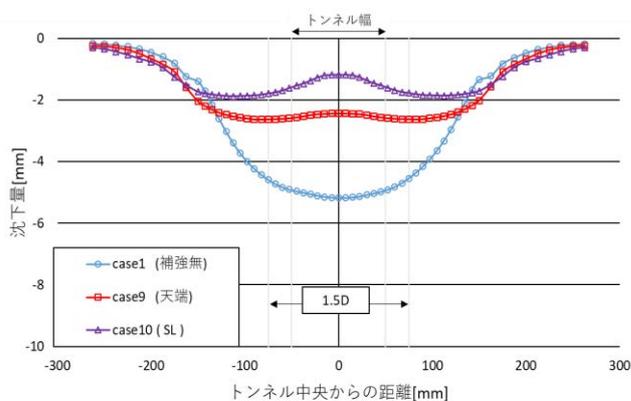


図5 地表面沈下量(根入れ深さ)