

事前地山改良を模擬した小土被りトンネル実験に対する解析的検討

京都大学工学研究科 学生会員 ○ 平坂友里恵
 名城大学理工学部 正会員 崔 瑛
 京都大学工学研究科 正会員 岸田 潔, 木村 亮

1. 研究の背景および目的

近年, NATM に対する補助工法の発達に伴い, 小土被り未固結地山においても採用事例が増加している. 東北新幹線や北陸新幹線の延伸工事区間¹⁾では, 掘削に伴う地表面への影響や切羽の安定性を総合的に判断した上で, 山岳工法の補助工法に事前地山改良工^{1),2)}を用いてトンネル掘削が行われている. しかしながら, トンネル掘削時における最適な改良範囲および改良強度については未だ解明されておらず, 実際には試行錯誤的に様々な改良形式を適用しているのが現状である. 著者ら³⁾は, トンネル掘削時の地山の応力解放を模擬できるに示す3次元降下床模型実験(図1)を実施し, 地山改良工の適切な改良範囲について検討を行った. 本稿では, 模型実験に対する数値解析を行い, トンネル掘削時における地山改良工の改良効果について検討する.

2. 模型実験に対する数値解析の概要

図1に模型実験土槽のイメージを示す. トンネル掘削時の切羽の進行は, 降下床を1から4まで順番に2.0mmずつ下降させることにより表現した. 解析の対象領域は実験土層の領域と同じとした. 解析の対象領域の側面と降下床を除く底面では, 法線方向の変位のみを拘束する. 降下床の下降は, 降下床上の節点に鉛直下方に2.0mm(0.002 mm/step)の強制変位を与えることにより模擬する. 本解析では, 弾塑性構成モデル subloading t_{ij} model を用いて, 基礎地盤の力学特性を表現した. また, 改良地山の力学特性は簡便のため, 弾性体としてモデル化した.

トンネル径は降下床幅 D に, 土被りは模型地盤の高さ H に相当する. 模型実験では, 土被り比 $H/D=1.0, 0.5$ に対して, 地盤改良の改良幅, 改良深さをパラメータとし, 表1に示す Case-1 から8について検討した. さらに, 解析では表1に示す幅と深さを变化させた Case-Depth と Case-Width について追加検討を行った.

3. 模型実験による改良幅に関する検討

図3に, 降下床3を下降後の沈下量を Case-1(未改良)の最大地表面沈下量に対する百分率で示す. いずれも土被り比 $H/D=1.0$ である. 実験および解析結果より, 改良幅を広くするほど地表面沈下が抑制される. 解析結果より, 改良幅が250mmより広い Case-4 と Case-5 については, 改良幅による沈下抑制効果の差が明確に現れない.

掘削時の地盤内の応力状態から地盤改良のメカニズムを検討するため, 図4に, 降下床3を下降終了後の降下床3の中央横断面におけるせん断ひずみの分布を示す. 改良幅が降下床幅と同じ Case-3 では, せん断ひずみが改良地盤と基礎地盤の境界に生じ, その分布形状は地表面に達している. 一方, 改良幅の広いケースでは, せん断ひずみが出現する箇所は改良地盤の底部で顕著となり, 地表面では明瞭なせん断ひずみ分布が確認されない. このことから, 改良幅を降下床幅より広くすることにより, せん断ひずみが抑制され, 結果的には地表面沈下を抑制する効果得られたと考えられる.

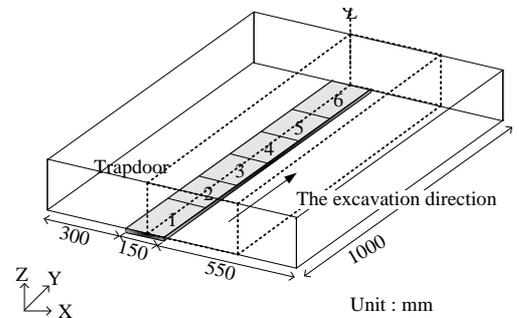


図1 実験土槽および数値解析の対象領域

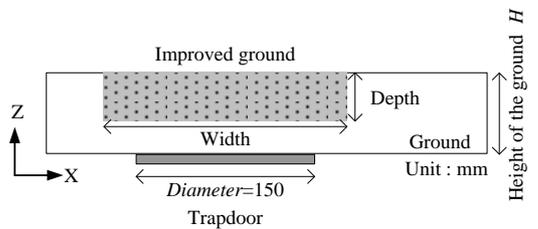


図2 地盤の断面図(奥行き方向に均一に作成)

表1 地盤改良のケース

	改良幅	改良深さ	土被り
Case-1	未改良		150
Case-2	250	50	
Case-3	150	100	
Case-4	250	100	
Case-5	350	100	
Case-Depth	250	75	
Case-Width	200	100	75
Case-6	未改良		
Case-7	150	50	
Case-8	250	50	

Unit : mm

キーワード 地山改良工, 山岳工法, 小土被り未固結地山

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-4-291 TEL:075-383-3136

図5は平均主応力の分布図を示す。Case-1と比較して、Case-4では、応力が降下床を跨ぐように、アーチ状の応力分布が改良体で形成されていることが確認できる。降下床下降時に伴う平均主応力の増加は、横断方向および縦断方向の水平応力の変化も一因であり、改良体により水平方向での拘束効果が強く表れる傾向を示している。

4. 実大トンネルへの適用

図6, 7に、実トンネルの上半掘削完了時におけるせん断ひずみ分布および平均主応力分布を示す。Case-0は未改良の地盤であり、Case-1-7は、改良範囲が東北新幹線の牛鍵トンネル¹⁾と同様のケースである。改良幅は14.0m、トンネル径10.5mとして解析を実施した。模型実験に対する数値解析と同様に、掘削地盤には弾塑性構成モデル subloading t_j model を用いてその力学特性をモデル化し、改良地盤は弾性体としてモデル化した⁴⁾。その後、掘削相当外力を徐々に減らすことで、トンネルの掘削過程をモデル化した。図6に示すせん断ひずみ分布より Case-1-7では、せん断ひずみが改良地盤により遮断され、改良地盤の下部に抑制されていることが確認できる。一方、図7に示す平均主応力の分布により、改良地盤実トンネルでも地山改良を施すことにより、アーチ効果が期待できると考えられる。

これらの解析結果は、模型実験の解析結果と同様の傾向を示している。模型実験から、改良体はせん断ひずみ分布の発生を局所的なものとし、地表面沈下を抑制する効果があることを確認しているが、実大トンネルにおいても同様の傾向が確認できた。

5. 結論

本稿では、模型実験およびその数値解析を通じて、一定の改良幅を設けることで沈下抑制の改良効果が得られることが確認された。これは、地山改良を施すことにより、せん断補強効果とともにせん断ひずみが抑制され、結果として沈下が抑制されるということである。また、模型実験で得られた傾向は、実大トンネルでの解析結果からも確認できた。

参考文献 1) 北川 隆, 磯谷篤実, 奥津一俊, 川口隆徳: 地山改良とサイドパイルで小土かぶり土砂地山を掘削東北新幹線 牛鍵トンネル, トンネルと地下, Vol.35, No.4, pp.7-14, 2004. 2) 野々村政一, 井浦智実, 岡嶋正樹, 岸田 潔: 小土被り未固結地山における事前地山改良工の有効性と課題, トンネルと地下, Vol. 42, No.5, pp.381-391, 2011. 3) 平坂友里恵, 崔 瑛, 岸田 潔, 木村 亮, 井浦智実: 改良地盤における小土被りトンネルの掘削挙動に関する実験的研究, トンネル工学会報告集, Vol.20, pp.199-204, 2010. 4) 崔 瑛, 岸田 潔, 木村 亮: 小土被りトンネル掘削時におけるトンネル脚部および地表面沈下対策工に関する実験的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.3, pp.261-272, 2008.

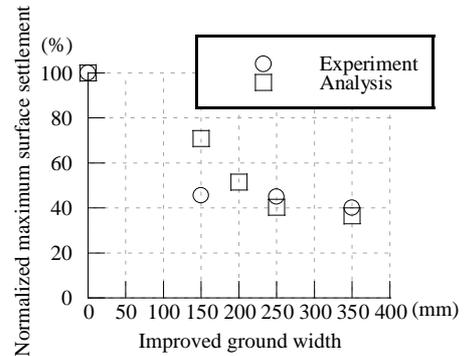


図3 未改良地盤に対する最大地表面沈下量

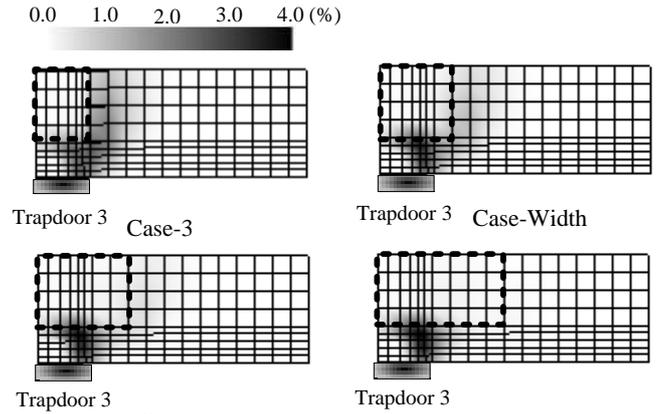


図4 降下床3の中央横断面のせん断ひずみ

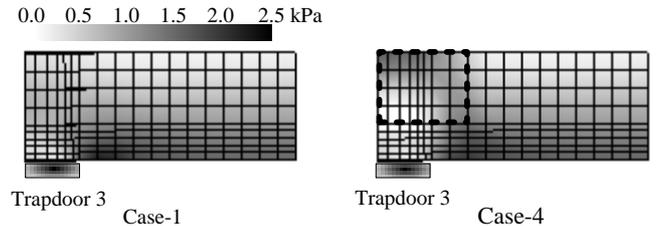


図5 平均主応力の分布図

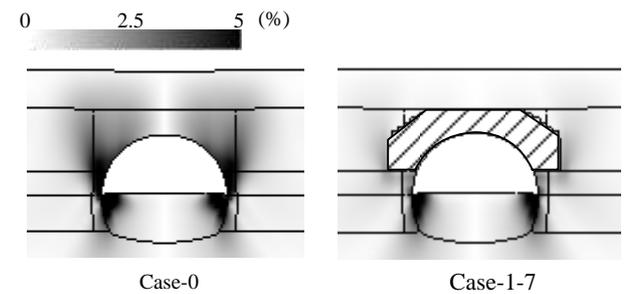


図6 実トンネル周辺のせん断ひずみ

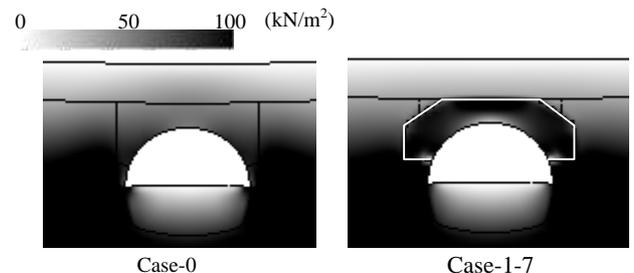


図7 実トンネルの平均主応力の分布図