

模型実験および数値解析による小土被り山岳トンネル下半掘削時の安定性の検討 Study on stability of shallow overburden mountain tunnel during lower-half excavation by physical model experiment and numerical analysis

○小池胡楠, 澤村康生, 岸田 潔

○Konan KOIKE, Yasuo SAWAMURA, Kiyoshi KISHIDA

During an excavation of the shallow overburden tunnel in the sandy ground using short bench cut method, certain width of a slope may be dug at a gap between upper half and lower half of the tunnel to facilitate the passage of construction vehicle. Although wider slope, with respect to tunnel diameter, makes a construction more efficient, it could make the tunnel structure unstable at the same time. Therefore, in the present work, the influence of the slope to the stability of the tunnel was studied through 2D physical model experiment. The data is compared with the numerical simulation result.

1. はじめに

小土被り未固結地山においてショートベンチカット工法を用いてトンネルを掘削するとき、図1のように切羽で作業する工事車両用に上半と下半の間の段差部分に斜路が掘られる場合がある。斜路の側方には抑えとして一定の幅の地盤が残されるが、径の小さいトンネル等で十分な斜路幅を確保する場合、残される部分の幅が狭くなり、トンネル安定性が損なわれている可能性がある。

そこで、本研究では模型実験により斜路の影響を検討するとともに、数値解析との相互補完を行った。手法として、トンネル横断面のみに着目した二次元化を行っており、“斜路”の奥行き方向の勾配は今回考慮しないものとしている。

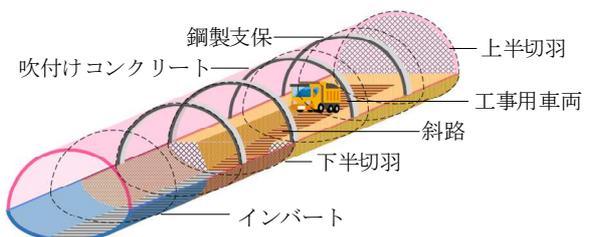


図1 掘削時のトンネル概形

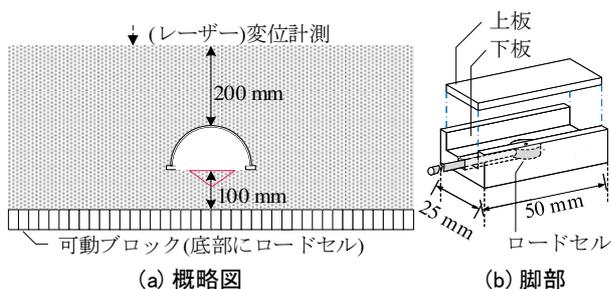


図2 実験装置

2. 二次元模型実験¹⁾概要

実験では上半掘削は模擬せずに、アルミ棒積層体の模型地盤に図2(a)のように亚克力製のアーチ(外径 200 mm)を埋設した状態を初期状態として、ピンセットでアルミ棒を少量ずつ除去するという方法で下半掘削を模擬した。実験上、支持力を確保するためトンネル脚部にフーチングを取り付けており、その内部のロードセル(図2(b))でアーチが地盤から受ける反力を計測した。計測・撮影は 5 g アルミ棒を除去する度に行った。

3. 再現解析(FEM)概要

図3に解析メッシュと境界条件を示す。地盤は弾塑性モデルの subloading tij モデルでモデル化している。アーチ部分はビーム要素としてモデル化し、フーチングは弾性体としている。地盤-ビーム境界及びフーチング-ビーム境界にはビーム要素を設定し、閾値を超えるせん断力に対してすべりが生じるようにしている。

解析は①2 cm の層毎に自重载荷②掘削範囲の要素の除去③除去した要素の内、掘削面に隣接する要素の等価節点応力を算出し、正負を逆にして節点荷重として载荷、という流れで行っている。

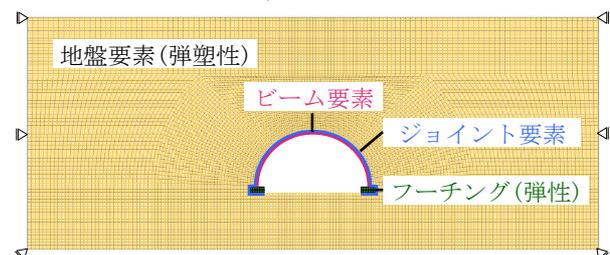


図3 解析メッシュ及び境界条件

4. 模型実験および再現解析結果

図4に天端におけるPIVによる変位計測結果と再現解析の結果を示す。ただし、掘削量と変位はそれぞれ「実験において1 cm 以上の変位が生じる1つ前の計測でのアルミ棒摘出量」及び「各データの最大絶対値」を用いて正規化している。続いて、図5に図4の掘削進行率100%の時点での地盤内の変位量分布の計測結果と解析結果をそれぞれ示す。実験では、下半を掘り進めることで、アーチは初め微小な沈下を生じ、一定量掘進めるとまとまった沈下が生じた。沈下発生時のトンネル周辺地盤は、アーチ脚部下方において、トンネル中心に向けて円弧状にせん断破壊しており、アーチ上方ではアーチに追従した沈下を生じた。図6に示す脚部荷重は、掘削に伴い減少し、アーチを上向きに支持する力は漸減している。また、掘削幅について幅広ケースで小規模な沈下が早い段階で生じることが確認され、より不安定であることが示唆される。再現解析は実験結果と定性的に同様の傾向を示した。応力解放率100%の時点での塑性せん断ひずみの分布を図7に示す。図より、塑性せん断ひずみは点線で囲った領域に集中しており、それぞれアーチ側方の地盤とアーチに接する地盤要素との相対変位及びフーチング直下の地盤とトンネル下半外側の地盤との相対変位に対応している。

図8にフーチング下の地盤の応力履歴を t_s - t_n 平面に赤線でプロットして示す。図の黒・灰色の線は要素試験(二軸圧縮試験)解析から求めたピーク応力発揮時の応力比 $X = t_s / t_n$ をピーク時の t_n 別に

-○- narrow_case (270, 18.6) ---- narrow_case_analysis (1.27)
 ● wide_case (280, 22.2) — wide_case_analysis (1.77)
 (value used for normalization) [g],[mm]

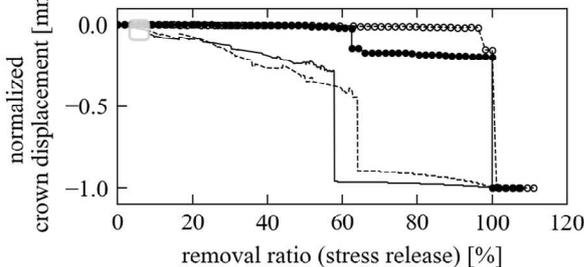


図4 掘削の進行率と天端の鉛直変位量の関係

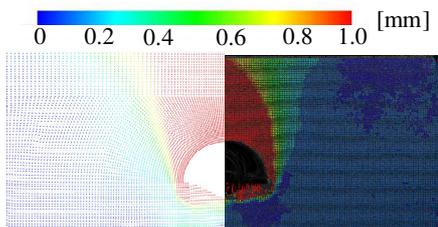


図5 地盤内変位分布(幅狭のケース)

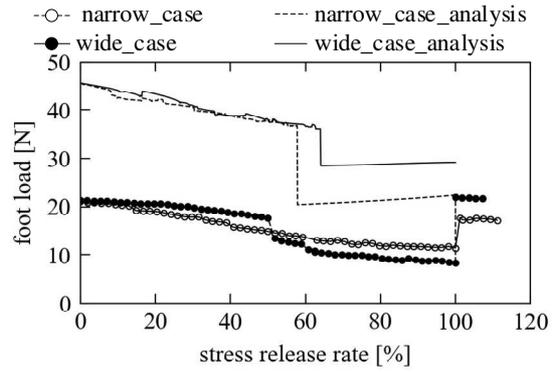
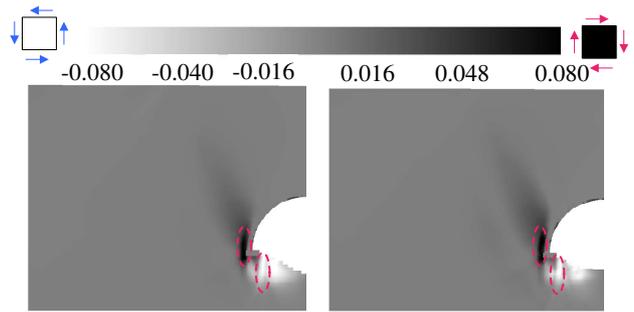


図6 脚部荷重変化



(a) 幅狭のケース (b) 幅広のケース

図7 塑性せん断ひずみ分布

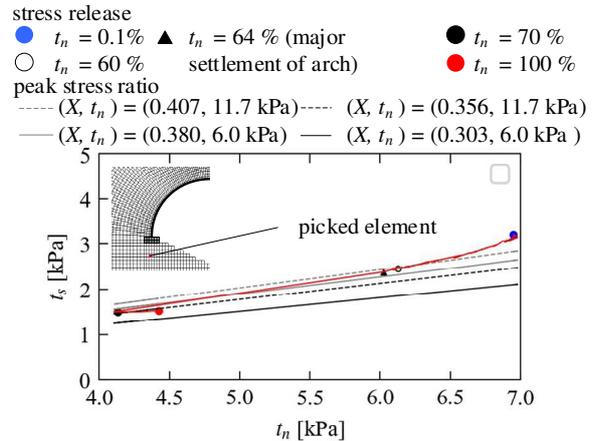


図8 フーチング下の地盤の応力履歴(幅狭のケース)

記入したものである。応力解放に伴い、 $t_n = 6.0 \text{ kPa}$ でのピーク応力比に上から漸近し、まとまった沈下の生じた64%から70%の短い区間で応力比の線に沿って急激に変化している。

5. まとめ

斜路が設けられる下半中央部の掘削は、脚部支持力を低下させ、一定以上応力が解放されると急激なトンネルの沈下を生じる恐れがある。

参考文献

- 1) 小池胡楠, 岸田潔, 澤村康生, 崔 瑛, 磯谷篤実: 小土被り山岳トンネルにおける下半掘削時の応力再配分に関する実験的研究, 第56回地盤工学会研究発表会, 2021.