

第Ⅲ部門

遠心模型実験によるトンネル全断面掘削時の切羽前方地盤挙動の検討

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○中村 聡一郎
 京都大学大学院工学研究科 正会員 澤村 康生
 京都大学大学院工学研究科 正会員 岸田 潔

1. はじめに

切羽安定を主目的として、切羽を上下に2分割して掘削するベンチカット工法が一般的に用いられているが、下半掘削時に不安定化し崩壊する事例が報告されている¹⁾。図-1のように下半中央部に上半盤と下半盤をつなぐ工事用の斜路を設ける際に、斜路の掘削幅が大きくなるとトンネル安定性に影響する可能性がある²⁾。そこで、ベンチカット工法によるトンネル掘削において、ベンチ長および斜路の幅がトンネル安定性・切羽安定性に与える影響を解明することを目的に、分割された各切羽面の応力解放機構を有する実験装置を製作した。本稿では、ベンチカット工法の模擬実験に先立って、遠心加速度 50G 場で全断面掘削を模擬した実験を実施し、その結果を報告する。

2. 遠心模型実験の概要

図-2に製作した装置を示す。土槽内部にトンネル模型が設置されている。トンネル模型は、形状の対称性から1/2断面を対象としており、分割面で土槽前面のガラス板に固定されている。覆工先端の切羽面には、軸方向の変位を制御できるブロックが取り付けられており、このブロックを引抜くことで切羽面の応力開放を模擬する。本模型の特徴として、切羽ブロックが3分割されており、上半・下半内側・下半外側の引抜き操作および変位・荷重の測定を個別に行うことができる。また、下半切羽の初期位置を上半切羽の0.5Dまたは1.0D後方に設定することができ、ベンチカット工法の表現が可能である。さらに、下半の2個のブロックは内側と外側の面積比が異なる組に取り換えることができ、内側の引抜きを斜路掘削と見立てることで斜路幅の違いの表現が可能である。

本稿では、この実験装置を50G場で用いたときの地盤挙動を確認するために、切羽ブロックを同じ初期位置から同時に引抜くことで全断面掘削を模擬した。1分間1mm/min(模型スケール)で引抜き操作を3回繰り返した。模型地盤は乾燥豊浦砂(相対密度 $Dr=80\%$, $\phi=40.6^\circ$)で、

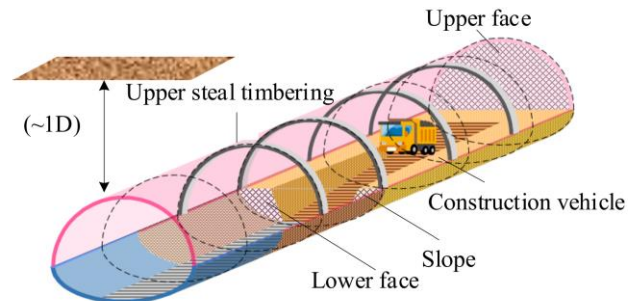
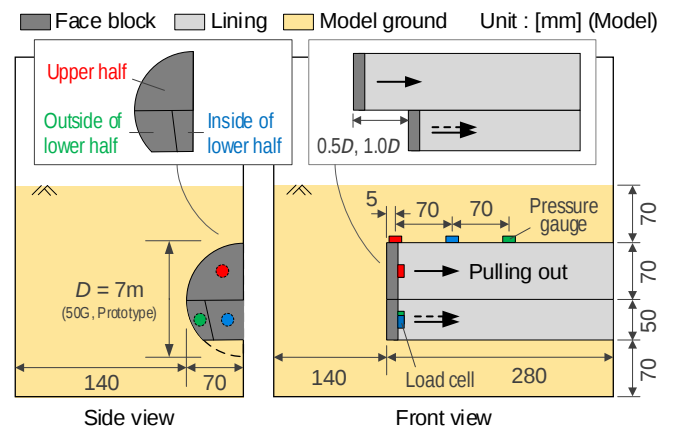
図-1 小土被り未固結地山のトンネル掘削の概略²⁾

図-2 実験装置の概要

土被りは0.5Dとした。下半のブロックは分割比が(内側):(外側)=2:1のものを取り付けた。

3. 実験結果と考察

図-3に操作1回目の切羽ブロックの変位、切羽土圧の補正值、およびトンネル天端に作用する鉛直土圧の変化を示す。各ブロックに作用する荷重を断面積で除して求めた切羽土圧の測定値は、引抜き開始直後に急激に減少して負の極小値(上半 -11.0 kN/m², 下半内側 -28.2 kN/m², 下半外側 -18.5 kN/m²)をとった。その後2・3回目の操作にかけて、若干変動しつつ安定した。全断面掘削を模擬した既往の実験³⁾において、引抜き開始直後に切羽土圧がゼロ近くまで急減した後に若干増加することが報告されている。本実験においても極小値が負になったことを除けば同様の

挙動が得られたため、同じ現象が起きているとの考えから、図-3(b)では操作1回目の間の最小値をゼロとみなし、最小値との差をとって補正した切羽土圧を示している。切羽土圧が負の値をとった原因として、切羽ブロックとガラス板およびブロック側面のカバーとの間の摩擦係数が大きかったことが予想される。予備実験を通して改善を試みたが問題は解消できず、測定方法のさらなる検討が必要である。補正した切羽土圧の引抜き前の値をJakyの式($K_0 = 1 - \sin\phi$)による静止土圧の理論値と比較すると、下半外側は大きかったが、上半・下半内側は近い値であった。

3回の操作の前後の土槽前面の画像を比較し、トンネル模型下端より上部の領域で、トンネル軸を通る鉛直断面における地盤変位を解析した(図-4)。村山⁴⁾は、掘削時に対数螺旋形のすべり線が切羽前方に形成されるとして、Terzaghiの緩み土圧式を用いて切羽土圧を理論的に求める式を示している。図から、この式で推定されるすべり線より幅が狭いものの、切羽前方にすべり線が発達し緩み領域が形成されていることが分かる。本模型は底部に切欠きがあるため、重心の高さと土被りが模型と等しい半円形断面を仮定して村山の式⁴⁾を適用すると、掘削時の切羽土圧は12.9 kN/m²と推定される。操作1回目後の各切羽土圧の補正値の平均は9.26 kN/m²であり、推定値より小さい結果となった。同じ断面に対して、図から読み取れる天端の高さにおける幅(19 mm)を所与とすると、切羽土圧は8.1 kN/m²と推定され、補正した測定値に比較的近い値が得られた。また、天端の高さより上部で、緩み領域の幅が地表面に近づくにつれて縮小している。図-3(c)において切羽直近の天端上部土圧が大きくなっていることと併せて、切羽前方上部で村山・松岡⁵⁾が示したようなアーチ形状の力の伝達線が形成され、周囲の地盤に応力が再配分されているといえる。

4. おわりに

分割して切羽面の応力解放する機構を有することで、ベンチカット工法でのトンネル掘削過程を模擬できる実験装置を製作し、本稿では、全断面掘削時の切羽安定性を検討する実験を行った。結果として、掘削時に切羽前方に緩み領域が発生し、切羽土圧の減少分が周囲の地盤に再配分されることが確認できた。また、村山・松岡⁵⁾が示す切羽前方の緩み領域と整合することを確認した。

謝辞：本研究は、一般財団法人鉄道建設技術研究会からの助成によって進められた。

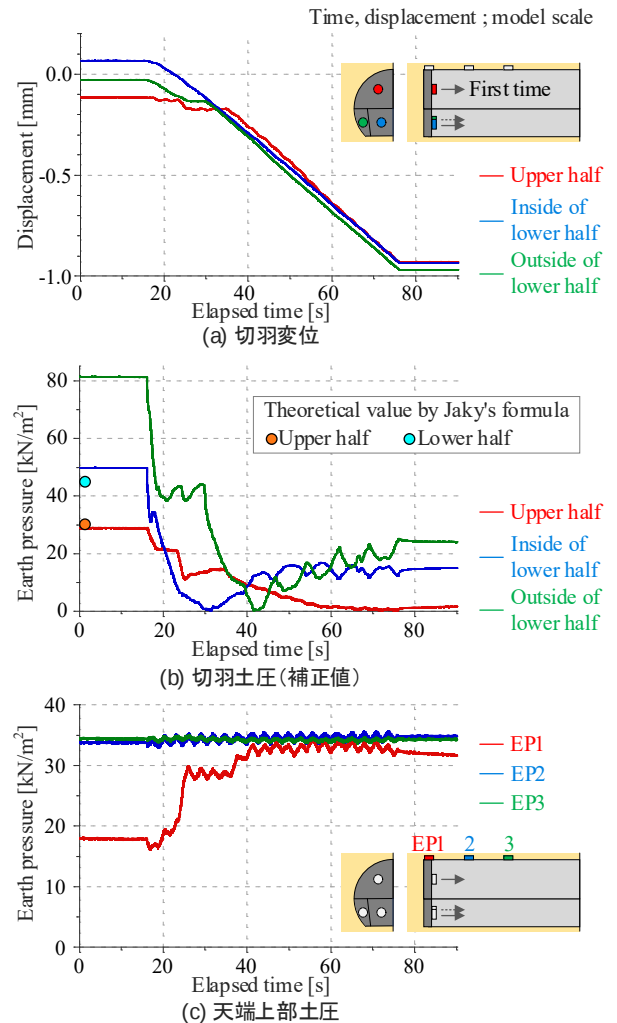


図-3 操作1回目の挙動

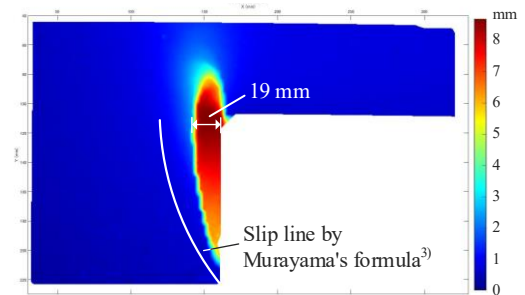


図-4 引抜きに伴う地盤変位量

参考文献

- 例えば, https://www.jrnt.go.jp/corporate/public_relations/pdf/pressh290908.pdf (2021/2/22 閲覧)
- 小池ら：小土被りトンネルにおいて下半中央部の掘削幅が地山挙動に及ぼす影響の検討, 2020年度土木学会関西支部年次学術講演会, III-3, 2020.
- 久武：トンネル切羽の安定・崩壊挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.517, pp.105-115, 1995.
- 村山ら：機械化シールドの掘削性能に関する土質力学的考察, 第1回土質工学会研究発表会講演集, pp.75-79, 1986.
- 村山・松岡：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.187, pp.95-108, 1971.