模型実験と数値解析を用いた切羽形状の安定性に関する比較検討

首都大学東京大学院 学生会員 ○住田 亮介 首都大学東京大学院 正会員 土門 剛 首都大学東京大学院 正会員 西村 和夫

1. 研究背景と目的

NATM によるトンネル施工では、大型機械の導入による全断面掘削が可能となっている。また、NATM や補助工法の技術進歩により都市部未固結地山での施工需要が増大している。しかし、全断面掘削では一時的に無支保となる切羽面積が大きくなりその安定性が問題となる場合もある。切羽の安定性を確保するには、鏡ボルト工や鏡吹付け工などの補助工法の適用が一般的であるが、施工速度の低下やコスト増加の要因となる。そこで、補助工法の低減を目的に、トンネルの切羽形状を曲面(以下、曲面切羽と称す)にし、切羽近傍地山内にアーチ作用を発揮させることにより、切羽を安定させる方法が考案されている。そこで当研究室では、曲面切羽の安定性を検証するため、未固結粒状体地山での全断面掘削を対象として底面摩擦実験を実施し、曲面切羽の挙動を明らかにしている。

本研究では、実験結果を解析により再現するため、解析手法に個別要素法(以下、DEM と称す)を採用した.模型実験による結果と DEM 解析による実験の再現解析結果を比較することで、DEM 解析の底面摩擦実験への適用性検討を行った. さらに、全断面掘削工法である曲面切羽と、切羽断面を小分割して掘削するベンチカット工法とをDEM 解析結果に基づいて比較し、切羽形状の安定性の比較検討を試みた.

2. 底面摩擦模型実験

2.1 実験装置

実験には、トンネルおよび周辺地山の挙動を静的に観察できる底面摩擦装置を用いた.地山材料は、長さ $40 \, \mathrm{mm}$ 、直径 $2.5 \, \mathrm{mm}$ および $5.0 \, \mathrm{mm}$ の 2 種類のステンレス棒を重量混合比 3:2 で混合して使用した. 内部摩擦角は約 $27 \, \mathrm{o}$ で粘着力は $0 \, \mathrm{kN/m}^2$ である. 装置上に**写真-1** のように地山材料を並べ粒状体地山模型を作成した.

2.2 実験方法

3. DEM による数値解析

トンネルの挙動に関する数値解析では、主に有限要素法が用いられるが、本研究では未固結粒状体を模擬した実験の地山挙動を再現するため、解析手法には不連続である粒状体の挙動を扱うことに適しているDEMを採用した.

解析モデルは、底面摩擦実験と同スケールとし、地山円要素の 重量混合比も実験と同様にした. DEM 解析に用いる物性値を表-1 に示す. 本解析でも実験と同様、地山に作用させる荷重を底面摩 擦力(疑似重力)とした.

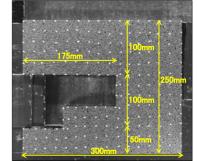


写真-1 地山材料配置例

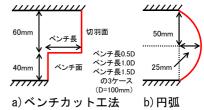


図-1 切羽概要 (トンネル縦断方向)

表-1 解析に用いた物性値

	地山円要素	吹付け円要素
縦弾性係数 (N/mm²)	200	200
せん断弾性係数比	0.25	0.25
反発係数	0	0
要素間粘着力(N/mm²)	0	0
要素間摩擦角(°)	50	50
許容引張応力 (N/mm²)	0	1.8
底面摩擦係数	1.95	1.95
単位体積重量(N/mm³)	7.70×10 ⁻³	7.70×10 ⁻³
要素径 (mm)	2.5,5.0	5.0

キーワード: トンネル, 曲面切羽, 底面摩擦実験, DEM

連絡先:首都大学東京 住所〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL042-677-1111 (代表)

模型実験および DEM 解析結果

4.1 無支保時の挙動

ベンチ長 0.5D のベンチカット工法を例に、底面摩擦実験および DEM 解析それぞれのスライド量 15mm における 地山拳動を図-2 に示す. また、図-3 に切羽面変位量を示す. 最大切羽面変位量は、底面摩擦実験 17.24mm, DEM 解析 30.32mm となった. 最大切羽面変位の値に約2倍の差があるが,変形モードを見ると,切羽面において底面摩

擦実験でみられた切羽内空側へ押し出されるような挙 動が DEM 解析で再現できた. 一方, 当研究室では, 無 支保時の曲面切羽について DEM 解析を実施している (図-4). この図から、曲面切羽では切羽天端部におけ る地山の崩落が比較的大きいことがわかる. また, 最大 切羽面変位量は,31.79mm となった.なお,底面摩擦実 験においても同様の挙動がみられた.

以上の結果と既往の研究より、底面摩擦実験に DEM 解析を適用することは可能であると判断した。また、無 支保時では,変位抑制効果において曲面切羽の優位性は 確認できなかった.

4.2 切羽に鏡吹付け工を施した場合の挙動

切羽面に鏡吹付け工を模擬した吹付け円要素を施し, その場合の地山挙動を図-5に示す. 最大切羽面変位量は, ベンチ長 0.5D のベンチカット工法が 25.32mm, 円弧型 の曲面切羽が 3.52mm となった. ベンチカット工法の場 合では, 吹付けが引張破壊し, 地山円要素がトンネル内 に流入した. しかし、曲面切羽では、吹付けのアーチ効 果により、切羽面の安定性が確認された.

以上の結果より、曲面切羽は鏡吹付け工を施すことで 十分な安定性を発揮することを確認した.

4.3 切羽面に作用する荷重

切羽面に作用する荷重は、DEM 解析により求めた. 切羽面に線要素を完全固定にして配置することで、その ^② 反力から切羽面に作用する荷重を求めた.物性値は表-1 と同様とした. 図-6 に各切羽形状における解析ステップ 毎(時間経過の相当)の切羽面に作用する荷重遷移図を 示す. ここで作用荷重は、線要素に作用する水平方向荷 重と鉛直方向荷重の合力を示す. 結果は, 切羽面を上部,

中部,下部の3等分し,それぞれに作用する荷重の平均値を示す.

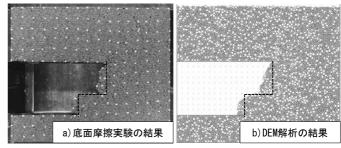
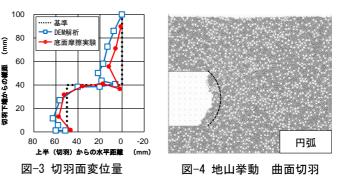
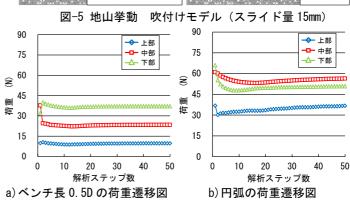


図-2 地山挙動 無支保モデル (スライド量 15mm)



b) 円弧



a) ベンチ長0.5D

図-6 切羽面に作用する荷重

図-6より,切羽断面が小さいベンチカット工法の方が全体的に小さい値となった.しかし,最大荷重値と最小荷 重値の差を比較すると、ベンチ長 0.5D のベンチカット工法では 23.34N、円弧型の曲面切羽は 19.76N となり、曲面 切羽の荷重差が小さい結果となった。これは、切羽のアーチ効果により切羽面にほぼ均等に荷重が配分されたため と考えられる.

本研究の範囲では、鏡吹付け工を施した場合の変位抑制効果および作用荷重の局所化を避ける点から、曲面切羽 はベンチカット工法と概ね同等あるいはそれ以上の安定性の高い切羽形状であると考えられる.