

個別要素法を用いた低強度地山における曲面切羽の安定性に関する検討

首都高速道路株式会社 非会員 住田 亮介
 首都大学東京大学院 学生会員 ○石橋 拓也
 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. はじめに

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多く用いられている。また、NATMや補助工法の技術進歩により都市部の低強度や未固結地山での施工需要も増大している。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になる。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、これらの適用は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、切羽近傍地山の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。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場で模型実験を行い、底面摩擦場を定式化した個別要素法（以下、DEMと称す）による数値解析で実験ケースの再現解析と、実験ケース以外への適用を行い、実験では計測できない吹付けコンクリートの応力や地山内変位、接触力などの挙動の確認を行ってきた。

本研究では、現実には実験ができない重力場での実規模の切羽安定性を確認するために、模型実験寸法での底面摩擦場から重力場への拡張を介して、実規模のDEMによる数値解析を目指した。さらに、DEM結果に基づいて地山挙動を確認し、切羽形状の安定性の比較検討を試みた。

2. DEMによる数値解析

2.1 解析モデル

解析モデルを図-1に示す。解析上、生成できる円要素数は80000個までが限界なので、解析領域の寸法から地山は直径75mm、150mmの2種類の円要素で構成される混合地山で、重量混合比3:2とした。ただし、弾塑性体の地山挙動となるよう、後述する2.2で物性 (E , ν , ϕ , c) を決定した。比較する切羽形状は4ケースで、各切羽形状の寸法を図-2に示す。

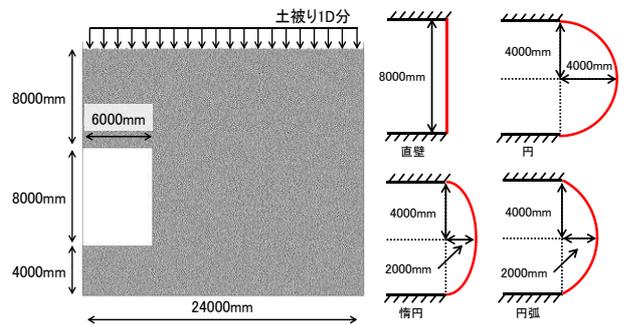


図-1 DEM解析モデル

図-2 切羽概要

(トンネル縦断方向)

2.2 解析入力値の算定

規則配列によるDEM解析では、仮想縦断性係数 k_n は、弾性係数 $E=k_n$ が成立する。また、引張強度 σ_t と要素間引張強度 σ_{tD} 、粘着力 c と要素間粘着力 c_D の関係は、 $\sigma_t=\sigma_{tD}$, $c=c_D$ となる。しかし、不規則配列ではポアソン比の影響などを考慮しなければならないため、本解析のような地山を形成する円要素が不規則配列の場合、上記の関係性は成立しない。

そこで、実際の地山等級の物性に合わせるために、DEMで三軸圧縮試験解析を行い、得られた結果から解析入力値を決定した。再現した地山物性値を表-1、三軸圧縮試験より求めた解析入力値を表-2に示す。

表-1 地山物性値

	記号	単位	地山等級E	鏡吹付け工
弾性係数 (変形係数)	E	N/mm ²	50	1000
ポアソン比	ν		0.40	0.20
粘着力	c	N/mm ²	0.10	-
内部摩擦角	ϕ	°	30	30
引張強度	σ_t	N/mm ²	-	0.60
単位体積重量	γ	N/mm ³	2.10×10^{-5}	2.30×10^{-5}

表-2 解析入力値

	記号	単位	地山円要素	吹付け円要素
仮想縦断弾性係数	k_n	N/mm ²	95	1000
反発係数	e		0	0
仮想せん断弾性係数比	s		0.25	0.20
要素間粘着力	c_D	N/mm ²	0.3	0.60
要素間摩擦角	ϕ_D	°	50	30
要素間引張強度	σ_{tD}	N/mm ²	0.3	0.60
単位体積重量	γ	N/mm ³	2.10×10^{-5}	2.30×10^{-5}

キーワード： トンネル, 曲面切羽, 低強度地山, DEM

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

3. DEM 解析結果

3.1 切羽面が無支保時の挙動

E 地山における各切羽形状の DEM 解析 最終ステップ時 ($t=2.0\text{sec}$) の地山挙動 (地山応力状態) を図-3 に示す。直壁型切羽では、曲面を形成するように地山が崩壊していく。切羽前方 $0.25D$ まで地山は緩み、そこまで切羽は崩壊する。これは、切羽前方に発生するアーチ効果を示す主応力の流れの内側にある応力解放域が崩落していると考えられ、崩壊した応力解放域の外側は、主応力のアーチ効果により地山は安定した。また、円型切羽では最も切羽前方への掘り込みが大きい形状であるため、切羽直上にある地山の崩落により、切羽は崩壊した。その一方、楕円型切羽と円弧型切羽ではアーチ効果の内側の応力解放域の大部分を初期状態で掘削していることになるので、切羽は安定したまま保持された。特に、円弧型切羽は地山に形成されているアーチ効果に沿った形で切羽面があるため、曲面切羽の中でも最も安定性が高い形状であった。

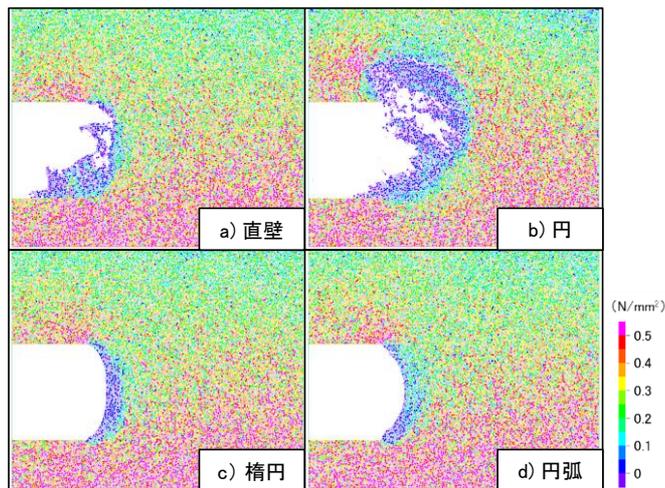


図-3 地山挙動 無支保モデル (地山等級 E)

3.2 切羽面に鏡吹付け工を施した場合の挙動

E 地山における切羽面に鏡吹付け工を模擬した鏡吹付け円要素を施した時の地山挙動を図-4 に示す。また、曲面切羽 3 形状の切羽面変位量を図-5 に示す。直壁型切羽の場合では、地山からの押し出しにより鏡吹付けは引張破壊し、切羽は崩壊した。また、鏡吹付け背面の地山には緩み領域が生じ、その形状は曲面状であった。その一方で、曲面切羽では、鏡吹付け要素に大きい圧縮応力が作用していることがわかる。鏡吹付けのアーチ効果により、鏡吹付けが圧縮部材として作用することで変形が抑制され、切羽面の高い安定性が確認された。

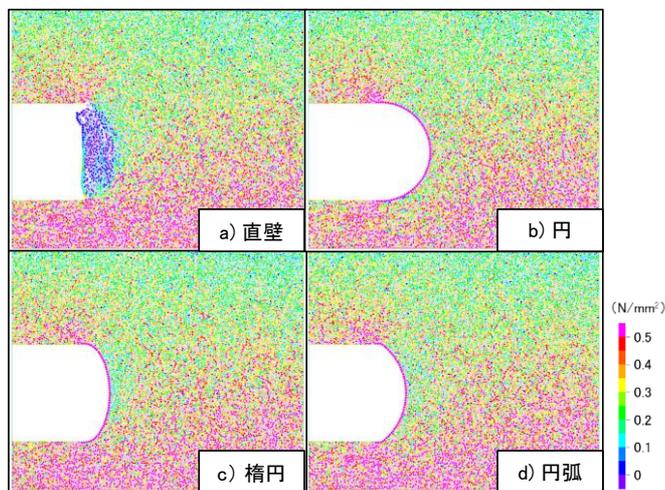


図-4 地山挙動 鏡吹付けモデル (地山等級 E)

以上の結果より、曲面切羽は鏡吹付け工を施すことでアーチ効果を十分に発揮し、高い安定性を示すことを確認した。

4. まとめ

直壁型切羽では、切羽前方に発生するアーチアクション内側の応力解放域が崩壊し、崩壊後の地山の形状は曲面状に形成され、その周辺地山は安定した。また、鏡吹付けを施した場合においても鏡吹付けの背面にある地山に緩み領域が形成されており、その形状は曲面状であった。つまり、曲面切羽は、直壁型切羽で形成が確認できた応力解放域をうまく掘削できるかが重要である。特に、円弧型切羽では地山内のアーチアクションに沿って切羽面が形成され、応力解放域の大部分を初期状態で掘削していたため、高い安定性を示した。

実施工においては、各掘削段階で地山の安定しやすい切羽形状を確認することが重要と考える。一つの方法として、3D スキャナーなどを用いて地山自身が安定しやすい切羽形状を探るために、掘削サイクルの中で鏡が部分的に崩落した後の鏡形状をデジタル値で計測し、その鏡形状に近い掘削形状に変更していくこと、ただし、整形のための時間が増えて鏡の自立時間に悪影響を与えないように心がけることが重要である。

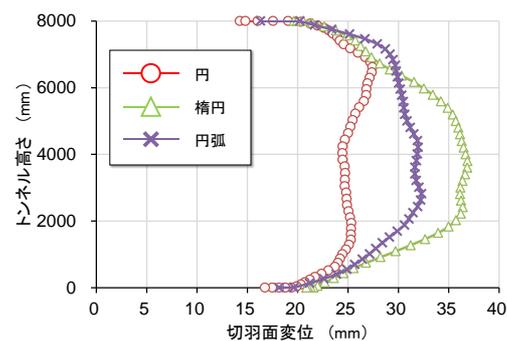


図-5 曲面切羽の切羽面変位 (地山等級 E)