

粒状体解析に基づくトンネル切羽安定のメカニズムに関する考察

山口大学 学○新田崇
山口大学大学院 学 星野貴史 学 澤江宏徳
山口大学工学部 正 清水則一

1. はじめに

一般に、土被りの浅い未固結地山に掘削されたトンネルおよびトンネル周辺地山は、不連続的な挙動を示し、通常よく用いられている連続体解析手法では、十分にその挙動を表現できないことが知られている。そこで本研究では、自由度の高い不連続体の挙動を表すことができ、それにより、対象とする地山の挙動をよりよく表現できる可能性のある個別要素法 (DEM) に基づく粒状体解析手法を用いる。特に、トンネルにおいてその安定性が最も重要な切羽前方および上部の地山挙動について、そのメカニズムを考察する。

2. 粒状体解析

本研究では、粒状体によってモデル化したDEMを用いる。DEMでは各要素を剛体と考え、各要素の変形および力の伝達は別の要素との接触点のみで生じるものとしている。解析にはPFC2D(Itasca 社汎用プログラム)²⁾を用いる。この特徴の1つは、粒子同士を連結させることで、鉄筋ボルトや覆工が模擬できることである。

3. 切羽挙動解析

3.1 解析条件

掘削については、砂質地山を対象とし、土被り 2D の位置に直径 10m のトンネルを掘削する。切羽パターンは素掘り、フォアパイル($\phi=30\text{cm}$)、フォアパイル($\phi=50\text{cm}$)、鏡ボルト、長尺鏡ボルトの5パターンである。概略図および材料パラメーターをそれぞれ図1および表1に示す。本研究では、弾性係数 50MPa 程度の地山材料を想定している³⁾(表1)。

3.2 解析結果

結果の一例として素掘り、フォアパイル($\phi=30\text{cm}$)、鏡ボルトの3つの切羽パターンについて示す。掘削後の粒子分布および接触力分布を図2に示す。接触力分布は、線の方で接触の方向を、太さで接触力の大きさを表している。粒子分布より、素掘りでは、切羽が崩壊しているが、対策工を施すと切羽の崩壊を抑制している。接触力分布をみると、素掘りでは切羽前方から地表面近くまで接触力が低下した領域(ゆるみ領域に対応する)が確認できる。フォアパイル、鏡ボルトでは、切羽前方に多少のゆるみ領域がみられるが、その外周にアーチ効果による接触力が強い部分が見られる。このように、粒状体解析では視覚的に崩壊の様子やゆるみ領域を確認しやすい長所がある。次に、周辺地山の応力を調査する。粒状体解析では直接応力を求めることができないため、任意の円領域を指定し、その領域内の接触力から平均応力を求める。結果の一例として、切羽前方 5m のライン(図1の点線)の応力分布を図3に示す。素掘りでは、切羽前方から上部にかけて、水平方向応力 σ_h 、鉛直方向応力 σ_v とも大きな低下がみられ、ゆるみ領域が発生する原因となっている。フォアパイル、鏡ボルトは、 σ_h 、 σ_v の低下を抑制し、特に鏡ボルトは、その効果が大きい。さらに、応力経路に着目すると(図4)、素掘りでは、破壊

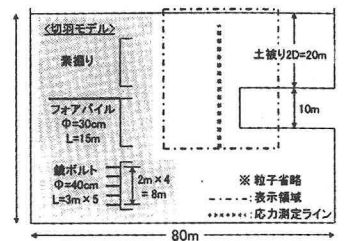


図1 解析領域と切羽補強モデル、および、応力算出ライン

表1 材料パラメータ

(a) 地山	
領域サイズ (m ²)	55 × 80
粒径 (m)	0.1 ~ 0.2
粒子数	約 53000
ばね定数 (N/m)	粒子間 Kn 1×10^8
	Ks 5×10^7
	壁-粒子間 Kn 1×10^8
	Ks 5×10^7
粒子間摩擦係数 0.5	
粒子密度 ρ (kg/m ³) 2000	
(b) フォアパイル, ボルト	
ボルト	長さ (m) 5
	本数 (本) 5
	接合剛性 (Pa/m) Pb_Kn 7×10^{11}
	Pb_Ks 8.4×10^9
	接着力 (Pa) Pb_n 7×10^{12}
	PB_s 8.4×10^{10}

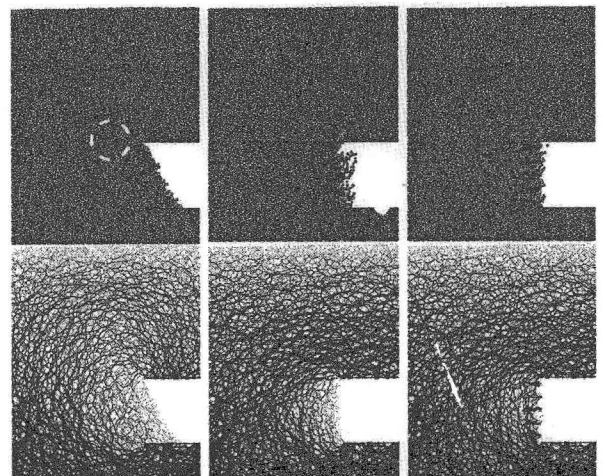


図2 トンネル切羽周辺の粒子分布(上)および接触力分布(下)

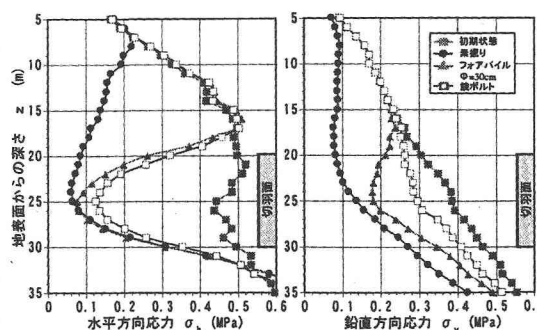


図3 応力分布

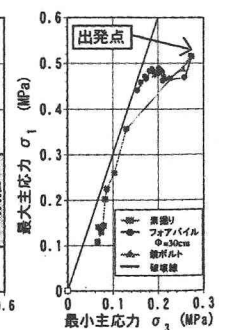


図4 応力経路

線に達し、その後破壊線に沿って応力が低下している。フォアパイルでは、破壊線に達しているが応力低下は小さく、鏡ボルトにおいては、破壊線に到達していない。以上のことから、切羽前面に施工する鏡ボルトが切羽の安定に効果があると考えられる。

4. 近接する切羽間の地山挙動解析

4.1 解析条件

前述の解析結果(素掘り、フォアパイル $\phi=30\text{cm}$ 、鏡ボルト)を用い、さらに反対側から掘削し、地山、既設切羽、新設切羽の挙動を調査する。地山の物性値および材料パラメーターは前述の解析と同様である。後進坑が先進坑の切羽に向かい掘削され、その距離が3Dと2Dとなるケースを解析する。後進坑は素掘りとする。本文では、切羽間距離2Dのケースについて示し、概略図を図5に示す。

4.2 解析結果

連続体弾性解析の後進坑掘削による増加変位分布を図6に示す。また、粒状体解析における、粒子分布、接触力分布および増加変位分布を図7に示す。素掘りにおいては、先進坑、後進坑の掘削により発生した2つのゆるみ領域が重なり、地表面から切羽周辺まで接触力は低下し、両切羽ともに崩壊している。また、地表面沈下もみられる。フォアパイルおよび鏡ボルトにおいては、天端付近を一体化するので、後進切羽側に天端付近の粒子が流入するのを抑え、切羽崩壊を抑制している。また、増加変位分布に着目すると、連続体解析では、全体的に後進切羽側に引っ張られるような挙動を示しているが、粒状体で表現した各パターンでは、両切羽に向かう挙動が見られる。この挙動は両切羽周辺地山にゆるみ領域が存在していたために生じた挙動であると考えられる。フォアパイルおよび鏡ボルトにおいては、地山が一体化され、変位挙動は弾性解析結果に近づいている。切羽前方5m(図5の点線)の応力分布を図8に示す。素掘りでは、応力が低下しているが、フォアパイルおよび鏡ボルトでは、天端付近で初期応力を維持していることがわかる。また σ_v の鏡ボルトについてはアーチ効果により応力低下を抑制していることがわかる。

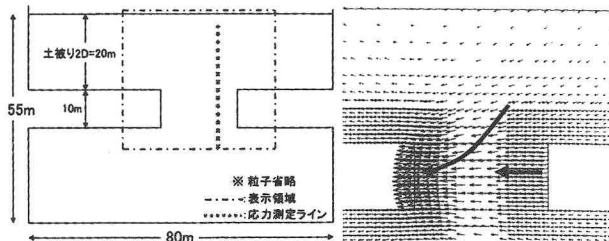


図5 解析領域、および、応力算出ライン

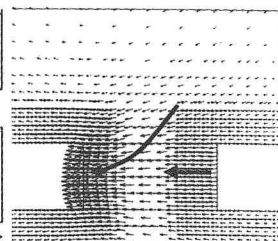


図6 連続体解析における増加変位分布

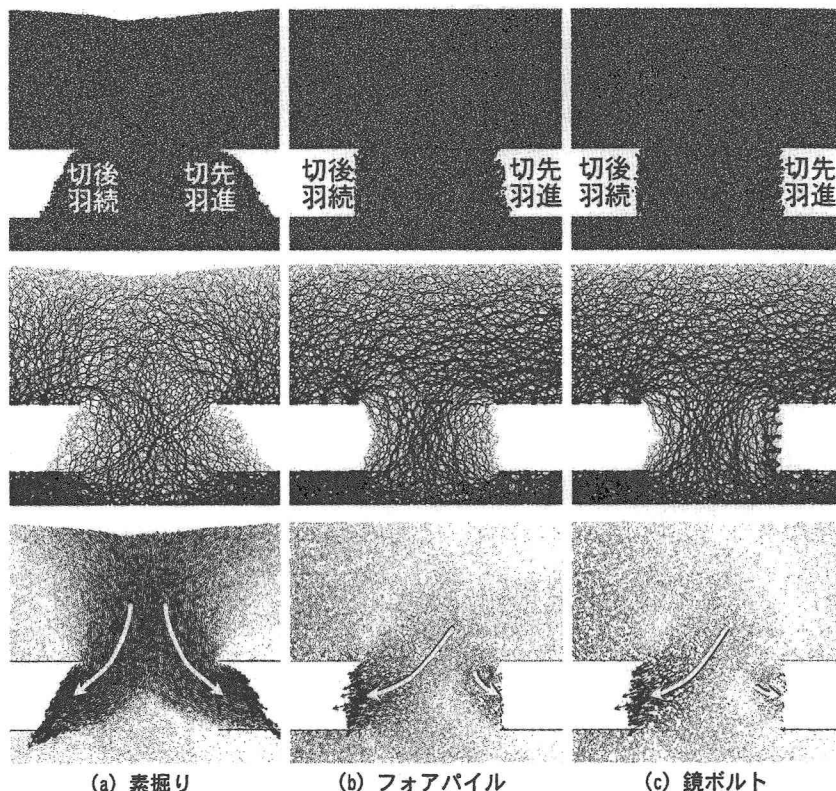


図7 トンネル切羽周辺の粒子分布(上)、接触力分布(中)、および、増分変位分布(下)

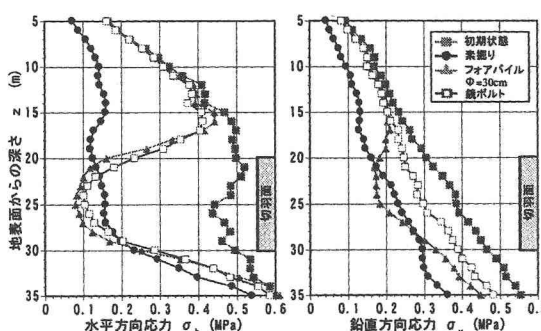


図8 応力分布(切羽間距離2D)

5. 結論

本研究の結論を以下に述べる。1) ボルトなどによって、地山の最小主応力の低下が抑制され、切羽のゆるみが広がらずに、切羽の安定性が確保される、2) フォアパイルのような長尺のボルトより、切羽前面に短くても密にボルトを打つほうが、支保効果がある、3) 効果的な支保は、粒状体であっても連続体的挙動に近づく、ことが示された。なお、この結果は限られた条件で得られたものであり、一般性の有無を調べることは今後の課題である。

参考文献

- 1) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L : A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, 29(1), pp.47-65, 1979.
- 2) Itasca : PFC2D ver.2.0 User's Guide, Itasca, 1999.
- 3) 清水則一, 澤江宏徳, 重田佳幸, 安部達也: 砂質地山トンネルの力学的挙動と支保効果のメカニズムについて, 第12回トンネル工学研究論文・報告集第12巻, pp.153-158, 2002.11.