

押し出し性地山における リングカット工法の作用効果

林久資^{1*}・長谷川昌弘²・吉岡尚也³・青木一男³・菅浩亮¹

¹大阪工業大学大学院 工学研究科都市デザイン工学専攻 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

²大阪工業大学 工学部都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

³大阪工業大学 工学部環境工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

*E-mail: hayashi@civil.oit.ac.jp

押し出し性地山にリングカット工法でトンネルを構築する場合、地山強度比がトンネルの挙動に及ぼす影響を把握するために三次元数値解析を行った。その結果、①リングカット工法は切羽の押し出し量を抑制する効果は大きいが断面変形率の抑制には寄与しないこと、②核を残すことによるロックボルトの打設遅れは断面変形率には影響しないこと、③地山特性曲線は収束判定や支保工の効果を知る上で有益な情報を得られることなどがわかった。

Key Words : NATM, squeezing rock, Ring-cut method, Numerical analysis

1. はじめに

仲野¹⁾らは、岩の一軸圧縮強さが地山の初期応力の2倍より小さければトンネル周辺地山がせん断破壊を起こすことを指摘している。このような地山にトンネルを掘削する場合には、トンネルの安定性を確保するために補助工法を併用したり、断面の早期閉合を行うことが多い。しかしながら、補助工法に用いる補助部材は、生産、廃棄に伴う環境負荷も大きい。地球環境保全が重要視されている現在においては、環境にやさしいエコトンネル施工法の確立が急務であると考えられるため、ここでは地山の支持力を利用して切羽の安定性を確保するベンチカット工法に核を残した工法（リングカット工法）に着目した。

以下では、地山強度比の違いが、リングカット工法に及ぼす影響を把握するためにFLAC3Dを用いた三次元数値解析を行った。トンネルの力学的な安定性評価は、切羽の押し出し変形量、断面変形率、ロックボルトの軸力分布、地山特性曲線を通じて行った。

2. 解析概要

(1) 地山強度比

Aydan²⁾は、我が国のトンネル施工において押し出し性

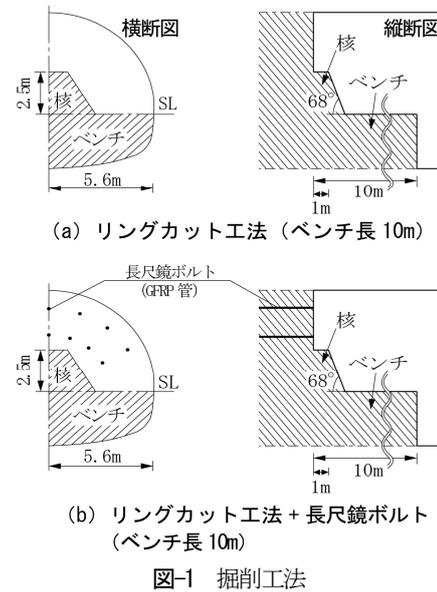


図-1 掘削工法

の現象が発生する地山は、地山強度比が1.6~2.0が境界値であること、またトンネルの壁面ひずみは1%~12%の範囲であることを指摘している。そのため、押し出し性の現象が顕著に表れるように地山強度比を1.0, 0.75, 0.5に設定して解析を行った。

(2) 掘削工法

トンネルの安定性を評価するための掘削工法を図-1に示す。掘削は、ベンチ長10mのベンチカット工法を基本

とし、これに核を設けたリングカット工法を図-1(a)に示す。図-1(a)の上半切羽の前方地山に長さ12.5mのグラスファイバー管(GFRP管)による長尺鏡ボルトを1断面14本(ラップ長3.5m)打設した工法を図-1(b)に示す。

(3) トンネル支保工および補助工法

押出し性地山におけるトンネルの構築においては、適切な支保パターンの設定が重要である。Hock³⁾らは、トンネル掘削に伴う変形量から支保工のガイドラインを提案しているため、そのガイドラインを参照した。

地山強度比1.0の場合は、吹付けコンクリートとロックボルトのみの軽微な支保でも掘削が可能であるとされており、吹付けコンクリート厚さは20cm、ロックボルトは長さ4mのものを周方向に1.2m間隔で1断面18本、そして奥行き方向には1m間隔で打設した。

つぎに、地山強度比0.75、0.5の場合は、吹付けコンクリート厚さ25cm、長さ6mのロックボルトを1断面18本、鋼製支保工についてはH-200を1m間隔で設置することとした。また、切羽安定対策として上半切羽に長尺鏡ボルトを1断面に14本(ラップ長3.5m)打設した。

(4) 解析領域と境界条件

仲野¹⁾によると側圧係数が1.0の場合、岩の一軸圧縮強さが地山の初期応力の2倍より小さければ押出し性の現象を有するとしている。また、三浦⁴⁾によると、土かぶり厚さが70m以上になると側圧係数の平均値は1.0になっている。したがって、土かぶり厚さは100mとした。その他の解析領域は、インバートより下部の領域は60m、横断方向の領域は100m、トンネル掘進方向の領域は100mに設定した⁵⁾。ただし、トンネル挙動の対象性を考慮して半断面とした。

境界条件はつぎのように設定した。地表面の挙動はフリーとし、底面は鉛直方向の挙動を固定した。そして、トンネル縦断方向の両側面は横断方向の挙動を固定した。一方、横断方向の両側面は縦断方向の挙動を固定した。

(5) 解析手順

解析は、まず地山の自重解析を行った。鉛直方向の初期応力は、地山の単位体積重量と土かぶり厚さより、水平方向の初期応力は鉛直方向の初期応力と側圧係数の関係より算出した。

トンネルの掘削は、実施工での掘削手順を考慮し、上半を1mずつ掘削した。支保部材については核部分を考慮し、吹付けコンクリート、鋼製支保工は切羽面より1m手前まで、ロックボルトは2m手前まで設置されるものとした。上半切羽が10m掘削された後の下半切羽は上半切羽に併進させて掘削した。下半の支保工については、切羽より1m手前まで施工されるものとした。

表-1 入力定数

地山強度比		1.0	0.75	0.5
地山	単位体積重量(kN/m ³)	20		
	変形係数(kN/m ²)	4×10 ⁵	3×10 ⁵	2×10 ⁵
	ポアソン比	0.3	0.43	0.45
	粘着力(kN/m ²)	150	140	130
	内部摩擦角	20°	19°	17°
	側圧係数	1.0		
吹付けコンクリート	変形係数(kN/m ²)	3.4×10 ⁶		
	ポアソン比	0.2		
	吹付け厚(m)	0.2	0.25	
鋼製支保工(H200)	断面積(m ²)	—	6.53×10 ⁻³	
	断面二次モーメント(m ⁴)	—	4.72×10 ⁻⁵	
	弾性係数(kN/m ²)	—	2.1×10 ⁵	
	ポアソン比	—	0.3	
ロックボルト	ねじり棒鋼	断面積(m ²)	4.52×10 ⁻⁴	
		ヤング率(kN/m ²)	2.1×10 ⁸	
		引張り強度(kN)	179.3	
	定着材	せん断剛性(kN/m ²)	1.1×10 ⁴	
		粘着強さ(kN/m)	230	
		摩擦角(°)	30	
長尺鏡ボルト	GFRP管	穿孔外周(m)	0.132	
		単位体積重量(kN/m ³)	17.5	
		弾性係数(kN/m ²)	2×10 ⁷	
	定着材	断面積(m ²)	1.71×10 ⁻³	
		せん断剛性(kN/m ²)	8.19×10 ⁵	
		付着強度(kN/m)	76	

(6) 力学モデルおよび入力定数

トンネルが掘削される地山の力学モデルは、弾完全塑性体とし、降伏判定にはモールクーロンの降伏基準を用いた。ロックボルトと鏡ボルトはケーブル要素、吹付けコンクリートはシェル要素、鋼製支保工はビーム要素でモデル化した。解析に用いた入力定数を表-1に示す⁶⁾。

3. 解析結果および考察

(1) 切羽の押出し変形量

図-1の工法でトンネルを50mまで掘削した場合の切羽の押出し量コンターを図-2に示す。田中ら⁸⁾は、実測値より切羽の押出し量が70mmを超えると切羽崩壊の危険性があると指摘しているため、その境界を黒の破線で示した。

まず、地山強度比1.0に注目する。ベンチカットで掘削した場合は切羽前方1.5m程度まで70mm以上の押出し量が発生しているのに対し、リングカット工法は核があるために切羽面での抵抗力が増大し、切羽前方0.6m程度まで抑制される。また、長尺鏡ボルトを併用した場合には、70mm以上の押出し量を生じる範囲が核部分のみに限定されていることがわかる。これは核部分の効果に加え、長尺鏡止めボルトによる引張り力が付加されたためである。

つぎに、地山強度比0.75に着目すると、核を残した場合には切羽前方2m程度まで70mm以上の押出し量が発生している。しかし、長尺鏡ボルトを併用した場合は1.5m

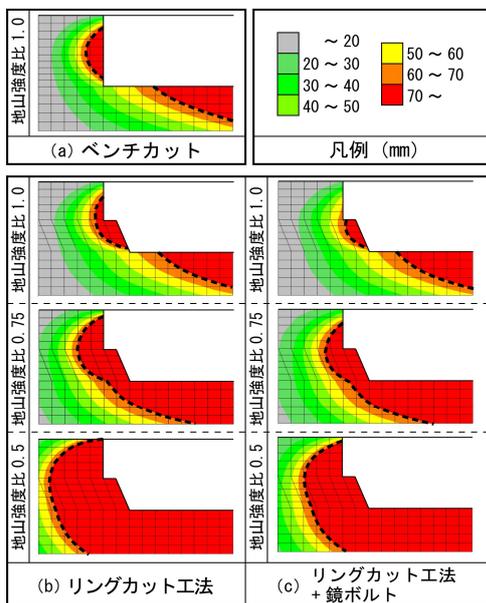


図-2(a)～(c) 押し出し変形量のコンター

程度まで抑制される。このように地山強度比が0.75まで低下した場合にも、核を残して補助工法を併用すると補助部材の使用量を減少させることができるものとする。

地山強度比が0.5まで低下すると長尺鏡ボルトを1断面に14本打設するだけでは、切羽の安定性を確保することが難しくなることがわかる。言い換えると、地山強度比がこの程度まで低下すると、大規模な切羽安定対策を必要としていることを示唆している。

(2) 長尺鏡止めボルトの有無による断面変形率

押し出し性地山でのトンネル施工は、断面変形率が1%～12%になるとされており²⁾、断面の変形率にも着目することが必要である。ここでは地山強度比が0.75のときの坑口より20m地点の切羽進行に伴う断面変形率を図-3に示した。ただし、ここでの断面変形率とはトンネル内空変位をトンネル掘削幅で除したものの百分率である。切羽位置0m地点が未掘削状態で20m地点が切羽が通過した状態である。

図-3にリングカット工法で掘削した場合と、これに長尺鏡ボルトを併用した場合の断面変形率を示す。両者の断面変形率がほぼ同じであることから長尺鏡止めボルトは断面変形率の抑制にはほとんど寄与していないことがわかる。

(3) ロックボルトの軸力分布

核を残してトンネル掘削を行う場合、核を残さない場合に比べロックボルトの打設が1間遅れている。そのため断面変形率の増加が懸念される。

図-4は、リングカット工法に長尺鏡ボルトを併用した工法と、ベンチカット工法に長尺鏡ボルトを併用した工法のロックボルト軸力を比較したものである。ロックボ

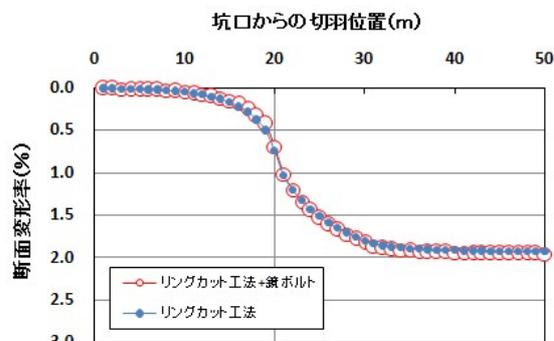


図-3 鏡ボルトの有無による断面変形率

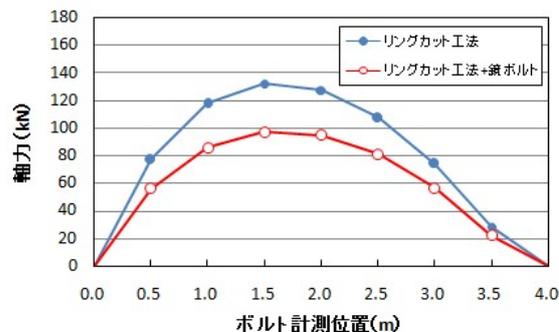


図-4 ロックボルト軸力分布

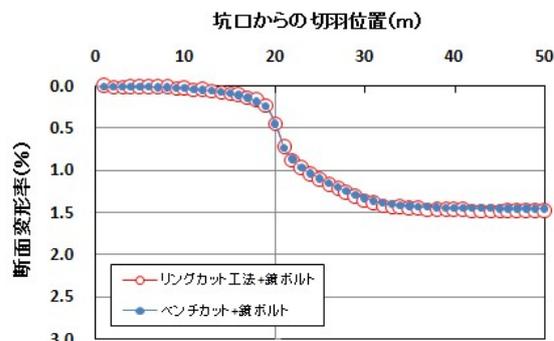


図-5 核の有無による断面変形率

ルトの軸力は、坑口から50m地点まで掘削した時の20m地点でのSL近傍のものを用い、計測位置0m地点がトンネル側壁部分を示している。ただし、図-4の解析結果は吹付けコンクリートとロックボルトによる支保工で施工した地山強度比が1.0の場合である。核を残さずにロックボルトを速やかに打設すると、ロックボルトの中央付近での軸力が少しだけ大きくなっていることがわかる。このことから、ロックボルトの支保効果を発揮させるためには早期に打設することが有効であると考えられる。

(4) 核部分の有無による断面変形率

図-4に示したロックボルトの軸力差が断面変形率にどのような影響を及ぼすのか調べるために、地山強度比1.0における断面変形率を図-5に示した。その結果、核の有無に関わらず同じような断面変形率を示しており、

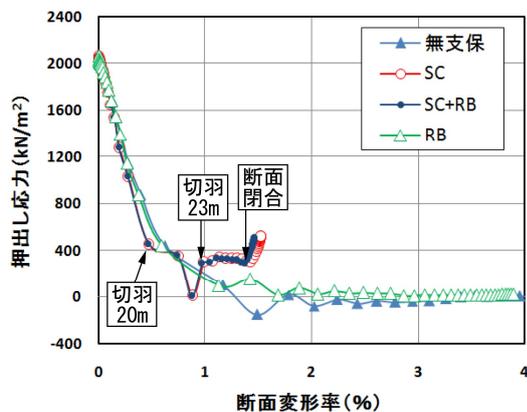


図-6 地山特性曲線

ロックボルトの打設遅延に伴うこの程度の軸力差では断面変形率にあまり影響しないことがわかる。

(5) 地山特性曲線

図-6は、地山強度比が1.0なる地山を種々な支保工を採用してリングカット工法で掘削した場合の坑口より20m地点における押し出し応力と断面変形率の関係、つまり地山特性曲線を描いたものである。図-6の凡例に示したように支保工はそれぞれ無支保の場合、吹付けコンクリートのみの支保を行った場合(SC)、吹付けコンクリートにロックボルトを併用した場合(SC+RB)、ロックボルトのみで支保を行った場合(RB)である。

SC支保で施工した場合とSC+RBで施工した場合に着目すると、切羽位置が20m地点より23m地点までに約0.5%の断面変形率が生じる。これは最終断面変形率の1/3に相当している。そのため、上半アーチ部分に吹付けコンクリートが施工されても支保反力が十分に発揮できないために支保内圧がゼロ付近まで低下するが、切羽が23m地点まで進行すると支保内圧が増加に転じる。そして、トンネル断面が閉合されると支保内圧のみが増大し、トンネルが釣合い状態に至る様子がわかる。一方、無支保で掘削した場合やRBのみの支保で掘削した場合には、断面変形率が3%以上となり、これではトンネルの内空断面を確保することが難しくなる。

4. まとめ

押し出し性地山におけるトンネルの挙動を考察するため三次元数値解析を行い、以下のことがわかった。

- 1) リングカット工法は、切羽の押し出し量を抑制する効果がある。
- 2) 長尺鏡ボルトも切羽における押し出し量の抑制には寄与するが、断面変形率を抑制する効果は認められない。
- 3) 核を残すことによるロックボルトの施工遅延は断面変形率には影響しない。
- 4) 地山特性曲線は、地山の押し出し応力と断面変形率の関係が明確になるため、支保工の効果などを知るうえで有益な情報が得られる。

参考文献

- 1) 仲野良紀：膨張性地山の実態，トンネルと地下，Vol.6 No.10, pp.15-25, 1975.
- 2) アイダノオメール，赤木友之，伊東孝，川本眺万：スクィーズイング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測方法について，土木学会論文集，No.448/III-19, pp.73-82, 1992.
- 3) Evert, H. and Paul, M. : Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and Tunneling International*, pp. 1-21, 2000.
- 4) 三浦克：大断面道路トンネルと山岳トンネル工法の現状と課題，土木学会論文集，No.516/VII-27, pp.1-13, 1995.
- 5) 林久資，長谷川昌弘，吉岡尚也：数値解析結果に基づくトンネルリングカット工法の作用効果，地盤工学研究発表会，pp.1483-1484, 2007.
- 6) 林久資，長谷川昌弘，吉岡尚也，青木一男，菅浩亮：ベンチカット工法に核を残して掘削した押し出し性地山でのトンネル挙動，第17回トンネル工学報告書，投稿中。
- 7) 林久資，長谷川昌弘，吉岡尚也，菅浩亮：押し出し性地山でのリングカット工法の適用性について，第12回岩の力学国内シンポジウム，pp.595-600, 2008.
- 8) 三浦克：大断面道路トンネルと山岳トンネル工法の現状と課題，土木学会論文集，No.516/VII-27, pp.1-13, 1995.

BEHAVIOUR OF TUNNEL IN SQUEEZING ROCKS

Hisashi HAYASHI, Masahiro HASEGAWA, Hisaya YOSHIOKA,
Kazuo AOKI and Kosuke SUGA

In order to understand the behavior of tunnel excavated by ring cut method in squeezing rock, numerical analysis was carried out. Obtained results are as follows: 1) when tunnel excavated by the ring cut method, the controlling effect of displacement of tunnel face is high, however, the ring cut method doesn't contribute to controll the tunnel cross deformation rate. 2) placing delay of rock bolt doesn't contribute to controll the tunnel cross deformation rate. 3) it is effective to draw the characteristic curve to know effect of timbering.