

浅い土かぶり下で側圧係数が トンネルリングカット工法に及ぼす影響

菅 浩亮^{1*}・林 久資¹・長谷川 昌弘²・吉岡 尚也²

¹大阪工業大学 大学院 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1)

²大阪工業大学 工学部 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1)

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

リングカット工法で掘削されたトンネルの挙動特性や支保部材の作用効果を応力再配分過程や地山特性曲線に基づいて検討した。その結果、トンネル切羽周辺地山の挙動は側圧係数に依存する、リングカット工法は切羽の安定対策として効果がある、長尺鏡ボルトはトンネル切羽の安定性を確保するうえで有効である、地山特性曲線は支保工の規模や収束時の断面変形率を把握するための情報が得られることが明らかになった。

Key Words : ring-cut method, shallow depth, coefficient of lateral pressure, numerical analysis

1. はじめに

浅い土かぶり下で切羽の自立が困難な場合でもNATMに補助工法を併用することで掘削・構築が可能となった。これにより従来適用されていたシールド工法に比べ低コストで掘削が可能となったが、補助部材の多用および廃棄による環境面への負担が懸念される。そこで、切羽面の地山を利用して核を残すことで補助部材を用いずに切羽近傍の地山の安定性を確保でき環境負荷の軽減が期待できるショートベンチカットに核を残して掘削する工法(リングカット工法)に着目した。

林ら¹⁾はリングカット工法で掘削した場合における適用限界を明らかにし、菅ら²⁾はトンネル切羽周辺地山の挙動は側圧係数に依存することを示した。ここでは、三次元数値解析を通して応力再配分や地山特性曲線を調べることでトンネルリングカット工法の挙動特性や支保部材の作用効果について検討した。

2. 解析概要

(1) 解析のための掘削工法

解析のための掘削工法を図-1³⁾に示す。ベンチ長10mのショートベンチカット工法を基本の掘削工法とし、掘削工法(a)は横断方向に台形形状、縦断方向に内部摩擦角を考慮した核を1m有するリングカット工法である。掘

削工法(a)に長尺鏡ボルトを併用したものを掘削工法(b)とした。なお、補助工法に用いた長尺鏡ボルトは長さ12.5mでラップ長を3.5mとし1断面に14本打設するものとした。

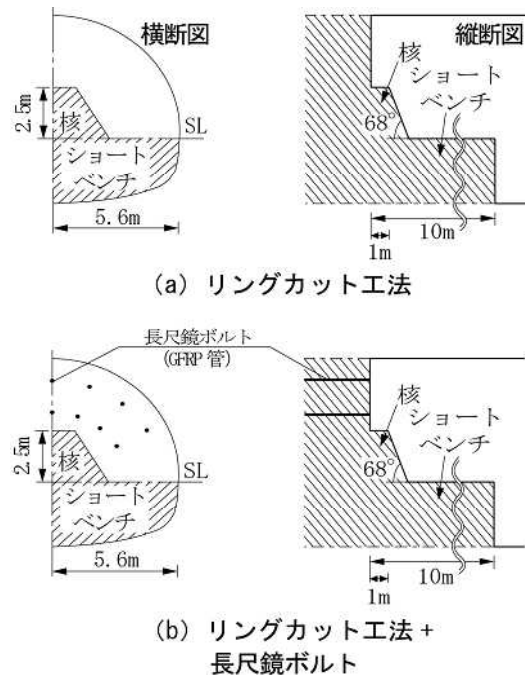


図-1 解析のための掘削工法³⁾

(2) 境界条件と解析領域

境界条件はつぎのように設定した。地表面の挙動

表-1 入力定数⁴⁾

地山	側圧係数	0.35, 0.57, 0.78	
	粘着力 (kN/m ²)	60	
	内部摩擦角 (°)	15	
	変形係数 (kN/m ²)	1.0 × 10 ⁵	
	ポアソン比	0.3	
	単位体積重量 (kN/m ³)	18	
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	
ロックボルト	ねじり棒鋼 (TD24)	断面積 (m ²)	4.52 × 10 ⁻⁴
		弾性係数 (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	弾性係数 (kN/m ²)	2 × 10 ⁷
		断面積 (m ²)	1.71 × 10 ³
		単位体積重量 (kN/m ³)	17.5
	定着材	せん断剛性 (kN/m ²)	8.19 × 10 ⁵
		付着強度 (kN/m)	76

はフリーとし、底面は鉛直方向の挙動を拘束した。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拘束した。

解析領域は都市部での浅い土かぶり下でのトンネル挙動を把握するため土かぶりは30mに設定した。インバートより下部の領域は60m、横断方向は100m、奥行は100mとし50mまで掘削されるものとした。

(3) 力学モデルおよび入力定数

地山の力学モデルは、弾完全塑性体とし、降伏の判定にはモールクーロンの降伏基準を用いた。ロックボルトと長尺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でモデル化した。

解析時に用いた入力定数を表-1に示す⁴⁾。

(4) 解析手順

解析手順は、ステップ1で初期応力を計算し、ステップ2以降は実施工を考慮し1mずつ掘削した。その際吹付けコンクリートは一問遅れ、ロックボルトは核が残されているために二問遅れで施工されるものとした。ただし、上半が10m掘削された後は上半と共に下半およびインバートを同時進行させた。

3. 解析結果と考察

(1) 上半切羽の押し出し変形量

図-2にリングカット工法で掘削した場合の上半切羽押し出し変形量のコンター図を示す。押し出し変形量が70mm

以上になると切羽崩壊の危険が指摘されており⁵⁾、その領域を赤色で示した。側圧係数が0.35では、核部分に崩壊の危険性が見られ、側圧係数が0.57、0.78へと大きくなると共に核部分だけでなく切羽前方地山における崩壊の危険性が増すことが読み取れる。一方、菅⁴⁾はショートベンチカット工法で掘削した場合には、核を残した場合よりも切羽崩壊の危険性のある領域が拡大することを明らかにしている。したがって、核を残して掘削した場合には補助工法を併用したとしても軽微なものになると考える。

トンネル掘削では、切羽が自立することが重要であるため、切羽の安全性を考慮し補助工法を併用した場合の結果を図-3に示す。ただし、補助工法に用いた長尺鏡ボルト(長さ12.5mでラップ長3.5m)は1断面に14本打設した。K₀=0.35では押し出し変形量が70mm以下に抑制される。そして、側圧係数が大きくなるとともに押し出し変形量も70mmを越えるが、その広がりには図-2と比較すると抑制されており、長尺鏡ボルトは押し出し変形量の抑制や切羽の安定対策として有用であることが認められる。

(2) 地表面沈下量

図-4にリングカット工法で掘削した場合の地表面沈下量を側圧係数ごとに示す。掘削工法の違いも比較するため、K₀=0.35の場合は長尺鏡ボルトを使用した結果も示した。その結果、掘削工法の違いによる地表面沈下量の

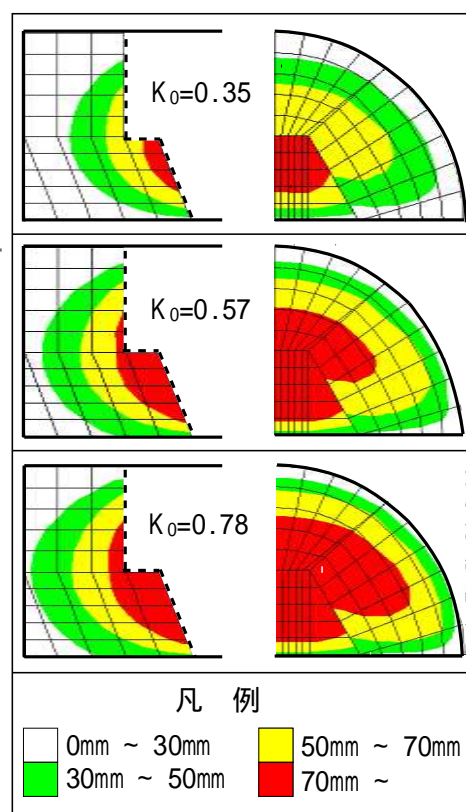


図-2 リングカット工法での上半切羽の押し出し変形量

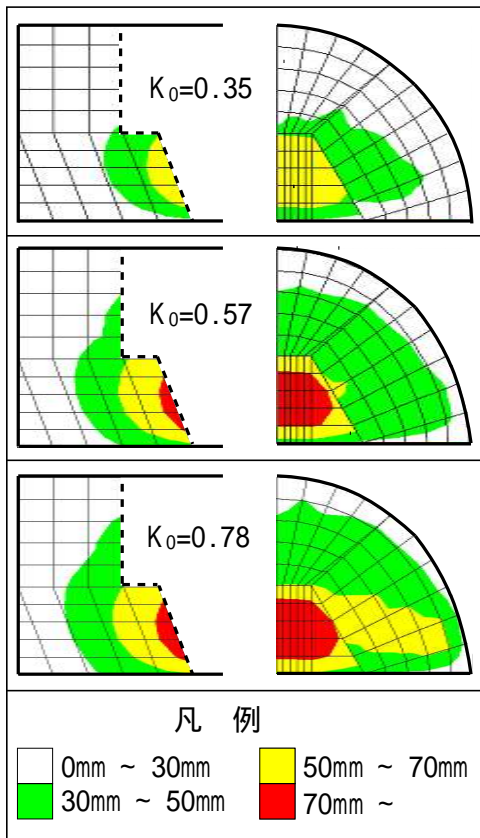


図-3 リングカット工法に鏡ボルトを併用した場合の上半切羽の押し出し変形量

差異が生じていないことから、長尺鏡ボルトは切羽の押し出し変形量は抑制するが、地表面沈下量の抑制には寄与しないことがわかる。また、側圧係数が大きくなると地表面沈下量が抑制されている。これは側圧係数に依存して水平面内の初期応力が大きくなるため、地山自身の持つ拘束効果が表れたものと考えられる。

(3) 応力再配分

支保工の作用効果を理解する為、ここからは側圧係数の上限値0.78での結果を中心に考察する。K₀=0.78で側壁部の応力再配分過程を示す。図-5にリングカット工法で掘削した場合の結果を、そしてリングカット工法に鏡ボルトを併用して掘削した場合の結果を図-6に示す。これらは坑口から20m地点でS.L.の1m上部の側壁での応力再配分の過程を示している。なお、図中に示した最大主応力は側線方向の応力、最小主応力は法線方向の応力を意味している。

図-5に着目すると、切羽が16m進行した時点で主応力の差が最大になっており塑性化していることがわかる。言い換えると、トンネル掘削中は切羽から4m前方の地山が塑性化し始めることを意味している。その後さらに掘削が進んで切羽が通過するまで主応力は共に減少する。そして上半支保工が設置されると支保工の内圧効果に

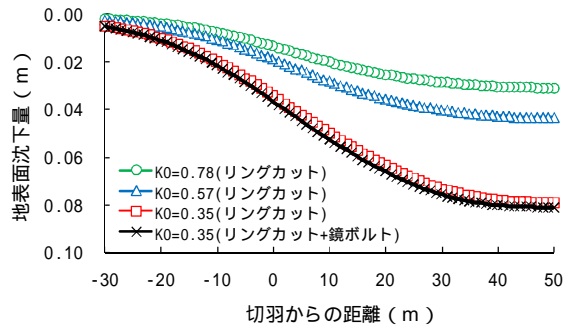


図-4 地表面沈下量

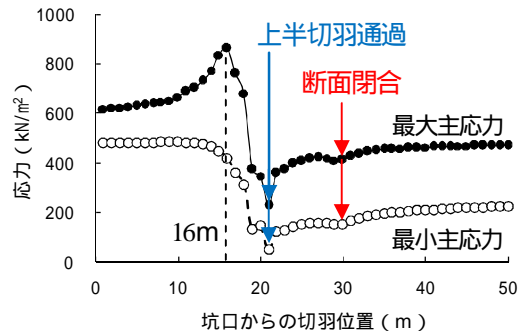


図-5 リングカット工法で掘削した場合の応力再配分（側壁：K₀=0.78）

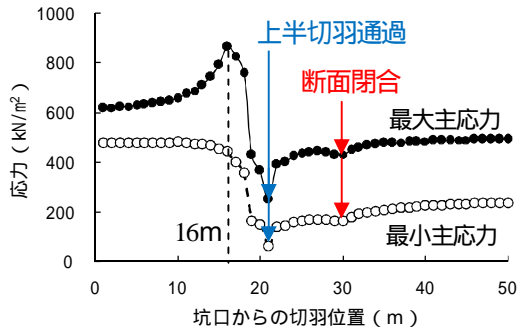


図-6 リングカット工法に鏡ボルトを併用した場合の応力再配分（側壁：K₀=0.78）

よって応力が上昇に転じる。トンネル断面が閉合された30m地点以降では主応力差がほぼ一定値に漸近し、収束に向かう様子を読み取れる。その結果として、トンネルの力学的安定性が得られたことがわかる。

一方、図-6に示したリングカット工法に鏡ボルトを併用して掘削した場合でも図-5に示した結果とほぼ同じ現象がみられる。このことより、長尺鏡ボルトの有無が応力再配分に及ぼす影響はないものと考えられる。

(4) 断面変形率

坑口から20m地点のS.L.の1m上部の側壁での断面変形率を図-7に示す。トンネル側壁間の変形量をトンネル掘削幅で割った百分率で断面変形率を算出している。断面変形率は側圧係数に影響されるが掘削工法に依存しな

いため⁴⁾、リングカット工法に長尺鏡ボルトを併用しトンネルを掘削した場合の解析結果のみを示した。切羽通過直前の19m地点までは変形率はほぼ0%で推移しているが、切羽通過とともに断面変形率が增大していくことがわかる。その後トンネル断面が閉合されると断面変形率は収束に向かうことがわかる。

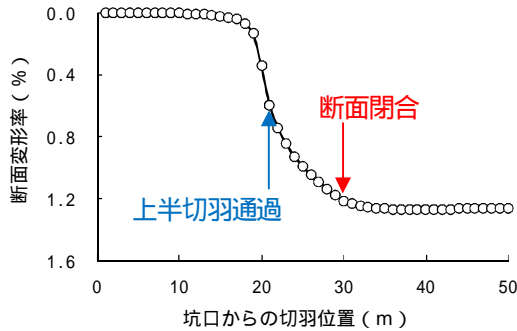


図-7 断面変形率

(5) 地山特性曲線

図-6と図-7における切羽位置を共通にして、図-6の最小主応力と図-7の断面変形率から描いた地山特性曲線を図-8に示す。掘削開始後応力は減少し断面変形率が増加する傾向を示す。切羽が通過するまで最小主応力すなわち押し出し応力は減少するが、支保工が設置されるとその内圧効果で押し出し応力は増加し始める。その後しばらく

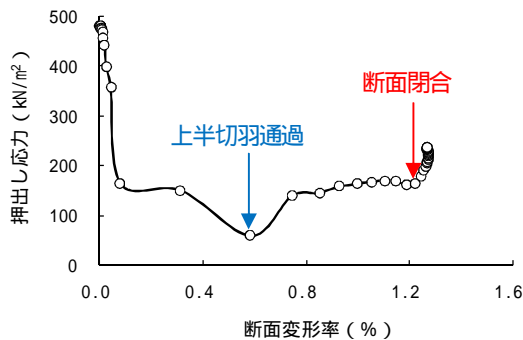


図-8 地山特性曲線

は押し出し応力はほぼ一定に推移し断面変形率が増加する状態が続いている。しかし、トンネルの断面が閉合されると断面変形率の増加が止まり押し出し応力が増大する様子がわかる。このように地山特性曲線を描くことは、支保工の規模や収束時の断面変形率を把握するうえで有益であることがわかる。

4. まとめ

浅い土かぶり下で側圧係数がトンネルリングカット工法に及ぼす影響を検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) トンネル切羽周辺地山挙動は側圧係数に依存する。
- 2) リングカット工法は切羽の押し出し変形量を抑制する効果がある。
- 3) 鏡ボルトはトンネル切羽の安定性を確保するうえで有益である。
- 4) 地山特性曲線は支保工の規模や収束時の断面変形率を把握するうえで有益である。

参考文献

- 1) 林久資, 長谷川昌弘, 吉岡尚也: 環境にやさしいショートベンチカット工法に核を残した場合の適用限界, 平成20年度全国大会第63回年次学術講演会 2008.
- 2) 菅浩亮, 林久資, 長谷川昌弘, 吉岡尚也: 側圧係数の違いがリングカット工法の挙動に及ぼす影響, 平成20年度全国大会第63回年次学術講演会 2008.
- 3) 林久資, 長谷川昌弘, 吉岡尚也: 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 2008.
- 4) 菅浩亮, 林久資, 長谷川昌弘, 吉岡尚也: 側圧係数が小土被りトンネルの挙動に及ぼす影響, 第18回トンネル工学研究発表会2008 (投稿中).
- 5) 田中一雄ほか: 切羽変位計測による切羽崩壊予測の一試み, トンネルと地下, Vol.27, No.6, pp55-60, 1996

BEHAVIOR OF THE SHALLOW DEPTH TUNNEL EXCAVATED BY RING-CUT METHOD UNDER DIFFERENT STRESS CONDITIONS

Kosuke SUGA, Hisashi HAYASHI, Masahiro HASEGAWA and Hisaya YOSHIOKA

To clarify the behavior and effect of timbering, stress redistribution and characteristic curve were examined. Obtained results are as follows: 1) tunnel behavior depends on coefficient of lateral pressure, 2) ring-cut method is effective for controlling deformation of tunnel face, 3) face bolt is effective to stabilize tunnel face, 4) the characteristic curve is useful to know scale of timbering and converged deformation.