

地山の強度定数がリングカット 工法に及ぼす影響

Behavior of the tunnel face excavated by the ring-cut method

林久資¹・長谷川昌弘²・吉岡尚也²

Hisashi HAYASHI, Masahiro HASEGAWA, and Hisaya YOSHIOKA

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

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

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

In order to estimate the effect of the ring-cut method, numerical analysis was carried out. The surrounding rock mass is assumed to behave as an elastic-perfectly plastic material in this analysis. Obtained results suggest that the ring-cut method is effective to control the stability of the tunnel face. Among the various auxiliary method, few are more economical and eco-friendly than the ring-cut method.

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

1. はじめに

NATMの補助工法が数多く開発されてからは、これまでシールドトンネルの適用範囲であった都市部における軟弱地山でも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。しかし、アンブレラ工法をはじめとする補助工法は資材を多用し、環境・経済的に見ると問題点も多くある。そこで、切羽面の地山を利用して切羽近傍の地山の安定性を確保するために用いられていた「リングカット工法(核残し工法)」の利点に再注目し、その効果を解明するための数値解析を行った。また、リングカット工法の核部分の形状が切羽の安定性に及ぼす影響についても検討した。

2. リングカット工法の効果の解明

(1) リングカット工法と他工法との比較

トンネルは、都市部におけるトンネル施工を想定し、浅い土かぶりであつ未固結な地山に掘削されるものとする。そこでトンネルリングカット工法の切羽周辺の変位抑制効果を検討するためにFLAC3Dを用いて弾塑性解析を行った。ここでの解析はリング

カット工法、切羽面の安定対策として用いられる鏡吹付け工法、切羽面に安定対策を行わないショートベンチカット工法を基本モデルとした。これらのモデルを図-1、図-2、図-3に示す。

図-1は、下半は長さ10mのショートベンチとし、上半には横断方向に台形形状の核、縦断方向には内部摩擦角 ϕ と粘着力 c を考慮した斜部を設けたリングカット工法である。

図-2は、下半のベンチ長を10mとし、上半部分の鏡面に厚さ50mmの吹付けコンクリートを吹付けた鏡吹付け工法である。

図-3は、切羽面に特別な対策が行なわれていないベンチ長10mのショートベンチカット工法である。

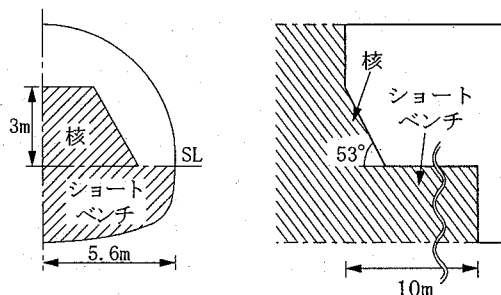


図-1 リングカット工法

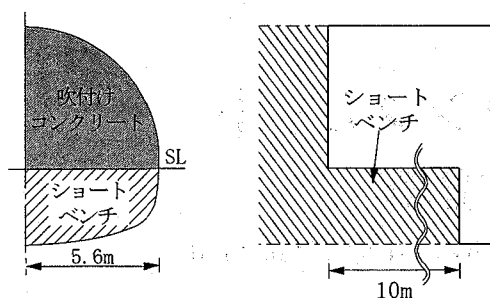


図-2 鏡吹付け工法

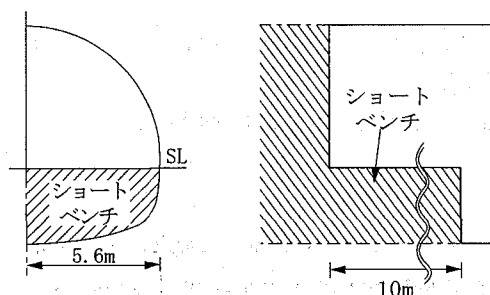


図-3 ショートベンチカット工法

(2) 解析領域

トンネル形状は、道路トンネルのD_{IIa}タイプを採用し、各工法ともトンネル半断面を対象として解析した。ただし、土かぶりは30mとする。このような解析の場合、トンネルインバートより下部の領域と横断方向の解析領域が適切に設定されていない場合には、実際の地山の変位より過小あるいは過大に評価されたりする恐れがある。そこで、土かぶり(H)とトンネルインバートより下部領域(D)との関係すなわち、 $D=\alpha H$ を数パターン解析した結果、 α を1.0以上設定しておくで解析結果に差異の生じないことが判明したので、 α を1.5¹⁾として解析した。また、横断方向の解析領域は50mと70mの2パターンについて解析した結果両者に大きな違いはみられなかったため、横断方向の解析領域については70mとした。また、奥行きはトンネルを50mまで掘削するものとし、100mと設定した。図-4は、数値解析で用いた領域を表している。

(3) 入力定数および力学モデル

解析に必要な入力定数を表-1に示す。これらの入力定数の決定方法として、地山の弾性係数Eの決定には、都市部でのシールドトンネルとNATMの適用事例を地山の一軸圧縮強度と掘削断面積との関係についてまとめた適用範囲中²⁾の一軸圧縮強度 $q_u=1000\text{kN/m}^2$ を採用し、 $E=105q_u$ より算出した。粘着力cと内部摩擦角 ϕ については、谷本³⁾⁴⁾の文献を参照

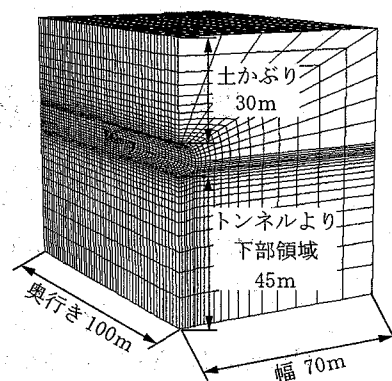


図-4 解析領域

表-1 入力定数の値

地山	弾性係数	$1.05 \times 10^5 \text{kN/m}^2$
	ポアソン比	0.3
	粘着力	50, 100, 150 (kN/m ²)
	内部摩擦角	15° 20° 25°
	側圧係数	0.57
吹付け コンクリート	弾性係数	$3.4 \times 10^6 \text{kN/m}^2$
	ポアソン比	0.2
	吹付け厚	0.2m(側壁) 0.05m(切羽)
ロック ボルト	ねじり 棒鋼	断面積 $4.52 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 弾性係数 $2.1 \times 10^8 \text{kN/m}^2$ 引張り強度 179.3kN
	定着材	せん断剛性 $1.1 \times 10^4 \text{kN/m}$
		粘着強さ 230kN/m
		摩擦角 30°
	定着材	穿孔径 $1.32 \times 10^{-1} \text{m}$

して粘着力c、内部摩擦角 ϕ の値をプロットしたものが図-5である。そこで強度定数の違いによるリングカット工法の効果を検討するために、図-5の下限側付近の値の $c=50\text{kN/m}^2$ 、 100kN/m^2 、 150kN/m^2 、 $\phi=15^\circ$ 、 20° 、 25° の組合せで解析を行った。ロックボルトはねじり棒鋼(TD24)を打設するものとし、吉岡ら⁵⁾が解析時に設定した値を用いた。吹付けコンクリートの弾性係数については、現場での実測値と数値解析値との対比を行って提案された土屋⁶⁾の値を用いた。トンネルが掘削される地山の力学モデルについては、完全弾塑性体的な挙動を呈するものとし、降伏の判定にはモール・クーロンの降伏基準を用いた。また、支保部材については、ロックボルトは引張りと圧縮力は伝達できるが、曲げモーメントは伝達しないケーブル要素、吹付けコンクリートはシェル要素でモデル化した。

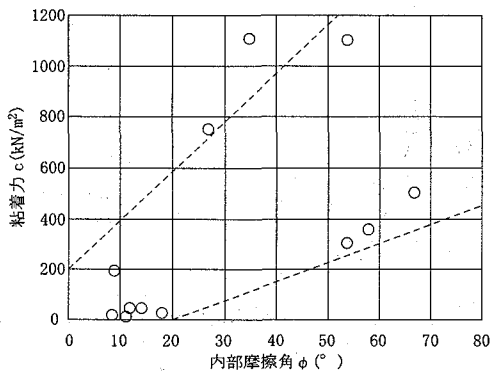


図-5 大阪・神戸層群における c と ϕ の関係

(4) 解析手順

解析は、2ステップで50mまで掘削を行った。ステップ1では地山の初期応力解析を行った。その際、鉛直方向の初期応力についてはトンネル土かぶり高さと単位体積重量を考慮して求めた。一方、水平方向の初期応力は、トンネルの土かぶりが30mであるため、三浦⁷⁾の論文を参照すると側圧係数は0.35~0.78の範囲にあることが指摘されている。そのためトンネル切羽の安定性は、側圧係数の影響を受けるものと考え、ここでの側圧係数は中間値である0.57を採用し、初期応力解析を行った。

このような初期応力のもとで、ステップ2では50mまで一括掘削し、吹付けコンクリート（厚さ200mm）とロックボルト（1断面18本、1.2m間隔）で支保した。これは、掘削段階を考慮した解析値と一括掘削を行った場合の解析値に大きな差異がみられなかったためである。また、鏡吹付け工法の場合は、切羽面に吹付け厚さ50mmの吹付けコンクリートが同時に施工されるものとした。

(5) 解析結果と考察

図-6はリングカット工法、鏡吹付け工法、ショートベンチカット工法の地山強度の違いにおける切羽押し出し量をコンターで示したものである。これらの図より、 ϕ と c が増加するにつれて切羽の押し出し量が抑制されていることがわかる。しかし、田中ら⁸⁾によると現場計測事例に基づき、切羽の押し出し量が70mmを越えると切羽の崩壊が生じる可能性が高いとしている。 $\phi=15^\circ$ 、 $c=50\text{kN/m}^2$ の解析結果では、掘削工法によらず切羽での押し出し量は70mmを大幅に越えている。したがって、このような地山条件下でトンネルを掘削する場合には、大規模な補助工法の併用が必要であると考え。一方、これ以外の強度定数（内部摩擦角と粘着力）の組み合わせでは70mmを越える押し出し量は生じていない。

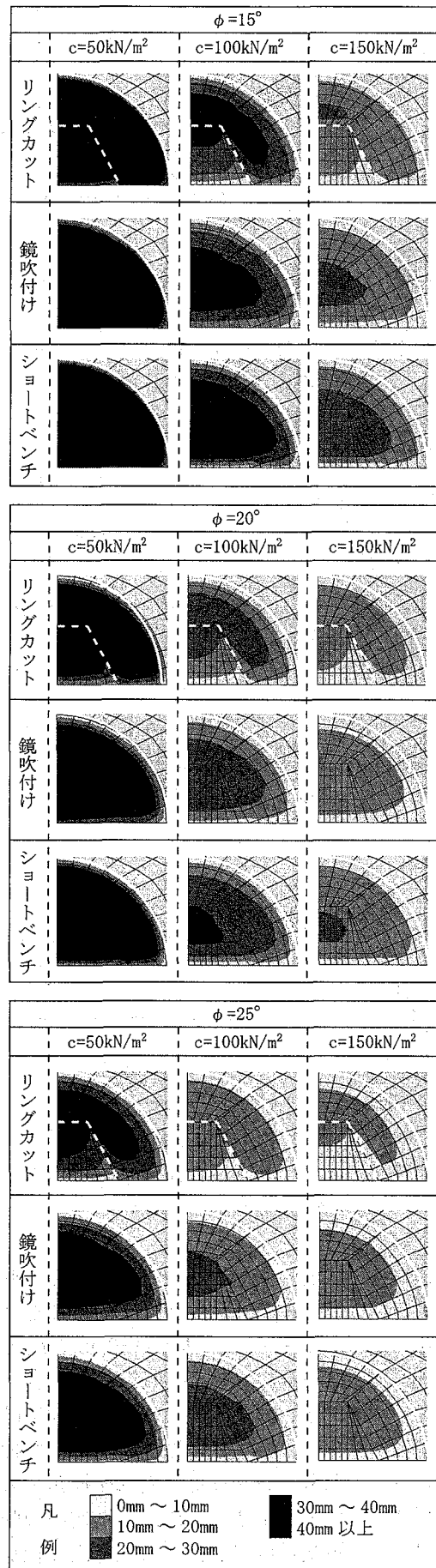


図-6 切羽押し出し変位のコンター

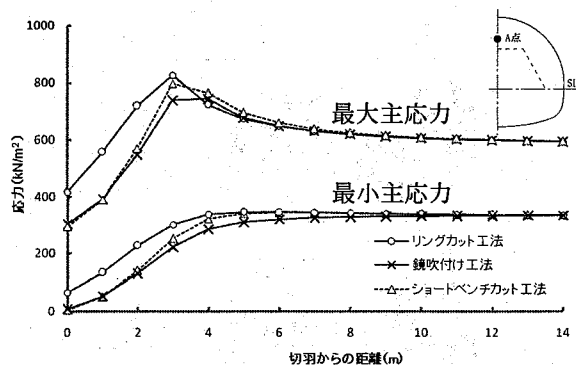


図-7 A点における切羽前方の主応力分布
(強度 $\phi=20^\circ$, $c=100\text{kN/m}^2$)

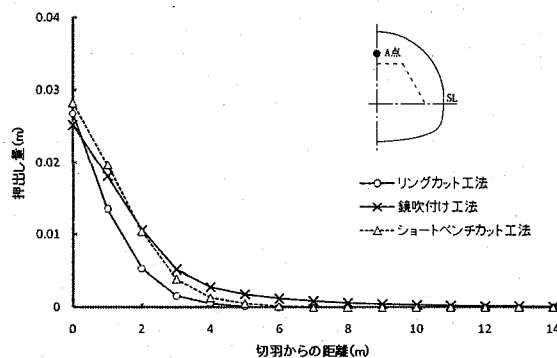


図-10 A点における切羽前方の押し出し量分布
(強度 $\phi=20^\circ$, $c=100\text{kN/m}^2$)

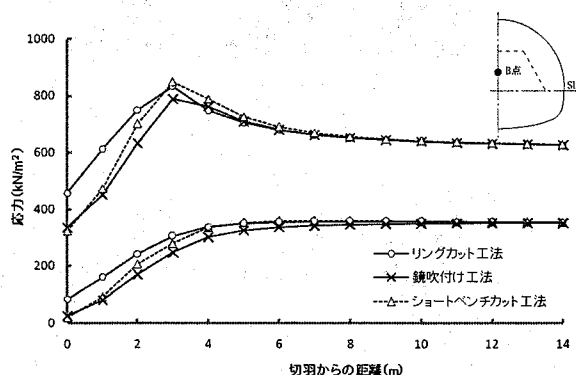


図-8 B点における切羽前方の主応力分布
(強度 $\phi=20^\circ$, $c=100\text{kN/m}^2$)

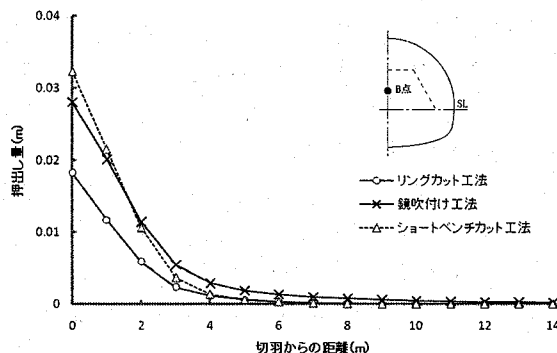


図-11 B点における切羽前方の押し出し量分布
(強度 $\phi=20^\circ$, $c=100\text{kN/m}^2$)

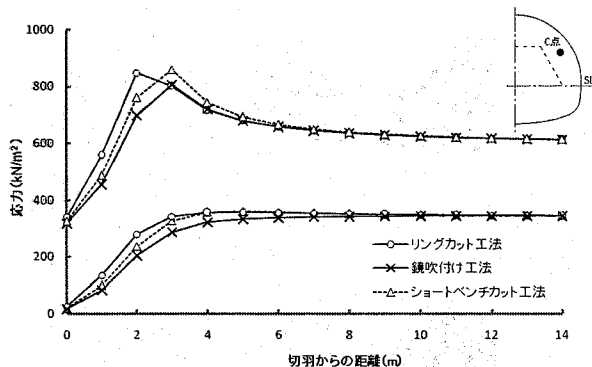


図-9 C点における切羽前方の主応力分布
(強度 $\phi=20^\circ$, $c=100\text{kN/m}^2$)

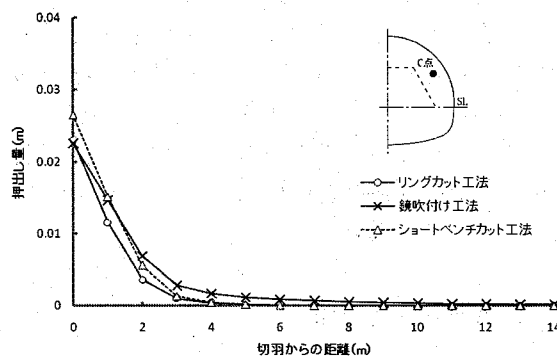


図-12 C点における切羽前方の押し出し量分布
(強度 $\phi=20^\circ$, $c=100\text{kN/m}^2$)

ここでは、切羽の押し出し量から判断して切羽の安定性が確保できる $\phi=20^\circ$, $c=100\text{kN/m}^2$ に着目するとショートベンチカット工法では30mmを超える押し出し量が生じているが、他の工法では30mm以下に抑制されていることがわかる。このような効果は、切羽面にわずかな核を残すことによって変形が抑制されているものと考えられる。また、内部摩擦角 ϕ の値によらずリングカット工法は、想定した地山の強度特性範囲内では鏡吹付け工法より最大押し出し量が小さくなるという結果が得られた。

つぎに、図-7~9は、縦軸に応力、横軸に切羽から

の距離を取って切羽前方地山の主応力分布を描いたものである。0m地点が切羽面でそれ以上は切羽前方地山を表している。ここでも図-6と同様に $\phi=20^\circ$, $c=100\text{kN/m}^2$ に着目した。これらのグラフより、A点とB点では最大主応力のピークが切羽前方地山の3m付近に表れているが、C点ではリングカット工法で掘削するとピークが約1m切羽面に近付いていることがわかる。言い換えれば、C点ではリングカット工法を用いることにより、ショートベンチカット工法や鏡吹き付け工法と比べると塑性域の広がりが増加していることになる。

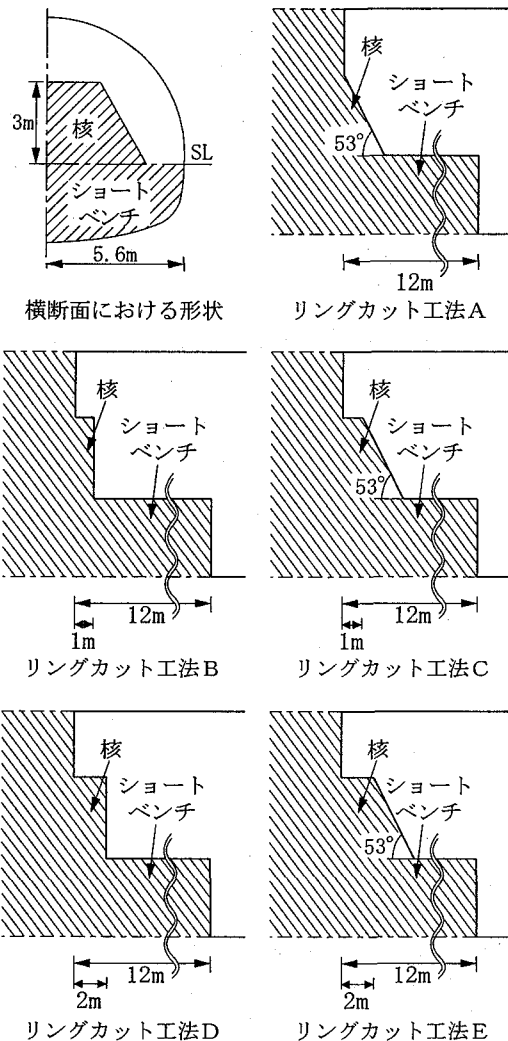


図-13 核の形状の違い

図-10～12 は、掘削工法の違いによる切羽前方地山の押し出し量をグラフにしたものである。縦軸に押し出し量、横軸に切羽からの距離を示している。これらの図より、押し出し量は切羽前方地山の3m深部を境にして切羽側で増大していることがわかる。これは、図-7～9に示した主応力分布とも調和している。すなわち、押し出し量は弾塑性境界を境にして塑性化している地山部分で急増している。

特に、B点ではリングカット工法で掘削を行うと、他の工法より切羽面で10mm程度押し出し量が抑制されているように見える。このように押し出し量が抑制されているのは、図-1のように僅かな核が残されているため、その効果が表れたものと考えられる。

3. 核形状の違いが切羽の安定性に及ぼす影響

(1) 核の形状

核部分の形状の違いが切羽の挙動に及ぼす影響を把握するために、図-13に示す5通りの形状を解析し

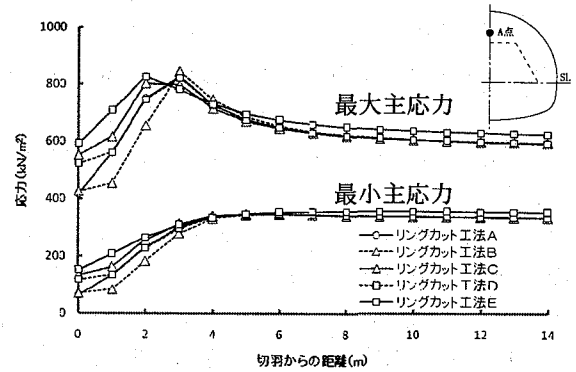


図-14 核形状の違いにおける応力分布
(強度 $c=100\text{kN/m}^2$, $\phi=20^\circ$ A点)

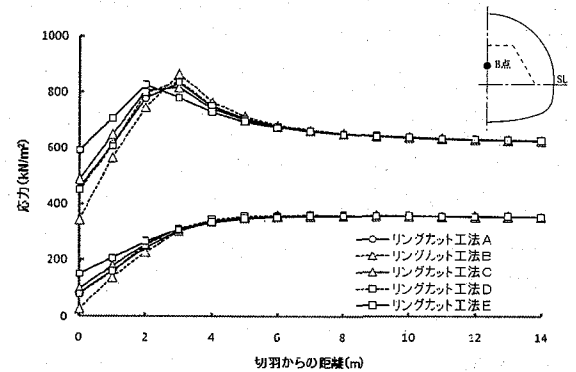


図-15 核形状の違いにおける応力分布
(強度 $c=100\text{kN/m}^2$, $\phi=20^\circ$ B点)

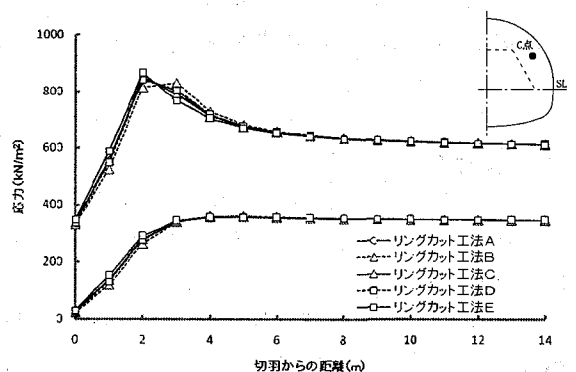


図-16 核形状の違いにおける応力分布
(強度 $c=100\text{kN/m}^2$, $\phi=20^\circ$ C点)

た。核に斜部を残したものをリングカット工法A、核部分を縦断方向に1m垂直に残したものをリングカット工法B、リングカット工法Bに斜部を残したものをリングカット工法C、核部分を縦断方向に2m垂直に残したものをリングカット工法D、リングカット工法Dに斜部を残したものをリングカット工法Eとする。

(2) 解析概要

解析領域、入力定数、力学モデル、解析手順については2章に述べた内容と同様である。

(3) 解析結果

図-14～16は、縦軸に応力、横軸に切羽からの距離を取り、核形状の違いによる切羽前方地山の主応力分布を表したものである。ただし、0m地点が切羽面である。これらのグラフより、A点については核部分に斜部を残したリングカット工法Eが最大主応力のピーク値が切羽面に近づいている。これは核部分をトンネル掘進方向に大きく残していることと、地山の粘着力と内部摩擦角を考慮して核部分に斜部を設けたことで切羽の押出しに対する抵抗力が増大したためであると考えられる。B点については、図-14に示したA点の応力分布と同様な傾向が認められる。C点については、最大主応力のピーク値が切羽面に近付いていることがわかるが、核を残して掘削したことによる拘束効果と、トンネル肩部による拘束効果の両方が表れたためであると考えられる。

図-17～19は、核形状の違いにおける切羽の押出し量を図化したものである。A点、B点、C点とも押出し量が增大し始める部分は、弾塑性境界とほぼ調和している。B点ではリングカット工法Eが押出し量を最も抑制しているように見えるのは、A点やC点の切羽面の位置を基準にしているためである。しかし、この基準面より奥の地山では核部分を垂直に残したリングカット工法よりも斜部を設けたリングカット工法の方が押出し量を抑制する効果の高いことがわかる。

3. まとめ

リングカット工法による切羽の安定性を検討するため種々な数値解析を行った。得られた結果をまとめると以下になる。

- 1) リングカット工法で掘削したときの切羽の押出し量については、鏡吹付け工法と同等以上に抑制されていることがわかった。
- 2) リングカット工法による核部分の形状は、奥行き方向に長く、また斜部を設けたものが切羽の押出し量を抑制する効果が高いことがわかった。

4. 参考文献

- 1) 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，2007。
- 2) ジオフロンテ研究会：都市部でのトンネル工法の適用事例，アンブレラ工法選定上の要点，p. 16，1996。
- 3) 谷本喜一：神戸層群地域における地すべりについて，第26回土質力学研究発表会，1991。
- 4) 谷本喜一：神戸三田線（谷上東工区）における地質調査，建設工学研究所報告第36号，1994。
- 5) 吉岡尚也，木梨秀雄，道廣一利，谷本親

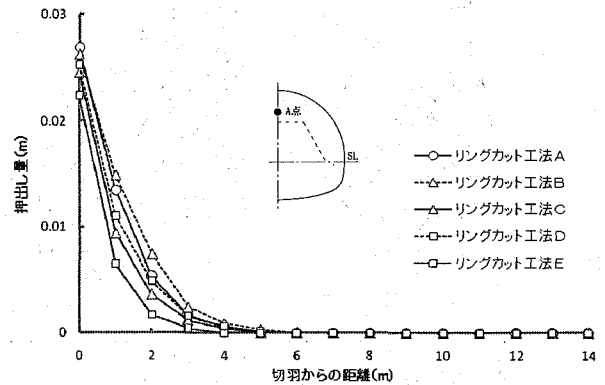


図-17 核形状の違いにおける切羽押出し量分布
(地山強度 $c=100\text{kN/m}^2$, $\phi=20^\circ$ A点)

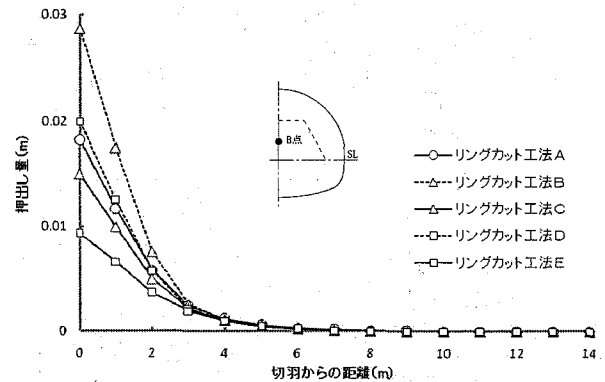


図-18 核形状の違いにおける切羽押出し量分布
(地山強度 $c=100\text{kN/m}^2$, $\phi=20^\circ$ B点)

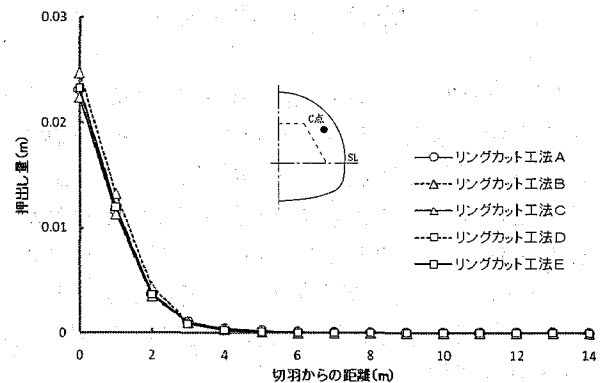


図-19 核形状の違いにおける切羽押出し量分布
(地山強度 $c=100\text{kN/m}^2$, $\phi=20^\circ$ C点)

- 伯：鏡止めボルトによるトンネル切羽面の補強効果，土木学会論文集，No.638/Ⅲ-49，pp.389-394，1999。
- 6) 土屋敬：トンネル設計のための支保と地山物性に関する研究，土木学会論文集，No.364/Ⅲ-4，1985。
- 7) 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/Ⅵ-27，pp1～13，1995。
- 8) 田中一雄，川上純，池田宏：切羽変位計測による切羽崩壊予測の試み，トンネルと地下，pp55～60，1996/06。