

リングカット工法で掘削されたトンネルの挙動

林 久資^{1*}・長谷川 昌弘²・吉岡 尚也³

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

リングカット工法が切羽の安定性に及ぼす影響を核の形状や強度定数に着目して三次元弾塑性解析を通じて調べた。その結果、1)内部摩擦角と粘着力が低下すると核の形状によらず切羽崩壊の恐れがあること、2)粘着力が少し増加すると、核に斜部を設けたリングカット工法は切羽周辺地山の挙動を制御するうえで優れた工法であることがわかった。

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

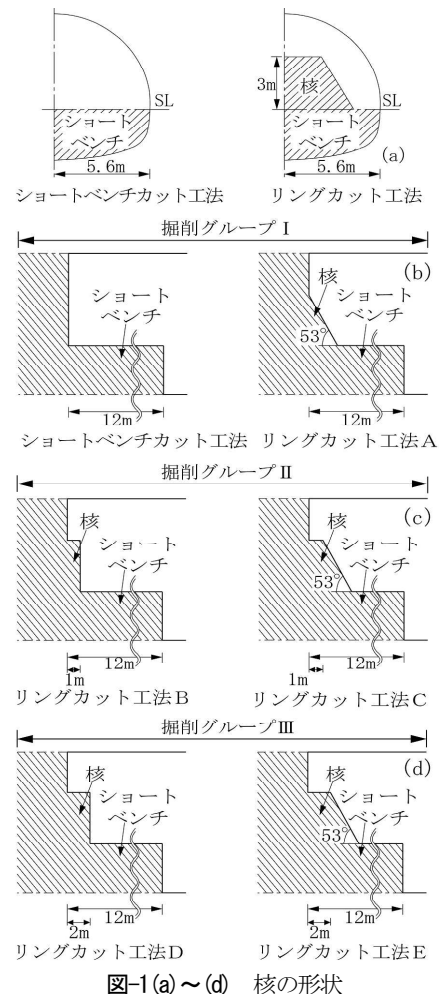
1. はじめに

NATMに補助工法を併用することにより、都市部における軟弱地山でも掘削・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するため、環境・経済的な見地から考え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「リングカット工法または核残し工法」の利点に再注目し、核部分の形状の違いが地山の強度特性に応じて切羽の安定性にどのような影響を及ぼすのかを解明するために数値解析的な検討を行った。

2. 核の形状

トンネルの掘削はベンチ長12mのショートベンチ工法を基本とし、図-1(a)のように上半切羽に核を残した場合と残さない場合について検討する。図-1(b)～(d)に核の形状を示す。図-1(b)を掘削グループIとする。グループIは核を残していないベンチ長12mのショートベンチカット工法と上半には横断方向に台形形状、縦断方向には内部摩擦角 ϕ と粘着力 c を考慮して斜部を設けたリングカット工法Aにわけられる。図-1(c)は掘削グループIIで、このグループは横断方向には核を台形形状に残し、縦断方向には長さ1mの核を直に残したリングカット工法Bとリングカット工法Bの核に斜部を設けたリングカット工法Cに区分する。掘削グループIIIは、核を縦断方

向に2mの核を残して垂直に掘削したリングカット工法Dとリングカット工法Dに斜部を設けたリングカット工法Eとする(図-1(d)参照)。



3. 数値解析方法

トンネルは、小土被りでかつ岩盤と土の境界付近のような地山に掘削されるものとした。そして、リングカット工法が切羽周辺に及ぼす影響を検討するための数値解析は、FLAC3Dを用いて弾塑性解析を行った。

(1) 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、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。このような条件下で解析を行うには、トンネルインバートより下の領域と横断方向の解析領域を適切に設定しておく必要がある。そこで、土かぶり(H)とトンネルインバートからの下部領域(D)との関係、すなわちD=αHを数パターン解析した。その結果、αを1.0以上に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1.5として解析した¹⁾。また、横断方向の解析領域については、50mと70mの組合せで解析した結果、両者に差異が見られなかったので、横断方向の解析領域については70mとした¹⁾。一方、奥行きはトンネルを50mまで掘削するものとして100mとした。

(2) 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。地山の変形係数については、地山の一軸圧縮強さを $q_u=1000\text{kN/m}^2$ とし、 $E=105\ q_u$ より算出した²⁾。粘着力c、内部摩擦角φについては、粘着力cは 50kN/m^2 、 100kN/m^2 、 150kN/m^2 、内部摩擦角φは 15° 、 20° 、 25° として、これらの組合せとした¹⁾。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³⁾が設定した値を用いた。吹付けコンクリートの変形係数については、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⁴⁾の値を用いた。トンネルが掘削される地山は、完全弾塑性体的な挙動をするものとし、降伏の判定にはモール・クーロンの降伏規準を用いた。また、支保部材については、ロックボルトは引張力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。

(3) 解析手順

解析は、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を求めるための側圧係数は、トンネルの土かぶりが30mの場合には、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⁵⁾。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るが、ここでの側圧係数は中間値である0.57を用いた。

表-1 入力定数の値

地山		変形係数	1.05×10 ⁵ 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 リート		変形係数	3.4×10 ⁶ 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	4.52×10 ⁻⁴ m ²
		ヤング率	2.1×10 ⁸ kN/m ²
	定着材	引張り強度	179.3kN
		せん断剛性	1.1×10 ⁴ kN/m/m
		粘着強さ	230kN/m
		摩擦角	30°
		穿孔径	1.32×10 ⁻¹ m

このような初期応力状態のもとで、掘削段階を考慮した場合と一括掘削を行った場合の収束変位の大きさは、同程度であった。したがって、ステップ2では上半をトンネル奥行き50m、下半およびインバートを奥行き38mまで一括掘削すると同時に、吹付けコンクリート(吹付け厚さ200mm)とロックボルト(1断面に18本、1.2m間隔で打設)が施工されるものとした。

4. 解析結果と考察

図-2(a)～(c)は、想定した強度定数のうち、ここでは内部摩擦角を 15° とし、粘着力が 150kN/m^2 から 100kN/m^2 、 50kN/m^2 へと低下するものとし、図-1に示したいろいろなトンネル掘削工法を用いてトンネルを掘削したときに生じる切羽の押出し量をコンターで示したものである。図-2(a)のφ=15°、c=50kN/m²に着目すると、トンネル縦断方向に斜部を設けることによって切羽の押出し量が抑制されているが、図-1(b)～(d)に示した工法で掘削した場合、切羽の押出し量が70mmを大幅に越えている。田中ら⁶⁾は、実際の現場での計測事例から切羽の押出し量が70mmを越えると切羽の崩壊が生じる可能性のあることを指摘している。したがって、このような条件下の地山に核残しだけでトンネルを掘削することは難しいと言える。言い換えると、リングカット工法になんらかのトンネル補助工法を併用する必要があると考える。

つぎに、図-2(b)と図-2(c)に着目すると、すべての掘削グループとも切羽の押出し量は70mm以下に抑制されている。トンネル掘削後の押出し量が70mm以下に抑制されているのは、粘着力の増大が切羽の安定に寄与しているためである。そして、核に斜部が付いていないリン

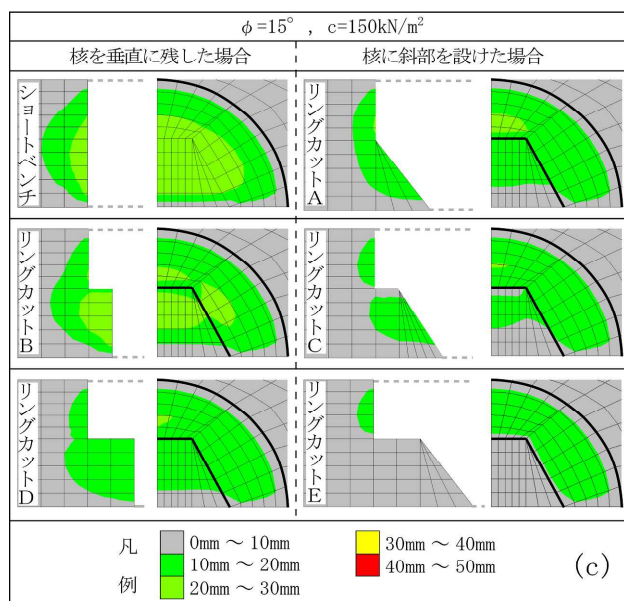
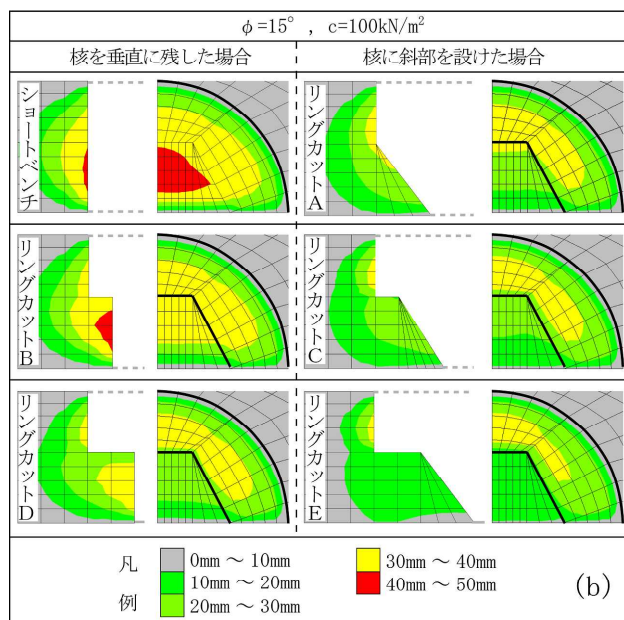
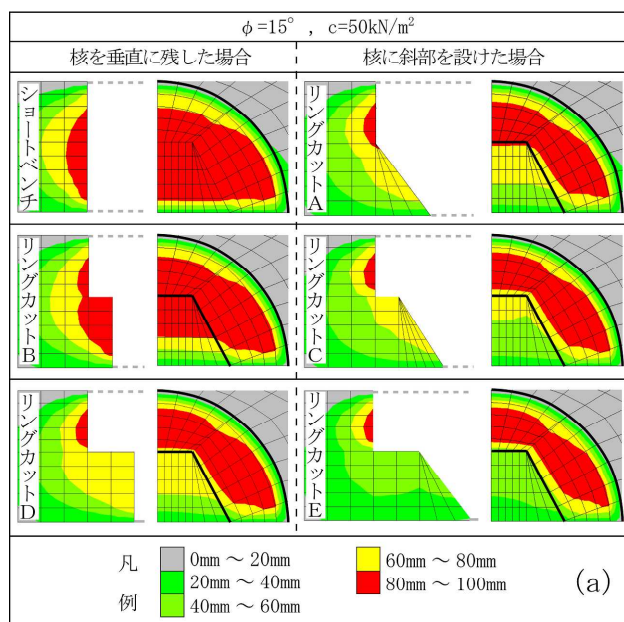


図-2(a)～(c) 切羽押し出し量のコンター

グカット工法に比べ、核に斜部を設けたリングカット工法の場合は、トンネル断面中央部における押し出し量がかなり抑制されていることもわかる。

図-3(a)～(c)は縦軸に応力、横軸に切羽からの距離を取って掘削後の切羽前方地山内の主応力分布を描いたものである。0m地点が切羽面で、それ以深は切羽前方の地山を表している。図-3(a)～(c)は、トンネル掘削に伴う切羽の押し出し量から切羽の崩壊が示唆された地山の強度特性が $c=50\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=15^\circ$ のときの主応力分布である。応力分布に着目すると、いずれの掘削グループとも最大主応力のピーク値が切羽から7m程度前方に存在していることがわかる。このように切羽前方地山に塑性領域が拡大するため、掘削に伴う切羽の押し出し量も大きくなったものと考えられる。したがって、一軸圧縮強さ⁷⁾から判断して、岩盤と土の境界付近のような地山において強度特性が小さい場合には、核の形状が異なっても切羽の安定性に及ぼす効果はあまりないものと言える。

つぎの図-4に、地山の内部摩擦角 ϕ が 15° のままで、粘着力が増大した場合、すなわち $c=100\text{kN/m}^2$ における主応力分布を示す。これらの図より、核に斜部を設けて掘削した場合には、トンネル掘削方向の核を直切りした場合よりも最大主応力のピークが切羽面に近付いていることがわかる。これは、応力再配分に伴って生じる切羽の押し出しに対し、核部分に安定角を有する斜部を設けることで抵抗力が増大したものと考えられる。

5. おわりに

核部分の形状の違いが地山の強度特性に応じて切羽の安定性にどのような影響を及ぼすのかを解明するために数値解析を行った。得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 強度定数としての粘着力と内部摩擦角がかなり小さいことが想定される地山にリングカット工法によりトンネルを掘削した場合には、核の有無によらず、切羽の崩壊の恐れがあることがわかった。
- 2) 粘着力が少し増大すると、核に斜部を設けたリングカット工法は切羽の安定性を確保する上で、優れた掘削工法であることがわかった。

なお、本解析の一部は社団法人近畿建設協会からの援助を得て行った。ここに記して謝意を表します。

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，pp.1483-1484, 2007.
- 2) 大島洋志監修：わかりやすい土木地質学，pp.74-77，土

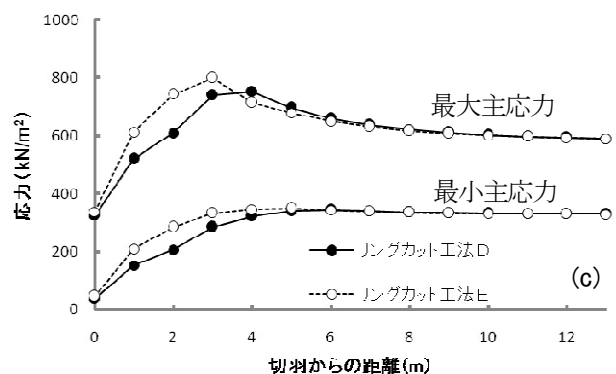
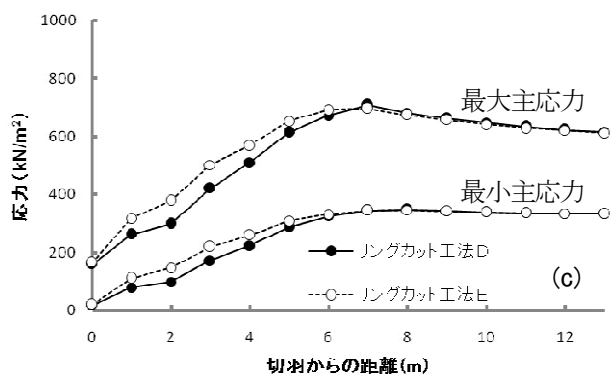
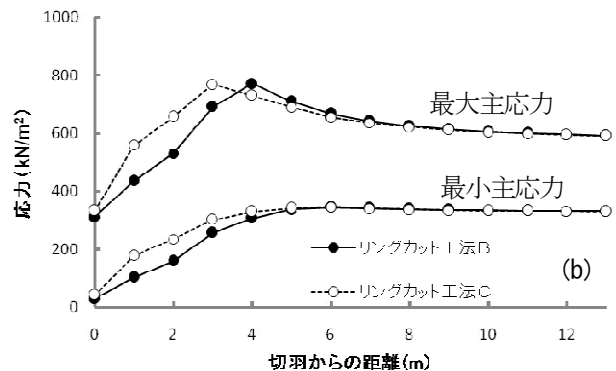
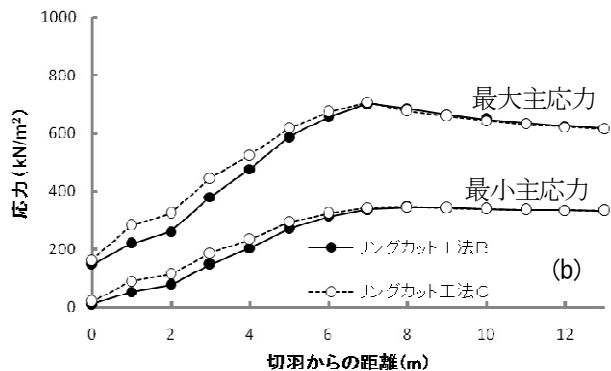
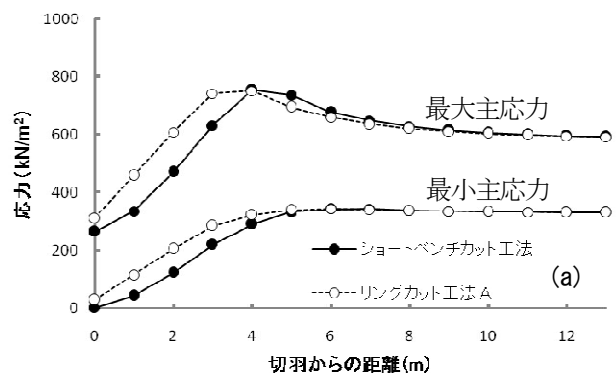
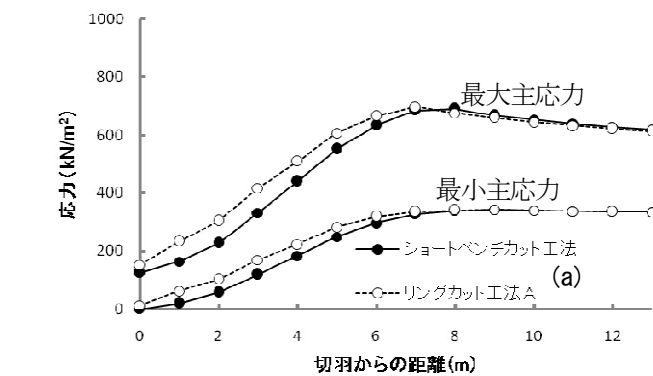


図-3(a) (b) (c) 切羽前方の主応力分布 ($\phi=15^\circ$, $c=50\text{kN/m}^2$)

図-4(a) (b) (c) 切羽前方の主応力分布 ($\phi=15^\circ$, $c=100\text{kN/m}^2$)

木工学社, 2002.

- 3) 吉岡尚也, 木梨秀雄, 道廣一利, 谷本親伯: 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.
- 4) 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, 19855.

- 5) 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, pp. 1-13, 1995.
- 6) 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.
- 7) Z. T. Bieniawsky: *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*, Chapter 6, A. A. BALKEMA, 1984.

BEHAVIOUR OF THE TUNNEL FACE EXCAVATED BY THE RING-CUT METHOD

Hisashi HAYASHI, Masahiro HASEGAWA and Hisaya YOSHIOKA

Three-dimensional analyses are carried out to evaluate the stability of the tunnel face with a various core shapes on the upper face. Obtained results are as follows:

- 1) When a large plastic zone is formed and when large inward deformations of tunnel face occurs, ring-cut method is no longer effective, and
- 2) Core shape with a stable angle does play a major role in controlling the deformation of the tunnel face.