

ショートベンチカット工法に核を残した場合の 補助部材削減の可能性について

菅 浩亮¹・林 久資¹・東 亮太¹・長谷川 昌弘²・吉岡 尚也²

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

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

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

近年、都市部でのトンネル掘削にNATMが採用される例が増えている。しかし、補助部材の多用は資源の枯渇に繋がるため、適切な打設本数の把握とともに、環境に配慮した省資源化が急務であると考えられる。そこで、切羽に核を残し近傍地山の安定化を図れるショートベンチカットに核を残した工法に着目した。核形状、打設本数および打設配置など種々の検討を行い補助部材削減の可能性を数値解析的に評価した。

得られた結果を以下に要約する。1) 核残しは切羽安定対策として有効である。2) 核形状を大きくすれば、切羽の安定性確保に必要な長尺鏡ボルトの打設本数を削減できる。3) 長尺鏡ボルトの打設や核残しは地表面沈下量や断面変形率に影響を与えないことが判明した。

Key Words: ring-cut method, reduction of auxiliary materials, shallow depth, numerical analysis

1. はじめに

近年、補助工法の技術的革新が図られ、その経済性などからも都市部でのトンネル掘削において、NATMが採用される例が増えている。土被りが浅く、強度が十分でない都市部の軟弱地山でのトンネル掘削には、補助工法の併用が一般的である。過去の事例によると、切羽の補強対策には長尺鏡ボルトを用いることが多いようである¹⁾。しかし、長尺鏡ボルトやその他の補助部材の多用は資源の枯渇にも繋がるため、適切な打設本数の把握とともに、地球環境を考慮した省資源化が急務であると考えられる。そこで、地山に核(さね)を残すことで切羽の安定化を図る「核残し」に着目した。

ショートベンチカット工法に核を残すことで、長尺鏡ボルトなどの補助部材の削減が可能と考えた。従来の研究では長尺鏡ボルトの作用効果の把握²⁾や適切な打設配置の検討¹⁾が行われているが、打設本数の削減について検討された例は見当たらない。そこで本研究は、都市部での浅い土被りトンネルを想定し、核の形状、打設本数および打設パターンなど種々検討を行い、合理的な掘削方法を数値解析的に検討した。解析にはFLAC3Dを用い、上半切羽における押出し変形量や断面変形率などの解析結果から、ショートベンチカット工法に核を残した場合における補助部材削減の可能性を評価する。

2. 解析概要

(1) 解析のための切羽安定対策

解析のための切羽安定対策を図-1³⁾に示す。全掘削工法はショートベンチカット工法を基本とした。核の形状が異なる各々の場合における補助部材の地山補強効果を検討する。まず、(a)～(c)はショートベンチカット工法とした。(a)は長尺鏡ボルトを併用しない場合、(b)と(c)は、それぞれ上半切羽に18本打設した場合と14本打設した場合である。(d)～(f)は高さ、幅が共に2.5mの核を残した核残しAを施した。また、内部摩擦角を考慮し、奥行き方向には斜部を設けた。(d)は、長尺鏡ボルトを打設しない場合、(e)と(f)は、それぞれ14本と10本の長尺鏡ボルトを打設した場合である。(g)～(k)は核形状が高さ3.0m、幅3.1mの核残しBを施した。核の高さ3.0mに対して斜部が急にならないような斜部を設けた。(g)は長尺鏡ボルトを打設しない場合、(h)は10本、(i)、(j)および(k)は8本とし、打設配置を種々変えたものである。

(l)～(p)は高さ3.6m、幅3.6mの核残しCを施し³⁾、この場合にも斜部を設けた。長尺鏡ボルトの打設パターンは、核残しBと同様である。なお、全工法ともにベンチ長は10mとした。また、長尺鏡ボルトは全長12.5mのグラスファイバー補強プラスチック(GFRP)管を用

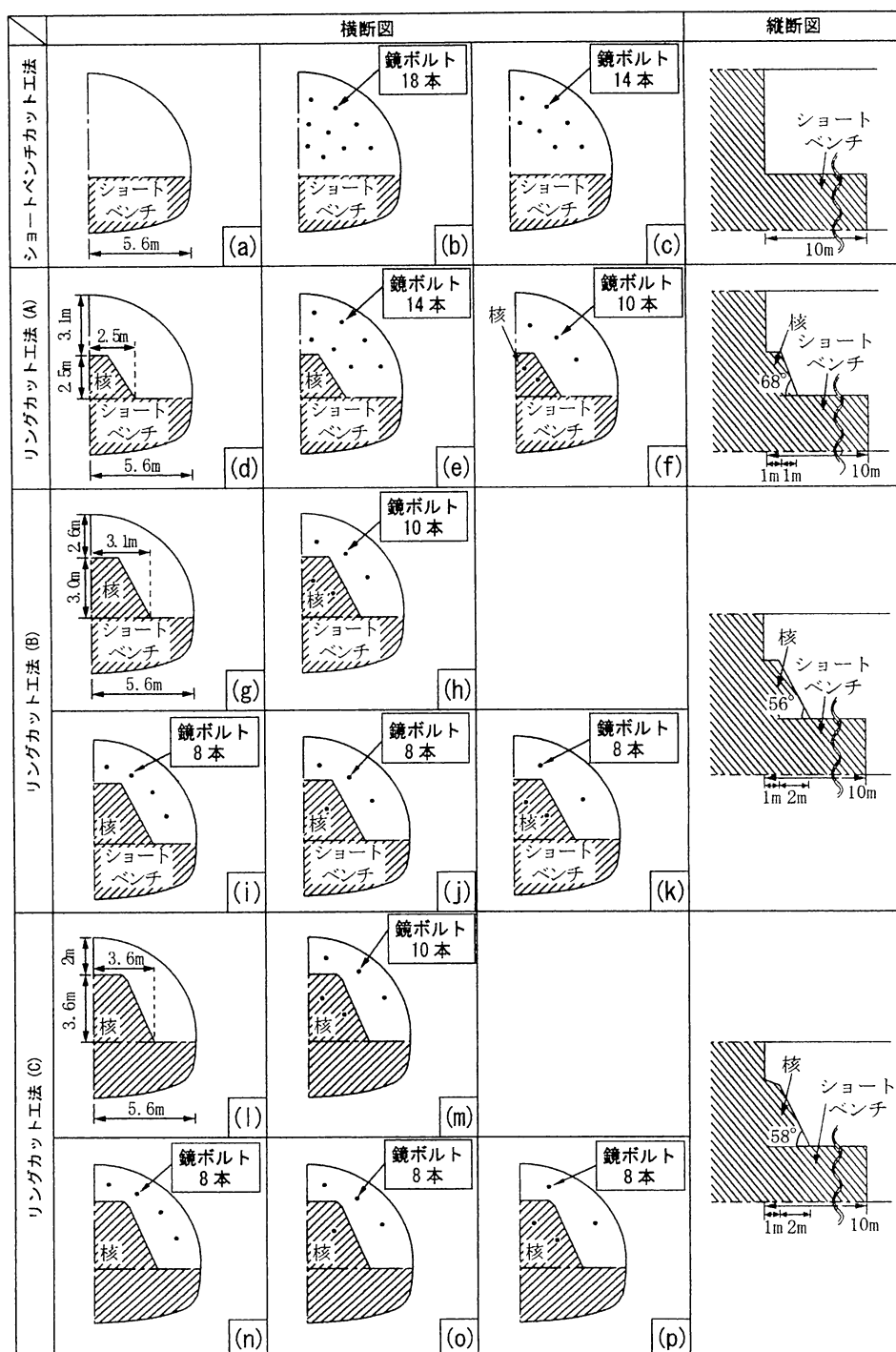


図-1 解析のための切羽安定対策³⁾

い、ラップ長は3.5mとした。

(2) 解析領域と境界条件

解析は D_H 相当の地山を想定し、土被りは都市部の浅い土被りでの道路トンネルを想定し30mとした。そして、横断方向と奥行方向には100m、インバート下部には60mの解析領域を設けた。境界条件は地表面を自由とし、底面は鉛直方向の挙動を拘束し、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。

(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で、吹付けコンクリートはシェル要素でモデル化した。

解析に用いた入力定数を表-1^{4)・11)}に示す。地山については、変形係数を $1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ とし、ポアソン比は0.3とした⁴⁾。粘着力 c および内部摩擦角 ϕ は核を残した場合の適用限界である 60 kN/m^2 と 15° に設定した⁹⁾。

計測事例に基づいて分析された側圧係数 K_0 の結果よ

り K_0 は 0.57 とした⁹⁾。支保部材の吹付けコンクリートの弾性係数 E は $3.4 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ とし⁷⁾、ポアソン比は 0.2、吹付け厚は 0.2m と設定した⁸⁾。ロックボルトには異形棒剛 (SD345) を用いるものとし、引張り強度などの機械的性質はトンネル標準示方書に基づいて設定した⁹⁾。定着材については Hyett ら¹⁰⁾の実験結果を参照し決定した。長尺鏡ボルトについては、大塚ら¹¹⁾が行った原位置引抜き試験の結果を参考にした。

(4) 解析手順

解析手順はステップ1で初期応力解析を行い、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、全工法ともに吹付けコンクリートは一間遅れで施工されるものとした。また、ロックボルトはショートベンチカット工法で一間遅れ、核を残した場合はロックボルトの斜め打を避けるため二間遅れとした。なお、ロックボルトの打設遅れは、断面変形率などの解析結果には影響しないことが明らかとなっているため、問題ないものとして考えた¹²⁾。また、上半が10m掘削された後は、上半と下半およびインバートを同時進行させた。

表-1 入力定数⁴⁾⁻¹¹⁾

		項 目	入力値 (単位)
地 山		側圧係数	0.57
		粘着力	60kN/m ²
		内部摩擦角	15°
		変形係数	1.0×10 ⁵ kN/m ²
		ポアソン比	0.3
		単位体積重量	18kN/m ³
吹付けコンクリート		変形係数	3.4×10 ⁶ kN/m ²
		ポアソン比	0.2
		吹付け厚	0.2m
ロック ボルト	異形棒鋼 (SD345)	断面積	5.07×10 ⁻⁴ m ²
		弾性係数	2.0×10 ⁸ kN/m ²
		引張り強度	175kN
	定着材	せん断剛性	1.1×10 ⁴ kN/m ²
		粘着強さ	230kN/m
		摩擦角	30°
		穿孔外周	0.132m
長尺鏡 ボルト	GFRP管	弾性係数	2×10 ⁷ kN/m ²
		断面積	1.71×10 ⁻³ m ²
		単位体積重量	17.5kN/m ³
	定着材	せん断剛性	8.19×10 ⁵ kN/m ²
		粘着強さ	76kN/m

3. 解析結果および考察

(1) 上半切羽の押出し変形量

図-2に上半切羽の押出し変形量のコンター図を示す。左側にトンネルを側方から見た縦断面図を、右側には正面から見た横断面図のコンターを示した。田中ら¹³⁾は上半切羽の押出し変形量が70mmを超えた場合、崩壊の危険性があると指摘しており、その箇所は破線で囲った。まず、(a)～(c)のショートベンチカット工法で掘削した場合に着目する。(a)は全体的に70mm以上の押出し変形量がみられるため、切羽安定対策が必要である。一方、(b)の長尺鏡ボルトが18本打設された場合に着目すると、崩壊の危険性は解消されるが、これでは打設本数が多過ぎると考える。そこで、打設本数の削減を考慮した(c)は、先程の(b)と比較すると打設本数が少ない分、押出し変形量が増加しているが、変形量は70mm以下に抑えられており、打設本数は妥当と考える。

核残しAを併用した(d)～(f)に着目する。(d)は核部分が抵抗力を発揮し(a)と比較すると押出し変形量が抑制されていることがわかる。しかし、核部分や切羽面に崩壊の危険性がみられる。長尺鏡ボルトを14本打設した(e)は、長尺鏡ボルトを打設したことにより切羽面における崩壊の危険性が解消された。しかし、僅かではあるが核の一部に崩壊の危険性がみられる。そこで、核部分への打設と打設本数の削減を考慮し10本打設した(f)に着目する。核部分での押出し変形量が抑制され崩壊の危険性が解消された。このことは、核残しにおける核の抵抗力を有効に利用し、併せて核部分に長尺鏡ボルトを打設することで効率的に切羽の押出し変形量を抑制できることを示唆している。また、ショートベンチカット工法に長尺鏡ボルトを14本打設した(c)と比較すると両者の押出し変形量はほぼ同様である。言い換えると、切羽の安定性を確保するために、ショートベンチカット工法では長尺鏡ボルトを14本打設する必要があるが、核残しを併用すれば10本で同等の効果が得られ、核残しは補助部材削減の可能性を有していると考え。

核残しBを併用した(g)に着目する。(d)と比べ押し出し変形量を抑制している。このことから、核の形状を大きくすれば押し出し変形量抑制効果も増大することがわかる。しかし、70mmを超える領域が核部分の一部で生じている。一方、(h)は核部分の抵抗力が増加し、変形量は70mm以下に抑えられている。(f)と比較しても押し出し変形量は抑制されており、特に切羽面においては50mm以下に抑制されている。そこで、核部分の抵抗力が増加した分、打設本数をさらに削減できるものと考え、8本打設した(i)～(k)に着目する。(g)で切羽崩壊の限界値である70mmに近い押し出し変形量が切

羽面に生じていたため、(i)では、切羽面に8本打設した。長尺鏡ボルトの補強効果により切羽の安定性は確保されたが、核部分に70mmを超える領域が生じている。核の一部に崩壊の危険性があるため、(j)では核部分の中心部に2本、切羽面に6本打設した。切羽面では、ほぼ同等の押出し変形量を示し、核部分でも押出し変形量が抑制されているが、未だ70mm以上の変形が生じている。そこで、(k)では切羽面に4本、核部分に4本打設した。ここでも切羽面での押出し変形量に差異はない。この程度核の形状を大きくすると切羽面では核の抵抗力による影響が大きく、切羽面での打設本数を削減しても

さほど影響しないと考えられる。(k)では崩壊の危険性が解消され切羽の安定化が図られた。また、10本打設した(h)と比べると同等の押出し変形量抑制効果が得られていることが分かる。言い換えると、適切な打設配置で施工することで補助部材を削減できることがわかる。核残しBを施した場合には、(k)の様な長尺鏡ボルトの打設本数と打設配置が上半切羽における押出し変形量を抑制できることが示された。

最後に、ショートベンチカット工法に核残しCを施した(1)～(p)に着目する。(1)は(g)と比較すると核部分の抵抗力が増大し、他の核残しを併用した場

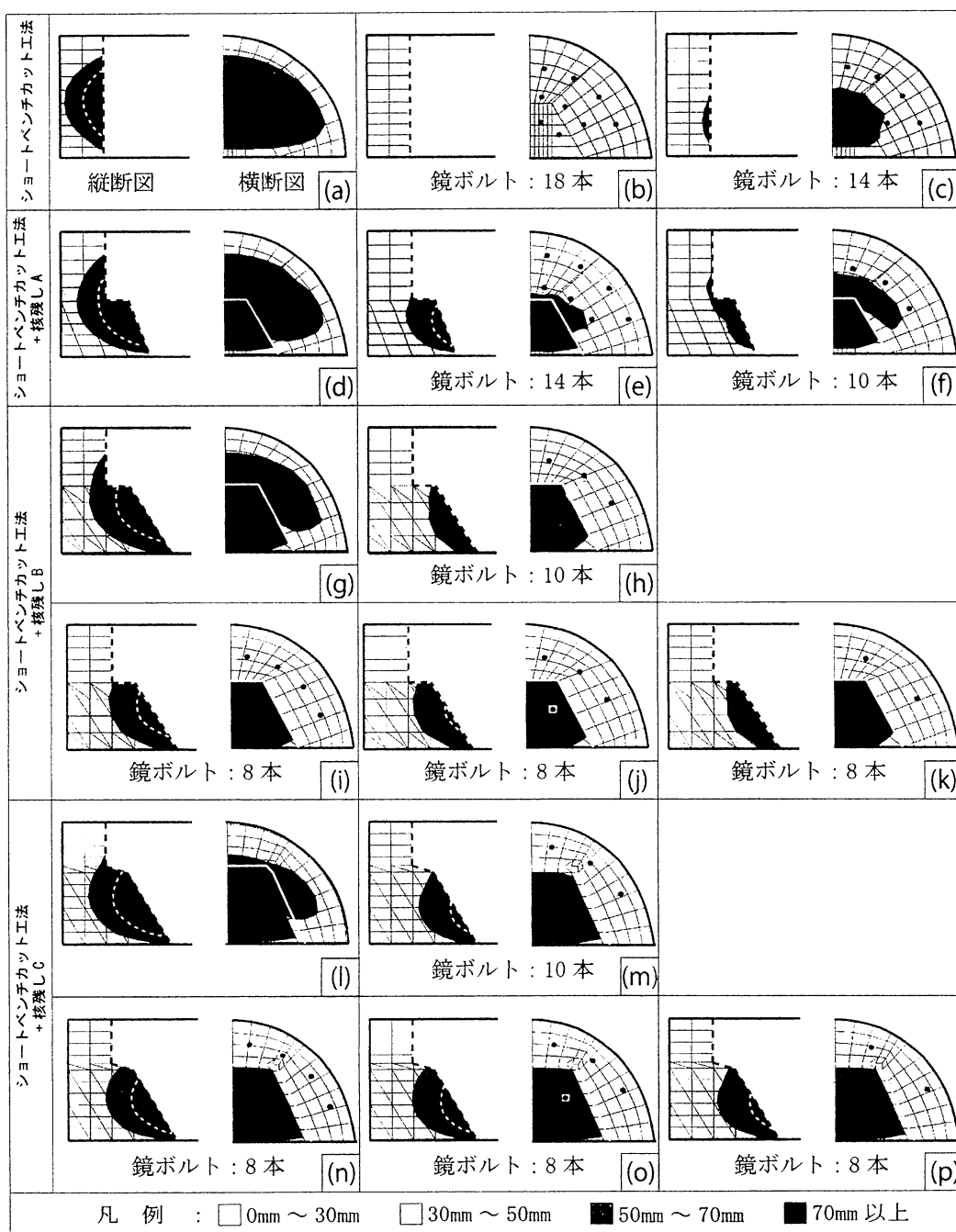


図-2 上半切羽における押出し変形量

合と比べ切羽面での押出し変形量は最も抑制できている。10本打設した (m) は核部分で僅かに70mm以上の押出し変形量が生じている。そのため核部分の変形量を抑制することを優先し、(n) では切羽面に8本打設した。核部分に崩壊の危険性がみられるが、切羽面での押出し変形量の抑制効果は他のどの工法より大きい。そこで、(o) では切羽面に6本、核部分に2本打設した。(n) と比べ核部分での押出し変形量を抑制しているが、核の一部で崩壊の危険性がみられる。切羽面に4本、核部分に4本打設した (p) の場合は押出し変形量を効果的に抑制しているが、核部分で僅かに70mm以上の押出し変形量が生じた。崩壊を避けるためには核部分での長尺鏡ボルトの打設本数を増やす必要があると考えられる。

以上より、核残しを併用した場合、ショートベンチカット工法と比較すると切羽の安定性を確保するために必要な長尺鏡ボルトの打設本数を少なくできることがわかった。言い換えれば、ショートベンチカット工法に長尺鏡ボルトを14本併用した場合と核を残して8本～10本の長尺鏡ボルトを併用した場合とでは、押出し変形量が同程度に抑制されていることがわかる。また、核を大きく残せば核の抵抗力が増大し切羽面での押出し変形量を抑制できることが判明した。しかし、核部分に押出し変形量が集中し、核部分での崩壊の危険性も増加する。今回のような核を残した場合の適用限界のような地山条件下⁹⁾では、核残しBを併用し長尺鏡ボルトを8本打設した (k) の工法が押出し変形量を効率的に抑制できているものとする。

(2) 地表面沈下量

図-3に各工法における地表面沈下量を示す。近年、長尺鏡ボルトは切羽の安定対策以外にも地表面沈下対策としての効果も期待されている。しかし、図-3よりすべての解析パターンにおいて同程度の地表面沈下量を示した。長尺鏡ボルトの併用による抑制量は最大でも1mm以下であった。このことから、核を残したことや長尺鏡ボルトを併用したことによる地表面沈下抑制効果がないことが読み取れる。これは、土被りがトンネル径Dの2.5倍程度になっているためであると推察される。一般的に1.5D～3.0D程度あればグラウンドアーチが形成されるとされている¹⁴⁾。グラウンドアーチが形成されたことにより、長尺鏡ボルトの効果が表れなかったのではないかと考えられる。また、大塚ら¹⁵⁾は長尺鏡ボルトによる地表面沈下抑制効果の検討を数値解析的に行っており、本解析のように粘着力cが大きく内部摩擦角φが小さい粘質土系地山は、粘着力cが小さく内部摩擦角φが小さい砂質土系地山と比べ長尺鏡ボルトによる地山の補強効果が表れにくいことを指摘している。今後、核残しにおける土被りの違

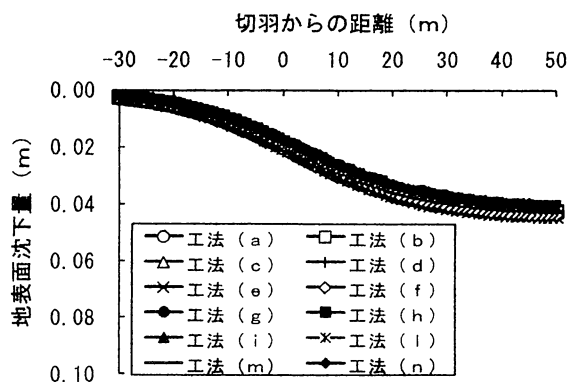


図-3 各工法における地表面沈下量

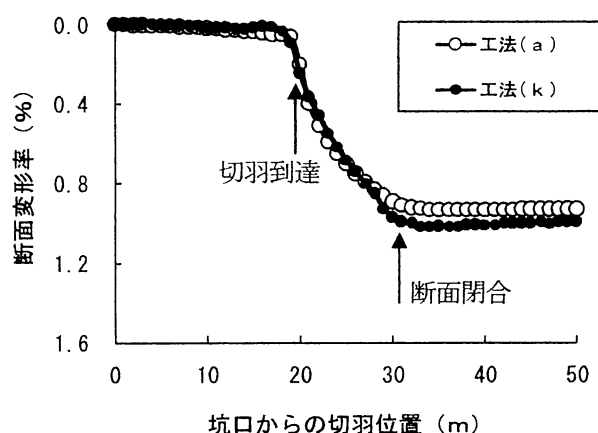


図-4 トンネル断面変形率

いや地山強度定数の違いによる影響の把握が必要であると考えられる。

(3) トンネル断面変形率

図-4に対策を行っていないショートベンチカット工法の工法 (a) と押出し変形量抑制効果が大きかった工法 (k) 両者のトンネル断面変形率を示した。坑口より20m地点でS.L.より1m上部の要素における断面変形率と坑口からの切羽位置との関係を示したものである。断面変形率はトンネル側壁間の変形量をトンネルの掘削幅で割り、それを百分率で表している。上半切羽が到達する直前の19m地点までは両者ともに断面変形率はほぼ0%を示した。上半切羽が到達すると同時にトンネル断面が変形し始め、上半切羽の通過とともに急激に変形量が増大している様子が読み取れる。これは、切羽自身の持つ拘束効果が掘削とともに解放されるためであると考えられる。また、変形が上半切羽の到達から断面閉合までの間に限定されていることも特徴的である。収束時の変形量に着目すると工法 (k) は工法 (a) と比べると、僅かではあるが変形量が大きくなっている。しかし、その差は断面

変形率にして0.1%以下の差であり、この変形量の違いは長尺鏡ボルトの打設本数の違いや核の有無に起因しているものとは考えにくい。また、他の工法でも両者と比べ断面変形率に差異はみられないことから、長尺鏡ボルトの打設や核残しは断面変形率には寄与しないことがわかった。

4. まとめ

都市部での浅い土被りトンネルにおいて、核の形状、打設本数および打設パターンなど種々の検討を行い、核を残した場合における補助部材削減の可能性の評価を試みた。得られた結果を以下に要約する。

- 1) 核残しは切羽安定対策として有効であり、核形状を大きくすれば切羽面における押出し変形量の抑制効果は増大する。
- 2) 核を大きくすることや打設配置を考慮することで、補助部材削減の可能性はある。
- 3) 今回の地山条件下では、長尺鏡ボルトの打設による地表面沈下抑制効果は認められない。
- 4) 長尺鏡ボルトの打設や核残しは断面変形率に影響を与えないことが判明した。

参考文献

- 1) 西崎晶, 宮本健太郎, 羽場徹, 岡部正: 長尺鏡ボルト工の適正配置に関する解析的評価, トンネル工学報告集, 第14巻 2004年11月
- 2) 道廣一利, 吉岡尚也: 鏡止ボルトの作用効果を三次元FEMで解析, トンネルと地下, Vol.33, No.6, pp43-48, 2002.6.
- 3) 林久資, 青木一男, 吉岡尚也, 長谷川昌弘, 菅浩亮: 押出し性地山での核形状の違いがトンネル挙動に及ぼす影響, 平成21年全国大会第64回年次学術講演会, pp749-750, 2009

- 4) 菅浩亮, 林久資, 長谷川昌弘, 吉岡尚也, 東亮太: 浅い土被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, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム, pp235-238, 2009
- 5) 林久資, 長谷川昌弘, 吉岡尚也: 環境にやさしいトンネルリングカット工法の適用限界, 平成20年度全国大会第63回年次学術講演会 pp.653-654, 2008.
- 6) 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.
- 7) 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, pp.31-40, 1985.
- 8) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書〔設計編〕, pp.17-40, 1997.
- 9) 土木学会トンネル工学委員会: トンネル標準示方書〔山岳工法〕・同解説, pp.84-86, 2006.
- 10) Hyett, A.J., Bawden, W.F. and Reichert, R. D.: The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts, *Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomechanics Abstract*, Vol.29, No.5, pp.503-524, 1992.
- 11) 大塚勇, 青木智幸, 小川哲司, 足達康軌, 田中崇生: 各種ボルト材による鏡ボルトの岩盤補強効果について, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.73-78, 2004.
- 12) 林久資, 長谷川昌弘, 吉岡尚也, 青木一男, 菅浩亮: 押出し性地山におけるリングカット工法の作用効果, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.231-234, 2008.
- 13) 田中一雄, 川上純, 池田宏, 恰士一美: 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, pp.55-60, 1996.
- 14) 稲見悦彦, 近藤達敏, 五味道義, 水谷敏則, 小林以策: 道路実務講座12 道路トンネル, p.331, 山海堂, 1985.
- 15) 大塚勇, 青木智幸, 大町達夫, 伊藤洋: 長尺鏡止めボルトによる地表面沈下の抑制効果に関する解析的検討, 土木学会論文集, Vol.62, No.1, pp.151-156, 2006.

POSSIBILITY OF AUXILIARY MATERIALS REDUCTION OF TUNNEL EXCAVATED BY RING-CUT METHOD

Kosuke SUGA, Hisashi HAYASHI, Ryota AZUMA,
Masahiro HASEGAWA and Hisaya YOSHIOKA

Because of technical improvement, the number of cases which NATM adopted in urban area is increased. Spending a lot of materials cause exhaustion of resources. So it's important to clarify the proper quantity of face bolts. Excavation method is ring-cut method, which is possible to stabilize tunnel face by leaving core. To evaluate possibility of auxiliary materials reduction by considering displacement of tunnel face and converged deformation, numerical analysis was conducted. Obtained results are as follows: 1) ring-cut method is effective to stabilize tunnel face; 2) tunnel face stabilizes more, when core is larger; 3) face bolt and ring-cut method didn't effect to converged deformation and surface settlement.