

# 土被りの違いがトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響

菅 浩亮<sup>1\*</sup>・林 久資<sup>1</sup>・東 亮太<sup>1</sup>・長谷川 昌弘<sup>2</sup>・吉岡 尚也<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大阪工業大学 大学院 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

<sup>2</sup>大阪工業大学 工学部 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

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

近年増加しているNATMによる都市部でのトンネル掘削には切羽を十分に安定させ、地表面沈下量を最小限に抑える必要がある。長尺鏡ボルトには地表面沈下抑制効果も期待されているが、未解明な部分もある。ここでは、特にショートベンチカット工法に核を残した場合に着目し、核残しや長尺鏡ボルトが異なる地盤条件下で浅い土被りでのトンネル挙動に及ぼす影響を検討した。

得られた結果を要約すると、1) 土被りや地山強度定数はトンネル挙動に大きな影響を及ぼす、2) 核残しや長尺鏡ボルトの併用は軟弱地山でのトンネル切羽周辺地山の補強に有効である、3) 長尺鏡ボルトの併用や核残しはトンネル掘削に伴う断面変形率に影響を及ぼさないことが明らかとなった。

**Key Words** : ring-cut, face bolt, shallow depth, strength parameters, numerical analysis

## 1. はじめに

近年の補助工法の技術革新に伴い、都市部でNATMによる掘削事例が増加している。都市部でのトンネル掘削の特徴として、①土被りが浅いこと、②軟弱地山が多いこと、③地上に構造物があることなどが挙げられる。このような条件下では、切羽を安定させるとともに地表面沈下量を最小限に抑える必要がある。

大塚ら<sup>1)</sup>は、土被りが10m程度と浅い場合、粘質土系地山（以下c系地山）と比べ、砂質土系地山（以下φ系地山）では長尺鏡ボルトの地表面沈下抑制効果が顕著に表れることを報告している。しかし、長尺鏡ボルトの地表面沈下抑制効果については、未解明な部分もある。また、補助部材の多用は資源の枯渇に繋がることから、打設本数の削減が望まれる。

そこで、ショートベンチカット工法に核を残し、核形状、長尺鏡ボルトの打設本数や打設配置を種々変えて解析を行った。その結果、長尺鏡ボルトを適切な打設本数と打設配置で併用することで切羽の押し変形量を有効に抑制し、補助部材削減の可能性が示された<sup>2)</sup>。

ここでは、軟弱地山におけるシールド工法とNATMの境界<sup>3)</sup>、つまりNATMの適用限界下で種々の切羽安定対策、c系地山・φ系地山に応じて地山の強度定数の異なる種々の地盤条件下で、土被りの違いがトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響を三次元数値解析的に評価した。

## 2. 解析概要

### (1) 種々の切羽安定対策

図-1<sup>4)</sup>に種々の切羽安定対策を示す。ただし、掘削工法はショートベンチカット工法を基本とした。

まず、対策を行わないショートベンチカット工法と、長尺鏡ボルトを14本併用した場合を検討した。

つぎは、ショートベンチカット工法に核残しAを施した場合である。核形状は高さ $2.5\text{m}$ と幅がそれぞれ $2.5\text{m}$ であり、内部摩擦角を考慮し奥行き方向には斜部を設けた。長尺鏡ボルトを打設しない場合と10本打設した場合について検討した。

さらに、ショートベンチカット工法に核残しBを施した場合を検討した。核形状は高さ $3.0\text{m}$ 、幅 $3.1\text{m}$ とした。核の高さ $3.0\text{m}$ に対して斜部が急にならないような斜部を設けた。長尺鏡ボルトを打設しない場合と8本打設した場合を検討した。

最後は、ショートベンチカット工法に核残しCを施した場合である<sup>4)</sup>。長尺鏡ボルトを打設しない場合と8本打設する場合を検討した。また、ここでも核については奥行き方向に斜部を設けた。なお、掘削工法に関わらずベンチ長は $10\text{m}$ としている。

これら種々の切羽安定対策の下、地山強度定数や土被りが異なることでトンネル周辺地山の挙動にどのような影響を及ぼすのか数値解析的に理解することとする。また、長尺鏡ボルトは全長が $12.5\text{m}$ でラップ長が $3.5\text{m}$ のグラスファイバー補強プラスチック(GFRP)管とした。

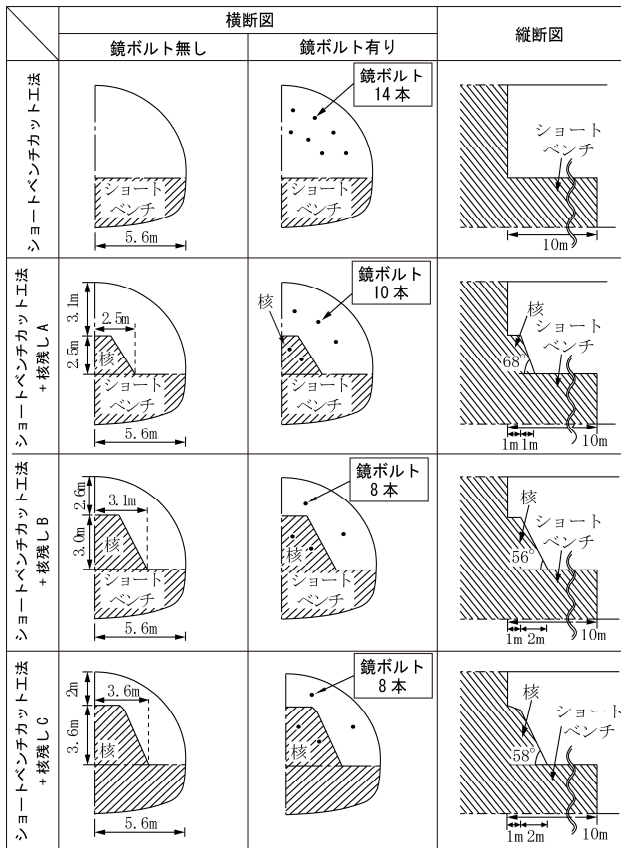


図-1 種々の切羽安定対策<sup>4)</sup>

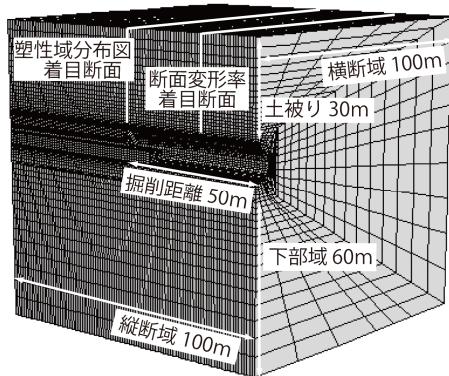


図-2 解析モデル図 (土被り 30m)

## (2) 解析領域および解析条件

地山は $D_{II}$ 相当の地山を想定し、土被りは30mと10mとした。また、土被りが浅い場合の数値解析では、変位の過小・過大評価を避けるため、解析領域の設定を慎重に行わなければならない。一般的に土被りが10m程度と浅い場合は、側方領域を5D以上、下部領域を1~3D程度にすればよいとされているが<sup>5)</sup>、不明確な部分もある。そこで、解析領域を種々変えて数パターン解析を行うとともに既往の文献<sup>2)</sup>、<sup>6)</sup>を参考にして掘削の影響を受けないよう解析領域を設定した。その結果として、土被り30mでは横断方向と奥行き方向に100m、インバート下部に60mの解析領域を設けた。図-2に土被り30mの場合の解析モデル図を示す。一方、土被り10mでは横断方向には5Dに相当する60m、奥行き方向に100m、インバ

ート下部には2Dに相当する20mの領域を設けた。

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) 入力定数および力学モデル

地山強度定数以外の入力定数については文献1)を参考にした。地山強度定数は実現場における粘着力 $c$ と内部摩擦角 $\phi$ の関係<sup>7)</sup>から下限付近の値を用いた。具体的には、 $c$ 系地山は $c=60\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=15^\circ$ とし、 $\phi$ 系地山は $c=10\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=30^\circ$ とした。

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で、吹付けコンクリートはシェル要素でモデル化した。

## (4) 解析手順

解析手順はステップ1で自重解析を行い、ステップ2以降は実施工を考慮し、1mずつ掘削する解析を行った。また、すべての掘削工法で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。ロックボルトはショートベンチカット工法では一間遅れとしたが、核を残した場合は、ロックボルトの斜め打ちを避けるために二間遅れとした。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を及ぼさないことから<sup>8)</sup>、ここでは打設遅れは問題ないものとして考えた。また、上半を10m掘削したあとは下半を同時進行させた。

## 3. 解析結果および考察

### (1) 地表面沈下量

表-1に各工法の最終沈下量および抑制量を示す。 $\phi$ 系地山では押し変形量の抑制効果が同程度であったショートベンチカット工法と核残しAを併用した場合について検討した<sup>1)</sup>。土被りが30mの場合、 $c$ 系地山では僅かであるが長尺鏡ボルトによる沈下量抑制効果がみられる。また、抑制量の大小は打設本数に依存している。一方、 $\phi$ 系地山では長尺鏡ボルトの効果が発揮され、約10~20%の抑制効果がみられた。

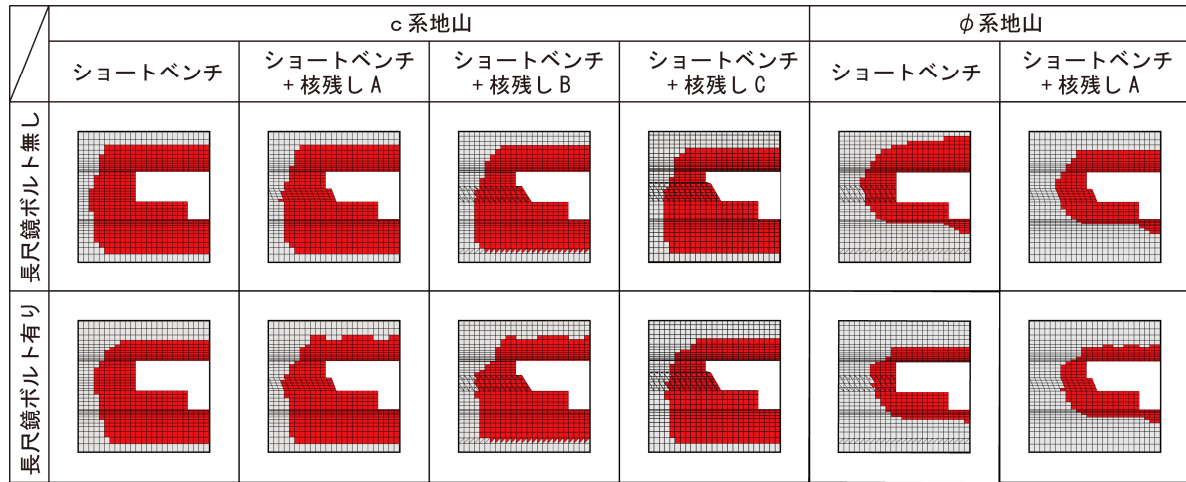
土被りが10mの場合、 $c$ 系地山では沈下抑制効果はみられなかった。一方、 $\phi$ 系地山では核を残した場合、約10%の沈下抑制効果がみられたが、ショートベンチカット工法では、掘削開始直後に地表面まで地山が塑性化し、大きな地表面沈下量を示した。

### (2) 塑性域の分布

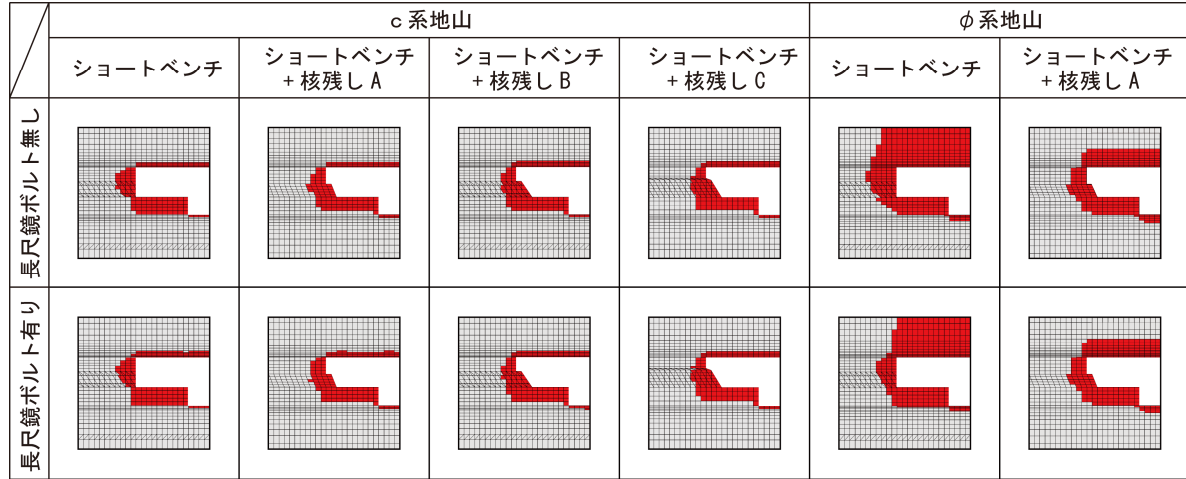
図-3に各工法における塑性域分布を示す。土被り30mの $c$ 系地山で長尺鏡ボルトが無い場合に着目すると、核を残すことで切羽前方の塑性域が僅かであるが減少していることがわかる。切羽での押し変形量の抑制効果が大きい核残しB・Cは塑性域の減

表-1 地表面沈下量

土被り	地山条件	掘削工法	地表面沈下量		抑制量
			長尺鏡ボルト無し	長尺鏡ボルト有り	
30m	c系地山	ショートベンチ	43.5mm	42.4mm	1.1mm
		ショートベンチ+核残しA	44.2mm	43.5mm	0.7mm
		ショートベンチ+核残しB	41.0mm	40.7mm	0.3mm
		ショートベンチ+核残しC	40.4mm	40.0mm	0.4mm
	φ系地山	ショートベンチ	40.5mm	32.4mm	8.1mm
		ショートベンチ+核残しA	39.4mm	35.3mm	4.1mm
10m	c系地山	ショートベンチ	16.9mm	16.8mm	0.1mm
		ショートベンチ+核残しA	13.7mm	13.7mm	0.0mm
		ショートベンチ+核残しB	17.1mm	17.1mm	0.0mm
		ショートベンチ+核残しC	16.9mm	16.9mm	0.0mm
	φ系地山	ショートベンチ	127.4mm	60.8mm	66.6mm
		ショートベンチ+核残しA	20.9mm	18.9mm	2.0mm



土被り 30m の場合



土被り 10m の場合

図-3 塑性域

少の度合いも大きく、核残しによる切羽前方地山の補強効果が塑性域の減少に繋がったと考えられる<sup>1)</sup>。つぎに、長尺鏡ボルトを併用した場合に着目する。全工法で天端前方上部の地山の塑性域が減少しており、切羽前方地山が補強されていることがわかる。また、他の掘削工法と比べ沈下量が抑えられていた核残しB・Cを併用した場合には、塑性域の減少が顕著であった。核残しによる地山補強効果と長尺鏡ボルトの地山補強効果により効果的に塑性域の発生を抑制できたと考えられる。また、切羽前方地山が

拘束され、塑性域が減少したことで沈下に伴う地山挙動が抑制され沈下量が抑制されたと推察される。一方、φ系地山でも長尺鏡ボルトの打設による塑性域の減少が顕著である。φ系地山では沈下抑制量も大きく塑性域の減少が沈下量抑制の一要因になるという先述の考察とも一致する。つぎに、土被りが10mのc系地山に着目する。土被り圧が小さいため、塑性域の発生が狭い範囲に限定されている。したがって、長尺鏡ボルトを打設しても塑性域の減少がみられないため、沈下抑制効果が

得られなかったと考えられる。一方、 $\phi$ 系地山のショートベンチカット工法の場合は、長尺鏡ボルトの有無に関わらず塑性域が地表面まで生じている。核を残した場合も同様に地表面まで塑性域が生じているが、核を残したことにより上半切羽での押し出し変形量が約28%抑制されている。切羽周辺地山が補強されたことにより地表面沈下量が大幅に抑制されたものと考えられる。さらに、核を残して長尺鏡ボルトを併用すると塑性域が大幅に減少している。言い換えると、切羽対策がされていないショートベンチカット工法でも核残しと長尺鏡ボルトを併用することで、地山が補強され掘削が可能となり両者の軟弱地山に対する有用性が確認できた。

### (3) トンネル断面変形率

図-3に土被り30mの場合のc系地山と $\phi$ 系地山におけるショートベンチカット工法と核残しAを併用した場合のトンネル断面変形率(側壁間の変形量を掘削幅で除した百分率)を示す。切羽安定対策の違いによる断面変形率への影響はみられなかった。 $\phi$ 系地山の断面変形率が僅かに小さい値を示したが、その差は0.1%程度と僅かな差であり、長尺鏡ボルトの併用が断面変形率に及ぼす影響はほぼないものと考えられる。なお、土被り10mの場合は、値が小さいものの同様な傾向を示した。

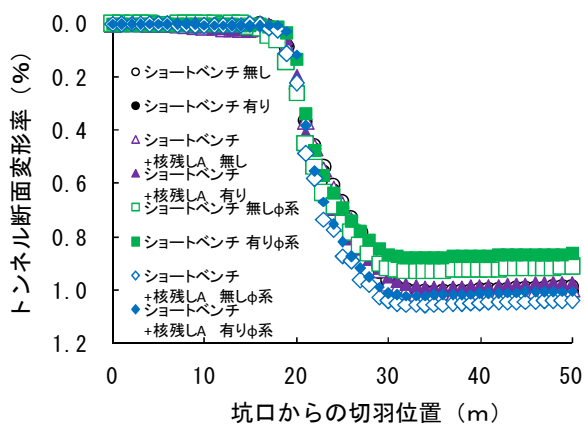


図-4 トンネル断面変形率

## 4. まとめ

種々な地盤条件において長尺鏡ボルトによる切羽周辺地山の補強効果を数値解析的に理解することを試みた。結果を要約すると、以下ようになる。

- 1) 土被り30mではc系・ $\phi$ 系地山に関わらず核残しや長尺鏡ボルトの併用により塑性域の広がりを抑制するとともに地表面沈下量を抑制できた。
- 2) 土被り10mでは核残しや長尺鏡ボルトの地山補強効果がc系地山ではみられなかったが、 $\phi$ 系地山で両者を併用した場合、地山補強効果が顕著に表れた。
- 3) 核残しや長尺鏡ボルトの併用は軟弱地山での地山補強に有効である。
- 4) 長尺鏡ボルトの併用や核残しはトンネル断面変形率に影響を及ぼさない。

## 参考文献

- 1) 大塚勇他：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。
- 2) 菅浩亮他：リングカット工法における補助部材削減の可能性について，トンネル工学研究論文・報告集（投稿中），2009。
- 3) 大島洋：わかりやすい土质地質学，pp76-77，2000。
- 4) 林久資他：押し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，土木学会第64回年次学術講演集 pp.749-750，2009。
- 5) 土木学会：山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務，トンネルライブラリー16，2006。
- 6) 森崎泰隆他：一次インバートの閉合距離が地表面沈下に与える影響に関する解析的検討と適用事例，土木学会論文集，Vol.64 No.3，227-236，2008。
- 7) 岡部正他：数値解析によるc系地山， $\phi$ 系地山の挙動の比較，トンネル工学研究論文・報告集第13巻，pp.157-162，2003。
- 8) 林久資他：押し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。

## THE INFLUENCE OF TUNNEL BEHAVIOR CAUSED BY DIFFERENCE OF OVERBURDEN

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

Recent year, the cases which excavated by NATM in urban area increases. The tunnel excavated in urban area, it is important to stabilize tunnel face and suppress surface settlement. Tunnel excavated by ring-cut method with face bolts. To understand the effect of ring-cut and face bolts in different overburden, numerical analysis was conducted.

The results are as follows: 1) difference of overburden and strength parameters gives large influence to the tunnel behavior, 2) ring-cut and face bolts are useful to reinforce soft ground, 3) face bolts and ring-cut did not works for controlling tunnel convergence.