

トンネル上半脚部の地盤改良による 沈下抑制効果

東亮太^{1*}・林久資¹・菅浩亮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)

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)

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

NATMに補助工法を併用することで、都市部の浅い軟弱な地山条件下でも、トンネルの掘削・構築が可能となった。そこで、補助部材の使用を低減させ、廃棄に伴う環境への負荷を減少させるためには、トンネルが掘削される地山の強度特性や変形特性に適した補助工法を選択することが重要である。本研究では、トンネル上半脚部下の地盤を改良した工法に着目し、トンネル掘削が地表面沈下、天端沈下、上半脚部の沈下に及ぼす現象を理解するために、数値解析的な検討を行った。その結果、トンネル上半脚部下の地盤を改良することによって、沈下抑制効果が得られることが判明した。

Key Words : NATM, soil improvement, numerical analysis, ground surface settlement

1. はじめに

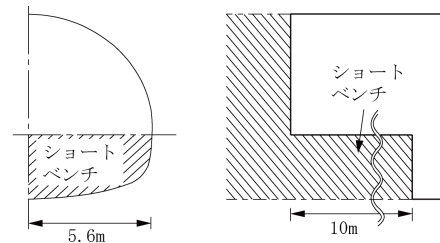
トンネル掘削時における、地表面の沈下抑制対策としては、先受け工や脚部の補強などが知られている。例えば、フォアパイリングや脚部ボルト、脚部の地盤改良などである。本研究では、その一つとして、上半脚部下の地盤を改良した工法に着目した。この補助工法が、トンネル掘削時に地表面沈下量・天端沈下量や上半脚部の沈下量に及ぼす影響を把握することを目的とした。

2. 解析概要

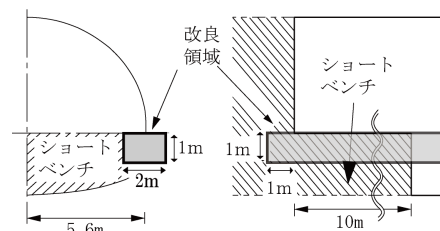
(1) 比較する掘削工法

都市部の浅い軟弱な地山条件下では、トンネル掘削による沈下が地表面まで達する可能性がある。ここでは、上半脚部下の地盤を改良する工法に着目し、この工法がどの程度沈下を抑制するかを解明する。

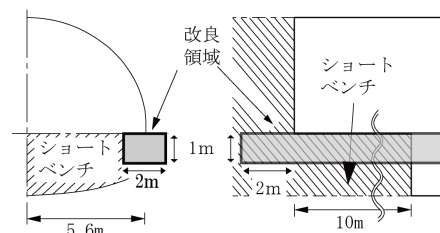
解析に用いた工法を図-1の(a)(b)(c)に示す。(a)は補助工法なしのベンチ長10mのショートベンチカット工法。上半脚部下に改良体を設けた工法では、改良体の形状は縦1m×横2mの長方形断面とし、(b)として切羽進行に伴って1m先行する工法と、(c)として2m先行する工法の3種類設定した。ただし、これらの改良体の大きさは、文献より実際の施工事例¹⁾を参照して決めている。また、



(a) ショートベンチカット工法



(b) ベンチカット工法(先行改良1m)



(c) ベンチカット工法(先行改良2m)

図-1 解析に用いた工法

改良体の造成は、脚部ウレタン注入工法や脚部ジェット工法による改良を想定している。

これらの補助工法を都市部の浅い軟弱な地山条件下に適用した場合、地表面沈下量・天端沈下量・上半脚部の沈下量にどのような影響を与えるのかを把握するための数値解析を行った。

(2) 解析領域と境界条件

解析領域を図-2に示す。境界条件は、地山側面は横断方向、前面と背面は縦断方向、底面は上下方向に拘束し、地表面は自由とした。

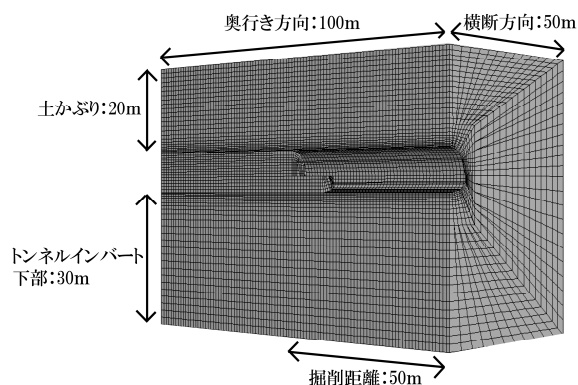


図-2 解析領域

(3) 入力定数および力学モデル

浅い土かぶり下で施工された土砂地山の事例を既住の文献より調べた。その結果、粘着力の多くが100kPa以下に、内部摩擦角の多くが50°以下に集中していることがわかった。

これより、地山の強度定数である粘着力 c は70kPa・100kPaの二種類に、内部摩擦角は10°・20°・30°・40°の4種類に設定し、これらの組み合わせを地山の強度定数として、表-2に示す。変形係数 D は都市部のトンネル工法の適用事例³⁾より、NATMとシールドトンネルの適用限界付近を想定し、 $D=1 \times 10^5 \text{ kPa}$ と設定した。

改良体の力学定数については、既住の文献³⁾を参照し、変形係数は地山の20倍の $2 \times 10^6 \text{ kPa}$ と設定し、粘着力は各解析ケースについて150kPaに増加するものとし、内部摩擦角 ϕ は増加しないものとした。

支保部材である吹付けコンクリートの入力定数は文献⁴⁾やコンクリート標準示方書⁵⁾より、また鋼製支保工の入力定数はトンネル標準示方書より⁶⁾設定した。

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・クーロンを用いた。さらに鋼製支保工はビーム要素、吹付けコンクリートはシェル要素でモデル化を行った。

(4) 解析手順

解析は実現場での施工を考慮し、ステップ1で地山の

表-1 解析ケース

地 山	変形係数(kPa)	1.0×10^5
	ポアソン比	0.3
改良体	変形係数(kPa)	2.0×10^6
	粘着力(kPa)	150
吹付け コンクリート	変形係数(kPa)	3.4×10^6
	ポアソン比	0.2
	吹付け厚(cm)	20
鋼製支保工 (H-200)	弾性係数(kPa)	2.1×10^8
	断面積(cm^2)	63.5

表-2 入力定数

解析ケース	粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 ϕ (°)
1	70	10
2		20
3		30
4		40
5	100	10
6		20
7		30
8		40

初期応力解析を行い、ステップ2以降トンネルを50mまで1mずつ掘削を行った。鋼製支保工と吹き付けコンクリートについては、一週間遅れで施工されるものとした。トンネル上半脚部の改良体については、既住の文献³⁾より切羽より1m先行するものと、2m先行するものの二種類設定した。

3. 解析結果と考察

ここでは、地表面沈下量と天端沈下量、上半脚部の沈下量について結果と考察を以下に記す。

(1) 地表面沈下量

図-3と図-4にトンネル掘削により生じた最大の地表面沈下量と内部摩擦角との関係を示す。図-3は地山の粘着力が $c=70 \text{ kPa}$ の場合、図-4は $c=100 \text{ kPa}$ の場合である。図中の○印は改良なし、△印は改良体の強度特性である粘着力が150kPaに増加し、切羽進行に伴い1m先行した場合である。□印は改良体の粘着力が150kPaに増加し、切羽進行に伴って2m先行して改良を行う場合である。

図-3において、地山の内部摩擦角が10°の場合は、トンネル上半脚部下を改良することによって沈下抑制効果が表れている。これは、支保工脚部の地盤を改良したことにより、脚部地盤の耐荷力が増大したため、沈下を抑制したものと考えられる。しかし、切羽進行に伴って1m先行改良する場合と2m先行改良する場合とでは効果に差はみられない。一方、地山の内部摩擦角が20°以上になると、トンネル上半脚部下の地盤の改良による沈下抑制効果はみられない。

図-4において、地山の粘着力が70kPaから100kPaに上昇すると内部摩擦角に関わらず沈下抑制効果は見られな

い。また、改良の先行距離の違いによる沈下抑制効果にも差はない。これは、地山の粘着力が約1.5倍大きくなったためであると考えられる。

(2) 天端沈下量

図-5と図-6は最大の天端沈下量と内部摩擦角の関係をを表している。図-5は地山の粘着力が $c=70\text{kPa}$ の場合、図-6は地山の粘着力が $c=100\text{kPa}$ の場合である。

まず図-5の粘着力が 70kPa の場合に着目する。上半脚部下の地盤を改良することによって沈下の抑制効果が表れているのは、地山の内部摩擦角が 10° の場合である。しかし、改良による先行距離が 1m と 2m では沈下の抑制効果に違いはみられない。一方、地山の内部摩擦角が 20° 以上になると、改良による沈下抑制効果は減少する。これは、地山の初期の強度特性が大きいため、改良効果が出なかったことが示唆される。

つぎに図-6の粘着力が 100kPa の場合に着目する。地山の粘着力が 70kPa の場合に比べると、内部摩擦角に関わらず沈下抑制効果は減少している。

地表面沈下量と天端沈下量との比を S_r とすると、 S_r が1.0の場合は共下がり現象を示す。今回の結果では、地山の粘着力が 70kPa の場合、改良の有無に関わらず地山の内部摩擦角が 10° と 20° で、 S_r がそれぞれ0.8と0.7になっており、地山の内部摩擦角が 30° 以上では0.5となっている。このような結果は、地山の粘着力が 100kPa の場合でも同様な傾向を示す。言い換えれば、 S_r が0.7より大きくなると、地表面沈下をさらに抑制するためには上半脚部下の地盤を改良するだけではなく、もっと剛な支保工への変更などが必要であると考えられる。例えば、吹付けコンクリートの厚さを増すことや、鋼制支保工のサイズを大きくすることなどがあげられる。

(2) 上半脚部沈下量

図-7と図-8に最大の上半脚部の沈下量と内部摩擦角の関係を示す。図-7は $c=70\text{kPa}$ の場合、図-8は $c=100\text{kPa}$ の場合である。

まず図-7に着目する。地山の内部摩擦角が 10° 以下の場合で上半脚部下の地盤改良による沈下抑制効果があらわれている。これは、上半脚部を改良することにより脚部地盤の応力低下領域が減少し、沈下が抑制されたと考えられる。ここでも、地表面沈下量や、天端沈下量と同様に改良の先行距離による効果の違いはみられない。一方、地山の内部摩擦角が 20° 以上になると、改良による沈下抑制効果は減少している。

つぎに図-8に着目する。こちらも粘着力が 70kPa の場合に比べると、どの内部摩擦角でも沈下抑制量は減少している。

(4) 坑口より20m地点での地表面沈下量

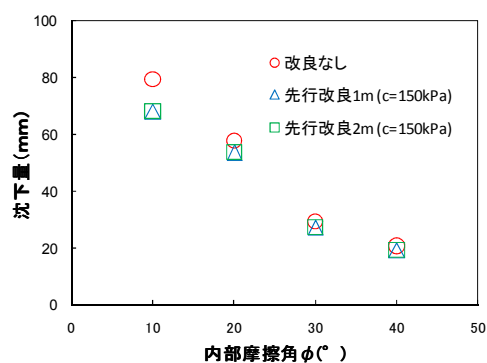


図-3 最大地表面沈下量 ($c=70\text{kPa}$)

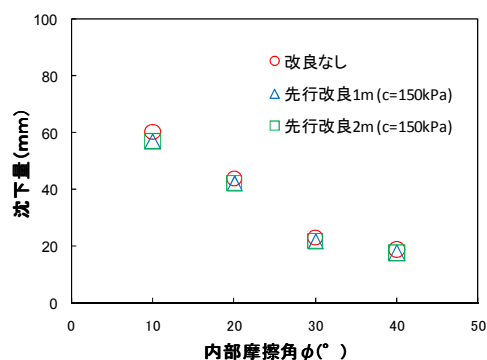


図-4 最大地表面沈下量 ($c=100\text{kPa}$)

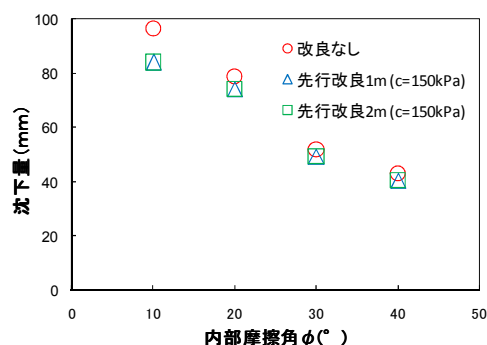


図-5 最大天端沈下量 ($c=70\text{kPa}$)

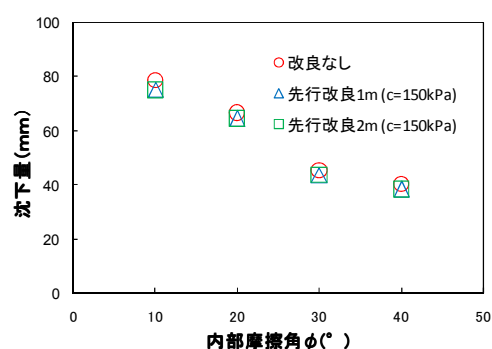


図-6 最大天端沈下量 ($c=100\text{kPa}$)

図-9は坑口より 20m 地点での地表面の沈下量を示している。縦軸に沈下量を横軸に切羽からの距離を示す。図中の○印は改良なし、△印は改良体の強度特性である粘着力が 150kPa に増加し、先行改良 1m 、□印は改良体の粘着力が 150kPa に増加し、先行改良 2m の挙動を示している。先行改良が 1m と 2m とでは、沈下抑制効果に違いはみら

れなかった。沈下の先行変位は切羽から前方約2Dの地点から発生しており、最終の沈下量の約50%となっている。上半脚部の改良を1m、2mと先行して行ったが、先行変位の抑制や、沈下量の抑制には効果は表われなかった。これは、地山の強度定数が小さいため、改良の先行距離の違いが沈下抑制効果に影響を与えなかったものと考えられる。一方、トンネル断面を閉合すると抑制の効果があらわれていることから、早期閉合を行えば効果が大きくなることが示唆される。

4. まとめ

上半脚部下の地盤改良における効果について、以下に得られた結果を述べる。

- 1) 小さい強度特性を有した地山では、上半脚部下の地盤を改良すると、沈下量を抑制することができる。
- 2) 一方、改良帯の先行距離の違いは沈下抑制効果に影響を与えない。
- 3) トンネル断面の早期閉合により、沈下抑制効果が大きくなることが示唆される。

なお、地山の強度特性に関する定数を決定するにあたり、株式会社鴻池組の山田浩幸博士に有益な助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 三島功裕，倉持秀明，福家佳則，伊藤邦彦：大断面近接土砂めがねトンネルに挑むアンブレラ工法，土と基礎，vol.30, No.2, pp.23-26, 1994
- 2) ジェオフロンテ研究会：アンブレラ工法に関する技術資料，pp.16, 1996
- 3) 中尾次生，関本宏，居相好信，西野健一郎：住宅密集地下・含水未固結地山を掘る，トンネルと地下，vol.30, No.2, pp.19-30, 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, pp.31-40, 1985

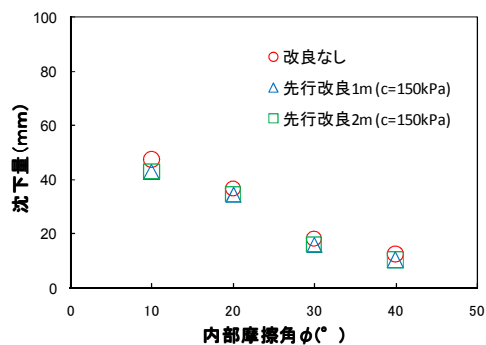


図-8 最大脚部沈下量(c=100kPa)

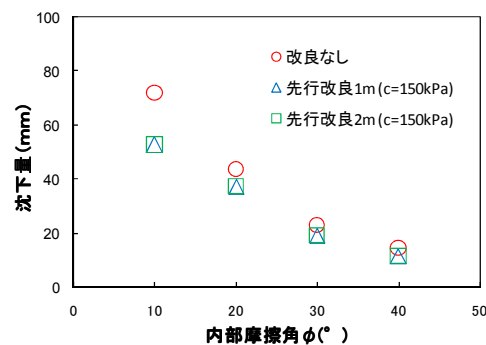


図-7 最大脚部沈下量(c=70kPa)

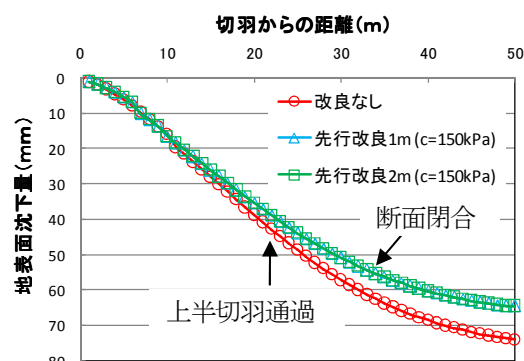


図-9 地表面沈下量

- 5) 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
- 6) 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.

THE CONTROLE OF DISPLACEMENT BY GROUND IMPROVEMENT OF TUNNEL FOOT AREA

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

When excavate the shallow depth tunnel to soft ground at urban area, it became possible to excavate the tunnel by NATM with auxiliary method. However, effect of auxiliary method is not clarified enough. So, it is important to select the auxiliary method that is proper for strength characteristic of ground and deformation characteristic. Then it is possible to reduce auxiliary materials and decrease the environmental load. To clarify the influence that tunnel excavation with improvement method gives ground condition, numerical analysis was conducted. As a result, there is controlling effect of surface settlement when improved tunnel foot area.