

地山特性に応じた上半脚部下の地盤改良による 沈下抑制効果

東亮太¹・林久資¹・長谷川昌弘²・吉岡尚也²・菅浩亮¹

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:ryota@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)

都市部の浅い軟弱な地山条件下でトンネルを掘削する際には、NATMに補助工法を併用することでトンネルを掘削・構築することが可能となった。トンネルを掘削する際には沈下管理値などが設定されているが、補助工法の効果は十分に解明されていないので沈下管理値にあった補助工法を適切に選択・採用することが重要である。本研究では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量や、天端沈下量、上半脚部の沈下量、に及ぼす影響を数値解析に基づき把握するとともに地山条件に応じた効果を解明することを主たる目的とした。数値解析的な検討を行った結果、上半脚部下の地盤を改良することにより沈下抑制効果があり、改良体の粘着力が増加するにつれて、その効果も増大していくことがわかった。

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

1. 研究の目的

NATMの補助工法が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の浅い軟弱な地山条件下でも補助工法を併用することで掘削・構築が可能となった。このような条件下でトンネルを掘削する場合には、地表面沈下量などの管理値を設定している。しかし、補助工法の効果は十分に解明したうえで、地山の変形特性・強度特性や施工時の管理値にあった補助工法を適切に選択することが重要である。そのことにより、補助部材の使用を低減できるだけでなく、補助部材の廃棄などによる環境への負荷を軽減できる。

本研究では、上半脚部下の地盤を改良した工法に着目

し、トンネル掘削が上半脚部の沈下量・天端沈下量・地表面沈下量に及ぼす影響を把握すると共に、地山の変形特性・強度特性に応じた効果を解明することを主たる目的とした。

2. 解析概要

(1) 補助工法の効果の比較

土かぶりの浅い都市部でのトンネル掘削は、掘削による沈下が地表面まで影響を及ぼす可能性がある。ここでは、土かぶりの浅いトンネルを掘削する際に上半脚部下の地盤を改良することによってどの程度沈下が抑制され

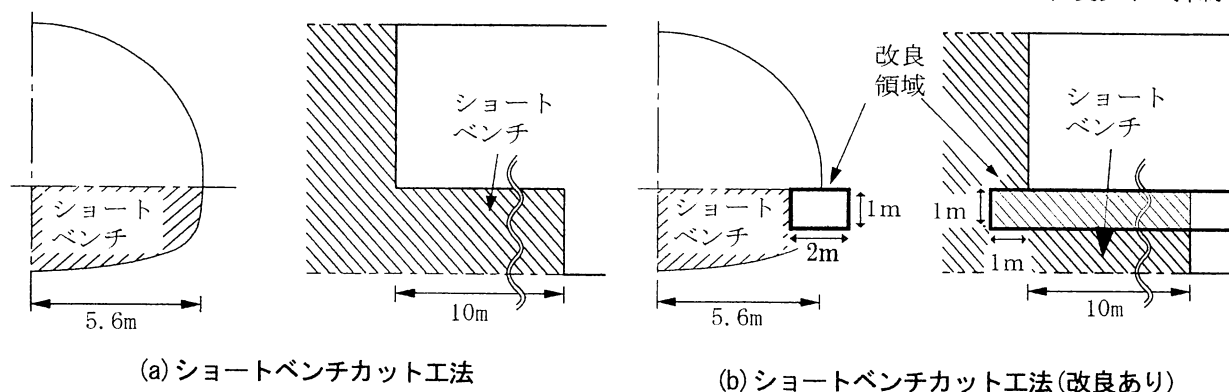


図-1 解析に用いた掘削工法

るのかを解明する。

解析に用いた工法を図-1の(a)(b)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、(b)は上半脚部に改良体を設けた工法である。形状は縦1m×横2mの長方形断面とし、切羽進行に伴い1m先行して改良を行うように設定した。これは、施工事例を参考に¹⁾にし、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。

トンネル脚部の地盤を改良する工法を都市部の軟弱な地山条件下で適用し施工した場合、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受けるかを把握するため数値解析を行った。

(2) 解析領域と境界条件

都市部での施工を想定し、トンネルの土かぶり厚は20mと設定した。トンネルインバートより下部は35m、横断方向は50m、奥行方向は100mとなる領域に設定した。トンネルの断面形状については、道路トンネルのD_{IIa}タイプを採用した。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、地表面は自由と設定した。

(3) 解析定数および力学モデル

浅い土かぶり厚で施工された土砂地山の事例を既往の文献より調べた。図-3は縦軸に粘着力 c を横軸に内部摩擦角 ϕ をとり、この二つの定数の関係を表したものである。プロットされた粘着力 c の多くは100kPa以下、内部摩擦角 ϕ の多くは40°以下に集中している。したがって、地山の強度特性である粘着力 c は0kPa・20kPa・50kPa・100kPaの4種類に、内部摩擦角 ϕ は10°・15°・20°・30°・40°の5種類に設定した。この粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の組み合わせを地山の定数としまとめたものを表-1に示す。地山の強度定数がケース1から6のような場合は解の収束が得られなかった。さらに、変形係数 D は都市部でのトンネル工法の適用事例³⁾よりNATMとシールドの適用限界付近の地山を想定し、 $D=100000\text{kPa}$ と設定した。また、粘着力 c が20kPa以下、内部摩擦角 ϕ が30°以上の地山である砂質土系地山を ϕ 系地山、粘着力 c が50kPa以上、内部摩擦角 ϕ が20°以下である粘質土地山を c 系地山とみなす²⁾。

改良部分の強度定数については、既往の文献⁴⁾を参考に、変形係数 D は地山の20倍の $D=2000000\text{kPa}$ とし、粘着力は各々の解析ケースについて粘着力 c を50kPa・100kPa・150kPaのパターンに増加するものとした。内部摩擦角について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はコンクリート標準示方書⁵⁾や文献⁶⁾より、鋼製支保工はトンネル標準示方書より⁷⁾、設定した。地山の力学モデルは、完全弾塑性

体とし降伏の判定にはモール・クーロンを用いた。支保部材については、鋼製支保工はビーム要素、吹付けコンクリートについてはシェル要素でモデル化を行った。

(4) 解析手順

解析は実現場でのトンネル施工法を考慮し、ステップ1

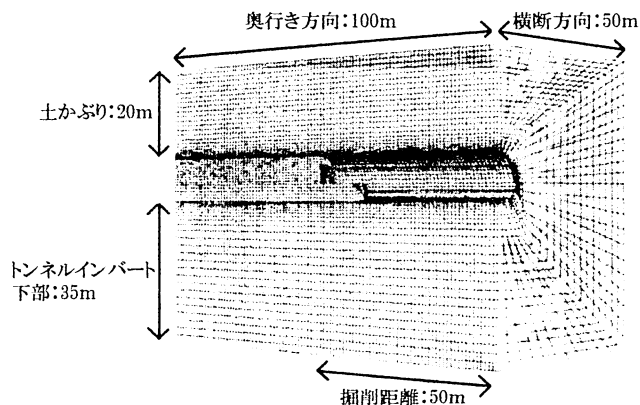


図-2 解析領域

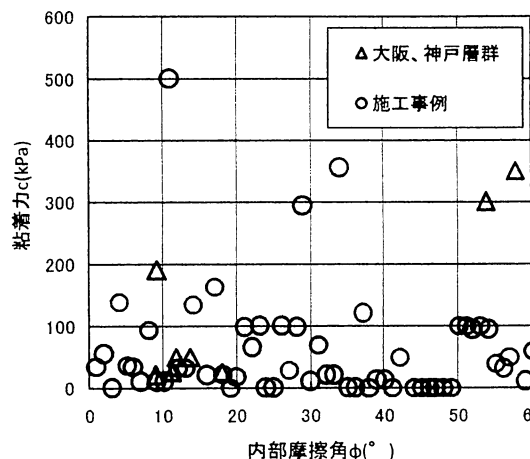


図-3 c と ϕ の関係

表-1 解析ケース

解析 ケース	地山の c (kPa)	地山の ϕ (°)	解	備 考
1	0	10	収束せず	
2		20	収束せず	
3		30	収束せず	ϕ 系地山
4		40	収束せず	ϕ 系地山
5	20	10	収束せず	
6		20	収束せず	
7		30	収束	ϕ 系地山
8		40	収束	ϕ 系地山
9	50	10	収束	c 系地山
10		15	収束	c 系地山
11		20	収束	c 系地山
12		30	収束	
13		40	収束	
14	100	10	収束	c 系地山
15		20	収束	c 系地山
16		30	収束	
17		40	収束	

で地山の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。また、鋼製支保工と吹付けコンクリートは一週間遅れで同時に施工されるものとし、これは、実現場でのずりだしなどの作業で支保工の施工が若干遅れることを考慮したためである。改良部分については、既住の文献⁴⁾を参考に切羽進行に伴い1m先行して改良を行った。

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述べる。

(1) 地表面沈下量

図-4(a) (b) (c)に最大の地表面沈下量を示す。(a)は地山の粘着力が $c=20\text{kPa}$ の場合、(b)は $c=50\text{kPa}$ の場合、(c)は $c=100\text{kPa}$ の場合である。図中の○印は改良なし、◇印は改良帯の変形特性のみが改良され、強度特性は改良されていない場合である。□印は改良帯の変形特性と強度特性のうちの粘着力のみが地山の粘着力の2倍の 100kPa まで改良された場合である。△印は改良帯の変形特性と強度特性のうちの粘着力のみが地山の粘着力の3倍の 150kPa まで改良された場合である。

地山の粘着力が $c=20\text{kPa}$ の場合の(a)に着目する。地山の内部摩擦角が 30° 以下でプロットがないのは、解が収束しなかったためである。地山の内部摩擦角が 30° の場合は、トンネル脚部の地盤を改良することで地表面沈下の抑制効果がみられ、その効果は粘着力の増加とともに大きくなっている。一方、地山の内部摩擦角が 40° になるとトンネル脚部の地盤改良による沈下抑制の効果は見られない。このように地山の内部摩擦角が 40° になると地山の ϕ 系特性がより強くなるためにトンネル脚部の地盤を改良してもその効果が表れにくくなるものと考える。

つぎに地山の粘着力が $c=50\text{kPa}$ の場合の(b)に着目する。地山の内部摩擦角が 20° 以下の場合はトンネル脚部の地盤改良することで地表面沈下の抑制効果がみられ、効果の大きさは粘着力が大きくなるとともに大きくなっている。ただし、地山の内部摩擦角が 10° の場合は、数値解析上の結果であり、NATMによるトンネル施工は不可能であると考え。一方、地山の粘着力が $c=50\text{kPa}$ で地山の内部摩擦角が 30° 以上になると、トンネル脚部の地盤を改良による地表面沈下の抑制効果はみられなくなる。これは再配分された応力に対して地山の強度特性が大きいためである。

最後に地山の粘着力が $c=100\text{kPa}$ の場合の(c)に着目する。地山の粘着力が 100kPa の場合は、内部摩擦角に関わ

らずトンネル脚部の地盤を改良による地表面沈下の抑制効果はみられない。

表-2 入力定数

地山	変形係数(kPa)	1.0×10^5
	ポアソン比	0.3
	粘着力(kPa)	0・20・50・100
	内部摩擦角($^\circ$)	10・15・20・30・40
改良体	変形係数(kPa)	2.0×10^6
	粘着力(kPa)	50・100・150
	内部摩擦角($^\circ$)	10・15・20・30・40
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	弾性係数(kPa)	2.1×10^5
	断面積(cm^2)	63.5

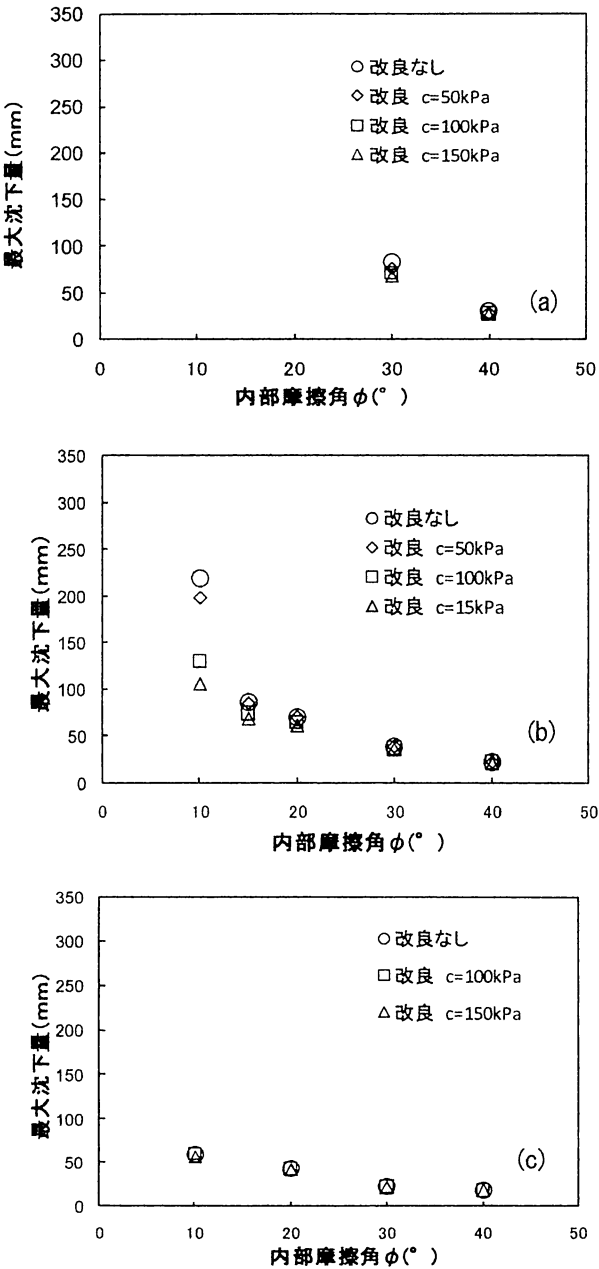


図-4 (a) (b) (c) 最大地表面沈下量

(2) 天端沈下量

図-5(a)(b)(c)に最大の天端沈下量を示す。(a)は地山の粘着力が $c=20\text{kPa}$ 、(b)は $c=50\text{kPa}$ 、(c)は $c=100\text{kPa}$ で、図中の○印、◇印、□印、△印は図-4の記号と同じ意味を有している。

地山の粘着力が $c=20\text{kPa}$ の(a)に着目する。天端沈下抑制効果として地山の内部摩擦角が 30° の場合、トンネルの脚部を改良することで沈下抑制効果が見られ、改良体の粘着力が増加するにつれて沈下抑制効果も大きくなっている。一方、内部摩擦角が 40° になると脚部の地盤改良による沈下抑制効果はみられない。天端沈下量は内部摩擦角が 30° で約 110mm 、内部摩擦角が 40° で約 60mm となり天端沈下量の70%が地表面沈下量として表れている。

つぎに、(b)の地山の粘着力が $c=50\text{kPa}$ の場合に着目する。この地山では内部摩擦角が 10° から 20° の間では天端沈下の80%が地表面沈下となっており、とも下がり現象が発生していると考えられるが、内部摩擦角が 30° と 40° の場合では50%となり、とも下がり現象は少なくなっていると考ええる。地山の内部摩擦角が 20° 以下で天端沈下抑制効果が表れており、改良体の粘着力が増加するにつれて沈下抑制効果も大きくなっている。一方、内部摩擦角が 30° 以上になると、沈下抑制効果はみられない。

最後に(c)の地山の粘着力が $c=100\text{kPa}$ の場合に着目する。地山の内部摩擦角に関わらず、天端沈下抑制効果はみられない。内部摩擦角が 10° 、 20° では天端沈下量の約70%が地表面沈下量となり、とも下がり現象が起こっていると考えられるが、内部摩擦角が 30° 、 40° では天端沈下量の50%が地表面沈下量となっており、とも下がり現象は少なくなっている。

(3) 上半脚部の沈下量

図-6(a)(b)(c)は上半脚部の最大沈下量を表している。(a)は $c=20\text{kPa}$ 、(b)は $c=50\text{kPa}$ 、(c)は $c=100\text{kPa}$ で、図中の○印、◇印、□印、△印は図-4と図-5の記号と同じ意味を有している。

地山の粘着力が $c=20\text{kPa}$ の(a)の場合に着目する。内部摩擦角が 30° の場合は上半脚部の沈下量は抑制されている。さらに、その効果は改良体の粘着力が増加するにつれて大きくなっている。一方、内部摩擦角が 40° の場合は改良による沈下抑制効果はみられない。上半脚部の沈下量は内部摩擦角が 30° の場合で約 60mm となり、同条件の天端沈下量の約55%となっており、とも下がり現象が起きていると考える。

つぎに、地山の粘着力が $c=50\text{kPa}$ の(b)の場合に注目する。地山の内部摩擦角が 20° 以下で沈下抑制効果が表れ、改良体の粘着力が増加するにつれてその効果も大きくなっている。一方、内部摩擦角が 30° 以上になると改良体の

沈下抑制効果はみられない。上半脚部の沈下量は内部摩擦角が 10° の場合、約 290mm となっており同条件の天端沈下より大きい沈下量となっている。これは、地山の強度定数が小さいため脚部地盤が安定せず多くの沈下が発生したと考える。内部摩擦角が 10° から 20° では脚部の沈下量は天端沈下量の70%となっており、とも下がり現象が発生しているが、内部摩擦角が 30° 、 40° では、50%となりとも下がり現象が少なくなっている。

最後に地山の粘着力が 100kPa の(c)では、内部摩擦角に関わらず改良の効果はみられない。脚部沈下量は内部摩擦角が 10° 、 20° の場合天端沈下量の60%となっており、とも下がり現象がみられる。内部摩擦角が 30° 、 40° では40%となっても下がり現象は少ないものと考えられる。

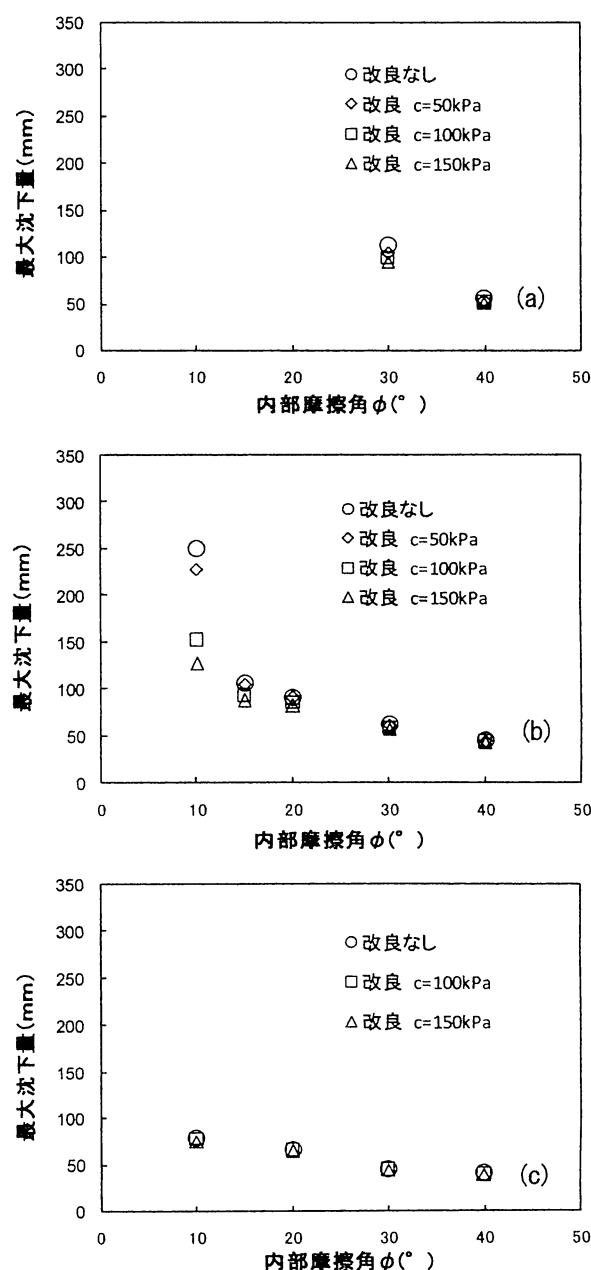


図-5 (a)(b)(c) 最大天端沈下量

(4) トンネル掘削後の地表面沈下量

図-7(a) (b)は、縦軸に地表面沈下量を、横軸に切羽からの距離をとってトンネル縦断方向の地表面沈下量を表したものである。(a)は沈下抑制効果がそれなりに表れている解析ケース10、(b)は沈下抑制効果がほとんど見られない解析ケース13の場合である。図中の○印、◇印、□印、△印は図-4と図-5などと同じ意味を有している。

(a)の改良体の定数が弾性係数のみ増加した改良工法では、改良なしの工法と比べて沈下量に大きな違いは見られない。一方、改良体の粘着力が増加すると沈下抑制効果が表れる結果となっている。また、先行変位は切羽から前方2Dあたりから発生し、その量は最大沈下量の約30%となっている。脚部の改良は切羽より1m先行して行ったが、改良による先行変位の抑制効果は見られていないものとする。したがって、先行変位の抑制する対策としては、先行して改良する距離をもっと長くすることが必要であろう。また、トンネルが閉合されると沈下抑制効果が表れているとも読み取れるため、早期閉合を行えばその効果が大きくなることを示唆している。

つぎに図-7の(b)を見ると、改良なしと改良ありの工法では違いはほとんど見られない。先行変位は(a)と同様に切羽から前方2Dあたりから発生している。

(5) 横断方向の地表面沈下量

図-8(a) (b)にトンネル横断方向の沈下量を示す。(a)は解析ケース10、(b)は解析ケース13を示している。図中の○印、◇印、□印、△印は図-4と図-5、図-6の記号と同じ意味を有している。

まず、図-8の(a)に着目する。横断方向の地表面沈下はトンネルセンターより3D付近から始まっていて、横断方向に60mの広がりがある。横断方向における沈下抑制効果はトンネルセンターから2Dの範囲内で表れことがわかる。一方、(b)を見ると、横断方向の沈下はトンネルセンターより3D付近から始まっている。

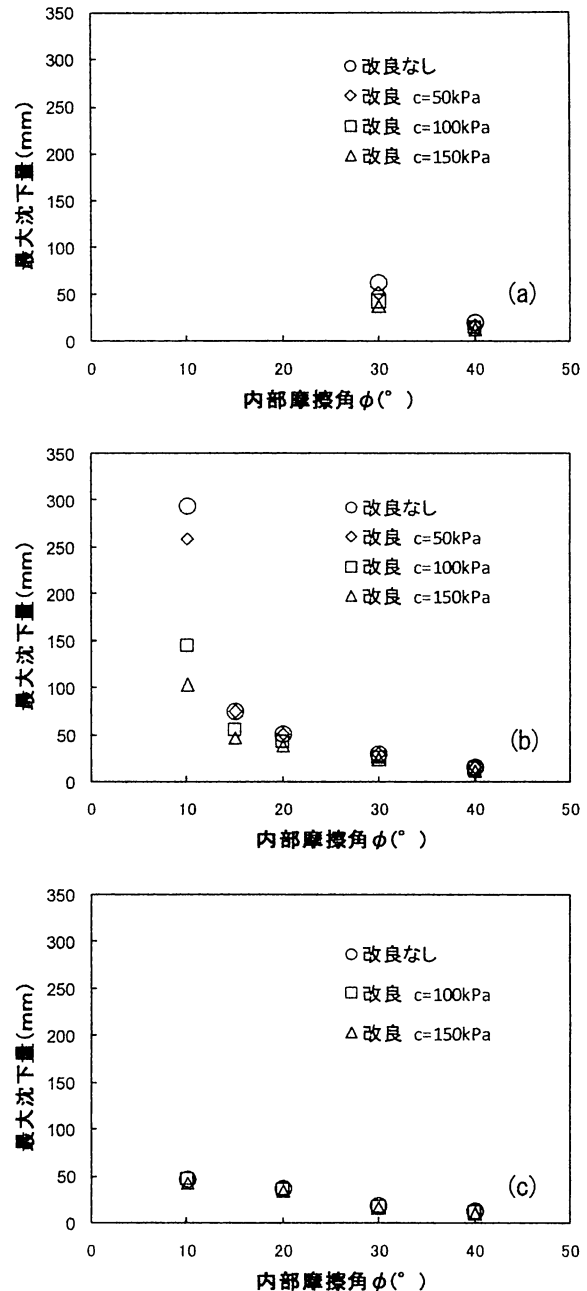


図-6 (a) (b) (c) 最大上半脚部沈下量

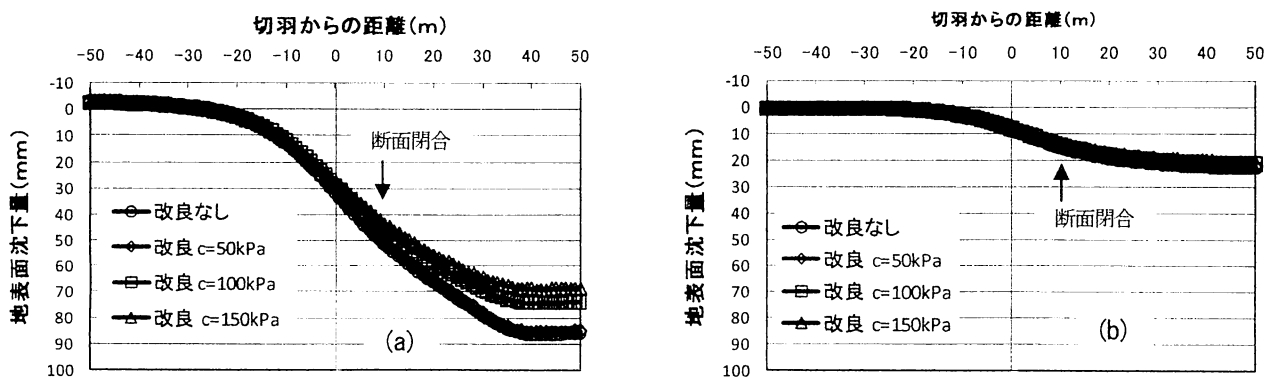


図-7 (a) (b) トンネル掘削後の地表面沈下量

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) 上半脚部下の地盤を改良することによって地表面沈下量、天端沈下量、上半脚部の沈下を抑制できる。
- 2) 上半脚部下の改良の効果は、地山の強度定数である粘着力が50kPa、内部摩擦角が20°以下で沈下抑制効果を発揮し、改良体の粘着力が増加するにつれて、沈下抑制効果も増大した。
- 3) トンネル切羽より1m先行して地盤改良を行ったが、この程度の改良では先行変位の抑制には効果はなかった。
- 4) 横断方向の地表面沈下はトンネルセンターから2Dの範囲で顕著になる。

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氏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，1994年
- 2) 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.1,151-156,2006.3
- 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，1996
- 4) 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，1999
- 5) 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.
- 6) 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

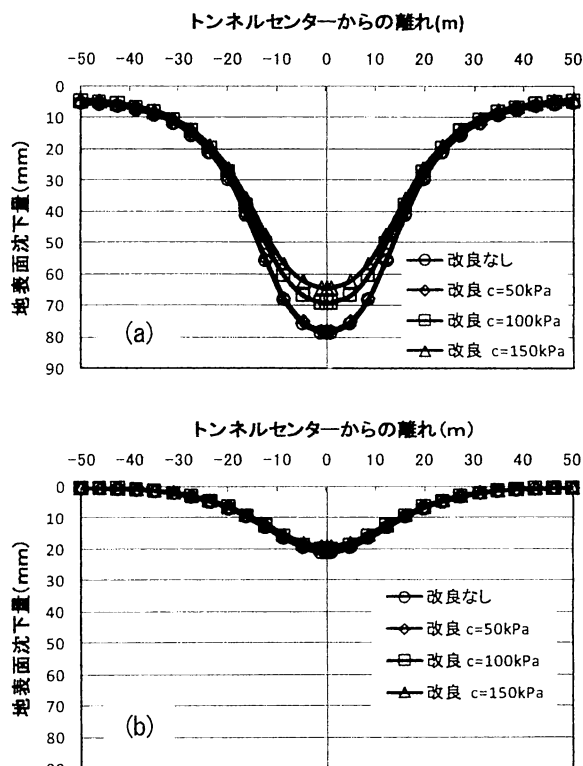


図-8 (a) (b) 横断方向の地表面沈下の挙動

計編〕， pp.17-40，1997.

- 7) 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.
- 8) 東亮太他：浅い土被り下におけるトンネル地表面対策，平成21年度土木学会関西支部年次学術講演会
- 9) 東亮太他：トンネル上半脚部の地盤改良による沈下抑制効果平成21年度全国大会第64回年次学術講演会(投稿中) 2008.

THE CONTROL OF DISPLACEMENT BY GROUND IMPROVEMENT OF TUNNEL FOOT AREA

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

When excavate the shallow depth tunnel to soft ground at urban area, it became possible to excavate the tunnel by NATM with auxiliary method. Because the effect of an auxiliary method has not been clarified enough, it is important to choose the good auxiliary method for the settlement management. To clarify the influence that tunnel excavation with improvement method gives ground condition, numerical analysis was conducted. The best way of confirming surface, top and foot settlement is improve the tunnel foot. And the effect of improvement increases when cohesion of the improved area increased.