

トンネル掘削時のとも下がり現象の解明と
その対策工に関する基礎的研究

2010 年

崔 瑛

要 旨

未固結地山での小土被りトンネルの掘削は、従来開削工法およびシールド工法が主流であったが、近年では支保パターンの多様化や様々な補助工法の開発により、NATM が頻繁に採用されるようになってきている。しかしながら、未固結地山での小土被りトンネルの掘削は、切羽の自立性および地山の変位などの問題を抱えている。現在建設中の東北新幹線八戸～新青森区間では、地形的な制約や線形的な制約により、未固結地山での小土被りトンネルの建設が進められている。地表面沈下の抑制が重要な課題となるこれらの建設現場では、「地表面とトンネル天端、或いはトンネル天端と脚部がほぼ同程度に沈下する」とも下がり現象が報告された。現場では、地盤およびトンネル沈下を抑制するため脚部補強工が採用されており、効果を発揮した施工事例が報告されている。しかしながら、そのメカニズムや合理的な補強工の条件などは、未だ十分に解明されていなく、現場での経験的な判断からその施工が進められているような状況である。したがって、場合によっては、不経済な施工、不十分な施工となっている可能性が考えられる。そこで本研究では、NATM で未固結地山に小土被りトンネルを掘削する際、とも下がり現象の発生原因、および実現現場で地盤沈下対策として採用された脚部補強工の効果のメカニズムについて検討した。

まず本研究では、脚部補強工の一つであるサイドパイル工の地盤沈下抑制効果を定性的に調べるため、とも下がり現象を簡易的に表現した三次元降下床模型実験および模型実験に対する数値解析を実施した。サイドパイルは降下床の下降により生じるすべり線を横切ることにより、せん断補強効果および荷重再配分効果を発揮し、地盤沈下抑制効果を発揮する。その効果はサイドパイルの長さが長くなるほど、設置間隔が狭くなるほど高くなる傾向を示す。また、模型実験では実施困難であった、フットパイル工のようにパイルを斜めに設置するケースに対する数値解析を行い、パイルを斜めに設置する場合、サイドパイルより大きい地盤沈下抑制効果を発揮することを確認した。

続いて本研究では、実現現場でのトンネル掘削過程およびとも下がり現象をシミュレートした後、様々な施工条件をパラメータとした解析を行い、とも下がり現象が発生した主な原因について検討した。過去の研究により、未固結地山に小土被りトンネルを掘削する際地表面と天端がほぼ同程度沈下すると報告されている。また、本解析の対象現場では周辺地山が非常に軟弱であったため、トンネルを掘削する前に地盤改良を行った。地盤改良を行うことにより、トンネルおよび地表面沈下を大幅に抑制することができたが、トンネル周辺地盤の剛性を高めることにより、トンネルおよび周辺地盤が一体となり同じく沈下したため、地表面とトンネル天端および脚部が同程度沈下する現象が発生した。このような両条件の組合せにより、地盤およびトンネルが同等に沈下するととも下がり現象が現れた。

最後に本研究では、実際のトンネル掘削現場を解析対象に、他補助工法と併用する場合および単独に使用する場合、サイドパイル工の地盤沈下抑制効果とそのメカニズムについて検討した。他補助工法の併用の有無に係わらず、模型実験およびその解析で得られた結果と同じく、サイドパイルはトンネル掘削により生じるすべり線を交差することによりせん断補強効果および荷重再配分効果を発揮し、サイドパイルが長くなるほどその効果は高くなる。さらに、いずれの長さにおいても内圧効果を発揮し、これら三種類の効果により地盤及びトンネルの沈下を抑制することができる。

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究の課題と構成	2
第2章 既往の研究	5
2.1 概説	5
2.2 とも下がり現象	5
2.3 トンネル掘削に伴う地表面沈下に関する研究	6
2.3.1 土被りと地表面沈下量の関係	6
2.3.2 地表面の沈下形状に関する研究	7
2.3.3 地表面沈下量の許容値	8
2.4 トンネル掘削におけるサイドパイル工の位置付け	9
2.4.1 脚部補強工の概要	9
2.4.2 サイドパイル工の使用状況	12
2.4.3 既往の研究	17
第3章 室内模型実験	19
3.1 概説	19
3.2 とも下がり現象を模擬した降下床模型実験の概要	19
3.2.1 トンネル覆工およびサイドパイルのモデル化	19
3.2.2 模型地山の作成と地山材料	21
3.2.3 三次元降下床模型実験装置	22
3.2.4 トンネル掘削およびとも下がり現象のモデル化	22
3.2.5 実験パターンおよび計測項目	23
3.3 模型実験結果	24
3.3.1 地表面沈下量	24
3.3.2 鉛直荷重	27
3.4 まとめ	29
第4章 模型実験を対象とする数値解析	31
4.1 概説	31
4.2 模型実験を対象とする数値解析の概要	31
4.2.1 解析領域とメッシュ	31
4.2.2 地山のモデル化	32

4.2.3 サイドパイルのモデル化.....	34
4.2.4 模型実験値との比較.....	35
4.3 サイドパイルの地盤沈下抑制効果に関する解析結果.....	36
4.3.1 サイドパイルが地盤の力学挙動に及ぼす影響.....	36
4.3.2 サイドパイルの力学挙動.....	41
4.3.3 模型実験におけるサイドパイル工の地表面沈下抑制効果のまとめ.....	45
4.4 パイルに角度を付けた場合の地盤沈下抑制効果.....	46
4.4.1 パイルに角度を付けた場合の概要.....	46
4.4.2 地盤の力学挙動.....	47
4.4.3 下向きに設置するパイルの力学挙動.....	51
4.4.4 下向きに設置するパイルの長さの影響.....	52
4.4.5 下向きに設置するパイルの地盤沈下抑制効果のまとめ.....	53
4.5 パイルの設置方向を変化させた場合の地盤沈下抑制効果.....	54
4.5.1 パイルを斜め上向きに設置する場合の概要.....	54
4.5.2 地盤の力学挙動.....	55
4.5.3 上向きに設置するパイルの力学挙動.....	57
4.5.4 上向きに設置するパイルの長さの影響.....	58
4.5.5 上向きに設置するパイルの地盤沈下抑制効果のまとめ.....	58
4.6 まとめ.....	59
第5章 トンネルの掘削過程およびとも下がり現象の再現.....	61
5.1 概説.....	61
5.2 模型実験を対象とする数値解析の概要.....	61
5.2.1 解析領域とメッシュ.....	61
5.2.2 地山のモデル化.....	64
5.2.3 サイドパイルのモデル化.....	64
5.2.4 改良体のモデル化.....	64
5.2.5 吹付けコンクリートおよび剛性支保工のモデル化.....	65
5.3 トンネル掘削過程の表現.....	65
5.4 とも下がり現象の発生メカニズム.....	67
5.4.1 とも下がりの発生原因に関する検討.....	67
5.4.2 とも下がりの発生時地盤とトンネルの力学挙動.....	70
5.5 とも下がり現象の発生メカニズムに関する考察.....	70
5.5.1 とも下がり現象に対する考え方.....	70
5.5.2 トンネル天端沈下量と地表面沈下量の関係.....	70
5.5.3 トンネル天端沈下量と脚部沈下量の関係.....	73
5.6 まとめ.....	73
第6章 実トンネルでのサイドパイル工の効果の検証.....	75
6.1 概説.....	75

6.2 とも下がり発生時サイドパイル工の地盤沈下抑制効果	75
6.2.1 サイドパイルの挿入効果	75
6.2.2 施工パターンの影響	79
6.2.3 とも下がり発生時サイドパイルの長さによる差異	80
6.2.4 地盤改良と併用時サイドパイルの沈下抑制メカニズム	82
6.3 サイドパイル工のみ使用時の地盤沈下抑制効果	83
6.3.1 サイドパイル工のみ使用時の挿入効果	83
6.3.2 サイドパイル工のみ使用時長さの影響	87
6.3.3 サイドパイル工のみ使用時の沈下抑制メカニズム	89
6.4 サイドパイル工の地盤沈下抑制効果に関する考察	89
6.4.1 模型実験と諸数値解析の比較	89
6.4.2 すべり線の発生位置の推定	91
6.5 まとめ	92
 第7章 結論	 93

参考文献

謝辞

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

Rabcewicz L. v. が1960年代の初めに提唱した New Austrian Tunneling Method (NATM)¹⁾は、地山の持つ強度をできるだけ有効に利用できるトンネル工法として注目され、日本においても、上越新幹線中山トンネルにおいて導入されて以来急速に普及し、多くのトンネルが NATM によって建設されてきた。同工法の長所は、経済的で、かつ開削工法などに比べて地上の交通を妨げない点にあるが、その適用にあたっては地山の自立性が重要な条件である。

日本の都市は洪積、沖積平野に位置することから、都市トンネルは、地山が軟弱で土被りは小さく、かつ地下水の存在する場所で建設されるのが通例である。未固結地山での小土被りトンネルにおいては、従来、開削工法およびシールド工法が主流であった。近年では、支保パターンの多様化や様々な補助工法の開発により、土被りの小さい未固結地山においても NATM が頻繁に採用されるようになってきている。しかしながら、未固結地山での小土被りトンネルの掘削は、切羽の自立性など安定問題を抱えて、地山の変位（地表面沈下）およびそれによる近接構造物への影響が付随する問題となる。すなわち、(1)地表面沈下の抑制、(2)切羽の安定性、(3)湧水の処理、(4)周辺環境への影響などの問題点を抱えている^{2),3)}。

東北新幹線八戸～新青森区間は、地形的な制約や線形的な制約により、未固結地山に小土被りトンネルを建設した。地表面沈下の抑制が重要な課題となるこれらの建設現場では、Fig. 1-1 に示すような「地表面とトンネル天端、或いはトンネル天端と脚部がほぼ同程度に沈下する」現象が報告された^{4),5)}。同現象はとも下がり現象と呼ばれ、今まで計測された事例がなく、その発生原因は不明確である。

現場では、とも下がり現象でトンネルの脚部および天端が地表面と同程度沈下する現象に着目し、「脚部の沈下を抑制すれば地表面の沈下も収まるであろう」との考えから、Fig. 1-2 に示すような脚部補強工⁴⁾ (サイドパイル、フットパイル) が用いられており、効果を発揮した施工事例が報告されている。しかしながら、そのメカニズムや合理的な補強工の条件などは、未だ十分に解明されていなく、

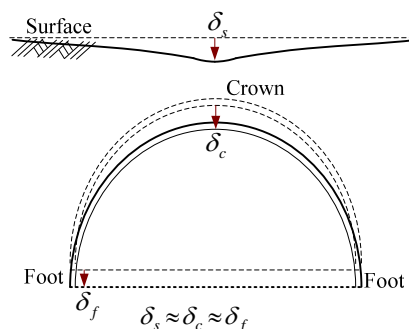


Fig. 1-1 とも下がり現象のイメージ図

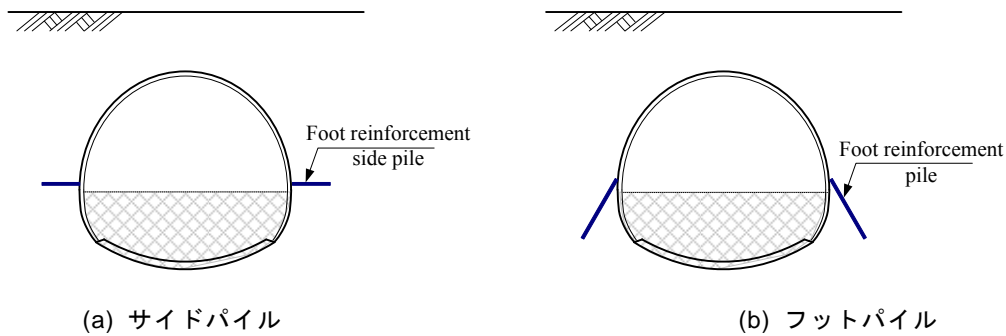


Fig. 1-2 脚部補強工のイメージ図

現場では経験的な判断から試行錯誤的にその施工が進められているような状況である。したがって、場合によっては、不経済な施工、不十分な施工となっている可能性が考えられる。

山地が国土の大半を占め、地質条件が非常に悪く中で培われた日本のトンネル施工技術は、世界の最先端であることは疑う余地のないことである。その技術の発展は、トンネル施工現場で得られた経験に負うところが多く、長年のトンネル施工を通じて少しずつ積み上げられたものである。すなわち、経験則に基づいたノウハウが、設計規範に反映されたもので、学理的に現象のメカニズムや施工法の効果が実証されて設計がなされているのかといえ、不十分である。国内外のトンネル施工は、現状は多くは経験則に頼ったものである。このような観点から、十分な科学的な検討を踏まえてトンネル工学の分野で発展・深化させる余地は、十分にあり、安全で経済性に配慮した施工を実現するには必要不可欠である。

多様な地形・線形に対応でき、また経済的であることから、未固結地山での NATM を用いたトンネル掘削は、さらに増加するものと考えられる。安全面、経済面でも優れたトンネルを施工するため、またその技術の汎用性を高めるためには、理論に基づいた信頼性の高い設計・施工基準を確立する必要がある。サイドパイル工を含む脚部補強工が地盤沈下抑制効果を発揮するメカニズムを解明し、学理的な理論に基づいた設計規範を樹立するのは、NTAM およびサイドパイル工をさらに発展させ、普及させるためには不可欠なものである。

以上のような状況を鑑み、本研究では地盤沈下対策として採用されたサイドパイル工を含む脚部補強工が地盤沈下抑制効果を発揮するメカニズムを解明し、その適切な選定・設計法の提案を目的とする。また、地表面沈下防止に加わり、また現場で計測された「とも下がり現象」も、その発生原因を解明しなければならない課題である。

1.2 研究の課題と構成

上節に示した背景および目的を念頭におき、本研究では降下床模型実験と模型実験に対する数値解析、実トンネルを対象とする数値解析を中心に検討を行い、トンネル掘削時サイドパイル工が地山の力学挙動に及ぼす影響について検討した。また、パイルの長さなど主なパラメータが、地山および脚部補強工の力学挙動に及ぼす影響について検討した。最後に、これらの結果を元に、サイドパイル工の適切な設計方法について議論した。なお、本研究で対象としているのは、未固結地山での小土被りトンネルの掘削問題である。

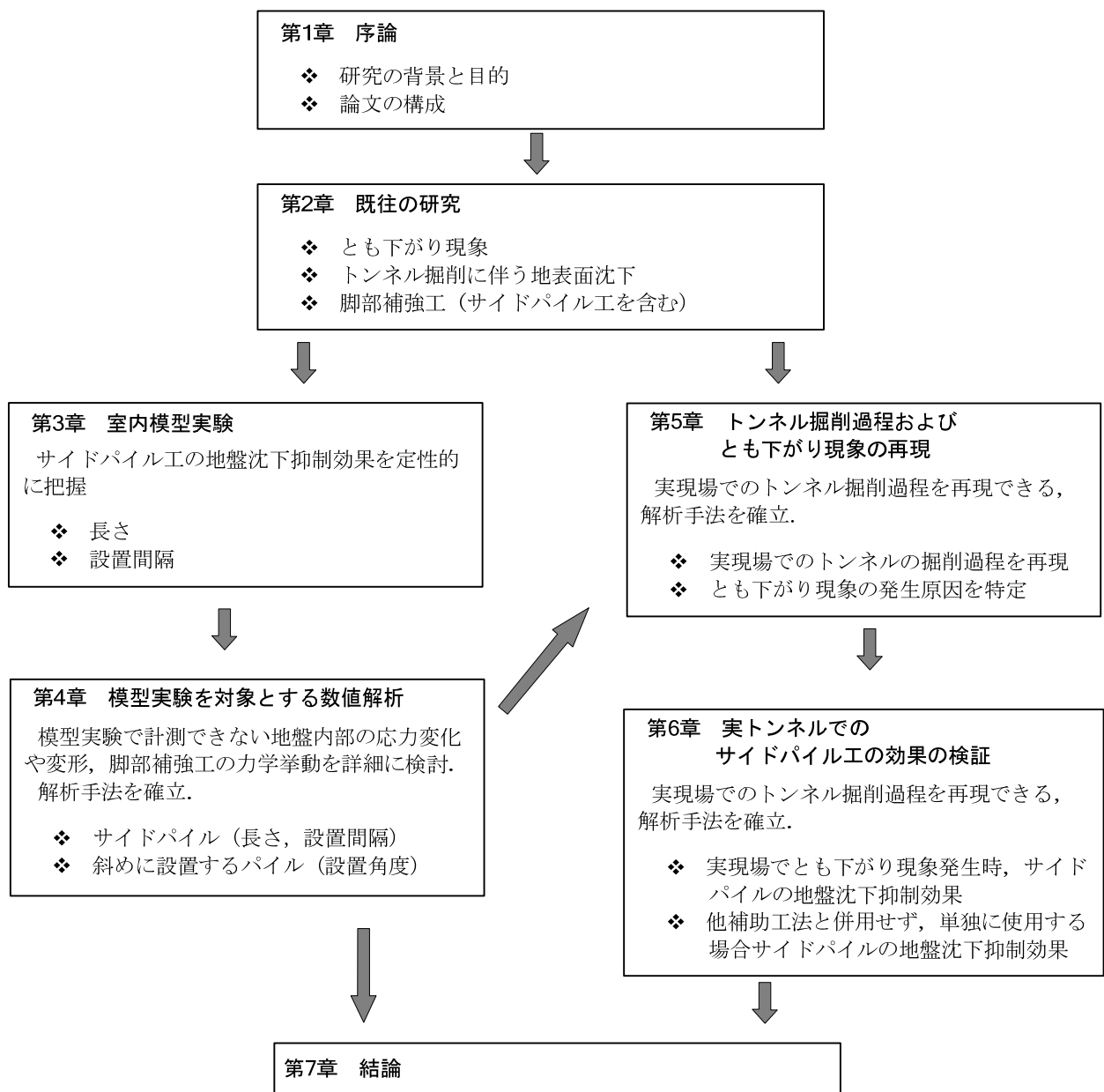


Fig. 1-3 本論文の構成

Fig. 1-3 に本論文の構成を示す。本論文は序論を含めて7章となる。

第2章では、未固結地山での小土被りトンネルの掘削における地表面沈下防止の重要性を論ずるとともに、沈下防止対策として使用されているサイドパイル工の概要について説明する。

第3章では、室内模型実験を通じ、サイドパイル工の地表面沈下抑制効果を定性的に把握する。詳しくは、実際の複雑な施工・地山条件を単純化し、サイドパイルの長さを変化させた実験を行い、サイドパイル工の地表面沈下抑制効果を検証するとともに、長さがその効果に及ぼす影響を調べる。

第4章では、室内模型実験と同じ領域を解析対象とし、弾塑性有限要素解析を行い、実験で計測できない地山内部の応力変化や変形、サイドパイルの力学挙動を詳細に検討する。なお、模型実験結果と解析結果を比較することで数値解析の妥当性を議論する。続いて、同じ解析領域を対象に、フットパイルのようにパイルを斜めに設置する場合、設置角度がその地盤沈下抑制効果に及ぼす影響について検討した。

第5章では、実トンネルに対する数値解析を行い、トンネルの掘削過程およびとも下がり現象をシミュレートする。実現場でのトンネル掘削過程をシミュレートした後、施工条件をパラメータとした解析を行い、とも下がり現象が発生した主な原因について調べる。

第6章では、第5章で確定された解析手法を用いて、実トンネルでとも下がり発生時のサイドパイル工の地表面沈下抑制効果について検討する。実トンネルにおいてのサイドパイル工の効果の把握した後、長さに対するパラメトリックスタディを行い、サイドパイル工の適切な設計方法の提案のための情報を収集する。さらに、地質特性、他補助工法との併用などについて検討し、脚部補強工が最も効果を発揮できる施工状態について検討する。なお、以上の解析結果は設計における参考データとして蓄積する。

第7章では、本論文で得られた成果を総括し、得られた成果のサイドパイル工設計への活用についての知見を述べるとともに、今後検討すべき課題を示す。

第2章 既往の研究

2.1 概説

未固結地山に小土被りトンネルを掘削する場合、従来シールド工法および開削工法が主流であったが、近年では計測技術や補助工法の進化を背景に、未固結地山に小土被りトンネルを掘削する場合にも NATM が採用されるようになった。しかしながら、小土被りのため、グラウンドアーチが形成しにくいこと、未固結のため地山の剛性が低いことなどの理由から、未固結地山での小土被りトンネルの掘削は切羽の自立性など安定問題に加えて、地山の変形問題（地表面沈下等）などが重要な課題となる。東北新幹線のうち、八戸・七戸間の建設現場では、地形的・線形的な理由により、未固結地山において低土被りトンネルを建設している。地盤沈下が重要な課題となるこれらの現場では、地表面と天端、もしくは脚部と天端が同程度沈下する「とも下がり現象」^{4),5)}が計測された。現場では、脚部補強工の一つであるサイドパイル工を採用し、地盤沈下の抑制を図っているが、その抑制効果については不明確な部分が多い。

本章では、まずとも下がり現象について紹介した後、2.3 節において本研究が対象としている未固結地山に小土被りトンネルを掘削する際の地盤の力学挙動について、既往の研究を整理する。次に 2.4 節において、サイドパイル工を含む脚部補強工の地盤沈下抑制効果に関する現場データおよび既往の研究について情報収集を行う。

2.2 とも下がり現象^{4),5)}

東北新幹線（八戸・新青森）のうち、青森県東部の八戸・七戸間には、低土被りのトンネルを貫くトンネルが 12 本存在するが、そのうち多くは NATM により施工されている。この区間の地形は第四紀更新世に形成された台地および段丘郡である。地質は、第三期鮮新世から第四紀更新世にかけて堆積した細粒分含有率が低く、粒径の均一な未固結の砂層を主体としている。

未固結地山に小土被りトンネルを掘削するこれらの建設現場では、Fig. 2-1 に示すように、天端 σ_c と地表面 σ_s 、もしくは天端 σ_c と脚部 σ_f がほぼ同程度沈下する現象が計測された。地表面沈下 σ_s は、先行沈下を除外したものを表示している。同現象は「とも下がり現象」と呼ばれているが、その発生原因については不明確である。

北川ら⁵⁾、浅野ら¹⁴⁾は、とも下がり現象およびその課題性について報告している。また、山田ら¹⁵⁾は、数値解析手法を用いてとも下がり現象を再現し、その対策として、長尺鏡ボルトによる鏡面安定対策と注入式フォアボーリングによる天端補強対策を選定し、実現場にてその効果の確認を行っている。このように、とも下がり現象に対する研究は、現象の報告およびその再現に止まり、その発生メカニズムに対する検討は十分に行われていない状態である。

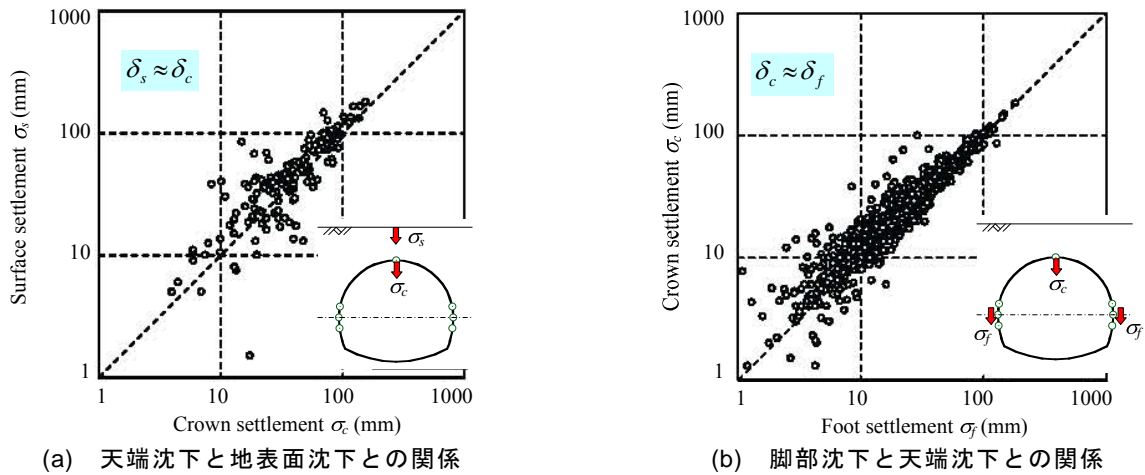


Fig. 2-1 小土被り土砂地山トンネル群における計測例⁵⁾
(牛鍵トンネルでの計測結果を含む)

2.3 トンネル掘削に伴う地表面沈下に関する研究

2.3.1 土被りと地表面沈下量の関係

トンネルの掘削に伴う地表面沈下は、地表や地中の構造物に変状等の重大な影響を及ぼすことがある。地表面沈下は広義の地盤沈下の一形態であるが、通常は地盤沈下（狭義）が地下水の流失等による圧密現象に起因した経時的な地盤変位を対象とするのに対し、地表面沈下は地下にトンネルや空洞を掘削することによって即時的に生ずる地盤変位を対象とする。

トンネルの掘削に伴い、地山内には緩み土圧が生じ、これが地表に地表面沈下となって現れる。掘削による影響は地盤の強度、土被りの厚さ、そして作業によって引きおこされる乱れの程度によるが、地表面まで広がり、多かれ少なかれ地表面に影響を与える。地表面沈下の大きさおよび沈下形状などは、トンネル断面の形状と大小、土被り厚さ、地盤の強度、施工方法、地下水状況など、様々な要因により影響されるため、最終沈下量の詳細の予測はかなり困難であり、せいぜい見積るだけとなる。ここでは、地表面沈下量の予測方法および過去の研究について説明する。

地表面沈下が最初に問題となったのは、地下深所に大規模な空洞を掘削する石炭鉱山においてであった。地下空洞の掘削に伴う地表面沈下に関する研究は、炭鉱や鉱山の採掘関係において古くから行われてきた。Briggs⁷⁾によれば、沈下量 S は次式で求まる。

$$S = m \frac{2.2}{2.2 + \sqrt{\frac{H}{100}}} \tag{2-1}$$

ここで m : 坑道の高さ
 H : 被り

また、Goldreich⁷⁾による他の経験公式がある。

$$S = m - kH \tag{2-2}$$

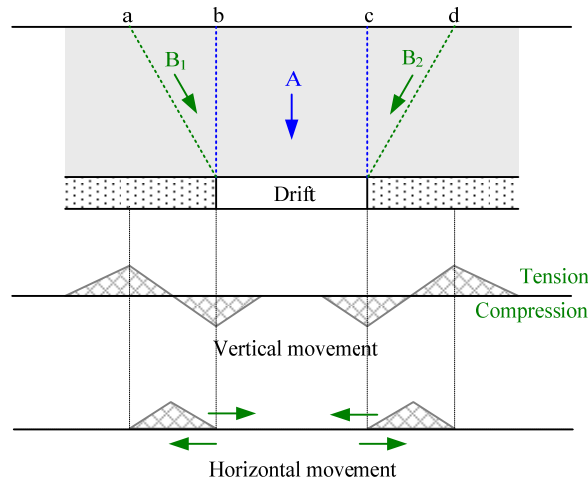


Fig. 2-2 地下掘削による動き⁷⁾ (Goldreich による)

ここで、 k は地盤の体積の膨張係数で、次式から計算される。

$$k = \frac{V_e - V_s}{V}$$

2-3

ここで V_e : 地下で掘削された土の体積
 V_s : 沈下の円錐体内の地盤の体積
 V : 全移動体の体積

k の値は、最小値として $k=0.01$ で、この最小値から被りの深さが増加するにつれ増加し、坑道の高さ $m=4.0$ m に対して、約 $k=0.03$ である。

Goldreich は地下掘削時地盤の動きについても研究してきた。Fig. 2-2 にそのイメージを示す。坑道 (Drift) を掘削することによって、ブロック A, B_1 , B_2 が動き始め、その影響は地表面 (abcd) に広がる。Goldreich によれば、地下の掘削は図に示すとおり、水平方向の運動を起こす。一旦ブロック A が下の方へ動くと、くさび B_1 と B_2 が後に続く。このよに、押し下げられた地域が地表面まで発展する。

以上のように、炭鉱や鉱山の採掘を背景とした地下空洞の掘削に関する経験的知識でも、共通として、土被りが小さいほど地表面沈下が大きくなることが示されている。

2.3.2 地表面の沈下形状に関する研究

Schmidt⁷⁾ は、地表面の沈下形状を正規分布曲線で近似することを提案した。

Peck⁹⁾, 島田¹⁰⁾ らは Fig. 2-3 に示すように、トンネル掘削に伴う地表面の横断方向の沈下形状を正規分布として次式で近似できることを示した。

$$S_{sx} = S_{s0} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)$$

2-4

ここに S_{sx} : トンネル横断面上の地表面沈下量
 S_{s0} : トンネルセンター上の地表面沈下量 (最大値表面沈下量)
 x : トンネルセンターからの距離
 i : トンネルセンターから変曲点 (inflection point) までの距離

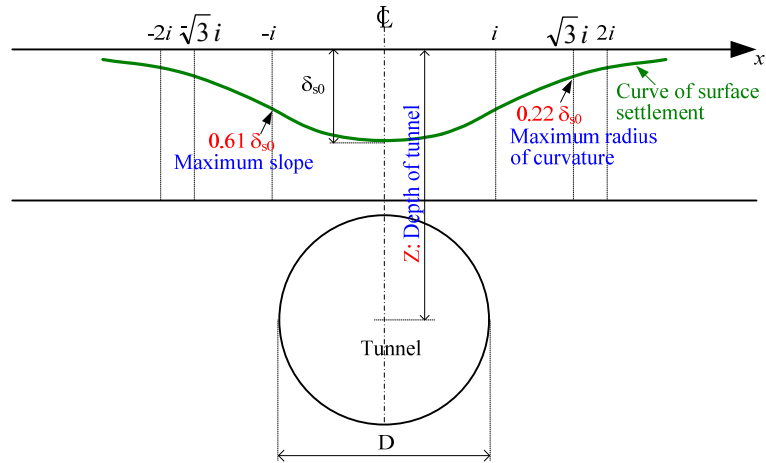


Fig. 2-3 地表面横断沈下形状⁸⁾

これより，トンネル掘削に伴う地表面沈下曲線のトンネル横断方向の傾きの最大値 (θ_{\max}) は， $x=i$ の地点で生じ，式 2-4 を微分することで次式より得られる．

$$\theta_{\max} = \frac{1}{i} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \cdot S_{s0} = \frac{0.61}{i} S_{s0} \quad 2-5$$

ここで，トンネル掘削に伴う地山の崩壊とは，地表面沈下曲線の傾きの最大値 (θ_{\max}) が，地山の最大せん断ひずみに達した時点で起こることである．よって，地山の最大せん断ひずみを γ_p とすると，式 2-5 から地山崩壊時の最大地表面沈下量 (S_{s0}) が算出できる．また，実務面から安全率 (F) を導入すれば，式 2-7 よりトンネルセンター直上の地表面沈下量の管理基準値 (S_a) を設定することができる．

$$S_{s0} = \frac{i}{0.61} \cdot \gamma_p \quad 2-6$$

$$S_a = S_{s0} \cdot \frac{1}{F} \quad 2-7$$

従って，式 2-7 より設定された管理基準値 (S_a) と地表面沈下計測結果を対比することで，トンネルの安定評価の判断を行うことができる．ここで i 値は， Z/D によって異なる (Z : トンネル中心の深さ， D : トンネル直径)．

2.3.3 地表面沈下量の許容値

地表面沈下量の許容値は，掘削現場の地盤条件，周辺環境等により大きく異なる．山岳トンネル地表面沈下検討部会調査・計測 WG (土木学会トンネル工学委員会技術小委員会) では，様々な現場に対する調査を通じ，地表面沈下の許容値は 60 mm の事例が 95 % であると報告している．また，そのうち，20~39 mm を許容値としている事例が 50 % で最も多いという¹¹⁾．

地表面に住居や施設がある場合は地表面沈下の総量に加えて傾斜角が管理されている．対象構造物によって傾斜値は異なるものの，1/1000 rad を許容値としている事例が 64 % であったことを，山岳トンネル地表面沈下検討部会調査・計測 WG は報告している¹¹⁾．

2.4 トンネル掘削におけるサイドパイル工の位置付け

2.4.1 脚部補強工の概要¹⁶⁾

上節で説明したように、未固結地山における小土被りトンネルの掘削では、地表面沈下の抑制が重要な課題となる。未固結地山での小土被りトンネル掘削では、種々の補助工法を併用し、地盤沈下抑制効果を図っている。しかしながら、地表面沈下対策のための補助工法の適用にあたっては、地山条件、沈下の影響を受ける地表、地中構造物などの調査を行い、各工法の効果、適用性、周辺地盤に与える影響およびトンネルの工程、施工法などを十分考慮した上で選定しなければならない。

Table 2-1 にトンネルの施工で実際に使用されている補助工法の代表的なものを示す。表より、地表面沈下対策には、切羽の補強、脚部の補強、地山の補強および地下水対策などが含まれる。

その中、脚部補強工はトンネル支保の脚部沈下量の抑制を目的として採用されている。標準的な支保構造であれば、Fig. 2-4 (a) に示すように、トンネル支保に作用する荷重の鉛直成分は支保脚部だけで支持され、脚部の地山に応力が集中する。地盤支持力が不足する場合や地山剛性が小さいと、脚部地山の局部的破壊や大きな変形が生じ、支保工脚部が沈下する。脚部の沈下が大きくなると内空断面が減少する他、トンネル天端周辺地山の緩みを助長し、切羽および地山全体が不安定な状態となる。

これに対して脚部補強工は、Fig. 2-4 (b) に示すように、支保脚部地盤の強度増加、あるいは支持杭を構築することにより脚部に集中する荷重を支持し、支保工の沈下を抑制することでトンネル構造の安定を図るものである。

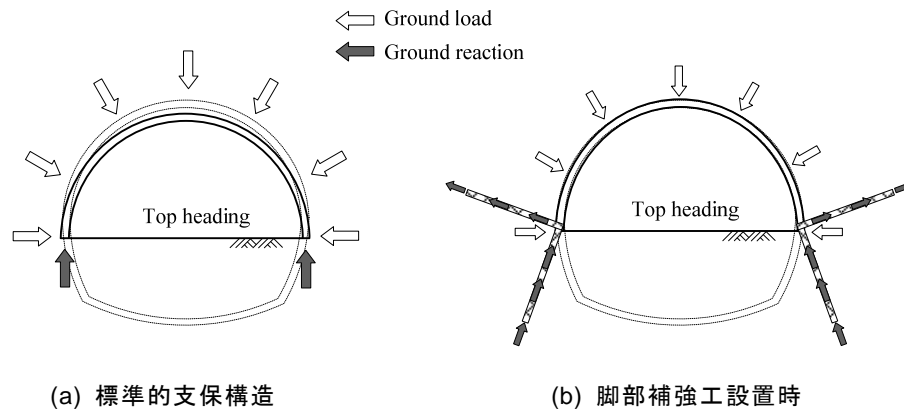


Fig. 2-4 脚部補強工の概念図¹⁶⁾より加筆修正

Table 2-1 補助工法の分類表¹⁷⁾

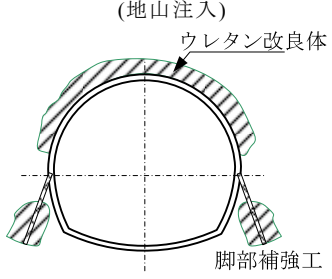
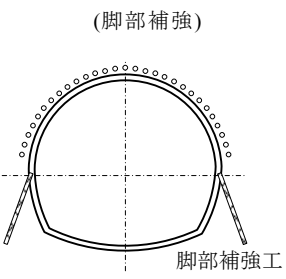
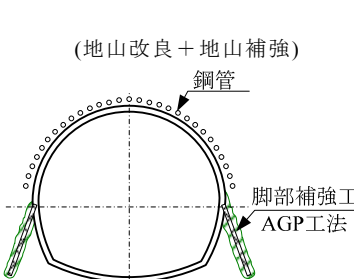
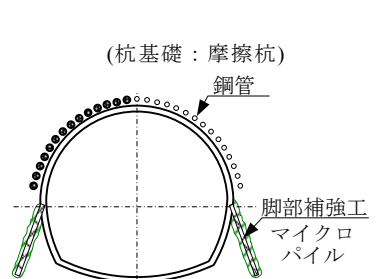
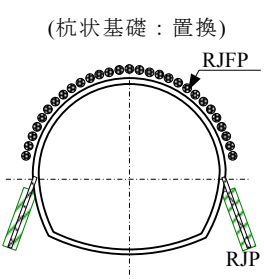
		目的						対象地山			摘要	
		施工の安全確保			周辺環境の保全			硬岩	軟岩	土砂		
		切羽安定対策			地下水対策	地表面沈下対策	近接構造物対策					
		天端の安定	鏡面の安定	脚部の安定								
先受け工	フォアボーリング (充填式, 注入式)	○						○	○	○		
	長尺フォアパイリング	○					○	○		○	*2	
	パイプルーフ	○					○	○		○	*1	
	水平ジェットグラウト (噴射攪拌)	○	○	○			○	○		○	*1	
	スリットコンクリート	○					○	○		○	*1	
鏡面の補強	鏡吹付けコンクリート		○					○	○	○		
	鏡ボルト		○							○		
	長尺鏡ボルト		○				○	○	○	○		
脚部の補強	脚部補強ボルト			○			○			○		
	脚部補強パイル			○			○			○	*2	
	仮インバート			○			○			○		
地下水位対策	排水	水抜きボーリング	○	○	○	○			○	○	○	*2
		ウェルポイント	○	○	○	○					○	*1
		ディープウェル	○	○	○	○					○	*1
		水抜き坑	○	○	○	○			○	○	○	*1
	止水	注入	○	○	○	○	○	○	○	○	○	*1
		遮断壁				○	○	○	○		○	*1
地山補強	注入	○	○				○	○		○	*1	
	垂直縫地	○	○				○			○	*1	

注) ○：比較的良好に採用される工法

*1：通常のトンネル施工機械設備，材料で対処が困難な対策

*2：適用工法によって，トンネル施工機械設備，材料で対処が異なる工法

Table. 2-2 脚部補強工の概要¹⁶⁾

	地山注入	脚部補強ボルト	レッグパイル (1)	レッグパイル (2)	高圧噴射式レッグパイル
概要図	 <p>(地山注入) ウレタン改良体</p> <p>脚部補強工</p> <p>地盤固結工法 ジオタイト工法など</p>	 <p>(脚部補強)</p> <p>脚部補強工</p> <p>中空ロックボルト PU-IF など</p>	 <p>(地山改良+地山補強)</p> <p>鋼管</p> <p>脚部補強工 AGP工法</p> <p>AGP 工法など</p>	 <p>(杭基礎：摩擦杭)</p> <p>鋼管</p> <p>脚部補強工 マイクロパイル</p> <p>マイクロパイル工法など</p>	 <p>(杭状基礎：置換)</p> <p>RJFP</p> <p>RJP</p> <p>RJP 工法, MJS 工法, トレヴィジェット工法など</p>
工法概要	<p>支保工脚部に注入管を打設し、ウレタン系注入材等を圧入して、補強ゾーンを形成する工法。地山の空隙充填、固結・強度増加により、地山の安定や支持力の増加を図る工法。</p>	<p>全面接着型のロックボルトを打設し、地盤のせん断補強や注入による地山の強度増加などにより、地山の安定や支持力の増加を図る工法。</p>	<p>支持工脚部の地山に鋼製パイプを打設した後、主にウレタン系の注入材を圧入して地山の強度や支持力を増加させ、脚部沈下の抑制や支保構造の安定を図る工法。</p>	<p>支持工脚部の地山に鋼製パイプを打設した後、主にセメントミルク系注入材を圧入して耐力の大きい支持杭を構築することにより、脚部沈下の抑制や支持構造の安定を図る工法。</p>	<p>支保工脚部の地盤にセメントミルクを高圧噴射し、固結改良体を構築することによって、地山の強度やすべり抵抗等を増加させ脚部沈下の防止や地山の安定を図る工法。</p>
打設長	2~4 m	2~4 m	3~5 m	4~12 m	3~5 m
設備	汎用機	汎用機	汎用機	専用機	専用機
支持力	小	小	中	大	大
沈下抑制効果	効果的である	効果的である	特に効果的である	特に効果的である	特に効果的である
適用	<ul style="list-style-type: none"> 部分改良や補強による効果が期待できると考えられる。砂質系地盤や支持層が浅い場合に適する。 応急処置的に補強する場合。 地質条件などによるが、支持力は比較的小さい。 		<ul style="list-style-type: none"> 確実な支持効果を必要とする場合。 比較的大きな支持力を必要とする場合。 支持構造補強や安定を目的とする場合。 注入材や打設長、改良体径を増やすことにより、支持力が大きくなる。 		

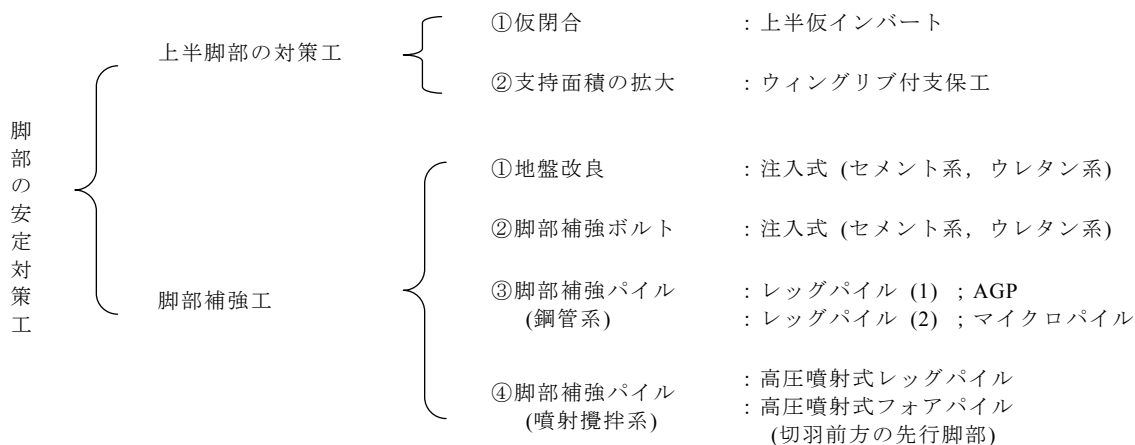


Fig. 2-5 脚部補強工の分類¹⁶⁾

一般的な脚部の安定対策工としては、①上半の仮閉合、②支保工脚部の支持面積の拡大、③脚部支持力の増強を主な目的とした脚部補強工が考えられる。また、複数の工法を組合せて用いる場合が多い。したがって、どの工法を採用するかについては、トンネルの施工法、地山条件、地下水の状況、周辺環境条件などを総合的に判断して、効果的で合理的な工法を採用する必要がある。Table 2-2, Fig. 2-5 に脚部補強工の分類と概要を示す。

脚部補強工を施工することにより、脚部に集中する荷重の分散・脚部地山の強度や変形特性の向上・せん断変形の抑制・水平力に対する抵抗といった効果が期待できる。脚部補強工に期待する効果を Table 2-3 に示す。しかしながら、これらの効果は、ほとんど想定したものであり、力学理論に基づいた証明は不十分である。

Table 2-3 脚部補強工の効果¹⁶⁾

脚部補強工に期待される効果	工法名
荷重の分散 鋼製支保工の底面積を拡大し、接地圧を少なくする。 緩み領域の外へ地山に荷重を分散させる。	ウィングリップ レッグパイプ サイドパイプ
強度増加の促進 地盤強度を増加させることによって安定を図る。 掘削や水による強度低下の阻止、安定化。	地盤改良 地山注入
せん断変形の抑制 掘削による施工基盤のリバウンド抑制。 下半掘削時の側方移動の抑制。	地山注入 レッグパイプ 補強ボルト
水平力への抵抗 引張り材として水平荷重に抵抗し、変形を抑制する。	サイドパイプ レッグパイプ (斜杭)

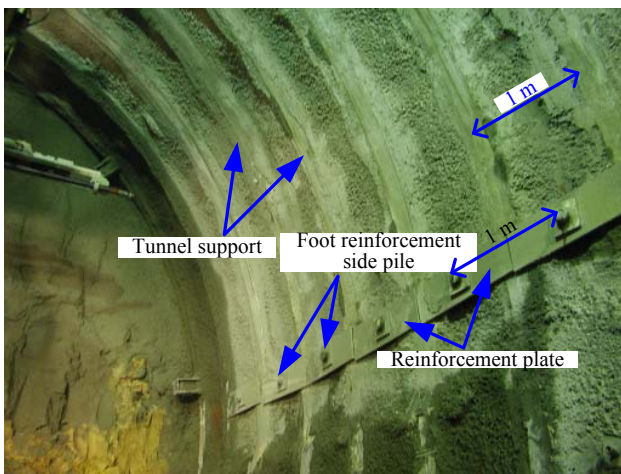
2.4.2 サイドパイプ工の使用状況

地盤沈下の抑制が重要な課題となる 2.2 節で説明した現場では、「とも下がり現象」で、トンネルと地表面が同等に沈下する特徴に着目し、「脚部の沈下を抑制したら地表面の沈下も収まるだろう」との発想から、サイドパイプ工を採用した。

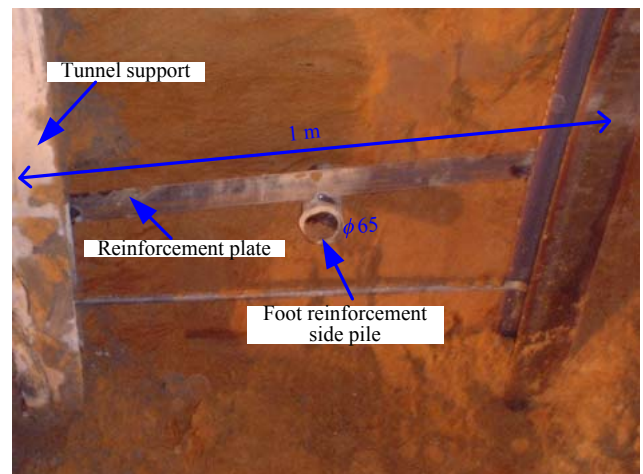
サイドパイル工は、上半あるいは下半掘削時のトンネルおよびトンネル周辺地盤の変形防止を目的としたもので、上半あるいは下半掘削・鋼製支保工設置後に、トンネル内部から側方に鋼管を水平に圧入することにより設置する工法である。その後、鋼管と両側の鋼製支保工に渡した補強プレート(等辺山形鋼)に溶着し、さらに吹付けコンクリートを施工することで、鋼製支保工、補強プレート、鋼管を一体化させる⁶⁾。

Photo 2-1, Fig. 2-6 に、現場で実際に使用されたサイドパイル工の適用例を示す。Picture 2-1 に示すように、補強プレートの設置位置は鋼管の上、中央など、規定はないが、いずれも鋼製支保工とサイドパイルおよび吹付けコンクリートを一体化させるために設置される。

以下では、主にサイドパイル工が適用され、程度の効果があると報告された牛鍵トンネル⁶⁾の施工条件などについて説明する。



(a) 施工例 1



(b) 施工例 2 (牛鍵トンネル例)⁶⁾

Photo 2-1 サイドパイルの施工状況の例

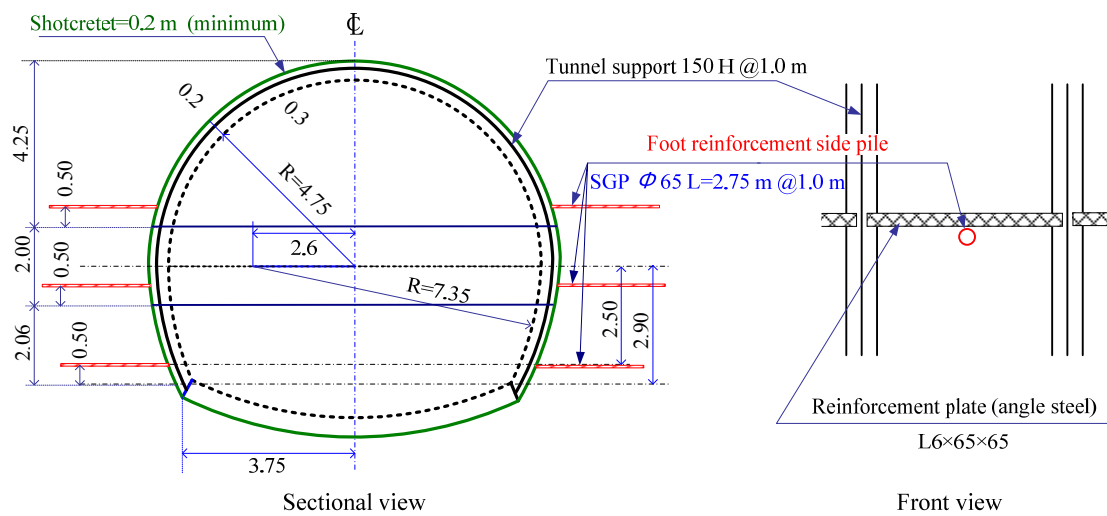


Fig. 2-6 サイドパイル工の適用例 (牛鍵トンネル例)⁶⁾ に加筆修正

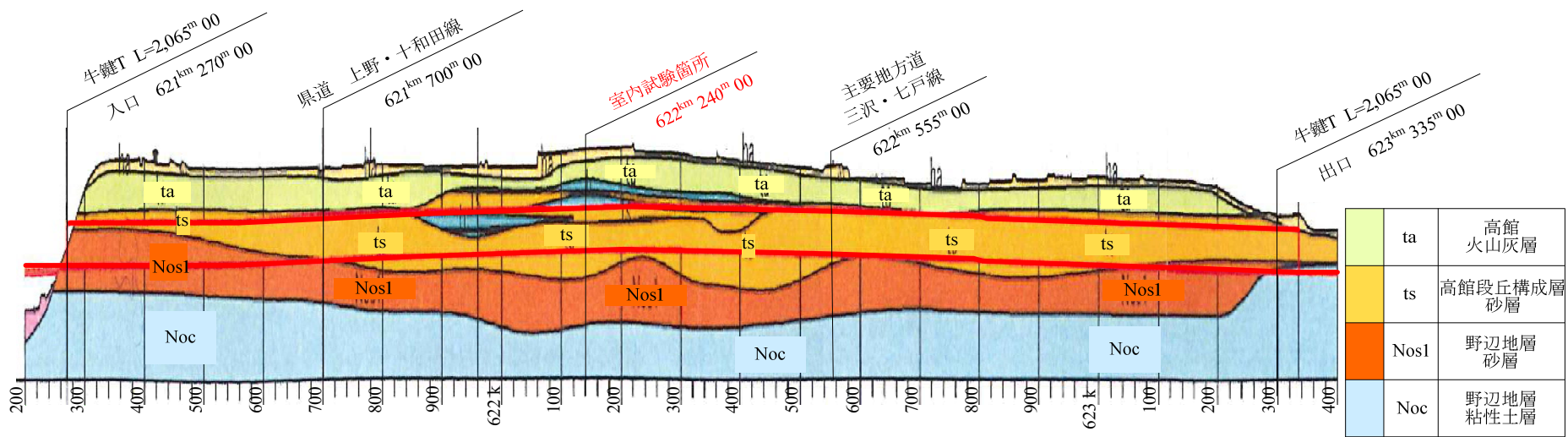


Fig. 2-7 牛鍵トンネルの地質縦断面図⁴⁾

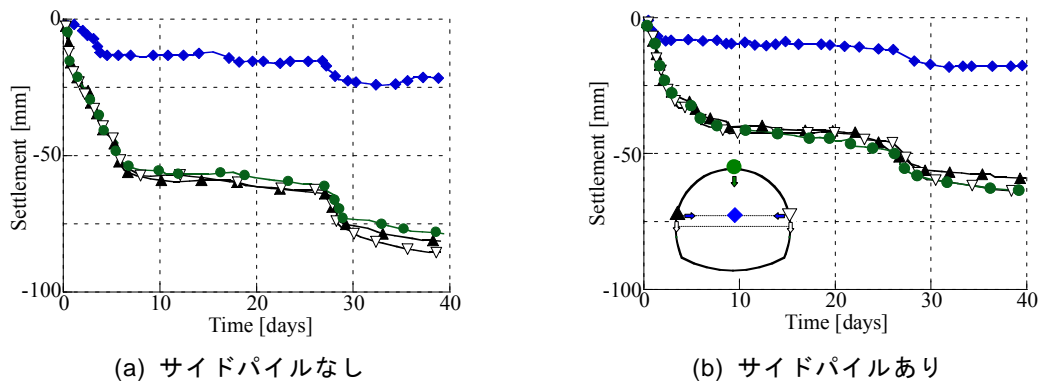


Fig. 2-8 トンネル沈下・内空変位経時変化(牛鍵トンネル)^{4), 6), 18)}

牛鍵トンネルは、青森県十和田市牛鍵地区を入口とし、上北郡上北町大浦地区を出口とする全長 2,070 m の山岳トンネルである。土被りは 1D 以下 (最小約 2.0 m ~ 最大約 10 m, 平均約 6.0 m) であり、七戸・八戸間のトンネルの中で最も小さい。なお、牛鍵トンネルは標高 40 m 程度の平坦な段丘面に、田畑、山林および主要地方道などが位置している直下を掘削する。地質は高館段丘層 (砂 ts) が主体であるが、中央部では高館段丘層 (粘性土 tc)、起点方では野辺地層 (砂質土 Nos1) が優勢となる。Fig. 2-7⁴⁾ に、牛鍵トンネル掘削地山の地質状況を示す。図より、トンネルが位置する深度には主に砂層が分布しているが、この層は堆積年代が新しく、固結度が小さくなっている。このため、622^{km}600^m 付近から終点までの約 700 m の区間では、トンネル上部を一旦開削し改良を行った後に NATM で掘削する工法を採用した⁶⁾。

牛鍵トンネル工事中、下半掘削時では最大 60 mm 程度の初期沈下と 20 mm 程度の初期水平変位などが計測された。この場合、従来の工法としては、フットパイル、ボルトのように、削孔後に鋼材を地山に挿入し、セメント系やウレタン系注入材で定着する補強工が代表的であるが、削孔により周辺地山に損傷を与えることや注入材の補強強度不足があることなどの欠点がある。以上の原因に加え、牛鍵トンネルでもとも下がり現象も計測されたため、「脚部の沈下を抑制したら地表面の沈下も収まるだろう」との想定に基づき、初期変位に対抗できる工法、沈下と水平変位に効果のある工法としてサイドパイル工が採用された。なお、牛鍵トンネルでは、全線 2,070 m のうち 90 % 以上の区間でサイドパイル工が採用されている¹⁸⁾。

牛鍵トンネルで使用したサイドパイルの諸元については、このトンネル現場では直径=65 mm、長さ L=2.75 m の鋼管とし、掘削 1 m 毎に上半に左右各 1 本、下半に左右各 2 本で、計 6 本打設した。

Fig. 2-8^{4), 6), 18)} に牛鍵トンネルにおいて、サイドパイルを設置した場合と設置しない場合での、トンネル掘削時トンネル変位 (水平内空変位、天端沈下、脚部沈下) の経時変化を比較した例を示す。図より、サイドパイルを設置する場合、設置しない場合に比べ、沈下当初の沈下速度が小さく、天端沈下、脚部沈下、水平内空変位が減少する結果が見られ、サイドパイル工はトンネル沈下抑制に効果があることが確認できる。さらに、サイドパイルを設置したケースでは、計測完了時に変位が収束しつつあるが、設置しないケースでは収束しない。なお、いずれのケースでもトンネル天端と脚部はほぼ同程度沈下する。

Table 2-4 に、サイドパイル工の施工例をまとめる。サイドパイル工は種々の現場で使用されたが、その現場のほとんどは地盤強度の不足、小土被りなどの問題を抱えている。さらに、いずれの現場でも、サイドパイル工は単独で使用されることなく、他補助工法と併用されている。

Table 2-4 サイドパイル工の施工例 ¹⁶⁾より整理

トンネル名	施工概要			地山条件		他補助工法	効果
	路線名	掘削方式	施工上の問題点	土被り	地形・地質		
石才トンネル (道路)	一般国道 483号	上半先進, 機械掘削	坑口付近の支持力不足, 偏土圧 (集中豪雨等)	30 m	崖錐性堆積層, 古生代の頁 岩・砂岩, 粘土分の多い強風 下頁岩, 破碎質頁岩の互層	注入式フォアパイリング (ウレタン 注入), レッグパイル (ウレタン注入)	集中豪雨・偏土圧等の影響により天端沈下 が 300 mm 程度となる. 吹付けコンクリ ートのクラック発生・ロックボルト頭部の変 状対策及び縫返しの補強対策として, 補助 工法を採用. 計測結果・岩質の変化等によ り対策工を軽減.
東山トンネル (道路)	名古屋市 道1号線	機械掘削, 上半先進ショ ートベンチカ ット法	周辺が住宅地で, かつ小 土被りである. 上下線が近接トンネル である. ウォータータイトトン ネルである.	5 ~ 14 m	新第3紀新世, 矢田川累層砂質土・粘性土互 層	注入式フォアパイリング, 鏡ボルト, ウィングリブ支保工, 脚部補強ボルト	
高田山トンネ ル (道路)	近畿自動 車道紀勢 線	機械掘削, 上半先進ベン チカット法	小土被り (H=3.5 m) 区 間の施工. 切羽付近では, 地質に起 因するゆるみ, 変位が増 大し, 支保工に変状を来 した.	3.5 ~ 168 m	四万十累層音無川帯の頁岩 ~頁岩・砂岩互層	注入式フォアパイリング, 長尺鏡ボル ト, 鏡ボルト, レッグパイル, 上半仮 インバート, インバート早期閉合, 脚 部補強ボルト, ウィングリブ付支保工	
武華トンネル (道路)	一般国道 39号	上半先進, 機械掘削		15 m 程度	段丘積物 (砂質土, N=7)	注入式フォアパイリング, レッグパイ ル	
オランダ坂ト ンネル (上り 線) (道路)	一般国道 324号	上半先進, 補助ベンチ付 全断面機械掘 削	住宅密集地の下を薄い 土被りで掘削する典型 的な都市トンネル.	適用区 間 2 D 以 下	土石流崖錐層, 火山円礫層, 安山岩自破碎溶岩	注入式フォアパイリング, 吹付け仮イ ンバート	先行先受けのみの区間に対して, 脚部補強 工および吹付け仮インバート施工区間は, 脚部沈下量が減少している傾向が確認さ れた.
八王子城跡ト ンネル (その 2) (道路)	圏央道	上半先進ショ ートベンチ, 頂設導坑先進 機械掘削	坑口部がジャンクショ ンに近接, 坑口部が超大断面 (日 本最大)	坑口部 が小土 被り	中生代白亜紀~新生代古第 三紀小仏層郡の砂岩・砂岩頁 岩互層・頁岩が主体である.	注入式フォアパイリング, フットパイ ル	
牛鍵トンネル (鉄道)	東北新幹 線	機械掘削, 上半先進ショ ートベンチカ ット法	未固結砂層を最大 45 m, 平均 20 m 以下の小土被 りで掘削する. 地山改良による天端安 定対策を, 終点方坑口か ら 700 m 区間を対象に 実施している.	最大 45 m, 平均 20 m 以下	扇状地堆積物の粘性土, 砂質 層, 第4期更新世の地層であ る砂質土, 粘性土等		ルーズな砂質土主体の地質において, 下半 掘削時に最大 60 mm 程度の初期沈下と 20 mm 程度の初期水平変位が確認された. サ イドパイルの打設により, 下半掘削時の沈 下量・内空変位量が低減し, 一定の効果が あったことが確認された.

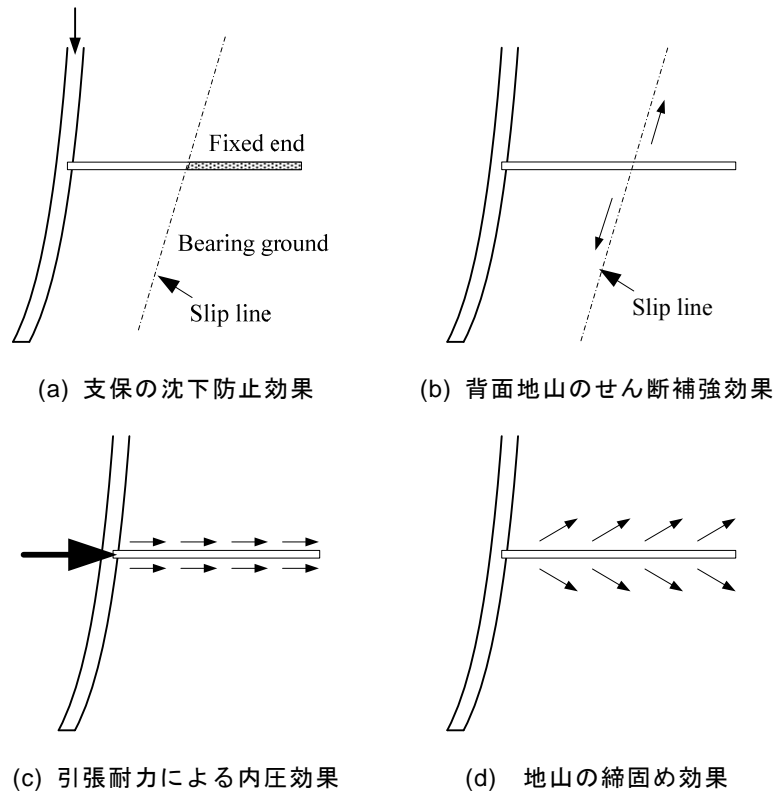


Fig. 2-9 サイドパイル工の考えられる効果⁶⁾

2.4.3 既往の研究

福島ら^{19),20)}は、土砂地山に NATM で小土被りトンネルを掘削する場合を想定して、縦断面内におけるトンネル掘削問題を想定した模型土槽試験を実施し、ボルトを用いた補助工法の地山補強効果、特に地表面沈下の防止効果について実験的に調べた。その結果、ボルトは地山が伸び変形をする方向に打設すると効果的であること、またボルトの補強効果は主にボルトと地山との間に発生する摩擦による地山の伸び変形によるものであるという結論を得ている。さらに、ボルトを使用した補助工法は、ボルトの打設方向により効果が大きく異なると報告している。同実験では、土被りが非常に浅いトンネル ($H/D=1.0$) を想定し、地山材料として乾燥砂を用いて地山を作製している。また、補強ボルトは、直径 2 mm の針金に砂粒を付着させたものにより、モデル化した。

鋼管系補助工法に関して、大川ら²¹⁾はパイプルーフが適用されたトンネルにおける各種計測結果をもとにパイプルーフの効果について検討し、パイプルーフは、トンネル掘削に伴う地山の変形(変形・強度低下)を大きく規制することが可能であり、特に地表面沈下等の周辺環境に及ぼす重大な悪影響を規制することができることを報告している。さらに、現場計測値に対する考察により、パイプルーフは次の二つの効果があるという結論を得ている。①支保工設置位置により後方(切羽に対して)では、支保工と同様に内圧効果としての働きがある。②支保工設置位置より前方では、パイプルーフの挿入により、地山の変形が大きく抑制され、地山が改良されたような効果が生じていると考えられ、結果的に早く支保工を施したのと同等の効果があると考えられる。

同じくボルト・鋼管系補助工法であるサイドパイル工に対して、北川ら^{5),6)}は、サイドパイル工は Fig. 2-9 に示すような、4 点の効果が想定されるということを報告している。以下に、その詳細を説明する。

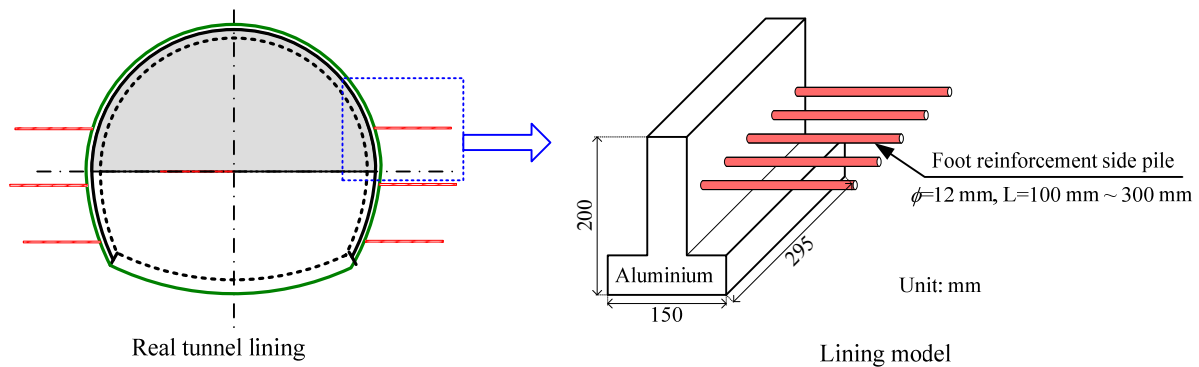


Fig. 2-10 サイドパイル工に関する過去の研究 (北川ら)^{18),22),23)}

① 支保工の沈下防止効果

パイルの曲げ剛性により，一次支保の沈下を防止する効果が期待できる．

② 背面地山のせん断補強効果

サイドパイルが地山のせん断補強材のような効果を発揮し，背面地山のすべりによる押出しを伴う沈下を防止する効果が期待できる．

③ 内圧効果

サイドパイルが鋼製支保工，補強プレートおよび吹付けコンクリートと一体化することで，ロックボルトと同様の引張り応力による内圧効果が期待できる．

④ 地山の締固め効果

通常の鋼管の先受け工で期待される効果と同様，サイドパイルを打設（圧入）することにより地山が締固められ，地山の強度の強化が期待される．

さらに，北川ら^{18), 22), 23)}模型実験および模型実験に対する数値解析を実施し，サイドパイル工の地盤沈下抑制効果について検討した．同研究では Fig. 2-10 に示すように，逆 T 字型の断面を持つ覆工モデルを用いてトンネルの脚部をモデル化し，三次元降下床実験装置を用いてトンネル掘削による地盤の緩みを表現した．その結果，トンネル近傍にすべり線が発生し，このすべり線と交差するような形でサイドパイルを敷設すると，沈下抑制効果が得られることが確認された．また，サイドパイルの長さ，設置間隔，固定条件などの設置条件を変化させた実験により，サイドパイルについて，一定の長さ以上を確保すること，トンネル支保工に十分に固定すること，剛性を高めることによりその効果が高まることを確認した．

しかしながら，Fig. 2-10 に示す模型実験は，覆工模型が実際のトンネルの一部を適切に表現できず，模型が重過ぎること，サイドパイルが堅過ぎること，また直径が大き過ぎることなどの問題点を抱えている．また，同実験では降下床の下降に伴い覆工模型が回転するなど実際トンネルではほぼ計測されないような結果が見られた．すなわち，実現場でのトンネルの力学挙動およびサイドパイル工の効果を適切に表現するためには，模型実験の改良が必要であると考えられる．

第3章 室内模型実験

3.1 概説

本章では、サイドパイルが地盤沈下抑制効果を発揮するメカニズムを解明するための先行研究として、簡易的な模型実験を通じ、サイドパイルの地盤沈下抑制効果について定性的な検討を行う。

北川¹⁸⁾らは、逆T字型の断面を持つ覆工モデルでトンネル脚部をモデル化し、サイドパイルの地表面沈下抑制効果について検討を行った。しかしながら、同実験はトンネル脚部の形状が実際と異なること、覆工模型が重過ぎること、さらに覆工が回転するなど様々な実現場とは異なる様々な問題点が存在する。そこで、本研究ではまず、サイドパイル工の地盤沈下抑制効果および長さ、設置間隔など主なパラメータがその効果に及ぼす影響を定性的に評価するため、北川ら¹⁸⁾の模型実験に改良を加えた室内模型実験を行った^{24)~27)}。

3.2 とも下がり現象を模擬した降下床模型実験の概要

3.2.1 トンネル覆工およびサイドパイルのモデル化

(1) トンネル覆工のモデル化²⁴⁾

トンネル覆工模型を Fig. 3-13²⁴⁾と Picture 3-1 に示す。同模型は実際のトンネル上半掘削時の側壁・脚部をモデル化したものであり、L字型の断面形状をしている。模型は無垢のアルミ製であり、覆工の変形を考慮しない剛な模型としてモデル化した。覆工模型の側壁部にはサイドパイル模型を設置す

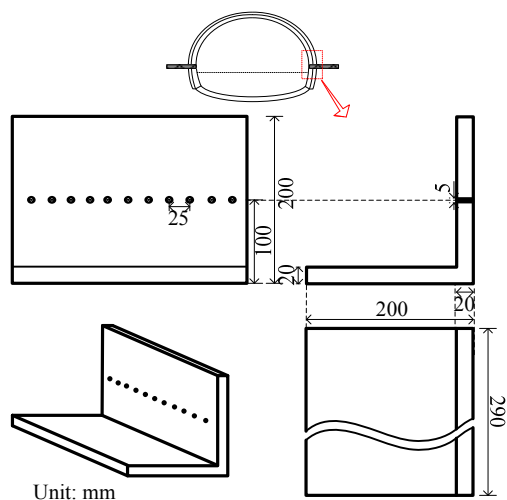
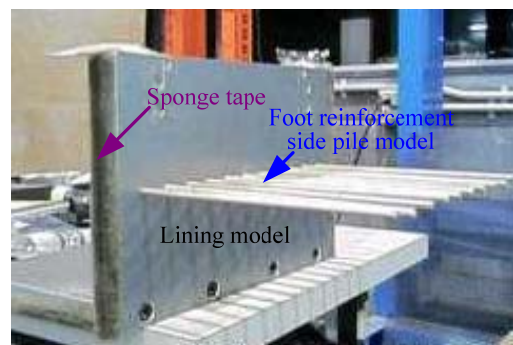
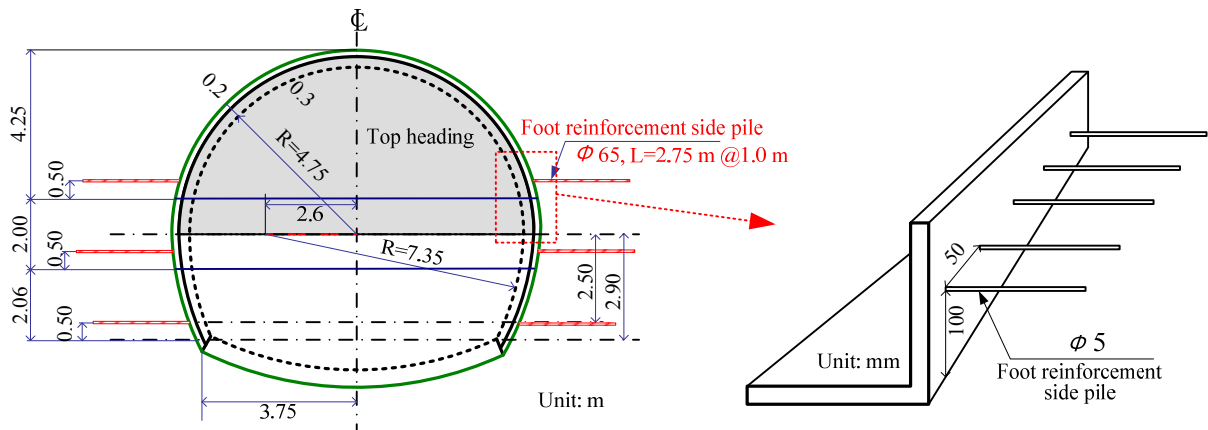


Fig. 3-1 トンネル覆工のモデル化²⁴⁾



Picture 3-1 覆工模型および摩擦低減方法



(a) 実現場でのサイドパイルの設置状況⁴⁾

(b) サイドパイルのモデル

Fig. 3-2 サイドパイルのモデル化

るため、直径 5 mm の穴が計 11 箇所空けられている。さらに、模型の側面にはスポンジテープを貼り、砂の漏出防止を図った。

(2) サイドパイルのモデル化²⁴⁾

サイドパイルは、直径 5 mm のラミン材の丸棒でモデル化した。Fig. 3-2 にサイドパイル工のモデル化のイメージ図を示す。

模型実験では、卓越するモードに対し相似則を合わせることが前提となる。サイドパイルの効果は主にパイルと周辺地盤の相対剛性、パイルの曲げ剛性およびパイルと地盤間の摩擦などに大きく関連すると考えられる。しかしながら、すべての条件をを同時に満足させるのは不可能であるため、本実験ではサイドパイルの材料を決める際、サイドパイルと周辺地盤の相対剛性に着目した。結果、地盤との相対剛性が最も近いラミン材を使用した。Table 3-1 に実施工と本模型実験でのサイドパイルの各パラメータを示す。ここで、模型実験での地盤のヤング率は模型実験での地表面沈下に対するフィッティング解析により得られたものである。

サイドパイル模型の直径および設置間隔は、その比率が実施工でのサイドパイルの直径と設置間隔の比率に極力一致するように設計した。Table 3-1 に実現場と模型実験での各値を比較する。

Table 3-1 模型実験で用いるサイドパイルの材質および寸法

諸元	実施工	模型実験
材料	鉄	ラミン材
ヤング率 E_p [kN/m ²]	2.0×10^8	14.2×10^6
地盤のヤング率 E_e [kN/m ²]	2.0×10^4 ¹²⁾	2.13×10^3
相対剛性 E_p/E_e	1.0×10^4	0.7×10^4
設置間隔 D [mm]	1000	50
直径 d [mm]	65	5
直径/設置間隔 d/D	0.065	0.1

*実施工の各値は、地盤のヤング率を除いて文献 6)を、地盤のヤング率は、文献 28)を参照。

Table 3-2 豊浦砂と模型地盤の諸元

比重 G_s	2.64
単位体積重量 γ [kN/m ³]	15.5
平均粒径 D_{50} [mm]	0.2
内部摩擦角 ϕ [°]	37
粘着力 C [kPa]	0
間隙比 e	0.627
最大間隙比 e_{max}	0.982
最小間隙比 e_{min}	0.58
ポアソン比 ν	0.33
相対密度 D_r [%]	88.3

3.2.2 模型地山の作成と地山材料

模型地盤の地山材料には、未固結な砂質地山におけるトンネル掘削を想定して、粘着力のない乾燥した豊浦珪砂を用いた。種々の条件下での現象を統一かつ高精度で評価するためには、均一で再現性の高い模型地山を作成し、実験を実施することが重要となる。そのため模型地盤は、地表面から約 600 mm の高さから豊浦珪砂を気中落下させて作成した。これにより、均一な模型地盤を高い再現性をもって作成することが可能となった。豊浦珪砂とそれにより作成した模型地盤の諸元を Table 3-2 に示す²⁹⁾。なお、地表面は変位計測のために平らな板で整地した。

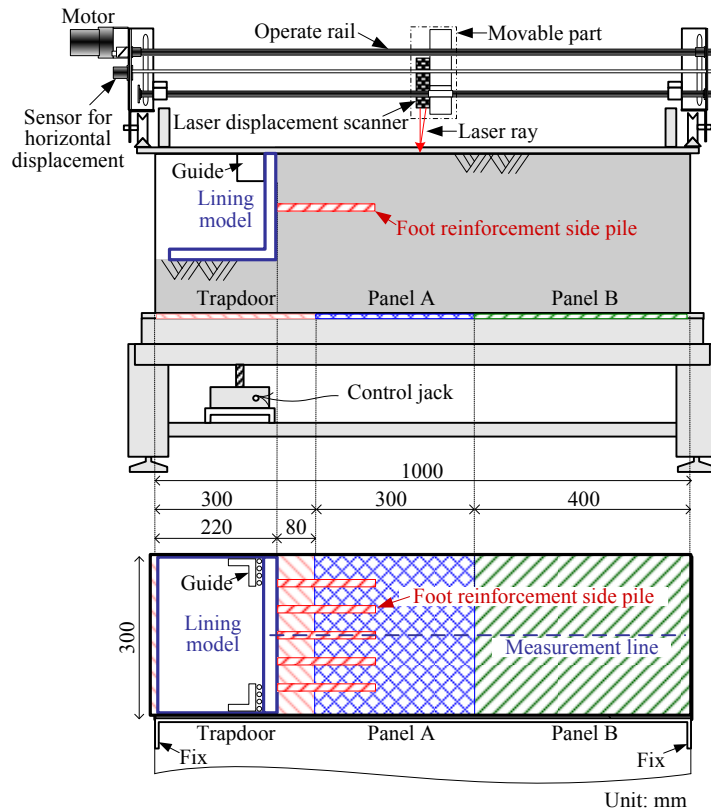
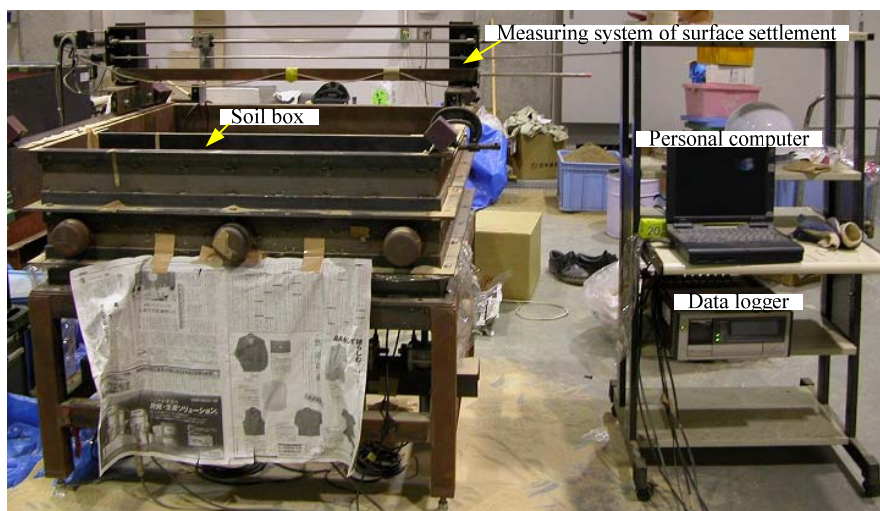


Fig. 3-3 三次元降下床実験装置^{29)~31)}



Picture 3-2 三次元降下床実験装置^{29)~31)}

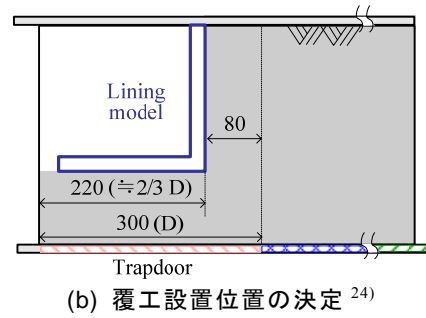
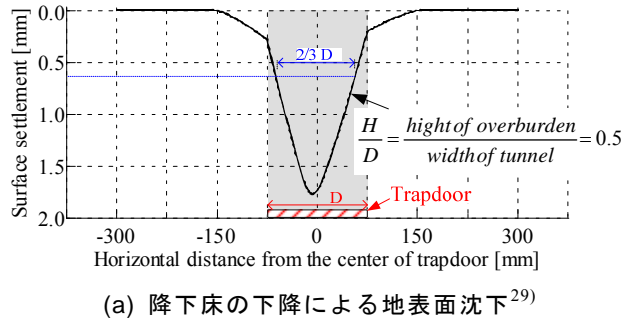


Fig. 3-4 覆工設置位置の決定方法

3.2.3 三次元降下床模型実験装置

本研究では、覆工の一部をモデル化し、地盤とともに強制的に沈下させることでとも下がり現象を表現するため、三次元降下床模型実験装置^{29)~31)}を用いて実験を行った。三次元降下床実験装置の概観および実験装置の平面図を Fig. 3-3, Picture 3-2 に示す。

土槽の底部には、模型地盤に強制変位を与える降下床と荷重計測パネル Panel A, Panel B を Fig. 3-3 に示すように設置した。降下床は一辺 300 mm の正方形であり、下部に接続したジャッキにより下降させる。降下床および荷重計測パネルに作用する荷重は、各々下部に接続した荷重計(TCLP-50KA)により計測する。なお、本実験で用いた荷重計の分解能は 0.1599~0.6493 N/ μ strain である。

模型地山の地表面変位は、Fig. 3-3, Picture 3-2 に示す地表面変位計測システムを用いて計測する。同システムでは、レーザー式変位センサー(LB-080)を駆動レールにより水平方向に移動させながら地表面までの鉛直距離を計測し、同時に水平移動検出センサー (精度: 350 μ m) により水平変位を計測することで、2 次元的に変位形状を把握する。なお、レーザー式変位センサーから地表面までの鉛直距離は、水平方向に 1 mm 移行する間の計測データの平均値をその区間での代表値としている。Fig. 3-3 に計測ラインを示すが、その水平方向の計測範囲は約 850 mm である。なお、レーザー式変位センサーの計測レンジは \pm 5 mm、分解能は 2 μ m、精度は 1 μ m である。

3.2.4 トンネル掘削およびとも下がり現象のモデル化

模型実験でとも下がり現象を再現するには、トンネル掘削とそれに伴う地表面沈下および同程度のトンネル沈下を同時に表現しなければならない。とも下がり現象の発生原因として、掘削に伴う応力解放と地盤条件の組合せなどが考えられるが、これらの境界条件・地山条件をすべて忠実に表現することは極めて困難である。そこで本研究では問題を単純化し、覆工の一部をモデル化し、地盤とともに強制的に沈下させ、トンネル掘削による地山の緩みを表現することを行った。実際には、トンネルの脚部のみをモデル化し、模型とその下部に位置するモデル地盤を強制的に沈下させ、地盤を覆工模型とともに沈下させることで、とも下がり現象を表現する。

菊本ら²⁴⁾は、三次元降下床模型実験装置次元降下床模型実験および数値解析手法を用いて、トンネル掘削時の力学挙動について検討を行い、土被り比 H/D (土被り/降下床幅) が 0.5 のケースにおいて、降下床を 2 mm 下降させた場合、地表面は Fig. 3-4 に示す曲線の降下床の中心から左右 55 mm (約降下床幅の 2/3) 位の領域で大きい地表面沈下(降下床下降量の 1/3 以上)が生じることが確認できる。トンネルの脚部と地表面でほぼ同じ沈下量が生じるととも下がり現象を表現するには、覆工模型をできるだけ大きい沈下量が生じる領域内に設置する必要がある。そこで本実験では、Fig. 3-3, Fig. 3-4(b)

に示すように覆工を降下床左端から 220 mm（降下床幅の 2/3 位）の領域に設置した．本実験では，とも下がり現象で地表面とトンネル周辺地盤が同程度沈下することを考慮し，降下床の下降により直上地盤を沈下させ，地盤の沈下に伴い覆工が沈下するようにした．覆工の沈下量が極力降下床の下降量と同じようにするには，覆工を降下床と同一の移動をする 1 次領域³²⁾ (Fig. 3-5) に設置する必要がある．したがって，覆工底面から降下床の間に設置する砂層の厚さは，降下床幅の 1/3 である 100 mm とし，覆工が 1 次領域内に位置するようにした．

3.2.5 実験パターンおよび計測項目

本実験では，まずとも下がり現象を再現するため覆工模型のみを設置して実験を行った．ここで得られた地表面の沈下形状は，とも下がり現象の確認を行うだけでなく，サイドパイル工を挿入した各ケースと比較検討を行うための基礎情報となる．続いて，長さ 200 mm のサイドパイルを 50 mm おきに設置したケースを実施し，サイドパイル無しのケースと比較する．これにより，サイドパイル工の地表面沈下抑制メカニズムについて考察を行う．さらに，長さと設置間隔をパラメータとした実験を行い，各パラメータが地表面沈下抑制効果に及ぼす影響について検討を行う．Table 3-3 に，本研究で行った実験ケースの一覧を示す．Table 3-3 に示す Case-3 が，本研究での実験の基本ケースとなる．

本実験での計測項目は，地表面沈下量及び周辺地山および底面に作用する鉛直荷重である．地表面沈下量は土槽上部に設置した地表面変位計測システムにより計測し，荷重は降下床および荷重計測 Panel A, B の下部に設置したか荷重計により計測する．

Table 3-3 実験ケース

長さ L [mm] \ 間隔 D [mm]	25	50	75
0		Case-0	
100		Case-1	
150		Case-2	
200	Case-6	Case-3	Case-7
250		Case-4	
300		Case-5	

注：長さ 0 はサイドパイル設置しない場合を示す．

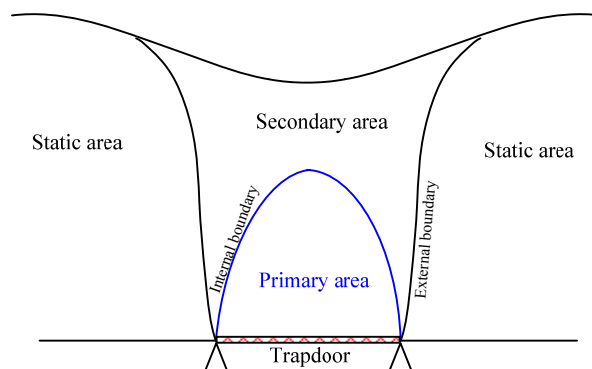


Fig. 3-5 1 次，2 次領域と内側，外側境界線³²⁾

3.3 模型実験結果 ^{24)~27)}

3.3.1 地表面沈下量

トンネル掘削による地表面沈下は、おおよそ正規分布曲線の形状を示し、トンネルの直上地盤で最も大きい沈下が生じるとされている。Fig. 3-6 にサイドパイルを設置しない場合、降下床を 0.5, 1, 2, 3 mm 下降させた時の地表面沈下形状を示す。横軸には、覆工模型右端からの水平距離、すなわち模型上端面と地表面境界線からの水平距離を示した。同図よりいずれの降下床の下降量においても、地表面沈下量は覆工に近いほど大きく、覆工上端面と地表面の境界付近で最大地表面沈下量が発生する。これは、実際のトンネル掘削時の地表面沈下量と同じ沈下形状を示し、本実験ではトンネル掘削に伴う地表面沈下を適切に表現できたと考えられる。さらに、同図から降下床の下降に伴い地表面沈下量が大きくなる結果が見られる。下記では降下床を 3 mm 下降させた時、各ケースでのサイドパイルの地表面沈下抑制効果について検討する。

Fig. 3-6 より、降下床を 3 mm まで下降させた時、最大地表面沈下量は約 2.5 mm である。本実験では、模型底部より 100 mm 下部の降下床を 3 mm 下降させており、覆工模型は地表面と同程度沈下しているものと考えられる。したがって、本研究で検討するとも下がり現象は再現できていると考える。

Fig. 3-7 に、サイドパイルを設置しない場合と長さ 200 mm のサイドパイルを 50 mm 間隔で設置した場合、それぞれ降下床を 3 mm 下降させた時の地表面沈下形状を示す。図より、サイドパイルの設置により覆工付近での地表面沈下量が小さくなる。これは、サイドパイルの設置により地表面沈下が抑制されたものと考えられる。

本研究では、定量的にサイドパイルの地表面沈下抑制効果を評価するため、最大地表面沈下量および区間平均地表面沈下量を用いて検討を行う。Fig. 3-6, Fig. 3-7 により、最大地表面沈下量は覆工と地盤の境界で生じる。一方、区間平均地表面沈下量は、Fig. 3-7 に示すように、ある計測位置までの沈下曲線の面積（図中の網掛け部分）を計測長さ（図中では L）で割ったものであり、地表面の全体的な沈下程度を表現できる。本研究では、長さや設置間隔の変化による地表面沈下量の差異が顕著である覆工右端から 200 mm の領域での区間平均地表面沈下量を用いて議論を行う。

これらの指標を用いて、Table 3-3 に示す各ケースの比較を行い、サイドパイルの長さおよび設置間隔が、地表面沈下抑制効果にどのような影響を及ぼすかについて検討を行う。

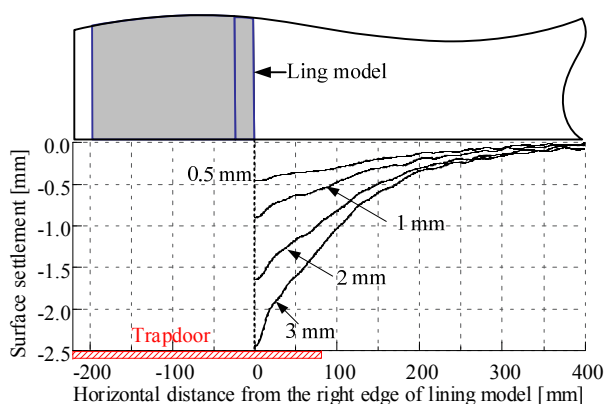


Fig. 3-6 降下床の下降に伴う地表面沈下形状の推移 (No pile)

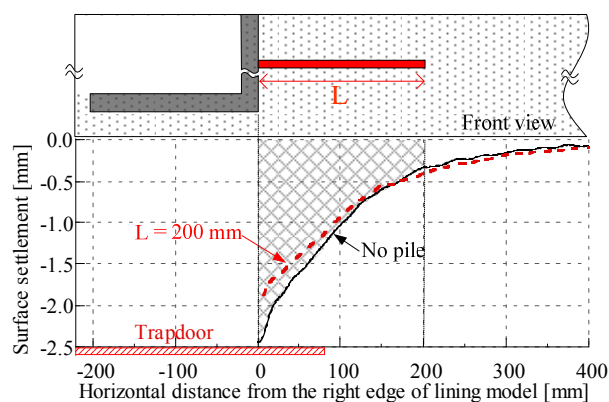


Fig. 3-7 サイドパイルの設置による地表面沈下曲線の変化

Fig. 3-8 に、異なるサイドパイル長での地表面沈下形状を示す。サイドパイル長が 100 mm の時、地表面沈下形状は No pile のケースとほぼ同じ形状を示す結果が見られ、ほぼ地表面沈下抑制効果を発揮しないことが分かる。長さが 150mm より長くなると、地表面沈下が小さくなる傾向が見られ、さらに長さが長くなるほどその効果が高くなる。

定量的に上に示す結果を評価するため、Fig. 3-9 に最大地表面沈下量と区間平均地表面沈下量による、サイドパイルの長さとの関係を示す。各沈下量の抑制率は、サイドパイルを設置しないケースでの沈下量に対する、各ケースでの沈下量の減少量の百分率である。

図に示す最大地表面沈下量は、サイドパイルが長くなるほど沈下抑制率は大きくなり、250 mm 以上になるとその効果はほぼ増加しなくなる。なお、長さが 250 mm の場合、覆工と地盤の境界で生じる最大地表面沈下量は約 25 %抑制される。一方、区間平均地表面沈下量は、サイドパイルの長さが 150 mm から抑制効果率が顕著に現れ、長くなるほどその効果が大きくなる。このことから、サイドパイルが 100 mm より長くなると覆工付近の地表面沈下量が抑制され、150 mm より長くなると、全領域にわたって地表面沈下を抑制することが可能であることが確認できる。

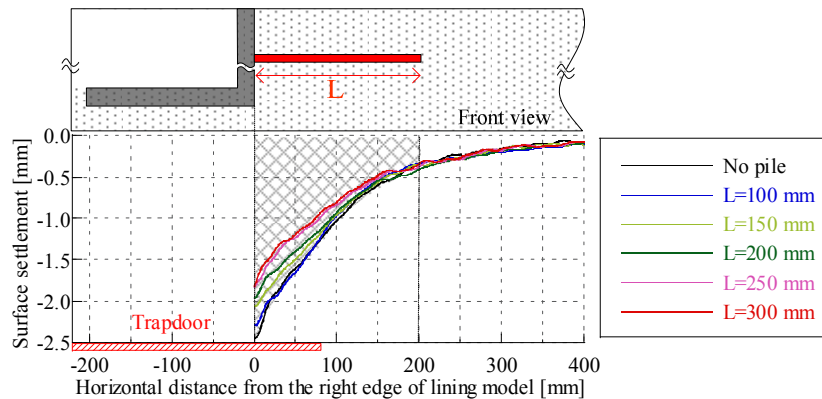


Fig. 3-8 長さが地表面沈下形状に及ぼす影響

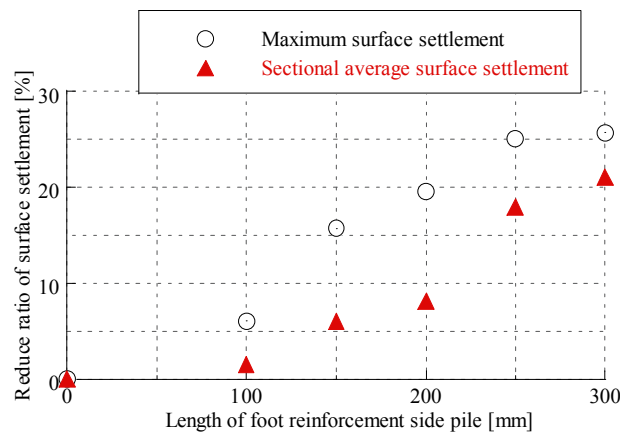


Fig. 3-9 長さが地表面沈下抑制率に及ぼす影響

Fig. 3-10 に、サイドパイルの設置間隔が地表面沈下形状に及ぼす影響を示す。図から、サイドパイルの設置間隔が 75 mm の場合、地表面沈下曲線はサイドパイル無しの場合とほぼ同じであり、この場合サイドパイルは地表面沈下抑制効果を発揮しないと考えられる。設置間隔が狭くなると、50, 25 mm の順に地表面沈下曲線が緩やかになり、地表面沈下量が小さくなるのが分かる。

次に、Fig. 3-11 に最大地表面沈下量と区間平均地表面沈下量による、サイドパイルの設置間隔と地表面沈下抑制率の関係を示す。図より、最大地表面沈下量と区間平均地表面沈下量両方から、設置間隔が広がるほど沈下抑制効果が低くなるのが確認できる。設置間隔が 75 mm のケースでは、最大地表面沈下量および区間平均地表面沈下量のいずれもサイドパイルを用いない場合と同じとなり、サイドパイルの効果がほぼ発揮されていない結果となった。

さらに Fig. 3-8~3-10 の結果より、いずれも区間平均地表面沈下量の抑制率が最大地表面沈下量の抑制率より小さい値を示す。これは、Fig. 3-8, 3-9 に示すように、サイドパイルの設置により、覆工模型付近の地表面沈下量が抑制されたことに対して、覆工模型から離れた領域では、サイドパイルを設置しないケースと同等の地表面沈下が発生しているからである。サイドパイルによる沈下抑制効果は、覆工模型付近で顕著に表れるため、覆工近傍に発生する最大地表面沈下量に顕著な抑制効果が現れる傾向となった。

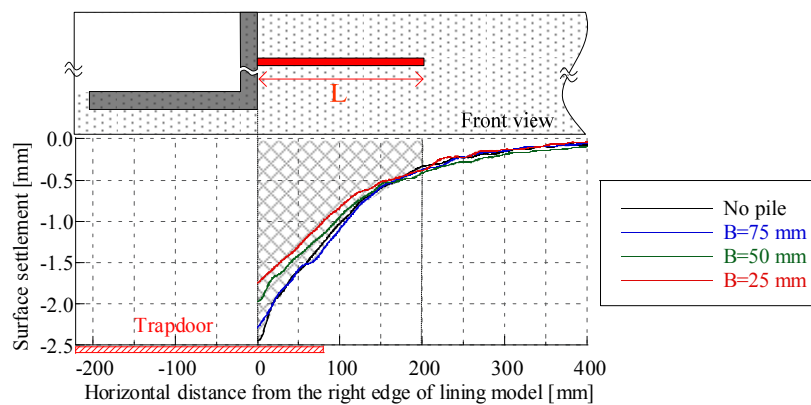


Fig. 3-10 設置間隔が地表面沈下形状に及ぼす影響

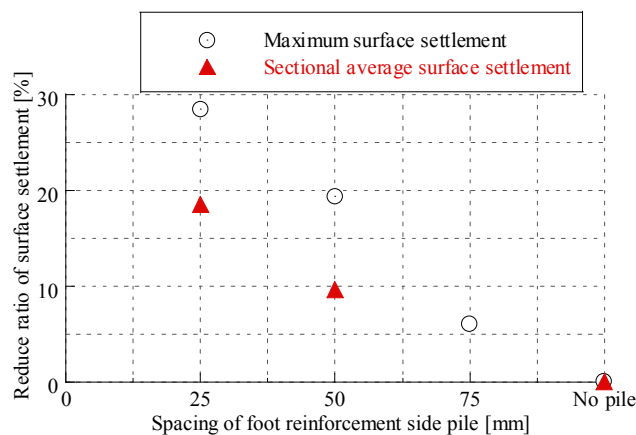


Fig. 3-11 設置間隔が地表面沈下抑制率に及ぼす影響

3.3.2 鉛直荷重

Fig. 3-12 に、サイドパイルを挿入しないケースの降下床および周辺地山に作用する鉛直荷重の推移を示す。図より、降下床の下降に伴い、降下床に作用する荷重は減少し、その減少分を負担する形で Panel A に作用する荷重が増加する。一方、降下床から遠く離れた Panel B では作用荷重がほとんど変化しない。なお、土槽底面全体に作用する荷重の合計は、ほぼ不変である。すなわち、Panel A の作用荷重の減少量は Panel B に作用する荷重の増加量と等しい。ここでは、地山底面における鉛直荷重について各実験ケースの比較を行う場合、降下床および Panel A に作用する荷重の変化に着目し、サイドパイルの荷重再配分効果を議論する。荷重再配分効果は、式 3-1 により算出し、トンネルおよびトンネル上部地盤に作用する鉛直荷重を周辺地盤 (Panel A) に分散させる能力を示す。

$$\text{荷重再配分効果} = \frac{\text{鉛直荷重の変化量} - \text{No pileで鉛直荷重の変化量}}{\text{No pileで鉛直荷重の変化量}} \times 100\% \quad 3-1$$

Fig. 3-13(a)は、各サイドパイル長さでの、降下床および Panel A に作用する鉛直荷重変化率の推移を示す。鉛直荷重の変化率は、降下床を下降させる前の鉛直荷重に対する変化を示す。Fig. 3-13(b)に、長さがサイドパイルの荷重再配分効果に及ぼす影響を示す。図より、サイドパイルの設置により、降下床に作用する鉛直荷重が大幅に減少、Panel A に作用する鉛直荷重は、減少分を負担する形で大幅に増加する現象が見られる。さらに、降下床と Panel A に作用する鉛直荷重いずれも、サイドパイルが長くなるほどその変化率が大きくなる傾向を示すが、その変化は小さいものである。サイドパイルの設置により約 25 %位の荷重再配分効果が得られるが、その長さによる差異は顕著でない。

Fig. 3-14 は、サイドパイルの設置間隔が降下床および Panel A に作用する鉛直荷重変化率の推移、およびサイドパイルの荷重再配分効果に及ぼす影響を示す。図より、設置間隔に関係なく、サイドパイルを設置することにより荷重再配分効果が得られる。さらに、設置間隔が狭くなるほど、高い荷重再配分効果を得ることができる。

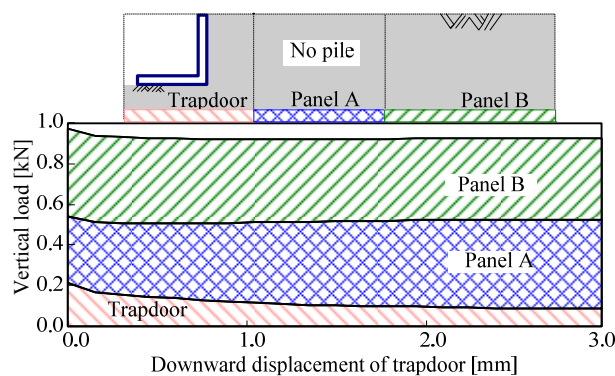
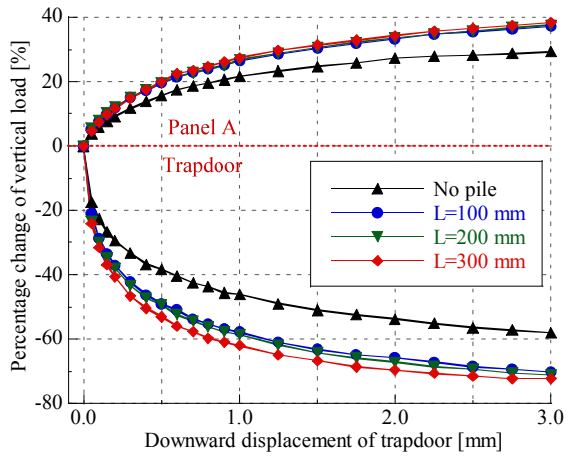
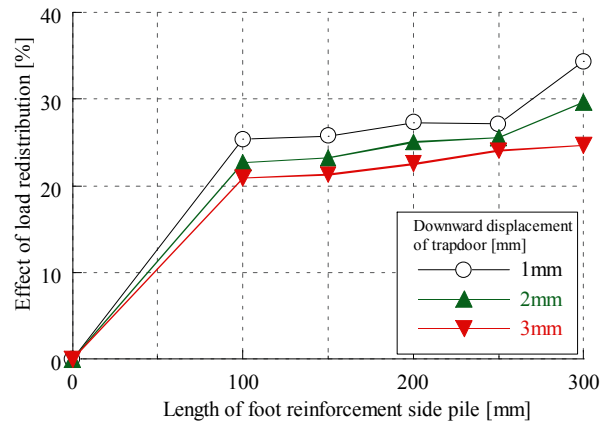


Fig. 3-12 降下床および周辺地山に作用する鉛直荷重

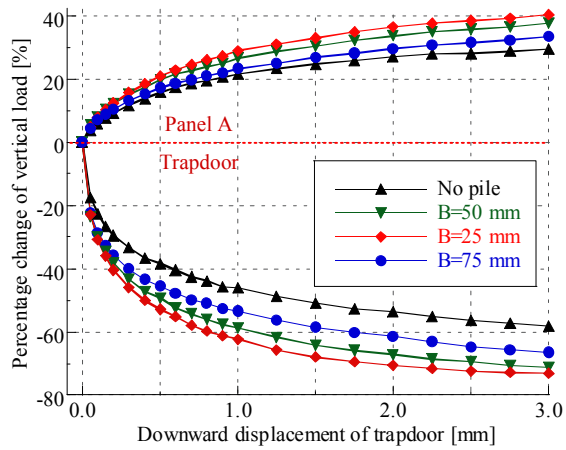


(a) 鉛直荷重の推移

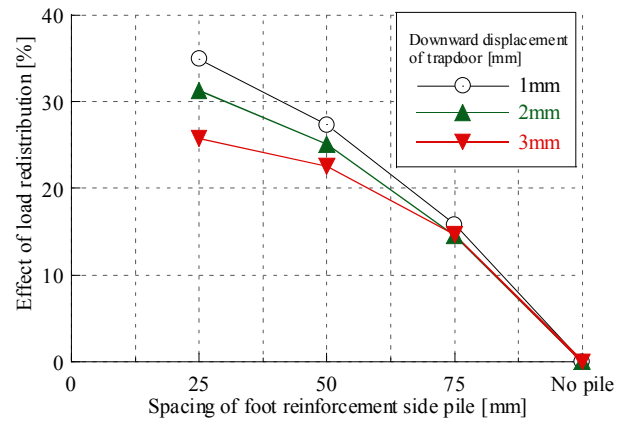


(b) 荷重再配分効果

Fig. 3-13 長さが鉛直荷重に及ぼす影響



(a) 鉛直荷重の推移



(b) 荷重再配分効果

Fig. 3-14 設置間隔が鉛直荷重に及ぼす影響

3.4 まとめ

降下床実験における Terzaghi の緩み土圧式^{33), 34)}は, Fig. 3-15 に示すように降下床の下降とともに, 降下床端部から鉛直上方にせん断面が形成されると仮定している. この考えに従えば, 本実験で降下床の下降により, Fig. 3-16 に示す線 AB のようなすべり線が形成されていると想定できる.

サイドパイルは, Fig. 3-16 に示すすべり線を横切ることでせん断補強効果を発揮し, 地盤の沈下を防ぐことができると考えられる. Fig. 3-8 に示す実験結果では, サイドパイルの長さが 100 mm より長くなると最大地表面沈下量が抑制されることを示している. これは, サイドパイルの長さが 100 mm より長くなると, 覆工から想定すべり線までの距離より長く, すべり線を横切るため, せん断補強効果が発揮されたと考えられる.

一方, Fig. 3-13, 13 の結果から, サイドパイルの設置により降下床に作用する鉛直荷重が, 大幅に軽減され, さらにそれを受け取る形でパネル A に作用する鉛直土圧が大幅に増加することが確認された. このことから, サイドパイルの設置により, 覆工および覆工下部地盤に作用する作用する荷重が, 覆工模型から離れた健全な地盤 (緩んでいない領域) に分担させ, 覆工模型の沈下を抑制できていると考える. すなわち, サイドパイルは, 先端部分が健全な地盤に位置することで, 土圧の再分配を健全な地盤にうながし, 荷重分散効果を発揮できる. ここに示した実験結果と先ほどのすべり線の考えを統合すれば, サイドパイルが 100 mm の場合, 先端の 20 mm 長の部分が, パネル A 上部の健全な地盤に位置するため, 荷重分散効果が得られたと考えられる.

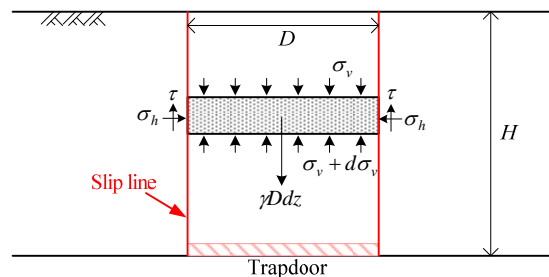


Fig. 3-15 Terzaghi の式による降下床土圧の算定³³⁾

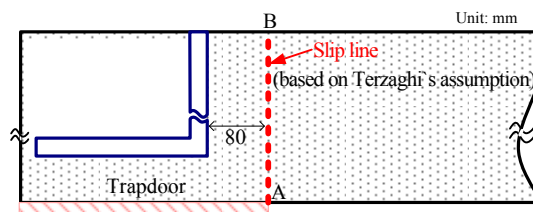


Fig. 3-16 Terzaghi の仮定によるすべり線

第4章 模型実験を対象とする数値解析

4.1 概説

第3章では簡易的な室内模型実験を実施し、サイドパイル工の地表面沈下抑制効果を定性的に把握した。しかしながら、模型実験でサイドパイル工が地表面沈下抑制効果を発揮するメカニズムを解明するためには、地盤およびサイドパイルの力学挙動について検討する必要がある。そこで、本章では、模型実験に対する、三次元弾塑性有限要素解析^{35)~37)}を実施する。目的は、模型実験に対する数値解析の適用性を検証し、さらに実験では計測困難である地盤中の土圧の変化や変形、サイドパイルの挙動を把握し、サイドパイルの効果に更なる考察を加えるためである。さらに、フットパイル工のようにパイルを斜めに設置するケースに対して数値解析を行い^{38)~41)}、パイルの設置角度および設置方向が同工法の地表面沈下抑制効果に及ぼす影響について検討した。

4.2 模型実験を対象とする数値解析の概要

4.2.1 解析領域とメッシュ

本研究では、Ye et. al⁴²⁾により開発された弾塑性有限要素解析コード DBLEAVES を用いて2次元弾塑性有限要素解析を行った。DBLEAVESは、Kimura and Zhangにより開発された三次元弾塑性有限要素解析コード DGPILE 3D⁵⁷⁾を元に、Ye et al.⁴²⁾により改良されたものであり、有限変形解析により大変形問題を考慮できるようになっている。

Fig. 4-1に模型実験に対する解析メッシュを示す。本解析では、模型実験を対象とし、奥行き方向(Y軸方向)は、地盤および実験条件に関して対称性を見出せることから、解析領域を模型地盤の半分にして実施した。解析の領域分割は、13050節点、11352要素である。覆工模型をモデル化する際、覆工模型が剛であることおよび壁面が平滑であることを考慮して、覆工模型の底面だけを要素化し、覆工模型壁面はX方向の変位を制御することとした。これにより、模型実験で覆工模型が直下方向のみ移動できる現象をモデル化した。

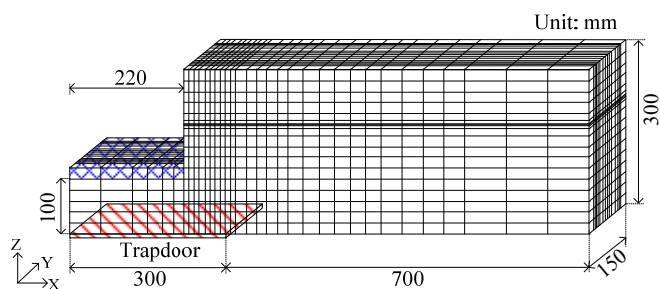


Fig. 4-1 解析対象領域および解析メッシュ²⁴⁾

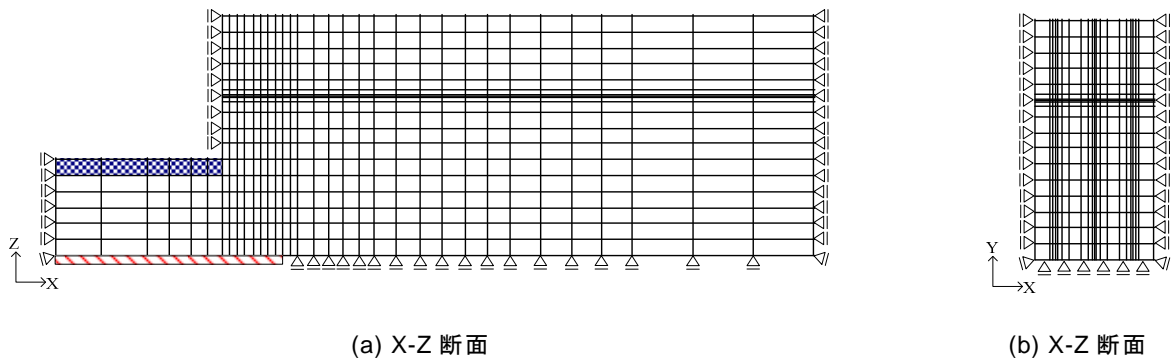


Fig. 4-2 境界条件

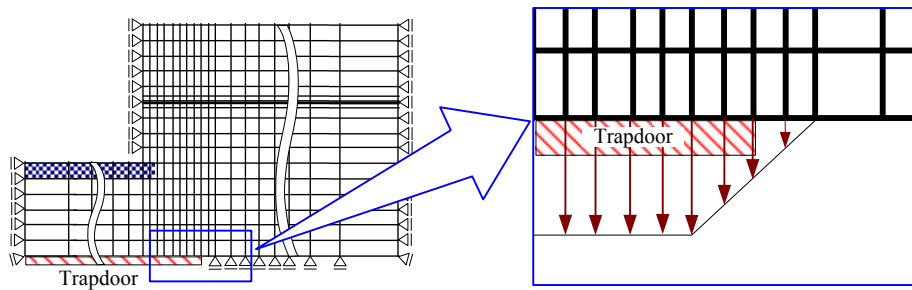


Fig. 4-3 降下床端部の境界条件

Fig. 4-2 に数値解析で用いた境界条件を示す．解析対象領域の側面および降下床部を除く底面では、面に垂直な方向の変位のみ拘束する．すなわち、YZ 面と平行な境界は、X 方向の変位を拘束し、XZ 面に平行な境界は、Y 方向の変位を拘束する．

降下床の下降は、降下床直上の節点に鉛直下方への強制変位を与えることで模擬する．模型実験では降下床を 3 mm まで下降させたことに対し、数値解析では微小変形理論に基づき降下床に 2.0 mm (0.005 mm/step) の下向き強制変位を与えた．なお、変位が不連続になる降下床端部の特異点では、Fig. 4-3 に示すように強制変位量に勾配を付ける．

4.2.2 地山のモデル化

トンネル掘削問題の解析（地盤の応力・変形解析）を適切に行うためには、土の材料特性を適切に表現できる構成モデルを用いる必要がある．本解析では地盤を弾塑性体として定式化した構成式 subloading t_{ij} model⁴³⁾を使用した．以下にその特性を示す．

- ① 中間主応力の強度・変形特性に及ぼす特性
- ② 正負のダイレイタンス特性
- ③ 密度や拘束応力が強度・変形特性に及ぼす影響
- ④ 塑性ひずみ増分方向の応力経路依存性
- ⑤ 容易かつ少ない土質パラメータ

本モデルでひずみ増分は次式で与えられる.

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad 4-1$$

弾性ひずみは一般的な Hooke 則により与えられる.

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu_e}{E_e} d\sigma_{ij} - \frac{\nu_e}{E_e} d\sigma_{kk} \delta_{ij} \quad 4-2$$

ヤング係数 E_e は, 膨潤指数 κ とポアソン比 ν_e および平均主応力 p を用いて次式で示される.

$$E_e = \frac{3(1-\nu_e)(1+e_0)p}{\kappa} \quad 4-3$$

塑性ひずみ増分は負荷条件を含めた以下の式で示す.

$$d\varepsilon_{ij}^p = \langle \Lambda \rangle \frac{\partial f}{\partial t_{ij}} = \left\langle \frac{df_\sigma}{h^p} \right\rangle \frac{\partial f}{\partial t_{ij}} \quad 4-4$$

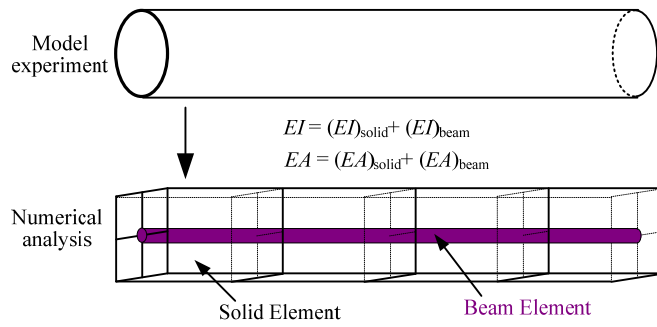
ここに $\langle \rangle$ の表記は Macaulay ブラケットであり, $A \geq 0$ ならば $\langle A \rangle = A$, それ以外の場合 $\langle A \rangle = 0$ となる.

この構成モデルは, 中間主応力・密度・拘束応力が材料の強度・変形特性に及ぼす影響, および正負のダイレイタンシー特性を考慮することができる. さらに, 解析に用いる土質パラメータは, 上式で示したように, 破壊時の主応力比 M_f , 密度 ρ , ポアソン比 ν , 間隙比 e_0 , 密度項 a , 応力・ダイレイタンシーパラメータ β , 圧密指数 λ , 膨潤指数 κ , 過圧密比 OCR と少なく, そのパラメータの決定も容易であるなどの利点がある.

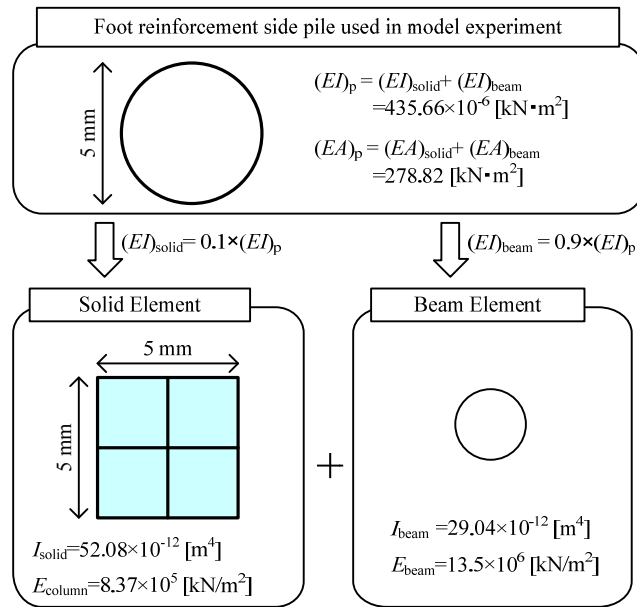
解析に用いるパラメータは Table 3-2 に示したポアソン比, 密度, 間隙比の他, 破壊時の主応力比 M_f , 密度項 a , 応力・ダイレイタンシーパラメータ β , 圧密指数 λ , 膨潤指数 κ がある. 主応力比 M_f は Iizuka & Ohta の方法^{44),45)}により決定し, 他パラメータは同じ豊浦硅砂を利用した参考文献²⁹⁾の値を準用した. 各値は $M_f = 1.506$, $a = 500$, $\beta = 2.0$, $\lambda = 0.07$, $\kappa = 0.0045$ である.

Table 3-2 豊浦硅砂と模型地盤の諸元

比重 G_s	2.64
単位体積重量 γ [kN/m ³]	15.5
平均粒径 D_{50} [mm]	0.2
内部摩擦角 ϕ [°]	37
粘着力 C [kPa]	0
間隙比 e	0.627
最大間隙比 e_{max}	0.982
最小間隙比 e_{min}	0.58
ポアソン比 ν	0.33
相対密度 D_r [%]	88.3



(a) サイドパイルモデルの概略



(b) サイドパイルモデルのパラメータ決定フロー

Fig. 4-4 サイドパイルモデル化概略とパラメータの決定 ⁴⁶⁾より加筆修正

4.2.3 サイドパイルのモデル化

降下床の下降により、サイドパイルは主に曲げ剛性を発揮するようになり、曲げ剛性を適切に評価することが必要である。さらに、模型実験で用いたパイルはある直径を持つ棒状のもので、その直径の決定は実現場でサイドパイルの設置間隔との比例を参考に決定したものである。ゆえに、数値解析でもその直径、すなわち体積効果を極力表現しなければならない。

本解析では、サイドパイルの挙動を簡便に計算し、かつサイドパイルの体積を適切に表現するために、Zhang et. al ⁴⁶⁾の研究を参考とし、Beam 要素の周囲にサイドパイルの曲げ剛性の 1 割を分配した弾性 Solid 要素を配置したハイブリッド要素でサイドパイルをモデル化した。このモデルは、水平力が作用する場合杭の力学挙動を表現するために提案され、その合理性が確認されている。トンネル覆工にサイドパイルを設置し、下方に変位させる挙動は、杭が水平力を受ける場合とほぼ同じ状況であると考え、本モデルを適用するのは合理的であると判断した。

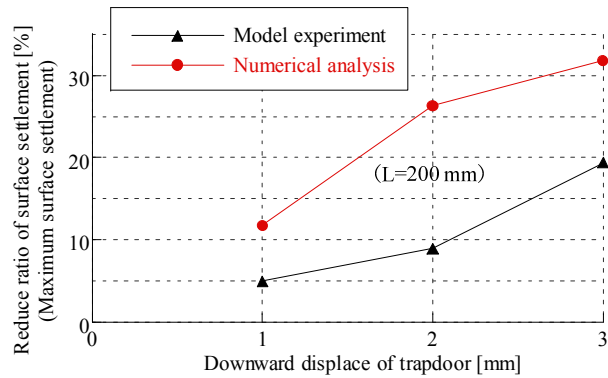


Fig. 4-5 降下床下降量の変化による沈下抑制率の差異

Fig. 4-4 にモデルの概略図と各パラメータの決定方法，およびこの方法により決定された各値を示す．ビーム要素とコラム要素の密度，およびポアソン比は両方模型実験で用いたラミン材の物性値と同じ値 ($\rho = 1.55 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0.4$) を準用した．ただし，本モデルではサイドパイルの断面を実際直径と同じ幅を持つ正方形断面でモデル化したため，その断面積が若干大きくなり，パイルの効果を過大評価する可能性がある．

さらに，サイドパイルは覆工に固定され，回転しないように境界条件を設定した．

4.2.4 模型実験値との比較

Fig. 4-5 に，模型実験と模型実験を対象とする数値解析により得られた，長さ 200 mm のサイドパイルを 50 mm 間隔で設置したケースでの，降下床の下降量と最大地表面沈下量の減少率の関係を示す．図より，実験値・解析値とともに降下床の下降量が大きくなるほど地表面沈下量の抑制率が大きくなり，解析では模型実験での傾向を表現できている．解析値が実験値より大きい値を示す傾向があるが，その原因としてサイドパイルのモデル化とサイドパイルと地盤の相互作用の 2 点が考えられる．

模型実験でのサイドパイルは，直径 5 mm の丸棒を使用しているのに対し，数値解析では，幅 5 mm の長方形断面を持つ直方体でモデル化されている．これにより，解析でのサイドパイルの表面積は，実験より大きくなり，サイドパイルの効果が過大に現れたと考えられる．

また，模型実験でのサイドパイルは，表面が滑らかであるため，周辺地盤との間に相対変位が発生すると考えられる．しかしながら数値解析では，サイドパイルに隣接した地盤要素はサイドパイルの solid 要素と同じ節点を共用しているため，地盤の変形はサイドパイルの変形に左右される．したがって，数値解析で剛なサイドパイルの変形に地盤が追従することになり，サイドパイルの効果が過大に現れたものとする．

以下では，降下床を 2 mm まで下降させた場合の数値解析結果を用い，地盤およびサイドパイルの挙動について検討し，サイドパイル工の地表面沈下抑制効果について考察を加える．

4.3 サイドパイルの地盤沈下抑制効果に関する解析結果

4.3.1 サイドパイルが地盤の力学挙動に及ぼす影響

(1) サイドパイル設置前後の比較

Fig. 4-5 に、降下床を 2 mm 下降させた際、地盤内部の鉛直変位分布を示す。鉛直変位分布は各位置での鉛直変位の降下床下降量に対する百分率で示す。Fig. 4-5(a)の点線は、サイドパイルの設置位置をイメージしたものである。Fig. 4-5(a)より、サイドパイルを設置しない場合、降下床直上部地盤は、降下床下降量と同等の変位が生じ、その変形は地表面に同等の量として現れる。これに対し Fig. 4-5(b)に示すようにサイドパイルを設置することにより、降下床直上の変位は、降下床下降量と同等であるが、サイドパイル上部地盤の鉛直変位が小さくなっていることが確認できる。これにより、地表面沈下量が抑制され、特に挿入されたサイドパイル上部の覆工周辺地盤での沈下抑制効果が確認できる。

Fig. 4-6 は、降下床 2 mm 下降時の、地山に生じるせん断ひずみ分布を示す。サイドパイルを設置しない場合、降下床端部から上部に向かい、直線的にせん断ひずみが発生していることが確認できる。一方、サイドパイルを設置した場合、サイドパイルの周辺および上部に発生するせん断ひずみが小さくなるのが分かる。これから、地盤に発生するせん断ひずみはサイドパイルにより遮断され、地表面まで発達するせん断ひずみが小さくなり、地表面沈下が抑制されると考えられる。本研究ではこの効果をせん断補強効果と称する。

Fig. 4-7 は、降下床下降前後に地山底面の中心線に生じる鉛直土圧の分布を示す。図中の点線部分は、降下床下降前の初期鉛直土圧分布である。図より、サイドパイルを設置しない場合と設置する場合いずれも、降下床の下降により鉛直土圧は降下床上部で減少、Panel A 上部で増加、Panel B 上部で

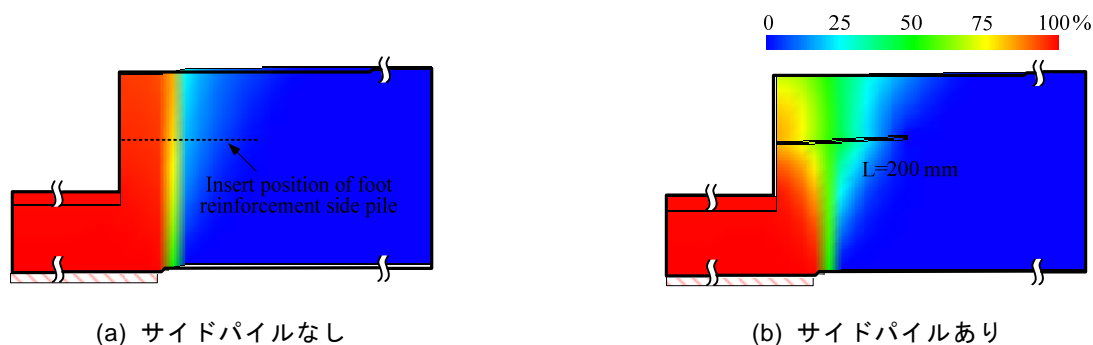


Fig. 4-5 サイドパイル設置による地山鉛直変位の変化

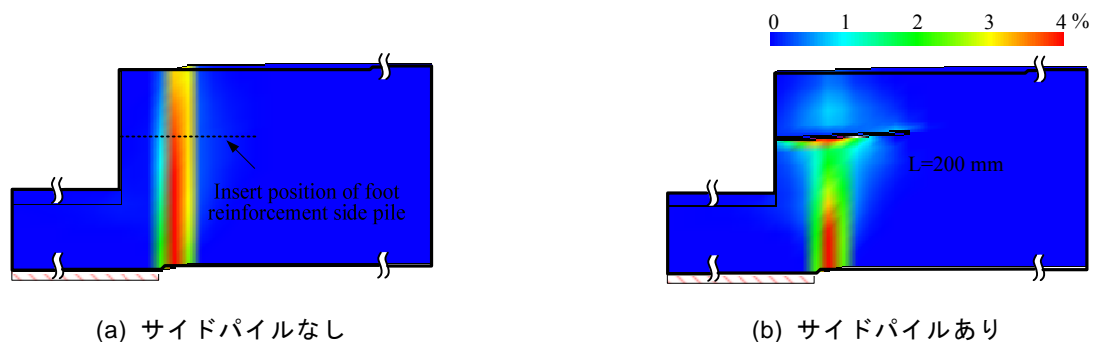


Fig. 4-6 サイドパイル設置によるせん断ひずみ分布の変化

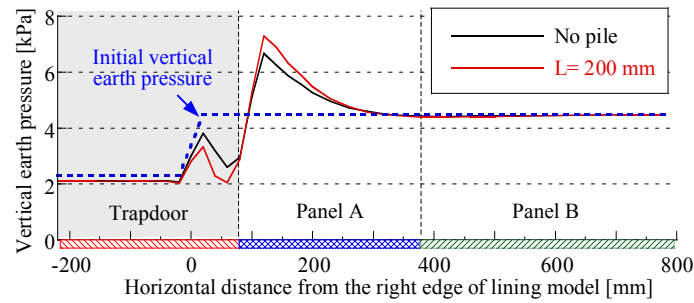


Fig. 4-7 周辺地盤の鉛直土圧分布

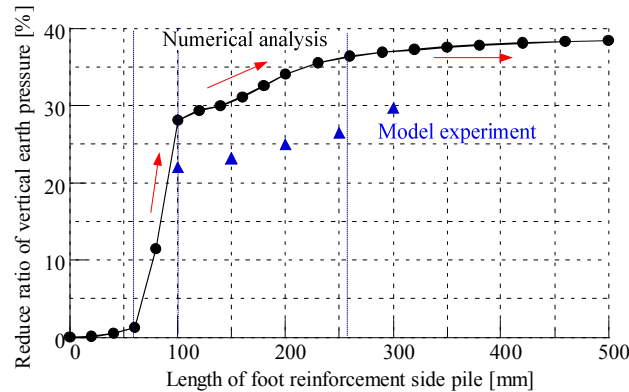


Fig. 4-8 長さが鉛直土圧の減少率に及ぼす影響 (降下床上部)

ほぼ不変となる傾向を示す。これは実験結果と同じ傾向を示している。一方、長さ 200 mm のサイドパイルを設置した場合、降下床の上部地盤に作用する鉛直土圧は、サイドパイルがない場合の初期土圧からの減少量より多くなり、Panel A 上部地盤に作用する鉛直土圧の増加量も多くなる。これから、降下床に作用する鉛直荷重はサイドパイルの設置により、Panel A 上の安定した地盤に分担されていると考えられる。Panel A 上の地盤では、ひずみがほとんど発生しない。本研究では、この部分は変位しない領域と仮定し、「健全な地盤」と称する。

(2) サイドパイルの長さが地盤の力学挙動に及ぼす影響

Fig. 4-8 に、解析により得られた、サイドパイルの長さと降下床に作用する鉛直土圧の低減率の関係を実験値と合わせて示す。ここで示す鉛直土圧の低減率は、サイドパイルを設置した場合、設置しないケースに比べて、鉛直土圧の初期状態からの減少率がどれくらい増加したかを示し、各ケースでの応力分布曲線と初期応力分布曲線間の面積の百分率で表す(Fig. 4-8 参照)。

解析値より、サイドパイルの長さが 60 mm より短い場合、降下床に作用する鉛直土圧はほとんど変化しない結果が見られる。一方、60 mm ~ 100 mm の区間では、鉛直土圧の低減率が急激に増加することが確認できる。確かに、実験においても 100 mm では明確な土圧低減効果が確認できる。さらに、100 mm を超えると低減率は漸増し、260 mm を過ぎると一定値となる。覆工側壁から降下床右端まで、すなわち覆工側壁から安定な地盤までの距離は 80 mm である。ゆえに、サイドパイルの先端が Panel A 上部の安定な地盤に達すると、降下床に作用する鉛直土圧が減少していることになる。さらに同図から、解析値は実験値より大きい値を示すものの、実験値とほぼ同じ傾向を示すことが確認できる。解析値が実験値より大きい値を示すのは、4.2 節での説明したのと同じく、サイドパイルのモデル化とサイドパイルと地盤の相互作用の 2 点が考えられる。

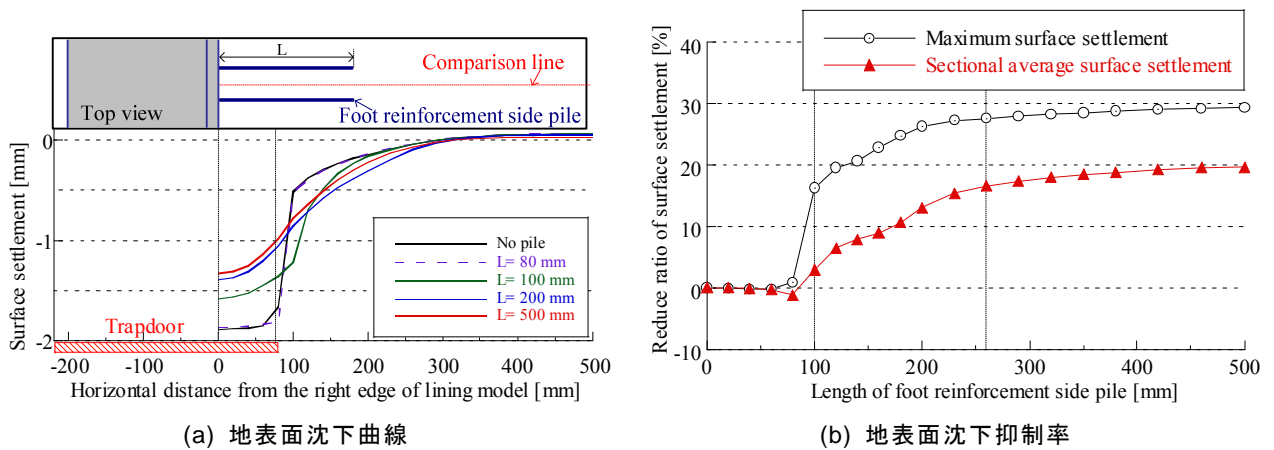


Fig. 4-9 長さが地表面沈下抑制効果に及ぼす影響

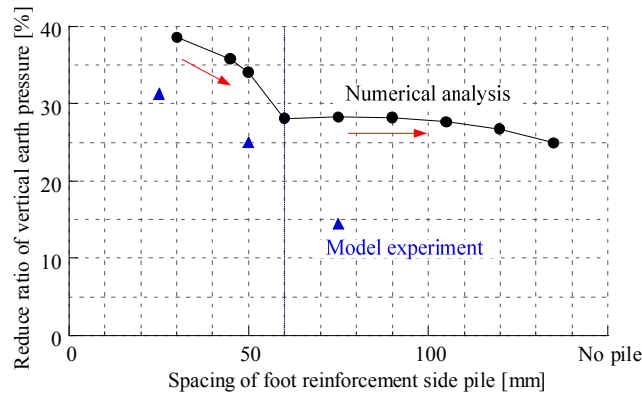


Fig. 4-10 設置間隔が鉛直土圧の減少率に及ぼす影響（降下床上部）

Fig. 4-9(a)に、長さ 80, 100, 200, 500 mm のサイドパイルを設置した時の地表面沈下曲線を、Fig. 4-9(b)に、最大地表面沈下量と区間平均地表面沈下量によるサイドパイルの長さ沈下抑制率の関係を示す。図から、80 mm のサイドパイルを設置した場合、地表面沈下は抑制されないが、100 mm になると覆工付近の地表面沈下量が小さくなる事が確認できる。さらに、200 mm のサイドパイルを設置した場合、100 mm のケースに比べて、地表面沈下量が大幅に減少しているのに対し、500 mm と 200 mm のケースでの地表面沈下量の差は顕著でない。Fig. 4-9(b)から、長さが 100 mm になると最大地表面沈下と区間平均地表面沈下両方とも抑制され、長さの増加とともにその抑制率が大きくなる事が確認できる。しかしながら、260 mm 以上になるとその効果が一定となる。これは、Fig. 4-8 に示した長さと鉛直土圧の関係と同じ傾向を示す。

(3) サイドパイルの設置間隔が地盤の力学挙動に及ぼす影響

Fig. 4-10 に、設置間隔と降下床上部地盤に作用する鉛直土圧の低減率の関係を示す。図には、解析結果と実験結果の双方を示す。図から、サイドパイルは設置間隔が狭くなるほど降下床に作用する鉛直土圧の変化率が大きくなる傾向を示すが、設置間隔が 60 mm 以上になると鉛直土圧の低減率が急激に減少し、設置間隔の増加による影響が顕著でない事が確認できる。これは、パイルの設置間隔が

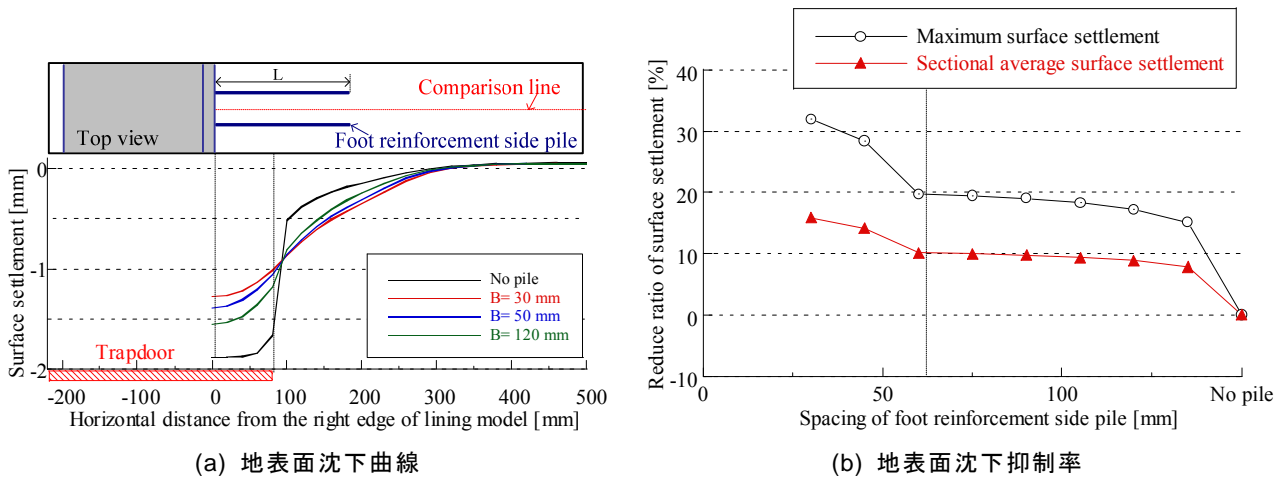


Fig. 4-11 設置間隔が地表面沈下抑制効果に及ぼす影響

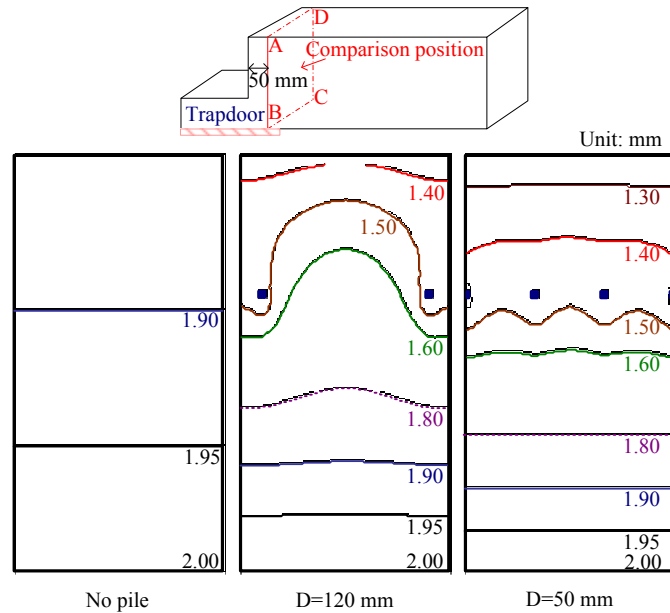


Fig. 4-12 奥行き地盤内変位分布（断面 ABCD）

60 mm より狭い場合, 隣接する二つのパイルの影響領域が重なり, パイルの効果が増すことに対して, 60 mm より広くなるとその効果がなくなるためであると考えられる. さらに, 設置間隔による鉛直土圧の差異に対する解析結果も, 実験値より大きい値を示すが, 実験値とほぼ同じ傾向が得られた.

Fig. 4-11 に, 設置間隔がサイドパイルの地表面沈下抑制効果に及ぼす影響を示す. Fig. 4-11(a)に, 設置間隔が 30, 50, 120 mm の時の地表面沈下曲線を示す. 図から, サイドパイルを密に設置するほど覆工付近に生じる地表面沈下量が小さくなる傾向が見られる. 数値的にその傾向を把握するため, Fig. 4-11(b)に, サイドパイルの設置間隔と地表面沈下抑制率の関係を示す. 図から, 最大地表面沈下量と区間平均地表面沈下量いずれも, 設置間隔が狭くなるほどその抑制率が高くなる現象が見られる. 設置間隔が 60 mm 以上になるとその効果が激減し, 設置間隔による差異が見られなくなる. これは, 設置間隔が降下床上部地盤の鉛直土圧の低減率に及ぼす影響と同じ傾向を示す. 以上から, 本実験条

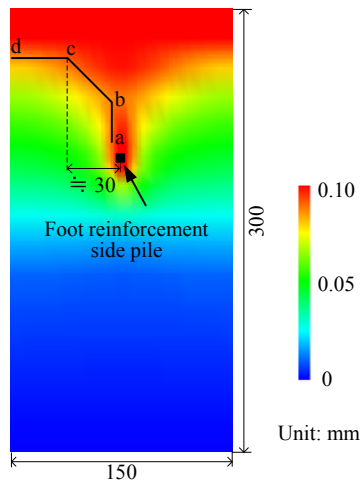


Fig. 4-13 サイドパイルの影響範囲
(鉛直変位の変化量)

件では、設置間隔が 60 mm 以上になると、サイドパイルによる鉛直荷重および地表面沈下に効果が十分発揮されないことになる。

Fig. 4-12 にサイドパイルを設置しないケースと、200 mm のサイドパイルを 50, 120 mm 間隔で設置したケースで、降下床上部領域の断面 ABCD (模型側壁から水平距離で 50 mm 離れた箇所) に発生する鉛直変位の等変位線を示す。図から、サイドパイルを設置しないケースでは降下床上部地盤の鉛直変位は、いずれも降下床底面に発生する 2 mm の変位に追随する形で、底面から離れるほど段々小さくなる現象が見られる。鉛直変位 1.90 mm の等変位線に着目すると、サイドパイルの設置により等変位線の位置が低くなり、設置間隔が狭くなるとさらに低くなる現象が見られる。これから、サイドパイルの設置により、降下床の下降に追随して発生する鉛直変位が抑制され、設置間隔が狭くなるほどその効果が大きくなることが確認できる。さらに、設置間隔 50 mm のケースでは、地表面付近の同変位線 (1.30 mm) が直線であることに対して、設置間隔 120 mm のケースでは曲線 (1.40 mm) を示すことが分かる。このことから、設置間隔が 50 mm のケースでは、サイドパイルは相互作用により一体的に地盤を支え、地表面の沈下を抑制しているが、設置間隔が 120 mm のケースでは、その影響が局所的であり、地表面に不等沈下が生じる結果となっている。

サイドパイルの設置間隔を決定する際は、1 本のサイドパイルの影響範囲がどの程度であるかを評価する必要がある。Fig. 4-13 にサイドパイルを設置しないケースと 1 本のみ設置したケースでの地盤内部に生じる鉛直変位の差、すなわち 1 本のサイドパイルの設置による鉛直変位の減少量を示す。対象エリアは、Fig. 4-12 に示す ABCD 断面である。図から、サイドパイルの設置により、サイドパイルの直上領域と地表面での地盤の変位が大きく抑制される。図中の折線 abcd は、サイドパイルによる鉛直変位の変化量が大きい領域をプロットしたものである。図から、サイドパイルの影響範囲はその設置位置から、点 C までの領域であると考えられ、その横幅は約 30 mm である。サイドパイルの設置間隔を選定する際は、隣接するパイルの影響領域が交差するのが望ましいと考えられる。本解析の条件では、一本のパイルの影響領域は 60 mm である。しかしながら、本解析ではパイルの断面積が実際より若干大きいこと、およびパイルと地盤間の摩擦を考慮できていないことから、パイルの効果が過大評価されている。したがって、実際の一の本のパイルの影響領域は 60 mm より若干小さいと考えられる。

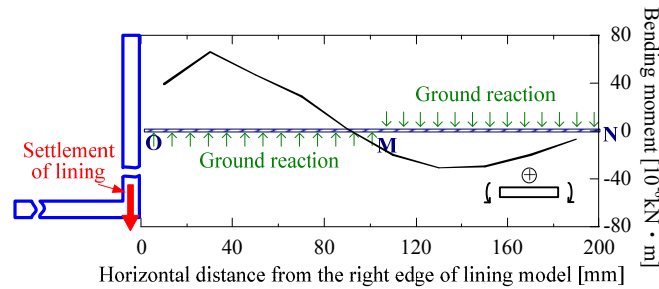


Fig. 4-14 サイドパイルに作用する曲げモーメント

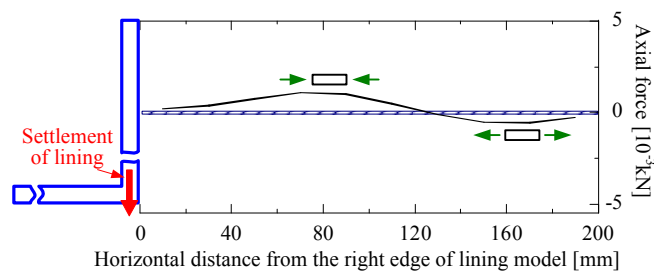


Fig. 4-15 サイドパイルに作用する軸力

4.3.2 サイドパイルの力学挙動

(1) サイドパイルに作用する曲げモーメントおよび軸力

Fig. 4-14, 15 に長さ 200 mm のサイドパイルを 50 mm 間隔で設置する場合、パイル全長に発生する曲げモーメントおよび軸力分布を示す。各値は、各ビーム要素に発生する曲げモーメントおよび軸力であり、その値はビームの中心点にプロットする。

曲げモーメントは、上側引張りで下側圧縮となる 1 対のモーメントを正として表示する。同図に表示した矢印は、曲げモーメント分布から推測できるサイドパイルに作用する力の状態である。サイドパイルと覆工の接続部分 O では、覆工の下降量とほぼ同じ鉛直変位が生じる。OM 区間、すなわち覆工から 100 mm の領域では、正の曲げモーメントが発生し、図に示すように上方向に地盤反力を受けると考えられる。これに対して、MN 区間では、負の曲げモーメントが発生し、パイルが上部地盤に押えられる形で、下方向に地盤反力を受けると考えられる。さらに、点 M では曲げモーメントが零となり、降下床の下降により生じる地盤のすべり線がこの位置を通ると推測できる。以上から、長さ 200 mm のサイドパイルは点 M を支点に梁のような働きをされると考えられる。

軸力は、圧縮を正、引張りを負とする。Fig. 4-15 により、パイルの先端部分には負の軸力が生じ、引張られるような挙動を示すことが分かる。これにより、サイドパイルは周辺地盤により拘束され、またその軸力は覆工の変位を拘束する働きをされると考えられる。さらに、サイドパイルに発生する軸力の変化は、サイドパイルと周辺地盤間に生じる摩擦力によるものである。周辺地盤はこの摩擦力により拘束、補強され、その変位が抑制されると考えられる。

以上から、降下床下降時サイドパイルは梁のような効果を発揮し、覆工およびその周辺地盤の荷重を健全な地盤に再配分することにより、覆工の沈下を防ぐことができると考えられる。さらに、サイドパイルは軸力、すなわち内圧効果を発揮して周辺地盤を補強し、地盤沈下を抑制できる。

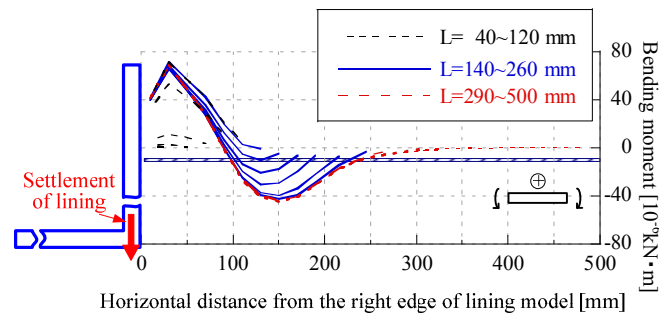


Fig. 4-16 長さが曲げモーメント分布に及ぼす影響

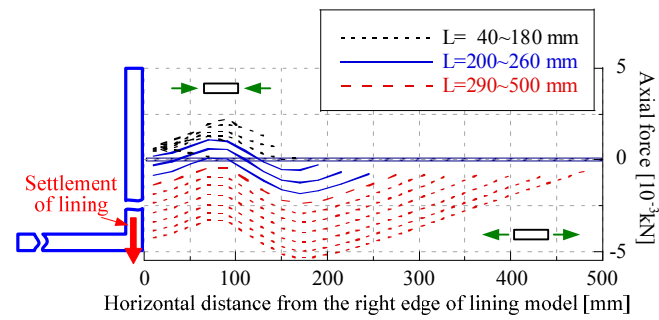


Fig. 4-17 長さが軸力分布に及ぼす影響

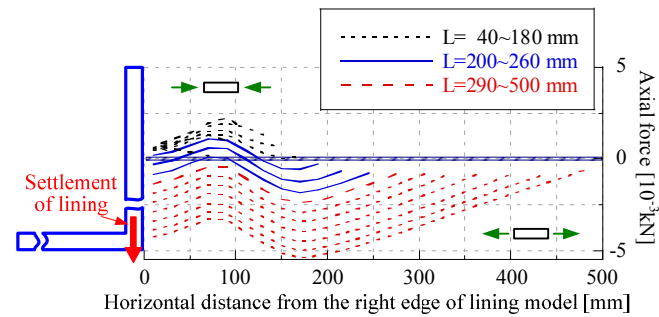


Fig. 4-18 設置間隔が曲げモーメント分布に及ぼす影響

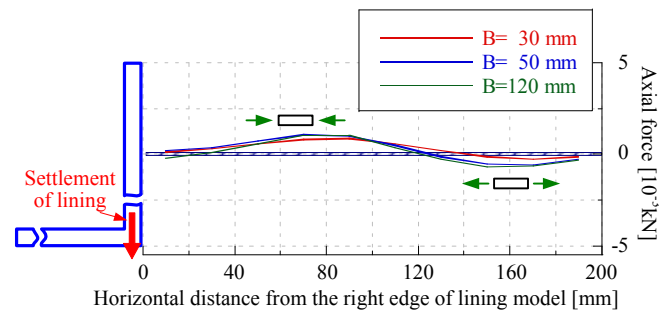


Fig. 4-19 設置間隔が軸力分布に及ぼす影響

(2) 長さがサイドパイルの力学挙動に及ぼす影響

Fig. 4-16 に、降下床が 2 mm 下降した際、異なる長さのサイドパイルに生じる曲げモーメント分布を示す。横軸は、サイドパイル左端からの距離を示し、曲線の横軸長さはサイドパイルの長さと同じである。図から、サイドパイルが 120 mm より短い場合、サイドパイル全長に正の曲げモーメントのみが発生し、長くなるほど正の曲げモーメントの値が大きくなる。140 mm より長くなると端部に負の曲げモーメントが発生し、長くなるほどその最大値が大きくなるが、正の曲げモーメントの最大値は変化しない。さらに、260 mm より長くなるとパイル全長に生じる曲げモーメントの形状がほぼ変化しない。これは、Fig. 4-9 に示したようなサイドパイルの長さが 260 mm より長くなると、最大地表面沈下量の低減率が一定になることと関連すると考えられる。さらに、サイドパイルの長さにかかわらず、覆工から約 100 mm 位離れた位置で曲げモーメントが零になることから、降下床に下降により地山に生じるすべり線がこの位置を通ると推測できる。

サイドパイルが長くなるほど、緩んでいない領域に設置される部分が長くなり、土被りによる拘束を受ける領域が大きくなり、これによって負の曲げモーメントが大きくなると考えられる。また、長さが 260 mm 以上になると曲げモーメント分布が変化せず、260 mm 以遠での曲げモーメントが零となることから、サイドパイルが有効な拘束を受ける領域は、覆工から 100 ~ 260 mm の領域であると考えられる。さらに、本実験の条件では長さが 260 mm 以上になると、地表面沈下抑制効果が増加しなくなり、過剰設計になる。

Fig. 4-17 に、異なる長さのサイドパイルに生じる軸力分布を示す。図より、サイドパイルの長さが 200 mm 以上になると、パイルの先端部分に負の軸力、すなわち引張力が生じる。さらに、サイドパイルが長くなるほど、軸力の最大値が大きくなり、290 mm になるとサイドパイルは全長に渡って引張られるようになる。これは、サイドパイルが長くなるほど地盤により拘束される部分が長くなるためであると考えられる。本実験と同じ条件では、サイドパイルが 200 mm より長くなると引張力が働き、内圧効果を発揮し、周辺地盤を補強する。

(3) 設置間隔がサイドパイルの力学挙動に及ぼす影響

Fig. 4-18 に、種々の間隔でサイドパイルを設置した場合、サイドパイルに生じる曲げモーメントの分布を示す。曲げモーメントはいずれも同じ形状を示し、サイドパイルの左端からほぼ 100 mm で曲げモーメントが零となる。このことから、設置間隔にかかわらず、地盤のすべり線は左端から 100 mm の位置付近を通過し、サイドパイルとしては同じ力学挙動を示すことが分かる。さらに、設置間隔が狭くなるほど、正負の曲げモーメントいずれもその最大値が小さくなることを確認できる。これは、サイドパイルに作用する地盤の拘束力は変化しないことに対して、設置間隔が狭くなると各パイルでの負担が減少し、モーメントの絶対値が減少するものと考えられる。

Fig. 4-19 に、サイドパイルの設置間隔が軸力分布に及ぼす影響を示す。図より、設置間隔にかかわらず軸力は同じ分布形状を示し、設置間隔が狭くなるほど軸力の最大値が大きくなる。これも、サイドパイルに作用する地盤の拘束力は変化しないことに対して、設置間隔が狭くなると各パイルでの負担が減少するためであると考えられる。

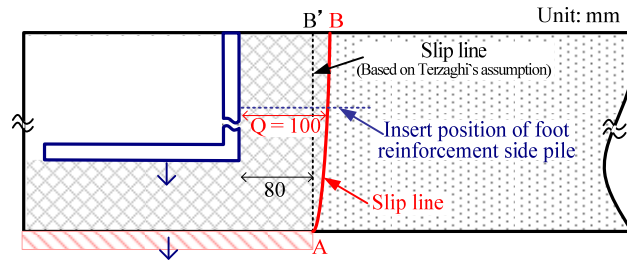
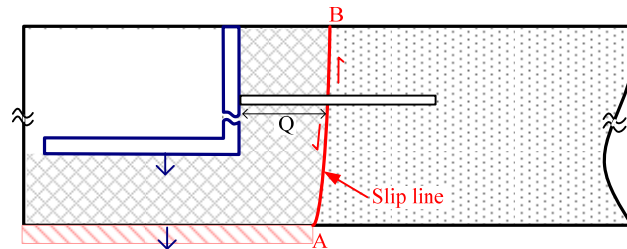
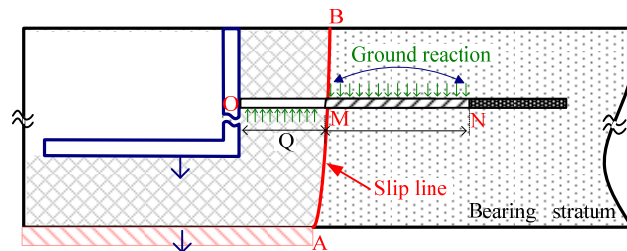


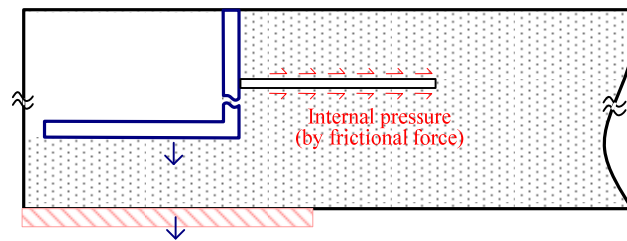
Fig. 4-20 背面地山に生じる実際のすべり線 (推定)



(a) せん断補強効果



(b) 荷重再配分効果



(c) 内圧効果

Fig. 4-21 サイドパイルの地表面沈下抑制メカニズム(模型実験)

4.3.3 模型実験におけるサイドパイル工の地表面沈下抑制効果のまとめ

本節では、模型実験に対する数値解析の適用性を検証し、サイドパイルを設置する際、地盤とサイドパイルの力学挙動について検討を行った。

Terzaghi の理論による仮定および解析結果により、降下床の下降により Fig. 4-20 に示す線 AB のようなすべり線が形成されると考えられる。さらに、解析結果から、覆工からこのすべり線までの位置はサイドパイルの効果を議論する際に極めて重要であると考えられる。本研究では、この長さを Q と表示し、これを用いて各値を標準化し、サイドパイルが地表面沈下抑制効果を発揮するメカニズムについて議論を行う。

模型実験および数値解析結果から考えられる、サイドパイルが地表面沈下抑制効果を発揮するメカニズムを Fig. 4-21 に示す。

サイドパイルが地表面沈下抑制効果を発揮できる原因の一つとして、せん断補強効果が確認された。サイドパイルを設置しない場合、降下床の下降により地山にせん断ひずみが発生し、その集中する領域がすべり線となり地表面まで到達する。サイドパイルを設置すると、そのすべり線がサイドパイルにより遮断され、地表面まで到達するのを妨げる。すなわち、サイドパイルが、覆工からすべり線までの距離 Q より長くなり、Fig. 4-21(a)に示すすべり線と交差すると、せん断補強材のような効果を発揮する。本模型実験での Q は 100 mm である。

地山は、すべり線を境に、覆工とすべり線の間は変位が大きく、すべり線以遠の領域は比較的に変位が小さい。サイドパイルの設置により、領域間の摩擦抵抗を増大させて変形を拘束し、一種のはりを形成して支持すると考えられる。さらに、このはり効果により覆工の沈下も抑制され、覆工および降下床上部地盤に作用する荷重ははりにより覆工以遠領域に分担される。すなわち、サイドパイルの設置により地盤に生じる土圧が再配分され、覆工直下および周辺地盤に生じる荷重が、より健全な地盤（緩んでいない領域）に分担される。これにより、覆工のさらなる変位が抑制される。

本模型実験では、サイドパイルの長さが $1.4 Q$ (140 mm) 以上になると荷重が再配分され、覆工および地表面の変位が抑制される。さらに $2.6 Q$ (260 mm) 以上になると、その効果が一定になる結果が得られた。

サイドパイルの長さを選定する際、覆工からすべり線までの距離 Q は最も重要な参考パラメータとなる。これから、サイドパイルを選定する際、まず数値解析などを通じて覆工周辺地山に生じるすべり線の位置を算出する必要がある。さらに、荷重の再配分効果が得られる最小長さおよびその効果が頭うちになる上限長さを把握したうえで、最小長さおよび Q と上限長さの間で選定する。周辺地盤が均一、もしくは多層地盤で水平方向に均一である場合、すべり線の発生位置は、トンネル掘削時トンネルに作用する緩み土圧を算出する際の Terzaghi の仮定により推測することができる¹⁷⁾。しかしながら、実現場の多くは地盤条件が均一でなく、この場合、トンネルの掘削により生じるすべり線を推定するのは簡単でない。これらに対しては、周辺地盤について詳しく調査した上、数値解析手法を用いた計算が考えられる。

設置間隔が狭いほど、大きい地表面沈下抑制効果が得られる。しかしながら、実際の NATM トンネルは 1m あるいは 1.2 m 間隔で鋼製支保工を建て込むため、その設置できるサイドパイルの本数が限られ、設置間隔はほぼ施工条件により決められる。本研究から、設置間隔の設定について、サイドパイルの効果が相互にオーバーラップするような設定にすることが望ましいと考える。結果として、地盤を一体化して保持することになる。本模型実験では、隣接するサイドパイルの影響領域がオーバーラップする最大設置間隔は $0.6 Q$ (60 mm) であるという結論を得た。

4.4 パイルに角度を付けた場合の地盤沈下抑制効果

4.4.1 パイルに角度を付けた場合の概要

実現場では、鋼管を水平に設置したサイドパイル工だけでなく、パイルをトンネル内部から斜め下方向に挿入したフットパイル¹⁶⁾も使用されている (Table. 2-1 参照). しかしながら、フットパイルに対しては実験装置などの制約により、模型実験は困難であった. そこで本節では、Fig. 4-22 に示すように、今まで行ってきた模型実験と同じ領域を対象として三次元弾塑性有限要素解析を行い、パイルをフットパイルのように斜め下に設置した場合、パイルの設置角度が地盤沈下抑制効果に及ぼす影響およびそのメカニズムについて検討する. さらに本研究では、斜めに設置する場合のパイルの材料特性は、サイドパイルと同じであると設定する.

Fig. 4-23 にパイルの設置角度の符号の規定を示す. 本研究で設置角度は、サイドパイルの設置角度は零、フットパイルのような下向きは正、上向きは負の値とする. 本節では、長さ 100, 200 mm のパイルを様々な角度で下向きに設置する場合、その地表面沈下抑制効果について検討する. Table 4-3 に、詳細な検討ケースを示す.

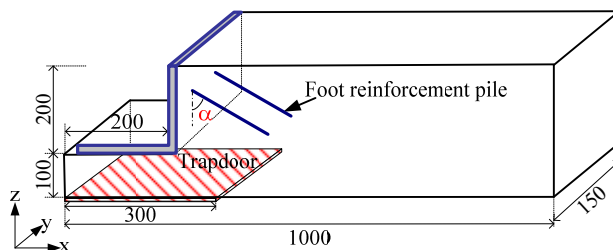


Fig. 4-22 解析対象 (パイルを斜めに設置する場合)

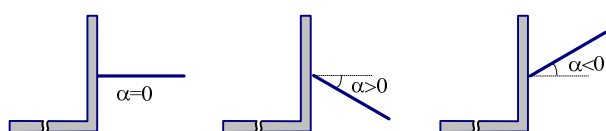
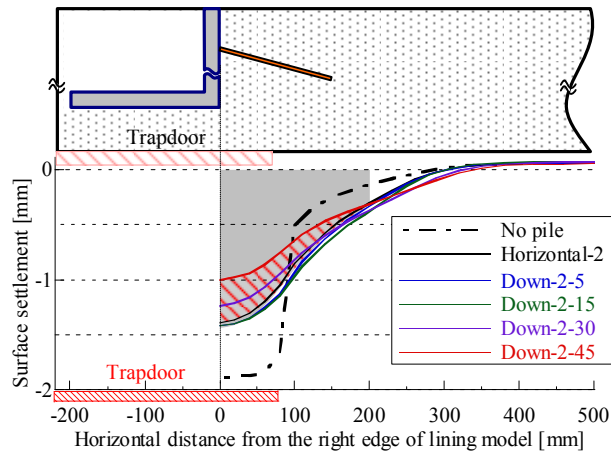


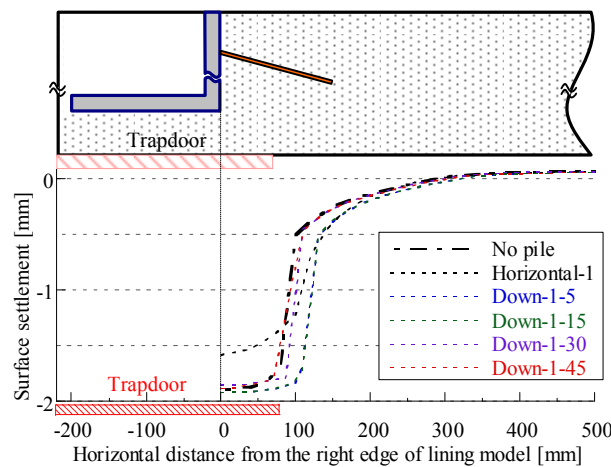
Fig. 4-23 パイル設置角度の符号

Table 4-3 解析パターン (フットパイル)

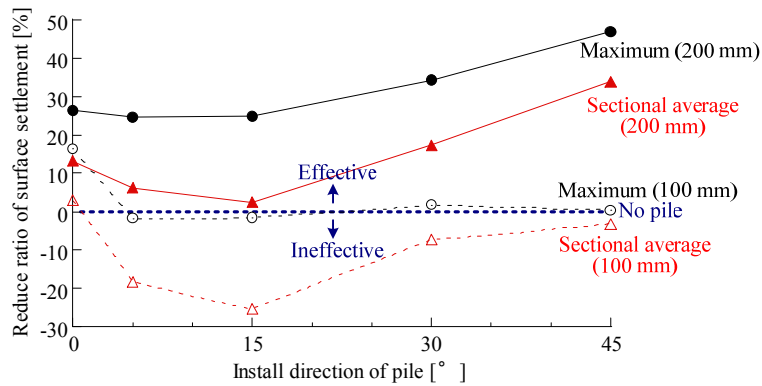
長さ (mm) \ 角度 (°)	200	100	0
0	Horizontal-2	Horizontal-1	No pile
5	Down-2-5	Down-1-5	
15	Down-2-15	Down-1-15	
30	Down-2-30	Down-1-30	
45	Down-2-45	Down-1-45	



(a) 地表面沈下曲線 (L=200 mm)



(b) 地表面沈下曲線 (L=100 mm)



(c) 地表面沈下抑制率

Fig. 4-24 設置角度の大きさが地表面沈下抑制効果に及ぼす影響

4.4.2 地盤の力学挙動

Fig. 4-24 は、設置角度を $0 \sim 45^\circ$ で変化させた場合、地表面沈下曲線および最大・区間平均地表面沈下量の抑制率を示す。沈下抑制率は、3 章および 4.3 節と同じく、パイルを設置しないケースに対する各ケースでの地表面沈下量の減少率で表す。図より、パイルの長さが 200 mm のケースでは、いずれも覆工付近の地表面沈下が大きく抑制される結果が見られる。設置角度が 15° より小さい場合、

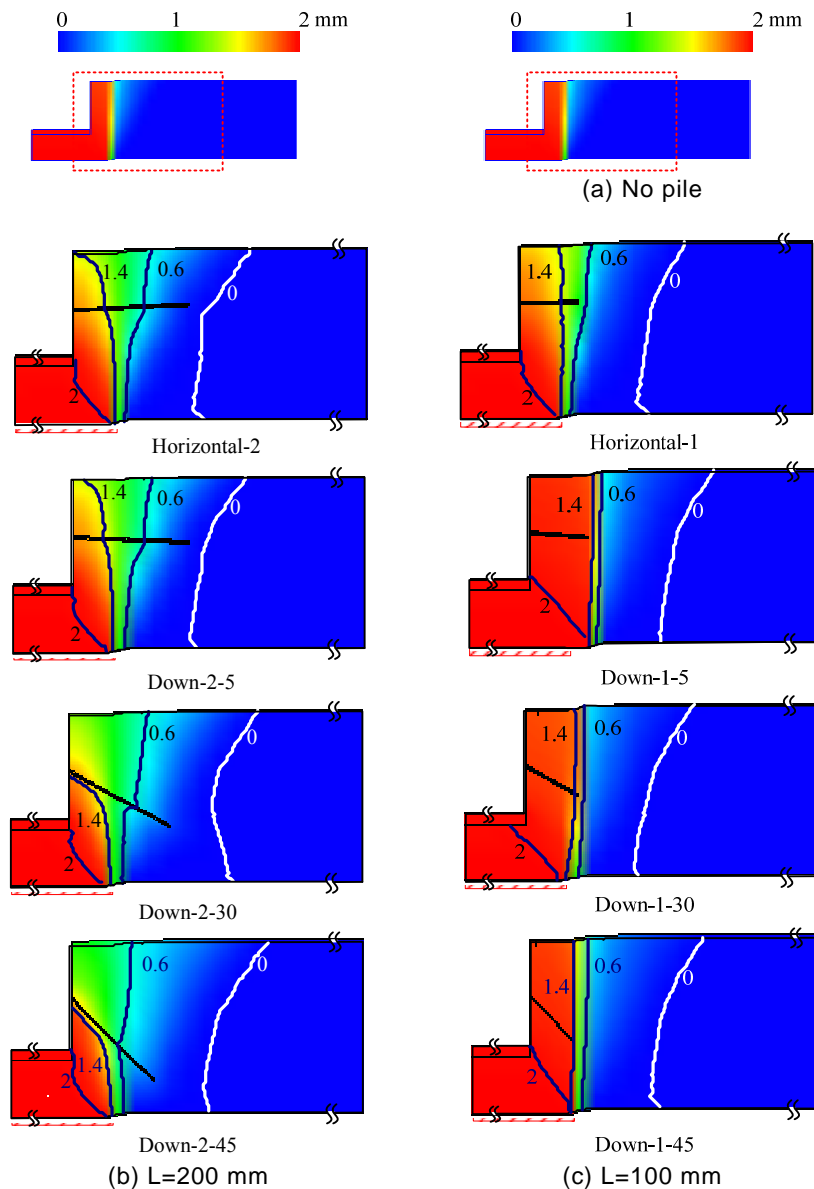


Fig. 4-25 設置角度の大きさが鉛直変位分布に及ぼす影響

最大と平均地表面沈下抑制率はいずれも水平に設置するケースより小さくなる。設置角度が 15° より大きくなると、地表面沈下抑制率は大きく増加し、設置角度が大きくなるほどその効果はさらに高くなる。これに対して、パイルの長さが 100 mm のケースでは、水平に設置する場合は地表面沈下量がわずかに抑制されるものの、斜めに設置すると地表面沈下抑制効果を得られなくなる。

Fig. 4-25 に、パイルを下向きに設置する場合、様々な設置角度での鉛直変位分布および等鉛直変位線を示す。パイルを設置しない場合、降下床直上部分の地盤は降下床下降量と同等の変位が生じ、その変形は地表面に同等の量として現れる。長さ 200 mm のケースでは、パイルの設置によりパイル上部地盤の鉛直変位が顕著に減少する。さらに、等鉛直変位線からは、パイルの設置角度が大きいくほど大きい沈下が生じる地盤領域（例えば、Fig. 4-25(b)で 1.4 mm より大きい鉛直変位が生じる地盤領域）が小さくなることが分かる。これに対して長さ 100 mm のケースでは、水平に設置した場合パイル上部地盤の鉛直変位が小さくなるものの、斜めに設置すると鉛直変位分布に顕著な変化が見られなくなる。著者ら²⁴⁾は、実験及び解析を通じて降下床の下降により地山に生じるすべり線は、覆工右端から

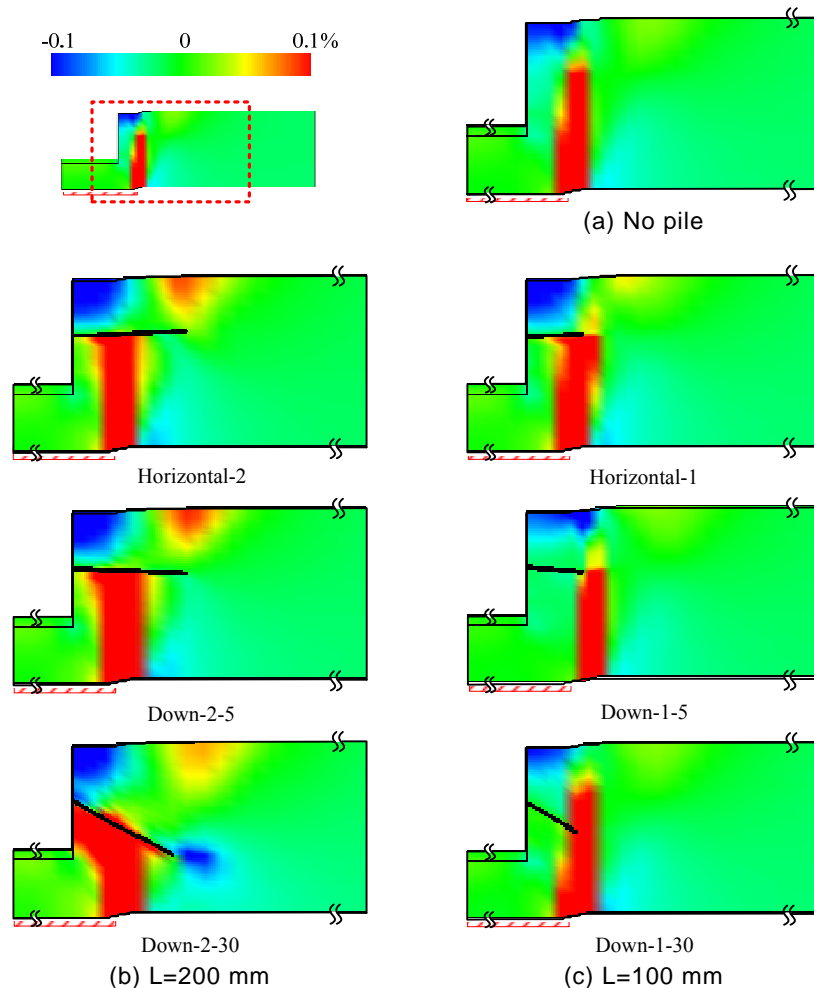


Fig. 4-26 設置角度の大きさが体積ひずみ分布に及ぼす影響

100 mm 位の位置を通ることを確認し、パイルがこのすべり線を交差することで地盤沈下抑制効果を発揮するという結論を得ている。長さ 100 mm の時、水平に設置する場合はパイルがこのすべり線を横切るが、斜めに設置するとすべり線に届かなくなり、沈下抑制効果が発揮されない状態となっていると考えられる。

Fig. 4-26 に、異なる設置角度での体積ひずみ分布を示す。正の値は体積の圧縮、負は膨張を表す。パイルを設置しないケースでは、すべり線 (Fig. 4-26 参照) の周辺地盤では圧縮、地盤と覆工の境界では体積の膨張が見られる。長さ 200 mm で、設置角度が小さい場合 (Down-2-5)、体積ひずみは水平に設置するケースとほぼ同じ分布を示す。設置角度が大きくなる (Down-2-30) と、圧縮される地盤領域が明らかに小さくなる結果が見られ、これにより覆工付近に生じる地表面沈下が抑制されたと考えられる。さらに、パイルを設置することにより、パイル先端部分の上部地盤で正の体積ひずみが生じる領域が見られるが、設置角度が大きくなると、この領域が小さくなる現象が見られる。これは水平に設置すると、降下床の下降による影響がパイルを介してパイル先端部分の地盤領域まで伝達し、圧縮ひずみを発生させることに対して、大きい角度で下向きに設置するとパイル先端部分から地表面までの距離が遠くなり、その影響が小さくなったためである。これに対して、長さ 100 mm の諸ケースでは、パイルを設置しないケースとほぼ同じ分布が見られる。これも Fig. 4-25 と同じく、傾けることによりパイルがすべり線まで届かなくなり、地盤沈下抑制効果を発揮しなくなったためである。

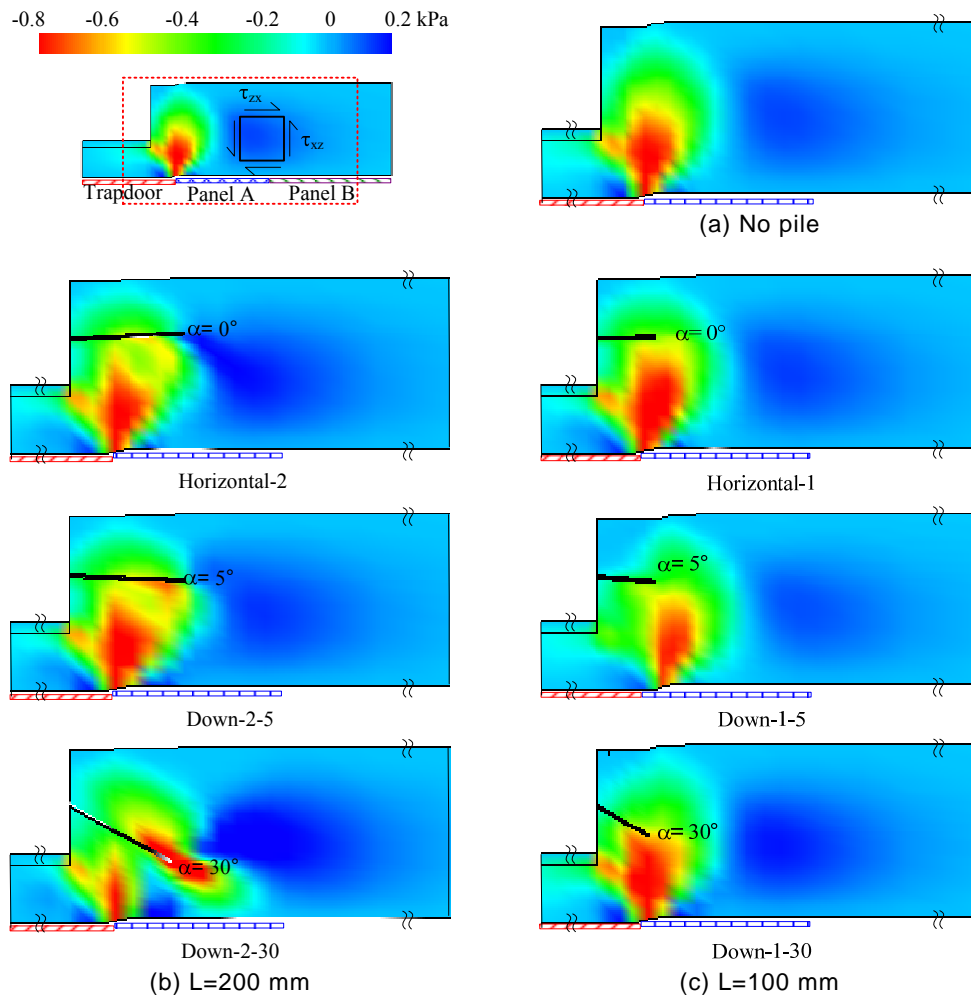


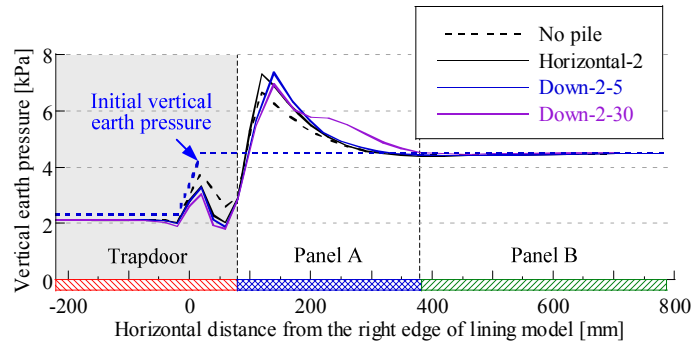
Fig. 4-27 設置角度の大きさがせん断応力分布に及ぼす影響

Fig. 4-27 は、Fig. 4-26 と同じケースでのせん断応力を表示している。パイルを設置しない場合、せん断応力は降下床の右端周辺に集中する。設置角度が小さい Down-2-5 では、Horizontal-2 とほぼ同じせん断応力分布を示す。これに対して設置角度が大きい Down-2-30 では、降下床右端周辺地盤に生じるせん断応力は減少し、パイル先端部分の周辺地盤に大きいせん断応力が集中する現象が見られる。これから、パイル先端部分の健全な地盤に荷重分担がなされ、その結果として沈下を抑制したと推測できる。しかしながら、長さが 100 mm のケースではパイルを設置しないケースに比べて、顕著な変化が見られない。これも、Fig. 4-25, 4-26 に示す結果と同じ原因が考えられる。

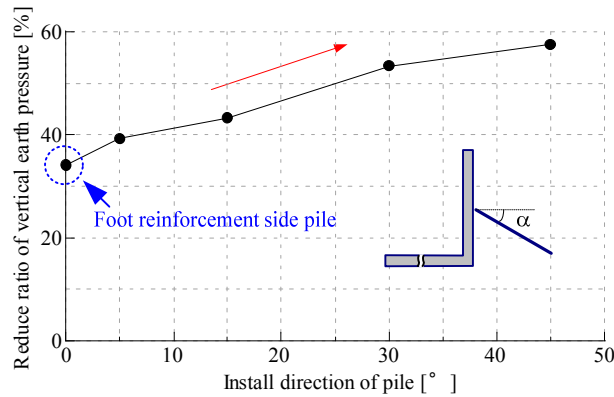
以下では、地表面沈下抑制効果が得られた L=200 mm のケースについてのみ検討を行う。

3章で説明した室内模型実験では、三次元降下床模型実験装置の土槽の底面に荷重計測パネル A, B を設置し(Fig. 3-3)、降下床上部および周辺地盤に作用する鉛直土圧の変化について検討した。その結果、サイドパイルを設置することにより、降下床に作用する鉛直土圧は大幅に減少し、その減少分を分担する形でパネル A に作用する鉛直土圧は増加することが分かった。

Fig. 4-28 に、設置角度の大きさが鉛直土圧に及ぼす影響を示す。ここでは、地山底面の中心線に生じる鉛直土圧について検討する。鉛直土圧の低減率は、3章および 4.3 節と同じく、パイルを設置しないケースに比べて、鉛直土圧の初期状態からの減少率がどれくらい増加したかを示し、各ケースでの降下床下降後の応力分布曲線と初期応力分布曲線間の面積の減少率で表す。



(a) 鉛直土圧分布（地山底面中心線）



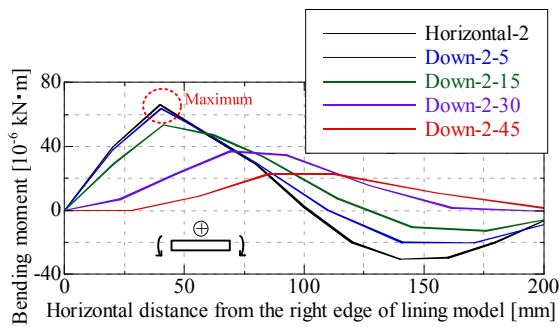
(b) 鉛直土圧減少率

Fig. 4-28 設置角度の大きさが鉛直土圧に及ぼす影響

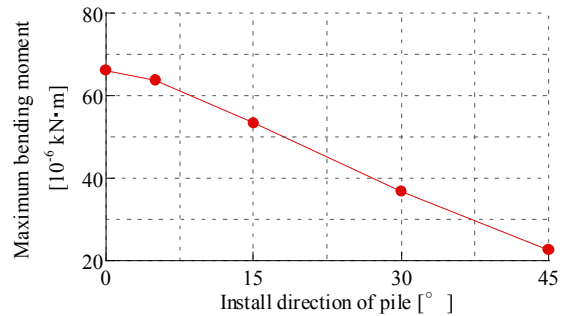
Fig. 4-28(a)により，設置角度が 5° の場合，鉛直土圧分布は水平に設置する場合とほぼ同じ分布および値を示す．設置角度が 30° になると，降下床に作用する土圧は55%ぐらいで，水平に設置するケースより約20%顕著に減少する．さらに，パネルAに作用する鉛直土圧もその分布形状が大きく変化し，最大値は小さくなるが，パネルAの右半分に作用する鉛直土圧が増加する領域は大きくなり，その値も大きくなる結果が見られる．これは，パイルを大きい角度で下向きに設置する場合，パイル先端部分に応力が集中し，パイルの延長線下の地盤に生じる鉛直荷重が大きくなり，その影響領域も広がると考えられる．以上から，パイルの設置角度が大きくなるほど，より広い範囲の健全な地盤が降下床に作用する鉛直荷重を分担することが分かる．

4.4.3 下向きに設置するパイルの力学挙動

Fig. 4-29にパイルの設置角度がパイル全長に生じる曲げモーメントに及ぼす影響を示す．設置角度が 0° , 5° , 15° の場合，パイルの先端部分には負の，覆工付近部分では正の曲げモーメントが生じる．設置角度が 15° 以下の場合，パイルは水平に設置した場合と同じく，覆工以遠部分の地盤からの反力により覆工の沈下に抵抗できると考えられる．設置角度が 30° と 45° のケースでは，パイル全長で正の曲げモーメントが見られ，パイルは全長にわたってパイル下部地盤に支えられるような挙動を示す．さらに，Fig. 4-29(b)に異なる角度における曲げモーメントの最大値をプロットするが，設置角度が大きいくほど最大曲げモーメントが小さくなる結果が見られる．

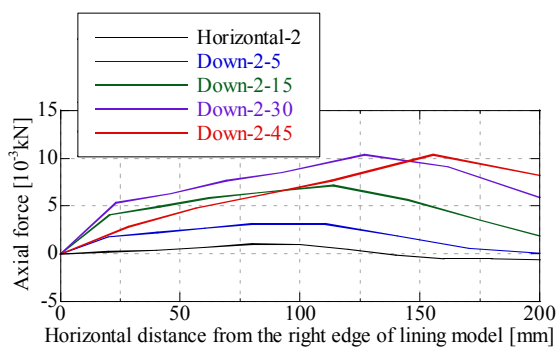


(a) 曲げモーメント分布

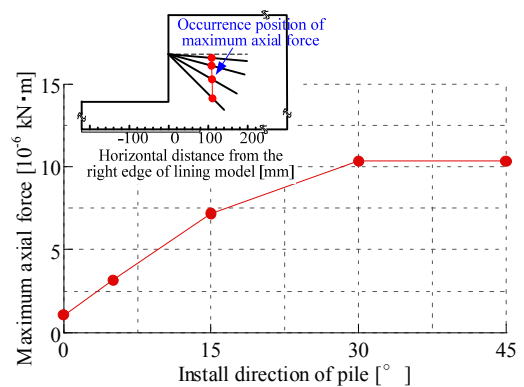


(b) 最大曲げモーメント

Fig. 4-29 設置角度の大きさが曲げモーメントに及ぼす影響



(a) 軸力分布



(b) 最大軸力

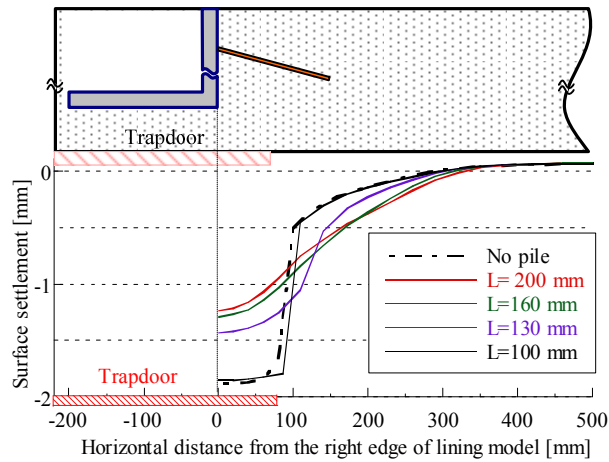
Fig. 4-30 設置角度の大きさが軸力に及ぼす影響

Fig. 4-30 に、異なる設置角度でのパイル全長に生じる軸力分布、最大軸力およびその発生位置を示す。パイルを斜めに設置することにより、全長に渡って圧縮力が生じ、角度の増加とともに大きくなる。しかしながら、角度が 30° 以上になると軸力の大きさが頭打ちになり、 30° と 45° のケースでは大きい差が見られなく、

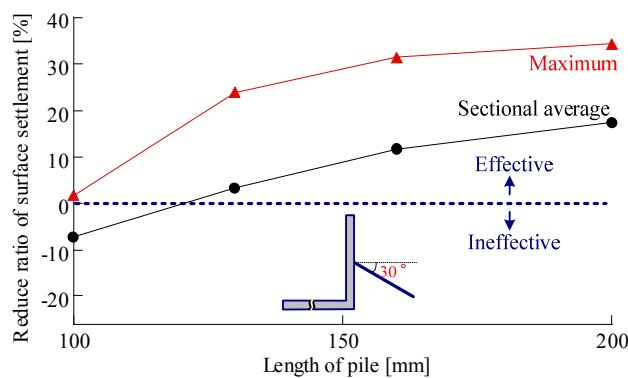
パイルを水平もしくは小角度で斜め下に設置した場合は、主に曲げ剛性により覆工の荷重を健全な地盤に伝える。これに対してパイルを大角度で斜め下に設置すると、パイルの軸方向に作用する圧縮力が生じ、この軸力により覆工の荷重がパイル先端部分の健全な地盤に伝わり、荷重分散効果が得られる。すなわち、パイルは曲げ剛性以外に、軸力を介しても覆工などの荷重を覆工以遠地盤に分担させる機能を果たすと考えられる。パイルが水平もしくは設置角度が小さい場合は、主に曲げ剛性により荷重分散効果を発揮するが、設置角度が大きくなると、軸力による作用が大きくなり、曲げ剛性による作用が小さくなる。

4.4.4 下向きに設置するパイルの長さの影響

Fig. 4-31 にパイルを斜め下 30° に設置する場合、パイルの長さが地表面沈下量に及ぼす影響を示す。図より、パイルを斜め下に設置した場合も、パイルが長いほど大きい地表面沈下抑制効果が得られることが確認できる。



(a) 地表面沈下曲線



(b) 地表面沈下抑制率

Fig. 4-31 下向きに設置する場合長さが地表面沈下抑制効果に及ぼす影響 ($\alpha = 30^\circ$)

4.4.5 下向きに設置するパイルの地盤沈下抑制効果のまとめ

本節では、第3章で紹介した模型実験と同じ領域を対象に、フットパイルのようにパイルを斜め下に設置する場合、パイルの地盤沈下抑制効果について検討した。

解析結果により、パイルをフットパイルのように斜め下に設置する場合、パイルはせん断補強効果および荷重再配分効果を発揮し、地盤沈下を抑制する。さらに、サイドパイルは梁のように曲げ剛性を発揮し、トンネルおよび周辺地盤の荷重を健全な地盤に分散させることに対し、フットパイルは、曲げ剛性に加わり、軸力も発揮する。パイルは、軸力を通じて覆工を支え、更なる沈下を抑制する働きをする。

さらに、斜め下に設置する場合も、パイルが長くなるほど地盤沈下抑制効果も高くなる。

4.5 パイルの設置方向を変化させた場合の地盤沈下抑制効果

4.5.1 パイルを斜め上向きに設置する場合の概要

通常、脚部補強工のパイルは、水平もしくは下向きに挿入する。Nakai et al⁴⁷⁾は、Fig. 4-32 に示すように、杭基礎に補強パイルを設置する際、杭基礎の移動方向とパイルの設置方向の関係を模型実験および数値解析手法を用いて検討を行った。その結果、パイルを上方向に引抜く場合パイルを下向き、すなわちパイルを杭の動きに従うような方向に設置するほうが高い補強効果が得られる結論を得ている。ここでは、パイルの設置方向が脚部補強工の地表面沈下抑制効果に及ぼす影響について検討する。検討項目は3章と同じである。

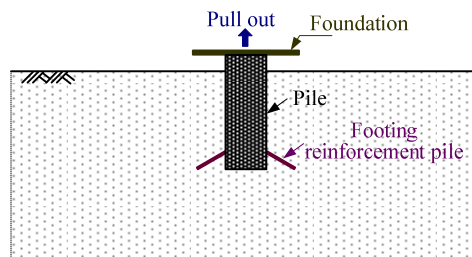
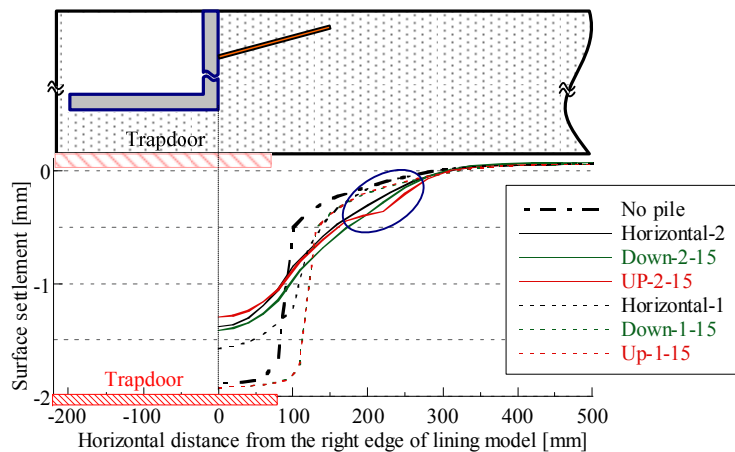
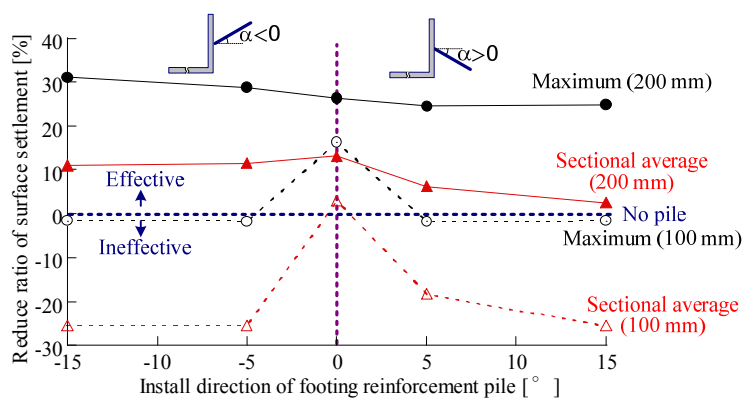


Fig. 4-32 杭基礎の補強パイルに関する研究⁴⁷⁾



(a) 地表面沈下曲線 (L=200 mm)



(b) 地表面沈下抑制率

Fig. 4-33 設置方向が地表面沈下抑制効果に及ぼす影響

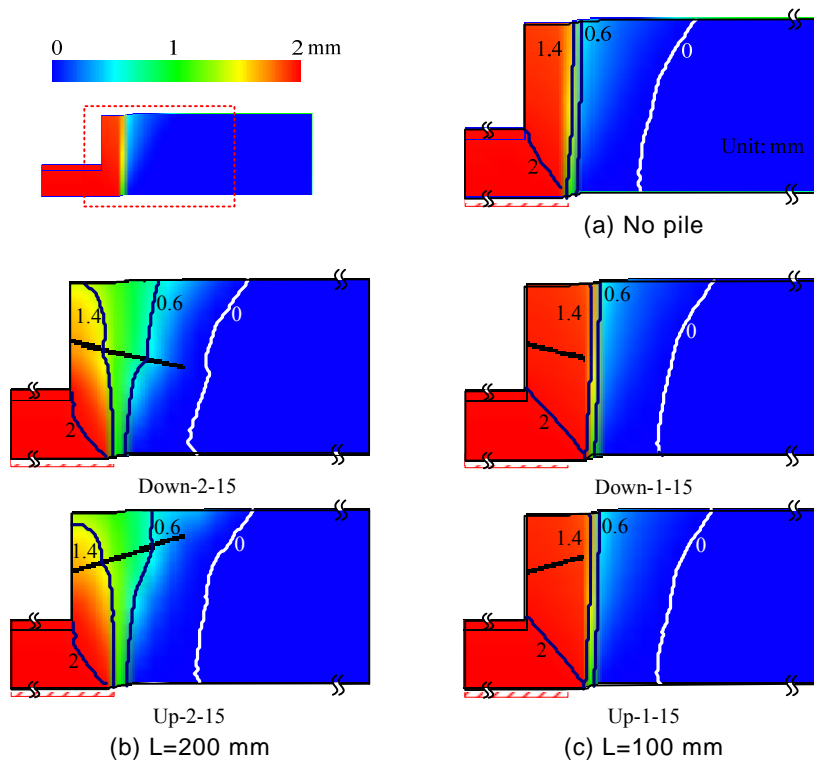


Fig. 4-34 設置方向が鉛直変位分布に及ぼす影響

4.5.2 地盤の力学挙動

Fig. 4-33 にパイルを上向きおよび下向きに設置した各ケースでの地表面沈下曲線および地表面沈下量の減少率を示す．長さが 100 mm のケースでは，下向きに設置した時と同じく，パイルを斜めに設置することにより地表面沈下量が大きくなる．すなわち，パイルの向きにかかわらず，長さ 100 mm のパイルを斜めに設置すると地表面沈下抑制効果が得られなくなる．一方，長さ 200 mm のケースでは，パイルを上方向に設置するほうが，水平もしくは下向きに設置するより覆工付近で大きい地表面沈下抑制効果が得られる．角度が 15° の場合は，上向きに設置することにより下向きに設置するケースに比べて，地表面沈下抑制率を約 10 % 向上できる．さらに，上向きに設置する場合も設置角度が大きいほど地表面沈下抑制効果が高いことが確認できる．しかしながら，パイルを上向きに設置すると，地表面上の沈下範囲が大きくなり，覆工右端から 180 mm 位離れた領域 (図中○で囲んだ部分) では，パイルを設置しないケースより大きい地表面沈下量が現われている．

Fig. 4-34 に，挿入角度が上下 15° の場合の地盤内部の鉛直変位分布および等鉛直変位線を示す．長さ 200 mm のケースでは，パイルを上向きに設置すると，大きい鉛直変位が生じる地盤領域 (例えば 1.4 mm より大きい鉛直変位が生じる地盤領域) が小さくなる．これに対して，長さ 100 mm の場合は，上向き・下向きいずれのケースでも顕著な変化が見られない．

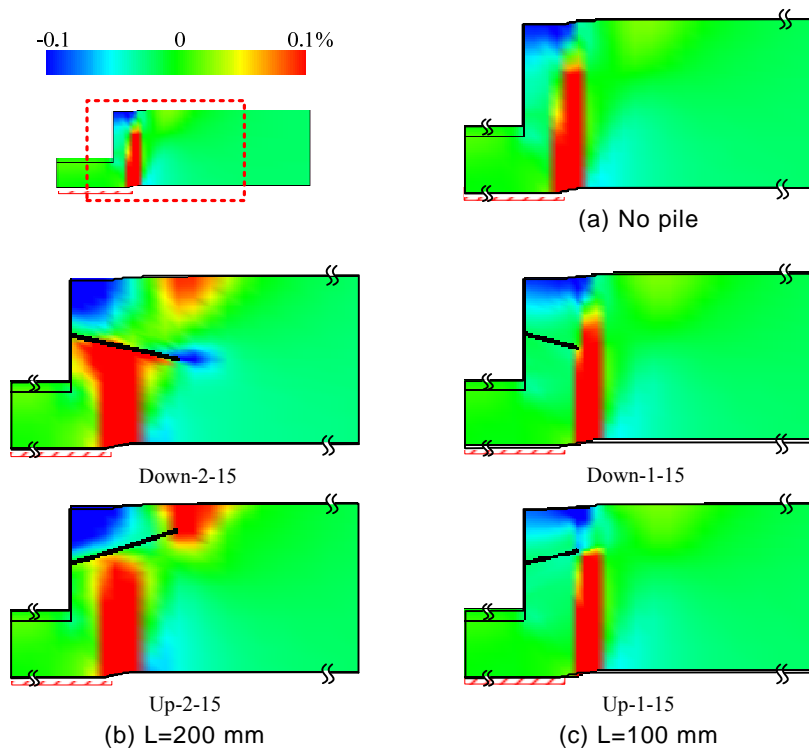


Fig. 4-35 設置方向が体積ひずみ分布に及ぼす影響

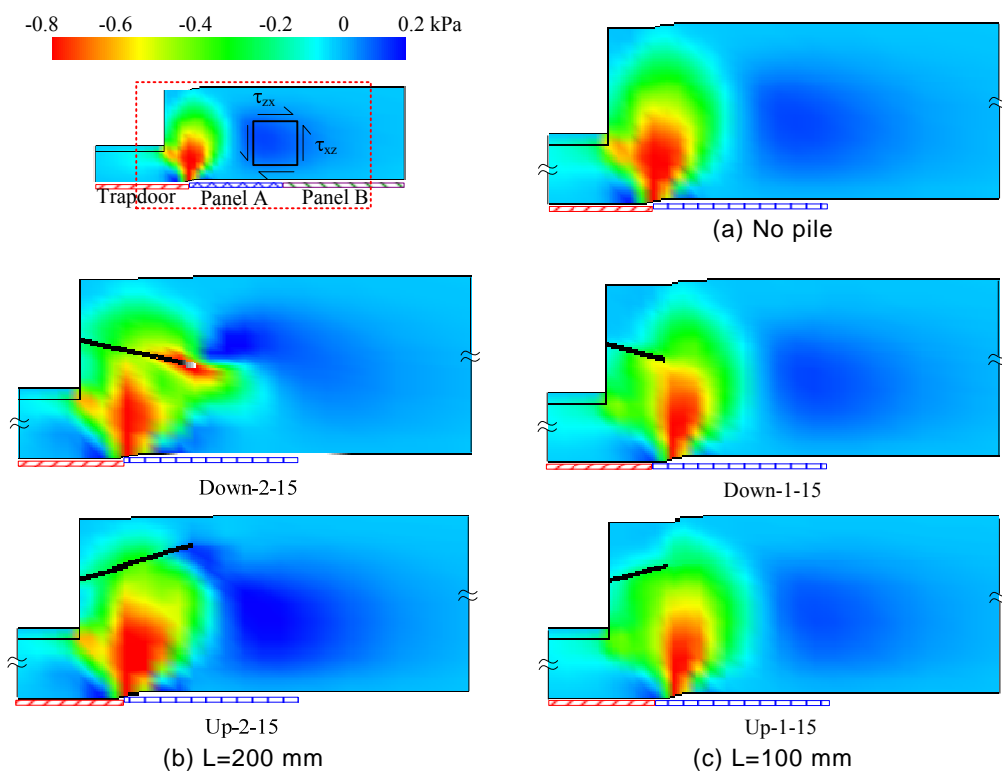


Fig. 4-36 設置方向がせん断応力分布に及ぼす影響

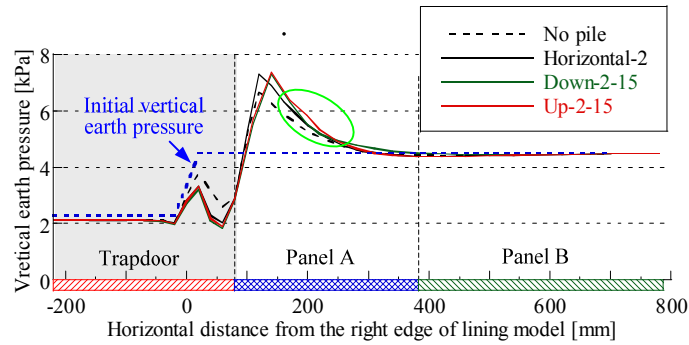


Fig. 4-37 設置角度の大きさが鉛直土圧に及ぼす影響

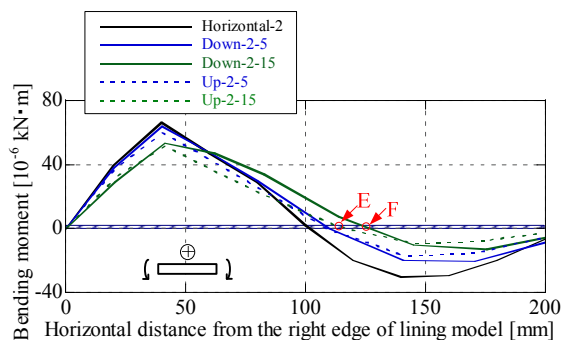
パイルを上向きに設置するほうが、覆工周辺でより大きい地表面沈下抑制効果を発揮するメカニズムを究明するため、Fig. 4-35 に体積ひずみ分布を示す。パイルを下向きに設置する場合、パイルと覆工壁面の成す角度（降下床側）は鋭角であり、大きい体積ひずみは発散できず、パイルと覆工の接続部分の周辺地盤でも大きい体積ひずみが生じる。パイルを上向きに設置する場合、パイル下部で大きな体積ひずみが生じる地盤領域が狭くなる現象がみられ、これにより覆工付近での地表面沈下がより小さくなると考えられる。しかしながら、パイル先端部分の上部地盤で圧縮ひずみが生じる領域は、パイルを上向きに設置することにより大きくなる現象が見られ、これにより、覆工以遠部分では下向きのケースより大きい地盤沈下が生じたと考えられる (Fig. 4-33(a) 中○で囲んだ部分)。これに対して、長さ 100 mm の諸ケースでは、明瞭な差異が見られない。

Fig. 4-36 に、地盤のせん断応力分布を示す。パイル長さが 200 mm のケースの Down-2-15 では、パイル先端部分で大きい負のせん断応力が見られ、さらにパイル先端部分から斜め上の領域に正のせん断応力が生じる。これに対して Up-2-15 の場合、パイル先端部分では負のせん断応力は見られなく、斜め下方向に向かって大きい領域で正のせん断応力が生じる。これにより、パイルを斜め上に設置する場合、降下床の沈下による影響が覆工から遠い領域まで伝わり、パイル先端付近では大きい地表面沈下が生じる結果が現れたと考えられる。長さ 100 mm の場合は、明瞭な差異が認められない。

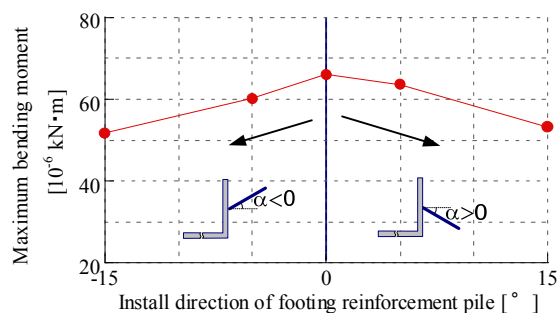
Fig. 4-37 に、パイルの設置方向が地山底面に作用する鉛直土圧分布に及ぼす影響を示す。降下床に作用する鉛直土圧は、いずれのケースでもパイルの設置により大幅に減少するが、設置方向による差異は明瞭でない。パネル A に作用する鉛直土圧を比較すると、パイルを上向きに設置するケースでは、鉛直土圧が明らかに大きくなる領域（○で囲んだ部分）が見られる。さらに、上向きに設置するとパネル A 上で鉛直土圧が増加する領域が狭くなる。以上から、パイルを上向きに設置すると、より狭い範囲の健全な地盤が、降下床に作用する鉛直荷重を分担するため、健全な地盤に作用する鉛直土圧が大きくなったと考えられる。

4.5.3 上向きに設置するパイルの力学挙動

Fig. 4-38 に、異なる方向で設置したパイル全長に生じる曲げモーメントおよび軸力分布をその最大値と併せて示す。曲げモーメント分布は、設置角度にかかわらずいずれも同じ形状を示す。Down-2-15 と Up-2-15 を比較すると、上向きに設置する場合、覆工右端から、曲げモーメントが零になる点（点 E）までの距離が短くなる傾向が見られる。すなわち、パイルを上向きに設置することにより、覆工の沈下に抵抗できる地盤反力を得られる部分（点 E と F の右部分）が長くなる。

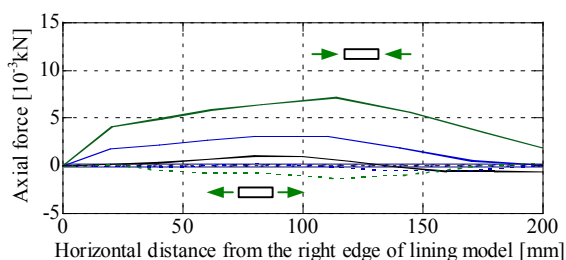


(a) 曲げモーメント分布

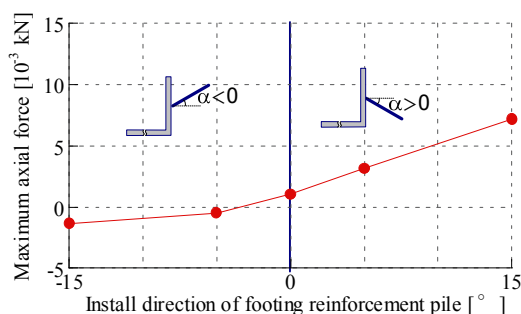


(b) 最大曲げモーメント

Fig. 4-38 設置方向が曲げモーメントに及ぼす影響



(a) 軸力分布



(b) 最大軸力

Fig. 4-39 設置方向が軸力に及ぼす影響

Fig. 4-39 より，下向きに設置したケースでは，パイル全長で圧縮力が生じるのに対し，Up-2-5 ではほぼ零で，Up-2-15 では小さい引張力が発生する．これから，パイルを上向きに設置する場合，パイルは引張力を発揮して，覆工を吊るすような効果を発揮し，覆工の沈下を抑制できると考えられる．さらに本解析では，パイルを上向きに設置するほうが水平，或いは下向けに設置するより大きい地盤沈下抑制効果を発揮する結果が得られた．

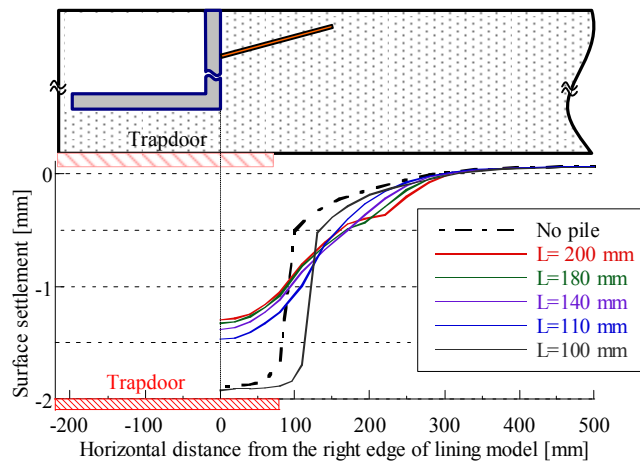
4.5.4 上向きに設置するパイルの長さの影響

Fig. 4-40 にパイルを斜め上 15° に設置する場合，パイルの長さが地表面沈下量に及ぼす影響を示す．図より，パイルを斜め上に設置した場合も，パイルが長いほど大きい地表面沈下抑制効果が得られることが確認できる．

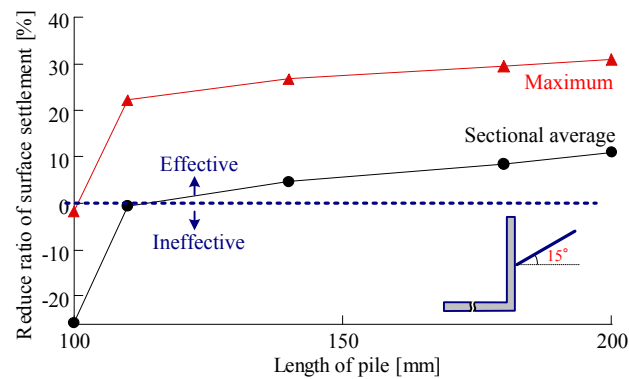
4.5.5 上向きに設置するパイルの地盤沈下抑制効果のまとめ

本節では，パイルを斜め上に設置する場合，パイルの地盤沈下抑制効果について検討した．パイルは上向きに設置する場合も，せん断補強効果および荷重再配分効果，内圧効果を発揮し地盤沈下抑制効果を発揮する．

さらに，上向きに設置する場合も，パイルが長くなるほどその地盤沈下抑制効果が高くなる．



(a) 地表面沈下曲線



(b) 地表面沈下抑制率

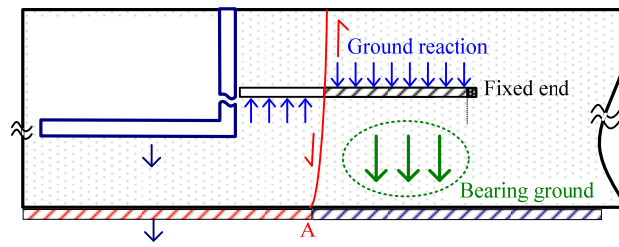
Fig. 4-40 上向きに設置する場合長さが地表面沈下抑制効果に及ぼす影響 ($\alpha = 30^\circ$)

4.6 まとめ

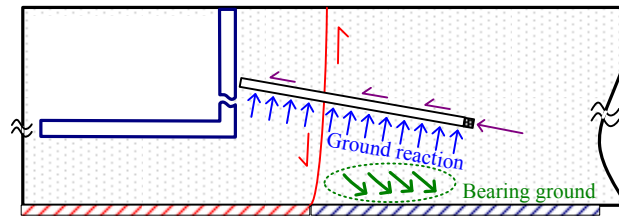
本研究では、模型実験でのサイドパイルの地盤沈下抑制効果について検討した後、パイルを上向きおよび下向きに設置する場合、設置角度が地表面沈下抑制効果に及ぼす影響について検討した。サイドパイルのようにパイルを水平に設置する場合、およびパイルをそれぞれ異なる方向・角度で設置した場合、パイルが地表面沈下抑制効果を発揮するメカニズムは、Fig. 4-41 に示すように考えられる。パイル周辺に示す矢印は、パイルが受ける地盤反力の状況を示し、点線に囲まれた領域内に示す矢印は、パイル下部地盤が受ける力の方向を示す。

パイルがすべり線を交差すると地表面沈下抑制効果が得られる。さらに、パイルはせん断補強効果および荷重分散効果を発揮して地表面沈下抑制効果を発揮する。ただし、各効果が全体的な効果で占める割合、および荷重分散効果を得られるメカニズムは、設置方向および角度によって異なる。

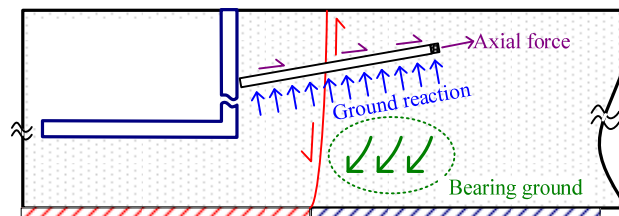
パイルは、設置方向および設置角度にかかわらず、すべり線を通ると地盤に生じるすべり線を遮断し、大きいひずみが地表面まで到達するのを防ぐことができる。



(a) 水平&下向き (サイドパイル&小角度下向き)



(b) 下向き (大角度下向き)



(c) 上向き

Fig. 4-41 パイルの補強メカニズム (模型実験)

さらに、パイルを水平もしくは上向きに設置する場合は、内圧効果を発揮し、覆工および地盤の変位が抑制できる。

水平あるいは小角度で下向きに設置する場合、パイルは Fig. 4-41(a)に示すように一種のはりを形成し、曲げ抵抗により覆工の沈下を抑制する。さらに、覆工および降下床上部地盤に作用する荷重は、梁により覆工以遠領域に分担され、覆工のさらなる変位が抑制される。この時、パイル下部の支持地盤はパイルにより鉛直下方向に押さえられる挙動を示す。

設置角度が大きい場合 (下向き)、パイルは Fig. 4-41(b)に示すように、地盤により軸方向の支持力を受け、軸力を発揮し下部地盤により支えられるような挙動を示す。覆工の荷重はパイルの軸力によって、健全な地盤に伝わり、覆工のさらなる沈下が抑制される。この際、支持地盤はパイルにより覆工以遠方向に押しつけられるような挙動をする。

パイルを上向きに設置する場合は Fig. 4-41(c)に示すように、パイルは引張力を発揮し、覆工を吊るすような機能を発揮し覆工の沈下を防ぎ、その荷重を健全な地盤に分担させる。この際、支持地盤はパイルにより覆工方向に押され、これにより覆工付近の地盤がパイルにより拘束され、地盤のせん断強度が高くなり、水平および下向きより大きい地盤沈下抑制効果が発揮できると考えられる。

以上に加わり、パイルを水平もしくは上向きに設置する場合、パイルは内圧効果を発揮し、地盤沈下抑制効果を発揮する。

第 5 章 トンネルの掘削過程およびとも下がり現象の再現

5.1 概説

第 3, 4 章では、L字型の断面を持つ覆工模型でトンネルの脚部をモデル化し、三次元降下床模型実験および模型実験を対象とする数値解析を行い、サイドパイルの地盤沈下抑制効果について検討した。しかしながら、実現場での地盤およびトンネルの応力状態は模型実験と大きく異なるため、サイドパイル工の設計基準の提案にあたり、模型実験結果のみでサイドパイル工の効果およびそのメカニズムを評価するのは不十分であると考えられる。そこで、第 5, 6 章では実際の施工現場を対象とし、トンネル掘削過程およびとも下がり現象に対してシミュレーションを行い、とも下がり現象の発生原因について検討する。続いて、とも下がり発生時サイドパイル工の地盤沈下抑制効果について議論する。

5.2 模型実験を対象とする数値解析の概要

5.2.1 解析領域とメッシュ

本研究では、Ye et. al⁴²⁾により開発された弾塑性有限要素解析コード DBLEAVES を用いて 2 次元弾塑性有限要素解析を行った。ここでは、第 2 章で紹介した牛鍵トンネル⁵⁾を検討の対象とする。

有限要素法などの数値解析を行う場合、一般に設定される解析領域は、「地盤は無限に広がっていると考え、外側境界の影響を取り除くために解析領域は十分大きくとる。」という思想のもと、下方領域については日本道路公団⁴⁸⁾では 3~4D、鉄道建設・運輸施設整備支援機構⁴⁹⁾では 2~3 D のように設定されている。側方領域については、日本道路公団では 4~5 D のように設定されている。以上を踏まえて本研究では、下方領域を 4 D、側方領域を 5.5 D とした。Fig. 5-1 に解析領域および境界条件を示す。

Fig. 5-2 に解析メッシュに境界条件を合わせて示す。本解析で領域分割は、初期状態 10556 要素、上半掘削過程で 10166 要素、下半掘削過程で 9736 要素である。節点はいずれも 10757 個である。

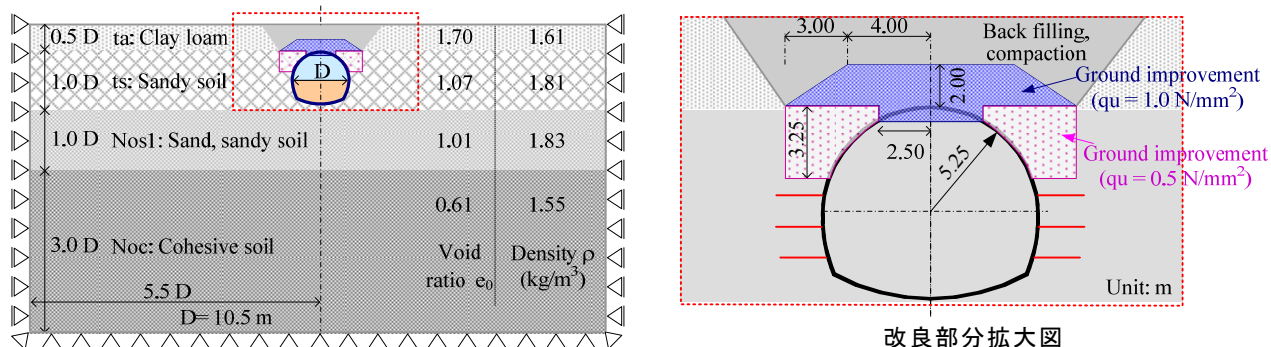
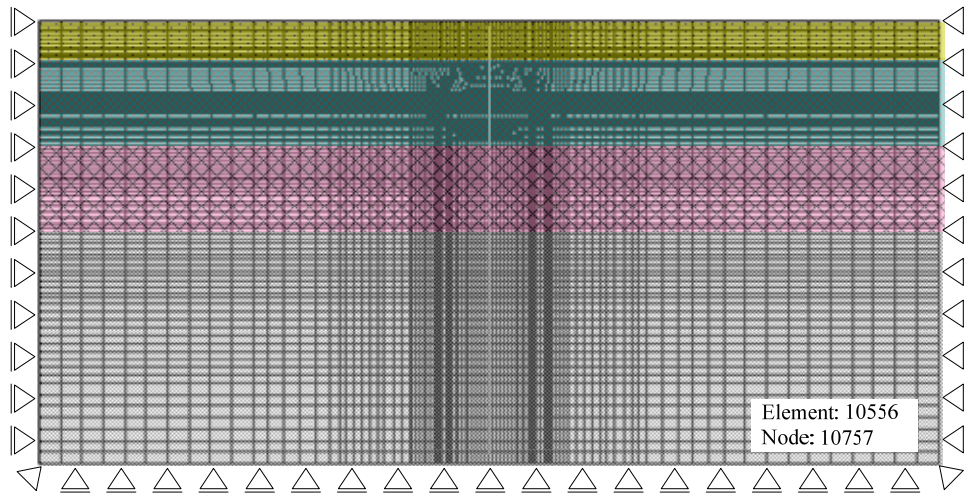
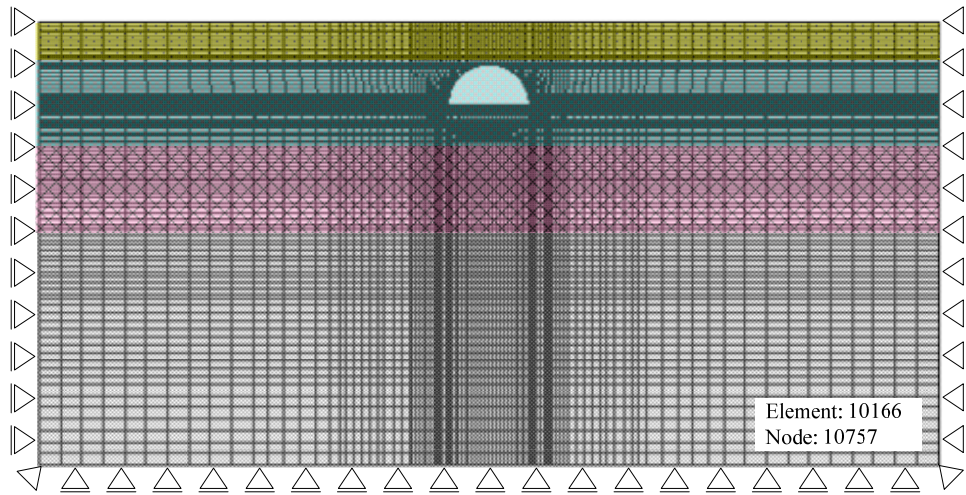


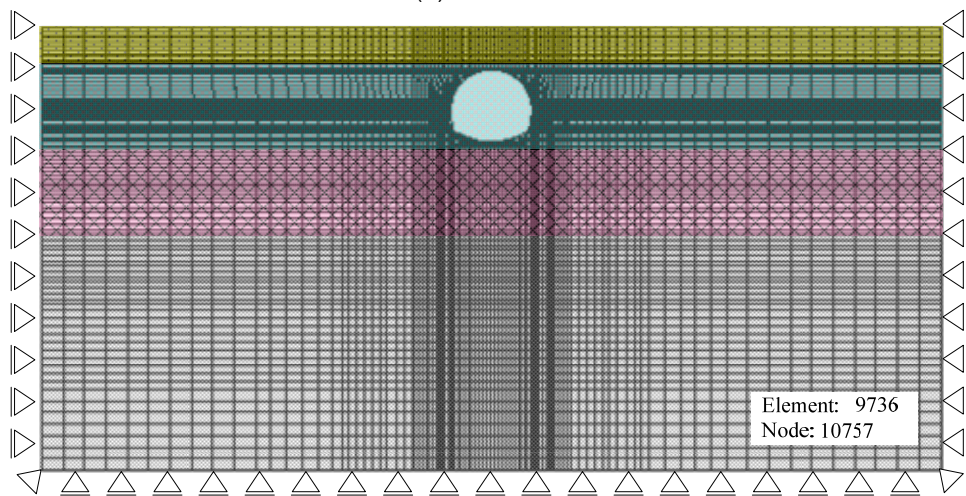
Fig. 5-1 解析領域および境界条件



(a) 掘削前



(b) 上半掘削



(c) 下半掘削

Fig. 5-2 解析メッシュ

Table 5-1 地盤材料および材料定数

種類	ta	ts	Nos1	Noc	埋戻し 圧密
定数					
塑性指数	40	40	8.7	8.7	5
密度 (10 ³ kg/m ³)	1.609	1.805	1.832	1.550	1.609
間隙比 e ₀	1.704	1.071	1.012	0.613	0.852
破壊時主応力比 M _f	2.550	2.550	3.888	3.888	4.668
ポアソン比 ν ¹⁰⁾	0.360	0.360	0.290	0.290	0.261
静止土圧係数 k ₀	0.562	0.562	0.409	0.409	0.353
β (stress-dilatancy) ⁴³⁾	1.5	2.0	2.0	1.5	1.5
a (ANN) parameter ⁴³⁾	500	500	500	500	500
圧縮指数 λ ⁴³⁾	0.137	0.070	0.070	0.082	0.094
膨潤指数 κ ⁴³⁾	0.030	0.005	0.005	0.018	0.021
OCR	3	3	3	3	3

* λ, κ は参考文献 43)を参考とし, 砂質土は豊浦硅砂, 粘性土は藤森粘土の値を引用した.

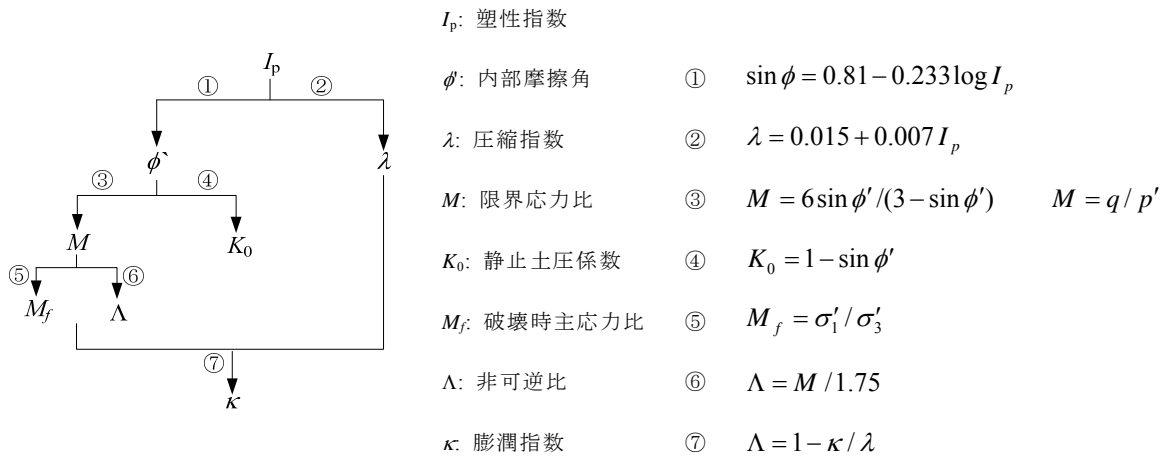


Fig. 5-3 パラメータ決定フロー (Iizuka & Ohta の方法⁴⁴⁾に準拠)

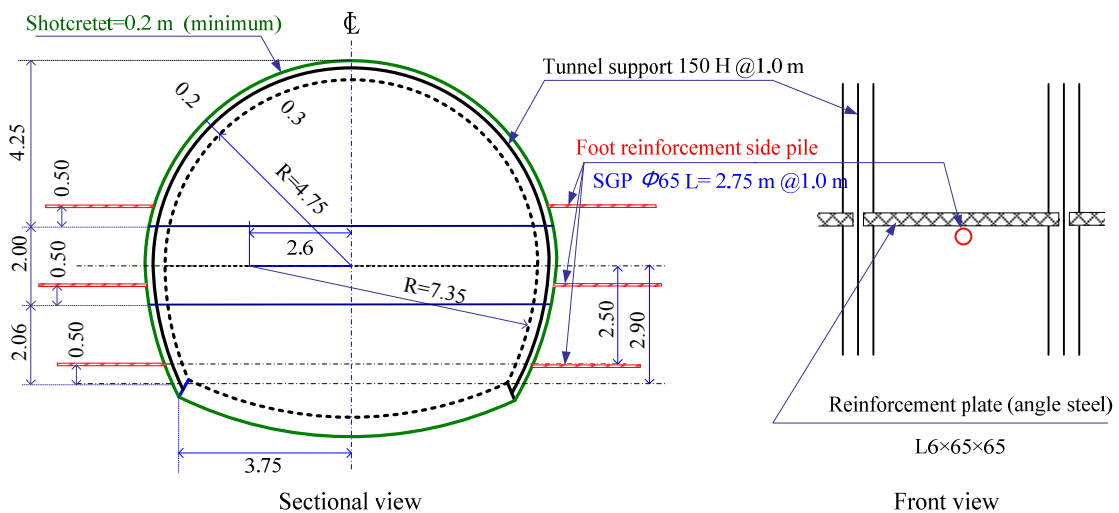


Fig. 5-4 サイドパイル工の適用例(牛鍵トンネル例)⁵⁾に加筆修正

5.2.2 地山のモデル化

ここでも、模型実験を対象とする数値解析と同様、Nakai & Hinokio⁴³⁾により開発された subloading t_{ij} model を用いて地盤の力学特性をモデル化した。

Table 5-1 に、本解析で用いた各地層の地盤定数を示す。現場での試験データは密度と間隙比のみである。破壊時の主応力比 M_f 、ポアソン比 ν は、土被り部分およびトンネル左右部分地盤は $I_p = 40$ 、トンネル下部地盤は $I_p = 8$ 、地盤改良後埋戻し部分地盤は $I_p = 5$ と仮定した上、Fig. 5-3 に示す Iizuka & Ohta の方法⁴⁴⁾に準拠し決定した。その他の土質パラメータについては参考文献⁴³⁾の値を準用した。

5.2.3 サイドパイルのモデル化

牛鍵トンネルでは Fig. 2-3 に示したように、とも下がり現象が計測され、さらにその対策として全線 2,070 m の内の 90 %以上の区間でサイドパイル工が採用された。サイドパイルの諸元は、Fig. 5-4 に示す現場と同様に直径 $\phi = 65$ mm、長さ $L = 2.75$ m の鋼管とし、1 m 間隔で上半 2 本、下半 4 本で、計 6 本打設している^{4), 5)}。

第 2 章で説明したように、サイドパイル工は荷重の分散効果およびせん断変形の抑制効果以外に、引張耐力による内圧効果も期待されている。サイドパイルに生じる引張力はサイドパイルと地盤間の摩擦による起因する。地盤とサイドパイル間の摩擦力の大きさは、サイドパイルの表面積に大きく左右されると考えられる。ゆえに、サイドパイルのモデル化においては、曲げ剛性だけでなく、その体積による効果も正確に表現することが望ましい。

サイドパイルは、模型実験を対象とする数値解析と同じく、Zhang ら⁴⁶⁾の研究を参考とし、ビーム要素 (はり要素) の周囲にサイドパイルの曲げ剛性の 1 割を分配した弾性ソリッド要素 (Solid 要素) を配置したハイブリッド要素でモデル化した²⁴⁾。本解析で用いたビーム要素およびソリッド要素のヤング率は、各々 1.23×10^7 kN/m²、 6.65×10^6 kN/m² である。

5.2.4 改良体のモデル化

対象現場は Fig. 2-7 に示したように、土被り部分がローム層、トンネル左右部分地盤が砂質土層で、いずれも N 値が 10 以下の軟質層であり、さらに小土被りであった。そこで現場では、トンネル掘削前に Table 5-2^{4), 5)}に示すように浅層混合処理および事前混合処理など地山改良を行った後、NATM を用いてトンネル掘削を行った。

改良地盤は、弾性体としてモデル化した。ヤング率 E は圧縮強さ q_u より、式 5-1、5-2 を用いて計算した⁵⁸⁾。地山を改良する際、固化材の添加量は Table 5-2^{4), 5)}に示すように、改良による重さの増加量は 50 kg/m³ で、周辺地盤の単位体積密度約 1,800 kg/m³ に比べると、その重さは約 2.78 %しか増加していない。そこで、本解析では簡単のため、改良前後地盤の単位体積が変化しなく、地盤の強度のみ増加すると仮定する。

Table 5-2 地山改良スペック

工法	改良目標強度 (N/mm ²)	固化材添加量 (kg/m ³)
浅層混合処理	0.5	50 (粘性土)
		90 (砂質土)
事前混合処理	1.0	50 (山砂)

$$N = \frac{q_u \times 8}{100} \quad 5-1$$

$$E = 2800 \times N (\text{kN}/\text{m}^2) \quad 5-2$$

ここで E : 地盤のヤング率
 q_u : 地盤の圧縮強度

5.2.5 吹付けコンクリートおよび剛性支保工のモデル化

通常の二次元有限要素解析において、吹付けコンクリートは軸力および曲げ抵抗を考慮するビーム要素（はり要素）、または軸力のみを受け持つトラス要素（棒要素）でモデル化することが多い。本研究では、吹付けコンクリートのヤング率として、 $4 \times 10^6 \text{ kN}/\text{m}^2$ を用いた⁵⁰⁾。この値は、実際の一軸圧縮試験などから得られる弾性係数より小さいが、吹付けコンクリートの硬化過程での物性変化やクリープ変形などを考慮した特性値として、実務においては一般に広く用いられている。

一方、鋼製支保工は一般にH型鋼が用いられており、二次元および三次元解析のいずれにおいてもビーム要素でモデル化されている。剛性支保工のヤング率は、 $2.1 \times 10^8 \text{ kN}/\text{m}^2$ 用ある。

本解析では便宜上、吹付けコンクリートと鋼製支保工を一体化させて合成はり（弾性Beam）としてモデル化した。この際、式5-3、5-4を用いて合成はりの等価弾性係数および等価断面二次モーメントを求めた⁵⁰⁾。

$$\text{合成梁の等価弾性係数} \quad E_e = \frac{E_c \cdot A_c + E_s \cdot A_s}{A} \quad 5-3$$

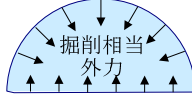
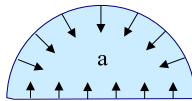
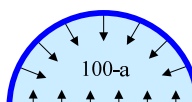
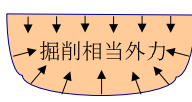
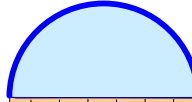
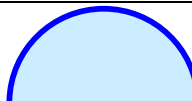
$$\text{合成梁の等価二次モーメント} \quad I_e = \frac{E_c \cdot I_c + E_s \cdot I_s}{E_e} \quad 5-4$$

ここで、 E_c と E_s はそれぞれ吹付けコンクリートおよび鋼製支保工の弾性係数、 A_c と A_s はそれぞれ吹付けコンクリートおよび鋼製支保工の断面積、 I_c と I_s はそれぞれ吹付けコンクリートおよび鋼製支保工の断面二次モーメントであり、Fig. 5-4に示す牛鍵トンネルの断面により計算した。また A は、断面の総面積であり、 $A = A_c + A_s$ により計算された。

5.3 トンネル掘削過程の表現

トンネルのような線形構造物は、二次元の平面ひずみ状態で表現することが可能である⁵⁰⁾。ただし、トンネル掘削解析においては、切羽近傍の三次元挙動を表現する必要がある。その対応策として、切羽の進行を考慮して掘削相当外力を徐々に開放することで、模擬的に三次元効果を表現する手法がとられる。具体的には、三次元解析によって得られるトンネル内空変位に二次元解析の変位を一致させるように掘削相当外力を調整するもので、変位特性曲線を用いる考え方が多い。本解析では、実現場での施工過程を表現するため、トンネル内空変位の現場計測値に解析結果を一致させるように、応力開放率 a 、 b を決定した。Table 5-3に本研究での解析手順を示す。

Table 5-3 解析ステージ

解析ステージ	施工過程	イメージ	工期 (days)
STAGE1	初期状態 (初期応力解析)		
STAGE2	上半掘削相当外力		
STAGE3	上半切羽到達 先行沈下		4
STAGE 4	上半支保工 吹付けコンクリート ↓ 上半掘削完了		22
STAGE5	下半掘削相当外力		
STAGE 6	下半切羽到達 先行沈下		2
STAGE 7	下半支保工 吹付けコンクリート ↓ トンネル掘削完了		10

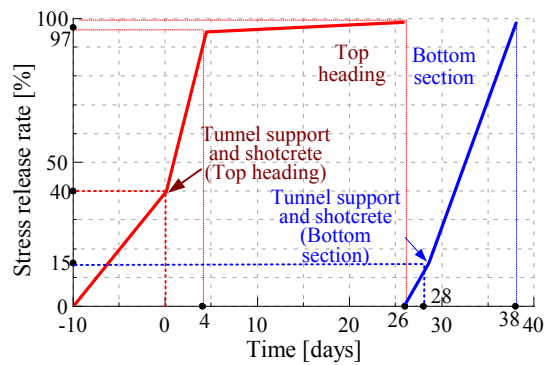


Fig. 5-5 工期～応力開放率関係 (仮定)

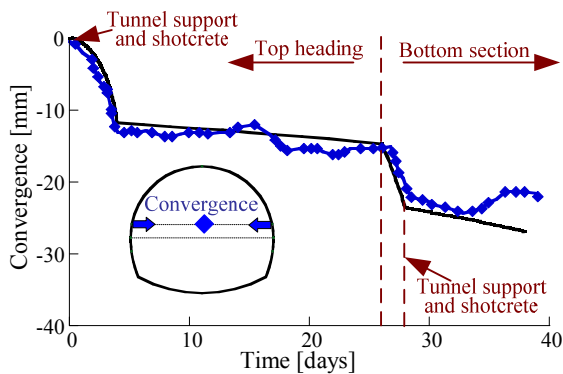


Fig. 5-6 内空変位の経時変化
(現場計測値と解析値)

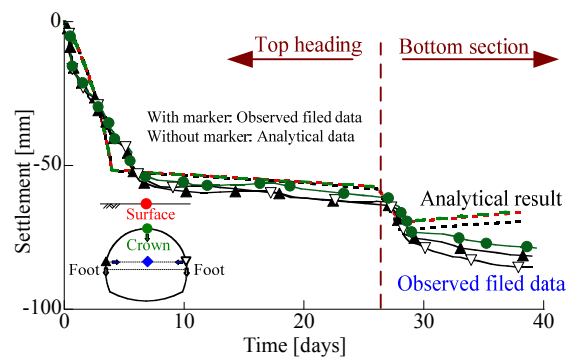


Fig. 5-7 各沈下量の経時変化
(現場計測値と解析値)

以上の手法およびパラメータを用いて、まず内空変位を實現場でのトンネル内空変位に一致するような上半応力開放率 a および下半応力解放率 b について検討した。その結果、応力開放率を $a=40\%$ 、 $b=15\%$ の場合、解析値が現場計測値に最も一致することが分かった。また、上半と下半の工期～応力開放率の関係 (工期の進行による応力開放率の変化) は、Fig. 5-5 に示すように仮定した。具体的には、上半掘削では 40% 開放させ、支保工と吹付けコンクリートを施工した後、22日後応力を 100% まで開放させる。さらに、下半掘削においては 15% 開放した後、支保工および吹付けコンクリート施工後に 100% まで開放させる。

Fig. 5-6 に、上記の仮定で計算した内空変位を現場実測値と併せて示す。図より、解析値は現場データとほぼ同じ値を示し、トンネル掘削過程を正確に表現することができたと考えられる。さらに、工期～応力開放率関係および地盤定数などの仮定が適切であったことが確認できる。

Fig. 5-7 に、地表面、天端、脚部沈下の経時変化の解析値と現場計測値を併せて示す。解析結果は、現場計測値とほぼ同じ値を示し、地盤定数、応力開放率および応力開放速度の設定は適切であると考えられる。さらに、同図に示す解析結果より地表面、トンネル脚部および天端の沈下量が同程度であることが確認でき、とも下がり現象で地表面・脚部・天端が同等に沈下する現象が再現できたものとする。以下では、とも下がり現象が発生した原因について調べる。

5.4 とも下がり現象の発生メカニズム

5.4.1 とも下がりの発生原因に関する検討

とも下がり現象は、対象区間(七戸～八戸)で共通として計測された現象であり³⁾。他の現場ではほとんど計測されていない。対象現場は、未固結の上、土被りが非常に薄かったため、トンネル掘削前に地盤改良を施した。地盤改良により、トンネル周辺地盤の剛性の向上、また改良部分と埋戻し部分地盤の重量の増加などが考え、本研究では Fig. 5-8 に示す 3 ケースでとも下がり現象が発生するか否かについて検討を行う。

ここでは、トンネルと地表面が同等に沈下した原因を調べるため、想定される各原因を極端に単純化させて検討を行う。Acomp_2 は、地盤改良を施さず、未固結地山に直接トンネルを掘削する場合を想定した。Acomp_1 は、地盤改良による、地盤改良および埋戻し・締固めによる単位体積密度の増加

を考慮せず、地盤の剛性のみ増加させた場合を想定する。Acomp_3 は地盤改良および埋戻し・締固めによる剛性の増加は考慮せず、密度の増加のみ考慮したケースである。ここでは、トンネル上部地盤の密度が既存の地盤の 1.2 倍と極端に大きくなった状況を想定した。

Fig. 5-8 に上に示す 3 ケースでのトンネルおよび地表面沈下量の経時変化を示す。図より、トンネル周辺地盤の剛性を高くしたケース Acomp_1 では、トンネル脚部、天端および地表面がほぼ同程度沈下する。これに対して、地盤改良を考慮していないケース Acomp_2 およびトンネル上部地盤の密度が高くなったケース Acomp_3 では、脚部が天端および地表面より大きく沈下する結果が見られ、とも下がり現象は現れない。これにより、地盤改良によるトンネル周辺地盤の剛性の増加は、トンネルと地表面の同等沈下を来す原因であると考えられる。

さらに、土被り部分の地盤が重くなる(Acomp_3)と沈下量が全体的に大きくなる結果が見られ、上部地盤の密度の増加により、沈下量は全体的に大きくなるが、地表面とトンネルが同等に沈下する原因ではないことが分かる。

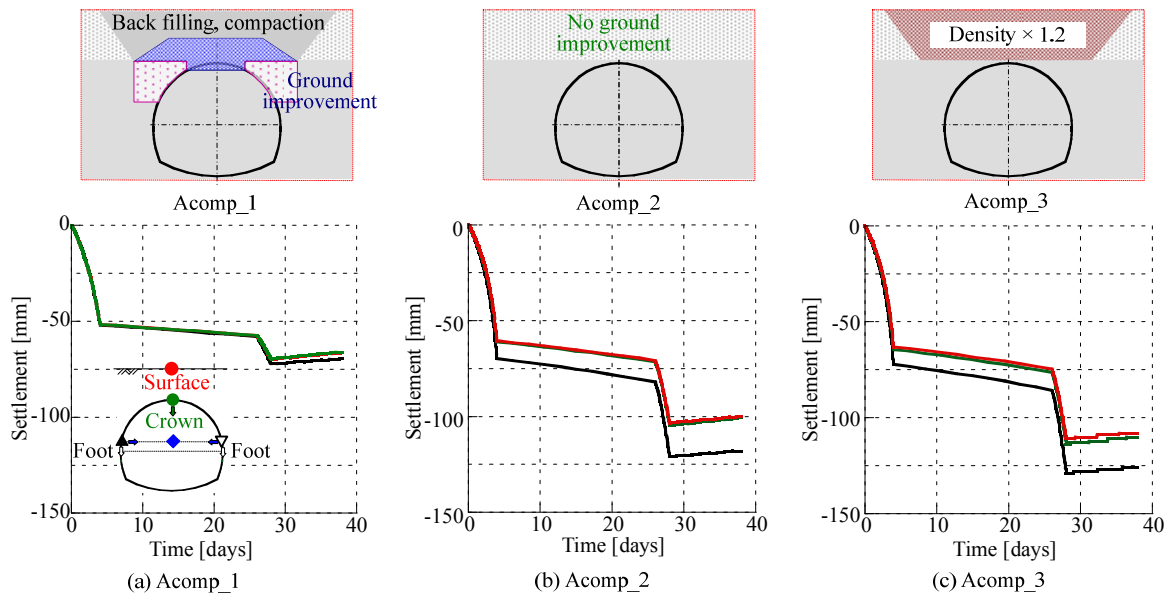
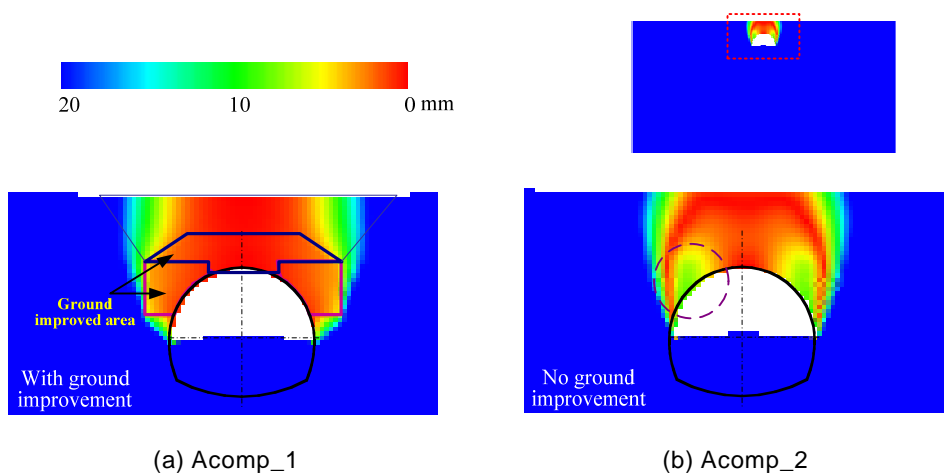


Fig. 5-8 トンネルと地表面同等沈下に関する検討



(a) Acomp_1

(b) Acomp_2

Fig. 5-9 地盤の鉛直変位と天端沈下量の差 (絶対値)

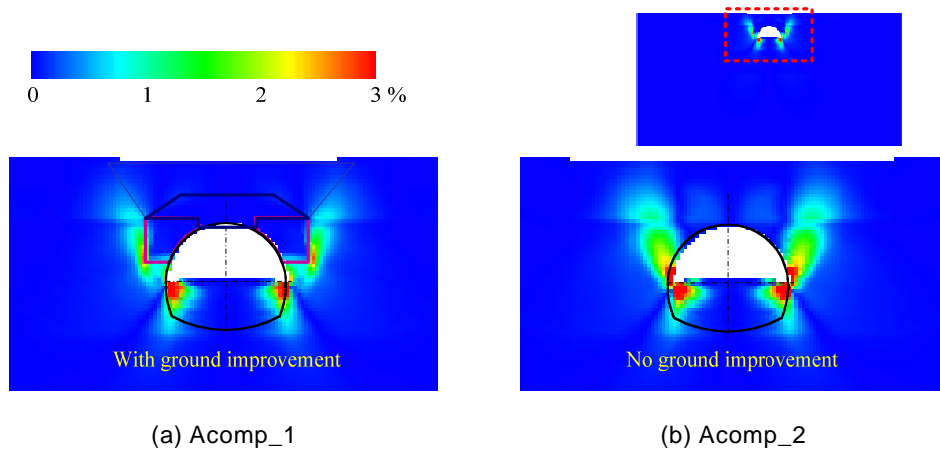


Fig. 5-10 地盤のせん断ひずみ分布(絶対値)

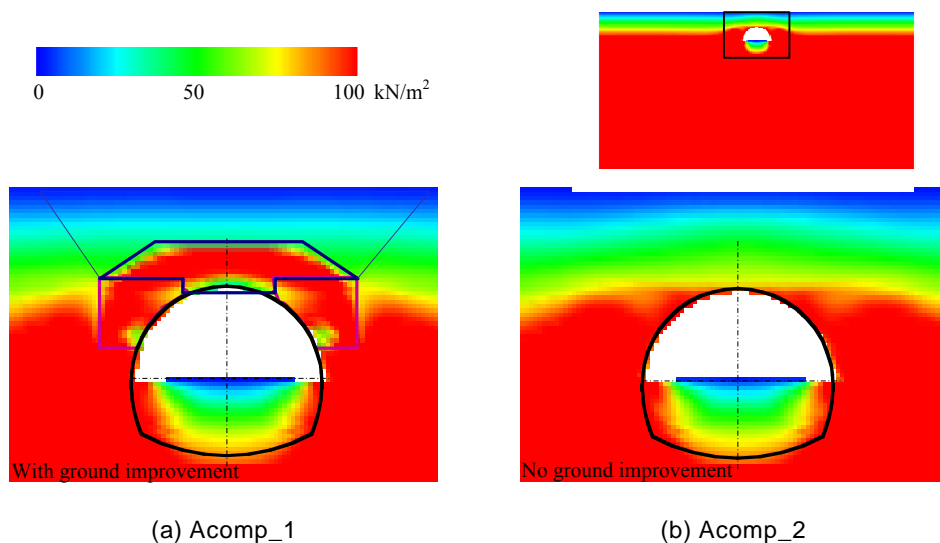


Fig. 5-11 地盤の平均応力分布

さらに、いずれのケースでも地表面とトンネル天端が同様に沈下する結果が見られる。第2章で説明したように、過去の研究により、未固結地山に小土被りトンネルを掘削する場合、地表面はトンネル天端と同程度沈下することが分かった。すなわち、とも下がり現象で地表面とトンネル天端が同程度沈下した原因は、対象現場が小土被りかつ未固結地盤であったことであると考えられる。

以下では、とも下がり現象のもう一つの特徴である、トンネル天端と脚部が同程度沈下した原因について議論する。ここでは、主に地盤改良による剛性の向上を考慮した Acomp_1 と地盤改良を実施していない Acomp_2 に対して、地盤およびトンネルの力学挙動について比較・検討する。

Fig. 5-9 に両ケースでのトンネル周辺地盤の変直変位と天端沈下量の差を示す。この値は、地盤の各節点の沈下量より天端沈下量を引き、絶対値を取ったものであり、値が 0 に近いほどその位置での鉛直変位がトンネル天端変位と一致することを示す。図より、Acomp_1 では、トンネル脚部・肩部地盤の沈下量が天端部分の沈下量と大きく異なる(点線○で囲んだ部分)。これに対して、Acomp_2 では、トンネル周辺の改良した部分およびその上部地盤の鉛直変位と天端沈下量との差がほぼ 0 であり、改良部分とトンネルが同程度沈下する。すなわち、改良部分とトンネルが一体となり、同時に沈下したと考えられる。

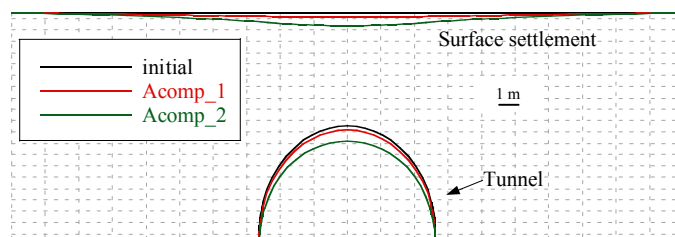


Fig. 5-12 トンネルの変形状

Fig. 5-10 に、トンネル周辺地盤に生じるせん断ひずみ分布を示す。図より、地盤改良を施さない場合、せん断ひずみは主に上半脚部から発生し、斜め上および斜め下方向に発達する。地盤改良を施した場合は、斜め下方向に発達するせん断ひずみ分布は変化がない。これに対して、脚部より斜め上方向に発達するせん断ひずみは、地盤改良を施すとその大きさが大幅に減少し、さらに改良地盤のコーナー部分から鉛直上方向に発達する。

Fig. 5-11 に示す地盤の平均主応力分布からは、地盤改良を施したケース Acomp_1 では、改良地盤に応力が集中し、改良された地盤に一応に同高度の地盤より大きい地盤応力が働くことが分かる。

5.4.2 とも下がり現象発生時地盤とトンネルの力学挙動

さらに、Fig. 5-12 に上半掘削完了時各ケースでのトンネルの変形状況を示す。ケース Acomp_2 では、トンネルが大きく変形する。これにより天端と脚部の沈下量が大きく異なる結果になると考えられる。これに対して地盤改良を施すことにより、トンネル覆工の変形は顕著に減少する。これは、トンネル覆工が周辺の改良体により拘束され、変形および変位とともに小さくなったことが原因である。これにより、トンネル脚部および天端沈下量の差が小さくなり、結果的にトンネル天端～脚部が同程度沈下する現象が発生したと考えられる。

5.5 とも下がり現象の発生メカニズムに関する考察

5.5.1 とも下がり現象に対する考え方

とも下がり現象とは、上で説明したようにトンネル天端と地表面、トンネル脚部がほぼ同程度沈下した現象である。本研究では、とも下がり現象の発生メカニズムの検討にあたり、トンネル天端と地表面が同等に沈下した原因、トンネル天端とトンネル脚部が同等に沈下した原因についてそれぞれ調べた後、これらの原因をまとめ、トンネルと地表面が同等に沈下したメカニズムについて考察する。

5.5.2 トンネル天端沈下量と地表面沈下量の関係

(1) Atkinson らの研究

Atkinson ら⁵¹⁾は、Fig. 5-13 に示すように、ゴムスリーブを用いた可縮性の 2 次元トンネル模型を用いたモデル実験を行い、最大地表面沈下量、天端沈下量、土被りの関係について検討した。その際、模型地盤は緩い砂、密な砂、カオリンで作製した。Fig. 5-13 に、Atkinson らの模型実験により得られた、トンネル内部応力の低減に伴う地表面沈下および天端沈下の変位を示す。図より、模型地盤が緩い砂地盤である場合、地表面沈下と天端沈下がほぼ同じ値を示す結果が見られる。

結果, Atkinson ら⁵¹⁾は, 最大地表面沈下量, 天端沈下量と土被りの関係を式 5-8 で与えている.

$$\delta_{s0} / \delta_{crown} = 1.0 - \alpha \cdot H / D$$

5-5

ここで, α の値は模型地盤により異なり, Fig. 5-13 に模型実験から得られた値を示す.

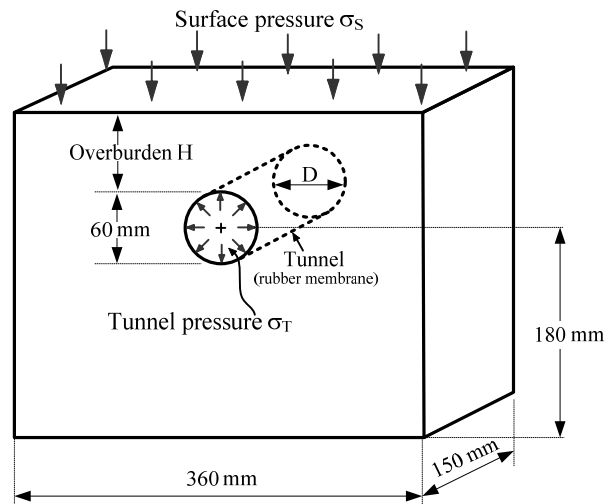


Fig. 5-13 Atkinson らが実施した模型実験⁵¹⁾

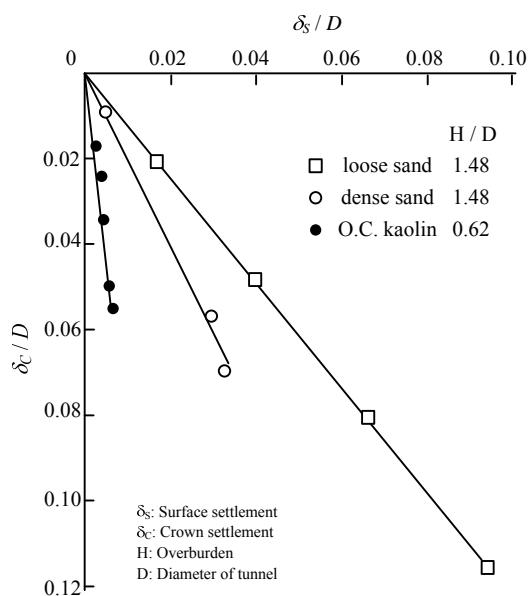
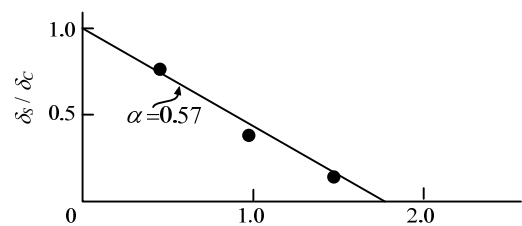
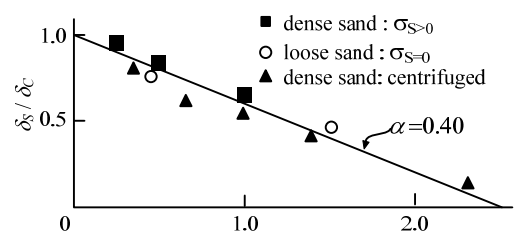


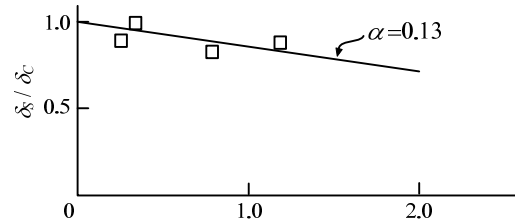
Fig. 5-14 トンネル内部応力の低減に伴う地表面沈下および天端沈下の変化 (Atkinson ら⁵¹⁾)



(a) Dense sand, $\sigma_s = 0$



(b) Sands



(c) Over consolidated Kaolin, $\sigma_s > 0$

Fig. 5-15 土被りによる δ_s / δ_c の変化 (Atkinson ら⁵¹⁾)

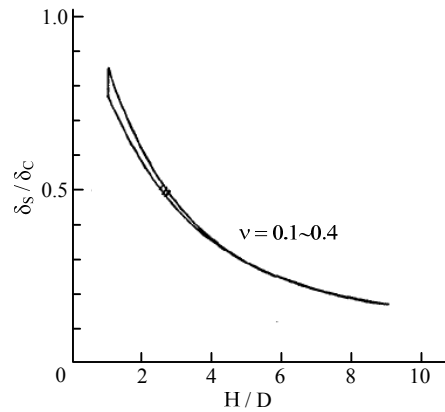


Fig. 5-16 土被りによる δ_s / δ_c に及ぼす影響 (木山ら⁵³⁾)

(2) 島田らの研究

島田ら⁵²⁾は、乾燥砂を用いてゆる詰め砂および密詰め地盤に対して、降下床実験により、土被り、トンネル沈下と地表面最大沈下量の関係について検討を行った。その結果、

ゆる詰め砂に対して、

$$\delta_{s0} = 1.6 \cdot \delta_{crown} \cdot e^{-0.24(H/D)} \quad 5-6$$

密詰め砂に対して

$$\delta_{s0} = 1.8 \cdot \delta_{crown} \cdot e^{-0.42(H/D)} \quad 5-7$$

を与えている。

(3) 木山らの研究

木山ら⁵³⁾は、Mindlin⁵⁴⁾の応力解析手法に習って、 δ_s / δ_c を二次元弾性論によって誘導している。結果、トンネル周辺地山の初期応力状態が水平方向変位拘束状態の場合、土被り比 H/D および地表面と天端の沈下比 δ_s / δ_c は、Fig. 5-14 に示すような関係を示すと報告している。図より、土被りが小さくなるほど、地表面と天端の沈下比 δ_s / δ_c は 1 に近づき、土被り H が $1D$ の場合 δ_s / δ_c はほぼ 1 を示す。

(4) 足立らの研究

足立ら^{12),13)}は、砂質地山に小土被りトンネルを掘削する場合、土被りと地表面沈下量、天端沈下量の関係を、FEM 解析を通じて検討した。解析モデルとしては、弾性対要素モデル、関連および非関連流動則に基づいた弾-塑性体要素モデル、No-Tension モデル、およびジョイント要素モデルがある。同研究で確認された土被りが、地表面の最大沈下量 δ_{s0} とトンネル天端の変位量 δ_{crown} の比に及ぼす影響を以下に示す。

- ① $H=1D$ (H は土被り、 D はトンネル幅である) と浅い場合は、グラウンドアーチの形成が十分で

なく、地表面沈下は直接的にトンネル天端の沈下により影響される。トンネル掘削過程の進行とともに、 $\delta_{s0}/\delta_{crown}$ は次第に 1 に近づく。

- ② $H=4D$ と深くなると、グラウンドアーチの形成によって、トンネル天端の沈下は直接的には地表面に影響を与えない。即ち、 $\delta_{s0}/\delta_{crown}$ はトンネル掘削の進行により変化しない。

いずれの式からも、最大地表面沈下量と天端沈下量の比 $\delta_{s0}/\delta_{crown}$ は、土被り H に大きく関連することが分かる。さらに、土被り H が小さくなるほど $\delta_{s0}/\delta_{crown}$ は次第に 1 に近づく。

上述の種々の研究より、低土被りトンネル掘削時は、グラウンドアーチが不十分であるため、地表面沈下はトンネル天端沈下に直接影響され、ほぼ同程度沈下するという傾向が報告されている。

5.5.3 トンネル天端沈下量と脚部沈下量の関係

トンネル天端沈下量と脚部沈下量の相対関係は、トンネル覆工の変形形状により大きく変化すると考えられる。

5.4 節に示す解析結果により、地盤改良を考慮したケースでは、トンネルの変形が周辺地盤により拘束され、抑制されたことが分かる。本解析の対象現場では、周辺地山が非常に軟弱であったため、トンネルを掘削する前に地盤改良を行った。地盤改良を行うことにより、トンネルおよび地表面沈下を大幅に抑制することができたが、一方、トンネル周辺地盤の剛性を高めることにより、トンネルの変形が抑制され、結果としてトンネル天端と脚部が同程度沈下する現象が現れたと考えられる。

さらに解析結果により、地盤改良によるトンネル上部地盤に対する埋め戻しおよび締固めにより、土被り部分の地山の強度が増加し、これも天端と地表面がほぼ同程度沈下した一因であると考えられる。

5.6 まとめ

本章では、未固結地山に小土被りトンネルを掘削する現場を対象とし、トンネルの掘削過程およびとも下がり現象を再現することができた。続いて、種々の施工条件での地盤およびトンネルの力学挙動に対する比較検討により、とも下がり現象の発生原因を特定することができた。

結果により、とも下がり現象でトンネル脚部と天端が同程度沈下する現象は、トンネルが周辺地盤と一体化され、ともに沈下するため生じると考えられる。地盤改良を行うことにより、トンネルおよび地表面沈下を大幅に抑制することができた。一方、トンネル周辺地盤の剛性を高めることにより、トンネルの変形が抑制され、結果としてトンネル天端と脚部が同程度沈下する現象が現れた。

また、過去の研究により、未固結地盤に小土被りトンネルを掘削する場合、トンネル天端と地表面が同程度沈下する現象が現れることが分かっている。

以上をまとめると、とも下がり現象でトンネルと地盤が同程度沈下する現象が発生した原因は、周辺地山の改良によるトンネルと周辺地盤の一体化、および小土被りにあると考えられる。

しかしながら、上に示すとも下がり現象の発生原因は、本研究で対象とした地盤改良を併用した場合に発生した場合のみに対するメカニズムであり、他現場で計測された同現象については更なる検討を行う必要がある。

第6章 実トンネルでのサイドパイル工の効果の検証

6.1 概説

第5章では、2次元有限要素解析により実トンネルの掘削過程およびとも下がり現象をシミュレートすることができた。本章では、まずとも下がり発生時、サイドパイルのトンネルおよび地盤沈下抑制効果について検討を行い、そのメカニズムについて検討を行う。さらに、地盤改良と併用しなく、サイドパイル工を単独に使用する場合、サイドパイル工が地盤とトンネルの沈下に及ぼす影響について検討する。その後、異なる施工条件でのサイドパイルの地盤沈下抑制効果を比較し、サイドパイルが地盤沈下抑制効果を発揮するメカニズムについてまとめる。

6.2 とも下がり発生時サイドパイル工の地盤沈下抑制効果

6.2.1 サイドパイルの挿入効果

(1) 地盤の挙動

Fig. 6-1 に、サイドパイルを設置しない場合と長さ 2.75 m のサイドパイルを設置した場合の沈下量の経時変化を示す。図より、サイドパイルを設置することにより、トンネル天端・脚部および地表面沈下がいずれも約 20 %程度減少する。各施工段階での効果は、上半掘削完了 (STAGE 4) で約 15 %、下半切羽開始から下半支保工設置前まで (STAGE 6) で約 4 %、下半支保工設置後から掘削完了まで (STAGE 7) で約 1 %であり、STAGE 4, 6 でその効果が顕著に現われる。STAGE 4 および STAGE 6 は、いずれもまだ上半のみにサイドパイルを設置した状態であり、下半に設置した 4 本のサイドパイルは沈下抑制に寄与していないことが考えられる。

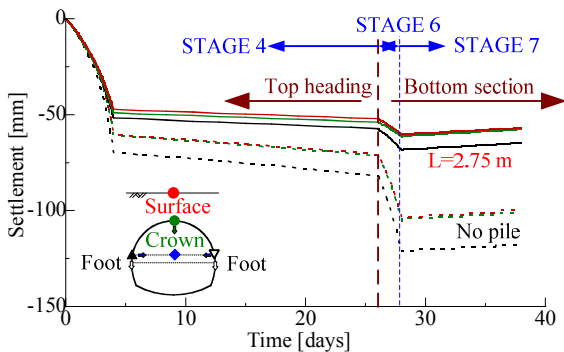


Fig. 6-1 サイドパイルが各沈下量の経時変化に及ぼす影響

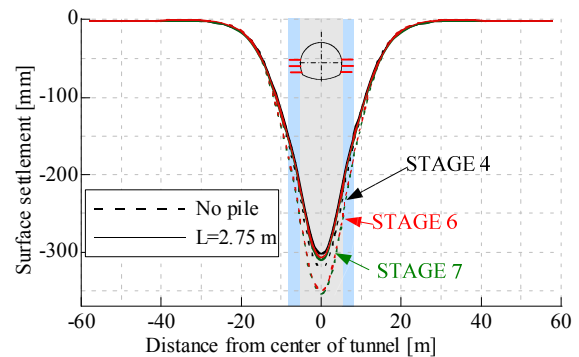


Fig. 6-2 サイドパイルが地表面沈下形状に及ぼす影響

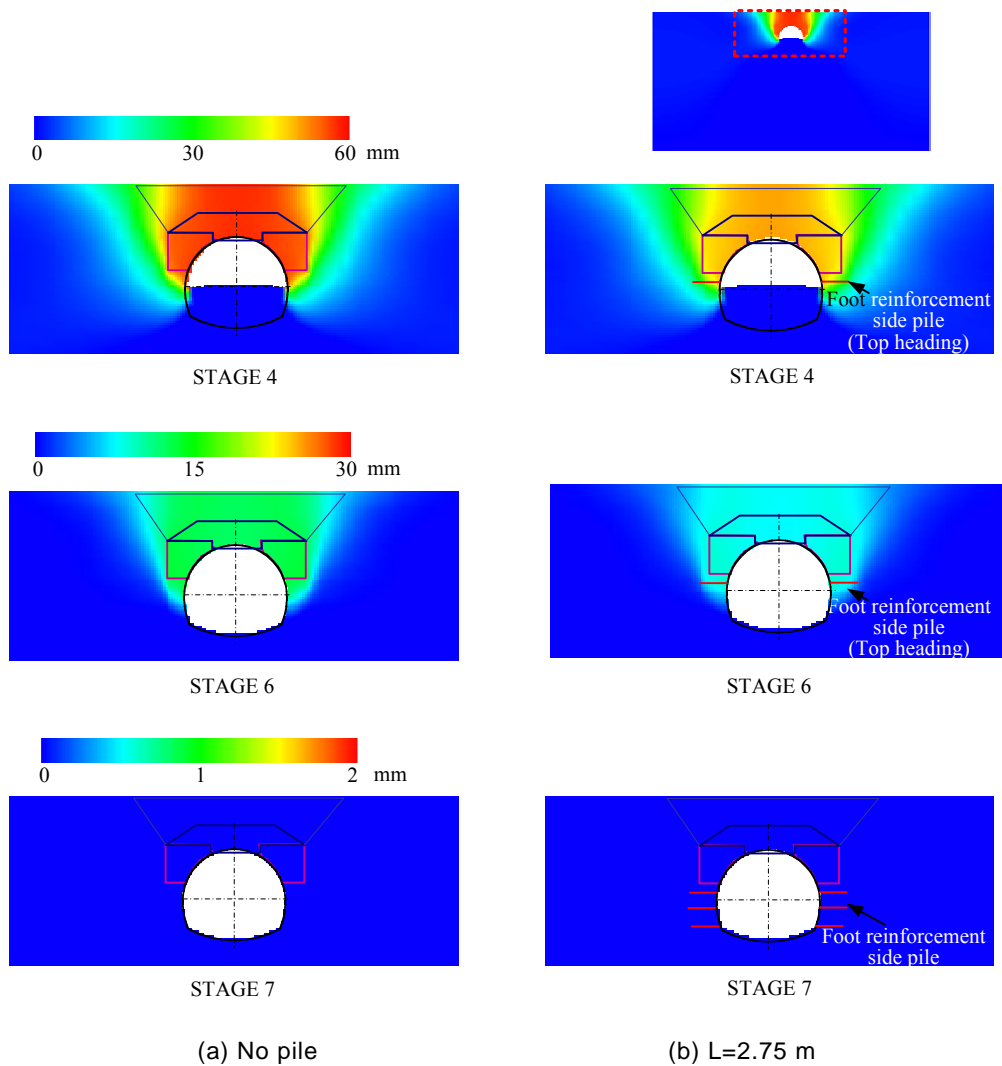


Fig. 6-3 サイドパイプが地盤の鉛直変位分布に及ぼす影響（改良あり）

さらに、サイドパイプを設置したケースでもトンネルおよび地表面が同程度沈下しており、沈下量は全体的に大きく抑制されているが、サイドパイプの設置によりとも下がり現象は解消されない。

Fig. 6-2 に、サイドパイプ有無の両ケースでの各施工段階での地表面沈下形状を示す。図より、いずれのケースでも、施工過程の進行により地表面沈下が大きくなり、その大部分の沈下は下半支保工設置前の STAGE 6 までで発生する。さらに、いずれの施工段階での地表面沈下量も、サイドパイプを設置することによりその沈下が小さくなる結果が見られる。また、同図に示す沈下量は、Fig. 6-1 より大きい値を示すが、これは同図の値は上半支保工設置前の先行沈下を含めているからである。

Fig. 6-3 に、サイドパイプ有無の両ケースでの各施工段階での鉛直変位分布を示す。コンター図は、前施工段階からの変化量を示す。即ち、STAGE 4 は上半支保工設置を設置後から上半掘削完了時まで生じた鉛直変位量を示す。STAGE 6 は、上半掘削完了時から下半支保工設置時まで生じた鉛直変位量であり、STAGE 7 は、下半支保工設置後からトンネル掘削完了時まで生じた鉛直変位量である。

図より、サイドパイプを設置しない場合 STAGE 4 施工段階では、トンネル周辺の改良部分がトンネルと一体となり、大きく沈下する。これに対して、サイドパイプを設置したケースでは、トンネル周辺および上部地盤の鉛直変位が大きく減少する結果が見られる。さらに、施工段階 STAGE 6 でも、STAGE 4 と同じ傾向が見られる。

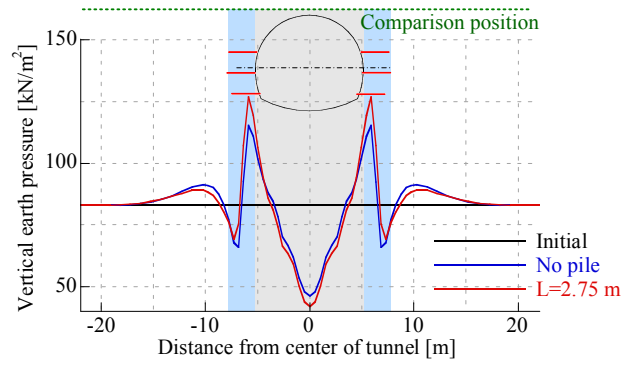


Fig. 6-4 サイドパイプが鉛直土圧分布に及ぼす影響
(トンネル掘削完了時～改良あり)

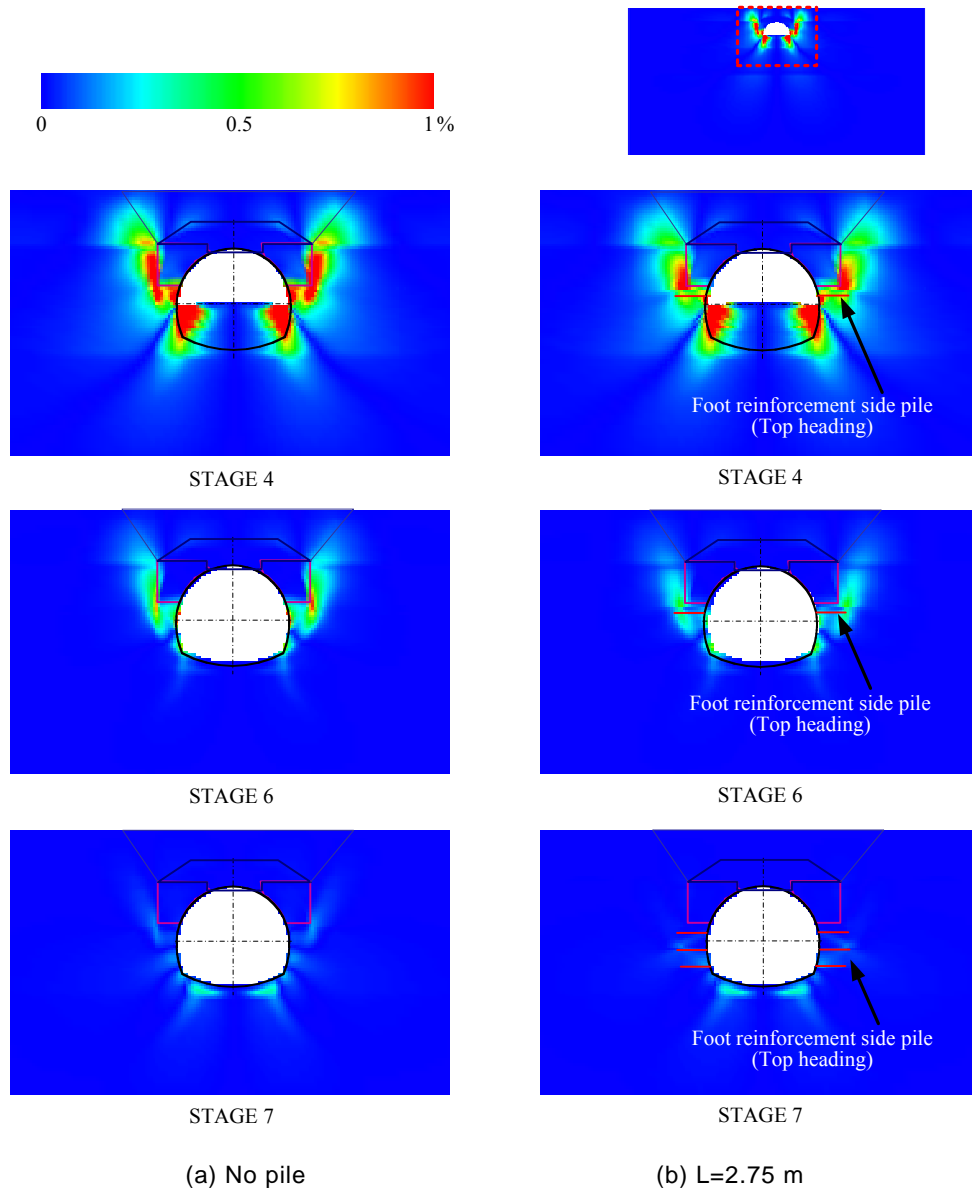


Fig. 6-5 サイドパイプが地盤のせん断ひずみ分布に及ぼす影響
(改良あり)

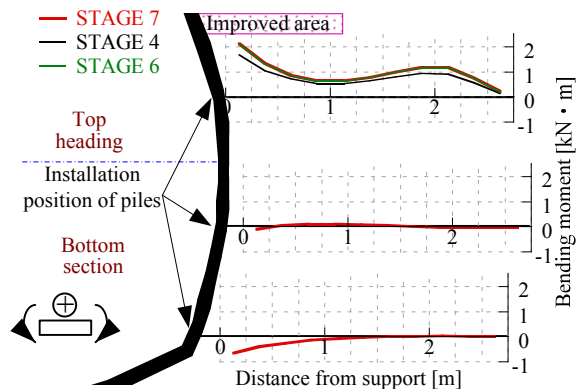


Fig. 6-6 サイドパイルに生じる曲げモーメント (L=2.75 m)

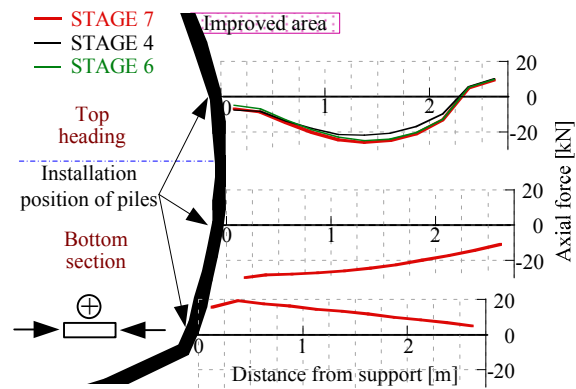


Fig. 6-7 サイドパイルに生じる軸力 (L=2.75 m)

上の両施工段階に比べ、下半支保工設置後の STAGE 7 では、サイドパイルを設置した場合および設置しない場合で、いずれもほぼ変位が生じない現象が見られる。すなわち、下半支保工設置後に生じる鉛直変位は、僅かなものであり、それに対する対策は必要でないと考えられる。したがって、下半支保工と同施工段階で設置する下半のサイドパイルについては、その有用性について検討する必要がある。

Fig. 6-4 に、トンネル掘削完了時のトンネル天端に沿った水平線上に作用する鉛直土圧分布を示す。図より、サイドパイルを設置することにより、トンネル上部地盤に作用する鉛直土圧が小さくなり、サイドパイル設置部分の上部地盤に作用する鉛直土圧は大きくなる現象が見られる。これは、サイドパイルを設置することにより、トンネルおよびトンネルの上部地盤による荷重が、トンネル周辺地盤に再配分されたことを示している。トンネル上部地盤に作用する鉛直土圧はトンネル周辺地盤に分散されて小さくなり、トンネルおよび上部地盤のさらなる沈下を防ぐ。これは、第 3, 4 章で説明した、模型実験およびその数値解析²⁴⁾で得られた荷重再配分効果と同じである。

Fig. 6-5 に、各施工段階でのせん断ひずみ分布を示す。ここでも、各値は前施工段階からの変化量で示す。上半支保工設置後から上半掘削完了までの STAGE 4、および上半掘削完了後から下半支保工設置前までの STAGE 6 に着目すると、パイルを設置しない場合、トンネル脚部および改良地盤のコーナー部分に大きいせん断ひずみが発生し、斜め上に地表面に向かって発達する。サイドパイルを設置することにより、改良地盤のコーナー部分に生じるせん断ひずみが大きく減少する。これは、改良部分のコーナーから発達したせん断ひずみが、サイドパイルにより遮断されたからである。下半支保工設置後の STAGE 7 でも、サイドパイルを設置しない場合は僅かながら改良体のコーナーからせん断ひずみが発生し、サイドパイルの設置により小さくなる結果が見られる。すなわち、サイドパイルはすべり線を交差することで補強効果を発揮し、地表面およびトンネルの沈下を抑制することができると考えられる。これも、第 3, 4 章で説明した模型実験及びその解析²⁴⁾と同じ傾向を示すため、模型実験および模型実験を対象とする数値解析から得られた結果と同じく、せん断補強効果と称する。

(2) パイルに作用する部材力

Fig. 6-6 に長さ 2.75 m のサイドパイルを設置する場合、各施工段階でのパイル全長に生じる曲げモーメント分布を示す。図より、上半部分に設置したサイドパイルは上部が引張られるような結果を示し、片持ち梁のような挙動をすることが分かる。さらに、トンネル掘削の進行に伴い、上半に設置し

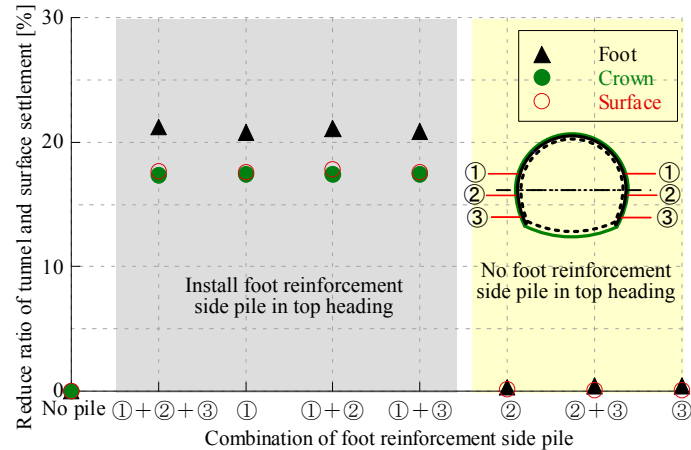


Fig. 6-8 施工パターンの影響 (改良あり)

たサイドパイルに生じる曲げモーメントは増加する傾向を示すが、その変化は僅かである。これに対して、下半に設置したサイドパイルには、僅かに下部が引張られるような曲げモーメントしか生じない。これは、下半支保工設置後からトンネル掘削完了時の施工段階では、トンネル周辺地盤に顕著な変位もしくは応力の変化が生じないためであると考えられる。以上から、下半に設置するサイドパイルは、トンネルおよび地表面に対する沈下抑制効果を発揮しないと考えられ、その必要性について検討する必要がある。

Fig. 6-7 に、長さ 2.75 m のサイドパイルを設置する場合、各ステージでのサイドパイルに作用する軸力を示す。図より、上半に設置するパイルが引張られるような挙動を示し、その値は僅かながらトンネル掘削に伴い大きくなる。これにより、サイドパイルは内圧を増加する効果も期待できると考えられる。下半に設置するサイドパイルは、上は引張り、下は圧縮されるような挙動を示す。図より、サイドパイルに生じる最大引張力は約 20 kN で、これによりサイドパイルには約 6×10^3 kPa の引張り応力が生じるが、これは鋼の引張り強さ 6×10^3 MPa を大きく下回る。

6.2.2 施工パターンの影響

本研究で検討対象とする建設現場では、上半に左右各 1 本、下半に左右各 2 本で、合計 6 本のサイドパイルを設置したが、必ずしも全てのパイルが有用であるとは限らず、各々の必要性について検討する必要がある。

Fig. 6-8 に、サイドパイルを 3 段全部設置した場合、パイルを上半もしくは下半だけに設置した場合など、パイル設置位置の組合せをパラメータとした計 7 ケースに対する検討結果を示す。縦軸は、トンネル掘削完了時、各ケースでサイドパイルを設置しないケースに対する各沈下量の減少率である。

図より、上半にサイドパイルを設置した場合は、下半の設置状況に関係なく、地表面およびトンネル沈下が大きく抑制される。さらに、各々の抑制効果はほぼ同じである。これに対して、下半のみにサイドパイルを設置した諸ケースでは、効果がほとんど見られない。以上により、本研究で実施した解析では下半に設置するサイドパイルは沈下抑制効果を発揮しないと判断できる。

これは、下半支保工設置後からトンネル掘削完了までの施工段階 STAGE 7 では、トンネルおよび周辺地盤の変位が小さいためであると考えられる。Fig. 6-1 に示したように、トンネル掘削によるトンネルおよび地盤の沈下はほとんど STAGE 6 までの施工段階で生じる。ゆえに、STAGE 6 後に設置したサイドパイルは、トンネルと地盤の沈下に影響を及ぼすことができない。

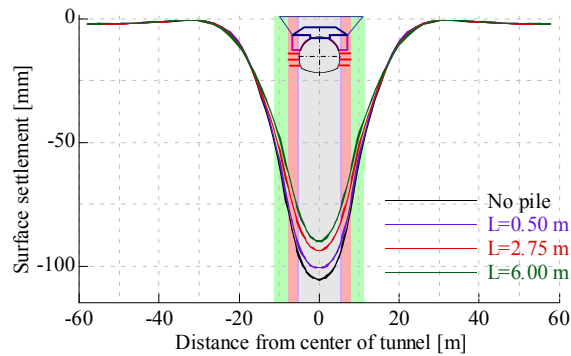


Fig. 6-9 サイドパイルの長さが地表面沈下形状に及ぼす影響（トンネル掘削完了後～改良あり）

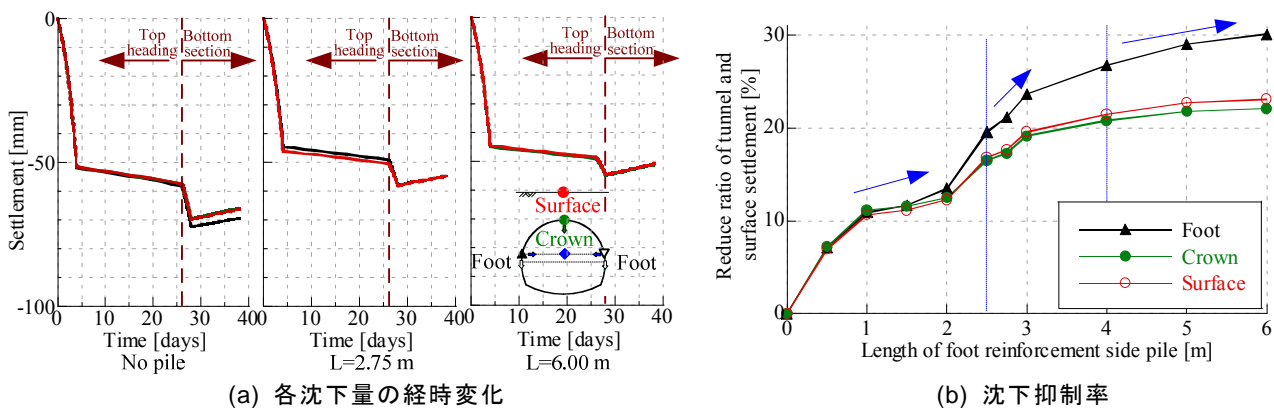


Fig. 6-10 サイドパイルの長さが地表面およびトンネル沈下抑制効果に及ぼす影響（改良あり）

6.2.3 とも下がり発生時サイドパイルの長さによる差異

ここでは、第5章で説明した牛鍵トンネルと同じく、トンネル掘削前に地盤改良を行い、さらに上半と下半に計6本のサイドパイルを設置したトンネルに対し、サイドパイルの長さを0.5 m～6 m間で変化させた場合、地盤およびサイドパイルの力学挙動の差異について検討する。

(1) 地盤の挙動

Fig. 6-9 に、異なる長さのサイドパイルを設置した各ケースでの、トンネル掘削完了時地表面沈下形状を示す。図より、サイドパイルが長くなるほど地表面沈下量が小さくなる結果が見られ、その地表面沈下抑制効果が高くなる。

Fig. 6-10(a)に、サイドパイルの長さが地表面とトンネルの沈下量の経時変化に及ぼす影響を示す。長さが6.00 mの場合は長さ2.75 mのケースより各沈下量が小さくなり、特に脚部沈下量がより大きく抑制される。これはサイドパイルはトンネル脚部に設置されるため、脚部沈下に最も効果があるためであると考えられる。Fig. 6-10(b)には、サイドパイルの長さが地表面とトンネルの沈下量の沈下抑制率に及ぼす影響を示す。沈下抑制率は、トンネル掘削完了時、各ケースでのサイドパイルを設置しないケースに対する沈下量の減少率で表す。同図より、サイドパイルの長さに関係なく、その設置により沈下抑制効果が得られる。さらに、長さがながくなるほどその効果が大きくなり、パイル長さが2.5 m以上になると、沈下抑制効果が急激に増加し、4 m以上になるとその増加率が小さくなる。

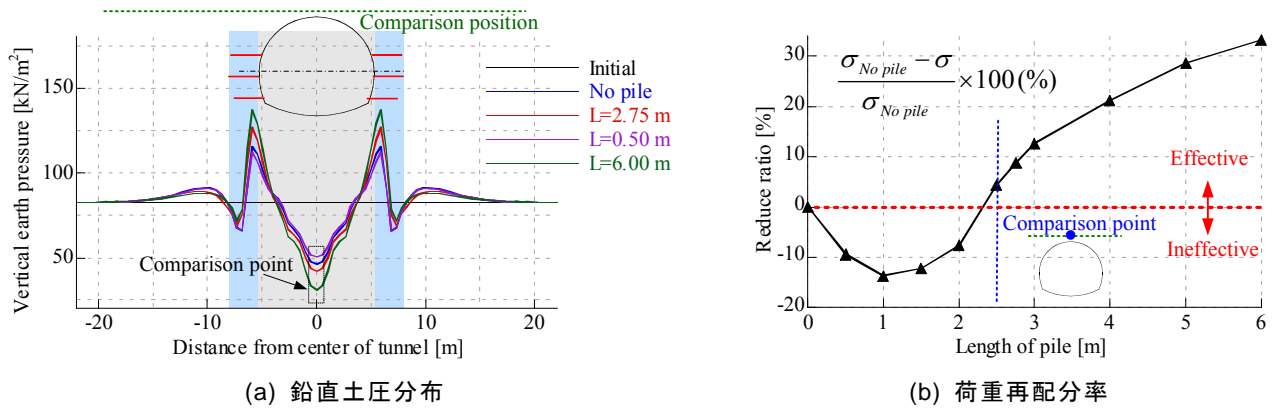


Fig. 6-11 サイドパイルの長さが荷重再配分効果に及ぼす影響（トンネル掘削完了時～改良あり）

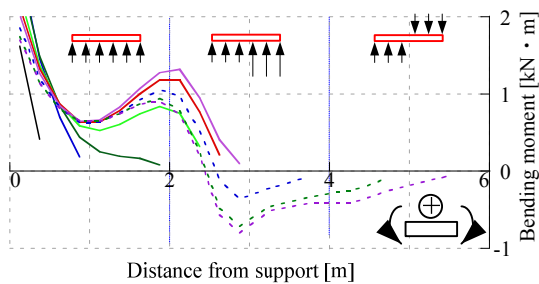


Fig. 6-12 サイドパイルの長さが曲げモーメント分布に及ぼす影響（改良あり）

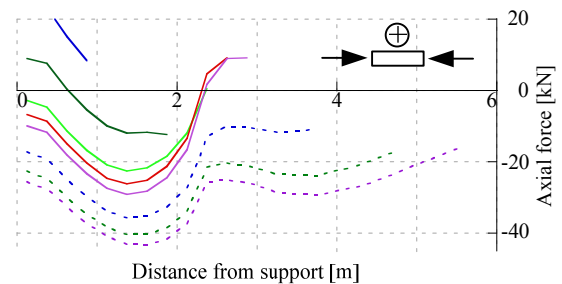


Fig. 6-13 サイドパイルの長さが軸力分布に及ぼす影響（改良あり）

Fig. 6-11(a) に、異なるサイドパイル長でのトンネル天端に沿った水平線上に作用する (Fig. 6-4 と同様) 位置での鉛直応力分布を示す。図より、 $L=2.75\text{ m}$ 、 $L=6.00\text{ m}$ のケースでは、サイドパイルを設置しないケース (No pile) に比べて、トンネル上部地盤に作用する鉛直土圧が減少する。しかしながら、 $L=0.50\text{ m}$ のケースでは、No pile のケースより大きくなる。量的にその傾向を把握するため、Fig. 6-11(b) 各長さでトンネル上部地盤の中央部分 (点線で囲んだ部分) に作用する鉛直土圧の減少率を併記する。鉛直土圧の減少率は、No pile に対して鉛直土圧がどれくらい減少したかを示し、正の符号は No pile に比べて鉛直土圧が減少したこと、すなわち、荷重分散効果が得られたことを意味する。図より、パイルが 2.5 m より長くなると荷重分散効果が得られ、トンネル上部地盤に作用する土圧が減少する。これは、サイドパイルが 2.5 m より長くなると Fig. 6-9 に示す沈下量の抑制効果が急激に良くなる原因であると考えられる。

(2) サイドパイルに作用する部材力

Fig. 6-12 に、トンネル掘削完了時、長さが異なる諸ケースでの上半に設置したサイドパイル全長に生じる曲げモーメント分布を示す。同図に、各長さでの曲げモーメント分布図から考えられるパイルに作用する力の状態を記す。図よりサイドパイルが 4 m より短い場合、サイドパイルは上部が引張られるような挙動を示す。サイドパイルが 4 m より長くなると、トンネル付近部分は、下部地盤により上向きに押され、上部が引張られるような挙動を示す。サイドパイル先端付近部分は、上部地盤に押され下部が引っ張られるような挙動を示す。さらに、サイドパイルに生じる曲げモーメントの最大値は、サイドパイルが長くなるほど大きくなるが、長さ 5 m と 6 m のケースでは顕著な差異が見られな

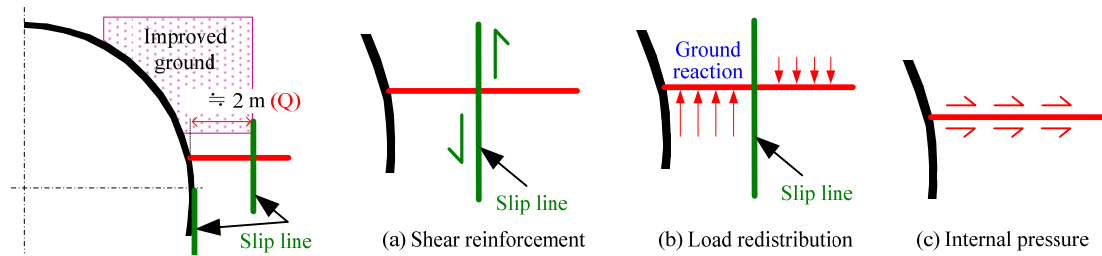


Fig. 6-14 地盤改良と併用時サイドパイルの沈下抑制メカニズム (改良あり)

い。これらの傾向は、Fig. 6-1 に示すパイルの長さが沈下抑制効果に及ぼす影響と同様の傾向を示す。

Fig. 6-13 に、トンネル掘削完了時、長さが異なる諸ケースでの上半に設置したサイドパイル全長に生じる軸力分布を示す。図より、サイドパイルが 1 m より長くなると、いずれのケースでもサイドパイルが引張られる挙動を示す。さらに、軸力の最大値はサイドパイルが長くなるほど大きくなる。以上から、サイドパイルの長さが 1 m より長くなると、内圧効果が得られる。

6.2.4 地盤改良と併用時サイドパイルの沈下抑制メカニズム

以上に示す結果により、サイドパイルはせん断補強効果、荷重再配分効果、内圧効果を発揮し、地盤とトンネルの沈下を防ぐことが可能である。さらに、いずれの施工状態でもサイドパイルの沈下抑制効果は、トンネル覆工からトンネル掘削により生じるすべり線までの距離と大きく関係する。解析結果により、トンネル上半掘削時、トンネル脚部周辺および改良体のコーナー周辺部分地盤に Fig. 6-14 に示すような 2 本のすべり線が生じると考えられる。ここでは、トンネル覆工から改良体コーナーから発達するすべり線までの距離を Q とし、各量の無次元化を測る。K トンネルにおいて、上半に設置するサイドパイルの端からすべり線までの距離 Q は約 2 m である。

サイドパイルの設置により、トンネルおよび地盤沈下抑制効果が得られ、長さが $2Q$ 以上になるとその効果は頭打ちになる。Fig. 6-14 に、以上の検討結果から推定できる、本施工状態でサイドパイルが地盤およびトンネルの沈下抑制効果のメカニズムを示す。

(1) せん断補強効果

サイドパイルは、改良体コーナーより発達するせん断ひずみを交差することにより、主要なせん断ひずみの発達を阻止し、地盤沈下を抑制する。しかしながら、脚部より発達するすべり線に対しては効果が得られない。

(2) 荷重再配分効果

サイドパイルが、トンネル覆工からすべり線までの距離 Q より長くなり、すべり線を交差すると、荷重再配分効果を発揮し、トンネルおよび上部地盤の荷重をトンネル周辺地盤に分散させ、トンネルと上部地盤のさらなる沈下を防ぐ。さらに、サイドパイルの長さが Q より短い場合は、荷重再配分効果を発揮しないだけでなく、トンネル上部地盤に作用する鉛直荷重が大きくなる。

(3) 内圧効果

サイドパイルはいずれの長さにおいても、内圧効果を発揮し、周辺地盤を補強する働きをする。これにより、トンネルと周辺地盤を一体化させ、トンネルと周辺地盤の沈下を抑制できると考えられる。

以上の結果は、第 3, 4 章で示した既往の模型実験および数値解析結果⁷⁾と同様の傾向を示す。これにより、既往の模型実験が妥当であったこと、本研究結果の信頼性が確認できる。また、とも下がり現象の発生か否かは、サイドパイルの有無により影響されないことが分かった。

6.3 サイドパイル工のみ使用時の地盤沈下抑制効果

6.3.1 サイドパイル工のみ使用時の挿入効果

(1) 地盤の挙動

Fig. 6-15 に、地盤改良と併用しなく、サイドパイル工のみ使用する場合、サイドパイルを設置しないケースと長さ 2.75 m のサイドパイルを設置したケースでの沈下量の経時変化を示す。図より、サイドパイルを設置することにより、トンネル天端・脚部および地表面沈下がいずれも約 43 %程度減少し、その中でも、脚部沈下が最も大きく抑制される結果が見られる。各施工段階での効果は、上半掘削完了 (STAGE 4) で約 30 %、下半切羽開始から下半支保工設置前まで (STAGE 6) で約 12 %、下半支保工設置後から掘削完了まで (STAGE 7) で約 1 %であり、STAGE 4, 6 でその効果が顕著に現われる。STAGE 4 および STAGE 6 は、いずれもまだ上半のみにサイドパイルを設置した状態であり、サイドパイル工のみ使用した場合も、下半に設置した 4 本のサイドパイルは沈下抑制に寄与していないと考えられる。さらに、サイドパイルのみを使用した場合、長さ 2.75 m のサイドパイルを設置することによりトンネルおよび地表面の沈下量が 43 %減少し、地盤改良と併用する場合の 20 %に比べて、2 倍以上の沈下抑制効果が見られる。

Fig. 6-16 に、サイドパイル工のみ使用する場合、サイドパイル有無の両ケースでの各施工段階での地表面沈下形状を示す。サイドパイル工のみ使用する場合も地盤改良工法と併用する場合と同じく、いずれのケースでも、施工過程の進行により地表面沈下が大きくなり、その大部分の沈下は下半支保工設置前の STAGE 6 までで発生する。さらに、いずれの施工段階での地表面沈下量も、サイドパイルを設置することによりその沈下が小さくなる結果が見られる。ここでも、沈下量は上半支保工設置前の先行沈下を含めているため、Fig. 6-15 より大きい値を示す。さらに、地盤改良を施した場合より、地表面が大きく沈下した現象が見られる。

Fig. 6-17 に、サイドパイル工のみ使用する場合、サイドパイル有無の両ケースでの各施工段階での鉛直変位分布を示す。ここでも、各値は前施工段階からの変化量を示す。図より、サイドパイルを設置しない場合、施工段階 STAGE 4 および STAGE 6 では、トンネルの掘削に伴いトンネル上部地盤が大きく沈下する。これに対して、サイドパイルを設置することにより、トンネル上部地盤の沈下が大きく減少し、結果として地表面沈下量が抑制されたと考えられる。

上の両施工段階に比べ、下半支保工設置後の STAGE 7 では、地盤改良工法と併用した場合と同じく、サイドパイルの有無にかかわらず、いずれのケースでも変位がほとんど生じない現象が見られる。すなわち、トンネル掘削前に地盤改良を施さない場合も、下半支保工設置後に生じる鉛直変位は僅かなものであり、それに対する対策は必要でないと考えられる。したがって、下半支保工と同施工段階で下半に設置するサイドパイルは、トンネルと地盤の沈下に対してほとんど抑制効果を発揮しないと考えられる。

Fig. 6-18 に、サイドパイル工のみ使用する場合、トンネル掘削完了時のトンネル天端に沿った水平線上に作用する鉛直土圧分布を示す。図より、サイドパイルを設置することにより、トンネル中心部の上部地盤に作用する鉛直土圧が小さくなり、サイドパイル設置部分の上部地盤に作用する鉛直土圧は大きくなる現象が見られる。これは、地盤改良工法と併用しない場合も、サイドパイルは荷重再配分効果を発揮し、トンネル上部地盤に作用する鉛直土圧をトンネル周辺地盤に分散させることにより、トンネルおよび上部地盤のさらなる沈下を防ぐ。これは、第 3, 4 章で説明した模型実験およびその数値解析、第 5 章の地盤改良工法と併用した場合と同じ結果を示し、荷重再配分効果と称する。

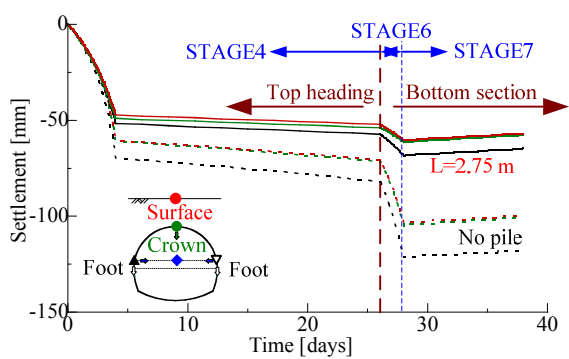


Fig. 6-15 サイドパイプが各沈下量の経時変化に及ぼす影響 (改良なし)

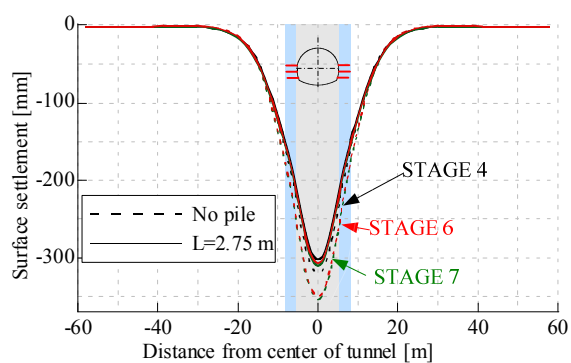


Fig. 6-16 サイドパイプが地表面沈下形状の推移に及ぼす影響 (改良なし)

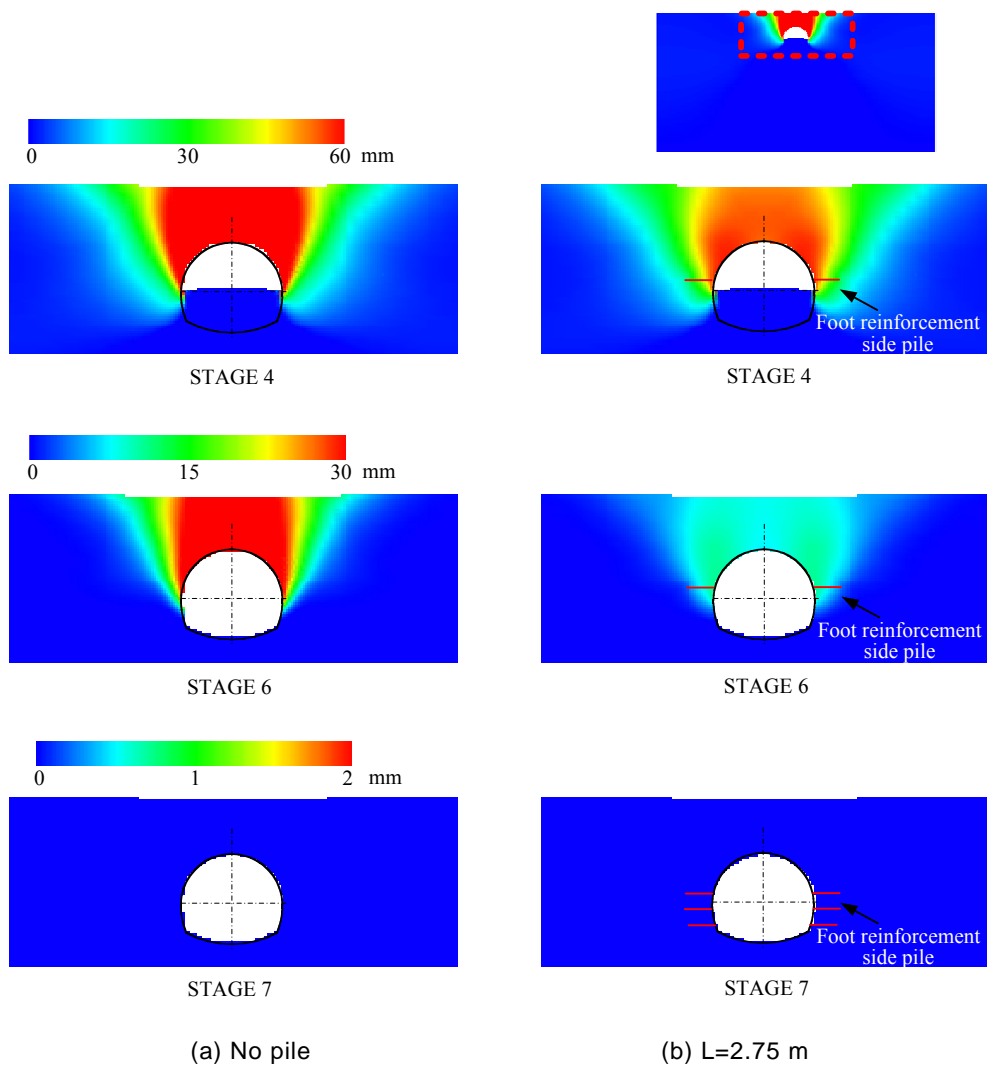


Fig. 6-17 サイドパイプが地盤の鉛直変位分布に及ぼす影響 (改良なし)

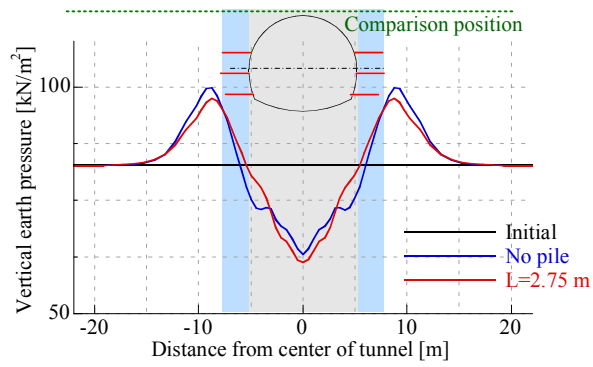


Fig. 6-18 サイドパイルのみ使用時
鉛直土圧分布に及ぼす影響
(改良なし～トンネル掘削完了時)

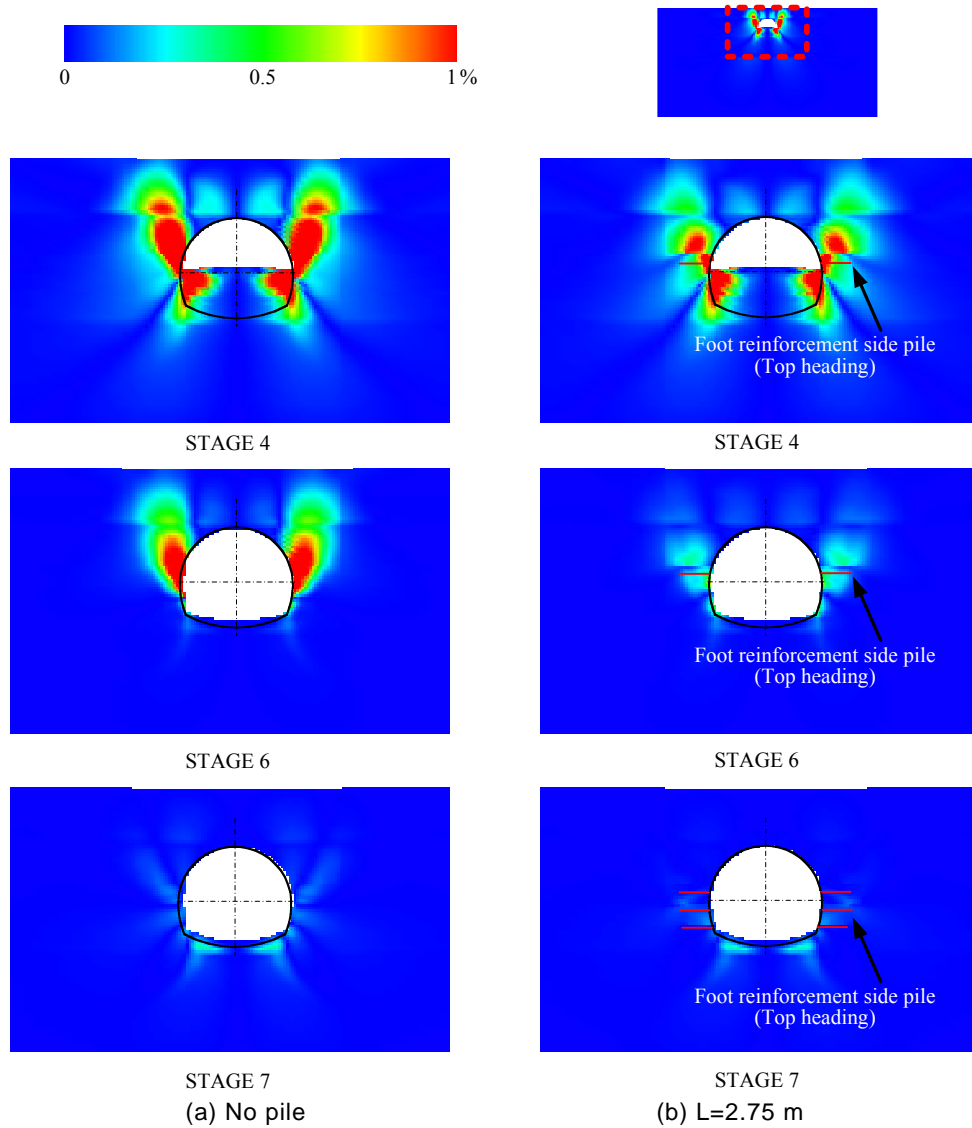


Fig. 6-19 サイドパイルが地盤のせん断ひずみ分布に及ぼす影響
(改良なし)

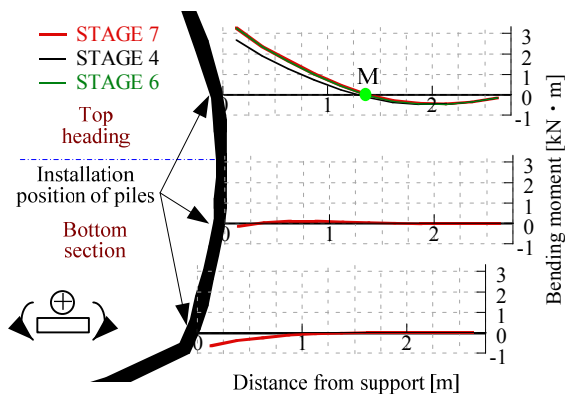


Fig. 6-20 サイドパイルに生じる曲げモーメント (L=2.75 m)

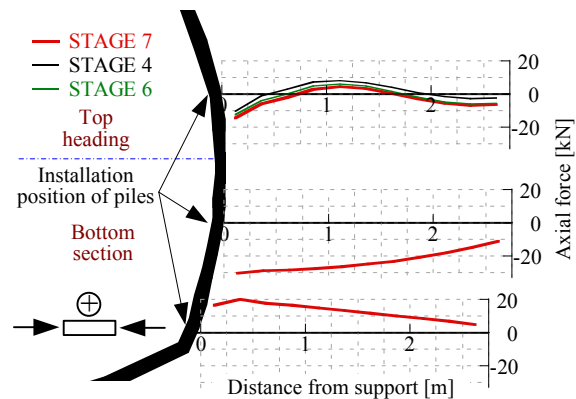


Fig. 6-21 サイドパイルに生じる軸力 (L=2.75 m)

Fig. 6-19 に、サイドパイル工のみ使用時、各施工段階でのせん断ひずみ分布を示す。ここでも、各値は前施工段階からの変化量で示す。上半支保工設置後から上半掘削完了までの STAGE 4 で生じたせん断ひずみについて比較すると、サイドパイルを設置しない場合、大きいせん断ひずみは上半脚部より斜め上および斜め下方向に発達する。サイドパイルを設置することにより、斜め上に発達する大きいせん断ひずみは、サイドパイルにより遮断され、大幅に減少するが、下向きのせん断ひずみ集中領域に対しては、ほとんど影響を及ぼさない。

上半掘削完了後から下半支保工設置前までの施工段階 STAGE 6 では、上半脚部から斜め上向きに大きいせん断ひずみが発達し、STAGE 4 と同じく、サイドパイルにより遮断され、減少する。下半支保工設置後の STAGE 7 でも、サイドパイルを設置しない場合は僅かながら上半脚部から斜め上方向の領域でせん断ひずみが発生し、サイドパイルを設置すると小さくなる結果が見られる。すなわち、サイドパイル工のみ使用した場合も、サイドパイルはすべり線を交差することでせん断補強効果を発揮し、地表面およびトンネルの沈下を抑制することができると考えられる。

(2) パイルに作用する部材力

Fig. 6-20 に、長さ 2.75 m のサイドパイルを設置する場合、各施工段階でのパイル全長に生じる曲げモーメント分布を示す。図より、サイドパイル工のみ使用する場合も、上半部分に設置したサイドパイルは上部が引張られるような結果を示し、片持ち梁のような挙動をすることが分かる。さらに、トンネル掘削の進行に伴い、上半に設置したサイドパイルに生じる曲げモーメントは増加する傾向を示すが、その変化は僅かである。これに対して、下半に設置したサイドパイルには、僅かに下部が引張られるような曲げモーメントしか生じなく、地盤改良工法と併用しない場合も、下半に設置するサイドパイルは、トンネルおよび地表面に対する沈下抑制効果を発揮しないと考えられる。

Fig. 6-21 に、Fig. 6-20 と同ケースでのサイドパイルに作用する軸力を示す。図より、上半に設置するサイドパイルは真中の部分が圧縮され、両端が引張られるような挙動を示し、トンネル掘削の進行に伴い、引張られる部分が長くなる。これにより、サイドパイル工のみ使用する場合も、内圧効果が期待できると考えられる。下半に設置するサイドパイルは、上は引張り、下は圧縮されるような挙動を示す。図より、ここでも、サイドパイルに生じる最大引張力は約 20 kN で、これによりサイドパイルには約 6×10^3 kPa の引張り応力が生じるが、これは鋼の引張り強さ 6×10^3 MPa を大きく下回る。

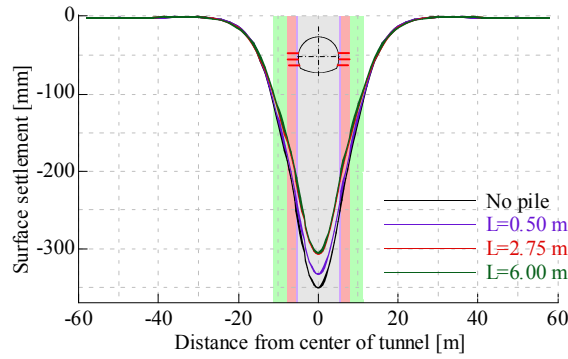


Fig. 6-22 サイドパイルの長さが地表面沈下形状に及ぼす影響
(トンネル掘削完了後～改良なし)

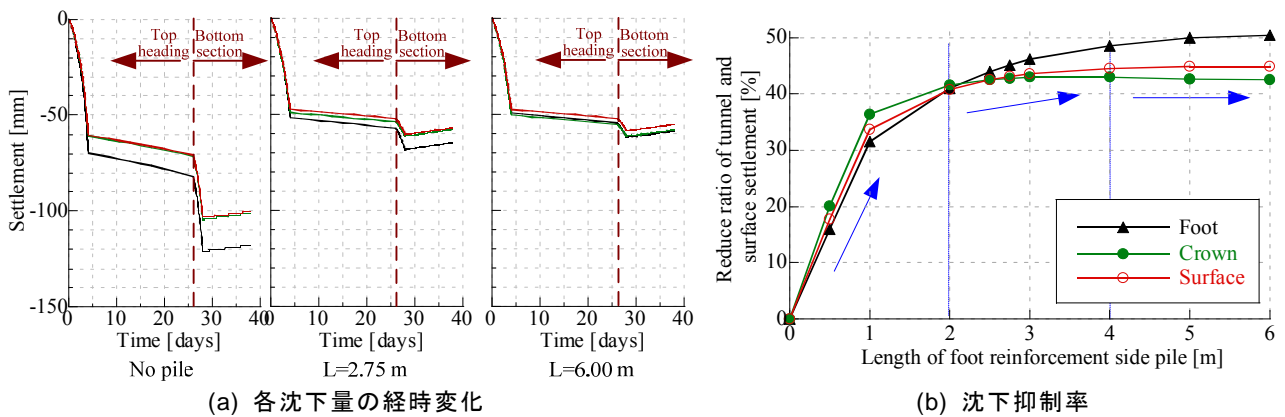


Fig. 6-23 サイドパイルの長さが地表面およびトンネル沈下抑制効果に及ぼす影響 (改良なし)

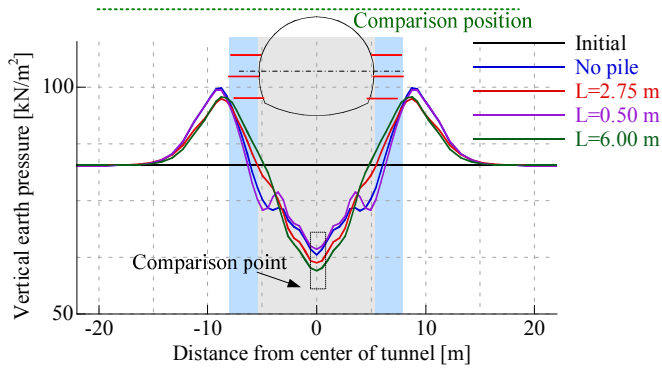
6.3.2 サイドパイル工のみ使用時長さの影響

ここでは、トンネル掘削前に地盤改良工法を適用せず、サイドパイル工のみ使用した場合を対象とし、サイドパイルの長さを 0.5 m～6 m 間で変化させ、長さが地盤およびサイドパイルの力学挙動に及ぼす影響について検討する。

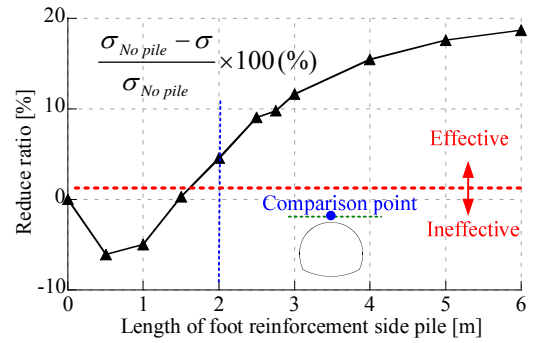
(1) 地盤の挙動

Fig. 6-22 に、異なる長さのサイドパイルを設置した各ケースでの、トンネル掘削完了時地表面沈下形状を示す。図より、サイドパイルが長くなるほど地表面沈下量が小さくなる結果が見られ、その地表面沈下抑制効果が高くなるが、 $L=6.00$ m のケースと $L=2.75$ m のケースではほとんど差が見られない。即ち、サイドパイル工のみ使用時は、最適長さが存在すると考えられる。

Fig. 6-23(a) に、様々な長さのサイドパイルを設置する各ケースでの、地表面とトンネルの沈下量の経時変化を示す。長さが 6.00 m の場合は長さ 2.75 m のケースより各沈下量が小さくなり、特に脚部沈下量がより大きく抑制される。これはサイドパイルがトンネル脚部に設置されるため、脚部沈下に最も効果があるためであると考えられる。Fig. 6-23(b) には、サイドパイルの長さが地表面とトンネルの沈下量の沈下抑制率に及ぼす影響を示す。同図より、サイドパイルが長くなるほど、その沈下抑制効果が大きくなり、パイル長さが 2 m 以上になると、その効果が頭打ちになる結果が見られる。



(a) 鉛直土圧分布



(b) 荷重再配分率

Fig. 6-24 サイドパイルの長さが荷重再配分効果に及ぼす影響
(トンネル掘削完了時～改良なし)

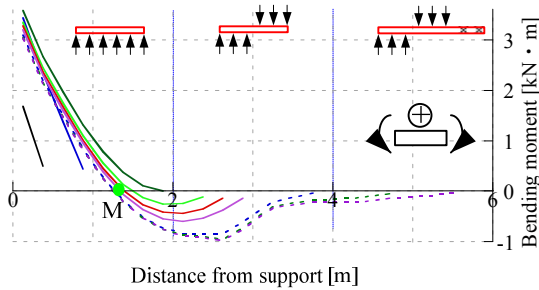


Fig. 6-25 サイドパイルの長さが
曲げモーメント分布に及ぼす影響 (改良なし)

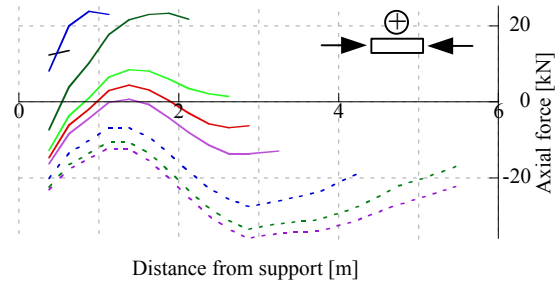


Fig. 6-26 サイドパイルの長さが
軸力分布に及ぼす影響 (改良なし)

Fig. 6-24(a) に、異なるサイドパイル長でのトンネル天端に沿った水平線上に作用する (Fig. 6-4 と同様) 位置での鉛直応力分布を示す。図より、 $L=2.75\text{ m}$ 、 $L=6.00\text{ m}$ のケースでは、サイドパイルを設置しないケース (No pile) に比べて、トンネル上部地盤に作用する鉛直土圧が減少する。しかしながら、 $L=0.50\text{ m}$ のケースでは、No pile のケースとほぼ変わらない。Fig. 6-24(b) に、各長さでトンネル上部地盤の中央部分 (点線で囲んだ部分) に作用する鉛直土圧の減少率を併記する。鉛直土圧の減少率は、No pile に対して鉛直土圧がどれくらい減少したかを示し、正の符号は No pile に比べて鉛直土圧が減少したこと、すなわち、荷重分散効果が得られたことを意味する。図より、パイルが 2.0 m より長くなると荷重分散効果が得られ、さらに長くなるほどその効果が高くなる。

(2) サイドパイルに作用する部材力

Fig. 6-25 に、トンネル掘削完了時、上半に設置したサイドパイル全長に生じる曲げモーメント分布を示し、同図に曲げモーメント分布図から考えられる力の状態を併記する。サイドパイルが 2 m より短い場合、全長に渡り上部が引張られるような曲げモーメントが見られる。長さが 2 m 以上になると、同図に示すトンネル覆工から約 1.3 m の位置の点 M を境に、トンネル側は上部が引張り、パイル先端側は下部が引張られるような挙動を示す。また、パイルが長くなるほど、曲げモーメントの最大値が大きくなる。パイルが 4 m 以上になると、曲げモーメント分布はほぼ同じ形状を示す。以上は、パイル長が沈下抑制効果に及ぼす影響と同じ傾向であり、サイドパイルに生じる曲げモーメントは、サイドパイルが沈下抑制効果を発揮できる主な原因であると推測できる。

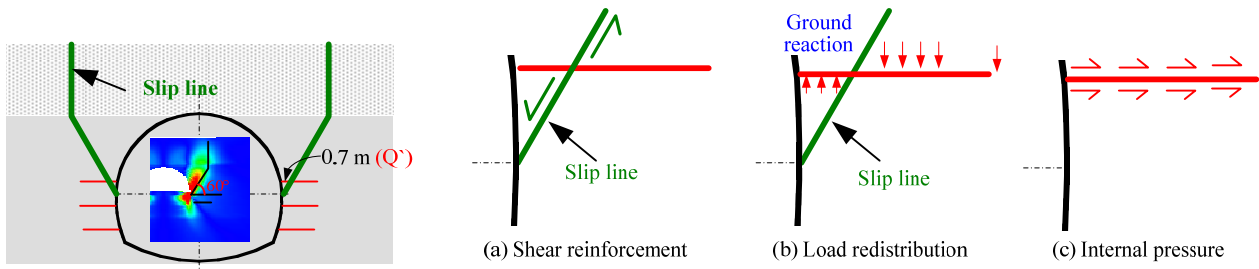


Fig. 6-27 単独使用時サイドパイルの沈下抑制メカニズム

Fig. 6-26 に、掘削完了時、上と同じケースでの軸力分布を示す。図より、パイルが 2 m より短い場合、パイルは全長に渡って圧縮される。パイル長が 2 m 以上になると、パイルに引張りを受ける部分が生じ、パイルが長くなるほど、圧縮される部分が短くなる。さらにパイル長が 4 m 以上になると、全長に渡って圧縮される挙動を示し、長さがながくなるほどその軸力が大きくなる。以上により、パイル長が 2 m 以上になると、内圧効果も期待できると考えられる。

6.3.3 サイドパイル工のみ使用時の沈下抑制メカニズム

解析結果により、地盤改良工法と併用しなく、サイドパイル工のみ設置する場合も、サイドパイルはせん断補強効果、荷重再配分効果、内圧効果を発揮し、地盤とトンネルの沈下を防ぐことが分かった。さらに、この場合も、いずれの施工状態でもサイドパイルの沈下抑制効果は、トンネル覆工からトンネル掘削により生じるすべり線までの距離と大きく関係する。

Fig. 6-27 に、以上の検討結果から推定できる、サイドパイル工のみ使用時サイドパイルが地盤およびトンネルの沈下抑制効果のメカニズムを示す。

サイドパイル工のみ使用する場合、Fig. 6-27 に示すように上半脚部から斜め上方向にすべり線が発達する。本解析状態で、トンネル覆工からすべり線までの距離は約 0.7 m であり、ここでは Q' とする。サイドパイルは Q' より長くなると、すべり線を交差することで、せん断補強効果を発揮できる。また、荷重再配分効果を発揮し、トンネルおよび上部地盤の荷重をトンネル周辺地盤に分散させ、トンネルと地盤の更なる沈下を防ぐ。さらに、サイドパイルは内圧効果を発揮し、地盤を強くするだけでなく、トンネルと周辺地盤を一体化させる働きもする。さらに、サイドパイル工のみ使用する場合も、その長さ $2Q'$ 以上になると、その効果が頭打ちになる。

6.4 サイドパイル工の地盤沈下抑制効果に関する考察

6.4.1 模型実験と諸数値解析の比較

本研究ではまず、簡易的な模型実験および模型実験に対する数値解析を行い、地表面とトンネル脚部が同程度沈下する場合、サイドパイル工の地盤沈下抑制効果について定性的な評価を行った。続いて、実際のトンネル施工現場を対象とし、地盤改良工法と併用する場合および地盤改良工法など他補助工法と併用せず、サイドパイル工のみ使用する場合の効果について検討した。ここでは、これらの結果を比較するとともに、サイドパイル工が地盤沈下抑制効果を発揮するメカニズムについて検討を行う。

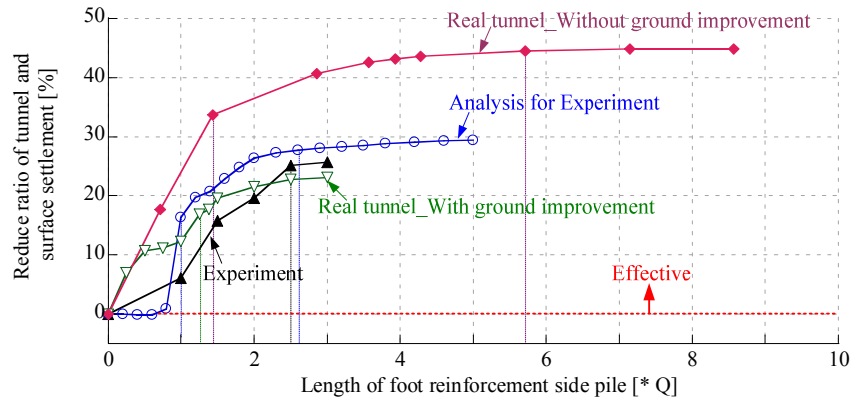


Fig. 6-28 模型実験および諸数値解析パターンでのサイドパイル工の地表面沈下抑制効果の比較

Table 6-1 模型実験および諸数値解析パターンでのサイドパイル工の効果の比較

	模型実験		実現場を対象とする数値解析	
	模型実験	模型実験を対象とする数値解析	地盤改良工法と併用	サイドパイル工のみ使用 (地盤改良なし)
すべり線のイメージ				
覆工からすべり線までの距離 Q (m)	0.1		2.0	0.7
大きい効果が発生し始める長さ (×Q)	1	1	1.2	1.5
効果が頭打ちになる長さ (×Q)	2.5	2.6	2.5	5.7

Fig. 6-28に、模型実験および模型実験に対する数値解析、実施工を対象とする数値解析で地盤改良工法と併用したケース、地盤改良を施さずサイドパイル工のみ使用したケースでの、サイドパイル工の地盤沈下抑制率を合わせて示す。横軸は、各々のケースで得られた覆工からすべり線までの距離Qにより無次元化したものである。縦軸は、最大地表面沈下量の減少率を表している。模型実験および模型実験に対する数値解析で、最大地表面沈下量は地盤と覆工の境界部分で生じる。実施工を対象とする数値解析では、トンネル中心の上部で最大地表面沈下が生じる。図より、実現場を対象とする数値解析でサイドパイル工のみ使用したパターンを除き、トンネル脚部と地表面がほぼ同程度沈下した他3パターンは、ほぼ同じ傾向を示している。

Table 6-1 は、以上の4パターンについて詳しく比較したものである。いずれのパターンでも、サイドパイル工の地盤沈下抑制効果は覆工からすべり線までの距離Qに大きく関連する。とも下がり現象が確認できなかった、サイドパイル工のみを使用した施工現場を対象とした数値解析を除き、他3パターンでは、いずれもサイドパイルの長さが約1Qより長くなると地盤沈下抑制効果を発揮するようになり、約2.5Q以上になるとその効果が頭打ちになる傾向を示す。

$$\sigma_v = \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \cdot \tan \phi} \cdot (1 + e^{-K_0 \cdot \tan \phi \cdot H / B_1}) + p_0 \cdot e^{-K_0 \cdot \tan \phi \cdot H / B_1}$$

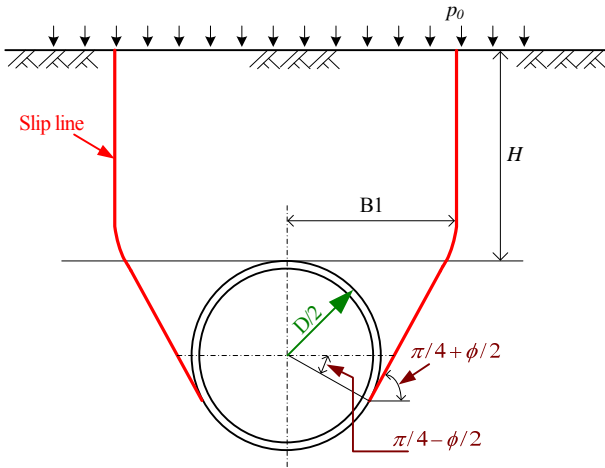
$$B_1 = \frac{D}{2} \cdot \cot\left(\frac{\pi/4 + \phi/2}{2}\right)$$

ここに、

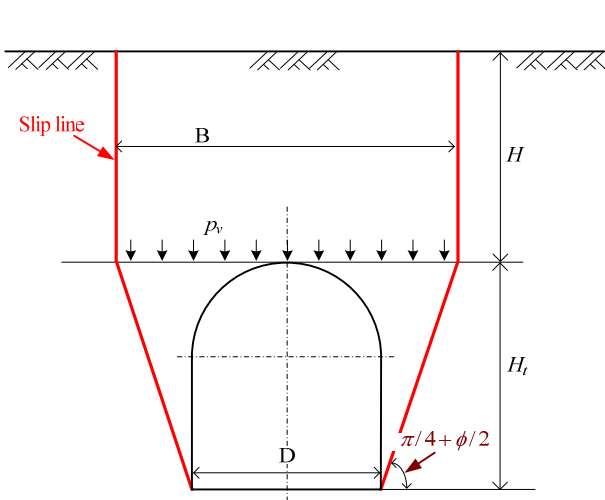
- σ_v : Terzaghi の緩み土圧 (kN/m²)
- B_1 : 緩み幅 / 2 (m)
- K_0 : 水平土圧と鉛直土圧の比 (通常 $K_0=1$ としてよい)
- ϕ : 土の内部摩擦角 (°)
- H : 土被り高さ (m)
- p_0 : 上載荷重 (kN/m²)
- γ : 土の単位体積重量 (kN/m³)
- c : 土の粘着力 (kN/m²)

ただし、 p_0/γ がHに比し小さい場合には下記の式によってよい。

$$\sigma_v = \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \cdot \tan \phi} \cdot (1 + e^{-K_0 \cdot \tan \phi \cdot H / B_1})$$



(a) 円形断面⁵⁵⁾



$$p_v = \frac{B(\gamma - 2c/B)}{2K \cdot \tan \phi} \cdot (1 + e^{-2K \cdot \tan \phi \cdot H / B})$$

$$B = D + 2H_i \cdot \cot(\pi/4 + \phi/2)$$

ここに、

- B : 緩み幅 (m)
- B_i : トンネルの掘削幅 (m)
- K : 側圧係数
- ϕ : 土の内部摩擦角 (°)
- H : 土被り高さ (m)
- H_i : トンネルの掘削高さ (m)
- γ : 土の単位体積重量 (kN/m³)
- c : 土の粘着力 (kN/m²)

(b) 馬蹄形断面⁵⁶⁾

Fig. 6-29 Terzaghi の緩み土圧およびすべり線の仮定

6.4.2 すべり線の発生位置の推定

サイドパイルの長さを選定する際、覆工からすべり線までの距離Qは最も重要な参考パラメータとなる。ここでは、サイドパイルを設計する際、まずトンネル掘削により覆工周辺地山に生じるすべり線の位置を推定する必要がある。

周辺地盤が均一、もしくは多層地盤で水平方向に均一である場合、すべり線の発生位置は、Fig. 6-29に示す、トンネル掘削時トンネルに作用する緩み土圧を算出する際の Terzaghi の仮定^{55), 56)}により推定することができる。

しかしながら、実現場での多くは地盤条件が均一でなく、この場合、トンネルの掘削により生じるすべり線を推定するのは簡単でない。これらに対しては、周辺地盤について詳しく調査した上、周知解析手法等を用いた計算が考えられる。

6.5 まとめ

本章では、とも下がり現象をシミュレートし、現場でとも下がりが発生し原因について検討した。さらに、とも下がり発生時および発生しない場合、サイドパイルが地盤・トンネル沈下抑制効果について議論した。

サイドパイルは、地盤改良有無に関係なく、せん断補強効果、荷重再配分効果、内圧効果を発揮し、地盤とトンネル沈下を防ぐことができる。さらに、いずれの施工状態でも、サイドパイルが沈下抑制効果は、トンネル覆工からトンネル掘削により生じるすべり線までの距離と大きく関係する。サイドパイルは、長さが短い場合も、内圧効果を発揮し、ある程度の沈下抑制効果を発揮できる。サイドパイルが、トンネル覆工からすべり線までの距離より長くなり、すべり線を交差すると、せん断補強効果と荷重再配分効果を発揮し、より大きい沈下抑制効果を発揮できる。

地盤とトンネルが同等に沈下する場合、まずすべり線の位置を計算し、サイドパイル工の長さは $1Q \sim 2.5Q$ の範囲で選定するのが合理的であると言える。サイドパイルが長くなるほどその効果は大きくなるが、長さが $2.5Q$ 以上になると、効果は頭打ちになり、無駄設計になる恐れがある。ここで、 Q は覆工からすべり線までの距離であり、その発生位置は施工条件により異なる。

第7章 結論

本研究では、NATMで未固結地山に小土被りトンネルを掘削する際、計測されたとも下がり現象の発生原因、および実現場で地盤沈下対策として採用されたサイドパイル工の効果のメカニズムについて検討を行った。具体的には、簡易的な模型実験および模型実験を対象とする数値解析、実際のトンネル掘削を模擬した数値解析を行い、サイドパイルの長さなど主要なパラメータが、地盤沈下抑制効果に及ぼす影響を調べた。また、その結果を参考にして、サイドパイルが地盤沈下抑制効果を発揮するメカニズムについて検討した。各章で得られた結果を以下にまとめる。

第1章では、本研究の背景として、日本でのNATMの発展と現状、NATMで未固結地山に小土被りトンネルを掘削する際、地盤沈下抑制の重要性およびその課題について述べた。続いて、本研究の検討対象である現場で計測された、「とも下がり現象」および地盤沈下対策として使用されている脚部補強工について紹介した。本研究では、降下床模型実験とその数値解析、実トンネルを対象とする数値解析を通じて、サイドパイル工が地盤沈下抑制効果を発揮するメカニズムを解明する。さらに、現場で経験により試行錯誤的に使用されているサイドパイル工に対し、その妥当性を検証するとともに、適切な長さなど設計手法を提案することを目的としている。

第2章では、未固結地山に小土被りトンネル掘削時における課題および地盤沈下抑制の重要性、トンネル掘削におけるサイドパイル工の位置付けについて説明した。未固結地山での小土被りトンネル掘削に対する従来の研究を概観し、地表面沈下形状の推定方法について述べた後、さらにもとも下がり現象について説明した。また、サイドパイル工を含む脚部補強工の現場での使用状況および脚部補強工に関する従来の研究を整理し、その問題点および本研究で解明すべき課題をまとめた。本研究で解明すべき課題とは、「とも下がり現象」の発生原因およびサイドパイル工が地盤沈下抑制効果を発揮するメカニズムの解明である。その際、「とも下がり現象」が発生しやすい施工状況、サイドパイル工の有無の両ケースでの地盤の力学挙動の差異、長さなど主要なパラメータがサイドパイル工の地盤沈下抑制効果に及ぼす影響について検討する必要がある。

第3章では、サイドパイル工の地盤沈下抑制効果を定性的に調べるため、三次元降下床模型実験を実施した。模型実験では、L字型の断面を持つ覆工模型でトンネルの形状を単純化し、さらに豊浦硅砂を用いて乾燥した砂質地山をモデル化した。サイドパイルの材料は、実現場でサイドパイル工と周辺地山の相対剛性に着目し、その相対比が実現場と最も近いラミン材を選定した。さらに、その直径などは実現場での設置間隔と直径の相対関係に着目して決定した。

模型実験では、サイドパイルの長さおよび設置間隔を主要なパラメータとし、それぞれがサイドパイル工の地盤沈下抑制効果に及ぼす影響について検討した。模型実験での主な検討項目は地表面沈下量、地山下部に作用する鉛直荷重である。

実験結果により、サイドパイルは降下床の下降によるすべり線を横切ることにより、せん断補強効

果および荷重再配分効果を発揮し、地盤沈下抑制効果を発揮することが分かった。さらに、それぞれの効果はサイドパイルの長さが長くなるほど、設置間隔が狭くなるほど高くなる傾向を示す。

第4章では、三次元弾塑性有限要素解析コード DBLEAVES を用いて、模型実験を対象として数値解析を行った。本解析手法を用いて得られた解析結果と第3章で示した室内模型実験結果を比較することで、解析手法の妥当性を検証すると同時に、模型実験では計測困難である地盤およびサイドパイルの力学挙動について検討し、模型実験でのサイドパイル工の地盤沈下抑制メカニズムを詳細に検証した。さらに、模型実験では実施困難であった、フットパイル工のようにパイルを斜めに設置するケースに対し、その設置角度が地盤沈下抑制効果に及ぼす影響について検討した。模型実験を対象とする数値解析により得られた知見を以下にまとめる。

- (a) 降下床の下降により地山に発生するすべり線は、降下床の端から地表面まで発達する。覆工から降下床端までの距離が 80 mm に対し、覆工からすべり線までの距離は 100 mm である。覆工からこのすべり線までの距離は、サイドパイルの効果を議論する際に極めて重要であり、本研究では、この長さを Q (100 mm) と表示し、これを用いて各値を標準化する。
- (b) 地山は、すべり線を境に、覆工とすべり線の間は変位が大きく、すべり線以遠の領域は比較的に変位が小さい。サイドパイルの設置により、領域間の摩擦抵抗を増大させて変形を拘束し、一種のはりを形成して支持すると考えられる。さらに、このはり効果により覆工の沈下も抑制され、覆工および降下床上部地盤に作用する荷重ははりにより覆工以遠領域に分担される。すなわち、サイドパイルの設置により地盤に生じる土圧が再配分(荷重再配分効果)され、覆工直下および周辺地盤に生じる荷重が、より健全な地盤(緩んでいない領域)に分担される。これにより、覆工のさらなる変位が抑制される。
- (c) サイドパイル工の地盤沈下抑制効果は、長さが長くなるほど高くなり、その長さが $2.6Q$ になるとその効果は頭打ちになる。さらに、設置間隔が狭くなるほどサイドパイル工の地盤沈下抑制効果が高くなる。なお、隣接するサイドパイルの影響領域がオーバーラップする最大設置間隔は $0.6Q$ (60 mm) であり、その設置間隔が $0.6Q$ より広くなると地表面に不等沈下が生じる。
- (d) パイルを大きい角度で下向きに設置する場合も、パイルはサイドパイル工と同じせん断補強効果および荷重再配分効果を発揮し地盤沈下抑制効果を発揮する。そのほか、地盤により軸方向の支持力を受け、軸力を発揮し下部地盤により支えられるような挙動を示す。覆工の荷重はパイルの軸力によって、健全な地盤に伝わり、覆工のさらなる沈下が抑制される。この際、支持地盤はパイルにより覆工以遠方向に押しつけられるような挙動をする。
- (e) パイルを上向きに設置する場合も、パイルはサイドパイル工と同じせん断補強効果および荷重再配分効果を発揮し地盤沈下抑制効果を発揮する。そのほか、引張力を発揮し、覆工を吊るすような機能を発揮し覆工の沈下を防ぎ、その荷重を健全な地盤に分担させる。この際、支持地盤はパイルにより覆工方向に押され、これにより覆工付近の地盤がパイルにより拘束され、地盤のせん断強度が高くなり、水平および下向きより大きい地盤沈下抑制効果が発揮できる。

第5章では、上と同じ解析手法を用いて実トンネルに対する数値解析を行い、トンネル掘削過程およびとも下がり現象をシミュレートする。続いて、様々な施工条件をパラメータとした解析を行い、とも下がり現象が発生した主な原因について検討した。

既往の研究により、未固結地山に小土被りトンネルを掘削すると、地表面と天端がほぼ同程度沈下

することが分かった。本解析の対象現場では、周辺地山が非常に軟弱であったため、トンネルを掘削する前に地盤改良を行った。地盤改良を行うことにより、トンネルおよび地表面沈下を大幅に抑制することができたが、トンネル周辺地盤の剛性を高めることにより、トンネルおよび周辺地盤が一体となり同じく沈下した。以上の両施工条件の組合せにより、地表面とトンネル天端および脚部が同程度沈下する現象が発生した。

すなわち、対象現場が小土被りであったため、地表面とトンネル天端が同程度沈下し、また地盤改良によりトンネルと周辺地盤が一体化となりトンネルの変形が拘束されることにより、トンネル天端と脚部沈下が同じになり、トンネルと地表面が同程度沈下する「とも下がり現象」が現れたと考えられる。

第6章では、実トンネルでとも下がり発生時サイドパイル工の地表面沈下抑制効果について検討した。実トンネルにおいてのサイドパイル工の効果の把握した後、長さに対するパラメトリックスタディを行い、サイドパイル工の適切な設計方法の提案のための情報を収集する。続いて、地盤改良を考慮しない場合、すなわち他補助工法と併用しなく、サイドパイル工を単独的に使用する場合、サイドパイル工の地盤沈下抑制効果および長さがその効果に及ぼす影響を調べた。以上を比較することにより、サイドパイル工が最も効果を発揮できる施工状態について検討する。なお、以上の解析結果は設計における参考データとして蓄積する。実トンネルでのサイドパイル工の地盤沈下抑制効果を以下にまとめる。

- (a) サイドパイル工の地盤沈下抑制効果は、他補助工法との有無と関係なく、トンネル掘削により生じるすべり線との位置に関係することが分かった。本研究では、トンネル覆工からすべり線までの距離を Q とし、各寸法を標準化する。地盤改良と併用時、すべり線は、改良地盤のコーナーから鉛直上向きに発達する。本研究の場合覆工からすべり線までの距離 Q は約 2 m である。地盤改良を施さずサイドパイル工のみ使用時、すべり線は上半脚部から斜め上向きに発達するが、トンネル設置領域を超えると鉛直上向きに方向を変える。この場合、覆工からすべり線までの距離 Q は約 0.7 m である。
- (b) 周辺地山が均一な場合、すべり線の発生位置は、トンネル掘削時トンネルに作用する緩み土圧を算出する際の Terzaghi の仮定により推定できるが、地質条件が複雑な場合は、より詳細な計算等が必要となる。
- (c) トンネルが周辺地山と同等に沈下する場合、サイドパイルの適切な設計長さは、 $1.0Q \sim 2.5Q$ である。サイドパイルは Q より長くなり、すべり線を効果するとせん断補強効果および荷重再配分効果を発揮し、地盤沈下抑制効果を発揮する。さらに、その効果はパイルが長くなるほど高くなり、 $2.5Q$ 以上になるとその効果は頭打ちになる。
- (d) 長さに関係なく、サイドパイルは内圧効果を発揮し、トンネル周辺地盤を補強するとともに、覆工の水平方向への変形すなわち内空変位を抑制できる。
- (e) トンネル掘削によりトンネルおよび地盤沈下は、そのほとんどが下半支保工設置前までの施工過程で生じ、サイドパイルは主に、下半支保工設置前に生じる沈下に効果的である。
- (f) 対象現場では、上半に左右 1 本ずつ、下半に左右 2 本ずつ計 6 本のサイドパイルを設置したが、解析結果により、下半に設置するサイドパイルはほとんど地盤沈下抑制効果を発揮しないことが分かった。

最後に、今後の課題を以下に示す。

- (a) 本研究では、実現場の一施工例を対象として、サイドパイル工の地盤沈下抑制効果について検討した。ただし本研究だけでは、サイドパイル工の設計基準を樹立するには、十分とは言えない。本研究に加え、種々の施工条件、施工方法の組合せに対し、サイドパイル工の効果および、本研究でまとめたサイドパイル工の効果のメカニズムの適用性について検討する必要がある。
- (b) 本研究では、乾燥した地盤を対象として数値解析を行った。しかしながら、実際のトンネル掘削現場では、地下水問題などが存在するため、水問題を取入れた連成解析も今後の課題となる。
- (c) 脚部補強工には、サイドパイル工のほか、第 2 章で紹介したようなレグパイルなど様々なサイドパイル工のようなパイル・ボルト系補助工法が使用されている。これらの工法に対しても、その効果およびサイドパイル工とのメカニズムの差異、設計方法などについて検討する必要がある。
- (d) 第 2 章にまとめた、脚部補強工はほとんど、脚部補強工のみでなく、地盤改良など他補助工法と組み合わせて使用させている。ゆえに、脚部補強工と他補助工法との併用による効果の変化についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) Rabcewicz, L. v. (1964; 1965): The New Austrian Tunneling Method, *Water Power*, Nov. 1964-Jan. 1965.
- 2) 谷本 親伯 著：土木特殊工法シリーズ 4 NATM_1, 森北出版株式会社, 1983.
- 3) 社団法人 土木学会関西支部：昭和 62 年度講習会テキスト 都市トンネルへの NATM の適用, 1986.
- 4) 社団法人日本トンネル技術協会：東北新幹線における未固結小土被りトンネルの設計施工対策評価報告書（別冊），2008.
- 5) 北川 隆，後藤 光理，磯谷 篤実，野城 一栄，松長 剛：低土被り土砂地山トンネルの掘削時挙動の分析，トンネル工学報告集第 15 巻，pp.203-210, 2005.
- 6) 北川 隆，磯谷 篤実，奥津 一俊，川口 隆徳：地山改良とサイドパイルで小土かぶり土砂地山を掘削--東北新幹線 牛鍵トンネル，トンネルと地下，Vol.35, No.4, pp.255-262, 2004.
- 7) Szechy, K.：トンネル工学 - 理論・設計・施工 - (島田隆夫訳)，鹿島出版社，1998.
- 8) 社団法人 地盤工学会，地盤工学・実務シリーズ 24 山岳トンネル工法の調査・設計から施工まで，2007.
- 9) Peck, R. B.: Deep excavations and tunneling in soft ground, *Proc. 7th ICSMFE*, Mexico City, Mexico, pp.225-290, 1969.
- 10) 島田 隆夫：土被りの浅い鉄道トンネルにおける地表沈下の形状および発生機構に関する研究，鉄道技術研究報告，No. 1162（施設編）第 509 号，1981.
- 11) 例えば，高橋 浩，重田 佳幸，遠藤 太嘉志，熊谷 幸樹，進士 正人：山岳トンネルにおける地表沈下計測に関する考察（その 2），土木学会第 64 回年次学術講演会，博多市，2009.9.
- 12) 足立 紀尚：かぶりの小さい土砂トンネルの設計規範の確立，平成 3 年度科学研究費補助金（試験研究(2)）研究成果報告書，No.01850113, 1992.
- 13) 足立 紀尚，田村 武，八嶋 厚，上野 洋：被りの浅い砂質地山トンネル掘削に伴う地表面沈下，土木学会論文集，No.370/III-5, pp.85-94, 1986.6.
- 14) 浅野 剛，山本 雅弘，土門 剛，安田 亨：山岳トンネルにおける地表面沈下予測評価手法の実態調査，土木学会第 64 回年次学術講演会，博多市，2009.9.
- 15) 山田 浩幸，加藤 吉文，大村 修一，久保田 聡：変位の大きい脆弱地山における補助工法の設計と施工に関する一考察，トンネル工学報告集，第 17 巻，pp.51-58, 2007.11.
- 16) ジオフロンテ研究会・アンブレラ工法・脚部補強 WG，脚部補強工技術資料，2008.
- 17) 土木学会：トンネル標準示方書 山岳トンネル・同解説，丸善（株），2006.
- 18) 北川 隆，後藤 光理，田村 武，木村 亮，岸田 潔，崔 瑛，野城 一栄：サイドパイルによるトンネル沈下抑制効果に関する実験的研究，土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.73-83, 2009.
- 19) 福島 伸二，望月 美登志，香川 和夫，横山 章：土被りの浅い砂質地山トンネルの補助工法に関する模型試験，土木学会論文集，No.406/III-11, pp.79-86, 1989.6.
- 20) 福島 伸二，望月 美登志，香川 和夫：土かぶりの浅い砂質地山トンネルにおけるボルト系補助工法の地山補強効果，土と基礎，Vol.38, No.4, pp. 41-48, 1990.4.
- 21) 大川 孝，横山 治朗，石原 久，小島 亘：トンネル補助工法としてのパイプルーフ効果の計測と考察，土木学会論文集，No.355/VI-2, pp.100-107, 1985.3.

- 22) 北川 隆, 後藤 光理, 磯谷 篤実, 菊本 統, 木村 亮, 岸田 潔, 野城 一栄: サイドパイルの沈下抑制効果に関する模型実験, 第 60 回土木学会年次学術講演会, 東京都, 2005.9.
- 23) 北川 隆, 後藤 光理, 田村 武, 木村 亮, 岸田 潔, 野城 一栄: サイドパイルの沈下抑制効果に関する基礎的研究, トンネル工学報告集, 第 15 巻, pp.1-8, 2005.
- 24) 崔 瑛, 岸田 潔, 木村 亮: 小土被りトンネル掘削時におけるトンネル脚部および地表面沈下対策工に関する実験的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.3, pp.261-272, 2008.
- 25) Cui, Y., Kishida, K. and Kimura, M. : Model tests on controlling effect of surface settlement using side-piles during tunnel excavation, Proceedings of The Nineteenth KKCNN Symposium on Civil Engineering, pp.441-444, Kyoto, Japan, 2006.12.
- 26) 崔 瑛, 木村 亮, 岸田 潔, 北川 隆: サイドパイルの地表面沈下抑制効果に関する模型実験, 第 41 回地盤工学会研究発表会講演集, pp.1693-1694, 鹿児島市, 2006.7.
- 27) 崔 瑛, 木村 亮, 岸田 潔, 北川 隆: サイドパイル補強工の施工状態と沈下抑制効果に関する検討, 第 61 回年次土木学会学術講演会, pp.147-148, 草津市, 2006.9.
- 28) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編・IV 下部構造編, 丸善(株), pp.254-257, 2002.
- 29) 菊本 統, 木村 亮, 岸田 潔, 足立 紀尚: トンネル掘削時の力学挙動に関する三次元降下床実験とその解析, 土木学会論文集, No.750/III-65, pp.145-158, 2003.12.
- 30) 足立 紀尚, 木村 亮, 岸田 潔, 小坂 馨太, 坂山 安男: 三次元降下床実験によるトンネル交差部の力学挙動, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.285-299, 1999.12.
- 31) 足立 紀尚, 木村 亮, 岸田 潔, 伊藤 浩志: 降下床実験によるトンネル掘削過程を考慮したトンネルおよび周辺地盤の力学挙動の解明, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.277-296, 2001.12.
- 32) 村山 朔郎, 松岡 元: 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.187, pp.95-108, 1971.
- 33) Terzaghi, K. : Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons, New York, pp.66-75, 1943.
- 34) Hermann Kastner: トンネルの力学 (金原 弘 訳), 森北出版株式会社, p.89, 1971.
- 35) 崔 瑛, 木村 亮, 岸田 潔, 北川 隆: 未固結地山トンネルにおけるサイドパイルの長さの決定について, 第 42 回地盤工学会研究発表会講演集, 名古屋市, 2007.7.
- 36) 崔 瑛, 木村 亮, 岸田 潔, 北川 隆: 地表面沈下抑制効果に対するサイドパイルの影響要因, 第 62 回年次土木学会学術講演会, 東広島市, 2007.9.
- 37) Cui, Y., Kishida, K. and Kimura, M. : Numerical study on preventive system of surface settlement during tunnel excavation under shallow overburden condition, Proceedings of The Twentieth KKCNN Symposium on Civil Engineering, pp.374-377, Jeju, Korea, 2007.10.
- 38) Cui, Y., Kishida, K. and Kimura, M. : Effect of Installation Direction of Footing Reinforcement Pile in Land Subsidence, Proceedings of The Twenty-First KKCNN Symposium on Civil Engineering, pp.332-335, Singapore, 2008.10.
- 39) 崔 瑛, 岸田 潔, 木村 亮: 小土被りトンネル掘削時の補強パイルの挿入角度と地表面沈下抑制効果について, 第 43 回地盤工学会研究発表会講演集, 広島市, 2008.7.
- 40) 崔 瑛, 岸田 潔, 木村 亮: 小土被りトンネル掘削時の補強パイルの挿入方向と地表面沈下抑制効果について, 第 63 回年次土木学会学術講演会, 仙台市, 2008.9.

- 41) 崔 瑛, 岸田 潔, 木村 亮: 地山補強パイルの挿入角度が地盤沈下抑制効果に及ぼす影響について, *土木学会論文集 C*, Vol. 65, No.4, pp.609-616, 2009.11.
- 42) Ye, B., Ye, G. L., Zhang, F., Yashima, A. : Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.3, pp.547-558. 2007.
- 43) Nakai, T. and Hinokio, M. : A Simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, *Soils and Foundations*, Vol.44, No.2, pp.53-70, 2004.
- 44) Iizuka, A. and Ohta, H. : A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, *Soils and Foundations*, Vol. 27, No.3, pp. 71-87, 1987.
- 45) 社団法人 地盤工学会 : 地盤工学・基礎理論シリーズ 1 地盤の変形解析-基礎理論から応用まで-, 丸善 (株), 2002.
- 46) Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T. : Mechanical behavior of pile foundations subjected to cyclic lateral loading up to the ultimate state, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.1-17, 2000.
- 47) Nakai, T., Teranishi, T., Hinokio, M. and Adachi, K. : Behavior of reinforced foundation under uplift and push-in loadings model-tests and analysis, *Proc. IS-KYUSHU*, Vol.1, pp.593-598, 2001.
- 48) 日本道路公団試験研究所 : トンネルの標準設計に関する研究報告書 -数値解析と施工実績の分析-, 1986.
- 49) (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 : 山岳トンネル設計施工標準・同解説, p.304, 2008.
- 50) 土木学会 : トンネルライブラリー第 16 号 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務, 丸善 (株), pp.150-173, 2006.
- 51) Atkinson, J. H. and David, M. P. : Subsidence above shallow tunnels in soft ground, *Proc. ASCE*, GT4, pp.307-325, 1977.
- 52) 島田隆夫 : 土被りの浅い山岳トンネルの地表沈下, *土木学会論文報告集*, No.296, pp.97-109, 1980.
- 53) 木山英郎, 藤村 尚 : 地下浅所のトンネル掘削に伴う地表沈下の弾性解析, *土質工学会論文報告集*, Vol.22, No.3, pp.161-169, 1982.
- 54) Mindlin, R. D.: Stress distribution around a tunnel, *Proc. ASCE*, Vol.65, pp.619-642, 1939.
- 55) 土木学会 : トンネル標準示方書 シールド工法・同解説, 丸善 (株), pp. 42-45, 2006.
- 56) 土木学会 : トンネルライブラリー第 16 号 山岳トンネルの補助工法, 丸善 (株), pp.98-100, 2009.
- 57) Kimura, M. and Zhang, F. : Seismic evaluations of pile foundations with three different methods based on three-dimensional elasto-plastic finite element analysis, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.113-132, 2000.
- 58) 社団法人セメント協会 : セメント固化材による地盤改良マニュアル, 技報堂出版株式会社, p.73, 2007.

謝辞

本論文は、筆者が京都大学大学院 博士前期・後期課程在学中に取り組んだ研究の成果をまとめたものです。本研究を行うにあたり、多くの先生方、先輩、同級生、後輩から御指導と御支援を賜りました。ここに感謝の意を表すとともに、御礼申し上げます。

京都大学教授 木村 亮 先生には、始終熱心にかつ厳しくご指導を賜りました。先生には、研究に対する姿勢のみならず人生に対する考え方も教授していただきました。先生の素晴らしい発想力と鋭い洞察力には敬服するばかりです。また、多数の国内外の学会、現場見学に参加する機会を与えていただき、様々な見聞を深めることができました。先生の厳しい指導のおかげで、研究者としてのみならず、人間として大きく成長できたと思います。先生には常に感謝の気持ちで一杯です。今後も先生の研究、教育姿勢を模範として精進してまいりたいと思います。ここに感謝の意を表すとともに、御礼申し上げます。

京都大学准教授 岸田 潔 先生には、研究全体にわたって粘り強く御指導をいただくとともに、論文作成や研究発表等に関しは、内容のみならず言葉遣いひとつに至るまで、懇切丁寧な御教示をいただきました。先生の叱咤激励が研究の遂行や本論文の作成の大きな原動力になったことは言うまでもありません。また、様々な現場見学・研修をコーディネートしていただき、卓上の知識だけでなく、実際の施工現場に対する知識も身に付けることができました。ここに、深く感謝いたします。

京都大学教授 田村 武 先生には、本論文の審査をしていただき、研究全般に関して鋭い御指摘と的確な御助言をいただきました。心より深く感謝いたします。

京都大学教授 岡 二三生 先生には、本論文の審査をしていただき、懇切丁寧な御指摘と御指導を賜りました。ここに感謝の意を表すとともに、御礼申し上げます。

名古屋工業大学教授 張 鋒 先生には、数値解析を実施するにあたり、懇切丁寧な御指導を賜りました。また、学会等でお会いするたびに、研究に対する貴重な御助言および暖かい励ましのお言葉をいただきました。心より深く感謝いたします。

京都大学教授 大津宏康 先生には、筆者が修士課程の間、研究に対し、的確な御助言とご指摘をいただきました。心より深く感謝いたします。

京都大学技官 矢野隆夫 先生には、実験装置の作成および模型実験の実施にあたり、多くの御助力、ご助言を賜りました。実験室ではいつも優しく励ましの言葉をいただき、様々なトラブルにもすぐ駆け付けて解決していただきました。ここに感謝の意を表します。

京都大学助教 稲積真哉 先生には、筆者が博士前期課程に在籍する間、研究に集中できる環境を整えていただきました。筆者が博士後期課程に進学してからも、就職活動について助言していただくなど、様々な相談に乗っていただきました。また、多忙の中学位論文を修正していただき、貴重な御意見をいただきました。心より感謝いたします。

筆者は、日本に留学して以来、多くの素晴らしい先輩や友人、後輩に恵まれました。

名古屋工業大学助教 菊本 統 先生には、筆者が日本に留学した時から、同じトンネルグループの先輩として、模型実験の手法を教えるなど未熟な筆者の面倒を見て頂きました。さらに、研究のみならず勉強方法から就職活動までいかなる悩みについても相談に乗っていただき、的確なアドバイスをいただきました。誠にありがとうございました。

長岡技術科学大学助教 磯部公一 先生には、研究から普段の生活に関することまで様々なアドバイスをいただきました。磯部先輩には、数値解析全般に関して基礎から教えていただいただけでなく、論文の修正などもしていただきました。本当にありがとうございました。

黄 再弘氏（現 大林組）には、同じトンネルグループの先輩として、実験結果の解釈から数値解析の実施まで丁寧に指導していただきました。また同じ留学生として、研究のみならず私生活の些細なことについても相談に乗っていただき、筆者を勉強だけでなく、精神的にもフォローしていただきました。心より深く感謝いたします。

福林良典氏（現 NPO 法人道普請人）には、日本の文化から文書の書き方まで丁寧に教えていただきました。先輩のおかげで、すぐ日本に慣れ、楽しい研究生生活を送ることができたと思います。また、多忙の中、学位論文を修正していただき、誠にありがとうございました。ここに深く感謝いたします。

博士前期課程で研究室の同輩であった段野孝一郎（現 株式会社日本総合研究所）氏、村上慶晃（現 近畿日本鉄道株式会社）氏、柳 民峰（現 日興シティグループ証券株式会社）氏とは、研究室での苦楽をともにしました。様々な相談に乗っていただき、いつも心強く励ましていただきました。博士後期課程に進学し、一人になってから、同級生がいる有難さを痛感することができました。本当にありがとうございました。

研究室（環境創造工学講座）の後輩である玉井俊行氏、Kepha Odhiambo ABONG'O 氏、角田敏光氏、立田安礼氏、澤村康生氏、竹中信博氏、寺本俊太郎氏、平坂友里恵氏には、研究生生活をともにする中で多くの面で御支援いただき、楽しい研究室生活を送ることができました。特に、Kepha Odhiambo ABONG'O 氏には、いつも英文の論文を修正していただき、誠にありがとうございました。

最後になりましたが、長年にわたって私の研究活動を経済面のみならず精神面からも支えてくれた、祖母と両親、妹に心より深く感謝します。謝謝。