

# 小土被りトンネル掘削時サイドパイル工の効果的な設置位置に関する解析的検討 Analytical study on the determination of installation position of foot reinforcement side pile during shallow overburden tunnel excavation

崔 瑛<sup>1</sup>, 岸田 潔<sup>2</sup>, 木村 亮<sup>3</sup>

- 1 名城大学・理工学部・cuiying@meijo-u.ac.jp
- 2 京都大学・工学研究科
- 3 京都大学・産官学連携センター

## 概 要

NATM を用いて未固結地山に小土被りトンネルを掘削する際、地盤沈下の抑制は最も重要な課題である。現場では、地盤沈下対策としてサイドパイル工が採用され、地盤沈下抑制効果を発揮するという事例が報告されているが、そのメカニズムと適切な設計方法などについては不明確な部分が多い。本研究では、実トンネルの掘削過程をモデル化した数値解析を行い、サイドパイル工の地盤沈下抑制効果について検討を行う。さらに、サイドパイルの設置パターンおよび設置高さがその効果に及ぼす影響について調べた。解析結果により、サイドパイルを設置することにより、地盤およびトンネルの沈下を抑制することができる。また、ベンチカット工法でトンネルを掘削する際は、上半に設置するサイドパイルのみが地盤沈下抑制効果を発揮し、さらに設置位置が低いほどその効果が高いという結果が得られた。

キーワード：サイドパイル，トンネル掘削，地表面沈下，小土被り，未固結地山

## 1. はじめに

未固結地山での小土被りトンネルの施工は、従来開削工法が主流であったが、近年では、施工・計測技術の向上を背景に、周辺環境への影響度が小さいこと、経済的であることなどの理由により、NATM の採用例が増えている。しかしながら、NATM は切羽の自立や地山の耐力を前提として開発された工法であるため、未固結地山での小土被りトンネル掘削に適用する際には、地盤およびトンネルの沈下の抑制が重要な課題となる。

東北新幹線の八戸～七戸のトンネル工事区間では、地形的な制約や線形的な制約により、NATM を用いて未固結地山において小土被りトンネルの掘削が行われた。沈下の抑制が重要な課題となるこれらの現場では、地盤とトンネル

が同等に沈下するとともに下がり現象が報告された。現場では、トンネルと地表面が同等に沈下することに着目し、「トンネル脚部の沈下を抑制すれば地表面の沈下も収まるだろう」との考えから、サイドパイル工が採用されている<sup>1), 2)</sup>。

図-1<sup>1)</sup>に、K トンネルでのサイドパイルの実施工例を示す。この工法は、脚部補強工の一種であり、鋼製支保工建込み直後にトンネル内側からパイルを地山に水平方向に圧入打撃する方法で設置する。図-2<sup>2)</sup>に、K トンネルで計測された、サイドパイル工を設置した場合と設置しない場合のトンネル掘削時の内空変位、トンネル天端と脚部の沈下の経時変化を示す。サイドパイルの設置により、天端沈下、脚部沈下、内空変位が減少したことが確認できる。

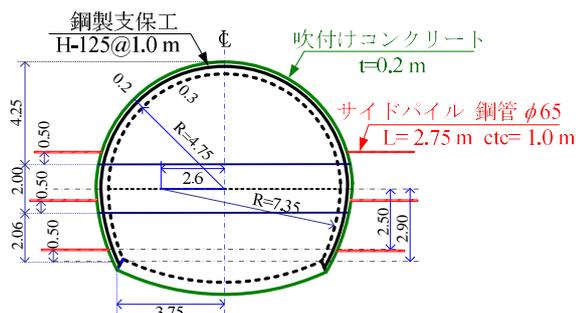


図-1 サイドパイル工の適用例 (K トンネル)<sup>1)</sup>に加筆修正

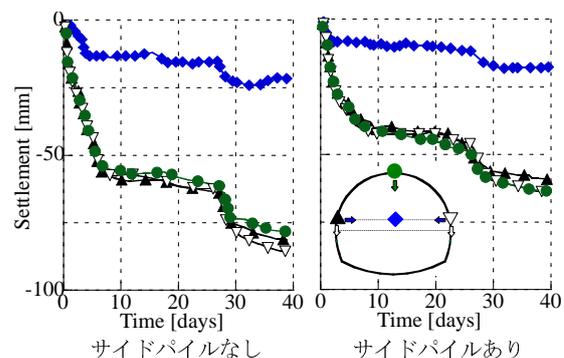


図-2 トンネル沈下・内空変位経時変化<sup>2)</sup>  
(K トンネル掘削現場での測定結果)

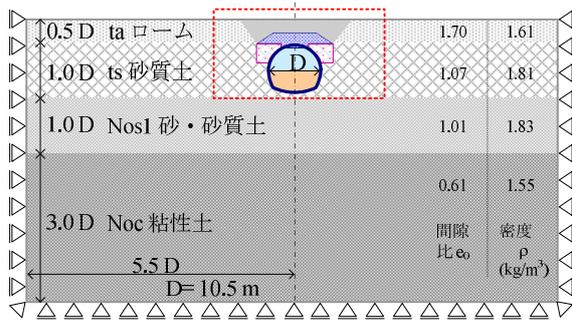
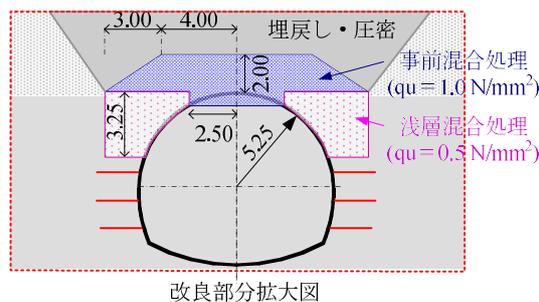


図-3 解析領域および境界条件



改良部分拡大図

このように、サイドパイル工は実際にいくつかの現場で使用されており、効果があるとの報告がなされている<sup>1)-2)</sup>。また、これらサイドパイル工の沈下抑制効果およびその作用メカニズムに関しては、いくつかの研究がなされている。

北川ら<sup>3)</sup>は、逆 T 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、サイドパイル工地表面沈下抑制効果について検討を行った。また、崔ら<sup>4)</sup>は、その模型実験に改良を加え、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、3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、サイドパイル工地盤沈下抑制効果について検討した。その結果、サイドパイルは降下床の下降により発生するすべり線を交差すると、せん断補強効果および荷重再配分効果を発揮し、地盤沈下を抑制できるという結論を示している。

上に示すように、室内試験においては、サイドパイル工の効果とその作用メカニズムについていくつかの成果が得られている。しかしながら、実現現場での応力状態は模型実験と大きく異なるため、模型実験結果のみでサイドパイル工の効果の評価するのは不十分である。また、サイドパイル工の適切な設置位置に対する議論は未だなされていない。K トンネルでは試行錯誤的に、上半掘削時に左右一本ずつ、下半に左右二本ずつ設置しているが、必ずしもすべてのサイドパイルが効果を発揮するとは限らず、各々のサイドパイルの効果についても検討する必要がある。

以上の背景を踏まえ、本稿ではまず、実際の施工現場を対象とし、トンネル掘削過程に対してシミュレーションを行い、実現現場でのサイドパイル工の地盤沈下抑制効果について調べる。さらに、サイドパイルの設置位置とその組合せを変化させたケースに対して数値解析を行い、設置位置の組合せと設置高さ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を行う。

## 2. 数値解析の概要

### 2.1 解析対象

図-3 に解析領域、地質条件および境界条件を示す。地質定数は、K トンネル周辺地盤の室内土質試験結果に基づいている<sup>1)</sup>。トンネルの上部領域は、実現現場で土被りが最小約  $0.2D$  ~ 最大約  $1D$  (平均約  $0.6D$ ) であることを参考として、 $0.5D$  とした。

本解析では、Ye et al.<sup>5)</sup>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。

### 2.2 地盤モデル

地盤の力学特性は、Nakai & Hinokio<sup>6)</sup>により開発された *subloading  $t_{ij}$  model* を用いて弾塑性体としてモデル化した。

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ス特性を考慮することができる。表-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り、他は文献<sup>6), 7)</sup>を参考して決定した。

表-1 地盤材料および材料定数

種類 定数	ta	ts	Nos1	Noc	埋戻し 圧密
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.768	17.689	17.954	15.190	15.768
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	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
stress-dilatancy	1.5	2.0	2.0	1.5	1.5
A (parameter)	500	500	500	500	500
圧密指数	0.137	0.070	0.070	0.082	0.094
膨潤指数	0.030	0.005	0.005	0.018	0.021
OCR	3	3	3	3	3

\* , は参考文献6)の中、砂質土は豊浦砂砂、粘性土は藤森粘土の値を引用した。

### 2.3 サイドパイルのモデル化

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ら<sup>8)</sup>により提案されたハイブリット要素を用いてサイドパイルをモデル化した。ハイブリット要素は、ビーム要素の周囲に弾性ソリッド要素を配置したものである。弾性ソリッド要素には、鋼管の曲げ剛性の1割を分配しており、これによってサイドパイルの体積による影響を考慮することができる。

### 2.4 改良体のモデル化

対象現場は図-3に示すように、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、トンネル掘削前に表-2<sup>2)</sup>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工法を用いてトンネル掘削が行われている。

表-2 地山改良スペック<sup>2)</sup>

工法	改良目標強度 (N/mm <sup>2</sup> )	固化材添加量 (kg/m <sup>3</sup> )
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)

改良地盤は、弾性体としてモデル化した。ヤング率 $E$ は、一軸圧縮強さ $q_u$ より式(1)、(2)を用いて計算した<sup>9)</sup>。

$$N = \frac{q_u \times 8}{100} \quad (1)$$

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

ここで、 $E$ ：地盤のヤング率 (kN/m<sup>2</sup>)

$q_u$ ：地盤の一軸圧縮強さ (kN/m<sup>2</sup>)

地山を改良する際、固化材の添加量は表-2<sup>2)</sup>に示すように、改良による重さの増加量は50 kg/m<sup>3</sup>で、周辺地盤の単位体積密度約1,800 kg/m<sup>3</sup>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いと仮定し、解析を行う。

## 2.5 鋼製支保工と吹付けコンクリートのモデル化<sup>10)</sup>

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(3)、(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。

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

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

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、図-2に示すKトンネルの断面により計算した。 $A$ は、断面の総面積である。鋼製支保工の弾性係数は $2.1 \times 10^8$  kN/m<sup>2</sup>、吹付けコンクリートの弾性係数は $4.0 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup>である。

## 2.6 トンネル掘削過程の模擬

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<sup>10)</sup>。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段階的に開放することで、模擬的に三次元効果を表現する手法がとられる<sup>12)</sup>。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、上半および下半の応力解放率 $a$ 、 $b$ を決定した。

表-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
STAGE4	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		
STAGE6	下半切羽到達 先行沈下		2
STAGE7	下半支保工 吹付けコンクリート トンネル掘削完了		10

表-3に示す手順および表-1のパラメータを用いて、まず内空変位を実現場でのトンネル内空変位に一致するような応力解放率 $a$ および $b$ について試行錯誤的に検討した。

図-4に、 $a = 40\%$ 、 $b = 15\%$ の条件で計算した内空変位および地表面、天端、脚部沈下の経時変化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

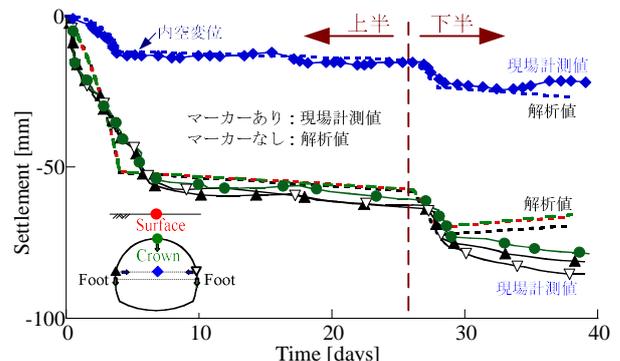


図-4 内空変位および各沈下量の経時変化 (現場計測値と解析値)

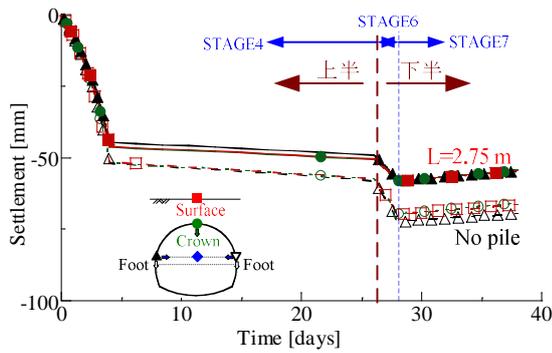


図-5 サイドパイルの有無が沈下量の推移に及ぼす影響

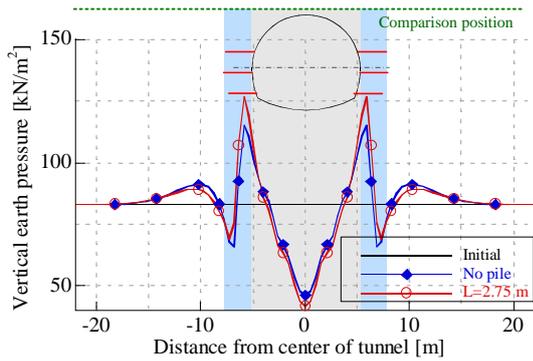


図-6 サイドパイルの有無が鉛直土圧分布に及ぼす影響

示し、トンネル掘削過程を正確に表現することができている。これにより、地盤定数および応力解放率の設定は適切であると考えられる。

以上より本研究では、上半掘削では 40% 応力を開放させ、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 % 応力を開放し、支保工および吹付けコンクリート施工後に 100 % まで開放させるという手順で数値解析を行う。

### 3. 実トンネルでのサイドパイル工の効果

#### 3.1 地盤の挙動

図-5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(STAGE4)で約15 %、下半掘削開始から下半支保工設置前まで(STAGE6)で約4 %、下半支保工設置後から掘削完了まで(STAGE7)で約1 %であり、STAGE 4, 6でその効果が顕著に現われる。なお、STAGE 4, STAGE 6はいずれも下半にサイドパイルを設置する前の施工段階である。

図-6に、トンネル掘削完了後、トンネル天端に沿った水平線上(図中の点線部分)に作用する鉛直土圧分布を示す。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。これは、サイ

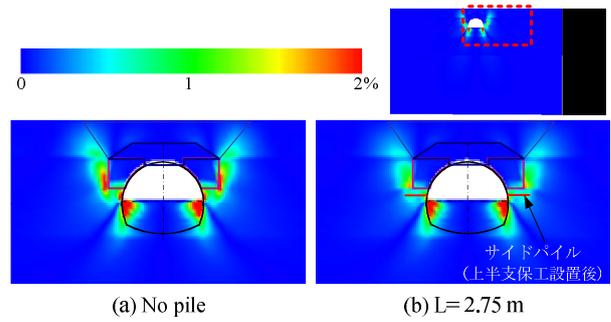


図-7 せん断ひずみ分布 (STAGE 4)

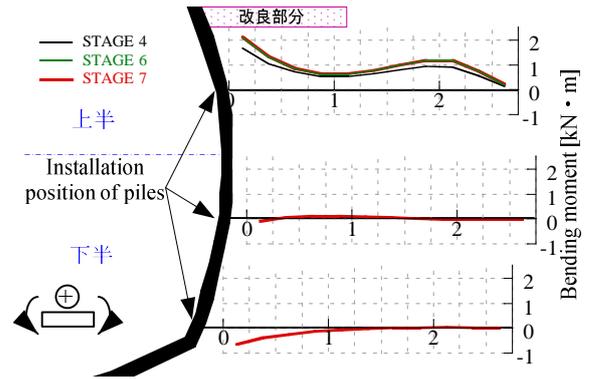


図-8 サイドパイルに生じる曲げモーメント(L=2.75 m)

ドパイルの設置により、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。この傾向は、著者ら<sup>4)</sup>が既往の研究で行った模型実験およびその数値解析で得られた荷重再配分効果と同じである。

図-7に、上半掘削時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、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と、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が、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ためであると考えられる。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ており、これも著者らが行った模型実験及びその解析<sup>4)</sup>と同じ傾向を示す。

#### 3.2 サイドパイルに作用する部材力

図-8は、各ステージ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傾向を示し、片持ち梁のような挙動をすることが確認できる。上半に設置したサイドパイルに着目すると、トンネル掘削に伴い曲げモーメントは増加するが、その変化は僅かであり、STAGE6とSTAGE7ではほぼ同じ値を示す。下半に設置したサイドパイルには、下部が引張られるような曲げモーメントが僅かしか生じない。この結果により、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。

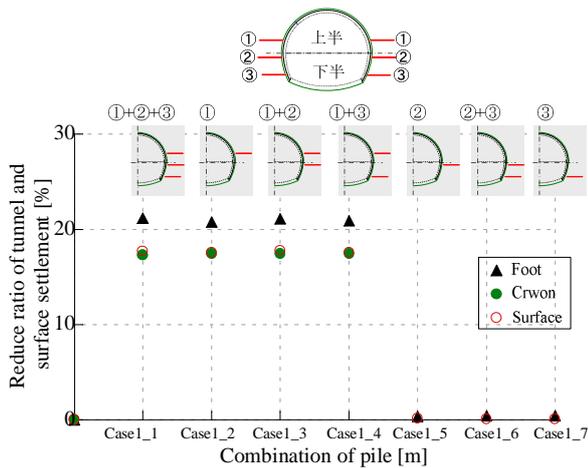


図-9 サイドパイルの組合せによる各沈下量の差異

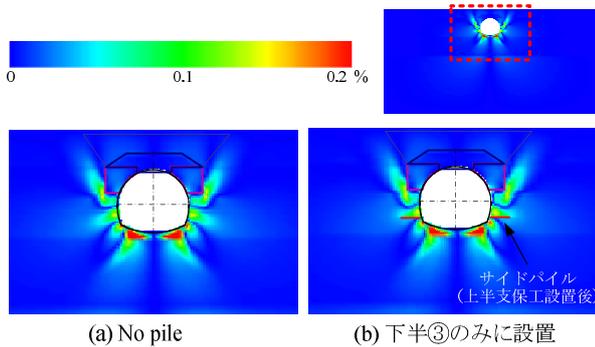


図-10 サイドパイルが地盤のせん断ひずみ分布に及ぼす影響 (STAGE 7: 下半支保工立設置後～掘削完了)

#### 4. サイドパイルの設置位置の影響

##### 4.1 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必要であるとは限らない。ここでは、パイルを上半と下半に3段全部設置した場合、上半のみもしくは下半のみに設置した場合など、サイドパイルの設置位置の組合せを変化させた計7ケースに対して検討を行った。

図-9に、各ケースでのサイドパイル工の沈下抑制効果を示す。横軸は、サイドパイルの設置位置の組合せを示し、同図にそのイメージを併記している。縦軸は、パイルを設置しないケースに対する各沈下量(トンネル掘削完了時)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の沈下が大きく抑制され、Case1\_1~Case1\_4ではほぼ同じ減少率が見られる。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。

下部に設置するサイドパイルとは、下半の支保工立て込み直後に挿入する。下半に設置するサイドパイルの効果を検証するため、図-10に、STAGE 7で生じるせん断ひずみの分布を示す。図-10 (a)は、サイドパイルを設置しないケース、図-10 (b)は、下半のみに左右一本ずつ設置したケースの解析結果である。図より、サイドパ

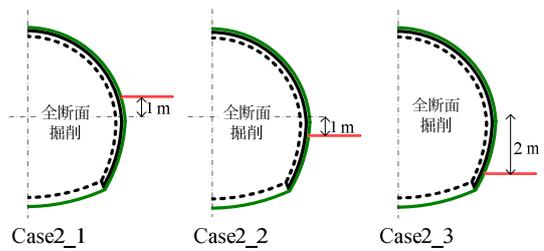


図-11 サイドパイルの高さの影響に関する検討ケース

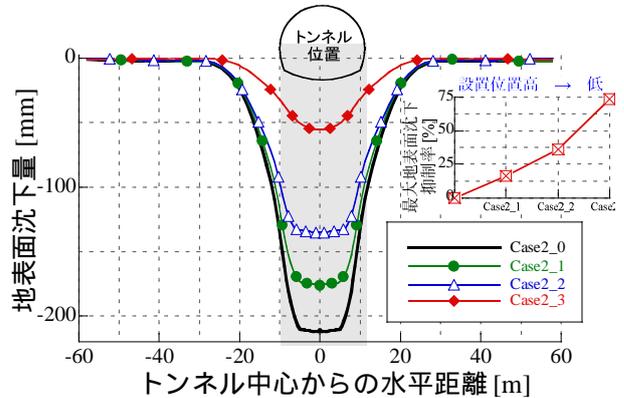


図-12 サイドパイルの設置高さが地表面沈下に及ぼす影響

を設置しないケースでも下半掘削により生じるせん断ひずみは微小なもので、STAGE 4では最大約5%のせん断ひずみが発生することに対して、STAGE 7では、約0.2%しか生じない。また、サイドパイル設置有無両ケースでは大きい差が見られず、これはSTAGE 7で生じるせん断ひずみは非常に小さいためであると考えられる。

図-4、図-5に示すトンネルと地表面の沈下量の推移により、大部分の沈下は、上半部分の掘削過程STAGE 4と下半掘削過程で下半支保工立て込み前までの掘削過程STAGE 6で生じる現象が見られる。

以上により、下半部分の支保工を立て込み後に発生する地盤沈下はわずかなものであるため、サイドパイルの設置有無はより明確な変化は見まれないと考えられる。すなわち、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、沈下抑制にほとんど寄与しないと判断できる。

##### 4.2 設置高さの影響

ここでは、図-11に示す諸ケースのようにサイドパイルを左右1本ずつ設置する場合、施工高さがその地盤沈下抑制効果に及ぼす影響について調べる。簡単のため、ここでは全断面工法でトンネルを掘削する場合を想定する。すなわち、まず全断面の応力を40%開放させ、支保工と吹付けコンクリートを施工した後、応力を100%まで開放させる。

図-12に、各ケースでの地表面沈下形状を示し、同図に最大地表面沈下量の抑制率を併記する。トンネル掘削による最大地表面沈下量はトンネル中央の直上地盤で生じ、その抑制率はパイルを設置しないケースに対する減少率で表す。図より、サイドパイルの設置位置が低いほど大きい地表面沈下抑制効果が得られる結果が見られる。

図-13に、トンネル掘削により周辺地盤に発生するせん断ひずみ分布を示す。図より、トンネル掘削により、大き

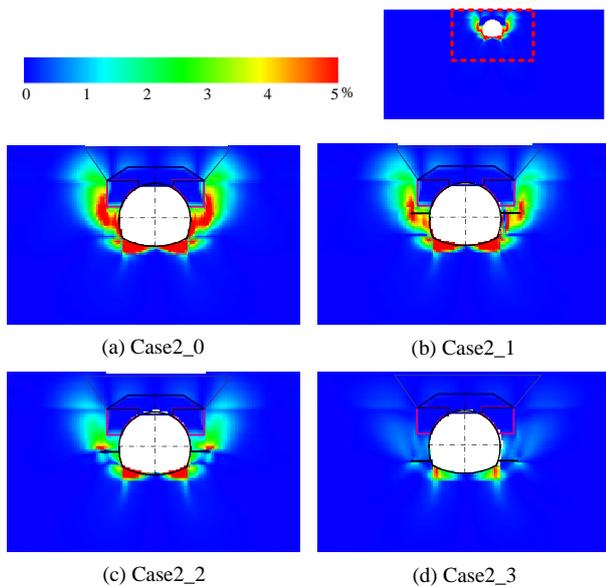


図-13 サイドパイルの高さの影響に関する検討ケース

いせん断ひずみが脚部から斜め上に向けて発生する。サイドパイルを設置すると、大きいせん断ひずみはパイルにより遮断され、その大きさおよび発生領域とともに減少する。これは、上で説明したせん断補強効果である。さらに同図より、サイドパイルの設置位置が低いほど、すなわちすべり線の発生位置から近いほどその効果が高い。これは、サイドパイルを低く設置するほど、大きいせん断ひずみをその発生位置である脚部から近い位置で遮断し、トンネル掘削による影響領域を小さくしたためである。

以上により、サイドパイルはすべり線の発生位置から近いほど、大きい地盤沈下抑制効果を発揮する。本解析で、すべり線は脚部から発達した。ここでは、簡単のため、全断面工法でトンネル掘削する場合に対して検討を行ったが、ベンチカット工法で掘削する場合も、同じ原理が適用できると考えられる。例えば、3段ベンチ工法でトンネルを掘削する場合は、サイドパイルを上半脚部から近い位置に設置するほどその効果が高い。

## 5. まとめ

本研究では、実トンネルを対象として数値解析を実施し、実現場でのサイドパイル工の地盤沈下抑制効果と、その施工パターンと設置位置の影響について検討した。

解析結果と過去の研究成果により、サイドパイルは図-14に示すようにせん断補強効果、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確認された。本解析で対象としたトンネルは、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図-14に示すような2本のすべり線が生じる。

サイドパイルは、改良体コーナーより発生するすべり線を交差することにより、主要なせん断ひずみの発生を阻止し、地盤沈下を抑制する。また、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、荷重

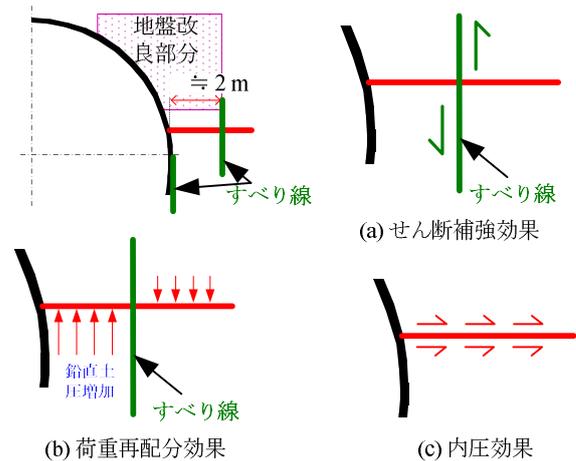


図-14 サイドパイルの地盤沈下抑制メカニズム

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、サイドパイルは内圧効果を発揮し、周辺地盤を補強することで、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。

サイドパイルは、脚部から近い位置に設置するほどその地盤沈下抑制効果が高くなる。ベンチカット工法でトンネルを掘削する際には、上半に設置するほうが一番大きい地盤沈下抑制効果が得られ、下半に設置するサイドパイルはほぼ効果を発揮しない。すなわち、サイドパイルの設置位置を選定する際には、できるだけ上半脚部に近い位置に設置することが効果的であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 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），P5, 2008.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) B. Ye, G. L. Ye, F. Zhang and A. Yashima : Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.3, 547-558. 2007.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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，P73, 2007.
- 10) 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，PP. 150-173, 2006.