

サイドパイルの沈下抑制効果に関する 数値解析

Numerical Analyses on Settlement Reduction Effect of Side Piles

北川隆¹・後藤光理²・田村武³・木村亮⁴・岸田潔⁵

Takashi Kitagawa, Mitsutaka Goto, Takeshi Tamura
Makoto Kimura and Kiyoshi Kishida

¹正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 新幹線部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東北新幹線建設局 (〒020-0034 盛岡市盛岡駅前通1-41)

³正会員 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 教授 (〒615-8520 京都市西京区京都大学桂)

⁴正会員 京都大学 国際融合創造センター 融合部門 教授 (〒615-8520 京都市西京区京都大学桂)

⁵正会員 京都大学大学院工学研究科 都市基盤工学専攻 助教授 (〒615-8520 京都市西京区京都大学桂)

We use side piles as one of countermeasures to control settlement when we construct NATM tunnels in a soft ground with small earth covering. We performed basic studies to clear reinforcing mechanisms and settlement reduction effect of side piles by simulation analyses and parameter analyses. As a result, we found following knowledge; numerical analyses express model tests properly and clear reinforcing mechanisms of side piles. If side piles are installed crossing slip line, side piles are effective to reduce settlement. Therefore side piles need to have enough length. And the ground needs to have a certain amount of bearing capacity.

Key Words : tunnel, side pile, model test, numerical analysis

1. 目的

山岳トンネルの沈下対策として、坑内から鋼管を打設することによるサイドパイルがあり、地山条件によっては効果が確認されたとの報告もされている¹⁾。筆者らは、山岳トンネルの補助工法としてのサイドパイルの沈下抑制効果に着目し、サイドパイルの作用のメカニズムを調べることを目的として、模型実験と数値解析による研究を実施している^{2)~4)}。

本稿では、昨年度実施した模型実験²⁾のシミュレーション解析、パラメータ解析を実施し、サイドパイルの作用メカニズムや、サイドパイルの長さ、トンネルとの結合条件、地盤条件がサイドパイルの沈下抑制効果に与える影響について行った検討の結果について報告する。

2. 実験概要

解析の対象としたのは、文献²⁾に示した実験で

ある。実験は、降下床実験装置(図1)を使用したもので、トンネルとサイドパイルについては図中の逆T型擁壁とアルミ棒による模型でモデル化している。模型を降下床と固定床の境界に設置し、降下床を降下させることで掘削に伴う沈下を表現し、沈下抑制対策としてのサイドパイルの有効性の検討を行うものである。

図2は、平均地表面沈下量について、ケース1(サイドパイルなし)を1として各ケースを比較したものである。ここで、実験においてはケース4(サイドパイル長さ $L=150\text{mm}$)を基本ケースとし、サイドパイルの長さ、模型との結合条件をパラメータとして変化させてこれらの影響を調べている。図によれば、短いサイドパイル($L=50\text{mm}$)を用いたケース3以外はおおむね沈下抑制の効果が見て取れた。トンネル側壁との結合部をフリー(分離)としたケース2についてはケース4~5に比べて、沈下抑制効果が少し小さ

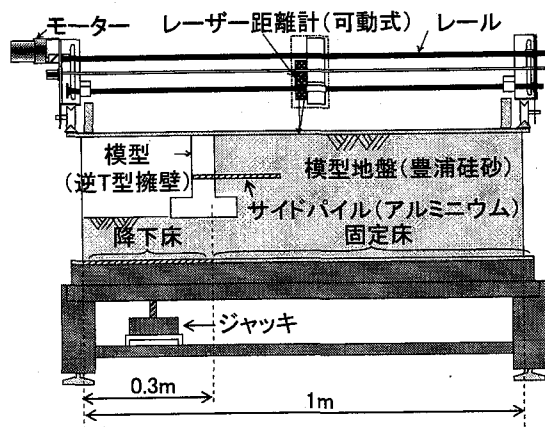


図1降下床実験装置

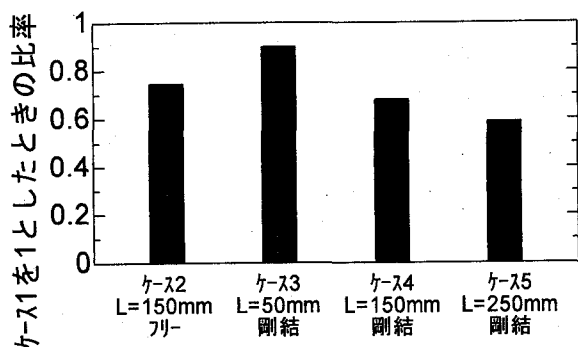


図2対策工の効果の比較

い。これは模型とサイドパイルの間に力やモーメントの伝達がなく、サイドパイルの沈下抑制効果が模型とサイドパイルとを剛結にしたケースよりも小さくなったため考えられている。L=50mmのケース3は、サイドパイルが模型の沈下の影響範囲内に設置されているため、沈下抑制効果が発揮されなかったものと考えられている。L=250mmのケース5は、ケース4とほぼ同程度の効果であった。これより、サイドパイルに沈下抑制効果を持たせるには一定の長さが必要であることが結論づけられている。

3. 剛塑性有限要素法による解析

3.1 概要

まず、2.で示した模型実験のシミュレーション解析を行った。数値解析手法には、前報²⁾同様、剛塑性有限要素法を用いることとした。剛塑性有限要素法解析においては、降下床の下降により生じる速度場・塑性ひずみ速度、降下床に作用する土圧を得ることができる。数値解析においては、サイドパイルの補強メカニズムを、主にすべり線の位置と降下床に作用する土圧の変化とに着目して考察することにする。

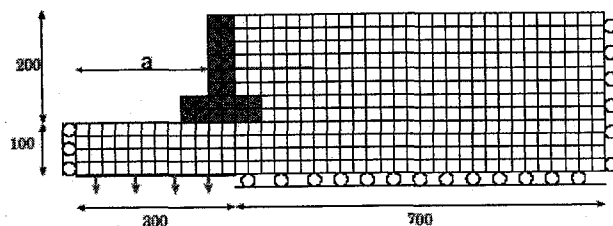


図3解析メッシュ (単位: mm)

表1 解析条件

項目	解析	実験
単位体積重量 γ (kN/m ³)	15.5	15.5
粘着力 c (kN/m ²)	5.9	ほぼ 0
内部摩擦角 ϕ (°)	45	45
ダイクタンシー角 (°)	22.5	—
トンネル模型の比重	2.7	2.7

3.2 解析モデル

解析メッシュを図3に示す。前報²⁾の解析モデルを改良し、逆T型のトンネル模型を忠実にモデル化している。境界条件は、底面を降下床およびスライダ、側面をスライダとし、その他の節点は自由である。荷重としては鉛直下向きに自重を考慮し、降下床には変位境界条件を与えた。また、トンネル模型およびサイドパイルは剛体と仮定し、十分な強度を持ち、変形しないものとした。

3.3 解析条件

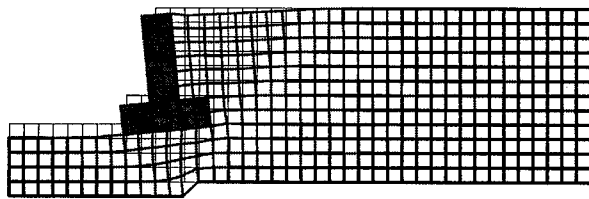
表1に解析条件を示す。単位体積重量 γ および内部摩擦角 ϕ は実験と同じ値を用いたが、粘着力 c については、実験がほぼ0であるのに対して解析では $c=5.9\text{kN/m}^2$ を用いた。これは主に解析の安定のためであるが、降下床に作用する土圧が実験と解析で同じ($=4.17\text{N}$)になるよう定めている。

サイドパイルについては、剛体、トンネル模型との結合条件は剛結とし、長さ L を0(なし)から400mmまで50mmきざみで変化させている。

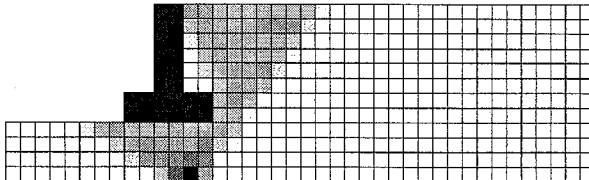
その他、解析は、サイドパイルのすべりの条件を考慮して行った。すなわち、サイドパイル～地盤間に地盤と同じ粘着力を考慮し、これを超えた場合にはすべりが発生する様にしている。

3.4 解析結果

解析結果については、変位速度分布図と塑性ひずみ速度分布図、降下床に作用する土圧、トンネル模型の変位速度、サイドパイルに作用する軸力・モーメントについて整理した。

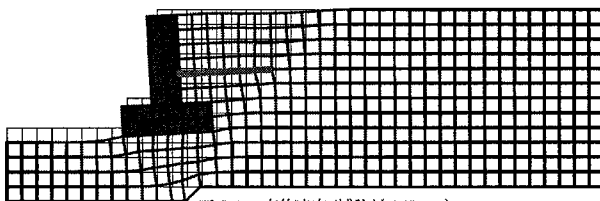


(a) 変位速度分布図

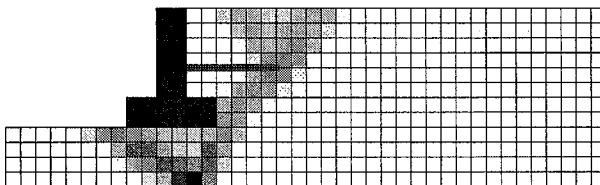


(b) 塑性ひずみ速度分布図

図4 サイドパイルなしの場合

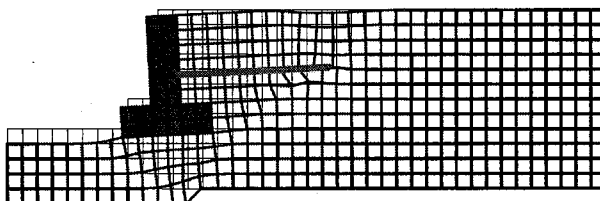


(a) 変位速度分布図

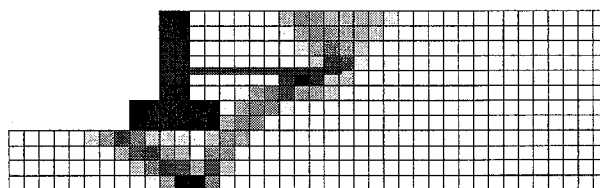


(b) 塑性ひずみ速度分布図

図5 サイドパイル長さ $L=150\text{mm}$ の場合



(a) 変位速度分布図



(b) 塑性ひずみ速度分布図

図6 サイドパイル長さ $L=250\text{mm}$ の場合

(1) 変形・破壊挙動

サイドパイルなし，サイドパイル長さ $L=150\text{mm}$ ，サイドパイル長さ $L=250\text{mm}$ の場合の変位速度分布図および塑性ひずみ速度分布図

を図4～図6に示す．ここで，変位速度分布図は破壊時の変位のモードを示すものである．また，塑性ひずみ速度分布図は，破壊時の相当塑性ひずみ速度について，速度が大きい部分ほど濃い色で表したものである．白色の部分には塑性ひずみ速度が生じない剛体領域である．塑性ひずみ速度の大きな部分をたどって生じる線がすべり線と考えることができる．なお，ここで，変位速度分布図や塑性ひずみ速度分布図ではその絶対値に意味はなく，それぞれの相対的な大きさおよび方向のみ意味がある．

1) サイドパイルなしの場合

図4(a)より，降下床の効果に伴い，実験で見られたような，降下床方向にトンネル模型が回転，移動する挙動が確認できる．また，図4(b)より，塑性ひずみ速度の大きな領域（すべり線）は，降下床の端部からトンネル模型の底部の左右端をめざして斜め方向に角度を持って地表面に向けて立ち上がっていることがわかる．

2) サイドパイルありの場合

サイドパイルの長さの短い $L=150\text{mm}$ の場合(図5)は，サイドパイルなし(図4)とほぼ同様の変形・ひずみを生じている．一方で，サイドパイルの長さの長い $L=250\text{mm}$ の場合(図6)は，変形・ひずみの形態はサイドパイルなしの場合から変化する．すなわち，図6(b)によると，すべり線はサイドパイルに交差する付近で右側に曲がり，サイドパイルの先端で左右に分かれV字型で地表面へと上がっていく．なお，図6(a)によると，(b)で示したすべり線で囲まれた部分については剛体的に変位していることがわかる．その他，地表面は一部隆起して上方向に凸となっており，実験で確認された傾向(文献2)図-5)が再現できている．

(2) 降下床に作用する土圧

サイドパイル長さとは降下床に作用する土圧との関係を図7に示す．ここで，降下床に作用する土圧は降下前の土圧を1として正規化して示している．ここで，降下床に作用する土圧が小さいほど，トンネル模型近傍の土圧がトンネルから離れた地盤に伝わり支持されていることになり，サイドパイルの効果は相対的に大きいと考えられる．

サイドパイルの長さが長いほど土圧が小さく，また，サイドパイル長さ $L=250\text{mm}$ 程度から降下床に作用する土圧が急に低下していることがわかる．図4～図6に示したように，サイドパイルがある程度の長さ以上になると，降下床の沈下で

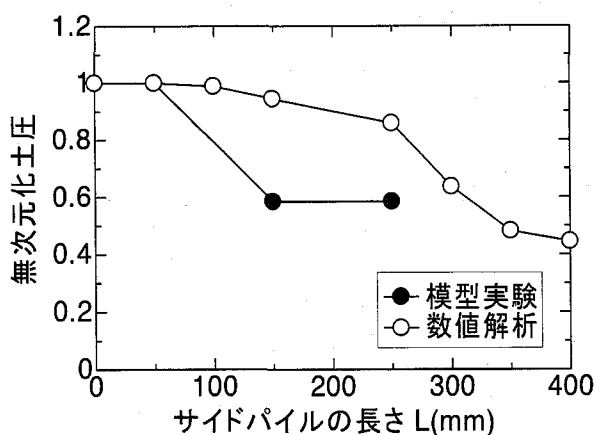


図7 サイドパイルの長さ
と降下床に作用する土圧との関係

生じたすべり線で囲まれた剛体すべり領域の外に支持できるようになり、サイドパイルの効果が急に大きくなるものと考えられる。

解析結果と実験結果とを比較すると、実験では、サイドパイル長さ $L=50\text{mm} \sim 150\text{mm}$ 間で土圧が急に減少しその後はほぼ一定となっているのに対し、解析では土圧が急に下がり始めるのは $L=250\text{mm}$ 程度、土圧が一定となるのは $L=350\text{mm}$ 程度であり、実験で見られたよりも長さを長くしないとサイドパイルは効果を発揮しない傾向にある事が異なっている。

(3) トンネル模型の変位速度

サイドパイルの長ささとトンネル模型の水平・鉛直方向の変位速度との関係を図8に示す。なお、変位速度の算出点は図9に示した通りである。ここで、トンネル模型の変位速度は破壊時の値であり、変位速度が大きいほど、急激に地盤がすべることを示している。図より、水平方向、鉛直方向のいずれについても、トンネル模型の変位速度はサイドパイルの長さが長くなるに従い低下し、サイドパイルの効果が大きくなるが、変位速度は特にサイドパイル長さ $L=250\text{mm}$ 程度から急に低下する傾向にある。これは(2)で示した降下床に作用する土圧と同様の傾向である。サイドパイルがある一定の長さをもってはじめて沈下抑制効果を発揮することの別の現れ方であると考えられる。

(4) サイドパイルに作用する軸力・モーメント

サイドパイルに作用する軸力の分布を図10に示す。軸力は、サイドパイル全長に亘ってほぼ引張で、絶対値はトンネルとの結合部あるいはその近傍で最大値をとり、サイドパイル先端に向かう

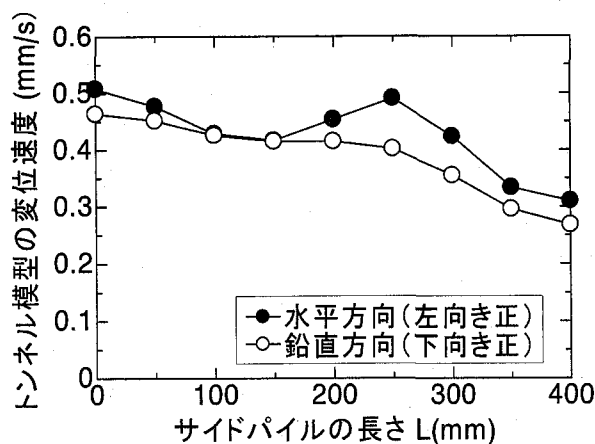


図8 トンネル模型の変位速度

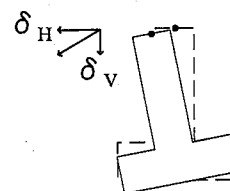


図9 トンネル模型の変位速度の算出点

に従って小さくなる。

サイドパイルに作用するモーメントの分布を図11に示す。曲げモーメントについても、サイドパイルの長さが長くなるに伴い大きくなる傾向にある。

図12にサイドパイル長ささと断面力との関係を示すが、特に、曲げモーメントについては、(2)、

(3)と同様、サイドパイル長さ $L=250\text{mm}$ 程度から急激に大きくなり始める。これはすべり面をサイドパイルが横断するようになり、サイドパイルがすべり面外の地盤に支持され、サイドパイルにより伝達される荷重が多くなったことが理由として考えられる。なお、モーメントの分布については、先端部やトンネル模型との剛結部では値が小さく、サイドパイル中央部で値が大きくなるのが特徴である。

軸力については、サイドパイルが長くなるに従って増加する傾向にあるが、その挙動は曲げモーメントのように明確な変化点を持つものではない。また、サイドパイル長さ $L=350\text{mm}$ を超えるとはほぼ一定となった。この理由であるが、図12から分かるように、 $L=250\text{mm}$ 以上になるとサイドパイル先端部で軸力=0となる領域が生じるようになる。本モデルでは、サイドパイル～地山の要素間にすべりが考慮されており、サイドパイルを長くしてもある程度以上の長さになると地山との間ですべりが生じて軸力がそれ以上大きくならないためと考えられる。

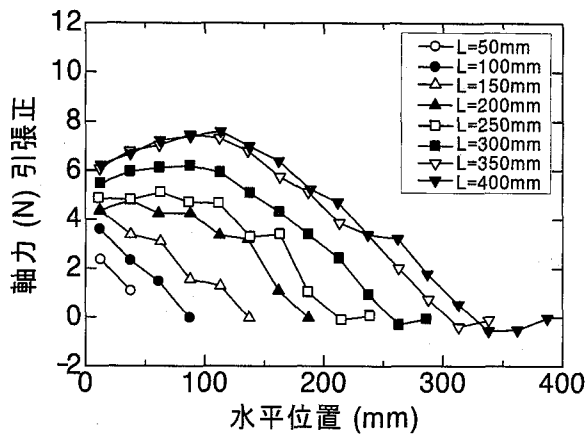


図 10 サイドパイルに作用する軸力の分布

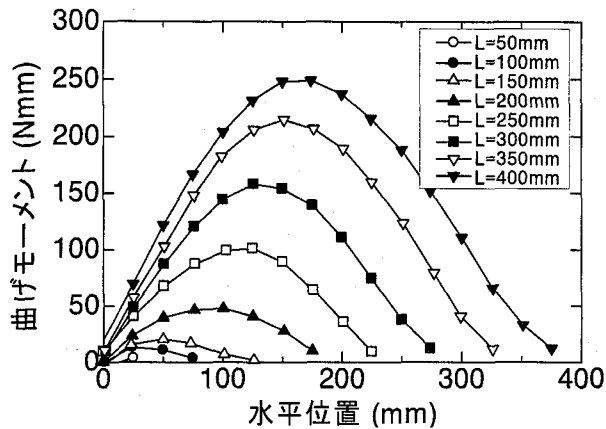


図 11 サイドパイルに作用するモーメントの分布

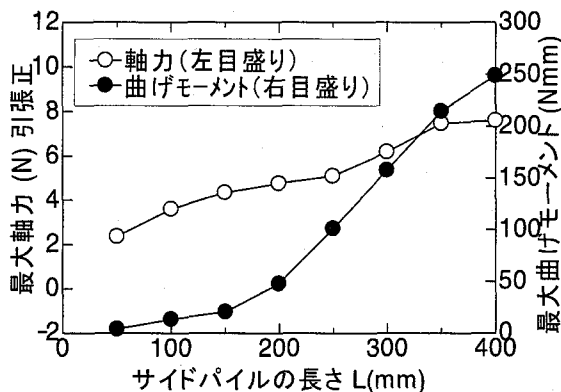


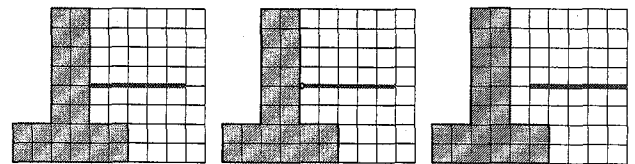
図 12 サイドパイルの長さとの関係

3.5 まとめ

剛塑性解析を用いたシミュレーション解析を行った結果、変位速度分布図から、実験で見られたような、降下床方向にトンネル模型が回転、移動する挙動や、地表面に一部盛り上がりが生じる挙動が再現できた。その他に、降下床に作用する土圧の変化から、実験で見られたような、サイドパイルの長さが一定以上になると降下床に作用する土圧が減少する傾向が確認できた。これらの結果より、解析は模型実験を適切に表現できていると判断できる。また、塑性ひずみ速度分布図から、サイドパイルが降下床の低下に伴い発生する

表 2 解析ケース

結合条件	内部摩擦角 ϕ (°)		
	0	30	45
(a) 剛結	Case1	Case2	Case3
(b) ヒンジ結合	Case4	Case5	Case6
(c) 一要素離す	Case7	Case8	Case9



(a) 剛結 (b) ヒンジ結合 (c) 一要素離す
図 13 トンネル模型とサイドパイルの結合条件

すべり線と交差するか否かでサイドパイルの沈下抑制効果が発揮されるか否かが決定されることが確認できた。

ただし、土圧が低下をはじめるサイドパイルの長さ、土圧が定常状態になるサイドパイルの長さが実験～解析間で異なることが確認された。この差異が生じる原因としては、

- ・解析は実験よりも粘着力 c がやや大きいこと
- ・実験が 3 次元であるのに対し、解析は 2 次元であること

・内部摩擦角が大きく、引張強度が小さいことなどの理由が考えられる。これらの原因については、3 次元モデルの適用、粘着力・内部摩擦角及びダイレタンシー角の再評価等により検討する必要があると考えられる。

しかしながら、定性的には実験と解析の両者の傾向は全体的に類似しており、解析モデルやサイドパイルの条件などの妥当性は許容範囲にあると判断し、パラメータ解析に用いることとした。

4. パラメータ解析

4.1 概要

次に、「3. シミュレーション解析」では固定とした、サイドパイルとトンネル模型との結合条件や地盤条件（内部摩擦角 ϕ ）が、サイドパイルの沈下抑制効果にどのような影響を及ぼすかについて、これらの条件をパラメータとして解析を行った。

4.2 解析条件

サイドパイルとトンネル模型との結合条件や内部摩擦角 ϕ を変化させ、表 2 に示す 9 ケースを想定し、また、それぞれについてサイドパイルの長さを変え、計 72 ケースについて解析を行った。

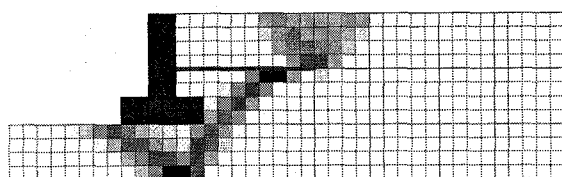


図 14 ヒンジ結合の場合 (case6)

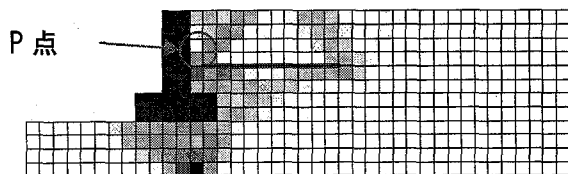


図 15 一要素離す場合 (case9)

ここで、結合条件については、3. では剛結として解析を行ったが、実際は、サイドパイルは鋼材を用いて H 鋼に溶接する構造となっているため、完全な剛結ではないと考えられる。このため、図 13 に示すように、(a)剛結、(b)ヒンジ結合、(c)一要素離すの 3 種類の条件を考えることとした。なお、それぞれのケースについて、サイドパイルの長さを $L=0\sim 400\text{mm}$ で 50mm ずつ変化させている。これら以外の条件については 3. と同様である。

4.3 解析結果

解析結果については、塑性ひずみ速度分布図、降下床に作用する土圧、サイドパイルに作用する軸力・モーメントについて整理した。

4.3.1 結合条件の影響

まず、サイドパイルとトンネル模型との結合条件の影響を把握することにした。

(1) 変形・破壊挙動

塑性ひずみ速度分布図を図 14～図 15 に示す。なお、代表的な結果として、 $L=250\text{mm}$ 、 $\phi=45^\circ$ の場合を例にとり示している。図 14 に示したヒンジ結合の場合は、図 6(b) に示した剛結の場合とほとんど同様の変形状態である。これは図 11 に示したように、剛結の場合でもサイドパイルとトンネル模型との結合部であまり大きなモーメントが作用していないためと考えられる。一要素離して設置した場合を図 15 に示す。この場合は、落とし戸からサイドパイルに続くすべり線については剛結の場合、ヒンジ結合の場合とあまり変わらないが、サイドパイルより上については、トンネル模型とサイドパイル左端部との間（例えば、図中の P 点）から地表面に向けて斜めに発生する

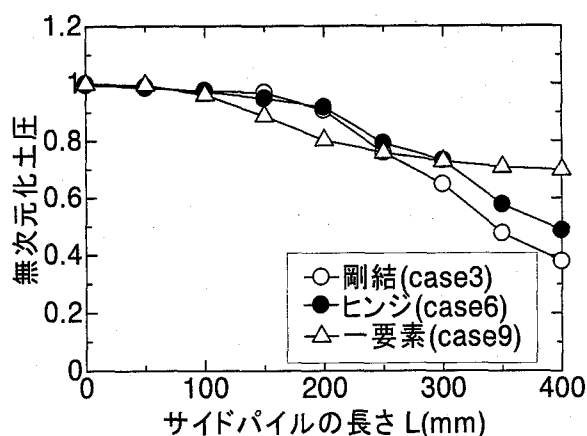


図 16 結合条件の違いによる土圧の変化

ようになるなど、すべりはトンネルの近くで局所的に発生していることがわかる。

(2) 降下床に作用する土圧

降下床に作用する土圧を図 16 に示す。ここで、 $\phi=45^\circ$ (case 3, 6, 9) の場合を例にとり示している。また、降下床に作用する土圧は、降下前の土圧を 1 として正規化して示している。

図によれば、剛結とヒンジ結合はほぼ同様の挙動で、サイドパイル長さ $L=250\text{mm}$ 程度から効果的になり、 $L=350\text{mm}$ 程度で土圧は半減する。これは、(1) で示したように、破壊形態で両者に大きな差がないことと関係している。一要素離す場合はサイドパイルが比較的短い場合でも効果が見られるが、一方で効果が頭打ちになる長さも短い傾向にある。これは、トンネルの近くで局所的にすべりが発生するようになり、サイドパイルの長さによる効果が失われるためと考えられる。

(3) サイドパイルに作用する軸力・モーメント

サイドパイルに作用する軸力分布の変化を図 17 に示す。ここで、 $\phi=45^\circ$ (case 3, 6, 9)、サイドパイル長さ $L=250\text{mm}$ の場合を例に取り示している。ヒンジ結合の場合は剛結の場合とほぼ同様の傾向を示しているが、一要素離す場合はトンネルに近い側で軸力が小さくなっている。これはサイドパイルとトンネルとの結合がなく、サイドパイルは単に地盤の変位のみを抑制しているためと考えられる。

次に、同様にしてサイドパイルに作用する曲げモーメント分布の変化を図 18 に示す。特に、一要素離した場合は全体的に値が小さめとなっている。一要素離す事により、トンネル模型から作用するせん断力が無くなり、曲げモーメントが小さくなったものと考えられる。

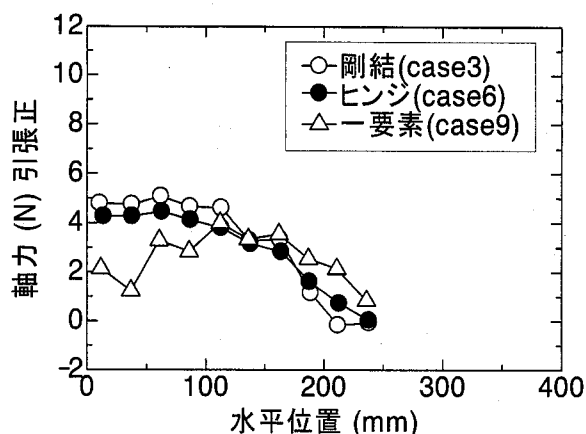


図 17 結合条件の違いによる軸力分布の変化
(サイドパイル長さ $L=250\text{mm}$ の例)

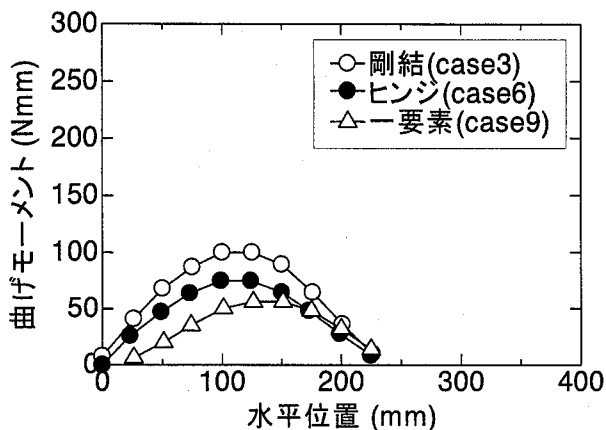


図 18 結合条件の違いによる曲げモーメントの分布の変化
(サイドパイル長さ $L=250\text{mm}$ の例)

4.3.2 地盤条件の影響

次に、地盤条件（内部摩擦角 ϕ ）の影響を調べることとした。なお、結合条件を剛結とした場合の例である。

(1) 変形・破壊挙動

特徴的な結果が得られた $\phi=0^\circ$ の場合について、変位速度分布図を、サイドパイルなし（図 19）、 $L=250\text{mm}$ （図 20）の場合を例に取り示す。図 4(a)、図 6(a) で示した $\phi=45^\circ$ の場合と比較し、すべり線が急角度で地表に向かって生じていること、サイドパイル～地盤間ですべりが生じていることがわかる。

(2) 降下床に作用する土圧

降下床に作用する土圧を図 21 に示す。ここで、降下床に作用する土圧は、降下前の土圧を 1 とし正規化して示している。

これより $\phi \neq 0^\circ$ の場合は、降下床に作用する土圧は ϕ によらずほぼ同様に、サイドパイルの長さが長くなるに従い土圧が小さくなる傾向を示し

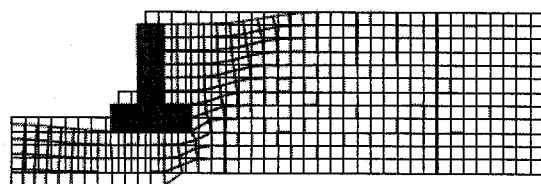


図 19 変位速度分布図 ($\phi=0^\circ$, サイドパイルなし)

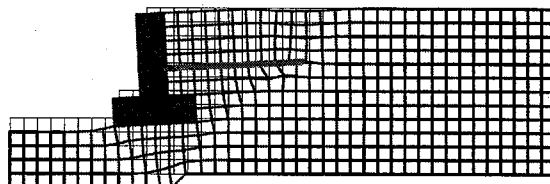


図 20 変位速度分布図 ($\phi=0^\circ$, $L=250\text{mm}$)

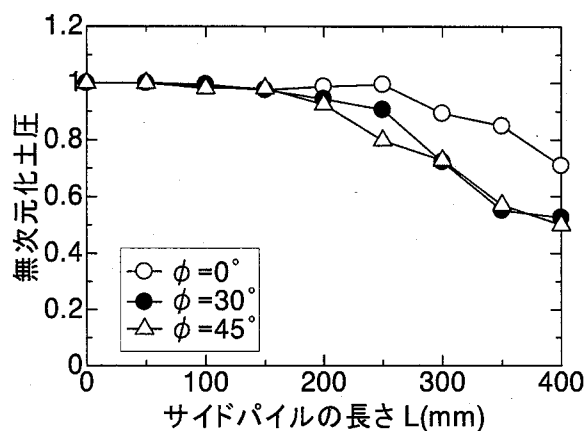


図 21 降下床に作用する土圧

ている。一方、 $\phi=0^\circ$ の場合はサイドパイルの長さを長くした時の土圧の低下量が $\phi \neq 0^\circ$ の場合より小さいことがわかる。これは、図 20 でも示したように、 $\phi=0^\circ$ の場合はサイドパイル～地盤間ですべりが生じ、サイドパイルが有効に機能しないためと考えられる。

4.4 まとめ

図 22～図 23 に降下床に作用する土圧の低減効果に着目して、パラメータ解析の結果をまとめる。なお、解析結果については、サイドパイルの長さとしては、サイドパイルの効果が現れ始める長さとして $L=200\text{mm}$ を、また、十分に効果が現れる $L=400\text{mm}$ の場合について整理した。

(1) 地盤のせん断強度定数の影響

図より、サイドパイルの長さによらず、地盤の内部摩擦角 ϕ が大きくなると降下床に作用する土圧が小さくなり、サイドパイルの効果が大きくなる。ただし、サイドパイルの長さが小さい場合には、全体に土圧低減効果が小さく、また、 ϕ の増加に伴う効果も小さい。 $\phi=0$ の場合、サイドパイルの土圧の軽減効果が特に小さい。

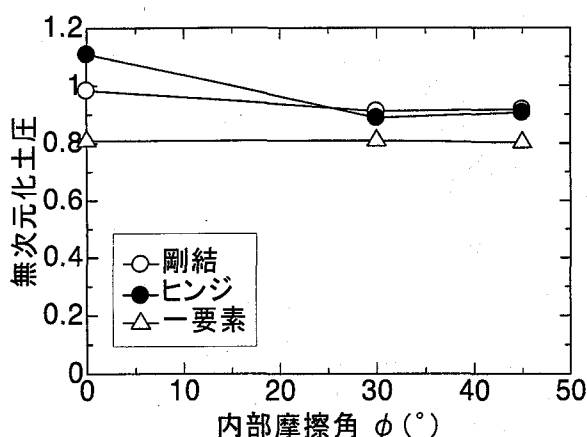


図 22 パラメータ解析まとめ

(サイドパイル長さ $L=200\text{mm}$ の場合)

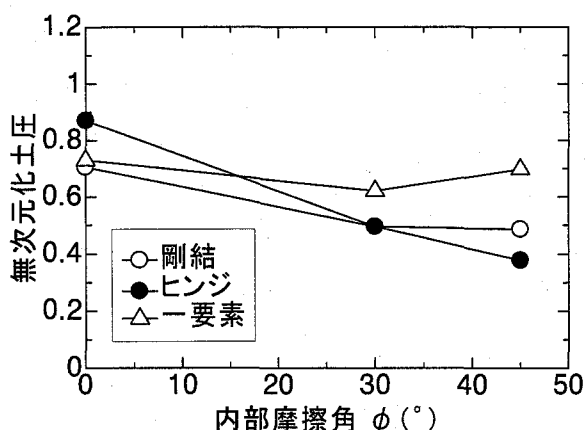


図 23 パラメータ解析まとめ

(サイドパイル長さ $L=400\text{mm}$ の場合)

これは、 ϕ が小さい場合はサイドパイル～地盤間ですべりが生じ、サイドパイルがあっても地盤との間に摩擦が働かず、トンネル模型が地盤から抜け出るように変位し、サイドパイルが有効に機能しないためと考えられる。

(2) 結合条件の影響

図より、剛結の場合は、 $L=400\text{mm}$ については、最も沈下抑制効果が大きいことがわかる。ヒンジ結合の場合は、剛結の場合と同程度の効果があるが、 ϕ が小さい時については沈下抑制効果が減少するなど、不確実性を有する。一要素離す場合はサイドパイルが短い $L=200\text{mm}$ の場合においても一定の沈下抑制効果が得られているが、 $L=400\text{mm}$ としても沈下抑制効果はあまり変化しない。これは、剛結、ヒンジ結合と比べ、トンネル近傍で局所的に大きな沈下速度が発生するため、長くしても沈下抑制効果はあまり変化しないためと考えられる。

5 まとめ

本研究では、模型実験のシミュレーション解析、パラメータ解析を実施し、サイドパイルの作用メカニズムや、サイドパイルの長さ、トンネルとの結合条件、地盤条件がサイドパイルの沈下抑制効果に与える影響について検討を行った。以下にその結果をまとめる。

(1) 数値解析手法について

剛塑性有限要素法により、サイドパイルに関する模型実験を適切に表現することができた。

(2) サイドパイルの作用メカニズム

数値解析によりサイドパイルの作用メカニズムが明らかになった。すなわち、サイドパイルの作用メカニズムは、トンネルの掘削により生じるすべり線をまたぐように打設することにより、すべり線の位置をトンネルから離れた場所に移動させ、地盤のすべりを起こりにくくし、地表面の沈下を減少させるというものである。

(3) サイドパイルの諸元と効果

数値解析より、サイドパイルが効果を発揮する条件を明らかにした。すなわち、長さについては、ある程度の長さが必要であることがわかった。また、トンネルとサイドパイルとの結合方法については、トンネルとしっかり結合すると効果が大きいことがわかった。地盤については、強度が小さい (ϕ が小さい) 場合はサイドパイルの効果は小さく、サイドパイルが効果を発揮するためには地盤の強度がある程度ある必要があることがわかった。

参考文献

- 1) 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被り土砂地山を掘削, トンネルと地下, vol.35, No.4, 2004.4
- 2) 北川隆, 後藤光理, 田村武, 木村亮, 岸田潔: 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, vol.15, 2005.12
- 3) 北川隆, 後藤光理, 田村武, 木村亮, 岸田潔: 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, 2005.9
- 4) 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 回地盤工学研究発表会, 2006.7