

サイドパイルの沈下抑制効果に関する 基礎的研究

Basic Studies 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⁴

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 九州新幹線建設局 (〒812-8622 福岡市博多区祇園町2-1)

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 (〒603-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻 助教授 (〒603-8501 京都市左京区吉田本町)

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 of side piles by model tests and numerical analyses. As a result, we found following knowledge; 1) side piles are effective to reduce settlement, 2) side piles become more effective under following conditions, they are installed crossing slip line, they are installed closer, they are installed near to the trapdoor, they are fixed to the tunnel tightly, adhesion to the ground is improved by pushing into the ground, and the ground have a certain amount of bearing capacity.

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

1. はじめに

経済性や補助工法の技術開発に伴い、最近では低土被り土砂地山トンネルにも山岳工法が採用される事例が増加している。ただし、山岳工法は切羽を開放して掘削するため、地山の剛性が小さい低土被り未固結地山では地表面沈下が大きくなる傾向にある。一方で、都市部でトンネルを施工する場合、地表面沈下等、地表に与える影響を極力抑えることが要求される。沈下対策のための補助工法としては、先受工（長尺鋼管式先受工等）や、脚部補強工（フットパイル等）、地盤注入等が一般に用いられているが、費用対効果が必ずしも良いとは言いきれない面がある。ここで、比較的安価な沈下対策として、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⁾。そこで、今回、サイドパイルの沈下抑制効果を明らかにし、作用のメカニズムを調べることを目的に、模型実験と数値解析による基礎的な研究を実施することにした。

2. 模型実験

2.1 概要

図-1にモデル化の考え方を示す。実トンネルにおけるサイドパイルは、掘削、吹き付け後、トンネル側壁～側壁脚部にかけて水平方向に打設することにより、下半掘削時あるいは次のサイクルの上半掘削時の沈下を防止すると考えられる。そこで、実験においては、降下床実験装置（図-2）²⁾を使用することとし、サイドパイルの周りの部分はT型擁壁とアルミ棒による模型（図-3）でモデル化することとした。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。模型はアルミ製で、側壁に穴が設けられており、実験ケースにあわせてサイドパイルの設置・交換が可能となっている。模型地盤は乾燥した豊浦珪砂を用い、気中落下法により作成している。実験時の相対密度は90%程度である。表-1に実験ケースを示す。ケース4を基本ケースとし、サイドパ

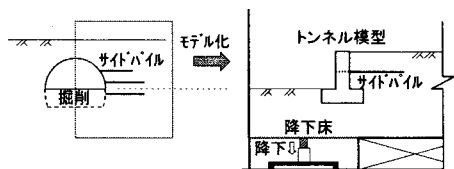


図-1モデル化の考え方

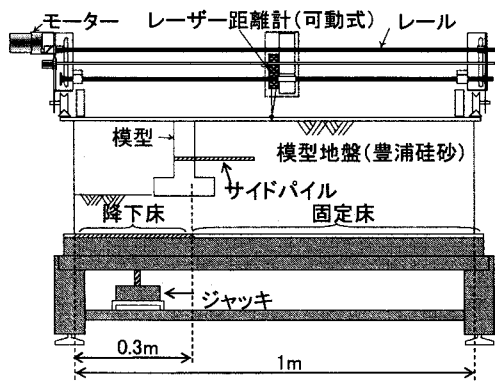


図-2降下床実験装置

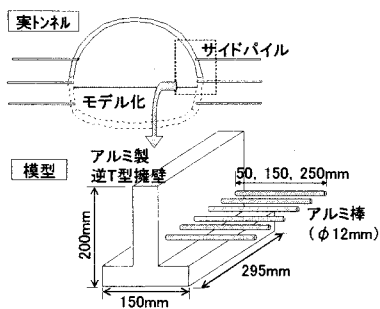


図-3 模型

表-1 実験ケース

	サイドパイル		模型との 結合条件	パイルの 圧入	備考
	本数	長さ			
1	サイドパイルなし				無対策
2	5本	150mm	フリー	なし	フリー
3		50mm	剛結		短い
4		150mm			基本
5		250mm			長い
6	11本	150mm			本数多
7	5本		あり		圧入

イルの本数, 長さ, 模型との結合条件, サイドパイルの圧入をパラメータとして変化させてこれらの影響を調べた。計測項目は, 地表面沈下, 模型の変位, 降下床に作用する荷重である。

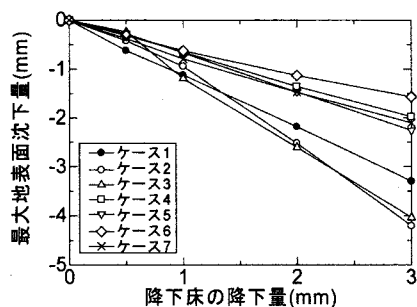


図-4 最大地表面沈下の推移

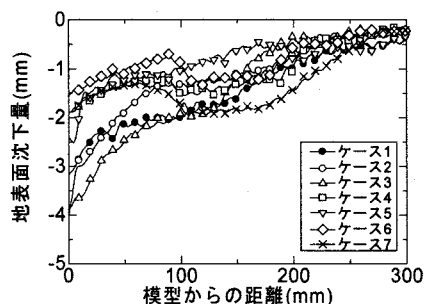


図-5地表面沈下の分布

2.2 実験結果

(1) 地表面沈下

図-4に最大地表面沈下量(模型直近部の沈下量)の推移を示す。いずれのケースにおいても, 降下床の降下に伴い弾性的に地表面の沈下が生じている。最大地表面沈下量からは, ケース4~7については明確な抑制効果が見られたが, ケース2,3についてはほとんど抑制効果が見られなかった。図-5に地表面沈下の分布を示す。いずれのケースも模型側の沈下量が大きくなる分布を示す。地表面沈下量については, 模型から離れたところではケース間で大きな差はないが, 模型に近い側については, ケース4~7では沈下が抑制されており, サイドパイルの沈下抑制効果が現れていることがわかる。図-6に平均地表面沈下量の推移を示す。これは地盤の地表面沈下量を水平方向に平均することで算出したもので, 沈下形状の違いを考慮した全体的な沈下量を示すものである。平均地表面沈下量についても降下床の降下量にほぼ比例して弾性的に沈下していることがわかる。図より, 最大地表面沈下量では効果が判明しなかったケース2でも沈下抑制効果を有していることが確認された。これは, 図-5にもあるように, 最大地表面沈下量は大きい, 模型からの距離が50mm程度以遠になるとケース1,3に比べて沈下が小さくなる傾向にあるためと考えられる。

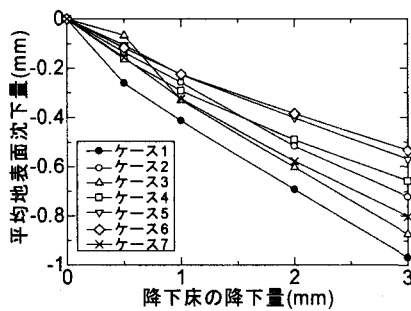


図-6 平均地表面沈下量の推移

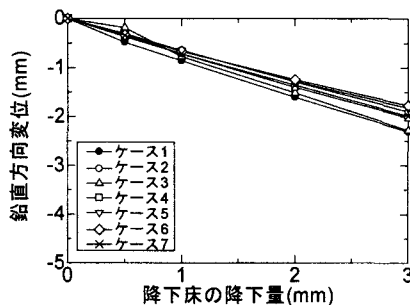


図-7 模型の沈下量の推移

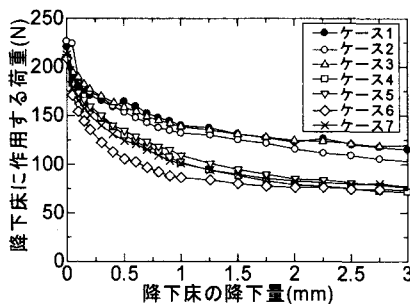


図-8 降下床に作用する荷重の推移

(2) 模型の挙動

図-7に模型の沈下量の推移を示す。模型の沈下量は地表面沈下量と比較してケース毎の差が少ない。これは、模型自体は降下床の降下に連動する形で沈下しているためと考えられる。模型は降下床と同じように沈下しようとするのに対し、トンネル周辺地盤についてはサイドパイルの効果で沈下が抑制されていると考えられる。

(3) 降下床に作用する荷重

図-8に降下床に作用する荷重の推移を示す。いずれのケースも降下床の降下に伴い荷重が低下していることがわかる。降下床上方の地盤に作用する荷重は、地盤およびサイドパイルに作用するせん断力により側方に伝達され、支持されているものと考えら

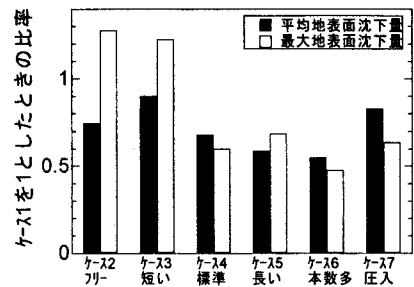


図-9対策工の効果の比較

れる。ここで、荷重の最終値は、ケース4～7はケース1～3の6割程度となっており、地盤に加えてサイドパイルによっても荷重が負担され、その結果として沈下が小さくなったものと考えられる。

(4) サイドパイルの効果

図-9は、平均地表面沈下量、最大地表面沈下量について、ケース1を1として各ケースを比較したものである。最大地表面沈下量についてはデータのばらつきの影響が出やすいので平均地表面沈下量もあわせて判断すると、短いサイドパイルを用いたケース3以外はおおむね沈下抑制の効果が見て取れた。模型（トンネル側壁）との接合部をフリー（分離）としたケース2についてはケース4～7に比べて、沈下抑制効果が少し小さかった。これは模型とサイドパイルの間で力やモーメントの伝達がなく、サイドパイルが沈下を抑制する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る。ケース3は短いサイドパイルを用いたもので、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る。長いサイドパイルを用いたケース5については、ケース4とほぼ同程度の効果であった。これは、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を有し、影響範囲外まで打設されていればよいことを示すものである。サイドパイルの本数を増加させたケース6については、サイドパイル一本当たり作用する荷重が小さくなった結果、沈下量も小さくなったと考えられるが、沈下量の抑制効果は、必ずしもサイドパイルの設置本数には比例しないことがわかった。これは、今回はサイドパイルの径が、サイドパイルの設置間隔に比べて大きく、本数を増加させることにより群杭効果が生じ、1本あたりの効果が低下したものと考えられる。サイドパイルを圧入したケース7については、圧入によりパイル周辺の地盤が締めり沈下量を抑制する効果が現れたものと考えられる。

2.3 まとめ

模型実験の結果得られた知見を以下にまとめる。

- ① サイドパイルの設置によりトンネルの沈下を抑制できる。
- ② サイドパイルには一定の長さが必要である。また、その効果はサイドパイルを密に打設するほど高まる。
- ③ サイドパイルをトンネルに十分に固定することや、圧入等によりと地山の付着を強めることにより効果が高まる。

3. 数値解析

次に、サイドパイルの導入による沈下抑制のメカニズムを定性的に把握することを目的として数値解析を実施した。

3.1 概要

土構造物の限界状態の解析においては、有限要素法により応力分布を求め、破壊条件の下でそれらが限界状態に達しているかを検討する極限解析が一般的に用いられている。よって、今回の降下床の解析においても、極限解析により実施することにした。なお、計算を容易にするため、弾性変形を無視し極限状態だけを直接考察する剛塑性有限要素法をまず用いることとした。剛塑性有限要素法解析により、降下床の下降により生じる速度場・塑性ひずみ速度、トンネル天端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トンネル天端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。

3.2 解析条件

(1) モデル化

図-10 にモデル化の考え方を示す。解析においては、模型および模型前面の地盤のモデル化は行わず、サイドパイルのみモデル化することとした。また、模型の底部を降下床と仮定しここを降下させることにより実験を再現することとした。これは、計算機能力上の制約と、モデルを単純化するためである。なお、図-7 によれば、模型の沈下量は降下床の沈下量と比例しており、一次近似としては妥当と考えられる。

解析に用いた有限要素メッシュを図-11 に示す。対称性を考慮し解析は対象領域の右半分とした。サイドパイルは剛な直線部材として水平方向に配置した。底面の左端 5 要素が降下床の部分である。側面・底面の境界条件はスライダーとした。なお、ここにおいてはすべり線とサイドパイルの位置関係の影響

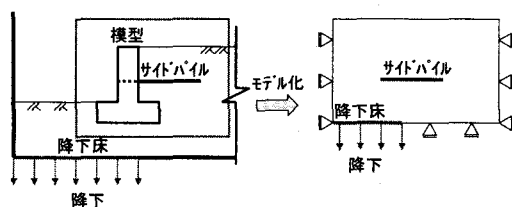


図-10モデル化の考え方

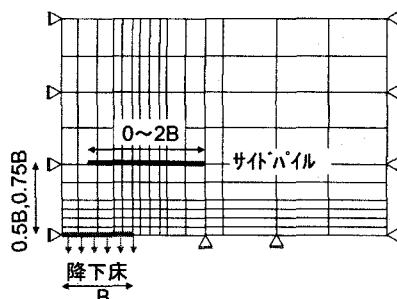


図-11 有限要素メッシュ

表-2 サイドパイルの長さ、位置の条件

物性	剛部材
タイプ	シリーズ A, B (下図参照)
サイドパイルの長さ	0~2B (B=降下床の幅)
サイドパイルの位置	0.5B, 0.75B

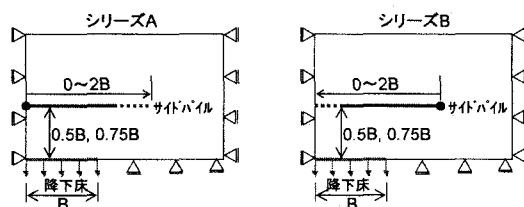


図-12サイドパイルの位置

を把握することを主眼とすることとし、土被りについては降下床の幅 B の 3 倍とした。

地盤材料の物性は、内部摩擦角 ϕ 、粘着力 c で関連流れ則に従う Mohr - Coulomb 材料とした。

降下床の節点変位速度 Δ は、鉛直上向きを正として 1.0 とした。

解析結果は極限状態において降下床に作用する土圧 P により評価することとし、降下床の各節点に作用する力の合計として求めることとした。

解析においては、地盤の種類、サイドパイルの長さ・位置を変化させ、パラメータ解析を行った。サイドパイルの位置については、模型にサイドパイルを剛結した場合を想定したシリーズ A と、模型とサイドパイルとがフリーになっている場合を想定した

表-3 地盤条件

地盤	単位重量 ρg (kN/m ²)	摩擦角 ϕ (°)	粘着力 c (kPa)	備考
C	10	0°	10	粘性土想定
S	10	30°	0.01	砂質土想定

シリーズBの2通りとした(表-2, 図-12)。ここで, シリーズAについては, サイドパイルの左端を始点として長さを0~2B(B: 降下床の幅)の範囲で増加させる。また, 左端は回転拘束条件とした。一方, シリーズBについては, サイドパイルの右端を始点として長さを増加させることが異なる。

地盤条件については, 粘性土を想定し材料パラメータを $\rho g=10$ (kN/m²), $\phi=0^\circ$, $c=10$ (kPa)としたケース(C地盤), 砂質土を想定し材料パラメータを $\rho g=10$ (kN/m²), $\phi=30^\circ$, $c=0.01$ (kPa)としたケース(S地盤)の2種類を設定した。表-3に地盤条件をまとめる。

3.3 解析結果

3.3.1 シリーズA

(1) 崩壊機構と相当塑性ひずみ速度分布

まず, C地盤の解析結果のうち, (a)サイドパイルなし, (b)L=B, (c)L=2Bの3ケースについて, 崩壊機構(左図)と相当塑性ひずみ速度の分布(右図)を図-13に示す。ここで, 右図は崩壊時の相当塑性ひずみ速度の分布を示すもので, ひずみ速度が大きい部分ほど濃い色で表してある。また, 白色の部分は, 塑性ひずみ速度が生じない剛体領域である。相当塑性ひずみ速度の大きな部分をたどる線が生じるすべり線と考えることができる。なお, いずれも $H=0.75B$ の時のものである。

図より, (a)サイドパイルなしのケースでは, 降下床端部から鉛直上方に向けてすべり線が発生し, 降下床上方の地盤が共下り的に崩壊していることがわかる。一方, サイドパイルを入れた(b)L=B, (c)L=2Bのケースでは, すべり線はサイドパイル端部から鉛直上方に発生している。ただし, (b)L=Bのケースでは, サイドパイルの長さLが不足し, 崩壊機構や相当塑性ひずみ速度分布については結果的にサイドパイルなしの場合と同様になっている。一方, (c)L=2Bのケースでは, サイドパイルの下部の要素にひずみ速度が大きな箇所が広く分布しているものの, すべり線はサイドパイルの先から鉛直に延びている。サイドパイルによりすべり線がトンネルから離れたところに移動し, サイドパイルによって地盤の荷重が支持されていることが確認できる。

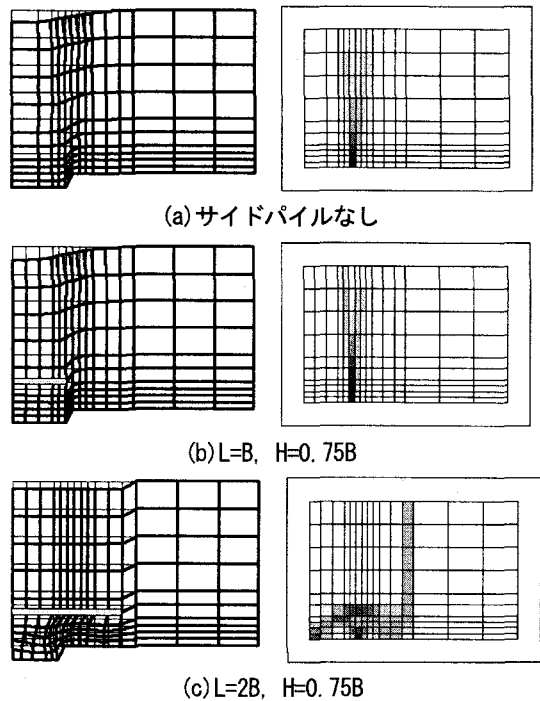


図-13 崩壊機構と相当塑性ひずみ速度分布 (C地盤)

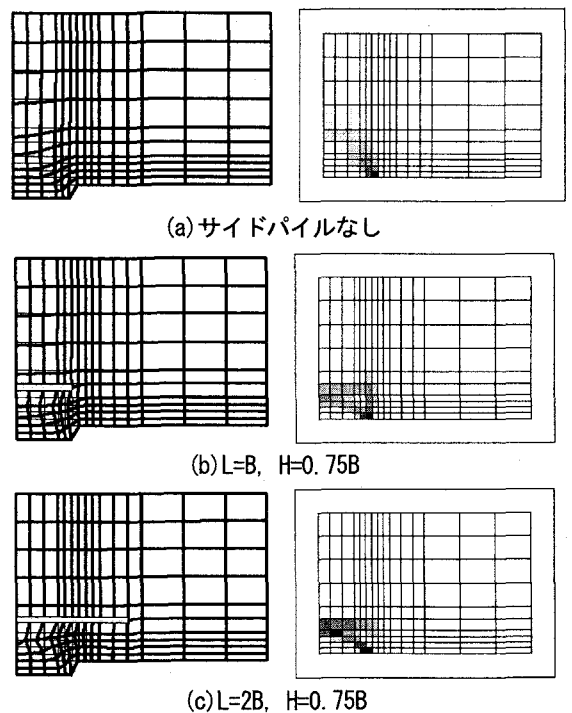


図-14 崩壊機構と相当塑性ひずみ速度分布 (S地盤)

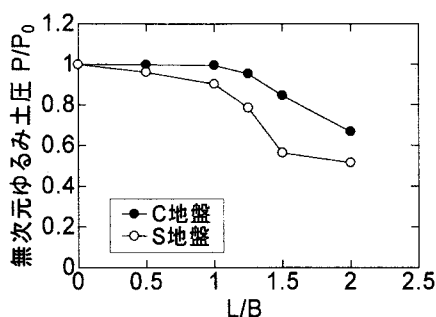


図-15 地盤の種類の影響 ($H=0.75B$)

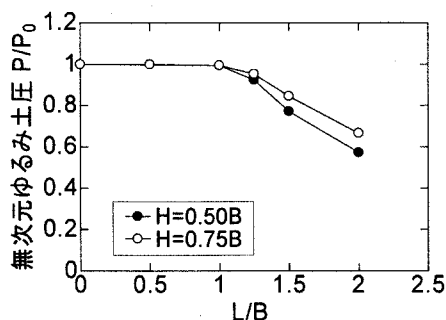


図-16 降下床とサイドパイルとの距離の影響 (C 地盤)

次に S 地盤であるが、図-14 に、C 地盤と同様のサイドパイルの条件の 3 ケースについて、崩壊機構と相当塑性ひずみ速度の分布を示す。図より、S 地盤は C 地盤とは異なり、(a) サイドパイルなしの場合のすべり線は降下床端部から降下床上部に向かって発生しグラウンドアーチを形成していることがわかる。これは落し戸実験において、摩擦角を持つ材料の場合に見られる現象³⁾で、摩擦角 ϕ の作用によるアーチング作用であり、Terzaghi の緩み高さが ϕ と共に小さくなることと同様のものである。

サイドパイルを導入した(b)(c)の場合を見ると、すべり線は降下床端部からアーチを形成するように左上へ向けてまず発生するが、サイドパイルに到達した時点ですべり線の発達は止まり、サイドパイル端部から再び地表に向けて鉛直に伸びるようになる。

(2) 地盤の影響

図-15 に、 $H=0.75B$ の場合について、サイドパイル長さ L と降下床に作用するゆるみ土圧との関係を示す。なお、サイドパイルの長さについては降下床の幅 B で、また、ゆるみ土圧 P は、サイドパイルなしのときのゆるみ土圧 P_0 で除すことにより無次元化している。

図より、無次元ゆるみ土圧 P/P_0 は、 L/B が 1 以下の範囲ではほとんど変化しないが、 L/B が 1 を超える

と急に減少していることがわかる。

地盤の違いに着目すると、S 地盤については、C 地盤より早く $L/B=0.5$ から減少を始めている一方で、 $1.5 < L/B$ で減少の勾配が緩やかになっている。これは、地盤物性の違いによるすべり線の形状の差異によるものと考えられる。すなわち、サイドパイルがない場合、C 地盤ではすべり線が鉛直上方に進展するが、S 地盤ではすべり線が傾きを持ち降下床上方に向けて進展するという違いがあった。この傾向により、S 地盤では、降下床側を始点としてパイルの長さを長くしていくシリーズ A ではサイドパイルの長さが相対的に短くても効果を発揮する傾向にあり、一方で、降下床と反対側を始点としてパイルの長さを長くしていくシリーズ B ではサイドパイルの長さが相対的に長く必要になっていると考えられる。

(3) 設置位置の影響

図-16 に C 地盤の場合を例に、降下床とサイドパイルとの距離の影響について示す。距離 H が小さくサイドパイルが降下床に近い方が P/P_0 は小さくなっている。この傾向は S 地盤についても同様であった。なお、崩壊機構と相当塑性ひずみ速度分布については降下床とサイドパイルとの距離にあまりよらず同様の傾向であった。

3.3.2 シリーズ B

(1) 崩壊機構と相当塑性ひずみ速度分布

次に、C 地盤の解析結果のうち、(a) $L=0.75B$ 、(b) $L=B$ 、(c) $L=2B$ の 3 ケースについて崩壊機構と相当塑性ひずみ速度の分布を図-17 に示す。なお、いずれも $H=0.5B$ の時のものである。

図より、C 地盤においてはシリーズ A の場合と同様、すべり線は降下床端部から鉛直上方に向かって発生していることがわかる。(c) $L=2B$ の場合ではすべり線は見られず、相当塑性ひずみ速度が大きい領域がサイドパイルの周囲に広く分布した。なお、サイドパイルは降下床側に傾いていることが確認できる。

次に S 地盤であるが、図-18 に、C 地盤と同様のサイドパイルの条件をもつ 3 ケースについて、崩壊機構と相当塑性ひずみ速度の分布を示す。

図-18(a)(b)より、 L が $1.5B$ 以下の場合にはすべり線はアーチ状に分布しているが、(c) $L=2B$ の場合はサイドパイルにさえぎられてアーチ状の分布にはなっていないことがわかる。

(2) 地盤の影響

図-19 に、無次元サイドパイル長さ (L/B) と降下

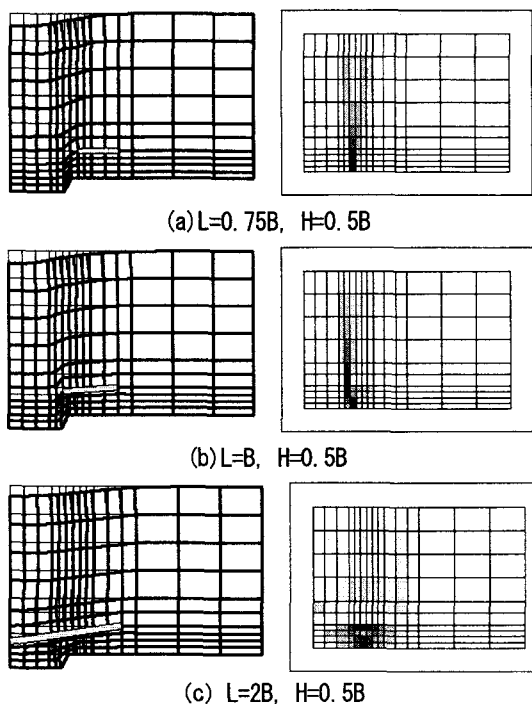


図-17 崩壊機構と相当塑性ひずみ速度分布 (C 地盤)

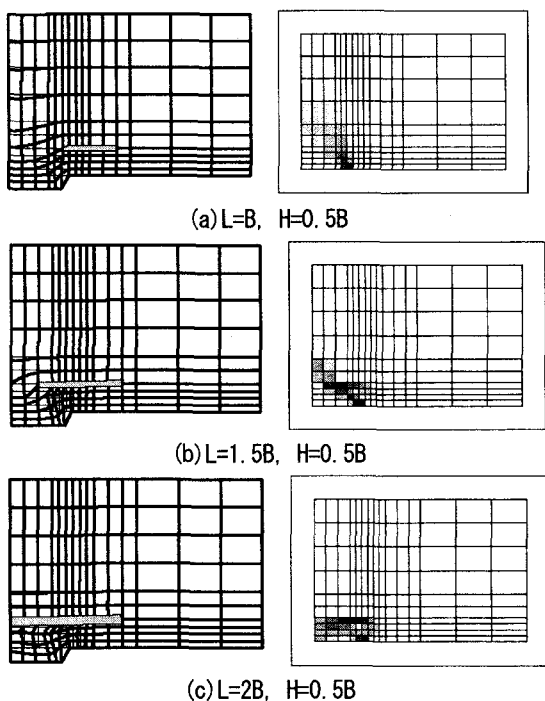


図-18 崩壊機構と相当塑性ひずみ速度分布 (S 地盤)

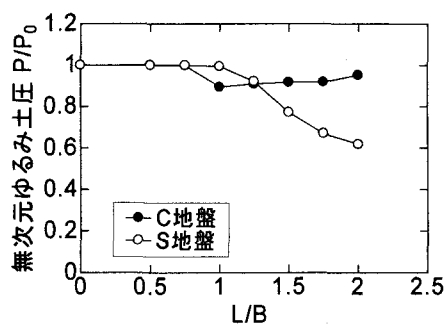


図-19 地盤の種類の影響 ($H=0.5B$)

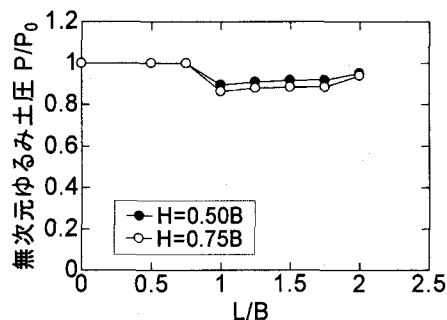


図-20 降下床とサイドパイルとの距離の影響 (C 地盤)

床に作用するゆるみ土圧との関係を示す。図より、シリーズ A 同様、無次元ゆるみ土圧 P/P_0 は L/B が 1 以下の場合にはほとんど変化しないが、 L/B が 1 を超えると急に減少する傾向を示す。

地盤による違いに着目すると、シリーズ B とは反対に、C 地盤の方が S 地盤より早く減少を始めている。その他、C 地盤についてはシリーズ B とは異なり、 P/P_0 は、サイドパイルの長さが長くなっても一旦減少した後はそれほど減少することはない。

これも、シリーズ A と同様、地盤物性の違いによるすべり線の形状の差異によるものと考えられる。

(3) 設置位置の影響

図-20 に C 地盤の場合を例に、降下床とサイドパイルとの距離の影響について示す。サイドパイルが降下床に近い方が P/P_0 は小さくなっている。この傾向は S 地盤についても同様であった。

3.4 まとめ

数値解析の結果得られた知見を以下にまとめる。

- ① サイドパイルが長く、すべり線をまたぐ場合にはゆるみ土圧が小さくなる
- ② シリーズ B の C 地盤では、それ以外の条件の場合とは異なり、サイドパイルを長くしてもゆるみ土圧はあまり減少せずむしろ増加する

③サイドパイルは落し戸に近い方が効果的だが大きな差ではない

4 考察

(1) サイドパイルの作用メカニズム

模型実験、数値解析の両方において、サイドパイルを長くしてゆきすべり線をまたいではじめて、沈下が抑制されるあるいは降下床荷重が小さくなる傾向が見られた。また、地盤や設置位置にもよるが、サイドパイルが一定の長さになると、それより長くしても効果はあまり変わらない傾向も見られた。

以上のことから、サイドパイルは、すべり線をまたいで打設することにより、すべり線の位置を降下床から離れた場所に移動させ、すべり線の長さを長くすることにより、沈下抑制効果を発揮すると考えられる。サイドパイルのせん断力により降下床上部に作用する土圧が側方に伝わり、降下床に作用する土圧が減少する。その結果、地表面沈下量も小さくなるものと考えられる。

(2) 地盤の影響

数値解析において、シリーズBのC地盤では、それ以外の条件の場合とは異なり、サイドパイルを長くしてもゆるみ土圧はあまり減少しなかった。むしろ、長くするとゆるみ土圧がかえって増加する傾向が見られた。これは、C地盤は $\phi=0^\circ$ であり、地盤の支持力が不足し、パイルの傾斜が生じたためと考えられる。なお、シリーズAのC地盤は左側の端部が曲げ固定となっているため傾斜せず、降下床上部の荷重を側方に伝達することができていると考えられる。これは、サイドパイルのトンネルへの十分な結合の重要性を示唆するものである。

(3) 設置位置の影響

数値解析において、サイドパイルの設置位置が低く降下床に近いほど効果があった。これは、サイドパイルが長い場合、ゆるみ範囲はサイドパイルの下方の領域に限られるようになるが、サイドパイルが降下床に近いほど、ゆるみ高さも小さくなり、降下床に作用する荷重が小さくなったものと考えられる。ただし、設置位置は、サイドパイルの長さ、すなわちすべり線をまたぐかどうかにか比べれば影響の度合いとしては支配的でない。

5. まとめ

今回、サイドパイルの沈下抑制効果を明らかにし、作用のメカニズムを調べることを目的に、模型実験と数値解析による基礎的な研究を実施することにした。その結果を以下にまとめる。

①サイドパイルの設置によりトンネルの沈下を抑制できる。

②サイドパイルは以下の条件において効果が高まる

- ・すべり線をまたいで設置する
- ・打設間隔が密
- ・降下床に近い
- ・トンネルに十分に固定する
- ・圧入等によりと地山の付着を強める

③サイドパイルが効果を発揮するためには地盤の支持力がある程度ある必要がある。

今後は、サイドパイルの条件を変化させた実験や、トンネルを考慮に入れた数値解析等を行い、サイドパイルの選定法、設計法に関して研究を深度化させていく予定である。

参考文献

- 1)北川隆他, 地山改良とサイドパイルで小土盛り土砂地山を掘削, トンネルと地下, 第35巻4号, 2004.4
- 2)足立紀尚他, 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
- 3)例えば, 村山他, 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.187, pp.95-108, 1971