とも下がり現象発生時サイドパイルの地盤・トンネル沈下抑制効果について

京都大学大学院	学生会員	○ 崔	瑛
京都大学工学研究科	正会員	岸田	潔
京都大学 産官学連携センター	正会員	木村	亮
(株)レールウェイエンジニアリング	正会員	野々柞	寸政−

1.はじめに NATM 工法を用いて地盤の剛性が低い未固結地山に 小土被りトンネルを掘削するある建設現場では,地盤とトンネルが 一体として沈下する「とも下がり現象」が観測されている.現場で は、「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,サイドパイルやフットパイルなど脚部補助工法が用いら れており,その効果が報告されている.著者ら¹⁾は,簡単な模型で トンネルをモデル化し,模型実験および模型実験に対する数値解析 を行い,パイルを水平に挿入したサイドパイル工法は,せん断補強 効果および荷重再配分効果を通じて地表面沈下を抑制できるとい う結論を得た.そこで本稿では,2次元弾塑性有限要素解析手法を 用いて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シ ョンし,とも下がり現象発生時サイドパイルが地盤・トンネルの沈 下に及ぼす影響について検討を行う.

2. 数値解析の概要 ここでは, 弾塑性有限要素解析コード DBLEAVES²⁾を用いて2次元弾塑性有限要素解析を行った. 図-1 に 解析対象および境界条件を示す. さらに, 同図にトンネル施工現場 の地層分布を併記する. これらの地盤は, 小土被りのうえ, 非常に 軟弱であったため, 現場では地盤改良を施した後トンネル掘削を行 った. 図-2 に, 本研究の検討対象現場での改良状況を示す.

地盤の力学特性は、弾塑性構成モデル subloading t_{ij} model³⁾を用い てモデル化した.現場での試験データは密度と間隙比のみである. 土被り部分およびトンネル周辺地盤の塑性指数 *Ip* を 40,トンネル 下部地盤は *Ip* = 8,埋戻し部分地盤は *Ip* = 5 と仮定した.さらにそ れらの *Ip* を用いて, Iizuka and Ohta⁴⁾の方法により各土質パラメータ を定めた.改良体部分は弾性体としてモデル化し、ヤング率 E は一 軸圧縮強度 q_u に基づき,浅層混合処理部分は $E = 1.12 \times 10^5$ kN/m², 事前混合処理部分は $E = 2.24 \times 10^5$ kN/m² と定めた⁵⁾.

吹付けコンクリートおよび鋼製支保工は,便宜上一体化させて合成ばり(弾性 Beam)としてモデル化した.合成ばりのヤング率は,曲 げ剛性 EI が支保工と吹付けコンクリートの曲げ剛性の和と一致す るように定めた.サイドパイルは,Beam 要素と Solid 要素を組合せ たハイブリット要素を用いてモデル化した.

3. トンネル掘削過程およびとも下がり トンネルは、上半および下 半に分けて掘削を行った.切羽到達時点での応力開放率は内空変位 の解析値が現場計測値と一致するように設定した.結果上半の切羽 到達時点での応力開放率は40%、下半は15%とした.切羽通過後 に対しては、上半と下半いずれも支保工を挿入した後応力を100% まで開放した.図-3に内空変位、図-4にトンネルおよび地表面沈 下の解析値と現場計測値を示す.図より、本解析では、実現場での トンネルの掘削過程を正確に表現することができたと考えられる. さらに図-4からは、トンネルと地表面の沈下量がほぼ一致すること が見られ、とも下がり現象もシミュレートでき、地盤定数の仮定が 適切であったと考えられる.



図-1 解析領域および境界条件



図-2 地盤改良およびサイドパイルの施工状況





キーワード サイドパイル,トンネル,有限要素法

連絡先 〒615-8520 京都市西京区京都大学桂ローム記念館 315 号室 TEL 07-5383-3041

4. サイドパイルの効果 ここでは、上記のトンネル掘削過程において、 φ65、長さ2.75 m のパイルを1 m 間隔で設置した場合、サイドパイルが地盤・トンネル沈下に及ぼす影響について検討する.

図-5 に、サイドパイルが地表面およびトンネル沈下の経時変化 に及ぼす影響を示す.図より、パイルを設置することにより、地 表面、トンネル脚部および天端の沈下量が大きく抑制される.サ イドパイルの効果は、主に上半掘削時に現われる.

図-6 に、上半掘削完了時、トンネル周辺地盤の鉛直変位分布を 示す.図より、パイルを設置しない場合トンネルの掘削によりト ンネルの上部地盤が大きく沈下する.パイルを設置することによ り、トンネル上部・周辺地盤の沈下は大きく抑制される.

図-7 に、トンネル掘削完了時、サイドパイルが鉛直土圧分布に 及ぼす影響を示す.パイルを設置すると、トンネル左右地盤に生 じる鉛直土圧は、パイルを設置しないケースより大きくなる.パ イルの設置により、トンネル左右地盤に荷重が分担され、荷重再 配分がサイドパイルにより促進されていると考えられる.

図-8 に、上半掘削完了時、トンネル周辺地盤のせん断ひずみ分 布を示す.パイルを設置しない場合、トンネル脚部付近に大きい せん断ひずみが生じ、斜め上に地表面に向かって発達する.パイ ルを設置することにより、このせん断ひずみはパイルにより遮断 され、トンネル左右地盤に生じるせん断ひずみが大きく減少する. これにより、サイドパイルは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.

5. サイドパイルの効果的な組合せ 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本を 設置したが、必ずしも全てのパイルが効果を発揮するとは限らな い.ここでは、図-9に示したように、パイルを3段全部設置した 場合、パイルを上半だけ設置した場合など、パイル設置位置の組 合せをパラメータとした計7ケースに対して検討を行った.

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,いずれのケースでもトンネルおよび地表面の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,上半にパイルを設置しない諸ケースでは,効果が見られない.本研究で取り扱った地盤条件では,上半に設置したパイルのみ沈下抑制効果を発揮できると考えられる.

6. まとめ本稿では、トンネル掘削およびとも下がり現象を再現 し、とも下がり現象発生時サイドパイルの地盤・トンネル沈下抑 制効果、および適切な組合せに対して議論した.サイドパイルは 荷重分散効果およびせん断補強効果を発揮し、トンネルと地盤の 沈下を抑制できるが、とも下がり現象に対する影響は見られない. さらに、下半に設置するサイドパイルはほぼ効果を発揮せず、上 半のみに設置すれば十分であると考えられる.

今後は、適切な設計基準を提案するため、パイルの長さ、直径、 設置角度などのパラメータが脚部補強パイルの地盤・トンネル沈 下抑制効果に及ぼす影響について検討する.

<u>参考文献</u> 1) 崔 瑛, 岸田 潔, 木村 亮:小士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. 2) 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. 3) 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, 2004.4 . 4) lizuka, 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, 1987.9. 5)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, 20007.



(b) L=2.75 m



(a) No pile





(a) No pile (b) L= 2.75 m 図−8 サイドパイルがせん断ひずみ分布に及ぼす影響

