

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

京都大学大学院 学生員 ○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

**1. はじめに** 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場合、地盤とトンネルが一体として沈下するとともに下がり現象が現れる。現状では、「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、効果を発揮している。著者ら<sup>1,2)</sup>は、模型実験および数値解析を行い、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。さらに、パイルを大きい角度で斜め下方方向に挿入した場合、水平に挿入するより大きい地表面沈下抑制効果を発揮することが分かった。

Nakai<sup>3)</sup>は、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について検討を行い、パイルを上方向に引抜く場合はパイルを下向き、即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、より高い補強効果を得られる結論を得た。これを参考として、本研究ではパイルを降下床の移動方向に従うように上向きに設置した場合の地表面沈下抑制効果について検討を行い、パイルの設置方向が地表面沈下抑制効果に及ぼす影響について議論する。

**2. 数値解析の概要** 図-1 に本研究の検討対象を示す。本解析は著者が今まで行ってきた模型実験<sup>1)</sup>を対象とし、B. Ye<sup>4)</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、三次元弾塑性有限要素解析を行う。模型実験の詳細、地盤とパイルのモデル化および各パラメータの決定方法については参考文献1)と同じである。本解析では、表-1 に示すように長さ 100, 200 mm のパイルを水平、上下斜めに設置した各ケースについて検討を行った。設置角度の符号は、負は上向き、正は下向きに設置する場合を示す。

**3. 解析結果および考察** 図-2 に各ケースでの地表面沈下曲線を示す。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大きい地表面沈下抑制効果が得られる。ただし、上向きに設置すると地表面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見られる(図-2 中○で囲んだ部分)。これに対して、長さが 100 mm の諸ケースでは、水平に設置するケースには地表面沈下量がわずかに抑制されるものの、斜めに設置すると設置方向にかかわらず地表面沈下量が設置しないケースより大きくなる。過去の研究で著者らは、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 100 mm 位の位置を通り、パイルがこのすべり線を通ると地表面沈下抑制効果十分得られることを確認している<sup>1)</sup>。本研究で、長さ 100 mm のパイルを水平に設置した場合はこのすべり線を通るが、斜めに設置するとすべり線まで届かなくなる。以上より、パイルの設置方向にかかわらず、パイルがすべり線を通るような状態で設置しないと、地表面沈下を抑制できない。以下では主に、地表面沈下抑制効果が得られた、ケース Down-2-15 と Up-2-15 について比較検討する。

図-3 に、パイルの設置方向が体積ひずみ分布に及ぼす影響を示す。正の値は体積の膨張、負は縮小を示す。Down-2-15 と Up-2-15 を比較すると、ライン AA' 以下に発生する体積ひずみはほぼ同じ分布を示す。しかしながら、Down-2-15 ではパイルの直下部分に大きい体積ひずみが発生する現象に対して、Up-2-15 では体積の変化が見られない。これにより、覆工付近でパイルを上向きに設置する Up-2-15 で地表面沈下がよ

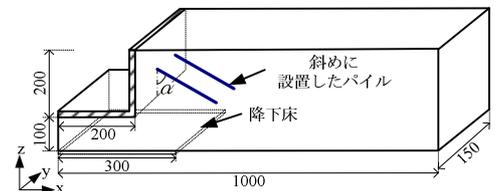


図-1 検討対象

表-1 解析パターン

長さ(mm) 角度(°)	200	100	0
-15	Up-2-15	—	No pile
-5	Up-2-5	—	
0	Horizontal-2	Horizontal-1	
5	Down-2-5	Down-1-5	
15	Down-2-15	Down-1-15	

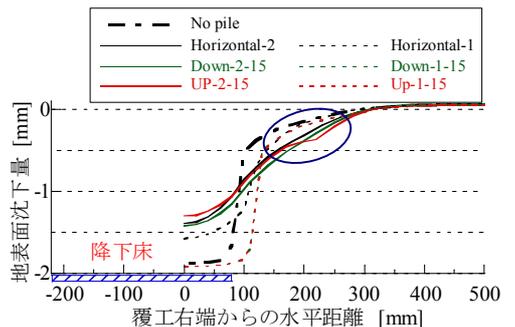


図-2 設置方向が地表面沈下抑制効果に及ぼす影響

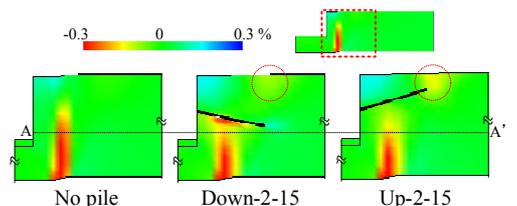


図-3 設置方向が体積ひずみに及ぼす影響

キーワード 補強パイル, 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ルーム記念館 315 号室 TEL 07-5383-3041

り大きく抑制されたと考えられる。さらに、Up-2-15ではパイル先端部分の上部地盤で、Down-2-15より大きい負の体積ひずみが見られるが(図-3中○で囲んだ部分)、これにより覆工から離れた位置で、Up-2-15の地表面沈下が大きくなる現象が現われたと考えられる。下向きに設置したDown-2-15ではひずみをパイルの下部に集中させることに対して、Up-2-15では大きい体積ひずみがパイルに沿って分散され、その影響がパイル先端部分の地盤に現われたと考えられる。以上により、上向きにパイルを設置するほうが、覆工付近でより大きい地表面沈下抑制効果が得られる。

図-4に、パイルの設置方向が鉛直土圧分布に及ぼす影響を示す。図より、パイルの設置によりいずれも降下床に作用する鉛直土圧が大幅に減少するが、設置方向による差異は顕著でない。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Up-2-15で、鉛直土圧が明らかに大きくなる領域(図-4中○で囲んだ部分)が見られ、さらに、鉛直土圧が大きくなる領域がより小さくなる現象が見られる。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し、これにより健全な地盤に作用する鉛直土圧が大きくなること分かる。

図-5に、パイル全長に生じる曲げモーメント軸力分布を示す。設置方向にかかわらず、パイルに生じる曲げモーメントは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0になる点(E)までの距離が短くなった現象が見られる。これから、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の右部分)が長くなると考えられる。

さらに同図から、上向きに設置するケースでは、下向きより曲げモーメントの絶対値が小さい現象が見られるが、これは、上向きに設置すると、パイル上部地盤の量が少なくなるからだと考えられる。図-5(b)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ことにに対し、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生じ、覆工の沈下を抑制できると考えられる。

**4.まとめ** 以上の解析結果により、パイルは設置方向に関係なくすべり線を通らないと地表面沈下抑制効果が得られない。さらに、パイルを上向きに設置するほうが、水平もしくは下向きに設置するより大きい地表面沈下抑制効果が得られる。

パイルはせん断補強効果および荷重分散効果を生じ、地表面沈下抑制効果を生ずる。設置方向にかかわらず、パイルはすべり線を通るとパイルは地盤に生じるすべり線を遮断し、地表面まで到達するのを防げる。ただし、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り異なる。水平あるいは狭角度で下向きに設置する場合、パイルは図-6(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。広角度で下向きに設置した場合は、図-6(b)に示すように地盤により軸方向の支持力を受け、下部地盤により支えられるような挙動を示し、その軸方向の支持力により覆工の沈下を抑制される。これに対して、パイルを上向きに設置する場合は図-6(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働き覆工の沈下を防ぎ、その荷重を健全な地盤に分担させる。

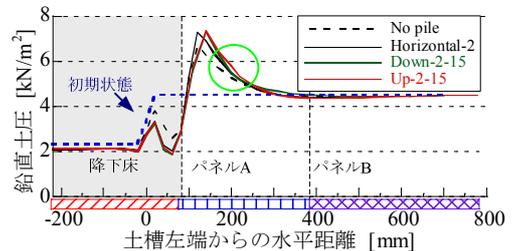
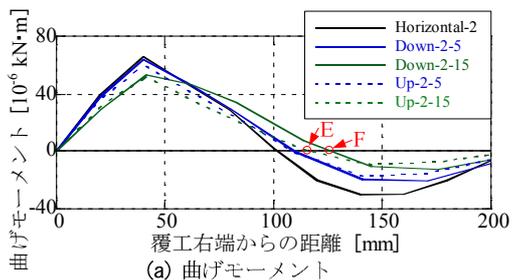
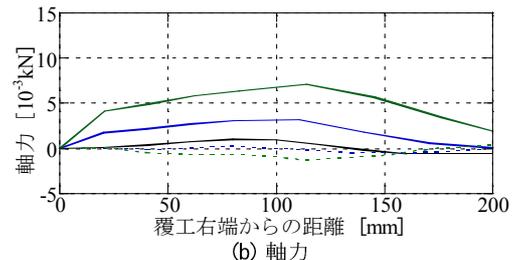


図-4 設置方向が鉛直土圧分布に及ぼす影響



(a) 曲げモーメント



(b) 軸力

図-5 設置方向がパイルの力学挙動に及ぼす影響

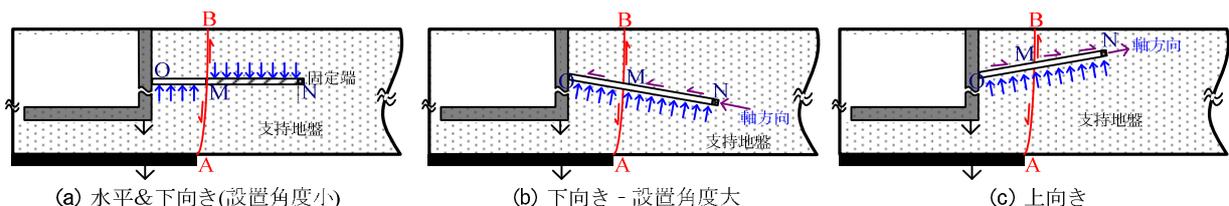


図-6 パイルの補強メカニズム

参考文献 1) 崔 瑛, 岸田 潔, 木村 亮: 数値解析によるサイドパイル補強工の沈下抑制効果に関する模型実験の評価, トンネル工学報告集第17巻/pp.21-27, 2007.11. 2) 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回地盤工学研究発表会講演集, 2008(投稿中). 3) T. Nakai, T. Teranishi, M. Hinokio & K. Adachi: Behavior of reinforced foundation under uplift and push-in loadings model-tests and analysis, Proc. IS-KYUSHU, Vol.1, pp. 593-598, 2001. 4) 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.