

地山特性曲線を用いた長尺鋼管フォアパイリングの効果に関する一検討

(国研) 土木研究所 正会員 ○佐々木 亨, 前田 洸樹, 日下 敦

1. はじめに

山岳トンネル工法では、天端安定対策等を目的として長尺鋼管フォアパイリング（以下、先受工）を用いることがあるが、先受工が支保工の応力状態やトンネルの変形に及ぼす効果については十分に明らかとなっていない。しかしながら、先受工の設計時に行われる数値解析においては、解析モデル化の方法によって支保工の応力や変位を抑制する効果が出力される場合があり、これを基に、支保工のランクダウン等の本来の主たる用途とは異なる目的で先受工を採用する事例もある。筆者らはこれまで現地計測や数値解析を行い、先受工の効果についていくつか知見を得てきた¹⁾。本論文では、それらの知見を踏まえ、先受工の効果を簡易な特性曲線法を用いて評価した結果を報告する。

2. 特性曲線法および検討手法

トンネルの安定は、地山からの荷重と支保内圧のつり合いにより担保され、**図-1**に示す地山特性曲線と支保工特性曲線の交点がトンネルの安定点となり、この時の変位および荷重が支保工（トンネル）の変位および支保工に作用する荷重となる。**図-1**において変位および内圧はトンネル中心方向を正とする。補助工法を用いた場合、地山の改良効果や先行変位の抑制効果等があれば、この地山特性曲線と支保工特性曲線の交点（以下、安定点）または支保工特性曲線の始点が変わると考えられる。筆者らはこれまで鏡ボルト工や先進導坑に対し、同様の検討を行うことでその効果を評価できる可能性があることを確認した²⁾。

本論文では、地山特性曲線と先受工を採用したトンネル掘削における支保工特性曲線を重ね合わせ、地山特性曲線と安定点および支保工特性曲線の始点の変化から、先受工の先行変位抑制効果や地山改良効果について検討した。地山特性曲線および安定点の算出方法は、既往の研究²⁾を参考に、2次元および奥行きを100mとする3次元の数値解析を用い、地山の内圧と変位から地山特性曲線および支保特性曲線を描いた。ここでは、3次元解析において**図-2**に示す切羽に接する要素において、掘削直後の解放された際の先行変位を始点（この時、内圧は0MPaとする）とし、安定点と結んだ線を支保工特性曲線とした。また、本解析においては、先受工の打設位置との関係により結果の差異があるため、全ケースで地山の内圧および変位が大きい値を示す先受工打設位置（口元）から2m前方を解析上の参照位置とした。

3. 数値解析の諸元

解析は有限差分法解析コードFLAC3Dを用いて**表-1**に示す全4ケースについて弾性解析を行った。ケースAは地山特性曲線を描くために実施した2次元解析であり、ケース1は先受工なしのケース、ケース2、3は先受工をビーム要素で360°打設し、打設間隔を12mと6mとしたケースである。解析に用いた各物性値を**表-2**に示す。なお、トンネル形状による地山特性曲線への影響をなくすためにトンネル形状は円形断面、初期応力状態は1MPaの等方応力状態とした。

ここで、3次元数値解析において先受工のモデル化手法は複数あり、実現象を十分に再現できる手法は確立され
キーワード 長尺鋼管フォアパイリング, 地山特性曲線, 数値解析, 山岳トンネル

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6 (国研) 土木研究所 道路技術研究グループ TEL 029-879-6796

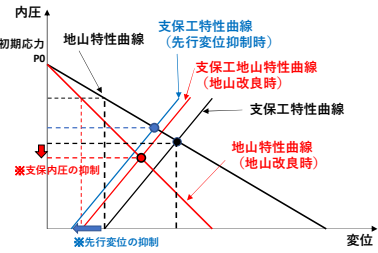
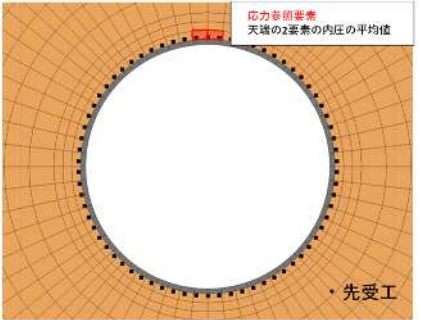
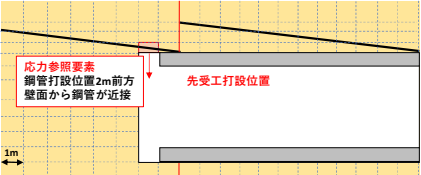


図-1 特性曲線による評価の概略



a) 横断面図



b) 縦断面図

図-3 応力参照要素周辺の概略図

表-1 解析ケース一覧

ケース	解析手法	支保工	先受工のモデル化要素	先受工打設範囲	先受工長さ	打設角度	シフト長	ラップ長
ケースA	2次元	なし	-	-	-	-	-	-
ケース1	2次元	なし	-	-	-	-	-	-
ケース2	3次元	あり	ビーム要素	360°	12m	5°	12m	0m
ケース3	3次元	あり	ビーム要素	(450mmピッチ)	12m	5°	6m	6m

表-2 解析物性値一覧

	変形係数 (MPa)	ポアソン比	外径 (mm)	肉厚 (mm)
地山	50	0.25	-	-
支保工 (吹付コンクリート)	4,000	0.2	-	200
先受工 (ビーム要素)	210,000	0.2	114.38	6

ていないのが現状である。筆者らは現地計測と3次元数値解析を実施し、先受鋼管のみをビーム要素でモデル化することで鋼管による先受け効果について概ね実施工と同じ挙動を再現できることを把握した¹⁾。このため、本数値解析においても先受鋼管のみをビーム要素でモデル化することとした。

4. 解析結果

図-3 にケース A (二次元解析) から得られた地山特性曲線とケース 1～3 で得られた支保工特性曲線を示す。図-3 より、ケース 1 とケース 2 を比較すると、ケース 2 は支保特性曲線が左 (変位が小さい) 側にあり、先行変位と安定点の変位が抑制されている。ただし、安定点の内圧はケース 1 よりもケース 2 のほうが大きくなった。また、ケース 3 はケース 2 よりも先行変位と安定点の変位が抑制され、安定点の内圧も最も小さくなる結果となった。これは打設間隔を短くし先受工をラップさせることで、トンネル周辺地山に含まれる鋼管の割合が大きくなったためと考えられる。しかし、各ケースの差はわずかなものであるとともに、後述する支保工軸応力の変化とも整合していない。このような差が生じる理由としては、地山要素に鋼管が挿入されている場合、解析計算上では地山の剛性に鋼管の剛性が加算された要素として変位-応力計算がされるが、出力上では地山の応力と鋼管の応力が別々に出力され、地山の真の内圧 (支保工作用荷重) を評価できていないため生じたと考えられる。

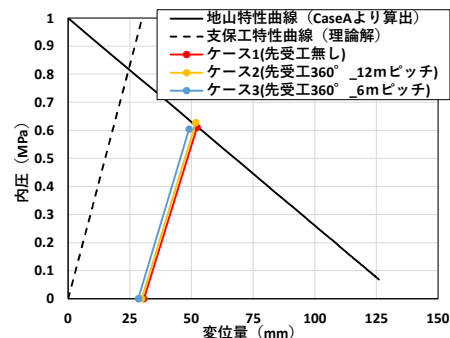


図-3 解析結果から得た特性曲線

変位収束時のケース 2 の 1 シフトに相当する区間における地山内圧の分布を図-4 に示す。図-4 より、ケース 2 では先受工の打設位置から 0～2m、6～12m 区間で地山の内圧が先受工のないケース 1 よりも小さく、2～6m 区間でケース 1 よりも地山の内圧が大きくなる結果となった。一方、ケース 3 では全体的にケース 1 よりも地山内圧が小さくなる結果となった。このような内圧分布は以下のようなメカニズムによるものと推測される。①先受効果により前方の荷重が先受工の口元に向かって伝達、②先受工の打設位置近傍 (0～2m) では、トンネル直上の要素に先受鋼管が含まれるため、見かけ上で地山内圧が減少、③先受工の中間 (2～8m) では、先受工により伝達された荷重を先受工とトンネル壁面の間の地山が単体で負担するため内圧が増加、④先受工の先端 (8～12m) では先受効果により荷重が後方へ伝達されるため、内圧が減少する。次に、同区間の支保工に発生する軸応力の分布を図-5 に示す。図-5 より、各ケースの支保工に作用する軸応力を比較すると、先受工のないケース 1 に比べ発生する先受工のあるケース 2、3 で全体的に軸応力が大きく、特に、先受工の口元前後で支保工に発生する軸応力が大きくなる結果となった。全体的に先受工がないケースよりも先受工があるケースで軸応力が大きくなる原因は、先受工により抑制された先行変位相当の荷重が応力解放に伴い支保工に作用するためと考えられ、先受工の口元付近は前方の荷重を負担するため、この傾向が顕著であると推測される。

これらのことから、数値解析において先受工を打設することにより先行変位はわずかに軽減されるが、地山改良効果等の地山特性の変化はなく、また、支保工に作用する荷重は軽減されないことが明らかとなった。

5. まとめと今後の課題

本論では、先受工の効果について特性曲線法を用いて検証した。その結果、数値解析において先受工によりわずかに先行変位は抑制されるが地山特性を変化させる効果はなく、一方で、先受工を打設することにより支保工に作用する軸力が増加する傾向があることが明らかとなった。なお、本論文では弾性条件での検討であったが、弾塑性条件では先受工の打設により地山の塑性化が抑制される等、異なる結果が現れる可能性も考えられる。今後は弾塑性条件において同様の検討を行い、先受工の効果についてより詳細な検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 佐々木亨, 日下敦, 巽義知, 砂金伸治, 菊地浩貴, 小出孝明: 長尺フォアパイリングの三次元的な効果に関する一考察, 第30回トンネル工学論文集, I-42, 2020.11
- 2) 前田洗樹, 佐々木亨, 日下敦: 補助工法の特長曲線上の効果に関する弾性解析による一考察, 第15回岩の力学国内シンポジウム, pp.189-194, 2021.1

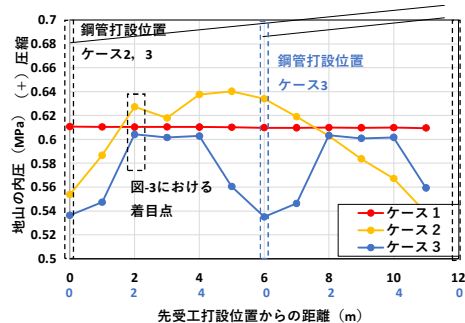


図-4 地山内圧の分布

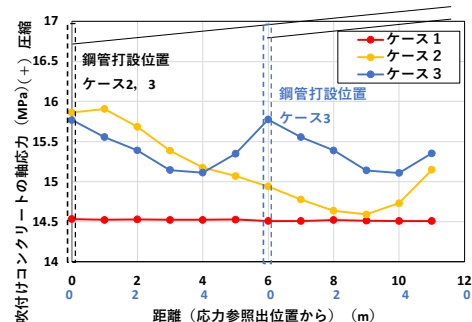


図-5 支保工軸応力の分布