

補助工法が支保工応力に及ぼす影響に関する 特性曲線法を用いた一検討

佐々木 亨¹・前田 洸樹²・日下 敦³

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: to-sasaki@pwri.go.jp

²正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町 3 丁目 22 番地)

(元 国立研究開発法人 土木研究所)

E-mail: kouki.maeda@tk.pacific.co.jp

³正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: kusaka@pwri.go.jp

山岳トンネルでは切羽安定等を目的として補助工法を用いることがあるが、補助工法がトンネルの変位や支保工に発生する応力に与える影響については明らかとなっていないものもある。筆者らは、補助工法によるこれらの影響について具体的かつ簡易に評価し、補助工法の選定のみならず支保工の選定の合理化に資することを目的に検討を行った。本論では、安定時のトンネルの変位および支保内圧を簡易に評価できる特性曲線法を活用し、いくつかの補助工法の効果（影響）について数値解析結果から検討した結果を報告する。

Key Words: conventional tunnelling, Auxiliary measure, ground characteristic curve

1. はじめに

山岳トンネルでは、切羽安定等を目的として、未固結地山や膨張性地山等の不良地山に対し補助工法を用いることがあるが、補助工法がトンネルの変位や作用荷重、および支保工に発生する応力に与える影響については解明されていないことが多い。

例えば、長尺鋼管フォアパイリング（以下、先受工）は一般的に天端安定や地表面沈下の抑制を目的に採用されるが、鋼管や注入材による地山の改良効果によりトンネルの変位や支保工応力を軽減することを期待する事例が散見される。しかしながら、先受工のこれらの効果について詳細に明らかとなっていないのが現状である。また、長尺鏡ボルト（以下、鏡ボルト）や先進導坑は、前方のゆるみ抑制やいなし効果により変位や支保工に発生する応力を抑制する効果を期待して採用される場合があるが、それらの効果の詳細についても明らかとなっていないのが現状である。

このような課題を鑑み、筆者らは、補助工法のメカニズムについて数値解析等を用いた検討を実施してきた^{1)~3)}。本稿では、補助工法のうち上記に挙げた先受工、

鏡ボルトおよび先進導坑の3工法について、トンネル掘削を模擬した三次元数値解析を実施し、補助工法の採用によるトンネルの変位および作用荷重の低減等の効果を特性曲線法を用いて評価するとともに、支保工に発生する応力への影響等について検討した結果を報告する。

2. 特性曲線法について

(1) 特性曲線法の特徴

特性曲線法は、図-1に示すように、地山内圧と掘削面変位の関係である地山特性曲線と、支保工の変位と支保内圧（以下、支保工作用荷重）との関係を示す支保特性曲線の関係から安定時の変位や支保工作用荷重を推定する手法であり、一般的にトンネルの安定は、地山特性曲線と支保特性曲線が交わる点（以下、安定点）で得られるとされている⁴⁾。図-1において、安定点での変位は δ_e 、その時の支保工作用荷重は P_e となる。

ここで、補助工法を採用した場合に先行変位抑制効果や地山改良効果およびいなし効果等により地山特性曲線や支保工の特性曲線が変化するのであれば、トンネルの

安定点が変わり、変位や支保工に作用する荷重も変わると考えられる。

例えば、補助工法の採用により地山改良効果が得られる場合は、図-2 a) に示すように、地山特性曲線が (A) から (C) のように変化し、支保工打設時の応力解放率が同じと仮定すれば支保工の特性曲線は (B) から (D) のように変化する。この時、安定点における変位および支保工作用荷重は $\delta e'$ および Pe' となり、ともに補助工法無しの場合に比べ小さくなる ($\delta e' \leq \delta e$ かつ $Pe' \leq Pe$) と考えられる。また、支保工の変位 $\delta e - \delta s$ を比較すると① > ② となり、支保工の変位も小さくなる。次に、補助工法の採用により地山の改良はされず、先行変位のみが抑制される場合は図-2b) に示すように、支保工の特性曲線が (B) から (E) のように変化する。この時、安定点の変位および支保工作用荷重は $\delta e''$ および Pe'' となり、安定点の変位は小さくなる ($\delta e'' < \delta e$) 一方で、支保工に作用する荷重は大きくなる ($Pe'' > Pe$) と考えられる。また、支保工の変位 $\delta e - \delta s$ を比較すると① < ③ となり、支保工の変位は大きくなる。

本論では、これらの特徴を用いて、先受工や鏡ボルト、先進導坑を採用したトンネル掘削における地山特性曲線および支保特性曲線を比較し、支保工に発生する応力等に及ぼす影響について報告する。

(2) 本論における特性曲線の描き方

a) 地山特性曲線

地山特性曲線は、無支保でのトンネル掘削を模擬した二次元数値解析（線形弾性および弾完全塑性）により、応力解放率ごとの内圧-地山変位関係をプロットすることで算定した。なお、本解析では、トンネル壁面に接する天端部直上に位置する要素のトンネル方向応力を地山内圧としており、応力参照位置が壁面（掘削面）よりも地山側に位置しているため、素掘りであっても掘削完了時の内圧はゼロとにならない。

b) 支保工特性曲線

支保工特性曲線は、支保工を設置するトンネル掘削を模擬した三次元数値解析により算定する。支保工設置時およびトンネルが安定した際の支保工作用荷重および地山変位を直線でつないだものが支保特性曲線となる。

ここで、三次元解析における応力参照位置の概略を図-3 に、支保工設置時および安定点での変位 (δs , δe) および内圧 (Ps , Pe) の定義を図-4 に示す。支保工設置のタイミングは解析上のステップで再現しておらず、切羽到達時ステップと支保工設置完了時ステップの中間点となる。そのため、支保工設置時の変位（以下、先行変位） δs は、図-4 に示すように、切羽到達時と支保工設置終了時における変位量の平均値と定義する。

また、支保工設置時の支保内圧 Ps は変位同様に切羽

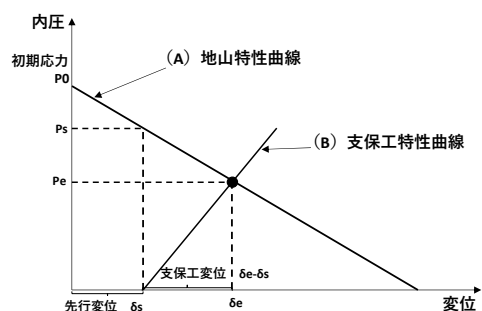


図-1 線形弾性状態における特性曲線法の概略

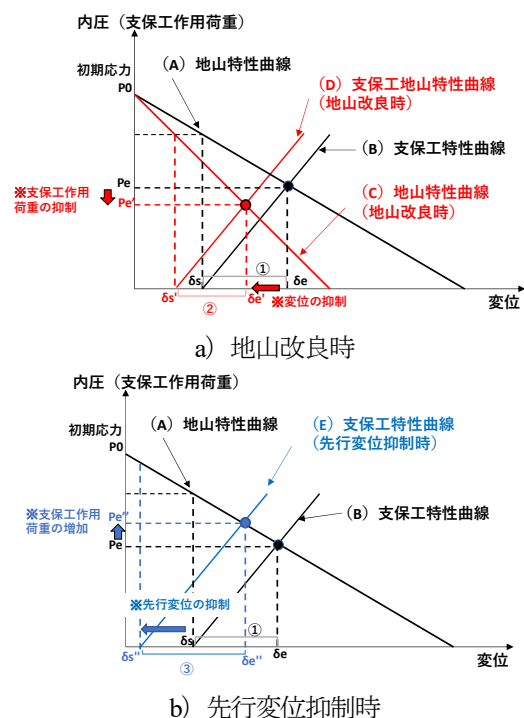


図-2 補助工法による特性曲線への影響例

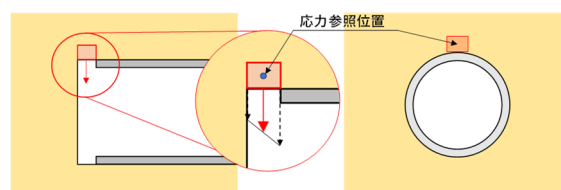


図-3 応力参照位置の概略図（三次元）

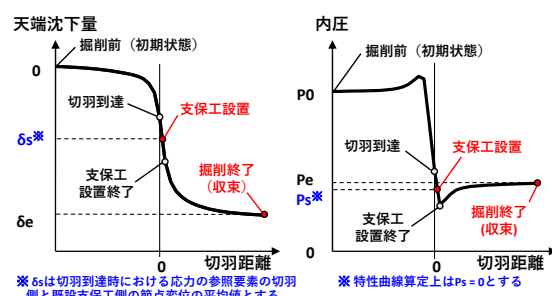


図-4 支保工特性曲線算定における変位および内圧の定義

到達時ステップと支保工設置完了時ステップの間であるため不明である。しかし、支保工設置直後は、支保工に地山からの荷重が作用していないことが想定されるため、本論では $P_s=0$ とした。

安定点の変位量 δe および内圧 P_e は、解析終了時の変位量および内圧と設定した。

3. 数値解析の概要

(1) 解析領域の諸条件

図-5 に数値解析モデルを、図-6 に境界条件および荷重状態の概略図を示す。トンネルは直径 10m の真円形とし、境界領域は、境界面の固定条件がトンネル断面の挙動に影響を及ぼさないようにトンネル壁面から上下左右に 5D (トンネル直径 $D=10m$) を確保した。また、奥行き方向は、二次元解析では単位奥行き (1m)、三次元解析では 100m (10D) とした。三次元解析における奥行き方向のメッシュ分割は、逐次掘削に対応するために間隔を 1m と設定した。

境界条件は奥行き方向のみ変位固定とし、上面、底面および側面は完全自由とした。

荷重 (初期応力) 条件は、上下左右から 1.0MPa の等分布荷重を作用させ、等方応力状態とした。掘削は全断面掘削とし、二次元解析は応力開放法による、三次元解析は 1m ごとの逐次掘削方式による解析とした。

なお、用いた解析コードは ITASCA 社製の FLAC3D である。

(2) 解析ケースと物性値

今回実施した解析ケースを表-1 に示す。解析に用いた地山の構成則は線形弾性および弾完全塑性の 2 種類であり、各構成則に対し 2 次元解析を 1 ケース、三次元解析を 4 ケース、計 10 ケースの解析を実施した。二次元解析 (CaseA, B) は各構成則における地山特性曲線を算出するために実施した。各構成則に対し三次元解析を行った 4 ケースの内訳は、補助工法無しのケース (Case1, 5) と、鏡ボルト (Case2, 6)、先受工 (Case3, 7) および先進導坑 (Case4, 8) を採用した 3 ケースである。

表-2 に解析に用いた物性値を示す。なお、本解析において、支保工は簡易化のために吹付けコンクリートのみとし、ソリッド要素でモデル化することとした。また、支保工は切羽離れ 1m でモデル化することとした。

表-3 に先受工および鏡ボルトの鋼管の物性値を、図-7 に各補助工法の配置を示す。

鏡ボルトの打設を模擬したケース (Case2 および Case6) は、切羽面全体に鋼管を 39 本 (円周方向 45cm ピッチ、中心方向 1m ピッチ) 打設するモデルとした。想定した

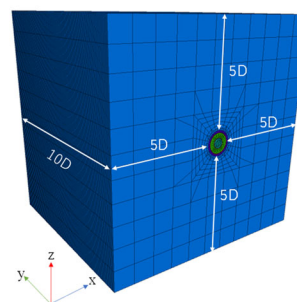


図-5 数値解析モデル

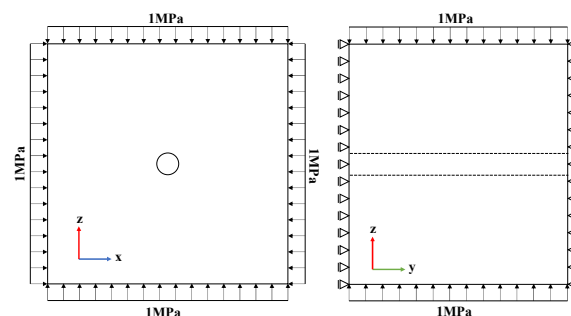


図-6 境界条件および荷重条件

表-1 解析ケース

ケース名	解析種別	構成則	支保工	補助工法	
CaseA	二次元	線形弾性	なし	—	
CaseB		弾完全塑性	なし	—	
Case1	三次元	線形弾性	あり (吹付けCo) t=20cm	—	
Case2				鏡ボルト	
Case3				先受工	
Case4				先進導坑	
Case5		弾完全塑性		—	
Case6				鏡ボルト	
Case7				先受工	
Case8				先進導坑	

表-2 地山と支保工の物性値

		変形係数 (Mpa)	ポアソン比	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (°)
地山	線形弾性	50	0.35	—	—
	弾完全塑性			20	30
支保工 (吹付けコンクリート)	本坑	4000	0.2	—	—
	導坑※			—	—

※Case4およびCase8のみ

表-3 鋼管の諸元

	外径 (mm)	内径 (mm)	肉厚 (mm)	断面積 (mm ²)	断面二次モーメント (N・m)	変形係数 (MPa)	ポアソン比
鋼管※	114.38	102.38	6	2,030	2.977×10^{-6}	210,000	0.3

※鏡ボルトと先受工ともに同じ鋼管を想定

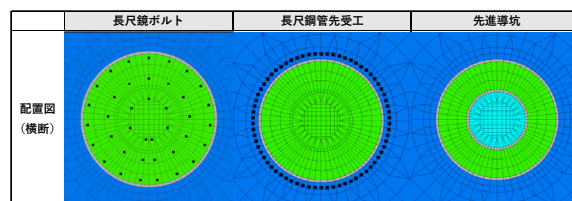


図-7 補助工法の配置図

鋼管はΦ114.38mm，肉厚 $t=6\text{mm}$ ，長さ12.5mである．また，先受工の打設を模擬したケース（Case3 および Case7）は，切羽周辺に 360° ，円周方向に45cmピッチで打設するモデルとした．想定した鋼管は鏡ボルトと同様とし，縦断方向の打設ピッチは9m，打設角度は仰角5度とした．さらに，先進導坑を模擬したケース（Case4 および Case8）は，導坑の直径が5mで中心に位置するモデルとした．導坑ありのケースについては，先進導坑を貫通した後には本坑を掘削することとした．

(3) 支保特性曲線算定における着目位置

三次元解析結果を特性曲線法により評価するにあたり，解析から抽出する値は，地山の変位として解析モデル前面から奥行き方向49.5m地点（49m地点と50m地点の平均）における天端沈下と地山内圧として支保壁面に接する天端直上に位置する地山要素の最小主応力（半径方向応力）とした．ただし，鏡ボルトおよび先受工を採用したケースについては，打設位置との関係により，1シフト内で変位や内圧が変化するため，シフト内の変化について確認した結果を後述する．

4. 数値解析結果

(1) 線形弾性における解析結果

a) 変位および支保内圧の推移

図-8に線形弾性条件での解析（以下，弾性解析）Case1～Case4の変位の推移を，図-9にCase1～Case4の内圧の推移を示す．各ケースとも切羽距離が近くなるにつれて変位や内圧の解放が緩やかに大きくなる結果となった．また，切羽到達前後（切羽距離1～1m）で変位および内圧の解放が急激に発生する傾向を示した．

鏡ボルトを採用したCase2および先受工を採用したCase3は，補助工法を採用しないCase1に比べ，切羽到達時点での変位（先行変位）は小さく，内圧は大きくなる傾向を示している．これは，鏡ボルトと先受工を打設することにより地山が拘束され，掘削による地山の応力解放と先行変位を抑制しているためであると考えられる．また，Case2とCase3を比較すると，Case3のほうが切羽到達時の変位は小さく，内圧は大きい．

先進導坑を採用したCase4は，先進導坑の掘削の影響で本坑掘削開始時点の変位や応力解放が発生している．また，Case1にくらべ，本坑掘削による変位や内圧の変化は他ケースよりも遅い傾向を示した．これは，上述した鏡ボルトや先受工と同様の傾向であり，先進導坑にも地山を拘束し変位や先行変位を抑制する効果があると推測される．一方で，本坑掘削後の安定点における変位は大きく，内圧は小さくなった．

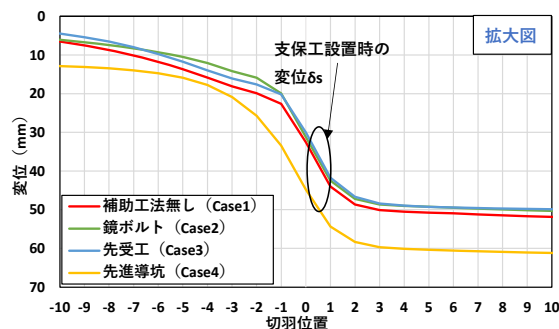
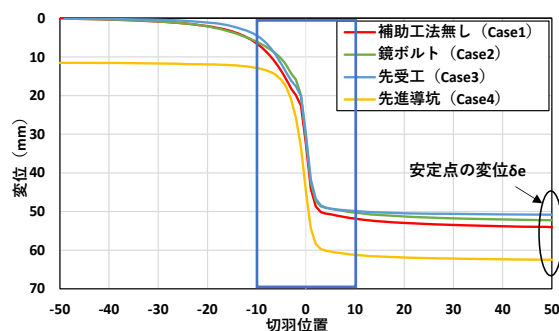


図-8 弾性解析における各ケースの変位量の推移

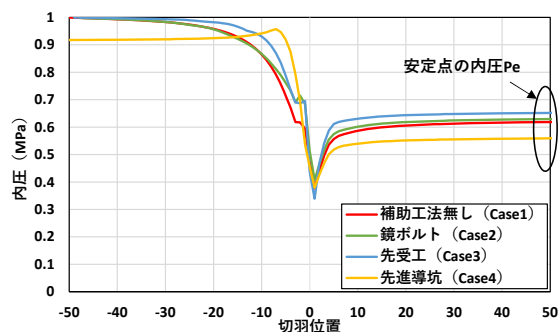


図-9 弾性解析における各ケースの内圧の推移

表4 解析結果一覧（弾性）

	地山先行変位 δ_s (mm)	地山最終変位 δ_e (mm)	支保工の変位 $\delta_e - \delta_s$ (mm)	支保内圧 P_e (Mpa)
Case1	32.61	54.00	21.39	0.62
Case2	31.38	52.51	21.13	0.63
Case3	29.95	50.37	20.43	0.64
Case4	44.84	62.48	17.64	0.56

※赤字は全ケースのうち最小値

b) 特性曲線法による評価

図-10に地山特性曲線および支保特性曲線を示す．

図-10より，鏡ボルトを採用したCase2は，Case1に比べ先行変位（ δ_s ）が小さくなったため，支保特性曲線が左（変位が小さい）側に推移する結果となった．また，安定点は二次元解析（CaseA）で得られた地山特性曲線上に概ね収束する結果となったが，先行変位が抑制されたことで安定点の変位（ δ_e ）は小さくなり，一方で，地山の内圧（支保内圧）（ P_e ）は大きくなった．これは，

図-2b)と同様の傾向であり、先行変位抑制効果を表していると考えられる。

先受工を採用した Case3 も、Case1 に比べ先行変位 (δ_s) が小さくなり、支保特性曲線は左 (変位が小さい) 側に推移し、安定点は地山特性曲線上に収束する結果となった。鏡ボルト同様に先行変位抑制効果が表れる結果となった。

先進導坑を採用した Case4 は、Case1 に比べ先行変位 (δ_s) が大きくなり、支保特性曲線が右側 (変位が大きい) に推移する結果となった。また、安定点は地山特性曲線上に収束するが、Case1 に比べ安定点の変位 (δ_e) は大きい値を示し、内圧 (P_e) は小さくなる結果となった。しかしながら、表4に示すように、支保工の変位および支保工作用荷重は他のケースよりも小さくなる結果となった。このことから、導坑を採用する事によって、地山の初期状態からの変位は大きくなるものの、支保工の変位および支保工作用荷重が軽減する効果が得られると考えられる。ここで、本稿では、この支保工の変位および支保工作用荷重両方を軽減する効果をいなし効果と定義する。

これらの結果から、補助工法により先行変位抑制効果がある場合は、支保工特性曲線が左側に推移することがわかる。先行変位抑制効果は先行変位を抑制することで安定点の変位を抑制する一方、支保工作用荷重を大きくすることが支保工特性曲線からも読み取れる。また、いなし効果がある場合は、支保工特性曲線は右側に推移することがわかった。地山の先行変位は増加する一方で、支保工の変位および支保工作用荷重は抑制されるため、特性曲線法上では、支保工特性曲線は短くなり、安定点の内圧が小さくなることが読み取れる。

c) 縦断方向の内圧の変化

ここでは、補助工法による縦断方向の内圧の変化を詳細に比較・検討する。図-11に鏡ボルトおよび先受工の1シフト (9m) 区間における各ケースの地山内圧の分布 (掘削完了時) を示す。横軸はトンネル縦断方向 (y 軸方向) の位置を示している。

補助工法を採用していない Case1 および先進導坑を採用した Case4 は、縦断方向に一樣の内圧が作用しているのに対し、鏡ボルトを採用した Case2 および先受工を採用した Case3 では縦断方向に内圧のばらつきが生じている。

Case2 は一部 Case1 よりも内圧が小さくなる箇所もあるが、全体的に Case1 よりも内圧は大きくなった。

Case3 では先受工打設位置付近では内圧が 0.1MPa 近く軽減されている一方で、中間部では内圧が 0.04MPa 程度 Case1 よりも大きくなっており、縦断的に効果が一樣ではないことがわかる。

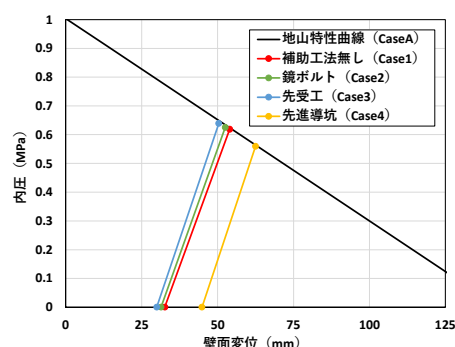


図-10 弾性解析における特性曲線

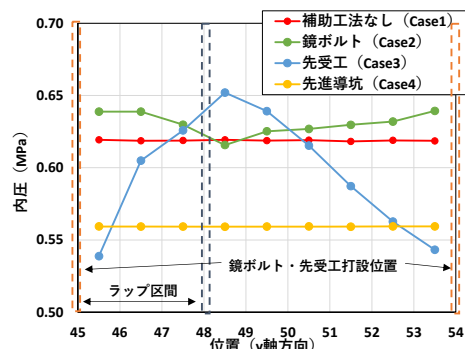


図-11 1シフト内の内圧分布 (弾性)

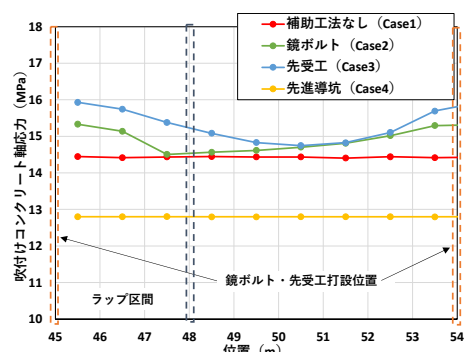


図-12 支保工に発生する軸力

先受工を採用した Case3 において、地山の内圧は抑制される箇所と逆に増加する箇所があることから、先受工の地山改良効果のような変位および支保工作用荷重を両方とも抑制する効果はないと推測される。

d) 支保工に発生する軸力

図-12に各ケースの支保工 (吹付けコンクリート) に発生する軸力を示す。支保工に発生する軸力は、図-11に示す地山内圧と同様に、Case1 および Case4 では縦断方向に一樣の軸力が発生しているのに対し、Case2 および Case3 では1シフト内でばらつく結果となった。また、Case2 および Case3 とともに発生する軸力は Case1 よりも大きく、鏡ボルトや先受工の打設により支保工に発生する負担が大きくなっている。

Case3 において、図-11に示すように地山の内圧が一部軽減されるような結果が出力されるのに対し、図-12に示

す支保工に発生する軸力は全体的に軽減されず、Case1よりも増加する結果となった。

(2) 弾完全塑性における解析結果

a) 変位および支保内圧の推移

図-13 に線形弾性条件での解析（以下、弾性解析）Case5～Case8の変位量の推移を、図-14にCase5～Case8の内圧の推移を示す。弾性解析のケース同様、各ケースとも切羽距離が近くなるにつれて変位や内圧の解放が緩やかに大きくなる結果となった。また、切羽到達前後（切羽距離-1～1m）では変位および内圧の解放が急激に発生する傾向を示した。

鏡ボルトを採用したCase6および先受工を採用したCase7は、補助工法を採用しないCase5に比べ、切羽到達時点での変位は小さく、内圧は大きくなる傾向を示している。これは、弾性解析同様、鏡ボルトと先受工の先行変位抑制効果によるものと推測される。また、Case6とCase7を比較すると、弾性解析結果とは異なり、鏡ボルトを採用したCase7のほうが切羽到達時の変位は小さく、内圧は大きい傾向を示している。これは、図-15に示すように、鏡ボルトを採用することにより切羽前方の塑性化が抑制されるため、先受工に比べ先行変位を抑制する効果が大きいと考えられる。

先進導坑を採用したCase4は、先進導坑の掘削の影響で本坑掘削開始時点の変位や応力解放が発生している。また、Case5にくらべ、本坑掘削による変位や内圧の変化は他ケースよりも遅い傾向を示している。これらの傾向は弾性解析と同様であり、先行変位を抑制する効果が確認できる。また、弾塑性解析では、導坑により切羽前方の塑性化が抑制されている（図-15）。しかし、本坑掘削後の変位は小さく、内圧は大きくなっており、表-5に示すように支保工の変位と作用荷重は補助工法を採用していないCase5より大きくなっており、今回の弾塑性解析条件下ではいなし効果は確認できない結果となった。

b) 特性曲線法による評価

図-16に地山特性曲線および支保特性曲線を示す。表-5に解析結果の一覧を示す。

補助工法を採用していないCase5は、安定点が二次元解析（CaseB）結果から算定された地山特性曲線上に収束せず、内圧と変位ともに大きくなった。これは、二次元解析は平面ひずみ状態と仮定しているため奥行き方向の応力の変化および変位が発生しないのに対し、三次元解析では奥行き方向に応力の再配分等の応力の変化や変位が発生するため二次元解析に比べより早いステップで地山の塑性化が生じ、地山特性曲線が変化するためと考えられる。そのため、三次元数値解析における地山特性曲線は二次元解析で算定した結果よりも上方（内圧が高い状態で変位が進行：図中の黒破線）へ推移すると考え

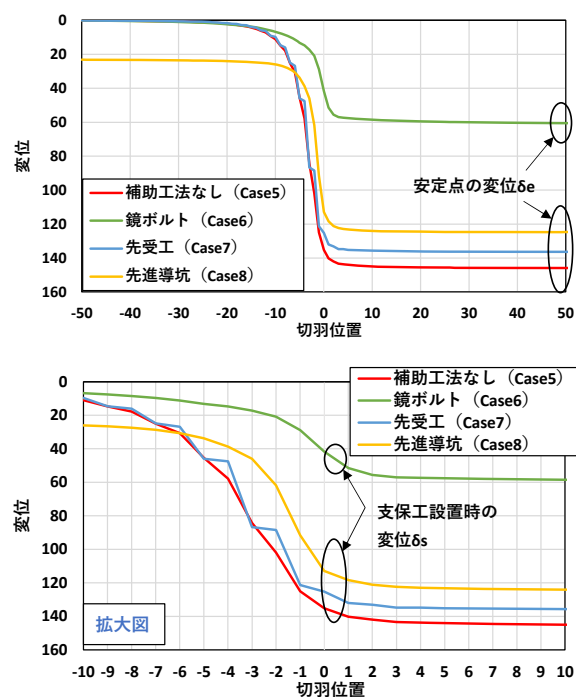


図-13 弾塑性解析における各ケースの変位量の推移

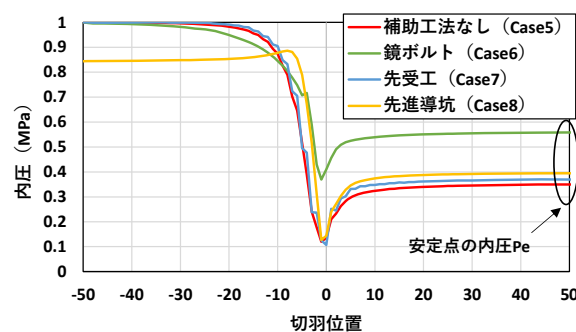


図-14 弾性解析における各ケースの内圧の推移

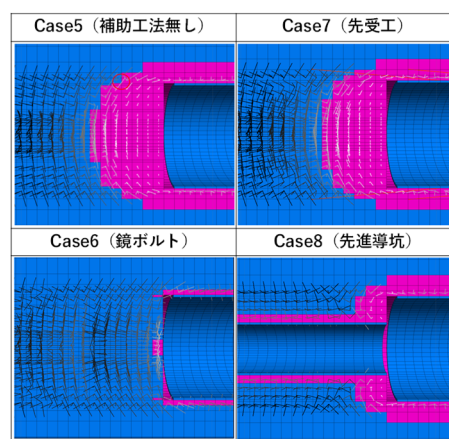


図-15 各ケースの塑性域図および主応力図

表-5 解析結果一覧（弾塑性）

	地山先行変位 δs (mm)	地山最終変位 δe (mm)	支保工の変位 $\delta e - \delta s$ (mm)	支保内圧 P_e (MPa)
Case5	138.7	149.0	10.3	0.35
Case6	41.7	60.6	18.9	0.57
Case7	132.7	142.2	9.5	0.35
Case8	113.6	125.3	11.8	0.39

られる。図-16 の破線は、三次元解析で支保工の剛性を变化させたパラメータスタディを行い、各安定点を用いて近似曲線を引くことで求めた。ここでは、この破線で示す曲線を三次元解析上の地山特性曲線と仮定する。

鏡ボルトを採用した Case6 は、Case5 に比べ先行変位 (δ_s) が小さく、支保特性曲線は左 (変位が小さい) 側に推移する結果となった。また、安定点は、Case5 とは異なり二次元解析から算出した地山特性曲線上で安定する結果となった。先行変位が抑制されたことで安定点の変位 (δ_e) は Case5 よりも 90mm 程度小さくなった一方で、先行変位を抑制することにより地山の内圧 (支保内圧) (P_e) は 0.2MPa 程度大きくなった。これは、弾性解析同様に鏡ボルトの先行変位抑制効果による影響を表現していると考えられる。

先受工を採用した Case7 は、Case5 に比べ先行変位 (δ_s) が小さくなり、支保特性曲線は左 (変位が小さい) 側に推移する結果となった。このことから、弾塑性解析においても、特性曲線法で先受工の先行変位抑制効果を表現している結果となった。

先進導坑を採用した Case8 は、Case6 や Case7 と同様に、Case5 に比べ先行変位 (δ_s) が小さくなり、支保特性曲線は左 (変位が小さい) 側に推移する結果となった。また、安定点は、Case5 と同様、地山特性曲線に収束しない結果となったが、先行変位が抑制されたことで安定点の変位 (δ_e) は Case5 に比べ 20mm 程度小さくなり、一方で、先行変位を抑制することにより地山の内圧 (支保内圧) (P_e) は Case5 よりも 0.04MPa 程度大きくなった。

これは、導坑の支保工の剛性を本坑支保工と同程度高いものとしたため、導坑によるいなし効果が十分に発揮されなかったと推測される。また、一方で先進導坑が鏡ボルトのように切羽前方の地山を拘束することで、図-15 に示すように切羽前方の塑性化を抑制し、先行変位を抑制したと考えられる。

これらのことから、今回実施した弾塑性解析では、鏡ボルトおよび先受工、先進導坑すべてにおいて先行変位抑制効果が得られたことにより、支保工特性曲線は左に推移し、安定点の変位は抑制される一方で、安定点の支保工作用荷重は増加した。

c) 掘削終了時の内圧の縦断方向分布

図-17 に鏡ボルトおよび先受工 1 シフト区間での内圧分布を示す。補助工法のない Case5 と先進導坑を採用した Case8 においては、弾性解析同様、縦断方向に一様の応力分布および変位分布となっている。また、鏡ボルトを採用した Case6 および先受工を採用した Case7 についても、弾性解析と同様、1 シフト間で内圧および変位がばらつく結果となった。

各ケースの結果を比較すると、補助工法を採用した Case6~8 は全て補助工法がない Case5 に比べ、平均的に

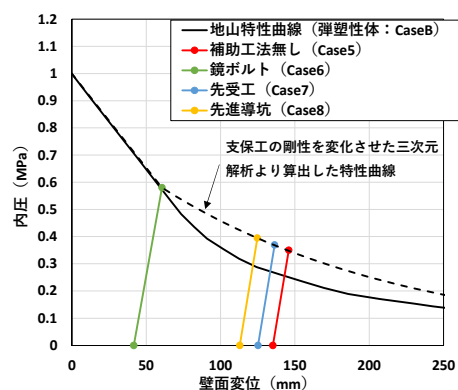


図-16 弾完全塑性解析における特性曲線

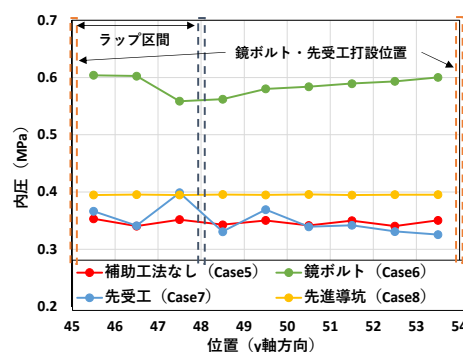


図-17 1 シフト内の内圧分布 (弾塑性)

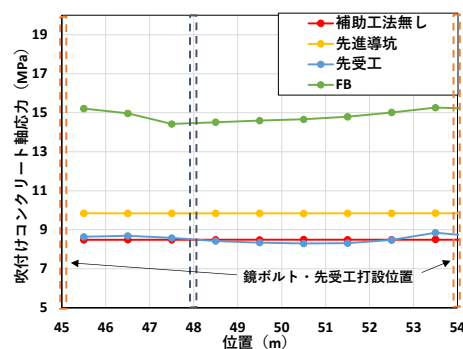


図-18 支保工に発生する軸力
(弾塑性: 掘削終了時)

みると内圧が同程度もしくは大きくなる傾向を示した。

d) 支保工に発生する軸力

図-18 に弾塑性解析における各ケースの支保工軸力の分布を示す。図-17 に示す地山の内圧同様、補助工法を採用することにより支保工に発生する軸力は同程度かもしくは大きくなる傾向が得られ、補助工法による支保工応力の軽減は確認できない結果となった。

(3) 特性曲線法から得られる補助工法の効果に関する考察

a) 鏡ボルトの効果

弾性解析および弾塑性解析に関わらず、鏡ボルトを採用したケース (Case2 および Case6) では、地山特性曲線

上に収束し、かつ、先行変位が抑制されている。このことから、鏡ボルトは先行変位を抑制する効果があることがわかる。また、そのメカニズムは、鋼管が地山に挿入されることにより、切羽面の押出しを抑制することで、地山のゆるみを小さくし先行変位が抑制されると考えられる。特に、弾塑性解析では、図-15 に示すように鏡ボルトの挿入により切羽前方の塑性化が抑制されるため、切羽前方に塑性領域が卓越するような地山条件ほど、その効果は大きくなると考えられる。しかし、先行変位抑制効果により支保工に作用する荷重は増加傾向にあり、支保工応力は、補助工法がない場合よりも大きくなる。

b) 先受工の効果

弾性解析および弾塑性解析に関わらず、先受工を採用したケース (Case3 および Case7) は、鏡ボルト同様、先行変位が抑制され、支保工特性曲線は左側に推移し先行変位抑制された。このことから、先受工に先行変位抑制効果があることがわかる。また、地山の内圧は、先受鋼管との位置関係により、1 シフト間で大きくばらつき、一部軽減される箇所もあるが、支保工に発生する応力は全体的に補助工法がないケースよりも大きくなっていることから、先受工による支保工にかかる負担を軽減する効果はなく、地山改良効果はないことがわかる。

c) 先進導坑の効果

先進導坑の効果については、弾性解析において、先行変位が大きくなり支保特性曲線が右側に推移した。また、この時の支保工変位および作用荷重は、補助工法がないケースよりも軽減されており、いなし効果が得られる結果となった。

一方、弾塑性解析では、支保特性曲線が左側に推移し、先行変位抑制効果が得られた一方で、支保工の変位や作用荷重については、補助工法を採用しないケースよりも大きくなり、いなし効果は得られなかった。

弾塑性解析においても、先進導坑の掘削により地山の内圧は解放されるため、いなし効果が発揮されることが想定されるが、前述の解析ではいなし効果が得られなかった。そこで本稿では、弾塑性解析において導坑のいなし効果が得られなかった原因について 4. で詳細に検討することとした。

5. 先進導坑の効果発現に関する検討

前述の 3. の結果から、先進導坑には先行変位抑制効果といなし効果の 2 種類の効果があることが推測されるが、この効果について、どのような条件下でどちらの効果が卓越するのか明らかとすることが必要である。ここでは、3. の解析に加え、先進導坑の施工条件を変えた

表-6 追加解析ケース

ケース名	解析種別	構成則	導坑掘削条件
Case8-1	三次元	弾完全塑性	閉合距離5m
Case8-2			素掘り

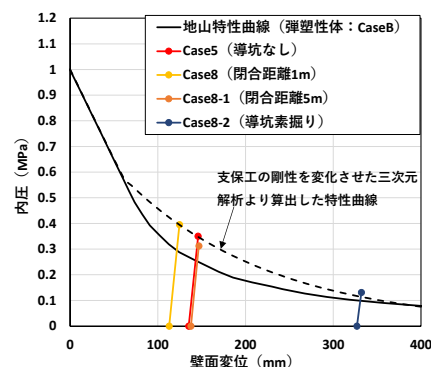


図-19 導坑掘削方法ごとの特性曲線

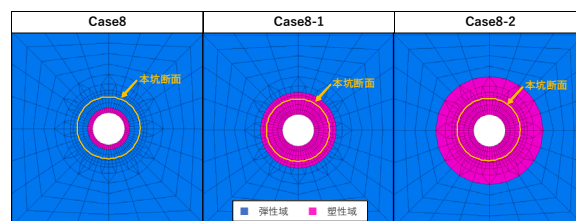


図-20 導坑掘削方法ごとの塑性領域分布

数値解析を行い、その結果を前述の Case8 と比較する事で、先進導坑の効果発現メカニズムについて検討した。

追加で解析を行ったケースは表-6 に示す 2 ケースとした。Case8-1 は先進導坑を素掘りとしたケース、Case8-2 は先進導坑の支保工を 5m 遅れ (以下、閉合距離 5m) としたケースである。地山の構成則は弾完全塑性とし、その他の地山条件および各物性値は 3. (1) および (2) に示す条件と同様とした。

まず、特性曲線法を用いて、各ケースの効果を比較する。図-19 に解析結果から得られた地山特性曲線を示す。

Case8 は (2) で前述した通り、先行変位が小さくなることにより、支保工特性曲線は左側に推移し、先行変位抑制効果が卓越する結果となった。一方、先進導坑を素掘りとした Case8-2 は、先行変位が大きくなり支保特性曲線が Case5 よりも右側に推移する結果となった。支保工の変位および支保工作用荷重は Case5 に比べ軽減されており、いなし効果が卓越したと考えられる。さらに、Case8-1 は、先行変位が Case5 同程度となり、支保工特性曲線も Case5 の曲線とほぼ重なる結果となった。支保工の変位および支保工作用荷重はやや軽減されている。これらのことから、先進導坑の支保剛性や支保工打設のタイミングにより先進導坑により得られる効果は異なることがわかる。

図-20 に各ケースの先進導坑掘削完了時点での塑性領域図を示す。

図-20 より、各ケースの塑性領域を比較すると、Case8 は導坑掘削による塑性領域は本坑断面の内側に収まっている一方、Case8-1 および Case8-2 は塑性領域が本坑断面の外へ及んでいる。このことから、導坑掘削によるいなし効果の有無は、導坑掘削により発生する塑性領域は本坑断面に対し内外どちらにあるかに左右されと考えられる。先進導坑のいなし効果について、大森らは、先進導坑により発生する塑性域が本坑掘削面内に収まる場合には、必ずしも先進導坑によるいなし効果が得られない⁵⁾ことを示しており、Case8 においても同様の結果となった。しかし、Case8-1 と Case8-2 はどちらも導坑掘削による塑性領域が本坑断面よりも外側へ広がっているにもかかわらず、そのいなし効果には大きな差が生じている。そこで本稿では導坑掘削時のトンネル周辺応力に着目した。

図-21 に各ケースの周辺応力分布を示す。弾塑性解析において、接線方向応力は導坑壁面ではなく、塑性領域と弾性領域の境界付近で最大を示している。弾性体の場合であれば、トンネル壁面のアーチ効果により地山の荷重を支持するが、弾塑性の場合は、この接線方向応力が最大となる箇所が本坑断面内に形成されることにより地山の荷重を支持していると考えられる。

本坑掘削面の周辺応力に着目すると、Case8 は接線方向応力が最大となる箇所が本坑断面内にあり、かつ、本坑壁面位置におけるトンネル接線方向応力が初期応力よりも大きくなっている。また、Case8-1 は、接線方向応力の最大となる箇所が本坑断面よりも外側にあり、かつ、本坑壁面位置における接線方向応力は 1.0 程度と初期状態とほぼ同程度である。一方、Case8-2 は接線方向応力の最大となる箇所が本坑断面よりも外側にあり、かつ、本坑壁面位置における接線方向応力は 0.4 と、初期応力よりも小さくなっている。トンネル半径方向応力は、導坑の掘削により全ケースで軽減されているが、その軽減率は、塑性領域が大きいほど大きくなっている。

図-19 の特性曲線から推定される導坑の効果と、図-21 の周辺応力分布より、導坑掘削完了時点（本坑掘削前）におけるトンネル接線方向応力の最大となる箇所が本坑断面よりも内にあり、かつ、本坑壁面位置におけるトンネル接線方向応力が初期応力よりも大きい場合は、本坑支保工に作用する荷重は軽減されず、いなし効果は得られない。これは、導坑掘削により形成されたグラウンドアーチを本坑掘削により削ってしまうため、グラウンドアーチにより支持されていた荷重を支保工で支持しなおさなければならないためと考えられる。逆に、トンネル接線方向応力の最大となる箇所が本坑断面よりも外にあり、かつ、本坑壁面位置における接線応力が初期応力よ

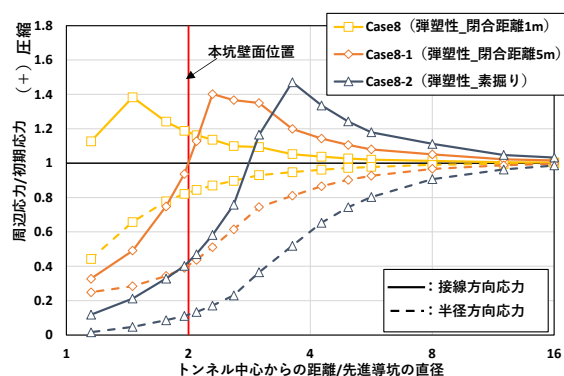


図-21 トンネル周辺応力分布

りも小さい場合は、導坑掘削により形成されるグラウンドアーチの内側を掘削するため、支保工に作用する荷重は小さく、いなし効果が得られると考えられる。

これらのことから、導坑によるいなし効果を期待する場合には、導坑掘削による塑性領域の分布および形成されるグラウンドアーチの形成位置や本坑断面内の応力状態を十分に確認することが肝要であると考えられる。

6. まとめ

本稿では、円形断面における二次元および三次元数値解析結果から、特性曲線法を用いて補助工法の効果および補助工法が支保工に与える影響について評価した。得られた知見を以下に示す。

【鏡ボルトについて】

- ・ 鏡ボルトは鋼管を切羽前方に挿入することにより先行変位を抑制効果がある。特に、弾塑性解析の場合、前方の塑性化を抑制するため先行変位抑制効果高い。
- ・ しかしながら、先行変位を抑制する分、地山の内圧は解放されず、支保工に作用する内圧（荷重）は補助工法を採用しない場合よりも大きくなる。

【先受工について】

- ・ 先受工は、鏡ボルト同様に先行変位抑制効果がある。一方で、支保工に作用する荷重は増加する。
- ・ 縦断方向で支保工に作用する内圧（地山作用荷重）はバラツキ、1 シフト内で支保工作用荷重が軽減される箇所と増加する箇所が混在する。
- ・ 支保工に発生する応力は先受工がない場合よりも大きくなる。

【先進導坑について】

- ・ 弾性解析において、先進導坑には、支保工の変位および支保工の内圧を抑制する、いわゆる、いなし効果がある。

- ・ 弾塑性解析においては、先進導坑におけるいなし効果は確認されず、先行変位抑制効果が発現する場合がある。
 - ・ 弾塑性解析において、導坑のいなし効果は、導坑掘削の影響により発生する塑性領域と接線方向応力に左右されると推測される。塑性域が本坑断面の外まで広がり、かつ、導坑掘削により本坑掘削面の接線方向応力が初期応力よりも小さくなる場合には、導坑によるいなし効果が期待できる。
- 2) 前田洸樹, 佐々木亨, 日下敦: 補助工法の実特性曲線上の効果に関する弾性解析による一考察, 第15回岩の力学シンポジウム講演集, p189-194, 2021.
 - 3) 佐々木亨, 前田洸樹, 日下敦: 地山特性曲線を用いた長尺フォアパイリングの効果に関する一検討, 第9回年次学術発表会, 2021. (投稿中)
 - 4) 今田徹: 山岳トンネル設計の考え方, p64-65, 土木工学社, 2010.
 - 5) 大森禎敏, 岡部正, 五味綾子, 砂金伸治: 中央導坑先進工法を適用した場合の本坑挙動と導坑の設計指標に関する考察, トンネル工学研究発表会論文集, I-1, 2020.

参考文献

(2021. 8. 6 受付)

- 1) 佐々木亨, 日下敦, 巽義知ほか: 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回トンネル工学研究発表会 報告集, I-42, 2020.

A STUDY ON IMPACT OF AUXILIARY SUPPORT METHOD ON TUNNEL SUPPORT WITH CHARACTERISTIC CURVE

Toru SASAKI, Koki MAEDA and Atsushi KUSAKA

During conventional tunnelling, an auxiliary support method may be used for the many purpose. However, impacts of the auxiliary support method on the tunnel displacement and the stress of support are not fully understood. If these impacts can be estimated simply and specifically, it is possible to design auxiliary support method reasonably. In this paper, we conducted an excavation analysis under 3D models, and evaluated the impact of auxiliary support method with characteristic curve from numerical analysis results. As a result, it was clarified that some of auxiliary support methods (ex. Face bolt and forepiling) has effect that suppressing the displacement before excavation, but increase the stress generated support after excavation.