

中央導坑先進工法適用時の2次元数値解析における 応力解放率と導坑効果に関する一考察

井野 裕輝¹・真下 英人²

¹正会員 一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵3154)
E-mail: ino@cmi.or.jp

²正会員 一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵3154)
E-mail: mashimo@cmi.or.jp

地山強度が小さく、掘削時に大変形が発生するトンネルの対策として中央導坑先進工法が適用されたトンネルの挙動を2次元解析により検討する際に必要となる応力解放率について2次元解析と3次元解析の比較により検討するとともに、導坑効果に及ぼす要因について検討を行った。解析結果から、3次元解析から得られる変位量と地山特性曲線の支保圧に着目した応力解放率を用いれば、地山が塑性化する場合でも2次元解析により導坑の効果、支保構造を検討することは可能であることが確認された。また、導坑の効果は、導坑の支保剛性、大きさなどの影響を大きく受けるとともに、応力解放率の値はこれらに加えて地山の強度、変形係数によって大きく変わることが明らかとなった。

Key Words : center pilot tunnel method, ground stress release rate, ground response curve, support reaction curve, finite element method

1. はじめに

地山強度が小さく、トンネル掘削時に大変形が発生する地山においては、その対策として導坑を掘削した後、本坑の拡幅を行う中央導坑先進工法が適用される場合がある。先進導坑の効果としては、一般的に作用土圧の低減、前方地質の把握、切羽の安定、水抜きなどが挙げられるが、大変形が発生する地山では、導坑掘削により本坑拡幅時までに発生する先行変位を増加させることによりトンネル周辺の地山応力を解放し、支保工に作用する土圧を減少させる効果が期待される。このような、導坑を用いた場合の変位予測や支保構造の検討には数値解析が用いられることが多いが、トンネル掘削時の挙動は、切羽の進行とともに変化する3次元の現象であるため、数値解析は3次元で行う場合が増えている^{2,3,4)}。しかし、実務では、その簡便さから応力解放率を用いることにより2次元の問題として近似した2次元解析が適用されることもある。応力解放率は、解析結果や施工実績などを参考に経験的に定めていることが多いが、中央導坑先進工法を用いた場合の応力解放率の値について検討した例は少なく⁵⁾、十分な知見が得られていない。また、中央導坑先進工法の適用に際しては、導坑の支保工の規模、

導坑の大きさなどを設定する必要があるが、これらが導坑の効果に及ぼす影響について把握しておくことが重要となる。このため、本研究では、FEMを用いた2次元解析と3次元解析の比較を行い、中央導坑先進工法を適用したトンネルの挙動を2次元解析で検討する場合の応力解放率について検討を行うとともに、導坑の支保工の剛性、導坑の大きさなどが導坑効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

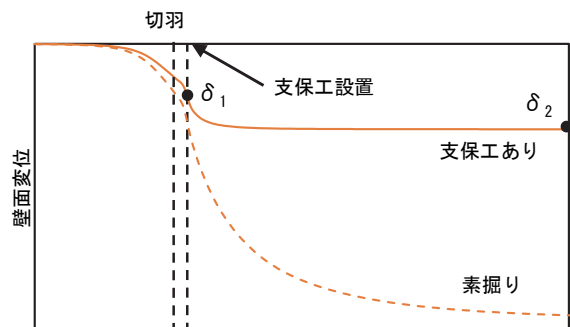


図-1 切羽位置とトンネル壁面変位との関係

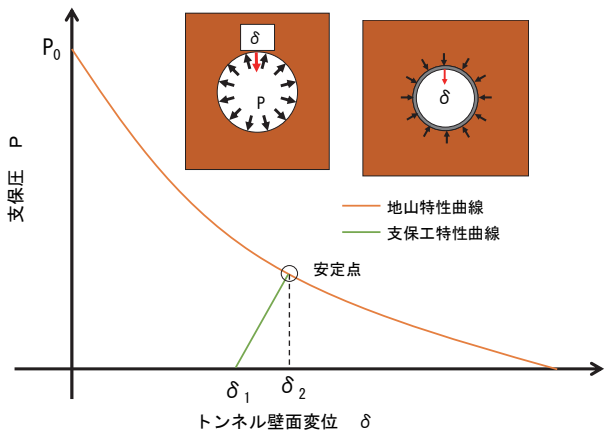


図-2 地山特性曲線と支保工特性曲線

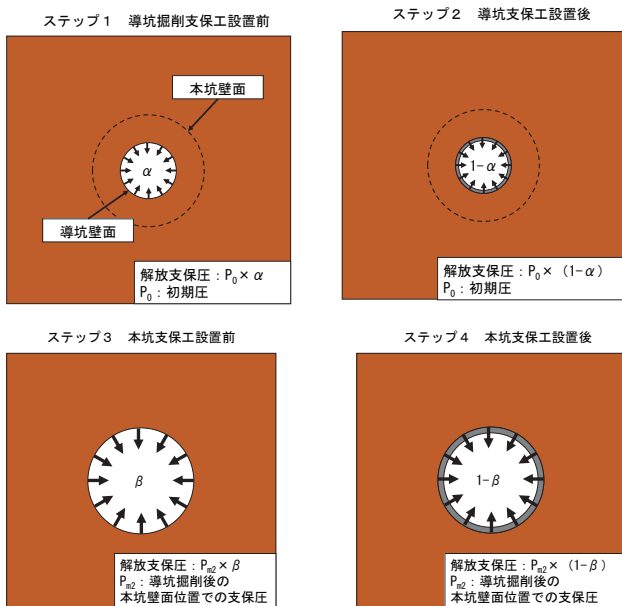


図-3 導坑が有る場合の2次元解析ステップ

2. 応力解放率の設定方法

(1) 地山特性曲線法と応力解放率

トンネルの挙動は、切羽の進行とともに変化する3次元の問題であり、3次元解析を行うと、切羽位置とトンネル壁面変位の関係として図-1が得られる。地山特性曲線法は、このようなトンネルの挙動を2次元問題として扱ったものであり、図-2に示すように支保工特性曲線の立ち上がり点を支保工設置時の先行変位 δ_1 とすることにより、トンネルの安定点は地山特性曲線と支保工特性曲線との交点として得られることになる。支保工設置時の先行変位は、それまでに解放された地山応力の大きさによって決まるが、2次元のFEM解析では、解放される地山応力を応力解放率を用いて与えており、3次元解析から得られる支保工設置時に発生する先行変位量に合うように2次元解析の応力解放率を設定すれば安定点における変位 δ_2 は3次元解析と一致することになる。ただし、2次元解析は平面ひずみ状態を前提としており、3次元

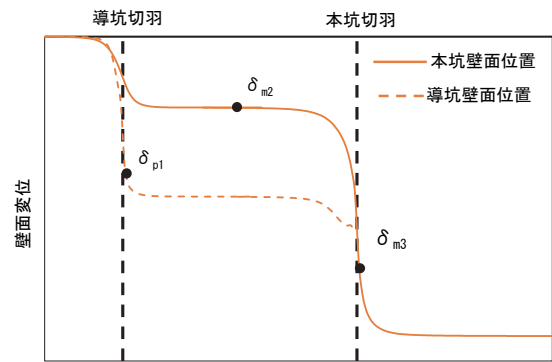


図-4 切羽位置とトンネル壁面変位の関係（導坑有り）

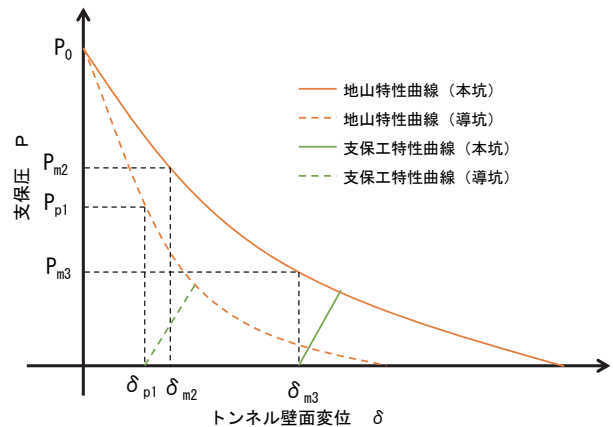


図-5 地山特性曲線と支保工特性曲線（導坑有り）

解析では切羽進行の影響を受けている間は平面ひずみ状態にはならないため、地山が塑性化する場合、安定点での応力状態が同じであっても、最終変位は応力履歴の影響を受けて、2次元解析と3次元解析は一致しない場合がある。

従来、応力解放率は、素掘り状態の弾性解析結果から得られた切羽到達時の先行変位量と最終変位量の比率を参考にして30-40%程度の値が設定されることが多かったが、地山が塑性化する場合地山特性曲線が線形とならないため、変位量の比率から得られた応力解放率を用いると3次元解析と同じ変位を得ることはできない。また、図-1から分かるように支保工の設置によって先行変位は抑制されるため、支保工を設置する場合の応力解放率は、素掘り状態の解析結果から求めた値よりも小さい値となる。このため、本研究では地山特性曲線の支保工設置時まで解放される支保圧の大きさに着目して応力解放率を求めることとした。

(2) 導坑がある場合の応力解放率

導坑を掘削して本坑拡幅を行う場合、2次元解析では、この解放される地山応力を図-3に示すような応力解放率 α 、 β として与えることになるため、導坑掘削時、本坑拡幅時において、それぞれ3次元解析で得られた先行変

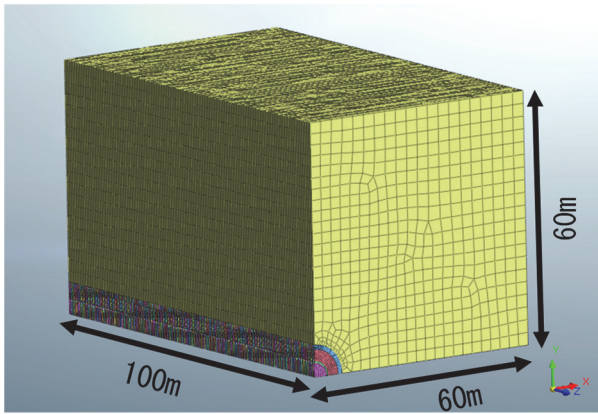


図-6 3次元解析モデル

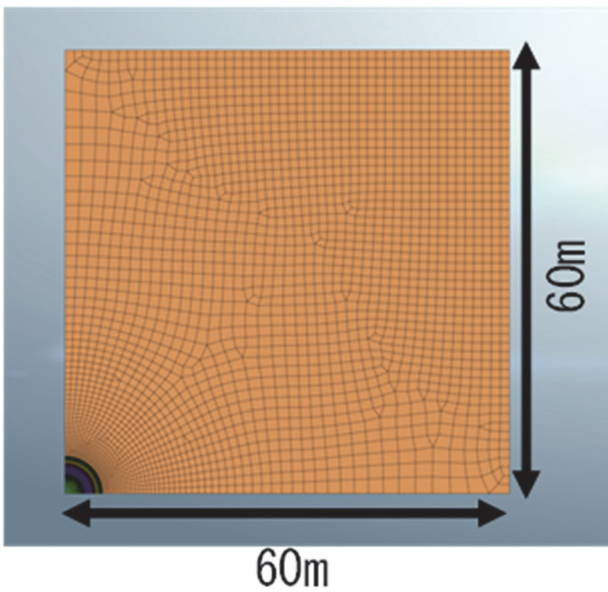


図-7 2次元解析モデル

位を与えるように応力解放率を設定すれば、3次元解析と同一の結果が2次元解析により得られることになる。具体的には、導坑掘削時の応力解放率 α は、図-4に示すような3次元解析から得られた先行変位 δ_{p1} に対応する導坑壁面の地山特性曲線上の支保圧 P_{p1} を図-5に示すように2次元解析から得られた地山特性曲線を用いて求めれば、 $\alpha=(P_0-P_{p1})/P_0$ (P_0 :初期圧)として、本坑拡張時の応力解放率 β は、同様に3次元解析から得られた導坑掘削時の本坑壁面位置での収束変位 δ_{m2} 、本坑拡張時の先行変位 δ_{m3} に対応する地山特性曲線上の支保圧 P_{m2} 、 P_{m3} を2次元解析から得られた地山特性曲線を用いて求めれば、 $\beta=(P_{m2}-P_{m3})/P_{m2}$ として得られる。ただし、 β は導坑掘削時の収束変位 δ_{m2} が応力解放率 α を用いた2次元解析で得られた本坑壁面位置での収束変位 δ'_{m2} と一致していることを前提としており、上述した3次元解析において切羽進行の影響を受けている間は平面ひずみ状態とならないことの影響により一致しない場合は、 P_{m2} として δ'_{m2} に対応した地山特性曲線上の P'_{m2} を用いないと本坑

表-1 支保工および地山の物性値

	単位	地山	支保工	
			導坑	本坑
変形係数 E	[MPa]	200 ^{※1}	4000 ^{※2}	4000 ^{※3}
ポアソン比 v		0.3	0.2	0.2
粘着力 c	[MPa]	2.1 ^{※4}	—	—
内部摩擦角 ϕ	[°]	10	—	—
ダイレイタンス角 Ψ	[°]	0	—	—
一軸圧縮強さ q_u	[MPa]	5 ^{※4}	—	—

※1 一部ケースについては $E_g=50, 400\text{MPa}$ についても実施
 ※2 一部ケースについては $E_{sp}=400, 1000, 8000, 20000\text{MPa}$ についても実施
 ※3 一部ケースについては $E_{sm}=8000$ および素振りについても実施
 ※4 一部ケースについては $c=4.2\text{MPa}$ および弾性体についても実施
 $q_u=2c \cdot \tan(45^\circ + \phi/2)$

拡張時の先行変位 δ_{m3} は2次元解析から得られる先行変位 δ'_{m3} と厳密には一致しない。

本研究では、半径が5mの円形トンネルを対象に3次元解析と2次元解析を行い、上述した応力解放率の設定方法の妥当性を検証するとともに、支保工の剛性、地山の变形係数、地山強度、導坑の大きさなどを変化させた解析を行い、これらが応力解放率 α 、 β さらに導坑の効果に及ぼす影響を検討した。

3. 数値解析の概要

(1) 解析モデル

3次元解析で使用したモデルを図-6に示す。解析では、導坑の掘削半径2.5m、支保工厚10cm、本坑の掘削半径5m、支保工厚20cmの円形断面トンネルを対象とした1/4モデルを用いた。境界条件は、トンネルが含まれない外周面を自由、含まれる側面をローラー境界とした。初期応力状態は側圧係数を1とし、上下左右から土被り約400m相当の10MPaを等分布荷重として作用させた。掘削は一掘進長1mの全断面掘削とし、支保工は切羽から後方1mに設置し、解析ステップは掘削と支保工設置のサイクルを繰り返すものとした。

2次元解析で使用したモデルを図-7に示す。導坑、本坑の半径、支保工の厚さは3次元解析と同じとした。境界条件は、トンネルが含まれない2辺を自由、含まれる2辺をローラー境界とし、初期応力状態も3次元解析と同じとした。

(2) 解析に用いた物性値と解析ケース

解析に用いた物性値を表-1に示す。地山はMohr-Coulombの破壊規準に従う弾完全塑性体とした。支保工は弾性体として、3次元解析ではソリッド要素、2次元解析では平面要素でモデル化し、変形係数は吹付けコンクリートを想定して4000MPaとした。地山の一軸圧

縮強度 q_u は 5MPa で地山強度比は 0.5 となるが、地山強度比 1 と弾性体の場合の解析も行った。また、一部のケースについては、支保工の変形係数、地山の変形係数、導坑の径を変化させてその影響を調べた。解析コードは 3次元解析、2次元解析ともに MIDAS-FEA-NX を用いた。

4. 数値解析結果

(1) 導坑が無い場合の挙動

a) 2次元解析と3次元解析の比較

図-8 は 3次元解析から得られた導坑が無い場合の切羽位置と壁面変位との関係を、図-9 は切羽位置と壁面での地山応力（半径方向）との関係を示したものである。なお、壁面での地山応力は、2次元解析、3次元解析ともに壁面に接する要素の中心応力を抽出した。地山の変形係数は $E_g=200\text{MPa}$ 、支保工の変形係数は $E_{sm}=4,000\text{MPa}$ 、地山強度比は $q_u/P_0=0.5$ とした。図中には、前述した手法により得られた、支保工設置時の応力解放率（ $\alpha=63\%$ ）を用いて、2次元解析から得られた変位、地山応力も示した。3次元解析から得られる壁面変位は、切羽が約 1.5Dm (Dm: 本坑の外径) 手前に来た段階で発生し始め、切羽通過直前に急激に増加し、切羽通過後約 1.5Dm で一定となり、収束する。支保工設置時、変位収束時の変位は、ともに2次元解析結果と概ね一致する。

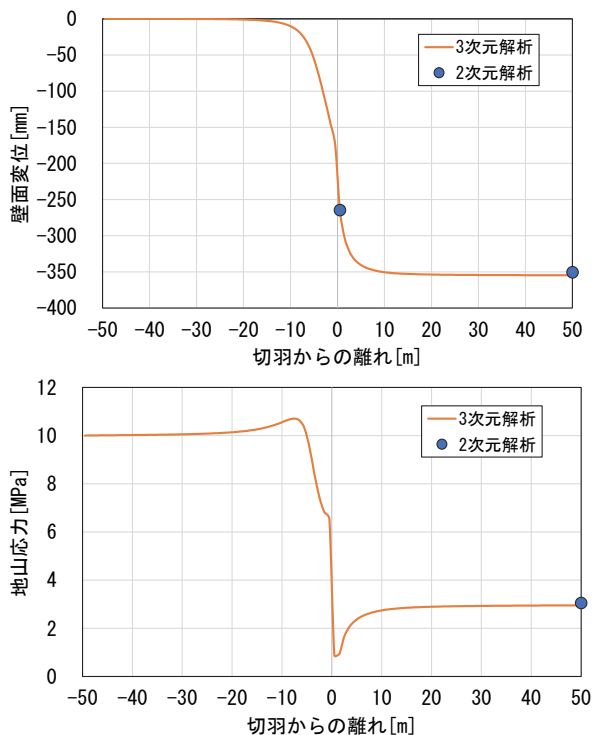


図-9 切羽位置と地山応力との関係（導坑無し）

地山応力は、切羽が約 2Dm 手前に来た段階で上昇し始めるが、切羽手前約 0.5Dm の位置でピークを示した後、急激に減少し、切羽通過後 1MPa 程度まで下がるが、支保工の設置後、再び上昇し始め、切羽通過後約 3Dm で一定となり、収束する。地山応力収束時の地山応力は、2次元解析と概ね一致する。

図-10 は、図-8 と図-9 から求まる壁面変位と地山応力との関係を 2次元解析から得られた地山特性曲線および支保工特性曲線に重ねて示したものである。地山特性曲線は壁面に作用する支保圧を減少させて作成した。また、支保工特性曲線は横軸上の支保工設置時の変位を示す点と 2次元解析から得られた変位収束時における変位と壁面での地山応力を示す点を結んで求めたが、変位収束時の地山応力と変位は地山特性曲線上に来ている。なお、3次元解析から得られる半径方向の地山応力は、地山特性曲線の支保圧に対応するものであるが、上述したように壁面に接する要素の中心点における応力であり、厳密には壁面位置での応力ではないことに留意する必要がある。3次元解析から得られる地山応力は、初期変位の段階では増加の傾向を示し、ピークを示した後、減少し始め、支保工設置時には 1MPa 程度まで減少する。支保工設置時の地山応力は地山特性曲線上における壁面の支保圧よりも非常に小さい値を示すが、これは、3次元解析では支保工設置を行う前のステップで無支保状態となるためであり、地山特性曲線上における壁面の支保圧は 3次元解析では切羽周辺の地山が負担しているものと考えられることができる。支保工設置後は、変位の増加とともに切羽が負担している応力が解放され、地山応力は支保工特性曲線に沿って増加し、変位収束時（安定点）には 2次元解析結果と概ね一致する。なお、安定点における支保工の変位、応力の 2次元解析と 3次元解析との差はともに 1~3% 程度であり、弾性解析での支保工の変位、応力の 2次元解析と 3次元解析の差も同程度であった。

図-11 は、支保工設置時、変位収束時のトンネル周辺の応力分布について、2次元解析と 3次元解析との比較

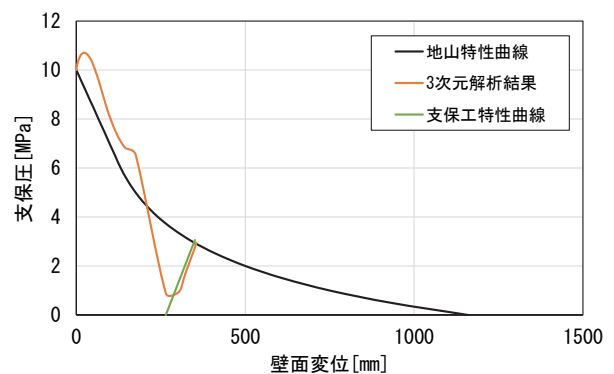
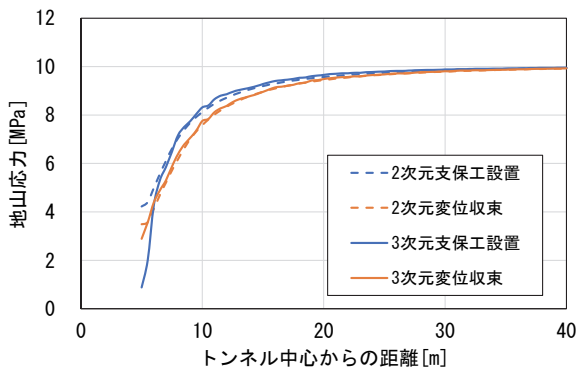
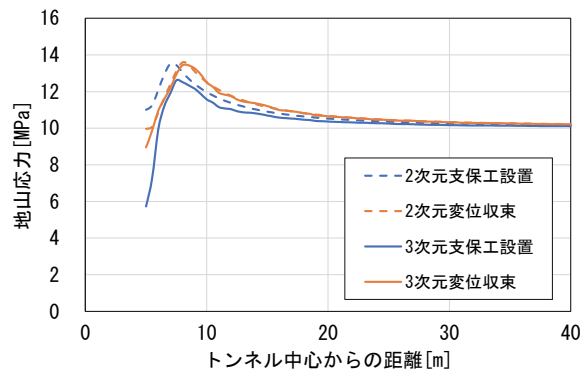


図-10 地山応力とトンネル壁面変位との関係（導坑無し）



(a) 半径方向



(b) 円周方向

図-11 トンネル周辺の地山応力分布 (導坑無し)

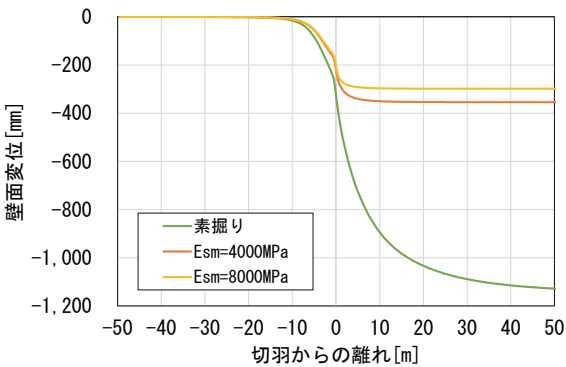


図-12 支保剛性が壁面変位に及ぼす影響 (導坑無し)

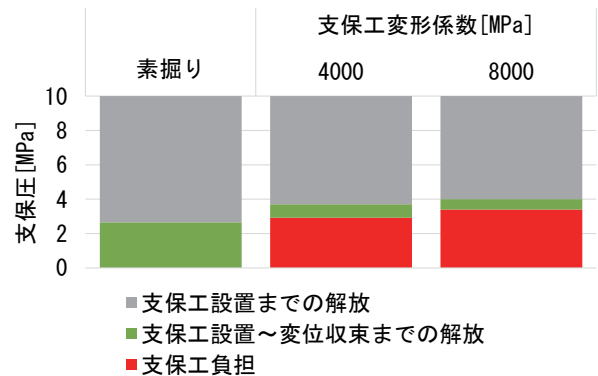


図-14 支保剛性が支保圧に及ぼす影響 (導坑無し)

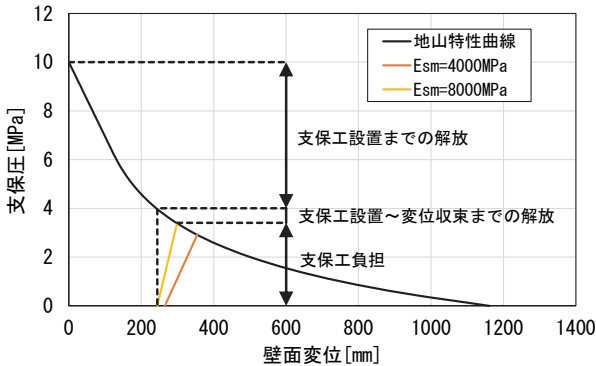


図-13 支保剛性が支保工特性曲線に及ぼす影響 (導坑無し)

を行ったものである。変位収束時の応力分布は、2次元解析と3次元解析はほぼ整合しているが、支保工設置時の応力分布は、前述したように3次元解析では支保工設置を行う前のステップで無支保状態となるため、半径方向応力 σ_r については壁面から数m、円周方向応力 σ_θ については壁面から10m程度の範囲では3次元解析は2次元解析よりも小さな値を示す。

以上のように、2次元解析と3次元解析から得られるトンネル周辺の応力分布は、変位収束時には概ね一致するが、支保工設置時には異なる。一般に、弾塑性体の場合、最終の応力状態が同じであってもそれ

までの応力履歴が異なると最終の変位は異なることもあると思われるが、今回、用いた解析モデルと解析条件のもとでは、その影響は小さく、支保圧に着目した応力解放率を用いれば、2次元解析によっても概ね3次元解析と整合した結果が得られると言える。

b) 支保剛性の影響

図-12は、地山の変形係数は $E_g=200\text{MPa}$ 、地山強度比は $q_u/P_0=0.5$ として、支保工の変形係数を $E_{sm}=4,000$ 、 $8,000\text{MPa}$ と変化させた場合の3次元解析から得られた切羽位置と壁面変位との関係を素掘りの場合と併せて示したものである。なお、本研究では、支保工の変形係数 E_{sm} を変化させて支保剛性 $E_{sm}T_s$ (T_s :支保工厚さ)を変化させているが、本研究の解析条件では支保工には曲げモーメントは発生しないため、厚さ T_s を変えても $E_{sm}T_s$ が同一であれば同一の結果が得られることを確認している。変位は支保剛性が大きくなるに伴い減少し、支保工設置時の先行変位も減少することが分かる。

図-13は、支保剛性を変化させた場合の3次元解析から得られた支保工特性曲線と地山特性曲線との関係、図-14は支保工設置時、変位収束時における壁面の支保圧を示したものである。図-14には素掘りの場合の切羽後方1mの位置での支保圧も併せて示した。なお、支保工特性曲線は、前述したように、弾塑性解析の場合でも変

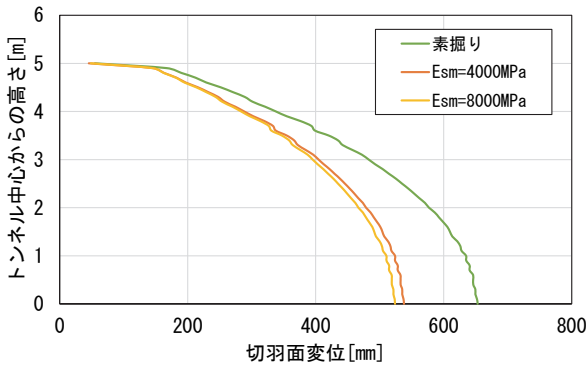


図-15 支保剛性が切羽押し出し量に及ぼす影響（導坑無し）

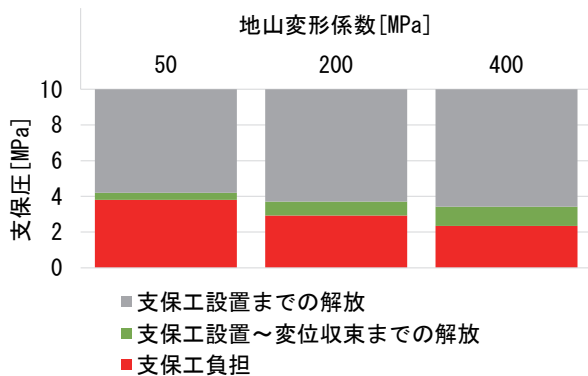


図-16 地山の変形係数が支保圧に及ぼす影響（導坑無し）

位収束時での変位は、3次元解析と2次元解析は概ね一致することから、横軸上の支保工設置時の変位を示す点と3次元解析から得られた変位収束時の変位に対応する地山特性曲線上の点を結んで求めており、以降、支保工特性曲線は同様の方法により求めることとした。また、壁面の支保圧は、3次元解析から得られた変位に対応する地山特性曲線上の支保圧の値を求めており、以降、支保圧は同様の方法により求めることとした。支保剛性が大きいほど、支保工設置時の先行変位は小さく、支保圧は大きくなり、変位収束時に支保工が負担する支保圧も大きくなる。また、支保工設置時の応力解放率 α は $E_p=8,000\text{MPa}$ の場合は60%、 $E_p=4,000\text{MPa}$ の場合は63%、素掘りの場合は74%と支保剛性が大きいほど減少することが分かる。

図-15は、切羽到達時における切羽面の押し出し量を示したものである。切羽の押し出し量は、縦断方向の応力解放による押し出し量と内空が縮小することにより押し出される量とが合わさったものと考えられるが、支保剛性が大きくなるほど切羽の押し出し量は減少しており、切羽後方における支保工設置による変形の拘束が切羽前方の挙動にも影響を及ぼしていることが分かる。

c) 地山の変形係数の影響

図-16は、支保工の変形係数は $E_{pm}=4,000\text{MPa}$ 、地山強度比は $q_u/P_0=0.5$ として、地山の変形係数を $E_g=50, 200,$

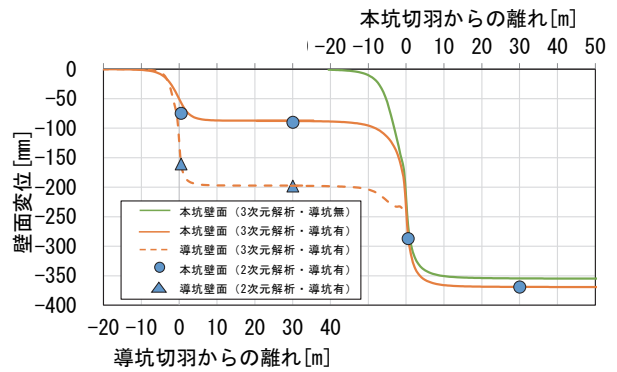


図-17 切羽位置と壁面変位との関係（導坑有り）

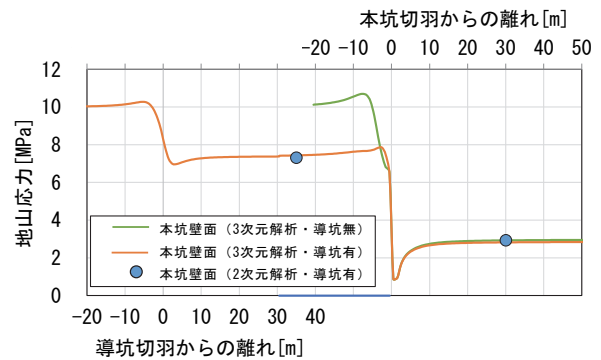


図-18 切羽位置と地山応力との関係（導坑有り）

400MPaと変化させた場合の支保工設置時、変位収束時における壁面の支保圧を示したものである。支保剛性が同一の場合、地山の変形係数が小さいほど支保工設置時の支保圧は大きくなり、応力解放率 α は $E_g=50\text{MPa}$ の場合は58%、 $E_g=200\text{MPa}$ の場合は63%、 $E_g=400\text{MPa}$ の場合は66%と小さくなることから分かる。地山の変形係数が小さくなると、地山の変形に対する支保工の剛性が相対的に大きくなり、拘束効果が大きく現れるためと考えられる。

(2) 導坑が有る場合の挙動

a) 2次元解析と3次元解析の比較

図-17は導坑が有る場合の3次元解析から得られた切羽位置と本坑壁面および導坑壁面の変位との関係を、図-18は3次元解析から得られた切羽位置と本坑壁面での地山応力との関係を示したものである。地山の変形係数は $E_g=200\text{MPa}$ 、本坑および導坑の支保工の変形係数は $E_{sm}=E_{sp}=4,000\text{MPa}$ 、地山強度比は $q_u/P_0=0.5$ とした。図中には、前述した手法により得られた支保工設置時の応力解放率($\alpha=69\%$ 、 $\beta=52\%$)を用いて2次元解析から得られた変位、地山応力も示すと同時に、比較のために導坑が無い場合の解析結果も示した。3次元解析から得られる本坑壁面の変位は、導坑切羽が約 $2D_p$ (D_p :導坑の外径)手前に来た段階で発生し始め、導坑の切羽通過直前

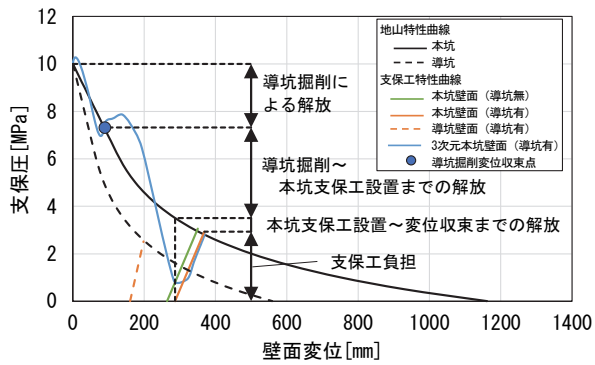
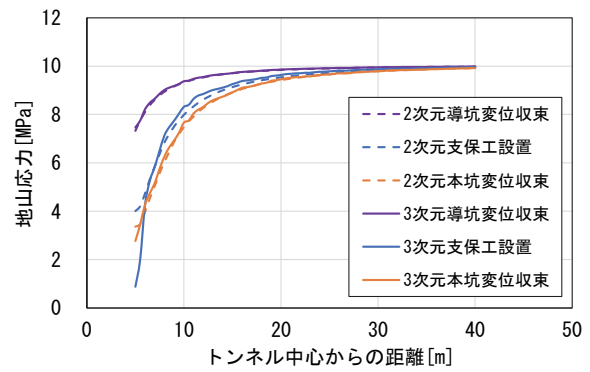


図-19 地山応力と壁面変位の関係（導坑有り）

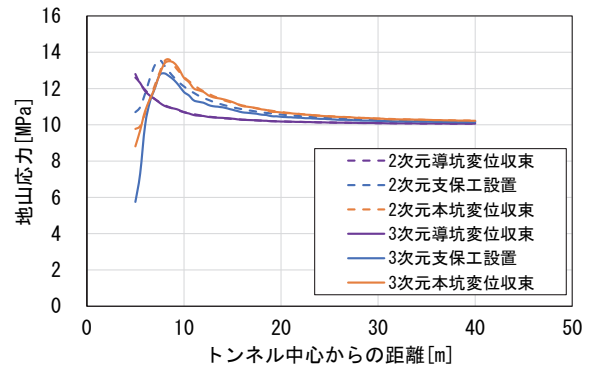
に急激に増加し、導坑切羽通過後、約 $2D_p$ で一定となり、収束する。さらに、本坑切羽が約 $1.5D_m$ (D_m :本坑の外径)手前に近づいた段階で再び変位が発生し始め、切羽通過直前に急激に増加し、切羽通過後、約 $1.5D_m$ で一定となり、収束する。本坑支保工設置時の先行変位は、導坑が無い場合と比較すると若干大きくなっている。2次元解析結果との比較では、導坑支保工設置時における本坑壁面の変位を除けば、導坑支保工設置時、導坑掘削変位収束時、本坑支保工設置時、本坑掘削変位収束時の変位は2次元解析と概ね一致することが分かる。本坑壁面の変位が導坑支保工設置時に一致しないのは、前述したように、導坑支保工設置時の応力分布が3次元解析と2次元解析とで異なることが要因と考えられる。

本坑壁面での地山応力は、導坑切羽が約 $3D_p$ 手前に来た段階で上昇し始めるが、切羽手前約 $1D_p$ の位置でピークを示した後、急激に減少し、切羽通過後、 $7MPa$ 程度まで下がるが、導坑の支保工が設置されると再び上昇し、導坑切羽通過後約 $3D_p$ で一定となり、収束する。その後、本坑の切羽が近づいて来ると再び上昇し始めるが、切羽手前約 $0.3D_m$ の位置でピークを示した後、急激に減少し、切羽通過後 $1MPa$ 程度まで下がるが、支保工が設置されると再び上昇し始め、本坑切羽通過後約 $3D_m$ 程度で一定となり、収束する。なお、導坑切羽通過、本坑切羽通過に伴うこれら本坑壁面での地山応力の挙動は、前述した導坑が無い場合と基本的に同じである。2次元解析結果との比較では、導坑掘削変位収束時、本坑掘削変位収束時の地山応力は概ね一致する。

図-19は、図-17と図-18から求まる壁面変位と地山応力との関係を2次元解析から得られた導坑と本坑の地山特性曲線および支保工特性曲線に重ねて示したものである。図中には比較のために導坑が無い場合の支保工特性曲線も示した。3次元解析から得られた本坑の地山応力は、導坑掘削時には、初期変位段階で増加し、ピークを示した後、減少し始め、導坑支保工設置時には $7MPa$ 程度まで下がるが、導坑掘削変位収束時には、地山特性曲



(a) 半径方向



(b) 円周方向

図-20 トンネル周辺の地山応力分布（導坑有り）

線上来て、2次元解析結果と概ね一致する。本坑掘削が始まると、地山応力は再び、増加し始め、ピークを示した後、減少し始め、本坑支保工設置時に $1MPa$ 程度まで下がった後、支保工特性曲線上を増加し、本坑掘削変位収束時（安定点）には地山特性曲線上来て、2次元解析結果と概ね一致する。なお、これらの挙動は、導坑が無い場合と基本的には同じである。支保工特性曲線は、導坑が無い場合に比べると支保工設置時点での先行変位が若干大きくなるため、安定点における支保工が負担する支保圧、すなわち支保工に作用する土圧が減少する効果が現れている。また、導坑掘削後の変位収束時は、本坑壁面では、地山特性曲線上では弾性領域にとどまっているが、本坑の掘削とともに塑性化が始まり、後述するように本坑支保工設置段階では塑性化している。なお、導坑掘削後の変位収束時における導坑壁面の変位量は $197mm$ と比較的大きいが、本坑壁面の変位量は $87mm$ と導坑壁面での変位量の44%と大幅に減少するため、導坑壁面の変位量が大きくても、地山特性曲線で評価する場合は本坑壁面の変位量の評価が重要となる。

図-20は、導坑掘削変位収束時、本坑支保工設置時、本坑掘削変位収束時の応力分布について、2次元解析と3次元解析との比較を行ったものである。導坑掘削変位収束時の応力分布は2次元解析と3次元解析は概ね整合しており、この段階では塑性領域は発生していない。本

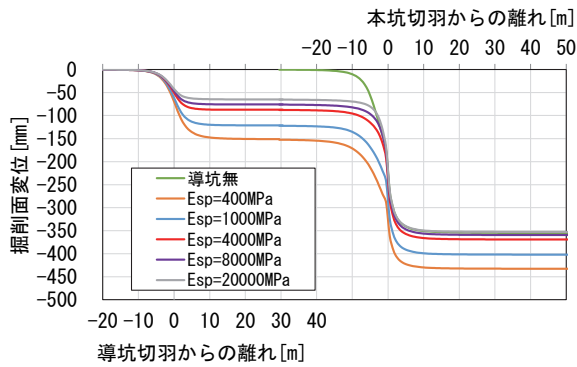


図-21 導坑の支保剛性が切羽位置と壁面変位の関係に及ぼす影響

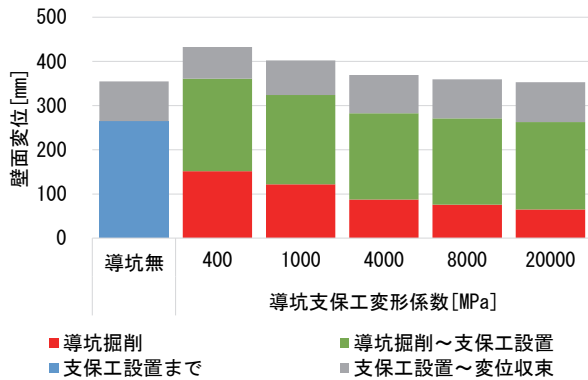


図-22 導坑の支保剛性が壁面変位に及ぼす影響

坑支保工設置時の応力分布は、導坑が無い場合と同様に壁面近傍では2次元解析と3次元解析は異なるが、ともに塑性領域が発生しており、本坑掘削変位収束時の応力分布は、2次元解析と3次元解析は整合している。また、導坑が無い場合と比較すると、本坑支保工設置時、本坑掘削変位収束時の塑性領域の大きさは、若干大きくなっている。

以上のように、導坑がある場合も、支保圧に着目した応力解放率を用いれば、2次元解析によっても3次元解析と概ね整合した結果が得られると言える。

b) 導坑の支保剛性の影響

図-21は、本坑支保工の変形係数は $E_{sm}=4,000\text{MPa}$ 、地山の変形係数は $E_g=200\text{MPa}$ 、地山強度比は $q_u/P_0=0.5$ として、導坑支保工の変形係数を $E_{sp}=400, 1,000, 4,000, 8,000, 20,000\text{MPa}$ と変化させた場合の切羽位置と本坑の壁面変位との関係を示したものである。なお、本研究では、導坑支保工の変形係数 E_{sp} を変化させて支保剛性 $E_{sp}T_s$ (T_s : 導坑支保工厚さ) を変化させているが、本研究の解析条件では支保工には曲げモーメントは発生しないため、厚さ T_s を変えても $E_{sp}T_s$ が同一であれば同一の結果が得られることを確認している。導坑の支保工の剛性が大きくなるに伴い、発生する変位は減少する傾向が見られるが、 $E_{sp}=8,000\text{MPa}$ を超えると変化はほとんど

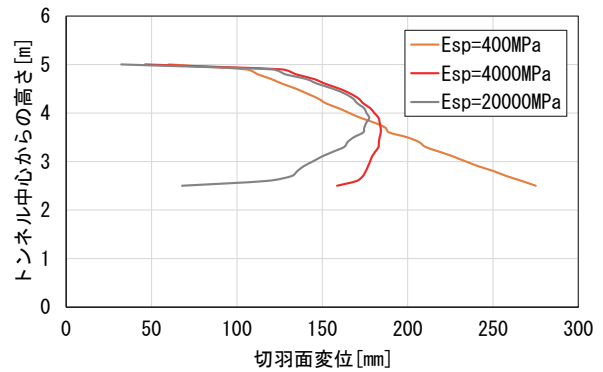


図-23 導坑の支保剛性が切羽の押し出し量に及ぼす影響

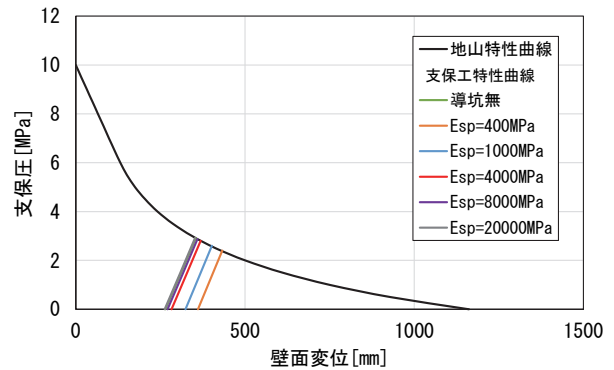


図-24 導坑の支保剛性が支保工特性曲線に及ぼす影響

見られなくなり、 $E_{sp}=20,000\text{MPa}$ の場合の本坑の支保工設置時、本坑掘削変位収束時の変位は、導坑が無い場合と概ね同じ値となる。

図-22は、導坑掘削変位収束時、本坑支保工設置時、本坑掘削変位収束時の変位を示したものである。本坑支保工設置時の先行変位は、導坑掘削により発生する変位と導坑掘削後から本坑掘削に伴い発生する変位から構成され、比率としては何れの場合も後者が大きい。前者は導坑が無い場合と同様に支保剛性が大きくなると小さくなるのに対して、後者は支保剛性の影響をほとんど受けていない。したがって、本坑支保工設置時の先行変位に対する支保剛性の影響は導坑掘削により発生する変位の違いが現れていることになる。図-23は、本坑切羽到達時における切羽面の押し出し量を示したものであるが、支保剛性が大きいほど、押し出し量の最大値が小さくなるのが分かる。したがって、導坑が、本坑掘削に伴って発生する縦断方向の変形を抑制しているが、壁面変位は支保剛性の影響をあまり受けていないことを考慮すると、切羽の押し出しは、縦断方向の応力解放による押し出しが支配的と考えられる。

図-24は、導坑の支保剛性を変化させた場合の支保工特性曲線と地山特性曲線との関係を示したものである。支保剛性が大きくなると、本坑支保工設置時の先行変位

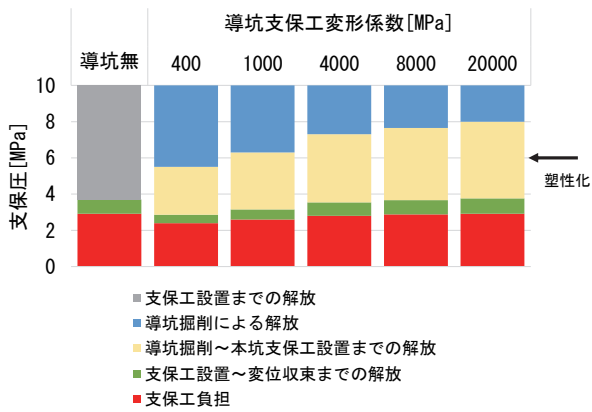


図-25 導坑の支保剛性が支保圧に及ぼす影響

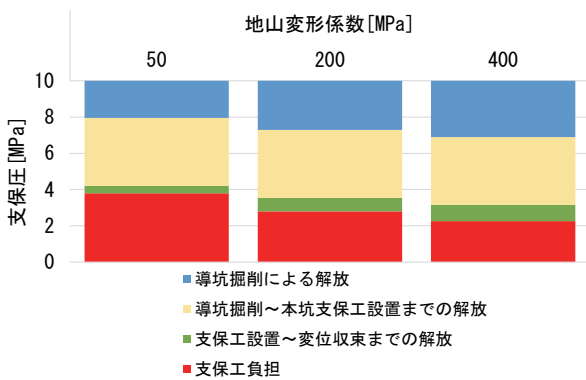


図-26 地山の变形係数が支保圧に及ぼす影響（導坑有り）

も小さくなり、その結果、安定点で支保工に作用する土圧は大きくなり、導坑効果は小さくなる事が分かる。

図-25 は、導坑の支保剛性を变化させた場合の導坑掘削変位収束時、本坑支保工設置時、本坑掘削変位収束時における本坑壁面の支保圧を示したものである。支保剛性が大きくなると、導坑掘削変位収束時、本坑支保工設置時、本坑掘削変位収束時における支保圧は大きくなり、導坑の効果が小さくなる事が分かる。導坑掘削後から本坑支保工設置までに解放される支保圧は、支保剛性が大きいほど大きくなるものの、導坑掘削により解放される支保圧は、支保剛性が小さいほど大きくなっており、 $E_{sp}=400\text{MPa}$ の場合は導坑掘削時に本坑壁面は塑性化している。また、導坑掘削により解放される支保圧が初期状態から本坑支保工設置時までに解放される支保圧に占める割合は、支保剛性が小さいほど大きくなっている。なお、導坑掘削後から本坑支保工設置までに発生する変位はほとんど支保剛性の影響を受けていないのに対して、解放される支保圧が支保剛性によって異なるのは、支保剛性が小さい場合は、導坑掘削変位収束時点で本坑壁面は塑性化しており、変位の増加に対する支保圧の減少割合が小さくなる事が主な要因と考えられる。

以上のように、導坑の支保剛性が大きくなると、本坑の支保工設置時における先行変位が小さくなり、支保工

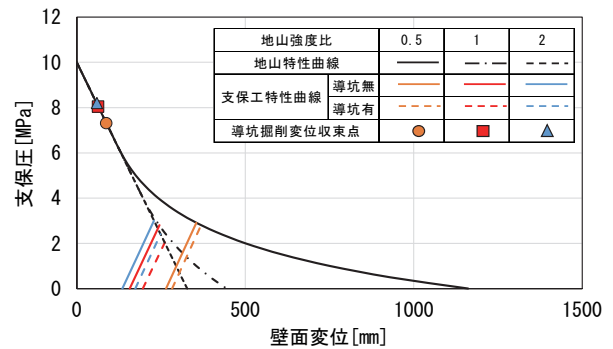


図-27 地山強度が地山特性曲線と支保工特性曲線に及ぼす影響

に作用する土圧を減少させる効果が小さくなる。導坑の効果を発揮させるには、導坑の支保剛性を小さくすることが有効となるが、一般に支保剛性を小さくすると導坑の耐荷力も減少するため、耐荷力も考慮して支保剛性を設定する必要がある。

c) 地山の变形係数の影響

図-26 は、本坑および導坑の支保工の変形係数は $E_{sp}=E_{sm}=4,000\text{MPa}$ 、地山強度比は $q_u/P_0=0.5$ として、地山の变形係数を $E_g=50, 200, 400\text{MPa}$ と変化させた場合の導坑掘削変位収束時、本坑支保工設置時、本坑掘削変位収束時における本坑壁面の支保圧を示したものである。支保剛性が同一の場合、地山の变形係数が小さいほど、導坑掘削変位収束時、本坑支保工設置時における支保圧が大きくなり、解放される支保圧は小さくなる事が分かる。地山の变形に対する支保工の剛性が相対的に大きくなり、拘束効果が大きく現れるためと考えられる。ただし、導坑掘削後から本坑支保工時までに解放される支保圧の大きさは地山の变形係数が変わってもほぼ同じ値を示しており、变形係数の影響はほとんど現れていない。導坑の効果を導坑が無い場合と有る場合の本坑掘削変位収束時の支保圧の比で評価すると、变形係数が $E_g=50\text{MPa}$ の場合が 1、 $E_g=200\text{MPa}$ の場合が 0.96、 $E_g=400\text{MPa}$ の場合が 0.96 となり、变形係数が小さいほど導坑効果は現れにくくなっている。

d) 地山強度の影響

図-27 は、地山の变形係数は $E_g=200\text{MPa}$ 、本坑および導坑の支保工の変形係数は $E_{sp}=E_{sm}=4,000\text{MPa}$ として、地山強度比を $q_u/P_0=0.5, 1, 2$ (弾性体) と変化させた場合の支保工特性曲線と地山特性曲線との関係を導坑が無い場合と併せて示したものである。図中には 3次元解析から得られた導坑掘削変位収束時の地山特性曲線上の点も示した。何れの場合も本坑支保工設置時の先行変位は

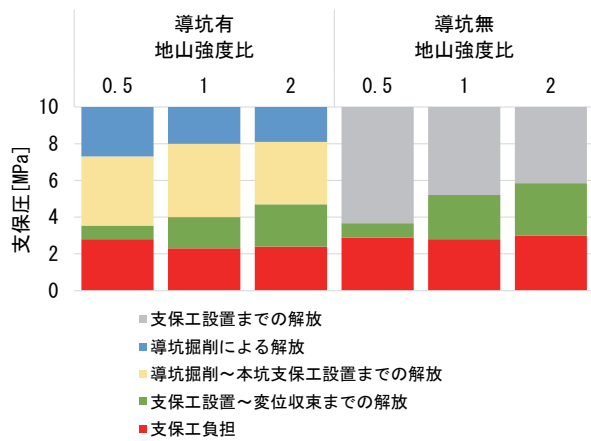


図-28 地山強度が支保圧に及ぼす影響

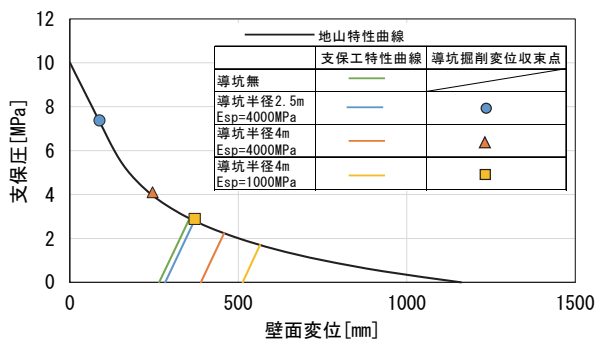


図-29 導坑半径が支保工特性曲線に及ぼす影響

導坑が無い場合よりも大きく、導坑の効果が現れている。地山強度比が 0.5 の場合、導坑掘削変位収束時は本坑壁面の応力状態は弾性領域にあるが、本坑の掘削に伴って塑性化が始まり、本坑支保工設置時は塑性化している。地山強度比が 1 の場合は、本坑支保工設置時においても本坑壁面は弾性領域にあるが、本坑掘削変位収束時は塑性化している。

図-28 は、地山強度比を変化させた場合の導坑掘削変位収束時、本坑支保工設置時、本坑変位収束時における本坑壁面の支保圧を示したものである。図中には導坑が無い場合の結果も示した。導坑掘削変位収束時、本坑支保工設置時の支保圧は地山強度比が大きいほど大きな値を示し、解放される支保圧は小さくなるが、本坑変位収束時の支保圧は、地山強度比が大きいほど小さな値を示している。また、本坑支保工設置時には塑性化している地山強度比 0.5 と塑性化していない地山強度比 1 を比較すると、導坑掘削後から本坑支保工設置までに解放される支保圧は地山強度比 0.5 の方が若干小さく、導坑掘削により解放される支保圧が初期状態から本坑支保工設置までに解放される支保圧に占める割合は地山強度比 0.5 の方が大きくなっている。導坑の効果を導坑が無い場合と有る場合の本坑掘削変位収束時の支保圧の比で評価すると、地山強度比が 2 の場合が 0.8, 1 の場合が 0.82, 0.5

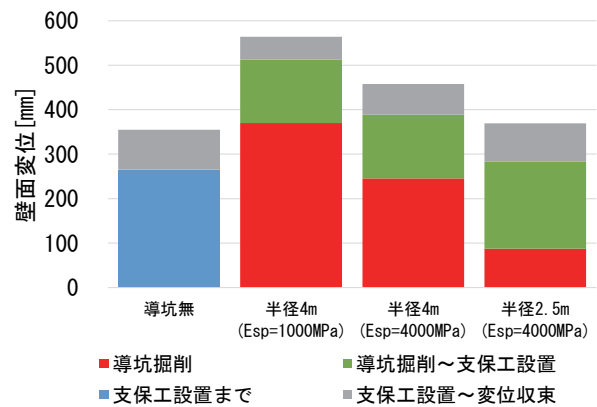


図-30 導坑半径が壁面変位に及ぼす影響

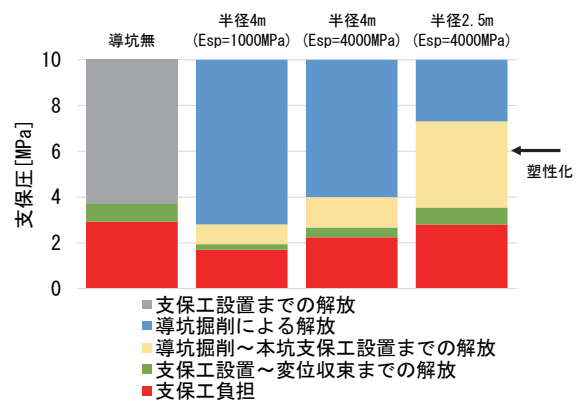


図-31 導坑半径が支保圧に及ぼす影響

の場合が 0.96 となり、地山強度が小さいほど、導坑効果は現れにくい結果となっている。

e) 導坑の大きさの影響

図-29 は、地山の変形係数は $E_g=200\text{MPa}$ 、本坑支保工の変形係数は $E_{sm}=4000\text{MPa}$ 、地山強度比は $q_u/P_0=0.5$ とし、導坑の半径を $R=2.5, 4\text{m}$ と変化させた場合の支保工特性曲線と地山特性曲線との関係を示したものである。なお、半径が 4m の導坑の支保工の変形係数は $E_{sp}=1,000, 4,000\text{MPa}$ の 2 通りとし、図中には 3 次元解析から得られた導坑掘削変位収束時の地山特性曲線上の点も示した。導坑の半径が大きくなると、導坑掘削変位収束時における本坑壁面の変位も大きくなり、 $R=4\text{m}$ の場合はすでに塑性化している。また、本坑支保工設置時の先行変位も大きくなり、導坑効果は大きく現れることが分かる。

図-30 は、導坑の半径を変化させた場合の導坑掘削変位収束時、本坑支保工設置時、本坑掘削変位収束時における壁面変位を、図-31 は本坑壁面の支保圧を示したものである。

導坑掘削変位収束時における変位は、半径が $R=4\text{m}$ 、導坑支保工の変形係数が $E_{sp}=1,000\text{MPa}$ の場合は既に導坑が無い場合の本坑支保工設置時の先行変位を超える変位が発生している。一方、導坑掘削後から本坑支保工設置までに発生する変位は、導坑掘削変位収束時に本坑壁面

表-2 解析から得られた応力解放率 α , β

導坑無	支保工変形係数Esm (Eg=200MPa, qu/P ₀ =0.5)			地山変形係数Eg (Esm=4000MPa, qu/P ₀ =0.5)			地山強度比qu/P ₀ (Esm=4000MPa, Eg=200)			
	素掘り	400MPa	800MPa	50MPa	200MPa	400MPa	0.5	1	2	
α	74%	63%	60%	58%	63%	66%	63%	48%	42%	
導坑有	導坑支保工変形係数Esp (Eg=200MPa, qu/P ₀ =0.5)						地山変形係数Eg (Esp=4000MPa, qu/P ₀ =0.5)			
	400MPa		1000MPa		4000MPa		8000MPa		20000MPa	
	α	75%	73%	69%	67%	65%	65%	69%	71%	
	β	48%	50%	52%	52%	53%	47%	52%	54%	
	地山強度比qu/P ₀ (Esp=4000MPa, Eg=200MPa)			導坑半径R (Eg=200MPa, qu/P ₀ =0.5)						
	0.5		1		2		半径2.5m Esp=4000MPa		半径4m Esp=1000MPa	
	α	69%	59%	52%	69%	70%	66%			
β	52%	50%	42%	52%	31%	33%				

が塑性化していない R=2.5m の方が大きく、塑性化している R=4m の場合、導坑支保工の変形係数が Esp=1,000MPa と Esp=4,000MPa ではほぼ等しい。R=4m の場合に導坑掘削後から本坑掘削に伴って発生する変位が支保剛性の影響を受けない傾向は R=2.5m の場合と同様であるが、R=4m の場合は導坑掘削時の変位はその後の本坑掘削に伴い発生する変位よりも大きく、導坑の効果は導坑掘削時に大きな変位が発生することが大きな要因となっている。

導坑掘削変位収束時における支保圧は、R=4m になると Esp=4,000MPa の場合でも初期圧の 4 割程度まで減少している。導坑掘削後から本坑支保工設置までに解放される支保圧は R=2.5m の場合が最も大きく、R=4m, Esp=1,000MPa の場合が最も小さく、導坑掘削により解放される支保圧が、初期状態から本坑支保工設置時までに解放される支保圧に占める割合は、導坑掘削時に最も塑性化が進んでいる R=4m, Esp=1,000MPa の場合が最も大きい。なお、R=4m の場合、本坑掘削に伴って発生する変位は Esp=1,000MPa と Esp=4,000MPa は同じであるにも関わらず、解放される支保圧は Esp=1,000MPa の方が小さいが、その要因として Esp=1,000MPa の方が塑性化は進んでおり、変位の増加に対する支保圧の減少割合が小さくなっていることが考えられる。

以上のように、導坑の径を大きくすると導坑掘削により発生する変位が大きくなり、支保工に作用する土圧が減少する効果が大きく現れるが、導坑の規模が大きくなると導坑に作用する土圧が大きくなり、切羽の安定性の確保も難しくなるため、これらも考慮して導坑の径を設定する必要がある。

(3) 応力解放率について

表-2 は、解析を行った全てのケースについて導坑掘削時の応力解放率 α 、本坑掘削時の β を示したものである。

支保圧に着目して求めた応力解放率は、支保工の剛性、地山の変形係数、地山強度、トンネル径などによって大きく異なっているが、特に弾性体に比較して弾塑性体の場合の方が、値が大きくなっていることが特徴となっている。また、いずれのケースも応力解放率 β は、 α よりも小さく、 α に関しては、導坑無しで半径が 5m のトンネルを掘削した場合と半径が 2.5m の導坑を掘削した場合を比較すると、径が小さい方が応力解放率は大きくなっている。ただし、応力解放率には様々な要因が関係してくるので、統一的な値を定めるためには、もう少し解析データを増やした分析が必要となる。

5. 結論

中央導坑先進工法を適用した場合の変位予測や支保構造の検討を 2 次元解析で行う場合に必要となる応力解放率について 2 次元解析と 3 次元解析との比較により検討するとともに導坑の効果に大きな影響を与える要因について検討した。

本研究で得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 3 次元解析から得られた支保工設置時の先行変位に対応する地山特性曲線の支保圧に着目した応力解放率を用いれば、地山が塑性化する場合でも 2 次元解析はトンネルの 3 次元的挙動を概ね再現でき、2 次元解析でも導坑の効果や支保工の変位、応力を検討することは可能である。
- 2) 2 次元解析を行う場合に必要な導坑掘削時の応力解放率 α 、本坑掘削時の応力解放率 β とともに地山の変形係数、地山強度、支保工の剛性、導坑の大きさなどによって値が異なるとともに、 α と β にも差が見られることから、実務においては支保構造や地山特性に応じた α 、 β の設定が必要となる。

- 3) 3次元解析から得られた導坑の効果を地山特性曲線と支保工特性曲線を用いて考えると、本坑支保工設置時の先行変位が導坑が無い場合よりも大きくなることにより、安定点においてトンネル壁面での半径方向の地山応力が低下し、支保工に作用する土圧が減少する。
- 4) 導坑の支保剛性が小さくなると、本坑支保工設置時の先行変位が大きくなり、導坑効果が大きくなる。先行変位は導坑掘削により発生する変位とその後の本坑掘削に伴う変位から構成され、比率は後者の方が大きい。支保剛性が本坑掘削に伴う変位に及ぼす影響は小さく、支保剛性の影響は導坑掘削により発生する変位の違いが現れる。
- 5) 導坑の径が大きくなると、本坑支保工設置時の先行変位も大きくなり、導坑効果が大きくなるが、導坑掘削により発生する変位が大きくなるのが、大きな要因となっている。
- 6) 地山強度が同一の場合、導坑掘削により解放される支保圧が大きいほど本坑支保工設置までに解放される支保圧も大きくなり、導坑効果は大きくなるが、導坑掘削時に本坑壁面が塑性化すると、その後の本坑掘削に伴って解放される支保圧は小さくなる傾向にある。

これらの知見は、土被りが大きい、円形断面、初期地山応力が等方などの条件の下での地山特性曲線と支保工特性曲線および FEM 解析により得られたものであり、現場では、一般的に断面形状は非円形が採用され、地山

の側圧係数は1以外となる場合が多い。また、地山強度が小さい場合は、切羽での応力解放に大きな影響を及ぼす早期閉合、長尺鏡ボルトや長尺鋼管先受工などが採用されることが多い。したがって、条件によってはこれらの知見が当てはまらない場合もあり、実務で2次元解析を行う場合は、これまでの実績や経験も踏まえて適切な応力解放率を設定する必要がある。今後は、地山強度が非常に小さい場合、非円形の断面形状、初期地山応力が非等方の場合などについても検討していきたい。

参考文献

- 1) 高橋浩, 谷井敬春, 岩井克彦, 桑原秀樹, 進士正人, 中川浩二: 膨張性地山における導坑の適用性に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.728/VI-58, pp27-39, 2003.
- 2) 御手洗良夫, 植松澄夫, 西間木朗: 大断面トンネルにおける導坑の三次元的地山改良効果の研究, トンネル工学研究発表会 論文・報告集, No.5, pp.111-116, 1995.
- 3) 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, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 76, No. 2, I_1-I_20, 2020.
- 4) 佐々木亨, 前田洗樹, 日下敦: 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, トンネル工学報告集, 第31巻, I-15, 2021.
- 5) 東芦谷謙, 福田毅, 征矢雅宏, 真下英人: 既設トンネルの拡幅掘削を想定した応力解放率に関する一考察, 土木学会第73回年次学術講演会, 2018.

(2022. 8.26 受付)

STUDY ON STRESS RELEASE RATE IN TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS AND EFFECT OF PILOT TUNNEL WHEN APPLYING CENTER PILOT TUNNEL METHOD

Yuuki INO and Hideto MASHIMO

In order to obtain the stress release rate in 2-dimensional numerical analysis which shows good agreement with 3-dimensional numerical analysis when applying center pilot tunnel method, 3-dimensional and 2-dimensional finite element method have been performed. Based on the finite element method results, it has been confirmed that two-dimensional finite method can be in good agreement with three-dimensional finite method when using the stress release rate obtained from deformation in 3-dimensional finite element method and tunnel support pressure in ground response curve. In addition, it has been clarified that the effect of pilot tunnel varies widely depending on the support rigidity and diameter of a pilot tunnel.