

トンネルの覆工の設計に寄与する数値解析的検討

井野 裕輝・笠井 大地

1. はじめに

近年、覆工構造の合理化を目的にプレキャスト覆工¹⁾や覆工の薄肉化に関する検討が行われている。加えて、トンネルのリニューアルや補強を目的に内面に新たなコンクリートを打設する内巻補強工が用いられることが多く、設計法に関する検討²⁾も行われている。しかし、山岳トンネルにおける覆工コンクリートの厚さや強度は経験的に定められることが多く、新たな技術の検証における設計荷重等が決まっていない。加えて、トンネルの掘削時の挙動についても経験的に定められた応力解放率を用いた2次元解析が用いられることが多い。そこで、これら事象について様々な数値解析的アプローチが行われているが、CMIで取り組んでいる数値解析による検証結果を紹介する。

2. 2次元数値解析における応力解放率とトンネル挙動

(1) 検討背景

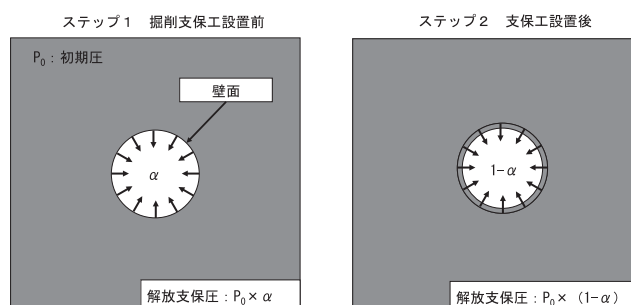
応力解放率は、単純化した条件での解析結果などを参考に経験的に定めているが、実務では地山条件、支保構造、断面形状、掘削工法に関係なくほぼ同一の値が一般的に用いられる。しかし、地山の初期応力状態、トンネルの断面形状、断面閉合時期などが、応力解放率に及ぼす影響については十分な知見が得られておらず、条件によっては2次元解析ではトンネル挙動を適切に評価できない場合があることも考えられ、解析結果の評価に際してはその適用性を把握しておくことが重要となる。このため、弾塑性体の地山を対象に、地山特性曲線法の考え方に基づいた応力解放率の設定法の提案³⁾を行っているが、そのうち本稿では、円形・等方圧の条件の結果について報告する。

(2) 応力解放率の設定方法

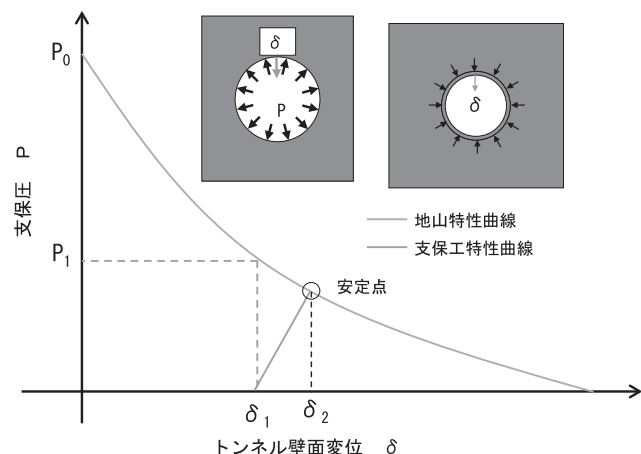
トンネル掘削時の挙動は、切羽の進行とともに地山応力が解放される3次元の問題となるが、一定の条件下では、切羽進行に伴う地山応力の解放過程を近似す

ることにより、2次元問題として扱うことが可能となる。具体的には、2次元数値解析においては、掘削手順に応じて解析を幾つかのステップに分け、切羽進行に伴い解放される地山応力（支保圧）を解析ステップごとにトンネル掘削位置壁面に作用させることで3次元の挙動を模擬しており、この過程で施工ステップに応じた支保工の設置もモデル化する。解析ステップは図—1に示すように支保位と支保圧工の設置前と設置後の2ステップとする場合が多く、応力解放率は、支保工設置までに解放される地山応力の初期応力に対する比率として定義される。支保工設置までの応力解放率は、一般的に30～50%が使われており、実務では、地山条件や支保構造、掘削工法、断面形状に関係なく、支保工設置前は40%、支保工設置後は60%とすることが多い。これまで、その設定方法は、施工実績から経験的に定める方法、3次元解析から得られた支保工設置時と収束時の変位の比率とする方法、3次元解析と変位が合うようにトライアル計算により求める方法などが用いられてきたが^{4)～6)}、本研究では、その力学的な位置づけを考え、地山特性曲線法の考え方に基づいて支保圧に着目して応力解放率を設定することとした。

地山特性曲線法の考え方においては、トンネル掘削前にトンネル掘削位置の壁面を支えていた半径方向の地山応力（支保圧）が切羽の進行とともに減少する過程を、2次元解析から得られる図—2に示すようなトンネル壁面変位と壁面の半径方向の地山応力の関係を示す地山特性曲線として表している。また、支保工を

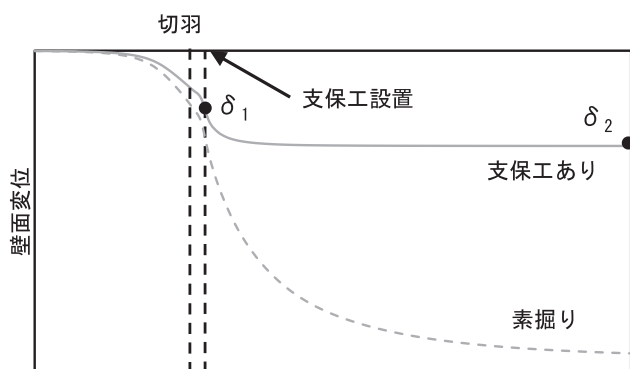


図—1 2次元数値解析ステップ



図—2 地山特性曲線と支保工特性曲線

設置した後の安定点は、支保工の変位と支保工に作用する荷重（支保圧）との関係を示す支保工特性曲線と地山特性曲線との交点として得られるが、支保工設置時には、図—3に示すように先行変位 δ_1 が発生しているので、支保工特性曲線の始点は先行変位 δ_1 となる。 δ_1 は、地山条件が同一でも支保工の剛性によっても異なり、理論的に求めることは難しいため、3次元の数値解析により求める必要がある。応力解放率は、この先行変位 δ_1 発生までに解放される地山応力の割合として定義されるため、3次元解析から得られた先行変位 δ_1 に対応する地山特性曲線上の支保圧 P_1 を求め、解放される支保圧 $(P_0 - P_1)$ を用いて応力解放率を $\alpha = (P_0 - P_1) / P_0$ (P_0 : 初期圧) として設定すれば、先行変位 δ_1 に関しては2次元解析により3次元解析と整合した結果が得られる。なお、地山が弾性体の場合は、解放される地山応力と変位は直線関係にあるため、応力解放率は、先行変位の最終変位に対する比率としても求めることができる。地山特性曲線は、地山の初期応力状態が等方圧、断面形状が円形の場合は、理論解析によっても求めることが可能で、天端、側壁、底盤などトンネル断面の位置に関係なく同一のものが得られる。



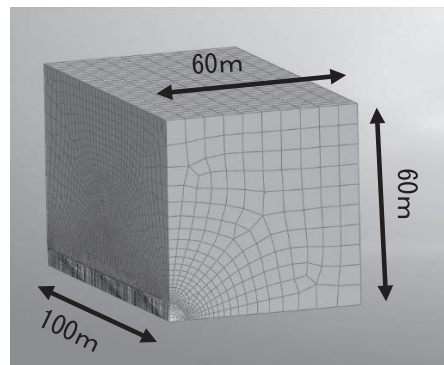
図—3 切羽位置と壁面変位との関係

(3) 数値解析の概要

解析で使用したモデルを図—4に示す。本研究では、数値解析により得られた地山特性曲線から応力解放率の設定を行うが、土被りが小さい場合は、解析領域の大きさが解析結果、特に変位に及ぼす影響が大きいため、解析領域の大きさが影響を及ぼさない大土被りのトンネルを対象とした。3次元解析では、掘削半径5 m、支保工厚20 cmの円形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 λ を1とし、上から土被り約400 m相当の10 MPa、左右からも10 MPaを等分布荷重として作用させた。掘削は一掘進長1 m、支保工は切羽から後方1 m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。掘削工法は、全断面工法を対象とし、断面形状は円形断面を基本とした。2次元解析では、トンネルの掘削半径、支保工厚、断面形状は3次元解析と同じとした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。

(4) 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-



図—4 解析モデル

表—1 物性値

	単位	地山	支保工
変形係数	E [MPa]	200 ^{*1}	4,000 ^{*2}
ポアソン比	ν	0.3	0.2
粘着力	c [MPa]	2.1 ^{*3}	—
内部摩擦角	ϕ [°]	10	—
ダイレイタンス角	Ψ [°]	0	—
一軸圧縮強さ	qu [MPa]	5 ^{*3}	—

※1 一部ケースについては $E_g=50, 400$ MPa についても実施

※2 一部ケースについては $E_s=8,000, 40,000$ MPa についても実施

※3 一部ケースについては $qu=10, 20$ MPa についても実施
 $qu=2c \cdot \tan(45^\circ + \phi/2)$

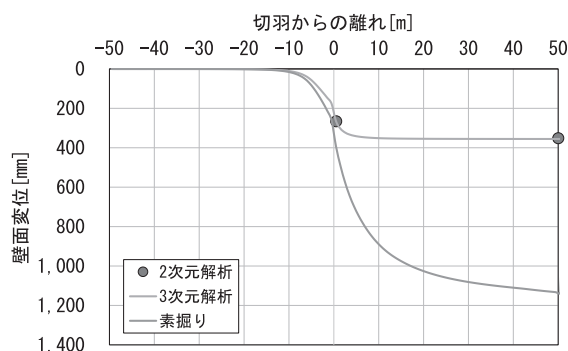
Coulomb の破壊規準に従う弾完全塑性体、地山の内部摩擦角は $\phi=10^\circ$ 、一軸圧縮強度は $q_u=5\text{ MPa}$ で地山強度比は0.5、変形係数は $E_g=200\text{ MPa}$ を基本とした。支保工は弾性体として、3次元解析ではソリッド要素、2次元解析では平面要素でモデル化し、変形係数は吹付けコンクリートを想定して $E_s=4,000\text{ MPa}$ とした。なお、一部のケースについては地山の一軸圧縮強度、変形係数、支保工の変形係数を変化させた解析も行った。解析は、地山の初期応力状態が等方圧（側圧係数 $\lambda=1$ ）、円形断面、全断面掘削を行った。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。

(5) 解析結果

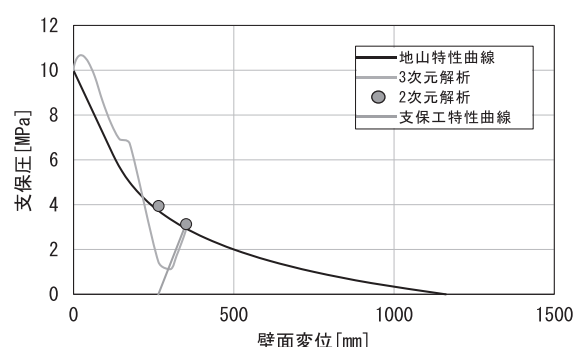
図—5は、3次元解析⁷⁾から得られた切羽距離とトンネル壁面変位との関係を、図—6は、トンネル壁面の地山応力（半径方向）と壁面変位との関係を2次元解析から得られた地山特性曲線と併せて示したものである。壁面変位の符号は内空側への変形を正としている。図中には、3次元解析から得られた支保工設置時の先行変位に対応する地山特性曲線上の支保圧から得られた応力解放率（ $\alpha=63\%$ ）を用いて得られた2次元解析結果も併せて示した。なお、壁面での地山応力は、地山特性曲線の支保圧に対応するものであるが、2次元解析、3次元解析ともに壁面に接する要素の中心応力を抽出しており、厳密には壁面位置での応力ではないことに留意する必要がある。参考までに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安定点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支保工特性曲線も示した。3次元解析から得

れた変位収束時の安定点は2次元解析から得られた地山特性曲線上に来るとともに、2次元解析結果とも概ね一致しており、支保工設置時の変位に対応する支保圧に着目した応力解放率を用いた2次元解析により3次元解析と整合した結果が得られることが分かる。なお、3次元解析から得られた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。

表—2は、支保工の変形係数 E_s 、地山の変形係数 E_g 、地山強度比 q_u/P_0 を変化させた場合の応力解放率を同様の方法により求めたものである。弾性解析と弾塑性解析との比較では、弾性解析（地山強度比 $=2$ ）の場合の応力解放率が42%であるのに対して弾塑性解析の応力解放率は地山強度比が1の場合で48%、0.5の場合で63%と地山強度比が小さくなるほど応力解放率は大きくなる。前述したように実務では40%が採用されることが多いが、この数値は弾性解析から得られる応力解放率に比較的近いと言える。したがって、弾塑性挙動を示す地山を対象に検討を行う場合、応力解放率40%を用いた2次元解析は、支保工に発生する応力に対しては3次元解析よりも大きな値を与える可能性がある。先行変位を含めた地山の変位に対しては3次元解析よりも小さな値を与える可能性がある。ただし、地山が塑性化する場合は、切羽安定のための鏡ボルトや天端安定のための長尺鋼管先受工が採用されることが多く、これらは切羽での応力解放を抑制する効果が期待できるため、これらの効果も考



図—5 切羽位置と壁面変位との関係



図—6 地山応力と壁面変位との関係

表—2 地山強度、支保剛性、地山変形係数を変化させたときの応力解放率

	支保工変形係数 E_s ($E_g=200\text{ MPa}$, $q_u/P_0=0.5$)			地山変形係数 E_g ($E_s=4,000\text{ MPa}$, $q_u/P_0=0.5$)			地山強度比 q_u/P_0 ($E_s=4,000\text{ MPa}$, $E_g=200$)		
	素掘り	4,000 MPa	8,000 MPa	50 MPa	200 MPa	400 MPa	0.5	1	2
α	74%	63%	60%	58%	63%	66%	63%	48%	42%

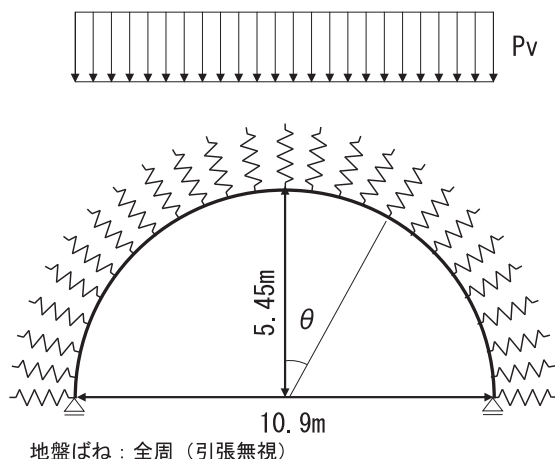
慮すると、実際の応力解放率は上述した値よりも小さくなると思われる。地山強度以外に応力解放率に影響を及ぼす要因は、支保工の剛性、地山の変形係数が挙げられ、応力解放率は支保工の剛性によって60%～63%、地山の変形係数によって58%～66%と変化する。支保工の剛性が大きいほど、地山の変形係数が小さいほど応力解放率は小さくなり、地山の変形係数に対して支保工の剛性が相対的に大きくなると、支保工設置時の先行変位は抑制され、支保工設置までの応力解放率は小さくなる傾向にある。以上のように、支保工設置時の変位に対応する地山特性曲線上の支保圧に着目して応力解放率を設定した場合は、弾塑性解析の場合でも、収束時の変位、支保工に作用する荷重ともに2次元解析は3次元解析と整合した結果が得られる。

3. 覆工の剛性が断面力分布に与える影響

覆工は地盤反力の影響を受けるため、薄肉化等で剛性（軸剛性や曲げ剛性）が変化すると地盤反力の受け方が異なり、作用する断面力が変化する可能性がある。しかし、これらの剛性が覆工に与える影響について検討した例がない。そこで、本稿は、覆工厚さや強度を変化させた場合の断面力分布に及ぼす影響を数値解析により検討した結果について報告するものである。

(1) 解析概要

解析に用いたモデルを図—7に示す。上半断面をモデル化し、覆工厚さ30 cmにおいて内径10.6 mとなるように図心軸が幅10.9 m、高さ5.45 mの単心円である。解析で使用する弾性係数については、一般的な覆工コンクリート強度の18 N/mm²の値であることから、コンクリート標準示方書⁸⁾より22,000 N/mm²とした。解析ケースを表—3に示す。断面力分布に



図—7 モデル図

表—3 解析ケース

ケース	覆工厚さ (cm)	ヤング係数 (N/mm ²) E=22,000	軸剛性 (N) EA	曲げ剛性 (N・mm ²) EI
1	30	1	1	1
2	30	1/2	1/2	1/2
3	30	1/8	1/8	1/8
4	15	1	1/2	1/8
5	15	2	1	1/4

与える軸剛性及び曲げ剛性の影響を検討するために、弾性係数もしくは厚さを変化させた。

解析は弾性のフレーム解析により行った。解析コードはEngineer's Studioを用いた。

荷重は、鉛直方向に作用する等分布荷重とし土被り10 m相当の220 kN/m²を作用させた。トンネル周辺の地山は引張無視の地盤ばねでモデル化し、地山の地盤反力係数 k_r は式(1)により求めた。地山の変形係数 E_g は1,000 MPa (CII 地山相当) とした。

$$k_r = 1.7 \times a \times E_g \times D - 3/4 \quad (1)$$

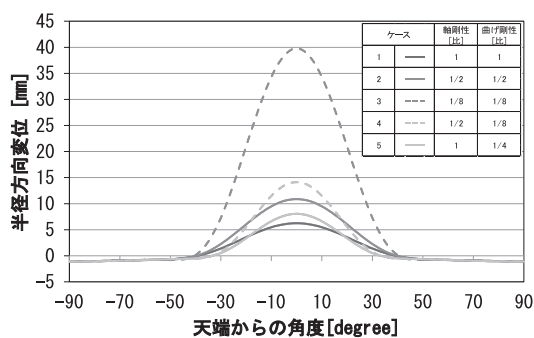
a : 補正係数 (=1), E_g : 地山の変形係数, D : トンネル幅

(2) 解析結果

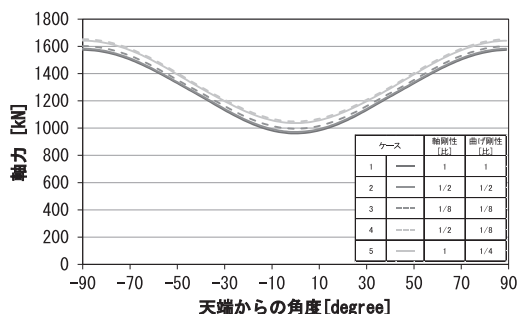
図—8は、解析から得られた変位分布を示したものである。軸剛性及び曲げ剛性の変化の比が同じケース1～3とケース4、5はそれぞれ剛性の比に反比例した変形量であることが分かる。しかし、ケース1とケース5は、軸剛性は同等で曲げ剛性は1/4であるが、天端変位の差は1/4よりも小さい。また、ケース3とケース4は、曲げ剛性は同等であるが、軸剛性は1/4である。同様に、天端変位の差は1/4よりも小さい。ただし、前述の曲げ剛性を変化させたものと比較し、軸剛性を変化させた方が変位の差は大きい。以上より、曲げ剛性よりも軸剛性の方が変位に与える影響が大きいことが分かる。

図—9 (a) は、軸力分布の関係を示したものである。軸力分布については、いずれのケースにおいても明確な差は確認できなかった。

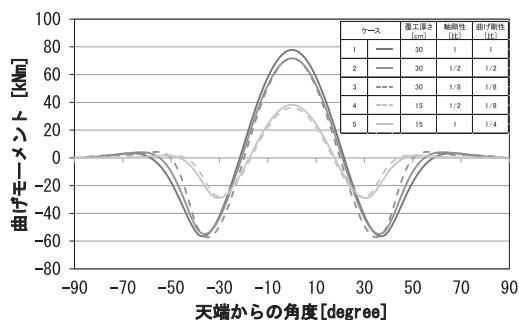
図—9 (b) は、曲げモーメント分布を示したものである。解析結果としては、覆工の厚さが30 cmであるケース1～3と15 cmであるケース4、5でそれぞれ同様の曲げモーメント分布を示した。単純な形状の断面力分布については、荷重が同一の場合、剛性によらずスパン等の梁の支持条件等の影響しか受けない。しかし、今回は鉛直荷重により作用する外力についてはいずれのケースも同一である。そこで、地盤か



図—8 変位-角度



(a) 軸力-角度



(b) 曲げモーメント-角度

図—9 断面力

ら作用する反力について確認を行った。それぞれのケースにおける水平反力及び鉛直反力の結果を表—4に示す。地盤反力を受ける範囲を受働領域、受けない範囲を主働領域としたとき、地盤反力の受働・主働領域を表—5に示す。その結果、地盤反力の大きさは、剛性が低くなるほど小さくなる傾向がみられたが、覆工厚さの変化による影響は確認されなかった。また、地盤反力の受働領域がケースによって異なることが確認された。これは剛性によって変形モード及び大きさが異なることが原因だと考えられる。これらのことから、軸剛性と曲げ剛性の関係により、変形モードが異なり、地盤反力の受け方が変わるため、断面力分布が異なることが分かった。

4. おわりに

数値解析的アプローチにより、従来では経験的に決

表—4 地盤反力

ケース	地盤反力の合計値 (kN/m ²)	
	水平方向	鉛直方向
1	920	366
2	942	384
3	1,128	535
4	1,058	490
5	1,008	446

表—5 受働領域と主働領域の範囲

ケース	受働領域 (m)	主働領域 (m)
1	4.189	6.711
2	4.189	6.711
3	4.648	6.252
4	5.450	5.450
5	5.124	5.776

定していた値の妥当性の検証や、大規模実験の難しい覆工構造の耐荷力に関する基礎的検討が行えた。今後は、実トンネルの計測結果との比較や実験を通じて数値解析手法の妥当性の検証を行うことができれば、より説得力のあるデータになると考えている。

当研究所では、設計における課題の解決を目的に、数値解析に取り組んでいる。今後は、設計法への反映方法の検討など、今後のトンネル設計の高度化に寄与できるように検討を進めていこうと考えている。

J C M A

《参考文献》

- 1) 真下英人, 井野裕輝, 吉武謙二, 鹿島竜之介, 夏目岳洋: 山岳トンネルにおけるプレキャスト覆工の耐荷力に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), 77 巻 2 号 p. I-1-I-18, 2021
- 2) 石田雄太郎, 川端康夫, 真下英人, 進士正人, 安井成豊, 井野裕輝, 細井秀憲, 小原勝巳, 阿部隆英, 林 久資, 中村明彦, 鯨井 巧: 巻厚不足の矢板工法トンネルにおける補強設計の提案, トンネル工学報告集, 第 33 巻 I-24, 2023
- 3) 井野裕輝, 笠井大地, 真下英人: 2 次元数値解析における応力解放率とトンネル挙動に関する一考察, トンネル工学報告集, 第 33 巻 I-3, 2023
- 4) 真下英人, 水川雅之, 日下 敦: トンネル早期閉合効果に関する解析的検討, トンネル工学報告集, 第 17 巻, pp.35-41, 2007
- 5) 前川和彦, 八木 弘, 伊藤哲男, 國村省吾, 奥井裕三, 桑島 滉, 蔣宇 静: 全断面早期閉合の二次元数値解析における応力解放率の検証, 土木学会論文集 F1, Vol.78, No.1, pp.26-39, 2022
- 6) 市田雄行, 小原 伸: トンネルの 2 次元掘削解析における応力解放率に関する一考察, トンネル工学報告集, 第 25 巻, I-31, 2015
- 7) 井野裕輝, 真下英人: 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, トンネル工学報告集, 第 32 巻, I-8, 2022
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2022

【筆者紹介】

井野 裕輝 (いの ゆうき)
(一社) 日本建設機械施工協会
施工技術総合研究所 研究第一部
主任研究員



笠井 大地 (かさい だいち)
(一社) 日本建設機械施工協会
施工技術総合研究所 研究第一部
技術員

