

行政情報

山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策

吉 川 直 孝

本報は、山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策として、厚生労働省より発出されたガイドラインの技術的背景を整理し、各種対策の有効性を定量的に評価したものである。国際的なリスク低減原則（Hierarchy of Controls）に従ってガイドラインに基づく対策を分類し、施工の自動化・遠隔化技術の事例を紹介した。また、肌落ちの発生確率と間接的に関連する切羽押出し変位に着目し、有限要素解析により各種対策の変位抑制効果を評価した結果、補助ベンチ、長尺フォアバイリング、長尺鏡ボルト、一次吹付け、鏡吹付けが有効であることが確認された。さらに、実施工で見られる補助ベンチの大背を掘削することが切羽の安定性を低下させることも示され、設計段階からの適切な施工機械選定の必要性を示した。

キーワード：トンネル、切羽、肌落ち、肌落ち災害防止対策、施工の自動化・遠隔化

1. はじめに

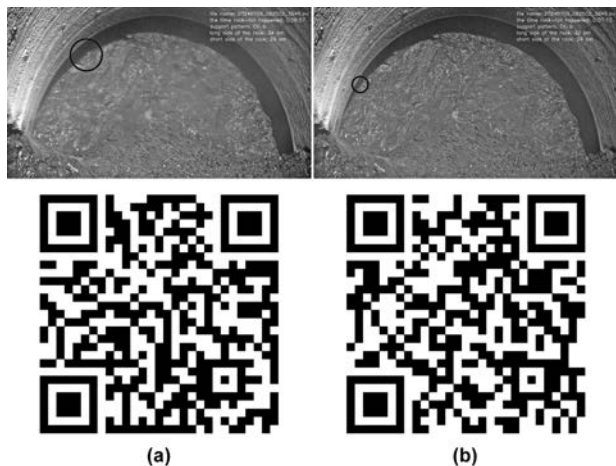
肌落ちとは、トンネル建設工事中において、トンネルの先端部分である掘削面から岩石が落下することをいう。掘削面から岩石が落下し、その直下に作業員がいた場合、重篤な災害となる。岩石が大きく、また落下高さが高い場合、最悪なケースでは死に至る。

図—1 にアップしている動画は、鏡面及びアーチ部からの肌落ち事象を捉えたものである^{1)~3)}。なお、切羽映像上の色変化を数値化する背景差分法⁴⁾により肌落ちの有無を抽出した。図—1 (a) の動画において鋼アーチ支保工の形状（直径）との比較から、肌落ち岩石の重量を概算すると、重さ約 90 kg の物体が

約 4 m の高さから落下することとなる。直下に作業員がいると重篤な災害となる。一方、図—1 (b) の動画は、アーチ部からの肌落ち事象を捉えたものである。結果として、重さ約 80 kg、落下高さ約 2.7 m であった。撮影時は、アタリトリ作業が終了したところであり、この動画の後、鏡面とアーチ部にコンクリートを吹付け、鋼アーチ支保工を建て込む作業に入った。鋼アーチ支保工の脚部を据えるために作業員が肌落ち岩石の落下地点の付近に立ち入る場合もある。もし、その時に、重さ 80 kg の岩石が 2.7 m 上空から落下してしまうと、非常に危険な事象となる。

これらの事象は、施工実績として支保パターン CII-b の鏡面及びアーチ部からの肌落ち事象を捉えたものである。このような場合でも、鏡吹付け及び一次吹付けを実施すれば、図—1 (a) 及び (b) の肌落ち岩石の重量を支持できる^{1), 3)}。

このような肌落ち事象であるが、近年においても実際に肌落ちした岩石が作業員に当たり死傷に至った災害がある。著者が知る限り、2021 年にも 1 件の死亡災害が発生し、2021 ~ 2024 年にかけて、2 件の休業 4 日以上、2 件の不休災害が発生している。統計が少し古いが、2000 年 ~ 2010 年において、日本トンネル専門工事業協会が調査した結果、計 47 名の肌落ちによる死傷者が確認された⁵⁾。そのうち、3 名が死亡災害、44 名が死傷災害である。また、施工サイクルのうち、被災した時に従事していた作業の内訳を示すと、「支保工建込作業」と「装薬作業」の作業中の



図—1 肌落ち事象を記録した動画。(a) 鏡面からの肌落ち事象、(b) アーチ部からの肌落ち事象^{1), 3)}

被災が最も多かった⁶⁾。両作業においては、作業員が切羽に近接して作業しなければならない現状がある。

2. 「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」の発出経緯

2016年、厚生労働省は「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」(以下、「ガイドライン」という。)を策定・公表し、以降、2018年及び2024年に改正を行っている⁷⁾。このガイドラインは、山岳トンネル工事の切羽において発生している肌落ち災害への防止対策を目的とした行政施策である。

2016年に発出されたガイドラインの核心的内容は、以下の3点に集約される：(a) 施工の自動化・遠隔化の推進、(b) 切羽への作業員の立ち入り最小化、(c) やむを得ず作業員が接近する場合には肌落ち災害防止対策を徹底することである。これらは、トンネル工事における労働災害リスクの低減に資する基本的方針として、その後の施策にも大きな影響を与えている。

その後、肌落ち災害は減少傾向にあるような印象であるが、それでもゼロにはなっておらず、2017年の肌落ち災害による死亡災害等を受けて、2018年には掘削解放面積の低減を図る掘削工法(補助ベンチ付き全断面工法、ベンチカット工法等)の採用、切羽監視責任者の専任制等についての内容を追記し、ガイドラインが改正されている。

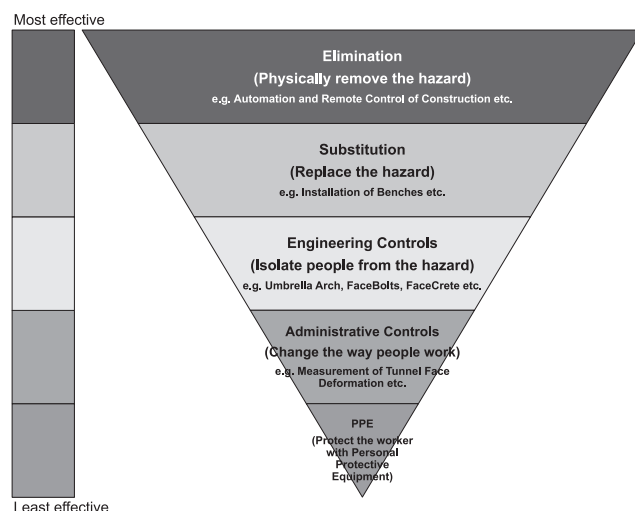
さらに、2021年の肌落ち災害による死亡災害及び不休災害、つづく2022年にも肌落ち災害による不休災害及び負傷災害が発生し、これらの災害を受けて、厚生労働省は安衛研に「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策のあり方についての研究」という行政要請研究の実施を依頼した。これを受け、2022年、安衛研において、「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に関する検討会」が設置され、同検討会の結果⁸⁾を受けて、ガイドラインが2024年に改正された。主な改正の要点は以下のとおりである。

- 発注者等が講ずべき措置の新設：設計段階において適切な支保パターンの選定や鏡吹付けの実施について設計図書等に記載するとともに、施工段階においても設計変更に係る施工者との協議等を行うこととしたこと。【ガイドラインの第4】
- 切羽の立入に関連し特段の配慮を必要とする範囲の新設：切羽(天端)からの45度の範囲を特段の配慮を必要とする範囲とし、可能な限り立入りを避けることとしたこと。【ガイドラインの第6の1関係】

- 地山の状況に応じた支保パターンの選定：事業者が現場で出現した地山の状況に応じ適切に支保パターン等を選定できるよう、発注者と必要な情報等を共有の上、十分協議し連携して取り組むこととしたこと。【ガイドラインの第6の5(1)関係】
- 適切なドリルジャンボの選定及び速やかなロックボルトの施工：掘削断面形状等に適合したドリルジャンボを使用するとともに、ロックボルトの施工についても事業者の施工サイクルに従い速やかに一問ずつ行うこととしたこと。【ガイドラインの第6の5(3)関係】
- 鏡吹付けの原則実施：切羽の自立が悪い場合には鏡吹付けを原則実施することとしたこと。【ガイドラインの第7の2(2)等関係】
- その他：最新のデジタル技術等も活用し、各種作業の遠隔化・自動化、各種センサー等を活用した監視・検知等の取組を積極的に進めることとしたこと。

3. Hierarchy of Controls (制御の階層) を用いた肌落ち災害防止対策の整理

肌落ち災害防止対策を考える場合に、Hazard (ハザード、危険源) は掘削面(鏡面及びアーチ・側壁部の素掘り面)である。なぜなら、掘削前には掘削面の前面にあった岩盤が、掘削によりその岩盤が除去されることで前面の支持を失い、不安定な状況となっているからである。作業員がハザード(掘削面)と接触する可能性がある場合、それはリスクとみなされる。リスク低減措置を検討する上での優先順位は、国際的にも国内でも認められている。国際的には、Hierarchy of Controls (制御の階層) として有名であり、図一2に示すように、ハザードの暴露に対する制御を信頼性の高



図一2 トンネル建設工事中の肌落ちをハザードとした時の Hierarchy of Controls (制御の階層)⁹⁾ に一部加筆

いものから順に検討することの重要性を示している⁹⁾。

同図から、制御の階層で最も安全対策の信頼性の高いリスク低減措置は、「Elimination（物理的にハザードを除去）」である。トンネル施工において、掘削面を除去することは不可能であることから、ハザード（掘削面）に近づかなくとも施工できるような対策を「Elimination」と考えると、施工の自動化・遠隔化が例として挙げられる。近年では、施工の自動化・遠隔化において、様々な技術が開発され、現場へ導入され始めている。

例えば、山岳トンネルでは、①穿孔、②装薬、③ずり出し、④アタリトリ、⑤吹付け、⑥支保工建込、⑦ロックボルト等の一連の施工サイクルとなっており、それら一連の施工サイクルの自動化・遠隔化技術として、「A4CSEL for Tunnel」¹⁰⁾、「OTISM」¹¹⁾、「シミズ・スマート・トンネル」¹²⁾等が開発または提案されている。

また、穿孔、装薬作業では、国土交通省が「トンネル発破作業の自動化・遠隔化技術の現状」中間とりまとめ（案）を公表しており、同案の中に各自動化・遠隔化技術の概要が整理されている¹³⁾。同案の公表以降も、トンネル全体の電波暗室（内外の電波の行き来が遮蔽された空間）化に成功し、切羽（トンネル掘削の最先端部）全面で使用可能な無線発破システムが開発されている¹⁴⁾。

ずり出し作業及びアタリトリ作業でも、施工の自動化・遠隔化技術が開発されている¹⁰⁾。また、吹付け作業の自動化・遠隔化技術としては、山岳トンネルにおける「コンクリート吹付け機遠隔操作システム（ヘラクレス-Remote）」¹⁵⁾、コンクリート吹付け作業の遠隔操作技術「T-iROBO[®] Remote Shotcreting」¹⁶⁾等、支保工建込作業の自動化・遠隔化技術としては、「クイックテレクター」¹⁷⁾、「T-支保工クイックセッター」¹⁸⁾、「鋼製支保工建込みロボット」¹⁹⁾、「鋼製支保工の自動建込技術（AUTOMATED TUNNEL RIBS）」²⁰⁾等、ロックボルト打設作業の自動化・遠隔化技術としては、6m継ぎ仕様のロックボルト打設専用機「BOLTINGER」²¹⁾、ロックボルトの遠隔打設装置（ボルティングユニット）を2基装備した「2ブームロックボルト打設専用機」による遠隔施工システム²²⁾等が開発されている。

その他、トンネル建設工事での掘削面である切羽の状態をLiDARにより高速・高密度で計測監視するシステム「TFS-Mapper」が開発され、切羽全体に対して、切羽の押出し量やその領域、また、切羽に施工する鏡吹付けコンクリートの厚さなどをリアルタイムかつ定量的に評価することが可能とある²³⁾。また、デジタル技術を活用した「切羽遠隔監視システム」が開発

され、4K画像伝送及びパンチルトズーム機能による湧水箇所や切羽性状の近接目視機能、複数箇所の同時監視機能により「目視で監視する場合と同等以上の安全衛生水準」を達成できる可能性が示唆されている²⁴⁾。

このように多くの技術が日進月歩で開発されており、本報に挙げた技術は全てを網羅しているといえないことに留意する。このような施工の自動化・遠隔化技術を適用することで、掘削面直下に作業員が立ち入る必要のない環境を形成することが大切である。

ここで、ガイドラインの第4には、「発注者においては、施工方法、工期等について、安全で衛生的な作業の遂行を損なうおそれのある条件を付さないように配慮することをはじめ、労働安全衛生関係法令を遵守するとともに、本ガイドライン等に基づき、事業者において的確な労働災害防止措置が講じられるよう、適切な設計図書の作成、必要な安全衛生経費の確保（装薬作業、支保工建込作業、ロックボルト打設作業等の自動化・遠隔化技術、最新のデジタル技術の導入支援等を含む。）等、的確に対応するものとする。」と明記されており、発注者による施工の自動化・遠隔化技術への支援が求められている。

なお、機械が故障した時の非定常作業の安全対策も忘れてはならない。それらを含めてリスク低減措置を検討することが重要である。

次に安全対策の信頼性が高い措置は、図—2から「Substitution（ハザードの変更）」である。ガイドラインでは、掘削断面積を縮小する補助ベンチ付き全断面工法またはベンチカット工法の採用を検討する必要性も謳っている。同工法により掘削面の減少、肌落ちの発生確率の減少、位置エネルギーの低減が達成されることが考えられる。

また、ガイドラインでは、「Engineering Controls（工学的対策）」として、フォアパイリング、鏡ボルト、一次吹付け、鏡吹付け、フォアポーリング等を挙げている。鏡面に対してコンクリートを吹き付けることを「鏡吹付け」、アーチ・側壁部に対して1次的に30～50mmほどの厚さでコンクリートを吹き付けることを「一次吹付け」という。「二次吹付け」とは、一次吹付けの厚さに加えて、トータルとして標準支保パターンで決められた厚さ（50～150mm）まで、残りの厚さを吹付けることをいう。フォアパイリングとフォアポーリングの相違は、長尺のパイプ（12.5m）を使う場合、短尺のパイプ（3m）を使う場合として本報では使い分けている。

さらに、「Administrative Controls（管理的対策）」として、ガイドラインでは、切羽変位計測、切羽監視責任者の配置、立ち入り禁止措置等を挙げている。

日本における現状の施工では、補助ベンチ付き全断面工法において、鏡吹付け及び一次吹付けを施し、切羽監視責任者の配置（デジタル技術による代用が可能な場合もある。）、立ち入り禁止措置を施すことが一般的な肌落ち災害防止対策となっている。

4. 肌落ち災害防止対策の効果について

ここで、「Elimination（物理的にハザードを除去）」として、施工の自動化・遠隔化の安全対策の信頼性が高いことは容易に想像されるが、「Substitution（ハザードの変更）」以下の安全対策の信頼性については定かではない。そこで「Substitution（ハザードの変更）」の補助ベンチ付き全断面工法、「Engineering Controls（工学的対策）」のフォアパイリング、鏡ボルト、一次吹付け、鏡吹付け、フォアポーリング等の効果を数値化することを考える。

Lunardi (2008)¹⁸⁾を参考にすると、肌落ちの発生メカニズムは以下のようなステップで進行すると考えられる。

- 1) 鏡面の岩盤は、発破掘削（または機械掘削）によって、鏡面の前面にあった岩盤の支えを失う。
- 2) 鏡面の岩盤内の岩石が微小に前面に動きはじめ、鏡面の岩盤内の亀裂が拡大・進展する。
- 3) 複数の亀裂が拡大・進展し、それらの亀裂により、鏡面表面の岩石が完全に切羽から切り離された時、その岩石は重力によって落下し、肌落ちに至る。これは、図—3に示すように、Lunardi (2008)の「Fig. 2.1」にある「Ground fall（落石）」及び「Spalling（剥離）」に該当すると考えている。

肌落ちの発生メカニズムが上記のとおりとすると、ステップ2)の時に鏡面を前面に一切動かさなければ、鏡

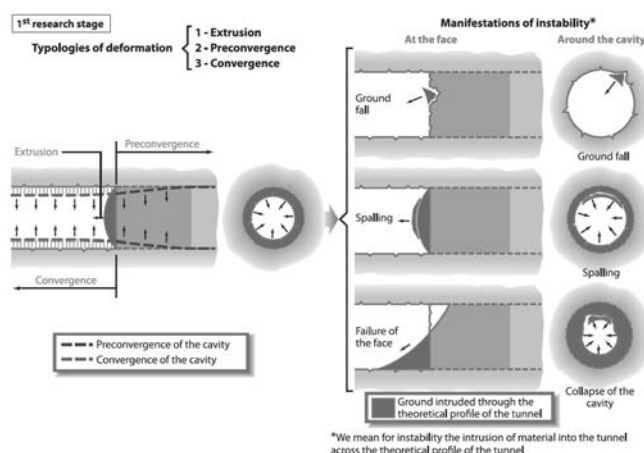
面の岩盤内の岩石は微小にも動くことができず、岩盤内の亀裂が拡大・進展することもないと考えられる。そこで、肌落ち災害防止対策として、非現実的ではあるが、掘削と同時に非常に重厚な対策を施し、一切鏡面を前面に動かさなければ、肌落ちが発生する確率はゼロに近くなると考えられる。つまり、鏡面の水平変位の大きさが、間接的に、肌落ちの発生確率の大きさを表現していると考えられる。これは、Lunardi (2008)²⁵⁾によるADECO-RS (Analisi delle DEformazioni CONTrollate nelle Rocce e nei Suoli, Analysis of COntrolled DEformation in Rocks and Soils)と類似の考えである。

そのため、本報では鏡面の押出し水平変位に着目する。ガイドラインにも管理的対策として、「切羽変位計測」が挙げられており、ガイドラインの対策の範囲内でもある。なお、鏡面の水平変位を一切発生させないことは現実的には不可能なため、鏡面の水平変位に着目し、各種の肌落ち災害防止対策がどの程度の効果（能力）を持っているか、有限要素解析により切羽押出し変位抑制率を算出し数値化する。なお、有限要素解析の解析条件等の詳細は文献²⁶⁾を参照のこと。

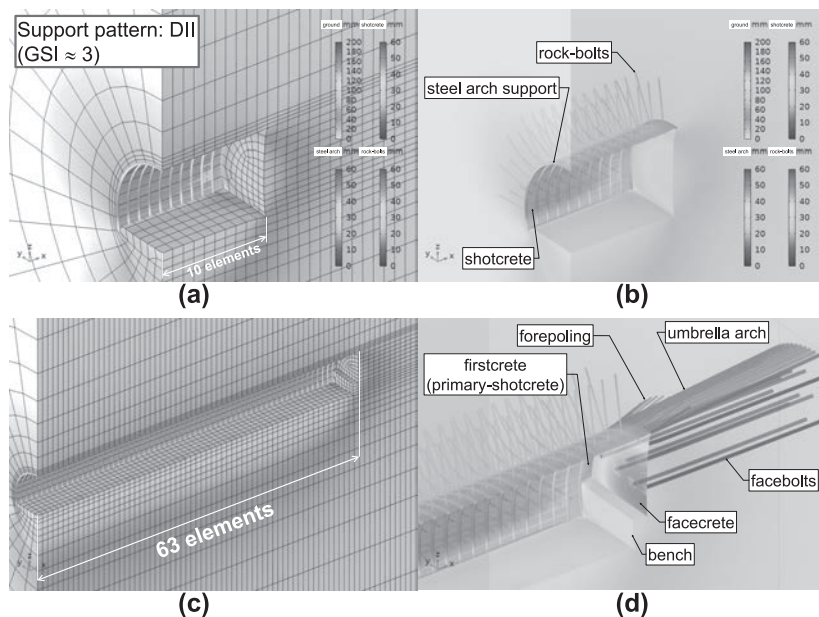
(1) 切羽押出し変位抑制率の算出方法

有限要素解析の手順として、図—4(a)に示すように、yz平面($x = 0$ m)からx方向に10要素分ほど掘削する（例えば、DIIパターンの場合、 $x = 10$ mまで掘削）。トンネル標準内空断面は「監視員通路あり」の「2級A・B」として、半径 $R1 = 5,400$ [mm]の断面である²⁷⁾。掘削と同時に、標準支保パターン²⁷⁾の仕様の支保部材を適用する（図—4(b)参照）。つまり、支保パターンごとに異なる仕様の支保部材を適用することとなる。ここで、FE解析においては、上半及び下半のトンネル掘削半径を有する円周上に吹付けコンクリート、鋼アーチ支保工、ロックボルトを適用した。地山は、Drucker-Pragerの降伏基準にテンションカットオフモデルを適用した弾塑性体として、地山等級ごとに異なる物性値（ヤング率 $E = 150 \sim 5,000$ N/mm², ポアソン比 $\nu = 0.25 \sim 0.35$, 粘着力 $c = 0.2 \sim 4.0$ N/mm², 内部摩擦角 $\phi = 30 \sim 50^\circ$, 引張強度 $\sigma_t = 0.2 \times c$ [N/mm²], 単位体積重量 $\gamma_t = 21.0 \sim 25.0$ kN/m³)を与えている²⁸⁾。一方、各支保部材は弾性体として、ヤング率、ポアソン比、単位体積重量を与えている²⁶⁾。

続けて、x方向に10要素分の掘削を4回繰り返し（DIIパターンの場合、 $x = 50$ mまで掘削）、次にx方向に5要素分の掘削を1回、4要素分の掘削を1回、1要素分の掘削を3回繰り返す（DIIパターンの場合、



図—3 Lunardi (2008)¹⁸⁾の「Fig. 2.1」にある「Ground fall（落石）」及び「Spalling（剥離）」



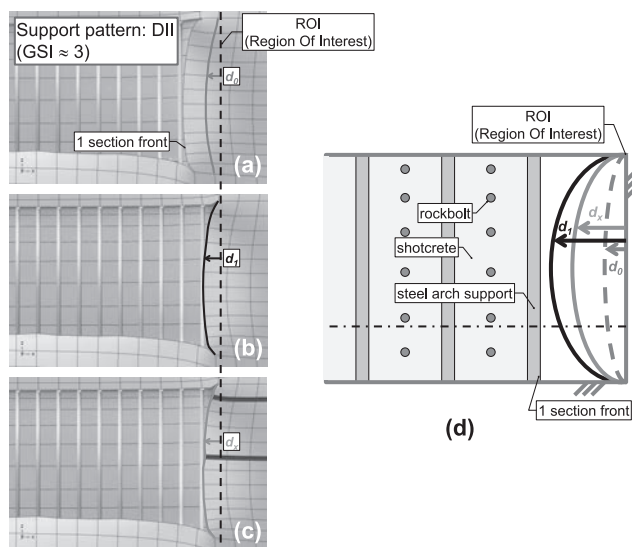
図—4 トンネル掘削，標準支保パターンの適用，肌落ち災害防止対策の適用²⁶⁾

x = 62 m まで掘削)，それぞれの掘削と同時に標準支保パターンを適用する。なお，標準支保パターンを適用する断面はここまでである。この時，x 方向に1要素先の鏡面（DII パターンの場合，x = 63 m）を計測対象面として，その時の切羽押出し変位 d_0 を出力しておく（図—5 (a) 参照）。

さらに，図—4 (c) に示すように，x 方向に1要素分ほど掘削し（DII パターンの場合，x = 63 m まで掘削），標準支保パターンを打設しない無支保の時の計測対象面の切羽押出し変位 d_1 を出力する（図—5 (b) 参照）。このような解析を支保パターンごとに行い，それぞれ d_0 及び d_1 を出力しておく。

最後に，計測対象面の1断面前までの解析結果から，x 方向に1要素分ほど掘削すると同時に，各種の肌落ち災害防止対策のうち1つの対策を施した解析を行い，その時の計測対象面の切羽押出し変位 d_x を出力する（図—4 (d)，図—5 (c) 参照）。なお，図—4 (d) は全ての肌落ち災害防止対策を同時に表示しているが，実際のFE解析では，ここに表示している対策のうち1つの肌落ち災害防止対策を適用した場合の d_x をそれぞれ出力している。

掘削と同時に各種の対策を施しているため，実際の施工とは条件が異なり，切羽押出し変位を過小評価している可能性がある。実際の施工では，例えば，発破掘削後，換気，こそく，浮石除去，ずり搬出，アタリトリを実施した後，切羽の準安定を確保するため，鏡吹付け，一次吹付けが実施される。余掘りを含めた掘削断面積にもよるが，地山等級 DII クラスであれば，発破掘削後，約 90 分後に鏡吹付け及び一次吹付けが



図—5 切羽押出し変位抑制率の算出方法²⁶⁾

実施される²⁹⁾。したがって，実際の施工では，約 90 分間，1断面ほど無支保であることから，その間の押出し変位を計算する必要がある。その後，鏡吹付け及び一次吹付けを適用し，押出し変位の変化を計算する必要がある。これらの値から切羽押出し変位抑制率を算出すべきである。これらの事項は，鏡吹付け及び一次吹付けに限ったことではなく，全ての支保部材に共通して言えることであり，施工プロセスを考慮した時間依存の弾塑性解析，つまり弾粘塑性解析が必要である。しかしながら，弾塑性解析に比べ，弾粘塑性解析を実行する場合，計算コストが著しく増加する。例えば，Neuner, et al. (2020)³⁰⁾によると，岩盤や吹付けコンクリートの非線形時間依存性材料挙動を考慮する

場合、2次元数値解析に比べ、3次元数値解析は困難で時間のかかる作業と述べている。

そのため、本報告では、まず基本的な弾塑性解析（支保部材は弾性解析）において、各種の対策の効果を計算する。このような基礎的な計算結果が土台となり、本報告以降では、効果のある対策に限った形で、また解析パラメータを限定した形で、弾粘塑性解析による各種の対策の効果の定量評価に繋げる予定である。

時間依存を考慮した材料非線形を取り入れた数値解析としては、例えば、Neuner et al. (2020)³⁰⁾、Kargar et al. (2020)³¹⁾、Graziani et al. (2005)³²⁾ 等が参考になる。

(2) 切羽押出し変位抑制率の算出方法

前項に示した d_0 、 d_1 、 d_x の関係は、図—5 (d) のとおりとなる。

1断面前まで掘削し標準支保を施した場合の計測対象面の変位 d_0 よりも、計測対象面まで掘削し無支保である場合の変位 d_1 の方が x 軸の負の方向に大きくなる。一方、計測対象面まで掘削し同時に肌落ち災害防止対策を施した場合の変位 d_x は、 d_0 と d_1 の間にあると推察される。したがって、 $(d_1 - d_x)$ が肌落ち災害防止対策による切羽押出し変位抑制量である。また、計測対象面に対して標準支保及び肌落ち災害防止対策を未だ施していない時の1断面前からの変位量は $(d_1 - d_0)$ である。 $(d_1 - d_0)$ で $(d_1 - d_x)$ を正規化することにより、切羽押出し変位抑制率 $R_{r,x}$ を算出することができる。つまり、次式のとおりである。

$$R_{r,x} = \frac{(d_1 - d_0) - (d_x - d_0)}{d_1 - d_0} \times 100 = \frac{d_1 - d_x}{d_1 - d_0} \times 100 \cdots (1)$$

ここで、

d_0 ：計測対象面（ROI）の1断面前まで標準支保を施した時の計測対象面の変位、

d_1 ：計測対象面（ROI）まで掘削し、同断面では無支保の時の計測対象面の変位、

d_x ：計測対象面（ROI）まで掘削し、同断面に肌落ち災害防止対策を施した時の計測対象面の変位、

$R_{r,x}$ ：切羽押出し変位抑制率（％）、

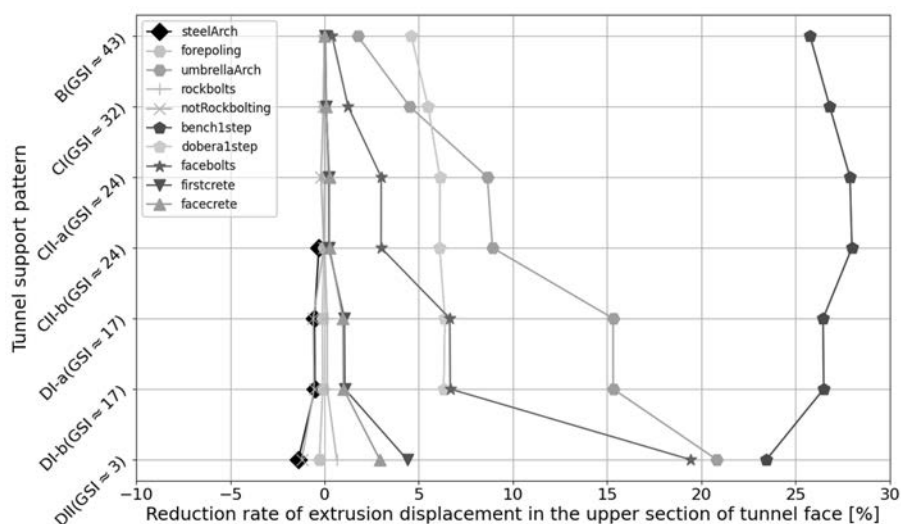
である。

なお、切羽押出し変位の計測点は、鏡面の天端とSLの midpoint を基準として、基準点から0.5 m四方の距離にある点とした。また、それら計測点の変位を出力し、それらの平均値として、切羽押出し変位を計算した。

このように算出した切羽押出し変位抑制率は、1掘進長ほど無支保の場合の変位量に対する肌落ち災害防止対策による変位抑制量の比となり、単純に肌落ち災害防止対策の効果を切羽押出し変位量から算出できる指標となる。

(3) 各種の肌落ち災害防止対策の切羽押出し変位抑制効果

式(1)を用いて、各種の対策の切羽押出し変位抑制率を算出し、支保パターンとの関係を図—6に示す。なお、縦軸は支保パターン（B～DII）だけでなく、海外の基準である Geological Strength Index (GSI)³³⁾ も合わせて示している。なお、補助ベンチを施した解析では、支保パターン DII の時、テンションカットオフモデルにおいて解が収束しなかったことから、テンションカットオフモデルを採用せず、通常の Drucker-Prager モデルで解析を実施して解を得ていることに留意する必要がある²⁶⁾。補助ベンチ上面の坑口側の



図—6 支保パターンと切羽押出し変位抑制率との関係²⁶⁾

要素が引張破壊し、力の釣り合いが取れなくなったものと推察される。

同図において、各種の対策を相対比較すると、非常に興味深い。まず、補助ベンチ (benchstep) が最も切羽押出し変位の抑制に効果があり、約 26% の抑制率となっている。この傾向は、支保パターンによらないことも興味深い。補助ベンチは鏡面前面にベンチを残置するもので、幾何学的なものである。幾何学的なものであるため、補助ベンチの物性値は、地山の物性値と共に変化し、補助ベンチと地山の物性値の相対的な関係は一定である。したがって、支保パターンによらず、ほぼ一定の抑制率を示したものと考えられる。なお、前述したように、補助ベンチの上面が局所的に破壊される可能性もあるため、注意が必要である。

続いて、支保パターン DII において、長尺フォアパイリング (umbrellaArch)、長尺鏡ボルト (facebolts) の順に抑制率が高いことが分かる (それぞれ約 21%、約 19%)。同図の凡例には、それぞれ “umbrellaArch” 及び “facebolts” と記載している。しかしながら、支保パターンとの関係性において、補助ベンチとの相違が見えて、とても興味深い。つまり、長尺フォアパイリング (umbrellaArch)、長尺鏡ボルト (facebolts) においては、支保パターンが軽くなる (地山が硬くなる、B に近づく) につれ、対策の効果が低減していることが分かる。長尺フォアパイリング (umbrellaArch) の弾性係数は $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、長尺鏡ボルト (facebolts) の弾性係数は $2.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ と支保パターンによらず一定であるのに対して、地山の弾性係数は $1.5 \times 10^2 \sim 5.0 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ となり、支保パターンが B に近づくにつれ、地山の弾性係数が支保部材の弾性係数に近づくことが分かる。そのため、支保部材の弾性係数と地山の弾性係数が近づくにつれ、結局のところ、地山の弾性係数によって切羽の押出し変位が決まってしまう、切羽押出し変位抑制率は下がると推察される。

次に、フォアポーリング (forepoling) を見ると、支保パターン DII において、約 -0.3% という押出し変位抑制率であり、ほとんど効果が見られないことが分かる。同図の凡例には “forepoling” と記載している。これは、長尺フォアパイリングの打設長 12.5 m に比べ、フォアポーリングの打設長が 3 m と短いためだと推察される。また、フォアポーリングの打設角度も水平面から 30 度と長尺フォアパイリングの 4 度よりも大きいこともあり、切羽の水平変位の抑制に効果があまり見られなかったと推察される。

次に、一次吹付けと鏡吹付けを見ると、支保パターン DII において、それぞれ約 4.4% と約 2.9% という抑

制率であることが分かる。同図の凡例には、それぞれ “firstcrete” 及び “facecrete” と記載している。一次吹付けは、1 断面ほど無支保だったアーチ・側壁部に対して吹付けコンクリートを打設する行為である。そのため、1 断面前までのアーチ・側壁部の吹付けコンクリートと連続した構造となる。また、一次吹付け厚さは 50 mm であり、鏡面とも接している。つまり、一次吹付けコンクリートは、ある一定の厚さを持って鏡面と接し、1 断面前までのアーチ・側壁部の吹付けコンクリートとも連続するため、鏡面が押し出してくる挙動に対してトンネル軸方向に反力を有している。一方、鏡吹付けはそれ単体ではトンネル軸方向に反力を有していない。そのため、一次吹付けの抑制率が鏡吹付けのそれを上回ったと推察される。

したがって、鏡吹付けと一次吹付けを同時に採用すれば、鏡吹付けもトンネル軸方向に反力を有することとなり、切羽押出し変位の抑制効果が高いと推察される。

(4) 標準支保パターン (ロックボルト) の切羽押出し変位抑制効果

次に、標準支保パターンを 1 つ 1 つ適用した場合も切羽押出し変位抑制率を算出している。

図—6 のロックボルトの抑制率を見ると、DII パターンにおいて、0.6% ほど効果が見られる。同図の凡例には、“rockbolts” と記載している。なお、Vitali et al (2018)³⁴⁾ と文献²⁶⁾ の結果から誤差 2% の範囲内であるが、トンネル横断方向に打設するロックボルトが、トンネル縦断方向の鏡面の押出し変位の抑制にわずかもプラスの効果があることは興味深い。

一方、日本における実施工では、本坑と作業坑 (または連絡坑) で断面の大きさが異なる場合においても、本坑用の大型のドリル・ジャンボを用いて、断面の小さな作業坑 (または連絡坑) におけるロックボルトを打設する状況も散見される。この時、ドリル・ジャンボのガイドシェルが補助ベンチに当たるため、補助ベンチがなくなる距離まで、例えば鏡面から 3 断面分ほどロックボルトを打設しないという施工も見られた。このような施工を想定して、3 断面分ほどロックボルトを打設しないといった解析も実施している。図—6 の “notRockbolting” というプロットがそれに該当し、抑制率は約 -1.2% となる。Vitali et al (2018)³⁴⁾ と文献²⁶⁾ の結果から誤差 2% の範囲内であるが、先ほどの鏡面の直近にロックボルトを打設する場合の抑制率が 0.6% ほどであったのに対して、3 断面分ほどロックボルトを打設しない場合の抑制率は約 -1.2% となり、わずかも鏡面の不安定化を招く可能性がある。

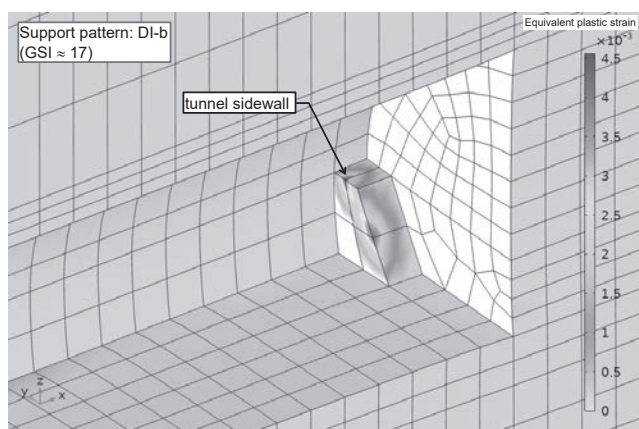
(5) 補助ベンチの大背を掘削する影響

本節では、補助ベンチの大背を掘削する影響を検討する。日本の実施工では、前述したように、本坑と作業坑（または連絡坑）で著しく断面の大きさが異なる場合においても、本坑用の大型のドリル・ジャンボを用いて、断面の小さな作業坑においてロックボルトを打設する状況も散見され、この時、ドリル・ジャンボのガイドシェルが補助ベンチに当たるため、補助ベンチの中央部分（ここでは「大背」という。）を掘削する施工も見られる。

本報では、このような施工も再現した解析を実施した。すなわち、トンネル横断面において、下半の大背を掘削し、下半の土平（tunnel sidewall）を残置するという解析を実施した。下半の土平の上底は1 m、下底は2 mとした。

支保パターン DI-b において、大背を掘削した時の解析結果を図一7に示す。同図は等価塑性ひずみの分布を示している。このような大背を掘削した時の解析結果から、土平の上面及び斜面において、等価塑性ひずみが卓越していることが分かる。大背を掘削することで、土平の安定性が低下することが分かる。なお、支保パターン DII においても同様の解析を実施した結果、テンションカットオフモデルを適用した場合とそうでない場合、両方の条件下において解が収束しなかった。土平の上面または斜面のうちのいずれかが引張破壊し、力の釣り合いが保てなくなったと推察される。

大背を掘削した時の切羽押し変位抑制率と支保パターンの関係も図一6に“doberalstep”として示している。同図から、支保パターンによらず、抑制率が約6%となることが分かる。前述したように、補助ベンチの抑制率が約26%であったことを考えると、20%も低下しており、大背を掘削することで著しく鏡面の不安定化を招くことが分かる。



図一7 大背を掘削し土平を残した場合の解析結果（等価塑性ひずみの分布図）

したがって、ドリル・ジャンボのガイドシェルに合わせて断面形状を決めるのではなく、設計段階または施工計画段階から、適切な補助ベンチを設けたとしても、適切にロックボルトが打設できるよう、適切な大きさのドリル・ジャンボとガイドシェルを事前に用意する必要がある。これにより、大背を掘削することなく、SLとベンチ上面を完全に一致させた施工ができ、鏡面の押し出し変位をある程度抑制した施工ができる。

5. おわりに

本報では、山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策について、厚生労働省のガイドラインの背景・内容を整理するとともに、各種対策の効果を定量的に評価した。肌落ち災害は、現在においても死傷災害につながる重大なリスクであり、特に支保工建込みや装薬作業時において発生する可能性が高い。そのため、作業員が掘削面（鏡面及びアーチ・側壁部）に近接しない環境の構築が重要である。

そのため、ガイドラインの改正経緯を通じて、発注者を含む関係者全体での安全確保の役割が明確化されてきた。特に、施工の自動化・遠隔化技術の導入が「Elimination（物理的にハザードを除去）」として、最も信頼性の高いリスク低減策である。さらに、肌落ち災害の発生確率と鏡面の水平変位に相関があるという仮説のもと、有限要素解析により各種対策の切羽押し変位抑制効果を定量評価した。その結果、補助ベンチが最も高い抑制効果を示し、長尺フォアパイリング、長尺鏡ボルト、一次吹付け及び鏡吹付けの効果も確認された。なお、地山を弾塑性体、支保部材を弾性体、総じて連続体を仮定し、施工状況を極めて単純にモデル化した有限要素解析の結果であることを明記しておく。

また、現場でしばしば見られる補助ベンチの大背掘削が、鏡面の不安定化を招き、変位抑制効果を大きく低下させることも解析により示された。このことから、設計段階及び施工計画段階において、掘削断面に応じた施工機械（特にドリル・ジャンボ）を選定することが不可欠であることが分かった。

今後は、時間依存を考慮した粘弾塑性解析を導入し、施工プロセスの実態に即したより現実的な評価を進めることが求められる。

肌落ち災害のさらなる低減を目指し、発注者・設計者・施工者の三位一体による安全対策の高度化が期待される。

《参考文献》

- 1) 吉川直孝：山岳トンネル建設工事における肌落ち事象と鏡吹付け及び1次吹付けコンクリートの有効性について，安衛研ニュース No.192 (2025-01-10)，[192-2] コラム，2025. https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/mail_mag/2024/192-column-1.html. (2025年3月10日閲覧)
- 2) 熊谷幸樹，宮原宏史，吉川直孝：山岳トンネル建設工事における肌落ち事象の画像監視システムの実用化，第80回年次学術講演会概要集，(公社)土木学会，VI-560，2025.
- 3) 吉川直孝，熊谷幸樹，宮原宏史，藤岡大輔，三浦雅也，森崎達之助：山岳トンネル建設工事における肌落ち事象と鏡吹付けおよび1次吹付けコンクリートの有効性，第80回年次学術講演会概要集，(公社)土木学会，VI-561，2025.
- 4) 藤岡大輔，中村隆史，西山哲，中岡健一：画像処理技術を利用したリアルタイム切羽監視システムの開発，第45回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp. 55-60，2017.1，<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00019/2018/45-0055.pdf>. (2025年3月27日閲覧)
- 5) (一社)日本トンネル専門工事業協会：NO.1『肌落ち労働災害防止のハンドブック その2』，http://www.tonnel.jp/htm_tebiki1.html，2012. (2025年7月3日閲覧)
- 6) 吉川直孝，伊藤和也，豊澤康男，堀智仁，玉手聡：トンネルの切羽からの肌落ちによる労働災害の調査分析と防止対策の提案，労働安全衛生総合研究所技術資料，JNIOH-TD-No.2，p.7，<https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/doc/td/TD-No2.pdf#zoom=100>，2012. (2025年7月3日閲覧)
- 7) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン，https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_40441.html. (2025年7月3日閲覧)
- 8) 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に関する検討会 報告書，https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/houkoku/tunnel_2023.pdf，2023.
- 9) National Institute for Occupational Safety and Health: Hierarchy of Controls，10 April 2024，<https://www.cdc.gov/niosh/hierarchy-of-controls/about/index.html> (2025年7月3日閲覧)
- 10) 鹿島建設㈱：プレスリリース 山岳トンネルの自動化施工システム「A4CSEL for Tunnel」が完成！，2024.7.31. <https://www.kajima.co.jp/news/press/202407/31c1-j.htm> (2025年7月3日閲覧)
- 11) ㈱大林組：安全と品質，生産性を飛躍的に向上させる統合システム「OTISM (オーティズム) Ⅱ」，<https://www.obayashi.co.jp/tunnelworld/system/mountain/> (2025年7月10日閲覧)
- 12) 清水建設㈱：次世代型トンネル構築システム「シミズ・スマート・トンネル」，<https://www.shimz.co.jp/topics/civil/item04/> (2025年7月10日閲覧)
- 13) 国土交通省道路局国道・技術課：「トンネル発破作業の自動化・遠隔化技術の現状」中間とりまとめ(案)を公表します～トンネル発破作業の安全性・生産性を向上する技術の開発・活用の促進に向けて～，https://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_001919.html (2025年7月10日閲覧)
- 14) 戸田建設㈱：トンネル全体の電波暗室化に成功し，無線発破システムを確立 山岳トンネル発破作業の安全性の大幅な向上へ，https://www.toda.co.jp/news/2025/20250627_006081.html (2025年7月10日閲覧)
- 15) 戸田建設㈱，清水建設㈱，西松建設㈱，前田建設工業㈱，エフティーエス㈱：山岳トンネルにおける遠隔施工技術『コンクリート吹付け機の遠隔操作システムを開発』トンネル坑内におけるコンクリート吹付け作業を無線で遠隔化，https://www.toda.co.jp/news/2022/20221214_003154.html (2025年7月10日閲覧)
- 16) 大成建設㈱：コンクリート吹付け作業の遠隔操作技術「T-iROBO® Remote Shotcreting」の本格運用を開始，2022.5.10.，https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2022/220510_8782.html (2025年7月3日閲覧)
- 17) ㈱大林組：山岳トンネル遠隔支保工建て込み技術 クイックテレクター®，https://www.obayashi.co.jp/solution_technology/detail/tech_d268.html (2025年7月3日閲覧)
- 18) 大成建設㈱：トンネル鋼製支保工の建て込み工法「T-支保工クイックセッター」を開発，2021.5.13.，https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210513_8240.html (2025年7月3日閲覧)
- 19) 水谷和彦，能代泰範，宮原宏史：第22回 国土技術開発賞 優秀賞受賞 鋼製支保工建て込みロボット 山岳トンネル工事の安全性・生産性向上技術，https://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/review/awards/kenmane/kenmane20210115_02.pdf (2025年7月3日閲覧)
- 20) ㈱熊谷組，岡三リビック㈱，伊藤忠丸紅住商テクノスチール㈱：山岳トンネル切羽作業の無人化へ前進 鋼製支保工の自動建込技術を国内初適用～ MACCAFERRI 社技術の実証試験を実施～，<https://www.kumagaigumi.co.jp/news/2025/pr-20250702-003883.html> (2025年7月3日閲覧)
- 21) 大成建設㈱：世界初6m 縦ぎロックボルト打設装置を開発 切羽近傍での作業を完全機械化し，省人化と安全性向上を実現，https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2020/200916_4978.html (2025年7月3日閲覧)
- 22) 清水建設㈱：山岳トンネル工事のロックボルト打設を完全機械化～2ブーム打設専用機を導入し，切羽直下での人力作業を排除～，2022.6.24.，<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2022/20220624.html> (2025年7月3日閲覧)
- 23) 飛鳥建設㈱：トンネル切羽高速・高密度計測システム：“TFS-Mapper”，https://www.tobishima.co.jp/press_release/detail/20221007142526.html (2025年7月3日閲覧)
- 24) 東急建設㈱：「切羽遠隔監視システム」の試験導入を開始～山岳トンネル建設工事の死傷災害の防止に期待～，<https://www.tokyu-cnst.co.jp/topics/2804.html> (2025年7月3日閲覧)
- 25) Lunardi, P.: Design and construction of tunnels, Analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- 26) Naotaka Kikkawa, Hidetaka SAOMOTO, Kazuya ITOH, Koki KUMAGAI, Atsushi WATANABE, Masaya MIURA: Evaluation of Rock Spalling Prevention Measures Considering Tunnel Face Extrusion in 3d Elasto-Plastic Finite Element Analysis: An Occupational Safety Perspective, SSRN, https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5222635 (2025年7月3日閲覧)
- 27) 東日本高速道路㈱，中日本高速道路㈱，西日本高速道路㈱：設計要領第三集，トンネル，[保全編] [建設編]，令和5年7月版，第2章 p.8，第4章 p.34，2023.
- 28) 日本道路公団：試験研究所技術資料第358号 トンネル数値解析マニュアル，第3章 p.26，1998.
- 29) 東日本高速道路㈱，中日本高速道路㈱，西日本高速道路㈱：土木工事積算基準 令和2年度版，㈱高速道路総合技術研究所，pp. 19-9，19-12，2020.
- 30) Neuner, M., Schreter, M., Gamnitzer, P., and Hofstetter, G.: On discrepancies between time-dependent nonlinear 3D and 2D finite element simulations of deep tunnel advance: A numerical study on the Brenner Base Tunnel, Computers and Geotechnics, Vol. 119, 103355, 2020.
- 31) Kargar, A. R., Haghgoei, H., and Babanouri, N.: Time-dependent analysis of stress components around lined tunnels with circular configuration, considering tunnel advancing rate effects, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 133, 104422, 2020.
- 32) Graziani, A., Boldini, D., and Ribacchi, R.: Practical Estimate of Deformations and Stress Relief Factors for Deep Tunnels Supported by Shotcrete, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 38, No. 5, p. 345-372, 2005.
- 33) Hoek, E. and Brown, E.T.: The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 11, Issue 3, pp. 445 – 463, 2019.
- 34) Vitali, O. P. M., Celestino, T. B., and Bobet, A.: 3D finite element modelling optimization for deep tunnels with material nonlinearity, Underground Space, Vol. 3, No. 2, p. 125-139, 2018.

【筆者紹介】

吉川 直孝 (きっかわ なおたか)
 (独)労働者健康安全機構
 労働安全衛生総合研究所

