トンネル切羽安定度予測システムを活用した切羽作業の安全性向上への取組み

辰巳　順一[1]・五味　春香[2]・河邉　信之[3]・進士　正人[4]・宮仲　美玖[5]

[1]正会員　安藤ハザマ　建設本部土木技術統括部技術第三部（〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20）
E-mail: tatsumi.junichi@ad-hzm.co.jp

[2]正会員　安藤ハザマ　建設本部土木技術統括部技術第三部（〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20）
E-mail: gomi.haruka@ad-hzm.co.jp

[3]正会員　安藤ハザマ　建設本部土木技術統括部技術第三部（〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20）
E-mail: kawabe.nobuyuki@ad-hzm.co.jp

[4]フェロー会員　山口大学大学院　創成科学研究科（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

[5]元山口大学大学院　創成科学研究科（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）
E-mail: mmiyanaka@yucivil.onmicrosoft.com

山岳トンネル工事では，切羽での作業の最中に肌落ち災害がたびたび発生している．現場では，切羽監視責任者が主となり目視観察により切羽の状態を確認しているが，切羽監視責任者本人の経験に依存する部分が大きいことから，切羽の不安定箇所を見落とし，肌落ち災害につながるおそれがある．そこで筆者らは，発破後に露出する次の切羽の安定度を予測することができる「トンネル切羽安定度予測システム（TFS-learning：Tunnel Face Stability calculation system by machine learning）」を開発し，現在までに４現場で運用してきた．筆者らは，TFS-learning の実現場での運用実績を基にシステム改良を実施し，さらなる切羽作業の安全性向上に取り組んできた．本稿では，その取組み内容の詳細について報告する．

Key Words: *tunnel face stability, drilling data, prediction ahead of tunnel face, face assessment scores*

1. はじめに

山岳トンネルの施工において，切羽面に穿孔した発破孔に爆薬を装填する作業や鋼製支保工を建込む作業については切羽面直下での作業となるため，切羽面からの落石に対して危険が伴う．このような作業環境の中，山岳トンネル工事では，切羽での作業の最中に落石が作業員に激突する肌落ち災害がたびたび発生している．このため，平成 28 年には，山岳トンネル工事の切羽での労働災害の防止を図ることを目的に，厚生労働省により「山岳トンネル工事における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン（以下，肌落ち防止ガイドラインと記す）」が策定され，様々な肌落ち災害防止対策が推奨されている．

肌落ち防止ガイドライン内で示されている事業者が講ずべき対策の一つとして，切羽監視責任者の選任がある．切羽監視責任者は，切羽で作業が行われる間，切羽の状態を常時監視し，切羽が不安定であると判断した場合には直ちに作業を中止させ，作業員を安全な場所へ退避させる者である． しかしながら，切羽監視責任者は目視により切羽を観察して切羽の状態を判断しているため，切羽監視責任者本人の経験に依存する部分が多く，切羽の不安定箇所を見落とし，肌落ち災害につながるおそれがある．

このような背景のもと，筆者らは，発破後に露出する次の切羽の安定度を予測することができる「トンネル切羽安定度予測システム（TFS-learning：Tunnel Face Stability calculation system by machine learning）」を開発し，現在までに当社で施工する山岳トンネル工事の４現場で運用してきた．TFS-learning を実現場で運用していく中で幾つかの課題が顕在化したため，システムの改良を進めながら切羽作業の安全性向上に努めている．

本稿では，筆者らが現在までに行ってきた TFS-learning のシステム改良内容，および当システムを活用した切羽作業の安全性向上への取組み内容について報告する．

2. TFS-learning の概要

(1) システム概要

TFS-learning は，発破孔の穿孔時に得られる穿孔データ（穿孔位置，穿孔方向，穿孔長，穿孔速度，穿孔時の打撃圧等の機械データ）を全ての発破孔にわたって収集，分析し，発破後に露出する次の切羽の安定度を予測するものである．**図-1** に穿孔データを基に切羽の安定度を予測した TFS-learning のシステム画面の一例を示す．切羽安定度の予測結果は，カラーコンター図で表示され，発破後に露出する次の切羽の安定度を網羅的に確認できる [1]．

切羽安定度の予測結果を基に，切羽の不安定箇所に対して，鏡吹付けコンクリート等の肌落ち防止対策工を迅速かつ的確に実施できる．さらに，切羽安定度の予測結果は，切羽作業員に対する不安定箇所の注意喚起等に活用するため，切羽作業員の安全意識も向上する．これらにより，切羽作業の安全性が向上する．

(2) 切羽評価点

山岳トンネルでは，トンネル掘削中に得られる地山情報を得ることを目的として日常的に切羽観察を実施する．施工者は，切羽評価表に従い，切羽の状態，素掘り面の状態，圧縮強度，風化変質等を評価して点数付けを行う（**表-1**）．評価結果は切羽評価点として数値化され，これに基づき地山等級を決定する（**図-2**）．

(3) 切羽安定度の予測手法

上記のとおり，切羽評価点と切羽の安定度は密接な関係があることから，TFS-learning では切羽安定度の指標として切羽評価点を用いる．掘削時に得られる穿孔データを TFS-learning により切羽評価点に変換することで，次の切羽の安定度を評価する．切羽安定度の予測手法は以下のとおりである．

まず始めに，掘削済み区間で得られた穿孔データと切羽評価点を教師データとし，機械学習技法の一つである遺伝的プログラミングを用いて穿孔データから切羽評価点を算出する数理モデルを構築する．トンネルの掘削にあたっては，構築した数理モデルにより，新たに得られた発破孔の穿孔データから切羽評価点を算出し，これを指標に次の切羽の安定度を予測する．なお，機械学習はデータが蓄積される毎に実施されるため，トンネル掘削の進捗とともに予測精度が向上する [2]．

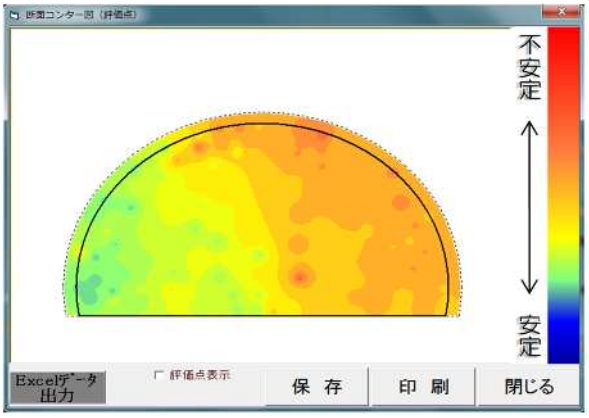

図-1 TFS-learning のシステム画面

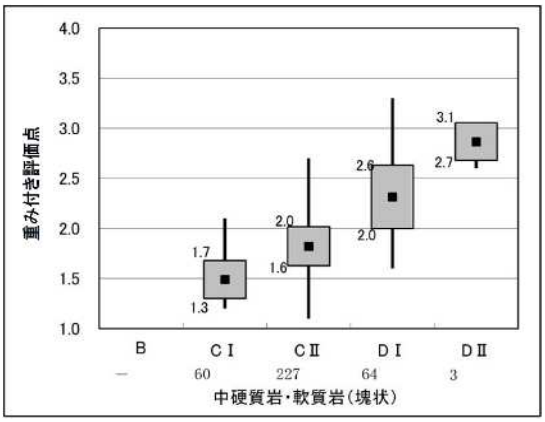

図-2 切羽評価点と地山等級の関係

表-1 切羽評価表の一例

評価区分（掘削地点の地山の状態と挙動）							評価区分		
							左肩	天端	右肩
(A)	切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押し出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩れ、あるいは流出	5. その他			
(B)	素掘面の状態	1. 自立（普請不要）	2. 時間がたつと緩み肌落ちする（後普請）	3. 自立困難掘削後早期に支保する（先普請）	4. 掘削に先行して山を受けておく必要がある	5. その他			
(C)	圧縮強度	1. σc≧100MPa ハンマー打撃はね返る	2. 100MPa＞σc≧20MPa ハンマー打撃で砕ける	3. 20MPa＞σc≧5MPa 軽い打撃で砕ける	4. 5MPa≧σc ハンマー刃先食いこむ	5. その他			
(D)	風化変質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色、強度やや低下	3. 全体的に変色、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結	5. その他			
(E)	割れ目の頻度	1. 間隔d≧1m 割れ目なし	2. 1m＞d≧20cm	3. 20cm＞d≧5cm	4. 5cm≧d 破砕当初より未固結	5. その他			
(F)	割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土を挟む、当初より未固結	5. その他			
(G)	割れ目の形態	1. ランダム方形	2. 柱状	3. 層状、片状、板状	4. 土砂状、細片状、当初より未固結	5. その他			
(H)	湧水	1. なし・滲水程度	2. 滴水程度	3. 集中湧水	4. 全面湧水	5. その他			
(I)	水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊、流出	5. その他			

3. 現場適用時の課題

実現場においては，切羽監視責任者の判断を補完するシステムとして，TFS-learningを切羽の作業フローに組み込み運用を開始した．運用フローを図-3に示す．

しかしながら，現場での運用を進める中で，現場から以下に示す要望が挙げられた．

(1) 切羽前方探査への適用

TFS-learningは，発破後に露出する次の切羽の安定度を精度良く予測できるものの，穿孔検層や長尺鏡ボルト等の長尺穿孔データには対応していなかった．この場合，発破掘削方式の現場での安全対策に限定される．実現場において運用を進める中で，次の切羽の安定度の予測にとどまらず，切羽前方の断層・破砕帯等の地山不良部を事前把握すれば，切羽作業のさらなる安全性向上につながると考えた．

以上から，TFS-learningを切羽前方探査へ適用することが課題として挙げられた．

(2) 予測結果の周知方法の改善

TFS-learningの切羽安定度の周知方法は，主に切羽監視責任者が予測結果をPC画面上で確認し，その都度切羽作業員に伝達する方法であった．この場合，予測結果の伝達不足や伝達漏れが発生するおそれがあった．

以上から，予測結果の周知方法を改善することが課題として挙げられた．

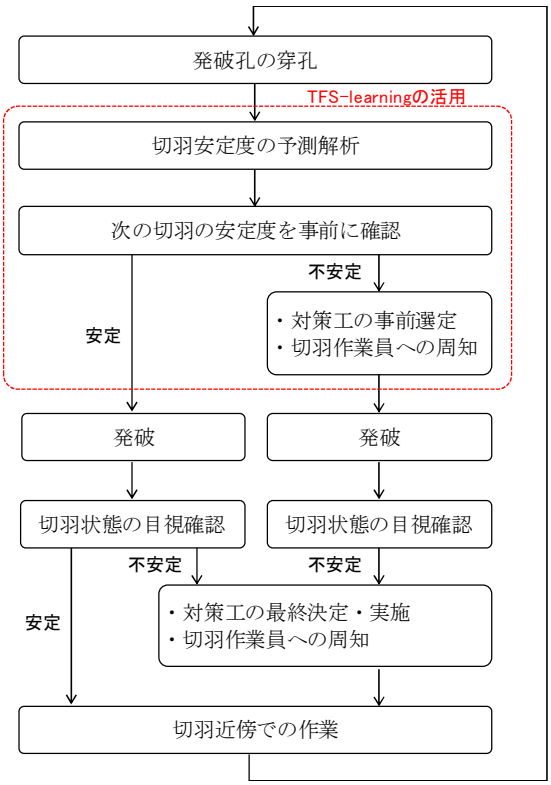

図-3 TFS-learningの運用フロー

4. TFS-learningのシステム改良

(1) 切羽前方探査機能の追加

長尺穿孔データを1掘進長毎に分割できるようにデータ処理方法を改善し，穿孔検層や長尺鏡ボルトなどの長尺穿孔データから切羽評価点を算出できるように改良した．これにより，切羽前方の切羽評価点を精度よく把握できるため，トンネル掘削前に切羽前方の地山等級を判定でき，今後掘削する箇所の支保パターンや補助工法の選定にも活用できる．

a) 従来手法との違い

切羽前方探査手法として一般的な穿孔検層法は，穿孔データから穿孔エネルギー（単位体積あたりの岩盤を破砕するのに要した仕事量）を算出し，穿孔エネルギーの変化に着目して切羽前方の地山を評価する手法である．しかしながら，穿孔エネルギーは，地山の硬軟の目安にはなるものの，地山を評価する一般的な指標となるまでには至っていない．一方，TFS-learningの場合，穿孔データから切羽評価点を算出できるため，前方地山の絶対的な評価が可能となり，より信頼度の高い前方探査が可能となる．

長尺穿孔データの解析機能を用いた切羽評価点の判定例を図-4に示す．

(2) カラーコンター図の投影機能の追加

予測結果として出力されるカラーコンター図をプロジェクターにより切羽面へ直接投影できるようにシステム改良を計画した．これにより，全ての切羽作業員が切羽の不安定箇所をほぼリアルタイムで把握できるため，さらなる切羽作業の安全性の向上が期待できる．

a) プロジェクターの仕様検討

切羽面へ鮮明に投影するためには，プロジェクターの明るさが非常に重要となる．通常，切羽近傍は120Lux以上の照度が確保されているため，低輝度のプロジェクターで投影した場合，投影するカラーコンター

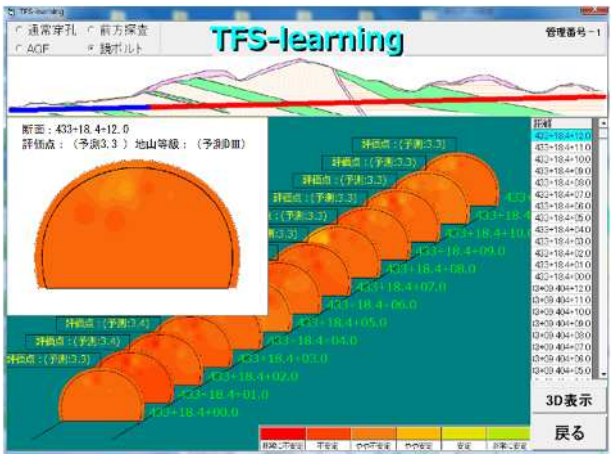

図-4 長尺穿孔データを用いた前方探査

図よりも切羽の照度が勝り，カラーコンター図を識別することが困難となる．したがって，切羽照明を点けた状態で切羽面にカラーコンター図を鮮明に投影するためには，高輝度のプロジェクターを選定する必要がある．

以上から，実現場においてプロジェクターによるカラーコンター図の投影実験を実施し，本機能に必要なプロジェクターの明るさを確認することとした．

b) プロジェクターによる投影実験

投影実験は，既に TFS-learning を適用している実現場において実施した．実験には**表-2**に示す光量10,000 lmと15,000 lmの２種類のプロジェクターを使用し，切羽面に対してカラーコンター図を投影した．

プロジェクターは切羽面から約 10 m 後方に設置し，切羽照明が点灯している状態でカラーコンター図を投影し，投影されたカラーコンター図の鮮明さを目視により確認した．なお，実験現場は，切羽照明器具として1,000 W の LED 投光器を２灯設置しており，切羽近傍の照度は 164 Lux であった．

c) プロジェクターによる投影実験結果

実験の結果，光量10,000 lmのプロジェクターで投影したカラーコンター図は，目視での識別が不可能であった．これに対して，光量15,000 lmのプロジェクターで投影したカラーコンター図は非常に鮮明であり，目視での識別が容易であった（**写真-1**）．

以上から，TFS-learningに追加する投影機能に使用するプロジェクターには，光量15,000 lm程度のプロジェクターを選定し，改良を進めることとした．

表-2 プロジェクター一覧

	プロジェクター①	プロジェクター②
メーカー	エプソン	Panasonic
型式	EB-L1755U	PT-DX100K
光量	15,000 lm	10,000 lm

写真-1 長尺穿孔データを用いた前方探査

5. システム改良による効果

(1) 切羽前方探査機能の効果

新潟県に位置する延長 1,128 m のＡトンネルおいて，切羽前方探査機能を追加した TFS-learning を適用した．Ａトンネルは機械掘削方式の山岳トンネルで，延長の約７割に掘削補助工法として長尺鏡ボルト（L=12.5 m）が計画されている．本トンネルでは，この長尺鏡ボルトの穿孔データを対象として，トンネル切羽前方の切羽評価点の予測に TFS-learning を活用した．

TFS-learningが予測した切羽評価点と，現場職員が観察した切羽評価点の相関図を**図-5** に示す．予測切羽評価点と観察切羽評価点の相関係数は 0.81，決定係数は 0.65 であり，非常に良い相関があることが分かる．一方，切羽前方探査の一般的な評価指標である穿孔エネルギーと観察切羽評価点の相関図を**図-6** に示す．穿孔エネルギーと観察切羽評価点の相関係数は 0.57，決定係数は 0.33 であり，ある程度の相関は見られるものの，TFS-learningの予測結果よりも相関が劣っている．

以上から，従来手法と比較しても，TFS-learningは精度良く前方地山の性状を予測することができるといえる．

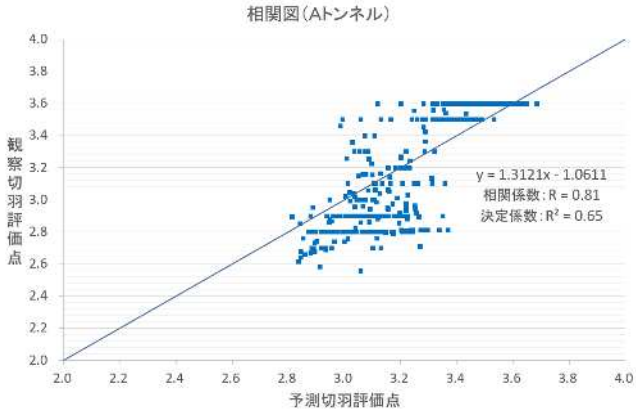

図-5 観察切羽評価点と予測切羽評価点の相関図

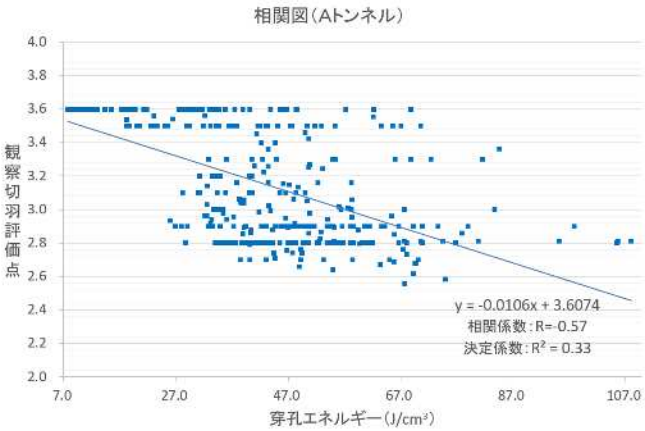

図-6 観察切羽評価点と穿孔エネルギーの相関図

(2) カラーコンター図の投影機能の効果

切羽安定度の投影機能については，現在，ドリルジャンボにプロジェクターを搭載するための架台，および排熱機構を備えた防塵ケースを作成しており，完成後，新規の現場へ適用予定である．投影機能の運用方法は，発破孔の穿孔完了後，発破前に切羽面へカラーコンター図を投影することを想定しているため，発破前に次の切羽の不安定箇所を全作業員に周知することができる．

6. まとめ

TFS-learningへ前方探査機能を追加したことにより，切羽前方の切羽評価点を把握することができるため，今後掘削する箇所の支保パターンや補助工法の選定にも活用できる．また，発破孔の穿孔データから次の切羽の安定度を詳細に予測することができるため，切羽の不安定箇所に対して迅速かつ的確な対策工を実施できる．さらに，カラーコンター図の投影機能により，次の切羽の安定度を全ての切羽作業員にほぼリアルタイムで周知することができるため，さらなる安全性向上が期待できる．

今後は，TFS-learningを多くの山岳トンネル現場へ適用し，切羽作業の安全性向上を図っていく．

参考文献

1) 五味春香，辰巳順一，河邉信之，宮仲美玖，森本真吾，進士正人：発破孔の穿孔データを用いたトンネル切羽安定度予測システムの開発，土木学会，トンネル工学報告集，第27巻，Ⅰ-20，2017.
2) 辰巳順一，河邉信之，土井美里，佐々木亨，森本真吾，進士正人：遺伝的プログラミングを用いた穿孔データに基づく地山評価手法の開発，土木学会，トンネル工学報告集，第26巻，Ⅰ-35，2016.

(2019. 8. 9 受付)

EFFORTS TO IMPROVE THE SAFETY OF WORKING NEAR THE FACE BY TUNNEL FACE STABILITY CALCULATION SYSTEM

Junichi TATSUMI, Haruka GOMI, Nobuyuki KAWABE, Masato SINJI and Miku MIYANAKA

In mountain tunnel construction, industrial accidents by fall of loosen-rock often occur during work near the face. So,The authors have developed the tunnel face stability calculation system by machine learning that can predict the stability of the next face exposed after blasting. We have improved the system based on the results of application in construction sites of the mountain tunnel, and have been working to further improve the safety of working near the face. In this paper, we report the details of the efforts.