

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

五味 春香¹・辰巳 順一²・河邊 信之³・宮仲 美玖⁴・森本 真吾⁵・進士 正人⁶

¹正会員 安藤ハザマ 土木事業本部 技術第三部 (〒107-0052 東京都港区赤坂6-1-20)
E-mail: gomi.haruka@ad-hzm.co.jp

²正会員 安藤ハザマ 東北支店 土木部 (〒980-8640 宮城県仙台市青葉区片平1-2-32)
E-mail: tatsumi.junichi@ad-hzm.co.jp

³正会員 安藤ハザマ 土木事業本部 技術第三部 (〒107-0052 東京都港区赤坂6-1-20)
E-mail: kawabe.nobuyuki@ad-hzm.co.jp

⁴学生会員 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: mmiyanaka@yucivil.onmicrosoft.com

⁵正会員 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: charlie@yamaguchi-u.ac.jp

⁶正会員 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

トンネル掘削後の切羽の安定度は、現場技術者が目視で切羽を観察することにより実施される。しかしながら、目視観察による確認では、現場技術者の経験に依存する部分が多いことから、切羽の不安定箇所を見落とし、地山崩落災害につながるおそれがある。そこで、筆者らは、発破方式で施工される切羽面の穿孔データを用いて、発破後に露出する次の切羽の安定度を予測する切羽安定度予測システムを開発した。本システムは、全ての発破孔の穿孔データを用いることにより、切羽の安定度を面的に予測することを可能とする。また、切羽安定度は切羽評価点を指標にして予測するため、定量的に次の切羽面の切羽評価点分布を評価できる。

本論文では、この切羽安定度予測システムの予測手法や現場への適用結果について述べる。

Key Words : tunnel face stability, drilling data, genetic programming, blasting hole, face assessment score

1. はじめに

山岳トンネルの施工において、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は、切羽面からの落石や崩落などに対する危険が伴う。通常、切羽の安定度は、現場技術者が目視で観察することにより確認している。しかしながら、目視観察による確認では、現場技術者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、崩落災害につながるおそれがある。そのため、発破直後の切羽の安定度を確実に把握し、安全対策を講じることは、切羽作業の安全性を確保する上で非常に重要である。

従来、切羽前方の地質状況を把握する場合、油圧削岩機を用いた削孔探査法を適用することは、有効

な手法の一つとされてきた¹⁾。削孔探査法とは、切羽から油圧削岩機を用いて長尺削孔を行い、油圧削岩機から得られる削孔データから、地山の地質性状を予測する方法である。しかしながら、削孔探査法は、削孔エネルギー等をもとに前方地山の硬軟を判断する目安にはなるが、定量的に地山の評価をするに至っていない。また、通常、切羽面で1～3箇所の調査となるため、詳細に切羽の安定度を評価することができない。以上のことから、切羽の安定度を確実に把握するためには、切羽面を定量的に評価する指標を用いて、切羽面を面的に評価する手法の確立が必要である。

以上を踏まえ、筆者らは発破孔の穿孔時に採取する穿孔データを用いて、切羽評価点を指標に発破後に露出する切羽の安定度を予測するシステム (TFS-

learning : Tunnel Face Stability calculate system by machine learning)を開発し、実際のトンネル現場に適用することで、本システムの適用成果を確認した。

2. 切羽安定度予測システム (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に収集した発破孔の穿孔データの一例を、図-2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、図-2に示すようにトンネル縦断方向に切羽状況を連続的に表示できる。また、各切羽における切羽安定度の予測結果はカラーコンター図で表示され、切羽の不安定箇所を可視化できる。

(2) 収集する穿孔データ

TFS-learningを適用するにあたって、油圧削岩機

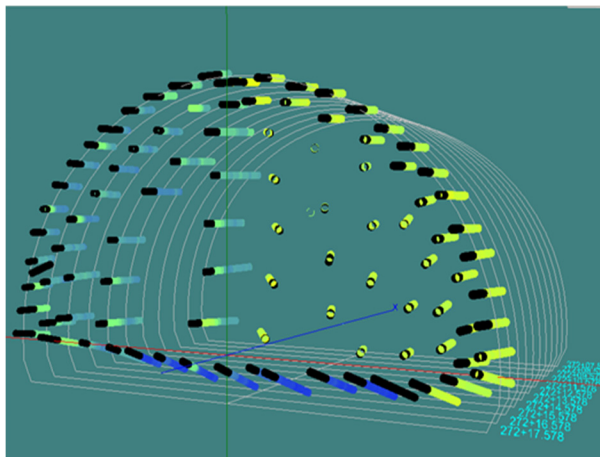


図-1 発破孔の穿孔データ

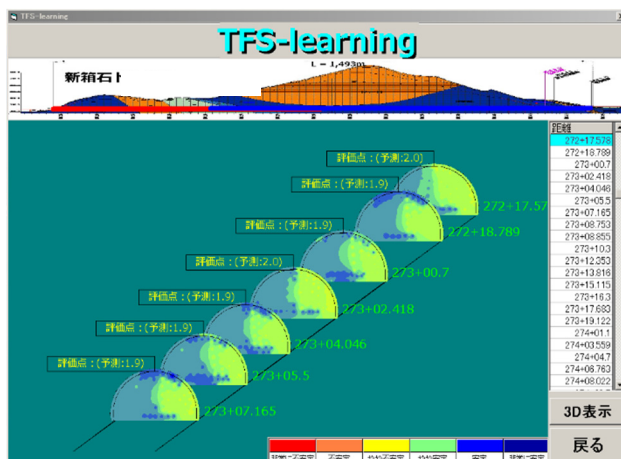


図-2 切羽安定度予測システムの画面

として(株)古河ロックドリル社製ホイール式ジャンボ (JTH3200R-IIIPLUS 3ブーム2バスケット)を用いた。穿孔データは、発破孔穿孔時に油圧削岩機に搭載した穿孔データ記録装置を用いて自動的に収集する。油圧削岩機から得られる穿孔データは、穿孔位置、穿孔角度のほか、表-1に示した穿孔時の機械データ（穿孔速度、打撃圧、回転圧、フィード圧）が挙げられる。機械データのうち、一般的に穿孔速度については速度が早いほど、軟質な地質であると判断され、回転圧が高くなると脆弱層や粘土層の出現などの地質の変化があると判断される²⁾。

3. 切羽安定度の評価指標

今回、TFS-learningにおいては、切羽の安定度を定量的に示すための指標として、切羽評価点を採用した。以下に切羽評価点の概要と設定した切羽安定度の考え方について述べる。

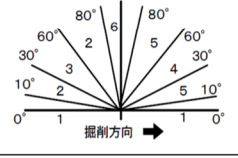
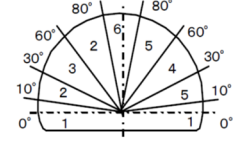
(1) 切羽評価点の概要

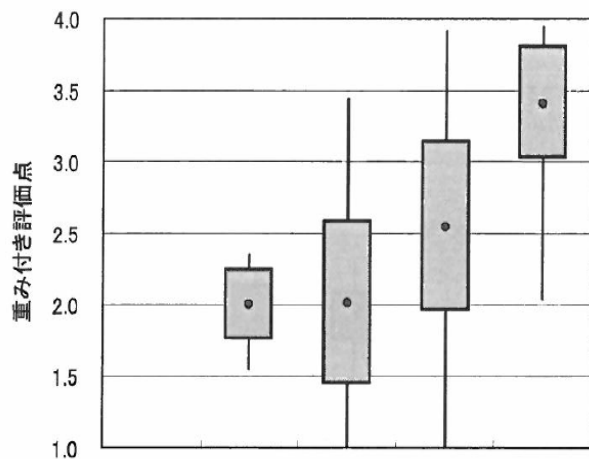
切羽観察は、トンネル掘削中に得られる地山情報を得ることを目的として実施するもので、主として切羽の地質の状態と地質の変化状況を目視調査するものである³⁾。また、切羽評価点とは、切羽観察結果を定量的に評価する方法で、切羽観察の各項目を点数により評価するものである。表-2に国土交通省東北地方整備局管内の現場における切羽評価表（中硬質岩層状）の一例を示す。切羽観察の項目には、切羽の状態、素掘面の状態、圧縮強度、風化変質、割れ目の頻度、割れ目の状態、割れ目の形態、湧水、水による劣化、割れ目の方向性⁴⁾の評価区分がある。この切羽観察の評価手法には、定量的に切羽を評価できる加重平均法が用いられている。加重平均法とは、切羽観察の各項目に重み付けを行い、これにより切羽の評価を実施しようとするものである⁵⁾。図-3に中硬質岩（層状）の場合の地山等級と重み付き評価点の関係を示す⁶⁾。重み付き評価点は各切羽毎に1.0～4.0の範囲で求められ、切羽の状態が安定しているほど評価点は低く示される。現場においては、切羽の観察結果を重み付き評価点で評価した結果と坑内変位発生状況等を総合的に勘案して地質状況等に見合った支保パターンを選定する。

表-1 穿孔時の機械データ

穿孔データ	単位	概要
穿孔速度	cm/s	単位時間当たりのフィード前進長
打撃圧	MPa	打撃の作動圧力
回転圧	MPa	ドリフタ油圧モータの作動圧力
フィード圧	MPa	通常油圧シリンダの作動圧力

表-2 切羽評価表の一例⁴⁾

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. $\sigma_c \geq 100\text{MPa}$ ハンマー打撃はね返る	2. $100\text{MPa} > \sigma_c \geq 20\text{MPa}$ ハンマー打撃で砕ける	3. $20\text{MPa} > \sigma_c \geq 5\text{MPa}$ 軽い打撃で砕ける	4. $5\text{MPa} \geq \sigma_c$ 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、破碎、当初より未固結	5. その他		
(E)	割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1\text{m}$ 割れ目なし	2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	4. $5\text{cm} \geq d$ 破碎当初より未固結	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		
純割面の方向性（卓越する不連）	縦断方向（切羽をみて）	1. 水平（ $10 > \theta > 0$ ） 2. さし目（ $30 > \theta > 10$, $80 > \theta \geq 60$ ） 3. さし目（ $60 > \theta \geq 30$ ） 4. 流れ目（ $60 > \theta \geq 30$ ） 5. 流れ目（ $30 > \theta \geq 10$, $80 > \theta > 60$ ） 6. 垂直 6（ $\theta \geq 80$ ） （最大傾斜角をとる）						
	横断方向（切羽をみて）	1. 水平（ $10 > \theta > 0$ ） 2. 右から左へ（ $30 > \theta \geq 10$, $80 > \theta \geq 60$ ） 3. 右から左へ（ $0 > \theta \geq 30$ ） 4. 左から右へ（ $60 > \theta \geq 30$ ） 5. 左から右へ（ $30 > \theta \geq 10$, $80 > \theta \geq 60$ ） 6.（ $\theta \geq 80$ ） （切羽面の見かけの傾斜角をとる）						



地山等級	B	C I	C II	D I	D II
標本数	—	25	591	530	214
標本割合(%)	—	1.8	43.5	39.0	15.7
最大値	—	2.34	3.44	3.91	3.94
平均値+偏差	—	2.24	2.58	3.14	3.81
平均値	—	2.00	2.01	2.55	3.41
平均値-偏差	—	1.76	1.44	1.96	3.02
最小値	—	1.55	1.00	1.00	2.04
標準偏差	—	0.24	0.57	0.59	0.39

図-3 重み付き評価点の分布⁶⁾

(2) 設定した切羽安定度の考え方

山岳トンネルにおいては、掘削から支保工の構築完了まで、切羽が安定しているということが前提である。したがって、切羽が安定しているとは、切羽の自立性が高い地山のことを指し、不安定とは地質状況が脆弱であり、肌落ちや崩落などが懸念される地山であるといえる。

本システムでは、前述した切羽評価点が切羽の安定度と密接な関係があることから、切羽評価点を指標に切羽安定度を予測した。また、切羽の安定度を示す切羽評価点は、前述した表-2、図-3に基づいた場合、1.0～4.0までの範囲で0.5点刻みに6段階で区分した。表-3に切羽評価点と切羽安定度の区分けを示す。

4. 切羽安定度の予測方法

切羽安定度の予測には、統計手法のひとつである回帰分析を用いた。以下に、回帰分析の方法と回帰分析を用いた切羽安定度の予測方法を示す。

(1) 回帰分析手法の選定

筆者らは、既往の研究⁷⁾で、削孔検層データを分析し、削孔データから切羽評価点を算出する地山評価手法を考案した。その際の分析手法は、回帰分析

の手法の一つである遺伝的プログラミング（GP：Genetic Programming，以下GPと呼ぶ）を用いた。今回、発破孔の穿孔データ分析にあたっては、GPによる回帰分析を採用することとした。GPとは、遺伝的アルゴリズム（GA：Genetic Algorithm）を改良したアルゴリズムで、生物が生存していく中で、交叉、突然変異、淘汰しながら環境に適合していくように進化するという説に基づき、適応度の最も高い解を導き出すという機械学習法の一つである⁸⁾。図-4にGPの流れを示す。

(2) 最適な数理モデルの決定

図-4の操作を繰り返し、最も適応度の高い数理モデルを採用する。算出された回帰式は、平方根平均二乗誤差RMSEおよび決定係数 R^2 を指標にして、精度評価を行う。ここで、観察切羽評価点とは、現場技術者が切羽観察を基に採点した切羽評価点であり、予測切羽評価点とは、発破後に露出する切羽の切羽評価点のことである。以下に、RMSEと R^2 について述べる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad \text{式 (1)}$$

N ：全予測対象数 y_i ：観察切羽評価点
 $\bar{y}_i$ ：予測切羽評価点

RMSEは、予測切羽評価点がどれだけ観察切羽評価点と乖離しているかを表し、式(1)により求める。この値が0に近いほど、精度が高いといえる。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_Y)^2} \quad \text{式 (2)}$$

(x_i, y_i) ：教師データ $f(x)$ ：数理モデル
 μ_Y ： y_i の平均値

表-3 切羽評価点と切羽安定度の区分け

色						
安定度	非常に不安定	不安定	やや不安定	やや安定	安定	非常に安定
評価点	3.5 ↙ 4.0	3.0 ↙ 3.5	2.5 ↙ 3.0	2.0 ↙ 2.5	1.5 ↙ 2.0	1.0 ↙ 1.5

表-4 教師データの一例⁷⁾

入力データ				出力データ
X_1	X_2	X_3	X_4	Y
穿孔速度 (cm/sec)	回転圧 (MPa)	フィード圧 (MPa)	打撃圧 (MPa)	切羽評価点
0.9	6.2	9.0	13.9	2.0
0.7	5.6	9.0	14.0	2.4

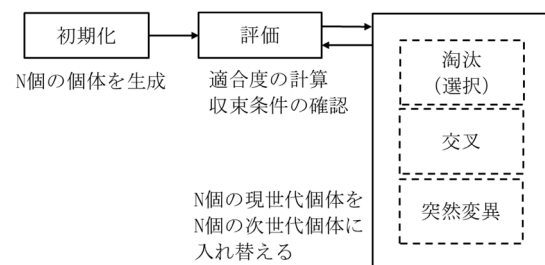
R^2 は、数理モデルによって実データをどれくらい説明できているかを表し、式(2)により求まる。この値が1に近いほど、精度が高いといえる。

(3) 教師データについて

GPによる機械学習を行うにあたり、発破孔の穿孔データとそれぞれの切羽の切羽評価点を教師データとして用いる。教師データのうち、穿孔データを入力データ、切羽評価点を出力データとして設定する。教師データの一例を表-4に示す。

(4) 切羽安定度の算出方法

切羽評価点の算出方法は、まず、掘削完了区間の穿孔データと切羽評価点を教師データとして、GPを用いて、数理モデルを構築する。続いて、数理モデルを用いて、次の切羽（1～2m先の切羽）を掘削するための発破孔の穿孔データを当てはめ、発破後に露出する切羽の切羽評価点を算出し、切羽の安定



淘汰（選択）	個体を残す処理
交叉	2つの個体から2つの子供を生成する処理
突然変異	1つの個体について遺伝子を変化させる処理

図-4 GPの流れ⁸⁾

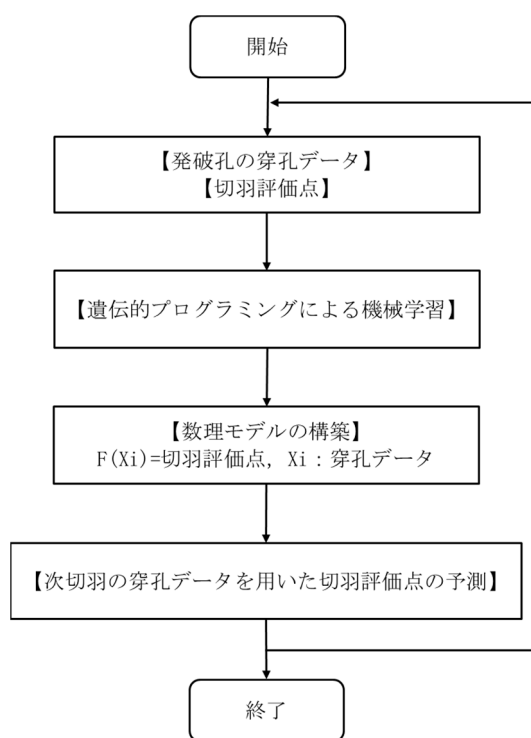


図-5 切羽評価点算出までのフロー

度を予測する。図-5に切羽評価点算出までのフロー図を示す。

5. 切羽安定度予測システムの適用結果

(1) 適用現場の概要

本システムを適用したAトンネルは、東北地方に位置する延長1,493mの山岳トンネルである。

本トンネルの主な地質は、中生代の付加体堆積物で、岩種は、粘板岩や砂岩、チャートである。現場で用いていた切羽観察記録は、前述した表-2、図-3に基づき実施しており、切羽評価表の岩種区分は中硬質岩（層状）を用いている。

(2) 適用結果

Aトンネルの穿孔データと切羽評価点を用いて算出した数理モデルの一例を式(3)に示す。

$$F(xi) = 0.078A + 0.015B - 0.203C + 0.124e^{0.130C} \times e^{0.151B} + 0.814 \quad \text{式(3)}$$

F(xi)：切羽評価点予測値

A：穿孔速度 (cm/sec)

B：回転圧 (MPa)

C：フィード圧 (MPa)

図-6に式(3)を用いて、切羽安定度の予測を行った結果と実際の切羽スケッチを示す。坑口からの距離が1,025m付近において、トンネル断面の右側肩部に、切羽評価点が2.5～3.0点のやや不安定な地山が出現すると予測された。発破後に切羽を確認したところ、本システムで切羽安定度がやや不安定であると予測した箇所には、滴水が見られ、粘板岩を優勢

とした軟弱化した地山が出現した。また、右側肩部よりも地山が安定していると予測された切羽の左側は、滴水は見られず、地山のゆるみは生じていなかった。

図-7に観察切羽評価点と予測切羽評価点の相関図を示す。横軸はAトンネルにて現場技術者が採点した観察切羽評価点、縦軸は式(3)で予測した予測切羽評価点とした。図-7のグラフは、予測切羽評価点と観察切羽評価点の一致の度合いを示し、赤色の直線グラフに近ければ近いほど、予測切羽評価点と観察切羽評価点が一致していることを表す。また、式(3)を用いた場合の相関係数は0.77であり、一般的に相関係数が0.7以上であれば相関関係があると考えられている⁹⁾。相関図と相関係数の結果から分かるように、予測切羽評価点と観察切羽評価点は、相関関係があると判断できる。

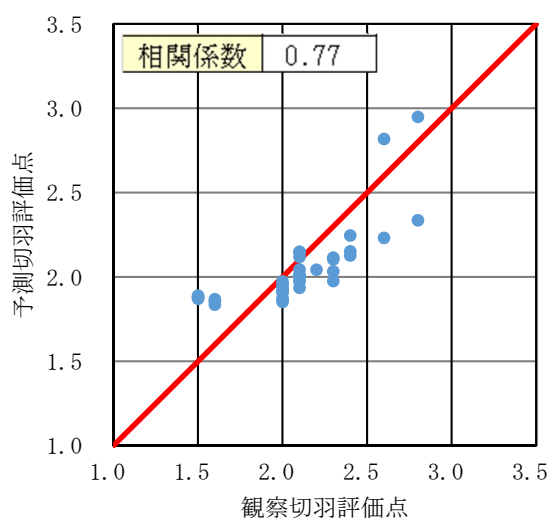


図-7 予測切羽評価点と観察切羽評価点の相関図

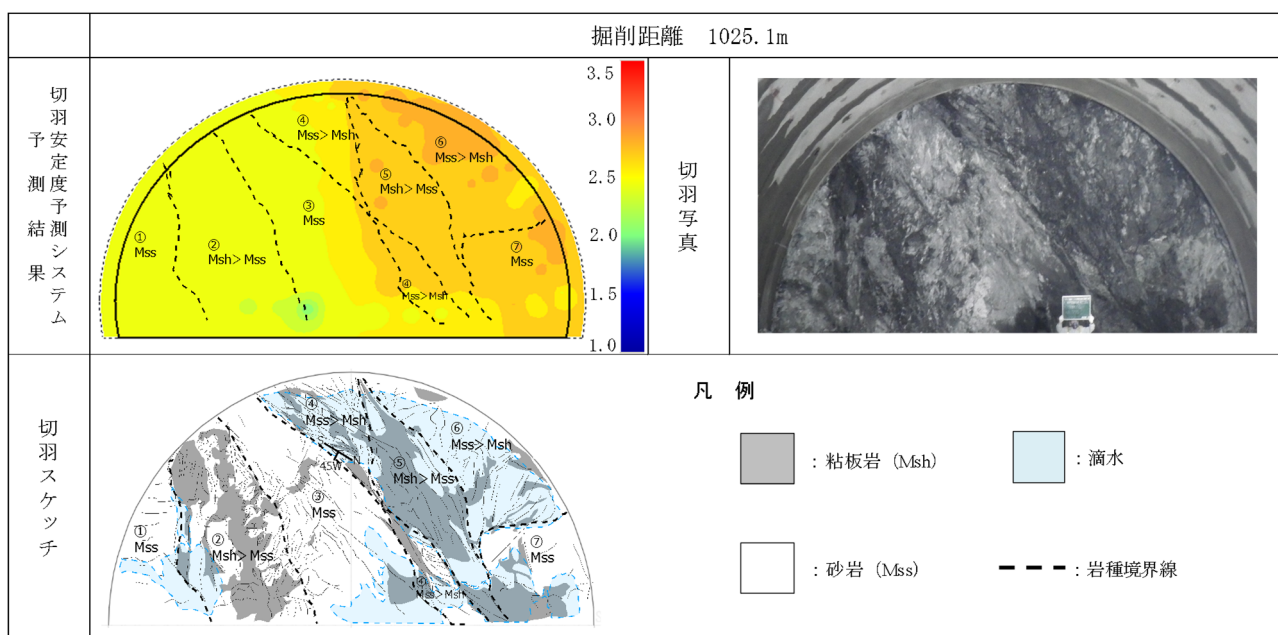


図-6 TFS-learning 予測結果と実際の切羽スケッチ

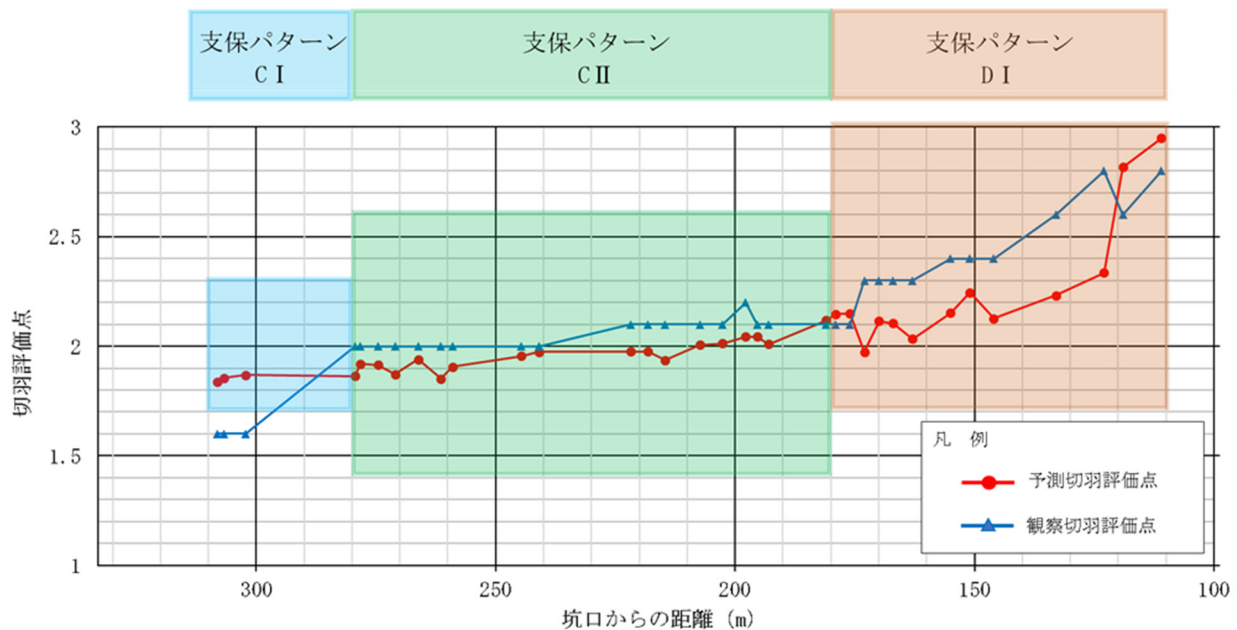


図-8 予測切羽評価点と観察切羽評価点の比較

次に、図-8 に予測切羽評価点と観察切羽評価点の比較を示す。横軸を坑口からの距離、縦軸を切羽評価点とした。2 種類の折れ線グラフは、赤線が予測切羽評価点、青線が観察切羽評価点である。図-8 に示す坑口からの距離において、A トンネルにて実際に採用された支保パターンは、D I、C II、C I であり、それぞれの支保パターンを茶色、緑、青のハッチングで示している。ハッチングをしている切羽評価点の領域は、図-3 の重み付き評価点の分布を示している。

図-8 に示す 2 本の折れ線グラフから、予測切羽評価点は、観察切羽評価点を追従していることがわかる。これは、A トンネルの現場技術者が観察した評価点に近い予測切羽評価点を算出できることを表しており、現場状況に対応した切羽安定度の予測が可能であるといえる。また、式(3)を用いて、切羽評価点の予測を行った場合、支保パターンの的中率は全体として一致していることを確認した。ここで、支保パターンの的中率とは、支保パターン選定の目安となる切羽評価点の幅に対して、全予測値がこの幅の中に含まれている割合のことである。

以上の結果から、本システムは、実際の切羽状況に沿った切羽安定度を予測することができ、地山の硬軟に応じて、次切羽の切羽安定度の傾向を把握することが可能である。

6. まとめ

本研究では、発破孔の穿孔時に得られる穿孔データから、切羽評価点を指標として、次の切羽つまり発破後に露出する切羽面の安定度を予測するシステムを構築した。本システムを用いることにより、従来の手法と比較して、定量的な切羽面の地山評価が

可能となり、実際のトンネル現場で適用した結果、地山の安定度の傾向を捉えることが可能であることを確認した。

今後の開発においては、教師データの選択方法や切羽観察手法を工夫することで、切羽評価点が地山の硬軟に的確に追従できる数理モデルを構築し、更なる精度向上を図っていくつもりである。

現段階では、A トンネルの適用のみであるが、今後、多数の山岳トンネル現場で適用する予定である。現場の適用実績を増やすことで、様々な岩種・岩質の穿孔データや切羽評価点のデータベースを構築することができると考えている。

謝辞：TFS-learningを開発するにあたって、古河ロックドリル株式会社、マック株式会社との共同開発により行った。古河ロックドリル長谷部健司氏、マック株式会社宮原宏史氏に、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説、pp.30-31, 2016.
- 2) 杉内仁志、石垣和明：山岳トンネル切羽前方穿孔探査システム (DRISS) の適用、土木学会、第 60 回年次学術講演会、2005.9
- 3) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針、p.21, 2009.
- 4) 国土交通省近畿地方整備局：トンネル地山等級判定マニュアル (試行案) (平成 18 年 9 月試行案の改訂版)、p.5, 2016.6
- 5) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針、pp.94-95, 2009.
- 6) 土木研究所：山岳トンネルにおける施工時観察・計測データの評価手法に関する研究報告書、p.11, 2008.3
- 7) 辰巳順一、河邊信之、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-35，2016.11

- 8) 多田智史，石井一夫：あたらしい人工知能の教科書プロダクト／サービス開発に必要な基礎知識，翔泳社，pp.114-116，2016.

- 9) 多田智史，石井一夫：あたらしい人工知能の教科書プロダクト／サービス開発に必要な基礎知識，翔泳社，p.95，2016.

(2017. 8. 11 受付)

THE DEVELOPMENT OF TUNNEL FACE STABILITY CALCULATE SYSTEM BY MACHINE LEARNING BASED ON DRILLING DATA OF BLASTING HOLE

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

The stability of tunnel face after the excavation by blasting is checked by visual observation of the civil engineers. But, there is some risk of tunnel collapse disaster by visual observation of the civil engineers because it depends on their experience and they tend to overlook unstable areas of the face. The authors have developed a system which can calculate tunnel face stability after the excavation by using the drilling data of blasting holes. It allowed comprehensive predictions on the stability of tunnel face with the drilling data of all blasting holes. And it can evaluate a rock mass quantitatively by using the face assessment scores as an index. This paper describes method of the system and the result of adopting tunnels under construction.