

サポートベクターマシンを用いた 切羽観察記録に基づく 切羽補助工法選定システム

平 拓洋¹・丸山 健太²・中田 主税³・進士 正人⁴

¹学生会員 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

E-mail:s027vf@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 東海旅客鉄道株式会社多治見保線区多治見支区 (〒507-0036 岐阜県多治見田代町二丁目21-1)

E-mail:fzs1000fazer1229@gmail.com

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail:c.nakata.aa@e-nexco.co.jp

⁴正会員 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

E-mail:shinji@yamaguchi-u.ac.jp

山岳トンネルの施工では、施工時にトンネル切羽の安定性の向上を目指し、切羽補助工法の必要性の評価と採用が行われている。しかし、切羽補助工法の選定には明確な基準は乏しく、技術者の経験的判断にゆだねられている。この状況を支援するため、既往研究で切羽観察記録から補助工法の採用確率を提示するシステムが提案されたが、その精度には若干の問題点が指摘されていた。本研究では切羽観察記録から補助工法を選定するシステムの流れはそのままに、より汎用性が高い補助工法選定システムの開発を目的とする。

Key Words :Support vector machine, Auxiliary tunnel method, Tunnel face observation sheets

1. はじめに

山岳トンネルの施工では、切羽の安定性向上を目指し、切羽状況に合わせて切羽補助工法（以下、“補助工法”と略称する）の選定が行われている。しかし、実際の補助工法の選定には明確な基準が乏しく、技術者の経験的な判断にゆだねられている¹⁾。そのため経験の浅い技術者が補助工法採用の判断を行う際に困難が予想される。この状況を支援するため、図-1に示すように、長野らにより切羽観察記録からカテゴリースコア、サンプルスコア、補助工法の採用確率算出式が提案された¹⁾。しかし、その予測精度に関して、若干の問題点が指摘されていた。

そこで、丸山らは精度向上を目的としてSupport Vector Machine（以下、“SVM”と略称する）を適用し、補助工法が必要かどうかを識別率として表現することで、SVM適用の有用性の検討を行った²⁾。本研究では、SVMを適用した補助工法採用システムの有用性を、補助工法採用確率（以下、“採用確率”と略称する）を用いて再度検討、現場データを適用し、より汎用性の高い補助工法選定システムの開発を目的とする。

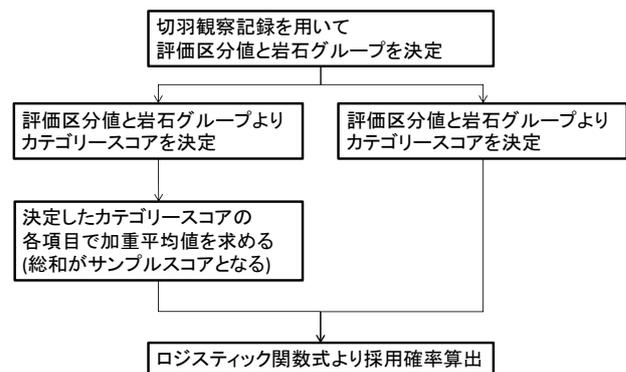


図-1 長野らによる採用確率算出フロー図¹⁾

2. 補助工法

補助工法とは、通常の地山区分における支保に追加して、トンネル施工時に何らかの対策を講じなければ切羽の安定性が保てず、安全に掘削できない場合などに採用される補助的または特殊な地山補強工法の総称である。

本研究で対象とする補助工法は、切羽面の安定対策として鏡吹付けコンクリート（以下、“鏡吹付け”と略称

する)と、鏡ボルトを対象とし、天端部の安定対策としてフォアポーリング（以下，“FP”と略称する）を対象補助工法とする。

鏡吹付けは、掘削後の切羽面に平均厚さ3～10cm程度の吹付けコンクリートを施工する工法で、広く適用されているが、施工会社の安全思想に影響を受けるといわれている²⁾。鏡ボルトは、鏡面での崩落が著しい場合に使用する。また、小土被りのトンネルなど崩落を生じた場合に地表陥没に発展するなどリスクが大きい場合にも予防策として使用される³⁾。FPは打設長6m以下の先受け工の総称であり、先受け工の中では最も軽い工法で、通常現場にある資機材である程度対応できる。長さ3mの補強材を一掘進ごとに600mm程度の周方向間隔で施工するパターンが標準化しており、一掘進長分の天端の安定を図る目的で用いられる³⁾。本報告では、天端部の安定対策であるFPについての検討を行う。

3. 補助工法選定システム

(1) 補助工法選定システム概要

本システムは図-2に示すように、予めSVMにより学習モデルを作成する。作成した学習モデルに補助工法の必要性を判定したい切羽の切羽観察記録の情報を入力することで、補助工法の必要性を出力するシステムである。

(2) Support Vector Machine

SVMとは1960年代にVapnikらにより提案された2クラスのパターン認識手法であり、図-3に示すように訓練データのちょうど中央を通る（マージン最大化）ように識別平面を構築する。識別平面を作成する過程を学習といい、マージン最大化により学習に用いていない未知データに対しても高い識別性能を有しているとされる。

4. 使用データ概要

本研究では表-1に示すように、切羽観察記録の天端部および左右両肩部の3ヵ所の圧縮強度、風化変質、割目間隔、割目状態、湧水量と劣化の5つの観察項目の評価点もしくは、評価点の平均分散をSVMへの入力項目の基本とする。この他に、切羽評価点の合計、土被り、支保パターン、一つ前の切羽での補助工法の有無などの情報を組み合わせてSVMへの入力項目として使用する

(1) 学習用データの切羽観察記録

1997年から2002年の間に施工された152本の道路トンネルの切羽観察記録27,388データを学習用データとした。

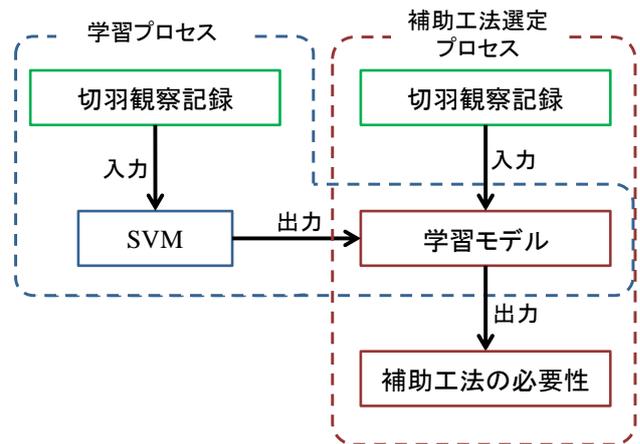


図-2 SVMを適用した補助工法選定システム概略図

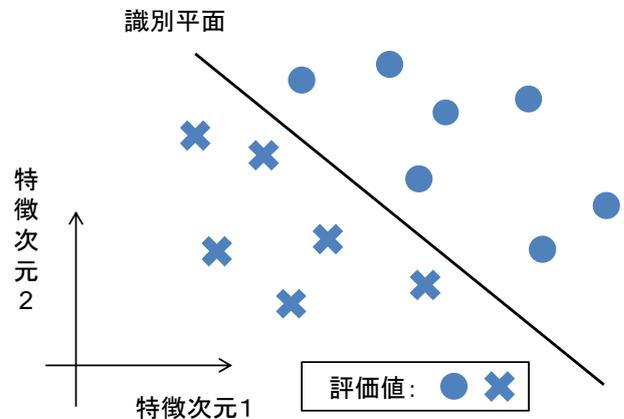


図-3 SVM概略図

表-1 SVMへの入力項目

観察項目		内容	観察項目以外の記載
評価点 平均分散	圧縮強度	岩石の硬さ	土被り
	風化変質	風化や変質の程度	支保パターン
	割目間隔	割目の間隔、RQD	評価点合計
	割目状態	割目の開口度、狭在物の有無	一つ前の切羽での補助工法の有無
	湧水量・劣化	湧水の量・状態、水による劣化	

(2) テストデータの切羽観察記録

SVM適用の有用性の検討のために、硬質・塊状岩な地山に施工されたAトンネル、中硬質軟質・塊状岩な地山に施工されたBトンネルと、中硬質軟質・層状岩な地山に施工されたCトンネルの切羽観察記録をテストデータとした。なお、Aトンネル、Bトンネル、Cトンネルは学習用データに使用したトンネルとは全く異なる道路トンネルである。

5. SVM適用の有用性の再検討

(1) 採用確率の算出

SVMの出力結果は、識別平面からの符号付き距離として出力される。このことを利用し、本研究では、SVMの出力結果を採用確率に換算する。ここで、採用確率とは同じ評価の切羽に対して過去何割の切羽で補助工法が使用されているかを表すものである。

本研究における採用確率の算出イメージを図-4に示す。

まず、SVMの出力結果を2つのクラス（αクラス、βクラス）として、αクラスでα max、βクラスでβ minを求めて、それぞれ識別平面からの距離を求める。つぎに、各クラスで識別平面からすべてのSVMの結果までの距離を求める。ここで、識別平面を採用確率50%と仮定し、2つのクラスでSVMの結果から採用確率を算出する。

a) αクラスでの採用確率算出

αクラスにおいてα max=100%と仮定し、次式(1)を用いて採用確率yを算出する。

$$y = 50 + \frac{\text{SVMの結果までの距離}}{\alpha \text{ max までの距離}} \times 50 \quad (1)$$

b) βクラスでの採用確率算出

βクラスにおいてβ min=0%と仮定し、次式(2)を用いて採用確率yを算出する。

$$y = 50 - \frac{\text{SVMの結果までの距離}}{\beta \text{ max までの距離}} \times 50 \quad (2)$$

また、次式(3)に示す、長野らにより提案された採用確率算出式（以下、“確率算出式”と略称する）を用いたシステムと比較を行うことにより、SVMを適用した補助工法選定システムの有用性の再検討を行う。

$$y = \frac{100}{1 + a \times e^{-bx}} \quad (3)$$

ここで、yは採用確率、xはサンプルスコア、そしてaとbは各岩石グループの定数を表している。

(2) 確率算出式とSVMの比較

AトンネルのFP施工事例を例に挙げる。また、図-5にAトンネルにおけるFPの使用状況を示す。

図-6に確率算出式を用いたFPの採用確率を示す。FPを使用した切羽にも関わらず、採用確率が20%という結果の切羽もあった。また、FP不使用な切羽にも関わらず、採用確率が約80%以上という結果となった切羽も存在し、FPの使用状況とは異なっている。このことから、確率算出式を用いた補助工法選定システムは、そのままでは適用に無理があることがわかる。

次に、図-7にSVMを用いたFPの採用確率を示す。ほとんどの切羽で、FPの使用状況に一致した採用確率の結果であるといえるが、FPを使用した切羽であっても採用確率40%以下の切羽がある。また、FP不使用な切羽に

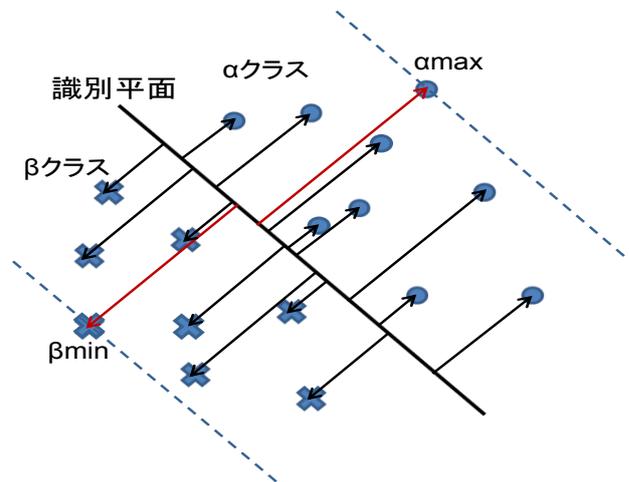


図-4 採用確率算出のイメージ図

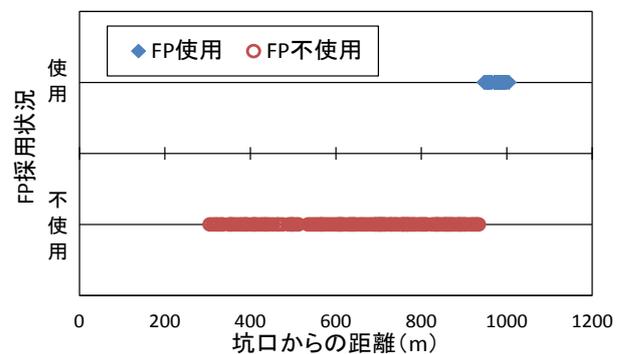


図-5 FPの使用状況 (Aトンネル)

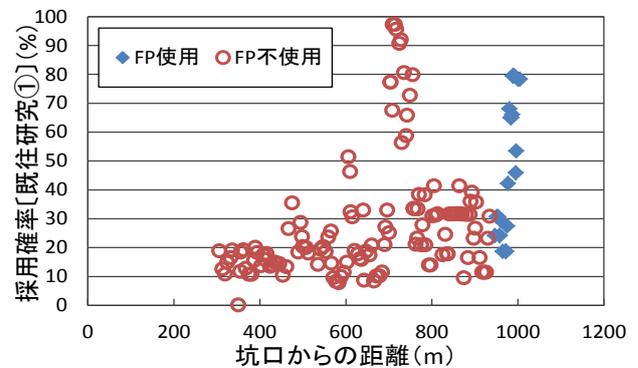


図-6 確率算出式を用いたFP採用確率 (Aトンネル)

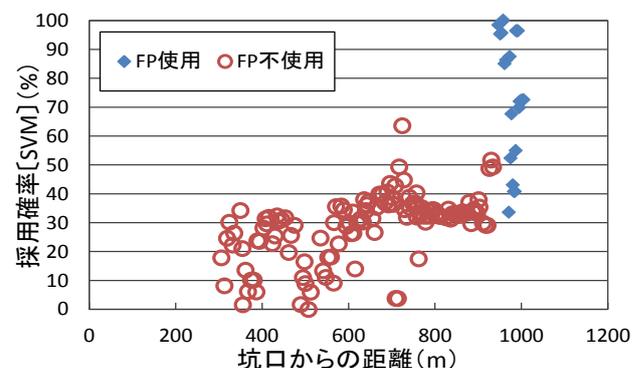


図-7 SVMを用いたFP採用確率 (Aトンネル)

も採用確率が高い切羽が存在している。そこで、横軸にSVMでの採用確率を、縦軸に確率算出式での採用確率をとったグラフを作成し比較を行った。

a) Aトンネルでの比較

図-8にAトンネルでの比較結果を示す。この結果から、実際にはFPが使用されていない一部の切羽に対して、確率算出式の結果では採用確率が高いと評価しているが、SVMによる結果では採用確率が低いと評価していることがわかる。また反対に、実際にFPが使用されている切羽の一部に対して、確率算出式では採用確率が低いと評価しているが、SVMによる結果では採用確率が高いと評価しているとわかる。

この結果より、確率算出式を使用した補助工法選定システムより、SVMを適用した補助工法選定システムの方が、補助工法の採用状況に一致した正確な評価を行っていると考えられる。

b) Bトンネルでの比較

図-9にBトンネルにおける比較結果を示す。Bトンネルにおいても、Aトンネルの結果と同様にSVMの方が、補助工法の採用状況に一致した正確な評価をしていると考えられる。

c) Cトンネルでの比較

図-10にCトンネルにおける比較結果を示す。Cトンネルでは、ほかの2つのトンネルとは違い、SVMを適用しても、確率算出式での結果とほとんど同じ評価結果となった。このような結果となった原因として、Cトンネルは中硬質軟質・層状岩な地山に施工されたトンネルであり、トンネル全体の地山が脆弱であったことが原因であると考えられる。

3つの現場データによる比較結果から、確率算出式を用いた補助工法選定システムと比べて、SVMを適用した補助工法選定システムの方がFP採用状況を正確に評価ができていると考えられる。このことから、FPの選定に対しSVM適用の有用性は高いと考えられる。

6. 観察項目が補助工法(FP)に与える影響

SVMの有用性は高いものの、トンネル技術者が切羽状況を判断した上で、現場で切羽観察記録からある程度補助工法選定の必要性を判断して、その判断と合わせて補助工法選定システムが適用できれば、現場における汎用性は高くなると考える。

そこで、現場でより簡単に補助工法の必要性が判断できるように、切羽観察記録の観察項目である、圧縮強度、風化変質、割目間隔、割目状態、湧水量、劣化が補助工法選定にどのような影響を与えるかを調べる。

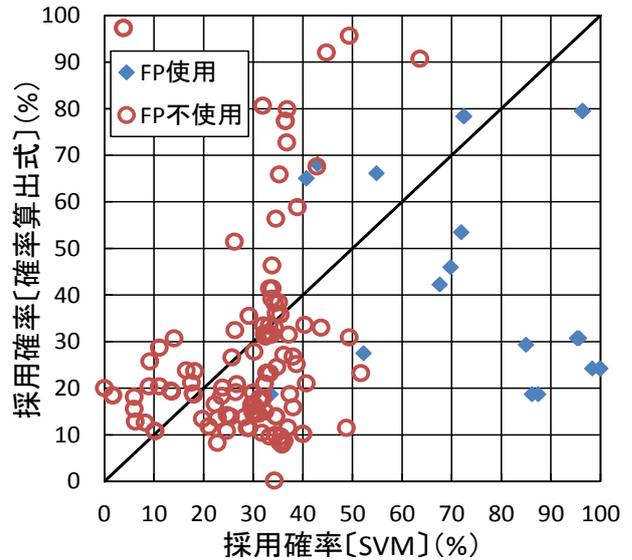


図-8 Aトンネルにおける比較結果

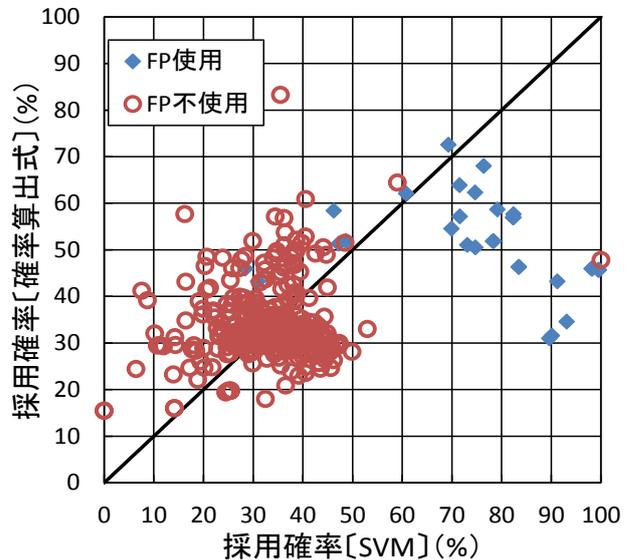


図-9 Bトンネルにおける比較結果

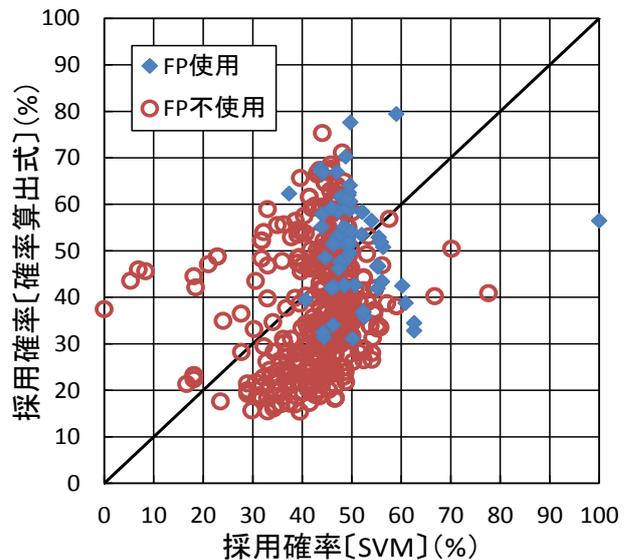


図-10 Cトンネルにおける比較結果

(1) 観察項目の与える影響

ここではAトンネルを例に挙げる。観察項目の影響を確認するために、横軸に坑口からの距離、第一縦軸に採用確率、第二縦軸に天端部における評価区分値を取ったグラフを作成した。ここで、天端部の評価区分値を採用したのは、FPが天端部の安定対策に用いられる補助工法であるためである。また、評価区分値は値が小さければ地山状態は良好で、値が大きければ地山状態が悪いことを示す。図-11(a)~(f)に各観察項目がFP選定に与える影響を示す。図-11(a)に示す圧縮強度では評価区分値が小さいときに、採用確率が低い結果となり、また評価区分値が大きいために、採用確率が高い結果となった。このことからFP使用状況と採用確率に対し、圧縮強度は影響していると考えられる。

また、図-11(b)と図-11(d)に示す風化変質と割目状態でも同じ結果となった。図-11(c)に示す割目間隔では、評価区分値の分布にわずかに変化が見られるが、ほぼすべての切羽で違いが見られず、評価区分値が4という結果となり、FPに与える影響は少ないと考えられる。また、図-11(e)と図-11(f)に示す湧水量や劣化についても、FP使用状況と評価区分値に関連は見られない。

これらの結果から、FPの選定について影響を与えている観察項目は、圧縮強度、風化変質、割目状態、そして、若干ではあるが割目間隔であると考えられる。

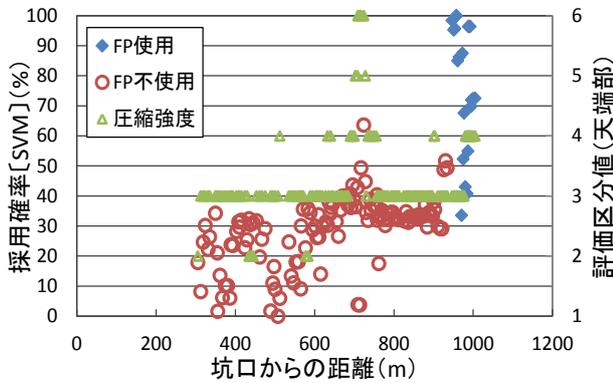


図-11(a) 圧縮強度が与える影響 (Aトンネル)

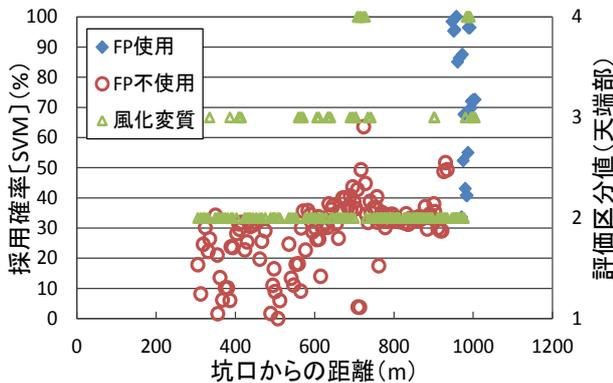


図-11(b) 風化変質が与える影響 (Aトンネル)

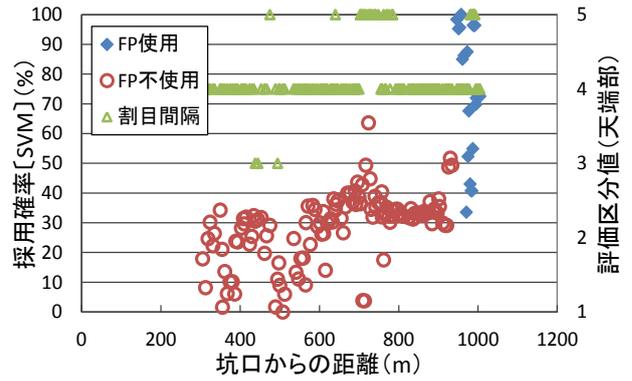


図-11(c) 割目間隔が与える影響 (Aトンネル)

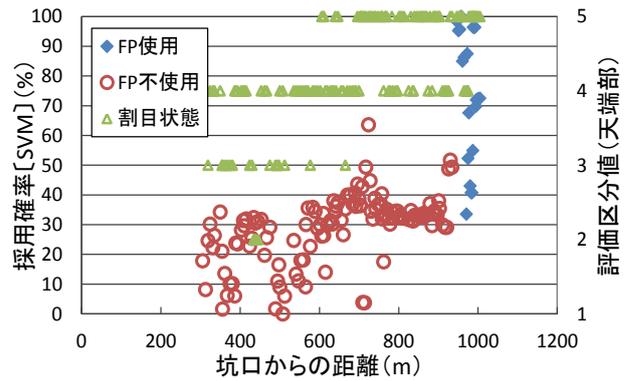


図-11(d) 割目状態が与える影響 (Aトンネル)

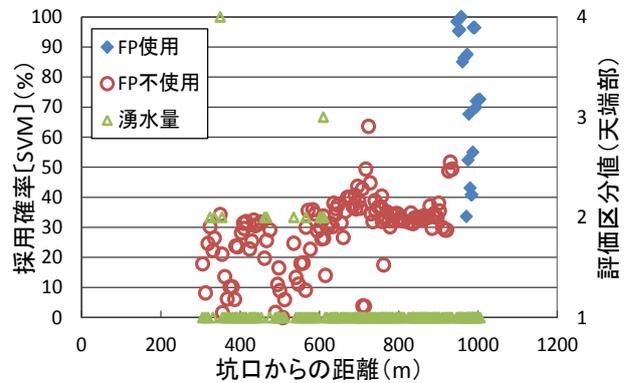


図-11(e) 湧水量が与える影響 (Aトンネル)

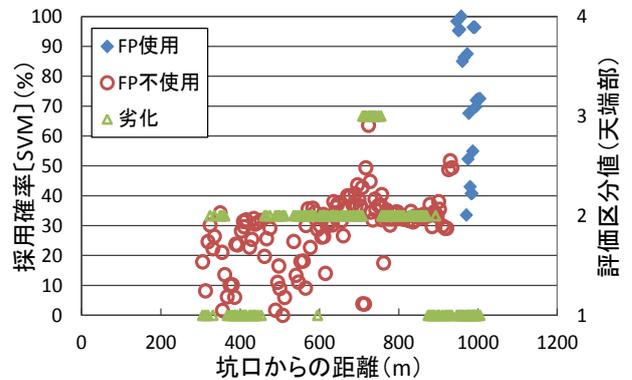


図-11(f) 劣化が与える影響 (Aトンネル)

(2) 観察項目による補助工法選定 (FP)

FPの選定に影響を与えるのは、第6章1節で示したように、圧縮強度、風化変質、割目状態、割目間隔の4つの観察項目が影響していると考えられる。これらの観察項目において評価区分値がどの値を示せば、FPを採用するか判断できれば、より現場での汎用性が高くなると考えられる。そこで、横軸に天端部における評価区分値を、縦軸にFP採用頻度をとったグラフを作成し検討を行った。ここで、FP採用頻度とは、テストデータである3つのトンネル現場のデータ全てで、評価区分値ごとにFP採用状況を調べたものである。

a) 圧縮強度について

図-12(a)に圧縮強度でのFP採用頻度について示す。この結果から、評価区分値が2~3のとき、FPはほとんどの切羽で使用されていないが、評価区分値が4~6のときは、FPを使用する切羽の頻度が多くなっている。この図から、FPを使用するかどうかは評価区分が4以上での時に判断していると考えられる。このことから、圧縮強度はFP選定に影響を強く与えている観察項目であると考えられる。

b) 風化変質について

図-12(b)に風化変質でのFP採用頻度について示す。この結果から、評価区分値が1から4に向かうにつれて、FPを使用しない切羽の頻度が下がり、FPを使用する切羽の頻度が上がっている。この図から、FPを使用するかどうかは、評価区分が3以上での時に判断していると考えられる。このことから、風化変質もFPの選定に影響を与えていると考える。

c) 割目状態について

図-12(c)に割目状態でのFP採用頻度について示す。評価区分値が変化してもほとんど、FPの採用頻度に変化はなく、割目状態からFPの選定の判断を行うことは難しいと考える。

d) 割目間隔について

図-12(d)に割目間隔でのFP採用頻度について示す。評価区分値が変化してもほとんど、FPの採用頻度に変化はなく、割目間隔からFPの選定の判断を行うことは難しいと考える。また、ほかの観察項目とは異なった結果となった。これは評価区分値2における切羽のデータ数が少なかったことが影響していると考えられる。

また、評価区分値1のデータがない結果があるが、これは3つのトンネルデータにおいて、評価区分値1の切羽が存在しなかったためである。

これらの結果から、FPの選定を行うことができる観察項目は、圧縮強度と風化変質であると考えられる。しかし、評価区分値のデータが少なかったり、存在しないといった結果もあり、さらに現場データを増やして、再度検討する必要があると考える。

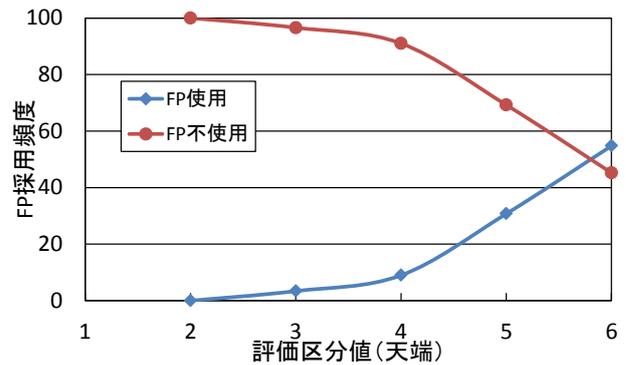


図-12(a) 圧縮強度におけるFP採用頻度

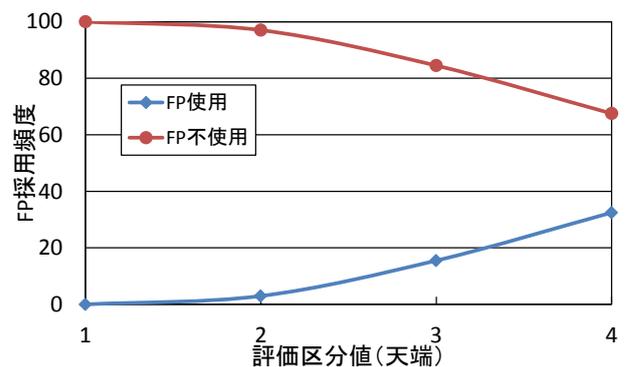


図-12(b) 風化変質におけるFP採用頻度

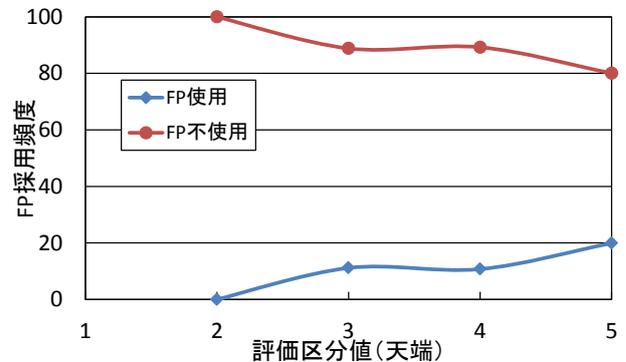


図-12(c) 割目状態におけるFP採用頻度

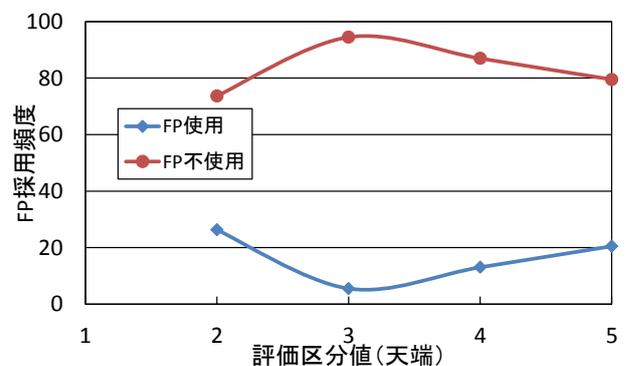


図-12(d) 割目間隔におけるFP採用頻度

7. 結論

天端の安定対策であるFPの選定に対し、SVMの適用の有用性は高いと考えられる。また、FPの選定に対し、切羽観察記録の観察項目である圧縮強度や風化変質などが、大きく影響を与えていることがわかった。

しかし、現段階では、FPのみしか検討できていないため、鏡吹付けや鏡ボルトへの検討を行うことが必要である。さらに、評価区分値のデータがまだ不十分であるため、圧縮強度などの観察項目が補助工法の選定に与える影響を検討する必要がある。

また、適用した現場データ少ないため、さらに適用現場を増やして補助工法選定システムの汎用性を高めることが求められる。

謝辞：本研究の遂行にあたり、多大なるご協力をいただいた株式会社高速道路研究所の大津敏郎氏をはじめ、関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 長野康彦, 清水弘史, 進士正人: トンネル補助工法選定支援システムのインターネット化とその適用, 平成 21 年土木学会中国支部学術講演会概要集, III-4, 2009.
- 2) 丸山健太, 進士正人: SVM を用いた切羽観察記録に基づく切羽補助工法選定システム, 山口大学大学院, 修士論文, 2013.
- 3) 土木学会: トンネル・ライブラリー第 20 号 山岳トンネルの補助工法-2009年版, pp.145-245, 2009

(2013.9.2 受付)

SELECTION SYSTEM OF AUXILIARY TUNNEL METHOD BASED ON TUNNEL FACE OBSERVATION SHEETS BY USING SUPPORT VECTOR MACHINE

Takumi HIRA, Kenta MARUYAMA, Chikara NAKATA, Masato SHINJI

By the construction of the mountains tunnel, an evaluation and adoption of the need of the tunnel face at the time of construction are carried out for improvement of the stability of the tunnel face at the time of construction. But, the clear standard lacks in the choice of the auxiliary tunnel method and it depended to the engineer's experiential judgment. The system which showed the adoption probability of the auxiliary tunnel method from tunnel face observation sheets was suggested in a previous studies to support this situation, but it had problems in the precision. In this study, the flow of a system choosing the auxiliary tunnel method based on tunnel face observation sheets are intended that versatility does it with a high system.

