

切羽観察記録結果を用いた 切羽補助工法の選定システム

進士正人¹・榎田敦之²・関茂和³・中川浩二⁴

¹正会員 山口大学助教授 大学院理工学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

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

²正会員 日本技術開発(株) 大阪支社道路・交通部 (〒531-0072 大阪市北区豊崎5-6-10)

³正会員 中日本高速道路(株) 中央研究所道路研究部トンネル研究室 (〒194-8508 町田市忠生1-4-1)

⁴フェロー会員 NPO法人臨床トンネル工学研究所 (〒755-0084 宇部市川上南側)

土被りの薄い都市部や、脆弱な地山への山岳トンネル工法の適用は、地山状況の変化に即応したさまざまな補助工法の開発・採用により成し遂げられてきた。加えて、広範囲の地山条件に対応できる種々の補助工法の積極的な採用によってトンネル切羽の自立性確保が実現可能になり、トンネル施工の安全性も高くなっている。しかし、補助工法の採用が結果的にトンネル施工コスト増大の一因になっているという見方もその一方にあり、適切な補助工法採用の判断根拠の確立が求められている。本ノートでは、一般には支保選定のために実施される切羽観察結果と実際に採用された補助工法との関連性を数量化理論に基づく判別分析により分析し、切羽観察結果から最適な補助工法を判断するシステムを提案する。

Key Words : *mountain tunnelling, rock mass classification, auxiliary method, statistical approach*

1. はじめに

山岳トンネル工法は、地形・地質上良好な条件の箇所のみならず、不良地山や土被りの薄い都市部などへ、その施工領域が飛躍的に拡大している。これは、これまでトンネル施工上のボトルネックであった切羽の自立性確保が、多種多様な補助工法の開発・採用によってより確実に実現可能となったことが拡大理由の一つであり、それにより補助工法の必要性ならびに重要性は広く認識されつつある¹⁾。

その反面、補助工法の採用はトンネル建設コストの増大を招くこともあり、補助工法の採用に際しては地山状況に見合った適切な選定が求められている。しかしながら、補助工法の採用が通常のトンネル施工の一プロセスになりつつある現在でも、その選定基準は必ずしも明確ではない。そのため、個々のトンネルでは、補助工法の採用が施工性・経済性などから総合的に判断され、選定されてはいるものの、技術者の経験的主観に大きく依存しているとの指摘もあり、経験的主観に依存しない統一かつ客観的な選定基準の確立が望まれている^{2),3)}。

一方、見方を変えると、技術者の経験的主観は、各技術者が持つ技術や経験を総合的かつ最大限に駆使した成果であるとも言える。したがって、施工事例を分析し技術者による判断基準を数量化することは、より合理的な補助工法の選定の端緒になるとも考えられる。

そこで、本ノートでは、主に支保パターンを選定に用いられている切羽観察記録と、切羽面・天端安定を目的とした補助工法の採用特性との関連性について数量化理論Ⅱ類による判別分析を実施し、この分析結果から定量的な切羽面・天端の安定対策補助工法の選定方法を提案する。そして、選定方法の有用性について検証する。なお、採用特性とは、地山状況から判断される補助工法の採用傾向のことを意味している。評価対象とした補助工法は、切羽安定対策工のうち、切羽面の安定対策に分類される切羽吹付けコンクリート工法（以下、「切羽吹付け」と呼ぶ）と、天端の安定対策に分類される短尺先受け工法（以下、「短尺先受け」と呼ぶ）、長尺先受け工法（以下、「長尺先受け」と呼ぶ）である。

2. 対象データの概要

本ノートで対象としたデータは、1997年から2002年に日本道路公団により施工されたトンネルのうち、表-1に示す切羽観察記録表⁴⁾を用いて切羽観察が実施されたトンネル本数152本、切羽観察データ数27,388データである。切羽観察記録表には、切羽観察6項目をはじめ、切羽安定対策工実施の有無や主岩種などの情報が記述されている。分析を始めるにあたり、切羽・天端の安定性は地質状況により異なることが十分予測される。そのた

表-1 切羽観察記録表の一部⁴⁾

観察項目	評価区分					
	100以上	100~50	50~25	25~10	10~3	3以下
圧縮強度 (N/mm ²)	1軸圧縮強度 ポイントロード ハンマーの打撃による強度の目安	4以上	2	2-1 岩片を手に持って押しつぶすことができる	1~0.4 岩片とおしをたたき合わせ割ることができる	0.4以下 両手で岩片を部分的にでも割ることができる
風化変質	風化の目安 熱水変質などの目安	概ね新鮮 変質は見られない	割れ目沿いの風化変質 変質により割れ目に粘土を挟む	岩芯まで風化変質 変質により岩芯まで強度低下	土砂状風化、未固結土砂	
割れ目間隔	割れ目の間隔 ROD	d≧1m 80以上	1m<d≦50cm 80~50	50cm<d≦20cm 60~30	20cm<d≦5cm 40~10	5cm≦d 20以下
割れ目状態	割れ目の開口度 割れ目の狭小物 割れ目の粗度類別	割れ目は密着している なし 粗い	割れ目の多くが開口している(幅<1mm) なし 割れ目が平滑	割れ目の多くが開口している(幅<1mm) なし 一部に鱗肌	割れ目が開口している(幅1~5mm) 薄い粘土を挟む(5mm以下) よく磨かれた鱗肌	割れ目が開口している(幅5mm以上) 厚い粘土を挟む(5mm以上) 5
湧水量	状態 評価区分	なし、湧水1l/分以下 1	湧水量1~20l/分 2	集中湧水20~100l/分 3	全面湧水100l/分以上 4	
劣化	水による劣化 評価区分	なし 1	緩みを生ず 2	軟弱化 3	流出 4	

表-2 岩石グループ別データ数

岩石グループ	トンネル本数	切羽観察データ
硬質岩 (塊状)	58	6,634
中硬質・軟質岩 (塊状)	81	8,734
中硬質岩 (層状)	33	5,687
軟質岩 (層状)	55	6,333
計	227	27,388

め、対象としたデータを、日本道路公団の切羽観察表に準拠してトンネル掘削時に同じ変形挙動を示す硬質岩 (塊状)、中硬質・軟質岩 (塊状)、中硬質岩 (層状)、軟質岩 (層状) の4つの岩石グループ^{5),6)} に大別し、それぞれのグループ毎に整理・分析を行う。表-2に、岩石グループ別のデータ数を示す。

3. 切羽吹付けの採用特性の把握

数量化Ⅱ類を用いた判別分析により、切羽観察結果から切羽吹付け採用の有無の判別を試みる。分析結果の一例として、図-1に硬質岩 (塊状) における観察項目とカテゴリースコアの変化結果を示す。図中のカテゴリースコアとは、施工実績の切羽吹付け採用に与える切羽観察6項目の評価区分値の影響度を数量化したもので、スコアの正の値は「採用有り」、逆に負の値は「採用無し」に与える影響度の大きさを意味している。すなわち、硬質岩 (塊状) の地質グループにおいて、カテゴリースコアは、「湧水量」の観察項目を除いて、地山評価が悪化する (評価区分値が大きくなる) ほど、切羽吹付けを採用する傾向を示す。その一方、「湧水量」の観察項目は、地山評価が悪化するほど切羽吹付けを採用しない傾向を示すことが分かる。これは、硬質塊状岩盤の場合、切羽に出現する地質は比較的硬質なため自立性が高く、

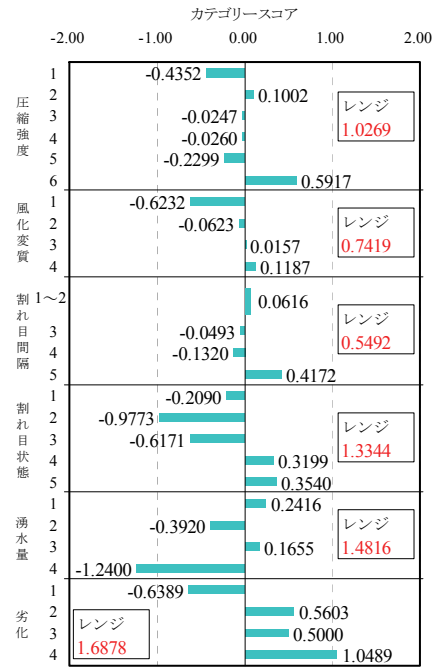


図-1 数量化Ⅱ類の解析結果
硬質岩 (塊状)

多量な湧水があると湧水処理が優先されるため切羽吹付けの必要性が相対的に低下するためと推察される。この傾向は、その他の岩石グループについてもほぼ同様の傾向を示す。

次に、各岩石グループにおける、切羽観察6項目のレンジの合計に占める各観察項目の比率を図-2に示す。ここでレンジとは、各観察項目における、最大と最小のカテゴリースコアの差の絶対値であり、その値が大きいほど施工実績の切羽吹付け採用に切羽観察6項目の評価区分値が影響を与えていることを意味する。この図から、「圧縮強度」と「風化変質」のレンジの比率は、岩石強度に関係なく、塊状岩盤よりも層状岩盤の方が2倍程度、切羽吹付けの採用の有無の判別に影響を与えていることが分かる。逆に「湧水量」と「劣化」のレンジの比率は、塊状岩盤よりも層状岩盤の方がレンジの比率が低く、影響の小さい観察項目となる。なお、「割れ目間隔」と「割れ目状態」のレンジの比率は、どの岩石グループもほぼ同程度の比率である。

4. 切羽吹付けの選定方法の提案

(1) 判別分析結果を利用した選定方法の提案

判別分析結果から、切羽観察データ毎に切羽観察6項目それぞれの評価区分のカテゴリースコアの和であるサンプルスコアを算出する。すなわち、すべての観察項目を最良の1と判断をした切羽観察記録の場合は、サンプルスコアは、図-1を参照して次式のよ

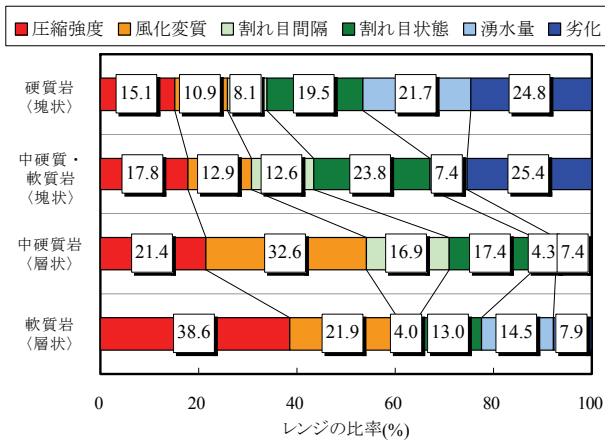


図-2 各岩石グループにおけるレンジの比率

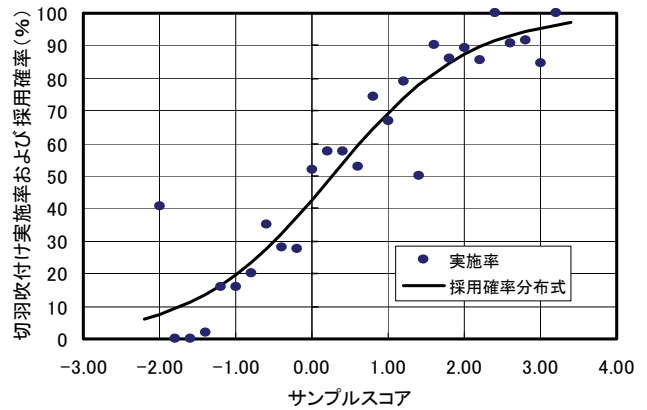


図-3 サンプルスコアと実施比率および採用確率との関係 軟質岩<層状>

うに与えられる。
(サンプルスコア)

$=(-0.435)+(-0.623)+0.062+(-0.209)+0.242+(-0.639)=-1.603$
そして、サンプルスコアを利用し、切羽吹付け選定の適否を提案する判別式を提案する。すなわち、説明変数をサンプルスコア、目的変数を切羽吹付けの有無とにおいて式(1)に示すロジスティック関数式による回帰分析を実施し、切羽吹付け採用確率分布式を求める。

$$y = \frac{k}{1 + ae^{-bx}} \quad (1)$$

ここに、 x : サンプルスコア

y : 採用確率

a, b, k : 関数式のパラメータ

回帰分析結果と実施工との一致状況を確認するため、図-3に、軟質岩<層状>グループにおけるサンプルスコア0.2間隔毎に含まれる切羽観察データの中で切羽吹付け工を実施した比率を●印で示し、合わせて式(1)のロジスティック関数式を示す。この図から明らかなように、サンプルスコアが1.6を超えると85%以上の実施比率で切羽吹付けが実施されており、提案式と実施比率はほぼ妥当な相関を有していることがわかる。なお、この岩石グループのサンプルスコアの取り得る範囲は-2.12~3.33の範囲である。

回帰分析によって得られる他の岩石グループのロジスティック関数式のパラメータ a, b, k の一覧を表-3に示す。すなわち、本選定方法は、まず大まかに岩石グループを選択し表-3のパラメータ係数の組合せを選択する。そして、切羽観察結果に対応した観察結果6項目のうちのそれぞれ一つに対応したカテゴリースコアの和をサンプルスコアとして求める。切羽観察結果、式(1)のロジスティック関数式に代入することで切羽吹付け採用確率という定量的な指標として切羽吹付け採用の可能性を表現している。この方法は、従来の技術者の経験的主観による判断に比べ、選定判断の意思決定により客観性を持たせた方法と言える。

表-3 各岩石グループにおける a, b, k の値

岩石グループ	a	b	k
硬質岩 (塊状)	1.19	0.91	100
中硬質・軟質岩 (塊状)	1.15	1.23	100
中硬質岩 (層状)	1.42	1.33	100
軟質岩 (層状)	1.34	1.11	100

表-4 本提案手法の的中率

岩石グループ	的中率(%)
硬質岩 (塊状)	68.50
中硬質・軟質岩 (塊状)	78.69
中硬質岩 (層状)	79.85
軟質岩 (層状)	75.23

(2) 提案方法の信頼度

本方法の信頼度を調べるために、それぞれの岩種毎の全実績データから採用確率を推定し実績と比較した。比較に当たっては、採用確率が50%より大きければ「採用」、逆に小さければ「不採用」と推定したものとし、以下の式に従って的中率を比較した。

$$\text{的中率} = 100 \times \frac{\text{実績と推定が一致したデータ数}}{\text{全データ数}}$$

すなわち、この的中率は一般に50%から100%の間の値をとり、100%に近いほど提案手法の信頼性が高くなる。逆に50%の場合は、提案手法を用いても例えば乱数から推定する手法と同じ精度でしかないことを意味している。各岩石グループ毎の的中率を表-4に示す。表に示す通り、いずれの岩石グループにおいても的中率は80%弱であり、一般に分析精度はやや良い程度の精度である⁷⁾。しかしながら、これまで選定基準が明確でないことを考えると、本提案手法は切羽吹付け選定判断の一助となり得る方法と考えられる。

(3) 有用性の検証

判別分析に採用していないAトンネルの切羽観察6項目の評価結果から採用確率を算出し、施工実績との一致

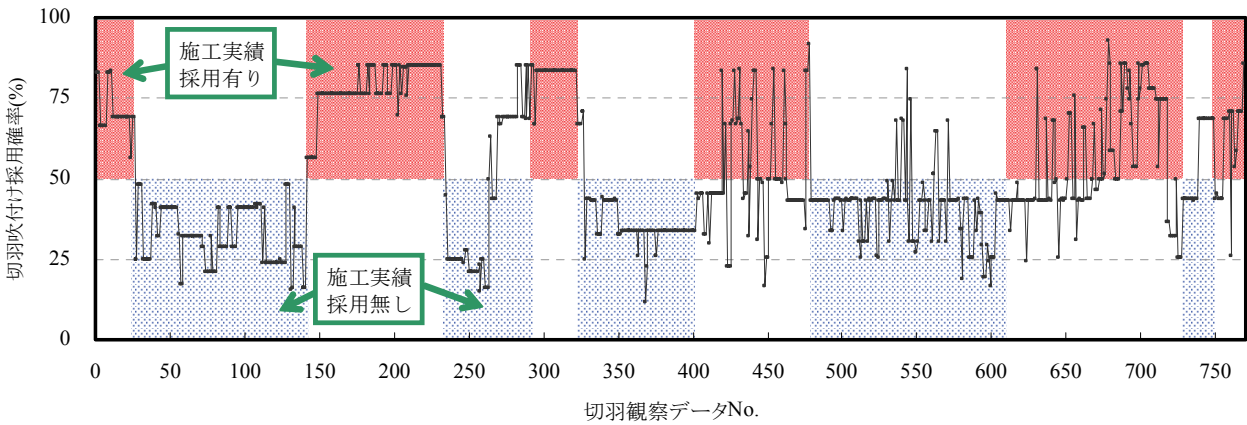


図-4 Aトンネルの適用結果

状況から提案手法の有用性を検証した。Aトンネルの岩石グループは軟質岩(層状)に属し、切羽観察データ数は769データ、そのうち採用有りのデータ数は368データである。図-4に、Aトンネルでの適用結果を示す。この図から、本選定方法により推定した採用確率と施工実績は概ね一致していることが分かる。したがって、表-4に示すとおりの中率は約76%とそれほど高い信頼度でないが、実施工では一定区間ごとに採否の判定を行っており、ある程度の不一致は許容できるとも考えられるため、選定判断の一指標としての有用性は検証できたものと思われる。

5. 天端安定対策工の採用特性の把握

短尺あるいは長尺の先受け工で代表される天端安定対策工の採用特性を把握するために、切羽吹付けと同様に、説明変数を切羽観察6項目の評価区分値、目的変数を天端安定対策工採用の有無とする数量化II類による判別分析を行った。ただし、切羽全体を天端および上半肩部の3分割で切羽観察が実施されるが、ここでは、対象部位に近い天端部の切羽観察記録のみを採用し分析を行った。なお、対象とした岩石グループは、分析を行うのに十分な切羽観察記録が収集できた軟質岩(層状)のみで実施した。

分析結果として切羽観察項目毎のカテゴリースコア、レンジ及びその比率を図-5に合わせて示す。これまでと同様、カテゴリースコアの正負は「対策工採用」に与える影響度の大きさを意味している。この図からわかるように、カテゴリースコアは、切羽吹付け分析結果と同様ほとんどの観察項目において、地山評価が悪化するほど天端安定対策工が採用される傾向にあることがわかる。しかし、この場合でも、「湧水量」は地山評価が悪化すると逆の傾向を示す。この理由として、湧水量の増加に伴って実施される水抜き対策工が切羽安定に直接効果を及ぼすことなども考えられるが今後の更なるデータ

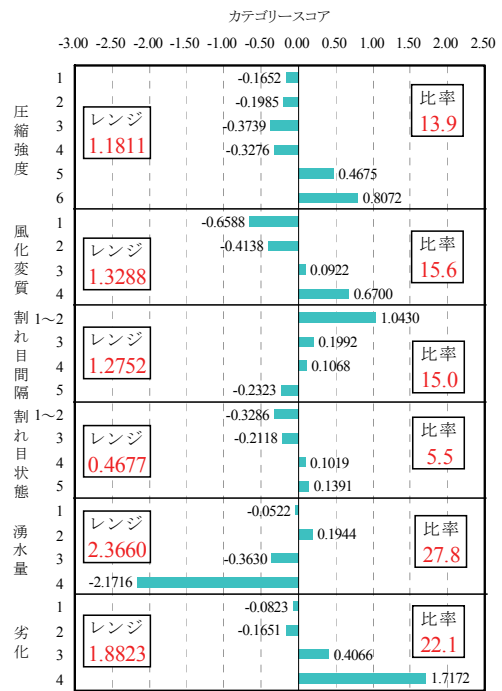


図-5 数量化II類の解析結果
軟質岩<層状>

の蓄積・分析が必要と考えられる。

次に、図中のレンジの比率をみると、「湧水量」と「劣化」の比率が全体の約5割程度を占め、これらの地山評価項目が天端安定対策工の採用の有無の判別に影響を与えている。水に関する観察項目は、その評価の良し悪しによって、切羽の安定性や天端安定対策工の施工性に大きく左右するためと考えられる。次に、「圧縮強度」と「風化変質」の比率が3割程度、「割れ目間隔」と「割れ目状態」の比率が2割程度と続く。

6. 天端安定対策工選定方法の提案

一般的な天端安定対策工の選定手順は、

- 安定対策工が必要かどうかの判断
- 必要と判断された天端部に対し、先受け工法の工種

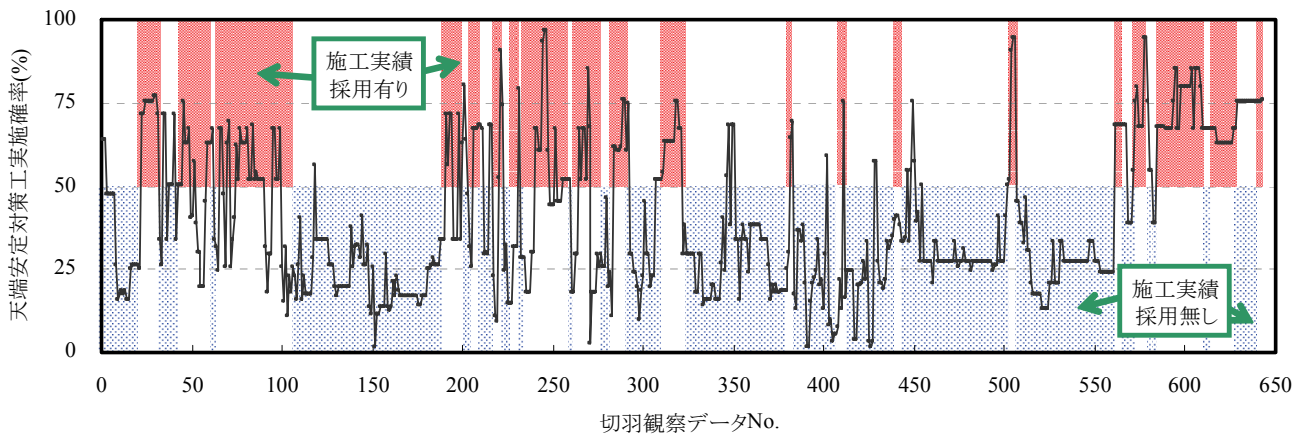


図-6 Bトンネルの適用結果(目的変数 天端対策工実施の有無)

(短尺あるいは長尺) 判断の2段階で実施される。そこでまず、切羽観察記録から天端安定対策工の採用判別法を提案する。次に、施工実績から天端安定対策工が必要と判断された切羽観察記録のみを抽出し、短尺先受けと長尺先受け等の天端安定対策工の工種選定方法を適用を検討する。

(1) 天端安定対策工の採用判定方法

切羽吹付けの場合と同様、図-5 に示す判別分析によって得られた切羽観察項目毎のカテゴリースコアから天端安定対策工の採用確率を求める。すなわち、4. (1)と同様に説明変数を項目毎のカテゴリースコアを加算したサンプルスコアとし、目的変数を採用実績とした式(1)に示すロジスティック関数式の回帰分析をおこなう。この関数式から、サンプルスコアに対応する天端安定対策工の採用確率を求める。ここでは、ロジスティック関数式のパラメータ abk の値は、それぞれ1.61, 1.15, 100となった。これが天端安定対策工の採用確率式となる。また、サンプルスコアの取り得る範囲は-3.93 ~ 4.57の範囲である。次に、4. (2)と同様に本選定方法の適用性を検証するため全データの的中率を調べた。その結果、的中率は約75%であり、これまでと同様それほど高い精度を得ることができなかったが、切羽吹き付けの場合と同じく従来の選定基準が明確でないことを考え合わせると、本提案手法は天端安定対策工の選定判断に利用可能と考えられる。

有用性の検証のため、4. (3)と同様、これまでの判別分析に用いていないBトンネルを対象に、切羽観察6項目の評価結果から天端安定対策工の採用確率を算出し、施工実績との一致状況を比較した。Bトンネルは軟質岩(層状)に属し、切羽観察データ数は643データ、そのうちFP, AGF採用有りのデータ数はそれぞれ178データ、60データである。Bトンネルでの比較結果を図-6に示す。この図から、採用判別式による採用確率分布は、施工実績と概ね一致していることが分かり、切羽観察結果から天端安定対策工の実施の判断がある程度可能である

ことを表している。また、Bトンネル全体の的中率は約80%とある程度高い精度が得られており、本採用判別式の有用性は説明できているものと思われる。

(2) 天端安定対策工法の工種選定方法

天端安定対策工の工種の選定方法を確立するため、これまでと同様の数量化II類を用いて、説明変数を天端部における切羽観察6項目の評価区分値、目的変数を施工実績の「短尺先受け採用」、「長尺先受け採用」とする判別分析を行った。そして、判別分析結果から得られた切羽観察項目毎のカテゴリースコアと採用実績から式(1)に示すロジスティック関数式による回帰分析を実施することにより長尺先受けの採用確率を求めた。この場合ではロジスティック関数式のパラメータ a,b,k の値は、それぞれ3.09, 1.81, 100となった。また、サンプルスコアの取り得る範囲は-2.65 ~ 2.31の範囲である。なお、分析に用いたデータは、5. で用いた軟質岩(層状)の切羽観察記録から、施工実績が天端安定対策工採用の切羽観察記録のみを抽出したものである。

有用性の検証のため、これまでと同様、図-6に示したBトンネルの天端安定対策工採用の切羽観察記録238データのみを対象に、長尺先受け採用の採用確率を算出し、施工実績との一致状況を比較した。その結果を図-7に示す。図中の切羽観察データNo.1 ~ No.130区間では、長尺先受けの採用実績がないにもかかわらず、本選定方法は、長尺先受け採用確率を75%以上と予測していく区間も多く、施工実績との乖離が認められる。そのため、一致率も約58%と低い。これは、天端安定対策工がいずれも切羽状態が劣悪な状況で採用される工法であるため、分析に用いた地山評価結果のみでは明確な差が現れず、選定基準の確立までには至らなかったと考えられる。したがって、天端安定対策工の工種判断には、切羽観察項目以外の情報も加えた検討が必要と思われる。今後の検討課題である。

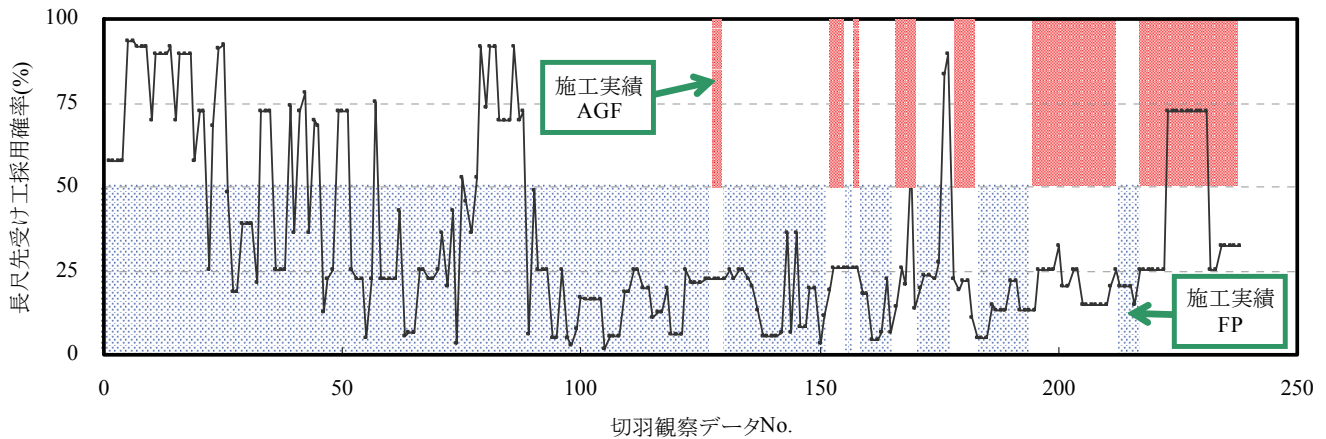


図-7 Bトンネルの適用結果(目的変数 短尺長尺先受け工採用)

7. おわりに

本ノートでは、通常、支保選定に利用されている切羽観察記録と切羽安定対策工との関係に着目した。そして、数量化Ⅱ類による判別分析を行い切羽観察結果から切羽補助工法の選定方法を提案した。得られた結論を以下に列記する。

- a) 切羽安定対策工に与える観察項目の影響度を量的に把握することができた。
- b) 切羽安定対策工と天端安定対策工の必要性を、採用確率という定量的指標によって提案し、その有用度を確認することができた。
- c) 本提案手法を検証したところ、切羽吹付けと天端安定対策工としての先受け工の選定判断の有用性は十分確保することができた。しかしながら、短尺先受けと長尺先受けそれぞれの選定基準は切羽観察項目以外の情報も必要であることが分かった。

今後は、トンネル実現場での更なる適用性試験や、切羽観察データのさらなる蓄積や分析、計測結果との比較等から、補助工法の支保効果に関する数量的評価を行いたい。

参考文献

- 1) 本間宏記, 栃木博, 古川浩平, 中川浩二: 双設トンネルの施工実績に基づく地山評価と補助工法の採用特性に関する研究, 土木学会論文集, No.553/VI-33, pp.21-31, 1996.12.
- 2) 中川浩二, 御手洗良夫, 寺戸秀和, 木村恒雄: 山岳トンネルの補助工法の選定における技術者の評価と意思決定に関するアンケート調査, 土木学会論文集, No.602/VI-40, pp.53-65, 1998.9.
- 3) 榎田敦之, 進士正人, 中川浩二, 関茂和: 切羽観察結果に基づく鏡吹付けコンクリート工の採用特性, 土木学会トンネル工学研究報告集「報告I-15」, 第14巻, pp.95-100, 2004.11.
- 4) 日本道路公団: 設計要領第三集トンネル, pp.86-90, 1997.10.
- 5) 日本道路公団: 設計要領第三集トンネル, pp.69-70, 1997.10.
- 6) 赤木渉, 佐野理, 進士正人, 西塚郎, 中川浩二: 山岳トンネル施工支援のための切羽評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.686/VI-52, pp.121-134, 2001.9.
- 7) 菅民郎: 多変量解析の実践(下), pp.66-69, 現代数学社, 1993.12.

(2005. 11. 17受付)

A PROPOSED METHOD FOR SELECTION OF AUXILIARY METHODS FOR TUNNEL FACE STABILITY BASED ON OBSERVATIONAL DATA

Masato SHINJI, Atsuyuki ENOKIDA, Shigekazu SEKI and Koji NAKAGAWA

An applicable scope of mountain tunnelling method has been expanding to the shallow overburden urban tunnel or the squeezing weak rock tunnel by the development of the various auxiliary methods. The more active adoption of the auxiliary method in mountain tunnel enables the improvement of safety of tunnel construction work. However, there is some recognition that the adoption of auxiliary method leads to the increases of tunnel construction cost. The suitable judgment of its adoption has been required. In this note, the method for selection of auxiliary methods for tunnel face stability based on tunnel face observational data is proposed by the statistical analysis based on quantification theory. Its applicability has been discussed.