

評価点によるトンネル地山評価の有効性と 課題についての研究

木村正樹¹・長谷川信介¹

¹正会員 応用地質株式会社 関西支社（〒532-0021 大阪市淀川区田川北 2-4-66）

E-mail:kimura-masaki@oyonet.oyo.co.jp

山岳トンネルの調査・設計担当者の大きな課題は、トンネル施工時に支保パターンの乖離が少ない地山区分を行うことである。筆者らは、2001年より切羽の評価と同じ基準による地質情報の評価を行う「評価点法」を実施し、これまで、花崗岩地山・火山岩地山・付加体地山などで精度の高い地山評価が可能であることを示してきた。この手法の導入に当たっては物理探査結果の有効利用が重要であり、地盤統計学手法と組み合わせることにより、さらに精度を高めることも可能となってきた。

しかし、昨今の発注機関の財政難から、物理探査の導入が最小限にとどめられる場合が多いため、地表踏査やボーリングコアから得られる情報を最大限に利用する方法について検討した。また、その結果を踏まえてこの手法の有効性と課題について整理した。

Key Words: *cutting face classification, scoring-method, geophysical investigation,*

1. まえがき

山岳トンネルの建設では、設計支保パターンに対して施工時のパターンが重くなることが多く、予算超過が問題となる。特に、想定外の補助工法が必要になる場合には、補助工法の種類の選定、実施区間の検討およびその承認作業で現場が休止することも生じる。

この原因については各種の報告で紹介されており、地質調査の不足や物理探査結果についての解析上の限界、担当技術者の個人差、地質調査段階の情報が設計、施工段階にスムーズに伝達されないなどの原因があると言われる^{1),2)}。

そこで筆者らは、施工段階の判定基準である切羽評価点に着目し、調査段階のデータを同じ基準で整理することにより、調査、設計、施工段階の情報伝達をスムーズに行う手法を2001年より導入し、花崗岩地山、火山岩地山、付加体地山などで良好な成果を得た。しかし、昨今の発注機関の財政難から、ボーリング数量も制限され、物理探査の導入も最小限にとどめられる場合が多くなっている。

このため、地表踏査やボーリングコアから得られる情報を最大限に利用するための手法について整理するとともに、地盤統計学的手法の導入による、

弾性波探査結果をさらに有効に活用して設計支保と施工支保一致の精度をさらに高める研究^{3),4)}についての有効性と課題について整理した。

2. 評価点法の概要

(1) 地山分類表による地山分類の問題点

トンネルの支保設計は、地山分類表に基づき実施される。しかし、弾性波速度に主眼をおいた地山分類には以下のような問題がある。

- 1) 初期応力状態の弾性波速度を基準とした地山評価であり、応力解放状態の切羽における必要支保パターンの情報が必ずしも対応していない。
- 2) 地山の弾性波速度を頼りに地山の評価を行いつつ、担当技術者の定性的な判断で地山評価の見直しがなされ、個人差を生む原因となっている。
- 3) トンネル掘削時の切羽周辺の弾性波速度の測定も試みられているが、設計段階で応力解放状態の弾性波速度に基づく地山分類表は提案されていない。

以上の問題点を解決する手段として調査・設計・施工時の地質情報を、トンネル掘削時と同じ基準で評価する「評価点法」を導入した。

(2) 評価点法による地山区分

トンネルの支保選定は、NEXCO の切羽評価点法に代表されるように切羽の地質情報を項目ごとに点数化し、その点数に応じた適切な支保選定が行われている。評価点を算定する項目は、NEXCO では岩石の強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態の4項目に湧水と劣化のマイナスの調整点を加えた6項目、国土交通省ではさらに割れ目の形態と切羽の状態、素掘面の状態を加えた9項目である。筆者らが考える調査段階における地質情報の評価点法を図.1 に示す。図.1 に示す一点鎖線で囲んだ部分は今後の活用が期待される部分であり、これらについては、後述する。現在のところ筆者らが実施している方法は、切羽の状態・素掘面の状態といった施工段階でなければ得られない項目以外の地質情報を、切羽判定を行う同じ評価点手法を露頭やボーリングコア（以下、コアとする）の観察時に適用するものである。コアの情報をトンネル施工レベルへ展開する手法としては、図.1 の右下のフローに示すように、ボーリング孔内検層（速度検層、電気検層）の結果と切羽判定を行う同じ評価手法により点数化したコアの評価点との相関を求め、地表や孔内・坑内から実施する物理探査の結果から面的な評価点の分布を推定するものである。

一般的には弾性波速度が速く、比抵抗値が高いほど評価点は高いが、弾性波速度や比抵抗値は地質、土被り、地下水の水質などに影響されるため、各トンネルの各土被り区間で物理量と評価点との関係

を求める必要がある。

このため、各物理量と評価点の相関は類似トンネルでの調査・施工実績によることなく、対象トンネルそのもので実施することが必要である。

調査報告書の最終成果である「総合地質断面」では地質分布、弾性波速度、各種孔内・室内試験結果、地山等級に加え、新たに各地質に対応した評価点が記入される。

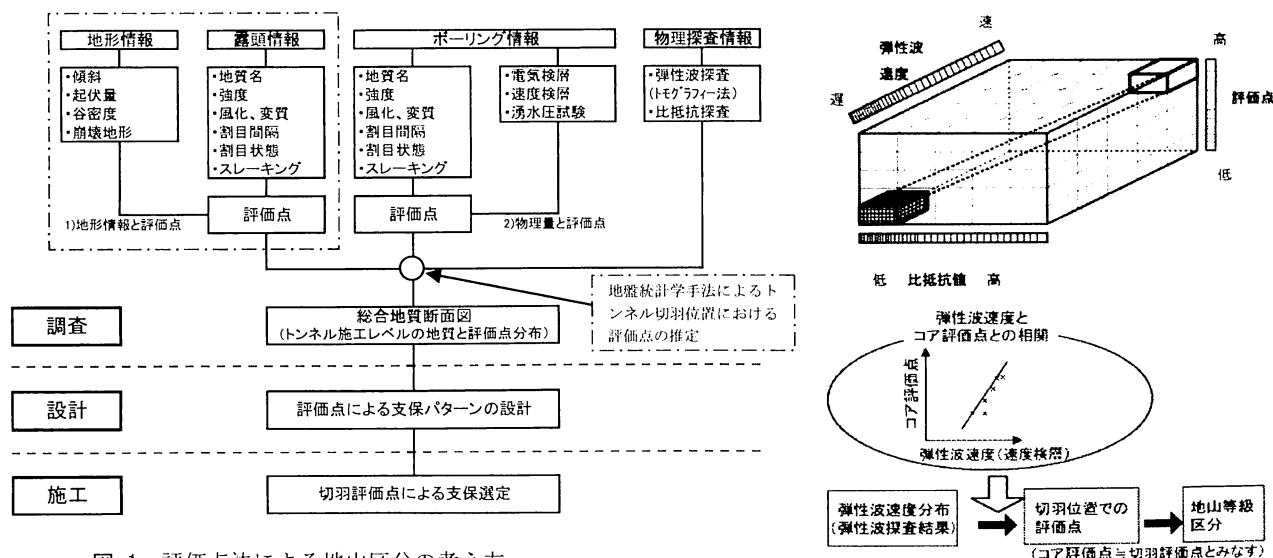
設計段階では、この評価点を参考に、支保パターンの選定や補助工法必要性の可否、坑口パターンの区間や非常駐車帯の位置などを検討する。施工段階ではこの設計支保パターンの妥当性を切羽での評価点によって確認していくことになる。

このように、各段階で同じ基準による評価点で情報伝達されるため、個人差や情報劣化がなく精度の高い技術・コスト管理が期待できる。

3. 評価点法による地山区分の実施例

図.2 に火山岩地山トンネルのボーリングコアを評価した事例を示す。評価点は切羽と同じく圧縮強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の性状を1 mごとに点数化した。このうち、圧縮強度は切羽評価と同様にポイントロード試験で算定した。また、割れ目の間隔は、RQD 算出のようなコアの長さではなく、割目の傾斜も考慮した「実間隔」で整理している。

トンネルの切羽判定では「弱層の分布割合」が



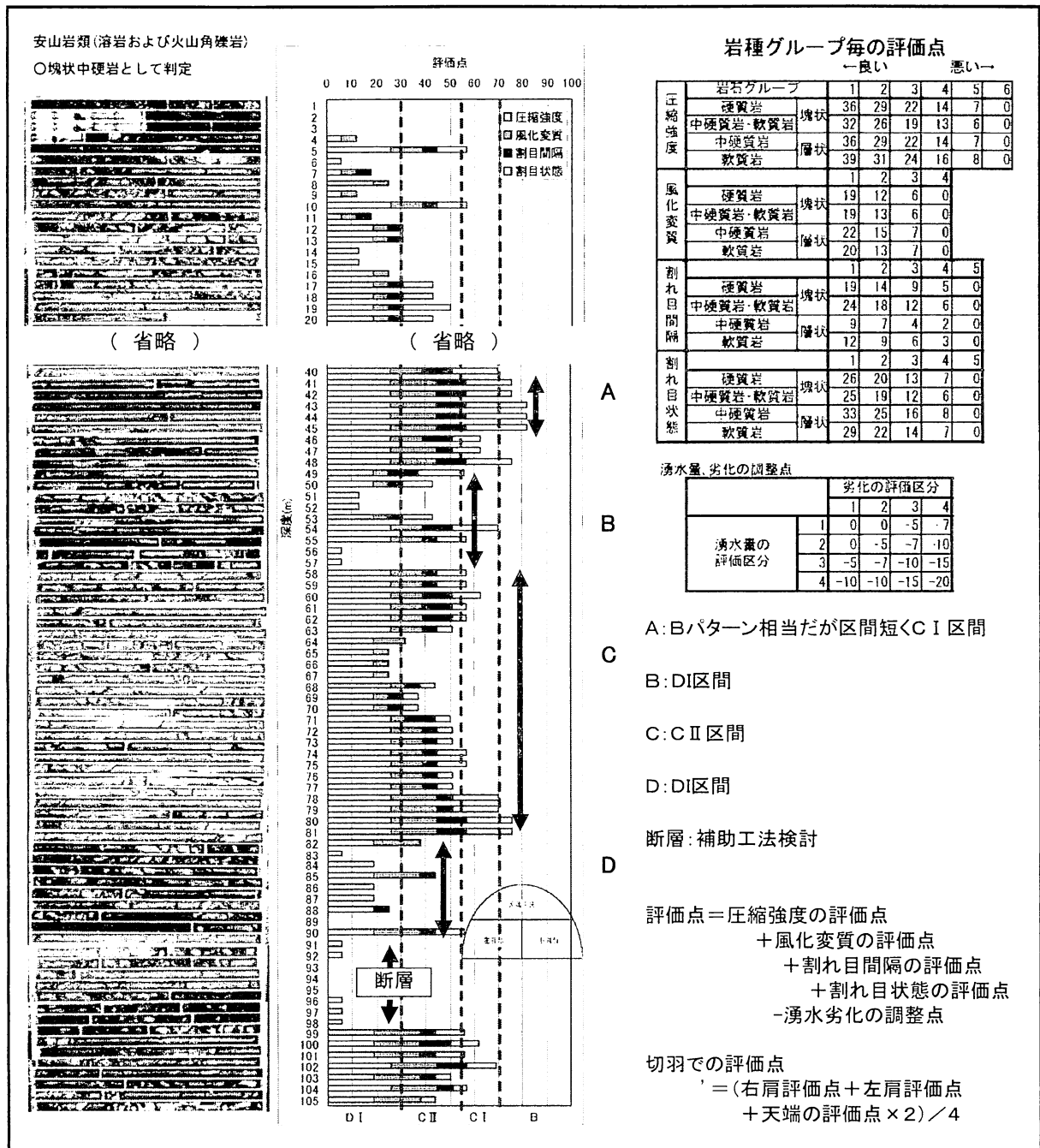


図.2 ポーリングコアの評価点例

10%, 30%を境に健全部の評価点, 健全部の強度と弱層の強度の中間評価点, 弱層の評価点で評価することになっている。このため, トンネルの掘削断面の大きさと地層連続を考慮して地層区分ごとの代表的な評価点を選定した。このようにして選定した支保パターンと施工パターンの関係は図.3⁸⁾のようになっている。トンネルトータルの支保パターンの延長も図.4⁸⁾のような状況になっている。図.4に示すように, 類似の火山岩トンネルでは, 設計段階ではBパターンが約3割, C IIパターンが約1割を占

めているが, 施工実績ではBパターンが1割以下に減少し, かわりにC IIパターンが約3割を占めるまでに増加している。すなわち, B, C Iといった鋼アーチ支保工の無いパターンが鋼アーチ支保工のあるC IIパターンに変更されていることがわかる。これに対し, コアの評価点により設計を行ったトンネルでは, 設計と施工実績に占める各支保パターンの割合は比較的一致しており, 評価点法により精度の高い設計が行われていることがわかる。

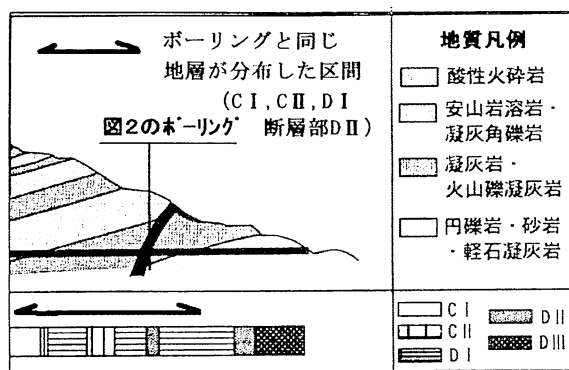


図.3 評価点区分付近の実績支保パターン⁸⁾

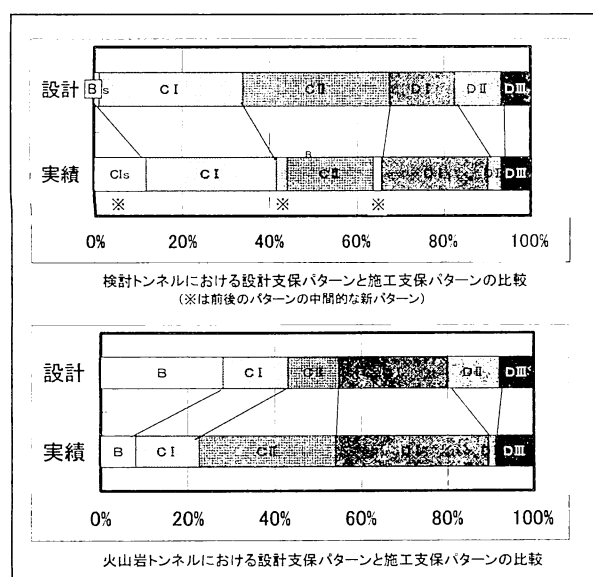


図.4 トンネル支保パターンの設計と実績の対比⁸⁾

4. 精度の向上に関する検討

(1) 地形評価

図.5に示すように、斜面の傾斜や起伏量は岩盤の強度と透水性に規制され、強度の大きな地山ほど起伏量が大きく、透水性が高いとなだらかなる⁵⁾。透水性は割目の間隔と割目の性状に関連するため、地形情報は評価点と相関があると言える。

図.6, 7は付加体トンネル¹⁰⁾で、トンネル切羽の評価点と近傍の斜面傾斜の関係を整理したものである。トンネルからの距離が最小となる斜面(図.6のLmin)の傾斜を最近斜面とすると図.7-1に示すように関連は薄い、切羽に分布する地層Bが形成する斜面の最大傾斜と切羽評価点の関係を整理すると、両者にやや強い相関がある。これは、地質解析で、切羽と同じ地層が分布する地表面傾斜を測定すれば、切羽評価点を推定できる可能性を示す。

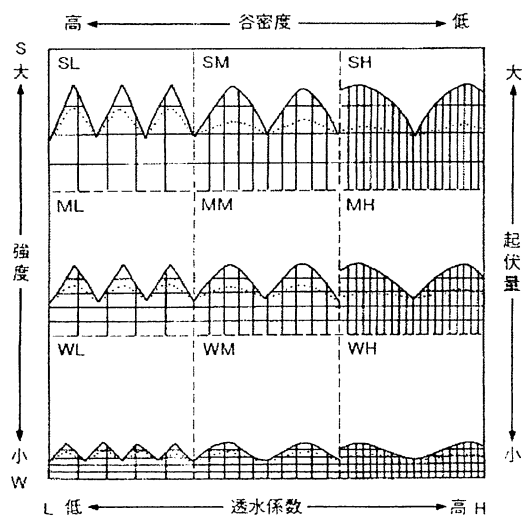


図.5 強度・透水係数と谷密度・起伏量の関係⁵⁾

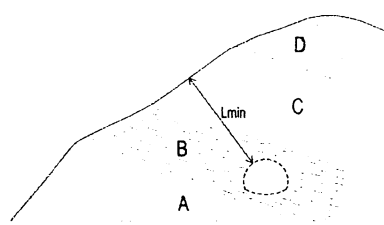


図.6 地表面傾斜とトンネル地質の関係

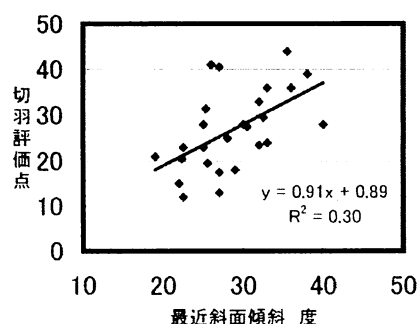


図.7-1 最近斜面(Lmin)傾斜と切羽評価点の関係

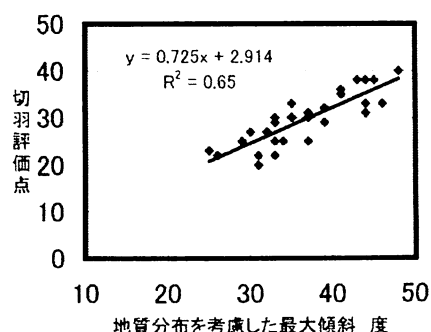


図.7-2 地質分布を考慮した最大傾斜と切羽評価点の関係

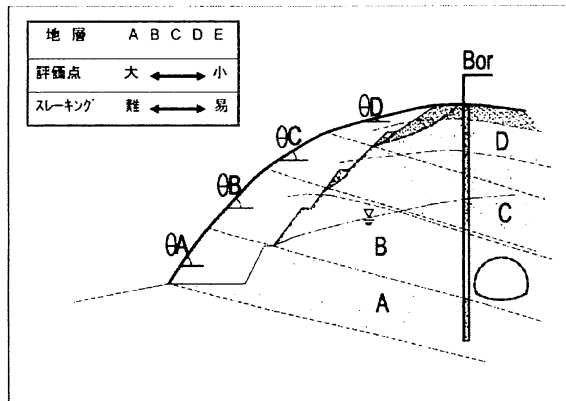


図.8 露頭・切土観察時の着目点

(2) 露頭評価

地質断面図の作成には谷沿い等の露頭観察や人工的な切土での観察が不可欠である。露頭において地質情報を評価点化する場合も、地質名のみならず強度、風化変質、割目間隔、割目性状を切羽評価と同じ評価点で整理する。また、露頭評価ではボーリングコアよりも広範囲の二次元的な評価が可能であり、スレーキングのしやすさの評価が可能である。スレーキングは乾燥や浸水の繰り返しにより岩盤の強度が低下する現象である。泥岩や凝灰岩などの軟質岩ではマイナスの評価点として大きなウエイトを示す。図.8示すような、表層のみのスレーキング（地層 B）、深部までのスレーキング（地層 C）、あるいはスレーキングした部分が崩壊を生じている（地層 D）かどうか判別することは、支保パターンの判定のための評価点算出のみならずインバートの設置の必要性を検討する場合に有効である。

(3) ボーリングコアの評価

ボーリングコアの評価は調査結果評価の根幹となる部分で、切羽評価に必要な情報を最大限に引き出す必要がある。

これまで 1m ごとに評価点を算出し、その連続性も考慮してグループ化した地層ごとに代表的な評価点を与える手法⁶⁷⁾を採用し良好な結果を得ている。また、ボーリングコアの評価点をトンネル施工レベルへ展開する方法としては地質学的な図学から延長を検討することとなるが、図.9に示すように、露頭やコア観察から求める地層の傾斜とトンネルの高さの関数となる。従来の地山分類表では「トンネルの施工基面から 1.5D（D はトンネル直径）の弾性波速度を参照」に検討することになっている。

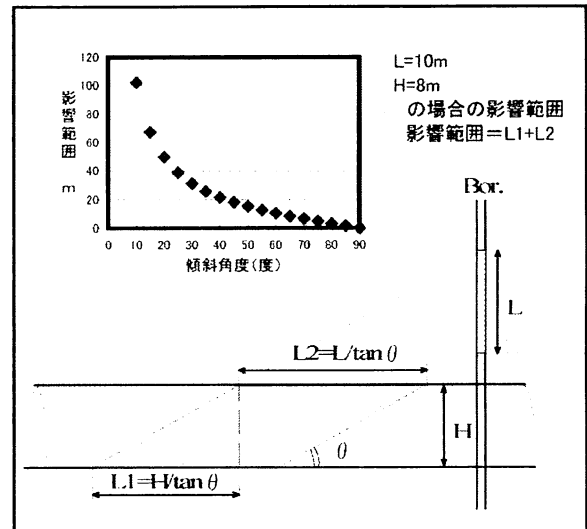


図.9 地層の傾斜とトンネル分布延長

しかし、弾性波探査は深部になるにつれ探査精度が低下することから、地下深部に位置するトンネル切羽位置における弾性波速度を見かけ上細かく区分しても意味がなく、弾性波速度のみから精度の高い地山分類を行うことには限界がある。したがって、弾性波速度区分を介することなく、評価点区分線で延長を検討する必要がある。

図.2において、湧水劣化のマイナスの配点は大きく、的確な評価が必要となる。地盤工学会や土木学会の「スレーキング試験」仕様ではそれぞれ 60℃、110℃で 24 時間強制乾燥後、水浸させて変化を観察することになっているが、トンネルの掘削サイクルの中ではこのような強制乾燥の条件にはなりえない。そこで、施工段階では切羽で採取した自然状態のコアを水浸させて劣化度を判定することにより、定量的に湧水・劣化の区分を行うことが多い。この際、1 日自然乾燥させた段階で試験を行うと結果に大きな差が生じる場合があるため、(写真 1) ボーリングコアで劣化の評価を行う場合には採取後直後のコア写真撮影後に浸水崩壊試験を行い、「湧水劣化の調整点」を評価することが望ましい。

また、トンネル施工時の湧水量の推定には、ボーリング孔内での湧水圧試験や揚水・注水試験で地山内の水位や透水係数を求め、井戸公式等で推定する。しかし、付加体地山などでは大きな脚部沈下や切羽崩壊が生じ施工上の問題が発生する区間は、必ずしも湧水が多いわけではない。多くの場合、湧水を抑制するような潜在亀裂沿いにフィルム状の粘土を伴う。中田らは、スレーキング試験において一度の

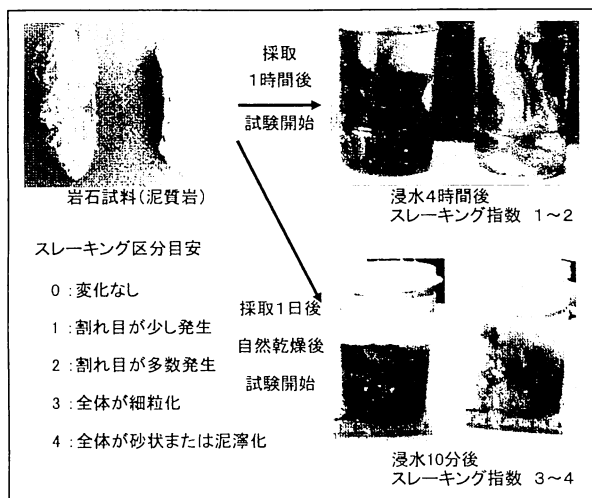


写真.1 試験開始時期による浸水崩壊度の相違

乾湿繰り返しで明らかに形態変化が起こる現象を「浸水崩壊」とした¹²⁾が、コア観察時の割目性状の評価や浸水崩壊試験でのスレーキング指数を参考にマイナスの調整点を柔軟に評価することが必要である。

5. 評価点法の有効性と発展

(1) 評価点の変更への対応性

日本における切羽評価点による支保判定はNEXCOの基準適用が主流となってきたが、各発注機関で独自の評価点を採用している場合もある。また、データの蓄積などで評価点が見直される場合もある。

図.10はNEXCOによる軟質塊状岩の評価点の例で、施工実績から評価点の配点を見直した結果、圧縮強度の配点、割目間隔の配点に変更されている。このような場合でも、基本となるデータに基づき新配点を行うことにより、コアや露頭の地質情報を最新の設計・施工に直ちに反映することが可能である。

また、海外ではRMRやQ値により支保選定を行っている場合もあり、このような場合も事前のコア評価や露頭情報の整理をRMRやQ値の基準に基づき整理することが、調査、設計、施工時の乖離を抑制することに繋がる。

(2) 地盤統計学的手法による弾性波速度の推定

弾性波探査においては、その探査原理上、上位層の弾性波速度より下位層の弾性波速度の方が速い

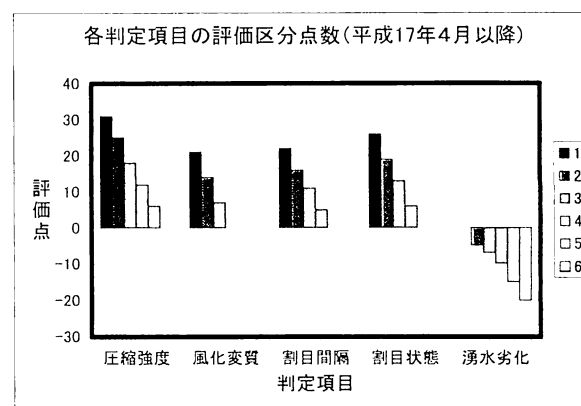
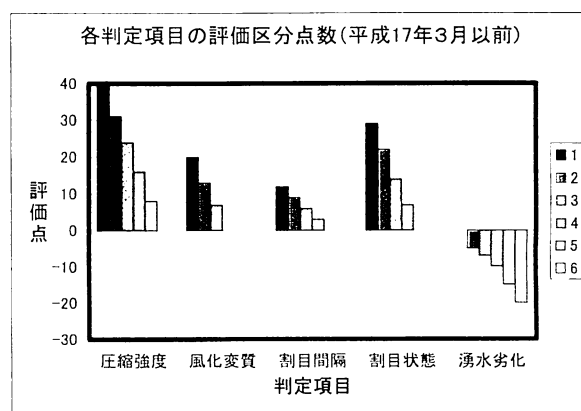


図.10 評価点の変更事例(NEXCO:軟質塊状岩)

ことを前提とし、上位層の弾性波速度が下位層の弾性波速度より速い場合には、速度の逆転層と呼ばれ、下位層を検出することができない。このようなことから、弾性波探査においては、最下層以深の弾性波速度については、最下層の弾性波速度が鉛直下方に続くものとして解釈されるものの、最下層以深にも最下層の弾性波速度より遅い速度層が存在する可能性がある。したがって、最下層以深の弾性波速度については未知とみなして、何らかの推定を行うことが望ましい。

大津ら³⁾は、地盤統計学手法の1つである外生ドリフト・クリギング手法によりトンネル切羽位置における弾性波速度の推定を行っている。この研究では、弾性波探査結果を不確実性が大きい面情報として、また、ボーリング孔で実施された速度検層結果は精度の高い点情報として、面情報および点情報を組み合わせてトンネル切羽位置における弾性波速度を推定している。図.11に、対象とした花崗岩地山の地質断面図と支保パターンの推定結果・実績の比較図を示した。

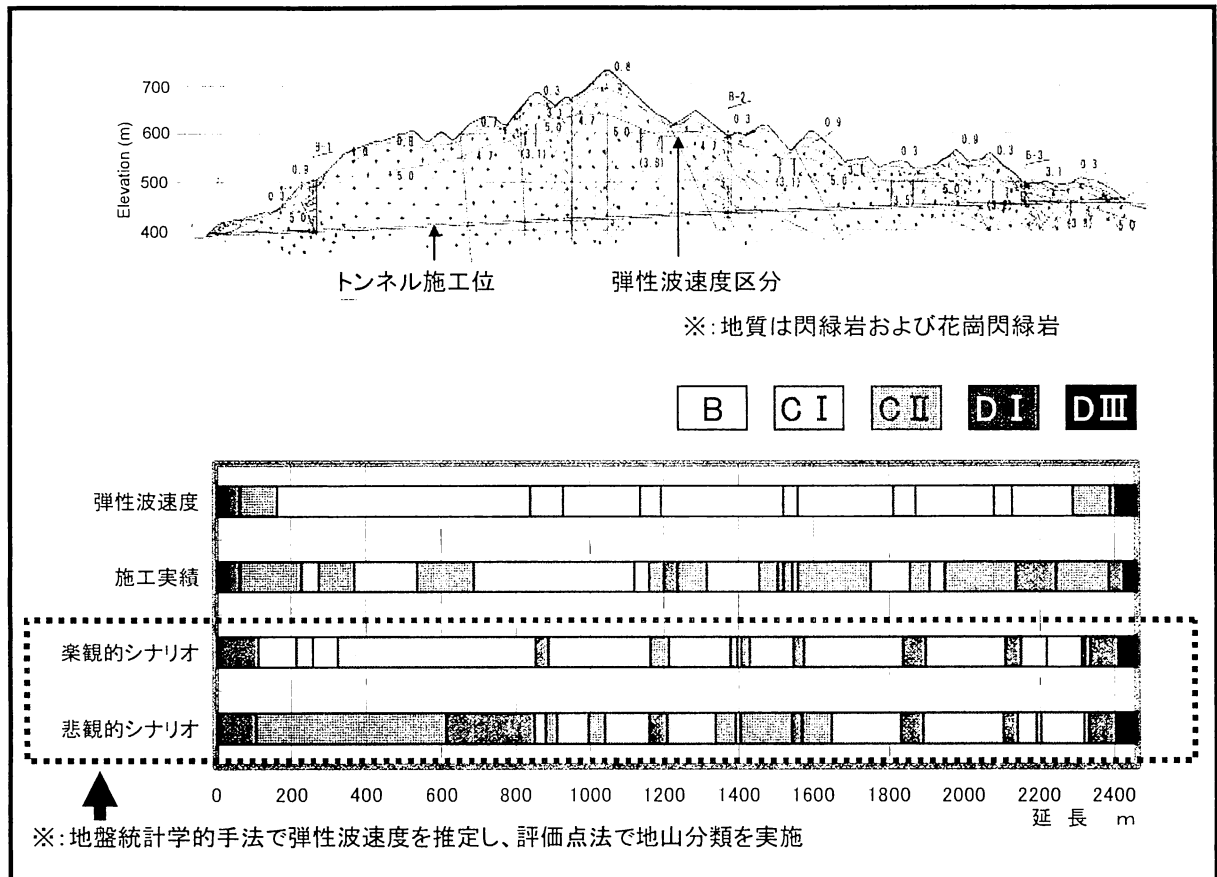


図.11 地盤統計学的手法による地山分類検

地山区分表の弾性波速度に主眼を置いた地山区分では、全線の8割程度がBパターンと推定されたが、実績支保ではBパターンの割合は1割以下であり、CIパターンとCIIパターンがそれぞれ4割程度であった。これに対して評価点法を用い、地盤統計学的手法で推定した弾性波速度を用いて地山分類を行った結果を図.11に示す。地盤統計学的手法を用いることにより弾性波速度の推定誤差標準偏差 σ が得られる。そこで $+1\sigma$ の弾性波速度をOptimistic（楽観的予測）、 -1σ の弾性波速度をPessimistic（悲観的予測）として地山分類を行ったものである。地盤統計学的に推定した結果では、いずれの結果もBパターンは区間長の1割以下であり、実績に近い評価となっている。

地盤統計学的评价法の詳細は論文^{3),4)}にゆだねるが、評価点法にこのような統計学的手法により、弾性波探査結果と速度検層結果を組み合わせたトンネル切羽位置における弾性波速度の推定を行うことにより精度向上が期待される。また、推定誤差標準偏差を用いることで、精度評価が可能となる。

6. あとがき

従来の地山分類表による地山評価においては、2.1で述べたように、弾性波速度を頼りに地山の評価を行いつつ、担当技術者の定性的な判断で地山評価の見直しが行われている。これに対し、評価点法を用いることにより、定量的な手法により地山評価を行うことが可能となり、しかも、地山分類表による地山評価と評価点法による地山評価と実施工を比較することにより、評価点法が有効であることがわかった。現在のところ、評価点法は、ボーリングコアの評価点と弾性波探査結果を結びつける手法を採用しているが、図.1に示したボーリングコアの評価点と弾性波速度との相関におけるデータのばらつきを考慮すれば、統計的な地山評価も可能となる。

なお、将来的には、図.1に示したように、地形情報、露頭情報も取り込んだ評価手法に発展させたいと考えており、付加体地山の泥質岩と砂質岩の最大傾斜量と切羽評価点にやや強い相関があることがわかったが、起伏量や谷密度情報の評価点への反映は今後の課題である。

また、本論文で述べた地盤統計学手法は、弾性波速度以外のパラメータ（たとえば、評価点）にも適用可能である。本論文で述べた地盤統計学手法のひとつである外生ドリフト・クリギングの特徴は、精度のあまり高くない面情報（たとえば、弾性波探査結果）と精度の高い点情報（たとえば、ボーリングデータ）をもとに、任意の地点におけるデータの推定を行うものである。このため、面情報としての地形情報および弾性波探査結果、点情報としての露頭情報、コアの情報を組み合わせることによりトンネル切羽位置での地山分類の精度向上が期待される。

参考文献

- 1) 鈴木守・富田宏夫：トンネル地質調査の性格と問題点(2)，トンネルと地下，1993.10
- 2) 中川浩二，保岡哲治，北村晴夫，三木茂，藤本睦，木村恒雄：トンネル事前設計における地質調査の問題点とその評価に関する研究，土木学会論文集，No.658/VI-48，2000.9
- 3) 大津宏康・坂井一雄・長谷川信介：屈折法弾性波探査を用いた山岳トンネルにおける地山区分推定手法に関する研究，材料，日本材料学会，Vol.56，No.9，pp.820-827，2007
- 4) 長谷川信介，・大津宏康・坂井一雄：山岳トンネル調査における地盤リスク評価の試み，建設マネジメント研究論文集，土木学会，Vol.14，pp.45-54，2007
- 5) Suzuki,T.,Tokunaga,E.,Noda,H and Awakaea,H(1985)
:Effects of rock strength and permeability on hill morphology, *Transaction, Japan, Geomorphological, Union*,6-2,pp101-130
- 6) 木村正樹・杉田理・大塚康範：評価点法を用いた事前調査による地山評価と施工，土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集 第11巻,pp87-92 2001.11
- 7) 木村正樹・杉田理・長谷川信介・古田尚子：トンネル建設における評価点法の活用に関する考察，第13回トンネル工学研究発表会,pp.37-44,2003.11
- 8) 木村正樹・岡部幸彦・鳥居敏・一幡和之・安田徹：火山岩地山トンネルの建設における評価点法の活用，土木学会，トンネル工学研究発表会報告集 第16巻 pp.83-90，2006.11
- 9) 真下英人・砂金信治・遠藤拓雄・木谷努：切羽観察表を用いた地山等級の判定手法に関する一提案，土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集 第14巻,pp89-93 2004.11
- 10) 木村正樹・渡辺雄二・杉田理・古田尚子：傾斜区分を考慮したトンネルの地山評価，土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集 第14巻,pp69-76 2004.11
- 11) 中川浩二：弾性波速度分布によるトンネル岩盤の事前予測と施工時の岩盤評価との関係，日本応用地質学会，平成13年度講演会概要集 2001.6
- 12) 中田英二・大山隆弘・馬原保典・市原義人・松本裕之：海底下堆積岩の浸水崩壊特性と水質が強度・透水特性に与える影響、応用地質,第45巻,第2号,p71-82,2004
- 13) 三宅和志：トンネル事前設計における弾性波速度評価に関する研究，山口大学大学院工学研究課修士論文,2002.2

Study on effectiveness and problems of the scoring method for ground condition assessment in tunnel construction

Since 2001, the authors have carried out geotechnical data assessments using a *scoring method* with the same criteria as for cutting face classification. In introducing the scoring method, the result of geophysical investigation must be fully exploited, and the accuracy of assessment can be further enhanced by combining with a geostatistic method. But, since the use of geophysical investigation is often minimized due to current financial embarrassment of construction owners, the authors studied in this paper how to make the best use of the information obtained from field exploration and boring cores and described the effectiveness and problems of the scoring method.