

トンネル支保選定エキスパートシステムの開発（その1）

——切羽観察からの支保選定方法——

畑 浩 二 藤 原 紀 夫
木 梨 秀 雄 中 尾 通 夫
(本社 情報システム
センターシステム開発
第二部)

Development of Expert System for Tunnel Support (Part 1)

——Determination of Tunnel Support from Tunnel Face Observation——

Koji Hata Toshio Fujiwara
Hideo Kinashi Michio Nakao

Abstract

Mountain tunnelling traditionally could not escape depending on qualitative judgment based on experience and feel since modification of support patterns during construction relied to a great extent on judgment of expert engineers. In recent years, artificial intelligence and expert systems have drawn much attention. The authors thought that the expert system would be suited to civil engineering problems such as tunnelling, and have been developing an expert system for tunnel support.

This paper describes the expert system developed for determination of tunnel support used for tunnel face observation, and this system was applied at a tunnel job site. The system consists of taking a tunnel face picture by still video camera, image processing, and evaluation of tunnel support.

概 要

山岳トンネル施工中における支保パターンの修正については、専門技術者の判断に負うところが大きく、まさに経験や勘といった領域から抜け出せないものであった。そこで、本研究ではトンネルの支保パターン選定に近年注目を集めているエキスパートシステムを導入することによって安全かつ経済的・合理的な施工の実現を目指し、坑内観察、各種原位置計測ならびに数値解析を利用したトンネル支保工規模の選定を支援するエキスパートシステムの開発を行なっている。この報告は、経験的方法である切羽観察から地山分類を行ない、支保選定を支援するため開発されたエキスパートシステムの概略を紹介し、現場適用事例について述べるものである。

1. はじめに

山岳トンネルでは事前地質調査の結果から、地山区分ごとに標準支保パターンを設定している。しかし、トンネルは線形構造物であるため、複雑に変化する地山特性を掘削前に把握することは困難である。トンネルを安全にかつ経済的・合理的に施工するためには、観察や計測の結果を利用し支保パターンを現地の状況に即したものと修正していくことが必要となる。

施工中における支保パターンの選定には、経験的方法、観測的方法および解析的方法の3つの方法がある。経験的方法である坑内観察結果を用いる方法は、切羽の節理や湧水状況などから地山分類を行ない、切羽を定量的に

評価しようとするものである。観測的方法である内空変位計測などの原位置計測では、出来るだけ初期の計測段階で最終の変形量や応力状態などを予測することが重要になる。一方、岩盤力学の発達と数値解析技術の向上により解析的方法は有効な道具となりつつある。これらの方法は本来単独で利用されるべきものではなく、それぞれが有機的につながりトンネルの経済的かつ合理的施工に寄与しなければならないと考える。

近年、AI（人工知能）やエキスパートシステムが注目を集めている。エキスパートシステムはAIを応用したもので、専門技術者の持っている知識や経験をコンピュータに取り込み、複雑な専門的問題をコンピュータで解決させようとするものである。このシステムは、各専門

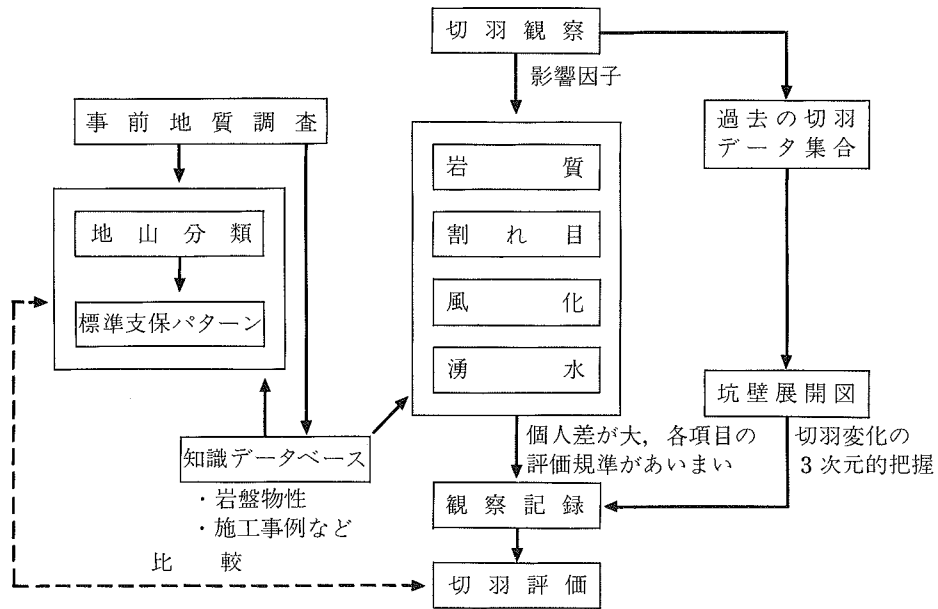


図-1 切羽の観察を中心とした思考モデル

技術者が持っている知識やノウハウを蓄積するため専門的問題に対する処理効率が格段に向上すること、若年技術者にも専門技術者と同様な判断が下せるなど利点が多い。トンネル工学は経験工学と呼ばれるように、専門技術者の持っている知識・経験・勘などを総合的にまとめて成り立っている工学である。トンネルの支保規模選定のように専門技術者の総合判断が必要となる問題には、エキスパートシステムが向いているものと考えられる。

2. 支保選定エキスパートシステムの開発

トンネル施工時の状況判断や意思決定業務のシステム化を図ることが目的となるが、本来これらの処理は数値解析を原則とする従来のコンピュータには馴染みにくく、実際の作業の不透明さも手伝って完全に人間の手にゆだねられていた。このような問題の質から考えて、記号処理技術を中心としたAI技術を活用する利点は大きい。具体的には、ルールベースプログラミング、画像処理技術、ニューラルネットワーク、ファジィ理論などのAI技術と、データベースや数値計算プログラムなどの従来技術を適切に使い分け、あるいは統合することにより柔軟性の高いエキスパートシステムの開発を目指すものである。

ここではまず第一段階として、経験的方法である切羽観察から地山分類を行ない、支保規模の選定を支援するためのエキスパートシステムを開発したので以下に述べる。

2.1 システムの概要

システムの開発に先立ち、切羽観察を利用した支保規模の選定とその関連業務の意思決定および判断方法を分析してみると、図-1に示すような思考モデルが考えられ、以下のことが問題点として挙げられる。

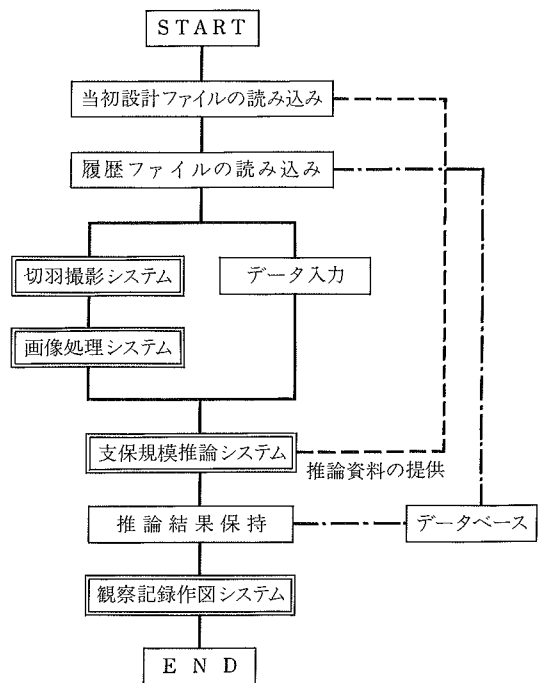


図-2 エキスパートシステムのフロー

- ① 思考モデルが業務担当者に認識されていない。
- ② 観察記録の記入は個人裁量にゆだねられている。
- ③ 観察記録から積極的な情報抽出は行なわれてない。
- ④ 切羽の認識方法が統一されていない。
- ⑤ 観察記録記入には多大の労力を要する。

以上のことから、図-1に示す思考モデルでは「切羽の認識とその描写」が最も重要になることが判明した。ここでは、この点を考慮したシステム開発を行なうものである。

開発したエキスパートシステムのフローを図-2に示す。この中で、切羽撮影システム、画像処理システム、支保規模推論システムおよび観察記録作図システムが中核を成す。まず、対象となる切羽で撮影を行ない切羽画像を入手する。この切羽画像にマイクロコンピュータで各種処理を施し、割れ目や湧水などの特徴を抽出しやすい画像に変換する。既存の画像処理では情報抽出の不足が生じる場合は、切羽画像をモニターしながら観察者が随時追加修正を行なう。変換された切羽データは観察記録作図システムに引き継がれる。次いで、支保規模推論システムで切羽画像と処理画像を参照しながら地山性状を入力すれば、即座に地山分類を行ない支保規模を推論するようになっている。得られた結果は観察記録作図システムに引き継がれ、プリンターにより出力される。以下、詳細について述べる。

2.2 切羽撮影システム

通常、現場では坑内観察記録が作成される。この記録表に関しては、原位置でのスケッチや写真を利用して切羽情報、例えば亀裂や節理および湧水状況などを記述しているのが現状である。この方法では、記述に要する時間は多大なものとなり、非効率的である。さらに、支保パターンを選定するに当たり切羽観察を積極的に活用するためには、切羽からの情報をより速く評価してやる必要があるとなり、切羽観察記録の作成をよりスピーディーに行なうことが極めて重要なこととなる。

著者らは実用的で簡単な方法として、一眼レフ方式のハイバンドスチルビデオカメラを利用することを考えた。装置の概略を図-3に示す。このカメラの映像記録の入口は、高感度38万画素のCCD撮像素子から成っている。この装置の大きな特徴は撮影画像が2インチフロッピーディスクに格納され、現像することなく撮影画像を即座にモニターおよびプリンターで再現できるところにある。この切羽画像データはイメージデジタイザを利用してマイクロコンピュータに入力され、画像処理システムに引き継がれる。撮影方法は通常の写真撮影と同様であるため、特別な処置を講ずる必要はない。この装置によって、切羽記述作業がかなり短縮される。

2.3 画像処理システム

前述の切羽撮影システムから得られる切羽画像を利用し、有益な情報の抽出と切羽観察図の作成のため画像処理技術を導入する。画像処理の効果としては、短時間で原画像に忠実な切羽情報を抽出できること、原画像がデータベース化できるため信頼度の高いデータとして再利用可能なことが挙げられる。

一般に、撮影された画像にはいろいろな雑音やひずみが含まれている。画像から有益な情報を得るためには、雑音やひずみを極力取り除いてやらなければならない。画像処理の最終目的である画像解析による特徴の抽出のためにも、画質の改善は必要不可欠なものである。そこで、このシステムではエッジ強調や平滑化・鮮鋭化フィルタを組み込み、これらを適宜組み合わせることによ

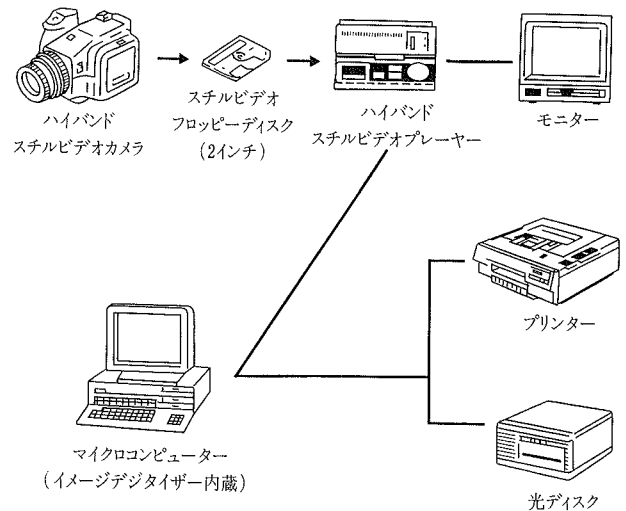


図-3 切羽撮影システムの概略

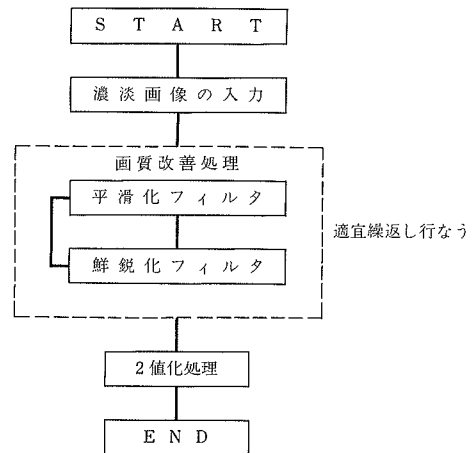


図-4 画像処理フロー

り対処することとした。画像処理の概略フローを図-4に示す。まず、撮影された切羽画像はマイクロコンピュータに組み込んだ512×512画素×8ビット×2画面のメモリを実装したイメージデジタイザに記録された後、各種フィルタにより画質改善が行なわれる。次いで処理の高速化や経済性を考慮して2値画像に変換し、節理や湧水状況などの特徴抽出を行なう。通常、「色」には貴重な情報が含まれているが、ここでは処理能力の制約から白黒の濃淡画像(256階調)を利用して画像処理を行なう。

画像処理は画像解析による特徴抽出を目的としているが、現状の処理技術からでは切羽の情報すべてを抽出することは困難である。そこで、情報の不足については観測者が適宜追加修正できるようにしている。ここで得られるデータは、観察記録作図システムに引き継がれ切羽観察図および地山評価資料を作成するときに利用される。本システムにおいて、岩種や割れ目介在物など数値処理

からでは得られない意味情報については、処理画像を参考にして後述の支保規模推論システムで与えている。将来的には、画像処理と知識ベース（岩種や力学物性）を積極的に利用する支保規模推論のアルゴリズム開発を目指す。

2.4 支保規模推論システム

切羽の描写とともに重要なのが切羽の認識・評価である。切羽を認識するためには、岩盤分類を利用した定量評価を行なう必要がある。岩盤評価手法にはいろいろある²⁾が、ここでは、北陸自動車道管内で試行された道路公団切羽評価方法³⁾と Bieniawski の提案した RMR 法⁴⁾に着目する。前者は切羽の状態、岩石強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の形態、割れ目の状態および湧水の7項目に対して評価点をつけ、その平均値で岩盤を評価しようとするものである。一方、後者の RMR 法は、岩石コアの一軸圧縮強度、RQD、割れ目の間隔、割れ目の状態、地下水の状態および割れ目の方向の6つのパラメータを定量的に取り扱い、各パラメータに対して評価点をつけ、これらの総和により岩盤を評価しようとするものである。このシステムでは、これらの地山評価点を基に支保規模の推論を行なう。

コンピュータにこれらの処理をさせるためには、従来型数値計算言語とは別個の知識処理言語が必要となる。いわゆる、エキスパートシステム構築ツールを用いたプログラム開発を行なうことになる。構築ツールは種々あるが、このシステムでは米国インファレンス社の開発した ART-IM (Automated Reasoning Tool for Information Management) を利用する。ART-IM は、データ駆動型の本格的なパーソナルコンピュータ用エキスパートシステム構築ツールである。エキスパートシステムの基本構造は、知識ベースと推論エンジンから成り立つ。このツールにおける知識ベースは IF「条件」…THEN「結論」…形式のプロダクション・ルールで表現される。推論エンジンは C 言語で記述されているため、高速推論が可能であるなどの特徴を有している。

支保規模推論システムは、ユーザとのインタラクティブな会話形式で進行するため、システムに問われるまま正確な割れ目等の情報を入力するだけで良い。実際の処理は、道路公団準拠の坑内観察記録に付随した「観察による地山の状態と性状」に関する質問事項および追加質問事項の入力が完了すると、上述2方法による地山評価点が計算され、これに対応する地山等級が出力されるようになっていく。質問事項は切羽の状態、素掘面の状態、圧縮強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態、割れ目の形態、湧水および水による劣化の9項目である。ここでは、地山等級と支保規模を1対1に対応付けているため、即座に支保規模が求められることになる。ここで得られるデータは、観察記録作図システムに引き継がれ、地山評価資料および支保規模判定表を作成する時に利用される。

上述2方法で計算される評価点と地山等級の関係は、

表-1 評価点と地山等級の関係

道路公団評価点	RMR 評価点	定義	地山等級
	81 ~ 100	極度に良い岩盤	A
25以下	61 ~ 80	非常に良い岩盤	B
25 ~ 40	41 ~ 60	良い岩盤	C _I
40 ~ 50	31 ~ 40	普通の岩盤	C _{II}
50 ~ 65	21 ~ 30	悪い岩盤	D _I
65以上	0 ~ 20	非常に悪い岩盤	D _{II}
	0以下	極度に悪い岩盤	

道路公団方式では標準支保パターンを、RMR 法では Bieniawski の提案を若干修正してそれぞれ利用している。道路公団方式および RMR 法の評価点と地山等級の関係を表-1 に示す。なお、これらの関係はあくまでも著者らの案であり、今後現場での試行データの蓄積とともに改良が必要となるであろう。

2.5 観察記録作図システム

このシステムでは、以下に示す結果の出力をレーザープリンターで行なう。

① 坑内観察記録

記録表は、切羽観察図、変状・特殊施工表および観察による地山の状態と性状表から構成されている。本表は東北自動車道トンネルで適用された坑内観察記録を手本に作成した。

② 地山評価資料

本資料は、地山評価を行なう上での参考とするもので、切羽観察図、地山評価基準項目、評価点および地山等級(支保規模)等の表示から構成されている。このシステムには道路公団評価方法と RMR 法を組み込んでいることから、2種類の判定資料が得られる。

③ 支保規模判定表

上述2種類の判定結果をまとめたもので、総合判定資料となる。

3. 現場適用事例

安山岩質の山岳トンネルで上述の「支保選定エキスパートシステム」を試行し、切羽撮影システム、画像処理システム、支保規模推論システムの適用性検討を行なった。

対象とした岩質は、新第三紀中新世の安山岩で比較的硬質であるが、部分的には風化を受けた凝灰質安山岩もあり、シュミットハンマーによる推定圧縮強度は 200 ~ 500 kgf/cm² 程度である。切羽状況は、全体にわたり白色石英脈(幅約 5 mm 程度)や粘性土が介在した目が多く肌落ちしやすいものと判断された。実際、コソク中に目に沿った岩塊の滑落が認められた。割れ目の間隔は 20 ~ 50 cm 程度であり、部分的に開口しているものもあった。また、局所的な少量の滴水が認められた地点もあった。

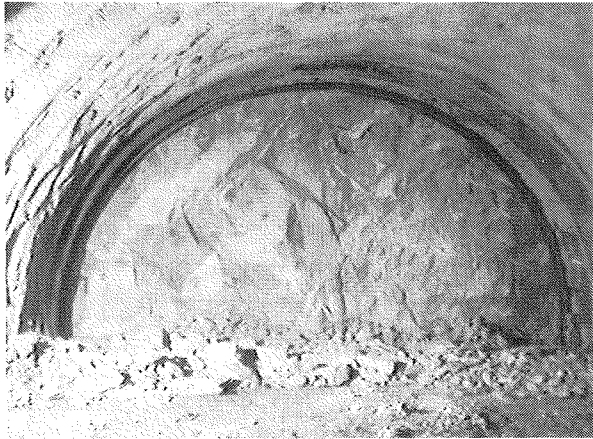


写真-1 切羽撮影画像

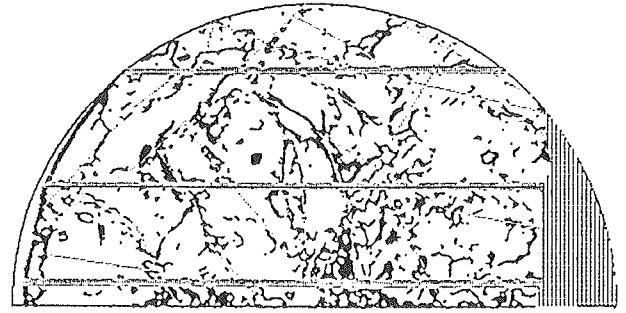
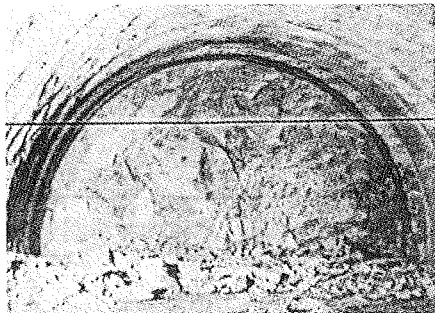
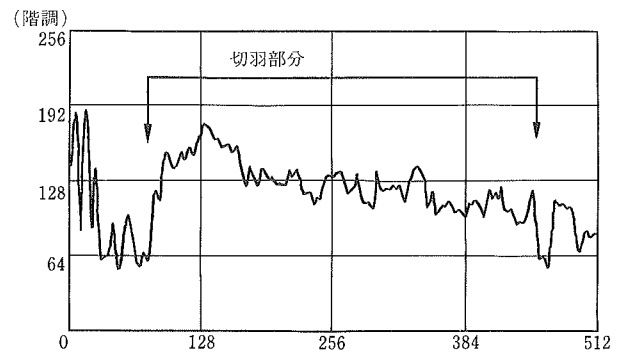


図-5 処理画像



(a)



(b)

図-6 濃淡測定結果の一例 (a) 濃淡測定位置；実線部 (b) 濃淡測定結果

た。実際現場では、地山を C_{II} と判断し施工している。

写真-1 にハイバンドスチルビデオカメラで撮影した切羽状況を示す。撮影方法自体は通常の写真撮影と同様であるため特別な処置を講ずる必要はないが、画像処理によって不必要な情報を抽出しないようにするため、外部光で生じる陰影には配慮しなければならない。外部光としては工事用電灯(1kW程度)で十分である。撮影に要する時間は数分であり、今回は支保工建て込み直後から次作業の間に実施したため、何ら支障は無かったものと判断できる。次いで、写真-1の撮影画像をマイクロコンピュータに入力し、画像処理を行ない割れ目等の情報を抽出する。観察者が割れ目情報等を追加した処理画像を図-5に示す。この図から、主要な割れ目群についてはなんとか抽出できているものの、細かなものについては不十分であると判断された。画像処理は、撮影画像の濃淡256階調からあるしきい値を境にして割れ目を抽出するようにしている。そのため、割れ目および割れ目以外の部分の階調差が小さい画像、すなわち全体的に階調幅の狭い画像に関しては処理が難しくなる。対象切羽は全体的に白っぽく色調に大きな変動はなかったこと、さらにコソクの傷痕が白っぽく残っていたことから十分

な処理が行なえなかったものと考えられる。切羽の任意水平線上における濃淡測定結果を図-6に示す。(a)は濃淡測定位置(図面中実線部)を、(b)は濃淡測定結果をそれぞれ示す。図に示すように階調に大きな変化が無い場合には、しきい値を決めにくく、割れ目の抽出が難しくなることがわかった。仮に、割れ目を境にした階調に明確な差があればしきい値は決めやすく、割れ目の抽出は比較的容易になるものと推察される。

地山評価は5つの切羽で行なわれた。評価点の計算例を表-2、3に示す。それぞれ、道路公団評価方法とRMR法から地山を評価したものである。前者の場合は47点となり、表-1から地山等級は C_{II} の中位程度と判断された。一方、後者のRMR法の場合は52点となり、 C_I の中位程度であると判断された。5つの切羽評価から総合して、対象地山は道路公団方式では C_{II} の中位、RMR法では C_I の中位から上位とそれぞれ評価され、2つの評価の間で差異の出ることが判明した。道路公団方式に比較して、RMR法を適用する方が良い地山と評価される傾向にあるようだ。このような差異が生じた原因として、RMR法における各評価項目の点数配分や表-1に示した評価点と地山等級の関係等が問題点として考

えられる。我が国の複雑な地山を評価するためには、今後多数の分析結果を積み上げ、評価項目・評価点を再考する必要がある。

4. おわりに

今回、経験的方法である坑内観察から岩盤分類を行ない、支保規模の選定を支援するためのエキスパートシステムを開発するとともに、現場で試行した。その結果、以下のことが判明した。

- ① 切羽撮影のための特別な処置は必要としない。
- ② 撮影画像は即時モニターで再現できるため、現場事務所等で切羽状況を確認できる。
- ③ 撮影画像が色調に乏しい場合には、画像処理のみからでは割れ目の情報を十分把握することは難しい。
- ④ 道路公団方法と RMR 法から評価された地山等級には 1 ランクの差異が認められた。
- ⑤ 坑内観察記録、地山評価資料作成に要する時間が格段に短縮された。

このシステムに組み込んでいる 2 つの岩盤分類はほぼ原案通りであるため、現段階では思考モデル案に過ぎない。今後多数の分析結果を積み上げ、我が国の複雑な地山状況を定量的に評価する方法の確立を目指したい。また画像処理についても同様に、既存のフィルタ処理しか行っていない。コントラストの低い撮影画像については処理が困難な場合も考えられることから、処理アルゴリズムを含めた最適画像処理方法の検討を行なっていきたい。

今後は、観測的方法と解析的方法によるシステムを追加して全体を完成させ、現場で適用しながら改良を図って行きたいと考えている。

参考文献

1) 例えば、田村秀行：コンピュータ画像処理入門，総研出

表-2 道路公団評価方法による地山評価例

項目	選択項目	判定	評価点
A	切羽の状態	肌落ちがある	2 2/4 ×100=50
B	岩石強度	ハンマーで容易に割れる	2 2/5 ×100=40
C	風化変質	目に沿って風化が認められる	2 2/4 ×100=50
D	割れ目間隔	50~20cm	3 3/5 ×100=60
E	割れ目の形態	方向性あり	3 3/4 ×100=75
F	割れ目の状態	部分的に開口	2 2/5 ×100=40
G	湧水	なし	1 1/5 ×100=20
			平均点：47

表-3 RMR 法による地山評価例

項目	選択項目	判定	評価点
1	掘削面の状態	時間がたつと肌落ちする	2 20 17 ⑬ 8 3
2	圧縮強度	500~200kgf/cm ²	2 15 12 7,④ 3 1,0
3	割れ目の状態	少し粗く、わずかに風化	1 30 ⑮ 20 10 0
4	割れ目の間隔	60~20cm	2 20 15 ⑩ 8 5
5	湧水	なし	1 15 ⑩ 7 4 0
6	割れ目の形態	層状	3 0 -2 -5 ⑩-12
			合計点：52

版，(1985)
 2) 吉中龍之進，他：岩盤分類とその適用，土木工学社，(1989)
 3) 日本トンネル技術協会：山岳トンネルの施工法に関する調査研究 (その3) 報告書，(1990)
 4) Z. T. Bieniawski : The Geomechanics Classification in Rock Engineering Application, Proceedings of 4th International Congress on Rock Mechanics, p. 41~48, (1979)