

## トンネル支保選定エキスパートシステムの構築 (その1)

### DEVELOPMENT FOR DETERMINATION SYSTEM OF TUNNEL SUPPORT (PART 1)

畑 浩二\*・藤原紀夫\*・木梨秀雄\*・中尾通夫\*\*

Koji HATA, Toshio FUJIWARA, Hideo KINASHI and Michio NAKAO

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 from tunnel face observation, and this system was applied at tunnel job sites. This system consists of taking a tunnel face picture by the still video camera, image processing of a tunnel face picture and evaluating of tunnel support.

Keywords : expert system, tunnel support, the still video camera, image processing, RMR

#### 1. まえがき

施工中における山岳トンネルの支保パターン選定には、経験的方法、観測的方法および解析的方法の3つの方法を利用することが考えられる。経験的方法は過去の施工データや坑内観察結果を利用するものであり、特に坑内観察では種々な岩盤分類が利用されつつある。観測的方法は現場計測結果を直ちに評価し、設計・施工にフィードバックするものである。現場計測には内空変位測定や地中変位測定など種々な測定があるが、谷本ら<sup>1)</sup>はコンバージェンス計測(内空変位測定)データの力学的意味を解明し、施工管理に供し得る岩盤分類の可能性と非弾性領域の推定できることを示している。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岩盤を評価する上で有効な道具となりつつある。従来、数値解析は事前設計として利用されていたが、マイクロコンピュータの発達に伴い現場で容易に実施できることが可能となりつつある。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

---

\* 正会員 ㈱大林組 技術研究所 土木第四研究室

\*\*正会員 ㈱大林組 情報システムセンター システム開発第二部

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. 支保規模選定エキスパートシステムの開発

本来、支保規模の選定に関する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委ねられていた。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ものと考えられる。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、ファジー理論などの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。支保規模選定エキスパートシステムを構築するということは、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ということに帰着する。著者らは道路トンネルを対象とし、経験的・観測的・解析的方法を統括した支保規模選定を支援するためのシステムの構築を目指している。<sup>2)</sup> 本論文ではまず第一報として、経験的方法から支保規模の選定を支援するために構築したエキスパートシステムについて述べる。

複数のトンネル現場において、坑内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た結果、観察記録の記入は個人裁量に委ねられていること、切羽の認識方法が統一されていないこと、観察記録記入には多大の労力を要することなどの問題点が抽出された。さらに、支保規模の選定における思考過程が業務担当者に十分認識されていないため、観察記録から積極的な情報抽出は行われていないことが明らかになった。経験的方法による支保規模の選定では、特に「切羽の認識とその描写」に着目したシステム開発を行うものである。

開発したエキスパートシステムの概略フローを図-1に示す。このシステムは切羽撮影、画像処理、支保規模推論および観察記録作図の各部分から構成される。以下に詳細を述べる。

### 2.1 切羽撮影

現場では坑内観察記録が作成される。この記録表は、主として現場でのスケッチを参考にして切羽情報、例えば亀裂や節理および湧水状況などを転記しているのが現状である。この方法では現場でのスケッチ、事務所での転記作業と二度手間であると共に、写真のように正確に切羽を表現することは難しい。切羽記述に多大な時間を割いているにもかかわらず、観察記録表に記載される情報が実際とは異なることが少なく無く、非効率的であると言わざるをえない。支保規模を選定するに当たり切羽情報を積極的に活用するためには、簡易で迅速な切羽の記述と情報の抽出が極めて重要となる。

そこで、著者らは切羽情報の抽出に一眼レフ方

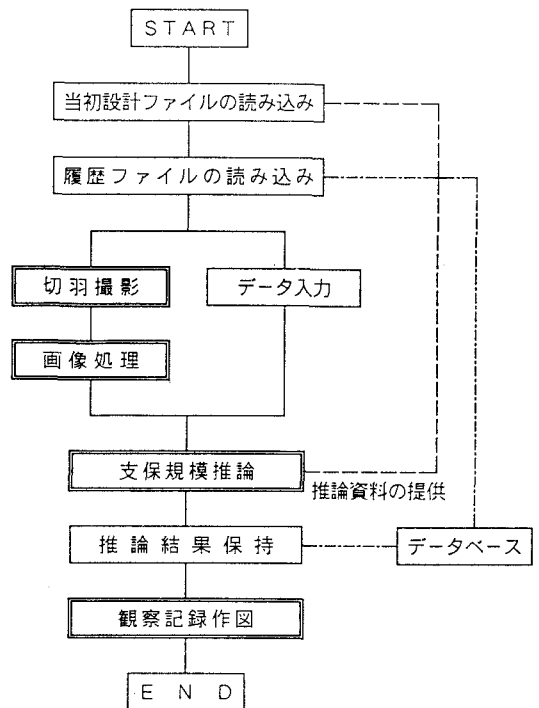


図-1 システム概略フロー

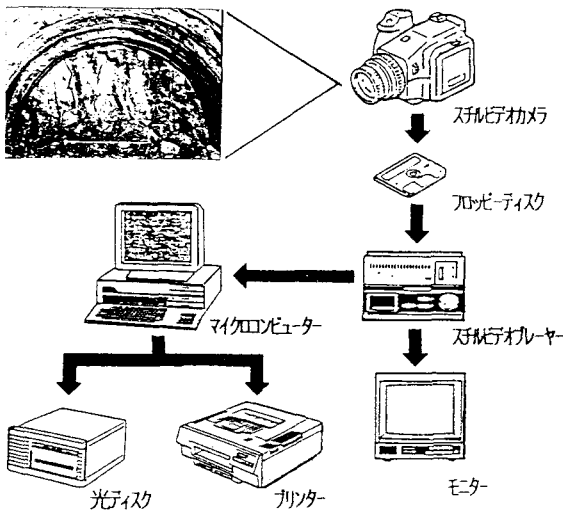


図-2 切羽撮影装置

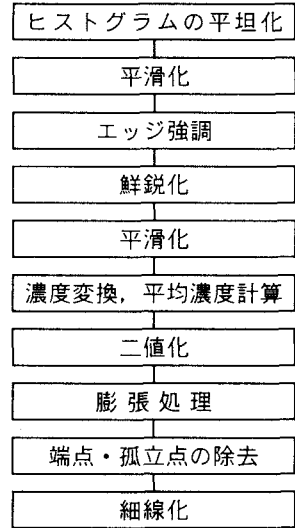


図-3 基本的な画像処理アルゴリズム

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案した。装置の概略を図-2に示す。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。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することができ、各種の画像処理を施すことによって亀裂や節理よび湧水状況などの切羽情報を抽出することが可能となる。

## 2.2 画像処理

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。

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。このシステムでは、エッジ強調や平滑化・鮮鋭化フィルタ<sup>3)</sup>を適宜組み合わせることにより対処することとしている。基本的な処理として図-3に示すアルゴリズムを組み込んでいるが、対象とする切羽特性によりフィルタ等の組み合わせは適宜変更される。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ーに記録された後、各種フィルタにより画質改善が行われる。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う。

## 2.3 支保規模推論

切羽の描写とともに重要なのが切羽の認識・評価である。切羽を定量的に評価するために、岩盤分類を利用する。岩盤分類手法にはいろいろあるが、このシステムに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<sup>4)</sup>とBieniawskiの提案したRMR法<sup>5)</sup>を取り込んでいる。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。各評価点には既に重みを加えられており、ここではBieniawskiの提案した評価点そのものを採用する。これら2種類の評価方法から地山評価点を算出し、支保規模の推論を行う。

コンピュータにこれらの処理をさせるためには、従来型の数値計算言語とは別個の知識処理言語が必要となる。ここでは、エキスパートシステム構築用ツールとしてART-IMを利用する。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。また、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。

支保規模の推論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る。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。評価点と地山等級の関係は、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。

### 3. システム適用事例

#### 3.1 画像処理の適用事例

切羽によっては割れ目の明瞭な場合とそうでない場合が存在する。そこで、割れ目の明瞭な切羽と比較的不明瞭な切羽の2種類の撮影画像について図-3の処理を実施し、画像処理効果の比較を行う。図-4に割れ目の明瞭な場合、図-5に割れ目の不明瞭な場合の結果をそれぞれ示す。図中、(a)は撮影画像、(b)は2値画像、(c)は切羽の任意水平線上における濃淡測定結果をそれぞれ示す。図-4のように割れ目の明瞭な撮影画像が得られた場合は、割れ目の情報は比較的良好に抽出できているものと考えられる。一方、図-5のように割れ目の不明瞭な撮影画像では、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。2値化処理は撮影画像の濃淡256階調からあるしきい値を境

表-1 道路公団方式およびRMR法の評価点と地山等級の関係(案)

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 <sub>I</sub>
40 ~ 50	31 ~ 40	普通の岩盤	C <sub>II</sub>
50 ~ 65	21 ~ 30	悪い岩盤	D <sub>I</sub>
65以上	0 ~ 20	非常に悪い岩盤	D <sub>II</sub>
	0以下	極度に悪い岩盤	

にして割れ目を抽出するため、図-4(c)に示すように割れ目と割れ目以外の部分の階調差が大きければ大きいほど処理効果は大となる。一方、図-5(c)に示すように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。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全てを抽出することは困難である。特に、階調幅の狭い撮影画像では情報の抽出不足が考えられるため、観測者が適宜追加修正できるようにすることが必要になる。

### 3.2 支保規模推論の適用事例

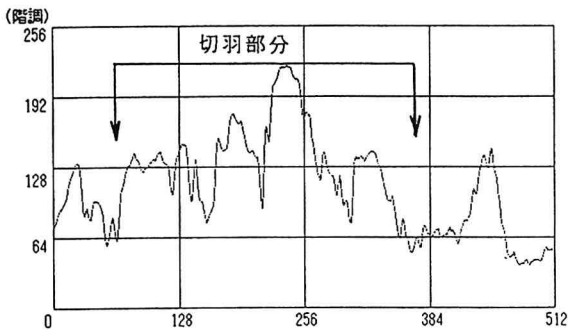
某山岳トンネルで「支保選定エキスパートシステム」を試行し、支保規模推論方法の適用性検討を行った。対象とした岩質は、新第三紀中新世の安山岩で比較的硬質であるが、部分的には風化を受けた凝灰質安山岩もあり、シュミットハンマーによる推定圧縮強度は200～500kgf/cm<sup>2</sup>程度である。切羽状況は、全体にわたり白色石英脈（幅約5mm程度）や粘性土が介在した目が多く肌落ちしやすいものと判断された。実際コソク中に目に沿った岩塊の滑落が認められた。割れ目の間隔は20～50cm程度であり、部分的に開口している



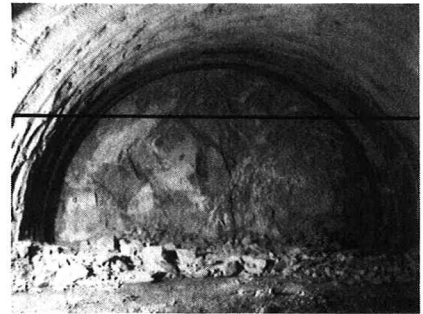
(a)



(b)



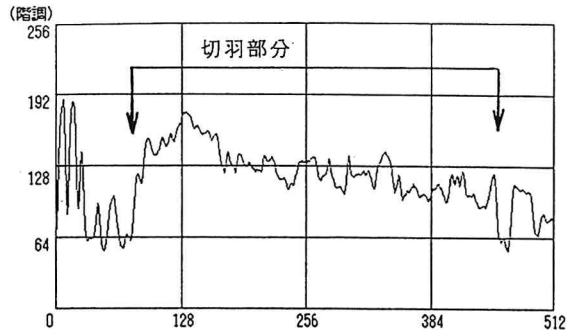
(c)



(a)



(b)



(c)

図-4 割れ目の明瞭な切羽の画像処理例  
(a) 撮影画像, (b) 2値画像, (c) 濃淡測定結果

図-5 割れ目の不明瞭な切羽の画像処理例  
(a) 撮影画像, (b) 2値画像, (c) 濃淡測定結果

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。実際現場では、地山をC<sub>11</sub>と判断し施工している。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えなかったため2値画像には観察者の手加えられた。得られた2値画像を図-6に示す。当現場の5切羽において地山評価を実施した。一例として図-6に示す切羽は道路公団方式では4.7点となり、表-1から地山等級はC<sub>11</sub>の中位程度と判断された。一方、RMR法では5.2点となり、C<sub>1</sub>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<sub>11</sub>の中位、RMR法ではC<sub>1</sub>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。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表-1の評価点そのものを再考するとともに、評価方法自体を考案していく必要がある。

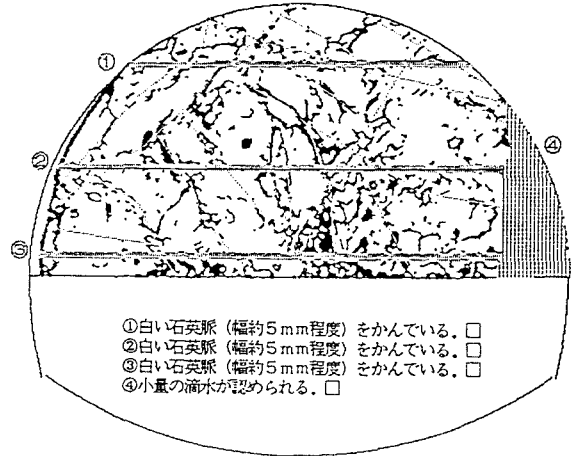


図-6 安山岩質トンネル切羽の処理画像

#### 4. おわりに

切羽観察から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構築するとともに、現場で試行した。その結果、以下のことが判明した。

- (a)濃淡変化の少ない切羽の場合、画像処理のみからでは割れ目情報を十分把握することは難しい。
- (b)道路公団方法とRMR法から評価された地山等級の間には1ランクの差異が認められた。
- (c)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ると共に、地山を定量的に評価することが可能となった。

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。我が国の複雑な地山状況をより定量的に評価するためには多数の分析結果を積み上げることが重要である。また、切羽面に関するいわゆる2次元情報からの評価が主体となっているが、過去の地山評価(データベース)やのみ下がりを利用した切羽前方の地山情報を有効に利用することにより、3次元情報を考慮した経験的方法による支保規模の選定を充実させて行きたい。

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く予定である。

#### 5. 参考文献

- 1) 谷本親伯・吉岡尚也：山岳トンネルにおけるコンバージェンス計測の意義，材料，第40巻，第452号，pp.630～636，1991。
- 2) 畑 浩二・吉岡尚也・藤原紀夫・木梨秀雄：トンネル支保選定エキスパートシステムの開発，第26回土質工学研究発表会講演集，pp.1825～1826，1991。
- 3) 田村秀行：コンピュータ画像処理入門，総研出版，1985。
- 4) 山岳トンネルの施工法に関する調査研究(その3)報告書，日本トンネル技術協会，1990。
- 5) Z.T.Bieniawski:The Geomechanics Classification in Rock Engineering Application, Proceedings of 4th International Congress on Rock Mechanics, pp.41～48, 1979。