

# 山岳トンネル坑口の 対話型施工コンサルテーションシステム

鍛冶茂仁<sup>1</sup>・北澤孝宗<sup>2</sup>・古川浩平<sup>3</sup>・中川浩二<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 鹿島 土木技術本部工務部山岳土木課長  
(〒107 東京都港区元赤坂1-2-7)

<sup>2</sup>工博 鹿島 情報システム部開発課主査

<sup>3</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

<sup>4</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

本論文は、トンネル坑口部の施工においてしばしば生じる地すべりなどの諸問題に対処するために、坑口部の施工に関する問題点を把握し、その問題点に対する適切な対策についての検討を支援するコンサルテーションシステムについて研究したものである。システムは熟練技術者の作業を支援するのみならず、坑口部の危険性を比較的経験の浅い技術者であっても事前に予知し、必要な対策を準備するとともに、高度な検討書類を迅速に作成することを可能にしている。またこの種の問題においては実績と技術者による状況把握が重視されることを考慮し、検討の過程が明らかとなるような対話型とした。

**Key Words :** AI , consultation system for portal construction

## 1. はじめに

トンネル掘削において、坑口部の施工がしばしば問題となる。出口・入口2つの坑口部は一般に地山の土被りが浅く、さらに、地質的には崖錐堆積物などの未固結土や風化岩から構成されていることが多い。また、一般にグランドアーチが形成されにくく、トンネル本体には全土荷重が作用すると考えられている。このため、掘削によって地すべり・斜面崩壊・地表面沈下などの発生が予測される。坑口部にこれらの問題が発生すると、トンネルの施工が継続できなくなるだけでなく、坑口上部・下部などの近隣に大きな影響を及ぼすことが多く、トンネルにおいては、坑口部の施工が最重点項目の一つとなる。

このように施工が技術的に難しいと思われるトンネル坑口部上部斜面では、工事着手前に地山の調査・観測を行い、起こりうる各種の変状を事前に評価し、必要な対策工法の検討・実施を行ってから坑口部の施工に掛かるのが望ましい。しかし、このようなことを短時間で、しかも検討が必要な項目の全てにわたって理解し、処置できる熟練技術者の数に限りがあるのが現状である。

実際上殆どのトンネルにおいて、坑口部で何らかの補助工法を採用しているが、そのうちの何件かは実際に何らかの変状が発生し、それを進行させない

ように止むを得ず大幅な設計変更による変状防止対策を実施せざるを得なかったものである。

そこで本研究では、山岳トンネル坑口部の施工計画を支援するために複数のエキスパートシステムを使用したコンサルテーションシステムを構築し、その有用性について論じた。本システムでは熟練技術者の作業を支援するのみならず、坑口部の危険性を比較的経験の浅い技術者であっても事前に予知し、必要な対策を準備できるようにするとともに高度な検討書類を迅速に作成することを目指した。また、この種の問題のような施工計画においては実績と技術者による状況把握が重視されることを考慮し、検討課題に対し検討過程が常に実績から明らかとなるようなフィードバックを可能にした対話型システムを目指している。

本システムを用いることにより、次のことが可能となる。

- ① システム内部に組み込まれた専門家の知識を用いて、
- ② 坑口部の施工に関する問題点を把握し、
- ③ その問題点に対する適切な対策についての検討を支援し、
- ④ 施工実績を抽出して確認する。
- ⑤ 加えて、これらの検討事項に関する書類を短時間で作成する。

## 2. エキスパートシステムの現状

土木工学は、多くの経験に基づいた技術によって支えられており、これらの経験を生かすためのエキスパートシステムの適用範囲は広い。エキスパートシステムを導入することにより、安全性の向上、省力化、品質・精度の向上、知識の継承などが期待できる。

現在、土木工学で使用されているエキスパートシステムの現状としては、大きく以下の3つに分類できると考えられる。

### (1) 独立型エキスパートシステム

独立型エキスパートシステムの利用例には、診断型として故障診断、医療診断、障害診断、レイアウト、事故処理法診断、工法選定支援、評価支援、最適化、計画支援などを行うものと、スケジューリング型としてダイヤ作成、プロセス作成、ワークスケジュール作成などを行うものがある。土木工学における独立型エキスパートシステムの公表例としては、ほとんどが診断型となっている。この例として、切土のり面保護工選定<sup>2)</sup>、道路構造物の維持管理<sup>3)</sup>、橋梁の比較設計<sup>4)</sup>、トンネル関連としてNATMの事前設計<sup>5)</sup>、トンネル設計用<sup>6)</sup>、トンネルの支保工選定<sup>7)</sup>、トンネル検査・診断<sup>8)</sup>などがある。

### (2) 融合型エキスパートシステム

上記の独立型エキスパートシステムを単体、あるいは複数組合せたものとCADやCGなど他のプログラムとを融合させた融合型の例も多い。例えば、CAD、文書作成システムなどと融合したトンネル施工計画<sup>9)</sup>、鉄道停車場配線<sup>10)</sup>、河川橋梁景観<sup>11)</sup>、CGと融合したシールド施工計画<sup>12)</sup>などがあり、実用度が高い。本研究のトンネル坑口施工計画のためのシステムは診断型システムに文書作成システムを融合した融合型システムと考えられる。

### (3) 機械組込型システム

建設工事の機械においては、従来個々の機械の機能について管理・制御を目的として開発が進められてきたが、自動化・省力化を進めるにはこれらの機械をリンクさせて、総合的に施工管理ができるシステムの構築が待たれていた。これを可能にするために、複数の機械の制御を目的とし、機械に組み込まれたファジィ理論などを使用した機械組込型のシステムには、シールド機姿勢制御<sup>13)14)</sup>、押土作業時のブレード制御<sup>15)</sup>などがあり、実作業で活躍しているものも多い。

## 3. システムの概要

### (1) トンネル坑口施工のためのエキスパートシステム

前述のように診断型エキスパートシステムには診断する対象によって種々アプローチの方法が工夫されている。特にトンネル坑口診断に関しては以下の特徴がある。

- ① 施工上のクリティカルポイントである。
- ② しばしばトラブルの原因となる。
- ③ 人身事故を含めた災害の危険性がある。
- ④ 地質調査の情報は比較的入手しやすい。
- ⑤ 反面、自然斜面に対する調査精度、技術、経費などから満足いく情報が得にくい。

これらより診断に過去の実績、経験が特に有用な領域と考えられ、システムとしては実績、経験を基本にしたものが望ましい。また、システムがトンネル坑口の施工計画に役立てるものであるという性格上、検討事項に関する文書を提供するものであることが必要であると同時に、その記載事項を担当者が関係者に十分説明できるものでなければならない。このことからシステムは技術者からの質問に対する解答機能を持った対話型であることが望ましい。

### (2) システムの構成と開発体制

本システムは、システムに組み込まれた専門家の知識を用いて、坑口部の施工に関する問題点の抽出と、その問題点に対する適切な対策について検討する目的で使用するために作成されたものである。

このシステムの作成にあたり、専門家としては情報システム担当者5名、研究・設計担当者各2名、工務・現場担当者各2名の合計13名の技術者でエキスパートグループを構成した。知識が偏らないよう広い範囲の部署からそれぞれの専門的な知識を有した技術者を集めたものである。

エキスパートシステムの開発・管理・改良は、開発課題の専門家・ナレッジエンジニア・エンドユーザーが三位一体となっていくのが理想的であると考えられる(ナレッジエンジニアは専門家から知識を引き出し、システムを構築する中心人物であり、コンピュータの深い知識が必要)。今回は情報システム担当者がナレッジエンジニア、研究・設計担当者が専門家、工務・現場担当者がエンドユーザーの役割分担をそれぞれ担当した。

システムの構成にあたっては、専門家の経験を反映するだけでなく、技術計算結果や客観的なデータに基づく判断が行えるようにした。また、知識の整理にあたっては、既存の標準類や技術資料<sup>16)</sup>を整

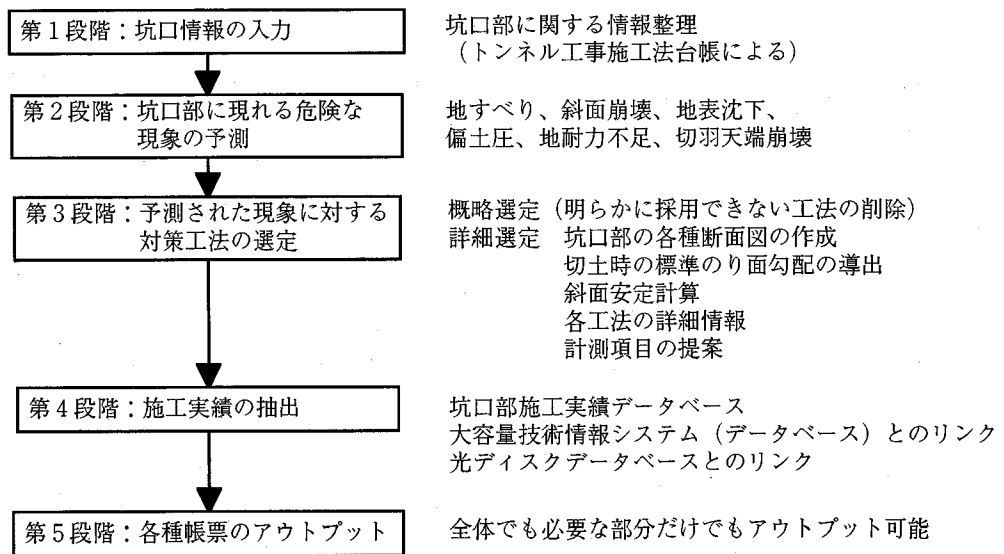


図-1 システムの構成図

理して、システムの骨格を作成し、それを基に開発を進めた。

これらを踏まえて上記技術者が討論の結果、システムとしては以下の5段階に分けることが使やすさ、メンテナンス、水平展開などの面で有利と判断された。図-1にシステムの構成図を示す。そのシステムの概要は次のようである。

まず、第1段階として坑口に関する情報を整理して入力する。つぎに第2段階として、そのデータに基づいて坑口部に現れる危険な現象を解析して予測する。第3段階として、その予測された現象に対する対策工法を、実績に基づきいくつか推薦し、利用者が工法を選定する支援を行う。第4段階として、必要に応じ類似した過去の工事施工実績を抽出して対策工の確認を行う。最終段階として、これらを完全な報告書の形で出力する。このような段階をふむことで、坑口に関する必要な各種の検討を比較的経験の浅い技術者であっても、短時間でもれなく行うことができるようになる。また、それぞれの段階で解析結果、実績との対応を準備することにより常に検討過程の位置付けを明快にしている。

### (3) システムの開発環境

本システムは以下の環境で開発された。

- ① コンピュータ：日立クリエイティブ・ワークステーション2050/32
- ② 構築ツール：ES/KERNEL/W17) …高機能な対話画面の作成、OFIS-EVシリーズ18) …説明図や説明文章の作成

### (4) 構築ツール

主にエキスパートシステムの言語は前述のES/KERNEL/Wである。ES/KERNEL/Wは、大きく分けて以下に示す四つのパートから成り立っており、これらを組合せることにより知識ベース、データベースの構築が可能となる。また、ES/KERNEL/Wの機能だけでは実現できない部分、例えば各種帳票の作成などについては、C言語を用いたプログラムを作成し、システムに組み込んだ。

- ① フレーム：項目とその特性値からなっており、データベースの役割を果たしている。例として、「岩：花崗岩」、「N値：30」等がある。
- ② プライベートメモ：事象とその確信度からなっており、事象の発生確率を具体化している。例として、「安定している：0.9」等がある。
- ③ ルール：仮説・推論・判定等を行い、経験や手順を具体的に表現するパートである。出入力も制御している。例として、「もし・・・であれば、・・・となる」等がある。
- ④ メタルール：多数のルールの実行順序を決め、制御を行っている。

## 4. 坑口情報の入力

### (1) 坑口部に関する情報の整理

坑口部に関する情報としては、災害記録、気象、現地の地形状況、地質の種類や構造、植生や地下水の状況、トンネルの諸元、ボーリングなどによる現

トンネル坑口施工法台帳（その1）

トンネル名	〇〇〇 トンネル	企業者		コード番号		4. 地形 (つづき)	(3)地表面の形状 1.凹形(谷形) 2.凸形(山形) 3.単傾斜 4.不明	
施工場所		用途	鉄道(近路) 水路 其他( )			(4)地表面の傾斜角 ⑩ $\theta = 40$ (°)		
工期	～	延長	(単位: m)	掘削断面積	m <sup>2</sup>	5. 地質	(1)地質名	
担当者	所長	工務主任		工事コード番号			* (2)地質構造 ⑤ 1.単斜構造(流れ登) 2.断層又は破砕帯 3.褶曲構造 4.岩派の貫入 5.キャップブロック	
(坑口付近の条件)							(3)地層材料 ⑦ 表層堆積物 ⑧ 岩盤	1.段丘 ② 崖壁 3.ローム 4.シラス 5.その他 1.中硬岩 2.破砕岩 3.低固結岩 ④ 風化変質岩 5.その他
* 1. 事前調査項目	① 地形図	② 地質図	3. 災害記録	6. 室内試験		(4)露頭(現地の状況)	1.新鮮な基盤岩 2.亀裂に富む岩盤 3.凍泥り粘土 4.凍泥り砂質土 5.不明	
2. 災害記録	④	1.あり(自然斜面)	2.あり(人工のり面)	3.なし	4.不明	(5) 軽石	1.あり 2.なし	
3. 気象	(1) 降雨	① 少ない	2.多い	3.集中豪雨あり		(6) 表層土砂	⑩ 表層土砂の推定厚さ: 6 (m)	
	(2) 降雪	① 少ない	2.多い			* 6. 地下水	(1)地下水状況 ③ 1.湧水箇所がある 2.雨のしばらく後に湧水がみられる ④ 地盤に湿りけがある 4.千枚田、小池がある	
	(3) 日照	① 斜面は西・北向き	2.斜面は東・南向き			* 7. 植生	(1)植生の状況 ④ 1.一列に高木がある 2.竹、杉が密生している 3.樹木が曲がっている 4.樹木が傾斜している 5.樹木の根が浮いている 6.崩壊地のような植生	
4. 地形	(1) 地形の種類	1.地すべり地形	② 崖壁地形	3.段丘地形	4.火山山麓地形	5.荒廃渓流地形	6.露岩地形	7.その他( ) 8.不明
	(2) 地形の特徴	① 等高線に乱れがある	2.帯状の陥没帯がある	3.斜面末端部に膨らみがある	4.沢や河川が不自然に曲がっている	5.急急線がある	6.合地状の緩斜面がある	7.分離小丘がある
	現地踏査より	⑨ 池や湿地が等高線にある	10.小さな丘が散在している			* 8. 地すべり	(1)地すべり指定地区 ③ 1.第三紀地すべり地帯 2.破砕地すべり地帯 3.温泉地すべり地帯 ④ 中生層地すべり地帯 5.火山破砕物地すべり地帯 6.その他の地すべり指定地区	
	⑫	1.最近の地すべりの跡がある	2.帯状の陥没帯がある	3.斜面末端部に膨らみがある	4.沢や河川が不自然に曲がっている	5.急急線がある	6.連続した階段状地形である	7.分離小丘がある
	⑬	9.山稜は丸くてなだらか	8.馬蹄形状の急崖がある			(2) 兆候	1.建物が傾いている 2.電柱が傾いている 3.電線が緊張または弛緩している 4.道路や線路が変形している 5.水田や畑の植生列に乱れがある 6.耕地が荒地化している 7.崖壁に亀裂が多い 8.地表に亀裂がみられる	
	⑭					(3) 斜面の動き (計測)	⑯ 1.亀裂日変動 1mm以上 2.ひずみ日変動 100×10 <sup>-6</sup> 以上 3.傾斜日変動 3秒以上	

\* 他種選択可能

図-2 トンネル坑口施工法台帳記入例（一部）

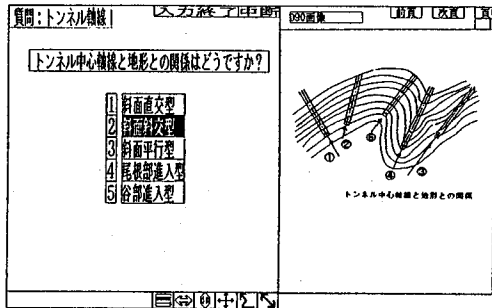


図-3 一値選択型の画面例

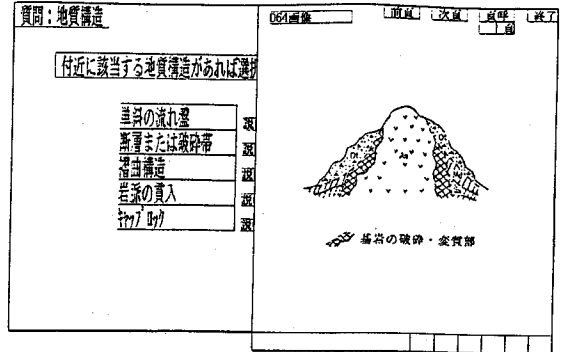


図-4 多値選択型の画面例

地地盤の調査データなどが考えられる。本システムの利用に先立って、これらの多種多様な情報の整理を効率的に行うために『トンネル坑口施工法台帳』を作成した。この台帳は4頁からなっており、前の2頁には基礎情報を、後の2頁には実績を記入するようになっている。基礎情報はエキスパートシステムの入力データとして、実績は施工完了後施工実績を記入することによって、『トンネル坑口施工法台帳』として、水平展開に役立つことになる。図-2

にトンネル坑口施工法台帳の一部を示す。

(2) 入力方式

坑口部の入力データが整理できると、システムを稼働し、これらの情報をコンピュータに入力する。効率の良い入力をするために、入力する情報の性質にあった入力方式が選べるようにした。坑口情報の入力方式として、次の3種類でメニューとマウスを用い、簡易でなおかつ迅速な方法を採用した。実際

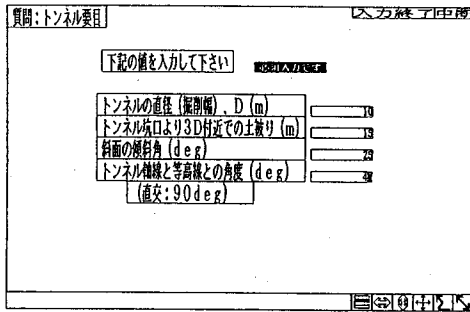


図-5 数値文字入力型質問画面例

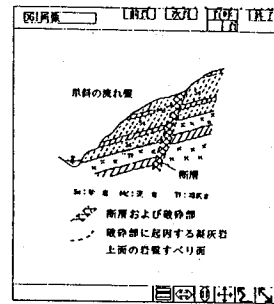


図-6 説明図の画面例

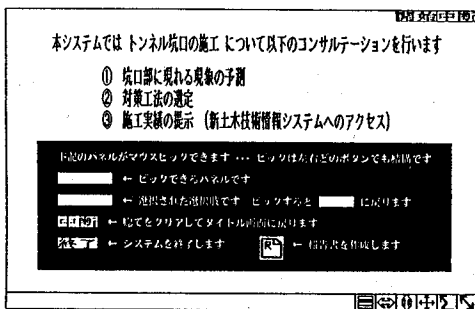


図-7 ガイダンスの画面例

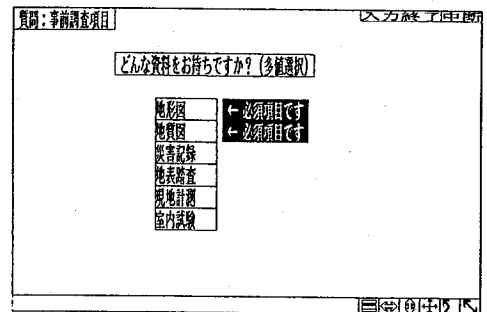


図-8 必須項目の画面例

に文字で入力するのは、トンネル名だけであり、通常30分足らずで全データの入力が完了する。

- ① 一値選択型：回答として選択肢の中からマウスで1つ選択する。図-3に一値選択型の画面例を示す。
- ② 多値選択型：回答として選択肢の中からマウスで複数選択する。図-4に多値選択型の画面例を示す。
- ③ 数値、文字入力型：回答として数値や文字（例えばトンネル名など）を入力する。図-5に数値文字入力型質問画面例を示す。

また、実施にあたって経験の少ない技術者や、コンピュータ知識の少ない技術者のために、次に示すような説明図やガイダンスを用意して画面内で参照できるようにし、かつ検討過程の位置付けを明快にしてあり、操作性を高めている。

- ① 説明図：質問の選択肢について詳しい内容が知りたい場合に適宜参照できる。図-6に説明図の画面例を示す。
- ② ガイダンス：操作方法の説明。図-7にガイダンスの画面例を示す。

このシステムは、時間が無いとき、データが少な

いときにも、それなりの結論を出せるように作られている。しかし、推論に妥当性を持たせるために、最低限必要な項目を『必須項目』と規定し、これらのデータを入力しなければ、システムが稼働しないようになっている。図-8に必須項目を利用者に伝える画面例を示す。

## 5. 坑口部に現れる現象の予測

### (1) 坑口部に現れる現象の種類

前章で整理した基礎情報を入力データとし、対象箇所では坑口部に障害を与える現象が発生するかどうかを予測する作業が重要となる。ここでは坑口部に現れる現象として通常考えられる以下の6種類の状況を考慮した。

- ① 地すべり：坑口部の切り取りなどによって、地表面のすべりが発生する現象
- ② 斜面崩壊：坑口付近の斜面が降雨、地震、トンネル掘削などによって崩れる現象
- ③ 地表沈下：トンネル掘削などの影響により地表面が沈下、陥没を起こす現象
- ④ 偏土圧：斜面の傾斜などによって、土圧が偏

現象の判定結果は下記の通りです 「非常に危険」と「危険」の場合は対策工法を選定します

トンネル者 D20トンネル

項目	判定結果	理由	対策	判定結果
地すべり	非常に危険	過去に地すべりの記録がある/地すべり指定地区である/地すべり地形である/扇状地のような植生である/表層土砂は地すべり土砂である		非常に危険
斜面崩壊	安全			安全
地表沈下	安全			安全
偏土圧	非常に危険	管壁は埋設管である/トンネルは斜面に直交または平行である/トンネルは地すべり地内にある		非常に危険
地耐力不足	非常に危険	表層土砂は粘性土である/管壁の支持力は小さい/高層部の風化が著しい		非常に危険
切羽天端崩壊	要注意	管壁は風化している		要注意

図-9 判定結果の画面例

『危険』、『要注意』、『安全』の4段階に判定される。各中間仮説の内容、及びその持ち点は、過去の実績などにより決められている。

### (3) 判定結果例

図-9に判定結果例を示す。判定結果例の理由の欄に上げられているものが判定の根拠となった中間仮説で、これが理由として文章で記載されるので判定の根拠が理解しやすくなっている。各画面はハードコピーも取れるが、「レポート出力」で報告書としてプリンタにも出力出来る。

## 6. 対策工法の選定

### (1) 対策工法の検討

この段階では、大きく2つのステップがある。

- ① 対策工法の概略検討：明らかに採用できない工法の削除。
- ② 対策工法の詳細検討：システムが推薦順位をつけて提示する工法を、利用者がシステムの供用する各種の情報を参考にして、対策工法を選定する。斜面安定計算、坑口断面図表示、標準のり勾配算出等のサブシステムがある。

### (2) 対策工法選定のツール

システムの供用できる情報には、坑口断面図の表示、斜面安定計算、標準のり面勾配の参照等がある。利用者はこれらの情報を利用して、対策工法を選定することができる。また、各危険な現象に対する計測項目も推薦することができる。

図-10に坑口断面図の画面例を、図-11に対策工法選定のツールの一例をそれぞれ示す。

### (3) 結果の表示

選定された工法は、工法比較検討表の形式でアウトプットできる。この表には工法名、施工概要図、工法の特徴、施工性等が表示される。

図-12に工法選択結果の一例、図-13に工法比較検討表をそれぞれ示す。

## 7. 施工実績の抽出

### (1) 施工実績の抽出

施工法の選択においては実績が重視され、担当の技術者が過去に経験した対策工法を採用する傾向が強く、また、担当者の施工経験、好みによって大きく左右されることが多いが、技術蓄積が少ない比較的経験の浅い技術者でも過去の施工実績が検索でき

ることによりトンネル支保などに変状が生じる現象

- ⑤ 地耐力不足：トンネル掘削によるゆるみ荷重などが地盤耐力を上回ることにより、トンネル全体が沈下する現象
- ⑥ 切羽天端崩壊：トンネル掘削時において切羽面や天端部が自立しない現象

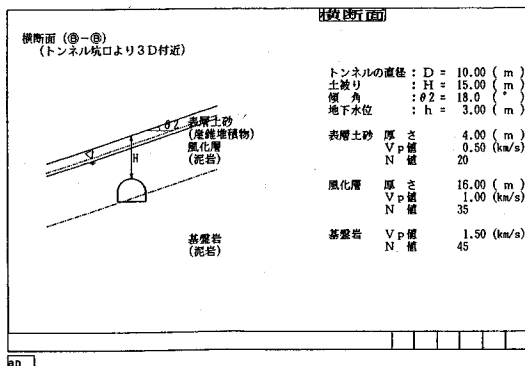
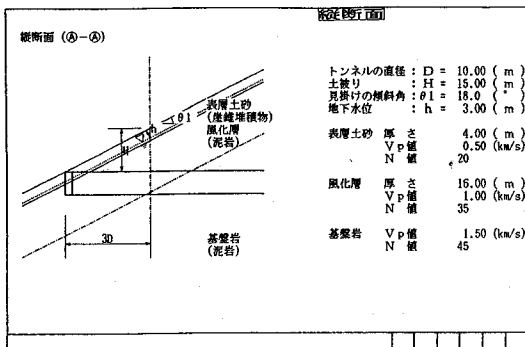
### (2) 判定の仕組み

判定は質問に対する回答を、用意した基礎情報に基づいて答えることによって、それらの情報を総合して実施する仕組みとなっている。

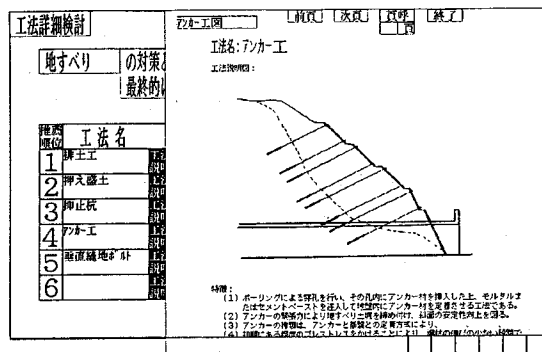
具体的には一つ一つの質問に対してしきい値を設定して、回答した選択肢に応じてつけられる重みの合計がこの値を越えたとき中間仮説が成立したとする、しきい値推論を採用している。この方法を採用することで、各選択肢の重みを変えることによって、選択肢が単独、又は、複数組みあっても判定することができる。本システムで採用したしきい値推論は、一種の曖昧推論であり、やや不明確な因果関係の中から要注意事項を抽出するのに適した推論法である。この推論機構は多値選択型質問に必要な手続きを組み込んでシステム内蔵型としたため、知識ベースとしては選択肢ごとに重みとしての点数を記述するだけの簡単な構造となっている。以下に、選択肢と中間仮説の具体例をそれぞれ示す。

- ① 選択肢例：「湧水箇所がある」、「地盤に湿り気がある」など
- ② 中間仮説例：「表層に地下水がある」、「表層土砂が厚い」など

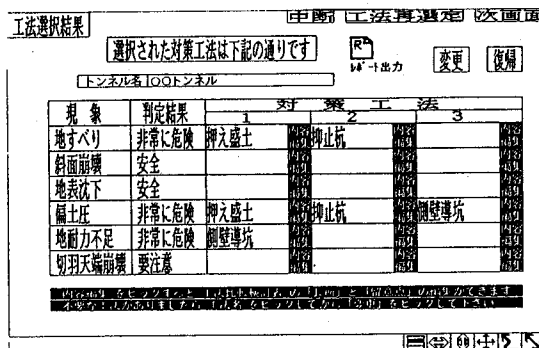
坑口に想定される各現象への危険性は、あらかじめ因果関係を持った中間仮説を選定し、それぞれの現象毎に中間仮説の持ち点を合計し、事前に設定した点数と比較することにより、『非常に危険』、



図一10 坑口断面図の画面例



図一11 対策工法選定ツールの一例



図一12 工法選択結果の一例

るよう、例えば次のような工夫をしている。

- ① 実績のデータベース化・充実
- ② 検索機能の充実：類似現象を指定するとその条件に近い状態の工事実績が自動的に検索され、その工事における主な対策工と参考文献が表示される。

現象が整理されることによって、具体的な対策工法が検討できる。つまり、これにより現場特有の拘束条件（現場条件）を再確認し、具体的な工法による検討が可能となる。

推薦された対策がよいかどうか分からないという問題に対しては、これらの実績を合わせて検討するシステムをとることにより、専門家に近い選択ができるように考えている。

また、この画面も対話型で作成されており、任意の条件の工事施工実績を抽出することもできるので、工事実績のフィードバックが容易になる。

図一14に施工実績の抽出を示す。

## (2) ホストコンピュータシステムとの接続

抽出した施工実績の詳しい情報が知りたい場合には、自動的にかつ迅速に大容量データベースとの接続が行われ、必要な情報を引き出すことができる。ただし、この機能は別途作成した大容量データベースを有するホストコンピュータとオンラインで接続されている場合のみ利用できる。

## 8. 有効性の確認

本システムは、工事着工前の事前検討時に利用することを第一目的にしたものであり、検討結果を実際の工事に適用するためには、研究・設計担当者等による詳細検討や詳細設計が必要である。すなわち、問題点を早期に発見し危険な兆候があった場合には、直ちに専門家による調査、検討を行うことを前提としている。

ここで本エキスパートシステムについての有効性を検討することが必要と思われる。すなわち本シ





表一 2 対策工法を実施した現象

トンネル名	地すべり	斜面崩壊	地表沈下	偏土圧	地耐力不足	切羽天端崩壊
A	●	●				
B	●					●
C	●			●		
D	●		●			●

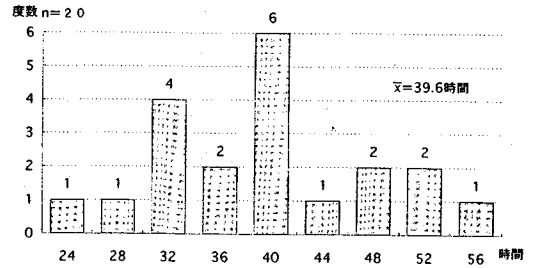
ルの切羽天端崩壊は当初設計のフォアパイルが有効と判断され、Bトンネルの斜面崩壊は地すべりに対する対策工が斜面崩壊にも有効と判断されて実施されなかったものである。また、本システムで○で示される危険と判定された8件中2件で対策工法が実施されており、その確率は非常に危険と判定されたものより低い。このように対策工法が実施された全ての現象を、本システムで◎か○で危険と判定しているとともに、非常に危険と判定されたものは危険と判定されたものに比べて対策工法を実施した割合が約3倍となっており、判定の重みづけが適当であることが分かる。以上のことから坑口施工で想定される危険な現象を全て網羅し、かつその判定結果の危険度も実態に則しており、本システムが非常に有効であることは明らかである。

加えて、システムによる推定結果が安全サイドになるのはコンサルテーションシステムとしては妥当である。

坑口部に現れる危険な現象の出現度数を見ると、地すべりの現象が一番出現度数が多く、それに他の現象が付帯し複数の現象が出現するような例が多いことが分かる。

## (2) 検討書類作成システムとして

従来の方法との作業時間を比較するために、ある工事について本システムで事前に検討を行い、その結果得られた判定結果、工法選択結果、工法比較検討表、計測項目、過去の施工実績などの技術検討資料を技術者に見せ、これと同程度の資料を本システムを用いずに作成するのにどれくらいのマンパワーが掛かるかのアンケート調査を実施した。アンケートの対象者は5年程度のトンネル経験を持つ技術者20名とした。入力データは別途調べて整理してあるという前提で調査を行った。本システムで実施した場合は入力30分、検討40分、打ち出し40分、製本その他10分の合計2時間で完了している。アンケート



図一 15 作成時間

結果を図一15に示す。アンケート結果によれば、本システムを用いれば従来の方法に比べて、約20分の1程度の時間で検討並びに資料作成が可能となることが判明した。

本アンケートでは、検討に必要な入力データは別途調べてあるとして作成に要する時間から除外したが、従来の方法だと、どの範囲のデータをどの程度集めるかといったことの決定に時間がかかり、特に比較的経験の浅い技術者においては、それが顕著であった。そのため、収集したデータのうち使わないものがあつたりして、これらのことに多くの時間を使っていたことも調査の過程で明らかになった。本システムを用いることにより、トンネル坑口施工法台帳や画面との対話からどのレベルの技術者に対しても必要なデータが即座に理解でき、データの収集範囲の決定や不用データの収集にとられる時間が不用になり、その面でも検討に要する時間の大幅な短縮が可能となった。

加えて、解析経過と結果がフロッピーディスクに残せるので、今後の実績のデータベースへの折り込みが容易になった。

このように熟練者のチェックを兼ねた技術者アシスタリングシステムとしてだけではなく、教育用の資料にも使用できるように、メニューとガイダンスに大きな領域を設定しているのも、どのレベルでも指定することにより説明文・図などの説明用のデータベースを参照することが可能である。このような機構により比較的技術レベルが低い者でも検討はできるが、当然コンピュータと対話中に技術レベルに応じた結果が出てしまうので、利用のレベルに応じては経験の浅い技術者だけに任せるのではなく、専門家の支援システムとしての位置付けが大きいと考えられる。

## (3) 現システムの問題点

この検証を行って指摘された問題点は下記の通り

である。

- ① 過去の実績データについては詳細の不明な場合があり、情報不足のために検証が困難な場合がある。情報不足のために本来危険な場合が誤って安全と判定されないために、データの十分な収集と整備が必要である。
- ② 判定結果は斜面傾斜角や土被り厚、表層土砂厚などの数値データに大きく支配される。これらのデータについては、正確な値を入力する必要があるとともに、データの数値的なあいまいさに対してシステム側で幅を持たせる等の考慮を払う必要がある。
- ③ 各現場の実情に則した詳細な判定を下すためには、今後より多くの工事への適用を積み重ね、知識ベース、データベースの追加や重みの調整を行う必要がある。

また、計画中のトンネル工事に、実際適応した技術者の意見として以下のものがある。

- ① 報告書の自動作成機能の実用性は高く、施工に対して十分説得力のある資料が作成できる。
- ② 極めて短時間に各種の検討ができ、トンネル技術者にとって魅力的なシステムである。また、コンピュータとの対話で意思決定ができるため、見落としのない検討ができる。
- ③ 知識、データベースを追加することにより、信頼性の高いシステムに育てることが可能である。
- ④ システムによる判定結果を誤りなく理解するためには、判定のアルゴリズムを理解しているほうが特殊なケースへの対応が可能となったり、結果の理解が深くなるので、知識ベースの中身についてある程度理解しておく必要がある。

## 9. まとめ

山岳トンネル坑口部のエキスパートシステムについて述べてきたが、これらを知識の整理、表現、AIの技術の3つの観点から以下にまとめる。

### (1) 知識の整理

本システムの開発を契機として、トンネル坑口の施工に関する知識を新しく体系化する機運が生まれたことは、本システム開発の最大の成果であると考えられる。知識の整理に関する考察をまとめると、下記の通りである。

- ① トンネル坑口の施工に関する知識が体系づけられ、散在していた知識が集積できた。
- ② 現象の予測に関する知識、対策工法の選定に

関する知識に関して、コンピュータシステム化という観点から、新たな判定基準を作成した。

- ③ 施工実績の整理の必要性が痛感され、トンネル坑口施工法台帳の見直しを行った。
- ④ 知識の整理には予想以上に時間がかかった。この最大の原因は知識の整理が単なる整理ではなく、意思決定の基準を構築するという、極めて創造的な作業であるためである。そのために、知識獲得は、専門家とシステムエンジニアがワーキンググループを作って何度も検討を繰り返した。
- ⑤ まず小さなシステムを作り、それを拡張していくプロトタイピングの手法は、非常に有効であった。

### (2) 知識の表現

知識の表現方法も、知識の種類に応じた表現方法が必要となり以下のように考えた。

#### ① 現象の予測に関する知識

一価選択メニュー、多価選択メニュー、文字・数字入力メニューなどの標準的な質問形式、およびしきい値推論と点数法により判定結果を導出する方法を考案し、これに基づいて整理した。

本表現法は、演繹的な推論法であり、優秀な専門家が行う長年の経験に基づく直感を重視した推論方法とは必ずしも一致しないが、見落としのない方法であり、初期検討には適した方法であると考えられる。今後さらに、より専門家の判定方法に近い知識の表現法の開発が望まれる。

#### ② 対策工法の選定に関する知識

確認質問によって適用可能工法を絞り込み、優先順位をつけて整理してある対策工法一覧表に基づいて工法を推薦する方法を採用した。この方法は一般性の高いものであり、他の問題にも容易に適用できる。

#### ③ 施工実績の抽出に関する知識

既存資料にまとめられた施工実績をさらに拡張し、一覧表として整理し、類似性を得点で判断する方法によって類似例を抽出した。これは柔軟な方法であり、どのような場合にも対応できる。

更に密度の高い情報を利用者に提供するためには、施工実績を分析しそのエッセンスを抽出する必要がある。

### (3) AIの技術

AI技術の観点から従来技術と比較すると、本システムにより下記の点が新たに実現できた。

- ① 診断型、選択型、検索型などの、いくつかのエキスパートシステムを統合して、実際の作業の流れをシミュレートできるようになった。
- ② エキスパートシステムと大型コンピュータ上のデータベースシステムを結び付けることができた。
- ③ ほとんどの入力がマウスを用いたメニュー方式で入力でき、対話性に富んでいる。
- ④ システムの操作を直接画面上に説明文として書き込み、マニュアルレスシステムに近いものとした。
- ⑤ 推論結果に基づいて、報告書を自動作成する仕組みが実現した。
- ⑥ 推論を繰り返し実施する機構を作成した。
- ⑦ 画面上で技術計算ルーチンや説明文書、坑口の概略図作成ルーチンなどを自由に呼び出して参照する仕組みを実現した。

### 参考文献

- 1) 花村義久, 大坂一, 鍛冶茂仁, 古田均, 佐々木浩二: 人工知能と土木, 土木学会平成4年度全国大会研究討論会土木情報システム委員会, 1992.9.
- 2) 三上市蔵, 家頭圭昌, 河野吉次郎, 広兼道幸: 切土のり面保護工選定に関する知識ベース・システム, 土木学会論文集, 第403号, VI-10, pp.121-129, 1989.3.
- 3) 岩松幸雄, 早川裕史, 原田隆郎: 道路構造物の維持管理システムに関する研究, 土木学会論文集, 第444号, VI-16, pp. 69-76, 1992.3.
- 4) 岩松幸雄, 早川裕史, 原田隆郎: 橋梁の比較設計支援エキスパートシステムに関する研究, 土木学会論文集, 第453号, VI-17, pp. 51-57, 1992.9.
- 5) 瀬崎満弘, Ömer AYDAN, 市川康明, 川本眺万: 岩盤データベースを用いたNATMの事前設計のための物性値, 土木学会論文集, 第421号, VI-13, pp.125-133, 1990.9.
- 6) 市川康明, Ömer AYDAN, 川本眺万, 大坂一: トンネル設計用エキスパートシステム, MicrocomputCiv Eng, Vol.5, No.1, pp.3-18, 1990.
- 7) 柚木孝治, 大北康治, 山本俊夫: トンネルの支保工選定エキスパートシステムの開発例, 土木学会年次学術講演会講演概要集第6部, Vol.42, pp.126-127, 1987.
- 8) 松岡彰彦, 八賀明, 松本吉雄, 河田博之: トンネル検査・診断エキスパートシステム, 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, Vol.25, pp.446-450, 1988.
- 9) 北澤孝宗, 早田光利, 松田元男, 鍛冶茂仁: 施工計画のための知的な文書作成システム, 人工知能学会第5回全国大会, 1991.6.
- 10) 杉山利幸, 松田元男, 北澤孝宗, 柏信男, 佐々木正信: 鉄道停車場配線計画システムの開発(その2) システム化の方法, 情報処理学会第43回全国大会, 1991.10.
- 11) 西土隆幸, 伊藤義人: 異なる形式の河川橋梁に対する景観の評価支援システム, 土木学会論文集, 第474号, VI-20, pp. 95-104, 1993.9.
- 12) 市原義久, 五十嵐善一: シールド施工計画におけるエキスパートシステム適用に関する研究, 土木学会論文集, 第427号, VI-14, pp. 95-104, 1991.3.
- 13) 桑原洋, 原田光男, 背野康英, 竹内幹雄: ファジイ理論のシールド掘進制御への適用, 土木学会論文集, 第391号, VI-8, pp.169-178, 1988.3.
- 14) 佐藤竜郎: DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC SHIELD EXCAVATION SYSTEM, 第9回国際建設ロボットシンポジウム論文集第2巻, 1992.6.
- 15) 深川良一, 室達朗, 鈴木貴雄: 押土作業におけるブレードのファジイ制御に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第444号, VI-16, pp. 77-85, 1992.3.
- 16) 社団法人日本トンネル技術協会: 山岳トンネルの坑口部の設計・施工に関する研究報告書(日本道路公団委託), 1985.2.
- 17) 株式会社日立製作所: E S / K E R N E L / W マニュアル, 1988.3.
- 18) 株式会社日立製作所: O F I S - E V シリーズマニュアル, 1988.3.

(1994.9.16 受付)

## DIALOGUE FORMAT CONSULTATION SYSTEM FOR TUNNEL PORTAL CONSTRUCTION

Shigehito KAJI, Takamune KITAZAWA, Kohei FURUKAWA  
and Koji NAKAGAWA

This paper describes research on a consultation system to cope with landslides and other problems which often occur during the construction of a tunnel portal by grasping the problems involved in the construction of the portal and assisting the study of suitable measures to be taken. This system is designed not only to assist the operations of trained engineers but also to aid even relatively inexperienced engineers to foresee in advance the dangers of a portal site so that the necessary measures can be prepared, and also enables the expeditious preparation of detailed study reports. Also, in consideration of the fact that past experience is of great importance in this type of problem, a dialogue format was adopted so that the process of study at all times clearly draws from this experience.