

# 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

## A STUDY ON APPLICATION OF EXPERT SYSTEM TO CONSTRUCTION PLANNING FOR SHIELD TUNNELLING METHOD

市原 義久\*・五十嵐 善一\*\*

By Yoshihisa ICHIHARA and Zen-ichi IGARASHI

The authors have developed the expert system to make construction planning for shield tunnelling method skillfully and rationally. As tunnelling conditions and technologies have been diversified in recent years, the knowledge of expert engineers has been accumulated. By utilizing the knowledge base from such expertise, this system can support construction planning and design shield machines automatically.

This paper describes the motive for introduction of expert system, the method of making the knowledge base and the details of this system. The authors have estimated the application of this system to actual construction planning.

*Keywords* : expert system, shield tunnelling, construction planning

### 1. ま え が き

近年、各種の産業分野で AI(Artificial intelligence; 人工知能) 技術が導入されており、建設分野でも工事を進めるうえで AI 技術を利用する事例が増加している。AI 技術のなかで特に数多く利用されているのは、ES (Expert System; エキスパートシステム) である。この ES とは、AI 技術の研究過程で生まれてきた応用システムの 1 つであり、熟練技術者の知識・ノウハウを整理してコンピュータに蓄え、これをもとに熟練技術者と同等の仕事を行うことを可能とするものである。

建設工事において、工事周辺部への影響を最小限におさえながら、安全性、品質、工期、コストのすべての面を満足させるためには、高度な管理技術が要求される。近年の施工条件の複雑化あるいは施工技術の進歩や多様化に伴い、管理技術も複雑多岐化する傾向にあり、熟練技術者にとっても適正な判断を行うのが困難な状況も増加しており、これを支援するニーズも高まってきている。また、その知識・ノウハウの継承は大きな課題となって

いる。このような状況の対応策として有効と考えられるのが ES の利用であり、工法選定、構造物診断、施工機械制御などの管理業務を支援するさまざまな ES が開発されており、実用化されているものもある<sup>1)</sup>。

今回、シールド工法の施工計画を支援する ES を開発し、実際の施工計画事例に対してこのシステムを適用した。本稿では、システム導入の経緯および処理内容について説明するとともに、その評価および今後の課題について述べる。

### 2. システム開発の背景

シールド工法は軟弱地盤から硬質地盤あるいは砂礫・玉石地盤までのさまざまな土質に適用されるが、最近のシールド工事では、急曲線、長距離、近接施工などの厳しい施工条件の工事が増加する傾向にあり、これに伴い各種の新技術、新材料が導入されてきているので、工事管理も多様化する傾向にある。シールド工事を進めるにあたり、このような状況のもとで、安全性、品質、工期、コストのすべての面に対して適正な管理を行うためには、計画の段階からこれらを考慮する必要があり、施工計画は工事マネジメントのなかで重要な管理要素として位置付けることができる。

シールド工事の施工計画では掘削管理、工程管理、補

\* 正会員 (株) 奥村組技術研究所機電研究室  
(〒559 大阪市住之江区浜口西 3-5-8)

\*\* 正会員 (株) 奥村組本社電算センター  
(〒545 大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2)

助工法などに関して検討するが、計画手法も多様化する傾向にあり、その知識・ノウハウも膨大な量になってきている。また、シールド工法は高度に機械化された施工法であり、シールド機の性能が施工の進行に及ぼす影響は大きく、施工条件に適合した機械設計が必要となる。施工条件の多様化に伴い、設計に関する専門知識も膨大な量になってきている。

施工計画では、こうした専門知識を集積して対処するために、複数の専門技術者が共同で作業を進めることが多く、多大な労力と時間を必要としている。また、このような専門知識は各専門技術者が数多くの経験を通して得たものであり、各個人のものとして存在することが多く、共通のものとして取り扱うことは困難であるのが現状である。

シールド施工計画支援 ES は、これらの専門知識を整理して蓄えておき、施工計画に関する最適な情報を提供することにより、シールド機の設計を含む計画業務を支援するシステムである。

以上述べたことから、本システムの開発目的を以下にまとめる。

- i) 施工計画立案業務を支援することにより、その省力化・合理化を図る
- ii) 経験の少ない技術者でも、専門技術者と同等の施工計画を立案できるようにする
- iii) 施工計画に関する知識・ノウハウを収集、整理することにより、計画手法の標準化を図る

### 3. システムの構築

#### (1) 基本構造

本システムの基本的な構造概念を図-1に示す。システムの構成要素は知識ベース、知識獲得機構、推論機構、マンマシンインタフェースの4つの部分である。また、システムの関与者はシールド専門技術者、ナレッジエンジニア (Knowledge Engineer)、利用者の三者である<sup>2)</sup>。

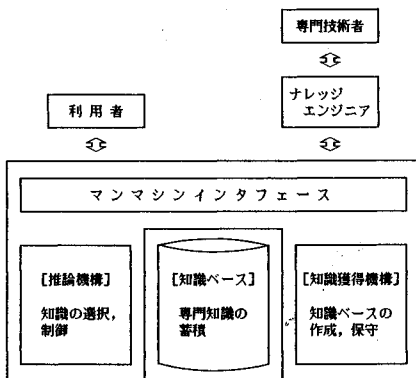


図-1 システムの構造概念

施工計画を支援するシステムを構築するためには、専門技術者がもつ知識・ノウハウをデータベースとして蓄えることが基本となる。このデータベースが知識ベースであり、専門知識をその種類にあわせて効率的に表現できる保存方法により蓄えておく。

この知識ベースに対する専門知識の登録あるいはその保守を行うのが知識獲得機構である。専門技術者がこの獲得機構を用いて知識を直接知識ベースに蓄えることも可能であるが、ES 構築手法の詳細な部分まで習得しなければならない。本システムの開発では、ES 構築手法に精通したナレッジエンジニアが専門技術者から知識を収集し、獲得機構を用いて知識ベースを構築した。また、知識獲得機構は保存している知識の修正あるいは新しい知識の追加などの知識ベースの保守も行う。ES を開発する場合、プロトタイプの段階で完全なシステムを構築することは困難であり、施工条件の複雑化あるいは施工技術の進歩にあわせて知識ベースを更新しなければならないので、その保守機能が必要となる。

計画対象工事の施工条件に基づいて、知識ベースに保存している知識を選択して使用することにより、実際に施工計画に関する検討を進めるのが推論機構である。なお、推論機構自体も施工技術の進歩にあわせて改良を加えていく必要がある。

推論を行う場合あるいは知識ベースの構築、保守を行う場合に、推論機構、知識獲得機構とシステム関与者を結ぶのがマンマシンインタフェースである。

#### (2) 知識表現<sup>3)</sup>

一般に専門技術者は知識ベースという概念を意識しているわけではないので、ナレッジエンジニアによる調査では、その知識の引出しに限界がある。本システムの開発では、開発担当者のなかに少数の専門技術者も参画させることにより、専門技術を表現しやすい知識ベースを設計した。

シールド専門技術者の知識は以下の2種類に分類することができる。

- i) 事実型知識
- ii) 規則型知識

事実型知識は、たとえば裏込注入料の種類とその特性などのように、専門技術者のあいだでは事実として広く認められている知識のことである。このような知識は一般に体系化されているので、フレームモデルにより表現する。このフレームモデルとは、フレームと呼ばれる1つのユニットに対して特性、状態などの従属する項目(スロット)とその特性値(スロット値)をもたせるためのデータ構造である。フレームモデルの特徴として、個々のフレームの関係を宣言することができ、相互に関連するフレームは属性により階層構造にすることができる。

階層構造となっている場合、上位のフレームの特性は下位のフレームに継承されるので、上位のフレームで定義した特性は、下位のフレームで再度定義する必要がない。下位のフレームで共通してもっている特性はその上位のフレームで定義することにより、知識の記述量を削減することができ、知識も細分化されないので推論あるいは保守の面で扱いやすくなる。たとえば、シールド工法のフレームモデルは図-2のような階層構造として表現することができる。また、処理条件として与えられる施工条件もフレームモデルにより表現する。

規則型知識は、専門技術者が数多くのシールド工事を通して得た判断論理あるいは計画手法のことである。このような知識は条件が与えられて結論を導き出すという性質のものであるので、プロダクションルールにより表現する。このプロダクションルールとは、“もし～ならば～である”というIF～THEN形式の知識表現であり、経験則を表現するのに適しており、専門技術者に対するヒアリングあるいはアンケートで得た知識をナレッジエンジニアがこの形式に変換して知識ベースを構築した。なお、IF部で参照するデータは主に各フレームのスロット値であるので、施工条件もフレームモデルにより表現する。

(3) 推論処理

本システムでは、施工管理項目の検討およびシールド機の設計を行うが、推論としてこれらの検討を進めるための施工条件の解釈から検討結果の整理・出力まで行う。

推論は、実行可能ルールの探索、実行可能ルールの競合解消、ルールの実行という手順を繰り返して行うことにより進める。実行可能ルールを探索する場合、全ルールを対象とすると処理時間が長くなるので、検討項目ごとにルール群としてグループ分けを行い、ルール群単位で探索を行う。また、実行可能ルールが複数存在する場合(競合状態)は、それを解消するために最も適合するルールを選択する。本システムでは、ルールの競合を解消するために以下の2種類の方法をルール群単位で使い分けている。

i) 実行可能ルールのなかで、IF部で条件として表

記されているフレームのスロット値が最も新しく変更されたルールを優先する

ii) ルール探索時に、最初に抽出されたルールを優先する(プログラム作成順)

本システムでは基本的にはi)の方法を用いており、1つのルールが実行されてフレームのスロット値が更新されることにより、IF部の条件が満たされ実行可能となったルールを優先している。すなわち最新性の高いルールを優先している。この方法では、ルールの実行順を予想しながら各ルールの条件部および実行部をチェックすることにより、ルール間の整合性をとることができるので、複雑なロジックをプログラム化しやすい。

また、ii)については、シールド機の部品の選定などある程度手順が確定している場合に用いる。これは手続き型言語でもプログラムを作成することができるが、IF～THEN形式で記述する方がプログラムも理解しやすく、メンテナンスも容易である。

なお、専門技術者のもっている事実型知識は、シールド掘削断面の土質、掘削径、地下水圧などの施工条件により細分化されており、これらをすべてフレームモデルにより表現した場合、膨大な記憶容量が必要となり、また、各ルールの参照するフレームが多くなるので、推論時間が長くなる。本システムでは、これらの施工条件を数種に分割して、この分割した諸条件を組み合わせてテーブル(表)を作成し、その中に事実型知識を記述している。与えられた施工条件を考慮して、テーブルから推論に必要な知識のみを抽出してフレームモデルとして表現するという方法により、フレームモデルによる記述量を削減し、推論時間の短縮を図っている。図-3に示したように、条件検索により基本知識を抽出する。なお、テーブル形式で表現されたデータは行単位あるいは列単位で管理することができるので、追加、修正などの保守が行いやすい。

(4) システム構成

ハードウェア構成を図-4に示す。システムの開発用コンピュータとして、32ビットのワークステーションを使用している。処理の進行をマウスを利用したディスプレイ画面との対話形式で進めることにより、操作性の

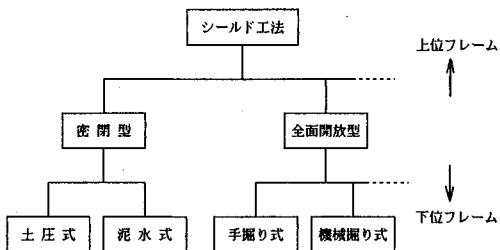


図-2 フレームモデルの階層構造

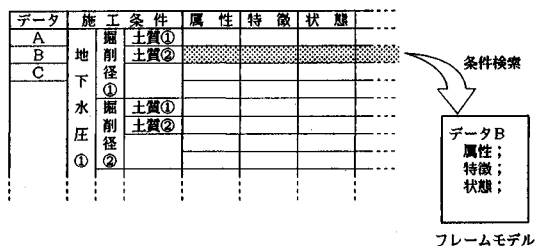


図-3 基本知識の抽出

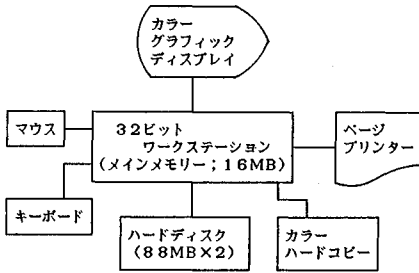


図-4 ハードウェア構成

向上を図っている。

ソフトウェア構成を図-5に示す。基本的には以下の3つのツールを効率的に組み合わせて使用している。

- i) データベース検索ツール
- ii) エキスパートシステム構築支援ツール (以下、エキスパートツールと称す)
- iii) CAD ツール

データベース検索ツールではテーブル形式で専門知識を保存しており、施工条件にあわせて、推論に必要な基本知識を抽出し、フレームモデルで表現してエキスパートツールに渡す。エキスパートツールではこの基本知識をもとに推論を進める。エキスパートツールとしては「ES/KERNEL/W」を使用した<sup>5)</sup>。また、本システムではシールド機の自動設計などに高度な図面作成機能が要求されるので、CAD ツールも連係している。なお、これらのツールでは複雑な技術計算を行うことができないので、計算部は外部プログラムとしてC言語あるいはFORTRANにより作成しリンクさせている。

4. 処理内容

シールド工法は、シールド機種種の構造により全面開放型、部分開放型、密閉型の3種類に分類することができる。最近のシールド工事では密閉型シールドが採用されることが多く、特に密閉型のなかでも土圧式シールドの適用事例が増加してきている<sup>6)</sup>。これは土圧式シールドの土質適応性や経済性が評価されてきたからである<sup>7)</sup>。

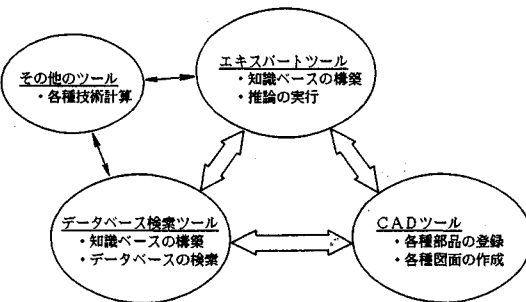


図-5 ソフトウェア構成

同工法の適用は今後もますます増加するものと思われ、ES 導入の必要性も高まってくるものと考えられたので、本システムの処理対象工法は土圧式シールドとした。

また、システムの処理範囲としては、シールド機の発進から到達までの一次覆工 (掘進工) を対象とし、シールド機の掘削管理、工程管理、補助工法、環境対策に関して検討する。シールド工事では、一次覆工以外にも立坑築造工、二次覆工、復旧工などの各工種があるが、施工管理の中心となるのは一次覆工であるので、これを支援対象とするシステムとした。

本システムの処理概念を図-6に示す。処理としては条件入力部、推論・計算部、結果出力部の3つの部分で構成されている。前述したように、ソフトウェアはデータベース検索ツール、エキスパートツール、CAD ツールを組み合わせて使用しており、これらのツールと処理の流れとの関係を表わしたシステムフローを図-7に示す。

以下、処理の流れに沿って、その内容について説明する。

(1) 条件入力部

条件入力部では、計画対象工事の施工条件に関して、表-1に示す項目のデータを対話形式で順次入力する。ここで入力した計画線形および周辺状況から、CAD ツールにより掘進路線の平面図を作成し出力する。

地盤条件は、掘進路線で行われる事前土質調査結果に基づいて入力する。入力項目は調査位置、地表面高さ、土質構成、地下水位、細粒土分、上載荷重、特殊条件であり、各項目の内容を表-2に示す。土質構成は名地層の土質分類とその層厚を入力するが、土質分類は標準土質として設定したのから選択する。標準土質は表-3に示したように14種類 (第二分類) のものがあり、これらは大きく5種類 (第一分類) に分けている。また、これらの標準土質には単位体積重量、粘着力、内部摩擦

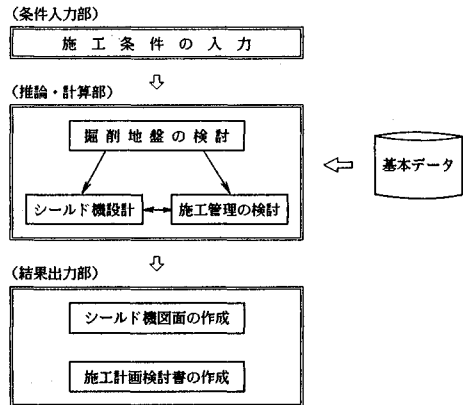


図-6 システムの処理概念

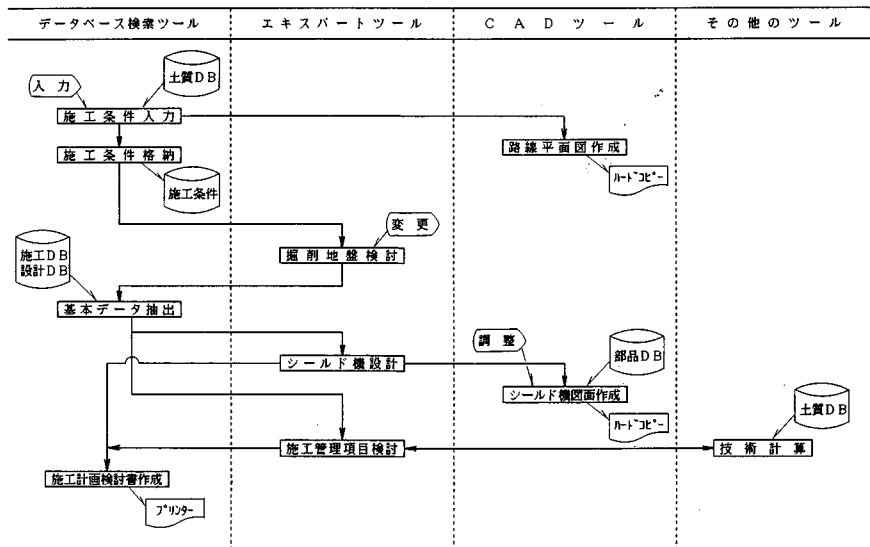


図-7 システムフロー

表-1 入力条件項目

項目	内容
工事番号	処理上の整理コード
工事名称	処理対象工事の名称
工期	発進から到達までの掘進工期
掘削径	シールド機の掘削外径
セグメント	セグメントの種類、径、幅
計画線形	掘進計画線形(種類、距離、勾配)
周辺状況	路線周辺の構造物の種類、位置
地盤条件	路線の土質条件
電源周波数	施工場所の電源周波数(50, 60Hz)

表-2 地盤条件に関する入力項目

項目	内容
調査位置	土質調査箇所の発進立坑からの距離
地表面高さ	土質調査箇所の地表面高さ
土質構成	各地層の土質分類、層厚
地下水位	地下水面の位置
細粒土分	掘削断面内の細粒土分
上載荷重	土質調査箇所の上載荷重
特殊条件	被圧帯水層、有害ガス、流木など

表-3 標準土質

土質番号	土質分類		N値	玉石の径 (cm)
	第一分類	第二分類		
1	粘性土	腐植土	0	
2		軟弱粘性土	0~2	
3		シルト	3~8	
4		粘土	9~20	
5		固い粘土	20以上	
6	砂質土	シルト混じり砂	10~15	
7		緩い砂	10~30	
8		締まった砂	30以上	
9	砂礫	砂礫	40以下	
10		砂礫	40以上	
11	玉石混じり砂礫	玉石混じり砂礫	40以下	20以下
12		玉石混じり砂礫	40以下	20以上
13		玉石混じり砂礫	40以上	20以下
14		玉石混じり砂礫	40以上	20以上

角、細粒土分(粒径0.074 mm以下の土粒子の含有率)などの土質物性に関する標準値も設定しており、地盤条件により物性値自体に変更のある場合は、その変更値を入力する。

なお、一般に土質調査は複数箇所で行われるので、その調査箇所にあわせて路線を複数のブロックに分割する。各ブロックの境界は調査箇所間の midpoint とした。推論のなかで土質条件が関与する場合は、基本的にこのブロックごとに検討する。

(2) 推論・計算部

a) 掘削地盤に関する検討

表-1に示した施工条件のうち、地盤条件以外のは入力データをそのまま推論に利用できるが、地盤条件に関しては、どのような掘削地盤であるかを評価して計画を進めなければならないので、技術的な判断が必要となる。ここでは、地盤条件をもとに掘削断面のなかで、どの地層が施工に対して支配的に影響するかを検討する。

この検討は掘削断面内の各地層の面積を基本に考えるが、土質によっては施工に対する影響の度合いに差があるので、掘削断面積に対する各地層の面積比により確信度(0.00~1.00)を設定して、その影響を考慮した。この確信度とは、あいまいな知識の確からしさを表現するパラメーターであり、ここでは14種類の標準土質(第二分類)それぞれの面積比に対して“施工に対する影響が支配的である”という状態の確からしさに関して、絶対肯定を1.00として表現している。確信度の数値を表-4に示す。この確信度の数値の決定方法として、各専門技術者が数多くのシールド工事を通して得た感覚値を

表一 土質選定用確信度一覧

土質番号	掘削断面積に対する面積比 (%)									
	~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~
1	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
2	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
3	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	0.80	0.90
4	0.00	0.15	0.25	0.40	0.50	0.60	0.70	0.85	0.90	0.90
5	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
6	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
7	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
8	0.00	0.10	0.25	0.35	0.50	0.60	0.70	0.85	0.90	0.90
9	0.00	0.15	0.30	0.40	0.55	0.65	0.75	0.90	0.90	0.90
10	0.00	0.20	0.35	0.45	0.60	0.70	0.80	0.90	0.90	0.90
11	0.00	0.20	0.40	0.50	0.60	0.80	0.90	0.90	0.90	0.90
12	0.10	0.30	0.45	0.70	0.80	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
13	0.00	0.25	0.40	0.55	0.65	0.85	0.90	0.90	0.90	0.90
14	0.10	0.35	0.50	0.80	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

アンケート調査により引出した。

各ブロックの適用土質の決定方法として、掘削断面内の各地層の面積からそれぞれの確信度を求め、確信度の最も大きい地層の土質分類を適用土質とする。この計算では、標準土質の第一分類のレベルで支配土質を決定した後、その第二分類のレベルで支配土質を決定する。第二分類だけでこの計算を行う場合、第一分類で明らかに支配的である土質分類であっても、その第二分類が細かく分かれていれば、個々の確信度は小さくなり、適用土質として選ばれないケースも生じてくるので、このような段階選択方式とした。

また、路線全体の適用土質に関しても、同様の計算方法により掘削断面内の各地層の確信度を求めるが、この場合はブロックの長さにより重み付けを行い、距離の長いブロックほど確信度が大きくなるようにした。

検討の結果、支配的であるとされた地層の土質分類(第二分類)は、適用土質として推論で使用するが、この適用土質は施工管理検討用とシールド機設計用のものを決定する。施工管理項目はブロックごとに検討するので、その適用土質も各ブロックのものを決定する方法にした。また、シールド機は発進から到達まで同一機械で掘進するのが一般的であるので、その設計用の適用土質は路線全体の地盤を対象として検討する方法にした。

適用土質は第一候補から第三候補まで決定するが、この検討結果はモニター画面に表示し、利用者が確認するという方法としている。利用者の判断により、第二あるいは第三候補を選択することもでき、利用者は掘削断面の土質分布図を参照して適用土質を検討する。利用者による変更のない場合は、第一候補の土質により以降の検討に進むことになる。

b) 基本データの抽出

テーブル形式のデータベースから、シールド機の設計および施工管理項目の検討を行うために必要な基本データのみを条件検索により抽出し、推論に利用できるようにフレームモデルとして表現する。検索の条件としては、適用土質、掘削径、地下水圧、掘進距離、曲線半径、セ

表一5 シールド設計用基本データ項目

基本データ項目	検索条件					
	適用土質	掘削径	地下水圧	掘進距離	曲線半径	セグメント種類
カッタ板	○	○		○		
掘削ビット	○	○		○	○	
カッタモータ	○	○			○	
スクリュコンベア	○	○	○			
ロータリフィーダ	○	○	○			
ゲート	○	○	○			
シールドジャッキ	○	○			○	
中折れ装置	○	○			○	
テールシール			○			
エレクタ			○			○
真円保持装置			○			○

表一6 施工管理検討用基本データ項目

基本データ項目	検索条件			
	適用土質	掘削径	地下水圧	曲線半径
添加材配合	○		○	
添加材注入箇所	○	○	○	
掘削地盤に必要な細粒土分	○		○	
裏込注入率	○	○		
シールド機掘進速度	○	○		
曲線部補助工法タイプ	○	○		○
曲線部補助工法注入材	○	○		○
曲線部補助工法注入率	○	○		○
発進部坑口補助工法タイプ	○	○		
発進部反力補助工法タイプ	○	○		
到達部坑口補助工法タイプ	○	○		
シールド機日進量	○	○		○

グメントの種類がある。ここで抽出する基本データの項目およびその検索時の条件を表一5、6に示す。表中の○印を記入した項目が、それぞれの検索条件である。また、各検索条件をどのように分割しているかを表一7に示す。検索条件のなかで曲線半径の分割を4種類設定した理由は、検討項目によっては曲線半径の長さにより判断基準が異なり、組み合わせ数をできるだけ少なくするためである。表中の①が曲線部補助工法、②がシールド機日進量、③が掘削ビット、カッタモータ、シールドジャッキ、④が中折れ装置の検索条件である。

テーブル形式のデータベースの一例として、地下水圧が1 kgf/cm<sup>2</sup>以下の場合の添加材配合テーブルを表一8に示す。このテーブルからは、たとえば適用土質の番号が“9”であれば、“添加材配合”というフレームを作成し、そのスロットである“粘土”、“ベントナイト”、“水”に対し、それぞれ480、155、753というスロット値をもたせる。

表一7 検索条件の分割状況

項目	検索条件		分割状況
	単位	分割数	
適用土質		14	No.1, No.2, No.3, ....., No.14
掘削径	m	5	0.0 ~ 2.0 ~ 3.0 ~ 4.0 ~ 5.0 ~
地下水圧	kgf/cm <sup>2</sup>	4	0.0 ~ 1.0 ~ 1.5 ~ 3.0 ~
掘進距離	m	3	0 ~ 500 ~ 1000 ~
曲線半径①	m	4	0 ~ 30 ~ 70 ~ 100 ~
曲線半径②	m	5	0 ~ 30 ~ 50 ~ 100 ~ 150 ~
曲線半径③	m	4	0 ~ 20 ~ 60 ~ 100 ~
曲線半径④	m	4	0 ~ 20 ~ 70 ~ 150 ~
セグメント幅	mm	3	750, 900, 1000

表-8 添加材配合テーブル

適用土質 番号	粘土 #200 (kg)	ベントナイト #250 (kg)	水 (L)
1	0	0	1000
2	0	0	1000
3	0	0	1000
4	0	0	1000
5	0	0	1000
6	0	250	900
7	0	250	900
8	0	250	900
9	480	155	753
10	500	170	740
11	500	170	740
12	500	170	740
13	500	170	740
14	500	170	740

(添加材1m<sup>3</sup>当りの配合)

## c) シールド機的设计

抽出したシールド機に関する基本データに基づいて、施工条件に適合するシールド機本体および後続設備の自動設計を行う。シールド機はカッタ板、スクリュコンベア、シールドジャッキなどの各種部品により構成されており、施工条件にあわせて本体の形状を決めるとともに、部品の寸法、能力などの仕様を決定し、その配置計算を行う。設計時の主な検討項目は、地山掘削、掘削土砂の搬出、止水性、曲線施工、セグメント組立などである。これらの項目の検討対象となる部品を表-9に示す。その検討内容の一例として、地山掘削に関しては、掘削断面の土質に適合する種類の掘削ビットを選択し、カッタ板の回転による各ビットの掘削範囲を考慮してその配置を決定する。また、曲線施工に関しては、シールド機の設備により対処できる方法として、オーバカッタの使用あるいはシールドジャッキの片押しだけで対処できる場合や中折れ装置が必要な場合などがあり、曲線半径と土質の種類により、設備の選択を行う。なお、シールド機の設備だけでは対処できない場合は、補助工法の検討を行う。

施工条件のなかでも特に重要な項目は地盤条件であり、ここでは基本的に路線全体の適用土質に基づいて設計を進める。しかし、路線の地盤条件は一定であるとは限らず、また、適用土質だけでは掘削地盤の特性をすべて表現することはできないので、特殊なケースに対する設計手法はプロダクションルールにより表現している。このようなルールの一例を以下に示す。

- i) 1か所でも玉石層を適用土質とするブロックがある場合、掘削、排土機構に玉石用の機能を付加する

表-9 シールド機設計に関する検討項目

項目	検討対象部品
地山掘削	カッタ板、掘削ビット、シールドジャッキ
掘削土砂の搬出	スクリュコンベア、ロータリフィーダ、ゲート
止水性	ロータリフィーダ、ゲート、テールシール
曲線施工	オーバカッタ、中折れ装置、シールドジャッキ
セグメント組立	エレクタ、真円保持装置

- ii) 掘削地盤中にメタンガスが含まれている場合、防爆型の機器を使用する  
 iii) 掘削断面内に流木が存在する場合、カッタ板に流木切削用のビットを装備する

また、掘削ビットに関しては、使用するビットの特性と施工条件に基づいて摩耗計算を行い、ビット交換の必要性について検討する。

なお、ここで検討した本体形状あるいは部品の仕様、配置などの設計データは、ファイル形式でCADツールに渡し図面化する。

## d) 施工管理に関する検討

抽出した施工管理に関する基本データに基づいて、ブロックそれぞれに対して各管理項目の検討を行う。検討項目は、掘削管理、工程管理、補助工法、環境対策であり、各項目の内容を表-10に示す。

掘削管理に関しては、隔壁土圧、掘進速度などの管理基準を設定するとともに、添加材注入および裏込注入の注入材料、配合、注入圧、注入量などについて検討する。

隔壁土圧は切羽の安定状態を直接示す指標であるので、土圧シールドの管理基準のなかでは最も重要な項目である。その基準値としては、基本的に切羽部の静止土圧に相当する値を設定する。しかし、この基準値の設定に関して

- i) 掘削地盤が砂質系（適用土質番号 No.6~14）である場合、土圧変動により主動状態になると切羽が崩壊する可能性があるため、静止土圧よりも多少受働側の隔壁土圧のほうが安全である  
 ii) シールド機のカッタ板が面板タイプである場合、隔壁内の土圧としては、面板の土留効果により切羽部の土圧が減衰して伝播する

という知識があるので、これらをプロダクションルールにより表現している。

添加材注入は掘削地盤の細粒土分を補うことにより、粒度分布を改善し掘削土砂の不透水性および塑性流動性を向上させることを目的としている。ここでは掘削断面内の各地層の細粒土分から断面全体で含有する細粒土分を求め、掘削に必要な細粒土分に対する不足分を補う注入量を計算する。

裏込注入は注入方法として同時注入と即時注入があり、それぞれ長所および短所があるので、本システムでは両方の注入方法について検討する。掘削地盤の土質を

表-10 施工管理に関する検討項目

項目	内容
掘削管理	掘削管理基準、添加材注入、裏込注入
工程管理	掘進工程の予測計算
補助工法	発進・到達部、曲線施工部の補助工法
環境対策	地盤沈下、地下水への影響

考慮して、配合、注入率を決定し、テールボイド量から注入量を求める。注入率の検討では、地山が安定しにくい軟弱層や崩壊性の高い砂礫層あるいは急曲線部において、注入量を通常より増加させている。また、掘削位置の土圧および水圧を計算し、それに対抗する注入圧を設定する。注入圧が低い場合は地盤の崩落につながり、高い場合は地盤の隆起あるいは攪乱につながる。ここでは、注入口の位置を考慮して地山圧に相当する注入圧を設定する。

工程管理に関しては、初期掘進長を計算して、初期掘進時および本掘進時のシールド機日進量から、段取替えの所要日数も考慮して、掘進工程の予測計算を行う。掘削地盤の土質、掘削径、曲線半径により工事の進行が異なり、たとえば掘削断面内に径の大きな玉石が存在する区間、掘削径が大きい場合あるいは急曲線施工部などにおいては日進量が低下する傾向にあり、ここではこのような施工条件を考慮して日進量を決定している。

補助工法に関しては、シールド機の発進部、到達部および曲線施工部に対する補助工法について検討する。掘削地盤の土質あるいは土被りなどにより地山の安定性を考慮して補助工法の必要性を検討し、必要である場合は、補助工法としての地盤改良工法の選定を行い、その改良範囲を検討するとともに、その数量計算を行う。

環境対策に関しては、シールド機掘進による地盤沈下、地下水への影響について検討する。地盤沈下は路線周辺構造物に対してその悪影響が懸念される箇所について予測計算の必要性を検討し、必要であればFEM解析を行う。なお、FEM解析用データに関しては、処理条件として入力した土質、層厚などの地盤条件と掘削径、土被りなどの掘削条件をもとに自動的に作成される。これらの諸条件をもとに、各地層を適当な大きさ、形状のメッシュで分割し、節点および要素のナンバリングを行った後、節点の拘束条件および要素の物性値を自動的に設定し、FEM解析用データに変換する。

### (3) 結果出力部

#### a) シールド機図面の作成

推論・計算部で検討した設計データに基づいて、カッター板、本体内部、後続設備の各図面を作成し出力する。掘削ビット、カッターモータ、シールドジャッキなどの部品図面は、それぞれの部品について各種の仕様ものの標準図を登録してあるので、設計仕様に基づいて抽出し使用する。出力はモニター画面およびカラーハードコピーにより行う。写真-1, 2にカッター板および本体内部の設計図面のモニター出力を示す。

#### b) 施工計画検討書の作成

施工管理項目に関する検討結果およびそれに伴う技術計算をまとめて文章化し、施工計画検討書として出力す

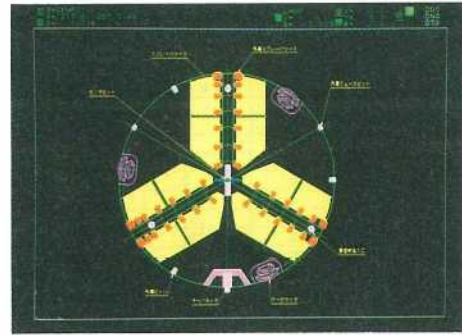


写真-1 カッター板設計図

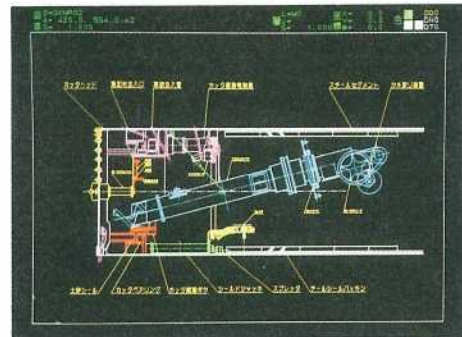


写真-2 シールド機本体設計図

る。表-11にその出力項目を示す。また、検討書の出力例として添加材注入に関する出力の一部を図-8に示す。なお、シールド機の各仕様もまとめ、仕様書として出力する。出力はページプリンターにより行う。

プリンターで形式を整えて出力することにより、検討書としてそのまま利用することができる。

## 5. システムの評価

本システムは11件の計画事例に適用しており、各現場の施工概要を表-12に示す。工事の規模としては、掘削径が2120~4940mm、土被りがGL-9.1~23.5m、掘進延長が366.0~1277.9mである。また、曲線施工として、半径45, 50mといった急曲線のものも含まれている。掘削地盤の土質としては砂質系のものが多い。

表-11 施工計画検討書の出力項目

No.	項目	No.	項目
1	工事概要	11	掘削管理基準値
2	掘進計画線形	12	裏込注入工
3	路線周辺構造物	13	初期掘進長計算
4	掘進路線平面図	14	掘進工程
5	標準土質物性値	15	発進部坑口の補助工法
6	ブロックデータ	16	発進部反力の補助工法
7	ボーリングデータ	17	到達部坑口の補助工法
8	掘削断面土質分布図	18	曲線施工部の補助工法
9	適用土質検討結果	19	地盤沈下に関する検討
10	添加材注入工	20	地下水に関する検討



【ブロックNo. 2】

・ 掘 削： 39.92 m ~ 165.97 m

・ 距離： 127.05 m

・ 添加材配合(1m<sup>3</sup>当り)

粘土 (kg)	セメント(kg)	水 (L)
0	250	900

・ フォーム： 250mm<sup>2</sup>を使用

・ 掘進1m当り必要な細粒土分V<sub>1</sub> (m<sup>3</sup>)

$$V_1 = S_1 \times A = \text{細粒土分}(\%) \times \text{シールド断面積}(m^2)$$

$$= 20 \times 3.53 \times 0.01$$

$$= 0.70 (m^3)$$

・ 掘削断面に含まれている細粒土分V<sub>2</sub> (m<sup>3</sup>)

土質名称	断面積(m <sup>2</sup> )	細粒土分(%)	細粒土分(m <sup>3</sup> )
1 締まった砂	3.31	10.00	0.33
2 粘土	0.22	60.00	0.13
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
計	3.53	13.03	0.46

図-8 施工計画検討書の出力例

表-12 適用現場一覧

No.	施工場所	掘削径 (mm)	土 被 り (CL-m)	掘進延長 (m)	適用土質
1	埼玉県	4940	10.3	788.5	シルト
2	東京都	3480	23.0	885.3	砂 礫
3	東京都	2680	23.5	885.3	砂 礫
4	大阪府	3280	11.1	702.0	シルト混じり砂
5	大阪府	2790	11.0	627.8	シルト混じり砂
6	大阪府	2140	9.1	1075.3	砂 礫
7	東京都	3930	13.3	1078.7	シルト
8	東京都	3080	10.8	806.4	締まった砂
9	東京都	2880	10.9	1277.9	締まった砂
10	愛知県	3280	13.5	438.2	緩い砂
11	茨城県	2120	10.0	366.0	締まった砂

本システムに対する総合評価として、出力結果を熟練技術者が検討したところ、実際の現場の施工計画案と比較して基本的な考え方は一致しており、掘削管理基準値、注入材料の数量、補助工法の改良範囲などの各種計画数量も適正な値であると考えられ、全体的に妥当な計画であるという評価を得た。また、個々の機能評価として、以下のような項目があげられた。

- i) 条件を変えた数量の処理結果を比較検討できる
- ii) 入力から処理まで比較的短時間で処理できる
- iii) 処理結果が整理されて出力されるので、検討書としてそのまま利用できる
- iv) 対話形式で処理を進めるので、操作しやすい
- v) 各種の図面がモニター画面に出力されるので、視覚的に理解しやすい
- vi) 新技術、新材料に関して、すべてのものは網羅されていない

以下、これらの評価項目に関して詳述するとともに、今後の課題について述べる。

### (1) 知識ベースの構築および保守

ESにとって知識ベースは核となる部分であり、その良否が直接システムの品質に影響する。3. で述べたように、本システムでは知識の性質にあわせてプロダクションルールとフレームモデルの2種類の表現方法を使用している。このフレームモデルの記述量が多いほど処理時間が長くなるので、基本データはテーブル内に保存

し、必要なものだけフレームモデルに展開するという方法としている。このテーブルは行単位あるいは列単位で管理することができるので保守が行いやすく、検討対象あるいは範囲を拡張するために新たにデータを追加する場合は、テーブルに行あるいは列を挿入することにより容易に対処できる。

知識ベースの規模としては、プロダクションルールが約900個、フレームモデルが約100種類、テーブル形式で表現されているデータが約15000項目であり、膨大な知識量を取り扱っている。しかし、一連の処理においてすべての知識を参照するような構造にはしていないので、対話形式で計画作業を進める際に、その応答性が問題となるようなことはなかった。

また、シールド専門技術者の知識・ノウハウを知識ベースに蓄えるために収集・整理したことにより、計画手法の標準化を図ることができた。

### (2) システムの操作性

ESを実務レベルで普及させるためには、システムの操作性は重要であり、マンマシンインタフェースの重要性は知識ベースのそれと同等である。本システムでは、モニター画面との対話形式で処理を進めることにより、操作性の向上を図っている。また、参照画面として、路線平面図、掘削断面土質分布図、土質柱状図、土圧分布図などをモニター表示することにより、利用者の計画構想の支援も図っている。

システムの処理時間としては、表-12に示した適用事例の平均処理時間は1時間程度であった。また、条件を一部変更して再処理する場合、30分程度の時間で行うことができた。従来、シールド機の設計も含めた施工計画の立案は、複数の専門技術者が2~3週間で行っていたが、本システムを適用することにより、処理対象範囲外の検討も含めて1週間程度で行うことができるようになり、かなり省力化を図ることができたといえる。

### (3) システムの活用

本システムを利用することにより、入力すべき施工条件が準備されれば、シールド工事の経験の少ない技術者でも、効率的に施工計画を立案することができる。また、シールド専門技術者が計画する場合は、他の専門技術者のもつ知識を間接的に自分の知識として取り込むことができるので、合理的に計画を進めることができる。

一般に施工計画の段階で地盤条件として得られる情報は、掘進路線に対して100m程度の間隔で行う土質調査の結果であり、調査箇所間の部分の土質は推定しなければならない。しかし、複雑な土質構成の地盤の場合、実際にはその推定と異なる場合もあるので、いろいろな土質条件を想定して検討を行わなければならない。本システムでは、利用者の判断により適用土質の推定結果を

変更することができるので、数種の土質条件を想定した計画案を比較することもできる。

また、本システムの現場適用を通して以下に示すような問題点があげられたが、今後の課題として対処したい。

- i) 添加材注入の材料に関して、本システムでは粘土、ベントナイトを主体とした配合を検討しているが、最近では高分子系の材料を使用する現場が増える傾向にあり、このような材料も検討対象とする必要がある。
- ii) シールド機日進量、初期掘進長などに関して、地域の施工指針で設定されている基準値と適合しない部分があり、このような施工地域の特異性を知識ベースに取り込む必要がある。

## 6. あとがき

ES は処理対象問題により、診断型、計画型、設計型、制御型の4種類に分類することができる。本システムは計画型と設計型の両方の要素をもつ ES であるということが出来る。計画型および設計型の ES の共通した特徴として、知識ベースが大規模になるという傾向がある。本システムにおいても、大規模な知識ベースを取り扱っているが、ソフトウェアとして既存のツールを有効に利用することにより、保守性の良好な知識ベースを構築することができた。

今後、シールド工事は大深度、高水圧などの特殊条件のものが増加するとともに、その施工条件はさらに厳しくなり、マネジメント技術にはより高度なものが要求されるようになると考えられる。本システムによる施工計画の妥当性を維持するためには、シールド工場の動向に柔軟に追随していく必要がある。

最後に、本システムの開発は(株)日立製作所との共同研究として進めたものである。関係各位に対し深く感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 日経 AI, 第 97 号付録, pp. 16~34, 1990 年 1 月.
- 2) 矢田光治編: AI 総覧, pp. 174~183, 1987 年 7 月.
- 3) 同上, pp. 36~52.
- 4) 林 和久・渡辺理彦・宮田 薫: リレーショナル型データベース ITOS-RDB, NEC 技報, Vol. 41, pp. 29~39, 1988 年 3 月.
- 5) (株)日立製作所: ES/KERNEL マニュアル, 1988 7 月.
- 6) JTA 研究開発委員会: シールド工法の都市トンネルへの適用性に関する調査報告(1), トンネルと地下, Vol. 19, No. 10, pp. 55~60, 1988 年 10 月.
- 7) JTA 研究開発委員会: シールド工法の都市トンネルへの適用性に関する調査報告(2), トンネルと地下, Vol. 19, No. 11, pp. 63~68, 1988 年 11 月.

(1990. 6. 4・受付)