

のり面設計エキスパートシステムの開発

中部電力(株)

正 土山 茂希

成和コンサルタント(株)

○正 大坂 一

1. はじめに

今後益々激しくなる経営環境の中で、電力会社にとって、総合技術力の向上は重要な課題である。電力施設の建設・保守においては経験によって支えられている技術と理論によって支えられている技術をどう結合していくかが検討課題として挙げられる。その対応策の一つとしてエキスパートシステム(以後ESと言う)の導入が考えられる。ESはコンピュータ利用の最新技術で、計算機があたかも専門家であるように反応をさせようとするもので、複雑な知識の分野や明確なロジックが存在しない分野、例えば、建設法規コンサルタント、各種機械故障診断、各種の工法選定、コンクリート劣化診断、岩盤分類など、への適用性が検討されている。その一部は実用化されている技術である。

のり面設計ESの開発は、設計者がのり面設計の基本となるのり面勾配の決定およびその安定性を検討するときにその作業を支援するESを開発し、試行することによってその有効性を確認すると同時に、このような経験を集積して、より合理的なのり面設計の作業実施手順を確立することを目的としている。

2. 開発環境

のり面設計ESは、図-1に示すように、地盤特性推論、のり面勾配推論、地盤定数推論、安定解析選定・実行、評価の5つの推論システムから構成されている。さらに、これらの推論システム間をつなぐために、全体の実行順序を制御する全体制御サブシステム、設計のためのデータ入出力を管理する、データ入力サブシステム、データ登録サブシステムがある。

のり面設計システムの構築を目的とした本研究は、最初に次の2種類の開発環境の組合せで、のり面用地盤分類を支援するES、基準による勾配の選定を支援するESを作成した。

①パソコンと簡易ES構築ツール(創玄)の組合せ

②EWS(インテリジガワークステーション)とAI言語(tps83)の組合せ

その結果として、結論部の記述能力の高さ、数値計算・図形処理用のFORTRAN言語との接続性の良さ、計算速度の速さ、記憶容量の大きさの面で比較して、パソコンでは今後の大規模システムの構築は困難であると判定された。

現在のES開発環境はEWSを用いて行っており、その構成を図-2に示す。文書表示はESが利用者に各種の情報を提示する効率的な方法としてOPS83に組み込んだもので、ワードプロセッサで作成した文書が簡単に画面に表示できるようにしたものである。現在、システムの規模はルール数で1500ルール、行数にして50,000行である。

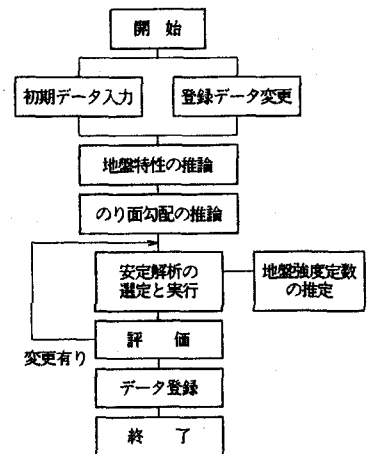


図-1 法面設計エキスパートシステムフロー

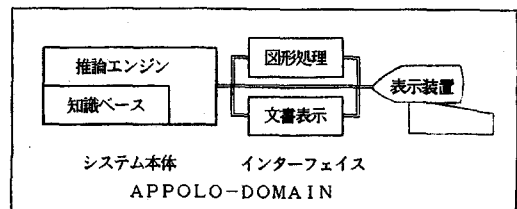


図-2 システム開発環境

3. システム概要

3. 1 データ入力と結果表示

ESを作成する上で、データの入力と結果の表示を利用者に分かりやすくすることはシステムの有効性を高めるうえで重要な点である。ES利用時に、利用者に、システムの下す工学的判定を鵜呑みにされることは、人間の専門家に相談することと異なっており、かなり危険な状態を誘発する可能性を持っている。システムの内部で行っている判断を利用者に理解させられることができればそのような状態の発生が低減できるであろう。本システムでは、分かりやすさ、使いやすさを目的として、データ入力・結果表示に次の方針を採用している。

1) ESではとするとデータの入力順番がバラバラになり、内容が理解しにくくなる。これを防止するため、原則として実際の設計業務で行わ

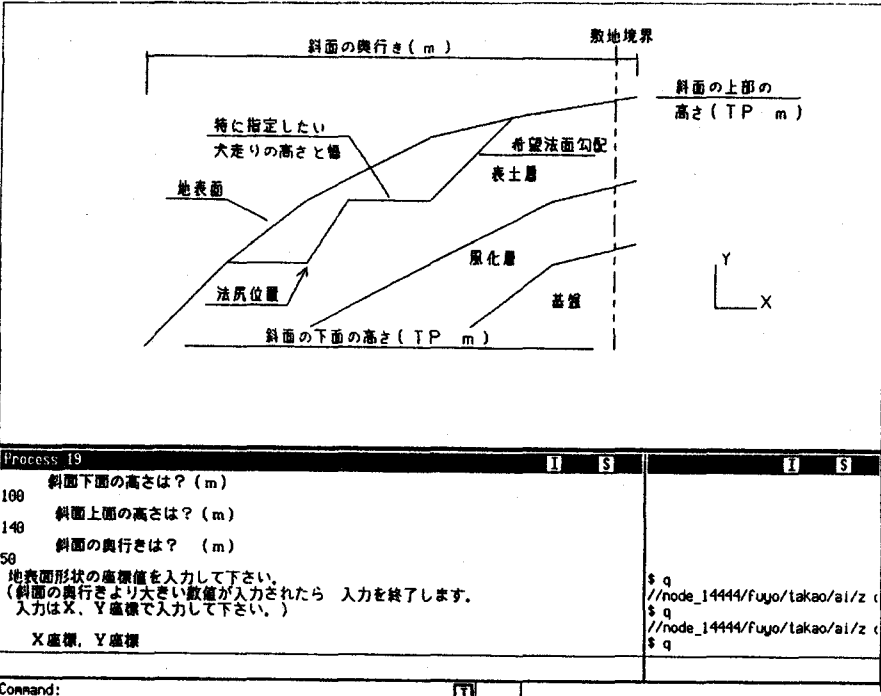


図-3 地表面形状入力説明図

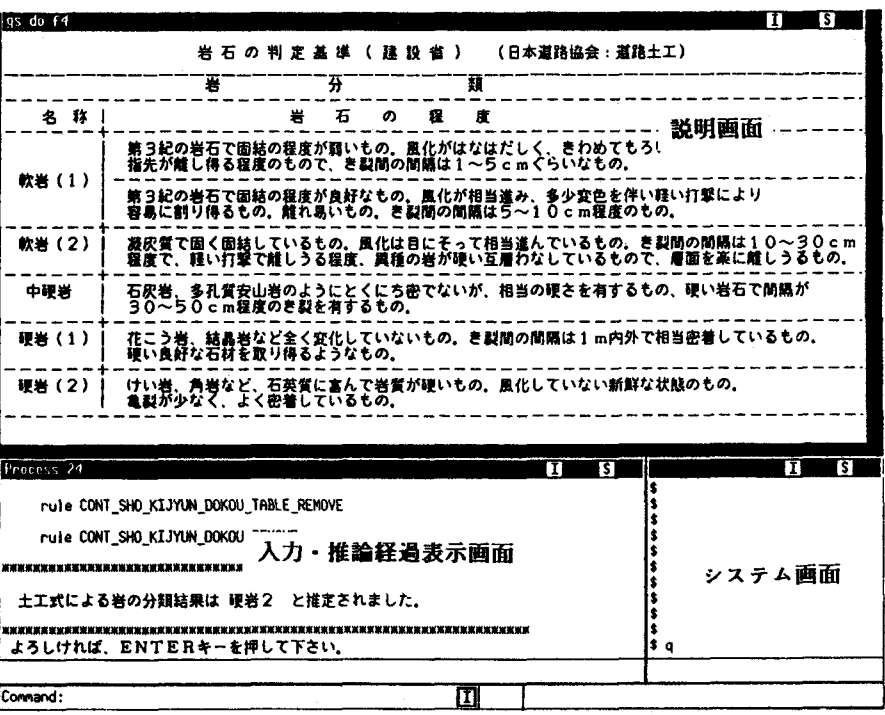


図-4 推論結果説明文書表示

れるデータの確認手順でデータが入力できるようにする。

- 2) データの入力に際しては必ず説明画面に、何を入力するのか、何故入力するのかを表示する。その例として、図-3に地表面形状入力の説明の例を示す。
- 3) 推論の途中結果は結果と共に必ず推論の理由を表示するようにした。岩石分類の例を図-4に示す。このため、画面全体を入力・推論経過表示画面、説明画面、システム画面の3つに分けた。また、規則の中でワープロ文書を説明画面に表示できる機能を追加し、説明画面の作成を容易にしている。

3. 2 地盤特性

地盤特性の推論では斜面の地質的特性と切取りに対する安定性を対応させるために地盤を工学的に分類する。この分類をもとにのり面勾配の決定および地盤強度設定が行われる。組み込まれている分類を表-1に示す。地盤分類には簡便で統一された分類方法はなく、表-1に見られるように多くの分類が提案されており、それらを組み合わせて使用できるようにした。システムの使用時に入力データが煩雑にならないように、最初に土質か岩盤かの大分類を行い、その後、地質と得られた情報に応じて適切な地盤分類が実行されるようにした。

表-1 地盤分類一覧表

分類名	分類方法	分類の目的
日本統一土質分類	粒度分布等	特定の目的なし
旧国鉄式土質分類	粒度分布、N値等	鉄道建設ののり面安定性判定
切取土砂岩石分類解説表	岩石種類、観察	鉄道建設の施工性判定
旧国鉄式岩の分類	観察	鉄道建設ののり面安定性判定
建設省岩石判定基準	観察	道路建設の施工性、のり面安定性判定
建設省岩分類	岩石種類、弾性波速度	道路建設の施工性、のり面安定性判定
リッパ限界	岩石種類、弾性波速度	リッパによる施工性の判定
電研式分類	観察、弾性波等	ダム基礎の総合的な判定に使用
花崗岩分類 (本四公団)	観察、弾性波速度	花崗岩のり面の安定性判定
砂岩と泥岩分類 (本四公団)	観察、弾性波速度	砂岩泥岩互層地盤ののり面安定性判定
蛇紋岩分類 (日本道路公団)	観察、ハンマー打診等	蛇紋岩のり面の安定性判定
第三紀層分類 (〃)	観察、ハンマー打診等	第三紀堆積層ののり面安定性判定
中古生層分類 (〃)	観察、ハンマー打診等	中古生代の堆積層ののり面安定性判定

地盤の分類方法としては、N値や弾性波速度などの計測値によるものと、肉眼観察によるものがある。本ESでは、土質地盤に対してはN値と粒度分布、岩盤に対しては弾性波速度と岩種による分類を主としているが、各種の観察による方法も取り入れている。

表-3 計画のり面勾配決定レベルの得点表

評価項目	分類	各レベルの得点								ウェイト		
		基準値		最急		代表					最緩	
		事例無		事例無		事例有		事例有				
		基準数		基準		基準		基準				
		レベル	1	2	3	4	5	6	7			
斜面高さ	土	0～10M	3	4	5	4	4	3	1	2		
		10～	×	×	×	×	×	×	×			
	岩	0～20M	4	4	5	4	4	3	1	2		
		20～50	3	4	5	5	5	4	2	2		
		50～100	×	×	×	×	5	5	5	3		
		100～	×	×	×	×	×	5	5	5		
法面目的	仮設のり面	5	3	3	2	2	1	1	4			
	放置のり面	3	5	5	3	2	2	1	4			
	一般道路法面	2	3	5	4	3	2	1	4			
	幹線道路法面	1	2	3	4	5	3	2	4			
	宅地後背法面	1	1	2	3	4	5	4	4			
	施工性	切り直し良	5	4	3	3	1	1	1	3		
切り直し普通		3	4	5	5	4	3	2	3			
切り直し不可		×	×	4	4	4	4	4	4			

注) ×はそのレベルでのり面勾配を決定するのは不可能なことを示す。

表の中の数字は判断項目に対する得点を示す。

各レベルの評価は総合得点 (総合得点 = 各得点 × 評価項目のウェイト) で行う。分類は各基準は次の意味を示す。

①一基準: 設計基準を一つでも満足すれば良い。

②全基準: 適用できる設計基準全てを満足させる。

③最急: 設計基準勾配の中から最急勾配値を使用する。

④代表: 設計基準の代表値を使用する。

⑤最緩: 設計基準勾配の中から最緩勾配値を使用する。

⑥事例無: 事例の勾配があっても採用しない。

⑦事例有: 事例の勾配があれば、全ての事例以下の勾配にする。

表-2 計画勾配選定基準一覧表

基準・事例名	制定・発表機関
地山の土質に対する標準斜面勾配	日本道路協会
のり面勾配の標準	旧日本国有鉄道
岩盤状況と斜面高および勾配 (花崗岩)	本四公団
岩盤状況と斜面高および勾配 (砂岩と泥岩)	本四公団
蛇紋岩類の岩質区分と実績のり面勾配	日本道路公団
第三紀層岩盤分類とのり面勾配の関係	日本道路公団
中古生層岩盤分類とのり面勾配の関係	日本道路公団

れている資料を参照する方法と、該当工事場所近辺にある安定したのり面の勾配を参考にする方法がある。前者の資料には、日本道路協会の標準勾配斜面のように設計の指針として発表されている設計基準と、道路

各 層 推 論 結 果 一 覧									
基 準	表 土 層			固 化 層			基 盤 層		
	限界勾配	標準勾配	安全勾配	限界勾配	標準勾配	安全勾配	限界勾配	標準勾配	安全勾配
土工式	1.500	1.500	1.500	0.500	0.600	1.200	0.300	0.550	0.800
旧国鉄式	1.200	1.350	1.500	0.500	0.750	1.000	0.300	0.550	0.800
花こう岩	-	-	-	-	-	-	-	-	-
蛇紋岩	-	-	-	-	-	-	-	-	-
砂岩泥岩	-	-	-	0.400	0.500	0.600	0.500	0.550	0.600
第三紀	-	-	-	-	-	-	-	0.600	-
中生代	-	-	-	-	-	-	-	-	-

図-5 設計基準・事例によるのり面勾配表示図

蛇紋岩地盤の例のようなのり面の現状を分析して得られた事例を参照する方法がある。本ESでは表-2に示すのり面勾配設定法を準備した。

各地盤分類に対応したのり面勾配は一覧表形式で表示され（図-5）、さらに、斜面高さ、のり面の目的、施工性、を考慮して各地層の最終勾配が決定される。この決定は表-3に示す得点を用いて行っている。全体を考慮した勾配は、地層間の関係と犬走りを考慮して決められる。

3. 4 地盤定数の推論

のり面の安定に対する判定の精度を高めるには安定解析結果も重要な情報となるが、実際ののり面構築にあつてはあまり行われていない。その理由として検討対象領域の広さと安定解析に必要な地盤定数算定の

難しさが上げられる。しかし、安定解析が可能であれば、より合理的な設計が実現できることは自明であり、ここでは安定解析の為の地盤定数設定を支援するサブシステムを作成した。

基 盤 層 岩 盤 定 数 推 論 結 果 一 覧 表						
方 法 名	粘 着 力 (kgf/cm^2)			内 部 摩 擦 角 (度)		
	上限値	代表値	下限値	上限値	代表値	下限値
原位置試験(岩盤せん断)	-	20.00	-	-	40.0	-
原位置試験(ブロックせん断)	-	15.00	-	-	42.0	-
本四公団の方法	-	-	-	-	-	-
電研式分層法	24.00	-	10.00	45.0	-	38.0
道路公団の方法	-	-	-	-	-	-
フックの方法	-	-	-	-	-	-

図-6 地盤定数推論結果表示図

地盤の強度推定は地盤の特性に応

じて、できる限りの検討を行い、得られる結果の全てを表示し、その中から最も信頼度の高い結果を推薦する方式とした（図-6）。地盤強度の推定は、すべり形状別に表-4の方法を準備している。

3. 5 安定計算

斜面の安定計算は円弧すべり、直線すべり、くさびすべり、複合すべりが可能である。安定計算とその評価は図-7示す順番に実行される。安定計算の前に設計条件として次の項目を確認する。

- 1)設計方針の設定：設計結果に影響を与える因子として設計定数を代表値とするか、下限に近い値とするかがある。これは、のり面の設計への要求レベルと地盤定数の設定レベルを勘案して決定することとした。

表-4 地盤分類別地盤定数決定法一覧表

方法名	対象地盤	地盤定数設定方法
土質	室内試験法	粘土質 一軸圧縮強度試験の一軸強度から粘着力を求める。
	新聞の方法	砂質土 N値がある時に、新聞の与えたグラフから内部摩擦角を求める。
	三木の方法	粘土・砂質 N値がある時に、三木の与えた式で強度を求める。
地盤	道路公団の方法	粘土質 N値がある時に、道路公団設計要綱の与えた式で粘着力を求める。
	簡易診断法	粘土質 ISRMの Manual Index Test による方法で粘着力を求める。
	フックの方法	礫・砂・粘 Hoek and Bray による地盤分類で与えられた表から地盤強度を求める。
岩盤	原位置試験法	岩盤 原位置での岩盤せん断試験ブロックせん断試験から地盤強度を設定する。
	本四の方法	花崗岩 ボーリング孔内の載荷試験から地盤強度を推定する。
	道路公団の方法	岩盤 三軸圧縮試験による岩石強度から割目指数を考慮して地盤強度を求める。
地すべり	準岩盤強度法	岩盤 準岩盤強度から、粘着力または内部摩擦角を想定して地盤強度を求める。
	電研式分類法	岩盤 電研式の岩盤分類が与えられているとき、岩盤分類で与えられた表から地盤強度を求める。
	フックの分類法	硬岩 フックの岩盤分類が与えられているとき、岩盤分類で与えられた表から地盤強度を求める。
地すべり	逆解析による方法	地すべり 地盤のすべり面を円弧すべりまたは複合すべりとしてすべり面強度を求める。
	試験による方法	地すべり 地すべり粘土の原位置せん断試験よりすべり面強度を求める。
	藤原の方法	地すべり 地すべり土壌の分類によって、藤原によって与えられた表より地盤強度を求める。
岩盤すべり	パットンの方法	岩盤 表面の平均粗さ角があるとき、パットンの式から節理面の摩擦角を求める。
	パートンの方法	岩盤 節理面の粗さ係数JRCがあるとき、パートンの式から節理面の摩擦角を求める。
	逆解析による方法	岩盤 岩盤すべり面を直線すべりまたはくさびすべりとして、節理面の摩擦角を求める。

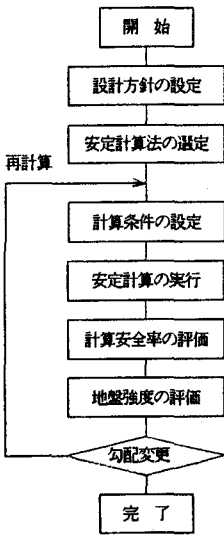


図-7 安定計算・評価処理フロー

2)安定計算法の選定：安定計算法の選定は図-8に示すフローに従って、必要な計算方法を選定するようにした。実行時に、フローの分岐で判定のつかないときは、両方とも計算するようにした。計算方法によって設計強度の設定方法も変えている。

3)安定計算条件の設定：安定計算法の実行にあたり、設計条件として、地盤構成、地盤定数以外に、地下水位と水平

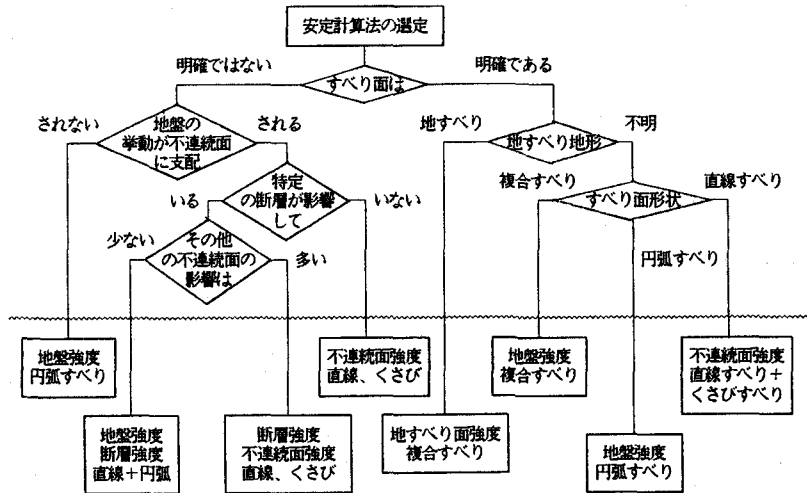


図-8 安定計算法判定ツリー図

震度を考慮する必要性の判断、すべり面の位置が必要であり、これらを設定する。

4)安定計算の実行：FORTRANプログラムを呼ぶことによって各安定計算を実行し、安全率を計算する（円弧すべりは簡便法を用いた）。結果を図-9に示す。

3. 6. 評価

のり面勾配の評価には安定計算より得られた安全率の評価と設計条件（特に設計定数）の評価がある。ここでは、それぞれ次の対応をした。

1)安全率の評価：計算によって得られた安全率をどのように評価するかはかなり困難なテーマである。本

来であれば基準に添った値を採用すべきであるが、のり面切取り工事に対しては広く認められたものはない。ここではのり面の目的と地盤強度の設定方法で安全率が変更できるようにした。

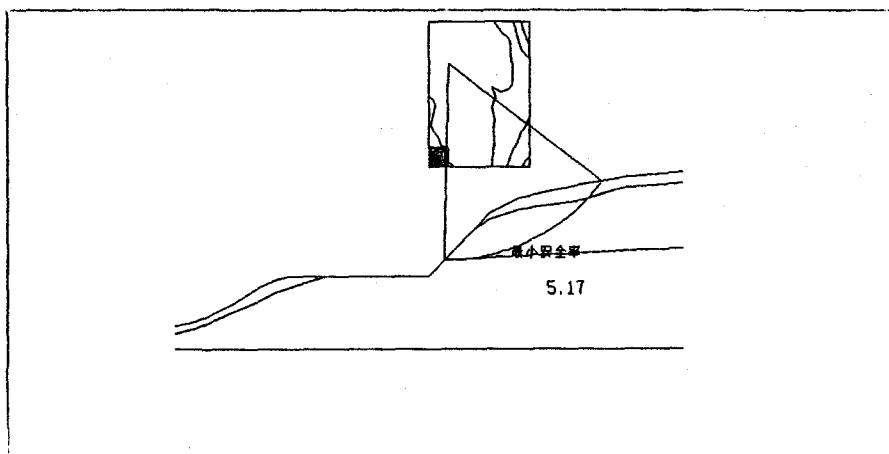


図-9 円弧すべり計算結果表示図

のり面設計上、安全率をいくらにするかは難しく、現時点では仮の値として設定している。

- 2) 地盤定数の評価：安定解析の結果安全率が低いと判定されたとき、一番問題となるのは求められた安全率の信頼度、すなわち地盤構成と地盤強度が安全側に取られ過ぎていないかである。ここでは、より詳細な調査・試験を対象として、各層の地盤強度が安全率に与える影響を判定するため、地盤定数の変動解析を行っている。変動解析では、各層の地盤強度（粘着力、内部摩擦角）が変動した時の安全率に及ぼす影響を求めて表示している。

4. ESの構築

4. 1. 知識の収集

ESを構築するのにどのような知識を獲得する必要があるかは、構築するテーマによってかなり異なってくるが、本システムで必要となった知識を4つに分類し、それぞれの問題を検討する。

- 1) 入力データの獲得に関する知識：地盤観察や地形観察、試験値の入手に関する知識がこれに対応し、システム内では自然斜面風化度判定やステレオネットによる節理面卓越方向の判定、各種岩盤分類の判定を組み込んでいる。この部分の知識は岩盤分類のように基本的なデータが数値化されておらず、観察と結果の対応が観察者の体験によって得られるものが多い。土木の分野では、数値で得られないデータ、数値化できても意味付の困難なデータがかなり多く、この部分のESへの取り込みは難しい。本システムではこれらの知識は教育を目的として組み込んであり、実際の利用にあたっては利用者の判断を入力することが原則となる。
- 2) 入力データの吟味に関する知識：入力データの吟味は試験結果、観察結果にバラ付きの多い地盤を対象としたときには重要な作業である。入力データにバラ付きがある時の処理としては信頼性設計・確率有限要素法が研究されているが、まだ実用には供されておらず、技術者の経験的な処理に任されている。吟味には設計条件として採用すべき値の決定方法とその値の妥当性に対する判断が含まれている。どのようなときに、設計値として試験値の代表値を用い、どのようなときに下限値を使用するかはケースバイケースであり、全てを網羅することは困難であるため、本システムにはその一部を組み込んだ。技術者が行う吟味の内容に関して十分な経験の蓄積が行われておらず、今後の課題である。本システムでは、それを補う意味で次の方法を採用している。

- ① 多面的な見方による強度定数の表示：岩盤であれば、岩盤分類による強度定数の範囲、岩盤の亀裂係数と一軸強度から推定される強度定数、原位置試験値など複数の方法から求められる強度定数を一覧

表として表示する。

②変動解析による強度定数の安全率に与える影響の検討：各層の強度定数を変えることによる安全率の変動を求め、各層の地盤強度が全体の安定性に与える影響を把握できるようにした。

3)作業手順に関する知識：作業全体をどう進めるのが最も合理的であるかの判断に関する知識で、設計は基本的にはステップバイステップの作業であり、不都合が生じればその時点で適切な作業まで後戻りする。どの状態が不都合であるかは作業によって得られる結果の評価と対応しており、E S 向きの知識である。ただし、設計業務での中間結果をどう評価すべきかは、技術者によって見方が異なることが多いこと、細部まで分からなければ判断しづらいこと、などから知識獲得としては困難な領域に属している。

4)処理内容に関する知識：処理は実際の設計における机上作業をイメージしており、本システムでは、地盤強度推定のような計算式の実行、基準によるのり面勾配選定のような表の検索、安定解析のようなプログラム化を必要とする計算、および結果の表示がそれに対応する。この知識はかなり定型化されているものが多く、知識獲得、知識表現上の問題は少ないが、本格的な設計分野のE S にとっては、計算式が多くなること、プログラム作成が必要となること、などハードウェア・シェルの能力にかなりの負担が掛かると思われる。

4. 2. 知識の整理

獲得された知識を整理する方法としていくつかの方法が考えられるが、ここでは本システム構築で適していると考えた方法について検討した結果を示す。

1)ネットワーク型：整理が十分でない知識間の関係を表現するもので、どのような知識にも適用できる。

電研式岩盤分類から岩盤強度を推定する時の例を、図-10に示す。この整理方法は問題の全体を示すことができ、システム化範囲を設定するのに有効であるが、ややもすると細かい所までは判定できず、かなり大規模なシステムとなってしまふことが多い。

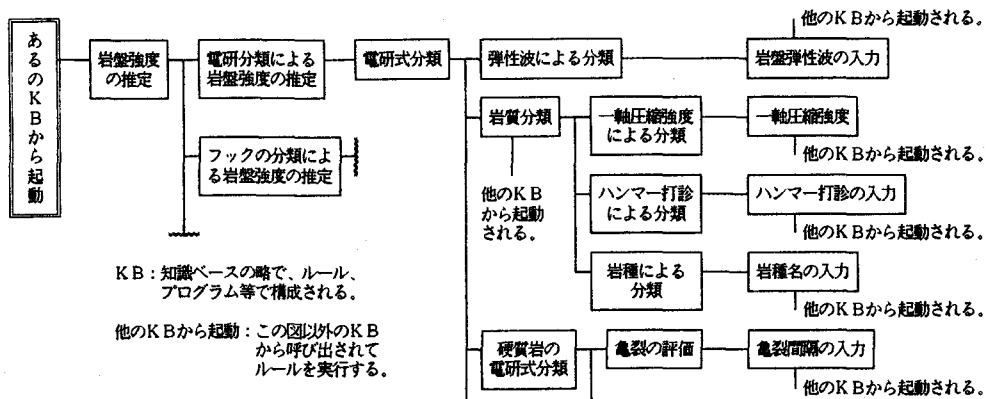


図-10 電研式岩盤分類による岩盤強度の推定に関するネットワーク図(図の右側でネット構造になる)

2)ツリー図：処理の体系、知識の体系を表現するのに使用した。ルールで記述するのに適しており、ルールを使用すると更に柔軟なツリー図が可能である。この形で整理できる知識は少なかった(図-9)。

3)フローチャート：作業手順を大まかに示す場合と細かい計算手順などを示す場合に使用した(図-1、図-7)。フローチャートで示されるような細かい計算手順はルールで記述するのに適しておらず、プログラムを適用した。今回使用した OPS83 はプログラム言語の機能を持っており、簡単なものはそれを利用し、複雑なものは FORTRAN を使用した。

4)○×表形式：定性的な経験を示す方法の一つとして○×式または得点式の表が使用される。特に工法選定や地盤分類などのように複数の基準を組み合わせで判断される知識の表現に適している。システムとしては確信度を使用して表している。この方法は、技術者の経験を整理する方法として新しい方法であ

る。実際の技術者の判断方法と異なっているように思われるが、今後この方式で知識が整理されれば、その分野のES構築は容易になると思われる。

5) 一覧表形式：一覧表で示される知識で、基準に示されているものの多くがこの形式で表され、データベースを用いるのに適している。システムの成長の面からはES外のデータベースを利用する方法が好ましいが、簡単なものであればES内部で、データベース検索形のルール表現を用いた方が簡単である。

6) グラフ、計算式：知識が最終的にグラフ、計算式で表現されているもので、複雑なものはFORTRANで処理した方が効率的である。

これらの方式で整理された知識はそのままではシステムに組み込むことができず、シェルに適したルール、フレームに変換する必要がある。その意味で現行のシェルはシステム構築、保守の面から見て、機能的に不十分である。ESを土木の設計業務に適用するためにはより専門領域に近い技術者が知識を導入しやすい、より高機能のシェルの開発が必要である。

5. おわりに

本ESは、ESとしては教科書的な知識と設計技術者の持つ各知識の組合せを加えたシステムであり、「深い知識」として安定計算機能を持たせている。また、教育に利用できるように推論過程を表示して、その内容が把握しやすいようにしている。現在、システム構築はテストが完了した時点であり、事例の検討はまだ少ないが、かなり広範囲の作業領域をカバーすることによって、ESの処理速度を、実際に資料を探したり安定計算を行うのに較べて、かなり早くすることができ、実際の設計に使用できる可能性を持っている。実用性を高めるには、より広範囲の、より細部に渡った知識、より面倒な計算処理(FEMなど)を組み込むことによって可能であると考えており、本システムはその骨格を与えている。

ESが騒がれて数年が経過し、故障診断、自動運転等の分野での有効性が確認されているが、土木の分野ではまだその有効性が明確になっていない。ESの利用形態として、ある程度の経験者が設計時の支援ツールとしてESを利用し、技術力を向上させると共に作業効率を向上させることへの可能性を示した。未経験者が土木工学的な判断を組み込んだESを利用できるかどうかはESの持つ機能の検証方法が不明確である間は不可能ではないかと考えられる。

EWS・パソコンの高速化・大容量化によって、より身近に設計CADを利用できる環境が整いつつあり、設計業務の標準化を図ると同時に、より高機能のシェルが開発されることによって、設計的な業務のES開発が進み、設計技術がより簡単に修得されることが期待される。

参考文献

- 1) Forgy, C. L. : 人工知能用言語OPS 83、パーソナルメディア、1986
- 2) 奥園誠之：切土斜面の設計から維持まで、鹿島出版会、1983
- 3) 国鉄：国鉄構造物設計標準、土木学会、1974
- 4) 土質工学会：土質基礎工学ライブラリー12 切土ノリ面、1984
- 5) 土木学会：本州四国連絡橋の耐震、地盤に関する調査報告書、土木学会、1980
- 6) 土木学会：本州四国連絡橋の耐震、地盤に関する調査報告書、土木学会、1981
- 7) 中村二郎編：砂防・地すべり防止、急傾斜地崩壊防止施工法、山海堂、1977
- 8) 日本道路協会：道路土工 のり面工・斜面安定工指針、日本道路協会、1980
- 9) 日本道路協会：道路土工 土質調査指針、日本道路協会、1986
- 10) 日本道路公団：設計要領第一集 土工・舗装・排水・造園、日本道路公団、1983
- 11) Hoek, E., Bray, B. : Rock slope engineering, INSTITUTION OF MINING AND METALLURGY, 1977
- 12) Hoek, E., Brown, E. T. : Underground excavation in rock, INSTITUTION OF MINING AND METALLURGY, 1980