

(Ⅲ-9)

制御発破のエキスパートシステムの開発

Development on Expert System of Cautious Blasting in Tunnel

佐藤工業(株) ○南出英男*

By Hideo MINAMIDE

従来、トンネル発破は施工性・経済性に重きをおいて行われていた。しかし最近はトンネル路線が都市周辺部で施工されるようになってきており、振動や騒音の影響を考慮せずに発破計画をたてることが許されなくなっている。そこで計画・設計段階で、想定どおりに岩盤を破碎でき、振動・騒音の低減効果があり、施工状況に応じて容易に計画を変更できるエキスパートシステムを開発した。

本システムは発破パターン設計から、施工計測データの蓄積までの一連のシステムを開発することによって、信頼の向上、品質の向上、技術力の向上、作業能率の向上などを目指したものである。

本システムはPC-9801 シリーズで稼働するシステムで、エキスパートシステム構築支援ソフトを利用して開発を行った。ここでは、その開発内容について報告する。

【キーワード】 施工計画、エキスパートシステム、ファジィ推論

1. システム開発のねらい

山岳トンネルの発破掘削は、周辺地山への損傷を与えないように平滑なトンネル形状を作りながら所定の進行長を確保していく上で重要な問題である。最近ではさらに振動や騒音を考慮することが必要になってきている。計画段階でこれらの要素を考慮して最適な発破掘削をするには、入力諸条件をいろいろ変えながら繰り返し同じような検討を行って、施工計画を決定することが望まれる。しかし、地盤条件や周辺条件や爆薬のかかり方によって振動値や騒音値にばらつきがあるので、推定値と測定値があまり一致しないのが実情である。よって現実に即し、フレキシブルに富んだ、振動・騒音計測値に基づいて計画段階の変更に戻れる”計画/設計型”のエキスパートシステムを開発した。

本システムを導入することにより次のようなこ

とが期待できる。すなわち、従来電気雷管のばらつき精度を無視していたために過装薬であったものが、ばらつきをふまえた発破パターンにすることによって適正装薬を図り、振動・騒音の低減に寄与することができる。また、発破地点周辺の岩盤自体に対して振動応力による損傷を防止できる。この発破パターンはスウェーデンをはじめとする欧米型のパターンで、それをシステムに組み込むのであるので、発破技術を欧米のレベルにまで高められる。また、各発破段ごとの振動予測値、騒音予測値を工事着手前に発注者や地域住民に提示できるので、工事の承認を得やすい。切羽岩盤に応じた適正削孔数・適正装薬量で今までと同等の効果が得られ、その結果として作業能率の向上が図れる。さらに、各現場でムダに捨てられていた施工データが本社に集められるので、データの管理をすることによって現場間の施工のばらつきが低減されるとともに、我が国にあった最適発破工法の確立や自動削孔への道が拓けるものと確信する。などの期待である。

* 中央技術研究所 研究員 0462-41-2171

本システムは振動・騒音の規制をうけないトンネルや振動速度・騒音レベルを計測していないトンネルにも適用できるので、幅広く発破技術が高められるものである。

2. システムの概要

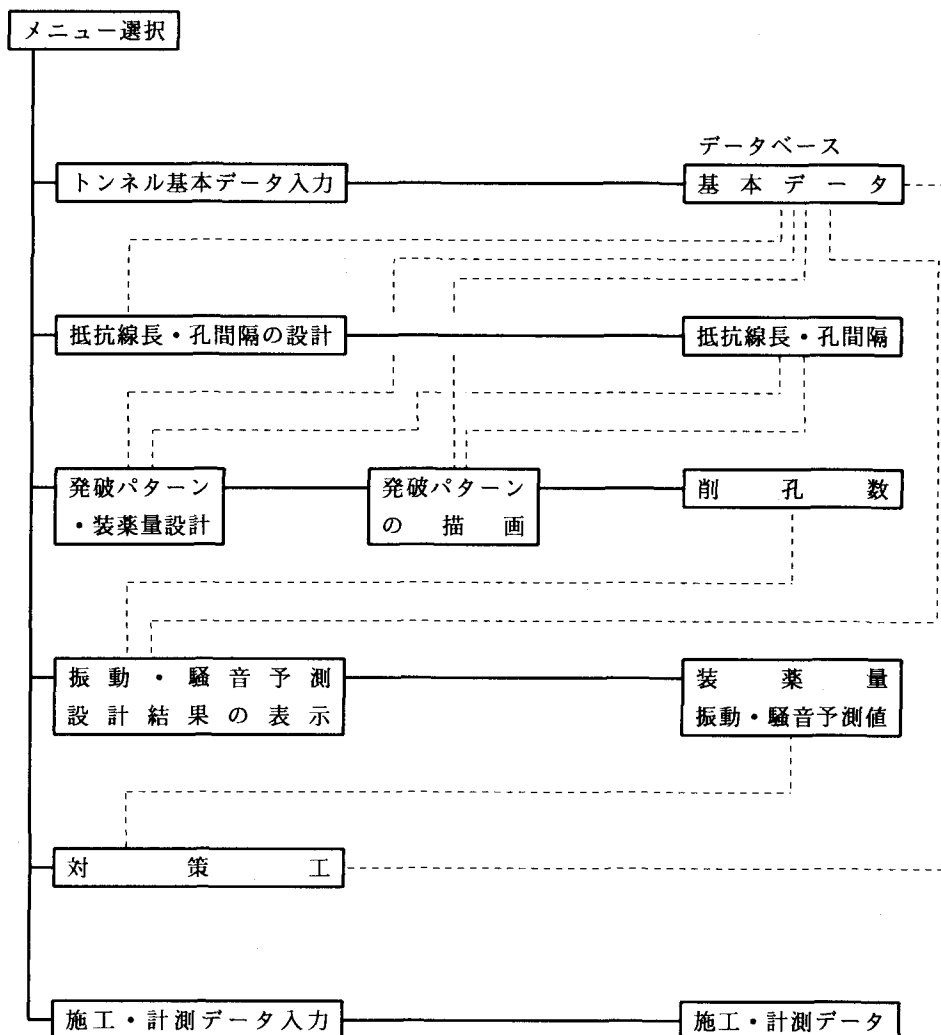
(1) システムフロー

本システムはフレームワークの側面をもった計画／設計型のエキスパートシステムで、前述のように実質性に重きをおいたシステム作りをしている。

- ①対象岩盤に応じた発破パターンを設計し、
- ②発生する振動・騒音を予測し、
- ③規制値以下になるように発破計画をたて、
- ④施工時の計測データをもとに計画をチェックし、つぎの発破にその成果を生かすシステムである。また、
- ⑤設計・施工の各種データを蓄積できるシステムである。

(2) ソフトウェア概要

本システムのソフトウェアは以下に示す内容のものとした。



図－1 システム構成図

a) 動作環境

- ・ 本 体 : PC-9801VM以上
メモリ 640KB以上
- ・ ディスプレイ : アナログ対応カラーディスプレイ
- ・ ハードディスク : 20MB以上
- ・ プリンター : PC-PR201系(136桁)
- ・ O S : MS-DOS ver3.1以上

b) 開発環境

- ・ エキスパートシステム開発環境 : GURU
- ・ 言 語 : Quick BASIC (ver4.5)
- ・ 開 発 マ シ ン : 動作環境と同じ

3. システム機能とその内容

本システムの機能と内容について以下に示す。

(1) トンネル基本データの入力

入力データは過去の種々のトンネルの発破データを検索するための検索用データ(名称/発注者/用途/延長/施工日時/切羽位置)と、発破設計のための設計用データ(岩盤/振動/騒音/掘削方法/掘削形状/芯抜き工法/外周発破法/一発破進行長/削孔径/爆薬/込め物)から成り立っており、これらのデータを入力/選択する機能である。これらの入力情報はファイルに保存する。

(2) 抵抗線長・孔間隔の設計

抵抗線長・孔間隔の設計は、ランゲフォースの岩石発破理論に基づいて、抵抗線長と孔間隔および切羽の部位(芯抜き/払い/踏前/外周/下半)ごとのボトムチャージ長・コラムチャージ長・無装薬長を設計して出力する機能である。設計結果はファイルに保存する。

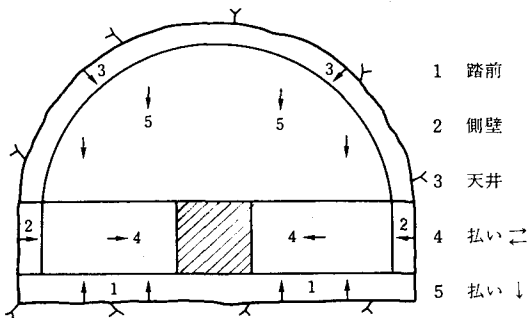


図-2 切羽の部位

(3) 発破パターンの設計

発破パターンの設計には2つの機能が備わっている。1つは抵抗線長・孔間隔の設計結果に基づいて、切羽全体の削孔位置の決定と爆発順序を決定してディスプレイ上に画面表示する機能である。発破段数はファイルに保存する。もう1つは抵抗線長・孔間隔の設計のボトムチャージ長・コラムチャージ長の設計結果に基づいて発破段数ごとの装薬量の計算をし、ディスプレイ上に表形式で表示する機能である。各段ごとの装薬量はファイルに保存する。

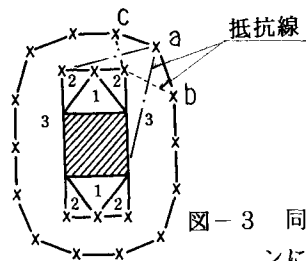


図-3 同心円状の発破パターンにおける岩の拘束度

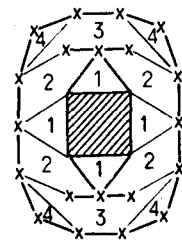


図-4 分散起爆の基本的な考え方

発破パターンの作成は切羽岩盤を想定どおりに破壊するうえでも、振動・騒音を低減するうえでも、ズリを集積するうえでも、最も重要なエキスパートの作業である。従来我が国では一般孔の発破パターンは芯抜きから同心円状に順次爆破されている。しかし図-3においてNo3のa孔が先に爆破した後でb, c孔が爆破した場合のa孔の岩の拘束度と、b, c孔が爆破した後で、a孔が爆破した場合のa孔の岩の拘束度は大きく異なる。これは各孔の起爆秒時のばらつきに関する問題で、このばらつきを考慮しない場合は相当程度の過装薬でなければ破碎できないからである。そのため周辺岩盤に大きな力が加わり割れ目や亀裂から抜け落ちが発生する。また破碎粒度も悪くなり、振動・騒音も大きくなる。そこで一般にトン

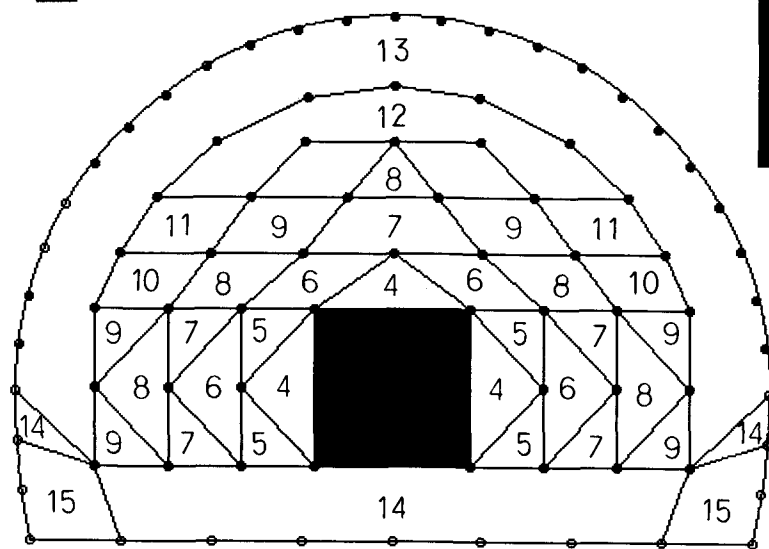
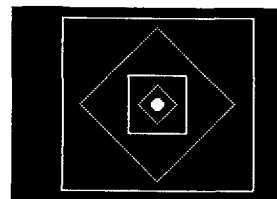


図-5 発破パターン出力例



シリング カット.1

ネル発破で利用する電気雷管では秒時差のばらつきを回避できないので、同心円状の同一起爆順序を分断して、分散起爆させて岩の拘束度の均一化を図っている（図-4）。

芯抜きは位置は放出状況、破碎粒度、孔数に影響する。芯抜きが下にあると重力を利用できるのでズリの放出距離は短くなり、集中した集積になるし、装薬量が少なくなる。そこで本システムでは芯抜きを下のほうに設定している（図-5）。

起爆方法も重要な要素で、ミリ秒発破では隣接孔を1000分の数秒という時差で発破することになる。この隣接孔間の非常に短い時間差は、お互いに岩石の抵抗を破碎するのを助長するのに役立つ。その上この時間差は飛石をお互いに打ち消し、ズリを堆積する働きをするので芯抜きはミリ秒電気雷管を使用している。

（4）振動・騒音予測

振動・騒音予測には2つの機能が備わっている。1つは装薬量計算に基づいて、発破各段ごとの振動と騒音の予測計算を行って、ディスプレイ上に表形式で表示する機能である。各段ごとの振動速度予測値と音圧レベル予測値はファイルに保存する。もう1つは、今まで行ってきた設計結果を一括して画面に表示する機能である。

振動予測において、振動計測を行っている場合は最新5発破の振動速度に対する係数の平均値をもとにして次発破の振動速度を予測する。振動計測を行っていない場合は発破種別／破碎効果／受振点の地盤状況／爆薬の種類／発破域に対する受振点の方向の差の5つの要素を考慮した予測式によって振動速度を予測計算する。

騒音予測においては、発破音の距離減衰をトンネル坑内での減衰と、トンネル坑外の自由空間での減衰とを考慮して音圧レベルを予測する。

（5）対策工

対策工には3つの機能が備わっている。1つは振動予測値もしくは騒音予測値がそれぞれの規制値（法的規制値／自主規制値）を上回っている発破段数について、どのような対策をとったらいかを、その現場特有の状況を考慮しない一般的な状況のもとにファジィ推論で対策工（芯抜き工法変更／段発数の分割／抵抗線長低減／進行長低減）を選定し、画面に表形式で出力する機能である。

もう1つは騒音伝播経路対策である。トンネル坑内に設置する遮音壁とトンネル坑外の防音壁の有無や距離関係など、その現場特有の条件を対話形式で入力すると、壁体の騒音低減効果と振音源対策の必要性の有無で提示する機能である。

最後の1つは振音源対策である。騒音伝播経路対策を行っても規制値を越えている発破段数、もしくは振動予測値が規制値を越えている発破段数について、装薬量の低減率を提示する。そして、そのための対策方法に対話形式で選定し、当初提示の装薬量低減率を順次カバーしていく。最後にはそれまでの対策手段と対策でカバーしきれなかった発破段数についての分割数を表示する機能で

ある。

ファジィ推論では、推論前件部には振動と騒音の感じ方をそれぞれのメンバーシップ関数で表現している。振動の感じ方と騒音の感じ方の組み合わせを16の制御ルールに表し、推論後件部もメンバーシップ関数で表現している。後件部のファジィ集合をMin-Max合成重心法により求め、その重心から対策方法を選定している。

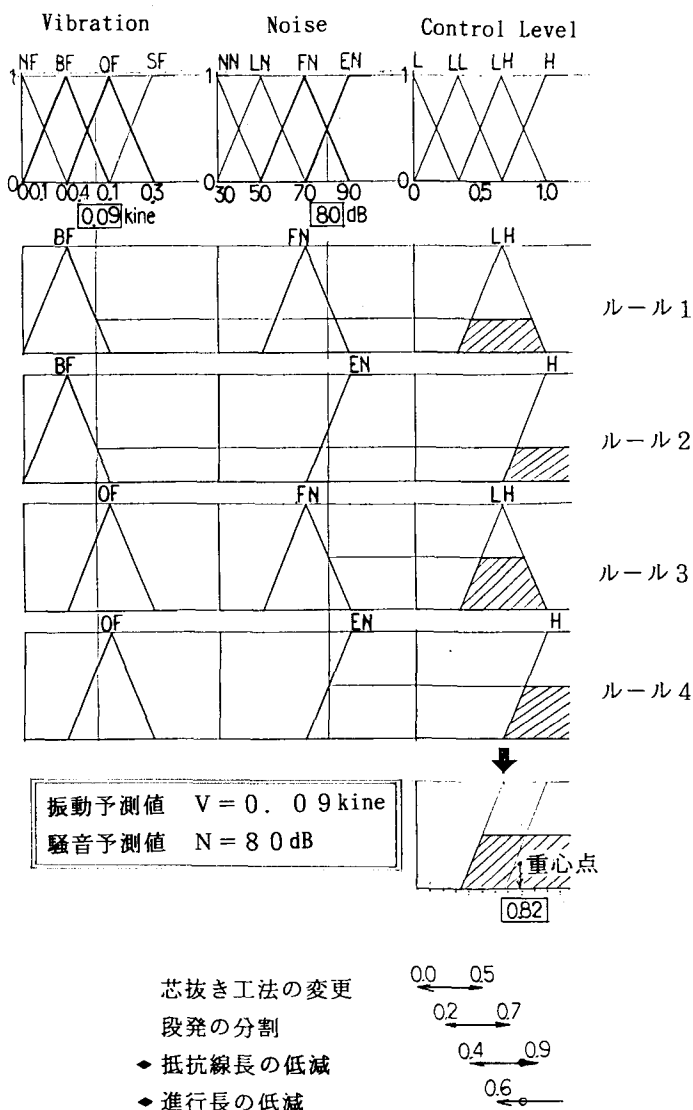


図-6 ファジィ推論部の適用例

(6) 施工・計測データ入力

施工・計測データ入力は施工で使用した装薬量（電気雷管／爆薬種／爆薬径／薬包重量／孔当たり装薬量／穿孔数／段当たり装薬量／合計装薬量）を入力する機能、現場計測を行っている場合にその計測結果（振動速度／音圧レベル／周波数／振動速度に対する係数）を入力する機能、及び「今発破での不具合」と「次発破への対処」をワープロ感覚で入力する機能の3機能を備えている。入力情報はファイルに保存する。

4. 今後の課題

本システムは現在ほぼ組み上がった段階で、現場への適用を行ってはいない。そこで考えられるシステム上の課題と将来現場適用したときの課題を想定して記述する。

(1) システム上の課題

- ①発破パターンや装薬量計算は設計段階（対策前）のものを画面表示するが、対策後については対策方法が表示するだけで発破パターンなどを画面表示しないので、現場特有のデータも設計に組み込んだかたちのシステムの自動化を図る。
- ②振動予測計算では我が国で一般に使用されている式を利用しているが、そのうちの各種要素係数に幅を持たせるなど予測値に幅を考慮する。
- ③騒音予測も予測値に幅を考慮する。また周辺の状況（受音点の方向／受音伝播経路途中の障害物）を考慮にいれた予測にする。
- ④施工時の計測データは現在最大値だけを入力するようになっているが、データ分析に使用する場合はもっと細かい入力方法が必要となる。
- ⑤岩石係数は切羽全体で一様のものを想定しているが、クラックの状況などにより岩石係数は部位により一定でなく削孔位置を局所的に移動させる必要があらうと推察できる。そこで発破パターン図をCAD化して削孔位置を状況に応じて動かせるようにフレキシブルにする。

(2) 現場適用上の課題

- ①岩石係数を削孔の機械的エネルギーなどと比較させて自動化への道を拓く。
- ②現場の作業者は芯抜きから同心円状に外側へ広がっていく発破パターンでずっと作業を行っているので、直線的なパターンに対しては違和感があると想像できる。この感覚を払拭する機械的な手段を必要とする。
- ③システム上ではボトムチャージの装薬密度を1.25kg/lで装填するようになっている。これを満足するためには、込め棒に30kg程度の力をかけて薬包を1本づつ入念に押し込むことが要求される。しかし、このような施工は実際的でなく、ダイナマイトの自動装填機の開発もしくはANFO+NONEL雷管への切り換えなどをしていく必要がある。

今後、前述のような課題を念頭におきながら現場適用を行ってシステムを実用化させていく所存である。

<参考文献>

- 1) Stig O Olofson: APPLIED EXPLOSIVES TECHNOLOGY FOR CONSTRUCTION AND MINING, 1989
- 2) Ulf Langefors & Björn Kilstöm: THE MODERN TECHNIQUE OF ROCK BLASTING
- 3) 工業火薬協会編：新・発破ハンドブック、山海堂、平成元年5月
- 4) 雑喉 謙：発破振動の周辺への影響と対策、鹿島出版会、昭和59年9月