

(27) 設計パターンの選択確率を考慮した NATM事前設計システムについて

九州大学工学部 正会員○相川 明
九州大学工学部 正会員 樗木 武
佐藤工業株式会社 正会員 三角衡一郎

A SIMPLE PRELIMINARY DESIGN FOR ROCK TUNNELS BY NATM USING THE DISCRIMINANT FUNCTIONS ON STANDARD SUPPORT TYPES

Akira AIKAWA, Kyushu University
Takeshi CHISHAKI, Kyushu University
Koichiro MISUMI, Sato Kogyo Co. Ltd.

Abstract

This paper proposes a simple procedure of the preliminary design of rock tunnels executed by the New Austrian Tunnelling Method (NATM). This procedure provides five basic types of design classified by two factors: the thickness of the shotcrete and existence of steel arch supports. These types would be determined by substituting the independent variables (overburden depth, velocity of elastic wave, state of cracks, and cross sectional area of tunnel) into discriminant functions which give the thickness of the shotcrete and existence of steel arch supports. All the variables can be easily got from the preliminary survey of construction field without tests. The functions are formed by using discriminant analysis on the data from many NATM tunnels. The proposed method is applied to practical cases and the reliability functions of the design types are also proposed.

1. はじめに

NATMトンネルの事前設計法としては、従来より地山分類表をもとに標準支保パターンを選択する方法が用いられている¹⁻³⁾。しかし、この方法に関していくつかの問題点を指摘できる。すなわち、地山分類や岩種分類に必要な説明変数が10項目以上と多く、その判断にかなりの熟練を要すること。しかも同じ地山分類法を施工時にも用いることを想定しているので、事前設計時点では入手しにくい説明変数が用いられていること。また全ての設計内容が一度に決まるので、便利な反面、地山条件の変化を設計に反映しにくいこと。採用した設計パターンが、従来の設計に比べてどの程度のレベルにあるかなどの信頼性が明かでないこ

と、また対象とする断面が標準断面に限られ、汎用性に欠けることなどが挙げられる。

そこで本研究ではこれらの問題を改善するために以下のようなことを考えるものである。

①. 使用目的と説明変数 モデルの使用目的を事前設計のみに限定する。したがって説明変数としては、事設設計時において入手可能なもので、しかもトンネルの力学的挙動に関与すると考えられるもののみ用いるものとする。また頑健で汎用性のあるモデルとするために、説明変数の数は最小限にとどめる。

②. 判別関数による定式化⁴⁾ 地山分類表や岩種分類に代わるものとして、事前調査項目を用いた判別関数により、支保部材の仕様を決定する。この判別関数は事前調査項目と支保部材の仕様とを

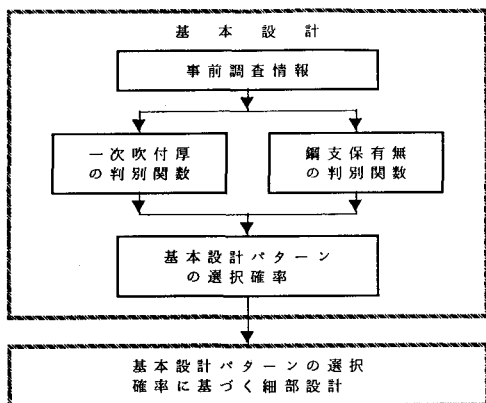


図-1 提案基本設計システムの概念図

統計的手法により関連づけたものであるが、結果が定量的に把握でき、判断が容易になる。

③. 設計項目の決定順序 各設計項目のうち力学的支保効果とその採用実績を吟味して、設計上重要であると考えられる支保部材の仕様をまず決定し、つぎに支保部材の細部にわたる設計内容を決める。これにより地山条件の変動を設計に反映することができるようになる。

④. 設計パターンの信頼性 施工実績に関する判別関数の分布に分布関数をあてはめることにより、各設計パターンの選択確率を評価する。これにより設計の信頼性や代替案の設定が容易になる。

2. 事前設計システムの構成

提案する事前設計システムは図-1に示すように基本設計と細部設計の2段階より構成される。基本設計とは設計上重要な支保部材の仕様を決定するものである。ここでは一次吹付厚の仕様と鋼製支保工の有無を判別する判別モデルの組合せにより、基本設計パターンを選択するものである。また細部設計とは、選択された基本設計パターン別に、パターン選択確率を考慮して、トンネル断面の大中小によりそれぞれ提案するものである。

本研究では、最近施工されたNATMに関する100あまりの実績データを整理し^{5)~8)}、事前調査と施工内容との関係をもとに、基本設計パターン選択モデルを提案するものである。なお本研究の対象は施工事例が多い硬岩地山に限定した。

3. 基本設計パターンの提案

事前設計で決定する支保の設計内容は以下のとおりである。

- ①一次吹付厚 ⑥ロックボルトパターン
- ②二次覆工厚 ⑦ロックボルトの長さ・径
- ③インパートの有無・厚さ ⑧鋼支保の有無・規格
- ④金網の有無・種類 ⑨工法
- ⑤防水シートの有無・種類 ⑩掘進長

この中から設計上重要な項目として、①一次吹付厚と⑧鋼製支保工の2項目を抽出し、これらを用いて施工実績を類型化し、基本設計パターンを設定した。具体的には、一次吹付厚の仕様は5cm, 10cm, 15cmの3タイプであり、鋼製支保工に関しては施工の有無の2タイプである。これら2項目の組合せで施工実績をグループ分けすれば表-1に示す5パターンに整理できる。ここにパターン[A], [B]はいずれも吹付厚が5cmで鋼製支保工がない場合であるが、ロックボルトの有無により両者を区別するものである。この[A]と[B]の判別は細部設計に譲り、ここでは[A]と[B]を同一のパターン[AB]として扱い、[AB], [C], [D], [E]の4パターンを本研究の基本設計パターンとして提案するものである。

表-1 基本設計パターンの提案

パターン	一次吹付厚	鋼製支保工	ロックボルト	サンプル
A	5 cm	なし	なし	20
B			あり	
C	10 cm	なし	あり	35
D	10 cm	あり	あり	26
E	15 cm	あり	あり	14

4. 一次吹付厚と鋼製支保工の判別関数

(1) 説明変数の抽出

判別関数の作成にあたり、まず説明変数を抽出した。説明変数は支保部材の仕様を決定するための指標となるものであるが、モデルの意味・操作性・適用に関して以下の3項目を満たすものであることが必要であると考えた。

- 1) 判別モデルが力学上の理論的な裏付けを持つために、説明変数は荷重・地山の変形特性・トンネルの形状や大きさを代表する変数であること。
- 2) 判別モデルの操作性がよいこと。すなわち、事

前調査で比較的容易に入手でき、しかもできる限り客観的・定量的評価ができるものであること。
3)モデルの適用にあたり、説明変数は目的変数と相関が高いもので、しかも互いに独立で相互補完的な因子であること⁴⁾。

事前調査項目のうち上記の条件を満たすものとして以下の5項目を抽出した^{9,10)}。

- ① 土被り厚(m)
- ④ 亀裂状況(多い,少ない)
- ② 岩種区分
- ⑤ 内空断面積(m²)
- ③ 地上弾性波速度(km/s)

なお④の亀裂状況は「多い」「少ない」の定性的判断となっている。これは現状ではRQDのような定量的データが少なく、また事前にそれらを精度良く推測することは困難であるためである。しかし亀裂状態は弾性波速度により情報の不足する分をいくらかは補えるものと考えられるので、ここではあえて定性的判断を採用し、亀裂がひどく脆弱な地山のみを亀裂が「多い」と判断し、それ以外は「少ない」とした。今後定量的データがそろった時点で、モデルに取り入れることが必要である。

本研究では判別モデルをより安定なものにするために、吹付厚に関しては数量化理論第Ⅰ類を、鋼製支保工に関しては数量化理論第Ⅱ類を用いて、さらに説明変数を絞り込んだ⁴⁾。その結果、岩種区分の寄与率が全体的に低く、しかも岩種区分を除外してもモデルの精度が低下しなかったため、岩種区分を説明変数から除外した。以上より、土被り厚、弾性波速度、亀裂、内空断面積の4項目を説明変数として用いることで十分であると判断した。

(2)説明変数のカテゴリー区分

各支保部材の仕様は、前述の説明変数が互いに影響しあって選択されたものと考えられる。したがって、ある説明変数と支保との単独の関係を把握するには、他の説明変数の影響を除外する必要がある。そこで本研究では、他の説明変数を固定したうえで、ひとつの説明変数に関して支保部材の仕様の採用率を調べ、その傾向の変わる値においてカテゴリー化を行うこととした。その一例として図-2に弾性波速度に対する一次吹付厚の仕様(3タイプ)の採用率を示す。上述の考えに従っ

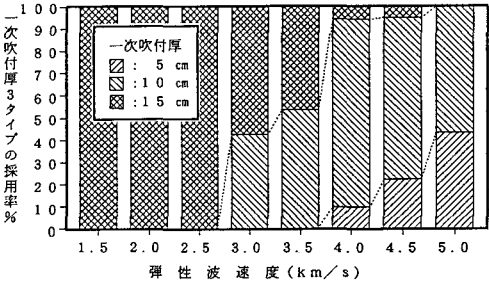


図-2 弾性波速度に着目した場合の一次吹付厚の仕様の採用率

てカテゴリー化を行った結果を表-2に示す。

同様の方法により他の変数についてもカテゴリー区分を行った。土被り厚についてみると、坑口部分を除くならば、およそトンネル断面の高さの2倍から25mまでは、一次吹付厚が15cmで鋼製支保工がないトンネルの施工実績が多い。また土被り厚が100mを超えると、鋼製支保工を装着したトンネルが多くなる傾向が認められる。

(3)判別モデルの作成

数量化理論第Ⅱ類により基本設計の判別モデルを作成した(表-3)。支保部材の仕様はカテゴリースコアの合計を判別規準値に照らして決定する。表中の相関比・誤判別率はモデルの精度を表し、相関比は1に近いほど、誤判別率は小さいほど良い。両モデルとも相関比は0.5以上、誤判別率は20%程度であり、使用したデータを再現する意味において信頼性の高い判別モデルが得られた。以下にそれぞれのモデルについて述べる。

一次吹付厚のモデルは吹付厚5cm, 10cm, 15cmを序

表-2 説明変数と外的基準

外的基準	一次吹付厚	鋼製支保工
	①吹付厚 5cm[51] ②吹付厚 10cm[58] ③吹付厚 15cm[54]	①鋼支保なし[47] ②鋼支保あり[35]
土被り厚 (m)	① 25 以下 [10] ② 25~100 [81] ③ 100~ [72]	① 50 以下 [21] ② 50~100 [30] ③ 100~ [31]
	① 3.5 以下 [58] ② 3.5~4.5 [62] ③ 4.5~ [43]	① 3.5 以下 [23] ② 3.5~4.5 [31] ③ 4.5~ [28]
	① 多 い [80] ② 少 ない [83]	① 多 い [41] ② 少 ない [41]
内空断面積 (m ²)	① 45未満 [70] ② 45以上 [93]	① 45未満 [36] ② 45以上 [46]

ここに、①②③：カテゴリー区分 []：サンプル数

表-3 基本設計の判別モデル

外的基準	1次吹付厚3群判別	鋼製支保工2群判別
判別モデルの精度		
相関比(η^2)	0.73	0.51
誤判率(%)	20.2	17.1
判別閾値		
1群/2群	-0.7	0.0
2群/3群	0.5	-
カテゴリースコア		
土被り厚(m)	① 0.324	① -0.368
	② 0.201	② -0.061
	③ -0.271	③ 0.308
弾性波速度(km/s)	① 1.172	① 1.285
	② -0.418	② -0.164
	③ -0.979	③ -0.874
亀裂	① 0.204	① 0.491
	② -0.196	② -0.491
内空断面積(m ²)	① -0.205	① -0.094
	② 0.155	② 0.074

列化するものである。判別への寄与の高い説明変数は、①弾性波速度、②土被り厚、③亀裂、④内空断面積の順である。ここで各説明変数のカテゴリーの判別モデルにおける意味について検討する。すなわち本モデルでは「亀裂が少なく弾性波速度が大きい地山に、土被りの厚い小トンネルを掘削する場合には、一次覆工は薄くてもよい」ことになる。これは自立性の高い地山ほど一次吹付厚を減らす意味を持ち、説明変数の寄与には実際面との矛盾は認められず、妥当な結果であるといえる。

鋼製支保工のモデルでは、カテゴリースコアの合計値が正のときには「鋼製支保工あり」、負のときには「鋼製支保工なし」と判断する。説明変数の寄与率は高い方から、①弾性波速度、②亀裂、③土被り厚、④内空断面積の順である。本モデルでは「亀裂が多く弾性波が遅い地山に、厚い土被りの大断面のトンネルを施工する場合には鋼製支保工を用いるほうが良い」という判断を得る。これは、硬岩地山において鋼製支保工が天端からの岩塊の崩落防止を一目的としていることに一致し、モデルの意味の妥当性を裏付けるものである。

5. 基本設計パターンの選択方法とその選択確率

(1) 判別関数の分布関数

ここでは、一次吹付厚と鋼製支保工に関する判別関数をもとに基本設計パターンを選択する方法について述べる。前節では一次吹付厚と鋼製支保

工は互いに無関係なものとして扱ってある。ところが、実際には一次吹付厚と鋼製支保工は互に関連しあって支保効果を発揮するものと考えられるので、設計パターンの選択に関しては、互いに競合するものとして判別確率の定義を行うものとする。すなわち、解析に使用した全データについて、基本設計パターン別に2つの判別関数に関するサンプルスコアの分布状況を二次元的に明らかにし、これを基本設計パターンを採択する信頼性の指標として設定するものである。

図-3は横軸に一次吹付厚の判別関数を、縦軸に鋼支保の判別関数をクロスで表し、各基本設計パターンに属する施工実績のサンプルスコアに関して二変量正規分布をあてはめたものである。分布関数を見ると[AB]→[C]→[D]→[E]の順で左下から右上にかけて分布している。なお各パターンに関する分布関数のパラメータを表-4に示す。

表-4 二変量正規分布パラメータ

パターン	平均値		標準偏差		相関係数 ρ_{xy}
	吹付厚 μ_x	鋼支保 μ_y	吹付厚 σ_x	鋼支保 σ_y	
A B	-0.979	-0.934	0.275	0.518	0.237
C	-0.620	-0.536	0.348	0.564	0.407
D	0.017	0.484	0.628	0.539	0.733
E	1.159	1.143	0.374	0.706	0.496

ここに、 x :吹付厚の判別関数値、 y :鋼支保有無の判別関数値

(2) 基本設計パターンの選択確率

4つのパターンの出現率と誤判断による損失が等しいと仮定するならば、ある支保パターンを採択する選択確率を以下のように定義できる。すなわち、一次吹付厚と鋼製支保工に関する判別関数値がそれぞれ x, y であるときの、4パターン[AB], [C], [D], [E]の確率密度関数をそれぞれ $F_{AB}(x, y)$, $F_C(x, y)$, $F_D(x, y)$, $F_E(x, y)$ と表すと、座標 (x, y) 近傍においてパターン $n(n=AB, C, D, E)$ を採択する判別確率 P_n が次式で与えられる。

$$P_n(x, y) = \frac{F_n(x, y)}{F_{AB}(x, y) + F_C(x, y) + F_D(x, y) + F_E(x, y)}$$

すなわち、計画トンネルに関して、前述の2つの判別関数値が与えられれば、各パターンの採択確率、すなわちパターン採択の信頼性を設定することができる。図-4は上式で定義される判別確率を各パターンについて計算したものである。

6. まとめ

提案する NATM 事前設計システムは基本設計と細部設計の 2 つから事前設計を行うものであり、そのうち基本設計で支保パターンを選択方法について本文に示した。本法は事前調査情報のうち、比較的入手しやすい 4 項目に限りて利用するという簡単なものであるにもかかわらず、施工内容に十分付合する設計になっているといえる。また各項目ともいたずらに細かくカテゴリー化することをさけ、判定の容易さを考慮した内容になっている。このことは基本設計を簡略化することに貢献できるものと考ええる。なお今後は、さらにデータを拡充して細部設計の内容を明らかにするとともに、硬岩以外の地山についても同様のシステムを作成することが必要である。

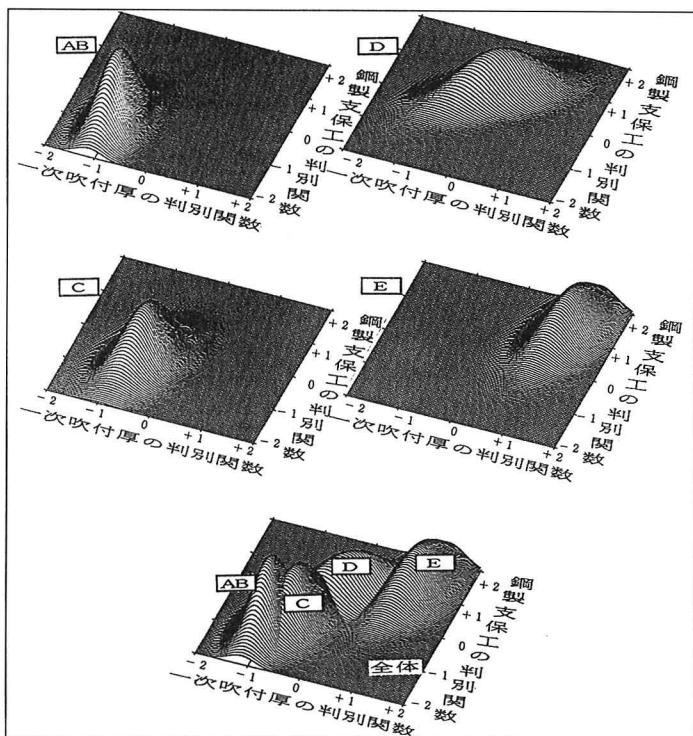


図-3 各基本設計パターンの判別関数値の分布関数

<参考文献>

- 1) 日本国有鉄道: NATM設計施工指針(案), 日本鉄道施設協会, 1983. 3.
- 2) 土木学会: トンネルにおける調査・計測の評価と利用, pp. 50-72, 1987. 9.
- 3) 日本道路協会: 道路トンネル技術基準(構造編)・同解説, 1989. 6.
- 4) 柳井晴夫・高木廣文: 多変量解析ハンドブック, 現代数学社, 1986. 4.
- 5) 日本トンネル協会: トンネルと地下, 土木工学社, 1980. 1~1988. 12.
- 6) 高速道路技術センター: 海南湯浅道路長峰第2トンネル報告書, 1984. 3.
- 7) 高速道路技術センター: 九州自動車道八代人吉間トンネルの施工法に関する調査研究(その1~その3), 1984. 2.
- 8) 高速道路技術センター: 北陸自動車道上越~朝日間総合検討, 1987. 3.
- 9) 樗木, 相川, 他: NATM標準設計について, 昭和62年度土木学会西部支部研究発表会, 1988. 3.
- 10) 樗木, 相川, 他: 施工実績に基づくNATM設計の標準化について, 土木学会第43回年次講演会, 1988.

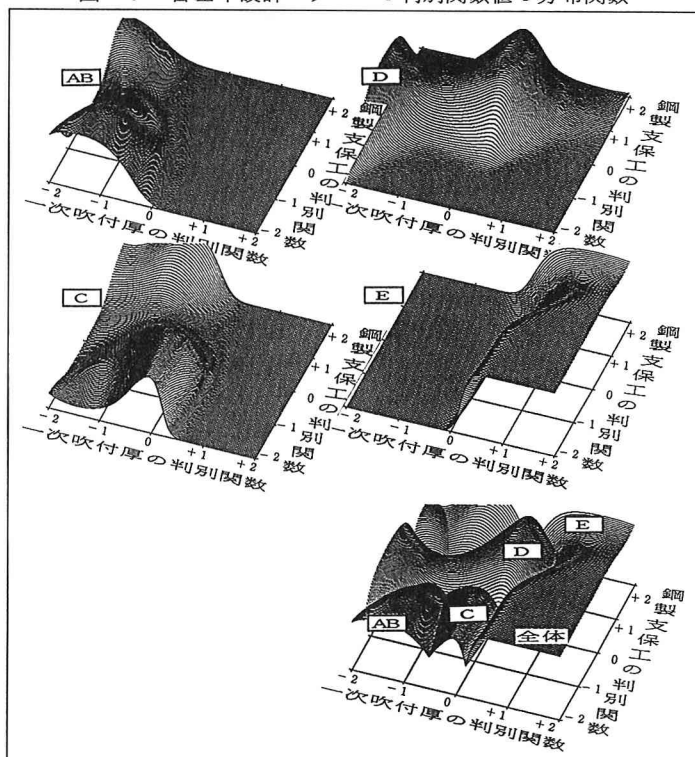


図-4 各基本設計パターンの選択確率