

(11) 観察の数値情報化に基づくNATMのための施工管理モデル

THE CONSTRUCTION MONITORING SYSTEM FOR THE NATM TUNNELS USING THE IN-SITU OBSERVATION QUANTIFIED

相川 明*・松井謙二**・吉田直紹**・横田康行**・樺木 武***

Akira AIKAWA, Kenji MATSUI, Naonori YOSHIDA,

Yasuyuki YOKOTA and Takeshi CHISHAKI

Abstract : A construction monitoring system for the NATM tunnels through hard rock mass has been developed by quantifying the in-situ observation after each drill and blast round. The system is advantageous because it allows sufficient accuracy in monitoring such hard rock mass whose deformation is too small to be measured accurately using the conventional instrumentation monitoring system. By substituting categorized observation into two proposed models, the thickness of shotcrete and the necessity of steel arch support are evaluated as numerical values. The most appropriate combination of supporting members is obtained by using both functions. Because of the introduction of the mid-procedure concerned with the requirement for the important supports between the explicable variables and the objective variables, the system has the capacity for higher monitoring accuracy than other more common systems.

Keywords: Tunnelling, NATM, Construction Monitoring, Rock Mass Classification System, Experimental Design, Discontinuous Hard Rock Mass, In-Situ Observation, Multivariate Analysis.

1. はじめに

NATMは、吹付けコンクリート、鋼製支保工、ロックボルト等の支保部材を用いて、地山の耐力を有効活用するトンネル工法であり、広く用いられている。しかしながら、地質構造が複雑な我が国では、同一のトンネルにおいても断面ごとに地山の支持能力に差がある場合が多く、その状況に応じて数種類の支保パターンを採用しているのが一般的である。そして、これらの支保パターン選定のため、あるいは、安全性や経済性を追求するために、計測による施工管理を導入している。すなわち、事前設計では、地山に関する調査をもとに地山を類型化し、支保の概略を決定した上で、施工時には、各種の計測をもとに、施工内容をより適切なものに修正しながら掘進する方法がとられる。しかしながら、これら計測に重点を置く現状の施工管理に関して、すべての地山について有効とはいえず、例えば硬岩地山では次のような問題点が挙げられ、十分に機能していない面がある。①.地山の変形量が小さく、所要の精度を確保しにくい。②.絶対量の直接的観測が難しく、切羽通過後の相対的変形量の観測となり、地質変化に対し判断が遅れる。③.不連続性を有し複雑な挙動を示す地山の定量的評価法が確立されておらず、計測値との関連性が十分に解明されていない。④.設計や施工の妥当性を判断する現場手続きが確立されていない。

* 正会員 国立大分工業高等専門学校助教授 土木工学科

** 正会員 (株)建設技術研究所 福岡支社 設計部

*** 正会員 工博 九州大学教授 建設都市工学科

一方、計測に並行して行われる切羽の観察は即時的に得られ、不連続性などの情報も含んでおり、上述の問題に対応できる可能性がある。従来より、これらの定性情報を定量化して施工管理に活用する研究がなされているものの、いまだ客観的な基準として利用されるに至っていない^{1)~5)}。そのため、実際の施工時の判断は、現場技術者の経験と勘に依存することが多い。本研究はこうした背景を踏まえて、観察を施工管理のための客観的指標として定量化するためのモデル構築の位置づけを明確にするとともに、施工実績データを整理し、支保部材の仕様に着目して観察を数値情報化することを試みるものである。

2. 観察による施工管理モデルの位置づけ

トンネルの安定性は地山と支保との相互作用によって達成される。このトンネルー地山の連成挙動をあらかじめ把握できれば、支保の施工内容を決定できるはずであるが、現状では未解明な点も多い。これらの系を表現する物理関数（力学モデル）は次式のような非線形の連立方程式であると考えられる。

$$F(\mathbf{x}) = 0 \quad (1)$$

ここに、 F ：トンネルー地山連成系を表現する連立方程式、 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_p]^T$ 、

$x_1 \sim x_p$ ：トンネルと地山の挙動に関連する項目、 p ：項目数。

上式は系全体を表現しているが、ある支保の施工内容 y について陽な形で解くと、次式の関数を得る。

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2)$$

ここに、 y ：ある支保の施工内容、 $x_1 \sim x_n$ ：トンネルと地山の連成挙動に関連する説明因子で

支保の施工内容 y に関連するもの、 n ：項目数。

この関数 f をある点 $A(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*)$ でテイラー展開し、二次以降の項を省略すると、点 A 近傍では関数 f を線形近似できる。変数 x に施工時の地山情報を設定するならば、地山分類や岩種分類に代わるものとして、施工時の地山情報による関数で、支保の仕様を決定しうることとなる。

$$g_m = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3)$$

ここに、 y_m ：第 m 番目の支保の施工内容、 g_m ：支保の施工内容に関する判別関数、

$x_1 \sim x_n$ ：施工時の地山情報、 n ：項目数。

式(3)は施工時の地山情報と支保の仕様とを関連づけるものであり、施工内容を関数形で表現することにより、結果を定量的に把握でき、判断も容易になる。ここに、施工時の地山情報の多くは定性的指標であり、利用にあたっては定量化することが必要であり、従来より、Qシステムをはじめ⁶⁾、多変量解析、ファジー理論、ニューラルネットワーク等の適用が試みられている。例えば、Qシステムは対数をとることにより線形モデルに帰着できるが、説明変数が岩盤の全体構造、不連続面のせん断抵抗、応力状態等の力学的なメカニズムを反映しており、かつ、十分なデータをもとに自立時間や施工内容との関連を明らかにすることにより、有効性を発揮することとなったと考えられる⁷⁾。すなわち、これら線形モデルが実際の設計・施工に関して有効となるのは、地山の挙動が線形であるためではなく、十分信頼できるデータをもとに力学的なメカニズムを考慮しながらモデルを構築することが極めて重要であり、その場合、展開点近傍の一定範囲内では線形関数で近似できることを意味するものである。

3. 観察に基づく施工管理モデルの構築方法

前章の考え方を踏まえれば、施工管理モデルは物理モデルをもとに構築する必要がある。しかしながら、トンネルー地山系の支配方程式に施工時の地山情報をそのまま入力することは困難であり、現状では、説明変数と目的関数の因果関係のみに依存してモデル構築することが多い。すなわち、力学モデルの構造を無視しているため、地山条件が変わると説明力を失うなどの問題点がある。ここでは、施工管理モデルの構築法に着目し、前者のような物理モデルの支配方程式を展開して利用するものを「力学活用型モデル」、後者を

「統計的外挿型モデル」とよぶことにする。

ところで、NATMの主要な支保部材は、吹付けコンクリート、鋼製支保鋼、ロックボルトである。観察を定量化する研究の多くは、図-1(a)に示すように、標準的な支保部材の組み合わせ、すなわち、標準支保パターンを、切羽観察を説明変数として直接判別するという「統計的外挿型モデル」として機能している。しかしながら、これら三者の支保効果は異なるものであり、むしろ、支保のメカニズムと観察結果とを適切に関連づけることが工学上重要であると考ええる。

また、パターンの類型化では複数の判別関数を用いるが、一般には解析過程をブラックボックスとして扱っており、それらの関数形はデータのばらつきのみ依存して決まる。したがって、判別関数に力学的な意味が不足し、施工事例ごとに評価軸の意味が異なることとなり、施工実績を他の類似地山に用いることを困難にしている。むしろ見かけ上の精度の向上のみを求めず、共通の評価軸を採用すべきであると考ええる。

これらの問題点を踏まえ、例えば図-1(b)に示すように、説明変数と目的関数の因果関係に、さらに、力学的な要因や機構を考慮し、できるだけ「力学活用型モデル」に近づけるような、第三番目のモデル構築法として「準力学型モデル」を提案するものである。ここでは、その一つの改善点として、複数の判別関数軸に異なる力学的な意味を与えて、施工中に得られる情報を一旦これらの関数軸に凝縮した上で、次に関数軸の相互効果を考慮すれば、トンネルの挙動に対応する確かな判断を得られ、また信頼性の把握や代替案の設定も容易になる。本研究では、吹付けコンクリートと鋼製支保工に関する判断過程をモデルの中間に取り入れて、力学モデルに関連づけるものである。

4. 適用例

砂岩、粘板岩主体の硬岩地山に施工されたトンネルを一例として、従来のモデルと提案モデルとの比較を行う。トンネルは図-2に示す延長約2,800m、最大土被り450mの2車線道路トンネルであり、事前設計は道路トンネルの標準設計法によった。起点側と終点側の両坑口より施工され、データ入手時の施工延長はそれぞれ約1100m、400mである。施工実績では起点側の18%、終点側の70%、全体の32%の断面で支保パターンが変更された。目的関数である標準支保パターンと、本解析で考慮する鋼製支保工の有無と吹付けコンクリート厚との関係を表-1に示す。

説明変数は、現場の切羽観察シートをもとに、観察8項目を抽出し、さらに土被り、弾性波速度、岩種区分を含めた。ここに、切羽観察は局所的あるいは断面ごとの地山の条件を把握するためであり、後者はトンネル周辺の比較的広い範囲での地山の力学的な条件を考慮するためである。これら説明変数をもとに、支保パターンを数量化理論2類で直接判別した「従来の方法」と、鋼製支保工の有無と吹付けコンクリート厚を目的関数として、数量化理論1類による重回帰分析を行った「提案方法」の結果を表-2に示す。

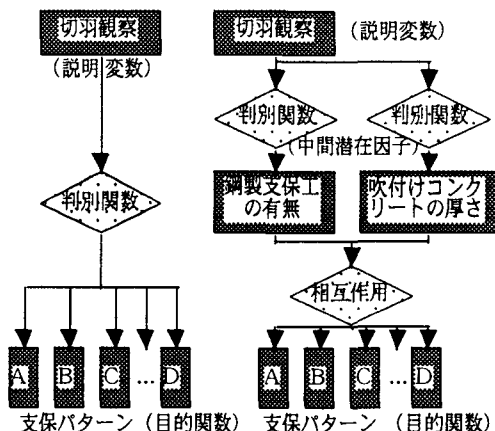


図-1 切羽観察に基づく施工管理モデルの構築方法 (a)支保パターンの直接的な判別(統計的外挿型モデル、従来方法:左図)(b)主要な支保に着目した支保パターン判別(準力学型モデル、提案方法:右図)

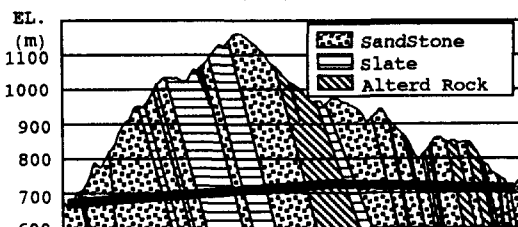


図-2 対象地山の地質縦断図

表-1 鋼製支保工の有無と吹付けコンクリート厚による標準支保パターンの分類

支保部材の仕様		吹付けコンクリート厚(cm)		
		5	10	15
鋼製支保工の有無	あり	-	C2	D
	なし	B	C1	-

従来の方法では、判別に有効な変数は、土被り、切羽鏡面、風化変質、割目間隔であった。対象地山での支保パターンの理論値は、2つの判別関数について、該当するカテゴリースコアの合計値が、いずれの支保パターン別の平均スコアに近いかにによって判断する。一方、提案方法では、土被り、岩種区分、切羽鏡面、風化変質、割目間隔、割目状態の変数が有効であった。対象地山での支保の理論値は、反応したカテゴリースコアの合計値に定数項を加えて得られる。以下これらを「鋼製支保工の有無関数」および「吹付けコンクリート厚関数」とよぶ。モデルの再現性に着目した的中率は、両モデルとも良好である。

図-3 および図-4 に両モデルのサンプルスコアの分布図を示す。図より各支保パターンの施工内容の差異が二次元平面上の距離で視覚的に把握できる。図中の*印は各支保パターンの平均値である。ある地山データが与えられると、それがいずれの支保パターンに近いかに、どの支保パターンを採用したらよいかを判断できるはずである。しかしながら、図-3 では、判別関数1はB,C₁,C₂,Dの支保パターンを序列化するものであるが、判別関数2の持つ意

味は不明瞭であり、数値がいかなる物理量と関連するものか明らかでない。したがって、従来の方法では、施工内容をどのように変更すればよいかという具体的な判断を得ることは難しい。このように支保パターン

表-2 観察に基づく施工管理モデルの解析結果

施工管理モデル		支保パターンの直接的な判別分析 (従来方法)				主要な支保に注目する場合の重回帰解析 (提案方法)				
説明変数		判別関数 1		判別関数 2		鋼製支保鋼の有無関数 (あり:1,なし:0)		吹付けコンクリート厚関数 (単位cm)		備考
変数名	カテゴリー	カテゴリースコア	レンジ (幅相関)	カテゴリースコア	レンジ (幅相関)	カテゴリースコア	レンジ (幅相関)	平均	レンジ (幅相関)	サンプル数
土被り (m)	80~	0.141		0.238		-0.032		0.20	-0.368	1091
	60~80	0.141		0.238		-0.032		0.20	0.146	78
	40~60	-0.304	2.17 (0.73)	0.213	5.14 (0.77)	0.175	0.20 (0.32)	1.00	0.600	57
	20~40	-0.599		-0.815		0.175		1.00	1.392	108
	20未満	-2.024		-4.897		0.175		1.00	5.276	39
岩種区分	砂 岩	-	-	-	-	-0.024	0.16 (0.20)	0.28	-	949
	粘板岩 破砕帯	-	-	-	-	0.063	0.39 (0.20)	0.39	-	395
切羽鏡面	自立	0.334		-0.287		-0.064		1.00	-0.918	833
	肌落ち 対策工	-0.405	1.44 (0.61)	0.691	1.91 (0.60)	0.102	0.17 (0.14)	0.83	1.181 (0.53)	9.7 465
風化変質	未風化 部分的	0.169	0.43 (0.28)	-0.282	0.62 (0.22)	0.092	0.27 (0.34)	0.04	-0.489 (0.25)	5.5 164
	全体的	0.036		-0.034		-0.028		0.20	-0.031 (0.11)	6.2 971
割目間隔 (cm)	20~	0.174	0.67 (0.47)	-0.237	1.06 (0.39)	-0.143	0.44 (0.43)	0.02	-0.461 (0.49)	5.2 912
	5~20	-0.063		0.819		0.233		0.88	0.081	10.4 179
割目状態	密着 部分的	-0.499		0.229		0.306		0.90	1.440	10.6 282
	全体的	-	-	-	-	-0.047	0.11 (0.11)	0.00	-0.186 (0.11)	5.0 824
定数項		-	-	-	-	0.319		0.80	0.223 (0.11)	9.0 369
目的関数		-	-	-	-	0.80		0.396	0.396	11.9 180
鋼製支保工の有無関数の平均スコア		なしあり	-	-	-	0.045		0.905	(5.32) (10.50)	929 444
吹付けコンクリート厚関数の平均スコア	5 cm	-	-	-	-	(0.027)		5.16		892
	10 cm	-	-	-	-	(0.853)		9.75		414
	15 cm	-	-	-	-	(1.087)		14.40		67
支保パターン別の平均スコア	B	0.632		-0.250		0.027		5.16		892
	C ₁	-0.480		0.937		0.495		8.78		37
	C ₂	-0.962		1.000		0.871		9.81		377
	D	-2.790		-2.761		1.087		14.40		67
相関比または重相関係数 (的中率)		0.900 (90.7%)		0.710 (88.3%)		0.927 (97.1%)		0.959 (97.7%)		-

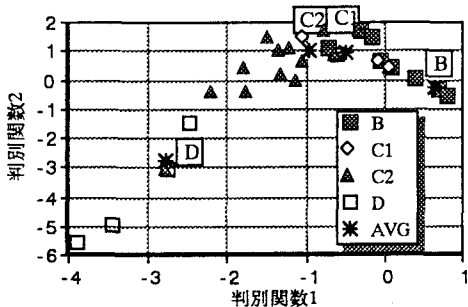


図-3 支保パターンの直接判別する場合のサンプルスコアの分布図 (従来方法)

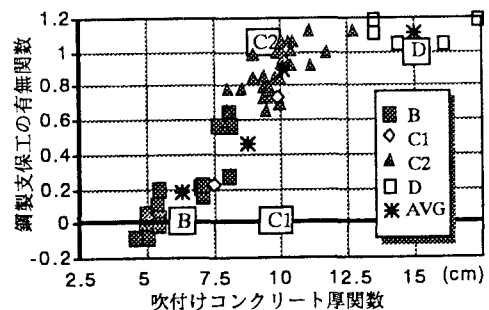


図-4 主要な支保に着目する場合のサンプルスコアの分布図 (提案方法)

を直接的に判別する方法では、判別関数軸の意味があいまいであることが、判断を困難にしているといえる。

一方、提案方法では、鋼製支保工の有無関数が0で、吹付けコンクリート厚関数が5の点がBパターンであり、

吹付けコンクリート厚関数が10の点がC₁パターンとなる。また鋼製支保工の有無関数が1で、吹付けコンクリート厚関数が10の点がC₂パターンであり、吹付けコンクリート厚関数が15の点がDパターンとなる。判別関数軸の意味が明確であり、各支保パターンも明瞭に判別されている。なお、C₁パターンは採用断面数が少ないため、従来の方法では十分な判断を得られないが、提案方法によると両パターンの差異が把握できる。また、提案方法では、対象地山での最適な支保パターンが得られると同時に、施工内容をどのように変更すればよいかという方針を得ることが可能である。

モデル構築に使用しなかったトンネル中間部のデータをもとに、掘削を再現する思考実験を行い、従来の方法と提案方法と精度の比較した。結果を表-3に示す。表より提案方法が精度が高く、有効性が認められる。また、C₁パターンについては、モデル構築時に採用断面数が少なく、先見情報が不足し、従来の方法では十分な判断結果を得ることはできなかったが、提案モデルでは有効に機能していることがわかる。

5. おわりに

硬岩NATMでは計測管理に所要の精度が得られず、計測管理システムが十分に機能していない場合がある。本研究では、まず、観察情報を施工管理に利用する際のモデル構築方法の考え方についてまとめ、さらに、吹付コンクリートの厚さや鋼製支保工の必要性などの「意味ある複数の物理量」と観察情報を関連づけることにより、観察情報をいくつかの関数軸に凝縮し、それらの関数値のクロスにより施工内容を決定するという方法を提案した。本法は、モデルの中間に重要な支保に関する判断過程を取り入れるという簡単な工夫ではあるものの、判断を容易にし、従来の支保パターンの選定システムに比べ精度を向上することができた。本解析では、個々の解析手法の比較は論点でないため、利用が簡便な数量化理論を用いたが、さらに実際的な中精度を確保するには、提案方法にファジー理論や、あるいは、非線形性を考慮できるニューラルネットワーク等を解析手法を道具として用いればよいと考える。また、本法をいくつかの地山について適用することにより、評価軸が同じ意味を持つことから、地山の差異を定量的に把握することも可能である。

本モデルは、技術者がトンネルをとりまく各種の制約条件を考慮し、ある水準の安全性を見込んだ上で施工パターンを選定することを想定しており、この意味からすると本モデルは安全率の下限値を与える。構造物の安全率の大きさがどの程度であるかは工学上重要なことであり、これらのことについては、本モデル以外の手法により、物理モデルをもとにして決定する必要がある。同時にそれらの結果を本モデルのような評価プロセスに関連づけて、岩盤に関する力学モデルを解析の中により多く反映することが重要である。

<参考文献>

- 1) 日本道路協会：道路トンネル観察計測指針，p.296，1993.
- 2) 日本道路協会(1989)：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説，pp.237-243.
- 3) 土木学会(1987)：トンネルにおける調査・計測の評価と利用，pp.188-267.
- 4) 日本トンネル技術協会(1985)：地山評価のあり方に関する研究，日本トンネル技術協会，p.36.
- 5) 吉中龍之進，桜井春輔，菊池宏吉(1989)：岩盤分類とその適用，土木工学社，p.231.
- 6) N.Barton, R.Lian and J.Lunde (1974)：Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Support, Rock Mechanics, Vol.6, No.4, pp.189-236.
- 7) Z.T.Bieniawski (1989)：Engineering Rock Mass Classifications, p.203.