

III-256

硬岩盤NATMトンネルにおける
変状有無の予測手法に関する研究

九州大学工学部 正 員 樗木 武
 梅林建設(株) 正 員 倉原隆二
 九州大学工学部 正 員 〇相川 明

1. はじめに NATMトンネルを施工する場合には、切羽の崩壊、天端崩落、吹付コンクリートのクラックの発生、ロックボルトの破断、鋼製支保工の座屈変形など種々の変状が発生するため、地山の変位や支持応力等の計測値を用いて、変状有無の予測を行うことが必要であるが、中古生層の硬岩盤地山では地山の変位が小さいことから、計測値により変状有無の予測を行うことは困難であることが多い。そこで、本研究では、計測データに加えて、トンネルの切羽観察の結果を地山変状の予測に積極的に活用することを提案するものである。すなわち、硬岩盤地山中に施工されるNATMトンネルを対象とし、標準的な設計施工内容のもとで、変状の発生が考えられるか否かの判別を、切羽観察データのみを用いる場合について、変状計測データのみを用いる場合について、および、切羽観察と計測値の双方を用いる場合について行い、3者の結果を比較した。

2. 切羽観察による地山変状の予測結果 NATMにより施工された、明神、各務原および新老坂の3つの硬岩盤地山トンネルの工事記録をもとに、313断面のサンプルを求め、地山変状の有無を明らかにするとともに、各現場の切羽観察の記録に共通する13項目について整理し、表-1に示すカテゴリーに区分した。つぎに、切羽観察項目を説明変数、変状の有無を外的基準として、数量化理論第II類を適用するものである。全サンプルについて、および、各トンネル毎に変状なしが連続する測点のサンプル群と、変状有りのサンプル群との予測判別を行った結果が表-1, 2である。予測モデルの判別率はかなり良い値を示しており、また、カテゴリースコアに符号上の矛盾は生じなかった。主要因では、割目に関する項目が共通して含まれており、判断基準としての重要性を物語っている。実際の施工では、湧水も重要視されるが、本分析では地山変状の判別の主要因とはなっていない。表-2の右側に、主要因3項目を説明変数として判別分析を行った結果を付した。また、誤判別

表-1 切羽観察による変状有無の判定基準の例(全項目)

説明変数	カテゴリー	サンプル	カテゴリースコア	レンジ(偏相関)
特殊条件	1 偏圧	17	-0.9921	1.221 (0.310)
	2 土盛りが小さい	91	-0.3293	
	3 その他	205	0.2285	
特殊産状	1 互層, 不整合, 貫入	44	-0.5219	0.719 (0.234)
	2 しゅう曲	95	-0.1198	
	3 その他	174	0.1974	
切羽状態	1 安定	196	0.5541	1.887 (0.504)
	2 岩塊が抜ける	96	-0.8004	
	3 押出し, 自立不能	23	-1.3329	
素掘状態	1 自立	42	0.2415	0.288 (0.078)
	2 後替請	213	-0.0349	
	3 先替請, 先受	58	-0.0468	
圧縮強度	1 $\sigma_c \geq 200 \text{ kgf/cm}^2$	156	0.2377	0.524 (0.170)
	2 $200 > \sigma_c \geq 50$	117	-0.2189	
	3 $50 > \sigma_c$	40	-0.2868	
風化変質	1 なし	46	-0.1797	0.318 (0.088)
	2 変色	121	-0.0144	
	3 強度低下, 変色	108	0.1381	
	4 土砂状, その他	38	-0.1291	
割目頻度	1 間隔 $d \geq 20 \text{ cm}$	77	0.0433	0.547 (0.149)
	2 $20 > d \geq 5 \text{ cm}$	178	0.1203	
	3 $5 > d$, 破砕	58	-0.4268	
割目状態	1 密着	81	-0.4287	0.876 (0.235)
	2 部分的に開口	128	0.0667	
	3 開口	38	-0.0869	
	4 粘土をはさむ	66	0.4468	
割目形態	1 ランダム, なし	37	-0.0137	1.226 (0.307)
	2 柱状	47	-0.0121	
	3 層状, 板状	197	-0.1666	
	4 土砂状, その他	32	1.0590	
湧水	1 なし	175	-0.0645	0.233 (0.095)
	2 滴水	103	0.1408	
	3 集中, 全面, その他	35	-0.0918	
水劣化	1 なし	240	0.0094	0.040 (0.015)
	2 ゆるみ, 軟弱化	73	-0.0308	
線割目	1 水平, さし目	68	0.0549	0.260 (0.078)
	2 さし目, 流れ目	139	-0.0011	
	3 垂直, 流れ目	69	-0.1244	
	4 その他	37	0.1351	
横割目	1 水平, 右-左	60	0.5606	0.964 (0.297)
	2 右-左, 左-右	78	-0.1653	
	3 垂直, 左-右	105	-0.0714	
	4 その他	70	-0.4034	
外的基準	1 地山変状あり	255	-1.1837	判別率 0.880 0.800
	2 地山変状なし	58	0.4485	

に寄与する要因を調べたところ、特殊条件、風化変質、横割目の順であった。すなわち、特殊条件は変状有無の判別にも影響するが、その評価が不適当であれば、判別を誤る危険性があることを意味している。

3. 計測値による変状の予測 NATMにおける計測管理において、地山変状の有無を推測する上で重要

であり、かつ比較的単純で精度よく求められるものは、最終内空変位量、天端沈下量および修正速度であると思われる。これに、弾性波速度および土被り厚さを加えた5つの変数を用いて、地山の変状有無の判別分析に役立てるものである。まず、5つの変数を用いて判別分析を行ったところ、いずれのケースも実際の現象に照らして矛盾する説明変数を含んでいたため、係数のF検定および変数相互の相関性をもとに変数の選択を行い、説明変数として

表-2 トンネル現場毎の切羽観察による変状有無の判別結果

トンネル	全項目(13項目)による判別				主要因(3項目)による判別			
	主要因	レンジ	偏相関	判別率	レンジ	偏相関	判別率	
全トンネル	切羽状態	1.887	0.504	地山変状	2.417	0.517	地山変状	
	割目形態	1.226	0.307	あり0.88	1.436	0.296	あり0.77	
	特殊条件	1.221	0.310	なし0.80	2.147	0.351	なし0.82	
明神トンネル(下り)	風化変質	2.244	0.469	地山変状	1.470	0.139	地山変状	
	割目頻度	1.558	0.522	あり0.95	2.350	0.382	あり0.73	
	割目形態	1.246	0.429	なし1.00	2.816	0.276	なし0.68	
各務原トンネル(上下)	圧縮強度	0.929	0.466	地山変状	1.493	0.689	地山変状	
	横割目	0.901	0.385	あり0.91	1.153	0.508	あり0.85	
	特殊産状	0.815	0.474	なし1.00	0.565	0.328	なし1.00	
新老の坂トンネル(上下)	特殊条件	1.199	0.550	地山変状	1.698	0.665	地山変状	
	割目形態	1.119	0.391	あり0.94	1.004	0.471	あり0.85	
	風化変質	1.002	0.480	なし0.98	1.193	0.445	なし0.95	

寄与が高い上位の2変数にしばって判別分析を行えば表-3のとおりである。精度的には必ずしも満足のいくものではないが、実際現象との不都合は生じていない。また、計測値として天端沈下量のみが採用される結果になっており、従来の計測管理において、水平内空変位を主体としてきたことと異なる。すなわち、中古生層の硬岩盤では、相対的な水平内空変位を主体とする管理では変状予測はむずかしく、絶対変位としての天端沈下を主体とした管理に変える必要性を示唆するものであり、計測管理の省力化の上でも非常に有意義であると考えられる。

4. 切羽観察と計測値の双方による総合評価 変状の有無について、切羽観察と計測値の双方から総合的に評価することを考え、切羽観察における判別スコアの値と計測値における判別スコアの値を説明変数として、変状の有無を予測判別することを提案する(表-4)。判別力 D^2 の値が極めて大きく、判別率も90%以上になり、高い信頼性が実証された。また、係数のF検定を行ったところ、切羽観察におけるF値が計測値のそれよりも著しく大きいことから判断すると、中古生層の硬岩盤では切羽観察による予測が非常に有効であり、計測値はその補助的な役割のみ果たすものと考えられる。

5. あとがき 切羽観察を用いる場合に主要因となるものは、割目の頻度・形態・方向等に関する項目、特殊条件および切羽状態の3つである。なお、特殊条件は、誤判別の主要因でもあるので、データの入手に十分注意する必要がある。他方、計測値により変状の有無を予測する場合には、天端沈下だけで十分であり、弾性波速度と共に評価しうる。また、切羽観察と計測値の両方を総合評価することにより、さらに精度を向上させることができるが、切羽観察に比べて計測データの寄与は小さく、したがって、硬岩盤におけるNATMトンネルの計測管理の見直しが必要であり、計測の目的を明確に位置づけることが肝要であるものと考えられる。

表-3 計測値主要2項目による変状有無の判別分析

トンネル	説明変数	判別関数 Zの係数	判別力 D ²	判別率 P		
全 トンネル	天端沈下 弾性波 定数項	0.0473 -0.3458 0.5093	1.493	地山変状 あり0.63 なし0.79		
	明神 トンネル (下り)	天端沈下 弾性波 定数項		0.0307 -1.2598 6.5671	5.307	地山変状 あり0.97 なし0.75
	各務原 トンネル (上下)	天端沈下 弾性波 定数項		0.0382 -0.5466 1.7131		1.704
新老の坂 トンネル (上下)	土被り 弾性波 定数項	0.0165 -0.3435 -0.1409	1.438	地山変状 あり0.52 なし0.98		
判定基準		変状あり(Z ≥ 0) , 変状なし(Z < 0)				

表-4 切羽観察(13項目)および計測値(2項目)による変状有無の総合評価

トンネル	説明変数	判別関数 Zの係数	判別力 D ²	判別率 P
全 トンネル	切羽スコア	-3.211	5.947	地山変状
	計測スコア	0.473		あり0.79
	定数項	-1.181		なし0.94
明神 トンネル (下り)	切羽スコア	-8.278	19.267	地山変状
	計測スコア	0.800		あり0.97
	定数項	1.137		なし0.97
各務原 トンネル (上下)	切羽スコア	-10.032	20.407	地山変状
	計測スコア	0.103		あり0.95
	定数項	4.629		なし1.00
新老の坂 トンネル (上下)	切羽スコア	-6.991	13.115	地山変状
	計測スコア	0.550		あり0.95
	定数項	0.875		なし0.95
判定基準	変状あり(Z ≥ 0) , 変状なし(Z < 0)			

本研究では、高速道路技術センターより貴重な現場データの提供をうけた。記して謝意を表すものである。