

(12) 補助工法選定の評価指標に関する研究

STADY ON ITEM FOR EVALUATION TO BE SELECTED AUXILIARY METHOD

池口 正晃*・真下 英人*・大杉 一郎**

Masaaki IKEGUCHI, Hideto MASHIMO and Ichiro OHSUGI

As the road networks have developed recently, it also have been often constructed road tunnels. In the tunnels, there are one which have larger area of cross section than before, or which oblige to construct in bad condition such as soft ground. At the result, the more difficult it comes for builders of tunnels to decide support or auxiliary method. Collecting physical ground data by observation of tunnel face, we analyzed them by statistical approach, to know what support or measure for face stabilization is decided according to ground condition, and studied what physical parameters of ground are useful for design of tunnel stabilization, based on the results of analysis.

Keywords: Tunnel, Auxiliary method, Statistical analysis, Observation of tunnel face, Quantificational theory

1. はじめに

ゆとりある道路構造と良好な環境を確保した道路の創造という道路概念から、近年の道路事業における山岳トンネルは、長大化、大断面化の傾向にあり、なお一層の施工時における切羽安定対策が求められている。そこで切羽安定の評価方法が確立されていない現状において、不安定なトンネル地山に対する補助工法の選定要因となる要素の解明が急務であることは周知の事実である。これまでも多方面で切羽安定に関する調査・研究がなされているが、多種多様なパラメータが存在しかつ要因が複雑であることから、理論的な切羽の安定性評価の方法を発見するには至っていないのが現状である。本研究では、実際に施工されたトンネルよりデータを収集し、多くの項目の中で関連性のある組み合わせを多変量解析を用いた統計学の面から探し出すことによって、効果的な評価指標となるパラメータを見いだすための検討を行った。

2. 解析手法について^{1) 2)}

多変量解析にはいろいろな手法がある。今回の切羽観察表のように目的変数^{*1}となる指標と説明変数^{*1}となる指標が共に質的変数^{*2}であった場合、数量化解析第2類が有効であると考えられるが、今までに報告されている多変量解析を使用した研究の大部分は、重回帰分析か数量化解析第1類を使用している。重回帰分析は目的変数、説明変数ともに量的変数^{*2}での解析手法、数量化解析第1類は目的変数が量的変数、説明変数が質的変数の場合の解析手法である。ここで1類や2類に限らず数量化理論とは、定性的な性質を持つ独

* 正会員 建設省土木研究所

** 正会員 東洋建設株式会社

立したカテゴリー（質的変数）に目的変数と説明変数の間の相関が最も高くなるようなカテゴリー数量（量的な数量に置き換えた重み付けのための係数）を算出するという統計学的解析手法であり、それぞれのカテゴリーに重みと順列性をつけられることが最大の特徴である。すなわち数量化理論とは、統計学的解析によって質的変数を量的変数に変換する手法である。

切羽観察表のように目的変数と説明変数が共に質的変数である解析を行う場合、質的変数を量的変数に変換する方法が、数量化解析第2類では目的変数、説明変数共に統計学的に算出されるのに対し、重回帰分析や数量化解析第1類では人為的に行わなければならないことが両者の大きな違いである。

例を挙げて説明すると質的変数である「切羽状態」を目的変数として数量化解析第2類を行ったとき、4つのカテゴリーに「①

安定”=-3.4、“②岩塊が抜け落ちる”=-1.0、“③押し出しを生じる”=-0.2、“④崩れたり流れ出す”=+5.6というカテゴリー数量が算出されたとする。それぞれのカテゴリーの性格の差はカテゴリー数量の差として表されるため、①と②の差は2.4、②と③の差が0.8、③と④の差が5.8となる。このうち②と③の差が非常に小さい。これは、②と③の性格の差は少ない、言い換えると②と③は同等に扱っても良いということがいえる。それに比べ、人為的に量的変数に変換した場合、例えば「切羽の状態」のカテゴリーにそれぞれ①=0.0、②=1.0、③=2.0、④=3.0という数値を与えたすると、①と②の差、②と③の差、③と④の差はすべて1.0となり、それぞれのカテゴリーの性格の差は均等となる。さらにこの値を使用して数量化解析第1類を行った場合、その相関係数は前述の数量化解析第2類での相関係数よりも低い値となることから、人為的に定めた量的変数が最良の相関を示す値であるかどうかは判断できないのである。以上の内容を線グラフによって表すと、図-1のようになる。

本研究では、切羽安定の評価および支保・切羽設計を行う場合に、とくに注目すべき指標を見いだすことを目的としているため、目的変数と説明変数の間に高い相関性を保持させることが重要であると考えられる。

よって、質的変数を量的変数に変換する操作から主観性を排除し、統計学的に量的変数が求められる数量化解析第2類を使用して解析を行い、支保工や補助工法の選定に有効な評価指標の分析を行うものとする。

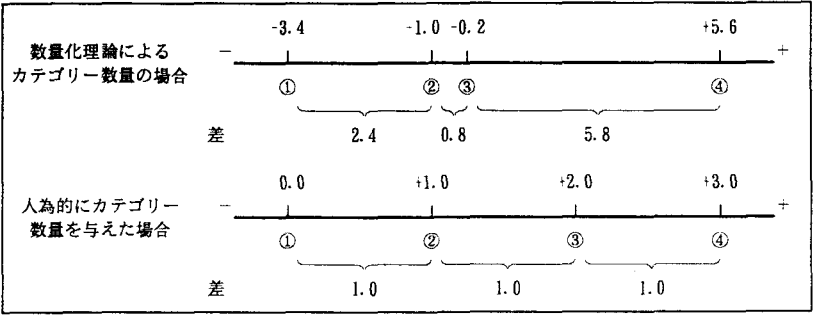


図-1 カテゴリー数量の一次元表示

3. 計測データ

計測データは5つのトンネル（主に $\sigma > 200 \text{ kgf/cm}^2$ の軟質岩）から収集され、計測項目が32、計測箇所総数が710からなるデータである。切羽観察表³⁾は、切羽近傍の安全性を確保し切羽の地山条件に応じた適切な支保を選定するための資料として、毎日記録され広くトンネル現場で使用されている。また、掘削中のトンネル切羽断面の状態をいろいろな面から客観的に観察していることから、切羽の安定性を検討するにも妥当な指標を有していると思われる。そこで本研究の評価指標の検討資料として、切羽観察表を用いる

こととした。

計測データを解析計算に使用するため、表-1の条件区分表のようにまとめた。データ量が他のカテゴリーよりも極端に少ないものやデータの少ないカテゴリーを含んでいると、そのカテゴリーの解析結果の信頼性は非常に低いものとなる。そのため解析データとして使用できないアイテムやカテゴリーを除外した。表-1に明記している除去したカテゴリーを含むデータの収集が今後のひとつの課題であろう。

4. 評価指標間の相関

前述した計測データのアイテムを表-2の項目のように目的変数と説明変数に分類した。目的変数の中には、例えば切羽や素掘面の状態から支保パターンを決定したり、変状が見られたために増しボルトを施した、といった目的変数同士に「目的変数」と「説明変数」の関係を持っ

ているものが一部あると考えられるが、これらの指標はすべて説明変数に分類した指標を要因とする人為的選択肢または現象であるため、説明変数には含めなかった。それぞれの指標の組み合わせにおいて数量化解析第2類による解析を行った結果より、各指標間の相関係数を表-2にまとめた。値のない欄「-」は、グループ集計の結果にデータのないカテゴリーが存在するため、解析結果が得られなかった場合である。

表-2における相関係数を考察すると、すべての目的変数に対して10「圧縮強度」11「風化変質」13「割れ目の状態」の3つが比較的高い値を示している。また8「岩種」は、1「支保パターン」2「切羽の状態」に対して高い値を示している。よって目的変数の要因となる指標は、これら4つの説明変数が有効であるのではないかと考えられる。また、15「湧水」16「水による劣化」17「割れ目の方向性（縦断）」18「同（横断）」はどれも非常に相関係数が低く、目的変数の要因としての関係は薄いという結果が得られた。7「土

表-1 計測データの条件区分

カテゴリー アイテム	1	2	3	4	5	6	除去した カテゴリー
1 支保パターン	B	C I	C II	D I	D II	E	A
2 切羽の状態	安定	岩塊が 抜け落ち る	粗し出しを 生じる	自立せず 崩れ、流出			
3 素掘面の状態	自立 普通不要	緩み肌落ち 後着請	自立困難 先着請	山受けの 必要あり			
4 変状	変状が なかった	ボルト異常 または 支保工変状	ボルト異常 支保工変状	ボルト異常 吹付カガ	ボルト異常 支保工変状 吹付カガ		インバー変状 次覆工の 変状
5 切羽安定のための 補助工法	なし	鏡止め	雄い地	鏡止め 雄い地			リソール 水抜き工 業散注
6 土圧による変状 に対する補助工法	なし	増しボルト	増し吹付け	ストラット			
7 土盛り Dは掘削幅	2D未満	2D以上 5D未満	5D以上 10D未満	10D以上			
8 岩種	a 変成岩 深成岩	c 火山岩 深成岩 岩脈	d 第三期層 下部洪積層	e 上部洪積層 沖積層			b 古成層 中成層
9 特殊な産状	なし	微褶曲	断層	その他			互層 木炭層 岩脈貫入
10 圧縮強度 (kgf/cm ²)	$\sigma \geq 1000$ ハンマーで はねかえる	$1000 < \sigma \leq 2000$ ハンマーで 砕ける	$200 < \sigma \leq 250$ 軽い打撃で 砕ける	$50 > \sigma$ 刃先が食い 込む			
11 風化変質	なし・健全	岩目が変色 強度が やや低下	全体に変色 強度が 相対的に低下	土砂状 粘土状 未固結			
12 割れ目の頻度 間隔d(m)	$d \geq 1.0$ 割目なし	$1.0 > d \geq 0.2$	$0.2 > d \geq 0.05$	$0.05 > d$ 未固結			
13 割れ目の状態	密着	部分的に 開口	開口	粘土挟む 未固結			
14 割れ目の形態	ランダム 方形	柱状	層状、片状	土砂状 板状 未固結	均一層		
15 湧水	なし 湧水程度	湧水程度	堰中湧水				全面湧水
16 水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	崩壊・流出			
17 割れ目の方向性 (縦断)	水平 $10^\circ \theta \geq 20$	さし目 $30^\circ \theta \geq 10$ $80^\circ \theta \geq 60$	さし目 $60^\circ \theta \geq 30$	流れ目 $60^\circ \theta \geq 30$	流れ目 $80^\circ \theta \geq 10$ $80^\circ \theta \geq 60$	垂直 $90^\circ \theta \geq 80$	
18 割れ目の方向性 (横断)	水平 $10^\circ \theta \geq 20$	右から左 $30^\circ \theta \geq 10$ $80^\circ \theta \geq 60$	右から左 $60^\circ \theta \geq 30$	左から右 $60^\circ \theta \geq 30$	左から右 $30^\circ \theta \geq 10$ $80^\circ \theta \geq 60$	垂直 $90^\circ \theta \geq 80$	

表-2 各指標間の相関係数

説明 目的変数	7 土盛り	8 岩種	9 特殊な 産状	10 圧縮 強度	11 風化 変質	12 割れ目 の頻度	13 割れ目 の状態	14 割れ目 の形態	15 湧水	16 水による 劣化	17 割れ目方向 縦断	18 割れ目方向 横断
1 支保 パターン	0.499	0.722	0.502	0.735	0.767	0.559	0.819	0.598	0.211	0.299	0.327	0.339
2 切羽の 状態	0.330	0.769	0.328	0.750	0.753	0.426	0.749	0.528	0.256	0.276	0.404	0.289
3 素掘面の 状態	0.349	0.472	0.336	0.775	0.730	0.482	0.659	0.501	0.132	0.020	0.034	0.263
4 変状	0.454	0.400	0.391	0.539	0.494	0.417	0.543	0.390	0.181	0.154	-	-
5 切羽の 補助工法	0.381	0.405	0.374	0.560	0.580	0.482	0.614	0.447	0.210	0.342	-	-
6 土圧変状 補助工法	0.432	0.462	0.373	0.645	0.641	0.461	0.749	0.495	0.163	0.220	0.221	0.016

凡例

 : 0.5以上 0.7未満

 : 0.7以上 1.0以下

被り」 9「特殊な産状」12「割れ目の頻度」14「割れ目の形態」の4つの説明変数は、比較的中位の相関係数となっている。これらが目的変数に対して何らかの相関性を示しているとすれば、それは間接的な相関性ではないかと推察できる。すなわち「割れ目の頻度が0.05m以下だった場合、割れ目の状態は未固結であることが多い」というように、「割れ目の頻度」と「割れ目の状態」は相関性が高いため、「割れ目の状態」を要因とする目的変数に対して「割れ目の頻度」の相関性も比較的高い値となったとも考えられる。

5. 評価指標の分析

それぞれの目的変数に対して、相関係数の高い指標が評価指標として適切であるか否かを目的変数のカテゴリ数量の順列性から検証する。「支保パターン」と「切羽の状態」は、「岩種」「圧縮強度」「風化変質」「割れ目の状態」の4つの指標について、「素堀面の状態」「変状」「切羽のための補助工法」「土圧による変状に対する補助工法」は、「圧縮強度」「風化変質」「割れ目の状態」の3つの指標についてそれぞれ検討を行う。目的変数ごとにそれぞれの解析から算出されたカテゴリ数量を図-2～図-7に示す。ただし、図中の Cy1～Cy6 は表-1 のカテゴリ番号に対応しているので参照していただきたい。

「支保パターン」のカテゴリ数量を図-2に示す。支保パターンの順列性は、B→CⅠ→CⅡ→DⅠ→DⅡ→Eの順になると考えられることから、「圧縮強度」と「風化変質」は正当な順列性を示している。また、双方とも Cy1 (B) と Cy2 (CⅠ) の値は非常に近接しており、ともに鋼製支保工を施さないBとCⅠの区別には、主観的な要因の影響が大きく、「圧縮強度」と「風化変質」からの判別では同等に扱われていると推察できる。このように両者を同等として見れば、「割れ目の状態」の順列性も同様の傾向であることがいえるのに対し、「岩種」はB→CⅠ→CⅡ→DⅠ→DⅡ→Eという正当な順列ではなく、またCy1、Cy4、Cy5、Cy6の値は他の説明変数の場合と比較して非常に近接しているため、「岩種」は他の説明変数とは同等に扱えないといえる。よって、「圧縮強度」「風化変質」「割れ目の状態」の3つの指標が「支保パターン」の評価指標として有効であるといえる。

図-3に示す「切羽の状態」では、すべての説明変数が安定から不安定という正当な順列性 (Cy1→Cy2→Cy3→Cy4) を示しているが、「岩種」でのCy2とCy3とCy4が近接しており、他の説明変数と比較して「岩種」では②③④の3つのカテゴリを区別することはできないといえる。よって、「切羽の状態」の評価指標として「圧縮強度」「風化変質」「割れ目の状態」の3つの指標が有効であると考えられる。

図-4に示す「素堀面の状態」では、3つの指標ともそれぞれのカテゴリ数量が正当な順列性 (Cy1→Cy2→Cy3→Cy4) と同等の値を示していることから、これらの指標が「素堀面の状態」の評価指標として有効であるといえる。

図-5に示す「変状」では、Cy1 (変状なし) 以外のカテゴリはすべて近い値を示しかつ順列性に一貫性がないことから、変状がない場合と何らかの変状がある場合の判断しかできないといえる。

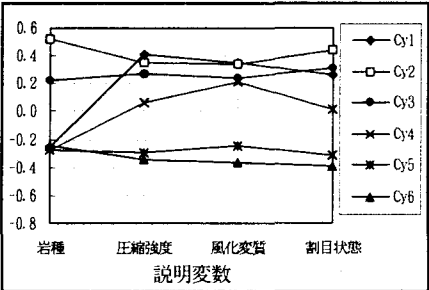


図-2 「支保パターン」のカテゴリ数量

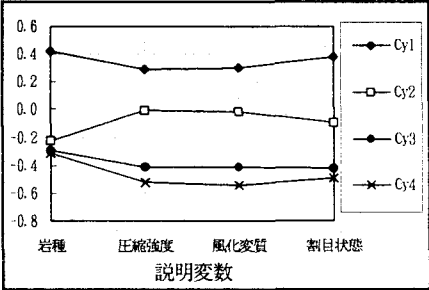


図-3 「切羽の状態」のカテゴリ数量

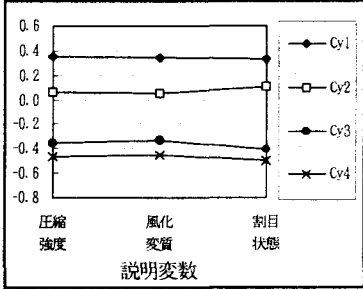


図-4 「素堀面の状態」のカテゴリ数量

また相関係数が 0.5前後と低いため、変状を事前に予測することはこの解析のうえからは比較的困難と考えられる。

図-6に示す「切羽安定のための補助工法」では、カテゴリー数量は一貫した順列を示している。高い値から並べてみると、Cy1（補助工法なし）→Cy3（縫い地）→Cy2（鏡止め）→Cy4（鏡止めと縫い地）の順となり、「圧縮強度」「風化変質」「割れ目の状態」の3つの指標は「切羽安定のための補助工法」を説明する指標になると考えられる。ただし相関係数が0.6前後と低いのは、「圧縮強度」「風化変質」「割れ目の状態」という要因が「切羽の状態」や「素堀面の状態」を支配し、「切羽の状態」や「素堀面の状態」という要因が「切羽安定のための補助工法」の選定を支配していると仮定すれば、「圧縮強度」「風化変質」「割れ目の状態」が直接「切羽安定のための補助工法」を決める要因となっておらず、その辺が主たる原因ではないかと推察される。

図-7に示す「土圧による変状に対する補助工法」では、Cy1（補助工法なし）以外のカテゴリーはすべて近い値を示しかつ順列性に一貫性がないことから、補助工法を実施しない場合と何らかの補助工法を実施する場合の判断しかできないといえる。すなわち各説明変数からどのような補助工法を選択すればよいのかを今回の解析からは求めることができなかった。また、補助工法実施の有無は「変状」（図-5）での変状の有無と同じような傾向となったため、トンネル壁面の変状が大きな要因となると推察できる。

6. 結論

切羽安定の評価指標として、「圧縮強度」「風化変質」「割れ目の状態」の3つの指標が有効であることがわかった。とくに「支保パターン」「切羽の状態」「素堀面の状態」との相関性は高い。また、「切羽安定のための補助工法」に対する評価指標についてもこれら3つの指標が有効であると思われるが、今後、これら以外にも有効な指標があるかどうか検討を進めることが望まれる。「土圧による変状に対する補助工法」については、補助工法を必要とする場合の補助工法の選定に対して明確な相関性は見られなかった。

7. おわりに

客観的かつ合理的に支保パターン・切羽安定対策工の設計を行うための指標を得ることを目的として本研究は行われたのであるが、まだ多くの不確定要素を含んでおり、克服しなければならない部分は数多くある。しかし、将来の設計のマニュアルを作成、具体化する際などには、もっと多くのデータや解析パターンを試すことによって、本手法はかなり有効な検討材料を提供する可能性を有していると考えており、今後のデータ蓄積が求められるところである。

参考文献

- 1) 木下栄蔵 [1993. 4]: わかりやすい数学モデルによる多変量解析入門, 啓学出版(株)
- 2) 有馬哲・石村貞夫 [1994. 5]: 多変量解析のはなし, 東京図書(株)
- 3) (社)日本道路協会 [1993. 11]: 道路トンネル観察・計測指針, (社)日本道路協会

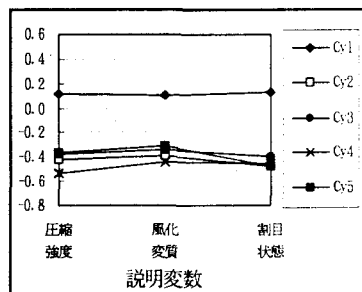


図-5 「変状」のカテゴリー数量

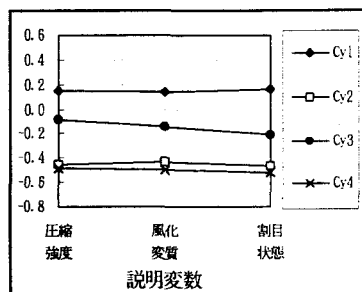


図-6 「切羽のための補助工法」のカテゴリー数量

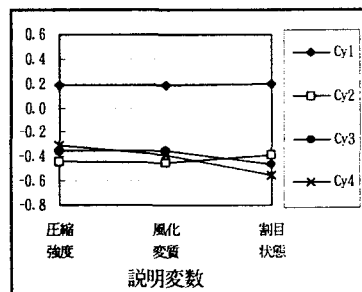


図-7 「土圧による変状に対する補助工法」のカテゴリー数量