

(8) 統計解析によるトンネル掘削に伴うゆるみの深さの予測について

(株) 間 組 正 会 員 五 味 道 義

1. まえがき

トンネル掘削に伴うトンネルのゆるみ深さは、地山状況や施工法等周辺環境条件により種々相違するものと考えられる。

従来、ゆるみ深さは設計時には過去のデータを参考に一様の深さに仮定しているのが実状である。また、ゆるみ深さの調査は従来、主に弾性波探査から求めた弾性波測度の变化より推定していたが、NATMの適用に伴い地中変位計で求めた地中変位量の変曲点から推定しているのが現状である。

ゆるみ深さが予測できると合理的な掘削工法や構造物の設計に寄与することができるものと考えられる。

我が国には昭和53年から適用され始め現在までに100件程度のトンネルに採用され、その計測データが蓄積されている。

そこで本文は、これまでに施工されたNATMを適用したトンネルでの約60ヶ所の計測データのうち、岩種、地山状況、掘削方式、掘削工法、掘削断面積、土被りとトンネル周辺地山のゆるみ深さとの関係について整理して、トンネル掘削にともなうゆるみ深さと上記の諸条件の関係を数量化理論Ⅰ類を用いて統計解析により予測を試みたものである。

2. データの整理

トンネルの設計や施工管理を行なう場合を考慮して、岩種、地山状況、掘削方式、掘削工法、掘削断面積、土被りが主に事前の諸条件となるので、この項目を質的変数に、ゆるみ深さを量的変数(目的変数)として整理した。

計測データのうち、特異な地山、例えば、内空変位量が50cm以上また、土被りがトンネル径以下となっているものは削除した。次に質的変数の概要を説明すると以下の通りとなる。岩種は挙動の性質が相違すると思われるタイプとして砂岩・頁岩、泥岩、凝灰岩・流紋岩、花崗岩、砂、片岩・粘板岩の6区分に、地山状況は地山の硬さ、軟さと固結状況に分けて中・硬岩、軟岩、未固結地山の3区分に、掘削方式は地山の破砕の仕方として、機械と手掘は掘削によるゆるみ深さに差異はないと考え同一項とし、機械手掘と発破の2区分とした。掘削工法は掘削断面の加背割りで分け全断面掘削とベンチ掘削の2区分に、次に掘削断面と土被りは量的変数であるが、解析上事前に判かるということから質的変数として取扱った。掘削断面積の区分け方は、鉄道トンネル単複、道路トンネルの断面積を考慮して、 10m^2 以下、 $10\sim 30\text{m}^2$ 、 $30\sim 60\text{m}^2$ 、 60m^2 以上の4区分に、土被りは25m以下、 $25\sim 75\text{m}$ 、 $75\sim 150\text{m}$ 、150m以上の4区分とした。

量的変数としてのゆるみ深さは、図-1に示すように地中変位量と掘削壁面からの深度との関係図から求めた値の平均値とした。

解析データの整理は、表-1に示すように、変数を質的と量的に分け、記号をAからGまで付し、質的変数は6アイテム、量的変数は1アイテムの合計7アイテムとし、データ数は $n=60$ 個について行った。

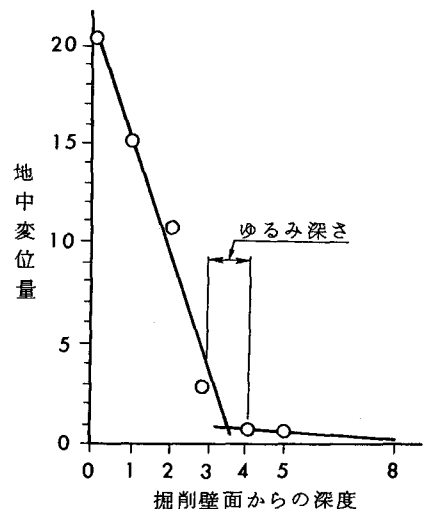


図-1 地中変位量と掘削壁面からの深度の関係

表-1 解析データ例

変 数 データ No	質 的 変 数																				量 的 変 数	
	A 岩 種						B 地 山 状 況			C 掘 削 方 式		D 掘 削 工 法		E 掘 削 断 面 積 (m ²)				F 土 被 り (m)				G むるみ深さ (m)
	A1 砂 岩・頁 岩	A2 泥 岩	A3 凝 灰 岩・流 紋 岩	A4 花 崗 岩	A5 砂	A6 片 岩・粘 板 岩	B1 中・硬 岩	B2 軟 岩	B3 未 固 結 地 山	C1 発 破	C2 機 械・手 掘	D1 全 断 面	D2 ベ ン チ	E1 10 以下	E2 10 30	E3 30 60	E4 60 以上	F1 25 以下	F2 25 75	F3 75 150	F4 150 以上	
1			○					○			○		○				○		○			2.5
2		○					○			○		○			○					○		6.5
...	○							○		○		○		○				○				2.5
...				○				○				○		○							○	1.5
...	○																					4.0
60		○					○			○		○				○		○				3.0

3. 解 析

使用したデータの統計量及び性質を説明すると次のようになる。

むるみ深さの統計量は図-2のむるみ深さのヒストグラムに示すようにデータ数 $n=60$ 個、平均値 $\bar{x}=3.19$ 、標準偏差 $s=1.42$ である。このヒストグラムの分布の姿はむるみ深さが 1m より小さいものが少なく、平均値より段々な

だらかに増加している傾向を示している。次は図-3～図-8にむるみ深さと質的変数のカテゴリー毎の関係を層別ヒストグラムで示した。図-3に示す岩種の層別ヒストグラムは、普通予想されるようにむるみ深さは平均値では花崗岩が最も小さく、泥岩が最も大きい傾向を示している。しかし、各カテゴリー毎のデータ数が少ないので今後のデータにより補正していく必要がある。図-4に示す地山状況の層別ヒストグラムは平均値で中硬岩が $\bar{x} \div 2\text{m}$ 、軟岩が $\bar{x} \div 3.7\text{m}$ 、未固結地山が $\bar{x} \div 4.5\text{m}$ である。しかし、未固結地山のデータの分布の姿は歯形で数も少ない状況にある。図-5に示す掘削方式の層別ヒストグラムは発破によるものが平均値 $\bar{x} = 3.4\text{m}$ で、標準偏差 $s = 1.6$ でバラツキが大きい、また、機械・手掘りでは $\bar{x} = 2.9\text{m}$ でやや小さい傾向を示している。図-6に示す掘削工法の層別ヒストグラムは全断面掘削によるものが平均値で $\bar{x} \div 2.5\text{m}$ 、ベンチ掘削によるものは $\bar{x} \div 3.4\text{m}$ で、標準偏差が $s = 1.5$ と大きい値を示している。図-7に示す掘削断面

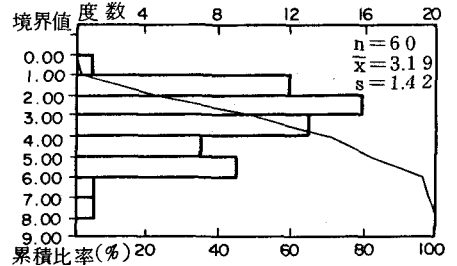


図-2 むるみ深さのヒストグラム

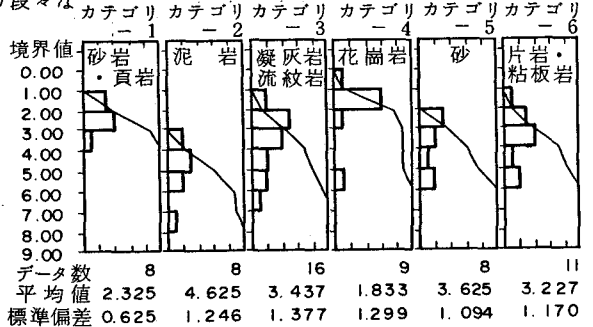


図-3 岩種別によるむるみ深さの層別ヒストグラム

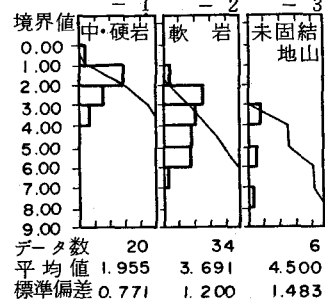


図-4 地山状況別によるむるみ深さの層別ヒストグラム

積の層別シスグラム10m²以下で平均値 $\bar{x}=1.7m$ 、10~30m²が $\bar{x}=2.6m$ 、30~60m²が $\bar{x}=3.4m$ 、60m²以上が $\bar{x}=3.9m$ と掘削断面積が大きくなるに従ってゆるみ深さも除々に大きくなる傾向を示している。また、10m²以下はデータ数が著しく少ない状況にある。なお、ヒストグラムの姿は30~60m²を削くと分布が悪い。図-8に示す土被りの層別ヒストグラムは25m以下で平均値 $\bar{x}=2.4m$ 、25~75mで $\bar{x}=2.9m$ 、75~150m以上で $\bar{x}=4.2m$ と土被りが増加するとゆるみ深さも増加する傾向を示している。また、ヒストグラムの姿は分布形状が悪い。

以上のデータを用いて数量化理論Ⅰ類を用いて統計解析した結果、表-2に示す通りとなった。

この結果、重相関係数Rは $R=0.85$ で寄与率 R^2 は $R^2=0.72$ となり比較的相関性が良いことを示している。また、ゆるみ深さに最も影響を与えている質的変数の因子は、レンジ及び偏相関係数から見ると地山状況、土被り、岩種、掘削方式、掘削工法、掘削断面積の順となっている。

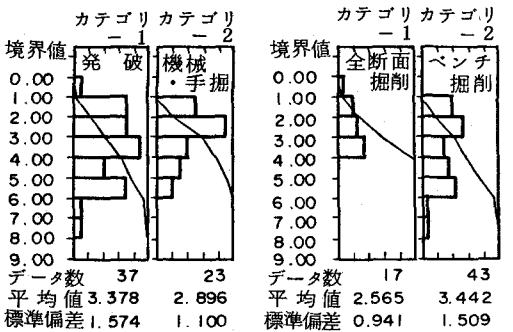


図-5 掘削方式別によるゆるみ深さの層別ヒストグラム

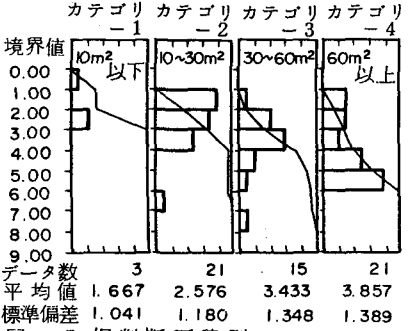


図-7 掘削断面積別によるゆるみ深さの層別ヒストグラム

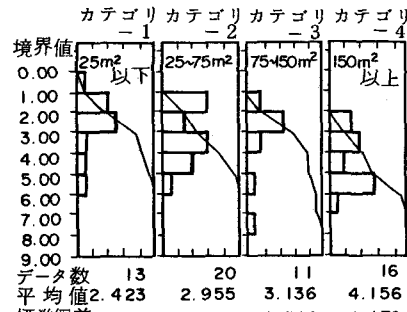


図-8 土被り別によるゆるみ深さの層別ヒストグラム

表-2 数量化理論Ⅰ類計算結果

質 的 変 数		カテゴリー ウエイト	キジュン カテゴリーウエイト	レ ン ジ			ヘンソウカンケイスイ	
				0	1	2	0	0.5
岩 種	A1 砂岩・頁岩	0.71	-0.61					
	A2 泥 岩	1.75	0.43					
	A3 凝灰岩・流紋岩	1.54	0.21					
	A4 花崗岩	1.12	-0.18					
	A5 砂	0.92	-0.41					
	A6 片岩・粘板岩	1.18	-0.15					
B 地 状 山 況	B1 中・硬岩	0.	-0.98					
	B2 軟 岩	1.31	0.33					
	B3 未固結地山	2.85	1.87					
C 掘方 削 式	C1 発 破	0	0.24					
	C2 機械・手掘	-0.59	-0.35					
D 掘工 削 法	D1 全断面	0	-0.37					
	D2 ベンチ	0.52	0.14					
E 掘断 面 削 積 (m ²)	E1 10以下	0	-0.28					
	E2 10~30	0.10	-0.19					
	E3 30~60	0.24	-0.05					
	E4 60以上	0.55	0.26					
F 土 被 り (m)	F1 25以下	0	-0.48					
	F2 25~75	0.38	-0.10					
	F3 75~150	0.36	-1.12					
	F4 150以上	1.11	0.64					

ジュウ ソウカン ケイスイ $R=0.85$ キョリツ $R^2=0.72$

4. ゆるみ深さの予測

トンネル周辺地山のゆるみ深さは支保の大きさを決める重要な因子である。しかし現状では過去の工事の実績や経験から決め、地山区分に対応して用いる例が多い。これは支保部材の作用機構が明確になっていないことや、解析に用いる地山物性値を把握することが困難であることによるためである。このため、NATMを適用したトンネルにおいては、その地山の代表的な地点において掘削に伴う周辺地山のゆるみ深さを計測して、設計値とのチェックを行って施工を進めている状況にある。しかし、このゆるみ深さの計測は計測器の設置及び計測に時間が掛ること、計測費用が高価であるなど問題があることから、そのトンネルの代表的な地点で1～2ヶ所計測するか、または全然しない場合が多く日常管理に適用しにくく、また事前に判断することが困難な場合が多いことが現状である。

そこで、これまでに調査、計測された諸条件として、岩種、地山状況、掘削方式、掘削工法、掘削断面積、土被りとゆるみ深さとに相関性があるかどうかについて数量化理論Ⅰ類を用いて統計解析を行って見た。

この結果、表-2に示すように重相関係数 $R=0.85$ で寄与率 $R^2=0.72$ と相関性が高いことを示したので、この統計解析で得られた係数を用いることにより式(1)でゆるみ深さを実用的に予測できるものと考えられる。

$$y = A_x + B_x + C_x + D_x + E_x + F_x \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 y ; ゆるみ深さ (m) D_x ; 掘削工法
 A_x ; 岩 種 E_x ; 掘削断面積 (m^2)
 B_x ; 地山状況 F_x ; 土被り (m)
 C_x ; 掘削方式

この式の設計・施工への適用に当っては、図-9に示すフローのように、トンネルの諸元・諸条件として、岩種、地山状況、掘削方式、掘削工法、掘削断面積を設定し、式(1)によりゆるみ深さを求めて施工法、支保工の検討を行ない妥当性のチェックと、施工法及び支保工の設定を行う。また、施工中においては、さらに詳しい情報にもとづき計算することでゆるみ深さの予測の精度を向上することができるのではないと思われる。

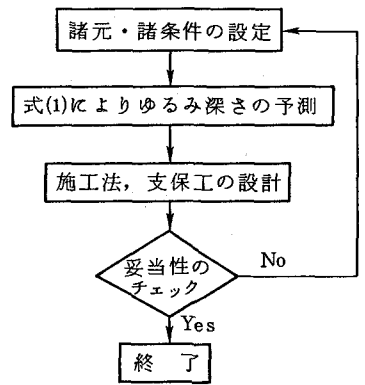


図-9 施工法・支保工の計画フロー

5. あとがき

トンネル掘削に伴うトンネルのゆるみ深さを数量化理論Ⅰ類を用いて統計解析することによる予測方法について提案した。しかし、ゆるみ深さは、種々の条件により推定するものと考えられるが計画時において概略の予測をして設計しておき、施工時に再度条件を見直して決定する必要がある。また、データ数が少ないカテゴリーがあり、今後データ量を増すことにより相関性の向上を図っていく必要がある。

さらに、この外の諸条件として、地山の強度、吹付け厚さ・強度、ロックボルトの径、長さ等の条件も含めた統計解析により考え方を拡大していき精度の向上を図る必要がある。

また、内空変位量、収束距離等量的変数についても同様な統計解析を行ない予測することができるので今後データを整理して行く予定である。

なお、本文作成に当って、トンネルと地下に掲載されたNATMの文献データを使用させていただいた関係者の方々にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本トンネル技術協会誌；トンネル地下、1977～1985
- 2) (社)日本トンネル技術協会；トンネル掘削によるゆるみ領域の調査報告書、昭和57年3月
- 3) (社)日本トンネル技術協会；地山評価のあり方に関する研究、昭和60年2月
- 4) 岡林信行、永井博史、塩谷幸弘；NATM支保設計の考察、鹿島建設技術研究所年報、第32号、昭和59年6月
- 5) 五味道義；トンネル掘削にともなう施工管理の一考察、第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1985.2

(8) ESTIMATION OF LOOSENING DEPTH CAUSED BY CONSTRUCTION OF
TUNNELS WITH APPLICATION OF STATISTICAL ANALYSIS

HAZAMA-GUMI, LTD. MICHIOYOSHI GOMI

Abstract:

The measured data of the tunnels that were constructed at 60 locations up to now are rearranged with respect to the rock type, ground condition, excavation method, construction method, cross sectional area for excavation, over burden and the loosening depth. The statistical analysis is performed by applying the theory of quantification of the first kind to these data.

As its result, the loosening depth can be estimated by the formula (1) at the ratio of contribution $r^2 = 0.72$.

$$y = A_x + B_x + C_x + D_x + E_x + F_x \dots\dots\dots (1)$$

where,

- y : Loosening depth (cm)
- A_x: Rock type
- B_x: Ground condition
- C_x: Excavation method
- D_x: Construction method
- E_x: Cross sectional area (m²)
- F_x: Over burden (m)