

(63) トンネル施工管理のための最終変位予測

国鉄・鉄道技術研究所 正・朝倉 俊弘 正・川上 義輝
" " 正・〇小野田 滋

1. はじめに

トンネル工事における最終変位量の予測は、施工管理上極めて重要である。特に早期に変位の予測を行うことができれば、設計・施工の妥当性を早い時期に判断し、設計の変更による手戻りを最少限に抑えることが可能となる。最終変位量の予測法についてはこれまでもいくつかの論文が発表されているが、そのうち簡便な手法によるものはおおむね下記のように分類することができる。

(1) 切羽観察に基づく方法¹⁾

切羽観察により施工の判断を行う方法は、従来の経験工学的なトンネル施工法の延長線上にあるが、近年これを定量的に扱う手法として数量化理論や重回帰分析を用いて変位量予測を行う方法が試みられている。この方法は、データがある程度蓄積されなければ良い相関が得られないこと、各従属変数の重みづけが必ずしも工学的に判断される定性的な傾向と一致するとは限らないことなどの問題点がある。

(2) 初期変位計による方法²⁾

掘削直後の素掘面に初期変位計をあて、初期の変位速度から最終変位量を予測する試みで、変位量の小さい領域では強い相関は見られないが、全体の傾向としては変位速度が 1×10^{-1} mm/minを超えると100mm以上の変位が生ずることが認められている。

(3) 初期の変位量に基づく方法³⁾

掘削初期における変位量（例えば1日あたりの変位量、切羽1D通過時の変位量など）と最終変位量の関係がほぼ比例することに着目し、変位の収束値を予測しようとするものである。筆者らの知見によればある程度の精度で予測が可能であるが、さらに精度の向上を図るためにはデータの蓄積、地山分類、施工方法などを考慮した各トンネルごとの傾向の把握が必要となる。

(4) 回帰式による方法

計測結果を最小二乗法により直接回帰させて最終変位量を予測するものである。岡田ら(1986)⁴⁾は指数関数に回帰させて初期の計測値から最終変位量を予測し、変位曲線を予め設定した領域内に収めることにより施工管理を行う方法を提案した。さらに、高橋ら(1986)⁵⁾は計測値を数種類の関数に回帰させ、最終変位予測のために最も適した関数の選択について検討した。本論文では、先に筆者らが提案した密な内空変位計測とこれらの手法をリンクさせることによって、より早い段階で最終変位量を予測できる可能性等について検討するものである。

2. 予測方法

密な内空変位測定とは、切羽掘削の直前、直後に内空変位を計測し、切羽掘削時の応力解放による変位成分と掘削と掘削の間における時間依存性変位成分とを分離し地山評価を行おうとするものである。これにより、通常の1日1～2回程度の測定頻度では得られなかった地山の挙動を把握することが可能となるが、ここでは通常の計測よりも数多くの測定データが得られることを利用し、初期の段階での最終変位予測について種々の検討を行う。回帰式は二要素フォークトモデルに基づく指数関数を用い、非線形最小二乗法により係数を求めるが、本論文においては掘削直後から計測初期値までの計測値の欠落を考慮できるように下記の関数形で式を表現することとした。

$$f(t) = U_t = A_t \cdot [1 - \exp(-B_t \cdot (t - t_0))] \dots\dots\dots (1)$$

U_t : t における変位量(mm) A_t : 係数(最終変位量(mm)) B_t : 係数

表－１ 測定断面の概要と回帰計算結果（上半での最終値）

トンネル名	工区名	測点 No	測 定 点 キ ロ 程	切羽の地質	経 時 変 化		経 距 変 化		実測最終 変位 (上半)
					A t	B t	A ℓ	B ℓ	
第二白坂 (篠ノ井線)	山 中	①	32km101.50m	泥岩	34.9	0.183×10^{-3}	32.0	0.104	72.2 ^(mm) (≈ 35)
	明 科	②	31km071.00m	砂岩・泥岩互層	35.5	0.243×10^{-3}	35.3	0.125	62.9 (≈ 35)
第一水路 (信濃川 発電所)	本屋敷	③	1km091.40m	スコリア質凝灰岩 ・礫混り砂互層	12.7	0.231×10^{-3}	9.36	0.272	36.2 (≈ 12)
	姿	④	3km250.25m	シルト・砂礫互層	32.8	0.281×10^{-3}	32.5	0.121	58.7 (≈ 30)
	姿	⑤	3km480.65m	礫混り砂・凝灰岩	29.6	0.294×10^{-3}	42.8	0.0744	69.7 (≈ 35)
	鉢 沢	⑥	5km104.50m	礫混り砂・ 砂質凝灰岩互層	14.5	0.498×10^{-3}	20.2	0.0920	39.1 (≈ 18)

t₀ : 掘削直後から初期値計測までの経過時間(min)

t : 経過時間(min)

また、切羽距離との関係では上式の t を ℓ と置換えて、 $f(\ell) = U_{\ell}$ を用いる。各パラメータの定義は、 U : ℓ における変位量(mm)、 ℓ : 切羽距離（計測断面の次の鏡面を0とする:m）、 A_{ℓ} : 係数（最終変位量(mm)）、 ℓ_0 : 掘削直後から初期値計測までの切羽距離、 B_{ℓ} : 係数、とする。

従って、(1) 式における t または ℓ に0を代入することにより掘削直後から初期値計測までの変位量を容易に求めることが可能となるが、本論文では式の提示のみにとどめ、この点に関する議論は行わない。

変位の予測方法は得られたデータを逐次回帰式に代入し、各測定段階毎の最終変位量予測値をプロットするもので、各測定段階における予測値が一定値に収束したと判断されれば変位量の予測が可能となる。これは高橋ら(1986)が直接変位予測法と称したものなどと同じ手法である。

3. 測定結果とその考察

3-1 測定結果

今回用いたデータは篠ノ井線第二白坂トンネル（第三紀砂岩・泥岩互層：複線：機械掘削：ベンチカット工法）および信濃川発電所第一水路トンネル（第三紀未固結砂・シルト互層：複線相当断面：機械掘削：ベンチカット工法）の2トンネル6断面の測定結果である。また、計測断面における一掘進長は第二白坂トンネルが1.0m、第一水路トンネルが0.9mである。表－1に今回測定を行った6断面における上半断面の最終変位量と各係数の最終結果を示す。

3-2 経時変化と経距変化による比較

内空変位測定結果の整理方法としては一般に経時変化（X軸= t ：Y軸= U_t ）による方法と経距変化（X軸= ℓ ：Y軸= U_{ℓ} ）による方法の2種類が用いられている。図－1は例として信濃川第一水路トンネル本屋敷工区における経時変化と経距変化を比較したものであるが、経時変化のグラフでは当然のことながら切羽の進行速度の影響を受けている。このような傾向は他の断面においても共通して見られるが、施工速度が一定の場合（例えば第二白坂トンネル山中工区）では認められない。

図－2に経時変化に基づいて計算した最終変位量予測値を、また図－3に経距変化に基づいて計算した最終変位量予測値を示す。経時変化による予測では早いものでは2～4日後に収束傾向が認められるが、切羽の進行が不規則な③では予測値の変動が見られる。また、経距変化では切羽距離5～10mで収束する断面もあるが、経時変化で収束性の良好であった①、⑤、⑥では予測値が漸増する傾向があり、逆に経時変化の収束性が悪い②、③での経距変化は収束性が比較的良好である。この点については、地質の違いに起因するものか関数の性質に起因するものかについてさらに検討を要する。また、予測値そのものは最終的に両者ともほぼ同一の値となるが、切羽の進行が不規則な断面では両者に差が認められる。

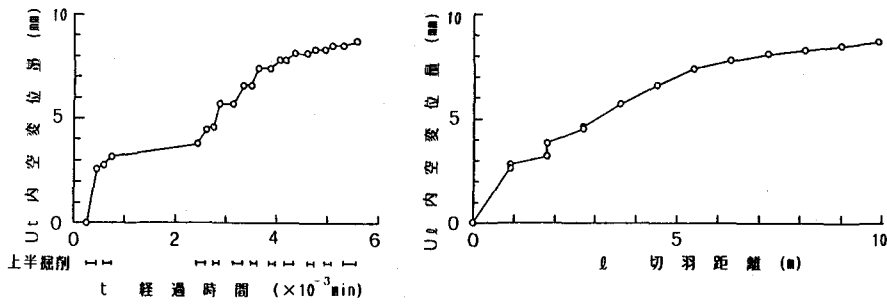


図-1 経時変化図(左)と経距変化図(右)の違い(測点 No.③)

3-3 測定頻度の違いによる比較

図-4は内空変位の測定を密に行った場合の予測値の変化と、1日1回のみ測定を行ったと想定した場合(初期値測定から24時間毎に最も近い時刻の値を採用する)、各切羽掘削の直前のみに測定を行った場合、各切羽掘削の直後に測定を行った場合の4ケースについて比較した例である。予測値そのものの比較ではその差はほとんどなく、1日1回の測定頻度でも十分な精度で予測が可能となることを示している。しかし、回帰計算を行うためには初期値を含めて最低限3個のデータが必要となり、従って計測開始から2日目以降でないと予測値が算出できず、2日後に予測値が得られたとしてもその値が収束しているか否かを判断するためにはさらに次の計測まで待たなければならない欠点がある。これに対して掘削の直前または直後の測定

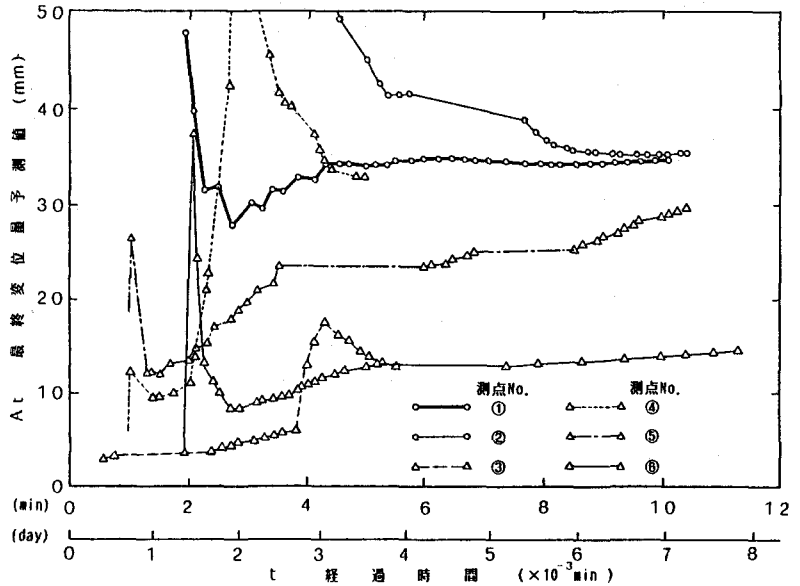


図-2 経時変化に基づく最終変位量予測値の変化

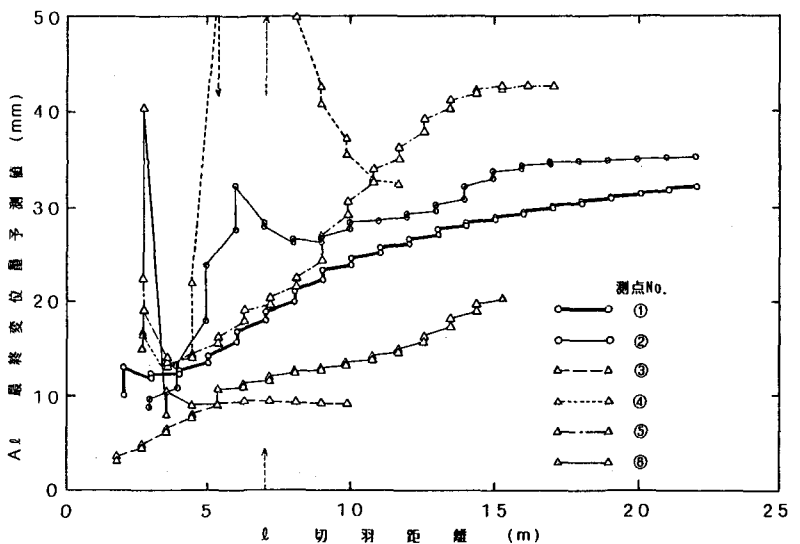
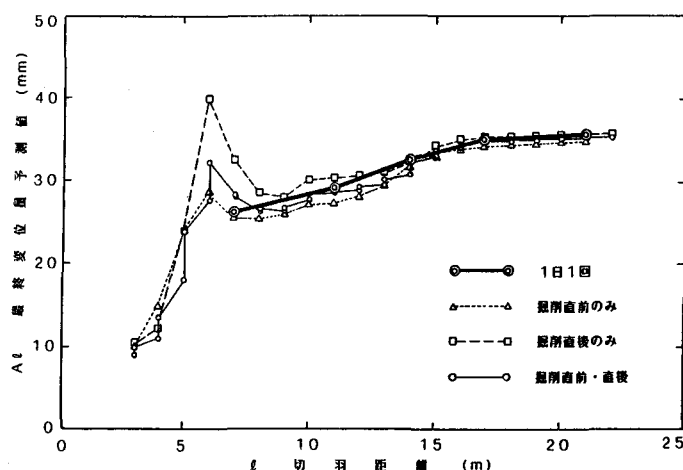


図-3 経距変化に基づく最終変位量予測値の変化

値を用いた例では掘削の直前・直後で測定した場合とはほぼ同じ精度で変位の予測ができることに加えて予測変位量の変化も同等に把握できる。従って、予測値の収束が認められるまで掘削の直前または直後に計測を行えばより早い段階での変位予測が可能となるとともに、次項で述べるような施工管理に必要な情報も得ることができる。



3-4 予測値の変化と施工管理 図-4 測定頻度の違いによる最終変位量予測値の差 (測点 No. ②)

今回測定を行った6断面の予測値の変化を大別すると、予測値がある一定値に収束する「収束型」、漸増傾向を示す「漸増型」、切羽がある程度進行しているにもかかわらず予測値が発散傾向を示す「発散型」の3種類の傾向が見られる。これらは前述したように同一断面の計測値を用いても時間変化で予測した場合と経距変化で予測した場合で別の傾向を示すことがあり、その相違が生ずる要因についてさらに分析を重ねる必要がある。しかし、一般的傾向として、収束型（例えば図-3の②、③）では変位量はそのトンネルの許容変位量を超えない限り施工上の問題はなく、漸増型（例えば図-3の①、⑤）では密な計測をさらに継続してその増加傾向を監視する必要がある、さらに増加傾向が続く場合（例えば図-3の⑥）や発散型（例えば図-3の④）を示す場合では地山の挙動が安定状態に至っていない可能性があると考えられる。従って密な内空変位測定によって得られる予測値の変化傾向を監視することにより追加施工の判断を早期に行うことが可能となろう。

4. 今後の課題

本手法では、ベンチ工法のように変位の立上りが2度以上生ずる場合には予測式が直接使えないため、このような場合の変位予測は上半の変位量と下半の変位量の割合を施工実績から求める方法⁸⁾、下半切羽の通過時にも密な内空変位を行い上半の予測変位量と下半変位量の和をとって最終変位量の予測を行う方法、上半の収束変位量だけで施工のための管理基準値を設定する方法などが考えられる。

また、最小二乗法による予測法は言うまでもなく選択した回帰式と実測値とがどれだけ精度良く適合しているかに支配される。今回の分析では経時変化と経距変化の予測値の相違が明らかとなったが、その原因として使用した指数関数が実際の現象を説明するための関数としては必ずしも適切でないことや回帰計算そのものの解法上の問題点などが考えられ、今後さらに予測精度を上げるべく検討を重ねる必要がある。

最後にデータの収集に御協力いただいた国鉄信濃川工事事務所、岐阜工事事務所の担当者各位、ならびに各トンネルの施工業者各位に深甚なる感謝の意を表する。

[参考文献] 1) 例えば、本間ほか“膨脹性泥岩中に掘削されたトンネルの地山挙動について”第18回土質工学研究発表会(1983), 2) 朝倉ほか“トンネル切羽における初期変位測定(第2報)”鉄研速報No. A-85-42(1985), 3) 古川ほか“トンネル掘削に伴う地殻表層の力学的挙動”月刊地球No. 59 (1984), 4) 岡田ほか“NATHにおける変位予測の適用性”第18回岩力シンポ(1986), 5) 高橋ほか“トンネルの施工管理(その1)”第18回岩力シンポ(1986), 6) 朝倉ほか“トンネル切羽付近における変位計測”第6回岩の力学国内シンポ(1983), 7) 高橋ほか“変形の大きいトンネルでの施工管理事例”土と基礎34-2(1986), 8) 前掲5)

(63) Forecasting of Final Convergence Value
for Tunnel Construction Control

Toshihiro ASAKURA *

Yoshiteru KAWAKAMI *

Shigeru ONODA *

Forecasting of final convergence value in tunnelling is very important for control of tunnel construction work. In this paper for the purpose of earlier forecasting of final convergence value a method of forecasting by frequent convergence measurement which has been proposed by authors is examined.

The results are as follows:

- (1) There are two types in convergence curves. One is the type in which forecasting by a convergence change with the progress of face advancing will be more exact. The other is the type in which forecasting by the change with the lapse of time is more exact.
- (2) Forecasting by values measured just before or after excavation systematically enable earlier estimation than that by values measured irregularly in early stage.
- (3) Frequent convergence measurement makes it possible to grasp more exactly the behavior of a tunnel.

* JNR Railway Technical Research Institute