

(6) トンネルの施工管理（その1） — 最終変位の予測 —

鹿島建設株式会社 正会員 土肥 稔
同 〇高橋 祐治
同 中島 健一

1. まえがき

NATMトンネルの施工管理は、切羽観察、支保工応力度測定、内空変位測定による方法など、いくつかの方法がとられているが、ここでは最終時の地山のひずみ分布を推定し、ゆるみ範囲を把握することを一つの施工管理法と考えた。この場合の管理のフローを図-1に示す。

本報告では、このうち最終変位の予測及び予測変位による簡単な地山の評価例について述べる。

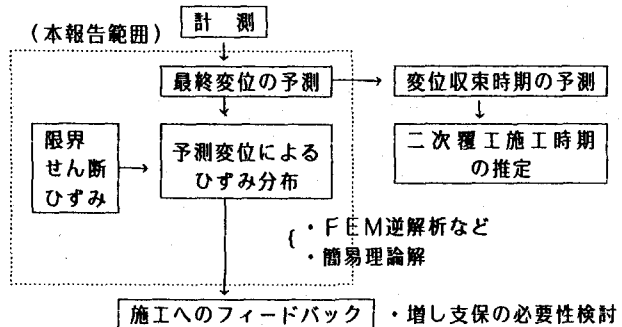


図-1 施工管理フロー

2. 最終変位の予測法

最終変位は下記A～F法の6つの方法により予測するものとする。変位は切羽距離と時間の関数であるが、ここでは時間のみの関数とした。これは、時間と切羽距離が一般にほぼ線形関係にあることと、現場での使い易さを考えたためである。

(1) 変位曲線の経時変化を関数で近似する方法

① A法：指数関数 $\delta = a(1 - e^{-bt})$ 、 $\delta_f = a$

② B法：ワイブル関数 $\delta = a(1 - e^{-bt^m})$ 、 $\delta_f = a$

これは、ワイブル関数を少し変形したものである。

③ C法：双曲線関数 $\delta = t / (a + bt)$ 、 $\delta_f = 1/b$

ここで、 δ ; 変位量

δ_f ; 最終変位量

t ; 計測開始からの時間

a, b, m ; 定数。ただし、 $0 < m < 1$ とする。

上記、A、B、C法とも、予測する時点で得られているすべての計測データを用いて最小自乗法により、 a, b, m を決定するもので、いずれの方法でも、 $b < 0$ となれば発散、即ち、最終変位が ∞ になることを示す。

(2) 任意の計測日での変位と変位速度を用いる方法

① D法：指数関数の微分

A法での関数を微分して得られる次式に δ, V を代入し、定数 a, b を求める。

$$\delta = \frac{V}{b}(e^{bt} - 1), \quad a = Ve^{bt}/b$$

$$\delta_f = a$$

ここで、 V ; 変位速度

② E法；双曲線関数の微分

C法での関数を微分してaを消去し、

$$b = \frac{1}{4Vt} \left\{ 1 - \frac{(2Vt - \delta)^2}{\delta} \right\} \text{を得る。}$$

$$\delta_f = 1/b$$

D、E法とも、 $b < 0$ の場合は、変位が ∞ になることを示す。

(3) 過去の最終変位と最大変位速度のデータから推定する方法¹⁾

- ① F法；過去のデータを最小自乗法により $\delta_f = a(V_{\max})^b$ で表わす。
ここで、 $V_{\max}$ ；最大変位速度

3. 各予測手法の比較

2. で述べたA～Fの6手法を実トンネルのデータに適用し、その比較を行った。図-2～3にP、Qトンネルの例を示した。これらの結果に基づき、各手法の特徴を表-1にまとめた。同表より、計測の早い時期に最終変位をある程度の精度で知るのには、C、F法が適していることがわかる。

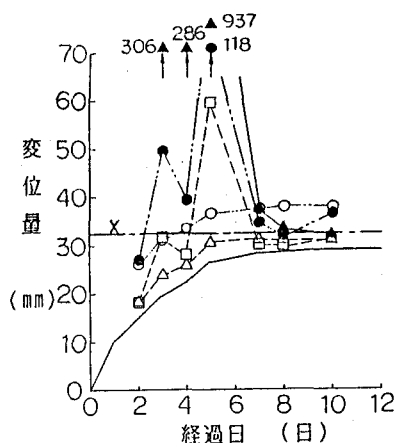


図-2(a) Pトンネルの内空変位

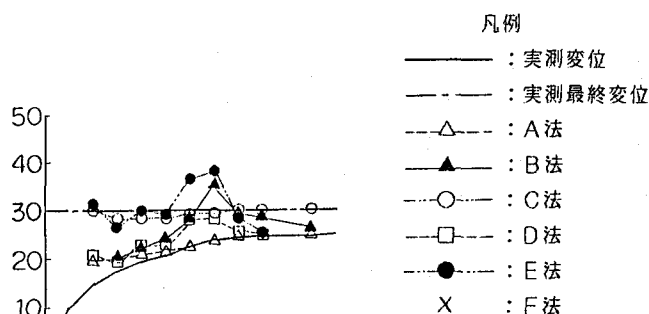


図-3(a) Qトンネルの内空変位

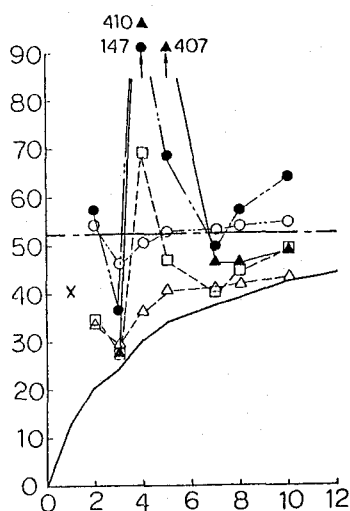


図-2(b) Pトンネルの内空変位

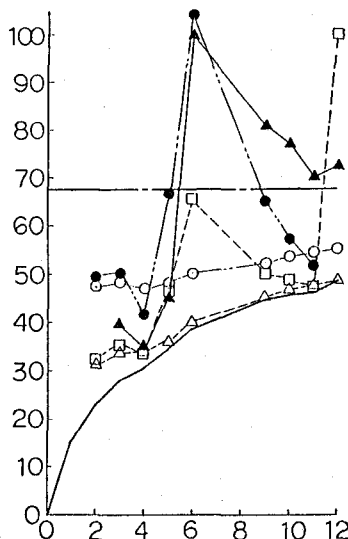


図-3(b) Qトンネルの内空変位

表-1 各予測手法の特徴

手法	略 称	必要 な データ数	変位 曲線 への近似度	5 日 目 以 前 での予測精度	備 考
A	指数関数	2 以上	やや悪い	やや良い	天端沈下のような収束の早い 変形に適する。
B	ワイブル	3 以上	良	"	パラメーターが多く、計算時 間が長くなる。
C	双曲線	2 以上	良	良	
D	部分データ、指数関数	2	—	やや良い	予測値が2度続けて過大値を 示すと要注意。
E	部分データ、双曲線	2	—	"	予測値が2度続けて過大値を 示すと要注意。手計算が可能。
F	変位と変位速度の相関	多数	—	良	相関式確立までに多くの時間、 データを要する。

4. 2段ベンチトンネルでの予測法

2段ベンチトンネルでの最終変位予測のフローを図-4に示した。前述のA～F法を用い、下半切羽通過以降に予測を行うことも可能であるが、ここでは、それよりも早い上半掘削時に予測を行う場合について考える。

図-5に、Rトンネルで上半データから最終変位を予測した例を示す。この場合、上半収束変位と最終変位の比率は3次元解析より求めた。

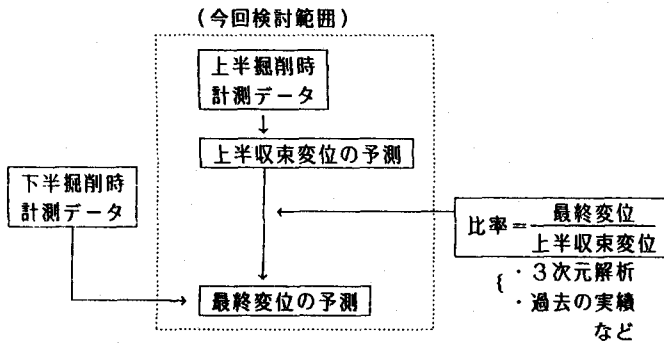


図-4 2段ベンチトンネルでの最終変位予測フロー

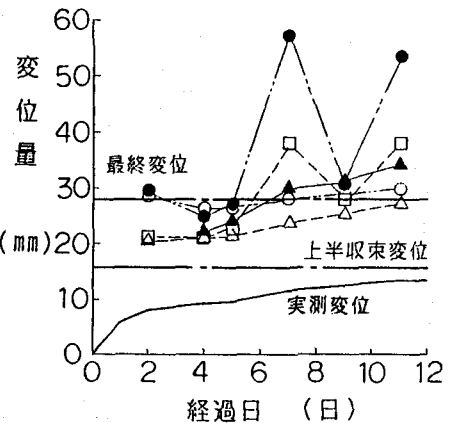


図-5 Rトンネルでの最終変位予測例

5. 施工へのフィードバック

最終変位の予測手法を実施工に適用する目的の1つとして、将来の地山の安定性及び増し支保の必要性を評価することが考えられる。ここでは、実際に崩壊のあったSトンネルにこの方法を適用し、増し支保の必要性を事前に知り得たかどうかをチェックした。

(1) ゆるみ域の推定

地山のひずみ分布の予測は、FEM逆解析などを用い、より詳細に行う方法もあるが、ここでは、単純化したモデルによる理論解を用い、簡便に求めた。

即ち、トンネルを円形断面とし、初期地圧を等圧（ $\sigma = \sigma_x = \sigma_y$ ）、また地山を弾性体と仮定した。この場合、地山内の半径方向の変位 δr 、及び壁面での半径方向の変位 δa は、次式で表わされる²⁾。

$$\delta_r = \frac{1+\nu}{E} \sigma \left\{ (1-\nu) \left(r + \frac{a^2}{r} \right) - \nu \left(r - \frac{a^2}{r} \right) - (1-2\nu) r \right\} \quad \text{①}$$

$$\delta_a = \frac{(1+\nu)}{E} \sigma \cdot a \quad \text{②}$$

ここで、 ν ：ポアソン比

E ：地山弾性係数

a ：トンネル半径

r ：トンネル中心からの距離

また、最大せん断ひずみは①、②式を用いて、

$$\gamma_{\max} = \frac{2 a \delta_a}{r^2} \quad \text{③}$$

(2) Sトンネルへの適用

図-6に、Sトンネルの崩壊部での内空変位データの一部を示した。下半切羽通過後のデータ2個よりE法を用いて最終内空変位を予測すると、 $\delta_f = 60\text{mm}$ となり、先行変位率を0.3とすると、壁面変位 $\delta_a = 43\text{mm}$ が得られる。

一方、コアの一軸試験から ν および限界一軸ひずみ ε_0 は、以下のとおりである。

$$\nu = 0.2$$

$$\varepsilon_0 = 0.003 \quad (0.3\%)$$

従って、限界せん断ひずみ γ_0 は簡便に次式で求められる。

$$\gamma_0 = (1+\nu) \varepsilon_0 = 0.0036$$

地山内のせん断ひずみが γ_0 に等しくなる点は、③式より $r-a = 6.0\text{m}$ 、即ち、壁面から 6.0m のところとなる。ロックボルトは 3m 長であるため、ゆるみ域がボルト端部より奥まで進展し、変位の発生を予測していることになり、実際の現象とよく合う。

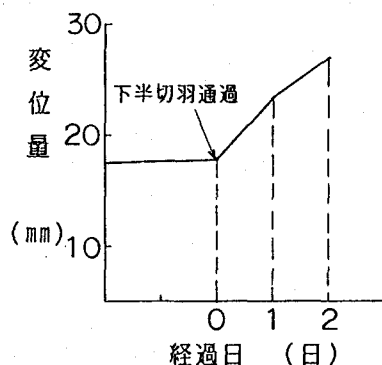


図-6 Sトンネルの内空変位

6. おわりに

- (1) 最終変位量の予測手法は数多く考えられるが、計測初期の段階では、双曲線関数に近似した場合の精度が良いことがわかった。しかし、今後更に多くのデータを用い、各手法の比較を行っていく必要がある。
- (2) ゆるみ域の推定を簡易計算式で行う方法と、最終変位の予測手法を組み合わせることにより、現場での簡便な変位の発生予知に役立つことがわかった。
- (3) 2段ベンチ掘削の場合、上半による変位と下半による変位の比率について、データの集積、及び3次元解析などとの比較を行っていく必要がある。

【参考文献】

- 1) 古川、朝倉、日吉、遠藤：“NATM計測実績の統計分析”、第15回岩盤力学に関するシンポジウム、PP.220-225、1983。
- 2) 今田：“岩盤力学入門(10)”、トンネルと地下、Vol.16、No.11、PP.61-67、1985。

(6) REALTIME CONSTRUCTION CONTROL OF TUNNEL EXCAVATIONS (PART I)

Minoru Dohi

Yuji Takahashi

Ken-ichi Nakajima

Kajima Corporation

Abstract

Six methods to predict ultimate displacements of a tunnel are proposed and compared with each other.

- Method A Simulate by an exponential function $\delta = a (1 - e^{-bt})$
- " B Simulate by a modified Weible function $\delta = a (1 - e^{-bt^m})$
- " C Simulate by a hyperbolic function $\delta = t / (a + bt)$
- " D Use a derivative function of Method A
- " E Use a derivative function of Method C
- " F Use a relationship from the past data between displacement and displacement velocity

where, δ : displacement

t : elapsed time

a, b, m : constants

These methods were applied to two tunnels, and it has been found that in the early stage of measurements Method C best predicts the ultimate displacements. It has also been recognized that the prediction by Methods D and E are very sensitive to the increase of the displacement velocity and therefore may be used to caution against the possibility of failure.

A simplified method of estimating the range of a plastic zone is also proposed here with relatively good results.