

金沢工業大学 正会員 川村 國夫

1. まえがき; 最近, 注目を浴びているトンネル工法NATMは, タフミ性の支保工を使用することによって, 地山の変位を許容し, 地山自身の強度を期待する施工法である。また, 施工中にトンネル内の変位を観測し, その結果に基づいて支保工の施工を制御したり, 時には増しボルトなどの設計変更の規模を決定したりする動的設計でもある。したがって, NATMで重要なことのひとつは施工中の観測結果に基づいて将来の挙動を予知することにある。すなわち, NATMが安全に, 経済的に実施できるか否かの問題はトンネル内孔変位の精確な予知にかかっていると, 言っても過言ではないであろう。以上の立場から, 本報告では施工中に導入されたトンネル内孔変位の観測結果を入手情報として, とれより将来の変位量や変位性状を予知できる方法のひとつが提案される。同時に, この提案法の適用性についても過去の実測事例をもとに検討する。

2. 予知法の提案; 過去に計測されたトンネル内孔変位量 y と時間 t の関係を検討すれば, 図1, 2から理解できる様に変位速度 (dy/dt) と t の時の変位量 y との関係は一次の線型式が成立するようである。図1は y が t とともに収束する現場計測例であり, 図2は施工中何らかのトラブルに見舞れ, y が発散しようとした現場計測例である。なお, 図1, 2中の縦軸, 内孔変位速度, には単位が記入されていない。これは, 各トンネル現場ごとでデータ測定の間隔 Δt の単位が異なるからである。図1, 2の傾向を踏まえ, 提案する予知法は図3の流れ図に示すとおり, 変位と時間の関係を次式の基礎式を表した。

$$\frac{dy}{dt} = ay + b \quad (1)$$

式(1)の一般解は $t=0$, $y=y_0$ の初期条件で式(2)となる。

$$y = e^{at} \cdot y_0 + \frac{b}{a}(e^{at} - 1) \quad (2)$$

一方, 式(1)と等価な差分方程式は $t_m = \Delta t \cdot n$, $y_m = y(t_m)$ とすれば簡単に次式で示される

$$y_m = \beta_1 \cdot y_{m-1} + \beta_0 \quad (3)$$

その一般解は $t=0$, $y=y_0$ の初期条件下で式(4)となる。

$$y_m = \beta_1^m \cdot y_0 + \frac{\beta_0}{\beta_1 - 1}(\beta_1^m - 1) \quad (4)$$

したがって, 式(2), (4)より次式が成立する。

$$a = \frac{1}{\Delta t} \ln \beta_1 \quad (5)$$

$$b = \frac{\beta_0}{\beta_1 - 1} \cdot a \quad (6)$$

いま, 図4に示す様に, 観測結果 (y_1, t_1) , $(y_2, t_2), \dots, (y_m, t_m)$, $t_m - t_{m-1} = \Delta t = \text{Const}$ として決められた変位量の観測結果 $y_1, y_2, \dots, y_m$ を

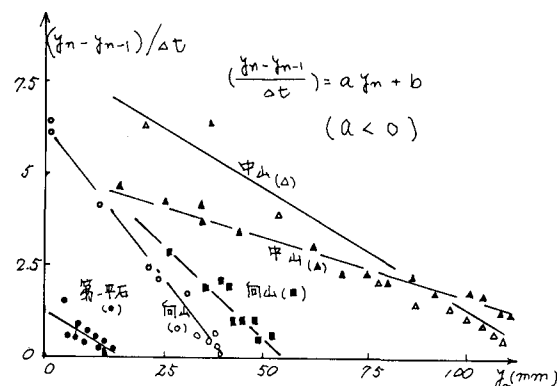


図1 収束型計測例

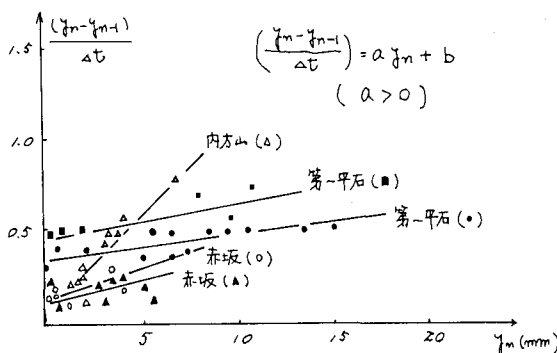


図2 発散型計測例

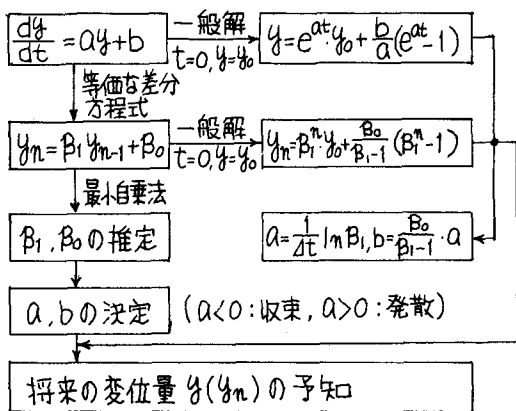


図3 予知法の流れ図

式(3)に代入すれば、最少自乗法から β_1, β_0 が求まる。さらに、式(5)、(6)より、 a, b が求められ、それらを式(1)に代入すれば将来の変位量および変位の性状（収束とか発散）が予測できることになる。

3. 予知法の検討；予知法の精度を検討するため、実際の現場計測例が用意された。図4は変位が収束した現場例であり、図6は途中まで収束し、その後発散に転じた現場例である。とれどれ実線が実測値、破線が計算値である。計算値はある時間まで実測値が入ってきたものとして、その後の変位量を予測した結果である。例えば図5ではデータ数が5, 10, 15, 20, 25個得られたときの将来変位量を予測した結果であり、実測値と比較すれば予知法の精度が理解できる。図5, 6より 予知法は実際の変形性状（収束か発散か）をよく追従でき、その精度は入手されたデータ数が多い程、また予測の時期が近い程高いといえよう。図7は収束傾向を示した数個の計測例に基づいて検討した予知法の精度である。横軸は予測ポイント（予測時期/ Δt ）-（データ数）、縦軸は予知精度 Δd （=計算予知量-実測値）である。図中実線は予知精度の平均値、点線は標準偏差をとれどれ示す。図7より、一般的な傾向として予知変位量は実際の変位量より若干小さく示される。また予測ポイント40あたり（時間を表わせば、最後の観測結果を入力した時点から、 $(40 \times \Delta t)$ 将来時点であり、今、 $\Delta t = 1$ 日とすれば40日後となる）の予知精度は、平均誤差で約-15mm程度、誤差（0~-30mm）の範囲内に入る確率約67%と期待できる。一方、結果は示されていないが、発散傾向を示した計測例に基づく予知精度は、予知計算値が実測値に比べて早期に発散する傾向を示し、その結果、予知計算値が実測値をかなり上回るようになった。以上により提案した予知法はいまだ修正すべき点もあるが、ほぼ実務への適用が可能になったといえよう。

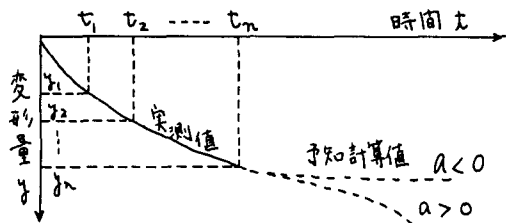


図4 観測結果と予知法への適用

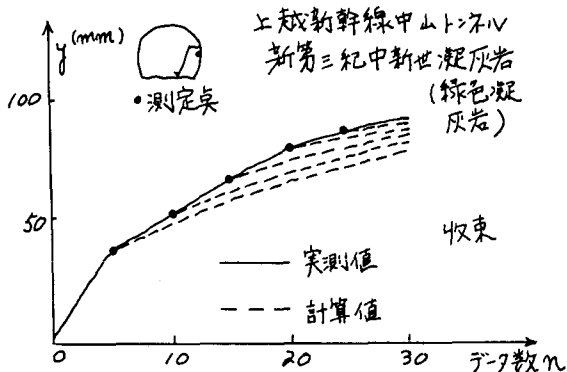


図5 計算予知量と実測値の比較例

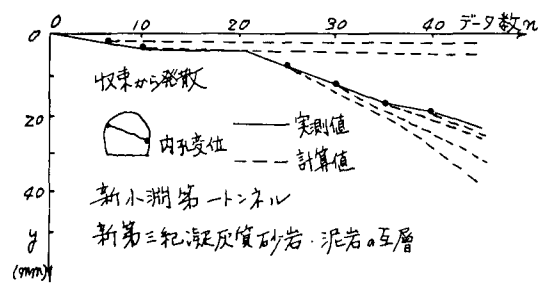


図6 計算予知量と実測値の比較例

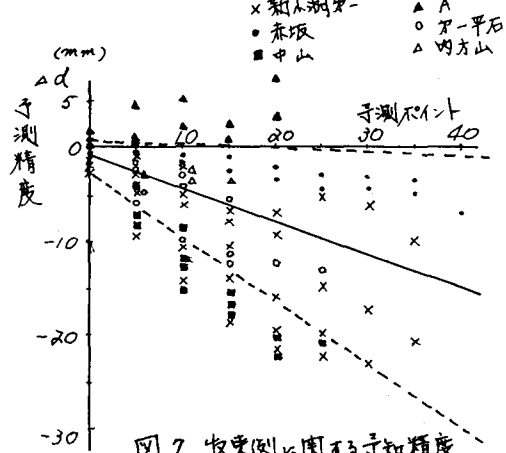


図7 収束例に関する予知精度

る。一方、結果は示されていないが、発散傾向を示した計測例に基づく予知精度は、予知計算値が実測値に比べて早期に発散する傾向を示し、その結果、予知計算値が実測値をかなり上回るようになった。以上により提案した予知法はいまだ修正すべき点もあるが、ほぼ実務への適用が可能になったといえよう。