

(5) NATMにおける変位予測法の適用性

前田建設工業株式会社技術研究所 正会員 関 順一

同 上 中村 敏夫

同 上 正会員 ○岡田 正之

同 上 正会員 三輪 俊彦

1. まえがき

NATMにおける計測管理では日常の坑内観察調査と計測結果にもとづいて、応急対策、支保パターンの修正、施工法の変更などを判断しなければならない。このためには掘削後の地山の挙動を早い時期に把握し変位の収束時期、収束値などを予測し、実測データと対比させながら施工を進めることが重要になる。

一般にトンネル掘削により生じる変位は、切羽距離や経過時間との関数で表わされる場合が多い。本文は内空変位と切羽距離との相関性に着目し、計測データからその関係式を求め早い時期に収束値と収束過程を予測する手法について実施工への有用性を検討したものである。

2. 実施工における計測管理

計測管理では変位量自体を把握することと、変位の収束過程を観察することの両方を行う必要がある。前者では変位量の管理基準値を、後者では変位速度の管理基準値や変形許容範囲を設定することによって実施されている場合が多い。これらのうち、あるトンネル施工で実施した方法について簡単に述べる。¹⁾

図-1は、トンネル掘進に伴う変形挙動の模式図である。図に示すように内空変位は切羽距離との関係で表わすことができ、これにもとづき計測管理を実施した。

変位量の管理基準値は、設定以前に得られた計測データをもとに切羽距離1Dでの変位と上半収束値との間の式(1)で表わされるような1次の関係式から設定した。

$$U_c = a \cdot U_B + b \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 U_c :上半での変位収束値(mm)、 U_B :上半との切羽距離1Dでの変位(mm)、 a 、 b :係数

変位の収束過程の把握については、図-1に示した変位と切羽距離の関係を式(2)に示すような関係式で表現することにより行った。

$$U_i = U_c (1 - e^{-\beta x_i}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 U_i :変位(mm)、 U_c :上半での変位収束値(mm)、 x_i :切羽距離(図-1参照)、 β :収束係数

式(2)に対し各断面の変位曲線のスケールを統一し、比較を容易にするため、変位 U_i を式(1)より求まる予測収束値 U_c に対する変位率 $\alpha (=U_i/U_c \times 100)$ で表わした。事前に得られた計測結果をもとに、収束係数 β の範囲を求め、変形許容範囲として変位管理域を設定した。(図-2)そこで図中に各計測データを逐次プロットすることにより変位挙動に異常があるか否かを判断した。

図-3は変位管理域の適用例である。

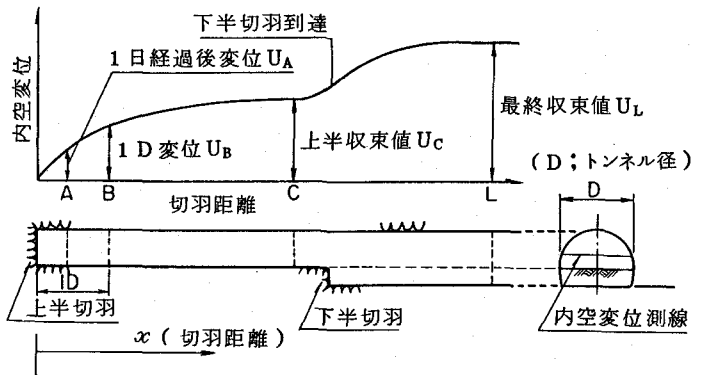


図-1 トンネル掘進に伴う変形挙動の模式図

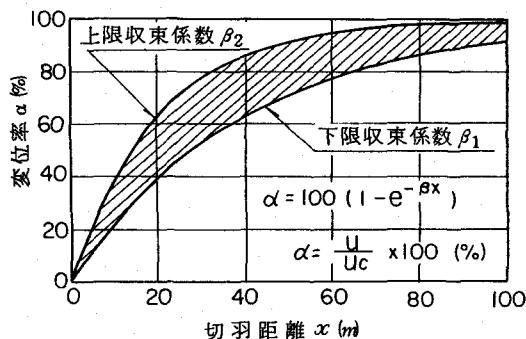


図-2 内空変位の管理域

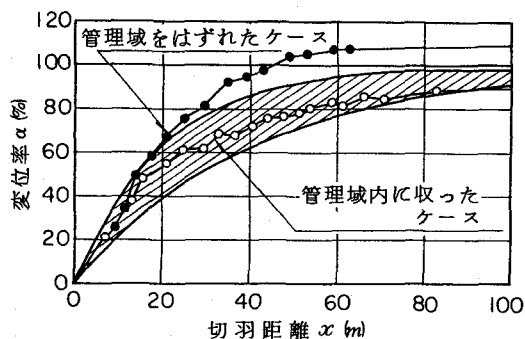


図-3 変位管理域の適用例

ほとんどの断面では図中の○印に示すように、変位は管理域内によく収まり安定した収束状況を示した。このように変位率を用いた変位管理域による方法は、実施工における計測管理法の一つとしてある程度有用であることが認められた。しかし幾つかの断面では、図中の●印のように予測収束値に対し実際の変形が予想以上に大きくなり、変位率が管理域の上限を越える場合が生じた。つまり、予測収束値の精度により変形過程が大きく左右されるため、その精度の良否によっては適切な管理が行えない場合がある。そこで、この欠点を補うために、収束値と収束過程の両者を同時に、しかもできるだけ早い時期に予測するという方法を検討した。以下にその手法と実測データの適用結果について述べる。

3. 予測手法

式(2)で与えられる予測式に対して直接最小二乗近似を行うことにより予測収束値 U_c と収束係数 β を同時に求める。

非線形である条件式(2)を次のように置きかえる。

$$f_i(U_c, \beta) = U_c(1 - e^{-\beta x_i}) - U_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

U_c と β の最初の推定値 U_{c0} 、 β_0 を求め、式(3)を (U_{c0}, β_0) のまわりで Taylor の級数に展開する。ただし、2次以降の項は無視する。

$$f_i(U_c, \beta) = f_i(U_{c0}, \beta_0) + \frac{\partial f_i}{\partial U_c} \bigg|_{U_{c0}, \beta_0} (U_c - U_{c0}) + \frac{\partial f_i}{\partial \beta} \bigg|_{U_{c0}, \beta_0} (\beta - \beta_0) = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{ここで、} \frac{\partial f_i}{\partial U_c} \bigg|_{U_{c0}, \beta_0} = 1 - e^{-\beta_0 x_i}, \quad \frac{\partial f_i}{\partial \beta} \bigg|_{U_{c0}, \beta_0} = U_{c0} x_i e^{-\beta_0 x_i}$$

そこで式(4)は、未知の係数 U_c 、 β について線形となる。したがって線形最小二乗法により U_c 、 β が決まり、それを新たな推定値として再び同様の演算を収束するまで繰返すことにより、最終的な U_c 、 β が計算される。

なお、最初の推定値 U_{c0} 、 β_0 は次の方法で決める。

式(2)において、 $x_i \rightarrow x_{i+1}$ 、 $U_i \rightarrow U_{i+1}$ の関係を Maclaurin の展開式で求めると

$$U_{i+1} - U_{c0} = e^{-\beta_0(x_{i+1} - x_i)} (U_i - U_{c0}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $x_i - x_{i-1} = x_{i+1} - x_i = \Delta x$ ならば式(5)は、

$$(U_{i+1} - U_i) - e^{-\beta_0 \Delta x} (U_i - U_{i-1}) = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

となり、式(6)において最小二乗法で $e^{-\beta_0 \Delta x}$ を求め、 β_0 を決める。次に式(2)の関係から U_{c0} を最小二乗法で求める。以上より求まる U_{c0} 、 β_0 を最初の推定値として式(4)に代入し U_c 、 β を予測する。

以上より、本手法では3箇以上の計測データがあれば U_c と β を予測することができる。

4. 手法の適用性の検討

前章で述べた手法により実測データを用い変位予測を行った例を図-4に示す。データ数が増すにしたがい、つまり掘削切羽が進むにしたがい実測値に対する予測値の精度が向上してゆくことが認められる。図-5に予測収束値と収束係数の切羽距離の増加に伴う誤差の変動を示す。図の例では切羽距離が1 D程度での予測値の誤差は大きいが切羽距離が増すにしたがい誤差が小さくなり、約2.5 D程度はなれた時点では収束値に対し約30%の誤差であることが分る。さらに4 D程度で実測値にほぼ一致している。この例のとおり本手法は切羽距離が大きくなる程、精度の高い予測が可能であるという性質を有している。したがって計測データが増えるにつれ、逐次予測収束値と収束係数(収束傾向)を修正して予測の精度を上げつつ変形挙動を把握することができる。

現場での実測データを用いて本手法の適用性を検討した。検討に用いたデータは道路公団の岩質区分A~Dに相当する4つの岩種のものである。図-6は各岩質区分毎に切羽距離の増加に伴う予測収束値の平均誤差の変動傾向を示したものである。各岩質区分とも切羽距離の増加に伴う予測収束値の誤差が減少していき予測の精度が向上しているのが分る。これより30%程度の誤差内の予測は、切羽距離約2.5 D以内で可能であることが認められ、20%程度の誤差ならば切羽距離約4 Dで予測可能である。ここで必要予測精度は、各現場において変形の大きさや構造物の重要性など多くの要因によって異なる。したがって実際に予測を行う場合には各切羽距離において予測される変位に対して、どの程度の精度で予測する必要があるのかを十分考慮した上で、その信頼性を判断しなければならない。

図-7に岩質区分別に変位が収束した時点での収束係数 β のヒストグラムを示す。 β の分布には岩質区分による傾向のちがいが見られ、岩質が良いほど値が大きくなっている。このことは岩質区分によって変位曲線の収束時期が異なり地山が悪いほど変位の収束時期が遅くなっていくことを示している。図-8に変位が収束した時点での収束係数と実測変位との関係を示す。これは適用したA~Dの各岩質区分に対する収束係数と実測変位とをそれぞれの平均値で表わしたものである。変位は岩質が

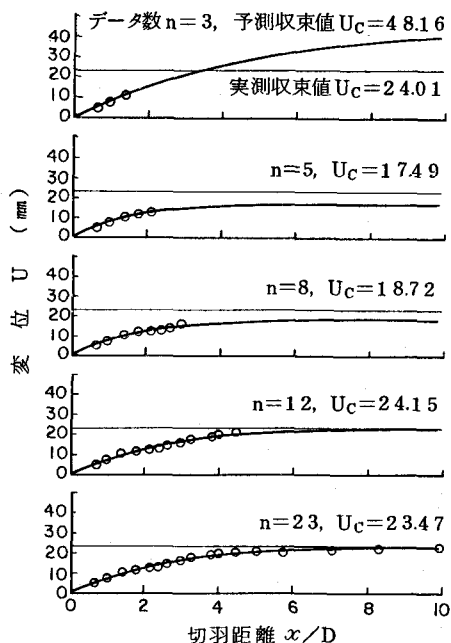


図-4 切羽距離(データ数)の増加に伴う変位予測の例

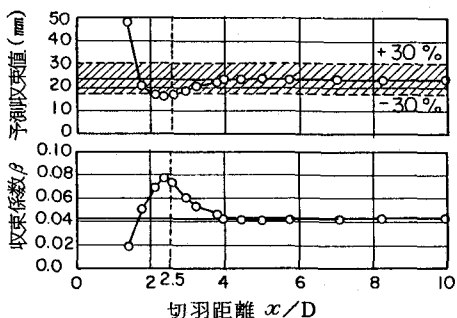


図-5 切羽距離の増加に伴う予測収束値と収束係数の誤差の変動例

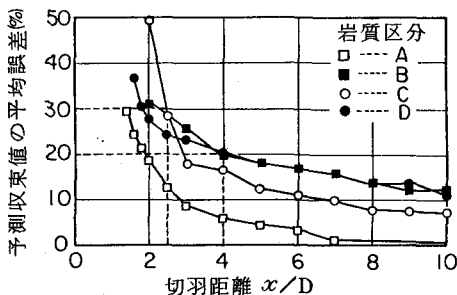


図-6 切羽距離に伴う予測収束値の平均誤差の変動

悪いほど大きくなっていることが分る。また収束係数は実測変位が大きくなるにしたがい小さくなる傾向にある。このような岩質区分別の変位挙動を模式的に表わしたのが図-9である。すなわち岩質のもっとも良いAでは、変位が小さく早い時期に収束する。また岩質が悪くなるにしたがい変位が大きくなり収束が遅くなってゆく傾向がある。このように、本手法を用いることにより変形過程を収束係数と収束値とで定量的に把握でき、岩質区分毎の変形過程の特徴をある程度、明らかにすることが可能であると考えられる。

5. まとめ

本文では、掘削による内空変位の収束値と収束係数（収束過程）を直接予測する手法について種々の岩質区分の現場実測データを用いて検討した。本手法は掘削切羽が進むにしたがい、より精度の高い予測が可能となる。そこで計測データが得られるたびに逐次予測値を修正することにより信頼性を向上させつつ変形挙動を把握することができる。また本手法を岩質区分の異なるデータに適用した結果、その適用性が認められこれにより岩質区分のちがいによる変形過程の傾向がある程度明らかとなった。今後より多くのデータを適用することにより、本手法の有用性を確立してゆくとともに、岩質区分による変形挙動の特性を定量的に明らかにしてゆくことが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 高橋・佐藤・関・岡田：変形の大きいトンネルでの計測管理事例、土と基礎、Vol 2, 1986（投稿中）
- 2) WYLIE, C.R. (富久泰明訳)：工業数学(上)、ブレイン図書出版、1962

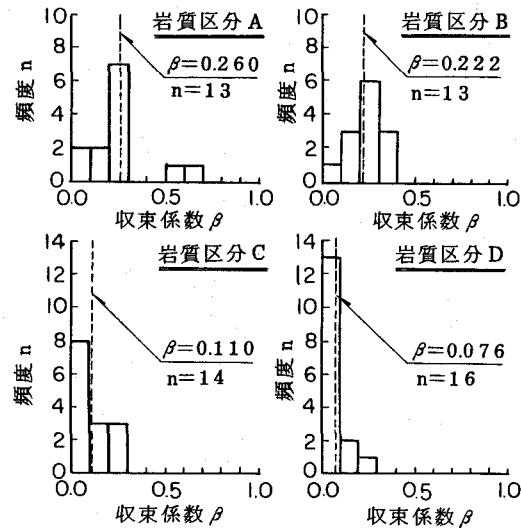


図-7 収束係数のヒストグラム

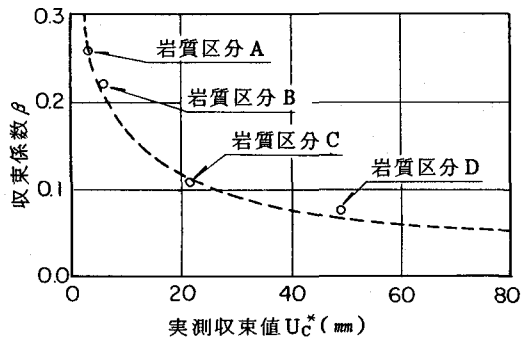


図-8 実測収束値と収束係数

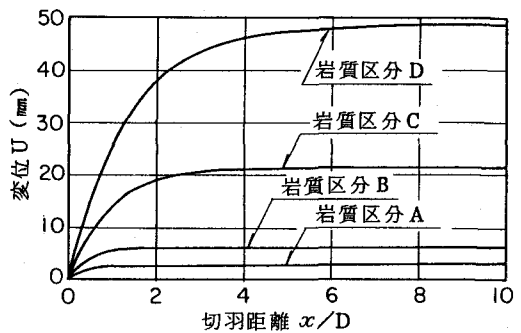


図-9 岩質区分別の変形挙動の模式図

(5) ADAPTABILITY OF METHOD FOR FORECASTING DISPLACEMENT UNDER NATM

by Jun'ichi SEKI, MAEDA CONSTRUCTION CO., LTD

Toshio NAKAMURA do.

Masayuki OKADA do.

Toshihiko MIWA do.

Abstract

From the following equation containing relations between a distance back from tunnel face and a displacement occur thereon by the tunnel excavation, a method of forecasting both ultimate displacement and ultimate coefficient (process of simulation of deformation) in early stage of excavation is shown.

$$U_i = U_c(1 - e^{-\beta x_i})$$

Where, U_i : Displacement (mm)

U_c : Ultimate displacement (mm)

x_i : Distance back from tunnel face (m)

β : Ultimate coefficient

This method has a characteristic that precision of forecasting displacement obtained is improved with the advance of tunnel excavation, and has been practiced even in the tunnels which have different rock classification and found to be satisfactorily utilizable in any cases.

Further, it can somehow clarify the tendency of processing deformation by difference in rock classification.