

(62) トンネル掘削時の現場計測結果に基づく 最終変位の予測法

神戸大学大学院 学生会員 ○進士 正人
神戸大学工学部 正 会 員 桜井 春輔

1. はじめに

トンネルや地下空洞をNATMで施工する場合の特徴は、現場計測の結果に基づいて安全性を確認し、場合によっては設計変更を行ないながら、より安全でかつ経済的に構造物を施工することにある。その特徴を生かすためには、現場計測結果を速やかに、設計・施工にフィードバックしなければならない。そのためには、地山の最終状態を予測し、管理基準との比較を行ない、増しボルト、増し吹き付けなどの対策工が迅速に実行される施工管理システムの確立が望まれる。そこで、本文では、計測断面における現場変位計測結果から、逆解析を行なうことにより現時点での地山の見掛け上の材料定数および、初期応力を求め、その結果から、最終の材料定数及び初期応力を予測し、さらに予測した値を用いて最終の地山の変位状態を推定する方法を提案する(図-1参照)。最終変位状態を予測する方法については、1) 地中の変位増加が指数関数で表わすことができることに着目して、最終状態を予測する方法¹⁾²⁾、2) 統計的に、過去の現場計測データを整理し、初期変位速度と最大変位との相関から最終変位状態を予測する方法³⁾などがある。これらの方法は、取り扱いが簡単であるが、現場計測結果のひとつの計測データだけに注目して最終状態を推定する方法であるため、両方法とも、各測線相互の関連性を考慮できず、従って、トンネル全体の安定性を予測することは難しいように思われる。一方、ここで提案する方法を用いれば、すべての変位計測値を一度に用いて最終状態を推定するため、従来の方法に比較して予測の信頼性が向上する。なお、必要とする解析は、簡単であり、建設現場に設置できる程度のマイクロコンピュータで十分に対応できることが望ましい。このため、著者がすでに提案した「直接逆解析法」プログラム"DBAP/M(Direct Back Analysis Program for Micro computer)"⁴⁾を用いて、計測変位から、地山の材料定数及び初期応力を推定することとした。DBAP/Mは、すでに多くの建設現場において使用されており、計算時間、計算容量、操作性などの面において、十分利用可能であることが実証されている。

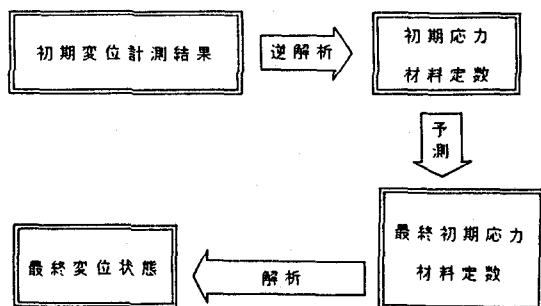


図-1 最終変位予測法の概念

2. 直接逆解析法を用いた最終変位の予測

DBAP/Mによれば、変位計測結果から初期応力パラメータ（初期応力を弾性係数で除した値、すなわち、 σ_{x0}/E 、 σ_{y0}/E 、 τ_{xy0}/E ）を経時的に求めることができる⁴⁾。そして、これらの値を通常のFEM解析等のインプットデータとするならば、現時点でのトンネル周辺の地山のひずみ分布を容易に求めることができる。しかし、このようにして求められる地山のひずみ分布は、測定が行なわれた時点のものであり、ロックボルトや吹き付けコンクリートの妥当性を検討するには不十分である。それらの妥当性は最終のひずみ分布を検討することによって初めて可能となる。そのためには、ある時点に得られた初期応力パラメータから常に、その最終値を予測する必要がある。ここではその方法を提案する。

2. 1 最終初期応力パラメータの予測法

まず、図-2に示すように、ある時間Tにおける初期応力パラメータ速度 $\Delta\sigma/\Delta t$ とTから最終状態までの初期応力パラメータの増加量 $\sigma_f - \sigma$ の間には、次のような関係が成り立つと仮定する。

$$\sigma_r - \sigma = C (\Delta \sigma / \Delta t) \quad (1)$$

ここで、 σ 及び σ_r は、それぞれ時間 T における初期応力パラメータ及び最終初期応力パラメータを表す。なお、ここでは簡単のために初期応力パラメータ σ_{x0}/E 、 σ_{y0}/E 、 τ_{xy0}/E を単に σ と表記してある。また、 C は地質状況、支保状況、トンネル形状等によって定まる時間の次元をもつ定数であり、本文では、“予知定数”と呼ぶ。(1)式を変形すると、次のようになる。

$$\sigma_r = C (\Delta \sigma / \Delta t) + \sigma \quad (2)$$

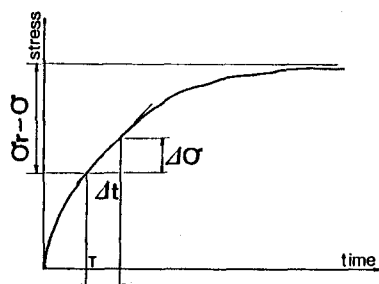


図-2 ある時間 T における初期応力パラメータ速度と初期応力パラメータの最終状態までの増加量

したがって、 C が既知なら、現時点の初期応力パラメータとその速度から最終初期応力パラメータを求めることができる。なお、計測開始直後には $\sigma=0$ であるため最終初期応力パラメータを予測する場合は次式によればよい。

$$\sigma_r = C (\Delta \sigma / \Delta t) \quad (3)$$

2. 2 予知定数の検討

Aトンネル(2車線道路トンネル)のある計測断面における地中変位計測の結果から初期応力パラメータの経時変化を求め、各測定時間に対する $(\Delta \sigma / \Delta t)$ と $(\sigma_r - \sigma)$ の関係を両対数紙上に示すと図-3のようになる。なお、ここでは初期応力パラメータをその主値 σ_1 、 σ_2 で整理した。図において、勾配を1として、回帰式を求め、予知定数を推定すると次のようになる。

$$\text{平均: } C = 6.271 \quad (4)$$

そして、回帰式の95%信頼区間を考えれば、次のようになる。

$$\text{上限: } C = 7.842 \quad (5)$$

$$\text{下限: } C = 5.015$$

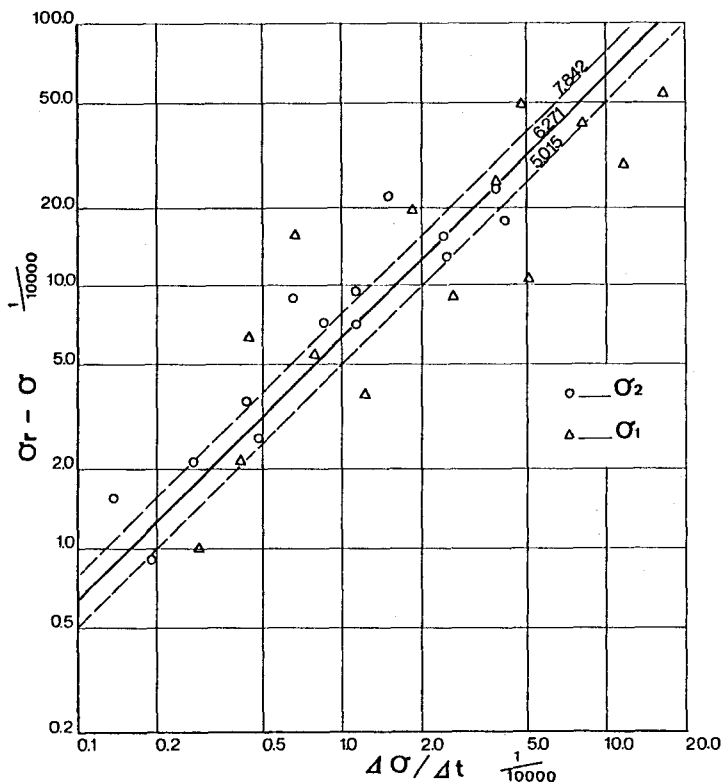


図-3 Aトンネル地中変位計測結果を用いた $\Delta \sigma / \Delta t$ と $\sigma_r - \sigma$ との関係

図から明らかなように、予知定数は、主初期応力パラメータの主値に関係なく、ほぼ一定となる。

次に、Aトンネルの他の計測断面において実施された内空変位計測結果および、天端沈下計測結果に対してDBAP/Mにより初期応力パラメータの経時変化を求め、計測開始後1日目の初期応力パラメータ速度 $(\Delta \sigma / \Delta t)$ と、最終初期応力パラメータ (σ_r) との関係で整理すると図-4のようになる。この図から、予知定数

は、両対数紙上で勾配を1として次のように求められる。

$$\text{平均: } C = 6.18 \quad (6)$$

そして、回帰式の95%信頼区間を考えれば、次のようになる。

$$\text{上限: } C = 8.05, \text{ 下限: } C = 4.74 \quad (7)$$

なお、吉川ら³⁾によれば、複線断面ベンチ工法の場合、切羽通過後数日間に生じる一日当たりの最大変位速度 u_{vmax} と最大変位量 u_{max} との相関関係は、次式のように与えられている。

$$\text{平均: } u_{max} = 7.24 u_{vmax} \quad (8)$$

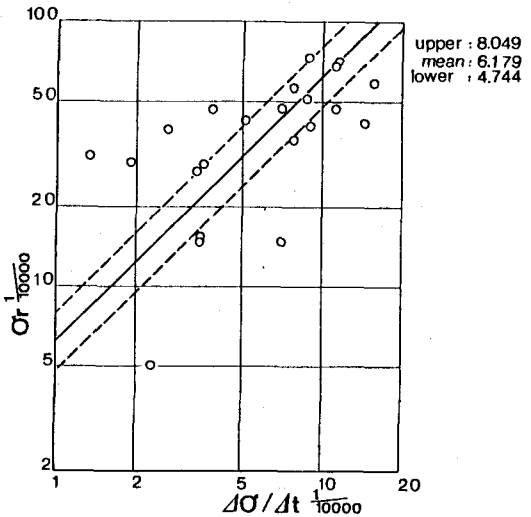


図-4 Aトンネル内空変位計測結果を用いた $\Delta\sigma/\Delta t$ と σ_r との関係

吉川らの、最大変位速度と最大変位量は、本文の初期応力パラメータ速度及び最終初期応力パラメータに対応する。また、計測開始後一日目に最大変位速度が生じることが多いことより、吉川らが提案している(3)式は、ここで述べている(6)式とはほぼ同じ意味であるといえる。よって、予知定数の平均値Cは、Aトンネルの結果及び、吉川らの結果より、2車線トンネルのベンチ工法の場合、ほぼ6から8であることがわかる。

以上で述べたように、予知定数が求められると(2)式によって最終の初期応力パラメータを予測することができる。そして、この値をインプットデータとして、通常の解析を行なうことにより直ちに、最終の変位及び、ひずみ分布を求める事ができる⁴⁾。さらに、これを管理基準値(通常は、限界ひずみ⁴⁾)と比較することにより支保工の適切な評価が可能となる。

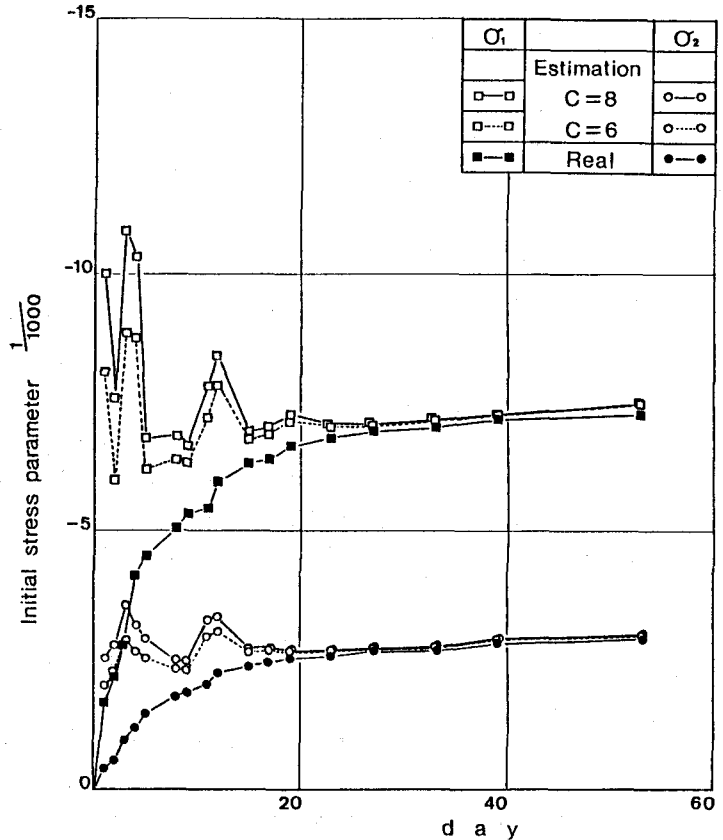


図-5(a) Aトンネル地中変位計測結果を用いた最終初期応力パラメータの予測

3. Aトンネルへの適用例

Aトンネルにおいて、ある時間Tにおける地中変位の計測結果からDBAP/Mによって、初期応力パラメータを求め、その値と増加の速度から(2)式によって最終初期応力パラメータの予測を行なった。その結果を、

図-5(a)、(b)に示す。図(a)において□、○印の点線及び実線は、予測定数を、それぞれ $C=8$ 及び、 $C=6$ とした時における最終初期応力パラメータの予測結果である。また、参考までに、各測定時間における初期応力パラメータを■、●印実線で示した。なお、ここで、初期応力パラメータは、その主値 $\langle \sigma_1, \sigma_2 \rangle$ と、その最大値のX軸からの傾き $\langle \phi \rangle$ によって示してある。図(b)から ϕ は、経時的に変化しないことが明らかとなったため、ここではこれを一定とした。図から明らかのように、最終初期応力パラメータの予測値は、計測開始後数日間、かなりばらつく。しかし、約5日目以降からは、かなりの精度で最終初期応力パラメータの予測が可能となる。

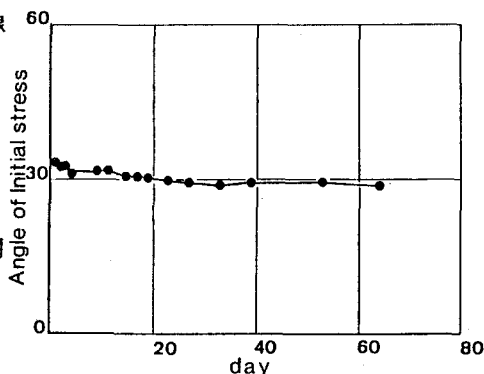


図-5(b) 主軸の傾きの経時的变化

図-6は、上半切羽通過53日後における、地中変位計測(△印実線)とDBAP/Mによる計算変位(○印実線)との比較を示す。図から明らかのように、両者は、比較的よく一致している。なお、ここでの解析は全てマイクロコンピュータNEC PC-9801によって行ない、1ケースあたりの所用計算時間は約2分であった。

4. おわりに

本研究では、直接逆解析法に基づきある時間Tにおける変位計測の結果から、マイクロコンピュータを用いて最終初期応力パラメータの予測方法を提案した。そして、実際のトンネルを対象として、予定定数Cを求め、さらに、適用例によって、早期の計測値から最終初期応力パラメータが十分推定できることを示した。

このようにして、最終初期応力パラメータが求められると、それを用いて地山の最大ひずみ分布が予測でき、従って、適正な支保工の評価が可能になる。

最後に、種々の御援助を賜った鹿島建設株式会社 前田建設工業株式会社 京滋バイパス宇治トンネル東工事共同企業体所長 安井 真三氏に心から感謝の意を表します。

参考文献

1. 近藤 達敏 「NATM工法によるトンネル掘削における変位予測」応用地質調査事務所年報No. 1 pp. 229-236、1979.
2. 斎藤 迪孝 「斜面崩壊発生時期の予知に関する研究」、鉄道技術研究所報告、No. 626, pp. i-53, 1968.
3. 吉川 恵也、朝倉 俊弘、日吉 直、遠藤 真一 「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講演論文集pp. 220-224、1983.
4. Sakurai, S. and Shinji, M., A monitoring system for the excavation of underground openings based on microcomputers, Proceedings of ISRM for Design and Performance of Underground Excavations, Cambridge, pp. 471-476, 1984.

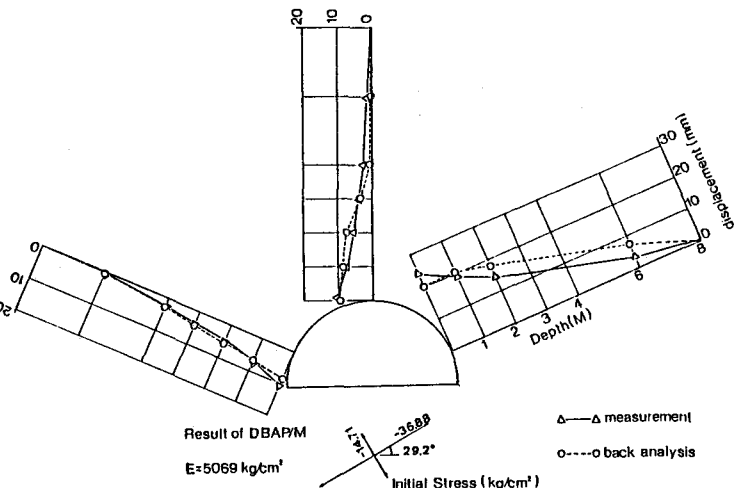


図-6 計測変位とDBAP/Mによる計算変位の比較

(62) A method of forecasting ultimate displacements around a tunnel
by using field measurement data in early stage

By M. Shinji*
S. Sakurai**

Summary

At the construction of tunnels and underground powerhouses, it must be emphasized that the feedback of field measurement data to design and execution of structures is of primarily importance. Nevertheless, no reliable method of feedback has been developed yet in practical monitoring system.

This paper deals with a method of forecasting ultimate displacements around underground openings from field measurement data in early stage. The method consists of two phases. The first is a back analysis of measured displacements in which the value called "normalized Initial stress" is obtained. The second phase is a forecast of ultimate value of normalized initial stress from its value in early stage. We reveal that the velocity of normalized initial stress is proportional to the remainder of normalized initial stress. Therefore, the following equation is proposed.

$$\sigma_r = C (\Delta\sigma/\Delta t) + \sigma$$

where σ and σ_r are the present and ultimate value of normalized initial stress, respectively. $\Delta\sigma/\Delta t$ is the velocity of normalized initial stress at present. C is constant depending on geology, tunnel shape and support measures. Considering previous field measurement data, the constant C ranges from 6 to 8.

A case study on UJI Tunnel shows that the proposed method has a good accuracy for forecasting the ultimate value of normalized initial stress. This then provides the maximum displacement and the maximum strain distributions around tunnel.

* Graduate Student

** Professor

Department of Civil engineering Kobe University