

不連続岩盤の変位挙動予測のための逆解析法

A back analysis method for predicting deformational behavior of discontinuous rock mass

寺戸秀和*・垣原裕**・清水則一***・中川浩二****

Hidekazu TERATO, Hiroshi KAKIHARA, Norikazu SHIMIZU, Koji NAKAGAWA

ABSTRACT: This paper describes a back analysis method of measured displacements for predicting deformational behavior of discontinuous rock mass. The method is formulated by the adaptive filtering combined with the Backward Discontinuous Deformation Analysis (DDA). The Backward DDA is used to derive the observation equation, and the governing equation of displacements is adopted as the state equation in this method. The final deformational behavior of rock mass is predicted from measured displacements and the present deformational behavior is also estimated. In order to verify this method, numerical simulations are conducted for an underground wall and a slope stability problem.

1. はじめに

不連続岩盤の解析手法は、これまでに数多く提案されている¹⁾。それらの多くは、入力値として岩盤基質部と不連続面の力学定数および力学的・幾何学的境界条件を与える必要がある。そのような条件を適切に与えることができれば信頼性の高い解析結果を得ることができるが、実際に原位置における岩盤に対してそのような条件を精度良く求めることは困難なことが多い。そのため、実際の挙動と解析によって予測した挙動が一致しないことがしばしばある。そのような背景から、岩盤構造物の施工においては、現場計測を行うことにより施工中あるいは施工後の安全管理を行うことが一般的となっている。通常の現場計測では、比較的精度が高く容易に実施できる変位計測が行われており、計測変位をより積極的に利用した解析法を考えることは、不連続岩盤の挙動管理を行う上で重要であると思われる。

そこで、筆者らは変位計測結果を利用した不連続性岩盤の挙動の推定方法を提案した²⁾。この手法では、Shiらの提案した Backward DDA (Discontinuous Deformation Analysis)^{3), 4)}を用いている。オリジナルの Backward DDA は、ある時点で計測した変位を用いてその時点における岩盤ブロックの変位挙動を逆算して推定するものである。本方法では、時々刻々計測される変位から現状のみならず、将来の岩盤ブロックの変位挙動をも推定しようとするものである。そのためにこの手法では、適応フィルタリングを用いる。また、この手法は不連続面の位置と方向（幾何学的境界条件）は解析条件として必要であるが、岩盤基質部および不連続面の力学定数ならびに外力（力学的境界条件）は必要としないという Backward DDA の長所を受け継ぐと共に、岩盤ブロックの経時的变化を支配するパラメータも同時に得られる特徴がある。

2. 目的と仮定

現在、現場施工や施工後の安全管理のために、現場計測を行うことが一般的になっている。その中でも比較的容易に精度の高い計測が実現できることから変位計測が行われることが多い。また、岩盤の不連続面の調査も盛んに行われており、計測変位とあわせて岩盤の幾何学的な情報を集めることが可能である。一方、岩盤の応力や不連続面の力学定数など力に関する情報を得ることは、幾何学的な情報を得ることよりも困難な場合が多いようである。このような背景から、本研究では幾何学的な情報をより積極的に利用する解析方法を提案することを目的とする。ここでは不連続面で囲まれた岩盤ブロックの初期の幾何学配置が与えられ

*	正会員	修 (工)	山口大学助手	工学部社会建設工学科
**		修 (工)	(株) オオバ	
***	正会員	博 (工)	山口大学助教授	工学部社会建設工学科
****	正会員	工博	山口大学教授	工学部社会建設工学科

るという前提のもと、不連続性岩盤の変形挙動を計測変位のみから経時的に推定し、さらに最終的な変形状態を予測する方法を提案する。

本提案手法における仮定を以下に示す。

- ① 岩盤は不連続面で囲まれたブロックの集合体と考える、
- ② 岩盤ブロック内は連続体であり、生じるひずみは微小とする、
- ③ 岩盤ブロックの剛体運動および岩盤ブロック内のひずみは、時間の経過とともに単調に増加するクリープ挙動を示すものとする。

3. 提案手法の定式化とその解法

3.1 Backward DDA の概要

不連続面に囲まれた岩盤ブロックの変位 $\bar{F}$ は、二次元問題の場合、微小ひずみおよびブロック内でのひずみを一定と仮定すると、

$$\bar{K}D = \bar{F} \quad (1)$$

で与えられる^{3),4)} (図-1 参照)。ここで、 $\bar{K}$ はブロックの形状と計測点、 $\bar{F}$ は計測変位から与えられるマトリックスおよびベクトルである。 $\bar{K}$ 、 $\bar{F}$ が既知となれば、ブロックの変形挙動を表すパラメータ D (変形パラメータと呼ぶ) は式(1)を用いて次のように求められる。

$$D = (\bar{K})^{-1} \bar{F} \quad (2)$$

D が得られれば、各ブロックの任意点の変位が計算できる。

3.2 変形パラメータの状態方程式

2. に示した3番目の仮定から、岩盤ブロックの剛体運動とひずみは経時的に収束するクリープ挙動を示すと考え、変形パラメータは定係数の線形常微分方程式で表される。その常微分方程式を離散化すると、ある時刻 $t (= \tau \Delta t)$ における変形パラメータ D_t の増分 X_t と、 $t + \Delta t$ における増分 $X_{t+\Delta t}$ の関係は次のように表される。

$$X_{t+\Delta t} = B(\theta)X_t \quad (3)$$

ただし、 θ は変形パラメータ D の時間推移を特徴づけるパラメータで、クリープパラメータと呼ぶことにする。

3.3 計測変位に対する観測方程式

ある時刻 t (τ ステップ目) における岩盤ブロックの挙動に対して式(1)を適用したものと、 $t - \Delta t$ ($\tau - 1$ ステップ目) に対して式(1)を適用したものの差をとり、観測誤差を考慮すると次式を得る。

$$\bar{V}_t = C_t X_t + V_t \quad (4)$$

ただし、 $\bar{V}_t = \bar{F}_t - \bar{F}_{t-1}$ 、 $C_t = \bar{K}_{t-1}$ である。また V_t は観測誤差である。

3.4 システム方程式

ここで、岩盤ブロック内の計測点において一定の時間間隔 Δt 毎に計測される変位から、各岩盤ブロックの変形パラメータとクリープパラメータを逆解析によって推定することを考える。それには、状態方程式(3)と観測方程式(4)を連立させて解けばよい。

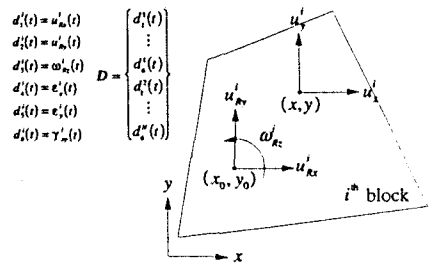


図-1 岩盤ブロックの変形パラメータ

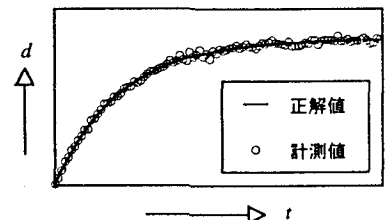


図-2 変形パラメータの正解値と計測値

$$\begin{cases} \hat{X}_{t+1} = B(\theta) \hat{X}_t \\ \hat{Y}_t = C_t \hat{X}_t + V_t \end{cases} \quad (5)$$

式(5)は、式の形から X_t だけでなく係数マトリックス $B(\theta)$ に含まれる θ を同時に推定する問題になっており、適応フィルタリングと呼ばれる式の形となっている。式(5)に対して拡張カルマンフィルタのアルゴリズムを適用すると、 X_t と θ は次式で求められる。

$$\begin{cases} \hat{Z}_{t/t} = \hat{Z}_{t/t-1} + K_t [\hat{Y}_t - C_t^T \hat{Z}_{t/t-1}] \\ Z_t = \{X_t^T \theta_t^T\}^T \\ \hat{Z}_{1/0} = \bar{Z}_0 \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 K_t はカルマンゲインである。そして、式(6)で求められる X_t , θ_t から最終変位が予測される²⁾。

4. 数値シミュレーション

前章で提案した逆解析手法の妥当性を確認するために数値シミュレーションを行った。この手法に必要な入力データは、ブロックと不連続面の形状および計測変位である。そこで適当な岩盤ブロックを設定し、計測変位については次のようにして求めた。まず、真の変形パラメータ D の各成分 $d_j^i(t)$ (図-1 参照) が次式で表されるとする。

$$d_j^i(t) = d_j^i(\infty) (1 - e^{-t/T_j}) \quad (7)$$

ただし、 T_j は遅延時間で、 $T_j = \theta_j^i \Delta t / (1 - \theta_j^i)$ である。式(7)で得られる各観測日数における変位を真の変位とし、この値に計測誤差として適当な標準偏差を与えて得られる値を計測変位として (図-2 参照) 数値シミュレーションを行った²⁾。

(1) 空洞壁面の岩盤ブロックモデル

図-3 に示すような空洞壁面を想定し、岩盤ブロックの変形挙動を推定する解析を行った。このシミュレーションにおいて、ブロック1は不動、ブロック2および3は剛体平行移動のみ生じるとして、真の変形パラメータの収束値をブロック2では $u_{Rx}^1(\infty) = 3.0\text{cm}$, $u_{Ry}^1(\infty) = -2.5\text{cm}$, ブロック3では、 $u_{Rx}^2(\infty) = -3.5\text{cm}$ と設定した。これは、ブロック2がブロック1の上面に沿って空洞内空へ押し出す変形を想定したものである。なお、他の変形パラメータの真の値は0としている。一方真のクリープパラメータは、 $\theta_1^1 = \theta_2^1 = \theta_3^1 = 0.938$ とした。計測変位は先に示した方法で与えており、ここでは計測誤差 (標準偏差) として $1/10\text{mm}$ を与えている。また、本ケースにおいては、各ブロックにおいて6個の変形パラメータおよび3個のクリープパラメータを独立した未知パラメータとしており、したがって、3個のブロックで構成される

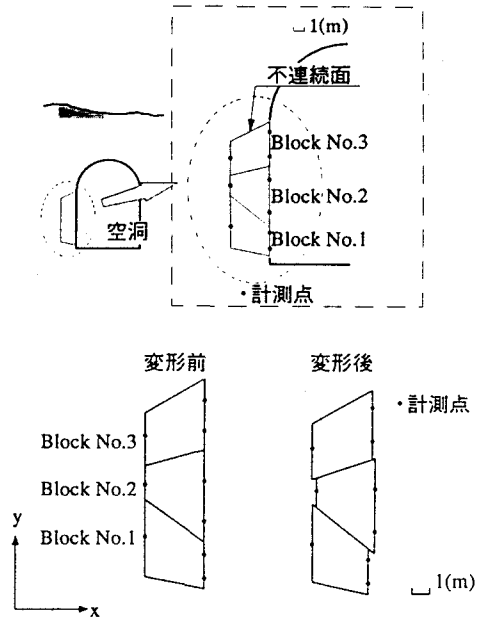
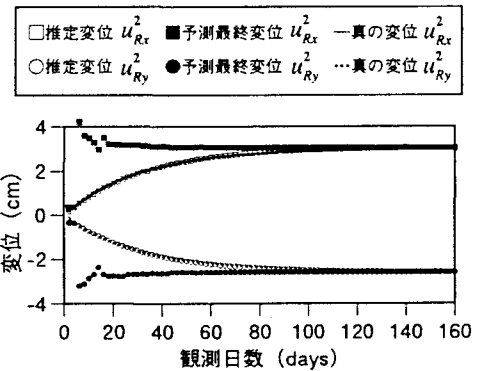
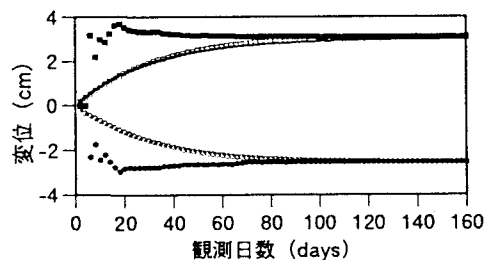


図-3 空洞壁面のシミュレーションモデル



(1) 標準偏差 = $1/10\text{mm}$ ($\theta_{1,v,0}^i = 0.5$)



(2) 標準偏差 = $1/10\text{mm}$ ($\theta_{1,v,0}^i = 2.0$)

図-4 剛体平行移動の推定値とその収束値の予測状況 (空洞壁面モデル)

本ケースにおいては全体として求めるべき未知パラメータは27個となる。

図-4 は、クリープパラメータの初期値を 0.5 および 2.0 とした場合の、ブロック 2 の剛体平行移動の推定および収束値の予測状況である。いずれの初期値に対しても、観測日における変形パラメータの推定値は観測開始直後からよい推定値を与えており、最終収束値の予測値は観測開始から 20~30 日頃には、真の収束値を数%の誤差で求めている。

図-5 は、各計測時刻において推定した変形パラメータとその予測収束値を用いて、式(1)よりブロックの変形状態を求めたものである。図において、左の欄はブロックの初期形状に観測日までに生じた変位を棒線で示したものの、中央の欄は観測日において推定した変形状態、右の欄はその観測日に予測したブロックの最終変形状態（実線）と真の最終変形状態（破線）を比較したものである。この図から、当初は十分な精度で最終変形状態が予測されていないが、40 日にはほぼ正確に最終状態が予測されているのがわかる。

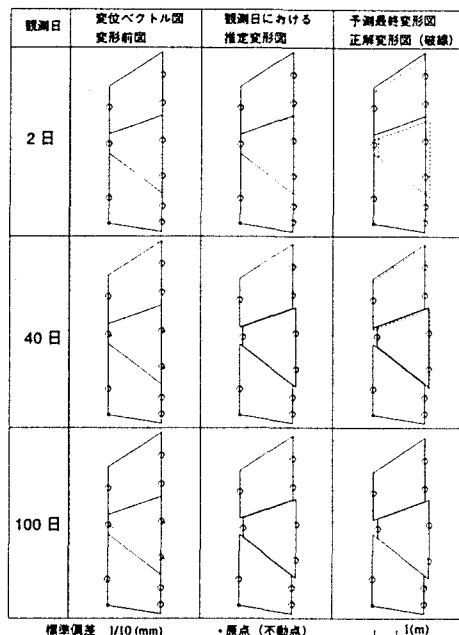


図-5 ブロックの変形状態の推定と予測（空洞壁面； $\theta_{j,1/0}^i = 0.5$ ）

(2) 斜面の岩盤ブロックモデル

次に図-6 に示すような Shi ら³⁾の取り上げた斜面の岩盤ブロックのすべりを想定した問題を解析する。このシミュレーションではブロック 1 は不動とし、ブロック 2, 3, 4 は剛体平行移動をするものと仮定する。真の変形パラメータの収束値は、ブロック 2 では $u_{kx}^2(\infty) = -2.3\text{cm}$, $u_{ky}^2(\infty) = -2.2\text{cm}$, ブロック 3 では $u_{kx}^3(\infty) = -2.5\text{cm}$, $u_{ky}^3(\infty) = -4.1\text{cm}$, ブロック 4 では $u_{kx}^4(\infty) = -1.2\text{cm}$, $u_{ky}^4(\infty) = -0.45\text{cm}$ とする。また、クリープパラメータはいずれのブロックの変形パラメータについても共通の値 $\theta_j = 0.938$ とした。なお、本ケースにおいても (1) の空洞壁面のモデルと同様に、各ブロックの 6 個の変形パラメータおよび 3 個のクリープパラメータを独立した未知パラメータとしており、したがってブロック数が 4 個の本ケースでは、全体として求めるべき未知パラメータは 36 個となる。

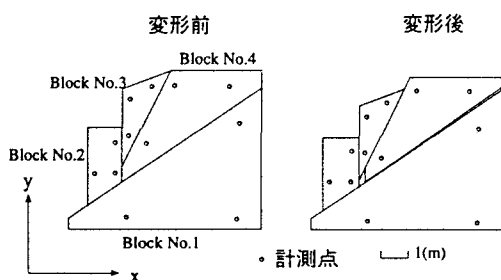


図-6 岩盤斜面のブロックすべりモデル

図-7 は、計測誤差 $\sigma_j = 1/10\text{mm}$ の場合の各ブロックの剛体平行移動の推定と、それぞれの収束値の予測状況である。なお、クリープパラメータの初期値は 2.0 とした。観測日における剛体平行移動の推定値は観測開始直後からよい推定値を与えており、最終収束値の予測値も観測開始から 20~30 日頃には、真の収束値を数%の誤差で求めている。クリープパラメータについても、早い段階で収束する結果を得ている。

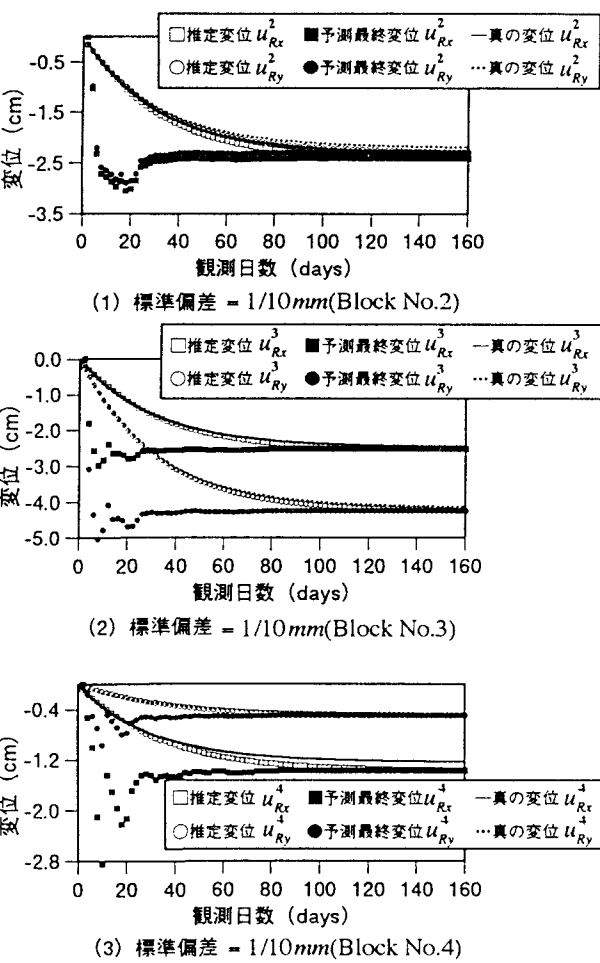
図-8 は、本手法によって得られた変形パラメータの推定値を用いて、図-5 と同様に観測日における変形状態とその時点で予測される最終変形の状態を比較したものである。本ケースにおいても、当初は十分な精度で最終変形状態が予測されていないが、40 日にはほぼ正確に最終状態が予測されているのがわかる。

5. 結論

本研究では不連続岩盤を対象とし、経時的に得られる計測変位から現在の岩盤の挙動と、最終的な岩盤の挙動を推定する逆解析法を提案し、その妥当性を確認するために数値シミュレーションを行った。以下に

提案手法の特徴と数値シミュレーションより得られた結果を取りまとめる。

1. 本研究では、(1)岩盤を不連続面で囲まれた集合体、(2)岩盤ブロック内に生じるひずみは連続で微小、(3)変形は単調増加で最終的には収束する挙動、と仮定した。
2. 提案手法は一種の逆解析であり、岩盤の物性等の力学的な条件を用いずに解析を行うことができる。
3. 提案手法の妥当性を確認するために、空洞壁面や岩盤斜面を対象とした基本的な数値シミュレーションを行った。その結果、適切な精度での計測が可能ならば精度のよい予測結果が得られることが分かった。

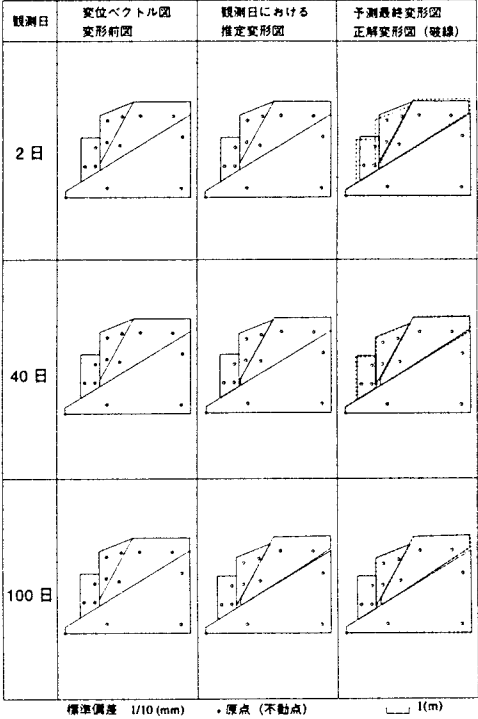


図一七 剛体平行移動の推定とその収束値の予測状況（岩盤斜面； $\theta_{j,1/0}^i = 2.0$ ）

謝辞：本研究では、永井哲夫博士（青木建設）が作成された DDA のプログラムを一部利用させて頂いた。また、本研究の一部は、（財）鹿島学術振興財団の研究助成を受けて行った。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 桜井春輔・清水則一：不連続性岩盤の解析手法の現状、土と基礎、40-11(418), pp.39-44, 1992.
- 2) 清水則一・垣原裕・寺戸秀和・中川浩二：不連続性岩盤の変形挙動予測のための計測変位を用いた一逆解析法、土木学会論文集、No.547/Ⅲ-36, pp.11-22, 1996.
- 3) Shi, G. and R.E. Goodman: Two dimensional discontinuous deformation analysis, Int. J. Numerical and Analytical Method in Geomechanics, 9, pp.541-556, 1985.
- 4) Shi, G.: Block system modeling by discontinuous deformation analysis, Computational Mechanics Publication, 1993.



図一八 ブロックの変形状態の推定と予測（岩盤斜面； $\theta_{j,1/0}^i = 2.0$ ）