

岩盤の強度定数を求めるための簡易逆解析手法

A BACK ANALYSIS METHOD FOR DETERMINATION OF ROCK MASS STRENGTH PARAMETERS

芥川真一*・山下 涼**

Shinichi AKUTAGAWA and Ryo YAMASHITA

A simple back analysis scheme for determining strength parameters of a rock mass is presented. General mathematical methods for determining any given sets of unknown parameters have been available for years; however, a degree of freedom allowed in a model assumption tends to be a little restrictive. The method proposed herein treats a nonlinear problem as a linear one by employing fictitious loads equivalent to nonlinear strain increment. An iterative scheme for obtaining a best set of strength parameters is used in which a search is made to find an optimized set of parameters minimizing discrepancy between measured and computed displacements. A point is made at last that the method can be extended to construct a more general scheme by which a yield criterion may be back-analyzed.

Key Words: back analysis, strength parameters, nonlinear problem, yield function

1. はじめに

地下構造物の設計、施工において、地山の力学的特性を把握することは重要だが、それを施工前に把握することは困難である。そこで、施工中に得られる現場計測結果を評価し、設計・施工にフィードバックする情報化施工が行われている。その際に用いられているのが逆解析^{例えば1)}である。地山が非線形な変形挙動を示す場合にその変位場を同定する手法^{みづ)}などもこれまでに提案されている。しかし、変位場の同定に集中した場合、地山の特性としての強度定数などを直接求める事が出来ないため、逆解析の成果を効率よく予測解析に結びつけることが困難であった。そこで、本研究では、現場で得た計測結果から原位置岩盤の強度定数を簡便な方法で求められるようにすることを目的として、簡易逆解析手法を開発し、数値実験によりその動作性を確認した。

2. 解析の方法

岩盤の初期応力、弾性定数などは一般的な逆解析手法¹⁾、あるいは原位置試験などで求められていると仮定する。それらのデータを用いて順解析を行い、予測と実測結果の差から強度定数(今回は、モール・クーロンの破壊基準を用いたので、粘着力と内部摩擦角)を同定する方法を構築する。ある破壊基準があるならば、実際、応力は破壊基準を超えない。そこで、解析領域を仮に弾性体として応力解析を行い、超過している応力を修正し(図-1)、修正された応力分(図-2)を等価な節点力に変換して弾性体としての地山に作用させる。具体的には、次のような手順を採用する。

* 正会員 Ph. D. 神戸大学工学部建設学科(土木系教室)

** 学生会員 学士(工学) 神戸大学大学院自然科学研究科建設学専攻

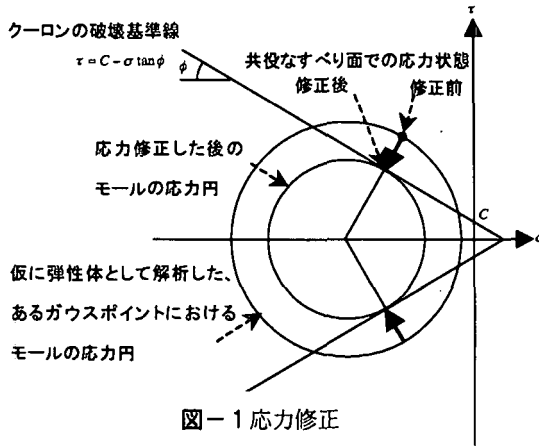


図-1 応力修正

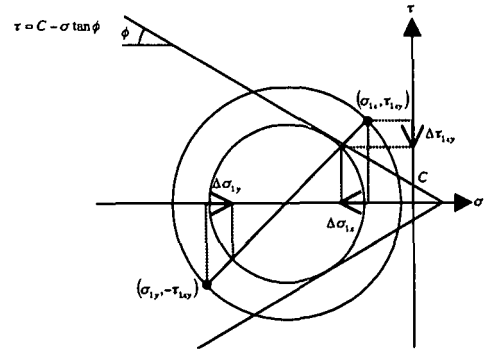


図-2 応力修正に用いたベクトル

まず、弾性順解析を行い、仮に弾性体としての各ガウスポイントの応力 $\sigma_1 = \{\sigma_{1x}, \sigma_{1y}, \tau_{1xy}\}^T$ を求める。次に粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ を仮定して破壊規準を設定し、応力 σ_1 が破壊規準を超過しないように修正する(図-1)。

修正するのに用いた分の応力 $\Delta \sigma_1 = \{\Delta \sigma_{1x}, \Delta \sigma_{1y}, \Delta \tau_{1xy}\}^T$ (図-2) を(1)式で等価な節点外力 Δf_1 におきかえる。

$$\Delta f_1 = - \int_V B^T \Delta \sigma_1 dV \quad (1)$$

ここで、 V は解析領域、 B はひずみ-変位マトリックスである。この Δf_1 を用いて、(2)式を解くことによって変位の増分 Δu_1 が得られる。

$$\Delta f_1 = K \Delta u_1 \quad (2)$$

ここで、 K は全体の剛性マトリックスである。この Δu_1 より、各要素の節点変位の増分 Δu_{elem1} を抜き出し、(3)式でひずみの増分 $\Delta \epsilon_1$ を求める。

$$\Delta \epsilon_1 = B \Delta u_{elem1} \quad (3)$$

また、ここで求めたひずみ $\Delta \epsilon_1$ は、弾性成分 $\Delta \epsilon_{e1}$ と非弾性成分 $\Delta \epsilon_{p1}$ とから成っている。応力に影響を与えるのは、弾性成分 $\Delta \epsilon_{e1}$ である。先ほど修正に使った応力 $\Delta \sigma_1$ より、(4)式を用いて塑性により生じた非弾性ひずみ増分 $\Delta \epsilon_{p1}$ を求め、(5)式でひずみの弾性成分 $\Delta \epsilon_{e1}$ を求める。

$$\Delta \epsilon_{p1} = D^{-1} \Delta \sigma_1 \quad (4)$$

$$\Delta \epsilon_{e1} = \Delta \epsilon_1 - \Delta \epsilon_{p1} \quad (5)$$

これより、(6)式で応力の増分 $\Delta \sigma_1'$ を求める。

$$\Delta\sigma_1' = D\Delta\varepsilon_{e1} \quad (6)$$

ここで、 D は応力-ひずみマトリックスである。 σ_1 に、この $\Delta\sigma_1'$ を加えたものを σ_2 として、破壊基準を応力状態が超過していれば、もう一度応力修正を行う。修正に用いた応力 $\Delta\sigma_2$ から、(1)～(6)式を用いて、 $\Delta\sigma_2'$ を求め、 σ_2 に加えて、 σ_3 とする。このように応力修正と、(1)～(6)式を、 σ_n が、破壊基準を超過しなくなるまで繰り返す。この行程が終わったら、(7)式により、この解析で得られた変位を求める。

$$u = u_1 + \sum_{k=1}^n \Delta u_k \quad (7)$$

ここで、 u_1 は、最初の弾性解析によって得られた変位である。こうして求めた変位と、計測によって得られた変位との誤差を求めておく。

このように、粘着力、内部摩擦角の考えられる範囲における可能な組み合わせに対して誤差を求め、そのうち最も誤差の小さいもの、すなわち、最もよく計測結果の変位場を再現する強度定数を原位置岩盤の代表値として採用する。この解析のフローチャートを図-3に示す。

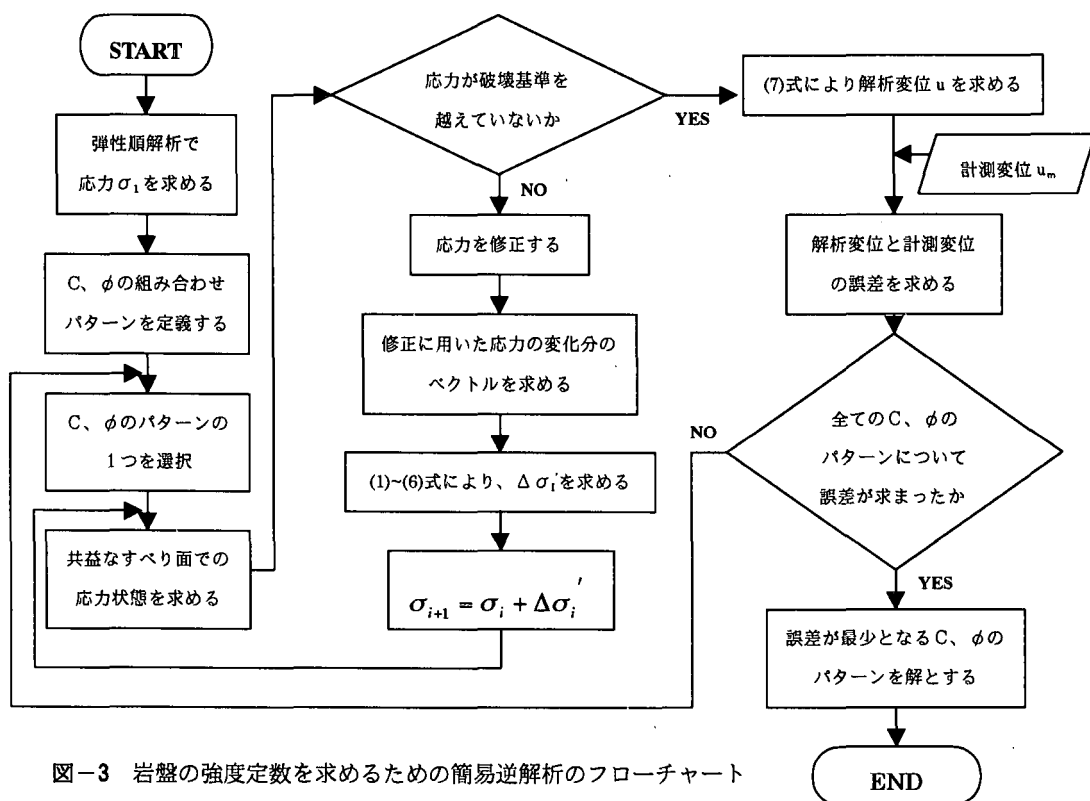


図-3 岩盤の強度定数を求めるための簡易逆解析のフローチャート

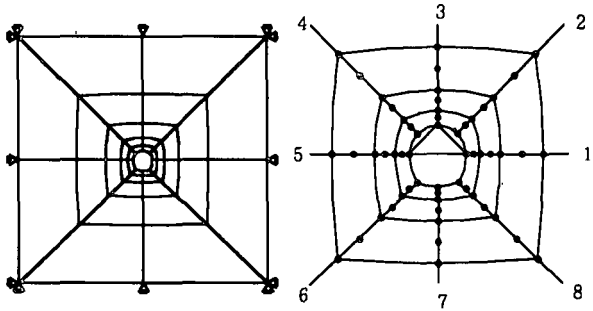
3. 数値実験

(1) 解析モデルとインプットデータ

2次元平面ひずみ問題としてトンネルの掘削問題を考える。逆解析に必要な計測データを弾塑性順解析によって作成する際に用いた諸定数を表－1に示す。このうち、弾性係数、ポアソン比、初期応力は、逆解析をする際にも既知であるとする。また、解析に用いた有限要素メッシュ、変位計測の位置を図－4に示す。この8本の地中変位計とコンバージェンス測定から得られる合計51個の相対変位と、これから行う解析結果とを比較して、最もふさわしい強度定数の値を同定するのである。

表－1 弾塑性順解析に用いた入力パラメータ

パラメータ	値
破壊基準	モール・クーロン
粘着力	1.0MPa
内部摩擦角	30°
弾性係数	10000MPa
ポアソン比	0.3
初期応力 (σ_{0x})	-3.0MPa
初期応力 (σ_{0y})	-5.0MPa
初期応力 (τ_{0xy})	2.0MPa



図－4 解析に用いたメッシュと変位計測点(地中変位計番号)

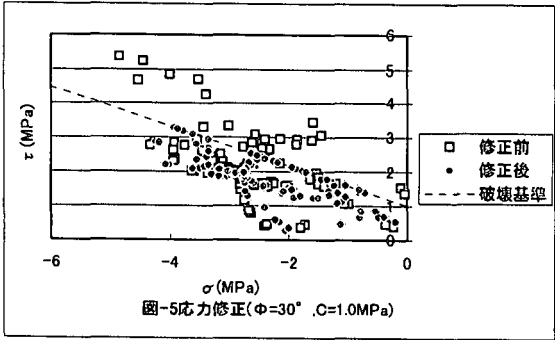
(2) 逆解析結果と評価

今回の解析では、内部摩擦角 ϕ を5°から60°まで5°ずつ変化させた。粘着力 C は、それぞれの内部摩擦角において、修正する応力ポイントが無くなるまで、0.0MPaから0.1MPaずつ増加させた。今回の解析で行った C と ϕ の組み合わせのパターンを表－2に示す。

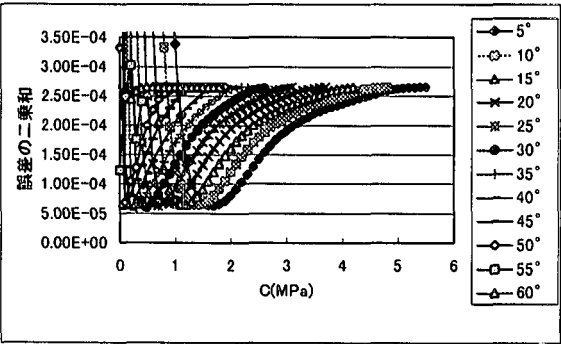
表－2 解析を行った C 、 ϕ の組み合わせ(C は0.1ずつ増加)

ϕ (度)	C (MPa)	ϕ (度)	C (MPa)	ϕ (度)	C (MPa)
5	0.0～5.5	25	0.0～3.1	45	0.0～2.0
10	0.0～4.8	30	0.0～2.6	50	0.0～1.9
15	0.0～4.2	35	0.0～2.3	55	0.0～1.8
20	0.0～3.7	40	0.0～2.1	60	0.0～1.8

各ガウスポイントにおける主応力面から $45^\circ + \phi/2$ の方向で定義された共役なすべり面での応力状態 ($C = 1.0\text{MPa}$ 、 $\phi = 30^\circ$ の場合)を図－5に示す。応力修正前と比べて、修正後は応力が破壊基準を越えていないことが分かる。



図－5 応力修正($\phi=30^\circ$ 、 $C=1.0\text{MPa}$)



図－6 各 C 、 ϕ における誤差の二乗和

C と ϕ の各組み合わせパターンにおける誤差の二乗和との関係を図－6に示す。誤差の二乗和が最も小さいポイントが C と ϕ の最適な組み合わせを与えることになるが、図を見ると、各 ϕ ごとに同レベルの誤差が出る C の

値が存在しており、各 ϕ ごとにおける誤差の二乗和の最小値も、非常に似通った値が得られた。このことから、今回の解析では唯一解が求めにくい設定になっていた事が分かる。図-7に地中変位計2番と4番(図-4)の、計測変位と、解析で得られた変位の状態を示す。計測変位を見れば分かるように、2番は塑性変形がよく出ている場所に、また4番はほぼ弾性変形のみが出ている場所に設置された地中変位計である。計測変位を作成する際に用いた値である $C=1.0\text{MPa}$ 、 $\phi=30^\circ$ を用いて本解析を行った場合、2番では塑性変形が十分に出ていないが、4番では、解析結果と計測変位がほぼ一致している。 $\phi=30^\circ$ の時誤差の二乗和が最小となる $C=0.5\text{MPa}$ の場合と、本解析で、僅差ながらも誤差が最小となった、 $\phi=40^\circ$ 、 $C=0.2\text{MPa}$ の場合は、比較的塑性変形は出ているが、弾性変形が大きくなっている。また、誤差の二乗和が近い、 $\phi=30^\circ$ 、 $C=0.5\text{MPa}$ の場合と $\phi=40^\circ$ 、 $C=0.2\text{MPa}$ の場合の二つを比較してみると、両者とも酷似した結果となっている。このほかにも各 ϕ ごとに誤差が一番小さくなる C の場合の変位場を比較してみたが、それぞれ類似した結果が得られた。これより、本解析では、各 ϕ ごとに、同じような変位場となる C の値が存在することが分かった。そこで、仮に原位置試験で比較的求まりやすい ϕ が 30 度だと分かっているとすると、 C は、 0.5MPa となるが、これも正解値の 1.0MPa とは異なっており、その原因についてはさらに検討を要する。

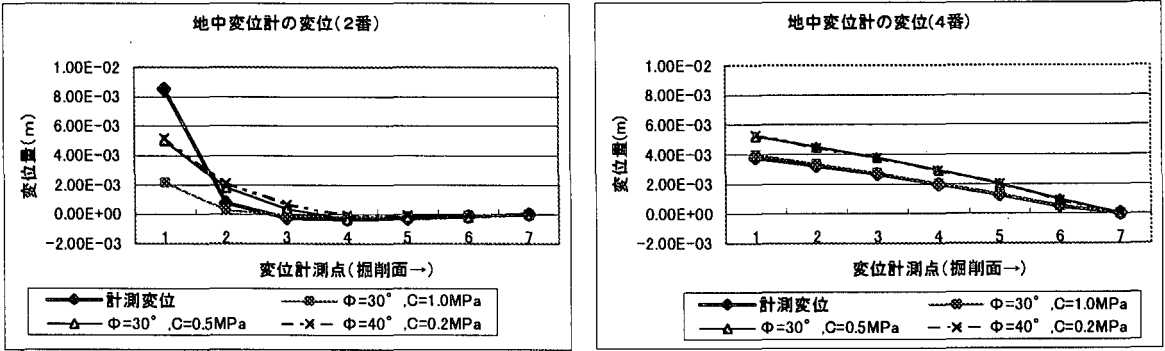


図-7 地中変位計の変位状態

4. 結論

本稿では、初期応力、弾性係数などの情報についてある程度信頼できる値が存在するような場合を想定して、計測変位から岩盤の強度定数を簡易な方法で求める事について考察してみた。ここで、提示した数値計算例においては十分な成果が得られたとは言えないが、本手法はより少ない変位計測結果しかなくても採用できることから、今後は本手法から得られる解の精度向上を図る予定である。また、この手法では破壊規準を任意形状に設定して良いため、たとえばモールクーロンの規準を選べば粘着力、内部摩擦角を求めることになり、あるいは他の規準が適当であるならばその規準におけるパラメータを求める方法論もまったく同様に構築することができる。これは、すなわち、どの破壊規準が与えられた岩盤に最も良く適合するか、との問いに答えるための方法論の確立にもつながるものであり、今後は現場計測結果の分析などを通してその可能性について検討する予定である。

参考文献

- 1) 櫻井春輔, 武内邦文: トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法, 土木学会論文報告集, 第 317 号, pp.93-100, 1982
- 2) 櫻井春輔, 芥川真一, 徳留修: ノルム最小化法に基づく非弾性ひずみの逆解析, 土木学会論文報告集, No.517/III-31, pp.197-202, 1995
- 3) 芥川真一, 柿原満, 武山真樹, 櫻井春輔: 岩盤不連続面のすべりを考慮した逆解析手法の開発と現場への適用例, 土木学会論文報告集, No.589/III-42, pp.335-348, 1998