

不均質岩盤の弾性定数と幾何学的特性の同定に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON IDENTIFICATION OF ELASTIC CONSTANTS AND GEOMETRY CHARACTERISTICS OF INHOMOGENEOUS ROCK MASSES

大西有三*・東出明宏**

By Yuzo OHNISHI and Akihiro HIGASHIDE

Recently attention is being directed toward developing a numerical procedure whose objective is to determine a set of parameters from a set of observed displacements at the field. The procedure, so called "Identification or Inverse" problem, is general and can be applied to any geotechnical problems, in which the system parameters are to be identified. In this paper, the method to identify the elastic constants and geometry characteristics of inhomogeneous rock masses is presented. Elastic parameters are calculated by the optimization process in mathematical programming. Geometry characteristics are determined by Akaike's information criterion (AIC) which estimates the maximum likelihood of the system. Several examples of tunnel problems with loosened area are examined and evaluated by the proposed method.

1. ま え が き

近年、同定問題 (Identification problem,あるいは逆解析問題: Back Analysis problem, 逆問題: Inverse problemともよばれる) という新しい分野が脚光を浴びている。これは現場計測工法におけるフィードバックの手法として提案されたもので、施工中の構造物や地盤の挙動を観測することにより、地盤の材料定数など系の未知パラメータを推定しようとするものである^{1)~3)}。

この問題は、土質力学や構造力学の分野では随所にみられる。たとえば複雑な土質力学や岩盤力学の問題を解析する場合、しばしば実際の系と“等価な”数学モデル(有限要素モデルなど)が必要とされる。ところが数学モデルを作るためには、実際の系を表現する次の3つの基本的データが必要となる。

(i) 異なる材料から形成される領域や、外力・拘束条件の加わる領域など、解析する対象の形状を決定するための幾何学的条件を表わすデータ。

(ii) 材料の挙動を示す法則や材料定数の値を定める材料データ。

(iii) 荷重分布を定めるデータ。

以上のデータを入力して数学モデルを完成させると、解が求められる。この問題が応力変形解析を扱ったものである場合、解は次の2つになる。

(iv) 解析領域での変位

(v) 材料内のひずみならびに応力の分布

これらをもとにして、同定問題は次のように考えられる。利用できる実験データ((iv), (v))にできるだけ近づくように、解析で用いる未知量((i), (ii), (iii))を決定することである。

未知パラメータの性質によって、同定問題は3つの範ちゅうに分けられる。すなわち、

(a) 対象場の形状を決定する幾何学的特性

(b) 材料定数

(c) 荷重(たとえばトンネル解析においては初期応力に相当する。)

である。このうち、これまでの同定問題では、均質地盤の(b)材料定数と(c)荷重を対象としたものが中心であり、不均質地盤を対象としたものや(a)の幾何学的特性に関する研究はほとんどみられない。そこで、この報告では、境界要素法を用いて不均質地盤を対象に材料定数ならびに幾何学的特性に関する同定を行う手法を検討し、その適用性について考察を加える。

* 正会員 Ph. D. 京都大学助教授 工学部交通土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 工修 大林組大阪本店(〒546 大阪市東住吉区今川1-1)

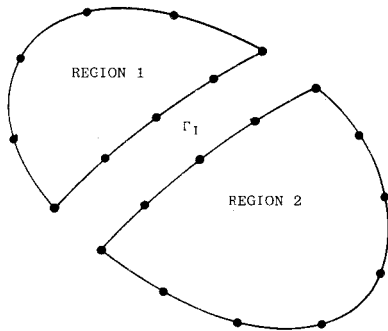
2. 不均質岩盤の材料定数の同定

(1) 境界要素法による定式化⁴⁾

桜井ら⁵⁾によると、同定問題におけるアプローチは次の2つに分類される。1つは“逆定式化法”とよばれ、他の1つは“直接定式化法”とよばれる。“逆定式化法”が未知パラメーターを未知数とする新たな定式化によって同定するのに対して、“直接定式化法”は構造解析の場合、次式で示される誤差関数を最小にするように荷重や材料定数を同定するものである。

$$J = \left[\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U}_i)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 U_i は計算変位、 \bar{U}_i は計測変位そして n は測定値の数を表わす。この式より明らかなように、このアプローチでは同定のための特別な定式化を必要としないので、既存のプログラムが使用でき、不均質・非線形問題など広範囲に及ぶ適用性が予想される。そこで本研究では、境界要素法⁶⁾に基づいた“直接定式化法”による定式化を二層地盤に対して行う。



図一1 2つの部分領域への分割

図一1に示すように、物体が2つの異なった領域に分けられる場合を考える。内部境界面を Γ_1 とし、領域1と2に対してそれぞれ異なる基本解を仮定する。領域1および領域2に対しては、

- P^1, P^2 : 領域1, 2の外表面上の表面力
- P_i^1, P_i^2 : 内部境界面 Γ_1 上の表面力
(領域1, 2に属する)
- U^1, U^2 : 領域1, 2の外表面上の変位
- U_i^1, U_i^2 : 内部境界面 Γ_1 上の変位
(領域1, 2に属する)

となる。すると、領域1に対する方程式は、

$$\begin{bmatrix} G^1 & G_i^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P^1 \\ P_i^1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H^1 & H_i^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U^1 \\ U_i^1 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに $[H], [G]$ は境界要素法に用いる係数マトリックスである。同様に領域2に対しては次式になる。

$$\begin{bmatrix} G^2 & G_i^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P^2 \\ P_i^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H^2 & H_i^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U^2 \\ U_i^2 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

適合条件、つり合い条件は次のように定義される。

$$\text{適合条件: } U_i = U_i^1 = U_i^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{つり合い条件: } P_i = P_i^1 = -P_i^2 \dots\dots\dots (5)$$

こうして定義された P_i, U_i をそれぞれ内部境界面 Γ_1 上の表面力、変位とよぶ。これを使うと式(2), 式(3)はそれぞれ次のようになる。

$$\begin{bmatrix} G^1 & G_i^1 - H_i^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P^1 \\ P_i^1 \\ U_i^1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H^1 \end{bmatrix} U^1 \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{bmatrix} -G_i^2 - H_i^2 & G^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_i^2 \\ U_i^2 \\ P^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H^2 \end{bmatrix} U^2 \dots\dots\dots (7)$$

この2つの方程式をまとめると、次式になる。

$$\begin{bmatrix} G^1 & G_i^1 - H_i^1 & 0 \\ 0 & -G_i^2 - H_i^2 & G^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P^1 \\ P_i^1 \\ U_i^1 \\ P_i^2 \\ U_i^2 \\ P^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H^1 & 0 \\ 0 & H^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U^1 \\ U^2 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

ここでこれらの定式化は一定要素に基づくものであり、領域1の節点数を n_1 、領域2の節点数を n_2 とすると、式(8)は $2(n_1 + n_2)$ 個の未知数をもつ方程式となる。そこで式(8)を再配列し、すべての未知数が左辺 $\{X\}$ に、既知数が右辺 $\{F\}$ にくるように式を書き直せば次式となる。

$$[A]\{X\} = \{F\} \dots\dots\dots (9)$$

上式で $[A]$ は正方行列となっているので、 $\{X\}$ は

$$\{X\} = [A]^{-1}\{F\} \dots\dots\dots (10)$$

で計算される。ここに、 $[A]$ は連立方程式の係数行列。

次に誤差関数を定義する。いま、式(8)の両辺のマトリックス中の材料定数 G_1 (領域1のせん断弾性係数)、 ν_1 (領域1のポアソン比)、 G_2 (領域2のせん断弾性係数)、 ν_2 (領域2のポアソン比)のうち、 G_1 と G_2 が未知であるとすると。これは G と ν を比較した場合、 G に比べて ν のとる値の範囲は非常に小さく、たとえば飽和粘土が非排水条件のもとでは $\nu = 0.5$ とみなされるように、ある程度予測が可能である。また変位 U^1, U^2, U_i のうちのいくつかは観測値として与えられているものとする。そこで式(10)に最小二乗法を適用すると、 G_1, G_2 は次式を満足するように決められるはずである。

$$J = \left[\sum_{i=1}^n ([A]^{-1}\{F\})_i - \bar{U}_i \right]^2 \rightarrow \min \dots\dots\dots (11)$$

上式において、 l は変位が観測されている節点を示す番号で、 \bar{U}_i は計測変位、 l_i はベクトル中の l 番目の要素を示すものとする。ただし、 G_1, G_2 は次式を満足しな

なければならない。

$$G_1 > 0, G_2 > 0 \dots\dots\dots (12)$$

以上より不均質岩盤での材料定数の同定問題は、式(12)を制約条件とし、式(11)を目的関数とする非線形最適化問題を解くことに等しくなる。非線形最適化問題を反復計算によって解く探索法は、直接探索法と勾配探索法の2つに大別される。 $f(x)$ を目的関数としたときに、点 x^* における関数値 $f(x^*)$ のみを使うのが直接探索法であり、 $f(x)$ が連続で微分可能な場合に $f(x)$ の勾配 $\partial f(x)/\partial x$ を使うのが勾配探索法である。ここでは煩雑な勾配の計算を必要としない直接探索法のうち代表的なSimplex法を採用する。この手法は最適解が制約条件によって与えられる凸な許容領域の端点にあることを利用したものである。

(2) 解析結果および考察

a) 複合岩盤への適用

まず最初に設定したモデルは図-2に示されるように複合岩盤を表現したものである。このモデルでは、平面ひずみ状態を仮定し、2つの異なる材料特性をもった領域からなる等方弾性地山内に半径5mの円形掘りトンネルを掘削した場合を考えている。そしてモデルは、トンネル掘削後の二次応力状態にあるものとする。要素は領域1, 2に対してそれぞれ20個、全体では37個となっている。このモデルに対する入力値は表-1に示される。

ところで、観測値として入力する節点変位の選定には配慮が必要である。これは式(8)より明らかなように、各領域の外表面上の要素の節点変位は各領域の材料定数のみに関係しており、他方の領域のそれには依存しないことによる。そこで好ましい節点変位の組合せとして考

表-1 複合地盤モデルの入力値

REGION 1 :	
SHEAR MODULUS	= 1.0×10^8 (tf/m ²)
POISSON'S RATIO	= 0.3
REGION 2 :	
SHEAR MODULUS	= 2.0×10^8 (tf/m ²)
POISSON'S RATIO	= 0.2
σ_y (垂直地圧)	= 1.0×10^7 (tf/m ²)
σ_x (水平地圧)	= 0.4×10^7 (tf/m ²)
κ (側圧係数)	= 0.4

えられるのは次の2つである。

- (i) 内部境界面 Γ_1 上の節点を必ず1つ選ぶ。
- (ii) (i)以外の場合は、領域1, 2の外表面上の節点からそれぞれ少なくとも1つ選ぶ。

これを参考に、このモデルでは次の3種類のパターンを設定し、通常解析による変位解を測定値として入力した:

- (A) トンネル内壁面上の全節点。すなわち、節点1, 2, 3, 4, 34, 35, 36, 37の合計8節点
- (B) 領域1, 2からそれぞれ1つずつ選ぶ。ここでは節点2, 36の2節点
- (C) トンネル内壁面と内部境界面 Γ_1 上の全節点。すなわち、節点1, 2, 3, 4, 18, 19, 20, 34, 35, 36, 37の合計11節点

また、同定すべきパラメーターは次の2つの無次元量とした。

$$\frac{G'_1}{G_1} = a_1, \quad \frac{G'_2}{G_1} = a_2 \dots\dots\dots (13)$$

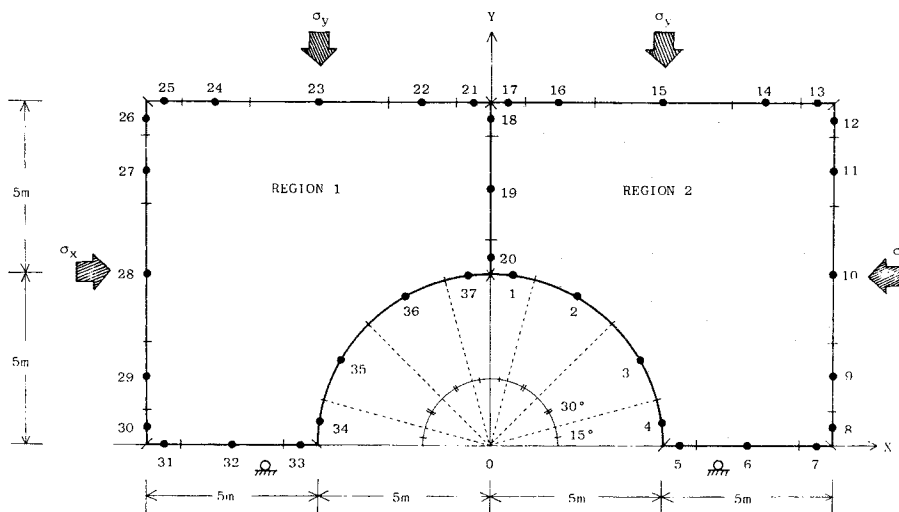


図-2 複合地盤モデルの要素分割図

表一 複合地盤モデルに対する解析結果 (1)

Type	Iteration	$G_1' / G_1 = \alpha_1$	$G_2' / G_1 = \alpha_2$
A	51	0.999974	1.999955
B	58	0.999944	1.999766
C	50	0.999990	1.999954
Solution		1.000000	2.000000

G_1, G_2 は同定により得られる領域 1, 2 のせん断弾性係数を表わす。この操作の目的はパラメーターのオーダーを落として解を探索しやすくするところにある。すると、 α_1, α_2 の正解は 1.0, 2.0 になる。

1 番目の case として、次のように初期値を決める。
 $\alpha_1^0 = \alpha_2^0 = 1.5$

表一がその結果である。本手法により得られる解の精度は十分なものであり、複合地盤への適用の可能性が示唆されている。

2 番目の case では、初期値を正解からやや離れた値とする。すなわち、

$$\alpha_1^0 = \alpha_2^0 = 0.5$$

である。結果は表一に示されている。この case でも解の精度は十分なものである。定性的にも表一と同じ傾向を示し、試行回数 (Iteration) は計測節点数が最大である (C) の場合に最小となっている。

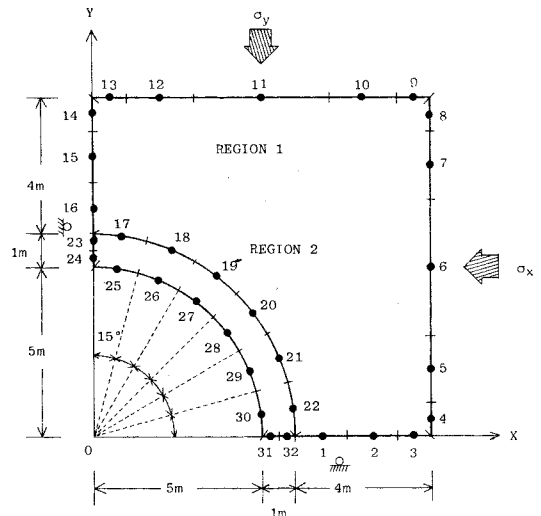
さらに、通常最適化問題の特性の 1 つであるパラメーターの初期値と試行回数の関係についてもこの結果は十分満足のいくものである。これは、初期値が正解に近いほど試行回数は少なくなるという特性であるが、表一と表三を比較することによって、両者の間には明らかな差異がみられ、特性をよく表わしている。

b) ゆるみ領域をもつトンネルへの適用

トンネルを開削すると、そのまわりの岩盤に高い応力が誘起される。この応力はしばしば岩盤強度を超過することがあり、また空洞のまわりの岩盤は発破による損傷

でその強度が低下しており、破壊していることが多い。このようにトンネル掘削によって生ずる強度劣化の領域をゆるみ領域と考えることにする。

モデルは図一に示すように、平面ひずみ状態の等質地山内に半径 5 m の円形素掘りトンネルを掘削したときに、トンネルの内壁面から地山に向かって厚さ 1 m にわたってゆるみ領域が発生したものを想定している。ここで、まだゆるんでいない地山を領域 1, ゆるみ領域を領域 2 として、 G_1, G_2 の推定を行う。ゆるみによる強度の低下は表面的には弾性定数が低下したものと仮定している。用いる目的関数は式 (11) で定義されるものとし、式 (13) の 2 つの無次元量 α_1, α_2 を同定する。正の問題ではモデルへの入力値は表一に示されるように、ゆるみ領域では本来もっているべき地山のせん断弾性係数の 1/5 のせん断弾性係数が設定されている。したがって逆解析での α_1, α_2 の正解は 1.0 と 0.2 になる。



図一 ゆるみ領域をもつトンネルモデルの要素分割図

表一 ゆるみ領域をもつトンネルモデルへの入力値

REGION 1 :	
SHEAR MODULUS	$G_1 = 1.0 \times 10^5 \text{ (tf/m}^2\text{)}$
POISSON'S RATIO	$\nu_1 = 0.2$
REGION 2 :	
SHEAR MODULUS	$G_2 = 0.2 \times 10^5 \text{ (tf/m}^2\text{)}$
POISSON'S RATIO	$\nu_2 = 0.3$
σ_y (垂直地圧)	$= 1.0 \cdot 10^2 \text{ (tf/m}^2\text{)}$
σ_x (水平地圧)	$= 0.4 \cdot 10^2 \text{ (tf/m}^2\text{)}$
K (側圧係数)	$= 0.4$

表二 複合地盤モデルに対する解析結果 (2)

Type	Iteration	$G_1' / G_1 = \alpha_1$	$G_2' / G_1 = \alpha_2$
A	64	1.000010	2.000099
B	80	1.000018	2.000008
C	59	0.999992	2.000000
Solution		1.000000	2.000000

表一五 ゆるみ領域をもつトンネルモデルに対する解析結果

Type	Iteration	$G_1' / G_1 = \alpha_1$	$G_2' / G_1 = \alpha_2$
A	65	0.999660	0.200270
B	63	1.000066	0.200112
Solution		1.000000	0.200000

また、設定した変位計測節点のタイプは次の2種類とする。

- (A) トンネル内壁面上の全節点ならびにトンネル天端を通る鉛直境界面上の全節点。すなわち、節点 14, 15, 16, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 の合計 11 節点
- (B) 領域 1, 2 からそれぞれ 1 つずつ選ぶ。ここでは、節点 15, 28 の 2 節点。

まず、初期値を次の値とする。

$$\alpha_1^0 = \alpha_2^0 = 0.5$$

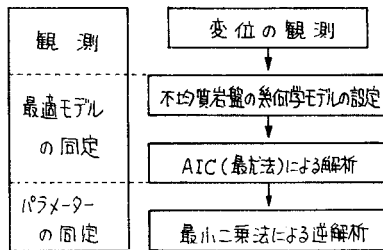
表一五が結果である。解の精度は優れたもので、本手法の妥当性が推察される。

ところで、実際には計測変位は誤差を含んでいるのが普通である。本研究では真の計測値に正規乱数をかけることによりばらつきを与えたものを入力値として逆解析を行ったが、入力データの数が適切であれば誤差に対して解は安定であることが判明した⁴⁾。

3. 不均質岩盤の幾何学的特性の同定

(1) モデル最適化の概念

本章では、材料定数を推定する前段階として幾何学的特性を取り上げ、対象とする岩盤がいくつの領域から構成されているか、またその領域が他の領域とどこで境界をもつかを決定できる手法を提案する。このことが決定されれば対象岩盤の最適なモデル化が達成されたことになり、続けて行われる材料定数や荷重に関する同定問題における解の信頼度が高くなる。そこで本研究では、2. で提案した同定手法に赤池により導入された AIC (Akaike's Information Criterion: 赤池の情報量規準)⁷⁾



図一四 AIC の位置づけ

を組み入れ、材料定数 G の最適なパラメーター数、幾何学的形状をも決定できる手法を開発した。 G の推定についての全体のアルゴリズムおよび AIC の位置づけを図一四に示す。すなわち、原位置において変位が観測されたとすると、まず解析のための最適モデルを見つけるために幾何学形状モデルを設定する必要がある。幾何学モデルは地層境界、測定値の急変点、ゆるみ域のようにある程度予測し得る範囲などを総合的に考慮して領域分割を行うことにより作成したいくつかの案から成る。これらの中から AIC を用いて最適なモデルを選んだ後、逆解析によりパラメーターの同定を行うという作業手順となる。

統計モデルの目的は、「与えられた情報を推測の目的に合った方向に縮約すること」である。この目的は、統計モデルが“母集団の構造”をできるだけ厳密に記述するものと考えるのではなく、統計モデルは 1 つの適切なよい推定方法を与える手段と考えることにより達成される。ある一組のデータに対して考えられるモデルは必ずしも 1 つではない。同じ考え方で近似を上げたモデル、異なるパラメーターで表現されたモデル、さらにはまったく違った考え方に基づくモデルなどでも、同様にそのデータを説明できることがある。このように多数のモデルが考えられ、それらが 1 つのモデルの族を構成する。そこでその中から、“母集団の構造”に最も適したモデルを与えられたデータに基づいて選ぶことが必要となる。

一般にパラメーターの数 m の大きいモデルの方が、データの微細な構造を反映できるために、目的関数として定義される残差二乗和を小さくすることができ見掛けのあてはまりはよくなる。極端な場合、データ数 n と同じ数のパラメーターを入れれば、すべてのデータを完全に合わせることもできる。たとえば、多項式モデルでは Lagrange の補間式がその一例である。それでは、パラメーター数が大きいモデルの方が常によいモデルであるといえるかという、必ずしもそうとはいえない。データには誤差が含まれているので、必要以上にパラメーター数の大きいモデルでは、対象の真の構造ではなく、測定誤差を忠実に再現するだけになってしまい、誤差と対象とを分離して信頼性のある情報を引き出すことが不可能になる。逆にパラメーターが少なすぎると、モデルが対象の構造を十分に反映できなくなり、得られる情報に偏りが生じる。その中間に最も“よい”モデルがあるはずで、それを選び出す客観的な基準が必要になる。ここに用いるのが、AIC である。

(2) 赤池の情報量規準-AIC^{7),8)}

真の確率分布密度 $P(y)$ からの、推定した確率分布密度 $\hat{P}(y)$ のずれを表わす量として、Kullback-Leibler の

情報量（以下、K-L 情報量と記す）

$$I(P, \hat{P}) = - \int P(y) \ln \frac{P(y)}{\hat{P}(y)} dy \dots \dots \dots (14)$$

をとる。これは、想定したモデルの分布 $\hat{P}(y)$ から $P(y)$ のような分布が得られる確率の逆数の対数ともいうべきものである。 $I(P, \hat{P})$ は $P(y) \equiv \hat{P}(y)$ のとき 0 となり、それ以外では必ず正である。これによって定義された I を、推定した分布 \hat{P} の悪さの規準と考える。尤度 (likelihood: もっともらしさ) は、想定したモデルの分布から特定のデータが得られる確率であったので I は定数部分を別にして、対数尤度の平均の符号を反転したものと考えることができる。

赤池は、かなり一般的な仮定のもとで K-L 情報量の 2 倍が定数部分を別にして

$$2I \sim \text{AIC} \equiv -2 \ln(\text{最大尤度}) + 2m \dots \dots \dots (15)$$

によって推定できることを証明した。ここで m はパラメーター数となっている。この AIC はモデルの適切さを評価するための基準であり、AIC の小さい方がモデルは適切であると判断される。AIC 最小によって得られたモデルを最小 AIC 推定モデル (Minimum AIC Estimate; MAICE) とよぶ。2つのモデルの間に格段の差があるときは右辺第 1 項に著しい差が現われ第 1 項に著しい差がないときは第 2 項が作用してパラメーター数の少ない方がよいものと評価される。したがって、これは理論構成に際して最小限の仮定を用いるべきであるとする“ケチの理論 (principle of parsimony)” の 1 つの具体化とみなすことができる。すなわち、なるべく少数のパラメーターによってモデルを表現することの重要性を暗示している。

本研究では、AIC を計算するに際して京都大学大型計算機センターで稼動している最小二乗法標準プログラム“SALS (Stastical Analysis with Least Squares fitting: 以下 SALS と記す)” システムを利用した⁹⁾。SALS は自然科学等における測定データの解析のための汎用で信頼のおける最小二乗法プログラムの開発の必要性と可能性によって 1975 年以来、東京大学大型計算機センターで研究されてきたもので、現在もなお、より一層の充実をめざして開発が進められている。また SALS では非線形最小二乗法に関するアルゴリズムもオプションとして準備されている。そこでここでは修正 Marquardt 法を選び、Simplex 法との優劣についても検討してみた。

(3) 解析結果および考察

a) 複合地盤の形状決定問題

ここでは解析の対象として、2. (2), a) で扱った図-2 に示される岩盤を選んだ。そして表-1 の入力値より理論的に式 (10) を解いて得られた節点変位のうち、ト

ンネル内壁面上の 8 節点 (節点 1, 2, 3, 4, 34, 35, 36, 37) の xy 両方向変位の合計 16 個の変位 1 つ 1 つについて測定誤差の標準偏差 $\sigma = 1.0 \times 10^{-5}$ (m) に対する正規乱数を加えて、それらを模擬データとして入力する。結局、図-2 のモデルを真の岩盤とするのである。この真の岩盤に対して設定したモデルは、図-5 のように 6 タイプとする。この 6 タイプに対して同定すべきパラメーターは次の 2 つ (あるいは、Model 4, Model 5, Model 6 に対しては 3 つ) の無次元量とする。

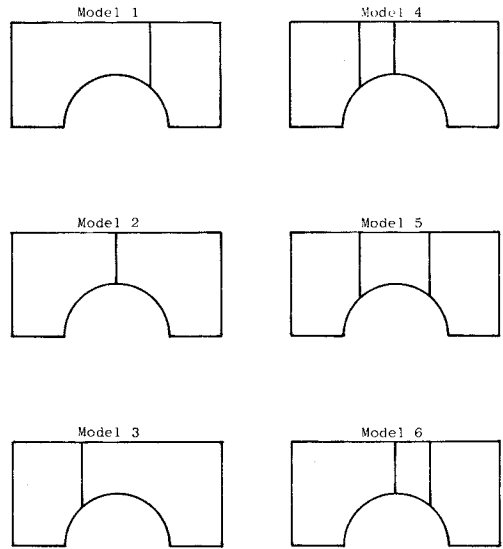


図-5 設定したモデルタイプ (1)

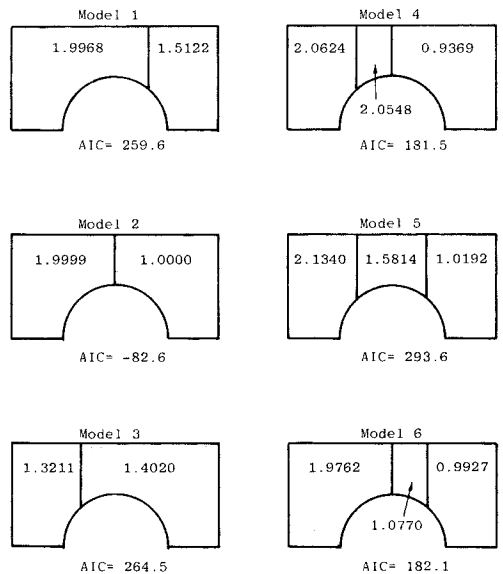


図-6 AIC と G の推定値 (1)

表一6 6タイプのモデルに対する解析結果(1)

MODEL	PARAMETER DIMENSION	ESTIMATED PARAMETER			OBJECTIVE FUNCTION	AIC
		α_1	α_2	α_3		
MODEL 1	2	1.5122	1.9968		0.86692×10^{-5}	259.6
MODEL 2	2	1.0000	1.9999		0.44631×10^{-14}	- 82.6
MODEL 3	2	1.4020	1.3211		0.11767×10^{-4}	264.5
MODEL 4	3	0.9369	2.0548	2.0624	0.27882×10^{-6}	181.5
MODEL 5	3	1.0192	1.5814	2.1340	0.11927×10^{-4}	293.6
MODEL 6	3	0.9927	1.0770	1.9762	0.36567×10^{-6}	182.1

$$\frac{G'_1}{G_1} = \alpha_1, \quad \frac{G'_2}{G_1} = \alpha_2 \left(\frac{G'_3}{G_1} = \alpha_3 \right) \dots \dots \dots (16)$$

本報告では、3つの領域からなる系に対する定式化には触れていないが、2つの領域に対するものを拡張すると容易に達成される。

この6タイプに対する解析結果をまとめたものが表一6である。そして、このときのパラメーターの値をわかりやすく図示したものが図一6である。表一6よりAICが最小なのはModel 2でMAICEの考え方よりこのモデルが設定した6タイプのモデルの中で最も適切なモデルと判断される。実際、図一2の真の岩盤のパラメーターの設定値および分割パターンとはほとんど一致している。次に適切と判断されるモデルは、AICがその次に小さいModel 4, Model 6である。これは領域分割パターンからみて、真の岩盤を表現し得るためと考えられる。すなわち、Model 4の領域2, 3で真の岩盤の領域2が表現でき、Model 6の領域1, 2で真の岩盤の領域1が表現できるからである。この両モデルともパラメーターの同定値がほぼ精度よく求められており、この点からも両モデルが次に適切と判断される。このことから逆に、もしモデル設定の際にModel 2を設定していなくとも、それ以外の各モデルにおいてパラメーターを同定し、AICを計算してMAICEを求めると、Model 4, Model 6が選び出され、パラメーターの推定値を検討することによって、より適切なモデルであるModel 2の設定が可能となる。一方Model 1, Model 3, Model 5はAICから適切でないと判断され、パラメーターの推定値も真の岩盤とは全く異なったものとなっている。

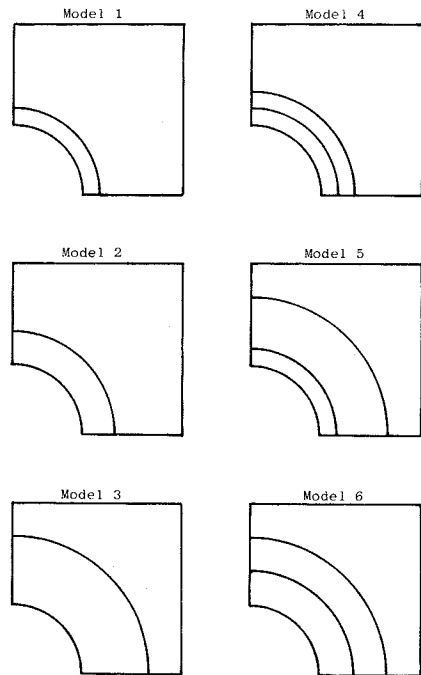
以上より、複合地盤に対する本手法の妥当性が検証された。

b) トンネルのゆるみ層厚の決定問題

ここでは、2.(2), b)で論じたゆるみ領域をもつトン

ネルに本手法を適用し、ゆるみ領域を明らかにしてそのゆるみ層厚の決定を試みる。

先に述べた経緯でゆるみ領域が発生すると、断面内への地山の変形が生じることになる。この変形は支保工の建て込みなどで抑えることが必要となる。そのためトンネル周辺に生じるゆるみ層の厚さを測定することは、支保工にかかる荷重を推定するための1つの方法である。掘削に伴うゆるみ層の測定にはいくつかの手段があるが代表的なものに弾性波探査がある。これによると、トンネル周縁はゆるみ層として本来の岩盤の弾性波速度より



図一7 設定したモデルタイプ(2)

表一7 6タイプのモデルに対する解析結果(2)

MODEL	PARAMETER DIMENSION	ESTIMATED PARAMETER			OBJECTIVE FUNCTION	AIC
		α_1	α_2	α_3		
MODEL 1	2	0.7181	0.1786		0.74186×10^{-4}	312.1
MODEL 2	2	0.9998	0.2000		0.50115×10^{-12}	- 7.7
MODEL 3	2	0.9245	0.6004		0.91598×10^{-5}	276.5
MODEL 4	3	0.9922	0.2037	0.1996	0.15699×10^{-7}	170.2
MODEL 5	3	1.1422	0.4636	0.3133	0.54952×10^{-4}	309.0
MODEL 6	3	1.0104	0.9897	0.2010	0.80845×10^{-7}	198.1

小さい速度となって現われる。これを利用してゆるみ層厚を算定するものである¹⁰⁾。

これに対して、ここではAICを利用してゆるみ層厚を決定し、同時に、地山およびゆるみ層の材料定数の推定を行う。対象となる真の地盤は図-3のモデルとする。表-4の入力値を用いて得られた変位のうち、節点14, 15, 16, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30の合計11節点の17個の変位に、3.(3), a)と同様の正規乱数を考慮したものを模擬データとして設定したモデルに入力する。図-7が6タイプのモデル図である。

計算結果を表一7に示す。推定されたパラメーターの値は、図-8にわかりやすく示されている。表一7より

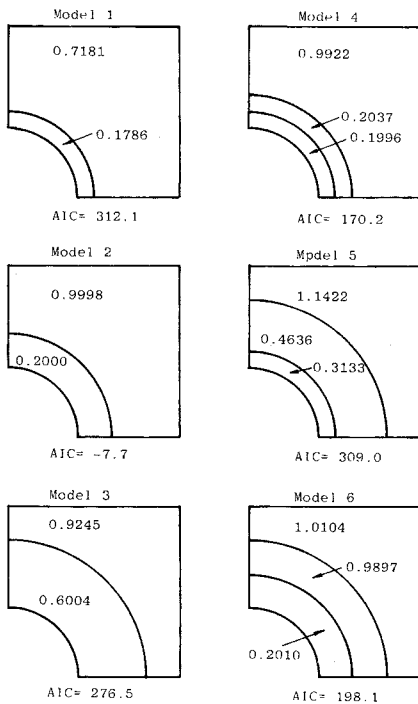


図-8 AICとGの推定値(2)

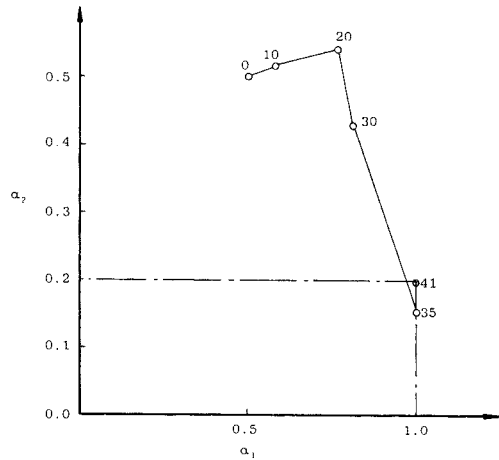


図-9 Simplex法による解の収束状況

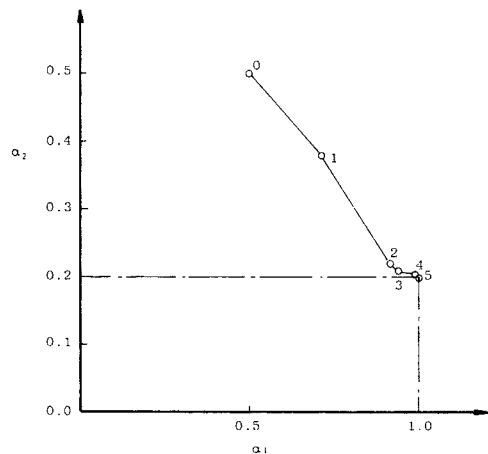


図-10 修正 Marquardt法による解の収束状況

AIC が最小値をとるのは Model 2 で、MAICE の考え方により、この Model 2 が設定した 6 タイプのモデルの中で最も適切なモデルと判断される。次に適切なモデルは、Model 4、Model 6 であるが、これらも領域分割パターンが真の地盤を表現できるようになっているためと考えられる。ところで、ここでは AIC の有効性を確かめるため、モデル間に差がないときにパラメーター数の違いによって AIC がどう変化するかを調べることの必要性にかられて 3 つの領域からなる地山もモデルとして加えてあるが、ゆるみ層厚を求めるだけであれば Model 1、Model 2、Model 3 の 3 つで十分である。

これらの結果より、本手法はトンネルのゆるみ層厚の算定にも非常に有効であることが示された。

c) Simplex 法と修正 Marquardt 法の比較

2.(2)、b) と 3.(3)、b) で扱ったゆるみ領域をもったトンネルモデルにおいて対比を行った。設定した初期値は、

$$\alpha_1^{(0)} = \alpha_2^{(0)} = 0.5$$

である。両解法の解の収束状況は、Simplex 法については図-9 に、修正 Marquardt 法については図-10 に示されている。図中の数字は試行回数を表わし、一点鎖線の交点で正解を表わしている。2 つの図を比較すると、修正 Marquardt 法は際だった動きをみせ、ほぼ 5 回目で正解に達しているのに対して、Simplex 法では 20 回目ぐらいまで正解と異なった方向へと動き、30 回目ぐらいからようやく向きを修正して正解へと向かっている。ちなみに、CPU Time は Simplex 法で 48 秒、修正 Marquardt 法では 17 秒となっている。両解法により得られる解の精度には遜色がないので、計算時間を考慮して修正 Marquardt 法の優位は動かない。これ以外のモデルに対しても同様の傾向が確認された。

4. 結 論

不均質岩盤の幾何学的特性ならびに材料定数を計測された変位から逆に求める方法について基礎的な検討を行った。得られた結果を要約すると以下のようである。

(1) 不均質岩盤での材料定数の同定は均質地盤と同様に可能であり、実用性が高い。また、同定パラメーターの数を減らすために、事前に予測可能な定数は除外したり、定数の比の形で値を求める方がよい。

(2) AIC という概念を導入することで、最適な幾何学的特性を推定することが可能となった。

(3) 最適化手法としての Simplex 法に代わる新しい解法を採用して、解析の効率化を図る必要がある。

最後に、論文作成についてご指導いただいた京都大学足立紀尚教授に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大西有三・東出明宏：地盤工学における逆問題の適用に関する一考察，土木学会関西支部年次学術講演会講演集，Ⅲ，1981。
- 2) Arai, K., Ohta, H. and Yasui, T. : Simple Optimization Techniques for Evaluating Deformation Moduli from field Observations, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 1, pp. 107~113, 1983.
- 3) Cividini, A., Jurina, L. and Gioda, G. : Some Aspect of 'Characterization' Problems in Geomechanics, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, 1981.
- 4) 大西有三・東出明宏：境界要素法による二層地盤の材料定数決定法について，第 19 回土質工学研究発表会講演集，1984。
- 5) 桜井春輔・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 337 号，pp. 137~145, 1983.
- 6) Brebia, C. A. : 境界要素法入門，神谷ほか訳，培風館，1980。
- 7) 赤池弘次：情報量規準 AIC とは何か——その意味と将来への展望，数理科学，No. 153, pp. 5~11, 1976.
- 8) 中川 徹・小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析，東京大学出版会，1982。
- 9) 中川 徹・小柳義夫：最小二乗法標準プログラム (SALS) 利用の手引き，第 1 部基礎篇，第 2 部制御・解法篇，東京大学大型計算機センター，1977。
- 10) 池田和彦・桜井 孝：トンネルのゆるみ層厚の判定，鉄道土木，Vol. 17, No. 12, pp. 11~14, 1975.
(1984. 8. 6・受付)