

# 発破振動に基づく地山の地質境界の同定に関する研究

An Identification of Geological Interface of Ground Based on Blast Waves

土木工学専攻 28 号 三瓶 重範

Shigenori MIKAME

## 1 研究背景

トンネルなどの地下構造物を建設する上で、地山の性状を把握することは不可欠である。トンネル掘削に限定して言えば、軟弱層や断層破砕帯への突入を防ぐため、事前にそれらの位置を把握しておく必要がある。本研究では、数値解析を用いて地盤性状の異なる層の境界である地質境界位置の同定問題に取り組む。

地質境界の位置同定は当研究室で行われてきた。力石ら [1] は現場で観測した地盤振動を用いて、地質境界の位置同定を行った。力石らの手法では地質境界を一つの面として仮定した。しかし、実際の地山の地質境界は湾曲しているなどの複雑な形状をしている。そこで本研究では三次元的な界面を表現することで、同定精度の向上を図る。

解析対象として、岐阜県に位置する岩田山トンネル工事現場 (以下、岩田山トンネル) を採用する。岩田山トンネルは総延長 1,001 [m] で、NATM 工法を用いた山岳トンネルである。事前のボーリング調査で現場はチャート層と砂岩層に分類されるが、それらの境界位置が最適であるか本手法を用いて調査する。従って本研究の目的は、パラメータ同定により地山を構成する層の境界位置を導出することである。なお、本稿で述べる地質境界とは、弾性係数の異なる 2 つの層の境界を示す。

## 2 パラメータ同定

添字記法と総和規約を用いて、地質境界位置の同定手法を示す。地質境界の位置を同定することは、以下の拡張評価関数  $J^*$  を最小にするような位置座標  $x_{\beta j}$  を求める最小化問題であると考えられる。

$$J^* = J + \Lambda + \Xi. \quad (1)$$

式 (1) における  $J$  は評価関数と呼ばれ、以下の形で定義される。

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (\dot{u}_{\alpha i} - \eta_{\alpha i}) Q_{\alpha i \beta j} (\dot{u}_{\beta j} - \eta_{\beta j}) dt, \quad (2)$$

ここに、 $\dot{u}_{\alpha i}$  と  $\eta_{\alpha i}$  はそれぞれ観測点  $\alpha$  における  $i$  方向の計算速度と観測速度である。 $Q_{\alpha i \beta j}$  は観測点数の自由度を持った重み係数で、 $t_0$  を  $t_f$  はそれぞれ初期時間と終端時間を意味する。本研究では地盤は線形弾性体であると仮定し動的解析を行う。支配方程式にはナビエの式を適用する。式 (3) は支配方程式を有限要素法により離散化し、Lagrange 乗数法を適用したものである。

$$\Lambda = \int_{t_0}^{t_f} \lambda_{\alpha i} (\Omega_{\alpha i} - M_{\alpha i \beta j} \ddot{u}_{\beta j} - C_{\alpha i \beta j} \dot{u}_{\beta j} - K_{\alpha i \beta j} u_{\beta j}) dt. \quad (3)$$

式 (3) における  $\lambda_{\alpha i}$  は随伴変数を表し、係数行列  $M_{\alpha i \beta j}$ 、 $C_{\alpha i \beta j}$ 、 $K_{\alpha i \beta j}$  はそれぞれ、質量、減衰、剛性を意味する。 $\Omega_{\alpha i}$  は外力項である。式 (1) の右辺第 3 項の  $\Xi$  は安定化項で、以下の形で定義される。

$$\Xi = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (x_{\alpha i}^{(l+1)} - x_{\alpha i}^{(l)}) W_{\alpha i \beta j} (x_{\beta j}^{(l+1)} - x_{\beta j}^{(l)}) dt. \quad (4)$$

ここに  $x_{\alpha i}$  は本研究の同定対象である境界面の位置座標値を表す。 $W_{\alpha i \beta j}$  は計算の安定性を確保するための安定化重みである。式 (4) は繰返し計算収束時にはゼロとなる。

## 3 勾配の導出

本研究では地質境界の位置を同定する際の逆解析手法として、随伴方程式法を用いる。 $J^*$  が最小となるには、以下の停留条件を満足しなければならない。

$$\delta J^* = 0. \quad (5)$$

式 (5) を考慮することで、式 (1) より随伴方程式を導出できる。

$$-\dot{\lambda}_{\alpha i} M_{\alpha i \beta j} + \dot{\lambda}_{\alpha i} C_{\alpha i \beta j} - \lambda_{\alpha i} K_{\alpha i \beta j} = (\ddot{u}_{\alpha i} - \dot{\eta}_{\alpha i}) Q_{\alpha i \beta j}, \quad (6)$$

上式より随伴変数が求まる。また、 $J^*$  の第一変分は以下のように変形できる。

$$\delta J^* = - \sum_{m=1}^M \int_{t_0}^{t_f} \lambda_{\alpha i} B_{\alpha i \beta j}^{(m)} dt \delta u_{\beta j}, \quad (7)$$

$$B_{\alpha i \beta j}^{(m)} = \int_{\Gamma^{(m)}} (N_{\alpha} D_{ijkl}^{(m)} N_{\beta, l}) n_j d\Gamma, \quad (8)$$

状態量  $B_{\alpha i \beta j}^{(m)}$  は  $m$  番目の層における弾性係数行列  $D_{ijkl}^{(m)}$  と補間関数  $N_{\alpha}$  によって表される．ここで変位  $u_{\beta j}$  は微小であるという仮定から，地質境界面の位置座標  $x_{\beta j}$  に関する勾配を得ることができる．

$$\text{grad}(J^{*(l)})_{\beta j} = \int_{t_0}^{t_f} \lambda_{\alpha i} B_{\alpha i \beta j}^{(m)} dt. \quad (9)$$

最小化手法として重み付き勾配法を適用することで，界面座標  $x_{\beta j}$  の更新式が得られる．

$$W_{\alpha i \beta j}^{(l)} x_{\beta j}^{(l+1)} = W_{\alpha i \beta j}^{(l)} x_{\beta j}^{(l)} - \text{grad}(J^{*(l)})_{\alpha i}, \quad (10)$$

$l$  は繰り返し回数を示す．上式により界面の位置座標を更新することで，最適な地質境界の位置を同定することができる．

## 4 解析領域の層分け

本研究では地質性状の指標として弾性係数を採用する．つまり，本稿で述べる地質境界とは弾性係数の異なる2つの層の境界を示すものであり，解析領域内に異なる弾性係数を与えることで層分けが可能である．図1が示すように，領域内における各境界，及び各層における弾性係数を  $\Gamma^{(0)}, \Gamma^{(1)}, \Gamma^{(2)}, \dots, \Gamma^{(M)}, E^{(0)}, E^{(1)}, E^{(2)}, \dots, E^{(M)}$  と表す．また，地質境界面は図2が示すような三角形平面の集合によって表される．

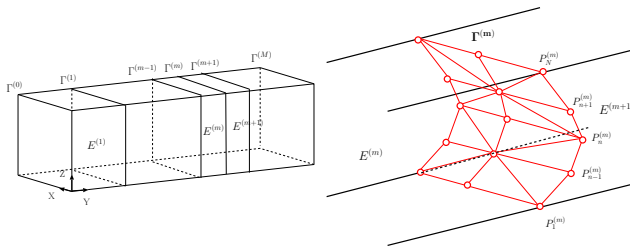


図1: 境界層の番号付け

図2: 地質境界面

次に領域内の各要素が  $E^{(m)}$  又は  $E^{(m+1)}$  であるかを判断するために符号付距離関数を導入する．符号付距離関数は界面と空間上の任意点  $a(x, y, z)$  間を法線方向に測った距離であり，任意点  $a$  が界面の外側にあるか内側にあるかで正負の符号付けする．各要素の重心点から界面までの距離関数を定める．(図3参照) ここで，要素番号  $i$  の距離関数を  $\psi_i$  とする．解析領域を異なる弾性係数をもつ層に分けるために要素ごとに弾性係数を与える．求め

た距離関数  $\psi_i$  を用いて要素番号  $i$  の弾性係数  $E_i$  は以下の式で表される．

$$E_i(\psi_i) = \frac{1}{2}(E^{(m)} + E^{(m+1)}) + (E^{(m)} - E^{(m+1)})H_i. \quad (11)$$

ここで， $H_i$  は拡張ヘビサイド関数であり， $\psi_i$  の関数として次式で表される．

$$H_i(\psi_i) = \frac{1}{2} \left\{ -1, \min \left[ 1, \frac{\psi_i}{\alpha} + \frac{1}{\pi} \sin \left( \frac{\pi \psi_i}{\alpha} \right) \right] \right\}. \quad (12)$$

$\alpha$  は界面厚さを示し，代表格子幅の1.5倍程度の値が設定される．以上の手順で領域内の各要素の弾性係数を設定する．例として，界面からの距離に対する弾性係数の推移を図4に示す．ここでは， $E^{(1)} = 1.0 \times 10^7$  [kN/m<sup>2</sup>],  $E^{(2)} = 5.0 \times 10^7$  [kN/m<sup>2</sup>],  $\alpha = 1.0$  [m] を設定している．

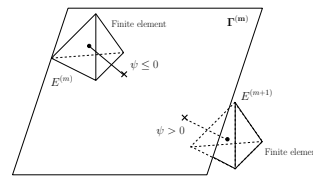


図3: 要素の分類

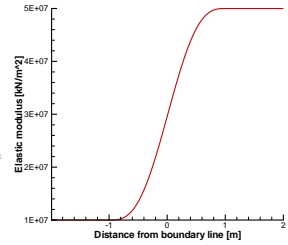


図4: 弾性係数の推移

## 5 境界面の更新

境界面は三角形平面の集合によって表される．これらの界面の各三角形要素の節点を変更することで，任意の界面を表現できる．式(10)を用いて，界面の節点座標  $x_{\beta j}$  は  $J^*$  を最小とする位置に更新される．界面の更新値を導出するために，界面周辺の有限要素について以下の計算を行う．ここで，界面周辺の有限要素とは前節で述べた界面厚さ  $\alpha$  内に位置する要素を示す．それらの要素ごとに得られる状態量  $\lambda_{\alpha i} B_{\alpha i \beta j}$  を算出する．次にその有限要素の距離関数を構成する界面の三角形要素について着目する．得られた状態量をその界面座標の勾配として集中化するために，各節点の式(9)に足し込む．最後に式(10)を用いて，界面座標を更新する．以上の手順を繰り返し計算することで， $J^*$  を最小とする界面座標を導出できる．

## 6 数値解析例

本手法の適用例として，トンネル掘削現場を例に挙げる．トンネル切羽前方の地山の地質境界の位置は未知で

あるが、本手法を適用することで、地質境界の位置を同定することができる。観測値として、発破などの衝撃力により生じた弾性波を地表面で観測したものを採用する。観測値に基づき本手法を適用することで、任意に設定した地層境界の初期位置から式(5)を満たす境界位置を導出する。得られた境界位置を用いて動的解析した地山の挙動は、実際に観測された地山の挙動と一致している。つまり、導出された境界位置は実際の地山のものと一致していると考えられ、地質境界を同定できたといえる。

解析モデルとして、岐阜県に位置する岩田山トンネル工事現場を採用する。当現場は掘削工法に発破掘削方式を採用している。地形データ等の工事現場に関するデータは、佐藤工業株式会社の協力により得られた。



図 5: 現場鳥瞰図

図 6: トンネル坑口

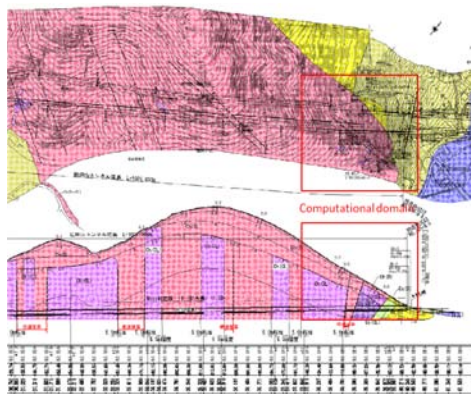


図 7: 平面縦断面図

現場付近の地形データ(図7参照)より、図8に示す有限要素分割図を作成した。総節点数と要素数はそれぞれ12,722および69,939となっている。地山斜面に2箇所の観測点が設けられている。(図8参照)これらの観測点から得られた速度を観測値として使用する。現場付近の地質データを参考に、地盤特性の違いから解析領域を2層に分割した。(図9参照)図9に示す境界位置を初期値として本手法を適用する。各層における地盤物性値を表1に示す。表1内の $E, \rho, \alpha_0, \alpha_1$ はそれぞれ弾性係数、密度、質量減衰定数、剛性減衰定数を表す。また、各層のポア

ソン比は0.3を設定している。時間増分 $\Delta t$ は0.002[s]とした。

表 1: 地山の物性値

	$E$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\alpha_0$ [s <sup>-1</sup> ]	$\alpha_1$ [s]
層 1	$1.2 \times 10^7$	$1.8 \times 10^3$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$
層 2	$5.5 \times 10^7$	$2.2 \times 10^3$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$

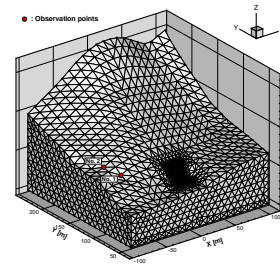


図 8: 有限要素分割図

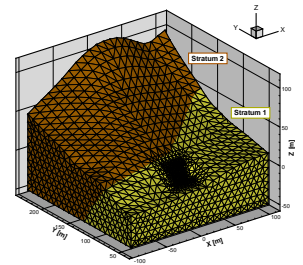


図 9: 解析領域の層分け

解析を行う上で、解析領域に外力を载荷する。トンネル切羽への発破を想定して、外力を図11に示す6節点に载荷する。また、発破現象を再現するために、外力の载荷方法としてBorehole pressure[3]を採用する。外力は時間 $t$ の関数として以下の式で表される。

$$\Omega_{\alpha i} = \int_{\Gamma_2} N_{\alpha} A_i (e^{-\xi t} - e^{-\eta t}) d\Gamma, \quad (13)$$

ここに、 $A_i$ は $i$ 方向における発破外力の最大振幅を表している。 $\xi$ と $\eta$ は爆破力の時間変化に依存するパラメータである。各パラメータは表2に示す値を設定した。

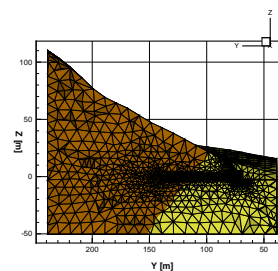


図 10: 横断面図

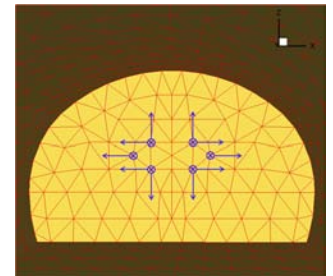


図 11: 発破外力の概略図

解析領域はその解析目的に応じて、十分な範囲を設定し、それぞれの境界には適切な境界条件を設定しなければならない。本研究では、境界条件として領域側面はそれぞれ法線方向のみの変位を固定する。また領域底面は水平

表 2: 外力のパラメータ

$A_x$ [kN]	$A_y$ [kN]	$A_z$ [kN]	$\xi$	$\eta$
$6.8 \times 10^6$	$1.7 \times 10^6$	$6.2 \times 10^6$	1000	5000

及び鉛直方向全ての変位を固定する．以上の解析条件で，発破振動に基づき地質境界の位置同定を行う．

## 7 数値解析結果

以下に，数値解析結果を述べる．図 12 は評価関数の推移，図 16-17 は導出された地質境界の位置を示す．本手法により，地質境界は設定した初期位置 (図 9) から図 16 に示す地質境界位置に移行された．また，評価関数は最小値に収束した．この結果は，設定した初期位置よりも導出された境界位置により，より観測速度と一致した計算速度が得られたを意味する．図 13-15 に 3 方向における観測速度 (赤線) と同定した地質境界を用いて得られた計算速度 (青線) との比較を示す．図より，観測速度と計算速度は酷似した波形を示していることから，実際の地山の挙動を導出できたことがわかる．つまり，事前のボーリング調査等によって想定された地質境界よりも，実際の地山のものにより近い地質境界が得られたと言える．

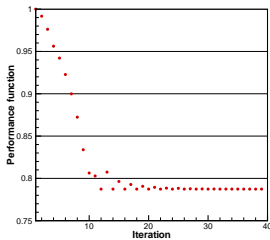


図 12: 評価関数の推移

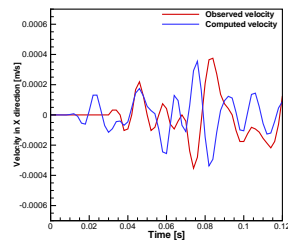


図 13: X 方向速度

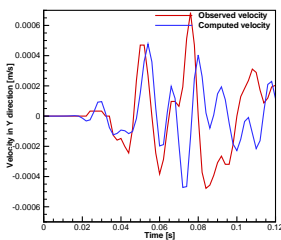


図 14: Y 方向速度

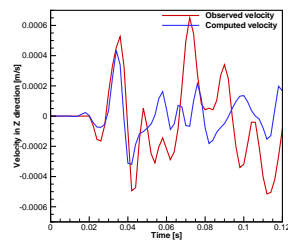


図 15: Z 方向速度

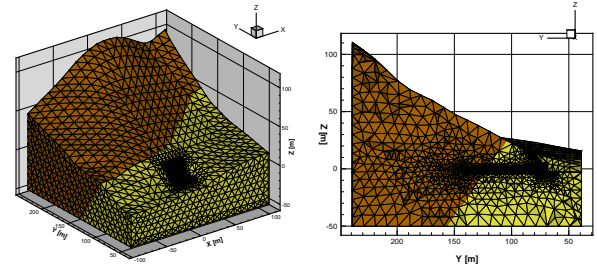


図 16: 同定された地質境界

図 17: 横断面図

## 8 考察

本手法を適用することで，当初想定された地質境界よりも実際の地山の地質境界に近い位置を導出することができた．しかし，評価関数が 0 に収束していないことからわかるように，観測速度と計算速度は完全には一致していない．その原因としては，次のことが考えられる．観測速度は現場での観測時の機器の機械的誤差や人的誤差を含む．他にも観測地点が局地的な地盤特性を有する場合，観測誤差が発生すると考えられる．よって，観測誤差のフィルタリング手法は本手法の精度向上のための一つの重要なテーマであると言える．

## 9 結論

数値解析の結果から，地表面で観測された地盤振動に基づいて，地質境界の位置を同定することができた．従来までは平面としか想定できなかった地質境界面を，符号付距離関数を用いることでより複雑な界面を表現することに成功した．これにより，実際の地山の地質境界面により近い界面を同定することができ，精度の高い解析が可能である．よって 3 次元問題における地質境界の同定手法を確立することができた．

## 参考文献

- [1] Chikaraishi M., M. Kawahara : “AN IDENTIFICATION OF GEOLOGICAL BOUNDARIES USING BLASTING WAVES AT TUNNEL EXCAVATION”, Internal Research Report, Kawahara Lab., Chuo Univ., Japan2010. <http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/ouyou/nenpou/ronbun10/M2/Chikaraishi.pdf>
- [2] Koizumi N. and M. Kawahara : “Parameter Identification Method for Determination of Elastic Modulus of Rock Based on Adjoint Equation and Blasting Wave Measurements”, (2009) Nummer. Anal. Meth. Geomech, Vol.33, pp1513-1533.
- [3] U.S.Army Corps of Engineers : “Systematic Drilling and Blasting for Surface Excavations”, Engineering Manuals, EM 1110-2-3800, Office of the Chief, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.,1972.