

## 心抜き自由面発破による岩盤破壊過程の解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 石沢 浩太  
 新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久  
 (株) 福田組 正会員 若月 和人

### 1. はじめに

トンネル工事において発破掘削を行う際に周辺に振動が生じる。そして、民家等に近接してトンネルの発破掘削を行う場合、発破振動の低減が必要となっている。今までの発破振動の低減方法の内、現在実用され効果が実証されている例<sup>1)</sup>として、心抜き自由面を形成する方法がある。ここで心抜き自由面とは、図1の様に発破掘削を行うときに掘削面中央にあらかじめ溝(以下、スリットと呼ぶ)を設けておき発破するという工法である。

本研究では、心抜き自由発破を対象とした数値解析手法の構成を試みる。具体的には、岩盤を個別要素で表現し、発破による圧力の流れを差分法で与える。その下で、後者により求めた圧力を前者の外力として与え破壊過程を解く。

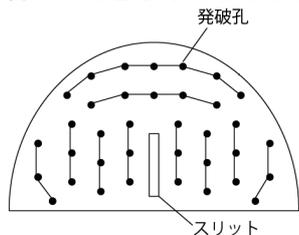


図1 心抜き自由面の例

### 2. 気体流動解析

発破孔内が気体で満たされる前の気体圧は次式で表現する<sup>2)</sup>。

$$\frac{P}{P_0} = \frac{v_0}{v_c} \frac{1 + (a/v_0^{b-1})(v_0/v_c)^{b-1}}{1 + a/v_0^{b-1}} \quad (1)$$

ここで、 $P$  は圧力、 $P_0$  は初期圧力、 $v_0$  は初期体積、 $v_c$  は気体の体積、 $a, b$  は係数であり実験結果<sup>2)</sup>から  $a = 10.99 \times 10^{-10}$ ,  $b = 4.0$  と設定する。

また、気体で発破孔内が満たされた後の気体の状態方程式は次式で近似表現する<sup>3)</sup>。

$$P = c\rho^\gamma \quad (2)$$

ここで、 $c$  と  $\gamma$  は定数、 $\rho$  は密度である。

気体の流動解析において、運動量保存則と質量保存則より得た次式を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\alpha) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x \alpha) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y \alpha) = 0 \quad (3)$$

$$v_x = -\frac{\bar{h}_x^2}{12\mu_t} \frac{\partial P}{\partial x}, v_y = -\frac{\bar{h}_y^2}{12\mu_t} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (4)$$

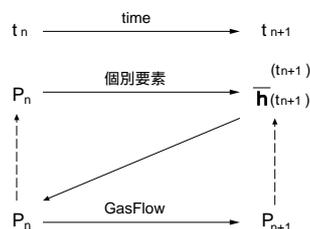


図2 連成系の解析アルゴリズム

ここで、 $\alpha$  は空隙比、 $v_x, v_y$  は速度成分である。また、 $\mu_t$  は粘性係数、 $\bar{h}_x, \bar{h}_y$  は  $x, y$  方向平均亀裂幅である。 $x, y$  方向で  $\delta x, \delta y$  の一様メッシュを考え、 $\rho, P$  および速度を評価する。式(3),(4)を差分近似して次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{i,j}\alpha_{i,j}) + \frac{1}{\delta x}[\rho v_x \alpha]_{x_i - \frac{\delta x}{2}, y_j}^{x_i + \frac{\delta x}{2}, y_j} + \frac{1}{\delta y}[\rho v_y \alpha]_{x_i, y_j - \frac{\delta y}{2}}^{x_i, y_j + \frac{\delta y}{2}} = 0 \quad (5)$$

$$v_x(x_i + \frac{\delta x}{2}, y_j) = -\frac{\bar{h}_y^2}{12\mu_t}(x_i + \frac{\delta x}{2}, y_j) \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{\delta x} \quad (6)$$

$$v_y(x_i, y_j + \frac{\delta y}{2}) = -\frac{\bar{h}_x^2}{12\mu_t}(x_i, y_j + \frac{\delta y}{2}) \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{\delta y} \quad (7)$$

これらの式を解くことで密度  $\rho$  が得られ、式(2)より気体圧  $P$  が得られる。

### 3. 岩盤破壊過程の解析

個別要素解析では、各要素とその周辺要素との接触力と、気体流動解析で得られた気体圧  $P$  の合力と合モーメントを外力として与え、運動方程式に代入する。それを陽的に時間積分することで、各時間ステップにおける破壊状態を求めて行く。

図2のように、時刻  $t_n$  から  $t_{n+1}$  に向けて個別要素解析と気体流動解析を実施する。時刻  $t_n$  における気体圧  $P_n$  が既知として、 $t_n$  での気体圧  $P_n$  を外力として設定し個別要素解析を行う。 $t_{n+1}$  での更新後の要素位置に基づき、平均亀裂幅  $\bar{h}_x, \bar{h}_y$  と空隙比  $\alpha$  を求める。その結果に基づき、気体流動解析を行い、 $P_{n+1}$  を求める。このアルゴリズムに基づき解析を行っていく。

### 4. 解析結果

#### (1) 解析条件

岩盤の初期設定を図3の左図のように与える。要素サイズは0.1m前後で与えた。上下・左右対称条件より1/4領域を解析対称としている。

Key Words: 自由面発破, 個別要素解析, 気体・岩盤連成

連絡先: 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL 025 (262) 7028 FAX 025 (262) 7021

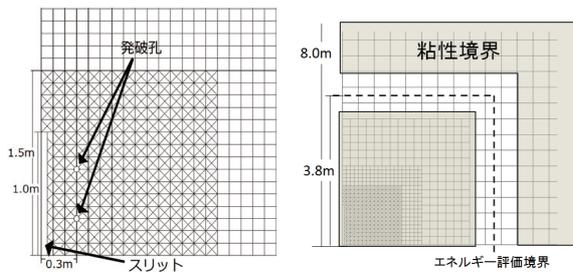


図3 岩盤域の設定

表1 岩盤の物性値

ポアソン比	0.25
摩擦係数	0.3
接線方向パネ定数	$2.0 \times 10^{10}$ Pa/m
法線方向パネ定数	$4.0 \times 10^{10}$ Pa/m
粘性係数	$3.0 \times 10^3$ Pa · m/s
破壊強度	$8.0 \times 10^6$ N/m <sup>2</sup>

発破孔は直径 50mm の八角形で表現してある。なお、上方の発破孔にのみ初期圧力を設定し、そこからの破壊過程を解析する。図3の左下のスリット部分の寸法は、幅 50mm 高さ 1.0m で設定している。なお、解析ではスリットの効果について検討するため、スリットがない場合とスリット幅が 100mm の場合についても解析を行った。また、図3右に示すように、対称境界辺から 3.8m の位置に発破による放射波動エネルギーを評価する境界を設け、さらにその外側に粘性境界を設けた。

岩盤の物性値は中硬岩の花崗岩を想定して表1のように与えた。また、発破孔内に設定した初期圧力は  $1.0 \times 10^{10}$  Pa である。解析における個別要素の時間増分  $\Delta t$  は  $1.0 \times 10^{-7}$  s とし、気体圧に関する  $\Delta t$  は  $1.0 \times 10^{-5}$  s とした。

(2) 解析結果

発破から 0.004s 後の破壊の様子を図4に示す。各結果とも亀裂の進展が見られたが、スリットの導入により、その周囲が大きく破壊している様子が窺える。

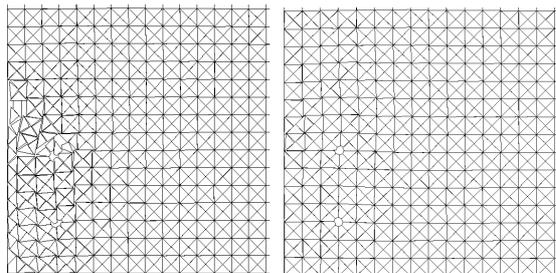


図4 0.004s 後の破壊状況 左: 図スリット 0.05 m, 右: スリットなし

鉛直・水平波動エネルギー境界を  $\Delta t$  秒間に通過する放射

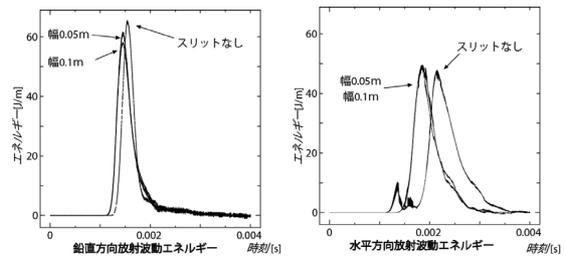


図5 鉛直・水平方向の波動エネルギー

表2 鉛直方向放射波動エネルギー

スリットなし	206104.4 [J/m]
スリット幅 0.05m	238040.8 [J/m]
スリット幅 0.1m	235606.6 [J/m]

表3 水平方向放射波動エネルギー

スリットなし	311849.9 [J/m]
スリット幅 0.05m	256863.2 [J/m]
スリット幅 0.1m	266698.6 [J/m]

エネルギーの時刻歴を図5に示す。また、鉛直・水平方向へ放射された全波動エネルギーを表2、表3に示す。この結果からスリットの存在により鉛直方向エネルギーは少し増加するものの、水平方向エネルギーが約 18% 低減され、全放射エネルギーは減少していることがわかる。また、スリット幅の影響について比較すると、両者間の差はわずかであることがわかる。以上より、少なくとも二次元解析では、例えば上方への振動伝播を抑制したい場合には、水平方向にスリットを導入する方が効果的であり、その幅は 0.1m 程度で十分であるとの結果を得た。

5. おわりに

本研究で構成した気体・岩盤連成系に基づく解析において、スリットの導入で放射波動が低減される傾向が認められた。なお、放射波動の低減には、自由面近傍の破壊による反射波の低減効果が重要であると考えられる。この評価には、発破孔から自由面までの距離や破壊エネルギーなどの影響の検討がさらに必要である。また、定量的な振動低減の評価には、発破孔の数や位置、発破パターンなどについて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 若月 和人, 木村 能隆, 多田 芳葉, 高橋 渉: 民家直下における心抜き自由面発破の振動低減効果, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, VI-387, 2011.
- 2) Munjiza, A., Hatham, J.P. and Andrews, K.R.F.: Detonation gas model for combined finite-discrete element simulation of fracture and fragmentation, I.J.N.M.E., 49, 1495-1520, 2000.
- 3) Minchinton, A. and Lynch, P.M.: Fragmentation and heave modelling using a coupled discrete element gas flow code, FRAG-BLAST, 1, 41-57, 1997.