

自由面近傍の発破孔深さが破壊特性に及ぼす影響

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
新潟大学大学院自然科学研究科	正会員	紅露 一寛

1. はじめに

トンネル掘削工事において、爆薬を用いた発破掘削が行われることがある。発破掘削の際には、発破振動が発生するため、それが周辺環境に及ぼす影響が懸念されている。そのため、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。

発破振動の低減効果のある工法として現在実用され、効果が実証されている例¹⁾に心抜き自由面発破という工法がある。心抜き自由面発破工法は、発破掘削を行う際に、掘削面中央にあらかじめ自由面を設けておき発破する工法である。この工法において発破振動の低減が実際に確認されている¹⁾が、自由面を形成することによる振動低減効果の予測手法は確立されていない。

これまでに当研究室では、発破による岩盤破壊過程の解析において岩盤を個別要素で、発破による気体の流れに差分を用いる手法を構築した²⁾。その中で、自由面の導入により放射波動が低減される傾向が認められた。本研究では、自由面と岩盤破壊の関係について、さらに詳細な検討を行う。具体的には、自由面近傍の発破孔深さが岩盤の破壊状態に及ぼす影響について、数値解析に基づき検討する。

2. 解析手法²⁾

(1) 気体流動解析

気体流動解析では、発破により生じた気体圧力の変化を差分法を用い評価していく。まず、発破孔内が気体で満たされる前の気体圧を文献³⁾に基づき設定する。

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⁴⁾。

$$P = c\rho^\gamma \quad (1)$$

ここで、 P は圧力、 ρ は密度、 c と γ は定数である。

気体の流動解析において、運動量保存則と質量保存則に関する次式を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\alpha) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x\alpha) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y\alpha) = 0 \quad (2)$$

$$v_x = -\frac{\bar{h}_x^2}{12\mu_t} \frac{\partial P}{\partial x}, v_y = -\frac{\bar{h}_y^2}{12\mu_t} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3)$$

ここで、 α は空隙比、 v_x 、 v_y は速度成分である。また、 μ_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。式(2)、

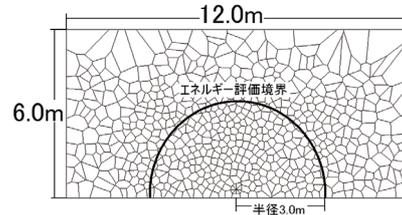


図1 岩盤メッシュの例(全体)

(3) を差分法により離散化して、以下に述べる個別要素の配置に基づき、亀裂内の気体圧力を求める。

(2) 岩盤破壊過程の解析

発破による気体圧力を受けた岩盤の運動は、個別要素法を用い評価していく。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。

個別要素と気体流動の連成解析では、まず時刻 t_n における気体圧 P_n を外力として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 α 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、以降同様の操作を繰り返す。

3. 解析条件

(1) 岩盤に関する解析条件

岩盤の初期設定を図1のように与える。全体の岩盤域は縦 6.0m 横 12.0m で与え、放射波動エネルギー評価境界を半径 3.0m の半円で設定した。また、図1において、発破孔は直径 50mm 径の八角形で表現し、下自由面から 0.15 ~ 0.6m、左右の自由面から 6.0m の中央部に設定した。なお、発破孔近傍の個別要素サイズは 0.2m ~ 0.3m で与えた。個別要素メッシュは、ポロノイ分割を用い作成した。

岩盤の物性値は中硬岩の花崗岩を想定して表1のように与える。また、発破孔に設定した初期圧力は 6.0×10^{10} Pa とし、解析における個別要素の時間増分は 1.0×10^{-7} s とした。

今回の解析では、下自由面から発破孔への距離を 0.15m、0.30mm、0.45mm、0.60mm とし、それぞれ8種類のメッシュ分割に対し解析を行った。

Key Words: 個別要素法、自由面発破

連絡先: 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL 025 (262) 7274 FAX 025 (262) 7274

表 1 岩盤の物性値

ポアソン比	0.25
摩擦係数	0.3
接線方向バネ定数	2.0×10^{10} Pa/m
法線方向バネ定数	4.0×10^{10} Pa/m
粘性係数	3.0×10^3 Pa · m/s
破壊強度	8.0×10^6 N/m ²

表 2 各種エネルギーと発破孔深さとの関係

発破孔深さ	放射波動エネルギー	運動エネルギー	被破壊面積
発破孔深さ 150mm	4.1 [%]	95.7 [%]	3.7 [m ²]
発破孔深さ 300mm	8.4 [%]	91.6 [%]	4.0 [m ²]
発破孔深さ 450mm	12.5 [%]	86.6 [%]	4.8 [m ²]
発破孔深さ 600mm	15.3 [%]	84.0 [%]	5.9 [m ²]

(2) 各種エネルギーに関する解析条件

解析結果より、エネルギー評価境界を通過する放射波動エネルギー、および岩の運動エネルギーを評価する。なお、岩の破壊エネルギーはこれらと比較して小さかったため評価していない。

放射波動エネルギー E は、エネルギー評価境界上要素の変位速度 \dot{u} とその要素に作用している応力 σ による仕事量として、式 (4) により評価する。

$$E = \int_t \dot{u} \cdot \sigma^T \cdot n d\Gamma dt \quad (4)$$

ここで、 n は法線方向ベクトル、 Γ はエネルギー評価境界である。また、運動エネルギーの評価は、図 1 に示すエネルギー評価境界の内側の要素に関してのみ行うものとし、解析最終時刻 (0.004sec) における値を算出するものとする。

4. 解析結果

表 2 に放射波動エネルギーおよび運動エネルギーの両エネルギーの和に対する各々の割合を示し、合せて岩盤の破壊域面積も示す。なお、値は各発破孔深さについて、それぞれ 8case 行った結果を平均したものである。表 2 を見ると、発破孔が深くなるにつれて放射波動エネルギーの割合が大きくなり、逆に運動エネルギーの割合が小さくなるのがわかる。また、破壊域の面積は、発破孔深さが深くなるにつれて大きくなる傾向がある。図 2、図 3 に解析最終時刻 (0.004sec) における発破孔深さ 0.30m、0.45m の岩盤の破壊状況を示す。これらを見ても岩盤の破壊域は、発破孔深さが深くなるにつれて広がっていることが確認できる。

破壊域の面積を放射波動エネルギーで除した値を表 3 に示す。この値は、単位放射波動エネルギー当りの破壊域面積を表しており、発破効率を意味している。表より、発破孔深さ 0.30mm ~ 0.45m において発破効率に関し最適な深さが存在することがわかる。

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, VII-387, 2011
 2) 石沢 浩太, 阿部 和久, 若月 和人: 心抜き自由面発破による岩盤破壊過程の解析, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, CS6-16, 2012

表 3 破壊域面積と放射波動エネルギーの比

発破孔深さ	150mm	300mm	450mm	600mm
発破効率 [m ² /J × 10 ⁷]	2.62	3.39	3.52	3.22

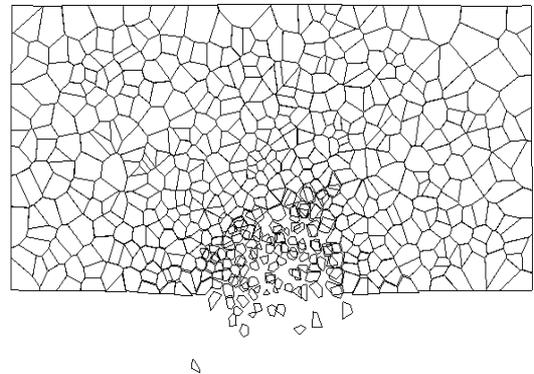


図 2 岩盤の破壊状況 (深さ 300mm)

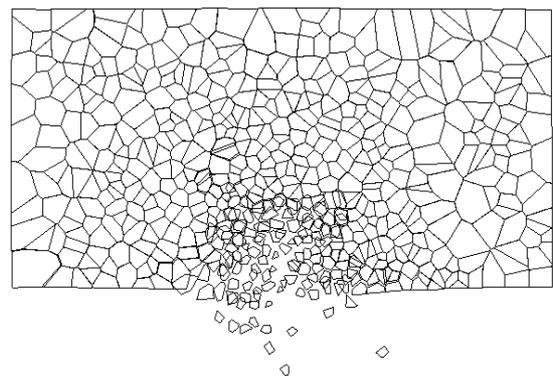


図 3 岩盤の破壊状況 (深さ 450mm)

3) 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
 4) Minchinton, A. and Lynch, P.M.: Fragmentation and heave modelling using a coupled discrete element gas flow code, FRAG-BLAST, 1, 41-57, 1997