

単一発破孔を対象とした自由面近傍の発破解析

新潟大学自然科学研究科	学生員	○ 石沢浩太
(株) 福田組	正会員	若月和人
新潟大学工学部建設学科	正会員	阿部和久
新潟大学自然科学研究科	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広く行われている。その際には、発破振動が発生するため、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くる。発破振動の低減効果を有する工法として、現在実用され効果が実証されている例に心抜き自由面発破¹⁾という工法がある。当該工法は、発破掘削を行う際に、掘削面中央にあらかじめスリット状の自由面を設けておき発破する工法のことである(図1)。

これまでに、発破孔近傍における亀裂進展解析例が報告されている²⁾。そこでは、有限要素法に基づいた亀裂進展過程における応力解析が比較的高精度に行われている。しかし、自由面発破による地盤振動解析では、亀裂進展の様な準静的な現象ではなく、連続体から離散体に至るまでの一連の岩盤破壊過程を適切に表現することが不可欠となる。

そこで本研究では、岩の破壊・飛散を伴うトンネルの発破掘削を対象に、単一自由面を有する問題(半無現場)を対象に個別要素法(DEM)を適用し、発破孔から自由面までの距離(最少抵抗線長)が破壊域面積や、放射波動エネルギー、飛散岩塊の運動エネルギー等に及ぼす影響について調べ、適切な最少抵抗線長について考察する。

2. 解析手法

本研究で対象とする解析は、大きく分けて2つの解析過程から構成されている。1つは岩の破壊過程を再現するDEM解析であり、もう1つは発破時の気体圧力分布を求める気体流動解析である。これら2つの解析の連成によって一連の解析を行う。

(1) DEMによる岩の破壊解析

岩盤のDEM解析では、各要素とその周辺要素との接触力に加え、気体流動解析で得られる気体圧 P による作用力を当該要素に外力として与える。その下で要素毎に作用する合力と合モーメントを求め、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各要素配置を更新して行く。

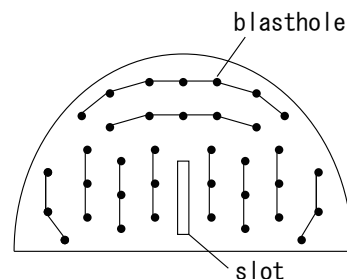


図1 Blasting pattern with central slot

(2) 気体圧力場の解析

気体流動解析では、発破により生じた気体圧力の岩盤破壊過程における変化を差分法を用い評価していく。気体圧力の発展過程は、発破孔がガスで満たされるまでと、その後の岩の破壊による気体密度変動に伴う圧力消散過程とに分けることができる。前者については既往の研究と同様、圧力の立ち上がり曲線(式(1))と最大圧力値を解析条件として与える。

$$P(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{t}{t_0} \pi \right) P_0, (t \leq t_0) \quad (1)$$

ここで、 $P(t)$ は時刻 t での圧力、 t_0 は圧力の立ち上がり時間、 P_0 は最大圧力である。

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³⁾。

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

ここで、 ρ は気体密度、 c と γ は定数である。

解析において、気体は亀裂内を一次元的に流れるものとする。それを二次元面内に縦横に存在する亀裂の問題に適用すると、質量保存則と運動量保存則より次式を得る³⁾。

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

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

ここで、 α は破碎された岩盤の空隙率、 v_x, v_y は気体の流速成分である。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。

x, y 方向に直交格子を設定し、 ρ, P および流速を設定し、式(3)、(4)を差分法により離散近似する³⁾。

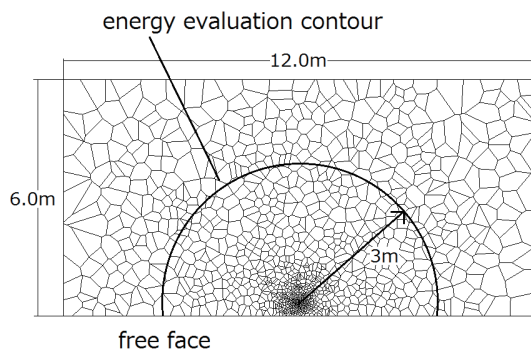


図2 Discretization of rock domain with distinct elements

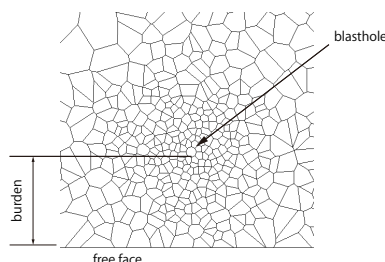


図3 Discretization around the blasthole

(3) 連成解析手順

気体流動解析の時間増分を個別要素解析のそのの N_D ステップ分に設定する。その下で、まず n ステップ目における気体圧 P_n を外力として $n + N_D$ ステップまで個別要素解析を行う。次に、 $n + N_D$ ステップでの個別要素配置に基づき、平均亀裂幅と空隙率を更新する。その結果に基づき、気体流動解析を行い、 P^{n+N_D} を求める。以降同様の操作を繰り返す。

3. 解析例

(1) 解析条件

図2のように自由面近傍に単一の発破孔を設けた場合を考える。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 の円弧で設定した。また、図3に示す様に直径 50mm の発破孔を左右中央に設け、その内部に初期圧力を式(2)により与える。なお、式(3)における定数 c および γ は、それぞれ 0.993, 2.87 と与えた。

発破孔の最少抵抗線長が破壊状態に及ぼす影響を把握するため、その値を 0.125m, 0.275mm, 0.425mm, 0.575mm と4ケース設定した。なお、解析結果は要素分割に依存するため、それぞれ8種類の分割に対し解析を行った。

(2) 各種エネルギーの評価方法

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 E_W 、および岩の運動エネルギー E_T を評価する。放射波動エネルギーは、エネルギー評価境界上に位置する要素の変位速度 $\dot{u}$ とその要素に作用している応力 σ とから評価する。また、運動エネルギーの評価は、図2に示

表1 Relation between burden and energies

burden [m]	E_W	E_T	fracturing area [m ²]
0.125	10.7 [%]	87.9 [%]	5.5
0.275	18.7 [%]	78.9 [%]	6.9
0.425	20.7 [%]	76.5 [%]	8.1
0.575	23.1 [%]	73.8 [%]	8.3

表2 Ratio of fracturing area to E_W

burden[m]	0.125	0.275	0.425	0.575m
e_B [m ² /J $\times 10^7$]	3.09	3.68	4.14	3.81

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する。

(3) 最少抵抗線長が結果に及ぼす影響

表2に放射波動エネルギー E_W および運動エネルギー E_T の総和に対する各々の割合と、岩盤の破壊域面積を示す。表2より、発破孔位置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、最少抵抗線長が長くなるにつれて増大する傾向にある。

以上の結果より、発破振動の原因となる放射波動エネルギーを低減するためには、最少抵抗線長を短く設定する方が効果的である。一方、トンネル掘削の目的では、本来広い破壊領域面積を広くすることが求められるが、これら2つの要求は互いにトレードオフの関係にある。そこで、破壊域の面積を放射波動エネルギーで除した値を発破効率 e_B と定義し、解析結果に対して求めたその値を表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、この値が大きければ少ない放射波動エネルギーで広い破壊領域面積が確保できることを意味している。表より、最少抵抗線長 0.425m 付近において、発破効率に関し最適な深さが存在することがわかる。このことより、心抜き自由面発破を実施する場合、自由面から近接発破孔までの距離を適切に設定することで効果的なトンネル掘削が可能となるものと考えられる。

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) 金子勝比古, 松永幸徳, 山本雅昭: 発破における岩石破碎過程の破壊力学的解析, 火薬学会誌, 56(5), 207-215, 1995.
- 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.