

自由面発破による岩盤破壊過程の個別要素解析

DISTINCT ELEMENT ANALYSIS OF ROCK FRACTURE AND FRAGMENTATION DUE TO BLASTING WITH FREE FACE

石沢浩太¹⁾, 若月和人²⁾, 阿部和久³⁾, 紅露一寛⁴⁾

Kouta ISHIZAWA, Kazuhito WAKATSUKI, Kazuhisa ABE and Kazuhiro KORO

- 1) 新潟大学大学院自然科学研究科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050)
- 2) (株) 福田組 (〒 951-8668 新潟市中央区一番堀通町 3-10, E-mail:waka1950@fkd.co.jp)
- 3) 新潟大学工学部建設学科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050, E-mail:abe@eng.niigata-u.ac.jp)
- 4) 新潟大学大学院自然科学研究科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050, E-mail:kouro@eng.niigata-u.ac.jp)

This paper presents a numerical method for rock blasting problems. In particular, fragmentation near the free face and wave propagation in the rock domain due to the blasting are analyzed. For this purpose, the distinct element method and a gas flow analysis method are coupled. In order to determine the analytical conditions, the maximum gas pressure and its initiation time are briefly examined. Furthermore, the influence of element size on the fracturing behavior is investigated. The developed method is applied to rock blasting problems of a single blasthole with free face. Through numerical experiments the relations between the burden and various properties are obtained. Based on these results, the optimum burden is discussed in the context of the tunneling method.

Key Words: Tunnel Blasting, Free Face, Vibration Reduction, DEM

1. はじめに

トンネル掘削工事中において、爆薬を用いた発破掘削が広く行なわれている。その際には発破振動が発生するため、周辺環境に及ぼす影響が懸念されている^(1, 2)。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⁽³⁾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である (Fig.1)。しかし、自由面を形成することによる振動低減効果の定量的予測は難しく、定性的評価に限っても必ずしも十分に議論がなされていない。そのため、自由面を有する発破における動的破壊と、それにより発生する地盤振動とを適切に評価し得る数値解析手法の確立が望まれる。

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⁽⁴⁾。そこでは有限要素法に基づいた解法が用いられており、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低減には、自由面からの岩塊の飛散が寄与していると考えられる。この場合、亀裂進展の様な準静的な現象ではなく、連続体が

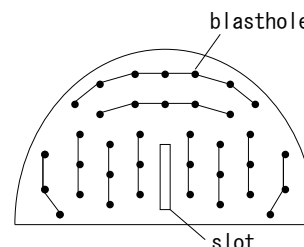


Fig. 1 Blasting pattern with central slot

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。

その様な現象を対象として、Minchinton と Lynch⁽⁵⁾ は有限要素法に基づいた解析を試みている。当該解析では、発破により発生した応力に基づき要素の破壊判定を行い、亀裂が発生すると判定された場合にはその要素を分割し、メッシュを更新しつつ離散体に至るまでの過程を解き進める手順が採られている。この場合、メッシュに依存せずに破壊・飛散解析を行うことが可能ではあるものの、比較的多くの解析時間と手間を要する。

これに代わり得るものとして、不連続変形法⁽⁶⁾ や個別要素法 (DEM) を用いた解析が挙げられる。DEM による解析

では、パネ・質点系の集合体で物体を表現するため、弾性係数など連続体としての物性値の再現に工夫を要するものの、連続体から離散体までの一連の破壊過程を単純なアルゴリズムで解析することができる。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、DEMに基づいた解法を構築する。さらに当該問題の適切な再現に必要な解析条件の設定について検討する。なお、本来は三次元解析が望ましいが、解析負荷を考慮し、既往の研究同様に二次元問題を対象とする。

爆薬の爆発によって発破孔が高圧の爆轟生成ガス（以降、ガスと呼ぶ）で満たされると、高い気体圧が短時間で孔の内面に作用し、その結果として孔近傍にはせん断破壊が、さらにその周囲には引張破壊が発生する⁽⁷⁾。その際に生じた亀裂内に気体が流入し、そこに新たな気体圧力作用面が形成されることとなる。最終的には、発破孔近傍に設けられた自由面から離散体状に破碎された岩塊が飛散し、それと同時に、亀裂内に閉じ込められていた気体圧が消散して行く。自由面を伴う岩の発破・飛散解析では、これらの過程を適切に表現することが望ましい。そのため文献⁽⁵⁾では、岩盤の有限要素メッシュとは別に、その背景に気体圧力場の固定格子を設定し、亀裂をそれと等価な空隙場の分布として表現し、その下で気体の圧力解析を行っている。本研究では、文献⁽⁵⁾の手法を用いて気体流動解析を行い、個別要素に作用する圧力を適宜評価しつつ岩の発破解析を行う。

また、解析領域内にエネルギー評価境界を設定し、発破孔から地盤内に放出される波動エネルギーを評価する。その際に個別要素内の応力を評価する必要がある。そこで、個別要素に作用する要素間接触力から要素内応力を求める⁽⁸⁾。

発破解析に関する既往の研究には、発破孔内における初期圧力の立ち上がり時間や、最大圧力の設定根拠が必ずしも明確でないものが多い。そこで本研究では、関連する研究結果や実際のトンネル発破での条件等を考慮して、これらの値を設定する。

また破碎過程の適切な再現のためには、発破により生成される岩塊のサイズが再現可能な程度に個別要素サイズを小さく設定することが望ましいと考えられる。そこで、実際の発破において観察される岩塊の粒度分布を参考とし、加えて数値実験を通して個別要素サイズが結果に及ぼす影響を確認して、その設定について検討する。

最後に、単一自由面を有する問題（半無限場）を対象に本手法を適用し、発破孔から自由面までの距離（最小抵抗線長）が破壊領域面積や、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、適切な最小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個別要素解析であり、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。以下に各解析手順について述べる。

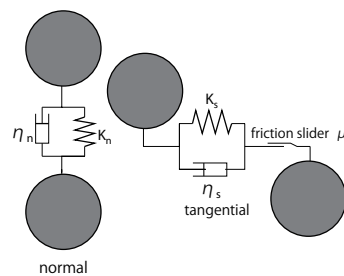


Fig. 2 Contact units

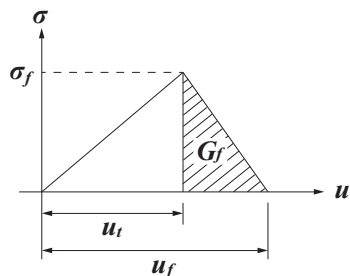


Fig. 3 Fracture based softening model

2.1. 個別要素による岩の破壊解析

岩盤のDEM解析では、各要素と他の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要素配置を更新する。なお、気体圧力の評価方法については2.2で述べる。

個別要素どうしの接触力は、Fig.2に示す様に、法線方向と接線方向の接触ユニットにより表現する。法線方向接触ユニットの破壊過程は、Fig.3に示すモデルにより与える。図において、 σ_f は引張破壊強度、 u_t は σ_f 発生時の接触バネの伸び、 u_f は亀裂発生時のバネの伸びである。なお u_f は、破壊エネルギー解放率 G_f を用いて $u_t + 2G_f/\sigma_f$ と与える。

本研究では、発破により地盤内に放射される波動エネルギーを求める。その際に個別要素内の巨視的応力を計算する必要がある。具体的には、次式により評価する⁽⁸⁾。

$$\sigma = \frac{1}{V_P} \sum_i \mathbf{a}_i \otimes \mathbf{F}_i \quad (1)$$

ここで、 σ は要素内の平均応力、 V_P は要素体積（面積）、 \mathbf{a}_i は要素重心から接触点 i までの相対位置ベクトル、 \mathbf{F}_i は接触点 i に作用する接触力ベクトルである。なお、エネルギー評価境界は破壊領域より遠方に設定するものとする。この場合、要素境界辺に気体圧力が作用することは無く、要素作用力は要素間接触力のみとなる。

2.2. 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

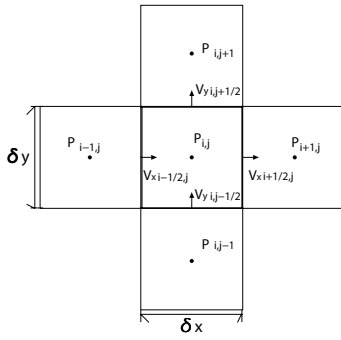


Fig. 4 Discretization with staggered grid

の破壊による気体密度変化に伴う圧力消散過程とに分けることができる。一般に、振動を低減しようとする制御発破では爆薬は軽装填され爆轟の影響は無視できることから、前者については既往の研究と同様、本研究でも圧力の立ち上がり曲線と最大圧力値を解析条件として与える。なお、圧力の立ち上がり曲線は次式で与えた。

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

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。 $t > t_0$ での圧力は以下の手順で求める。

気体で発破孔内を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⁽⁵⁾。

$$P = c\rho^\gamma \quad (3)$$

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⁽⁵⁾。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\alpha) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x \alpha) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y \alpha) = 0 \quad (4)$$

$$v_x = -\frac{\bar{h}_y^2}{12\mu_t} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v_y = -\frac{\bar{h}_x^2}{12\mu_t} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (5)$$

ここで、 α は破碎された岩盤の空隙比、 v_x, v_y は気体の流速成分、 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。なお、 \bar{h}_x, \bar{h}_y の算出方法については後述する。

Fig.4 のような x, y 方向格子サイズが $\delta x, \delta y$ の直交格子を用い、 ρ, P および流速を設定する。上式を差分により離散近似して次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{i,j}\alpha_{i,j}) + \frac{1}{\delta x}[\rho v_x \alpha]_{x_i - \frac{\delta x}{2}, y_j} + \frac{1}{\delta y}[\rho v_y \alpha]_{x_i, y_j - \frac{\delta y}{2}} = 0 \quad (6)$$

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

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

式(7)を式(6)に代入し、さらに式(3)を考慮すると、式(6)は密度 ρ に関する非線形方程式を与える。実際の解析では、まず現時間ステップにおける ρ より式(3)を用いて圧力 P を

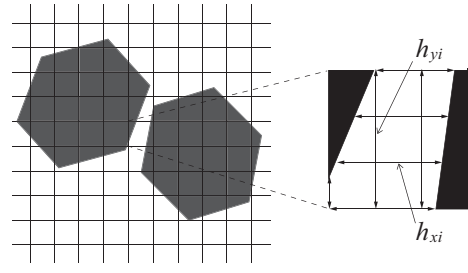


Fig. 5 Evaluation of crack width

求め、式(7)より流速を評価し、それを式(6)に代入して ρ の時間増分を求め、特に反復計算は行わない。

なお、上述の解析では、各格子点における岩の空隙比と平均亀裂幅とを設定する必要がある。以下にその具体的方法について述べる。Fig.5 左に示すような、気体の格子と個別要素を考える。当該の要素配置の下で、各格子毎に Fig.5 右に示すように x, y 方向それぞれ4箇所の亀裂幅を求め、それより平均亀裂幅 \bar{h}_x, \bar{h}_y を算出する。また、この亀裂幅の値を用い各格子毎の空隙比を次式より求める。

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{4\delta x} \sum_i^4 h_{xi} + \frac{1}{4\delta y} \sum_i^4 h_{yi} \right) \quad (8)$$

ここで、 h_{xi}, h_{yi} は、亀裂幅評価における第 i 番目の測定箇所での x, y 方向亀裂幅である。

2.3. 連成解析手順

DEMと気体流動の解析において、安定解を得るために要求される時間増分は、通常前者の方が小さくなる。そこで、気体流動解析の時間増分を個別要素解析のその 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 を外力として与え個別要素解析を行う。同様の解析を $n + N_D$ ステップまで実行する。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 \bar{h}_x, \bar{h}_y と空隙比 α 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。なお通常、 N_D ステップ間の個別要素変位が亀裂形状に及ぼす影響は無視し得る。

3. 解析諸条件の検討

3.1. 圧力の立ち上がり時間の設定

圧力の立ち上がり時間は、使用する爆薬の設定等により大きく異なり、 $1\mu s$ から $1ms$ 程度までの範囲をとり得る。文献⁽⁷⁾では、圧力の立ち上がり時間を $10\mu s, 100\mu s, 500\mu s, 1000\mu s$ に設定し、動的有限要素解析を行っている。その結果、圧力の立ち上がり時間を $10\mu s, 100\mu s$ と設定した場合、発破孔全周にわたり多数の亀裂が半径方向に進展していくが、 $500\mu s, 1000\mu s$ と比較的長く立ち上がり時間を設定した場合は、わずかに数本の長い亀裂のみ進展することが示されている。この様に立ち上がり時間により破壊形態が異なるため、その設定には注意を要する。しかし、従来の発破解析における圧力の立ち上がり時間は、必ずしもその設定根拠が明

確でない (6, 9, 10, 11, 12) .

文献⁽¹³⁾では, 爆轟圧力による鋼管内応力を計測している. その結果より, 爆発で生じた圧力は $12\mu\text{s}$ で最大値に達し, その後低下したものと推測できる. また文献⁽¹⁴⁾では, ガス圧の立ち上がり時間が発生応力に及ぼす影響について解析的に検討している. 動弾性解析ではあるが, 発破孔周囲の応力は圧力の立ち上がり時間に依存し, それが $10\mu\text{s}$ 以上になると徐々に低下し出すことが示されている. 本研究では, これら既往の研究結果を踏まえ, 圧力の立ち上がり時間を $10\mu\text{s}$ に設定する.

3.2. 最大圧力の設定

圧力の立ち上がり時間同様, 既往の研究における解析では, 最大圧力の設定についても明確な根拠が示されていない. そこで本研究では, 発破による最大圧力を以下のようにして設定する.

まず, 直径 45mm, 奥行き 1000mm の円筒状の発破孔内に, 体積 282.74mm^3 (直径 30mm × 長さ 200mm × 2 本) の爆薬を装填した場合を想定する. 一般に最大圧力は, 以下に示す JWL 状態方程式⁽¹⁵⁾より求められている.

$$P = a\left(1 - \frac{\omega}{r_1 v}\right)e^{-r_1 v} + b\left(1 - \frac{\omega}{r_2 v}\right)e^{-r_2 v} + \frac{\omega e_0}{v} \quad (9)$$

ここで, $a, b, r_1, r_2, \omega, e_0$ は爆薬成分に関するパラメータで, v は発破孔体積と爆薬の体積比である. 諸パラメータの値は製品 (火薬) に依存するが, 火薬メーカーからは公開されていない. そのため本研究では, 上述の設定条件で式 (9) に基づく圧力の算出を火薬メーカーに依頼した. その結果より, 最大圧力 P_0 を 178MPa と設定した.

3.3. 個別要素サイズの設定

個別要素サイズは現実の破碎状態を適切に表現し得る様に設定するのが望ましい. そのためには, 発破掘削におけるトンネル掘削ずりの粒度分布を知る必要がある.

既往の研究において, 平均粒径 D_{50} は概ね 200mm 程度であるという報告がなされている^(16, 17). また, 発破孔近傍では, せん断破壊が支配的となり, 岩は細かく破碎され全周にわたり微細な亀裂が発生する. 一方, 50cm 以遠では, 引張破壊が支配的となり, 発破孔近傍に比べ亀裂の密度は疎になる. その結果, 発破孔近傍での粒度は細かく, それ以遠では徐々に大きくなる⁽¹⁸⁾.

そこで本研究では, 発破孔周囲の半径 30cm 以内においては要素サイズを $20 \sim 50\text{mm}$ に設定し, それ以降半径 1m 以内では粒径が概ね 200mm 以下となるよう徐々に要素サイズを大きくした. なお, 個別要素メッシュは, ボロノイ分割により生成した.

4. 解析例

4.1. 解析条件

Fig.6 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, Fig.7 に

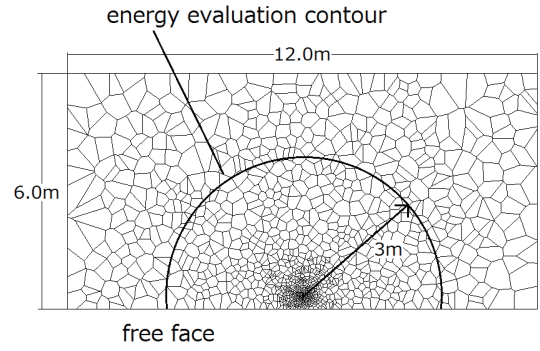


Fig.6 Discretization of rock domain with distinct elements

Table 1 Parameters in DEM analysis

μ	0.3
k_s	20 GPa/m
k_n	40 GPa/m
η_s, η_n	3 kPa · s/m

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) によって与える.

岩盤の物性値は中硬岩の花崗岩を想定し, ヤング率を 50GPa , 質量密度を 2600kg/m^3 と設定した. 個別要素集合体のバネ定数は, 巨視的ヤング率が概ね岩盤の物性値を表現し得る様に, 文献⁽¹⁹⁾の設定方法に基づき Table 1 のように与える. 発破孔周囲のせん断破壊は通常の DEM 解析同様, Table 1 の摩擦係数 μ で表現した. また, 個別要素解析と気体流動解析の時間増分を, それぞれ $1.0 \times 10^{-7}\text{s}$, $1.0 \times 10^{-5}\text{s}$ と設定した. この場合, 2.3 に述べた N_D は 100 となり, 気体流動解析の 1 ステップ間, 一定の圧力分布の下で個別要素解析を 100 ステップ間進めることとなる. なお, 気体流動解析の格子サイズは 1.25cm に設定し, 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⁽⁵⁾.

今回の解析では, 発破孔の最小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 $0.125\text{m}, 0.275\text{m}, 0.425\text{m}, 0.575\text{m}$ 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 4 種類の分割に対し解析を行った.

4.2. 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 , 岩の運動エネルギー E_T , および破壊エネルギー E_F 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 $\dot{\mathbf{u}}$ と, そこに作用している応力 $\boldsymbol{\sigma}$ とから次式により評価する.

$$E_W = \int_T \int_{\Gamma} \dot{\mathbf{u}} \cdot \boldsymbol{\sigma}^T \cdot \mathbf{n} \, d\Gamma dt \quad (10)$$

ここで, \mathbf{n} はエネルギー評価境界 Γ の外向き法線方向ベクトルである. 時間積分の上限は, 発破による波動が通過して振

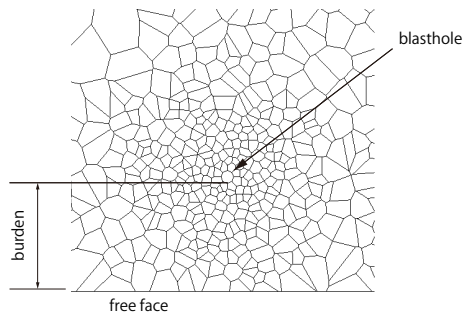


Fig. 7 Discretization around the blasthole

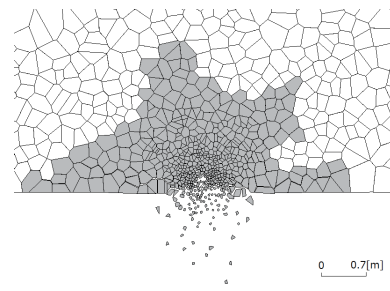


Fig. 8 Fragmentation around the blasthole (burden=0.125m)

Table 2 Relation between burden and energies

burden [m]	E_W [%]	E_T [%]	E_F [%]	fracturing area [m ²]
0.125	10.5	88.0	1.5	6.9
0.275	20.4	76.9	2.7	7.8
0.425	24.9	70.9	4.2	7.8
0.575	25.9	70.6	3.5	9.6



Fig. 9 Fragmentation around the blasthole (burden=0.425m)

幅が十分小さくなり、且つ解析領域端から反射波が戻ってくるより前の0.002sに設定した。また、運動エネルギーは、エネルギー評価境界の内側の要素に関してのみ評価するものとし、0.002sにおける値を算出する。なお、この時点での運動エネルギーは、発破による波動が既に Γ 上を通過し終えているため、概ね飛散要素の運動エネルギーと一致する。

破壊エネルギー E_F は、破壊と判定された要素辺のクラック長さを s として次式で求めた値を、全亀裂について総和をとることで評価する。

$$E_F = \frac{1}{2} \sigma_f u_f s \quad (11)$$

なお本解析では、 $G_f=400\text{Pa}\cdot\text{m}$ 、 $\sigma_f=8\text{MPa}$ のもと、 $u_f \approx 2G_f/\sigma_f$ より $u_f = 1.0 \times 10^{-4}\text{m}$ と設定した。

4.3. 個別要素サイズが結果に及ぼす影響

個別要素サイズが結果に及ぼす影響について確認するため、発破孔近傍の要素サイズを約100mmと20mmの2ケース設定し、他は同一条件の下で解析を実施した。要素サイズ20mmの解析では、亀裂進展および岩の飛散が確認できたが、要素サイズ100mmの解析では、亀裂進展・岩の飛散共に確認できなかった。3.3で述べたように、発破孔近傍の破壊形態は多数の亀裂が密集するせん断破壊に支配される。粗いメッシュではそれが再現できず、岩の破壊・飛散に至らなかったと推測される。以上より、発破孔近傍の要素サイズは、実際に観測される破砕状態を再現し得る程度に十分に細かくする必要があることがわかった。

4.4. 最小抵抗線長が結果に及ぼす影響

Table 2に放射波動エネルギー E_W 、運動エネルギー E_T および破壊エネルギー E_F の総和に対する各々の割合と、岩

盤の破壊域面積を示す。ここで、破壊域面積は破壊境界を有する要素の総面積により求めた。なお表中の値は、各最小抵抗線長に対し4種類の要素分割で解析した結果を平均したものである。0.125–0.575mの各最小抵抗線長に対する E_W の平均値自体は、それぞれ1.89、1.83、1.64、2.46MJであり、発破孔が最も深いケース以外は大差ないが、Table 2を見ると、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、設定範囲内に関する限り、最小抵抗線長が長くなるにつれて増大する傾向にある。一方、破壊エネルギーを見ると、最小抵抗線長0.425mの場合に最大値を示している。これは、発破孔位置が深くなる程破壊域は広がるものの、破砕が抑制されて相対的に亀裂密度が低下するためと考えられる。Fig.8, Fig.9に、最小抵抗線長0.125m、0.425mの場合の、0.002sにおける岩盤の破壊状況をそれぞれ示す。図でグレーの領域は破壊域を示しているが、最小抵抗線長が短い程岩盤の破壊域が小さくなり、岩塊の飛散がより顕著になる様子が確認できる。

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、最小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、本来広い破壊域面積を確保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Table 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、それ

Table 3 Ratio of fracturing area to E_W

burden[m]	0.125	0.275	0.425	0.575
e_B [m ² /MJ]	3.64	4.28	4.79	3.91

が大きければより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、最小抵抗線長 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、心抜き自由面発破の様に発破孔近傍に自由面を有する場合、自由面から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になるものと考えられる。

5. おわりに

トンネルの心抜き自由面発破を想定し、発破による岩盤の破壊と地盤内に放射される波動とを評価可能な解析手法の構築を試みた。岩盤の破壊は DEM により表現し、発破孔から岩盤亀裂内に流入する気体圧は差分法により求めた。また、実現象をより適切に再現することを目的に、ガス圧の立ち上がり時間や最大圧力、および個別要素サイズの設定について検討した。一自由面を有する単一発破孔を対象に解析を行い、最小抵抗線長が破壊特性に及ぼす影響について調べた。その結果、破壊域面積と地盤内に放射される波動エネルギーとは最小抵抗線長に対して共に増大傾向を示すものの、それらの比を最大とする最小抵抗線長が存在することがわかった。

今後は、実測値との比較を通して本解法の適用性を検証し、心抜き自由面発破工法の効果について検討して行くつもりである。

参考文献

- (1) 高村浩彰, 石田能康, 若月和人, 三宅拓也, 小林真人: 発破振動に起因する固体音伝搬音について, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), **68**(2012), pp.L81-L89.
- (2) 火薬学会発破専門部会編: 発破工学ハンドブック 第 8 章「発破の安全対策と環境対策」, (2001), 共立出版.
- (3) 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, (2011), VII-387.
- (4) 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**(1995), pp.207-215.
- (5) Minchinton, A. and Lynch, P.M.: Fragmentation and heave modelling using a coupled discrete element gas flow code, FRAGBLAST, **1**(1997), pp.41-57.
- (6) 緒方雄二, 和田有司, 勝山邦久, 三宅淳巳, 小川輝繁, 西田 佑: ベンチ発破における飛石の飛翔性に関する実験的研究, 火薬学会誌, **59**(1998), pp.254-259.
- (7) 趙 祥鎬, 三宅秀和, 木村 哲, 金子勝比古: 一自由面破碎の破壊プロセスに及ぼす圧力波形の影響に関する数値解析, Sci. Tech. Energetic Mat., **64**(2003), pp.116-125.
- (8) 阿部和久, 後藤嘉雄: 個別要素集合体の巨視的応力度の評価, 計算工学講演会論文集, **1**(1996), pp.913-916.
- (9) Jung, W-J., Utagawa, M., Ogata, Y., Seto, M., Katsuyama, K. Miyake, A. and Ogawa, T.: Effects of rock pressure on crack generation during tunnel blasting, 火薬学会誌, **62**(2001), pp.138-139.
- (10) 金子勝比古, 山本雅昭, 諸岡敬太, 田中義晴: スムースプラスティングにおける起爆秒時精度の影響, 火薬学会誌, **58**(1997), pp.91-99.
- (11) 緒方雄二, 田中 誠, 手島利之, 古閑 豊, 井清武弘: 起爆法の相違による発破効果の検討, 工業火薬, **48**(1987), pp.355-360.
- (12) 勝山邦久, 緒方雄二, 和田有司: 反射引張場による発破現象に関する動的弾性実験と 3 次元動的数値シミュレーション, 工業火薬, **53**(1992), pp.181-192.
- (13) 伊藤一郎, 佐々宏一: 装薬室内壁に作用する爆轟圧について, 日本鉱業会誌, **76**(1960), pp.904-910.
- (14) 伊藤一郎, 佐々宏一, 谷本親伯: 爆破による岩石の破壊機構 (主としてガス圧による破壊), 材料, **20**(1971), pp.97-102.
- (15) デトネーション研究会編: デトネーションの熱流体力学 1, 基礎編, (2011), 理工図書.
- (16) Cho, S.H., Nishi, M., Yamamoto, M. and Kaneko, K.: Fragment size distribution in blasting, Mater. Trans., **44**(2003), pp.951-956.
- (17) 廣島 隆, 大久保誠介, 福井勝則, 籠橋広文, 西崎晶土: トンネル掘削における発破ずりの粒度分布, トンネル工学報告集, **14**(2004), pp.181-186.
- (18) 手塚昌信, 蓮井昭則, 工藤洋三, 中川浩二: 発破による爆破点近傍岩盤の損傷に関する一考察, 土木学会論文集, **602**(1998), pp.139-144.
- (19) 阿部和久: 個別要素法による連続体解析におけるパネ定数の設定, 土木学会論文集, **543**(1996), pp.83-90.