

# 個別要素法を用いた自由面発破実験の再現解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 齋藤 優  
(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

トンネル掘削工事では、爆薬を用いた発破掘削方式が広く採用されているが、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る<sup>1)</sup>。特に、民家等に近接して発破掘削を行う場合は発破振動の低減が必要となってくる。一般的な対策としては、雷管段数を増加して1孔あたりの装薬量を低減する制御発破が採用されているが、掘削面中央の心抜き部にあらかじめスリット状の自由面を設けて発破を行なう「心抜き自由面発破」という方法もある。この方法では、岩盤を破碎するにあたって最も負荷が大きくなる心抜き発破に対して、自由面の存在によって効率よく岩盤を破碎することが可能となり、結果として地盤振動の原因となる放射波動が抑制されることで振動低減を図るものである。

石沢ら<sup>2)</sup>は、発破孔から自由面までの距離が破壊領域面積や放射波動エネルギー、および発破により飛散する岩塊の運動エネルギー等に及ぼす影響について議論している。しかし、解析には二次元個別要素モデルを用いており、実際の発破孔周辺の破壊挙動の再現性が明らかではない。今後当該解析法を適用するためには、発破孔近傍の破壊挙動を明らかにした上で、二次元解析の妥当性を検討することが必要である。

そこで本論文では、まずコンクリート供試体を用いた発破実験を実施し、自由面発破における破壊挙動について調べる。また、供試体表面で測定した加速度データに基づき、発破孔内に作用する圧力波形の推定を試みる。その結果に基づき再現解析を行い、破壊状況の実験結果との比較を通し、解析手法の妥当性について検証する。

## 2 自由面発破実験

### 2.1 供試体概要

供試体の概要を図-1に示す。破壊挙動や振動を捉えやすくするため無筋コンクリート(配合24-8-25BB)により供試体を作成した。発破孔は1孔(直径52mm, 奥行き1500mm)とし、図-1正面図右側面を自由面発破におけるスリットと見立てている。ここでは発破孔中心から自由面までの距離を40cmに設定した。爆薬は含水爆薬(直径25mm, 100g)

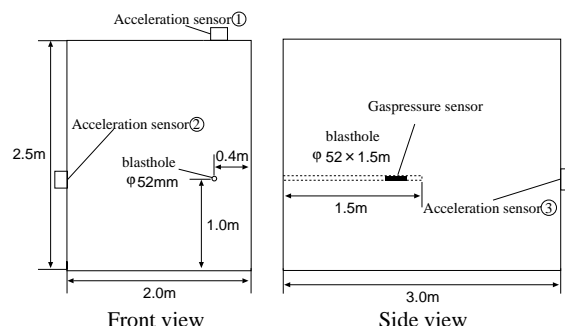


図-1 Outline of concrete specimen

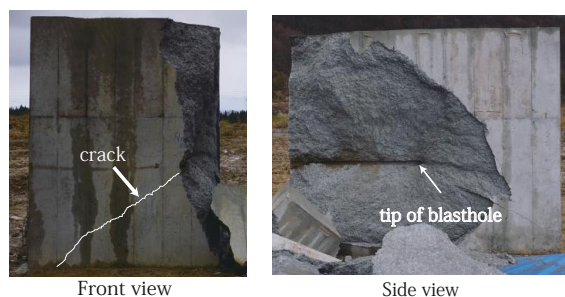


図-2 Experimental result

とし、雷管は瞬発雷管を使用した。また、制御発破を念頭に置き軽装薬とするために、装薬時にはスペーサ(30cm×2)を使用した。

ガス圧の確認を行うために発破孔内部にガス圧センサを、また振動の様子を捉えるために、発破孔の頂部①、側部②、および裏面③の3ヶ所に加速度センサを設置した(図-1参照)。また、デジタルカメラによって高速撮影した動画から破壊挙動を確認した。なお、別途行った材料試験より得られたコンクリートの物性値を表-1に示す。

### 2.2 実験結果

発破実験終了後の供試体の様子を図-2に示す。発破孔から斜め左下方向に亀裂が伸びている。また、鉛直方向への亀裂進展の結果、発破孔から右側の領域が大きく剥離して飛散している。図-2右の写真に示す様に、この破壊面は発破孔とほぼ平行に広がっている。なお、発破孔先端の前方においては、発破孔先端部から自由面に対して45°方向に円錐状に破壊しているが、その他の顕著な亀裂は確認できない。以上のことから、自由面近傍での破壊挙動は、発破孔長手方向に直交する面内に概ね二次元的であることがわかる。

表-1 Material properties of concrete

Density	$\rho$	2390(kg/m <sup>3</sup> )
Compressive strength	$\sigma_c$	39.6 (N/mm <sup>2</sup> )
Tensile strength	$\sigma_t$	3.75(N/mm <sup>2</sup> )
Young's modulus	$E$	32500(MN/m <sup>2</sup> )
Velocity of P-wave	$V_P$	4010(m/s)

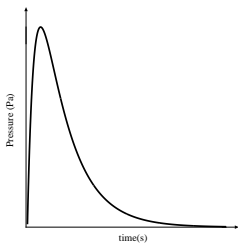


図-3 Pressure waveform<sup>3)</sup>

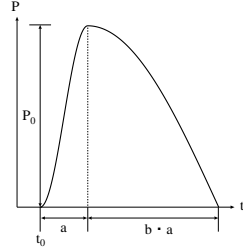


図-4 Pressure waveform in present analysis

何らかの不具合により加速度センサ①は測定不能、さらに、ガス圧センサも発破の際にケーブルが破断されたため測定不能であった。なお、加速度測定値の絶対最大値の大小関係は、裏面③ = 6326.9m/s<sup>2</sup> < 側部② = 29288.5m/s<sup>2</sup> となった。これは発破による波動が、発破孔の内壁面にガス圧が作用して発生するものであるため、細長い形状の発破孔から概ね円筒状に波面が伝播したことによるものと考えられる。

以上より、自由面近傍における破壊と波動伝播の様子は、発破孔が伸びている範囲内において概ね二次元的であるものと思われる。

### 3 圧力波形の推定

#### 3.1 予備解析

先の実験において発破孔内のガス圧力の測定を試みたが、センサ破損のためそれは不可能であった。そのため、供試体表面で測定した加速度データに基づき、ガス圧の波形を逆解析により求める。

詳細解析を進める前に、図-3に示す文献<sup>3)</sup>の圧力関数を用いた予備解析を行い、圧力波形と亀裂伸展挙動との関係を定性的に把握した。その結果、圧力がピークに達した後の減少時間を、ある程度長く設定することで、亀裂進展の再現性が向上する傾向が認められた。さらに、様々な関数により圧力波形を表現したところ、ピーク以降の圧力減少域を上凸関数で与えることでより良好な再現結果を得た。これは、発破孔近傍が破壊することで、気体の領域が急拡大し、結果的に内部圧力が急速に低下するためと考えられる。

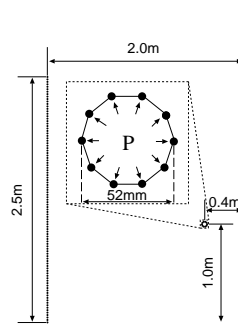


図-5 BE mesh

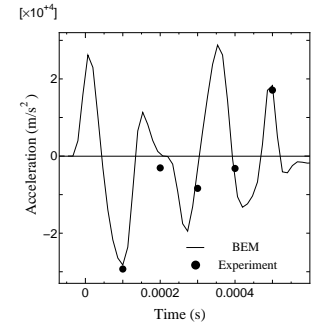


図-6 Comparison of BE-analysis and acceleration data

#### 3.2 発破孔内圧力の推定

供試体側部に設置した加速度センサ②における測定波形から発破孔内の圧力を推定する。なお、当該実験に用いた加速度センサの応答周波数とサンプリング間隔は5kHzおよび10<sup>-4</sup>sである。なお、底面は直接地面に接しており、波動の反射条件を正確に設定することは容易でない。そこで底面からの反射波が到達するまでの波形を用いるものとする。この場合、当該センサに圧力波が到達してから5 × 10<sup>-4</sup>sまでのデータが使用可能となるが、この間に存在する加速度データはわずか5点しかない。

3.1の予備解析の結果を踏まえ、圧力の基本波形は次式により与えた(図-4)。

$$\bar{P}(t) = \begin{cases} P_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\left(\frac{t}{a} - 1\right)\right) & 0 \leq t \leq a \\ P_0 \cos\left(\frac{\pi}{2b}\left(\frac{t}{a} - 1\right)\right) & a \leq t \leq (b+1)a \\ 0 & (b+1)a < t \end{cases} \quad (1)$$

ここで、図-4に示すように $P_0$ は最大圧力、 $a$ は圧力の立ち上がり時間、 $b$ は圧力が最大値からゼロのまで低下する時間を $a$ で除した値である。さらに、推定する圧力波形 $P(t)$ は、圧力が立ち上がり出す時刻 $t_0$ だけ $\bar{P}(t)$ をシフトした関数で与え、以下のように表わす。

$$P(t) = \bar{P}(t - t_0) \quad (2)$$

ただし、用いる初期加速度データの1step(10<sup>-4</sup>s)前を $t = 0$ とする。本研究では、これら4つの値( $P_0, a, b, t_0$ )を未知量として推定する。

この圧力波形 $P(t)$ に対する応答を、1次要素を用いた二次元動弾性時間域境界要素解析より求める。なおその際に、図-5のように、両サイドの自由面を各100要素(要素長2.5cm)、発破孔を10要素で離散化した。前述の通り、底面からの反射波が加速度センサーに到達する以前を解析対象としており、この場合上面からの反射波も到達せず、よってこれらの境界は離散化していない。また、各種物性

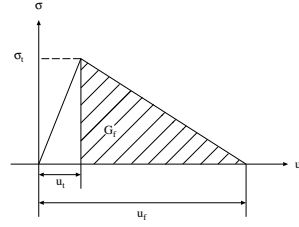
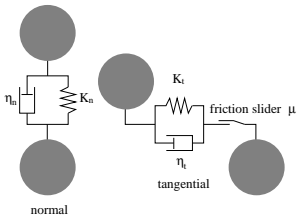


図-7 Contact units between distinct elements

図-8 Fracture model in DE-analysis

値は表-1 に従うものとし、時間増分  $\Delta t = 1.0 \times 10^{-5}$  sec で解析を行った。なお、本境界要素解析では、発破孔要素に 1step のみ単位圧力を与えたときの、側部の加速度センサ ② と同位置の節点における水平方向加速度時刻歴  $A'(t)$  を求め、それと設定した圧力波形  $P(t)$  との合成積により、加速度時刻歴  $A(t)$  を以下のように作成している。

$$A(t) = \int_{-\infty}^t P(\tau) A'(t - \tau) d\tau \quad (3)$$

なお、3.3 に示すように  $t_0 < 0$  となり得るため、式 (3) の積分区間下端は  $-\infty$  としている。これにより、以降の同定解析でその都度境界要素解析を実施する必要がなくなる。

この加速度時刻歴  $A(t)$  と、実験から得られた測定時刻  $t_i$  における加速度離散データ  $B_i (i = 1, \dots, 5)$  との誤差の二乗和を、次式の目的関数として設定した。

$$E = \frac{1}{2} \sum_i^5 (A(t_i) - B_i)^2 \quad (4)$$

この目的関数  $E$  を最小にするように未知量を修正していく。  $E$  のある未知パラメータ  $x$  に関する偏微分は次式の様になる。

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \sum_i^5 \frac{\partial A(t_i)}{\partial x} (A(t_i) - B_i) \quad (5)$$

各未知量の修正量を次式により与える。

$$(\Delta t_0, \Delta P_0, \Delta a, \Delta b) = -\alpha \left( \frac{\partial E}{\partial t_0}, \frac{\partial E}{\partial P_0}, \frac{\partial E}{\partial a}, \frac{\partial E}{\partial b} \right) \quad (6)$$

ここで  $\alpha$  は正の定数である。式 (6) の各補正量に基づき、目的関数  $E$  が十分収束するまで計算を繰り返して、 $t_0$ ,  $P_0$ ,  $a$ ,  $b$  を推定する。

### 3.3 推定結果

3.2 に述べた推定法により得られた各パラメータは初期時刻  $t_0 = -4.46 \times 10^{-4}$  s, 最大圧力  $P_0 = 5.75 \times 10^8$  Pa, 立ち上がり時間  $a = 1.33 \times 10^{-4}$  s, 立ち上がり時間以降の圧力減少時間係数  $b = 2.75$  であった。これらのパラメータの下で設定した圧力波形より、側部 ② における水平方向加速度の時刻歴を求めた結果を図-6 に示す。実線は解析結

果、● は測定データである。前述のとおり、測定データは 5 点しかないものの、解析は概ねそれらを再現できていることが確認できる。

## 4 個別要素解析による発破の再現解析

### 4.1 解析モデル

個別要素解析では、要素間接触力を図-7 のような接触ユニットにより表現している。発破孔壁面にガス圧を外力として与え、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し破壊の進展過程を追跡する。

個別要素法線方向の破壊モデルには、図-8 に示す軟化過程を考慮している。ここで、 $\sigma_t$  は引張破壊強度、 $u_t$  は  $\sigma_t$  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、 $u_t + 2G_f/\sigma_t$  と与える。これらの具体的な設定値については、図-7 の接触ユニットに関する値と合わせ、4.2 に示す。

個別要素分割はボロノイ分割により作成した。なお、底面は地盤と接しているため、地盤を等価な粘性境界として設定した。

### 4.2 解析パラメータの設定

表-1 の値を元に個別要素の解析パラメータを設定する。密度  $\rho$  および引張破壊強度  $\sigma_t$  は表-1 に示した値をそのまま用いた。個別要素同士が連続体として結合している破壊前の状態においては、粘弾性接触条件を要素間の接触辺上に分布して設定するものとした。法線方向および接線方向の個別要素間の辺に分布する単位長さ当りのバネ定数  $K_n$ ,  $K_t$  は、個別要素のバネ定数と要素集合体の巨視的弾性係数との関係から理論的に決定する方法<sup>4)</sup>に基づき、次式により設定した。

$$K_n = \frac{G}{L} \cdot \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{1}{\psi}, \quad K_t = \frac{G}{L} \cdot \frac{1-4\nu}{1-2\nu} \cdot \frac{1}{\psi} \quad (7)$$

ここで、 $G$  はせん断弾性係数、 $\nu$  はポアソン比であり  $\nu = 0.2$  とした。また、 $\psi$  は単位ラジアン当りに存在する接触点数であり、それを 6 点と仮定し、 $\psi = 6/2\pi \approx 1$  と設定した。 $L$  は個別要素辺の代表長さであり、 $L = 0.05$  m で与えた。

法線方向および接線方向の粘性係数  $\eta_n, \eta_t$  は、次式<sup>5)6)</sup>を用いて算出した。

$$\eta_n = 2h \sqrt{\frac{m}{L}} K_n, \quad \eta_t = \eta_n \sqrt{s} \quad (8)$$

ここで、 $h$  は減衰定数、 $m$  は要素質量、 $s = K_t/K_n$  である。減衰係数は衝撃弾性波法により測定したコンクリート

表-2 Parameters in DE-analysis

Spring constant (nomal)	$K_n$	450000 (MPa/m <sup>2</sup> )
Spring constant (tangent)	$K_t$	90000(MPa/m <sup>2</sup> )
pre-fracture		
Damping coefficient (normal)	$\eta_n$	22.59(MPa · s/m <sup>2</sup> )
Damping coefficient (tangent)	$\eta_t$	10.10(MPa · s/m <sup>2</sup> )
post-fracture		
Damping coefficient (normal)	$\hat{\eta}_n$	3.08(MPa · s/m)
Energy release rate of fracture	$G_f$	99.67(N/m)

供試体の対数減衰率  $\delta$  から、減衰定数  $h \simeq \delta/2\pi$  を求めて算出した。

破壊により個別要素同士が分離した後の状態における、辺と頂点間の減衰係数  $\hat{\eta}_n$  は、コンクリート片の落下試験から反発係数  $\epsilon$  を求めることで次式より減衰定数  $h$  を算出<sup>5)</sup> し、式 (8) に従い  $\hat{\eta}_n = 30.8\text{MPa}\cdot\text{s}/\text{m}$  と導出した。

$$h = \sqrt{\frac{(\ln \epsilon)^2}{\pi^2 + (\ln \epsilon)^2}} \quad (9)$$

個別要素解析において実験結果と同程度の破壊領域を再現するためには、落下試験で得られた粘性係数より小さくする必要があり、上述の値の 1/10 である  $\hat{\eta}_n = 3.08\text{MPa}$  に設定することで良好な再現性を得た。なお、反発係数によって算出した値には、よって、その様な破壊がほとんど生じないごく微細な亀裂間の接触にもこの値を適用すると、減衰が過大となるため、 $\hat{\eta}_n$  を低減して設定する必要があったものと考えられる。

また、図-8 における破壊エネルギー解放率  $G_f$  の値は、普通コンクリートに対して定められた以下の式<sup>7)</sup> により算出した。

$$G_f = 10(d_{max})^{1/3} \cdot f'_{ck}{}^{1/3} \quad (\text{N/m}) \quad (10)$$

ここで、 $d_{max}$  は粗骨材の最大寸法 (mm)、 $f'_{ck}$  は圧縮強度の特性値 (設計基準強度) (N/mm<sup>2</sup>) である。今回用いた粗骨材寸法は  $d_{max} = 25\text{mm}$  であり、 $f'_{ck}$  については、実測した値 (表-1 の  $\sigma_c$ ) を用いて算出した。以上より設定した各種解析パラメータを表-2 に示す。

### 4.3 解析結果

解析により得られた発破後 0.02s における破壊の様子を図-9 に示す。またデジタルカメラにより撮影した、同時刻における実験画像を図-10 に示す。図-9 において、発破孔周辺が細かく破碎され、そこから数本の方向性を持った亀裂が放射状に伸びている様子が窺える。特に左斜め下方向や、左斜め上方向、さらに自由面 (右側面) 方向に伸びる亀裂に関しては、実験結果を比較的よく再現できている。また、自由面方向にコンクリート塊が飛散し始めており、最

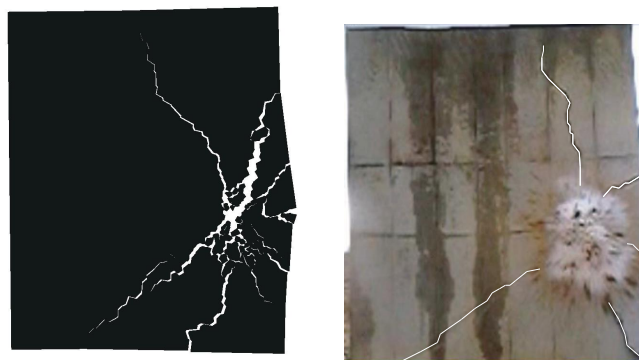


図-9 DE-analysis (time=0.02s) 図-10 Snapshot of experiment (time=0.02s)

終的な剥落域は実験結果 (図-2) と同様に、発破孔を中心に左上方から右下部まで貫通するものと考えられる。

なお、このような破壊状況は個別要素メッシュに多少依存するものと考えられるが、幾つかの異なるメッシュによる解析でも、同様の亀裂進展および飛散の傾向を得ることができた。このことから、これらの破壊特性は概ね再現性を有するものであると思われる。

## 5 おわりに

発破掘削における発破孔周辺の破壊挙動解明のために発破実験を行い、個別要素法によりその再現解析を試みた。

コンクリート供試体の発破実験では、自由面発破における破壊や振動の挙動が概ね二次元的であることが確認された。さらに、実験により得られた物性値および実測データから、適切にガス圧や解析パラメータを設定することで、個別要素法を用いた本手法により実験結果を概ね再現可能であることがわかった。

岩盤を対象とした場合であっても、解析パラメータを適切に設定することで、本解析手法により自由面発破による破壊および振動挙動を評価可能であるものと考えられる。

### 参考文献

- 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伝播音について, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), **68**(2012), pp. I.81-I.89.
- 石沢浩太, 若月和人, 阿部和久, 紅露一寛: 自由面発破による岩盤破壊過程の個別要素解析, 計算数理工学論文集, **13**(2013), pp.61-66.
- 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系の影響に関する数値計算, Sci.Tech.Energetic Mat., **64**(2003), pp.116-125.
- 阿部和久: 個別要素法による連続体解析におけるバネ定数の設定, 土木学会論文集, **543**(1996), pp.83-90.
- 大町達夫, 荒井靖博: 個別要素法で用いる要素定数の決め方について, 構造工学論文集, **32**(1986), pp.715-723.
- 木山英朗, 藤村尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文集, **333**(1983), pp.137-146.
- 土木学会 コンクリート委員会: 2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], (2013), pp.37-38.