

個別要素法によるコンクリート供試体発破実験の再現解析

DE-based numerical simulation of blasting experiment of a concrete box

齋藤 優¹⁾, 若月和人²⁾, 阿部和久³⁾, 紅霧一寛⁴⁾

Yutaka SAITO, 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, E-mail: f14e017a@mail.cc.niigata-u.ac.jp)
 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)

Numerical simulation of blasting experiment of a concrete box is attempted based on the distinct element (DE) method. For this purpose, the gas pressure acting at the inside of the blasthole is identified so that the dynamic reaction can fit with the acceleration data measured on the box surface. In this inversion the wave propagation is analyzed by the time-domain boundary element method. The DE analysis in which the obtained gas pressure is loaded as prescribed data is then achieved. The applicability of the DEM to the blasting process is verified based on the comparison with the crack pattern observed in the experiment.

Key Words: Blasting Experiment, Identification of gas pressure, DEM

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⁽¹⁾⁽²⁾。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⁽³⁾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。

また、発破孔内に作用する圧力は、極めて短時間に大きな値に達することから、その波形の測定は容易でない。そのため、これまではあまり明確な根拠がないまま様々な波形が数

値解析に用いられてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。なお文献⁽³⁾では、気体の状態方程式と流体解析とに基づき、発破孔内に作用する圧力の消散過程を評価する方法⁽⁷⁾を採った。しかし、この方法によっても圧力の立ち上がり曲線や、最大圧力の値などは別途設定する必要があり、依然としてその点に曖昧さが残されていた。また、流体解析と岩盤破壊を表現する個別要素解析とを交互に実施する際に、圧力変化を安定かつ高精度に求めることは必ずしも容易ではなく、解析時間上の負荷も決して無視し得ないものとなっていた。発破解析において、発破孔内の圧力波形は岩盤の破壊特性に大きく影響する⁽⁸⁾ため、それを解析により評価する際には、実際に作用する圧力を適切に設定することが望ましい。

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。なおその際に、ある関数波形の仮定下で、発破時刻、圧力の立ち上がり時間と低下時間、および最大圧力を未知量として、時間域境界要素法により加速度を再現し、感度解析を行った。その結果に基づき個別要素法による再現解析を行い、主要な亀裂の進展方向や本数など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。

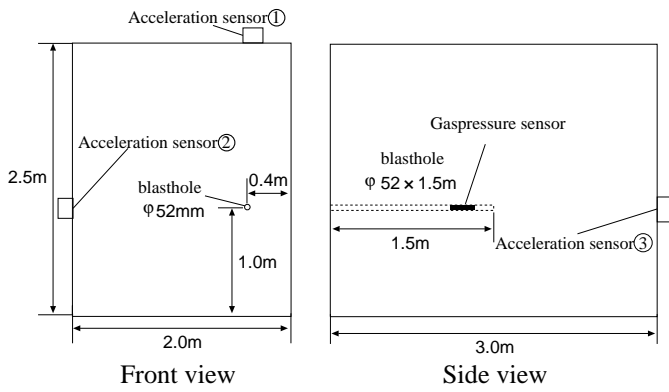


Fig. 1 Outline of concrete specimen

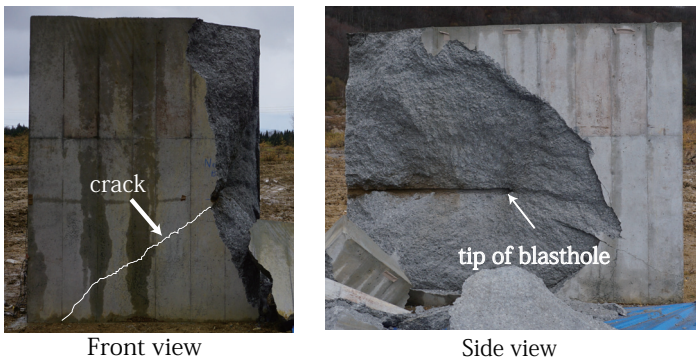


Fig. 2 Experimental result

2. 自由面発破実験

実験に際して、コンクリート供試体を3体製作したが、ここでは、加速度等の測定不良が比較的少なく、実験終了まで概ね良好にデータが得られた1ケースを対象とする。

2.1. 供試体概要

供試体の概要を Fig.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，Fig.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）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（Fig.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 Table 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 Fig.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

Table 1 Material properties of concrete

Density	ρ	2390(kg/m ³)
Compressive strength	σ_c	39.6 (N/mm ²)
Tensile strength	σ_t	3.75(N/mm ²)
Young's modulus	E	32500(MN/m ²)
Velocity of P-wave	V_P	4010(m/s)

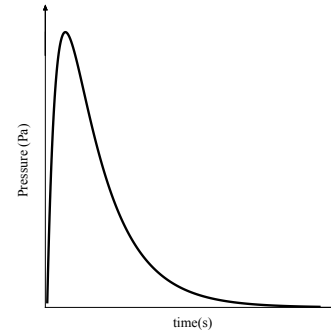


Fig. 3 Pressure waveform⁽⁸⁾

している。Fig.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。

Fig.1 の供試体では，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 = 7048m/s² < 側部 ② = 29289m/s² となった。発破孔から自由面までの距離を変えて行った他の実験でも，加速度は発破孔の側部 ② と頂部 ① に比べ，裏面 ③ で小さくなる傾向が確認された。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。なお，文献⁽³⁾では気体の状態方程式と流体解析よりガス圧を表現した。しかし，その妥当性が必ずしも定かではない。そのため，本解析では，発破孔周囲の個別要素に推定した圧力波形を規定外力として加えることとした。

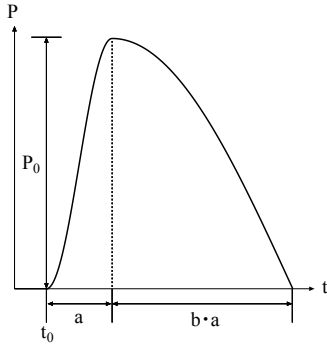


Fig. 4 Pressure waveform in present analysis

発破孔内部の圧力関数としては、立ち上がり時間に比べ緩やかに減少するようなものが種々提案されている。詳細解析を進める前に、Fig.3 に示す文献⁽⁸⁾の圧力関数を用いた予備解析を行い、圧力波形と亀裂伸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な関数で与えることで加速度について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。

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^{-4} 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^{-4} 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 (Fig.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、Fig.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、用いる初期加速度測定データの 1step (10^{-4} 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。

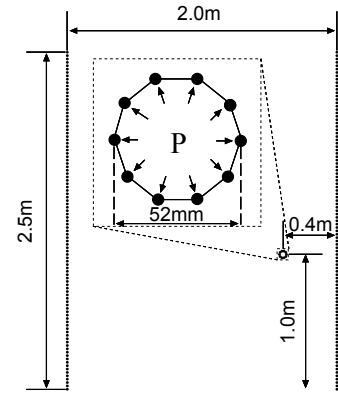


Fig. 5 BE mesh

この圧力波形 $P(t)$ に対する応答を高精度に再現するため、1 次要素を用いた二次元動弾性時間域境界要素解析を実施した。なおその際に、Fig.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。これは波動前面が加速度計に到達・反射する間の時刻に相当し、その領域における亀裂発生時刻はそれ以降であり、よって境界要素法による線形弾性解析が結果に及ぼす影響は小さいと考える。また、各種物性値は Table 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。ここで、各パラメータの修正 $\Delta t_0, \Delta P_0, \Delta a, \Delta b$ による E の変化 ΔE は次式のように表わすことができる。

$$\Delta E = \frac{\partial E}{\partial t_0} \Delta t_0 + \frac{\partial E}{\partial P_0} \Delta P_0 + \frac{\partial E}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial E}{\partial b} \Delta b \quad (5)$$

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。

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \sum_i^5 \frac{\partial A(t_i)}{\partial x} (A(t_i) - B_i) \quad (6)$$

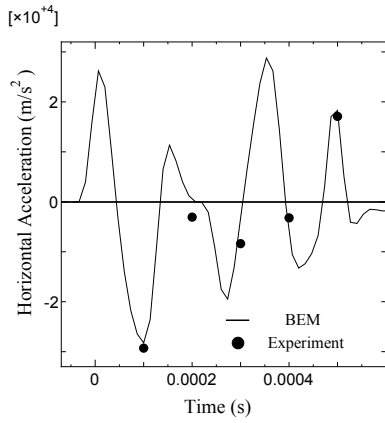


Fig. 6 Comparison of BE-analysis and acceleration data

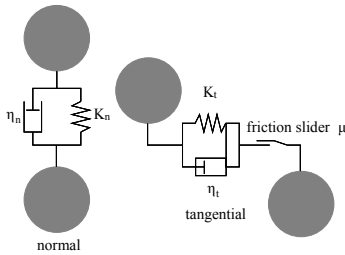


Fig. 7 Contact units between distinct elements

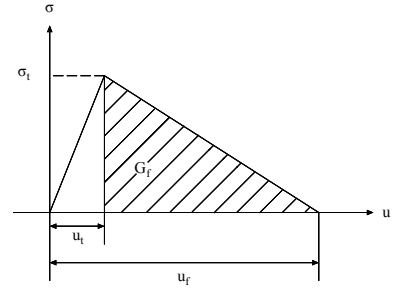


Fig. 8 Fracture model in DE-analysis

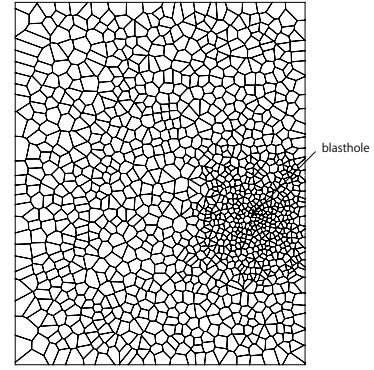


Fig. 9 Discretization with distinct elements

各未知量の修正量を次式により与える．

$$(\Delta t_0 \ \Delta P_0 \ \Delta a \ \Delta b) = -\alpha \left(\frac{\partial E}{\partial t_0} \ \frac{\partial E}{\partial P_0} \ \frac{\partial E}{\partial a} \ \frac{\partial E}{\partial b} \right) \quad (7)$$

ここで α は正の定数である．なお， $A(t)$ のある未知パラメータ x に関する偏微分は，式 (3) から以下の様に求められる．

$$\frac{\partial A(t_i)}{\partial x} = \int_{-\infty}^{t_i} \frac{\partial \bar{P}(\tau - t_0)}{\partial x} A'(t_i - \tau) d\tau \quad (8)$$

式 (7) 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 $t_0 = -4.46 \times 10^{-4} \text{ s}$ ，最大圧力 $P_0 = 5.75 \times 10^8 \text{ Pa}$ ，立ち上がり時間 $a = 1.33 \times 10^{-4} \text{ s}$ ，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 Fig.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．最大圧力 P_0 は，JWL 状態方程式⁽⁹⁾ から導出される値よりも 10 倍程度大きく，実際に作用する圧力波形は，従来想定されていたものと幾分異なっている可能性がある．

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 Fig.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．

個別要素の法線方向破壊モデルには，Fig.8 に示す軟化過程を考慮している．ここで， σ_t は引張破壊強度， u_t は σ_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，Fig.7 の接触ユニットに関する値と合わせ，4.2 に示す．

個別要素解析における供試体の離散化の様子を Fig.9 に示す．前述のとおり，破壊状況は発破孔に直交する面においてほぼ二次元的となることから，領域寸法や発破孔径とその位置は Fig.1 正面図と対応するように設定した．また，個別要素分割はポロノイ分割により作成した．発破孔近傍では亀裂が密に分布し，細かく破壊されるため要素サイズを 20 ~ 50mm となるように設定した⁽³⁾．一方それ以外の領域は発破孔に比べ亀裂の分布は疎になると考えられるため，要素分割は発破孔近傍に比べ粗く設定し，合計 1200 要素で離散化している．

また，実験において供試体底面は地盤と接しているため，地中への波動伝播を考慮する必要がある．対象地盤を無減衰の一次元半無限地盤で近似すると，作用力とのつり合い式から，地盤の鉛直方向等価剛性 K_s は以下の複素剛性で与えられる．

$$K_s = (\lambda_s + 2\mu_s)ik \quad (9)$$

ここで λ_s ， μ_s は地盤のラメ定数， $i = \sqrt{-1}$ ， k は波数である．

Table 2 Parameters in DE-analysis

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

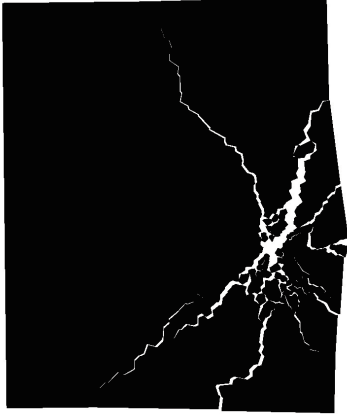


Fig. 10 DE-analysis (time=0.02s)

式 (9) より, K_s に対応するダッシュボットの単位長さ当りの粘性係数 η_s (インピーダンス) を次式で与えた .

$$\eta_s = \sqrt{(\lambda_s + 2\mu_s)\rho_s} \quad (10)$$

ここで, ρ_s は地盤の密度である . $\rho_s = 1800\text{kg/m}^3$, ヤング率 $E_s = 28\text{MPa}$, ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ の地盤と仮定し, 式 (10) より $\eta_s = 278\text{kPa} \cdot \text{s/m}^2$ と設定した .

4.2. 解析パラメータの設定

Table 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 ρ および引張破壊強度 σ_t は Table 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⁽¹⁰⁾ に基づき, 次式により設定した .

$$K_n = \frac{G}{L} \cdot \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{1}{\psi}, \quad K_t = \frac{G}{L} \cdot \frac{1-4\nu}{1-2\nu} \cdot \frac{1}{\psi} \quad (11)$$

ここで, G はせん断弾性係数, ν はポアソン比であり $\nu = 0.2$ とした . また, ψ は単位ラジアン当りに存在する接触点数であり, それを $6/2\pi$ 点と仮定し, $\psi = 6/2\pi \simeq 1$ と設定した . バネ定数が各辺長に比例する様に, L は個別要素辺の代表長さとし, $L = 0.05\text{m}$ で与えた .

法線方向および接線方向の単位長さ当りの粘性係数 η_n, η_s は, 次式⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ を用いて算出した .



Fig. 11 Snapshot of experiment (time=0.02s)

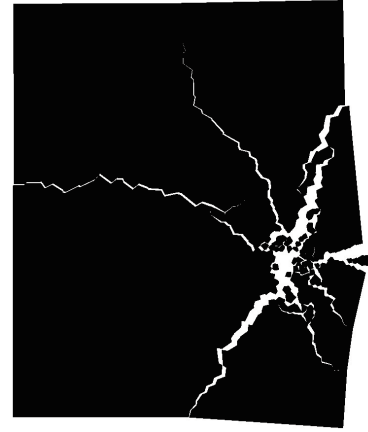


Fig. 12 DE-analysis without transmitting boundary at the bottom (time=0.02s)

$$\eta_n = 2h\sqrt{\frac{m}{L}K_n}, \quad \eta_t = \eta_n\sqrt{s} \quad (12)$$

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供試体の対数減衰率 δ 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 ϵ を求めることで次式より減衰定数 h を算出⁽¹¹⁾ し, 式 (12) に従い $\hat{\eta}_n = 30.8\text{MPa} \cdot \text{s/m}$ と概算した .

$$h = \sqrt{\frac{(\ln \epsilon)^2}{\pi^2 + (\ln \epsilon)^2}} \quad (13)$$

この値を参考値として, 個別要素解析において破壊域の粘性係数が破壊領域および亀裂の進展挙動に及ぼす影響を定性的に評価したところ, 当該粘性係数を高く設定するほど破壊領域は小さくなり, 同時に亀裂の進展も抑制される傾向が認められた . 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, コンクリート片落下時の破壊の影響も含まれる . 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、Fig.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⁽¹³⁾により算出した。

$$G_f = 10(d_{max})^{1/3} \cdot f'_{ck}{}^{1/3} \quad (\text{N/m}) \quad (14)$$

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^2) 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 (Table 1 の σ_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 Table 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 Fig.10 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 Fig.11 に示す。Fig.10 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、実験結果を概ね再現できている。また、自由面方向にコンクリート塊が飛散し始めており、最終的な剥落域は実験結果 (Fig.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。

また、4.1 で設定した底面の粘性境界を取り除いた場合の結果を Fig.12 に示す。Fig.10 と異なり、左水平方向に伸びる亀裂が発生している様子が窺える。これは、底面からの過大な反射波が影響を及ぼしているものと考えられ、地表面境界の条件を適切に設定することの重要性が確認できる。なお、固定境界とした場合も、同様に反射波が影響を及ぼすものと考えられる。ただし、粘性境界を設定した Fig.10 においても、実験に比べ発破孔より下方に大きな亀裂が発生しており、地盤の影響が必ずしも十分に再現されてはいないものと考えられる。

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。

発破孔内圧力は、加速度の実測データ5点に基づく同定解析により推定した。その波形は文献⁽⁸⁾で用いられていたも

のと同様に、圧力の立ち上がり時間に対して、その減少時間が長目 (約3倍) となったものの、ピーク以降急減少する形状とした方が、加速度の再現性が向上することがわかった。本検討により、今まで根拠が曖昧であった圧力波形について、ある程度客観性を持った設定が可能となった。

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。今後は、岩盤における自由面発破を想定した解析を行い、周辺への波動伝播特性に基づき、合理的な振動低減効果の検討を進めていく。

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伝播音について, 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) 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.
- (4) 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.
- (5) 金子勝比古, 山本雅昭, 諸岡敬太, 田中義晴: スムースプラスチックにおける起爆秒時精度の影響, 火薬学会誌, 58(1997), pp.91-99.
- (6) Jung,W-J., Utagawa,M., Ogata,Y., Seto,M., Katsuyama,K., Miyake,A. and Ogawa,Y.: Effects of rock pressure on crack generation during tunnel blasting, 火薬学会誌, 62(2001), pp.138-146.
- (7) Minchinton, A. and Lynch, P.M.: Fragmentation and heave modelling using a coupled discrete element gas flow code, FRAGBLAST, 1(1997), pp.41-57.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 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.