心抜き自由面発破の個別要素解析と 振動低減効果の解明

若月 和人¹・齋藤 優²・阿部 和久³・紅露 一寛⁴

¹正会員 株式会社福田組 技術企画部（〒951-8668 新潟市中央区一番堀通町3番地10）

E-mail:waka1950@fkd.co.jp

²一般財団法人ふくしま市町村支援機構 業務部土木一課（〒960-8043 福島県福島市中町7-17）

E-mail:yutaka_s@fctc.or.jp

³正会員 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正会員 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

切羽外周部あるいは中央部に自由面を形成する制御発破（以下、自由面発破と呼ぶ）では、発破振動を大幅に低減できることが知られている。一方で、その効果メカニズムについての議論は、これまでほとんどなされていなかった。このため、自由面発破における合理的な発破パターン設計は実現困難であり、もっぱら経験的に行われてきた。

本論文では、個別要素解析手法を適用するとともに、発破孔近傍における破壊挙動やエネルギー収支および発破孔遠方における波動場に着目することで、自由面発破の振動低減効果について検証した。この結果、自由面発破における振動低減メカニズムを推測するとともに、特徴的な波動の伝搬特性を確認することができた。

Key Words : *controled blasting, continuous slot, fragmentation, vibration, DEM*

1. はじめに

発破振動の制約が厳しい場合、発破掘削と割岩工法の間接的な位置づけとして、割岩工法で使用する自由面形成技術を利用して、掘削面の中央部や外周部に自由面を形成させて大幅に振動を低減させる発破（以下、自由面発破と呼ぶ）が適用されるケースがある¹⁾²⁾。既往の自由面発破の施工実績では、すべての事例で高い振動低減効果があったと報告されており、その有用性が確認されている。

一方で、自由面の形成には多大なコストと時間を要するため、最小規模の自由面で最大限の振動低減効果を得ることが施工上の課題になると考えられるが、現状では、最大限の振動低減効果を得るためにはどのような自由面を形成すれば良いのかを決定することができない。つまり、自由面発破パターンの合理的な設計手法は存在しない。また、既往の事例においても、自由面形成パターンの採用過程は明確ではない。

一般に発破に伴う振動速度 V の推定には、発破係数 K 、

装薬量 W 、距離 D 、指数 m, n を用いて以下の経験式³⁾が使用されている。

$$V = K \cdot W^m \cdot D^{-n} \quad (1)$$

しかしながら、最適な自由面のパターンを経験的に設計できるほど施工実績の蓄積はないため、経験式による最適な自由面形成パターンの検討は困難である。また、事前に多数の自由面形成パターンについて試験施工を行なうことも現実的ではない。

自由面発破パターンの合理的な設計手法が確立されていない背景としては、自由面の併用による振動低減効果の定性的かつ定量的な議論が十分になされておらず、このため自由面による振動低減効果のメカニズムが十分に解明されていないためと考えられる。しかしながら、発破による岩盤の動的破壊や振動伝搬の挙動は、高速かつ複雑な現象であり、実際の岩盤中ではこれらを捉えることは非常に困難と考えられる。このため、これらを解決するためには、発破による破壊と振動とを適切に評価できる数値解析手法の適用が有効と考える。

このような状況のなか、岩盤の破壊挙動の再現に個別

要素法を適用した研究事例は多く存在する。また、発破振動についても、個別要素法が適用可能であると確認されている⁹⁾。さらに筆者らは、自由面発破における自由面の効果を確認するため、発破孔近傍を模擬した実物大の発破実験を行なうことにより、自由面発破における実挙動の補足を試みるとともに、2次元個別要素解析手法を用いた再現解析を行なうことで、その解析手法の妥当性について検証し、一定の信頼性があることを確認した⁹⁾。自由面の効果メカニズムを明らかにするための議論に、個別要素法の適用は効果的と考える。

そこで本研究では、個別要素解析手法を用い、自由面による振動低減のメカニズムについて、解析的に明らかにすることを試みた。また、発破孔近傍だけでなく、遠方場における振動伝搬傾向について検討した。なお、ここでは議論を容易にするため、心抜き部に自由面を設けた単発発破を対象とし、自由面の無い通常の発破と自由面発破とを比較することで自由面の効果解明を図った。

2. 個別要素法を用いた解析手法

(1) 個別要素法

自由面発破において、連続体から離散体に至る一連の破砕過程と、これに伴って発生する振動とを適切に表現することのできる解析手法として、個別要素法を適用する。発破時の挙動は厳密には3次元であるが、自由面発

図-1 個別要素モデル

図-2 引張軟化モデル⁷⁾

破における発破孔近傍の破壊や振動の挙動はおおよそ2次元的な議論が可能と判断できることから⁴⁾、ここでは2次元解析を採用する。

個別要素間の接触力は、図-1に示す接触ユニットにより表現する。法線方向破壊モデルでは、岩石の引張破壊過程においても残留強度領域が存在する⁶⁾ことから、図-2に示す引張軟化過程を考慮する。ここに、 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 は亀裂開口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。

また、接線方向破壊モデルでは、Mohr-Coulombの破壊規準を採用する。

(2) 解析モデル

自由面の無い通常の心抜き発破と自由面発破をモデル化する。自由面発破はおおむね2次元的な議論が可能であることに対して、自由面の無い通常の心抜き発破は明らかに3次元的な挙動であると考えられ、2次元解析の適用には限界がある。

一般に、通常的心抜き発破ではVカットが多く採用されるが、これは最小抵抗線長の大きな発破と見なすこと

図-3 自由面発破に対する通常的心抜き発破のモデル化

図-4 解析モデルとエネルギー評価境界

ができる。そこで、通常の心抜き発破を2次元解析で取り扱うことにあたっては、最小抵抗線長を大きくした自由面発破として近似し、両者の定性的な比較を行なうこととする（図-3）。

個別要素解析モデルを図-4に示す。解析領域は、解析時間の短縮を目的に半径6mの半円形とする。また、要素形状に起因する波動伝搬の指向性をキャンセルするため、要素分割にはボロノイ分割を適用する。発破孔の位置は、最小抵抗線長 $d=10\sim100\text{cm}$ とし、自由面の長さは $L=2.0\text{m}$ とした。

自由面側の境界では、水平変位および回転を拘束する境界条件を設定し、外周の境界は、無減衰の半無限地盤との境界となることから粘性境界とした。地山の物性値は、ここでは解析結果より基本的破壊挙動の評価を容易にするため、破壊前は亀裂の無い等方均質な中硬岩地山を想定して表-1のように設定した。

なお、解析上の時間増分 Δt の設定にあたっては、解析の安定を図るためのCFL（Courant - Friedrichs - Lewy）条件⁸⁾を十分に満足するよう $\Delta t=1.0\times10^{-8}\text{s}$ とした。

(3) ガス圧波形

制御発破のようなデカップリング係数の大きな発破では、爆ごうの影響が軽減され、高压の爆ごう生成ガス（以下、ガスと呼ぶ）の影響が相対的に大きくなる⁹⁾。本研究では、発破孔内面に作用するガス圧を以下に示すように準静的に取り扱うことで、発破に伴う現象を工学的に評価することとする。

表-1 解析パラメータ

密度	ρ	2,600	kg/m ³
ポアソン比	ν	0.25	—
せん断弾性係数	G	20	GPa
引張強度	σ_t	8.0	MPa
法線方向バネ定数	K_n	8.0×10^5	MPa/m ²
接線方向バネ定数	K_s	4.0×10^5	MPa/m ²
離散化前	法線方向粘性係数	η_n	22.59 MPa·s/m ²
	接線方向粘性係数	η_s	10.10 MPa·s/m ²
離散化後	法線方向粘性係数	η_n	3.08 MPa·s/m
破壊エネルギー開放率		G_f	270 N/m
粘着力	c	6.66	MPa
摩擦係数	μ	0.58	—

図-5 発破孔の体積変化イメージ

的に評価することとする。

ガスの圧力波形 $P(t)$ は次式のように設定する。

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

ここに、 P_0 は最大圧力、 a はガス圧が最大値に達するまでの時間（以下、立ち上がり時間と呼ぶ）、 b はガス圧が最大値からゼロにまで減少する時間を a で除した値である。具体的には、自由面発破を模擬した発破実験の結果から逆解析により求めた圧力波形を用いる⁹⁾。ただし、この結果は最小抵抗線長 $d=40\text{cm}$ という条件のもとで求められたものである。

最小抵抗線長を変えると破壊挙動が変化するため、岩盤中におけるガスの占める体積が変化し、ガス圧も変化するはずである。このときのガス圧は、次式に示す理想気体の状態方程式に従うと考えられる⁷⁾。

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

ここに、 P は気体の圧力、 c 、 γ は係数、 ρ は密度である。さらに、比体積 $V=1/\rho$ とし状態変化の前後で一定とすれば次式を得る。

$$PV^\gamma = \text{const} \quad (4)$$

ここでは、まず発破実験から得られた圧力波形の時刻歴 $P(t)$ と発破孔周りの体積の時刻歴 $V(t)$ を求める。続いて、体積変化が無い場合、つまり発破孔の外周が破碎しなかった場合の圧力 $P_0(t)$ を発破孔の体積 V_0 から求める（式(5)、図-5(a)）。さらに個別要素解析により、最小抵抗線長を変えた場合に、発破孔の拡がりによって変化する体積 $V(t)$ を求め、 $P(t)$ を算出する（式(6)、図-5(b)）。

$$\text{体積変化がない場合：} P_0(t) = P(t) \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^\gamma \quad (5)$$

$$\text{体積変化がある場合：} P(t) = P_0(t) \left(\frac{V_0}{V(t)} \right)^\gamma \quad (6)$$

図-6 最小抵抗線長を変えた場合のガス圧力波形

なお、気体定数は $\gamma=2.87$ とした⁷⁾。

最小抵抗線長 d を変えた場合に推定されるガスの圧力波形を図-6に示す。ここでは、発破実験で得られた圧力波形 P 、体積変化がない場合の圧力波形 P_0 、および最小抵抗線長 d を10cm, 30cm, 50cmとした場合の圧力波形を示した。

(4) 各種エネルギーの評価

発破に伴う破壊や振動の現象は完全には解明されていないが、発破で生じたエネルギーは発破孔壁で応力波に変換され、これが媒体中を伝搬して破壊域を形成するとともに、破壊に費やされなかった余剰エネルギーの一部が弾性波となって発破振動になると考えられる^{10),11)}。そこで、発破孔近傍（図-4のエネルギー評価境界内）において、岩盤破壊に費やされる破壊エネルギー、破壊された岩塊を飛散させる運動エネルギー、および周辺地山に放出される放射波動エネルギーを算出する。これらのエネルギー収支に着目することで、自由面を形成することによる効果メカニズム解明を試みる。

a) 放射波動エネルギー

発破振動を評価するため、発破により岩盤内に放射される波動エネルギー E_W を求める。放射波動エネルギーは、破壊領域の外側に設定するエネルギー評価境界上の要素における変位速度 $\dot{u}$ と、その要素に作用する応力 σ による仕事量として次式により評価する。

$$E_W = \int_{\Gamma} \dot{u} \cdot \sigma^T \cdot n \, d\Gamma \, dt \quad (7)$$

ここに、 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、発破後の破壊が十分に進展するまでの $t=0.01s$ とする。また、個別要素内の応力 σ は、要素の接触点に作用する外力から算定される巨視的応力として次式により評価する¹²⁾。

$$\sigma = \frac{1}{V_p} \sum_i a_i \otimes F_i \quad (8)$$

ここに、 σ は要素内の平均応力、 V_p は要素体積（面積）、 a_i は要素重心から接触点 i までの相対位置ベクトル、 F_i は接触点 i に作用する接触力ベクトルである。

b) 運動エネルギー

破壊された岩塊の運動エネルギー E_T は、次式で求めた値について、エネルギー評価境界内の要素の総和をとることで評価する。なお、算出のタイミングは、放射波動エネルギーの時間積分上限時とする。この時点では、波動が Γ 上を通過し終えているため、おおむね飛散要素の運動エネルギーと一致すると考えられる。

$$E_T = \frac{1}{2} m \cdot \dot{u}^2 \quad (9)$$

c) 破壊エネルギー

岩盤の破壊に費やされた破壊エネルギー E_R は、図-2に

もとづき引張破壊した（要素間法線方向の接触力がゼロ）と判定された要素辺について、破壊強度を $\sigma_f (= \sigma_c)$ 、破壊時の亀裂幅を u_f 、および亀裂長さを 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。

$$E_F = \frac{1}{2} \sigma_f u_f s \quad (10)$$

なお、引張破壊後は、接線方向の接触力もゼロとなる。

d) 入力エネルギー

発破孔に入力されるエネルギー E_i は、ガス圧が発破孔の内面に対して成した仕事量として算出する。ガス圧 P と発破孔 A を構成する要素の外向き法線方向速度（ $\dot{u}$ と n の内積）との積として次式により評価する。

$$E_i = \int_t \int_A P (\dot{u} \cdot n) \, dA \, dt \quad (11)$$

なお、入力エネルギー E_i の内、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 として消費されなかった残りのエネルギーは、ひずみエネルギーおよび減衰により消費されたエネルギーとみなす。

3. 遠方場における放射波動

前章では発破孔近傍での検討手法を示したが、発破振動の影響が問題となるのは、通常は発破孔から離れた遠方であり、放射波動について遠方場で評価する必要がある。しかしながら、広域の解析領域を個別要素法で解析

図-7 積分境界と遠方場

図-8 単位立体角あたりの平均パワー

することは、解析時間が膨大となり現実的ではない。

このため、遠方場における波動伝搬特性について考察を行なうため、弾性波動解析において従来から用いられている波動の遠方場近似^{13),14),15)}の考え方を適用する。

ある閉境界 Γ から放射される波動場の概念を図-7に示す。ここに、 x_l は無限領域内の点、 $\hat{\mathbf{x}}$ は単位ベクトル、 y は Γ 上の点、 r_0 は原点Oから点 x までの距離、 r は点 y から点 x までの距離である。このとき、点 x における波動場は次の積分方程式で表現することができる。

$$u_j = \int_{\Gamma} u_{jk}^* p_k d\Gamma - \int_{\Gamma} p_{jk}^* u_k d\Gamma \quad (12)$$

ここに、 u_j は点 x における変位、 u_k 、 p_k は Γ 上における変位と表面力、 u_{jk}^* 、 p_{jk}^* は周波数空間における変位と表面力の基本解である。

ここで、距離 r_0 が、原点Oから点 y までの距離に比べて十分に大きいものと近似する。また、発破孔近傍では、発破孔延長方向への波動伝搬が小さくなる指向性があると推測されることから⁴⁾、 Γ は長さ l (=発破孔の長さ)の円筒とし、 Γ 上の積分において u_j 、 p_j が Γ の長手方向に一定であると近似設定する。

半径 r_0 の円形境界上における単位面積あたりの平均パワー $P_s(\omega)$ は次式により与えられる。

$$P_s(\omega) = -\frac{\omega}{2} \text{Im}(p_j(\mathbf{x}, \omega) \bar{u}_j(\mathbf{x}, \omega)) \quad (13)$$

$$p_j \bar{u}_j = p_j^T \bar{u}_j^T + p_j^L \bar{u}_j^L \quad (14)$$

ここに、 ω は円振動数、 $\bar{u}_j$ は u_j の複素共役、 $\text{Im}()$ は $()$ 内の虚部であり、 $\bar{u}_j^T$ 、 p_j^T は放射方向 $\hat{\mathbf{x}}$ に直交する横波成分を、 $\bar{u}_j^L$ 、 p_j^L は $\hat{\mathbf{x}}$ に平行な縦波成分を与える。このことから、放射波動の平均パワーは、横波および縦波の各成分に分離できることとなる。また、単位立体角あたりの平均パワー(図-8)は次式で与えられ、最終的に距離 r_0 に依存しない式を得る。

$$P_{\theta\phi}(\omega) = r_0^2 P_s(\omega) \quad (15)$$

遠方場における波動場は以下のフローで算出する。まず個別要素解析を用いて、エネルギー評価境界上(=閉境界 Γ)の個別要素における応力および速度の時刻歴を算出する。次に、この応力および速度をフーリエ変換により周波数領域に変換する。最後に、周波数領域の表面力 p および変位 u を用いて、放射波動の遠方場近似を算出する。

4. 発破孔近傍の解析結果

(1) 破壊状況

最小抵抗線長 d を変えた場合の代表的な破壊状況を図-9に示す。ここでは、 $d=10\sim 70\text{cm}$ のケースを示す。 d がごく小さい場合(おおよそ20cm以下)、自由面側の破壊は浅い領域にとどまっているが、破壊片は遠方にまで飛散している(図-9(a),(b))。とくに $d=10\text{cm}$ のケースでは、発破のエネルギーの多くが破壊片の飛散に費やされてい

図-9 最小抵抗線長 d を変えた場合の破壊状況 ($t=0.02\text{s}$)

と考えられ、大きな加速度でより遠方にまで飛散するとともに、要素分割による解析上のバラツキも見受けられる。ただし、破壊領域が非常に小さいことから、発破本来の目的である岩盤破碎という観点からはきわめて非効率である。一方、地山側の亀裂は比較的浅い範囲にとどまっており、このことから外周への波動の放射は小さいと推測される。

d が大きくなるに伴い（おおむね20～40cm）、自由面

図-10 破壊面積

(a) 放射波動エネルギー

(b) 破壊エネルギー

(c) 運動エネルギー

図-11 最小抵抗線長を変えた場合の各種エネルギー

側ではクレーター状の破壊領域が拡大しており、効率的な掘削が可能となるが、一方で、地山側の亀裂発生範囲も拡大するようになっている（図-9(c),(d)）。このことから、外周への波動放射も大きいと推測される。

d が一定以上大きくなると（おおむね50cm以上）、自由面側において亀裂の発生領域がクレーター状の形状を示すものの、顕著な破壊面が発達するほどではなく、破壊片の飛散挙動も見られなくなる（図-9(e),(f),(g)）。地山側においては亀裂が広い範囲で発生している。今回の解析では爆薬量を一定としているため、大きな抵抗線長に対して爆薬量が不足気味となり、発破孔近傍で亀裂を発生させることはできるものの、自由面側で明瞭な破壊面を発生させるだけのエネルギーが足りていないためと考えられる。これは“ゆるめ発破”のような状態とも言えるが、岩盤破碎という観点では効率は低い。発破によるエネルギーは、限定的な亀裂発生と外周への波動放射に費やされていると推測される。

このときの破壊面積を図-10に示す。この破壊面積は、破壊規準に達した要素辺を有する個別要素の面積の積分である。折れ線上のエラーバーは標準偏差を示す。ここでは、解析モデルに起因する結果のバラツキを考慮することとし、最小抵抗線長を $d=10\sim100\text{cm}$ と変えた10ケースについて、それぞれランダムな要素分割モデルを10個作成し、解析結果の平均値をグラフ化している。

上述の最小抵抗線長 d と破壊状況の関係を裏付ける結果が、破壊面積にも現れている。すなわち、 d が大きくなるにしたがって破壊面積は増加する傾向にあるが、おおむね d が40cmあたりを越えると破壊面積の増加傾向が緩くなっている。図-9で示されているとおり、 d が一定以上大きくなると“ゆるめ発破”の状態になるため、掘削本来の目的からすると効果は限定的と考える。

(2) 各種エネルギー

最小抵抗線長 d を変えた際の各種エネルギーを図-11に示す。ここで、放射波動エネルギー E_w 、破壊エネルギー E_r および運動エネルギー E_t は、それぞれ式(7)、式(9)および式(10)より算出した。

放射波動エネルギー（図-11(a)）および破壊エネルギー（図-11(b)）は、最小抵抗線長 d が大きくなるに伴って増加する傾向にあるが、ある程度大きくなると（おおむね $d=40\text{cm}$ 以上）横ばい傾向を示している。これは、破壊状況で確認したとおり、 d の増加に伴って地山側の亀裂範囲が拡大し、これと同時に放射波動エネルギーも増加しているためと推測される。破壊エネルギーについては、破壊面積と相関性が高いため当然の傾向である。また、爆薬量を一定として解析しているため、 d が一定以上大きくなると破壊が限定的となり、両エネルギーともに増加しなくなると考えられる。なお、 $d=50\text{cm}$ および

図-12 最小抵抗線長を変えた場合のエネルギー比率

図-13 最小抵抗線長を変えた場合のエネルギー比率

60cmとしたケースで放射波動エネルギーがやや減少しているが、この2つは他と比較して標準偏差が大きくなっていることから、個別要素メッシュの違いによるバラツキの影響がやや大きかったものと考えられる。このため解析数を増やすことで、滑らかな横ばい傾向に収束するものと推測される。

運動エネルギー（図-11(c)）は、前者とは異なり、 d の増加に伴って減少する傾向を示している。これについても、破壊状況で確認できるように、 d がごく小さい場合は破壊片が遠方に飛散しているのに対し、 d の増加とともに破壊が小規模となり亀裂が発生するのみにとどまるためである。

以上のように、振動の低減を図る場合には、自由面発破を採用して最小抵抗線長をより小さくすることで放射波動エネルギーを低減することが有効であるが、一方で発破掘削の効率が大きく損なわれることが分かる。逆に、自由面発破の特徴を弱めて最小抵抗線長を大きくすると、掘削効率は向上するものの、放射波動エネルギーが大きくなる。これらのことから、自由面発破においては、掘削効率と振動低減との間にはトレードオフの関係が存在すると判断できる。

発破時のエネルギー収支として、入力エネルギー E_i に対する「放射波動+運動+破壊」エネルギーの比率と「ひずみ+減衰」エネルギーの比率を図-12に示す。ここで、「放射波動+運動+破壊」エネルギーは、発破に

よるエネルギーが岩盤に対して何らかの仕事（振動や破壊など）をなした割合であり、それ以外のエネルギー「ひずみ+減衰」は損失した割合として理解でき、 E_i と $(E_w + E_f + E_r)$ との差として算出した。

全体傾向として、「ひずみ+減衰」エネルギーの比率の方が「放射波動+運動+破壊」エネルギーの比率を上回っている。また、最小抵抗線長 d の増加とともに、「放射波動+運動+破壊」エネルギーの比率が減少し、「ひずみ+減衰」エネルギーの比率が増加している。とくに、 d がおおむね50cm以上になると、入力エネルギーのほとんどが「ひずみ+減衰」に費やされており、発破によるエネルギーのほとんどが損失していると言える。

また、「放射波動+運動+破壊」における各エネルギーの比率を図-13に示す。 d が20～50cmの範囲において、 d と放射波動エネルギーは正比例の関係であり、 d と運動エネルギーは反比例の関係にあることが示されている。破壊エネルギーも d と比例関係にあると言えるが、その比率は非常に小さい。また、 d がおおむね60cm以上では、各エネルギーはほぼ横ばいであり、 d の影響度は低い。

以上より、最小抵抗線長を小さくすることで、発破により入力されたエネルギーを運動エネルギーとして破壊片の飛散に多く費やさせ、相対的に放射波動エネルギーを小さくすることができる。ただし、破壊エネルギーつまり掘削効率も低下するため、これら3者のバランスを考慮する必要がある。

(3) 波動放射の指向性

放射波動エネルギーの指向性について理解するため、解析領域を6分割し（図-14）、放射波動エネルギーの指向性について調べた（図-15）。ここでは、最小抵抗線長 $d=10\sim80\text{cm}$ のケースを示した。

d がごく小さい場合（おおむね $d=10\text{cm}$ ）、自由面と平行方向で放射波動エネルギーが大きいようであるが、そもそも放射波動エネルギー自体が小さいため、指向性としては明瞭ではない。 d が大きくなるに伴って、自由面と平行方向で放射波動エネルギーが大きく、自由面と鉛直となる方向で比較的小さい分布となっている。これは、自由面側で破壊領域が形成されて反力体が無い状態となるため、自由面に対して鉛直方向で波動の放射が小さくなるためと考えられる。 d が一定以上大きくなると（ここではおおむね $d=80\text{cm}$ 以上）、バラツキはあるものの、放射波動エネルギーの分布に差が小さくなる。もはや自由面の影響がほとんど無くなり、全周にわたって同様に波動が放射されるようになるためと考えられる。

以上のように、最小抵抗線長が大きい通常の発破では波動の放射における指向性は小さいが、自由面発破では自由面の存在により最小抵抗線長が小さくなり、発破孔近傍で波動の放射に指向性が現れることが推測される。

図-14 放射波動エネルギーの放射方向区分

(a) $d=10\text{cm}$

(b) $d=20\text{cm}$

(c) $d=30\text{cm}$

(d) $d=40\text{cm}$

(e) $d=50\text{cm}$

(f) $d=60\text{cm}$

(g) $d=70\text{cm}$

(h) $d=80\text{cm}$

図-15 放射波動エネルギーの放射方向分布

5. 遠方場における放射波動の解析結果

(1) 遠方場近似の解析結果

発破孔近傍での放射波動に対し、遠方場におけるトンネル横断方向の放射波動場を図-16に示す。4.と同様に最小抵抗線長 $d=10\sim100\text{cm}$ の10ケースについて、それぞれ10個作成した要素分割モデルで算出した放射波動エネルギーの平均値に遠方場近似を適用した結果であり、赤のプロットはP波を、青のプロットはS波を、緑のプロットはP波とS波の合成を示す。

通常、発破振動では100～200Hz以下程度の低い周波数帯が問題となること、そして個別要素解析では高周波成分の解析精度が高くないと考えられることから、ここでは200Hz成分について考察する。また、エネルギー評価境界 Γ の長手方向で放射波動を一定と仮定していることから、トンネル延長方向の放射特性についての考察は行なわない。

いずれの d においても、P波およびS波ともに、波動場の形状はおおよそ相似形であり、P波は上下に長い瓢箪状であり、S波はバタフライ形状である。

自由面が無い場合、P波が主体となる放射波動が同心円状に拡がると考えられるが、ここでは、P波は自由面と平行方向（図では上下方向）に卓越しており、細長い瓢箪状の特長的な波動場を示している。この理由としては、発破孔から放射されるP波は同心円状に拡がるものの、発破後の早期に自由面側で破壊領域が形成されて反力体が無い状態となるため（図-16 (a)～(d)）、自由面と鉛直方向（図-16の水平方向）の波動伝搬が抑制されているものと考えられる。自由面と平行方向については、自由面が無い場合と同様に波動場が形成されると考えられる。この結果として、P波は自由面と平行方向で細長い形状を示すP波の波動場が形成されるものと推測される。

一方のS波は、自由面に対しおおよそ 45° 方向に卓越しており、バタフライ形状の波動場を示している。発破孔から放射されたP波は同心円状に伝搬するが、自由面に対して斜めに入射した場合、P波は入射角 θ_i と等しい反射角 θ_r で反射すると同時に、S波の反射波（PS変換波）を生成する。一般に、反射面におけるP波の入射角 θ_i と反射波との間には、スネルの法則が成立する。また、一

図-16 放射波動の遠方場近似（図中のプロットは単位立体角あたりの平均パワーである）

般に $V_s < V_p$ であることから、S波の反射角 ϕ は $\phi < \theta_i$ となる。また、S波はP波と比較して媒体内での減衰が小さいため、遠方に対してより強いエネルギーを保持して伝搬すると考えられる。これらのことから、 $\phi < \theta_i$ なる角度においてS波の卓越した波動場が形成されるものと推測される。

以上の結果より、自由面発破における遠方場の放射波動は、P波およびS波それぞれで特徴的な指向性を有していることが推定される。これらのことから、発破振動を低減するにあたっては、トンネルと対象物との相対的位置関係に応じて自由面パターンを設計することで、効果的に振動低減を図ることができると言える。一般的なトンネル発破では、発破振動を低減すべき制約物件に対して自由面が垂直となるようにパターン設計することが合理的と考えられる。

しかしながら、このような波動の指向性が計測された事例は、これまでのところ見当たらない。従来、発破振動の指向性に関する知見が無かったこと、そして、このような波動場を実際の施工現場で計測することが非常に

困難なためと考えられる。とは言え、今回のような等方均質な検討条件ではあったとしても、自由面の形成パターンを検討する際、このような指向性を持った波動場が発生することは参考にすることができると考える。

放射されるパワーの大きさに着目すれば、 $d=10\text{cm}$ の場合ではきわめて小さくなっており、遠方場に対してほとんど波動が放射されていない。おおむね $d=20\sim 40\text{cm}$ の範囲では、 d の増加に伴ってP波およびS波ともに大きな波動が放射される傾向がある。そして、おおむね $d=40\sim 50\text{cm}$ 程度以上で、波動の大きさはほとんど増加していないことが示されている。4.(3)で示したトータル放射波動エネルギーは $d=40\text{cm}$ 程度以上で増加しなくなっているが、遠方場においてもこの傾向は同様である。

(2) S波に関する検証

前節では、遠方場においてS波が指向性を持って卓越することが示されたが、このようなS波の存在について検証を行なう。当該S波は、発破孔から放射されたP波が自由面で反射する際に発生していると推測される。そ

ここで、発破直後における発破孔近傍の波動伝搬特性について、2次元の動弾性時間域境界要素法¹⁰⁾を適用して、その解明を試みる。

用いる要素は1次要素とし、最小抵抗線長を $d=30\text{cm}$ 、自由面長を $L=2.0\text{m}$ とし、発破孔を10要素、自由面を100要素で離散化した(図-17)。解析の時間増分は $d=5\times 10^{-6}\text{s}$ とし、100step(0.0005s)まで解析を行なった。物性値は、せん断弾性係数 $G=20\text{GPa}$ 、縦波伝搬速度 $V_p=4,800\text{m/s}$ 、横波伝搬速度 $V_s=2,770\text{m/s}$ とした。この解析条件のもと、発破孔要素の法線方向に単位圧力加振した

図-17 波動伝搬特性解析モデル

ときの境界要素解を求め、積分表現式により解析領域内における変位の絶対値を求めた。

波動の伝搬挙動として、発破孔近傍の変位分布を図-18に示す。発破直後、第1波目のP波が発破孔に対して同心円状に伝搬していることが確認できる。このP波が自由面に到達した後、第2波目としてP波の反射波が同心円状に伝搬している。さらに第3波目として、これとは別の平面的な反射波が発生し、 45° 程度の角度(当該解析では自由面に対して約 35°)を持って伝搬している。

この平面的な反射波は、20step($t=0.0001\text{s}$)で約0.275m伝搬していることから、伝搬速度は約2,750m/sと算出される。これは $V_s=2,770\text{m/s}$ とほぼ等しいことから、この平面的な反射はS波であると判断できる。P波が自由面に到達した際、一部はP波として反射するが、残りは力のつりあいを保つためにS波に変換されていると考えられる。なお、S波が卓越する角度は、 V_p や V_s 等の条件や、図-9に見られるような自由面側の破壊形態に影響を受けると考えられるため、地山条件ごとに変化することに注意が必要である。

また、図-18を見て分かるとおり、P波の波面は曲面であり球面波(円筒波)として伝搬しているが、S波の波面は平面に近い形状であり平面波として伝搬している。

図-18 境界要素解析結果 (自由面長 $L=2.0\text{m}$)

図-19 境界要素解析結果 ($t=0.0005\text{s}$)

球面波であるP波は、媒体内部を伝搬する際に距離減衰するだけでなく、伝搬距離 r に応じて広がって伝搬するため、エネルギー保存則により単位面積あたりのエネルギーは r の2乗に比例して幾何減衰する。一方で、当該S波は、両端部を除いて平面波に近い形態であるため、距離減衰するのみで幾何減衰はゼロである。このため、S波はP波と比較して減衰しにくいいため、遠方場においても大きな放射エネルギーを維持できると考えられる。

自由面の長さを $L=1.0\text{m}$ および 1.5m とした場合の解析結果を図-19に示す。 $L=2.0\text{m}$ の場合（図-18(c)）と比較して、発生したS波の幅が狭くなっていることから、この放射エネルギーは小さいと考えられる。

以上のことより、

- ・自由面により指向性を持ったS波が発生する
- ・自由面長を長くすることでS波が卓越する
- ・S波は自由面に対して 45° 程度の方向（地山条件によって変化）で卓越する

ことが確認できた。この結果は、前節における遠方波動場の解析結果を裏付けるものである。

6. 自由面の効果についての考察

4.および5.の結果について、自由面の効果という観点で整理する。最小抵抗線長がある一定値より大きくなると、自由面による放射波動を低減する効果はほとんど見られなくなり、最小抵抗線長が大きいパターン（つまり通常の心抜き）とあまり変わらなくなる。また、最小抵抗線長が大きい場合、そもそも当該検討条件のような少量の爆薬量では効果的な破碎は実現できず、これより多量の爆薬が必要である。これらのことより、自由面による振動低減効果は、①最小抵抗線長を小さくすること、②斉発する爆薬量を低減すること、の2つを同時に実現することであると換言できる。

以上のことは、自由面による振動低減効果として既往の施工実績²¹⁾で確認されている、 K 値および装薬量の低減効果と同意と考えられる。すなわち、①の最小抵抗線長を大幅に小さくできる効果は、同じ装薬量であっても地山側に放射される波動エネルギーを小さくすることであり、これは式(1)の K 値を小さくする効果と同意と考えられる。また、斉発薬量を低減できる効果は、装薬量 W の低減そのものである。

一方で、自由面の効果が有効となる条件が存在することも認められた。当該検討条件において、自由面を形成することによって放射波動の大きさをコントロールできるのは、最小抵抗線長 d がおおむね $0\sim 40\text{cm}$ の範囲であった。ただし、 $d=0\sim 10\text{cm}$ では掘削効率がきわめて低いため、現実的な d の範囲は $20\sim 40\text{cm}$ と判断できる。

7. おわりに

自由面発破の最小抵抗線長を変化させたケーススタディを行い、破壊状況や各種エネルギーに着目することにより、自由面発破における振動低減効果のメカニズム解明を試みた。

まず、破壊状況や各種エネルギーについて比較した結果は以下のとおりである。

- 1) 最小抵抗線長が大きくなるに伴い破壊面積は増加するが、ある一定値より大きくなる（当該解析条件では 40cm 程度以上）と破壊面積の増加傾向が緩くなる。
- 2) 放射波動および破壊エネルギーは、最小抵抗線長が大きくなるに伴って増加するが、ある一定値より大きくなる（当該解析条件では 40cm 程度以上）と、これらの増加傾向は止まる。逆に、運動エネルギーは最小抵抗線長と反比例の関係を示す。
- 3) 1)および2)より、自由面発破で最小抵抗線長を小さくすることで放射波動エネルギーを低減できるが、発破掘削の効率が損なわれる。自由面発破では、掘削効率と振動低減との間にはトレードオフの関係が存在する。
- 4) 自由面の存在によって波動の放射に指向性が現れる。とくに遠方場においては、P波は自由面に沿う方向で放射波動が大きく、S波は自由面に対して 45° 程度の方向（地山条件によって変化）で放射波動が大きくなる。ただし、この指向性は最小抵抗線長の大きさに影響を受けない。
- 5) 当該条件では、自由面の形成によって効果的に振動を低減できるのは、最小抵抗線長がおおむね $0\sim 40\text{cm}$ の範囲であり、掘削効率も考慮すれば、現実的な最小抵抗線長の範囲は $20\sim 40\text{cm}$ と判断される。また、自由面発破における振動低減のメカニズムは次のように整理することができる。
- 1) 自由面を形成することで最小抵抗線長を大幅に小さくすることができ、自由面側の岩盤を最小限の爆薬量で効率的に破壊することが可能になる。
- 2) 発破によって発生したエネルギーは、自由面側の岩盤を選択的に破壊する破壊エネルギーと、破壊された岩盤を飛散させる運動エネルギーの総和としてより多く費やされるようにし、外周に放射される波動エネルギーの比率が相対的に低減されるようにすることが肝要である。
- 3) 自由面側の岩盤が飛散することで反力体が無くなり、外周に放射される波動が低減される。
- 4) 放射される波動にはP波およびS波ともにそれぞれで指向性が生まれる。自由面と鉛直方向で波動の放射が小さい。

従来、自由面発破パターンの設計には確立された考え方が存在せず、既往の施工事例を踏襲したものがほとんどであった。これに対して、合理的な自由面発破パターンの設計に向けて、自由面発破の動的破壊と振動とを適切に評価できる数値解析手法を構築し、自由面による振動低減効果を明らかにするとともに、自由面パターン設計のための基礎的な知見を得ることができた。

また、波動論と矛盾のない波動伝搬挙動が確認できただけでなく、最小抵抗線長や自由面長がどのような影響を与えるのかを確認することができた。

本研究では、議論を容易にするため心抜き部の単発発破を想定した議論を行なったが、同様の手法で多段発破の解析を行なうことで、より詳細な発破後における岩盤破壊と振動の検討が可能と考えられる。また、発破振動の事前予測においては、式(1)の経験式、そして物理量として評価できない発破係数 K 値に頼らない検討が可能になることも期待できる。

参考文献

- 1) 萩森健治, 竹知芳男, 古川浩平, 中川浩二: スロット工法を用いた低振動発破工法に関する研究, 土木学会論文集, 第 391 号/VI-8, pp.142-150, 1988.
- 2) 若月和人, 木村能隆, 多田芳葉, 高橋渉: 心抜き自由面発破による発破振動の低減効果, トンネル工学報告集, Vol.21, pp.225-232, 2011.
- 3) 日本トンネル技術協会: トンネル工事の発破振動および騒音対策に関する調査研究報告書, pp.21-22, 1977.
- 4) 若月和人, 齋藤優, 阿部和久, 紅露一寛: 自由面発破の実験と個別要素法を用いた数値解析手法の検証, 土木学会論文集 F1, Vol.71, No.3, pp.1-10, 2015.
- 5) S. G. Chen, J. G. Cai, J. Zhao, and Y. X. Zhou: Discrete element modelling of an underground explosion in a jointed rock mass, *Geotechnical and Geological Engineering*, 18, pp.59-78, 2000.
- 6) 福井 勝則, 金 豊年, 大久保 誠介: 一軸引張荷重下での岩石の完全応力-歪曲, 資源と素材, Vol. 111, No.1, pp.25-29, 1995.
- 7) Minchinton, A. and Lynch, P.M.: Fragmentation and heave modelling using a coupled discrete element gas flow code, *Fragblast - International Journal for Blasting and Fragmentation*, 1, pp.41-57, 1997.
- 8) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション—拡張個別要素法で破壊を追う—, 森北出版, pp.50-51, 2004.
- 9) 伊藤一郎, 佐々宏一: スムースブラスティングにおける破壊機構の一考察, 日本鉱業会誌, Vol.84, No.964, pp.1059-1065, 1968.
- 10) 上西幸司, H.P.Rossmann, N.Kouzniak: 爆速および起爆法が発破孔近傍の岩盤の動的挙動に与える影響について, 火薬学会誌, Vol.61, No.6, pp.254-259, 2000.
- 11) 社団法人 火薬学会: エネルギー物質ハンドブック 第 2 版, 共立出版, p.410-412, 2004.
- 12) 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, pp.913-916, 1996.
- 13) 北原道弘, 中川克也: 3 次元クラック問題に対する弾性散乱断面積, 境界要素法論文集, Vol.12, pp.75-80, 1995.
- 14) 小林昭一 編著: 波動解析と境界要素法, 京都大学学術出版会, 2000.
- 15) 阿部和久, 加藤宏輝, 古田勝: 地下鉄周辺地盤における波動の伝播特性, 鉄道力学論文集, Vol.9, pp.43-48, 2005.
- 16) 吉田裕, 阿部和久: 面内波動問題時間領域型境界要素法の実用化に向けての一検討, 土木学会論文集, No.416/I-13, pp.265-274, 1990.
- 17) 本田裕夫, 萩森健治, 古川浩平, 中川浩二: 硬岩トンネルの無発破掘削に関する研究, 土木学会論文集, No.379/VI-6, pp.55-64, 1987.

(2016. 5. 16 受付)

A SIMULATION OF CONTROLLED BLASTING WITH CONTINUOUS SLOT BY DISCRETE ELEMENT ANALYSIS AND ELUCIDATION OF THE VIBRATION REDUCTION EFFECT

Kazuhito WAKATSUKI, Yutaka SAITO, Kazuhisa ABE and Kazuhiro KORO

It is known that the controlled blasting with continuous slot can largely reduce blasting vibration. However, the mechanism of its effect has not been discussed yet. Therefore, the design of the rational blasting pattern in the controlled blasting with continuous slot was difficult to be realized.

In this study, the vibration reduction due to the employment of the controlled blasting with continuous slot is discussed from the viewpoints of the fracture behavior, the energy balance in the neighborhood of blasthole and the wave energy radiated to the far field. To this end, numerical experiments are achieved, and the role of free face and the dynamic nature of radiated waves are investigated.