

空孔導入がトンネル発破振動に及ぼす影響の検討

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エネルギーが小さくな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。

一方、掘削面の外周に沿ってスリットを形成させる方法も存在し、大幅な振動低減効果が示されている⁴⁾。こちらは、波動が伝搬して行く掘削面の内側と外側とを絶縁し、放射波動の伝搬を遮断することで振動を低減するものである。しかしながら、スリットの形成には特殊な技術が必要であり、大規模なスリット形成は掘削効率の低下や施工コストの増大につながる。

以上のような検討結果や、施工上の課題を踏まえ、本研究ではスリットの代わりに図-1の様に空孔列を導入することによる、スリットでの振動遮蔽に準ずる効果の実現可能

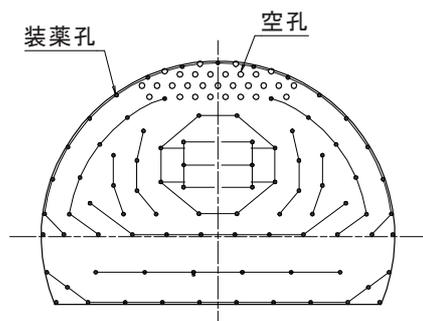


図1 空孔を配置した振動低減法のイメージ

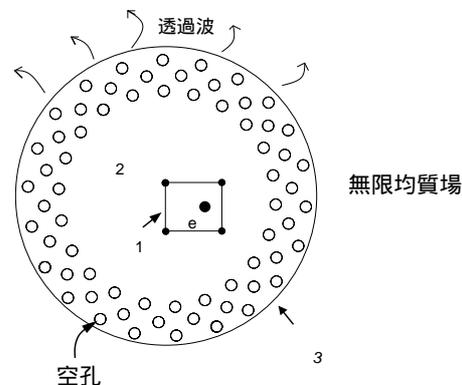


図2 対象とする問題

性について検討する。

本問題は加振点の周囲に多数の空孔が配置された二次元無限動弾性場により表現する。当該領域を空孔を含む有限な部分と、その外部に広がる無限領域とに分け、後者をそれを表現する動的等価剛性により与える。その下で、有限要素法により定式化を行う。さらに、発破に対応する加振力を、無限小円孔内に作用する調和圧力に対する波動解で表現し、それによる応答を求めていく。

2. 解析手法

(1) 対象とする問題

トンネル掘削面に対して垂直に発破孔と空孔が設けられているものとし、掘削面外周近傍に図-2のように空孔を配置する問題を考える。なお、実際には、トンネル側面と掘削面の2つの自由境界が存在しているが、ここでは掘削面に平行な面内に伝搬する発破振動を対象とし、それを二次元面内波動場として近似表現する。また、波動透過の基本特性を調べる目的で、単一の加振点を設定する。均質な二次元無限場の中に Γ_3 で囲まれた有限領域(掘削面)をとり、空孔の配置された領域を含む Γ_3 内側の領域を Ω_2 とおく。 Ω_2 内におかれた単一発破孔の加振圧は、無限小の円孔内面に作用する振動数 ω の調和圧力で表わす。この加振点を含む要素を Ω_e 、その境界を Γ_1 とおく。なお、 Γ_3 の外部無限領域は、 Ω_2 と同一材料で与えられているものとする。

(2) 求解方程式の導出

$\Omega_2 - \Omega_e$ における運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \hat{K}_{11} & \hat{K}_{12} & \hat{K}_{13} \\ \hat{K}_{21} & \hat{K}_{22} & \hat{K}_{23} \\ \hat{K}_{31} & \hat{K}_{32} & \hat{K}_{33} + K_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで $\hat{K}_{ij} = K_{ij} - \omega^2 M_{ij}$ であり, K_{ij} , M_{ij} はそれぞれ剛性行列と質量行列である. $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3$ は, それぞれ $\Gamma_1, \Omega_2, \Gamma_3$ 上に関する節点変位ベクトル, \mathbf{F}_1 は Γ_1 上の内部節点力, K_B は外部無限領域を表す Γ_3 上の動的等価剛性である⁷⁾. Γ_1 において, Ω_e 側の節点変位と節点力は次式で与えられる.

$$\mathbf{u}_e = \mathbf{u}_1^I + \mathbf{u}_1^S, \mathbf{F}_e = \mathbf{F}_1^I + \mathbf{F}_1^S \quad (2)$$

ここで, \mathbf{u}_1^I は空孔のない均質な無限場におかれた無限小円孔の加振により放射される波動の Γ_1 上の節点変位, \mathbf{F}_1^I はその応力から与えられる内部節点力である. また, $\mathbf{u}_1^S, \mathbf{F}_1^S$ は Ω_2 側からの散乱波成分である. Γ_1 上の変位の適合条件と力のつり合い条件は次式で与えられる.

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_1^I + \mathbf{u}_1^S, \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_1^I + \mathbf{F}_1^S = \mathbf{0} \quad (3)$$

なお, $\mathbf{u}_1^S, \mathbf{F}_1^S$ は Ω_e 内に加振外力を持たない成分であるので, 次式が成り立つ.

$$[\tilde{K}_{11}] \{\mathbf{u}_1^S\} = \{\mathbf{F}_1^S\} \quad (4)$$

ここで, \tilde{K}_{11} は有限要素 Ω_e の動的要素剛性行列である. 以上の式を整理すると, \mathbf{F}_1 は次式のように表わせる.

$$\{\mathbf{F}_1\} = [\tilde{K}_{11}] \{-\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_1^I\} - \{\mathbf{F}_1^I\} \quad (5)$$

式 (5) を (1) に代入して最終的な求解方程式を得る.

$$\begin{bmatrix} \hat{K}_{11} + \tilde{K}_{11} & \hat{K}_{12} & \hat{K}_{13} \\ \hat{K}_{21} & \hat{K}_{22} & \hat{K}_{23} \\ \hat{K}_{31} & \hat{K}_{32} & \hat{K}_{33} + K_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{K}_{11} \mathbf{u}_1^I - \mathbf{F}_1^I \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

(3) \mathbf{F}_1^I の計算

\mathbf{F}_1^I は \mathbf{u}_1^I に対応する Γ_1 上の表面力 \mathbf{p} より次式により導出する.

$$\begin{aligned} [\delta \mathbf{u}^T] \{\mathbf{F}_1^I\} &= \int_{\Gamma_1} \mathbf{p} \cdot \delta \mathbf{u} d\Gamma \\ &= \int_{\Gamma_1} (p_x N_i \delta u_i + p_y N_i \delta v_i) d\Gamma \end{aligned} \quad (7)$$

ここで N_i は Γ_1 上の補間関数である. また, $\delta u_i, \delta v_i$ は仮想節点変位の x, y 成分, (\cdot) は複素共役である. ここで表面力 p_x, p_y は Γ_1 上の応力から求める. なお, 無限小円孔内面に

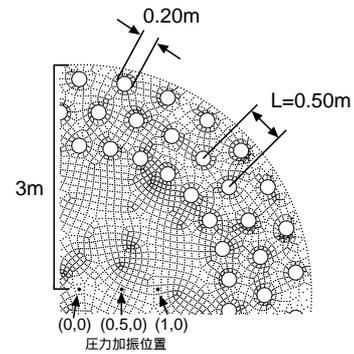


図3 解析領域 (1/4 部分)

$\lim_{a \rightarrow 0} \pi a^2 p = \frac{4\mu i}{k}$ (a は空孔半径) の調和圧力 p が作用するときの極座標下の応力成分は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= -\frac{2\mu}{r} H_1^{(2)}(kr) + (\lambda + 2\mu) k H_0^{(2)}(kr) \\ \sigma_{\theta\theta} &= \lambda k H_0^{(2)}(kr) + \frac{2\mu}{r} H_1^{(2)}(kr) \end{aligned} \quad (8)$$

ただし, $\sigma_{r\theta} = 0$ であり, 変位 u_r^I は次式で与えられる.

$$u_r^I = H_1^{(2)}(kr) \quad (9)$$

ここで r は円孔中心からの距離, μ, λ は Lamé 定数, k は縦波波数, $H_n^{(2)}$ は n 次の第二種 Hankel 関数である.

3. 解析条件の設定

(1) 解析領域の設定

(2) 空孔径, 間隔, 配置方法の設定

通常, 掘削時の空孔径は大きくても 0.10m 程度であるが, これ以上小さい空孔では, 以下に示す様に十分な振動低減効果を得るために必要な孔数がかかなり多くなると考えられる. そのため空孔径を 0.10m ~ 0.25m までの範囲で設定し解析を行う.

また, 空孔列の層数を極端に多くすることは施工効率の低下につながる. そのため, ここでは 1~4 層と比較的少ない層数に設定する. さらに, 道路および鉄道トンネルの最小掘削幅は 6~7m 程度であり, 例えば 3 層の下で, 外周近傍に空孔列を配置することを考慮すると, なお, 空孔間隔を 0.5m 以下とするのが妥当と考えられる. 空孔配置パターンは, その違いによる効果を確認するために直交格子と三角形ハニカム状配置の 2 ケースを用いる.

以上の条件に基づき本解析では, 空孔径を 0.10m, 0.15m, 0.20m, 0.25m と変化させた場合, 空孔間隔 L を 0.50m および 0.25m と変化させた場合, 層数を 1~4 層と変化させた場合, 直交格子およびハニカム状配置とした場合について解析を行う. なお以降の解析例では, 空孔間隔 0.5m・空孔径 0.2m の空孔を三角形ハニカム状に 3 層配置した場合を基準設定として, 各条件を変化させたことによる影響について調べる.

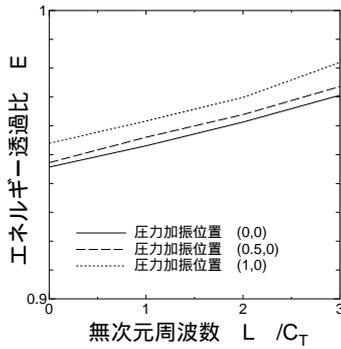


図4 基本設定がエネルギー透過比に及ぼす影響

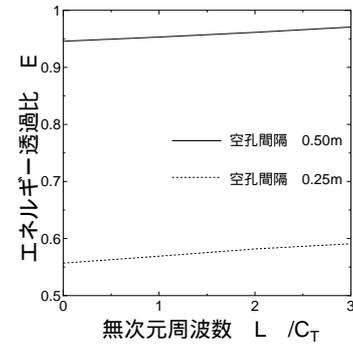


図6 空孔間隔がエネルギー透過比に及ぼす影響

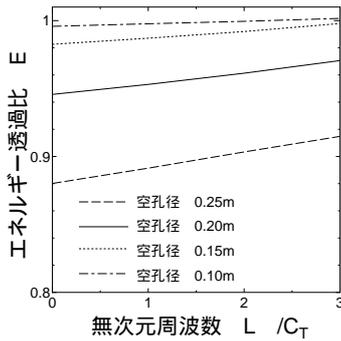


図5 空孔径がエネルギー透過比に及ぼす影響

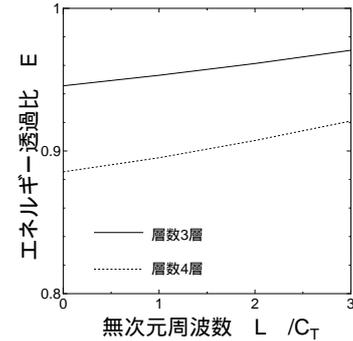


図7 空孔層がエネルギー透過比に及ぼす影響

解析領域 Ω_2 は無限場内におかれた半径 3m の円形領域とし、適切な解析精度が確保できるように、 Ω_2 内を約 5000 要素に分割した (図-3)。また、 K_B 作成の際に、ユニットセルを 1 辺 12m の正方形で与え、円形境界 Γ_3 を 150 要素、450 節点で離散化した。

Γ_3 上の節点変位 \mathbf{u}_3 から放射波動エネルギーの時間平均 \bar{E}_R を次式により求める。

$$\bar{E}_R = \frac{\omega}{2} \text{Im}(\mathbf{u}_3^* \mathbf{K}_B \mathbf{u}_3) \quad (10)$$

ここで、 $()^*$ は共役転置であり、 $\text{Im}()$ は虚部を表す。また、岩盤は花崗岩を想定し ($C_L=3000\text{m/s}$)、ポアソン比は 0.25 と設定する。発破振動により発生する地盤振動の主要周波数は 100~200Hz であるが、これに対する無次元周波数は基準空孔間隔 $L=0.5\text{m}$ の下で $\bar{\omega} = L\omega/C_T = 0.175 \sim 0.35$ となる。なお、以降長さに関する無次元化は、 $L=0.5\text{m}$ に基づくこととする。この範囲の周波数を十分に包含するように、解析する周波数の上限はその 10 倍程度までとし、無次元周波数 0~3 までの範囲を対象に解析を行う。図-3 中の圧力加振位置 (0,0)m、(0.5,0)m、(1,0)m にそれぞれ調和圧力を入力し、以下のエネルギー透過比 E を求める。

$$E = \frac{\text{空孔がある場合の } \bar{E}_R}{\text{空孔がない場合の } \bar{E}_R}$$

4. 解析結果

(1) 各種条件が解析結果に及ぼす影響

直径 0.20m の空孔を間隔 0.50m で三角形ハニカム状に周期的に配置した基本設定の場合の、各圧力加振位置に対する解析結果を図-4 に示す。無次元周波数 $\bar{\omega} = 0 \sim 3$ の範囲で、 $\bar{\omega}$ の減少と共にエネルギー透過比が一樣に減少している。特に発破による地盤振動の主な周波数帯に相当する $\bar{\omega} = 0.175 \sim 0.35$ の範囲では、エネルギー透過比が 0.95 程度に低下しており、わずかながらも本手法による振動低減効果が確認できる。

以降に図-4 の圧力加振位置 (0,0)m の結果を基準条件として、各解析条件の変化がエネルギー透過比に及ぼす影響を確認する。まず、空孔径を 0.10m、0.15m および 0.25m と変化させた解析結果を図-5 に示す。空孔径を基準値 (0.20m) より 0.05m 大きくすることにより、エネルギー透過比がさらに 0.06 程度減少している。一方、空孔径を基準値より 0.05m 小さくすると、エネルギー透過比は 0.98 程度に止まっており、空孔径 0.10m では、ほとんど低減効果が確認できず、空孔径を大きくとる程振動低減効果が顕著になることがわかる。

空孔間隔を基準値の 1/2 (0.25m) にした場合の結果を図-6 に示す。空孔間隔を半分にすることで空孔数は単純に 2 倍になるが、エネルギー透過比は 0.4 程度減少しており、空孔総面積を基準に考えると、空孔径を変化させた場合よりも大きな低減効果が得られることがわかる。なお、この空

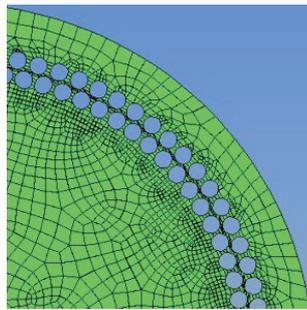


図8 空孔間隔 0.17m での配置

孔間隔が及ぼす効果については、4.2 で詳しく述べる。

層数を基準値の3層から4層に変化させた場合の結果を図-7に示す。層数を1層増加させることで空孔を0.25mに拡大した場合と同程度の低減効果が得られている。

なお、直交格子と三角形ハニカム格子との差はほとんど認められず、空孔配置パターンは他の条件に比べ重要でないことがわかった。

(2) 空孔間隔が透過エネルギーに及ぼす影響

先の結果で、空孔間隔を狭めた場合に、エネルギー透過比が著しく減少したことを踏まえ、空孔間隔が透過エネルギー低減に与える効果をより詳細に検討する。

なお、4.1 より、層数の増加によってもエネルギー透過比が減少することが示された。しかし実際に掘削面に空孔層を形成する場合、3層以上は空孔総数も多くなりコスト面で現実的ではないと考えられる。よって本章では、直径0.15mの空孔を使用し、1層および2層のハニカム配置で解析する。なお、層数が減ることで、低減効果が小さくなることが予想されるが、その分空孔間隔を狭めることで、エネルギー透過比の減少が見込める。

以下では、空孔間隔を0.50mから0.17mまで変化させて解析を行った。2層で空孔間隔0.17mの時の空孔配置の様子を図-8に示す。図より、各層の空孔どうしが接触まではしていないものの、ほぼ最密に近い状態となっていることがわかる。解析結果を図-9に示す。横軸に空孔間隔、縦軸にエネルギー透過比 E をとっている。発破振動の主な周波数帯が $\bar{\omega} = 0.175 \sim 0.35$ の範囲であり比較的小さいため、プロット点は $\bar{\omega} = 0$ での外挿値を代表値として示している。図より、空孔間隔を狭めることでエネルギー透過比が激減しており、内側と外側の空孔間の厚みが小さくなり、スリットを設けた場合に近い低減効果が得られている様子が窺える。

また、空孔の総面積で空孔間隔と層数増加のエネルギー透過比 E を比較したものを図-10示す。図は、図-9の結果および同空孔を層数1~4層まで増加させた場合の空孔総面積 A を L^2 で無次元化した値とエネルギー透過比との関係である。空孔総面積は施工コストと密接に関係しているが、

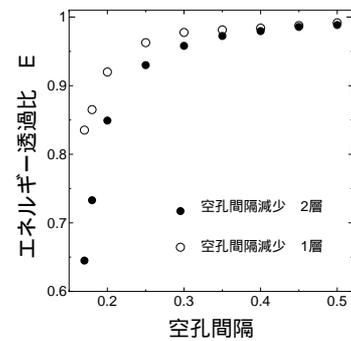


図9 空孔間隔がエネルギー反射比に及ぼす影響

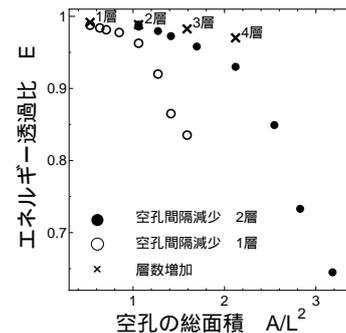


図10 空孔総面積とエネルギー透過比

層数増加よりも空孔間隔を狭める方がより効果的であることがわかった。

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.
- 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.
- 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.11-131129.
- 野間達也, 土屋敏郎: 外周スリットと電子雷管を用いた制御発破の試験施工, 土木学会学術講演解説概要集 55(2000), VI-67, pp.134-135.
- 阿部和久, 中山 悠, 紅露一寛: 中間層を有する周期複合材の弾性波動解析, 応用力学論文集 13(2010), pp.1041-1048.
- チャールズ H. ダウデン: 発破振動の測定と対策, p.18, (1995), 山海堂
- 阿部和久, 本間広紀, 紅露一寛: 一部に欠陥を有する二次元周期場の動弾性解析, 土木学会論文集 A2(応用力学) 68(2012), No.2, I-823-I-831.
- Eringen, A.C. and Şuhubi, E.: Elastodynamics, Vol. II, (1975), Academic Press, Inc.