

# 空孔配置によるトンネル発破振動低減効果の検討

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

トンネルの発破掘削を民家等に近接して行う場合、発破振動を低減して構造物や住民への影響を最小限に抑える必要がある。一般的には1孔あたりの総葉量を低減するなど振動低減を図るが、特に制約が厳しい場合、波動の伝播を遮断するために、掘削面の外周に沿ってスリット(自由面)を形成させて大幅に振動を低減させることがある<sup>1)</sup>。ただしこの場合、スリットの形成に特殊な工法が必要であると共に、掘削効率の低下や施工コストの増大が問題となる。

一方、周期構造内の波動場に、如何なる周波数においても波動モードを持たない周波数帯(ストップバンド)が存在し得ることが知られており、この特性を利用することで波動の透過性や遮蔽性を制御することができる。既往の研究<sup>2)</sup>では、周期場のバンド特性を利用することで、十分な遮蔽性能が得られることが示されている。

また、円形領域に対してバンド特性を適用した例としてホーリーファイバがある。これは、「コア」と呼ばれる心線を「空孔」を設けた「グラッド」と呼ばれる周期素材で包んだ構造で与えられ、光の反射率を向上させ、従来の光ファイバに比べはるかに高い光の保持率を可能にしている。

本研究では、ホーリーファイバのように、多数の空孔を掘削面に配置することによる、発破振動低減の可能性について検討する。

## 2. 空孔域を有する無限場の加振応答解析

### (1) 対象とする問題

トンネルを発破によって掘削していく場合、掘削面に対して垂直に発破孔が設けられる。掘削面外周近傍に図1のように空孔を配置する場合を考える。解析では、均質な二次元無限場の中に $\Gamma_3$ で囲まれた有限領域をとり、孔の配置された領域を含む $\Gamma_3$ 内側の領域を $\Omega_2$ とおく。 $\Omega_2$ 内で加振力が加わる無限小の円孔(発破孔)を含む要素を $\Omega_e$ 、その境界を $\Gamma_1$ とおく。なお、 $\Gamma_3$ の外部は、 $\Omega_2$ の均質域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。

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

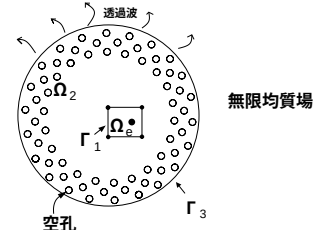


図1 対象とする問題

ここで $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3$ は、それぞれ $\Gamma_1, \Omega_2, \Gamma_3$ 上における節点変位、 $\mathbf{F}_1$ は $\Gamma_1$ 上の節点力、 $\mathbf{K}_B$ は $\Gamma_3$ 上の外部インピーダンス行列である<sup>3)</sup>。 $\Gamma_1$ において、 $\Omega_e$ 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、 $\mathbf{u}_1^I$ は円孔加振で放射される波動の $\Gamma_1$ 上での節点変位、 $\mathbf{F}_1^I$ 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 $\Omega_2$ 側からの散乱波成分である。 $\Gamma_1$ 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 $\Omega_e$ 内に外力加振を受けない成分であるので、次式が成り立つ。

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

ここで、 $\tilde{\mathbf{K}}_{11}$ は $\Omega_e + \Gamma_1$ に対する動的要素剛性行列である。以上の式を整理すると、 $\mathbf{F}_1$ は次式の様に表わせる。

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

式(5)を(1)に代入して最終的な求解方程式を得る。

$\Gamma_3$ からの放射波動エネルギーの時間平均 $\bar{E}_R$ は次式により求める。

$$\bar{E}_R = \frac{\omega}{2} \text{Im}(\mathbf{u}_3^* \mathbf{K}_B \mathbf{u}_3) \quad (6)$$

ここで、 $()^*$ は共役転置を表す。

## 3. 解析

### (1) 分散解析

格子間隔 $L=0.50\text{m}$ で直径 $0.20\text{m}$ の空孔を三角形ハニカム状に周期的に配置した場合の(a)分散曲線と、(b)ハニカム状配置における第1Brillouinゾーンを図2に示す。

**Key Words:** トンネル発破, 振動低減, 空孔配置

連絡先: 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL 025 (262) 7028 FAX 025 (262) 7021

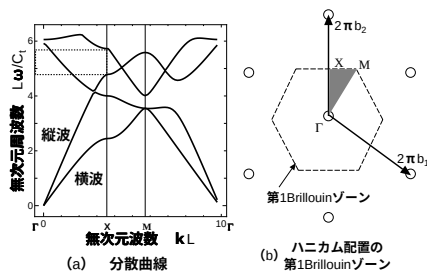


図2 ハニカム状配置の分散曲線と第1Brillouin ゾーン

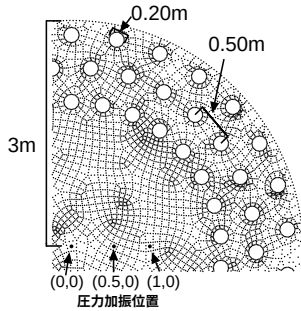


図3 解析領域 (1/4 部分)

なおここで用いられている周波数 ( $L\omega/C_t$ ) および波数 ( $kL$ ) は地盤の横波伝播速度  $C_t$  と格子間隔  $L$  により無次元化されたものである。この時の解析波数領域は、逆格子空間における三角形  $\Gamma$ -X-M- $\Gamma$  上となる。完全なストップバンドは存在しないが、 $\Gamma$ -X の波数区間において点線で囲まれた周波数域で縦波モードが存在しないことが確認できる。

## (2) 加振問題の解析条件

解析領域は、無限場内におかれた半径 3m の円形領域とする。図3の様に要素分割し、空孔は3層の三角形ハニカム状に配置する。無次元周波数 0~6 までの範囲で図中の発破孔位置にパルス波を入力し、以下のエネルギー透過比  $E$  を求める。

$$E = \frac{\text{空孔がある場合のエネルギー透過率}}{\text{空孔がない場合のエネルギー透過率}}$$

## (3) 解析結果

図4に圧力加振位置を (0,0), (0.5,0), (1,0)m と設定した場合の解析結果を示す。横軸に無次元周波数、縦軸はエネルギー透過比  $E$ 、太枠で囲まれた範囲が分散曲線の  $\Gamma$ -X の波数領域で縦波の存在しない周波数帯を表わしている。この周波数帯でエネルギー透過比が減少していることがわかる。圧力加振位置を中心からずらしていくにつれて、エネルギー透過比が高くなっている。これは空孔域に対する波の入射角度が変化していき、図2の分散曲線の X-M, M- $\Gamma$  の縦波モードが存在する波数ベクトル方向の波動が入射したためと考えられる。本解析では、上記解析条件以外にも、空孔の直径、格子間隔、層数を変化させ、さらに直交格子でも解析を行った。その結果、上に示したケースと同様の傾

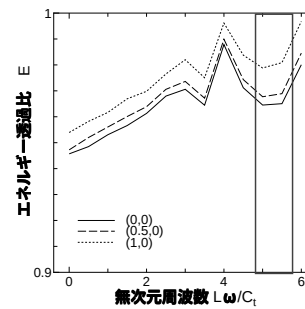


図4 エネルギー透過比

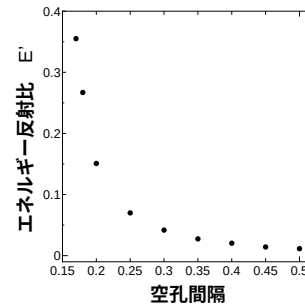


図5 エネルギー反射比

向が確認された。なおエネルギー透過比は、空孔の直径の拡張、格子間隔の縮小、層数の増加により低減されることがわかった。また、無次元周波数が 0~3 の範囲では、伝播波動モードが存在するものの、エネルギー透過比が低減している。これは、空孔を設けた範囲の見かけの剛性が低下した影響と考えられ本手法の有用性が確認できる。

無次元周波数が 0~3 の範囲の低減効果に注目し、空孔間隔を小さくしていったときの解析結果を示す。空孔配置は、直径 0.15m で2層のハニカム配置とする。空孔間隔が 0.50m から 0.17m までにおける結果を図5に示す。横軸に空孔間隔、縦軸に反射したエネルギー比  $E' = 1 - E$  をとり、プロット点は各間隔における無次元周波数  $L\omega/C_t \rightarrow 0$  の値である。図より、空孔間隔を小さくしていくことで、反射するエネルギーが急増していることがわかる。またこの傾向は、1層でも確認することができ、空隙率が反射(透過)エネルギーの増減に関係することがわかる。

本解析結果から、空孔を周期的に配置することで、ストップバンドと空孔域の見かけの剛性低下によりパルス波の透過をある程度低減し得ることが確認できた。有意な低減効果を得るためには密な空孔配置が必要ではあるが、波動透過の観点から本振動低減法の特性を検討することができた。

## 参考文献

- 1) 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, 土木学会第55回年次学術講演講演概要集, VI-67, pp.134-135, 2000.
- 2) 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, Vol.13, pp.1041-1048, 2010.
- 3) 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), Vol.68, No.2, I823-I831, 2012.