

スリット付シェルターによるトンネル微気圧波の低減

環境工学研究部 熱・空気流動研究室

主任研究員 福田 傑

1. はじめに

豪雪地帯に高速鉄道を建設する際、複数のトンネルが近接している場合には、雪覆い（スノーシェルター）^{1), 2)} でトンネル間を接続することにより雪害対策を行うことがある（図 1）。スノーシェルターの側面にスリットを設けると、シェルター内の圧力変動を緩和することができ、さらにトンネル坑口から放射される微気圧波^{3), 4)} を低減することもできる。近年では、降雪の少ない地域に建設される高速鉄道においても、微気圧波対策等のためにスリット付シェルターでトンネルを接続する事例もある⁵⁾。

スリット付シェルターによる微気圧波の低減の原理を図 2 に示す。一つ目のトンネル（第 1 トンネル）に列車が突入することにより形成された圧縮波がシェルター設置部に到達すると、微気圧波は幅の狭いスリットから徐々に放射されるため、通常の坑口から放射される微気圧波よりも小さくなる。またスリットから圧力が抜けるため、シェルターを通過する間に圧縮波は急激に減衰し、波面圧力勾配は緩やかになる。このためこの圧縮波が二つ目のトンネル（第 2 トンネル）内へ伝播し、反対側の坑口へ到達したときに放射される微気圧波も小さくなる。さらにシェルターにトンネル緩衝工^{2), 4)} のような効果があることから、列車先頭部が第 2 トンネルに突入する際に形成される圧縮波の波面圧力勾配は通常の坑口の場合よりも緩やかになるため、第 2 トンネルへの列車突入時の圧縮波によって第 2 トンネルの出口側坑口から放射される微気圧波も小さくなる。本研究では、新幹線の実トンネルのスノーシェルターにおける現地測定および数値解析により、シェルターのスリットから放射される微気圧波の特性を調べた。



図 1 新幹線におけるスリット付シェルターの設置例

2. 現地測定

現地測定の概要を図 3 に示す。本現地測定では第 1 トンネル（断面積：61.9 m²，全長：260 m）内測定点 p1，スノーシェルター（断面積：79.5 m²，

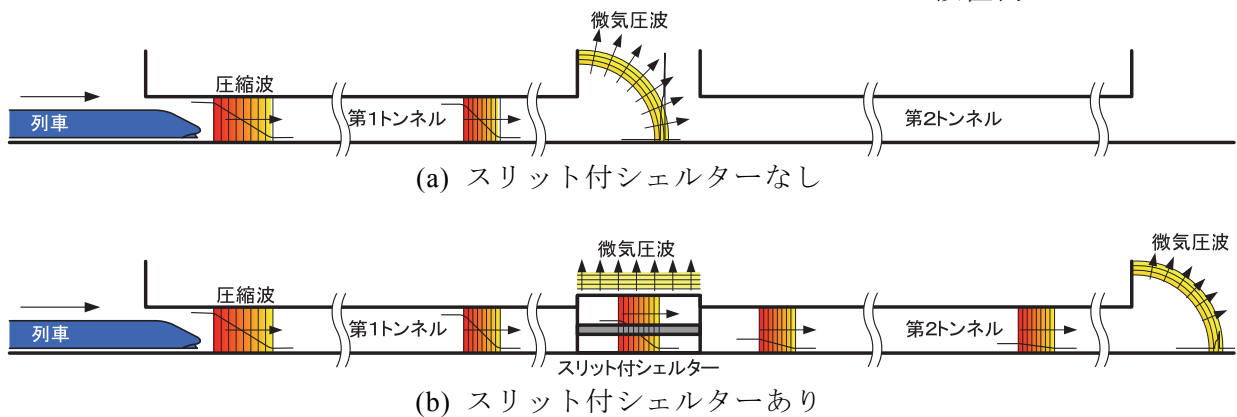


図 2 微気圧波のスリット付シェルターによる低減対策

全長：130 m，スリット：両側面に幅 15 cm) 内測定点 p2，第二トンネル（断面積：61.9 m²，全長 25 808 m）内測定点 p3 の圧力を圧力変換器で測定した。さらに，スノーシェルターの周囲の圧力（測定点 x1 ～ x3）を低周波マイクロホンにより測定した。ここで，シェルター周りの微気圧波測定点の座標 (x_m, y_m) を図 3 に示すように定義する。

3. 数値解析

隣接したトンネルを接続するシェルターのスリットから放射される微気圧波の数値解析においては，図 4 に示すような断面積 A_s の管内を伝播する平面音波を考える。管の側面に管断面積に比べて十分に小さい面積 A_w の開口部があるとき，開口部への入射波の圧力 p_{in} と透過波の圧力 p_{tr}，および開口部から放射される圧力波の圧力 P は次式で与えられる^{6), 7)}。

$$p_{tr} - p_{in} = -\frac{\rho c A_w}{2 A_s} v \quad (1)$$

$$l \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2} v^2 + \frac{c A_w}{2 A_s} v = \frac{p_m(t)}{\rho}, \quad v(0) = 0 \quad (2)$$

$$P(t) = \frac{\rho A_w}{\Omega r} \left[\frac{\partial v}{\partial t} \right] \quad (3)$$

ただし，ρ：静止空気密度，c：静止空気中の音速，v：開口部から流出する空気の流速の法線方向成分，l：開口部の特性長さ（≈ 開口部等価直径），Ω：放射立体角（シェルター周りの地形の効果を表すパラメータ），r：開口部から観測点までの距離，t：時間，[]：遅延時間（= t - r/c）である。また，管の片側面（図 4 (b)）あるいは両側面（図 4 (c)）に細長いスリットが設置されている場合，スリットを多数の開口部に分割し，それぞれの開口部から放射される圧力波を重ね合わせ，スリットから放射される圧力波の圧力を求める。

ここで，図 5 のように第 1 トンネルからシェルター，あるいはシェルターから第 2 トンネルのように断面積の不連続変化部を圧力波が通過するときの入射波の圧力 p₁ と透過波の圧力 p₂ は，p₂/p₁ = 2A₁ / (A₁ + A₂) の関係⁸⁾ より求めた。

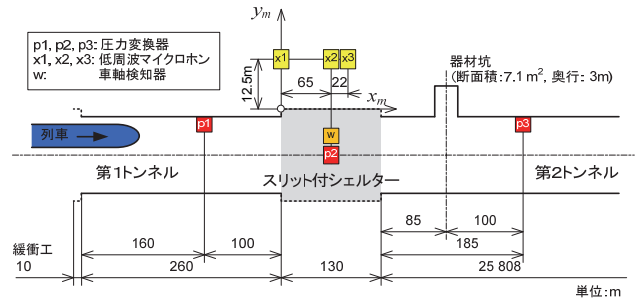
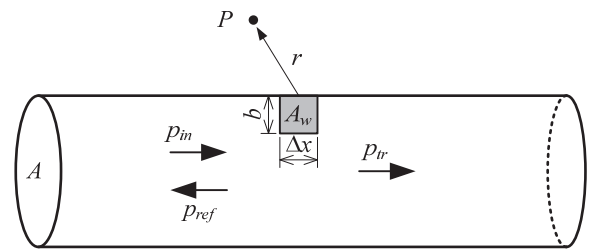
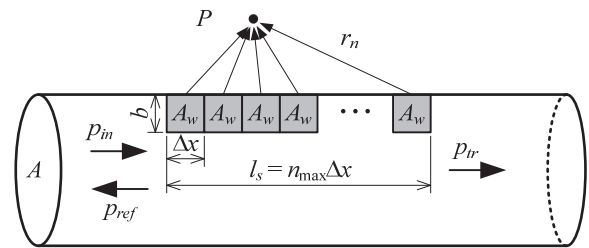


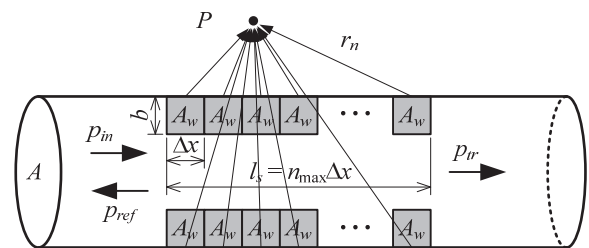
図 3 現地測定の概要



(a) 側面に開口部が一つある場合



(b) 片側面にスリット状の開口部がある場合



(c) 両側面にスリット状の開口部がある場合

図 4 側面に開口部がある管内を伝播する圧力波

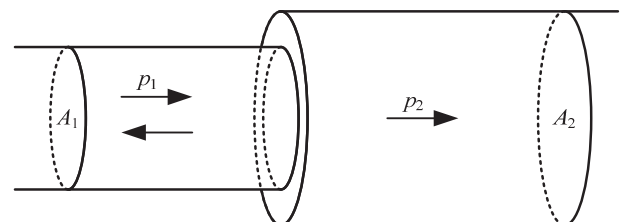


図 5 断面積不連続変化部を通過する平面音波の圧力

4. 結果と考察

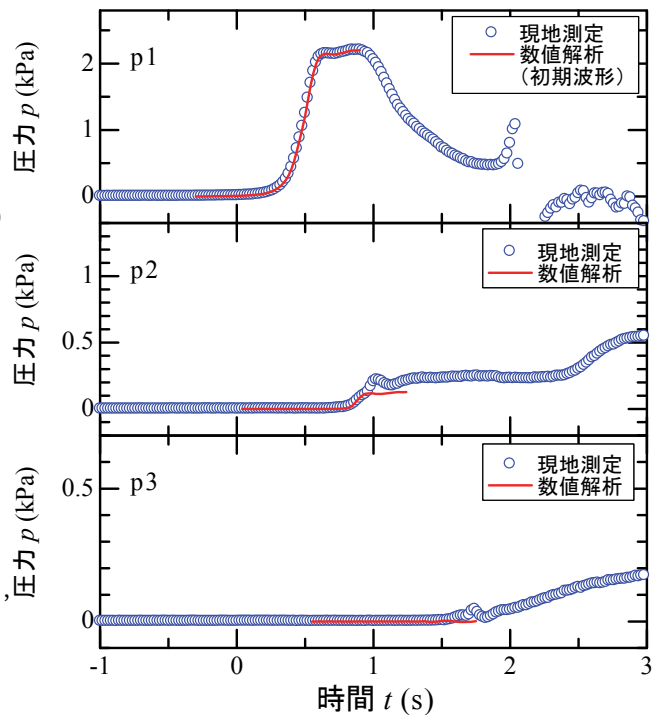
現地測定および数値解析（第1トンネル内の現地測定波形を初期波形）によるトンネルおよびシェルター内およびスリット付シェルター外部の圧力の変化をそれぞれ図 6 (a), 図 6 (b) に示す。ここで図 6 (b) のシェルター外の圧力は、現地測定の測定点 x1 における微気圧波のピーク値に対する相対値である。

図 6 (a) より、圧縮波のスリット付シェルター内を通過する間の減衰を数値解析により模擬できていることがわかる。また図 6 (b) より、スリット付シェルター外の各測定点において現地測定と数値解析の波形がほぼ相似であること、測定点 x1 より x2 の方が微気圧波ピーク値は大きいことなどの点において数値解析結果が現地測定結果と一致していることから、放射立体角 Ω を適切に設定（本解析では $\Omega = 2\pi / 1.23 \approx 5.1$ と設定）することにより、本数値解析手法によりスリット付シェルター周りの微気圧波を評価することが可能であると考えられる。

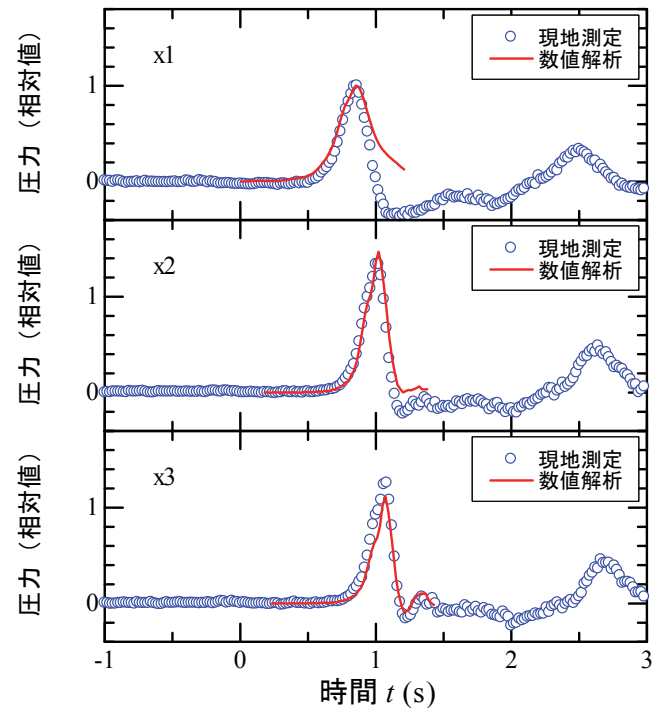
第1トンネル内の圧縮波の圧力 p1 の波形を圧力勾配最大値 = 5 kPa/s の tanh 波形⁷⁾ と設定し、 $\Omega = 2$ としたときの微気圧波の波形の数値解析結果を図 7 に示す。測定点(40 m, 20 m) は測定点(0 m, 20 m)より第1トンネルから離れているにもかかわらず、微気圧波が大きいことがわかる。このときのシェルター周りの微気圧波のピーク値の分布を図 8 の上側に示す。また、通常のトンネル坑口から放射される微気圧波のピーク値について、山本の式³⁾により求めた微気圧波のピーク値の分布を図 8 の下側に示す。図 8 より、通常の坑口において微気圧波はほぼ球面波状に放射されるのに対し、シェルターのスリットから放射される微気圧波の指向性は通常の坑口とは異なることがわかる。

5. まとめ

隣接したトンネルを接続するシェルター側面のスリットから放射される微気圧波を現地測定および数値解析により調べた。現地測定結果と数値解析結果の比較より、シェルター周りの地形の効果を表すパラメータである放射立体角 Ω を適切に設定することにより、本数値解析法によ



(a) トンネル・シェルター内



(b) シェルター外

図 6 現地測定・数値解析により得られた圧力波形

てスリットからの微気圧波を評価可能であると考えられる。さらに数値解析結果より、スリットから放射される微気圧波が、通常の坑口から放射される微気圧波と異なる指向性を持つことが明らかになった。本数値解析手法は新線建設や速度向上を実施する際の微気圧波低減対策の検討に用いることが可能である。

文献

- 1) 高橋泰富, 伊藤則昭, 種池信好: 上越新幹線スノーシェルターの設計と施工, 構造物設計資料, No. 62, (1980), pp. 27-30.
- 2) 福田傑, 宮地徳蔵, 飯田雅宣: 微気圧波を小さくする地上設備, RRR, Vol. 66, No. 8, (2009), pp. 10-13.
- 3) 山本彬也: トンネル出口からの微気圧波, 日本物理学会春の分科会 応用数学, 力学, 流体物理予稿集, (1977), p. 137.
- 4) 小沢智: トンネル出口微気圧波の研究, 鉄道技術研究報告, No. 1121 (1979).
- 5) 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構鉄道建設本部九州新幹線建設局: 九州新幹線工事誌 (新八代・西鹿児島間), (2005), pp. 298-303.
- 6) Ozawa, S. and Murata, K.: A pressure wave emitted from openings of tunnel wall, *Proceedings of the 10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, (2000), pp. 757-765.
- 7) Fukuda, T., Saito, S., Iida, M., Kurita, T. and Ozawa, S: Countermeasure against the micro-pressure wave by a shelter linking neighboring tunnels, *Proceedings of the 15th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation & Fire in Tunnels*, (2013), pp. 539-552.
- 8) Lighthill, J.: *Waves in fluids*, Cambridge University Press, (1978), pp. 100-106.

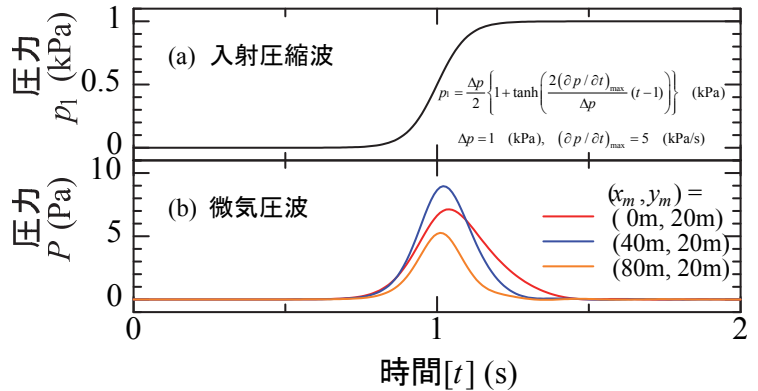


図 7 第1トンネル内およびシェルター外の圧力波形 (数値解析結果, $(\partial p_1 / \partial t)_{\max} = 5 \text{ kPa/s}$, $\Omega = 2\pi$)

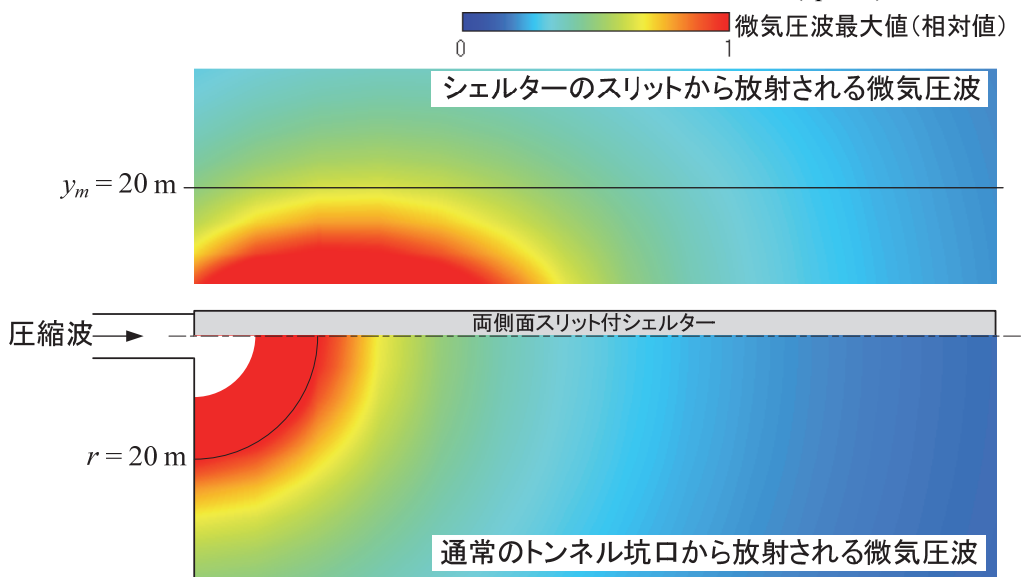


図 8 シェルターのスリット (上) および通常のトンネル坑口 (下) から放射される微気圧波の最大値の分布 (数値解析結果, $(\partial p_1 / \partial t)_{\max} = 5 \text{ kPa/s}$, $\Omega = 2\pi$)