

トンネル微気圧波の放射に対する地形条件の影響

宮地 徳蔵* 福田 傑*

Experimental Investigation of the Effects of Topography Around the Tunnel Portal on the Micro-pressure Wave

Tokuzo MIYACHI Takashi FUKUDA

When a high speed train enters a tunnel, a micro-pressure wave radiates out from its exit portal. The micro-pressure wave can cause wayside environmental problems. Topography around the tunnel exit portal affects the peak value of the micro-pressure wave. In this paper, model experiments using a train model launcher were performed for investigating the effects of topography around the tunnel portal on the micro-pressure wave. Four types of topography models, infinite flat ground, one side excavation, both sides excavation and elevated bridge, were used to measure the spatial distribution of the peak values of the micro-pressure waves. Furthermore, a modification of a prediction model for the peak value of the micro-pressure wave radiation was made on the basis of experimental results.

キーワード：高速鉄道，トンネル微気圧波，放射，地形

1. はじめに

高速列車がトンネルに突入すると、トンネル内に圧縮波（トンネル内圧縮波）が形成される。このトンネル内圧縮波が音速で伝播してトンネル出口に到達すると、出口坑口から外部にトンネル微気圧波^{1) 2)}とよばれるパルス状の圧力波が放射される。この微気圧波は、トンネル出口付近で騒音・振動などの環境問題を引き起こすことがある。そのため、その予測手法と低減対策の開発が重要となる。

山本¹⁾は、微気圧波の主要音源は圧縮波に誘起された空気のトンネル出口からの湧き出し流れであること、微気圧波の音源の強さがトンネル出口に到達したトンネル内圧縮波の時間変化率に比例することを示した。トンネル入口で形成されるトンネル内圧縮波の時間変化率最大値（圧力勾配最大値）は、列車速度のほぼ3乗に比例する。したがって、短いトンネルでは、微気圧波ピーク値（時間波形の最大値）は列車速度の3乗に比例する。一方、10 km以下のスラブ軌道トンネルでは、トンネル内圧縮波の圧力勾配最大値は、圧縮波の伝播に伴い大きくなる。このため、スラブ軌道トンネル出口では、微気圧波ピーク値は列車速度の3～10乗程度に比例する。

このように微気圧波ピーク値は列車速度に大きく依存する。近年の新幹線列車の高速化に伴う微気圧波ピーク値増大を抑制するため、これまで以上に微気圧波低減対策の重要性が増している。このため、微気圧波対策の効果をより正確に予測する必要が生じており、より高精度な微気圧波予測モデルが求められている。

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

山本¹⁾は、トンネル坑口からみた広義の開き角（放射立体角）を用いて微気圧波に対する地形の影響を定式化した。本報告では、これを放射立体角モデルとよぶ。放射立体角モデルは、微気圧波の時間ピーク値が球対称分布であることを仮定した1次元モデルであり、その簡便性からよく用いられている。しかし、実際の新幹線トンネルでは、微気圧波は地形の影響によって3次元的な分布となるため、トンネル坑口からみて球対称な観測点であっても、場所によって微気圧波ピーク値は異なる。したがって、トンネル微気圧波の放射に対する地形条件の影響を明らかにしなければならない。

本研究では、トンネル微気圧波の放射に対する地形条件の影響を把握するため、超高速模型発射装置を用いた模型実験を行った。そして、実験結果にもとづき、低周波近似の微気圧波ピーク値予測モデルを修正した。

2. 模型実験による検証

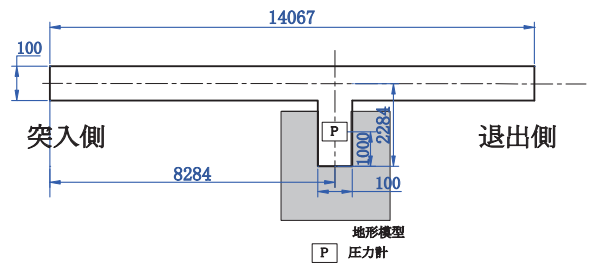
2.1 実験概要

微気圧波の放射に対する地形条件の影響を明らかにするため、模型実験を行った。トンネル内圧縮波を発生させるジェネレータとして、鉄道総研が所有する超高速模型発射装置³⁾を用いた。トンネル外に配置するマイクロホンとトンネルを退出する列車模型の干渉を避けるため、トンネル模型を枝坑に分岐して、枝坑出口をトンネル出口とみなした⁴⁾。

トンネル模型として、本坑、枝坑ともに内径100 mmの塩化ビニル製のパイプを用いた。トンネル模型の概要を図1、図2に示す。列車模型の先頭部は直径44.7

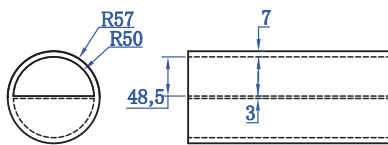
特集：沿線環境

mm, 長さ 67.1 mm の回転楕円体形状であり, 発射速度は 230 - 270 km/h とした。本坑模型は列車突入坑口から約 8 m の位置で枝坑と分岐している。トンネルを半円で近似するため, 図 2 に示すように枝坑用パイプは厚み 3 mm の板を挿入して上下に仕切って分岐管とし, その上半分をトンネルとみなした。この仕切り板とパイプの内壁は接着剤で密閉している。枝坑の仕切り板の影響を考慮して枝坑坑口の上半分の断面積を新幹線の実トンネル坑口断面積 63.4 m² に対応させると, 本実験の縮尺は 1 / 130 になる。



単位：mm

図 1 トンネル模型全景



単位：mm

図 2 枝坑模型

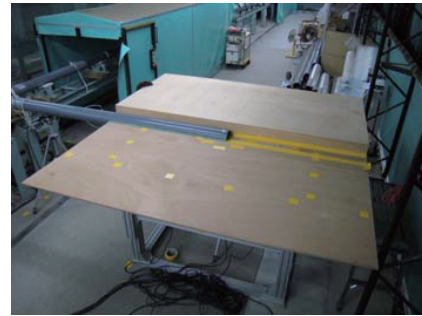
地形は, 平地, 片側が崖 (片側切土), 両側が崖 (両側掘割), 高架橋の 4 種類とした。各地形の模型を図 3 に, 諸元を表 1 に示す (平地はのぞく)。なお, 本報告では, 「桁, 床組など上部構造物全体」を橋桁とよぶ⁵⁾。各地形の模型で使用している地面板は約 1800 mm × 2000 mm である。本実験条件下では, 地面板は十分に大きく, その境界からの散乱波が微気圧波測定に影響しない無限平板とみなすことができる。

本実験では, 枝坑坑口中心から 157 mm (以下 20 m 相当点), 394 mm (以下 50 m 相当点) の位置にマイクロホン (Rion, NL-32) を設置し, 微気圧波を測定した。これらの測定点は, 厳密には実スケールでそれぞれ 20.4 m 点, 51.2 m 点となる。例として, 片側切土条件の場合のマイクロホン設置位置を図 4 に示す。ここで, h は切土の高さである。また, 枝坑坑口からトンネル内へ向かって約 1 m の位置に圧力計 (Kulite, XCS-190-5G) を設置しトンネル内圧縮波を測定した。

本実験では, 分岐管の出口の上側から放射する微気圧波を測定した。地面板の下側に分岐管の下半分が隠れる場合には, 地面板上側での微気圧波測定に影響がないと考え, 下側の出口を開放して実験した。高架橋の条件で

は, 分岐管の下半分が地面板の上部に暴露するため, 下側出口を閉鎖し, 微気圧波測定に影響が及ばないようにした。

なお, 本研究では, トンネル出口に緩衝工²⁾は設置していない。



(a) 片側切土



(b) 両側掘割



(c) 高架橋

図 3 地形の模型

表 1 地形模型諸元 (mm)

片側切土	
切土高さ h	0, 50, 100, 200
トンネル坑口中心から切土までの距離	57
両側掘割	
掘割高さ h	0, 50, 100, 200
掘割の幅	117
高架橋	
高架橋高さ h	79, 157, 315
高架橋の幅	117
防音壁高さ	15.7

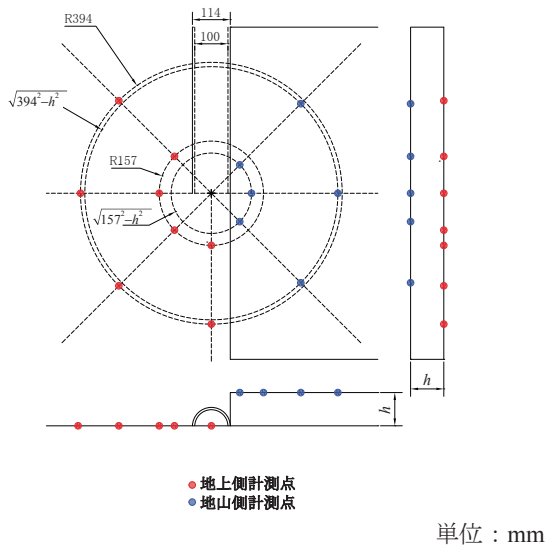


図4 マイクロホン設置位置の例（片側切土）

2.2 実験結果

本研究では、トンネル内圧縮波を入力、微気圧波を応答とした場合の伝達関数を実験結果から求めた。得られた伝達関数を用い、トンネル内圧縮波の基準波形が入力された場合の微気圧波の波形とピーク値を計算した⁴⁾。基準波形は $p = 1 + \tanh(10t)$ (kPa) (現地スケール)、基準音速は 340 m/s とした。実験結果から計算した微気圧波波形の例を図5に示す。地形条件は両側掘割、観測点距離は 20 m、 $\theta = 0^\circ$ である。ここで、 θ は坑口中心からみた観測点位置ベクトルと線路のなす角（方位角）、 h は掘割や高架橋の高さである。本稿において、これ以降、実験結果とは上記の手順で実験結果から基準波形に対する微気圧波の応答を計算したものである。

実験結果を図6～図9に示す。ここで、 r は坑口中心から観測点までの距離（観測点距離）である。また、観測点の位置について、地面側をA、掘割上や高架橋の橋桁上をBと表記する。これらにおいて、微気圧波ピーク値とは、図5のように実験毎に算出された微気圧波時間波形のピーク値を同一条件について平均したものである。図6～図8から、微気圧波ピーク値の空間分布は地形とともに変化する3次元的になることがわかる。また、本実験では、高架橋50 m相当点をのぞくすべての実験結果において、微気圧波ピーク値はトンネル正面($\theta = 0^\circ$)において最大となっている。

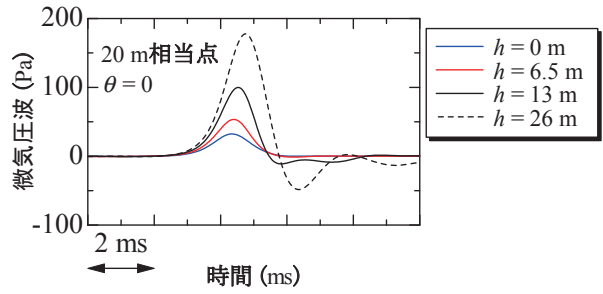


図5 実験結果 波形例（両側掘割）

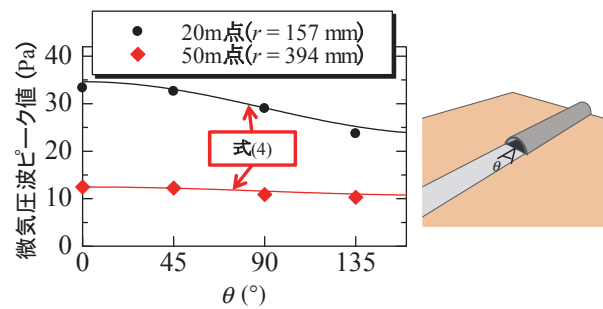


図6 実験結果 平地条件 微気圧波ピーク値分布

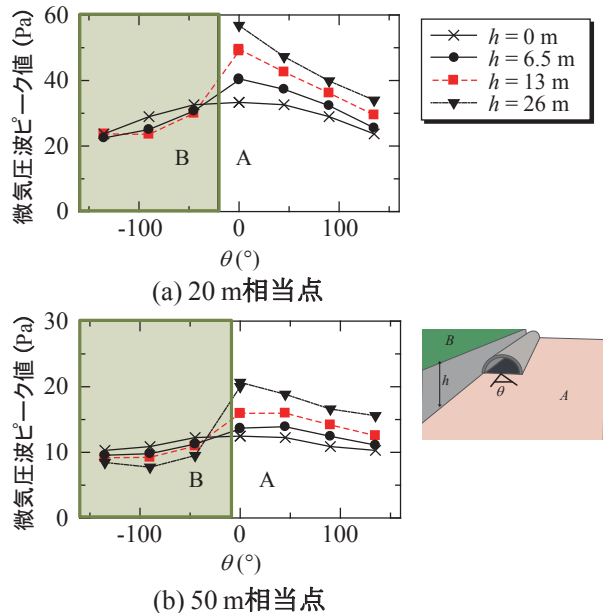


図7 実験結果 片側切土条件 微気圧波ピーク値分布

特集：沿線環境

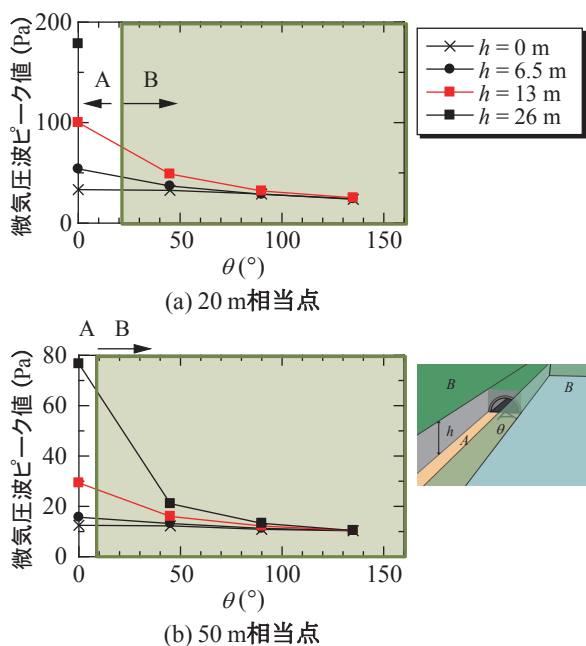


図8 実験結果 両側掘削条件 微気圧波ピーク値分布

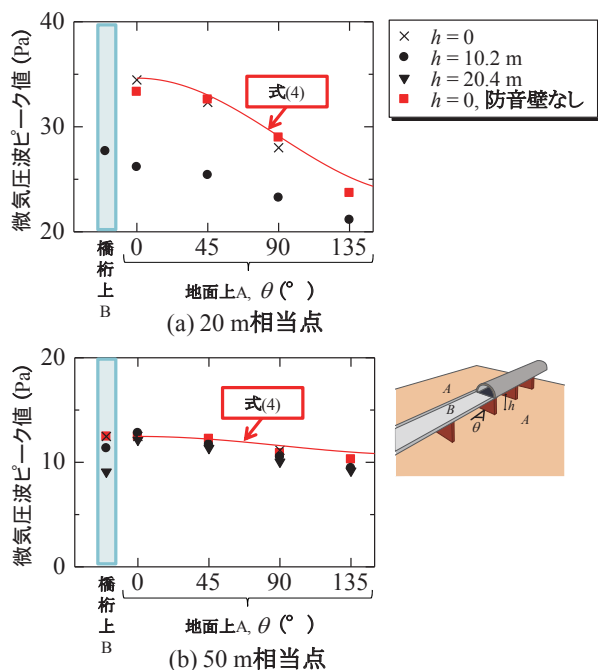


図9 実験結果 高架橋条件 微気圧波ピーク値分布

3. 地形の影響を考慮した放射立体角モデル

トンネル微気圧波の放射段階の予測では、(a) “微気圧波の音源” と (b) “地形による音の散乱効果” の両者のモデル化が必要となる。この両方を考慮した低周波遠方場近似の微気圧波放射モデルとしてよく用いられる放射立体角モデルは、次式で与えられる^{1) 2)}。

$$P_{MW} = \frac{2S}{\Omega cr} \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (1)$$

ここで、 t ：時間、 P_{MW} ：微気圧波、 p ：トンネル坑口面

でのトンネル内圧縮波の圧力、 c ：大気条件下での音速、 r ：観測点距離、 Ω ：放射立体角、 S ：トンネル坑口断面積（緩衝工がある場合には緩衝工断面積）である。

片側切土条件で、中心が坑口中心にあり半径が観測点距離 r の球を図 10 に示す。図 10 において、地上に暴露している球の表面積（図 10 の青表示部分の表面積）を用いた立体角を放射立体角として定義する⁶⁾ と、片側切土の放射立体角は観測点距離 r の関数として次のようになる。

$$\frac{w}{2} < r < \sqrt{h^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2} \text{ のとき}$$

$$\Omega = \pi \left(1 + \frac{w}{2r} \right) \quad (2)$$

$$r > \sqrt{h^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2} \text{ のとき}$$

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{h}{r} \right) + \int_0^h \left(\pi + 2 \sin^{-1} \left(\frac{w}{2\sqrt{r^2 - z^2}} \right) \right) d \left(\frac{z}{r} \right) \quad (3)$$

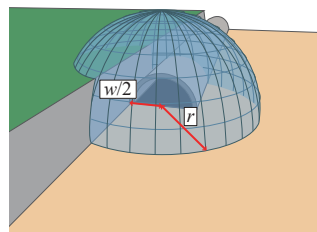


図 10 放射立体角の定義

ここで、 z は積分変数、 w は坑口中心から切土面までの距離の 2 倍の値であり、図 10 においては、トンネル外径に等しい。式 (2)(3) を式 (1) へ代入して得られる予測結果と実験結果の比較を図 11 に示す。この例では、 $\theta = 0^\circ$ および、 $\theta = -90^\circ$ における微気圧波ピーク値の予測誤差が大きいことがわかる。

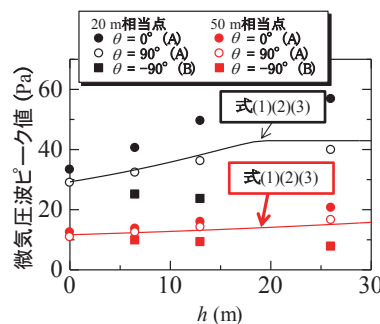


図 11 放射立体角モデルによる予測結果と実験結果

トンネル坑口正面では、地形の影響にくわえ、微気圧波の音源がもつ指向性の影響があらわれる。二重極子音源によって微気圧波音源の指向性を考慮した平地における微気圧波の予測モデル⁴⁾に低周波近似を課すと次式が得られる。

$$P_{Mw} = \left(1 + \frac{\ell}{r} \cos\theta\right) \frac{2S}{2\pi cr} \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{r}{c}\right) \quad (4)$$

ここで、 ℓ は開口端補正量である。式(4)中の $(\ell \cos\theta)/r$ は単極子音源による微気圧波に対する二重極子音源による補正を表わす。式(4)と実験結果の比較を図6に示す。両者はよく一致している。

地形の効果をさらに精度よく予測するため、式(4)をもとにして、低周波近似が成り立つ場合の地形の影響を表わす新たなパラメータ Φ を以下のように定義する。

$$\Phi = \left(1 + \frac{\ell}{r} \cos\theta\right) \frac{2S}{[P_{Mw}]_{\max} cr} \left[\frac{\partial p}{\partial t}\right]_{\max} \quad (5)$$

ここでは Φ を有効放射立体角とよぶ。さらに、平地での放射立体角 2π (たとえば、 $h=0$ を式(3)に代入)と有効放射立体角の比を補正係数 k とする。有効放射立体角 Φ あるいは補正係数 k を用いると、微気圧波ピーク値は次のように表わすことができる。

$$[P_{Mw}]_{\max} = \left(1 + \frac{\ell}{r} \cos\theta\right) \frac{2S}{\Phi cr} \left[\frac{\partial p}{\partial t}\right]_{\max} \quad (6)$$

$$= \left(1 + \frac{\ell}{r} \cos\theta\right) \frac{2S}{2\pi k cr} \left[\frac{\partial p}{\partial t}\right]_{\max} \quad (7)$$

各実験条件における補正係数 k を表2～表7に示す。補正係数は、 $k=1$ の場合は微気圧波ピーク値が平地で観測されるものと等しいことを意味し、 $k>1$ は微気圧波ピーク値が平地より小さくなることを表わす。片側切土や両側掘割の場合、それらの上側(地山上、B)で方位角が大きい場合では、 $k \approx 1$ であり、微気圧波は平地で観測されるものとほぼ等しい。高架橋の場合には、本実験条件では、すべての場合において $k>1$ である。

表2 有効放射立体角補正係数 k 片側切土 20 m 相当点

方位角 θ (°)	切土高さ (m)			
	0	6.5	13	26
-135	1.1	1.1	1.1	
-90	1.0	1.2	1.2	
-45	1.0	1.1	1.1	
0	1.0	0.9	0.7	0.6
45	1.0	0.9	0.8	0.7
90	1.0	0.9	0.8	0.7
135	1.1	1.0	0.9	0.7

表3 有効放射立体角補正係数 k 片側切土 50 m 相当点

方位角 θ (°)	切土高さ (m)			
	0	6.5	13	26
-135	1.1	1.1	1.2	1.3
-90	1.0	1.2	1.3	1.5
-45	1.0	1.1	1.1	1.3
0	1.0	0.9	0.8	0.6
45	1.0	0.9	0.8	0.6
90	1.1	0.9	0.8	0.7
135	1.1	1.0	0.9	0.7

表4 有効放射立体角補正係数 k 両側掘割 20 m 相当点

方位角 θ (°)	掘割高さ (m)			
	0	6.5	13	26
0	1.0	0.6	0.3	0.2
45	1.0	0.9	0.7	
90	1.0	1.0	0.9	
135	1.1	1.0	1.0	

表5 有効放射立体角補正係数 k 両側掘割 50 m 相当点

方位角 θ (°)	掘割高さ (m)			
	0	6.5	13	26
0	1.0	0.8	0.4	0.2
45	1.0	0.9	0.8	0.6
90	1.1	1.0	1.0	0.9
135	1.1	1.1	1.1	1.1

表6 有効放射立体角補正係数 k 高架橋 20 m 相当点

方位角 θ (°)	高架橋高さ (m)	
	0	10.2
橋桁上	1.0	1.3
0	1.0	1.3
45	1.0	1.3
90	1.0	1.3
135		1.2

表7 有効放射立体角補正係数 k 高架橋 50 m 相当点

方位角 θ (°)	高架橋高さ (m)		
	0	10.2	20.4
橋桁上		1.0	1.1
0	1.0	1.0	1.0
45	1.0		1.0
90	1.1	1.0	1.1
135	1.1		1.2

4. 考察

本研究では、実際の鉄道トンネルまわりの地形を模擬した実験により、微気圧波ピーク値の空間的な分布を調べた。

表2～表7より、実験結果から算出した有効放射立体角 Φ および補正係数 k は、トンネル坑口正面をのぞくと、 $3.8 < \Phi < 9.4$ 、 $0.6 < k < 1.5$ の範囲であった。前田⁷⁾は、有効放射立体角が $2 < \Phi < 4$ と比較的小さい値の範囲にある現地試験結果を報告している。本実験でも、両側掘割の掘割内(A)において $1.3 < \Phi < 4$ となる結果が得られた。

図7、図8より、片側切土、両側掘割のいずれの条件においても、地面側(A)では、切取や掘割の高さ h が大きくなるほど微気圧波ピーク値が大きくなる。一方、地山側(B)では、微気圧波ピーク値は平地と同程度以下となる。また、片側切土の場合、表2、表3から地山側(B)では、有効放射立体角は h や r にほとんど依存しないことがわかる。さらに、両側掘割の場合、表4、表5より、地山側(B)の微気圧波ピーク値は掘割の影響をほとんど受けない。

たとえば、高さ約26mの両側掘割のトンネル坑口正面(掘割の内側,A)では、 $k = 0.2$ であり、平地の5倍程度の微気圧波が観測される。一方、実際に近隣家屋が存在する可能性のある地山上(掘割の外,B)では、 $k \approx 1$ であり、平地とかわらない微気圧波が観測されることになる。

図9より、高架橋まわりでは、微気圧波ピーク値が平地よりも小さくなるという傾向がある。実験したすべての条件において $k > 1$ であり、高架橋高さ h が大きくなるほど微気圧波ピーク値は小さくなる。また、図9の $h = 0$ mの防音壁なしの微気圧波ピーク値は、2m相当の防音壁ありの結果に比べ、 $\theta = 0^\circ$ において小さくなり、 $\theta = 90^\circ$ において大きくなるが、その差はわずかである。このことから、2m程度の防音壁によりトンネル正面方向の微気圧波の指向性は増すといえるが、その効果はわずかであり実用上は無視してよい。

高架橋において、地面上(A)で観測される微気圧波ピーク値に着目すると、20m相当点では $k > 1$ があるが、50m相当点では $k \approx 1$ であり、高架橋の影響はほとんどみられない。これは、高架橋の比較的近傍にある観測点では、高架橋の橋桁の遮音効果が卓越しているものと考えられる。

微気圧波予測によく用いられる放射立体角モデルは、比較的地形の影響が小さい場合について、低周波遠方場近似の1次元モデルとして得られる。本研究では、実用性を考慮し、低周波近似が成り立つ範囲の実験結果にもとづき、地形の影響を表わすパラメータを提示した。これにより、放射立体角モデルの簡便性を損なうことなく、予測精度を向上することができる。微気圧波の空間分布

をより精度よく予測するためには、たとえば、地形の影響を表わすグリーン関数を用いる予測手法⁴⁾がある。今後は、条件を追加した模型実験や上記のグリーン関数を用いた予測手法により、補正表を拡張していく必要がある。

5. まとめ

本研究では、トンネル微気圧波の放射に対する地形条件の影響を明らかにするため、鉄道トンネル坑口周辺の代表的な地形を模擬した実験を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 片側切土の場合、地面上では、切土が高くなると微気圧波ピーク値が大きくなる。10m程度の切土の場合、微気圧波ピーク値は平地の約1.5倍程度となる。一方、地山上では、微気圧波ピーク値は平地よりも小さくなる。
- (2) 両側掘割の場合、地面上(掘割の内)では、掘割が高くなると微気圧波ピーク値が大きくなる。10m程度の掘割の場合、微気圧波ピーク値は平地の約3倍程度となる。一方、地山上(掘割の外)では、微気圧波は掘割の影響をほとんど受けない。
- (3) 高架橋の橋桁上あるいは地面上で観測される微気圧波ピーク値は、平地で観測されるものよりも小さい。20m観測点では、橋桁による遮音効果が無視できない。一方、高さ20m以下の高架橋まわりの50m観測点における微気圧波ピーク値は、平地で観測される微気圧波ピーク値と同程度であり、高架橋の影響はほぼ無視できる。
- (4) 低周波近似の微気圧波ピーク値予測モデルに含まれる地形の影響を表わすパラメータ(有効放射立体角)を実験結果から求めた。

文献

- 1) 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，p.137, 1977
- 2) 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
- 3) 福田傑，飯田雅宣：列車・トンネル系の空気力学に関する模型実験，日本音響学会誌，Vol.63, No.9, pp.543-548, 2007
- 4) 宮地徳蔵：トンネル坑口周りの地形を考慮した微気圧波放射モデル，鉄道総研報告，Vol. 24, No. 9, pp. 23-28, 2010
- 5) 財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道技術用語辞典，丸善，1997
- 6) 宮地徳蔵：トンネル微気圧波に関する理論的および実験的研究，大阪府立大学博士論文，2012
- 7) 前田達夫：列車の空気力学的特性およびトンネル微気圧波低減対策法に関する研究，鉄道総研報告，特別20号，1998