

内壁付きトンネル出口フードへの列車突入時性能に関する模型実験

斉藤 実俊* 宮地 徳蔵* 飯田 雅宣**

Model Experiments for Investigating Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel Exit Hood with Inside Partition

Sanetoshi SAITO Tokuzo MIYACHI Masanobu IIDA

An impulsive pressure wave radiated from a tunnel exit portal, called a micro-pressure wave, is one of the important wayside environmental problems in high-speed railways. The most typical countermeasure is a tunnel 'entrance' hood which is installed at a tunnel 'entrance' portal. Recently, we have proposed a new countermeasure, which is a hood with an inside partition installed at a tunnel 'exit' portal. Since Shinkansen tunnels are double-tracked tunnels, trains running in the opposite direction naturally enter this 'exit' hood. Consequently, it is necessary to estimate the effect of the inside partition of the exit hood on the compression wave generated by the opposite train. In this paper, this effect has been investigated by model experiments. As a result, it is shown that by selecting the specifications suitably the 'exit' hood has no bad influence on the compression wave.

キーワード：微気圧波，圧力波，鉄道，トンネル

1. はじめに

列車が高速でトンネルに突入するとトンネル内に圧縮波が形成される。この圧縮波は反対側の坑口（トンネル出口）に向かって音速で伝播し、トンネル出口に到達したときに外部にパルス状の圧力波（トンネル微気圧波¹⁾ ²⁾）を放射する。この圧力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ため、新幹線の建設時や速度向上時には低減対策を行う必要がある。現在の主な微気圧波対策としてはトンネル入口緩衝工²⁾（以下、通常緩衝工）の設置や車両先頭部の延伸・形状の最適化などがあるが、さらなる高速化に対応するためには、これらの対策だけでは不十分となる可能性がある。そこで筆者らは新しい微気圧波低減方法として、内部を壁（以下、内壁）で線路方向に2分割し、分割した一方の坑口を閉鎖する構造のフードを提案した^{3) 4)}。

現在の主な地上側対策である通常緩衝工がトンネル入口側（列車突入側坑口）に設置されるのに対し、内壁付きフードはトンネル出口側（列車退出側坑口）に設置される。しかし、新幹線トンネルは複線トンネルであることから必然的に反対方向の列車は内壁付きフードに突入することになり、その際に発生する微気圧波（その原因となるトンネル内圧縮波）への内壁の影響を把握する必

要がある。

そこで、列車模型発射装置⁵⁾による模型実験によって、内壁付きフードが設置された坑口に列車が突入したときに発生するトンネル内圧縮波について、内壁長さやフード断面積の影響を調べた。

2. 内壁付きフード

内壁付きフードの設置状況を図1に、構成概要を図2に示す。図1のように、内壁付きフードは列車の退出側（微気圧波が放射される側）の坑口に設置される。

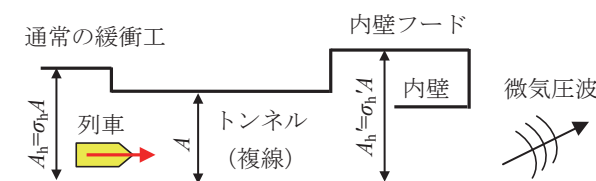


図1 内壁フードの設置状況

フード内部は内壁によって固定端（C点）側と開口端（O点）側とに分割されている（図2参照）。内壁付きフードの微気圧波低減効果を示す指標として、内壁付きフード（断面積 A_h' 、本坑との断面積比 σ_h' ）から放射される微気圧波最大値 P_h' と通常緩衝工（断面積 A_h 、本坑との断面積比 σ_h ）から放射される微気圧波最大値 P_h との比（以下、微気圧波比 γ ）を採用する。フードの出口開口率

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

** 環境工学研究部

特集：環境工学

(=フード口断面積 A_e / フード断面積 A_h) を σ とすると、微気圧波比 γ は以下の式で示される^{3) 4)}。

$$\gamma = \frac{P'_h}{P_h} = \sigma \frac{1 + \frac{1}{\sigma_h}}{1 + \frac{1}{\sigma'_h}} \quad (0.5 \leq \sigma \leq 1) \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{P'_h}{P_h} = 2\sigma(1-\sigma) \frac{1 + \frac{1}{\sigma_h}}{1 + \frac{1}{\sigma'_h}} \quad (0 \leq \sigma \leq 0.5) \quad (2)$$

式(1)(2)の関係を図3に示す。図3より、 $0.5 < \sigma < 1.0$ で微気圧波比 γ はフード出口開口率 σ に比例しており、 σ を小さくすると効果的に微気圧波を低減できることがわかる。一方で、フード口断面積 A_e は列車走行に支障しないようトンネル本坑程度の大きさを確保する必要があるため、出口開口率 σ を小さくする場合、フード断面積比 σ'_h をある程度大きくしなければならない ($A_e = \sigma A'_h = \sigma \sigma'_h A \geq A$, すなわち $\sigma \sigma'_h \geq 1$)。

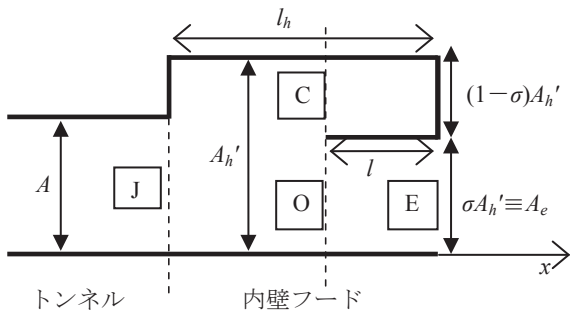


図2 内壁付きフードの構成

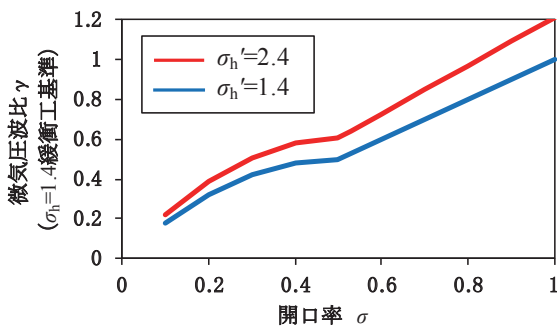


図3 内壁付きフードの微気圧波低減効果

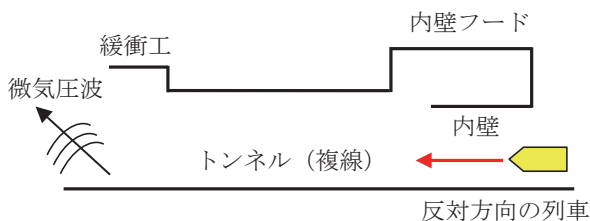


図4 内壁付きフードに突入した列車による微気圧波

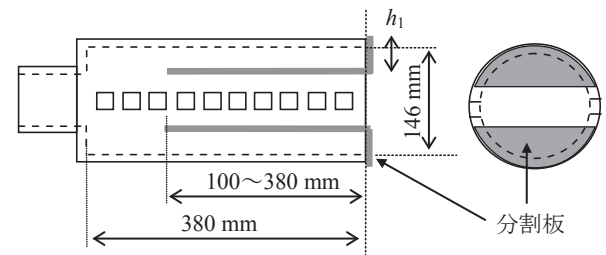
新幹線のトンネルは全て複線トンネルであるが、その場合、図4のように反対方向の列車は内壁付きフードに突入することになるため、反対側の坑口から放射される微気圧波に対する内壁の影響を調べる必要がある。微気圧波の大きさは、列車突入時に発生したトンネル内圧縮波の時間微分波形（以下、圧力勾配）の最大値に依存する^{1) 2)}ので、本研究では内壁付きフードに列車が突入したときに発生するトンネル内圧縮波の圧力勾配最大値を列車模型発射装置⁵⁾による模型実験により調べた。

3. 模型実験

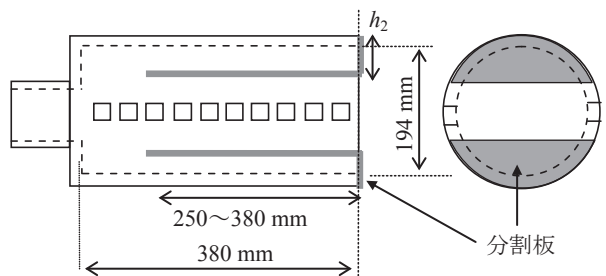
3.1 模型概要

実験に使用した模型の主要諸元を表1に示す。フード模型、トンネル模型、列車模型は全て円断面で、地面効果を鏡像法で模擬しており、縮尺は1/102に相当する。

今回使用したフードは断面積が既存の通常緩衝工と同程度 ($\sigma_h = 1.36$) のフード1と、微気圧波低減効果を高める目的で出口開口率を小さくするためにフード断面積を既存の通常緩衝工より大きくしたフード2 ($\sigma_h = 2.40$) の二種類である。フード模型の外観ならびに主要寸法を図5に示す。フード模型には通常緩衝工と同じように側面に $20\text{mm} \times 26\text{mm}$ の開口部が10個、中心間隔 38mm で等間隔に設置されている。フード内部の分割はアルミ製 ($t=1.5\text{mm}$) の分割板を設置することで模擬した。



(a) フード1 (断面積：本坑の1.36倍)



(b) フード2 (断面積：本坑の2.40倍)

図5 内壁付きフード外形図

表1 模型の主要諸元

トンネル 模型	断面積 A (m ²)	0.0123
	全長 (m)	12.0
フード1 模型	断面積 A_h' (m ²)	0.0167
	全長 (m)	0.38
	トンネル・フード 断面積比 σ_h'	1.36
フード2 模型	断面積 A_h' (m ²)	0.0295
	全長 (m)	0.38
	トンネル・フード 断面積比 σ_h'	2.40
列車模型	断面積 A_0 (m ²)	0.00212
	全長 (m)	1.0
	先頭部長さ l_n (m)	0.1
	列車・トンネル本坑 断面積比 R	0.172

3.2 実験条件

設置した内壁の条件（内壁長さ l ，出口開口率 σ ）を表2に示す。また，側面開口部は全閉条件と最適開口パターン（予備実験で得られた圧力勾配最大値が最小となる開口パターンで，フードの条件毎に異なるパターンとなる）で実験を行った。列車模型の走行位置はトンネル中心軸上である。

表2 内壁付きフードの内壁条件

フード	内壁長さ l (mm)	図5 h_1 or h_2 (mm)	フード口面積	
			出口開口率 $\sigma = A_e / A_h'$	フード口断面積比 $\sigma\sigma_h' = A_e / A$
フード1 $\sigma_h' = 1.36$	100	32.5	0.90	1.23
	150	上側のみ		
	250	32.5	0.80	1.09
	300			
	350	39.5	0.70	0.96
フード2 $\sigma_h' = 2.40$	250	62.0	0.58	1.40
	350	68.5	0.50	1.21
	380	72.5	0.46	1.10

3.3 測定概要

トンネル内圧縮波はトンネル本坑口から1m点に設置した圧力計（Kulite社製XCS-190-5G）によって測定した。大気密度算出のための気温，大気圧はT&D社製Thermo Recorder TR-73Uにより測定した。

測定データのサンプリング周波数は20kHz，圧力勾配波形（圧力の時間微分波形）は圧力データを中心差分し，3点移動平均を行った（遮断周波数3kHz（実寸換算30Hz）のローパスフィルタに相当）。

3.4 実験結果

実験で得られた圧力データは以下に示す式を用いて無次元化した。

$$p_c = \frac{1-(1-R)^2}{(1-M)\{M+(1-R)^2\}} \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (3)$$

$$t_c = \frac{d}{2U} \quad (4)$$

ここで， p_c ：圧縮波の圧力上昇量理論式⁶⁾， t_c ：フードがないときの圧縮波の波面の特性時間， ρ ：空気密度， U ：列車速度， M ：マッハ数（=列車速度/音速）， R ：列車・トンネル断面積比（列車断面積 A_0 /トンネル断面積 A ）， d ：トンネル直径（鏡像考慮）である。

3.4.1 内壁長さの影響

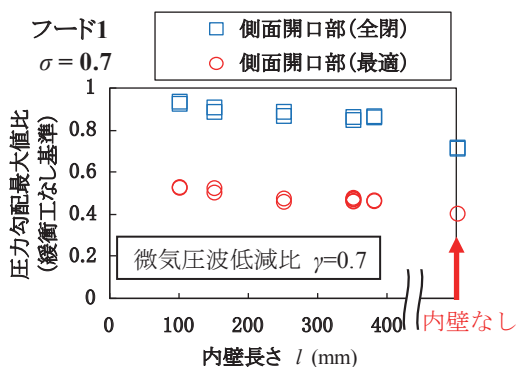
各フードについて，実験で得られた内壁長ささと圧力勾配最大値の関係を図6に示す。図6の縦軸は通常緩衝工なし条件（トンネル本坑に列車が突入した場合）の圧力勾配最大値との比（以下，圧力勾配最大値比）を示す。

図6(a)より，断面積比 σ_h' が既存の通常緩衝工と同程度であるフード1（ $\sigma_h' = 1.36$ ）の圧力勾配最大値は，内壁が長くなるにしたがって小さくなり，内壁長さ $l > 250\text{mm}$ でほぼ一定値（最小値）をとる。一方，図6(b)の断面積比 σ_h' が通常緩衝工より大きいフード2（ $\sigma_h' = 2.4$ ）については，測定データが $l > 250\text{mm}$ しかないが，フード1と同様に圧力勾配最大値はほぼ一定である。

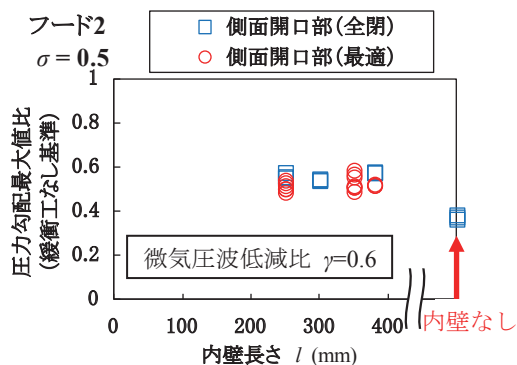
側面開口部を最適開口パターンにすると，フード1では圧力勾配最大値を大幅に低減できるが，フード2では側面開口部全閉条件と同程度であった。なお，図6に示した最適開口パターンはフード口側の開口部から順に，フード1では内壁の有無にかかわらず1111100101，フード2では内壁なしの場合は全閉条件，内壁ありの場合は0001000000であった（1は開状態，0は閉状態を示す）。

3.4.2 出口開口率の影響

実験によって得られた圧力勾配最大値と出口開口率 σ の関係を図7に示す。図7より， σ が大きくなるにしたがって，すなわちフード口断面積 $A_e (= \sigma A_h')$ が大きくなるにしたがって圧力勾配最大値は小さくなっている。特にフード1において，全閉条件で $\sigma = 0.9$ （フード口断面積 $A_e = 1.22A$ ），最適開口条件で $\sigma = 0.8$ （フード口断面積 $A_e = 1.09A$ ）のとき，フード口断面積 A_e が通常緩衝工（ $A_e = 1.36A$ ）より小さいにもかかわらず，通常緩衝工とほぼ同等の圧力勾配最大値が得られている。

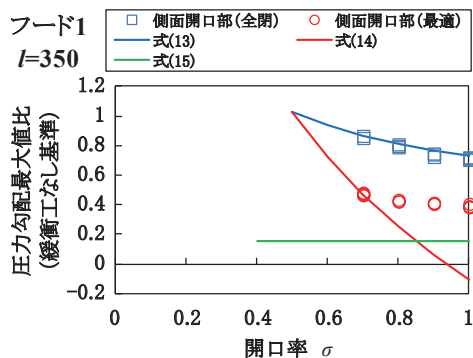


(a) フード1 (断面積：本坑の1.36倍)

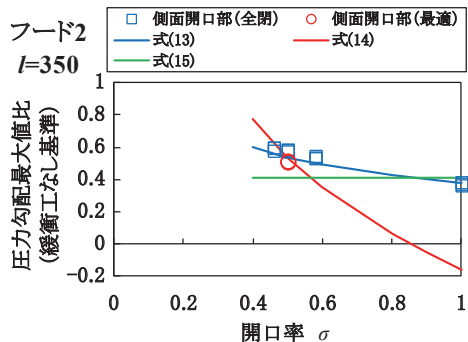


(b) フード2 (断面積：本坑の2.40倍)

図6 内壁長さの圧力勾配最大値への影響



(a) フード1 (断面積：本坑の1.36倍)



(b) フード2 (断面積：本坑の2.40倍)

図7 出口開口率の圧力勾配最大値への影響

4. 考察

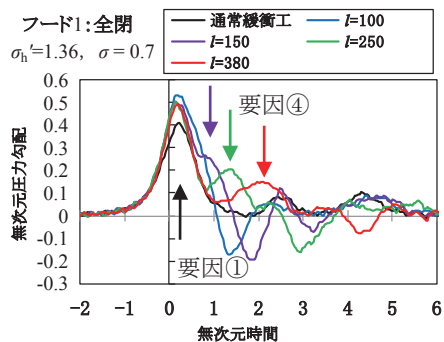
4.1 内壁長さの影響

内壁のない通常緩衝工（ただし、側面開口部全閉条件）の場合、圧力勾配波形のピークは①列車先頭部のフード口突入時の圧縮波、②本坑突入時の圧縮波、③②と同時に発生しフード口方向に伝播した膨張波がフード口で開口端反射した圧縮波、によって発生する。一般に、これらのピークは突入口の断面積（内壁がないのでフード断面積に等しい）が小さい場合は要因①が大きく、フード断面積が大きくなるほど要因①は小さくなり、逆に要因②③が大きくなる傾向にある。

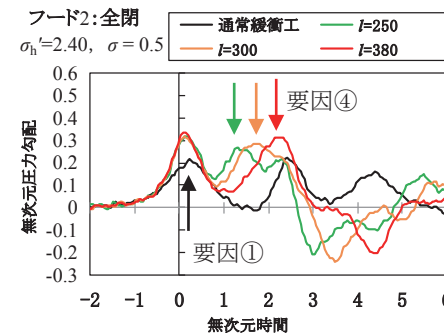
内壁を設けると要因①の他に、要因①による圧縮波が内壁端部（O点）で開口端反射した後にフード口で反射したものと、内壁端部（C点）を透過してフード閉鎖端で反射したものとによってもピークをとる（要因④）。

側面開口部全閉条件における圧力勾配波形実測結果を図8に示す。内壁のない場合、すなわち通常緩衝工の場合（図8の「通常緩衝工」）、フード1、2とも上記の要因①、②、③によるピークが測定されている（無次元時間 $t^*=0.0, 2.5, 4.5$ 付近）。フード1 ($\sigma_h=1.36$) では要因①が最大であるのに対し、フード2 ($\sigma_h=2.4$) では要因①と②がほぼ同じ大きさである。

内壁を設けると、 $t^*=0.0$ の第1ピーク（要因①）のほかに第2ピーク ($t^*=1.0 \sim 2.5$, 要因②+④) が見られ、



(a) フード1 (断面積：本坑の1.36倍)



(b) フード2 (断面積：本坑の2.40倍)

図8 圧力勾配波形（側面開口部：全閉）

その発生時刻は内壁長さが短いほど早くなっている（図8参照）。内壁なしの場合に見られた $t^*=4.5$ 付近の第3ピーク（要因③）は、内壁を設けることで発生する負のピーク（列車先頭部が内壁端O点を通じたときに発生する膨張波）によって打ち消され、明確に観測されない。

図8(a)より、フード1において内壁長さが短い場合に圧力勾配最大値が大きくなる傾向を示した（図6(a)）のは、要因④による第2ピークが第1ピーク（要因①）に重なったためと考えられる。ある程度内壁が長くなると両者は分離するために圧力勾配最大値は第1ピークで決まり、一定値となる（内壁が短い場合のデータがないが、この傾向はフード2（図6(b)）でも同様と考えられる）。

よって、圧力勾配最大値が最小となる一定値領域（本実験では $l>250\text{mm}$ ）になるためには、要因①と④を分離する程度内壁長さが必要で、両者の行路差が内壁長さの2倍であることから、圧縮波の波面幅の1/2倍より長い内壁であれば十分であるといえる。

4.2 出口開口率の影響

通常緩衝工のないトンネル（断面積 A ）に突入した時の圧縮波の大きさ ΔP_{E0} と、断面積 A_h' 、突入口断面積 A_e の内壁付きフード（図2参照）に突入した時の圧縮波の大きさ $\Delta P_{E'}$ はHoweの解析により以下のように示される⁷⁾。

$$\Delta P_{E0} = \frac{\rho U^2}{1-M^2} \frac{A_0}{A} \left(1 + \frac{A_0}{A}\right) \quad (5)$$

$$\Delta P_{E'} = \frac{\rho U^2}{1-M^2} \frac{A_0}{A_e} \left(1 + \frac{A_0}{A}\right) \quad (6)$$

式(5)(6)より、Howeのモデルの適用範囲内である列車・トンネル断面積比が小さい場合には、圧力上昇量は突入口断面積に反比例することがわかる。

発生した圧縮波はJ点とO点の断面積変化点（図2参照）で透過、反射を行う。その透過係数をそれぞれ T_j, T_o 、反射係数を R_j, R_o すると、以下の式で示される⁸⁾。

$$T_j = \frac{2\sigma_h'}{\sigma_h'+1}, \quad R_j = \frac{\sigma_h'-1}{\sigma_h'+1} \quad (7)$$

$$T_o = \sigma, \quad R_o = \sigma - 1 \quad (8)$$

また、速度 U の列車がトンネルまたはフードに突入したときに発生する圧縮波の立ち上がり時間 Δt は、列車先頭部長さを l_n とすると以下の式で示される程度である⁹⁾。

$$\Delta t = \frac{l_c}{U}, l_c \sim \max\left(\frac{d}{2}, l_n\right) \quad (9)$$

今回の実験では $d/2 \approx l_n$ であるので $l_c=d/2$ とすると、トンネルまたは内壁付きフードに突入したときに発生する圧縮波の立ち上がり時間 $\Delta t, \Delta t'$ は、以下のようになる。

$$\Delta t = \frac{\sqrt{A/\pi}}{U}, \quad \Delta t' = \frac{\sqrt{A_e/\pi}}{U} \quad (10)$$

よって要因①の圧力勾配最大値は以下のように示される。

$$\frac{\Delta P_{E0}}{\Delta t} = \frac{\rho U^3}{1-M^2} \frac{A_0}{A} \left(1 + \frac{A_0}{A}\right) \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_j T_o \Delta P_{E'}}{\Delta t'} &= \frac{2\sigma_h'}{\sigma_h'+1} \sigma \frac{\rho U^3}{1-M^2} \frac{A_0}{A_e} \left(1 + \frac{A_0}{A}\right) \frac{1}{\sqrt{A_e}} \\ &= \frac{2}{\sqrt{\sigma\sigma_h'}} \frac{1}{\sigma_h'+1} \frac{\Delta P_{E0}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\therefore \frac{T_j T_o \Delta P_{E'}}{\Delta t'} \bigg/ \frac{\Delta P_{E0}}{\Delta t} = \frac{2}{\sqrt{\sigma\sigma_h'}} \frac{1}{\sigma_h'+1} \quad (13)$$

要因④は式(6)の $\Delta P_{E'}$ がO点またはJ点で反射したものであるが、内壁長さ l がフード長さ l_h とほぼ等しい場合には両反射波はほぼ同時に発生する。この圧縮波の大きさを $\Delta P_{E2'}$ とすると圧力勾配最大値は以下の式で示される。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_{E2'}}{\Delta t'} &= T_j T_o (-R_o - R_j T_o) \frac{\Delta P_{E'}}{\Delta t'} + T_j T_o (T_o + R_j T_o) \frac{\Delta P_{E'}}{\Delta t'} \\ &= \left[2(1-\sigma) + (1-2\sigma) \frac{\sigma_h'-1}{\sigma_h'+1}\right] \frac{T_j T_o \Delta P_{E'}}{\Delta t'} \quad (l \approx l_h) \\ \therefore \frac{\Delta P_{E2'}}{\Delta t'} \bigg/ \frac{\Delta P_{E0}}{\Delta t} &= \left[2(1-\sigma) + (1-2\sigma) \frac{\sigma_h'-1}{\sigma_h'+1}\right] \frac{2}{\sqrt{\sigma\sigma_h'}} \frac{1}{\sigma_h'+1} \end{aligned} \quad (14)$$

また、要因②の圧力勾配最大値は以下の式で示される⁷⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_{JT}}{\Delta t} \bigg/ \frac{\Delta P_{E0}}{\Delta t} &= \frac{1}{\kappa} \frac{\rho_0 U^3}{1-M^2} \frac{A_0}{A} \left(1 + \frac{A_0}{A}\right) \left(\frac{A_h - A}{A_h + A}\right) \frac{1}{\sqrt{A}} \\ &= \frac{\sigma_h'-1}{\sigma_h'+1} \end{aligned} \quad (15)$$

式(13)(14)(15)の計算結果を図7に示す。圧力勾配最大値が第1ピークで生じている全閉条件の実験結果（図8参照）は式(13)の計算結果と良く一致している。

図7より、フード1、フード2とも出口開口率 σ （フード口断面積 A_e ）を大きくすることで、圧力勾配最大値を小さくできることがわかる。しかし、断面積 A_h' が小さいフード1では要因①（式(13)）が他の要因に比べて大きく、第1ピークによって圧力勾配最大値が決定されるのに対し、断面積 A_h' が大きいフード2では要因①と②がほぼ同程度であるため、出口開口率 σ を大きくして第1ピークを下げて、要因②を小さくできないので、全体として圧力勾配最大値を小さくすることは困難である。

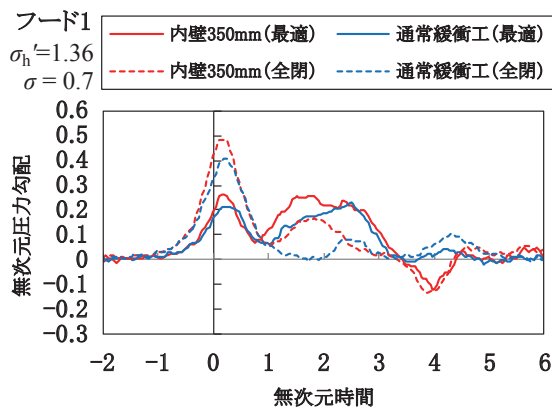
4.3 側面開口部の影響

側面開口部を最適にしたときの圧力勾配波形の代表例として、内壁長さ350mmの場合と内壁なし（通常緩衝工の構成）の場合の結果を図9に示す。なお、フード2の内壁なし（通常緩衝工）の場合、最適開口パターンは全閉条件であった（全閉条件時の圧力勾配波形の各ピークの大きさがほぼ同じであることから推察できる）。

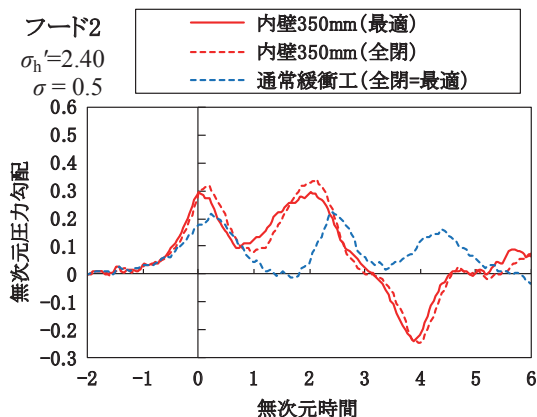
特集：環境工学

要因①による第1ピークはフード口に列車が突入したときに形成されるものであるため、側面開口部によって低減が容易であり²⁾、開口部を最適化することで内壁の有無にかかわらず全閉時の約1/2まで低減している。しかし、フード2においては側面開口部によって第1ピークを低減できたとしても要因②が含まれる第2ピークがほとんど低減できておらず、圧力勾配最大値をこれ以上小さくすることは困難であると考えられる。

内壁付きフードとして微気圧波低減効果を大きくするためには出口開口率 σ をできるだけ小さく構成する必要がある(図3)。しかし、一方で、出口開口率 σ を小さくすると圧力勾配最大値が大きくなってしまう(図7)ため、両者のバランスが重要となる。実験による検証が必要であるが、図7の計算式より、要因①と②をバランスさせるためにフード断面積をフード1とフード2の間、 $\sigma_h=2.00$ 程度にすれば出口開口率を小さくしても圧力勾配最大値をさらに低減できる可能性がある。



(a) フード1 (断面積:本坑の1.36倍)



(b) フード2 (断面積:本坑の2.40倍)

図9 圧力勾配波形の側面開口部の影響

5. まとめ

内壁付きフードに列車が突入する時に発生するトンネル内圧縮波について模型実験により調査した。

- ①圧力勾配最大値は内壁が長くなるにしたがい小さくなり、圧縮波の波面幅の1/2倍程度以上の内壁長さではほぼ一定(最小値)となる。
- ②内壁付きフードの断面積 A_h' が既存の通常緩衝工レベル(本坑の1.4倍程度)の場合、側面開口部を適切に設けることで、出口開口率 σ を0.8程度にすれば、同じ長さの通常緩衝工と同程度の圧力勾配低減効果が得られる(内壁長さ>波面幅の1/2倍)。
- ③出口開口率 σ を小さくするためにフード断面積 A_h' を既存の通常緩衝工より大きく、本坑の2.4倍とした内壁付きフードでは本坑突入時の圧縮波による圧力勾配が大きいため、側面開口部の調整では低減できず、同じ長さの通常緩衝工より圧力勾配低減効果は悪い。

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予稿集，4pH4，1977
- 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) 斉藤実俊，宮地徳蔵，飯田雅宣：フード状構造物による列車退出側坑口でのトンネル微気圧波低減対策，鉄道総研報告，Vol.27，No.1，pp.17-22，2013
- 4) 斉藤実俊，宮地徳蔵，飯田雅宣：内壁付きトンネル出口フードによる放射段階でのトンネル微気圧波低減対策，日本機械学会論文集B編，Vol.79，No.806，2013
- 5) 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
- 6) 原朝茂：高速でトンネルに突入する場合に列車に作用する空気力，日本機械学会論文集，Vol.26，No.171，1967
- 7) M.S.Howe, M.Iida, T.Maeda, Y.Sakuma, "Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood", J.of Sound and Vibration, 297 (2006), pp.267-292.
- 8) J.Lighthill, "Wave in fluid", Cambridge University Press, Cambridge,1978, pp.100-106.
- 9) 飯田雅宣，村田香，福田傑：複数車種の突入を考慮したトンネル入口緩衝工の長さの算出法，鉄道総研報告，Vol.16，No.12，pp.35-40，2002