

# 微気圧波低減に効果的な緩衝工断面積の提案

福田 傑\* 中村 真也\* 斉藤 実俊\*

Effective Specifications for Cross-Sectional Area of Tunnel Hoods for Reducing Micro-pressure Waves

Takashi FUKUDA Shinya NAKAMURA Sanetoshi SAITO

Tunnel hood is one of countermeasures adopted for reducing micro-pressure waves emitted from high-speed railway tunnels. Experimental tests were conducted using axisymmetric models to investigate the effect of the cross-sectional area of the hood. The results show that the effective cross-sectional area of the hood with a uniform cross-section is larger than that of existing hoods installed in Shinkansen tunnels in the high-speed range with faster speed than 260 km/h. Furthermore, tunnel hoods with multistep cross-sections are more effective than those with a uniform cross-section. Adoption of the proposed hood specifications based on these findings enables the required hood length to be shorter than existing hoods.

キーワード：微気圧波，緩衝工，新幹線，速度向上

## 1. はじめに

高速鉄道における沿線環境問題の一つに、トンネル坑口から放射される微気圧波<sup>1) 2)</sup>がある。微気圧波のような鉄道の空気力学的現象は列車速度への依存性が高いため、高速鉄道の建設や速度向上の際にはあらかじめ対策を講じておく必要がある。微気圧波の大きさ（音圧の最大値）は、坑口に到達したトンネル内の圧縮波の波面圧力勾配最大値に比例する。そのため、微気圧波の低減対策の原理は、圧縮波の波面を緩やかにすることであり、地上側の対策として最も多く用いられているものが列車突入側坑口への緩衝工（図1）の設置である。

現在の新幹線における緩衝工の一般的な仕様は、緩衝工と本坑の断面積比 $\sigma_h$ が1.4～1.6かつ緩衝工の長手方向に一定で、側面に開口部を有するというものである（ごく少数であるが、本坑と同一断面の $\sigma_h=1$ のものもある）。材質はコンクリート製もしくは鋼製である。この仕様は40年以上変わっていない。新幹線において、緩衝工の長さは最短で10mであるが、緩衝工は長いほど微気圧波低減効果が大きいので、最高速度が300km/hを超える区間では80m以上のものも存在する。

現在の緩衝工の断面積の仕様は、微気圧波対策の検討の初期に行われた、緩衝工と本坑の断面積比が約1.55のときに最も効果的であるという模型実験の結果<sup>2)</sup>に基づくものである。ただしこの模型実験は、当時の実験装置の性能により列車速度が90km/hと低速であった。また、使用した列車先頭部および緩衝工の長さは実スケールでそれぞれ約2mおよび約11mである。一方、現在の

新幹線では営業用列車の先頭部の長さは最長で15mであり<sup>3)</sup>、今後の速度向上を想定すると、緩衝工の長さについては30m以上のものが一般的になると考えられる。

そこで本研究では、現在の新幹線の仕様および将来の速度向上を想定した条件において、緩衝工/本坑断面積比 $\sigma_h=1$ および1.4で側面に開口部がある緩衝工（以下、従来型緩衝工）の効果を模型実験により調べた。さらにこの従来型緩衝工の仕様にこだわらず効果的な緩衝工の仕様を調べるため、側面開口部がないときに効果的な緩衝工/本坑断面積比 $\sigma_h$ を調べた。



図1 新幹線に設置されている緩衝工

## 2. 模型実験方法

本研究で実施した模型実験の概要を図2、模型実験の実施状況を図3に示す。本実験は、鉄道総研のトンネル空気力学模型実験装置<sup>4) 5)</sup>で実施した。列車、トンネル、緩衝工に円断面の軸対称形状の模型を用い、走行位置は

\* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

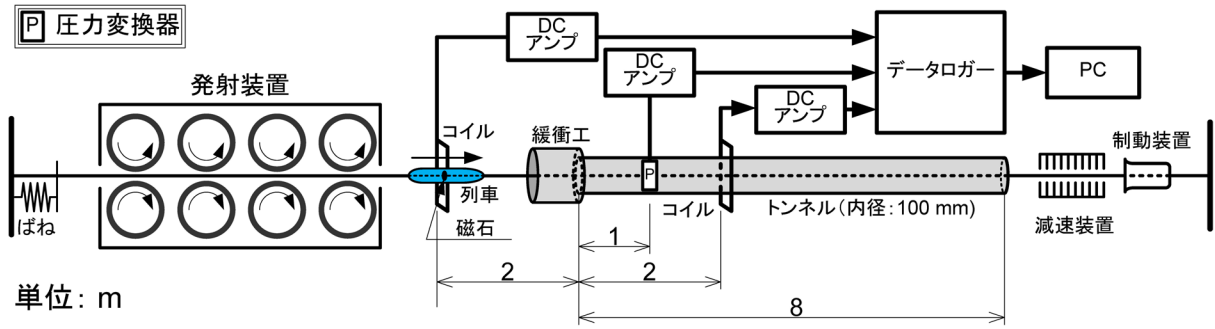


図2 模型実験の概要



図3 模型実験実施状況

表1 列車と緩衝工の模型の概要

列車	先頭部形状	回転楕円体
	先頭部長さ $l$	実スケール 15 m
	ブロッケージ比 $R_T$	0.19
	速度 $U$	360 km/h (一部 260 km/h, 320 km/h)
緩衝工	緩衝工/本坑断面積比	1, 1.4, 2, 2.5, 3
	長さ $L$	実スケール 0 ~ 50 m (10 m 単位で設定)

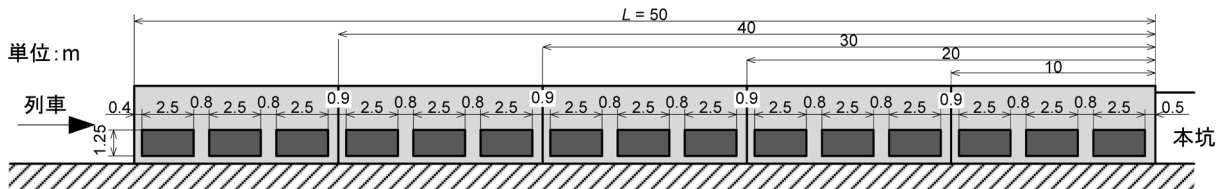


図4 本実験で想定した従来型緩衝工 (実スケール)

列車とトンネルの中心軸を一致させた中心走行とした。地面の効果は鏡像法<sup>6)</sup>により模擬した。トンネルの模型には、内径 100mm の円管を用いた。新幹線の実トンネル (断面積 63.4m<sup>2</sup>) の鏡像を考慮した等価直径とトンネル模型の内径の比より、模型の縮尺は約 1/127 となる。実験に用いた列車と緩衝工の模型の概要を表 1 に示す。列車模型の先頭部形状は回転楕円体、その長さ  $l$  は実スケール換算で 15m とした。先頭部の鋭い端部 (スノープラウ) からの流れのはく離による断面積の見かけの増加<sup>7)</sup>を考慮し、ブロッケージ比 (列車とトンネル本坑の断面積比)  $R_T$  は 0.19 とした。また列車模型の速度  $U$  は、マッハ数を合わせるために実物と同じ値にする必要がある。本実験では今後の新幹線速度向上を想定し、 $U$  を 360km/h に設定した (一部、260km/h および 320km/h にも設定)。ここで、微気圧波の大きさは坑口に達したトンネル内圧縮波の波面圧力勾配最大値  $(\partial p/\partial t)_{\max}$  にほ

ぼ比例するので、緩衝工がないときを 1 とした  $(\partial p/\partial t)_{\max}$  の比  $\alpha$  を用いて緩衝工の効果を評価した。

本実験で想定した従来型緩衝工を図 4 に示す。この緩衝工は、実スケール換算で全長が 10, 20, 30, 40, 50m で、長さ 10m あたり三個の側面開口部 (1.25m × 2.5m) がほぼ等間隔で離散的に設けられている。側面開口部の配置をそれらの開閉で調整すると、それぞれの緩衝工長さについて開閉パターン数は、10m : 2<sup>3</sup> = 8 通り、20m : 2<sup>6</sup> = 64 通り、30m : 2<sup>9</sup> = 512 通り、40m : 2<sup>12</sup> = 4096 通り、50m : 2<sup>15</sup> = 32768 通りとなる。本実験では、長さ 10m の緩衝工については 8 通りの全開閉パターンについて実験を実施したが、それよりも長いものについては、圧縮波の圧力勾配波形の複数のピークが均等化され、圧力勾配最大値ができるだけ小さくなるよう開口部開閉パターンを試行錯誤的に探索した。以下、決定した開口部開閉パターンを“最適パターン”と呼ぶこととする。

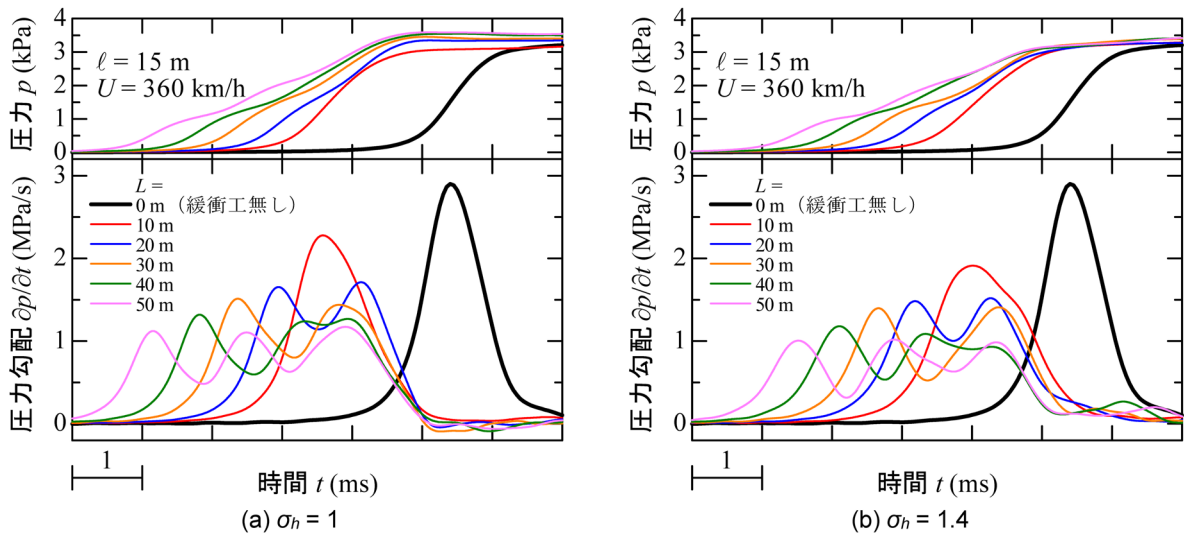


図5 従来型緩衝工設置時の圧縮波の圧力・圧力勾配波形

### 3. 模型実験結果

#### 3.1 従来型緩衝工の効果

緩衝工の離散型側面開口部が最適開閉パターンのときの圧縮波の圧力波形とその時間微分波形(圧力勾配波形)の例を図5に示す。緩衝工が長くなるほど圧縮波の波面が緩やかになり、圧力勾配最大値が小さくなることわかる。さらに、緩衝工の長さ  $L$  が20m 以上の場合には圧力勾配波形には複数のピークができ、それらがほぼ同じ値になっていることがわかる。このことから、さらに圧力勾配最大値を小さくできる開口部開閉パターンが存在する可能性はあるものの、本実験での開口部開閉パターンの探索の結果は概ね妥当なものであると考えられる。

圧縮波の波面圧力勾配最大値の比  $\alpha$  と緩衝工の長さ  $L$  の関係を図6に示す。図6中の曲線は、 $\alpha$  と  $L$  の関係を緩衝工の長さの検討<sup>8)</sup> に用いられている式(1)<sup>9)</sup> で最小二乗近似した結果である(ここでは緩衝工長  $L$  が0m および列車先頭部15m より十分に長い  $L = 30m$  以上の値を用いて計算した)。

$$\alpha = \frac{D}{D+L} \quad (1)$$

ここで、 $D$  は列車先頭部形状や緩衝工の仕様から決まる特性長さである。図6より、緩衝工が長いほど圧力勾配最大値が小さくなり、緩衝工の長さに応じた効果が得られていることがわかる。また、 $\sigma_h = 1.4$  の緩衝工は  $\sigma_h = 1$  の緩衝工よりも効果が大きいことから緩衝工の効果は長さだけでなく断面積にも依存することがわかる。次節で緩衝工の断面積の効果についてさらに検討した結果について述べる。

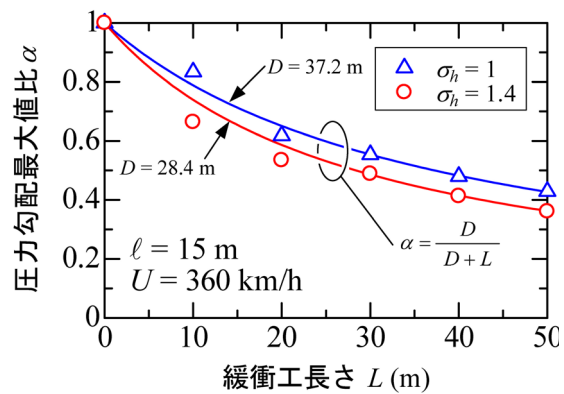


図6 従来型緩衝工の効果

#### 3.2 緩衝工の断面積の効果

緩衝工の効果はその長さ、断面積、側面開口部に依存するが、側面開口部が存在しない条件下において断面積の効果を調べた。ここで速度  $U$  は260km/h, 320km/h, 360km/h の三段階に設定した。緩衝工の長さ(実スケール換算)  $L$  についてはまず30m および50m に設定した。そして、 $U = 360km/h$ ,  $L = 50m$  で最も効果の大きい断面積について、 $L = 10, 20, 40m$  のときについても調べた。緩衝工断面積を変えたときの圧縮波の圧力波形と圧力勾配波形の例を図7に示す。圧力勾配波形に三つの明確なピークがあることがわかる。この三つのピークはそれぞれ、列車先頭部の緩衝工口(E点)突入による圧縮波(図8(a), 以下、第1波)、列車先頭部の本坑(緩衝工と本坑の接続部J点)通過によるトンネル本坑内圧縮波と第1波がJ点で反射しさらにE点で反射した膨張波の二つの圧力波の重ね合わせ(図8(b), 以下、第2波)、列車先頭部のJ点通過による緩衝工内膨張波がE点で反射した圧縮波(図8(c), 以下、第3波)によるもの

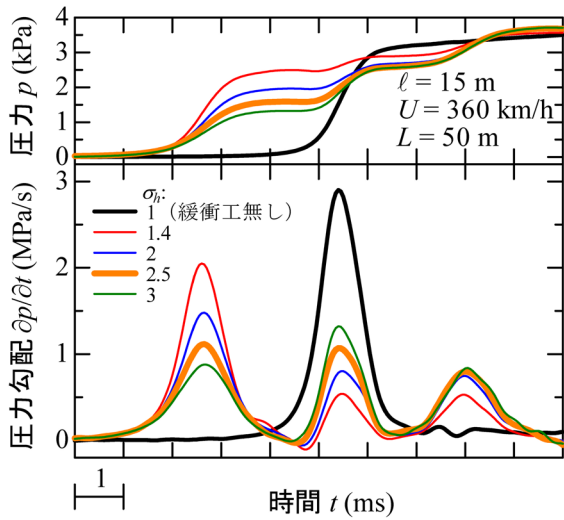


図7 緩衝工断面積を変えたときの圧縮波の圧力・圧力勾配波形

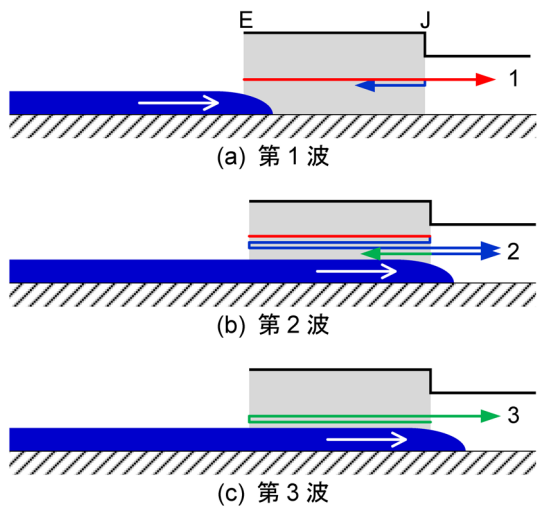
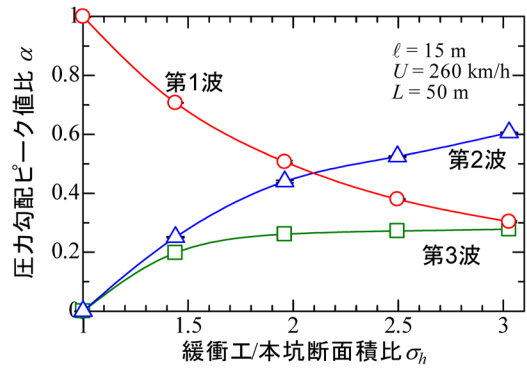


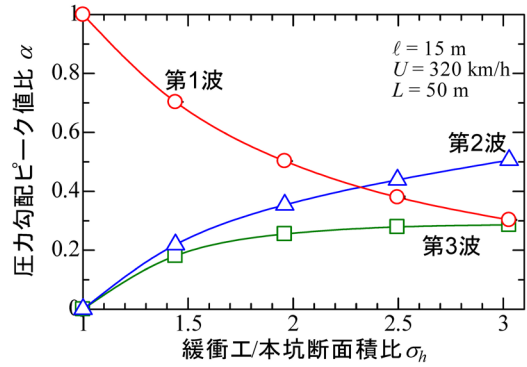
図8 緩衝工のあるトンネルに列車が突入するときの圧力波の形成

である<sup>10)</sup>。この三つの圧力勾配のピーク値比 $\alpha$ と緩衝工/本坑断面積比 $\sigma_h$ の関係を図9に示す。 $\alpha$ は $\sigma_h$ が大きくなるにしたがって第1波が小さくなり、第2波が大きくなる。この第1波と第2波のピーク値が交差するところが、圧縮波の波面圧力勾配最大値が最も小さくなる最適な $\sigma_h$ となる。図9より、最適な $\sigma_h$ は $U=260\text{km/h}$ で約2.1、 $320\text{km/h}$ で約2.3、 $360\text{km/h}$ で約2.5となり、列車が速くなるに従い大きくなる傾向がある。

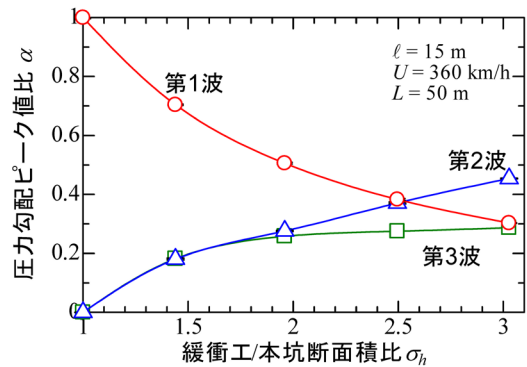
側面に開口部がない緩衝工を設置したときの圧縮波の波面圧力勾配最大値比 $\alpha$ と緩衝工の長さ $L$ の関係を図10に示す。図10には、前節で述べた開口部のある $\sigma_h=1.4$ の従来型緩衝工の効果も比較のため載せている。ここで $\sigma_h=2.5$ に関する曲線は式(1)によるものではなく、全プロットを滑らかに結んだものである。図10より、 $\sigma_h=2.5$



(a)  $U=260\text{ km/h}$



(b)  $U=320\text{ km/h}$



(c)  $U=360\text{ km/h}$

図9 圧力勾配のピーク値比 $\alpha$ と緩衝工/本坑断面積比 $\sigma_h$ の関係

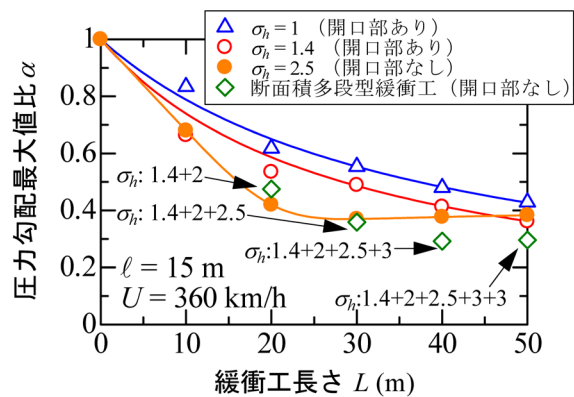
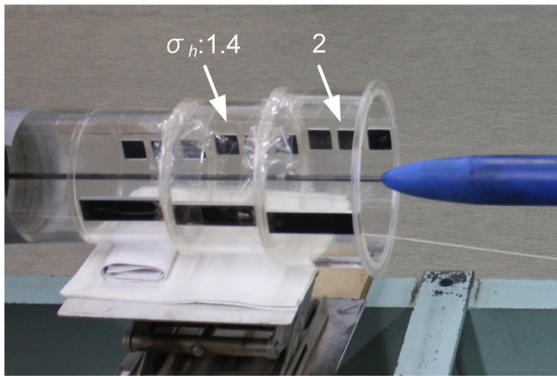
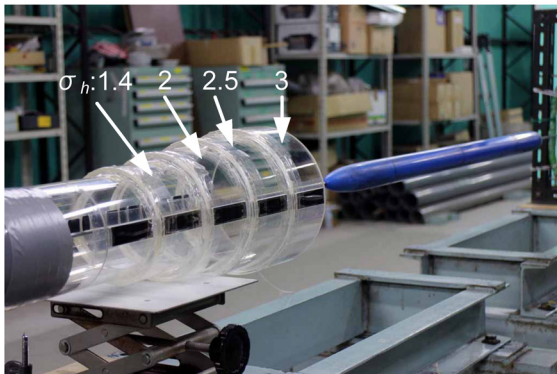


図10 側面開口部のない緩衝工の効果



(a)  $L = 20 \text{ m}$ ,  $\sigma_h: 1.4 + 2$



(b)  $L = 40 \text{ m}$ ,  $\sigma_h: 1.4 + 2 + 2.5 + 3$

図 11 断面積多段型緩衝工の模型

の緩衝工（開口部なし）は、 $L$  が 30m までは長くなるほど圧縮波の波面圧力勾配最大値を小さくできるが、それより長くするとわずかに大きくなるのがわかる。また、約 45m までは、 $\sigma_h = 2.5$  の緩衝工（開口部なし）の方が同じ長さの  $\sigma_h = 1.4$  の従来型緩衝工よりも圧縮波の波面圧力勾配最大値が小さく、 $L = 30\text{m}$  の  $\sigma_h = 2.5$  の緩衝工（開口部なし）の緩衝工と、 $L = 50\text{m}$  の  $\sigma_h = 1.4$  の従来型緩衝工（開口部あり）の効果はほぼ同等になることがわかる。

ここまでは、緩衝工の断面積が線路方向に一定の場合について検討してきた。しかしながら  $\sigma_h = 2.5$  の緩衝工（開口部なし）はある長さ（図 10 では 30m）までは長さに応じた効果が得られるものの、それ以上長くしても圧縮波の波面圧力勾配最大値は小さくならない。また、 $\sigma_h = 2.5$  の緩衝工を既設緩衝工の延伸に適用しようとする、既設部の断面積も変更する必要がある大がかりな工事を伴うことになる。さらに、緩衝工延伸において既設部の断面積と延伸部の断面積を変えることにより、緩衝工の効果を大きくできる可能性がある。

そこで本研究では、長手方向で段階的に断面積が異なる緩衝工（以下、断面積多段型緩衝工）の効果を調べた。断面積多段型緩衝工の模型を図 11 に示す。ここでも側面開口部はないものとした。本模型は表 1 に示したよう

表 2 断面積多段型緩衝工の検討ケース

No.	$\sigma_h$	$L$ (m)
1	1.4 + 2	20
2	1.4 + 2 + 2	30
3	1.4 + 2 + 2.5	30
4	1.4 + 2 + 2.5 + 2.5	40
5	1.4 + 2 + 2.5 + 3	40
6	1.4 + 2 + 2 + 2	40
7	1.4 + 2 + 2.5 + 2.5 + 2.5	50
8	1.4 + 2 + 2.5 + 3 + 3	50
9	1.4 + 2 + 2 + 2 + 2	50

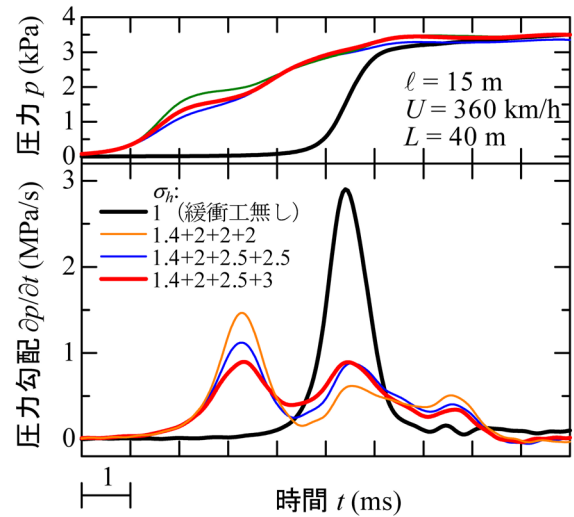


図 12 断面積多段型緩衝工を設置したときの圧縮波の圧力・圧力勾配波形 ( $L = 40 \text{ m}$ )

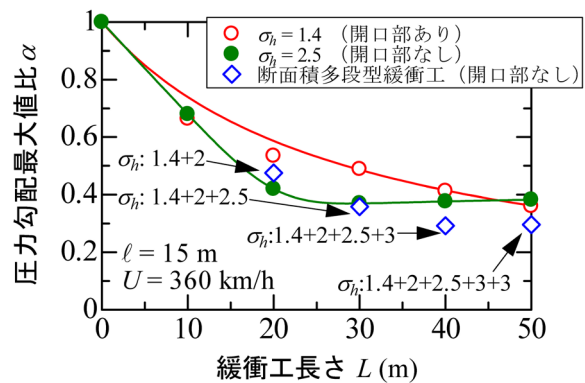


図 13 緩衝工の効果の比較

に、実スケール長さ 10m 単位で緩衝工 / 本坑断面積比  $\sigma_h$  を設定可能であり、例えば図 11(b) のように、本坑から突入する列車を見た方向に  $\sigma_h$  を 1.4, 2, 2.5, 3 と設定する場合、“ $\sigma_h: 1.4 + 2 + 2.5 + 3$ ” と表記することとす

る。断面積多段型緩衝工の検討ケースを表2に示す。

断面積多段型緩衝工を設置したときの圧縮波の圧力波形と圧力勾配波形の例を図12に示す。図7に示した断面積が長手方向に一定の緩衝工の場合と同様に、圧縮波の波面圧力勾配波形に三つのピークが存在することがわかる。この三つのピークは、図8に示した列車先頭部の緩衝工口突入および列車先頭部の緩衝工と本坑の接続部通過による圧縮波の形成、および圧力波の緩衝工内反射により生じた圧力波によるものに相当し、列車先頭部の緩衝工内断面積変化部通過や緩衝工内の断面積変化部における圧力波の反射によるものは、明確なピークとして表れていない。図12のケースにおいて第1波と第2波による圧力勾配のピークが同程度となり、圧力勾配最大値が最も小さくなるのは、“ $\sigma_h: 1.4 + 2 + 2.5 + 3$ ”とした場合である。

模型実験で得られた断面積多段型緩衝工の効果を、 $\sigma_h = 1.4$ で側面開口部のある従来型緩衝工、 $\sigma_h = 2.5$ で側面開口部のない緩衝工と比較したものを図13に示す。この結果より、緩衝工断面積を段階的に拡大する断面積多段型緩衝工により緩衝工の性能向上を図ることが可能であること、言い換えれば必要な緩衝工を短くすることが可能であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、微気圧波低減に有効な緩衝工の断面の仕様を模型実験で検討した。ここで列車先頭部の長さは15mとした。その結果を以下にまとめる。

- (1) 側面開口部の有無によらず、緩衝工の効果は緩衝工/本坑断面積比に依存する。
- (2) 緩衝工の側面に開口部がなく断面が長手方向に一樣であるとき、最も効果的な緩衝工/本坑断面積比は列車速度に依存し、その値は速度260km/hで約2.1、320km/hで約2.3、360km/hで約2.5である。
- (3) 緩衝工の側面に開口部がなく断面が長手方向に一樣である緩衝工は、緩衝工の長さがある値を超えると、それ以上延長しても効果は大きくならない。
- (4) 側面開口部がない緩衝工について、緩衝工断面積を段階的に拡大する断面積多段型緩衝工

は、緩衝工/本坑断面積比2.5の緩衝工よりもさらに大きい効果が得られる。

- (5) 緩衝工の断面積を従来型よりも大きくすることで、必要な緩衝工の長さを短くすることが可能であると考えられる。

ただし、実際のトンネルにおいて、断面積多段型緩衝工を適用するときの仕様の決定においては、列車の形式や速度、トンネルの長さや坑口周辺の状況、既設の緩衝工の仕様などをもとに、個別に詳細な検討が必要である。

#### 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，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) 田島信一郎：JR東日本E5系新幹線電車量産先行車の概要(I)，鉄道車両と技術，No. 155，pp. 2-7, 2009
- 4) 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
- 5) 中村真也：トンネル空気力学模型実験装置，RRR，Vol. 72，No. 8，p. 39, 2015
- 6) 田中靖幸，飯田雅宣，菊地勝浩：単純な形状の模型を用いてトンネル突入時の圧縮波形成を模擬する方法（列車中心軸の偏心と地面の影響），日本機械学会論文集B編，Vol. 69，No. 683，pp. 1607-1614, 2003
- 7) 福田傑，宮地徳蔵，齊藤実俊，飯田雅宣，栗田健，菊地善基：列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の三次元・軸対称模型を用いた実験，日本機械学会論文集B編，Vol. 78，No. 793，pp. 1521-1533, 2012
- 8) 中村真也，福田傑，宮地徳蔵，齊藤実俊：トンネル緩衝工長さの検討方法，鉄道総研報告，Vol. 32，No. 11，pp. 47-52, 2018
- 9) Ozawa, S., Uchida, T. and Maeda, T., “Reduction of micro-pressure wave radiated from tunnel exit by hood at tunnel entrance,” QR of RTRI, Vol. 19, No. 2, pp. 77-83, 1978.
- 10) Saito, S., “Optimizing cross-sectional area of tunnel entrance hood for high speed rail,” Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol. 184, pp. 296-304, 2019.