

新しいトンネル緩衝工 (ダクト付・軽量パネル型) の開発



石川 聡*



中出 千博*



柳沼 謙一*



渡邊 康夫*



増田 達*

トンネル緩衝工は、高速列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の圧力勾配を低減することでトンネル微気圧波低減効果を発揮する構造物である。トンネル緩衝工の効果は長さにより決まるので、列車高速化に伴い延伸が必要となる。本報告では、トンネル緩衝工の延伸に伴う工事費を低減するため、必要となる延伸長を短縮する技術と、設置コストを低減する技術の開発について述べる。

前者の技術は、管状構造（ダクト）を取付けたダクト付トンネル緩衝工で、圧縮波圧力勾配を低減する効果、圧力勾配を制御する仕組みなどを模型実験および、現地試験により確認した。

後者の技術は、大型・軽量で耐久性の高いパネルを用いた、軽量パネル型トンネル緩衝工であり、トンネル緩衝工の構築費、コスト構成比率の高い主構造部材の構築費軽減を目的として開発した。

●キーワード：トンネル緩衝工、トンネル微気圧波、圧力勾配、ダクト、軽量パネル、膜材料

1. はじめに

列車が高速でトンネルに突入すると、出口側で発破音が鳴ったり、付近の家屋の窓や戸が揺れたりすることがある。この現象はトンネル微気圧波（以下、微気圧波）によるもので、図1に示すようなメカニズムで発生する。まず、トンネルに列車が高速で突入することにより、トンネル入口で圧縮波が形成される。この圧縮波は、変形しながらトンネル内を伝播する。

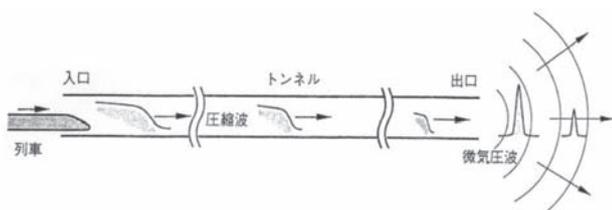


図1 トンネル微気圧波の現象

圧縮波が出口に達した時、その一部が外部にパルス状の圧力波として放射される。このパルス状の圧力波が微気圧波である。

高速列車のさらなる速度向上の実現に際して、微気圧波対策が最も重大な課題の一つとなる。微気圧波対策は、車両先頭部形状を最適化することによっても一定の効果を得られるが、列車としての機能を構成するため、形状の最適化には限界がある。したがって、車両先頭部形状の最適化だけでは対策が不十分な微気圧波に対しては、地上施設での対策を講じる必要が生じる。

トンネル緩衝工は、微気圧波の地上施設での代表的な対策であり、図2のようなトンネル入口に設置されるフード形状の構造物である。トンネル緩衝工の線路直角方向の大きさ

（断面積）は、トンネル本坑の1.4～1.5倍程度となっている。従来からのトンネル緩衝工（以下、「従来型緩衝工」という）は、線路方向の長さによって微気圧波低減に一定の効果を発揮している。しかし、列車速度を向上させる場合には新設や延伸が必要であり、線路に近接した作業が多いことや電柱などの支障物の移転を伴うことが多いことなどから、費用のかさむことが難点となっている。

そのため、高速列車のさらなる速度向上をめざす中で、従来型緩衝工よりも安価に設置できる新たな形態のトンネル緩衝工の開発が求められてきた。ここでは、これまでに取り組んできた新しいトンネル緩衝工（ダクト付・軽量パネル型）の概要を報告する。



コンクリート構造形式 (PC)



鋼構造形式

図2 トンネル緩衝工の構造

2. ダクト付トンネル緩衝工の開発

2.1 ダクト付トンネル緩衝工の開発概要

ダクト付トンネル緩衝工とは、高速列車のトンネル突入時に発生する圧縮波の圧力勾配を低減させることにより、トンネル緩衝工の延伸長を短縮することを目的として、トンネル緩衝工の内部と連通する管状構造（ダクト）を外方に取付けたトンネル緩衝工である。ダクト付トンネル緩衝工の開発にあたっては、模型実験を実施するとともに、新幹線高速走行試験に

合わせて、現地の既設トンネル緩衝工にダクトを試験設置して、圧縮波の圧力勾配の低減効果を検証した。

なお、模型実験は、財団法人鉄道総合技術研究所の微気圧波模型実験装置を用いた。

2.2 ダクト付トンネル緩衝工の模型実験

模型実験では、種々のダクト形態における圧縮波の圧力勾配低減効果を確認した。図3は、ダクト付トンネル緩衝工の模型実験の写真である。まず、簡略化模型で、ダクト付トンネル緩衝工の基礎的現象を把握し、その効果を確認した。その後、現地に仮設したダクト付トンネル緩衝工（詳細は後述）の現地再現模型での検証を実施した。

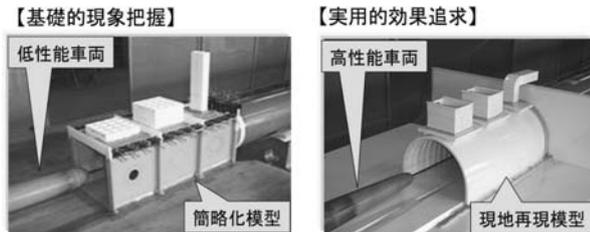


図3 ダクト付トンネル緩衝工模型実験

図4は、現地再現模型での模型実験の結果の一例であり、トンネル緩衝工長さ25m相当で、列車速度360km/hのものである。なお、車両模型は、新幹線の高速試験車をモデル化したものを使用している。ダクト付トンネル緩衝工の方が、従来型緩衝工より圧力勾配の大きい時間が長く、結果として圧力勾配最大値は従来型緩衝工より小さい。このように、トンネル緩衝工にダクトを取付けることにより、圧力勾配最大値の低減効果を確認できた。つまり、ダクトを取付けることにより、短い延長で従来型緩衝工と同等の効果を得ることができる。

種々の模型実験の結果、次の知見が得られた。

- (1) 入口方ダクト、中間ダクト、本坑方ダクト（図5に位置関係を示す）の各々の効果は、本坑方ダクトの効果が大きい。入口方ダクトの効果は非常に小さく、中間ダクトの効果はダクトの規模（取付け費用）に見合わない。
- (2) ダクトを本坑寄りに長さや太さを調節して取付けると、圧力勾配最大値を効果的に小さくできる。
- (3) ダクト付トンネル緩衝工の長さが40mを越えると、圧力勾配の低減効果が発揮されにくくなる。

なお、ダクト付トンネル緩衝工の長さが20m未満に対しては、圧力勾配の低減効果を検証していない。これは、長さが短いため、ダクトを取付けることによるトンネル緩衝工の短縮量も少なくなり、ダクト取付け費用に対して短縮量が見合わなくなると想定されたためである。

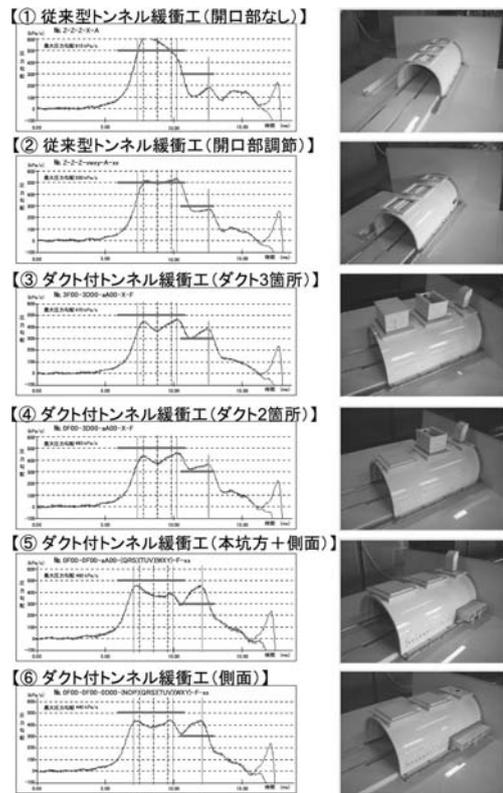


図4 ダクト付トンネル緩衝工の模型実験の結果



図5 検討したダクト取付け位置

2.3 ダクト付トンネル緩衝工の現地試験

東北新幹線の既設トンネル緩衝工にダクトを3ヶ所試験設置した。このダクトは、開口部の開閉により、長さや太さを調節できる。図6に既設トンネル緩衝工へのダクト取付け状態を示す。

現地試験では、新幹線高速走行試験に合わせて、ダクトの長さや太さを調節しながら、列車突入時のトンネル本坑入口からトンネル内へ約80mの地点における圧力の時刻歴を列車速度と共に測定した。



図6 現地試験（ダクト取付け状態）

圧力の時刻歴から圧縮波の圧力勾配を求め、従来型緩衝工より圧力勾配を低減できることを確認した。また、本坑方ダクトのみでも、圧力勾配を低減できることを確認した。

2.4 ダクト付トンネル緩衝工の導入範囲

模型実験および、現地試験での種々の取付け位置や大きさに対する検証をもとに、ダクト付トンネル緩衝工の導入に向けて、以下のように規定化した。

- (1) ダクトは本坑寄りに取付ける。
- (2) ダクト付トンネル緩衝工は、ダクト付トンネル緩衝工の長さが20～40mとなる場合に適用する。
- (3) ダクト付トンネル緩衝工は、従来型緩衝工よりトンネル入口における圧力勾配最大値を10%程度低減できると見込む。

27～49mの長さが必要なトンネル緩衝工にダクトを取付けることにより、20～40mに短縮できる(7～9m短縮できる)。この結果、延伸長を抑えられるので、ダクト取付け工事費を含めても、総工事費の削減が図られる。

3. 軽量パネル型トンネル緩衝工の開発

3.1 軽量パネル型トンネル緩衝工の開発概要

軽量パネル型トンネル緩衝工とは、大型・軽量で耐久性の高いパネルを用いることで、コスト構成比の高い主構造部材の構築費を抑えることを目的とするトンネル緩衝工である。

3.2 膜材料と構造概要

3.2.1 膜材料の特徴

膜材料は、近年、駅舎や大規模建築構造物などに適用されている(図7)。また、膜材料の構成を図8に示す。ガラス繊維を平織りした材料に、フッ素樹脂によってコーティングしたもので、耐久性にたいへん優れた材料である。重量は1.3kg/m²であり、従前から用いられているデッキプレート20kg/m²と比較してたいへん軽量である。



図7 膜構造を用いた構造物の例

3.2.2 構造概要

主構のピッチを従来型緩衝工の2.5mから3.8mに広げ、設置費用のコストダウンが可能となっている。また、屋根材料の構造は、万が一膜材料が破損した場合に備え、

交換が容易となるように「パネル構造」の形式(以下「軽量パネル」)とした。

開発では屋根材料を大型化するため、膜を用いた軽量パネルについて各種の耐力試験を実施した。

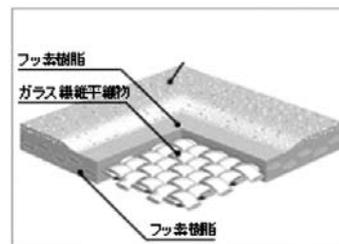


図8 膜材料拡大図

3.3 軽量パネルに関する耐力および、性能の確認

軽量パネルの耐力を確認するため、以下の項目について検討した。

- ①作用荷重
- ②静的引張強度
- ③静的引張強度(経年変化)
- ④疲労強度
- ⑤疲労強度(経年変化)
- ⑥性能確認

このうち、①③⑥はフィールド試験、②④⑤については室内試験を実施して検討した。ここでは①⑤⑥について述べる。

3.3.1 作用荷重

軽量パネルの耐力検討を行うにあたり、トンネル緩衝工の作用荷重を特定した。作用荷重は特に列車突入時の圧力変動による荷重(以下「車両内圧荷重」)を明らかにする必要があった。

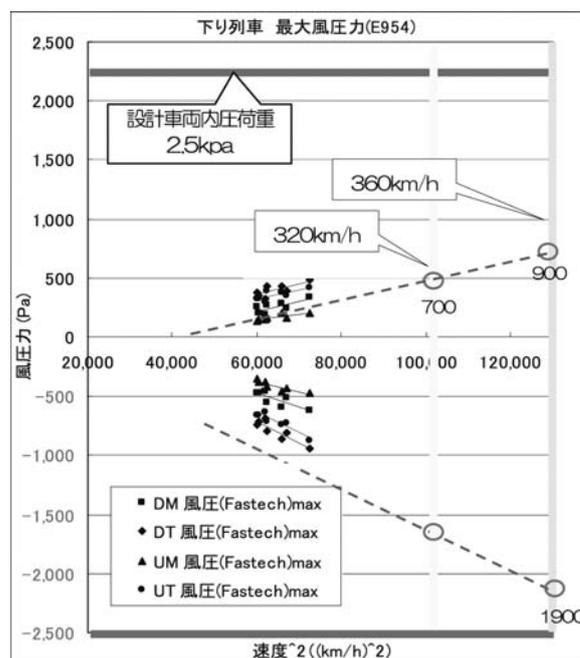


図9 車両内圧荷重測定結果の一例

作用荷重は、フィールド試験においてトンネル緩衝工内に圧力計を設置して計測した実測値と既往の理論式から、これらを十分満たす設計荷重とした。

図9に車両内圧荷重の測定結果を示す。

3.3.2 疲労耐力の検討

トンネル緩衝工に用いられる膜材料は、列車通過時の車両内圧荷重による繰返し荷重を受けるため、疲労耐力の検討を行った。検討には図10に示す繰返し載荷試験で疲労限界を特定した。ここで疲労限界は、200万回繰返し試験の95%非破壊確率としている。疲労耐力の確認は未使用の材料のほか、促進暴露を行った材料によっても行った。

本試験により疲労限界を特定し、設計引張力と比較すると疲労限界の方が大きいことを確認した。また、促進暴露した材料においても、70年分の劣化を考慮した疲労限界の方が、設計引張力よりも大きいことを確認している。

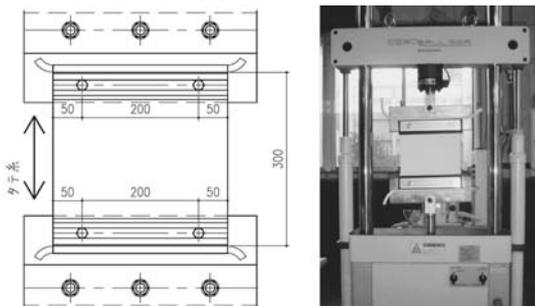


図10 繰返し載荷試験の状況 (左：サンプル、右：試験装置)

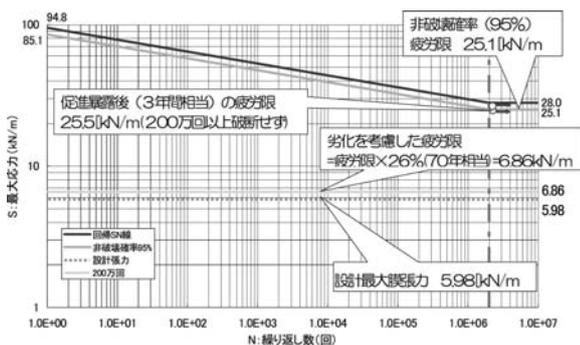


図11 繰返し載荷試験結果

3.3.3 性能確認 (実物大トンネル緩衝工の試験施工)

営業線において長さ15mの実物大トンネル緩衝工の試験施工を行い、トンネル緩衝工としての性能を確認した。これにより従来型緩衝工と同等の性能を確保できることを確認した。図12に試験施工(設置完了)時の写真を示す。



図12 試験施工(設置完了)

4. おわりに

ダクト付トンネル緩衝工は、模型実験および、現地試験により性能を確認し、開発を行ってきた。これまでの成果をふまえて、「ダクト付トンネル緩衝工設計マニュアル」を制定し、東北新幹線高速化に伴うトンネル微気圧波対策として導入している。

また、軽量パネル型トンネル緩衝工については、基礎実験ならびに試験施工により、所定の耐力・性能を確認した。軽量パネル型トンネル緩衝工についても、これまでの成果をふまえて、「軽量パネル型トンネル緩衝工設計施工マニュアル」を制定し、東北新幹線高速化に伴うトンネル微気圧波対策として導入している。

参考文献

- 1) 櫻井、佐伯、高桑、渡邊：新しいトンネル緩衝工(ダクト付・軽量パネル型)の開発、JR EAST Technical Review、No.22、2008.3
- 2) 高桑、野澤、飯田、福田：排気筒付きトンネル緩衝工の現地試験、平成18年度土木学会全国大会第61回年次学術講演会、7-198、pp.395-396、2006.9
- 3) 高桑、野澤、飯田、福田：トンネル微気圧波低減効果を向上するパイプ付き緩衝工の模型実験、平成17年度土木学会全国大会第60回年次学術講演会、7-184、pp.367-368、2005.9
- 4) 高桑、野澤、飯田、福田：トンネル微気圧波を低減するパイプ付き緩衝工の模型実験、平成16年度土木学会全国大会第59回年次学術講演会、7-170、pp.339-340、2004.9
- 5) 高桑、野澤：改良型トンネル緩衝工の模型実験、JR EAST Technical Review、No.14、2006.2
- 6) 小沢、内田、前田：入口緩衝工によるトンネル出口微気圧波の低減、鉄道技術研究資料、1978.2
- 7) 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、1979.7
- 8) 飯田：入口緩衝工と先頭部形状によるトンネル微気圧波対策、RRR、62巻、5号、pp.8-11、2005.5