

改良型トンネル緩衝工の 模型実験



高桑 靖匡* 野澤 伸一郎*

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が、列車速度の向上に伴って延伸が必要になることが難点である。

そこで、従来のトンネル緩衝工より線路方向に短い長さでトンネル微気圧波低減効果の発揮が期待できるパイプ付き緩衝工を考案し、模型実験により、パイプ付き緩衝工の圧縮波圧力勾配低減効果、圧力勾配を制御する仕組みなどを把握して、実地試験につながる知見を得た。

実寸法が約27mのトンネル緩衝工をパイプ付き緩衝工に改良すると、約7m延伸した場合と同等の圧縮波圧力勾配低減効果が得られ、パイプ取り付けは延伸よりも少ない費用で実施できる見込みである。

●キーワード：トンネル緩衝工、トンネル微気圧波、圧縮波、圧力勾配、パイプ

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、環境問題になる場合がある。

微気圧波は列車がトンネル入口に突入する時に形成される圧縮波に起因し、圧縮波の波面の勾配（圧力の時間変化率；以下、圧力勾配）を小さくすることが微気圧波の低減につながる。そこで、トンネル入口において圧縮波の圧力勾配を小さくするために、地上設備に係る対策として、図1に示すようなトンネル



図1 トンネル緩衝工

緩衝工（以下、緩衝工）が設けられる。従来からの緩衝工（以下、従来型緩衝工）は、線路方向の長さによって圧縮波圧力勾配の低減すなわち微気圧波低減に一定の効果を発揮しているが、列車速度を向上させる場合には延伸が必要で、用地取得や線路に近接した作業が多いことから費用の高むことが難点となっている。

以上のような背景から筆者らは現在、従来型緩衝工よりも線路方向に短い長さで圧縮波圧力勾配を低減させる改良型緩衝工の開発に取り組んでいる。開発中の改良型緩衝工は、図2に示すように従来型緩衝工にパイプを取り付けたもので、今回、模型実験を行ってトンネル入口における圧縮波圧力勾配

に及ぼす影響を調べた。

本稿では、パイプ付きの改良型緩衝工に関して、パイプの太さや長さなどの組み合



図2 パイプ付き緩衝工構想図

わせを様々に変化させた場合の模型実験により、圧縮波圧力勾配の制御の性状・仕組み・効果などを追究して得られた、微気圧波低減効果の発揮につながる知見について述べる。

2 トンネル緩衝工によるトンネル微気圧波対策

2.1 トンネル微気圧波

トンネル微気圧波は図3に示すようなメカニズムで発生する。列車が高速でトンネルに突入すると、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し、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。このような圧力波がトンネル微気圧波である。

トンネル入口での圧縮波圧力勾配は、列車速度の3乗に比例する。スラブ軌道のトンネル内を伝播する圧縮波は、その過程で圧力勾配が大きくなっていく。そして微気圧波の大きさは、

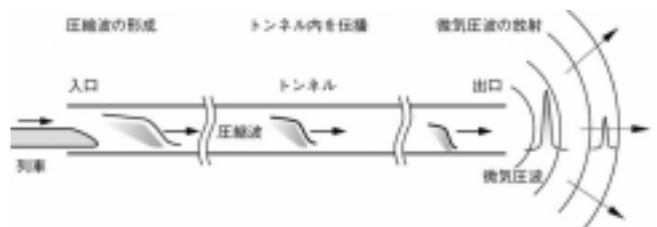


図3 トンネル微気圧波の発生メカニズム

出口に達した圧縮波の圧力勾配に比例する。

以上のような微気圧波の性状からこれを低減するためには、①トンネル入口で圧縮波が形成される段階、②トンネル内を圧縮波が伝播する段階、③トンネル出口で微気圧波として放射される段階、での対策が考えられる。

2.2 トンネル緩衝工

トンネル緩衝工は、図1に示す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。線路直角方向の大きさ(断面積)がトンネル本坑の1.4~1.5倍程度で、圧縮された空気を抜く開口部が側面に設けられており、トンネル入口で圧縮波が形成される段階で、圧力勾配を小さくする機能を持つ。

図4に、緩衝工によるトンネル入口付近の圧縮波圧力勾配の低減効果を示す。トンネル入口付近の圧力は、高速列車のトンネル(緩衝工)突入開始と同時に上昇し始め、トンネル突入完了により最大値に達するが、緩衝工は列車のトンネルへの突入を段階的に行わせることで圧縮波の急激な形成を抑えて圧力上昇を緩やかにし、圧力勾配を小さくする。

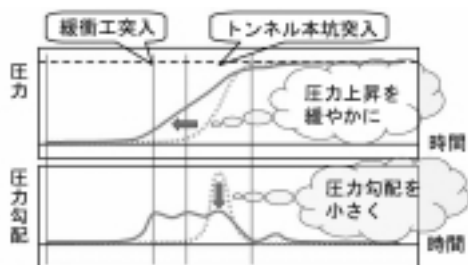


図4 緩衝工による圧縮波圧力勾配低減効果
(トンネル入口付近の圧力時刻歴の概略図)

このような従来型緩衝工に関しては、1975年頃から国鉄の鉄道技術研究所を中心に研究開発が始まり、現在では線路方向に必要な長さの算出方法や側面への開口部の設け方など、対象とする列車や速度に応じて緩衝工が具備すべき基本的な形状寸法を設定するための技術は、ほぼ確立されている。

3 パイプ付き緩衝工に期待する効果

パイプ付きの改良型緩衝工(以下、パイプ付き緩衝工)は、従来型緩衝工よりも少ない設置費用で微気圧波低減効果を発揮させることを目標にして開発を進めている。この目標に向けて、パイプを取り付けることにより期待する圧縮波圧力勾配低減効果発揮の仕組みを、図5に大まかな過程を示しながら説明

する。

高速列車の緩衝工への突入により形成された圧縮波は、緩衝工内をトンネル本坑に向かって伝

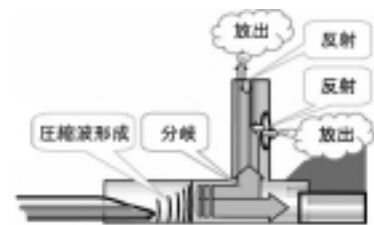


図5 パイプ付き緩衝工の圧縮波圧力勾配低減の仕組み

播するが、まず、パイプ接続部で圧縮波の一部がパイプ側に分岐して、トンネル本坑に伝播する圧縮波が低減する。

次に、分岐してパイプ内を伝播する圧縮波は、パイプの開口部で一部が外部へ放出され、一部が反射して膨張波となる。パイプ内の圧縮波は外部への放出により低減し、さらに膨張波との干渉により低減する。

また、分岐してパイプ内を伝播しパイプの閉鎖部に到達した圧縮波は、圧縮波のまま反射する。反射してパイプ内から緩衝工に戻った圧縮波は、トンネル本坑に直接伝播した圧縮波よりも遅れてトンネル本坑に伝播する。

以上のような過程を組み合わせることで、トンネル本坑内における圧縮波の急激な形成を抑えられるものと考えられる。

4 模型実験の概要

4.1 実験方法

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。実験装置の概略を図6に示す。

列車模型が機械式発射装置から高速で打ち出され、ピアノ線を伝って緩衝工・トンネル本坑に突入すると、トンネル内に圧縮波が形成される。トンネル本坑内の入口付近に圧力計を設置しておき、列車模型のトンネル突入時の圧力を測定する。測定した圧力の時刻歴から圧力勾配を算出し、微気圧波低減効果を評価する。

4.2 実験条件

4.2.1 パイプの取り付け本数・緩衝工の長さ

図5では、パイプ取り付けに期待する圧縮波圧力勾配低減効果発揮の仕組みを、パイプが1本の場合を例にして示したが、この仕組みは2本以上の場合でも同様に適用できることは容易に推考される。さらに言えば、パイプの本数が多い方が、個々のパイプによる効果を適切に発揮させることで全体としての効果を大きくすることができ、列車の種類や速度への対応範囲も

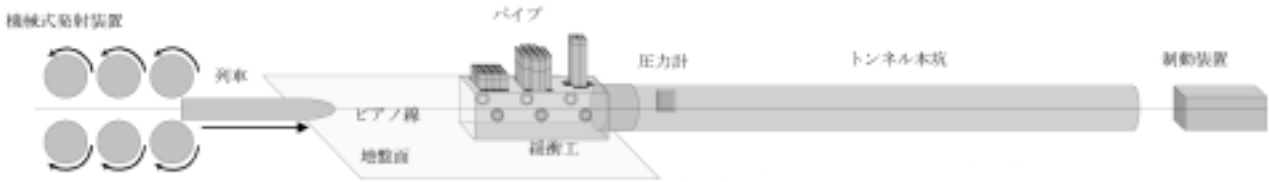


図6 微気圧波模型実験装置概略図

広くなると考えられる。

しかしながら、パイプの本数が増えると設置費用が高くなることを考慮する必要もある。

そこで模型実験におけるパイプの数は、パイプ取り付け位置の違いによる特性が最低限把握できると考えられる、緩衝工の入口方・中間・本坑方を取り付け位置として、最大3本とすることにした。

また緩衝工の長さは、トンネル本坑内径と同じ長さの範囲に1本のパイプを取り付けるものと仮定し、パイプを3本取り付ける場合に対応させて、トンネル本坑内径の3倍とすることにした。

4.2.2 列車模型・トンネル突入速度

列車模型は従来型車両と新型車両を用意した。但し、本稿で述べる内容は特に断りのない限り、車両先頭部が短く圧縮波を形成し易い従来型車両を用いて行った模型実験についてである。

またトンネルへの突入速度は、従来型車両では実験を安定して行い易い300km/hとしたが、新型車両では速度の違いに関して調べるため300km/hに加えて360km/hでの実験も行った。

4.3 模型の縮尺・形状寸法

4.3.1 緩衝工模型

実物のトンネル本坑の線路直角方向の大きさ(断面積)を63.4m²とすると、模型実験装置のトンネル本坑は内径が146mmであるので、縮尺は61.5分の1となる。

実験では、図7にその概要を示すように、緩衝工模型の断面を155mm×155mmの矩形とした。これは実物換算で90.9m²に相当し、トンネル本坑の1.43倍である。長さは、トンネル本坑内径の3倍の438mm(実物換算26.9m)で、天板上の3箇所(入口方・中間・本坑方)にパイプが取り付けられるようになっている。また緩衝工模型の左右両側面には、開閉の調節が可能な開口部を3箇所ずつ設けた。

4.3.2 パイプ

パイプは、内側寸法18mm×18mmの小型パイプを多数用意

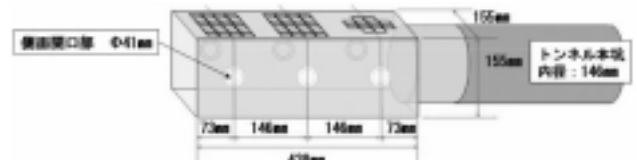


図7 緩衝工模型概要図

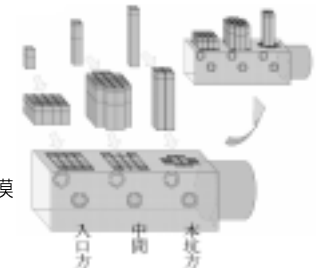


図8 小型パイプの緩衝工模型への取り付け要領

し、図8に示す要領で任意に組み合わせて太さや長さの細かい変化を実現した。

なお、図5で説明したパイプ取り付けに期待する圧縮波圧力勾配低減効果発揮の仕組みから、パイプの形態としては、図8に示すような先端が開いているパイプ以外に、中間に開口があるパイプや先端が閉鎖したパイプなどが考えられる。しかしこれらについては、本開発における初期段階で行った模型実験の結果を検討し、本稿で述べる実験対象からは外している。

5 模型実験の結果と考察

5.1 パイプ付き緩衝工の圧力勾配制御の性状

5.1.1 圧力・圧力勾配波形の特徴

図9は、パイプ付き緩衝工がトンネル本坑内入口付近の圧縮波を制御する様子

を例示したものであるが、①緩衝工突入時の圧力勾配、②中間パイプ取付箇所から本坑方パイプ取付箇所への通過時の圧力勾配、③トンネル本坑

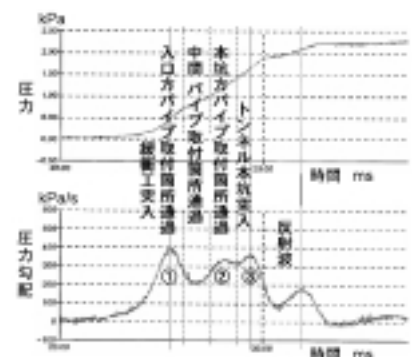


図9 パイプ付き緩衝工の圧力および圧力勾配波形の例

突入時の圧力勾配、に強い影響を及ぼすことが特徴である。

列車のトンネル突入開始に伴って圧力の上昇が始まり、上昇が終わった時点での圧力(最大圧力)は、列車の断面積とトンネル突入速度が同じであれば緩衝工によらず一定である。すなわち圧力の上昇量は一定であるので、圧力勾配を小さくするということは、圧力波形の傾きの変化をできるだけ少なくし、圧力勾配波形の複数の極大値をできるだけ均等に小さくすることと理解できる。

5.1.2 各パイプによる影響

(1) 入口方パイプ

図10は、入口方だけに小型パイプ12本分を合わせた太さのパイプを取り付け、長さを変化させた場合の実験結果の例を示したものである。この例から、長さを短くすると、緩衝工突入時の圧力勾配が小さくなるのが分かる。また、パイプを太く変化させても同様の傾向を示す。

入口方パイプは、無限大の広がりを持つ外界と緩衝工内を緩やかにつなぐと共に、圧縮波を外界に放出させ易いように、太く短い形状寸法にするのが良いと考えられる。

(2) 中間パイプ

図11は、中間のみに、パイプの長さを32mmで一定とし、小型パイプを合わせる数(太さ)を変化させて取り付けた場合の実験結果の例を示したものである。この例から、太さを太くすると、緩衝工突入時の圧力勾配が小さくなると同時に、中間パイプ取付箇所から本坑方へ進む際の圧力勾配は大きくなるのが分かる。この傾向は、パイプを短く変化させた場合も同様である。

中間パイプは、圧縮波を外界に放出させ易いように、太く短

い形状寸法にするのが良いと考えられる。

また同時に、列車が中間パイプ取付箇所から本坑方へ進む際の圧力勾配を適度に保つ(圧力勾配が増大し過ぎない)ように、本坑方パイプの細さ・長さを考慮した太さ・長さとする必要がある。

(3) 本坑方パイプ

図12は、本坑方だけに、パイプの長さを64mmで一定とし、小型パイプを合わせる数(太さ)を変化させて取り付けた場合の実験結果の例を示したものである。この例から、太さを太くすると、緩衝工突入時の圧力勾配が小さくなると同時に、トンネル本坑突入時の圧力勾配は逆に大きくなるのが分かる。

本坑方パイプは、緩衝工内とそれよりも狭い空間のトンネル本坑内を緩やかにつなぐように、細く長くするのが良いと考えられる。但し、極端に細く長い場合は、緩衝工突入時の圧力勾配が著しく増大する恐れのあることに注意が必要である。

5.1.3 従来型緩衝工との比較

図13に従来型緩衝工に対するパイプ付き緩衝工の圧縮波圧力勾配制御の違いを、波形を比較して示す。

パイプ付き緩衝工の圧縮波圧力勾配制御の効果(範囲)は、従来型緩衝工の側面開口部調節によるそれと異なる。したがって、パイプ付き緩衝工の効果と従来型緩衝工の側面開口部調節の効果を併用することができると考えられる。

5.2 効果の特徴

図14において、トンネル本坑突入後の圧力勾配を比較してみると、波形のグラフが本坑突入後に描く面積(塗り潰した部分)は、従来型緩衝工よりパイプ付き緩衝工の方が大きい。これ

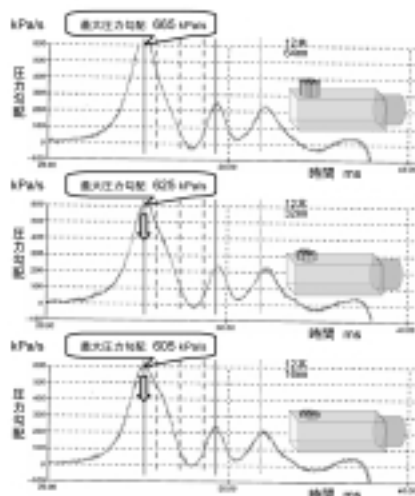


図10 入口方パイプを変化させた実験例

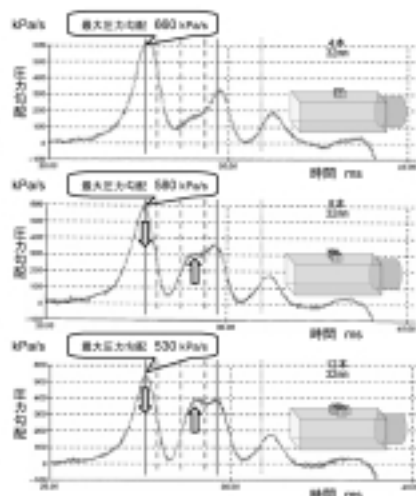


図11 中間パイプを変化させた実験例

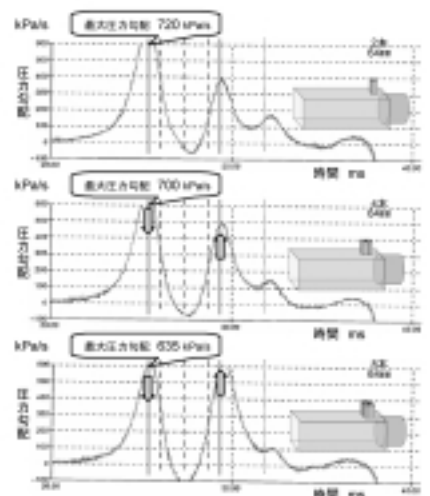


図12 本坑方パイプを変化させた実験例

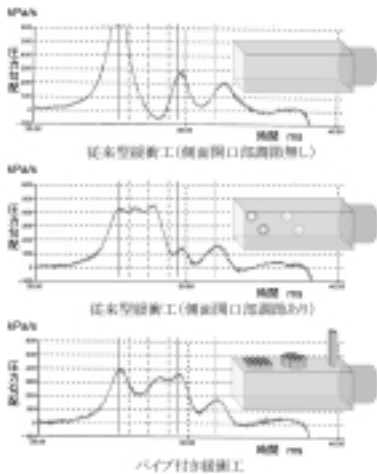


図13 圧縮波圧力勾配波形の比較

は、トンネル本坑突入後の圧力上昇が、従来型緩衝工よりパイプ付き緩衝工の方が大きいことを示している。

圧力の最終的な上昇量は、列車の断面積とトンネル突入速度が同じであれば緩衝工によらず一定であるので、トンネル本坑突入後の圧力上昇が小さい従来型緩衝工ではトンネル本坑突入までの圧力上昇量は大きく、逆にトンネル本坑突入後の圧力上昇が大きいパイプ付き緩衝工ではトンネル本坑突入までの圧力上昇量は小さい。すなわち、パイプ付き緩衝工の方が従来型緩衝工より圧力上昇が遅く、これは図14の圧力のグラフにおいて本坑突入時の圧力が、従来型緩衝工では約185kPaであるのに対し、パイプ付き緩衝工では約1.65kPaとなっていることに表れている。

以上のように、パイプ付き緩衝工の方が従来型緩衝工よりも圧力の上昇時間が長いので、圧力勾配は小さくなる。図14の圧力勾配のグラフを見ると、パイプ付き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、結果として最大圧力勾配は従来型緩衝工の450kPa/sに対しパイプ付き緩衝工は385kPa/sとなっている。

5.3 車両形状・列車速度による効果の違い

パイプの取り付け方を同一にして、①従来型車両で速度を300km/hにした場合、②新型車両で速度を300km/hにした場合、③新型車両で速度を360km/hにした場合、の実験

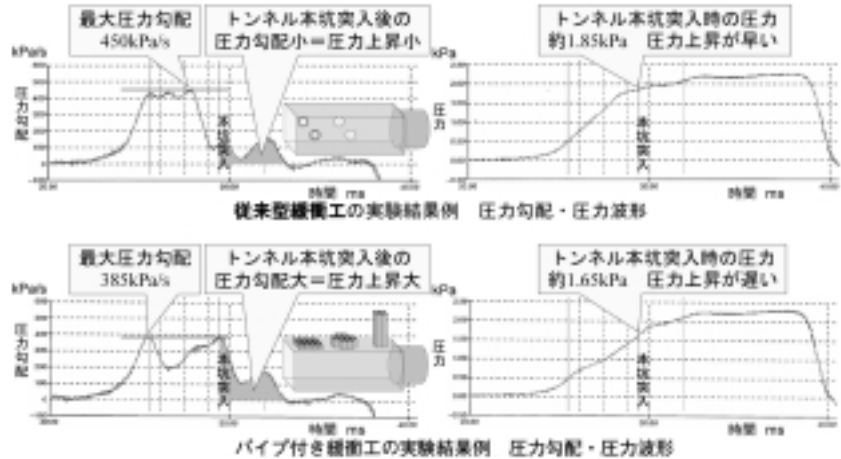


図14 従来型緩衝工とパイプ付き緩衝工の圧力勾配・圧力の相違点

結果を3例、図15に対比させて示す。

図15で、左列の先頭部が短い従来型車両と、中列の先頭部が長く形状を改良した新型車両の圧力勾配波形を同じ300km/hで比較してみると、新型車両は従来型車両よりも圧力勾配は小さくなり、変化が緩やかになった。

車両先頭部形状が同一で、列車速度が300km/hの中列と360km/hの右列の圧力勾配波形を比較すると、列車速度の上昇に伴って圧力勾配は大きくなるが、変化の様子は類似することが見て取れる。

6 現段階での評価

6.1 従来型緩衝工との効果の比較

今回の模型実験で実現したパイプ付き緩衝工の圧縮波圧

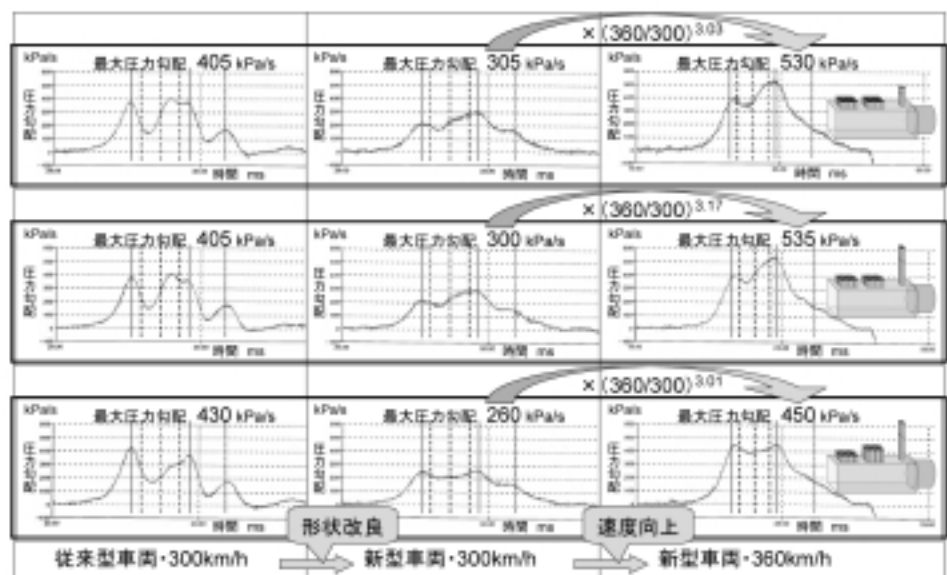


図15 車両先頭部形状・列車速度による違い

力勾配低減効果を、車両種類・列車速度の条件別に同じ長さの従来型緩衝工と最大圧力勾配の値で比較してみると表1の通りである。

パイプ付き緩衝工の圧力勾配低減効果は、従来型緩衝工より大きく、圧力勾配を同じ長さの従来型緩衝工の85%程度に低減する。

表1 模型実験で実現した条件別の最大圧力勾配の最小値

車両種類 列車速度	従来型車両 300km/h	新型車両 300km/h	新型車両 360km/h
従来型緩衝工・・・A	約450kPa/s	約310kPa/s	約540kPa/s
パイプ付き緩衝工・・・B	約385kPa/s	約260kPa/s	約450kPa/s
B/A	86%	84%	83%

6.2 効果に対する設置費用の見通し

図15の中列と右列に示した3つの例において、列車速度が360km/hの場合の最大圧力勾配の値は300km/hの場合の1.73～1.78倍となっている。この値は、速度比の3乗 $((360/300)^3=1.73)$ にほぼ等しく、従来の知見と一致する。圧力勾配を85%に低減することは、3乗則で速度に換算すると、95%に減速することに相当する。

また、実験で用いた緩衝工模型の長さは実寸法で約26.9mに相当するが、長さ26.9mの緩衝工を延伸して圧力勾配の大きさを85%にする場合、 $D=10\sim 15(m)$ を特性長さとして、必要な延伸量 $L(m)$ は、

$$(D+26.9)/(D+26.9+L)=85\%$$

から、

$$L=65\sim 74(m)$$

と求められる。すなわち、今回行った模型実験では、実寸法が約27mの緩衝工をパイプ付き緩衝工に改良すると、約7m延伸した場合と同等の圧縮波圧力勾配低減効果が得られるということになる。

この効果の程度を設置費用の点から評価してみる。模型実験で圧力勾配低減効果の大きかったパイプ寸法の組み合わせを参考に、パイプ取り付けの概算工事を構造本体の表面積で試算してみると、緩衝工の延伸7mとほぼ同量の工事に抑えられる見込みである。そして、パイプは緩衝工本体よりも構造規模が小さいので、必要な構造上の強度は小さくて済む。さらに、工事の施工条件について見れば、パイプ取り付けは線路に近接した作業を緩衝工延伸よりも格段に少なくできる。よって、パイプ取り付けの費用は、緩衝工延伸の費用より少なくでき

る可能性が高い。

7 おわりに

今回行った模型実験により、パイプ付き緩衝工は従来型緩衝工より線路方向に短い長さで微気圧波低減効果の発揮を期待できることがわかった。その過程で得た知見で最も意義があると考えられるのは、パイプ付き緩衝工は従来型緩衝工より圧力上昇の時間を長くする(圧力上昇を遅らせる)ことができるといふことである。

また、3本の各パイプが圧縮波圧力勾配に与える影響を把握し、実地試験に関して、①それぞれのパイプの寸法や取り付け方による圧力勾配への影響は適度な感度で、実地においても圧力勾配の制御が可能である、②太さや長さの調節が可能な現実的な範囲で、実地でのパイプ寸法が設定できる、といった一定の見通しも得た。

本開発の現状は、実地においてパイプ付き緩衝工を実現し、その効果を検証することが課題となっている。

最後に、今回の模型実験に際して、財団法人鉄道総合技術研究所環境工学研究部空気力学研究室の諸氏から多大なる指導を受けたことを書き記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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、pp367-368、2005.9
- 2) 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
- 3) 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
- 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、1979.7
- 5) 飯田雅宣；入口緩衝工と先頭部形状によるトンネル微気圧波対策、R R R、62巻、5号、pp8～11、2005.5