Special edition paper

防音壁上に設置する新幹線用騒音低減装置の開発

櫻井　一樹*　森　圭太郎**　増田　達*

新幹線高速化に対応する地上設備による騒音対策として、既設直立型防音壁の上部に設置する騒音低減装置を開発した。この装置は、音の回折と干渉現象を利用することで騒音低減量を向上させるものである。開発に先立ち、回折と干渉現象を利用した騒音低減装置が、高速走行する新幹線の騒音低減に効果があることを現地試験で確認した。騒音低減装置の形状は、まず数値解析で検討し、それに基づき製作した実物大模型によるスピーカー実験で検証することにより考案した。続いて、高速走行試験にあわせて、現地の既設直立型防音壁に騒音低減装置を取り付けて、騒音低減効果を確認した。また、振動・繰返し載荷実験、既設直立型防音壁へ取り付けた状態でのひずみ等測定、降積雪条件下での状態確認試験などを行い、問題ないことを確認した。

●キーワード：騒音低減装置、回折、干渉、防音壁、新幹線騒音

1. はじめに

鉄道の高速化に関する技術的な課題の一つに騒音対策がある。この騒音対策には、車両の改良及び地上設備の改良の2通りがある。

地上設備による新幹線の騒音対策は、防音壁の壁高を高くする「嵩上げ」が一般的な方法である。嵩上げは、コンクリート板やポリカーボネート板（透明板）を防音壁の上部に継ぎ足した構造で、高さ1mの嵩上げは、軌道中心から25m離れた地上1.2mの点（以下、25m点）において、およそ2dBの騒音低減効果があると言われている。しかし、さらなる新幹線の高速化を実現するには、嵩上げを施した時よりも大きな騒音低減効果が得られる対策が期待されている。

防音壁は、車両と沿線民家との間を遮断する壁を設けて、音が直接民家側へ伝播しないようにすることで騒音を低減する。また、音の回折や干渉現象を利用した防音壁（以下、多重回折・干渉型防音壁）も、騒音対策として、これまで研究されている。その形状には、トナカイ型[1),2)]や水車型[3)]などがあり、道路の騒音対策として実用化されているものもある。これらは、音を多重に回折させる効果、及び防音壁上部で入射音と反射音とを干渉させる効果を利用して騒音を低減する仕組みのものである。

新幹線の騒音対策としては、音の干渉現象を利用した図1の騒音低減装置がJR東日本とメーカーとの間で共同開発され、一部区間の防音壁上部に設置し、実用化されている。しかし、この干渉型騒音低減装置は、防音壁面から民家側へ800mm以上張り出すために、高架橋下の隣接用地境界を侵してしまうという問題があった。

図1　干渉型騒音低減装置

また、鉄道騒音、特に新幹線騒音は道路騒音に比べると、騒音源がレール付近やパンタグラフ付近など複数ある点や、車両壁面と防音壁面との狭い領域で音が多重反射する現象がある点などの特長がある。このため、道路用の多重回折・干渉型防音壁が新幹線の騒音低減に効果を発揮するか否かは、未解明であった。

以上のような状況を踏まえ、本開発は、新幹線騒音に対する道路用の多重回折・干渉型防音壁の低減効果を検証するとともに、新幹線沿線の既設の直立型防音壁を対象として、嵩上げよりも大きな騒音低減効果が得られ、かつスペースや用地の問題に拘束されない、新たな地上設備による騒音対策を考案することを目的とした。

2. 開発の概要

本開発ではまず初めに、道路の騒音対策では実績があ

* JR東日本研究開発センター　フロンティアサービス研究所
** 東北工事事務所　仙台工事区（元　フロンティアサービス研究所）

る既存の多重回折・干渉型騒音低減装置を新幹線の高架橋区間の直立型防音壁上部へ取り付けて、その新幹線騒音に対する低減効果を確認した。

次に、回折・干渉効果を生み出す形状を数種類考案して、各形状の新幹線騒音に対する騒音低減効果を数値解析で検討した。

続いて、数値解析の結果をもとに、騒音低減装置の実物大模型を製作した。これを用いて、実物大模型によるスピーカー実験（以下、実物大模型実験）を実施し、騒音低減装置の騒音低減効果を検証した。さらに、高速走行試験にあわせて、現地の既設直立型防音壁に騒音低減装置を取り付けて、実車での騒音低減効果を検証した。

併せて、騒音低減装置の構造的な検証のため、振動・繰返し載荷実験を行った。さらに、現地の既設直立型防音壁に取り付けて、列車の高速走行に伴って発生するひずみ等を測定した。

また、寒冷降雪地方での使用を考慮して、雪に対する状態確認試験を行った。

3. 既存の多重回折・干渉型防音壁の騒音低減効果確認試験

3.1 上越新幹線での高速走行試験

2003年にE2系車両を使った高速走行試験が、上越新幹線で実施された。これにあわせて、道路用の騒音低減装置として既に実用化されていた図2に示す形状の多重回折・干渉型騒音低減装置[4]を新幹線高架橋区間の直立型防音壁の上部へ取り付けて、多重回折・干渉型防音壁が新幹線騒音に対して騒音低減効果が得られるか否かについて検証した[5]。装置を取り付けた延長は、列車長と同じ200mとした。

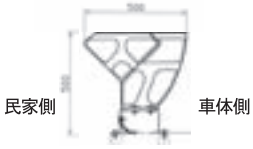

図2 既存の多重回折・干渉型騒音低減装置

また、多重回折・干渉型騒音低減装置の比較対象として、防音壁の側壁面に側面吸音材を200m取り付けた。この側面吸音材は、東北新幹線の防音壁用吸音材として一般的に使用されるポリエステル系のものを使用した。

3.2 高速走行試験の結果

多重回折・干渉型騒音低減装置を取り付けた箇所と側面吸音材を取り付けた箇所のそれぞれにおいて、25m点で騒音測定を実施した。また、これらを取り付けていない状態でも、騒音測定を実施した。騒音測定では、音圧レベルを聴感補正したA特性音圧レベル（以下、騒音レベル）を測定した。

測定の結果、両箇所とも列車の速度が上昇するにつれて騒音レベルは大きくなった。しかし、多重回折・干渉型騒音低減装置を取り付けた箇所は、側面吸音材を取り付けた箇所よりも、速度の上昇に伴う騒音レベルの増加量が小さいことを確認できた。このことは、多重回折・干渉型騒音低減装置が側面吸音材よりも速度依存性が小さいことを示す。

表1は、列車速度が240km/hの騒音対策の有無による騒音のピーク値の差を、低減効果量としてまとめたものである。将来の高速化で計画されている速度よりも低い速度域での結果ではあるが、多重回折・干渉型騒音低減装置は新幹線の騒音低減に対しても有効であることが検証できた。

表1 騒音対策の騒音低減効果量

騒音対策	低減効果量
多重回折・干渉型騒音低減装置	1.5dB
側面吸音材	0.5dB

時定数：1s(SLOW)

4. 防音壁上部形状の数値解析

4.1 数値解析の条件

新幹線騒音をより効果的に低減する騒音低減装置を開発するために、防音壁の上部形状を変えて数値解析を行った[5]。数値解析は、図3に示す簡略化したモデルで、2次元境界要素法に基づいて実施した。騒音低減装置の大きさは、車窓からの景色が阻害されにくい高さ、及び防音壁脇の通路の歩行に支障のない幅を考慮して、最大で高さ500mm、幅800mmとした。

様々な上部形状に対する騒音低減効果量を比較する点として、代表評価点を設定した。代表評価点の位置は、標準的な高さの高架橋を想定して、軌道中心から25m離れた軌道面から-8mの点とした。

音源は、当初、図3に示すレール部音源、車体肩部音源、パンタ部音源の3つを対象とした。しかし、解析を進める中で、パンタ部音源は代表評価点から見通せる位置にあるため、防音壁の上部形状を変化させても低減効果がほとんど見られないことが判明した。このため、以後の解析では、パンタ部音源についての検討は実施しなかった。

数値解析では、前述の上越新幹線での高速走行試験で騒音測定した地点における騒音レベルのピーク値の周波数特性と、図3のモデル内で同じ測定地点において計算された周波数特性とが一致するように、図3の各音源の各周波数バンドに重み付けを行った。解析は、5Hz刻みにした周波数ごとで計算し、オクターブバンドごとに足し合わせて、オーバーオール値で評価した。

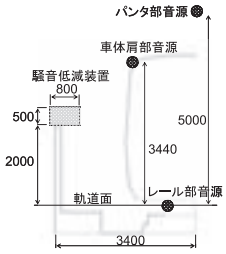

図3　簡略化した数値モデル

上部形状の検討手順は、まず初めに上部形状の外形を決める輪郭形状を検討し、その後に上部形状の内部空間を決める内部形状を解析した。

4.2　数値解析の結果

防音壁の上部形状としては、図4の8つの輪郭形状について数値解析を行った。その結果、以下のことが確認できた。

(1) 民家側形状の異なるC・G・Hを比較すると、民家側形状は、先端の小さな突起形状（H）が効果的である。

(2) 車体側形状の異なるA～Fを比較すると、車体側形状は、レール部音源に対して鉛直形状（A）と傾斜形状（C）が効果的で、ほぼ同程度の効果量である。

以上から、騒音低減に有利である輪郭形状は、民家側は先端に小さな突起がついた形状（H）、車体側は鉛直形状（A）もしくは傾斜形状（C）であると推測した。また、車体側は、防音壁脇の通路を歩行するときの圧迫感を考慮して、傾斜形状（C）がよりよい形状と考えた。

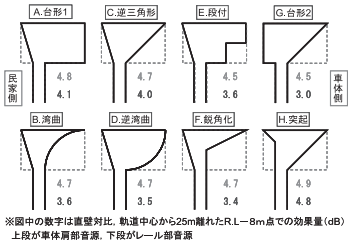

図4　輪郭形状例と効果量

続いて、上部形状の内部空間の形状を検討した。数値解析の結果、最終的に、図5に示す形状が最も効果があることを確認した[5]。この形状は、民家側にはY字の先端が折れた五角形形状、その五角形形状と車体側の傾斜板との間には仕切り板を有する、というものである。

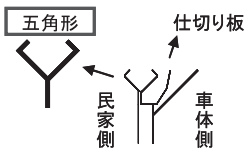

図5　数値解析による最適形状

5.　実物大模型実験による騒音低減効果の検証

5.1　試作品の製作

数値解析の結果から得られた最適形状（図5）の実物大の騒音低減装置を試作した。図6は、試作した騒音低減装置で、高さ約500mm、幅約800mm、長さ5m（1m/個×5個）、材質は亜鉛メッキ鋼板（厚さ1.6mm）である。

図6　試作した騒音低減装置

実物大車両・防音壁模型を使用して、この騒音低減装置の実物大模型実験を行った[5)、6)]。また、騒音低減装置の車体側の傾斜板面には吸音材（厚さ40mm、密度70kg/m^{3}のポリエステル系）が取り付けられるような工夫を施した。

5.2　実物大模型実験の概要

実物大模型実験を実施した主なケースを、図7に示す。ケース2とケース3が、図6に示した騒音低減装置を防音壁模型の上部に取り付けたケースであり、車体側の傾斜板面に吸音材を取り付けた状態がケース3である。

図8に、実験の状況写真と測定配置図を示す。音源は、パンタ部音源、車体肩部音源、レール部音源の3つを設定して、車両模型の各位置にスピーカーを設置した。実物大模型実験では、パンタ音源に対する効果確認を含めて実施した。測定点は、図8に示す範囲内の格子交点に計30点を設けた。何れかのスピーカ

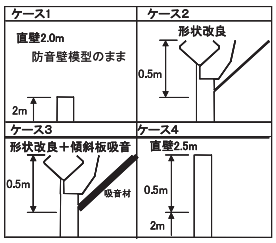

図7　実物大模型実験の実施例

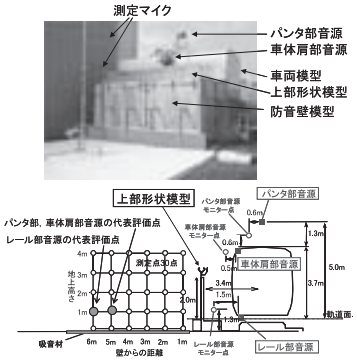

図8　実物大模型実験の状況写真と配置

ーからピンクノイズを発信させた時の騒音レベルを、各測定点で200Hz～4kHz帯域を対象として計測した。スピーカーの出力レベルの変化を補正するために、各スピーカー近傍にはモニター点を設置した。

また、図8の測定配置図内に示すとおり、各音源別に代表評価点を設定した。この代表評価点の設定は、短距離の範囲における音の周波数特性の変化は小さいと考え、25m点の周波数特性と最も類似する周波数特性を持つ1点を、測定点30点の中から選定することにより行った。この際の各点の周波数特性は、図3の解析モデルで計算した。[5)]

5.3 実物大模型実験の結果

表2は、代表評価点における図7の各ケースのケース1に対する低減量を、音源別に示したものである。この結果から、次のことが確認できた。

表2 ケース1に対する音源別の騒音低減効果量（dB）

音源位置	ケース2 形状改良	ケース3 形状改良+傾斜板吸音	ケース4 直壁2.5m
レール部	6.0	6.7	1.5
車体肩部	5.0	5.2	4.8
パンタ部	−0.5	−0.6	−0.2

ケース1をゼロとし、正値がケース1より騒音低減効果があることを示す。

(1) レール部音源に対しては、ケース3の騒音低減量が最も大きく、ケース2も大きい。騒音低減装置は、嵩上げ（ケース4）よりも低減効果が大きい。

(2) 車体肩部音源に対しては、各ケースとも同等程度である。

(3) パンタ部音源に対しては、各ケースとも代表評価点が音源を見通せる位置にあったため、各ケースの低減効果は見られなかった。

このほか、代表評価点以外の点においても騒音低減効果があること、特に、ケース2とケース3の低減量が大きいことを確認した。[5)、6)]

6. 高速走行試験での騒音低減効果の測定

6.1 騒音測定の概要

騒音低減装置を東北新幹線高架橋の既設直立型防音壁上部に延長200m取り付け（図9）、新幹線高速試験車の高速走行試験時に、騒音低減効果を測定した[7)]。騒音低減装置の車体側傾斜板面の吸音材は、「無し」と「付き」の2状態で行った。また、比較のため、既設直立型防音壁のままの状態でも測定した。

図9 騒音低減装置取付け箇所

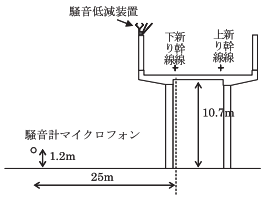

図10 測定箇所の断面概略図

測定箇所はRCラーメン高架橋区間で、図10に測定した構造物の概略断面と騒音測定箇所を示す。騒音測定の対象は、下り線を高速走行する新幹線高速試験車とし、下り線軌道中心から25m点で測定した。

6.2 騒音測定の結果

図11は、25m点における新幹線高速試験車の騒音レベルを散布図である。騒音低減装置（吸音材付き）と騒音低減装置無しとを比較すると、騒音低減装置（吸音材付き）の方が約2dB騒音値は低くなっている。一方、騒音低減装置（吸音材無し）は、明確な効果量が十分読み取れるまではいたらなかった。

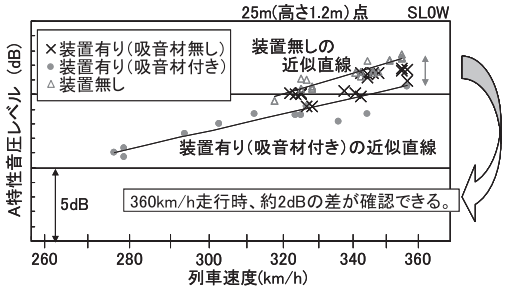

図11 25m点の騒音測定結果

7. 振動・繰返し載荷実験

7.1 振動・繰返し載荷実験の概要

騒音低減装置の構造的な強度については、構造計算で確認をしている。力学的挙動の確認のために、実物大模型を用いて、振動・繰返し載荷実験を実施した。

7.2 振動実験

振動実験では、図12に示すように、水平加振器の振動台の上に実物大模型を固定して、騒音低減装置全体を水平方向に振動させた。振動台の振動は、1～200Hzで変動させた。振動台加振部、騒音低減装置本体（複数点）に加速度計

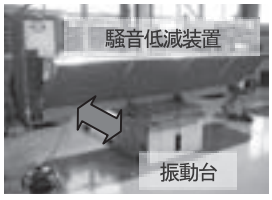

図12 振動実験

を取り付け、振動加速度（振動台の振動加速度A_0、騒音低減装置本体の測定点の振動加速度A_i）を測定した。これらより、伝達関数（A_i/A_0）をFFT（高速フーリエ変換）により求め、共振周波数を評価した。さらに、減衰特性を検討するために、代表的な共振周波数のSIN波で加振し、加振停止したときの挙動を観察した。SIN波加振を停止したときの減衰状況の一例を図13に示す。速やかに振動が減衰しており、問題ないことが確認できた。

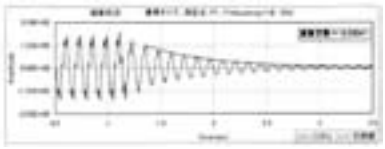

図13　減衰状況時間波形

7.3　繰返し載荷実験

風圧に対する耐久性を確認するために、水平方向繰返し載荷実験をした。図14は、繰返し載荷実験の写真であり、水平加振器と騒音低減装置とを専用連結装置の連結棒にて3箇所で連結した。載荷した荷重は、±1kPaとなるように設定した。加振周波数は、加振器の能力の制約により2Hzとした。加振回数は、1×10^6回以上実施した。

図14　繰返し載荷実験

繰返し載荷実験では、40万回付近で、傾斜板を補強しているパネル補強板取付け用リベットが切断し破損した（図15）。これは、今回の実験では、できるだけ均等に荷重をかけようとしたが、必ずしも均等になっておらず、実際の風圧とは異なり、専用連結装置の連結棒との連結部分に変形が集中したものである。このような想定外の荷重でも微細な損傷（この部位の損傷が問題となることはない）で収まり、このことから想定される荷重のもとでは安全であると判断できる。なお、繰返し載荷実験では、そのほかの異常は認められなかった。

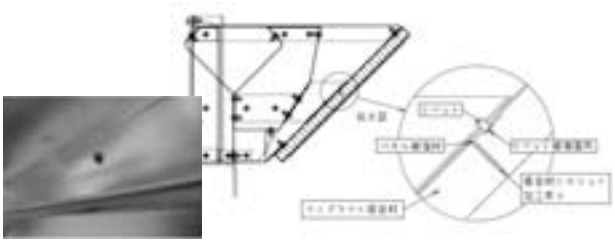

図15　繰返し載荷実験でのリベット損傷

8.　現地ひずみ等測定

8.1　現地ひずみ等測定の概要

騒音低減装置を東北新幹線の既設直立型防音壁上に取り付け、新幹線高速走行試験にあわせて、図16に示す位置で、ひずみ、加速度、列車風圧、列車風速を測定した。

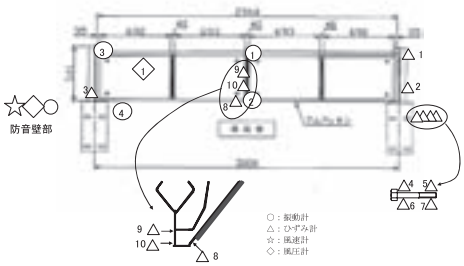

図16　現地ひずみ等測定の位置

8.2　現地ひずみ等測定の結果

新幹線高速走行試験及び営業列車に対する現地ひずみ等測定の主な結果を、表3に示す。この結果、各部材に生じる応力は、疲労限と比較して十分に小さいことを確認した。そのほかの測定値も、許容範囲内に収まっていることを確認した。

表3　現地ひずみ等測定の主な測定結果

[ ]内は営業列車での測定値

	発生応力(MPa)			加速度(m/s²)			列車風圧(kPa)	列車風速(m/s)
	支柱根元	固定ボルト	支柱と騒音低減装置との接続部	騒音低減装置	支柱上部	防音壁部		
騒音低減装置	9.5	28.4	23.2	73.8	36.6	22.9	0.51	—
騒音低減装置非設置箇所	—	—	—	—	—	14.8	0.49	9.8 [10.8]

（参考）疲労限　強度等級F：46MPa、ボルト：56MPa程度

9.　雪に対する状態確認試験

9.1　雪に対する状態確認試験の概要

新幹線の沿線地域は、寒冷降雪地方が多いので、雪に対する状態確認試験を行った。この試験は、降雪地方の地上での暴露試験、既設直立型防音壁に取り付けての暴露試験、降雪装置による試験を行った。

9.2　地上での耐雪試験

2006年冬期と2007年冬期において、JR東日本信濃川発電所（新潟県小千谷市）で、騒音低減装置の雪暴露試験を行った。図17は、2006年の暴露試験の写真である。初年の2006年冬期は、雪での損傷状態の確認を目的とし、2007年冬期はそれに加え、ツララや雪ぴの発生状況の確認を目的とした。

2006年及び2007年の試験期間終了後に騒音低減装置を

確認したが、破損や変形は見られなかった。ツララや雪ぴは発生しなかったが、2007年はまれに見る少雪の年であったため、降雪装置による試験（後述9.4）を行うこととした。なお、いずれの年でも、騒音低減装置上に積もった雪は、日射のもとで短期間で融けることが観察された。

図17　信濃川発電所での耐雪試験

9.3　既設直立型防音壁での耐雪試験

2007年の冬期間を通じて、いわゆる「雪の通り道」である東北新幹線北上駅付近で、既設直立型防音壁に騒音低減装置を取り付けた。ここでは、積雪状態、ツララや雪ぴの発生状況の確認を目的とした。

図18　既設直立型防音壁での耐雪試験

2007年冬期の北上のアメダスの最深積雪は、3月13日の41cmであった。図18は、その翌日の3月14日の写真である。騒音低減装置上の雪は、かなり融けて少なくなっていることがわかる。

2007年はまれに見る少雪の年であったので、次節の降雪装置による試験を行うこととした。

9.4　雪氷防災実験棟での耐雪試験

独立行政法人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センターの雪氷防災実験棟を借用して、騒音低減装置の耐雪試験を行った。ここでの目的は、騒音低減装置の変形状態、積雪状態、ツララや雪ぴの発生状況、落雪状態、低温下での状態の確認とし、表4の試験条件で実施した。図19は、30時間の連続降雪を実施した際の騒音低減装置の写真である。

図19　雪氷防災実験棟での耐雪試験(連続降雪30時間後)

雪氷防災実験棟での試験では、騒音低減装置の破損や変形は見らず、落雪や雪ぴは生じなかった。また、騒音低減装置の下部の水抜き穴に細く短いツララは発生したが、大きなツララは発生しなかった。

表4　雪氷防災実験棟での耐雪試験の条件

	日付		実験内容	使用装置	室温条件	記事
1日目	5月24日（木）	午前	・連続降雪、積雪着雪状態観測、落雪状態観測	降雪装置A	−10℃	
		午後	・連続降雪、積雪着雪状態観測、落雪状態観測	降雪装置A	−10℃	
		夜間	・連続降雪	降雪装置A	−10℃	
2日目	5月25日（金）	午前	・連続降雪、積雪着雪状態観測、落雪状態観測	降雪装置A 横風発生装置	−10℃	
		午後	・連続降雪（30時間）、積雪着雪状態観測、落雪状態観測	降雪装置A 横風発生装置	−10℃	
		夜間	・低温状態で降雪する（低温以外の実験装置の動作なし）。	（低温）	−7℃ 〜 +2℃ で繰り返し変動	盛岡の1月下旬〜2月上旬の平均的な気温
3日目	5月26日（土）	終日	・低温状態で降雪する（低温以外の実験装置の動作なし）。雪を載せたまま凍らせることが目的。			
4日目	5月27日（日）	終日				
5日目	5月28日（月）	朝	・凍結（脆弱）に対する騒音低減装置の状態確認			
		午前	・連続降雪、凍結後の積雪着雪及び落雪の状態観測	降雪装置B 横風発生装置	−5℃	
		午後	・日射による融雪及び落雪の状態観測	日射装置A	+3℃	500〜550W/m²程度 盛岡冬期日中相当
		夜間	・（夜間再凍結させる）	（低温）	−20℃	盛岡の過去最低
6日目	5月29日（火）	朝	・凍結（脆弱）に対する騒音低減装置の状態確認			
		午前	・連続降雪、凍結後の積雪着雪及び落雪の状態観測	降雪装置B 横風発生装置	−2℃	
		午後	・日射による融雪及び落雪の状態観測 ・最終的な騒音低減装置の状態確認	日射装置A	+5℃	500〜550W/m²程度 盛岡冬期日中相当

降雪装置Aは樹枝状結晶（径0.5mm〜5mm）、降雪装置Bは氷球（径0.025mm）を降らせる装置

9.5　雪に対する状態確認試験の評価

新幹線沿線の気象条件は個々に異なるが、以上の結果から、高速化が計画されている東北新幹線沿線程度の降雪地方に対しての耐雪性は確認できた。なお、散水消雪設備が設置されている上越新幹線においては、凍結の影響を含めて、別途確認が必要であると考えている。

10.　おわりに

今回、音の回折や干渉現象を利用した新幹線用騒音装置を開発した。高速走行試験で確認した結果、騒音低減効果は約2dBあった。また、耐久性なども問題ないことを確認した。

なお、より多くの騒音低減が必要な箇所への適用を目指して、今回開発した騒音低減装置を嵩上げ板上に設置する形態についても、研究開発に取り組んでいる。

参考文献

1) 渡辺敏幸、島広志、水野恵一郎；分岐型遮音壁の騒音低減メカニズム、日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集、pp.171〜174、1996.9.
2) 渡辺敏幸、島広志、水野恵一郎；分岐型遮音壁の騒音低減メカニズム－第2報－　橋梁部用小型タイプの開発、日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集、pp.197〜200、1997.9.
3) 大久保朝直、藤原恭司；ソフトな円筒エッジを持つ防音壁の遮音性能に関する研究、日本音響学会講演論文集、pp.729〜730、1996.9.
4) 島広志、渡辺敏幸、横井隆、水野恵一郎；ミニトナカイ型防音装置の騒音低減メカニズム、日本音響学会講演論文集、pp.815〜816、1998.
5) 森圭太郎、高桑靖匡、野澤伸一郎、島広志、渡辺敏幸；鉄道用新型騒音低減装置の効果検証実験、土木学会論文集G、Vol.62、No.4、pp.435〜444、2006.12.
6) 森圭太郎、高桑靖匡、野澤伸一郎、渡辺敏幸、島広志；上部形状を改良した鉄道用防音壁の実物大模型実験、平成17年度土木学会全国大会第60回年次学術講演会、7-183、pp.365-366、2005.9
7) 森圭太郎、高桑靖匡、野澤伸一郎、渡辺敏幸、島広志；上部形状を改良した鉄道用防音壁の騒音低減効果確認実験、平成18年度土木学会全国大会第61回年次学術講演会、7-196、pp.391-392、2006.9