

土木工事現場での環境対策事例 —音響技術の新しい活用方法(騒音・交通安全)—

宮瀬 文裕¹・牧野 有洋²・岩橋 輔³・谷川 将規⁴・宇野 昌利⁵
藤吉 卓也⁶・井出 一直⁷・高野 泰明⁸・花村 洋一郎⁹

¹正会員 清水建設株式会社 土木技術本部基盤技術部 (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)
E-mail: f.miyase@shimz.co.jp

²正会員 清水建設株式会社 関西事業本部神戸支店 (〒651-0086 兵庫県神戸市中央区磯上通4-1-13)
E-mail: a.makino@shimz.co.jp

³正会員 清水建設株式会社 関西事業本部大阪支店 (〒541-8520 大阪府大阪市中央区本町3-5-7)
E-mail: iwahashi@shimz.co.jp

⁴正会員 清水建設株式会社 技術研究所総合解析技術センター (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)
E-mail: tanigawa@shimz.co.jp

⁵正会員 清水建設株式会社 土木技術本部技術開発部 (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)
E-mail: uno@shimz.co.jp

⁶正会員 清水建設株式会社 土木技術本部機械技術部 (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)
E-mail: t.fujiyoshi@shimz.co.jp

⁷非会員 三井化学産資株式会社 埼玉事業所環境資材開発部 (〒346-0028 埼玉県久喜市河原井町9番地)
E-mail: Kazunao.Ide@mitsui-chem.co.jp

⁸非会員 ヤマハ株式会社 SN開発統括部第2開発部 (〒430-8650 静岡県浜松市中区中沢町10-1)
E-mail: yasuaki_takano@gmx.yamaha.com

⁹非会員 ヤマハ株式会社 音響営業統括部SN営業部 (〒108-8568 東京都港区高輪2-17-11)
E-mail: youichirou_hanamura@gmx.yamaha.com

大規模な土木工事は、周辺環境に対して大きな影響を与える。工事現場で大型機材から発生する騒音に加え、工事車両走行時の道路周辺での騒音や第三者災害（交通事故）の防止にも留意する必要がある。近年は環境や安全に対する意識の高まりにより、発注者と地域住民の両方から工事中の環境保全と安全確保についてより高い要求がなされている。このため、土木工事現場では環境保全と安全確保に対して、様々な工夫をしている¹⁾。本論文では、1) 苦情の多い騒音、2) 運搬車両が多い場合に重要な交通安全対策の2つについて、既存の音響技術を新たな方法で活用した1) 逆位相騒音低減システム（Active Noise Control）、2) 制振樹脂、3) 音声安全看板の技術概要と対策効果を紹介する。

Key Words : construction site, environmental measures, noise, traffic safety

1. 土木工事現場での環境対策の必要性

土木工事現場の特徴として、騒音の大きな機材が多数稼働する、大量の物資を運搬するの2点がある。これらは、周辺環境に大きな影響を与える要因となる。筆者らゼネコン関係者は、騒音規制法はもとより、さらに厳しい自治体独自の規制等を遵守して施工している。

近年は環境保全への要望が高まり、地域住民や発注者

から高いレベルの対応を要求されることが多い。順調に工事を進めるため、工事中の環境対策はますます重要となっている。そのため、環境保全に効果的な新技術の導入も積極的に行われている。

本報告では、1) 苦情の多い騒音、2) 運搬車両が多い場合に重要な交通安全対策を対象に、既存の音響技術を新たな方法で活用した3つの事例について、技術と対策効果について概要を述べる。

2. 逆位相騒音低減システム (Active Noise Control)

(1) 開発目的

ダム工事では堤体コンクリート用の骨材の運搬に、1日当たり百数十台もの工事車両が走行する。ダム建設現場の沿道はもとも静穏な環境のため、工事車両走行時の騒音対策が重要となる。通常、騒音対策として道路に沿って写真-1に示すような防音壁が設置される。しかし、防音壁はダンプから発生する低音域の騒音（体に震えを感じる低い音）には十分な効果を発揮できない。そのため、地域住民が不快感を覚える大きな要因となり、効果的な対策が望まれていた。そこで、筆者らは低音域の騒音に対して、低減効果が高い逆位相騒音低減システム (Active Noise Control) を、ダンプ走行時の低音域騒音の対策に活用することとした。

(2) 活用した既存技術の基本

逆位相騒音低減システムは、図-1に示すように騒音の波（+）と逆の波形の波（逆位相の波（-））を合成することで、騒音を低減する仕組みであり、500Hz以下の低音域騒音に対して効果がある。この仕組みは、身近な例ではノイズキャンセルヘッドホンにも活用されている。

逆位相騒音低減システムの基本的な構成を図-2に示す。システムは、1) 騒音を感知するセンサーマイク、2) 感知した騒音を分析して逆の波形の波を作り出す制御部、

3) 逆の波形の音（逆位相音）を出力する制御スピーカーで構成される。制御スピーカーから出力される逆位相音が騒音と民家付近で合成して低減されるように、制御部がコントロールする。

(3) 開発した技術の特徴

今回開発した技術の実施概要を図-3に示す。ダンプから発生する騒音の高音域は防音壁で低減する。そして、防音壁の上方を乗り越えてくる音（回折音）の低音域は、防音壁の上方に設置した逆位相騒音低減システムで低減する。この2つの効果を組合わせて、民家での騒音を低減し、低音域の騒音が要因となる不快感を大幅に改善している。これと同様な考え方の装置は、高速道路の騒音対策として設置されている事例がある。しかし、高速道路を走行する車両の音に反応し、制御スピーカーから常時逆位相音を出力しているため、その音自体が周辺民家の環境負荷になっているという課題があった。

そこで、騒音を感知するセンサーマイクを活用してダンプの位置を自動的に検出し、ダンプが民家の前を通行する時だけ逆位相音を出力することにした。この検出方法の概要を図-4に示す。この方法は、人間の耳の機能を模したものである。人間の耳は、左右各1つ備わっており、非常に感度が高いセンサーである。そのため、音が左右の耳に到達するわずかな時間差から、音源の位置や近づいているのか遠ざかっているのかを判断できる。今

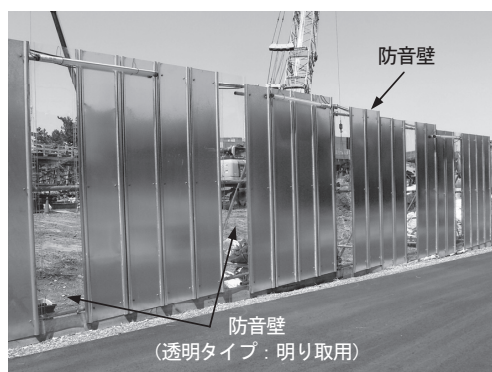


写真-1 道路に沿った防音壁の事例

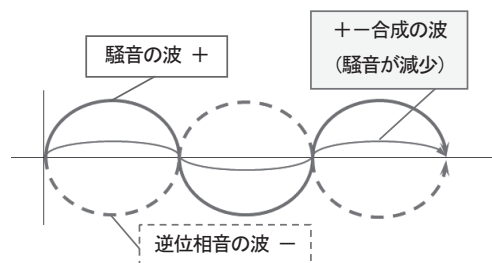


図-1 逆位相騒音低減システムの低減効果のイメージ

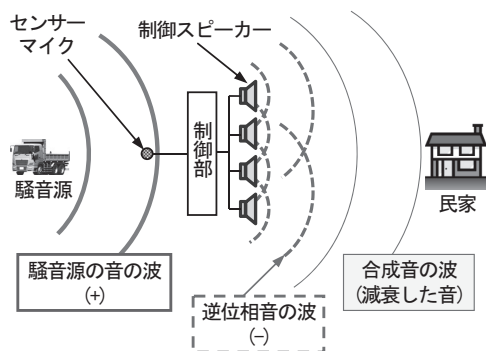


図-2 逆位相騒音低減システムの基本構成

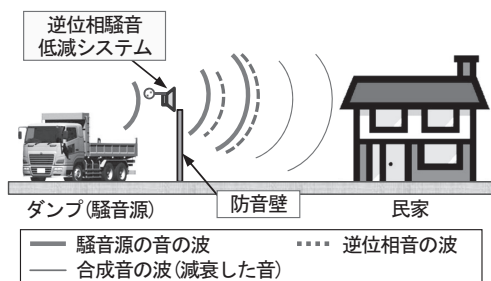


図-3 開発技術の実施概要

回のシステムでは、2つのユニットを1組として制御し、センサーマイク S_1 、 S_2 を人間の耳と同様に機能させた。

ダンプが民家に近づくとき、センサーマイク S_1 、 S_2 で騒音を感知する。この時、 $L_{t1} < \ell_{t1}$ のため、センサーマイク S_1 、 S_2 への到達時間がわずかに異なる。音速 $C=340\text{m/s}$ として、到達時間差から距離差の絶対値 $(L_{t1} - \ell_{t1})^2$ が算出できる。時刻 t_n での $(L_{tn} - \ell_{tn})^2$ が、一定値内であれば、ダンプが民家の前を通過していると判断してシステムが自動的に作動し、逆位相音を出力する。民家の前を通過すると、一定値を超えるため、システムが自動的に停止する。このシステム自動作動機能を有するため、常時逆位相音を出力することがなく、民家への影響を大幅に低減できる。

(4) 現場での効果確認結果

本システムの効果を、兵庫県朝来市で建設中の与布土（よふど）ダムで確認した。ダムの建設に必要な骨材は、民家に近接した一般道を使用して運搬しており、120台以上／日のダンプが通行する場合がある。このダンプが発生する低音域の騒音を対象とした。写真-2にユニットの外観を、写真-3～4に使用状況を示す。ユニットは、逆位相音を出力するスピーカーを4個、センサーマイク1個を備えており、人力運搬が可能な大きさ（幅150cm、高さ25cm、奥行25cm）と重量（約25kg）である。4基のユニットで約10mの幅（民家1軒分）に対応でき、ユニット数の増減により民家の大きさにあわせて柔軟に対応できる。図-5に逆位相騒音低減システムの低減効果

を示す。なお、今回は予備試験の結果をもとに、逆位相騒音低減システムの制御範囲を50～500Hzとした。図-5に示すように、システム稼働時には50～200Hzの範囲で騒音値の低下が見られ、最大で10dBの低下が確認された。また、ダンプの走行方向が往路側、復路側の両方で、システムが自動的に作動・停止することも確認できた。



写真-2 ユニットの外観



写真-3 現場でのシステム使用状況

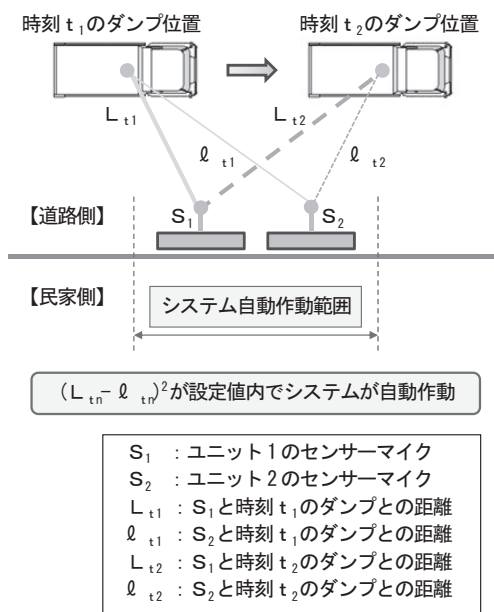


図-4 センサーマイクを活用した位置検出機能

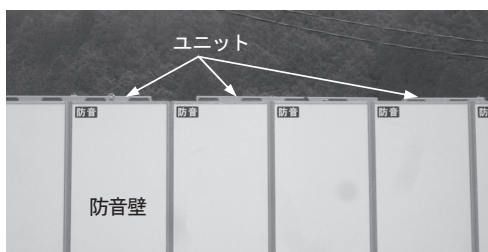


写真-4 防音壁とシステムの設置状況

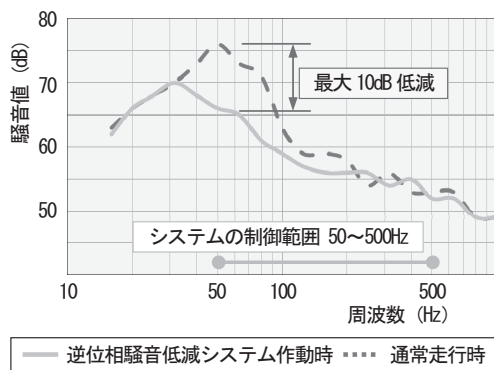


図-5 逆位相騒音低減システムの騒音低減効果

3. 制振樹脂

(1) 開発目的

ダム工事では、現場の敷地内にコンクリート製造設備を設置し、大量のコンクリートを製造することが多い。近年、ダム建設現場が民家に近接している場合があり、この設備から発生する大きな騒音の対策が重要となっている。ダムの堤体コンクリート用の骨材は、最大粒径80mm（大人のこぶし大程度）と大きく、この骨材を受入れる鋼製のホッパーでは、骨材がダンプの荷台から落

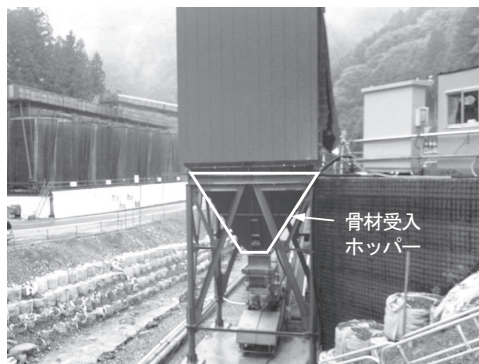


写真5 ダムの骨材受入ホッパー（鋼製）の例

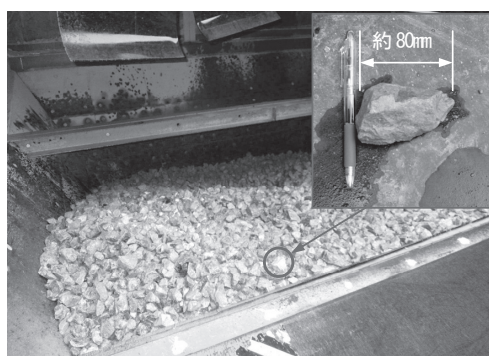


写真6 骨材受入時のホッパー内の状況

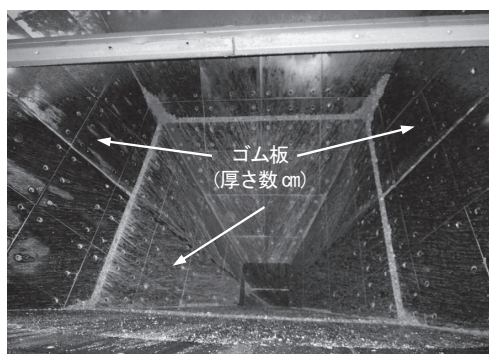


写真7 ホッパー内の全面に貼付したゴム板

下する衝撃で、瞬間的に最大100dB以上の大きな騒音が発生する。そこで、ホッパーの内側全面に厚さ数cmのゴム板を貼付し、落下する骨材がホッパーに衝突する音を低減させているが、さらなる対策が望まれていた（写真5～7）。筆者らは、骨材受入時のホッパーの騒音とホッパーの鋼板の振動について計測を実施した。その結果、ホッパーの鋼板は骨材落下の衝撃により、太鼓の皮のように振動が持続し、そこから発生する放射音（700～2,000Hzが顕著）が、大きな騒音の要因であることを確認した（図6～7）。そこで、鋼板等の板状材料の放射音の低減に対して効果がある制振技術を、ダムの骨材受入ホッパーの騒音低減に活用することとした。

(2) 活用した既存技術の基本

制振技術は、板状の材料の表面に制振材料を面上に貼付し、揺れを抑制することで放射音を低減する仕組みである。身近な例では、乗用車のドアや新幹線の車体に使用され、ドア閉鎖時のバンという音や、走行する新幹線の車体の揺れによる客室内への放射音の低減に効果を發揮している。制振技術に使用される材料には、プチルゴム等のゴム系材料や、薄鋼板（厚さ1～3mm程度）の表面に樹脂を1mm程度塗布した複合タイプのもの等が使用されている。また、制振材料の板状の材料への取付けは、接着剤での貼付、これに加えて板状の材料に薄鋼板の敷き所を点付溶接する等で行われている。

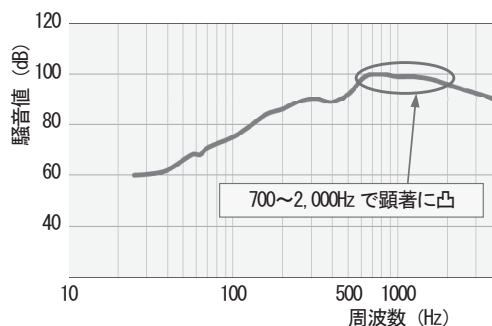


図6 骨材受入時のホッパーの騒音測定結果

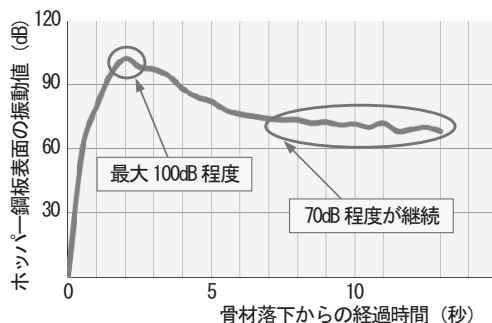


図7 骨材受入時のホッパー鋼板表面の振動測定結果

(3) 開発した技術の特徴

骨材受入ホッパーの外面（写真-5で視認できる側）に制振材料を貼付することで、図-7に示す大きく継続的な振動を抑制し、放射音の低減に有効と考えた。図-8に、制振材料の貼付による骨材受入ホッパーから発生する放射音の低減効果のイメージを示す。

制振技術の効果を発揮させるためには、放射音を低減したい材料に面的にしっかりと密着していることが重要である²⁾。骨材受入ホッパーの外面には、補強用のリブ、ジョイント部、電源や制御機材の配線等が多数存在する。また、ホッパーは複数の現場で繰返し使用されるため、鋼板の表面には小さな凹凸が発生している。既存の制振材料は、シート状の材料を平滑な面に貼付することを前提としているため、ホッパーへの施工は困難であり、面的な密着も確保しがたいと考えられた。また、鋼板表面には骨材の落下による大きな衝撃が、ダムの施工期間中の数年間にわたり繰返し加えられる。そのため、長期間にわたる高い接着性も必要と考えられた。

そこで、1) 複雑な形状にも施工が容易、2) 凹凸のある表面にも面的に密着、3) 長期間にわたる高い接着性が確保可能な材料として、下水道施設の防食材料に使用事例が多い、ポリウレタ樹脂（三井化学産資（株）製）を選定した。この材料は、下水道施設の表面に長期間にわたり密着している実績が豊富で、鋼板表面への接着性も高い。そして、ペンキを塗装するようにスプレーガンによる吹付けで施工できることから、複雑な形状へも施工が容易である。さらに、樹脂の塗布厚さの調整が可能なことから、騒音を低減したい対象の特性に合わせて塗布厚さを容易に変更できる。

この材料の基本性能の確認のため、予備実験を行った。実験では、施工対象と考えていたホッパーの鋼板と同じ厚さの試験用鋼板（厚さ 9mm、幅 50cm、高さ 70cm）の片側に、ポリウレタ樹脂を塗布し、塗布した反対側にハンマーで衝撃を与え、鋼板から発生する放射音を計測して効果を確認した。ポリウレタ樹脂の塗布厚さは、0mm

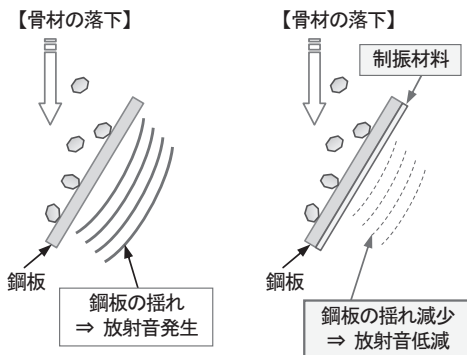


図-8 制振材料をホッパーに適用した効果のイメージ

（対策なし）、2mm、4mm、6mmの4種類とした。打撃に使用するハンマーは加振力が記録可能なインパルスハンマーを使用し、衝撃力を1回づつ確認しながらほぼ一定の打撃を実施した。実験の結果から、塗布厚さ2～6mmの全てで、高音域の1,000～4,000Hzの範囲全体で騒音値の低下が確認された。低下量は、塗布厚さ2mmで1dB程度、4mmと6mmはほぼ同等で3～5dB程度であった。

(4) 現場での効果確認結果

制振樹脂（ポリウレタ樹脂）の効果を、兵庫県朝来市で施工中の与布土ダムの骨材受入ホッパーで確認した。このダムでは、G1～G3の3種類の骨材を受け入れており、最大粒径は80mmである。制振樹脂の塗布厚さは、予備実験の結果と経済性を考慮して4mmとし、骨材受入ホッパーの全面に塗布した。そして、その効果を確認するため、骨材の運搬時に騒音の測定を実施した（写真-8）。図-9の計測結果に示すように、予備実験結果と同様に、高音域の1,000～4,000Hzの範囲全体で3～5dBの騒音値の低下が確認できた。なお、定性的な判断であるが、計測時の騒音は対策前に比較して不快感が減じて感じられた。これは、1,000～4,000Hzの範囲の騒音に対して人間の耳は感度が高いため、数値以上に低減効果を大きく感じられたためと思われる。

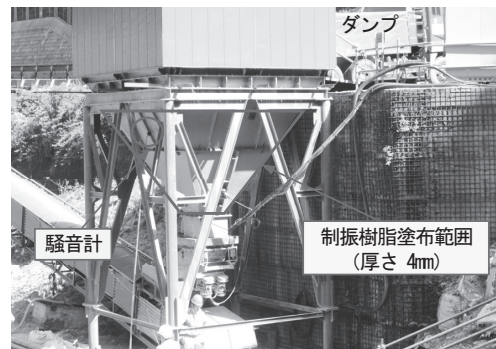


写真-8 制振樹脂塗布の効果確認の計測状況

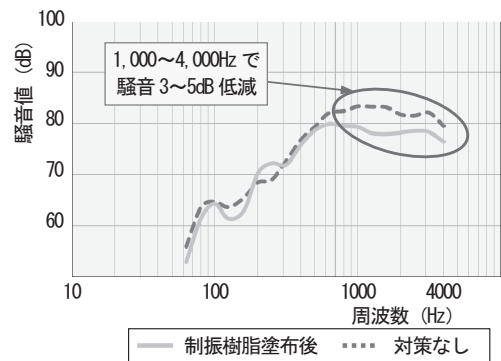


図-9 骨材受入ホッパーの騒音測定結果

4. 音声安全看板

(1) 開発目的

土木工事では、掘削した土砂等の運搬に、大量の工事車両が走行する。ダンプが現場から車道へ出入りする時には、歩道を横断することもあり、そして、その歩道が小中学生の通学路や、地域住民の重要な生活道路となっている場合も少なくない。そこで、安全対策として、交通誘導員の配置、安全看板の設置、車両の出場を警告するランプの設置等がなされている（写真-9）。しかし、安全看板や車両警告ランプ等は、歩行者が見落した場合に危険を認識できず、安全確保が図れない。そのため、歩行者への注意喚起や安全意識の向上に役立つ技術が求められていた。そこで、薄く軽量でシート状のため安全看板との一体化が容易で、雑踏の中でも聞き取りやすい音質である薄型軽量平面型スピーカー（ヤマハ（株）製 T L F スピーカー）を活用し、視覚と聴覚の両方で注意喚起が可能な音声安全看板を開発することとした。

(2) 活用した既存技術の基本

今回活用した薄型軽量平面型スピーカーの概要を写真-10に示す。このスピーカーは幅 70cm、高さ 100cm、厚さ 0.15cm のシート状で、重量 350g と非常に軽量である。通常のスピーカーは音が球面状に広がるが、このスピーカーは指向性が非常に強く、ほぼ正面のみにビーム状に広がり、シートの両面に同時に出力可能である。音声データを保存した SD カードや外付の音声再生プレーヤーを専用アンプに差し込むことで、容易にアナウンス内容を



写真-9 工事車両出入口での安全対策事例

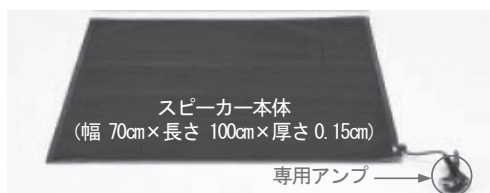


写真-10 薄型軽量平面型スピーカーの概要

を変更できる。これらの特性を生かし、ポスターの背面にこのスピーカーをセットし、音が出るポスターとして、駅構内や店舗等で新商品の宣伝に多数使用されている。

(3) 開発した技術の特徴

このスピーカーは、屋内使用を前提に製作されており、これまで屋外での使用実績はなかった。土木現場で数カ月から数年使用する場合、雨水による電気系統の故障、強風による破損の懸念があった。そこで、スピーカーを風雨から防護できる薄鋼板製の函体に収納し、スピーカーの前面に設置するポスターの材質は、撥水性に優れ、強風で容易に破損しない素材を使用することとした。ポスターは、背面からのスピーカーの音を阻害することなく透過させる必要がある。そのため、試作品を複数作製し、音の透過性に優れ、音質の低下が少ない素材を選定した。今回開発した音声安全看板の内部構造の概要を写真-11に、現場に設置した状況を写真-12に示す。

(4) 現場での効果確認結果

今回開発した音声安全看板を、和歌山県西牟婁郡白浜町で建設中の十九渕（つづらぶち）第一トンネルに適用した。この工事では、トンネル掘削で発生する土砂を国道42号を利用してダンプで運搬している。ダンプが現場から国道42号へ出入りする時には、小中学生の通学路となっている歩道を横断する。そのため、安全対策として写真-9に示す対策がなされていたが、低学年もいる小学

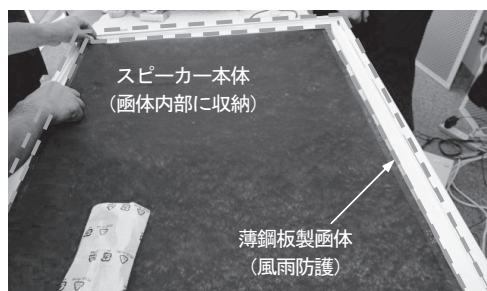


写真-11 音声安全看板の内部構造の概要



写真-12 音声安全看板の現場設置状況



写真-13 注意喚起アナウンスのイメージ

生のためにさらなる安全対策が望まれていた。

そこで、視覚と聴覚の両方に訴える音声安全看板を設置することで、小学生へ強く注意喚起し、通学時の安全を向上させることとした。注意喚起の対象が主に小学生のため、アナウンス内容はBGMと注意喚起のセリフの両方で構成し、聴覚へ強く訴えることとした。そして、注意喚起の文言は平易な表現とし、工事車両出入口がすぐ近くにあることを直ちに理解できるようにした。写真-13に注意喚起アナウンスのイメージを示す。

現場での安全対策の実施効果については、これまで定量的な評価がほとんどなされていない。交通標識等の設置効果については、その設置前後で車両の動きの差を定点観測し、たとえば減速する車両の台数の増減等をもとに定量的に評価されている。そこで、音声安全看板の設置前後の小学生の行動を定点観測し、工事車両出入口付近での行動の差をもとに定量評価することとした。

定点観測は、音声安全看板の設置前、設置初日、設置3日後、設置1カ月後に、朝夕の通学時間帯において各2時間ビデオ撮影し、画像により小学生の行動を分析した。なお、撮影方向は小学生の行動を確認しやすいように、登校時間帯、下校時間帯でそれぞれ最適な位置とした(写真-14)。画像分析の結果、工事車両出入口付近で、工事現場の方向に視線を向けて安全を確認する行動に差が生じていた。そこで、視線を向けて安全確認する行動の増減により評価することとした。

音声安全看板設置前の現場へ注意を払わずにそのまま通過する事例を写真-15に、設置後の現場へ視線を向ける安全確認行動の事例を写真-16に示す。また、各時点で安全確認行動をする小学生の割合(=安全確認行動する小学生の人数/通過した人数の合計)を図-10に示す。図-10に示すように、音声安全看板の設置前には、安全確認行動する小学生は50%であった。設置初日は、90%以上とほとんどの小学生の行動に変化が見られた。3日後は78%、1カ月後は67%であった。時間の経過とともに比率は低下したものの、設置前に比べ1カ月後の安全確認行動の割合は20%弱向上しており、小学生の安全確



写真-14 定点観測の画像イメージ(登校時)



写真-15 音声安全看板設置前の小学生の行動



写真-16 音声安全看板設置後の小学生の行動

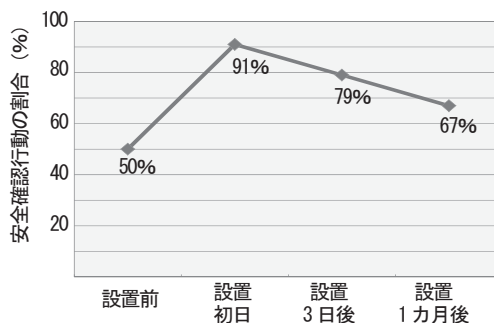


図-10 安全確認行動の時系列変化

認する意識が定着したと考えられる。今回はポスターの図柄、アナウンス内容は一定であったが、例えば一定期間で変更することで、小学生の関心が再度高まり、安全確認行動をする割合を高い状態で維持できると思われる。

5. まとめ

(1) 逆位相騒音低減システム (Active Noise Control)

ダンプ走行時の低音域騒音の対策として、低音域の騒音低減効果が高い逆位相騒音低減システム (Active Noise Control) を活用したシステムを開発した。

開発したシステムは、騒音を検知するセンサーマイクを活用してダンプの位置を自動的に検出し、ダンプが民家の前を走行する時だけ逆位相音を出力できる。そのため、不要時には逆位相音がせず環境負荷を低減できる。

現場での計測で、50～200Hzの範囲で最大10dBの騒音低減効果が確認された。ダンプの走行方向が往路側・復路側の両方で、逆位相音を自動的に出力・停止するシステムが確実に作動することも確認できた。

(2) 制振樹脂

ダム工事の骨材受入ホッパーは、骨材受入時に放射音により大きな騒音が発生する。この騒音対策として、放射音の低減に有効な制振技術の考え方をを用い、ホッパー全面に樹脂を塗布して放射音を低減する方法を開発した。

ホッパーの複雑な形状に施工が容易で、凹凸のある表面にも面的に密着し、長期間にわたり高い接着性が確保可能な材料として、下水道の防食に多用されるポリウレタ樹脂を選定した。制振樹脂を塗布した試験用鋼板による予備実験により基本性能を確認し、現場での塗布厚さを4mmと設定した。

ホッパーの全面に制振樹脂を塗布後、骨材受入時の騒音を計測した結果、高音域の1,000～4,000Hzの範囲全体にわたり、3～5dBの騒音値の低下が確認された。

(3) 音声安全看板

現場に設置する安全看板の注意喚起効果を向上させるため、薄く軽量でシート状のため安全看板との一体化が容易で、雑踏の中でも聞き取りやすい音質の薄型軽量平面型スピーカーを活用した音声安全看板を開発した。

薄鋼板製の函体内にスピーカーを収納し、前面に設置するポスターに撥水性、強度、音の透過性に優れた素材を使用することで、はじめて屋外使用を可能とした。

交通施設等の設置効果を定量評価する手法を参考に、ビデオ撮影した画像により、音声安全看板の設置前後で小学生の安全確認行動を分析した。その結果、安全確認する小学生の割合が、設置前で50%、直後で91%、1カ月後も67%となり、安全を確認する意識が高まり、定着したと考えられた。

謝辞：今回の技術開発では、多くの方々に協力いただいた。与布土ダム、十九淵トンネルの各現場事務所の関係者には、現場での準備作業、データ収集等で協力いただいた。また、三井化学産資（株）、ヤマハ（株）の関係者には、予備試験、試作品の製作、技術的なアドバイス等の多くの協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 宮瀬文裕，中牟田直昭：土木工事現場での環境対策事例－騒音・粉塵・交通渋滞－，第40回環境システム研究論文発表会 講演集，pp121-126，2012.10
- 2) 日本音響材料協会編：騒音・振動対策ハンドブック，pp.334，358-3599，1982。

(2013. 7. 19 受付)

SPECIFIC EXAMPLES OF ENVIRONMENTAL MEASURES AT CONSTRUCTION SITES - NEW USE OF ACOUSTIC TECHNOLOGY (NOISE, TRAFFIC SAFETY) -

Fumihiro Miyase, Arihiro Makino, Tasuku Iwahashi, Masaki Tanigawa, Masatoshi Uno,
Takuya Fujiyoshi, Kazunao Ide, Yasuaki Takano, Youichirou Hanamura

A large-scale civil engineering works have a significant influence on the surrounding environment. For instance, many construction vehicles are used to transport the aggregate for concrete dam construction. Since heavy construction vehicles are used in public works, prevention of traffic accidents and noise is needed. Additionally high requirements for environmental preservation and security are desired from both clients and neighborhood residents with a great awareness of environment and safety.

For this reason, construction site make various efforts for environmental preservation and security. This paper introduces the following new attempts implemented in the civil engineering works. 1) Control of construction vehicles noise with complaints, 2) Traffic safety of construction vehicles. For noise control, Active Noise Control System, having an effect to reduce low tone range, is applied to construction temporary road. In addition, damping plastics is applied to the receiving hopper of aggregate unloaded repeatedly more than a hundred times a day from dump truck. For traffic safety, Voice Safety Signboards with directional speaker are applied to heighten passengers' recognition around the construction site.