

放射音対策のための複合減衰材料の開発

研究代表者 研 究 員 平野 廣和 (中央大学総合政策学部)
共同研究者 研 究 員 檜山 和男 (中央大学理工学部土木工学科)
共同研究者 客員研究員 連 重俊 (三井造船鉄構工事㈱)
共同研究者 客員研究員 丸岡 晃 (八戸工業高等専門学校)

1 はじめに

阪神・淡路大震災以降、鋼構造橋梁等の支承が耐震性の向上のため、鋼製からゴム支承に取替えられてきた。これにより構造系の変化が生じ、取替え前は気にならなかった騒音・振動・疲労などの諸問題が発生しつつある。代表的な問題としては、付属構造物等の変形や破損、低周波騒音の発生などである。この振動は、大型車両が橋梁の伸縮継手部を通過した時、車両のタイヤが鋼製の伸縮継手を叩くことにより衝撃振動が発生し、これが固体伝搬振動となり橋梁本体へ伝搬し、主に主桁や横桁の腹板等の比較的板厚が薄くかつ桁高の高い部分で放射音として生じている。この卓越振動数はおおよそ 50Hz～400Hz の範囲であり、従来の騒音振動対策の主として取り上げられてきた周波数帯より比較的低い周波数帯である。またこの騒音振動は、人間の可聴音の下限値に近い音域であり、沿道住民には「太鼓の音」・「遠雷の音」や「地震の地鳴り」の様に聞こえる不気味な放射音となっている。この放射音を減少させるためには、発生源であるジョイント部と舗装との不陸を修正するなどの対策が施されてはいるが、構造的にも完全に打ち消すことは現状の技術では困難となっている。

著者らはこのように比較的低い周波域での固体伝搬振動に関して、振動している部材に複合材料の制振板を付加することにより、振動エネルギーを減衰させるメカニズムを持つパッシブ型減衰システムを開発してきた^{1), 2)}。本報では、まずその開発過程を紹介することにする。次に、本研究において開発した減衰システムを実機の非合成単純 2 箱桁橋梁に試験施工する機会を得たので、この成果に関しても報告するものである。

2 低減対策工法の比較

低減工法としては、表 1 の(A)案～(C)案に示すような 3 種類の案が考えられる。それぞれに関して、音響・振動の面及び施工の面からそれぞれ評価を行った。その結果(A)案、(B)案は剛性または質量を増加するものであり、共振部材の固有振動数を移動させるに過ぎず、根本的な対策にはならないと考えられる。また、施工面で

も足場の組立解体、養生・防食対策など施工期間の長期化は避けられない。これに対して(C)案は、制振板によりエネルギーそのものを吸収してしまう方法であり、パッシブ型の振動制御方法に属する。桁と鉄板で挟まれた弾性材料が一種の粘性ダンパーの役割をして、減衰材を付加したことで同等以上の効果が期待できる。また(C)案の特徴は、事前に各種の付加材料の音響特性を把握した上で、現地の振動レベルの測定値から、材料をチューニングして振動エネルギーを吸収することであり、桁本体の振動に伴う低周波空気振動に対してもその効果は十分に期待できる。現地での作業は工場製作した制振板を取り付けるだけの簡単な作業であり短期間の現場施工を可能とした。(B)案と比較すると材料費がコンクリートに比べて高価だが、仮設備、作業性から総合的に判断するとコスト面では両者大差ないと予想される。

3 室内実験

防音・制振材料として一般的な材料は、ゴム板であり、例えば鉄道軌道部分の防音・地盤への振動伝搬の遮断、建物内のダクト部分の防音等に広く採用されている。さらに、鉛板との複合化により、低周波域から高周波域までの広い範囲での防音・制振にも用いられている。本研究においては、ブチル系のゴム板(以下、ゴム)を中心として、厚さを 10mm, 20mm, 50mm, と変化させ、これを基準板である試験板に厚さ 3.2mm の鉄板に接着させて取り付け、片面装着、両面装着のそれぞれを基本ケースとした。さらに、鉛板を追加することにより材料の複合化を計り、効果の向上が計られるか否かに関しても確認の試験を行った。さらに比較のために海外の高速鉄道軌道の枕木やレール用の防振材として採用されている硬質発泡系のウレタン材(以下、発泡ウレタン)に関しても試験を行った。

ところで、新設段階からの防音・防振対策を行う場合は、設計段階から添接位置を変更するなどの装着位置の検討が可能であるので、ゴム板やウレタン材を装着することは容易である。開発の目的の一つは、既存の橋梁構造物へ対応可能な防音・防振材を見い出すことである。

既存の橋梁桁の場合、添接などの表面の不陸が必ず存在している。不陸の部分での効果と施工性の向上のために、現場で注入できる材料の開発・検討も不可欠である。ここでは、広く使われている2種類のシール材の検討を行った。一つは、非排水型鋼製伸縮装置用の弾性シール材であり、水酸基末端ポリブタジエンに硬化剤としてMDI系プレポリマーを100:8の割合で混合したものである(通称ハヤシール、以下、シール材)。2つ目は、斜張橋ケーブル定着部のパフファ材として用いられている材料であり、水酸基末端ポリブタジエンに硬化剤としてMDI系プレポリマーを100:12.4の割合で混合したものである(以下、パフファ材)。

選定した防音・制振材料の特性を把握するために、室内で防音効果測定実験を行った。厚さ30mmの定板上

にH型鋼で門型構造を組み、これに横桁の腹板に用いることの多い厚さ9mmで、縦1800mm、横2000mmの鋼板を水平材から吊り下げた。門型構造物には振動が伝播しないように防振材を取り付けてある。この鋼板に2枚の縦1000mm、横500mm、厚さ3.2mmの鉄板と制振材を合わせて取り付けて、ボルト締めして密着させたものを試験体とした。制振材を付けない状態の鋼板を防音効果算出の基準としている。

振動放射音を正確に把握するために、音響インテンシティ法を採用した。この方法により試験体から垂直方向に放射される成分を求めた。放射音の測定面は加振側の面とし、測定位置は試料面から5cm離れた位置で1試料につき4点測定し、この4点の測点の平均値を求めた。この実験により測定された値から、1/3オクターブ

表1 低減工法の比較

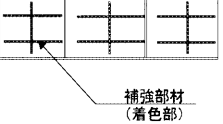
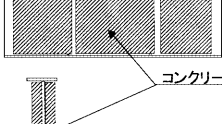
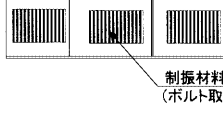
	A案 共振部材の補剛材付加 による剛性増加	B案 共振部材のコンクリート による剛性増加	C案 共振部材への制振材付加 による振動吸収
《施工概要》	水平および垂直補剛材を付加することによって共振板の剛度増加をはかり、振動数をシフトする。 	共振部材をコンクリートにより巻立て振動を抑制する。 	共振部材に制振材を付加することにより、エネルギーを吸収する。 
《音響的評価》	・周波数特性が変化するために根拠付けが困難(合致確立低い) ・剛度増加は振動吸収効果なし ・基本的に高次に振動数が移行するために音質の変化はあるが音圧の低下は期待できない。	・コンクリートの質量により固有振動数の大幅な移行、減衰が期待できる。	・材料の音響特性把握が事前に可能 ・試験施工によりチューニングが可能 ・振動レベルにより複合使用が可能
《施工的评价》	・溶接、ボルトなどの取付方法での施工性に問題がある。 ・工事用足場設置が不可欠 ・施工期間が長期(3週間)になる。 ・足場作業、塗装作業での交通規制が必要になる。	・コンクリート型枠、足場が必要 ・交通規制が必要になる。 ・塗装剥離作業が困難 ・振動により硬化までに隙間が発生し部分的ではあるが欠陥を生じる。 ・アルカリ反応により部材が腐食され構造物に問題が生じる。	・軽量部材のために交通規制は不要 ・足場組立、塗装作業は必要なし。 ・施工期間が短い(1週間)
《コスト評価》	△	◎	○
《総合評価》	△	○	◎

表2 制振材料の減衰性能比較

	20mm厚ゴム板+鉄板	50mm厚ゴム板+鉄板	40mm厚パフファ材+鉄板	40mm厚シール材+鉄板	40mm厚発泡ウレタン+鉄板
《材料概要》	CRゴム(クロロブレンゴム)+3.2mm鉄板張、またはフチールゴム(軟質)の材料により、発生場所に工場製作した部材をボルトなどにより取付ける。	左記同様の材料(厚50mm)を製作し発生場所に取り付ける。	斜張橋ケーブル制振材料として実績のある材料を左記同様に製作して発生場所に取り付ける。	伸縮装置の非排水タイプに実績があるが制振材料としての実績なし。	海外での鉄道床組の運営には実績はあるが国内実績なし。
《吸音性評価》	30~40Hz帯での減衰効果が問題	左記同様ではあるが全域に減衰大	30、60~80Hz帯では効果大	60~100Hz帯では効果大	100Hz帯以上の周波数では効果小
《減衰量評価》	片面設置(鉛板なし) -6 dB 片面設置(") -6 " " 片面設置(鉛板あり) -7 " " 片面設置(") -9 " "	片面設置(鉛板なし) -8 dB 片面設置(") -10 " " 片面設置(鉛板あり) -10 " " 片面設置(") -11 " "	片面設置(鉛板なし) -7 dB 片面設置(") -7 " " 片面設置(鉛板あり) -8 " " 片面設置(") -9 " "	片面設置(鉛板なし) -5 dB 片面設置(") -5 " " 片面設置(鉛板あり) -8 " " 片面設置(") -9 " "	片面設置(鉛板なし) -7 dB 片面設置(") -10 " " 片面設置(鉛板あり) -7 " " 片面設置(") -10 " "
《両面効果》	0 dB	2 dB	0 dB	0 dB	3 dB
《鉛付加効果》	1 dB(片面) 3 dB(両面)	2 dB(片面) 1 dB(両面)	1 dB(片面) 2 dB(両面)	3 dB(片面) 4 dB(両面)	0 dB
《平面施工性》	◎	▲	▲	△	○
《不陸対応》	▲	△(軟質材可能)	△	○(現場施工可能)	△(軟質材可能)
《取付施工性》	◎	▲	△	○	△
《総合評価》	○	▲	△	○	△

バンドの中心周波数毎に基準板での計測値（ケース 0）を引いた値を音圧レベル差とし、これを放射音の減衰値とした。基準板からの減衰が無ければ 0dB となる。

以上の手順に従って各制振材料毎に減衰量を求めた結果を表 2 の減衰値評価に示す。この表には各制振材に関する吸音性評価、両面・片面施工の効果、鉛付加効果、ならびに施工性に関する平面施工性、不陸対応、取付施工性を併せて示す。表 2 に示す結果から、人間の可聴範囲の低周波域で効果が期待でき、かつ施工性に優れているのは、不陸を有しない面ではゴム 20mm、不陸を有する面ではシール材である。この 2 つを併用して採用することが適していることがわかった。

4 試験施工の概要

従来の道路を対象とした防音対策工事は、一般的に音の伝搬経路での伝搬低減が施工されてきた。代表例として遮音壁、ノイズリデュース等が挙げられる。ここで対象としている騒音は、主にタイヤが路面上に接地する際に生じるタイヤと路面間の騒音と車両の吸排気時に生じる吸排気系騒音である。これらの周波数帯は 1/3 オクターブバンド周波数分析によると、中心周波数で 630 Hz～1.25KHz 付近が卓越する騒音である。この周波数帯は、図 1 に示す今回試験施工した橋梁の騒音特性にも現れている。一方、この橋梁には、従来の騒音特性とは傾向が異なり、低い周波数域である 50～80Hz と 250～400Hz の周波数域が卓越している。これが、太鼓を叩くような衝撃音と同等なものとなっている。この橋梁から発生する騒音は、従来の車両の走行によって生じるものと異なる騒音であり、従来の防音対策施工では明確な効果を期待することが難しい。

そこで、著者らは本試験施工の橋梁へは、騒音の発生源での対策である音源対策技術が必要であると判断した。まず、基礎調査により、発生源・音源は伸縮継手周辺の部材であることを特定した。

実際の試験施工では、施工時に容易に組み立てられるように制振材間の取り合いを考慮した図 2 に示すようなステンレス板とブチル系合成ゴムからなるパッシブ型の制振システムを制作した。これを事前調査で直接振動していると判断した部材に貼り付け、スタッドボルトで固定する対策方法を採用した。図 3 に端横桁に施工した例を示す。本制振システムは、貼り付けた複合材料そのもので振動エネルギーを吸収するものである。桁とステンレス板で挟まれた弾性材料であるブチル系合成ゴムが、一種の粘性ダンパーの役割となり、減衰を付加した

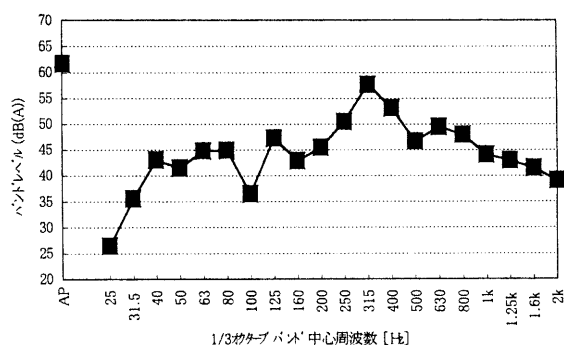


図 1 施工した橋梁の騒音特性

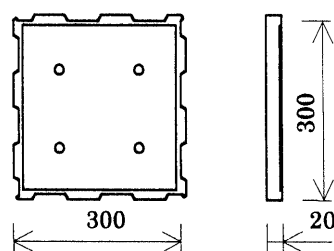


図 2 複合材料制振システム

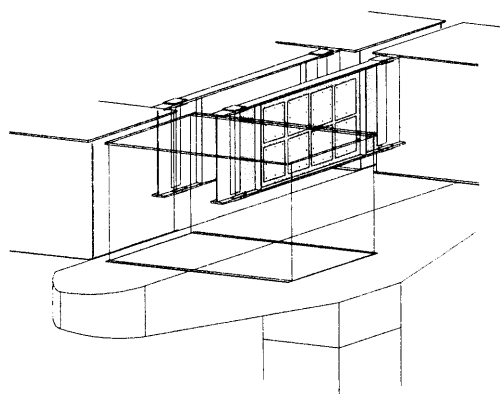
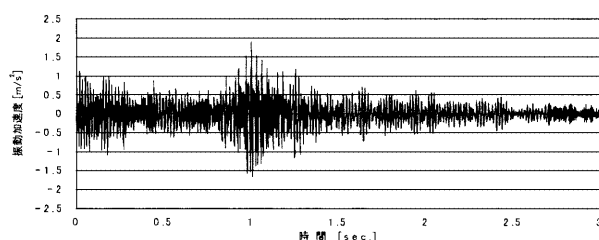


図 3 端横桁への施工例

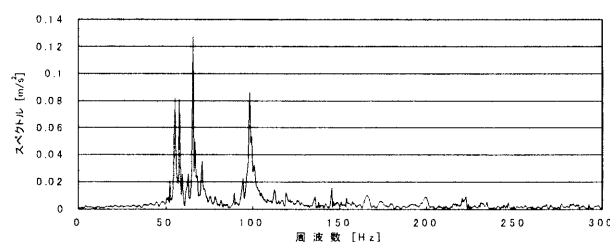
ことと等価になる。また、ステンレス材は、桁からの振動を蹴り返す効果があり、減衰をさらに高める役割を果たしている。なお、本制振システムの設計に際しては、事前に現地での振動特性を把握した上で、最適な弾性材料のチューニングを実施している。また、現地での施工作業は、制振システムを取り付けるためのスタッドボルトの打拙、工場製作された制振システムを取り付けるだけの簡単な作業だけであるので、短期間の現場施工を可能とした。

5 減衰効果の確認

今回試験的に施工をした橋梁構造は非合成単純 2 箱桁橋梁である。この橋梁の箱桁ウェブ面および横桁に本制振対策を実施し、196kN (20tf) の重量の試験車両を 80km/h で走行させた。その際の箱桁ウェブ面に取り付

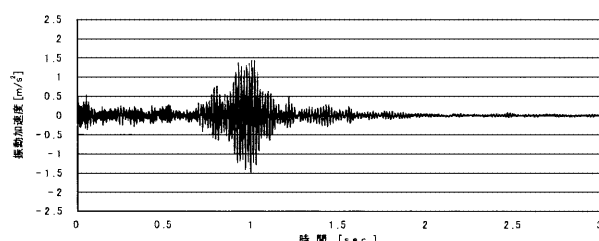


(a) 振動加速度の時刻歴

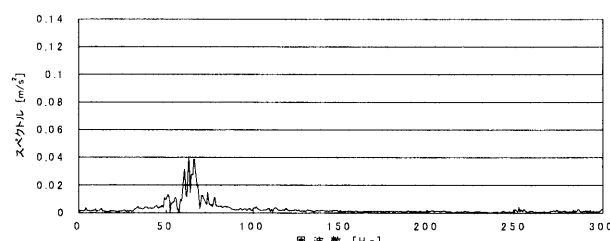


(b) スペクトル解析結果

図4 対策前の振動加速度の時刻歴とスペクトル解析の結果



(a) 振動加速度の時刻歴



(b) スペクトル解析結果

図5 対策後の振動加速度の時刻歴とスペクトル解析の結果

けた振動加速度計の出力により、対策前後での振動加速度を評価した。図4(a)に、対策前の振動加速度の時刻歴を示す。図4(a)での1秒後の振動加速度のピークは、試験車両が鋼製ジョイント部を通過した際の衝撃のピークを示している。この衝撃のピークから2秒間の時刻歴をFFT解析した結果が図4(b)（片側パワースペクトル÷時間長）である。図4(b)に示した箱桁ウェブ面のFFT解析結果では、図1に示した騒音特性で確認された50～80Hz帯の成分が卓越している。

図5(a)、(b)に対策後の振動加速度の時刻歴とFFT解析結果を示す。図5(a)の加速度時刻歴より、対策前（図4(a)）と比べ、衝撃ピーク後の振動減衰が明らかに早いことが分かる。図5(b)の対策後のスペクトル解析結果を見ると、騒音特性（図1）に含まれる卓越周波数帯の振動成分が明らかに低減している。よって、本制振対策を行ったことから、この対策区間で確認された太鼓を叩くような固体伝搬音に関しては、実感として良好な低減効果を得ることができた。

6 終わりに

騒音・振動等の問題は、ゴム支承を採用した鋼製橋梁では避けて通れない問題となりつつある。発生源を改善することはもとより、発生している部材に制振対策を施すことにより、実感として騒音・振動を低減させること、さらには構造全体のライフサイクルを延ばすためにも、今後色々な角度からの検討が望まれる。本報で提案した方法が、遮音壁等の既存の対策との組み合わせによ

り、鋼製橋梁の騒音・振動対策の一助となれば幸いである。

なお、本研究で得られた成果は、（学）中央大学と三井造船（株）グループとで共同で特許出願中である。

謝 辞

試験施工を行う機会を与えてくれた、阪神高速道路公団大阪建設局の関係各位に心から感謝の意を表す。また、開発段階から色々と助言を頂いた三井造船（株）鉄構建設事業本部 井上浩男氏、佐野健一氏、渡邊茂氏にも感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 小田，連，平野，氏原：放射音対策のための減衰材料の開発，土木学会第52回年次学術講演会第I部門，1997
- 2) 渡邊，飯村，井上，佐野：構造音低減を目的とした高効率な制振材の取り付け配置について，土木学会第54回年次学術講演会第VII部門，1999