

## 鋼橋の低周波域騒音環境対策システムの開発と試験施工\*

平野廣和<sup>†</sup>, 連 重俊<sup>‡</sup>

# THE DEVELOPMENT OF A METHOD TO REDUCE LOW-FREQUENCY NOISE IN STEEL GIRDERS

### abstract

We developed a complex material to attenuate low frequency noise from 30Hz to 200Hz that occurs in steel girders. This method permitted us to reduce noise in the frequencies that affect steel girders, particularly in experimental construction project. The method reduces the time required for project completion, as well as construction costs. This paper describes the development process and techniques of the new method.

*Key Words* : low frequency noise, complex material, experimental construction

## 1 はじめに

大型車両が橋梁の伸縮継手部を通過する時、衝撃振動が発生して固体振動となり橋梁本体へ伝搬する。これが主桁や横桁の腹板等比較的板厚が薄くかつ桁高の高い部分で空気振動に置き換えられる結果、放射音として生じ騒音となる。この音の卓越振動数帯は、従来の騒音対策として取り上げられてきた周波数帯より比較的低い領域で人間の可聴音下限界に近い音域である。

一般に騒音を減少させるためには、発生源である伸縮継手部乗り越し衝撃エネルギーを減少させることになる。まずは伸縮継手部での舗装不陸を修正することであるが、既存の鋼製伸縮継手構造においてこれを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。他に遮音壁による直接放射音の拡散、排水性舗装による走行音低減、路下交通の騒音反射を防止する裏面吸音板による拡散防止、さらに桁連続化による発生音の低減が挙げられる。これらの対策で高音域騒音は低減されるが、逆に大型車輛による騒音が間欠的になるなどの現象のため低音域が相対的に目立つようになる。一方、振動部材の振動特性を変える方法としては、桁本体に補剛材を取り付けて剛性を上げたり、コンクリートを付加して重量を増やす方法がある。しかし、事前に振動特性の調査を十分に行わないと、逆に他の振動を助長してしまう可能性もある。さらに、これらの対策には足場の組立解体、養生・防食対策、施工期間の長期化、重機使用のための交通規制等、二次的な問題も生じることになる。よって、橋梁振動から発生する低音域の騒音に対しては、有効な対策が見られないのが現状である。

このような背景から、著者らは新たな騒音対策手法 [1] の開発を試みた。まず制振材料の基本的な材料特性を把握するために要素試験 [2] を実施し、この過程で部材振動の制御が騒音低減に直接関与することを確認した。次に、この試験結果に基づいて、低音域での固体伝搬振動に関して、振動している橋体部材にゴムと鋼板からなる複合材料の制振材を直接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 [2] ~ [4] を開発した。ここで開発した減衰システムが、写真 1 に示すように 2000 年に阪神高速道路公団大阪池田線延伸部の非合成単純 2 箱桁橋梁に採用され、試験施工 [4], [5] をする機会を得た。ここにおいて、鋼橋の構造物振動に伴い発生する 30 ~ 200Hz の比較的低い騒音の低減効果と振動減衰定数の変

\* 土木学会論文集第 VI 部門で関連論文発表済 [1]

<sup>†</sup> 総合政策学部 教授

<sup>‡</sup> 三井造船 (株) 鉄構・物流事業本部本部長補佐

化による音色変化に関し、期待通りの成果が得られた。これにより、部材振動を制御することが低音域騒音対策に有効であることが実証された。また、施工の簡素化による工期短縮、工費低減をも実現することができた。

本論文では、新しく開発した制振・騒音低減システムが、従来困難とされてきた橋梁構造音の低音域騒音対策に有効であることがわかったので、要素試験から実橋での効果確認試験までの一連の成果を論ずるものである。

## 2 開発の概要

従来の研究において騒音の発生メカニズムを検討する場合、振動数帯の違いから騒音と橋体の振動とはそれぞれ別の扱いをされることが多かった。しかし、本研究では、比較的低い周波数域の騒音を扱うことから、騒音の発生メカニズムと振動が密接に関連することに着目し、騒音と振動を同時に扱うことができたとした。それは、何らかの衝撃エネルギーが発生し、これが橋梁の構造振動として橋体に伝搬、桁の部分振動が発生していることによる。さらに、これが空気振動となり騒音へ置き換わっている。そこで、騒音の発生源である橋体の部材振動を制御できれば、騒音を低減させることが可能と判断した。

さて、道路橋で問題となる騒音は、騒音源から解明すると伝搬ルートは大きく次の3種類に大別することができる。

- ① 舗装面とタイヤの摩擦による直接放射
- ② 走行振動床版を通過する放射音
- ③ 橋梁構成部材伝播放射

伝搬放射が発生していることは既に知られており、①、②を対象とした防音対策工事として、一般的に音の放射経路での低減策が施工されてきた。代表例として遮音壁、ノイズリデュース等 [7]～[9] が挙げられる。ここでの対象としている騒音は、①、②に示す様に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 630Hz～1.25KHz 付近が卓越するような騒音である。この周波数帯は、今回試験施工した橋梁での 196kN (20tf) 重量の試験車両による騒音特性にも現れている。代表的な例として下り車線 60km/h 走行時の官民境界での騒音特性計測結果を図 1 に示す。

一方、今回試験施工した橋梁では、従来の騒音特性とは傾向が異なり、比較的低い周波数域である 40～80Hz と 125～400Hz の周波数帯が卓越している。これが③であり、太鼓を叩くような衝撃音と同等なもので、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る。従来の防音対策施工では有効な騒音低減効果を期待することが難しいことがわかる。

以上の様な見地から、新しい騒音対策として振動エネルギーを減衰させるメカニズムを持つ写真 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複合減衰材制振システム [5], [6] (MTC ダン

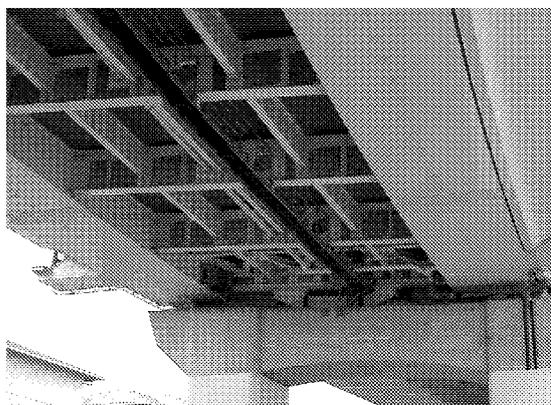


写真 1 試験施工現場

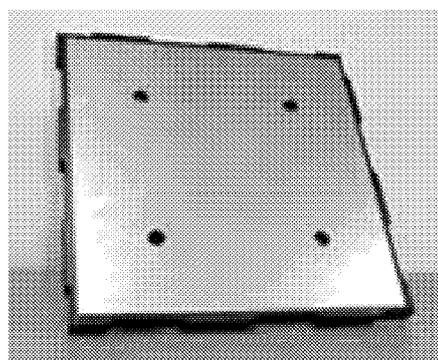


写真 2 パッシブ型複合減衰材  
(MTC ダンパー：おとなし君)

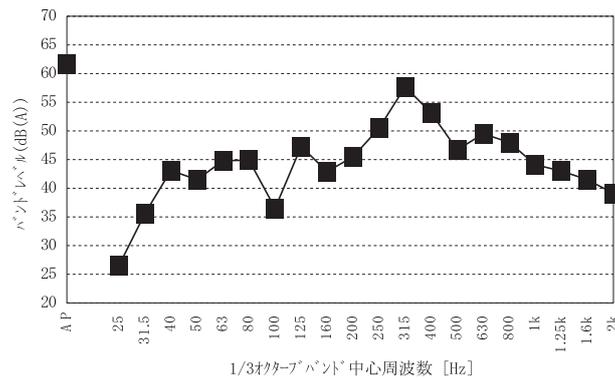


図 1 施工した橋梁の騒音特性

パー：おとなし君)を振動している部材に直接貼り付け、スタッドボルトで固定する対策方法を提案した。

本制振材の特徴は、貼り付けた複合材料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として機能し、減衰を付加したことで等価になる。また、ステンレス材は、桁からの振動を蹴り返す効果もあり、減衰定数を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、最適な弾性材料の配置などチューニングを実施している。また、現地での作業は、制振システムを取り付けるためのスタッドボルトの打設、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短期間の現場施工を可能とした。

### 3 基本構想の比較

#### (1) 抑制の原理

横桁ウェブや主桁ウェブに代表される比較的板厚の薄い部材が面外方向に揺れているとすれば、これを抑制するにはその揺れと反対側に外力を与えれば良いことになる。変形の間中点付近にこの揺れに抵抗する素材を貼り付け、反力を得ればエネルギーは減衰する。しかし、その材料だけで抑制を試みると、相当な質量と十分な硬度を有していないと効果が期待できない。これは、従来工法の一つである RC 巻き立て工法と同様なことである。一方、効果的かつ軽量化するためには振動に追従して逆方向の起振を与えることが必要であり、そのためには適度な弾性力と剛性を有する材料を組み合わせる。さらに、付加する部材を振動部材の中立軸から離して固定すれば、その部分の断面係数は 2 乗に、断面二次モーメントは 3 乗に比例するので応力レベルは低減可能である。また位相に関しては、弾性体部分での伝播遅れを起こさせて反射するため減衰定数の増加が期待できる。ここで部材を付加する位置は、形状面からも卓越モードからも大きな面外変位が生じる部位が好ましく、さらに部材振動から空気振動としての騒音に置換されていることから、部材表面を覆うことによってこの置換を妨げることで効果も同時に得られる。このような考えを基に、部材に弾性材と剛性を有する材料とを組み合わせた複合材の制振材を付加することで減衰遮音効果を期待することになる。

#### (2) 低減工法の比較

低減工法としては、表 1 の (A), (B), (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させるものであり、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になり、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。(C)案を(B)案と比較すると、材料費がコンクリートに比して高価であるが、仮設備、作業性、さらに設置面積および手法の柔軟性から総合的に有利と判断する。

#### 4 要素試験

開発段階において、基礎機能の確認から応用試験まで、3種類の要素試験を実施した。要素試験Iでは、素材の選定および基礎機能の把握を目的として実施した。要素試験IIでは、基礎機能の詳細確認および適正配置設計を無響室で、さらに要素試験IIIとして広範囲な周波数帯への適用のための連結効果など応用機能試験を同じ無響室で実施した。

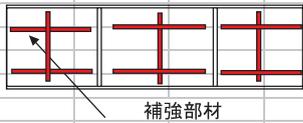
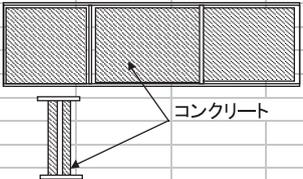
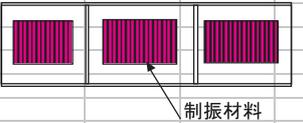
##### (1) 要素試験I

###### 1) 素材の設定

制振材料として一般的な材料はゴム板であり、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制振にも用いられている。本開発では材料の入手性も考慮し、規格品であるブチル系のゴム板(以下、ゴム)を中心とした。ここで厚さを10mm, 20mm, 50mmと変化させ、これを基準板である試験鋼板に、厚さ3.2mmの鉄板とともに接着させたものを取り付け、片面装着、両面装着のそれぞれを基本ケースとした。なお、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ついても確認の試験を行った。また、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)についても試験を行った。

一方、橋梁の新設段階からの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制振材を見出すことである。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

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。 	共振部材に制振板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》	<ul style="list-style-type: none"> <li>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)</li> <li>剛度増加は振動吸収効果なし</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料の音響特性把握が事前に可能</li> <li>試験施工によりチューニングが可能</li> <li>振動レベルにより複合使用が可能</li> </ul>
《施工的評価》	<ul style="list-style-type: none"> <li>溶接、ボルトなどの取付方法での施工性に問題がある。</li> <li>工事用足場設置が不可欠</li> <li>施工期間が長期(3週間)になる。</li> <li>足場作業、塗装作業での交通規制が必要になる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート型枠、足場が必要</li> <li>交通規制が必要になる。</li> <li>塗装剥離作業が困難</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>軽量部材のために交通規制は不要</li> <li>足場組立、塗装作業は必要なし。</li> <li>施工期間が短い(1週間)</li> </ul>
《コスト評価》	△	◎	○
《総合評価》	△	○	◎

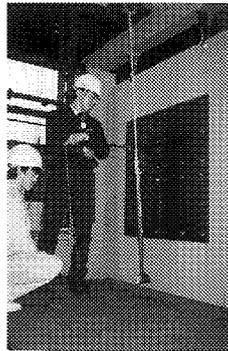


写真 3 基本機能確認実験状況

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（以下、シール材）。二つ目は、斜張橋ケーブル定着部のバッ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、バッファ材）。

## 2) 基礎機能試験

選定した素材の特性を把握するために、室内で制振材の減衰性能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できる厚さ 9mm の鋼材（縦 1,800mm、横 2,000mm）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。これに 2 枚の縦 1,000mm、横 500mm、厚さ 2.3mm の鉄板と制振ゴム材を貼り付けた制振材をボルト締めして密着させて試験体とした。制振材を付けない状態の鉄板を防音効果算出の基準としている。実験状況を写真 3 に示す。

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、4 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 オクターブバンドの中心周波数毎に基準板での計測値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。基準板から減衰が無ければ 0dB となるように定義する。

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 の減衰性能比較に示す。この表には各制振材

表 2 制振材の減衰性能の比較

	10mm厚ゴム板 +鉄板*	20mm厚ゴム板 +鉄板*	50mm厚ゴム板 +鉄板*	40mm厚バッファ材 +鉄板*	40mm厚シール材 +鉄板*	40mm厚発泡ウレタン +鉄板*
《材料概要》	鉄板(硬質)+ゴム(軟質)の材料により、構成された複合材料を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。	左記同様の材料を製作し発生場所に取付ける。	左記同様の材料を製作し発生場所に取付ける。	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付ける。	伸縮装置の非排水タイプに実績はあるが制振材料としての実績なし。	海外での鉄道床組の遮音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	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》	鉛板なし   -3 dB	鉛板なし   -6 dB	鉛板なし   -8 dB	鉛板なし   -7 dB	鉛板なし   -5 dB	鉛板なし   -7 dB
	鉛板あり   -6 //	鉛板あり   -7 //	鉛板あり   -10 //	鉛板あり   -8 //	鉛板あり   -8 //	鉛板あり   -7 //
《鉛付加効果》	△	○	◎	○	○	◎
《鉛付加効果》	3dB	1dB	2dB	1dB	3dB	0dB
《平面施工性》	◎	◎	×	×	△	○
《不陸対応》	×	×	△	△	○	△
《施工性費用》	◎	◎	×	△	○	△
《総合評価》	△	○	×	△	○	△

に関する吸音性評価，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，取付け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，軽量かつ安価で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最適であることが判明した．また，鉛板の付加効果に関しては，顕著な効果が見られなかったので，本研究での採用は見送ることとした．

(2) 要素試験 II

部材振動と放射音には強い関係があることに着目し，部材を制御することが，本開発の目的である．そこで，要素試験 II として振動と音圧を同時に計測し，鋼板の制振と放射音の低減の関係を明らかにした．この試験では無響室を利用し，放射音低減効果と制振効果を同時に検討できるシステムを採用した．

基準板の大きさは 500mm×2,000mm，板厚は 9mm，制振材 (300mm×300mm) は，ボルトナットにより試験片に圧着した．制振材の取り付け中心位置は，試験片長手方向に端から 250, 625, 1,000, 1,350, 1,750mm の計 5 箇所である．配置の検討では，取り付け位置をパラメータとして，各位置に制振材 1 つを取り付け，吊り下げた基準板の一端をハンマーで打撃した．

図 2 に，全 5 箇所制振材を取り付けた時の卓越中心周波数 (1/3 オクターブバンド毎) に対する振動加速度と音圧 (平坦特性) の減衰量 (- dB) を示す．図 2 の縦軸の振動加速度・音圧の低減量 (- dB) は，基準板との差を示した．周波数毎の振動加速度と音圧の低減量は同様な傾向を示し，制振材で部材振動を制御することにより構造音が大幅に低減できていることが分かる．

(3) 要素試験 III

良好な制御効果を得るには，制振材で振動モードの腹 (曲率が大) の部分を覆う必要がある．そこで，低い周波数帯の長い波長振動モードに見合った大きさの制振材をモードの腹に取り付ける対策も考えられるが，実際の施工現場では，①振材単体の重量の増加による作業性の悪化 (複数人での作業が必要)，②箱桁内部に制振材を設置する場合のマンホールサイズの制限が発生する．よって，長い周波数 (長い波長振動モード) に対応し，かつ，問題点を考慮した制振手法の開発を目的として，現場での長い波長モードに対応した大きさの制振材を構築する方法を検討した．これを要素試験 III とする．ここで試験ケースは，図 3 に示すように，(a) 制

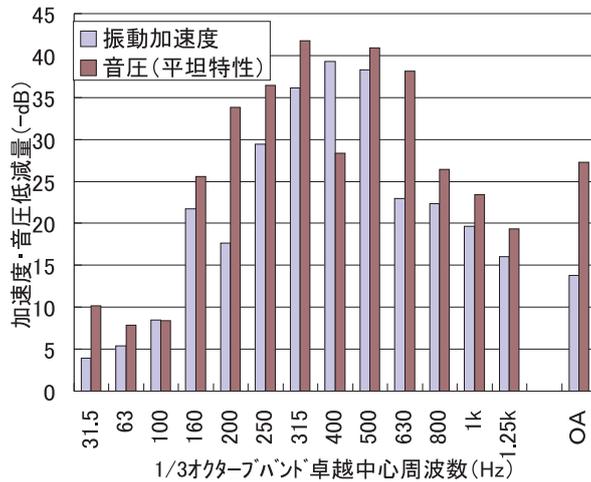


図 2 制振材取り付け時の振動加速度と音圧

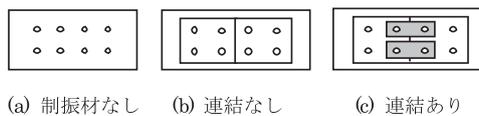


図 3 試験ケース

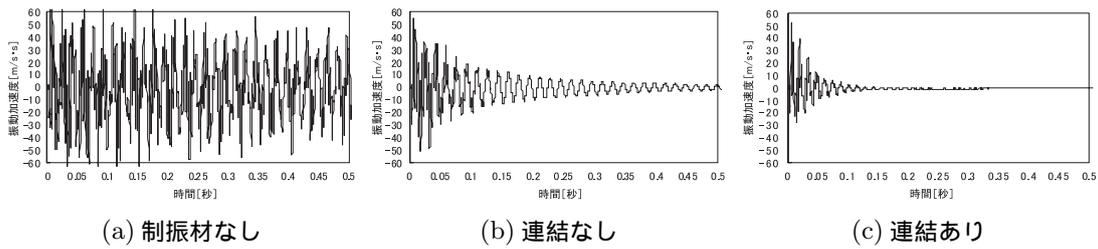


図 4 振動加速度の時刻歴

振材なし, (b) 制振材を付け連結材なし, (c) 制振材同士の切れ目に短冊状の薄鋼板を渡し制振材同士を連結したものとする。

図 4 (a) ~ (c) に, ハンマー加振直後から 0.5 秒間のバンドパス処理制限後の 1 次モード振動加速度時刻歴を示す。(a) ~ (c) では, 加振時の初期振幅はほぼ同じ値を示しているのに対し, 制振材を付けた場合, 振動減衰が明らかに早く, 制振効果 (a) << (b) < (c) が得られていることが分かる。図 5 に, 各モードの時間平均的な振動加速度低減量 (dB) を示す。試験 (b) では, モードの腹が制振材に覆われている 2 次および 4 次モードの周波数帯に関しては, 試験 (c) と同様の減衰効果があるのに対し, 1 次および 3 次モードの制振効果が余り見られない。これは, モードの腹 (曲率が大きい) の部分に制振材の切れ目が当たり, モードの曲率が大きい場所での制振ゴム層のせん断変形が十分に得られていないからである。一方, 制振材の切れ目に短冊状の薄鋼板を渡し, 各々の制振材の制振ゴム層外側に付いている薄鋼板の面をフラットに保とうとしたものが試験 (c) である。この方法を用いた結果, 図 5 に示す様に試験 (b) では減衰が顕著に現れなかった 1 次, 3 次モードの振動成分に対しても良好な制振効果が得られた。これにより, 連結材の効果が確認された。

### 5 騒音対策の判定基準

放射音の発生源は, 衝撃エネルギーと走行振動であり, その両方を制御することが必要である。ここで, 騒音対策の判定基準の意義が大きく問題となり, 特に低周波域騒音の低減対策には, 距離と振動部材の減衰定数が支配的であることを考慮する必要がある。そこで, 以下の手順で計測を行うこととする。

第一段階としては, 試験車走行による官民境界での騒音測定である。この段階において周波数帯の分布特性を把握することによって対象周波数帯が決定される。第二段階としては, 構造図面から部材形状寸法を抽出して代表的な部材の固有値解析から発生予想周波数ごとに部材を分類することである。第三段階ではその部材配置を点から線, さらに面までに展開して測点を定めて試験車走行試験を実施する。第四段階では各車線毎に設置した計測点の加速度計で試験車走行の時刻歴を作成してデータを分析, 固有値解析データと比較検証し, 発

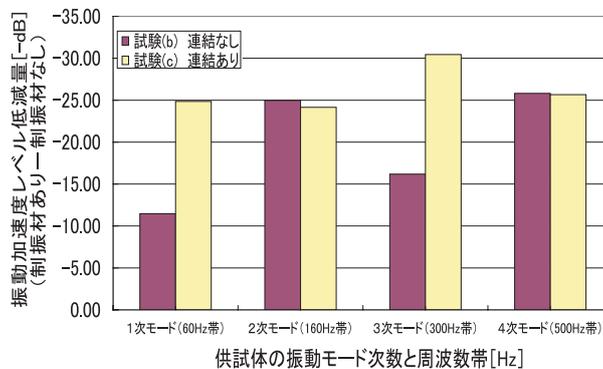


図 5 各モードの振動加速度低減量

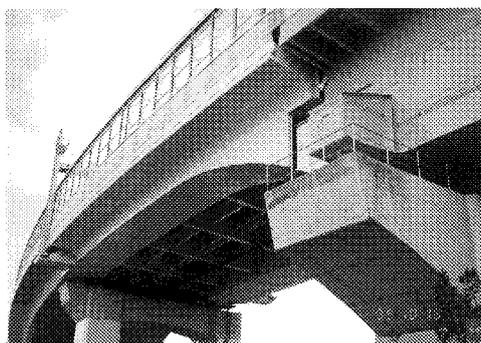


写真 4 施工現場近景

生源である部材代表を特定する。

これが騒音対策対象箇所の基本方針となる。これらの段階での振動加速度のオーバーオール値は極めて大きな数値となることが多く、 $1/3$  オクターブバンド中心周波数の騒音特性は、通常の交通騒音のグラフとは異なった低音域（50～200Hz）に若干の変化が見られる程度の場合が多い。しかし、試験車走行の数秒の時刻歴をオーバーオール値でも数秒から8秒くらいまで高い山が連続している場合がある。この連続した山がデシベル値だけで判断できないものであり、低音域騒音の特徴である。この状態のなだらかな山の時間を短くするのが低音域の騒音対策に必要不可欠である。低音域での数秒間の連続音を0.5秒程度になるように急速に減衰させるとOA値のデシベルが同じであっても体感的にはあまり気にならない通常の乗り越し音に変化してしまう。デシベル値を下げることだけが騒音対策ではないことがわかる。

さて、部材の代表が特定できれば第五段階として、前述の分類した部材の個別確認である。これは原始的なハンマリングによる加速度測定であり、個別部材の振動特性の把握と固有値解析データとの照合となる。この作業によりグルーピングの確認と加速度レベルによる対象部材の可否判断となってゆく。ハンマリングという不安定な外力であるが、特定の周波数帯に着目すれば安定しており、十分に判定基準の目安になるものである。代表部材のハンマリング振動レベルと比較して、可否判断を数値的に処理すれば良い。

## 6 試験施工内容

本試験施工は、阪神高速道路大阪池田線延伸部で施工され、4径間連続桁鋼床版箱桁と単径間非合成箱桁とが掛け違い構造になっている部分である。近景を写真4に示す。

### (1) 部材計測

伸縮装置直下の端横桁は質量付加方式であるRC巻き立て工法が採用されていたが、事前調査の段階で低音域騒音発生源がウェブ全域であることが予想されていた。しかし、詳細は未確認であったので、まず発生原因の部材特定からが施工範囲となった。工事着手後ハンマリング調査により部材振動の測定による原因究明を開始した。

ハンマリングによる対策部材特定方法は、主桁ウェブ、横桁ウェブおよびダイヤフラムについて、上下フランジとスティフナに囲まれた面を1区画として、コーナ付近を同程度に打撃しての計測とした。区画の狭い部材と添接部は、データ採取のために幾分強めな打撃とした。これらのデータ採取は、チャンネル数と計測個所の施工性を考慮して、12チャンネル程度のグループ計測とした。計測時は数回の試験打撃後のデータ採取し、異常値を排除するためにその都度測定値を出力してチェックする手法を採用した。なお、初めての実施工でもあり調査に慎重を期するために測定区画はほぼ全部材の300箇所余りとなった。

この計測結果から部材振動データの卓越周波数帯を発生騒音データと比較して低音域の周波数で振動している部材を特定した。当初は伸縮継手近傍が主たる対象部材と予想していたが、調査計測するにつれて一般部の走行振動と伸縮部からのエネルギー伝播の相互作用によって箱桁ウェブ全域から横桁までもが30Hz～200Hz

の周波数帯が卓越していることが判明した。

一方、ハンマリングだけの推定では、汎用性に乏しいと判断し、実部材データによる FEM 構造解析により出現可能モードと周波数帯解析を平行して進めた。このことは理論的な根拠と予測システムへ展開するための基礎資料となった。

(2) 騒音調査

計測・解析の両面から、対象部材が特定できたので、その代表的な箱桁ウェブに制振板を取付け、部分的な制振効果確認試験を実施した。基礎データ蓄積の後、施工段階ごとに機能確認試験を行いながらの実施工となった。

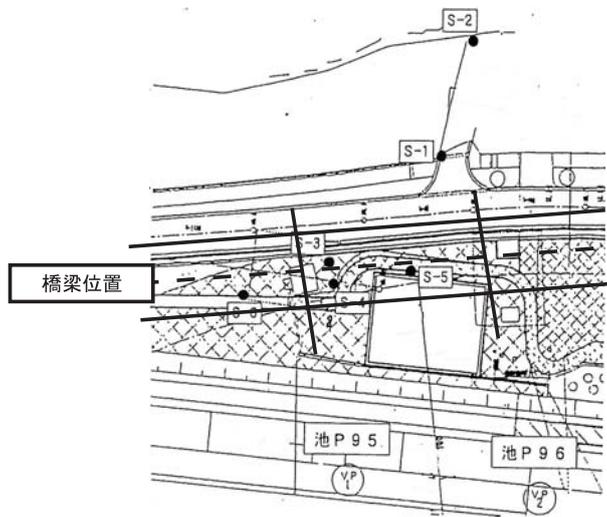


図 6 騒音測定位置

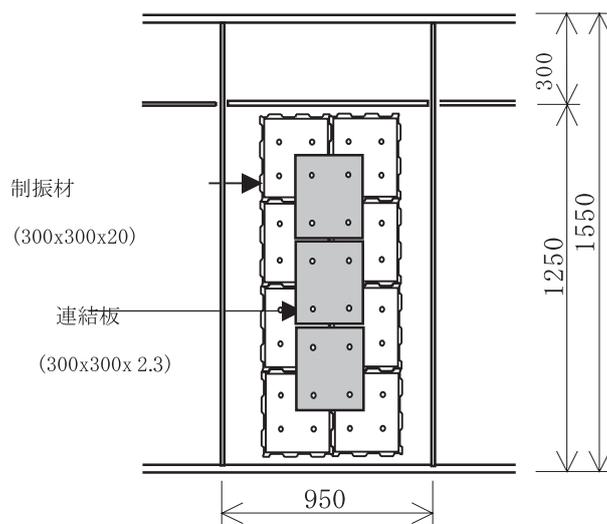


図 7 箱桁ウェブ面制振材取り付け例

具体的な確認試験は、以下の 5 段階施工の過程で、試験車両の各車線走行、騒音測定、一般車両の 12 時間測定など各種計測作業を実施した。

- ① 施工前の状態
- ② P96 伸縮継手近傍への制振材貼付対策終了後
- ③ P95 伸縮継手近傍への制振材貼付対策終了後
- ④ 全域への制振材貼付対策終了後
- ⑤ 足場解体時

騒音測定は当初から周辺地域への影響を考慮して図 6 に示すように S1～S6 の定点計測とした。試験車は、10t ダンプ満載の 196kN(20tf) 重量とし、数回の試験走行の後、ほぼ各車線の定位置を走行するように運転者に習熟させ路面の不陸の影響を排除するように努めた。部材振動計測点数はフルチャンネルの 24 点同時計測とした。計測が長期間に渡ることから観測日誌を作成し、気象条件を記録して採取データの補正を考慮した。

### (3) 対策施工概要

対策は、ウェブ全域と横桁全域にわたって行った。図 7 に箱桁ウェブ内に制振装置を取り付けた状態の例を示す。ここに示す部材は箱桁ウェブ面であり、上フランジ側に設置された水平スティフナと下フランジ及び両側の鉛直スティフナの間で発生する低次モードを考慮した取り付け例である。実際の工事では、まずスタッドボルトを打設した後、制振材を取り付けている。使用した制振材は、写真 2 に示した物を用いた。なお、対策に際しての施工上の検討の詳細に関しては、文献 [6] を参照されたい。

### (4) 対策施工前後の振動変化

代表的なデータとして下り走行車線 80km/h での①の対策施工対前の状態および⑤の足場解体時の対策施工終了後での振動波形（振動加速度）変化を図 8 およびオクターブバンドでの周波数分布の変化を図 9 にそれぞれ示す。

図 8 の「対策施工前」波形データに見られるように、振動加速度は、一回目の伸縮装置の乗り越し衝撃から二回目にかけての減衰が遅く、半分近くまで減衰した時に二回目のインパクト入力となり、その後 2 秒以上経過して減衰している。図 9 「対策施工前」の加速度の FFT 分析波形分布から、60Hz 前後と 100Hz 前後が卓越していることがわかり、これが不快音の原因となっていると解釈できる。なお、他の周波数域は 10%程度以下であり、問題になることはほとんど無いと考えられる。

図 8 の「対策施工終了後」のグラフから、一回目の伸縮装置の乗り越し衝撃から二回目の乗り越し前に速やかに減衰し、ほぼ衝撃入力前の状態に戻っている。さらに二回目の入力も 0.5 秒程度で減衰しており、スペクトルより音色も明らかに変化していることが読みとれる。卓越周波数に関しては、60Hz 前後では加速度で 30%ほどに、100Hz 前後では 10%以下にまで小さくなっている。ところで、衝撃総エネルギーは試験車両と速度で定まり、固体伝搬速度は材質で決まっていることから、制振材で衝撃エネルギーが吸収され部材振幅が制御されて低減していると考えられる。

### (5) 対策施工前後のデシベル変化

代表的なデータとして、下り走行車線 80km/h での施工前後の振動波形のデシベル変化を図 10 およびオクターブバンドでの周波数分布の変化を図 11 に示す。

図 10 は、左側から右に向かって時間軸で隣接 PC 桁上走行、P96 伸縮装置上、鋼桁上、P95 伸縮装置、4 径間連続桁を遠ざかって行く状態を表している。図 10 の「対策施工前」、「対策施工後」を比較すると試験車両が接近してくる段階で 4dB 程度低いレベルから始まっているが、ピーク値では幾分低くなっている程度で大きなレベル差はない。P96 から P95 にかけてスラブ上を走行している段階で比較すると「対策施工後」は急速な減衰が見られ「対策施工前」最小値である 80dB まで瞬時に低下している。続いて P95 伸縮上でパルスを受け、その後の減衰勾配は目を見張るものがあり、明確な減衰定数の変化が見られる。「対策施工前」では元の状態まで戻るのに 4 秒程度要したのに対し、対策施工後では 1 秒程度となっている。なお、このグラフは振動加速度レベルをデシベル変換したもので直接的に騒音デシベルとは一致しないが、傾向的にはほぼ一致すると考えら

れる。

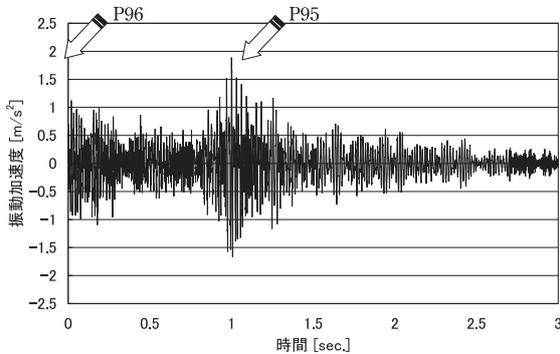
図 11 に騒音 FFT 分析の立体時刻層グラフを示す。対象としている周波数帯が低音域のため騒音計の感度や表示精度に若干の問題はあるが、「対策施工前」、「対策施工後」の図を比較すると、全体的に約 50Hz 程度高周波側に周波数帯がシフトされたような傾向にあり、対象低音域に明確な低減結果が示されている。しかし、対象周波数域以外の 200Hz 帯付近では、走行音のスラブ伝搬などの影響から対策施工前後の比較は難しく、明らかな違いはつかめていない。よって、対象周波数域では伸縮装置上での絶対値の低減効果を含めて騒音低減に鮮明な効果が表れている。

図 12 に官民境界での P95 伸縮装置通過時の騒音レベルを 60km/h 走行時と 80km/h 走行時のそれぞれの走行ピーク値に対する低減効果として走行車線毎に OA 値で示す。車線毎に路面状況と伸縮装置の設置誤差、不陸の程度、さらに微妙な走行位置など条件に固有値が介在する懸念はあるが、低減効果を確認することができる。特に、計測点から離れた上り線に低減効果が表れていることがわかる。これは高音域の距離減衰の影響も含まれた値であり、低音域だけを検出可能であればさらに差のある傾向が得られると予測される。

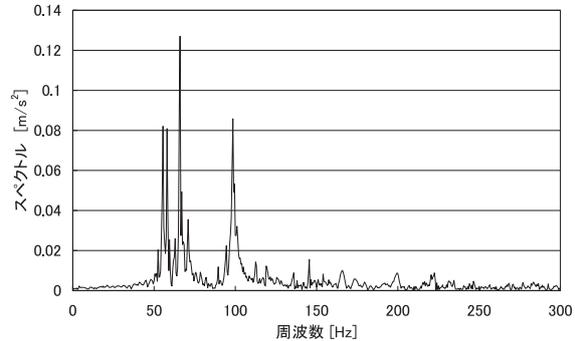
### (6) 地元住民への調査

近隣への影響の評価は対策結果の総合的な騒音変化であるが、他の騒音との区別、音源の制御効果のデータ整理には適切な基準が見当たらず、定量的に効果を定義することは困難である。そこで、住民の生の声を聞くことが第一と考え、試験施工完了後、地元住民への工事前後の音の変化について聞き取り調査を行った。その結果は以下の通りである。

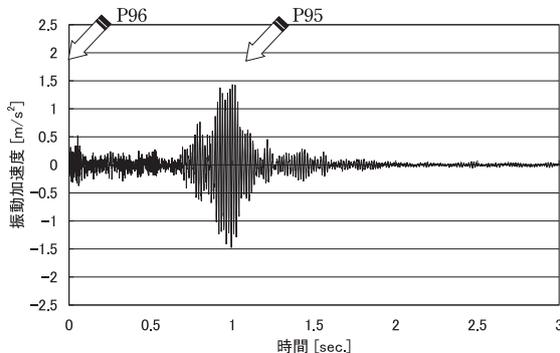
- ① ジョイント通過時の音は完全に無くなってはいないが、工事前の「ドド〜ン」と鳴り響く音が、短く「ドン」と聞こえるようになり、前よりも聞こえにくくなった。
- ② 早朝、午前 4 時から 6 時頃は、大型車両のジョイント通過時の音よりもスピードを出している車両の走行音が気になるようになった。



対策施工前 (①の状態)

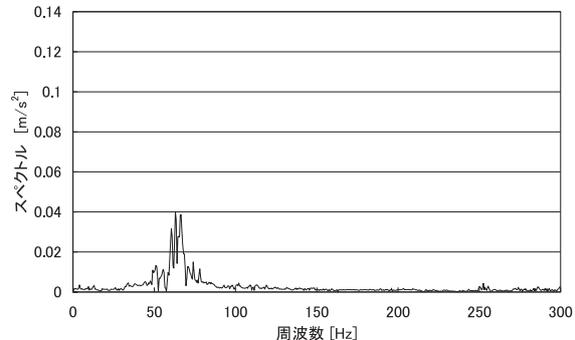


対策施工前 (①の状態)



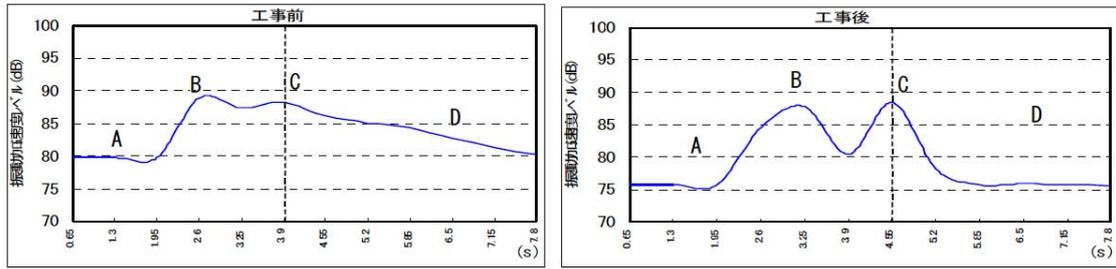
対策施工終了後 (⑤の状態)

図 8 振動波形の比較 (振動加速度)



対策施工終了後 (⑤の状態)

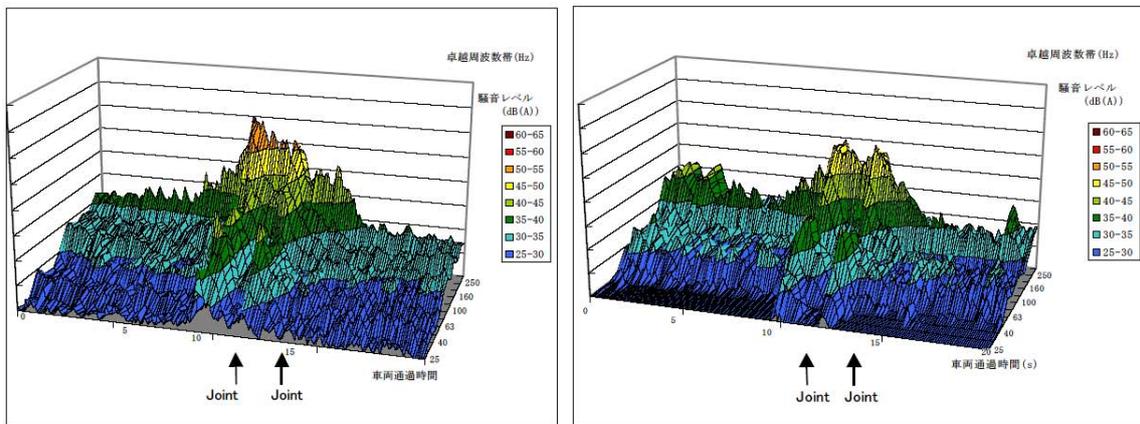
図 9 周波数分析波形 (FFT 分析波形)



対策施工前

対策施工後

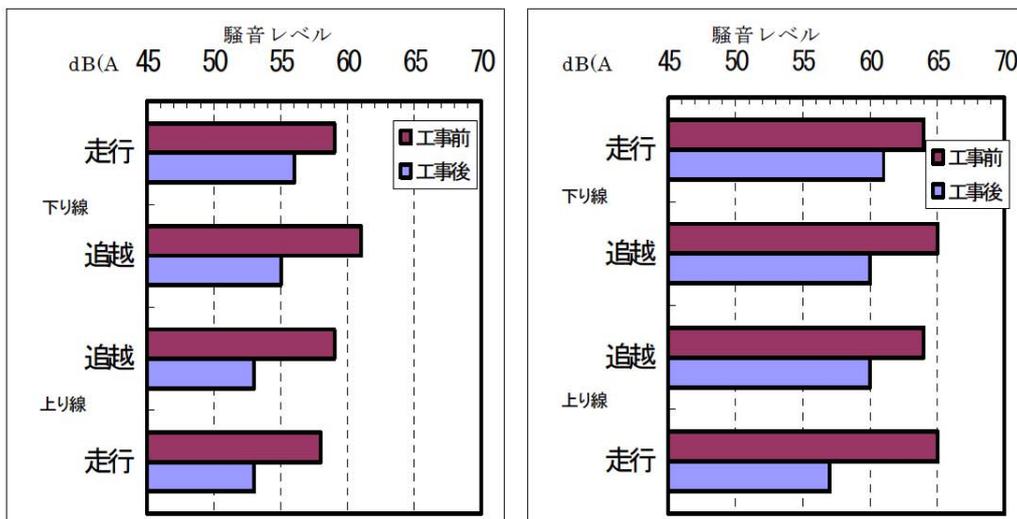
図 10 振動波形のデシベル変化 (A. 接近中 B. P96 通過 C. P95 通過 D. 現場離脱)



対策施工前

対策施工後

図 11 周波数変化 (FFT 分析の立体図)



60km/h 走行時

80km/h 走行時

図 12 試験車両走行時の官民境界 (S1) での騒音レベル

①に関しては低音域が消えた音色になっており、腹に効く低い音から高音の接触音に音質が変化していることから、少なくとも受ける印象は明確に変化したと考えられる。しかし、今まで打ち消されていた②の騒音のように他の周波数帯の音域が相対的に目立つ結果となってしまった。これが騒音対策の難しさの一つである。

## 7 おわりに

今回の試験施工において、低音域の騒音に関して顕著な低減効果が確認され、かつ振動減衰による音色の変化も得られる結果となり、期待通りの成果を達成することができた。これは、橋体の振動部材に制振材を設置することにより部材の減衰性能を高くし、橋梁全体の振動を制御できたことによる。これにより騒音の減衰が早くなり比較的低い周波数帯である低音域(30Hz~200Hz)が低減された。住民の生の声からも減衰効果により対策前に発生していた音の音色が変化し、聞こえにくくなったことは成果があったと判断することができる。

ところで、騒音や揺れ対策に関しては、現状では明確な基準がほとんどなく、あくまで人の感覚に依存した部分が多いことから、効果の数値的な面からの検証は難しい。この基準作りのためにも、さらには汎用性を高めるためにも今回採取した膨大なデータの中から、一般解を求めるように研究、整理して行くことが必要である。

一方、本研究は、コンクリート構造物に比べて鋼構造物の持っている優位性(均一性、軽量、加工性)を否定するようなものでもあり、従来の設計手法の限界を問題提起するような提案でもある。しかし、本研究は既設新設を含めて鋼構造橋梁がどうしても避けて通ることができない環境対策を含めた問題の一つの解決策であることを理解して頂きたい。今、鋼構造橋梁で希求されていることは、『揺れ、振動、騒音の根本的環境対策』、それにリンクする『寿命』を大きなテーマとして、その中での簡易かつ安価に対策することである。

## 謝 辞

本研究を行うに際し、元阪神高速道路公団吉川実氏から多くの貴重な助言を得た。また、研究当初から(株)十川ゴム 研究開発部 渋谷正典氏、井田剛史氏より試験素材、多数のゴム材料特性に関する貴重な資料提供を受けるとともに、我々が要求する高機能ゴム制振材の製作を担当していただいた。ここに心から感謝の意を表す。

### 参考文献

- [1] 連重俊, 平野廣和: 鋼橋低音域騒音低減工法の開発と試験施工, 土木学会論文集 No.735 / VI-59, pp131-144, 2003.6.
- [2] 小田義明, 連重俊, 平野廣和, 氏原徹: 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, 1997.9.
- [3] 渡邊茂, 飯村耕作, 井上浩男, 佐野健一: 構造音低減を目的とした高効率な制振材の取付け配置について, 土木学会第 54 回年次学術講演会第 I 部門, 1999.9.
- [4] 連重俊, 渡邊茂, 平野廣和, 志村敦: 複合材料を用いた固体伝搬振動の減衰に関する試験施工, 土木学会第 55 回年次学術講演会第 I 部門, 2000.9.
- [5] 連重俊, 平野廣和, 志村敦: 鋼橋の低周波域騒音低減工法の開発と試験施工, 橋梁と基礎 No.2001-4, pp.41-48, 2001.4.
- [6] 田中秀男, 渡邊茂, 連重俊: 鋼橋の構造放射音減衰工法 (MTC ダンパー), 三井造船鉄構工事技報, Vol.14, pp.32-42, 2001.12.
- [7] 庄野豊, 吉田幸信, 山本貢平: 道路遮音壁先端に設置する騒音低減装置の開発, 土木学会論文集, No.504/VI-25, pp. 81-89, 1994.12.
- [8] 富田尚隆: 低騒音舗装とタイヤ道路交通騒音, 騒音制御, Vol.23, No.3, pp.142-147, 1999.6.
- [9] 上坂克巳, 大西博文, 鉢嶺清範, 石川 賢一, 高木 興一: 種々の低層遮音壁による減音効果の予測評価に関する研究, 騒音制御, Vol.23, No.2, pp.99-108, 1999.4.