

論文 ポリマーセメントモルタルを活用した鋼橋の騒音振動対策に関する研究

谷口 望^{*1}・廣江 正明^{*2}・佐竹 紳也^{*3}

要旨：ポリマーセメントモルタルは、耐久性、耐衝撃性に優れているとともに鋼材との付着力も強く、鋼構造物の被覆材としての活用が試みられている。また、近年は、環境適合性への配慮の観点から、鋼構造物の騒音振動が課題となっている。そこで本研究では、鋼構造物に対するポリマーセメント被覆を、騒音振動対策として考え、従来からの騒音振動対策である制振材と比較し、その効果を検証した。また、その検証にあたっては、騒音振動の伝搬を空気粒子の移動ととらえ、これを測定できる粒子速度計を用い、従来の加速度計や集音マイクとは異なる観点での検討を行った。

キーワード：ポリマーセメントモルタル、騒音振動対策、粒子速度計

1. はじめに

近年、環境適合性への配慮が重要になってきている。特に、土木鋼構造物では、鋼部材の騒音振動に配慮することが必要不可欠であり、鋼鉄道橋では、鉋桁の場合、構造物から生じる音（構造物音）が最も生じやすいウェブパネルに対して、制振材が取り付けられる（図-1）。この制振材は、ゴムやアスファルトなどとメッキ鋼板を層状に取り付けたものであり、鋼材に接着剤や磁石、ボルト等で取り付けるものである。メッキ鋼板が拘束層となり、ゴムやアスファルト層自身の内部損失や、この層と鋼板との接触面における摩擦損失により、振動低減を行うものである¹⁾。ただ、この制振材の課題としては、形状や寸法の決まった製品であることから鋼部材への取り付け箇所が制限される点にある。また、維持管理上、制振材を取り付けた鋼材面の塗り替えが困難になり、腐食損傷への懸念も指摘されていることに加え、制振材自身が高価であり、建設費が嵩むという問題点もある。

そこで著者らは、以前より、ポリマーセメントモルタル（PCM）被覆を活用し、鋼部材の騒音振動対策として活用することを提案し、一部実用化されている状況にある^{2), 3)}。PCMは、耐久性、耐衝撃性に優れているだけでなく、鋼材との付着力も強いものもある。つまり、このPCM自身が、鋼部材の騒音振動を抑える効果を持ちつつ、鋼部材の防食材として機能することも期待できる。また、PCMは吹付やコテでの塗り付けが可能であることから、鋼部材の寸法や表面形状に作用されることなく、設置が可能となる点も有利である。

一方、騒音振動の評価に関しては、以下の課題がある。一般的な鋼部材の騒音振動対策では、制振を行う材料を付加することで、鋼材を含む構造体の内部損失を増やし、



(a) 制振材の例（製品寸法 300×450mm）



(b) 橋梁箱桁内ウェブに設置された制振材の例



(c) 上路プレートガーダーに試験的に設置した例

図-1 従来より使用されてきた鋼鉄道橋の制振材の例

列車通過に伴って発生する鋼材振動の消費エネルギーを増加させ、その結果として構造物音の発生エネルギーを減少させる方式である。ただし、これらの対策による鋼材振動とその振動放射音の低減効果が乖離する事例も多く⁴⁾⁻⁶⁾、対策による低減効果が正確に把握できていない。

*1 前橋工科大学 社会環境学科 准教授 工博（正会員）

*2 小林理学研究所 騒音振動研究室 室長 工博

*3 太平洋マテリアル株式会社 営業本部 混和材営業部

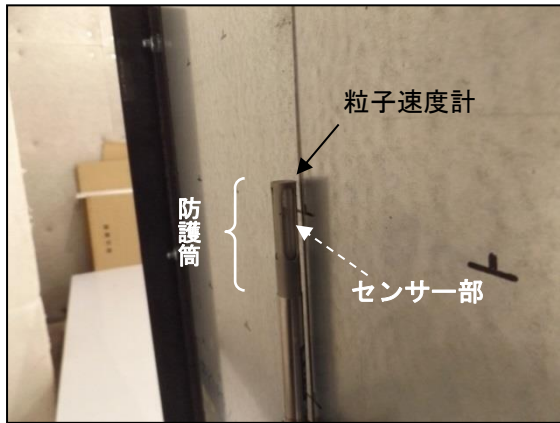


図-2 平板試験に用いた実験で使
1 軸粒子速度計

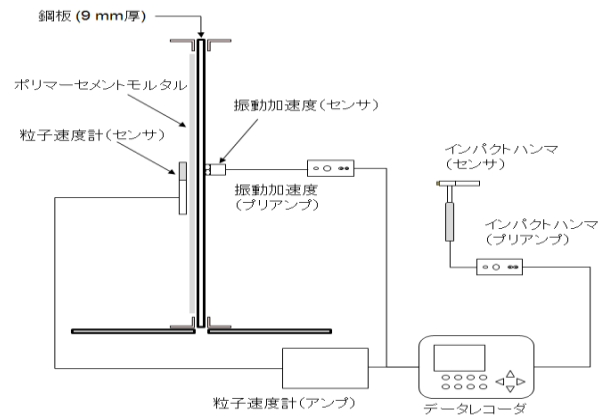


図-5 試験体と計測機器配置図

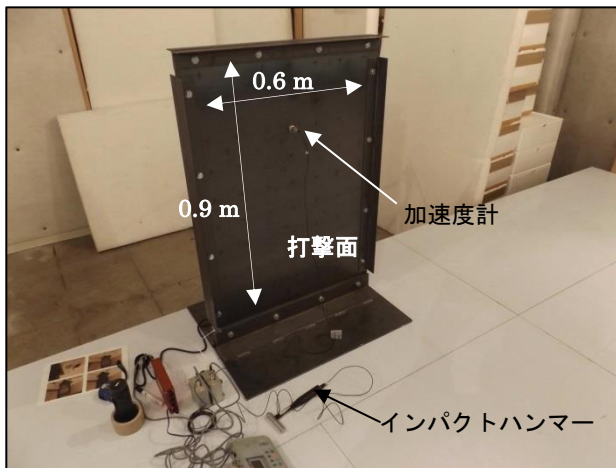


図-3 打撃面における振動加速度の計測状況

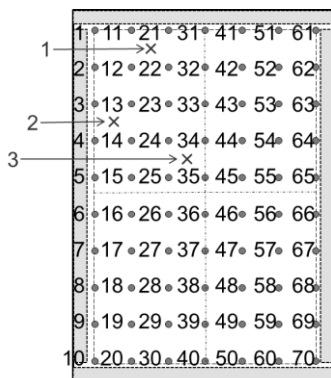


図-4 平板上の打撃点(x)と計測点(●)の配置図

そこで本研究では、試験体による打撃試験の結果をもとに、従来の制振材 2 種と PCM 被覆の制振効果に比較を行う。また、この比較にあたっては、振動部位近傍で直接計測した音の粒子速度をもとに対策効果を評価する手法を提案すると共に、被対策部位の粒子速度と振動の低減効果を比較することで、提案法の妥当性を検証することとした。

2. 計測方法と評価手順

2.1 粒子速度計

本研究では 1 軸方向の粒子速度を計測できる粒子速度計を使用した (図-2 参照)。この計測機器は、防護筒の中にあるセンサー部に、平行に並んで固定された 200℃の 2 本の白金製の熱線があり、熱線と直交する方向に沿って伝搬する音波によって生じる熱線間の熱量の移動を、両者間の抵抗値の変化として計測する特殊な機器である。この白金製の熱線の太さは毛髪の 400 分の 1 程度で、音波に起因して生じる空気中の微小な振動 (圧力ではなく向きを有する流れ) が計測可能である。粒子速度計は、センサー部周辺の微小範囲内の変化を計測する為、被測定部位との距離を小さくする必要がある⁷⁾。ただし、同機器は風等の空気の流れの影響を受け易い為、屋外計測には不向きな面がある。

2.2 鋼試験体および打撃試験の概要

実験で使った平板試験体は、鋼プレートガーダーのウェブ 1 パネルを模擬したものとし、ウェブ 4 辺を L 型アングル (補剛材) で補強された鋼製平板 (1.055 m × 0.740 m : [被対策部] 0.9 m × 0.6 m, ウェブ厚み 9 × 10⁻³ m) である。図-3 に示すように、4 辺の L 型を除く平らな範囲を被対策部とし、制振材貼付前後における振動加速度 a (m/s²) とその近傍の粒子速度 u (m/s) を板全面に亘って 70 点ずつ計測することとした (図-4)。なお、打撃点ごとに異なる振動モードが励起されるように、板の四辺付近から 2 点、板中央付近から 1 点、計 3 点の打撃点を選んだ。

打撃においては、入力値の計測できる一般的なインパクトハンマーを用い、振動加速度センサ、粒子速度計、インテンシティ・マイクロホンを用いてそれぞれ計測を行った (図-3 ~ 図-5 参照)。振動加速度センサはマグネット・アタッチメントを用いて被対策部の打撃面側に設置し、粒子速度計は振動加速度センサ設置位置の真裏で、被対策部の放射面側の表面から 0.01 ~ 0.02 m 離れた位置

に軸方向が放射面と垂直になる向きで固定した。インパクトハンマで被対策部の打撃面側を加振した時の打撃力と各計測機器からの出力電圧信号をデータレコーダ（サンプリング周波数は $f_s = 24.0 \text{ kHz}$ 、および、 $f_s = 25.6 \text{ kHz}$ を使用）に収録した。打撃点および計測点の組合せごとに、雑音(Noise)の成分に比して十分な大きさの打撃振動(Signal)の成分が確保された S/N の良いデータを 5 個得るようにした。

2.3 制振対策工の概要

(1) PCM

本試験で使用する PCM 被覆による制振対策工には、鋼橋のリニューアルで実績のあるもの^{2), 3)}を使用した。本 PCM の基礎的な特性は、鋼材・コンクリート双方への付着性能は、一般に材齢 7 日付着引張付着強度で 1.0MPa 程度（一般コンクリートの 5 倍程度）であり、耐塩化物性能、耐衝撃性能にも優れていることが実証されている⁸⁾。本対策工においては、この高い付着性能から、鋼部材の防食だけでなく、コンクリート部材との一体化を促進することも可能であると考えた。なお、PCM のヤング係数は、一般に $2.00 \times 10^4 \text{ MPa}$ 程度である。PCM 被覆厚は、比較する従来の磁性式制振材の厚さを参考に 10mm 厚（鋼板片面）とした。この厚さは、施工性及び、耐塩化物性能から算定される通常のコンクリートの設計かぶりと同様な耐久性から決まる厚さ（5mm 程度）を十分満足する値である³⁾。本試験で用いた PCM の配合は、セメント：細骨材 = 1:1.75、水セメント比 26.6%、ポリマーセメント 17.7% とし、既調合の粉体材料（セメント、細骨材、その他混和材料）：セメント混和用ポリマーディスパージョンを 6.25 : 1 で練混ぜて、ポリマーセメントモルタルを調製した。20℃ 気中養生における圧縮強度は材齢 7 日で 40.1MPa、材齢 14 日で 42.2MPa であった。本試験体における PCM の設置状況を図-6 に示す。

(2) 磁性式制振材

PCM の効果と比較するために、従来から使用されている制振材を 2 種用意した。本製品は両者ともに磁性式制振材⁴⁾⁻⁶⁾であり、一般に鋼橋の騒音振動対策用に販売されているものである（図-7）。磁性式制振材は、接着剤により取り付ける制振材とは異なり、磁力に鋼材に取り付けられる制振材である。また、この磁性式制振材には 2 種類があり、それぞれ通常型 A、改良型 B とした。磁性型制振材 2 種類のうち、通常型は「基板+制振材」の非拘束タイプ、改良型は「基板+制振ゴム+拘束板(鋼板層)」の拘束タイプで、改良型の方が重く固定磁力が強いことが分かっているが、本製品においては、詳細な基礎材料データは公開されていない。

磁性式制振材の製品は、基本サイズが 300mm×450mm であるため、試験体ウェブパネルに隙間なく 4 枚を取り



(a) PCM 設置状況



(b) 計測用に試験体を組み立てた状況

図-6 PCM の設置状況

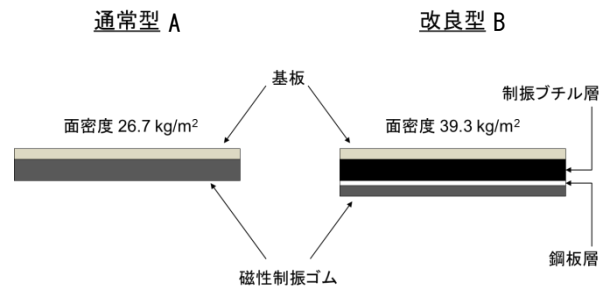


図-7 2 種類の磁性式制振材の構造概要

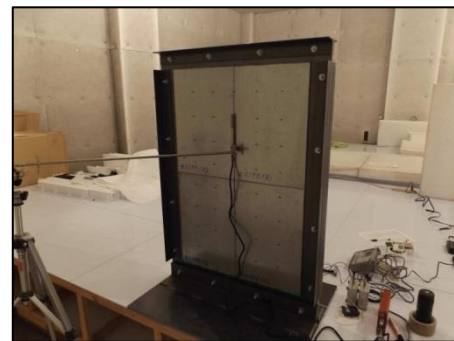


図-8 磁性式制振材取り付け状況

付けた（図-8）。この取付面積は、先述の PCM 取り付け面積と同等となっている。

3. 測定結果

3.1 粒子速度計の評価手法

初めに、換算式(1)、および、今回使用した粒子速度計の固有の変換係数（表-1 参照）に従い、粒子速度計の出力電圧信号から粒子速度 u への換算を周波数帯域ごと

表－1 粒子速度計における換算係数一覧

Variables	Sensitivity or Frequencies
S_{u0} [V/(m/s)]	17.6
f_{c1u} [Hz]	1
f_{c2u} [Hz]	545
f_{c3u} [Hz]	3910
f_{c4u} [Hz]	85

に行った。

$$S_u[V/(m/s)] = \frac{S_{u0}}{\sqrt{1 + \frac{f_{c1u}^2}{f^2}} \sqrt{1 + \frac{f^2}{f_{c2u}^2}} \sqrt{1 + \frac{f^2}{f_{c3u}^2}} \sqrt{1 + \frac{f_{c4u}^2}{f^2}}} \quad (1)$$

また、振動加速度センサとインテンシティ・マイクロホンからの出力電圧信号は、それぞれの校正信号をもとに振動加速度 a 、音圧 p に換算した後、前者は $1/f$ フィルタを通過させることで周波数帯域別の振動速度 v (m/s) に、後者は直接法⁹⁾を用いて周波数帯域別の音響インテンシティ I に変換した。同様な手法を用いて、インパクトハンマの出力電圧信号は、周波数帯域別の打撃力 F (N) に換算している。

ここで、打撃点番号、計測点番号、繰返し回数を i 、 j 、 k と置き、式(2)に従って周波数帯域別の打撃力 F 、振動速度 v 、粒子速度 u 、音響インテンシティ I の時間波形の2乗値を時間積分して求めた1回の打撃加振に対する各曝露量を F_{ijk} 、 v_{ijk} 、 u_{ijk} 、 E_{ijk} で表す（∵音響インテンシティ I の時間積分は単位面積を通過する音響エネルギー E である）。変数 P は F 、 v 、 u 、 I (E) を示す。

$$P_{ijk} = \int_0^{\infty} P_{ijk}^2(t) dt \quad (2)$$

つぎに、振動速度、粒子速度の曝露量や音響エネルギーを打撃力の曝露量 F_{ijk} で基準化(F) した後、繰返しデータ数 ($N_k=5$) で平均化し、基準化曝露量 v_{ijF} 、 u_{ijF} 、 E_{ijF} を求めた。更に、被対策部の面全体(計測点数 $N_j=70$) で平均化することで、打撃点毎の面平均基準化曝露量 v_{iF} 、 u_{iF} と平均基準化エネルギー量 E_{iF} を求めた。基準化及び平均化の手順を式(3)～(5)に示す。

$$P_{ijk/F} = P_{ijk}/F_{ijk} \quad (3)$$

$$P_{ij/F} = \left(\sum_{k=1}^{N_k} P_{ijk/F} \right) / N_k \quad (4)$$

$$P_{i/F} = \left(\sum_{j=1}^{N_j} P_{ij/F} \right) / N_j \quad (5)$$

最終的に、式(6)に従い、制振材貼付前（無対策）の基準化曝露量 v_{iF}^0 、 u_{iF}^0 、 E_{iF}^0 に対する貼付後（対策後）の基準化曝露量 $v_{iF}^{(P,A,B)}$ 、 $u_{iF}^{(P,A,B)}$ 、 $E_{iF}^{(P,A,B)}$ の比をレベル化し、制振対策による周波数帯域別の低減効果 Δv 、 Δu 、 ΔE 、即ち低減効果の周波数特性を算出した。

$$\Delta P_i^{(P,A,B)} = -10 \times \log_{10} \left(\frac{P_{i/F}^{(P,A,B)}}{P_{i/F}^0} \right) \quad (6)$$

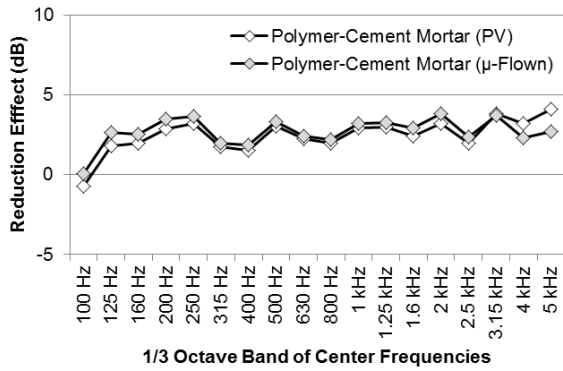
3.2 PCM の測定結果

打撃面側の面平均基準化曝露量と、放射面側の平均基準化エネルギー量から求めた各点における振動の低減効果 (Vibration Reduction) Δv_{iF}^P と、粒子速度の低減効果 (Noise Reduction) ΔE_{iF}^P との低減効果 (Reduction Effect) 間の比較を図－9 に、周波数帯域 315 Hz、2.5 kHz について、打撃点 3 に対する低減効果 Δv_{3F}^P 、 Δu_{3F}^P の試験体上での分布状況を図－10 に示す。各図中の正値は対策によって振動又は粒子速度が低下したことを、負値は逆に増加したことを示している。

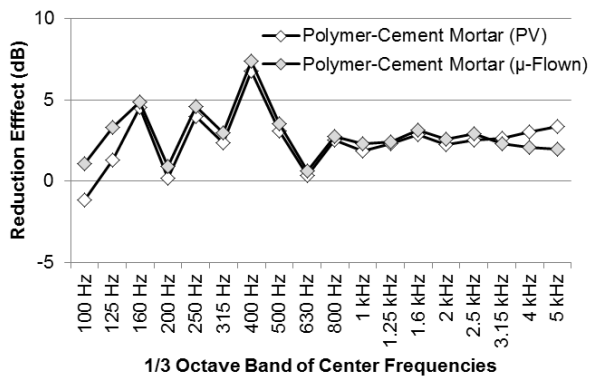
図－9 は、「PV」は加速センサによる結果を示し、「 μ -flown」は粒子速度計の結果を示しているが、両者の低減効果の評価に大きな乖離は見られない結果となった。本結果は、後述の磁性式制振材の傾向とは異なっている。また、図－10 (a) から、低い周波数帯域の板振動に対して部分的に負の効果（対策による増加）が見られることを含め、全体を通じて、振動速度と粒子速度の低減効果の評価結果に大きな乖離は見られない。図－10 (b) の高い周波数帯域の板振動に対して負の効果は見られず一律に正の効果が得られている点を含め、両者の低減効果の評価結果に大きな乖離は見られない結果となった。

3.3 磁性式制振材と PCM との測定結果の比較

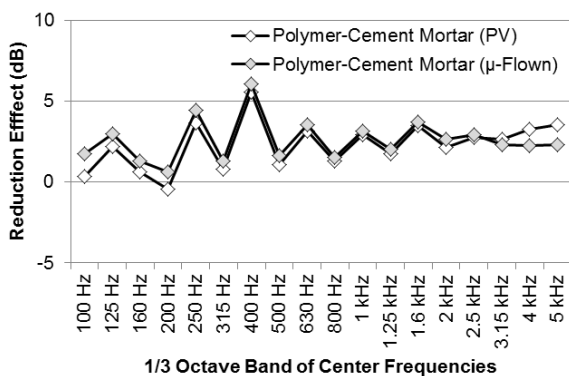
磁性式制振材通常型 A、改良型 B の低減効果 Δv_{iF}^A と ΔE_{iF}^A 、 Δv_{iF}^B と ΔE_{iF}^B の各比較を図－11 に示す。図－11 から、通常型 A では周波数 630 Hz 付近を境に高周波域になると振動速度と粒子速度の低減効果 $\Delta v_{3F}^{(A,B)}$ 、 $\Delta u_{3F}^{(A,B)}$ に差が生じることが分かる。厚さ 9×10^{-3} m の鉄板の屈曲振動の波長 λ_B は 500 Hz (約 0.43 m) \sim 1 kHz (約 0.30 m) の間で制振材のサイズと同程度となる為、当該周波数付近 (630 Hz 付近) を境に鉄板側の振動速度と制振材側の粒子速度の挙動に差が生じ、結果、両低減効果に違いが現れたと推察される¹⁰⁾。また、改良型 B は通常型 A とは面密度や固定磁力が異なる為、低減効果間に差が生じる周波数が高域にシフトしている。



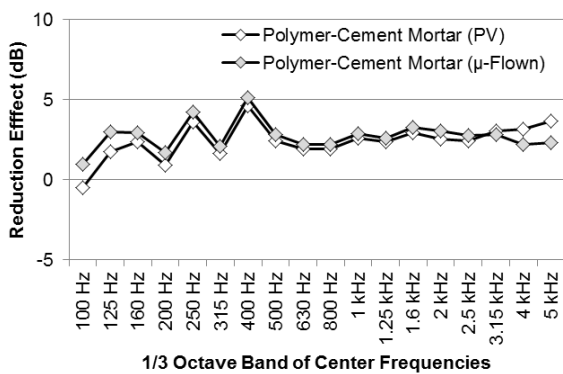
(a) 打撃点 1



(b) 打撃点 2

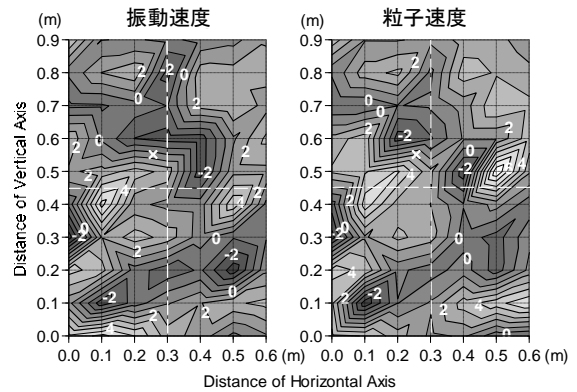


(c) 打撃点 3

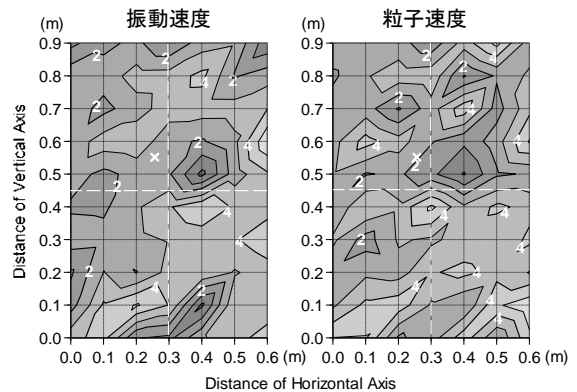


(d) 打撃点 1~3 の平均値

図-9 試験における低減効果の比較 (PCM)



(a) 1/3 オクターブバンド中心周波数 315Hz



(b) 1/3 オクターブバンド中心周波数 2.5kHz

図-10 PCMにおける低減効果の面的分布

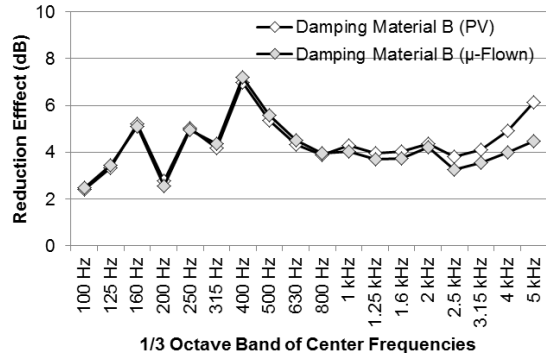
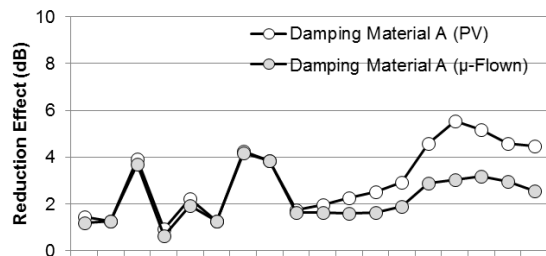
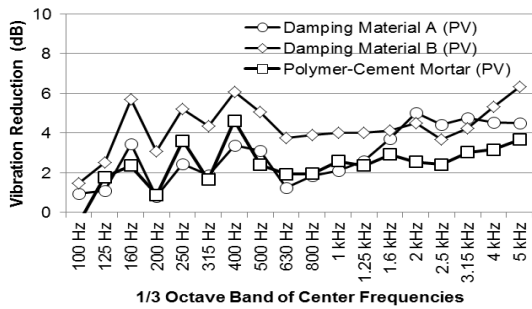
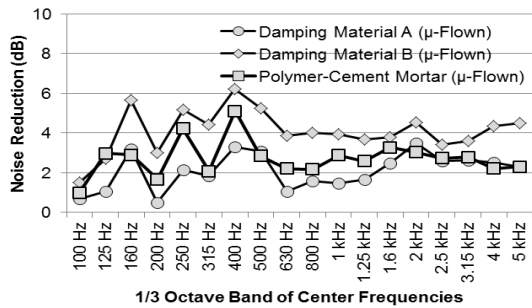


図-11 制振材 A, B の低減効果 (打撃点 3)

次に、PCM□印と2種類の磁性型制振材(通常型 A ○印と改良型 B ◇印)、各々の対策による低減効果の周波数特性の比較結果を図-12に示す。(a)が振動速度による評価、(b)が粒子速度による評価である。(a)、(b)のい



(a) 振動速度



(b) 粒子速度

図-1 2 PCMと制振材の低減効果比較(打撃点1~3平均)

ずれの評価においても、PCMの低減効果は磁性式制振材の通常型Bより低いものの、通常型Aの低減効果と同程度となっている。図-11から、周波数2kHz以上において振動速度が粒子速度より過大な評価になっていることを考慮すると、磁性式制振材・通常型AとPCMは粒子速度(振動放射音)に対して同程度の低減効果を有していると言える。磁性式制振材と比べて重量の軽いPCMが同程度の放射音の低減効果を発揮することから、この効果はPCM材料自体の振動減衰特性が大きく寄与していると推察される。

本結果より、PCMを騒音振動対策に用いることは、従来の制振材と同面積での比較した場合、より軽量であっても同程度の効果を発揮することが予測でき、設置面に対する自由度やコストの観点から、PCMを用いた方が有効な対策となりうる事が分かる。

4. まとめ

本検討では、PCM被覆を騒音振動対策として用いた場合を検討する目的で、要素打撃試験を行った。本検討より得られた結果を以下にまとめる。

- (1) PCM被覆を騒音振動対策として用いた場合、10mm厚の被覆を用いた場合、従来の制振材と同程度の効果となることが分かった。
- (2) PCM被覆は、様々な鋼部材の形状や寸法に適用可能なため、取り付け面に制約を受ける制振材よりも広い面積で対策を行うことが可能であるため、より高い効果を得られる可能性がある。

- (3) 粒子速度計を用いた計測では、従来の制振材においては高い周波数帯で加速度計との差異を生じたが、PCMの測定では、粒子速度計と加速度計の結果に大きな差は生じなかった。これは、制振材とPCMでは、騒音振動を低減させるメカニズムが異なるためと考えられる。

謝辞

本研究はJSPS科研費(15K06189:研究代表者 谷口望)の助成を受けた。また、粒子速度計測では東陽テクニカ(株)から多大な支援を頂いた。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 半坂征則:磁性複合型制振材の開発, JREA, Vol.36, No.2, 1993
- 2) 谷口望, 半坂征則, 碓山晴久, 上月隆史, 棚橋明朗, 依田照彦:ゴムラテックスモルタル被覆を用いた低騒音鋼橋の開発に関する研究, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1164~1171, 2009.4
- 3) 谷口望, 大久保藤和, 佐竹紳也, 杉野雄亮, 松浦史朗, 半坂征則:既設鋼橋の複合構造化によるリニューアル工法の施工と実証試験, 土木学会論文集・A1-複合構造特集号, pp.II_40~II_52, 2014.5
- 4) 半坂征則, 御船直人, 西本一夫, 伊藤修二, 永井靖隆:磁性複合型制振材の制振特性, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp.205~208, 1992.9
- 5) 半坂征則, 御船直人, 福知幹男:信越本線岡田川橋梁における騒音・振動試験結果-磁性複合型制振材の実橋性能評価試験-, 鉄道総研・研究業務資料, No.V380005R-1, 1998.3
- 6) 半坂征則, 原田聡, 間々田祥吾, 鈴木実:在来線鋼鉄道橋に対する騒音対策材料の効果確認試験結果, 鉄道総研・研究業務資料, No.V492042R-1, 2005.4
- 7) 岩瀬昭雄, 阿部将幸:孔あき板のより実用的な条件での反射吸音特性について, (一社)日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.987~990, 2009.9
- 8) 杉野雄亮, 佐竹紳也, 大垣賀津雄, 小出宜央:床版補修用ポリマーセメントモルタルの耐久性に関する評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, 2012
- 9) 橋秀樹:音響インテンシティ法による音響測定, 建材試験情報, Vol.44, pp.6~12, 2008.2
- 10) Masaaki Hiroe, Nozomu Taniguchi: Noise reduction due to vibration damping estimated by measurement of particle velocity, ASEA-SEC-4, 2018.1