

在来線騒音対策工における 構造物音低減効果の 把握に関する一考察



伊戸川 絵美*



金子 達哉*

在来線沿線では、列車走行時に鋼鉄道橋から発生する構造物音が課題となっている。制振対策による構造物音低減効果を把握するため、供用終了後の鋼桁部材および鉄板数種類に磁性複合型制振材を貼付した前後について加振試験を実施し、対象振動面の面積、厚さ、周辺固定長等の物理量をもとに制振対策前後の総合損失係数 η_{total} を予測する手順を考案した。その結果、実測値と予測値との比較から、概ね精度良く予測できることを確認した。

●キーワード：鋼鉄道橋、制振材、構造物音、総合損失係数

1. はじめに

在来線沿線では、列車走行時に鋼鉄道橋（以下、鋼橋）から発生する構造物音が課題となっている。

これまで、鋼橋の低騒音化について様々な研究が行われてきたが、筆者らは構造物音の発生源となる鋼橋の桁部材に制振材を貼付し、振動を低減することにより構造物音を低減させる方法に着目し調査を行ってきた¹⁾。この調査では、供用終了後の鋼橋の桁部材を対象に数種類の制振材対策前後の加振実験を実施し、制振対策による振動低減効果が対策前後における対策面の総合損失係数 η_{total} から予測可能であることと、低減効果の実測値と実測の η_{total} から求めた予測値が概ね一致することを確認した。しかし、事前に効果を予測するには、鋼橋の主要な振動面の面積、厚さ、固定条件等において対策前後の η_{total} を推定する手法の確立が不可欠である。

そこで、鋼橋の主要な振動面における振動低減効果を予測するため、対象振動面の面積や厚さ等の各種条件をもとに η_{total} を推定する手法について新たに調査を行った。ここでは、供用終了後の鋼桁部材および鉄板数種類を対象とした、制振対策前後の加振試験結果から、各種物理量をもとに制振対策前後の η_{total} を推定する手順を考案したので報告する。

2. 平板および橋梁部材における加振試験

今回の調査では、制振対策前後における鋼橋の振動部位における総合損失係数 η_{total} を算定するため、インパクトハンマーを用いた加振試験を実施した。

2.1 平板および橋梁部材と制振材

本調査では、鋼橋の主要振動部位を数種類の試験体で模擬して加振試験を実施することとした。試験体としては、図1に示すように、プレートガーダーの腹板や、箱桁の腹板・下フランジ等と同程度の面積や厚さを含む鉄製の平板4種類（面積の小さい順に平板1～4という）と、供用終了後の鋼橋の一部を切断した橋梁部材1種類（腹板はA、Bの2面）を使用した。

制振対策は、図2に示すように、対象振動面の片側全面に磁性複合型制振材（縦450mm×横300mm）を貼付した。

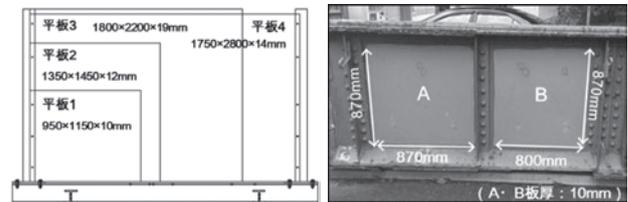


図1 平板1～4（左図）、供用終了後の鋼桁橋梁部材（右図）

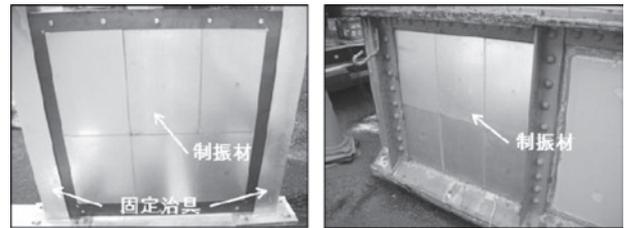


図2 磁性複合型制振材貼付状況（左図：平板、右図：鋼桁橋梁部材）

ここで、磁性複合型制振材とは、フェライト粉体を配合し着磁した磁性ゴム層に拘束層を接着積層した制振材で、磁性ゴム層の吸着力で振動面と固定される。

2.2 測定概要

振動測定では、平板1～4および橋梁部材A、Bの加振側の対象面全体に140mm～160mmの間隔で圧電式の加速度ピックアップRION PV-85/86を設置し、加振にはゴム製と鉄製の2種類のパッド部のインパクトハンマーを使用した。加振位置は、測定対象面が左右端部・上下端部で概ね対称と見なせることから、相反性および再現性が成り立つものと考え、加振点を測定対象面の1/4相当の範囲に限定すると共に、振動測定点と同様に140mm～160mmの間隔とした。

これにより、平板1および橋梁部材A、Bは振動測定点数、加振点が（49点、16点）、以下同様に、平板2は（90点、25点）、平板3は（208点、56点）、平板4は（228点、60点）となった。加振の際にはすべての加振位置においてゴム製、鉄製の2種類のインパクトパッド部による打撃を5～7回繰り返す行い、各打撃に対する振動加速度を振動面全体ごとに収録した。振動測定時における計測機器の系列図の例を図3に、測定対象面の加振側に設置した振動加速度ピックアップの状況の例として、平板1の状況を図4に示す。

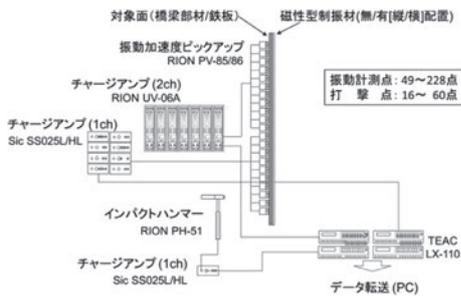


図3 振動計測時における測定機器系列図

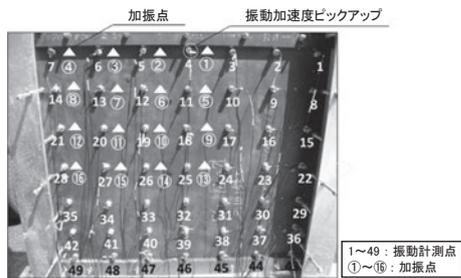


図4 平板1における振動計測点49点と加振点16点

3. 制振対策前後における総合損失係数の算定

3.1 分析方法

1回ごとの打撃加振に対して、平板あるいは橋梁部材の各測定点で得られた振動加速度の時間波形を125Hz～4kHzの6つの帯域に分け、式(1)に示す「シミュレータ積分法(インパルス応答積分法)」を適用して振動エネルギーの減衰曲線 $E_{vib}(t)$ を求めた。

$$E_{vib}(t) = \int_t^{\infty} \frac{a^2(\tau)}{a_0^2} d\tau = \int_0^{\infty} \frac{a^2(\tau)}{a_0^2} d\tau - \int_0^t \frac{a^2(\tau)}{a_0^2} d\tau \dots (1)$$

この減衰曲線は、板の曲げ振動のエネルギー減衰を表す残響曲線であり、この曲線をもとに定常状態のレベルから60dB減衰するまでに要する時間 $T_{60}(s)$ を読み取ったが、とくに今回の試験では、振動減衰が始まった直後から-5dBまで減衰するまでの初期減衰時間 $T'(s)$ から T_{60} を換算した。

測定データ数は加振点 ($i=16$ 点～60点、 M_i)、振動計測点 ($j=49$ 点～228点、 M_j)、5～7回の測定の繰り返し ($l=1$ 回～7回、 M_l)、2種類のパッド部の材質 ($n=1, 2$: ゴム製 ($n=1$) or 鉄製 ($n=2$), M_n) の組合せで決まる。1回の打撃加振に対して得られる振動加速度から125Hz～4kHzの6つの帯域 ($k=6, M_k$) の残響時間が得られることから、 $T_{60}(i, j, k, l, n)$ を繰り返し回数 l 、計測点数 j 、加振点数 i で平均化し、帯域別の残響時間の代表値 $T_{60}(k)$ を求めた。なお、125Hz帯域はゴム製 ($n=1$)、1kHz帯域以上は鉄製 ($n=2$)、250Hz帯域と500Hz帯域は両者の結果の平均値 ($n=1, 2$) とした。

$$f = 125 \text{ Hz}, T_{60}(k) = \frac{1}{M_i} \sum_i \left\{ \frac{1}{M_j} \sum_j \left(\frac{1}{M_l} \sum_l T_{60}(i, j, k, l, \text{rubber}) \right) \right\}$$

$$f = 250 \text{ Hz or } 500 \text{ Hz}, T_{60}(k) = \frac{1}{M_n} \sum_n \left\{ \frac{1}{M_j} \sum_j \left(\frac{1}{M_l} \sum_l T_{60}(i, j, k, l, n) \right) \right\}$$

$$f = 1 \text{ kHz}, 2 \text{ kHz}, 4 \text{ kHz}, T_{60}(k) = \frac{1}{M_i} \sum_i \left\{ \frac{1}{M_j} \sum_j \left(\frac{1}{M_l} \sum_l T_{60}(i, j, k, l, \text{steel}) \right) \right\}$$

..... (2)

125Hz～4kHzの帯域別の残響時間の代表値 T_{60} から、式(3)を用いて各帯域の総合損失係数 η_{total} を算出した。ここで、 f_c は各周波数帯域の中心周波数 (Hz) である。

$$\eta_{total} = 2.2 / (f_c \times \overline{T_{60}}) \dots (3)$$

3.2 分析結果

図5に、各振動対象面における対策前後の総合損失係数 η_{total} の周波数特性を示す。これらの結果は、3.1節で述べた振動減衰の残響時間 T_{60} の測定結果の代表値をもとに、式(3)を用いて計算したものである。

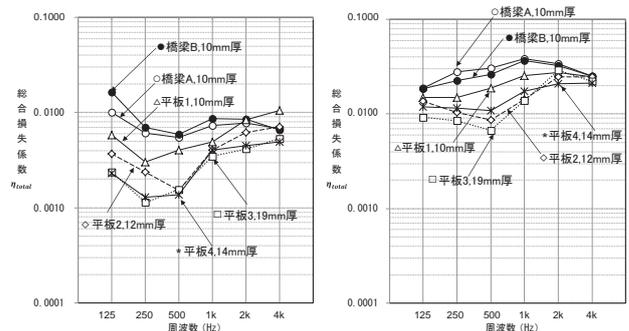


図5 対策前(左図)・後(右図)における各種対象面の総合損失係数の周波数特性

ここで、対策前の総合損失係数 η_{total} の特徴を見る。125Hz～500Hzの中低域の総合損失係数 η_{total} は板厚順ではなく(橋梁B(10mm)→橋梁A(10mm)→平板1(10mm)→平板2(12mm)→平板4(14mm)、3(19mm)の順から推測)、板の面積 S (橋梁B(0.70m²)→橋梁A(0.76m²)→平板1(1.09m²)の差異から推測)や、図6に示す固定境界の長さ l (橋梁A(3.48m)、B(3.34m)→平板1(1.9m)の順から推測)に依存していて、面積 S と反比例、固定境界長 l とは比例の関係にあることが分かる。一方、1kHz以上の中高域の総合損失係数 η_{total} は中低域ほど大きな差はなく、板の面積 S 、固定境界の長さ l に対する依存度が小さいと推察される。

つづいて、対策後の総合損失係数 η_{total} と板の面積 S 、固定境界の長さ l の関係を見ると、対策前ほど依存度は高くないものの、1kHz以下で両者の間に反比例あるいは比例の依存関係が見られる。

以上の結果から、対策前後の総合損失係数 η_{total} には、板の面積 S 、固定境界の長さ l に依存する特性と、それらに依存しない別の特性の2面性のあることが分かった。

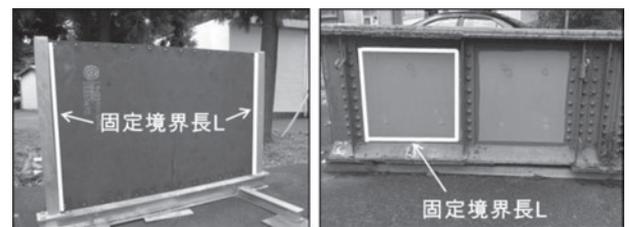


図6 鉄製の平板(左図)および橋梁部材(右図)における固定境界長 l

4. 制振対策前後における総合損失係数の予測

3章の検討結果をもとに、制振対策前後の総合損失係数 η_{total} を予測するモデルを考案した。本予測モデルでは、式(4)を用いて制振対策前後における板の曲げ振動減衰の残響時間 T_{60} (s)を予測し、その結果をもとに総合損失係数 η_{total} を求める(式(5))。

$$T \approx \frac{(2.2\pi/c_b)S}{-\ln(1-\bar{\alpha}) \cdot l \cdot \sqrt{f/f_c + (Q/c_b)S}} \dots\dots(4)$$

$$\eta_{total} = 2.2/(f \times T) \dots\dots(5)$$

ここで、 c_b は曲げ波の伝搬速度(m/s)、 S は対象振動面の面積(m^2)、 l は振動減衰に寄与する周辺境界の長さ(m)、 $\bar{\alpha}$ は周辺境界での平均振動吸収係数、 f_c はコインシデンス周波数(Hz)、 Q は内部損失の大きさを表す指標(数値)で、 \ln は自然対数である。なお、対象部材のヤング率を E (N/m^2)、面密度を m (kg/m^2)、厚さを h (m)、ポアソン比を γ (=0.3)、空気中の音速を c (m/s)とすると、 c_b 、 f_c はつぎの式(6)、(7)で求めることができる。

$$c_b = \left[2\pi f \sqrt{\frac{Eh^3}{12m(1-\gamma^2)}} \right]^{1/2} \dots\dots(6)$$

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi \sqrt{\frac{Eh^3}{12m(1-\gamma^2)}}} \dots\dots(7)$$

制振対策前後の総合損失係数 η_{total} を予測するため、対策前の未知数である周辺境界での平均振動吸収係数 $\bar{\alpha}$ と内部損失の大きさを表す指標 Q 、対策後の未知数の複合材のヤング率 E' (N/m^2)と制振材の損失を加味した指標 Q' を測定結果から確定し、予測モデルを構築することとした。なお、対策前後で内部損失を表す指標 Q やヤング率 E は変化するが、周辺境界での平均振動吸収係数 $\bar{\alpha}$ は変化しないと仮定した。

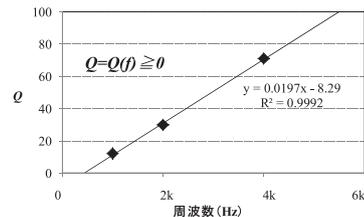
まず、対策前で内部損失 Q が非常に大きな場合について考えると、振動減衰の残響時間は式(8)で表される。

$$Q \gg -\ln(1-\bar{\alpha}) \cdot (c_b l / S) \cdot \sqrt{f / f_c}$$

$$T \approx \frac{2.2\pi}{Q} = const. \dots\dots(8)$$

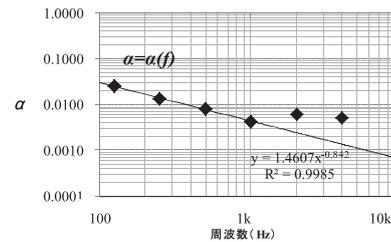
対策前の1kHz~4kHzの残響時間 T_{60} の測定結果から、式(8)を用いて内部損失の大きさを表す指標 $Q=2.2\pi/T$ を計算した。その結果を図7に示す。変数 Q は内部要因のエネルギー損失を表す量($Q \geq 0$)である。3.2節の結果より、125Hz~250Hzの中低域は内部損失の寄与が低かったことから $Q=0$ とした。

つぎに、対策前の指標 Q と残響時間の測定値をもとに、式(4)を用いて、周辺境界における平均振動吸収係数 $\bar{\alpha}$ を計算した。その結果を図8に示す。



周波数 (Hz)	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Q	0	0	1.57	12.07	30.13	70.85

図7 対策前の内部損失の大きさを表す指標 Q



周波数 (Hz)	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
$\bar{\alpha}$	0.0251	0.0136	0.0081	0.0043	0.0060	0.0051

図8 周辺境界における平均振動吸収係数 $\bar{\alpha}$

図7、図8に示す対策前の内部損失指標 Q 、周辺境界での平均振動吸収係数 $\bar{\alpha}$ を用いて、式(4)に面積等の物理量を代入し、平板1~4、橋梁部材A、Bの総合損失係数 η_{total} を推定した。測定結果と推定結果の比較を図9に示す。総合損失係数 η_{total} の推定値は、平板3において若干の乖離はあるものの、測定値とよく一致している。

つづいて、対策後の未知数、複合材のヤング率 E' と対策後の内部損失の大きさを表す指標 Q' について考える。初めに、複合材のヤング率 E' を算出するが、対策前後で駆動点インピーダンスに顕著な相違はないことから、対策前の駆動点インピーダンス Z_p (式(9))と対策後の駆動点インピーダンス Z_p' (式(10))を等価と置き、複合材のヤング率 E' を求める式(11)を導出した。ここで、 ρ 、 h は基材の密度(kg/m^3)と厚さ(m)、 $\Delta\rho$ 、 Δh は制振材の密度(kg/m^3)と厚さ(m)である。式(11)を用いて推定した複合材のヤング率 E' を式(6)、式(7)に代入して、複合材の曲げ波速度 c_b' とコインシデンス周波数 f_c' を算出する。ただし、複合材の面密度は $m'(kg/m^2) = \rho h + \Delta\rho \Delta h$ 、厚さは $h + \Delta h$ である。これらの結果を式(4)に代入し、未知数 Q' を求めた。最終的に、対策後の指標 Q' を基材(鉄板)の面密度 m の関数として整理した結果を図10に示す。なお、鋼橋の主要な部材の鉄板の厚さは9mm以上であり、点線で示す面密度以上が適用範囲である。

$$Z_p = 8 \sqrt{\frac{\rho E h^4}{12(1-\gamma^2)}} \dots\dots(9)$$

$$Z_p' = 8 \sqrt{\frac{(\rho h + \Delta\rho \Delta h) E' (h + \Delta h)^3}{12(1-\gamma^2)}} \dots\dots(10)$$

$$E' = \frac{\rho E h^4}{(\rho h + \Delta\rho \Delta h)(h + \Delta h)^3} \dots\dots(11)$$

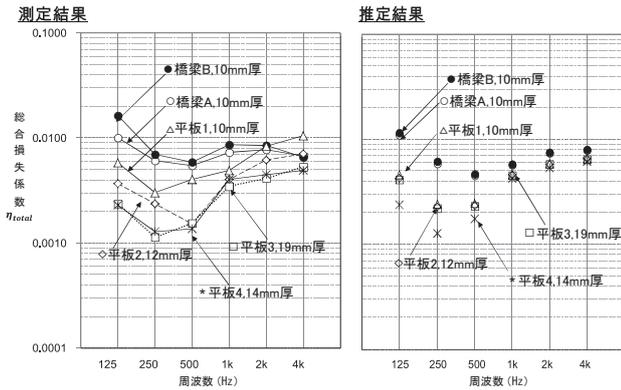


図9 測定結果と推定結果の周波数特性の比較
(対策前の総合損失係数 η_{total})

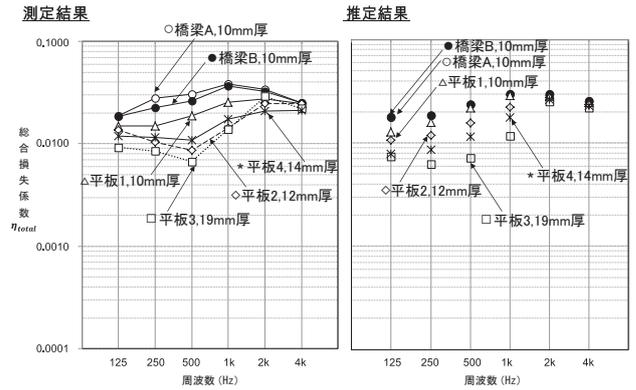


図11 測定結果と推定結果の周波数特性の比較
(対策後の総合損失係数 η_{total})

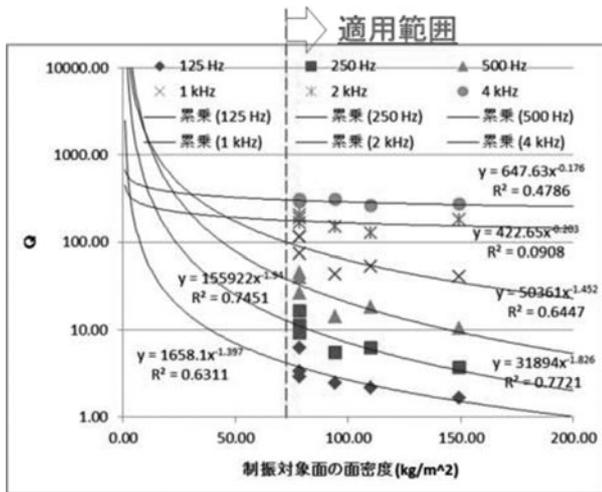


図10 対象振動面の面密度と対策後の指標 Q' の関係

対策後の内部損失の大きさを表す指標 Q' と複合材のヤング率 E' 等から求めた複合材の曲げ波速度 c_b' とコインシデンス周波数 f_c' 、周辺境界における平均振動吸収係数 a など、式(4)に代入して推定した平板1~4、橋梁部材A、Bの対策後の総合損失係数 η_{total} と、測定結果の比較を図11、12に示す。総合損失係数 η_{total} の推定結果は、一部の測定結果と若干相違があるものの、測定結果と概ね一致していると考えられる。

今回提案した予測手法は、対策前後の内部損失を表す指標 Q 、 Q' 、ヤング率 E 、 E' と、周辺境界での平均振動減衰率 a を用意することで、対策面の面積、厚さ、周辺固定長さ等の各種物理量から総合損失係数 η_{total} が計算可能な形式になっており、今回の加振試験で取り扱った鉄製の平板や橋梁部材以外の振動面にも適用可能である。

ただし、本予測手法は残響時間 T_{60} 等の統計的指標をベースにした関係式であるため、対象とする振動面は十分な振動モード数を持ち、振動場が拡散状態を満たすことを前提としている。このため、極端に振動モードが少ない条件への適用は避ける必要があると考える。

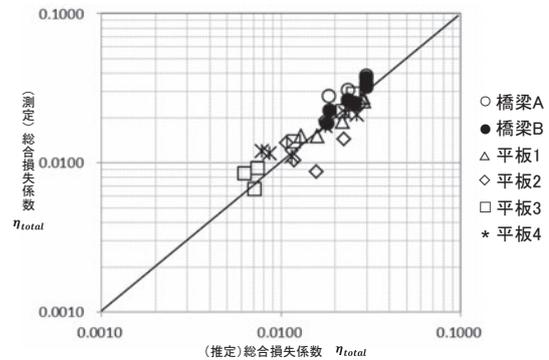


図12 対策後の総合損失係数 η_{total} に関する測定結果と推定結果の比較

5. おわりに

供用終了後の鋼桁部材および鉄板数種類を対象とした制振対策前後における加振試験の結果、対象振動面の面積、厚さ等の各種物理量をもとに制振対策前後の総合損失係数 η_{total} を予測する手順を考案した。

今後は、制振対策前後の総合損失係数 η_{total} をもとに振動低減および構造物音低減効果を精度良く予測する手順を整理するとともに、制振対策後の沿線騒音²⁾についても予測できるように研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 今裕之、柳沼謙一他：鋼鉄道橋による騒音・振動の低減効果に関する実験的研究、日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集、pp.53~56、2010.9.
- 2) 伊戸川絵美、石川聡史他：数値計算による構造物音を含む在来鉄道騒音の予測、JR EAST Technical Review No.37、pp.55~60、2011-Autumn