

# 軌道騒音防止システムの開発

## ーウレアウレタン樹脂と防音パネル併用による騒音防止対策ー

### Development of Railway-noise Reduction System - Noise Prevention Measures by Combining Urea-urethane Resin and Soundproofing Panel -

森本克秀\* 稲留康一\*\* 塚本耕治\*\* 津田晃宏\*\*\*

#### 要旨

市街地に位置する鉄道鋼製桁は、列車走行時の騒音がコンクリート桁と比べて大きく、騒音が問題となっている地域もある。防音壁等の設置は騒音対策に有効であるが、自重や風荷重による既設鋼製桁の構造的な負担を大きくする対策法の採用は難しい。これまでに実施した既設鋼製桁のウェブにウレアウレタン樹脂を塗布する試験施工により一定の騒音低減効果を得た。本研究ではさらなる騒音低減を目的として、開床式の鉄道鋼製桁へ水平方向に使用できる防音パネルを開発し、前述の対策工に併用することで基準点において最大 4.5dB の騒音低減効果を得た。

キーワード：鉄道橋梁、鋼製桁、騒音、ウレアウレタン樹脂、防音パネル

#### 1. まえがき

鉄道鋼製桁はコンクリート桁と比べて列車走行時の騒音が大きく、住宅が近接する市街地では騒音問題となっている地域もある。一般軌道の騒音防止対策には、レールやまくら木からの振動・騒音を抑制する方法、砂利（バラスト）布設やロングレール、弾性材によるまくら木支持などの軌道構造を改良する方法が採用されている。これに対し、鉄橋部の防音対策には周辺に遮音壁を設置する対策が効果的であるが、既設鋼製桁の重量増や風荷重増加など構造的に負担を大きくする対策の適用は難しい。このような対策は、新線建設時に採用されるに止まっている。

一般的な鋼製桁における主な騒音源には、レールと車輪の接触による転動音、鋼製桁の振動に伴い発生する構造物音、開床式では転動音と構造物音が桁下から廻り込む騒音（廻り込み音）がある。構造物音を抑制する方法としては、磁性制振ゴムを桁ウェブに貼り付ける方法もあるが、桁重量が大きくなり、さらに脱落の危険性からウェブに穴を開けてボルト締めが必要な場合もあり、桁に対する構造的負担が大きい。

一方、平成 13 年に実施した試験施工では、鋼製桁にウレアウレタン（以下、UU と表記）樹脂を塗布する工法を実施すると、基準点（軌道中心から 12.5m 離れ、地表面から 1.2m の位置）で 2dB 程度の騒音低減効果を得

確認している<sup>1)2)</sup>。UU 樹脂は、磁性制振ゴムよりも軽く、鋼材への付着性と防食性に優れており、制振機能があるので構造物音抑制に対して有効である。桁下からの廻り込み音や転動音に対しては、桁下や軌道横に防音パネルを設置すれば、さらに騒音低減効果が向上すると期待できる。構造物音以外の騒音には防音パネルが有効であるとの考えに基づき、開床式の鋼製桁において、UU 樹脂の塗布と防音パネルを併用した総合的な騒音対策システムの開発を行った。

#### 2. UU 樹脂による制音効果

構造物音の抑制に使用する UU 樹脂は、表-1 に示す基本性能を持ち、遮水性、遮塩性に優れ、鋼材に対して高い付着力を有する樹脂であり、これまでコンクリート構造物の防水、防食に用いられてきた。鋼材への付着力が大きい弾性体であることから、鋼製桁に対する制音効果があると考え、室内試験を経て実橋において確認試験を行った。

室内試験では、厚さ 9mm の母材の両側に 5mm の塗膜を行うと 5dB の制音効果がある予想されたが、実橋による試験では基準点において 2dB 程度の騒音低減効果であった。同方法では構造物音を低減できるが、転動音と桁下からの廻り込み音を抑制することができないので、これらを抑制する方法が必要であった。

\*東日本支社環境技術部 \*\*技術研究所 \*\*\*西日本支社環境技術部

表一 UU 樹脂の基本性能

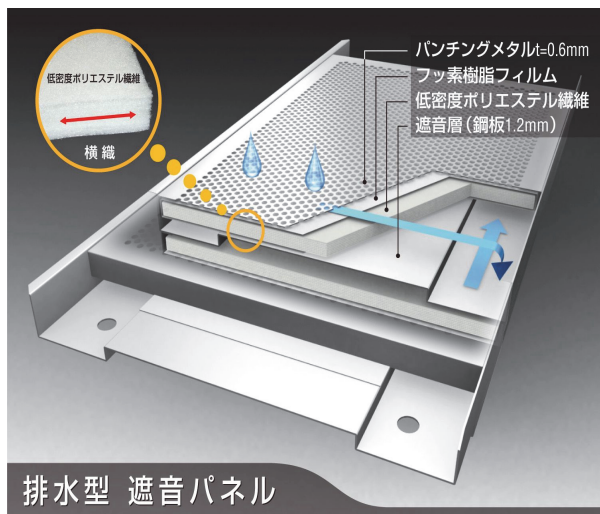
項目		結果	
基本物性	引張強度	10	(MPa)
	伸び率	500	(%)
	引裂強度	500	(N/cm)
	比重	1.08	
	ゲルタイム	20	(sec)
性能	耐酸性試験	異常なし	
	耐アルカリ試験	異常なし	
	付着力試験		
	コンクリート	2.3	(MPa)
	鉄板	4.4	(MPa)
	塩素イオン透過試験	0.0007以下	(mg/cm <sup>2</sup> ・日)

### 3. 防音パネルの開発

鉛直方向に適用する防音パネルには既製品があるが、水平方向に適用する防音パネルは市販されていない。前者のパネルは、廻り込み音を遮音および吸音するものであるが、鉛直方向に使用する場合よりも降雨による影響を受けやすい。このため、一定量以上の雨水の蓄積により重量が増加しない、降雨後に滴下しないといった仕様が求められたので、これに適合する防音パネルの開発を行った。さらに、桁下を通行する車両からの走行音が反響しないようにする必要があるので、両面に吸音材を設置する構造を採用した。

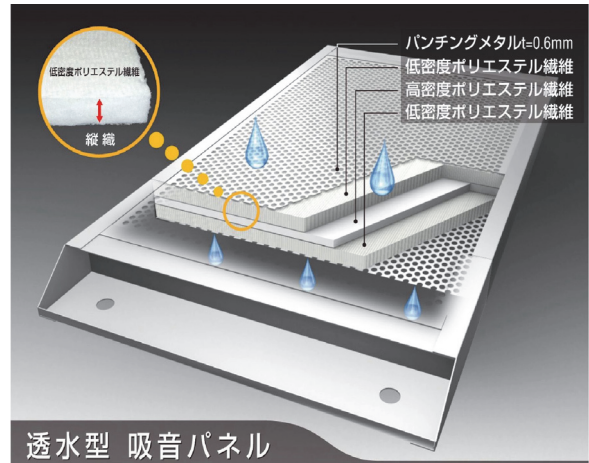
#### 3.1 パネルの構造

防音パネルとして、排水性と遮音・吸音性を重視した TYPE-A、透水性と吸音性を重視した TYPE-B を考案した。TYPE-A は、1.2mm 厚鋼板の遮音板の両端を折り曲げて両側に排水溝と下面に空気層を形成し、その上下面に吸音材を設置して、遮音を重視しつつ吸音機能を有した構造とした (図一 参照)。吸音材をフッ素樹脂フィルムで覆い、低密度ポリエステル繊維が吸水することを防止している。



図一 排水型遮音パネル (TYPE-A)

TYPE-B は、遮音層の高密度ポリエステル繊維を吸音層の低密度ポリエステル繊維で挟み込んだ構造とした (図二 参照)。ここで使用するポリエステル繊維は、水平方向に使用した場合でも排水しやすいように織り方が工夫されたタイプを使用した。両タイプとも上下の外表面を穴あき鋼板 (パンチングメタル) で覆っている。



図二 透水型吸音パネル (TYPE-B)

#### 3.2 基本性能試験

製作した防音パネルの遮音、吸音に対する性能を確認するため、実験室における音響透過損失試験と残響室法吸音率試験を実施した。音響透過損失試験は、JIS A 1441-1:2006 「音響インテンシティレベル法における建築物および建築部材の空気遮断性能の測定方法—第1部：実験室における測定」に基づき、残響室内スピーカーよりピンクノイズを発生させ、その時の半無響室側試料より 0.1~0.3m 離れた位置のインテンシティレベルの測定を行った。インテンシティ音響透過損失  $R_1$  は、音源室内で測定した室内平均音圧レベルと隣接する受音室で測定したノーマルインテンシティレベルから計算する音響透過損失で、次式から求まる。

$$R_1 = L_{P1} - 6 - \left[ \bar{L}_{in} + 10 \log_{10} \left( \frac{S_M}{S} \right) \right] \quad (1)$$

ここで、

- $L_{P1}$  : 音源室における室内平均音圧レベル [dB]
- $\bar{L}_{in}$  : 受音室内に設定した測定面上のノーマル音響インテンシティレベルの平均値 [dB]
- $S_M$  : 測定面の総面積 (m<sup>2</sup>)
- $S$  : 測定対象の資料の面積 (m<sup>2</sup>)

残響室法吸音率の測定は、体積 314.6m<sup>3</sup>、表面積 257.8m<sup>2</sup> の残響室において約 10 m<sup>2</sup> の試験体を床面に設置して実施した。JIS A 1409 「残響室法吸音率の測定方法」に準じ、試験体ごとの残響時間および空室時の残響時間を測定し、計算により吸音率を算出した。

TYPE-A、B 両防音パネルの音響透過損失を図一 3 に、

残響室法吸音率を図-4に示す。TYPE-Aのパネルは、遮音板に鋼板を使用していることもあり、中高周波数帯域で高い透過損失を示している。残響室法吸音率では、上下面吸音材の背後空気層厚さが異なるため、低周波数帯では上面、中高周波数帯では下面で吸音率が向上している。また、吸音材の厚さが小さいため、TYPE-Bの防音パネルと比べると吸音効果が中高周波数帯で小さくなっている。

TYPE-Bの防音パネルは、遮音板に高密度ポリエステル繊維を用いており、鋼板に比べ密度が小さいことから、透過損失は全周波数帯で小さくなっている。その一方、中詰めのポリエステル繊維全体が吸音効果を発揮するため、吸音率は中高周波数帯において優れた性能を示している。

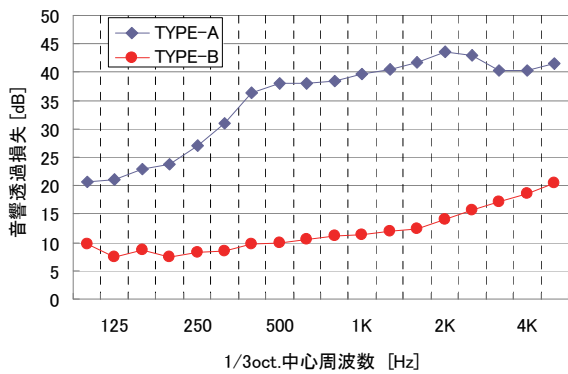


図-3 音響透過損失試験結果

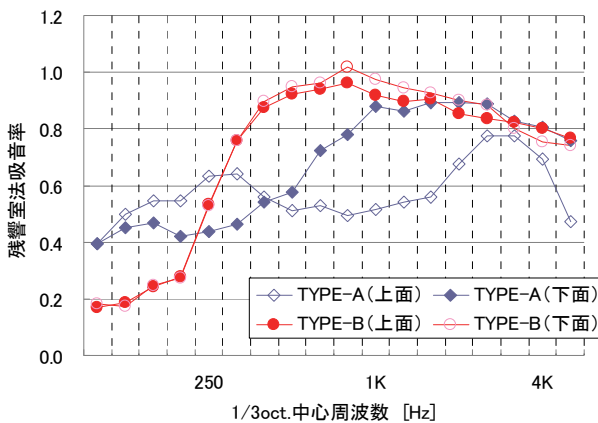


図-4 残響室法吸音率試験結果

### 3.3 防音パネルのたわみおよび排水試験

防音パネルを水平方向に使用する場合には、防音パネル兼通路としての使用、および降雨時の吸水による重量増加が考えられる。このため、所定荷重に対するたわみ試験と降雨を想定した滞水試験を行った。

防音パネルのたわみ試験では、2点支持状態で足場の想定荷重  $110\text{kg/m}^2$  (実際には  $120\text{kg/m}^2$  を載荷) の載荷時に  $L/200$  以下 ( $L$  はパネルの全長=1.5m) であることを確認した。試験の結果、各防音パネルの最大たわみ量

は、TYPE-A が  $3.23\text{mm}$ 、TYPE-B が  $2.28\text{mm}$  となり、許容値 ( $7.5\text{mm}$ ) 以下であった。

吸水による重量増加に対する確認試験は、均等に散水できる試験装置を製作し、降雨を想定した散水を行いながら、図-5に示す方法で防音パネル重量の変化を測定した。なお、TYPE-Aの吸音材はフィルムで被覆されており、散水後には直ちに排水されることを確認したので、同試験を省略した。

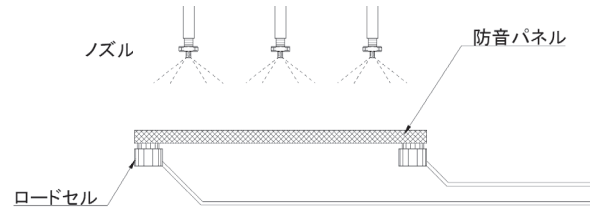


図-5 散水試験装置の概要

散水量は強雨を想定した  $128\text{mm/hr}$  とし、防音パネル重量が定常状態になるまで散水した後、散水を停止した。重量の測定の結果を図-6に示す。散水開始から1000秒後(17分後)に、防音パネルの重量は  $9\text{kg}$  から  $15\text{kg}$  に増加し定常状態になった。散水停止後に  $2\text{kg}$  まで減少するが、その後はほぼ一定の重量である。

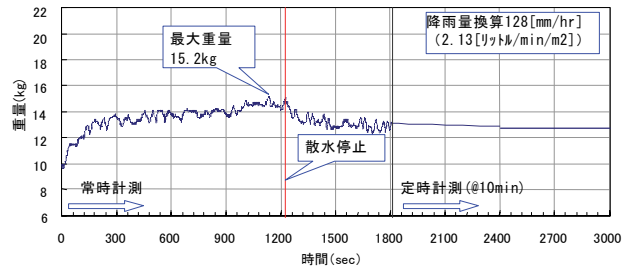


図-6 128mm/hr 散水時のパネル重量変化

確認試験の結果より、当該防音パネルは、載荷重によるたわみが許容値以下であり、通常の使用には問題ないことを確認した。TYPE-Bの防音パネルは、通常の降雨では増加量が  $4\sim 6\text{kg}$  であり、その後も滴下がないことが明らかになった。さらに、滴下がない状態での重量減から、滞水の蒸発によって2日後にはほぼ元の重量に戻ると予測される。以上のことから、 $1500\text{W}\times 500\text{W}\times 50\text{H}(\text{mm})$  サイズで  $9\text{kg}$  の TYPE-B は、重量制限のため  $15\text{kg}$  の TYPE-A よりも重量増を抑制したい場合に有効である。

## 4. 実橋試験における騒音低減効果の確認

### 4.1 実橋における騒音測定

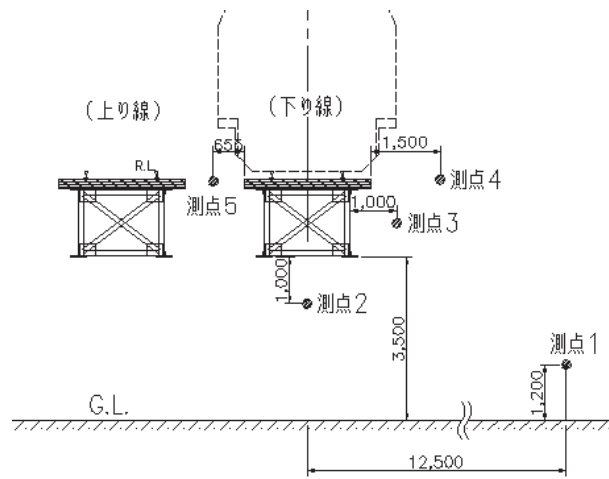
#### a. 目的

実橋における実証試験として、供用中の橋梁(桁長  $13.4\text{m}$  の上路鋼鈹桁)に開発した防音パネルを設置し、騒音・振動測定を実施した。この橋梁において、平成

13 年に鋼製桁の制音を目的として UU 樹脂（5 mm 厚）を桁ウェブ両面に塗布する試験施工を実施している。今回の実証試験は、防音パネルの騒音低減効果を目的とするものであるが、これまでの UU 樹脂による騒音低減効果も併せて効果の検証を行った。

b. 測定方法

防音パネルの設置パターンを図-7に示す。桁下フランジ上に開発した2種類の防音パネル、軌道横に工事騒音対策に用いられる一般の防音パネルを用い、無対策時と各組合せ時の測定値の差から騒音低減効果を確認した。測定は、桁中央部の橋軸直角断面において図-8に示す5測点で行った。できるだけ測定条件が平均化されるよう、各測定を行う5日間にわたり平日の同一時間帯に30本の電車騒音を測定し、そのうち騒音レベルが最大値の上位20本を評価対象とした。



- 測点1：軌道中心から12.5m位置 (GL+1.2m)
- 測点2：桁下開口中心位置 (桁・下フランジ-1m位置)
- 測点3：桁ウェブから1m位置
- 測点4：レール近傍位置 (まくら木端部から1.5m位置でまくら木と同じ高さ)
- 測点5：上り線と下り線の間 (まくら木の同じ高さに設置し、対策時の相互比較用の基準値とする)

図-8 測定点位置図

c. 各対策の測定結果

基準点 (測点1) における各対策ごとの測定データのうち、騒音レベル最大値の上位20列車を対象として

設置パターン	①	②	③	④	⑤
対策イメージ					
対策概要	無対策	桁下にTYPE-Bパネルを設置	桁下にTYPE-Aパネルを設置	桁下にTYPE-Bパネル、軌道横に工事パネル設置	桁下にTYPE-Aパネル、軌道横に工事パネル設置

図-7 設置パターン

A 特性音圧レベルを求めた。測定ケースごとのデータから求めた A 特性音圧レベルについて、測点5 (桁間) における無対策時と各対策の差を図-9に示す。

上下線の間位置する測点5における低減量は、測定日ごとに異なる通過列車の種類や速度の影響を受けており、防音パネルからの反射等の影響をほとんど受けていないと考えられる。すなわち、音源が同じであればどの測定ケースでも同じ騒音レベルになるので、測点5の増減量に基づき測点1~4の測定値を補正した数値を表-2に示す。これらの値は、すでにUU樹脂による制音対策が実施されているため、防音パネルのみによる低減効果である。

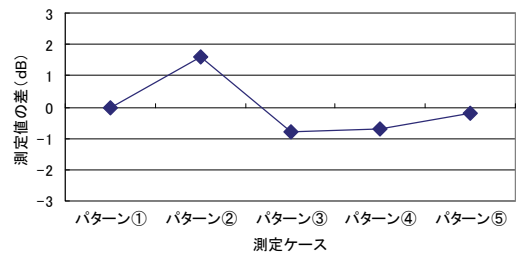


図-9 測定値 (測点5) の増減

表-2 防音パネルによる対策低減効果

設置パターン	測点位置			
	測点1 (基準点)	測点2 (桁下)	測点3 (桁横)	測点4 (軌道横)
②	0.5	5.2	0.9	0.5
③	0.5	6.1	0.7	0.1
④	2.2	5.2	0.4	4.1
⑤	2.6	6.4	0.9	4.6

単位：dB

測点2 (桁下) では、桁下の防音パネルによる構造音や転動音が遮音されるため、最も低減効果が大きい。遮音効果の大きい TYPE-A を使用したときに、この傾向はより顕著である。測点4 (軌道横) では、軌道横の防音パネルが設置されたときには転動音が遮音されるため、低減効果が大きくなっている。測点1 (基準点) では、橋梁の高さが地上より 3.5m と低いこともあり、桁下よりも軌道横の防音パネルの影響がより大きく現れている。

4.2 測定データの基づく騒音源の推定

列車走行に伴う鋼製桁からの騒音源は、列車走行に伴う転動音、各種構造物から発生する構造物音などである。

今回の実橋試験で対象とした橋梁（上路鋼桁）では、主な騒音源はレール振動から発生する転動音と、鋼製桁ウェブの振動から発生する構造物音であると考えられる。対策工の効果をシミュレーションすることを目的に、参考文献<sup>3)4)</sup>の音源分離の方法を参考にして以下の方法により各音源を推定した。転動音の音源位置は、軌道中央でレール高さとした。構造物音の音源中心位置は、水平方向を軌道中央、鉛直方向を縦桁高さの 1/2 とした。音源の推定は、列車の転動音と構造物音の音源を測点 2 および 4 の音圧レベルから推定する。

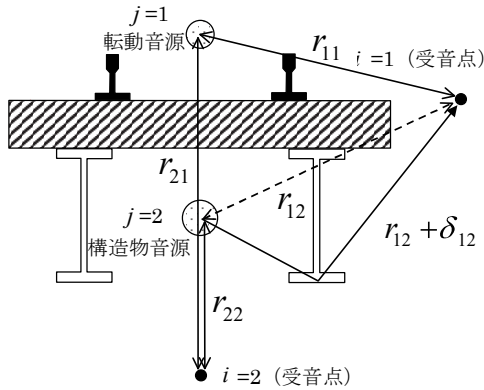


図-10 音源と測定位置の関係

音源を ( =1 ; 転動音源、 =2 ; 構造物音源)、受音点を ( =1 ; レール近傍、 =2 ; 桁下直下) で表す。各音源で発生し、受音点に伝播される騒音は音響伝搬特性を考慮して次式で与えられる。

$$L_{p_{ij}} = L_{w_j} + \Delta L_{ij} \quad (2)$$

$$\Delta L_{ij} = -8 + 10 \log \left[ \frac{2}{r_{ij}} \tan^{-1} \left( \frac{1}{2r_{ij}} \right) \right] + \Delta L_{d_{ij}} \quad (3)$$

ここに、

- $L_{p_{ij}}$  : 音源別騒音レベル (dB)
- $L_{w_j}$  : 線路方向単位長さあたりの線音源パワーレベル (dB/m)
- $r_{ij}$  : 音源 j と受音 i 点間距離(m)
- $l$  : 線音源の長さ、列車長 (m)
- $\Delta L_{d_{ij}}$  : 障害による減音量 (dB)

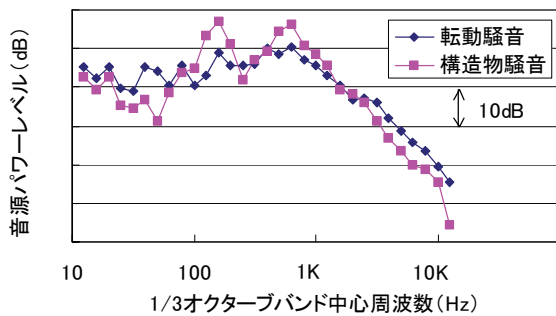


図-11 音源のパワーレベル

無対策時の標準的と思われる特定の列車騒音のデータを用い、周波数ごとに式(2)(3)より音源として転動音、構造物音に対するパワーレベルを推定した結果を図-11に示す。

推定した音源は、測点 2 および 4 の騒音レベルと類似した特性を示している。

### 4.3 計算による周辺騒音レベルの推定

前章で求めた音源パワーレベルを基に、逆音線法によるシミュレーションを行い、基準点における音圧レベルの計算を行った。モデル化は、橋台や鋼製桁などの構造物を設定せずに、音源および防音パネルだけを考慮した疑似 3次元モデルとした。音源は、橋長に等しい構造物音、列車長 (8両編成) に等しい転動音を有限長の線音源として与えた。

無対策時の測点 1 における A 特性音圧レベルについて、計算値と測定値の比較を図-12 に示す。音圧レベルは、全周波数にわたってほぼ一致しており、オールパス値では両者の差は 1.9dB である。無対策時の計算値は、近接する測点の測定値から求めた音源を基にシミュレーションしているため、影響が距離減衰に限定され、比較的測定値とよく一致したと考えられる。

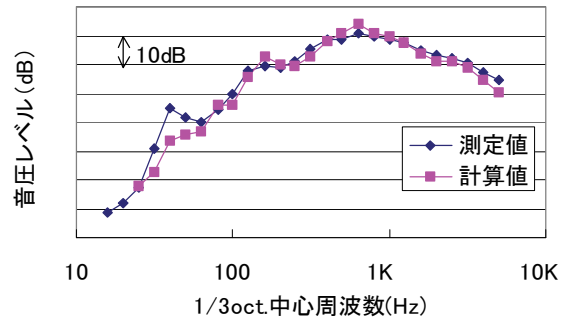


図-12 計算値と測定値の比較

今回のような無対策時のシミュレーションでは、ある程度実際に近い結果を得ることができた。しかし、防音パネル設置時には、鋼製桁や周辺構造物の反射や吸音などを反映した 3次元のモデル化が必要と考えられる。今後、前章で求めた転動音および構造物音をもとに、実態を 3次元モデルで反映できるシミュレーションにより、対策工実施前に各対策工の効果を把握できるようにしたい。

### 5. 騒音低減効果の推定について

これまでに実施した下り線の鋼製桁のウェブに UU 樹脂を塗布した実橋試験では、実際に UU 樹脂が構造物音の低減に寄与した結果、測点 1 (基準点) において片面塗布時 1.7dB、両面塗布時には 1.9dB、桁下では 2.3dB

の騒音低減効果が得られた。一方、今回の実橋試験では、防音パネルは UU 樹脂が施工された状態から、主に転動音の低減に寄与した結果、基準点（測点 1）で表-2 に示す効果が測定された。したがって、UU 樹脂がない状態から防音パネルを施工すると、このときの低減効果は表-2 を若干上回るものと予想される。

今回の実橋試験の低減効果である表-2 は防音パネルだけの効果であるので、全くの無対策から UU 樹脂をウェブ両面に塗布し、防音パネルを設置した場合には、両者の効果を加算した値になると考えられるので、騒音低減効果は表-3 のように推定できる。表-3 の推定値は、今回実橋試験を行った橋梁において推定した数値であり、条件が異なる場合には異なる効果が得られるが、他物件に適用する上での参考値になるものと考えられる。

表-3 各対策の騒音低減効果

対策種別	推定低減効果	
	基準点 (桁中心から 12.5m高さ 1.2m)	桁下直下 (桁中心の桁 下1.0m)
無対策	—	—
UU片面(t=5.0mm)	1.7	2.8
UU両面(t=5.0mm×2)	1.9	3.0
UU両面+桁下 (TYPE-A)	2.4	8.2
UU両面+桁下 (TYPE-B)	2.4	9.1
UU両面+桁下 (TYPE-A) +軌道横	4.5	8.2
UU両面+桁下 (TYPE-B) +軌道横	4.1	9.4

単位：dB

## 6. まとめ

本研究において開発した防音パネルについて、以下の見解を得た。

- i. TYPE-A のパネルは遮音性に優れ、TYPE-B は吸音性に優れており、パネル重量も考慮して使用条件によって使い分ける必要がある
- ii. 載荷重によるたわみは許容値 (L/200 : L はパネル全長) 以下であり、防音パネル兼通路として使用できる
- iii. TYPE-B の防音パネルは降雨量に応じて滞水量が増加するが、通常の降雨では増加量は 4 ~ 6 kg 程度であり、その後も滴下がないため、使用上の問題は無い

実橋試験における測定、およびこれらを基にしたシミュレーションによる検討を行い、以下の知見を得た。

- i. 防音パネル設置前であれば、桁下と軌道横の測定データから音源を推定し、逆音線法によるシミュレーションから基準点の音圧レベルをオールパス値 1.9dB 程度の差で推定できる
- ii. 現段階ではシミュレーションで防音パネルの騒音

低減効果を検証できないので、実橋試験で把握した騒音低減効果を参考に、各対策の騒音低減効果を推定するのが妥当である

- iii. UU 樹脂、および今回開発した防音パネルを併用すれば、一事例ではあるが基準点において最大 4 ~ 4.5dB 程度の騒音低減効果が得られることを確認できた

## 7. あとがき

本報告は、市街地にあるため騒音低減が問題となる橋梁を想定しているが、実際には橋長や橋梁の設置高さだけでなく、舗装の有無、車両の通行、並びに建物の近接度合いなどの周辺環境の違いにより効果は異なると思われる。今後、条件の異なる橋梁に同工法を適用して実績を蓄え、詳細にモデル化できるシミュレーションと測定結果の比較から、騒音低減効果を推定できるようにしたい。

また、水平方向に使用する防音パネルの実績が少ないため、耐久性や性能変化を観察する目的で、試験を実施した橋梁に防音パネルを存置しており、今後も経過を観察していく予定である。

なお、防音パネルの開発にあたっては、栗本鐵工所およびクリモテクノスとの共同研究により実施した。

## 謝辞

実橋試験の場を提供して頂いた阪急電鉄には、この場を借りてお礼を申し上げます。

## 【参考文献】

- 1) 上田宗市、中川、西山、稲留、「ウレアウレタン樹脂の塗装による鋼製桁の騒音対策」、第 59 回年次学術講演概要集、IV pp. 209-210、2004
- 2) 西山宏一、稲留、上田、中川、「ウレアウレタン樹脂の騒音対策への適用に関する室内実験」、第 59 回年次学術講演概要集、VI pp. 665-666、2004
- 3) 北側敏樹、長倉、緒方、「在来鉄道における騒音予測手法」、鉄道総研報告、No. 12、pp. 41-46、1998
- 4) 半村征規、杉本、長倉、「鋼構造物騒音の部材ごとの寄与度解析および対策材料の検討」、RRR、pp. 14-18、2007. 2