

高架構造物音推定方法の検討

日本道路公団試験研究所 正会員 紺野義仁、山本稔、オリエンタルコンサルタンツ 石川賢一

1. はじめに

橋梁構造から発生する固体放射音である高架構造物音のレベルが、場合によっては遮音壁等の対策を行った上空伝搬音より大きなケースがあることが近年分かってきている。本稿では、近似計算による振動と放射音の関係を求め、供用前の高速道路における試験車走行の結果と放射面積の値を比較したものである。

2. 振動と放射音の関係

振動、特に振動速度レベルと放射音の関係は、特に低い周波数帯域において様々な検討がなされている。床版放射音のパワーが有効面積 S_0 を通して伝達されるとする。放射される単位面積あたり音の強さレベル L は、放射パワーの有効面積あたりの値となる。また橋梁直下では放射音は平面波的挙動をすると仮定すれば、床版直下の点の音圧レベルと等しくなり、音の強さレベルが音圧レベルとほぼ等しいとし、音圧レベルは次のように表される。

$$L_p = 10 \log_{10} \sigma + L_v + 10 \log_{10} (S/S_0) = 10 \log_{10} \sigma - 20 \log_{10} f + 10 \log_{10} (S/S_0) + L_a + 30.2 \dots \dots \dots (1)$$

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{\tilde{p}^2}{p_0^2}, L_v = 10 \log_{10} \frac{\tilde{v}^2}{v_0^2}, L_a = 10 \log_{10} \frac{\tilde{a}^2}{a_0^2}, p_0 = 2 \cdot 10^{-5} N/m^2, v_0 = 5 \cdot 10^{-8} m/s, a_0 = 1 \cdot 10^{-5} m/s^2$$

[L_p : 音圧レベル、 L_v : 振動速度レベル、 L_a : 振動加速度レベル、 σ : 放射効率、 f : 周波数、 S : 放射面積、 S_0 : 有効面積]

ただし、この関係は床版あるいは橋梁桁下部の放射音を平面波であると仮定する場合の関係である。高架構造物音の対策を考える場合、床版あるいは桁の振動と放射音の関係を明確に捕らえ、有効かつ経済的なものとなるようにしなくてはならない。このため、PC 中空床版橋と Me 鋼桁橋での橋梁下実測音場と各部振動の関係を求めることにより、どの部位の振動がどれだけ放射音に寄与しているかを様々な手法により上記の放射面積を推定することにより検証してみた。

3. 放射効率

橋梁からの放射音については曲げ波の影響が大きいことが知られている。表-1 に実測試験を行った PC 床版および Me 床版・桁についての曲げ波の速度および臨界周波数を示す。

これより、PC 中空床版橋の場合、臨界周波数は約 17Hz、Me の床版では約 80Hz、桁では約 1,250Hz 付近にあり、この範囲以下で放射効率を考える必要がある。

Heckl らの放射効率についての検討に依れば、「構造物内の振動の波長、および振動面のディメンションが音の波長より大きい場合、放射効率はほぼ 1 としてよい」とあり、音の波長と構造物内の振動の波長および振動のディメンションの関係から、臨界周波数以下で放射効率を考慮すればよいと推察される。

	PC	Me	
	床版 (t=1.2m)	床版 (t=250mm)	桁 (t=10mm)
要素の幅	10m	10m	4 主桁 2m
ヤング率 E(N/m ²)	2.6 × E10	2.6 × E10	2.1 × E11
質量 (kg/m ³)	2,300	2,300	7,800
μポアソン比	1/6	1/6	1/3
曲げ波速度(m/s)	83.0√f	39.1√f	9.6√f
臨界周波数	16.8Hz	75.8Hz	1,258Hz

表-1: 諸定数および曲げ波速度、臨界周波数

4. Plain Radiator

Cremer らの検討に依れば、平板上に微小分割要素を設け、互いの要素が 180° 位相の異なるよう配置された放射体を考えれば、放射面よりある程度離れた位置での音圧レベルを予測できるとしている。今、半径 a の微小な球体を考え、この球体が振動している場合の r 離れた任意点の音圧は、放射効率まで含んだ形で、式(2)のように表現できる。このような微小な球状放射体が平面に並んだ状態を考える。式(2)から得られる各微小要素を合計したものが任意点の音圧であるとするなら、式(3)のように表される。試験を行った橋梁の放射音と振動の関係を Cremer らの方法によりモデル化してみた。今、周波数ごとに曲げ波の波長を考える。曲げ波の波長の 1/2 の大きさを微小要素分割単位 b とし、この全体が一定の振動速度 v で振動するとすれば、単位面積の各要素からの音圧寄与は式(4)のように与えられる。

$$p = v_a \frac{i\omega\rho a^2}{1 + ika} \frac{1}{r} e^{-ik(r-a)} \dots \dots \dots (2)$$

$$p = i\omega\rho \sum \frac{(v_a a^2)_n}{(1 + ika)_n} e^{-ik(r-a)} \dots (3)$$

$$p = v \frac{i\omega\rho}{1 + ika} a^2 \sum_{n=0}^{n1-1} \sum_{m=0}^{n1-1} \frac{1}{r_{n,m}} e^{-ikr_{n,m}} e^{-i\pi(n+m)} \dots (4)$$

キーワード：騒音、振動、環境、高架構造物音

日本道路公団 〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1 Tel.:042-791-1621 TeleFax:042-792-8650

ただし、 $a=b/2$ で、この中に放射効率も含まれる。これより任意点における音圧レベルを求めると式(5)となる。

$$L_p = L_v + 10 \log \frac{v_0^2}{p_0^2} + 10 \log \left| \frac{i\omega\rho}{1+ika} a^2 \sum_{n=0}^{n_1-1} \sum_{m=0}^{n_1-1} \frac{1}{r_{n,m}} e^{-ikr_{n,m}} e^{-i\pi(n+m)} \right|^2 = L_v - 52.0 + 10 \log \left| \frac{i\omega\rho}{1+ika} a^2 \sum_{n=0}^{n_1-1} \sum_{m=0}^{n_1-1} \frac{1}{r_{n,m}} e^{-ikr_{n,m}} e^{-i\pi(n+m)} \right|^2 \dots(5)$$

上式右辺の2,3項が放射面積と放射効率に関する寄与項となると考えられる。ピーク時の桁下音場を式(5)を用いて予測してみる。長方形の要素適用を考え、式(5)を次のように変換する。

$$L_p = L_a - 20 \log f + 30.2 - 52.0 + 10 \log \left| \frac{i\omega\rho}{1+ika} a^2 \sum_{n=0}^{n_1-1} \sum_{m=0}^{n_1-1} \frac{1}{r_{n,m}} e^{-ikr_{n,m}} e^{-i\pi(n+m)} \right|^2 = L_a - 20 \log f - 21.8 + 10 \log \left| \frac{i\omega\rho}{1+ika} a^2 \sum_{n=0}^{n_1-1} \sum_{m=0}^{n_1-1} \frac{1}{r_{n,m}} e^{-ikr_{n,m}} e^{-i\pi(n+m)} \right|^2 \dots(6)$$

計算に用いる要素の大きさはPC 中空床版橋で全幅 10m、鋼桁橋で床版が桁と桁の間にはさまれる幅 2.5m を与えるものとする。また縦断方向はピークレベルから 3dB 以上低下が見られない 0.5 秒範囲での対応を考え 11m (80km/h 相当) を与えた。また、反射は一回反射まで考慮し、PC 橋、Me 橋の実測値から得られる放射面積と比較した。

PC 中空床版橋について放射面積の推定結果を図 1 に示す。

この図は 1m 離れ位置での床版中央と、中央から横に 5m 離れた場合の放射面積相当分を示している。この結果から実測値より得られる放射面積に比べ、低い周波数をのぞいてよい相関があるばかりでなく、125Hz 以上の放射面積の形状もよく一致している。

同様に鋼桁橋の床版と桁の放射面積を推定した。床版では低い周波数の寄与はほとんど無く、630Hz 付近から上で実測値に近い値となった(図-2)。桁については、ほぼ全域で実測値より小さな値となり、桁の寄与は考えられないという結果となり、桁については別途検討が必要となった。

5. 桁放射音の検討

桁放射音は上記のようなポイントラジエータを用いた手法では説明が出来ず、坂上らによる放射の考え方から推定する方法を検討した。

鋼桁は 1.25kHz 以下の周波数で周辺媒体である空気の波数より波数が大きい。このような場合は、桁を励起するような振動荷重がかかる場合に大きな放射がなされることが知られている。桁にかかる最も大きな荷重とは、床版と桁の接合点であると推定される。このため最も単純にモデル化しやすい床版との接合部について検討した。桁の床版との接合点を中心とし、中心部に振動荷重がかかると仮定する。また、鋼桁の中央部への荷重は単位長さ 1m にかかる点加振を考え、両端のフランジ部は剛な構造と仮定し、両端での変位は拘束されていると仮定する。このとき、点荷重がガーダー表面にかかるものとする。このとき原点から x 方向 l の位置に点荷重がかかったとすると、r 離れた点での音圧は以下のように近似できる。(D : 曲剛性、 α : 減衰定数、h : 厚さ、 ν : ポアソン比、 $k_n = n\pi/2L_x, n=1,2,3,\dots$)

これから放射面積相当分を求めることができた。この結果を図-3 に示す。

またこの値を 1/3 オクターブバンド範囲でエネルギー平均し、床版および桁の推定結果と放射面積の実測値を比べたものが図-4 で

ある。特に高い周波数と低い周波数での桁の

寄与は大きく、中間の 1000Hz 付近では床版が大きい、全体的には桁の寄与の方で決まるといえる。以上から、ある程度実測結果の再現が出来たと考えている。

なおこれまで求めた放射面積とは、放射効率を含んだものであることを付記する。

$$p(r) \cong \omega^2 \rho_0 F_0 \frac{e^{ik_0 r}}{2\pi r} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2k_n}{DL_x (k_n^2 - k_0^2 \cos^2 \phi \sin^2 \theta)} \left[(k_n^2 + k_0^2 \sin^2 \phi \sin^2 \theta)^2 - \mu^4 \right] \times \begin{cases} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \cos k_n l \cos(k_0 L_x \cos \phi \sin \theta), n = 1,3,5,\dots \\ i(-1)^{\frac{n}{2}} \sin k_n l \sin(k_0 L_x \cos \phi \sin \theta), n = 2,4,6,\dots \end{cases} \dots(7)$$

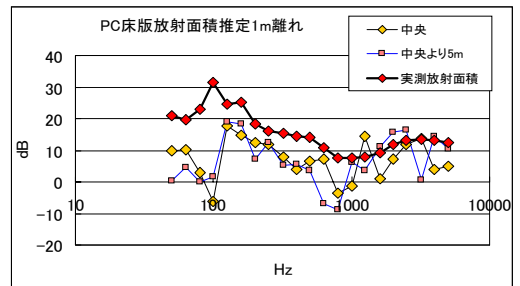


図 1 PC 中空床版橋の放射面積推定

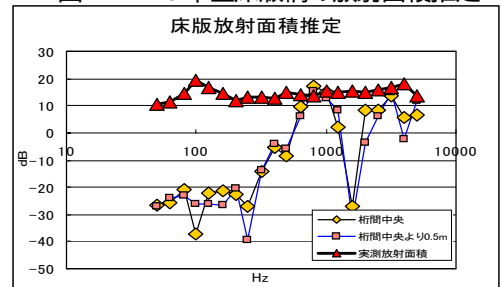


図 2 床版放射面積の推定

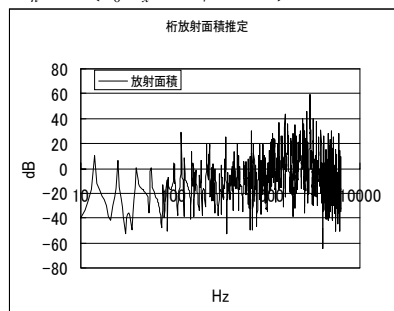


図 3: 桁放射面積の推定

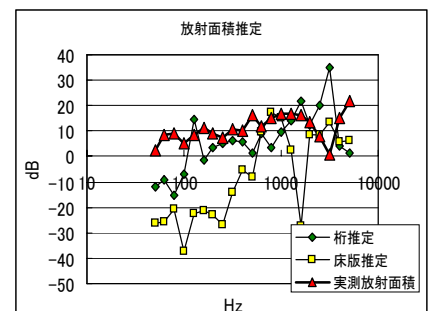


図 4: 放射面積の比較