

九州大学	工学部	○正員	鳥野 清
九州大学	工学部	正員	園田 敏夫
九州工業大学		正員	高西 照彦
九州大学	工学部	正員	小坪 清真

1. まえがき

著者等は先の模型（スパン長2m、幅員20cm、アクリル板による単純梁）および実橋（トラス道路橋、全長390m、幅員30m）に対する実験結果から以下に示す低周波空気振動の一般的性質を明らかにした¹⁾。まず、模型実験から(1)、低周波空気振動の音圧は橋体の振動加速度に比例する。(2)、音圧は橋体の振動数に対して無関係である。(3)、音圧の分布は橋体の振動加速度分布に相似した形となる。次に、実橋に対する実験から(1)、実橋の音圧分布、距離減衰は地形の変化等による音圧の反射の影響を大きく受け模型実験とかなり異なる。(2)、橋体自身の振動だけでなく、ジョイント通過時の車の衝撃が低周波空気振動の発生源となっている。

そこで、今回の研究は橋体振動から発生する低周波空気振動の音圧レベルおよび距離減衰を理論的に解析し、今後の低周波空気振動による公害対策に役立てようとするものである。

2. 解析理論

2.1. 橋円柱の振動を用いた2次元解析

橋体直下で発生している音圧は橋体のスパン長および幅員に比べて、橋体に非常に近い距離の音圧であることから、2次元解析で十分に求められるものと思われる。したがって、図-1に示すような長軸2a、短軸2bの橋円柱の上下方向振動を考えてみる。橋円柱のb=0とあれば、幅員2aの平板となり、橋体の振動を考えることになる。図-1に示した橋円柱が短軸(z)方向に振動する場合の空気分子の運動方程式は橋円柱座標を用いて、次式となる。

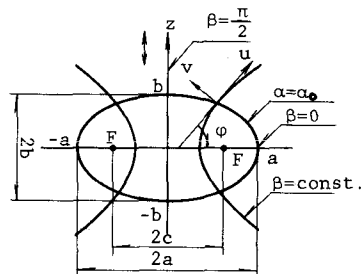


図-1

図-1

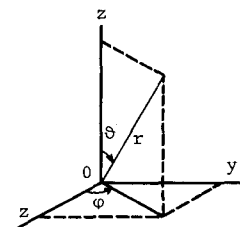


図-2

$$\rho \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \rho \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{\rho_w \partial^2 p}{E_v \partial t^2} \quad (1)$$

ただし、 ρ_w : 空気密度 E_v : 空気の体積弾性率 p : 空気の動圧

$$r^2 = c^2 (\cos h 2\alpha - \cos 2\beta) / 2 \quad c^2 = a^2 - b^2 \quad (a > b)$$

いま、橋円柱が短軸方向に $-\tilde{\alpha} e^{i\omega t} / \omega^2$ で振動している場合の境界条件は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} p|_{\beta=0} &= 0 & p|_{\alpha=\infty} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial \beta} \Big|_{\beta=\frac{\pi}{2}} &= 0 & \frac{\partial p}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=\alpha_0} &= -i \tilde{\alpha} \rho_w \sin \phi e^{i\omega t} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 g : 重力加速度 $\tilde{\alpha}$: 音源表面（橋体）の加速度 ϕ : 橋円表面上の法線とx軸とのなす角

(2)式を(1)式に代入して整理すれば、結局 Mathieu の微分方程式を解くことによって、空気の動圧 p を求めることができる。²⁾

2.2. 球の振動を用いた3次元近似解析

橋体からかなり離れた点での音圧は、橋体のあらゆる点から発生した音圧の影響を受けているはずである。しかも、橋体の振動モードは各点で異なっていることから、この影響を考慮するためには3次元解析を行なう必要

があろう。そこで、図-2に示すような座標をとり、球が z 方向に振動する場合を考えてみる。この場合の空気分子の運動方程式は次式となる。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \frac{\partial p}{\partial \theta}) - \frac{\rho_0}{E_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

ここで、次に示す境界条件を用いて(3)式を解けば、1個の球が振動した場合の空気の動圧 p が求められることになる。

$$\left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_0} = -\tilde{\alpha} \rho_0 \cos \theta \cdot e^{i\omega t} \quad (4)$$

r_0 : 球の半径

次に、図-3に示すように、半径 r_0 の半球が平板の幅員(B)方向に m 個、橋軸(L)方向に n 個、隙間なく並び平板面と垂直方向(z 方向)に振動しているモデルを考える。この場合、各球の加速度は橋の1次の加速度分布(図-3中の α_1)を用いる。したがって、図-3における任意の点 Q の音圧は先の(3)、(4)式から求められる1個の球振動の結果を用い、各球から伝播してくる音圧を重ね合わせることで求めることができる。

3. 解析結果

表-1は先に述べた模型および実橋に対し、 $b=0$ の楕円柱による2次元解析で求めた橋体直下に発生する音圧レベルである。この計算に用いた音源表面の加速度 $\tilde{\alpha}$ および橋体の円振動数 ω は実験から得られた値で、模型において $\tilde{\alpha}=44.7 \text{ gal}$ 、 $\omega=43.4 \text{ rad/s}$ 、実橋において $\tilde{\alpha}=517 \text{ gal}$ 、 $\omega=23.9 \text{ rad/s}$ である。表中の理論値と実験値を比較してみると両者はよく一致している。一方、模型に対して、図-3に示したように半径 $r_0=1 \text{ cm}$ の

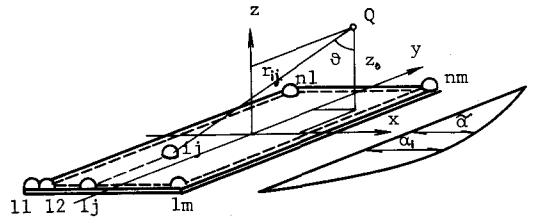


図-3

	実験値	理論値
実橋	106 dB	105 dB
模型	80 dB	79 dB

表-1

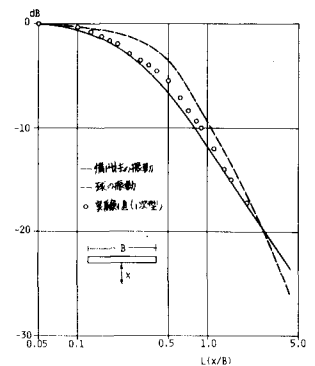


図-4 橋幅員中央点の距離減衰

半球が $n=100$ 、 $m=10$ 、合計1000個の半球が橋面にあるものとして3次元解析を行なった。この解析法で得られた橋面直下の音圧レベルは当然ながら実験値に比べてかなり小さな値となり、橋面直下の音圧レベルは楕円柱による2次元解析で求めた方がよい結果が得られる。図-4は橋面直下の音圧レベルからの距離減衰を示したもので、模型に対する計算結果である。図中の○印は模型実験値、—は2次元解析、---は3次元解析の結果であり、測点はスパン中央における幅員中央点上である。図-4をみると、橋面からの距離 x と幅員 B の比 $L=x/B$ が1.0以下では2次元解析の方が3次元解析よりも実験値と合っているが、 $L=1.0$ 以上では逆に3次元解析の方が実験値に合っている。

以上の計算結果から、橋面直下における音圧レベルは楕円柱を用いた2次元解析で求め、この値からの距離減衰は球の分布を用いた3次元解析結果を使用すれば、橋体から発生する低周波空気振動を理論的に推定することができるであろう。しかしながら、2次元解析で求めた橋面直下の音圧レベルは1次振動のように橋体が比較的一様に振動している場合に実験値と一致したが、2次振動のように逆位相で振動する場合などかなり異なってくるものと思われる。また、図-4に示した距離減衰は音圧の反射等による影響を全く考慮していない。実際、著者等が行なった実橋に対する実験と模型実験の結果を比較してみると、実橋では地形等による反射の影響がかなりみられた。これらの問題については今後の研究課題としたい。

1)、島野、園田、上山「低周波空気振動に関する基礎的研究」土木学会第34回年次学術講演会 1979.10

2)、N.W.McLACHLAN「Theory and Application of Mathieu Functions」

Oxford at The Clarendon Press