

京都大学大学院工学研究科 学生会員 ○増田康男
 京都大学大学院工学研究科 正会員 西村直志

1 序論

構造物は、外力によって振動する。その振動が構造物周囲の空気粒子を振動させ、音波として伝わる。この音波の中には周波数が数十ヘルツ以下の、人間の耳には直接、知覚されない低周波音がある。この構造物の振動に伴う低周波空気振動については、実験および解析の両面で様々に研究されてきている。しかし、解析による研究で時間変化にともなう音圧の変化を扱った研究はあまり行なわれていないように思われる。

本研究は、走行荷重に伴う橋梁の低周波振動のモデルとして段差のある板の上を一自由度のばね - 質量系からなる走行荷重が、一定速度で走行する際に遠方で発生する音圧を求めるという問題を仮定し、段差と遠方での音圧との関係を調べたものである。

2 解析方法

本解析では、現象は空間的に三次元とし、構造物を一様断面の長方形薄板とした。今、板の中央を走行荷重が、一定速度で走行する場合について考える。また、音圧を板のたわみと板の周囲の空気の振動のみに起因するものとする。

まず、板に関する運動方程式を有限要素法によって離散化し、荷重に関する運動方程式とばねに関する構成関係式とを連立させることによって板のたわみ形状を解く。

次に、空気粒子の速度ポテンシャル ϕ は波動方程式に従い、また、板のたわみの速度 $\dot{w}$ と板の境界での空気の速度は等しいという関係と使って、板の振動によって発生する板の上下面間の速度ポテンシャル ϕ の差 $\varphi = [\phi]$ に関する次の変分方程式を得る。

$$\begin{aligned} \int_S \psi(\mathbf{x}) \dot{w}(\mathbf{x}, t) dS_{\mathbf{x}} &= - \int_S \frac{\partial \psi}{\partial S}(\mathbf{x}) \int_S \int_0^t \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial S}(\boldsymbol{\xi}, \tau) dS_{\boldsymbol{\xi}} d\tau \\ &\quad - \int_S \psi(\mathbf{x}) \int_S \int_0^t \Gamma \ddot{\varphi}(\boldsymbol{\xi}, \tau) dS_{\boldsymbol{\xi}} d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 Γ は波動方程式の基本解、 ψ は test 関数、 S は板の占める領域である。また、 $(\dot{}) = \partial/\partial t$ であり、適当な無次元化によって空気中の音速は 1 とした。式 (1) を Galerkin 法によって解くことができる。

最後に、音圧が速度ポテンシャルの時間微分に比例することに注意して音圧 P の積分表現式に遠方場近似を用いると、式 (2) を得る。

$$P(\mathbf{x}, T) \simeq \frac{1}{4\pi} \int_S \int_t \frac{\ddot{\varphi}(\boldsymbol{\xi}, T + \hat{\mathbf{x}} \cdot \boldsymbol{\xi})}{|\mathbf{x}|} \quad (2)$$

ここに、 $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}/|\mathbf{x}|$ を表す。また、 T は波の到達時刻から計った時間である。

3 解析結果と結論

解析については、文献 1 を参考にし、表 1 に示した値を用いた。また、表 2 の条件に示すように、段差のある場合とない場合、および、観測点が鉛直上方と鉛直から 30° および 45° 傾いた場合について板から 20m の位置での時間変化に伴う音圧の解析を行なった。なお走行荷重の速度 u は、104.85km/h であり、1.6 秒で板の両端の間を通過する。

表1 数値計算の諸元

荷重の質量 M	1.5×10^4 kg	ばね定数 k	4.21×10^6 N/m
板剛性 D	4.0×10^{12} Nm ²	板の長さ	46.6 m
板の幅	10.0 m	板の厚さ	0.21 m
板の単位面積あたり質量 m		5.42×10^3 kg/m ²	

表2 解析条件

図	条件	u (km/h)
1	段差なし。観測点を鉛直上方、鉛直から30°、45°幅方向に傾ける	104.85
2	左端から11.5m(0.40秒)の地点に1cmの段差あり。鉛直上方で観測。	104.85

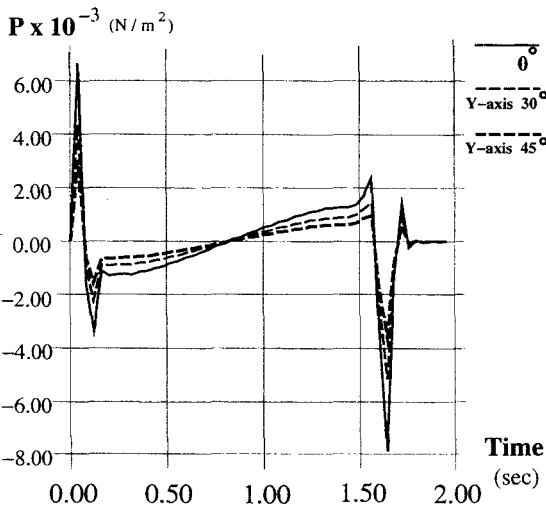


図1 走行荷重による音圧の時間変化

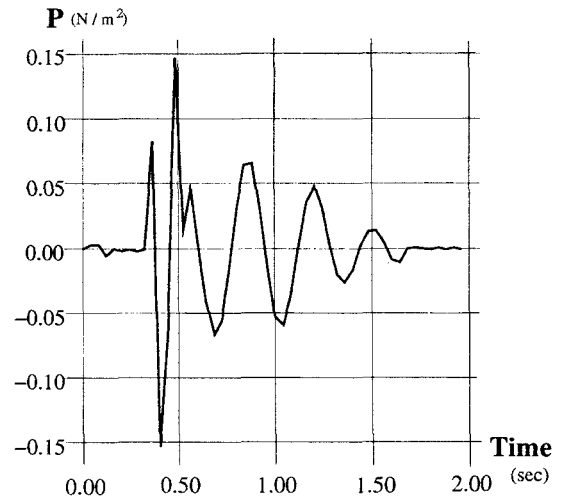


図2 走行荷重による音圧の時間変化

上の解析結果の図1から段差のない時は板の端部で、また、図2から段差が存在する時は段差でそれぞれ大きな音圧が発生していることがわかる。以上から、構造物の出入部、及び段差を走行する時に大きな音圧が発生する。これは、段差などによって外力がばねを通して板に作用するためと考えられる。

図1から板の振動によって発生する音は鉛直上方で最も大きく観測されることがわかる。これは板が上下方向にのみたわむためと考えられる。

4 最後に

今回の解析では簡単な走行荷重を取り扱ったが、より自動車に近い特性の荷重を取り扱うことも可能である。これにより、より現実の問題に近い解析を行なうことも可能であろう。

参考文献

1. 深沢泰晴・杉山俊幸・中原和彦・水上浩之：「車両走行時に道路橋から放射される低周波音の基本特性」構造工学論文集 Vol.37A, pp.945-956, 平成3年3月