道路橋から発生する低周波音に係る３次元有限要素法解析の試み

（株）高速道路総合技術研究所　正会員　○岩吹　啓史
（株）高速道路総合技術研究所　正会員　長船　寿一
（株）建設環境研究所　正会員　志村　正幸
（株）建設環境研究所　正会員　上明戸　昇

１．目的

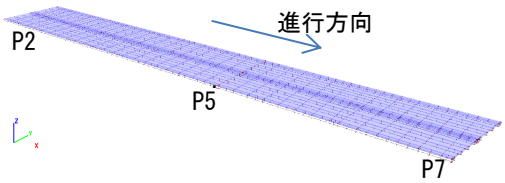
橋梁（道路橋）が低周波音発生の一因となっていることは既往の研究で多く報告されているところであるが、近年、橋梁形式の多様化や、環境対策や維持管理を目的とした橋梁付属物が設置されていること等から、低周波音の発生メカニズム究明や対策工の選定が困難な状況にある。費用対効果の高い対策工を行うためには、問題となっている全ての橋梁を低周波音の発生要因と想定される部材（床版・主桁の他、裏面吸音板や遮音壁などの橋梁付属物を含む）について現地測定を行い、データを整理し分析結果より発生原因を特定した上で効果的な対策工を策定することから、膨大な労力と費用を必要とする。筆者らは、調査の省力化とシミュレーションによる対策工の効果を推測するため、３次元有限要素法を用いて橋梁の動的応答解析から低周波音の音響解析を試みた。

また、音響解析結果より低周波音を可視化し、発生部位の寄与度を定量評価するとともに対策効果を分かりやすく整理することを目指している。これにより、低周波音の影響を受ける道路沿線住民に対し、道路管理者が現状の報告と対策工の計画について理解を得られやすい説明を行うことができる。

本報告において、FEM 解析により低周波音の音響解析を実施した事例を紹介する。

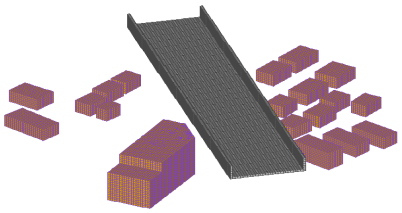
２．解析モデル検討

対象橋梁は、高速道路の高架橋（鋼３径間連続４主鈑桁）である。沿道住民から低周波音と思われる苦情が寄せられた橋梁で、主な要因は床版と考えられるが、当該箇所に設置されている主桁からの吊り下げ構造の裏面吸音板が、低周波音の発生を増幅させている可能性があり、検証のため解析を行った。



図－１　解析モデル（動的応答解析）

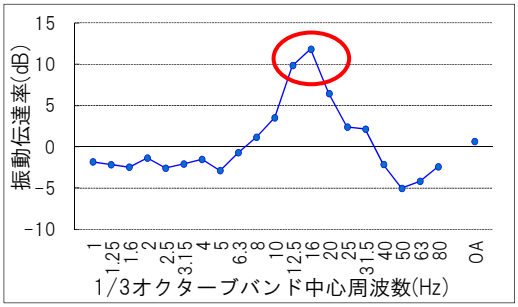
橋梁の動的応答解析は、既存商用コード DALIA（(株) 構造計画研究所）を使用した。（**図－１**）P4～P5 間が対象箇所であり、隣接する連続径間を含んでモデル化した。運動方程式を有限要素法で離散化し、非定常外力（車両走行）に対して逐次時間積分を行い非定常な応答解析を行った。


図－２　解析モデル（音場解析）

音場解析は、橋梁の動的応答解析から算出された橋梁全体の振動速度波形を荷重速度として設定し、橋梁全体を音圧放射の対象として FEM 解析を行った。メッシュ数は、対象周波数を 30Hz（1 波長約 10m）とし、1 波長を 10 分割して 1m メッシュ（要素数約 72 万）で設定した。（**図－２**）

３．実橋調査

対象橋梁に大型試験車両（日産ディーゼル：KL-CD48ZWH、3 軸大型車両、総重量 245kN）[1)] を走行させ、主桁・床版・橋脚・裏面吸音板・支承等の部材の振動加速度・低周波音を合計 80ch で同期計測を行った。その結果の一例として、床版から裏面吸音板への振動伝達率を表したグラフが**図－３**である。12.5Hz、16Hz 帯域の振動加速度において、裏面吸音板は床版より Leq で約 10～13dB の増加が見られる。

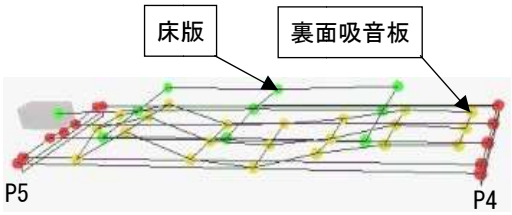


図－３　Leq の振動伝達率（床版から裏面吸音板）

キーワード　高速道路，道路橋，低周波音，FEM，シミュレーション，可視化
連絡先　〒194-0035　東京都町田市忠生 1-4-1　（株）高速道路総合技術研究所　ＴＥＬ042-791-1621

４．大型試験車両走行による動的応答解析

大型試験車両を単独走行させた場合の車両の振動加速度を計測し、モード形状確認のためアニメーションを周波数毎に作成した。**図－４**に 16Hz 帯域（1/3oct.）のアニメーション作成事例を示す。その結果、床版に対して裏面吸音板の方が大きく振動する傾向が確認された。



図－４　16Hz 帯域（1/3oct.）のアニメーション

５．低周波音響解析

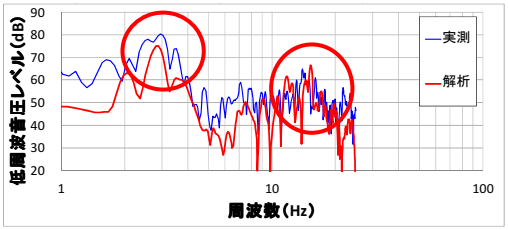
音場の基礎方程式は、原始変数で記述すると次の連続式と運動方程式で表わされる。

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}=0 \qquad \rho\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial y}=0 \qquad \rho\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial z}=0 \qquad \rho\frac{\partial p}{\partial t}+\rho C^2\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)=0$$

ここでの未知数は u、v、w と p の 4 変数であるが、計算の効率化のため、速度ポテンシャルφを導入して波動方程式を導出し、未知変数をφのみとして計算を行った。

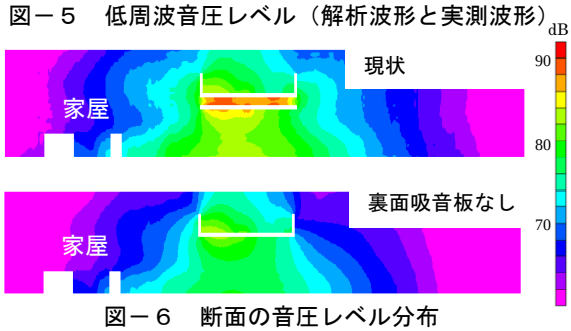
$$p=\rho\frac{\partial \varphi}{\partial t} \qquad u=-\frac{\partial \varphi}{\partial x} \qquad v=-\frac{\partial \varphi}{\partial y} \qquad w=-\frac{\partial \varphi}{\partial z} \qquad \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}-C^2\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right)=0$$

音場解析の妥当性を検証するため、低周波音圧レベルの実測波形と解析波形を比較した。（**図－５**）3.15Hz、16Hz 帯域（1/3oct.）付近の卓越周波数において概ね一致する傾向が示された。



図－５　低周波音圧レベル（解析波形と実測波形）

裏面吸音板の影響を調べるため、裏面吸音板があるケースと無いケースにおいて、音場解析を行った 7 秒間のエネルギー平均から求めた等価音圧レベル（Leq）を比較した結果を**図－６**に示す。断面の音圧分布をみると、裏面吸音板がある場合、家屋近傍の音圧レベルが大きくなる傾向が確認できる。

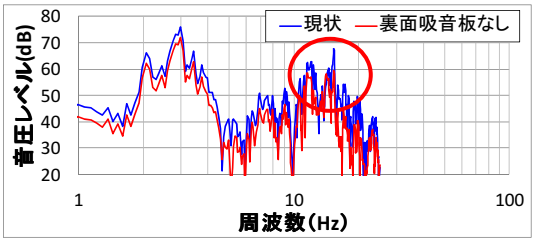


図－６　断面の音圧レベル分布

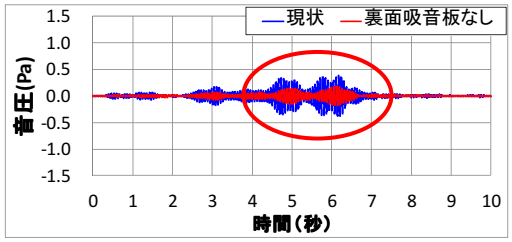
裏面吸音板の有無による違いを**図－７**に示す。周波数特性は、裏面吸音板がある場合に 16Hz 帯域（1/3oct.）で約 7dB 増加する結果であった。時刻歴の音圧波形をみると、裏面吸音板がある場合は同帯域で振幅が 2 倍程度に増加している。

以上から、今回解析した橋梁の裏面吸音板は、低周波音の発生を増幅させる要因であると考えられる。

a）周波数特性



b）16Hz 帯域（1/3oct.）



図－７　裏面吸音板の有無による違い（　a）家屋近傍の周波数特性　b）家屋近傍の音圧波形）

６．まとめ

実橋調査の測定結果と動的応答解析・低周波音響解析より、橋梁の有限要素法の３次元モデルとその非定常解析を行った。今回は、この手法により裏面吸音板が低周波音の発生を増幅させる要因となるケースがある結果を得た。この手法は現状を把握するだけでなく、設定条件を変えることにより、原因究明や対策効果の予測が可能になる。また、アニメーションでアウトプットが出来るため、説明資料として非常にわかりやすく、今後の低周波音問題や振動問題への対応ツールとして有効活用が期待できる。

参考文献

１）深田宰史、薄井王尚、梶川康男、原田政彦：解析上で斜角延長床版化した橋梁の振動・音響特性に関する一考察、構造工学論文集 Vol. 53A, pp. 287-298, 2007. 3