

道路橋における床版支間・床版厚が床版振動特性に及ぼす影響

Investigation on vibration characteristics of highway bridge deck slabs

村上琢哉* 川畑篤敬**

Takuya Murakami, Atsunori Kawabata

*工修 JFE 技研 (株) 土木・建築研究部 (〒210-0855 神奈川県川崎市南渡田町 1 番 1 号)

**工修 JFE エンジニアリング (株) 鋼構造事業部計画部開発技術室 (〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町 2-1)

This paper deals with the vibration characteristics of highway bridge deck slabs. First, preliminary designs of some plate girder bridges with several deck slab spans were prepared. Next, eigenvalue analyses were conducted using their 3-dimensional bridge models. In addition, time domain vehicle moving simulations were also conducted by using a simple vehicle model and a bridge model having runway surface roughness. It is found that the span and thickness of the deck slab influences on the dynamic response caused by vehicle traffic. The thickness of 320mm required by Specifications for Highway Bridges for slabs spanning 6m shows better dynamic performance, compared with the shallow deck slab of 180mm thickness. The sound pressure level is also affected by the thickness of the deck slab.

Key Words: Highway, deck slab low-frequency sound

キーワード: 道路橋, 床版, 低周波音

1. まえがき

道路橋の床版は荷重を直接支持するため、輪荷重の繰返しによる疲労損傷の発生が従来より報告されてきている。これらの床版損傷に対して、過去に幾度となく道路橋示方書の改定が行われ、最小床版厚、床版の設計曲げモーメント、配力鉄筋量、鉄筋の許容応力度などが見直されてきている¹⁾。したがって R C 床版の設計においては、条文中に記載された版厚や曲げモーメント式を随時照査していくことで、適切に設計する手法が確立されてきたと言える。

しかしながら、近年では、P C 床版や合成床版などの高い疲労耐久性を有する床版を用い、床版の支間長を大きくして主桁本数を削減することにより、工費の縮減を目指した橋梁が採用されてきている^{2,3)}。

これらの橋梁では、従来にない長支間の床版や、新しい構造や材料を用いた床版が採用されており、従来の耐荷力を中心とした設計に加えて、耐久性や供用性など床版に必要とされる各種性能の規定とその照査を意識した床版設計が必要となる^{4,5)}。

一方、鋼道路橋では、橋梁全体の死荷重に占める床版の割合が大きく、床版厚を極力薄くすることが橋梁全体の合理化に必要となる。特に長支間床版においては、所定の耐荷力と疲労耐久性が確保される範囲で床版厚をできるだけ薄くすることが必要である。

しかしながら床版厚の低減は、床版支間に対する床版の剛性が相対的に低下することになり、桁振動とともに低周波音との関係も懸念され^{6,7,8)}、床耐荷力や疲労耐久性に加えて、供用性に影響する振動性状に対する定量的

な照査が必要となる。

特に橋梁の低周波音問題については、振動数が 10Hz ~ 50Hz となるジョイント付近から発生する振動音 (ジョイント音) と振動数が 4Hz ~ 5Hz となる支間部から発生する振動音 (スパン音) の存在が実測結果等から明らかにされており注意が必要である^{9,10,11)}。

橋梁の振動に関する研究では、実橋での橋梁振動と音圧レベルの多点同時測定により音の距離減衰量を求め、ジョイント音が点音源からの距離減衰に類似し、スパン音は線音源からの距離減衰に類似していることを確認した研究¹²⁾や、低周波音の放射音圧レベルを、版の振動と格子構造としての振動を重ね合わせた振動性状から解析的に動的応答を求めたもの¹³⁾、はりの振動理論を用いて走行車両との連成効果や橋面粗度の影響を求めたもの¹⁴⁾などがあるが、床版支間の長支間化にともなう床版の振動特性から必要となる最小床版厚の定量化という観点から研究は行われていない。

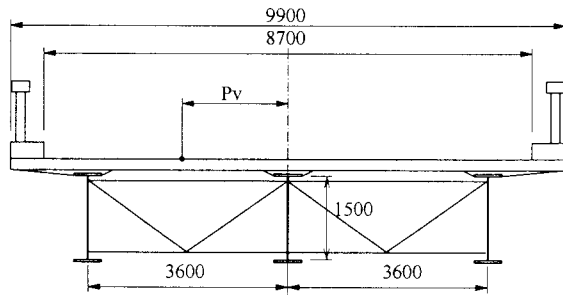
そこで、本論文では、過去に低周波音が問題となった橋梁形式を対象として、床版支間、床版厚などの床版設計上のパラメータが橋梁振動に与える影響を解析的に検討した。具体的には、床版たわみが卓越する振動数の変化、車両走行による応答解析による床版の応答変位性状、さらに音響的評価による床版応答による超低周波音の音圧レベルを解析的に検討することより、床版支間、床版厚が振動特性に与える影響を検討した。

2. 検討対象橋梁

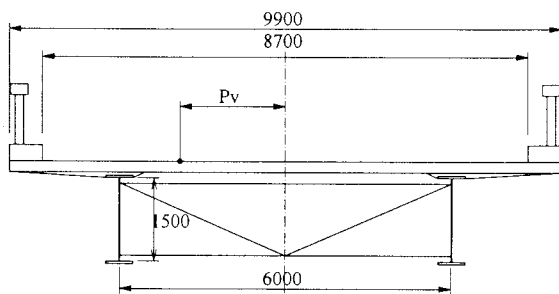
検討対象橋梁を表－１に示す．まず，過去に低周波音が問題となった橋梁形式として，桁支間が 25m，有効幅員が 8.7m，桁高が 1.5m の非合成 3 主桁橋として設計されたもの⁸⁾を基本ケース（Case A）を定め，合成桁と非合成桁の違いを調べることを目的とした Case B1，床版支間の影響を調べることを目的とした Case B2,B3 を定めた．代表的桁断面図として 3 主桁桁と 2 主桁桁の断面図を図－１に，代表区間（径間中央部）の主桁寸法を表－２に示す．試設計においては，全ての桁の横桁形状は対傾構とした．また，同図には，４章で実施した交通振動シミュレーションにおける車両走行位置 P_v の定義も記載しており，桁中心からの距離として定義した．

表－１ 検討対象橋梁の諸元

Case	主桁		床版	
	本数	形式	支間	厚
A	3	非合成	3.6m	0.18m
B1	3	合成	3.6m	0.18m
B2	4	非合成	2.6m	0.18m
B3	2	非合成	6.0m	0.18m



(a) 3主桁桁（ケース A,B1）



(b) 2主桁桁（ケース B3）

図－１ 代表ケースの主桁断面図

3. 固有値解析

3. 1 解析モデル

検討対象橋梁について，固有値解析を実施した．解析モデルは，床版，主桁をシェル要素，横桁は梁要素とし，

表－２ 各ケースにおける径間中央部の主桁寸法

Case	主桁番号	上フランジ		ウェブ		下フランジ	
		幅	厚	幅	厚	幅	厚
A	G1,G3	480	32	1500	9	500	40
	G2	460	25	1500	9	490	32
B1	G1,G3	260	12	1500	13	550	32
	G2	260	12	1500	13	600	22
B2	G1,G4	460	25	1500	9	480	32
	G2,G3	390	22	1500	9	480	25
B3	G1,G2	500	48	1500	9	500	61

(備考) 単位:mm

主桁番号は，桁端部からG1,G2...と呼ぶ．

表－３ 固有値解析結果

ケース	鉛直たわみ 1次 (Hz)	ねじれ1次 (Hz)	床版たわみ 1次 (Hz)
A	4.21	5.21	9.45
B1	4.21	5.22	9.45
B2	4.33	5.88	11.9
B3	3.90	4.48	4.72

高欄，舗装の質量（高欄：4.9kN/m，舗装厚：75mm）は仮想部材に質量を付加して考慮した．また，本検討では非合成桁，合成桁ともに主桁と床版は剛結させている．床版は橋軸方向には 0.5m 毎に，橋軸直角方向には，床版支間を少なくとも 4 分割できるように適宜分割数を定めた．

3. 2 解析結果

床版たわみが卓越する代表振動数として，桁全体鉛直たわみ 1 次モード，桁全体のねじれ 1 次モード，主桁を支点とした床版支間における床版たわみの最低次モード（以下，床版たわみ 1 次モード）を取り上げ，各ケースの固有振動数を比較して表－３に示す．これより，合成桁（Case B1）は，非合成桁（Case A）と同じ固有振動数であることがわかる．これは，合成桁として設計された断面と主桁寸法の違いはあるものの，両者とも主桁と床版を剛結させたことから，床版を含めた全体剛性にその影響が現れなかったものと考えられる．また，床版支間に着目すれば，床版支間 2.6m（4 主桁桁：Case B2），床版支間 3.6m（3 主桁桁：Case A）に比べて，床版支間 6m（2 主桁桁：Case B3）の固有振動数が低いことがわかる．特に，床版支間の拡大による床版たわみ 1 次振動数の低下が顕著であり，床版支間 6m の床版たわみ 1 次振動数は床版支間 3.6m の半分程度の 4.72Hz まで低下している．橋梁の低周波音で問題となる 4～5Hz の振動数領域内であることから，床版厚を一定にして床版支間を拡大した場合には車両走行による低周波音が懸念される．

ここで床版支間 6m（Case B3）において，床版厚を 180mm から 320mm まで変化させた場合の固有振動数の変化を図－２に示す．これより，床版たわみ 1 次振動数の変化が最も顕著であることがわかる．仮に，床版たわ

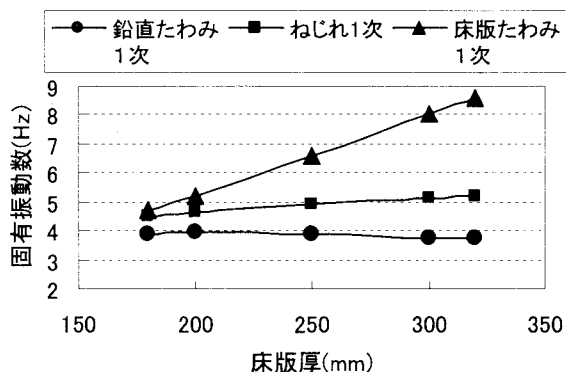


図-2 床版厚が振動特性に及ぼす影響

み1次振動数を低周波音のスペン音の実測振動数領域(4~5Hz)よりも高くするためには、床版厚は少なくとも200mm以上必要となる。床版厚と床版たわみ1次振動数が概ね線形関係にあるが、これは単純支持された2次元矩形梁のたわみ振動数が梁高さと比例関係にあることと同等であると判断される。一方、ねじれ1次振動数も床版厚の影響を受けるが、その程度は大きくない。Case B3における代表的な床版振動卓越モードの一例を図-3に、Case B1の代表例を図-4に示す。床版たわみ1次の振動モードはそれぞれ同図(1)に示した。これより、Case B3においては、床版たわみが卓越する振動数は、床版たわみ1次以外にも大型車両のばね下振動と共振する12~15Hz付近¹⁵⁾にも幾つかのモード(20次、23次、24次)が存在する。一方、Case B1では、床版たわみモードは18.7Hz(13次)まで上昇しており、車両ばね下振動数の近傍に床版振動が卓越する固有モードが現れていないこと、固有振動次数もCase B3より低く全体の振動数が高くなっていることがわかる。これより、Case B3では、車両のばね下振動により床版振動が励起され、低周波音が問題となる可能性があるかと判断できる。

4. 解析概要

4.1 解析手法

(1) 交通振動解析

本論文で実施した交通振動解析手法は、文献15)に基づいている。すなわち、路面凹凸を有する3次元橋梁モデル上を車両を想定した1軸2自由度系が走行するものとし、橋梁モデルと車両モデルの連立運動方程式をNewmark β 法で逐次積分させ、橋梁と車両の時刻歴応答を算出した。この時、 $\beta = 1/6$ 、時間間隔は0.001秒とし、各時間間隔における収束判定は加速度について1/1000以内とした。また、本解析では、モーダル解析法を用いており、解析時に考慮する振動次数は固有値解析結果で50Hzまでのモードを取り込んだ。

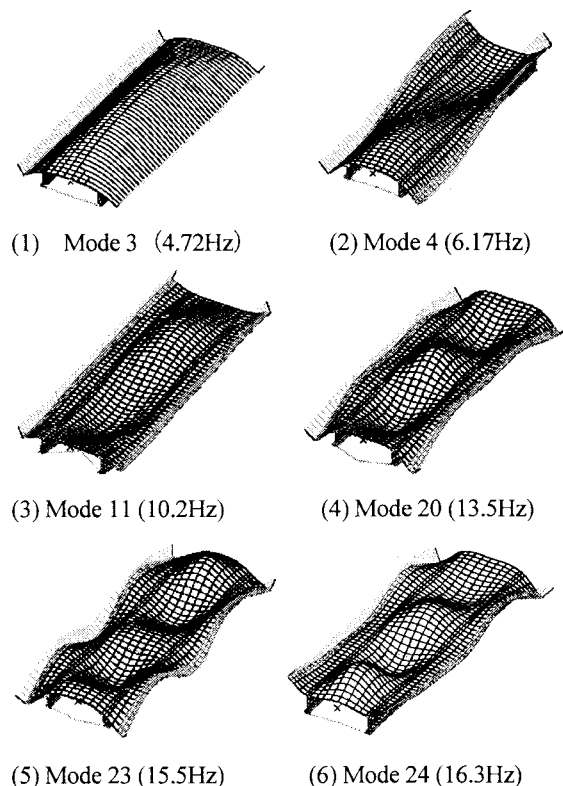


図-3 代表的な床版振動(Case B3)

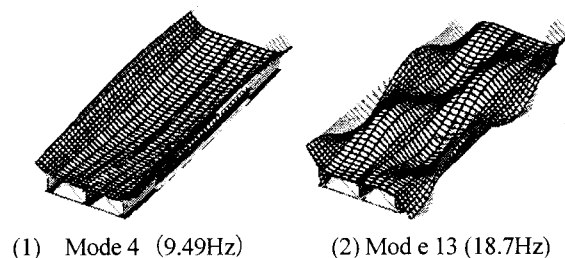


図-4 代表的な床版振動(Case B1)

(2) 解析モデル

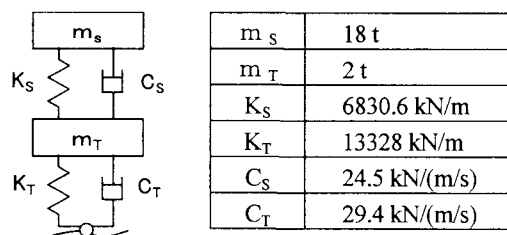
橋梁モデルは固有値解析モデルと同一であり、車両モデルには図-5に示す1軸2自由度系モデルを用いた。本モデルの固有振動数は、ばね上振動数2.5Hz、ばね下振動数が15.9Hzである。

(3) 路面凹凸スペクトル

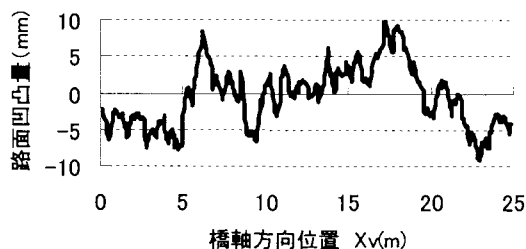
路面凹凸パワースペクトル密度関数については、以下の式を用いた¹⁵⁾。

$$S_z(\Omega) = \frac{a}{\Omega^n + \beta^n} \quad (1)$$

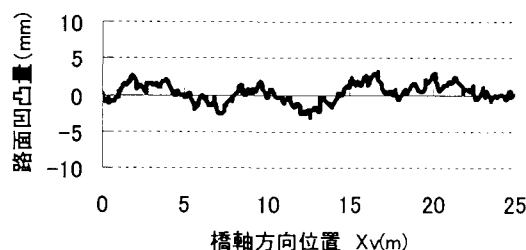
ここで、 Ω : 路面周波数(cycle/m)、 a : 路面の平坦性を表す平滑度パラメータ($\text{cm}^2 \cdot \text{cycle/m}$)、 n : 周波数によるパワーの分布を示す指数、 β : $\Omega \rightarrow 0$ のとき、無限大に発散しないための分布形状を表す形状パラメータである。



図－5 車両モデル



(1) 路面凹凸波形 (a = 0.01)



(2) 路面凹凸波形 (a = 0.002)

図－6 シミュレートした路面凹凸波形

本検討では、既往の事例¹⁵⁾を参考に、 $\beta = 0.05$ 、 $n = 2$ とし、 $a = 0.01$ とした路面凹凸スペクトルを基本としたが、路面凹凸性状の影響を検討するために、一部 $a = 0.002$ の場合も実施した。これらは、ISO¹⁶⁾の乗り心地の評価基準に基づく5つのカテゴリ（極良、良好、普通、悪い、極悪）の中で、それぞれ「良好」の下限と上限に相当する。凹凸波形のシミュレーションについては、凹凸を平均値0の定常ランダムなガウス過程と見なし、凹凸スペクトルにランダム位相を与えることによって行ない、一つの代表波形のみを用いた。シミュレートした路面凹凸波形を図－6に示す。

(4) 低周波音評価

低周波音の評価については、文献17)の手法を参考とした。すなわち、橋梁床版を橋軸方向に n 等分割、幅員方向に m 等分割し、それぞれの要素を微小な点音源とみなす。一要素から放射される周波数 f の音波の任意受音点(座標 (X,Y,Z))における音圧 $p_{ih}(f,t,X,Y,Z)$ は、その要素を無限バツフル中にある一つの半球状の呼吸球音源と考えると式(2)で表される。

$$p_{ih}(f,t,X,Y,Z) = \frac{j\rho ck}{2\pi r_{ih}} \{v_{ih}(f) \cdot dS\} \exp\{j(\omega t - kr_{ih})\} \quad (2)$$

ここに、 j ：虚数単位、 ω ：円振動数、 ρ ：空気密度、 c ：音速、 k ：音波の波数 ($=2\pi/\lambda$, λ ：波長)、 dS ：要素の面積である。 r_{ih} は、要素中心と受音点(観測地点)の間の距離であり、座標 (X,Y,Z) から換算される。また、 $v_{ih}(f)$ は、要素の速度振幅スペクトルであるが、ここでは、交通振動解析で得られた床版各要素の時刻歴速度応答を用いた。

さらに、全ての要素について、音圧を周波数ごとに重ね合わせ、実効値 $P_{rms}(f)$ を式(3)で求める。

$$P_{rms}(f) = \sqrt{\frac{1}{T} \int \left[\sum_n \sum_m p_{ih}(f,t,X,Y,Z) \right]^2 dt} \quad (3)$$

最終的には、実効値から音圧レベル SPL (単位：dB) に式(4)により換算する。 $P_o = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ を表す。

$$SPL(f) = 20 \log_{10} \frac{P_{rms}(f)}{P_o} \quad (4)$$

さらに、受音側の特性を考慮するために、20Hz 以下の超低周波音の人体感覚を評価するための周波数補正特性である G 特性¹⁸⁾で補正した音圧レベルを最終的な音圧レベルとした。

実際の計算にあたっては、 $m=50$ 分割程度、 $n=50$ 分割とし、床版からの音の放射をみるために、床版上面から上方に放射される成分の音圧だけを考慮した。したがって、本手法は、定常波を重ね合わせて床版上面からの放射だけを考える簡易的な手法であるが、対象橋梁の様な支間長の短い橋梁において、継続的に車両が通行している高速道路の様な交通状況を考えれば、定性的な傾向は把握できると考えている。

4. 2 解析ケース

解析ケースは、非合成鈹桁(表－1のケース A, B2, B3)について、車両走行速度を 80km/h として、車両走行位置 P_v (図－1 参照)を適宜変化させたケースを実施した。 P_v は、桁中央部、床版支間中央部、主桁上位置などの代表点の他、幾つかの点を定めた。車両は橋軸直角方向位置を常に一定で走行させた(走行中 P_v は一定)。また、橋梁の構造減衰については、影響が小さいことを確認して、各モード $\delta = 0.05$ とした。さらに、2主鈹桁(B3)では、路面凹凸波形の影響、床版厚の影響を変化させた場合を実施し、床版厚の検討については、低周波音評価も実施した。観測地点は桁支間中央部の幅員中心位置から橋軸直角方向に 20m、床版から上方に 20m に離れた位置とした。

5. 橋梁応答解析結果

橋梁応答の代表点として、車両走行位置 P_v の応答変位を抽出し、橋軸方向位置 X_v の各点における時刻歴波形からその最大値を抽出し、横軸を橋軸方向位置 X_v 、縦軸に応答最大値 η の関係で評価した。したがって、車両走行位置 P_v が異なる解析結果では、評価点が異なっている。

5. 1 3主鈑桁（床版支間 3.6 m）の応答特性

解析結果を図-7に示す。これより、車両走行位置 $P_v=0\text{m}$ では桁支間中央付近 ($X_v=13\text{m}$) で最大応答値を示し、 $\eta=5\text{mm}$ 程度となるが、 η が最大となる車両走行位置は、床版支間中央位置に相当する $P_v=1.8\text{m}$ と外側主桁位置に相当する $P_v=3.6\text{m}$ の場合であり、 $\eta=7\text{mm}$ 程度をとることがわかる。 $P_v=3.6\text{m}$ と 0m はともに主桁上にあることから、両者の差はねじれ振動による成分であることから、ねじれの寄与も大きいと言える。

$P_v=1.8\text{m}$ の橋軸方向位置 $X_v=5, 10, 13$ および 15m の時刻歴波形を図-8に示す。これより、概ね車両が通過する時間でピークをとること、卓越している周波数は概ね 4Hz であり、車両のばね上振動により励起された鈑桁全体の鉛直たわみ1次成分が大きく寄与していると判断される。ただし、橋桁中央部付近である $X_v=13$ よりも $X_v=5, 10, 15$ の方が大きい応答変位を示している。この傾向は、 $X_v=5, 10$ は路面凹凸の大きい段差の位置に相当する（図-6(1)）こと、図-7における最大応答の波打ち方は路面凹凸とほぼ対応しており、床版支間中央部である $P_v=1.8\text{m}$ で最も波打ち方が顕著に現れていることから、路面凹凸の大きな段差により床版振動が励起された結果と考えられる。

5. 2 4主鈑桁（支間 2.6 m）の応答特性

解析結果を図-9に示す。これより、車両走行位置 $P_v=0\sim 2.1\text{m}$ では応答最大値 η は概ね同程度であり最小となるのは内側主桁上を走行する $P_v=1.3\text{m}$ の場合であることがわかる。また、 $P_v=2.1\text{m}$ 以上では応答最大値 η が概ね増加する傾向にあり、 $P_v=3.9\text{m}$ （外側主桁位置）で $\eta=6.5\text{mm}$ 程度となる。この傾向は、ねじれ応答成分が寄与していることを示しており、床版のたわみ成分の寄与は大きくないと判断される。3主鈑桁と比較すると、応答最大値 η の最大値は、橋軸方向位置 X_v に違いが見られるものの、概ね同等であることがわかる。一方、床版支間上を走行した場合の応答最大値 η を比較すると、4主鈑桁（図-9： $P_v=2.6\text{m}$ ）の方が3主鈑桁（図-7： $P_v=1.8\text{m}$ ）よりもやや小さい。両者の観測地点が異なるため、直接的な評価はできないものの、 P_v の増加は偏載によるねじれ応答成分の増加があることを考慮すれば、4主鈑桁の方が車両走行により誘発される床版振動は小さいと言える。

5. 3 2主鈑桁（支間 6m）の応答特性

(1) 車両走行位置の影響

解析結果を図-10に示す。これより、車両走行位置

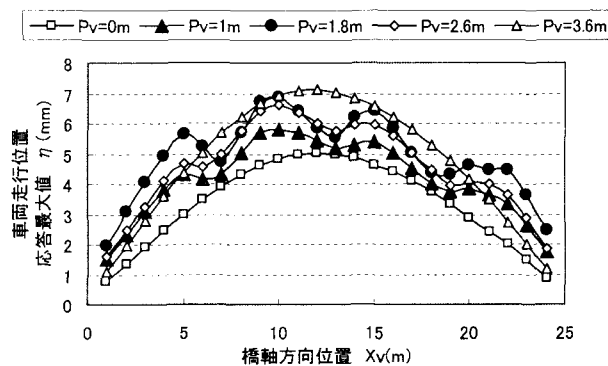


図-7 車両走行位置の影響検討結果（3主鈑桁）

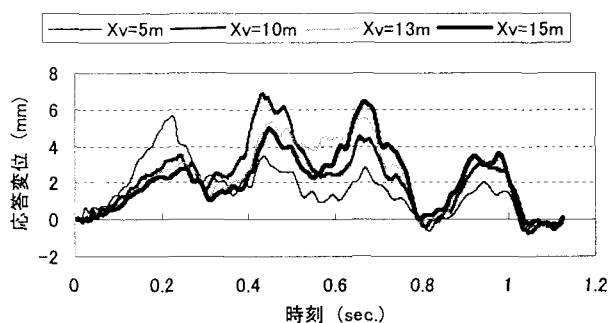


図-8 時刻歴波形の代表例（Case A： $P_v=1.8\text{m}$ ）

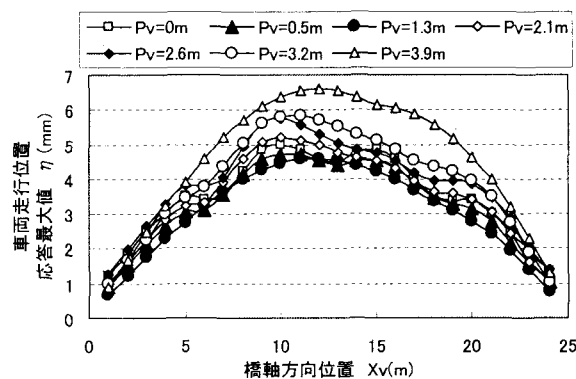


図-9 車両走行位置の影響検討結果（4主鈑桁）

$P_v=0\text{m}$ （床版支間中央部）の場合に、応答最大値 η が 12mm と最も大きい応答を示し、桁中央と主桁の中央である $P_v=1.5\text{m}$ においても $\eta=10\text{mm}$ と3主鈑桁、4主鈑桁よりも大きな応答値を示している。また、 η が最小となるのは、主桁上を走行する車両走行位置 $P_v=3\text{m}$ の場合であることから、本形式では主桁を支点とした床版たわみによる応答が支配的であると言える。 $P_v=1.5\text{m}$ の橋軸方向位置 $X_v=5, 10, 13$ および 15 の時刻歴波形を図-11に示す。これより、図-8と比べて応答値は大きいものの、概ね車両が通過する時間でピークをとること、卓越している周波数は概ね 4Hz であるなどの波形の傾向は概ね同等であることがわかる。時刻歴波形からは、鈑桁全体の鉛直たわみ1次成分が大きく寄与しているものの、橋桁中央部付近である $X_v=13\text{m}$ よりも $X_v=10, 15\text{m}$ の方が高い応

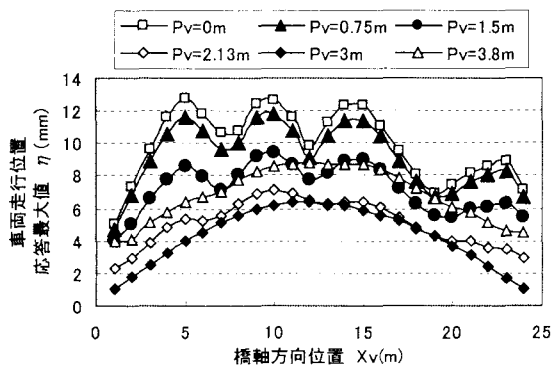


図-1 0 車両走行位置の影響検討 (2主鈑桁)

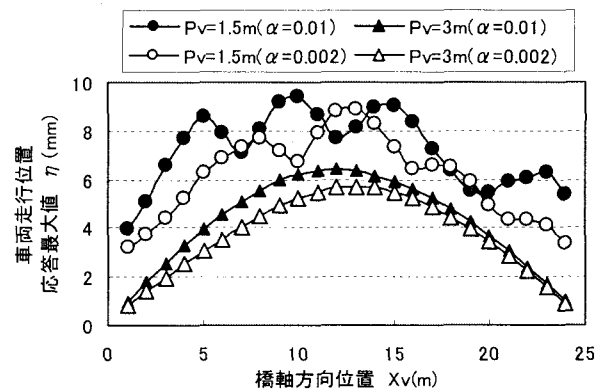


図-1 2 路面凹凸の影響検討 (2主鈑桁)

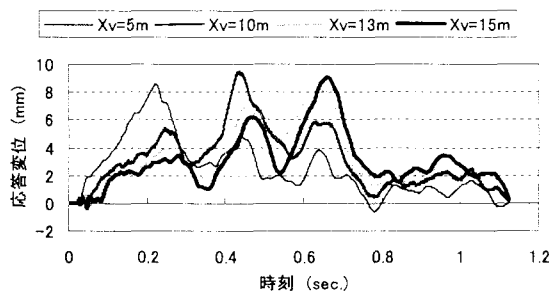


図-1 1 時刻歴波形の一例 (Case B3; Pv=1.5m)

答変位を示している。これは、車両ばね下振動数 15.9Hz と近い周波数成分である床版振動モード (図-3 (4)-(6)) の寄与が大きいと考えられる。さらに、本橋梁形式では床版たわみ 1 次振動数が 4.72Hz とねじれ 1 次振動数付近まで低下していることことから、2 主鈑桁では、床版支間が増大することで、床版たわみが卓越する振動モードが車両ばね上振動数、車両ばね下振動数の近くにまで低下することで、応答が励起されていると判断できる。

(2) 路面凹凸の影響

路面凹凸波形の影響検討結果を図-1 2 に示す。これより、主桁上 ($P_v=3.0\text{m}$) では、橋軸方向位置 $X_v<10\text{m}$ では $\alpha=0.002$ の最大応答がやや小さくなっているものの、 $X_v>15\text{m}$ では路面凹凸波形によらず最大応答はほぼ同じであり、路面凹凸の影響は比較的大きくないことがわかる。一方、 $P_v=1.5\text{m}$ では応答最大値 η の傾向が異なり、路面凹凸の影響が現れている。 $\alpha=0.002$ では桁支間中央部 ($P_v=13$ 付近) で、 $\alpha=0.01$ では $X_v=10\text{m}$ で η の最大値をとり、その値は 9mm 程度である。また、 $\alpha=0.01$ では $X_v=5, 15\text{m}$ でも最大値に近い応答を示す。これは、 $\alpha=0.01$ では床版振動モードの寄与もあるものの、両者とも図-6 に見られる路面凹凸の段差が比較的大きい箇所と一致することから、主桁上に比べて、床版支間中央部の方が路面凹凸の影響を受けやすいと判断される。

(3) 床版厚の影響

$P_v=1.5\text{m}$ (桁中央部と主桁の中間部) とした場合に、床版厚を 180mm から 320mm に順次変化させた場合の解析

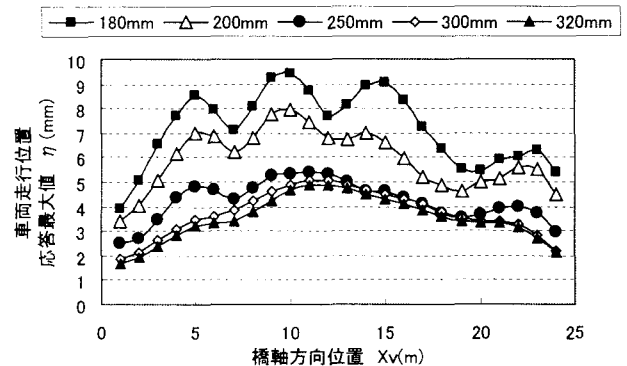


図-1 3 床版厚の影響検討結果 (2主鈑桁)

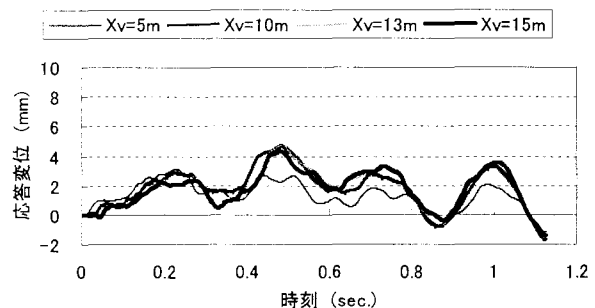


図-1 4 時刻歴波形 (床版厚 320mm, $P_v=1.5\text{m}$)

結果を図-1 3 に示す。これより、床版厚 180mm では 9mm、200mm では 8mm 程度であった応答最大値 η が、床版厚 250mm では 5mm 程度まで減少していることがわかる。さらに、床版厚 300mm、320mm まで増加させた場合には、 $X_v=5\text{m}$ 付近で η がさらに小さくなるものの、それ以外の橋軸方向位置では床版厚 250mm の結果と概ね同程度である。 $X_v=5\text{m}$ 付近で異なる原因は、床版厚の増加により床版たわみが卓越する振動モードの固有振動数が車両ばね下振動数である 15Hz から増加したためと考えられる。また、床版支間中央位置における応答最大値 η は、3 主鈑桁 ($P_v=1.8\text{m}$) では 7mm、4 主鈑桁 ($P_v=2.6\text{m}$) では 6mm であることから、車両走行位置は異なっているものの、床版厚 250~300mm 以上の 2 主鈑桁であれば、車両走行による橋梁応答は 3 主鈑桁、4 主鈑桁と同程度であると判断できる。これは、固有値解析で示した様に、床版厚の増加により床版たわみ 1 次振動

数、および、車両ばね下振動数付近の床版たわみが卓越する振動数が増加したためと判断される。これより、床版支間 6m の場合には、床版厚は車両走行による床版振動に大きな影響を及ぼすため、床版厚の低減を検討する場合には十分な注意が必要である。

また、床版厚 320mm の $X_v=5, 10, 13, 15\text{m}$ の時刻歴波形を図-14に示す。これより、橋軸方向位置 $X_v=10, 13, 15\text{m}$ の場合の時刻歴応答は、時刻 0.5sec 付近とともに最大値をとる。これは、 $X_v=10\text{m}$ 付近を車両が通過する時刻であり、路面凹凸波形の大きな段差の位置と一致していることから、路面凹凸の影響と判断される。また、図-11の床版厚 180mm の時刻歴波形と比較すると、各地点における床版卓越振動と思われる車両通過時の衝撃的な応答が消えていることがわかる。これは、床版厚の増加により、床版振動が卓越するモードの固有振動数が車両ばね下振動数よりも高くなったためと判断される。

床版厚 180mm と 320mm の場合の G 特性音圧レベルスペクトルを比較して図-15に示す。これより、両者とも 12~18Hz における音圧レベルが卓越しており、80~90dB をとっていること、橋桁全体の振動数成分である 4~5Hz の振動数は 75dB と小さくなっていることがわかる。これは、G 特性の周波数特性により 10~20Hz が強調されたためであると判断できる。一方、床版厚 180mm において、床版卓越振動が見られた 15Hz 付近の音圧レベルを床版厚 320mm と比較すると、12~18Hz では 0~15dB 大きく、10dB の差異が生じている 14Hz と 16Hz は、床版振動が卓越する固有モードとほぼ一致する。本結果から算定された音圧レベルは最終的な環境評価につながるものではないが、床版厚の低減、床版支間の拡大により、床版振動が卓越する固有モードが車両ばね下振動数に近くなった場合には、超低周波音が問題となる可能性があることを示唆するものであるため、今後の床版の設計においては、床版振動、超低周波音に対する検討も必要と判断される。

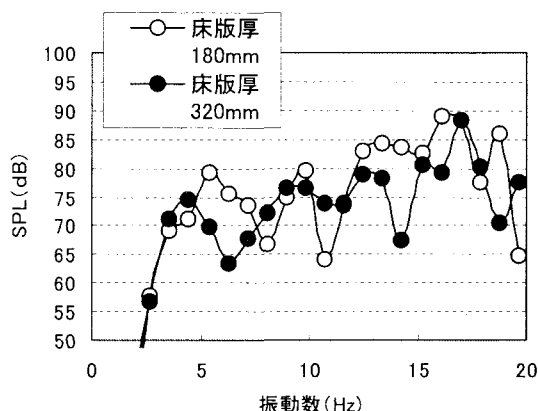


図-15 G 特性音圧レベルスペクトルの比較

6. まとめ

本論文では、支間 25m の鉸桁橋梁に対して、固有値解析、交通振動解析、音響評価を実施し、主桁本数、床版支間、床版厚が橋梁の動的特性に及ぼす影響を検討した。その結果をまとめると以下の様になる。

- 1) 床版厚を 180mm に固定して、床版支間を 2.8m から 6m まで変化させた場合には、主桁を支点とした床版の最低次振動数（床版たわみ 1 次振動数）が大きく低下する。床版支間 6m では、床版たわみ 1 次振動数は 4.72Hz であり、橋梁の低周波音が懸念される 4~5Hz の領域まで低下すること、さらに、床版たわみが卓越する振動が大型車両のばね下振動に共振する 12~15Hz 付近にも存在することから、床版振動が励起されることが懸念される。
- 2) 床版厚は床版たわみ 1 次振動数に大きな影響を及ぼす。床版厚の増加により、床版たわみ振動数は概ね比例関係にある。床版支間 6m の場合では、床版厚 200mm で固有振動数 5Hz 以上となる。
- 3) 床版支間 6m の床版厚 180mm の場合には、同一床版厚の床版支間 2.6m、3.6m に比べて車両走行による応答値が増大する。これは、振動数が低下した床版たわみ 1 次モードを車両ばね上振動が誘起していることが主原因であるが、車両ばね下振動により振動数 15Hz 周辺の床版振動も誘起されていると判断される。しかしながら、床版支間 6m においても、床版厚が 250mm を上回れば、床版支間 2.6m、3.6m と同程度の応答になる。路面凹凸波形が床版の応答に及ぼす影響については、主桁上は大きくないが、床版支間中央部では大きい。
- 4) 今回の評価方法により算定された G 特性音圧レベルによれば、車両ばね下振動数付近である 12~18Hz における音圧レベルが橋桁全体の振動数成分である 4~5 Hz よりも卓越し、80~90dB の値をとる。床版支間 6m の床版厚 320mm と 180mm の音圧レベルを比較すると、周波数領域によっては 10dB の差が生じているが、これは床版厚 180mm における床版振動卓越の固有モードが車両ばね下振動数近辺にあることが原因と判断できる。したがって、床版厚の低減、床版支間の拡大により、床版振動の固有振動数が車両ばね下振動数に近接した場合には、超低周波音が問題となる可能性も考えられる。

参考文献

- 1) 玉越隆史，川畑篤敬：鋼道路橋床版の設計と留意点―道路橋示方書改訂について―，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 1-8，2003. 6.
- 2) 梶一，清水健介，庄司志津男，須藤聡，松村達夫，石田照明：腹板孔明け工法による固定型枠支保工の駒瀬川橋床版工への適用，第三回道路橋床版シンポ

- ジウム講演論文集, pp. 307-312, 2003. 6.
- 3) 川畑篤敬, 高尾道明, 猪村康弘, 滝口伸明, 葛西敏: ユリブ合成床版の広幅員開断面合成箱桁橋への適用—木津川橋—, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp. 265-270, 2003. 6.
 - 4) 秋元礼子, 川畑篤敬, 大田幸二, 中原智法, 内田大介, 田中千尋, 浜田純夫: 性能照査型設計の現状分析と道路橋床版への応用に関する考察, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp. 25-32, 2003. 6.
 - 5) (社) 土木学会鋼構造委員会鋼橋床版の調査研究小委員会: 道路橋床版の新技术と性能照査型設計, pp. 242-311, 2000. 10.
 - 6) 内田英夫, 栗田秀美: 中央高速道西宮線阿知川橋からの低周波空気振動と騒音・振動, 長野県衛公研報告 1, PP. 81-91, 1979.
 - 7) 石井皓, 樋口茂生, 水上雅義, 根木輝久, 松島景一, 真船洋: 習志野市谷津の京葉道路周辺の低周波空気振動, 千葉県公害研究所研究報告, 第 13 巻, 第 1 号, PP. 1-7, 1981. 7.
 - 8) 国土問題研究会: 超低周波空気振動公害問題, 国土問題, 29 号, 1984. 7.
 - 9) 小川清, 小野正二: 橋梁振動に伴う低周波空気振動に関する試験研究, 日本道路公団試験所報告, pp. 234-252, 昭和 52 年 12 月.
 - 10) 小川清, 小野正二: 橋梁振動に伴う低周波空気振動に関する試験研究 (その 2), 日本道路公団試験所, pp. 259-278, 昭和 52 年 12 月.
 - 11) 小野正二: 橋梁振動に伴う低周波空気振動に関する試験研究 (その 3), 日本道路公団試験所報告, pp. 194-201, 昭和 53 年 12 月.
 - 12) 五郎丸英博, 白石捷夫, 原公, 小森武: 中小支間道路橋における低周波空気振動の放射音圧レベルとスペクトルの推定, 土木学会論文集, 第 403/VI-10, pp. 137-145, 1989. 3.
 - 13) 足立義雄, 岡村宏一, 島田功: 道路橋床版の低周波域における振動性状について, 土木学会論文報告集, 第 330 号, PP. 37-48, 1983. 2.
 - 14) 大島俊之, 能町純雄, 月田良博, 三上修一: はり理論による低周波空気振動の放射音圧レベルの解析, 土木学会論文集, 第 356 号/I-3, pp. 527-536, 1985. 4.
 - 15) 橋梁振動研究会編: 橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版, 1993. 10.
 - 16) I S O : Proposals for generalized road inputs to vehicles, ISO/TC 108/WG9 Document No. 5, pp. 1-9, 1972.
 - 17) 深澤泰晴, 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, 1991. 3.
 - 18) 環境省環境管理局大気生活環境室: 低周波音防止対策事例集, pp. 1, 平成 14 年 3 月.

(2004 年 9 月 17 日受付)