

道路橋床版の振動特性について

Dynamic Characteristics of Highway Bridge Deck Slabs

川畑篤敬* 村上琢哉**

Atsunori KAWABATA, Takuya MURAKAMI

*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)

** 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)

This paper deals with the dynamic 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. Specifically, the extension of the deck slab span makes the natural frequency of the bending mode of the deck slab lower and closer to the natural frequency of the vehicle due to oscillating the suspension system. The thickness of 320mm required by Specifications for Highway Bridges for slabs spanning 6m shows better dynamic performance, compared with the conventional deck slab of 2.9m and thickness of 200mm.

Key words: Highway, deck slab, dynamic response, low frequency

1. はじめに

近年、公共事業費の縮減を目指して、PC床版や合成床版などの高い耐久性を有する長支間床版と少数主桁や開断面箱桁を組み合わせた橋梁が採用されている¹⁾²⁾。新しい形式の床版設計に際しては、従来のRC床版の設計のように、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、大きな誤りのない設計を可能にするといった設計手法の適用が困難な場合もある。そこで、道路橋床版に要求される性能をあらためて整理し、要求性能が満足していることを照査する新たな設計手法の導入が検討されている³⁾⁴⁾⁵⁾。

また、著者らは、道路橋床版に要求される性能として、安全性(耐力性能、疲労耐久性能、材料耐久性能)、使用性(供用性、維持管理性能)、社会・環境適合性(経済的合理性、環境適合性)といった性能を提案している⁴⁾。

これらの性能のうち、長支間床版の採用に際して、供用性能の一つとして考えられる床版振動について、床版の剛性が床版支間に対して相対的に低下する場合には、桁振動とともに低周波問題との関係もあると考えられ⁶⁾⁷⁾⁸⁾、定量的な検討が必要であると考えられる。

橋梁の低周波振動問題について、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)の存在が実測結果から明らかにされている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

また、文献12)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、これらの音の距離減衰量を求め、ジョイント音は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ている。

低周波空気振動の放射音圧レベルに対する解析的なアプローチとしては、床版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、動的応答を求めたもの¹³⁾や、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⁾があるが、主に上下向の振動のみを考慮したものであり、橋梁全体の挙動を含めたものではない。

筆者らは、床版支間、床版厚などの床版設計上のパラメータが床版振動による低周波騒音に及ぼす影響を評価する事を試みている。ここでは、幾つかのコンクリート床版を有する鈹桁橋梁について試設計を行い、主桁本数、床版支間、床版厚が床版たわみの振動特性に及ぼす影響を検討した。

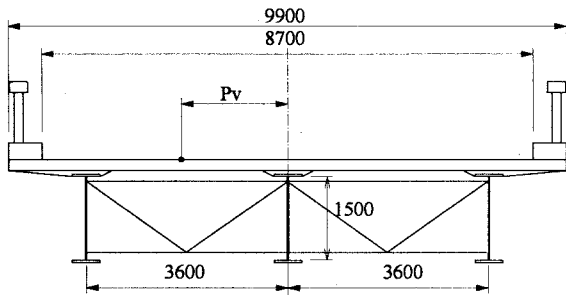
2. 検討対象橋梁

検討対象として試設計を実施した橋梁の代表的な諸元を一覧表にして表-1に示す。まず、桁支間が25m、有効幅員が8.7m、桁高さが1.5mの非合成3主鈹桁橋として設計したもの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。さらに、桁支間が比較的長く、現行道示で床版厚が決定された非合成4主鈹桁と2主

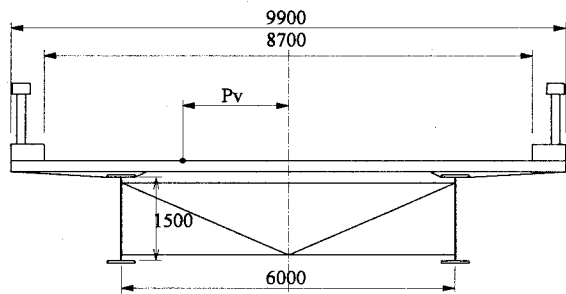
鋸桁を Case B4, B5 とし、2 主鋸桁の床版を道示に規定される最小版厚を想定して Case B6 を定めた。代表的桁断面図として3 主鋸桁と 2 主鋸桁の断面図を図-1 に示す。全ての鋸桁の横桁形状は対傾構としている。また、同図には、4 章で実施した交通振動シミュレーションにおける車両走行位置 P_v の定義も記載しており、桁中心からの距離で定義した。

表-1 検討対象橋梁の諸元

Case	支間長	桁高	主桁		床版	
			本数	形式	支間	厚
A	25m	1.5m	3	非合成	3.6m	0.18m
B1	25m	1.5m	3	合成	3.6m	0.18m
B2	25m	1.5m	4	非合成	2.6m	0.18m
B3	25m	1.5m	2	非合成	6.0m	0.18m
B4	50m	2.5m	4	非合成	2.9m	0.20m
B5	50m	2.5m	2	非合成	6.0m	0.32m
B6	50m	2.5m	2	非合成	6.0m	0.16m



(a) 支間 25m 3 主鋸桁 (ケース A, B1)



(b) 支間 25m 2 主鋸桁 (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、高欄、舗装の質量(高欄: 4.9 kN/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、鋸桁全体の鉛直たわみ 1 次モード、鋸桁全体のねじれ 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-2 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の方が下フランジの板厚が大きくなっているものの、両者とも主桁と床版を剛結させたことから、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 主鋸桁: Case B2)、床版支間 3.6m(3 主鋸桁: Case A)に比べて、床版支間 6m(2 主鋸桁: 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って床版たわみ 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。橋梁の低周波振動問題で問題となる 4~5 Hz 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振動問題が懸念される。一方、支間長 50m のケースにおいても、床版支間 3.6m(4 主鋸桁: Case B4)に比べて、床版支間 6m(2 主鋸桁: Case B5)の方が、鉛直たわみ 1 次、ねじれ 1 次、床版たわみ 1 次ともに振動数が低く、支間長 25m の場合と同様な傾向を示す。床版支間 6m において、現行道示に基づいた床版厚 320mm の床版たわみ 1 次振動数は 7.37Hz であり、床版支間 3.6m 床版厚 200mm の 60%程度であるが、床版厚を最小板厚の 160mm(Case B6)にした場合には 3.81Hz まで低下していることから、床版厚の減少が床版たわみ 1 次振動数に大きな影響を与えていることがわかる。

表-2 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
B4	2.35	3.45	12.1
B5	2.20	2.83	7.37
B6	2.48	2.93	3.81

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支配的であることがわかる。仮に、

床版たわみ1次振動数を低周波振動問題のスパ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増加とともに増加す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に示す。床版たわみ1次の振動モードは同図(a)に示した。これより、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が存在することから、車両のばね下振動により床版振動が励起される低周波振動問題も懸念されると考えられる。

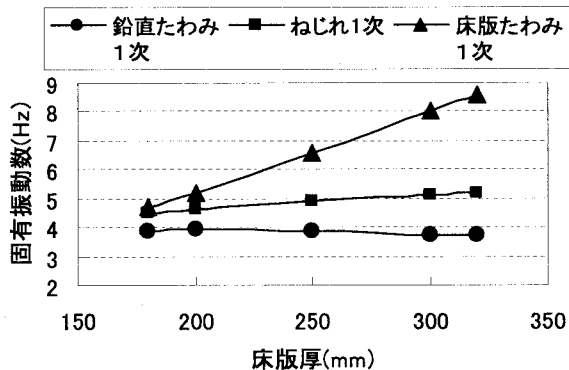


図-2 床版厚が振動特性に及ぼす影響

4. 交通振動シミュレーション

4.1 解析手法概要

(1) 計算手法概要

本論文で実施した交通振動シミュレーション手法は、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100次としている。

(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-4に示す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。

(2) 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。

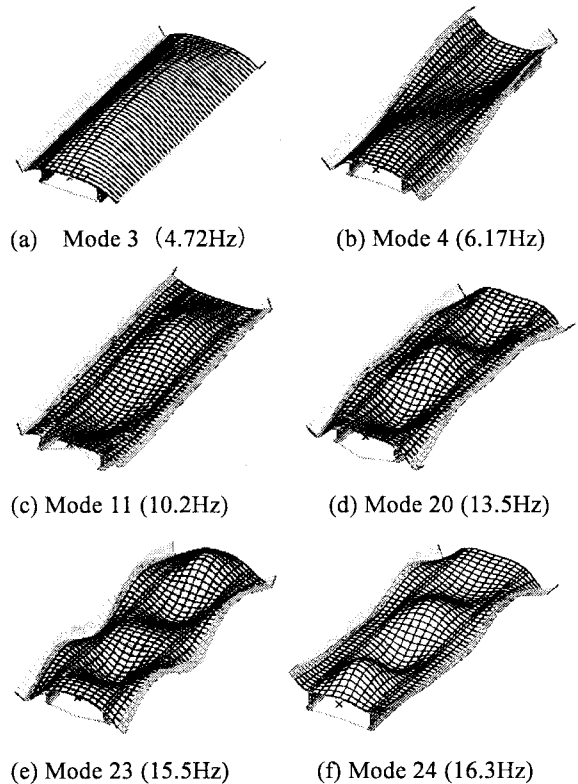


図-3 代表的な床版振動(Case B3)

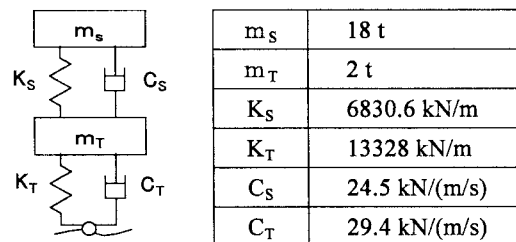


図-4 車両モデル

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

ここに、 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。

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用いた。これらは、ISO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、「良好」の下限に相当する。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った。支間25mにおいてシミュレートした路面凹凸波形を図-5に示す。

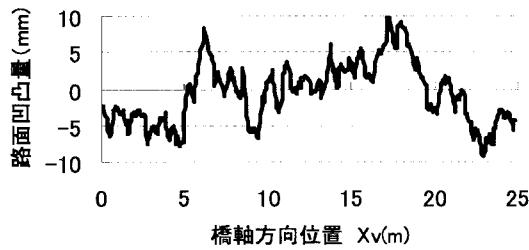


図-5 シミュレートした路面凹凸波形 (支間 25m)

4. 2 解析ケース

解析ケースは、まず、支間 25m の非合成鈹桁 (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。車両走行中は橋軸直角方向位置は常に同じ位置を走行しているものとした (走行中 P_v は一定)。また、橋梁の構造減衰については、影響が大きくないことを確認して、各モード $\delta = 0.05$ とした。さらに、2 主鈹桁 (B3) で床版厚を変化させた場合、支間 50m の非合成鈹桁 (表-1 のケース B4, B5) のケースも実施した。

4. 3 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 が異なるシミュレーション結果では評価点が異なっている。

(1) 3 主鈹桁 (床版支間 3.6m) の応答特性

解析結果を図-6 に示す。これより、車両走行位置 $P_v=0m$ では桁中央付近で最大応答値を示し、 $\eta=5mm$ 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 $P_v=1.8m$ と外側主桁位置に相当する $P_v=3.6m$ の場合であり、 $\eta=7mm$ 程度をとることがわかる。

$P_v=1.8m$ の橋軸方向位置 $X_v=5, 10, 13$ および 15 の時刻歴波形を図-7 に示す。これより、概ね車両が通過

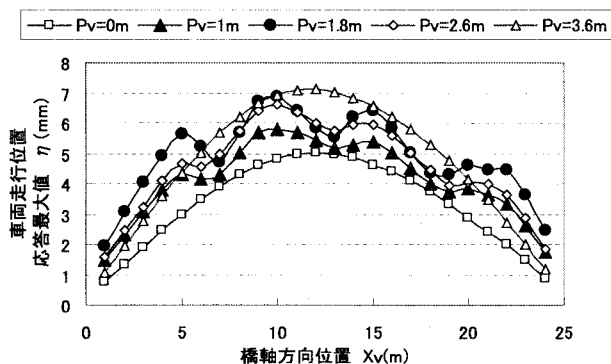


図-6 車両走行位置の影響検討結果 (3 主鈹桁)

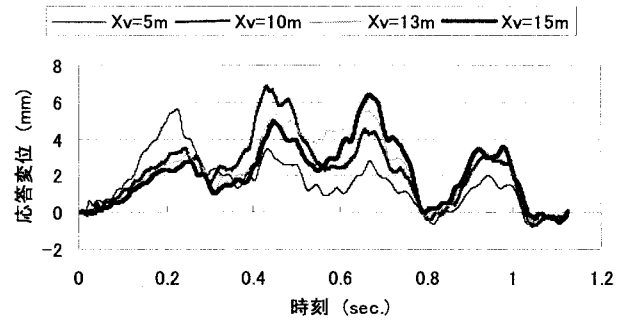


図-7 時刻歴波形の代表例 (Case A : $P_v=1.8m$)

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 4 Hz であり、車両のばね上振動により励起された鈹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 $X_v=10, 15$ の方が高い応答変位を示していることから、鉛直たわみ 1 次以外の床版振動が寄与していることが推察される。

(2) 4 主鈹桁 (支間 2.6m) の応答特性

解析結果を図-8 に示す。これより、車両走行位置 $P_v=0\sim 2.1m$ 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 $P_v=1.3m$ の場合であることがわかる。また、 $P_v=2.1m$ 以上では応答最大値 η が概ね増加する傾向にあり、 $P_v=3.9m$ (外側主桁位置) で $\eta=6.5mm$ 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 主桁鈹桁と比較すると、応答最大値 η が最大となる時の橋軸方向位置 X_v に違いが見られるものの、 η の最大値は概ね同等であることから床版の動特性には顕著な差異は見られないものの、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 主鈹桁 (図-8 : $P_v=2.6m$) の方が 3 主鈹桁 (図-6 : $P_v=1.8m$) 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 主鈹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。

(3) 支間 25m 2 主鈹桁の応答特性

解析結果を図-9 に示す。これより、車両走行位置

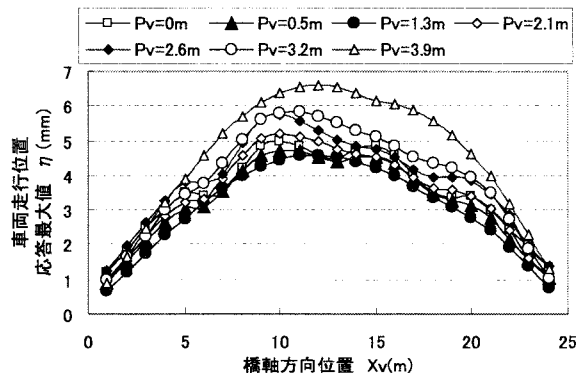


図-8 車両走行位置の影響検討結果 (4 主鈹桁)

$P_v=0m$ (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 $P_v=1.5m$ においても $\eta=10mm$ と 3 主桁桁, 4 主桁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 $P_v=3m$ 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。 $P_v=1.5m$ の橋軸方向位置 $X_v=5, 10, 13$ および 15 の時刻歴波形を図-10に示す。これより, 図-7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, 桁全体の前直たわみ 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 $X_v=13$ よりも $X_v=10, 15$ の方が高い応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(d)~(f)) 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 主桁桁では, 床版支

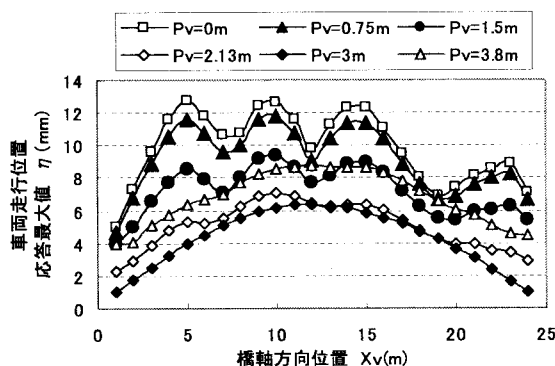


図-9 車両走行位置の影響検討 (2 主桁桁)

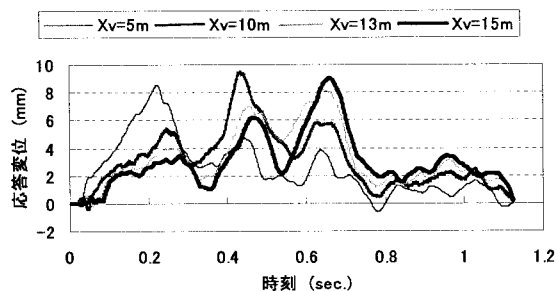


図-10 時刻歴波形の一例 (Case B3: $P_v=1.5m$)

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, 床版振動が励起されていると判断できる。

さらに, $P_v=1.5m$ (桁中央部と主桁の中間部) とした場合に床版厚 180mm から 320mm と変化させた場合の解析結果をまとめて図-11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では, $X_v=5m$ 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。 $X_v=5m$ 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 主桁桁 ($P_v=1.8m$) では 7mm, 4 主桁桁 ($P_v=2.6m$) 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 主桁桁であれば, 車両走行による橋梁応答は 3 主桁桁, 4 主桁桁と同程度であると判断できる。これは, 床版厚の増加により固有値解析で示した様に, 床版たわみ 1 次振動数, さらには, 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上昇したと判断される。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車両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と判断できる。

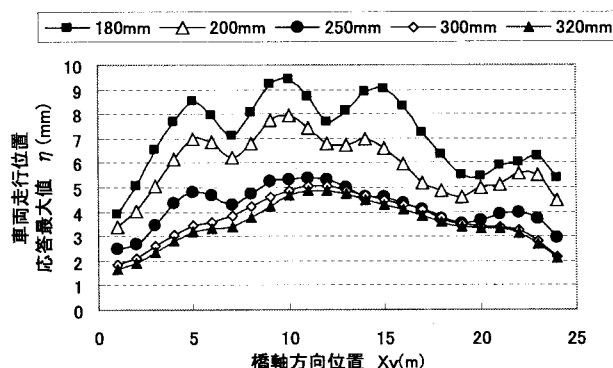


図-11 床版厚の影響検討結果 (2 主桁桁)

(4) 支間 50m の応答

解析結果を図-12に示す。これより, 2 主桁桁 (床版厚 320mm) の応答最大値 η は, $P_v=1.5m$ (桁中央と主桁の中央部) および $P_v=3.0m$ (主桁上) において 9mm 程度であり, 4 主桁桁の床版支間中央である $P_v=2.9m$

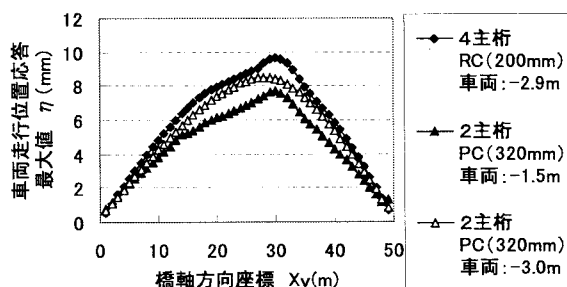


図-12 支間 50m 桁の解析結果

の応答最大値よりもやや小さい事が分かる。これより、現行道示で床版厚が設計された2主鈹桁は、4主鈹桁と同程度の振動特性を有していることがわかる。

5. まとめ

本論文では、幾つかの鈹桁橋梁に対して、固有値解析、交通振動シミュレーションを実施し、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、橋梁の低周波振動問題が懸念される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、床版振動による低周波振動問題が懸念される。
- 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250~300mm程度以上であれば、床版支間2.6m、3.6mと同程度の応答になる。
- 4) 桁支間を50mに延ばした場合でも、道示に従って床版厚を設定した床版厚320mmの2主鈹桁は、4主鈹桁と同等の床版振動特性を確保できる。

したがって、交通振動による低周波騒音問題から見た場合には、床版支間の長い場合には、床版厚は影響の大きいパラメータであると言える。今後は、これらの得られた橋梁振動応答から音圧レベルの評価を実施し、低周波騒音問題の評価を実施する予定である。

参考文献

- 1) 輛一, 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.

- 2) 川畑篤敬, 高尾道明, 猪村康弘, 滝口伸明, 葛西敏: U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.
- 3) 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.
- 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.