

R C 床版の振動の測定と解析

VIBRATION MEASUREMENT AND ANALYSIS OF CONCRETE BRIDGE DECK SLABS

加藤 雅史* 加藤 育久**

By Masafumi KATO and Ikuhisa KATO

Recently, damage of concrete bridge deck slabs has become a serious issue in road maintenance. But a practical method to accurately judge the soundness of slabs has not yet been established. Vibration test is one of the inspection methods to measure the structural soundness. In order to develop the vibration inspection method, the vibration measurements of reinforced concrete slabs were carried out on two simple supported plate girders. This paper deals with the practical technique about how to make the vibration measurement of slabs and how to analyze the vibrational characteristics theoretically. The results are as follows: In the vibration inspection, it is useful to measure the vibration at several points of slabs. In the theoretical analysis, plate analysis by FEM is useful, and it needs to accurately evaluate the effect of haunch, curb and handrail.

1. まえがき

近年、橋梁の維持管理が世界各国で大きな社会問題となりつつある。橋梁の中でも、道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版と略記）は舗装とともに路面を構成するが、自動車の輪荷重を直接受けるため他の橋梁諸部材に比して最も過酷な使用条件下にある。我が国では、すでに1965年頃からひびわれ発生を主とする損傷・破損が多発し、損傷機構の解明と対応策としての定期的な点検および補修補強が全国的規模で行われてきた。

現在、我が国における供用中のRC床版が、そのままさらに継続して使用に耐えられるか否かの判定、すなわち補修補強が必要か否かの判定は主としてひびわれの目視に基づいて行われている¹⁾²⁾³⁾。しかし、ひびわれの目視観察による方法は、簡便ではあるが統一性に欠け、検査者の主観的判断に偏るため、定量的かつ簡易な調査判定法の確立が望まれている。こうしたことから、健全度調査手法に関する各種の研究が精力的に進められている現状にある。

RC床版の健全度調査手法の1つとして、振動測定を適用することも検討され、実橋における経年的な振動性状の研究⁴⁾あるいは模型実験や実橋実験に基づいた判定法の研究⁵⁾等が進められている。しかし、この方法の実用化に際しては、多くの検討課題が残されている。

橋梁における振動測定はこれまで主として、橋梁全体を対象とすることが多く、構造系の全体振動を対象

* 工博 名古屋大学助手 工学部土木工学科 (〒464 名古屋市千種区不老町)

** 工修 前田建設工業(株) 電算センター (〒102 東京都千代田区富士見 2-10-26)

とする場合とＲＣ床版のような局部振動を対象とする場合では、自ずと振動測定の方法も異なってくる。床版振動を対象とする場合には、対象とする振動数領域が高くなり、床版の低次固有振動数の領域が上部工全体振動の高次固有振動数領域と一致し、さらには他の局部振動の振動数領域とも一致してくる可能性がある。こうしたことから、床版振動に適した測定手法の検討が必要である。また、床版の健全時の性状を全て測定しておくことは不可能である。したがって、振動特性を測定し、定量的に健全度を判定するためには健全時の状態を推定する必要がある。測定データが豊富でない現状においては理論計算あるいは数値モデル解析によって健全度を推定せざるを得ず、精度良く簡易な計算手法の検討が必要である。さらには、西村・宮本らが振動特性値による評価判定法を提案⁵⁾⁶⁾しているが、主として模型や切出し床版による室内実験に基づいており、実橋での評価判定についてはさらに検討が必要である。

以上のように、振動測定の適用に際しての研究課題は、次の３点が主なものである。

- ① 実橋での精度良い振動特性の把握手法の検討
- ② 実橋に即した振動特性の数値解析手法の検討
- ③ 実橋における評価判定手法の検討

そこで、本研究はＲＣ床版の健全度調査に振動測定を適用するための基礎的な研究として、特に基本となる固有振動数、振動モードに着目し、健全なＲＣ床版を有する実橋での振動試験を通して、上記①と②について検討を加えるものである。

２． 振動試験対象橋梁

振動試験は、名古屋市内に建設中の名古屋高速道路高速１号線の２橋（Ａ桁橋、Ｂ桁橋）で行った。Ａ桁橋は支間 34.94m、幅員 5.5mを有する３主桁（主桁間隔2.25m）の単純活荷重合成鉄桁であり、支間中央に分配横桁、約 5.9m間隔で対傾構が配置されている。また、床版は厚さ22cmのＲＣ床版で、高さ1.23m、幅25cmの壁高欄を有している。Ｂ桁橋は支間 30.30m、幅員 8.5mを有する４主桁（主桁間隔 2.5m）の単純合成鉄桁であり、支間中央に分配横桁、約 5.1m間隔で対傾構が配置されている。また、床版は厚さ23cmのＲＣ床版で、高さ1.23m、幅25cm（下り線側は18cm）の壁高欄を有している。

Ａ桁橋はオフランプ部に架設されており、床版下側での作業のし易さから選定し、またＢ桁橋は本線上り線上に架設されており、Ａ桁橋より主桁間隔の広い桁ということで選定したものである。尚、両桁橋とも振動試験時には未舗装の状態であった。

３． 振動試験方法

床版振動を測定するためには、床版を何らかの方法で加振する必要がある。一般に橋梁振動を測定する場合の起振法には種々の方法⁷⁾があるが、床版を対象とすることおよび橋梁の供用開始後にも測定することを考えて、次の３種類の加振方法での試験を行い、加振方法の適否についても検討することとした。

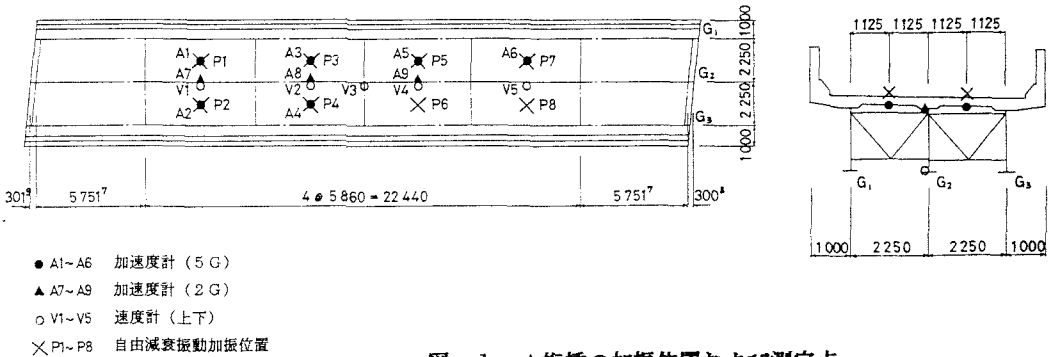
- ① 自由減衰振動試験
- ② 車両走行振動試験
- ③ 常時微動振動試験

①の自由減衰振動試験は、床版上の加振位置において自動車のタイヤ（重量 18kgf）を所定の高さ（100、75、50、25cm）から落下させ、床版面でバウンドしたタイヤを受け止めて衝撃力の入力１回となるようにした。このタイヤを落下させて自由減衰振動を起させることを、各加振位置で３～４回ずつ繰り返して行っ

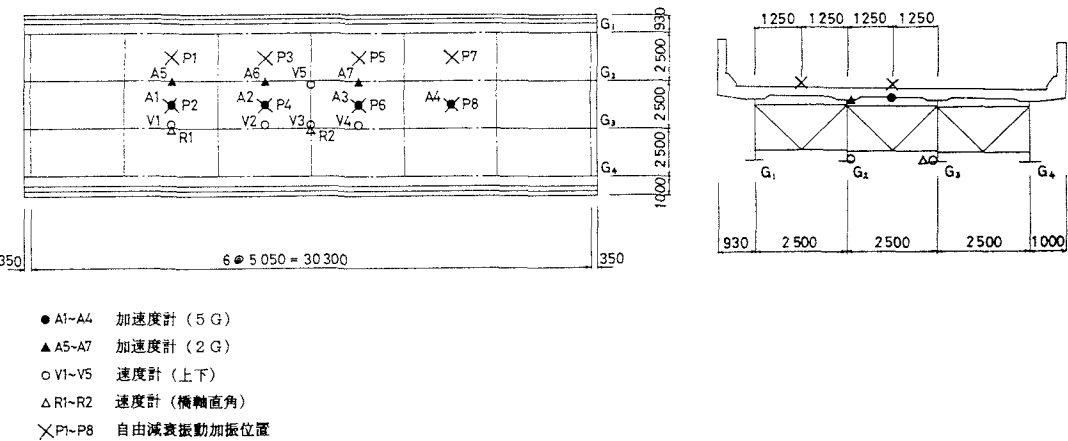
た。②の車両走行振動試験は、対象橋梁が供用前であるため試験車（総重量 20tonのダンプトラック）を10～20 km/h の速度で走行させ、車両走行時の振動を測定した。試験車は、その片側車輪が床版スパン中央（主桁と主桁の中央）を通るようにして、対象橋梁を含む前後3つの桁を連続して走行させた。③の常時微動試験は対象橋梁を特に加振せず、周辺の一般道路を走行する車両等の周囲からの外力による常時微動を測定した。

床版および桁全体の振動を測定するために、図一1、図一2に示すような測定点にひずみゲージ型加速度計および動電型速度計を設置した。床版振動の測定には、主桁と対傾構あるいは横桁で囲まれる床版（以下、これを1パネルと呼ぶ）の中央に測定点を設け、床版の固有振動数範囲を想定して応答周波数 0～120 Hzの加速度計（最大5 G）を床版下面に貼り付けた。また、主桁位置での振動および上部工全体の振動を測定するために、主桁上フランジ下面には応答周波数 0～70Hzの加速度計（最大2 G）を貼り付け、主桁下フランジ上には動電型速度計を設置した。測定する振動方向は全て鉛直方向とした。

ひずみゲージ型加速度計は延長コードによって動ひずみ増幅器と接続し、動ひずみ増幅器で適当に増幅してその出力である加速度波形をデータレコーダに記録した。また、動電型速度計は自己発電型であることから、延長コードによって直接データレコーダに接続し、その速度波形を記録した。



図一1 A桁橋の加振位置および測定点



図一2 B桁橋の加振位置および測定点

4. 振動試験結果

自由減衰振動データは振動波形から直接その振動数を読み取る方法もあるが、自由減衰振動波形には複数の振動数の波形が重なり合っているため、他の車両走行時振動データ、常時微動データと同様にスペクトル解析による方法を用いた。データ解析は 100Hz以下の振動数を対象とすることとし、全測定データを遮断周波数 100Hzのローパスフィルタを通してサンプリングタイム 0.005秒でAD変換した。AD変換したデータはFFT法によってスペクトル解析したが、自由減衰振動データは波形の減衰時間から計算に用いるデータ数を1024個、車両走行時振動データは対象橋梁上の走行時間を網羅するようにデータ数4096個、常時微動データはデータ数1024個と4096個の両方について解析した。

床版振動データには上部工全体の振動成分も含まれており、その卓越振動数にも床版の固有振動数だけでなく、上部工全体の固有振動数等が現れてくる。そこで、床版の加速度データから主桁上フランジの加速度データを差し引いた床版の相対的な振動データを求め、このデータについても同様のスペクトル解析を行った。床版の生振動データと相対的な振動データのスペクトル解析結果の一例を図-3に示す。図-3の左右の図を比較すると、左側の生加速度データに比して右側の床版の相対的な加速度データは低振動数成分が少なくなり、高振動数成分すなわち床版の振動が卓越していることがわかる。また、それぞれのパワースペクトルにおいても同様のことが言える。

以上のようにして、各加振ケース、各測定点の振動データの解析結果全てから卓越振動数を拾いだし、各解析結果で再現性の高いものから振動モード形状を参照して固有振動数を求めた。固有振動数に相当するパワースペクトルのピーク振動数は各測定データ間で多少変動するので、それらを平均して固有振動数とした。尚、振動モードは固有振動数に相当するパワースペクトル値の平方根と各測定点間のクロススペクトルの位相角から求めた。

このようにして求めたA桁橋およびB桁橋の固有振動数、振動モードを表-1、表-2に示す。これより、A桁橋の床版の1次固有振動数は 36.2 Hz、B桁橋の床版の1次固有振動数は40.4Hzである。床版スパン（主桁間隔）はA桁橋が2.25m、B桁橋が2.50mとB桁橋の方が

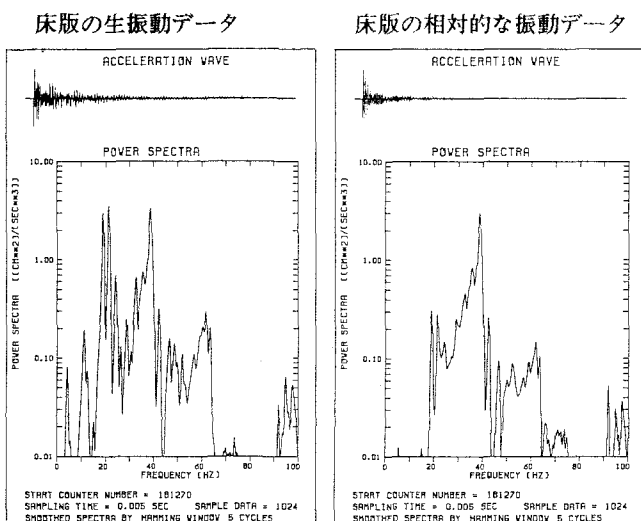


図-3 A桁橋自由減衰振動データのスペクトル解析結果
(加振位置P1、落下高 100cm、測定点A1)

表-1 A桁橋の固有振動数および振動モード

次数	固有振動数	振動モード
桁 1次	4.3 Hz	
桁 2次	21.4 Hz	
床版 1次	36.2 Hz	
床版 2次	39.0 Hz	
床版 3次	46.7 Hz	

広いが、床版厚がB桁橋の方が厚いことおよび主桁本数の違いによってA桁橋の固有振動数の方が低くなっているものと考えられる。

本振動試験結果から次のような点が明かとなった。

- 1) 自由減衰振動試験において、タイヤの落下高によって加振の影響の及ぶ範囲が異なるかどうかを比較検討したが、対象橋梁が健全であることもあって固有振動数、振動モードともその相違はほとんど見られない。
- 2) 自由減衰振動試験において、主桁の振動を差し引いた床版の相対的な振動データを解析することにより、床版の固有振動数をより明確に把握することができる。
- 3) 車両走行振動試験では、試験車の固有振動数（約3 Hz）と桁の1次固有振動数が非常に卓越しており、相対的に床版の振動成分が小さくて、床版の固有振動が把握しにくい。
- 4) 車両走行振動試験においても、自由減衰振動試験と同様に主桁との相対的な振動データを解析することにより床版の固有振動数は把握できる。ただし、測定手法上、床版の固有振動数を想定してハイパスフィルタを用い、非常に卓越する試験車や桁の固有振動数成分を除去した測定をすることが精度上望ましいと考えられる。
- 5) 常時微動試験でも、他の試験データと同様にして床版の振動を把握することは可能ではあるが、床版の振動レベルが低く、精度的に床版振動の把握にはあまり適さないと考えられる。

表一2 B桁橋の固有振動数および振動モード

次数	固有振動数	振動モード
桁 1次	4.4 Hz	
桁 2次	19.7 Hz	
床版 1次	40.4 Hz	
床版 2次	43.6 Hz	

5. 数値解析手法

従来、実橋におけるRC床版の振動性状を厳密に数値解析的に求めた例はほとんどなく、実橋の健全時の固有振動数を求める際には、2辺単純支持無限縁板としての次の理論式⁸⁾が用いられている。

$$f_0 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{gD}{wH}} \lambda \quad (1)$$

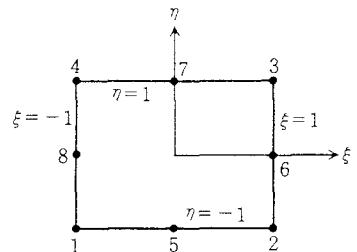
$$D = \frac{EH^3}{12(1-\nu^2)}$$

ただし、 f_0 は1次固有振動数、 L は床版スパン、 D は板剛度、 w は板の単位体積重量、 H は板厚、 λ は支持条件による定数（ $=1.0$ ）、 E は弾性係数、 ν はポアソン比である。

しかし、この式(1)では対象とする床版の周囲の状態を無視しており、必ずしも実橋には適合していないと考えられる。

そこで、次の3種の方法を用いて数値解析を行った。

- ① 平板理論に基づき、8節点アイソパラメトリック四辺形要素（図一4）を用いたFEM解析⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾



図一4 8節点アイソパラメトリック四辺形要素

② 2次元ビーム質点系モデルによる解析

③ 式(1)による解析

RC床版の振動を解析する際に、入力データで最も問題となるのは弾性係数の値をどのようにとるかである。振動試験時の床版の応力レベルは微小であり、解析に用いる動弾性係数 E_d は初期弾性係数 E_i にほぼ一致すると考えられることから、コンクリートの弾性係数の算定にはCEB-FIP国際指針の次式¹²⁾を用いた。

$$E_i = 20665 \sqrt{f_c} \quad (2)$$

ただし、 E_i はコンクリートの初期弾性係数(kgf/cm²)、 f_c は円柱供試体による圧縮強度(kgf/cm²)である。さらに、床版に配置されている鉄筋による割増しを考慮すると、床版の弾性係数 E は次式で与えられる。

$$E = E_c \left(1 + \frac{A_s}{A_c} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (3)$$

ただし、 E は鉄筋により割増したコンクリートの弾性係数、 E_c はコンクリートの弾性係数、 E_s は鉄筋の弾性係数、 A_c はコンクリートの断面積、 A_s は鉄筋の断面積である。

振動試験時にシュミットハンマーで測定した反発硬度より求めた床版コンクリートの平均圧縮強度はA桁橋が409 kgf/cm²、B桁橋が401 kgf/cm²であったことから、それぞれこの値を式(2)の f_c とした。式(2)、式(3)により $E_c = E_i$ 、 $A_s/A_c = 0.01$ として床版の弾性係数を算定すると、A桁橋で 4.39×10^5 kgf/cm²、S6U桁で 4.34×10^5 kgf/cm²となり、解析にはこの値を用いた。尚、床版の単位体積重量は2500 kgf/m³とした。

6. 数値解析結果

(1) 上部工全体系の解析

実測結果の検証のために、まず上部工全体系すなわち桁としての固有振動数を解析した。解析には2次元ビーム質点系モデルを用い、A桁橋は37質点、B桁橋は25質点に分割した単純梁にモデル化した。その結果を表一3に示すが、実測値と比較して1次固有振動数はよく一致している。2次固有振動数は実測値より低い値となっているが、これはモデル化に際して、対傾構や横桁などを考慮せず簡素化したことによる影響と考えられる。

(2) 全橋床版の板解析

実測結果によれば、床版の固有振動数は加振点および測定点の違いによる差は見られなかった。これは対象とした床版が供用前で健全であるため、床版が全橋床版としてのモードで振動することを示していると考えられる。そこで、全橋床版を対象として8節点アイソパラメトリック四辺形要素によるFEM解析

表一3 上部工全体系の固有振動数

		曲げ1次	曲げ2次	橋軸1次	曲げ3次
A 桁 橋	実測値	4.3 Hz	21.4 Hz	——	——
	解析値	4.25 Hz	16.99 Hz	33.91 Hz	38.22 Hz
B 桁 橋	実測値	4.4 Hz	19.7 Hz	——	——
	解析値	4.65 Hz	18.62 Hz	39.66 Hz	41.90 Hz

を行った。要素分割は主桁、ハンチ、壁高欄の位置を考慮して、A桁橋は36要素、B桁橋は44要素に分割した。境界条件としては、主桁上および橋梁両端支点上の主桁間を単純支持とした。

A桁橋およびB桁橋の解析結果を振動モードとともに図一5および図一6に示す。床版の低次振動モード形状は実測値と同様に、橋軸方向に単純梁の低次モードのような形状を示し、幅員方向には連続梁の1次モード形状となっている。これは床版が幅員方向に比べ橋軸方向の支点間距離が極端に長いと考えられる。固有振動数について、表一1、表一2の実測値と比較すると、全体的に解析値の方がやや低めではあるがほぼ一致している。実測値と解析値との若干の差異は、床版ハンチ部分の剛性の評価方法に起因すると考えられる。すなわち、本試験では主桁の上フランジは床版ハンチ部と同じ動きをすると考えられ、主桁上フランジをハンチ部分の剛性に取り入れれば測定値により一致した結果が得られると考えられる。しかし、解析結果からこの床版のモデル化が妥当であり、床版が健全である場合の振動性状は本解析方法によって高次モードまで推定することができると言えよう。

(3) 部分床版の解析

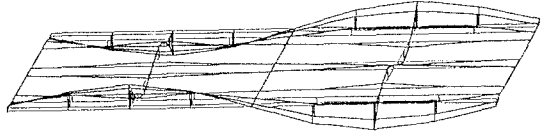
全橋床版を対象とした解析では、高次モードまで正確に得ることができるが、四辺形要素の分割の増加に伴い計算機の使用容量が増し、計算時間も非常に長くなる。また、床版にひびわれ等の損傷が生じた場合には、対象とする床版のパネルごとに固有振動数が変化することも実測例⁴⁾から考えられる。そこで、床版の一部を対象として数値解析した場合の実用性をみるために、部分床版の解析を次の3種類で検討した。

- ① 幅員方向には全スパン、橋軸方向には3パネル（橋軸方向に全橋の1/2相当）を対象とした板解析
- ② 幅員方向には全スパン、橋軸方向には1パネル（橋軸方向に全橋の1/6相当）を対象とした板解析
- ③ 幅員方向には全スパン、橋軸方向には単位長さを考えたビーム質点系解析

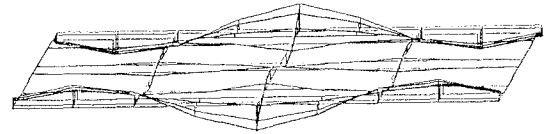
1次モード (34.22 Hz)



2次モード (37.93 Hz)

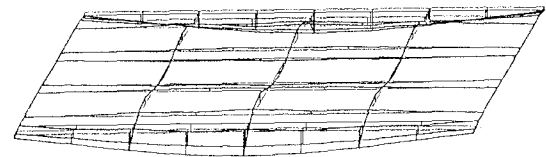


3次モード (46.26 Hz)

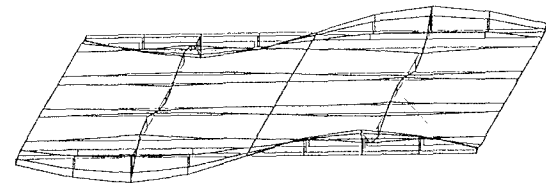


図一5 A桁橋の全橋床版解析結果

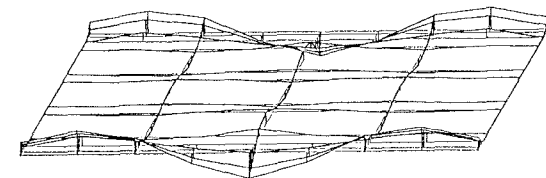
1次モード (36.73 Hz)



2次モード (41.51 Hz)



3次モード (52.61 Hz)



図一6 B桁橋の全橋床版解析結果

表一４ A桁橋の部分床版解析結果（固有振動数）

		1 次	2 次	3 次
実 測 値		36.2 Hz	39.0 Hz	46.7 Hz
板 理 論	全橋床版	34.22 Hz	37.93 Hz	46.26 Hz
	3 パネル	34.20 Hz	38.26 Hz	
	1 パネル	34.55 Hz		
梁 理 論		38.85 Hz		

表一５ B桁橋の部分床版解析結果（固有振動数）

		1 次	2 次	3 次
実 測 値		40.4 Hz	43.6 Hz	—
板 理 論	全橋床版	36.73 Hz	41.51 Hz	52.61 Hz
	3 パネル	36.28 Hz	41.22 Hz	
	1 パネル	37.25 Hz		
梁 理 論		41.67 Hz		

いずれの解析においても、境界条件は主桁上でのみ単純支持とした。したがって、①②のモデルでは主桁に直交な端部は自由端とした。

A桁橋、B桁橋の解析結果を表一４、表一５に実測値、全橋床版の解析値とともに示す。尚、表中の次数は実測値の次数に対応した振動モードのものを示してある。この結果より、2次モードまでを対象とする場合には橋軸方向に支間の半分の長さ（ここでは3パネル）を取り出して解析すれば十分であり、1次モードのみを対象とする場合には橋軸方向に1パネル分を取り出せば十分な値が得られることがわかる。また、③の梁理論による解析結果は板理論によるよりも高めの値となっている。これは、今回対象とした橋梁がいずれも壁高欄を有しており、その剛性評価の違いにより差が生じたものと考えられる。

（４） 床版振動の周囲条件の相違による比較

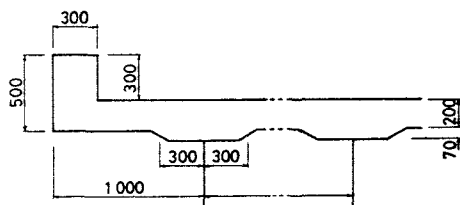
A桁橋、B桁橋において、理論式の式（１）を適用すると固有振動数はそれぞれ83.1Hz、70.0Hzとなり、実測値と大きく異なった値となる。この原因としては、桁より外に張り出した部分の影響、特に壁高欄の質量の影響が大きいと思われる。そこで、①壁高欄なし、②張り出し部なし、の場合を想定して、1パネル分を対象とした板解析とビーム質点系による解析の2通りで解析を行って比較した。

結果を表一６に示すが、板理論と梁理論とは非常に近い値となっている。また、張り出し部のないときの値はA桁橋、B桁橋ともに式（１）による理論値とほぼ一致している。このように、同一床版スパンであっても、張り出し部の構造により固有振動数が大きく変わることがわかる。また、表一６からわかるように、張り出し部が地覆程度のものであれば、梁理論による解析でも十分精度があると言えよう。

そこで、図一七に示すような張り出し部の構造をもつ、床版厚20cm、ハンチ高7cmの標準的な橋梁床版モデルを考える。床版スパン（主桁間隔）、主桁本数を変化させて、①式（１）による理論値、②1パネル分を対象とした板理論による解析、③梁理論による解析、の3手法で解析を行い、それぞれの手法の有効性を比

表一６ 張り出し部の違いによる固有振動数の比較

橋梁名	解 析 法	壁高欄付 (実橋)	壁高欄 なし	張り出し部 なし
A 桁 橋	板 解 析	34.55 Hz	63.11 Hz	80.41 Hz
	梁 解 析	38.85 Hz	63.51 Hz	80.81 Hz
	式（１）	83.1 Hz		
B 桁 橋	板 解 析	37.25 Hz	60.33 Hz	67.99 Hz
	梁 解 析	41.67 Hz	59.70 Hz	68.70 Hz
	式（１）	70.0 Hz		

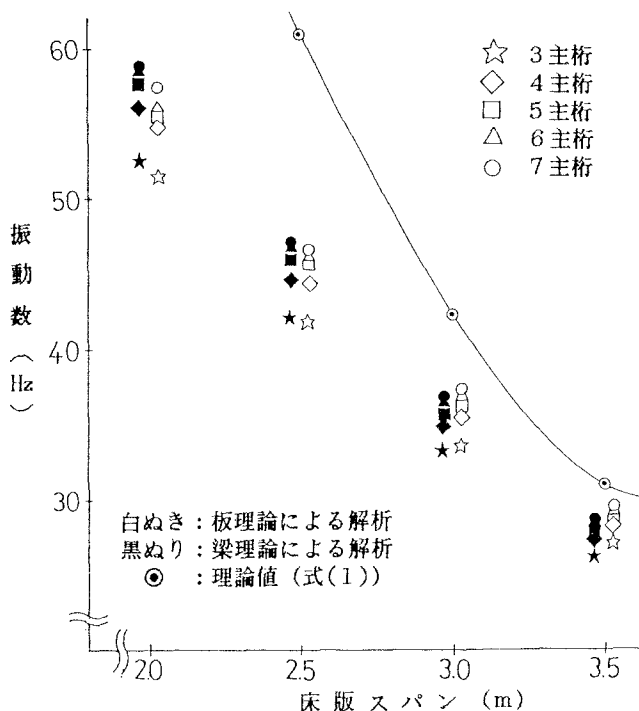


図一七 標準的な橋梁床版モデル

較した。尚、床版の弾性係数はB桁橋と同じ $4.34 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、単位体積重量は 2500 kgf/m^3 、ポアソン比は0.18として計算した。

その結果を図一8に示す。これより、次のようなことが言える。

- 1) 板理論による解析と梁理論による解析では、あまり差異は見られない。
- 2) 床版の固有振動数は、単に床版スパンのみでなく主桁本数も関係する。
- 3) 主桁本数による影響は床版スパンが小さいほど大きい。
- 4) 2辺単純支持無限縁板の理論式は、床版スパンが小さいときには実際よりかなり高い固有振動数を与えるため適用には問題がある。しかし、床版スパンが3 mを越えるような場合にはほぼ妥当な値が得られ、適用することができる。



図一8 標準的な橋梁床版の固有振動数の比較

7. 結論

本研究では、RC床版の固有振動数・振動モードに着目し、実橋での振動測定手法ならびにその数値解析手法について検討を加えた。その結果、次の結論が得られた。

測定・データ解析方法について

- 1) 床版の振動性状およびモード形を詳細に把握するためには、橋軸方向に適当な数の振動計を、また、主桁をはさんで反対側の床版にも振動計を設置するのが望ましい。
- 2) 後のデータ処理のことを考えて、主桁位置にも同じ振動計を設置する。
- 3) 床版の固有振動数を求めるには自由減衰振動試験が適している。
- 4) 車両走行時の振動測定においては、車両や桁の低次固有振動成分をハイパスフィルタによって除去して測定するのが良いであろう。
- 5) 今回の測定では壁高欄の挙動を厳密には明らかにすることができなかった。そこで、より詳細な挙動を得るには壁高欄にも振動計を設置するのが望ましい。
- 6) 床版での振動から桁での振動を差し引いたデータを解析すると、床版の固有振動数をより明確に把握できる。

数値解析方法について

- 7) 壁高欄、ハンチ部を考慮に入れた、板理論による全橋床版のFEM解析は有効である。
- 8) 必要とするモード次数によって、板理論によるFEMモデルで解析対象とする橋軸方向の長さは適宜短くできる。

- 9) 幅員方向の主桁からの張出し部の構造が地覆程度のものであれば、さらに簡便な解析として、橋軸方向には単位長さをとり幅員方向に連続梁とした梁理論によるモデルも有効である。
- 10) 2 辺単純支持無限縁板の理論式は床版スパンの大きい場合など限られた場合にのみ適用できる。

また、振動測定による床版健全度調査手法の研究を進めるためには、今後さらに、①壁高欄、地覆、ハンチ部分の剛性のより正確な評価、②床版がアスファルト舗装を有する場合の舗装の剛性の評価、③損傷を受けた床版に対する適用、等の検討が必要である。

最後に、振動試験および数値解析について御指導いただいた名古屋大学島田静雄教授、山田健太郎助教授、また振動試験に御協力いただいた名古屋高速道路公社の方々、特に前野裕文氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋補修便覧，1979年。
- 2) 岩森 修・向井敏明：軍行橋における損傷調査と補強対策，既設の橋梁構造物およびその構成部材の健全度・耐久性の判定に関するシンポジウム論文集（土木学会関西支部），pp33～40，1983年 2月。
- 3) 日永田雅司：橋梁床版維持補修の調査手法とその判定について，既設の橋梁構造物およびその構成部材の健全度・耐久性の判定に関するシンポジウム論文集（土木学会関西支部），pp59～63， 1983年 2月。
- 4) 加藤修吾・吉川 紀・山崎信之：鉄筋コンクリート床版の健全度判定のための基礎資料収集について，既設の橋梁構造物およびその構成部材の健全度・耐久性の判定に関するシンポジウム論文集（土木学会関西支部），pp83～90，1983年 2月。
- 5) 宮本文穂：道路橋鉄筋コンクリート床版の力学的特性とその耐用性判定に関する基礎的研究，学位論文，1984年 9月。
- 6) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂：道路橋RC床版の健全度判定法に関する研究，既設の橋梁構造物およびその構成部材の健全度・耐久性の判定に関するシンポジウム論文集（土木学会関西支部），pp99～106， 1983年 2月。
- 7) 加藤雅史・島田静雄：橋梁の現地振動実験法，土木学会誌，Vol.66，No.2，pp38～42，1981年 2月。
- 8) 小坪清真：土木振動学，森北出版，pp255～259，1973年 4月。
- 9) 大地羊三：有限要素法とその応用，森北出版，1975年 2月。
- 10) 鷺津久一郎・宮本 博・山田嘉昭・山本善之・川井忠彦：有限要素法ハンドブック（基礎編），培風館，1981年 9月。
- 11) 川股重也：シェル構造解析，培風館，1974年10月。
- 12) 岡田 清・六車 熙：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp465～468，1981年11月。

（1986年10月17日受付）