

広幅員多径間連続桁橋に対する振動照査について

VERIFICATION OF VIBRATION FOR 6-SPAN CONTINUOUS GIRDER BRIDGE WITH WIDE WIDTH

松村駿一郎* 梶川康男** 山内幸裕*** 酒井 徹**** 中平進夫*****

By Shunichiro MATSUMURA, Yasuo KAJIKAWA, Yukihiro YAMAUCHI,
Tohru SAKAI and Nobuo NAKAHIRA

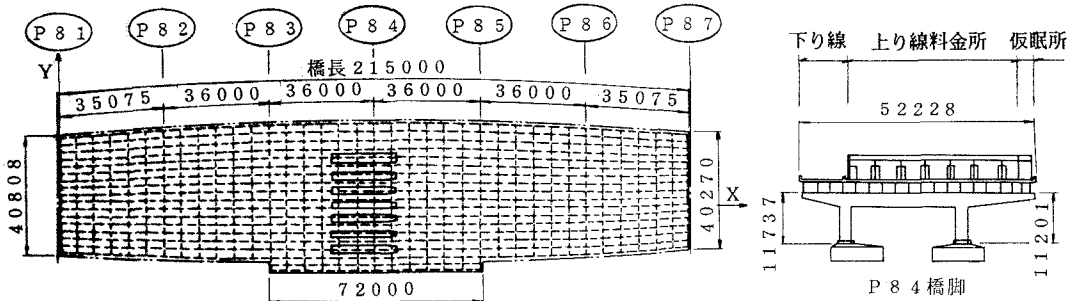
This paper deals with the verification method of vibration for six-span continuous girder bridge with wide width in Hanshin Expressway. It is necessary that the health of workers in toll gate on this bridge is not lost by exposing to strong bridge vibration. When a single moving vehicle idealized the model of four-degree-of-freedom system is running on the bridge with constant speed, dynamic response has been numerically simulated by using normal mode analysis. Those results have been discussed with the view to more comfortable work in toll gate by the reduced comfort boundary(ISO-2631). Stiffening cross beams and sway bracings in 3rd and 4th spans has done to satisfy its vibration boundary.

1. まえがき

走行する自動車荷重によって、ひき起こされる道路橋の振動問題は古くから衝撃係数の検討を対象として主に行われてきた^{1) 2) 3)}。ところが、近年では利用できる土地の関係などから複雑な線形をもつ橋梁構造物を建設することが多くなってきたために、衝撃係数の検討のほかにも構造部材の疲労や利用者の振動感覚⁴⁾、周辺環境への影響^{5) 6)}などを対象として研究が行われるようになってきた。

一方、複雑な線形や構造のために橋脚の構造も複雑となり、大きく偏心する荷重が作用したり、張り出しの大きな横ばりを持つなどの橋脚が用いられるようになってきた。従来、上部構造の設計時に格子げたあるいは版としての計算を行う際、橋脚上の支点は剛なものと考えることが多かったが、たわみやすい橋脚の出現のために支点を剛と考えずに弾性支持を考えた格子げた計算あるいは橋脚を含めた立体骨組としての計算を行うことが必要となってきた。同じ理由で、走行荷重による振動問題も橋脚の変形を考慮することによって、従来、剛支点として扱ってきた場合に比べて、その動的挙動が大きく異なる可能性や橋脚の柱部材や横ばり部材に過大な動的応力が作用する可能性などが考えられ、これらに対する検討の必要性が生じてきた。

*	阪神高速道路公団・神戸建設部 部長	(〒650 神戸市中央区新港町 16-1)
**	工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科	(〒920 金沢市小立野 2丁目 40-20)
***	阪神高速道路公団・大阪第一建設部設計課	(〒559 大阪市住之江区北加賀屋 2-11-8)
****	日本橋梁(株) 橋梁本部設計部	(〒552 大阪市港区福崎 2丁目 1-30)
*****	(株)片山鉄工所 橋梁設計部	(〒551 大阪市大正区南恩加島 6丁目 2-21)



図－１ 対象とした６径間連続桁の一般図

阪神高速道路大阪府道高速湾岸線（南伸部）高砂工区において図－１に示すような最大幅約５．２ｍという広幅員の、支間長約３．６ｍの６径間連続鉄桁橋が建設中である。本橋の下部構造はすべてπ型鋼製橋脚であり、一般街路との関係から橋脚横ばりの張出し量が大きく、最大約１．５ｍにも達し、たわみやすい構造となっている。しかも、本橋の上には料金所が設けられ、その料金所で働く人々の仮眠施設が設置されることになった。

そこで、本橋を設計するに際して、衝撃係数については多径間連続桁では単純桁よりも小さくなるとの報告⁷⁾から道路橋示方書に従うこととし、本橋の周辺が住宅地区ではないことから周辺環境に対する影響はないものと判断した。ところが、料金所で働く人々に対する振動の影響が考えられ、その労働環境の快適性について検討を行い、その結果を本橋の設計および製作に反映させたので報告する。

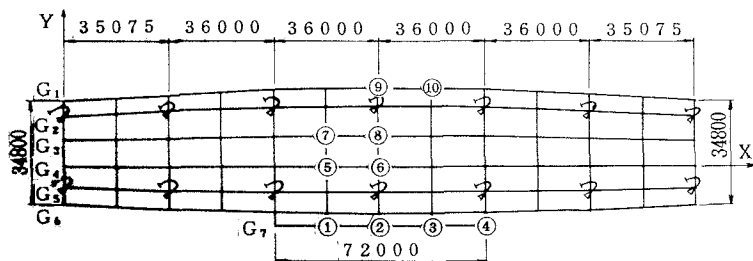
２．高架橋のモデル化と固有振動

本橋は図－１に示したように６径間連続鉄桁橋で１７本主桁であり、料金所付近の拡幅部の第３、４径間では１９本主桁である。そして、橋脚はすべてπ型であり、本来、立体骨組構造として動的解析を行うのが望ましいが、計算容量などの点を考慮し、つぎのような連続格子構造としてモデル化を行った。

まず、主桁については剛性や自重等を数本分まとめて６本桁（第３、４径間においては７本桁）とし、格間の剛度については変断面のそれぞれの剛度を加重平均した。横桁については各支間中央点に１本配置し、橋脚線上の部材については橋脚の横ばりと支点上対傾構を単純に加算した値とした。中間対傾構はトラス型であり、剛性も小さいことから横桁剛性に加算できるものとした。また、橋脚の柱については、下端を固定と考え、片持ばりとしての曲げ剛性に相当する２つの回転ばねが橋脚横ばりを橋軸方向と橋軸直角方向に支持

するものとした。なお、柱の鉛直方向の剛性は大きく、剛支点であるとした。すなわち、図－２に示すような構造を今回のモデルとした。

なお、本橋が前節で述べたように拡幅部に料金所が設けられ、しかも張り出し部に仮眠施設が設けられることから、この部分での振動が大きくなることが予想される。そこで、振動を小さ



図－２ 解析モデル図

くする対策として、分配横桁や中間対傾構（トラス型を充腹型とするなど）の剛性を大きくすることを考えた。そこで、対象としている第3、4径間のみの横桁・中間対傾構の剛性を増加させた構造（以下、改良構造Ⅰと呼ぶ）と、全径間の横桁・中間対傾構の剛性を増加させた構造（以下、改良構造Ⅱと呼ぶ）を考え、基本構造の振動と比較することとした。

このようにモデル化した連続格子構造に対して、林川らによる固有剛性マトリックス法⁹⁾に単純ねじりを考慮して30次までの固有振動数とモードを求めた。その結果を表-1に示した。また、基本構造における低次の代表的な振動モードを図-3に示した。表-1からわかるように低次においては主桁の曲げ振動であるので、各構造ともほとんど差がみられない。また、橋脚の横ばりの振動が支配的となる6～9次と20次以上の振動についてもそれほど差はみられない。しかし、横桁や対傾構の曲げが支配的となる振動においては若干の差が認められる。しかし、振動による影響を考える場合、振動数と振動モードのみからでは振動低減の効果の判定は難しく、次節で述べる走行荷重による動的応答解析の結果から判断する必要がある。

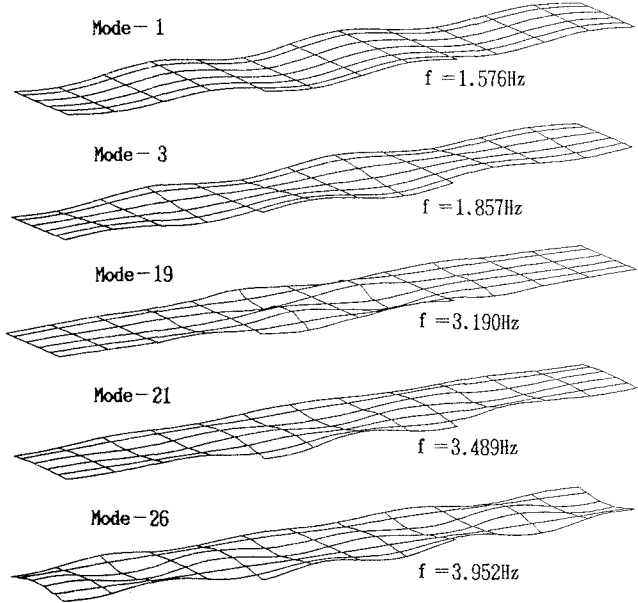


図-3 基本構造の代表的な固有振動モード

3. 動的応答解析

自動車荷重が主桁上を定常走行するものとして、図-2に示すモデル橋に対する動的応答解析手法としてモード解析法を用いた。モード解析法によれば、ある部材におけるx点の動的たわみ $y(x, t)$ は基準関数 $X_{ni}(x)$ と一般座標 $q_n(t)$ により

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) X_{ni}(x) \quad (1)$$

表-1 固有振動数 (Hz)

次数	計算ケース		
	基本構造	改良構造Ⅰ	改良構造Ⅱ
1	1.576	1.576	1.576
2	1.736	1.736	1.736
3	1.857	1.857	1.858
4	1.933	1.942	1.943
5	1.988	1.988	1.990
6	2.026	2.031	2.031
7	2.118	2.124	2.132
8	2.138	2.139	2.163
9	2.193	2.193	2.214
10	2.340	2.353	2.359
11	2.368	2.368	2.398
12	2.410	2.414	2.591
13	2.434	2.437	2.782
14	2.584	2.587	2.874
15	2.788	2.775	2.897
16	2.845	2.867	3.155
17	2.890	2.891	3.331
18	3.150	3.151	3.437
19	3.190	3.213	3.553
20	3.344	3.380	3.714
21	3.489	3.496	3.767
22	3.505	3.514	3.957
23	3.610	3.663	4.092
24	3.844	3.845	4.109
25	3.867	3.874	4.275
26	3.952	3.955	4.862
27	4.268	4.270	4.901
28	4.463	4.857	5.071
29	4.858	4.867	5.178
30	4.872	5.012	5.613

で表わすことができる。ここで、 $X_{ni}(x)$ はある部材の n 次振動時の固有モードを示し、次式で示されるものとした。

$$X_{ni}(x) = A_{ni} \cos \beta_{ni} x + B_{ni} \sin \beta_{ni} x + C_{ni} \cosh \beta_{ni} x + D_{ni} \sinh \beta_{ni} x \quad (2)$$

ここに、 $\beta_{ni}^4 = (\rho_i / EI) \omega_n^2$ である。そして、各係数 A_{ni} 、 B_{ni} 、 C_{ni} 、 D_{ni} は次式の正規化条件を満たすものとした。

$$\sum_{i=1}^N \frac{\rho_i l_i}{2} (A_{ni}^2 + B_{ni}^2 + C_{ni}^2 + D_{ni}^2) = 1 \quad (3)$$

このように正規化された固有振動モードを $\phi_n(x)$ と表わすことにする。

そして、図-4 に示すようなピッチングを考えた 4 自由度自動車モデルを考えると、路面-自動車-橋梁系の運動方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \ddot{q}_n + 2h_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n \\ = \{C_{TF}(Z_{TF} - \dot{y}_{VF}) + k_{TF}(Z_{TF} - y_{VF}) - (M_{SF} + M_{TF})g\} \phi_n(x_{VF}) \\ + \{C_{TR}(Z_{TR} - \dot{y}_{VR}) + k_{TR}(Z_{TR} - y_{VR}) - (M_{SR} + M_{TR})g\} \phi_n(x_{VR}) \end{aligned} \quad (4)$$

また車両の運動方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} M_S \ddot{Z}_G + C_{SF}(\dot{Z}_G + \dot{\ell}_F \dot{\theta} - \dot{Z}_{TF}) + k_{SF}(Z_G + \ell_F \theta - Z_{TF}) \\ + C_{SR}(\dot{Z}_G - \dot{\ell}_R \dot{\theta} - \dot{Z}_{TR}) + k_{SR}(Z_G - \ell_R \theta - Z_{TR}) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M_{TF} \ddot{Z}_{TF} + C_{SF}(\dot{Z}_{TF} - \dot{Z}_G - \dot{\ell}_F \dot{\theta}) + k_{SF}(Z_{TF} - Z_G - \ell_F \theta) \\ + C_{TF}(\dot{Z}_{TF} - \dot{y}_{VF}) + k_{TF}(Z_{TF} - y_{VF}) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} M_{TR} \ddot{Z}_{TR} + C_{SR}(\dot{Z}_{TR} - \dot{Z}_G + \dot{\ell}_R \dot{\theta}) + k_{SR}(Z_{TR} - Z_G + \ell_R \theta) \\ + C_{TR}(\dot{Z}_{TR} - \dot{y}_{VR}) + k_{TR}(Z_{TR} - y_{VR}) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} I \ddot{\theta} + \ell_F \{C_{SF}(\dot{Z}_G + \dot{\ell}_F \dot{\theta} - \dot{Z}_{TF}) + k_{SF}(Z_G + \ell_F \theta - Z_{TF})\} \\ - \ell_R \{C_{SR}(\dot{Z}_G - \dot{\ell}_R \dot{\theta} - \dot{Z}_{TR}) + k_{SR}(Z_G - \ell_R \theta - Z_{TR})\} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 M_{SF} 、 M_{SR} はばね上質量 M_S を車体の前後に振りわけた質量であり、次式のように表わされる。

$$M_{SF} = (M_S \ell_R^2 + I) / \ell^2, \quad M_{SR} = (M_S \ell_F^2 + I) / \ell^2 \quad (9)$$

ここに、 I はばね上部質量重心を通る軸まわりの回転慣性モーメントである。また式(9)のように質量を振りわけた場合、それぞれの重心点を Z_{GF} 、 Z_{GR} とすると次のような関係がある。

$$Z_G = (\ell_R Z_{GR} + \ell_F Z_{GF}) / \ell, \quad \theta = (Z_{GF} - Z_{GR}) / \ell \quad (10)$$

本解析では、ニューマークの β 法にて式(4)~(8)の連立微分方程式を解いた。その結果、得られるある時刻 t における一般座標での $q_n(t)$ や $\dot{q}_n(t)$ を用いて、着目点 x の応答は式(1)より変位 (たわみ) が求められ、次式より加速度が求められる。

$$\ddot{y}(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \ddot{q}_n(t) X_{ni}(x) \quad (11)$$

表-2 自動車モデルの諸定数

自動車総荷重	20tf (10tf、40tf)	ばね下・前輪	0.4tf
ばね上荷重	18tf (8tf、38tf)	ばね下・後輪	1.6tf
懸架部	ばね定数 $K_{SF}=1200\text{kgf/cm}$ $K_{SR}=4800\text{kgf/cm}$	減衰定数 $C_{SF}=5\text{kgf/cm/s}$ $C_{SR}=20\text{kgf/cm/s}$	
タイヤ部	$K_{TF}=2400\text{kgf/cm}$ $K_{TR}=9600\text{kgf/cm}$	$C_{TF}=6\text{kgf/cm/s}$ $C_{TR}=24\text{kgf/cm/s}$	

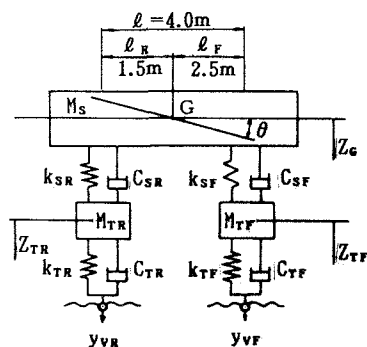


図-4 4 自由度自動車モデル

4. 数値計算と振動照査

本研究においては、料金所で働く人々に対する振動の影響を労働環境の快適性という観点から検討するために、つぎに示す諸量を用いて数値計算を行い、労働環境の照査を行った。

(1) 路面凹凸

対象としている路線は建設中であるので、他の既設路線において光学式プロファイルメーターにより実測された路面凹凸データを用いた。なお、実測路面は単純げた部で測定されたデータであるので今回の利用に際しては伸縮継手の段差を取り除いて用いた。その路面凹凸を図-5に示した。

(2) 走行車両モデル

計算に用いた走行車両は表-2に示すような諸量をもつ2軸4自由度系モデルとした。なお、積荷量によって車両の振動特性が変化することが考えられるので、ばね上質量については空荷車8tf、標準車18tf、過積車38tf（総重量10tf、20tf、40tf）の3種類を考えた。また、走行速度についてはG₁ 桁上は下り線の走行車線上であり、高速車が通過することから20m/s(72km/h)とした。

(3) 橋梁の減衰定数

減衰定数を予測することは難しいので、加藤らの研究¹⁰⁾や阪神高速道路における他の橋梁の減衰定数⁹⁾を参考にして、すべての振動次数に対して $h=0.010$ と 0.015 の2種類で計算した。

(4) 数値計算例

図-6に総重量20tfの車両が20m/sの速度で、走行車線下のG₁ 桁上を定常走行したときの基本構造における各点の応答変位と応答加速度の波形の一例を示した。ここ

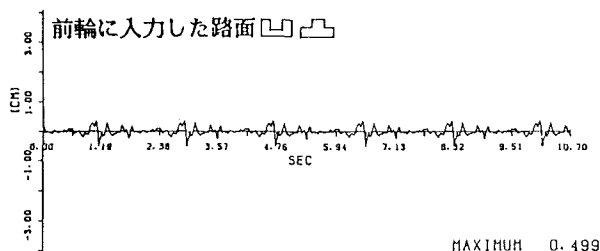


図-5 前輪に入力した路面凹凸

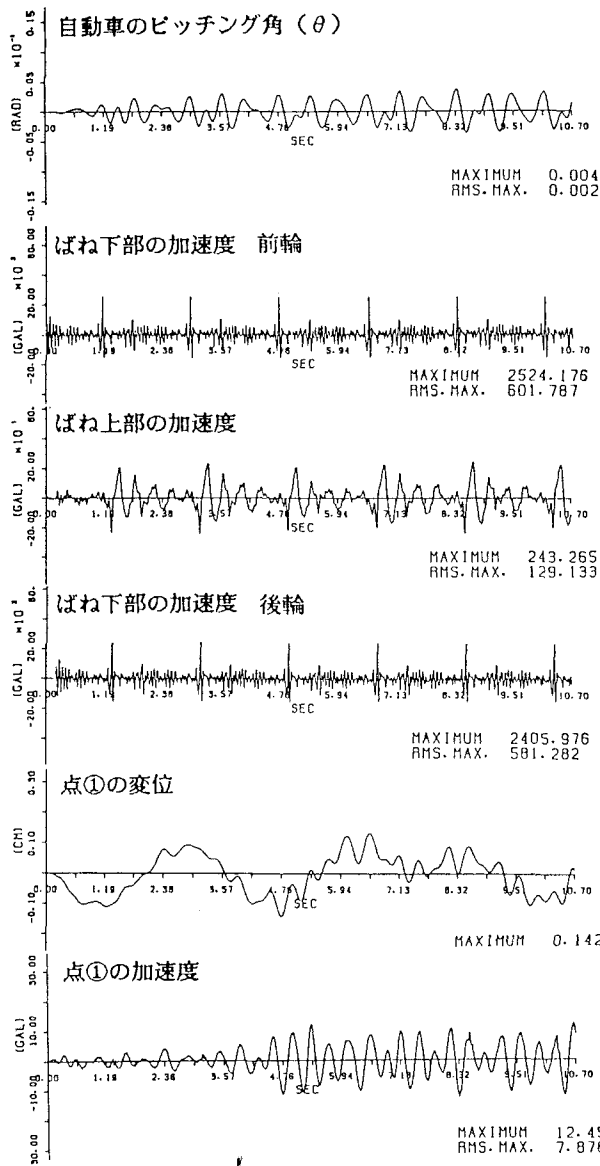


図-6 動的応答解析例（基本構造）

で、応答計算には30次までのすべてのモードを考慮した。なお、着目した点は仮眠施設の設けられる付近（点①、③）、料金所付近（点⑤、⑦）、車両が走行する桁の支間中央点（点⑩）とした。

(5) 労働環境の快適性の検討

振動の人体への影響の評価方法には種々の基準が提案されているが、今回、料金所で働く人々の労働環境を対象としているので、ISOの振動ばく露基準（快適減退境界線）¹¹⁾を適用することとした。ISOの基準では、ばく露される振動方向と振動数に対して、許容される加速度の実効値がばく露時間ごとに示されている。そこで、図-6のような動的応答結果をつぎのように処理した。橋梁の振動は上下方向のみであるが、料金所では立位か座位であるので身体の軸方向（鉛直方向）を対象とし、仮眠施設内では座位か横臥位であるので身体の軸方向（立位、座位での鉛直方向）と前後左右方向（横臥位での水平方向）を対象としてISOの基準を適用した。

振動数については、前節で述べたように非常に多くの固有振動モードが存在するので、本解析においては応答加速度波形を高速フーリエ変換して、フーリエスペクトルを求めて応答波形中、最も卓越する振動数を求めた。また、加速度の実効値については応答加速度波形から0.63秒間ずつの実効値を計算し、その実効値の最大値を用いた。そして、料金所での勤務時間が24時間（平均的には16時間は料金徴収、8時間は休憩・仮眠）であることから、料金所内（鉛直方向振動）については振動ばく露時間を16時間を、仮眠施設内（水平方向振動）については8時間を考えることにした。このような処理を行った結果を図-7に示した。

(6) 考察

以上のような数値計算およびデータ処理

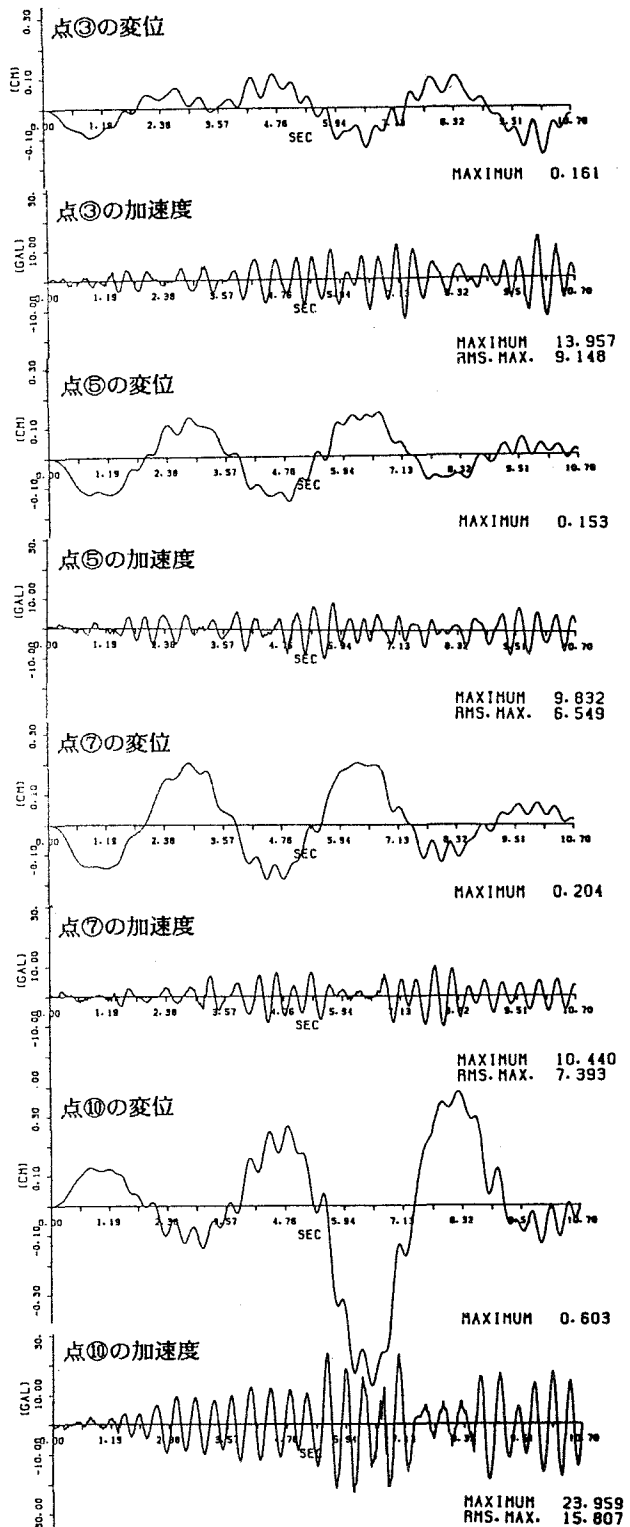


図-6 動的応答解析例（基本構造）（つづき）

の結果、つぎのことが明らかになった。

1) 仮眠施設内 (点①、③) での振動について結果をみると、その許容値は実線 (8 時間) であり、減衰が小さい図-7 (a) の点③が許容値上にある。そこで、横桁の剛性を高めるなどの構造改良によって許容値以下に振動を小さくすることが可能である。

2) 料金所内 (点⑤、⑦) での振動について結果をみると、その許容値は破線 (16 時間) であり、基本構造のままでは 10 t 車、20 t 車が走行したときに許容値を超えることとなる。そこで、構造を改良することで一部のケースで許容値以下とすることができない点はあるが、ほとんどの場合、許容値以下に振動を小さくすることができる。

3) 改良構造 I (第 3、4 径間のみの横桁や対傾構を補強) と改良構造 II (全径間にわたって補強) では大きな差はなく、改良構造 I の補強で、労働環境の快適性を満たす構造とすることが可能である。

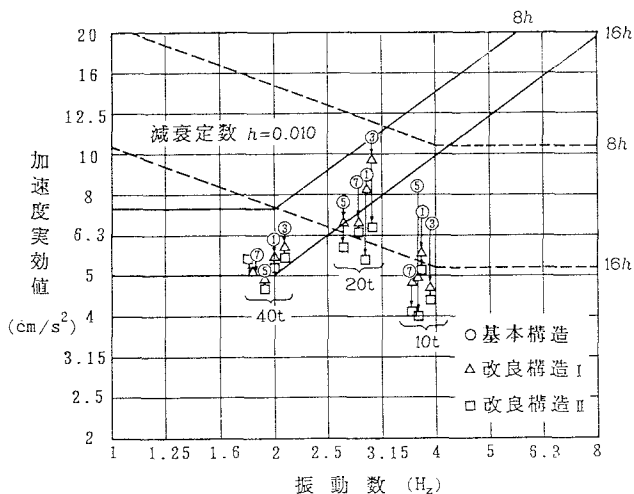
5. あとがき

橋梁構造物が振動することによって、その構造物を利用する人々あるいはその周辺の人々に影響を及ぼすことがある。その影響をできるだけ小さくする努力は計画時や設計時に行われるのが望ましい。今回、広幅員多径間連続桁橋上の料金所で作業する人々の労働環境の快適性を対象として、高架橋の振動が人体に及ぼす影響について数値シミュレーションで、その影響を予測し、設計に反映させることとなった。本研究での検討の結果、

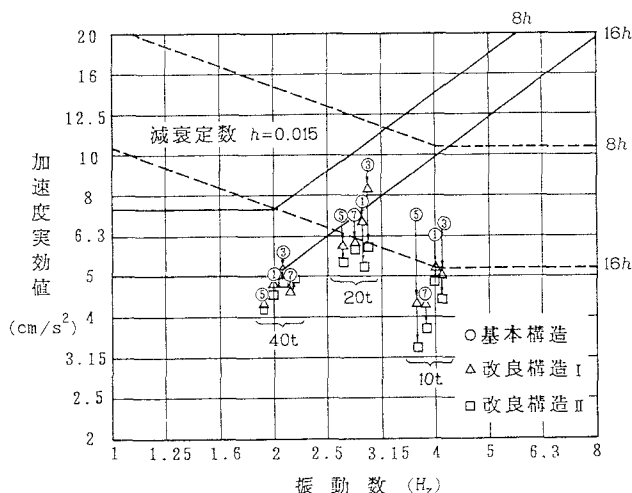
1) 横桁の剛性を高めるとともに、中間対傾構をトラス型式から充腹型式とすることで横方向剛性を上げ、分配効果を高めることで、その影響を小さくすることができる。

2) 応答加速度の減少効果を考えると、全径間の中間対傾構を充腹構造とする必要はなく、対象径間である第 3、4 径間の中間対傾構を充腹型式にすれば十分であるということが明らかとなった。

しかし、数値シミュレーションでの予測結果であり、路面性状、減衰定数、車両のモデル化などにおいて、まだ不確定な要素が含まれており、また、橋脚横ばりの張り出し部の疲労対策上の問題も残されていること



(a) 減衰定数 $h=0.010$ の場合



(b) 減衰定数 $h=0.015$ の場合

実線；ISOの水平振動に対する快適限界線
破線；ISOの垂直振動に対する快適限界線

図-7 加速度実効値と卓越振動数

から、将来横ばり先端にロッキングピアー等を設けて支持しても応力的に安全であるようにも設計することとした。

今後、諸般の事情から本橋のような張り出し量の大きな鋼製橋脚が建設されることも多くなるであろうし、また、その上にさまざまな施設が設けられることもあり、そこで作業する人々に対する配慮も必要となるであろう。本文が、このような橋梁を計画・設計する場合に参考になれば幸いである。

最後に、本検討で御協力いただいた阪神高速道路公団ならびに日橋・片山・函館・檜崎共同企業体の各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 山田・小堀：活荷重に対する道路橋の動的応答－衝撃係数－に関する研究，土木学会論文集，第148号，pp.40－50，1967年。
- 2) 伊藤：走行荷重に対する吊橋の動的応答と衝撃，土木学会論文集，第149号，pp.1－17，1968年。
- 3) 岡林・山口：連行車両による道路橋の二乗平均応答解析，土木学会論文報告集，第334号，pp.1－11，1983年。
- 4) 梶川：振動感覚を考慮した道路橋の使用性解析に関する考察，土木学会論文報告集，第304号，pp.47－58，1980年。
- 5) 梶川・大嶋：周辺環境への影響を考慮した高架橋の防振効果に関する一解析法，土木学会論文報告集，第341号，pp.79－86，1984年。
- 6) 矢作・吉田：高架橋における交通振動のアクティブコントロール，土木学会論文報告集，第356号/I－3，pp.435－444，1985年。
- 7) 本田・小堀・山田：多径間連続桁橋の動的応答と衝撃係数に関する考察，土木学会論文報告集，第331号，pp.65－73，1983年。
- 8) Hayashikawa & Watanabe: Dynamic Behavior of Continuous Beams with Moving Loads, Proc of A S C E, Vol.107, No. EM 1, pp.229－246, 1981.
- 9) 阪神高速道路公団：道路橋交通振動調査研究検討会報告書，阪神高速道路管理技術センター，1984年。
- 10) 加藤・島田：橋梁実測振動特性の統計解析，土木学会論文報告集，第311号，pp.49－58，1981年。
- 11) I S O－2631: Guide for the Evaluation on Human Exposure to whole-Body. Vibration, 1974.
(1986年10月17日受付)