

高架橋と周辺地盤の交通振動予測と制振効果

ASSESSMENT AND CONTROL OF TRAFFIC VIBRATION FOR URBAN VIADUCT AND NEARBY GROUND

梶川 康男*・沖野 真**・吉川 実***・松本 正信****

By Yasuo KAJIKAWA, Makoto OKINO, Minoru YOSHIKAWA

and Masanobu SUGIMOTO

In order to reduce traffic vibration of the urban viaducts and nearby ground caused by running cars, the assessment method using the computer simulation is investigated. Its method is consisted of eigen value analysis, normal mode analysis and analytical results to semi-infinite ground.

Using its assessment method, the degrees of vibration control are analytically simulated, with the changes of running speed and position of cars, the condition of road roughness, the changes of bending stiffness of main and cross girders, the setting of tuned mass dampers, the changes of flexural rigidity of piers and the ground condition.

1. まえがき

高架橋の振動が原因で周辺地盤が振動する問題に対して、従来、高架橋の橋軸方向の面内挙動についてフーチング反力に着目した解析¹⁾や、面内のスウェイ振動と面外のロッキング振動を非連成として取り扱った解析²⁾を行ってきた。ところが、高架橋の多くは、つぎのような動的挙動をしていると言われている。まず、自動車が支間部を進むにつれて主桁のたわみ振動が生じ、そのときの主桁のたわみ角によって橋脚は橋軸方向にスウェイ振動させられる。と同時に各主桁の反力差によって橋脚は橋軸直角方向にロッキング振動を生ずる。これらの振動は連成して生じ、フーチングは3方向に地盤を加振することとなる。このような挙動を解析において再現することは、従来の方法^{1)・2)}では不可能である。そこで、今回、このような挙動を再現するために、高架橋の面内と面外の挙動を連成させて解析するとともに、周辺地盤の振動についても考慮した解析を行い、定量的な解析シミュレーション手法を開発し、さまざまな防振対策についての効果の予測を試みた。

2. 対象とした高架橋のモデル化と固有振動モード

*	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)
**	工修	阪神高速道路公団	計画部環境対策室	(〒541 大阪市東区北久太郎町4丁目68)
***		阪神高速道路公団	大阪第二建設部設計課	(〒550 大阪市西区立売堀3丁目1-14)
****	工修	㈱フジエンジニアリング	調査設計部	(〒530 大阪市北区中崎西4丁目3-27)

(1) 高架橋のモデル

(2) 上部構造（主桁）と橋脚のはり部との接続部のモデル

Technical drawing of a bridge structure. The left side shows a cross-section of the bridge deck, which is 17.6m wide. It is supported by three piles. The distance between the piles is 13.7m. The height of the pier is 1.0m. The right side shows a plan view of the bridge, which consists of a continuous beam supported by six pile groups. The spans between the pile groups are 27.0m each. A small vehicle is shown on the bridge deck for scale.

図-1 対象とした高架橋の一般図

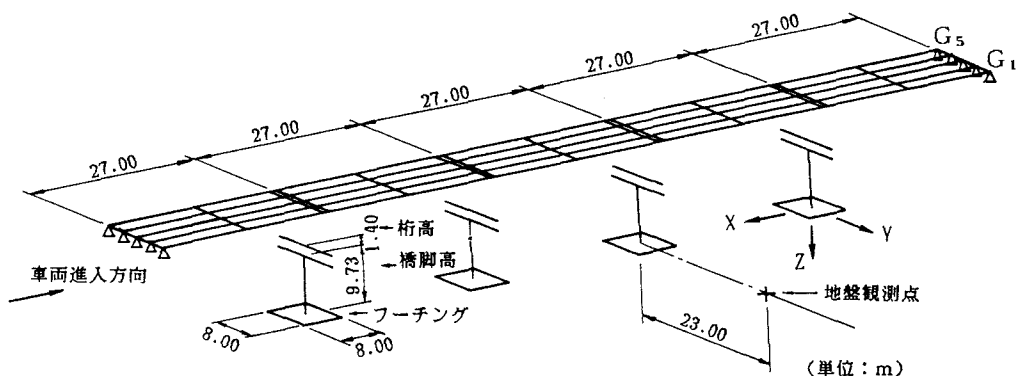


図-2 解析モデル

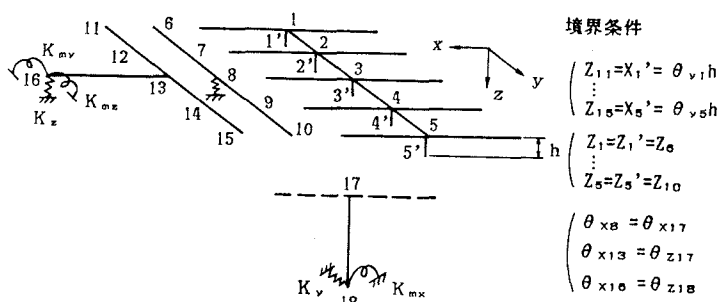


図-3 橋脚と桁の接続条件

(3) モード解析

このようにモデル化した標準構造に対して、ねじり剛性を等価な曲げ剛性に換算し、林川らによる固有剛性マトリックス法³⁾によって、20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、代表的な振動モードを図-4に示した。

3. 高架橋の動的応答解析

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

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

で表すことができる。ここで、 $X_{ni}(x)$ はある部材(i)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、 $\beta_{ni}^4 = (\rho_i / EI_i) \omega_n^2$ 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。

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

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

そして、図-5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つぎようになる。

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

また、車両の運動方程式はつぎようになる。

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

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

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

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

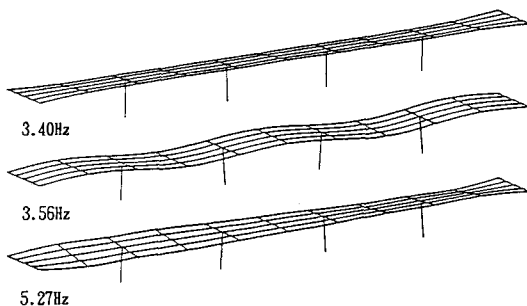


図-4 代表的な振動モード

表-1 固有振動数 (Hz)

次数	振動数	次数	振動数
1	3.400	11	8.956
2	3.556	12	9.757
3	3.893	13	10.313
4	4.255	14	10.659
5	5.271	15	11.052
6	5.604	16	11.566
7	6.440	17	13.294
8	6.648	18	13.522
9	6.768	19	13.721
10	7.181	20	13.862

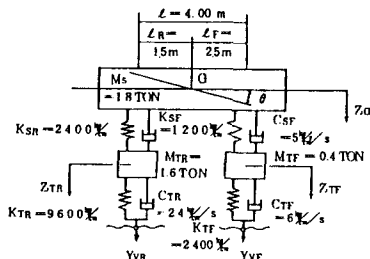


図-5 4自由度車両モデル

ここに、 M_{SF} 、 M_{SR} はばね上質量 M_s を車体の前後に振り分けた質量であり、次式のように表される。

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

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分けた場合、それぞれの重心点を Z_{GF} 、 Z_{GR} とするとつぎのような関係がある。

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

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) より変位が求められ、次式より加速度が得られる。

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

4. 周辺地盤の振動解析

高架橋付近の地盤振動は、車両の接近に伴い 2 ~ 3 本手前の橋脚からの振動伝播を受けている。したがって、数本の橋脚からの波動の影響を考慮しなければならない。この現象を数値計算で再現し、地盤の応答を求めるために、地盤を半無限弾性体とみなした。

本解析では、高架橋のフーチング底面に働く反力が基礎底面全体に分布して作用していると考えた。そして、解析解⁴⁾を利用してつぎの手順に従って図-6 のようにして地盤の応答を計算した。

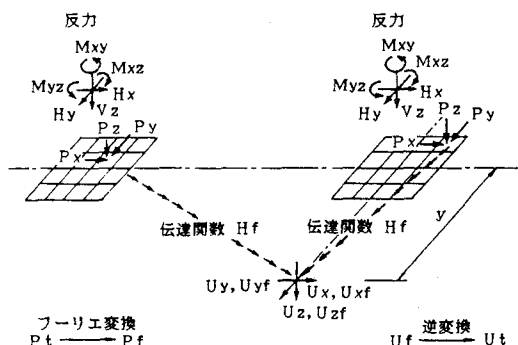


図-6 地盤振動の計算法

- ① フーチング底面 (8mx8m) を 0.5mx0.5m の微小要素に分割し、各分割要素に働く x 、 y 、 z 方向の反力を求め、その反力は地盤に対して点加振であるとする。
- ② ある要素の各反力の時刻歴をフーリエ変換する。
- ③ 解析解⁴⁾ から得られる伝達 (周波数応答) 関数を掛け合わせて、着目点のフーリエスペクトルを x 、 y 、 z の各方向について求める。
- ④ ある橋脚の各要素および各橋脚について、全要素によるスペクトルをすべて加え合わせることによって、着目点の周波数領域での応答が得られる。
- ⑤ 得られたスペクトルをフーリエ逆変換することによって、着目点の時間領域での変位応答波形や加速度応答波形が得られる。また、スペクトルをフーリエ逆変換するまえに、振動レベル計の持つ振動感覚補正回路に相当するフィルターをスペクトルに掛け合わせたのちに、フーリエ逆変換し、振動レベル計の Slow 特性 (時定数 0.63sec) に合わせて加速度の実効値を求めれば、その対数表示により振動レベルに換算することもできる。

表-2 上部・下部構造の諸定数

上部構造	橋脚 (はり部)
$I_{s1}=0.41 \text{ m}^2$	$I_{s1}=1.81 \text{ m}^2$
$W_{s1}=2.96 \text{ t/m}$	$W_{s1}=6.15 \text{ t/m}$
$E_s=2.1 \times 10^7 \text{ t/m}^2$	$E_s=3.0 \times 10^6 \text{ t/m}^2$
橋脚 (柱部)	支持ばね
$I_{s1}=1.72 \text{ m}^2$	$K_h=3.0 \times 10^4 \text{ t/m}$
$W_{s1}=11.6 \text{ t/m}$	$K_v=3.7 \times 10^5 \text{ t/m}$
$E_s=3.0 \times 10^6 \text{ t/m}^2$	$K_n=2.4 \times 10^6 \text{ tm/rad}$

5. 動的応答解析に用いた諸定数と計算例

高架橋に対して動的応答解析を行い、種々の振動軽減対策工の効果をシミュレーションによって求める際に、標準となるモデルの諸定数は、つぎに示す通りとした。

(1) 路面凹凸

計算に用いた路面は、阪神高速道路守口線で光学式プロフィールメータにより得られたデータ（打換予定のない標準路面、打換直前の路面、打換直後の路面）をさらにモデル化したものを用いて、支間長を調整して使用した。図-7に使用した路面のパワースペクトル密度を示した。これによると、長周期領域での差はあるが、 $10^{-1}c/m$ 以上の領域ではあまり大きな変化はない。

(2) 上部構造と下部構造

上部構造については、設計書から諸定数を求め、表-2の値とした。また、下部構造に対しては、橋脚はり部と柱部の定数、基礎杭ならびに地盤を含めてフーチングを支持するばね係数を表-2に示した。なお、減衰定数については、他の橋梁の実測値を参考にして、上・下部構造ともに0.03とした。

(3) 地盤

地盤の振動解析を行う際に必要な横波伝播速度 V_s とせん断弾性係数 G は次式⁵⁾によって求めた。

$$V_s = 76N^{0.39} \quad (12)$$

$$G = \gamma V_s^2 / 9.8 \quad (13)$$

ここで、 γ は単位体積重量 ($1.6t/m^3$)であり、 N は N 値であり、モデル区間付近の地盤での平均値 $N=15$ を用い、 $V_s=220m/s$ 、 $G=7800t/m^2$ とした。

(4) 走行車両

高架橋の振動を考える場合、走行車両モデルとしては伸縮継手部での前輪と後輪の挙動が表現できるのが望ましい。そのために、本解析では図-5に示すような4自由度自動車モデルを考えた。車両に幅を考えるモデルも考えられるが、現状としては諸数値を決めることが実際には困難なため、今回このモデルを用いることとし、車両モデルは主桁上を走行するものとした。

(5) 数値計算例

実構造をモデル化した標準構造の外桁上を、図-5に示した車両モデルが走行速度60km/hで通過したときの高架橋各部と地盤（第3橋脚中心から直角方向に23m離れた地表点、ほぼ官民境界点）での応答加速度波形を図-8に示し、さらに地盤での振動レベル (dB) を示した。実構造を大型車が通過したときの振動レベルとよく類似した値が得られた。

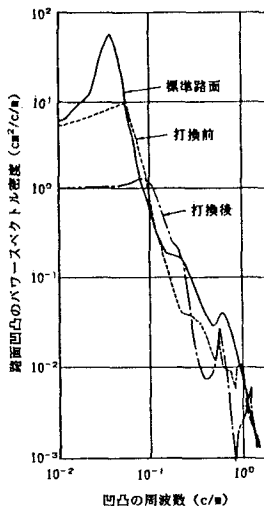


図-7 使用した路面のスペクトル

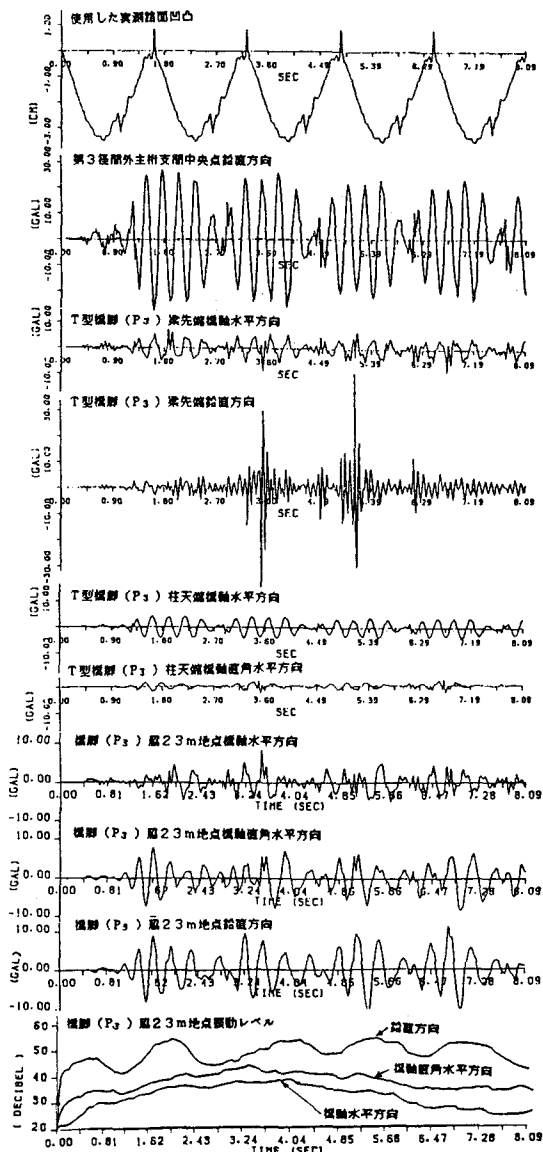


図-8 モデル車が60km/hで走行したときの解析例

6. 高架橋への防振対策とその効果のシミュレーション

防振対策を考えると、実験を実施することは確かに重要であるが、その労力と費用から考えると、いろいろなケースを試行することが困難であり、最適な対策を求める場合、解析的なアプローチの支援による防振効果のシミュレーションを行うことが必要となろう。また、都市内高架橋の場合、類似の構造が多いことから標準的な区間に対しての結果は参考になることになる。そこで、本モデル区間の高架橋には、どのような防振対策が適当であるかをシミュレーションした。図-9～17に、その代表的な対策項目と地盤での振動レベルを示した。なお、図-10～17では荷重が G_1 桁上を速度60km/hで走行するものとした。以下に、それぞれの対策項目の内容と効果について述べる。

(1) 通過車両に対する規制による対策

1) 走行速度の規制 車両の走行速度を40, 60, 80, 100km/hと変化させた場合の地盤での振動レベル値を図-9に示した。これによると、各方向ともに80km/h以下の速度範囲で、速度の増加に従ってレベル値の増加が認められるが、80km/h走行と100km/h走行とはあまり振動レベルの変化は見られない。しかし、早朝や深夜の走行実態を考えると、走行速度の規制と遵守によって振動軽減の効果はある程度期待できると言えよう。

2) 走行車線の規制 図-9には、車両が外桁上を走行したときと第2桁上を走行したときの振動レベルを示したが、どの速度の場合にも3～5 dBの差があり、車両が内側を走行したときには振動レベルが低いことが解析でも示された。このことは、実測でも同様の傾向にあり、上部構造の振動には差がないことから、橋脚の橋軸直角方向のロッキング振動との関係から生ずる結果であると考えられる。夜間の大型車の車線規制が一部で採られているが、振動面からも有効な方法であると言えよう。

(2) 路面に対する対策

1) 伸縮継手部の段差の除去 伸縮継手部の段差は、走行車両の振動を励起する原因の1つであり、段差の除去（ノージョイント化）は従来実施された防振対策のうち最も件数が多い⁴⁾。本解析では、標準路面の段差（10mm）を人工的に0mmと20mmにして、そのときの地盤の振動レベルを比較した。図-10にその結果を示した。この結果によると段差によって振動レベルは大きく変化しており、これは、伸縮継手部直下の橋脚はり端上下方向の応答との関係が深く、高次振動対策として有効なものであることを示している。

2) 路面の平坦性の保持 路面の平坦性は、道路橋の動的応答に大きく影響されている。そこで、

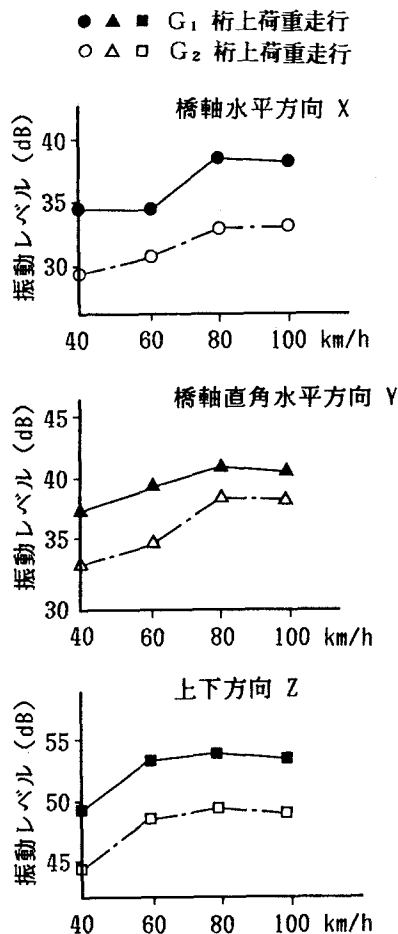


図-9 走行速度・位置と振動レベル

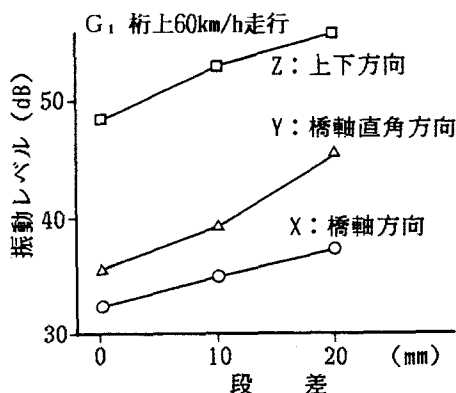


図-10 路面段差と振動レベル

高速道路で実施されている舗装の打換えが、振動対策上有効なものであるかを確認するために、舗装の打換えの予定のない（あまり痛んでいない）標準路面、打換え直前の路面、打換え直後の路面の実測凹凸を用いて、高架橋の応答を求め、地盤振動への影響を計算した。ただし、舗装の打換えによって継手部の段差も改善されているが、それはそのまま路面の一部として考慮した。図-11に示すように、地盤での上下方向については、打換え後に減少しているが、他の方向についてはあまり変化していない。主桁の振動では、打換え後の振動が標準路面や打換え直前の路面の場合よりもやや大きくなることもあり、舗装の打換えが高架橋の振動軽減上有効な対策とは必ずしも言えないことを示している。同様のことが一般の道路橋で指摘された報告⁷⁾もある。これは、一般に、舗装の打換え時期が横断方向のわだち深さなどを基準に決定されることと関係がある。

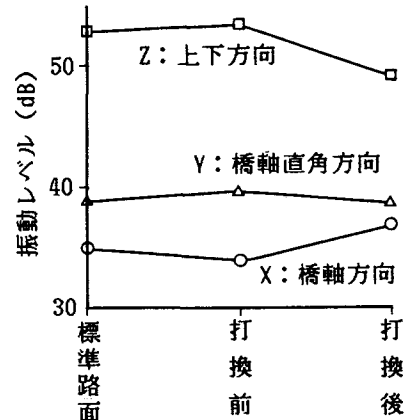


図-11 路面平坦性と振動レベル

(3) 上部構造に対する対策

1) 主桁の剛性の増加 橋梁の振動が問題になると、その剛性不足がよく議論され、剛性を高めるための対策がよく考えられている。そこで、主桁の曲げ剛性を1.2倍、2倍に増加した場合の地盤振動への影響を求めた。この場合、基本振動である主桁の曲げが卓越する振動モードの振動数が3.5Hzから3.9Hzと5.0Hzに上昇し、大型自動車の持つ振動数（ほぼ3Hz前後）から大きく離れるために振動が小さくなることが期待できる。図-12によれば剛性を1.2倍にした場合には地盤の上下方向で大きく減少しているが、他の方向ではあまり変化が見られない。また、剛性をそれ以上増加しても軽減効果は上がっていない。このことから考えると本橋の場合には支間も短く、卓越振動数が3.5Hzであったので1.2倍の剛性増加で振動軽減が現れているが、他の高架橋の場合にもこの程度の剛性増加でよいかについては検討しなければならない。

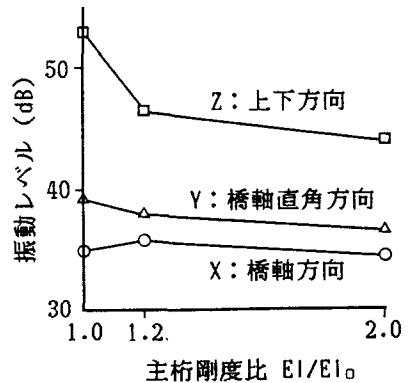


図-12 主桁剛性と振動レベル

2) 横桁の剛性の増加 モデルとして選んだ本区間の上部構造においては、設計計算書によると主桁の横分配があまり考慮されておらず、格子曲げ剛度（Z）が4.3とやや小さい。上部構造がねじれやすいと橋脚を橋軸直角方向に加振することとなり、望ましいことではない。そこで、横桁の曲げ剛性を2倍（Z=8.6）、3倍（Z=12.9）、4.65倍（Z=20）に増加した場合の地盤振動への影響を計算した。横桁の曲げ剛性を増加させても、基本振動である主桁の曲げが卓越する振動モードの振動数を変えることは期待できないが、横分配によって上部構造のねじれを抑えることによって、橋脚の橋軸直角方向への振動を減少させることができる。図-13によると、横桁の曲げ剛性を3.0倍にすれば、地盤の上下方向で大きく減少し、橋軸直角方向への振動も減少させることができることを示している。しかし、3.0倍以上にしてもそれ以上の軽減効果は期待できない。本橋の場合、横方向の剛性がもともと低いためにこのような結果が得られたが他の高架橋でこのような振動軽減が期待できるとは限らない。

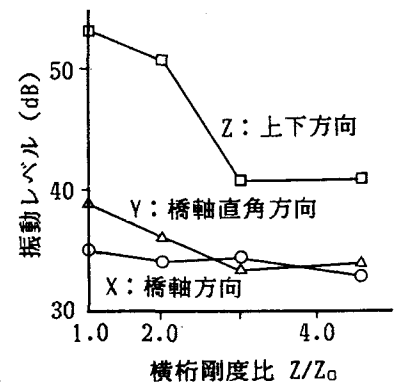


図-13 横桁剛性と振動レベル

3) 動吸振器の設置 動吸振器とは、適当な値を持つ弾性ばねと粘性減衰機構を備えた付加質量を主振動系に取りつけ、その連成振動によって主振動系の振動軽減を図るものである。まず、モデル橋の外桁の支間中央位置にそれぞれ1基の動吸振器(重錘1tf/基、3.55Hz、減衰定数10%、合計10基)を設置することを考えた。数値計算の結果、主桁の振動を20%程度減少させることはできるがこの程度の大きさの動吸振器では、図-14に示したように、地盤にはその軽減効果が現れないことがわかった。そこで、各主桁の支間中央位置にそれぞれ1基の動吸振器(重錘2tf/基、3.40Hz、減衰定数15%、合計25基)を設置して、その軽減効果を求めた。数値計算の結果、主桁の振動を50%程度減少させることができ、しかも、地盤においても3~6dBの振動レベルの軽減が期待できる結果となった。従来、動吸振器はたわみやすい構造に小さな質量の付加によって振動軽減が期待されているが、高架橋の場合には下部構造および基礎構造までを含めての振動軽減対策を考えなければならず、大きな動吸振器が多数個必要となった。

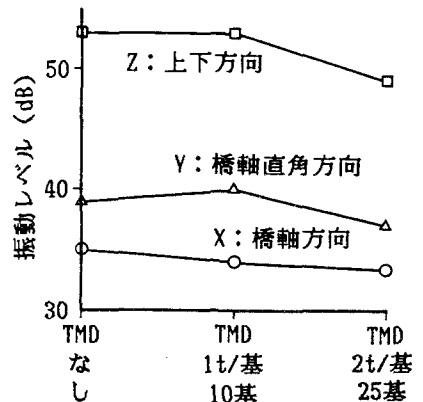


図-14 動吸振器と振動レベル

(4) 下部構造に対する対策

1) 橋脚の剛性の増加 T型橋脚であることから、その橋軸直角方向の挙動が地盤を振動させる1つの原因と考えられる。そこで、橋脚の柱部の剛性を増加させることによる地盤振動への影響を調べた。橋脚の柱部の剛性を1.5倍と2倍に増加したときの地盤の振動レベルを図-15に示した。その結果によると、橋脚の柱部の剛性の変化に対して振動レベルはほとんど変わらないものとなっている。同様に、柱部の質量を変化させたが、影響は現れない結果となった。

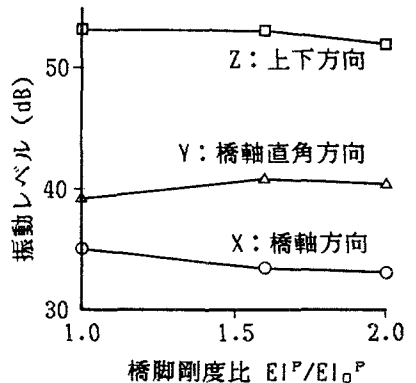


図-15 橋脚剛性と振動レベル

2) 門型橋脚の採用 高架橋にはT型橋脚がよく用いられている。T型橋脚は、はり部の張出しが大きいため偏心载荷に対して橋軸直角方向に振動しやすい構造である。そこで、本解析で用いたモデル橋が門型橋脚であったとすると、どの程度の振動をするかを求めた。阪神高速道路で用いられている類似の区間の門型橋脚を参考にしてモデル化した。門型であることから、脚柱は8本であり、そのすべての反力を地盤に入力した。その結果を図-16に示した。これによると、はり部の張出しが小さいため偏心载荷に対して橋軸直角方向に振動しないことによって、地盤振動もかなりの減少が見られている。このことは、実測⁹⁾でも観測されており、門型橋脚はT型橋脚よりも振動面では有利な構造と言えよう。

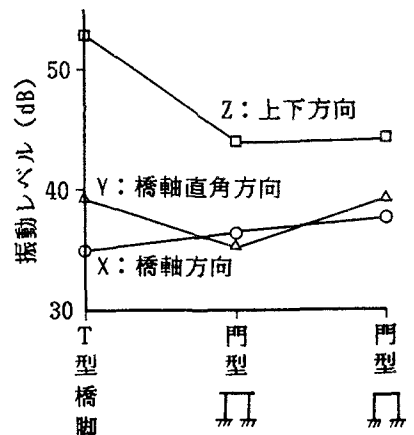


図-16 橋脚形式と振動レベル

(5) 地盤に対する対策

都市内高架橋は、その立地条件の制約から軟弱地盤上にあることが多く、しかも、軟弱地盤であることから橋体重量の軽い鋼橋が選ばれることが多くなる。多くの場合、振動問題は軟弱な地盤の地点で生じており、これらの因果関係は複雑である。そこで、振動伝播経路である地盤の定数によって、振動レベルがどの程度変化するか

を調べた。N値として、標準では15を用いたが、より軟弱の場合 (N=8) とやや堅い場合 (N=30) について求めた。当然の結果であるが、図-17に示すように、地盤の悪い場合には振動レベルは 2～5dB大きくなり、良い場合には 3～5dBの低下が見られている。振動軽減対策としては、その効果は大きいとその施工には難点が多いであろう。

7. あとがき

本研究では、まず、走行自動車による高架橋の動的応答を立体解析ししかも、地盤振動をも考慮する手法を提案した。そして、その手法を用いて、阪神高速道路の標準的な区間の高架橋に対して、さまざまな振動軽減対策による効果をシミュレーションし、その対策の有効性の有無について検討を行い、さまざまな知見を得ることができた。しかし、ここで、提案したシミュレーション手法にはまだ問題（主桁と橋脚との接合部の取扱い、基礎杭の評価など）があり、今後、さらに改善され、実際の現象をより忠実に再現できるようになることが期待される。

高架橋周辺での騒音対策が進む一方で、交通振動問題に対する関心が高くなってきており、よりよい橋梁環境の整備のために、阪神高速道路公団では、高架橋振動の軽減対策に積極的に取り組んできており^{6)・9)}、本シミュレーション結果をも参考にして、動吸振器の設置、主桁と横桁の剛性増加を含めたI形断面の箱桁化、ノージョイント化（舗装と床版の連続化による段差の除去）、ゴム支承を用いた連続桁化、下部構造への対策、地中防振壁などについて詳細な検討を進めてきており、一部の対策については実橋試験を行っている段階^{9)・10)}である。

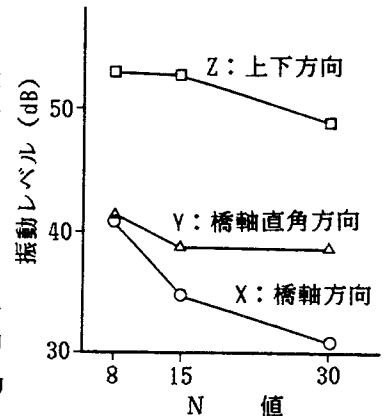


図-17 地盤条件と振動レベル

参考文献

- 1) 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。
- 2) 梶川・吉川・根本：走行荷重による高架道路橋の動的応答解析について、土木学会第39回年次学術講演会講演概要集、I-248、1984。
- 3) Hayashikawa T. and N.Watanabe: Dynamic Behavior of Continuous Beams with Moving Loads、Proc. of ASCE、Vol.107, No. EM1、pp.229-246、1981。
- 4) 北村・桜井：剛基礎底面の複素剛性に関する一解析法、土木学会論文報告集第 290号、pp.43-52、1979。
- 5) 吉村・内山・今井：弾性波速度と土の性質について、第5回土質工学研究発表会、I-4、1970。
- 6) 阪神高速道路公団・側道路環境研究所：道路交通振動対策に関する研究業務報告書、1987。
- 7) 前田・米田・作田：走行車両による実橋の振動応答特性に及ぼす伸縮継手部の段差と路面凹凸の影響、橋梁振動に関するコロキウム講演概要・資料集、II-3、1987。
- 8) 建設省土木研究所構造研究室：高架橋交通振動実測調査報告書、土木研究所資料第2428号、1987。
- 9) 梶川・沖野・宇藤・松浦・伊関：動吸振器による高架橋の振動軽減対策、土木学会構造工学論文集、Vol.35A、1989。
- 10) 阪神高速道路公団・側道路環境研究所：道路交通振動対策に関する研究業務報告書、1988。

(1988年10月12日受付)