

既設単純合成鈑桁橋の主桁連続化とそれに伴う低周波空気振動の低減効果

Low Frequency Sound Pressure Level Generated from Girder-connected Continuous System for Simply Supported Plate-girder Bridges

米田昌弘*, 宮崎正男**, 藤本 朗***, 鈴木隆久****

Masahiro YONEDA*, Masao MIYAZAKI**, Akira FUJIMOTO*** and Takahisa SUZUKI

- | | | | | |
|------|----|-----------------|-------------|------------------------------|
| * | 工博 | 近畿大学助教授 | 理工学部土木工学科 | (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1) |
| ** | 工博 | 住友重機械工業(株) | 鉄構機器事業本部技術部 | (〒141-8686 東京都品川区北品川 5-9-1) |
| *** | 工修 | 住友重機械工業(株) | 鉄構機器事業本部技術部 | (〒141-8686 東京都品川区北品川 5-9-1) |
| **** | | 住重鐵構工事(株) 第1事業部 | | (〒141-4848 東京都品川区北品川 5-9-41) |

Low frequency sound pressure from highway bridges caused by heavy vehicles is one of the most important themes in the bridge engineering. A series of dynamic response analyses due to running vehicles on bridges was carried out in order to evaluate the low frequency sound pressure level for girder-connected continuous bridge system for simply supported plate-girder bridges. Bridge surface roughness and irregularities at the expansion joints were taken into account for numerical analysis. It was found that greatly increased sound pressure level was observed when one of the typical irregularities at the expansion joints was used for the simply supported plate-girder bridges. It was also shown from the analytical results that girder-connections for simply supported plate-girder bridges could effectively reduce the sound pressure level generated from highway bridges by running vehicles.

Key Words : *sound pressure level, dynamic response analysis, running vehicle, girder-connected continuous bridge system, simply supported plate girder*

1. まえがき

近年における交通量の増加と車両の大型化は著しく、市街地内の単純桁で構成された高架橋などでは走行車両に起因した地盤振動や低周波空気振動などの環境振動問題が今までにもまして指摘されるようになっており、走行車両に起因した橋梁振動の低減方法について議論する機会も増加している。

ところで、交通量の増加と車両の大型化は、環境振動問題のみならず、活荷重応力も大幅に増大させることから、活荷重応力の低減を目的として、平成5年11月には設計荷重がB活荷重(TL-25)に変更されるに至った。一方、1995年1月17日の兵庫県南部地震を契機として、都市内の多くの既設橋梁では耐震性の向上に対応する必要が生じている。このような状況のもと、最近では、B活荷重への対応と耐震性向上を目的とした、既設単純桁橋の主桁連続化工事が急増している¹⁾。この主桁連続化工事では、多くの場合、床版の増厚と弾性ゴム支承への交換も同時になされるが、橋

梁交通振動に着目すれば、結果として相隣り合う主桁を連結して路面の連続化を図る“ジョイントレス化工法(ノージョイント化工法)”が採用されたことになる。したがって、主桁連続化工事は、B活荷重への対応と耐震性向上という本来の目的に加え、伸縮装置の撤去に伴って走行性が改良されるほか、地盤振動や低周波空気振動についても改善効果が期待できると考えられる。

走行車両に起因した環境振動問題の中でも、低周波空気振動は近年特に注目を浴びている現象の一つである。したがって、最近の主桁連続化工事の急増を考えた場合、低周波空気振動に関する検討はきわめて重要な課題であり、また、主桁連続化工事に携わる技術者からの要望も非常に高い。橋梁から発生する低周波空気振動については、すでに、今市・辻本ら²⁾、足立³⁾、大島・能町ら⁴⁾、五郎丸・白石ら⁵⁾、⁶⁾、深沢・杉山ら⁷⁾をはじめとする研究者が理論的・実験的な見地から研究を実施しており、低周波空気振動に関する有用な知見を報告している。しかしながら、これらの研究は基

本的に単純桁橋を対象としており、連続桁橋の特性に着目した研究は、別途、深沢・杉山らが文献 8) で実施しているのみである。ただし、文献 8) は梁の曲げ振動のみを対象とし、伸縮継手部の段差についてもきわめて単純なモデル化を行っていることから、低周波空気振動に及ぼす主桁連続化の効果を評価するには更なるデータの蓄積が必要であると考えられる。

そこで、本研究では、連続化工事が実施された実在橋梁を多主桁の格子モデルに置換し、走行レーンや走行速度ならびに伸縮継手部を含む前後 10m 区間の段差を変化させた動的応答解析を実施するとともに、橋梁モデルの各節点から放出される音圧レベルを算定して低周波空気振動への影響を評価することとした。その結果、主桁連続化工事に携わる実務技術者にとって示唆に富んだ知見が得られたことから、ここにその検討結果を報告する。

2. 対象橋梁

(1) 主桁連続化工事の概要

対象とした橋梁（工事前の既設橋梁）は、支間長 36.9m の単純合成鉄桁橋 8 連（上り線側橋梁と下り線側橋梁）から構成されていたが、車両の大型化によって増大した活荷重応力を低減させる必要から主桁連続化工事を実施することとなった。その結果、上り線側と下り線側の単純合成鉄桁橋 8 連は、それぞれ一つの単純合成鉄桁橋と 3 径間連続桁橋ならびに 4 径間連続桁橋に構造変更された。なお、本研究では、このうち、図-1 に示す 3 径間部を検討対象とする。

既設単純合成鉄桁橋の連続化にも種々の工法が考えられるが、本橋では、写真-1 に示すように隣り合う単純桁の主桁端部を補強桁（連結桁）を設置して連結した後、それぞれの床版を一部撤去して配力鉄筋を配置し、コンクリートを打設して鋼桁とコンクリートを一体化させる主桁連続化工法を採用した。また、主桁連続化工事にあたっては、コンクリート床版厚を 160mm から 210mm に増厚し、既設単純合成鉄桁橋で採用されていた鋼製支承も弾性ゴム支承（減衰機能のない積層ゴム支承）に変更するものとした。

(2) 固有振動特性

主桁連続化工事の完了後、鋼桁部分とコンクリート打設部分との合成効果等を確認するため、3 径間連続桁橋区間を対象として載荷試験を実施している。そこで、本研究でも、載荷試験と同じく 3 径間連続桁橋に着目することとし、単純合成鉄桁橋 3 連と工事完了後の 3 径間連続桁橋をそれぞれ格子構造物にモデル化して固有振動解析を実施した。固有振動解析で使用した解析モデルと構造諸元をそれぞれ図-2 および表-1 に示

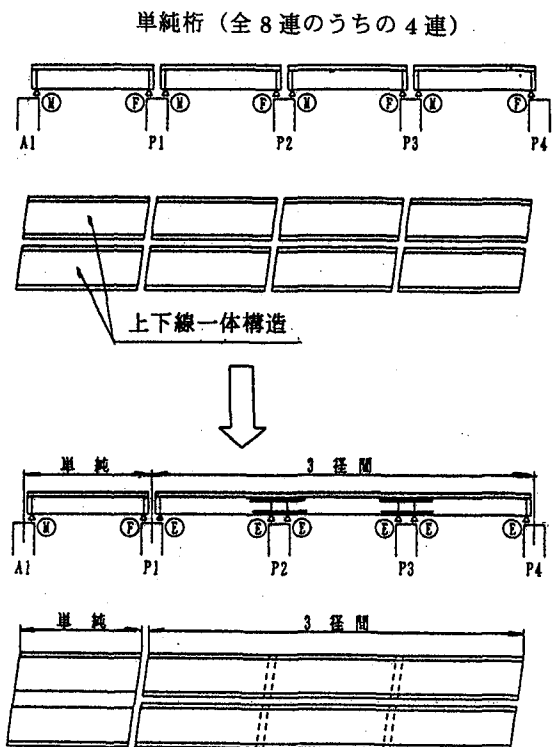


図-1 主桁連続化工事による構造変更

す。なお、表-1 に示した剛性は、床版の寄与を考慮しているが、舗装については無視している。

後述する動的応答解析にあたっては、単純合成鉄桁橋 3 連で 18 次 (22.139Hz) まで、3 径間連続桁橋で 13 次 (22.210Hz) までの固有振動モードを使用した。ここでは代表的な固有振動モードを図-3 に示すこととする。図-3 からわかるように、単純合成鉄桁橋 3 連では各径間のたわみ対称 1 次が 2.6Hz 付近に、ねじれ対称 1 次が 2.7Hz 付近に近接して存在するのに対し、主桁連続化工事を施した 3 径間連続桁橋ではたわみ対称 1 次が 2.88Hz に、ねじれ対称 1 次が 3.27Hz まで上昇する結果となっている。

3. 車両と路面凹凸のモデル化

(1) 車両モデル

走行車両として種々のモデルが知られているが、ここでは交通振動問題の検討で最も多く使用されている 4 自由度系モデル⁹⁾を使用するものとした。ただし、大型化した車両の影響を考慮するため、車両の総重量を従来の 20tonf から 25tonf に変更（車両ばね上部の重量のみを増加させて対処）するものとした。以下では、この車両モデルを基本モデルとし、必要に応じ CAR-25K と記すこととする。車両モデル (CAR-25K) とその諸元をそれぞれ図-4、表-2 に示す。なお、CAR-25K の固有振動数は 1 次（ばね上前輪部が卓越）

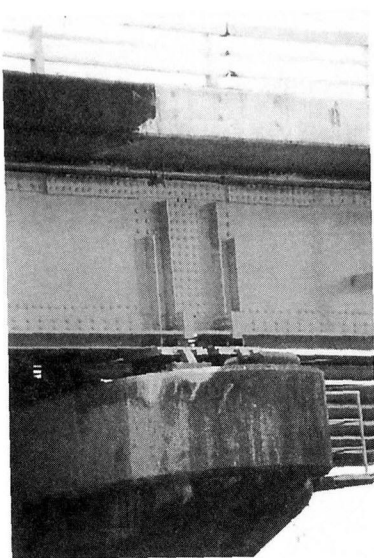


写真-1 主桁連続化工事の状況

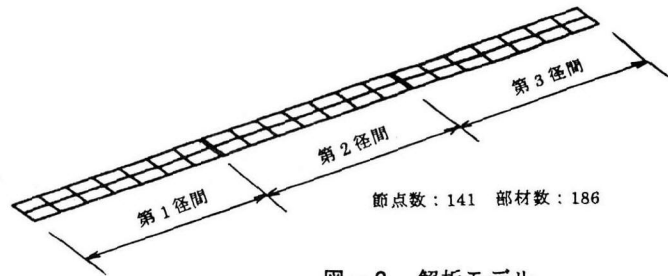


図-2 解析モデル

表-1 解析モデルの構造諸元

(1主桁当たり)

	単純合成鉄桁橋 (補強前)	3径間連続桁橋 (補強後)
重量	2.31 tf/m	2.74 tf/m
断面2次モーメント	0.0334~0.0648 m ⁴	0.0491~0.0738 m ⁴
ねじれ定数	0.00055 m ⁴	0.00125 m ⁴
支点のばね定数	(鋼製支承)	49,774~53,945 tf/m

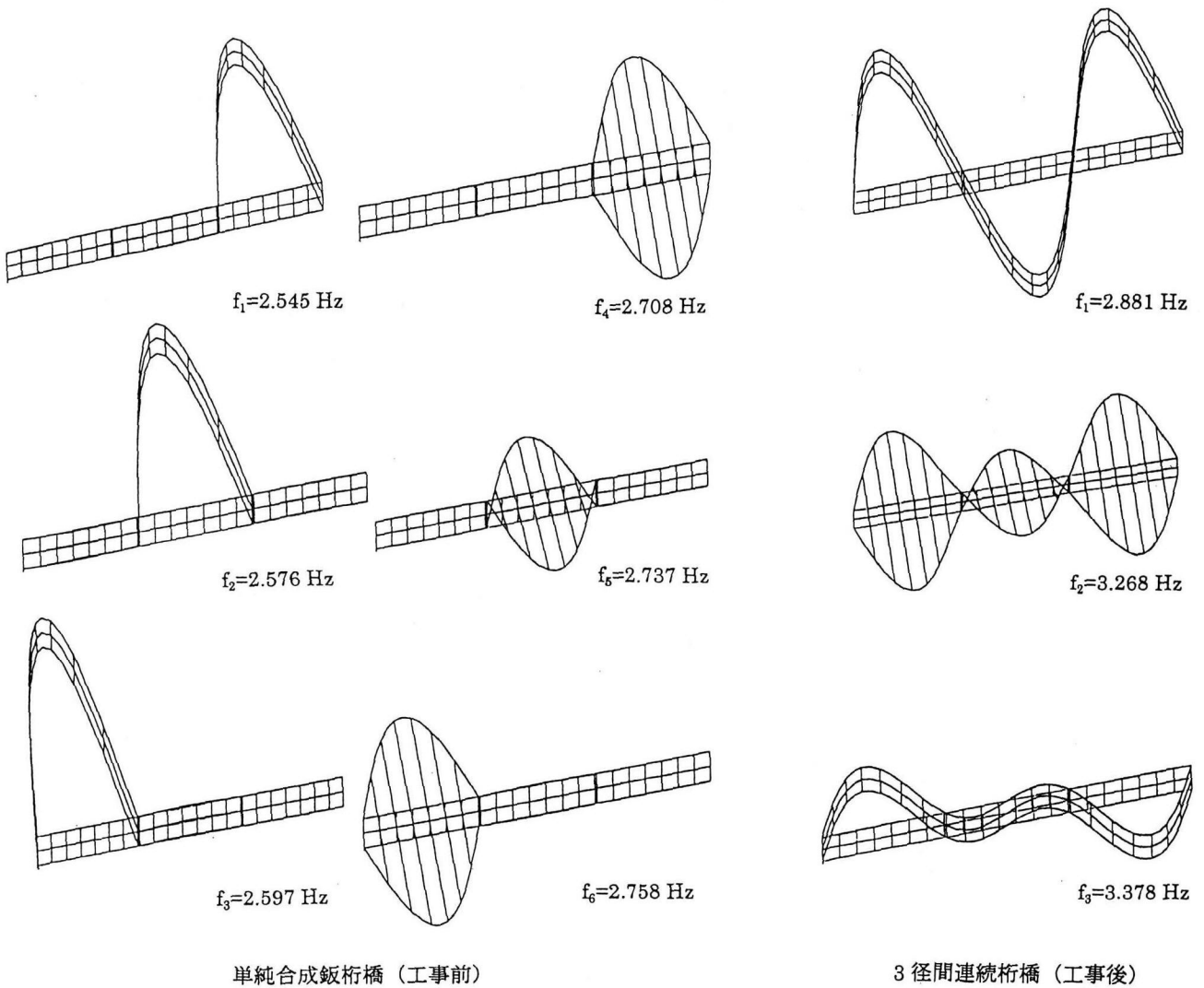


図-3 代表的な固有振動解析結果

表-2 4自由度系車両モデル (CAR-25K) の諸元

重 量	ばね上		23 tf
	ばね下	前輪	0.4 tf
		後輪	1.6 tf
総重量			25 tf
重量慣性モーメント			$I_o=76.25 \text{ tf} \cdot \text{m}^2$
ばね定数	ばね上	前輪	$K_{SF}=1,200 \text{ kgf/cm}$
		後輪	$K_{SR}=4,800 \text{ kgf/cm}$
	ばね下	前輪	$K_{TF}=2,400 \text{ kgf/cm}$
		後輪	$K_{TR}=9,600 \text{ kgf/cm}$
減衰係数	ばね上	前輪	$C_{SF}=5 \text{ kgf} \cdot \text{s/cm}$
		後輪	$C_{SR}=20 \text{ kgf} \cdot \text{s/cm}$
	ばね下	前輪	$C_{TF}=6 \text{ kgf} \cdot \text{s/cm}$
		後輪	$C_{TR}=24 \text{ kgf} \cdot \text{s/cm}$
ばね上重心までの距離		前軸	$\lambda_F=2.5 \text{ m}$
ばね上重心までの距離		後軸	$\lambda_R=1.5 \text{ m}$

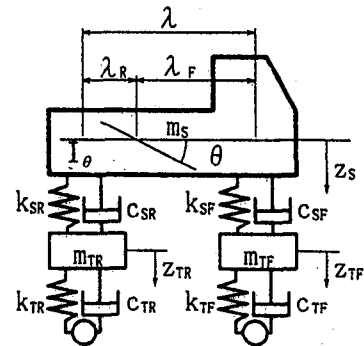


図-4 4自由度系車両モデル

が1.63Hz, 2次(ばね上後輪部が卓越)が2.46Hz, 3次(ばね下前輪部が卓越)が14.97Hz, 4次(ばね下後輪部が卓越)が15.05Hzとなっている。

ところで、車両ばね上部の固有振動数が対象橋梁の基本固有振動数と接近した場合、共振現象で橋梁の動的応答も増加すると予想される。そこで、本研究では、比較対比の目的で、CAR-25Kのばね上部とばね下部のばね定数をそれぞれ1.4倍したCAR-25Hについても、後述するように動的応答解析を実施することとした。なお、参考までに、CAR-25Hの固有振動数は1次(ばね上前輪部が卓越)が1.93Hz, 2次(ばね上後輪部が卓越)が2.91Hz, 3次(ばね下前輪部が卓越)が17.72Hz, 4次(ばね下後輪部が卓越)が17.80Hzとなっている。

(2) 路面凹凸のモデル化

路面凹凸の特性については、路面を平均値0の定常ランダムなガウス過程とみなしてパワースペクトル密度で表す方法が一般的に行われている。すなわち、路面凹凸のパワースペクトル密度 $S_r(\Omega)$ は一般に指数関数で近似され、次式のように表される¹⁰⁾。

$$S_r(\Omega) = a\Omega^{-n} \quad (1)$$

ここに、 Ω は路面の空間周波数、 a は路面の平坦性を表す平滑度パラメーター、 n は周波数によるパワーの分布を表す指数である。

主桁の連続化工事が完了した後、3径間連続桁部では簡単な車両走行試験が行われ、総重量20tonfの散水車が速度60km/hで走行した場合の加速度応答を計測している。その結果によれば、中央径間中央点での最大加速度応答は約50galであった。走行車両によって誘起される主桁の動的応答は、路面の状態(路面凹凸)によって変化することが知られている。そこで、実験と同じく総重量を20tonfに設定した4自由度系車両モデル(CAR-25Kにおいてばね上部の重量を18tonfに変更した車両モデル)を用い、路面凹凸をパラメータ

とした動的応答解析を実施したところ、

$$S_r(\Omega) = \begin{cases} 0.4 & (\Omega \leq 0.05c/m) \\ 0.001\Omega^{-2} & (\Omega \geq 0.05c/m) \end{cases} \quad (2)$$

のパワースペクトル密度を有する路面凹凸(シミュレーション波形)を用いた場合、中央径間中央点で50gal程度の最大加速度応答が算出された。この結果に基づき、本研究では、式(2)の条件でシミュレーションした図-5の路面凹凸を動的応答解析の基本路面として採用することとした。なお、参考までに、ISOの路面凹凸評価基準¹¹⁾に従えば、図-5の路面凹凸は「非常に良い」状態に相当する。また、図-6は、図-5に示したシミュレーション波形をF.F.Tでスペクトル解析した結果であるが、この図からわかるように、シミュレーション波形のパワースペクトル形状は仮定値と非常に良く一致していることを付記しておく。

一方、既設の単純合成鋼桁橋では、上に述べた路面凹凸に加え、伸縮継手部を含む前後10m程度の区間でも比較的大きな段差(波長の長い段差)が生じ、車両走行性の悪化や騒音・振動の発生原因となるばかりか、維持管理上の大きな問題にもなっている。この長波長段差には種々のパターンが存在するが、図-7に示すような二つの山型段差が存在する場合に大きな動的応答が生じると報告されている¹²⁾。それゆえ、既設の単純合成鋼桁橋を対象とした検討では、図-8に示すような長波長段差を考慮した路面凹凸(図-5と図-7を重ね合わせた路面凹凸で、以下、2Y路面と記す)についても動的応答解析を実施するものとした。ただし、ここでは、伸縮継手部を含む長波長段差の影響が顕著に現れるようにとの配慮から、第1径間進入部での段差については無視するものとしている。また、比較のため、図-9に示すような、一つの山型段差(最も多い段差パターン)と図-5を重ね合わせた路面凹凸(以下、1Y路面と記す)についても、一部、動的応答解析を実施するものとした。なお、ここに設定した40mm

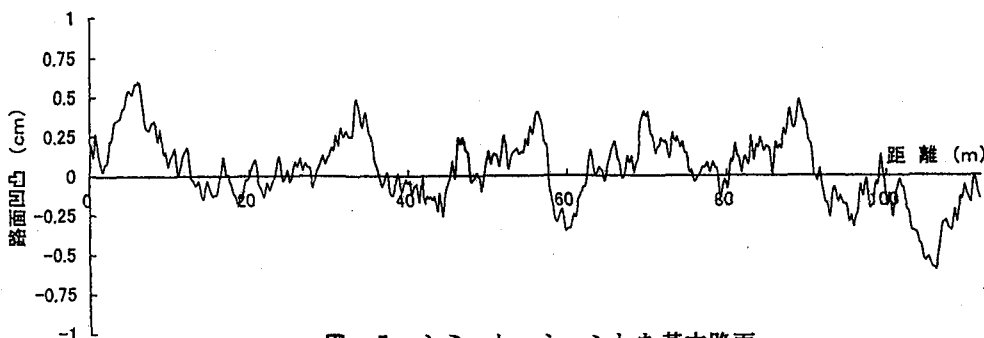


図-5 シミュレーションした基本路面

の段差は実測の最大値にほぼ対応する。

4. 動的応答解析と低周波空気振動の評価法

(1) 動的応答解析

走行車両による橋梁の動的応答解析手法については、すでに多数の論文⁹⁾や成書¹⁰⁾に報告されていることから、ここでは本研究を理解する上で必要な基本事項のみを記述する。

車両が走行する場合、橋梁の運動方程式は次式で表される。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{F\} \quad (3)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ は、それぞれ橋梁の質量、減衰、剛性を表すマトリックス、 $\{y\}$ は節点変位を表すベクトル、 $\{F\}$ は節点外力ベクトルである。また、添字・は時間に関する1階微分を表す。車両重量は橋梁の重量に比べて小さいことから、モーダルアナリシスを適用すれば、式(3)は次のように変形される。

$$[\ddot{q}] + 2[h][\dot{q}] + [\omega^2][q] = [\Phi]\{F\} \quad (4)$$

ここに、 $\{q\}$ は一般化座標 q_n を成分とするベクトル、 $[\Phi]$ はモーダルマトリックスである。また、 $[h]$ 、 $[\omega]$ 、 $[\omega^2]$ は h_n と ω_n を第 n 次固有振動モードの構造減衰定数および固有円振動数とするとそれぞれ h_n 、 ω_n 、 ω_n^2 を対角要素とするマトリックスである。

一方、4自由度系車両の運動方程式は、 r_F と r_R を車両の前輪と後輪位置での路面凹凸とし、図-4に記した記号を用いれば、次式で与えられる。

$$m_s \ddot{z}_s + c_{SF}(\dot{z}_s + \lambda_F \dot{\theta} - \dot{z}_{TF}) + k_{SF}(z_s + \lambda_F \theta - z_{TF}) + c_{SR}(\dot{z}_s - \lambda_R \dot{\theta} - \dot{z}_{TR}) + k_{SR}(z_s - \lambda_R \theta - z_{TR}) = 0 \quad (5)$$

$$m_{TF} \ddot{z}_{TF} + c_{SF}(\dot{z}_{TF} - \dot{z}_s - \lambda_F \dot{\theta}) + k_{SF}(z_{TF} - z_s - \lambda_F \theta) + c_{TF}(\dot{z}_{TF} - \dot{y}_F - \dot{r}_F) + k_{TF}(z_{TF} - y_F - r_F) = 0 \quad (6)$$

$$m_{TR} \ddot{z}_{TR} + c_{SR}(\dot{z}_{TR} - \dot{z}_s + \lambda_R \dot{\theta}) + k_{SR}(z_{TR} - z_s + \lambda_R \theta) + c_{TR}(\dot{z}_{TR} - \dot{y}_R - \dot{r}_R) + k_{TR}(z_{TR} - y_R - r_R) = 0 \quad (7)$$

$$I_\theta \ddot{\theta} + \lambda_F \{c_{SF}(\dot{z}_s + \lambda_F \dot{\theta} - \dot{z}_{TF}) + k_{SF}(z_s + \lambda_F \theta - z_{TF})\} - \lambda_R \{c_{SR}(\dot{z}_s - \lambda_R \dot{\theta} - \dot{z}_{TR}) + k_{SR}(z_s - \lambda_R \theta - z_{TR})\} = 0 \quad (8)$$

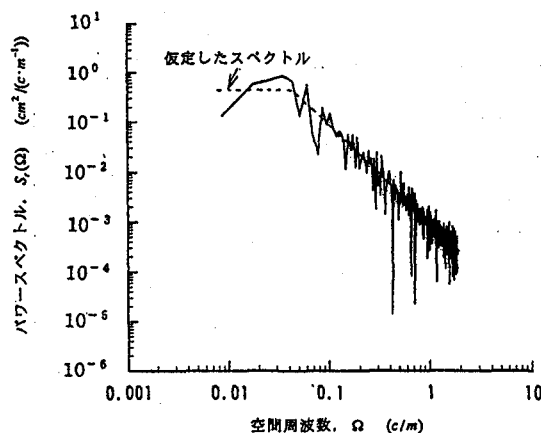


図-6 基本路面のスペクトル解析結果

ここに、 y_F と y_R は車両の前輪と後輪位置での主桁のたわみであり、 $\{\varphi(t)\}$ を荷重分配係数ベクトルとすれば、次のように表される。

$$y_S(t) = \{\varphi(t)\}^T \{y\} = \{\varphi(t)\}^T [\Phi] \{q\} \quad (S = F, R) \quad (9)$$

また、車両が主桁に及ぼす外力 F_F 、 F_R は、 m_{SF} と m_{SR} を車体の前後軸に配分される質量、 g を重力加速度とすれば、それぞれ次式で表される。

$$F_F = -(m_{SF} \ddot{z}_S + m_{TF} \ddot{z}_{TF}) + (m_{SF} + m_{TF})g \quad (10)$$

$$F_R = -(m_{SR} \ddot{z}_S + m_{TR} \ddot{z}_{TR}) + (m_{SR} + m_{TR})g \quad (11)$$

したがって、式(4)～式(8)で与えられる連立方程式を、適切な初期条件のもとで数値積分すれば、橋梁と車両の動的応答を求めることができる。ちなみに、本研究では、工事前の単純合成鋼桁橋3連については18次まで、工事後の3径間連続桁については13次までの固有振動数と固有振動モードを使用し、Newmarkの β 法($\beta=1/6$ 、積分時間間隔 $\Delta t=0.005$ 秒)を適用して動的応答解析を実施した。ただし、固有振動モードの構造対数減衰率 δ は、道路橋耐風設計便覧¹³⁾を参照してすべてのモードで $\delta=0.123$ なる値(最大径間長36.9mに対応する値)を仮定した。

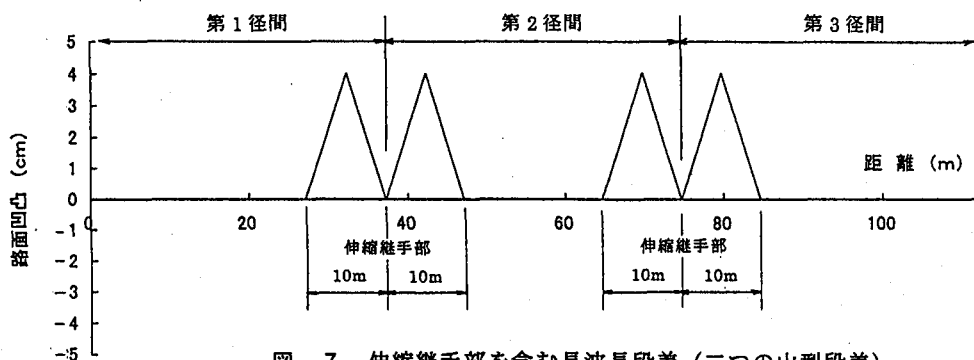


図-7 伸縮継手部を含む長波長段差（二つの山型段差）

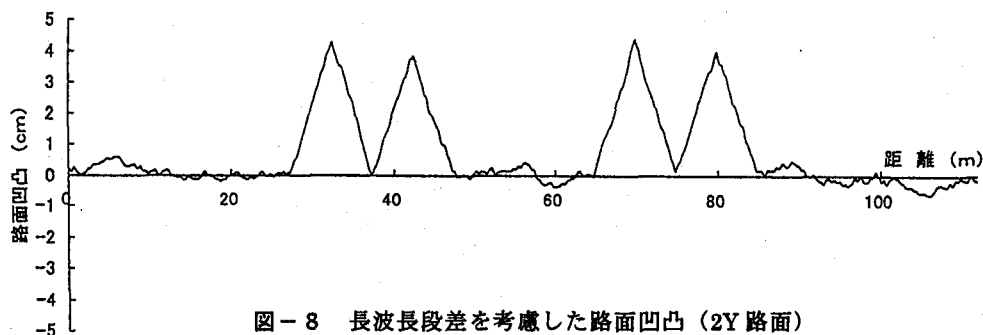


図-8 長波長段差を考慮した路面凹凸（2Y路面）

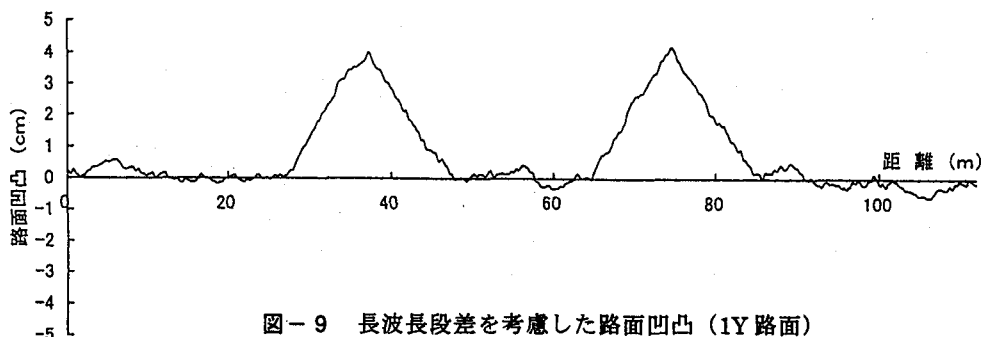


図-9 長波長段差を考慮した路面凹凸（1Y路面）

(2) 低周波空気振動の評価法

上述した動的応答解析を実施すれば、それぞれの橋梁モデルについて各節点の速度応答を算出することができる。したがって、それぞれの節点における低周波空気振動の放射音圧 $p(t)$ は、各節点での法線方向の振動速度が空気振動の粒子速度に等しいと仮定すれば、近似的に平面音波の式⁶⁾を用いて次のように計算できる。

$$p(t) = \rho_a C_a v(t) \quad (12)$$

ここに、 $v(t)$ は音圧を求める節点の振動速度、 ρ_a は空気密度 ($\rho_a = 1.205 \text{ kg/m}^3$, 1 気圧 20℃) であり、 C_a は音速 ($C_a = 343.7 \text{ m/s}$, 1 気圧 20℃) である。

低周波空気振動の物理的な大きさについては正式に定められていないが、通常は可聴音と同じ音圧レベルを用いて評価している。したがって、

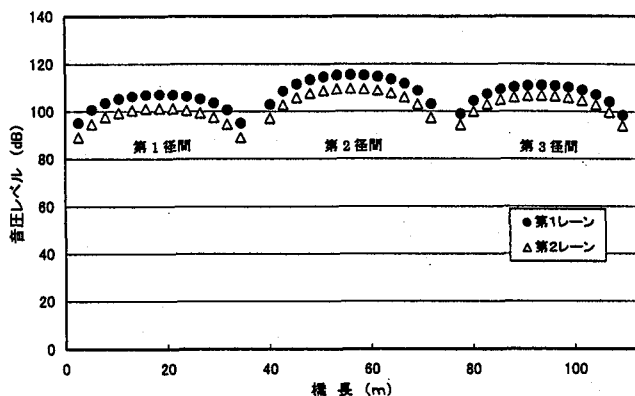


図-10 音圧レベルに及ぼす走行レーンの影響
(単合成鋼桁橋, 基本路面, CAR-25K, V=60km/h)

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int p(t)^2 dt} \quad (13)$$

を用いて音圧 $p(t)$ (N/m^2) から音圧の実効値 p_{rms} を計算した後、次式に代入すれば音圧レベル SPL (dB) を算出できる。

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{p_{rms}}{p_0} \quad (14)$$

ここに、 T は車両が橋梁を通過するのに要する時間で、 L を橋長、 V を車両速度とすれば $T = L/V$ と表される。また、 p_0 は最小可聴値で $p_0 = 2 \times 10^{-5} N/m^2$ を用いれば良い。

5. 低周波空気振動の低減効果

前章で示したように、動的応答解析を実施して橋梁モデルの各節点における速度応答を求めれば、式(12)～式(14)を適用することによって各節点から放出される音圧レベルを算出できる。ただし、各節点での速度応答は、車両の進行方向によっても変化する。それゆえ、ここでは車両が第1径間側から第3径間側に向かって進行する場合について音圧レベルを算定した。

ところで、1973年にパリで開催された国際会議では20Hz以下の音を超低周波音と定義したのに対し、わが国では、騒音や振動などの公害問題と同等の取り扱いができるよう、一般には1Hz～100Hz程度までの周波数範囲を低周波空気振動として取り扱っている¹⁰⁾。わが国の規定にしたがえば、100Hz程度までの非常に高い周波数範囲までを検討対象としなければならないが、本研究では動的応答解析の簡便さも考え、床版や端横桁での局部振動を考慮しない20Hz程度以下の固有振動モードを検討の対象とした。したがって、本章で示した放射音圧レベルは、人間の耳に聞こえない20Hz以下の超低周波空気振動に対するオールオーバーレベルである。

(1) 単純合成鈹桁での特性

a) 走行レーンの影響

単純合成鈹桁については、走行レーンが相違した場合の影響を調べるため、車両(CAR-25K)が第1レーン(端主桁、基本路面)と第2レーン(中央主桁、基本路面)上を60km/hの速度で走行した場合の放射音圧レベルをそれぞれ計算した。第1レーン上の各節点に対する解析結果を図-10に示す。この図からわかるように、第2レーンを走行した場合には、第1レーンを走行した場合と比較し、全節点で4～6dBも音圧レベルが低下している。それゆえ、梁モデルでは放射音圧レベルを過小評価する可能性があり、解析にあたってはねじれ変形を評価できる橋梁モデルを採用する方が望ましいと言える。

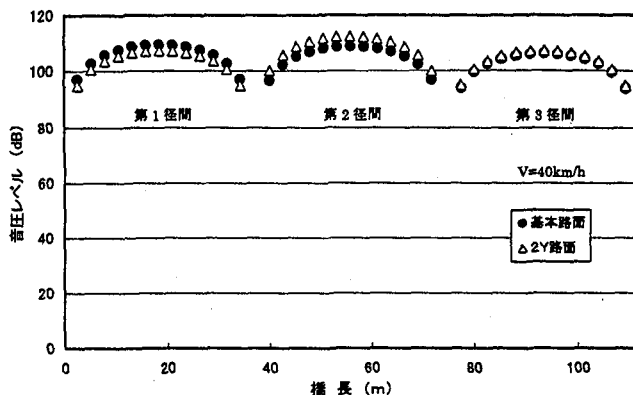


図-11 音圧レベルに及ぼす長波長段差の影響

(単純合成鈹桁橋、基本路面と2Y路面、CAR-25K、V=40km/h)

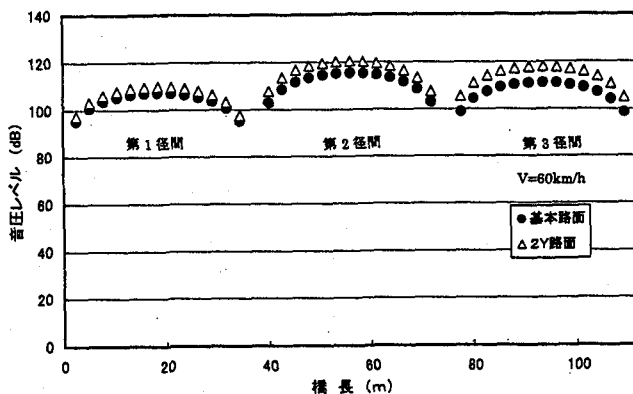


図-12 音圧レベルに及ぼす長波長段差の影響

(単純合成鈹桁橋、基本路面と2Y路面、CAR-25K、V=60km/h)

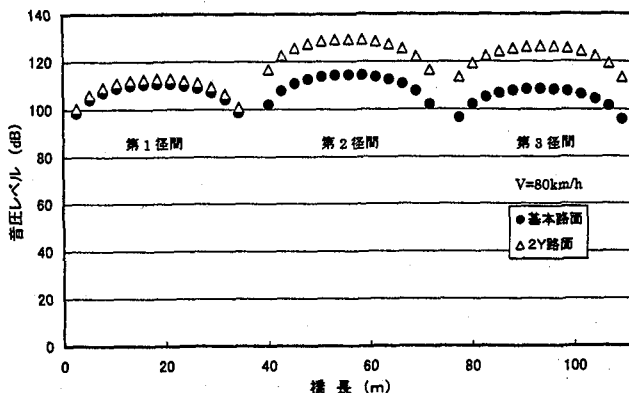


図-13 音圧レベルに及ぼす長波長段差の影響

(単純合成鈹桁橋、基本路面と2Y路面、CAR-25K、V=80km/h)

b) 伸縮継手部を含む長波長段差の影響

伸縮継手部を含む長波長段差の影響を把握するため、車両(CAR-25K)が第1レーン(基本路面、2Y路面)上をそれぞれ40km/h、60km/h、80km/hの速度で走行した場合について放射音圧レベルを計算した。第1レーン上の各節点に対する解析結果を図-11～図-

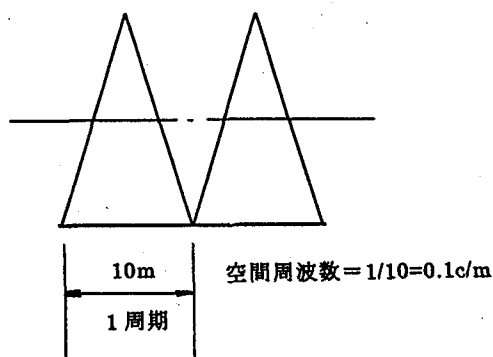


図-14 2Y路面の空間周波数

13に示す。図-11から、40km/hで走行した場合には、長波長段差が及ぼす影響は比較的小さいと言える。これに対し、図-12と図-13からわかるように、走行速度の増加とともに段差の影響が現れ、2Y路面では60km/hで最大7dB程度であった差異が80km/hでは18dB程度まで増大する結果となっている。

このように、2Y路面上を80km/hの速度で走行すると音圧レベルは急激に増大するが、これは以下のように考えれば理解できる。すなわち、図-14に示したように、2Y路面段差部の空間周波数を0.1c/mと考えれば、80km/h (22.222m/s)で走行した場合、車両(CAR-25K)は $f=22.222 \times 0.1 = 2.222\text{Hz}$ で加振されることになる。この加振周波数はCAR-25Kの2次振動数(ばね上部後輪側が卓越する振動数)に近く、その結果、各節点の速度応答が共振現象で増大し、放射音圧レベルも急激に大きくなったものと推察される。なお、1Y路面の段差部については加振周波数が $f=22.222 \times 0.05 = 1.111\text{Hz}$ となり、CAR-25Kの2次振動数と離れている。したがって、図-15に示したように、80km/hで走行しても音圧レベルの有意な増大は認められなかったことも付記しておく。

(2) 主桁連続化による低減効果

a) 基本路面上をCAR-25Kが走行する場合

図-16は、車両(CAR-25K)が単純合成鋼桁3連と3径間連続桁の第1レーン上(基本路面)を60km/hの速度で走行した場合の放射音圧レベルを対比したものである。ここに、放射音圧レベルを算出する際に必要となる車両通行時間 T は、単純合成鋼桁3連と3径間連続桁で等しく設定している。ところで、単純合成鋼桁3連では鋼製支承が採用されていることから、解析上、支承部では速度応答が生じない。これに対し、工事後の3径間連続桁ではゴム支承が採用されており、支承部でも若干ではあるが速度応答が発生する。それゆえ、3径間連続桁の支承部では音圧レベルも算定されるが、その値はきわめて小さいことから、図-16を

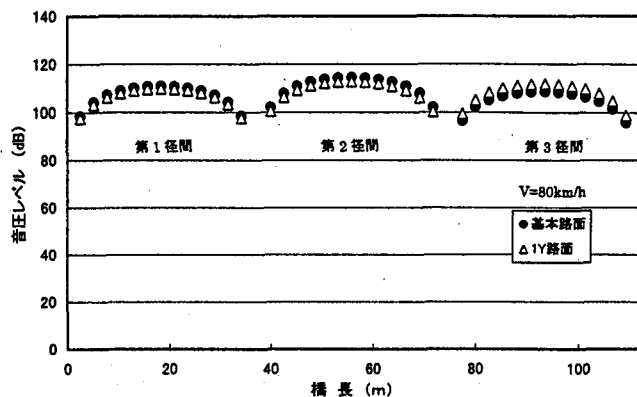


図-15 音圧レベルに及ぼす長波長段差の影響

(単純合成鋼桁橋、基本路面と1Y路面、CAR-25K、 $V=80\text{km/h}$)

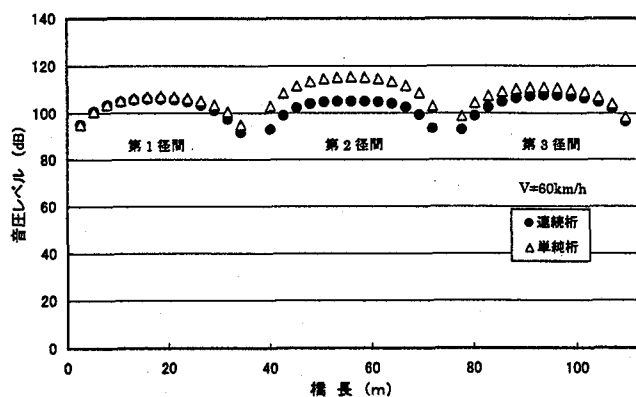


図-16 単純合成鋼桁橋(基本路面)と3径間連続桁橋

(基本路面)における音圧レベルの比較

(CAR-25K、 $V=60\text{km/h}$)

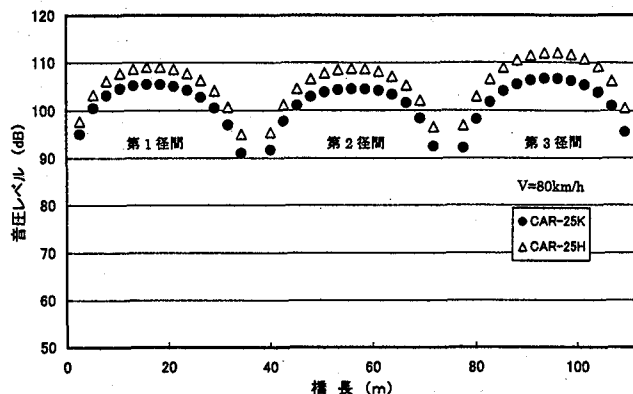


図-17 3径間連続桁橋の音圧レベルに及ぼす車両

特性の影響(CAR-25K、CAR-25H、 $V=80\text{km/h}$)

はじめとする3径間連続桁の解析結果では無視するものとしている。

図-16より、主桁連続化工事を実施した3径間連続桁の第2径間では、単純合成鋼桁と比較し、最大で10dB程度も音圧レベルが低下していることがわかる。ただし、第3径間については3~5dB程度の低減効果

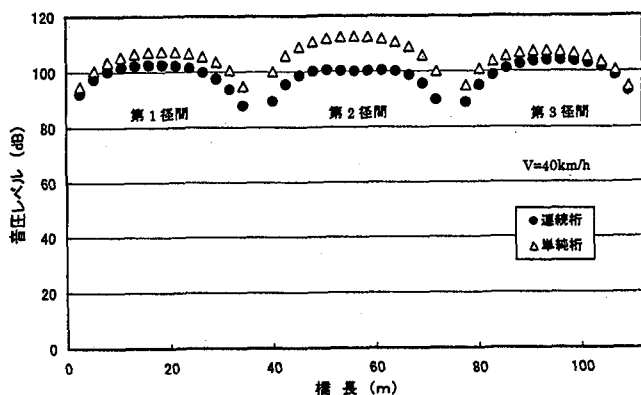


図-18 単純合成鈹桁橋（2Y路面）と3径間連続桁橋（基本路面）における音圧レベルの比較（CAR-25K, V=40km/h）

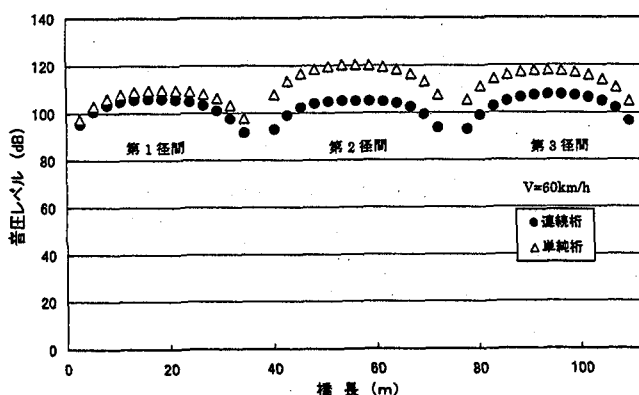


図-19 単純合成鈹桁橋（2Y路面）と3径間連続桁橋（基本路面）における音圧レベルの比較（CAR-25K, V=60km/h）

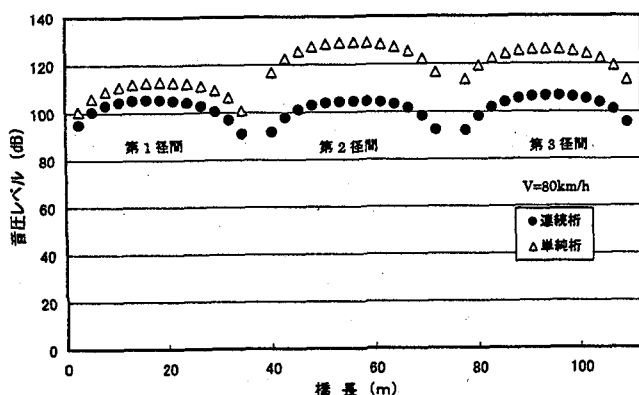


図-20 単純合成鈹桁橋（2Y路面）と3径間連続桁橋（基本路面）における音圧レベルの比較（CAR-25K, V=80km/h）

しか得られていないが、これは3径間連続桁ではどの径間に車両が進入しても応答が生じるのに対し、単純合成鈹桁橋では車両が第3径間に進入した場合にしか応答が生じないためである。このように、着目する径間によっては低減効果に差異は生じるが、主桁連続化工事を実施して構造特性や振動特性を変化させれば、

たとえ路面凹凸が全く同じであっても、放射音圧レベルは一般に工事前の単純合成鈹桁橋よりも小さくなると考えられる。

b) 車両の振動特性を変化させた場合

車両ばね上部の固有振動数が対象橋梁の基本固有振動数と接近した場合、共振現象で放射音圧レベルも増大すると予想される。そこで、3径間連続桁橋（基本固有振動数は2.88Hz）については、第1レーン（基本路面）上をCAR-25H（2次の固有振動数が2.91Hz）が80km/hで走行する場合についても動的応答解析を実施した。第1レーン上の各節点での音圧レベルを、CAR-25Kの結果と対比して図-17に示す。この図からわかるように、差異の程度は着目する径間によって相違するが、CAR-25Hを用いた今回の計算では第3径間の中央点で最大5.5dB程度も増大する結果となっている。

車両ばね上部の固有振動数はそれぞれの車両ごとに变化するが、一般の大型積載車では2.5Hz～3.0Hzの範囲にある場合が多い。それゆえ、既設単純合成鈹桁橋の固有振動数にもよるが、主桁連続化化工事にあたっては、工事後の基本固有振動数を3Hz程度以上に高める配慮も必要と考えられる。

c) 路面凹凸の差異を考慮した場合

主桁連続化工事を実施した3径間連続桁の低減効果をより適切に評価するためには、伸縮継手部を含む長波長段差を考慮した単純合成鈹桁の解析結果と対比するのが望ましい。そこで、単純合成鈹桁では図-8の2Y路面が、3径間連続桁については図-5の基本路面がそれぞれ存在した場合を想定し、車両（CAR-25K）が40km/h、60km/h、80km/hで走行した場合の放射音圧レベルを対比することとした。その結果を図-18～図-20に示す。これらの図からわかるように、3径間連続桁の第2径間に着目すれば、40km/hでは12dB、60km/hでは15dB、80km/hでは25dBも単純合成鈹桁橋と比べ小さくなっている。したがって、主桁連続化工事にあたっては、低周波空気振動を大幅に低減させるためにも、伸縮継手部を含む長波長段差を除去することが重要であると言える。

6. まとめ

本論文は、走行レーンや走行速度ならびに伸縮継手部を含む前後10m区間の段差を変化させた動的応答解析を実施するとともに、各橋梁モデルの節点から放出される音圧レベルを算定して、主桁連続化工事による低周波空気振動の低減効果を検討したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 工事前の単純合成鈹桁橋3連を対象として、総重量25tonfの基本車両（CAR-25K）が第1レーン（端主桁、

基本路面)と第2レーン(中央主桁,基本路面)上を60km/hの速度でそれぞれ走行した場合の放射音圧レベルを計算した。その結果,第2レーンを走行した場合には,第1レーンを走行した場合と比較し,全節点で4~6dBも音圧レベルが低下する結果が得られた。それゆえ,梁モデルでは放射音圧レベルを過小評価する可能性があり,解析にあたってはねじれ変形を評価できる橋梁モデルを採用する方が望ましいと言える。

(2) 単純合成鈹桁橋3連を対象として,基本車両(CAR-25K)が基本路面と2Y路面(2つの長波長山型段差を考慮した路面)上をそれぞれ走行する場合の放射音圧レベルを第1レーン上の各節点について計算した。その結果,40km/hで走行した場合には,長波長段差が及ぼす影響は比較的小さいことがわかった。これに対し,走行速度の増加とともに長波長段差の影響が現れ,2Y路面では60km/hで最大7dB程度であった差異が80km/hでは18dB程度まで増大する結果が得られた。これは,二つの山型段差部の空間周波数を0.1c/mとすれば,車両(CAR-25K)が2次振動数に近い $f=22.222 \times 0.1=2.222\text{Hz}$ で加振されるため,共振現象で各節点の速度応答が増大したためと推察される。

(3) 基本路面上をCAR-25Kが走行する場合について,主桁連続化工事を実施した3径間連続桁橋と工事前の単純合成鈹桁の音圧レベルを比較した。その結果,CAR-25Kが走行する場合,主桁連続化工事を実施した3径間連続桁の第2径間では,単純合成鈹桁と比較し,最大で10dBも音圧レベルが低下する結果が得られた。したがって,たとえ路面凹凸が全く同じであっても,主桁連続化工事を実施して構造特性や振動特性を変化させれば,放射音圧レベルは一般に工事前の単純合成鈹桁橋よりも小さくなると考えられる。

(4) 3径間連続桁橋(基本固有振動数は2.88Hz)については,第1レーン(基本路面)上をCAR-25H(2次の固有振動数を2.91Hzに調整した総重量25tonfの車両)が80km/hで走行した場合についても動的応答解析を実施した。その結果,CAR-25KとCAR-25Hの差異は着目する径間によって相違するが,CAR-25Hを用いた今回の計算では第3径間の中央点で最大5.5dB程度も増大する結果が得られた。それゆえ,既設単純合成鈹桁橋の固有振動数にもよるが,主桁連続化化工事にあたっては,工事後の基本固有振動数を3Hz程度(大型積載車のばね上部振動数)以上に高める配慮も必要と考えられる。

(5) 工事後の3径間連続桁における低減効果をより適切に評価するため,CAR-25Kが3径間連続桁(基本路面)上を走行した場合の解析結果を単純合成鈹桁(2Y路面)の解析結果と対比した。その結果,3径間連続桁の第2径間に着目すれば,40km/hでは12dB,60km/hでは15dB,80km/hでは25dBも単純合成鈹桁橋と比

べ小さくなる結果が得られた。したがって,主桁連続化工事にあたっては,低周波空気振動を大幅に低減させるためにも,伸縮継手部を含む長波長段差を除去することが重要であると言える。

低周波空気振動をより厳密に評価するには床版や端横桁で生じる20Hz程度以上の局部振動についても考慮する必要がある。また,本研究では,簡単のため,近似的に平面音波の式を用いて節点の振動速度から音圧レベルを算出したが,今後は振動から音への変換効率である放射効率⁵⁾についてもより定量的に解明していく必要がある。このように,橋梁から発生する低周波空気振動については今後とも継続的な研究が必要であるが,既設単純合成鈹桁橋の主桁連続化工事が急増する現在,低周波空気振動に関するデータを蓄積することは今までにもまして重要になると思われる。限定されたケーススタディではあるが,本文で提示した知見が,主桁連続化工事に携わる実務技術者にとって示唆に富んだ有益な技術資料になることを心から願う次第である。

参考文献

- 1) たとえば,徳永法夫,江上輝男,西村 昂,刑部清次:既設単純鈹桁の主桁連結工法による超多径間化に関する一考察-10径間程度のノージョイント工法の有益性,橋梁と基礎,Vol.31, No.4, pp.21~30, 1997年4月。
- 2) 今市憲作,辻本良信,高島 伸,北川晃一:道路橋の振動に伴う音響放射の理論解析,日本機械学会論文集(C編),46巻408号, pp.904~912, 1980年8月。
- 3) 足立義雄:橋梁の振動性状が低周波域の空気振動に及ぼす影響に関する研究,土木研究所報告,第164号, pp.1~62, 1984年11月。
- 4) 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年4月。
- 5) 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号/VI-10, pp.137~145, 1989年3月。
- 6) 五郎丸英博,白石捷夫,原 公,小森 武:単一走行車両による単純桁橋の低周波空気振動の解析,土木学会論文集,第427号/VI-14, pp.133~142, 1991年3月。
- 7) 深沢泰晴,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年3月。

- 8) 水上浩之, 深沢泰晴, 杉山俊幸: 連続桁道路橋の車両走行による振動と低周波音放射, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集, Vol.37A, pp.478~479, 1992 年 9 月.
- 9) たとえば, 梶川康男, 沖野 真, 吉川 実, 枚本正信: 高架橋と周辺地盤の交通振動予測と制振効果, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.597~605, 1989 年 3 月.
- 10) 橋梁振動研究会編: 橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版, 1993 年 10 月.
- 11) ISO (International Organization for Standardization): Proposals for generalized road inputs to vehicles, ISO/TC 108/WG9 Document No.5, 1972.
- 12) 木下義康, 徳永法夫, 米田昌弘: 走行車両に起因した橋梁構造物の動的応答特性に関する一考察ー伸縮継手部近傍の路面段差をパラメーターとした解析的検討ー, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, I-B455, pp.910~911, 1998 年 10 月.
- 13) 日本道路協会編: 道路橋耐風設計便覧, 1991 年 7 月.

(1998 年 9 月 18 日受付)