

渦励振が発生した斜張橋上を走行する自動車の応答特性に関する研究

Dynamic Response Characteristics of a Running Vehicle on the Oscillating Cable-stayed Bridge with Roughness on its Surface

米田昌弘*, 大枝征尚**, 尾崎直人***

Masahiro YONEDA*, Masanao OOEDA** and Naoto OZAKI***

- * 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)
 ** 近畿大学 理工学部土木工学科 (研究当時) (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)
 *** 近畿大学 理工学部土木工学科 (研究当時) (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

It is not easy to suppress the vortex-excitation of a bridge completely, due to various restrictions such as the technical and financial reasons, etc. Therefore, it may be reasonable to provide the acceptable amplitude for the vortex-excitation in view of the structural fatigue strength and the serviceability of the bridge under the consideration of the runnability of the running vehicles. In this paper, the dynamic response characteristics of running vehicles on oscillating bridges are investigated through the numerical simulation analysis to check the runnability of running vehicles.

Key Words : *dynamic response analysis, running vehicle, cable-stayed bridge, vortex-excitation*

1. まえがき

乱れを含む自然風のもとでは、風速や断面形状の差異による振動振幅の大小はあるものの、バフエーティングは必ず発現する。また、渦励振は充腹断面を有する桁や充実率の大きいトラス断面に発生する可能性があり、従来から提案されている各種の対策を施しても完全に制振することが困難であったり、また、完全に制振できたとしても経済的にかなりの負担となる場合も少なくない。それゆえ、渦励振やバフエーティングのような限定振動に対しては、構造物の安全性からの疲労、使用性からの走行安全性、運転者や歩行者の生理的・心理的感応等から、許容振幅の適切な設定或使用性に対する検討が必要であると考えられる。

このような観点から、白石・松本¹⁾は渦励振とバフエーティングを対象に、疲労に対する許容振幅を算定する手法を提案している。また、松本・藤沢²⁾は吊橋の水平横方向にバフエーティングが発生している場合に走行する鉄道車両の蛇行動について、さらに小松³⁾は長大斜張橋の渦励振時に走行する鉄道車両の走行安全性について、それぞれ有用な結果を報告している。一方、生理的・心理的感応や乗心地から、限定振動の許容振

幅を規定する際の目安とされるものには、McConnellの知覚限界による基準値⁴⁾、Janewayの乗心地係数として1.0を採用した場合の基準値⁵⁾、ISO2631の基準値⁶⁾、Wardlow・Bucklandの提案値⁷⁾などがある。また、松本・白石ら⁸⁾は、大島大橋を対象として、起振実験時と鉛直振動台上でのアンケート調査結果から、長大橋梁の振動に対する人間の感覚について検討している。

ところで、最近、わが国で架設された最大支間長240mの鋼連続箱桁橋において、たわみ渦励振と考えられる振動(発現風速; 16m/s程度、最大振幅; 30cm~40cm)が発現した⁹⁾。この橋梁では、供用前でもあり箱桁内にTMDを設置して渦励振に対処したが、今後は渦励振が発生した橋梁上を走行する自動車の応答特性についても十分な事前調査が必要になると考えられる。しかしながら、渦励振発生時における自動車の走行安全性や運転者が受ける応答に着目した研究は、第一著者らが斜張橋を対象とした解析を一部実施しているのみで、未だ十分な知見が得られているとは言い難い。すなわち、第一著者らは、文献10)で渦励振が発生した斜張橋上を自動車が行った場合の接地圧減少率や自動車の振動応答特性を算定しているが、これらは

路面凹凸を無視した場合の解析結果であり、路面凹凸を考慮した場合など、さらに詳細な検討が必要であった。

そこで、本研究では、限定振動のうち鉛直たわみ渦励振に着目し、路面凹凸を考慮した斜張橋上を自動車が行くする場合の応答解析を新たに実施し、自動車の接地圧減少率と運転者が受ける振動応答特性を明らかにすることとした。その結果、渦励振が発現した斜張橋上を走行する自動車の走行安定性は、橋面上に存在する路面凹凸によって大きく変化すること、また、自動車ばね上部の固有振動数が渦励振の固有振動数と接近した場合、共振現象で自動車の加速度応答や接地圧減少率が大幅に増大することなど、実務設計者にとって興味ある解析データを収集できたことから、ここにその検討結果を報告する。

2. 渦励振時に走行する自動車の動的応答解析法

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¹¹⁾や成書¹²⁾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。

車両が行くする場合、橋梁の運動方程式は次式で表される。

$$[M]\ddot{y} + [C]\dot{y} + [K]y = \{F\} \quad (1)$$

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。

今、自動車を図-1に示すように最も簡単な2自由度系にモデル化し、 r と i をそれぞれ自動車位置での路面凹凸とその速度成分とすれば、自動車の運動方程式は次式で与えられる。

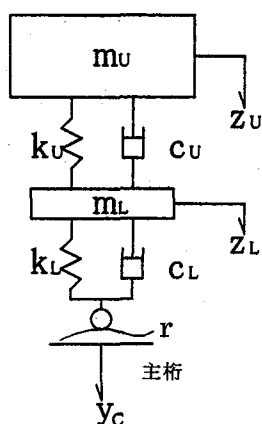


図-1 2自由度系車両モデル

$$m_u \ddot{z}_u + c_u (\dot{z}_u - \dot{z}_L) + k_u (z_u - z_L) = 0 \quad (2)$$

$$m_L \ddot{z}_L + c_L (\dot{z}_L - \dot{y}_c - \dot{r}) - c_u (\dot{z}_u - \dot{z}_L) + k_L (z_L - y_c - r) - k_u (z_u - z_L) = 0 \quad (3)$$

ただし、式(2)、式(3)において、 m_u 、 c_u 、 k_u はそれぞれ車体部(ばね上部)における質量、粘性減衰係数、ばね定数であり、 m_L 、 c_L 、 k_L はそれぞれタイヤ部(ばね下部)における質量、粘性減衰係数、ばね定数である。また、 z_u 、 z_L はそれぞれ車体部(ばね上部)とタイヤ部(ばね下部)の鉛直方向変位、 y_c は自動車位置での主桁の鉛直方向であり、さらに、 g は重力加速度である。

ここではモーダルアナリシスを用いて式(1)~式(3)を解く手法を採用することから、まず、はじめに橋梁の各節点におけるたわみを次のように展開する。

$$\{y(t)\} = \sum \{\Phi\}_n \cdot q_n = [\Phi] \{q\} \quad (4)$$

ここに、 $\{\Phi\}_n$ は第 n 次固有振動モードを表すベクトル、 $[\Phi]$ はモーダルマトリックス、 $\{q\}$ は一般化座標 q_n を成分とするベクトルである。ところで、 $[I]$ を単位マトリックスとして、モーダルマトリックス $[\Phi]$ を

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] = [I] \quad (5)$$

となるように正規化しておけば、式(1)は次のように変形される。

$$\begin{aligned} & [\ddot{q}] + 2[h][\omega]\{\dot{q}\} + [\omega^2]\{q\} = [\Phi]^T \{F\} \\ & = [\Phi]^T \{k_L(z_L - y_c - r) + c_L(\dot{z}_L - \dot{y}_c - \dot{r}) + (m_u + m_L)g\}\{\varphi(t)\} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、

$$\{\varphi(t)\} = \{0; \dots; 0; \varphi_k; \varphi_{k+1}; 0; \dots; 0\} \quad (7)$$

は荷重分配係数ベクトルで、 φ_k 、 φ_{k+1} は任意の節点間にある集中荷重をそれらの節点反力に逆比例分配する係数である。時間の経過とともに自動車が行くので $\{\varphi(t)\}$ は時間の関数となる。さらに、 $[h]$ 、 $[\omega]$ 、 $[\omega^2]$ 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

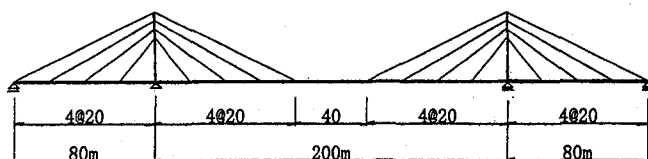


図-2 MODEL-CS200の一般図

表-1 MODEL-CS200の構造諸元

		主 桁	タワー	ケーブル
断 面 積	A	m ²	0.6	0.4
断面2次モーメント	I	m ²	1.0	0.5
弾 性 係 数	E	tf/m ²	2.1×10 ⁷	2.0×10 ⁷
重 量	w	tf/m	15.0	3.5

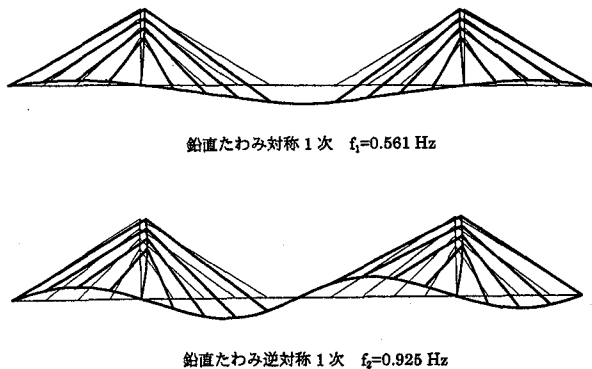


図-3 代表的な固有振動解析結果

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、式(3)と式(6)中に現れる自動車位置での主桁のたわみ $y_c(t)$ は、要素の両端点のたわみから、次のように表される。

$$y_c(t) = \{\varphi(t)\}^T \{y\} = \{\varphi(t)\}^T [\Phi] \{q\} \quad (8)$$

したがって、式(2)、式(3)および式(6)で与えられる連立方程式を、後述するように適切な初期条件のもとで数値積分すれば、渦励振が発生した橋梁上を走行する自動車の動的応答を求めることができる。

なお、自動車の加速度応答が求まれば、自動車の接地圧減少率 $\Delta P/P$ は、次式を用いて算定できる。

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{m_u \ddot{z}_u + m_L \ddot{z}_L}{(m_u + m_L)g} \quad (9)$$

ここに、接地圧減少率 $\Delta P/P$ が 1.0 を超えると自動車が路面から離れた状態となり、自動車の走行性に重大な支障をきたすこととなる。ちなみに、鉄道車両では、接地圧減少率の代わりに輪重減少率を用い、輪重減少率 0.8 を走行安全性の基準としている³⁾。

3. 対象とした計算モデル

(1) 橋梁

吊形式橋梁の中でも斜張橋は、特に力学的あるいは美観上の特徴を生かすという観点から、一般に扁平な箱桁断面が採用されている。しかしながら、一方でこのような箱桁断面では、よほど扁平な断面でない限り、渦励振が発生する可能性があることも知られている。そこで、本研究でも、橋梁モデルの基本系として中央支間長 200m の 3 径間連続斜張橋 (MODEL-CS200) を採用することとした。MODEL-CS200 の一般図と構造諸元をそれぞれ図-2 および表-1 に示す。また、固有振動解析で得られた、代表的な固有振動モード (鉛直たわみ対称 1 次と逆対称 1 次の振動モード) とその固有振動数を図-3 に示す。

表-2 対象とした自動車の諸元

重 量	車 体 部 W_u	tf	大 型 車	小 型 車
	タイヤ部 W_L	tf	18.0	0.98
ばね定数	車 体 部 k_u	tf/m	500.0	7.0
	タイヤ部 k_L	tf/m	1000.0	80.0
減衰係数	車 体 部 C_u	tf·s/m	2.5	0.08
	タイヤ部 C_L	tf·s/m	3.0	0.12
固有振動数	車 体 部 f_u	H_z	2.131	1.284
	タイヤ部 f_L	H_z	13.731	14.857

(2) 自動車

車両のモデル化として種々のものが提案されているが、本研究では文献 10) と同じく、実際の車両を図-1 に示したように車体部 (ばね上部) とタイヤ部 (ばね下部) に分け、それぞれが上下振動する 2 自由度系に置換することとした。対象とした車両 (総重量が 20tonf の大型車と 1.078tf の小型車) の構造諸元を表-2 に示す。なお、表中に示したように、大型車の固有振動数は車体部が 2.131Hz、ばね下部が 13.731Hz、小型車の固有振動数は車体部が 1.284Hz、ばね下部が 14.857Hz となっている。

(3) 路面凹凸

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¹²⁾。

$$S_r(\Omega) = a\Omega^{-n} \quad (10)$$

ここに、 Ω は路面の空間周波数、 n は周波数によるパ

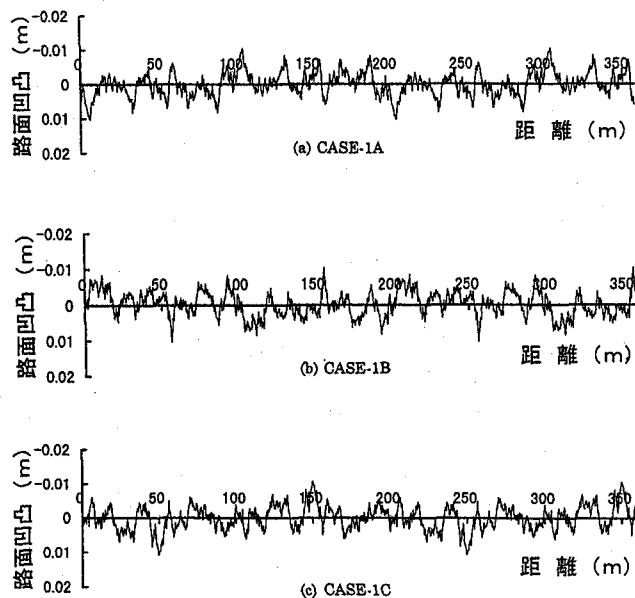


図-4 CASE-1 のパワースペクトルに対応する路面凹凸

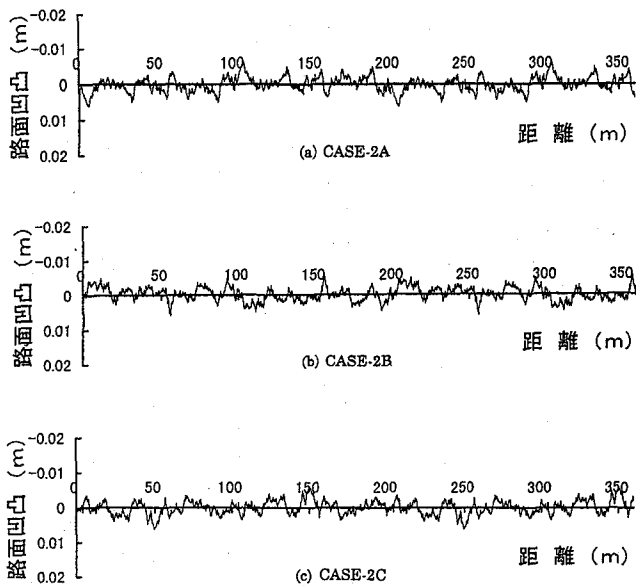


図-5 CASE-2のパワースペクトルに対応する路面凹凸

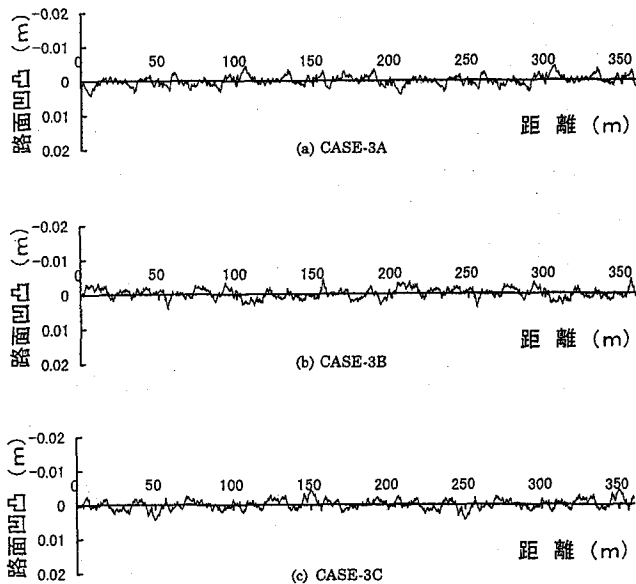


図-6 CASE-3のパワースペクトルに対応する路面凹凸

ワ-の分布を表す指数で、通常は $n=2$ 前後の値になる。
 a は路面の平坦性を表す平滑度パラメーターで、
 $a=0.001\text{cm}^2/(\text{m}/\text{cycle})$ 程度では極良の路面状態を、また、
 $a=0.01\text{cm}^2/(\text{m}/\text{cycle})$ 程度では普通の路面状態を表す。

ところで、橋梁の動的応答には $0.1\text{cycle}/\text{m}$ 以下の路面周波数成分があまり影響しないことから、路面凹凸をシミュレーションする場合、通常は $\Omega_c = 0.05\text{cycle}/\text{m}$ 以下 (この Ω_c をカットオフ周波数と呼んでいる) では平坦なスペクトルにする場合が多い。そこで、本研究では、路面凹凸のパワースペクトルを

$$S_r(\Omega) = \begin{cases} \alpha & (\Omega \leq 0.05c/m) \\ \beta\Omega^{-2} & (\Omega \geq 0.05c/m) \end{cases} \quad (11)$$

と表示し、

CASE-1 ($\alpha=1.2$, $\beta=0.003$)

CASE-2 ($\alpha=0.4$, $\beta=0.001$)

CASE-3 ($\alpha=0.2$, $\beta=0.0005$)

の三つのケースについて、路面凹凸をシミュレーションすることとした。ただし、各ケースのパワースペクトルを満足する路面凹凸は無限に存在するが、ここでは各ケースのパワースペクトルを基にシミュレーションした三つの異なる路面凹凸波形をそれぞれ使用するものとした。参考までに、各ケースの路面凹凸を図-4～図-6に示す。なお、これらの図において、ケース番号の後に付した A, B, C の記号は、パワースペクトルは同じであるが路面凹凸波形が異なることを表している。

4. 自動車の加速度応答と接地圧減少率

(1) 解析の初期条件

対象とした斜張橋モデルの橋幅 B を $B=15\text{m}$ と仮定し、耐風設計便覧¹³⁾を適用して渦励振の発現風速を概算したところ、鉛直たわみ対称1次渦励振で 16.8m/s 、鉛直たわみ逆対称1次渦励振で 27.8m/s 程度となった。そこで、以下では、鉛直たわみ対称1次モードの渦励振を解析の主たる対象とし、鉛直たわみ逆対称1次モードの渦励振については補足的に実施することとした。

本研究では、1次 (0.5702Hz) から30次 (23.032Hz) までの固有振動モードを用いてモーダルアナリシスを適用した。そして、たとえば、中央径間中央点での最大振幅が 0.1m の鉛直たわみ対称1次モードの渦励振を対象とした場合、式(5)で正規化した中央径間中央点でのモード振幅が -0.08955 であったことから、1次モードの一般化座標 q_1 の初期値を $q_1 = -1.16659$ に、また、定常振幅状態が持続するように1次モードの構造対数減衰率 δ_1 は $\delta_1 = 0$ に設定した。これに対し、2次から30次までの振動モードに対応する一般化座標 q_i ($i=2, 3, 4, \dots, 30$) の初期値は、渦励振が発現していないことから $q_i = 0$ とし、構造対数減衰率 δ_i は道路橋耐風設計便覧¹³⁾を参照して $\delta_i = 0.02$ ($i=2, 3, 4, \dots, 30$) に設定するものとした。一方、自動車については、初期条件の影響は非常に小さいと考えられることから、車体部とタイヤ部の初期変位、初期速度、初期加速度をそれぞれ0に設定することとした。

以上の初期条件のもと、車両と橋梁の連成方程式を Newmark の β 法 ($\beta=1/6$, 積分時間間隔 $\Delta t=0.006$ 秒) を適用して数値解析し、渦励振が発生した斜張橋上を走行する自動車の動的応答を算出した。なお、渦励振が発現する風速域 (鉛直たわみ対称1次モードで 16.8m/s 、鉛直たわみ逆対称1次モードで 27.8m/s) で

は自動車に作用する横風の影響も無視できないが、本研究では解析の関係から横風の影響を無視することとした。ただし、最近ではウィンドシールド（防風柵）に関する研究¹⁴⁾も鋭意実施されており、その研究成果によっては、相対的に横風の影響が低下する可能性があることを付記しておく。

(2) 大型車が $V=60\text{km/h}$ で走行した場合

まず、渦励振の発現した斜張橋上を 60km/h の速度で大型車が走行した場合の動的応答解析を実施した。一例として、路面凹凸を CASE-2A ($\alpha = 0.4$, $\beta = 0.001$)、中央径間中央点における渦励振の最大振幅 $y_{\max,c}$ を $y_{\max,c} = 0.1\text{m}$ と仮定した場合の解析結果（中央径間中央点における主桁の加速度応答、ばね上部の加速度応答、接地圧減少率）を図-7に示す。また、図-8には、比較のため、その他の条件は同じで路面凹凸のみを無視した場合の解析結果を示す。図-8から、路面凹凸を考慮しなかった場合、車体部（ばね上部）での加速度や接地圧減少率は、主桁の変位が最大となる中央径間中央部付近を通過する際に最も大きくなり、また、図-9のFFTによるスペクトル解析結果からわかるように、この付近では明らかに鉛直たわみ対称1次振動数成分が卓越していると言える。これに対し、図-7と図-8を比較すればわかるように、路面凹凸（CASE-2A）を考慮した場合の車体部における加速度や接地圧減少率は、路面凹凸を考慮しなかった場合と比べ2.5倍程度も大きく、かつ、応答波形には高次振動数成分が明確に現れている。なお、この高次振動数成分は、図-10に示したFFTによるスペクトル解析結果からわかるように、主に車体部の振動に起因するものである。

上述の解析結果から、車体部の加速度や接地圧減少率は、路面凹凸によって大きく変化すると言える。そこで、CASE-1、CASE-2、CASE-3のパワースペクトルに対応するそれぞれ3種類の路面凹凸（A、B、C）を考慮した場合について動的応答解析を実施し、渦励振の最大振幅（ $y_{\max,c} = 0$, $0.1\text{m} \sim 0.4\text{m}$ ）と車体部の最大加速度応答の関係および最大振幅と接地圧減少率（最大値）の関係を算定することとした。その結果を図-11～図-13に示す。なお、これらの図には、比較のため、路面凹凸を無視した場合の結果も付記している。図-11～図-13から、車体部の最大加速度応答や接地圧減少率の最大値は、渦励振の振動振幅が同じであればCASE-1、CASE-2、CASE-3の順に大きく、路面凹凸のパワースペクトルが大きいほど増加すると言える。また、たとえば、図-12中のCASE-2AとCASE-2Bの解析結果から、路面凹凸のパワースペクトルが同じであれば、路面凹凸波形が相違しても車体部の最大加速度や接地圧減少率の最大値は大きく変

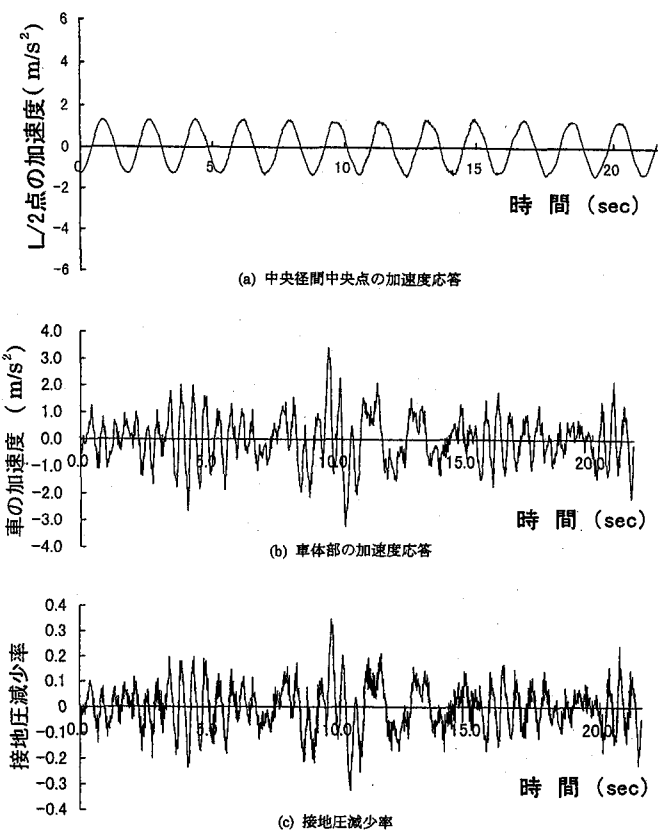


図-7 渦励振の発現した斜張橋を走行する自動車の動的応答特性（大型車、 $V=60\text{km/h}$ 、振幅： $y_{\max,c}=0.1\text{m}$ 、路面凹凸：CASE-2A）

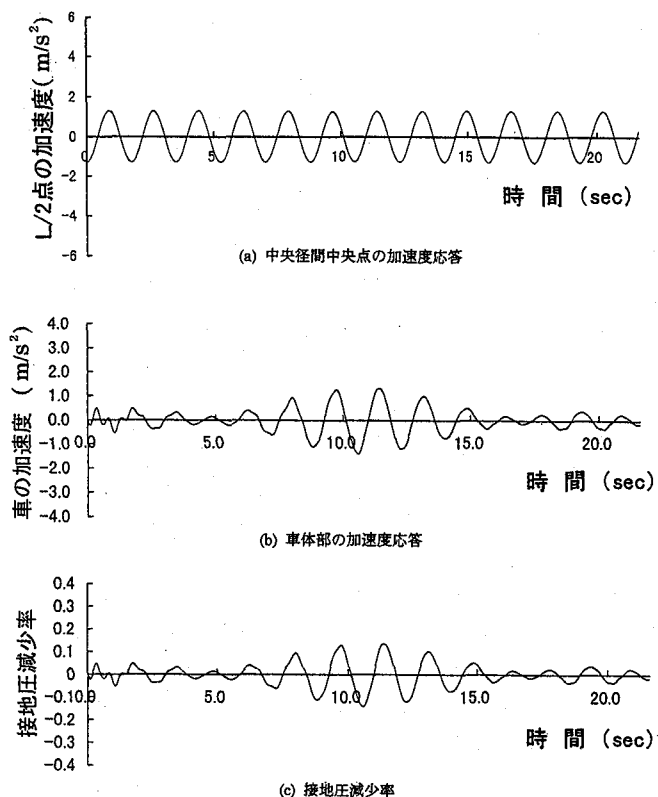


図-8 渦励振の発現した斜張橋を走行する自動車の動的応答特性（大型車、 $V=60\text{km/h}$ 、振幅： $y_{\max,c}=0.1\text{m}$ 、路面凹凸：なし）

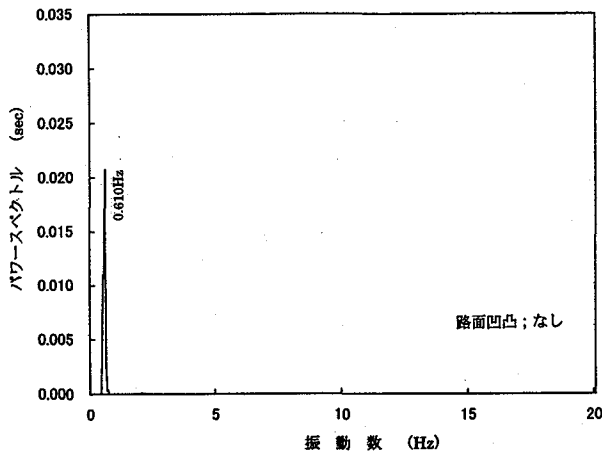


図-9 FFTによる接地圧減少率波形のスペクトル解析結果
(大型車, $V=60\text{km/h}$, 振幅; $y_{\max,c}=0.1\text{m}$, 路面凹凸; なし)

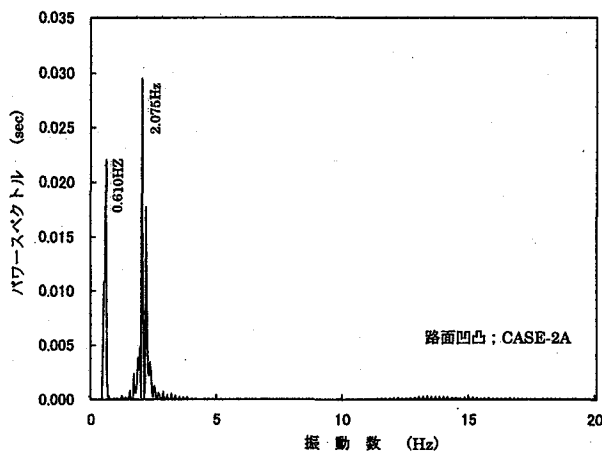
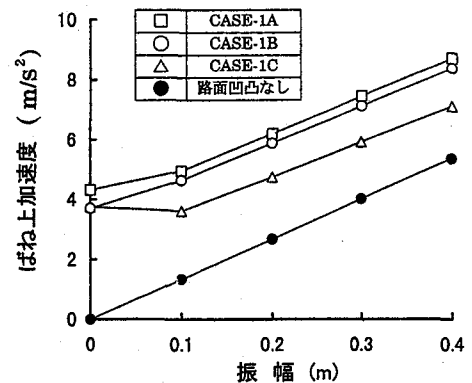


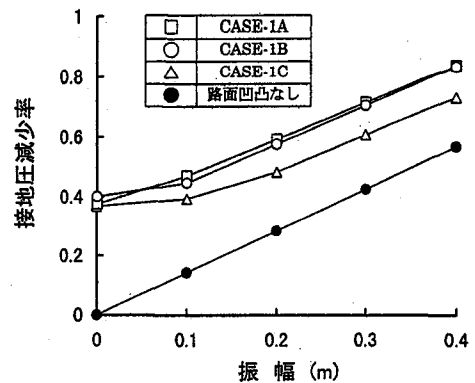
図-10 FFTによる接地圧減少率波形のスペクトル解析結果
(大型車, $V=60\text{km/h}$, 振幅; $y_{\max,c}=0.1\text{m}$, 路面凹凸; CASE-2A)

動しないこともわかる。ただし、CASE-2C では、CASE-2A と CASE-2B の解析結果と比べ、幾分小さくなっているが、これは図-5 の路面凹凸波形を比較すればわかるように、CASE-2C では中央径間中央点 (180m) 付近の路面凹凸が CASE-2A や CASE-2B よりも若干小さくなっているためと考えられる。このことから、鉛直たわみ対称 1 次モードの渦励振を対象とした場合、中央径間中央点付近の路面凹凸をできるだけ小さくするように管理するのが望ましいと言える。

さらに、上に述べた知見に加え、図-11~図-13 から、路面凹凸のパワースペクトルが相違した CASE-1, CASE-2, CASE-3 のいずれにおいても、車体部の最大加速度や接地圧減少率の最大値は概ね渦励振の最大振幅に一次比例して増加しており、しかも、その増加割合は路面凹凸を無視した場合とほぼ等しくなっていることがわかる。この知見は、渦励振が発生していない状態 ($y_{\max,c} = 0\text{m}$) を走行する自動車の最大加速度や接地圧減少率の最大値が事前にわかれば、文献 10) に示した簡易推定式を適用することにより、渦



(a) 車体部の加速度



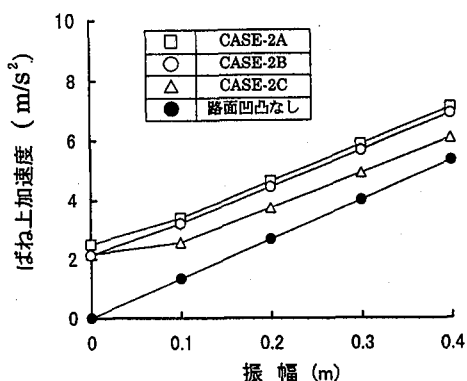
(b) 接地圧減少率

図-11 動的応答解析結果に及ぼす路面凹凸の影響
(大型車, $V=60\text{km/h}$, 路面凹凸; CASE-1)

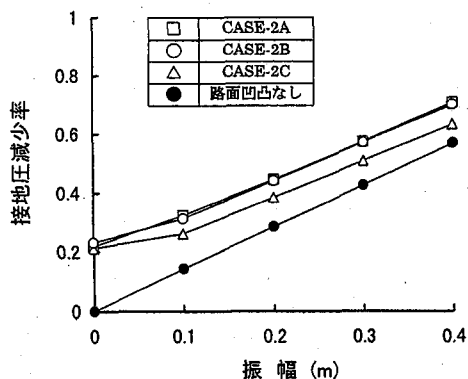
励振が発生した橋梁上を走行する自動車の動的応答特性を推定できる可能性を示唆しているが、これについては次章で詳細に検討することとする。

(2) 小型車が $V=60\text{km/h}$ で走行した場合

同様に、CASE-2A の路面凹凸を考慮した場合について、小型車が 60km/h の速度で斜張橋上を走行した場合の動的応答解析を実施した。渦励振の最大振幅を種々変化させた場合 ($y_{\max} = 0, 0.1\text{m} \sim 0.4\text{m}$ とした場合) の、振幅と車両ばね上部の最大加速度応答の関係および振幅と接地圧減少率 (最大値) の関係を図-14 にまとめる。なお、この図には、比較のため、大型車の解析結果も付記している。図-14 からわかるように、ばね上部固有振動数の差異 (大型車では 2.131Hz , 小型車では 1.284Hz) に起因し、小型車のばね上部最大加速度応答は、渦励振の振動振幅が同一の場合、大型車よりも幾分小さくなっている。しかしながら、大型車が走行した場合と同様、車両ばね上部の最大加速度応答や接地圧減少率の最大値は渦励振の



(a) 車体部の加速度

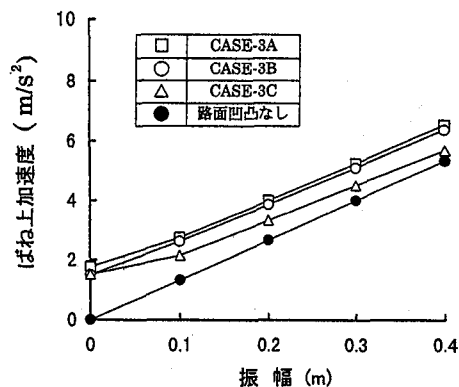


(b) 接地圧減少率

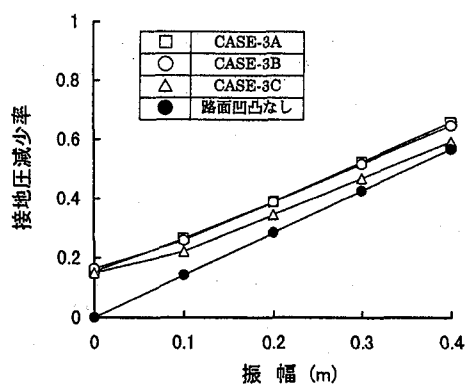
図-12 動的応答解析結果に及ぼす路面凹凸の影響
(大型車, $V=60\text{km/h}$, 路面凹凸; CASE-2)

最大振幅にほぼ比例して増加し、しかも、振動振幅に対する増加割合（勾配）は大型車よりも逆に幾分小さくなっている。このように小型車で振動振幅に対する増加割合が幾分大きく算出されたのは、着目した渦励振の振動数（鉛直たわみ対称 1 次振動数に等しく、 $f_1=0.561\text{Hz}$ ）と自動車ばね上部の固有振動数 f_u との比 $\phi=f_1/f_u$ を計算すれば、大型車では $\phi=0.561/2.131=0.263$ であるのに対し、小型車では $\phi=0.561/1.284=0.437$ となり、共振状態にやや近づいたためと考えられる。

そこで、このことを検証するため、振幅が 0.1m の鉛直たわみ逆対称 1 次モードの渦励振（振動数は 0.925Hz ）が発現している場合を想定し、大型車と小型車がそれぞれ 60km/h の速度で斜張橋上（路面凹凸は CASE-2A）を走行した場合の接地圧減少率を計算した。なお、鉛直たわみ逆対称 1 次モードの渦励振について $\phi=f_2/f_u$ （逆対称 1 次モード渦励振の振動数 f_2 と自動車ばね上部の固有振動数 f_u との比）を計算すれば、大型車で $\phi=0.925/2.131=0.434$ 、小型車で $\phi=0.925/1.284=0.720$ となる。得られた時刻歴波形を比較して図-15 に示す。ただし、鉛直たわみ逆対称 1



(a) 車体部の加速度



(b) 接地圧減少率

図-13 動的応答解析結果に及ぼす路面凹凸の影響
(大型車, $V=60\text{km/h}$, 路面凹凸; CASE-3)

次モード（2 次モード）の渦励振を対象とする場合、式 (5) で正規化した中央径間 $1/4$ 点でのモード振幅が 0.06945 であったことから、2 次モードの一般化座標 q_2 の初期値（ 0.1m の振動振幅に対応する値）を $q_2=1.43988$ に設定している。図-15 からわかるように、鉛直たわみ逆対称 1 次モードの渦励振を対象とした場合、振動振幅が 0.1m であっても、小型車では共振現象で 0.85 程度もの接地圧減少率を示し、大型車の 0.5 よりも大きくなっている。それゆえ、渦励振が発現した斜張橋上を走行する自動車の走行安定性を検討する場合、渦励振と自動車ばね上部との共振現象に留意する必要があると言える。

(3) 走行速度が変化した場合

CASE-2A の路面凹凸を考慮した場合について、大型車と小型車が 40km/h 、 60km/h 、 80km/h の速度で、鉛直たわみ対称 1 次の渦励振が発生した斜張橋上を走行した場合の接地圧減少率（最大値）を計算した。渦励振の最大振幅（ $y_{\max}=0$ 、 $0.1\text{m}\sim 0.4\text{m}$ とした場合）と接地圧減少率（最大値）の関係を図-16 にまとめる。この図からわかるように、小型車では走行速度に

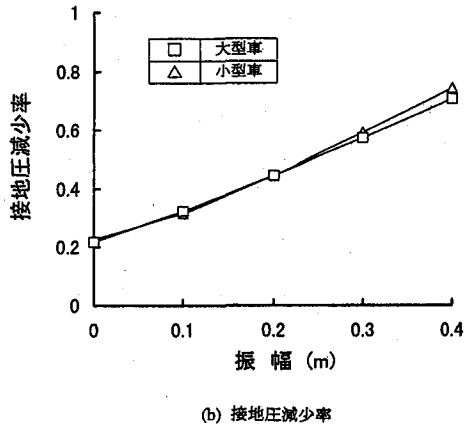
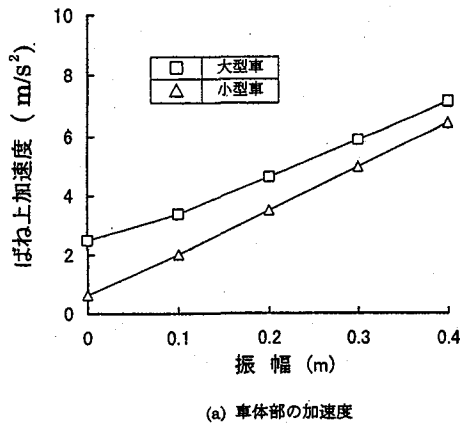


図-14 小型車と大型車が走行した場合の動的応答解析結果の比較 (V=60km/h, 路面凹凸; CASE-2A)

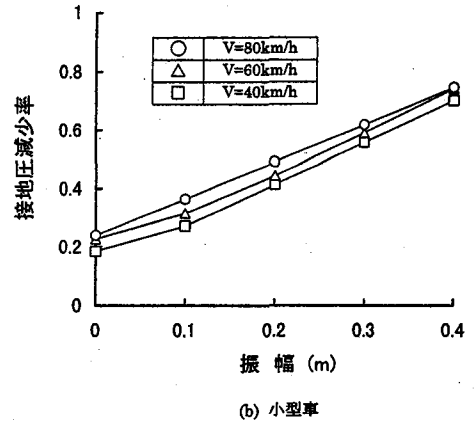
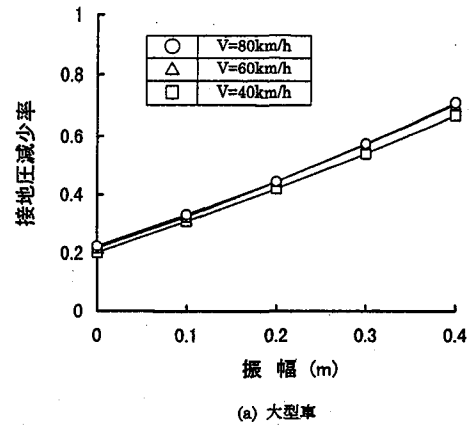


図-16 接地圧減少率に及ぼす走行速度の影響 (渦励振; 鉛直たわみ対称1次, 路面凹凸; CASE-2A)

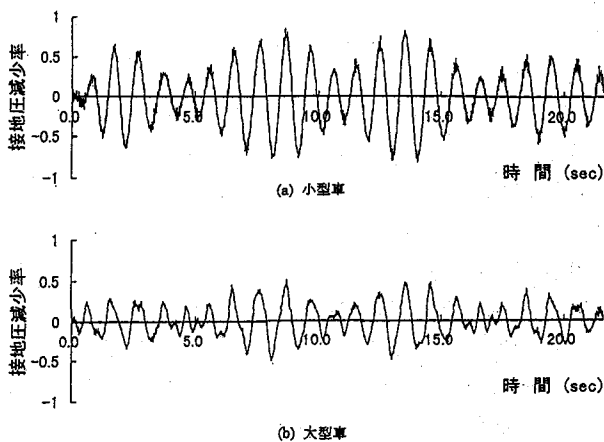


図-15 小型車と大型車が走行した場合の接地圧減少率 (渦励振; 鉛直たわみ逆対称1次, V=60km/h, 路面凹凸; CASE-2A)

よって接地圧減少率に若干の差異が認められているが、本研究で対象とした大型車や小型車では接地圧減少率に及ぼす走行速度の影響は比較的小さいことがわかる。なお、小型車において接地圧減少率に若干の差異が認められたのは、重量が大型車よりも軽く、走行速度が増加した場合には路面凹凸の影響で車体部がやや大きく振動するためと考えられる。

5. 簡易推定式

自動車の重量は車体部が支配的である。それゆえ、簡単のため、路面凹凸を無視し、図-17に示すように車体部のみの1自由度系にモデル化した自動車が振動台上に設置されていると仮定すれば、十分に時間が経過した後では、自動車ばね上部における加速度の最大応答倍率 $(\ddot{z}_u / \ddot{y}_c)_{\max}$ と接地圧減少率の最大値 $(\Delta P / P)_{\max}$ はそれぞれ次式で計算できることになる。

$$(\ddot{z}_u / \ddot{y}_c)_{\max} = \sqrt{\frac{1 + 4h^2\phi^2}{(1 - \phi^2)^2 + 4h^2\phi^2}} \quad (12)$$

$$(\Delta P / P)_{\max} = \frac{\ddot{z}_{u, \max}}{g} \quad (13)$$

ここに、 h は自動車の減衰定数、 g は重力加速度、 ϕ は振動台の加振振動数 (渦励振の振動数) f と自動車車体部の振動数 f_u との比 f / f_u を表す。

そこで、まず、路面凹凸を無視した場合の動的解析結果 (大型車が 60km/h の速度で、鉛直たわみ対称1次の渦励振が発生した斜張橋上を走行した場合の解析結果) と式(12)、式(13)による推定結果 ($h = 0.05$, $\phi = f / f_u = 0.263$ とした推定結果) を比較することとし

た。その結果を図-18に示す。この図から、路面凹凸を無視した場合、式(12)と式(13)による推定結果は、動的応答解析から算出された車体部の加速度応答や接地圧減少率とそれぞれ非常に良く一致していることがわかる。

しかしながら、前章で示したように、車体部の加速度応答や接地圧減少率は路面凹凸によって変化することから、簡易推定式にも路面凹凸の寄与を考慮する必要がある。そこで、本研究では、路面凹凸の寄与を表す補正係数 C_{ra} (車体部の加速度応答に対する補正係数

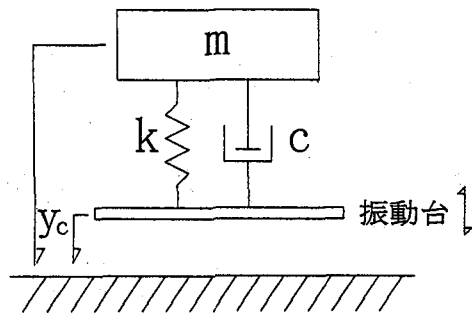
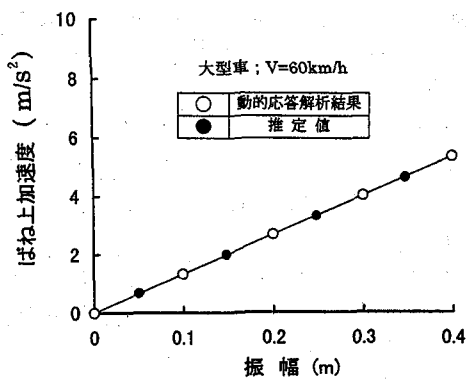
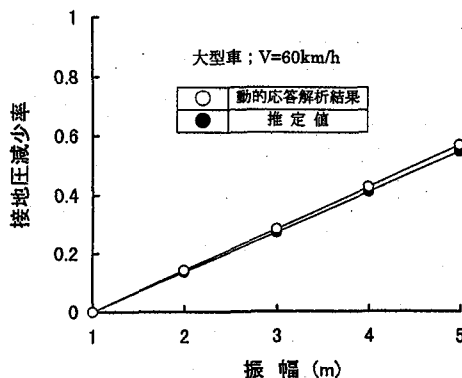


図-17 振動台上にある1自由度系モデル



(a) 車体部の加速度



(b) 接地圧減少率

図-18 動的応答解析結果と推定値の比較
(路面凹凸を無視した場合)

で次元は m/s^2) と C_{rp} (接地圧減少率に対する無次元の補正係数) を導入し、次式で車体部の加速度応答や接地圧減少率を推定できるものとした。

$$\ddot{z}_{u,max} = \ddot{y}_{c,max} \times \sqrt{\frac{1+4h^2\phi^2}{(1-\phi^2)^2+4h^2\phi^2}} + C_{ra} \quad (14)$$

$$(\Delta P/P)_{max} = \frac{\ddot{z}_{u,max} - C_{ra}}{g} + C_{rp} \quad (15)$$

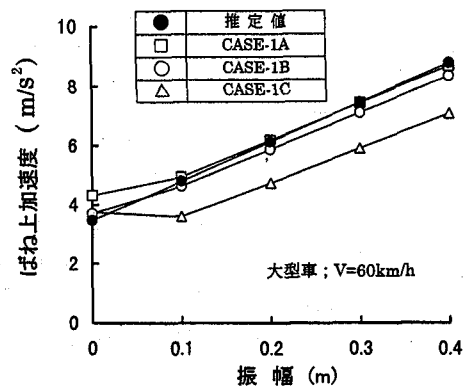
ただし、補正係数 C_{ra} と C_{rp} は、前章の大型車に対する解析結果を考慮し、

$$C_{ra} = 2.0 \times \sqrt{a/0.4} \quad (16)$$

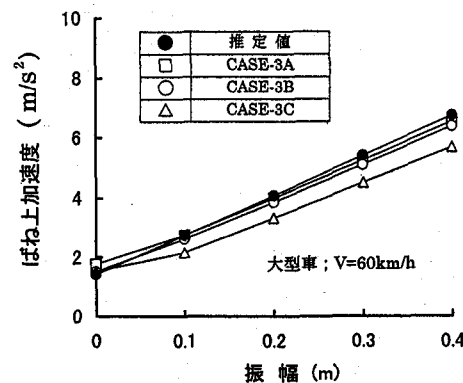
$$C_{rp} = 0.2 \times \sqrt{a/0.4} \quad (17)$$

と仮定するものとした。ここに、式(16)と式(17)中の 2.0, 0.2 なる定数は、大型車が CASE-2A の路面を有する斜張橋上 (渦励振が発生していない橋面上) を 60km/h の速度で走行した場合のばね上部最大加速度と接地圧減少率にそれぞれ対応している。また、 a は路面の平坦性を表す平滑度パラメータであることから、 $\sqrt{a/0.4}$ は平滑度パラメータが a と 0.4 の路面 (本研究では CASE-2 の路面) の凹凸比率を表している。

式(14)~式(17)の適用性を検討するため、CASE-1A と CASE-3A の路面を有する場合の動的解析結果 (大



(a) CASE-1 の路面凹凸



(b) CASE-3 の路面凹凸

図-19 動的応答解析結果と推定値の比較
(ばね上部の加速度)

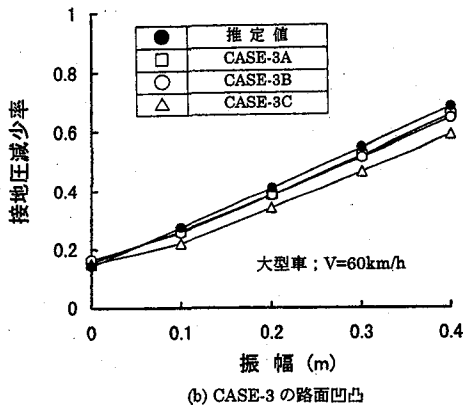
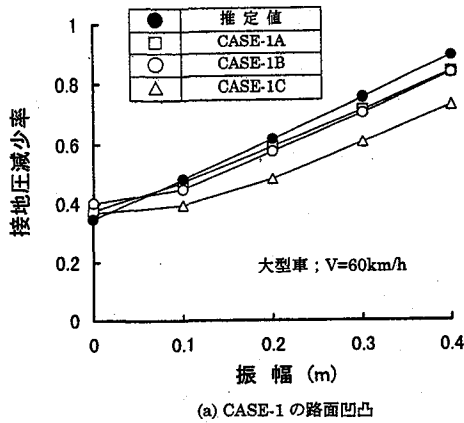


図-20 動的応答解析結果と推定値の比較
(接地圧減少率)

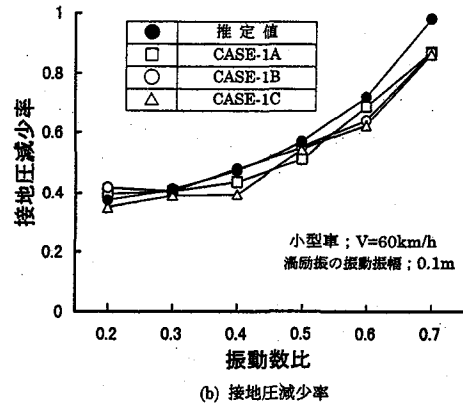
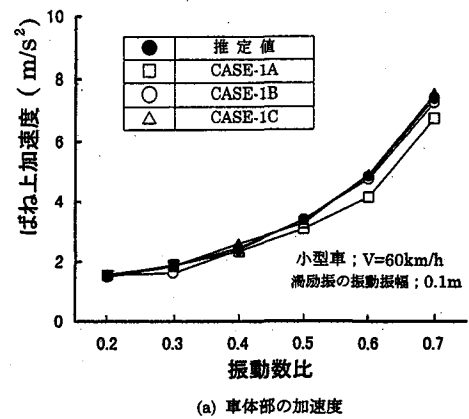


図-21 動的応答解析結果と推定値の比較
(小型車)

型車が鉛直たわみ対称 1 次モードの渦励振が発生した斜張橋上を 60km/h の速度で走行した場合の解析結果と対比することとした。その結果をそれぞれ図-19、図-20 に示す。これらの図より、式(14)~式(17)を適用すれば、渦励振が発生した斜張橋上を走行する大型車のばね上部加速度や接地圧減少率を概ね推定できることがわかる。

また、補足的に、小型車が鉛直たわみ対称 1 次モードの渦励振が発生した斜張橋上を 60km/h の速度で走行した場合の解析結果とも対比することとした。ただし、この場合には、補正係数 C_{ra} と C_{rp} として

$$C_{ra} = 0.7 \times \sqrt{a/0.4} \quad (18)$$

$$C_{rp} = 0.2 \times \sqrt{a/0.4} \quad (19)$$

を仮定するものとした。ここに、式(18)と式(19)中の 0.7, 0.2 なる定数は、小型車が CASE-2A の路面を有する斜張橋上（渦励振が発生していない橋面上）を 60km/h の速度で走行した場合のばね上部最大加速度と接地圧減少率にそれぞれ対応している。渦励振（鉛直たわみ対称 1 次モード、振動振幅は 0.1m に固定）の振動数を適宜変更して振動数比 $\phi = f/f_u$ を変化した動的解析結果と簡易推定式による結果 ($h = 0.05$) を比較した。一例として、CASE-1A~CASE-1C に対す

る比較結果を図-21 に示す。この図より、式(14)と式(15)および式(18)と式(19)を適用すれば、渦励振が発生した斜張橋上を走行する小型車のばね上部加速度や接地圧減少率も概ね推定できることがわかる。

以上、鉛直たわみ渦励振が発生した斜張橋上を走行する自動車の接地圧減少率と車両ばね上部加速度を推定できる簡易式を提示したが、その適用にあたっては補正係数 C_{ra} と C_{rp} の仮定値について留意が必要である。すなわち、補正係数 C_{ra} と C_{rp} は自動車のばね下部（タイヤ部）の諸元によっても変化することから、本研究と大幅に相違する諸元を有する自動車を対象とする場合、別途、路面凹凸を考慮した動的応答解析（自動車が渦励振の発生していない橋面上を走行する解析）を実施して、新たに補正係数 C_{ra} と C_{rp} を算出しなければならない。ただし、この場合にも補正係数 C_{ra} と C_{rp} が定まれば、式(14)と式(15)の適用は可能で、鉛直たわみ渦励振が発生した斜張橋上を走行する自動車の接地圧減少率と車両ばね上部加速度を推定できる。

6. まとめ

本論文は、鉛直たわみ渦励振が発生した斜張橋上を

自動車が行走する場合の動的応答解析を実施し、自動車の接地圧減少率と車両ばね上部の加速度応答について検討したものである。得られた主要な知見を以下にまとめる。

- (1) 車体部の最大加速度応答や接地圧減少率の最大値は路面凹凸の大きさに依存し、渦励振の振動振幅が同じであれば、路面凹凸のパワースペクトルが大きいほど増加する。したがって、渦励振発生時の斜張橋上を走行する自動車の応答特性を把握する際には、路面凹凸を考慮した解析が不可欠である。
- (2) 走行速度を 40km/h～80km/h の範囲で変化させた場合、小型車では接地圧減少率に若干の差異が認められた。しかしながら、本研究で対象とした大型車や小型車を対象とする限り、実務検討にあたっては接地圧減少率に及ぼす走行速度の影響は小さいと考えて差し支えない。
- (3) 路面凹凸の寄与を表す補正係数 C_{ra} と C_{rp} を導入し、接地圧減少率や車体部の加速度応答を推定できる簡易式を提案した。提案した簡易式を適用すれば、渦励振が発生した斜張橋上を走行する自動車の接地圧減少率や車両ばね上部の加速度応答を比較的精度良く推定できる。

本研究では、最も簡単な 2 自由度系車両を用いて、渦励振が発生した斜張橋上を走行する自動車の動的応答解析を実施した。しかしながら、接地圧減少率や車両ばね上部の加速度応答は車両モデルによっても変化すると予想されることから、今後は 4 自由度系車両を用いた解析も実施し、渦励振発生時の斜張橋上を走行する自動車の走行性についてより詳細に検討していく所存である。

参考文献

- 1) 白石成人, 松本 勝, 長尾文明, 真下英人, 本田明弘: 渦励振に及ぼす断面形状の影響と許容振幅に関する研究, 第 7 回風工学シンポジウム論文集, pp.203～210, 1982 年 12 月。
- 2) 松本嘉司, 藤沢伸光: 風を受けて振動する吊橋上の 2 軸車両の走行性, 土木学会論文報告集, 第 317 号, pp.123～135, 1982 年 1 月。
- 3) 小松定夫: 風の作用を受ける柔構造物の使用限

界状態, 柔構造物の強風災害防止のための設計規範に関する研究 (研究代表者 伊藤 学), 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, 第 5 章, 1984 年 6 月。

- 4) 高速道路調査会: 本州四国連絡橋における自動車走行安全に関する研究, 1974 年 2 月。
- 5) 鉄道施設協会: 本州四国連絡橋の列車走行性に関する研究, 中間報告, 1974 年 3 月。
- 6) ISO/TC108/SC4/WG2 (Allen/Sussman-1) 41: Standard ISO 2631, 1975 年。
- 7) Wardlaw, R.L. and Buckland, P.G.: Some Aerodynamic Consideration in Bridge Design, The Engineering Journal, April, 1972.
- 8) 松本 勝, 白石成人, 榎井幸夫, 三澤 彰: 鉛直振動に対する人間感覚—橋梁の使用性に関連して—, 土木学会論文集, 第 410 号 / I-12, pp.267～275, 1989 年 10 月。
- 9) 吉田好孝, 藤野陽三, 時田秀往, 本田明弘: 東京湾アクアライン橋梁部鋼箱桁橋に発現した渦励振とその特性, 土木学会論文集, 第 633 号 / I-49, pp.103～117, 1999 年 10 月。
- 10) 米田昌弘, 伊藤 学: 自動車の応答特性に着目した場合の渦励振の許容振幅について, 第 10 回風工学シンポジウム論文集, pp.203～210, 1988 年 12 月。
- 11) たとえば, 梶川康男, 沖野 真, 吉川 実, 松本正信: 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。
- 12) 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。
- 13) 日本道路協会編: 道路橋耐風設計便覧, 1991 年 7 月。
- 14) たとえば, 枝元勝哉, 畠中真一, 宮地真一: 道路に対する横風軽減用防風柵の実験的検討, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1129～1136, 1999 年 3 月。

(1999 年 9 月 17 日受付)