

# 渦励振が発現した少数主桁橋上を走行する 自動車の動的応答特性

米田昌弘

フェロー会員 工博 近畿大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

橋梁の製作費用や維持管理費用の削減を図るべく、近年では2主桁橋をはじめとする少数主桁橋の建設が増加している。少数主桁橋は構造減衰が小さく、その断面形状と相まって自動車が走行する25m/s~30m/s程度以下の風速域において、渦励振が発生する可能性があるとして強く危惧されている。そこで、本研究では、自動車の固有振動数を計測し、自動車の固有振動数とほぼ一致する少数主桁橋が実在することを明らかにした。また、渦励振が発生した2主桁橋上を走行する自動車の動的応答解析を実施して自動車の走行性について考察するとともに、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推定できる設計用簡易評価式を提示した。

*Key Words* : plate girder bridge, vortex-excitation, dynamic response analysis, running vehicle, acceptable amplitude

## 1. まえがき

わが国では、支間長が200mまでの橋梁構造物に対し、道路橋耐風設計便覧<sup>1)</sup>を適用して耐風性を検討する機会が多い。この道路橋耐風設計便覧は200mから300mまでの橋梁に対しても準用されているが、この中に渦励振の許容振幅が提示されている。たわみ渦励振の許容振幅を具体的に記述すれば $h_a = 0.04/f_h$  ( $h_a$ は許容振幅、 $f_h$ はたわみ振動数)となるが、この式は許容振幅を100gal程度に設定した場合に対応するものである。これは支間長が200mを若干越える橋梁に100gal程度の渦励振が発現しても初通過破壊が生じないこと、また、風速の発生頻度分布を仮定すれば疲労破壊にも至らないことなどが採用の背景となっている。それゆえ、道路橋耐風設計便覧における許容振幅は、橋梁構造物の初通過破壊や疲労破壊に対する規定であると言える。

一方、渦励振の許容振幅については、利用者の生理的・心理的感応や乗心地などからの規定も考えられる。代表的なものとして、McConnellの知覚限界による基準値<sup>2)</sup>や乗心地係数を1.0としたJanewayの基準値<sup>3)</sup>などが知られている。しかしながら、McConnellの知覚限界(鉛直方向)は0.124g(122gal)、乗心地係数を1.0としたJanewayの基準値は0.2g(196gal)といずれも道路橋耐風設計便

覧の規定値よりも大きく、利用者の生理的・心理的感応や乗心地から渦励振の許容振幅を評価するためには、さらに詳細な検討が必要であった。このようなことから、松本・白石ら<sup>4)</sup>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。また、著者ら<sup>5)</sup>も、自動車の走行安全性や運転者が受ける応答に着目し、渦励振が発生した斜張橋上を2自由度系車両が走行した場合の応答解析を実施している。その結果、渦励振時に走行する自動車の加速度応答や接地圧減少率には共振現象が大きく関係し、横風の影響を無視した場合には乗用車の方が大型トラックよりも大きな応答を呈するなどの知見を報告している。

周知の如く、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、小振幅域における構造対数減衰率 $\delta_s$  ( $\delta_s = 0.03$ 程度)が鋼桁橋に対する道路橋耐風設計便覧の最小規定値 ( $\delta_s = 0.04$ )よりも下回ったため、たわみ渦励振と考えられる振動が発現した<sup>6)</sup>。最も多く観測された振動はたわみ1次の渦励振で、最大振幅は15m/s~16m/sの風が作用した場合に50cmにも達したとの報告がなされている。たわみ1次振動数は0.35Hzであることから、この橋梁では加速度に換算して242galもの応答が生じたことになる。この観測値は道路橋耐風設

計便覧の規定値と比べ 2.4 倍も大きく、最終的に合計 16 個の TMD を箱桁内に設置して渦励振に対処することとなった。

一方、橋梁の製作費用や維持管理費用の削減を図るべく、近年では 2 主桁橋をはじめとする少数主桁橋の建設が増加しており、すでに支間長が 80m を超える事例も報告されている。少数主桁橋では同程度規模の桁橋と比較して構造減衰が小さく、渦励振が発現しやすい断面形状と相まって、自動車が走行する 25m/s～30m/s 程度以下の風速域において渦励振が発生する可能性があるとして強く危惧されている<sup>7)</sup>。すなわち、渦励振が同様に発生する可能性のある斜張橋では、最大支間長が 200m 程度であっても基本固有振動数は 0.5Hz 程度で、自動車と共振する可能性はきわめて低かった。これに対し、支間長が 60m～90m 程度の少数主桁橋では基本固有振動数が 1Hz～2Hz 付近にあり、渦励振が発現した場合、その上を走行する自動車には共振現象が生じて走行安全性が著しく低下する可能性があるとして推察される。このような状況のもと、渦励振が発現した少数主桁橋上を走行する自動車の動的応答特性に関する検討は、実務技術者からの要望もきわめて強く、急務の課題となっていた。

そこで、本研究では、まず、自動車の固有振動数を計測するとともに、自動車の固有振動数とほぼ一致する少数主桁橋が実在することを明らかにした。また、渦励振が発生した 2 主桁橋上を走行する自動車の動的応答解析を実施して自動車の走行安全性について考察するとともに、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推定できる設計用簡易評価式を提示した。

なお、著者は、斜張橋を対象として同様の動的応答解析をすでに実施している<sup>5)</sup>。しかしながら、少数主桁橋では構造減衰が比較的小さく、渦励振の発現とその制振が最重要課題となっている現時点において、自動車の固有振動数計測結果や少数主桁橋を対象とした動的応答解析結果（クォーターカーモデルを適用した動的応答解析結果）など、新たな実験データや IRI（国際ラフネス指数）に着目した新たな解析結果を提示することは実務技術者にきわめて有用な情報を提供するものと考えられる。すなわち、本論文は、渦励振に対する少数主桁橋の許容振幅と自動車の走行安全性を初期の設計段階から合理的に検討できるようにとの観点から、著者の既往研究<sup>5)</sup>をもとに、新たな実験や解析データならびに知見を加味して再構成したものである。

表-1 自動車の固有振動数

番号	種類	固有振動数
1	軽トラック	1.651 Hz
2	RV 車	1.405 Hz
3	普通乗用車	1.967 Hz
4	普通乗用車	1.702 Hz
5	普通乗用車	1.108 Hz
6	クーペ	1.553 Hz
7	クーペ	1.378 Hz
8	RV 車	1.794 Hz
9	乗用車(外国車)	1.503 Hz
10	RV 車	1.570 Hz
11	普通乗用車	1.313 Hz
12	普通乗用車	1.687 Hz
13	ワンボックス車	1.915 Hz
14	軽自動車	2.095 Hz
15	乗用車(外国車)	1.571 Hz

## 2. 自動車の固有振動数測定

一般的な乗用車では、ばね上部固有振動数が 1.2Hz～1.5Hz、ばね下部固有振動数が 10Hz～17Hz 付近にあると考えられている<sup>8)</sup>。しかしながら、自動車の固有振動数は車種によっても変化することから、本研究の目的を考えた場合、自動車の固有振動数を計測することは必要不可欠であると言える。そこで、自動車の固有振動数を以下のように計測することとした。

### (1) 計測方法

自動車の減衰定数は非常に大きく、人力で加振しても減衰自由振動波形を得るのは容易でない。そこで、自動車の固有振動数（厳密には減衰固有振動数）と同調するように自動車を人力で加振し、その応答波形から自動車の固有振動数を算出するものとした。実験では LabVIEW（Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench）によってプログラミングした振動計測システムを採用し、無人状態の自動車（合計 15 台）を対象として固有振動数（3 回づつ計測した振動数の平均値）を算出するものとした。

### (2) 計測結果と考察

自動車の固有振動数計測にあたっては、一般的な

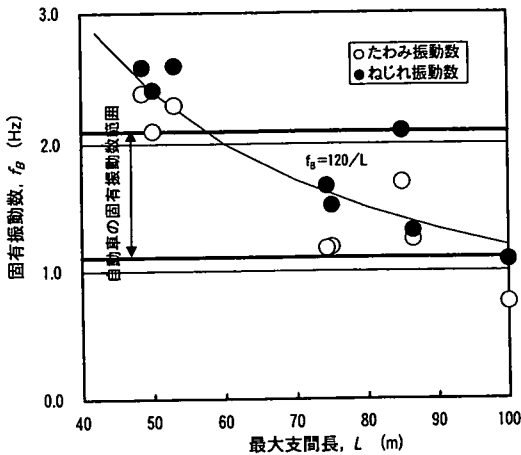


図-1 少数主桁橋の固有振動数と最大支間長の関係

乗用車に加え、数は少ないが軽トラックや軽自動車ならびにワンボックス車なども対象とした。計測した自動車の固有振動数を表-1に示す。一般的な乗用車のばね上部固有振動数は1.2Hz~1.5Hz付近にあると言われていたが、表-1からわかるように、自動車の固有振動数は車種によって変化し、今回の計測結果では最小が1.108Hz、最大が2.095Hzで、平均値は1.614Hzであった。そこで、現在までに架設された代表的な少数主桁橋<sup>9)~13)</sup>ならびに試設計された少数主桁橋(2主桁橋)<sup>7), 14)</sup>の固有振動数と自動車の固有振動数範囲を比較することとした。その結果を図-1に示す。なお、耐風設計便覧には、最大支間長をLとした場合、橋梁のたわみ固有振動数 $f_B$ の推定式として

$$f_B = 100/L \quad (1)$$

が提示されている。少数主桁橋ではたわみとねじれの基本固有振動数が比較的接近しており、両者を考慮すると式(1)の推定結果よりも幾分高い傾向が認められたことから、参考までに図-1には、

$$f_B = 120/L \quad (2)$$

の推定式を付記することとした。

図-1からわかるように、60m~90mの少数主桁橋では、橋梁の固有振動数と一致するような自動車が走行する可能性が十分にあると言える。また、実際、図-2と図-3から、利別川第一橋(最大支間長86.5m)や宿茂高架橋(最大支間長85m)では、自動車の固有振動数 $f_c$ と橋の固有振動数 $f_B$ との比 $f_c/f_B$ が1.0付近となる自動車が存在することがわかる。それゆえ、少数主桁橋で渦励振が発現した場

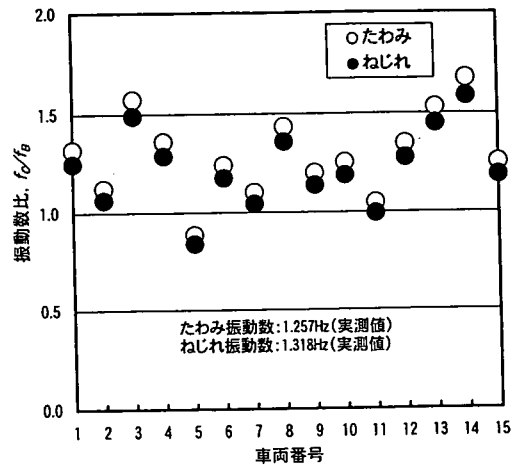


図-2 利別川第一橋での振動数比 $f_c/f_B$

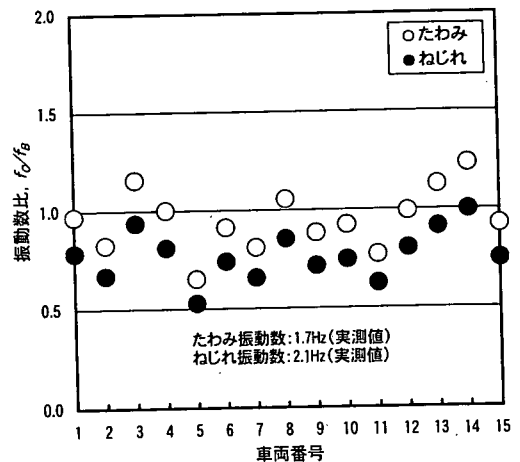


図-3 宿茂高架橋での振動数比 $f_c/f_B$

合、自動車によっては共振現象が発生し、走行性や安全性に重大な支障をきたす場合があるものと言える。

そこで、次章以降では、渦励振が発現した橋梁上を走行する自動車の動的応答解析を実施し、自動車の走行安全性と渦励振の許容振幅について考察を加えることとした。

### 3. 動的応答解析で対象とした検討モデル

#### (1) 橋梁

文献7)には少数主桁橋の試設計例が報告されている。試設計された橋梁は支間長が等しい3径間連続

表-2 対象とした2主桁橋の構造諸元

支間長 $l$	重量 $w$	重量慣性 モーメント $I_g$	断面2次 モーメント $I$	(/Br.) ねじれ定数 $J$
75 m	154.0 kN/m	1500.9 kN·m <sup>2</sup> /m	1.388 m <sup>4</sup>	0.048 m <sup>4</sup>

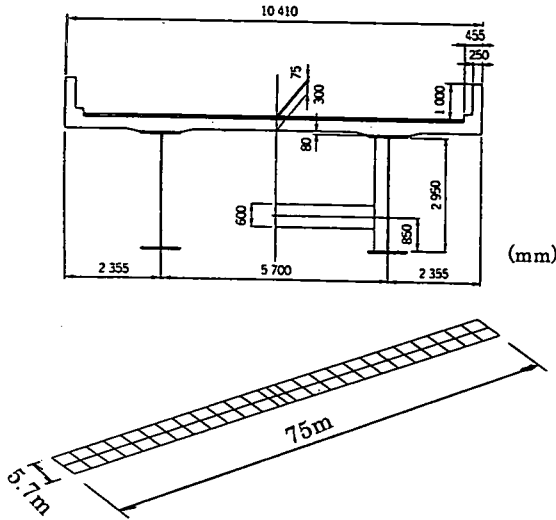


図-4 対象とした橋梁の断面形状と解析モデル

桁橋であるが、このような等径間の連続桁橋では中央径間部分を取り出し、単純桁橋としてモデル化しても基本固有振動数は変化しない。そこで、本研究では、文献7)に示された75m+75m+75mの3径間連続桁橋に着目し、その中央径間部分(75m)を単純桁としてモデル化した2主桁橋を検討の対象とした。対象橋梁の一般図と構造諸元をそれぞれ図-4および表-2に示す。また、立体骨組モデルの固有振動解析で得られた、鉛直たわみとねじれの基本固有振動モードを図-5に示す。なお、対象橋梁が2主桁橋であるにも係わらず、本研究で3主桁の立体骨組にモデル化したのは、2主桁のモデル化では所定の重量を主桁位置に付与すると極慣性モーメントが過大な値となるためである。そこで、左右の主桁部で所定の極慣性モーメントを満たすように重量を付加した後、不足分の重量を中央の主桁部に付加させるものとした。したがって、中央の主桁部はダミー部材であり、全体の剛性には寄与していない。図-5には鉛直たわみとねじれの基本固有振動数(1.192Hzと1.513Hz)も併記しているが、これらの値は橋梁部材をソリッド要素とシェル要素に分割した固有振動解析結果(鉛直たわみとねじれの基本固有振動数はそれぞれ1.191Hz, 1.518Hz)<sup>7)</sup>とも非常に良く一致している。

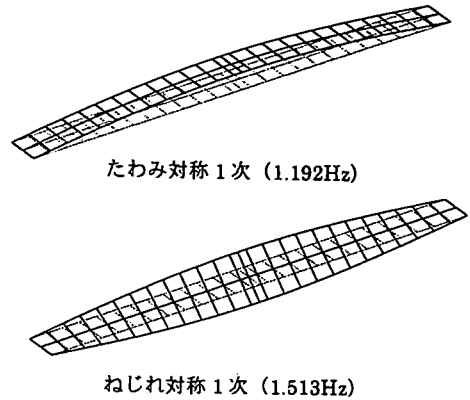


図-5 たわみとねじれの基本固有振動モード

少数主桁橋では必ずしも大きな構造減衰を期待できない場合が多い。それゆえ、対象橋梁でも構造対数減衰率 $\delta_s$ が $\delta_s = 0.015$ の条件で風洞実験が実施されている<sup>7)</sup>。その結果によれば、実橋換算で20m/s付近の風速で片振幅5cm程度のたわみ渦励振が、また、35m/sを超える風速で振動振幅 $2^\circ$ 以上のねじれ渦励振が発現している。

橋梁上を走行する自動車に対して、一般に25m/s~30m/s程度の風速域から速度規制や通行規制を実施する場合が多い。対象橋梁において振動振幅 $2^\circ$ 以上のねじれ渦励振が発現する風速は35m/s程度以上であり、実際には通行規制が実施されるものと考えられる。しかしながら、支間長がさらに増大した場合にはねじれ基本固有振動数も相対的に低下し、30m/s以下の風速域で大きな振動振幅を有するねじれ渦励振が発現する可能性もある。さらに、25m/s程度を通行規制風速に設定した場合、通行規制の頻度が比較的高くなることから、最近ではウィンドシールド(防風柵)に関する研究も鋭意実施されている<sup>15)</sup>。また、厳密にはウィンドシールドではないが、遮音壁を設置することによって少数主桁橋のねじれ渦励振が安定化され、振動振幅も低減することが知られている。これらの研究成果によっては、通行規制風速も30m/s程度まで引き上げられる可能性もあることから、本研究では、たわみモードの渦励振に加え、ねじれモードの渦励振についても、動的応答解析を実施するものとした。

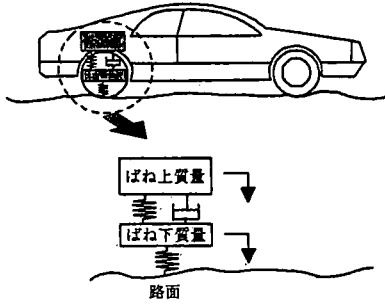


図-6 クォーターカーモデル

## (2) 車両モデル

路面凹凸プロファイルを評価する指標として、最近では IRI (国際ラフネス指数) が国際的に使用されつつある<sup>16)</sup>。ここに、IRI とは、図-6 のクォーターカーモデルを用いたシミュレーション結果から、以下に示す値を算出したものである。

$$IRI = \int_0^L \nu |z_U - z_L| dt / L \quad (\text{mm/m}) \quad (3)$$

上式において、 $z_U$  と  $z_L$  はばね上部とばね下部の速度応答、 $\nu$  は走行速度で IRI を算定する場合には 80km/h と定められている。また、 $L$  は評価長であり、普通は 160m が採用されている。クォーターカーモデルでは、以下のように車両諸元が規定されている<sup>17)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} c_U / m_U &= 6.0 \\ k_L / m_U &= 653 \\ k_U / m_U &= 63.3 \\ m_L / m_U &= 0.15 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 $c_U$  はばね上部 (車体懸架装置) の粘性減衰係数、 $k_U$  はばね上部 (車体懸架装置) のばね定数、 $k_L$  はばね下部 (タイヤ) のばね定数、 $m_U$  はばね上部質量 (車輪 1 個で支持された車体の質量)、 $m_L$  はばね下部質量である。

クォーターカーは、その名の通り車輪 1 個とそれに支持された車体部分をモデル化したもので、車両重量そのものは実際の 1/4 となっている。しかしながら、渦励振が発現した場合、橋梁の慣性力と比較して自動車の重量は非常に小さく、車両重量の差異はばね上部加速度や接地圧減少率の解析結果に影響を及ぼさない。一方、IRI は路面凹凸プロファイルを評価する指標ではあるが、後述するように一般に

表-3 クォーターカーモデルの諸元

重量	ばね上部 $W_U$	kN	2.403
	ばね下部 $W_L$	kN	0.361
ばね定数	ばね上部 $k_U$	kN/m	15.509
	ばね下部 $k_L$	kN/m	159.981
減衰係数	ばね上部 $C_U$	kN·s/m	1.470
	ばね下部 $C_L$	kN·s/m	-
減衰固有振動数	1次 (ばね上部) $f_U$	Hz	1.165
	2次 (ばね下部) $f_L$	Hz	10.754
減衰定数	1次 (ばね上部) $h_U$	-	0.333
	2次 (ばね下部) $h_L$	-	0.302

は公表されていない自動車の諸元を明確に設定できることに加え、渦励振が発現した橋梁上をクォーターカーが走行する場合の IRI を算出すれば、すでに明らかにされている IRI と路面凹凸性状の関係を適用することによって、自動車の走行性を定性的にはあるが評価できるものと考えられる。

以上の理由から、本研究では、国際的に認知されたクォーターカーモデルを基本車両モデルとして採用し、動的応答解析を実施するものとした。ただし、5章ではクォーターカーモデルの重量などを4倍して、実際の自動車に近い重量を有する自動車モデルを用いた検討も実施している。自動車ばね上部の総重量を 9.61kN (0.980tonf) と仮定すれば、クォーターカーモデルのばね上部重量は 2.403kN となる。この条件のもとで、式(4)を満足するように設定したクォーターカーモデルの諸元を表-3に示す。ここに、表中に示した減衰固有振動数と減衰定数は、複素固有値解析を実施して算出した値である。表-3からわかるように、クォーターカーモデルのばね上部振動数  $f_U$  は  $f_U = 1.165\text{Hz}$  となっているが、この値は一般的な乗用車のばね上部振動数と考えられてきた 1.2Hz~1.5Hz のほぼ下限値に対応するものである。

## (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<sup>18)</sup>。

$$S_r(\Omega) = a\Omega^{-n} \quad (5)$$

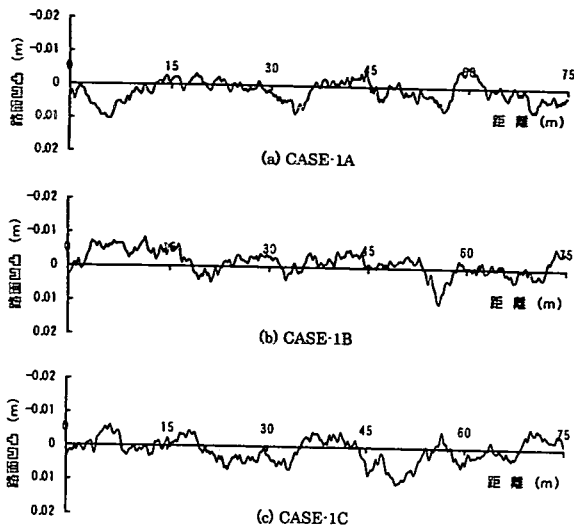


図-7 CASE-1の路面凹凸

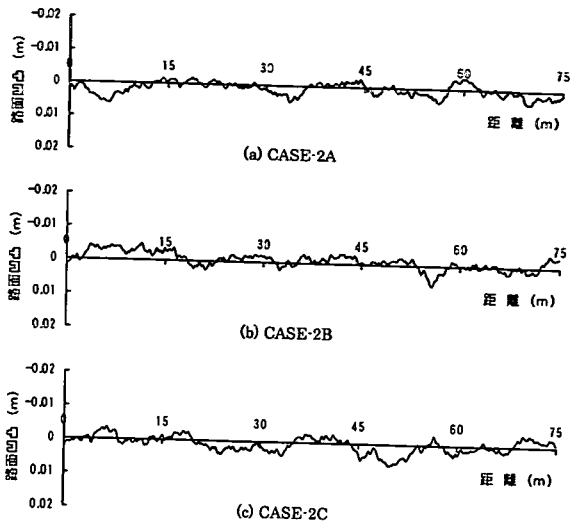


図-8 CASE-2の路面凹凸

ここに、 $\Omega$ は路面の空間周波数、 $n$ は周波数によるパワー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 $\Omega_c$ 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、カットオフ周波数以下では一定(平滑度パラメーターを $a_1$ と表示)、カットオフ周波数以上では指数関数(平滑度パラメーターを $a_2$ と表示)となるように路面凹凸のパワースペクトルを場合分けして

$$S_r(\Omega) = \begin{cases} a_1 & (\Omega \leq 0.05) \\ a_2 \Omega^{-2} & (\Omega \geq 0.05) \end{cases} \quad (6)$$

と表示し、

CASE-1 ( $a_1=1.2$ ,  $a_2=0.003$ )

CASE-2 ( $a_1=0.4$ ,  $a_2=0.001$ )

CASE-3 ( $a_1=0.2$ ,  $a_2=0.0005$ )

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もと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

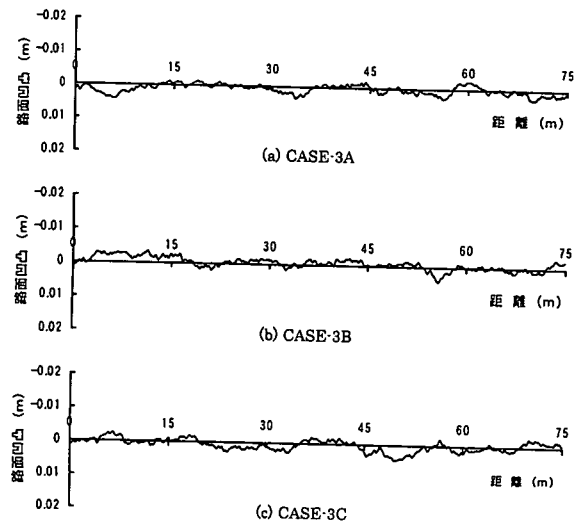


図-9 CASE-3の路面凹凸

路面凹凸を図-7~図-9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。したがって、次章以降において、たとえばCASE-1Aと記した解析結果はCASE-1Aの路面凹凸を考慮した場合に対応している。ただし、A, B, Cの記号を省略して単にCASE-1と記した場合は、CASE-1A, CASE-1B, CASE-1Cの路面凹凸に対してそれぞれ動的応答解析を実施した後、得られた解析結果を平均した値であることを表している。

#### 4. 動的応答解析結果と考察

##### (1) 解析手法の概略

渦励振が発現した橋梁上を走行する自動車の動的応答解析手法についてはすでに文献5)に詳述していることから、ここでは解析手法の概略のみを記述することとする。

本研究では、1次(1.192z)から8次(12.195Hz)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、端主桁中央点での最大振幅が0.05mの鉛直たわみ基本モードの渦励振を対象とした場合、 $[\Phi]$ をモーダルマトリックス、 $[M]$ を質量マトリックス、 $[I]$ を単位マトリックスとして

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] = [I] \quad (7)$$

となるように正規化した端主桁中央点でのモード振幅が-0.1290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 $q_1 = -0.38757$ 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 $\delta_1$ は $\delta_1 = 0$ に設定した。これに対し、2次から8次までの振動モードに対応する一般化座標 $q_i$  ( $i=2, 3, \dots, 8$ )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 $\delta_i$ は $\delta_i = 0.015$  ( $i=2, 3, \dots, 8$ )に設定するものとした。一方、ねじれ基本モード(2次モード)の渦励振を対象とする場合、式(7)で正規化した端主桁中央点でのモード振幅が-0.1178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(0.05mの振動振幅に対応する値)を $q_2 = -0.42444$ に設定して同様の解析を実施するものとした。なお、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、ばね上部(車体部)とばね下部(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 $\beta$ 法( $\beta=1/6$ , 積分時間間隔 $\Delta t=0.005$ 秒)を適用して数値解析し、渦励振の発生した2主桁橋上を走行する自動車のばね上部加速度と接地圧減少率を算出した。ここに、接地圧減少率 $\Delta P/P$ は次式を用いて算定でき、この値が1.0を超えると解析上は自動車が路面から離れた状態となつて自動車の走行に重大な支障をきたすこととなる。

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{m_U \ddot{z}_U + m_L \ddot{z}_L}{(m_U + m_L)g} \quad (8)$$

ここに、 $g$ は重力加速度である。

なお、遮音壁や適切なウィンドシールド(防風柵)

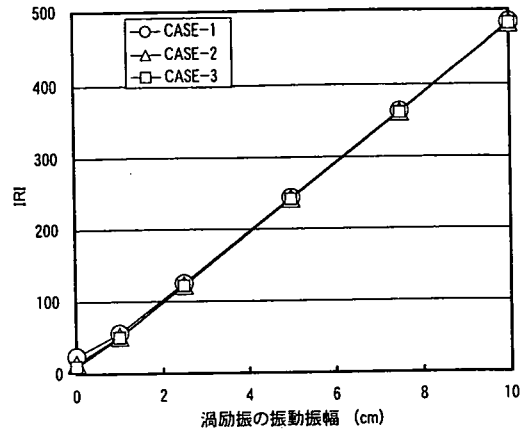


図-10 たわみ渦励振の振動振幅とIRIの関係

を設置した場合、乗用車に及ぼす横風の影響は比較的小さいと考えられることから、本解析では横風の影響を無視できるものと仮定している。

##### (2) クォーターカーモデルを用いた検討

IRI(国際ラフネス指数)の算出基準にしたがい、本研究でも走行速度を80km/hに設定し、鉛直たわみ基本モードの渦励振が発生した2主桁橋上をクォーターカーモデルが走行する場合の動的応答解析を実施することとした。なお、たわみ渦励振の振動数 $f_B$ は $f_B = 1.192\text{Hz}$ 、クォーターカーモデルのばね上部振動数 $f_U$ は $f_U = 1.165\text{Hz}$ である。したがって、振動数比を計算すれば $f_U/f_B = 0.977$ となり、クォーターカーが渦励振の発生した橋梁上を走行した場合、ほぼ完全な共振現象を呈することになる。

IRIを算定する際の評価長として普通は160mを採用しているが、この値は必ずしも厳守すべき数値ではない。本研究では、渦励振が発現した支間長75mの2主桁橋上を走行する自動車の応答に着目している。そこで、評価長としては橋長と等しい $L=75\text{m}$ を採用するものとした。解析で得られた、渦励振の振動振幅とIRIの関係を図-10に示す。図-10より、1cm程度以上の渦励振が発現した場合、IRIは路面凹凸にはほとんど依存せず、渦励振の振動振幅に比例して増加していることがわかる。一方、図-11と図-12は、渦励振の振動振幅と車両ばね上部の加速度応答(絶対最大値)ならびに接地圧減少率(絶対最大値)の関係をそれぞれ示したものである。これらの図より、車両ばね上部加速度と接地圧減少率は路面凹凸によって若干の差異が認めら

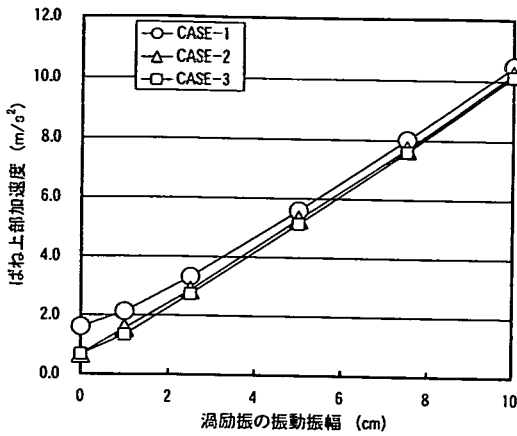


図-1 1 たわみ渦励振の振動振幅とばね上部加速度の関係

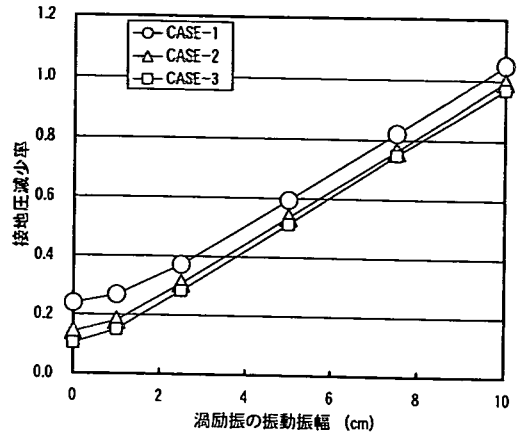


図-1 2 たわみ渦励振の振動振幅と接地圧減少率の関係

れるものの、いずれも渦励振の振動振幅に比例して増加し、渦励振の振動振幅が10cm程度に達すると車両ばね上部加速度は10m/s<sup>2</sup>程度、接地圧減少率は1.0程度にもなっていることがわかる。また、図-10を参照すれば、接地圧減少率1.0(渦励振の振動振幅10cm)に対応するIRIは490程度にも達している。それゆえ、対象とした2主桁橋では、自動車が行する風速域内で10cm以上の渦励振を絶対に発現させてはならないと言える。一方、鉄道車両では、接地圧減少率の代わりに輪重圧減少率を用い、輪重圧減少率0.8を走行安全性の目安基準としている<sup>19)</sup>。風洞実験で予想された5cm程度の渦励振では、接地圧減少率は0.5程度であり、鉄道車両の走行安全性基準を下回っている。しかしながら、車両ばね上部加速度は5m/s<sup>2</sup>程度となっており、耐風設計便覧の規定値である100galと比較して5倍も大きな加速度応答が発現する結果となっている。

図-11においてCASE-2やCASE-3の路面凹凸に着目すれば、自動車ばね上部での加速度応答が100gal程度となる渦励振の振動振幅は1cm程度で、加速度に換算すれば56gal程度となる。また、図-10を参照すれば、渦励振の振動振幅1cmに対応するIRIは50程度であることがわかる。ちなみに、乗心地係数を1.0としたJanewayの基準値(196gal)は渦励振の振動振幅が1.7cmの場合に対応し、IRIに換算すると80程度となる。一方、荒い非舗装道路を走行する場合のIRIは、8~20程度であることが知られている<sup>16)</sup>。したがって、たとえ渦励振の振動振幅が1cmであっても走行性は必ずしも良好とは言えないが、振動振幅が1cm程度のたわみ渦励振であれば自動車の走行に重大な支障をきた

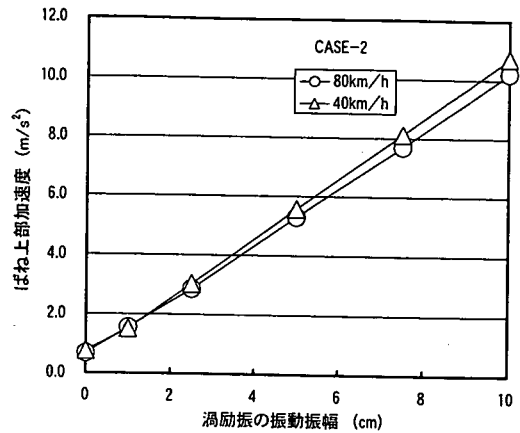


図-1 3 ばね上部加速度に及ぼす走行速度の影響(たわみ渦励振)

すことは少ないと推察される。なお、現行の耐風設計便覧でも許容振幅を100galに設定しているが、この値は渦励振が発現した主桁上での許容振幅であり、増幅効果を考慮して車両ばね上部で許容振幅を規定すべきとする本研究と相違するものである。

以上までの検討では、IRIを算定する必要もあり、走行速度を80km/hに限定していた。これに対し、渦励振が発現する風速域では速度規制が実施されることも十分に予想されることから、走行速度を40km/hに設定した場合についても動的応答解析を実施し、80km/hでの解析結果と対比することとした。車両ばね上部加速度の比較結果を図-13に示す。この図より、走行速度を40km/hに設定した場合には、自動車の通過時間(渦励振によって加振される時間)が増加し、走行速度80km/hの解析結果



より若干大きくなる傾向を示している。しかしながら、両者の差異はさほど小さくなく、走行速度の影響は比較的小さいと言える。

渦励振が発現した橋梁上を走行する自動車の動的応答解析は、実務技術者にとって難解な検討作業と考えられる。それゆえ、次章では、車両ばね上部での加速度応答と接地圧減少率の最大値を評価できる簡易式を提示することとする。

## 5. 簡易評価式とその適用性

### (1) 簡易評価式

車体部（ばね上部）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ものと仮定する。また、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）を導入すれば、ばね上部の加速度応答や接地圧減少率は次式で推定できると考えられる<sup>5)</sup>。

$$\ddot{z}_{U,max} = \ddot{y}_{g,max} \times \sqrt{\frac{1+4h^2\phi^2}{(1-\phi^2)^2+4h^2\phi^2}} + C_{ra} \quad (9)$$

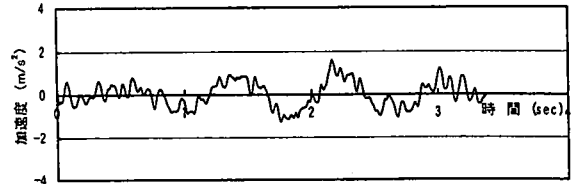
$$(\Delta P/P)_{max} = \frac{\ddot{z}_{U,max} - C_{ra}}{g} + C_{rp} \quad (10)$$

ここに、 $\ddot{z}_{U,max}$  は自動車ばね上部での最大加速度応答、 $\ddot{y}_{g,max}$  は渦励振の最大加速度、 $(\Delta P/P)_{max}$  は接地圧減少率の最大値、 $h$  は自動車ばね上部の減衰定数、 $\phi$  は加振振動数（渦励振の振動数） $f_B$  と自動車ばね上部の振動数  $f_U$  との比  $f_B/f_U$  を表す。なお、2章では橋の固有振動数  $f_B$  を基準として振動数比を  $f_C/f_B$ （ $f_C$  は自動車の固有振動数）としていたが、本簡易評価式中の振動数比は  $f_B/f_U$  で定義されていることに留意が必要である。

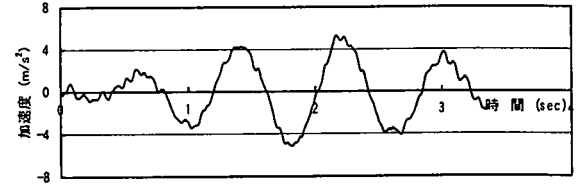
乗用車に対する補正係数  $C_{ra}$ 、 $C_{rp}$ （ $C_{rp} \geq 0$ ）は、先の論文5)では一定の値を仮定していた。しかしながら、自動車の動的応答は走行位置での変位（＝路面凹凸+渦励振の振動振幅）に依存することから、渦励振の振動振幅  $y_{max}$  が大きくなれば、図-14からもわかるように相対的に低下する。そこで、本論文では新たに以下の式(11)と式(12)を提示することとした。ただし、これらの式中に現れる0.25の数値は振動振幅に対する補正係数で、式(11)では  $1/s^2$  の次元を有し、式(12)では無次元である。

$$C_{ra} = (0.7 - 0.25 \times y_{max}) \times \sqrt{a_1/0.4} \quad (11)$$

$$C_{rp} = (0.07 - 0.25 \times y_{max}) \times \sqrt{a_1/0.4} \quad (12)$$



(1) 振動振幅が1cmの場合(80km/h)



(2) 振動振幅が5cmの場合(80km/h)

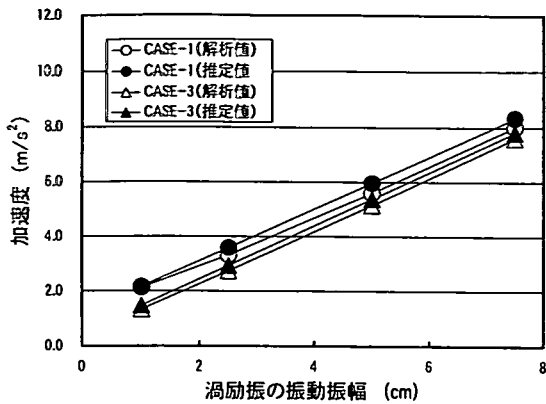
図-14 自動車のばね上部加速度波形  
(たわみ渦励振, CASE-2Aの路面凹凸)

なお、式(11)と式(12)中の  $a_1$  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、 $\sqrt{a_1/0.4}$  は平滑度パラメータが  $a_1$  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。また、0.7 と 0.07 は、渦励振が発生していない橋面上（CASE-2の路面凹凸上）を走行した場合のばね上部加速度と接地圧減少率の最大値から決定した数値である。

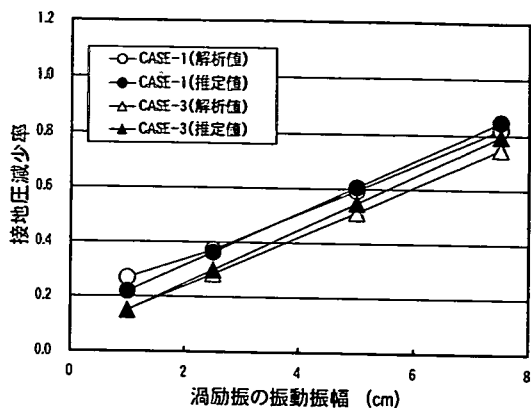
### (2) たわみ渦励振に対する適用

前章では、たわみ渦励振が発現した2主桁橋上を、表-3の諸元を有するクォーターカーモデルが80km/hで走行する場合の動的応答解析を実施した。そこで、本節では、たわみ渦励振に対する簡易評価式の適用性を検討するため、前章の動的応答解析結果（ばね上部加速度と接地圧減少率の絶対最大値）と簡易評価式による推定結果を対比することとした。動的応答解析結果と簡易評価式の推定結果を比較して図-15に示す。ただし、簡易評価式の適用にあたっては、まず、式(11)と式(12)から補正係数  $C_{ra}$ 、 $C_{rp}$  を評価した。そして、渦励振の振動振幅に対応する最大加速度  $\ddot{y}_{g,max}$ 、 $h = 0.333$ （自動車ばね上部の減衰定数）、 $\phi = f_B/f_U = 1.192/1.165 = 0.977$ （振動数比）を式(9)に代入して自動車ばね上部での最大加速度  $\ddot{z}_{U,max}$  を算定した後、式(10)から接地圧減少率の最大値  $(\Delta P/P)_{max}$  を算出するものとした。なお、これらの計算は卓上計算機で簡単に実施できる。

図-15より、若干の誤差は認められるものの、本評価式を適用すれば、たわみ渦励振が発現した2

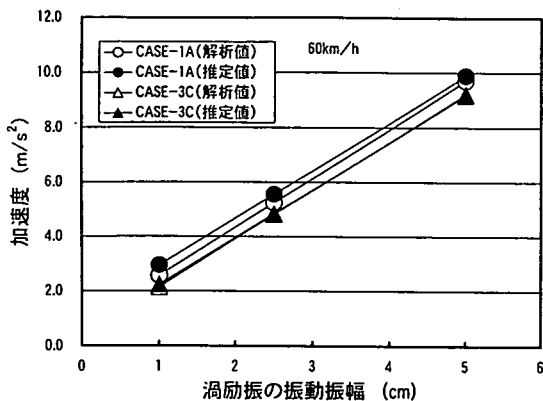


(1) ばね上部加速度

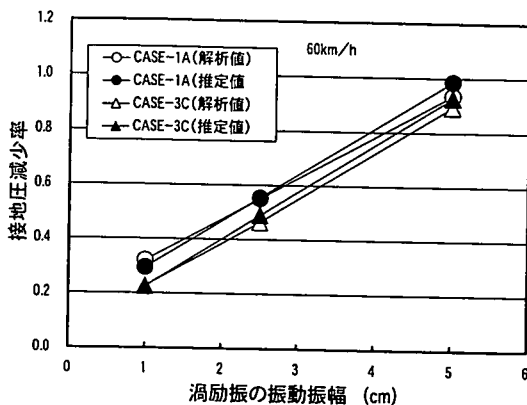


(2) 接地圧減少率

図-15 動的応答解析結果の推定値の比較 (たわみ渦励振, 80km/h)



(1) ばね上部加速度



(2) 接地圧減少率

図-16 動的応答解析結果の推定値の比較 (ねじれ渦励振, 60km/h)

主桁橋上を走行する自動車のばね上部加速度や接地圧減少率を比較的精度よく推定できることがわかる。

### (3) ねじれ渦励振に対する適用

たわみ渦励振に着目した動的応答解析ではクォーターカーモデルを採用したが、クォーターカーモデルでは車両重量そのものが実際の1/4となっている。車両重量が実際の1/4であっても動的応答はほとんど変化しないことを事前に確認しているが、ここではクォーターカーモデルの重量などを4倍した、実際に近い諸元を有する自動車モデルを検討の対象とすることとした。ところで、車両ばね上部の減衰固有振動数は、重量、ばね定数、粘性減衰係数を4倍しても変化せず1.165Hzである。一方、ねじれ渦励振の振動数は1.518Hzであることから、振動数比 $\phi$ を計算すれば $f_B/f_U = 1.303$ となり、やや共振からはずれた状態で走行することになる。そこで、ここ

表-4 ねじれ渦励振と共振する自動車モデル

重量	ばね上部 $W_U$	kN	9.612
	ばね下部 $W_L$	kN	1.444
ばね定数	ばね上部 $k_U$	kN/m	105.337
	ばね下部 $k_L$	kN/m	639.924
減衰係数	ばね上部 $C_U$	kN·s/m	7.662
	ばね下部 $C_L$	kN·s/m	-
減衰固有振動数	1次(ばね上部) $f_U$	Hz	1.504
	2次(ばね下部) $f_L$	Hz	10.100
減衰定数	1次(ばね上部) $h_U$	-	0.304
	2次(ばね下部) $h_L$	-	0.391

ではクォーターカーモデルの重量、ばね定数、粘性減衰係数をそれぞれ4倍した自動車モデルにおいて、さらに、ばね定数を $(1.518\text{Hz}/1.165\text{Hz})^2 = 1.698$ 倍、粘性減衰係数を $1.518\text{Hz}/1.165\text{Hz} = 1.303$ 倍した自動車モデルを想定することとした。ねじれ渦励振の検討

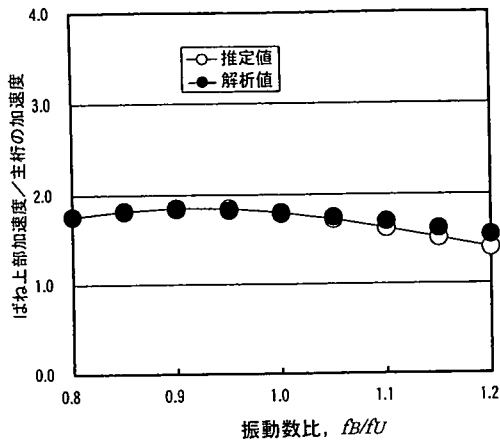


図-17 加速度の増幅率と振動数比  $f_B/f_U$  の関係  
(たわみ渦励振, 路面凹凸なし)

で採用した自動車モデルの諸元を表-4に示す。なお、ここで、ばね下部のばね定数を1.698倍しなかったのは、提案した簡易評価式の汎用性を検証するため、自動車のばね上部とばね下部の振動数比や減衰定数をクォーターモデルと相違させるためである。

端主桁中央点での鉛直方向最大振幅が 0.01m ( $0.201^\circ$ ), 0.025m ( $0.503^\circ$ ), 0.05m ( $1.005^\circ$ ) のねじれ渦励振が発現した場合を想定し、上述の自動車モデルが端主桁上を走行する場合について、動的応答解析結果と簡易評価式による推定結果を対比することとした。ただし、本節の動的応答解析では、車両の走行速度を 60km/h に設定している。対比結果を図-16に示すが、若干の誤差は認められるものの、簡易評価式による推定結果は動的応答解析結果と比較的良く一致していることがわかる。それゆえ、本評価式を適用すれば、たわみ渦励振のみならず、ねじれ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も比較的精度よく推定できると言える。なお、この知見は、振動数と振動モードおよび振動振幅はたわみ渦励振と異なるものの、ねじれ渦励振であっても鉛直方向のばね上部加速度を対象とした検討であることを考えれば十分に理解できる。

#### (4) 渦励振と自動車の共振現象に対する考察

以上までの議論では、渦励振と自動車の振動数が接近した場合に共振現象が生じるという考えに立脚し、振動数比  $\phi = f_B/f_U$  が  $\phi = 1.0$  の条件で動的応答解析や簡易評価式を適用してきた。また、逆に、渦励振と自動車の振動数が接近して  $\phi = 1.0$  とならない限り、自動車には大きな動的応答は生じないと理解されている実務技術者も多いと思われる。しかしながら、渦励振が発生した橋梁上を走行する自動車の共振現象については、橋梁分野における従来の共

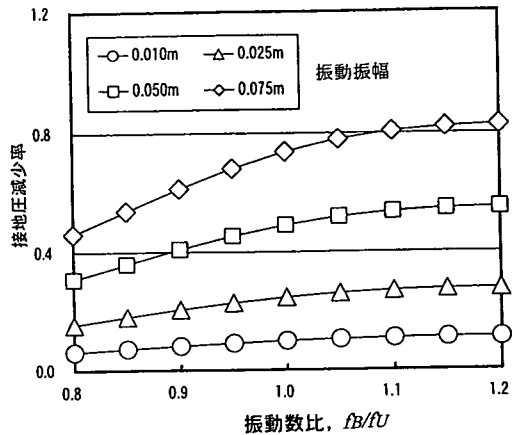


図-18 接地圧減少率と振動数比  $f_B/f_U$  の関係  
(たわみ渦励振, 路面凹凸なし)

振現象と異なる理解が必要である。以下では、簡易評価式を適用して、渦励振が発生した橋梁上を走行する自動車の共振現象について考察する。

本節では、簡単のため、式(9)と式(10)において補正係数  $C_{ra}$ ,  $C_{rp}$  をそれぞれ 0 とした場合(路面凹凸を無視した場合)について考える。たわみ基本モードの渦励振に着目し、自動車の振動数 ( $f_U = 1.165\text{Hz}$ ) は変化させないで、渦励振の振動数のみを変化させた場合 ( $\phi = f_B/f_U = 0.8 \sim 1.2$  の場合) の最大加速度応答を簡易評価式で計算した。その結果を図-17に示す。ただし、この図において、縦軸は自動車の加速度を主桁の加速度で除して無次元化しており、加速度の増幅率を表している。また、図中には、時速 80km/h でクォーターカーが走行した場合の動的応答解析結果を黒塗り記号で付記している。簡易評価式では自動車をばね上部のみの 1 自由度系にモデル化しているのにも係わらず、簡易評価式の推定結果は動的応答解析結果と比較的良く一致していると言える。それゆえ、簡易評価式の推定結果にもとづく以下の考察は十分に妥当なものである。

図-17から、加速度の増幅率には鋭いピークが認められず、振動数比が幾分変化しても増幅率は大きく変動していないことがわかる。また、共振点に対応する振動数比は  $\phi = 1.0$  ではなく  $\phi = 0.9$  付近となっている。これらは、自動車の減衰定数が  $h = 0.333$  (対数減衰率  $\delta$  に換算すると  $\delta = 2.092$ ) ときわめて大きいことに起因するものである<sup>20)</sup>。したがって、渦励振が発生した 2 主桁橋上を走行する自動車では、図-2と図-3において  $f_C/f_B = 1.0$  付近だけでなく比較的広い振動数比の範囲で共振現象が生じることに留意する必要がある。なお、振動数比  $\phi = 1.0$  で加速度の増幅率が 1.0 を超えて 1.8 程度もの値に達

しているが、これは自動車の減衰定数が  $h = 0.333$  と非常に大きいものの、加速度の増幅率が 1.0 となる減衰定数  $h = 0.5$  よりも小さいことを考えれば理解できる<sup>20)</sup>。一方、式(9)と式(10)からわかるように、図-17の結果に渦励振の最大加速度  $\ddot{y}_{g,max}$  を乗じた後、重力加速度  $g$  で除すれば接地圧減少率の最大値が得られる。図-18はこのようにして算出した接地圧減少率を示したものである。図-18から、接地圧減少率は共振点である  $\phi = 0.9$  付近の振動数比では最大とはならず、振動数比の増加とともに上昇していることがわかる。これは、振動数比が幾分変化しても増幅率は大きく変動しないのにも関わらず、渦励振の加速度は振動振幅が同じであっても2主桁橋の振動数が上昇すれば増大するためである。

以上に述べた考察より、最大支間長が 60m~90m 程度の2主桁橋（少数主桁橋）で渦励振が発生すれば、その上を走行する多くの自動車が共振現象で大きな動的応答を呈すると言える。したがって、風洞実験で渦励振が発現すると予想された少数主桁橋では、渦励振の許容振幅と自動車の走行安全性について詳細な検討が必要であると考えられる。

## 6. まとめ

本論文は、自動車の固有振動数を計測するとともに、渦励振が発生した2主桁橋上を走行する自動車の動的応答解析を実施して自動車の走行安全性について考察を加えたものである。得られた主要な知見を以下にまとめる。

- (1) 自動車の固有振動数は車種によって変化し、今回の計測では最小が 1.108Hz、最大が 2.095Hz で、平均値は 1.614Hz であった。
- (2) 現在までに架設された代表的な少数主桁橋と自動車の固有振動数を対比した。その結果、利別川第一橋（最大支間長 86.5m）や宿茂高架橋（最大支間長 85m）では、橋の固有振動数とほぼ一致するような自動車が走行する可能性があることがわかった。
- (3) 1.192Hz のたわみ渦励振が発生した2主桁橋（支間長 75m）上をクォーターカーモデル（ばね上部の振動数は 1.165Hz）が 80km/h で走行する場合の動的応答解析を実施し、IRI（国際ラフネス指数）を算定した。その結果、接地圧減少率が 1.0 に達する渦励振の振動振幅は 10cm 程度であり、IRI に換算すると 490 程度となった。また、たわみ渦励振の振動振幅 1cm に対応する IRI は 50 程度であった。この値は荒い非舗装道路を走行する場合の IRI よりも

大きく、走行性は必ずしも良好とは言えないが、自動車の走行に重大な支障をきたすことは少ないと推察された。

(4) たわみ渦励振の振動振幅 1cm を加速度に換算すると 56gal 程度となるが、自動車のばね上部では増幅効果で 100gal 程度の加速度が生じた。現行の耐風設計便覧では許容振幅を 100gal に設定しているが、この値は渦励振が発現した主桁上での値である。それゆえ、耐風設計便覧を準拠して自動車の走行安全性を評価する場合には、増幅効果を適切に考慮し、自動車ばね上部における許容加速度を設定する方が合理的である。

(5) 路面凹凸の寄与を表す補正係数  $C_{ra}$  と  $C_{rp}$  を導入し、渦励振が発生した橋梁上を走行する乗用車の加速度応答や接地圧減少率を推定できる簡易式を提案した。また、数値計算例から、本評価式を適用すれば、たわみ渦励振のみならず、ねじれ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比較的精度よく推定できることを提示した。

(6) 渦励振が発生した2主桁橋上を走行する自動車の共振現象については、橋梁分野における従来の共振現象と異なる理解が必要である。すなわち、加速度の増幅率には鋭いピークが認められず、振動数比が幾分変化しても増幅率は大きく変動しない。また、共振点に対応する振動数比は  $\phi = 1.0$  ではなく  $\phi = 0.9$  付近にある。これらは、自動車の減衰定数が  $h = 0.333$ （対数減衰率  $\delta$  に換算すると  $\delta = 2.092$ ）ときわめて大きいことに起因するものである。したがって、渦励振が発生した2主桁橋上を走行する自動車では、比較的広い振動数比の範囲で共振現象が生じる。

(7) 最大支間長が 60m~90m 程度の2主桁橋（少数主桁橋）では、渦励振が発生すればその上を走行する多くの自動車が共振現象で大きな動的応答を呈する。したがって、渦励振の許容振幅と自動車の走行安全性について詳細な検討が必要である。

少数主桁橋は構造減衰が比較的小さく、その断面形状と相まって自動車が走行する 25m/s ~ 30m/s 程度以下の風速域において渦励振が発生する可能性があるとして強く危惧されている。このような状況のもと、渦励振が発現した少数主桁橋上を走行する自動車の走行安全性について論じた本論文が、実務に携わる橋梁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) 日本道路協会編：道路橋耐風設計便覧，1991年7

- 月.
- 2) 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.
  - 3) 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.
  - 4) 松本 勝，白石成人，福井幸夫，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.
  - 5) 米田昌弘，大枝征尚，尾崎直人：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，Vol.46A，構造工学論文集，pp.1043～1053，2000年3月.
  - 6) 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.
  - 7) 山田 均，上島秀作，枝元勝哉，台原 直，澤田繁樹，篠原修二：少数主桁橋梁の耐風性，橋梁と基礎，pp.37～42，2002年2月.
  - 8) 景山克三，景山一郎：自動車力学，理工図書，pp.183～199，1995年.
  - 9) 橋 吉宏，高橋昭一，山中 治，吉岡昭彦，牛島祥貴，土角 学：PC床版2主桁橋「ホロナイ川橋」の載荷試験，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集，I-A341，1996年9月.
  - 10) 大垣賀津雄，西尾研二，山本晃久，石毛立也，中村 元，川尻克利，長井正嗣：千鳥の沢橋—PC床版連続合成2主桁橋—の実橋振動試験，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，I-B253，1999年9月.
  - 11) 水口和之，西星匡博：PC床版連続合成2主桁橋（日計平高架橋）の実橋振動試験，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，I-B103，2000年9月.
  - 12) 中村 元，宮越 信，藤浪紀雄，橋 吉宏，畠中真一，枝元勝哉：利別川第一橋（PC床版連続合成2主桁橋）の実橋振動試験，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，I-B108，2000年9月.
  - 13) 雨森慶一，中嶋浩之，岡田 創：宿茂高架橋の実橋振動試験，バコーポレーション技報，No.14，pp.38～43，2001年3月.
  - 14) 植田利夫，山口映二，猪原 茂：合理化構造型式2主桁橋梁の空力振動特性，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，I-B61，2000年9月.
  - 15) 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.
  - 16) 笠原 篤，加藤昌太郎：国際ラフネス指数，舗装，Vol.26，No.7，pp.24～26，1991年7月.
  - 17) マイケル W.セヤーズ（笠原 篤，関口幹夫，加藤昌太郎 訳）：道路縦断プロファイルからのIRIの算出（上）：舗装，Vol.31，No.7，pp.21～27，1996年7月.
  - 18) 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.
  - 19) 小松定夫：風的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.
  - 20) 戸田盛和：振動論，培風館，pp.10～13，1987年11月.

(2002.3.8 受付)

## DYNAMNIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF A RUNNING VEHICLE ON THE OSCILLATING PLATE GIRDER BRIDGE

Masahiro YONEDA

Plate girder bridges have been recently planned and constructed in our country because of economical reason. Plate girder bridges are prone to oscillation due to wind such as a vortex excitation. Therefore, it will be necessary to examine the dynamic response characteristics of a moving vehicle on the oscillating plate girder bridge. In this paper, measurements were carried out to grasp the natural frequency of standard-sized cars. The dynamic response characteristics of moving vehicles on a wind-induced oscillating bridge are investigated through the numerical simulation analysis to check the driveability of vehicle on such a bridge. A simplified method for evaluating the dynamic responses of the vehicle is also proposed with the required accuracy in engineering.