

プロフィールメータでの測定路面から実路面への近似法の提案

A proposal method to reproduce real road surface roughness from measurement data given by profile meter

讃岐康博* , 梶川康男** , 深田宰史*** , 杵本正信****

Yasuhiro SANUKI, Yasuo KAJIKAWA, Saiji FUKADA, Masanobu SUGIMOTO

*株式会社フジエンジニアリング (〒532-0002 大阪府大阪市淀川区東三国5丁目5番28号)

(金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻)

**工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2丁目40番20号)

***博(工) 金沢大学大学院助手 自然科学研究科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2丁目40番20号)

****工博 株式会社フジエンジニアリング (〒532-0002 大阪府大阪市淀川区東三国5丁目5番28号)

Device called 3m or 8m-profile meter are used to measure road surface roughness. However, the measurement data given by these devices are different from real existence road surface roughness, because of own length. The measurement data are influenced by period of road surface roughness. In this study, we investigated the problem of measurement data given by profile meter using vehicle model. And we proposed a method that can reproduce real existence road surface roughness from measurement data. The validity of this method is confirmed comparing acceleration amplitude of vehicle and analytical result moving on the reproduced road surface. As the results, relation between the period of road surface roughness and vehicle velocity, the dynamic response of the bridge was greatly influenced.

Keywords : profile meter, road surface roughness, dynamic response analysis

1. まえがき

近年、建設分野においても、造ったものをいかに維持管理していくかを問われる時代、さらに「快適空間の創造」や「生活環境の保全」等、ソフト面にも配慮しなければならない時代へと突入している。

橋梁を取り巻く環境も例外ではなく、設計時には予想しなかった耐久性に関する早期の劣化¹⁾や、広義の使用性ともいえる振動苦情などの環境問題も表面化²⁾している。特に、任意の走行車両による橋梁の動的挙動に起因する種々の振動問題については、画一的な対策ではなく発生原因や立地条件そして住民の声も考慮した最適な対策工の検討が求められている。

振動問題に対する対策工の検討を行うに当たっては、苦情の要因となる振動の発生原因の究明調査が重要であると共に、種々の対策工の対策効果を予測し得る動的応答解析を用いたシミュレーション手法の確立が重要である。シミュレーション手法を確立するためには、動的応答解析の前提条件である路面、走行車両および橋梁構造の動的挙動を再現できる適切なモデル化が重要な課題となっている¹⁾。このうち、車両についてはローリングやピッチング挙動を表現できる、詳細な3次元立体車両モ

デルが種々開発されている³⁾。また、構造物についても上下部構造を含めた3次元モデルでの研究が、鋼鉄桁橋⁴⁾、コンクリート橋^{5), 6)}、斜張橋^{7), 8)}など数多く行われている。しかし、路面については、交通運用上簡単に車線規制ができないこともあって、その平坦性のデータを採取しにくい面がある。また、データが採取されたとしても、平坦性データは3mあるいは8mのプロフィールメータによって測定された路面(以後、プロフィール路面という)がほとんどで、実際の路面の凹凸をどこまで忠実に再現できているのか疑問である。数値シミュレーション手法を確立するためには、橋梁振動の入力源となる路面の凹凸性状を正確に再現することも重要となる。

本研究では、3m、8mのプロフィールメータにより得られた路面平坦性データの問題点を指摘するとともに、これらプロフィールメータにより得られたデータから、実際の路面をより近似し再現する手法について提案している。

また、橋梁の動的応答に関し、路面の凹凸波長と車両の走行速度との関係から得られる加振振動数が、車両のばね上振動、さらには橋梁の固有振動数と密接な関係にあり、これらが近接する場合には、非常に大きな応答となることを、実測データならびに動的応答解析から検証している。

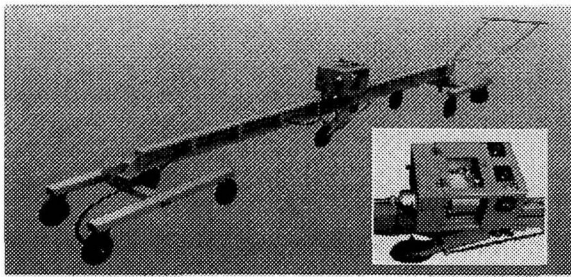


図-1 3m プロフィールメータ

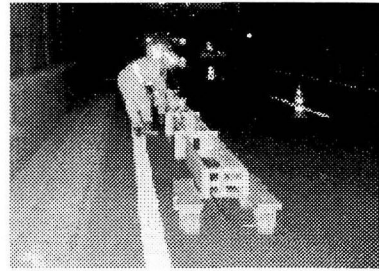


図-2 8m プロフィールメータ

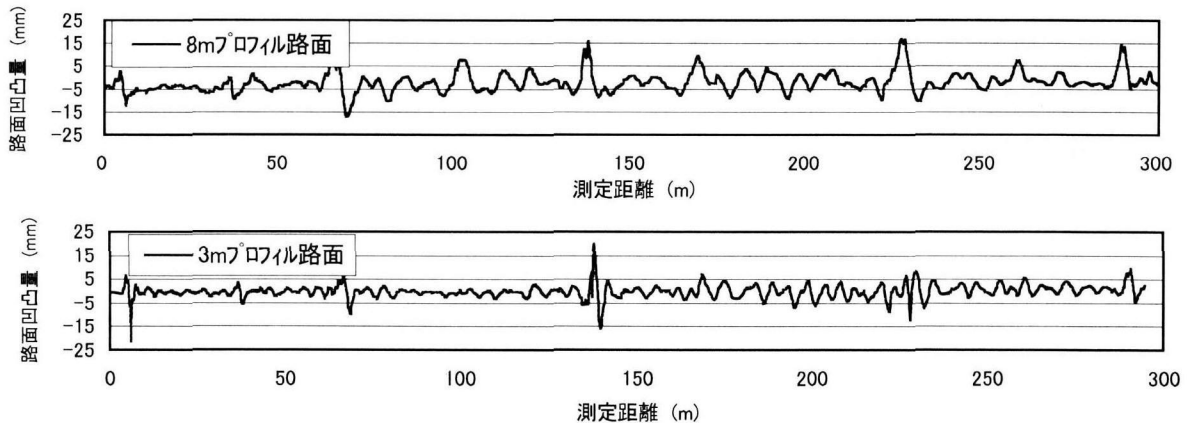


図-3 3m, 8m プロフィール路面の凹凸波形比較

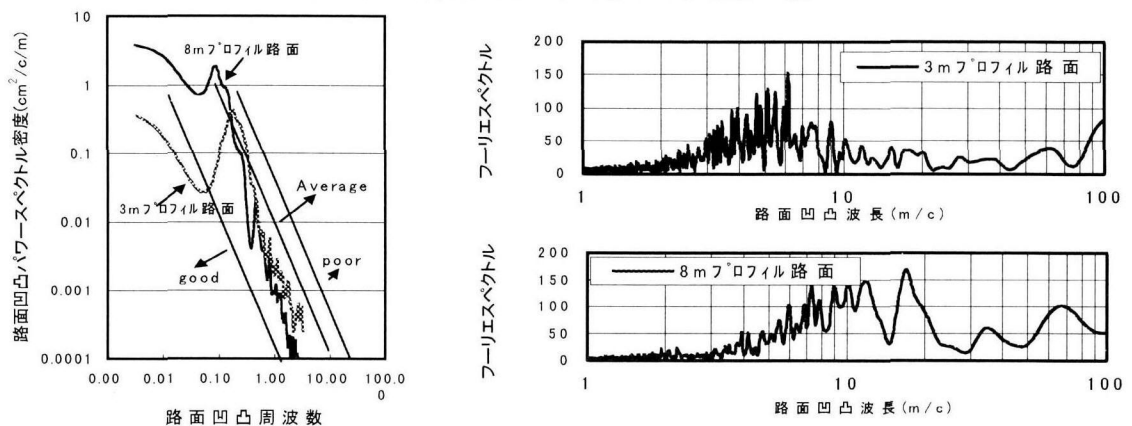


図-4 3m, 8m プロフィール路面のスペクトル比較

2. プロフィール路面の特徴

2.1 プロフィールメータ

プロフィールメータは、図-1、図-2 に示すように各 4 個の車輪よりなる前後 2 台の基準台車を、1 本の基準梁で連結して基準面を形成する構造となっている。この基準梁の中央部に路面の凹凸によって上下する測定車輪があり、この動きを記録計に導いて凹凸波形を記録するものである。現在、基準梁の長さが 3m と 8m のものが多用されており、それぞれ 3m プロフィールメータ、8m プロフィールメータと呼んでいる。なお、図-2 の 8m プロフィールメータは、従来の車両牽引方式を人力牽引方式に改良するため、基準梁の構造をトラス構造から箱桁断面構造に

変更したもの⁹⁾である。

2.2 3m と 8m プロフィール路面の比較

図-3 は、2@30m+2@35m+3@30m+(30m+32m) のジョイントレス工法¹⁰⁾により 2~3 径間が連結化された高架橋付近の約 300m 区間を、3m および 8m プロフィールメータによって測定した路面凹凸波形を示したものである。また、図-4 は、それぞれの路面のパワースペクトル密度と FFT 分析による凹凸スペクトルを示している。

図-3、図-4 によると 3m および 8m プロフィール路面は、かなり異なった凹凸波形を示している。パワースペクトル密度によると、3m、8m プロフィール路面はいずれも ISO の基準¹¹⁾によれば、good から average に分類されるが、全

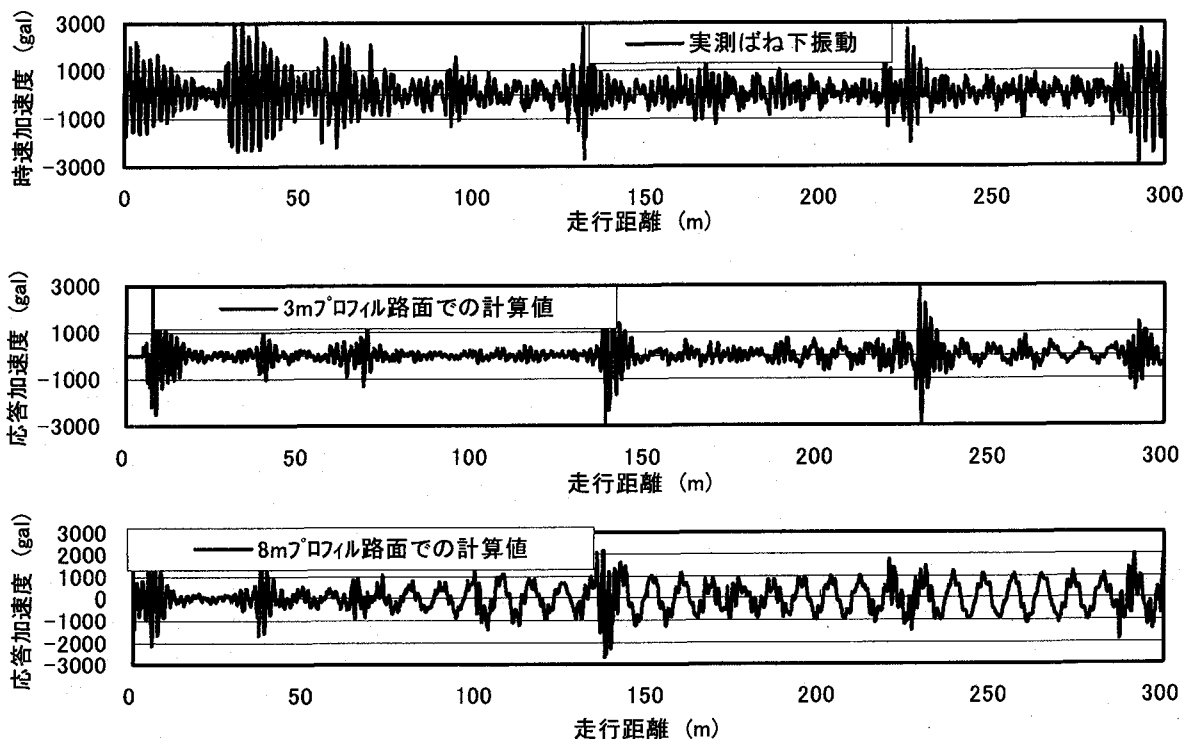


図-6 3m, 8m プロファイル路面でのばね下振動のシミュレーション結果比較

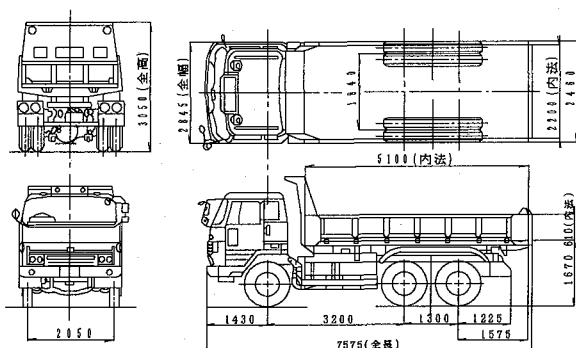


図-5 試験車両

体的に 3m プロファイルメータでは長周期成分が少なく、一般的に言われている¹²⁾ように、基準梁長より長い長周期成分がうまく検出できていないといえる。また、それぞれの路面の卓越凹凸波長は、FFT 分析結果に示す凹凸波長 (m/c) で比較すると、3m プロファイルメータでは 6m/c 以下に分布しているが、8m プロファイルメータでは 6m/c 以上に分布しており、これらの結果からは両者のプロファイル路面は異なった路面といわざるを得ない。

このように、同一路面でもプロファイルメータの機種が異なれば得られる路面が異なるということは、車両—橋梁系の動的応答解析を基本とするシミュレーション解析を行う場合の橋梁への加振力が異なるということ、シミュレーション結果を大きく左右することになる。

2.3 プロファイル路面での車両応答解析

この見かけ上異なった 2 種類の路面に、11 自由度のモ

デル車両(詳しくは後述)を走行させ、車両振動の動的応答解析を行い、図-5に示すような試験車両の実測ばね下振動の時刻歴と比較した。

解析結果を図-6に示すが、ばね下振動においては、3m プロファイル路面と 8m プロファイル路面には大きな差異があり、8m プロファイル路面において長周期成分の卓越が目立つ。また、実測のばね下振動と比較すると、いずれの路面でも、0m~75m 区間の衝撃的な振動をうまく再現することができていない。

このように路面の凹凸波形は、橋梁や地盤、低周波空気振動の数値シミュレーションの精度に大きく影響するため、プロファイル路面から実際の路面を精度良く再現する手法が重要となる。

3. プロファイル路面の問題点

3.1 プロファイル路面の概念

プロファイルメータによる測定値 (P_n) は、図-7に示すように、基準梁両端部での路面高さ (G_a , G_b) と、測定車輪位置の路面高さ (G_n) から式(1)のもとに計算できる。ただし、基準梁と軸線がずれている基準台車 4 個の車輪(車輪幅 0.4m)は、測定車輪と同一凹凸路面¹²⁾を移動すると仮定している。

$$P_n = G_n - \frac{G_a + G_b}{2} \quad (1)$$

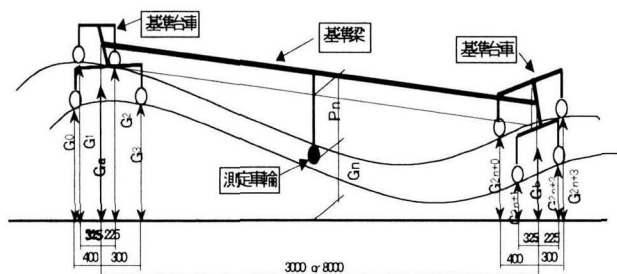


図-7 プロフィールメータの測定概念

ここで、

$$G_a = \frac{\left(G_0 - \frac{0.4}{0.7}(G_0 - G_3)\right) + \left(G_1 - \frac{0.35}{0.55}(G_1 - G_2)\right)}{2}$$

$$G_b = \frac{\left(G_{0,2n} - \frac{0.4}{0.7}(G_{0,2n} - G_{3,2n})\right) + \left(G_{1,2n} - \frac{0.35}{0.55}(G_{1,2n} - G_{2,2n})\right)}{2}$$

(2)

式(1)の第2項は、2台の台車で形成する基準面のうち測定車輪位置での高さ(ここでは平均基準面という)である。プロフィールメータによる測定路面は、測定車輪位置での路面高さと平均基準面高さとの相対変位を表している。

3.2 式(1)の妥当性の検証

式(1)の妥当性を検証するため、ジョイント近傍20m区間でのレベル測量(実路面と仮定：上段図)および3m, 8mプロフィールメータでの各測定結果(中段図)と、レベル測量結果をもとに式(1)により計算した計算上のプロフィール路面(下段図)を比較し、図-8に示した。

図-8によると、計算上のプロフィール路面は実際のプロフィール路面をほぼ再現しているといえ、式(1)による計算結果は妥当であるといえる。

3.3 プロフィール路面の問題点

プロフィールメータによって得られた路面凹凸は、式(1)に示すように、平均基準面からの相対変位であり、基準梁が有限長であること、基準台車が2組4輪で構成されているため、実際には路面の凹凸波長の影響を受け、測定路面と実路面とは異なった凹凸特性を示す。

図-9は、周期の異なる三角関数(正弦曲線)でモデル化した擬似路面と式(1)から求めた3m, 8mプロフィールメータに相当する計算上のプロフィール路面を比較したものである。図-9に示すように、3m, 8mいずれのプロフィールメータによっても、基準梁長より波長の短い短周期の凹凸から長周期の凹凸まで、凹凸波長は比較的確に検出で

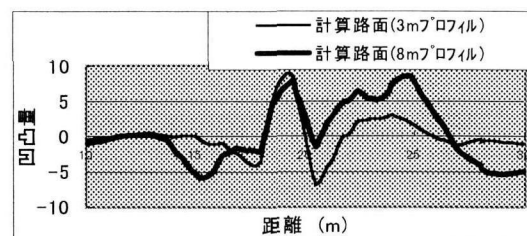
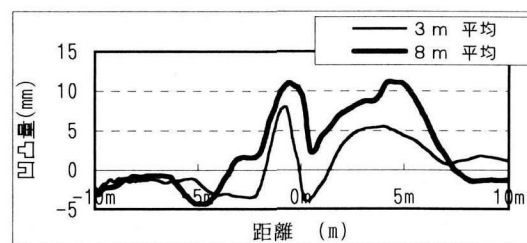
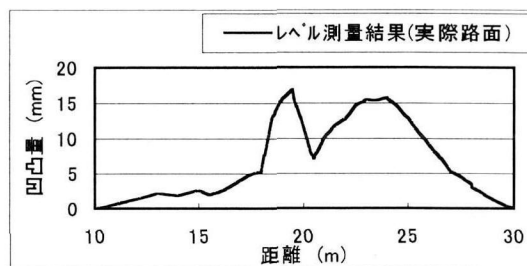


図-8 計算式(1)の妥当性の検証

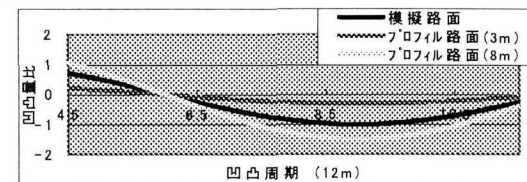
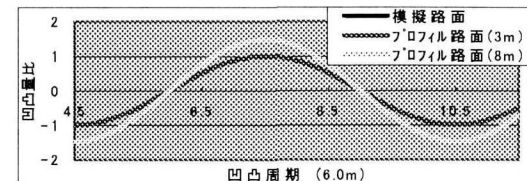
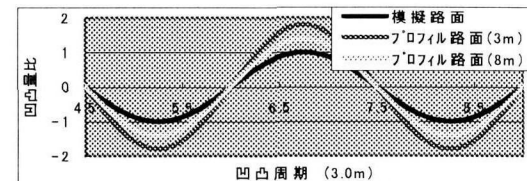
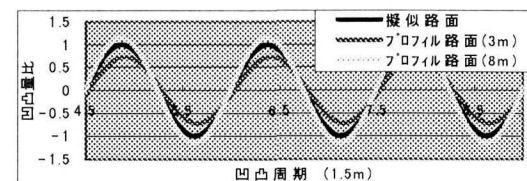
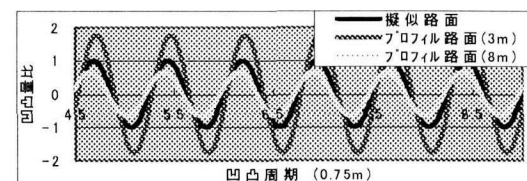


図-9 プロフィール路面の凹凸波長との関係

きることがわかる。しかし、凹凸量は、凹凸波長によって3m, 8m いずれのプロファイルメータによっても大きく変化している。この変化の割合を、基準梁長 (L) と凹凸波長 (S) との比(L/S; 以下波長比という)をパラメータとして、およそ路面波長 1.0m/c まで計算したものが図-10である。つまり、プロファイル路面の実路面に対する凹凸波長別の応答倍率を示している。図中縦軸は、擬似路面の最大凹凸量に対する計算上のプロファイル路面の最大凹凸量の比を凹凸量比として表している。

図-10 からわかるように、凹凸量比が1, つまりプロファイルメータによって正確に路面凹凸を再現できるのは、波長比が(2n-1)/2 倍の時だけといえ、その他の波長比では何らかの補正が必要となる。特に、路面周期が基準梁長の3倍以上(波長比が0.3以下)になると、プロファイル路面は実際の路面凹凸を非常に小さく評価することになる。また、8m プロファイルメータでは、波長比が2付近でも同様に、プロファイル路面は実際の凹凸を小さく評価する。

図-11 は凹凸量比の逆数、つまりプロファイル路面から実路面を求める場合の補正係数を示したものであり、8mのプロファイルメータの波長比2付近では、プロファイル路面を最大で約9倍しないと実路面の凹凸を再現できないことがわかる。また、長周期路面についても同様、波長比が0.3以下では大きな補正を必要とする。

この長周期に関する補正值について、式(1)、式(2)をもとに検討する。路面周期が長周期化すると、各基準台車の2組4輪の相対高さに差が無くなり、 $G_0 \div G_1 \div G_2 \div G_3$, $(G_{0+2n} \div G_{1+2n} \div G_{2+2n} \div G_{3+2n})$ と仮定することができ、式(2)は次のようになる。

$$G_a = \frac{1}{2} G_0 \quad G_b = \frac{1}{2} G_{0+2n} \quad (3)$$

式(3)を式(1)に代入すると、式(4)のようになる。

$$P_n = G_n - \left(\frac{G_0 + G_{0+2n}}{2} \right) \quad (4)$$

これを、模式図で表すと図-12 のようになる。

ここで、 G_n, G_0, G_{0+2n} を擬似路面である正弦曲線で表すと、プロファイル路面は式(5)のようになる。

$$\begin{aligned} P_n &= \sin\left(\frac{L\pi}{2} + \pi x_0\right) - \left(\frac{\sin(\pi x_0) + \sin(L\pi + \pi x)}{2} \right) \\ &= \sin\left(\frac{L\pi}{2} + \pi x_0\right) - \left(\sin\left(\frac{L\pi}{2} + \pi x_0\right) \times \cos \frac{L\pi}{2} \right) \\ &= \left(1 - \cos \frac{L\pi}{2} \right) \times \left(\frac{L\pi}{2} + \pi x_0 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

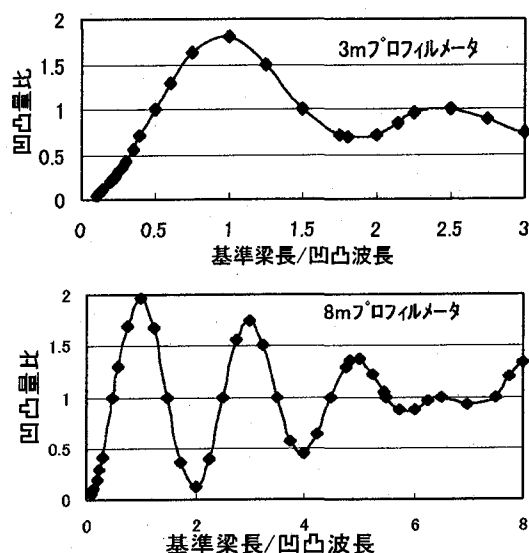


図-10 各プロファイル路面の凹凸波長と凹凸量比との関係

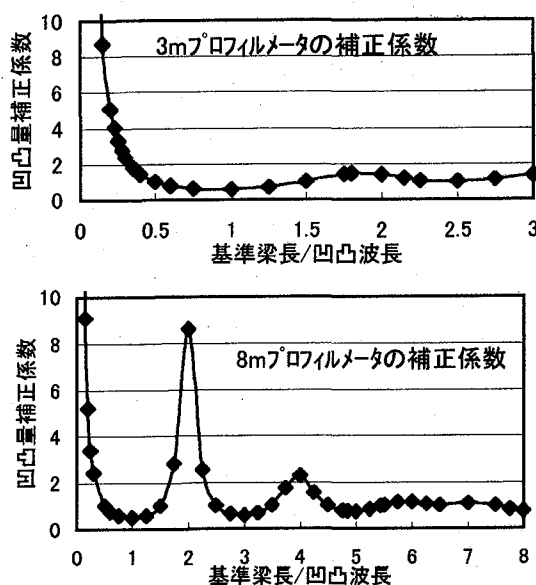


図-11 プロファイル路面の補正係数

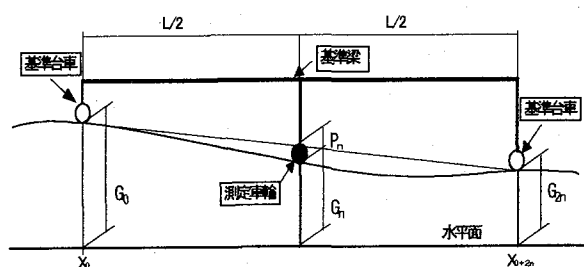


図-12 長周期路面での測定概念図

つまり、実際の路面凹凸に対してプロファイル路面は、 $(1 - \cos(L\pi/2))$ 倍の振幅になる。

ここで、 $L/2$ を波長比 L/S に置き換え、波長比をパラメータとしてプロファイル路面の最大凹凸量比(応答倍率)を計算した。その結果を簡易応答倍率として図-13

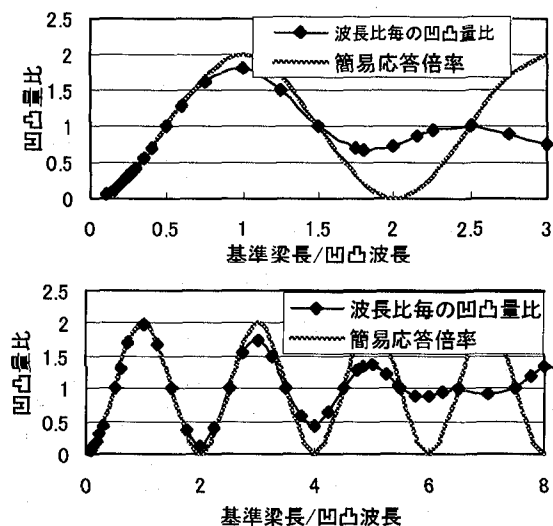


図-13 簡易計算による凹凸量比

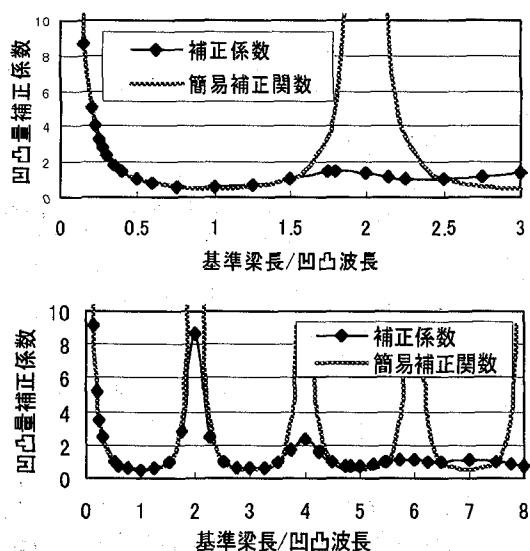


図-14 簡易補正関数

に示し、図-10 に示した波長比ごとの凹凸量比に重ね書きした。また、図-14 には簡易応答倍率の逆数、つまり簡易補正関数として、図-11 の補正係数に重ね書きした。図-14 によると、凹凸波長が約 2m~2.5m 程度、波長比で示すと 3m プロファイルメータでは 1.5 付近、8m プロファイルメータでは 3.5 付近以下の長周期に関しては、簡易補正関数で補正できることがわかる。ただし、簡易補正関数は波長比が偶数になると補正係数は無限大を示す不連続な関数となり、波長比 2 近傍ではこの簡易法では補正できない。このため、図-9 の凹凸量比の波形をある通減率 h (自由減衰振動波形の減衰定数に相当) を持った波形と仮定し、補正係数を式(6)に示す連続関数(実路面補正関数という)として求めた。

$$1/(1 - e^{(-h \times L / S)} (\cos \sqrt{(1 - h^2 \times \pi L / S)})) \quad (6)$$

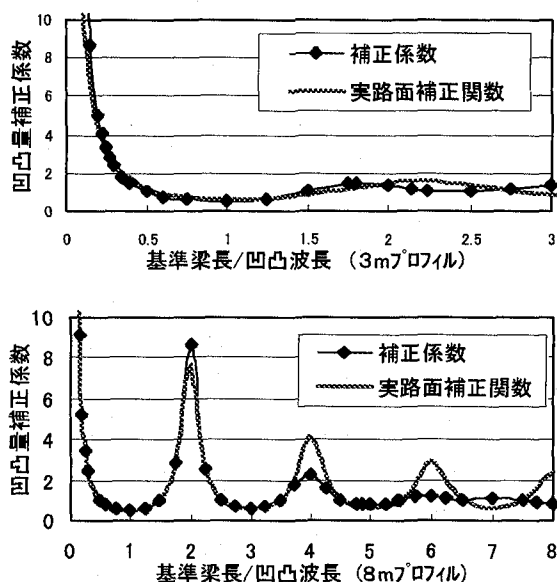


図-15 実路面再現への補正関数

その結果を図-11 の補正係数に重ね書きし図-15 に示すが、3m プロファイルメータの実路面補正関数に関しては通減率が 0.45、8m プロファイルメータの実路面補正関数に関しては通減率 0.07 が最も精度良い近似となった。

4. プロファイル路面から実路面への再現法

4.1 プロファイル路面から実路面への再現手順

プロファイル路面から実路面への再現については文献¹³⁾にもあるように、式(1)を変換した式(5)から求めようとすると、未知数の方が方程式の数よりも多いため、連立方程式を解くことはできない。この未知数の数を減らすため、最初にプロファイルメータを設置した個所の路面凹凸値をレベル測量等により求めなければならず、現実的な方法とはいえない。

$$G_n = P_n + \left(\frac{G_a + G_b}{2} \right) \quad (7)$$

ただし、

$$G_a = \frac{\left(G_0 - \frac{0.4}{0.7} (G_0 - G_3) \right) + \left(G_1 - \frac{0.35}{0.55} (G_1 - G_2) \right)}{2}$$

$$G_b = \frac{\left(G_{0+2n} - \frac{0.4}{0.7} (G_{0+2n} - G_{3+2n}) \right) + \left(G_{1+2n} - \frac{0.35}{0.55} (G_{1+2n} - G_{2+2n}) \right)}{2}$$

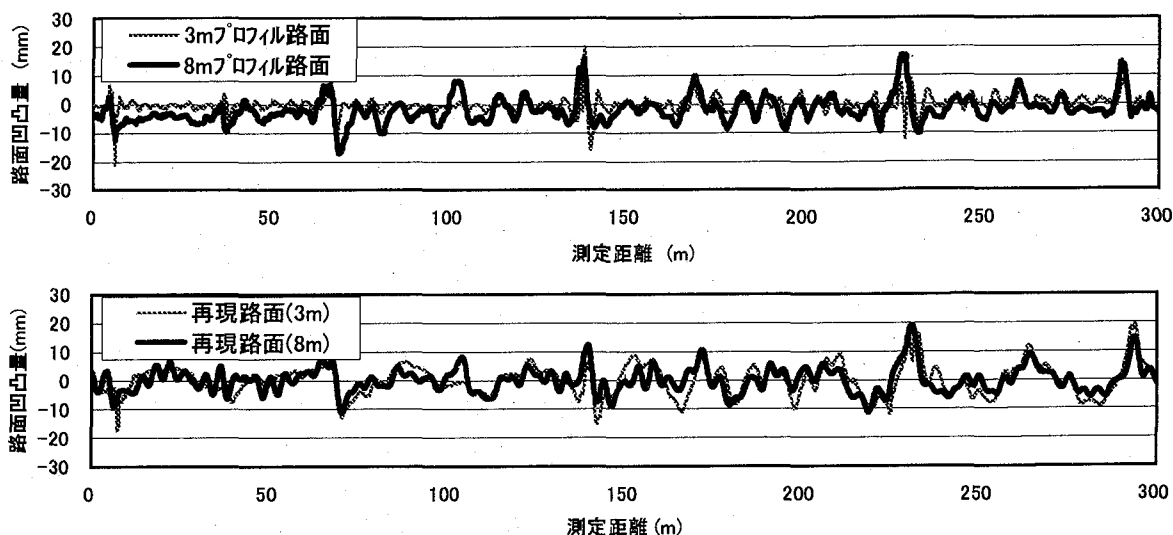


図-16 3m, 8m プロファイル路面および計算した再現路面の比較

ここでは、図-15の実路面補正関数をもとに、プロフィール路面から実路面を再現する手順について述べる。

①プロフィール路面のFFT分析

プロフィール路面をもとにAD変換からFFT分析を行い、周波数（路面波長）領域のデータに変換することにより卓越路面波長（m/cycle）を把握する。

②フーリエ振幅の補正

各フーリエ振幅に、図-15に示した補正関数、つまり $1/(1 - e^{(-h\pi L/S)}) \times (\cos \sqrt{(1-h^2)} \times L\pi/S)$ の補正係数を乗じて補正を行う。

ただし、橋梁振動の動的応答解析を目的とする場合、長周期成分については対象とする橋梁のスパン長に相当する路面波長を補正範囲の最大値とすればよい。また、補正範囲の最小値は、路面データのサンプリング間隔の2倍に相当する周期とする。

③補正後の逆フーリエ変換

各波長比の補正後のフーリエスペクトルにおける逆フーリエ変換分析を行い、実路面を再現する。

4.2 プロフィール路面から実路面の再現

4.1に示した手順をもとに、図-3に示した2～3径間のジョイントレス工法により連結化された高架橋の約300m区間の路面を再現する。なお、この区間においては、レベル測量による実路面が得られていないため、車両のばね振動により、再現路面の妥当性を検討した。つまり、図-3に示したプロフィール路面を基にした車両の動的応答計算結果（図-5参照）では、実測の車両振動と一致しないため、再現路面での車両の動的応答と実測の車両応答振動が一致するか否かで再現路面の妥当性を検討した。図-16は、3m, 8mプロフィール路面と、それぞれの路

面を基に計算した再現路面を比較したものである。なお、実路面への再現にあたっての路面波長補正範囲の最大値は、対象区間の最大径間長である35mとし、最小範囲は路面のサンプリング間隔の2倍20cmとした。図中上段の3mおよび8mのプロフィール路面は、前述したようにかなり異なった路面を示しているが、再現路面では両者の路面はほぼ一致している。ただし、8mプロフィール路面からの再現路面には4m/c程度の凹凸が、3mプロフィール路面から再現したものより顕著に卓越している違いが認められる。この再現路面の妥当性を、車両振動の実測値ならびに車両の動的応答計算(80km/h)から検証したものが、図-17である。図-17によると実測のばね下振動は、8mプロフィール路面から再現した路面での動的応答計算結果とほぼ一致し、本再現手法は妥当であるといえる。

5. 路面凹凸波長がもたらす橋梁の動的応答への影響

これまで述べた高架橋区間において、試験車両の走行位置によって、橋梁の動的応答に大きな差異が生じている。この原因をこれまで述べた実路面再現法によって得られた路面モデルならびに3次元シェル要素を用いた動的応答解析によって検証する。

5.1 解析条件

(1)対象橋梁および橋梁のモデル化

動的応答解析を行なった高架橋は、2@35m+3@30m+3@30mの計7径間である。P-1～P-4、P-4～P-6、P-6～P-8は、桁連結によりそれぞれ3径間、2径間、2径間の連続桁となっている。

この対象橋梁を、上下部構造を含めた3次元モデルにモデル化した。モデルの全体図を図-18に示す。一般的に、橋梁モデルは立体骨組み構造が中心で、高欄、地覆の曲

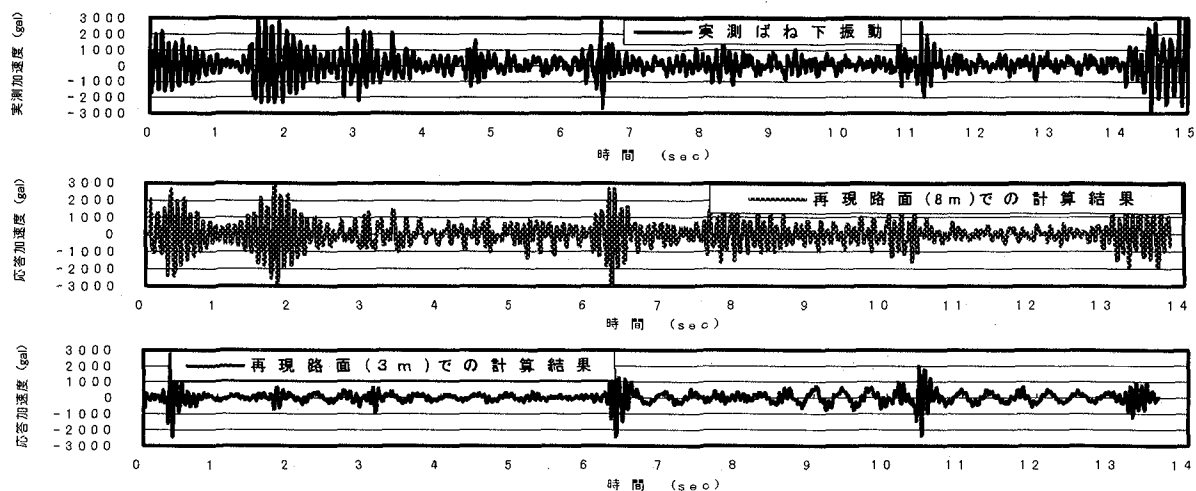


図-17 再現路面による車両の動的応答と実測値の比較

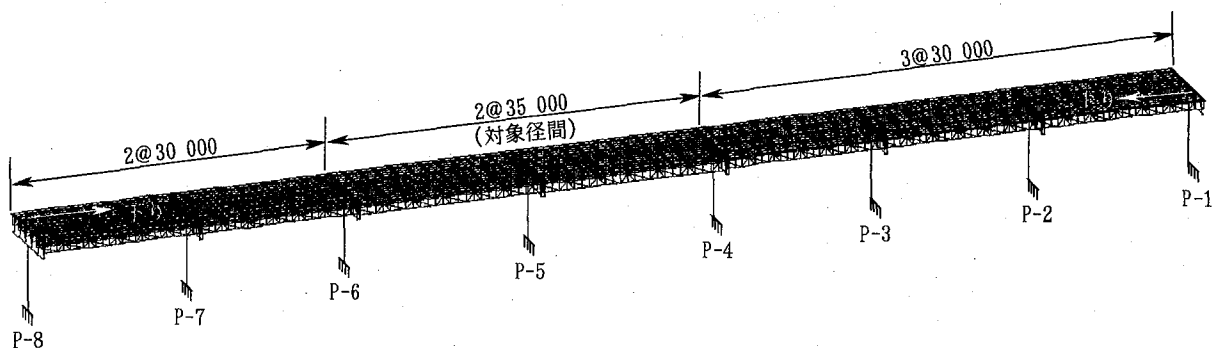


図-18 解析モデル

げ剛性への寄与や、対傾構、ラテラル、床版のねじり剛性への寄与を精度良く評価できているとは言い難い。今回、解析に用いた橋梁モデルは、実橋をできるだけ忠実に再現できるモデルとするため、図-19に示すように上部構造のうち、主桁ウェブおよび床版は、シェル要素で、対傾構、ラテラル、高欄および橋脚(梁と柱)は、梁要素でモデル化した。また、幾何学的な中立軸のずれは、オフセット部材を用いてモデル化している。

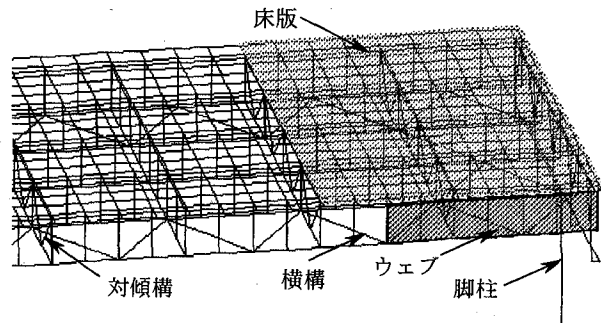


図-19 解析モデルの詳細

(2) 固有値解析

この解析モデルの妥当性を検証するため、対象径間の固有値解析を行い、実測値と比較した。

固有値解析は、サブスペース法を用いて行ない、実測で得られた対象径間の卓越振動数に対する固有値および振動モードを図-20に示した。以下の動的解析では、P-4～P-5径間中央の測点を代表例として述べるが、卓越振動数としては、実験、解析ともに、対称たわみ1次(3.2Hz付近)、ねじれ1次(3.9Hz付近)である。また、P-1～P-4径間においては、対称たわみ1次が3.3Hz付近となっており、これらのたわみ1次振動数は、車両のばね上振動数に近い値となっている。

(3) 動的応答解析

次に、車両走行による動的応答解析を行ない、実測加速度の時刻歴と比較した。動的解析では、Newmark β 法(時間間隔 0.01sec, $\beta=1/4$)を用いて直接積分法により解析した。車両モデルは図-21に示すように、左右輪での面的な加振、そして後輪タンデム軸による加振など、実際の試験車による加振状態を再現しやすい11自由度の車両モデル¹⁴⁾を用いた。車両モデルの各諸元は、実験時に使用した試験車両に近い特性を示すように、表-1の値(片側車輪分)を用いた。

たわみ 1 次振動 実測値 ; 3.28Hz 解析値 ; 3.19Hz

ねじれ 1 次振動 実測値 ; 3.85Hz 解析値 ; 3.99Hz

図-20 対象径間の固有値解析結果代表例

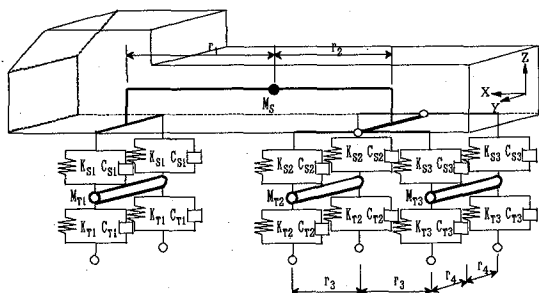


図-21 11 自由度のモデル車両

表-1 車両モデルの諸元 (片側車輪分)

総重量 (kN)			196.0
ばね上関係	ばね定数 (kN/m)	前軸 K_{S1}	1278/2
		前軸 $K_{S2} K_{S3}$	2556/2
	減衰係数 (kNs/m)	前軸 C_{S1}	2.7/2
		前軸 $C_{S2} C_{S3}$	5.4/2
ばね下関係	ばね定数 (kN/m)	前軸 K_{T1}	3549/2
		前軸 $K_{T2} K_{T3}$	7099/2
	減衰係数 (kNs/m)	前軸 C_{T1}	5.3/2
		前軸 $C_{T2} C_{T3}$	10.6/2
前軸ばね上～重心 距離 r_1 (m)			2.4
重心～後軸ばね上 距離 r_2 (m)			1.45
後軸間距離/2 r_3 (m)			0.65
左右軸間距離/2 r_4 (m)			1.0
ばね上回転慣性モーメント $\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}^2$			62.5
ばね下回転慣性モーメント $\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}^2$			0.68

ただし、回転慣性モーメントはY軸回り

橋梁モデルの減衰特性としては、対象径間のたわみ 1 次およびねじれ 1 次振動を用い、等価減衰定数 2% として、

Rayleigh 減衰 ($\alpha=4.4\times 10^{-4}$, $\beta=0.696$) を仮定した。

また、解析に用いた路面は図-22 に示すように、下り追越車線と上り追越車線であり、前項で述べた手法により実路面を再現したものを用いた。なお、両者の路面 Pr.I (区間距離当りの 6mm 幅を超える凹凸値の割合) は、表-2 に示すように、建設時の舗装路面の平坦性に関する管理基準¹⁵⁾を大幅に、そして同程度上回っている。また、図-23 の MEM(データ数: 3000, 次数: 110) に示す路面のパワースペクトル密度から分類しても、ほぼ同じ程度の悪い路面といえる。

表-2 対象路面の Pr.I

	区間距離 L (Km)	$\sum a_i$ (cm)	Pr.I ($\sum a_i/L$)
下り追越	0.22	5.5	25.0
上り追越	0.22	5.7	25.9
建設時の管理基準 (8m ² プロファイル)	アスファルト舗装 (8m ² プロファイル)	橋梁部	Pr.I ≤ 8
		土工部	Pr.I ≤ 5

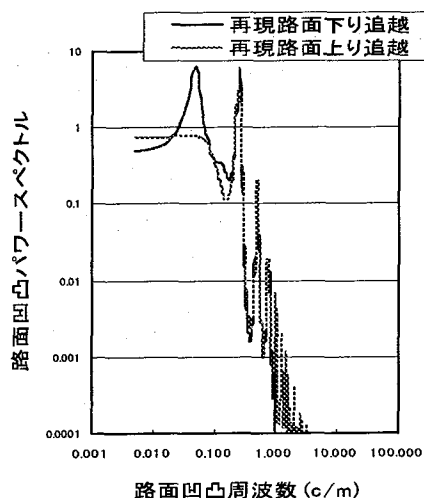


図-23 両路面のパワースペクトル密度

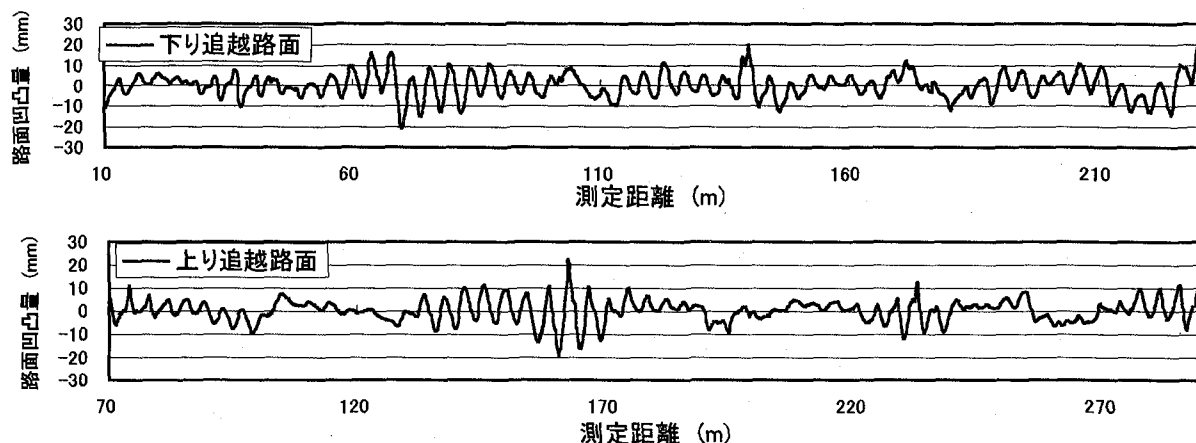


図-22 解析に用いた再現路面

5.2 実測結果と解析結果の比較

表-2、図-23 が示すように、ほぼ同じ程度の凹凸を持つ路面に対し、試験車両がそれぞれの路面を走行した時の同一橋梁の動的応答を図-24 に示した。図には、実測の加速度値とスペクトルおよび、動的応答解析によって得られた応答値とスペクトルを比較してある。

図-24 によると、試験車通過時の橋梁中央の最大加速度応答値は、下り追越車線走行時には上り追越車線走行時の約 2 倍程度の大きさを示している。この傾向は実測でも、応答解析結果からも得られている。

このように、ほぼ同じ程度の凹凸性状を持つ路面であるにもかかわらず、橋梁の応答が大きく異なる要因としては、路面の凹凸波長の卓越傾向が異なることが考えられる。このため、図-25 に示す高速フーリエ変換法 (FFT データ数: 4096, サンプリング間隔: 0.1m) によるスペクトルで確認した。図-25 の下段の図は、両者の違いを明確にするため、凹凸波長 (m/c) 5m~15m の部分を拡大したものである。図-25 の下段の図によれば、下り追越車線には 6m~7.6m, 9m 付近および 15~20m 付近の凹凸波長が、上り追越し車線に比べ卓越していることが分かる。特に 6~8m の凹凸波長の卓越の違いが重要となる。

試験車は 80km/h で走行しているため、卓越凹凸波長を秒速(22.2m)で除した加振周期で橋梁を加振することになり、加振周期と橋梁の固有周期が近接する場合には、共振現象によって橋梁の応答が増大する。当該橋梁では、路面凹凸波長が 6~8m 付近で橋梁の固有振動数と一致する。表-3 は、各車線の卓越凹凸波長と加振周波数の関係をまとめたものであるが、両車線で最も大きく異なっている 16.95m/c は、加振周波数が 1.31Hz と橋梁の固有振動数とはかけ離れており、橋梁応答の違いをもたらす要因にはならないといえる。加振周波数から判断すると、対象径間の固有振動数に近接する 6.62m/c, 7.58m/c の波長

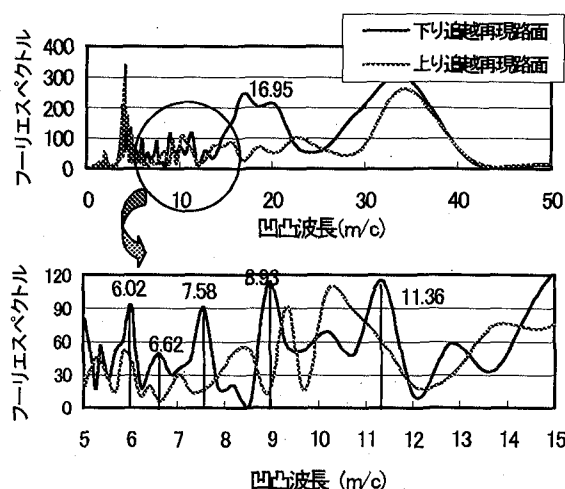


図-25 両路面の卓越凹凸波長の違い

表-3 卓越凹凸波長と加振周波数の関係

	卓越凹凸波長 (m)	車両の速度 (m/sec)	加振周期 (sec)	加振周波数 (Hz)
下り追越	6.02	22.2	0.27	3.69
	6.62	22.2	0.30	3.35
	7.58	22.2	0.34	2.93
	8.93	22.2	0.40	2.49
	11.36	22.2	0.51	1.95
	16.95	22.2	0.76	1.31
上り追越	5.85	22.2	0.26	3.79
	8.55	22.2	0.39	2.60
	9.35	22.2	0.42	2.37
	10.2	22.2	0.46	2.18

を持つ凹凸が要因であると考えられる。図-26 は下り追越車線を対象に、走行速度を 50km/h, 80km/h, 100km/h に変化させた場合の、車両のばね上振動の応答を計算したものである。図によると、走行速度の差異による車両ばね上振動の応答の変化が明確に現れているが、やはり車両振動においても走行速度との関係で決まる、加振周波

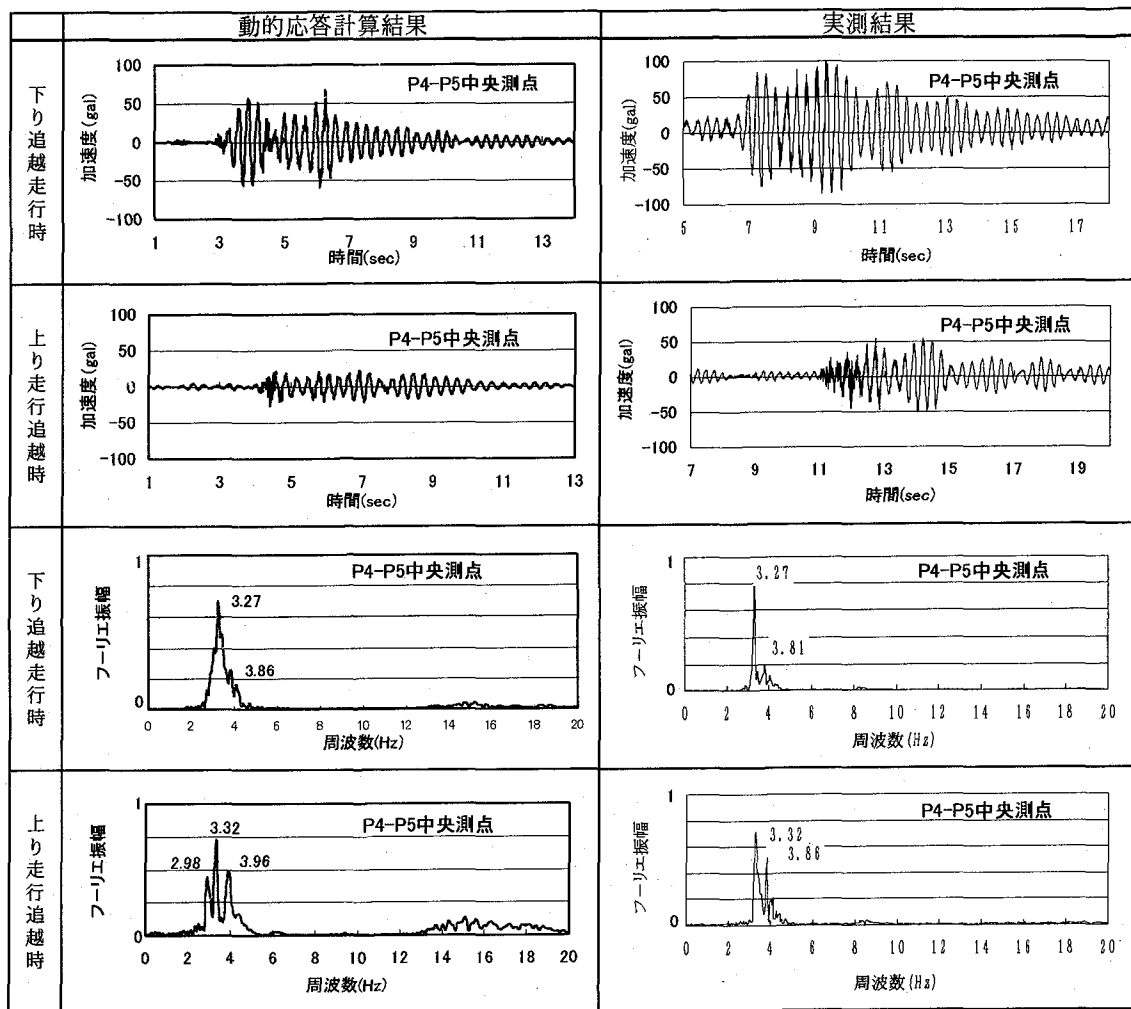


図-24 走行位置の違いによる橋梁の動的応答の差異

数の影響を受けている。つまり、ばね上振動の固有振動数も3.2Hz付近に存在するため、前述した6.62m/c、7.58m/cの波長を持つ凹凸の影響を受けて共振し、80km/h走行時が最も大きな応答を示している。

6. まとめ

低周波空気振動を含む橋梁環境振動問題に対し、実際に対策工を実施する前に、振動低減効果の判定や予測が解析上で検討できる、数値シミュレーション手法の確立が急がれている。数値シミュレーションは動的応答解析を基本として行なわれるが、実橋をできるだけ忠実に再現できる解析モデルを構築するかが、シミュレーション精度を左右する。本研究では解析モデルのうち、路面、および橋梁モデルについて検討した。検討結果から次のような知見を得た。

- (1) 3m, 8m プロフィールメータは、それぞれの基準梁長の $(2n-1)/2$ 倍の凹凸波長は正確に再現するが、その

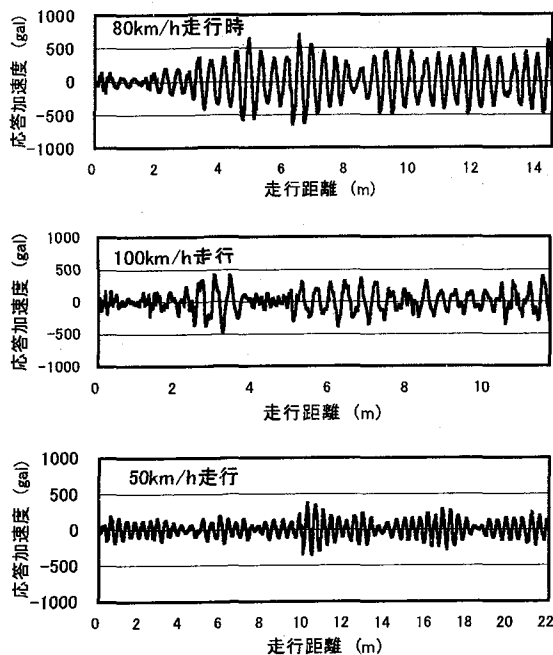


図-26 走行速度による車両ばね上振動の応答の違い

他の波長比において実路面を再現するには補正が必要となる。

- (2) 波長比が0.3以下(基準梁長の3倍以上)の長周期の路面については、大きな補正が必要で、簡易補正関数で補正できる。
- (3) プロフィールメータにおいて測定された路面から実路面を再現するには、路面波形を高速フーリエ変換し、そのフーリエ振幅に、実路面補正関数(式(6))を乗じて、逆フーリエ変換することによって近似できる。ただし、式中の h は、3mプロフィールメータの場合0.45、8mプロフィールメータの場合0.07を用いる。
- (4) 橋梁の動的挙動は、上記近似法によって再現された路面ならびに3次元シェル要素で橋梁をモデル化するとともに、11自由度の立体車両モデルを使った動的応答解析によって精度よく再現することができる。
- (5) 橋梁および車両そして周辺地盤の動的応答は、車両の走行速度と路面の凹凸波長の関係によって決まる加振周波数の影響を強く受け、橋梁の固有振動数と近接する場合には、共振によって非常に大きな応答を示す。

橋梁環境振動問題をシミュレーション手法によって検討する場合、動的応答解析の前提条件である、走行車両や橋梁の解析モデルの標準化が重要であるといわれている¹⁵⁾。本研究は、プロフィールメータによって測定された路面を直接使用することの問題点を述べるとともに、その対処法について述べた。本研究結果が、路面モデル化の標準の一助となれば幸いである。また、橋梁環境振動問題に対し、従来の伝播経路上での力づく(断面補強、部材補強など)の対策に対し、橋梁への加振エネルギーをできるだけ抑制する路面上での対策が、経済性や低減効果の観点から、今後の対策の主流となるものといえる。ただし、路面上で対処する場合、Pr.Iのような凹凸量の管理だけでなく、路面波長も重要な管理項目として位置付けることを検討していくことが望ましいといえる。

末筆とはなりましたが、3m、8mプロフィールメータの測定データを提供して頂いた、阪神高速道路公団大阪管理部の関係各位の皆様方に、心より感謝の意を表する次第であります。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼床版の疲労，1990。
- 2) 山田伸志：低周波音問題の現状と諸外国の動向，騒音制御 特集低周波音，(社)日本騒音制御工学会，Vol.23，No.5，p.299，1999。
- 3) 本田秀行：動的応答の解析モデル，橋梁交通振動コロキウム論文集，PARTA，pp.1-13，1995。
- 4) 山田靖則，川谷充郎：桁端補強工法による橋梁交通振動軽減の解析的研究，構造工学論文集，Vol.437 pp.737-746，1997。
- 5) 足立義男，岡村宏一，島田功：道路橋床版の低周波域における振動性状について，土木学会論文報告集，第331号，pp.37-48，1981。
- 6) 梶川康男，新開正英，讃岐康博，村田浩一：都市内PC高架橋の環境振動軽減対策とアセスメント手法の適用，構造工学論文集，Vol.41A，pp.691-700，1995。
- 7) 前田幸雄，前田研一，越後滋：斜張橋のシステムダンピングに関する2,3の考察，土木学会論文報告集，第333号，pp.35-45，1981。
- 8) 深田幸史，梶川康男，角本周：2径間連続PC斜張橋の車両走行時の振動特性と動的増幅率，土木学会論文集，No.605/I-45，pp.37-47，1998。
- 9) ㈱フジエンジニアリング：会社案内(業務実績)，2000。
- 10) 財)道路保全技術センター：既設橋梁のノージョイント工法の設計施工手引き(案)，pp.2-1-2-130，1995。
- 11) ISO：Proposals for generalized Road Inputs to Vehicles，ISO/DIS 2631，pp.1-7，1972。
- 12) 川谷充郎，小松定夫，佐々木孝：走行自動車荷重を受けるプレートガーダー橋の動的応答性に関する研究，土木学会論文集，No.392/I-9，pp.353-354，1988。
- 13) 本田秀行，城戸隆良，梶川康男，小堀為雄：道路橋の路面凹凸パワースペクトル密度に関する調査，土木学会論文報告集第315号，pp.149-155，1981。
- 14) 田中孝義，本田秀行：タンDEM型ダンブトラック車の3次元振動モデル化に関する一考察，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，I-293，1993。
- 15) 日本道路公団：8mプロフィールメータによる路面凹凸測定法，日本道路公団規格，pp.2-91-2-93，1992。
- 16) 林川俊郎：動的応答の計算法，橋梁交通振動コロキウム論文集，PARTA，pp.15-21，1995。

(2000年9月14日受付)