

道路橋の路面凹凸パワースペクトル密度に関する調査

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF ROADWAY ROUGHNESS ON BRIDGES

本田 秀行*・城戸 隆良**・梶川 康男***・小堀 為雄****

By Hideyuki HONDA, Takayoshi KIDO, Yasuo KAJIKAWA
and Tameo KOBORI

基礎的な資料を得るために行ったものである。

1. まえがき

道路橋の衝撃係数、疲労強度および歩行者の振動感覚などに関する研究において、道路橋の動的応答を解析する場合、その振動の原因の一つとして橋面の凹凸（橋梁舗装面の凹凸）があげられている^{1)~8)}。

一般に、路面凹凸の測定はプロフィルメーターによる方法、あるいは動的特性の明確な自動車の振動記録から、その入力である路面凹凸を逆算推定する方法が用いられている。そして、路面舗装の維持修繕および自動車の振動乗心地や走行性に関する研究から、路面凹凸の調査報告^{9)~16)}は比較的多い。しかし、これらの方法では測定可能な周波数の範囲が狭いこと、あるいは橋梁の振動成分が自動車の振動記録に入ることなどから、橋面の測定には両方法とも不向きであり、あまり調査が行われていないのが現状である。

橋面凹凸のデータ不足から、過去に発表されている道路橋の動的応答に関する多くの研究では、川合・森崎¹⁰⁾によって求められた路面凹凸のパワースペクトル密度を指数関数に近似した値 $a=0.001 \text{ cm}^2/(\text{m}\cdot\text{c}^{-1})$ が用いられてきた。しかし、このパワースペクトル密度は昭和 40 年に名神高速道路で測定されたものであり、ISO の評価基準¹⁷⁾によれば、非常に滑らかな状態の路面を示している。したがって、この値を用いた解析では、橋梁の動的応答を過小に評価していることになる。

そこで、著者らは測量用レベルによって道路橋の橋面凹凸の測定を行い、検討を加えてきた^{18)~20)}。本報告は、その測定結果に基づいて橋面凹凸の実際の性状を把握し、あわせて走行自動車による道路橋の動的応答解析の

2. 橋面凹凸の測定

橋面凹凸の性状とは橋梁舗装面の凹凸性状を意味し、これには縦断方向の凹凸や伸縮継手付近に生じる段差、あるいは横断方向の凹凸であるわだち掘れ等がある²¹⁾。本報告では、橋梁上を走行する自動車振動のおもな原因が橋面の縦断方向の凹凸であると考え、走行自動車による橋梁の動的応答解析に用いられる橋面の性状に関する基礎的な資料を得ることから、縦断方向の凹凸の性状を対象とする。

路面凹凸の測定方法は各種考案されている²²⁾が、それらの中で、8 m、あるいは 3 m プロフィルメーターによる方法や動的特性の明確な自動車の振動記録から、その入力である路面凹凸を逆算推定する方法^{9)~15)}が一般的である。

前者については、測定台車間の距離以上の路面波長を測定できない欠点を有している。橋面凹凸に関しては、橋梁の支間長、あるいは桁橋の中間対傾構間隔やトラス橋およびアーチ系橋梁の格間長などの比較的長い路面波長が卓越することも考えられる。したがって、橋面凹凸の場合、プロフィルメーターの使用は不向きであると思われる。最近、3 m のプロフィルメーターでは測定不可能な長波長の路面凹凸をも測定する測器（高速プロフィルメーター）が開発²³⁾されているが、橋面凹凸の調査報告²⁴⁾は少ない。

自動車をを用いる方法については、路面凹凸を間接的に求める方法であるが、自動車の周波数応答関数の推定が難しいことや、またその関数は自動車の走行速度によって変わるため、得られる路面凹凸も速度によって変動する。しかも、橋梁の振動成分が自動車の振動記録に入ることなど、橋面凹凸の測定には向いていない。最近、光学的非接触型測定機（OCS system）¹⁴⁾が開発され、実際

* 正会員 工修 金沢工業大学講師 土木工学科

** 正会員 金沢大学技官 工学部建設工学科

*** 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木工学科

**** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部建設工学科

に路面凹凸の測定が行われている。この測定方法は、投射ユニットから路面に光を当て、受信ユニットが感光する光の反射率から間接的に路面凹凸を測定するものである。しかし、この方法は測定装置を自動車で牽引するため、前述の自動車を用いる方法と同様な理由から橋面の測定には不向きであり、また測定装置の製作に多額の費用を要する。

以上のことから、本調査では、データ収集に時間を要する欠点はあるが、測定が単純で、しかも精度の点から比較的信頼度の高いとされており¹¹⁾、従来、飛行機の滑走路面の測定に多く用いられてきた測量用レベルによって橋面凹凸値を測定した。本調査では、自動車の交通量や幅員から、測定可能な北陸地方のおもに一般国道と県道に架設されている 56 の道路橋を対象として、測定ライン数 84 の橋面凹凸の測定を行った。なお、測定は、自動車の車輪の走行頻度が比較的高いセンターラインから 0.5 m、あるいは 2.0 m 離れた地点を、橋軸方向に 10 cm 間隔（一部の橋梁については、交通量、橋長および橋面状態から考えて、20 cm、または 50 cm 間隔とした）で測定した。また、レベル測量に用いる箱尺では精度が不足することから、測量用ポールにミリメートルの目盛の入ったスケールを貼り付けて、それを読んだ。自動車が通行しているときは、橋梁が振動しているため測定を中断し、振動が完全に止まっている間に測定した。

3. 橋面凹凸のスペクトル解析

路面の縦断凹凸の性状を知る方法の一つとして、おもに路面の維持修繕に関する情報を得るため、プロフィールメーターによる測定記録から路面凹凸の標準偏差を推定する方法がある。しかし、この方法では、路面凹凸の周波数およびその振幅の強さに関する情報が得られない欠点を有する。このため、路面凹凸の性状については、路面を平均値 0 の定常ランダム過程とみなして、不規則振動解析からパワースペクトル密度で表わす方法が一般的である。

いま、路面凹凸のパワースペクトル密度を $S_r(\Omega)$ とすると、通常の走行速度の自動車振動に影響する周波数範囲において、一般に $S_r(\Omega)$ は指数関数に近似され、次式のように表わされる⁹⁾。

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

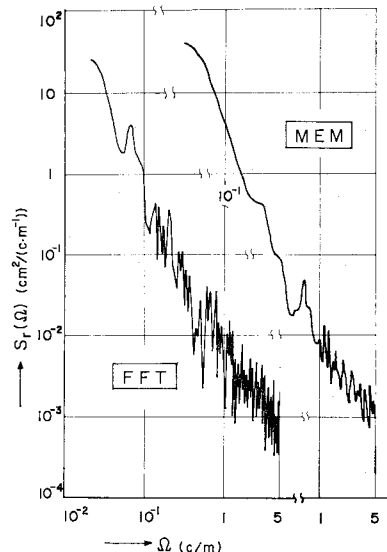
ここに、 Ω は路面周波数であり、波長 $\lambda = 1/\Omega$ の関係がある。また、 a は路面の平坦性を表わす平滑度パラメータを、そして n は周波数によるパワーの分布を示す指数であり、通常の舗装路面の場合 2 前後であるといわれている⁹⁾。

一般に、橋面凹凸は平均値 0 の定常ランダム過程とし

て扱われている。ところが、橋面凹凸をレベルで測定した場合、橋梁の縦断勾配も同時に測定される。このことから、本調査では、仮定した放物線と測定値との差の二乗和が最小になるような縦断の放物線勾配を求め、凹凸値からこの縦断勾配を差し引いた値を凹凸の変動成分のデータとした。そして、次式に示す最大エントロピー法 (MEM) の推定式²⁵⁾によってパワースペクトル密度を求めた。

$$S_r(\Omega) = \frac{\Delta P_m}{\left| 1 + \sum_{k=1}^m r_{mk} \exp(i 2 \pi \Omega k \Delta l) \right|^2} \dots (2)$$

ここに、係数 r_{mk} は予測誤差フィルターとよばれているものであり、また P_m は予測誤差の分散を、 Δl はデータ間隔をそれぞれ示している。なお、予測誤差フィルターの項数 m については、二、三のデータに対して、スペクトル密度の面積とデータの分散とができるだけ近い値になるような項数を求めた結果、データ数を N とするとき、 $m \approx (2.0 \sim 2.5) \sqrt{N}$ となったので、本計算では、この項数として、 $2\sqrt{N}$ を採用した。この最大エントロピー法は非線形推定法といわれ、一般に高速フーリエ変換法 (FFT 法) よりも演算時間を要するが、スペクトルの分解能や安定性に関して、Blackman-Tukey 法 (B-T 法) や高速フーリエ変換法のいずれよりも優れており、特にデータ数が少ない場合でも分解能のよい安定したスペクトルを与える特徴を有していることが報告されている²⁵⁾。なお、本調査では、最大エントロピー法のほかに高速フーリエ変換法でもパワースペクトル密度の推定を行い、両者の方法による橋面凹凸のスペクトルの



図一 最大エントロピー法 (MEM) と高速フーリエ変換法 (FFT) によるスペクトルの相違の一例 (単純合成析橋, データ数 1480, MEM のフィルター数 77 および FFT 平滑化のバンド幅 0.025 c/m)

相違についても検討を行った。その一例を図-1に示す。

図-1は、単純合成桁橋のセンターラインから0.5mにおける橋面凹凸のパワースペクトル密度について、その計算方法による結果の相違を示したものである。図中の横軸は路面周波数を、縦軸は橋面凹凸のパワースペクトル密度を示している。この図から、橋面凹凸に関しても、FFT法でも広い周波数の範囲にわたり全体的な性状を把握できるスペクトルが得られるが、周波数が大きくなるに従い、MEMより安定性にやや劣る傾向がある。このことから、本調査では、以下に示す計算結果について、式(2)に示した最大エントロピー法によって橋面凹凸のパワースペクトル密度を求めた。

以上に述べた橋面凹凸のデータ解析から、本調査では橋面凹凸の性状に関する検討を行い、その結果について次節で述べることにする。

4. 調査結果および考察

ここでは、本調査で対象とした橋面凹凸のパワースペクトル密度を最大エントロピー法によって求めた結果について考察を加える。

(1) 各橋梁形式におけるパワースペクトル密度

図-2から図-5は各橋梁形式における橋面凹凸のパワースペクトル密度の一例である。図中の実線と破線はセンターラインから0.5mおよび2.0mの測定位置での結果を示している。図-2は単純桁橋の場合であり、(a)は鋼桁を、(b)はPC桁の場合を示している。図-3はトラス橋、図-4はランガー桁橋および図-5は3径間連続鋼桁橋の場合である。まず、これらの図から、

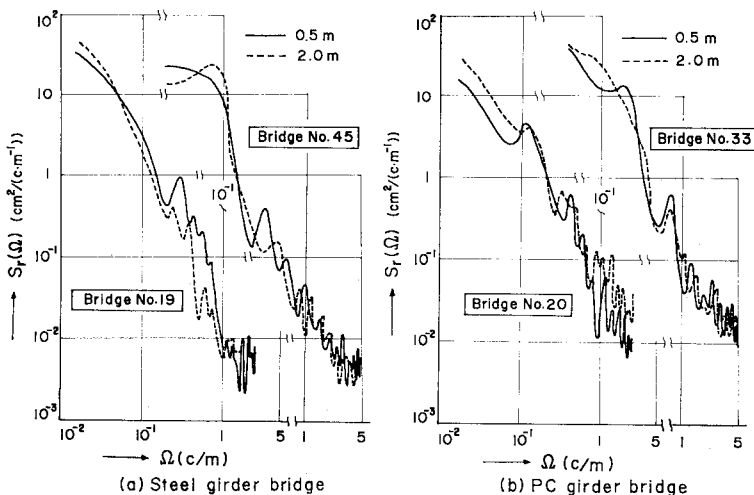


図-2 単純桁橋

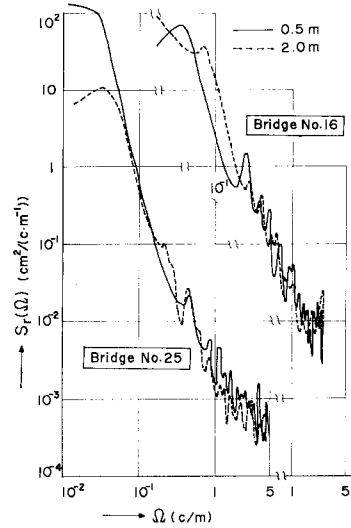


図-3 トラス橋

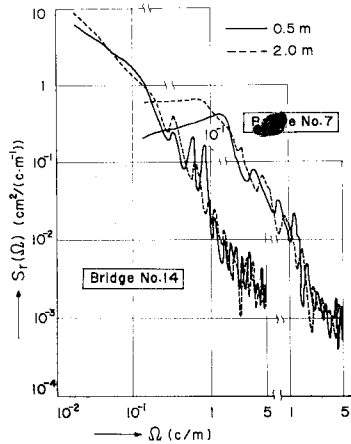


図-4 ランガー桁橋

0.5mと2.0mとの測定位置におけるパワースペクトル密度の差はほとんどなく、橋面凹凸の性状としては同程度とみなすことができる。また、これらの図から、橋面凹凸のパワースペクトル密度は、一般路面と同様に、路面周波数と指数関係にあることが認められる。なお、本調査では、ガーダー系橋梁の場合には中間対傾構間隔、非ガーダー系橋梁の場合には格間長に対応する路面周波数が卓越することも予想していたが、パワースペクトル密度の計算結果から、そのような路面周波数の卓越は認められなかった。また、高速

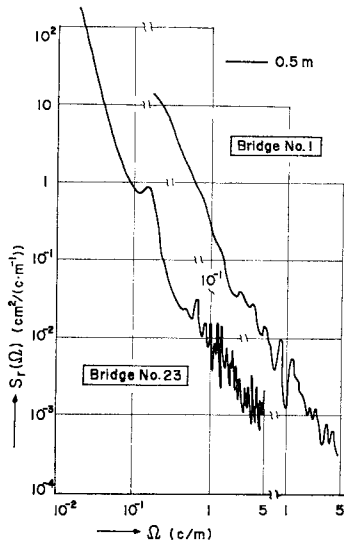


図-5 連続桁橋

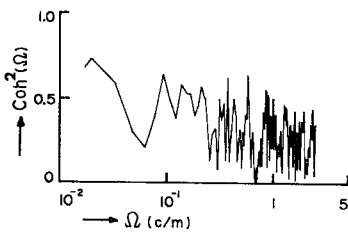


図-6 コヒーレンスの計算例 (単純合成桁橋)

フーリエ変換法によってセンターラインから 0.5 m と 2.0 m の測定位置でのクロススペクトルから、各路面周波数別の相関を表わすコヒーレンスを求め、その一例を図-6 に示した。その結果、強い相関を表わす周波数成分は認められなかった。すなわち、0.5 m と 2.0 m の測定位置での橋面では、相関が弱いものであることがわかった。

(2) 指数 n と平滑度パラメーター a 値について

ここでは、56 橋、測定ライン数 84 の橋面凹凸について計算されたパワースペクトル密度を、式 (1) のような指数関数に近似し、最小二乗法によってパワーの分布を表わす指数 n と橋面の平滑度パラメーター a 値を求め、 n と a との関係から各橋梁形式の分類を試みた。

図-7 は、 n と a 値との関係を、橋梁形式および舗装別に示したものである。横軸は平滑度パラメーター a 値を、縦軸はパワーの分布を表わす指数 n 値を示している。図中の N は橋面の測定ライン数である。また、A.P. と C.P. はアスファルト舗装およびコンクリート舗装をそれぞれ示し

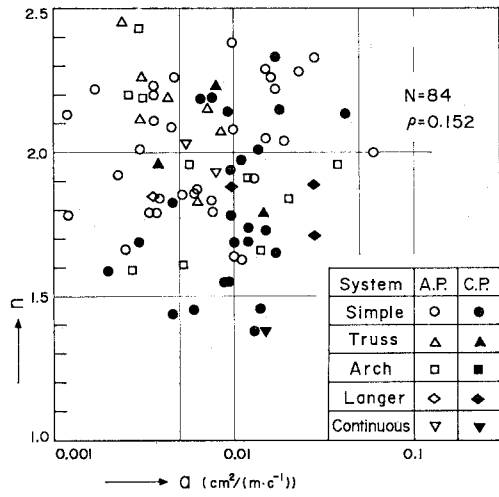


図-7 n と a 値との関係

ている。この図から、 a 値は 0.001~0.06 $\text{cm}^2/(\text{m}\cdot\text{c}^{-1})$ の範囲にばらつくが、 n は 1.3~2.5 の間に分布していることがわかる。いま、 n と a 値との相関係数を求めると、 $\rho=0.152$ となり無相関である。すなわち、 n と a 値とは互いに独立に取り扱ってもよいことを示している。さらに、 n と a 値との関係から橋梁形式間および舗装別の有意な差も予想していたが、この図によれば、そのような差は認められない。

続いて、本調査では n と a 値の相対頻度分布を求め、橋梁の構造系による両者の分布についても検討を行った。図-8 は、橋梁の主構造をガーダー系 (単純桁橋および連続桁橋) と非ガーダー系 (トラス橋、ランガー桁橋およびアーチ系橋梁) とに分けて考えた場合、 n 値の相対頻度分布を示している。ガーダー系と非ガーダー系を含めた橋梁全体では正規分布に近似できそうであ

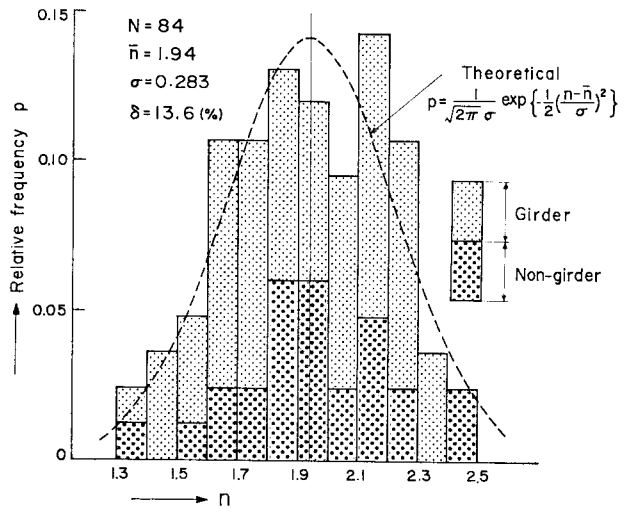


図-8 n 値の相対頻度分布

り、全体の平均値 $\bar{n}=1.94$ 、標準偏差 $\sigma=0.283$ 、変動係数 $\delta=13.6\%$ を得た。なお、図中の破線は橋梁全体における平均値と標準偏差と同じ値を用いた理論正規分布を示している。また、 n 値の分布は橋梁の主構造をガーダー系と非ガーダー系に分けた場合、両者ともそれぞれ正規分布に近い形をしている。図-9 は a 値の相対頻度分布を示している。図中の記号は 図-8 と同様である。橋梁全体では指数分布に近い形を示している。本調査で対象にした道路橋は比較的新しい橋梁が多いため、非常に悪い状態の橋面は少なく、普通、あるいは良好な状態の橋面が多いことから、 a 値の分布は指数分布に近い形になったものと思われる。また、ガーダー系および非ガーダー系に分けた場合も指数分布に近い形をしている。

以上に示した調査結果を整理すると表-1 のようになる。表-1 は橋梁の構造系および舗装別による平滑度パラメーター a と指数 n の平均値 \bar{a} および \bar{n} を示している。

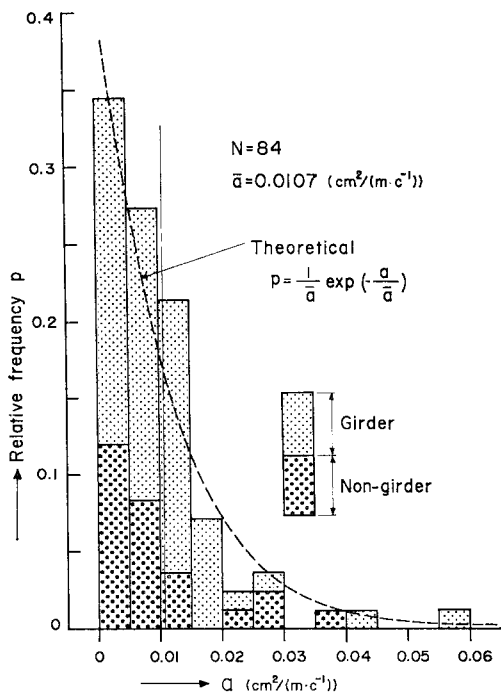


図-9 a 値の相対頻度分布

表-1 構造系および舗装別による a と n の平均値

	Pavement	Total		\bar{a} ($\text{cm}^2/(\text{m}\cdot\text{c}^{-1})$)		\bar{n}
① Girder	Asphalt	35	60	0.008 0	0.009 8	2.04
	Concrete	25		0.011 5		
② Non-girder	Asphalt	18	24	0.009 6	0.011 6	2.02
	Concrete	6		0.013 5		
①+② Whole	Asphalt	53	84	0.008 8	0.010 7	2.03
	Concrete	31		0.012 5		

る。この表から、アスファルト舗装とコンクリート舗装とを比較すると、コンクリート舗装は、一般にアスファルト舗装より橋面状態が悪く、高周波数成分も多くなっているため、パワースペクトル密度の勾配もゆるくなっている。また、ガーダー系と非ガーダー系とを比較した場合、 \bar{a} および \bar{n} も顕著な差がないことから、両構造系の橋面性状はほとんど同程度とみなしてもよいように思われる。

(3) 橋面状態の分類

ISO の評価基準¹⁷⁾では、路面周波数が $1/2\pi$ のときのパワースペクトル密度の値でもって路面状態を分類している。そこで、橋面状態を ISO の評価基準に対応させることを考えた。

図-10 は、指数関数に近似した橋面凹凸のパワースペクトル密度に関して、路面周波数 $\varrho=1/2\pi$ のときのパワースペクトル密度の値 $S_r(\varrho=1/2\pi)$ と a 値との関係を示したものである。この図から、 $S_r(\varrho=1/2\pi)$ の値と a 値とはほぼ線形関係にあることが認められる。図中、縦軸の破線は ISO の評価基準に対応する路面状態の各カテゴリーの境界を示している。また、横軸 a 値の破線は、表-1 に示した橋梁全体の平均値 $\bar{n}=1.94$ を用いて、ISO の評価基準に相当する a 値を式 (1) から逆算推定したものであり、橋面状態の各カテゴリーの境界を示している。すなわち、 a 値が小さい方から、極良、良好、普通、悪い、および極悪に橋面状態を分類している。したがって、 a 値がわかれば、図-10 から測定した道路橋の橋面状態を知ることができる。なお、前述の川合・森崎¹⁰⁾が提示した路面凹凸のパワースペクトル密

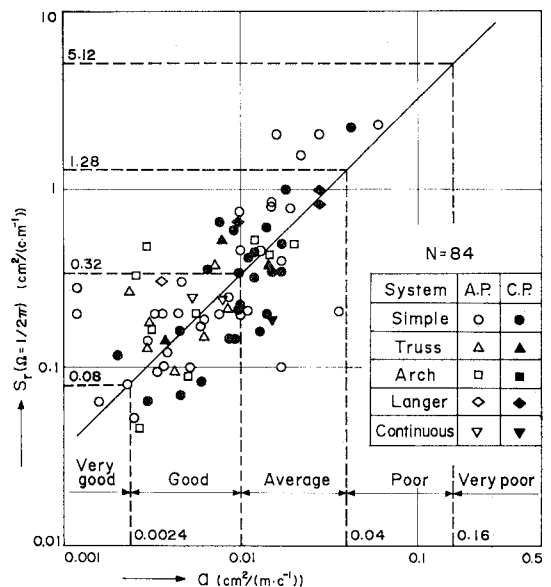


図-10 a 値による橋面状態の各カテゴリー

度(名神高速道路)を指数関数に近似した値 $a=0.001 \text{ cm}^2/(\text{m}\cdot\text{c}^{-1})$ は、この図によって判断すると、極良の路面状態であったことを示している。このことから、走行自動車による道路橋の動的応答解析に関する従来の研究では、非常に滑らかな橋面状態における橋梁の動的応答を計算していることになる。

(4) 橋面凹凸スペクトルの分布形状パラメーター

橋面凹凸のパワースペクトル密度が、一般の路面と同様に、式(1)のような指数関数に近似されることを本調査では確認し、その指数 n や平滑度パラメーター a がどの程度であるかを求めることができた。しかし、式(1)によるスペクトル密度は、 $\Omega \rightarrow 0$ のとき、無限大に発散することになる。そこで、従来の研究においては次の3つの方法が用いられてきた。

- 1) 路面周波数の範囲を定めたもの²⁾。
- 2) Cut-off wave number (Ω_C) を定め、それ以下では平坦スペクトルとしたもの^{3),4)}。
- 3) 分布形状のパラメーター β を導入し、次式でそのスペクトル密度を表わしたもの⁵⁾。

$$S_r(\Omega) = \frac{a}{\Omega^{2n} + \beta^n} \dots\dots\dots (3)$$

この3つの方法のうち、路面のサンプル関数をシミュレーション法で求めるときには1)と2)の方法が用いられ、解析的に扱う場合には1)と3)の方法が用いられている。さて、1)の場合、その周波数範囲は対象とする橋梁の動的応答に影響する程度から求めればよいが、2),3)の場合には実測から Ω_C や β を求めねばならない。そこで、本調査結果から、これらの値がどの程度になるかを求めた。

各実測橋面に対して最小二乗法で求めた n と a を図-2~5 のような両対数グラフに書き入れ、その指数近似式からはずれていく周波数を求めてみると、どの場合も $0.05 \sim 0.1 \text{ c/m}$ の範囲にあり、Cut-off wave number はほぼこの範囲にあるものと思われる。また、同様に低周波数域を平坦スペクトルと仮定し、高周波数域では最小二乗法で求めた n と a を用いた式(1)で示されるものとしたとき、両者に適合するような β を求めた。そしてその平均を求めてみるとガーダー系橋梁(42橋, 60測定ライン)で 0.08 c/m 、非ガーダー系橋梁(14橋, 24測定ライン)で 0.06 c/m であった。図-11に、これらの β を用いた式(3)で表わされる橋面凹凸の平均的なパワースペクトル密度を示した。

従来、Cut-off wave number (Ω_C) として $0.01 \sim 0.05 \text{ c/m}$ が用いられており、また、分布形状のパラメーターとして 0.05 c/m が用いられているが、これらの数値がほぼ妥当であったことが確認できた。しかし、橋梁の動

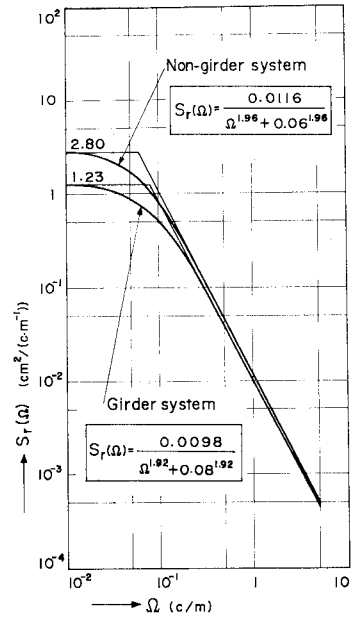


図-11 構造系による橋面凹凸の平均的なパワースペクトル密度

動的応答には 0.1 c/m 以下の低周波数成分があまり影響しないことも報告³⁾されており、このような低周波数域でのスペクトルの形状は数値計算上必要なことから、その取扱いが簡単な1),あるいは2)の方法が適当であると思われる。

5. あとがき

本報告は、走行自動車による道路橋の動的応答解析の際に用いられる橋面凹凸のパワースペクトル密度に関する基礎的な資料を得るために、橋面凹凸の測定を行い、その性状について検討したものである。その結果、次のような点を指摘することができた。

- (1) 同じ橋梁であれば、センターラインから 0.5 m と 2.0 m での測定位置における橋面凹凸のパワースペクトル密度の差はほとんどなく、橋面凹凸の性状としては同程度とみなすことができる。
- (2) 橋面凹凸のパワースペクトル密度は、一般の路面と同様に、指数関数に近似できる。
- (3) 指数 n と平滑度パラメーター a 値との関係から、橋梁形式間の有意な差は認められなかった。
- (4) 橋梁の主構造をガーダー系と非ガーダー系に分けて n と a 値の分布を求めた結果、 n と a の平均値 \bar{n} と \bar{a} に顕著な差がないことから、両構造系の橋面性状は同程度とみなすことができる。
- (5) 橋面凹凸スペクトル密度についての Cut-off wave number (Ω_C) が $0.05 \sim 0.1 \text{ c/m}$ の範囲にあり、

また、分布形状のパラメーター β の平均値はガーダー系で0.08、非ガーダー系で0.06 c/mであることがわかった。

(6) ISOの評価基準に相当する α 値を推定し、この α 値から橋面状態の各カテゴリーを示すことができた。

以上の調査で得た橋面凹凸の性状が、今後、走行自動車による道路橋の振動を考える際に参考になれば幸いである。なお、本調査では、測定方法の関係から比較的交通量の少ない橋梁であったことや橋面凹凸パワースペクトル密度の特性値である n と α 値の経年変化、路面周波数と橋梁の振動数との関係、および伸縮継手部に生じる段差について検討を行っていない。これらについては今後の課題としたい。

最後に、多くの橋面凹凸の測定とデータ解析に協力していただいた金沢工業大学土木工学科および福井工業大学建設工学科(著者の一人・梶川の前勤務校)の各橋梁研究室の学生諸氏に感謝の意を表す。なお、本調査での計算は金沢工業大学計算機センターのIBM 3031を使用した。

参 考 文 献

- 1) 山田・小堀：活荷重に対する道路橋の動的応答—衝撃係数—に関する考察，土木学会論文集，No. 148，pp. 40~50，1967年12月。
- 2) 小堀・梶川：単一動荷重に対する道路橋の振動感覚，土木学会論文報告集，No. 248，pp. 11~23，1976年4月。
- 3) 吉村・彦坂・内谷：単一走行車両による道路橋の非定常ランダム応答の解析，土木学会論文報告集，No. 258，pp. 35~44，1977年2月。
- 4) Snyder, J.E. and D.N. Wormley: Dynamic interactions between vehicles and elevated, flexible randomly irregular guideways, Transactions of the A.S.M.E., Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Ser. G, Vol. 99, pp. 23~33, March, 1977.
- 5) 成田・桂樹・江本：路面凹凸を考慮した橋梁の衝撃係数，土木技術資料，Vol. 20, No. 3, pp. 27~32, 1978年。
- 6) 岡林隆敏：単一走行車両による道路橋の二乗平均応答解析，土木学会論文報告集，No. 286，pp. 15~27，1979年6月。
- 7) 本田・小堀：実験計画法によるローゼ橋の振動軽減法評価，土木学会論文報告集，No. 301，pp. 37~46，1980年9月。
- 8) 梶川康男：振動感覚を考慮した道路橋の使用性解析に関する考察，土木学会論文報告集，No. 304，pp. 47~58，1980年12月。
- 9) 兼重一郎：自動車走行時振動のパワースペクトル解析，自動車技術，Vol. 18, No. 4, pp. 261~267, 1964年。
- 10) 川合・森崎：自動車走行路面の性質と振動乗心地への関連性，三菱重工技報，Vol. 2, No. 2, pp. 20~27, 1965年。
- 11) 兼重一郎：道路凹凸特性の解析，いすゞ技報，No. 50, pp. 1~7, 1967年。
- 12) 永光・中矢：走行路面のプロファイルについて，自動車技術，Vol. 27, No. 8, pp. 919~927, 1973年。
- 13) Dodds, C.J. and J.D. Robson: The description of road surface roughness, Journal of Sound and Vibration, Vol. 31, Part 2, pp. 175~183, November, 1973.
- 14) Still, P.B. and D.R.C. Cooper: Measurement of surface texture by an optical contactless sensor, Highways and Road Construction, pp. 8~11, October, 1975.
- 15) Healey, A.J., E. Nathman and C.C. Smith: An analytical and experimental study of automobile dynamics with random roadway inputs, Transactions of the A.S.M.E., Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, Ser. G, Vol. 99, pp. 284~292, December, 1977.
- 16) 飯島 尚：舗装の維持修繕の計画に関する調査的研究，土木技術資料，Vol. 22, No. 4, pp. 42~44, 1980年。
- 17) ISO: Proposals for Generalized Road Inputs to Vehicles, ISO/DIS 2631, pp. 1~7, 1972.
- 18) 小堀・本田・城戸：中島大橋(ローゼ橋)の補強に関する調査，橋梁と基礎，Vol. 13, No.9, pp. 16~22, 1979年。
- 19) 本田・小堀：橋面凹凸のパワースペクトル密度に関する調査的研究，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，I-1, pp. 2~3, 1980年2月。
- 20) 本田・梶川・小堀：道路橋の橋面特性に関する研究，土木学会第35回年次学術講演会講演概要集，I-162, pp. 321~322, 1980年9月。
- 21) 日本道路協会：道路維持修繕要綱，丸善，pp. 114~120, 1979年7月。
- 22) 藤原 武監修：道路維持修繕ハンドブック，鹿島出版会，pp. 44~51, 1976年5月。
- 23) 成田・池村・水口：プロフィールメーターの開発，土木技術資料，Vol. 16, No. 8, pp. 46~48, 1974年。
- 24) 成田・桂樹・江本：I共通編—衝撃係数の検討に関する実橋実験，土木技術資料，Vol. 22, No. 5, pp. 21~27, 1980年。
- 25) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，pp. 183~227, 1978年2月。

(1980.9.22・受付)