

# 道路橋における歩行者の 振動感覚に関する使用性の確率論的考察

川谷充郎<sup>1</sup>・小林義和<sup>2</sup>・今枝拓也<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> 正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)  
<sup>2</sup> 正会員 ㈱ニチゾウテック 技術コンサルティング本部 (〒551-0023 大阪市大正区鶴町 2-15-26)  
<sup>3</sup> 正会員 大成建設㈱ 土木設計第一部橋梁設計室 (〒163-06 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

道路橋における振動使用性の問題は、①走行車両の走行安定性および乗り心地、②道路橋を渡る歩行者の振動感覚、の二つに大別され、本研究では後者の問題を考える。道路橋における歩行者の振動感覚を解析的に検討する場合、通常、歩道は幅員の端にあることから、桁の曲げ振動のみならずねじり振動も考慮する必要があるものと考えられる。本研究では、路面凹凸の確率特性を考慮し、走行車両の偏心走行を想定して、橋梁の曲げとねじりの連成振動を考慮した走行荷重下のシミュレーション解析および非定常不規則振動解析を行い、解析結果を既往の研究による振動使用性評価法に基づき考察すると共に、路面凹凸管理目標値について言及する。

*Key Words* : traffic-induced vibration, coupling vibration of torsion and bending, nonstationary random vibration, vibration serviceability, limit state probability

## 1. まえがき

道路橋の設計法を限界状態設計法に移行するためには、種々の限界状態における構造物の挙動を解明すると共に、その挙動の評価法を確立する必要がある。従来、安全性に関わる終局限界状態に比べて、機能性に関わる使用限界状態は、直ちに破壊につながることはないことから、二次的な扱いを受けてきた。しかし、利用者に不快感や不安感を与えることは避けねばならず、構造物は設計耐用期間に亘り使用目的に適合する十分な機能を保持しなければならない。ここでは、使用限界状態に関する状態変数として振動感覚に着目し、道路橋の振動使用性について考える<sup>1)</sup>。

道路橋における振動使用性の問題は、①走行車両の走行安定性および乗り心地、②道路橋を渡る歩行者の振動感覚、の二つに大別され、本研究では後者の問題を考える。前者は、一般の道路橋において問題となることは少ないが、吊橋や斜張橋あるいは支間長が200mを越える連続桁橋などの長大橋において、比較的頻度の高い風速10~20m/s程度の風で発生する渦励振により、振動使用性が問題となる場合もある<sup>2)</sup>。このような発生風速域も振幅も限定的な振動

**Table 1** Category and lower limit of velocity for walking

Content of Category	Lower limit value(cm/s)		
	Peak	RMS	$\sigma$
Not perceptible			
Lightly perceptible	0.6	0.42	0.28
Definitely perceptible	1.2	0.85	0.35
Lightly hard to walk	2.4	1.70	0.60
Extremely hard to walk	3.8	2.70	0.70

に対して、従来からのフラップやフェアリングなどの空力的な制振対策と共に、TMDなどの機械的な振動制御法も取り入れられるようになってきた<sup>3)</sup>。一方、中小規模の道路橋において後者の問題が起こることがある。これは、車両走行による道路橋の振動が、そこを渡る歩行者に不快感や不安感を与える場合であり、近年、橋梁が高強度材料の使用によって軽量化し、たわみ易くなっていることや、車両の大型化とそのような重量車の増加が著しくなっていることに対応した現象である。

歩行者の振動感覚に関する使用性の研究は歩道橋に関するものが多く<sup>4)-7)</sup>、道路橋に関するものには小堀・梶川の一連の研究がある<sup>8)-11)</sup>。梶川らは、文献9)において、歩行が可能な大型振動台を製作し、この上を実際に歩いたときの振動感覚実験を行い、その結果より、歩行者の振動感覚の評価尺度として

は振動速度の実効値（2乗平均値の平方根）が最適であり、Table 1に示すように歩行者が少し歩きにくいと感じる状態に対する振動限度度として、振動速度の実効値を1.7cm/s未滿とするのが望ましいとした。さらに、文献8)–11)では、多くの道路橋で大型車通行時の振動測定を行うと共に、実橋の振動と交通流との同時測定により複数の大型車が載荷したときの振動性状も把握した。また、路面凹凸を有する道路橋の走行荷重による動的応答を、橋梁と車両の連成を無視した非定常不規則振動解析法により確率論的に評価した。これらにより、歩行者の振動感覚の観点から、道路橋の振動使用性を応答速度の実効値によって評価する方法を提案した。

一方、著者らは、単純桁橋の交通振動の実測データで、外桁の動的応答が内桁より大きい場合について、これを桁の曲げとねじりの連成振動シミュレーション解析によって検証した<sup>12)</sup>。このような場合に、道路橋における歩行者の振動感覚に着目するなら、歩道が幅員の端にあることより、橋のねじり振動による影響を含めるべきと考えられる。

そこで、本研究では、文献13)の桁の曲げとねじりの連成振動シミュレーション解析により、桁の歩道位置における動的応答を示し、また、その不規則振動解析法<sup>14)</sup>により振動速度の実効値の評価を行う<sup>15)</sup>。さらに、歩行者の振動に対する感覚反応を確率変数とし、また、橋梁の動的応答を振動刺激と考えてこれも路面凹凸の変化により確率的に変動すると考え、それらに基づいて、支間長30m~70mの単純桁橋モデルについて、振動刺激により歩行者の心理的な限界状態が発生する確率(限界状態確率)を求め、振動使用性を評価する。このような振動使用性を確保する観点から、路面凹凸の維持管理目標値に言及する。

## 2. 解析手法

### (1) 曲げとねじりの連成振動シミュレーション解析法<sup>13)</sup>

本解析法では、桁橋を曲げとねじりを考慮した平面の梁構造にモデル化し、また、走行車両は前後輪を考慮した2自由度系にモデル化する(Fig. 1参照)。モード法による橋梁と走行車両の連成振動の微分方程式をNewmark- $\beta$ 法により逐次積分し時系列応答を求める。本解析法の妥当性は、文献12)、13)において、実験値との比較により検証している。

### (2) 橋梁と車両の非定常連成不規則振動解析法<sup>14)</sup>

本解析法は、前節により定式化される路面凹凸を

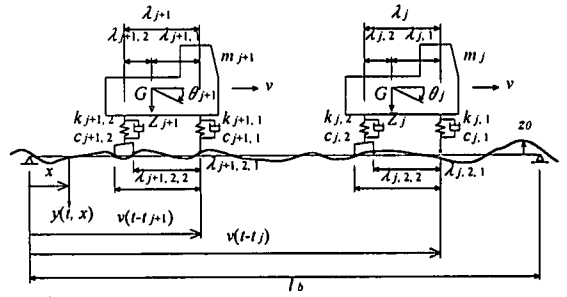


Fig.1 Analytical models of a bridge and moving vehicles

有する桁橋と走行荷重に関する連成振動の微分方程式から、状態ベクトル表示を用いた状態方程式を誘導し、線形微分方程式の理論より得られるこの解過程を用いて、直接、応答の共分散行列を求める。これより得られる2乗平均値応答RMSは、路面平滑走行時の動的応答からの偏差に関するものであり、これに路面平滑走行時のシミュレーション結果を足し合わせて振動速度を評価する。本非定常不規則振動解析法の妥当性は文献14)において検証している。

### (3) 振動使用性の確率論的評価法<sup>4)</sup>

#### a) 限界状態確率

歩行者の振動使用性に関する限界状態確率 $P_d$ は、交通荷重による橋梁の動的応答を振動刺激として、歩行者にある感覚反応を起こさせる確率であり、振動刺激 $S$ と感覚反応 $R$ の確率分布を考慮すれば次式となる。

$$P_d = P(S > R) = \int_0^{\infty} f_S(x) \left\{ \int_0^x f_R(y) dy \right\} dx \quad (1)$$

$$= \int_0^{\infty} f_S(x) F_R(x) dx$$

ここに

$P_d$  : 限界状態確率

$f_S(x)$  : 振動刺激(桁振動速度)の確率密度関数

$f_R(y)$  : 振動に対する感覚反応の確率密度関数

$F_R(x)$  : 振動に対する感覚反応の確率分布関数

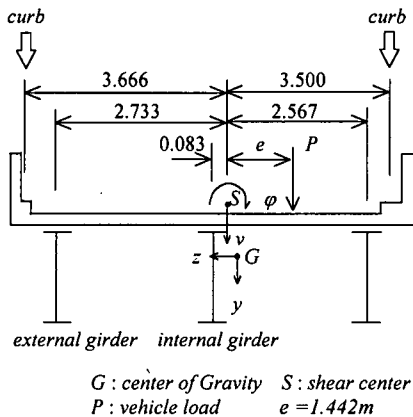
#### b) 感覚反応の確率密度関数

梶川らは文献9)、4)において、振動刺激として振動速度を考えれば、歩行者の感覚反応 $R$ は正規分布に従い、少し歩きにくい状態を振動限度度とした場合、実効値平均1.7cm/s、標準偏差0.6cm/sの正規分布になるとしており(Table 1参照)、この1.7cm/sを道路橋における振動使用性を検討する場合の振動限度度として提案している。この振動限度度は振動台(幅1.2m、長さ6.5m)における振動感覚実験をもとにして提案されたものであり、実歩道部にお

**Table 2** Structural properties of model bridges

Span length	$l$ (m)	40.4*	30	40	50	60	70
Weight per unit length	mgA (kN/m)	74.01	50.67	52.33	53.31	54.00	54.39
Moment of inertia of area	$I_x$ (m <sup>4</sup> )	0.220	0.118	0.233	0.402	0.627	0.763
Polar moment of inertia	$I_p$ (m <sup>4</sup> )	21.68	11.67	22.94	39.66	61.82	75.32
Torsional constant	$J$ (m <sup>4</sup> )	0.055	0.018	0.036	0.059	0.085	0.086
Warping constant	$C_w$ (m <sup>6</sup> )	1.126	0.606	1.191	2.060	3.211	3.912
Damping constant for 1st and 2nd modes	$h$	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026
Natural frequency							
Bending vibration	1st (Hz)	2.35	3.79	2.94	2.45	2.11	1.71
	2nd (Hz)	9.42	15.15	11.76	9.80	8.45	6.82
	3rd (Hz)	21.19	34.09	26.45	22.05	19.00	15.35
Torsional vibration	1st (Hz)	3.86	4.91	3.83	3.19	2.74	2.22
	2nd (Hz)	10.16	15.43	10.92	8.53	7.01	5.56
	3rd (Hz)	19.89	32.65	22.28	16.86	13.50	10.58

\* : Umeda entrance bridge of Hanshin Express



**Fig.2** Cross section of model bridge

ける実験から得られたものではないが、著者らが実施した実道路橋に付随する歩道部における歩行者の振動感覚調査<sup>16)</sup>でも、この振動速度実効値1.7cm/sは、歩きにくいとまでは感じないが、「はっきりと振動を感じ、不安感を覚える」程度の振動刺激と判断されたので、本論文ではこの数値を道路橋歩道部における歩行者の感覚反応の評価基準値とする。

**c) 振動刺激の確率密度関数**

20tf(196kN)車が橋梁上を走行する場合の振動速度を振動刺激と考え、この確率密度関数 $f_s(x)$ を、式(2)のように指数関数で表される路面凹凸パワースペクトル密度の各係数の確率特性を考慮して求める。

$$S_{z0}(\Omega) = \frac{\alpha}{\Omega^n + \beta^n} \quad (2)$$

ここに、

$\Omega$ : 路面周波数

$\alpha$ : 路面の平坦性を表す平滑度パラメーター、

$n$ : 周波数によるパワーの分布を示す指数、

$\beta$ :  $\Omega \rightarrow 0$ のとき、 $S_{z0}(\Omega)$ が無限大に発散しないための分布形状を表す形状パラメーター。

各係数は、文献17)に一般橋梁の路面凹凸の調査結果としてまとめられており、以下の特徴を有す。

- ①  $n$  値と  $\alpha$  値は無相関
- ②  $n$  値は平均値1.92、標準偏差0.283の正規分布
- ③  $\alpha$  値は平均値0.0098の指数分布
- ④  $\beta$  値は平均値0.08c/m

(以上は標準偏差を除いてガーダー系橋梁の値)

本研究では、以下の手順で1台の大型走行車両の通過による桁振動速度 (RMS 値+期待値) の最大値を求める。

- 1)  $n$  値に対応する100個の正規分布乱数を発生させ、各々の路面凹凸スペクトルに対する桁振動速度の RMS 値を非定常不規則振動解析にて求める。このとき  $\alpha$  値は平均値を使用する。
- 2) 1) で求めた各 RMS 値に対し、RMS 値は  $\sqrt{\alpha}$  に直接比例することを考慮して、 $\alpha$  値に対応する100個の指数分布乱数を発生させ、それに対応する RMS 値を求める。
- 3) 2) で求めた10,000個の RMS 値に期待値を加算し、それぞれの最大値を求め、確率分布へのあてはめを行う。

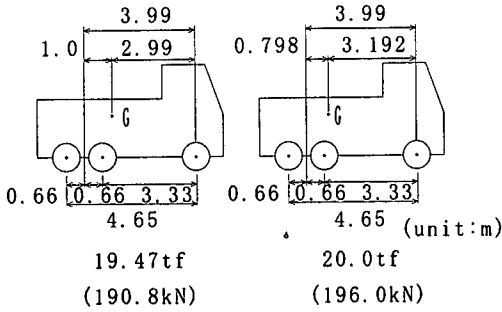


Fig. 3 Dimension of model vehicles

Table 3 Dynamic properties of model vehicles

Weight	(tf)	19.47	20.0
	(kN)	190.8	196.0
Degree of freedom		2	2
Natural frequency	(Hz)	3.3	3.0
Moment of inertia	( $\text{tm}^2$ )	58.22	50.94
Damping Constant		0.03	0.03

### 3. 解析モデル

#### (1) 橋梁モデル

シミュレーション解析例や不規則振動解析例を示すための解析対象橋梁として、阪神高速道路梅田入路橋のうち、Fig.2に示す支間長40.4mの単純桁を用いる。図中eは実験時の走行車の走行中心位置を示している。この橋梁には歩道がないが、試験車走行実験において外桁における動的応答が内桁におけるそれより大きい場合があった<sup>12)</sup>。また、振動使用限界状態確率を求めるモデル橋梁として、この梅田入路橋と文献18)を参照してモデル化した支間長30m~70mの単純桁橋を考える。橋梁モデルの断面形状はFig.2と同じとし、いずれも2車線を有する橋梁とする。その諸元をTable 2に示す。ここでは、道路橋における歩行者の振動感覚を扱うため、車線の端の縁石位置を歩道部とし、スパン中央において内桁、載荷側と非載荷側の外桁、および載荷側と非載荷側の歩道位置に着目する。考慮するモード次数は、既往の研究成果より曲げおよびねじり振動ともに3次とする<sup>19)</sup>。

#### (2) 車両モデル

走行車両は大型ダンプトラックの軸配置を表現して、前輪1軸、後輪2軸を有する2自由度振動系にモデル化し、シミュレーション解析例を示す場合には、梅田入路橋の試験車走行実験に用いられた19.47tf(190.8kN)の試験車を用いる。また、不規則振動解析例を示す場合や振動使用限界状態確率を求める場合には、一般的な20tf(196kN)車を考える。車両の寸法諸元

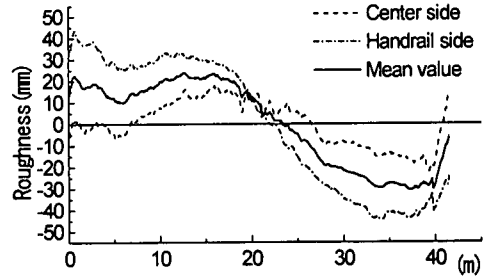


Fig.4 Profile of road surface roughness at UMEDA Entrance

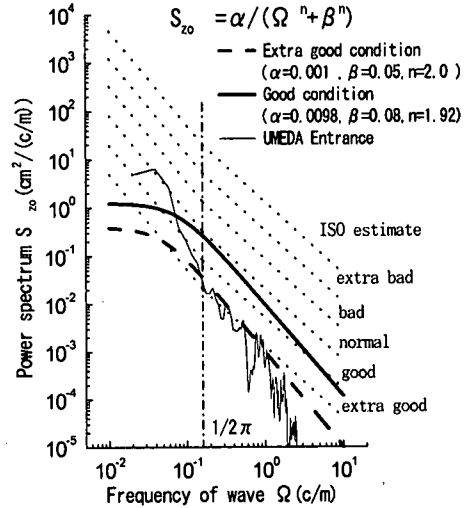


Fig.5 Power spectra or roadway roughness

をFig.3に示し、車両構造諸元をTable 3に示す。

本研究では、単一車両走行の場合を考える。また、本橋梁モデルは2車線橋であり、走行位置は全解析ケースとともに、せん断中心からの距離 $e=1.442\text{m}$ とする。

#### (3) 路面凹凸

シミュレーション解析例を示す場合には、路面凹凸として、梅田入路橋で車輪通過位置において測定した凹凸波形データ(Fig.4参照)を、左右輪位置の凹凸値を平均したものをを用いる<sup>12)</sup>。また、不規則振動解析例を示す場合には、その梅田入路橋での路面凹凸データから高速フーリエ変換により求めたパワースペクトル密度(Fig.5における細実線)ならびに、Fig.5に示す路面周波数の指数関数として近似した路面凹凸パワースペクトル密度を用いる<sup>17),20)</sup>。振動使用限界状態確率を求める場合にも、前述のように指数関数で表される路面凹凸パワースペクトル密度を、その確率特性を考慮して用いる。Fig.5における太実線はその平均的なパワースペクトル密度を示している。

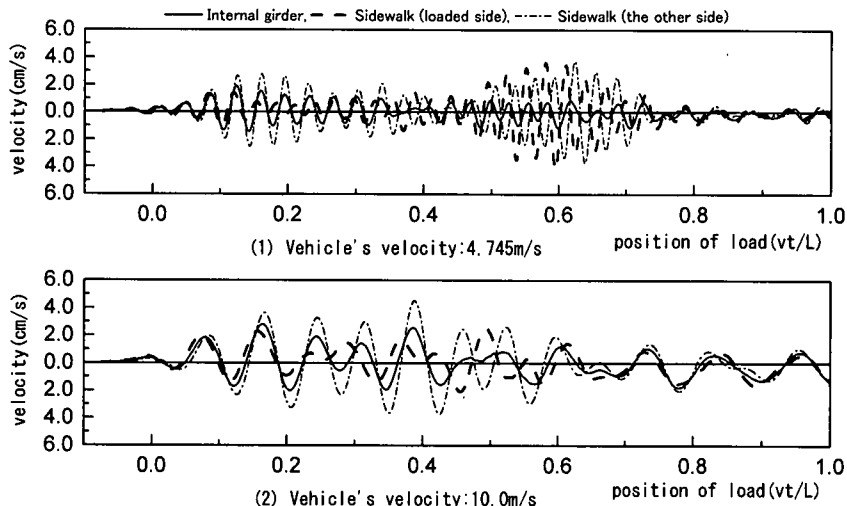


Fig.6 Time history of vertical velocity of girder at span center (Vehicle:weight=190.8kN)

#### 4. 速度応答の解析結果

##### (1) シミュレーション解析結果

3. (1)に記したように、梅田入路の支間長40.4mの単純桁橋では、試験車走行実験において外桁の動的応答が内桁より大きい場合があり、文献12)では曲げとねじりを考慮したシミュレーション解析により、内桁および外桁の動的ひずみ応答を求め、それが実測結果と良く一致することを確認している。その試験車両19.47tf(190.8kN)車による走行速度4.745m/sのときのシミュレーション解析結果(桁鉛直方向振動速度応答)をFig.6(1)に示す。路面凹凸は実測値を用いている。なお、横軸は車両重心位置の桁上位置を示している。車両が桁に進入後 $vt/L=0.1$ 付近から内桁と外桁の速度応答に差が生じ、特に車両が支間中央付近( $vt/L=0.6$ )では、内桁に比べて歩道位置の応答が明らかに大きくなり、また載荷側と非載荷側の速度応答が完全に逆相になってねじり振動が卓越している様子が伺える。このとき、歩道位置での速度応答は最大4cm/sを超え、Table 1)に示すかなり歩きにくい状態の恕限度のピーク値3.8cm/sをも越えている。

一方、同じ車両を用いても、走行速度10m/sの場合は、Fig.6(2)に示すように、歩道位置における振動速度は内桁に比べてそれほど大きくなり、車両速度と路面凹凸との兼ね合いで桁の動的応答が大きく異なることを示している。

##### (2) 非常連成不規則振動解析による振動使用性の評価

不規則振動解析による実効値の評価では、車両条

件とし、20tf(196kN)車が10m/sで走行する場合を考える。梅田入路橋での路面凹凸スペクトルを用いた場合の、スパン中央における各着目点の振動速度の解析結果をFig.7(1)に示す。図中には、路面平滑走行時のシミュレーション解析から得られる期待値のみと、これに2乗平均値応答RMSを加えたものを示してある。

解析結果は、「はっきりと振動を感じ、不安感を覚える」という感覚反応の評価基準値として採用した実効値1.7cm/sを少し越える場合がある。モデル化した路面凹凸スペクトルを用いた解析結果をFig.7(2),(3)に示す。路面凹凸の振動速度に及ぼす影響が顕著であり、高速道路完成直後に測定された「極良」の路面凹凸スペクトル<sup>20)</sup>による解析結果は、Fig.7(2)に示すように評価基準値1.7cm/sを超えることはないが、一般の道路橋での路面凹凸の平均的な特性を表すスペクトル<sup>17)</sup>を用いた解析結果は、Fig.7(3)に示すように、橋梁への車両後輪進入以後ほぼ全区間にわたって基準値を越えている。また、ねじり振動の影響により載荷側と非載荷側の歩道位置あるいは内桁の応答に差が生じているが、この路面凹凸の場合、本橋ではこのねじり振動を考慮するまでもなく明らかに振動使用性に問題があると言えよう。

従来から言われているように、橋梁の動的応答には路面凹凸の影響が大きく、路面凹凸の管理が振動使用性確保のために重要であることが、本解析例からも理解できる。また、歩行者が受ける振動速度を考える場合、歩道は一般的に幅員の端にあることから、より実態に則した解析結果を得るため、曲げとねじりの連成振動を考慮して解析を行う必要がある。

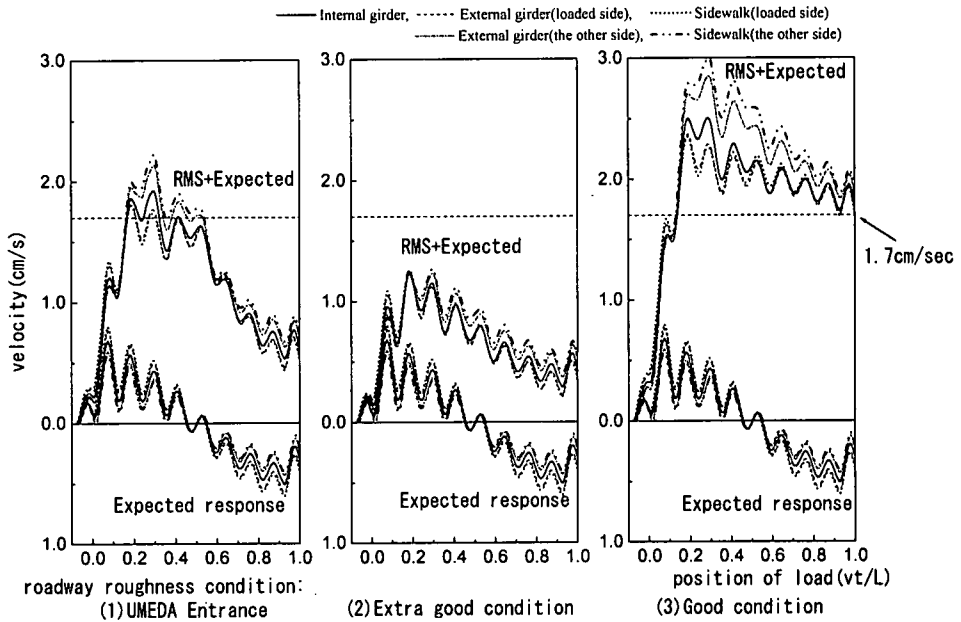


Fig.7 Time history of R.M.S value and expected value of vertical velocity of girder at span center (Vehicle:weight=196kN, velocity=10.0m/s)

## 5. 振動使用性の確率論的評価

### (1) 速度応答の最大値分布

2. (3) c)に記したように、10,000個の速度応答の最大値について、正規分布、対数正規分布、極値I型分布(Gumbel分布)、極値II型分布(Fréchet分布)、極値III型分布(Weibull分布)の5種類にあてはめた結果、Gumbel分布への適合度が最も良かった<sup>21)</sup>。なお、車両は10m/sおよび20m/sで走行するものと仮定する。

### (2) 振動使用限界状態の超過確率

以上の結果より、2. (3) a)の式(1)で計算した限界状態確率はそれぞれ Table 4, Fig.8 のようになる。この限界状態確率は、1台の大型車が橋梁を通るとき、橋上のスパン中央付近を歩いている人の何割の人が、「はっきりと振動を感じ、不安感を覚える」かを示している。

走行速度 10m/s の場合、Fig.8(1)に示すように、限界状態確率は、全般に支間長 40m でピークを示し、支間長が長くなるに従い低下していく。支間長 40m でピークを示すのは、車両と橋梁曲げ振動の共振現象により動的応答が大きくなったことに対応するものと考えられる。この影響により支間長 30m~50m ではいずれの着目位置においても限界状態確率は 50%を超えて大きい値となっている。

ねじり振動の影響は内桁と歩道位置における限界状態確率の差として現れると考えれば、いずれの支間長においてもねじり振動の影響で、歩道位置における限界状態確率は内桁におけるそれに比べて大きくなっているが、限界状態確率が大きい 40m, 50m 橋梁ではその差は 10%程度と小さいのに対し、限界状態確率の比較的低い 60m, 70m 橋梁では 20%程度と逆に大きくなっている。

走行速度 20m/s の場合、Fig.8(2)に示すように、限界状態確率は、全般に走行速度 10m/s におけるそれに比べて大きくな

る。これは、動的応答に対する路面凹凸スペクトルの低周波成分の寄与度が大きくなるためと考えられ、大型車両の高速走行が歩行者の振動使用性に悪影響を与えることがわかる。この結果、支間長 30m~50m では、限界状態確率は 80%を超える。

ねじり振動の影響は、走行速度 10m/s のときと同様に、いずれの支間長においても、歩道位置における限界状態確率は内桁におけるそれに比べて大きくなり、支間長 30m~50m では、限界状態確率が 80%を超えており内桁と歩道位置での限界状態確率の差は顕著ではないが、限界状態確率の比較的低い 60m, 70m 橋梁では 20%程度になっており、橋梁の振動使用性を評価する場合に、ねじり振動の影響を無視できない場合のあることが分かる。

**Table 4** Vibration serviceability limit state probability

1) Vehicle speed=10m/s

bridge length(m)	Internal girder	loaded side		the other side	
		External girder	Sidewalk	External girder	Sidewalk
30	60.6	73.0	76.9	52.8	53.4
40	73.7	83.0	83.8	80.7	80.9
50	68.7	70.7	74.4	74.0	76.5
60	44.1	61.5	68.2	44.5	47.5
70	27.0	41.3	46.7	19.6	19.5

2) Vehicle speed=20m/s

bridge length(m)	Internal girder	loaded side		the other side	
		External girder	Sidewalk	External girder	Sidewalk
30	89.2	91.2	91.0	89.6	88.1
40	86.5	89.4	88.5	84.8	82.8
50	84.1	87.9	86.1	77.3	80.0
60	76.8	84.8	86.3	62.9	59.6
70	66.4	77.1	81.9	50.0	44.6

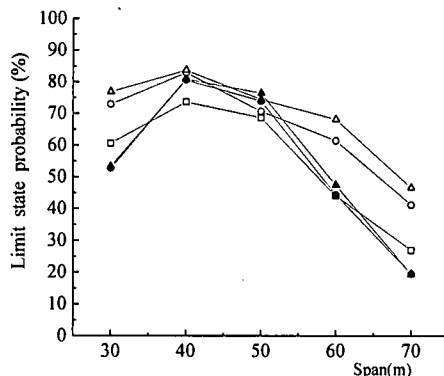
**Table 5** Maintenance criteria of road roughness

bridge span length(m)	roughness $\sigma$ (cm)	
	V=10m/s	V=20m/s
30	0.31	0.16
40	0.27	0.16
50	0.31	0.18
60	0.37	0.25
70	0.53	0.32

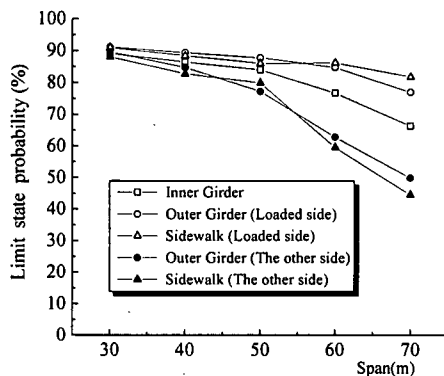
## 6. 路面凹凸維持管理目標値

前項の結果から、一般的な支間長 30m~70m の単純桁橋の振動使用性を考える場合、一般道路橋における路面凹凸の実測スペクトルの確率特性<sup>17)</sup>を考慮する場合、30m~50m 橋梁の使用限界状態確率は 70% から 90%に達し、振動使用性に問題ありという結果になる。これは、これらの橋梁で振動使用性を向上させるためには、その路面凹凸の平滑度を向上させる必要があることを示している。

道路橋の振動使用性に関する限界状態確率がどの程度ならば適切であるかは判断の難しい問題である。使用限界状態は直ちに構造物の破壊につながるものではないため終局限界状態確率ほど小さく設定する必要はないと考えられる。また、振動する橋梁を歩き慣れた歩行者はその振動に適応して徐々に不安感を覚えなくなることも当然考えられる。そこでここでは、1台の大型車が橋梁を通るとき、橋上のスパン中央付近を歩いている人が、「はっきりと振動を感じ、不安感を覚える」確率が 50%となるための路面凹凸の標準偏差を求め、目標値として示す。具体



1) Vehicle speed 10m/sec



2) Vehicle speed 20m/sec

**Fig.8** Limit state probability

的には、 $\beta$ は平均値 0.08c/m に固定し、 $n$ 値は前記の 100 個の正規分布乱数を用い、各  $n$ 値に対し振動速度応答の最大値が 1.7cm/s となるような  $\alpha$  を求め、そのパラメータで表されるパワースペクトル密度関数からその標準偏差を求める。この 100 個の標準偏差の平均値を路面凹凸の管理目標値として **Table 5** にまとめる。管理目標値は車両の走行速度が速い方が厳しくなる傾向にあるが、この目標値を満足すれば、本モデル橋梁において大型車両走行時の歩行者の振動感覚に関する使用性の限界状態確率を 50%に抑えることが可能になる。このように、大型車両走行を考える場合、歩行者の振動感覚に関する使用性確保のためには、路面凹凸の管理が重要であるが、今後は制振装置などを用いた橋梁制振技術の発展<sup>22)</sup>、あるいは車両そのものの構造の改良<sup>23)</sup>等による振動抑制も検討されていくものと考えられる。

## 7. 結論

本研究では、大型車両走行時における道路橋の歩行者の振動感覚に関する使用性について、既往の研

究による評価法に基づき、理論解析の結果を確率論的に考察し、路面凹凸の管理目標値に言及した。

- (1) 道路橋で歩行者が受ける振動速度を考える場合、歩道は一般的に幅員の端にあることから、曲げとねじりの連成振動を考慮して解析を行う必要性があることをシミュレーション解析例より示した。
- (2) 道路橋において、路面凹凸の振動速度に及ぼす影響が顕著であり、一般の道路橋における実測路面凹凸の平均的な特性を表すスペクトルを用いた解析結果では、「はっきりと振動を感じ、不安感を覚える」感覚反応を評価基準とした実効値 $1.7\text{cm/s}$ を越える場合のあることを示した。
- (3) 一般道路橋の路面凹凸確率特性を考慮し、車両走行時の桁振動を振動刺激とし、「はっきりと振動を感じ、不安感を覚える」という歩行者の振動感覚反応を評価基準として求めた支間長 $30\text{m} \sim 70\text{m}$ の単純桁橋における振動使用性の限界状態確率は総じて $50\%$ を超える大きな数値となった。
- (4) この限界状態確率が $50\%$ となるような路面凹凸の標準偏差を管理目標値として提示し、大型車両走行時の振動使用性確保には路面凹凸の管理が重要であることを示した。

#### 参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会：交通荷重による橋梁振動に関する研究の現状と課題（橋梁交通振動研究小委員会報告書），1994. 4.
- 2) 秒速 $16\text{m}$ の風が橋桁を揺らす一渦励振の抑制にTMDを設置，日経コンストラクション，1995. 4. 28
- 3) 土木学会構造工学委員会 振動制御小委員会：振動制御コロキウム PART A 構造物の振動制御，1991. 7.
- 4) 梶川康男，小堀為雄：動的応答から見た歩道橋の使用性に関する確率論的考察，土木学会論文報告集，No. 266，pp. 51-61，1977. 10.
- 5) 梶川康男：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察，土木学会論文報告集，No. 325，pp. 23-33，1982. 9.
- 6) 田中信治，加藤雅史：桁形式歩道橋の設計時振動使用性照査手法の提案，構造工学論文集，Vol. 40A，pp. 693-702，1994. 3.
- 7) 小幡卓司，窪田公二，林川俊郎，佐藤浩一：歩道橋の使

用限界状態に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 41A，pp. 669-676，1995. 3.

- 8) 小堀為雄，梶川康男：道路橋の振動とその振動感覚，土木学会論文報告集，No. 222，pp. 15-23，1974. 2.
- 9) 小堀為雄，梶川康男：橋梁振動の人間工学的評価法，土木学会論文報告集，No. 230，pp. 23-31，1974. 10.
- 10) 小堀為雄，梶川康男：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. 4.
- 11) 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. 12.
- 12) 川谷充郎，西山誠治：路面凹凸を考慮した道路橋の走行車両による動的応答特性，構造工学論文集，Vol. 39A，pp. 733-740，1993. 3.
- 13) 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特性に関する研究，土木学会論文集，第 392 号/I-9，pp. 351-358，1988. 4.
- 14) 川谷充郎，小林義和，高森和恵：曲げとねじりを考慮した単純桁橋の走行荷重による非定常連成不規則振動解析，土木学会論文集，No. 570/I-40，pp. 231-238，1997. 7.
- 15) 川谷充郎：道路橋の振動使用性，橋梁交通振動に関するコロキウム論文集 PART A，pp. 61-68，1995. 11.
- 16) 川谷充郎，小林義和，下村和也：道路桁橋の振動使用性の確率論的評価と路面凹凸維持基準，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集，I-B274，1999. 9.
- 17) 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，No. 315，pp. 149-155，1981. 11.
- 18) 山田善一，小堀為雄：活荷重に対する道路橋の動的応答一衝撃係数一に関する考察，土木学会論文集，第 148 号，pp. 40-50，1967. 12.
- 19) 川谷充郎，嶋田玲志：桁橋の構造諸元実態調査と走行荷重による不規則振動，構造工学論文集，Vol. 34A，pp. 721-730，1988. 3.
- 20) 岡林隆敏，山口実浩：連行車両による道路橋の二乗平均応答解析，土木学会論文集，第 334 号，pp. 1-11，1983. 6.
- 21) 川谷充郎，小林義和，今枝拓也：道路橋の交通振動使用性の確率論的評価，土木学会 橋梁振動コロキウム論文集，pp. 131-138，1997. 10.
- 22) 岡林隆敏，加賀敏明，吉村徹，尾口慎也：単一車両が走行する道路橋の確率的制御理論による振動制御，土木学会論文集 No. 591/I-43，pp. 339-349，1998. 4.
- 23) 野原 晴，竹之内博行，国広卓夫：エアサス化による大型トラックの道路に与える影響の調査研究，自動車技術，Vol. 53，No. 5，PP. 63-68，1999.

(2000. 2. 28 受付)

## PROBABILISTIC SERVICEABILITY FOR PEDESTRIANS OF TRAFFIC-INDUCED VIBRATION OF HIGHWAY BRIDGES

Mitsuo KAWATANI, Yoshikazu KOBAYASHI and Takuya IMAEDA

Among various limit states, serviceability limit state has not been fully investigated, because serviceability is not a fatal phenomenon in comparison with a collapse or a damage of structures. This study applies to a vibration as a serviceability limit state. Dynamic response of highway bridge under a moving vehicle is analyzed by simulation method and means of nonstationary random vibration theory, taking account of roadway roughness and coupling vibration of bending and torsion. Root mean square (RMS) values of a velocity of girder are calculated and considered as a vibration stimulus for pedestrians, and limit state probability of human vibration sensitivity is calculated. And also maintenance criteria of road roughness are examined.