

大阪大学工学部 正 員 川谷充郎

大阪大学大学院 学生員 ○今枝拓也

1. まえがき 従来、使用限界状態については、直ちに損傷を受けることが少ないことから、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亙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。本研究では使用限界状態として振動使用性に着目し、道路橋における歩行者の振動感覚の観点から考える。

ところで、試験車走行による桁橋の動的応答実験から、橋梁の振動応答は内桁と外桁で異なっていることが報告されている¹⁾。また通常、歩道は幅員の端にあることより、車両が橋梁のせん断中心から偏心して走行する場合には、桁橋の振動感覚を評価する場合にも、曲げ振動のみでなくねじり振動も考慮に入れる必要があるものと考えられる。そこで、曲げとねじりを考慮した非定常連成不規則振動解析により、内桁、外桁および幅員端における動的応答を求め、振動速度の実効値の評価を行う。さらに、振動使用性を確率論的に評価する方法について考える。評価の基準となる振動限度については Table 1 に示す梶川らの研究²⁾があり、これを利用するものとする。

2. 不規則振動解析手法³⁾ 本解析手法は、路面凹凸を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ものである。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加えて評価することとする。

3. 解析モデル (1)橋梁モデル 対象橋梁として支間長 40m の単純桁橋を用いる。構造諸元を Table 2 に示す。着目点はスパン中央において、内桁、外桁および歩道位置として幅員端を考える。モード次数は曲げ振動、ねじり振動ともに3次まで考慮した。

(2)車両モデル 走行車両は前輪1軸、後輪2軸を有する 20tf 車を2自由度振動系にモデル化する。諸元を Fig.1 および Table 3 に示す。

(3)路面凹凸 路面凹凸としては、路面凹凸パワースペクトル密度 $S_{20}(\Omega)$ を路面周波数 Ω の指数関数として $S_{20}(\Omega) = \alpha/(\Omega^n + \beta^n)$ で近似したモデルを用い、パラメータと共に

Fig.2 に示す。

4. 不規則振動解析結果

以上のモデルで、単一車両走行によるスパン中央における各着目点の振動速度は Fig.3 のようになる。橋梁

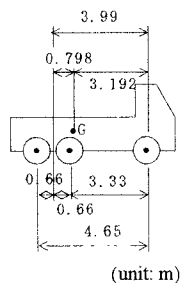


Fig.1 Dimension of model vehicle

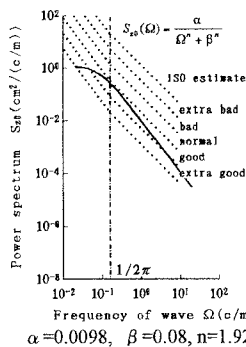


Fig.2 Power spectrum of roadway roughness

Table 1 Category and lower limit at walking

Content of Category	Lower limit (cm/sec)	
	Peak Value	RMS Value
Not perceptible		
Lightly perceptible	0.6	0.42
Definitely perceptible	1.2	0.85
Lightly hard to walk	2.4	1.7
Extremely hard to walk	3.8	2.7

Table 2 Structural properties of model bridge

Span length	(m)	40.0
Weight per unit length	(tf/m)	5.34
Area of section	(m ²)	2.626
Moment of inertia of area	(m ⁴)	0.2324
Polar moment of inertia		
× Weight per unit length	(tf·m)	3.117×10^1
Torsional constant	(m ⁴)	5.796×10^{-2}
Warping constant	(m ⁶)	1.191
Damping constant		
for 1st and 2nd modes		0.020
Natural frequency		
Bending vibration	1st (Hz)	2.94
	2nd (Hz)	11.75
	3rd (Hz)	26.44
Torsional vibration	1st (Hz)	5.54
	2nd (Hz)	14.61
	3rd (Hz)	28.66

Table 3 Dynamic properties of model vehicle

Weight	(tf)	20.0
Degree of freedom		2
Natural frequency	(Hz)	3.0
Moment of inertia	(tm ²)	50.94
Damping Constant		0.03
Vehicle's velocity	(m/s)	10.0

への車両後輪進入以後ほぼ全区間にわたって少し歩きにくい状態の恕限度を越えており、内桁と比較して外桁、さらに幅員端での応答が大きくなる。幅員端での最大値は3.88cm/secとなり、Table 1に示すかなり歩きにくい状態を考慮した恕限度も越えている。

5. 確率論的評価 (1)解析法 橋梁の振動が歩行者に及ぼす心理的影響に関して評価する場合、使用限界状態とは振動がある限度を超えるということではなく、歩行者が不快あるいは不安の念を持つ状態であると考えることができる⁴⁾。歩行者の振動感覚の評価尺度としては、Table 1に示す梶川らの振動恕限度がある。文献4)において、歩行者の感覚反応は正規分布に従い、少し歩きにくい状態を振動恕限度とした場合、平均値 1.7cm/sec、標準偏差 0.6cm/sec の正規分布になるとしている。この結果を利用し、動的応答量を振動刺激として、心理的な限界状態が発生する確率（限界状態確率）を求めると次式のようになる。

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

$$= \int_0^\infty f_s(x) F_R(x) dx$$

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

($\mu=1.7\text{cm/sec}$, $\sigma=0.6\text{cm/sec}$ の正規分布)

$F_R(x)$: 振動に対する感覚反応の確率分布関数

(2)振動刺激の確率密度関数 ここで、振動刺激の確率密度関数 $f_s(x)$ を求める必要がある。ここ

では、車両は10m/secで走行するものと仮定し、Table 2の40m橋梁について、Table 4に示す路面凹凸を使用することにより変化する桁振動速度(期待値+RMS値)の最大値を求め(Table 4参照)、確率分布へのあてはめを行う。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(Frechet分布)、極値III型分布(Weibull分布)の5種類にあてはめた結果、極値II型分布への適合度が最も良かった。極値II型分布のパラメータをTable 5に示す。

(3)振動使用限界状態の超過確率 以上の結果より式(1)で計算した限界状態確率はそれぞれTable 5のようになった。この限界状態確率は、1台の大型車が橋梁を通るとき、橋上を歩いている人の何割の人が不快に感じるかを示している。その値は幅員端で約47%に達しており、かなり大きな値といえる。使用性についての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り、明確な根拠を持つ値は未だ示されていない。今後、使用性に問題がないとされている橋梁においてコードキャリブレーションを行い、目標となる限界状態確率を設定することが望まれる。

[参考文献]

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 川谷充郎・小林義和・高森和恵：曲げとねじりを考慮した桁橋の走行荷重による非定常連成不規則振動解析，橋梁交通振動に関するコロキウム論文集 PART B, 1995.11.
- 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.

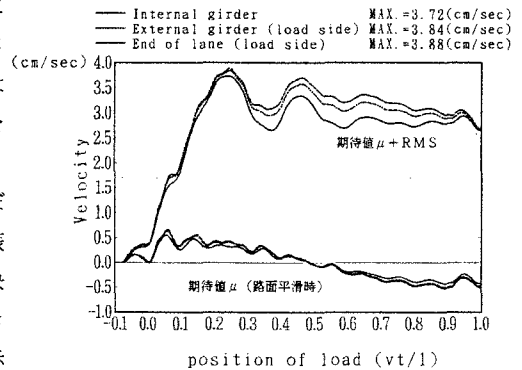


Fig.3 Velocity response of girder

Table 4 Parameter of roadway roughness and maximum value of velocity of girder

Roadway roughness	Parameter of roadway roughness			Max. value of velocity of girder (cm/sec)		
	α	n	β	Internal girder	External girder	End of lane
1	0.003000	2.500	0.020	3.53	3.61	3.64
2	0.000110	2.236	0.013	0.84	0.91	0.94
3	0.000081	3.006	0.036	1.06	1.13	1.16
4	0.000184	3.060	0.035	1.48	1.57	1.59
5	0.000281	2.593	0.020	1.40	1.48	1.50
6	0.000169	2.479	0.037	1.02	1.09	1.12
7	0.001000	2.000	0.050	1.51	1.59	1.63
8	0.009800	1.920	0.080	3.72	3.84	3.88
UMEDA entrance	-	-	-	2.75	2.77	2.79

Table 5 Parameter of probability density function and limit state probability

	Parameter of Frechet distribution		Limit state probability (%)
	u	k	
Internal girder	1.189	2.005	42.9
External girder	1.265	2.099	45.8
End of lane	1.294	2.135	46.9