

# 道路橋の振動とその振動感覚

## PSYCHOLOGICAL EFFECTS OF HIGHWAY BRIDGES VIBRATION ON PEDESTRIANS

小堀 為雄\*・梶川 康男\*\*  
By Tameo Kobori and Yasuo Kajikawa

### 1. まえがき

近年、橋梁の設計理論の進歩、計算能率の高度化および使用材料の高強度化によって、比較的剛性の小さい橋梁が出現するようになった。一方、交通量は増大し、車両は大型化していることから過大な荷重を受けている橋梁が多く実在している。これらの橋梁に共通していえることに、走行荷重による動的安定性の問題がある。この問題に対して、従来は主として力学的あるいは材料強度学的に、または車両の走行安定性の面から研究されてきた傾向がある。しかし、最近、一般歩行者に不快感を与える橋梁が現われてきたことは周知のとおりである。

本研究では、道路橋の振動問題を一般歩行者に与える振動感覚という立場から究明することを試みた。この種の研究は、現在のところ数も少ない。わが国では、最近、松本<sup>1)</sup>や牛尾<sup>2)</sup>らによって歩道橋に対する研究がなされ、さらに橋梁と人間の振動感覚に注目した研究としては、西脇<sup>3)</sup>、片山<sup>4)</sup>らや著者<sup>5)</sup>の研究が発表された程度で、この問題はこれからのひとつの課題であろう。

本論文では、主として走行自動車による道路橋の振動と歩行者の振動感覚との関係について、室内実験と実橋での振動調査結果とを対比しながら論じ、この問題を究明して行くことを目的にしている。次節 2. では人間の振動感覚について感覚テストを含めて考察し、3. では数十橋に及ぶ各種道路橋の実測結果を紹介し、4. では道路橋に対する振動感覚の評価について論ずる。

### 2. 振動感覚テスト

#### (1) 振動感覚テストへのアプローチ

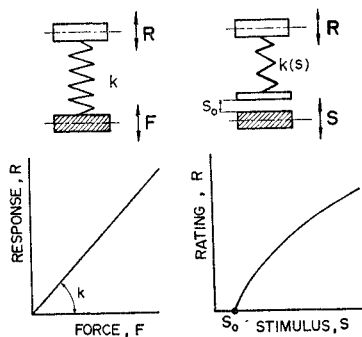
##### a) 刺激と感覚

振動感覚テストについて述べる前に、著者が行ったテストの基礎となる刺激と感覚との関係について力学モデルと対比しながら説明しておく。

さて、ある刺激が人間のある部分に加わると、神経を伝わって脳に伝達され、これが感覚として現われるものであり、刺激と感覚との関係は振動モデルにおける入力とその応答の関係に似ている。しかし、異なる点として、振動モデルでは入力があれば必ず応答があるのに対し、刺激と感覚との関係では小さな刺激は経路中に吸収されてしまって感覚として現われない範囲が存在することがあげられる。これを図に示すと図-1 のようである。図-1(b)では、刺激体がある刺激  $S_0$  以下では感覚反応がなく、その値以上になって始めて感覚反応があることを示している。この感覚が生じ始める点を閾(いき)という。

また、刺激と感覚との関係には次のような特性があるとされている<sup>6)</sup>。すなわち、刺激と感覚が一次的な関係ではなく、刺激  $S$  とその増分  $dS$  との比が一定であるという Weber の法則により、感覚的増分  $dR$  と  $dS$  は比例的に変化するものと考えられる。これを式で示せば

$$dR = C \frac{dS}{S} \dots\dots\dots(1)$$



(a) 振動 (b) 感覚  
図-1 振動モデルと感覚モデル

\* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木工学科  
\*\* 正会員 金沢大学助手 工学部土木工学科

ここに、 $C$  は定数であり、 $dS$  は刺激  $S$  に対する弁別閾（刺激が変化したことに基づく刺激の最小変化量）である。

式 (1) を Fechner の基本公式という。さて、式 (1) を微分方程式と考えるならば、感覚量  $R$  は積分することにより求められる。すなわち、

$$R = C \log_e S + A \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに、 $C, A$  は定数であるが、 $A$  は刺激閾 ( $S=S_0$ ) のところでは  $R=0$  であることから

$$A = -C \log_e S_0 \dots\dots\dots (3)$$

となる。したがって、式 (3) を式 (2) に代入すれば、

$$R = C \log_e \left( \frac{S}{S_0} \right) \dots\dots\dots (4)$$

と書きあらためられる。 $S_0$  を単位とし、自然対数を常用対数で表示すると式 (4) は次式となる。

$$R = K \log_{10} S \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $K = C \log_e 10$  である。

式 (5) が、Fechner の法則と呼ばれるものである。

Fechner の法則は各種の改良が試みられているが、代表的なものとしては、 $dS/S$  を一定とせずに、 $dS/S^n$  を一定と考え、導かれた  $n$  乗法則がある。この法則は J.P. Guilford により導かれたが、引用されることが少なく、S.S. Stevens によって提案された経験式が  $n$  乗法則としてよく引用されている。その経験式は、次式のようにある。

$$R = kS^n \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $k, n$  は実験値から求められる定数である。

式 (5) と式 (6) を図示すると図-2 のようになり、それぞれ傾向は類似している。医学や心理学の分野で、この2式がよく用いられているので、本研究においてもこの2式を橋梁の振動感覚を求める基本式とする。

**b) 振動刺激とその感覚**

本論文の主題である人間の振動感覚を生じさせる刺激がどのようなものかについて考えるとき、われわれは直感的に「振動数とその振幅である」と推測できる。すな

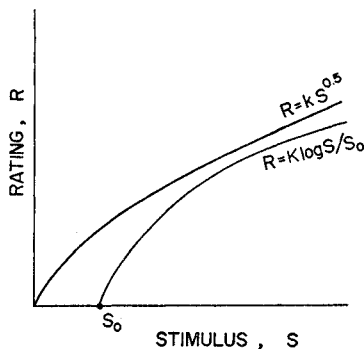


図-2 刺激と感覚の関係

わち、振動数の高い振動ほどより強い刺激を与え、また、振幅が大きいほど人間に振動しているという実感を与える。このことから著者は、振動の刺激として次の関係を与えた。

$$S = a \omega^m \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $a$  は振動の変位振幅（片振幅）、 $\omega$  は円振動数、 $m$  は実験によって求められる定数である。

式 (7) を式 (5) に代入し、刺激閾  $S_0$  を単位に考える

$$R = K \log_{10} (a \omega^m / S_0) \dots\dots\dots (8)$$

となり、一方、式 (7) を式 (6) に代入すると

$$R = k (a \omega^m)^n \dots\dots\dots (9)$$

となる。この2式が振動刺激とその感覚を表わす式である。

**(2) 振動感覚テストA (マグニチュード推定法)**

式 (8) と式 (9) を基本式として、橋梁の振動と振動感覚について研究を進めるにあたって、これらの式の各定数を求めなければならない。このことから次のようなマグニチュード推定法<sup>7)</sup>に基づく振動感覚テストを行った。まず、第一段階として、弛緩した直立姿勢でテストを行い、テストの振動数は実橋の振動数を考慮して、低サイクルの範囲で種々の振幅をもつ振動を加えた。

このテストは、ある振動数と変位振幅をもつ振動（基準振動）を1つ設定し、その基準振動の与える感覚量を中心に10とすると、個々の振動（評定振動）の与える感覚量がいかに相当するかを数値によって報告させるものである。具体的には、金沢大学に設置されている

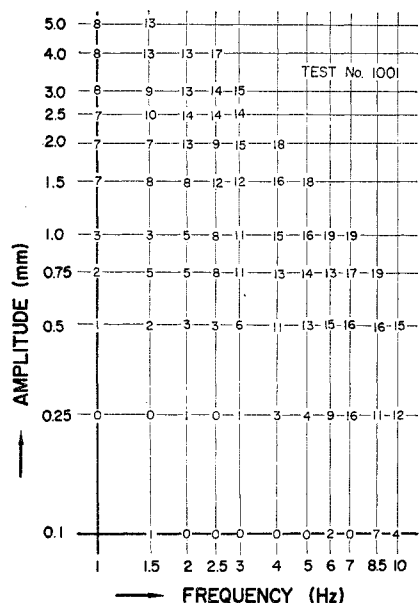


図-3 テストAの一例（数字はマグニチュード）

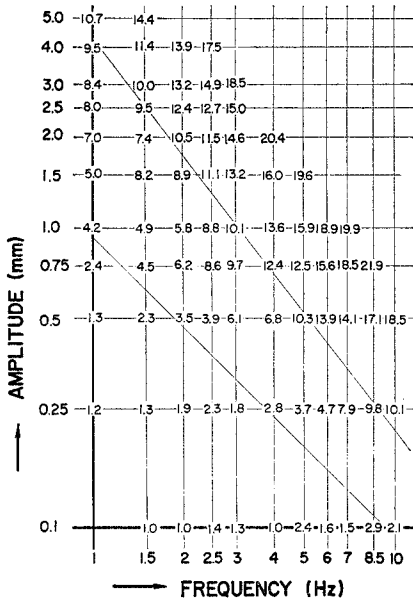


図-4 テストAの対数平均値 (数字はマグニチュード)

電気油圧式(サーボパルサ)振動発生機を用い、実験桁を上下方向に正弦振動させ、桁上の被験者にそのときの振動感覚量を答えさせた。振動数と振幅との種々の組合せを考え、これをランダムにプログラムし、被験者には振動番号のみを知らせた。なお、振動を与える時間の長さについて問題があるろうが、今回はすべて8秒とした。基準振動として振動数 3 Hz、変位振幅 1 mm を設定し、評定振動として振動数範囲 1~10 Hz、最大振幅 5 mm とした。

本テストの結果の一例を図-3 に示す。図-4 には被験者 10 人に対し 2 回ずつ計 20 回の結果を各評定振動ごとに対数平均した値を示した。図-3 および図-4 はいずれも対数座標であり、図-4 の細線はマグニチュード等値線の一例である。この図から、振動数と振幅はマグニチュードをパラメーターに指数関係にあることがわかる。

いま、式 (8) を変形すると

$$\log_{10} a = -m \log_{10} \omega + B \dots\dots\dots(10)$$

ここに

$$B = \frac{R}{K} + \log_{10} S_0 \dots\dots\dots(11)$$

となり、図-4 の等値線の勾配が式 (10) の  $m$  の値であることがわかる。

この  $m$  の回帰を求めた結果が表-1 である。この表から次の関係が得られる。

$R$  が低い範囲 (マグニチュードが 8 以下);  $m \approx 1.0$

$R$  が中程度の範囲 (マグニチュードが 8~12);  $m \approx 1.4$

$R$  が高い範囲 (マグニチュードが 12 以上);  $m \approx 1.6$

このようにマグニチュードが大きくなると  $m$  が大きくなり、等値線の勾配が急になってくることがわかる。このような傾向は、Zeller<sup>8)</sup> や Schubert<sup>9)</sup> の研究において認められていることと一致する。

一方、式 (9) を変形して式(10)と同様な式を得ることができる。この場合、式 (10) の定数  $B$  は

$$B = \frac{1}{n} (\log_{10} R - \log_{10} k) \dots\dots\dots(12)$$

である。ここで、式 (11)、(12) の  $K$ 、 $S_0$  および  $k$ 、 $n$  は定数であり、それぞれの振動感覚を研究する対象物特有のもので、個々の場合、たとえば橋梁の振動特性と人間の感覚から実験的に求められねばならない。このことは 4. で述べる。

(3) 振動感覚テスト B (系列カテゴリ法)

テストAは振動感覚の数量化のために行ったのに対し、このテストは振動感覚がどのような範ちゅう(以後、カテゴリという)に属するかを調べるために行う。すなわち、計量心理学でいう系列カテゴリ法<sup>5)</sup>に基づく振動感覚テストである。本研究では、表-2 に示すように 5 段階に順序づけられたカテゴリを用意し、テストAと同時にを行った。

表-1 テストAの重回帰結果

Range of magnitude	Expression No.	Regression coefficient			Degree of freedom		Unbiased variance		Ratio $V_1/V_2$	$F(\phi_1, \phi_2, \alpha)$	
		$K$ or $k$	$m$	$B$ or $n$	Reg. ( $\phi_1$ )	Res. ( $\phi_2$ )	Reg. ( $V_1$ )	Res. ( $V_2$ )		(%)	$F(\alpha)$
$0 < M \leq 4$	Exp. No. 8	2.99	0.88	3.85	2	19	0.580	0.0027	21.65	0.5	7.09
	No. 9	4.46	0.90	0.65			0.2808	0.0093			
$4 < M \leq 8$	No. 8	8.15	1.08	5.11	2	10	0.07035	0.00644	10.92	0.5	9.43
	No. 9	5.01	1.09	0.60			0.03865	0.0032			
$8 < M \leq 12$	No. 8	7.56	1.41	4.02	2	15	0.08145	0.00155	52.55	0.5	7.70
	No. 9	5.39	1.41	0.34			0.0161	0.0003			
$12 < M \leq 16$	No. 8	8.67	1.68	1.82	2	13	0.0521	0.00619	8.42	0.5	8.19
	No. 9	5.87	1.67	0.27			0.0050	0.00061			
$16 < M$	No. 8	17.56	1.60	1.49	2	6	0.04908	0.003658	13.42	1.0	10.93
	No. 9	4.11	1.60	0.42			0.002864	0.000217			

表-2 カテゴリと振動刺激

Category No.	Content of Category	Stimulus	Lower limit
0	全く感じない (Not Perceptible)	—	—
1	少し感じた (Lightly Perceptible)	$a\omega$	0.26
2	明らかに感じた (Definitely Perceptible)	$a\omega$	0.57
3	不快である (Unpleasant)	$a\omega^{1.4}$	7.3
4	苦痛である (Pain)	$a\omega^{1.6}$	32

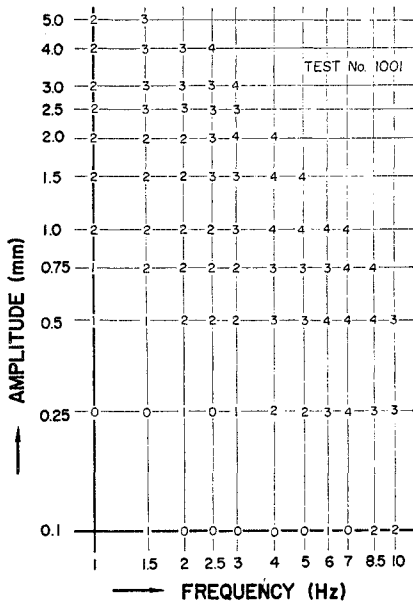


図-5 テストBの一例 (数字はカテゴリ番号)

その結果の一例を図-5 に示す。この図-5 は、テストAと同様、横軸に振動数を、縦軸に振幅をとり、その交点の振動に対して、ある被験者の答えたカテゴリ番号を示したものである。このテストを被験者 10 人に対し 2 回ずつ計 20 回の測定を行い、その結果を次のように整理した。

各振動に対し、感覚がそのカテゴリに属していると答えた回数の百分率 (以後、評定率という) を計算する。その例として、図-6 には、“明らかに感じた”と答えた評定率を、図-7 には、“不快である”と答えた評定率を示した。これらの図と図-4 とを対比することにより、評定率の 50% の範囲がどの程度のマグニチュードの大きさであるかを推定することができる。このようにしてマグニチュードの大きさを推定すれば、各カテゴリの閾値を与える刺激としては、どのような形が適切であるかを知ることができる。このようにして求めた各カテゴリの刺激の形を表-2 の右の欄に示した。各カテゴリの刺激量 ( $a\omega^m$ ) と評定率 (%) を図示すると図-8 のようになる。

一方、計量心理学<sup>9), 7)</sup> において、閾の値は反応がおき

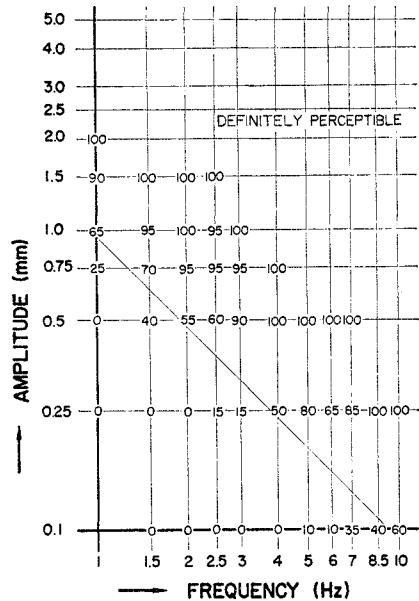


図-6 “明らかに感じた”に対する評定率

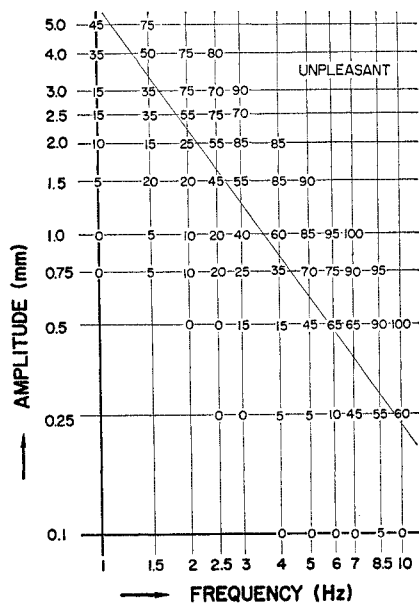


図-7 “不快である”に対する評定率

る確率が 50% の刺激値であると定義しているの、本研究においても、図-8 の各分布曲線が 50% に達する点の刺激量を各カテゴリの閾値とする。例として、“不快である”の閾値を求めてみる。まず、図-7 において、評定率が 50% の範囲は図-4 のマグニチュードが 8~12 の範囲である。したがって、“不快である”の閾値を求めるとは刺激として  $a\omega^{1.4}$  が適切である。そこで、各振動の  $a\omega^{1.4}$  の値と“不快である”に対する評定率をプロットすると図-8 の“Unpleasant”の分布曲

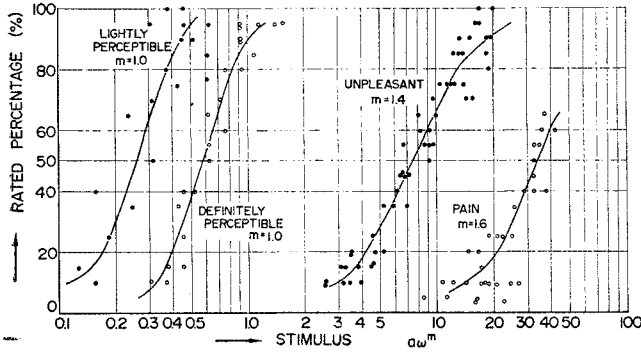


図-8 各カテゴリの刺激量と評定率

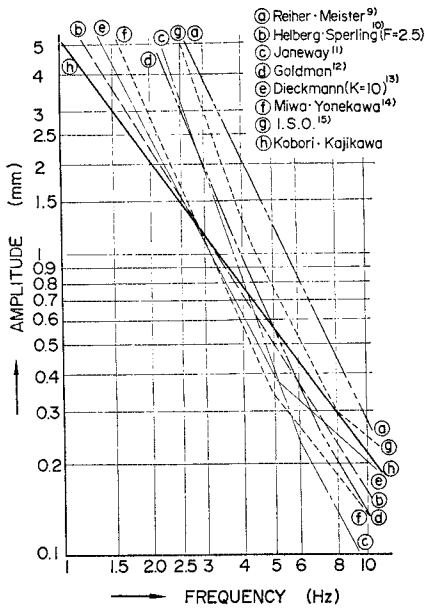


図-9 代表的な不快な振動の忍限度

線が得られる。前述の閾値の定義により、不快の閾値は  $a_w^{1.4}=7.3$  であることがわかる。このようにして求めた各カテゴリの閾値を表-2の右の欄に示した。

さらに、従来、行われた研究<sup>9)~13)</sup>の代表的なものと同本研究の結果を図-9に示した。図中の⑩は本研究で得られた不快の忍限度であり、振動数が3 Hz以下では各研究結果の下限を、3 Hz以上では全体の中位にある。このことからほぼ妥当な値であると思われる。

### 3. 道路橋の振動調査

走行自動車による道路橋の動的応答は、橋梁の形式・支間長などにより異なり、不規則な振動性状を示すことはこれまでの多くの研究で明らかである。ここでは、振動感覚という立場から道路橋の振動をとらえてみる。

#### (1) 計測方法

調査対象を中小支間の道路橋に限り、前章の振動感覚テストから、振動の刺激要因として振動数とその変位振幅をとることにして調査を行った。また、調査は各種形式橋に対して多くの資料を集めなければならないことから、ある程度の精度で簡便に、手際よくデータが得られるように工夫した。

走行車両による振動は、支間中央点と支間1/4点に設置した変位計で採取し、データレコーダーに記録した。この方法によれば、計測は交通に支障を起こすことなく、しかも計測時間は1時間程度である。なお、連続形式橋の測点は第1径間と第2径間の支間中央点とした。調査対象橋梁は北陸・関西・東海に架設されている25橋である。

#### (2) 振動数の求め方

走行車両による橋梁の振動は不規則であるので、この記録からただちに振動数を求めることは困難であるが、振幅も同時に関係することから、スペクトル解析<sup>16), 17)</sup>の手法を取り入れることにした。この手法は、複雑な振動波形をある1つの定常確率過程と仮定して解析するものであり、この仮定を満足するかどうか疑問のあるところであるが、多くの実測結果を機械的に処理する手段として、ある程度の確かさで卓越振動数などが得られることから、以下のデータ整理にはスペクトル解析の手法を用いた。

まず、データレコーダーの磁気テープに記録された振動記録は、A-D変換装置でデジタル化し、電子計算

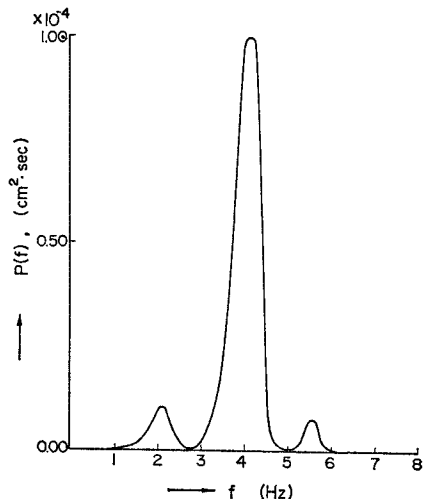


図-10 走行自動車による橋梁振動のパワースペクトル密度の一例

機によってパワースペクトル密度を求めた。そのパワースペクトル密度の一例を図-10 に示す。このパワースペクトル密度のピークから橋梁の振動数を求めることもできるが、図-10 でもわかるように、ある分布をもっているため、本研究では精度上ゼロクロッシングの回数から得られる期待等価振動数<sup>18)</sup>を用いた。期待等価振動数 ( $f$ ) は次式で表わされる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\int_a^b \omega^2 p(\omega) d\omega}{\int_a^b p(\omega) d\omega} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(13)$$

ここに、 $p(\omega)$  は  $\omega$  に対するパワースペクトル密度  
 $a, b$  はピークに対する積分区間である。

この振動数に対する振動形は、橋梁の形式・振動の計測位置によって、どのようなものであるかについては、推察を要する。また、積分区間についても各ピークに対応する振動が、それぞれ独立であるとしているので、その取り扱い方に問題は残るが本研究の範囲では許される程度の誤差であると思われる。

(3) 変位振幅の求め方

求められているパワースペクトル密度を用いて、変位波形の二乗平均値 ( $\bar{x}^2$ ) は

$$\bar{x}^2 = 2 \int_0^\infty p(\omega) d\omega \dots\dots\dots(14)$$

で表わされる。いま、各ピークに対応する振動は、それぞれ独立であると考え、各ピークに対する波形の標準偏差 ( $\sigma$ ) は次式のように求められる。

$$\sigma = \left[ 2 \int_a^b p(\omega) d\omega \right]^{1/2} \dots\dots\dots(15)$$

この標準偏差は重量 8~12 トンの走行車両に対するものであるため、これを標準車両に対する値に換算\* した。また、整理にあたっては、起こりうる最大振幅として  $3\sigma$  をとった。

(4) 減衰定数

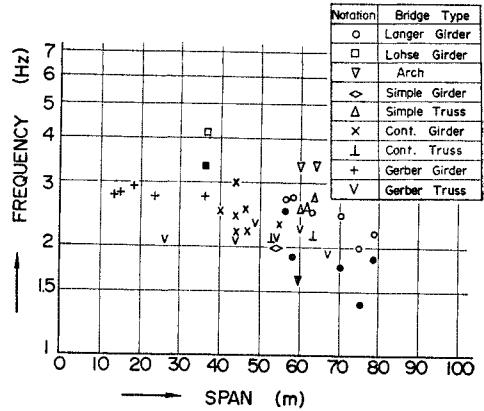
以上は、主として振動感覚が振動数と振幅に関係するとして、これらを中心に調査したけれども、橋梁の振動感覚は、歩行者が振動をうける時間の長さにも関係することが考えられる。このために、橋梁の減衰性についても調査した。幸い、パワースペクトル密度が計算されているので、この値から田中らが地震解析で行った方法<sup>19)</sup>により減衰定数\*\*を求めて、測定橋梁間の比較を行って

\* 標準車両の重量を 10 トンとし、大型バスなど重量の明確な自動車による振動を記録した。自動車の型式などから重量を推定し、振幅は重量に比例するものとした。  
 \*\* この方法で求められる橋梁の減衰定数は解析上の仮定から、他の方法で求めたものとは多少異なるので、絶対値として見ることに問題がある。

みた。

(5) 調査結果

実橋 25 橋 37 スパンにて行った調査結果を表-3 に示した。図-11, 12 は各特性値の関係を図示したものである。図-11 には支間長と振動数との関係を示した。この図より、アーチ系橋梁 (アーチ・ローゼ・ランガー橋) 以外の基本振動数は、支間長にかかわらず、2~3



(●●▽は逆対称振動を示している)

図-11 支間長と振動数の関係

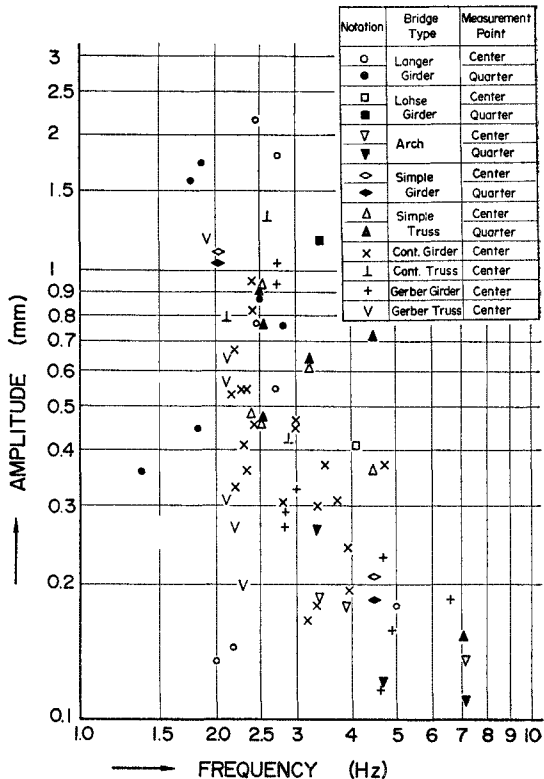


図-12(a) 振動数と変位振幅の関係

Hz であることがわかる。しかし、アーチ系橋梁では支間長が大きくなるに従って、振動数は低くなり、特に逆

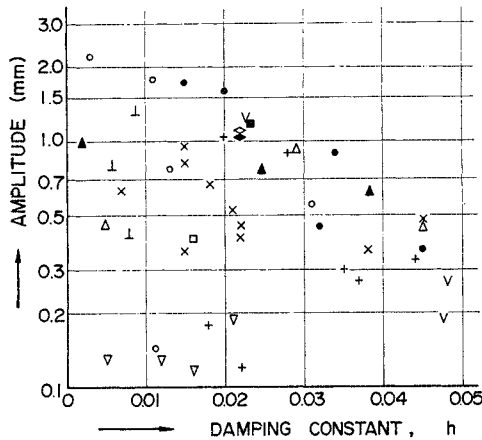


図-12(b) 減衰定数と変位振幅の関係

対称振動において、その傾向が認められる。図-12(a)は振動数と変位振幅との関係を示したもので、大きい変位を示す形式を順にあげると、ランガー桁橋、トラス橋、連続桁橋、ゲルバー桁橋である。しかし、ランガー桁橋以外では最大振幅 1.5mm 以下であった。図-12(b)は減衰定数と変位振幅との関係を示したもので、減衰定数の大きい橋ほど変位振幅が小さいことがわかる。

#### 4. 道路橋の振動感覚の評価

2. の振動感覚テストと、3. の道路橋の振動調査の結果を総合して、著者は道路橋の振動感覚について、次のような評価を行った。

まず、振動感覚に対する刺激  $S$  として、式 (7) で表わされる値を用いる。すなわち、

$$S = a \omega^m \dots \dots \dots (16)$$

ここで、 $m$  の値は表-2 に示す各カテゴリに対応する指数である。

次に、振動感覚を生じさせる刺激を式 (16) で表わせれば、基準振動とある評定振動との振動感覚の大きさの比はそれぞれの刺激の対数値の比で表わされることをマグニチュード推定法の結果より知ることができた。すなわち、次のような式で表わすことができる。

$$\frac{R}{R_{10}} = \frac{\log_{10} S}{\log_{10} S_{10}} \dots \dots \dots (17)$$

ここに、 $S_{10}$  : 基準振動の刺激値  
 $S$  : 評定振動の刺激値  
 $R_{10}$  : 基準振動の感覚の大きさ (今回は 10)  
 $R$  : 評定振動の感覚の大きさ

そこで、右辺の分母の  $S_{10}$  の代りに、系列カテゴリ法によって得られたカテゴリの閾値をとることにより、左辺はあるカテゴリの閾値が与える感覚の大きさとの比を表わすことになる。この左辺を評価指数  $CI$  (Criteria Index) と定義する。すなわち

$$CI = \frac{\log_{10} S}{\log_{10} S_L} \dots \dots \dots (18)$$

ここに、 $S_L$  は対象にしているカテゴリの閾値である。

さて、“不快である” というカテゴリの下限を基準にして評価指数を求め、表-3 に示した。また、図-13(a) は、横軸に支間長をとり、図-13

表-3 各橋梁の実測結果

Bridge Type	Span (m)	Pl.	Freq. f (Hz)	Ampl. $\sigma$ (mm)	Damp. C. h	Unpl. C. l	Bridge Type	Span (m)	Pl.	Freq. f (Hz)	Ampl. $\sigma$ (mm)	Damp. C. h	Unpl. C. l
Langer Girder	78	C	2.18	0.048	0.011	0	Simple Truss	62.4	C	2.66	0.307	0.029	0.79
		Q	1.82	0.150	0.032	0.16			Q	2.65	0.251	0.025	0.68
Tied Arch	64	C	3.37	0.062	0.021	0.15	Gerber Truss	44.5	C	2.12	0.187		0.37
		Q	3.33	0.089	0.32	0.09			Q	2.15	0.104		0.09
Cont. Girder	44	C	2.45	0.181		0.46	Gerber Truss	67	C	1.92	0.394	0.023	0.58
		Q	2.99	0.156	0.045	0.52			Q	2.16	0.214		0.45
		C	2.42	0.181		0.45	Gerber Truss	59.8	C	2.24	0.090	0.048	0.05
		Q	3.03	0.155	0.53	0			Q	2.32	0.066	0.048	0
Langer G.	63.0	C	2.47	0.729	0.003	1.17	Simple Girder	54	C	2.03	0.368	0.022	0.68
		Q	2.74	0.307	0.028	0.80			Q	4.50	0.071		0.42
Gerber Girder	36.4	C	2.75	0.353	0.020	0.88	Cont. Girder	40.5	C	2.01	0.356	0.022	0.66
		Q	46.7	2.41	0.272	0.015			0.70	Q	4.50	0.061	
Cont. Girder	46.7	C	2.41	0.318	0.015	0.73	Langer Girder	69.4	C	2.49	0.154	0.022	0.39
		Q	44.2	2.19	0.177	0.021			0.37	Q	3.66	0.103	
Cont. Girder	44.2	C	3.28	0.056		0.09	Cont. Girder	40.5	C	4.73	0.124		0.73
		Q	3.95	0.065		0.29			Q	2.30	0.137	0.022	0.28
		C	2.19	0.223	0.018	0.49	Langer Girder	69.4	C	2.83	0.101		0.27
		Q	3.35	0.061		0.14			Q	2.46	0.257	0.013	0.64
Gerber Girder	14.8	C	4.87	0.014		0	Trussed Arch	60	C	5.03	0.061		0.42
		Q	7.70	0.017		0.08			Q	1.78	0.532	0.020	0.78
		C	2.84	0.090	0.037	0.21	Trussed Arch	60	C	1.65	0.052		0
		Q	4.94	0.053		0.34			Q	3.89	0.060		0.35
Simple Truss	60	C	2.51	0.154	0.005	0.39	Trussed Arch	60	C	7.10	0.045	0.012	0.51
		Q	4.46	0.119		0.67			Q	1.43	0.034		0.06
		C	2.52	0.297	0.002	0.73	Langer Girder	75	C	3.96	0.035	0.005	0
		Q	4.46	0.238		1.02			Q	4.72	0.040		0.16
Gerber Girder	18.8	C	2.99	0.110	0.044	0.35	Langer Girder	75	C	7.09	0.037	0.016	0.41
		Q	4.69	0.076		0.49			Q	2.03	0.045		0
		C	6.59	0.062	0.018	0.61	Cont. Truss	63	C	2.12	0.264	0.006	0.54
		Q	4.74	0.039	0.022	0.15			Q	2.92	0.141	0.008	0.46
Simple Truss	62.4	C	4.74	0.039	0.022	0.15	Langer Girder	56	C	2.59	0.438	0.009	0.95
		Q	5.98	0.028		0.15			Q	2.68	0.183	0.031	0.53
		C	2.42	0.160	0.045	0.39	Langer Girder	58.6	C	2.50	0.296	0.034	0.72
		Q	3.22	0.202	0.038	0.71			Q	2.75	0.608	0.011	1.14
Cont. Girder	47.6	C	2.53	0.156	0.046	0.41	Langer Girder	58.6	C	1.86	0.589	0.015	0.86
		Q	3.22	0.205	0.038	0.72			Q	2.83	0.252		0.73
		C	7.02	0.051		0.57	Lohse Girder	36	C	4.11	0.134	0.016	0.67
		Q	2.32	0.121	0.015	0.22			Q	5.58	0.026		0.07
Cont. Girder	47.6	C	3.37	0.101		0.39	Notation of measurement point						
		Q	2.20	0.212	0.007	0.46							

Notation of measurement point  
 C; Center of span  
 Q; Quarter of span

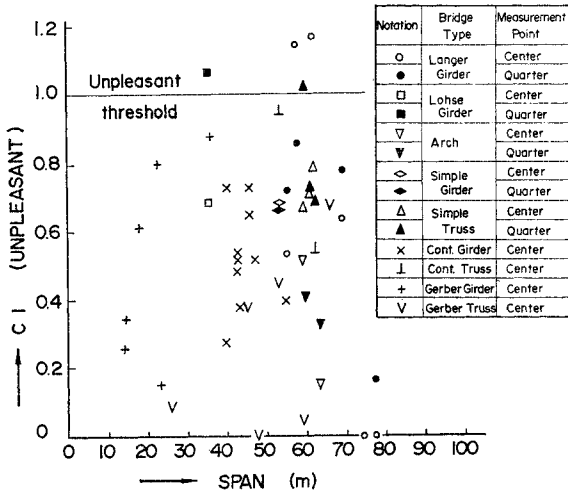


図-13(a) 支間長と不快評価指数の関係

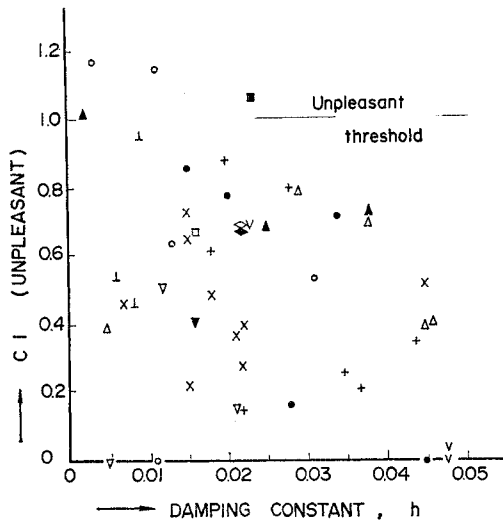


図-13(b) 減衰定数と不快評価指数の関係

表-4 不快な範囲にある橋梁の諸量

N th	Bridge Type	Span (m)	Measurement Point	Freq. (Hz)	Ampl. $\sigma$ (mm)	Damp.C. h	Unpleasant CI	Plan CI
1	Langer Girder	63	Center	2.47	0.729	0.003	1.17	0.83
2	Langer Girder	58.6	Center	2.75	0.609	0.011	1.14	0.82
3	Lohse Girder	36	Quarter	3.39	0.382	0.023	1.06	0.79
4	Simple Truss	60	Quarter	4.46	0.238	0.002	1.02	0.78

(b) は横軸にパワースペクトル密度から求めた減衰定数をとって評価指数との関係を示した。この評価指数  $CI$  が 1.0 未満であれば、不快な振動ではないことを示し、もし、1.2 であれば、振動感覚的に基準の 1.2 倍の振動であることを示している。

われわれの調査結果では、評価指数が 1.0 以上の橋梁すなわち不快な振動をしている橋梁が 4 橋ある。特に変位振幅の大きいランガー桁橋が高い指数を示し、振動感覚的にはきわめて不適当と思われる橋梁がある。次に減

衰定数との関係を見ると図-13(b) からわかるように、減衰定数の小さい橋梁ほど評価指数は大きく、やはり振動感覚上からも減衰定数を大きくとることが必要であることがわかる。なお、不快な振動をしていると思われる橋梁の諸量を、参考までに表-4 にあげた。

### 5. むすび

本研究は、道路橋の振動を歩行者の振動感覚という立場から検討を加えたものである。

まず、振動感覚上から振動数と振幅をどのように評価すべきであるかについて検討し、その最適基準と一評価法を提案し、実在道路橋の振動を評価した。その結果、次に示す結論が得られた。

(1) 振動の刺激は  $a\omega^m$  ( $a$ : 変位振幅 cm,  $\omega$ : 円振動数 rad/sec) で表わされ、“不快” という情緒を対象にするならば、 $m$  として 1.4 を選ぶのが適当である。この場合、不快の下限の刺激量は  $a\omega^{1.4}=7.3$  として表わされる (図-9 ⑩ 線)。

(2) 振動の感覚の大きさは、振動の刺激の対数値に比例し、振動を評価するにはその対数値の比、すなわち評価指数  $CI$  が適している。

(3) 上記の評価指数で実在道路橋の振動調査結果を整理してみると、図-13 のように歩行者に不快な感じを与えていると思われる橋梁がある。その中には、“不快”の基準の 1.17 倍に達している橋梁があり、動的安定性の検討が必要である。

現段階では、橋梁の振動を定常確率過程として取り扱っていることや、それぞれの振動が独立であることなど、いくつかの仮定を設けていること、実験数の不足なこと、など多くの問題を残している。さらに、橋梁上では歩いていることを考慮しなければならないこと、また橋梁の振動は正弦振動ではなく狭帯域ランダム振動をしていることなどによって振動感覚が異なってくることが考えられ、これらに対する検討も加えれば一層興味ある結果が得られると思う。この報告が、橋梁の振動感覚の評価に対して 1 つの参考になれば幸いである。

終りに、本研究の実験にいつも協力いただいた金沢大学の城戸隆良技官と同橋梁工学研究室の学生諸氏に感謝の意を表わす。なお、本研究の一部に文部省科学研究費一般研究 (C) の援助を受けたことを付記する。

### 参考文献

- 1) 松本・佐藤・西岡・塩尻：歩行者の特性を考慮した歩道橋の動的設計に関する研究，土木学会論文報告集 第 205 号，1972
- 2) 牛尾・南条：歩道橋の振動に関する諸問題，日立造船技報，Vol. 33-3，1972



- 3) 西脇・嶋村・中島：通行荷重による橋の振動の人体への感じについて，土木学会第 27 回年次学術講演会講演概要集，I-193，1972
  - 4) 小川・片山：橋梁の振動限度について，土木学会第 27 回年次学術講演会講演概要集，I-191，1972
  - 5) 小堀・梶川：道路橋の振動とその振動感覚について，土木学会第 27 回年次学術講演会講演概要集，I-192，1972
  - 6) 田中良久：心理学的測定法，東京大学出版会，1971
  - 7) 中谷和夫：尺度構成法，講座心理学 2. 計量心理学第 5 章，東京大学出版会，1969
  - 8) 岡田・中村：騒音・振動・衝撃の影響と対策，人間と技術社，1970
  - 9) 大島正光：生体振動論，東京大学出版会，1969
  - 10) 松井信夫：乗心地の限界について，交通技術 No. 144，1955
  - 11) 平尾・近藤・亘理・山本：理論自動車工学，山海堂，1968
  - 12) Goldman, D.E. & von Gierke, H.E.: Effects of shock and vibration on man, In shock and vibration Handbook, Edited by Harris C.M. and Grede, C.E. (Vol. III), McGraw Hill, 1961
  - 13) Dieckmann, D.: Study of influence of vibration on man, Ergonomics 1, 1958
  - 14) 三輪俊輔：全身振動の評価法 (ISO/TC 108/DIS 2631 を中心として)，日本音響学会誌 29 巻 4 号，1973
  - 15) 三輪・米川：振動の評価法 1,2,3，日本音響学会誌 27 巻 1 号，1971
  - 16) 島田静雄：相関解析手法による構造物の振動解析，土木学会論文報告集第 174 号，1970
  - 17) 赤池弘次：スペクトル解析，東京大学出版会，相関関数およびスペクトル，I-2，1968
  - 18) Lin, Y.K.: Probabilistic theory of structural dynamics, McGraw-Hill, 1967  
同訳，森・富田・小林・佐藤・小林共訳：構造力学の確率論的方法，培風館，1972
  - 19) 田中・吉沢・森下：地震時における実在建物の周期と減衰，第 3 回日本地震工学シンポジウム講演会 IV-5，1970  
(1973.7.5・受付)
-