

金沢大学工学部 正員 小堀為雄
 金沢大学工学部 正員 梶川康男

1. ま え が き

橋梁は、土木構造物の中で最もよく振動しやすい構造物の一つである。このことから、橋梁の動的応答に関する問題は、古くから多くの研究がなされてきた。さらに、最近、構造用鋼材の高張力化・新形式橋梁の出現・設計の合理化などによって、ますます、動的な問題が重要となってきた。橋梁の振動を測定してみると応力的には問題とならないが、心理的影響が大きいと思われる橋梁がありこの種の研究も必要になってくるものと思われる。そこで、われわれは心理学的測定ならびに人間の力学的特性の測定を行なうことにより、“よく揺れる”とは何であるかを究明し、各種橋梁の動的特性と合わせて、その評価をどのようにすべきかについて考察を行なった。なお、本研究は橋梁の防振を考える上でも、重要な意味を持つものと考えられる。以下に、その実験方法・解析方法ならびに問題点を報告する。

2. 心理学的測定

人間の振動感覚に関する研究の基礎になっているのは、マイスターの研究¹⁾であろう。彼によれば、振動感覚は周波数特性をもち、等感覚レベルが存在するとしている。そこで、マイスターの研究に従って、われわれは計量心理学の手法を用いて、図2に示すような振動感覚実験を試みた。まず、行なった実験は、マグニチュード推定法²⁾に基づいたもので、任意の周波数・変位振幅を持つ振動に対する人間の感覚量が標準の振動と比べて、いくつになるかを数値によって報告させるものである。図3について、説明すれば、標準振動(1 Hz・0.5 cm)の感覚を10として、他の振動の感覚が、いくつであるかを答えたものである。そこで、こうして得られた結果に対して、感覚量は刺激のN乗に比例するというN乗法則²⁾が成り立つものとして、最小二乗法(重回帰)により、定数の値を決定する。ただし、振動の刺激(S)は、次式で与えられるものとする。

$$S = a (2\pi f)^n \quad \text{---(1)} \quad \text{ここで、} a; \text{片振幅(cm)} \\ f; \text{振動数(Hz)}$$

従って、N乗法則により、感覚量(R)は次式で表わされる。

$$R = A \cdot S^N = A \{ a(2\pi f)^n \}^N \quad \text{---(2)}$$

ここで、A; 標準振動によって決まる定数

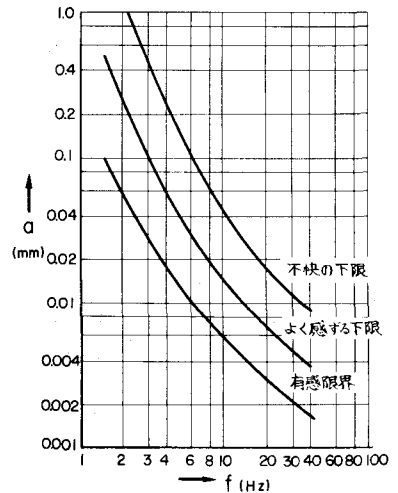


図-1 マイスターの振動感覚曲線

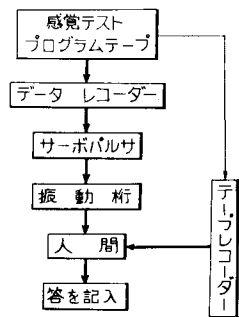


図-2 心理学的測定

図3に対しての結果は、次のようになる。

$$A = 4.3, \quad n = 0.95, \quad N = 0.85$$

現在、評定の変動を小さくするために、標準振動として次の3種を選んで実験中である。

ケース 1. $f = 1 \text{ Hz}, \quad a = 0.5 \text{ cm}$

ケース 2. $f = 3 \text{ Hz}, \quad a = 0.25 \text{ cm}$

ケース 3. $f = 5 \text{ Hz}, \quad a = 0.1 \text{ cm}$

次に、マイスターの振動感覚曲線と同じような、あるカテゴリの閾(りき)値決定のために、系列カテゴリ法²⁾に基づいた実験を行なった。この実験は、ある周波数・変位振幅を持つ振動に対する感覚が、用意された数個のカテゴリのいずれに該当するかを評定するものである。われわれは、次の5つのカテゴリを用意した。

- カテゴリ 0. 全く感じない
- カテゴリ 1. 少し感じた
- カテゴリ 2. 明らかに感じたが、不快ではない
- カテゴリ 3. 不快であるが、苦痛なほどではない
- カテゴリ 4. 苦痛である

ある評定者の答が図4に示すものであった。そこで、各カテゴリに対する等感覚レベルは互いに平行であるとして、前に求めた定数を用いて、式(2)によりカテゴリの閾値が標準振動(ケース1)に対して、いくつになるかを計算すると次のようになる。

- カテゴリ 0-1の閾値 $R_{01} = 1.2$
- カテゴリ 1-2の閾値 $R_{12} = 1.5$
- カテゴリ 2-3の閾値 $R_{23} = 10.6$
- カテゴリ 3-4の閾値 $R_{34} = 17.2$

次に行なった実験は、実橋の振動記録をサーボパルサにて再現し人間の心理的影響を測定する再現テストである。4節でのべる橋梁の動的応答と心理的評価に役立たせるための実験である。

3. 人間の動的応答

人体が振動をうけた時、どのような力学的応答をするかを調べるために、小型加速度計を口にくわえた人に振動桁に載ってもらい、図5に示すような実験を行なった。ある周波数・ある変位をもつ振動を振動桁に与え、その時の振動桁と人間の加速度比を求め、周波数応答関数を得ようとするものである。これにより、人間の感しやすい周波数域が判明できる。また、図5に示したように、白色雑音発生器にてサーボパルサを制御し、この動的応答を求める実験を現

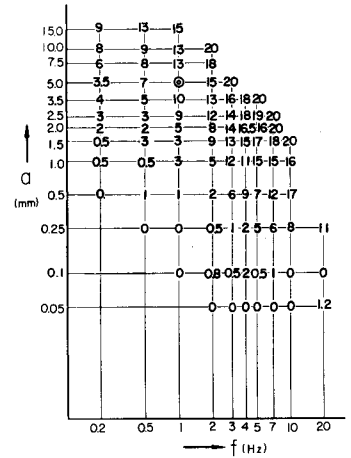


図-3 マグニチュード推定法による測定

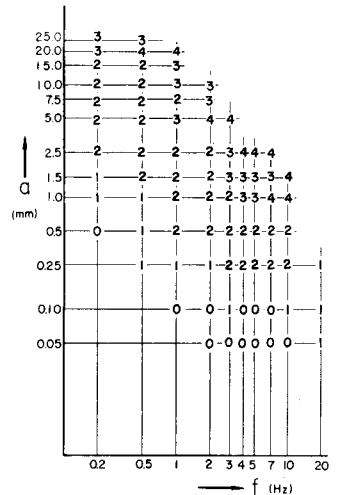


図-4 カテゴリ系列法による測定

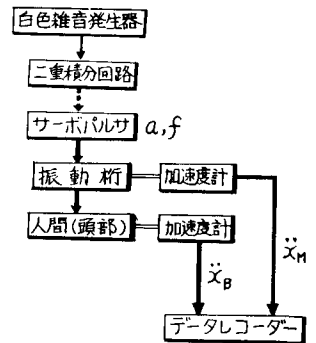


図-5 人間の動的応答測定

在、行なっている。この場合には、人体を一質点系モデルとみなし、スペクトル解析にて周波数応答関数を求める。

$$A(f) = \frac{P_{yx}(f)}{P_{xx}(f)} \text{-----}(3)$$

ここで、 $A(f)$: 周波数応答関数
 $P_{xx}(f)$: 入力のパワースペクトル
 $P_{yx}(f)$: 入出力のクロススペクトル

4. 橋梁の動的応答

道路橋に対しては、走行荷重による動的応答問題が一般的である。このことから、われわれは走行荷重による鉛直方向の振動のみを対象に研究をすすめた。地震・風による水平振動に対しても同様な方法で可能であろう。動的解析理論については多くの研究がなされているが、動的特性値を総合的に各形式の間で、比較しているものは少ない。そこで、われわれは、どのような特性をもつ橋梁がよく揺れるのかを調べるために、まず実橋について、各形式別に動的特性を調べた。実験方法は図6に、データ処理方法は図7に示した通りである。この測定・処理方法は文献³⁾に基づいている。

橋梁に対する入力が定常ガウス過程であるとすれば、次のような方法によって解析が可能である。

橋梁を一質点系であるとみなせば、入出力のスペクトル密度の関係は次式のようになる。

$$S_o(f) = \frac{S_i(f)}{(f_o^2 - f^2)^2 + 4h^2 f_o^2 f^2} \text{-----}(4)$$

ここで、 $S_i(f)$: 入力のパワースペクトル密度
 $S_o(f)$: 応答のパワースペクトル密度
 f_o : 系の固有振動数
 f : 入力の振動数
 h : 系の減衰定数

入力は定常ガウス過程としているので、 $S_i(f)$ は一定であり、応答のパワースペクトル密度関数は周波数応答関数と相似であるとみなしうる。よって得られたスペクトル密度の値より、最小=乗法によって回帰すれば、固有振動数(f_o)・減衰定数(h)を求めることができる。他の推定法⁴⁾も考えられているが、橋梁のように、特に減衰の小さい構造物の場合には、図8に示すように鋭いピークを持っているので、最小=乗法によった方がよいと思われる。データ処理によって得られるスペクトルは平滑化の影響を受けているので、減衰定数に対しては補正を必要とする。補正方法は、文献⁴⁾に示されている方法による。

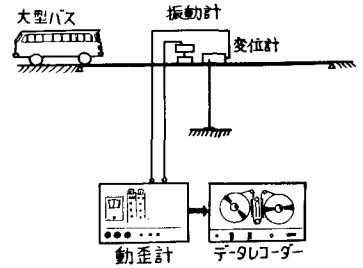


図-6 橋梁振動測定法

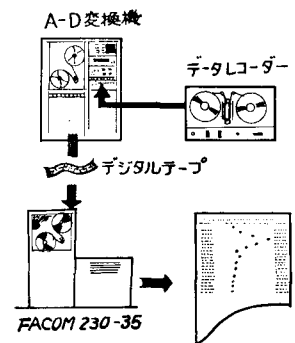


図-7 データ処理方法

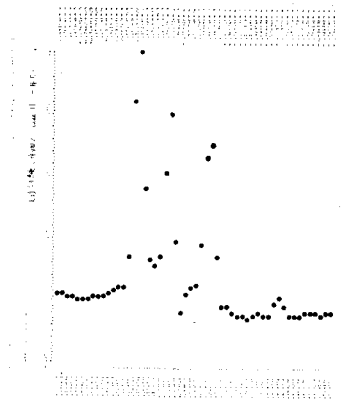


図-8 実橋のパワースペクトル密度

次に、動振幅の大きさを求める。測定は、大型バス(約10トン)を対象に行なった。パワースペクトル密度関数の面積は、波形の大きさの分散を表わしていることから、次式により標準偏差を求めることができる。

$$\sigma^2 = R(T=0) = \int_0^{\infty} S_0(f) df \quad (5) \quad \begin{array}{l} \text{ここで、} R(T); \text{自己相関関数} \\ S_0(f); \text{応答のパワースペクトル密度} \end{array}$$

式(1)による振動の刺激が、振幅の極値を問題にしていることから、極値の分布を考える。定常ガウス加振に対する減衰の小さい線形-自由度系の応答の極値分布は Rayleigh 分布になる。

$$P(\xi) = \frac{\xi}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right) \quad \dots\dots\dots (6) \quad 0 \leq \xi \leq \infty$$

Rayleigh 分布では、 2σ に約 88% が入っていることから、 $-\sigma$ 、 2σ 値を感覚評価のための動振幅基準と考えて差しつかえないだろう。

5. 振動感覚の評価

以上、心理実験・人体の応答実験・橋梁の応答測定ならびに解析方法について述べてきた。そこでいかにこれらを実験評価するか。まだ、測定中のもの、実験結果の整理中のものがあり、具体的には確定してないが、およそ次のように評価しようと考えている。

- (1) 固有振動数(f_0)に対する識閾の値(R_0)を、式(2)により求める。
- (2) 動振幅として、 2σ を採り基準感覚値(R)を、同様に式(2)より求める。
- (3) 感覚評価指数(I)を次式より求める。

$$I = 10 \cdot \log_{10}(R/R_0) \quad \dots\dots\dots (7)$$

- (4) カテゴリ実験に基づいて、不快指数・苦痛指数などの決定を行ない、(3)で求めた指数が、これらと較べて、どの範囲に属するかにより、判定を行なう。
- (5) 人が感じやすい振動数の場合・複数個の固有振動数を持つ場合については、補正を行なう。
- (6) 交通量(車両・歩行者)・車両重量分布により、また橋梁の主要用途目的により補正を行なう

6. あとがき

紙面の都合上、方法の説明のみになってしまったが、心理測定・人間の力学特性・実橋の動的応答・振動感覚評価指数等の結果については、当日、講演にて発表の予定である。なお、本実験は、金沢大学サーボパルス型振動発生機EHF-40にて行なったことを付記するとともに、実験に協力いただいた学生諸女に対し深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 鳥海 勲 「振動の影響と許容値」 土木学会関西支部「騒音・振動公害」131ページ
- 2) 中谷和夫 「尺度構成法」 東京大学出版会「講座 心理学2 計量心理学」
- 3) 島田静雄 「相関解析手法による構造物の振動解析」 土木学会論文集177号
- 4) 田中吉沢森下 「地震時における実在建物の周期と減衰」

東京大学出版会「相関函数およびスペクトル」