

福井工業大学

正会員 梶川 康男

金沢大学

正会員 小堀 義雄

まえがき 最近、振動が歩行者へ及ぼす影響という点から歩道橋の主桁のたわみ制限が変更され、かつ振動に付けての規定が新しく設けられることになった<sup>1)</sup>。これらの変更・規定は歩行者にとって歓迎すべきであるが、歩行者への影響に関する従来の評価法では、たわみ制限の変更の効果あるいは振動に対する配慮の方法などを明確にすることはできなままである。それは、従来の評価法では構梁の動的特性・歩行者の動的荷重としての特性・到着特性として歩行者の心理的反応の特性などを統合的に加味していなければ、それらの特性の影響度を数量的に求めることができなかったことにあると思われる。上記の各特性は、ある程度の把握をもつために結局、確率論的な評価方法に頼らざるを得ないものと考えられ、また、構造物の安全性が信頼性あるいは破壊確率にて評価されようとする現在、使用性も確率にて評価されるのが妥当であると思われる。そこで、快適な使用性が損われる確率を「さまざまな載荷状態によって生ずる橋の振動が歩行者に好しくなり反応(例えば、歩きにくさ・不快など)を生起させる確率」と定義して、非使用性確率と呼ぶことにする。本文ではこの確率とたわみ制限との関係について述べる。

2 歩行外力による動的応答と振動刺激の影響 ここでは、図-1に示すように歩行者①が歩道橋を渡るとき、②と時間間隔でだけ離れた歩行者(③あるいは④)にどのような影響を及ぼすかを求める。この影響を及ぼす振動刺激としては筆者らの実験結果<sup>2)</sup>に基づいて、歩行者が橋を渡る間の振動速度の実測値を考えることにする。一人の歩行者による橋梁の振動は一般座標  $\ddot{y}_m(t)$  と正規化された基準関数と用いて、右モードごとに次式で表わされる。

$$\ddot{y}_m(t) + 2\omega_m \dot{y}_m(t) + \omega_m^2 y_m(t) = f(t) \varphi_m(vt) \quad (1)$$

そして、時間  $t$  における②がいる位置  $\{x = v(t - t)\}$  での振動速度の標準偏差の期待値は次式にて求められる。 $(\bar{\omega}_m = \omega_m \sqrt{1 - h_m^2})$

$$E[\dot{y}^2(t, x)] = \sum_{n=1}^{\infty} \{ E[\dot{y}_m^2(t)] \cdot \varphi_m^2(v(t-t)) \} \quad (2)$$

$$\therefore E[\dot{y}_m^2(t)] = \frac{2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_f(w) \left[ -h_m w I_s(w, t) + \frac{\partial I_s(w, t)}{\partial t} \right]^2 + \left[ -h_m w I_c(w, t) + \frac{\partial I_c(w, t)}{\partial t} \right]^2 dw \quad (3)$$

$$\text{なお, } I_c(w, t) = \int_0^t e^{j h_m w \delta} \sin \bar{\omega}_m(t-\delta) \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m \pi v \delta}{l} \right\} \sin w \delta \cos w \delta d\delta \quad (4)$$

であり、この積分結果および  $\frac{\partial I_s(w, t)}{\partial t}$  と  $\frac{\partial I_c(w, t)}{\partial t}$  の結果については、文献<sup>3)</sup>の付録を参照のこと。そして、外力のパワースペクトル密度  $S_f(w)$  としては実測した歩調分布  $P(w)$  を用いて、 $S_f(w) = \pi \left( \frac{W}{g} A \right)^2 P(w)$  とした。ここに、  $W$  は体重、  $A$  は歩行時の腰部加速度振幅である。

式(2)によって②が①から時間  $t$  に受ける刺激が求められる。两者が橋上にいるか否かに留意しながら、大きさを変化させれば②が橋を渡る間に①から受ける全刺激が計算される。この一例を図-2に示すが、これだけで離れた歩行者によって与えられる刺激の影響線とみることができる。

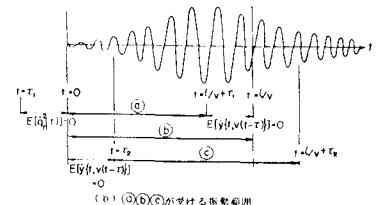
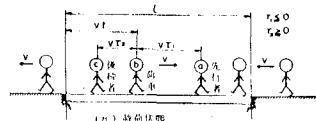
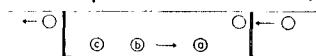
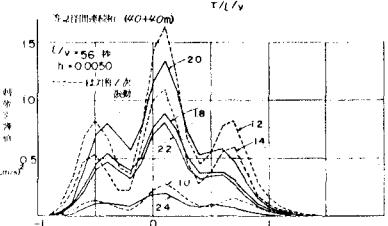
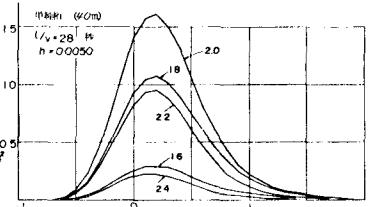


図-1. 歩行者と橋梁のモデル

図-2. 刺激影響値  
(図中の数字は基本ノイズ振幅を表す)

3 非使用性確率 振動に対する歩行者の反応は、かなりばらつくものである<sup>3)</sup>。従来、このばらつきは全く考慮されず平均的な反応のみで処理されてきた。しかし、確率論的評価方法においては、これらの分布を考えることができる。そこで、刺激(S)の分布と、その刺激による反応(R)の分布を、信頼性における部材力(S)の分布と材料強度(R)の分布に対応させて、次式にて非使用性確率を求めることにある<sup>4)</sup>。

$$P_u = \text{Prob}(S > R) = \int_0^{\infty} f_S(x) \int_{R(x)}^{\infty} f_R(r) dr dx = \int_0^{\infty} f_S(x) F_R(x) dx \quad (5)$$

ここで、感覚反応(R)の分布は文献<sup>2)</sup>より正規分布であるとする。そして、刺激(S)の分布に対しては図-3のようにして求められる。歩行者がポアソン到着するものとすれば、どの微小区間にありても刺激が生ずるか否かの確率は同じである。そして、刺激影響範囲(T)内にn人がいるとき、T=0にいる歩行者が他から受ける刺激の大きさは0からAまで均等に分布し、しかも、自ら自身が走る振動による刺激Bを加えて受けすることになる。そして、n人がT内にいる確率P(n)のうち、B+Aに刺激の二乗がある確率はP(n)/n!となる。すべてのnについて計算すれば、その確率は $\frac{(AT)^n}{n!} e^{-AT}$ となる。したがって、刺激の二乗の分布が計算され、刺激の分布f\_S(x)を求めることができる。そして、式(5)のように反応の分布関数F\_R(x)とによって非使用性確率を求めることができる。

4 活荷重によるたわみ制限と非使用性確率 歩道橋の活荷重による最大たわみと支間長との比( $\delta/L$ )と、一次振動数(f<sub>1</sub>)との関係はつぎのようく表わされる<sup>5)</sup>。 $\delta/L = 10^2 f_1 / f_1^2 \approx 1/400 \text{ or } 1/600 \rightarrow f_1^2 \approx (400 \text{ or } 600) \delta L^2 / L$  (6) ここで、 $L$ は単純桁で3.35、等=径間連続桁で2.49であり、 $\delta$ は単位長さあたりの活荷重/死荷重である。これにより、たわみ制限が $\delta/L$ をパラメーターとした振動数制限であることがわかる。そこで、歩きにくさに関する非使用性を幅員4mの単純桁と等=径間連続桁のモデル橋<sup>5)</sup>に対して求めた。そして、歩行者の到着率を0.5人/秒とし、非使用性許容確率を仮に5%に設定し、それを超える振動数範囲を図-4に示した。なお、図中の直線式(6)で示されるたわみ制限による振動数下限値である。まず、鋼床版を有する単純桁に対して、従来の制限では30m以上の支間長において振動数が2Hzに近くなる可能性があり、それらの範囲では非使用性確率が5%以上になっていたが、今回の改訂によって支間長が50m以下において振動数がほぼ2Hz以上となつたために、支間長50m付近で、しかも減衰性が特に低くなり限り、非使用性確率が5%以上になることはほとんどなくなったと言える。しかし、鋼床版を有する等=径間連続桁に対しては減衰定数が0.0050以下で、しかも支間長50m付近において、まだ使用性を損なう振動数範囲が存在している。ところが、今回の改訂によって加えられた振動についての規定でその使用性は照査されることになる。一方、RC床版の場合、改訂によっても約30mの支間長をもつ単純桁、多少使用性が損なわれる範囲もあるが、減衰定数が非常に小さい範囲であることから、実際上、問題は生じないものと思われる。

5 あとがき 以上的のように、たわみ制限改訂の効果を認めることができるが、振動の照査方法は未だ確立されておらず、早急に耐震設計で用いられているような簡易な動的設計法が考案されることが望まれる。なお、幅員4m以外の歩道橋の使用性に対する考査は当日発表することにした。

- 〈参考文献〉 1)近藤、立体構造設計技術基準の改正、橋梁と基礎、1977年3月、第24号、1977
- 2)小堀・梶川:橋梁振動の人間工学的評価法、土木学会論文報告集第230号、1977
- 3)小堀・梶川:単一動荷重に対する歩道橋の振動感覚、// 第24号、1977
- 4)小堀・梶川:振動感覚から見た橋梁の使用性について、土木学会第3回学術講演会、1977
- 5)小堀・梶川:振動感覚を考慮した歩道橋の設計、橋梁と基礎、8巻12号、1977.12

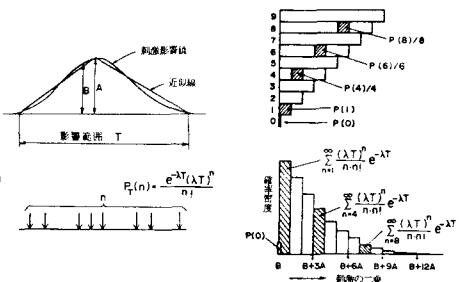


図-3. 刺激分布の近似解法

ここで、感覚反応(R)の分布は文献<sup>2)</sup>より正規分布であるとする。そして、刺激(S)の分布に対しては図-3のようにして求められる。歩行者がポアソン到着するものとすれば、どの微小区間にありても刺激が生ずるか否かの確率は同じである。そして、刺激影響範囲(T)内にn人がいるとき、T=0にいる歩行者が他から受ける刺激の大きさは0からAまで均等に分布し、しかも、自ら自身が走る振動による刺激Bを加えて受けることになる。そして、n人がT内にいる確率P(n)のうち、B+Aに刺激の二乗がある確率はP(n)/n!となる。すべてのnについて計算すれば、その確率は $\frac{(AT)^n}{n!} e^{-AT}$ となる。したがって、刺激の二乗の分布が計算され、刺激の分布f\_S(x)を求めることができる。そして、式(5)のように反応の分布関数F\_R(x)とによって非使用性確率を求めることができる。

#### 4 活荷重によるたわみ制限と非使用性確率

歩道橋の活荷重による最大たわみと支間長との比( $\delta/L$ )と、

$$\delta/L = 10^2 f_1 / f_1^2 \approx 1/400 \text{ or } 1/600 \rightarrow f_1^2 \approx (400 \text{ or } 600) \delta L^2 / L \quad (6)$$

ここで、 $L$ は単純桁で3.35、等=径間連続桁で2.49であり、 $\delta$ は単位長さあたりの活荷重/死荷重である。これにより、たわみ制限が $\delta/L$ をパラメーターとした振動数制限であることがわかる。そこで、歩きにくさに関する非使用性を幅員4mの単純桁と等=径間連続桁のモデル橋<sup>5)</sup>に対して求めた。そして、歩行者の到着率を0.5人/秒とし、非使用性許容確率を仮に5%に設定し、それを超える振動数範囲を図-4に示した。なお、図中の直線式(6)で示されるたわみ制限による振動数下限値である。まず、鋼床版を有する単純桁に対して、従来の制限では30m以上の支間長において振動数が2Hzに近くなる可能性があり、それらの範囲では非使用性確率が5%以上になっていたが、今回の改訂によって支間長が50m以下において振動数がほぼ2Hz以上となつたために、支間長50m付近で、しかも減衰性が特に低くなり限り、非使用性確率が5%以上になることはほとんどなくなったと言える。しかし、鋼床版を有する等=径間連続桁に対しては減衰定数が0.0050以下で、しかも支間長50m付近において、まだ使用性を損なう振動数範囲が存在している。ところが、今回の改訂によって加えられた振動についての規定でその使用性は照査されることになる。一方、RC床版の場合、改訂によっても約30mの支間長をもつ単純桁、多少使用性が損なわれる範囲もあるが、減衰定数が非常に小さい範囲であることから、実際上、問題は生じないものと思われる。

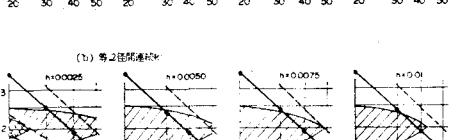
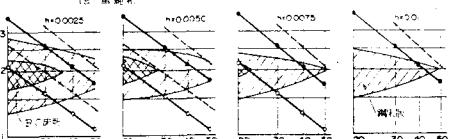


図-4. 非使用性確率が5%を超える振動数範囲とたわみ制限による振動数範囲(到着率0.5人/秒)。——は鋼床版、—はRC床版を示す。ただし、破線は今回改訂による数値である。