

振動感覚を考慮した歩道橋の確率論的設計

PROBABILITY-BASED DESIGN OF PEDESTRIAN-BRIDGES IN
CONSIDERATION OF THE ERGONOMICAL SERVICEABILITY

梶川 康 男*・小堀 為 雄**

By Yasuo KAJIKAWA and Tameo KOBORI

1. ま え が き

限界状態設計法は、1964年ヨーロッパコンクリート委員会(CEB)によって鉄筋コンクリート構造物の設計施工に関する国際指針¹⁾が公表され、新しい設計方法として採り入れられるようになった。限界状態設計法においては一般に、信頼性設計法などを用いて終局限界状態に対する安全性の検討を行い、この点から断面を定め、その断面を用いて使用限界状態に対する照査を行うが、この使用限界状態に含まれる振動の照査についてはあまり具体例がなく、まだ多くの議論の余地が残されている。しかし、その重要性は、安全性が終局限界状態によって考えられるようになれば、いっそう増加するものである²⁾。従来、鋼構造の橋梁では、使用限界として活荷重による主桁のたわみの照査が行われてきた。その主な理由は設計計算において、たわみによる二次的影響を考えていないためとされていた。最近の歩道橋の設計基準³⁾では、振動が歩行者へ及ぼす影響という立場から、次のような三段階に分けて考えることとなった。

- 1) 活荷重によるたわみを支間長の1/600以下とする。
- 2) 歩行者への振動の影響について配慮した場合は、1/400まで緩和することができる。
- 3) 40mを越えるプレートガーダー形式の歩道橋で、たわみ振動の固有振動数が歩調(約2Hz)に近い場合には歩行者への振動の影響について配慮しなければならない。

以上の三点を要約すると、活荷重によるたわみを支間長の1/600以下とするか、あるいは振動に対する配慮をするかのどちらかしか方法はないことになる。これらのうち、たわみ制限の強化は振動数の下限を従来よりも約

2割高める結果になり、歩行者への影響から考えるとかなりの効果を認めることができるが、支間長が大きくなると、この制限を守ることは難しくなる⁴⁾。しかし、振動の照査が義務づけられたことは、この種の問題を扱う場合、大きな前進であろう。ところが、その照査方法はまだ確立されておらず、早急に簡便かつ十分な精度をもつ方法が開発されることが望まれている。このように、使用性問題に対して徐々に関心もたれ、使用性問題も進歩しつつある。しかし、安全性研究に比べるとまだ相当な開きを認めざるを得ず、いっそうの努力が待たれている。また、限界状態設計法では終局限界状態と使用限界状態とが統一された設計理念で評価されるべきであろう。その点から使用性についても安全性と同様、確率論的な評価が重要となってくる。

著者らは、橋梁の振動が歩行者に及ぼす影響について振動感覚という立場から歩道橋や道路橋に対する考察などを行い、その成果を逐次発表してきた。まず、橋梁振動の特性を考慮して、振動刺激と歩行者の感覚反応との関連を求め⁵⁾、橋梁振動の心理的な大きさを表わす尺度を提案し⁶⁾、その尺度を用いて実橋の振動調査結果を評価した^{7), 8)}。また、振動刺激の大きさを理論的に予測する方法を不規則振動解析によって考え、道路橋振動のための動的応答スペクトルを示すとともに、よく振動するといわれてきたランガー桁橋の振動の大きさを評価した^{9), 10)}。ところが、「振動の大きさ」という尺度はA橋の振動がB橋の振動の何倍に感じられるであろうと評価できる比例尺度である。しかし、橋梁での載荷状態は実験時以外、確率的な取り扱いを行わねば解析できないために、「振動の大きさ」という尺度を用いたとしても通常の使用状態を把握するには、まだ十分ではない。そこで、構造物の安全性が終局限界状態の生ずる確率を定量的な尺度として評価されるならば、構造物の使用性もまた、使用限界状態の生ずる確率を尺度として用いるのが妥当であると考えた。そして、歩行者が橋梁を渡る間に

* 正会員 福井工業大学助教授 工学部建設工学科

** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部建設工学科

受ける振動刺激の確率分布と、ある刺激によって心理的な反応を生ずる確率分布とを比較することによって心理的な限界状態が発生する確率を求め、非使用性確率と呼ぶことにした¹¹⁾。この確率には、橋梁の動的特性、歩行者の動的荷重としての特性、到着特性そして歩行者の心理反応の特性などのほとんどが加味されているので、橋梁の使用性を論議する際にもっとも適した尺度であると思われる。しかも、恕限度としても理解されやすい尺度であると考えられる。文献 11) では歩道橋における非使用性確率の基本的な考え方を述べるとともに、近似法による数値計算例を示し、従来、歩道橋の設計に用いられている活荷重によるたわみの制限と非使用性確率との関連について述べた。ところが、文献 11) で述べた刺激分布の算出方法は大胆な仮定による近似法である。この近似法の精度を確かめるには、刺激分布の算出方法をより詳細に検討して精解値を求めねばならない。

そこで、本論文では、まず非使用性確率の精解値を求め、近似値と比較した。次に、歩行者の到着が、より一般的なアーラン型となった場合についての考え方を述べた。そして、安全性評価の際に設計との関連から用いられる傾向にある二次モーメント法による安全性指標¹²⁾と同様に、平均値と分散のみで示される使用性指標を提案し、その指標がもつ特徴について述べた。

2. 歩道橋の使用性解析

歩道橋を対象として、歩行者が通行するときに受ける振動を、不規則振動解析の手法によって求め、振動刺激に変換して心理的な反応の特性と比較することにより、心理的な限界状態が発生する確率、すなわち非使用性確率が求められることは、すでに文献 11) において述べた。ここでは、文献 11) と重複するが、これらを概説し、その精解値を求めることとする。

(1) 歩行者による動的応答と振動刺激の影響

図-1 に示すように歩行者 ① が歩道橋を渡るとき、① と時間間隔 τ だけ離れた歩行者 (② あるいは ③) にどのような影響を及ぼすかを求める。歩行者に振動感覚を生じさせる振動刺激としては著者らの実験成果^{9), 6)}に基づいて、歩行者が橋を渡る間の振動速度の実効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 $q_n(t)$ と正規化された基準座標 $\varphi_n(x)$ とを用いて、各振動モードごとに次式で表わされる。

$$\ddot{q}_n(t) + 2\omega_n h_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = f(t)\varphi_n(vt) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ω_n : 橋梁系の非減衰固有円振動数
 h_n : 橋梁系の減衰定数

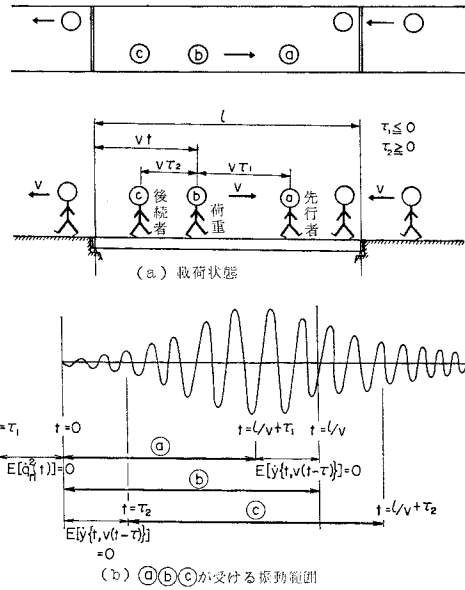


図-1 歩行者と橋梁のモデル

- $f(t)$: 時間 t における外力
- v : 外力の移動速度
- n : 振動モードの次数 ($n=1, 2, 3, \dots$)

そして、時間 t において歩行者 ② がいる位置 $\{x=v(t-\tau)\}$ における振動速度の二乗平均値の期待値は次式にて求められる。

$$E[\dot{y}^2(t, x)] = \sum_{n=1}^{\infty} \{E[\dot{q}_n^2(t)]\varphi_n^2\{v(t-\tau)\} \dots (2)$$

ここで、

$$E[\dot{q}_n^2(t)] = \frac{2e^{-2h_n\omega_n t}}{\bar{\omega}_n^2} \cdot \int_0^{\infty} S_f(\omega) \left[\left\{ -h_n\omega_n I_S(\omega, t) + \frac{\partial I_S(\omega, t)}{\partial t} \right\}^2 + \left\{ -h_n\omega_n I_C(\omega, t) + \frac{\partial I_C(\omega, t)}{\partial t} \right\}^2 \right] d\omega \dots (3)$$

なお、 $\bar{\omega}_n = \omega_n \sqrt{1-h_n^2}$ (減衰固有円振動数) である。また、

$$I_S(\omega, t) = \int_0^t e^{h_n\omega_n \xi} \sin \bar{\omega}_n(t-\xi) \cdot \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} a_{nm} \sin \frac{m\pi v \xi}{l} \right\} \sin \omega \xi d\xi \dots (4)$$

$$I_C(\omega, t) = \int_0^t e^{h_n\omega_n \xi} \sin \bar{\omega}_n(t-\xi) \cdot \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} a_{nm} \sin \frac{m\pi v \xi}{l} \right\} \cos \omega \xi d\xi \dots (5)$$

であり、この積分結果およびその微分結果 $\frac{\partial I_S(\omega, t)}{\partial t}$ と $\frac{\partial I_C(\omega, t)}{\partial t}$ は文献 9) の付録に示されている。そして、 $S_f(\omega)$ を外力のパワースペクトル密度であるとする、歩行者の歩調の分布 $p(\omega)$ を用いて、

$$S_f(\omega) = \frac{1}{2} \left(\frac{W}{g} AW \right)^2 p(\omega) \dots\dots\dots (6)$$

として表わされる*. ここで、 W は歩行者の体重であり、60 kg を標準とし、 AW は歩行者の腰部加速度振幅であり、ここでは文献 8) に示した実験結果より 0.4 g を用いることとする。

式 (2) によって、図-1 の歩行者 ㉓ が ㉒ から時間 t に受ける振動刺激が求められる。㉓ と ㉒ の両者が橋上にいるか否かに留意しながら、 t を変化させれば歩行者 ㉓ が橋を渡る間に歩行者 ㉒ から受ける全刺激が計算される。そして、歩行者 ㉓ が橋路上にいる時間 (l/v) で平均すれば、その値は τ だけ離れた歩行者によって与えられる刺激の影響とみなすことができる。

(2) 刺激の分布と非使用性確率

時間間隔 τ だけ離れた位置に歩行者がいるか否かは確率事象であるので振動刺激の大きさの分布を求めるには確率的な取り扱いが必要となる。ところが、 τ だけ離れた微小区間に n 人がいる確率を計算し、すべての区間についてこれを考えていけば振動刺激の大きさとその確率を求めることはできるが、計算回数の点で実用的ではない。そこで、吊鐘状になる刺激の影響を図-2 のように三角形で近似することによって、着目した歩行者以外の 1 人の歩行者による刺激が、0 から A まで一様に分布するものとみなしうる。そして、歩行者がポアソン到着するものとすれば、刺激影響区間 T 内に着目した歩行者を含めて $(n+1)$ 人がいる確率 $P_T(n+1)$ は、歩行者の到着率を λ 人/秒 とすれば、 T 内に 1 人もいない確率を考慮した条件付確率を用いて次式で表わされる。

$$P_T(n+1) = \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^{n+1} / (n+1)!}{1 - e^{-\lambda T}} \dots\dots\dots (7)$$

この確率を用いることによって歩行者が受ける振動のみを対象とすることができる。 n 人の歩行者が相互に独

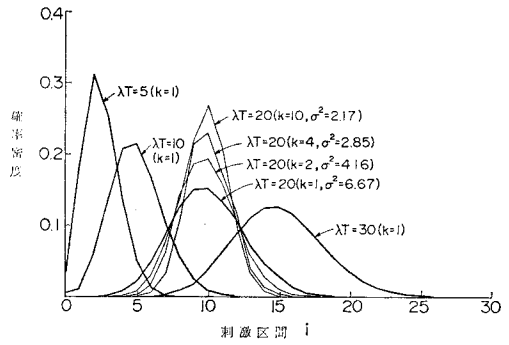


図-3 平均到着数・位相による刺激分布の変化

立であるとすれば、 n 人によって与えられる刺激 S は各人の起こす振動刺激 S_i の和で表わされる。すなわち、

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n \dots\dots\dots (8)$$

で表わされる。1 人の歩行者による刺激 S_i が 0 から A までの同一の一様分布で表わされるので、他から受ける刺激の平均は $n \cdot A/2$ となり、着目した歩行者自身による影響 B を加えて、この歩行者が受ける刺激の平均値は $B + n \cdot A/2$ となる。また、 S_i の分散が $A^2/12$ で表わされるので、 S の分散は $n \cdot A^2/12$ となる。そして、刺激は B から $(B+nA)$ の間に分布するが、その形は n の大きさによって変わる。 $n=1$ では一様分布、 $n=2$ では階段状となるが、 n が十分大きければ中心極限定理によって正規分布形となる。そこで、 n が小さい範囲でも近似的に正規分布で表わされるとすれば、 n 人による刺激が i 番目の単位区間、すなわち $(i-1)A$ と iA の間に入る確率 $P_n(iA)$ は、

$$P_n(iA) = P_{\text{rob}}[(i-1)A \leq y < iA] \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{n}{12}} A} \int_{(i-1)A}^{iA} e^{-\frac{6(\frac{nA}{2}-y)^2}{nA^2}} dy \dots\dots (9) \\ i=1, 2, 3, \dots, n$$

$(n+1)$ 人の歩行者が T 内にいる確率は式 (7) で示されるので、刺激の二乗が $\{B+(i-1) \cdot A\}$ と $\{B+iA\}$ の間に入る確率は式 (7) と式 (9) の積の合計で表わされる。

$$f_s^2(x) = P_{\text{rob}}[B+(i-1)A \leq x < B+iA] \\ = \sum_{n=0}^{\infty} P_T(n+1) P_n(iA) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $B=0, A=1$ として種々の λT について式 (10) を計算した結果を図-3 に示す。図-3 より、 λT が大きくなる

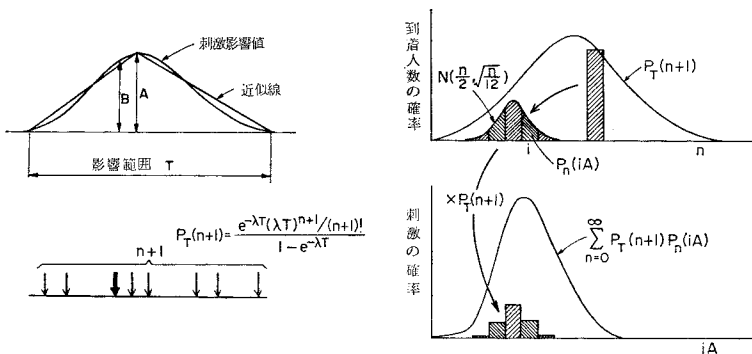


図-2 刺激分布の求め方

* 文献 11) で、外力のパワースペクトル密度の係数が π となっているが、これは著者らの考え違いであり、 $1/2$ が正しい。ただし、数値計算では 2π で除するという処理をしているので結果には影響していない。

に従って正規分布に近づくことがわかる。これは、次のように説明できる。

T 内に $(n+1)$ 人がいるとき、 $(n+1)$ 人による刺激の平均値は $B+nA/2$ であり、分散は $nA^2/12$ である。 λT が大きい場合、式 (7) の分子は正規分布にて近似され、しかも、小さい n の生ずる確率は非常に小さくなる。一方、 n の十分大きい範囲で標準偏差 $\sqrt{n/12} \cdot A$ は平均値に比べて、相対的に小さくなってしまふ。そこで、平均値 $(B+nA/2)$ の近くのみが重要となり、式 (10) で示される刺激の二乗の分布は、式 (7) で示される T 内に $(n+1)$ 人がいる分布形と類似することになる。このような理由で、刺激分布は正規分布形に近づくのである。そして、その平均値は着目した歩行者自身による刺激を別に考えているので、他の歩行者の平均人数は $(\lambda T - 1)$ 人であることから、 $[B + 1/2(\lambda T - 1)A]$ である。また、分散は式 (8) がもつ分散 $\lambda T/12 \cdot A^2$ と到着のばらつきにより分散 $\lambda T/4 \cdot A^2$ を加え合せて、 $\lambda T/3 \cdot A^2$ となる。

このようにして、刺激の分布の原形が予測できるので、 B や A に実際の数値を代入すれば、刺激の二乗の分布をほぼ正確に求めることができる。この二乗の分布から刺激分布 $f_S(x)$ を求め、振動に対する感覚反応の確率分布関数 $F_R(x)$ と比較すれば、次式によって心理的な反応を生ずる確率、すなわち非使用性確率 p_d を求めることができる。

$$p_d = \int_0^{\infty} f_S(x) F_R(x) dx \dots \dots \dots (11)$$

以上に説明した方法によって、文献 11) において定義した非使用性確率の精解値を求めることができる。ここで、文献 11) で述べた近似法の精度を確かめるために、支間長 40m・幅員 4m の鋼床版単純桁橋 (文献 11) の図-13 (a) に対して、本節で述べた精解値を求め、近似

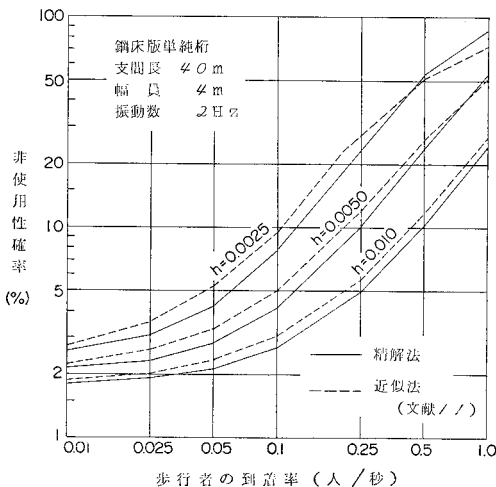


図-4 精解法と近似法による非使用性確率の比較

法による数値と比較したのが図-4 である。両者には、あまり差がなく、近似法によっても実用上差しつかえないと思われる。ところが、精解値を求めることがもっとも望しいけれども、前述したように複雑な計算を必要とする。特に、 λT が大きい場合には電子計算機の演算に頼らざるを得ない。設計作業上では簡便で、しかも十分な精度をもつ方法が要求される。そこで、より実用的な解法として、4. において二次モーメント法による解法について述べる。

3. アーラン到着に対する非使用性確率

歩行者を荷重として扱う場合、その最大密度に興味がもたれ¹³⁾、活荷重の大きさの決定が行われている。また、横断歩道橋設置の必要性を解析する場合には車道部分を走行する自動車の到着特性は考えられているが、歩道橋を使う歩行者の到着特性はほとんど考えられていない。ところが、本研究で対象とするような日常的な載荷状態を問題にする場合には、歩道橋の使用性に歩行者の到着特性が大きく影響するものと考えられる。従来の測定結果^{14), 15)}によれば、歩行者はポアソン到着をしていると考えられるが、到着数が比較的小さい場合に限定されていた。しかし、毛利・塚口の調査¹⁵⁾によれば、0.2人/m²以下ではポアソン到着をしているが、0.2~0.8人/m²では位相が 1~2、0.8人/m²以上では位相が 2~3 のアーラン到着をしているとの結果を得ている。著者らは、文献 11) でポアソン到着をするものとして扱ってきたが、アーラン到着に対する使用性を検討しておくことは、特に歩行者の到着が増えたとき、その重要性を増すものと思われるので、ここで、その考え方を示す。

平均到着率 λ 人/秒で、しかも位相 k のアーラン到着の場合、 T 内に n 人がいる確率すなわち到着人数分布は、

$$U_n(T) = e^{-k\lambda T} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(k\lambda T)^{n+k+i}}{(n+k+i)!} \dots \dots \dots (12)$$

と表わされる¹⁶⁾。なお、 $k=1$ のとき、式 (12) はポアソン分布に、 $k \rightarrow \infty$ のとき、単位分布 (一定間隔到着) に一致する。さて、着目した歩行者を含めると $(n+1)$ 人が T 内にいる確率 $P_T(n+1)$ は、 T 内に 1 人もいない確率 $U_0(T)$ を考慮した条件付確率を用いて、次式で表わされる。

$$P_T(n+1) = \frac{U_{n+1}(T)}{1 - U_0(T)} = \frac{e^{-k\lambda T} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(k\lambda T)^{n+k+i}}{(n+k+k+i)!}}{1 - e^{-k\lambda T} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(k\lambda T)^i}{i!}} \dots \dots \dots (13)$$

そして、 $k=1$ (ポアソン到着) とすると式 (13) は式 (7) に一致する。アーラン到着の場合、 T 内に $(n+1)$

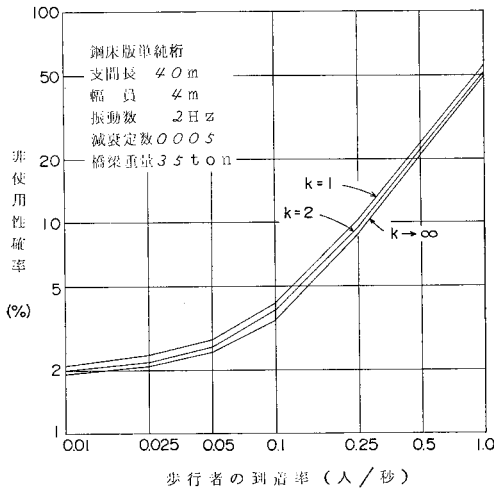


図-5 アーラン到着の位相による非使用性確率

人がいる確率としては式 (13) を用いるが、 $(n+1)$ 人がいるときに区間 i に刺激が入る確率としては、ポアソン到着の場合と同様、式 (9) を用いることにする。図-3 に $\lambda T=20$ の場合、位相 k によって刺激の分布形がどのように変化するかを示した。この結果、 k が増加すると刺激はその平均値のまわりに集中し、徐々に平均値のみの単位分布に近づくことになる。これは、一定間隔に到着する歩行者がまったく同じ大きさの刺激を受けることに相当する。ここで、前節で示したモデル橋（支間長 40m・幅員 4m の鋼床版単純桁橋）に歩行者がポアソン到着 ($k=1$)、アーラン到着 ($k=2$)、一定間隔到着 ($k \rightarrow \infty$) した場合の非使用性確率を図-5 に示した。その結果、ポアソン到着した場合がもっとも大きく、一定間隔に到着した場合がもっとも小さくなっており、アーラン到着の場合は、その中間に位置している。このように歩行者の到着がポアソン型のとき、振動振幅がもっとも大きくなることは歩行者列をシミュレーションによって計算した結果からも指摘¹⁷⁾されていたが、非使用性確率についても同様の結果を得た。しかし、これらの差は図-5 からわかるように小さく、アーラン到着の位相による影響は少ないことがわかる。このことから歩道橋の使用性を検討する場合にはポアソン到着を考えておけば、十分であると思われる。

4. 使用性指標

構造物の安全性あるいは信頼性解析において、荷重や強度の分布形などの問題点から確率論の適用の是非が議論されている。そして、二次モーメント法が提唱され、破壊確率に代えて安全性指標 (Safety index) が提案されている。その指標は強度 R と荷重 S との差を安全性

の余裕 (Safety margin) M とすると、その平均 μ_M が破壊をもたらす限界である $M=0$ から標準偏差 σ_M の何倍だけ隔たっているかを示し、次式にて表わされる¹²⁾。

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \dots\dots\dots (14)$$

このような安全性指標を用いることは荷重係数などを決定する際に、有力な手法となっている。

そこで、著者が研究対象としている使用性に関してもまったく同様な考えを導入することによって、使用性の定量的な把握ができないものであろうか。このような指標によって、より具体的に設計との結びつきを考えていくことも必要であると思われる。ここで、使用性指標 (Serviceability index) を定義する。感覚反応 R と振動刺激 S との差を使用性の余裕 (Serviceability margin) m とするとき、その差の平均 μ_m が使用性を損う限界である $m=0$ から標準偏差 σ_m の何倍だけ隔たっているかを使用性指標 β_d で表わし、式 (14) と同様に次式で示されるものとする。

$$\beta_d = \frac{\mu_m}{\sigma_m} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \dots\dots\dots (15)$$

ここで、感覚反応については、刺激側が二乗の分布を用いる関係上、すでに発表した振動感覚に関する実験結果⁹⁾から、その平均値として $2.9 (=1.7^2)$ cm^2/s^2 、変動係数 0.5 の正規分布であるとする。しかも、刺激の二乗の分布は、すでに説明したように λT が大きければ正規分布にて近似できる。その平均値は $\{B+1/2(\lambda T-1)A\}$ であるが、 $B=A$ とみなしうるので、 $0.5(\lambda T+1.0)A$ となる。そして、分散は $\lambda T/3 \cdot A^2$ で表わされる。ただし、アーラン到着を考える場合には到着のばらつきによる分散が $\lambda T/4 k \cdot A^2$ となるので、 $(1/12+1/4 k)\lambda T A^2$ となる。

以上のことを考慮して、式 (15) を書き改めると使用性指標 β_d は

$$\beta_d = \frac{2.9 - 0.5(\lambda T + 1)A}{\sqrt{1.45^2 + \left(\frac{1}{12} + \frac{1}{4k}\right)\lambda T A^2}} \dots\dots\dots (16)$$

となる。感覚反応 R と振動刺激 S の分布が、ともに正規分布であるとするれば、非使用性確率は $1 - \Phi(\beta_d)$ にて計算され、両者の関係は 図-6 (d) の実線のようになる。なお、 $\Phi(\)$ は平均値 0、標準偏差 1 の正規確率分布関数である。また、振動刺激 S の分布を近似法 (文献 11)) によって求め、刺激の平均値と標準偏差から使用性指標を計算し、その指標と非使用性確率との関係を示したものが 図-6 (d) の破線である。図-6 (d) の実線と破線は比較的良好に一致しており、刺激の分布形にあまり影響されないことがわかる。ただし、指標 β_d が 1.6 以上では両者に差が認められるが、これは式 (16) において感覚反応の変動係数を 0.5 (標準偏差=1.45)

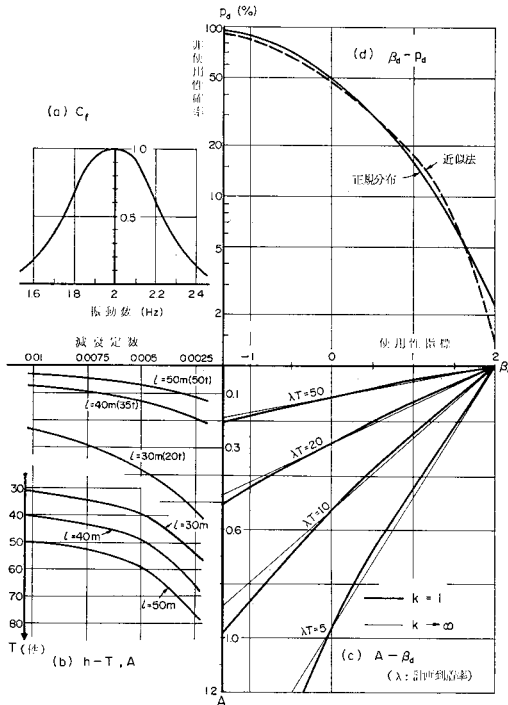
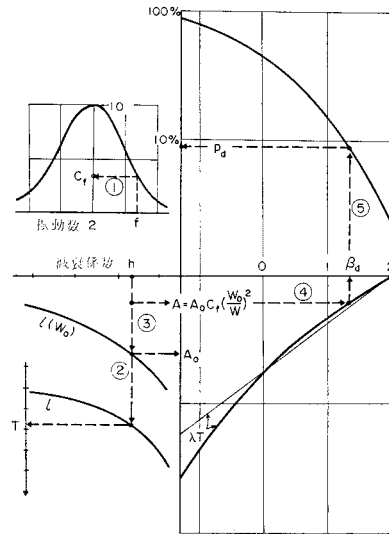


図-6 使用性指標と非使用性確率

と仮定したために生じているが実用上、差しつかえないものと考えられる。

次に、式(16)に対して λT をパラメーターに、 A と β_d との関係をグラフ化したものが図-6(c)である。細直線はアラン到着の位相を無限に大きくした場合であり、曲線は位相が1、すなわち歩行者がポアソン到着をしている場合である。図-6(c)において、 $\beta_d \geq 0$ で $k=1$ と $k \rightarrow \infty$ の両者には、あまり差がないが、 $\beta_d < 0$ では少し差が生じている。しかし、実際問題として $\beta_d < 0$ の範囲で使用性が議論されることは少ないであろうから、実用上、歩行者の到着の仕方がポアソン到着や一定到着あるいはそれらの中間のアラン到着であろうと使用性指標にはあまり影響しないといえる。このことから図-6(c)と(d)を用いて、使用性指標をダミーとして非使用性確率が容易に求められることがわかる。ここで、ほかの図を用意することによって残るパラメーター A と T を定めることができれば、橋梁の動的特性(振動数や減衰など)から使用性指標と非使用性確率を求めるためのすべての作業を図-6のみで終えることができる。しかも、さまざまな特性と使用性との関係を論ずる場合に、重要な図表となりうると思われる。

そこで、振動刺激の影響最大値 A と影響範囲 T について考えてみた。支間長 30~50 m、減衰定数 0.0025~0.01、振動数 1.6~2.4 Hz の単純桁歩道橋に対する A と T を求め^{9),11)}、その傾向を調べてみると影響最大値



(○の数字は本文中の作業番号である)

図-7 歩道橋の使用性指標と非使用性確率の求め方

A については振動数による補正を図-6(a)のように行えば、支間長をパラメーターにして図-6(b)のように示される。また、影響範囲 T は振動数によって変化するが、その量はわずかであることと、その誤差が指標や確率に及ぼす影響は少ないことから、振動数による影響を無視することにすれば、支間長をパラメーターにして示される。さて、このように図-6(a),(b)によって影響最大値 A と影響範囲 T を求めることができれば、すでに用意された図-6(c),(d)によって使用性指標や非使用性確率を求めることができ、歩道橋の使用性を検討することができる。ここで、図-6の使用法を図-7に従って説明する。

① 単純桁歩道橋の振動数を計算し、その値によって図-6(a)から振動数補正值 C_f を求める。

② 減衰定数 h を予測し、図-6(b)から影響基準値 A_0 と影響範囲 T を求める。

③ 図-6(b)の影響基準値 A_0 は各支間長ともに、図中に示した基準重量 W_0 について計算されたものである。実際の重量が W であるときは $(W_0/W)^2$ 倍しなければならない⁹⁾。また、固有振動数が 2 Hz のときの値であるので、設計した歩道橋の実際の影響最大値 A は次式にて重量と振動数について補正される。

$$A = A_0 C_f \left(\frac{W_0}{W} \right)^2 \dots\dots\dots (17)$$

④ 補正された影響最大値 A を図-6(c)上をずらしながら、計画到着率を λ 人/秒 とするとき、所定の λT (T は図-6(b)より求める) との交点を求め、その交点から垂線を立て横軸との交点が使用性指標 β_d を表わす。

⑤ そのまま垂線を延長し図-6(d)の指標-確率曲

線との交点を求め、その交点の縦座標値が非使用性確率を与えている。

この方法において、アーラン到着の位相の大小によって使用性指標や非使用性確率があまり変わらないことはすでに述べたが、ここでは歩行者がポアソン到着をするものとして扱えば十分であると思われる。また、いままでに説明した手順を逆に行えば、非使用性確率をある値以下にするには橋梁の特性値をどのような数値にすべきかという設計上有効な情報を得ることができる。

ここで、数値計算例として幅員 2m、支間長 40m の π 型断面鋼床版単純桁歩道橋について、その使用性を検討した。断面算定などは本来限界状態設計法によるべきであるが、この種の設計法はまだ確立されていないために従来から用いられている許容応力度設計法に基づいて行った。その結果、断面は図-8 のようになり、活荷重によるたわみは 6.47 cm であり、支間長との比は 1/618 となる。しかし、主桁の 1 次たわみ振動の固有振動数を計算すると 2.0 Hz となり、技術基準⁹⁾によ

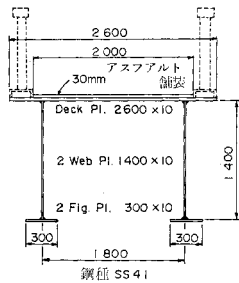


図-8 モデル橋の断面構成

ると振動による歩行者への影響を配慮しなければならぬ歩道橋である。そこで、本橋の使用性を図-6 によって照査してみる。仮に減衰定数を 0.005 として考えると $A=0.13 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 、 $T=48.5$ 秒となる。どの程度の歩行者を考えるかは、設計活荷重の大きさとの関連からまだ検討されねばならないが、仮に $\lambda T=10$ 人を考えることにすると使用性指標 β_d は約 1.4、非使用性確率は約 8% となる。この程度の確率であれば使用性を著しく損うものとは考えられないが、一応 5% 以内に抑えられるように設計変更を行うことにする。そのためには、指標を約 1.6 以上にする必要があり、 A を $0.1 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 以下にしなければならない。減衰の制御は難しいことから振動数を 2.2 Hz 以上とする必要がある。そこで、使用性改善にはいろいろな手段¹⁸⁾が考えられるが、設計時には腹板高の変更がもっとも容易であろうから、腹板高を 140 cm から 155 cm に変更することとした。変更後の振動数は 2.23 Hz となり、指標 β_d は約 1.7、非使用性確率は約 4% 程度とすることができる。腹板高の変更による主桁の鋼重変化は約 30 kg/m 増と非常に少なく、付帯的に増える工費もあろうが、それらはそれほど多額とはいえないと思われる。ここで用いた振動数は計算値であり、完成後の実際の振動数は多少高く現われることが報告されている¹⁹⁾。これらを予測する方法としては設計者の手持ちの情報を活用できるペイズの方法²⁰⁾、²¹⁾を用いる

のがよいと考えられるが、その適用の是非についてはまだしの感があるので、ここではもっとも使用性を損う計算振動数について照査した。

さて、安全性の検討の際、従来よく用いられてきた尺度に中央安全率がある。これと同様な尺度として、刺激の平均値に対する感覚反応の平均値の比 ν_d (仮に、中央使用率と呼ぶことにする) を用いて、使用性を考えてみる。式 (15) で表わされる使用性指標 β_d を刺激と感覚反応の変動係数 δ_S 、 δ_R を用いて書き直すと次のようになる。

$$\beta_d = \frac{\mu_m}{\sigma_m} = \frac{\nu_d - 1}{\sqrt{\nu_d^2 \delta_R^2 + \delta_S^2}} \dots\dots\dots (18)$$

ここに、

$$\nu_d = \frac{\mu_R}{\mu_S} = \frac{2.9}{0.5(\lambda T + 1)A} \dots\dots\dots (19)$$

$$\delta_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R} = \frac{1.45}{2.9} = 0.5 \dots\dots\dots (20)$$

$$\delta_S = \frac{\sigma_S}{\mu_S} = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{12} + \frac{1}{4k}\right)\lambda T A}}{0.5(\lambda T + 1)A} = \sqrt{\frac{\frac{1}{3} + \frac{1}{k}}{\lambda T}} \dots\dots\dots (21)$$

したがって、中央使用率 ν_d と使用性指標 β_d との関係は次式となる。

$$\beta_d = \frac{\nu_d - 1}{\sqrt{0.25 \nu_d^2 + \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{k}\right) \frac{1}{\lambda T}}} \dots\dots\dots (22)$$

このように表わされるので、例えば非使用確率を 5% 以下に抑える場合には、図-6 (d) から使用性指標を 1.6 以上とすればよいので、仮に $\lambda T=10$ の場合を考えるとすると、ポアソン到着 ($k=1$) の状態では、 $\nu_d \geq 5.20$ 、一定間隔到着 ($k \rightarrow \infty$) の状態では、 $\nu_d \geq 5.05$ となる。すなわち、 $\nu_d \geq 5.0$ とすれば到着の仕方がかわらず非使用性確率を 5% 以下とすることができる。このように、中央使用率を用いても近似的ではあるが使用性を検討することができ、従来の設計法との整合を考える場合や載荷実験の結果を用いて使用性を検討する場合などに有効な方法であると思われる。

ここで、図-6 に基づいて、橋梁のもつ動的特性と使用性との関連について考えてみる。すなわち、どの特性が使用性に大きく影響するかという Sensitivity Analysis²²⁾、²³⁾を行うことは、設計上重要なことであると思われる。まず、減衰を制御することは実際上至難であるが、図-6 から見る限り、たとえ制御したとしてもよほど大幅な変更でない和使用性を大きく改善させることはできない。ところが、重量や振動数を制御することは比較的容易であるし、また、その使用性への影響は大きいことがわかる。これ以外の特性たとえば到着特性などを制御することは、逆に別な面の使用性を損うことになってしまう。このように考えてみると、結局常識的な結果

ではあるが橋梁重量を大きくするか、桁高などを変えることによって剛性を上げるかのいずれかの方法によって使用性の向上を図る以外方法はないように思われる。しかし、ここで注意したいことに重い橋であれば、例えば振動数が 2 Hz に近くなっても必ずしも使用性を損うものではないことを認識するとともに、新しい技術基準²⁾によって活荷重によるたわみを支間長の 1/600 以下にしたとしても場合によっては使用性を損うこともありうることも認識すべきである。

5. あとがき

本論文は、歩道橋の振動が歩行者へ及ぼす影響を考えた設計を行う際、有効な検討方法として非使用性確率の精解値の求め方やアラン到着に対する検討そして使用性指標による検討を行ったものである。この種の検討に対して非使用性確率を提案した文献¹¹⁾と本論文とによって歩道橋の動的問題から見た使用性に対する検討方法はいっそう進歩し、構造物の安全性研究のレベルに近づくことができるものと信じている。ところが、使用性確保のためにはどの程度の確率あるいは指標が必要であるかについてはキャリブレーションを行わねばならないし、どのような荷重状態に対して照査するかなど、さらに検討すべき点が多く残されており、今後、いっそうの研究努力をしなければならぬ。なお、単純桁歩道橋の振動の照査には本文に示した図表のみで十分可能であるが、他の形式の橋梁やより具体的な設計例、詳細な図表等については別の機会に発表したい。

最後に、図面の作成等にご助力いただいた金沢大学の城戸隆良技官に感謝いたします。なお、本研究の一部に昭和 52 年度金井学園福井工業大学特別研究費の援助を受けたことを付記します。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会・日本コンクリート会議：コンクリート構造物設計 施工国際指針 (CEB/FIP 1970), 鹿島出版会, 1971.
- 2) Brown, C.B.: Concepts of structural safety, Proc. of ASCE, Vol. 86, No. ST. 12, pp. 39-57, 1960.
- 3) 佐藤 清：立体横断施設技術基準の改正, 建設図書「橋

- 梁と基礎」11巻3号, pp. 12-17, 1977.
- 4) 梶川・小堀：歩道橋のたわみ制限と振動感覚との関係について, 土木学会第 32 回年次学術講演会講演概要集, I-275, 1977.
- 5) 小堀・梶川：道路橋の振動とその振動感覚, 土木学会論文報告集第 222 号, pp. 14-22, 1974.
- 6) 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, pp. 23-31, 1974.
- 7) 小堀・梶川：道路橋の振動測定法とその特性, 日本道路協会「道路」第 401 号, pp. 37-45, 1974.
- 8) 小堀・梶川・城戸：振動感覚を考慮した歩道橋の設計, 建設図書「橋梁と基礎」8巻12号, pp. 23-29, 1974.
- 9) 小堀・梶川：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第 248 号, pp. 11-23, 1976.
- 10) 小堀・梶川：振動感覚を評価するためのアーチ橋の動的応答スペクトル, 土木学会論文報告集第 251 号(ノート), pp. 127-130, 1976.
- 11) 梶川・小堀：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第 266 号, pp. 51-61, 1977.
- 12) Cornell, C.A.: A probability-based structural code, ACI Journal, Vol. 66, No. 12, pp. 974-985, 1969.
- 13) 日本道路協会横断歩道橋委員会：横断歩道橋研究報告書, pp. 65-90, 1964.
- 14) 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, pp. 63-70, 1972.
- 15) 毛利・塚口：歩行路における歩行者挙動に関する研究, 土木学会論文報告集第 268 号, pp. 99-108, 1977.
- 16) 西田俊夫：待ち行列の理論と応用, 朝倉書店, p. 68, 1971.
- 17) 塩尻弘雄：歩道橋の動的設計について, 第 19 回橋梁・構造工学研究発表会, pp. 1-8, 1972.
- 18) 松崎・西岡・松本：歩道橋に取り付けた吸振器の効果について, 土木学会論文報告集第 261 号(ノート), pp. 129-131, 1977.
- 19) 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, No. 3, pp. 28-33, 1972.
- 20) Cornell, C.A.: Bayesian statistical decision theory and reliability-based design, Published in Structural Safety and Reliability, ed. by A. Freudenthal, Pergamon Press, pp. 47-68, New York, 1972.
- 21) Ang, A.H.S. and Tang, W.H.: 伊藤・亀田共訳：土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, pp. 323-354, 1977.
- 22) 星谷・中根：橋の振動による心理的反応の理論解析, 土木学会論文報告集第 246 号, pp. 1-8, 1976.
- 23) 西脇威夫：歩道橋における振動感覚の数量化と設計への応用, 土木学会論文報告集第 257 号, pp. 1-12, 1977.

(1978.4.7・受付)