

1. ま え が き 歩道橋の振動が問題となり始めて以来、すでに十余年が経った。現在では横断歩道橋の新設こそ少なくなったが車道橋員の狭い道路橋に並行して架けられるスパンの長い側道橋あるいは単独の歩道橋が多く設けられている。一般に大規模であるために、その振動問題はさらに重要な課題となっている。ところが、日本でのこの種の研究の多くが横断歩道橋を対象としてきたことから、かなり密な荷重状態での照査を義務づけている。密な状態であれば確率的な考察³⁾⁽⁴⁾も妥当な方法と言えようが郊外部などではむしろ疎な荷重状態での照査をしておけばよいようにも考えられる。また、構造も複雑になってきており、より簡潔な形の照査方法が望まれている。BS5400(1978)¹⁾では極めて具体的な照査方法が示されており、また遅れをとった感すらある。とは言うもののBSをそのまま適用するのはあまりに早計であろう。そこで、従来の成果^{1)~4)}を踏まえて、より具体的に簡潔かつ広範囲に適用できる照査方法について考えた。

2. 単歩歩行時の歩道橋の動的応答解析

歩行者による衝撃周期力を $f(t) = f_0 \cos \omega t$ で表わし、また振動モード $\phi_n(x)$ が正弦級数 $\sum_{n=1}^{\infty} A_{nm} \sin \frac{n\pi x}{L}$ で表わされるものとする。各振動モードに対する運動方程式は次式で示される。ただし、 $\sum_{n=1}^{\infty} A_{nm}^2 = 2/\rho L$ である。

$$\ddot{y}_n + 2h_n \dot{y}_n + p_n^2 y_n = \frac{f(t) \phi_n(vt)}{\int_0^L \phi_n^2(x) dx} = f_0 \cos \omega t \sum_{m=1}^{\infty} A_{nm} \sin \frac{n\pi vt}{L} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 h_n : 減衰定数、 p_n : 固有振動数、 v : 荷重の移動速度、 L : 橋長である。

式(1)の解(変位 y_n 、速度 $\dot{y}_n$ 、加速度 $\ddot{y}_n$) はつぎのようになる。

$$y_n(t) = \frac{f_0}{2} \sum_{m=1}^{\infty} A_{nm} \left[e^{-h_n p_n t} (C_1 \cos p_n' t + C_2 \sin p_n' t) + \gamma_1 \sin(\beta_1 t - \theta_1) + \gamma_2 \sin(\beta_2 t - \theta_2) \right] \quad \dots\dots (2)$$

$$\dot{y}_n(t) = \frac{f_0}{2} \sum_{m=1}^{\infty} A_{nm} \left[-e^{-h_n p_n t} \{ (h_n p_n C_1 - p_n' C_2) \cos p_n' t + (h_n p_n C_2 + p_n' C_1) \sin p_n' t \} + \gamma_1 \beta_1 \cos(\beta_1 t - \theta_1) + \gamma_2 \beta_2 \cos(\beta_2 t - \theta_2) \right] \quad \dots\dots (3)$$

$$\ddot{y}_n(t) = \frac{f_0}{2} \sum_{m=1}^{\infty} A_{nm} \left[h_n p_n e^{-h_n p_n t} \{ (h_n p_n C_1 - p_n' C_2) \cos p_n' t + (h_n p_n C_2 + p_n' C_1) \sin p_n' t \} - e^{-h_n p_n t} \{ (h_n p_n C_1 + p_n' C_2) p_n' \sin p_n' t + (h_n p_n C_2 - p_n' C_1) p_n' \cos p_n' t \} - \gamma_1 \beta_1^2 \sin(\beta_1 t - \theta_1) - \gamma_2 \beta_2^2 \sin(\beta_2 t - \theta_2) \right] \quad \dots\dots (4)$$

ここに、 $\beta_1 = \frac{n\pi v}{L} + \omega$, $\beta_2 = \frac{n\pi v}{L} - \omega$, $\theta_1 = \tan^{-1} \frac{2h_n p_n \beta_1}{p_n'^2 - \beta_1^2}$, $\theta_2 = \tan^{-1} \frac{2h_n p_n \beta_2}{p_n'^2 - \beta_2^2}$, $p_n' = p_n \sqrt{1 - h_n^2}$, $\gamma_1 = 1/\sqrt{(p_n'^2 - \beta_1^2)^2 + (2h_n p_n \beta_1)^2}$, $\gamma_2 = 1/\sqrt{(p_n'^2 - \beta_2^2)^2 + (2h_n p_n \beta_2)^2}$, $C_1 = \gamma_1 \sin \theta_1 + \gamma_2 \sin \theta_2$, $C_2 = \{ h_n p_n C_1 - (\gamma_1 \beta_1 \cos \theta_1 + \gamma_2 \beta_2 \cos \theta_2) \} / p_n'$ である。

各モードごとに $y_n(t)$, $\dot{y}_n(t)$, $\ddot{y}_n(t)$ を求めれば着目点の変位、速度、加速度は次式より求めることができる。

$$y(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) \phi_n(x), \quad \dot{y}(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \dot{y}_n(t) \phi_n(x), \quad \ddot{y}(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \ddot{y}_n(t) \phi_n(x) \quad \dots\dots (5)$$

3. 数値計算と最大変位応答スペクトル

式(2)を用いて、最慢歩調である $\omega = 2\pi/5$ s に対する応答変位を単純桁と等2径間連続桁について発表したことがある²⁾。さらに広範囲に適用可能な方法として、今回、応答スペクトル図を考えた。まず、式(2)~(4)を用いて最大値をそれぞれ計算してみると実用上の範囲で $\frac{n\pi v}{L} \ll \omega$ であり、 p_n は非常に小さいために、 $\dot{y}_{n, \max} = p_n y_{n, \max}$, $\ddot{y}_{n, \max} = p_n^2 y_{n, \max}$ が成立する。そこで、最大変位について考えることにする。式(2)において h_n と $\frac{n\pi v}{L}$

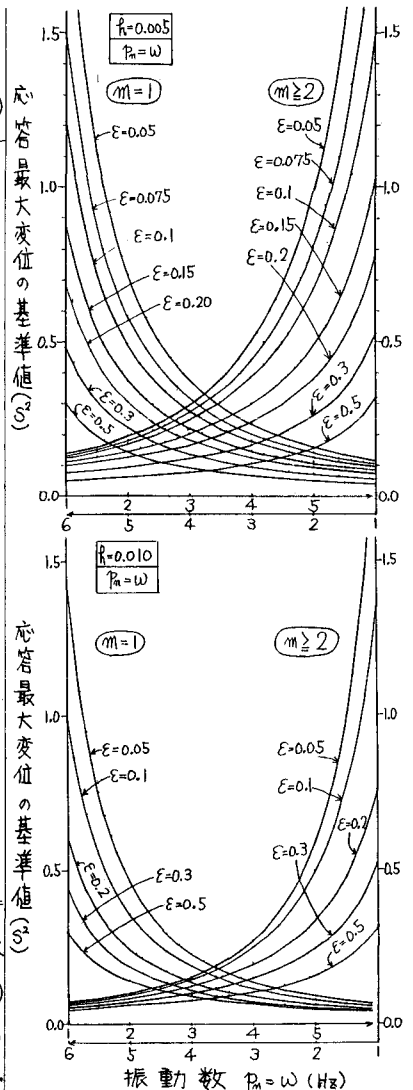


図-1 最大変位応答スペクトル図

($=\varepsilon$)をパラメーターとすることにより、各 $p_n(=w)$ 固有振動数と歩調が一致)に対する応答変位の最大値の基準値(式(2)の【】内の値)を計算した。この結果を図-1に示した。この図を最大変位応答スペクトル図と呼ぶことにした。図-1には $p_n=0.005$ と 0.01 について示したが他の p_n の場合も計算できるように $p_n=w=2.5/s$ と $3/s$ の場合について図-2を用意した。一方、 ε に対する影響は直線と十分内挿できる。これらの図と式(2),(5)を用いて歩調が基本の固有振動数に一致する場合の最大応答変位振幅を求めることができる。なお、基本振動数以外の振動の影響あるいは共振しない場合を考慮するための応答スペクトルと係数係数を図-3に示した。 $p_n=\alpha$ が $0.95 \sim 1.05$ の範囲以外では p_n と ε によって応答値がほとんど影響を受けないために図-3のみで照査できる。なお、応答スペクトル図において、 $m=1$ の場合には式(2)の第1項の減衰項が多少影響するので、それを考慮した値であり、 $m \geq 2$ ではその影響は小さく第2項の定常項のみの値である。

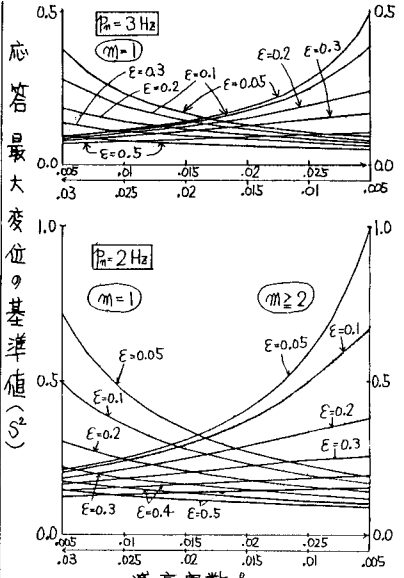


図-2 減衰定数による基準値の変化

4. 応答スペクトル図を用いた歩道橋の振動使用性の照査法

振動モードを正弦級数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{n\pi x}{L}$ という形で考えたために、この形が使えるような固有振動解析法、たとえばエネルギー法や結合法などによって固有振動数 p_n と固有モード係数 a_n を計算すれば、ここに示した応答スペクトル図によって、つぎのようにして最大応答値が計算される。

(イ) p_1 が歩調 w と一致するとき……減衰定数を仮定し、 $\varepsilon (= \frac{n\pi w}{L})$ の値によって図1~2から基準値を求める。 p_2 が p_1 と十分離れておれば p_1 についての基準値を式(2)の【】に代入し、必要な m について合計し、 $5/2$ を掛ければ、 $g_{1,max}$ が求められる。そして、 $g_{1,max}$ と $g_{2,max}$ を求めて式(5)に代入すれば着目点の応答最大値が計算される。(ロ)歩調と共振しない振動($0.95 \leq \frac{w}{p_n} \leq 1.05$ 以外)を考慮するとき…… $\frac{w}{p_n}=0.95, 1.05$ のときの各歩調 w に対する基準値を図-3に示したスペクトル図から求め、異なる $\frac{w}{p_n}(\alpha)$ に対する係数係数を図-4から算出し、その積を式(2)における【】の値とする。他の扱いは(イ)と同じである。なお、 p_2 が p_1 に近いときも $p_2=w$ とする必要はなく、 $p_1=w$ とし(ロ)を用いる。

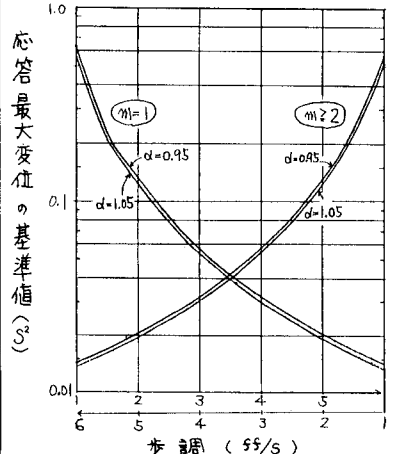


図-3 $\alpha=0.95, 1.05$ のときの応答スペクトル図

5. あとがき

ここで述べた照査法を用いて、実橋の振動実験値との比較を2,3橋について行った結果、十分満足な近似値となっている。これらの比較検討の結果については発表時に行うこととした。

<参考文献> 1) BSI: Steel, Concrete & Composite Bridge. Part 2: Specification for Load. BS5400:1978.
 2) Irwin, A.W.: Human Response to Dynamic Motion of Structures, Structural Engineer, Vol. 56A, No. 9, pp. 237-244, 1978.
 3) Blanchard, J., et al.: Design Criteria and Analysis for Dynamic Loading of Footbridges, UK. TRRL Rept. SR 275, 1979.
 4) Wheeler, J.E.: Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges, ARRB Proceedings, Vol. 10, Part 3, pp. 21-35, 1980.
 5) Matsumoto, Y., et al.: Dynamic Design of Footbridges, IABSE Proceedings, P17/78, pp. 1-15, 1978.
 6) 西田: 歩道橋における振動感の最小化設計への応用, 土木学会報告集第257号, pp. 1-12, 1977.
 7) 小堀: 歩道橋の振動感の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.
 8) 小堀: 歩道橋の振動感の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: 歩道橋の振動感の考慮した歩道橋の設計, 土木学会報告集第285号, pp. 29-36, 1979.

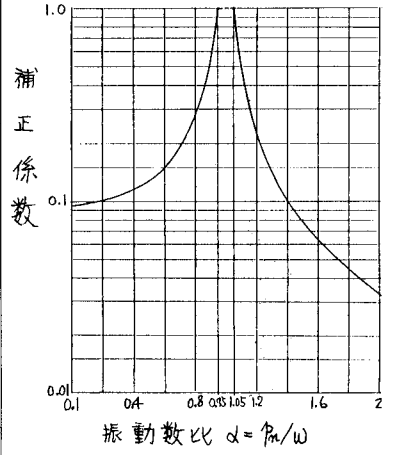


図-4 図-3の値に対する各 α の補正係数