

大阪大学工学部 正 小松 定夫
立命館大学理工学部 正 〇小林 敏士

[1] はしがき

充膜断面主桁を有する斜張橋は、ある特定の風速、迎角のもとでたわみまたはねじり1自由度の限定振動を発生する例が多い。二次元模型風洞実験を行ない、主桁断面形状に改良を加えることにより、迎角0°付近の風に対しては、比較的容易に限定振動の発生を抑えることができるが、数度を超すような大きな迎角の風に対してまでその振動の発生を抑えることは容易ではない。しかし、実橋の限定振動は迎角の瞬間的な値によつて生ずるものではなく、時間的および空間的なある条件を備えた迎角の値が振動を発生させ得るものと考えられる。本報告では、斜張橋の限定振動の発生に対し、自然風の迎角の時間的および空間的な変動特性がいかなる影響をおよぼすかについて3次元的考察を加えてみた。

[2] 斜張橋の限定振動に対する迎角の時間的、空間的変動の影響

限定振動は風速16m/sのもとで迎角がα₀度以上となったときはじめて発生するものと仮定する。先ず自然風迎角の時間的変動に関して考えてみる。限定振動が発生し始めて定常振幅に達するまでに要する時間、すなわち発達時間はかなり長いものである。限界迎角α₀を超過する迎角の風がその発達時間内に吹く時間以上にわたって継続して吹くとき、限定振動は顕著な振幅に達し得るものと言える。すなわち、振動の発達時間を評価時間としたときの迎角の値が限界迎角を超過するか否かが問題となる。

次に迎角の空間的変動に関して考えてみる。橋梁がたとえたわみ1次モードの限定振動を起しているときの運動方程式は、第1次モードをφ(x)とすると、

$$\ddot{\phi} + 2h\omega\dot{\phi} + \omega^2\phi = \int_0^l f(t,x)\phi(x)dx / \int_0^l m_0\phi^2(x)dx \quad (1)$$

風速は全スパンにわたって一様であるとし、空気力は $f(t,x) = \frac{1}{2} \rho V^2 A C [\phi(x)/V] \sin(\alpha)$ と表わされると仮定する。ここに $\sin(\alpha)$ は図-1に示すような、 $\alpha \neq \alpha_0$ となる領域を表わす荷重分布函数である。この空気力を用いると式(1)は

$$\ddot{\phi} + \frac{\omega}{\tau} [\delta_s - \delta_a \int_0^l \phi(x) \sin(\alpha) dx / \int_0^l m_0 \phi^2(x) dx] \dot{\phi} + \omega^2 \phi = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\delta_s = 2\pi h$ (構造減衰)、 $\delta_a = \frac{1}{2} \rho V^2 A C L / m_0 \omega V$ (空力減衰) は風洞実験による $\delta-V$ 曲線を用いて推定することができる。この式から、 $\delta^* = \delta_s - \delta_a \int_0^l \phi(x) \sin(\alpha) dx / \int_0^l m_0 \phi^2(x) dx$ の符号の正、負により、限定振動が減衰するか発達するかが決まることがわかる。 δ^* の符号は δ_s/δ_a , $\phi(x)$, $m(x)$, $\sin(\alpha)$ の性格に左右される。南障頭連絡橋を例にとり、 ΔL の長さにかたって限界迎角以上の風が橋に作用する場合、限定振動が発生しない最大の ΔL の長さを $\delta^* \geq 0$ の条件により求めて、 δ_s/δ_a に対しプロットしてみると図-2のようになる。

[3] 自然風の迎角の変動特性について

1) 評価時間による迎角の標準偏差の変化

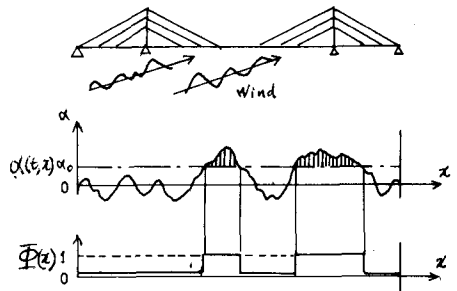


図-1. 迎角の空間分布と荷重分布函数

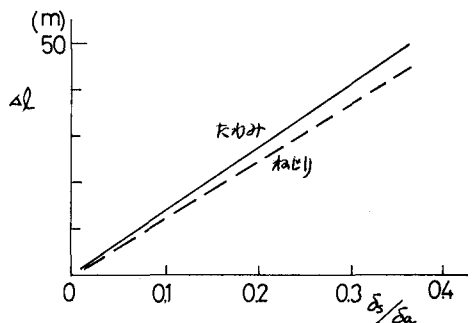


図-2. 迎角の許容分布長さ ΔL

評価時間を長くすると迎角変動の標準偏差は小さくなる。
 図-3 に評価時間と迎角変動の標準偏差との関係を示す。

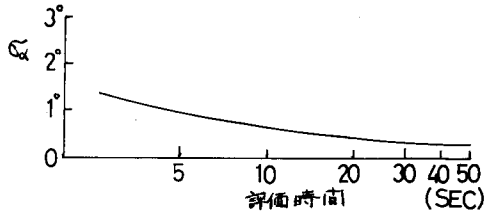


図-3 評価時間と迎角の標準偏差

ii) 評価距離による迎角の標準偏差の変化

変動値を空間的に平均化するときの距離を評価距離と呼ぶことにすると、評価距離を l としたときの迎角は、

$$\hat{\alpha}_l(t) = \frac{1}{l} \int_0^l \alpha(t, x) dx \quad (3)$$

この値をもとに迎角変動の分散を求めてみると、

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha, l}^2 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \hat{\alpha}_l(t) \cdot \hat{\alpha}_l(t) dt \\ &= \frac{1}{l^2} \int_0^l \int_0^l \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \alpha(t, x) \cdot \alpha(t, x') dt \right] dx dx' \quad (4) \end{aligned}$$

右辺の [] の中は迎角変動の空間相関である。迎角の空間相関が $\sigma_\alpha \exp(-\xi/l)$ 、 $\xi = |x-x'|$ 、 l : 迎角変動のスケールと表示できるものとすれば、

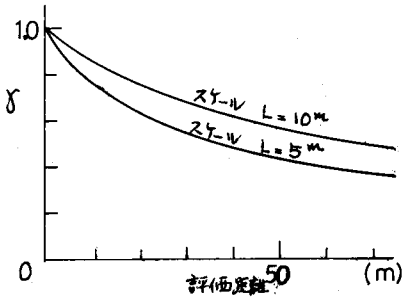


図-4 評価距離による迎角の減衰

$$\sigma_{\alpha, l}^2 = \frac{\sigma_\alpha^2}{l^2} \int_0^l \int_0^l \exp(-\xi/l) dx dx' = \frac{2L^2}{l^2} [e^{-l/L} + l/L - 1] \sigma_\alpha^2 (= \gamma^2 \sigma_\alpha^2) \quad (5)$$

この $\sigma_{\alpha, l}$ は評価距離を l とした場合の迎角変動の標準偏差である。一点における観測値をもとに求められた変動の標準偏差 σ_α に対し、評価距離を考慮した場合の標準偏差が減衰する割合を γ で示す。図-4 はスケール L をパラメータとしたときの減衰係数 γ を評価距離 l に対しプロットしたものである。

iii) 迎角の超過確率について

迎角の変動が正規分布と仮定すれば、時間 T 内に迎角がレベル α_0 を1回だけ超過する確率は、

$$Q(T) = 1 - \exp(-\lambda_0 T) \approx \lambda_0 T, \quad \lambda_0^* = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_\alpha}{\sigma_\alpha} \exp\left\{-\frac{(\alpha_0 - \bar{\alpha})^2}{2\sigma_\alpha^2}\right\} \quad (6)$$

また、破損時間の期待値は次式により求められる。

$$E[T] = 1/\lambda_0^* \quad (7)$$

4) 実橋の限定振動に対する安全性の評価

以上の考察にもとづいて実橋の限定振動に対する安全性を評価するプロセスについて考えてみる。まず、2次元模型風洞実験を行ない、0度よりいっくら大きな迎角 α_0 ではじめて限定振動を発生するような断面を選定し、振動発生時の S-V 曲線および到達時間を求めておく。橋梁の動特性をもとに図-2 に示す迎角の許容分布長さ曲線を求め、風洞実験による σ_{α_0} を用いて迎角の許容分布長さ Δl を求める。

次に橋梁架設地点における自然風の観測を行ない、迎角の時間的、空間的な変動について解析して、図-3、図-4 の曲線を得る。上述の到達時間および許容分布長さをそれぞれ評価時間、評価距離とする迎角の評準偏差 $\sigma_{\alpha, l}$ がこれらの図から求められる。

最後に限定振動の発生に着目した橋梁の耐用年数が式(7)により求められる。

5) あとがき

斜張橋の限定振動の発生確率について、斜張橋の耐風特性、動的構造特性を考慮し、自然風迎角の時間的、空間的な変動特性、すなわち平均迎角、評価時間および評価距離による迎角の標準偏差の変化などについて知ることにより、合理的に評価されることがわかった。