

I - B 59

自励空気力の空間相関を考慮したフラッター解析

横浜国立大学 正会員 勝地 弘

The Johns Hopkins University Nicholas P. Jones & Robert H. Scanlan

本州四国連絡橋公団 正会員 北川 信

1. まえがき

フラッター解析の実施にあたっては、一様流中で計測された非定常空気力係数を用い、解析においても乱流の影響は無視して行うのが通常である。しかしながら、実際は、乱流中の風速変動する状況の下でフラッターが発生するわけであり、フラッターに対する何らかのいわゆる乱流効果が存在すると考えられる。ここでは、乱流中の風速変動に伴う自励空気力の空間相関をガスト空気力のそれに倣って定義し、フラッター解析を行うことで、自励空気力の空間相関がフラッター限界風速に及ぼす影響を解析的に調査した。

2. 解析手法

フラッター解析は、複素モードを用いたモード法によるものとする¹⁾。いま、鉛直たわみ、水平たわみ、ねじれをそれぞれ h 、 p 、 α とし、自励空気力を非定常空気力係数 (H_i^* , P_i^* , A_i^* , $i=1-6$) を介して定義すると (ここでは、一例として揚力のみ表示)、

$$L_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} + KH_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 H_6^* \frac{p}{B} \right] \quad (1)$$

マルチモードのフラッター方程式は次のようになる。

$$\mathbf{I}\ddot{\xi} + \mathbf{A}\dot{\xi} + \mathbf{B}\xi = \mathbf{0} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{I}$ は単位行列、 ξ は一般化座標である。また、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ の ij 要素は次のようになる。

$$\mathbf{A}_{ij}(K) = 2\zeta_i K_i \delta_{ij} - \frac{\rho B^4 L K}{2I_i} [G_{hjh_j}^{H_1^*} + G_{h\alpha_j}^{H_2^*} + G_{hp_j}^{H_3^*} + G_{p\alpha_j}^{P_1^*} + G_{pjh_j}^{P_2^*} + G_{p\alpha_j}^{P_3^*} + G_{\alpha h_j}^{A_1^*} + G_{\alpha\alpha_j}^{A_2^*} + G_{\alpha p_j}^{A_3^*}] \quad (3a)$$

$$\mathbf{B}_{ij}(K) = K_i^2 \delta_{ij} - \frac{\rho B^4 L K^2}{2I_i} [G_{hjh_j}^{H_3^*} + G_{h\alpha_j}^{H_4^*} + G_{hp_j}^{H_6^*} + G_{p\alpha_j}^{P_4^*} + G_{pjh_j}^{P_6^*} + G_{p\alpha_j}^{P_6^*} + G_{\alpha h_j}^{A_4^*} + G_{\alpha\alpha_j}^{A_6^*} + G_{\alpha p_j}^{A_6^*}] \quad (3b)$$

ここで、 $[\]$ 内の各項は、非定常空気力係数 (T_m^*) を介した i 次及び j 次の振動モード (r_i , s_j) 間の連成度合いを表すものであり、次のように定義される。

$$G_{r_i s_j}^{T_m^*} = \int_0^l T_m^*(x) r_i(x) s_j(x) \frac{dx}{l} \quad (4)$$

この時、自励空気力はスパン全長にわたって完全に相関していると考えているが、乱流中の風速変動する状況においては、当然、相関の低減が存在すると考えられる。これをガスト空気力のクロススペクトルの定式化に倣って取り込むことをここでは考える。具体的には、(4)式に替えて以下のように定義する^{2), 3)}。

$$\tilde{G}_{r_i s_j}^{T_m^*} = \text{sign}(G_{r_i s_j}^{T_m^*}) \times \sqrt{\int_0^l \int_0^l T_m^*(x_A) T_m^*(x_B) r_i(x_A) s_j(x_A) r_i(x_B) s_j(x_B) \exp\left(-k^* \frac{|f(x_A - x_B)|}{U}\right) \frac{dx_A}{l} \frac{dx_B}{l}} \quad (5)$$

ここで、 x_A 、 x_B は、スパン方向の任意の2点、 k^* は自励空気力に関するディケイファクターである。

3. 解析結果と考察

解析は、明石海峡大橋を対象に、フラッター解析に最低限必要であると判断された6モード(水平対称1次[1]、鉛直対称1次[2]、鉛直対称2次[10]、水平対称2次[11]、ねじれ対称1次[12]、鉛直対称3次[13]、 $[\]$ はモードキーワード: 長大橋、フラッター解析、自励空気力、空間相関

連絡先: 〒240-0067 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 (TEL: 045-335-1451, FAX: 045-331-1707)

表-1 自励空気力の空間相関がフラッター限界風速に与える影響

ディケイ ファクター	フラッター限界風速 (m/s)
$k^* = 0$	79.1 (1.000)
1	91.8 (1.161)
2	94.9 (1.200)
3	99.1 (1.252)
4	102.3 (1.293)
8	111.4 (1.408)

番号) ⁴⁾を用いて、自励空気力のディケイファクター k^* をパラメータにして行った。また、文献 4 で述べられているように、風荷重によるねじれ変形、メインケーブルの空力干渉、非定常抗力の影響など、明石海峡大橋のフラッター特性を評価する上で不可欠と考えられる要因を全て考慮している。

解析結果のうち、フラッター限界風速を表-1に、フラッター発現時の各モードの寄与率を図-1にそれぞれ示す。自励空気力の空間相関を考慮すると、 k^* がごく小さい時からフラッター風速は大きく上昇し、 $k^* = 1$ で約 16 %、 $k^* = 4$ では約 29 % も上昇し、その影響はかなり大きいことが判る。

フラッター限界風速が上昇する理由としては、(5)式による自励空気力の空間相関の低減分だけ、見かけ上低い風速での非定常空気がフラッター方程式に取り込まれていることに相当するためと考えられる。しかしながら、図-1によると、連成条件が若干変化しており（モード 2、10、11、13 の振幅比、特にモード 10 のそれ）、フラッター発生メカニズムも少し変わっていることが推察される。

ところで、乱流がフラッターに及ぼす影響については、不安定化と安定化の相反する 2 つの意見があり、既往の実験的研究でも両方の現象が認められている。実際には、風速変動による μ_F の影響、空間相関の低減の影響、さらには乱流中での非定常空気力特性の変化が密接に関わり合っており、風速変動する乱流中でのフラッター風速が決まっているものと考えられる。従って、これらの影響のメカニズムを定量的かつ総合的に調査する必要がある。さらに、自励空気力の空間相関の定義に関しても、ガスト空気力の場合と違い、自励空気力は平均風速に対して定義されるため、空間相関を考える場合には、平均風速の空間的な相関を考えるべきではないかということが考えられる。

4. 結論

自励空気力の空間相関の影響をフラッター解析によって調査した結果、自励空気力のディケイファクター k^* が 1 でフラッター限界風速は約 16 %、 k^* が 4 では約 29 % 上昇し、フラッター限界風速に大きな影響を及ぼす結果となった。なお、自励空気力の空間相関低減の定式化については、今後の検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1) Jain, A., Jones, N. P. and Scanlan, R. H., "Coupled Flutter and Buffeting Analysis of Long-Span Bridges", *J. Str. Engrg.*, ASCE, 122(7), 1996, 716-725.
- 2) Scanlan, R. H., Jones, N. P. and Lorendeaux, O., "Comparison of Taut-Strip and Section-Model-Based Approaches in Long-Span Bridge Aerodynamics", *Proc. of 9th Int. Conf. on Wind Engrg.*, New Delhi, India, 1995, 950-961.
- 3) Scanlan, R. H. and Jones, N. P., "Aeroelastic Analysis of Cable-Stayed Bridges", *J. Str. Engrg.*, ASCE, 116(2), 1988, 279-297.
- 4) 北川信、鈴木周一、勝地弘、明石海峡大橋のフラッター特性に関する検討、一大型風洞試験結果と解析との比較一、本四技報、Vol. 18, No. 71, 1994, 35-41.

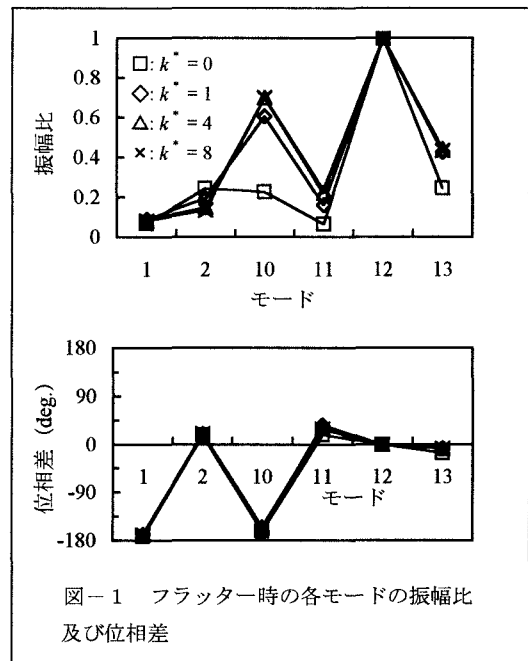


図-1 フラッター時の各モードの振幅比及び位相差