

乱流中の風速変動が長大橋の フラッター限界風速に及ぼす影響

勝地 弘¹・北川 信²

¹正会員 M.S. 横浜国立大学工学部建設学科 (元 本州四国連絡橋公団)
(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

²正会員 工修 本州四国連絡橋公団 設計部長 (〒651-0088 神戸市中央区小野柄通 4-1-22)

乱流中の風速変動の影響を受ける長大橋のフラッター限界風速は、一様流中と比べて、風速の評価時間との関係で不安定化するという考えと、自動空気力の空間相関の低減によって逆に安定化するという考えの相反する2つが存在する。また、既往の実験的研究によっても、両方の結果が得られている。本研究では、明石海峡大橋を対象に、自動空気力の空間相関を考慮したフラッター解析を行い、同橋の一様流中及び境界層乱流中での全橋模型試験結果と比較検討することで、乱流中の風速変動がフラッター限界風速に及ぼす影響を検討した。その結果、自動空気力の空間相関を考慮することでフラッター限界風速が上昇することを確認したが、風洞試験結果からは明らかな風速変動の影響は認められなかった。

Key Words: flutter, turbulence, wind-speed fluctuation, spatial correlation, aeroelastic force, long-span bridge

1. まえがき

長大橋のフラッターの照査は、これまで一様流中での部分模型風洞試験を中心に行われてきた。これは、風洞試験の便宜を考慮してであるが、実際の自然現象では、橋梁に作用する風速は常に変動しており、一様流ではない。本州四国連絡橋では、風速変動を時間的・空間的に平均化し、その最大値と平均風速との比の分だけ割増した風速を一様流中での照査風速とすることで、風速変動の効果を取り入れている。

ところで、自然風の乱れ、あるいは風速変動がフラッター限界風速に及ぼす影響については、限界風速を低下させるという考えと、逆に上昇させるという相反する2つの考えがある。実際、ある一定の条件下でその両方が実験的にも確認されている。先の本州四国連絡橋の場合は、風速変動を考慮して照査風速を割増していることから、風速変動がフラッター限界風速を低下させるという考えを採っていることになる。

一方、フラッター限界風速が風速変動によって上昇するという考えは、自動空気力の空間相関によ

って説明される。長大橋においては、その空間的な広がりも大きく、特に乱流によって風速変動がもたらされると、橋体に作用する自動空気力の任意点間の相関は何かしら低下すると考えられ、その結果フラッター限界風速が上昇するというものである。

本論文では、まず自動空気力の空間相関を定式化したフラッター解析を行うことで、その影響度を解析的に調査し、また別途実施された明石海峡大橋の全橋模型風洞試験の結果と比較検討することで、乱流中の風速変動がフラッター限界風速に及ぼす影響について検討する。

2. 既往の研究及び理論的背景

既に述べたように、乱流中の風速変動がフラッター限界風速に与える影響に関しては、風速変動がフラッターの発現を早め、フラッター限界風速を低下させるという考えと、自動空気力のスパン方向にわたっての相関が風速変動によって低減し、結果としてフラッター限界風速が上昇するという考えの相反する2つの考えがある。

前者に対しては、松本ら¹⁾がH型断面柱 (B/D < 5-6) のねじれフラッターを対象に実験的に確認するとともに、Lin²⁾は理論的考察と数値解析によって、風速変動がフラッターを不安定化させるとしている。また、明石海峡大橋耐風設計要領³⁾(以下、明石要領)においても、理論的考察をもとに不安定化の立場をとっている。一方、後者に対しては、Huston et al.⁴⁾が実験的に安定化の傾向を示すとともに、Scanlan⁵⁾は自励空気力の空間相関低減の影響を理論的に考察し、安定化の根拠を示している。

風速変動がフラッターを不安定化させるという考えに対する理論的背景については、例えば、明石要領では、次のように考えている。すなわち、ある点の変動風のパワースペクトル密度 (PSD) を S_{uu} とすると、評価時間 τ 及び橋長 l で平均化した PSD, \bar{S}_{uu} は以下のように表される。

$$\bar{S}_{uu} = \frac{2}{\phi^2} [\phi - 1 + e^{-\phi}] \cdot \left(\frac{\sin \pi \tau f}{\pi \tau f} \right)^2 S_{uu} \quad (1a)$$

$$\phi = \frac{kfl}{U} \quad (1b)$$

ここで、 k は指数型の空間相関関数を仮定した場合のディケイファクター、 f は振動数、 l は橋長、 U は代表点の平均風速である。

このような変動風特性の 10 分間での最大期待値 ($U + \bar{u}_{\max}$) と平均風速 U との比を風速変動に係る補正係数 μ_F と定義すると、次のようになる。

$$\mu_F = \frac{U + \bar{u}_{\max}}{U} = 1 + \frac{g\sigma_u}{U} \quad (2)$$

ここで、 g はピークファクター、 σ_u は時間及び空間で平均化した変動風速 \bar{u} の標準偏差であり、それぞれ、以下のように表される。

$$g = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(vT)}}, \quad T = 600 \text{ sec.} \quad (3a, b)$$

$$v = \frac{\left[\int_0^{\infty} f^2 \bar{S}_{uu} df \right]^{1/2}}{\left[\int_0^{\infty} \bar{S}_{uu} df \right]^{1/2}}, \quad \sigma_u = \left[\int_0^{\infty} \bar{S}_{uu} df \right]^{1/2} \quad (3c, d)$$

すなわち、風速変動がある自然風中においては、フラッターに対して、風速が μ_F の分だけ上昇した効果をもたらすため、10 分間平均風速で議論した場合、結果としてフラッターが不安定化 (限界風速が低下) するというものである。

次に、風速変動がフラッターを安定化させるという考えに対する理論的背景については、Scanlan⁵⁾ et al.⁶⁾ が示した自励空気力の空間相関低減説に従うと、以下のように説明される。

いま、マルチモードによるフラッター解析手法 (例えば、Jain et al.⁷⁾, Katsuchi et al.⁸⁾) によれば、橋桁の振動変位を次のように振動モード (h_i, p_i, α_i) の重ね合わせで表現し、

$$\text{鉛直: } h(x, t) = \sum_i h_i(x) B \xi_i(t) \quad (4a)$$

$$\text{水平: } p(x, t) = \sum_i p_i(x) B \xi_i(t) \quad (4b)$$

$$\text{ねじれ: } \alpha(x, t) = \sum_i \alpha_i(x) \xi_i(t) \quad (4c)$$

また、次のように自励空気力を非定常空気力係数 ($H_i^*, P_i^*, M_i^*; i=1-6$) を介して定義することで、

$$L_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} + KH_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 H_6^* \frac{p}{B} \right] \quad (5a)$$

$$D_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[KP_1^* \frac{\dot{p}}{U} + KP_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 P_3^* \alpha + K^2 P_4^* \frac{p}{B} + KP_5^* \frac{\dot{h}}{U} + K^2 P_6^* \frac{h}{B} \right] \quad (5b)$$

$$M_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} + KA_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 A_6^* \frac{p}{B} \right] \quad (5c)$$

フラッター方程式は以下のようになる。

$$\mathbf{I}\ddot{\xi} + \mathbf{A}\dot{\xi} + \mathbf{B}\xi = \mathbf{0} \quad (6)$$

ここで、 x は橋軸座標、 t は時間、 i はモード次数、 L_{ae} 、 D_{ae} 及び M_{ae} は揚力、抗力及び空力モーメントに関する自励空気力、 ρ は空気密度、 B は桁幅、 $K (= B\omega/U)$ は無次元振動数、 ω は円固有振動数、 (\cdot) は時間 t に関する微分、 $\xi = (\xi_i)$ 基準座標ベクトル ($\dot{\xi} = d\xi/ds$, $\xi'' = d^2\xi/ds^2$), $s (= U/lB)$ は無次元時間、 \mathbf{I} は単位行列をそれぞれ表す。

また、 \mathbf{A} 及び \mathbf{B} の ij 要素は、それぞれ以下のように表される。

$$\mathbf{A}_{ij}(K) = 2\zeta_i K_i \delta_{ij} - \frac{\rho B^4 l K}{2I_i} [G_{h_i h_j}^{H_i} + G_{h_i \alpha_j}^{H_i} + G_{h_i p_j}^{H_i} + G_{p_i p_j}^{P_i} + G_{p_i \alpha_j}^{P_i} + G_{p_i h_j}^{P_i} + G_{\alpha_i h_j}^{A_i} + G_{\alpha_i \alpha_j}^{A_i} + G_{\alpha_i p_j}^{A_i}] \quad (7a)$$

$$\mathbf{B}_{ij}(K) = K_i^2 \delta_{ij} - \frac{\rho B^4 l K^2}{2I_i} [G_{h_i \alpha_j}^{H_3^i} + G_{h_i h_j}^{H_4^i} + G_{h_i p_j}^{H_6^i} + G_{p_i \alpha_j}^{P_3^i} + G_{p_i p_j}^{P_4^i} + G_{p_i h_j}^{P_6^i} + G_{\alpha_i \alpha_j}^{A_3^i} + G_{\alpha_i h_j}^{A_4^i} + G_{\alpha_i p_j}^{A_6^i}] \quad (7b)$$

ここで、 δ_{ij} はクロネッカーデルタ関数、 ζ_i は i 次モードの減衰定数、 I_i は i 次モードの一般化質量であり、 $I_i = \int_{\text{structure}} \eta_i^2(x, y, z) dm(x, y, z)$ である。 η_i は i 次モードの3次元的なモード変位、 dm は任意点での微少要素質量である。

自励空気力の影響は非定常空気力係数と振動モード形を掛け合わせてスパン長にわたって平均化（モード積分）することで、フラッター方程式に取り込まれる。すなわち、式(7a)、(7b)において、

$$G_{r_i s_j}^{T_m^*} = \int_0^l T_m^*(x) r_i(x) s_j(x) \frac{dx}{l} \quad (8)$$

ここで、 T_m^* は非定常空気力係数、 r_i 及び s_j は i 次及び j 次振動モード形である。

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。しかしながら、長大橋の空間的広がり、特に風速変動を伴うことを考えると、着目点の風速の違いによって生じる相関の低減が何かしら考えられ、この影響を考慮すれば、フラッターが安定化（限界風速が上昇）するというものである。ここでは、ガスト空気力のクロススペクトルの定式化に倣って、以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{r_i s_j}^{T_m^*} &= \text{sign}(G_{r_i s_j}^{T_m^*}) \times \\ & \sqrt{\frac{\int_0^l \int_0^l T_m^*(x_A) T_m^*(x_B) r_i(x_A) s_j(x_A) r_i(x_B) s_j(x_B) \exp\left(-k^* \frac{f|x_A - x_B|}{U}\right) \frac{dx_A}{l} \frac{dx_B}{l}}{l}} \quad (9) \end{aligned}$$

ここで、 k^* は自励空気力（非定常空気力係数）に関するディケイファクターであり、ガスト空気力のものとは違う適切な値を設定してやる必要がある。また、 x_A 及び x_B は、それぞれスパン方向の任意の2点である。さらに、 sign 関数は、式(8)で定義される元のモード積分値が有する符号を保持することが目的である。

ただし、以上の定式化は、非定常空気力係数が風速変動する乱流中でも一様流中と変わらないことを前提としており、このことについては、別途の検討が必要である。

3. 風速変動がフラッター限界風速に及ぼす影響

(1) フラッター解析

理論的背景で述べた自励空気力の空間相関の低減がフラッター限界風速に及ぼす影響について、解析検討を行う。

解析は、明石海峡大橋全橋模型を対象にしたフラッター解析において最低限必要であると判断された6モード⁹⁾（表-1参照）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。フラッター解析は、複数モードを用いるモード法によるものとし、文献9)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。ここでは、風洞試験でフラッターが観測された基本断面の結果と比較するため、フラッター解析も基本断面を対象に行った。解析に用いた非定常空気力係数のうち、基本断面の迎角0度での係数を、代表として図-1に示す。

解析結果のうち、フラッター限界風速を表-2に、フラッター発現時の各モードの寄与率を図-2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、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、式(9)による自励空気力の空間相関の低減によって、見かけ上低い風速での非定常空気力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-2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。

変動風速の空間相関は、過去の実測結果¹⁰⁾によると、主流変動成分の主流直角水平方向のディケイファクターで、風速や2点間の距離に依存し、3~15と大きくばらつく傾向が見られる。実際の耐風設計においては、Davenport¹¹⁾が提唱した7や垂水観測塔での実測結果に基づいて明石要領で設定されている8が多く使われている。

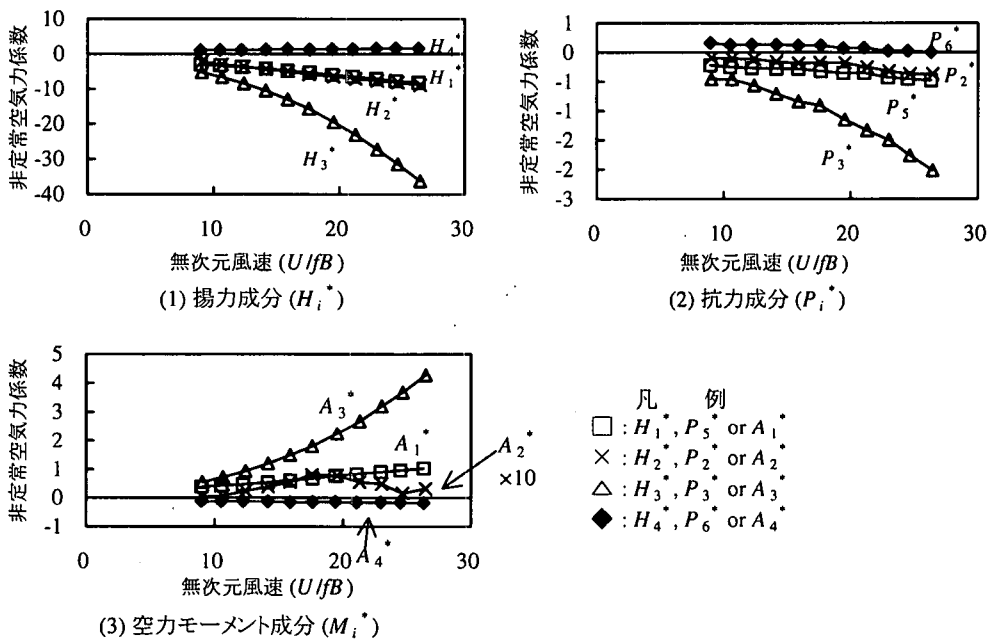
一方、変動（ガスト）空気力の空間相関は、箱桁を対象とした風洞試験によって、変動風のそれよりも大きくなるのが複数の研究者によって確認されている（例えば、Larose¹²⁾やKimura et al.¹³⁾）。

今回の解析結果では、 $k^* = 1$ でフラッター風速は約16%、 $k^* = 4$ では約29%も上昇し、その影響はかなり大きい。自励空気力が変動風速よりも相関が大きいと考えられる平均風速に対して定義されるこ

表一 全橋模型の振動特性と境界層乱流特性

振 動 特 性				
モード名称 (モード次数)	卓越振動成分 のモード形	固有振動数 (Hz)	対数減衰率	備 考
鉛直曲げ 対称1次 (2)		0.647	0.032	実橋単位長さ質量 桁： 29.54 t/m ケーブル： 14.25 t/m
鉛直曲げ 対称2次 (10)		1.245	0.036	
鉛直曲げ 対称3次 (13)		1.636	0.055	
ねじれ 対称1次 (12)		1.560	0.031	実橋単位長さ 極慣性モーメント 9,826 t·m ² /m
水平曲げ 対称1次 (1)		0.391	0.016	
水平曲げ 対称2次 (11)		1.270	0.041	
境 界 層 乱 流 特 性				
	乱れ強さ	べき指数	乱れスケール	ディケイファクター
境界層乱流 Ⅰ	$I_u = 6.5\%$	1/8.9	$L_x^u = 0.7\text{ m}$	$k_y = 5-7$
	$I_w = 5.5\%$		$L_x^w = 0.3\text{ m}$	$k_z = 5-7$
境界層乱流 Ⅱ	$I_u = 9.5\%$	1/5.0	$L_x^u = 1.0\text{ m}$	$k_y = 5-8$
	$I_w = 6.8\%$		$L_x^w = 0.4\text{ m}$	$k_z = 5-7$

*実橋レベルで考える場合は、振動数は1/10倍、乱れスケールは100倍となる。



図一 非定常空気力係数 (基本断面, ケーブルなし, 迎角0度)

と、そして空気力の相関が風速の相関よりも大きいことなどを考えると、かなり小さな値 (k^*) を使うのが適当と考えられる。Golden Gate 橋を対象にし

た検討¹⁴⁾でも、 $k^* = 1$ で約11%、 $k^* = 4$ では約30%のフラッター限界風速の上昇が試算されている。

表一 2 自励空気力の空間相関がフラッター風速に与える影響

ディケイファクター	フラッター限界風速
$k^* = 0$	79.1 m/s (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)

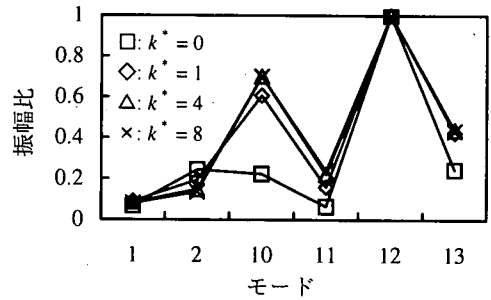
(2) 全橋模型試験

次に、明石海峡大橋の耐風安定性を検討するため、縮尺 1/100 の全橋模型を使った風洞試験^{15), 16)}が実施されたが、一様流と乱流中の試験結果を使って風速変動がフラッター限界風速に及ぼす影響について、検討を行う。試験では、耐風安定化対策や乱流の影響を検討するため、一様流及び表一に示す2種類の境界層乱流 (I 及び II) 中でいくつかの断面の安定性が確認された。

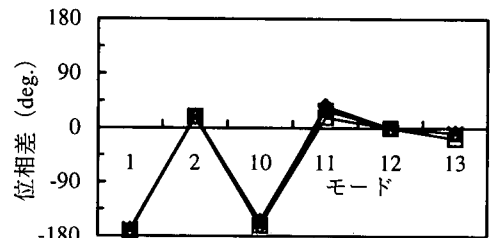
図一3に模型の応答特性として、中央径間中央でのねじれ振幅と風速の関係、図一4にねじれ対称1次モードの減衰と風速の関係を示す。減衰の同定に関しては、一様流中では、模型をねじれ対称1次モードで加振した後の減衰波形から、乱流中では、模型のガス応答データをもとに RD 法¹⁷⁾によって、それぞれ評価した。RD 法による減衰の同定に関しては、事前検討を行い、1,000 回以下の重ね合わせでは評価誤差が最大で 20%程度となるが、1,000 回以上では 5~10%以下になり、文献 11)の結果と変わらないことを確認した。なお、今回の解析では、高風速領域において、約 1,300~1,500 回の重ね合わせを行うことができた。

風洞試験では、一様流中での各断面と主流乱れ強さ 6.5%の境界層乱流 I での耐風対策を施さない基本断面において、フラッターが観測された。その他の断面では、模型強度の関係上、十分な高風速まで試験が行えず、フラッター発現までには至らなかった。

各試験ケースでのフラッター限界風速を表一3にまとめる。ここで、限界風速の同定にあたっては、一様流中の各ケースにおいては、風速-減衰曲線が減衰ゼロを横切る風速を、乱流中でのケースにおいては、風速-減衰曲線の高風速部分、すなわち減衰が低下する部分を多項式で外挿して(図一4中に外挿曲線を破線で表示)、ゼロクロッシングを求め、その風速をそれぞれフラッター限界風速とした。ただし、図一4から判るように、基本断面以外では乱流中での高風速(減衰が0に近い)データが得られ



(1)各モードのフラッターへの寄与率



(2)モードの位相差

モード1:水平対称1次, モード2:鉛直対称1次
 モード10:鉛直対称2次, モード11:水平対称2次
 モード12:ねじれ対称1次, モード13:鉛直対称3次

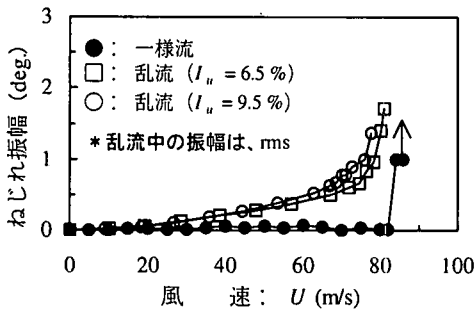
図一2 フラッター時の各モードの振幅比及び位相差

なかったため、外挿の方法によって限界風速が 5%程度変化した。このため、これらのケースの限界風速は、最も相関係数が高くなった場合の値を参考値(≒)として表示した。

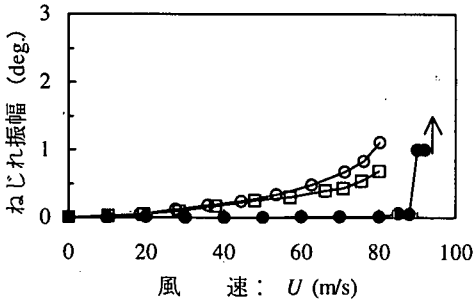
求められた各ケースのフラッター限界風速から判断すると、概して乱流中の方が一様流中よりも限界風速がわずかに低くなる傾向にあり、式(2)によって算出される μ_F の値(表一4)(この場合、乱流中の風速変動がフラッター限界風速を低下させることになる)と同レベルと見ることもできるが、実験誤差を考えると、有意な差とは言い難い。また、自励空気力の空間相関を考慮したフラッター解析結果を裏付けるような結果は得られなかった。

しかしながら、実際には風速の橋長にわたっての完全な空間相関(相関係数 1)が保証されることはないため、何らかの空間相関の影響は存在するものと考えられる。

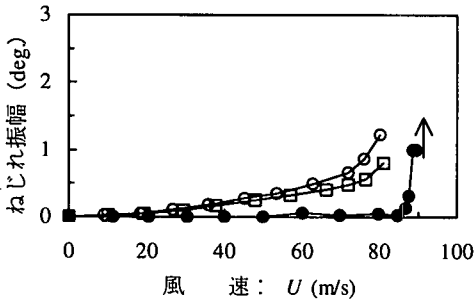
自励空気力の空間相関低減が存在するとした場合に、フラッター解析で試算したほどにその効果が顕



(1)基本断面(耐風対策なし)

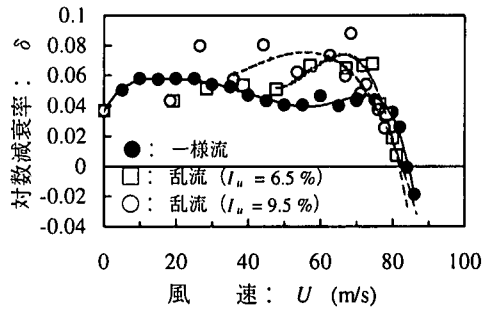


(2)改良断面II(全径間に鉛直スタビライザーとセンターバリアを設置)

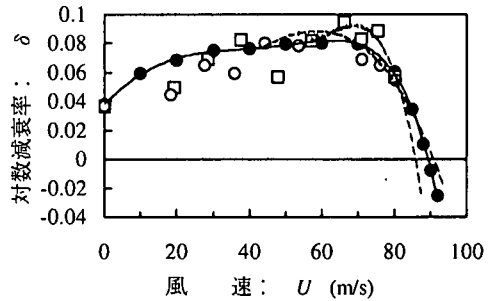


(3)改良断面IV II(中央径間に鉛直スタビライザー設置)

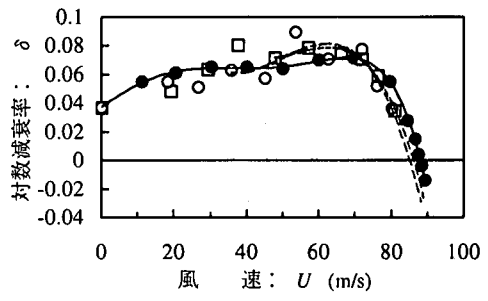
図-3 風速と補剛桁中央径間中央点のねじれ振幅の関係



(1)基本断面(耐風対策なし)



(2)改良断面II(全径間に鉛直スタビライザーとセンターバリアを設置)



(3)改良断面IV II(中央径間に鉛直スタビライザー設置)

図-4 一様流及び境界層乱流中での風速とねじれ対称1次モードの減衰の関係

表-3 各ケースのフラッター限界風速

	基本断面	改良断面II	改良断面IV
一様流	84.0 m/s (1.0)	89.5 m/s	88.5 m/s
境界層乱流 I ($I_u = 6.5\%$)	82.0 m/s (0.976)	≒ 86.0 m/s	≒ 86.5 m/s
境界層乱流 II ($I_u = 9.5\%$)	82.5 m/s (0.982)	≒ 91.0 m/s	≒ 85.0 m/s

() は、一様流中での限界風速に対する比。

著でない理由の1つとして、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ということが考えられる。解析は行っていないが、変動風速のそれと比べて平均風速の空間相関はかなり大きく(ディケイファクターはかなり小さく)なるはずである。

さらに、フラッター解析は、ガスト応答解析の強制振動問題と異なり、いわゆる不安定問題として捉えられている。したがって、ガスト応答解析でのク

表-4 風速変動に係る補正係数 μ_F の試算値

	評価時間: τ (sec.)						
	15	30	60	120	180	300	600
境界層乱流 I ($I_u = 6.5\%$)	1.031 (0.970)	1.024 (0.977)	1.016 (0.984)	1.015 (0.985)	1.014 (0.986)	1.010 (0.990)	1.0
境界層乱流 II ($I_u = 9.5\%$)	1.053 (0.950)	1.042 (0.960)	1.027 (0.974)	1.026 (0.975)	1.024 (0.977)	1.018 (0.982)	1.0

() は、 μ_F の逆数 ($1/\mu_F$)。 μ_F の算出に際しては、 S_{mm} は風洞試験で計測されたものを使用。

ロス (外力) スペクトルの定式化とは異なる定式化あるいはアプローチが必要ではなからうか。例えば、乱流中での断面の非定常空気力特性を考えることも一つの方法となるであろう。

実際には、風速変動による μ_F の影響、空間相関低減の影響、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、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、今後は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。

4. 結論

本研究では、乱流中の風速変動に起因する自動空気力の空間相関を取り込んだフラッター解析を行うとともに、明石海峡大橋の一樣流および境界層乱流中での全橋模型試験結果と比較検討することで、乱流中の風速変動がフラッター限界風速に及ぼす影響を検討した。得られた結論をまとめると以下のとおりである。

(1) 乱流中の風速変動に起因する自動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、自動空気力のダイケイファクター 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。自動空気力が変動風速よりも相関が大きいと考えられる平均風速に対して定義されること、そして空気力の相関が風速の相関よりも大きいことなどを考えると、かなり小さな値(k^*)を使うのが適当と考えられる。

(2) 全橋模型風洞試験からは、一樣流中よりも乱流中の方が、わずかではあるがフラッター限界風速が概して低くなる傾向が認められた。この傾向は、風速変動に係る補正係数 μ_F の効果と同レベルであるが、実験誤差を考えると有意な差とは言い難い。また、自動空気力の空間相関を考慮したフラッター解析結果を裏付けるような結果は得られなかった。

フラッター限界風速に与える乱流中の風速変動の影響は、既往の研究結果によると、不安定化と安定化の相反する2つの意見があるが、本研究ではどちらかを支持する明確な結論は得られなかった。今後は、実際の現象を決めていると考えられる風速変動による μ_F の影響、空間相関低減の影響、さらには乱流中での非定常空気力特性の変化を定量的かつ総合的に評価していく必要があると考えられる。

謝辞：明石海峡大橋の全橋模型試験は、本州四国連絡橋耐風委員会 (委員長：宮田利雄横浜国立大学教授) 及び委員会の中に設置された風洞試験作業班 (主査：佐藤弘史建設省土木研究所構造研究室長) の指導を受けながら、本州四国連絡橋公団と建設省土木研究所との共同研究によって実施された。また、空間相関を考慮したフラッター解析は、第一筆者が Johns Hopkins 大学留学中に実施したものである。解析の指導及び結果に関して有益な意見を頂いた Nicholas. P. Jones 及び Robert. H. Scanlan の両教授に對して、深く感謝するものである。

参考文献

- 1) 松本勝, 白石成人, 白土博通, 平井滋登, 伊藤裕一, 重高浩一: H型断面柱のねじれフラッター特性に関する研究, 第11回風工学シンポジウム論文集, pp. 251-256, 1990.
- 2) Lin, Y. K.: Motion of Suspension Bridges in Turbulent Winds, *J. of Engrg. Mech. Div.*, ASCE, Vol. 105, EM6, pp.921-932, 1979.
- 3) 明石海峡大橋耐風設計要領・同解説: 本州四国連絡橋公団, 1990
- 4) Huston, D. R., Bosch, H. R. and Scanlan, R. H.: The Effects of Fairings and of Turbulence on the Flutter Derivatives of a Notably Unstable Bridge Deck, *Proc. of Seventh Int. Conf. on Wind Engrg.*, Vol. 4, West Germany, pp.223-233, 1990.
- 5) Scanlan, R. H.: Amplitude and Turbulence Effects on Bridge Flutter Derivatives, *J. of Str. Engrg.*, ASCE, Vol. 123, No. 2, pp.232-236, 1997.

- 6) Scanlan, R.H. and Jones, N.P.: Aeroelastic Analysis of Cable-Stayed Bridges, *J. of Str. Engrg.*, ASCE, 116(2), pp.279-297, 1990.
- 7) Jain, A., Jones, N.P. and Scanlan, R.H.: Coupled Flutter and Buffeting Analysis of Long-Span Bridges, *J. Str. Engrg.*, ASCE, 122(7), pp.716-725, 1996.
- 8) Katsuchi, H., Jones, N. P., Scanlan, R. H. and Akiyama, H.: A Study of Mode Coupling in Flutter and Buffeting of the Akashi Kaikyo Bridge, *J. Struct. Mech. Earthquake Engrg.*, JSCE, No.598/ I-44, pp.21-36, 1998.
- 9) 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, pp.35-41, 1994.
- 10) 塩谷正雄: 強風の性質 (三訂新版), 開発社, 1992.
- 11) Davenport, A. G.: The Response of Slender, Line-like Structures to a Gusty Wind, *Proc. Inst. Civil Engrg.*, Vol. 20, pp.389-408, 1962.
- 12) Larose, G. L.: The Span-wise Coherence of Wind Forces on Streamlined Bridge Decks, *Proc. of Third Int. Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications*, Virginia, USA, pp.BX1-4, 1996.
- 13) Kimura, K., Fujino, Y., Tamura, H. and Nakato, S.: Characteristics of Buffeting Forces on Flat Cylinders, *Proc. of Third Int. Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications*, Virginia, USA, pp.CV1-4, 1996.
- 14) Scanlan, R.H.: Amplitude and Turbulence Effects on Bridge Flutter Derivatives, *J. of Str. Engrg.*, ASCE, 123(2), pp.232-236, 1997.
- 15) 保田雅彦, 鈴木周一, 勝地 弘: 明石海峡大橋大型風洞試験 (一様流試験結果), 本四技報, Vol. 17, No. 67, pp.2-9, 1993.
- 16) 北川 信, 鈴木周一, 勝地 弘: 明石海峡大橋大型風洞試験の乱流試験結果 (第一報), 本四技報, Vol. 17, No. 68, pp. 9-15, 1993.
- 17) 田村幸雄, 佐々木淳, 佐藤民夫, 高坂隆一: R D法による強風時の構造物の減衰評価, 第12回風工学シンポジウム論文集, pp.303-308, 1992.

(1998. 4. 1 受付)

EFFECTS OF WIND-SPEED FLUCTUATIONS IN TURBULENT FLOW ON FLUTTER SPEED OF LONG-SPAN BRIDGES

Hiroshi KATSUCHI and Makoto KITAGAWA

There are two opposite viewpoints on flutter speed of long-span bridges in a turbulent flow. One is that it is destabilized with consideration of build-up time to flutter. The other is that it is stabilized due to the loss of spatial correlation of aeroelastic forces. In addition, both viewpoints were confirmed by wind-tunnel studies. In this research, executing flutter analyses with the loss of aeroelastic-force spatial correlation and comparing the results with a full-model wind-tunnel test of the Akashi Kaikyo Bridge performed in smooth and turbulent flows, effects of wind-speed fluctuations in a turbulent flow on flutter speed of long span bridges were investigated. As a result, the analysis showed flutter-speed increase due to the loss of correlation, however the evidence was not observed in the wind-tunnel test.