

松尾橋梁(株) 正員 小林 勝
立命館大学理工学部 正員 小林 紘士
(株)ニチゾウテック 正員 畑中 章秀

1. まえがき 長大構造物の耐風安定性を検討するためには構造物の動特性を的確に把握しておく必要がある。風によって構造物が振動を生じる時、その応答量は構造物の減衰定数によって大きく変化する。したがって、減衰定数を正しく評価することは重要である。しかし、乱流中での空力減衰の計測法に関してはまだ改善の余地が残されている。空力減衰は風的作用を受けている時の構造物の減衰(有風時減衰)と構造減衰との差によって求めることができる。乱流中での自由振動波形は乱流によって振動が不規則となる、定常振動より小振幅の自由減衰振動が得られない等により、有風時減衰をその波形から直接計測することが難しくなる。本報告はアクティブ乱流発生装置を用いて発生させた乱流をばね支持模型に作用させて有風時減衰を求める方法について検討した結果について述べる。

2. 自由振動による減衰の算定 乱流中で1自由度ばね支持された模型に作用する空気力は、気流の乱れによる空気力 $f_b(t)$ 及び模型の運動にともなう速度、変位に比例する自動的な空気力との和であると仮定する。その時の模型の運動方程式は模型の変位を y_1 、質量を m 、減衰係数を c 、ばね定数を k とすると式(1)のようになる。

$$m\ddot{y}_1 + c_s\dot{y}_1 + k_s y_1 = f_b(t) + c_a\dot{y}_1 + k_a y_1 \quad (1)$$

もし、同じ時系列の乱流のもとで異なる初期条件を与えたときの模型の変位を y_2 とすると、その時の模型の運動方程式は式(1)と同じ形式で与えられ、式(2)のようになる。

$$m\ddot{y}_2 + c_s\dot{y}_2 + k_s y_2 = f_b(t) + c_a\dot{y}_2 + k_a y_2 \quad (2)$$

同時刻で式(1)と式(2)の差をとると、 $f_b(t)$ は消えて次式のようになる。

$$m(\ddot{y}_1 - \ddot{y}_2) + (c_s - c_a)(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + (k_s - k_a)(y_1 - y_2) = 0 \quad (3)$$

式(3)において、 $\Delta\ddot{y} = \ddot{y}_1 - \ddot{y}_2$ 、 $\Delta\dot{y} = \dot{y}_1 - \dot{y}_2$ 、 $\Delta y = y_1 - y_2$ 、 $c = c_s - c_a$ 、 $k = k_s - k_a$ とおくことにより、式(3)は次式で表される。

$$m\Delta\ddot{y} + c\Delta\dot{y} + k\Delta y = 0 \quad (4)$$

両辺を m で除し、

$$\Delta\ddot{y} + 2\delta\omega\Delta\dot{y} + \omega^2\Delta y = 0 \quad (5)$$

ここに、 $f_b(t)$: 強制空気力

Δy 、 $\Delta\dot{y}$ 、 $\Delta\ddot{y}$: 模型の応答変位、速度、加速度

$\delta = (\pi c / m\omega)$: 有風時対数減衰率

ω : 有風時の模型の円振動数

式(5)は自由減衰振動の式である。すなわち、全く同じ乱流中で求められた初期条件の異なる2つの応答の差から有風時の減衰 δ が求められることになる。 y_1 、 y_2 の記録及びこうして得られた自由振動波形 Δy を図-1に示す。図-1の(a)、(b)において A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 は異なる初期条件を実現させるための攪乱である。

以上は気流の時系列に再現性があるという前提条

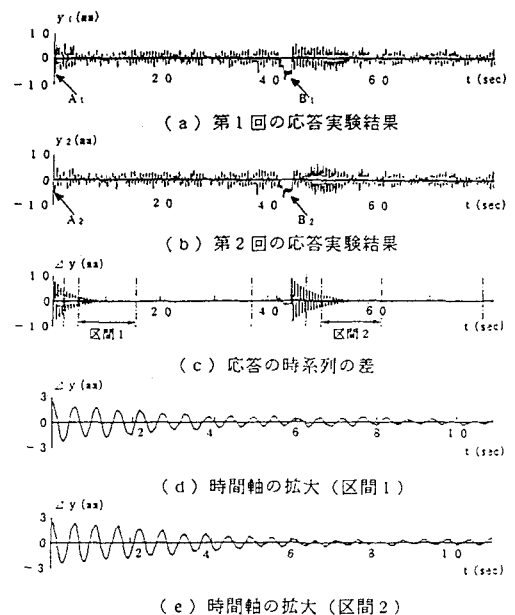


図-1 乱流中における応答波形と解析結果

件に基づいたものである。そこで、以下にアクティブ乱流発生装置を用いて得られた乱流の再現性及び乱流中の有風時減衰の解析結果について述べる。

3. 実験結果

3.1 気流の再現性 同一時系列（約82秒）を連続して10回風洞内に再現し、乱れ特性値やパワースペクトル等の再現性について検討した。そのうち紙面の都合上、時系列の再現性を検討するために行った1回目と10回目の時系列を取り出し、両者のコヒーレンスとフェイズを求めた（図-2）。約2Hzまで相関は0.9以上であり位相のずれもみられない。乱れ特性値についても各特性値とも10回の平均値からの偏差は全て5%以内であった。したがって、固有振動数の低いモデルを用いれば、式（3）で仮定した「2回の測定で強制空気が等しい」の仮定がほぼ満足される。

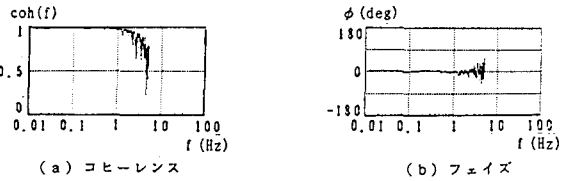


図-2 時系列の再現性（鉛直方向成分）
（乱流特性値： $U=4\text{m/s}$, $U=10\%$,
 $L_w=5\%$, $L_u=160\text{cm}$, $L_w=40\text{cm}$ ）

（図-2）。約2Hzまで相関は0.9以上であり位相のずれもみられない。乱れ特性値についても各特性値とも10回の平均値からの偏差は全て5%以内であった。したがって、固有振動数の低いモデルを用いれば、式（3）で仮定した「2回の測定で強制空気が等しい」

の仮定がほぼ満足される。

3.2 乱流中の減衰の解析例

(1) 実測例 固有振動数 $f=1.8\text{Hz}$, 構造減衰 $\delta_s=0.02$, 質量 $m=1.64\text{kg}$ の2次元モデルを用いた。気流は参考文献(1)に示すものと同様の乱流で、 $U=10\%$, $L_w=5\%$ である。乱流中の空力減衰 δ_a は図-1(d), (e)の波形のピーク値を結ぶ包絡線を最小自乗近似することにより対数減衰率 δ を求め、 δ から無風時の減衰 δ_s を差し引いて求めた。

(2) 解析条件の検討 基準振幅（幅員/200 $\approx 1.1\text{mm}$ ）を一定にし解析波数を変えたとき及び解析波数を一定（20波＝基準波数）にし基準振幅を変えたときの空力減衰を基準振幅，基準波数で得られた空力減衰に対する偏差として図示したものを図-3に示す。これより、解析波数は10波以上であれば偏差は2%以下に抑えることができる。しかし、基準振幅については基準振幅が大きくなるにしたがって偏差も大きくなっている。以上より、解析条件として基準振幅を変えず10波以上の自由振動波形を有効データとする。

(3) 風速と空力減衰 乱流特性値を一定にし風速だけを変化させた乱流において、初期変位を数種類変えて実験を行い乱流中の空力減衰を求めた。その結果を一様流中で得られた空力減衰と共に表-1に示す。これより、各風速とも解析区間による空力減衰の違いはみられなかった。また、各風速毎の乱流中の全空力減衰の平均値を一様流中で計測された空力減衰と共にプロットしたものを図-4に示す。これより、高風速になるにしたがって若干一様流中の空力減衰より小さくなる傾向がみられるがほとんど変わらなかった。

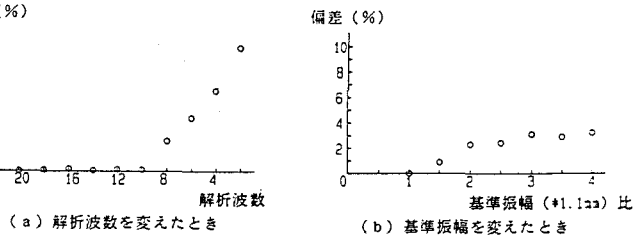


図-3 解析条件と減衰

表-1 乱流中の空力減衰

平均風速 U (m/s)	一様流中での空力減衰 δ_{s1}	乱流中での空力減衰 δ_a		
		区間1 δ_{a1}	区間2 δ_{a2}	平均 δ_a
1.5	0.037	0.037(15/15)	0.037(14/15)	0.037
2.0	0.061	0.057(45/60)	0.060(57/60)	0.058
2.5	0.082	0.081(15/15)	0.075(15/15)	0.078
3.0	0.098	0.090(13/15)	0.096(12/15)	0.093
3.5	0.122	0.120(12/15)	0.118(12/15)	0.119
4.0	0.147	0.145(36/60)	0.141(30/60)	0.143

注：（）内は（有効データ数/全データ数）を示す。

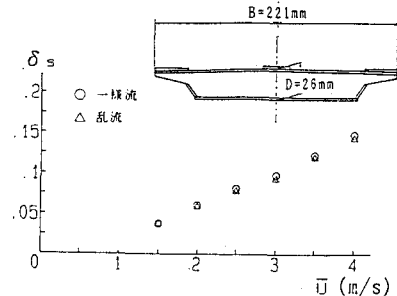


図-4 風速と空力減衰

参考文献 (1)小林, 畑中他: アクティブ乱流発生装置による強風の時系列のシミュレーション、第12回風工学シンポジウム論文集、1992