

第1部門

二次元構造断面に作用するガスト空気力の空間相関の評価について

京都大学工学部	学生員	Do Bao Van	京都大学工学研究科	フェロー	松本 勝
京都大学工学研究科	正会員	白土博通	京都大学大学院	学生員	古川拓郎
京都大学大学院	学生員	Le Thai Hoa	京都大学大学院	学生員	角倉佑哉

1. はじめに

過去の研究において構造物に作用するガスト空気力の空間相関は接近流の空間相関より高くなることが知られている。従来のガスト応答解析において用いられたジョイント・モード・アクセプタンス(以下 JMA と呼ぶ)は、Davenport 型または Karman 型で近似された変動風速のコヒーレンスを用いて算出されているため、空気力のパワースペクトル特性や構造断面の変位応答特性などの解析結果に大きな誤差が生じた。このような問題を解決し、応答解析結果の精度をよりよくするために変動圧力の空間相関を定性的に評価できるコヒーレンスの近似式を新しく提案し、周波数領域と時間領域で解析を行い、その精度を検討する。

2. 実験概要

本研究では、X 型熱線流速計を用いて、格子乱流中における変動風速鉛直成分の計測実験及び模型表面圧力の測定実験を行った。変動風速の空間相関を把握するために、断面周り変動風速の測定は、水平面内で $y=0, x=-150, -100, -50, 0, 50, 100, 150\text{mm}$ の点に基準とする熱線を置き、それぞれの基準位置について、span 方向に $y=25, 50, 75, 100\text{mm}$ だけ離れた位置にもう 1 本の熱線を設置することで行った。圧力測定用の $B/D=5$ 矩形断面模型に関して、表面には span 方向に 41 個、chord 方向に 19 個の圧力孔前縁から順に position1~19 と定義した。なお、主流方向平均風速は 4, 6, 9m/s に設定した。また、変位応答特性の検討を行うために、他の $B/D=5$ 矩形断面模型をばね支持し、二次元自由振動実験を行った。

3. 変動風速のコヒーレンスを用いたガスト応答解析精度の評価

変動風速のコヒーレンスの近似式としてよく使われたものは Davenport 型の式(1)及び Karman 型の式(2)である。これらを用い、変動風速鉛直成分のコヒーレンスを近似した結果は Fig.1 に示される。Davenport 型の近似結果は低周波数領域において実測のコヒーレンスを過大評価することに対し、Karman 型の近似結果は実測のコヒーレンスに比較的適合することがわかった。

$$coh_w(y_i, y_j; f) = \exp(-k_1 \frac{f|y_i - y_j|}{U}) \dots (1)$$

$$coh_w(y_i, y_j; f) = \exp\left(-k_2 \frac{f|y_i - y_j|}{2\pi z_w^2} 0.747 \sqrt{1 + 70.78 \left(\frac{f z_w^2}{U}\right)^2}\right) \dots (2)$$

これらの結果を用いて変位応答のパワースペクトル密度(以下 PSD と呼ぶ)を求めると、Fig.2 のような結果が得られた。変動風速のコヒーレンスを過大評価した Davenport 型の近似式による変位応答の PSD は、結果的に実測の変位応答の PSD によく一致し、その原因は次の理由で解釈できる。実際にガスト応答解析において、用いるべき変動空気力のコヒーレンスが変動風速のコヒーレンスより大きい。この増加分は前述の Davenport 型が実測のコヒーレンスを過大評価する分と偶然的に打ち消しあったため、良好な結果が得られたと考えられる。一方、コヒーレンスに適合した Karman 型の式を用いると、変位応答を過小評価する結果が得られた。これは上述のように、変動空気力が変動風速より大きな空間相関を持つからである。

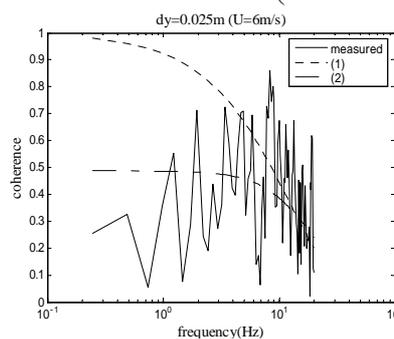


Fig.1 変動風速鉛直成分のコヒーレンス特性

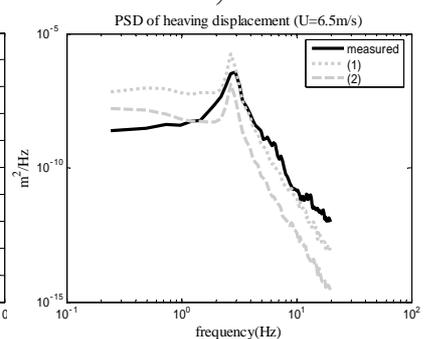


Fig.2 たわみ応答の PSD 特性

4. 変動空気力のコヒーレンスを用いた周波数領域及び時間領域での応答解析結果

ここでは実際に格子乱流中において、 $B/D=5$ 矩形断面に作用するガスト空気力の空間相関の評価を試みる。そも

そも、矩形断面に作用する変動空気力の空間相関特性を知るためには、ある y の位置の断面内に作用する変動空気力を評価する必要が生じる。そのためには、各断面内に作用する変動圧力を chord 方向に積分することで変動空気力を評価すればよい。今回は、近似的に模型片面に作用する変動圧力データを用いるだけでも変動空気力の空間相関特性を十分に評価することが可能であるという仮定の下で一連の解析を行った。さらに、今回評価した変動空気力の相関特性を表現する近似式として以下の式(3)を提案する。

$$\text{coh}(y_1, y_2, f) = \left(1 + \frac{|y_1 - y_2|}{b} q\right)^{-1} \exp\left(-k \frac{f|y_1 - y_2|}{U}\right) \dots (3) \quad J_F(ik) = \left\{ \frac{ab}{b^2 + k^2} + \frac{cd}{d^2 + k^2} \right\} - i \left\{ \frac{ak}{b^2 + k^2} + \frac{ck}{d^2 + k^2} \right\} \dots (4)$$

$$S_\eta(f) = \left(\frac{dC_L}{d\alpha} \rho b U\right)^2 |H_\eta(f)|^2 |\phi_L(f)|^2 |J_L(f)|^2 S_w(f) \dots (5)$$

ここで、 q , t , k は変動空気力のコヒーレンス特性を決定するパラメータであり、 b は模型半弦長、 U は主流平均風速を表わす。変動空気力のコヒーレンスが、変動風速のコヒーレンスと比較して、特に低周波数域で大きくなるという実際の現象を比較的精度良く表現することができたため、この提案式を採用した。

しかし、各パラメータに物理的な意味づけができないという点には注意を要する。例として、実際に(3)式を用いて今回得られた変動揚力のコヒーレンスを近似させたものを Fig.3 に示す。これより、今回の提案式を用いて得たコヒーレンスの近似曲線は精度良く空間相関特性を評価できているといえる。

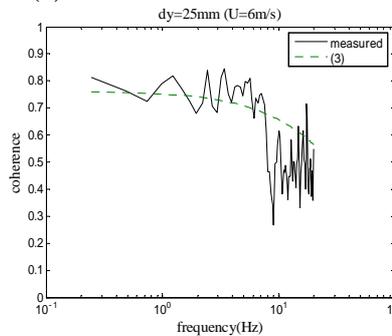


Fig.3 変動揚力の
コヒーレンス特性

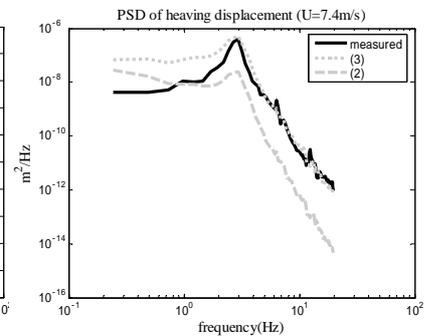


Fig.4 たわみ応答の
PSD 特性

変動揚力のコヒーレンスを span 方向に 2 重積分するなどの操作を加えることによって、実際に JMA を算出した。この JMA を用いて、式(5)を適用することで変位応答の PSD を計算し、たわみ変位の PSD に関する結果を Fig.4 に示す。この結果から、提案式による PSD は実測の PSD によく一致することが分かった。なお、式(5)において $|H_\eta(f)|^2$, $|\phi_L(f)|^2$ はそれぞれ、力学的アドミッタンス及び空力アドミッタンスである。

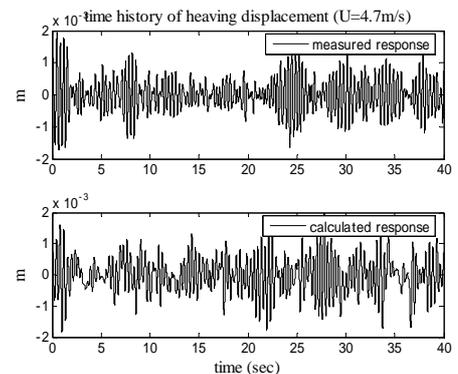


Fig.5 たわみ不規則応答の時刻歴応答計算

時間領域においても、応答計算¹⁾を行い、二次元自由振動実験で得られた応答の実測値と比較する。実際に、たわみ・ねじれ振動に関する単位衝撃応答関数と 3 次元ガスト空気力の Duhamel 積分を行うことで、格子乱流中の $B/D=5$ 矩形断面の 2 自由度振動応答の時刻歴計算を行った。例としてたわみ応答結果について Fig.5 に示す。

総合的に判断すると、特にねじれ応答に関して、実測応答とシミュレーション結果のトレンド及び応答振幅が比較的良好に一致する結果が得られているが、実測値で応答のピークが現れる時間帯にシミュレーション結果では応答のピークが再現されない箇所も存在する。これについては、JMA のゲイン特性の精度や、今回位相特性を式(4)のような分数関数で評価したことなどが諸原因として考えられる。

5. 結論

Davenport 型の近似式は変動風速のコヒーレンスを低周波数領域で過大評価したが、結果的に変位応答のパワースペクトル特性をよく再現することができた。一方、変動風速のコヒーレンスに適合した Karman 型の近似式は実測応答のパワースペクトル密度を過小評価する。また、提案した式を用いた結果は、変動圧力のコヒーレンスに適合するのみならず、実測の変位応答のパワースペクトル特性もよく評価できた。さらに、時間領域において提案式による変位応答結果は実測応答の振幅特性をよく再現することができた。

参考文献

- 1) 白石成人, 松本勝, 白土博通: 風の乱れに起因する構造物の非正常特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集 No.328, (1982) pp.19-30