

風速変動の時間・スケール特性を考慮したガスト応答推定法

名古屋大学理工科学総合研究センター 正会員 北川徹哉

1. はじめに

風速変動が非定常性を帯びるとピークファクターが変化し¹⁾, 従来の周波数領域におけるガスト応答解析では最大応答振幅を予測できない. この場合, 時間領域における応答解析(例えば文献2))が一つの手段ではあるが, 空力アドミッタンスを時間領域に展開することは容易ではない. そこで本研究においては, 空力アドミッタンスを周波数の関数のまま考慮することができ, かつ時刻歴応答解析を行うことなくガスト応答の時刻歴を推定する一手法を提案する.

2. ウェーブレットの周波数領域解析法への組込み

1自由度系の主流方向ガスト応答を対象とする. 最初に, 推定しようとする応答変位の時刻歴 $x(t)$ をウェーブレット変換で用いられるスケールパラメータ j (周波数の帯域に対応) とシフトパラメータ k (時間軸上の位置に対応) とにおける各応答 $x_{j,k}(t)$ の重ね合わせとし, これを周波数領域において表現すると

$$x(\omega) = \eta(\omega) + \sum_j \sum_k x_{j,k}(\omega) \quad (j: \text{スケールパラメータ}, k: \text{シフトパラメータ}, j, k \in \mathbb{Z}) \quad (1)$$

となる. まず, 式(1)の $x_{j,k}(t)$ について述べる. 風速変動 $u(t)$ のウェーブレット係数を $\alpha_{j,k}$ とすると, $\alpha_{j,k}$ に対応する風速変動のフーリエ変換 $u_{j,k}(\omega)$ は離散ウェーブレット基底 $\Psi_{j,k}(\omega)$ を用いて $u_{j,k}(\omega) = \alpha_{j,k} \Psi_{j,k}(\omega)$ と表される. そこで, 各 $u_{j,k}(\omega)$ による局所的な変動抗力のフーリエ変換を従来の周波数領域におけるガスト応答解析法に習い,

$$F_{j,k}(\omega) = \frac{2P_{j,k}}{U_{j,k}} X_D \left(\frac{\omega d}{2\pi U_{j,k}} \right) \alpha_{j,k} \Psi_{j,k}(\omega) \quad \left(U_{j,k} = \frac{2^j}{T} \int_{kT/2^j}^{(k+1)T/2^j} u(t) dt, T: \text{継続時間}, P_{j,k} = \frac{1}{2} \rho d C_D U_{j,k}^2 \right) \quad (2)$$

と定義する. ここで, 局所平均風速 $U_{j,k}$ はスケール j および位置 k の離散ウェーブレットが支配する時間区間における $u(t)$ の平均であり, 同様に $P_{j,k}$ は局所的な静的空気力である. また, $X_D(\omega d / (2\pi U_{j,k}))$ は $U_{j,k}$ に基づく無次元周波数を入力とする空力アドミッタンスである. 式(2)に伝達関数 $H(\omega)$ を乗じるとともに K で除して

$$x_{j,k}(\omega) = F_{j,k}(\omega) H(\omega) / K \quad (K: \text{ばね定数}) \quad (3)$$

を得る. 式(3)と静的成分近傍を表す $\eta(\omega) = (1/2) \rho d C_D U^2 \Phi_{j=0}(\omega) / K$ とを式(1)に代入し ($U: u(t)$ 全体の平均風速, $\Phi_{j=0}(\omega):$ スケーリング関数), フーリエ逆変換を行えばガスト応答の時刻歴 $x(t)$ が得られる. なお, 式(3)の $H(\omega)$ 中に含まれる減衰比 ζ には構造減衰 ζ_0 と空力減衰の和として

$$\zeta = \zeta_0 + \rho d C_D U_{j,k} / (2\omega_0 M) \quad (\omega_0: \text{固有角振動数}, M: \text{質量}) \quad (4)$$

を用いることとする. 本手法においては, 空気力が各スケールと各時刻とに依存する局所平均風速 $U_{j,k}$ に基づいて計算されており, 空力減衰や X_D も $U_{j,k}$ に応じて変化している点が特徴である. 以下では X_D を実関数とし, Davenport³⁾の提案式(デイクファクターは1とした)を暫定的に用いてガスト応答の推定を行う.

3. ガスト応答の推定

解析に与える風速変動のデータは, 市街地の建物の屋上において超音波風速計により 20Hz のサンプリングで実測されたものである. 計測時間 10 分間の時刻歴データが 66 個得られているが, FFT を用いる都合上, 各時刻歴の約 409 秒間のデータを対象とした. 計測された主流方向成分の風速変動 $u(t)$ の一例を図1に示す. 170s 付近にやや大きな変動がみられ, 300s 以降は変動が小さくなるとともに平均風速が低下する傾向にある. このパワースペクトルが図2であり, $U=8.4$ m/s, 乱れの強さ $I_u=0.24$, 乱れのスケール $L_u=100$ m のカルマン・スペクトルに整合している. なお, 全ての実測データはカルマン・スペクトルにほぼ従っており, $U=4 \sim 11$ m/s, $I_u=0.19 \sim 0.41$, $L_u=60 \sim 160$ m の値を有していた. まず, これらの実測データに対し, 風速と構造物との相対速度に基づいて外力を与えた時刻歴応答解析を行った. 本研究においては, この結果を本手法の検証対象とする. 2の最後に触れた X_D は本研究が対象とする無次元周波数の範囲ではほぼ1となるため, この時刻歴応答解析の結果を比較対象とすることは適当であると思われる. 解析対象とする構造物の諸元および振動特性は明

ウェーブレット, ガスト応答, 準定常理論, 非定常性, ピークファクター, 風速変動

〒464-8603 名古屋市千種区不老町 電話: 052-789-5918 FAX: 052-789-3734

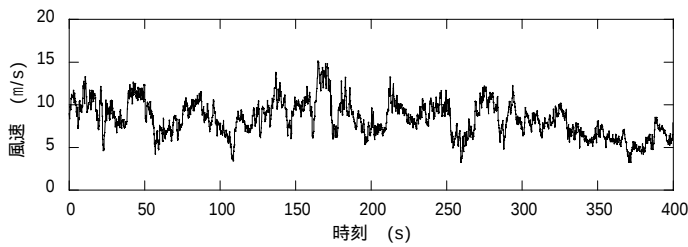


図1 自然風の一例

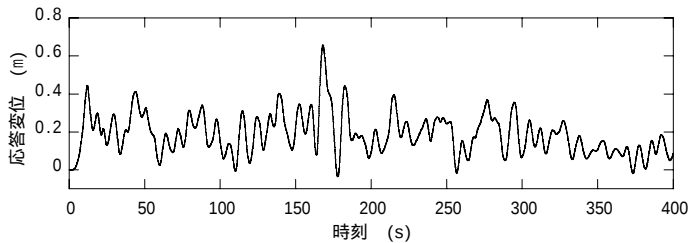


図3 図1に対するガスト応答の時刻歴応答解析の結果

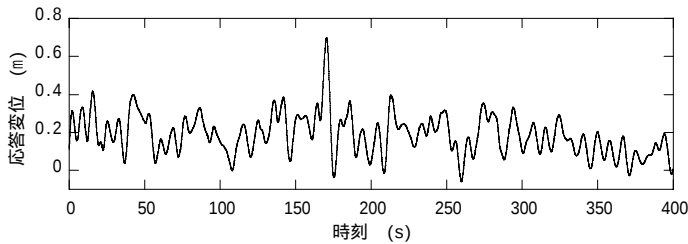


図5 図1に対する本手法によるガスト応答の推定結果

石海峡大橋のものをういたが、固有振動数には水平1次モード固有振動数の約3倍の0.116Hzを与えている。また、 C_D および ζ_0 は風洞実験の結果を引用した。図1の風速変動を用いた時刻歴応答解析の結果を図3に示す。170s付近に大きな振幅がみられ、300s以降は変動が小さくなっている。なお、0sにおける風速がゼロとなるように0~10sの区間にスムージングをかけているため、応答はゼロから立ち上がっている。全ての風速データに対する時刻歴応答解析により得られた応答変位 $x(t)$ のピークファクター g^r を“風速変動のピークファクター” g^w に対してプロットしたものが図4である。風速変動の非定常性により、 g^r は一般に言われている3~3.5を大きく超える場合がある。また、 g^r は g^w に比例する傾向にあるが、ばらついており g^w がさほど小さくなくても g^r が大きくなることもある。図1の風速変動に対して本手法により推定した応答変位 $x_p(t)$ を図5に示す。スケール関数 $\Phi_{j=0}(\omega)$ および式(2)の離散ウェーブレット基底 $\Psi_{j,k}(\omega)$ には Yamada ら⁴⁾によって構成された Meyer 系の関数を用いている。全体的に図3と似た波形が得られており、170s付近に発生している大振幅もほぼ一致する。全ての自然風に対して本手法により $x_p(t)$ を求め、各 $x_p(t)$ についてピークファクター g_p^r を算出した。得られた g_p^r と g^r との対応関係を示したものが図6である。 g^r が著しく大きい場合に g_p^r がこれに一致しないケースはあるが、全体的には整合しており、本手法は十分な精度を有していると思われる。

4. まとめ

時刻歴応答解析を行わなくても定常・非定常な風速変動下のガスト応答時刻歴が推定可能な一手法を提案した。また、本手法は空力アドミタンスを周波数の関数のまま考慮できるように定式化されている。

謝辞：自然風の実測において日本大学・野村卓史教授より御支援を賜りました。ここに謝辞を表します。

参考文献 1)北川ら：非定常風速変動におけるガスト応答特性に関する解析的検討，第16回風工学シンポジウム論文集，pp.393-398，2000。2)松本ら：空力連成を考慮した長大橋ガスト応答解析，第13回風工学シンポジウム論文集，pp.227-232，1994。3)A. G. Davenport：Applications of statistical concepts to the wind loading of structures, *Proc. Inst. Civil Engrs.*, 19, pp.449-472, 1961。4)M. Yamada and K. Ohkitani：Orthonormal wavelet analysis of turbulence, *Fluid Dynamic Res.* 8, pp.101-115, 1991。

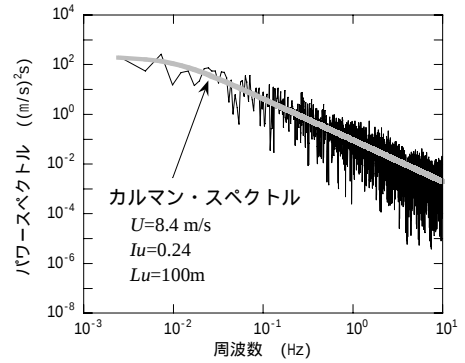


図2 図1のパワースペクトル

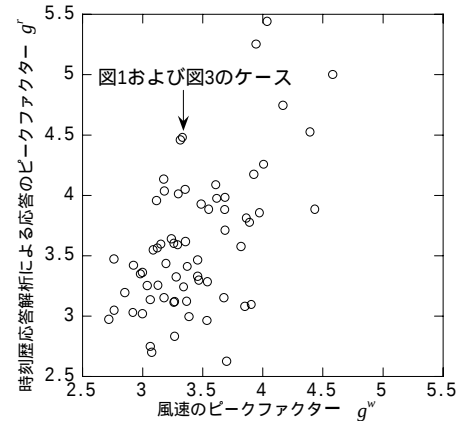


図4 “風速のピークファクター”に対する時刻歴応答解析による応答のピークファクター

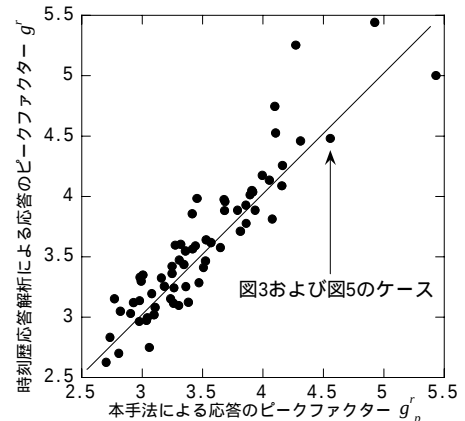


図6 本手法と時刻歴応答解析との応答ピークファクターの比較