

令和 2 年 4 月 22 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06650

研究課題名(和文) 風応答に伴う風力に関する非定常解析法の開発

研究課題名(英文) Development of an unsteady analysis for wind forces induced by responses of structures

研究代表者

谷口 徹郎 (Taniguchi, Tetsuro)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30231418

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：超高層建築物、あるいは今後建設が予想される超々高層建築物の耐風設計を行う場合に、建築物の振動に伴って付加的に作用する風力の評価が重要になります。特に、振動変位と風力の時間のズレの方が、風力の強さよりも振動に与える影響が大きくなります。この研究では、そのズレをある程度の周期範囲ごとに時間とともに変化する量として評価する方法を開発しました。また、この方法で評価した風力が建築物に与えるエネルギーと建築物が消費するエネルギーがほぼ等しくなることを示し、この方法の定量的な正確さも確認しています。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築物の高さ、あるいは高さの幅に対する比であるアスペクト比が大きくなると、風による振動も大きくなり、設計用の風荷重が地震荷重を上回るケースもでてくる。また、振動が大きくなることは建築物周辺の流れにも影響を与えるため、振動に依存した風力である非定常風力の影響を無視できなくなる。本研究では、従来、定常振動下においてのみ評価可能であった非定常風力を、時間の関数として求める方法を開発した。これによって、将来の超々高層建築物の実現に貢献できるものと考えている。

研究成果の概要(英文)：For the wind resistant design of super-high-rise buildings, the wind forces due to the vibration of the buildings should be considered. Especially, the time lags between the wind force and vibration more affect the vibrations of the buildings rather than the intensity of the wind forces. This study presented the technique to estimate the time lags in each frequency range as time series. And the accuracy of this technique was examined by the comparing the works of wind force and the energy dissipation of the buildings.

研究分野：工学

キーワード：非定常風力 Wavelet変換 Analytic Signal 風洞実験 多自由度弾性模型

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超高層建築物では風方向とともに風直交方向、あるいはねじれ方向の振動応答について検討が必要になる。一般に、これらの応答は、振動しない状態の模型に作用する風力を用いて評価される。しかし、超高層建築物、あるいは今後建設が予想される超々高層建築物では、風による応答が大きくなり、同手法での評価が難しくなることもあり、建築学会の「建築物荷重指針」においてもアスペクト比(高さ/幅)による制限を設け、アスペクト比が制限を超えるスレンダーな建築物は対象外としている。建築物の応答に伴う風力、所謂、非定常風力を適切に評価できれば、これを考慮した風荷重の設定が可能となり、現在制限されているアスペクト比の大きな建築物を建設できる可能性が高くなることが期待される。

一般に、非定常風力は風洞実験によって評価される。特に、ある一定振幅で強制的に振動させた状態における作用風力と応答との位相差を用いた強制振動法による評価が一般的である[西村ら、日本建築学会構造系論文集 1994]。この方法によれば、ある条件の下で一つの評価値が包括的、かつ安定して得られる。しかし、風洞実験であっても、自由に振動する模型を用いた場合には、共振状態などの特殊な状況を除いて、応答振幅とともに、応答と風力との位相関係も時々刻々変化する。特に、自然風の下での現象では、接近流の非定常性も加わるため、応答と風力の位相関係を時間とともに変化する量として評価する必要がある。

本研究代表者は、野外実験において大規模角柱模型の応答と、模型に作用する風力を計測し、時間とともに変化する非定常風力を、空力減衰力と付加質量力にわけて評価する方法を提案した[谷口ら、風工学シンポジウム論文集 1998]。この研究では、複素型の Wavelet を用いて、時間とともに連続的に変化する量として非定常空気力を評価し、特に空力減衰力と応答振幅の間の密接な関係を明らかにした。

しかし、上で用いた Wavelet は直交性を持たないため、エネルギーの観点からの考察が難しい。そこで、直交 Wavelet を用いて空力振動をエネルギー的に評価する方法を提案した[谷口ら、風工学シンポジウム論文集 2004]。この研究では、風力による仕事と振動エネルギーとともに、構造物の減衰による消散エネルギーを定量的に評価できることを示した。ただし、この研究では、応答変位からある仮定に基づいて求めた応答速度を解析に用いており、応答と風力の位相差は直接評価していない。

直交 Wavelet を用いて、時間とともに変化する相関性を、Wavelet Coherence として評価することを試みた研究では、接近流の風速と角柱に作用する風力の位相差を時々刻々評価した[谷口ら、日本建築学会大会学術講演梗概集 2005]。この研究では、複素型の Wavelet を用いる代わりに、解析対象時系列の Complex Envelope を仮想的な解析対象と考えることで、2つの時系列の位相差を時々刻々評価している。なお、Complex Envelope は対象時系列をフーリエ級数展開し、正の周波数成分のみを再合成することで求めることができる。

本研究では、Wavelet Coherence をベースにして、角柱に作用する風力と応答の位相差を時間とともに変化する量として評価する方法により、非定常風力の評価手法の開発を目指す。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超高層建築物、あるいは超々高層建築物の耐風設計に用いる風荷重の評価に結びつく、建築物の応答に伴う非定常風力を時々刻々評価する非定常解析法を開発することである。また、風洞実験および自然風の下での野外実験によって得られたデータを同手法によって解析した結果により、各状況における非定常風力の相違点および類似点を明らかにすることを目的とする。さらに、両者の比較に基づき、風洞実験結果を耐風設計に、より合理的に用いる方法について検討する。詳細は以下のとおりである。

(1) Wavelet 変換を用いた非定常風力の評価方法の提案

直交 Wavelet 変換と Complex Envelope の概念を用いた非定常なコヒーレンスである Wavelet Coherence の考え方をベースにして、風力と応答の関係について調べ、応答に伴う風力である非定常風力の評価方法を提案する。この方法を用いて、正方形断面角柱模型を用いた風洞実験結果を解析し、風洞流中における非定常風力の特徴について考察する。

(2) 自然風の下での非定常風力特性の評価

提案した方法により、大規模弾性角柱模型を用いた野外実測結果について解析し、風洞実験結果から得られた解析結果と比較・考察することにより、自然風の下での非定常風力の特徴を、風洞流中のものと対比して示す。特に、風力による供給エネルギーと振動エネルギーの変化についても考察する。

また、風洞実験結果から複素 POD 解析を用いて抽出した変動風圧パターンにより、自然風の下での変動風圧場を分解することを試みる。

さらに、接近流の風速および風向変化と、非定常風力特性の変化の関係について調べるとともに、風洞流中での現象と比較し、風洞実験結果から自然風の下での現象を予測できる範囲、およびその限界について考察する。

(3) 非定常風力を考慮した設計用風荷重の提案

風洞流中および自然風の下での現象を対比し、非定常風力を考慮した超々高層建築物の設計用風荷重を提案するとともに、風洞実験結果からより合理的な設計用風荷重を評価する方法について検討する。

3. 研究の方法

(1) 1辺 10cm、高さ 50cm の角柱弾性模型を制作し、風洞実験を実施する。模型壁面 4 面に 1 面あたり 29 点、計 116 点の風圧測定孔を設ける。模型には芯材を通し、芯材はある点を中心に回転できるようにする。芯材の模型と反対側にバネを設置することで、模型が振動できるようにする。なお、バネの強さ、あるいは取り付け位置を調整することで振動数を変化させることができるように設計する。実験気流は境界層流とし、風速を熱戦風速計で計測するとともに、風圧を風圧計で計測し、模型頂部の変位をレーザー変位計によって計測する。実験は面に正対する風向について行う。

(2) Analytic Signal を用いた直交 Wavelet 変換による Wavelet Coherence[谷口ら、日本建築学会大会学術講演梗概集 2005]をベースにした非定常風力の評価方法について検討する。

(3) ロッキング振動模型より実構造物に近い、5 自由度弾性模型を設計する。形状はロッキング模型と同様とする。ロッキング模型と同条件下で風洞実験を行う。

(4) 実直交関数の Wavelet を用いた非定常風力の評価方法を用いて、風力による供給エネルギーと建築物の減衰による消散エネルギーについても調べる。

4. 研究成果

(1) Analytic Signal と直交 Wavelet 変換を用いた非定常風力の評価法

1 次的一般化変位 $x(t)$ の解析信号 $\tilde{x}(t)$ を次式より求める。

$$\tilde{x}(t) = 2 \sum_{k \geq 0} S_x(\omega_n) e^{i\omega_n t} \quad (1)$$

$$S_x(\omega_n) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-i\omega_n t} dt \quad (2)$$

ここで、 T は解析時間であり、 $i = \sqrt{-1}$ である。Meyer のウェーブレット $\psi(t)$ を用いた $\tilde{x}(t)$ のウェーブレット変換 $X_{j,k}$ は次式となる。

$$X_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t) \cdot \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (3)$$

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (4)$$

ここで j, k は整数で、それぞれスケールおよび位置を表すパラメータであり、* は複素共役を表す。一般化風力 $f(t)$ についても同様に解析信号 $\tilde{f}(t)$ を用いて、ウェーブレット変換 $F_{j,k}$ を求めた。

時系列データ $x(t), f(t)$ の一例を、 $j = 10, 11, 12$ のウェーブレット変換の絶対値 $|X_{j,k}|, |F_{j,k}|$ とともに図 1 および図 2 にそれぞれ示す。なお、各 j における $\psi_{j,k}(t)$ のフーリエ変換の中心周波数は、それぞれ 5.2, 10.4 および 20.8 Hz である。また、ウェーブレット変換は元データとの比較のため、それぞれ $2^{j/2}$ 倍して示す。

模型の固有振動数は $j = 11$ の中心周波数にほぼ一致することから、図中の $2^{11/2} |X_{11,k}|$ は変位 $x(t)$ を包絡するように変化している。一方、風力については、共振風速よりやや低い風速のため、固有振動数よりやや低い周波数が卓越することから、 $j = 10$ の成分も多く含まれることを示している。

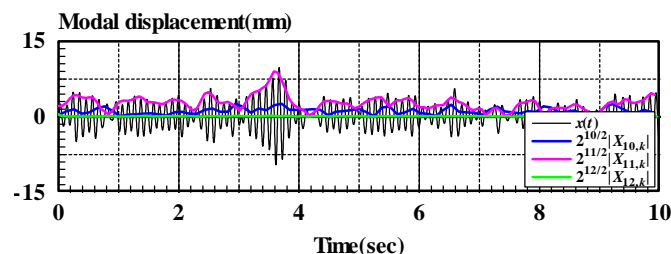


図 1 一般化変位の時系列の一例 (1 次 $V_f=9.45$)

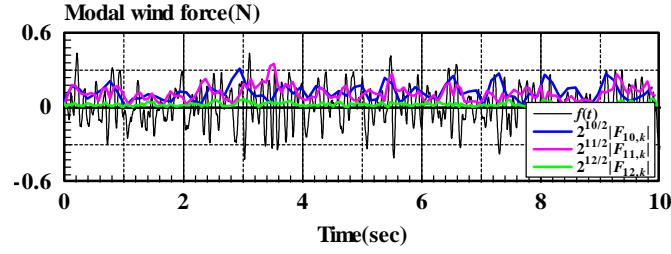


図2 一般化風力の時系列の一例 (1次 $V_T=9.45$)

風力の変位同相成分および速度同相成分の振幅 $|F_{Vj,k}|$ 、 $|F_{Dj,k}|$ をウェーブレット変換を用いて以下のように求める。

$$|F_{Dj,k}| = 2^{j/2} \text{Re}(F_{j,k} X_{j,k}^*) / |X_{j,k}| \quad (5)$$

$$|F_{Vj,k}| = 2^{j/2} \text{Im}(F_{j,k} X_{j,k}^*) / |X_{j,k}| \quad (6)$$

得られた結果の一例を図3に示す。例えば、図1の3~3.6秒付近では変位振幅が増大しているが、その区間の $|F_{V11,k}|$ は比較的大きな正の値を示しており、速度同相成分が振動エネルギーを供給していることを表している。

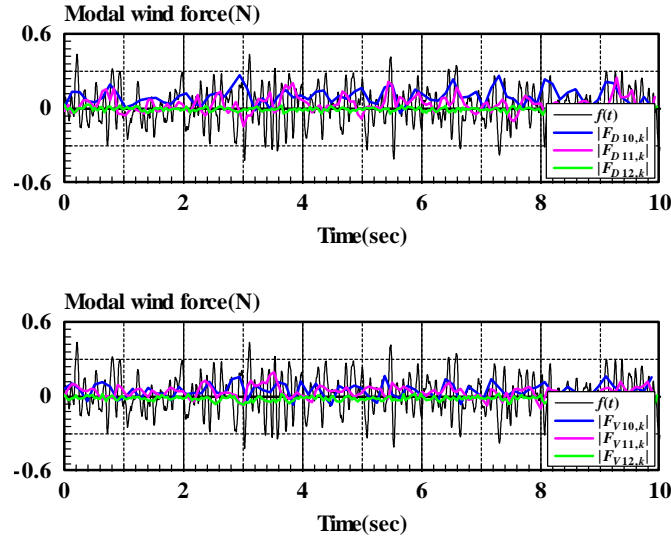


図3 風力の変位同相成分および速度同相成分

(2) 風力の仕事から求めた減衰定数

速度および加速度のウェーブレット変換 $V_{j,k}$ 、 $A_{j,k}$ を、 $\bar{\omega}_j$ を各 j を代表する各振動数として、以下のように仮定する。

$$V_{j,k} = i\bar{\omega}_j X_{j,k}, \quad A_{j,k} = -\bar{\omega}_j^2 X_{j,k} \quad (7), (8)$$

これにより、運動方程式から次式が得られる。

$$\text{Re} \left(\sum_{j,k} F_{j,k} X_{j,k}^* \right) = M \sum_{j,k} (K - M\bar{\omega}_j^2) X_{j,k} X_{j,k}^* \quad (9)$$

$$\text{Im} \left(\sum_{j,k} F_{j,k} X_{j,k}^* \right) = C \sum_{j,k} \bar{\omega}_j X_{j,k} X_{j,k}^* \quad (10)$$

ここで、 M, C, K は一次の一般化質量、一般化減衰係数および一般化剛性である。(9)式の各 j に関する和から求めた $\bar{\omega}_j$ を用いて、(10)式から減衰係数を評価した。減衰定数として図4に示す。自由振動実験による模型の減衰定数と概ね一致していることから、この手法によりエネルギー需給を定量的に表すことができると考えられる。

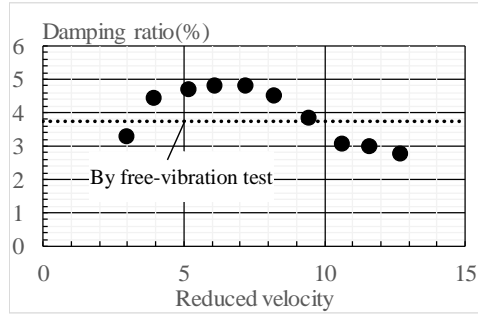


図4 空力減衰定数と平均風速の関係

(3) ウェーブレット係数の相互相関係数

図5に、風力の変位・速度同相成分 $|F_{Dj,k}|$ 、 $|F_{Vj,k}|$ と変位振幅 $|X_{j,k}|$ との相互相関係数を示す。速度同相成分については $j=10,11$ の $\tau < 0$ で正のピークがみられ、図3でみられた風力の作用に伴う変位振幅の変化を表わしている。また、 $\tau > 0$ では負のピークがみられるが、これは変位の増大に伴って振動を抑制する風力が作用すること、あるいはその逆の現象を表しており、この手法によって振動に依存した風力を明確に抽出できたことを示していると考えられる。また、この現象は $Vr=5.18$ の方がより顕著であった。

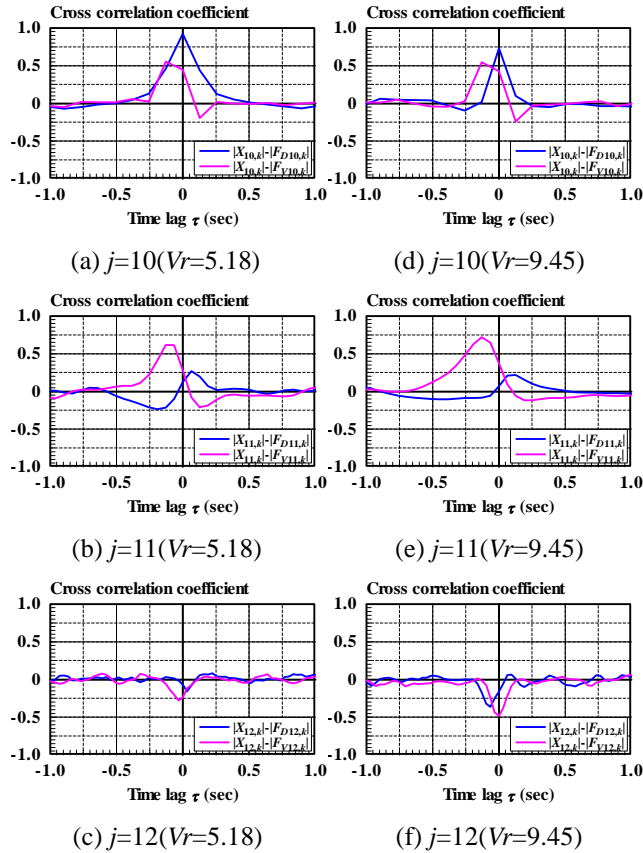


図5 ウェーブレット係数の相互相関係数

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 原田慎也 谷口徹郎
2. 発表標題 ウェーブレット変換を用いた空力減衰定数の評価
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 RD 法およびウェーブレット変換により求められる空力減衰定数の比較
2. 発表標題 村上智之 谷口徹郎
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上智之 谷口徹郎
2. 発表標題 直交性を有するウェーブレットを用いた空力減衰力の評価法
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----