

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 30 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656159

研究課題名(和文)風応答長期観測記録に基づく塔状構造物の動特性変動の定量化

研究課題名(英文)Quantification of variations in the dynamic characteristics of a tall structure based on the long-term wind response observation records

研究代表者

菊地 優 (Kikuchi, Masaru)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50344479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大規模塔状構造物の風応答観測を継続的に行い、気象条件に応じて変化する構造物の動特性変動を定量的に評価した。はじめに、風応答によって生じる微動を観測するための計測システムを構築し、長期連続観測を行った。同時に、気象庁より公開されている気温・風速・地震記録等のデータを収集した。続いて、風応答の観測記録を用いて、構造物の固有振動数と減衰定数を同定した。最後に、観測記録の分析結果と気象データを併用し、動特性の季節変動や経年変動の定量化を行った。

研究成果の概要(英文)：We conducted continuous observation of wind-induced response of a tall tower, and quantified dynamic properties of the tower varied with climatic conditions. First, we built an observation system to monitor the wind-induced vibration of the structure, and conducted the long-term continuous observation. The climatic data such as temperature, wind speed and earthquake information reported by JMA are also collected. Next, natural frequency and damping ratio of the tower are identified from the observation results. Finally, we quantified seasonal variation and aging of the dynamic properties of the tower using the observation data and the climatic conditions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：振動制御 モニタリング 制振装置 風応答 振動計測 固有周期 減衰定数

1. 研究開始当初の背景

屋外大規模構造物の固有振動数や減衰定数は、気象条件による影響を受けて変化しやすい。例えば、強風時には弱風時よりも固有周期が長くなり、剛性の振幅依存性が認められる場合がある。このような動特性の変動を長期連続観測によって把握することは、以下の2つの観点から重要である。

制振装置の設計へのフィードバック

制振装置の設計では、振動制御対象となる構造物の動特性によって最適なシステムが決定される。しかし、四季の気象に応じて変化する動特性を設計段階において予測することは現実的に不可能である。そこで、制振装置設置後に構造物の実際の振動観測データを蓄積することで、より効果の高い振動制御システムを設計することができる。

構造ヘルスマニタリングの信頼性向上

構造物の動特性が損傷によって変化する現象を利用して、構造物の健全性を探知する構造ヘルスマニタリングに動特性評価技術を応用する研究が行われている。しかし、気象条件による動特性の変動幅は構造損傷による変化量に対して無視できないとの指摘がある。そのため、気象条件による影響を定量的に明らかにすることで、構造ヘルスマニタリングの信頼性が向上する。

屋外大規模構造物の振動を長期的かつ連続的に計測して動特性の変動を調査した事例は非常に少ない。本研究課題の構想段階において、函館五稜郭タワーの好意によりほぼ恒久的に計測機器の設置場所を提供され、良好な条件のもとで安定的に構造物の振動計測を行える機会を得ることができた。北海道・函館という積雪寒冷地での冬期間の強い季節風は、台風以上に継続時間の長い強風を構造物に作用させる。北海道の日本海側には数多くの風力発電施設が建設されており、強風による損傷・倒壊事故も報告されている。観測する構造物が被る気象条件は風力発電施設と同等であり、観測結果から風外力を推定できれば、構造物の耐風安全性評価に関する有用な知見が得られる。また、本観測地は四季を通じて寒暖の差・風力の差が大きく、気象条件が構造物の動特性に与える影響を把握するにあたって好適である。このような厳しい自然条件にさらされる地域を積極的に選択することによって、気温や日照量などの気象条件を考慮した動特性変動の検討・定量化が可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、風応答の長期連続観測によって蓄積される膨大なデータから、構造物の動特性変動(日・季節・経年)に気象が与える影響を定量化することを目的とする。長期間にわたる風応答の連続観測記録を分析し、気象条件に応じた構造物の動特性変動を定量的に明らかにすることで、長期間の供用が予定される制振システムの設計や構造物の健全

全性評価技術をより精度の良いものとする。

観測対象とする構造物は、不静定次数の少ない単純な構造形式であり、シンプルな力学モデルに置き換えても現実との乖離が少ない。このような構造に対して長期間の振動計測を実施できることは、振動理論、特に制振における定点理論(Den Hartog et al. 1928)の適合性を確認できる貴重な機会である。

3. 研究の方法

観測対象構造物は、平成18年4月に完成した函館五稜郭タワーである(写真1)。RCチューブ構造を主体とする高さ98mの塔状構造物であり、頂部に2層のS造展望階を有する(図1)。頂部には強風時の居住性改善を目的とする液体同調型ダンパーが設置されている(図2)。



写真1 函館五稜郭タワー

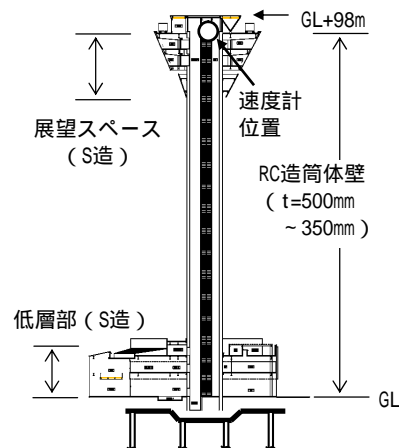


図1 構造体の概要



図2 液体同調型ダンパー

本研究では3年間の研究期間(平成23~25年度)で、風応答長期連続観測の実施と観測記録の分析・評価を行った。具体的には以下の(1)~(3)のプロセスを経て研究を遂行した。

(1) 計測システムの構築

まずは、本研究の目的に合致する計測システムを構築した。計測システムの構成を図3に示す。速度計センサーは展望階の筒体内壁面に設置する。計測状況の監視と計測システムの操作は、携帯電話回線を用いた遠隔接続によって行い、無停電電源装置を併用することでシステムを安定稼働させ、計測データの欠損期間を極力短くした(図4)。風応答は設置方向の異なる3台の速度計によって計測し、A/D変換の後リアルタイムでPCに取り込んだ。サンプリング振動数は100Hzとし、10分間ごとのファイルに分割して現地PC内のディスクに記録した。

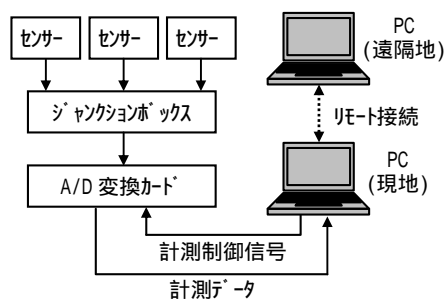


図3 計測システムの構成



図4 稼働中の計測システム

(2) 風応答長期連続観測の実施

観測は基本的に無人で行うが、データ回収と機器メンテナンスのため定期的に現地に赴いた。並行して、函館海洋気象台より公開される気象データ(風速・気温等)をWeb上からダウンロードし、風応答観測とともに気象条件のデータベースを蓄積した。

(3) 観測記録の分析・評価

観測された速度波形データは、建造物の1次固有振動数に対応する正弦波に近い波形であり、風外力の変動に伴う振幅の変化がみられた。データの統計処理およびスペクトル分析により、以下の物理量を抽出した。

- ・速度、加速度応答のPeak値、RMS値
- ・固有振動数と減衰定数

これらの観測記録の分析結果と(2)のプロセスで得られた気象条件データベースを用いることで、気象条件が動特性に与える影響を定量化した。

4. 研究成果

(1) 振動特性の分析

図5に、計測システムにより得られる時刻歴の速度波形データ例を示す。1時間ごとに区切った速度波形をスペクトル分析し、パワースペクトル理論曲線へのフィッティングにより、図6のようにX方向とY方向における固有振動数と減衰定数を同定した。

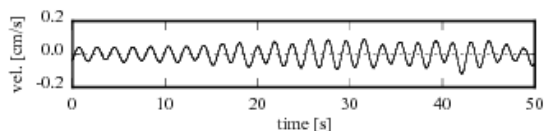


図5 速度応答波形記録

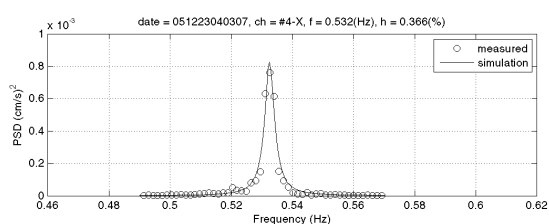


図6 固有振動数・減衰定数の分析

これらの分析を、風応答の観測期間全体のデータについて行った。以降の(2)~(5)では、気象条件等と特に明瞭な関係が見られた固有振動数の変動に関して示す。

(2) 応答値との関係

図7に2012年における建造物の固有振動数と応答加速度の関係を示す。振動の振幅依存性により、応答値の増大によって固有振動数が低下する傾向が見られた。

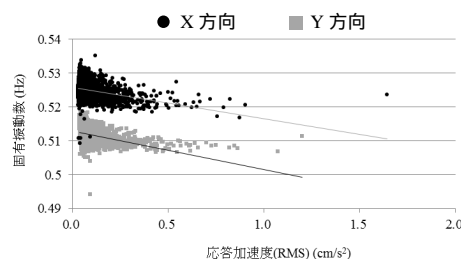


図7 固有振動数と応答加速度の関係(2012年)

(3) 地震記録との関係

図8に2012年全体における固有振動数の変動を示す。

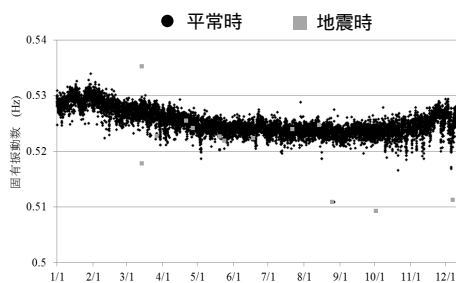


図8 平常時と地震時の固有振動数(2012年、X方向)

図8では、計測データの分析記録と地震記録を照合し、地震時の固有振動数は色を変えて示した。これより、地震時には固有振動数が低下する傾向があることが確認できた。減衰定数に関しては、固有振動数のように地震時に変動する傾向は見られなかった。

(4) 気象条件との関係

観測期間全体のデータより、季節変動の影響を抽出した。ここでは、固有振動数の長期的な性状を検討するため、各観測日に得られたデータから外れ値を除いて平均した代表値を用いた。振動特性に影響を与えらる気象条件として気温と風速に注目した。固有振動数と気温の関係を図9に、固有振動数と風速の関係を図10に示す。

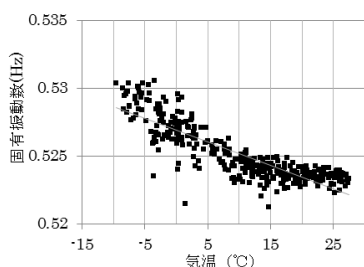


図9 固有振動数と気温の関係 (2012年、X方向)

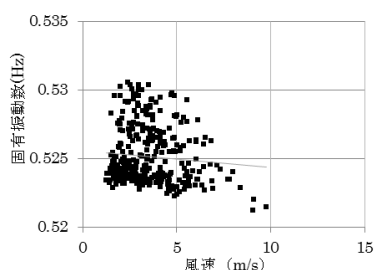


図10 固有振動数と風速の関係 (2012年、X方向)

図9~10のように、気温が高い時期と風が強い時期に固有振動数が低下している。ただし、気温と風速は両方ともに季節変動する傾向を持つので、後述する重回帰分析により、それぞれの影響を定量化した。

(5) 振動特性の予測

長期連続観測により対象構造物の固有振動数には経年変化が見られた。風速と気温と経過日数の3変数を用いて次の回帰式を得た。

$$f = 0.5394 - 1.729 \times 10^{-4} T - 2.949 \times 10^{-4} W - 5.0723 \times 10^{-6} D \quad (1)$$

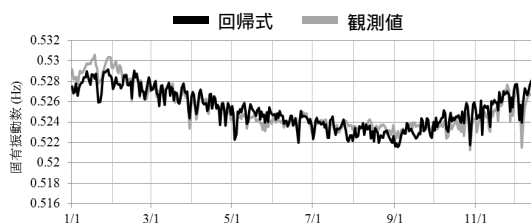


図11 固有振動数の回帰分析結果 (2012年、X方向)

ここで、 f は固有振動数(Hz)、 T は当該日の平均気温(°C)、 W は平均風速(m/s)、 D はダンパー設置からの経過日数(日)である。図11に、実際の観測値と回帰式による予測値の比較を示す。3個の外的要素により、固有振動数の変動を良好に再現できた。

(6) 居住性評価

計測データを用いて1/3オクターブバンド分析を行い、性能評価曲線と照合して建物居住性を調査した。図12に分析結果を示す。

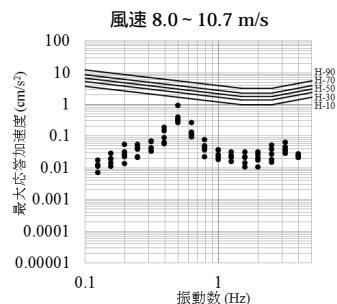


図12 1/3オクターブ分析結果 (2012年3月1日~8日、X方向)

図中の全ケースにおいて、風による振動の知覚確率は10%を下回っている。また、振動特性には経年変化が表れていたが、いずれの計測年においても知覚確率の変化は見られず、制振効果は低下していなかったと判断される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計2件)

Ken Ishii, Masaru Kikuchi, 'Evaluation of Long-term Variation in Dynamic Properties of a Tall Reinforced Concrete Tower with Tuned Liquid Dampers', HKICEAS-648, Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science, Hong Kong, December 19-21, 2013

Ken Ishii, Masaru Kikuchi, Yoriko Suzuki 'Dynamic Properties of a Tall Reinforced Concrete Tower with Tuned Liquid Dampers', The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12) Seoul, Korea, August 26-30, 2012

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊地 優 (KIKUCHI MASARU)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：50344479