

(21) 多自由度系構造物の振動モニタリングのための 外力判別と卓越振動数抽出方法

阿部 雅人¹・杉崎 光一²

¹正会員 株式会社BMC 主幹研究員 (〒261-7105 千葉県美浜区中瀬2-6 WBGマリブウエスト5階)

E-mail: masato@hashimori.jp

²正会員 株式会社BMC (〒261-7105 千葉県美浜区中瀬2-6 WBGマリブウエスト5階)

E-mail: sugisaki@hashimori.jp

構造物のヘルスモニタリングは、センサによる長期的な観測結果から有意義な情報を抽出することにある。構造物をシステムとして考えれば、モニタリングは、入力や出力を監視してシステムの変化を捉えたと考えることができる。本研究では、モニタリングの汎用化や自動化を検討する上で、出力である構造物の応答加速度から入力となる外力を自動で判別する方法とシステムの特徴である卓越振動数を自動で抽出する方法として、振動数評価を行う際にスペクトルを分割して評価する手法を提案する。

Key Words : health monitoring, accelerometer, frequency, load type

1. はじめに

構造物のヘルスモニタリングは、センサによる長期的な観測結果から有意義な情報を抽出することにある^{1),2)}。構造物をシステムとして考えれば、モニタリングは、入力や出力を監視し、システムの変化を捉えることである。本研究では、モニタリングの汎用化や自動化を検討する上で、出力である構造物の応答加速度から入力となる外力を自動で判別する方法とシステムの特徴である卓越振動数を自動で抽出する方法として、振動数評価を行う際にスペクトルを分割して評価する手法を提案する。

AD 変換等の技術向上は目覚ましく、振幅レベルや対象振動数範囲等において様々な外力に対応できるセンサが開発されている。また、信号処理の方法も様々開発されており、外力の特性に合わせた評価方法が検討されている^{3),4)}。このため、運用において外力が分かる場合は、その外力に対する評価手法を適用することで、モニタリングシステムの多機能化を行うことが可能となり、高付加価値なシステムを構築できると考えられている⁵⁾。外力を判別する際に、センサ応答のみでなく画像等を併用する方法も考案されている⁶⁾。

2. 応答加速度を利用した外力判別方法

(1) 外力判別の目的

センサの応答には、常時微動、地震、流体力（水、風等）、交通振動等の物理現象の他に、電気的なノイズ等様々なものが混在しているため、ヘルスモニタリングを行うためには、外力特性と構造物の特性を信号処理等を利用してそれぞれ評価をする必要がある。通常、センサの選定は目的とする外力に対応するように選定されるが、昨今のセンサデバイスや

(2) 外力判別手順の概要

外力判別は以下に行う指標を組み合わせで行う。なお、適用事例としては文献5)に示すような、橋脚天端に設置された加速度応答に対して適用した内容を記載する。

a) ピークファクタ

波形においてスパイクノイズが生じていないかを判別する方法を以下に示す。大きなスパイクノイズは最大値や平均といった統計指標に影響する、また、トリガー計測を行う場合は、異常なトリガーとなる。

収録加速度波形を T 秒ごとの区間と考え、 p 区間目の m ($=T/dt$) 個のサンプルによる最大値と標準

偏差を以下の式で求める．

$$\begin{aligned} \max[\ddot{x}]_p &= \max[|\ddot{x}_{p+i}|] \quad i = 1, 2, \dots, m \\ m &= T/dt \quad p = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{rms}[\ddot{x}]_p &= \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\ddot{x}_{p+i} - \bar{\ddot{x}})^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \\ m &= T/dt \quad p = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $|\cdot|$ は絶対値を表わし、 $\max[\cdot]$ 、 $\text{rms}[\cdot]$ はそれぞれ最大値、標準偏差を求める手順である．標準偏差と最大値の比から以下のようにピークファクタを求める．

$$\text{PeakF}[\ddot{x}]_p = \frac{\max[\ddot{x}]_p}{\text{rms}[\ddot{x}]_p} \quad (3)$$

閾値として e_p を以下のように設定する．

$$\text{PeakF}[\ddot{x}]_p = \begin{cases} > e_p & \text{スパイクノイズ無} \\ \leq e_p & \text{スパイクノイズ有} \end{cases} \quad (4)$$

ただし、 e_p はセンサの温度特性等からあらかじめ決める値となる．

b) 振動数成分の比較

図-1に示すように、地震応答によるスペクトルと交通振動によるスペクトルでは含まれる振動数帯が相違する．このような、振動数成分の違いを利用して外力判別する方法を提案する．

加速度時系列波形を $\ddot{x}$ として、 p 区間目の加速度時系列応答をフーリエ変換して以下のフーリエスペクトルを算出する．

$$F_{\ddot{x}_p}(\omega) = \int_0^{\omega_{N/2}} \ddot{x}(t) e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

ここで、 ω は角振動数、 $\omega_{N/2} = \pi/dt$ でナイキスト角振動数である．パワースペクトルは、

$$S_{\ddot{x}_p \ddot{x}_p}(\omega) = \frac{|F_{\ddot{x}_p}(\omega)|^2}{2\pi T} \quad (6)$$

パワースペクトルを累積したものを以下のように累積パワースペクトルとして算出する．

$$I_p(\omega) = \int_0^{\omega_{N/2}} S_{\ddot{x}_p \ddot{x}_p}(\omega) d\omega \quad (7)$$

ハイパスフィルタのカットオフ振動数を ω_{el} 設定し、式(7)の累積スペクトルにおいて、 ω_{el} より高周波のスペクトルを以下のように累積する．

$$I_{h,p}(\omega) = \int_{\omega_{el}}^{\omega_{N/2}} S_{\ddot{x}_p \ddot{x}_p}(\omega) d\omega \quad (8)$$

スペクトル全体の中で高周波がどの程度含まれるかを式(7)と式(8)を利用して以下のように算出する．

$$q_{el,p} = \frac{I_{h,p}(\omega)}{I_p(\omega)} \quad (9)$$

閾値として q_{et} を定め以下の判定基準で判別する．

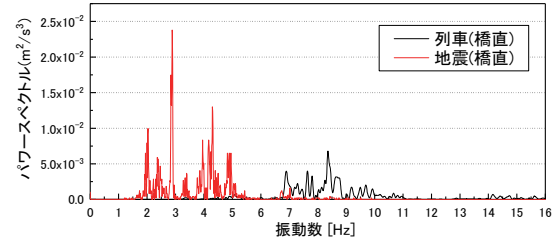


図-1 地震スペクトルの特性

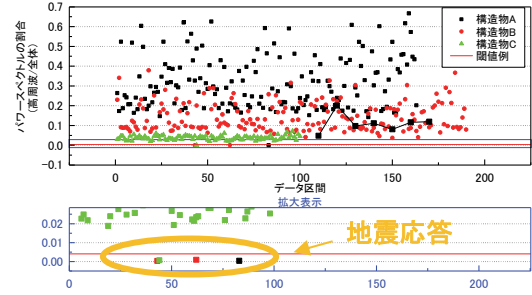


図-2 判定例

$q_{el,p} < q_{et}$ のとき p 区間内の波形に地震外力有

$q_{el,p} \geq q_{et}$ のとき p 区間内の波形に地震外力無

地震外力有と判定された場合は、近接する地震外力有りの区間を全て接続して地震波形を作成し、地震振動解析を行う．閾値については、構造物の特性等を考慮して設定する．上記手法はデジタルフィルタを利用しても実装することができる．

c) 応答の大きさ

橋梁等の荷重に抵抗する構造物において、交通振動や地震による応答は、微動応答に比して大きい．そこで、応答の大きさの相違を利用して微動応答を判別する方法を示す．

加速度波形時系列 $\ddot{x}$ の標準偏差は式(2)で求めることができる．閾値 e_t と定めれば、以下のように判別できる．

$$\text{rms}[\ddot{x}]_p = \begin{cases} > e_t & \text{交通外力有} \\ \leq e_t & \text{交通外力無} \end{cases} \quad (10)$$

より信頼性を向上する場合、判定不能とする区間を e_{qt} で定め、以下のように判定不能判定を行う．

$e_t - e_{qt} < \text{rms}[\ddot{x}]_p < e_t + e_{qt}$ のとき判定不能

交通外力有と判定された場合は、近接する交通外力有りの区間を全て接続して交通（列車）波形を作成し、交通振動解析を行う．図-3に判別例を示す．

d) 非定常性平均

微動波形の利用不可な波形としてドリフトが大きく生じている波形を以下の方法で除去する．

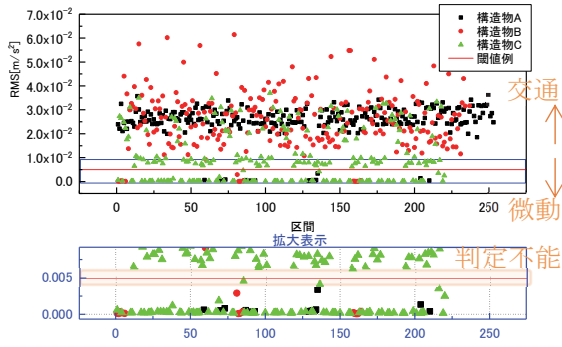


図-3 交通振動と微動応答の判別例

微動加速度波形の p 区間の平均値を以下のように求める。

$$\text{mean}[\ddot{x}]_p = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \ddot{x}_{p+i} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

p 区間内で、区間を2つとりそのサンプル数を l, k として、ドリフト量を以下のように定義する。

$$q_{(l,k),p} = \frac{|\text{mean}[\ddot{x}]_l - \text{mean}[\ddot{x}]_k|}{(k-l)m} \quad (12)$$

一般的に波形の最初 l 個と最後 k 個とするのがよい。閾値を q_{dt} 利用して以下のように判定を行う。

$$q_{(l,k),p} = \begin{cases} > q_{dt} & \text{ドリフト無} \\ \leq q_{dt} & \text{ドリフト有} \end{cases} \quad (13)$$

ただし、 q_{dt} はセンサの温度特性等からあらかじめ決める値である。ドリフト有の波形については、利用しないととも、波形の確認を行いセンサの故障等も含めて対処する。

e) 微動応答の大きさ

増水や強風時の応答は、列車振動に対しては、強風時の応答のように2オーダー程度低い応答になるが、通常の常時微動に対しては大きな応答が生じる。微動が大きくなればS/N比が大きくなり、また、構造物の特性が明確に表れるようになり、信頼性の高い解析を行うことが可能となる。

微動加速度波形が得られた場合、連続した時間軸において式(2)を利用して標準偏差を算出する。基準となる振動レベルを e_{at} と e_{bt} を決め、以下のような判定を行う。

$$\text{rms}[\ddot{x}]_p = \begin{cases} < e_{at} & \text{利用不可} \\ > e_{at}, < e_{bt} & \text{常時微動} \\ \geq e_{bt} & \text{外力有} \end{cases} \quad (14)$$

常時微動判定となれば、常時微動を利用した解析を行う。また、外力有の場合は、増水や強風時の応答解析を行う。閾値 e_{at} はセンサの自己ノイズや量子

化の解像度等のシステム性能を考慮して設定を行う。閾値 e_{bt} はフィールドにおける環境や構造物特性を評価して決める。

4. 卓越振動数抽出方法

(1) 手法の目的

構造物のヘルスマニタリングにおいてはセンサデータから構造物の状態が変化したことを検知する方法が必要となる。近年ではオートエンコーダーなど深層学習を応用した AI 技術を適用して異常を検知をする手法の研究があり、構造特性を考慮したシミュレーションモデルを想定したモニタリング手法も提案されている。応答のみから異常を検知する上では、構造物の固有振動数の変化から健全度を判定する方法が考えられる。しかし、実際の構造物で得られる応答は多自由度応答であり、そのスペクトルには複数の卓越振動数がみられる。また、卓越する振動数は外力の状況において、どのピークが卓越するかが変化する。このため、特定の振動数範囲を探索して振動数を決める場合は、外力の変化および健全性の変化によって振動数が変化することに対して追従できない可能性がある。そこで、多自由度応答から複数の卓越振動数を評価するための振動数範囲の分割方法とその評価方法として、算出した累積スペクトルを回帰することで分割する方法（以下、回帰クロス法と呼ぶ）を提案する。

(2) 手法の概要

連続的に計測された加速度応答波形から継続時間 T の波形 $\ddot{x}$ を切り出す。切り出した微動波形をフーリエ変換し以下のパワースペクトル密度を計算する。

$$\Phi(\omega) = \frac{1}{T} |F(\omega)|^2 \quad (15)$$

ここで、 ω ：外力の角振動数。

各振動数に対してパワースペクトル密度の大きさが自己ノイズ以上の振動数を抽出し、それ以外の振動数は 0 とした $\bar{\Phi}(\omega)$ とする。自己ノイズの値はセンサ性能に応じて設定するが、デフォルトとして 10^{-10} としている。抽出された振動数のパワースペクトル密度を累積し、累積パワースペクトルを文献3)の方法を利用して以下のように累積する。

$$\bar{I}_x(\omega) = \frac{\int_{\omega_l}^{\omega} h \frac{\Phi}{\omega^4} d\omega}{I_x(\infty)} \quad (16)$$

$$\bar{I}_x(\omega) = \frac{\int_{\omega_l}^{\omega} h \frac{\Phi}{\omega^2} d\omega}{I_x(\infty)} \quad (17)$$

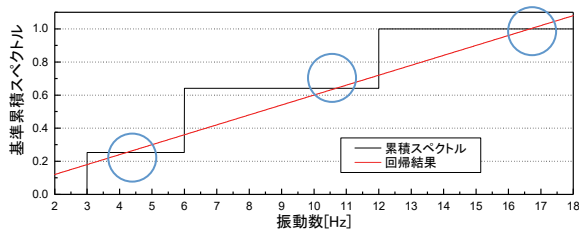


図-4 累積スペクトルの回帰結果

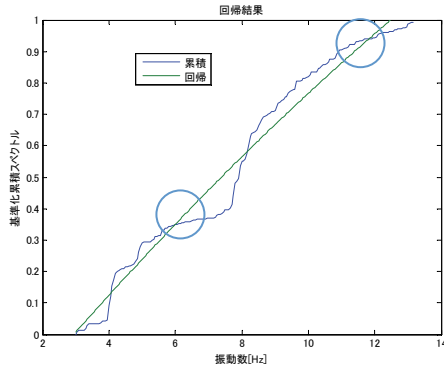


図-5 実際の微動波形

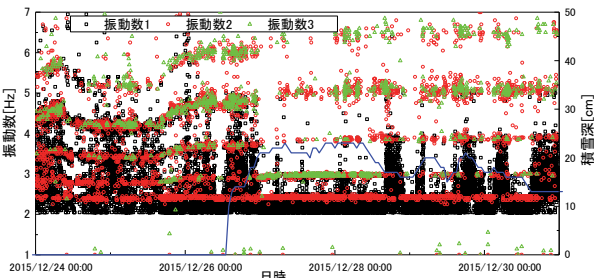


図-6 振動数の評価事例

ここで、 ω_l および ω_h は外力特性やセンサ性能等から決まるバンドパスフィルタで、累積スペクトルの形状から適宜決定する。以下の正規化を利用する。

$$I_{mean}(\omega) = \frac{I_x(\omega) + I_y(\omega)}{2} \quad (18)$$

算出した累積スペクトルに対して以下の式を適用して回帰を行う。

$$I_{mean}(\omega) = \alpha\omega^2 + \beta\omega \quad (19)$$

関数の性質上、高振動数成分が多い場合パラメータ α が正（下に凸）、低振動数成分が多いと α が負（上に凸）の形状になる。中立的な場合は直線回帰となる。累積スペクトルと回帰結果の交点を求めるが、累積スペクトルに対して回帰式からの差を求めた場合、面積がマイナスからプラスに転じる振動数がスペクトルの谷となり、プラスからマイナスに転じる振動数がスペクトルにピークとなる。

(3) 手法の適用事例

まずは、3Hz、6Hz、12Hz のピークを持つサイン波の重ね合わせ波形を利用する。波形から得られる

パワースペクトルを式(18)を利用して累積すると図-4 のようになるが、これに式(19)を利用して回帰を行った結果を合わせて示している。赤枠で囲った交点がスペクトルの谷であることがわかり、この振動数でスペクトルを分割する。この分割点を境界にしてそれぞれの振動数範囲で文献3)などの手法で卓越振動数を決める。次に文献6)において実際の応答に適用した事例であるが、図-5 には、橋脚天端に設置した加速度計による橋軸直角方向の波形およびパワースペクトルから求めた累積スペクトルを示した。なお、 ω_l は 3Hz、 ω_h は 20Hz としている。回帰スペクトル法を長期の微動波形に適用すれば、図-6 に示すような複数の卓越振動数を指標とできる。

4. 結論

以下に結論を整理する。

- ・応答加速度のみから構造物に入力された外力を判別する手法を提案した。
- ・加速度応答から得られる累積スペクトルを回帰して分割することで、複数の卓越振動数を客観的かつ自動で抽出する方法を提案した。

参考文献

- 1) 鋼構造工学委員会鋼橋の性能照査型維持管理とモニタリングに関する調査研究小委員会：鋼橋の性能照査型維持管理とモニタリング，土木学会，2019。
- 2) モニタリングシステム技術研究組合：土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン（案），2019.12，<<https://raims.or.jp/>>（入手 2020.4.13）
- 3) 阿部雅人，藤野陽三：不規則外力に対する加速度記録からの最大応答変位推定，土木学会論文集 A，Vol.66，No.3，pp.477-490，2010。
- 4) 渡邊諭，佐溝昌彦，淵脇晃，杉山友康：微動から得られる固有振動数を用いた増水時の橋脚健全度評価，鉄道総研報告，Vol.21，No.1，2007。
- 5) 杉崎光一，増井洋介，堀合聡，阿部雅人，阿部允，島村誠：傾斜センサを用いた洗掘モニタリングシステムの開発，第14回鉄道力学シンポジウム，2010。
- 6) 竹谷晃一，吉田純司：一般自動車と動画像分析を活用した低速走行車に対応した B-WIM の提案，鋼構造年次論文報告集，Vol.27，No.85，pp.665-672，2019。
- 7) 野村泰稔，井田一晟，宮地翼，宮本学，菅真人：深層学習に基づく配管バルブの健全性モニタリング，土木学会論文集 F6，Vol.72，No.2，pp.I_183-I_190，2016。
- 8) 樺建典，鈴木修：橋脚の健全度モニタリングが可能な新しい洗掘検知装置の開発，JR EAST Technical Review No.45，pp.53-58，2013。