

東京大学工学部 学生員 長山智則

東京大学大学院工学系研究科 正会員 阿部雅人

東京大学大学院工学系研究科 フェロー 藤野陽三

1. 背景と目的 高精度の実橋動特性同定は、効率的な維持管理や健全性評価をはじめとする構造ヘルスマニタリングの基礎を成すものである。従来も試みられてきたが、データ処理、動特性同定手法にそれぞれ問題があり、十分な結果を得られていない。

北海道室蘭市湾口の白鳥大橋において供用前の1998年6月、北海道開発局により常時微動計測が行われた。この計測は、①計測周波数が高い(100Hz)、②計測時間は100時間を超え、広い風速範囲での計測を含む、③鉛直方向加速度計を19点設置した多点計測である、という動特性同定に有利な条件を備えている。

このデータを利用して低次モード特性の同定がなされた¹⁾。そこで高次モード特性同定および風速、振幅レベルによる動特性変化の解明をすることで高精度の動特性同定を図った。

2. 方法 まず、次の2つの手法で動特性を同定する。①常時微動計測結果を重ね合わせ、自由減衰応答波形を作成する、②得られた自由減衰応答波形から固有値問題によりモード特性を導出する。次に、③振幅レベルによる動特性の変化を解明する。

[1]自由減衰応答波形の作成 Random Decrement 法²⁾を用いる。初期変位が a_0 である場合、ランダム外力下での応答 $y(t)$ は、①初期変位 a_0 、初速度 0 の自由減衰応答 $y(t)_1$ 、②任意の初速度、初期変位 0 の自由減衰応答 $y(t)_2$ 、③初期変位 0、初速度 0 でランダム外力を受ける応答 $y(t)_3$ の線形和と考えられる。初期条件を満たす波形を多数重ね合わせ平均すると $y(t)_2$ および $y(t)_3$ は 0 に漸近し、 $y(t)_1$ だけが残る。常時微動波形(図1)から初期条件を満たす波形を多数切り取り重ね合わせることで自由減衰応答 $y(t)_1$ を得た(図2)。ここでは簡便のため、 $y(t)$ を変位波形としたが、本研究では計測加速度波形について同様に重ね合わせた。なお、重ね合わせサンプル数は、波形の安定する 5000 個に、初期条件 a_0 は加速度応答 RMS の 0.8 倍とした。

[2]多自由度モード特性の導出³⁾ 得られた自由減衰応答をモード毎の非連成振動の線形和として(1)式に行列表示する。ここに $[x]$:自由減衰応答、 $[P]$:モード形、 $[A]$:固有振動数 ω_j およびモード減衰比 ξ_j からなる行列、である。

$$[X]=[P][A] \quad (1)$$

次に Δt 秒後、 $2\Delta t$ 秒後の応答をそれぞれ $[Y]$ 、 $[Z]$ とすると、

$$[Y]=[Q][A] \quad (2)$$

$$[Z]=[R][A] \quad (3)$$

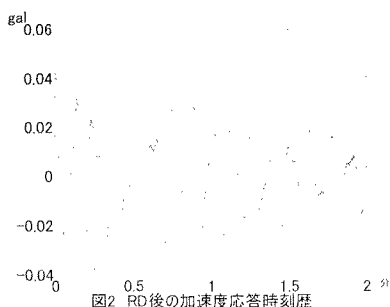
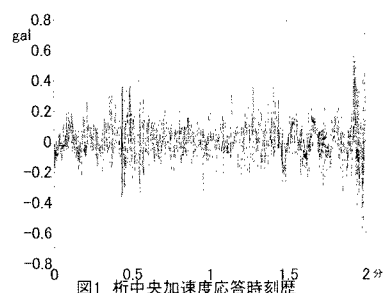
ただし、 $[P]$ 、 $[Q]$ 、 $[R]$ を構成する列ベクトル p_j 、 q_j 、 r_j はそれぞれ、

$$q_j = p_j \exp(-\xi_j \omega_j + i \omega_j \sqrt{1-\xi_j^2} \Delta t) = p_j \exp(\lambda_j \Delta t) \quad (4)$$

$$r_j = q_j \exp(\lambda_j \Delta t) = p_j \exp(2\lambda_j \Delta t) \quad (5)$$

と表される。4つの行列 $[\Phi] = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$ 、 $[\hat{\Phi}] = \begin{bmatrix} Y \\ Z \end{bmatrix}$ 、 $[\Psi] = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}$ 、 $[\hat{\Psi}] = \begin{bmatrix} Q \\ R \end{bmatrix}$

を使い、



キーワード：構造ヘルスマニタリング、常時微動計測、モード特性同定、付加回転剛性、振幅レベル依存性
連絡先：〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL03-5841-6099 FAX03-5841-7454

$$\begin{bmatrix} \hat{\Phi} \\ \Phi^{-1} \end{bmatrix} \Psi_j = \exp(\lambda_j \Delta t) \Psi_j \quad (6)$$

なる関係が得られる。(6)式より固有値問題としてモード特性を得ることができる。なお、高次モード特性同定のため、自由減衰応答にバンドパスフィルターをかけた。

[3]振幅レベルによる動特性変化の解明⁴ 加速度応答 RMS レベルにより常時微動データを 10 段階に分け、それぞれ[1], [2]の方法で動特性を同定した。振幅レベルによる動特性変化を、主塔中央径間側の支承回転摩擦に求める。まず、桁の運動エネルギー T 、位置エネルギー V を振幅レベルの最も高い場合のモード形により表す。摩擦力は振幅レベルとともに相対的に小さくなる。回転剛性として近似すると、振幅レベルと供に小さくなるはずである。回転剛性の値 k_θ を仮定し、主塔中央径間側に付加したモデルを考える。回転剛性の位置エネルギー V を k_θ により表す。系のエネルギーを用いてラグランジュの運動方程式を立てこの固有値問題を解くと新しいモード形、振動数が得られる。このモード形と低振幅時のモード形のずれが最小となる k_θ を探した。

3. 結果 19 次モードまでのモード特性を同定できた。モード振動数、減衰比の例を表 1 に、モード形を図 3 に示す。また、振幅レベルにより、モード

表 1 同定振動数、減衰比の例

モード	振動数(Hz) 0内は設計値	モード減衰比
1 次	0.132(0.115)	0.010
2 次	0.155(0.150)	0.009
8 次	0.886	0.042
19 次	3.78	0.020

形、モード振動数、モード減衰比に変化が見られた。図 4、図 5 には振幅レベルと 1 次振動数、減衰比の関係を示す。動特性変化を摩擦力による影響と考え、等価剛性 k_θ を同定した結果を振幅レベルに対してプロットすると図 6 のように逆比例の曲線で近似できた。摩擦力を仮定すると、 k_θ は振幅レベルに反比例するが、これと矛盾しない同定結果が得られた。

4. 結論 常時微動計測より、高次モードまでの動特性を同定することができた。また、振幅レベルによる動特性の違いを支承における等価回転剛性として説明した。今後は、等価減衰、剛性を組み合わせ、動特性変化を詳細に解明したい。

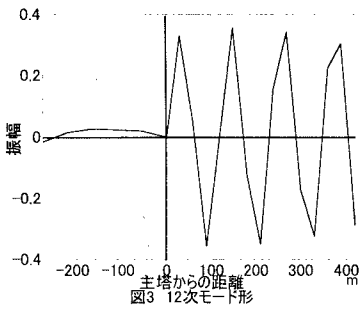


図3 12次モード形

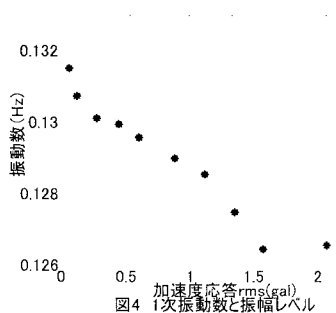


図4 1次振動数と振幅レベル

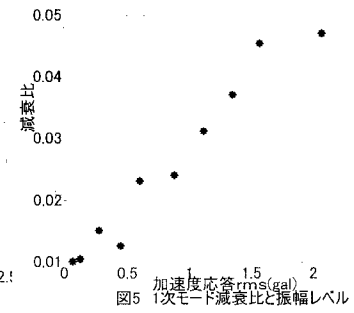


図5 1次モード減衰比と振幅レベル

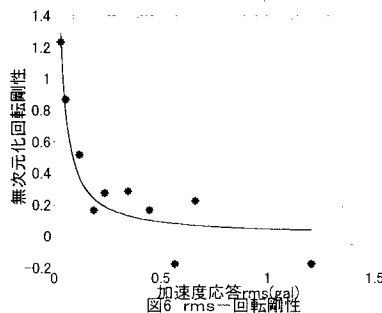


図6 rms-回転剛性

【謝辞】北海道開発局の三田村氏には数々の有益な助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。
 【参考文献】¹ 梶村徹:常時微動計測に基づくモード特性同定手法の構築, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, 1999.9
² Cole: On-line Failure Detection and Damping Measurement of Aerospace Structures by Random Decrement Signatures, NASA CR-2205, 1973.3
³ Ibrahim 他: A Method for the Direct Identification of Vibration Parameters From the Free Response, shock and Vibration Bulletin 47,1977
⁴ Dowell :On Some General Properties of Combined Dynamical System, Journal of Applied Mechanics