

東京大学工学院工学系研究科 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 構造物の増加と多様化の中で、効率的かつ確実に構造物の健全性や荷重を評価する手法が必要である。振動計測結果には重要な情報が現れているはずで、その利用は今後の大きな課題である。例えば、従来の方法では、高次モードの動特性同定が困難であり、また複素モードを有する非比例減衰系の構造同定を扱えない、などの問題がある。

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。

このデータから低次モード特性の同定がなされたり、そこで高精度な高次モード特性同定手法および非比例減衰を考慮した構造同定手法を提案し、白鳥大橋の振動計測結果に適用した。

2. 方法と結果 まず、振動計測結果から動特性を同定する。[1]常時微動応答を重ね合わせることで自由減衰応答を作成し、[2]得られた自由減衰応答からモード特性を導出する。次に、動特性から構造モデルを得る。[3]振幅レベルによる動特性の変化を調べ、[4]構造減衰、剛性の変化として同定する。

[1]自由減衰応答の作成 Random Decrement 法²⁾を用いる。初期条件 a_0 を満たす応答 $y(t)$ を多数重ね合わせ平均するとランダム応答成分が除去され、自由減衰応答が得られる。本研究では常時微動加速度応答(図 1)について処理した。初期条件を満たす応答を多数サンプリングし、平均化することで自由減衰応答を得た(図 2)。なお、重ね合わせサンプル数は 5000 個とし、初期条件 a_0 は加速度応答 RMS の 0.8 倍とした。

[2]モード特性の導出³⁾得られた自由減衰応答を非連成モード振動の和として(1)式に行列表示する。ここで[X]:自由減衰応答行列、[P]:モード形行列、[Λ]: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。

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

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

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

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

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 $[\Phi]=\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$, $[\hat{\Phi}]=\begin{bmatrix} Y \\ Z \end{bmatrix}$, $[\Psi]=\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}$, $[\hat{\Psi}]=\begin{bmatrix} Q \\ R \end{bmatrix}$ を使い、

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

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。ここで次の時刻歴を用いて見かけ上の計測点数を増やし、モード特性同定の解像度向上、高次モード同定を図った。すなわち、 N 個の計測点中、 i 番目($i \leq N$)の計測点における応答を x_i とする時、

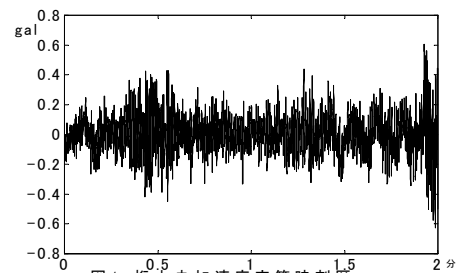


図1 桁中央加速度応答時刻歴

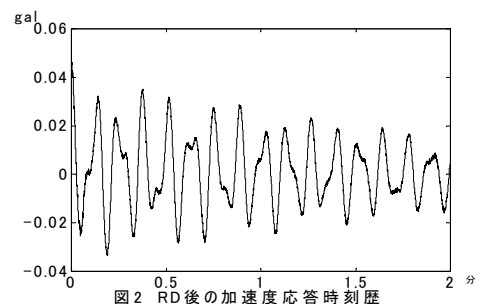


図2 RD後の加速度応答時刻歴

キーワード：非比例減衰、構造同定、モード特性同定、常時微動、長大吊橋

連絡先：〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL03-5841-6099 FAX03-5841-7454

$$x_{i+mN}(t) = x_i(t + \tau_m) \quad (7)$$

により見かけ上の計測点の応答を定義した．これにより，鉛直たわみについて 19 次までモード特性を同定できた(表 1)．

[3]振幅レベルによる動特性の変化 常時微動データを加速度応答 RMS により 10 段階に分類し，動特性を同定したところ，振幅レベル依存性が見られた(図 3)．モード形(特に位相)，減衰比にも振幅レベル依存性が見られた．

[4]非比例減衰系の構造逆解析 振幅レベル依存性の原因として，モード形位相の変化および物理的考察から，支承と空気力の影響が挙げられる．そこで基準となる振幅レベル(A)のモード特性に対して，支承と空気力に相当する剛性および減衰が変化することで異なる振幅レベル(B)のモード特性が得られると考える．支承と空気力に相当する付加剛性[K']付加減衰[C']を仮定し，運動方程式を立てる．

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (8)$$

状態変数表示し，行ごとに定数倍すると次式が得られる．

$$[[I] - [C']T][s'] - [s] + [K']T[z] = 0 \quad (9)$$

ここで[K'],[C']はそれぞれ[K],[C]を起源とする行列，[s]は対角成分に

$$s_r = -h_r \omega_r + i\sqrt{1 - h_r^2} \omega_r \quad (10)$$

を持つ行列で h_r ， ω_r は r 次減衰比，固有円振動数である．[s']は付加剛性，減衰作用後の[s]である．式(9)の固有値問題より新しいモード特性が得られるので(B)のモード特性との差を誤差関数とし，これが最小となる[K']，[C']を探す．なお，行列[C'],[K']を得るために，近似([C] ≪ [M])を用いている．

簡単な非比例減衰系モデルに本手法を適用し，付加剛性，付加減衰を検出可能であることが確かめられたので，白鳥大橋に適用した．最小値の探索にはシンプレックス法を用いた．図 4，図 5 に同定された空気力に相当する付加剛性，付加減衰を振幅レベルに対してプロットした．破線で風洞実験結果より求められる空力剛性，空力減衰をあわせて示した．空力減衰はよく一致する．空力剛性は風洞実験値と少し差がある．

3. 結論と今後の課題 常時微動計測から高精度で高次までモード特性を同定する手法を確立できた．また，同定モード特性の振幅レベル依存性を，非比例減衰を考慮した構造逆解析手法により支承，空気力に相当する剛性，減衰の変化として検出した．空気力を実橋において逆解析により求めた例は珍しく，意義深い．

問題点として，誤差関数が極小値を多く持ち最小値の探索が困難であることが挙げられる．今後誤差関数に感度の情報を加えるなど改善を図りたいと考えている．

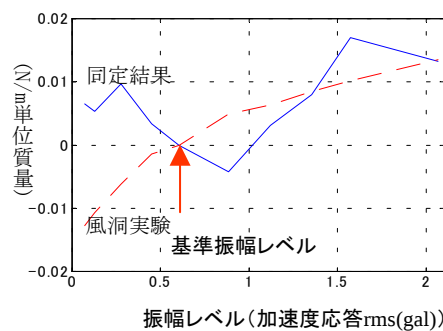


図4 空力剛性

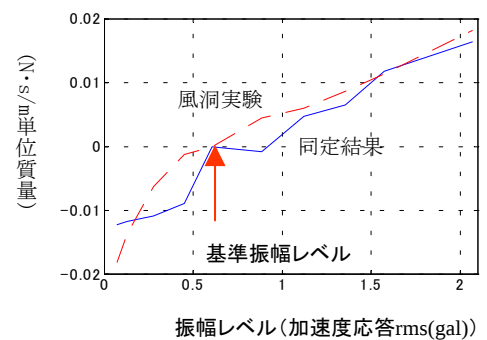


図5 空力減衰

表 1 同定振動数，減衰比の例

モード	振動数(Hz) ()内は設計値	モード 減衰比
1 次	0.130(0.115)	0.022
2 次	0.152(0.150)	0.014
16 次	2.866	0.081
19 次	3.824	0.126

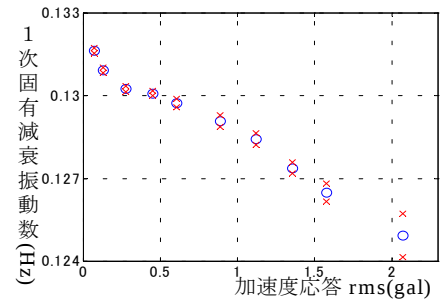


図 3 振動数の振幅レベル依存性
(鉛直たわみ 1 次モード)

【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