

I - B 255 常時微動計測に基づくモード特性同定手法の構築

東京大学大学院 学生会員 梶村 徹 正会員 阿部 雅人 フェロー 藤野 陽三
北海道開発局 室蘭開発建設部 正会員 柳原 優登 開発土木研究所 正会員 佐藤 昌志

1. はじめに 実橋常時微動からモード特性を精度よく同定するにあたっては、測定時間、測定点数などの計測に関する問題だけでなく、同定手法の信頼性の問題がある。そこで本研究では、外力のランダム性の影響が消去可能で近接モード応答を含むデータにも適用できる、時間領域での新しいモード特性同定手法を提案した。これを用いた実橋常時微動解析結果から風速によるモード特性の変化を検討し、その要因について考察した。

2. 白鳥大橋の常時微動計測 白鳥大橋は北海道室蘭市の湾口を結ぶ、中央径間 720m の鋼箱桁吊橋である。白鳥大橋における常時微動計測は、供用開始前となる平成 10 年 6 月に北海道開発局によって行われた。従来の実橋常時微動計測に比べた利点としては、次を挙げることができる。①計測延べ時間が 100 時間以上と長時間であるため、計測時間内で風速などの環境条件が多様に変化しており、環境条件によるモード特性の変動評価が可能である。②桁鉛直モード計測時にはスパンの約半分に 19 点センサーが配置されており、従来の長大橋常時微動計測に比べセンサー数が多く、高次までのモード形を同定することが可能である。

3. 同定手法 その概要を図 1 に示す。

[1] 重ね合わせによる自由減衰応答の作成：この手法は Random Decrement 法¹⁾を基礎としている。ある時点での加速度 a_0 である場合のその後の応答は、①初期加速度 a_0 による自由減衰応答②以降の外力による応答の線形和と考えられる。外力を定常白色雑音と仮定した場合、初期加速度 a_0 の時系列常時微動応答サンプルを多数重ね合わせることで②が消去されることから、①の自由減衰応答成分を取り出すことができる。本研究では、重ね合わせサンプル個数を、重ね合わせ波形が安定する 5000 とした。また多自由度系を対象としているため、 a_0 の値は対称モードについては中央スパンの 1/2 点、逆対称モードについては中央スパンの 1/4 点での計測値で定めた。重ねあわせにより①が消去されないよう、 a_0 の値は対象となる常時微動応答の加速度 RMS の 0.8 倍とした。

[2] 固有値問題による多自由度モード特性の導出²⁾

[1] で得られる多自由度自由減衰応答を、各モードの自由減衰応答の線形和に展開する。すなわち、

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{r=1}^{2N} \exp(-\xi_r \omega_r + i \omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2} t) \{\Psi_r\} \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{x}(t)$:時刻 t の常時微動応答 $\omega_r, \{\Psi_r\}, \xi_r$: r 次固有振動数、モード形、モード減衰比 N :モード次数 である。

(1) を行列表示したものを (2)、(2) の $[\mathbf{x}], [\Psi]$ について時刻を全体に Δt ずらした行列を (3) の $[\hat{\mathbf{x}}], [\hat{\Psi}]$ とし、 $[\mathbf{A}_r]$ を (4) のように定義する。

$$[\mathbf{x}] = [\Psi] [\mathbf{A}] \quad (2)$$

$$[\hat{\mathbf{x}}] = [\hat{\Psi}] [\mathbf{A}] \quad (3)$$

$$[\hat{\mathbf{x}}] = [\mathbf{A}_r] [\mathbf{x}] \quad (4)$$

(4) に左から $[\mathbf{A}_r]$ をかけることにより $[\mathbf{A}_r]$ を (5) のように求められ、(6) の固有値問題解がモード特性となる。

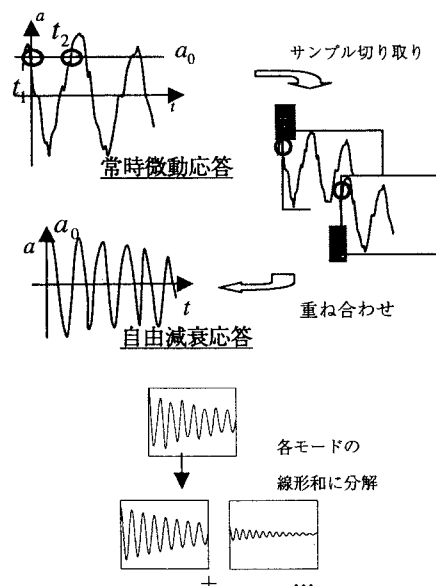


図 1 本手法の概念図

Key Words: 常時微動計測, モード特性の同定, 自由減衰応答, 多自由度モード展開, モード特性の風速変動

連絡先: 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学 Tel: 03-3812-2111 内線 6099 Fax: 03-5689-7292

$$[A_r] = [\hat{x}][x]^* = [\hat{x}][x]'([x][x]')^{-1} \quad (5)$$

$$[A_r]\{\Psi_r\} = e^{i\omega_r t} \{\Psi_r\} \quad (6)$$

多自由度のモード特性を同時に算出することから、モードが近接している場合でも適用可能である。

4. 同定結果 風速によるモード特性の変動を見るために、常時微動データを橋軸直角方向風速によって10ランクにわけ、それぞれのランク内で3.に示した手法によりモード特性を求めた。なお、対象とした時間帯の最大風速は15分平均で14.8m/sであった。同定に当たっては、同定値のばらつきをみるために5000個の重ね合わせサンプルの選び方を変えて同定を繰り返し、それぞれ10個の同定値を得た。

桁鉛直モードについて結果の一例を示す。表1、図2のように、変位振幅RMS約1cmとなる風速9.4m/s以上の風速域において5次モードまで同定

できた。ランク内での同定値の変動係数は卓越振動数の場合0.01以下、モード減衰比の場合0.1程度と、同定値のばらつきは小さい。また、別におこなわれた強制振動試験結果ともよく整合している³⁾。次に風速の変化に伴うモード特性の変化を調べた結果、図3のように卓越振動数は風速の増大と共に若干低下する傾向にあることがわかった。この傾向は、風洞実験値に基づく自励空気力による影響としては説明できない。図4のように小振幅域におけるモード減衰比についても、同様に自励空気力では説明できない現象が生じている。したがって設計で想定された以外に、付加的な非線形剛性・減衰の存在が考えられる。現在、伸縮装置、ウインドダンプなど桁連結部装置における摩擦力が原因ではないかと考えており、桁連結部の回転剛性を同定卓越振動数・モード形に基づいて逆解析することを試みているところである。

5. 結論と今後の課題 本研究で提案したモード特性同定手法により、モード減衰比や高次モード形を含むモード特性を高い精度で求めることができた。今後は同定されたモード特性に基づき摩擦力による剛性を逆解析するのをはじめとして系の性能評価をおこなうとともに、空気力評価、さらには健全度モニタリングへの応用を図りたいと考えている。

【謝辞】振動実験結果のデータについて便宜を頂いた(株)新日本製鐵の坂本良文氏、北海道開発コンサルタントの菅原登志也氏に深い感謝の意を表します。【参考文献】1) Cole:On-line Failure Detection and Damping Measurement of Aerospace Structures by Random Decrement Signatures,NASA CR-2205,1973.3 2) S.R.Ibrahim 他:A Method for the Direct Identification of Vibration Parameters From the Free Response,Shock and Vibration Bulletin 47,1977 3) 梶村徹:常時微動試験に基づく構造モニタリング手法の確立,東京大学工学部土木工学科卒業論文,1999.3

表1 同定値の平均・標準偏差(平均風速10.6m/sのランク)

モード	卓越振動数		モード減衰比(対数減衰率)	
	平均(Hz)	変動係数	平均	変動係数
1次	0.129	0.0030	0.015(0.09)	0.105
2次	0.150	0.0039	0.036(0.23)	0.109
3次	0.221	0.0007	0.005(0.03)	0.050
4次	0.310	0.0049	0.030(0.19)	0.117
5次	0.446	0.0010	0.006(0.04)	0.260

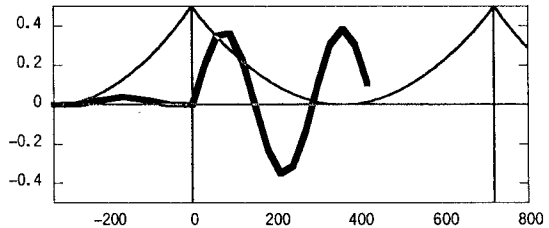


図2 同定モード形の一例（桁鉛直5次モード）

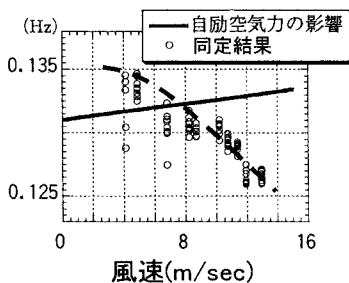


図3 卓越振動数の風速による変動（桁鉛直1次モード）

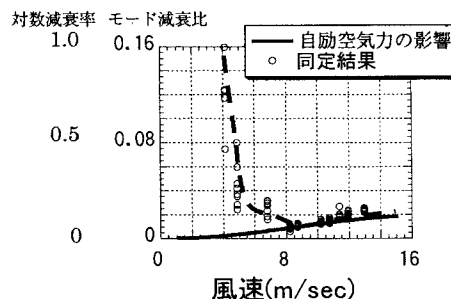


図4 モード減衰比の風速による変動（桁鉛直1次モード）