

BAYOMA による水平 2 方向載荷を受ける RC 柱の固有振動モードの同定

早稲田大学 学生会員 ○小嶋 啓介, 佐藤 裕紀

早稲田大学 正会員 秋山 充良

University of Liverpool Yan-long Xie, Siu-Kui Au

1. はじめに

大地震発生後における構造物の早期復旧のための迅速な健全度評価は重要な課題である。現行の目視点検に代わる手法として、構造物の損傷による剛性低下を応答測定によってとらえる手法の開発が進められてきた。中でも風や人々の活動による常時微動 (ambient vibration) を用いる手法は加振を必要とせず、簡易に測定できるため、これによる固有モードの同定が実現されれば、最も合理的な手法になり得る。一方、常時微動は振幅が極めて小さく、測定時のノイズの影響を受けやすいため、固有モードの同定を行う際には洗練された逆解析手法も必要となる。

本研究では、常時微動測定と Au によって提案された BAYOMA²⁾を用いることにより、正負交番載荷を受ける RC 柱で生じる固有振動数の低下と柱の損傷度の関係に関する基礎データを得る。本研究では、特に、水平 1 方向載荷と 2 方向載荷を受ける場合に、固有振動数の低下の様子にどのような違いが表れるのかを考察する。

2. Bayesian Operational Modal Analysis (BAYOMA)²⁾

ベイズ推定の考え方に基づくと、事後の確率密度関数は式(1)で表される。ここで、 θ は観測データ D から得られるモードパラメータベクトル、モデル M は測定データ D と θ を関連付けるものとする。

$$p(\theta | D, M) = p(D | M)^{-1} p(D | \theta, M) p(\theta | M) \quad (1)$$

$$F_k = \sqrt{\frac{\Delta t}{N}} \sum_{j=0}^{N-1} \hat{x} \exp[-2\pi i j k / N] \quad (2)$$

$$p(\theta | D, M) \propto \exp[-L(\theta)] \quad (3)$$

$$L(\theta) = nN_f \ln \pi + \sum_k \ln |E_k(\theta)| + \sum_k F_k^* E_k(\theta)^{-1} F_k \quad (4)$$

Au は FFT に基づく、ベイズ推定によるモード同定手法を高速化したアルゴリズム (BAYOMA) を提案した。測定データ $D = \{F_k\}$ は FFT を用いた式(2)で表される。

ここで、 $i^2 = -1$, Δt はサンプリング間隔である。 $k=1, \dots, N_q$ $= (N/2+1)$ (N_q : 整数) に対して、 N_q はナイキスト振動数に

$$E_k(\theta) = E[F_k F_k^*] = \Phi H_k(\theta) \Phi^T + S_e I_n \in C^{n \times n} \quad (5)$$

対応する。本手法では検討対象とする共振振動数付近のフーリエデータのみを用いる。式(3)のモードパラメータベクトル θ には固有振動数 f_i , 減衰比 ζ_i , 各モードのパワースペクトル行列 S , 予測誤差のパワースペクトル密度 S_e に加え、モード形状 ϕ_i も含まれる。 θ は検討対象とする振動数帯にある振動モードのパラメータを表す。十分なサンプリング周波数と測定データに対して、同定したパラメータ θ と事後の確率密度関数には式(3)~(5)の関係がある。式(5)において I_n は単位行列、 $H_k(\theta)$ はモード応答により理論的に誘導されるパワースペクトル行列である。共振振動数付近のフーリエデータを用いて、 $L(\theta)$ を最小化するようなパラメータを同定結果として推定する。

3. 実験および解析結果

本研究では、水平 2 方向載荷により RC 柱に段階的に損傷を与え、常時微動測定から同定した固有モードと固有振動数の変化を観察する。その際、全く同じ諸元を有する供試体を二つ用意し、一方は水平 1 方向の正負交番載荷を行う。両者の結果を比較することで、水平 2 方向載荷が RC 柱の固有振動数の低下に及ぼす影響を考察する。

載荷パターンは、引張鉄筋の降伏時の変位を δ_y として、1 方向載荷の場合には、 $\pm \delta_y$, $\pm 2\delta_y$, および $\pm 4\delta_y$ の位置で正負交番載荷を 1 回与えた。2 方向載荷の場合には、 $\pm \delta_y$ で正負交番載荷を 1 回与えた後、供試体を 90 度回転して $\pm \delta_y$ の正負交番載荷を与え、再び -90 度回転して元に戻した後、 $\pm 2\delta_y$ の正負交番載荷を与え、 $\pm 4\delta_y$ までこの作業を繰り返した。本論文では紙面の都合上 2 方向載荷の結果のみを示す。図-1 に荷重変位関係を示す。ここで「 $\cdot$ 」は 2 方向目の載荷を示す。また、無損傷時から損傷段階ごとに、その除荷時に常時微動測定を行い、BAYOMA に

キーワード 常時微動, ベイズ推定, 振動モード同定, Bayesian Operational Modal Analysis, 水平 2 方向載荷

連絡先 〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学創造理工学部社会環境工学科 TEL 03-5286-2694

よる振動モードの同定を行った。図-2 に常時微動測定を行う際の加速度センサの取り付け位置を示す。常時微動の定常性を仮定し、図中に星印で示した固定点と丸印で示した移動点 31 カ所の合計 32 計測点において、サンプリング周期 1000(Hz) で 10 分間の常時微動測定を行った。固定点には 1 軸加速度センサを 3 つ、移動点には 3 軸加速度センサを用いた。

常時微動測定結果に基づく各損傷段階の代表的なパワースペクトルをそれぞれ図-3 に示す。パワースペクトルは式(5)の中央の辺である PSD 行列により得られる。スペクトル図からはノイズの影響を含む複数の共振部が確認できる。このように、スペクトル図のみでは固有モードの同定は困難である。

そこで、スペクトルの共振部を固有モード同定の初期値として BAYOMA を適用し、各モード形状を同定する。鉄筋降伏時のモード図を図-4 に示す。また、同定された固有振動数と減衰比を損傷段階ごとに $2\delta_y'$ まで表-1 に示す。鉄筋降伏以降の 1 方向载荷と 2 方向载荷の損傷段階ごとの固有振動数の変化率を図-5 に示す。2 方向载荷による固有振動数の変化は、1 方向载荷と同様であることが確認できる。

4. まとめ

ベイズ推定に基づくモード同定手法を用いると、軽微な損傷であっても、固有振動数の低下を捉えられる可能性が示された。また、2 方向载荷を受ける場合でも、損傷に伴う固有振動数の低下は 1 方向载荷と同程度であった。

今後、構造諸元を変更した RC 柱や震動実験等を行い、地震により損傷を受ける RC 柱に生じる固有振動数の低下に関する知見を蓄積したい。

表-1 同定された固有振動数と減衰比

損傷段階		無損傷	δ_y	δ_y'	$2\delta_y$	$2\delta_y'$
载荷方向	振動数(Hz)	10.89	8.41	7.48	6.07	5.61
	減衰比(%)	3.31	4.54	2.50	1.55	1.82
载荷直角方向	振動数(Hz)	9.04	7.84	7.71	6.51	5.92
	減衰比(%)	3.52	2.59	2.10	3.18	2.27

参考文献

- 1) 篠田昌弘, 真井哲生, 江原季映, 中島進, 阿部慶太, 藤田圭一, 土屋宗典: 小型起振器と光ファイバセンサを用いた鉄道橋梁下部構造物の振動計測, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.69, No.1, 40-56, 2013
- 2) Siu-Kui Au: Operational Modal Analysis Modeling, Bayesian Inference, Uncertainty Laws, Springer, 2017

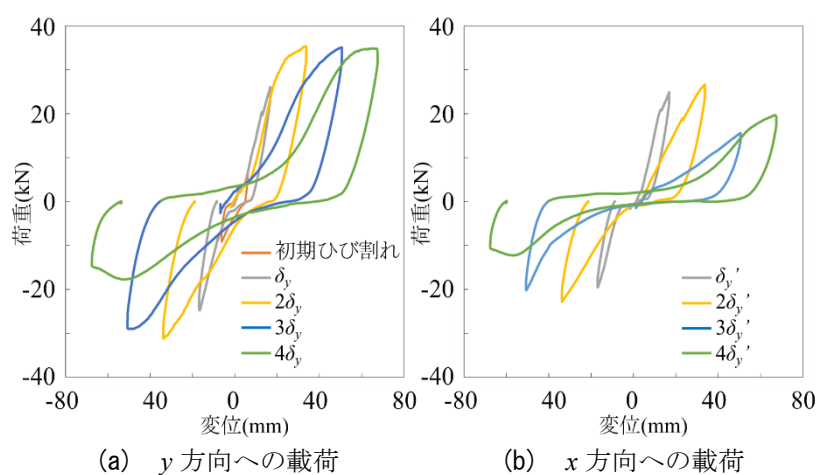


図-1 水平荷重-水平変位関係

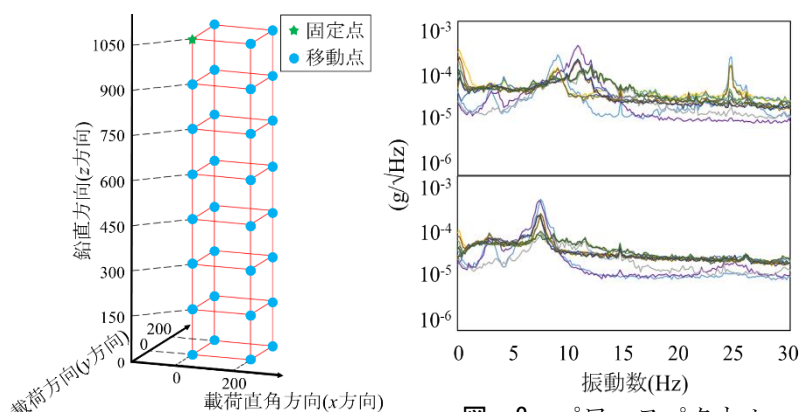


図-2 センサ取り付け位置

図-3 パワースペクトル (上から無損傷, δ_y 時)

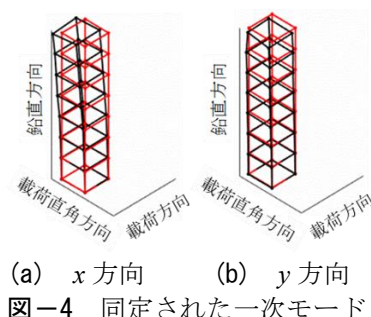


図-4 同定された一次モード

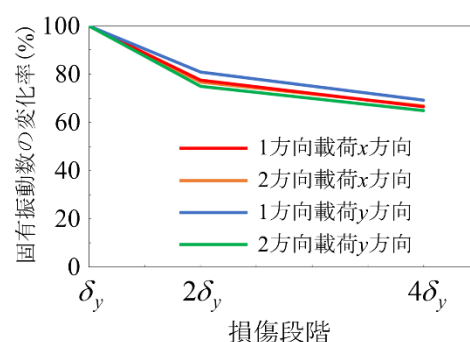


図-5 固有振動数の変化率 (鉄筋降伏時を 100%とする)