

1. 序

近年、構造物に設置したセンサからの情報に基づいてその構造健全性を診断する、構造ヘルスマニタリング技術(SHM)への関心が高まっている。大規模な建造物になるほど膨大な数のセンサを取り扱うことや、ケーブルコストや敷設コストが問題であるため、ワイヤレスセンサを用いたSHMの研究が活発となっている。しかし、この技術にもセンサ、時刻同期誤差、計算能力、消費電力、データ転送・集約などについて課題が残されており実用化に至っていない。本研究の目的は、物理パラメータを同定する既往の方法を採用し、時刻同期誤差やデータ損失が生じた際の、建築の構造健全性への影響を明らかにすることである。

2. 同定理論

建物パラメータ同定法として、中村・竹脇らが提案した手法(文献1)を採用する。線形弾性剛性、線形粘性減衰、線形履歴減衰を有するせん断型構造物モデルに対して、同定対象層の直上及び直下の層の水平変位(あるいは加速度)のみから、対象層の層剛性と層減衰係数を同定することが可能である。

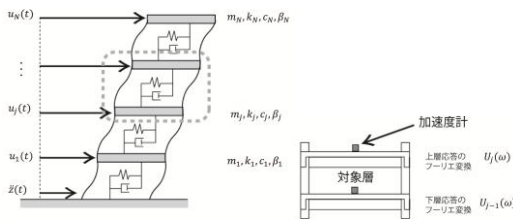


図1 せん断型モデル

節点および要素番号を建物最下層から付け、第j番目の質量、剛性、減衰係数をそれぞれ m_j 、 k_j 、 c_j とし、地動入力加速度を $\ddot{z}(t)$ とする。 M_j は最上層から第j層までの質量の和、 U_j は上層の加速度フーリエ変換値、 U_{j-1} は下層の加速度フーリエ変換値を示す。同定関数の実部、虚部及び虚部の勾配についてそれぞれ $\omega \rightarrow 0$ における極限值を計

算することで、層剛性 k_j 、履歴減衰定数 β_j 及び粘性減衰係数 c_j が次のように同定される。

$$f_j(\omega) = -\frac{\omega^2 M_j}{\left\{ \frac{U_j(\omega)}{U_{j-1}(\omega)} \right\}^{-1}} \quad (1)$$

$$k_j = \lim_{\omega \rightarrow 0} \text{Re}\{f_j(\omega)\} \quad (2)$$

$$\beta_j = \frac{1}{2k_j} \lim_{\omega \rightarrow 0} \text{Im}\{f_j(\omega)\} \quad (3)$$

$$c_j = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{d}{d\omega} \text{Im}\{f_j(\omega)\} \quad (4)$$

同定に用いる観測データを適用した場合、振動数領域データの振動数0近傍はノイズの影響を受けやすいため、フーリエ変換で定義された関数に対して近似関数を用いて $\omega \rightarrow 0$ における極限值を求める必要がある。近似関数に関しては $f = a\omega^n + b$ の関数形をとることが妥当であると判断し、得られた波形ごとに未知項を決定して適用した。

3. 数値シミュレーション

図2に示す4層せん断型構造物モデルを設定し、図3に示す外力(上からランダム波、El Centro波、東日本地震波)を与えて時刻歴応答解析を行う。得られた各層の加速度応答に時刻ずれやデータ欠損を伴わせ、同定関数(1)と(2)式に適用した。

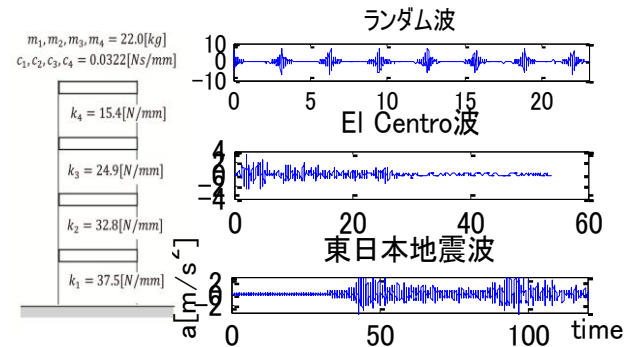


図2 各層 m,c,k

図3 入力加速度

また、本研究では同定関数と近似関数の対応を見るために、以下に示す平均二乗誤差を採用する。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X)^2} \quad (5)$$

3.1 時刻ずれによる影響

図 4,5 は時刻ずれが 0.01 秒と 0.02 秒の場合の同定関数適用時波形を表しており、時刻ずれが短いほど波形のずれが小さいことがわかる。表 1 はそれぞれの時刻の場合に近似関数の平均二乗誤差と同定値の差をまとめたものである。同定値の差から見ると、最上層ほど時刻ずれがない場合の同定値に近く、第 3 層と最下層は波形の全体にずれがみられ同定値にもその影響が出た。また、図 4(b)のように、地震波作用時はランダム波よりスムーズな応答波形を表し、近似関数を一致させやすいことが確認された。

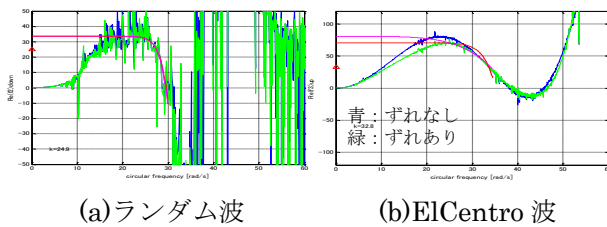


図 4 第 3 層時刻ずれ 0.01 秒の場合の同定結果

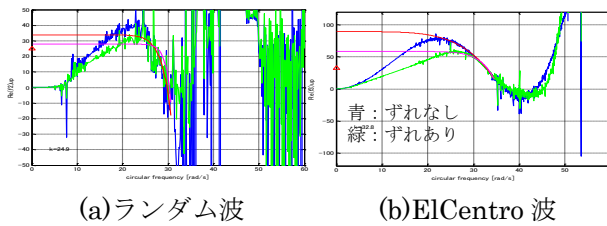


図 5 第 3 層時刻ずれ 0.02 秒の場合の同定結果

表 1 ElCentro 波 3 層の同定結果

	秒	1 層	2 層	3 層	4 層
近似関数誤差	0.01	0.7	19.0	4.3	3.2
	0.02	4.0	37.6	16.4	4.5
同定誤差 [%]	0.01	2.6	2.1	14.0	2.6
	0.02	8.5	2.7	34.5	15.8

3.2 データ損失による影響

図 6 は 1 パケット目が損失した場合の波形を表しており、損失のありなしで波形のばらつきが大きいことがわかる。表 2,3 はパケット損失箇所ごとの同定結果をまとめたものであり、近似関数の平均二乗誤差が同定値の精度に影響しないとい

う結果が得られた。また、データ損失がどの位置で生じても、同定結果に大きな影響を及ぼす可能性があることが確認された。

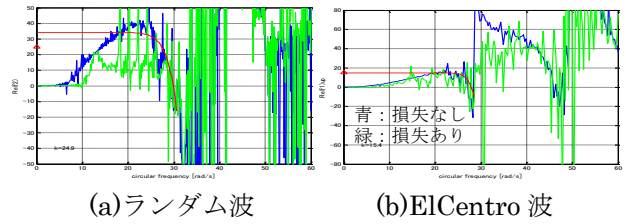


図 6 データ損失発生時の同定関数実部波形

表 2 ランダム波最上層の同定結果

損失箇所	1 番目	10 番目	40 番目
近似関数誤差	3.3	6.9	9.0
同定誤差 [%]	3.8	51.4	19.6

表 3 ElCentro 波最上層の同定結果

損失箇所	1 番目	10 番目	40 番目
近似関数誤差	7.1	6.9	6.0
同定誤差 [%]	4.1	0.6	26.7

4. 結論

外力の種類によらず、既往の同定手法を適用した場合、最上層の同定精度がもっとも高く、第 3 層の同定もほぼ高い精度で解析可能であることが判明した。

本研究の結果より、わずかな時刻ずれが同定値に影響することや、データ欠損位置により同定値に大きな差が生じることが明らかとなった。今後もこれらの問題点を考慮した同定手法の改良を進めていくことが、SHM のシステム同定法の確立につながると考える。

参考文献

- 1) 中村充,竹脇出:地震観測結果に基づく免震建物モーダルパラメータの時変性評価,日本建築学会構造系論文集,675-676,2005
- 2) 前田朋宏,吉富信太,竹脇出:限定された観測データを用いた ARX モデルによる剛性・減衰同定法,日本建築学会構造系論文集, No.51,141-144,2011