

微動計測に基づく建物の多自由度系地震応答推定モデル
 A Multi-degree-of-freedom Building Model Based on Microtremor Measurement
 for Seismic Response Estimation

○池田芳樹・倉田真宏

○Yoshiki IKEDA, Masahiro KURATA

To estimate seismic response of a large-scale low-rise building, this paper proposes to produce a multi-degree-of-freedom equivalently-linear model based on microtremor measurement. The proposed modeling utilizes the identified natural frequencies, the corresponding damping ratios and the modal shapes of the building in the lowest some vibration modes. The advantage is that neither structural design drawing nor calculation document is required. The structural seismic responses, i.e. accelerations, velocities and displacements at all the measurement locations, can be obtained by inputting the acceleration measured at the base to the analytical model. The modeling is useful to develop systems for determining damage levels of large-scale low-rise buildings.

1. はじめに

大規模低層建物の地震被災度即時判定法を展開する目的で、微動計測から得られた情報のみを利用して建物の簡易な多自由度系等価線形モデルを作成し、地震応答を推定する方法を提案する。

振動計測に基づく地震被災度即時判定法の研究は10年ほど前に本格化し、今では中高層鉄骨造建物ならば、3~5の階に加速度計を適切に設置することで、建物の地震被害と相関性が高い各階の加速度と各層の変位の最大値を20%以内の誤差で推定できると認識されている¹⁾。その方法は、基準階をもつ整形な建物形状と各階の剛床を暗黙に仮定しているため、振動性状を数理モデルで表現し易い高層建物への適用性が高い。しかし、大規模低層建物には不整形な形状、平面的広がり、吹抜空間といった特徴があるため、それに既存の判定法は適用できない。国内の多くの建物が低層であることから、その地震被災度即時判定法の研究は建築構造分野が取り組むべき課題の一つである。

提案するモデル化は、設計図面や構造計算書を用いずに、微動で得たモード情報だけで実施できる。現行の建築基準法は低層建物の設計に振動解析を義務付けておらず、その振動計測もほとんど実施されていないため、動特性には不明な点が多い。低層建物に多数の地震計を常時設置することは経済的に難しいことから、一日の微動計測で簡易な地震応答推定モデルが得られれば、地震被災度即時判定法を展開する上で役立つであろう。

2. 微動に基づく建物のモード同定

限られた数の振動計測器の配置換えを繰返して、微動から建物全体のモード特性を同定した事例では、計測配置ごとに得られた周波数伝達関数の乗算と除算により建物全体の伝達関数を得て、それからモード特性を評価している^{2),3)}。1入力多出力系と剛床を暗黙に仮定しているため、序論で述べた特徴を有する低層建物には適用できない。

そこで著者らは、計測器の配置換えの影響を受けない位置を固定した計測点を確保して、同時計測データごとに文献4の同定法を適用することで、低次モードで固有振動数と建物全体のモード形を得ることを可能にした⁵⁾。さらにモード減衰比をRD法⁶⁾で評価した。その結果、複雑な振動性状を示す大規模低層建物の低次モードで、固有振動数、減衰比およびモード形が評価可能になった。

3. 地震応答推定モデルの構築

前節で得たモード同定結果から簡易な地震応答推定モデルを作成する。しかし、微動で低層建物のモード同定を行うと、(1)高次モードの評価が難しい、(2)モード振幅比は得られるが、物理的意味をもつ刺激係数が得られない、という問題が残る。そこで、限られた数のモード形から刺激係数を近似的に評価することを考える。

微動計測点の総数 n を水平1方向の総自由度数とする線形モデルを想定する。地動加速度 $\ddot{y}(t)$ を入力した運動方程式は、モード分解すると下式で

表現できる。

$$\ddot{q}_j(t) + 2h_j\omega_j\dot{q}_j(t) + \omega_j^2q_j(t) = -\beta_j\ddot{y}(t) \quad (1)$$

j 次モード ($j=1, 2, \dots, n$) の ω_j , h_j , β_j および $q_j(t)$ は、それぞれ円固有振動数、減衰比、入力地震動に対する刺激係数、モード変位である。

u_{ij} を計測点 i の j 次モード振幅とおくと、各自由度に対応する各計測点で式(2)が成り立つ。

$$\sum_{j=1}^n u_{ij}\beta_j = 1 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$u_{1j}^2 + u_{2j}^2 + \dots + u_{nj}^2 = 1 \quad (3)$$

モード振幅比は相対量であるため、各モードで振幅の二乗和が1になるように規準化している。

同定できる低次モードの数を m ($m < n$)、刺激係数の計算に用いる計測点数を l とおき、式(2)を式(4)で近似する。上の階の計測点ほどモード打切誤差の影響が小さいため⁷⁾、刺激係数の近似精度を確保するために上の階の計測点で式を再構成する。

$$\sum_{j=1}^m u_{ij}\beta_j = 1 \quad (i=1, 2, \dots, l)$$

$$\Rightarrow U_{lm}b_m = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{l1} & u_{l2} & \dots & u_{lm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

U_{lm} と b_m は m 次までのモード行列と刺激係数ベクトルで、 b_m は最小二乗法で得られる。その刺激係数と同定結果を式(1)に代入してモード応答 $q_j(t)$ を求め、それに計測全点のモード行列 U_{nm} を左から掛けると、計測点で地震応答 $x_i(t)$ が得られる。

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = U_{nm} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \vdots \\ q_m(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

4. 作成したモデルによる地震応答推定

図1に、L型平面形をもつ $280\text{m} \times 160\text{m}$ の6階建て商業建物で地震応答を推定した例を示す。屋上では微動計測を実施できなかったため、図の最上階は5階を意味する。同定モード数はX方向で8、Y方向で6であり、昨年のお阪北部地震時に京都市左京区で記録された加速度を水平2方向に入力した(最大値:X方向 118cm/s^2 , Y方向 145cm/s^2)。地震時の建物の固有振動数は微動時よりも低くなるため、同定値の90%を設定した。1次固有振動数はX方向で 1.35Hz , Y方向で 1.24Hz である。同定値と鉄骨造低層建物を考慮して、各方向の1

次モードで2%となる内部粘性減衰を仮定した。建物応答はX方向で大きく、その最大値は3階加速度で 442cm/s^2 , 5階変位で 2.5cm である。

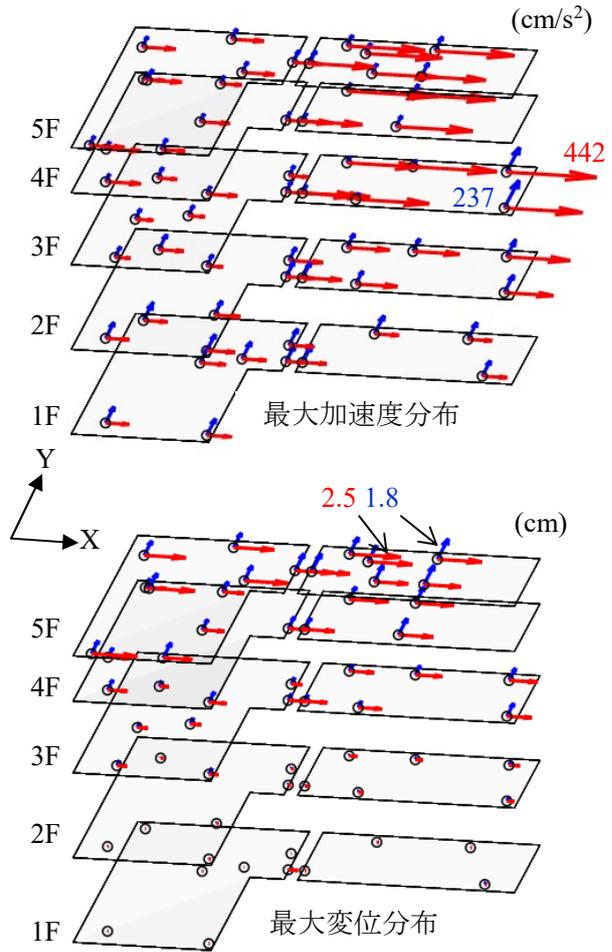


図1 ある大規模低層建物の地震応答解析例

5. まとめ

微動情報のみから建物の多自由度系等価線形モデルを作成し、地震応答を簡易に推定する方法を示した。建物動特性の振幅依存性のような非線形性の扱いを、今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 池田, 久田: 限られた階の地震観測記録を利用した建物全階の応答推定, 日本地震工学会論文集, 第13巻, 第4号, 2013.8
- 2) 杉本ほか3名: 多点移動常時微動計測と伝達関数再構築による高層建物の振動特性評価, 清水建設研究報告, 第91号, 2014.1
- 3) 栗栖ほか4名: 常時微動の部分移動測定による建物振動性状の評価, 日本建築学会技術報告集, 第54号, 2017.6
- 4) R.Brincker, L.Zhang and P.Andersen: Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition, *Proc. 18th Int. Modal Analysis Conf.*, 625-630, Texas, USA, 2000.2
- 5) 川崎ほか4名: 微動に基づく大規模低層鉄骨造商業建物のモード同定, 日本建築学会近畿支部研究発表報告集, 第58号構造系, 2018.6
- 6) 田村ほか2名: RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第454号, 1993.12
- 7) 鈴木: 耐震設計における荷重合成問題の研究, 総合都市研究, 第20号, 1983