

ERAに基づく構造物のモード同定と部分構造合成法を併用した健全度評価の試み

日本建設コンサルタント 正会員 ○安田大樹
 埼玉大学 正会員 山口宏樹, Natthapong Areemit

1. 序論 膨大な数の社会資本ストックが更新の時期を迎え、これらを安全に維持していくための健全度評価技術が必要とされている。この一つの方法として振動計測を用いた方法が注目されており、簡便かつ安価に計測できることからその利点は大きい。しかし常時微動計測は振幅レベルが小さいこと、また局所的構造変化に比べ振動特性の変化は微小であるなど課題も多い。そこで本研究では、常時微動計測から相関関数と ERA を併用してモード特性を同定した後に、部分構造合成法に基づいた構造逆解析を行うことで構造状態の変化を大きく抽出することを試みる。本手法を構造状態の異なる RC 造 4 層建物の常時微動計測データに適用し、健全度評価への適用性について検討を行う。

2. 解析手法 用いる手法は 2 段階で構成され、Step1:常時微動計測からのモード特性同定, Step2:構造逆解析による構造変化の抽出, である(図 1)。

[Step1] 常時微動計測の相関関数をとることで、自由減衰応答を作成し、ERA によるモード同定を行う。本手法は特異値分解によりノイズに対して安定した解を与え、多点参照に適用可能、精度指標を持つなど多くの利点を有する。

[Step2]¹⁾ モード特性を用いて部分構造合成法に基づいた逆解析を行う。特徴としては構造物全体を部分構造に分割し、部分構造の結合部変位による弾性変形モードと内部領域の拘束モード(図 2)の重ねあわせとして表現することにあり、利点としてモデルの自由度を縮小できること、部分構造に着目することで全体構造よりも大きく変化を抽出できることが挙げられる。以下に簡単な逆解析の手順を示す。

(1) 弾性変形モードで座標変換を行い縮小された剛性(逆行列は Flexibility)はモード特性を用いて次式より算出できる。ここで結合部を計測位置とする。

$$\bar{K}^{-1} = \Phi_m \Omega^{-1} \Phi_m^T \quad \Omega: \text{対角成分に固有値を持つマトリクス}$$

$$\Phi_m: \text{計測点位置のモードマトリクス(質量正規化)}$$

(2) 部分構造固有振動数は部分構造の拘束モードの固有振動数と定義し、これはモード特性と縮小された剛性マトリクスを用いて次式の関係から算出できる。

$$\Delta \Omega = \Phi_r \Omega_r^{-1} \Phi_r^T = \Omega - \Phi_m^T \bar{K} \Phi_m$$

Ω_r : 部分構造固有振動数(拘束モードに対する固有振動数)

Φ_r : 部分構造のモードのモード(全体モードへの拘束モードの寄与量を表す)

部分構造固有振動数は同定されたモード数 n と弾性変形モード数 m(計測点数と等しい)に依存し、(n-m)の数だけ同定でき、モデル次数は同定されたモード数に依存する。

3. 評価対象とする構造物 埼玉大学構内 RC 造 4 層建物の改修工事により構造物の両側に耐震壁が新設された。これに伴い特徴的な建設段階 7 つ(表 1, 図 3)について常時微動計測を実施し、サンプリング周波数 500Hz で 140 秒間のデータを同一の建設段階につき 2 回ずつ得た。計測方向は図 3 に示す紙面奥方向で、フロアごとに計測を行い、常時設置した 3 階計測点を参照点として全フロアの計測データを関連付けた。

表 1 改修工事の進行状況

| Stage | 改修工事進行状況 |
|-------|---------------|
| 1 | 工事開始前 |
| 2 | 全フロア壁撤去 |
| 3 | 基礎躯体工事完了後 |
| 4 | 1階立ち上がり躯体工事完了 |
| 5 | 2階立ち上がり躯体工事完了 |
| 6 | 3階立ち上がり躯体工事完了 |
| 7 | 4階立ち上がり躯体工事完了 |



図 1 解析の流れ

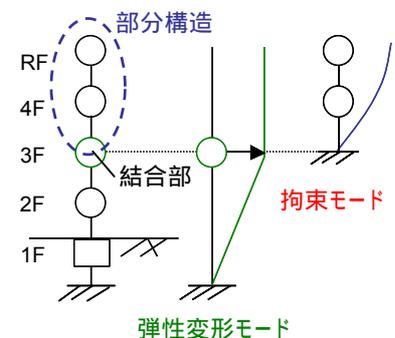


図 2 部分構造合成法概念図
(2 自由度によるモデル化の例)

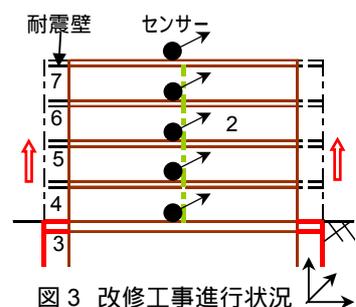


図 3 改修工事進行状況とセンサー配置

キーワード: ERA 健全度評価 実構造物 常時微動計測 部分構造合成法 モード同定

連絡先 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学建設工学科 電話:048-858-3552 FAX:048-858-7374

4. 常時微動計測からのモード同定²⁾ 各建設段階における固有振動数の変化を図4に示す. 同定されたモードは低次2モードで両モードともその変化は比較的大きい. 図5は2回の計測における1次モード形状の同定誤差を表し横軸が建設段階, 縦軸が計測位置, 高さが誤差の大きさを表す. 振幅レベルが非常に小さいデータでもMAC=96%以上の精度で同定できた. ただし Stage2, 4, 6に10%程度の誤差が見られる.

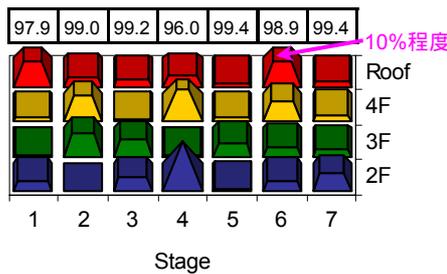


図5 2回の1次モード形状の同定精度上:MAC(%), 下図:誤差

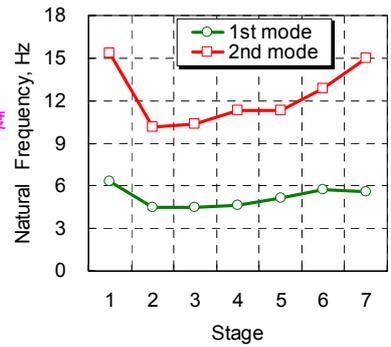


図4 固有振動数の変化

5. 部分構造合成法に基づく逆解析

5.1. 部分構造固有振動数の有用性検討 同定されたモードは2モードと計測点数に比べ少ない. そこで試みとして図2のように3階計測位置を結合部とし, 縮小された剛性と部分構造固有振動数を1自由度ずつの2自由度モデルを作成し逆解析を行った. 図6(b)の部分構造固有振動数について解析結果と同定値を比較すると, Stage2-5では近い値が得られたものの Stage 6, 7において同定値が大きいことが確認できる. 図6(a)の3階自由度に縮小された剛性についても Stage 6, 7で増加傾向が見られるが結合部より上部剛性が影響するとは考えにくい. これより剛性の同定誤差が部分構造固有振動数に影響したことが推測される.

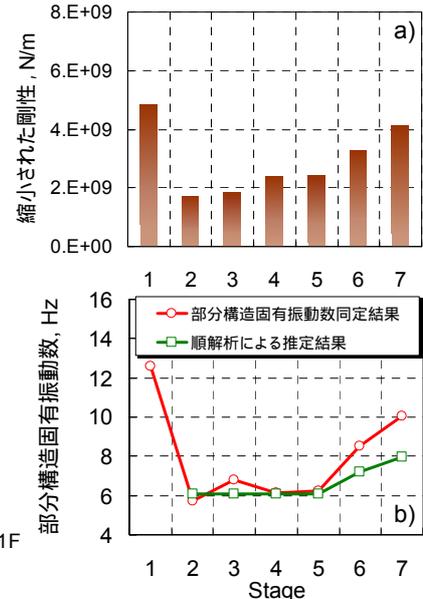


図6 2自由度モデルによる同定結果
a) 3階自由度に縮小された剛性
b) 部分構造固有振動数(4F-Roof)

5.2. Flexibility 各階のセンサー5点を用い, 低次2モードにより Flexibility を算出した. Flexibility Matrix 作成における2次モードの寄与量を図7に示す. 低層ほど2次モードの寄与が大きく, 高次モード(3次以上)無視による誤差が考えられる. 逆に高層ほど2次モードの寄与は小さく, 解が安定していると考えられ, 5.1.で求めた縮小された剛性の誤差の原因の一つと考えられる.

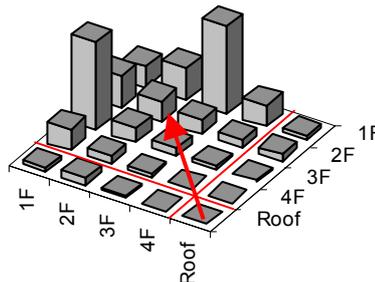


図7 例)Flexibility Matrixへの2次モードの寄与

5.3. 層剛性 Roofに関する情報のみを用い, 次式により各層剛性を算出した. $k_i = (g_{i+1} - g_i)^{-1}$ g_i : Roofに関するi層の Flexibility 図8は各層剛性を建設段階ごとにプロットしたもので, 合わせて解析値を示す. 構造変化と同定値には対応が見られ, 構造変化位置の特定もほぼ可能である. ただし図5に示したモード形状の同定誤差が大きい Stage2, 4にはばらつきが見られ, 実用化には経年的に変化を見ることが必要と考える.

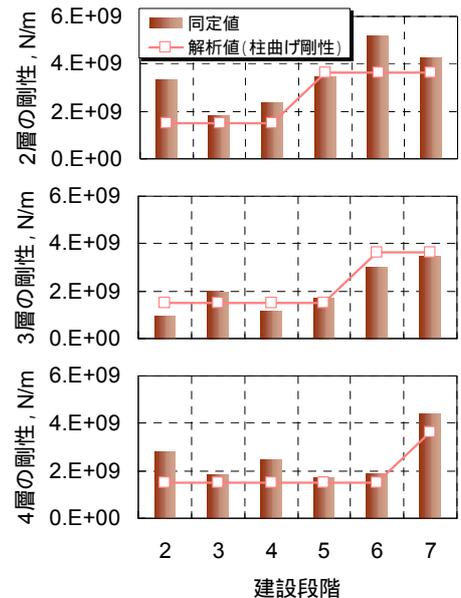


図8 各層の層剛性の変化

6. 結論 振幅レベルが小さな常時微動計測からでも低次2モードを同定できることが確認できた. 2自由度モデルによる同定結果は建設段階ごとに見て部分的には解析結果と近い結果を得た. ただし, 同定モード数の影響が見られ, 妥当性については更に検討を必要とする. 同定精度の高い低次2モードを用いることで構造の変化位置を特定することができた.

参考文献: 1) Alvin K.F. and Park K.C. "A Second Order Structural Identification Procedure via State Space Based System Identification", AIAA Journal, Vol.32, No.2, pp397-406, 1994.

2) N.Aremit, H.Yamaguchi, Y.Matsumoto and T.Ibi, "Modal identification of a four-story reinforced concrete building under renovation by using ambient vibration measurement", Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, 2003.