忘却係数付き逐次最小二乗法により評価した鉄骨造建物のモード特性

Modal Properties of Steel Buildings Evaluated by Recursive Least Squares Method with Forgetting Factor

> 佐藤 匠^{**1} Takumi Satou

【要旨】

福井新聞社社屋における地震発生時の観測記録を ARX モデルとしてモード特性を同定して分析する.更に建物の非 線形性や時刻歴に沿った時間変化を評価するため、忘却係数付き逐次最小二乗法を適用する.同定の結果、忘却係数を 設定することで建物動特性の時間変化を把握することが可能となった.

当社では今年度より建物内に地震計を設置することで、建物使用者のBCPを支援するサービスを提供している. 少ない計測点からより詳細な分析が可能となるように、今後本手法の適用を進める.

【キーワード】 構造ヘルスモニタリング 鉄骨造建物 地震観測 忘却係数付き逐次最小二乗法 ARX モデル

1. はじめに

2024年1月1日に発生した令和6年能登半島地震は Mj7.6、最大震度7の大地震であり、震源地である石川県 だけでなく、東北地方から中国地方にかけて非常に大き な揺れが発生した¹⁾.福井県にある当社施工の福井新聞 社社屋では、震度4相当の揺れを記録した.しかし、構 造上支障のある被害は生じておらず、地震後も機能停止 することなく継続使用されている.社屋オフィス棟(以 下,当該建物)では、約20年間地震観測を実施しており、 今回の地震を含めて多くの地震が記録されている.これ まで当社では、スペクトル解析や地震応答解析を用いて 観測記録を分析し、構造的被害の有無や免制震装置の効 果などを検証してきた²⁾.しかし、スペクトル解析だけで は建物の非線形性の評価が難しく、地震応答解析では記 録を再現できるモデル構築に多くの時間がかかり、地震

観測記録のみを用いた構造物のモード同定手法の一つ として ARX モデルがある³⁴⁾. 最小二乗法により建物を 多入力多出力系モデルとして同定することで, 固有振動 数, モード減衰比および出力点のモード振幅を評価でき る⁵⁾. ただし ARX モデルは線形モデルであり, 剛性変化 などの非線形性を評価するためには, 時刻歴に沿った等 価動特性の変化として評価する必要がある. これに対し て文献 6 では, 新しい観測記録を重視することで建物動 特性の時間変化を評価する, 忘却係数付き逐次最小二乗 法を実大 4 層鉄骨造建物の振動台実験結果に適用して, 建物動特性の非線形性が把握されている. 本報では鉄骨造である当該建物で観測された地震記録 に忘却係数付き逐次最小二乗法を適用し, ARX モデルと して同定することで, 地震時における動特性を評価する.

2. 建物概要

当該建物は2001年に竣工した,地上9階,塔屋1階の 鉄骨造建物である.低層部は1階から4階にかけてセッ トバックしており、5階から上部には吹抜けのあるツイ ンコリドール型の平面形状となっている.建物北側では 印刷棟に,東側ではホール棟に繋がっているが Exp.J に より3棟は構造的に分離している.写真-1に建物全景, 表-1に当該建物概要,図-1に南立面図,図-2に6 階平面図を示す.



写真-1 建物全景

建物内部には耐震性能向上のため、制震装置として増 幅機構付き油圧制振ブレース(トグル制震構法)^のを設置 している.制震装置の配置検討は地震応答解析によって 行われており、付加軸力による柱の軸力変動なども合わ せて検討している.参考として**表**-2に検討用立体応答 解析モデルの固有値解析結果を示す.

表一1 当該建物概要				
項目	内容			
竣工	2001年11月			
構造	鉄骨造			
階数	地上9階,塔屋1階			
最高高さ	55. 2m			
基礎	場所打ち杭基礎			
建築面積	6, 091m ²			
延床面積	19, 642m²			
■				



表― 2	立体応答解析モデルの固有値解析結果
x 2	- エードー・アート - アート・コード - 一日 - 一日 - 一日 - 二日 - 二日 - 二日 - 二日 - 二日

モード	固有振動数[Hz]	備考
1次	0. 799	Y方向1次モード
2次	0. 845	X方向1次モード
3次	1. 026	ねじれ方向1次モード
4次	2. 105	Y方向2次モード
5次	2. 262	X方向2次モード
6次	2. 410	ねじれ方向2次モード

3. 地震観測記録

地震観測のために、建物竣工時より1階および屋上階 にサーボ型加速度計を設置している(図-1).これまで 観測された地震記録から表-3に示す4つの地震記録を 選び、分析を行う.図-3に各地震の加速度波形、図-4 に屋上階加速度の1階加速度に対する周波数伝達関数 (Hanning Window で3回処理)を示す.伝達関数から水 平2方向において、1次と2次の共振振動数が確認でき る.またこれらがほぼ変動していないことから、構造部 材の降伏などによる大きな剛性低下は生じていないと予 想される.

表-3 地震記録の概要

地震発生日	1 階計測震度	震央地名・地震名 (震源深さ[km])	М
2020/9/4	3.8	福井県嶺北(7.0)	5.0
2023/5/5	2.3	能登半島沖(12.0)	6.5
2024/1/1	4.1	能登半島地震(16.0)	7.6
2024/1/6	2.0	石川県能登地方(12.0)	5.4

4. 地震記録の分析・評価

4.1 分析方法

忘却係数付き逐次最小二乗法(以下,本手法)のモデ ルパラメータ推定アルゴリズムを以下に示す.

$$y_N = z_N^{\ T} \theta_N \tag{1}$$

$$\hat{\theta}_{N} = \hat{\theta}_{N-1} + \frac{P_{N-1}z_{N}}{\rho + z_{N}{}^{T}P_{N-1}z_{N}}(y_{N} - z_{N}{}^{T}\hat{\theta}_{N-1})$$
(2)

$$P_{N} = \frac{1}{\rho} \left(P_{N-1} - \frac{P_{N-1} z_{N} z_{N}^{T} P_{N-1}}{\rho + z_{N}^{T} P_{N-1} z_{N}} \right)$$
(3)

ここで、 y_N は時刻Nの出力(建物応答)、 z_N は観測記録 から構成される回帰ベクトル、 θ_N はARXモデルのパラメ ータベクトル、 ρ は忘却係数である.1入力1出力系ARXモ デルで次数が2の場合には、 u_N を時刻Nの入力とすると z_N 、 θ_N は以下となる. a_i はARXモデルの自己回帰パラメ ータ、 b_i は外生入力パラメータである.

$$z_N = \{ y_{N-1} \quad y_{N-2} \quad u_N \quad u_{N-1} \quad u_{N-2} \}^T$$
(4)
$$\theta_N = \{ a_1 \quad a_2 \quad b_0 \quad b_1 \quad b_2 \}^T$$
(5)

推定した各時刻のパラメータより,建物の等価モード 特性として固有振動数,減衰比および出力点の刺激関数 を算出⁵⁸⁾する.なお本報でも,文献5,6と同様に同定前 処理として観測記録をバンドパスフィルタに通している. 図-4の伝達関数の結果から,1次モードの同定では0.5 ~1.5Hz を,2次モードの同定では2.0~3.33Hz を等価振 動数帯とした.この処理を行うことで,計測ノイズや高 次モード成分は除去されるが,捩れ方向1次と水平方向 1次のモード成分の分離除去が難しいことから,1次モ



ード同定の際にはモデル次数を4として2つのモードの存 在を仮定し、2次モード同定では2として1つのモードの存 在を仮定した.また忘却係数 ρ は1.000,0.998,0.995を設 定し、 θ_N の初期値は全て零ベクトル、 P_N は対角成分が 1.0×10⁶である対角行列とした.なお加速度の単位は cm/s²である.

4.2 分析結果

各地震で観測加速度波形から同定された固有振動数, 減衰比,刺激関数を示す.

2020年9月4日の地震の結果を図-5に示す.振幅が小さい10secまでは両方向とも固有振動数は1.1Hz程度であったが、入力の大きくなる12sec前後に大きく低下した後、1.0Hz程度に回復しており、加速度振幅と対応している.モード減衰比については、Y方向は固有振動数の低下に対応して一時的な上昇が見られる一方で、X方向は加速度波形との明確な対応は見られなかった.刺激関数の同定結果についてX方向は1.2、Y方向は1.9程度という結果となり、一般的なモード振幅に対応している.また











図-6 2023/5/5 地震分析結果

短辺方向であるY方向の刺激関数は大きな値を示してい ることから,建物全体として曲げ系のモード分布である 可能性が考えられる. 忘却係数を考慮しないp = 1.0の場 合は、20sec以降に同定値が一定値に収束する傾向が見ら れ、線形に近くなっているが、忘却係数を考慮すること で時間変化を表現できている. ただしX方向の減衰比は、 ほぼ地震入力が小さく自由振動に近いと考えられる 20sec以降も大きく変動を繰り返し、安定しない値を示し ている. 文献6が指摘しているように、忘却係数が小さい ほど非線形性が強く現れる性質が逐次同定法にはあるが、 最適な忘却係数の理論的な決定方法はないため、忘却係 数の設定は同定結果を確認しながら行う必要がある.

次に、2023年5月5日の地震の結果を図—6に示す. X方 向の固有振動数は、12sec以降で一時的に低下しており、 入出力の振幅に対応しているが、X方向の減衰比につい ては変動が大きく分析が難しい.一方でY方向は固有振 動数の大きな変動は見られないが、減衰比は10sec以降で 大きく上昇してる.ここでバンドパス処理を行ったY方 向の加速度記録を積分して屋上階と1階の絶対速度を求 め、その差分を取った相対速度を図-7に示す.減衰比 が大きくなる11.0~24.0secにおいて相対速度も増加して おり、対応が見て取れる.建物内部に設置している増幅 機構付き油圧制震ブレースは速度依存型のダンパーであ ることから、制震ダンパーの影響で減衰比が増加した可 能性がある.

2024年1月1日の地震については1次モードと2次モード について分析した.1次モードの同定結果を図-8に2次 モードの同定結果を図-9に示す.1次モードの固有振動 数は両方向とも0.9Hzまで低下し、2次モードも同様に 2.5Hz程度まで低下しており、一時的な建物水平剛性の低 下が生じている可能性がある.減衰比は加速度の小さい 10sec以前でも大きな値を示しているが、実現象との関連 性を見出せない.50sec以降において、 $\rho = 1.0$ の場合は、 やはり一定値に収束する傾向を示すが、 $\rho = 0.998$ 、 0.995のように忘却係数を考慮することで、時間変化を表 現できている.Y方向の刺激関数は1次モードと2次モー ドの合計が1に近い値となっていることから、2次モード までが支配的な揺れであることが見て取れる.一方でX 方向の刺激関数は $\rho = 1.0$ の場合、1次モードが1.8程度、 2次モードが-0.5程度に収束しており、3次モード以上の高



刺激関数 1





図-8 2024/1/1 地震分析結果(1次モード)











次モードの影響も考えられる.またこれは図-4(a)から も分かるように、4.0Hz以上の高い振動数でも大きな伝達 率を示しており、ここでも同様の傾向が見て取れる.

2024年1月6日発生地震の同定結果を図-10に示す. 図-8にて1次モードの固有振動数の低下が見られたが、 両方向とも1.0Hz前後まで回復していることが確認でき た. 全ての同定結果で,同定開始直後は算出結果が安定 せず大きくばらついていた. θ_N や P_N の初期値が実建物と 大きくかけ離れていることがこのばらつきの要因の一つ ではあるが、逐次同定の初期の時間帯では入出力の振幅 が小さく、算入できるデータ数が少ないため、このパラ メータ変動を完全に抑えることはできない. そこで2024 年発生の二つの地震観測記録(図-3(c)および(d))を繋 げて連続した記録として同定を試みる. 図-11に連続 した観測記録の1次の固有振動数の同定結果を示す. 2024 年1月1日発生地震は全観測記録が180secあり、観測記録 の繋ぎ目で大きく同定結果が変動していることが分かる. ただし以前の観測記録のパラメータを引き継いだことに より,同定結果が早い段階で安定している.また180sec以 降における同定結果は, ρ = 0.998, 0.995の場合には図 -10の同定結果と同様に、固有振動数の回復傾向を示 している.しかしρ = 1.0の場合には固有振動数の回復が

見られない.これは忘却係数を考慮していないため,同 定開始から180secまでの入出力情報が支配的となり,時 間変化を表現できなかったためであると考えられる.



5. まとめ

地震観測記録のみを用いた分析方法として、ARXモデ ルと忘却係数付き逐次最小二乗法を統合したモード同定 を選び、実建物の観測記録に適用した.建物の固有振動 数、モード減衰比および屋上階のモード振幅の時間変動 を評価して、単純な線形モデルでは得られない動特性の 振幅依存性を評価した.以下に得られた知見を示す.

- ・忘却係数を設定することで建物動特性の時間変化を把 握することが可能となった.ただし、最適な忘却係数 の理論的な決定方法はないため、常に同定結果を確認 しながら忘却係数を設定する必要がある.
- ・長辺方向よりも短辺方向で、安定した同定結果が得ら れた.固有振動数は最も安定した値を得易く、一方で 減衰比は不安定になりやすい傾向にあった.これは、 これまで指摘されていた傾向と対応していた.
- ・複数の観測記録を人為的に繋げた長い加速度波形履歴 で同定した場合には、第2の記録でやや同定値の変動が 抑えられた.

飛島建設では、今年度より自社施工物件に対して小型 地震計を設置して建物挙動を計測する取り組みを行って いる.地震発生時には即時分析結果をビルオーナーに提 示する建物見守りサービスを提供することで、お客様の BCPを支援する.少ない地震計測点からより詳細な分析 が可能となるように本手法を適用することが、今後の課 題である.

謝辞:本報に記載の地震観測記録は、福井新聞社様の長年に渡るご協力を賜ることで実現することができました. また解析検討については、京都大学防災研究所池田芳樹 教授、倉田真宏准教授にご指導頂きました.ここに記して感謝の意を申し上げます.

【参考文献】

1) 気象庁: 震度データベース検索,

https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html

- 2)池田隆明,高瀬裕也,妹尾嘉章,阿部良洋,船木尚己, 守研二,佐々木清,鈴木幸一:平成23年(2011年)東北 地方太平洋沖地震における仙台市役所本庁舎のトグル 制震補強効果の確認、とびしま技報第60号, pp.81-85, 2011.9.
- N.M.M. Maia and J.M.M. Silva :Theoretical and experimental model analysis, John Willey & Sons Inc., 1997.
- 4) 足立修一: MATLAB による制御のためのシステム同 定,東京電機大学出版, 1996.
- 5) 斎藤知生:モード解析型多入力多出力 ARX モデルを 用いた高層建物のシステム同定,日本建築学会構造系 論文集,第508号,pp.47-54,1998.6.
- 他田芳樹: 忘却係数付き逐次最小二乗法による建物動 特性の地震時変化の評価,日本建築学会技術報告集, 第18巻,第38号,pp.51-54,2012.2.
- 7) 久保田雅春, 秦一平, 石丸辰治, 新谷隆弘: 増幅機構を 用いた制震構造システムに関する研究, 第 10 回日本 地震工学シンポジウム, pp.31-34, 1998.
- Şafak E. : Adaptive Modeling, Identification, and control of dynamic structural Systems. I: Theory, Journal of Engineering Mechanics, Vol.115, No11, pp.2386-2405, 1989.11.

Summary Seismic data observed at the new building of Fukui Shimbun during an earthquake was analyzed by applying the ARX model. Since the ARX model requires only the observed data to identify structures, it lets us evaluate a building's dynamic characteristics directly after the occurrence of an earthquake. Additionally, to evaluate nonlinearity of the building's dynamic characteristics and chronological changes in building parameters, we applied the recursive least squares method with forgetting factor.

Starting in the current fiscal year, we have begun installing seismometers in buildings to provide services to support building users in the area of BCP. We intend to implement this method in the future to enable detailed analysis that requires only a small number of measurement points.

Key Words: Structure Health Monitoring, Steel Buildings, Seismic Observation, Recursive LSM with Forgetting Factor, ARX model