

地震時の建物挙動を再現できる解析モデルの自動同定に関する研究

Study on the Automatic Identification of Analytical Models Capable of Reproducing Structure Behavior During Earthquakes

山崎 康雄*

Yasuo Yamasaki

要 約

構造ヘルスマニタリングは地震被災後の構造物の損傷や劣化状況を把握するための技術として注目されている。このモニタリングで得られた観測記録から地震時の建物挙動を再現できる解析モデルを構築することで、被災後の建物補修や補強検討に活用できると考えられる。本報では、部分空間法を用いて地震時の建物挙動を再現する解析モデルの自動同定手法を提案する。更に提案手法を用いて数値実験と実建物の観測記録による検証を実施し、地震時の建物挙動を高精度で再現できるモデルの同定が可能であることを確認した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 再現度の高い解析モデルの自動同定手法
- § 3. 数値実験による同定精度の検証
- § 4. 実建物を対象とした同定精度の検証
- § 5. まとめ

提案手法の有効性を確認するため、ねじれ応答が生じる立体解析モデルの時刻歴応答解析結果を用いた数値実験と実建物の観測記録を用いた検証を実施する。

§ 2. 再現度の高い解析モデルの自動同定手法

構造ヘルスマニタリングで得られた観測記録から地震時の建物の挙動を再現できる解析モデルは部分空間法により同定できる。しかし、与えるパラメータ毎に解析モデルが異なるため、パラメータの与え方やどのパラメータを選択するかは専門知識や経験が必要とされる。そこで、図一1に示すフローに従って、同定時に用いるパラメータを網羅的にばらつかせて、観測記録との乖離を二乗平均平方根誤差（Root Mean Squared Error, RMSE）（式1）及びコサイン類似度（式2）を用いて定量的に評価することで、再現度の高い解析モデルを自動同定する手法を提案する。

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (\text{式 1})$$

ここに、 y_i ：観測記録、 $\hat{y}_i$ ：同定値、 n ：データ総数

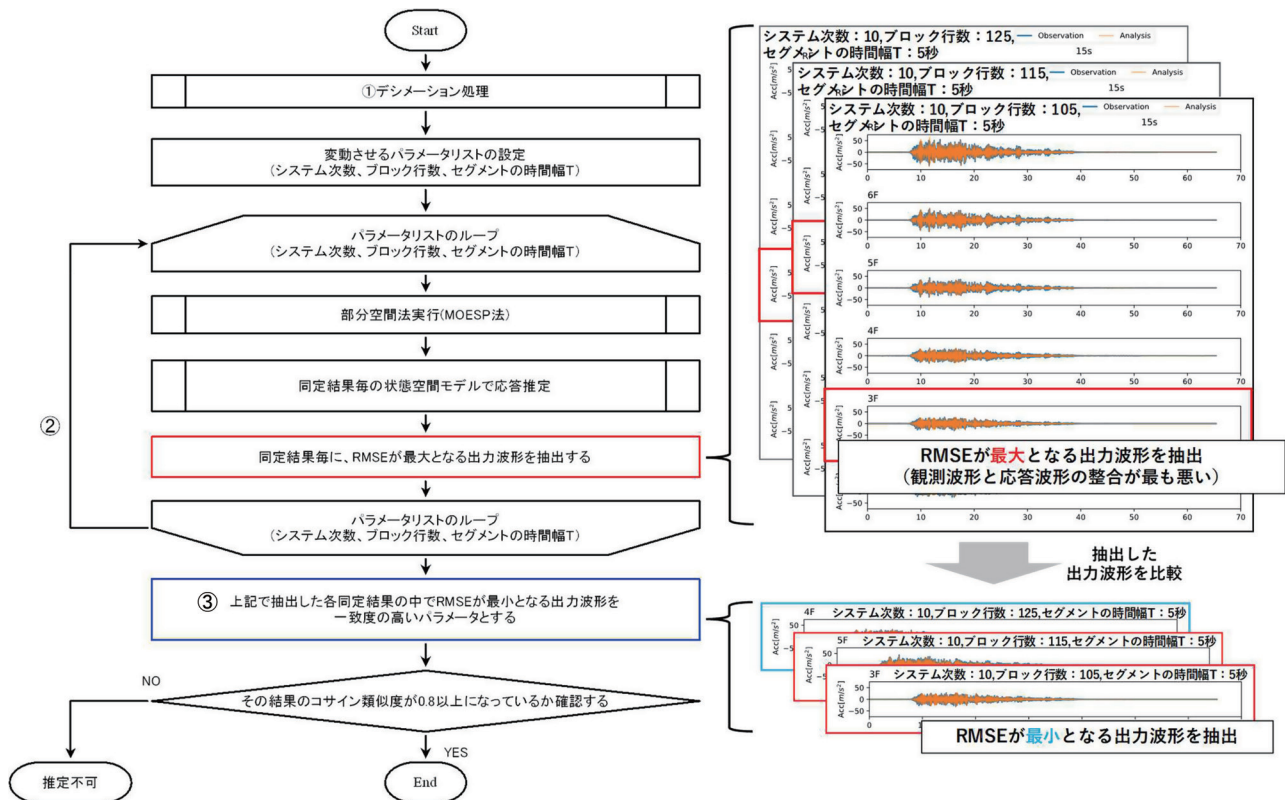
$$\cos sim(A, B) = \cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} \quad (\text{式 2})$$

ここに、 θ ：角度、 $A \cdot B$ ：ベクトルの内積、 $\|A\|$ ：ノルム
ここで手法のフローについて記す。まず始めに、得られた観測記録に対して、デシメーション処理を行う（図一

§ 1. はじめに

構造ヘルスマニタリングは地震被災後の構造物の損傷や劣化状況を把握するための技術として注目されている。特に内閣府第3期SIP課題「スマート防災ネットワーク」において、被害状況の瞬時把握と多角的な詳細把握が可能な実用レベルの技術として期待されている¹⁾。このモニタリングで得られた観測記録から地震時の建物挙動を再現できる解析モデルを同定することで、被災後の建物補修や補強検討に活用できると考えられる。しかし、解析モデルの作成には専門家や設計者による手作業での検証が必要であり、今後のモニタリング対象建物の増加に伴い、作業負担となることが予測される。そこで、再現度の高い解析モデルを自動同定できる手法の確立が求められる。本報告では、部分空間法を用いて地震時の建物挙動を再現する解析モデルの自動同定手法を提案する。

* 技術研究所建築技術グループ

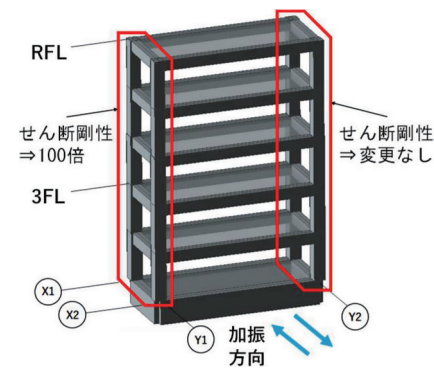


1の①). この処理により, 建物の応答にほとんど影響を与えない高振動数成分を除去することで, 同定精度の向上と解析時間の短縮が期待できる. 次に設定したパラメータの組み合わせで部分空間法 (MOESP 法²⁾) によるシステム同定を行い, 幾つかの解析モデルを得る. パラメータはシステム次数, ブロック行数, セグメントの時間幅 T となる. 解析モデルと観測記録による時刻歴応答解析の出力から応答波形を得る. 観測記録と対象フロアの出力波形の RMSE を算出し, 最大誤差となる RMSE を各パラメータの代表値とする (図一 ②). 上記の処理を各パラメータで行い, 各パラメータの代表値が最小となる出力波形を選定する (図一 ③). 更により再現度の高い結果を得るため, 観測記録と対象フロアの出力波形のコサイン類似度が 0.8 以上の結果を採用する.

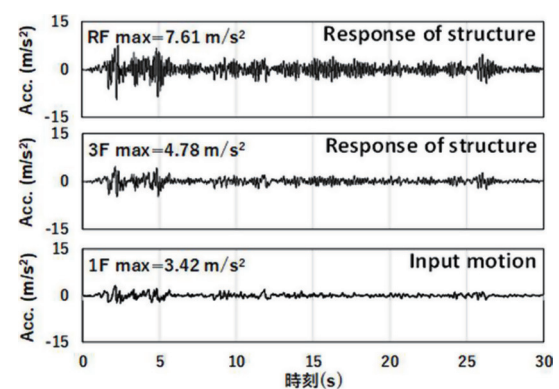
§ 3. 数値実験による同定精度の検証

3-1 数値実験の概要

前章で提案した手法の有効性を検証するため, 質点系モデルでは再現が難しいねじれ応答が生じる立体解析モデルの時刻歴応答解析の結果を用いて, 本手法による同定精度を確認する. 立体解析モデルを図二に, 応答解析結果を図三に示す. 応答解析モデルは 1×1 スパンの 5 層立体モデルとし, Y1 通りと Y2 通りの柱のせん



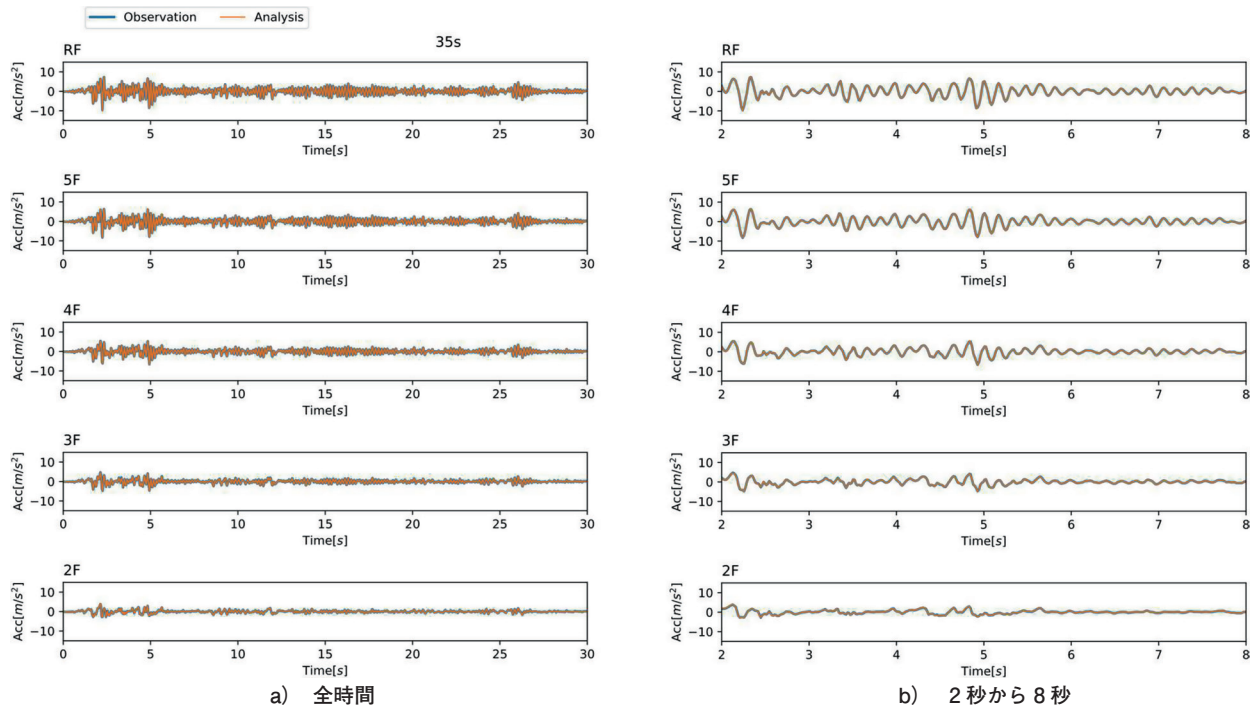
図二 立体解析モデル



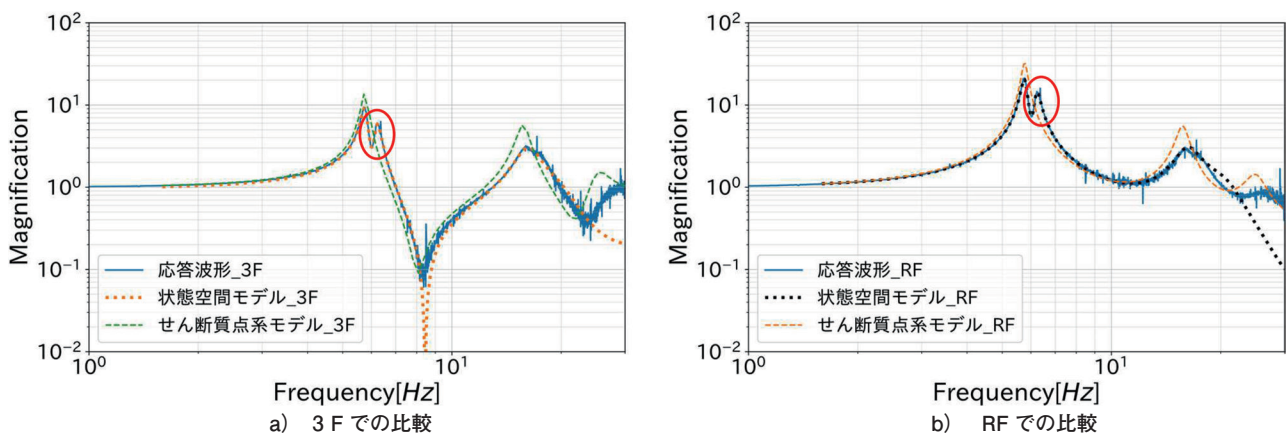
図三 入力および応答波形

表一 パラメータの変動範囲

システム次数	ブロック行数	セグメントの時間幅
6~10	50~210 (5 刻み)	5 秒, 10 秒



図一4 解析結果と同定結果の時刻歴波形での比較



図一5 応答波形および各モデルによる周波数領域での比較

断剛性に差異を設けることでねじれ応答を再現している。解析条件として、時間刻みは0.001秒、入力波形はEL-CENTRO_NSとする。本数値実験では、30 HzのLPFを適用し62.5 Hzにダウンサンプリングするデシメーション処理を施した3FLとRFLの応答波形を再現対象とし、パラメータの変動範囲は表一1に示すとおりとした。

3-2 検証結果

立体モデルでの時刻歴応答解析結果と本手法による同定結果の比較を図一4に示す。3FLおよびRFLの周波数領域での比較結果と立体解析モデルから作成した多質点系せん断ばねモデルでの結果を併せて図一5に示す。同定結果の最適なパラメータはシステム次数8、セグメントの時間幅5秒、ブロック行数200、時刻35秒の組み合わせとなった。周波数領域では、図中の赤枠で示す1次

固有振動数のピーク付近にねじれに起因する第2のピークが確認される。立体モデルでの応答波形の周波数領域と状態空間モデルは良好な一致を示すが、せん断質点系モデルとの一致は見られない。この差異は、状態空間モデルではシステム次数の増加に伴いスペクトル比の極の数が増加し、より複雑な挙動の再現が可能となるためである。

ねじれ応答が生じる立体解析モデルによる応答解析結果とシステム同定したモデルの応答波形は良好な一致を示しており、提案手法の有効性が確認された。

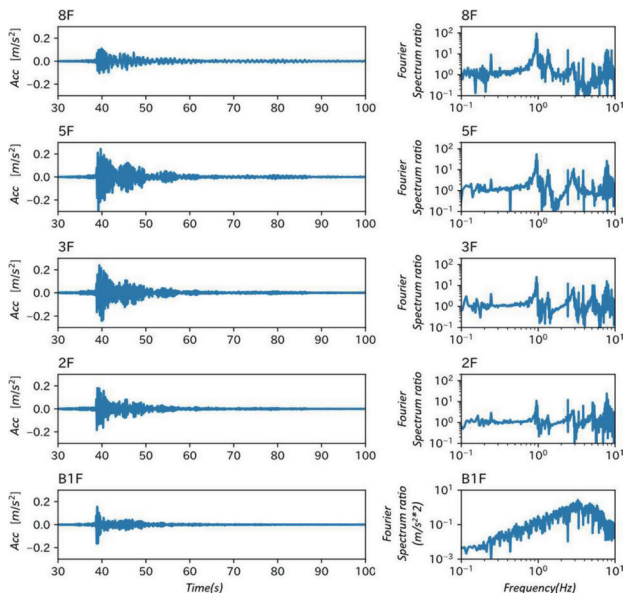
§ 4. 実建物を対象とした同定精度の検証

4-1 実建物の概要

対象建物は東京都内の事務所ビルとし、その諸元を

表一 実建物の諸元

建物規模	地下2階，地上8階，塔屋なし
構造種別	地下：RC造，地上：S造
建築面積／延床面積	680.63 m ² /6349.32 m ²
最高高さ	33.04 m
架 構	地下：耐震壁付ラーメン構造 上部：長辺短辺共にラーメン構造
加速度計設置階	B1F，2F，3F，5F，8F



図一 観測記録の波形とフーリエスペクトル (B1F) 及びスペクトル比 (1F～8F)

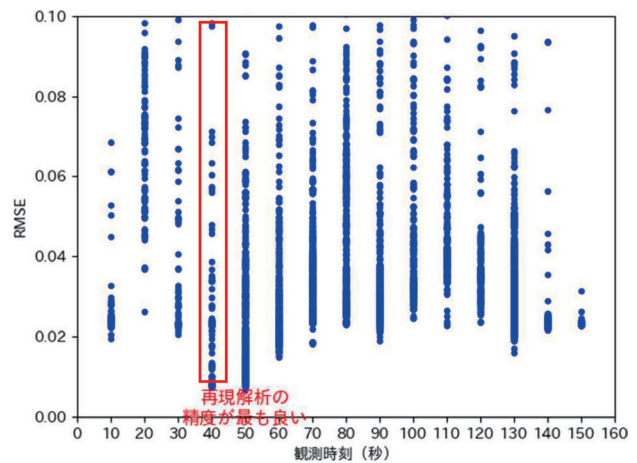
表一に示す，2024年1月28日8時59分に発生した東京湾を震源とする地震 (Mj=4.8) において，強震計設置階で観測された加速度波形を図一に示す．観測記録のサンプリングは100 Hzであるが，12.5 HzのLPFを適用し，25.0 Hzにダウンサンプリングするデシメーション処理を施した．

4-2 同定結果と応答結果

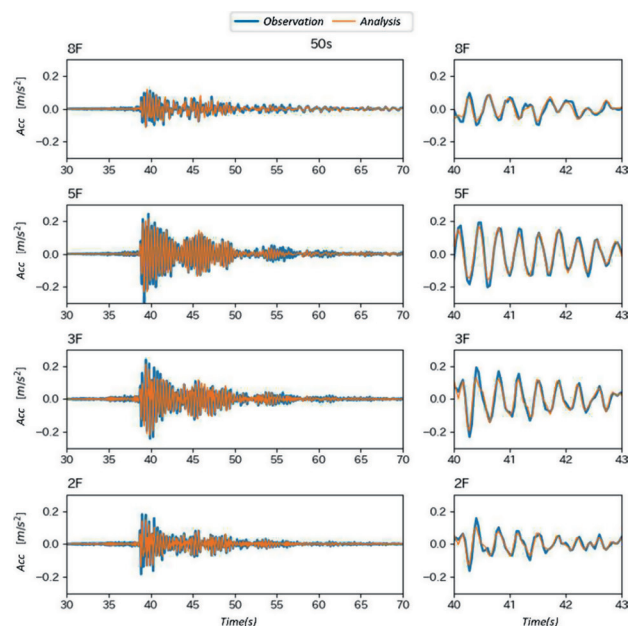
表三に示すパラメータ範囲で変動させた全同定結果に対応する応答同定のRMSEを図二に示す．同定結果は，システム次数10，セグメントの時間幅10秒，ブロック行数100，観測時刻50秒の組み合わせにおいて波形の一致度が最も高く得られた．このパラメータにより同定された状態空間モデルによる応答同定結果の時刻歴波形の比較を図三に示す．最大値および位相ともに再現度が高いことが確認される．この状態空間モデルと設計時の質量を用いてせん断質点系モデルによる応答解析結果の周波数領域での比較を図四に示す．その結果，数値実験と同様に周波数領域では不一致が確認され，単純化されたせん断質点系モデルでは表現できない挙動の存在が確認された．

表三 実測データの検証に用いる変動パラメータ

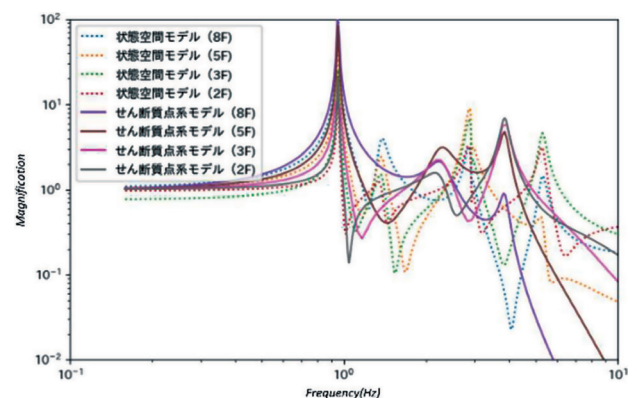
システム次数	ブロック行数	セグメントの時間幅
6～100	55～165 (5刻み)	10秒



図二 全同定結果に対する RMSE



図三 観測記録と応答同定結果の時刻歴波形での比較



図四 状態空間モデルとせん断質点系モデルの周波数領域での比較

4-3 実建物の主要固有振動数の同定手法

システム同定の主な目的は、建物の主要な固有振動数などの振動特性を把握することである。しかし、上記で求めた状態空間モデルの各係数は、質点系モデルの質量、減衰、剛性とは異なり物理的な意味を持たない。また観測記録はノイズやねじれ応答などの複雑な挙動の成分が含まれており、波形での一致度を高めるためシステム次数を大きくすると周波数領域での形状は複雑化することから主要な固有振動数の特定が困難となる。この課題に対してスタビライゼーションダイアグラムを用いて固有振動数を目視により評価する方法が挙げられる。本報では確率密度関数などを用いて固有振動数を自動評価する手法を提案する。以下に、提案手法の手順を記す。

＜提案手法＞

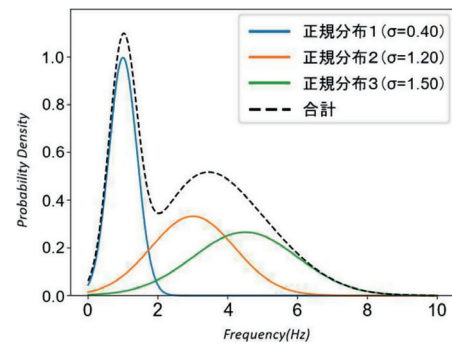
- ① 全同定結果に対する応答同定を実施し、RMSE を算出する。
- ② RMSE の大きさに対応する標準偏差を決定する関数を設定する。
- ③ 各同定結果について、固有振動数を平均値とし、手順②で求めた標準偏差を持つ正規分布を作成し、全結果を重ね合わせる。

本手法は、スタビライゼーションダイアグラムに現れる固有振動数の特性を出現頻度として捉え、応答同定の一致度が高いパラメータに小さい標準偏差を付与して、重み付き評価を行う。各同定結果の固有振動数に対応する正規分布の重ね合わせのイメージを図一10に示す。応答同定結果のRMSEに対する標準偏差は、ロジスティック関数（式3）により設定する。

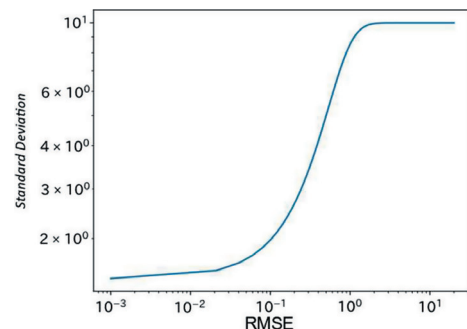
$$f(x) = a + \frac{b-a}{1+e^{-c(x-d)}} \quad (\text{式3})$$

ここで、関数の下限値 a を 0.001、上限値 b を 10 とし、勾配係数 c は 3.5 を採用する。また、反曲点位置 d は RMSE の最大値と最小値の範囲における 10% 点に設定する。 e はネイピア数である。これらのパラメータによる関数形状を図一11に示す。

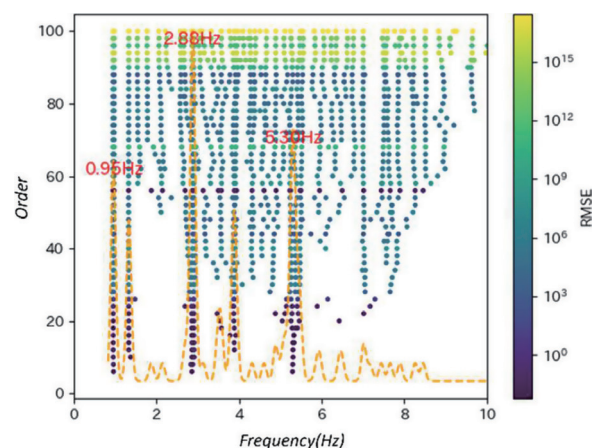
提案手法を今回の同定結果に適用した結果を図一12に示す。固有振動数の分布において、0.95 Hz, 2.88 Hz, 5.30 Hz に顕著なピークが確認される。これらの値は図一13に示す各フロアにおける周波数領域でのピークと概ね一致しており、目視評価を行うことなく主要な固有振動数を自動同定することが可能となる。ただし、本手法は式3のロジスティック関数の設定に依存するため、その適用には注意を要する。今後の展開として、さらなる自動化の実現に向け、関数パラメータの合理的な決定手法の構築が課題となる。



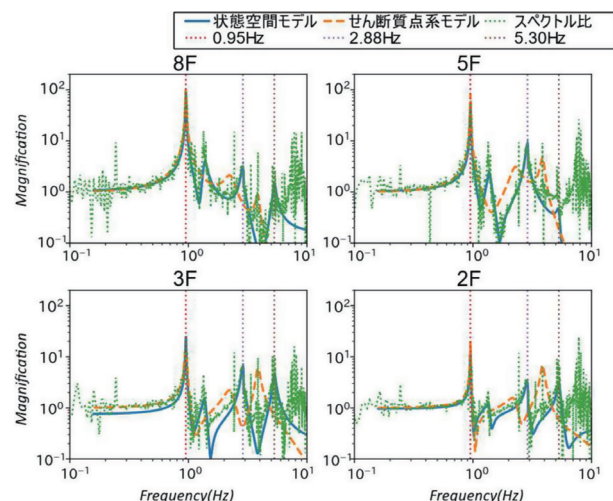
図一10 正規分布の重ね合わせのイメージ



図一11 RMSE と標準偏差の対応関係



図一12 スタビライゼーションダイアグラムと固有振動数の同定結果



図一13 各フロアにおける周波数領域での比較

§5. まとめ

部分空間法を用いて、地震時の建物挙動を再現できる解析モデルの自動同定する手法を提案し、その有効性を確認した。得られた知見を以下に列挙する。

- 1) RMSE およびコサイン類似度を評価指標とし、同定パラメータの網羅的な検討により再現度の高い解析モデルを自動同定する手法を考案した。
- 2) スタビライゼーションダイアグラムと正規分布の重ね合わせにより、建物の主要な固有振動数を自動同定する手法を考案した。
- 3) 時刻歴応答解析による数値実験および実建物の観測データによる検証により、本手法の有効性を確認した。

今後の課題として、さらなる自動化の実現に向けた関数パラメータの合理的な決定手法の構築が挙げられる。

謝辞. 本報は文献3および4に加筆修正を行ったものである。研究の遂行にあたりご協力を頂いた関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 楠浩一：建物の構造ヘルスマニタリングによる被災度区分判定技術の開発地震災害対応として求められるもの、シンポジウム建物から人間に至るモニタリング技術の取り組みと災害時への適用, p. 59-71, 2024. 3.
- 2) 肥田剛典, 永野正行：部分空間法に基づくシステム同定による建物の固有振動数と減衰定数の同定精度, 日本建築学会構造系論文集, 第701号, p. 923-932, 2014. 7.
- 3) 三沢健介, 村木唯人, 正月俊行, 山崎康雄, 肥田剛典：計測データを再現できる解析モデルの自動作成に関する研究 その1, 日本建築学会大会（関東）, p. 345-346, 2024. 8.
- 4) 村木唯人, 三沢健介, 正月俊行, 山崎康雄, 肥田剛典：計測データを再現できる解析モデルの自動作成に関する研究 その2, 日本建築学会大会（関東）, p. 347-348, 2024. 8.