

時間遅延埋め込み動的モード分解に基づくデータ駆動型地震応答解析 (シンポジウム講演概要)

Data-driven seismic response analysis based on dynamic mode decomposition with time-delay embedding (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

塩井 瑛大 (東北大学, 構造計画研究所*) 大竹 雄 (東北大学) 吉田 郁政 (東京都市大学) 村松 正吾 (新潟大学)
Akihiro SHIOI, Tohoku University (*Belonging from April 2023; KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.)
Yu OTAKE, Tohoku University
Ikumasa YOSHIDA, Tokyo City University
Shogo MURAMATSU, Niigata University
E-mail: as7401sk@gmail.com

This study aims to develop a data-driven method for seismic response analysis based on the simultaneous analysis of seismic acceleration records in three directions at the ground surface and engineering bedrock. Seismic response analysis involves dealing with non-stationary earthquake input motion and the nonlinearity of geomaterials. To address these challenges, we propose a method that combines time-delay embedding and dynamic mode decomposition for time-series data observed in real space. The proposed method aims to construct a high-dimensional linear model that accurately represents the time evolution of seismic response. In this study, we apply the proposed method to field observations and demonstrate its effectiveness for extrapolation estimation by constructing a high-accuracy linear model replicating the seismic response.

1. はじめに

我が国では、K-net や KiK-net に代表される高密度地震計ネットワークに加え、建物やガスメータ等のインフラ施設等に設置されている簡易計測器など、極めて高密度な地震動観測記録網が整備されている。著者らは、これらの高密度地震動データの有効活用を目的として、データ駆動型の地震応答解析手法の開発を目指している。具体的には、多数の地表面地震動観測記録と対象地域を代表する工学的基盤もしくは露頭基盤の地震動観測記録を活用したデータ駆動型地震応答解析のサロゲイトモデル開発を志向する。この際、地盤情報は一切利用せず、観測地震動の応答関係のみを学習する点に特徴がある。地震動観測記録に基づくデータ駆動型手法は、直達波以外の表面波や反射波、回折波のような地震応答の3次元効果も自動的に考慮される可能性があると考えている。従来のモデル駆動アプローチでは不可能とされてきた空間規模の解析を高解像度で実現し、地盤調査が実施されていない地点の地震動観測も有効に活用した広域的地震リスク評価やリアルタイム予測システムの構築に繋げることを目指している。このコンセプトに基づき、著者らは、動的モード分解 (Dynamic mode decomposition; DMD) の応用を検討してきた。DMD は、現象の支配方程式を陽に必要とせず、時系列データの時間発展に注目した特異値分解に基づくモード分解を行うことによって、時間に依存しない空間固有モードと、それぞれのモードに対応する時間発展を指数関数で表現し、各モードの減衰や周期的特徴、系の安定性を数学的に記述する手法である。また、対象物理を線形時不変システムで近似する方法とも解釈できるため、上記のようなこのような解釈性の高さの反面、解析対象データの定常性、線形性を強く要求する手法でもある。地震応答解析のような、入力地震動の非定常性や地盤の材料非線形性が卓越する問題に適用するためには、これら2つの要求への対処が重要な課題となる。本研究では、この課題に対して、実空間で観測される時系列データに対して、時間遅延埋め込みによる高次元化と動的モード分解による次元圧縮を融合した手法を展開し、高次元空間において線形モデルによる時間発展表現を可能と

する地震応答解析モデルの構築を試みる。なお、本稿では、ある1地点の実観測記録を用いて、再構成と外挿推定を行う。その上で、時間遅延埋め込みによる状態量のデータ構造の変換が、データ駆動地震応答解析の高度化や工学的知見の獲得へ寄与するか考察を行う。

2. 研究に用いる手法

Fig. 1 は、提案手法の概要図を示している。Shioi et al. (2023)¹⁾と同様に、Dynamic Mode Decomposition with control (DMDc)により入力地震動の非定常性を考慮したデータ駆動解析モデルを構築する。この際、時刻 t_k における n 次元の状態量（ここでは観測された加速度の3方向成分）ベクトル $x_k \in \mathbb{R}^n$ を下に示すHankel行列として高次元化する。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_q \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{q+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_d & x_{d+1} & \cdots & x_m \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{d \times p}$$

ここで、 $q = m - d + 1$ であり、 d は遅延埋め込み階数である。Hankel行列 $\mathbf{H}$ に対して特異値分解 $\mathbf{H} = \mathbf{U}_H \mathbf{\Sigma}_H \mathbf{V}_H$ を施し、状態量を高次元化した空間（これを遅延座標空間と呼称する）の中から支配的な低次元基底と低次元奇跡を求めることができる。 $\mathbf{U}_H$ は遅延座標空間の基底を形成し、 $\mathbf{V}_H$ は、 $\mathbf{U}_H$ の各行（固有モード）の時間発展モード、 $\mathbf{\Sigma}_H$ はその重みを表す。すなわち、元の状態空間における局所的ダイナミックスは $\mathbf{U}_H$ により射影され、それらの時間発展は $\mathbf{\Sigma}_H \mathbf{V}_H$ によって記述される。本研究では、 $\mathbf{U}_H$ をDelay構造基底、 $\mathbf{\Sigma}_H \mathbf{V}_H$ は改めて $\mathbf{W}_H$ と記述し、Delay空間要素波形と呼称する。本研究では、観測した低次元時系列データをDelay構造基底 $\mathbf{U}_H$ によって高次元空間にリフトさせ、Delay空間要素波形 $\mathbf{W}_H$ の時間発展に対してDMDcを適用する。これにより、元の状態空間が遅延座標空間上に再定義され、高次元化され、高次元空間においてDMDcによる次元圧縮を行うことで主要な基底空間における時間発展を線形モデルによって表現可能になると考えられる。本論文では、この手法をTime-delay DMDc (TD-DMDc)と呼称する。

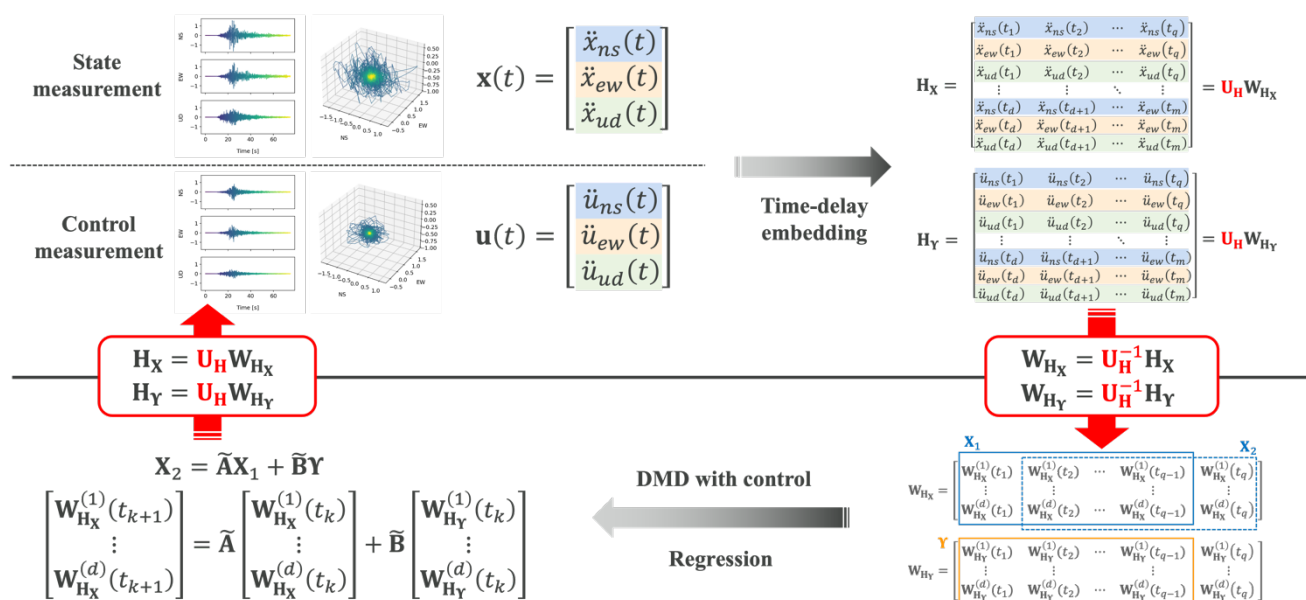


Fig. 1 Application of TD-DMDc to 3D seismic acceleration records

3. 結果と考察

本研究では、宮城県仙台市仙台港雷神埠頭で観測された地震動波形²⁾を用いる。表層地盤は、礫や砂、シルトの互層地盤であり、工学的基盤の深度は 55.07m である。研究に用いる地表面と工学的基盤の地震動観測記録の 31 セットを研究に用いる。このうち、学習用に 30 セット、外挿推定用に地表面の最大加速度が最も大きい 1 セットを抽出した。

地表面で観測された 3 方向成分の加速度時刻歴を状態量ベクトルとし、工学的基盤で観測された 3 方向成分の加速度時刻歴を制御項ベクトルとし、同じ次元の遅延時間埋め込みを行い、TD-DMDc により学習と予測を行う。

Fig. 2 はある 1 つの学習データに対する再構成結果を示している。Shioi et al. (2023) の手法では、地表面の加速度時刻歴の特性を適切に再現できないが、TD-DMDc による次元拡張により再現性が向上していることが分かる。

Fig. 3 は、外挿推定用の観測記録と TD-DMDc による予測結果を重ねて示している。外挿推定においても、観測記録の時刻歴特性を適切に予測できていることが分かる。

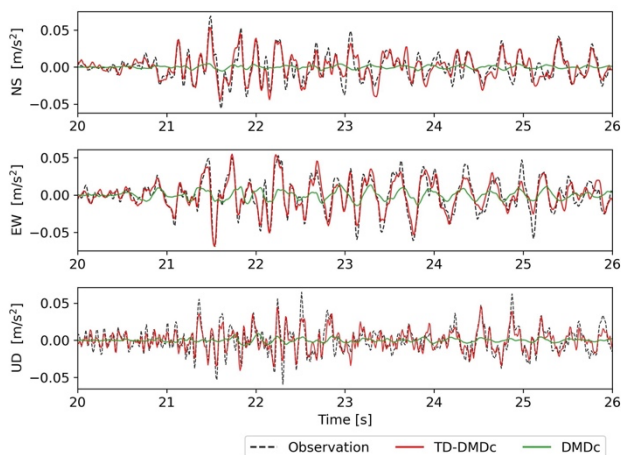


Fig. 2 Comparison of reconstruction accuracy

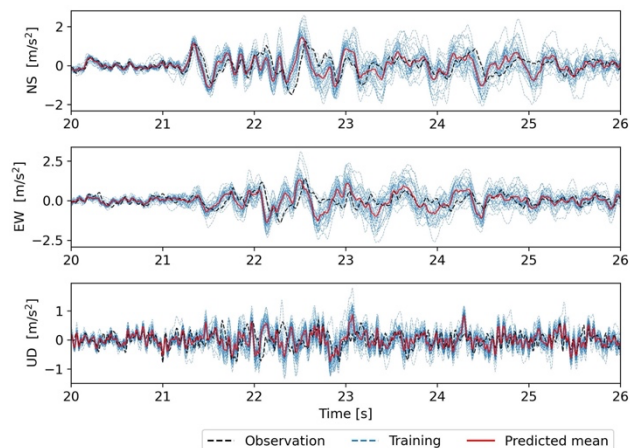


Fig. 3 Results of extrapolation estimation

4. 結論と今後の課題

本研究では、データ駆動地震応答解析法の開発に向けて、遅延時間埋め込みによる次元拡張に基づく動的モード分解の有効性を検証した。遅延時間埋め込みは、複雑な地震応答特性を適切に捉え、遅延時間埋め込みを行わない従来のモデルと比較して推定精度を向上させることを確認した。今後は、遅延時間埋め込みと次元圧縮の操作と力学的特性との関係を考察し、広範な問題に適用できるデータ駆動地震応答解析モデルの開発を目指す。

参考文献等

- 1) Akihiro Shioi, Yu Otake, Ikumasa Yoshida, Shogo Muramatsu & Susumu Ohno, Data-driven approximation of geotechnical dynamics to an equivalent single-degree-of-freedom vibration system based on dynamic mode decomposition, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2023, DOI: 10.1080/17499518.2023.2184479
- 2) 独立行政法人港湾空港技術研究所, 港湾地域強震観測, URL: <https://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>