

領域知識を考慮したデータ駆動型地盤応答解析法の開発に関する基礎研究 Fundamental study on development of data driven earthquake response analysis considering geotechnical engineering knowledge

中村 鴻介 (新潟大・自然) 大竹 雄 (新潟大・工)
Kosuke NAKAMURA, Niigata University
Yu OTAKE, Niigata University
E-mail: f18e027f@gmail.com

The authors address at performing ground response analysis using Dynamic Mode Decomposition (DMD). In this study, we attempt to utilize geotechnical engineering knowledge into DMD analysis algorithm by interpreting the physical meaning of the time transition matrix A obtained from DMD analysis. In order to consider the nonstationary of the input seismic motion, we implemented DMD-C which extended the algorithm of DMD for ground response analysis. Finally, we applied this method to a simple example of one-dimensional ground response analysis and verified its effectiveness.

1. はじめに

近年、調査技術、コンピュータ技術の飛躍的な発展、数値シミュレーション技術の向上により、容易に高次元の膨大なデータを獲得、活用することが可能になった。しかし膨大なデータの中から、本質的なデータ、有意な原理や現象を発見・解明するのは、解析コストが非常に大きくなり困難な場合が少なくない。そのため、データの次元を縮約する手法が必要とされており、その一つとしてモード解析法である動的モード分解(DMD; Dynamic Mode Decomposition)が使用されている。DMDは、近年発達、流体力学の分野などで使われている手法であり、系の時間遷移に着目しモード分解を行うことにより、空間的な特徴だけでなく、動的な情報も得ることができ、動的な物理現象の解析・予測を行うことができる。

本研究では、DMDを地盤の地震応答解析(以下、地盤応答解析)に適用するための基礎研究である。DMDは、先にも示した通り、系の時間発展則をデータから導き、データ駆動型の予測を行うことができる。ただし、DMD解析を効果的に実施しうる対象は、(1)系が線形であること、(2)系の時間発展特性が指数関数で表現される定常的な減衰を有していること、が挙げられる。これに対して、地震時の地盤応答挙動は、小さなひずみレベルから力学的非線形性が卓越することが知られており、入力地震動は非定常性を有している。従って、上記2点の克服が、本研究の具体的な課題となる。

(1)DMDの線形化の議論は、クープマン作用素論に基づき、カーネル変換や辞書学習等の物理的意味を持たせることができない、極めて非線形な関数で置き換える議論が行われている。しかしながら、この変換は物理的意味を消失するとともに、場当たりのモデル化がなされる場合が多い。本研究では、データから得られる時間発展則に物理的意味をもたせることにより、非線形特性を地盤工学分野の領域知識(モデル)を導入することを考える。

(2)時間発展の非定常性については、PrimitiveなDMDではモデル化が困難であることから、DMD-C(DMC-with-Control)の概念を導入し、入力地震動を強制項として導入することにより、地震動の非定常性を考慮した時間発展予測モデルの構築を行う。

2. 運動方程式に基づくDMD-Cの定式化

本研究では、1次元の地盤応答解析を対象として、工学的基盤に入力された地震動波形の増幅特性を評価することを考える。まず、1質点系の振動問題から運動方程式とDMDの式との関係を整理する。DMDによりデータの時間発展は、

$$X_{k+1} = AX_k \quad (1)$$

と記述され、データの時間発展特性は、時間遷移行列Aにより表現される。また、Fig.1の1質点系が正弦波を受ける時の、運動方程式は、

$$\ddot{x} = -\frac{c}{m}\dot{x} - \frac{k}{m}x + \theta \quad (2)$$

k :バネ定数 c :減衰定数 m :質点質量 θ :外因性強制力
式(1)をマトリックス表記に直し次の形に整理する。

$$dt \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \theta \quad (3)$$

ここで、

$$X_k = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, \quad \dot{X}_k = dt \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix}$$

として、式(3)を式(1)の形へと整理すると、

$$\frac{(X_{k+1} - X_k)}{dt} = \dot{X}_k = GX_k$$

$$X_{k+1} = dtGX_k + X_k = (1 + dtG)X_k$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & dt \\ -\frac{k}{m}dt & -\frac{c}{m}dt \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & dt \\ -\frac{k}{m}dt & 1 - \frac{c}{m}dt \end{bmatrix} X_k \quad (4)$$

となり、質点系の時間発展特性は、質点系の各パラメータとデータの時間遷移間隔により導かれることがわかる。よって時間遷移行列Aは、系のパラメータから導くことができ、系の特性は、時間遷移行列Aから解釈できることが示唆される。

3. DMD-C を用いた地盤応答解析の流れ

本研究で提案する DMD を用いた地盤応答解析法の概要を下記に示す。

(1) STEP1; 中小規模の地震動観測による学習ステップ(逆解析)

対象現場の地表面で観測された地震動と周辺の露頭基盤での地震動の応答関係の時間発展を DMD-C により同定する。時間発展項から、地盤の等価線形化されたせん断剛性と減衰定数を同定する。複数の地震動観測に基づいて、様々なひずみレベルの等価せん断剛性および減衰定数を得ることができる。なお、ここでは、地震動の観測ではなく、動的弾塑性 FEM 解析に基づいて、いくつかの中小規模の地震に対する応答特性を解析し、これを用いている。

(2) STEP2; 地盤の動的な非線形モデルの同定

STEP1 で得られた複数の等価せん断剛性および減衰定数のデータを R-O モデルで回帰分析することで、対象地盤の動的変形特性を同定する。なお、ここでは、簡便に地盤が複数の層で構成されている場合においても、単一の層として評価することとする。

(3) STEP3; 大地震を想定した地盤応答解析 (DMD シミュレーション)

STEP2 で得られた地盤の動的変形特性を用いて、DMD-C により大地震時の地盤応答解析を実施する。SHAKE で行われるパラメータの収束判定を準用し、適切な等価せん断剛性および減衰定数を用いて DMD-C シミュレーションにより地盤応答解析を行う。

以上のステップにより、解析上最も時間を要する地盤モデルの作成やパラメータの設定過程を全てデータに基づいて実施できるため、解析の効率を高めることができる。繰り返し解析が要求される、信頼性解析やリスク評価において有効に機能すると考えられる。

4. 解析条件と解析結果

4.1 解析条件

Fig.2 に示す地層構成を持つ地盤モデルを想定し、DMD-C を用いた 1 次元地盤応答解析を行う。入力地震動は、糸井らの論文 1) から得られている地震動パラメータを元に作成した模擬地震動波(Fig.4)を使用した。

4.2 解析結果

Fig.5 に DMD-C シミュレーションにより行った地盤応答解析結果と FEM 解析結果との地盤応答波形の比較を示す。図から確認できるように、DMD-C シミュレーションにより FEM 解析と同様の地盤応答を表現できていることが確認できる。

5. 結論と今後の課題

本研究では、DMD 適用への課題であった地盤応答挙動の非線形特性、地盤応答の時間発展特性の非定常性の問題を考慮し、モデルを構築することで、DMD の地盤応答解析への適用を試みた。地盤の非線形特性は、DMD と運動方程式との関係を整理することにより、時間遷移行列 A の物理的意味を解釈し、地盤工学分野の領域知識の導入することで考慮し、地盤応答の時間発展則の非定常性については、DMD の概念を拡張させた DMD-C を導入することにより、地震動の非定常性を考慮した。さらに、DMD-C を用いた地盤応答解析を行い、動的弾塑性 FEM 解析との地盤応答波形の比較から、地震動応答波形の増幅特性を評価できることを示した。

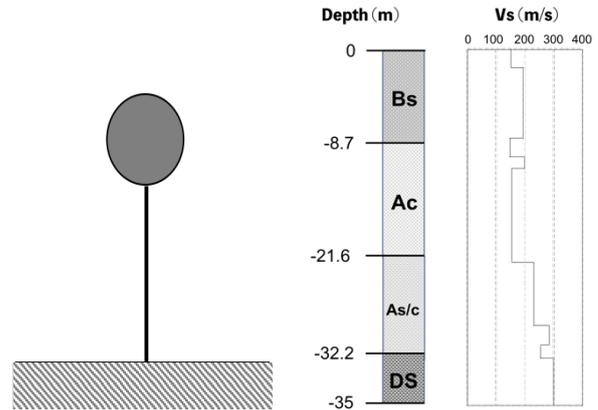


Fig.1 single particle system

Fig.2 geological structure of ground model

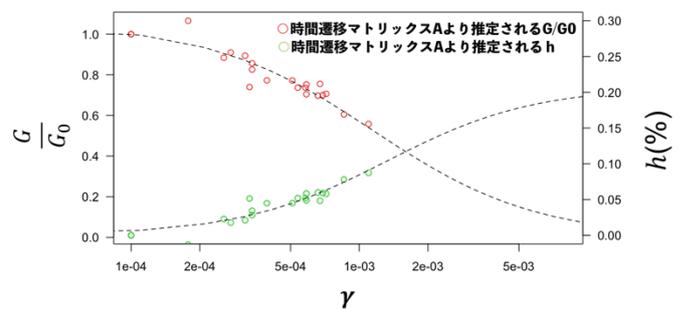


Fig.3 Dynamic deformation characteristics of model ground

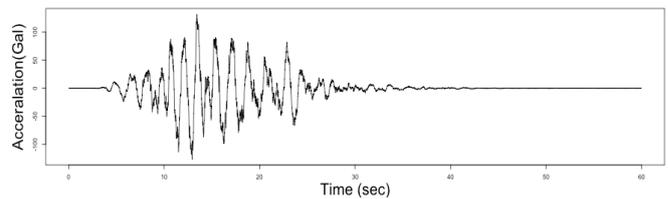


Fig.4 simulated earthquake

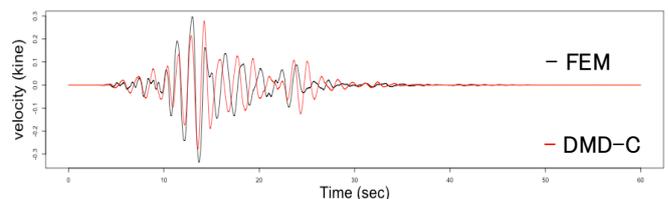


Fig.5 A comparison between FEM and DMD-C

参考文献

- 1) 糸井達哉, スタッフォード ピーターJ, 金子雅彦, 佐藤一郎, 地殻内地震の地震動時刻歴波形の統計的予測法, 日本地震工学会 2014
- 2) Kutz, J. N., Brunton, S. L., Brunton, B. W., and Proctor, J. L.: DYNAMIC MODE DECOMPOSITION: Data-driven Modeling of Complex Systems, SIAM, 2016.
- 3) Per B. Schnabel, John Lysmer, H. Bolton Seed : SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontal layered sites