

多重解像度 DMD を用いた信号復元による
大規模港湾空港の沈下挙動の再現
(シンポジウム講演概要)

Reconstruction Simulation of Time-Dependent Dynamics of Large Offshore Airport
by Signal Restoring Using Multi-Resolution DMD
(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

畑井 向 (東北大・工) 大竹 雄 (東北大・工) 高野 大樹 (港湾空港技術研究所)
吉田 郁政 (東京都市大学・工) 村松 正吾 (新潟大学・工)

Ko HATAI, Tohoku University
Yu OTAKE, Tohoku University
Daiki TAKANO, Port and Airport Research Institute
Ikumasa YOSHIDA, Tokyo City University
Shogo MURAMATSU, Niigata University
E-mail: ko.hatai.r1@dc.tohoku.ac.jp

We are engaged in research to enhance the effective utilization of monitoring information for condition monitoring of civil engineering works. The signals observed during the construction process may significantly contribute to bridging the gap between the design and maintenance of civil engineering structures and facilitating the optimal life-cycle management of such structures. Specifically, this study investigates the feasibility of constructing an optimization method for the construction process utilizing high-density settlement time-series data collected from offshore airports. Our main objective is to predict unequal settlement of airports after completion, based on the settlement time-series data recorded during the construction process, and optimize the construction process based on maintenance and management performance, such as long-term flatness assurance. As a fundamental research contribution, this paper also examines signal restoration techniques for handling low-quality information, including observation noise and missing data. Furthermore, we clarify the relationship between the unequal settlement of airports and the environmental conditions of the targeted area and identify pertinent issues for developing a prediction method using settlement time-series data.

1. はじめに

近年、急速に発達する機械学習や IoT の先端技術が建設業界の生産性向上に大きく貢献することが期待されている。著者らは、社会基盤施設の設計と維持管理をシームレスに接続することの重要性を感じ、施工時状態監視に活用されている大規模かつ高次元なデータの高度利用法を研究している。ここで、施工時に観測されるデータは低品質である可能性が高く、低品質データの信号復元が重要な技術になる。

本研究では、大規模海上空港の盛土構築時に計測される高密度沈下時系列データのライフサイクルマネジメントへの活用可能性について考察する。海上空港は、盛土構築後に長期間の圧密沈下が生じる可能性があり、その挙動は施工プロセスと強い関係があると考えられる。従って、施工時に盛土構築後の将来挙動が予測できれば、施工段階で空港の維持管理性能を制御できる可能性がある。一方で、施工時の沈下時系列データには観測ノイズやデータ欠損が混在しており、これら低品質な高次元データの信号復元技術の開発が、データ利活用促進の重要な要素であると考えられた。

なお、本研究は、維持管理性能を尺度とした施工時最適化法開発を志向し、その基礎研究として、施工時の沈下時系列データの復元方法を検討した結果を提示する。復元した信号により、対象空港の施工プロセスを再構成し、基礎地盤の沈下プロセスを明らかにした。また、対象地域の地盤調査等との関係を考察することにより、地盤工学的性質を明らかにするとともに、沈下時系列データを用いたリアルタイム将来予測法の構築のための課題を抽出する。

2. 対象施設の概要

近年建設された海上空港構築時の盛土施工時不同沈下の時系列計測値を収集した。約 $0.5\text{km} \times 2\text{km}$ の空港盛土の平面範囲に対して、39 点に沈下板が設置され約 700 日間のデータが蓄積されている（以降、これを施工時沈下データと呼称する）。施工時沈下データは盛土構築時の盛土基面の沈下時系列データであり、大きな変形が観測され、基礎地盤の力学特性に関する情報が取得できると考えられる。この他、約 400m 間隔で標準貫入試験が実施されており、基礎地盤の大まかな土層構成は把握できる。加えて、本稿では利用していないが、施工終了後には、年に数回の空港全面のレーザ測量が実施されており、平坦性を継続的に計測しながら維持管理がなされている。

3. 研究手法

施工時沈下データを用いたデータ駆動予測を行うために、観測ノイズや欠損補間を行い、データを擬似的に完全データに変換することを考える。ここでは、Dynamic Mode Decomposition (DMD) のアルゴリズムを応用する。DMD と多重解像度表現を組み合わせた mrDMD¹⁾による低次元化作業により局所性のある観測ノイズの除去を行い、大域特徴により欠損部分を補間することを考える。

まず、データ欠損部分は前処理として、欠損の前後の値を線形補間して、それを平均値として $\pm 0.5\text{m}$ の一様乱数で擬似的にデータを補間する。その上で、mrDMD による低次元化再構成結果を真の観測データとみなす。

mrDMD の初期ステップでは、任意時刻 t における沈下量 $x(t)$ を以下のように、固有値の大きい低周波数モード (slow

mode) とそれ以外の高周波数モード (fast mode) によって表す.

$$x(t) = \sum_{k=1}^{m_1} \psi_k^{(1)} \exp(\omega_k t) b_k + \sum_{k=m_1+1}^M \psi_k^{(1)} \exp(\omega_k t) b_k$$

ここで, m_1 , $\psi_k^{(1)}$, ω_k , b_k は初期ステップにおける slow mode の数, DMD モード (空間特徴), 各 DMD モードの固有値, 初期振幅を表す. ステップ 2 では, 右辺第二項のみでデータ行列を再構成し, 時間方向に 2 分割する. 分割したデータ行列に対して, 上式と同様に slow mode を取り出す. このプロセスと再帰的に繰り返すことにより, 各分解レベルにおける低周波モードを用いて, 時刻 t における沈下量を再構成する.

4. 研究結果

Fig.1 は, 解析対象の沈下時系列データである. このデータの他, 盛土の構築履歴時系列データがあり, 両者を用いて対象空港の沈下時空間データの解析を行う. 一部区間でデータが欠損し, また局所的に現実的ではない挙動が存在することが確認される. このデータに対して mrDMD より信号復元を行い, その結果に対して DMDc¹⁾による将来予測モデルを構築する.

Fig.2 は, 信号復元より得られた, 対象空港盛土の a) 基面の最大沈下量の空間分布, b) 盛土の最終高さ, c) 基礎地盤の粘性土層の厚さ, d) DMDc による予測誤差を示している. 沈下量の空間分布は盛土高さの空間分布と相関していることが分かった. ただし, 盛土高さの最大位置と沈下量の最大位置は異なっている事がわかる. 沈下量の最大位置は, 粘性土とシルト層の合計の層厚が最大となる点で生じている. 盛土高さだけでなく, 基礎地盤の特性が盛土の沈下挙動を支配する要因になっていることを確認した.

Fig.3 は, 信号復元したデータ行列を用いた DMDc による将来予測結果を示している. 予測精度が高い点 (上図) と予測結果と実データにバイアスが生じている点 (下図) の例を示している. Fig.2d) は, 対象空間の計算最終時刻における予測誤差の空間分布を示している. 予測精度が低下する地点は, 一部箇所限定されている.

5. 結論と今後の課題

本研究は, 維持管理性能を尺度とした施工時最適化法開発のための基礎研究として, 施工時沈下データの復元方法を研究し, 対象空港の施工プロセスと基礎地盤の沈下プロセスを明らかにすることに取り組んだ. 今後は, 施工時沈下データから将来予測するデータ駆動モデルの開発を行う予定である. mrDMD による信号復元の有効性と DMDc による即時予測の基本的な有効性を確認した.

しかしながら, 局所的に大きな誤差が生じることを確認した. この誤差の原因は明確にすることができなかったが, 盛土量 (強制項) の不確かさや地盤材料非線形性の影響が懸念された. 今後は, 計測が困難な地盤材料非線形性の影響を考慮するため, 数値解析ベースの学習との融合, ベイズ推論に基づくデータ駆動モデルの開発を通じて, 不確かさを考慮したデータ駆動予測モデルの開発を行う予定である.

参考文献

- 1) Kutz, J. Nathan and Brunton, Steven L. and Brunton, Bingni W. and Proctor, Joshua L., Dynamic Mode Decomposition, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2016.

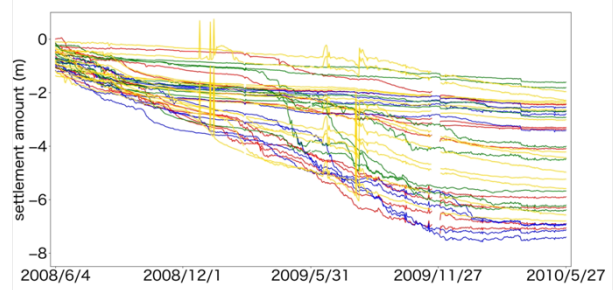


Fig.1 Settlement time series of the target site

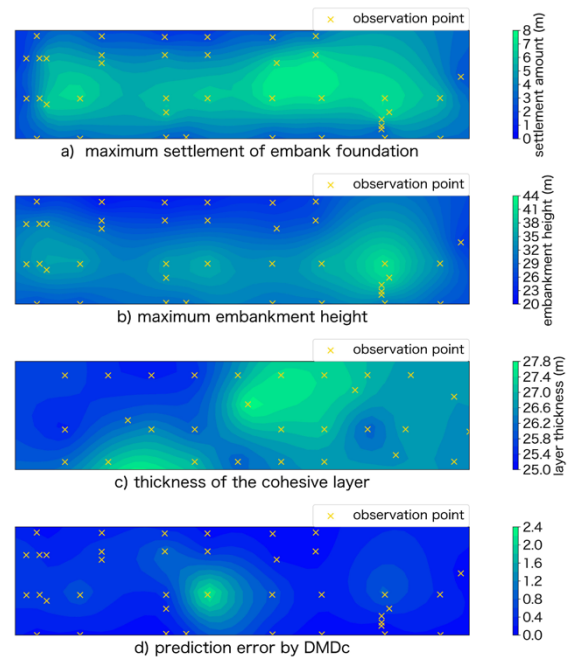


Fig.2 Signal resolution results a) maximum settlement of embank foundation, b) maximum embankment height, c) thickness of the cohesive layer, d) prediction error by DMDc

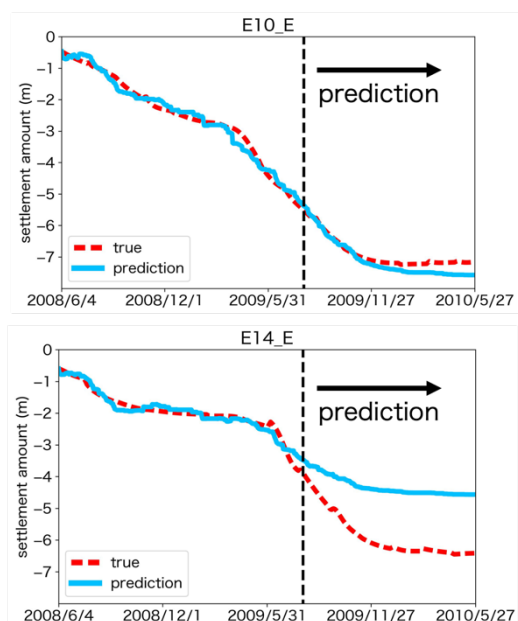


Fig.3 Forecasting results by DMDc