

重力式岸壁の地震応答解析に対する特異値分解による線形次元削減と代替モデルの活用

国土技術政策総合研究所（出向元：㈱エコー） 正会員 ○住岡直樹

国土技術政策総合研究所 正会員 宮田正史 福永勇介

東北大学 正会員 大竹雄

1. はじめに

耐震強化岸壁はレベル2地震動等の作用後であっても、緊急物資輸送用の船舶が安全に接岸・係留できることが求められる。このため、港湾分野では地盤液状化を考慮できる地震応答解析（FLIP¹⁾）を用いて、地震後の残留変形量や残留応力の照査を行う。しかしながら、実務設計では計算コストの制約から、数百mに亘る施設の全延長のうち代表一断面で照査を行うため、船舶が岸壁に接岸できるか否かの鍵となる岸壁の凹凸変位量（残留変形量の法線方向分布）は現状では照査していない。このためには、地震後の凹凸変位量を、全断面の数値解析を行わずに、かつ地盤条件等の入力パラメータのばらつきや法線方向の変化も考慮した上で、簡易に評価できる手法の構築が望まれる。本研究はその端緒として、重力式岸壁の地震応答解析に対して大竹らの提案手法²⁾、すなわち特異値分解による線形次元削減と代替モデルの構築を適用し、上述の簡易評価手法の構築の可能性を検討するものである。

2. 本研究に用いる手法の全体構成

本研究に用いる手法の全体構成²⁾を図-1に示す。本研究では、まず、特異値分解による線形次元削減（以後、モード分解と呼称する。）を活用し、FLIP解析結果から特徴的かつ重要な情報のみを抽出する（Step1）。具体的には、解析結果のうち、全節点の水平・鉛直変位量と全要素の過剰間隙水圧比を行方向に、全時間ステップの各応答値を列方向に並べた行列 X に対してモード分解を行い、できるだけ少ないモードまでで、元々のFLIP解析の結果を一定精度で再現できるように情報を縮約（基底を決定）する。次に、縮約した基底と入力変数を最小二乗法により関連付けた代替モデル（Reduced Order Model, ROM）の構築を行う（Step2）。本検討の代替モデルは、岸壁背後の埋立土の地盤パラメータ（入力変数）が変化した場合の、全節点・要素の応答値の推定を目的とした。入力変数は N 値と細粒分含有率 F_c の2変数を対象とし、全13港湾の埋立土等を対象とした土質調査結果からそれぞれの平均と標準偏差を設定した（ N 値（ $\mu_N=10.4$, $\sigma_N=3.3$ ）、 F_c （ $\mu_{F_c}=10.1$, $\sigma_{F_c}=3.7$ ））。なお、代替モデルは、FLIPによる解析結果と入力変数を回帰分析により線形結合して構築するため、入力変数の異なる複数のFLIP解析結果が必要となる。本検討では、 N 値を μ 及び $\mu \pm \sigma$ の3通り、 F_c も同様に3通りの合計9ケースのFLIP解析結果を使用した。

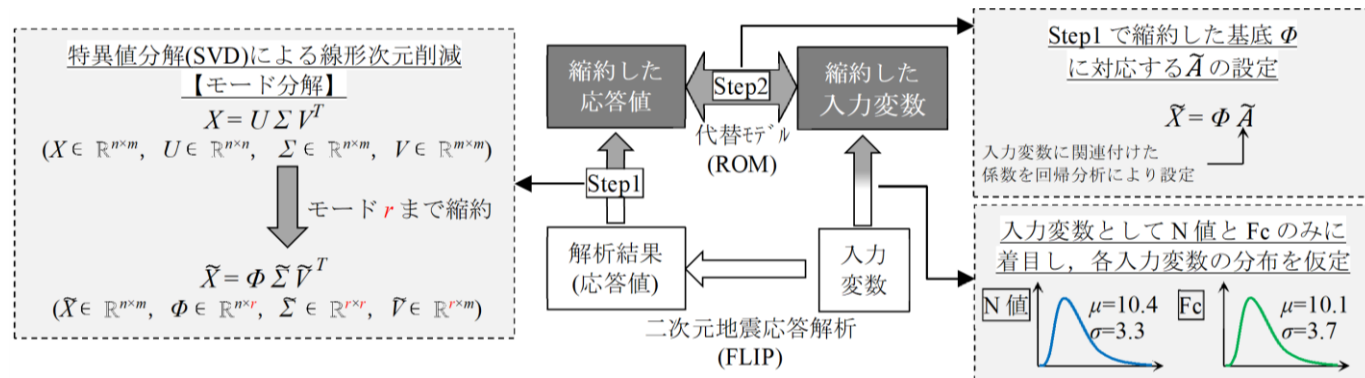


図-1 本研究の全体構成

3. 検討結果

(1) モード分解

まず、FLIP解析結果に対して、モード分解が適用可能であるか検討を行った。ここで、モード r とは、特異値分解により得られる左特異ベクトル U 、特異値 Σ 、右特異ベクトル V の、それぞれの r 番目の次元で構成したものを意味する。図-2(a)~(c)に、FLIP、モード1及びモード2による応答値（節点変位と過剰間隙水圧比）の空間分布を

キーワード 港湾施設の耐震性能照査, 地震応答解析, 特異値分解, 代替モデル

連絡先 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省 国土技術政策総合研究所 TEL 046-844-5019

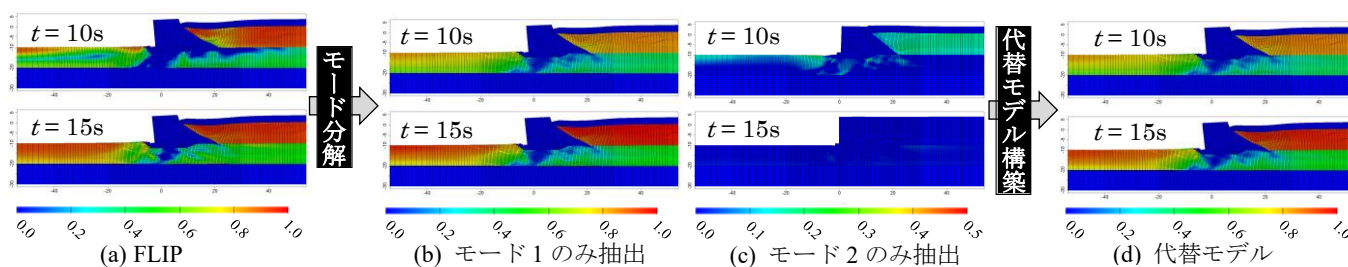


図-2 スナップショット

示す。この結果より、モード1のみで主要な応答のほとんどが表現されていることがわかる。モード1においては図-3に示す岸壁天端における水平変位時刻歴でも同様である。一方、モード2は一時的に陸側に変動し、最終時間ステップに向けて元の位置に戻るような挙動となっている。なお、本稿では示していないが、過剰間隙水圧比も同じ結果であった。さらに、寄与率の累積値は90.4%（モード1：85.9%，モード2：4.5%）であった。このため、本ケースではモード2までの情報で元のFLIP解析結果を概ね再現可能と判断できる。

(2) 代替モデル構築

代替モデル（以後、ROMと呼称する。）の構築には、まず、モード分解により抽出したモード1・2の左特異ベクトル Φ を基底とした。この基底と、9ケースのFLIP解析結果を用いて設定した回帰係数を用いることにより、限られたケースの解析結果から、図-2(d)および図-3に示すように、空間的情報と時間的情報を損なうことなく施設の応答の推定が出来るということが、本手法の利点である。本来、入力変数を変化させた際の応答を知るには、その条件に応じたFLIP解析をその都度行う必要がある。これに対しROMでは、入力変数と応答値の関係を線形回帰により推定しているため、入力変数の値を入力値とした四則演算のみで応答が推定できる。

さらに本研究では、各入力変数を5~20と変化させた全組合せ256ケースに対してFLIPを実行し、その解析結果とROM推定値を比較することで、ROMによる推定精度の検証を行った。図-4は岸壁天端の残留水平変位に着目した比較結果である。FLIPにおいて非線形性が顕著に表れている結果（例えばN値・Fcが5付近）はROMでは正確に推定できていないものの、その誤差は10cmに満たないものである。さらに、推定誤差の検証として、FLIP解析結果とROMによる推定値との比（ROM/FLIP）の度数分布を確認した（図-5）。ROM構築に用いた9ケースの内挿範囲・外挿範囲に関わらず、誤差は±5%程度の精度で推定ができています。

4. おわりに

本検討では、数値解析結果の精度を維持しつつ、計算コストを抑えることができる手法²⁾の検討を行い、港湾施設の地震応答解析に対する本手法の適用性と推定精度が確認された。また、本手法を用いることにより、岸壁の凹凸変位量の評価をはじめ、入力条件のばらつきによる解析結果への影響評価に関する様々な活用が期待できる。

参考文献

- 1) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, 港研報告 Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990
- 2) 大竹雄, 茂野恭平, 渡邊慎也, 肥後陽介, 村松正吾: モード分解を用いた時空間の特徴抽出に基づくデータ駆動型・動的信頼性解析法: 有効応力動的解析への適用, 土木学会論文集, 2020

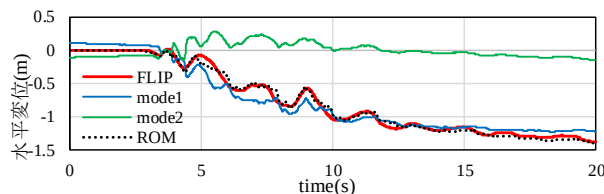


図-3 水平変位時刻歴(岸壁天端)

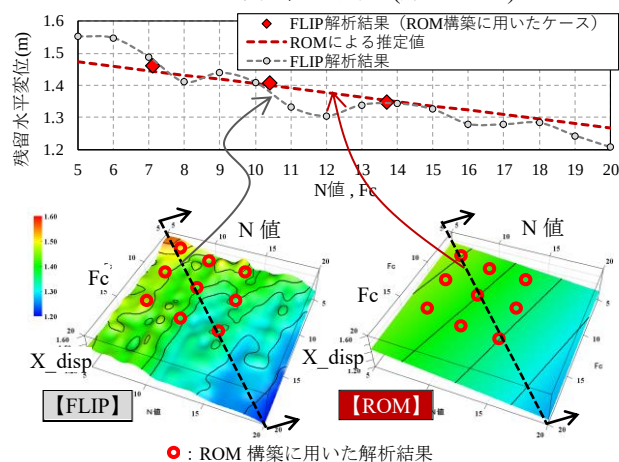


図-4 FLIP と ROM の残留水平変位の比較

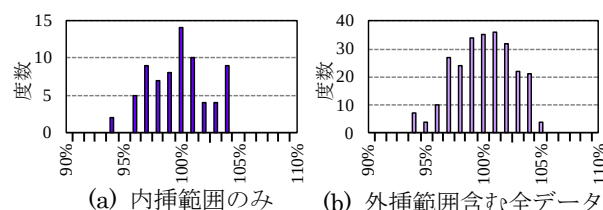


図-5 推定誤差(ROM/FLIP)の度数分布