

## 地盤構造物の応答特性を考慮した探索型の設計地震動設定へ向けた基礎研究 A Study on Exploratory Setting Method of Input Ground Motions Considering Site-Specific Response Characteristics of Geotechnical Structures

林 大暉 (東北大・工) 大竹 雄 (東北大・工) 肥後 陽介 (京都市大・工)  
吉田 郁政 (東京都市大・工) 糸井 達哉 (東京大・工)  
Daiki HAYASHI, Tohoku University Yu OTAKE, Tohoku University  
Yosuke HIGO, Kyoto University Ikumasa YASHIDA, Tokyo City University  
Tatsuya ITOI, Tokyo University  
E-mail: daiki.hayashi.t5@dc.tohoku.ac.jp

In this study aims to develop a design method for geotechnical structures under accidental loads. We propose a framework for seismic input waves' setting method that considers the site-specific response characteristics under study. The proposed framework consists of the following three functions 1) engineering feature management of earthquake ground motions, 2) search for fatal failure zones based on adaptive experimental design, and 3) synthesis of earthquake input waves for "the stress test." To validate this framework, we conducted numerical analysis on all observed seismic records (2827 waves). And we targeted the behavior of a simple embankment on a liquefiable sand layer. The maximum settlement of the embankment was then set as a performance index for simplicity in this paper. The maximum settlements obtained from the liquefaction analysis results were appropriately clustered in the feature space of the seismic waveform (principal component space). It is confirmed that the input seismic wave features that produce fatal failure can be extracted. Finally, based on the concept of "design point" and "sensitivity coefficients" in reliability analysis theory, we generated a sample of synthesized seismic input waves and discussed their characteristics.

### 1. はじめに

信頼性設計法は構造物設計の主流となり定着してきている (ISO2394:2015, 道路橋示方書:2017 等)。ただし、既存の信頼性設計法の適用範囲は、主に変動荷重時 (e.g., L1 地震時) に限定される。モデル化が困難な確率分布の裾野の議論になる偶発荷重時 (e.g., L2 地震時) を対象とした設計法は確立されていないのが現状である。

著者らは、偶発荷重時の合理的な設計法構築のため、精緻な数値解析に基づいた次元削減代替モデル (以降、ROM 解析) により、強非線形領域における地盤挙動の確率評価を実現した<sup>1)</sup>。ただし、この研究では、設計地震動を固定した定式化になっており、地震動外力の不確実性の影響は考慮されていない。本研究では、この点を改善することを目的としている。一方で、設計地震動の候補は、無数にあるため、直接的に信頼性設計に考慮することは現実的ではない。宮本と本田<sup>2),3)</sup>の取り組みに見られるように、対象構造物の非線形応答特性を考慮して、致命的な崩壊シナリオを引き起こす地震動特性を探索した上で、設計計算に組み込むことが現実的である。本研究では、探索型の設計地震動の設定方法を提案し、その有効性について考察する。

### 2. 提案フレームワーク

提案フレームワークは、主に下記 3 つの機能で構成する。

- 1.) 地震動の工学的特徴量管理: Rezaeian and Kiureghian<sup>4)</sup> や糸井ら<sup>5)</sup>が提案する統計的波形合成法のパラメータにより地震動波形をモデル化する。地震動観測記録の大規模データベースより、事前に準備したパラメータ群の共分散行列の情報縮約により、地震動特性を縮約管理する。ここで、パラメータの縮約空間を合成変数空間と呼称する。
- 2.) 適応型実験計画に基づく致命的な破壊領域の探索: 合成変数空間で実験計画を行い、複数の地震動シナリオに対して数値解析を行い対象構造物の応答を標本抽出する。その上で、混合共分散を用いた Gaussian Process Regression (GPR)<sup>6)</sup>により、合成変数空間全体

の応答を補間推定し、致命的な破壊形態を生じさせる地震動波形群を抽出する。このプロセスでは適応型サンプリング<sup>7)</sup>を適用し、できるだけ少ない数の数値解析で目的を達成する。

- 3.) 設計地震動波形の生成: 信頼性設計法における設計点<sup>8)</sup>と感度係数<sup>9)</sup>の考え方に基づいて、合成変数空間において効率的に設計地震動を探索する。ここで、設計点は、目標性能に対する波形を選定したことと等価になり、感度係数は合成変数空間の方向余弦を意味することから、この方向に沿って波形を生成することでストレステストに用いる。

### 3. 研究の方法

本研究では、Otake et al.<sup>1)</sup>で対象とした液状化地盤上の単純な盛土構造物を対象に検証を行う。糸井ら<sup>5)</sup>が収集した地殻内地震の観測波形 (2827 波) 全てで液状化地盤上の単純な盛土の数値解析 (LIQCA) を実施する。この解析結果を正解データとして、「1.)地震動の工学的特徴量管理」の有効性と「2.)適応型実験計画に基づく致命的な破壊の探索」の可能性を検討する。

なお、本研究では、簡便に盛土天端の最大沈下量を性能指標とする。合成変数空間において最大沈下量を指標とした GPR を実施することで、最大沈下量が大きくなる地震動波形の特性を探索する。その上で、合成変数空間における設計点と感度係数を算定し、ストレステスト用の模擬地震動波形を生成し、探索された地震動波形の特徴と対象構造物の関係について考察する。

### 4. 結果と考察

Fig. 1 は、全波形で実施した数値解析の結果 (最大沈下量) を合成変数空間で示している。ポイントの着色は、盛土天端の最大沈下量を表している。大局的には、合成変数空間で最大沈下量がなめらかに分布し、合成変数が対象構造物の性能を説明していることが分かる。ただしなめらかに分布しているのは沈下量が 0m~3m 程度の範囲であり、

3 m～最大沈下量の最大ケース 6m の変化は急激であることが分かる。探索的に設計地震動を設定することの重要性が伺える。

Fig.2 は、最大沈下量を指標として、合成変数空間で GPR を実施し、制限値を沈下量 1m および 2m とした場合の破壊領域を特定した結果を示している。図中の赤プロットは制限値を超過したケースを意味しており、判別誤差はあるものの、合成変数空間で破壊領域を概ね特定できることを確認した。

また、破壊領域における確率密度最大点（中心からの最短距離の点）を設計点と定め、その方向余弦（感度係数）に着目した。Fig.3 は、この方向余弦に従って、波形を合成した結果である。Fig.4 から、周期約 2s 付近に強いエネルギーを有する波形が同定されていることが分かる。対象盛土の液化化時の固有周期が波形探索により同定されたと解釈した。

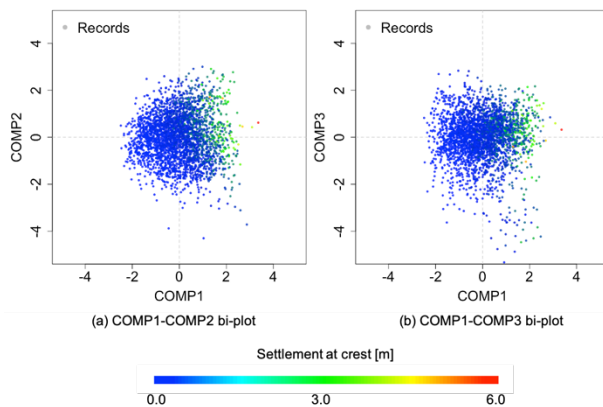


Fig. 1 Scatter plot of numerical analysis results with PCA

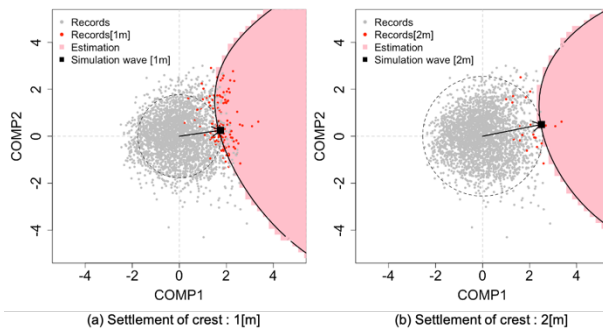


Fig. 2 Extraction of the fatal failure zone by GPR

## 5. 今後の展望

今後の展望として、信頼性解析の効率化のための適応型の実験計画<sup>7)</sup>を応用し、破壊領域の効率的な探索手法を構築することで実用化を目指す予定である。加えて、地盤の不均質性の影響を考慮することを考えている。地盤の不均質性も地震動特性と同様に事前のモデル化が困難な不確実性である。しかし、目標性能（制限値）が決定されれば、シナリオを絞り込むことができる可能性があると考えている。一般化した偶発荷重時設計用のシナリオ絞り込み法として拡張する予定である。

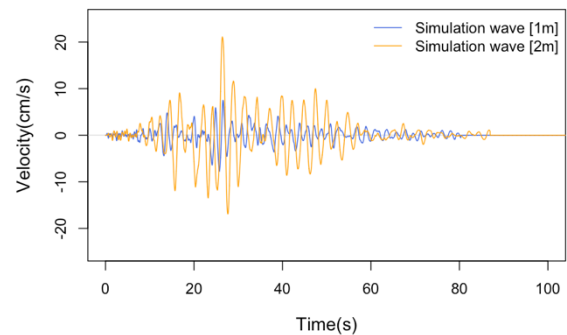


Fig.3 Simulated ground motions.

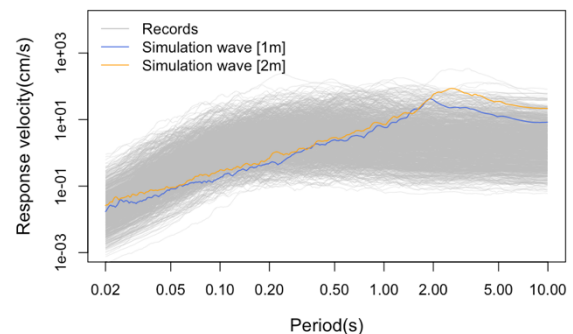


Fig.4 Response velocity spectrum

## 参考文献

- 1) Otake, Y., Shigeno, K., Higo, Y., Muramatsu, S.: Practical dynamic reliability analysis with spatiotemporal features in geotechnical engineering, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1–16, 2021.
- 2) 宮本崇, 本田利器: 非線形応答値を特徴指標とした探索的な設計地震動の合成手法の鉄筋コンクリート橋脚モデルに対する適用性の考察, *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, 67 巻, 2 号, p. I439-I449, 2011.
- 3) 宮本崇, 本田利器: JSdivergence に基づく地震動波形のクラスタリング手法による観測地震動記録群の分類, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, 72 巻, 4 号, p. I810-I820, 2016.
- 4) Rezaeian and Der Kiureghian: Simulation of synthetic ground motions for specified earthquake and site characteristics, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39(10), pp.1155-1180, 2010.
- 5) 糸井達哉, STAFFORD Peter 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, *日本地震工学シンポジウム論文集 (CD-ROM)*, 14th, ROMBUMNO.GO16-FRI-8, 2014.
- 6) Ikumasa Yoshida, Yukihiisa Tomizawa, Yu Otake: Estimation of trend and random components of conditional random field using Gaussian process regression, *Computers and Geotechnics*, Volume 136, 2021.
- 7) Echard B, Gayton N, Lemaire M: AK-MCS: an active learning reliability method combining kriging and Monte Carlo simulation, *Structural Safety*, 33:145 – 54, 2011.
- 8) Der Kiureghian, A: First-and Second-order Reliability Methods. Chapter 14 in *Engineering Design Reliability Handbook*, Eds. E. Nikolaidis, DM Ghiocel and S. Singhal, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.