

各種地盤改良に関するメカニズムや効果確認手法の検討

肥後 陽介*

1. 研究の目的

各種の地盤改良技術のメカニズムや効果確認手法の検討に有用な数値解析技術を探索することを目的とし、以下の項目について議論を行った。

- 1) 流体駆動による亀裂進展解析…Peridynamics (PD)
- 2) 鋼材貫入時の地盤の大変形解析…Material Point Method (MPM)
- 3) 機械学習技術の適用—液状化解析—…Finite Element Method (FEM)

2. 解析手法の概要と解析事例

- 1) Peridynamics^{1), 2)}

来の連続体力学を離散化し再構築した理論であり、破碎の解析に有利である。破碎により生じる複雑な形状の不連続面も特殊な取り扱いを必要としない。図1に流体注入による既存進展を解析した事例を示す。亀裂の進展と応力状態を知ることができる。

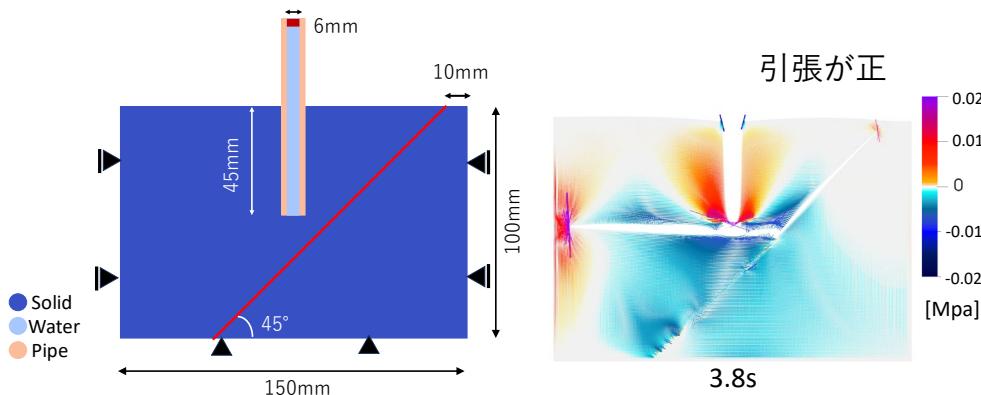


図1 流体注入による亀裂新手に対する既存亀裂の影響

- 2) Material Point Method^{3), 4)}

格子法と粒子法のハイブリット手法であり、粒子から背景格子に情報をマッピングし1stepのFEMと同様の手法で支配方程式を解き、その解として得られる格子点の加速度や速度から粒子の変位、ひずみ、応力を更新し、計算格子は毎step元の形状にリセットされるため、大変形時もメッシュの絡み合いが発生しない点が特徴である。地盤への鋼材貫入解析事例を示し、鋼材と地盤の相互作用に伴う鋼材周辺の著しいせん断変形を追跡可能であることを確認した。

- 3) 機械学習技術：固有直行分解（POD）によるFEMの代替多数解析^{5), 6)}

液状化解析には、多くの構成式のパラメータを決定する必要がある。また、パラメータ自体は、地盤固有の不均質性やパラメータを決める際の誤差など、多くの不確実性を有する。このような不確実性を明示的に取り扱うため、液状化解析法のパラメータセットを複数収集したdata bankを作成し、パラメータセットの主成分分析（PCA）を実施し、パラメータセットの平均と分散を主成分空

*京都大学・教授

間で定義した。これを観測値（例えば、せん断波速度 V_s 、内部摩擦角 ϕ ）を用いてベイズ更新し、 V_s や ϕ が分かれば、ある程度パラメータセットを絞り込める技術を開発した。更にその絞り込まれたパラメータセットで MCS を実施することで解析結果を得ることができるが、多数解析が必要となるため、代表的な解析結果に POD 適用することで次元縮減し、同じく PCA により次元縮減したパラメータセットと線形回帰することによる代替解析法を開発した。これは、機械学習の一種であるが最も原始的な手法である一方、数学的背景が明確であり、深層学習のようなブラックボックス化を避けられるメリットがある。代替解析法は、詳細な地震時応答までは再現できないものの、安定性の照査で重要な沈下量や過剰間隙水圧比などは、高い精度を有していた。

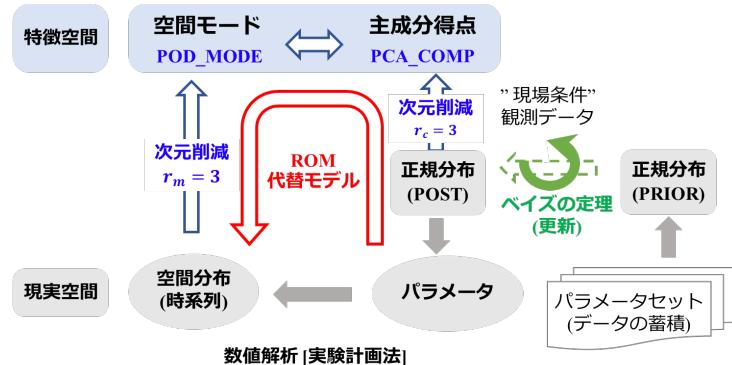


図2 機械学習技術の液状化解析への適用事例

3. 新たな数値解析技術の地盤改良工法評価技術としての適用性

ジェットグラウトなどの地盤改良技術における、グラウトが地盤を割裂する現象の解析への Peridynamics の適用性が示唆された。一方で、グラウトは割裂よりも浸透及び侵食現象として解釈する方が自然であり、別の解析法の必要性が示唆された。

MPM はサンドコンパクションパイルのシミュレーションの可能性が示唆された。従来は砂杭が拡径する境界条件の元、周辺地盤の圧縮挙動を解くのが通常であったが、MPM を用いれば砂杭の打設自体をシミュレーションできる可能性がある。現地発生土の砂杭材料としての利用など、異なる材料での打設による砂杭の形成過程と締固め効果の検証などへの適用性が議論された。

機械学習は実務レベルで急速に適用が拡がっており、簡単な理論でも本解析事例のように省力化の図れる事例は多くあると考えられる。

参考文献

- 1) 加藤大雅, ZHU Fan, 肥後陽介, Peridynamicsに基づく流体運動による亀裂進展解析, 第59回地盤工学研究発表会, 旭川, 2024年7月.
- 2) Zirui Lu, Fan Zhu, Yosuke Higo, Jidong Zhao, Coupled semi-Lagrangian and poroelastic peridynamics for modeling hydraulic fracturing in porous media, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.437, 15 March 2025, 11779. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2025.117794>
- 3) 鎌森元吾, 肥後陽介, 上野一彦, 三好俊康, 白可, 吉田誠, 土水構造物の相互作用を考慮した軸対称MPMによる鋼管貫入時の地盤大変形運動解析, 土木学会論文集, Vol.80, No.18, 24-18171, 2024. <https://doi.org/10.2208/jccejj.24-18171>
- 4) Yosuke Higo, Yudai Takegawa, Fan Zhu, Daichi Uchiyama, A three-phase two-point MPM for large deformation analysis of unsaturated soils, Computers and Geotechnics, Vol.177, Part A, January 2025, 106860. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106860>
- 5) 大竹雄, 茂野恭平, 渡慶眞也, 肥後陽介, 松村征吾(2020), 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・動的の信頼性解析法: 有効応力動的解析への適用, 土木学会論文集 C, Vol.76, No.2, 142-157. https://doi.org/10.2208/jccege.76.2_142
- 6) Otake, Y., Shigeno, K., Higo, Y., and Muramatsu S. (2021). Practical dynamic reliability analysis with spatiotemporal features in geotechnical engineering. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, Volume 16, Issue 4, pp.662-677. Published online: 29 Aug 2021. DOI:10.1080/17499518.2021.1971250