

Peridynamics による入力地震波特性に着目した盛土の亀裂進展解析 Crack Propagation Analysis in an Embankment by Peridynamics focusing on Maximum Acceleration and Frequency of Input Seismic Wave

新保 泰輝 (石川高専) Muhammad Khairullah Bin Adlan (石川高専)

河村 知記 (五大開発) 福元 豊 (長岡技大)

Taiki SHIMBO, National Institute of Technology, Ishikawa College

Muhammad Khairullah Bin Adlan, National Institute of Technology, Ishikawa College

Tomoki KAWAMURA, Godai Kaihatsu Corporation

Yutaka FUKUMOTO, Nagaoka University of Technology

E-mail: shimbo@ishikawa-nct.ac.jp

To improve the earthquake resistance of soil embankments, it is crucial to clarify the crack initiation and propagation processes. Peridynamics is a powerful method for such analyses. In the present study, a crack propagation analysis of a compacted clay embankment is conducted using OSB-PD with seismic waves of several maximum accelerations and frequencies. The results show typical failure patterns of embankments during the earthquakes, such as cracks in the slope and shear failure (i.e., a sliding surface).

1. はじめに

地震によって盛土の法面及び天端から開口亀裂が発生する事例が多数報告されている。現在、盛土耐震設計法として Newmark 法が汎用されている。ただし、開口亀裂の発生・進展メカニズムは円弧滑りのメカニズムとは異なるため、Newmark 法ではこれらを評価することはできない。盛土構造物の耐震性を向上のためには、亀裂の発生やその進展現象を考慮することが重要である。亀裂の進展挙動を表現することができる解析手法として、拡張有限要素法 (X-FEM) や Peridynamics (PD) がある。これまでに X-FEM を用いた地盤破壊現象に関する研究が行われている^{1)~3)}。一方、Silling が提案した PD は亀裂の自然発生から進展までを容易に表現できる解析手法である。しかし、PD は比較的新しい解析手法であるため、地盤への適用例は少ない。著者らはこれまでに、水平成層地盤の応答加速度や盛土形状の応答加速度に対して有限要素法 (FEM) と解析結果の比較を行い、PD の精度と解析コードの妥当性を確認した^{4)~5)}。また、地盤材料への適用を目的として盛土形状の亀裂進展解析⁶⁾を実施した。ただし、応力による妥当性の検証や地盤の破壊靱性値を用いた検討は行われていない。本研究では、自重解析に対する応力の精度検証を実施し、さらに締固め粘土で構築された盛土の地震時の破壊形態を明らかにするために、いくつかの最大応答加速度や振動数の地震波に対する亀裂進展解析を実施した。

2. PD の定式化

本研究ではポアソン比の制限のない Ordinary State-based PD (以下、OSB-PD) に対して、レイリー減衰を考慮する。質量比例減衰・剛性比例減衰を考慮した OSB-PD の支配方程式は次式で表される⁴⁾。

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}_i, t) + \rho \alpha \dot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}_i, t) = \sum_{j=1}^{N_H} \left\{ \mathbf{T}(\mathbf{x}_i, t) \langle \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i \rangle - \mathbf{T}(\mathbf{x}_j, t) \langle \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \rangle \right\} dV_j \quad (1)$$

$$+ \beta \frac{d}{dt} \left[\sum_{j=1}^{N_H} \left\{ \mathbf{T}(\mathbf{x}_i, t) \langle \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i \rangle - \mathbf{T}(\mathbf{x}_j, t) \langle \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \rangle \right\} dV_j \right] + \mathbf{b}(\mathbf{x}_i, t)$$

ここで ρ は密度、 α は質量比例減衰のパラメータ、 β は剛性比例減衰のパラメータ、 t は解析時間[s]、 N_H は影響範囲内の粒子数、 $\mathbf{x}_i$ は中心となる粒子の位置ベクトル、 j は影響範囲内の粒子番号、 $\mathbf{u}$ は粒子の変位、 dV_j は粒子の持つ体積、 $\mathbf{b}$ は物体力である。 $\mathbf{T}$ は相互作用力であり構成式に相当する。詳細は文献 4) を参照されたい。本定式化では、モデル

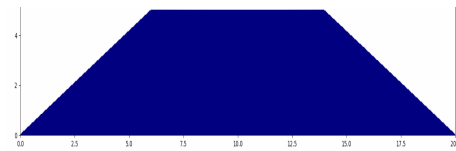


Fig.1 An embankment model of PD.

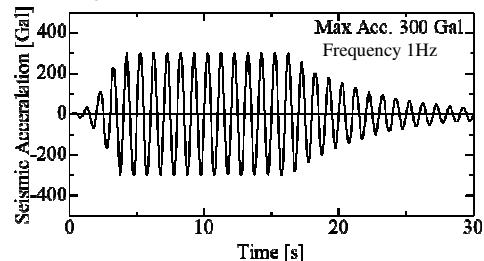


Fig.2 Input seismic wave (Max Acc. 300Gal, Frequency 1Hz).

底面の粒子の変位を固定した境界条件を用いる。したがって、入力波形は E+F 波である。また、応力については、解析時に求めた変位に対して粒子法に汎用される Kernel 近似によって求めている。紙面の都合上詳細は割愛する。

3. 解析手順

解析モデルを Fig.1 に示す。高さ 5m、下幅 20m、上幅 8m の盛土とし、締固め度 $D_c=90\%$ 、含水比 18% の青粘土の試験結果⁷⁾より、湿潤重量 γ_t は 18kN/m^3 、ヤング率 E は 8.5MPa 、モード II の破壊時の応力拡大係数 K_{IIC} は $6.2\text{kPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ であり、クリティカルストレッチ S_c は 0.0018 である。また、ポアソン比は 0.25 とした。PD の粒子間距離は水平鉛直方向共に $1/300\text{m}$ であり、解析時間間隔 $dt=10^{-5}\text{s}$ とした。上記のモデルに対して自重解析を行い、15 秒経過後にモデル底面から Fig.2 に示す地震波を入力した。入力地震波は正弦波に対して原子力規制委員会が提示する振幅包絡線 (マグニチュード 7、等価震源距離 10km) を重ね合わせた模擬地震波を用いている。解析ケースは模擬地震波形の振動数を 1Hz とし、地震波形の最大加速度を 280Gal から 400Gal まで 10Gal ごとに解析を実施したケース 1 と最大加速度を 300Gal とし振動数を 0.5Hz、1.0Hz、2.0Hz、3.0Hz、4.0Hz、5.0Hz としたケース 2 の 2 ケースを実施した。

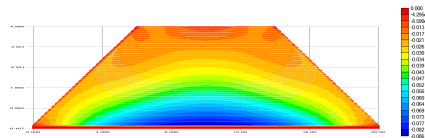


Fig.3 Horizontal stress distribution.

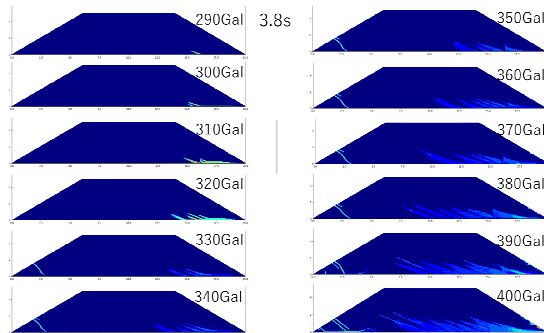


Fig.4 Failure mode with each maximum acceleration of 3.8 s.

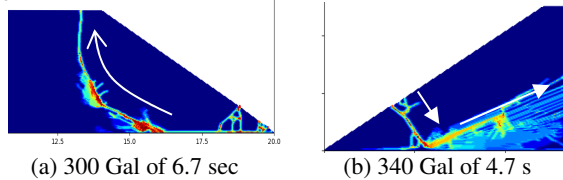


Fig.5 Failure modes.

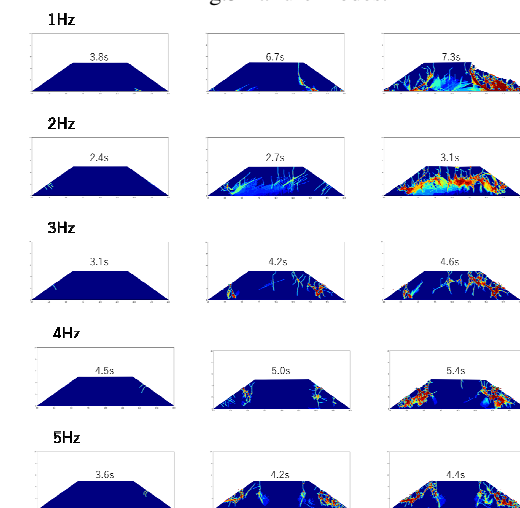


Fig.6 Failure mode with each frequency.

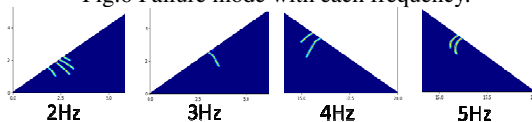


Fig.7 Crack initiation pattern with each frequency.

4. 解析結果

自重解析後の水平応力分布を Fig.3 に示す。FEM との比較を行った結果、定性的にも定量的にも良い一致を示した。また、ケース 1 において加振後 3.8s での盛土の破壊状況を Fig.4 に示す。図中青色が無傷であり、それ以外の箇所が亀裂（損傷）の生じた箇所である。280Gal は亀裂を生じなかったため、一覧から除いた。290Gal から 320Gal の結果より、亀裂は右法尻から発生していることが分かる。300Gal の亀裂進展後の破壊形態を Fig.5(a) に示す。底面から発生した亀裂が天端に向かって円弧上に進展しているのが見て取れる。330Gal から 400Gal では亀裂は法面から発生してい

る。Fig.5(b) に示す通り、法面から生じた亀裂がモデル底面まで到達後、盛土内部へ進展している様子がうかがえる。以上より、最大加速度が小さい場合に破壊が生じるとすべり破壊となり、加速度が高い場合には法面から亀裂が進展することが分かる。この結果は、池田ら³⁾の X-FEM を用いた盛土の亀裂進展解析と同様の結果である。Fig.6 にケース 2 の解析結果を示す。0.5Hz は亀裂を生じなかったため一覧から除いた。Fig.6 より、1Hz は前述した通り、底面からのすべり破壊を生じており、振動数が高くなると法面から亀裂が生じることが分かる。また、Fig.7 に示すように振動数が高いほど亀裂発生位置は法面の上方になっていることが分かる。5Hz の亀裂は法面だけでなく、盛土天端付近からも亀裂が生じ、その亀裂が下向きに進展している。また、本盛土は固有振動数が 2.15 Hz 程度であり、2Hz の方が 5Hz よりも被害が大きいのは共振によるものと考えられる。以上より、加速度が比較的小さい場合には低振動数側ですべり破壊が生じ、高振動数側では法面から亀裂が生じるといえる。すなわち、固有振動数と変形モードが破壊形態に寄与すると言える。今後の課題としたい。

5. まとめ

本研究では PD を用いて地震の最大加速度、振動数に対する締固め粘土で構築された盛土の亀裂進展解析を行った。その結果、最大加速度が低い場合に破壊とすべり破壊を生じ、高い場合には法面から亀裂が進展する。また、振動数が高いと法面から亀裂を生じ、振動数が低いとすべり破壊を生じる可能性を示唆する結果を得た。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K04957 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 原田陽弓, 後藤浩之, 澤田純男, 液状化地盤上の盛土における引張クラック発生メカニズムについての一考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 76, No.4, pp. I_96-I_105, 2020.
- 2) 新保泰輝, 矢富盟祥, 亀裂進展解析による地震時の河川堤防分離破壊の解明, 地盤工学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—, No.23, pp.212-218, 2014.
- 3) 池田 貴昭, 後藤 浩之, 澤田 純男, 地震時盛土の引張破壊を考慮した拡張有限要素法によるクラック進展解析, 応用力学論文集, Vol. 76, No.2, pp. I_227- I_235, 2016.
- 4) Taiki Shimbo, Ryota Itto, Koutaro Inaba, Kouichi Araki, Naoto Watanabe: Seismic response analysis for ordinary state-based peridynamics in a linear isotropic elastic material, Journal of Peridynamics and Non-local Modeling, Vol.2, No.3, pp.185-204, 2020.
- 5) Ryota Itto, Hiroki Kubo, Taiki Shimbo, Semi-verification of seismic-response analysis for an embankment using peridynamics, COMPSAFE2020, 2020.
- 6) 内井 右京, 河村 知記, 新保 泰輝, 福元 豊, Peridynamics による引張破壊を考慮した盛土の亀裂進展解析, 令和 3 年度第 76 回土木学会全国大会, 2021.
- 7) Taiki Shimbo, Chisato Shinzo, Ukyo Uchii, Ryota Itto, Yutaka Fukumoto, Effect of different water contents and initial crack lengths on the mechanical properties and failure modes of pre-cracked compacted clay under uniaxial compression, Engineering Geology, 2022 (accepted).