

Peridynamics による引張破壊を考慮した盛土の亀裂進展解析

石川工業高等専門学校 学生会員 ○内井 右京
 五大開発株式会社 河村 知記
 石川工業高等専門学校 正会員 新保 泰輝
 長岡技術科学大学 正会員 福元 豊

1. 目的

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 法が用いられているが、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、開口亀裂を考慮することが重要である。Silling は亀裂の生成及び進展を扱う解析手法として Peridynamics (以下、PD) を提案している。PD は図-1 に示すように対象粒子を中心とした影響範囲内に存在する粒子に相互作用があると考える非局所理論であり、図-2 に示すように変形に応じて相互作用をなくすことで亀裂の生成から進展までをシームレスに表現することができる手法である。著者らはポアソン比の制限のない Ordinary State-based PD (以下、OSB-PD) に対して、OSB-PD 用のレイリー減衰と粘性境界条件を用いた地震応答解析手法を提案している^{1), 2)}。本研究では OSB-PD を用いた盛土の引張破壊メカニズムの解明を目的とし、その基礎的検討として地盤特性による破壊形態の違いについて検討した。

2. OSB-PD

本研究では OSB-PD を用いる。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。

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

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 2) を参照されたい。

3. 解析モデル

図-3 に解析モデルの概要図、表-1 に解析パラメータを示す。モデル底面は粘性境界とし、粘性境界は破壊しないものとした。解析モデルに自重を作用させ、放置解析を行って自重による衝撃が収束した後、モデル底面から図-4 に示す調和波を入力し、破壊形態を可視化した。調和波の振動数は 1 Hz、最大加速度は 50 Gal である。

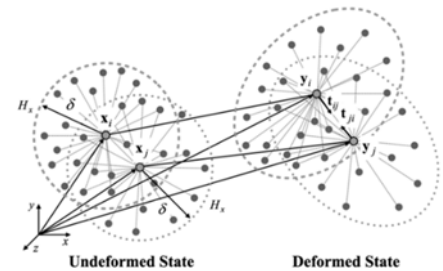


図-1 PD モデル図

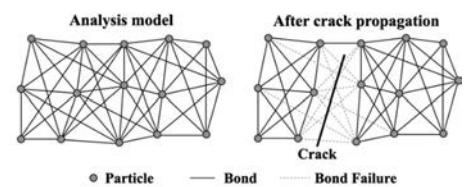


図-2 変位不連続面の表現

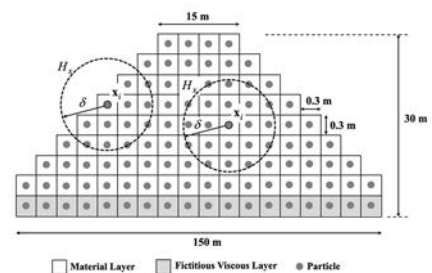


図-3 解析モデル概要図

表-1 解析パラメータ

Parameters			
Young's modulus	E	220.8	MPa
Wet density	ρ	2040.8	kg/m ³
Critical stretch	S_{cr}	1.416×10^{-3}	-
Possion's ratio	ν	0.25	-
Rayleigh damping	α	0.02093	-
	β	0.00032	-
Lattice width	$\Delta x = \Delta y$	0.300	m
Horizon size	δ	$4\Delta x$	m
Time interval	Δt	0.0001	s
Number of particles	N_H	28,289	-

キーワード 破壊力学, Peridynamics, 引張破壊, 盛土構造物, 亀裂進展解析

連絡先 〒929-0342 石川県河北郡津幡町北中条 石川工業高等専門学校 TEL076-288-8166

4. 地盤適用可能性の検証

経過時間毎の解析結果を図-5に示す。図-5に示すように、盛土法面（盛土高さの1/3程度）から発生した亀裂が盛土内部へと進展する破壊形態を示した。これは盛土の特徴的な破壊パターン³⁾であり、妥当性のある破壊形態といえる。

5. 破壊形態のケーススタディ

地盤特性と破壊形態の関係性を明らかにするために、破壊靱性値を一定として、ヤング率による破壊形態のケーススタディを実施した。図-6に加振終了時の結果を示す。全ケースで盛土法面から亀裂が発生して盛土底面に向かって進展する破壊形態を示した。ヤング率が小さい場合、変形が大きいため、多数の亀裂が同時に生じて進展した。これに伴い亀裂の分岐や結合など複雑な破壊形態を示している。一方、ヤング率が高いと法尻付近から亀裂が生じ、鉛直下向きに直線的に進展する破壊形態となった。また、全ケースにおいて法面上部や天端からの亀裂は確認されなかった。

6. 盛土底面での亀裂進展挙動

全ケースで亀裂が盛土底面に達した後に水平方向に進展する結果が得られた。図-7に盛土底面付近の時刻歴の亀裂進展状況を示す。この極端な亀裂進展方向の変化は、粘性境界が破壊しないために生じたものと考えられる。粘性境界自体が解析結果に与える影響や盛土以震の地盤の破壊靱性値が与える影響などについては今後の課題とする。

7. まとめ

本研究では、盛土の引張破壊現象の解明を目的として、OSB-PDを用いた盛土の地震時の亀裂進展解析を行なった。その結果、以下の知見を得た。

- OSB-PDを用いた地震時の亀裂進展解析を行った。その結果、盛土法面から亀裂が生じ、盛土底面に向かって進展する妥当な解析結果を得た。
- ヤング率が小さい場合には変形が大きいため多数の亀裂を生じる。ヤング率が高い場合には比較的低い位置から亀裂が生じる。ヤング率によらず、生じた亀裂は加振に伴い盛土底面に向かって進展する。今後は、基盤層や複数の地盤特性を持つ盛土モデルによる検討を行う。

謝辞 本研究の一部はJSPS 科研費 19K04957の助成を受けたものです。本研究の一部は長岡技術科学大学令和2年度「高専一長岡技科大共同研究助成」の助成を受けたものです。

参考文献 1) 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. 2) Ryota Itto, Hiroki Kubo, Taiki Shimbo, Semi-verification of seismic-response analysis for an embankment using peridynamics, COMPSAFE2020, 2020. 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, 土木学会論文集, Vol.72, No.2, pp.227-235, 2016.

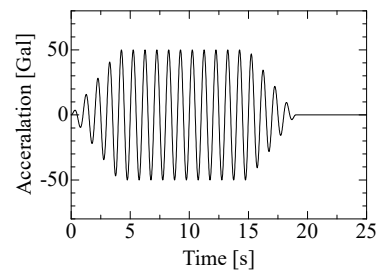


図-4 入力加速度

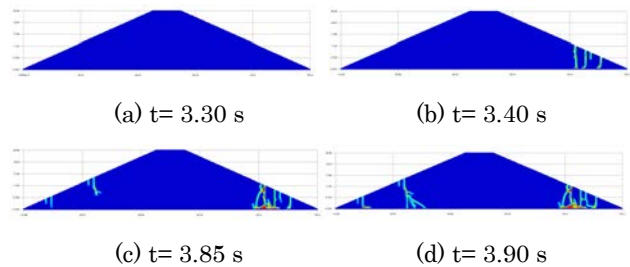


図-5 亀裂進展の様子

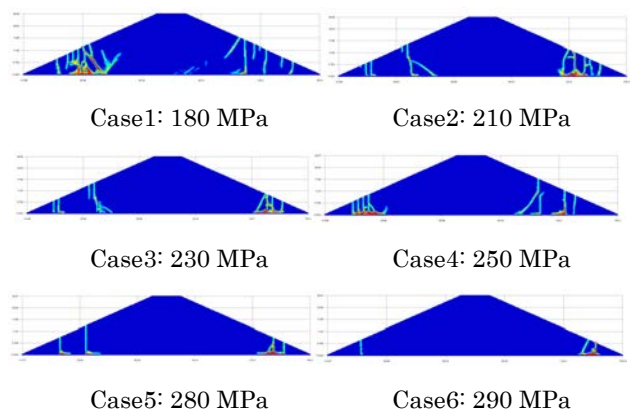


図-6 ヤング率による破壊形態の差異

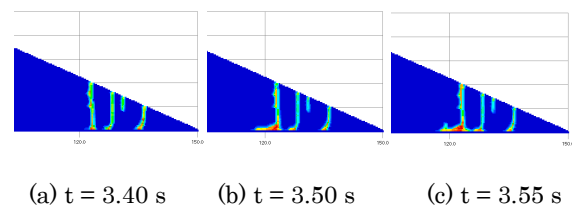


図-7 底面付近の破壊形態