

Peridynamics を用いた自重解析への質量比例減衰の影響

石川工業高等専門学校	学生会員	○内井	右京
石川工業高等専門学校	学生会員	一藤	亮太
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
五大開発株式会社	正会員	荒木	光一

1. 目的

地震時の盛土の残留変形量解析としてニューマーク法が汎用されている。ニューマーク法はすべり土塊を剛体と仮定した簡易な解析手法であり、すべり土塊の変形やすべり面の発生・成長を捉えることはできない。すべり土塊の変形と応答加速度を考慮するために著者らの一人はX-FEMを用いた解析手法を提案している¹⁾。ただし、すべり面の発生・成長までは取り扱っていない。亀裂の発生・成長を扱うX-FEMとして原田らの研究がある²⁾。今後の研究に期待したい。一方、亀裂の発生・成長を扱う解析手法としてSillingは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しており、変形に応じて相互作用をなくすことで亀裂の生成・成長を容易に表すことができる手法であり、近年精力的に研究がなされている。しかし、地震応答解析への適用は少なく、著者らはOrdinary State-based PD（以下、OSB-PD）に対するレイリー減衰と粘性境界条件を提案している^{3),4)}。ただし、盛土の地震時残留変形量を求めるためには重力によるすべり土塊の移動を考慮する必要がある。しかし、OSB-PDの自重解析に関する検討は行われていない。本稿ではその基礎検討として、OSB-PDにおいて、重力で生じる衝撃力が質量比例減衰のパラメータによって解が収束するまでにかかる時間を検討した。

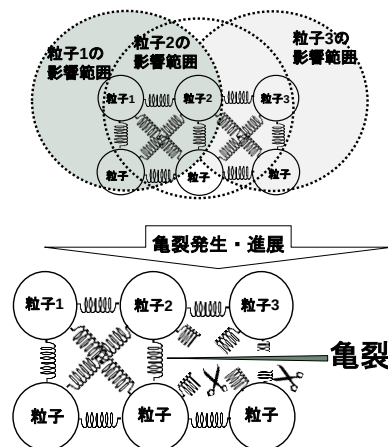


図-1 Peridynamics の概念図

2. Ordinary state Peridynamics

本研究ではOSB-PDを用いる。質量比例減衰を考慮した離散化されたOSB-PDは次式で表される。

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

ここで、 ρ は密度、 α は質量比例減衰の値（以下、減衰値）である。 t は解析時間、 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 i 以外の粒子番号、 $\mathbf{u}$ は粒子の変位、 dV_j は粒子の持つ体積であり、 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_i)$ は重力である。 $\mathbf{T}$ は Force Density であり、構成式に相当する。その他、詳細は文献 4) を参照されたい。

3. 解析モデル

解析モデルの概要図を図-2に示す。高さ 10m、幅 50m、天端幅 5m とした。粒子は 0.2m 間隔で水平鉛直共に等間隔に配置し、粒子数は 7,263 である。その他諸量を表-1に示す。また、粒子の影響範囲を示す Horizon は粒子間隔の 4 倍としている。モデル底面は鉛直固定境界条件としている。このとき、質量比例減衰を変化させて重力加速度によって生じる振動の収束を図った。用いた減衰値を表-2に示す。本稿では同一サイズの盛土モデルに対する準静的 FEM による自重解析から得られた天端の変位量を基準として OSB-PD の時間に対する収束性を検討した。

4. 解析結果

図-3 に解析結果を示す。図-3 の縦軸は OSB-PD の結果を FEM の結果で除したものである。図-3 より、0 秒地点であっても変位は FEM と比較して誤差 0.03%以下である。ただし、減衰値によってはその後に振動が生じている。減衰値が 1000 以外の場合は 2 秒以内に結果が収束している。1000 の場合は収束時間が 5 秒程度と遅くなっている。1000 の場合は過減衰状態となり、天端変位に振動は見られない。天端に振動が生じると引張力が生じて破壊靱性値によっては亀裂を生じるため、自重解析は過減衰状態であることが望ましい。したがって、減衰値を過減衰が生じる程度に適切に設定し、1~2 秒程度の自重解析を実施すれば良いといえる。また、減衰値の粒子数に対する依存性を検討するために、減衰値 1000 において粒子数を 7263, 28,276, 63,043 に変化させた結果を図-4 に示す。図-4 より、粒子数による減衰値の影響は殆ど見られないことが分かる。

5. まとめ

本稿では地震応答解析時に必要となる自重解析について検討を行なった。その結果、OSB-PD では減衰値を過減衰状態になるように適切に設定すると短時間に重力加速度の影響がなくなり、地震応答解析が行えることを示した。今後は自重を考慮した地震応答解析ならびに亀裂進展解析を実施し、地震時に生じる天端の開口亀裂や地滑り等の検討を行なっていく。

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—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, Development and application of a dynamic XFEM for the seismic residual displacement analysis of an embankment, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 57, No. 3, pp.357 – 370, 2017.

2) 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, 地震工学論文集第 39 巻, 76 巻 4 号, p.I_96-I_105, 2020.

3) 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 Nonlocal Modeling, Vol.2, No.3, pp.185 - 204, 2020.

4) Ryota Itto, Hiroki Kubo, Taiki Shimbo, Semi-verification of seismic-response analysis for an embankment using peridynamics, COMPSAFE2020, 2020.

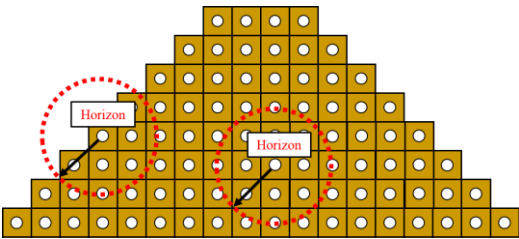


図-2 解析モデル概要図

表-1 解析に用いたパラメータ

Parameter	Value	Unit
Young's modulus E	112	MPa
Possion ratio ν	0.25	-
Wet density ρ	1835.5	kg/m ³
Rayleigh damping β	0.00032	-
Time interval Δt	0.001	s

表-2 解析に用いた減衰値

Parameter	Value	Unit
Rayleigh damping α	0.02	-
	1	
	10	
	100	
	1000	

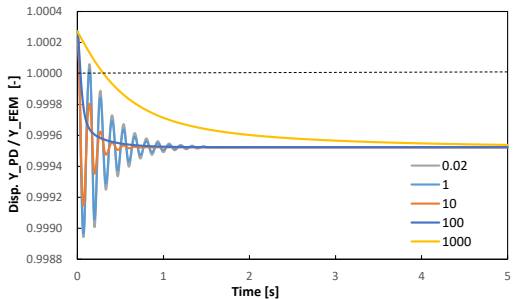


図-3 天端変位の時刻歴変化

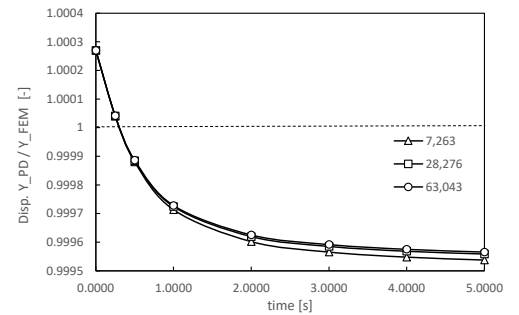


図-4 粒子数による時刻歴変化