

Ordinary State-Based Peridynamics を用いた地震応答解析手法の開発

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
 五大開発株式会社 正会員 荒木 光一
 株式会社ケー・エフ・シー 正会員 渡邊 直人

1. はじめに

現在、亀裂の進展挙動を表現することが出来る動的拡張有限要素法(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⁾。しかし、X-FEM は亀裂を扱うためにあらかじめ解析モデルに初期亀裂を導入する必要がある。また、亀裂進展の方向を定める破壊基準を与える必要がある。特に初期亀裂の位置を決めるための根拠付けは難しく、その位置が恣意的になる可能性があるなどの問題点がある。本研究では、この問題を解決し、亀裂の進展挙動を表現するために Silling(2000)が提唱した Peridynamics²⁾ を地盤に適用する。

Peridynamics は、物体が不連続になることを想定して定式化されており、従来の X-FEM 手法等と比較して、亀裂の自然発生・進展等の複雑な過程を比較的容易に表現できると期待されている手法である。しかし、Peridynamics の理論は比較的新しい力学理論であるため、地盤への適用例は少ない。特に地震時の解析に関しては皆無である。そこで本研究では、地震時の地盤破壊解析手法確立のために、Peridynamics に地震応答解析手法として新たに仮定の粘性境界層を導入し、土木分野で汎用されている数値解析手法の一つである有限要素法(FEM)と比較して Peridynamics の精度検証を行った。

2. Ordinary state-based Peridynamics の定式化

Silling が最初に提唱した理論は Bond-based Peri-dynamics(BB-PD)である。図-1 に示すように連続体を離散化する際に物体を粒子の集合と捉え、その粒子間にバネが存在するものとして離散化された積分型の運動方程式を解くものである。しかし、BB-PD では任意のポアソン比を扱うことが出来ないため、多種多様な地盤材料を扱えないという問題がある。そこで、本研究ではポアソン比の制限のない Ordinary state-based Peridynamics(OSB-PD)を用いた。OSB-PD に対し、地震による慣性力を導入した離散化された積分型の運動方程式を次式に示す。

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}_r(\mathbf{x}_I, t) = \sum_{j=1}^{N_{Hj}} \{ \mathbf{T}(\mathbf{x}_I, t) \langle \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_I \rangle - \mathbf{T}(\mathbf{x}_j, t) \langle \mathbf{x}_I - \mathbf{x}_j \rangle \} dV_j + \mathbf{b}(\mathbf{x}_I, t) - \rho \ddot{\mathbf{u}}_g(\mathbf{x}_I, t) \quad (1)$$

右辺第三項が入力加速度を意味する。紙面の都合上、その他の記号については割愛する。以上の定式化に対し、図-2 に示す解析対象(Material Layer)に対し、格子上的粒子配置を行う。仮想粘性境界層(Fictitious Viscous

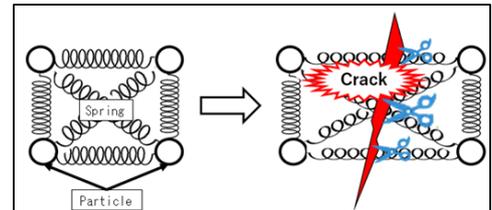


図-1 解析モデル

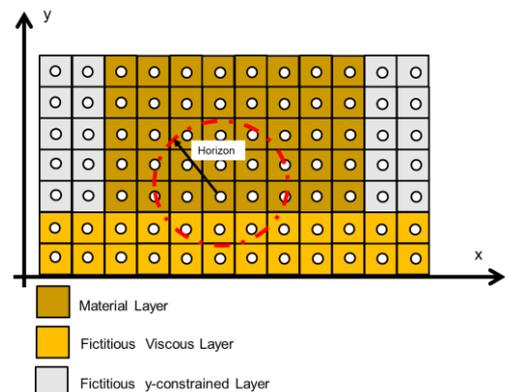


図-2 仮想粘性境界層

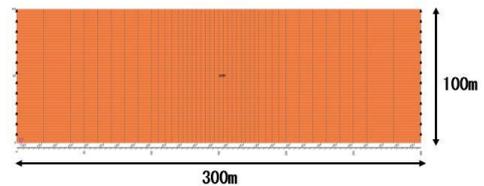


図-3 FEM の解析モデル

表-1 各ケースでの物性値

	ポアソン比 ν	初期せん断剛性 G ₀ (MPa)	せん断波速 V _s (m/sec)
Case1	0	10.50	75.63407
Case2	0.25	8.40	67.64917
Case3	0.33	7.89	65.58305

キーワード Peridynamics, 地震応答解析, 仮想粘性境界, FEM

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

Layer)をモデル底面に配置し、粒子速度に応じた反力を与える。また、側方向鉛直変位固定層 (Fictitious y-constrained Layer) として、鉛直方向変位を固定した粒子を配置して解析を行う。なお、Material Layer 内の粒子は鉛直方向を固定していない。

3. 仮想粘性境界層を導入した OSB-PD の精度検証

図-3に FEM の解析に用いたモデルを示す。OSB-PD も同形状のモデルとし、両者共底面から地震波形を入力する。材料は線形等方弾性体とし、重量 18kN/m^3 、ヤング係数 21MPa とした。また、FEM は四角形メッシュとし、節点数 $2,193$ 、要素数 $2,100$ とした。OSB-PD は水平方向粒子数 600 、鉛直方向粒子数 200 とした。上述の条件に加えて、ポアソン比 ν が $0, 0.25, 0.33$ の3ケースについて、それぞれ Case1, 2, 3 として解析を実施した。

表-1にケース別の初期せん断剛性 G_0 とせん断波速度 V_s を示す。入力地震波形には簡易に $300\sin(t)[\text{gal}]$ を $0 \leq t \leq 2\pi[\text{s}]$ の範囲で解析モデルの底面から与えた。水平位置 150m 、底面から $0, 25, 50, 100\text{m}$ の地点で水平方向の応答加速度を求めた結果を図-4に示す。図中 T1~T4 は地表面から $50, 100\text{m}$ に地震波形が伝播する時間を T1, T2 とし、地表面から $25\text{m}, 0\text{m}$ 地点に再び地震波形が伝播する時間を T3, T4 とする。

減衰のない線形等方弾性体では、基盤からの入射波(E波)は地表面に達した際に、2E波になることが知られている。図-4に示すように FEM, OSB-PD 共に全てのケースで 100m 位置での応答加速度は入力に対して2倍になっていることが確認できる。また、図-4に示すようにポアソン比によらず、全てのケースで FEM, OSB-PD の応答加速度は一致しているのが見て取れる。

以上より、仮想粘性境界を用いる事で地震波の入力が可能となり、OSB-PD を用いた地震応答解析が可能であることが示された。

4. おわりに

本稿では、OSB-PD の仮想粘性境界を導入し、FEM との比較を実施した。その結果、以下のことが判明した。

- 仮想粘性境界によって、FEM と同様に OSB-PD でも底面から E 波が入力されることを確認した。
- ポアソン比が異なる場合の解析を実施した結果、ポアソン比によらず OSB-PD と FEM の結果が高い精度で一致した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) S.A.Silling, Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces, J. Mechanics and Physics of Solids, Vol.48, Issue.1, pp.175-209, 2000.

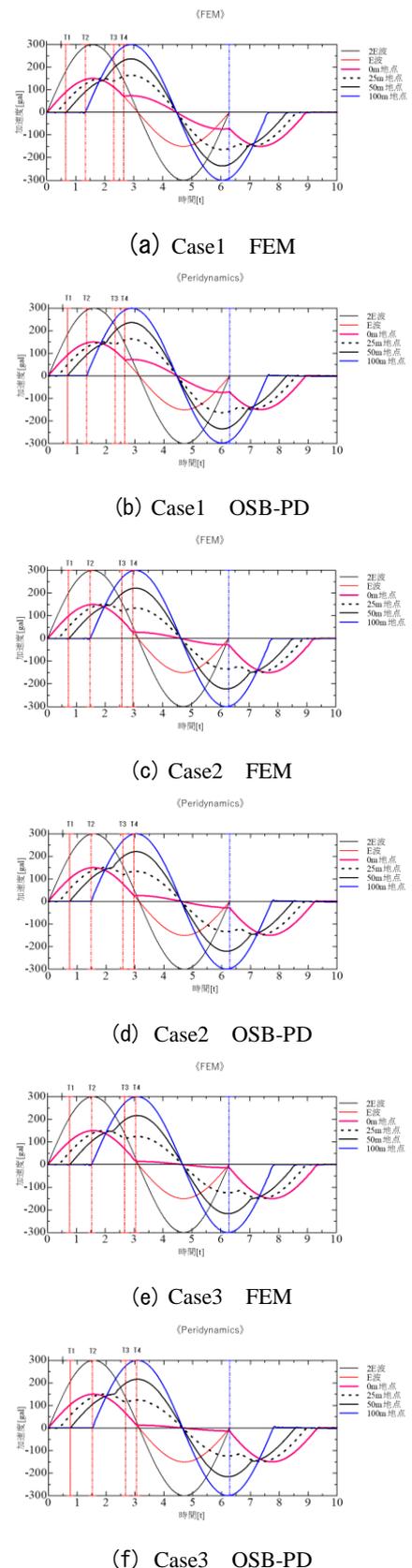


図-4 FEM vs Peridynamics