

1. はじめに

1978年の宮城県沖地震は、当時の人口50万人以上の都市が初めて経験した都市型地震であり、死者28名のうち18名がブロック塀や石塀の倒壊によるものであった。この地震を契機に住宅密集地における塀の倒壊の危険性が注目されることとなった。このような塀の倒壊の解析法には個別要素法(以下DEM)が用いられる。また塀の背面に土砂を有する場合もあり、その場合、背面土砂の崩壊はラグランジアン・パーティクル有限差分法(以下LPFDM)で解析することができる。しかし、塀の倒壊と背面土砂の連成を考慮できる解析法は確立されていない。そこで本研究ではLPFDMとDEMを境界面で融合したハイブリッド法を提案し、地震時における背面土砂一擁壁系の崩壊解析への適用を行った。

2. 解析手法

LPFDMでは解析対象となる物質をマテリアルポイント(以下MP)と呼ばれる多数の粒子で表現する。物質の情報(ラグランジュ変数)はこのMPによって空間に固定された矩形格子(以下セル)上を自由に移動する(図-1)。MPの持つ諸情報(密度、位置、応力など)は一定時間きざみごとにそれぞれのMPの存在するセルの格子点(以下ノード)に内挿関数を用いて集約される。そして各ノードにおける運動方程式を解くことにより、次の時間ステップのノードの変位増分が計算される。この時各MPも変位するので、ラグランジュ変数も更新される。変形したセルは次の計算サイクルに備え、移動したMPをその位置に残したままで、再び元の位置に戻される¹⁾。

一方、DEMでは各要素(本研究ではコンクリートブロック)間には仮想のばねとダッシュポットを有しており、要素間の接触によって各要素に作用する力はこれらを介して伝達される(図-2)。本研究では、個別要素を長方形で剛体としており、その結果コンクリートブロックを積み重ねた擁壁は、個別要素の二次元集合体として表現される。ただし、要素間の接触判定を簡便化するために、各頂点を微小な半径を持つ1/4円、辺を長方形と仮定する。この仮定により、接触パターンは頂点と頂点の接触、頂点と辺の接触の2つだけになる²⁾。

3. LPFDMとDEMのハイブリッド法

本研究では、ブロック塀と背面土砂の境界の挙動の表現に際して、LPFDMとDEMの接触領域における接触判定を行なうが、DEMの要素に対する、LPFDM領域の接触は、セルのノードによるものとMPによるものの二つが考えられる。LPFDMのノードを接触判定に用いる方法では、変位したノードとブロックの間に接触力が働き、それを外力としてノードで運動方程式が解かれる。この場合解析結果はセルのサイズやノード間の距離に大きく依存し、セルのサイズをブロックのサイズに対して小さく設定しないとブロックとの接触が離散的になってしまう。このため、図-3のようにブロックの内側にあるにもかかわらず、接触領域から外れたノードが存在してしまうという問題が生じることが分かった。

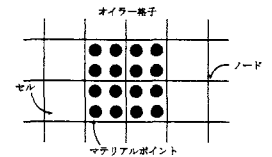


図1: セルとMP

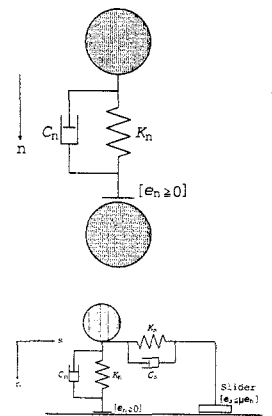


図2: 要素の接触

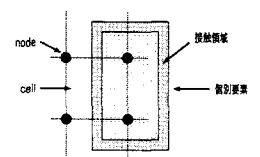


図3: 要素内のノード

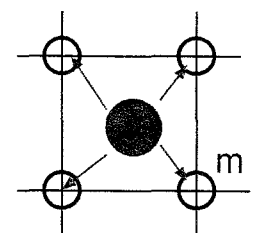


図4: 接触力の分配

一方、MP を用いて接触を考える方法では、MP とブロックとの接触によって生じた力をその MP が存在するセルの各ノードに分配し (図-4)、ノードで運動方程式を解くことにより、接触力を MP の変位に還元する。本来、LPFDM では外力は全てノードに働くものとしており、MP はセルのひずみによる応力が作用するのみであるが、MP に作用した外力をノードに振り分けることにより、LPFDM のアルゴリズムに従った計算が可能である。

4. 解析結果

ここでは、本研究で提案する DEM と LPFDM のハイブリッド法を解析は 2 次元で行い、1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録を入力として、水平方向には NS 成分を、鉛直方向には UD 成分を用いた。

まず、LPFDM により背面土砂部分において、土圧分布が適切に計算されることを確認する。水平 2 方向と鉛直下方向を固定した状態で LPFDM によって求めた背面土砂内の水平土圧分布を図-5 に点で示す。また、Rankine の土圧理論によって求めた水平主働土圧分布の理論値を図-5 中に実線で示す。本解析ではブロックのサイズ ($0.4\text{m} \times 0.2\text{m}$) に対して、セルのサイズを 0.1m 四方の正方形と設定した。LPFDM ではセルのサイズによって離散的に土圧分布が得られるが、解析値の理論値に対する誤差は小さく、一般に長大斜面の崩壊や数キロオーダーにおよぶ地盤の大変形を記述するために用いられる LPFDM を、本研究で対象とするような高々数 m オーダーの変形解析に用いることに問題はないことが分かる。

次に、ノードとブロックとの接触判定に基づき行った背面土砂-擁壁系の崩壊シミュレーション結果のうち、地震動入力後 0sec、5sec、10sec、及び 15sec のものを図-6 に示す。塀はブロックを 5 段に積み重ね、全体の高さを 2m とした。LPFDM 側の接触要素をノードとした場合、セルのサイズが大きすぎるため、ブロックの内側に MP が入り込んでしまっている。これは、前述のようにブロックの内側に接触力の働かない領域があるためである。この現象はセルのサイズを細かくすることにより解決されるが、MP とノードのそれぞれの個数、個別要素との接触判定の回数が膨大な数になり、計算時間が大幅に増加してしまう。

次に、MP とブロックとの接触判定による崩壊シミュレーション結果のうち、地震動入力後 0sec、5sec、10sec、及び 15sec のものを図-7 に示す。MP との接触力と地震動によって、ブロック塀が倒壊する様子がシミュレートできていることが分かる。

5. 結論

- ・土圧分布を確認することで、比較的小規模な変形解析でも LPFDM を適用できることを検証した。
- ・背面土砂-擁壁系の崩壊解析のために、LPFDM と DEM のハイブリッド法を提案した。接触判定には LPFDM のノードを用いるものと MP を用いるものとの考慮したが、MP によるものの方が安定して解析を行えることが分かった。
- ・ハイブリッド法を用いて背面土砂-擁壁系の崩壊解析を行なった結果、ブロックと背面土砂の間に接触力が生じ、倒壊に至った。

参考文献:

- 1) 小長井一男:地盤と構造物の地震工学, 東京大学出版会, 2002
- 2) 伯野元彦:破壊のシミュレーション, 森北出版株式会社, 1997

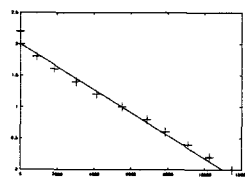


図 5: 土圧分布

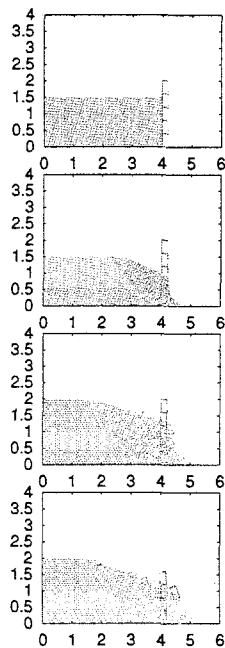


図 6: ノードでの接触

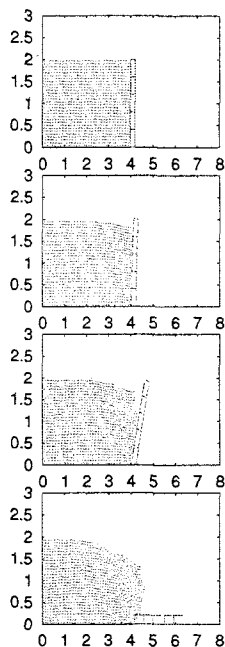


図 7: MP での接触