

国土技術政策総合研究所 小山内信智, 内田太郎
 日本工営株式会社 倉岡千郎, ○中島祐一, 杉山実

1. はじめに

待受け式擁壁に作用する衝撃荷重に関するこれまでの検討により、衝撃荷重を計算する方法として、流体圧を表す式、離散体モデル、連続体モデル、多質点モデルなどの適用性が検討されている^{1),2)}。これらの手法のなかで、離散体モデルの一つであるDEM(個別要素法)³⁾は、粒子一つ一つをモデル化することで粒子の衝突や飛散運動などを詳細に表現することができる。しかし、DEMが取り扱える粒子数には限りがあるので、崩土の粒子一つ一つを取り扱うことは難しい。そこで本研究では、一つのDEM粒子が砂などの粒子の集合を表すものと考え、衝撃力をシミュレートする上で必要となる粒子数や接触モデルの入力パラメータの設定方法について検討した。

2. 水路モデル及び流下方法

DEMモデルの水路および衝撃力を測定する受荷台(衝撃力測定板)は剛体の板とし、水路の幅は一定(0.8m)とした(図1)。実験装置にある流動幅調整板(図2)は表2のケース5で設定したが、衝撃力に対する影響が小さかったので他のケースでは設定していない。流下方法としては、粒子を土砂供給箱に堆積させ、次に開閉扉の壁を瞬間的に除去することで表現した。ただし、後述するように開閉扉を開放する速度は衝撃荷重の増加速度に影響がある。

いずれの場合も水路底面と粒子の間には摩擦を考慮したが側壁と粒子間の摩擦はゼロとした。

3. DEMパラメータ

粒子間または粒子一壁の間の接触モデルに設定するパラメータは、バネ係数、臨界減衰定数、摩擦係数である。粒子間および粒子一壁間の臨界減衰定数は既往の事例³⁾を参考に1.0として一定値とした。粒子一底面間および粒子一粒子間の摩擦係数は、それぞれ0.6, 0.7とした。粒子の密度は砂礫などの固体の密度(2476 kg/m³)を設定した。

バネ係数は砂礫などの単体粒子の剛性を表すのではなく、土塊などの粒子集合の固さを表すものとして考えた。本解析では、Hertzの衝突理論に基づいた球体と半無限弾性体との接触における圧縮力(P)と変位(δ)の関係式⁴⁾に一般的な土質材料の変形係数⁵⁾を設定することで、その割線の傾きをバネ係数の参考とした(図3および表1)。

流下する土砂は弾性体とは異なるが、表1の割線バネ係数を見ると、土石流や落石のシミュレーション等単体粒子間の剛性を表現する際に用いられている値⁶⁾(5×10⁴ kN/m~10⁵ kN/m)と比べて低い値(2 kN/m~10 kN/m)を設定しても矛盾のないことが示唆される。

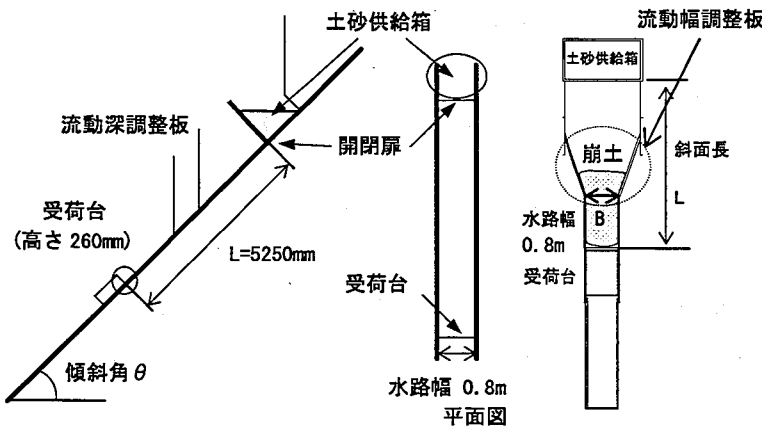


図1 水路のDEMモデル

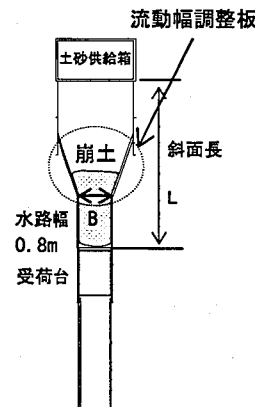


図2 実験装置(平面)

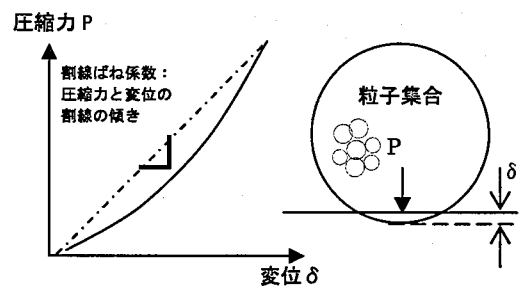


図3 接触モデル

表1 代表的な土砂の変形係数に対する割線係数

	変形係数 kN/m ²	割線バネ係数 kN/m
硬い場合(しまった砂層)	80000	448
中間(硬い砂層)	10000	85
やわらかい場合(軟らかい粘土)	5000	8

4. 解析ケースおよび解析結果

本解析では、まずバネ係数および粒子数の影響を調べた。次に良好な再現性を示したバネ係数と粒子数を設定して、水路勾配と土砂量が異なる砂礫材料を用いた実験の再現解析(表2)を実施してDEMモデルの適用性を評価した。

表2のケース5⁷⁾は、土砂量0.5m³のケースにおいて解析と実験から得られた衝撃力の時間変化の違いの原因について検討するために、流動幅調整板を設定し土砂供給箱の開放速度を調整したケースである。

(1) 粒子数とバネ係数の影響(図4)

土砂量が0.1 m³の砂礫のケースを対象として、粒子の数を1000個から増やした解析を実施した。この際、粒子間バネ係数は鉛直および接線方向とも同じ値とし、10 kN/mと2 kN/mの二通りを実施した。解析の結果、粒子の数が増えるほど解析から得られるピーク荷重は実験のピーク荷重に漸近し、ほぼ10000個を超えると一定値に収束する。また、バネ係数は10 kN/mとするよりも2 kN/mを設定したケースが実験のピーク荷重をよく再現できる。

表 2 解析ケースおよび解析条件

ケース	斜面勾配	土砂量 (m ³)	粒径 (mm)	粒子数	総重量 (kg)	バネ定数 (kN/m)	備考
1	45度	0.25	27.1	15,424	400	粒子間 2 粒子-底面 20 粒子-衝撃板 20	流動幅の調整板および開閉速度の調整
2	42度	0.25	27.1	15,424	400		
3	38.7度	0.25	27.1	15,424	400		
4	45度	0.1	20.0	15,424	160		
5	45度	0.5	39.5	10,000	800		
5'	45度	0.5	39.5	10,000	800		

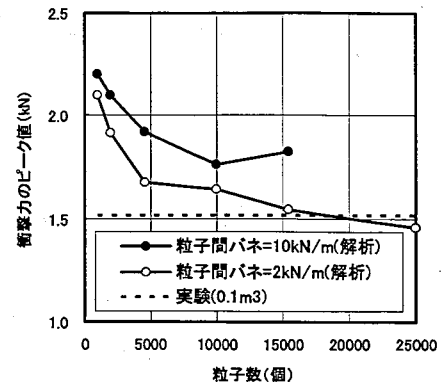


図 4 粒子数の影響

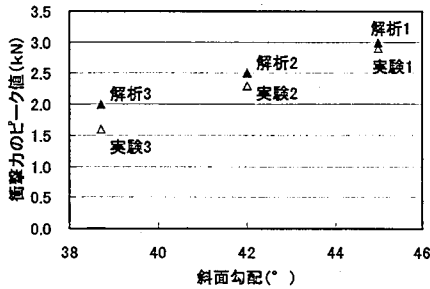


図 5 水路勾配の影響

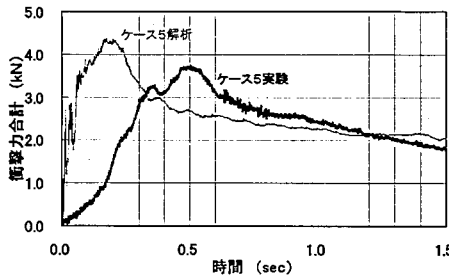


図 7 ケース5 砂礫 0.5m³-45度-衝撃力

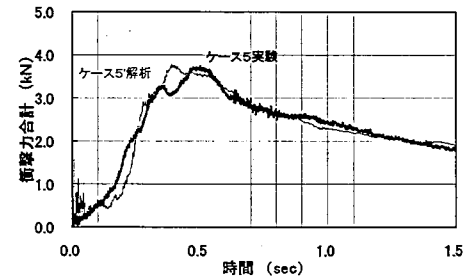


図 8 ケース5' 砂礫 0.5m³-45度-衝撃力

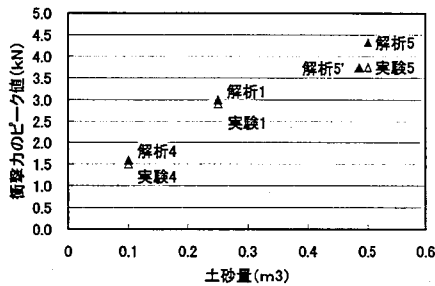


図 6 土砂量の影響

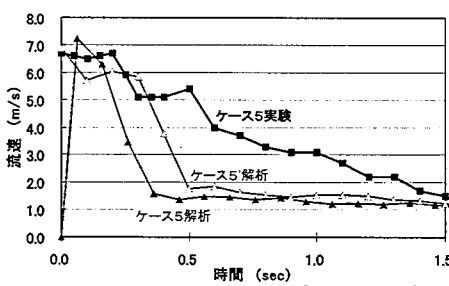


図 9 ケース5と5' 0.5m³-45度-速度

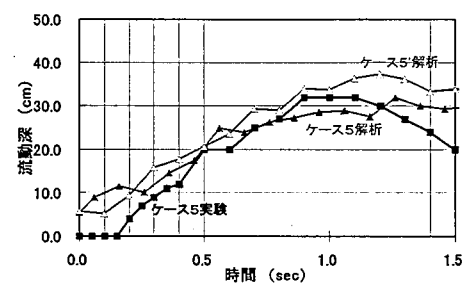


図 10 ケース5と5' 0.5m³-45度-流動深

(2) 水路勾配と土砂量の影響

解析の結果、DEM モデルは実験から得られた水路勾配と土砂量の影響をほぼ再現できている (図 5, 図 6)。ただし、ケース 5 およびケース 3 の解析のピーク衝撃力が実験のピーク衝撃力よりも大きい。また、ケース 5 の衝撃力の時間変化に着目すると図 7 のように実験に比べて荷重の増加が早い。この原因は次のように考えられた。DEM の粒子群は実験に比べて粒子群がまとまって流下し、衝突し始めてから短時間で粒子の越流と堆積過程が終了する。

一方、実験では図 10 から示唆されるように先頭粒子群の流動深が小さく、粒子群全体が水路方向に引き伸ばされていると考えられるので、荷重の増加速度がシミュレーションに比べて遅いものと考えられる。この点を検証するために、DEM モデルに流動幅調整板を設定し扉の開閉速度を 0.5 秒に調整することで、先頭粒子の流動深と速度を低下させた (図 9, 図 10)。その結果、図 8 に示されるように衝撃荷重の時間変化のみならずピーク衝撃力の再現性が改善された。

6. まとめと今後の課題

再現解析から同定されたパラメータを用いて水路勾配と土砂量の異なる実験結果を予測すると、ピーク衝撃力は実験結果とほぼ一致し DEM モデルの適用性が示された。ただし、粒子数を一定とした場合、崩壊規模によっては粒径が大きくなり、衝撃荷重が過大になる懸念がある。今後は、実際の擁壁の倒壊記録などを基に他の解析手法との比較検討も含めて、実斜面規模における DEM のモデル化方法を検討する必要がある。

<参考文献>

- 1) 内田ら：室内実験による崩壊土砂の衝撃荷重に関する検討，第 7 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，2004，
- 2) 小山内ら：崩壊土砂が衝撃時に待受け式擁壁に作用する荷重の時間変化推定手法の検討，平成 17 年度砂防学会研究発表会概要集，
- 3) 倉岡ら：粒状体個別要素法による崩土の衝撃荷重のシミュレーション，平成 17 年度砂防学会研究発表会概要集，
- 4) 建設省土木研究所土質研究室：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験報告書，1982，
- 5) 水道協会，水道施設耐震工法指針・解説，1997，
- 6) 例えば，深和ら：3次元個別要素法によるオープン型鋼製砂防堰堤の土石流捕捉効果解析，土木学会論文集，No. 738，2003