

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○皆見 侃  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 五十里 洋行  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 後藤 仁志

## 1. 序論

防波堤のマウンドのように砂地盤上に礫が存在する場の洗掘を計算するためには砂・礫・流体<sup>1)</sup>の3相の移動と変形を解く必要があるが、既往の研究で行われた計算は砂層のみまたは礫層のみの洗掘計算であり、砂と礫が両方存在する場における洗掘計算は行われていない。そこで本研究では、砂礫混合場の洗掘計算のための数値モデルを開発し、その適用性の検討を行う。

## 2. 数値解析手法

本研究では粒子法<sup>3)</sup>の一種である ISPH 法を用いて流体の計算を行う。礫は簡単のため円形の粒子で扱い、その運動計算には粒子間の相互作用力をばね-ダッシュポット系で計算する個別要素法(DEM)を用いる。砂層は弾塑性体で近似し、弾完全塑性体の構成則に基づいてその運動・変形解析を行う。

砂層を弾塑性体として扱い、弾塑性構成則に従って計算する際には十分な数の近傍粒子が必要であるが、周囲に粒径が大きい礫が存在すると影響半径内に空隙が含まれる場合と同様の扱いになり、計算精度が低下する。そこで、本研究では礫粒子の存在位置に重複して砂粒子を配置することを許容する。図-1に、模式図を示す。図中の赤線で囲った砂粒子を例に説明する。本モデルでは、砂粒子と礫粒子の間の距離を $r_{ps}$ として、砂粒子の礫粒子に対する重複割合 $\phi_{ps}$ を

$$\phi_{ps} = \frac{r_{lim} - r_{ps}}{d_s} ; 0 \leq \phi_{ps} \leq 1 ; r_{lim} = \frac{d_p + d_s}{2} \quad (1)$$

と与える。ここに、 $d_p$ ：礫粒子の粒径、 $d_s$ ：砂粒子の粒径である。これを用いて、礫粒子と位置が重複する砂粒子の最大土砂保有率 $\xi_{max}$ を

$$\xi_{max} = 1 - (1 - \gamma_p)\phi_{ps} \quad (2)$$

と与える。ここに、 $\gamma_p$ ：礫層の間隙率である。礫粒子と重複する砂粒子において土砂保有率が上式で与えた最大値を下回り、かつ、当該砂粒子より上方で別の砂粒子が近接する場合には、土砂が礫間の空隙に侵入することを想定して、土砂保有率が最大となるように保

有土砂の一部を受け渡す。こうすることで、扱う土砂の総量が過大評価されず、また、砂礫層の堆積厚が適正に評価される。さらに、砂層の変形や礫の移動とともに砂粒子と礫粒子の相対位置が変化するが、模式図の右側に示すように、重複割合が減少し、最大土砂保有率が増加した場合は、当該砂粒子よりも上方に位置する近傍砂粒子から保有土砂の一部が譲渡される。逆に、重複割合が増加する場合は最大土砂保有率を超える分の保有土砂を近傍砂粒子に分け与える。なお、最大土砂保有率が0.9を超える砂粒子と礫粒子の間にはDEMと同様の反発力が計算される。

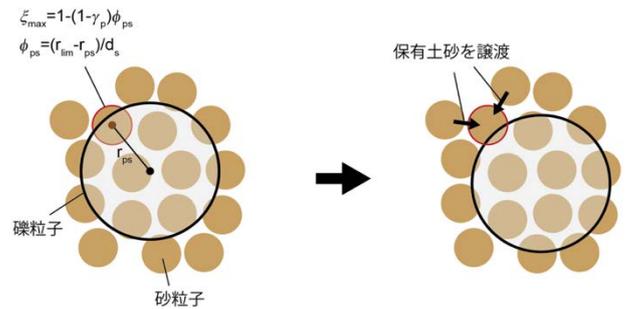


図-1 透過型礫—砂層連成モデル模式図

## 3. 鉛直噴流洗掘解析

### (1) 計算条件

計算領域を図-2に、計算条件を表-1に示す。砂礫混合場の洗掘現象に関する実験として、Takegawaら<sup>2)</sup>は砂層に60秒間鉛直噴流を作用させたときの洗掘形状と洗掘孔の深さ、直径、砂層の間隙水圧を計測している。本研究では、Takegawaらの実験と同様の条件で計算を行った。実験では大抵の場合砂層を完全に飽和させることが難しく、空気の入混による見かけ上の粘性が発生しやすいことから、本計算ではそれに対応するものとして、 $1.0 \text{ kN/m}^2$ の粘着力を与えて計算を行うこととした。洗掘孔の形状と洗掘深さを砂層のみの場合と砂礫混合層の場合でそれぞれ実験結果と比較した。

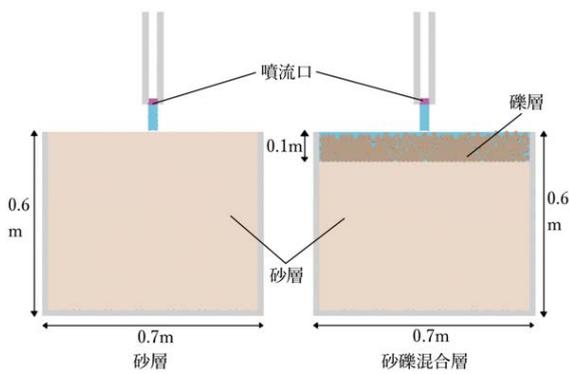


図-2 計算領域

表-1 計算条件

水平流路の高さ	0.5 m
水平流路の幅	0.9 m
粒子群の初期高さ	0.25 m
粒子群の初期幅	0.05 m
小粒径粒子の粒径	0.012 m
小粒径粒子の密度	880 kg/m <sup>3</sup>
大粒径粒子の粒径	0.06 m
大粒径粒子の密度	967 kg/m <sup>3</sup>

(2) 計算結果

図-3 に砂礫混合層の洗掘計算結果と実験結果を示す。砂礫混合層のケースでは、 $t = 1.0$  sでは洗掘深は実験画像よりも計算結果の方が大きくなっているが、 $t = 10.0$  sでは計算結果の方が洗掘深さは小さくなっていることが確認できる。続いて図-4 に、洗掘深の時系列変化を示す。図-4 を見ると、砂層のみの場合は洗掘深が $t = 0.0$  sから約 $t = 10.0$  sまでは計算結果と実験結果で概ね一致しているが、その後は計算結果の方が深さが大きくなっており、実験結果との差が広がっていることが確認できる。また、砂礫混合層の場合は、 $t = 1.0$  sから $t = 10.0$  sにかけて洗掘深は計算結果の方が実験結果よりも大幅に小さいことが分かる。また、実験では $t = 10.0$  sで礫による洗掘孔の埋め戻しが発生していることが図-3 から確認できるが、計算では実験のような埋め戻しは確認されなかった。実験では左右端から排水が行われ、礫も同様に流出するものと推察されるが、水路奥側境界は排水条件となっておらず、壁が存在する。実験は三次元的に行われ、水槽手前側の壁面近傍に入射された噴流によって左右と奥行方向に放射状に洗掘孔が発達するが、奥行き方向に移動した礫は壁によって反射して流出せずに埋め戻しに寄与したと思われる。

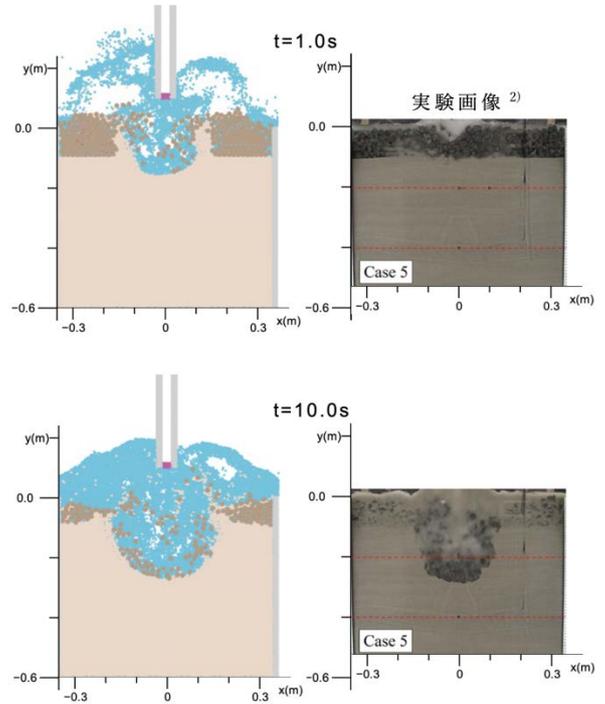


図-3 砂礫混合層の洗掘計算の実験結果との比較

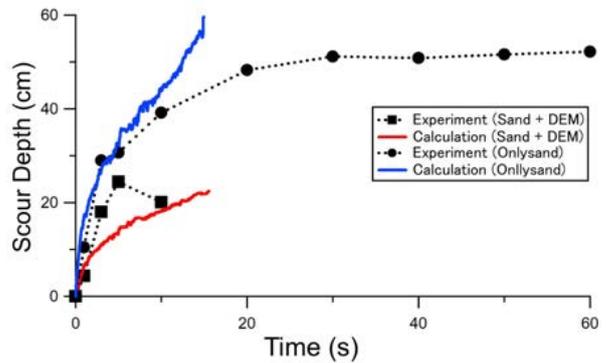


図-4 洗掘深の計算結果と実験結果の比較

4. 結論

本研究では高精度 ISPH 法を基盤とした固液混相型粒子法を用いて砂層及び砂礫混合層に鉛直噴流を作用させた場合の洗掘過程の数値シミュレーションを行った。本数値モデルは良好な実験結果との一致が得られたが、礫層長時間計算を行うと安定性に問題が発生し、また実験で見られた礫粒子による洗掘孔の埋め戻しの現象が確認出来なかったため、引き続き検討を進めたい。

参考文献

- 1) 後藤仁志：流れの方程式，森北出版，568p，2022.
- 2) N. Takegawa, Y. Sawada, T. Kawabata：Scour reduction in sand beds against vertical jets by applying sheet-like countermeasures, *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol.39, Issue 6, pp.649-658, 2021.
- 3) 後藤仁志：粒子法 連続体・混相流・粒状体のための計算科学，森北出版，pp.1-10，2018.