

## コンクリート個別要素法のサブパーティクルスケールの摩耗モデルを導入した 高精度の Euler-Lagrange シミュレーション

中央大学研究開発機構 正会員 ○福田 朝生  
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

### 1. 序論

排砂バイパス水路内のコンクリートの摩耗量の推定に関する研究では、流下砂礫が理想的に流れる状態を推定し、コンクリートとの衝突により粒子が失う力学的エネルギー  $\Delta E_{nm}$  と摩耗量  $\Delta V_w$  が、摩耗係数  $C_w$  を用いて次式のように関連づけられている<sup>1)</sup>。

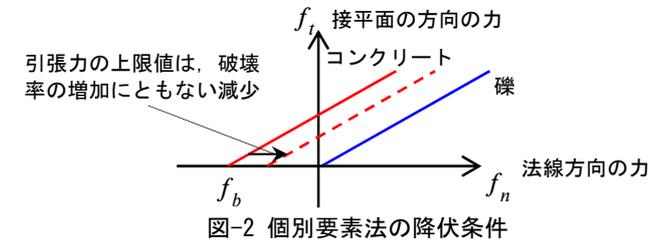
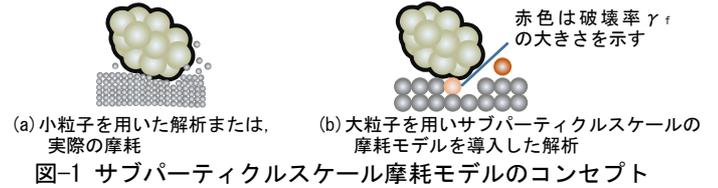
$$\Delta V_w = C_w \Delta E_{nm} \quad (1)$$

この摩耗係数は、比較的理想的な流れ場の実験により求められ、信頼性が高いため、粒子の失う力学的エネルギーを正しく見積もることが出来れば、摩耗量は概ね推定できると考えられる。しかし、上式のみでは、コンクリート摩耗形状の変化による水流や粒子運動の変化など、摩耗と水と粒子運動の相互作用を推定することはできない。

著者ら<sup>2)</sup>は、水の運動は粒子よりも小さな計算格子を用いて解析し、粒子は球体連結モデルで構成し、この運動を剛体として解く高精度の Euler-Lagrange カップリング法 (E-L 法) による三次元運動解析法 (APM(Arbitrarily Particle Multiphase)法と呼ぶ) を構築した。これらの解析手法は摩耗シミュレーションのための水と土砂の運動解析に有効である。

コンクリートの摩耗は微視的な視点でみればコンクリートの破壊である。コンクリートの破壊現象については、引張力まで拡張したコンクリートの個別要素法の適用性が確認されており<sup>3)</sup>、摩耗進行過程のコンクリート破壊やコンクリート粒子の抜け出しなどの説明にも有効であると考えられる。図-1(a)のように、摩耗粉のレベルまで、コンクリートを構成する球を小さくすれば、摩耗現象は適切に表されると考えられるが、この場合、計算負荷が非常に大きく計算の実施が難しい。また、コンクリートを構成する球を大きくすると、コンクリート球間の衝撃力は球スケールで平均化されるため、隣接するコンクリート球間の衝撃応力は平均的に小さくなり、破壊を説明することが難しい。そのため、比較的大きな球で摩耗を説明するためには、小さなコンクリート粒子の抜け出し等の摩耗現象 (サブパーティクルスケールの摩耗) を説明するモデルが必要となる。本研究では、粒子が衝突により失う力学的エネルギーを、衝突されたコンクリートの破壊に費やされたエネルギーとして考慮するサブパーティクルスケールの摩耗モデルを構築する。摩耗モデルの概念図を図-1(b)に示す。ここで、破壊率の設定に式(1)の関係を用いる。そして

右の大粒子を用いたモデルにおいてサブパーティクルスケールの摩耗 (左図の小粒子の運動) を説明するため、小粒子を解析する代わりに各粒子で破壊率  $\gamma_f$  を計算し、破壊率の増加に応じてコンクリート粒子の引張力の上限値を減少させる。大粒子が全て破壊されるとき ( $\gamma_f = 1$ : 引張力ゼロ) に要するエネルギーを、小粒子で大粒子と同体積分の摩耗を生じるときに要するエネルギーに設定することにより、大粒子で小粒子の摩耗の進行を考慮する。



APM 法と連成させることで、水と土砂および摩耗の相互作用を解析可能な新しいシミュレーションモデル APM-CDEMA (APM-Concrete DEM-Abrasion) を構築する。構築したモデルで福岡ら<sup>4)</sup>によって行われた石礫流送によるコンクリート水路の摩耗実験を対象に解析し、解析結果の摩耗進行過程の妥当性を確認した。

### 2. サブパーティクルスケールの摩耗モデル

#### 2.1 降伏条件

コンクリート個別要素法の降伏条件は、図-2 に示すようにシンプルなものとした。コンクリートを構成する球の隣接する球との引張力の上限值  $f_b$  は、引張強度と接触面積  $A$  を用いて次式で算出する。

$$f_b = A \frac{\sigma_{t,max,i} + \sigma_{t,max,j}}{2}, \quad A = 4r_c^2, \quad (2)$$

ここに  $\sigma_{t,max,i}$ ,  $\sigma_{t,max,j}$  は、接触する粒子  $i$  と粒子  $j$  の引張強度であり、 $r_c$  はコンクリート球の半径である。この各コンクリート球の引張強度  $\sigma_{t,max}$  は、各球ごとにそれぞれ個別に求められ、初期の引張強度  $\sigma_{t,max}^{(0)}$  と各球の破壊率  $\gamma_f$  を用いて、次のように求める。

$$\sigma_{t,max} = (1 - \gamma_f) \sigma_{t,max}^{(0)} \quad (3)$$

#### 2.2 破壊率

図-1(b)に示したように、本研究の摩耗モデルは、ある体積のコンクリート球が全て破壊する ( $\gamma_f = 1$ , 引張強度がゼロとなる状態) ために要するエネルギーは、同体積の摩耗粉を生じるために要するエネルギーに等しいと仮定する。式(1)の関係を用い、ある体積  $V_0$

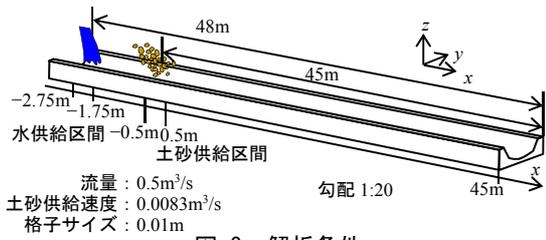


図-3 解析条件

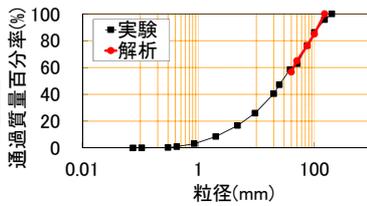


図-4 粒度分布

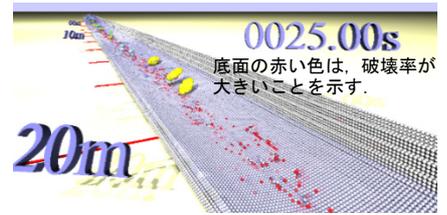


図-5 解析結果の水面と粒子および摩耗の状況

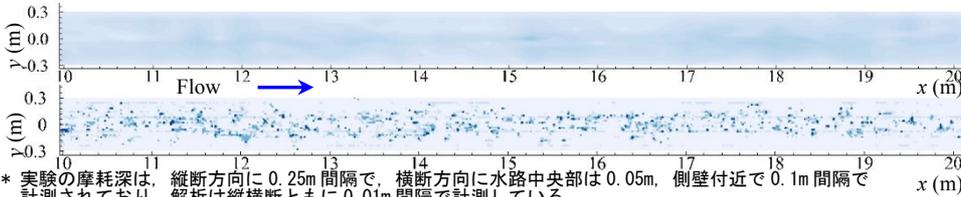


図-6 摩耗深コンター図  
\* 実験の摩耗深は、縦断方向に0.25m間隔で、横断方向に水路中央部は0.05m、側壁付近で0.1m間隔で計測されており、解析は縦横断ともに0.01m間隔で計測している。  
\* 解析の摩耗深は、サブパーティクルスケールの摩耗(図-5の赤色部分)も考慮した値として求めるため、表面のコンクリート粒子の半径を  $(1-\gamma_f)r_c$  として評価し、摩耗深を計測した。

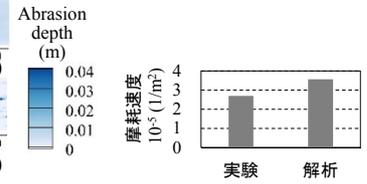


図-7 水路中央部の単位通過土砂量当たりの摩耗速度

のコンクリート球の破壊に要するエネルギーを  $V_\Omega/C_w$  とする。コンクリート球に対し、このエネルギーが費やされたとすると、当該コンクリート球は、全て破壊されたとして破壊率  $\gamma_f$  が1になるようにする。任意の時刻の破壊の程度を示す破壊率は、このエネルギー  $V_\Omega/C_w$  に対する、当該コンクリート球が他の粒子との衝突によって失われていく力学的エネルギーの和  $\sum \Delta E_{nm}$  の比として次のように定義する。

$$\gamma_f = \frac{C_w \sum \Delta E_{nm}}{V_\Omega} \quad (4)$$

粒子が失う力学的エネルギーは、全てコンクリートの破壊には費やされず、一部は音や熱のエネルギーに変換される。しかし、ここでは、コンクリートの破壊に費やされるエネルギーと音や熱に費やされるエネルギーの比は固定されていると仮定する。これは、 $\Delta E_{nm}$  の大きさに依らず摩耗係数を定数として与える式(1)と同様の仮定である。

i 粒子と j 粒子の衝突により、両粒子が失う力学的エネルギーの和  $\Delta E_{nm,ij}$  は次式で算定される。

$$\Delta E_{nm,ij} = \mathbf{f}_{c,i} \cdot (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \Delta t \quad (5)$$

ここに  $\mathbf{f}_{c,i}$  は、j 粒子から i 粒子に作用する力、 $\mathbf{v}_i$ 、 $\mathbf{v}_j$  は粒子 i, j の接点の速度である。式(4)では、各コンクリート球がそれぞれ個別に、衝突によって失われる力学的エネルギー  $\Delta E_{nm}$  を合計する必要がある。そのため、式(4)の  $\Delta E_{nm}$  には、i, j 粒子が失う力学的エネルギーの和  $\Delta E_{nm,ij}$  を等分した  $\Delta E_{nm} = 0.5 \Delta E_{nm,ij}$  を用いた。

### 3. コンクリート製水路の摩耗シミュレーション

#### 3.1 解析条件

摩耗実験<sup>4)</sup>を基に設定した数値解析条件を図-3に、また、粒度分布を図-4に示す。本解析は計算負荷が大きいため、実験は80hr実施されているが、解析では初期の33.3hrを対象とし、33.3hrを25sに短縮した解析を行った。実験時間に応じた摩耗量を推定するため、式(4)の右辺に加速パラメータ  $\beta (=4,800 (=33.3 \times 60 \times 60 / 25))$  を乗じた。摩耗係数は、文献<sup>1)</sup>を参考に  $C_w = 1.11 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{J}$  とし、初期の引張強度  $\sigma_{t,max}^{(0)}$  は、

実験に用いたコンクリートの圧縮強度の1/12に相当する  $2.7 \times 10^6 \text{ (Pa)}$  を用いた。

#### 3.2 解析結果

図-5に解析結果の水と土砂および摩耗状況を示す。底面では広範囲に破壊率の増加が見られる。実験と解析結果の摩耗深コンターを図-6に示す。解析時間は、25sと短かく、下流部ではまだ少量の土砂しか通過していない。そのため、比較的上流の  $x=10\text{m}$  から  $20\text{m}$  の範囲の摩耗深を示した。実験の摩耗深は、土砂供給開始後最初の計測結果(245m<sup>3</sup>の土砂供給後)であり、解析は最終段階(25s:換算土砂通過量91m<sup>3</sup>)である。換算土砂通過量は  $x=10\text{m}$  地点を通過した土砂量に加速パラメータ  $\beta$  を乗じて求めた。通過土砂量が少なく、実験も解析もまだ、顕著な摩耗の波打ちは見られない。図-7に  $x=10\text{m}$  から  $20\text{m}$  の範囲の、実験と解析の水路中央部の単位土砂量通過当たりの摩耗深の進行速度を示す。解析の土砂量には、換算土砂量を用いた。解析値は実験値に近い値を示しており、水路中央に集中する土砂の運動や、粒子運動と摩耗の関係が推定できていると考えられる。

#### 4. 結論

本研究で構築した APM-CDEMA 法は、モデル定数として摩耗係数を直接用いることができる利点がある。また、加速パラメータは、短縮時間を基に一義的に決まり、これを導入しても摩耗実験の初期の摩耗深の進行速度を良く説明できた。この結果は、長期の摩耗予測においても高精度の E-L 法が、解析手段として活用できることを示唆している。今後は、本計算をさらに進め、実験で見られる摩耗による水路底面の波打ちなど、より激しい摩耗量に対する適用性を確認する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 石橋毅, 土木学会論文報告集, 334:103-112, 1983.
- 2) Fukuoka et al., *Adv. Water Resour.*, 72:84-96, 2014.
- 3) Hentz et al., *J. Eng. Mech.*, 130(6):709-719, 2004.
- 4) 福岡ら, 水工学論文集, 48:1135-1140, 2004.