

固液混相乱流モデルに基づく橋脚周辺の局所洗掘シミュレーション

東京理科大学大学院 学生会員 ○井上 隆

東京理科大学 正会員 柏田 仁, 二瓶 泰雄

1. はじめに

近年、極端豪雨の頻発化に伴う大規模洪水氾濫が全国各地で甚大化している．これらの中では、河川流・河床変動解析で取り扱える問題が多い一方、混相乱流解析を必要とする課題も顕在化してきた．例えば、土砂災害の一因となる土石流に加えて、高濃度の流砂運動が顕著となる河川堤防の越流侵食や橋脚周辺の局所洗掘、橋桁周辺の橋台侵食等に関しては、固体（土砂）-液体（水）の混相流と見なせる．これらのうち豪雨災害に伴う橋梁被害は、近年増加傾向になっており¹⁾、特に橋脚周辺の局所洗掘が顕著となっている．これら橋脚の局所洗掘被害を未然に被害を防ぐために、橋脚周辺の複雑な流砂過程を精度良く把握・評価・予測することが重要となり、その素過程のモデリングが可能な固液混相乱流モデルの開発が必須となる．混相流モデルのうち土粒子挙動を取り扱う固相（固体粒子相）モデルとしては、一般的にラグランジュ型とオイラー型に分類される．ラグランジュ型モデルは、個々の土粒子を追跡するため計算機負荷が膨大となるため、橋脚局所洗掘解析への適用は皆無である．一方、土粒子挙動を「流体」と取り扱うので計算負荷は大きく削減できるものの、個々の粒子挙動、特に粒子間の衝突・接触力の定式化が課題である．一方、著者の一人は、過去にオイラー型モデルとラグランジュ型モデルの両者の長所を取り込んだオイラー・ラグランジュ混合型モデルの GAL (Grid-Averaged Lagrangian) モデルを構築し、流体相の LES をカップリングした GAL-LES モデルを構築し²⁾、高濃度粒子運動への適用・検証も行い³⁾、今後の発展が期待される．本報では、GAL-LES モデルを用いた橋脚周辺における局所洗掘現象の数値シミュレーションを行った．そのモデル構成や計算結果の一部を報告する．

2. 研究手法

(1) GAL-LES モデルの概要：GAL モデルでは、粒子群をラグランジュ的に追跡することで超多粒子の運動素過程を反映しつつ、計算機負荷を抑えることが可能なモデルである．具体的には、図-1 に示すように、ある時刻 t において格子全体で空間平均された粒子群は、次のステップ ($t+\Delta t$) までに、移流と拡散のより、それぞれ重心の移動と粒子群幅の増加を伴う．その際、粒子群の広がり幅は矩形形状を保持すると仮定する．その後、粒子群を各格子に再配分し、粒子相の速度や濃度を計算する．流体相の乱流モデルとして LES を導入しているため、整合性を取るべく固相モデルにも GS (Grid Scale) 運動と SGS (Sub Grid Scale) 運動を設定する．ここで固相モデルの GS 運動は、粒子群の重心移動 $\Delta \bar{x}_{si}$ (式(1))、SGS 運動は重心周りの各座標方向への分散 $\Delta \bar{x}_{si}^{'2}$ (式(1)) で代表化し、次式のように表す．

$$\Delta \bar{x}_{si} = \bar{u}_{si} \Delta t, \quad \Delta \bar{x}_{si}^{'2} = 2 \bar{u}_{si}^{'2} \cdot T_p \Delta t \quad (1)$$

ここに、 $\bar{u}_{si}$ は格子平均粒子速度、 Δt は計算時間間隔、 $\bar{u}_{si}^{'2}$ は粒子速度分散、 T_p は粒子運動の拡散時間スケールである．運動方程式系や粒子の再配分操作等に関しては既往文献²⁾を参照されたい．また、粒子間力モデルとして、粒子間の衝突力・運動応力・接触力の3つを考慮する．この中でも、粒子運動応力に関しては、GAL モデルの粒子拡散過程に伴う運動量輸送と一致しているため、直接的に算出することが可能である．そのため、粒子間衝突力と接触力のみを定式化している．具体的な定式化に関しては井上³⁾を参照されたい．

(2) 計算条件：計算条件は、著者らの橋脚局所洗掘実験を参考に、流下方向 2.00m、横断方向 1.00m、鉛直方向 0.30m の 3 次元場を計算領域とし、上流から 1.13m、左岸から 0.50m の位置に矩形橋脚（長径 0.26m、短径 0.14m）を配置した（図-3）．計算格子数は 100×50×59、格子幅は 2.00×2.00×0.50cm、計算時間間隔 Δt は 0.0010s である．また境界条件は、底面に No-slip condition、上面に Slip condition、左右には Slip 壁を与えた．初期流速分布は液相のみ対数分布を与え、固相は流速 0 とした．初期河床高さを 0.20m とし、河床材料として砂粒子（粒径 $d=0.136\text{cm}$ 、比重 2.65）を最密充填濃度 ($c_{\max}=0.60$) で敷き詰めた．予備計算として、流体相速度が準定常状態に至るまで粒子速度を 0 とし、準定常状態後から計算さ

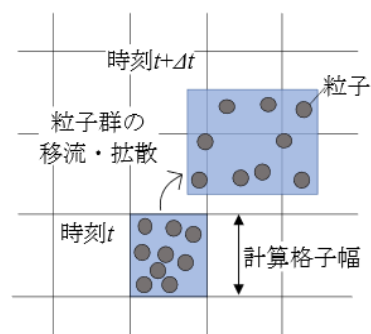


図-1 GAL-LES モデルの粒子群追跡過程

表-1 計算パラメータ

反発係数 e	0.80
最密充填濃度 $c_{\max}$	0.60
限界濃度 $c_{\min}$	0.40
内部摩擦角 ϕ	30°
計算時間間隔 $\Delta t[\text{s}]$	1.0×10^{-3}

キーワード 豪雨災害、橋脚、局所洗掘、固液混相流、GAL-LES モデル、粒子間力

連絡先 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 東京理科大学 TEL04-7124-1501 (内線 4065)

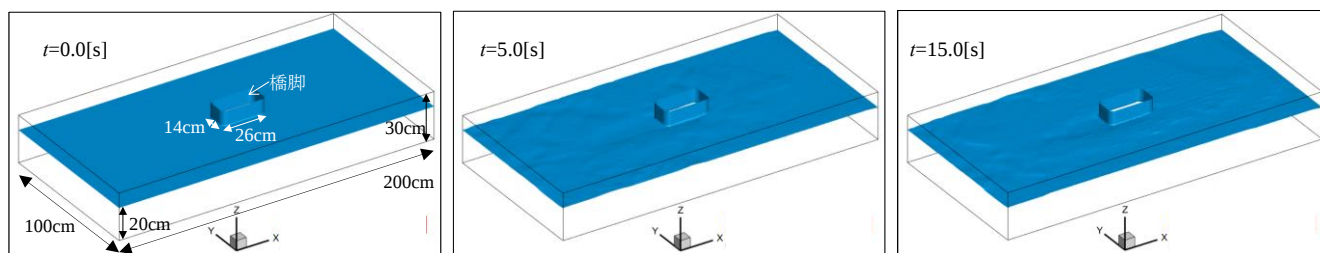


図-3 初期条件及び $t=5.0s$, $15.0s$ における橋脚周辺の洗掘状況
(粒子体積濃度 $c=0.10$ の等値面コンター)

れた粒子速度を用いて固相の運動を解いた．以下に示す時間は，固相の運動を解き始めた時刻を $0.0s$ とし，これからの時間を t とする．また，計算時に使用した固相モデル内のパラメータを表-1 に示す．

3. 結果と考察

(1) 全体の河床変動状況と橋脚周辺の洗掘状況：本解析により得られる橋脚周辺の洗掘や河床変動状況を把握するために， $t=5.0$, $15.0s$ における計算領域全体の河床高分布を図-3 に示す．ここでは，粒子体積濃度 $c=0.10$ の等値面を図示しており，この等値面を便宜的に河床高とし，立体的にとらえるために鳥瞰図の形で表示している．これより， $t=5.0s$ 後では，小さいながらも河床高の凹凸が発生しており，主として，橋脚の上流側や流速が早くなる橋脚側面にて生じている．一方，橋脚周囲の直上流部付近では，周囲に比べ若干洗掘が進行している程度であり，微小な河床変動に留まっている．次に， $t=15.0s$ 後では， $t=5.0s$ と比べての河床高の凹凸（河床波の波高）が大きくなると共に，全体的に下流方向に流下していた．また，橋脚上流側では，全体的に河床高は低下している様子が伺える．一方，橋脚下流側における河床高は増加している様子は見られず，一般的な橋脚背後における土砂堆積は再現されていない．流速場を確認したところ，橋脚背後の Wake が十分に再現できておらず（図省略），橋脚背後に供給される土砂輸送量が小さかったためと考えられる．

(2) 橋脚前面における局所洗掘状況：橋脚前面における局所洗掘状況を詳細に把握するために，橋脚中心線上の縦断面における固相体積濃度コンターと流体相速度ベクトルを図-4 に示す．ここでも， $t=5.0$, $15.0s$ の結果を表示している．これより， $t=5.0s$ では，横断方向に軸を持つ大きな渦が形成されると共に，橋脚前面に置いて，顕著な鉛直下降流が発生している．それに伴って，橋脚前面では，深さ $1.4cm$ 程度の洗掘が生じていた．次に， $t=15.0s$ では，鉛直下降流により，橋脚前面の洗掘が進行している様子が伺える．ただし，洗掘範囲は相対的に狭くなっている．体積濃度コンターを見ると，図中矢印部分のように，高濃度層 ($c=0.5-0.6$) が中濃度層 ($c=0.3-0.4$) の上に覆い被さっている様子が分かる．これは，粒子間接触の評価に課題があり，現状では，周辺セルの土粒子間の接触力評価が不十分の可能性があり，今後の検討課題とする．

謝辞：本研究の一部は，科研費（課題番号：21H04577）によって実施された．ここに記して，謝意を表す．

参考文献：1) 二瓶，井上：基礎工，Vol.50, No.6, pp.2-7, 2022, 2) Nadaoka, Nihei, Yagi : International, J. Multiphase Flow, Vol.25, pp.1619-1643, 1999, 3) 井上，柏田，二瓶：土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.78, No.2, pp.I_979-I_984, 2022.

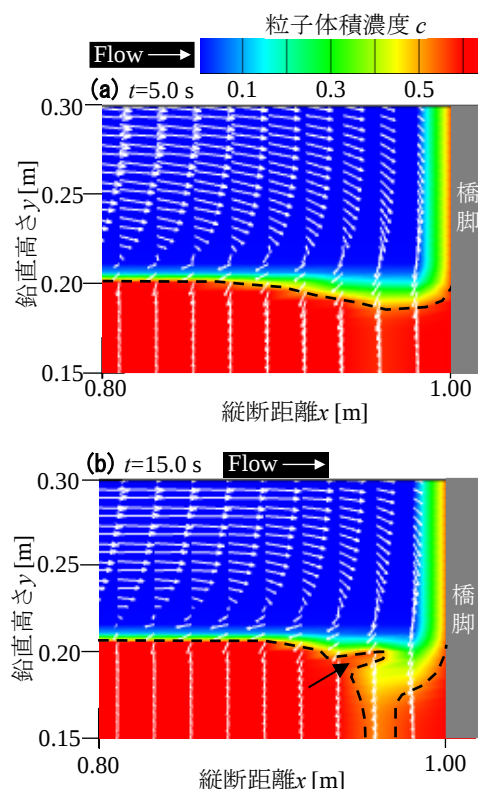


図-4 縦断面における固相体積濃度コンターと流体相速度ベクトル（(a) $t=5.0s$ と (b) $15.0s$ ，橋脚中心線上，図中黒点線：初期河床高）