

複雑な三次元開水路粗面乱流場の流速・圧力分布評価の高精度化

中央大学 学生会員 ○宅和 佑悟
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 序論

山地部の巨岩・巨石の多い流れ場では、図1のように三次元的な渦運動が見られる。大野ら¹⁾はこうした巨岩・巨石による形状抵抗の大きい複雑な流況に対して非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS)法²⁾、個別要素法(DEM)を用いた洪水流と石礫の移動解析を行っている。この際、洪水解析により得られた流速・圧力分布から流体力を求め、個別要素法(DEM)による接触力と一体的に巨石の始動について評価している³⁾。しかし、巨石背後の逆流域等の流速の逆勾配が生じる流況の評価に課題があり、始動解析の精度は現状50%程度と高いとは言えない。Q3D-FEBSは、これまで複断面蛇行流路等の砂礫移動を適切に評価してきたが、大礫のある河川のQ3D-FEBSの流速・圧力評価について高精度な評価手法の構築が求められている。こうした背景から本研究は、複雑な三次元開水路粗面乱流場における数値解析データを用い、高精度な流速・圧力評価手法の検討を行う(図2; 本研究のフローチャート)。



図1. 巨岩・巨石の多い流れ場の様子
④川辺川(筆者撮影 2022.06.24)

2. 高精度な流速・圧力分布の評価

本研究では、Q3D-FEBSの流速鉛直分布式に着目した。Q3D-FEBSでは、平面二次元解析法の枠組みで水平方向流速(u, v)の鉛直分布を底面・水面・水深平均流速を境界条件とした3次関数で評価している。この際、境界条件の設定では河床付近で生じる流速の逆流域を評価できることが重要である。また、底面位置が「水深の3%分河床から離れた位置」としており、物理的にあいまいな境界位置で解析している。これら2つの条件を改善するため、本検討では計算領域を逆流域を含む河床面から水面までに設定、底面位置はレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の極大位置とし、これを境として2層に分割する(図3; 2層モデルの概念図)。そして、2層それぞれ表1に示すような境界条件を考慮した4次関数カップリングモデルを提案する。また、圧力分布は、水平方向流速(u, v)と連続条件を満たすように鉛直方向流速(w)を求め、これら(u, v, w)を鉛直方向の運動方程式に代入することで、圧力分布の評価を行う。以上本検討では流速鉛直分布として2層4次関数カップリングモデルを用い、これと連続条件を満たす鉛直方向流速と一体的に直接非静水圧成分の評価を行うこととする。ただし、本検討の段階では、得られた圧力項がFEBSの水平方向の運動方程式を満足させてはいないことに注意が必要である。

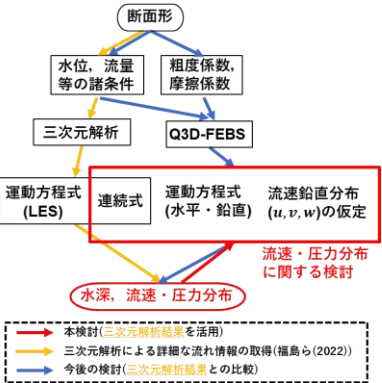


図2. 本研究のフローチャート

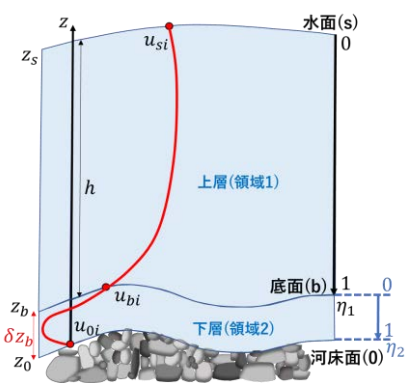


図3. 2層モデルの概念図

領域1 ($\eta_1 = \frac{z_s - z}{h}$)	番号	領域2 ($\eta_2 = \frac{z_b - z}{\delta z_b}$)	番号
$u_{1i}(0) = u_{si}$	①	$u_{2i}(0) = u_{bi}$	⑥
$u_{1i}(1) = u_{bi}$	②	$u_{2i}(1) = u_{0i}$	⑦
$\int_0^1 u_i(\eta_1) d\eta = U_{1i}$	③	$\int_0^1 u_i(\eta_2) d\eta_2 = U_{2i}$	⑧
$\frac{\partial u_i}{\partial \eta} \Big _{\eta_1=0} = 0$	④	$\frac{\partial u_i}{\partial \eta} \Big _{\eta_2=0} = -\frac{\tau_{bi}}{\rho v_{tb}}$	⑨
$\frac{\partial u_i}{\partial \eta} \Big _{\eta_1=1} = \frac{\tau_{bi}}{\rho v_{tb}}$	⑤	$\frac{\partial u_i}{\partial \eta} \Big _{\eta_2=1} = \frac{\tau_{0i}}{\rho v_{t0}}$	⑩

従来モデル(単層①~④) 新しいモデル(二層①~⑤、⑥~⑩)

(未知数について)
 U_{1i} : 水深高さ平均流速、 U_{2i} : 底面高さ平均流速、 ρ : 密度、 v_t : 渦動粘性係数、 τ_t : セン断応力

表1. 流速分布を決定する境界条件について
(左: 上層(η_1 軸), 右: 下層(η_2 軸))

3. 検討対象とする三次元開水路粗面乱流場数値解析データについて

検討対象の流れ場は図 4, 5 の 2 ケース(福島ら^{4), 5)}である。実験では、幅 0.02(m)、長さ 1.5(m)、勾配が 1/20、半径が 0.004(m)の半円柱粗度をもつ開水路に対し、一定流量(0.171(1/s))を流している。Case1, 2 両方とも側壁、円柱粗度による抵抗をもち、複雑な第二種の二次流が発生している一方で、Case2 は Case1 と比較して幅の広い実験水路であり、より非静水圧成分の強く発生する流れ場である。こうした複雑な流況において適用可能なモデルについて検討する。なお、本検討では、Case1, 2 とともに水路中央断面粗度谷部付近における検討結果を示す。

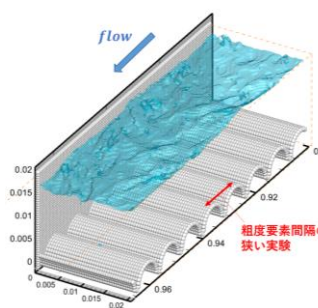


図 4. 数値実験水路(Case1)

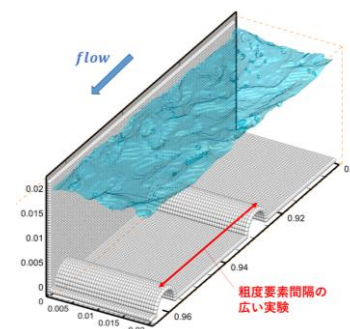


図 5. 数値実験水路(Case2)

4. 流速・圧力分布におけるモデルの適用結果

図 6~8 に Case1 における流速(u, v)・圧力分布、図 9~11 に Case2 における流速(u, v)・圧力分布の検討結果を示す。流速分布に関しては従来の 3 次関数モデルと 4 次関数 2 層モデルをプロットし、圧力分布に関しては 2 層モデルの結果をプロットしている。なお、圧力分布は河床面にはたらく静水圧で無次元化している。

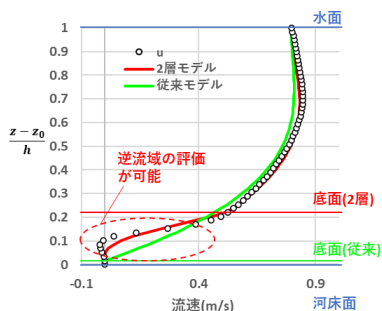


図 6. 主流速分布(Case1)

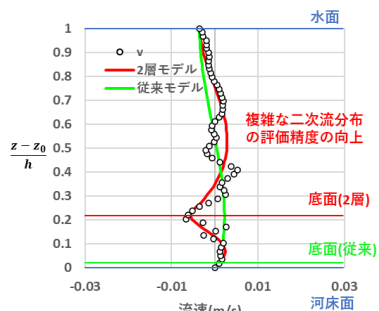


図 7. 横断方向流速分布(Case1)

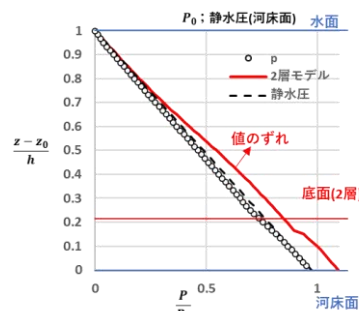


図 8. 圧力分布(Case1)

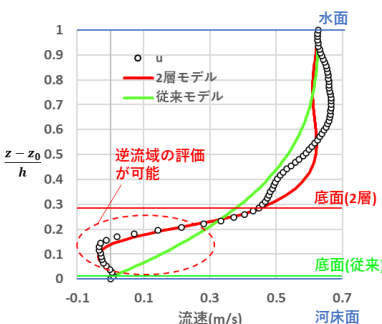


図 9. 主流速分布(Case2)

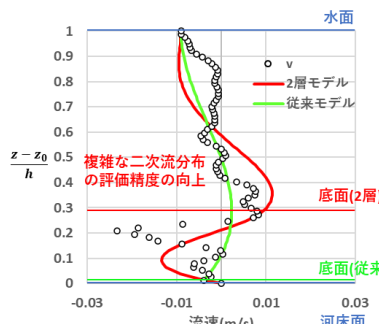


図 10. 横断方向流速分布(Case2)

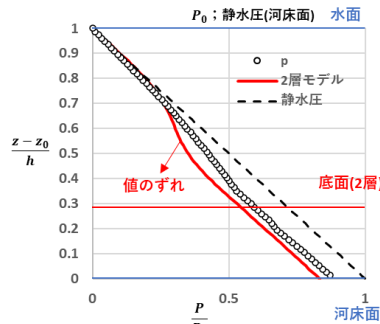


図 11. 圧力分布(Case2)

結果としては、Case1, 2 とともに流速分布に関して、逆流域ならびに複雑な二次流分布を 2 層モデルは評価できており、河床面近傍の境界条件の追加が効果的であることを示した。一方で、圧力分布に関して、静水圧に近い線形分布を示す Case1 では、水面から河床面にかけて連続的に値のずれが見られる。また、Case2 では、非静水圧分布の傾向は捉えられているものの、同様に値のずれが見られた。この理由は、圧力分布計算の際に鉛直方向の運動方程式のみを用いており、水平方向の運動方程式を満足させていないことが理由と考えられる。今後は非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS)法による解析を行い、改良を重ねていく。

参考文献

- 1) 大野ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 77, No. 2, pp. 631-636, 2021.
- 2) 竹村ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 75, No. 1, pp. 61-80, 2019.
- 3) 大野ら, 河川技術論文集, 第 28 巻, pp. 277-282, 2022.
- 4) 福島ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 78, No. 2, pp. 607-612, 2022.
- 5) 福島ら, 2022 日本流体力学会年会, 9/29 14:50~