

粗度の多重スケール性と非平衡粗面抵抗則を取り入れた流れの解析法

中央大学研究開発機構 正会員 ○内田 龍彦, フェロー 福岡 捷二

IIHR-Hydrosience and Engineering, The University of Iowa A. N. Papanicolaou and A. G. Tsakiris

1. 目的

巨石などの大型粗度の存在する礫床河川では、古くから対数分布則が適用できないことが指摘されており、抵抗評価や流れの解析には特に課題が多い。本研究では、粗度の多重スケール性と非平衡粗面抵抗則を取り入れた新しい解析法を開発し、水没した巨石が粗面上に点在する流れの水理実験に適用し、検証することを目的とする。

2. 粗度の多重スケール性と従来の抵抗則の課題

礫床河川では、様々な大きさの粗度が存在するため、図-1に示すように、粗度の多重スケール性を導入し、大きな粗度(LSR)と小さな粗度(SSR)の抵抗が分けて評価されてきた¹⁾。通常、SSRは表面抵抗として取り扱われる小さな粗度形状、LSRはそれより大きな形状の粗度を指し、河床波や水路形状などの形状も含まれる。このため広義には、特別に意識されるかどうかは別にして、ほぼすべての自然河川の解析において粗度のスケール分離は行われていることになる。粗度の多重スケール性を意識した既往の研究では、Nicholas²⁾は三次元解析において大きな粗度の影響を不規則な河床の起伏で表現し、小さな粗度は底面近傍で対数分布則を仮定した壁法則により与える、礫床河川の解析法を提案している²⁾。粗面の壁法則は、より一般的に言う、小さな粗度(SSR)の影響を底面境界条件として評価するために、粗度の大きさと流速評価点の高さ(渦層の厚さ、図-1)等を用いて底面近傍の流速と摩擦速度の関係が与えられる。このことは、図-1の底面近傍を拡大した図-2に示すように、底面より上の流速分布が変形しても、渦層内底面定義位置 z_b より下の層(渦層、粗度層)においては底面流速に対する平衡状態の流速分布が仮定され、変化しないことを意味している。しかし、巨石など LSR が存在する場合、河床近傍の渦層内の流れは LSR の影響によって乱される。この流れの非平衡性は粗度層にも及ぶ。これを考慮する方法として、気象分野の樹木評価などに用いられていたダブルアベレージングの考え方を導入し、渦層内や粗度層内の非平衡流れを運動方程式から求める方法が提案されている³⁾。しかし、この方法も、基礎方程式の平均化に伴う種々の未知係数を決定する必要があることと、従来の抵抗則との関連が明確でない課題を有している。また、これらの三次元解析法は計算負荷が大きく、礫床河川への適用性は困難である。

著者らは、河川構造物周りの局所洗掘解析モデルを構築するために、静水圧分布等の浅水流の仮定を用いない準三次元解析法(BVC法)を開発してきた⁴⁾。BVC法は河床の凹凸などによる底面近傍の流れと圧力分布を解析できるため、LSRが流れに与える影響を評価できると考えられる。しかし、水没粗度に対する適用性の検討は十分でない。また、BVC法においても従来の三次元解析と同様に、壁面近傍で平衡状態を仮定した壁法則が用いられている。このため、粗度の多重スケール性を有する流れ場の解析のためには、LSRの存在を考慮できるSSRの評価法、即ち新しい粗面抵抗則が必要である。

3. 粗度の多重スケール性を有する流れの解析手法

本解析手法では、LSRが流れに与える影響を直接解析するために、図-1に示す渦層よりも上の領域の流速と圧力の分布をBVC法⁴⁾により解く。BVC法では、底面の薄い渦層から水面まで積分された、連続式と運動方程式が解かれる。浅水流の仮定が用いられていない運動方程式を計算するためには、流速と圧力の鉛直分布、及び底面の鉛直方向流速とせん断応力を計算する必要がある。後者はSSRの抵抗であり、抵抗則により計算する。LSRの影響は、前者で表現される。流速と圧力の非静水圧成分の分布には、それぞれ、三次関数と線形分布が仮定され、水深積分された渦度の定義式、渦度方程式、水表

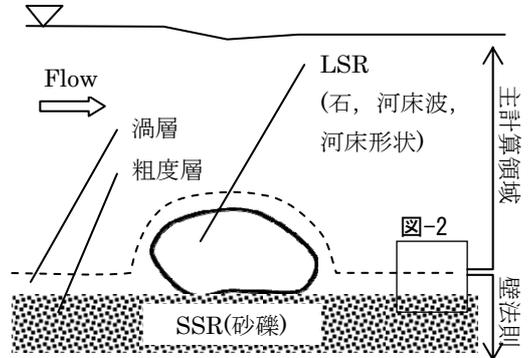


図-1 粗度の多重スケール性と抵抗評価法

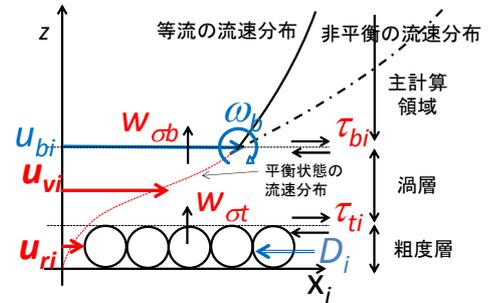
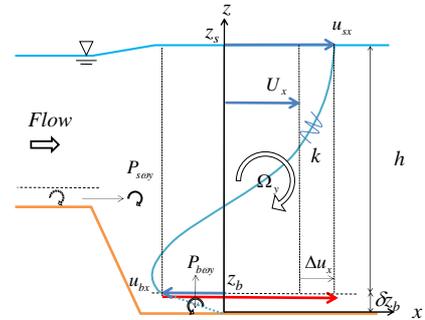


図-2 粗度の多重スケール性と抵抗評価法



未知量	基礎方程式
水深 h	水深積分した連続式
水深平均流速 U	水深積分した水平方向運動方程式
乱れエネルギー k	水深積分した乱れエネルギーの輸送方程式
底面流速 u_{bi}	水深積分した水平方向渦度の定義式
水面流速 u_{si}	水面の水平方向運動方程式
水深平均渦度 Ω_i	水深積分した水平方向渦度方程式
鉛直方向流速 W	水深二重積分した連続式
底面圧力の非静水圧成分 dp_b	水深積分した鉛直方向運動方程式
底面せん断応力 τ_{bi}	抵抗則(渦層, 粗度層の運動方程式)
底面鉛直方向流速 w_{abi}	渦層, 粗度層の連続式

図-3 BVC法の未知量と基礎方程式

キーワード 底面流速解析法, 非平衡粗面抵抗則, 多重スケール, 非静水圧分布, 巨石

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31208 中央大学研究開発機, TEL 03-3817-1617

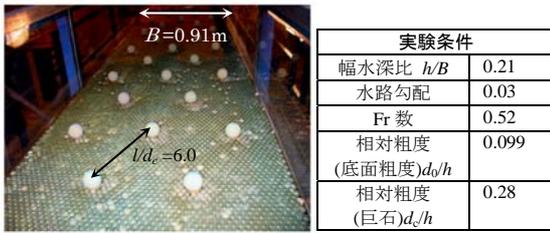


図-4 粗面上に巨石が点在する流れ場の実験⁵⁾

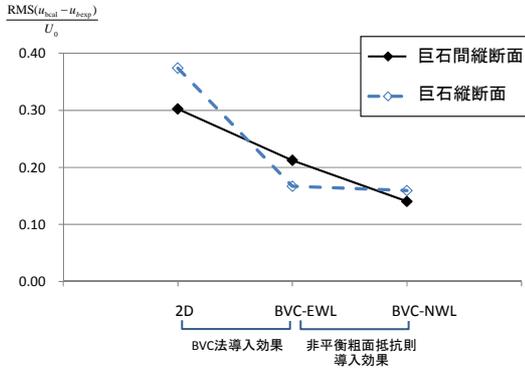


図-7 BVC法と非平衡粗面抵抗則を導入することによる底面流速場の解析精度向上の効果

面の運動方程, 二重水深積分した連続式及び水深積分した鉛直方向運動方程式を解くことによって, 分布形が計算される. 図-3にBVC法の未知量と基礎方程式を示す.

LSRの影響による底面近傍の流れの非平衡性を評価するため, 本研究では渦層と粗度層において連続式と運動方程式を解く非平衡粗面抵抗則により底面境界条件を与える. これらの方程式は渦層, 粗度層が十分薄いと仮定して導かれるが, 運動方程式には図-2に示すせん断応力 τ_{bi} , τ_{ii} や抗力 D_i が含まれる. 本非平衡粗面抵抗則では, 平衡状態において従来の抵抗則を満たすようにこれらを定めることによって, 従来の抵抗則に用いられていた相当粗度 k_s の値を用いることができ, 運動方程式と連続式に基づいて流れの非平衡性が考慮できる点に特長がある.

4. 水没した巨石が粗面上に点在する流れの解析

水没した巨石が点在する流れ場の実験(図-4)に非平衡粗面抵抗則を用いたBVC法(BVC-NWL)を適用し, 妥当性を検討する. ここでは, 同一解析条件において平衡粗面抵抗則を用いた場合(BVC-EWL)と平面二次元解析法を用いた場合(2D)の結果を比較し, BVC法とNWLの効果をはっきりさせる. k_s には巨石が無い条件の流速分布の実験値から求めた $k_s/d_0=0.9$ を用いた. 図-5の水面流速分布を見ると, 巨石の影響はほとんど現れておらず, 水面の流れは概ね一様であり, 各種解析結果の差もほとんどない. 図-6は底面近傍の流速分布の比較である. 水没する巨石の影響を受け, 底面近傍の流れは複雑である. 2D解析では水没粗度の抵抗や流速分布の変形の影響が考慮できず, ほぼ一様な速い底面流速となっている. BVC-EWL解析では, 水没粗度背面の剥離等を計算できているが, 全体的に底面流速がやや大きめに計算されている. これに対し, 非平衡粗面抵抗則を導入したBVC-NWL解析は底面流速が全体的に小さくなり, 実測結果をよく説明できている. 図-7に2D解析, BVC-EWL解析, BVC-NWL解析による底面流速場の解析結果と実測結果の平均二乗誤差の比較を示す. 誤差は図-6の実験計測断面において, 巨石間縦断面(巨石を通過しない縦断面:S2,S3)と巨石断面(巨石を通過する縦断面:S1,S4)で分けて示している. 2D解析とBVC-EWL解析の差がBVC法を導入した効果, BVC-EWLとBVC-NWLの差が非平衡粗面抵抗則を導入した効果を示している. BVC法を導入することによって, 巨石断面の解析精度は大きく向上していることが分かる. これはLSRによる流速分布の変形や作用する流体力はBVC法によって概ね評価できていることを示している. 一方, 巨石間断面においては, 平衡粗面抵抗則を用いた解析では解析誤差があまり小さくなっておらず, 非平衡粗面抵抗則を導入することによって, 誤差が大きく低減している. これは, 巨石間断面では巨石による底面近傍の非平衡流れが粗度層や渦層との運動量交換を生じさせていることを示している. このことから, 粗面上に点在する巨石は作用流体力による直接的な抵抗増だけでなく, 底面近傍の流れを乱すことにより粗面の抵抗を大きくする二次的な抵抗増を引き起こすと言える. 粗度の多重スケール性を有する礫床河川の解析においては, これら両方の効果を評価することが重要であり, 非平衡粗面抵抗則とBVC法を用いた本解析手法が有用であることが示された.

参考文献: 1) Clifford et al., Earth Surface Processes and Landforms 17(2): 111-126, 1992. 2) Nicholas, Earth Surf. Process. Landforms 26: 345-362, 2001. 3) Nikora et al., J. Hydraul. Eng 133: 873-883, 2007. 4) 内田・福岡, 土木学会論文集 B1 Vol. 68(4), I_1225-I_1230, 2012. 5) Papanicolaou et al., Acta Geophysica. 60(6):1502-1546, 2012.

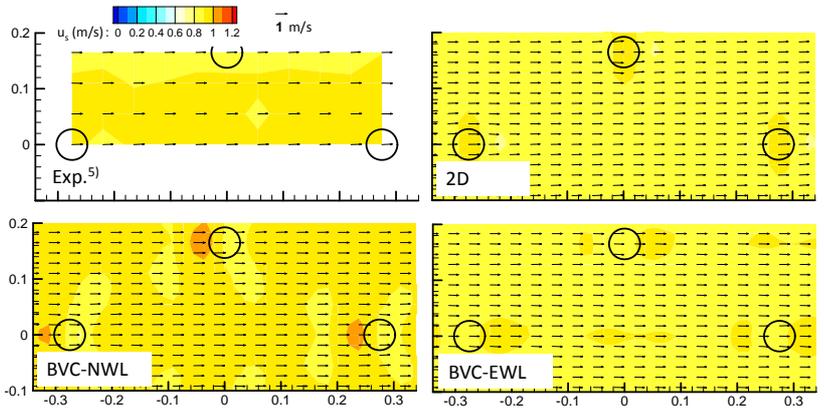


図-5 水面の流速分布の比較

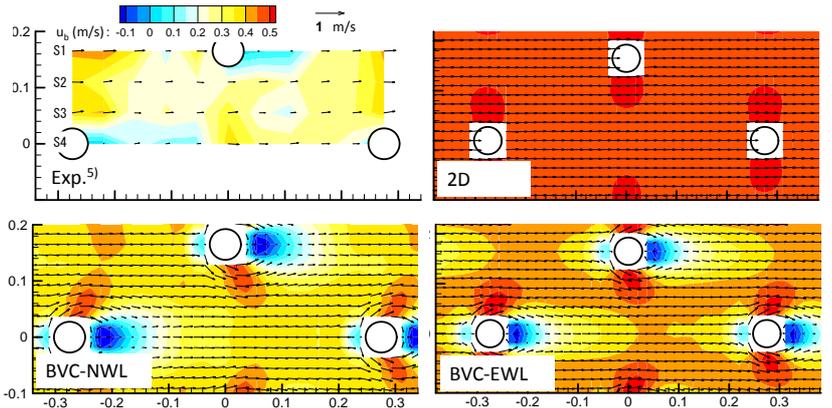


図-6 底面の流速分布の比較