砂漣型河床開水路における非ニュートン流体流れの抵抗特性

熊本大学大学院	学生会員	崔	志英
熊本大学丁学部	正会員	大本	昭憲

1.はじめに

河床波の存在が流れ場にどのような影響を及ぼすかについては古くから多くの研究が成されており,河床 波の形成機構や乱流構造について明らかになりつつある.しかし,これらの研究は掃流砂及び浮流砂に関す る研究が多く,一部河口域及び黄河流域などで発生する粘性粒子(d<5µm)を多く含む高濃度土砂流に関する 研究は少ない.粘性粒子を高濃度に含む流れは比較的特殊な流れにあり,その研究はビンガム流体モデルに より代表される場合が多い¹⁾.著者ら²⁾の研究では高濃度土砂流は非ニュートン流体特性を持ち,低せん断 速度領域において擬塑性流体に近似可能であり,滑面開水路流れでは強い粘性により乱れが抑えられ層流化 することが明らかになった.本研究は剥離を伴う砂漣を模擬した連続固定波面上に清水及び高濃度土砂流と 類似の非ニュートン流体特性を有する高分子溶液の流れを形成させ,PIV(Particle Image Velocimetry)システム を用いて計測された流速変動の計測結果を基に,ニュートン流体(清水)と非ニュートン流体(高分子溶液)の比 較のなかで,平均流速,乱流統計量について検討を行った.

2.実験装置及び方法

実験材料および河床形状

実験には高分子溶液として PSA(ポリアクリル酸ソーダ)溶液を用いた. 図-1は PSA 溶液の粘性特性を示す.高分子剤溶液は非ニュートン流体の 特性を示し,低せん断速度領域において粘性係数µはせん断速度への依存 性が強く,べき乗則モデル(Power-law model)に従う.本研究で用いた河床 形状を図-2に示す.砂漣河床の波長と波高をそれぞれ =8cm,Hs=1cm とした.砂漣の平面形状には,三次元的な不規則のものから峰と谷が横断 方向に一様な二次元的な平面形状があるが,本研究では,二次元 状の砂漣河床波に注目した.

実験装置及び実験条件

本研究に用いた計測システムの概略を図-3に示す.実験に用いた水路は長さ10m,幅40cm,高さ30cmの循環型可変勾配水路である.砂漣河床を模擬するため,図-2の河床波を水路上流端から流下方向に6.4m設置した.座標系は,水路上流端より2m下流位置の水路中央の河床を原点とし,流下方向を×軸,横断方向をy軸,鉛直方向をz軸に設定し,それぞれに対応した流速変動成分をu,v,wとした.PIV計測は,平衡状態にある水路上流端から2mの地点で一波長分の計測を行った.流速のサンプリング周波数は15Hz,一計測面に1000枚の画像データに関して統計処理を施した.清水においては,表-1の砂粒レイノルズ数および無次元限界層流力から,砂漣の発生条件を逆算し,表-1に示す実験条





	清水	PSA 溶液
流量 Q (l/s)	1.7	1.7
水深 H (cm)	2.5	3.5
断面平均流速 Um(cm/s)	17.0	12.1
最大流速 U ₀ (cm/s)	20.8	18.0
水路勾配 I_0	1/2000	1/2000
フルード数 Fr	0.34	0.21

件を定めた. PSA 溶液の場合,抵抗特性を調べるために水路勾配及び流量を清水の場合と統一させた. 3.平均流特性及び流れ関数

図 - 3は,最大流速 U₀, 波高 Hs で無次元化された主流速の流下方向変化を示しており, 流下方向に 0.5 ず つ, ずらして表示している.また実線は清水における剥離線を示す.清水の場合, 流下方向に河床波クレス トから剥離した流れは, 剥離線下層において剥離循環領域及び主流域からの流体の連行を受けながら混合層 が発達し,水路床に再付着している様子が確認される.また,流下 方向の各位置においての主流速の変曲点は剥離線と一致しているこ とが分かる.また,再付着店下流では剥離流は,徐々に弱まり,内 部境界層が発達し混合層は抑制される様子が確認され,x/Hs=4.5 付 近から底面付近で加速されている.一方,PSA 溶液の場合,剥離及 びそれに伴う混合層の発達は見えず,清水の剥離線の下層では主流 速の鉛直方向勾配が極小さいが剥離線からは急に加速され鉛直勾配 が大きくなることが認められる.また,清水と同様に x/Hs=4.5 付近 から下流に向けて底面付近で加速されている.

流れ関数は,横断方向に流れ場が一様で あると仮定し,式(1)から求められ,その等 $\psi(x,z) = \int_{0}^{z} U dz$ (1) 値線を図 - 5に示す. PSA 溶液の場合にお

いて <0 となる剥離領域は,底面付近において確認されるが,ごく 小さいために剥離渦の影響はほとんどないと考えられる.一方,清 水の場合,再付着点距離は,x/Hs=3.5 であることが分かる.剥離線 下層では,循環流が形成され,その最小値は =-0.03 逆流渦の中心 は x/Hs=1.8,z/Hs=-0.5 であることが認められる.

4. 乱れ特性

図 - 5 は最大流速で無次元表示したレイノルズ応力 – u'w'の極大値の流下方向変化を示す.清水の場合は x/Hs=3.5 の位置で最も大きく, PSA 溶液のレイノルズ応力は清水に較べて0に近い.

5.おわりに

- 砂漣河床においてニュートン流体(清水)の場合には逆流域が形成され,再付着店距離は x/Hs=3.5 であり,剥離線は主流速の変曲点位置と対応している.砂漣河床波上におけるレイノルズ応カ - u'w'は,剥離線の上層にてピーク値を示し,レイノルズ応力は剥離渦の河床への衝突により強められている.
- 2) 同一水路に清水と同流量の非ニュートン流体(PSA 溶液)の流れを 形成した場合,抵抗が大きくなり,水深は上昇,流速は減少する. 流れ関数の分布からニュートン流体(清水)の再付着点までに若干 減速,その下流で加速されるが,ニュートン流体(清水)同様な剥離 及び剥離に伴う循環剥離渦は形成されないことが明らかになった. レイノルズ応力はほぼ0に近い値を示す.よって,高粘性の非ニ ュートン流体の流れは河床形状により起因する乱れによるエネル ギー損失は粘性により抑えられ,粘性抵抗によるエネルギー損失 が支配項であることが明らかになった.



参考文献

1) 水理委員会共同研究グループ(芦田和男・江頭進治・佐々木幹夫・清水義彦・関根正人・玉井昌宏・藤田正治・宮本邦明・ 森明巨): 固液混相流における支配方程式とその適合性,水工学論文集,第39巻, pp.537-550, 1995

2) 大本照憲・崔志英・柿原ゆり:高濃度土砂流の抵抗特性について,応用力学論文集, Vol.7, pp.979-986, 2004.