

固体粒子浮遊流における周囲流体の違いが乱流構造に与える影響

福島工業高等専門学校専攻科 社会環境システムコース 学生会員 ○佐藤 広樹
福島工業高等専門学校 都市システム工学科 正会員 菊地 卓郎
長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 正会員 衛藤 俊彦
東京建設コンサルタント 河川計画部 正会員 大澤 範一

1. はじめに

自然界においては様々な固体粒子浮遊流がたびたび観測され、海岸における飛砂、河川における浮遊砂が代表例として挙げられる。飛砂は海岸林や農地の埋没、道路へ堆積して走行障害を引き起こす。また、浮遊砂は河道閉塞による洪水の要因や河道内の植生へも大きな影響を及ぼす。これらは防災・環境の観点からも重要な現象である。そこで本研究では飛砂、浮遊砂について統一的な取り扱いができる $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いて数値解析を行い、周囲流体の違いが流れの乱流特性に与える影響を評価し、乱流構造の変化についての考察を行った。

2. 飛砂と浮遊砂

飛砂と浮遊砂は砂粒子が周囲流体に輸送される問題として捉えた時に多くの共通項があり、同様の方程式を用いて記述することができる。一方で同じ方程式を用いて現象を表現することはできるが、それぞれに違いが存在する。一つ目は周囲流体が飛砂では空気、浮遊砂では水である点、二つ目は浮遊砂には水面が存在するが、飛砂ではそのような境界が存在しない点である。これらの違いは流体中での終速度が異なることや水面の存在の有無による境界条件の設定の違いに現れてくる。

3. 数値解析モデル

解析手法として乱流拡散方程式を用いた。この手法は固体粒子が十分に小さく、流体の流動に固体粒子が追従して運動する場合には有力な手法である。今回構築したモデルは砂粒子を拡散型の輸送方程式で定式化している。基本方程式は連続式、レイノルズ方程式、乱れ運動エネルギー k 、エネルギー散逸率 ε 、乱流拡散方程式についての方程式である。

4. 解析対象実験

飛砂における数値解析の比較には久保田ら¹⁾によって報告された幅 1.0m、高さ 1.1m、長さ 20mの吹出型風洞を用い、風洞底部に厚さ 10cmの実験砂層を設けた実験データを用いた。風速鉛直分布の測定には熱線風速計を使用し、飛砂量鉛直分布の測定には風上から 15mの地点に設置してある捕砂器を用いている。また、この実験で用いられた砂は鹿島海岸の砂をふるい分けし、粒度をそれぞれ揃えた砂である。今回の数値解析では中央粒径が 0.15mmの結果を用いている。浮遊砂における数値解析の比較には、Vanoni²⁾が行った精度の良い浮遊砂の実験として有名な水路長 12.192m、幅と深さともに 0.845m程度のスケールで行われた浮遊砂流の室内実験によるデータをもとに菊地・福島³⁾が数値解析を行ったデータを用いた。この浮遊砂における砂粒子の中央粒径は飛砂との乱流構造を比較するために同程度の粒径に対する結果である 0.16mmでの結果を用いている。

5. 数値解析モデルの検証

解析手順としては最初に風速分布の数値解析値と実験値が最も一致するような無次元圧力勾配 I_p と相当粗度 k_s を同定した。そして、飛砂量の実験値と風速、砂粒子の密度から砂の体積濃度を推定し、底面近傍の濃度 c_b を求め、飛砂量分布を計算した。計算領域として飛砂は浮遊砂と違い水面といった境界が存在しないので対数則が成立している高さ 0.3mを上部境界とし、下部境界は全領域の 5%を与えた。乱流拡散方程式を用いた場合には底面もしくはごく近傍における固体粒子の転動、跳躍を取り扱うことは困難なためにこの下部境界をどのように設定するかは重要である。

Keys Words：飛砂、浮遊砂、数値解析、乱流拡散方程式

連絡先：〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30 福島工業高等専門学校 都市システム工学科

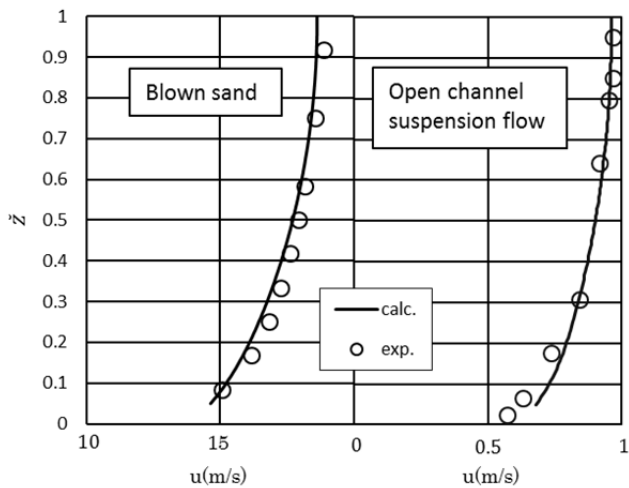


Fig.1 Distribution of velocity

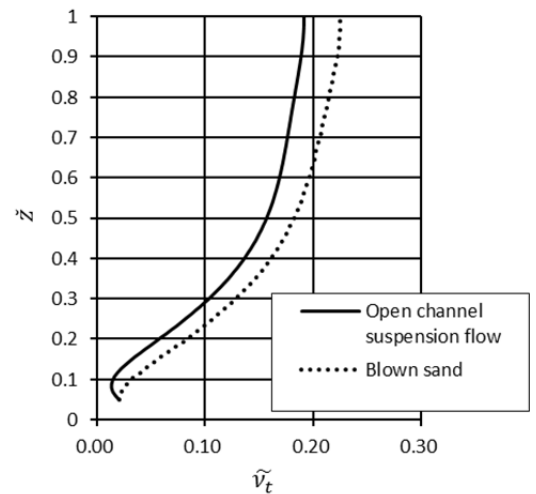


Fig.3 Distribution of eddy viscosity

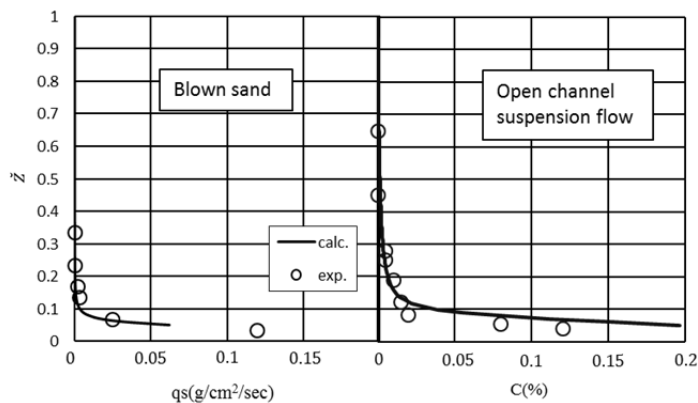


Fig.2 Distribution of solid particle flux

今回は固体粒子の状態を浮遊か跳躍かを区別せずに、浮き上がった粒子の運動に対して底面近傍を下部境界と考えた。Fig.1, Fig.2は飛砂、浮遊砂における速度分布と流砂量分布について実験値と解析値を比較したものである。速度、流砂量分布ともに実験から得られた分布形の特徴をよく表しているといえる。流砂量分布は底面から急激に減少しているがこれは周囲流体の密度に比べて、固体粒子である砂粒子の密度がはるかに大きいために見られる特徴である。

6. 乱流構造の評価

Fig.3に数値解析によって得られた飛砂と浮遊砂の無次元化した乱れ運動エネルギー $\tilde{k}$ 、エネルギー散逸率 ε から渦動粘性係数 $\tilde{\nu}_t$ を比較したものを示す。渦動粘性係数 ν_t は、乱れ運動エネルギー k とエネルギー散逸率 ε で表現され、以下の式のように表される。

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \dots \quad (1)$$

ここで、 c_μ は $k-\varepsilon$ 乱流モデルの数値定数であり標

準値である 0.09 を用いている。

今回の解析結果から、流体中の砂粒子の輸送における乱流構造は同程度の粒径の大きさであっても周囲流体の違いによって異なることが示された。Fig.3で示した渦動粘性係数 ν_t で比較すると領域全体に渡って、飛砂の方が大きい値を示した。これは流体中での終速度や相対比重が大きく異なることによるものと考えられる。

7. 結論

本研究で用いたモデルが自然界における固気二相流の代表的な現象である飛砂の流動現象を再現することができることを確認した。さらに、同じ砂粒子の輸送現象である浮遊砂との比較をすることによって、周囲流体の違いが乱流構造に与える影響の違いを評価することができた。

今後は飛砂の比較データ数を増やし、粒径の違いによる乱流構造の変化や同じ自然界における固体粒子浮遊流である吹雪との比較も行い、固体粒子の違いによる乱流構造の変化の評価も行っていく予定である。

参考文献

- 1) 久保田進, 保坂幸一, 鵜飼正志, 堀田新太郎: 平成 18 年度土木学会海岸工学論文集, No.53, pp.431-435, 2006
- 2) Vanoni, V.A.: Transportation of suspended sediment by water, Trans. of ASCE., 111, pp.67-102, 1946
- 3) 菊地卓郎, 福嶋祐介: 日本混相流学会誌混相流, Vol.21, No.2, pp.177-184, 2007