

漂砂による地形変化計算時における斜面崩壊の取り扱いに関する一考察

名古屋大学大学院工学研究科 正 会 員 ○中村 友昭

名古屋大学大学院工学研究科 正 会 員 趙 容 桓

名古屋大学大学院工学研究科 フェロー 水谷 法美

1. はじめに：漂砂による地形変化計算時には安息角を超える勾配の斜面が形成されることがあるため、斜面の崩壊を適切に取り扱えるモデルが不可欠である．このような斜面崩壊モデルは、長田ら(2001)、関根(2003)、前野ら(2004)、Roulund ら(2005)、奥田ら(2014)等により提案されている．しかし、いずれのモデルも斜面の崩壊が瞬時に生じると仮定しており、安息角を超える斜面の存在は許容されていない．そのため、洗掘が急激に発達し安息角を上回る斜面が形成されうる津波作用時のような現象への適用には限界がある．そこで、3次元流体・構造・地形変化・地盤連成数値計算モデル FS3M（中村・水谷、2015）では、斜面崩壊計算の時間進行を流体解析と同じだけしきさせないように Roulund ら(2005)のモデルを改良し、漂砂計算の枠組みで斜面の崩壊過程を取り扱えるようにしている．ただし、斜面の崩壊に関する既往の実験結果や計算結果との比較は行われていないことから、本研究では水中での砂柱崩壊現象を対象とした宮本ら(2004)の水理実験に FS3M を適用し、斜面崩壊に関するパラメータの同定と斜面崩壊モデルの再現性の検討を行う．また、漂砂計算の枠組みで斜面の崩壊を取り扱った影響を確認するとともに、水と砂の保存性の観点から漂砂計算の妥当性を検討する．

2. 斜面崩壊モデルの概要：斜面の傾斜角 β が安息角 θ_r より微小角度 θ_r^+ だけ上回ったとき、全ての底質粒子が静水中で一定速度で斜面下向きに崩壊すると仮定する．このとき、斜面の崩壊に伴う掃流砂量 q^{slide} は、

$$q^{slide} = \frac{\pi}{3} C_{slide} d_{50} \sqrt{\frac{1}{3} \frac{d_{50}}{\varepsilon C_{D1}} (s-1) g (\sin \beta - \mu_d \cos \beta)} \quad (1)$$

となる．ここで、 C_{slide} は斜面崩壊に関する無次元パラメータ、 s は底質粒子の比重、 d_{50} は底質粒子の中央粒径、 μ_d は底質粒子の動摩擦係数、 C_{D1} は抗力係数、 ε は遮蔽係数、 g は重力加速度である．また、斜面崩壊計算時には浮遊砂の巻き上げと沈降が生じないと仮定し、基準面からの底質表面の高さを z_s 、底質の空隙率を m 、 q^{slide} の x 、 y 軸方向成分をそれぞれ q_x^{slide} 、 q_y^{slide} とすると、底質の質量保存式は次式のように与えられる．

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} + \frac{1}{1-m} \left(\frac{\partial q_x^{slide}}{\partial x} + \frac{\partial q_y^{slide}}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

3. 計算条件：図-1 に宮本ら(2004)の水理実験をモデル化した計算領域の概略図を示す．同図に示すように、幅 255 mm、高さ 110 mm の砂柱を厚さ 5 mm の砂の上に設定し、計算開始とともに崩壊させた．このとき、斜面崩壊に関する無次元パラメータ C_{slide} を 5 パターン(1, 10, 100, 290, 400)変化させた．また、砂の中央粒径 d_{50} 、空隙率 m 、密度 ρ_s は水理実験と同値の $d_{50} = 0.32$ mm、 $m = 0.47$ （体積濃度 53%）、 $\rho_s = 2.65 \times 10^3$ kg/m³ とした．さらに、静止摩擦角 θ_s 、動摩擦角 θ_d 、水中安息角 θ_r 、斜面崩壊開始基準 θ_r^+ 、斜面崩壊完了基準 θ_r^- は与えられていないことから、簡単のため $\theta_r^+ = 0.00^\circ$ 、 $\theta_r^- = -0.01^\circ$ とした上で、 $\theta_s = 6.01^\circ$ 、 $\theta_d = 5.99^\circ$ 、 $\theta_r = 6.00^\circ$ と仮定した．なお、計算領域の奥行きは 10 mm とした．また、水理実験では砂柱を支える厚さ 50 mm の鉛直可動壁が 4 m/s で引き抜かれていたものの、ここでは鉛直可動壁のモデル化は行わなかった．

4. 計算結果および考察：図-2 に砂柱の先端到達位置の比較を示す．ここで、水理実験では鉛直可動壁を引き抜いてから砂柱が崩壊し始め

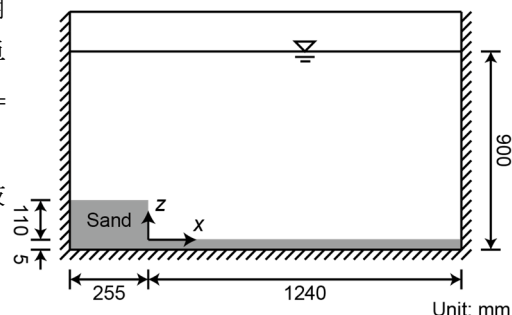


図-1 計算領域の概略図

キーワード 漂砂, 地形変化, 安息角, 斜面崩壊, 砂柱崩壊, 再現計算

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Tel: 052-789-4632

るまでに若干の遅れがあると考えられる一方で、本計算では鉛直可動壁をモデル化しておらず砂柱が崩壊し始めるのが水理実験と比べて早いと考えられることから、同図では水理実験結果を 0.65 s 早めた。図-2 より、水理実験結果との対応は $C_{slide} = 290$ のときが最も良好なことが分かる。ただし、斜面の崩壊を漂砂として取り扱ったため図-3(a)に示すように鉛直部分が残る不自然な崩れ方となっていること、また砂柱が徐々に崩壊していく過程を式(1)に示したように一定速度で崩壊すると仮定して取り扱っており一定速度に達するまでの過程は考慮していないことから、 $x \approx$

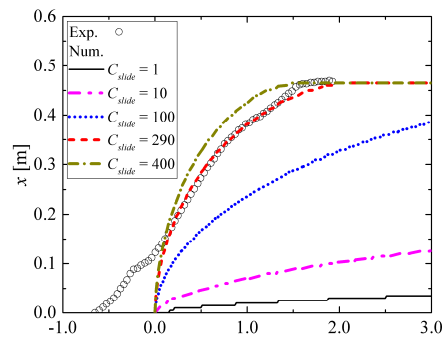


図-2 砂柱の先端到達位置

0.15 m までは先端到達位置の増加を過大評価していることが確認できる。しかし、図-3(b)に示すように鉛直部分が見られなくなる $x \approx 0.15$ m 以降は、 $C_{slide} = 290$ とすることで水理実験結果を概ね表せている。なお、 C_{slide} に関わらず、全てのケースで $x \approx 0.47$ m に収束することを確認している。

続いて、 $C_{slide} = 290$ のときの堆積砂量 V_{dep} と浮遊砂量 V_{sus} の時間変化を図-4 に示す。同図より、図-3(c)に示した $t = 1.71$ s 頃にかけて底質の巻き上げにより V_{sus} が増加し、その分だけ V_{dep} が減少していることが分かる。その後、底質の沈降に伴い、 V_{sus} がゼロに漸近するとともに V_{dep} が徐々に初期値に近づいている。このときの水の体積の変化率 $rV_{water} = \Delta V_{water} / V_{water}^{init}$ と砂の総体積の変化率 $rV_{sand} = \Delta V_{sand} / V_{sand}^{init}$ の時間変化を図-5 に示す (ΔV_{water} , ΔV_{sand} : 水と砂の体積の変化量; V_{water}^{init} , V_{sand}^{init} : 水と砂の初期体積)。同図より、 rV_{water} と rV_{sand} は倍精度浮動小数点数の精度の限界近くで小刻みに変動しつつ、いずれも徐々に減少していることが分かる。ただし、 rV_{water} , rV_{sand} ともに減少量は非常に小さく、水と砂の保存性は概ね確保されていると言える。

5. 結論：本研究では、水中での砂柱崩壊現象を対象とした

水理実験の再現計算を行い、斜面の崩壊を漂砂計算の枠組みで取り扱った斜面崩壊モデルの再現性を確認するとともに、斜面崩壊の際に水と砂の保存性が概ね確保されていることを示した。今後は、本モデルが組み込まれた FS3M を用いて、漂砂現象に対するさらなる検討を行っていく所存である。最後になるが、科学研究費補助金若手研究(B) (代表者：中村友昭；課題番号：26820200) の補助を受けたことを付記し、謝意を表す。

参考文献：[1] 関根(2003), 水工学論文集, 47, 637-642. [2] 中村・水谷(2015), 数値流体力学シンポジウム, A07-1, 10 p. [3] 長田・細田・中藤・村本(2001), 水工学論文集, 45, 427-432. [4] 前野・小川・上間(2004), 水工学論文集, 48, 817-822.

[5] 宮本・佐々・徳山・関口(2004), 海岸工学論文集, 51, 401-405. [6] 與田・中川・水谷・川池・張(2014), 自然災害科学, 33-1, 29-41. [7] Roulund, Sumer, Fredsøe, Michelsen (2005), J. Fluid Mech., 534, 351-401.

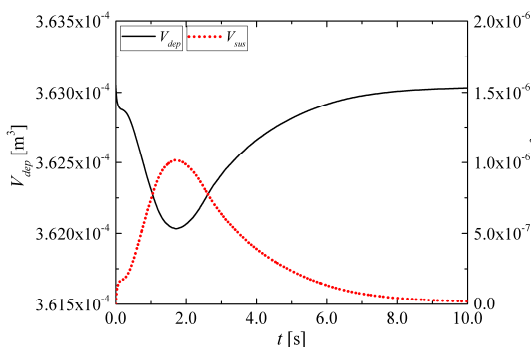
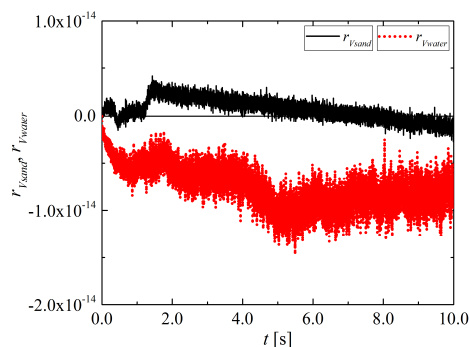
図-4 堆積砂量 V_{dep} と浮遊砂量 V_{sus} の変化

図-5 水および砂の保存性