

粘着力を考慮した漂砂計算手法と粘着力が地形変化に及ぼす影響に関する一考察

名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 ○ 趙 容桓
名古屋大学高等研究院 正 会 員 中村 友昭
名古屋大学大学院工学研究科 正 会 員 水谷 法美

1. はじめに：浚渫作業により生じる浚渫土砂の活用に関する風間ら（2006）の研究において、三河湾に造成された人工浅場には底生生物の増加や浄化能力などの効果があることが確認されている．それに加えて、人工浅場は背後域の静穏度を向上させる効果も期待されているものの、浚渫土砂は細粒分を多く含むことから底質の安定性が懸念されている．そこで、中村ら（2012a, 2012b, 2012c）は細砂からなる人工浅場の安定性に関する研究を水理実験と数値計算の両面から行い、主に浅場内部の間隙水圧の観点から地形変化の特性を検討している．そして、間隙水圧の影響を含む波浪場と浅場の地形変化の関係を水理実験で明らかにするとともに、漂砂計算に浅場内部の間隙水圧を考慮した数値計算モデルを用いることによって再現性が向上することを示している．その一方で、実際の浚渫土砂には細粒分が多く含まれているものの、上述のモデルでは細砂より細かい粒径の粒子が含まれることによる粘着力の効果は考慮されていない．本研究では、芦田ら（1981）が提案した粘着力の概念を漂砂計算に導入し、それを上述のモデルに組み込む．そして、中村ら（2012a）による浅場の安定性に関する水理実験に適用することで粘着力の効果を検討する．

2. 粘着力の影響を考慮した数値計算モデルの概要：砂礫床に粘土が含まれることによって抵抗力が増加する現象を取り扱うために提案された芦田ら（1981）の研究に基づいて、漂砂計算に粘着力の影響を考慮する手法を提案する．芦田ら（1981）は、単一粒径の砂粒子と粘度の混合物を考え、砂粒子間の摩擦は粘土を含まない場合と同じである状況を仮定し、図-1 に示す移動限界状態の砂粒子に作用する力を考えた．このとき、砂粒子に作用する力の釣り合いより、以下の関係式が成り立つ．

$$F_D + F_W \sin \theta = (F_W \cos \theta - F_L - F_B) \tan \varphi + F_C \quad (1)$$

ここで、 F_D は抗力、 F_W は重力、 F_B は浮力、 F_L は揚力、 F_C は粘着力、 φ は砂粒子の安息角である．これらの力のうち、 F_C は $k'_1 d^2 f_c$ と定義されており、次式のように書ける．

$$k'_1 d^2 f_c = \frac{\pi d^2}{4} \left[\left\{ 1 + \frac{1}{1-\lambda} \frac{p_f(1+\sigma\omega)}{p_f\sigma\omega+1} \right\}^{2/3} - 1 \right] * n * f_c \quad (2)$$

ここで、 p_f は粘土の含有率、 ω は粘土の含水比、 $\sigma = \rho_s/\rho$ 、 n は接点数、 λ は空隙率であり、 $k'_1 d^2$ は粘着抵抗に寄与する粘土の粘着面積を意味するまた、 f_c は単位面積当たりの粘土の粘着力である．この状態は砂粒子の空隙に粘土が含まれていることを意味し、砂粒子を囲んだ粘土の粘着力によって抵抗力の増加することを表す．

本研究で用いる中村・水谷（2012）の数値計算モデルは、可動構造物や地形変化を考慮した連続式と Navier-Stokes 方程式に基づく LES に、気液界面を追跡する VOF モジュール、構造物の運動を取り扱う IB モジュール、浮遊砂の解析を行い、掃流砂と浮遊砂の輸送に伴う地形変化を追跡する底質輸送モジュールが組み込まれている．ここでは、同モデルのうち、底質輸送モジュールに上述の粘着力 F_C を組み込む．具体的には、 F_C の影響を考慮して限界 Shields 数と掃流砂量を修正する．図-2 に掃流形態で移動する砂粒子に作用する力を示す．ここで、 W は砂粒子の水中重量、 v_f は摩擦速度、 C_{vf} は v_f の係数、 v_b は底質粒子の平均輸送速度、 β は斜面の傾斜角、 α は斜面下向きに対する v_f の方向、 Ψ は v_b に対する v_f の方向、 Ψ_1 は v_b に対する v_r の方向であり、図-3

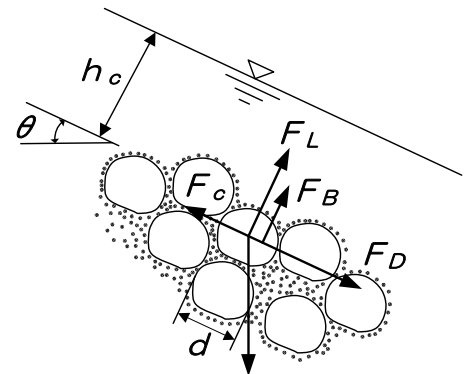


図-1 粘土が混合しているときの砂粒子に作用する力の釣り合い

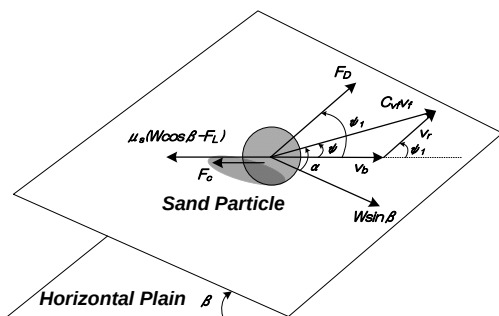


図-2 掃流形態で移動する砂粒子に作用する力

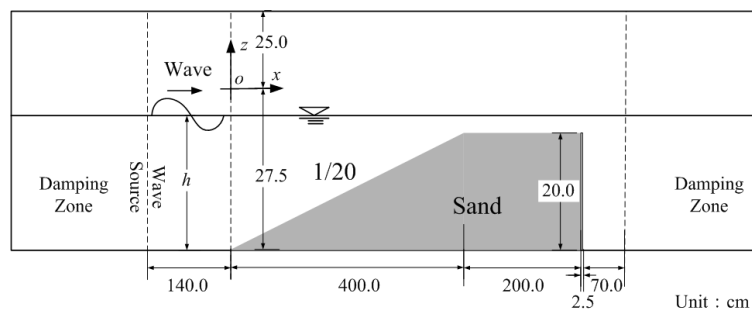


図-3 計算領域の概略図

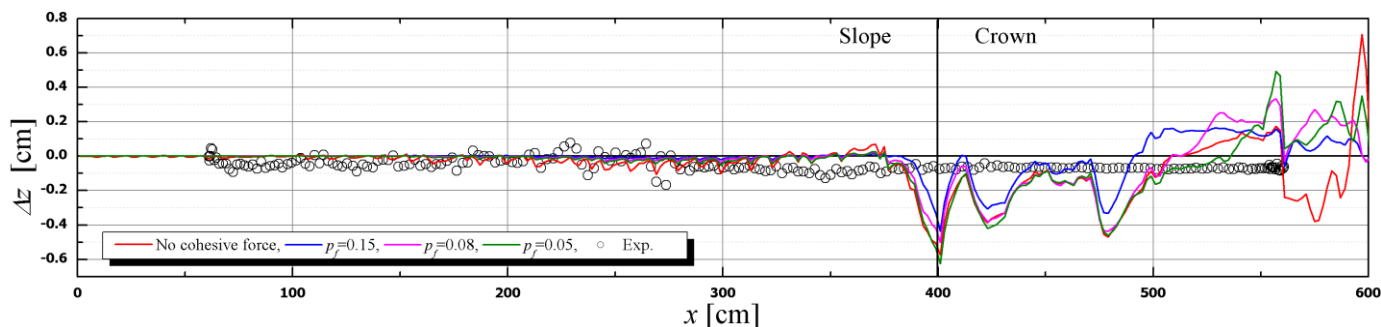


図-4 浅場の地形変化量 Δz

に示すように F_c を考慮する．そして，砂粒子に作用する力の釣り合いから v_b を求め，粘着力の効果を考慮した掃流砂量が求められる．紙面の都合上，説明は割愛するが，同様にして限界 Shields 数も求められる．

3. 計算領域および計算条件：図-3 に中村ら（2012a, 2012b）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，天端高，天端幅，法面勾配がそれぞれ 20 cm, 200 cm, 1/20 の浅場（中央粒径 0.1 mm）を設置した．静水深を 22.5 cm とし，周期 1.0 s，波高 6.5 cm の波を作用させた．粘土の粘着力 f_c ，粘土の含水比 ω ，接点数 n は実験値に基づいて決める必要があるが，ここでは $f_c = 10 \text{ dyne/cm}^2$ ， $\omega = 0.5$ ， $n = 3$ とした．そして，粘土の含有率 p_f を 0.05, 0.08, 0.15 と変化させ，粘着力を考慮した効果を検討する数値実験を行った．

4. 計算結果および考察：計算開始 60 秒後の地形変化量 Δz に関して，数値計算結果と水理実験結果の比較を図-4 に示す．ここで， Δz は堆積を正とする．図-4 より，法面の中央部から法先にかけての $x < 3.0 \text{ m}$ では，粘着力の影響を考慮したことによる差があまり認められず，いずれの結果も侵食傾向を示していることが分かる．一方，法面の上部から天端にかけての $x > 3.0 \text{ m}$ では，水理実験では侵食が一様に生じている一方で，数値計算では沖側には局所的に深い侵食が生じており，岸側には堆積が生じていることが確認できる．この天端の侵食は粘着力の効果を考慮した影響を受け， p_f が大きくなるに伴って侵食の深さが浅くなることが分かる．また， p_f が大きくなるとともに堆積も生じやすくなり， p_f の増加とともに堆積量も増加していることが確認できる．これは， p_f を考慮したことで限界 Shields 数が大きくなり，そのために土砂の移動が生じにくくなるとともに，その移動が止まりやすくなったためと考えられる．ただし，図-4 より，地形変化の傾向は粘着力の効果の考慮の有無に関わらず変わらず，水理実験結果との相関は必ずしも高くないことが分かる．これは，造波水路内に仕切り板を設置し，循環流が生じる状況であった水理実験を断面 2 次元計算では完全にモデル化できず，浅場周辺の平均水位を再現できていないことから波浪場に差異が生じていたためと考えられる．

5. おわりに：本研究では，漂砂計算に粘着力の効果を導入した数値計算モデルを浅場の安定性に関する水理実験に適用し，地形変化に与える粘着力の影響を検討する数値実験を行った．その結果，浅場の法面から下側では粘着力の効果を考慮した影響はほとんど認められなかったものの，浅場の天端に生じていた局所的な侵食が粘土の含有率を増加させるとともに浅くなり，その岸側の堆積量が増加することが判明した．

参考文献：[1] 芦田ら(1981)：京大防災研究所年報，24 号 B-2，pp. 349-360． [2] 中村ら（2012a）：土論 B3（海洋開発），Vol. 68，No. 2，pp. I_1061-I_1066． [3] 中村ら（2012b）：土論 B2（海岸工学），Vol. 68，No. 2，pp. I_541-I_545． [4] 中村ら(2012c)：土論 B2（海岸工学），Vol. 68，pp. I_1161-I_1165．