

波浪場における混合土砂の移動評価式に関する一考察

名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 ○赤星 怜
 名古屋大学大学院工学研究科 正会員 趙 容桓, 中村 友昭
 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: 混合土砂における漂砂挙動は、底面砂層に含まれている粘土などの粘着性粒子の影響で複雑な挙動を示す。河川工学分野では混合土砂の挙動に関する実験的・理論的研究が多くなされているものの、波浪場における混合土砂の挙動特性の検討は非常に少ない。本研究では、芦田ら(1982)が提案した混合土砂の無次元限界掃流力の評価式を考察し、さらに評価式の修正を試みる。

2. 粘着性土砂の接着面積の導出: 混合土砂の移動限界の評価は、砂粒子を囲んでいる粘土による粘着力が砂粒子の抵抗力として作用する概念から導びかれた芦田ら(1982)の移動限界式を参照して行った。1個の砂粒子に働く粘着抵抗力 F_c は、接着面積を A 、粘土固有の粘着力を f_c 、砂粒子との接点数 n とすると $F_c = Af_c n$ の式が成り立つ。また、粒径 d の砂粒子表面に粘土が均一な厚さで付着した状態のみかけの粒径を d' とし、図-1のような接触状態を考えると接触面積 A は幾何学的関係より式(1)になる。

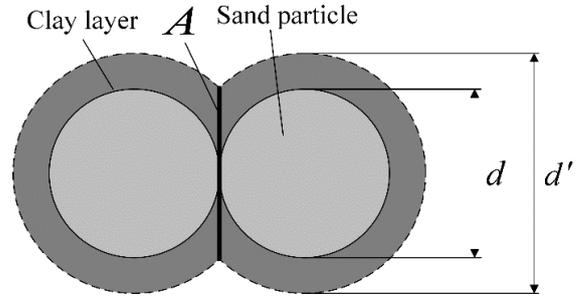


図-1 混合土砂の模式図

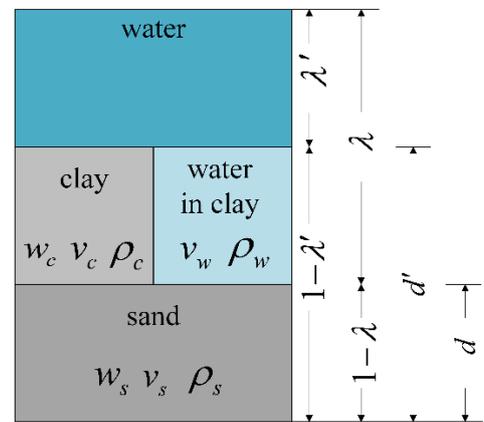


図-2 混合土砂の構造

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \left\{ \left(\frac{d'}{d} \right)^2 - 1 \right\} \quad (1)$$

ここで、砂粒子以外の領域を空隙とみなした場合の空隙率を λ 、砂と水を保持した粘土以外の空隙率を λ' とし、粒子間の空隙が飽和状態の場合、図-2 より粒径 d と空隙率 λ の関係式が式(2)のように成り立つ。

$$\left(\frac{d'}{d} \right)^3 = \frac{1-\lambda'}{1-\lambda} = 1 + \frac{\lambda-\lambda'}{1-\lambda} \quad (2)$$

同図の w は重量、 v は体積、 ρ は密度であり、添え字 s, c, w はそれぞれ砂、粘土、粘土が含有する水を表す。また、 ρ_s と ρ_c が等しいと仮定すると粘土の含有率 $p_f (= w_c/(w_c+w_s))$ は式(3)のようにまとめられる。

$$\frac{\lambda-\lambda'}{1-\lambda} = \frac{(1+\sigma\omega_c)p_f}{1-p_f} \quad (3)$$

ここで、 σ は比重 ($= \rho_s/\rho_w$)、 ω_c は粘土の含水比 ($= w_c/w_w$)

である。式(3)より空隙を満たす水の体積が微量である場合、 $V \approx (1-\lambda)V$ となり、次の式(4)が導かれる。

$$\frac{\lambda}{1-\lambda} = \frac{1}{1-\lambda} \frac{(1+\sigma\omega_c)p_f}{p_f\sigma\omega_c+1} \quad (4)$$

すなわち、空隙率 λ は p_f と ω_c で表現できる。ここで、空隙は水分を保持した粘土で満たされるため、混合土砂全体の含水比 $\omega (= (w_c+w_s)/w_w)$ は ω_c と p_f を用いて式(5)のように表現できる。

$$\omega = \frac{w_w}{w_c+w_s} \frac{w_c}{w_c} = \omega_c p_f \quad (5)$$

したがって、以上の式(1), (2), (4)及び(5)より、測定可能量による接着面積 A の定義が可能となり、以下の式(6)で表される。

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \left\{ \left(\frac{1+\sigma\omega}{1-p_f} \right)^{2/3} - 1 \right\} \quad (6)$$

3. 修正評価式の検討：実験値と理論値の粘土含水比が一定の条件下における粘土含有率 p_f と無次元限界掃流力の増分 $\Delta\tau_{*cc}$ の関係を図-3 に示す。無次元限界掃流力の増分 $\Delta\tau_{*cc}$ は、芦田ら(1982)の実験条件に倣い、重力加速度 g 、球体の形状係数 $k(=\pi/6)$ 、静止摩擦係数 $\mu_s=0.765$ 、パールクレイの粘着力 $f_c=14.0\text{Pa}$ 、 $\rho_s=2.65\times 10^3\text{kg/m}^3$ 、 $\rho_w=1.00\times 10^3\text{kg/m}^3$ 、 $d_{50}=2.85\text{mm}$ 、 $\phi_s=0.047$ を用いて式(7)より算出した。芦田ら(1982)の理論式では空隙率 λ を 0.468 とした。

$$\Delta\tau_{*cc} = \frac{F_c}{(\rho_s - \rho)gd_{50}^3} \frac{\phi_s}{\mu_s} \quad (7)$$

修正前の芦田らの理論値は、実験値の指数関数的増加傾向に対して対数的増加傾向を示しており、異なる傾向が確認できるものの、修正評価式では、芦田の理論式において定数として扱われていた空隙率を粘土含有率と含水比の関数として表現したため、実験値と同様の指数関数的な増加傾向がみられ、修正評価式の妥当性が見受けられる。

4. 波浪場への適用：波作用条件下での修正評価式の妥当性を評価するため、前節で修正した評価式を中村・水谷 (2010) が開発した 3 次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルに組み込み、粘着性土砂からなる浅場の地形変化の水理実験結果と比較した (趙ら, 2014)。漂砂計算手法については中村ら (2013) を参照されたい。数値計算領域の概略図を図-4 に示す。同図に示すように、水理実験の再現計算を断面 2 次元計算により実施し、中央粒径 $d_{50} = 0.96\text{mm}$ の細砂から構成される混合土砂の初期地形とその背面の鉛直壁を実験と同様に設置した。また、波浪条件として波高 $H_i = 0.40\text{m}$ 、周期 $T = 0.10\text{s}$ 、静水深 $h = 0.15\text{m}$ の規則波を 60 秒間作用させた。なお、カオリンの粘着力は、芦田ら(1982)の実験値から $f_c = 0.5\text{Pa}$ と算定し、混合土砂の含水比を 100%とした。数値実験と水理模型実験の 60 秒後の地形変化量の比較を図-5 に示す。芦田らの理論を導入した場合は、修正評価式を導入した際に比べて、法面で激しく侵食され岸方向に堆積する傾向がみられ、侵食形状及び侵食位置について実験値と大きな差異がみられることから、修正評価式の妥当性が確認できる。修正評価式の結果では、概ね実験の侵食形状が一致しているものの、侵食量及び侵食位置が若干ずれていることが確認できる。この不一致は、水理実験から確認されたよう

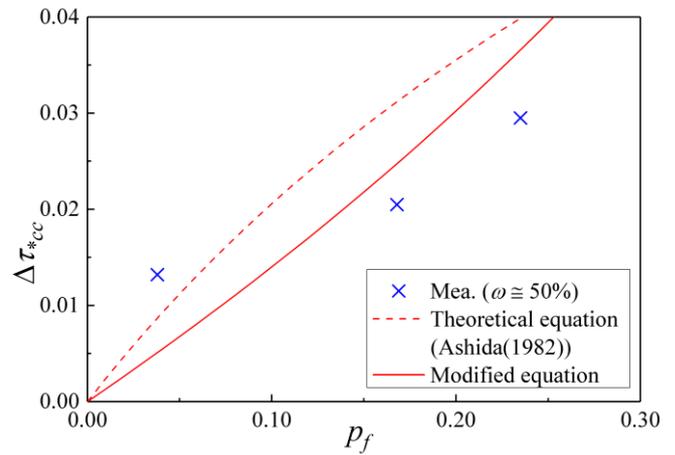


図-3 実験値と理論値の比較

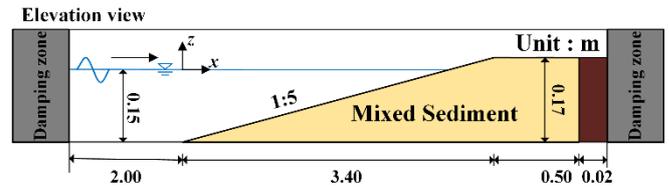


図-4 計算領域の概略図

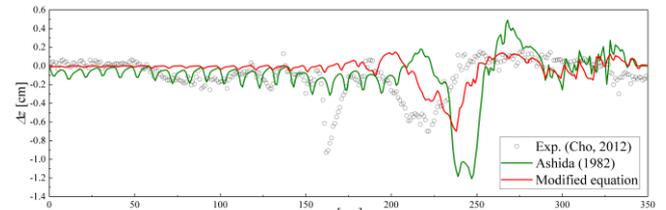


図-5 造波開始 1 分後の地形変化量 Δz

に、時間経過による粘土の抜け出しによる粘着力 F_c の低下効果が修正評価式では反映されていないためだと考えられる。したがって、混合土砂の移動評価式の精度を向上させるためには、砂粒子間の粘土の抜け出しの時間変化を考慮する必要があると言える。

5. おわりに：本研究では、粘着性を有する混合土砂の移動限界の評価式を見直し、修正した移動評価式の波浪場での適用可能性を検討した。その結果、修正評価式は、循環式水路及び造波水路での実験値の傾向と概ね一致することが確認できたものの、修正評価式の精度を向上させるため、混合土砂の移動特性である粘土の抜け出し現象の考慮が求められる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金・若手研究 (B) (研究代表者：趙容桓，課題番号：16K18156) の助成を受けたことをここに付記し、感謝の意を表す。

参考文献：1) 芦田ら：京都大学防災研究所年報，第 2 号 B-2，pp.349-360，1982。2) 趙ら：土論 B3 (海洋開発)，Vol. 70，No. 2，pp. I_738-I_743，2014。3) 中村・水谷：数値流体力学シンポジウム，E10-4，9p，2010。4) 中村ら：土論 B3 (海洋開発)，Vol. 69，No. 2，pp. I_1036-I_1041，2013。