粘性力の影響を考慮した漂砂計算手法の提案と 浅場の地形変化への適用

中村 友昭¹・趙 容桓²・水谷 法美³・李 光浩⁴

¹正会員 名古屋大学特任講師 高等研究院 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

E-mail: tnakamura@nagoya-u.jp

²学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: wbj53@nate.com

³フェロー 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: mizutani@civil.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 韓国海洋科学技術院先任研究員 (〒210-701 韓国大田廣域市儒城區)

E-mail: khlee@kiost.ac

砂粒子の間に粘土が含まれることによる粘着力の効果を導入した漂砂計算手法を提案するとともに、それを組み込んだ波と地形変化の相互作用を解析できる数値計算モデルを構築し、浅場の地形変化現象への適用を通じてモデルの妥当性の検証と粘着力の効果の感度分析を行った。その結果、砂粒子の間に粘土があることによる効果は限界Shields数を大きくするだけでは表せず、粘着力の効果を適切にモデル化することの重要性を示した。また、粘土の含有率、含水比、粘着抵抗力の増加とともに、限界Shields数は増加し、掃流砂量は減少することから、浅場の地形変化が小さくなる一方で、地形変化の傾向は影響を受けないことを明らかにした。したがって、砂粒子の間に粘土を含ませることで、地形変化の傾向に影響を与えることなく地形変化が抑えられる可能性を示唆した。

Key Words : cohesive force, fine sediment, sediment transport, shallow, numerical analysis

1. 緒言

船舶の安全な航行のために浚渫作業が定期的に行われているものの、その際に発生する浚渫土砂の処分が問題となっている。その有効活用の一つである浚渫土砂によって造成された人工浅場には、底生生物の増加や高い水質浄化能力など環境面で優れた効果があることが確認されている¹⁾。ただし、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おり、これまでに細砂からなる浅場の地形変化特性を検討した研究が水理実験と数値計算の両面から行われている^{2), 3)}。その一方で、実際の浚渫土砂には粘着性を有する細粒分が多く含まれているものの、上述の研究では細砂を用いた検討に留まっていることから、浚渫土砂からなる浅場の地形変化特性について十分な知見が得られているとは言えない。

これに関連して、漂砂現象を取り扱っている研究の多くは非粘着性の底質粒子を対象としており、浚渫土砂のように粘着性の底質粒子を対象とした研究はほとんど見受けられないのが実情である。芦田ら⁴⁾は、砂粒子の間

隙に粘着力を有する細粒分（以下、粘土と称する）が含まれる効果を考慮した限界掃流力と流砂量の評価式を提案するとともに、その妥当性を水理実験との比較により検証している。しかし、その評価式の波浪場への適用は行われていないことから、浚渫土砂からなる浅場の地形変化特性の検討には課題を残している。

本研究では、浚渫土砂のように細粒径の粒子からなる浅場での底質移動とそれに伴う地形変化の特性の解明に向けて、砂粒子の間に粘土が含まれることによる粘着力の影響を考慮した漂砂計算手法を提案し、その基本的な特性を検討する。また、提案した漂砂計算手法を波と地形変化の相互作用を解析できる3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデル⁵⁾に組み込むとともに、そのモデルを細砂からなる浅場の地形変化に関する水理実験²⁾に適用する。そして、モデルの再現性を水理実験結果との比較により検証するとともに、細砂の間に粘土が含まれた状態を想定した数値実験を実施することで提案した漂砂計算手法の感度分析を行う。

2. 粘着力の影響を考慮した漂砂計算手法

砂粒子の間隙に粘着力を有する粘土が含まれることによる効果を考慮した漂砂計算手法を提案する。具体的には、3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデル³⁾を構成している底質輸送モジュールのうち限界Shields数 τ_{*c} と掃流砂量 q_b を修正対象とし、それらの量に対して芦田⁴⁾に倣って粘着力の影響を組み込む。

底質粒子として、粒径 d_{50} の均一な粒子径の球体の砂粒子と、その間隙に粘着力を有する粘土を含んだ混合物を考え、砂粒子間の摩擦は粘土を含まない場合と変化しない状態を対象とする。すなわち、間隙の粘土を取り除いても砂粒子は静的に安定した状態を保持できるものとする。このとき、粘土による粘着力 F_c は

$$F_c = k'_1 d_{50}^2 f_c \quad (1)$$

と表される。ただし、 $k'_1 d_{50}^2$ は粘着抵抗に寄与する粘土の粘着面積、 f_c は単位面積当たりの粘土の粘着抵抗力である。ここで、砂粒子間の1つの接点における粘着面積 a は芦田⁴⁾にあるように簡単な幾何学的な関係から近似的に求められ、1個の砂粒子は m 個の接点で支えられているとすると $k'_1 d_{50}^2 = am$ となることから、式(1)は最終的に

$$F_c = \frac{\pi d_{50}^2}{4} \left[\left\{ 1 + \frac{1}{1-m} \frac{p_f(1+s\omega)}{p_f s\omega + 1} \right\}^{2/3} - 1 \right] n f_c \quad (2)$$

となる。ここで、 m は空隙率、 p_f は粘土の含有率、 ω は粘土の含水比、 s は比重(= ρ_s / ρ_w ; ρ_s : 砂粒子の密度; ρ_w : 水の密度)である。また、式(2)に示した粘着力 F_c 以外に砂粒子1個に作用する力として、砂粒子の水中重量 W 、底面流速による抗力 F_D と揚力 F_L があり、それぞれ

$$W = \frac{1}{6} \pi (\rho_s - \rho_w) g d_{50}^3 \quad (3)$$

$$F_D = \frac{1}{8} \pi \varepsilon C_{D1} \rho_w d_{50}^2 v_r^2 = C_{FD} v_r^2 \quad (4)$$

$$F_L = \frac{1}{8} \pi \varepsilon C_{L1} \rho_w d_{50}^2 v_r^2 = k_L C_{FD} v_r^2 \quad (5)$$

と書ける。ここで、 g は重力加速度、 ε は遮蔽係数、 C_{D1} は乱流抵抗力係数、 C_{L1} は揚力係数、 k_L は C_{D1} と C_{L1} の比(= C_{L1} / C_{D1})、 v_b は底質粒子の位置での底質粒子の平均輸送速度 v_b に対する相対底面流速、 $C_{FD} = \pi \varepsilon C_{D1} \rho_w d_{50}^2 / 8$ である。以下では、 F_c の影響を組み込んだ τ_{*c} と q_b を導出する。

(1) 限界Shields数

移動限界時の砂粒子には図-1に示す力が作用している。ここで、摩擦速度を v_b 、その係数を C_{vf} 、斜面下向きに対する v_b の方向を α 、 v_b に対する v_r の方向を Ψ 、 v_b に対する v_r の方向を Ψ_1 とすると、図-1の F_{DC} 、 F_{LC} 、 v_{rc} 、 v_{bc} 、 v_{rc} 、 α 、 Ψ_c 、 Ψ_{lc} は移動限界時の F_D 、 F_L 、 v_b 、 v_r 、 α 、 Ψ 、 Ψ_1 を

図-1 移動限界時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の釣り合い

表す。また、 β は斜面の傾斜角、 μ_s は砂粒子の静止摩擦係数である。このとき、移動限界時であることから、 $v_{rc} = 0$ つまり $v_r = C_{vf} v_{bc}$ および $\Psi_c = \Psi_{lc}$ であり、 v_{bc} と同方向および直交方向の力の釣り合いより、

$$v_{rc}^2 = \frac{\{\mu_s \cos \beta - \sin \beta \cos(\alpha - \Psi_c)\} W + F_c}{(\cos \Psi_c + \mu_s k_L) C_{FD}} \quad (6)$$

$$\Psi_c = \arctan \left\{ \frac{W \sin \beta \sin \alpha}{C_{FD} v_{rc}^2 + W \sin \beta \cos \alpha} \right\} \quad (7)$$

と求められる。ただし、 Ψ_c は α と同符号かつ $|\Psi_c| \leq |\alpha|$ である。ここで、未知数は v_{rc}^2 と Ψ_c であることから、繰り返し計算により v_{rc}^2 と Ψ_c が求められる。したがって、粘着力 F_c を考慮しない場合($F_c = 0$)の水平面($\beta = 0$)での限界Shields数を τ_{*c0} とすると、 τ_{*c} は次式のように表される。

$$\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*c0}} = \frac{v_{rc}^2 / \{(s-1)gd_{50}\}}{v_{rc0}^2 / \{(s-1)gd_{50}\}} = \frac{v_{rc}^2 / \{C_{vf}^2 (s-1)gd_{50}\}}{v_{rc0}^2 / \{C_{vf}^2 (s-1)gd_{50}\}} = \frac{v_{rc}^2}{v_{rc0}^2} \quad (8)$$

ただし、 v_{rc0}^2 と v_{rc0} は粘着力 F_c を考慮しない場合($F_c = 0$)の水平面($\beta = 0$)での v_{rc}^2 と v_{rc} であり、式(6)に $F_c = \beta = \Psi_c = \Psi_{lc} = 0$ を代入した次式から求められる。

$$v_{rc0}^2 = \frac{\mu_s W}{(1 + \mu_s k_L) C_{FD}} \quad (9)$$

また、断面2次元現象のときは $\alpha = \Psi_c = \Psi_{lc} = 0$ であるので、次式のようにまとめられる。

$$\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*c0}} = \frac{(\mu_s \cos \beta - \sin \beta) W + F_c}{\mu_s W} \quad (10)$$

なお、この限界Shields数 τ_{*c} を介して、砂粒子の巻き上げ量に対しても粘着力の影響が考慮されている。

(2) 掃流砂量

単位幅、単位時間当たりの i 方向の掃流砂量 q_{bi} は、

$$q_{bi} = \frac{1}{6} \pi d_{50} p_{EF} v_{bi} \quad (11)$$

により与えられる⁶⁾。ここで、 p_{EF} は掃流形態で移動する砂粒子の割合であり、次式から求められる。

$$p_{EF} = \begin{cases} 0 & \text{if } \tau_* \leq \tau_{*c} \\ \frac{6}{\pi \mu_d} (\tau_* - \tau_{*c}) & \text{if } \tau_* > \tau_{*c} \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 μ_d は砂粒子の動摩擦係数($\mu_d \leq \mu_b$)、 τ_* は次式により定義されるShields数である。

$$\tau_* = \frac{v_f^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (13)$$

図-2に掃流形態で移動する砂粒子に作用する力を示す。同図より、 v_b と同方向および直交方向の力の釣り合いからそれぞれ次式が得られる。

$$F_D \cos \Psi_1 + W \sin \beta \cos(\alpha - \Psi) = \mu_d (W \cos \beta - F_L) + F_c \quad (14)$$

$$F_D \sin \Psi_1 = W \sin \beta \sin(\alpha - \Psi) \quad (15)$$

また、 v_b 、 $C_{vf} v_f$ 、 v_r の簡単な幾何学的関係より、

$$v_r \sin \Psi_1 = C_{vf} v_f \sin \Psi \quad (16)$$

$$v_r \cos \Psi_1 + v_b = C_{vf} v_f \cos \Psi \quad (17)$$

と表される。ここで、式(14)から式(17)に対して未知数は v_b 、 v_r 、 Ψ 、 Ψ_1 の4つであることから、繰り返し計算によって v_{bi} が求められる。したがって、式(11)、式(12)、前章で求めた τ_{*c} から q_{bi} が求められる。また、断面2次元現象の

ときは、 $\alpha = \Psi = \Psi_1 = 0$ より以下のようにまとめられる。

$$v_b = C_{vf} v_f - v_r \quad (18)$$

$$v_r = \left\{ \frac{(\mu_d \cos \beta - \sin \beta)W + F_c}{C_{FD}(1 + \mu_d R_L)} \right\}^{1/2} \quad (19)$$

3. 粘着力の影響を考慮した漂砂計算手法の特性

本章では、繰り返し計算を必要としない断面2次元現象に対する式(10)、(18)、(19)を対象に、提案した漂砂計算手法の基本的な特性を検討する。具体的には、水平面上($\beta = 0^\circ$)に $d_{50} = 0.1$ mm、 $\rho_s = 2.65 \times 10^3$ kg/m³、 $\tau_{*0} = 0.03$ の砂粒子がある状況を対象とする。そして、その砂粒子の間隙に含まれる粘土の含水比 ω を3種類(= 0.2, 0.5, 0.8)、含有率 p_f を2種類(= 0.05, 0.20)、単位面積当たりの粘着抵抗力 f_c を3種類(= 0.1, 0.5, 1.0 N/m²)変化させた。また、比較のために、粘着力の影響を考慮しない場合($f_c = 0.0$ N/m²)の計算も行った。その他のパラメータは、中村・水谷⁹⁾と同様に、 $g = 9.80$ m/s²、 $\rho_w = 9.97 \times 10^2$ kg/m³、 $C_{D1} = 0.45$ 、 $C_{vf} = 10.0$ 、 $k_L = 0.85$ 、 $\varepsilon = 0.4$ 、 $\mu_b = 0.63$ 、 $\mu_d = 0.51$ とした。

無次元掃流砂量 q_* とShields数 τ_* の関係を図-3に示す。

図-3(a)より、 ω の増加とともに限界Shields数 τ_{*c} も増加することが分かる。また、 τ_* が等しいとき、 ω が増加するとともに q_* が減少する傾向も認められる。ただし、その減少幅は f_c の増加とともに大きくなることから、 q_* に与える ω の影響は f_c によって異なると言える。同様の傾向は図-3(b)からも確認でき、 $f_c = 0.1$ N/m²のときには p_f の増加に伴う q_* の減少が若干認められる程度であるものの、 $f_c = 1.0$ N/m²ではその減少幅が大きくなること分かる。図-3(c)より、 f_c の増加とともに τ_{*c} も増加すること、また

τ_c が等しいとき f_c の増加とともに q_s が減少することが確認できる。また、 $f_c = 1.0 \text{ N/m}^2$ のときの限界Shields数 τ_{c0} が約0.046であることから、緑色の実線で示した粘着力の影響を考慮しない場合($f_c = 0.0 \text{ N/m}^2$)に $\tau_{c0} = 0.046$ としたときの結果と比較すると、 $f_c = 1.0 \text{ N/m}^2$ かつ $\tau_{c0} = 0.03$ とした結果(青色二点鎖線)と、 $f_c = 0.0 \text{ N/m}^2$ かつ $\tau_{c0} = 0.046$ (緑色実線)とした結果は一致しておらず、同じ τ_c なら $f_c = 1.0 \text{ N/m}^2$ かつ $\tau_{c0} = 0.03$ の q_s の方が小さくなることが分かる。これは、砂粒子の間に粘着力を有する粘土があることによる効果は τ_{c0} を単純に大きくするだけでは表せないことを示しており、漂砂計算において粘着力の効果を適切にモデル化することの重要性が示唆される。

4. 3次元連成数値計算モデルの概要

3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデル²⁾は、移動床の間隙内部の流体を含む非圧縮粘性流体からなる全気液相の流体運動を可動構造物の運動と地形変化を考慮して解析する連続式とNavier-Stokes方程式に基づくLESに、気液界面を追跡するMARSに基づくVOFモジュール、可動構造物を取り扱う体積力型埋め込み境界法に基づくIBモジュール、浮遊砂の解析と掃流砂および浮遊砂の輸送に伴う地形変化の計算を行う上述の底質輸送モジュールが、流体・構造・地形変化の相互作用を考慮できるようにTwo-Wayカップリング手法により組み込まれている。ここで、砂粒子の間に粘着力を有する粘土が含まれることによる効果を考慮できるようにするために、底質輸送モジュールに対して前章で提案した漂砂計算手法を導入した。なお、本論では構造物の運動は取り扱わないことから、IBモジュールは使用しなかった。モデルの詳細な説明は中村・水谷⁵⁾を参照されたい。

5. 粘着力の影響を考慮したモデルの適用

細砂からなる浅場の地形変化に関する水理実験²⁾を取り上げ、まず水理実験結果との比較によりモデルの再現性を検証する。続いて、細砂の間に粘着力を有する粘土が含まれた状態を想定した数値実験を実施し、提案した漂砂計算手法の感度分析を行う。

(1) モデルの再現性の検証

a) 計算条件

水理実験をモデル化した計算領域の概略図を図-4に示す。同図に示すように、水理実験で計測された初期地形に基づいて設定した中央粒径 $d_{50} = 0.1 \text{ mm}$ の細砂から構成される浅場(高さ20.0 cm, 天端幅200.0 cm, 法面勾配

図-4 計算領域の概略図

図-5 水理実験結果との水位変動 η の比較

1/20)と砂留用鉛直壁(高さ20.0 cm, 幅4.0 cm)を設置した。また、浅場の法先から沖へ140.0 cm位置に造波ソースを設定するとともに、造波ソースの沖側と砂留用鉛直壁の岸側に後述する入射波の波長の2倍以上の減衰領域をそれぞれ設けた。そして、波高 $H_i = 6.5 \text{ cm}$, 周期 $T = 1.0 \text{ s}$, 静水深 $h = 22.50 \text{ cm}$ の周期波を作用させた。計算格子は、効率的な計算を行うために、減衰領域を除く範囲に対して $2.0 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ の等間隔格子を、減衰領域に対して格子幅を徐々に広げた不等間隔格子を用いた。また、境界条件の設定は中村ら³⁾と同じとした。パラメータは、細砂の空隙率 m を0.4, 密度 ρ_s を $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 水平面での限界Shields数 τ_{c0} を0.03, 水中安息角を 30.0° とし、細砂のみから構成されており粘土を含んでいないことから粘土の含有率 p_f を0.0とした。その他のパラメータは、第3章と中村・水谷⁵⁾を参照されたい。

b) モデルの再現性

水理実験において造波開始1, 10, 30, 60, 300分後の地形変化が計測されているものの、長時間の計算は現時点では計算所要時間の観点から現実的ではないことから、ここでは造波開始後の1分間を対象に検討を行う。

図-6 水理実験結果との造波開始1分後の浅場の地形変化量 Δz の比較

図-5にW2からW6(図-4参照)での水位変動 η に関する水理実験結果との比較を、図-6に造波開始1分後の地形変化量 Δz に関する水理実験結果との比較を示す。ここで、 t は時刻であり、正の Δz は堆積を表す。

図-5より、浅場の沖側のW2や法面中央部のW3では、若干の位相差が確認できるものの、水理実験結果との良好な一致が確認できる。また、碎波による波高の減衰が見られる法面の上部から天端にかけてのW4からW6では、 η の振幅は概ね再現できていることが分かる。ただし、特にW5では時間の経過とともに平均水位に差が生じる傾向が確認できる。水理実験では、幅2.22 mの造波水槽内に仕切り板を設置して幅0.40 mの水路を作り、そこに上述の浅場を設置して実験を行っていた。このとき、仕切り板を水槽の岸側端にある消波まで十分に延ばしていなかったことから、水槽内に平均水位の変化に伴う循環流が生じうる状況であった。そのため、断面2次元計算では水理実験を完全にはモデル化できないことから、上述したように特に水深が小さいW4からW6で水理実験結果との差が現れたと推測される。また、その法面上部から天端にかけての差のために、その周辺に水理実験結果にはみられない大きな地形変化が生じていることが図-6より確認できる。なお、以上と同様の傾向は中村ら³⁾の数値計算結果にも表れている。

そこで、水理実験の再現を計算負荷の低い断面2次元計算で行うために、静水深 h を若干変化させた計算を行った。その結果、静水深 h を水理実験よりも0.25 cm上げ $h = 22.75$ cmとすることで、図-5に示すようにW4やW5での η の再現性が向上し、水理実験結果との対応が良くなったことが分かる。また、それに伴って図-6に示すように法面の上部から天端にかけて生じていた大きな地形変化がみられなくなったことから、地形変化についても水理実験結果との相関が向上したことが確認できる。

以上より、 $h = 22.75$ cmとすることで本モデルの再現性が確認できたことから、浅場の地形変化現象への本モデルの適用性が示された。そこで、以下では、提案した漂砂計算手法が浅場の地形変化に与える影響を検討するために、 $h = 22.75$ cmとして感度分析を進める。

(2) 粘着力が浅場の地形変化に与える影響

浅場を構成する細砂の間隙に粘着力を有する粘土を含

(a) 単位面積当たりの粘着抵抗力 f_c の効果($\omega=0.5$, $p_f=0.15$)

(b) 粘土の含水比 ω の効果($p_f=0.15$, $f_c=0.1$ N/m²)

(c) 粘土の含有率 p_f の効果($\omega=0.5$, $f_c=0.1$ N/m²)

図-7 粘着力による造波開始1分後の浅場の地形変化量 Δz の差異

んだ状態を想定する。その粘土による粘着力に寄与する重要なパラメータとして、粘土の含有率 p_f 、含水比 ω 、単位面積当たりの粘着抵抗力 f_c に着目し、それらが浅場の地形変化に与える影響を検討する。

造波開始1分後の浅場の地形変化量 Δz に与える f_c 、 ω 、 p_f の影響を図-7に示す。なお、地形変化は主に法面で生じることが図-6より確認できていることから、図-7では $x = 50 \sim 450$ cmの範囲の Δz を示した。単位面積当たりの粘土の粘着抵抗力 f_c の影響を示した図-7(a)より、 f_c の増加とともに Δz の大きさが減少する傾向が確認できる。具体的には、 f_c を 0.1 N/m²から 1.0 N/m²に増加させると、法面の上部から天端にかけて生じていた堆積や法面の中央部に生じていた侵食がほとんどみられなくなることが分かる。これは、図-3(c)に示したように、 f_c の増加とともに限界Shields数が増加し、掃流砂量が減少することから、上述したように Δz もその影響を受けたと考えられる。また、粘土の含水比 ω の影響を示した図-7(b)より、 ω の増加とともに Δz の大きさが減少する傾向が確認できるものの、その差は非常に小さく、 ω が Δz に与える影響は小さいことが分かる。これは、 $f_c = 1.0$ N/m²とすると地形変化がほとんどみられなくなったことから図-7(b)では $f_c = 0.1$ N/m²としたものの、 $f_c = 0.1$ N/m²では図-3(a)で示したように限界Shields数や掃流砂量に与える ω の影響が小さいことから、上述したように地形変化に与える ω の影響も小さくなったと考えられる。以上の ω と同様の傾向は、粘土の含有率 p_f の影響を示した図-7(c)からも確認できる。また、

f_c , ω , p_d は地形変化の傾向には影響を与えないことが図-7より確認できる。したがって、細砂の間に粘土を含ませることで、浅場の地形変化の傾向を変えることなく地形変化の発生を抑えられる可能性が示唆される。

6. 結論

本研究では、砂粒子の間に粘土が含まれることによる粘着力の効果を導入した漂砂計算手法を提案し、その基本的な特性を検討するとともに、それを組み込んだ数値計算モデルを浅場の地形変化に関する水理実験に適用し、造波開始後の1分間を対象にモデルの再現性の検証と粘着力の効果の感度分析を行った。その結果、得られた結論は以下の通りである。

1. 無次元掃流砂量の検討を通じて、粘土の含有率、含水比、単位面積当たりの粘着抵抗力の増加とともに、限界Shields数が増加し、掃流砂量が減少する傾向を確認した。また、砂粒子の間に粘土があることによる効果は限界Shields数を大きくするだけでは表せず、粘着力の効果を適切にモデル化することの重要性が示唆された。
2. 浅場の地形変化に対する感度分析を通じて、粘土の含有率、含水比、単位面積当たりの粘着抵抗力の増加とともに地形変化量が減少するものの、地形変化の傾向は影響を受けないことが判明した。したがって、砂粒子の間に粘土を含ませることで、地形の傾向を変えることなく地形変化が抑えられる可能性が示唆された。

以上の検討を通じて、本モデルにより多様な性質の粘土を含む底質の移動を解析できる可能性があることが確認できたものの、提案した手法の妥当性を水理実験などとの比較により検証する必要があるなど課題を残していることから、今後も継続して研究を進めていく所存である。

謝辞：本研究は、公益財団法人鉄鋼環境基金環境研究助成（研究代表者：中村友昭）から補助を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 風間崇宏, 中田喜三郎, 田辺義夫, 長谷川雅弘, 大島巖, 長倉敏郎: 浚渫砂を用いて造成した干潟・浅場による沿岸海域環境への効果とその課題について, 海洋開発論文集, 第22巻, pp. 607-612, 2006.
- 2) 中村友昭, 根笹裕太, 水谷法美: 人工浅場の地形変化過程に与える浅場内部の間隙水圧変動の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_541-I_545, 2012.
- 3) 中村友昭, 石原 遼, 水谷法美: 浅場表層の間隙水圧変動の影響を考慮した人工浅場の地形変化解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_1161-I_1165, 2012.
- 4) 芦田和男, 江頭進治, 加本 実: 山地流域における侵食と流路変動に関する研究(1)―粘着性材料を含む砂礫の移動限界と流砂量, 京都大学防災研究所年報, 第2号 B-2, pp. 349-360, 1982.
- 5) 中村友昭, 水谷法美: 3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルに基づく遡上津波による陸上構造物周辺の局所洗掘現象に関する数値シミュレーション, 第24回数値流体力学シンポジウム, E10-4, 9 p, 2010.
- 6) Engelund, G. and Fredsøe, J.: A sediment transport model for straight alluvial channels, *Nordic Hydrology*, Vol. 7, pp. 293-306, 1976.

SEDIMENT TRANSPORT CALCULATION CONSIDERING COHESIVE EFFECTS AND ITS APPLICATION TO WAVE-INDUCED TOPOGRAPHIC CHANGE OF SHALLOWS

Tomoaki NAKAMURA, Yong-Hwan CHO, Norimi MIZUTANI and Kwang-Ho LEE

A sediment transport calculation considering cohesive force is proposed to deal with transport phenomena of cohesive sediment. In the proposed calculation, each sand particle is assumed to be surrounded by a thin layer of clay, and a critical Shields parameter and a bed-load sediment transport rate are modified to include cohesive force acting on the sand particle. The proposed calculation is incorporated into a coupled fluid-structure-sediment interaction model, and applied to wave-induced topographic change of an artificial shallow. Numerical results show that an increase in the content rate of the clay, the cohesive force per unit surface area and the water content causes an increase in the critical Shields parameter and a decrease in the bed-load sediment transport rate, and accordingly reduces the topographic change of the shallow without any change in its trend. This suggests that mixing clay in the pore of the sand particles can reduce the topographic change of shallows.