

海底地盤における有効応力応答を考慮した掃流による底質移動の定量的評価法

Evaluation Method for Traction Sediment Flow Regarding Effective Stress Response in Seabed to Wave Loading

三浦均也¹, 松田達也¹, Anh Quang Tran², 後藤志侑子², 吉野貴仁³

- 1 豊橋技術科学大学, 建築・都市システム学系・k-miura@ace.tut.ac.jp
2 豊橋技術科学大学, 大学院博士前期課程, 建築・都市システム学専攻
3 豊橋技術科学大学, 建築・都市システム学課程

概 要

種々の海洋構造物の計画・設計において、構造物の安定性を左右する海底の底質移動を合理的に評価することは重要である。底質移動は海底面に作用する流速の関数として評価されるが、その際、波浪によって繰り返して作用する水圧に対する海底地盤の有効応力変動を適切に考慮する必要がある。本研究の目的は海底の底質移動を定量的に評価する方法を提案することである。「微小振幅波理論に基づいた線形波浪解析」と「多孔質弾性モデルを用いた海底地盤の有効応力解析」に「掃流力による漂砂量の経験的な評価法」を組み合わせることで底質移動の挙動を定量的に解析する方法を説明し、平面波浪の進行波および定常波の条件下で解析手法の妥当性と海底地盤の有効応力応答の重要性を検討している。

キーワード：海底地盤, 底質移動, 掃流力, 有効応力応答, 堆積・侵食

1. はじめに

波浪場における構造物の安定性は、基本的には直接作用する波浪荷重によって検討されるが、構造物を支持する海底地盤の健全性も重要である。海底によける漂砂の移動によって生じる構造物周辺地盤の洗掘および海底地盤の地形変動も構造物の安定に対する重要な影響要因であり、漂砂挙動を合理的に評価する手法が求められている。

海岸工学においては海底面に作用する流速の関数として生じるシートフロー、浮遊漂砂、掃流漂砂などの形態を検討することによって洗掘現象が評価されている。その一方で、離岸堤や防波堤の被災事例の中には、波浪荷重によって励起される海底地盤における有効応力の変動が、強く影響していることを示唆しているものも見られる(例えば西田ら¹⁾, Oka, et al.²⁾)。海底地盤を連続体と見做し、その境界面である海底に作用する水圧変動への海底地盤の有効応力応答に関する研究も進められてきた(例えば, Yamamoto, et al.³⁾, Zen and Yamazaki⁴⁾)。海底地盤内における有効応力の変動が激しければ周期的に有効応力がゼロになる液状化状態となるなど、構造物の支持特性に直接影響を与えるが、また、有効応力の変動は掃流力による漂砂挙動(底質の流動性)にも影響すると考えられる。

筆者ら⁵⁾はこれまで、進行波、定常波、不規則波を対象に底質移動の方向性などを定性的にはあるが検討した。本研究は定量的な底質移動の解析を可能にすることであ

り、「線形波動理論による波浪解析」と「多孔質弾性体モデルによる海底地盤の有効応力解析」、「掃流力による漂砂量の経験的な評価」からなる掃流漂砂の解析手法を提案する。直線構造物に入射したときに典型的な定常波が発生し、特徴的な底質移動挙動が見られる。ここでは、進行波と定常波を対象に基本的な底質移動挙動を検討し、漂砂流とそれに伴う地形変動における海底地盤の有効応力応答の重要性について定量的に検討する。

2. 解析手法

2.1 波浪解析

微小振幅波理論⁶⁾の枠組みで線形波浪を解析した。一様水深 h の波浪場において、海水の海底地盤への微小な浸透速度を無視して海底を不透水地盤とした。海水は非圧縮とでいて渦無しポテンシャル流れを仮定し、また、粘性による波浪の減衰を考慮していない。

2.1.1 進行波

図 1(a) に示すように、 x -軸方向に進行する波高 H 、波長 L 、周期 T の平面波の水面形 η_i と速度ポテンシャル ϕ_i は式(1a,b) のようである。テンソル表示した速度成分 v_j と水圧 p は速度ポテンシャルの導関数として計算できる(式(2))。

$$\eta_i(x, y, t) = \frac{H}{2} e^{i(\lambda x - \omega t)} \quad \because \lambda = \frac{2\pi}{L}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1a)$$

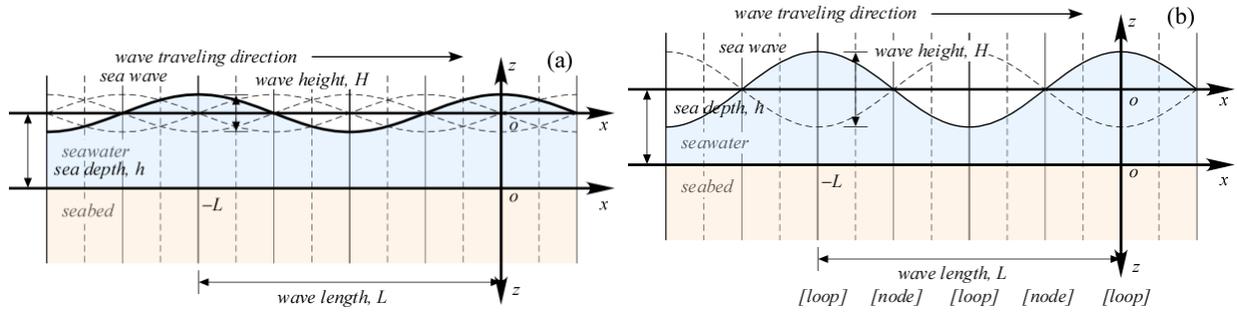


図 1 線形波浪の定義 (a) 進行波, (b) 定常波

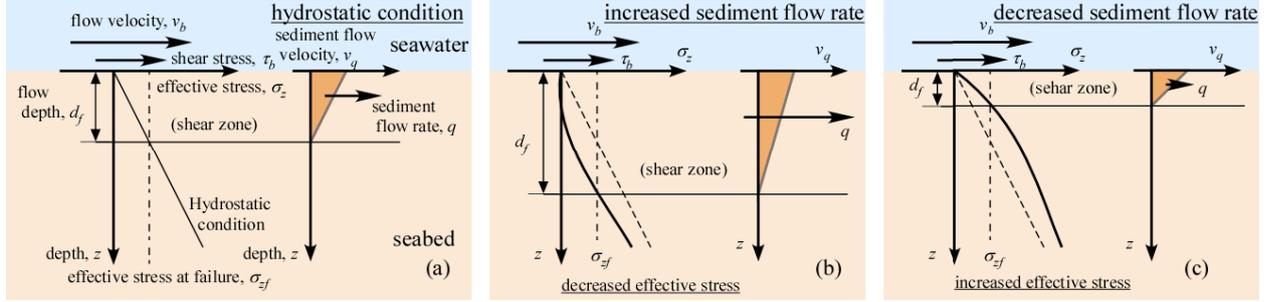


図 2 漂砂量の算定; (a) 静水圧条件, (b) 有効応力減少条件; 漂砂量増大, (c) 有効応力増大条件; 漂砂量減少

$$\phi(x, y, z, t) = i \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh \lambda(h+z)}{\cosh \lambda h} e^{i(\lambda x - \omega t)} \quad (1b)$$

$$v_j = -\dot{\phi}_{,j}, \quad p = \rho_w (\dot{\phi}_i - gz) \quad (2)$$

2.1.2 定常波

図 1(b) が示すように, 式(1a,b)で表される入射波が直線構造物 $x=0$ に垂直に入射すると, 固定境界条件 $v_x=0$ ($x=0$) を満たす以下のような反射波が発生する。

$$\phi_r(x, y, z, t) = i \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh \lambda(h+z)}{\cosh \lambda h} e^{i(-\lambda x - \omega t)} \quad (3)$$

このような入射波と反射波を重ねあわせることによって定常波を下記のように表すことができる。

$$\phi = \phi_i + \phi_r = i \frac{gH}{\omega} \frac{\cosh \lambda(h+z)}{\cosh \lambda h} \cos \lambda x \cdot e^{-i\omega t} \quad (4)$$

2.2 海底地盤の有効応力応答解析

波浪による水圧変動を受ける海底地盤の有効応力解析は, 多孔質線形弾性体モデルを用いて行った^{3,4)}。土粒子が形成する多孔質の固体相および, 間隙水と間隙空気を平均化した間隙流体相, この2相の相互作用を考慮し, 準動的条件において **u-p** モデル (**u** は粒子骨格の変位と **p** は間隙水圧に対応) により定式化した。三浦ら⁷⁾ は多孔質弾性体モデルの定式化について広範囲に検討し, 一般的な波浪の周期では加速度項を無視して速度項までを考慮する準動的条件で十分な精度が得られること。波長の 10 分の 1 程度の深さまでは, 2次元解析を必要とせず 1次元解析で十分な精度が得られること。間隙流体の変位を消去して **u-p** モデルで定式化することによって境界値問題を解くことが可能であること, を示した。均質な海底地盤に対しては境界条件を無限深さに取った場合に, 間隙水圧と有効応

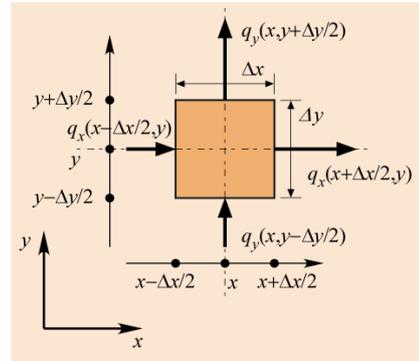


図 3 漂砂量の収支による漂砂蓄積量の算定

力の変動成分 Δp , $\Delta \sigma_z$ は式(5)のように計算できる。ここで, E_u , B_f はそれぞれ固体相と液体相の剛性率, 複素数パラメータ ζ は水理圧密係数 h_v (s/m^2) と式(6)の関係にある⁷⁾。また, ρ_s と ρ_f は地盤材料と間隙水の密度である。

$$\begin{aligned} \Delta p(z, t) &= \Delta p_0 \frac{1}{B_f + E_u} (B_f + E_u e^{-\zeta z}) e^{-i\omega t} \\ \sigma_z(z, t) &= \Delta p_0 \frac{E_u}{B_f + E_u} (1 - e^{-\zeta z}) e^{-i\omega t} + (\rho_s - \rho_f) z \\ &\because \Delta p_0 e^{-i\omega t} = \rho_w \dot{\phi}; \quad z = -h \text{ (on seabed surface)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\zeta = \sqrt{i\omega h_v} \quad (6)$$

2.3 掃流力による漂砂流・漂砂貯留量の評価

海岸工学で広く用いられるシールズ数と同様な考え方にに基づき, 掃流力による漂砂の定量的な評価を試みた。

2.3.1 漂砂量の算定方法

海底面に作用するせん断応力 (単位面積当りの掃流力) τ_b (N/m^2) は水粒子の流速 v_b (m/s) の 2 乗に比例するとし, 次式で評価した。ここで, 無次元係数 C_b を $1/40$ とした。

表 1 解析で用いた代表的な土質の物理的・力学的性質⁸⁾

Material Type	Loose Sand	NC Clay	Gravel	Note
ρ_t : bulk density of wet material (kg/m ³)	1.90×10^3	1.80×10^3	1.75×10^3	
ρ_s : density of solid phase (kg/m ³)	2.65×10^3	2.75×10^3	2.36×10^3	
n : porosity	0.454	0.543	0.448	
G_s : shear modulus of solid phase (N/m ²)	0.4×10^8	0.3×10^8	1.0×10^8	
ν_s : Poisson's ratio	0.30	0.30	0.30	
B' : Skempton's B-value in 1-D	0.40	0.80	0.60	
k : coefficient of permeability (m/s)	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-2}	
E_{us} : stiffness in 1-D of solid phase (N/m ²)	1.40×10^8	1.05×10^8	3.50×10^8	$E_{us} = 2(1-\nu_s)G_s / (1-2\nu_s)$
K_f : bulk modulus of fluid phase (N/m ²)	0.424×10^8	2.28×10^8	2.35×10^8	$K_f = nE_{us}B' / (1-B')$
S_r : degree of saturation of pore (%)	99.30	99.88	99.88	$S_r = (1/K_a - 1/K_f) / (1/K_a - 1/K_w)$
c_v : coefficient of consolidation in 1D (m ² /sec)	1.43	1.07×10^{-4}	3.57×10^2	$c_v = kE_{us} / (g\rho_w)$
h_v : hydraulic Consolidation Factor (sec/m ²)	1.75	1.17×10^4	4.67×10^{-3}	$h_v = 1 / (c_v B')$

density of air, $\rho_a = 0.0$ (kg/m³)
density of water, $\rho_w = 1000.0$ (kg/m³)

bulk modulus of air, $K_a = 3.03 \times 10^5$ (N/m²)
bulk modulus of saturated water, $K_w = 2.31 \times 10^9$ (N/m²)

$$\tau_b = C_b \rho_w v_b^2 \quad (7)$$

地盤材料はせん断応力 τ_b がせん断強度 τ_f を超える海底面付近の浅いせん断領域 ($z < d_f$) で流動化すると考える。 τ_f は有効応力 σ_z と内部摩擦角 ϕ_e の関数の積で与えられる(式(8))。有効応力 σ_z は深さ z の関数として有効応力解析で与えられ、条件を満たすせん断領域の深さ d_f が時刻の関数として計算できる。

$$\tau_f = \sigma_z(z, t) \cdot \tan \phi_e \quad (8)$$

$$\tau_b = \tau_f \quad \therefore \sigma_z(d_f, t) = \tau_f / \tan \phi_e \quad (9)$$

底質の移動速度 v_f は図 2 に示すように三角形分布で単純化し、単位幅当りの漂砂流動ベクトル q (m²/s) を式(10)で算定する。図示のように有効応力が減少してせん断領域が厚くなるので漂砂量は増大し(図 3(b))、逆に有効応力が増大するとせん断領域は薄くなるので漂砂量は減少する(図 3(c)) ことをモデル化している。無次元係数 C_q は、底質移動速度 v_f が水粒子の流速 v_b より遅いことを考慮するもので、値を 2/5 とした。

$$q = \frac{1}{2} d_f v_f = \frac{1}{2} d_f C_q v_b \quad (10)$$

2.3.2 海底の侵食・堆積；漂砂の蓄積量

海底地盤高の変化に対応する漂砂が蓄積する速度 Q (m/s) は、図 3 が示すように微小長方形領域への漂砂の流入・流出収支から次式で算定した。

$$Q = -\frac{q_{x(x+\Delta x/2, y)} - q_{x(x-\Delta x/2, y)}}{\Delta x} - \frac{q_{y(x, y+\Delta y/2)} - q_{y(x, y-\Delta y/2)}}{\Delta y} \quad (11)$$

$$\rightarrow -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}\right) \quad (\Delta x \rightarrow 0, \Delta y \rightarrow 0)$$

漂砂蓄積速度 Q の正負はそれぞれ海底地盤高の上昇・

下降(堆積と侵食)に対応している。漂砂量 q と蓄積速度 Q は流速に依存するので時刻の関数として変動するが、これらを所定の時刻 t まで積分した累積値を q_t (m²)、 Q_t (m)、周期 T の間で積分した周期当たりの累積値を q_T (m²)、 Q_T (m) と定義した。

本研究での掃流漂砂の評価法は線形理論の範囲にあるので、その信頼性や実際問題への適用性については検証が必要である。提案した漂砂量 q と蓄積速度 Q は、有効応力応答を考慮できる漂砂挙動の定量化のために導入した、単純化に基づく指標である。また、式(7,10)で用いた無次元係数 C_b 、 C_q の値は海底地盤が静水圧条件にある場合には漂砂量がシールズ数による評価と同等になるように決定したが、これらについても検討が必要である。

3. 波浪と地盤材料の解析条件

土木学会・海洋工学委員会⁸⁾では共通の条件で複数の研究者が地盤の波浪に対する海底地盤の有効応力応答解析を実施したが、これらの既往の研究成果との比較検討が可能ないように本研究でも同一の設定を採用した。

3.1 波浪条件

対象とする波浪域は一様水深 $h=20$ m、入射波の周期を $T=13$ s (波長 $L=167.5$ m) とし、波高を $H=10$ m を上限としてパラメトリックに変化させた。

3.2 地盤条件

土木学会・海洋工学委員会⁸⁾では複数の典型的な海底地盤材料を選定した。表-1 はそれらのうち三種類(緩い砂、正規圧密粘土、礫)の物理的・力学的性質を列挙している。また、図 4 は進行波の下における 3 種類の土質で構成さ

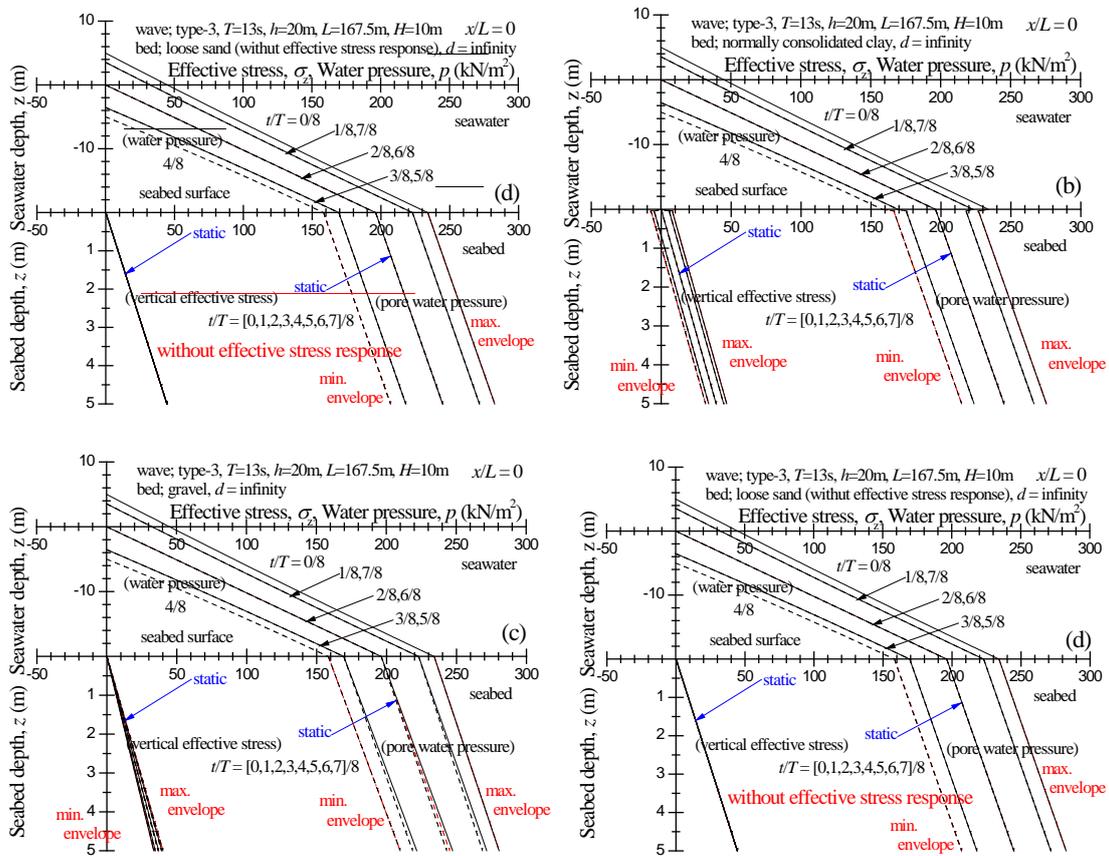


図 4 海底地盤における有効応力挙動 (a) 緩い砂, (b) 正規圧密粘土, (c) 礫, (d) 応答無し

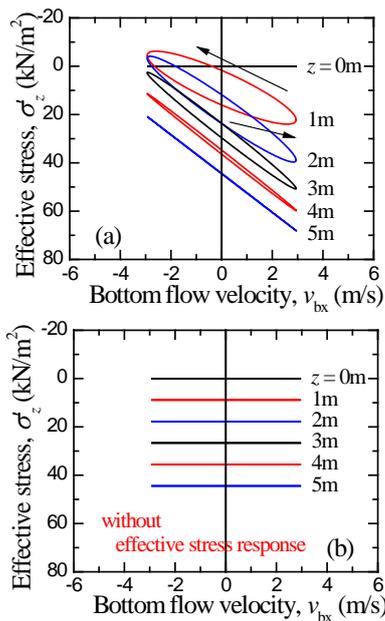


図 5 進行波における流速と鉛直有効応力の関係

(a) 有効応力応答有り, (b) 有効応力応答無し

れる海底地盤の波浪に対する有効応力応答を示している。図の上段は海水中の水圧変化, 下段は海底地盤中の間隙水圧・有効応力応答を示している。ただし, 図 4(d)は海底地盤の波浪への応答を考慮しない場合に, 間隙水圧のみが変化し, 有効応力は静水圧状態で変動しないことを示している。三浦ら⁷⁾が示したように, 正規圧密粘土や礫と比較し

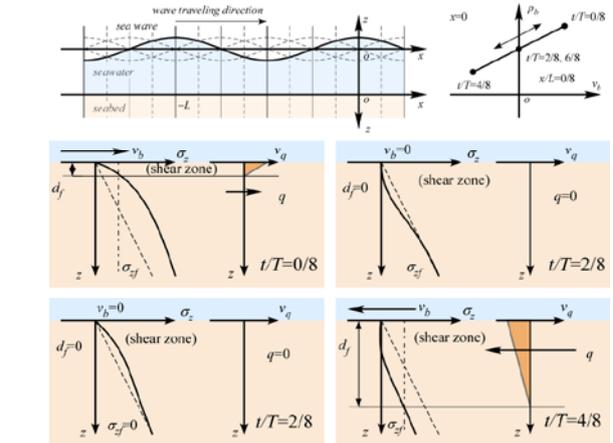


図 6 進行波における負の方向に卓越する漂砂流動

て, 緩い砂は波浪に対する有効応力応答が顕著であることから, 本研究では緩い砂で構成される海底地盤を選択した。

4. 解析結果と漂砂挙動の検討

4.1 進行波の下での漂砂挙動

4.1.1 有効応力応答

図 5 は海底地盤内の所定の深さにおける鉛直有効応力 σ_z の海底面での流速 v_{bx} に対する変化を示している。海底地盤の有効応力応答を考慮すると図 5(a) が示すように 1 周期の間で有効応力 σ_z が変動し, 減少するときには流速

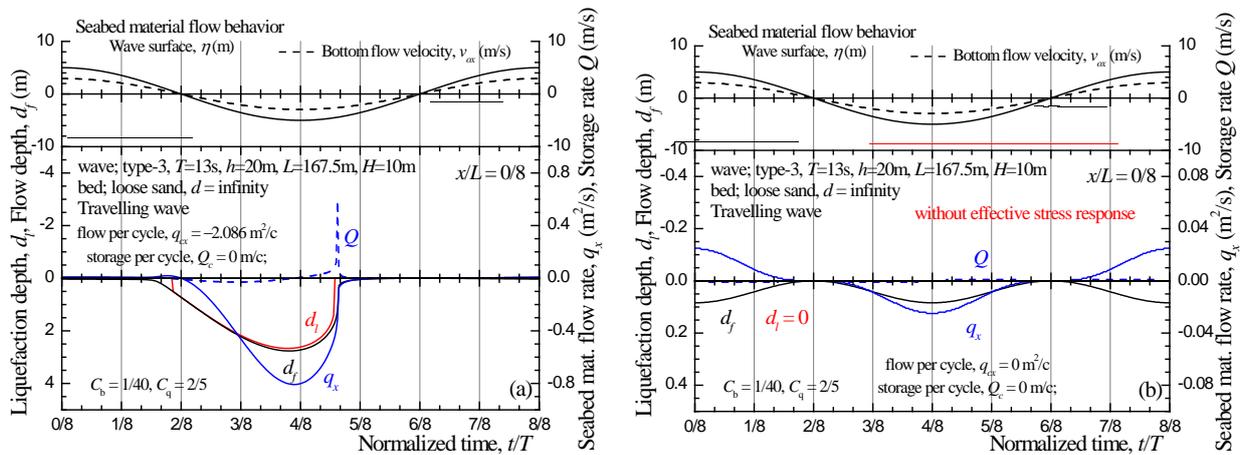


図 7 進行波における漂砂量の挙動 (a) 有効応力応答有り, (b) 有効応力応答無し

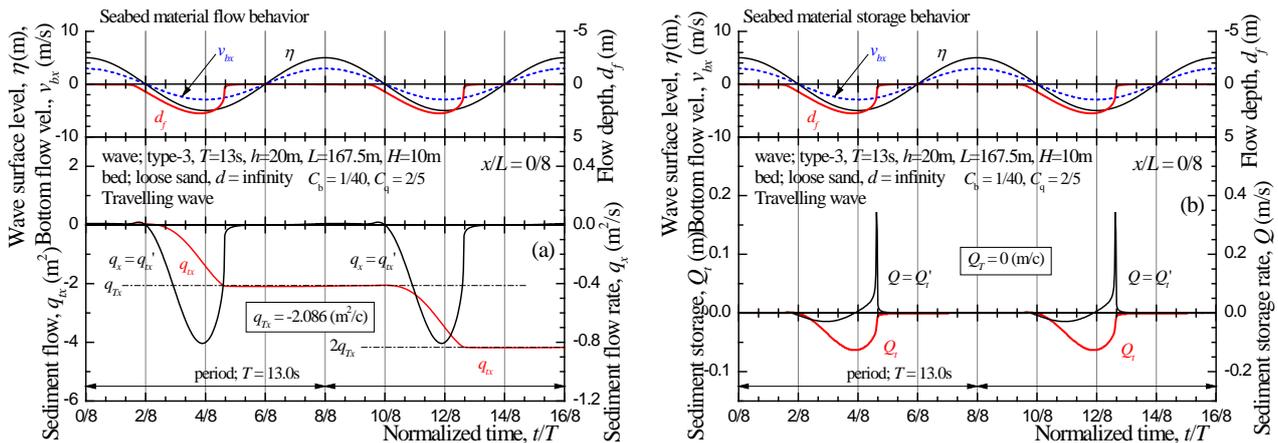


図 8 進行波における漂砂挙動 (a) 漂砂流量 q_x, q_{tx} , (b) 漂砂蓄積量 Q, Q_t

v_{bx} は常に負になるので、漂砂量は負の方向（波の進行方向と逆向き）に卓越すると考えられる。図 6 はこのような有効応力応答が漂砂流動に及ぼす影響を模式的に示し、漂砂は負の方向へ卓越して流動することを説明している。

一方、有効応力応答を考慮しない場合には、図 5(b) が示すように有効応力 σ'_z は変化しないので、漂砂量は正負対称になる。

4.1.2 漂砂挙動

図 7 は漂砂のこのような挙動を定量的に説明している。すなわち、有効応力応答により漂砂は 1 周期の間に正負両方向へ流動するが、正の方向への流動量よりも負の方向へ流動量が大きくなる。このように有効応力応答により、漂砂流量 q_x は負の方向へ大きく偏るが（図 7(a)）、有効応力応答を考慮しない場合には、正負対称になっている（図 7(b)）。したがって、有効応力応答を考慮しない限り、漂砂は特定の方向へ偏ることはなく、1 周期の間では漂砂は水粒子と同様に特定の場所で前後に振動するのみであることを示している。

図 8(a,b) には漂砂流量 q_x と漂砂蓄積速度 Q それぞれの所定の時刻までの累積値の変化 q_{tx}, Q_t を、2 周期にわたって示している。1 周期の間に、漂砂の流量 q_{tx} は負の方向へ蓄積する。しかし、この q_{tx} は 1 波長においては進行波を受けるすべての海底地点で等しい値となるので、貯留

累積値 Q_t は 1 周期の間にゼロへ戻る。したがって、進行波の下では漂砂は波の進行方向とは逆の負の方向へ流動するが、その量はすべての点で等しいために、結果的に海底では侵食も堆積もしない、ということになる。このように、波浪場における非線形性を考慮せず、単純な三角関数波を用いる限りは、海底地盤の有効応力応答を考慮しなければ海底の地形変化（地盤高の変動、侵食・堆積）を説明できないことになる。

4.2 定常波の下での漂砂挙動

図 9 は定常波の腹（構造物側面）における漂砂挙動を 2 周期にわたる漂砂流量 q_x, q_{tx} と漂砂蓄積量 Q, Q_t の変化で定量的に示している。また、図 10 は漂砂挙動における有効応力応答の影響を模式的に説明している。図 11, 12 は節における漂砂挙動を、また、図 13, 14 および図 15, 16 は腹と節の中間点における漂砂挙動を示している。

4.2.1 腹における漂砂挙動

定常波の腹においては、水位の変動は最大であるが海底面での流速 v_{bx} は常にゼロであるので、図 9(a) が示すように漂砂流動量 q_x およびその累積値 q_{tx} は常にゼロである。図 10 は有効応力 σ'_z は変動があるものの、流速がゼロであるために漂砂が流動しないことを模式的に説明している。腹の周辺では腹から節に向けて（腹から離れる方向に）

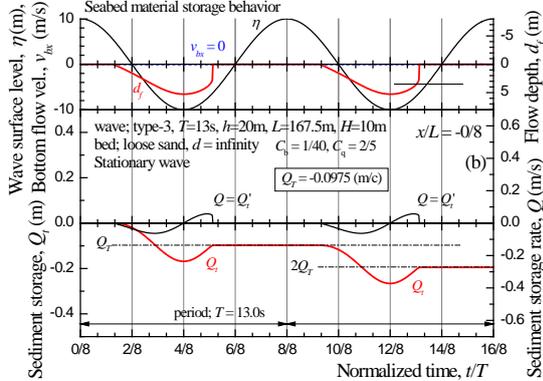
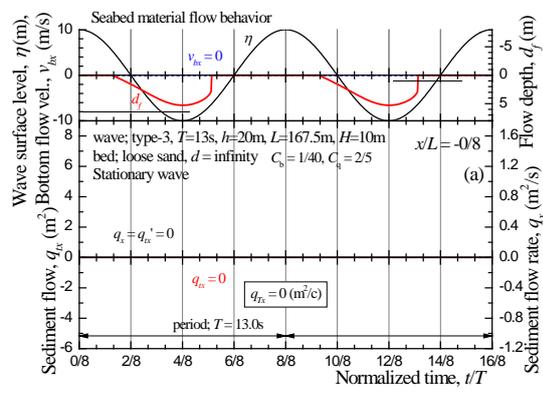


図 9 定常波の下での腹における漂砂流動; $x/L=0/8$
(a) 漂砂流動挙動, (b) 漂砂蓄積挙動

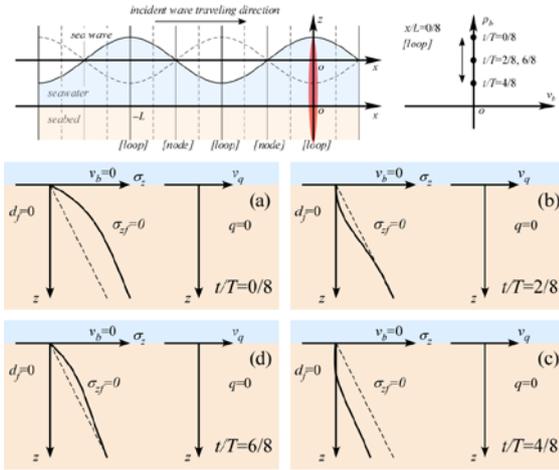


図 10 定常波の下での腹における漂砂流動; $x/L=0/8$

漂砂が流動するので、図 9(b) が示すように漂砂蓄積速度 Q の累積値 Q_t は増減を繰り返すが、1 周期の間の蓄積量 Q_T は負の値、すなわち海底地盤高は降下し、海底は侵食されることが分かる。

4.2.2 節における漂砂挙動

定常波の節においては、海底面での流速 v_{bx} は最大振幅で変動するものの、水位の変動が常にゼロなために有効応力 σ'_z が変動しないので、図 11(a) が示すように漂砂流動量 q_x は正負対称に変動し、その結果累積値 q_{bx} は 1 周期の間にはゼロに回帰する。図 12 は有効応力 σ'_z は変動しないので、正負両方向への流動量は等しくなることを模式的に説明している。すなわち、漂砂は前後に振動するだけで、特定の方向へ累積的に流動することはない。この挙動は水

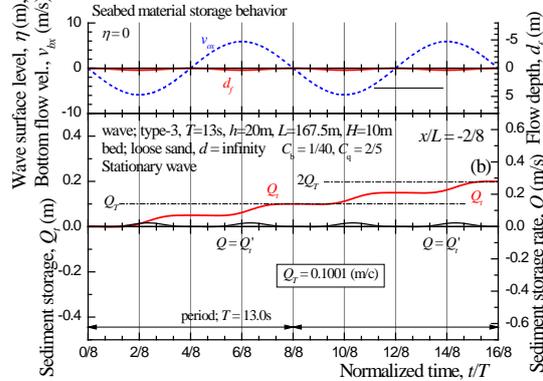
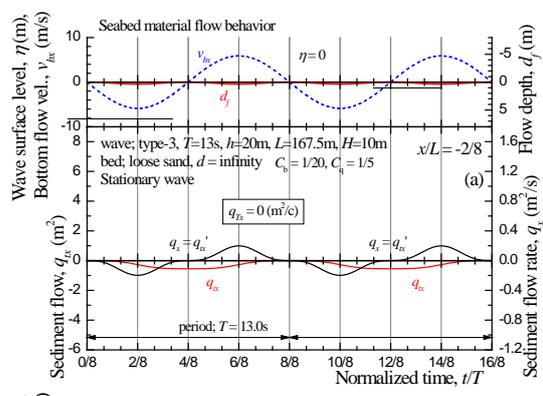


図 11 定常波の下での節における漂砂流動; $x/L=-2/8$
(a) 漂砂流動挙動, (b) 漂砂蓄積挙動

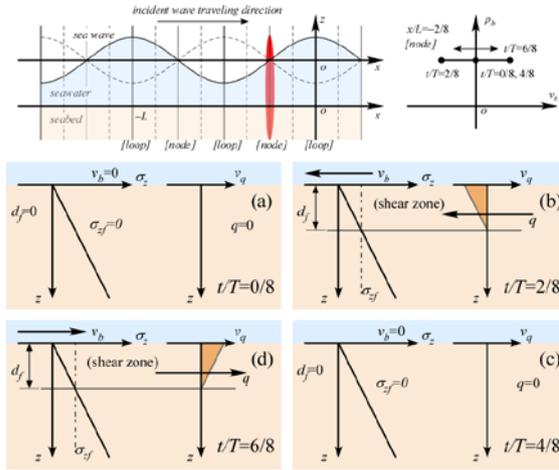


図 12 定常波の下での腹における漂砂流動; $x/L=-2/8$

粒子の挙動に対応している。

節の周辺では腹から節に向けて（節へ向かう方向に）漂砂が流動するので、図 11(b) が示すように漂砂蓄積速度 Q の累積値 Q_t は増減しながらも増加し、1 周期の間の蓄積量 Q_T は正の値、すなわち海底地盤高は上昇し、漂砂が堆積することが分かる。

4.2.3 腹と節の中間点における漂砂挙動

定常波の腹と節の中間点においては、海底面における流速 v_{bx} と水位がともに変動するので、腹と節における漂砂挙動の中間的な挙動を示す。

節の右側 $x/L=1/8$ においては、水位が降下して有効応力 σ'_z が減少している過程では流速 v_{bx} が負の方向となっているので、図 13(a) が示すように漂砂流動量 q_x は負の方向

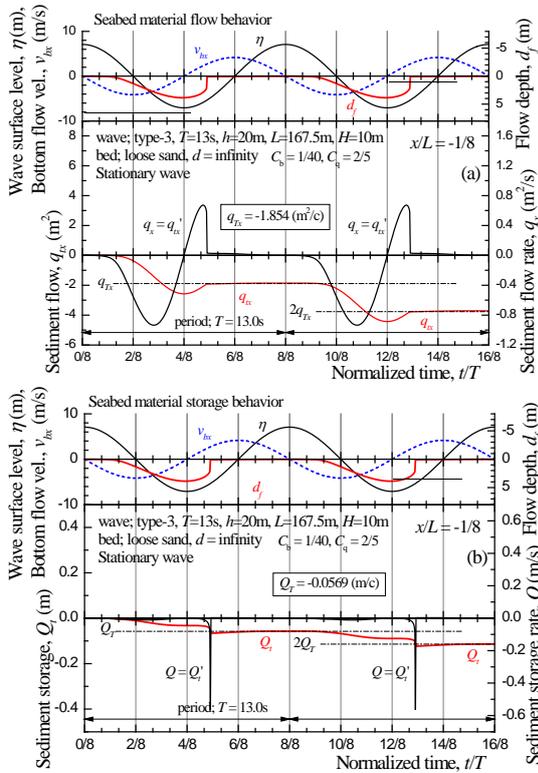


図 13 定常波の下での中間点における漂砂流動; $x/L=-1/8$
(a) 漂砂流動挙動, (b) 漂砂蓄積挙動

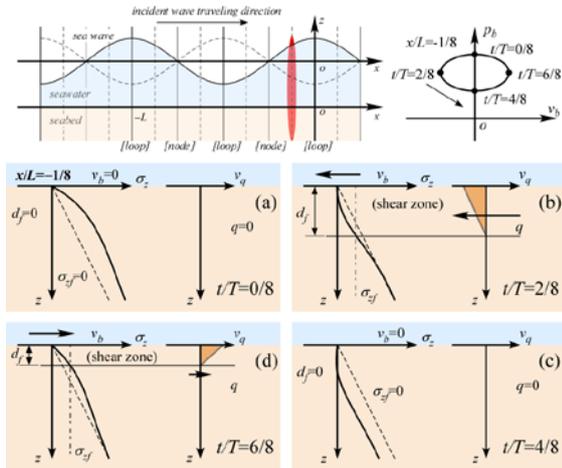


図 14 定常波の下での中間点における漂砂流動; $x/L=-1/8$

に偏り、その結果として累積値 q_{Tx} は減少と増加を繰り返しながら負の方向に卓越する。その結果、1 周期当たりの累積値 q_{Tx} は負の値となる。図 14 は有効応力 σ_z の変動の影響により、負方向の流動量が卓越することを模式的に説明している。すなわち、漂砂は正負両方向に周期的に流動するが、負の方向（腹から節）に向かって累積的に流動することになる。

図 13(b) が示すように漂砂蓄積速度 Q の累積値 Q_t は増加現象を繰り返しながら減少し、1 周期の間の貯留量 Q_T は負の値、すなわち海底地盤高は降下し、海底が侵食されることが分かる。ただし、侵食の量は図 9(b) に示す腹におけるよりは小さく、半分程度である。

もう一方の中間点、節の左側 $x/L=3/8$ においては、水位

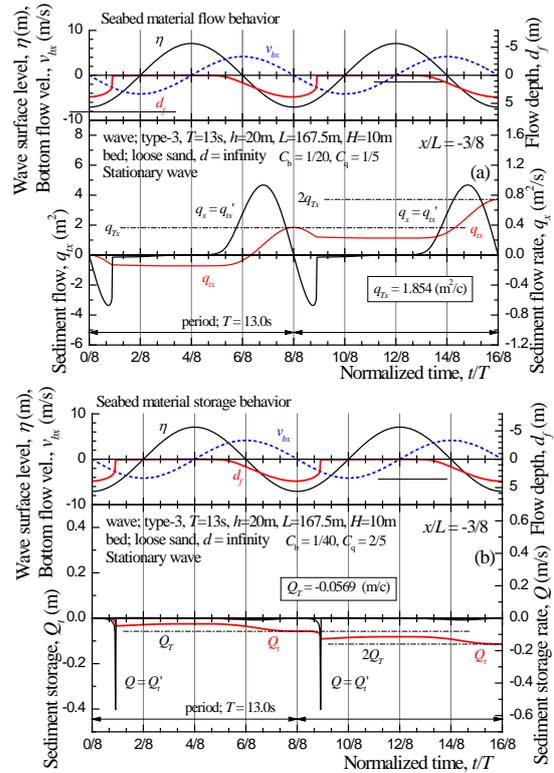


図 15 定常波の下での中間点における漂砂流動; $x/L=3/8$
(a) 漂砂流動挙動, (b) 漂砂蓄積挙動

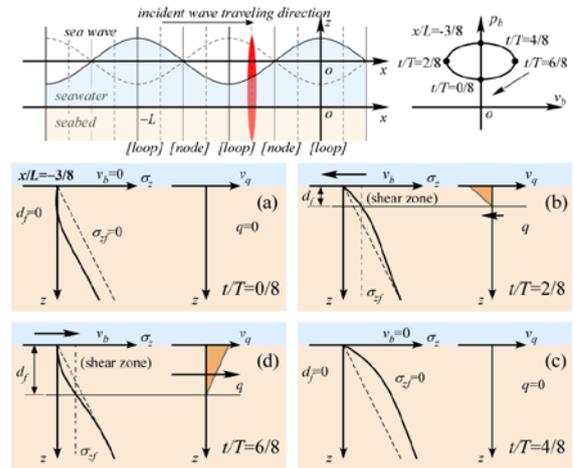


図 16 定常波の下での中間点における漂砂流動; $x/L=3/8$

が降下して有効応力 σ_z が減少している過程では流速 v_{bx} が正の方向となっているので、図 15(a) が示すように漂砂流動量 q_x は正の方向に偏り、その結果として累積値 q_{Tx} は減少と増加を繰り返しながら正の方向に卓越する。1 周期当たりの累積値 q_{Tx} は正の値となる。図 16 は有効応力 σ_z の変動の影響により、正方向の流動量が卓越することを模式的に説明している。すなわち、漂砂は正負両方向に周期的に流動するが、正の方向（腹から節）に向かって累積的に流動することになる。

図 15(b) が示すように漂砂蓄積速度 Q の累積値 Q_t は断続的に減少し、1 周期の間の貯留量 Q_T は負の値、すなわち海底地盤高は降下し、海底が侵食されることが分かる。ただし、侵食の量は図 13(b) に示した中間点と等しく、図

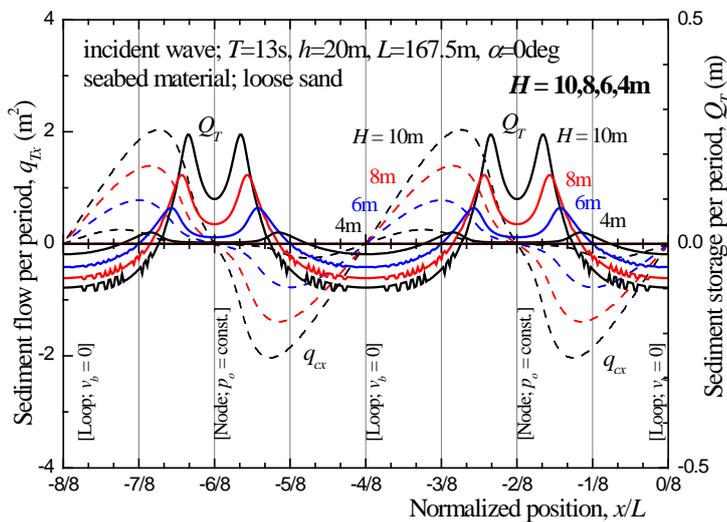


図 17 定常波における漂砂流動・蓄積挙動

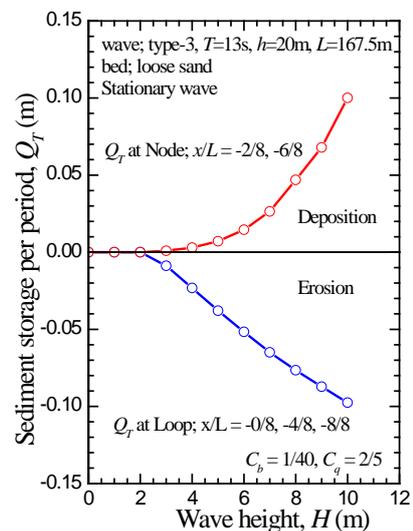


図 18 定常波における漂砂挙動の波高依存性

9(b) に示す腹におけるよりは小さくて、半分程度である。

4.2.4 海底地盤高の変化；堆積と侵食

図 17 は波高を $h=10\text{m}$ から 2m までパラメトリックに変化させたときの 1 周期当りの漂砂蓄積挙動を 1 波長の範囲で示している。破線は累積漂砂流量 q_{Tx} 、実線は漂砂蓄積量 Q_T を示している。2 つの節 ($xL=-6/8, -2/8$) に対して q_{Tx} は反対称に変化している。このことは節の右側では漂砂は左方向へ ($q_{Tx} < 0$)、腹から節に向かって移動する、逆に節の左側では漂砂は右方向へ ($q_{Tx} > 0$)、やはり腹から節に向かって移動することを示している。結果として、節では漂砂蓄積量 Q_T は正で堆積し、逆に腹では Q_T は負で海底は侵食することが分かる。ちなみに、式(11)が示すように Q_T は q_{Tx} の導関数である。

図 18 は腹と節における漂砂蓄積量 Q_T を、波高 H に対して示している。波高が低くなると流速と有効応力の変動両がともに減少するので、図示のように海底地盤の地形変動（堆積と侵食の度合い）は大きく減少する。

5. おわりに

「線形波動理論による波浪解析」、「線形多孔質弾性モデルによる地盤の有効応力解析」、「掃流力による漂砂量の経験的な評価法」からなる掃流力による漂砂挙動の解析手法を提案し、これを適用して、進行波および定常波の下での掃流漂砂の特性を検討した。

本研究の成果をまとめると以下のようである。

- 1) 海底地盤の波浪に対する有効応力挙動を考慮しなければ、漂砂は海水の水粒子と同様に所定の場所で振動するのみで、特定の方向に累積的に流動することは説明できないことを示した。
- 2) 線形理論の範囲において非線形性を考慮せず単純な三角関数波浪を用いる場合でも、海底地盤の有効応力応答を考慮することによって、漂砂が特定の方

向へ累積的に流動することを説明できることが分かった。

- 3) 進行波の下では、漂砂は波の進行方向とは逆向きに流動することを示した。
- 4) 定常波の下では、漂砂は腹から節へ向かい累積的に流動することを明らかにした。その結果、構造物側面を含む腹部では海底が侵食し、節部では漂砂が堆積することを示した。侵食と堆積の度合いは波高の影響を強く受けることを定量的に示した。

今後は、Dean Number に基づく相似則を満たした模型実験⁹⁾ や現地観測による検証を並行して進める予定である。

参考文献

- 1) 西田仁志, 山口豊, 近藤豊次: 孔間弾性波探査法による離岸堤の埋没状況に関する考察, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.365-369.
- 2) Oka, F., Yashima, A., Miura, K., Ohmaki, S. and Kamata, A.: Settlement of breakwater on submarine soil due to wave-induced liquefaction, 5th ISOPE, Vol.2, pp.237-242, 1995.
- 3) Yamamoto, T., H. S. L. Koning and E. Van Hijum: On the response of a pore-elastic bed to water waves, J. Fluid Mech., Vol.87, part 1., pp.193-206, 1978.
- 4) Zen, K. and Yamazaki, H.: Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed, Soils and Foundations, Vol.30, No.4, pp.90-104, 1990.
- 5) 三浦均也, 守政信吾, 大塚夏彦, 山崎浩之, 小浪岳治: 海底地盤の不安定化に及ぼす流速と水圧変動の相乗効果, 土木学会論文集, Vol. 66, No.1, 851-855, 2010.
- 6) 服部昌太郎: 「海岸工学」, pp.13-36, コロナ社, 1987.
- 7) 三浦均也・浅原信吾・大塚夏彦・上野勝利: 波浪に対する海底地盤応答の連成解析のための地盤の定式化, 第49回地盤工学会シンポジウム論文集, pp. 233-240, 2004.
- 8) 土木学会: 「海岸波動」, pp. 430-503, 1994.
- 9) 松田達也, 三浦均也, 佐藤隼可, 諫山恭平, 澤田弥生: Dean Number を適用した移動床造波水路実験における地盤内水圧応答, 土木学会論文集, Vol.73, No.2, pp.I_1117-I_1122, 2017.