

河口域での潮汐作用による底泥一直上水間の物質輸送に関する研究

九州大学工学部 学生会員 〇徳永 典子 九州大学大学院 学生会員 橋本 文子
九州大学大学院 正会員 崎田 省吾 九州大学大学院 フェロー 楠田 哲也

1. はじめに

河口域における底泥一直上水間の物質の輸送には分子拡散や沈降による堆積、底生動物の活動による攪拌などが考えられている。本研究では、潮汐による間隙水圧変動により底泥内の気泡が収縮・膨張し、底泥一直上水間で水の輸送が生じるという新しい輸送形態に着目し、底泥一直上水間の輸送現象の特性を把握し、自然浄化機能を有効利用することを目的とした。そこで、実験によりこの水輸送現象を検証した。また、モデル解析により輸送現象を定量的に把握した。

2. 実験方法

試料は福岡市内の多々良川から未攪乱状態で採取した。内径7cm、長さ50cmのアクリルパイプを底泥内に垂直に押し込み引き抜いた。実験には深さ約40cm分の底泥を使用し底泥の上部を河水で満たし、アクリルパイプの上部にマンメーターを連結した。コンピュータ制御された加圧装置内に試料を設置し、潮汐作用に擬した圧力変動を12時間与えた。マンメーターの水位差を実験開始から1時間毎に取り、底泥一直上水間の水輸送量を測定した。実験装置の概略を図-1に示す。室温20℃、暗所にて実験した。実験後に不飽和透水係数を測定した。

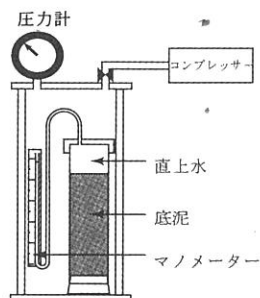


図-1 実験装置概要

土粒子の密度、含水比、間隙比を土質試験法に準じて測定し底泥の各相の体積分率を計算した。気泡量は未攪乱状態の底泥体積と湯せんにかけて気泡を抜いた底泥体積をピクノメータで測定し、その差とした。

3. 解析手法

底泥は、固相、液相、気相から構成される。各層に作用する力として、土粒子の水中重量、粒子間接触による有効応力、土粒子に挟まれている気泡の変形により伝達される見かけの有効応力、間隙水が土粒子に対して相対運動するとき土粒子に作用する流体粘性力、水位変動に伴い変化する水圧、大気圧を考える。

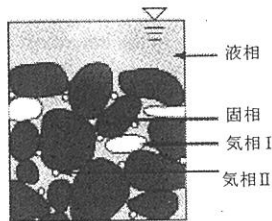


図-2 底泥の構成図

なお、気相は比較的大気泡の有効応力を伝播する部分(気相I)と、粒子に付着した有効応力を伝播せず間隙水の移動のみに影響する部分(気相II)に分けられると仮定した。底泥の構成の概念を図-2に示す。

底泥の連続式と運動方程式はいくつかの仮定のもとに以下のように導かれる。

鉛直方向座標をz(上方を正)として

連続式:

$$\text{液相: } \frac{\partial \epsilon_l}{\partial t} + \frac{\partial V_l}{\partial z} = 0 \quad \dots (1) \quad \text{固相: } \frac{\partial \epsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial V_s}{\partial z} = 0 \quad \dots (2)$$

$$\text{気相 I: } \frac{\partial C_{gl}}{\partial t} + \frac{\partial N_{gl}}{\partial z} = 0 \quad \dots (3) \quad \text{気相 II: } \frac{\partial C_{gII}}{\partial t} + \frac{\partial N_{gII}}{\partial z} = 0 \quad \dots (4)$$

運動方程式:

$$\text{全体: } \frac{\partial}{\partial z} (P_l + P_s) + \{\epsilon_s (\rho_s - \rho_l)\}g = 0 \quad \dots (5)$$

$$\text{液相: } \frac{\partial P_l}{\partial z} - \frac{\mu}{k} \left(V_l - \frac{\epsilon_l V_s}{\epsilon_s} \right) = 0 \quad \dots (6)$$

$$\text{固相: } \frac{\partial P_s}{\partial z} - \frac{\mu}{k} \left(V_l - \frac{\epsilon_l V_s}{\epsilon_s} \right) + \{\epsilon_s (\rho_s - \rho_l)\}g = 0 \quad \dots (7)$$

$$\text{気相: } \frac{\partial P_{gl}}{\partial z} - \frac{\mu}{k \epsilon_s + \epsilon_{gl}} \left(V_l - \frac{\epsilon_l V_s}{\epsilon_s} \right) + \{\epsilon_{gl} (\rho_g - \rho_l)\}g = 0 \quad \dots (8)$$

ϵ : 体積分率
V : 体積速度(空塔速度) [m/s]
v : 実速度 [m/s]
l, s, g : 添字でそれぞれ液、固、気相を表す
I, II : 添字でそれぞれ気相の有効応力伝達部分と非伝達部分を表す
C_g : 堆積物単位体積あたりの気相分の質量 [kg/m ³]
N_g : 単位水平面あたりの気相の質量速度 [kg/m ² /s]
T : 絶対温度 [°K]
R : 気体定数 [J/°K/kg]
p_e : 水圧(大気圧、過剰間隙水圧も含む) [Pa]
P_g : 表面張力による気泡内圧力増分 [Pa]
t : 時間 [s]
P_l : 有効応力 [Pa]
P_s : 過剰間隙水圧 [Pa]
P_{gl} : 気相 I が伝達する有効応分 [Pa]
μ : 液相の分子粘性係数 [kg/m/s]
k : 透水係数 [m/s]
ρ : 密度 [kg/m ³]
g : 重力加速度 [m/s ²]

これより、底泥の座標(z, t)を質量を基準とした座標(w, t)系に変換すると、

$$\epsilon_s \rho_s \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{k}{\mu} \rho_s \epsilon_s \frac{\partial P_l}{\partial w} \right) = \frac{RT}{P_a + P_m + P_l + P_{oil}} \epsilon_{gl} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_a + P_m + P_l + P_{oil}}{RT} \right) \quad \dots (9)$$

$$V_l = \frac{k}{\mu} \rho_s \epsilon_s \frac{\partial P_l}{\partial w} \quad \dots (10)$$

が導かれる。式(9)に条件を与えて解くことにより P_l を、さらに式(10)より V_l を求め、底泥内移動水量を求めた。

条件: $P_l = a \sin \frac{\pi}{6} t$ at $w = 0$, $P_l = 0$ for $w = -\infty$

気泡内圧力増分 P_σ は外圧により変化する。その変化量を

$$\Delta P_\sigma = \frac{P_\sigma}{3(P_m + P_a + P_l) + 2P_\sigma} \cdot \Delta P_l \text{ として与え、初期状態で基準値を}$$

$$P_\sigma = \frac{2\sigma}{r} \quad (\sigma: \text{表面張力}, r: \text{気泡半径}) \text{ とした。}$$

土粒子の密度、固相・気相 II の体積分率、透水係数は実測値より表-1のように与え、気泡半径は $10[\mu\text{m}]$ と仮定した。

表-1 各パラメーターの値

土粒子の密度	$\rho_s = 2650 [\text{kg/m}^3]$
固相の体積分率	$\epsilon_s = 0.56$
気相 II の体積分率	$\epsilon_{gII} = 0.005$
透水係数	$k = 1.50 \times 10^{-7} [\text{m/s}]$
気泡半径	$r = 10 [\mu\text{m}]$

4. 実験結果及び考察

図-3に直上水の表面侵入量を示す。実験では、加圧時に下方向の鉛直流が生じ、減圧時に上方向の鉛直流が生じた。これは底泥内の気泡が圧力変動により収縮・膨張しその体積変化に伴い水が輸送されたためと考えられる。

図-4にモデル式(9)による過剰間隙水圧分布の計算結果を示す。加圧開始時と減圧終了時の過剰間隙水圧を比較して差が0.5%以下に収まるまで計算した。このとき過剰間隙水圧が安定したとみなした。図-4(A)に加圧時を、図-4(B)に減圧時を示した。底泥の深さ方向に、圧力の伝達の遅れが生じること、300cm以下の点ではほとんど過剰間隙水圧が変化しないことがわかった。

1周期目の過剰間隙水圧分布をモデル式(10)に与え、直上水の表面侵入量を計算した(図-3)。実験開始8時間まで下方向の鉛直流が生じ、その後上方向の鉛直流が生じた。実験値に比べ計算値は、緩やかな変化を示した。過剰間隙水圧が安定するまで20周期以上の圧力変動を必要としたが、1周期目の圧力変動において表面侵入量を測定したためと考えられる。

5. おわりに

本研究では、実験により河口域の底泥内の圧力を変動させることで、底泥-直上水間に鉛直流が生じていることを確認した。さらに、モデルにより過剰間隙水圧を計算し、底泥の深さ方向に圧力の伝達が遅れることを確認した。

水の表面侵入量は実測値と計算値に差が生じた。過剰間隙水圧が安定するまで繰り返し圧力変動を与え、水の表面侵入量を測定すること、また、高精度の実験にはさらに深い点までの底泥を使用することが必要である。

今後は、水輸送現象に引き続き、これに伴う物質輸送現象を把握し、人工的に底泥内の気泡量を増加させるなどして直上水から底泥内への侵入量を増加させることより、底泥による自然浄化機能を有効利用することを考えるなどを行っていく予定である。

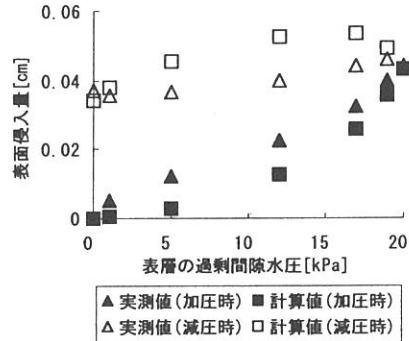


図-3 水の表面侵入量

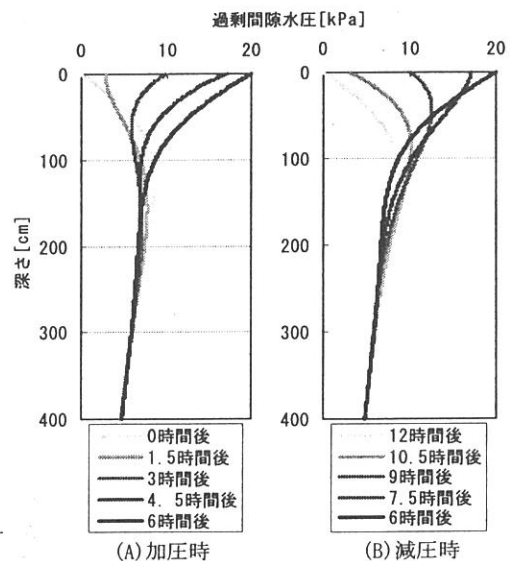


図-4 過剰間隙水圧分布