

水域における浸透性底質中の圧力伝達

大分高専専攻科	学生会員	山本俊介
大分高専	正会員	東野 誠
九州工業大学	正会員	鬼束幸樹

1. はじめに

河川や湖沼等の水域の水環境や生態系を考えるに際して、底層部での溶存酸素(DO: Dissolved Oxygen)の収支は極めて重要である。一例として、河川でのアユやサケの産卵を想起すれば、卵は河床で孵化し、稚魚はそこで生育するが、それにあたっては十分な酸素が不可欠であり、酸素の欠乏は卵や稚魚に致命的な影響を及ぼす。この水域底層部での酸素の収支は、底質、あるいは河床直上での流水から底質や河床表面へのDOの移動速度と、底質内部でのDOの移動、および消費速度によって決まる。上述の底質内部でのDOの移動は、従来、直上の流れ場の影響を受けないと考えられてきた。著書らは湖沼・貯水池等の閉鎖性水域で、底泥内部での物質移動は底泥表面直上の流れ場(乱れ)の影響を受けると考え、底泥直上の乱れを単一の正弦波と仮定して底泥内部への乱れの伝播について数値実験による検討を行った。その結果、乱れが深さとともに底泥の粘性によって減衰し、界面から十分下方ではその影響は殆んどなくなることを明らかにした¹⁾。本研究では、浸透性、すなわち砂や細砂で構成される底質が湖沼や貯水池底部に堆積している状況を想定し、水表面に生じた擾乱(水面の上下動)による底質表面での圧力変動の底質内部への伝播と、それによるDO等の物質移動に及ぼす影響を調べた。

2. 基礎式

図-1のように、浸透性底質表面を原点として鉛直上向きにy軸をとる。水表面に生じた変動に起因する底質表面の圧力変動の底質内部への伝播は、底質を透水性の砂と仮定すれば、連続の式とDarcy則によって表現される。ここでは、上述の圧力変動の伝播と砂・粘土の圧縮・圧密との類似性に着目して検討を行う。水と砂や粘土等の底質材料の非圧縮性を仮定し、底質中の間隙は完全に水で満たされていると考えれば、底質内部での流れ場に対する連続式は次式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{\rho g m_v} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad (1)$$

ここに、 h は過剰間隙水圧に対する水頭、 k は透水係数、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。また、 m_v は底質の体積圧縮係数であり、密な砂では $C_v \approx 1800 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{kgf}$ ($\approx 184 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{N}$)、ゆるい砂の場合には $C_v \approx 9000 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{kgf}$ ($\approx 918 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{N}$)とされている²⁾。前述のように、本研究では透水性の砂質土からなる底質を想定しており、以下では $C_v \approx 5000 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{kgf}$ ($\approx 510 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{N}$)として解析を行う。

境界条件を底質表面での圧力振動、すなわち、

$$h(t, 0) = h_0 \cdot \cos \omega t = h_0 \cdot \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (2)$$

$$h(t, \infty) = 0 \quad (3)$$

とし、 $a = k / \rho g m_v$ とすれば、Stoke's second problem(振動平板の流れ)³⁾とのアナロジーより $h(t, y)$ の解は次式で与えられる。

$$h(t, y) = h_0 \cdot e^{-\left(\frac{\omega}{2a}\right)^{\frac{1}{2}} y} \cdot \cos\left(\omega t - \left(\frac{\omega}{2a}\right)^{\frac{1}{2}} y\right) \quad (4)$$

上式(4)において、 $\omega (= 2\pi / T)$ は角周波数、 T は底質表面での圧力変動の周期である。前述の基礎式(4)より、

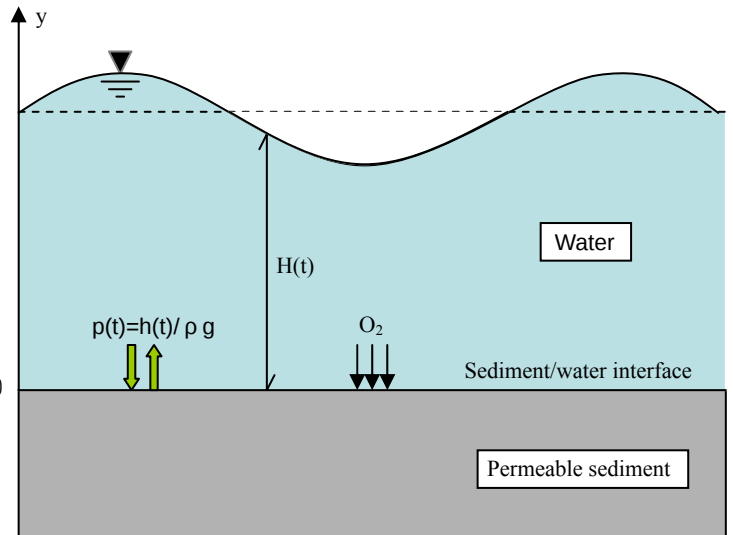


図-1 水面の上下動による底質表面の圧力変動の底質内部への伝播

底泥内部での過剰間隙水圧に対する水頭 h の変化をシミュレートできる。

3. 底質内部への圧力変動の伝播

前述の底質の体積圧縮係数を $C_v = 510 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{N}$, 透水係数を $k = 0.001 \text{ cm/s}$ とすれば $a = 200$ を得る。図-2 は、このようにして $a = 200$, 振幅 $h_0 = 10 \text{ cm}$, 周期 $T = 10 \text{ s}$ とした場合の、前述の式(4)による底質内部での過剰間隙水圧に対する水頭 h の変化の計算結果($t = 0.05 \text{ s}$, 1.5 s , 2.0 s , 2.8 s , 3.5 s , 5.0 s)を示したものである。この図より過剰間隙水圧に対する水頭 h は、底質表面からの距離(深さ)とともに減衰し、表面から 100 cm の深さでは、 $h \rightarrow 0$ となる様子が見て取れる。

上述(2.)のように、底質内部での流速はDarcy則より

$$v = -k \frac{\partial h}{\partial y} \quad (5)$$

であるので、 v の時間平均値(1周期)は

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt = 0$$

である。他方、底質表面の圧力変動の伝播によって生じた底質内部での乱れの強度 $\sqrt{v^2}$ は次式で与えられる。

$$\sqrt{v^2} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T (v - \bar{v})^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} = h_0 k \left(\frac{\omega}{2a} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\left(\frac{\omega}{2a} \right)^{\frac{1}{2}} y} \quad (6)$$

上式(6)による $\sqrt{v^2}$ のシミュレート結果($a = 200$, 振幅 $h_0 = 10 \text{ cm}$)を図-3, 4に示す。図-3は透水係数 $k = 0.001 \text{ cm/s}$ とし、周期 T を 1 s , 10 s , および 100 s と変化させた場合の $\sqrt{v^2}$ の底質内部への伝播を示したものである。 $\sqrt{v^2}$ は深さとともに小さくなり、

底質表面から十分下方では0に漸近するのが確認できる。底質表面での $\sqrt{v^2}$ の値は周期 T が長くなるとともに小さくなる。周期 T が短ければ底質表面での $\sqrt{v^2}$ は大きくなるが、底質表面からの距離とともに急激に減衰する。一方、周期 T が長くなるほど底質深さ方向への変化は緩慢になる。次に、図-4は周期 T を 1 s とし、透水係数 k を 0.01 cm/s , 0.001 cm/s , 0.0001 cm/s と変化させた場合の結果である。図-3と同様、 $\sqrt{v^2}$ は深さとともに小さくなる。また、透水係数 k が大きいほど底質表面での $\sqrt{v^2}$ は大きく、深さとともに急激に減衰する。一方、透水係数 k が小さければ、底質表面での $\sqrt{v^2}$ も小さく、底質深さ方向への変化も小さい。

参考文献

- 1) 東野 誠：底泥内部での分子拡散による物質移動に関する一考察，平成16年度土木学会西部支部研究発表会，2005。
- 2) 松屋新一郎編著：新稿土質工学，山海堂，1989。
- 3) 例えば，日野幹雄：流体力学，朝倉書店，1994。

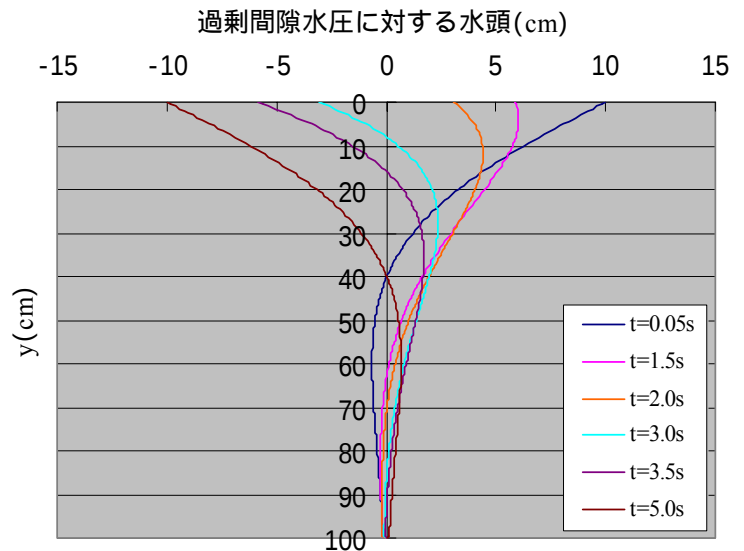


図-2 過剰間隙水圧に対する水頭 h の変化

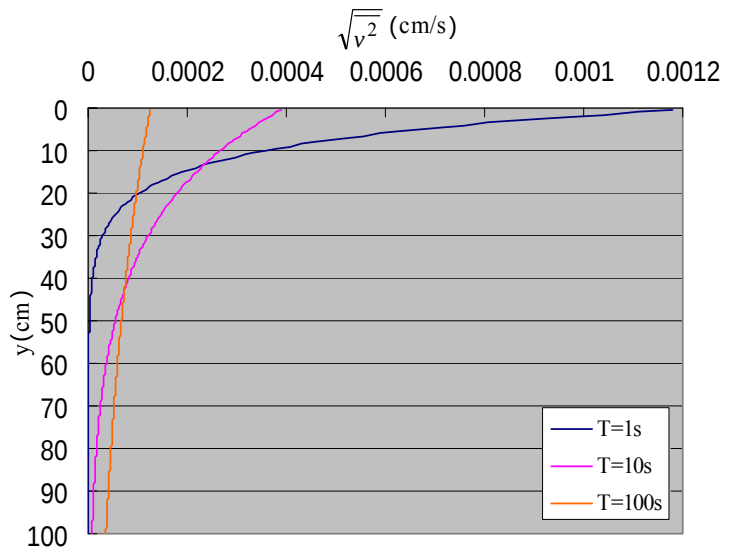


図-3 底質内部での乱れ強度 ($\sqrt{v^2}$) ($k = 0.001 \text{ cm/s}$)

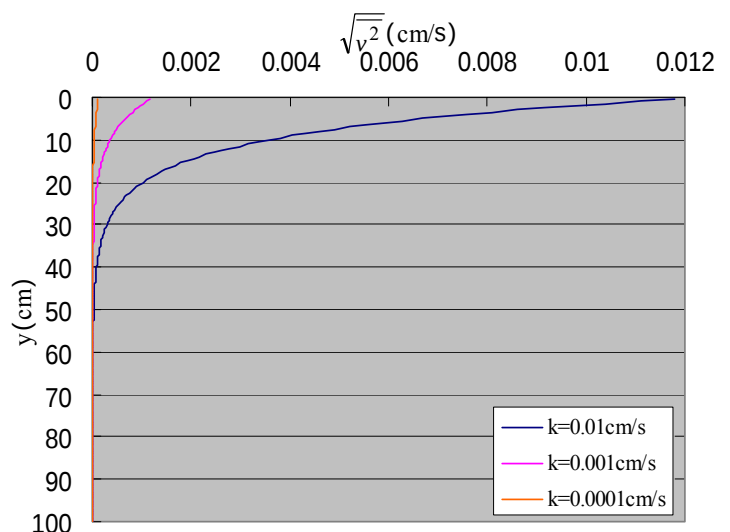


図-4 底質内部での乱れ強度 ($\sqrt{v^2}$) ($T = 1.0 \text{ s}$)