

多孔質堤体で囲まれた水域における 水理諸量の潮汐応答解析

大阪市立大学工学部
大阪市
日本道路公団

正会員 小田一紀
正会員 ○兼岡俊樹
松井秀誠

1. はじめに 近年、沿岸域での海水の水質汚濁が問題になってきており、その改善策として様々な方面で検討されている。このような問題を解決する試みの一つとして潮汐変動を利用した多孔質堤体の生物膜による水質浄化機能に注目し、ある水域を多孔質堤体で囲み波浪・潮汐などの自然のエネルギーを利用してこの機能を高めると共に、この生物膜を栄養源とする食物連鎖機構によって、海洋性生物、特に魚類の増殖を図ろうとする一つの水質浄化・海洋生物増殖システムが提案されている。

本研究では、その一段階としてこのシステムの物理的側面である外水域の潮汐変動による堤体内部および背後水域における水理諸量を線形解から導くことにより堤体諸元との関係を解明しようとするものである。

2. 理論解析

(1) 問題の定式化 図-1に示すように、堤体幅 b で、空隙率 λ 、透水係数 k の様な多孔質材料から構成されている無限長の直立堤が不透過な地盤上に置かれているものとし、その背後の鉛直不透過壁までの長さを l （以後、内水域幅と呼ぶ）、平均水深を h_0 とする。このとき、堤体前方の外水域において角周波数 σ （ $=2\pi/T$ 、 T :周期）、振幅 a の調和的な潮汐変動（以後、外水位変動）を与えたときの内水位変動を考える。

座標系は x 軸を平均水面上に堤体の外水域側の端（以後、堤体前面）を原点として内水域の方向を正に取り、以下の仮定を設けて、堤体内部の流体の運動の基礎方程式を導く。

（仮定）1) 潮汐の慣性力の影響は無視する。 2) 平均水深 h_0 に比べて水位変動量は微小である。 3) 堤体内の水面勾配は緩やかで、そのため流れがほぼ x 軸に平行で堤体内の流速の鉛直分布は一樣である（Dupuit-Forchheimerの準一様流の仮定）。 4) 堤体内の流れは層流である。 5) 内水域の水位は水域のいたるところで等しいものとする。

図-1において、 η_i は外水位変動、 η_t は内水位変動、 b は堤体幅、 h は堤体内水位、 h_i は外水域の水深、 h_0 は平均水深、 h_t は内水域の水深。堤体内流体の運動方程式および連続方程式は次式で与えられる。

$$\text{運動方程式} : u = -k \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

$$\text{連続方程式} : \lambda \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (u h)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 u は堤体内流速。

したがって、式(1)を式(2)に代入し、仮定2)より、非線形項のうち $(\partial h / \partial x)^2$ は省略され、また、 $k h (\partial^2 h / \partial x^2) \approx k h_0 (\partial^2 h / \partial x^2)$ と近似できるので、式(1)、(2)および、 $h = h_0 + \eta$ の関係より、結局基礎方程式は線形的な形で次のように表される。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = k h_0 \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (3)$$

(2) 境界条件 境界条件の一つは、堤体前面における水位変動 $\eta_{x=0}$ が次式のような単調和潮で表現される外水位変動と等しいとするものである。

$$\eta_{x=0} = a \exp(i \sigma t) \quad (4)$$

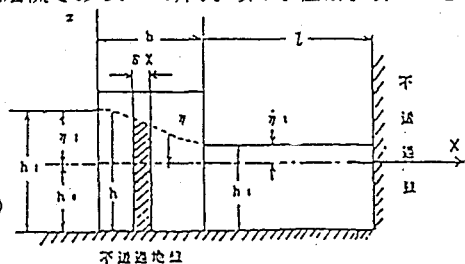


図-1 座標系

Kazuki ODA, Tosiki KANEOKA and Hidenobu MATUI

ここに、 a_i : 外水位変動の実振幅、 σ : 角周波数($=2\pi/T$)、 T : 周期、 $i = \sqrt{-1}$ 。

次に、堤体背面における水位が内水位に一致するとおくことが、2つめの境界条件であり、 $h_{x=b} = h_i$ (5) さらに微小時間 δt の間に堤体背面から内水域に流入する流体は、その間の内水域の水位上昇 δh_i をもたらすとする連続条件式 $(uh)_{x=b} \delta t = l \delta h_i$ が成り立つ。これから上述と同様 $h_i \approx h_o$ と近似し、式(1)を代入すると以下ようになる。

$$\frac{dh_i}{dt} = - \frac{kh_o}{l} \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=b} \quad (6)$$

(3)基礎方程式の解 基礎方程式(3)の解を変数分離形で表し、境界条件式(4),(5)の下で内水域における連続方程式(6)と連立で解くことによって、堤体内水位変動 η は式(7)のように求めることができる。

$$\eta = \frac{a_i \exp\{\beta(x-b)\}}{S} \{A \cos(\beta x + \sigma t) + B \sin(\beta x + \sigma t)\} + \frac{a_i \exp\{-\beta(x-b)\}}{S} \{C \cos(\beta x - \sigma t) - D \sin(\beta x - \sigma t)\} \\ = a_i \sqrt{X^2 + Y^2} \cos(\sigma t + \epsilon t) \quad (7)$$

ここで、 A, B, C, D, S, β は定数であり、 X, Y は定数 A, B, C, D, S, β を含む x の関数である(紙面の関係で詳細は省略する)。

また、内水域の水位変動量 η_i は式(7)に $x=b$ を代入することによって求められる。

3. 水理諸量の潮汐応答 2. で求めた解を用いて水理諸量の計算を行った結果、一般に、内水位変動は外水位変動に対して振幅が減少し、位相の遅れを生じ、内水位と外水位が等しくなる時刻とがほぼ一致する。この様な傾向は現地海岸でも観測されている。

また、2. で求めた解より無次元量として $b\beta$ と $b\gamma$ を取り上げてその無次元量を変化させて、内水域の水位、堤体背面流速の変動を調べると図-2および図-3に示すごとくである。

(ここで、 $\beta = \sqrt{\sigma \lambda / 2kh_o}$ 、 $\gamma = \sigma l / kh_o$)

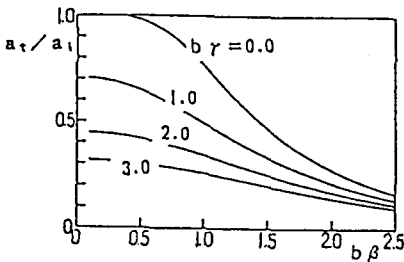


図-2 内水位の無次元振幅

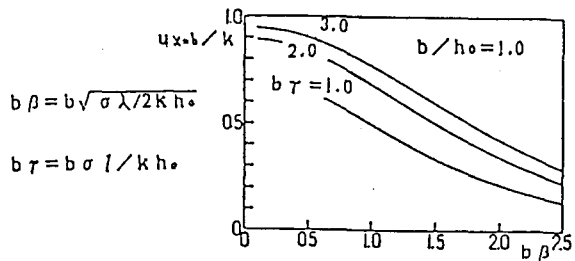


図-3 無次元背面流速

さらに、 $b\beta$ 、 $b\gamma$ は相対堤体幅 b/h_o 、相対内水域幅 l/h_o 、無次元透水係数 kT/h_o で構成されており、図-2 から、内水域の振幅 a_i は b/h_o 、 l/h_o が大きくなると減少し、 kT/h_o が大きくなると増加することがわかる。また図-3 から、 $b/h_o = 1.0$ で一定にすると、堤体背面流速は kT/h_o が大きくなるほど減少し、 l/h_o が大きくなるほど増加することがわかる。堤体内水面形の時間変動、内水位の位相差なども計算したが紙数の関係上講演会当日に解説する。

結局、2つの無次元量に含まれる b/h_o 、 l/h_o 、 kT/h_o の3つのパラメーターによって内水域の振幅と堤体背面での流速は一意的に決定されることがわかる。

4. まとめ 本研究では、多孔質堤体によって囲まれた水域および堤体内部における流体の運動を解析する際に、いくつかの仮定を用いることによって線形解を導き、その解により水理諸量の潮汐応答の解析を行った。その結果、水理量である内水位変動の振幅および堤体背面流速などの潮汐応答は、 b/h_o 、 l/h_o 、 kT/h_o の値によって一意的に決定されることを示した。