

中海本庄工区潮通しパイプについて

上野博芳

平成10年5月15日

1 潮汐エネルギーを利用した海水制御工 - 海水交流によるモデル

二つの海域の水が潮汐によって交互に行き来する現象を海水交流という。ここでは湾と外海が一つの水路で連結しているモデルを用いて、海水交流による水交換の理論的背景と計算方法について簡単に述べる。

1.1 海水交流に関する基礎方程式系

最初に基礎方程式系について簡単にまとめてしまうと、海水の外海における振動方程式を条件として、湾口における運動方程式と連続の式から湾内における振動方程式を求め、海水交換に係わる諸量を算出しようとするものである。

ここで外海潮位の振動が既知であるとする。すなわち外海水位 h_0 が周期 T 、振幅 ζ_0 で正弦運動をしているとすると、
→ 参照 (4.28)

$$h_0 = \frac{\zeta_0}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (1)$$

このとき湾内の水位 h 、振幅 ζ 、位相遅れ ΔT を求めることになるが、これは基礎方程式から変数変換した結果である。

まず湾面積 S 、湾口の通水断面積 A 、平均深さ D 、長さ L 、海水密度 ρ 、重力加速度 g とする。湾口流量 q は、流速 v 、水路の流量係数 c とすると、
→ 参照 (4.29)

$$\begin{aligned} q &= Av \\ &= cA\sqrt{2g|h_0 - h|} \end{aligned} \quad (2)$$

となり、これは湾口での運動方程式を表わす。

次に湾内の水量の変化率と湾面積を乗じたものは、移動した水量に等しいから、連続の式は、
→ 参照 (4.30)

$$S \frac{dh}{dt} = Av \quad (3)$$

この二つの式 (2)、(3) に対して、未知数が v 、 h の2個となる。これらを式 (1) を条件として解けばよい。しかしながらこのまま式展開しても非線型微分方程式となり、容易に厳密解は得られない。そこで実測例によると、外海の潮位曲線と湾内の潮位曲線との間に次の関係が認められることから、
→ 参照 (4.31)

$$h = \frac{\zeta}{2} \sin \frac{2\pi}{T}(t - \Delta T) \quad (4)$$

式 (2)、(3) の解の形をこの式 (4) で与えて、振幅 ζ と位相遅れ ΔT を求めることにする。

解の導出は省略し、結果だけまとめると以下のものである。
→ 参照 (4.38)

$$\frac{\zeta}{\zeta_0} = \sqrt{\frac{\sqrt{1+4K}-1}{2K}} \quad (5)$$

但し、

→ 参照 (4.37)

$$K = \left(\frac{2}{\beta}\right)^4 \left(\frac{S}{cA}\right)^4 \left(\frac{\zeta_0}{gT^2}\right)^2 \quad (6)$$

→ 参照 (4.36)

$$\beta = 0.76 \quad (7)$$

また、

→ 参照 (4.32)

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} \frac{\zeta}{\zeta_0} \quad (8)$$

これを見ると、 ζ と ΔT は K で決定される。そこで「水産土木学」では、

$$K_1 = \frac{S}{cA} \quad (9)$$

$$K_2 = \frac{\zeta_0}{gT^2} \quad (10)$$

とおき、これを用いて $\frac{\zeta}{\zeta_0}$ 、 $\frac{\Delta T}{T}$ の値をグラフ図 4.12、図 4.13 に示して計算の簡便化をはかっている。

1.2 計算フロー

次に実際の計算手順についてまとめておく。計算しようとする場合は必要なパラメータを準備し、以下の手順にしたがって計算すれば良い。

(1) 流量係数 c を次のいずれかの式を用いて求める。

→ 参照 (1.52)

$$c = \left(K_f \left(\frac{A}{A_f}\right)^2 + K_e \left(\frac{A}{A_e}\right)^2 + K_o \left(\frac{A}{A_o}\right)^2 + \dots \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

→ 参照 (1.53)

$$c = \left(1.4 + 0.02 \frac{l}{D^{\frac{4}{3}}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

(2) K_1 、 K_2 を求める。

$$K_1 = \frac{S}{cA} \quad (13)$$

$$K_2 = \frac{\zeta_0}{gT^2} \quad (14)$$

(3) K_1 、 K_2 を使い、図 4.12 (P318) から $\frac{\zeta}{\zeta_0}$ を読み取り、振幅 ζ を求める。

(4) K_1 、 K_2 を使い、図 4.13 (P319) から $\frac{\Delta T}{T}$ を読み取り、位相遅れ ΔT を求める。

(5) 海水交流に関する諸量は、平均流速 \bar{v} 、時刻 t の流速 v 、一回の干満での流出入流量 Q とすると、

→ 参照 (4.39)

$$\bar{v} = \frac{2S\zeta}{AT} \quad (15)$$

$$v = \frac{\bar{v}}{\beta} \sin^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2\pi}{T} t + \delta \right) \quad (16)$$

但し、

$$\begin{aligned}\beta &= 0.76 \\ \delta &= \sin^{-1} \frac{\zeta}{\zeta_0} = \frac{2\pi}{T} \left(\frac{T}{4} - \Delta T \right) \\ Q &= S\zeta\end{aligned}\tag{17}$$

(6) 内海がその面積に対して水深が小さい場合や複数の水路でつながっている場合は、この手法の修正や拡張が必要となる。

2 基本的なモデルの計算例

計算例として本庄工区に現在の潮通しパイプを1本設けた場合を仮定し、前項の計算フローに従って実際に計算を行ってみる。

2.1 計算条件

外海の潮位振幅を0.4m、周期12時間と仮定し、内湾面積1700ha、潮通しパイプの長さ26m、基準水深1.9m(直径2.5m、上方に0.6mの空隙)から、各パラメータの値は以下のようになる。

$$\begin{aligned}\zeta_0 &= 0.4 \text{ (m)} \\ T &= 12 \text{ (hr)} = 12 \times 3600 = 4.32 \times 10^4 \text{ (sec)} \\ S &= 1.7 \times 10^7 \text{ (m}^2\text{)} \\ l &= 26 \text{ (m)} \\ A &= 4.00 \text{ (m}^2\text{)} \\ g &= 9.8 \text{ (m/s}^2\text{)}\end{aligned}\tag{18}$$

2.2 計算例

(1) 流量係数 c 求める。(p45 ~ p58 参照)

- 水路を要素に分解して、各々の損失水頭の和から求める方法 → 参照(1.44) ~ (1.52)
この手法は、水路を入口の断面急変部、中間の流路部分、出口の断面急変部に分け、各々の損失係数 K_e 、 K_f 、 K_o から c を求める。ここで基準断面積 A 、各部の断面積 A_e 、 A_o である。但し $A = A_e = A_o$ ととる。

$$c = \left(K_f \left(\frac{A}{A_f} \right)^2 + K_e \left(\frac{A}{A_e} \right)^2 + K_o \left(\frac{A}{A_o} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}}\tag{19}$$

まず入口部は表1.3(p52)の角端から、

$$K_e = 0.5\tag{20}$$

次に流路部は式(1.44)(p52)から、

$$K_f = \frac{2gn^2l}{R^{\frac{4}{3}}}\tag{21}$$

ここでマンニングの粗度係数 n は、表1.2(p51)の鋼(波状板の平均値)より、

$$n = 0.025\tag{22}$$

をとった。また動水半径 R は、 $S = 5.29m$ を断面を囲む接触面長 (潤辺長) といい、

$$\begin{aligned} R &= \frac{A}{S} \\ &= \frac{4.00}{5.29} = 0.756 \end{aligned} \quad (23)$$

で表わされる。従って、

$$\begin{aligned} K_f &= \frac{2 \times 9.8 \times 0.025^2 \times 26}{0.756^{\frac{4}{3}}} \\ &= 4.62 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

最後に出口部は式 (1.51) (p55) から、

$$K_e = 1.0 \quad (24)$$

以上より

$$\begin{aligned} c &= (0.5 + 4.62 \times 10^{-1} + 1.0)^{-\frac{1}{2}} \\ &= 7.14 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

● 近似法

→ 参照 (1.53)

$$c = \left(1.4 + 0.02 \frac{l}{D^{\frac{4}{3}}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (25)$$

ここで D は平均水深であるが、これは動水半径に相当するので、前項から $D = R = 0.756$ を用いて、

$$\begin{aligned} c &= \left(1.4 + 0.02 \times \frac{26}{0.756^{\frac{4}{3}}} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ &= 6.81 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

以上のように、この例ではどちらの方法を採用しても大差ない。この後については $c = 7.14 \times 10^{-1}$ を用いることにする。

(2) K_1 、 K_2 を求めると、

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{S}{cA} \\ &= \frac{1.70 \times 10^7}{(7.14 \times 10^{-1}) \times 4.00} \\ &= 5.95 \times 10^6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_2 &= \frac{\zeta_0}{gT^2} \\ &= \frac{0.4}{9.8 \times (4.32 \times 10^4)^2} \\ &= 2.11 \times 10^{-11} \end{aligned}$$

(3) 図 4.12 から $\frac{\zeta}{\zeta_0} = 1.39 \times 10^{-2}$ を読み取り (実際には読み取れないので次項参照)、

$$\begin{aligned} \zeta &= \zeta_0 \times (1.39 \times 10^{-2}) \\ &= 0.4 \times (1.39 \times 10^{-2}) \\ &= 5.56 \times 10^{-3} (m) \end{aligned}$$

となり、振幅はわずか 5.56mm でしかない。

(4) 同様に図 4.13 から $\frac{\Delta T}{T} = 2.48 \times 10^{-1}$ を読み取り、

$$\begin{aligned}\Delta T &= T \times (2.48 \times 10^{-1}) \\ &= 12 \times (2.48 \times 10^{-1}) \\ &= 2.97 \text{ (hr)}\end{aligned}$$

(5) 海水交流に関する諸量は、

$$\begin{aligned}\bar{v} &= \frac{2S\zeta}{AT} \\ &= \frac{2 \times (1.70 \times 10^7) \times (5.56 \times 10^{-3})}{4.00 \times (4.32 \times 10^4)} \\ &= 1.09 \text{ (m/s)} \\ Q &= S\zeta \\ &= (1.70 \times 10^7) \times (5.56 \times 10^{-3}) \\ &= 9.45 \times 10^4 \text{ (m}^3\text{)}\end{aligned}$$

2.3 例外 - グラフから求められない場合

内海の振動方程式のパラメータが図 4.12、図 4.13 から求められない場合は、式 (6) によって K をもとめ、式 (5)、(8) を用いて $\frac{\zeta}{\zeta_0}$ 、 $\frac{\Delta T}{T}$ を計算すればよい。前項の計算例のばあいでは、以下のようになる。

$$\begin{aligned}K_1 &= 5.95 \times 10^6 \\ K_2 &= 2.11 \times 10^{-11} \\ K &= \left(\frac{2}{\beta}\right)^4 \left(\frac{S}{cA}\right)^4 \left(\frac{\zeta_0}{gT^2}\right)^2 \\ &= \left(\frac{2}{\beta}\right)^4 (K_1)^4 (K_2)^2 \\ &= \left(\frac{2}{0.76}\right)^4 (5.95 \times 10^6)^4 (2.11 \times 10^{-11})^2 \\ &= 2.68 \times 10^{-2} \\ \frac{\zeta}{\zeta_0} &= \sqrt{\frac{\sqrt{1+4K}-1}{2K}} \\ &= \sqrt{\frac{\sqrt{1+4 \times (2.68 \times 10^{-2})}-1}{2 \times (2.68 \times 10^{-2})}} \\ &= 1.39 \times 10^{-2} \\ \frac{\Delta T}{T} &= \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} \frac{\zeta}{\zeta_0} \\ &= \frac{1}{2\pi} \cos^{-1}(1.39 \times 10^{-2}) \\ &= 2.48 \times 10^{-1}\end{aligned}$$

3 中海潮通しパイプの場合 - 応用編

中海潮通しパイプの場合は、対象水域が複数の水路を通じて外海と接続しており、専門委員会での中村先生の発言から「水産土木学」[1] の例 4.6 (P342) に該当すると考えられる。ここではこの例に基づいて解説する。

3.1 基本的な考え方

対象水域が複数の水路を通じて外海と接続している場合は、水路の流量係数を地形条件から算出することができない。この場合は対象水域の内外潮位を同時観測し、さらに現況が新水路のみで外海と接続されていると仮定して、観測データから逆に仮想水路の通水断面積を求める。新水路がこれに加わることになるので断面積を加え、開削後の通水断面積から新たな振幅を求める。海水交流による諸量は式 (15) ~ (17) を用いれば良い。結局この方法では、開削後の水路の評価を仮想水路の通水断面積の増加で行っていると言える。

3.2 計算フロー

(1) 対象水域の面積を S とする。

(2) 対象水域の内外潮位を同時観測し、振幅比と周期をもとめる。→ $\frac{\zeta}{\zeta_0}, T$

(3) 新水路の計画条件(断面形、長さ、水路面形状)から流量係数 c を求める。→ 参照 (1.52)

$$c = \left(K_f \left(\frac{A}{A_f} \right)^2 + K_e \left(\frac{A}{A_e} \right)^2 + K_o \left(\frac{A}{A_o} \right)^2 + \dots \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (26)$$

(4) 対象水域は複数の水路で外海とつながり潮位現象が生じているが、この新水路のみで外海と接続していると仮定し、前項の c と観測データを用いて、現況についてこの仮想水路の通水断面積 A_0 を逆に求める。まず図 4.12 において、 $\frac{\zeta}{\zeta_0}$ と $K_2 (= \frac{\zeta_0}{gT^2})$ から K_1 を読み取る。次に

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{S}{cA_0} \\ A_0 &= \frac{S}{K_1 c} \end{aligned} \quad (27)$$

より A_0 を算出する。

(5) この現況に対し新水路の通水断面積 A_n が増加するので、開削後は、

$$A = A_0 + A_n \quad (28)$$

(6) この A を用いて、

$$K_1 = \frac{S}{cA} \quad (29)$$

と K_2 から再び図 4.12 において $\frac{\zeta}{\zeta_0}$ を読み取り、任意の ζ_0 (例えば大潮時、小潮時等) について新たな振幅 ζ を得る。これが開削後の潮位振幅である。

(7) 開削後の海水交流に関する諸量は、平均流速 \bar{v} 、時刻 t の流速 v 、一回の干満での流出入流量 Q とすると、→ 参照 (4.39)

$$\bar{v} = \frac{2S\zeta}{AT} \quad (30)$$

$$v = \frac{\bar{v}}{\beta} \sin^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2\pi}{T} t + \delta \right) \quad (31)$$

但し、

$$\beta = 0.76$$

$$\delta = \sin^{-1} \frac{\zeta}{\zeta_0} = \frac{2\pi}{T} \left(\frac{T}{4} - \Delta T \right)$$

$$Q = S\zeta \quad (32)$$

参考文献

- [1] 中村充, 「水産土木学」, 工業時事通信社, pp313-345, 1991
- [2] (社)全国沿岸漁業振興開発協会, 沿岸漁場整備開発事業施設設計指針, 平成4年度版, pp259-270