

潮位差を利用した海水交換システムの開発

DEVELOPMENT OF SEA WATER EXCHANGE SYSTEM USING TIDAL DIFFERENCE

足達 康行¹、今藤 勇²、坂本 裕明³、鈴木 康正⁴

Yasuyuki ADACHI, Isamu KONDOU, Hiroaki SAKAMOTO and Yasumasa SUZUKI

- | | | | |
|---|-----|------------------|---------------------|
| 1 | 工博 | 株式会社東京久栄 技術開発部 | (埼玉県川口市芝鶴ヶ丸6906-10) |
| 2 | | 海洋開発コンサルタント (株) | (東京都中央区日本橋3-1-15) |
| 3 | | 株式会社東京久栄 技術開発部 | (埼玉県川口市芝鶴ヶ丸6906-10) |
| 4 | 正会員 | 工博 株式会社東京久栄 上席理事 | (東京都中央区日本橋3-1-15) |

In order to improve the water quality in closed water body like a port, various breakwaters with the seawater exchange function are studied and developed. The seawater exchange function of this case is using the wave energy. On the other hand, for the seawater exchange system using the tidal difference, it is necessary to operate the gate and measure the water level.

Then, authors designed the siphon type check valve. In this paper, the structure of this siphon type check valve is explained and the performance of this seawater exchange system involving this check valve is studied by a numerical analysis. From the results obtained by the numerical calculations, it was confirmed that this system with the siphon type check valve can apply to seawater exchange in a port.

Key Words : Seawater exchange, tidal difference, siphon type check valve

1. はじめに

近年、港湾や漁港など閉鎖性の高い水域における水質・底質悪化が問題となっており、港内の水質・底質を改善するメンテナンスフリーで自然エネルギー利用型の海水交換システムが望まれている。

従来より、海水交換を目的とした防波堤の研究・開発が進められてきているが、これらの多くは波浪エネルギーを利用したものである。^{1),2)} 一方、潮位差を利用した海水交換システムでは、図-1に示すように港湾内に設けた貯水池の流入側および流出側の水路にゲートを設け、満潮時にフレッシュな海水を貯水池に導入し、干潮時に貯水池から港内に放出するものがある。この時、海水交換を効率よく行うためには潮位変動にしたがったゲートの開閉操作が必要となるが、この方法では機械要素を含むためにメンテナンスが必要となる。

そこで本報告では、開閉動作が不要で単純な構造

を有するサイフォン式逆止弁を貯水池の流入側および流出側水路に設置した海水交換システムを提案し、数値計算により本海水交換システムの有効性を確認する。

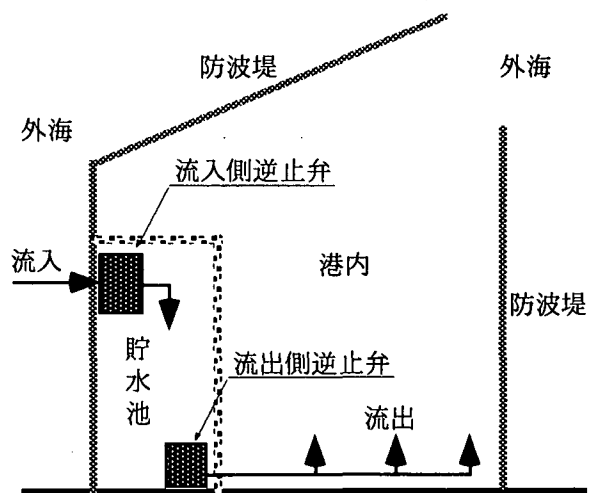


図-1 海水交換システムの概念図

2. 本システムの概要と各部の名称・記号

本報告で提案している、潮位差を利用した海水交換システムの概念図を図-2に示す。図に示すように、海（外海）と貯水池の間に流入用の逆止弁を、貯水池と港内の間に流出用の逆止弁をそれぞれ設置する。流入側の逆止弁は海側と貯水池側にその水面を分離する堰を設け、その上部に空気室（サイフォン管路）およびこの空気室の上部から貯水池内に逆U字空気管（サイフォンブレーカ管）を設けと構造となっている。一方、流出側の逆止弁については、空気室および逆U字空気管の他に、さらにサイフォン形成用のU字空気管を港内側に配管したもので、海側の水位が低下してくると、空気室内の空気がサイフォン形成管より噴出し、空気室（サイフォン管路）内でサイフォンが形成され貯水池内の海水を港内へ放流することができる。

本報告で用いる主な記号は以下の通りである。

・ 共通

z_s : 海の水位（潮位）

z_p : 貯水池の水位

A_p : 貯水池の面積

・ 流入側逆止弁（外海から貯水池へ）

Q_{in} : 流入流量

x_s : 海側空気室の水位

x_p : 貯水池側空気室（池側空気室）の水位

B : 堰の幅

w_{dx} : 堰のレベル

w_{cx} : 逆U字空気管の管端設置レベル

・ 流出側逆止弁（貯水池から港内へ）

Q_{out} : 流出流量

B : 堰の幅

y_s : 港内側空気室の水位

y_p : 貯水池側空気室（池側空気室）の水位

w_{dy} : 堰のレベル

w_u : サイフォン形成管の管端設置レベル

w_{cy} : 逆U字空気管の管端設置レベル

3. 本システムによる海水交換量の定式化

(1) 流入側逆止弁の検討

初期状態として、海および貯水池の水位がともに干潮時の水位の場合から検討していく。

・ $z_p < w_{cx}$ の場合

この場合は、空気室内の圧力は大気圧に等しいため、海側空気室内のおよび貯水池側空気室（以後、池側空気室）の水位はそれぞれ海および貯水池の水位に等しい。

$$\therefore z_s = x_s, z_p = x_p \quad (1)$$

この状態で海側空気室の水位が上昇してきても、その水位が堰のレベル(w_{dx})に達するまでは海側からの流入はない。

$$\therefore Q_{in} = 0$$

・ $z_s > w_{dx}$ かつ $z_p < w_{cx}$ の場合

上記と同様に空気室内の圧力は大気圧に等しいが、海側空気室の水位が堰のレベル以上になるため海から貯水池に海水が流入する。いま、海側空気室のおよび池側空気室の水位をそれぞれ x_s, x_p とし、この時の流入量を Q_{in} とする。海からの導水路の損失水頭 h_{sx} は次式で与えられる。

$$h_{sx} = f_{sx} \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_{in}}{a_{sx}} \right)^2 \quad (m) \quad (2)$$

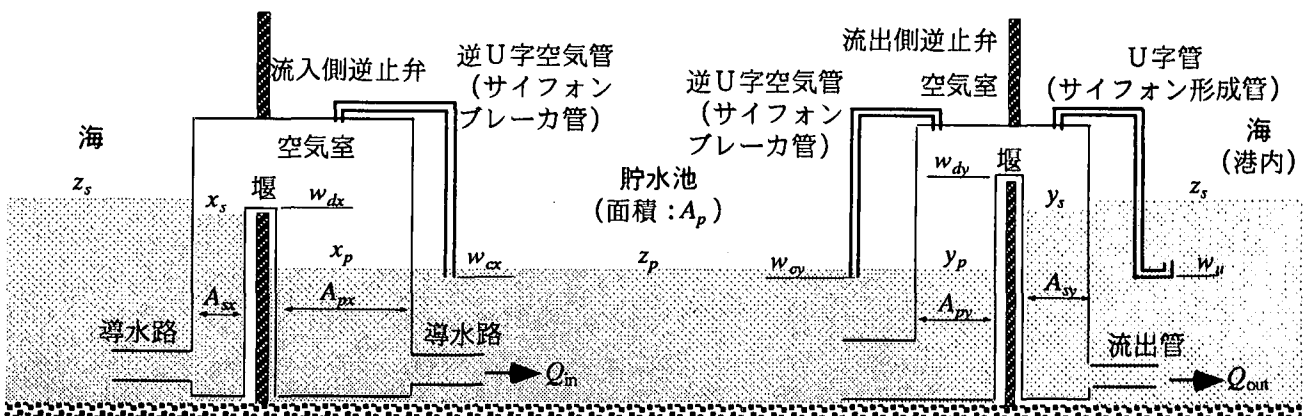


図-2 提案するサイフォン式逆止弁を有する海水交換システムの概要

f_{sx} : 海側導水路損失係数

a_{sx} : 海側導水路通水面積

したがって、海側空気室の水位 x_s は

$$x_s = z_s - h_{sx} \quad (3)$$

であり、このときの堰の越流量は、

$$Q_{in} = CB(x_s - w_{dx})^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (4)$$

C : 流量係数, B : 堰幅 (m)

となる³⁾。(2), (3), (4)式より海側水位 z_s を与えると流入量および海側空気室の水位が得られる。また、この時の、貯水池の水位 z_p および池側空気室の水位 x_p はそれぞれ次式で与えられる。

$$z_p = \frac{1}{A_p} \int_0^t Q_{in} dt \quad (5)$$

$$x_p = z_p + h_{px} = z_p + f_{px} \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_{in}}{a_{px}} \right)^2 \quad (6)$$

f_{px} : 池側導水路損失係数

a_{px} : 池側導水路通水面積

この状態で、貯水池水位が $z_p = w_{cx}$ まで上昇する。

・ $z_p > w_{cx}$ かつ $z_s > w_{dx}$ の場合

貯水池水位が $z_p > w_{cx}$ となると、空気室内の圧力は大気圧よりもこの水位差分だけ上昇する。空気室内の圧力は均一であるため、

$$z_s - (x_s + h_{sx}) = z_p - (x_p + h_{px}) \quad (7)$$

ただし、 h_{sx} および h_{px} はそれぞれ海側および貯水池側導水路の損失水頭である。また、空気室内の空気を非圧縮と仮定し、空気室内の海側および貯水池側の断面積をそれぞれ A_{sx} および A_{px} とすると、空気室内のそれぞれの水位関係は次式で与えられる。

$$A_{sx} x_s + A_{px} x_p = A_{sx} x_{s0} + A_{px} x_{p0} \quad (8)$$

ただし、 x_{s0} および x_{p0} はそれぞれ $z_p = w_{cx}$ の時の海側空気室および池側空気室の水位とする。

(7), (8)式より x_p を消去し x_s について解くと次式が得られる。

$$x_s = \frac{1}{1+n_x} \left\{ x_{s0} + n_x x_{p0} - n_x (z_s - z_p) - n_x (h_{sx} + h_{px}) \right\} \quad (9)$$

ただし、 $n_x = A_{px} / A_{sx}$

堰の越流量は(4)式、海側および貯水池側導水路の損失水頭はそれぞれ(2)および(6)式で与えられ、それらを(9)式に代入して整理すると次式が得られる。

$$x_s = \frac{1}{1+n_x} \left\{ x_{s0} + n_x x_{p0} - n_x (z_s - z_p) - n_x H(x_s) \right\} \quad (10)$$

ただし、

$$H(x_s) = \frac{1}{2g} \left(\frac{f_{sx}}{a_{sx}^2} + \frac{f_{px}}{a_{px}^2} \right) \left\{ CB(x_s - w_{dx})^{3/2} \right\}^2$$

(10)式より、海の水位(潮位) z_s を与えると海側空気室の水位が得られ、この時の流入量および貯水池の水位はそれぞれ(4)および(5)式で与えられる。

・ 海の水位が干潮に向かう場合

海の水位が満潮をすぎて下がってくる時、(10)式で得られる x_s が堰の高さ (w_{dx}) 以下となると海側からの流入は停止する。この時、池側空気室の水位 (x_p) が堰の高さ以下であれば、貯水池から海に逆流することはない。

(2) 流出側逆止弁の検討

流入側逆止弁と同様に、初期状態として干潮の場合から検討していく。

・ $z_p < w_{cy}$ の場合

この場合、流出側逆止弁空気室内の圧力は大気圧に等しい。

$$\therefore z_s = y_s, \quad z_p = y_p$$

この時、海側空気室の水位 (y_s) が堰の高さ (w_{dy}) 以下であれば、海側からの流入はない。

・ $z_p > w_{cy}$ の場合

この場合は、空気室内の圧力が上昇する。海側空気室および池側空気室の水位 y_s および y_p が堰のレベル以下の場合、それぞれ海および貯水池の水位と上記の圧力で釣り合っている。

$$z_s - y_s = z_p - y_p \quad (11)$$

また、先と同様に空気室内の空気を非圧縮と仮定し、海側空気室および池側空気室の断面積をそれぞれ A_{sy} および A_{py} とすると、空気室内のそれぞれの水位関係は次式で与えられる。

$$A_{sy} y_s + A_{py} y_p = A_{sy} y_{s0} + A_{py} y_{p0} \quad (12)$$

ただし、 y_{s0} および y_{p0} はそれぞれ $z_p = w_{cy}$ の時の海側空気室および池側空気室の水位とする。

(11), (12)式より y_p を消去し y_s について解くと次式が得られる。

$$y_s = \frac{1}{1+n_y} \left\{ y_{s0} + n_y y_{p0} - n_y (z_s - z_p) \right\} \quad (13)$$

ただし、 $n_y = A_{py} / A_{sy}$

$$y_p = (z_p - z_s) + y_s \quad (14)$$

したがって、海および貯水池の水位変動とともに、空気室内の水位も(13)、(14)式にしたがって変動する。このとき、これらの空気室内の水位が堰の高さ(w_{dy})以下であれば、流入も流出も生じない。

・ $y_s < w_u$ の場合

貯水池の水位が最大の状態のまま、海(港内)の水位が下がってくると空気室内の水位は(13)、(14)式にしたがって変動し、空気室内の海側の水位 y_s については空気U字管(サイフォン形成管)の設置レベル(w_u)に達する。この時、空気室内の圧力は大気圧よりも高い状態であるため、空気室内の空気が噴出し貯水池側より空気室内に海水が流入し、空気室内で水理的に連結しサイフォンが形成される。この時の貯水池から港内への流出量は、貯水池および海(港内)の水位を z_p および z_s とし、流出管の断面積および損失係数をそれぞれ a_y 、 f_y とすると、次式で与えられる。

$$z_p - z_s = f_y \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_{out}}{a_y} \right)^2 \quad (15)$$

貯水池の水位はこの流出により低下し、 w_{cy} 以下になるとサイフォンが切れ流出は停止する。したがって、貯水池の最低水位は

$$z_{p,min} = w_{cy}$$

となる。この時、空気室内の水位は海および貯水池の水位にそれぞれ等しくなる。

(3) 海水交換量

以上に示すように、流入側および流出側逆止弁の各レベルを適切に設定することにより、海水交換を実現することができる。1周期の潮位変動に対する海水交換量は貯水池の最大および最小水位より、

$$Q = A_p(z_{p,max} - z_{p,min}) \quad (m^3) \quad (16)$$

となる。

4. 計算例

(1) 港内海水交換の数値計算例

ここでは図-1に示すように、港内に貯水池を設けた場合の海水交換量の計算例を示す。計算条件を以下に示す。

- ・ 潮位： $z_{s,max} = 2.0$ (m), $z_{s,min} = 0.0$ (m)
- ・ 潮位変動周期： $T = 12.0$ (h)

$$\therefore z_s(t) = -\frac{z_{s,max} - z_{s,min}}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{z_{s,max} + z_{s,min}}{2}$$

・ 貯水池の面積： $A_p = 4,000$ (m²)

・ 流入側逆止弁

$$B = 5$$
 (m), $w_{dx} = 0.8$ (m), $w_{cx} = 0.5$ (m)

$$A_{sx} = 10$$
 (m²), $A_{px} = 30$ (m²)

$$a_{sx} = a_{px} = 0.8$$
 (m²), $f_{sx} = f_{px} = 2.5$

・ 流出側逆止弁

$$B = 5$$
 (m), $A_{dy} = 10$ (m²), $A_{py} = 15$ (m²)

$$w_{dy} = 1.0$$
 (m), $w_{cy} = 0.5$ (m), $w_u = 0.4$ (m)

$$a_y = 0.8$$
 (m²), $f_y = 2.5$

この場合の計算結果を図-3に示す。図中、横軸は時間、縦軸は海および貯水池の水位を示す。図より、貯水池水位は海水流入時の導水路における損失水頭の影響により、外海水位より遅れて上昇する。また、貯水池の最大水位は外海水位が下がっても逆止弁効果により保持されている。さらに外海(港内)の水位が下がると、流出側逆止弁においてサイフォンが形成され、貯水池の水位は急激に降下する。この結果より、本計算例では外海潮位差2.0mに対して、貯水池水位差は1.15mであり、1周期(12h)あたりの海水交換量は、

$$Q = A_p(z_{p,max} - z_{p,min}) = 4,000 \times 1.15 = 4,600 \quad (m^3)$$

となる。例えば、40,000m²で平均水深4.0mの港内に上記の貯水池を設けたとすると、1周期(12h)で約3%の海水が交換できる。

次に、同じシステムを用いて潮位変動を変えた場

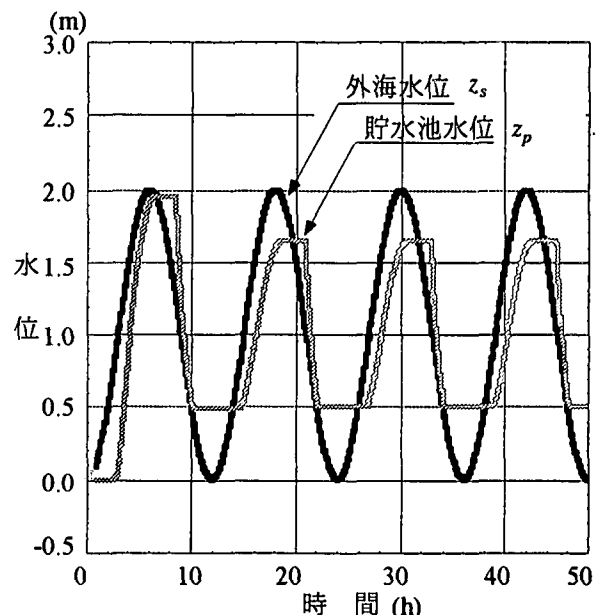


図-3 海および貯水池の水位変動

表-1 潮位変動に対する海水交換量

外海潮位		貯水池水位		海水交換量
H.W.L	L.W.L	最高水位	最低水位	
(m)	(m)	(m)	(m)	(m ³ /12h)
2.2	-0.2	1.85	0.5	5,400
2.0	0.0	1.65	0.5	4,600
1.8	0.2	1.46	0.5	3,800
1.6	0.4	1.27	0.5	3,000

合について海水交換量を計算した結果を表-1に示す。潮位差が小さくなると海水交換量も少なくなってくる。また、本計算例では流出側逆止弁のサイフォンブレーカの設置レベル(w_{cy})を0.5mとしているために、貯水池の最低水位は外海潮位のL.W.L.に無関係となる。

以上の検討では、外海の潮位変動を正弦波で与えたものである。そこで、同じシステムを用いて、実際の潮位変動を与えた場合の計算結果を図-4に示す。ここでは、潮位変動として大潮から小潮までを与えた。本結果より、連続した潮位変動に対しても、本システムで海水交換が可能である。しかしながら、小潮時の干潮のように、潮位が流出側逆止弁のサイフォンブレーカの設置レベル以上の場合には、流出側逆止弁のサイフォンが切れないために、貯水池の水位は外海の水位と連動し有効な海水交換ができなくなる。したがって、本システムを適用する場合は、流出側のサイフォンブレーカの設置レベルに注意する必要がある。

(2) 本システムの応用例

次に、本システムの応用例として、図-5に示すように海岸付近にある池の浄化を考える。この場合は、浄化の対象となる池を貯水池と見なすことにより検討する。計算条件を以下に示す。

- ・潮位： $z_{s,max} = 2.0(m)$, $z_{s,min} = 0.3(m)$
- ・潮位変動周期：12時間
- ・池の面積： $A_p = 60,000 (m^2)$
- ・流入側逆止弁
 $B = 20(m)$, $w_{dx} = 0.8(m)$, $w_{cx} = 0.5(m)$
 $A_{sx} = 30(m^2)$, $A_{px} = 90(m^2)$
 $a_{sx} = a_{px} = 12.6(m^2)$, $f_{sx} = 2.5 f_{px} = 2.5$
- ・流出側逆止弁

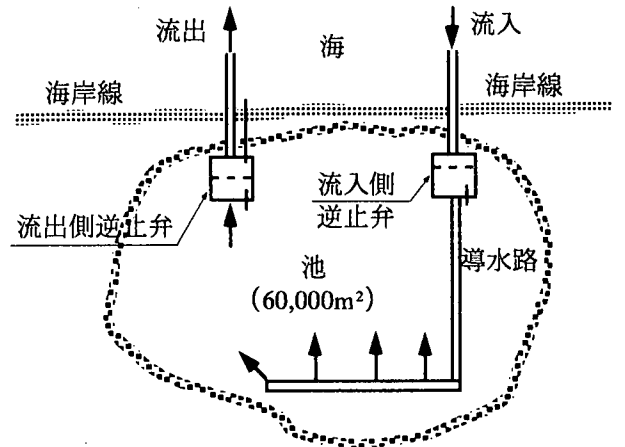


図-5 池の浄化システム

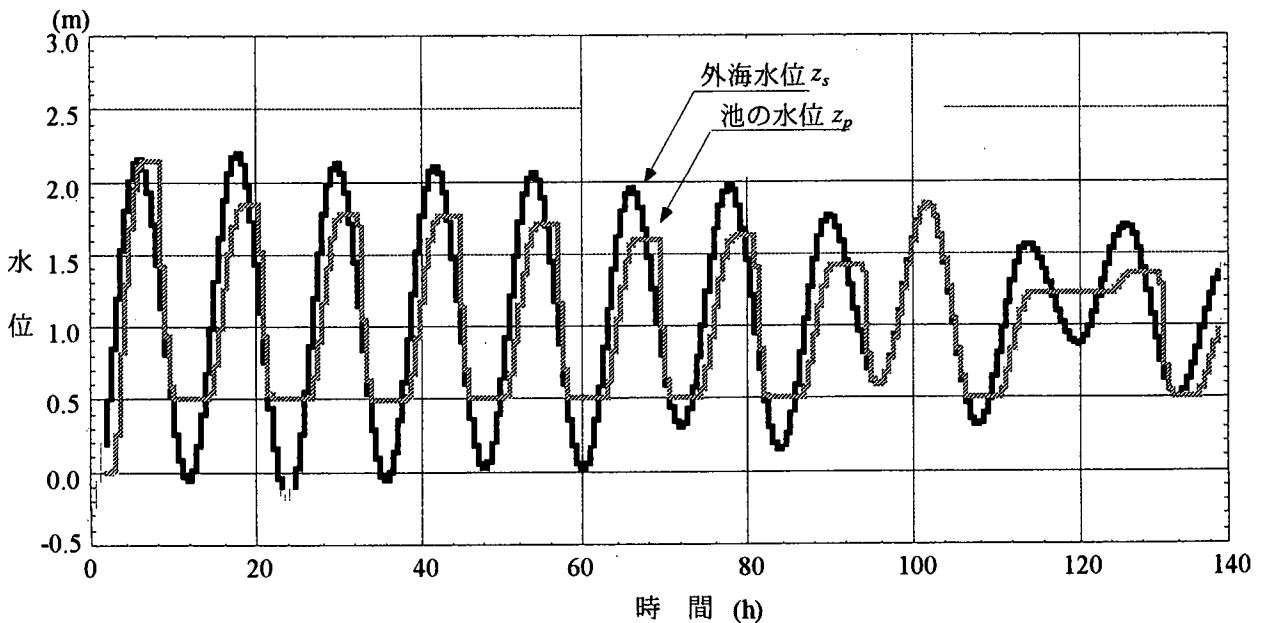


図-4 実際の潮位変動を考慮した場合の水位変動

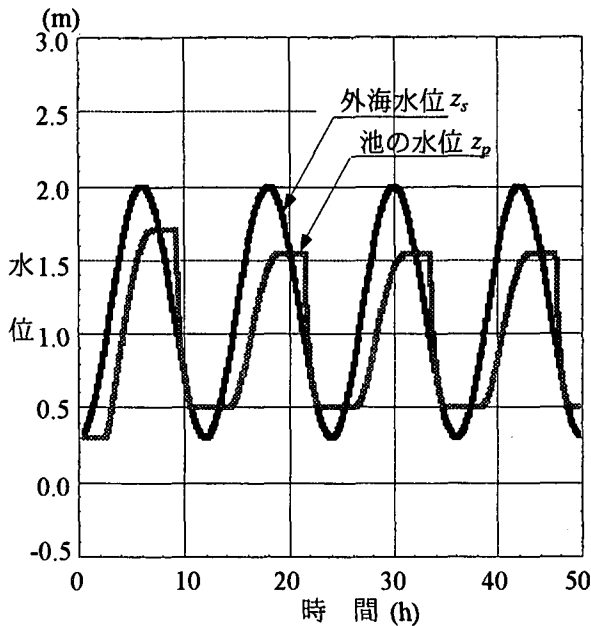


図-6 海および池の水位変動

$$B = 20 \text{ (m)}, A_{sy} = 50 \text{ (m}^2), A_{py} = 75 \text{ (m}^2)$$

$$w_{dy} = 1.0 \text{ (m)}, w_{ey} = 0.5 \text{ (m)}, w_u = 0.4 \text{ (m)}$$

$$a_y = 18.8 \text{ (m}^2), f_y = 2.5$$

計算結果を図-6に示す。図中、横軸は時間、縦軸は海および池の水位を示す。この結果より、本計算例では潮位変動1.7mに対して、貯水池水位変動は約1.0mである。したがって、1周期あたりの海水交換量は

$$Q = A_p(z_{p,max} - z_{p,min}) = 60,000 \times 1.0 = 60,000 \text{ (m}^3)$$

となる。池の平均水深を3mとすると1周期の潮位変動で約33%の海水交換が可能となる。さらに、図-5に示すように流入側の導水路を適切に配置することにより、効率のよい池の浄化が可能となる。

5. おわりに

本報告では、サイフォン式逆止弁を用いた潮位差利用の海水交換システムを提案し、その定式化および数値計算を行った。その結果をまとめると以下の

ようになる。

(1) 数値計算により、本システムによる潮位差を利用した海水交換が可能であることを確認した。とくに、流出側逆止弁は貯水池と港内の水位差が大きくなるまで流出することはなく、流出時にはサイフォン効果により短時間に大量に流出する。

(2) 海域の潮位変動については、干潮時の水位がサイフォンブレーカの設置レベル以上だと、有効な海水交換が行われない。一方、サイフォンブレーカの設置レベルを上げると、貯水池の最低水位も上昇するために海水交換量が減るため、適切な設置レベルの検討が必要となる。

(3) 本システムの応用例として、海岸付近の池の浄化を目的とした計算を行った。外海潮位差1.7m、貯水池の面積60,000m²とした場合の池の海水交換量は1周期(12時間)で約60,000m³であり、有効な浄化法であると考えられる。

今後は、水理実験により連続する潮位変動に対する海水交換特性を確認するとともに、交換効率のよい堰および空気管等の設置レベルについての検討を行う。また、実際の港湾規模を想定し、その形状および水質改善まで含めた解析を行い、本システムの有効性を確認する予定である。さらに、港内の貴重な面積を占有する貯水池の有効利用法および貯水池の止水性などの構造様式についても検討していく予定である。

参考文献

- 1) 水野雄三, 谷野賢二, 木村克俊: 海水交換型防波堤に関する水理特性について, 海洋開発論文集, Vol.8, pp.253-258, 1992.
- 2) 川嶋直人, 中村昭男, 早瀬松一: 潮位変動を考慮した海水交換型防波堤の開発, 海洋開発論文集, 第15巻, pp.427-432, 1999.
- 3) 土木学会: 水理公式集, pp.244, 平成11年版.