潮汐により堰を越える流れによる養殖池の水位応答

萩原国宏¹・田中修三²・福井吉孝³・NADJADJI ANWAR⁴

¹正会員 工博 東洋大学教授 工学部環境建設学科 (〒350 埼玉県川越市鯨井中野台 2100)

²正会員 工博 東洋大学助教授 工学部環境建設学科

³正会員 工博 東洋大学教授 工学部環境建設学科

⁴Member of JSCE, Ph. D., Department of Civil Engineering Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS), Surabaya, Indonesia

スラバヤのラモン川に結合している養殖池の現地調査を重ねた結果、養殖池の多くは堰、あるいはゲートで結合していることが分かってきた。ラモン川とそれに結合している養殖池の塩分濃度、水質の変化を知るためには、そのような場合に対応した潮汐運動による養殖池の水位応答を解析しておく必要がでてきた。この報告は、河川と養殖池が堰やゲートで結合している場合の、潮汐による養殖池の水位の応答についての理論式と実験結果をまとめたものである。

Key Words : tidal river, numerical analysis, flow over the weir and gate, response of water level fish pond

1. はじめに

インドネシア (Indonesia) のスラバヤ (Surabaya) 東部のグレスク (Gresik) 地区にあるインドネシアラモン川 (Kali Lamong) に結合している養殖池の水位は、潮汐運動によって変化し、その水位応答はオリフィスや堰を越える流れの非線形方程式によって決定される。オリフィスを流れる養殖池の水位応答はすでに理論解析を行い、その結果は観測データに良く一致し、解析の正しさを証明できた^{1), 2), 3), 4)}。

その後、スラバヤのラモン川に結合している養殖池の現地調査を重ねた結果、養殖池の多くは堰、あるいはゲートで結合していることが分かってきた。

そこで、ラモン川とそれに結合している養殖池の塩分濃度、水質の変化を知るためには、そのような場合に対応した潮汐運動による養殖池の水位応答をも解析しておく必要がでてきた。

この報告は、河川と養殖池が堰やゲートで結合している場合の、潮汐による養殖池の水位の応答についての理論式と実験結果をまとめたものである。なお、本報告は養殖池の塩分濃度の変化を求めることを最終目標としているが、潮汐貯水池を用いて河口閉塞制御を論じた沢井等⁵⁾の論文がある。

図一 養殖池と河川の水位

2. 理論的な検討

(1) 池の概要

ラモン川における養殖池と河川の水位の関係を図一に示す。養殖池と河川は頂部を有する堰で結ばれている。

堰の幅は1.5 mより小さく、深さは1.0 mより浅いものがほとんどである。そこで、堰を越える流量は、川と池の水位応答による流れの方向の変化によって決定されるので、堰を越える流量は本間の公式⁶⁾を使用することにした。

(2) 基礎方程式の誘導

ここでは最も単純な場合の、一つの養殖池が河川に結合している場合を考えた。堰を越える流れには本間の式を適用することにした。

図一の h_1 , h_2 は養殖池と河川の水位であり、堰の高さ h_b を基準としている。 h_b は池の底からの堰の高さ

である。 h_0 は池の底からの河川の平均水位である。

堰を越える流れのパターンは、養殖池から河川へ流れる場合と河川から養殖池へ流れる場合とがあり、それぞれ完全越流型と不完全越流型に分けることができる。したがって、4種類の流れのパターンが存在し、以下の方程式で示すことができる。

$$\frac{2}{3}h_1 > h_2, \quad q = mh_1\sqrt{2gh_1} \quad (1a)$$

$$h_1 > h_2 > \frac{2}{3}h_1, \quad q = m'h_2\sqrt{2g(h_1 - h_2)},$$

$$m' = \frac{3\sqrt{3}}{2}m \quad (1b)$$

$$h_2 > h_1 > \frac{2}{3}h_2, \quad q = m'h_1\sqrt{2g(h_2 - h_1)},$$

$$m' = \frac{3\sqrt{3}}{2}m \quad (1c)$$

$$\frac{2}{3}h_2 > h_1, \quad q = mh_2\sqrt{2gh_2} \quad (1d)$$

ここに、 q は単位幅当たりの流量である。 m は流量係数であり、通常0.35を使用する。

養殖池における連続の方程式は次のように書ける。

$$\frac{dh_1}{dt}A = qB \quad (2)$$

ここに、 A は養殖池の表面積、 qB は河川からの流入流量である。

河川の水位変動は海の潮汐運動に依存し、次のように書くことができる。

$$h_2 = \frac{H}{2}\sin(\omega t) + h_0 - h_b, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

H は潮汐の振幅、 T は潮汐の周期、 h_0 は養殖池の底を基準とした河川の平均水位である。したがって、 h_2 は堰の頂部からの水位変動を与えることになり、堰を越えて流入してくることになる。数値計算では、 $h_2 \geq 0$ 以上で計算している。

(3) 数値計算の方法

数値計算は式(2)を差分化して解くことになるが、その前に潮汐の波高 H で割った形の無次元化した方程式に書き直す。

無次元化した、4つの方程式と連続の式は次のようになる。

$$\frac{2h_1}{3H} > \frac{h_2}{H}, \quad \frac{QT}{AH} = m\alpha\left(\frac{h_1}{H}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (4a)$$

$$\frac{h_1}{H} > \frac{h_2}{H} > \frac{2h_1}{3H}, \quad \frac{QT}{AH} = m'\alpha\frac{h_2}{H}\sqrt{\left(\frac{h_1}{H} - \frac{h_2}{H}\right)},$$

$$m' = \frac{3\sqrt{3}}{2}m \quad (4b)$$

$$\frac{h_2}{H} > \frac{h_1}{H} > \frac{2h_2}{3H}, \quad \frac{QT}{AH} = m'\alpha\frac{h_1}{H}\sqrt{\left(\frac{h_2}{H} - \frac{h_1}{H}\right)},$$

図—2 水位応答と時間

$$m' = \frac{3\sqrt{3}}{2}m \quad (4c)$$

$$\frac{2h_2}{3H} > \frac{h_1}{H}, \quad \frac{QT}{JH} = m\alpha\left(\frac{h_2}{H}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (4d)$$

$$d\left(\frac{h_1}{H}\right) = \frac{QT}{AH}d\left(\frac{t}{T}\right) \quad (5)$$

ここに、 α は

$$\alpha = \frac{B\sqrt{2gH}}{A}T \quad (6)$$

であり、現象を支配するパラメータである。

河川の側岸における堰を越える水位の変動は、式(3)を無次元化して式(7)で与えられる。

$$\frac{h_2}{H} = \frac{1}{2}\sin\left(2\pi\frac{t}{T}\right) + \frac{h_0}{H} - \frac{h_b}{H} \quad (7)$$

計算に際して、一潮汐を12時間、時間刻みを50ステップとしたので、1ステップは0.24時間である。池の面積 A 、堤防の高さ h_b 、堰の幅 B 、潮汐の波高 H を変えて、色々な場合について計算した。

池の水位が負の時は、 h_1 と h_2 は0として計算している。

(4) 計算結果

計算にはルンゲ・クッタ法を用いた。

図—2は水位応答と時間の関係を示したものである。縦軸は無次元化した水位、横軸は位相 ϕ を表している。

河川の平均水位、堤防高、ゲートの幅、流量係数は同じにし、池の面積を $A = 2 \times 10^4 \text{m}^2$, $2 \times 10^5 \text{m}^2$, $2 \times 10^6 \text{m}^2$ にして $\alpha = 0.484, 4.84, 48.4$ の場合について、計算した。

その結果、 α が小さくなると、池の水位の応答は小さく、かつ遅くなる。 α が48.4より大きくなると池の水位の応答は河川と同じになることが分かった。

図—3に河川の水位応答と α の関係を示している。2

図-3 水位応答と α

つのケースについて示しているが、河川の平均水位、ゲート幅、池の面積は同じにしている。縦軸 H は無次元化した水位、横軸は無次元パラメータ α である。 H_{2max} は河川の最高水位であり、すべての α に対して1の値で

表-1 実験条件

	ケース1	ケース2
周期	6種類	6種類
ゲート幅	10 cm	10 cm
波高	8 cm	5.5 cm
堰の高さ	22.5 cm	15 cm
河川の平均水位	21.9 cm	20 cm
池の面積	4種類	4種類

図-4 水位応答と時間

ある。 H_{2min} は河川の最低水位であり、すべての α に対して0の値である。これは、堤防の頂部より河川の水位が低い場合は0としているためである。

H_{1max} は池の最高水位であり、 α が1より大きくなると、池の最高水位もより大きくなる。 H_{1min} は池の最低水位を示しており、 α が1より大きくなると最低水位は下がりはじめ、 α がさらに大きな値になると最低水位は0になる傾向を示している。 H_{1min} が最大になるのは $\alpha=1$ の時である。

さらに、図-3には、 α と河川水位の位相との関係をもグラフで示しているが、波高、ゲート幅、堤防高の組み合わせにより、 H_{1min} が周期遅れで出現することが分かる。

数値計算によって、堰を有する池の水位応答を示すことができた。この応答は、非線形の応答であり、波高、波の周期、池の表面積、堰の幅を含むパラメータ α によって決まることを示すことができた。 α が大きくなると、池の水位は波高と同じくらい大きくなり、 α が小さくなると、池の水位は小さくなる。

3. 模型実験

理論式の数値解析の結果を検討するために、以下のような模型水路による実験を行った。

図—5.1 水位応答と α

図—5.2 位相と α

(1) 模型水路と実験条件

実験に使用した水路は、文献 4) と同様のものであり、長さ 6.0 m、幅 0.1 m のアクリル製の水路である。下流端に河川補給用の貯水槽、潮汐用ゲートを取り付けている。池の面積は水路を仕切ることによって、変更している。

実験ケースを表—1 に示す。周期は 14 秒から 90 秒の間の 6 種類である。池の面積は、100 cm²、200 cm²、300 cm²、600 cm² の 4 種類である。

(2) 実験結果

図—4 にケース 1 の水位応答と時間の関係を示している。

縦軸は水位、横軸は無次元化した時間である。池の面積が 600 cm² の時の波形は非常に小さく読みとることができなかったので省略している。

α が小さくなると、池の水位応答は小さくなり、かつ遅くなることが分かる。このことは、理論解析の図—2 に対応し一致していることが分かる。

図—5.1 にケース 1 の場合の、河川の水位応答と α 、図—5.2 に位相と α の関係を示している。図中の実線は、理論曲線である。実験結果は理論曲線に定性的、定量的に一致しており、理論式ならびに数値解析の正しいことが証明できたと考えている。

4. おわりに

数値計算によって、堰を有する池の水位応答を示すことができた。この応答は、非線形の応答であり、波高、波の周期、池の表面積、堰の幅を含むパラメータ α によって決まることを示すことができた。 α が大きくなると、池の水位は波高と同じくらい大きく、 α が小さくなると、池の水位変動は小さくなる。

模型実験の結果は、数値計算の結果に定性的、定量的に一致しており、本解法の正しいことが証明できたと考えている。

参考文献

- 1) Nadjadji Anwar and Kunihiro Ogihara : Non-linear response of water table in fish Pond by tide, *Proc. of Symposium on coastal, port and rive engineering hosted by ITS Delft, Surabaya, Indonesia, October, 1990.*
- 2) Nadjadji Anwar, Anggrahini, Kunihiro Ogihara and Yoshitaka Fukui : Observation of salt intrusion in the tidal river with fish Ponds, *Proc. of 8th Congress of APD IAHR, pune, India, Octorber, 1992.*
- 3) Nadjadji Anwar, Anggrahini, Kunihiro Ogihara and Yoshitaka Fukui : Analysis on the response of water level in series fish ponds by tidal motion, *Proc. of 25th IAHR Congress, Tokyo, Japan, 1993.*
- 4) 荻原, 田中, 福井, Nadjadji Angrahini : ラモン川の養殖池の水位応答, 土木学会論文集 No. 509/II-30, 1995.
- 5) 沢井健二, 沈 建華 : 潮汐貯水池を用いた河口堆砂制御に関する研究, 水工論文集, 37 巻, pp.729-736, 1993.
- 6) 水理公式集, 土木学会編, 1985.

(1995.9.11 受付)

NUMERICAL ANALYSIS OF WATER LEVEL RESPONSE IN FISH POND BY TIDAL MOTION THROUGH WEIR AND GATE

Kunihiro OGIHARA, Shuzo TANAKA, Yoshitaka FUKUI
and Nadjadji ANWAR

Supply of water to the fish ponds from a tidal river depends on the response of water level in ponds due to the tide motion through the weir and gate. The most simple case is introducing single fish pond connected to a tidal river and the flow over the weir can be applied Dr. M.Homma's equation. The patterns of flows over the weir are four cases. Those are free flow and submerged flow in both directions river to pond and pond to river. This paper is summarized numerical analysis of water level responses in fish ponds using trial data and comparing to the measurement data from model experiment.