

投稿論文 (和文ノート)
**TECHNICAL
NOTE**

ラモン川(Kari Lamong)の養殖池(Fish Ponds)の 水位応答

荻原国宏¹・田中修三²・福井吉孝³・ANWAR NADJADJI⁴・ANGGRAHINI⁵

¹ 正会員 工博 東洋大学教授 工学部土木工学科 (〒350 埼玉県川越市鯨井 2100)

² 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科

³ 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科

⁴ Lecturer of ITS (Institute of Technology Sepuluh Nopember)

⁵ 1st Rector of ITS (Campus of ITS Sukulilo, Surabaya 60111, INDONESIA)

インドネシアのスラバヤ東部を流れるラモン川には多くの養殖池が連結している。この養殖池の存在が、ラモン川の塩水楔をより複雑にしていることが分かったので、本研究所では、ラモン川の潮汐運動による養殖池の水位応答に関する理論解析を行った。養殖池が1つの場合と、2つ連結している場合について解析し、模型実験に良く一致していることより解の妥当性を示すことができた。

Key Words : tidal river, theoretical analysis, 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 (Glesic) 地区にあるラモン川 (Kari Lamong) には海老の養殖池が多数結合されている。代表的な養殖池の規模は図-1 に示している。この地区の工業化に伴い河川水の上水への利用の問題が持ち上がり、スラバヤ工科大学 (Institute of Technology Sepuluh Nopember) の水工研究室と東洋大学の水理研究室との間で共同研究のテーマとして「感潮河川の塩水楔」を取り上げ、現地観測を行った。

その結果、この河川の塩水楔は強混合型の塩水楔である事が判って来た。観測時期が乾期であった事もあるが、ラモン川の周辺にある養殖池の存在がかなり影響していると考えられるに至った。

この報告はこれらの観測のうち養殖池の水位の潮汐による応答について理論的な検討をする為に、水位応答の理論式の確立とその解の妥当性を模型実験の結果との比較をする事によって確認した結果をまとめたものである。

池が一つの場合は既に解を誘導^{1), 2)}してあるので今回、特に養殖池が多段に連結されている場合の解析を行った。

2. 理論的な検討

感潮河川に連結されている養殖池が図-2 の様に多段

に連結されているときの水位応答についての理論解析をする。これは図-1 の現地の養殖池の連結とは異なるが実験によるデータの取得の容易さを考慮し、理論解との整合性を確認する事がまず第一の目的であるため、単純な図-2 のようなタイプをここでは考える。

(1) 基礎方程式の誘導

いま河川の水位を y_0 で表し、養殖池の水位をそれぞれ y_1, y_2, y_3 の様に表す。池の平面積を A_1, A_2, A_3 とし池を相互に連結している結合管の面積を a_1, a_2, a_3 として表す。

連結管を通じての流速は河川を $i=0$ として河川から遠い池に向かって番号を付け、池の水位が奥の池ほど低いとして

$$v_i = c_i \sqrt{2g(y_{i-1} - y_i)} \quad (1)$$

となる。水位の関係と流速の向きについては後で整理することにする。次に養殖池の水位に関する連続の式は、次のようになる。

$$A_i \frac{dy_i}{dt} = a_i v_i - a_{i+1} v_{i+1} \quad (2)$$

(2) 一番奥の池の場合の解

この場合は池が一つの場合に相当している。この場合には式 (2) の右辺第2項は、考えなくて良い。従ってこの池を n 番目の池とすると、 $i=n$ であり式 (1), (2) は次の方程式となる。

$$v_n = c_n \sqrt{2g(y_{n-1} - y_n)} \quad (3)$$

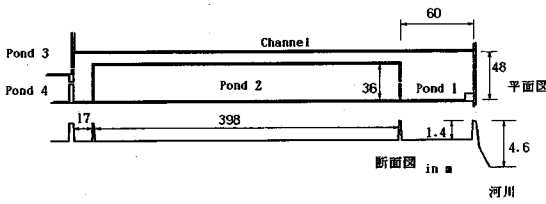


図-1 Lamong川の養魚池の一例

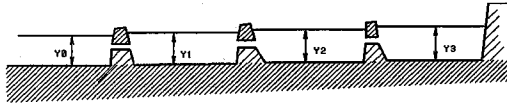


図-2 養殖池と河川との関連図

$$A_n \frac{dy_n}{dt} = a_n v_n \quad (4)$$

この2式から式(5)が導かれ、書き直して式(6)と

$$A_n \frac{dy_n}{dt} = a_n v_n = a_n c_n \sqrt{2g(y_{n-1} - y_n)} \quad (5)$$

$$\left(\frac{A_n}{a_n c_n}\right)^2 \frac{1}{2g} \frac{dy_n}{dt} \left| \frac{dy_n}{dt} \right| + y_n = y_{n-1} \quad (6)$$

なる。ここで第1項の係数を C_n として書き直すと式(7), (8)となる。

$$C_n = \left(\frac{A_n}{a_n c_n}\right)^2 \frac{1}{2g} \quad (7)$$

$$C_n \frac{dy_n}{dt} \left| \frac{dy_n}{dt} \right| + y_n = y_{n-1} \quad (8)$$

この式は非線形の方程式であるので解を求めるのに工夫を要する。いま $n-1$ の池の水位が

$$y_{n-1} = H_{n-1} \cos(\omega t - \phi_n), \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (9)$$

の様に変化するときに養殖池の水位が

$$y_n = H_n \cos(\omega t) \quad (10)$$

の様に変化したとして H_n と ϕ_n を求める。現地観測より ω は同じとしている。式(9), (10)を式(8)に代入して整理する事になる。位相角を河川の方に持たせた方が計算が簡単になるので、そのようにしている。代入した結果の式は次の様になる。

$$\begin{aligned} -C_n (H_n \omega)^2 \sin \omega t |\sin \omega t| + H_n \cos \omega t \\ = H_{n-1} \cos(\omega t - \phi_n) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで絶対値を含む第一の項をフーリエ級数を使って展開し、近似値として第一項を採用する事にする。

$$\sin \theta |\sin \theta| = \frac{8}{\pi} \left[\frac{1}{3} \sin \theta - \frac{1}{15} \sin^3 \theta \dots \right] \quad (12)$$

この第一項をとって式(11)に代入し、右辺と左辺のそれぞれ $\sin \omega t$, $\cos \omega t$ に関する項を等値する事によって次の2式を得る。

$$-C_n (H_n \omega)^2 \frac{8}{3\pi} = H_{n-1} \sin(\phi_n) \quad (13)$$

$$H_n = H_{n-1} \cos(\phi_n) \quad (14)$$

この2式から ϕ_n を消去して H_n を求める式と位相を求める式を出す次の様になる。

$$\left[C_n \omega^2 \frac{8}{3\pi} \right]^2 H_n^4 + H_n^2 - H_{n-1}^2 = 0 \quad (15)$$

$$\tan(\phi_n) = -C_n H_n \omega^2 \frac{8}{3\pi} \quad (16)$$

式(15)より波高は2次方程式の解として

$$H_n^2 = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 4H_{n-1}^2 \left[C_n \omega^2 \frac{8}{3\pi} \right]^2}}{2 \left[C_n \omega^2 \frac{8}{3\pi} \right]^2} \quad (17)$$

が得られる。±の記号の内プラスを取ったのが解である。

この式から判るように応答は潮汐の周期と共に潮汐の大きさにも関係している事が判る。

(3) 養殖池が2つの場合の解

この場合には式(1), (2)に $n=1, 2$ を適応して式を求めると次の式が得られる。

$$v_1 = c_1 \sqrt{2g(y_0 - y_1)}$$

$$v_2 = c_2 \sqrt{2g(y_1 - y_2)}$$

$$A_1 \frac{dy_1}{dt} = a_1 v_1 - a_2 v_2$$

$$A_2 \frac{dy_2}{dt} = a_2 v_2 \quad (18)$$

このとき y_0 は河川の水位変化を表す事になる。これらの式より流速項を消去すると次の2つの式が得られる。

$$\left(\frac{A_2}{c_2 a_2}\right)^2 \frac{1}{2g} \left[\frac{dy_2}{dt} \right] \left| \frac{dy_2}{dt} \right| + y_2 = y_1$$

$$\left(\frac{A_1}{c_1 a_1}\right)^2 \frac{1}{2g} \left[\frac{dy_1}{dt} + \frac{A_2}{A_1} \frac{dy_2}{dt} \right] \left| \frac{dy_1}{dt} + \frac{A_2}{A_1} \frac{dy_2}{dt} \right| + y_1 = y_0 \quad (19)$$

この2つの式を連立にして解く事になる。第1式は先の一番奥の池の場合の解と同じである。すなわち水位の応答の関係を式(20), (21)とすると解は式(22)

$$y_1 = H_1 \cos(\omega t - \phi_1), \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (20)$$

$$y_2 = H_2 \cos(\omega t) \quad (21)$$

$$\tan(\phi_1) = -C_2 H_2 \omega^2 \frac{8}{3\pi}$$

$$H_2^2 = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 4H_1^2 \left[C_2 \omega^2 \frac{8}{3\pi} \right]^2}}{2 \left[C_2 \omega^2 \frac{8}{3\pi} \right]^2} \quad (22)$$

$$C_2 = \left(\frac{A_2}{a_2 c_2} \right)^2 \frac{1}{2g}$$

となる。次に式 (19) の第 2 式の解であるが若干工夫をする必要がある。パラメータ C_1 を導入して書き直すと次の式となる。

$$C_1 = \left(\frac{A_1}{c_1 a_1} \right)^2 \frac{1}{2g} \quad (23)$$

$$C_1 \left[\frac{d}{dt} \left(y_1 + \frac{A_2}{A_1} y_2 \right) \right] \left| \frac{d}{dt} \left(y_1 + \frac{A_2}{A_1} y_2 \right) \right| + y_1 = y_0 \quad (24)$$

ここで

$$y = y_1 + \frac{A_2}{A_1} y_2 = H \cos \omega t \quad (25)$$

と置き式 (20) の場合よりさらに位相を ϕ_2 ずらす事を考える。

$$y_1 = H_1 \cos(\omega t - \phi_1 - \phi_2)$$

$$y_2 = H_2 \cos(\omega t - \phi_2) \quad (26)$$

と置き式 (25) の左辺と右辺を等置する事により次の関係式を得る。

$$H = \left[H_1 \cos(\phi_1 + \phi_2) + H_2 \frac{A_2}{A_1} \cos(\phi_2) \right]$$

$$0 = \left[H_1 \sin(\phi_1 + \phi_2) + H_2 \frac{A_2}{A_1} \sin(\phi_2) \right] \quad (27)$$

が得られる。第 1 式から H が第 2 式から位相角が次の様に求められる。

$$\tan \phi_2 = - \frac{\sin \phi_1}{\cos \phi_1 + \frac{H_2 A_2}{H_1 A_1}} \quad (28)$$

次に方程式 (24) の解を求める。 y_0 を次の様に仮定し式 (26) で位相をずらした式を (24) に代入する。

$$y_0 = H_0 \cos(\omega t - \phi_0) \quad (29)$$

$$-C_1 (\omega H)^2 \sin^2 \omega t + H_1 \cos(\omega t - \phi_1 - \phi_2) = H_0 \cos(\omega t - \phi_0) \quad (30)$$

これの第 1 項にフーリエ級数の展開の 1 項目を適用し時間に関係なく成立する条件より次の関係式を導ける。

$$H_1 \cos(\phi_1 + \phi_2) = H_0 \cos(\phi_0) \quad (31)$$

$$C_1 (\omega H)^2 \frac{8}{3\pi} + H_1 \sin(\phi_1 + \phi_2) = H_0 \sin \phi_0$$

この式から位相角 ϕ_0 を消去すると

$$\left[C_1 (\omega H)^2 \frac{8}{3\pi} + H_1 \sin(\phi_1 + \phi_2) \right]^2$$

$$+ [H_1 \cos(\phi_1 + \phi_2)]^2 = H_0^2$$

となり位相角 ϕ_0 を求める式を出す

$$\tan \phi_0 = \frac{C_1 (\omega H)^2 \frac{8}{3\pi} + H_1 \sin(\phi_1 + \phi_2)}{H_1 \cos(\phi_1 + \phi_2)} \quad (32)$$

が得られる。

(4) 無次元化した解との数値解の誘導

ここで式を整理して無次元化すると共にパラメータの整理をしてみる。河川の水位変化の波高 H_0 で各池の波高を割って無次元化した波高を

$$h_1 = \frac{H_1}{H_0}, h_2 = \frac{H_2}{H_0} \quad (33)$$

と置くことにして、まず池の 1, 2 の間の解は

$$\tan(\phi_1) = -\alpha_2 h_2$$

$$h_2^2 = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 4h_1^2 \alpha_2^2}}{2\alpha_2^2}$$

$$\alpha_2 = H_0 C_2 \frac{8\omega^2}{3\pi} = \frac{8}{3\pi} \left(\frac{A_2}{a_2 c_2} \right)^2 \frac{H_0 \omega^2}{2g} \quad (34)$$

となっている。

河川と池 1 の間の解は位相 ϕ_2 を入れて

$$h = \frac{H}{H_0} = h_1 \left[\cos(\phi_1 + \phi_2) + \frac{h_2 A_2}{h_1 A_1} \cos(\phi_2) \right]$$

$$\tan \phi_2 = - \frac{\sin \phi_1}{\cos \phi_1 + \frac{h_2 A_2}{h_1 A_1}} \quad (35)$$

とし解を求める式は

$$[\alpha_1 h^2 + h_1 \sin(\phi_1 + \phi_2)]^2 + [h_1 \cos(\phi_1 + \phi_2)]^2 = 1$$

$$\tan \phi_0 = \frac{\alpha_1 h^2 + h_1 \sin(\phi_1 + \phi_2)}{h_1 \cos(\phi_1 + \phi_2)} \quad (36)$$

$$\alpha_1 = \frac{8}{3\pi} C_1 H_0 \omega^2 = \frac{8}{3\pi} \left(\frac{A_1}{c_1 a_1} \right)^2 \frac{H_0 \omega^2}{2g} \quad (37)$$

となっている。式 (35), (36) を結び付けて直接解くことは困難であるので数値的に解くことにする。

まず h_1 を仮定して式 (34) より h_2 と ϕ_1 を求める。次に式 (35) から h と ϕ_2 を求める。最後に式 (36) より修正した h_1 と ϕ_0 を求め仮定値と合うまで計算を繰り返す。式 (36) の第 1 式は次の様に変形した方が使いやすい。

$$h_1^2 = 1 - \alpha_1^2 h^4 - 2\alpha_1 h^2 h_1 \sin(\phi_1 + \phi_2) \quad (38)$$

3. 模型実験

模型実験には図-3 に示すような長さ 6 m, 幅 0.1 m のアクリル製の水路を使用した。

下流端に河川補給用の貯水槽を、最下流端に潮汐用ゲートを取り付けている。理論解析より水位応答の傾向は、断面積比 (A_2/A_1) と結合水路の断面積比 (a_2/a_1)、流量係数の比 (c_2/c_1) の組み合わせによって決まってくる事が予想されるので、実験では池の面積は 1000 cm² に固定し、河川と池 1, 池 1 と池 2 の結合水路の面積 (半径を 2, 3, 5 cm) と潮汐の周期を 6 種類変えて全 18 ケースを実施した。

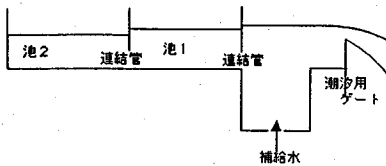


図-3 模型図

4. 理論解析と実験結果の比較

水位の応答の理論曲線と実験結果を図-4に示している。縦軸は無次元化した池1 (h_1) と池2 (h_2) の水位である。横軸はパラメータ α_1 であり、パラメータ比は ($\alpha_2/\alpha_1=1$)、流量係数は ($c_1=c_2=0.9$) の場合である。

図-5に水位の位相を示している。横軸は図-4と同じである。図-4、図-5のいずれも実験結果は理論曲線に良く一致しており、理論解析の正しいことを示している。

5. おわりに

速度と連続の方程式を使用して感潮河川に連結されている養殖池の水位応答についての理論解析と水理実験を行い、理論解の妥当性を示すことができた。気候、地形も日本とは大きな差異のある熱帯のインドネシアのラモン川の河口部に生ずる淡水と塩水の混合現象の特徴を明らかにし、汎用性のある解析モデルを構築して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 荻原国宏, 上原忠保: 「干潟の潮汐による水位変動および

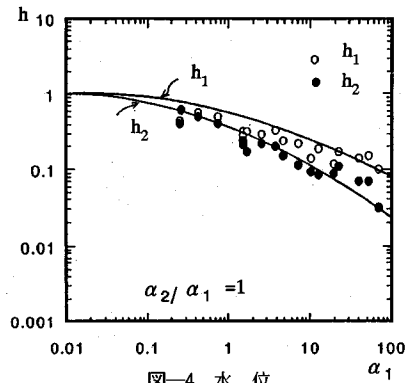


図-4 水位

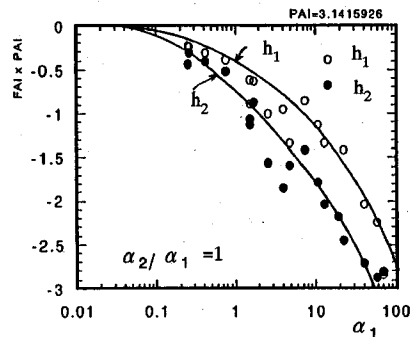


図-5 位相

水位計の波動による水位変動および非線形応答解析, 土木学会論文集, 第399号/II-10, 11, pp.141-146, 1988.

- 2) 荻原国宏, 上原忠保: 「水域の潮汐, 波動による非線形応答」, 東洋大学工学部研究報告, 第23号, pp.19-32, 1987.

(1994.4.19 受付)

RESPONSE OF WATER SURFACE IN FISH PONDS BY TIDAL MOTION IN LAMONG RIVER

Kunihiro OGIHARA, Shuzou TANAKA, Yoshitaka FUKUI,
ANWAR NADJADJI and ANGGRAHINI

Field observation for the salt intrusion in Lamong river in Surabaya, Indonesia has been continued by the teams of Hydraulics in ITS and Toyo University. This research has been done under the cooperative research between STS and Toyo University since 1990. This report is the results of theoretical analysis on the tidal motion in the fish ponds which are connected each other and also connected to the tidal river. But the fields observations are now proceeding and the data from the fields are not sufficient, so the comparison between the theoretical results and the data from the laboratory model has been done. In this case two connected fish ponds has been done in experiment and the comparison between the theory is good in the response of amplitude and phase lag.