数値モデルを用いた開水路チェックゲートの機能評価

—そのⅠ：間接型フロート式上流水位一定ゲートの場合—

稲垣仁根¹・益田和範²・小西邦寿³・大塚明克³・小倉尚基⁴・秋吉康弘⁵

Performance Evaluation of Check Gate in Canal Using a Numerical Model

—PART I: Float-Operated Constant Upstream Level Control Gate in Indirect Level Action—

Hitone Inagaki¹, Kazunori Masuda², Kuniyoshi Konishi³, Akiyoshi Ootuka³
Naoki Ogura⁴ and Yasuhiro Akiyoshi⁵

Abstract: Float-operated water level control gates in direct level action (say, Neyrtec-design gates) are successfully used as hydro-mechanically controlled cross regulators in many canal systems in the world. The Japanese experiences learned from their use in the Aichi Water Supply System and the Toyogawa Water Supply System, however, show that a series of the gates in direct level action on relatively short successive reaches of the canal with the bed slope of 1/2000 to 1/5000 often creates interference water surface oscillations which result in high frequency hunting, and the gate located closely upstream of a siphon conduit is prone to be unstably controlled depending on the flow in the conduit. In this paper, as the alternative to the conventional Neyrtec-design gates, use of the particularly designed gate that may successfully be controlled in difficult conditions encountered in Japan is proposed. The float that is installed in an off-canal chamber automatically operates the upstream level control gate in the manner of indirect level action. Performance and validity of the gate in the Aichi Water Supply System are evaluated by the numerical investigations together with the *in-situ* hydraulic tests. The results show that the off-canal float could stably operate the gate to implement constant upstream water level control, confining upstream water level fluctuations within a desired range. In addition, it is demonstrated that the numerical model in which mechanical action of the gate is also incorporated is capable of successfully reproducing the canal flow and the gate action.

Keywords: Check gate; Open channel; Mathematical model; Constant upstream level control gate; Float-type

1 はじめに

開水路の水位を確保する自動水位調節ゲートとしては、フランス・ネルテック社製のゲート群が広く世界で使用され、信頼性の高い自動式ゲートとして認知されている。ゲートの種類としては、上流水位を一定に制御するアミルゲートと下流水位を一定に制御するアビスゲート、アビオゲートがあり、国内では愛知用水や豊川用水において導入され、唯一の無動力で稼働する自動水位調節ゲートとして農業用水路に普及してきた（農林水産省、2001a）。これらのゲートは、扉体にフロートが内蔵されていることに特徴があり、フロート内蔵型の自操型ゲートに分類され、さらに制御対象となる上下流の水面がフロートに直接接触して動作す

ることから、Direct Level Action 型のフロート式ゲートに分類できる。

愛知用水は、供給主導型の水路であるため、主に上流水位を一定にするアミルゲートを使用しているが、水路勾配が 1/2000～1/5000 と急であるため、ゲート間の距離が短くなり、さらに、地形が複雑なためサイホンやトンネルが数多く混在するという特徴がある。ゲート間の距離が短い場合は前後のゲート相互に干渉が生じる可能性があり、またゲートの下流にサイホンがある場合は、サイホン内の流れが安定しないと、ゲートの下流水面が乱れてゲートがハンチングを生じるなどの課題を抱えていた。これらの課題は、国内の農業用水路におけるゲートの設置条件やその水理環境に起因するものであるが、管理の現場ではゲートのアームにオイルダンパを設置するなど対策を講じて現在に至っている。

その後、フロートを水路外に設置した間接型フロート式の上流水位一定ゲートが国内で開発され（農林水産省、2001b）、九州地区などで採用されたことから、愛知用水の二期事業でも、このゲートを採用候補とした。このゲートは、制御対象となる上流水位とフロートの間に欠口を有する隔壁を設置するため、Indirect Level Action 型のフロート式ゲートに属するといえる。このゲートの特徴としては、フロート室は水路と欠口で連通しているため開水路の水面変動の影響が緩和されること、設定する上流水位を任意に変更できること、ゲート断面が水路断面と同じ矩形であることなど国内の実状に考慮した機能が付加されている。

¹宮崎大学農学部助教授 Associate Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192 Japan

²水資源開発公団愛知用水総合事業部部長 General Manager, United Division of Aichi Waterworks, Water Resources Development Public Corporation, 373 Akaike Yasita, Nitushinn-shi, Aichi, 470-0126 Japan

³水資源開発公団愛知用水総合事業部課長 Manager, United Division of Aichi Waterworks, Water Resources Development Public Corporation, 373 Akaike Yasita, Nitushinn-shi, Aichi, 470-0126 Japan

⁴豊国工業課長 Manager, HOKOKU KOGYO CO., LTD, 6400-3 Misonou Saijo-cho, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima, 739-0024 Japan

⁵宮崎大学農学部教授 Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192 Japan

そこで、本ゲートの制御機能について検討した結果、愛知用水で採用することとし、上流部では既に設置済みで稼働中である。また、下流部における農業用水専用区間でのゲートの連続設置などの様々な水路システムの課題を検討するために、ゲートの数値モデルの開発とシミュレーション手法の整備に着手し、現地実験の結果をほぼ再現できるところまで成果を得た。

本論文では、間接型フロート式上流水位一定ゲートの現地水理実験の結果と数値モデルを用いたシミュレーションによる再現結果との比較を行い、ゲートの制御機能の評価を行った。

2 フロート式上流水位一定ゲートの分類と特徴

愛知用水では二期事業以前は直接型フロート式上流水位一定ゲートのアミルゲートが主に使われていた。この直接型フロート式ゲートは、扉体とフロートが一体となっており、フロートに作用する浮力、ゲート自重、カウンターウェイトによるモーメントの釣り合いで動作する仕組みになっている。

そのため、開水路の水面がフロートに直接接触することにより、フロートの浮力が増減してゲートが駆動されるので、愛知用水のようにゲート下流にサイホンがあり流況が安定しない場合には、ゲートの動作が影響を受けることになる。また、実際の水管理においてはゲートの設定水位の状況に応じた変更が必要となる場合が生じるが、設定水位は変更できず、制御精度も±10cmと粗いので細かな水位管理には支障が生じる場合がある。さらに二期事業では水路断面が台形から矩形に変更され、水路両側のバームが管理用道路として使用されるため、ゲートも矩形断面であることが望まれた。

二期事業では上記のような国内の使用条件を考慮して、フロートを設置する水槽と開水路を欠口で連通し水面変動の影響を緩和できる、設定する上流水位を任意に変更できる、ゲート断面が水路断面と同じ矩形であるなどの特徴を有する間接型フロート式の上流水位一定ゲートが採用されることとなった。アミルゲートの概要を図1に、間接型フロート式の上流水位一定ゲートの概要を図2に、さらに直接・間接型のフロート式上流水位一定ゲートの比較を表1に示す。

図1: アミルゲートの概要

3 間接型フロート式上流水位一定ゲートの作動機構

間接型フロート式上流水位一定ゲートは、ゲートの駆動機構を水路の外に設置していることに構造的な特徴がある。水路の外部側面に3個の連続した水槽A、フロート室、水槽Bを設置し、上流側の水槽Aと下流側

図2: 間接型フロート式上流水位一定ゲートの概要

の水槽Bは水路と欠口により接続しており流水が自由に出入りでき、水槽Aはゲートの上流水位、水槽Bは下流水位と同じとなる。水槽A、Bは水路と欠口を介して接続しているため、水路の波立ち等の影響を受けにくくなっている。

作動の原理は表2の間接型フロート式ゲートの作動フロー表と図3の間接型フロート式上流水位一定ゲートの作動機構図に示す。

図3: 間接型フロート式上流水位ゲートの作動機構図

4 間接型フロート・ゲートの作動機構の運動方程式

4.1 既往のゲートモデル

自動水位調節ゲートを開水路の数値モデルに組み込んで解析した事例は、白石ら(1972)による研究があるが、白石らは「上流一定ゲートは上流水位を常に設定水位に維持するように作動するのであるから、ゲートとゲート直上流の任意区間の流量の連続条件が保持されるように、ゲート流量を設定するという方法」を採用している。

白石らの手法は、自動水位調節ゲートを含んだ水路システムの流況を再現するために、ゲートが正常に作動した場合に生じる結果を水路モデルに組み込んだものである。従って、ゲート自体の作動機構をモデル化

表 1: フロート式ゲートの機能比較表

項 目	間接型 Indirect Level Action 型	直接型 Direct Level Action 型
動 力	水路外に設置したフロート	ゲート扉体に内蔵したフロート
駆動方式	フロートに作用する浮力, ゲート自重, カウンターウエイトによる回転軸周りのモーメントの釣り合い	
フロート位置	水路外にフロート水槽を設置し, 欠口で連通する	水路内のゲート扉体に内蔵する
フロート内への水の導入	水を導入する	水を導入しない
上流設定水位の精度	± 3.0cm 以内	± 10.0cm 程度
上流設定水位の変更	可能	不可能
変動流量に対する機能性	流量ゼロから計画流量の範囲で任意な流量に対して作動する	計画流量の約半分以下の流量では十分に作動しない
水路断面形状	矩 形	台 形
上流水位一定ゲートの例	ウオッチマンゲート	アミルゲート
下流水位一定ゲートの例	フローマンゲート	アビスゲート, アビオゲート

したのではなく, ゲート自体の作動機構の評価を行うには限界があった. そこで, 間接型フロート式上流水位一定ゲートを開水路の数値モデルに組み込むために, ゲートの作動機構の数値モデル化を行う.

4.2 フロート室流入量

フロート室への流入量 Q_i は, 注水堰からの越流量で与えられるため, (1) 式で与えられる.

$$Q_i = C_i \pi D_i (H_u - H_s)^{3/2} \quad (1)$$

ここで, H_u = 水槽 A (ゲート直上流) の水深 (m), H_s = 注水堰の堰頂の高さ (m), D_i = 注水堰の直径 (m), C_i = 堰の流量係数 (=1.8), Q_i = フロート室流入量 (m^3/s) である. ただし, $H_u \leq H_s$ の時は, $Q_i = 0$ である.

4.3 フロート室流出量

フロート室からの流出量 Q_o は, フロート室と下流水槽 B の水深の差によるオリフィス流出となるため, (2) 式で与えられる.

$$Q_o = C_o \frac{\pi D_o^2}{4} \sqrt{2g(H_f - H_l)} \quad (2)$$

ここで, H_f = フロート室の水深 (m), H_l = 水槽 B (ゲート直下流) の水深 (m), D_o = オリフィスの直径 (m), C_o = オリフィスの流量係数 (=0.6), Q_o = フロート室流出量 (m^3/s) である. ただし, $H_f \leq H_l$ の時は, $Q_o \leq 0$ である.

4.4 フロート内流入量

フロートの昇降動作はフロートの内外水位差に追従するが, 定常状態ではフロート内水面の位置は水槽 B の水深 H_l に一致し, フロート室水深 H_f と喫水差 H_d を保持して均衡している. この均衡状態から H_f が変化した場合のフロート内への流入量 Q_f は, (3) 式で与えられる.

$$Q_f = C_f \frac{\pi D_f^2}{4} \sqrt{2g(H_f - H_d - H_l)} \quad (3)$$

ここで, H_d = フロートの喫水差 (m), D_f = 導水管の直径 (m), C_f = 導水管の流量係数 (=0.5), Q_f = フロート室内流入量 (m^3/s) である. ただし, $H_f - H_d \leq H_l$ の時は, $Q_f \leq 0$ である.

4.5 フロート室の連続方程式

フロート内外の水深の関係は, 定常状態では (4) 式で与えられる.

$$H_{f1} = H_f - (H_w + H_d) \quad (4)$$

ここで, H_{f1} = フロート底面から水路底までの水深 (m), H_w = フロート内の水深 (m) である.

水深の時間的な変動がある場合は, H_{f1} は (4) 式を t で微分して (5) 式で与えられる. なお, 喫水差 H_d は水深の変化により変動しないものとする.

$$\frac{dH_{f1}}{dt} = \frac{dH_f}{dt} - \frac{dH_w}{dt} \quad (5)$$

フロート室内の連続方程式は, 微小時間 dt のフロート室水深の変動量 dH_f , フロートの微小変動量 dH_{f1} , フロート室の水の流入量 Q_i および流出量 Q_o を用いて, (6) 式で与えられる.

$$(A_f - A_{f1}) \frac{dH_f}{dt} + A_{f1} \frac{dH_{f1}}{dt} = Q_i - Q_o \quad (6)$$

ここで, A_f = フロート室の面積 (m^2), A_{f1} = フロートの面積 (m^2) である.

(5) 式を (6) 式に代入して整理すると (7) 式が得られる.

$$A_f \frac{dH_f}{dt} - A_{f1} \frac{dH_w}{dt} = Q_i - Q_o \quad (7)$$

フロート内の水位変化を表す (9) 式を (7) 式に代入して整理すると, フロート室の連続方程式として (8) 式が得られる.

$$A_f \frac{dH_f}{dt} = Q_i - Q_o + Q_f \quad (8)$$

表 2: 間接型フロート式ゲートの作動フロー表

項 目	作動の内容
水槽 A	開水路の水位が上昇すると、流入口からの流入量が発生し、水槽 A の水位が上昇する。
注水堰	開水路の上流水位が上昇し、注水堰の位置より高くなるとフロート室への流入量が発生する。この注水堰の高さが上流制御水位であり、この高さを変化させて、設定水位を容易に変更することができる。
フロート室	フロート室への流入量が増減するとフロート室の水位が変化し、フロートが上下動する。
水槽 B	フロート室の水位と下流水位の差により、フロート室からオリフィスを経由して水を水槽 B へ流出させる。
フロートアーム	フロート上部に設置されたフロートアームは回転軸に接続しており、フロートの上下運動がゲートの回転運動へと変換され、ゲートの扉体の開閉を行う。
フロート内部	フロートの上下運動が急激に起こらないようにフロート内部にフロート導水管を接続して、導水管から下流水位に対応した量の水の出入りがある構造になっている。
カウンターウェイト	フロートの上下運動だけでは、重い金属製のゲートを開閉するのが困難であるので、ウェイトを付加している。

4.6 フロート内の連続方程式

フロート内の水深 H_w は、フロートの昇降動作と連動するが、フロート内は水槽 B と導水管で連通しているため、フロート内水深は水槽 B の水深 H_l に一致するべく変動する。従って、フロート内の連続方程式は、微小時間 dt のフロート内水深の変動量 dH_w 、フロート内からの水の流入出量 Q_f を用いて、(9) 式で与えられる。

$$A_{f1} \frac{dH_w}{dt} = Q_f \quad (9)$$

図 4: 間接型フロート式上流水位ゲートの作動機構図

4.7 フロートアームの角度

ゲートの開度が H_g となる場合のゲートアーム、フロートアーム及びフロートの位置関係は図 5 の太線で示すようになっている。図 5 の細線は、ゲートが全閉した場合のアームとフロートの位置関係を示している。

そこで、フロートアームの任意の開度 θ とフロートの位置 H_{f1} の関係は、(10) 式により与えられる。なお、フロートの位置 H_{f1} は、(8) 式で求めたフロート室水深 H_f 、(9) 式で求めたフロート内水深 H_w と喫

水差 H_d を用いて、(4) 式より求める。

$$\frac{H_{f1} - H_{fc}}{R_f} = \sin \theta_f - \sin(\theta_f - \theta) \quad (10)$$

さらに、(10) 式を整理して、フロートアームの任意の角度 θ は (11) 式で与えられる。

$$\theta = \theta_f - \sin^{-1} \left(\sin \theta_f - \frac{H_{f1} - H_{fc}}{R_f} \right) \quad (11)$$

ここで、 R_f = フロートアーム長 (m)、 H_{fc} = ゲート全閉時のフロートの底面から水路底までの水深 (m)、 θ = フロートの底面から水路底までの水深が H_{f1} の時にフロートアームが全閉時のフロートアームとなす角度 (rad)、 θ_f = ゲート全閉時のフロートアームが水平面となす角度 (rad)、 θ_g = ゲート全閉時のゲートアームが水平面となす角度 (rad) である。

図 5: フロートアームとフロートの位置関係図

4.8 ゲートの開度

ゲートアームとフロートアームは常に一定の角度 $\theta_g - \theta_f$ を保つように結合されているので、フロートアーム

が角度 θ だけ回転した場合は、ゲートアームも角度 θ だけ回転する。ゲートの開度が H_g となる場合のゲートアームと扉体の位置関係は図 6 の太線で示すようになっている。図 6 の細線は、ゲートが全閉した場合のゲートアームと扉体の位置関係を示している。

従って、フロート・ゲートアームが角度 θ だけ回転した場合のゲートの開度 H_g は (12) 式で与えられる。

$$H_g = R_g \sin \theta_g - R_g \sin(\theta_g - \theta) \quad (12)$$

ここで、 R_g = ゲートアーム長 (m), θ = フロートアームの回転角 (rad), θ_g = ゲート全閉時のゲートアームが水平面となす角度 (rad), H_g = ゲートの開度 (m) である。

図 6: ゲートアームとゲート開度

4.9 ゲートの流量

ゲートの流量は、Henry によるスルースゲートについての流量係数 (土木学会, 1971) C_1 を用いて, (13) 式で与えられる。

$$Q_g = C_1 H_g B \sqrt{2gH_u} \quad (13)$$

ここで、 B = 流出幅 (m) である。

ゲートの開度 H_g を用いて、ゲート上下流の水深を、 $H_u = \alpha H_g$, $H_l = \beta H_g$ と設定すると、ゲートの流量は (14) 式で得られる。

$$\begin{aligned} Q_g &= C H_g B \sqrt{2g(H_u - H_l)} \\ &= C \sqrt{1 - \frac{\beta}{\alpha}} H_g B \sqrt{2gH_u} \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 C = ゲートの上下流水位差を用いた場合の流量係数である。

流量係数 C と C_1 の関係は、(15) 式で与えられるので、 C_1 と α , β の関係を C との関係に変換して、図 7 に示す流量係数 C を求めた。

$$C = C_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha - \beta}} \quad (15)$$

5 シミュレーション手法

5.1 開水路流れの解析手法

開水路の 1 次元の不定流について、摩擦損失に Manning 則を適用した場合の運動方程式と連続方程式は、(16) 式と (17) 式で表すことができる。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) + \frac{\partial H}{\partial x} + i + \frac{n^2 u |u|}{R^{4/3}} = 0 \quad (16)$$

図 7: ゲートの流量係数

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (17)$$

ここに、 g = 重力の加速度 (9.8 m/s^2), u = 流速 (m/s), x = 距離 (m), H = 水深 (m), t = 時間 (s), n = 粗度係数 ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$), R = 径深 (m), A = 流積 (m^2), Q = 流量 (m^3/s), i = 水路底勾配である。

(16), (17) 式を中心差分スキーム (白石英彦, 1969) で差分化して、流速と水深を求める。

5.2 フローチャート

チェックゲートのフロートの作動機構の運動方程式は 4 次のルンゲ・クッタ法による数値積分を用いて解き、時間 t のフロート室の水深 H_f とフロート内の水深 H_w を求める。この水深を用いて、フロートアームの回転角 θ 、ゲートの開度 H_g を求め、ゲート流量 Q_g を算出する。

開水路流の運動・連続方程式を中心差分スキームで解く過程において、ルンゲ・クッタ法を用いてフロートの運動方程式を解く部分の組み込みについて、FORTRAN 言語に準じたフローチャートを図 8 に示す。ここで、 m はモデル数、 $jstop$ は最大時間ステップ数を示す。

6 現地水理実験による機能検討

6.1 実験水路の概要

現地水理実験を行ったゲートは、八幡チェックであり、このゲートは愛知用水の土工用水と農業用水の共用区間の愛知池と佐布里池に挟まれた区間の末端に位置する。この区間の水路勾配は $1/5000$ と緩やかである。

八幡チェックと上流の開水路の概要を写真 1, 2 に示す。開水路は、幅 3.50 m 、高さ 2.40 m の 2 連の矩形水路であるが、水路の中央には計画水位の場合に溺れる高さの隔壁が設置されている。八幡チェックの直上流には東浦揚水機場が設置されており、揚水機場のポンプと八幡チェックゲートの諸元を表 3 に示す。

図 8: フローチャート

6.2 実験条件

水理実験は、ゲートが上流側からの流量変動に対して、設定水深を所定の精度で保持しつつ、速やかに対応できるかどうかを検証するのが目的である。そこで、愛知池から設定流量を放流し、八幡チェック上流の東浦揚水機場の揚水量を変化させて、ゲート通過流量を変更する方法で行った。さらに、ゲート稼働中にゲートを一部閉鎖する場合とゲートの設定水深を変更する場合についても検証を行った。

実験設備を図 9 に示すが、ゲートの上流水位とゲート開度については、量水と開度計をビデオで撮影し、映像データを数値化した。また、下流水位は量水表を目視して記録した。実験条件の時間的経過については、表 4 に示すとおりである。

6.3 実験結果

図 10 に放流量、ポンプ揚水量、稼働ゲート数、上流設定水深の実験条件とゲート上下流の水深とゲート開度の計測値の時間変化を示す。ゲート地点の流量は、東浦揚水機場のポンプが起動停止するたびに増減を繰り返すが、ゲート下流水深はこの流量の増減に対応して上下動している。一方、上流水深は 0~2.5hr では設定水深 1.9m 近傍に制御されており、設定水深を 2.5hr 以降で 2.0m に増加し、その後 1.8m に減少させた場

合でも上流水深は速やかに移行している。

ゲート開度は、実験条件の変更に合わせて追従して変化しており、条件変更時に開閉を繰り返すようなハンチング現象は生じていない。従って、現地水理実験の結果からは、間接型フロート式上流水位一定ゲートは、実際の運用時における様々な水理条件の変化に十分対応でき、かつ所定の水位制御精度が得られる機能を有していると考えられる。

7 シミュレーションによる再現検討

7.1 解析モデル

解析モデルの概要は図 11 に示すが、解析の対象とする区間は、上流端を大堀暗渠の始点、下流端を八幡トンネルの出口と設定した。八幡チェックの下流には桜鐘チェックがあり、ゲートで上流に堰上げしているため、桜鐘チェックの設定水位 EL32.420m を静止水位とするために、下流端には標高 EL32.50m の位置に仮想の余水吐を設置し、さらに越流水深を小さく抑えるために、延長を 50m とした。

境界条件としては、上流端を流量境界として放流量を与え、下流端は桜鐘チェックが全閉され、行き止まりの状態になっているとして取り扱い、上流からの流量が到達して末端水路水位が仮想余水吐の天端を越える場合は、越流水深に相当する流量が余水吐からの横

表 3: 東浦揚水機場・八幡チェックゲートの諸元

東浦揚水機場			八幡チェックゲート		
ポンプ	諸元	単位	ゲート	諸元	単位
台数	2	台	台数	2	台
口径	800	mm	幅	3.50	m
機種	渦巻		高さ	2.40	m
容量	1.20	m ³ /s	形式	自動水位調節水門扉	
			敷高	EL 31.30m	
			設定水深	1.80~2.20	m
			計画流量	15.0	m ³ /s

表 4: 放流量・ポンプ揚水量・設定水深・稼働数の変化パターン

時間	上流放流量	東浦揚水量	ゲート設定水深	稼働ゲート数
時間：分	m ³ /s	m ³ /s	m	台
0:00～0:30	7.544	0.0	1.9	2
0:30～1:00		2.4		
1:00～1:30		1.2		
1:30～1:40		0.0		1
1:40～2:00				
2:00～2:30		2.4		
2:30～2:35		1.2	2.0	2
2:35～2:40				
2:40～2:55			1.8	
2:55～3:00		1.8	1.9	
3:00～3:30

図 9: 水理実験設備

写真 1: 八幡チェックゲート

流出量として、系外に放流されるモデルとした。また、東浦揚水機場は、八幡チェックの直上流において、ポンプによる揚水量を分水量として系内から取り出すモデルとした。

水路の断面形状は、暗渠は2連断面、開水路は溺れ隔壁を設置した2連断面、トンネルは2R標準馬蹄形断面であり、寸法諸元は図中に示している。水路断面としては、写真2に示すような通常時において中間隔壁が水面に溺れた状態の2連水路を考慮しており、さ

らに写真1に示す2台のゲートは同じ動きをするものと仮定して、1台のゲートに2台分の幅を与えている。なお、距離差分 Δx は10m、時間差分 Δt は0.1sと設定した。

7.2 解析ケース

解析ケースは、間接型フロート式上流水位一定ゲートの現地水理実験の結果を数値モデルを用いて再現するケースAと間接型フロート式ゲートの制御方法の特

写真 2: 八幡チェック上流開水路

微であるフロート内へ水を入れる場合の効果を確認するために、フロート内へ水を入れない場合のケース B の 2 ケースを設定した。表 5 にケース A, B におけるゲート諸元を示す。

7.3 フロート内へ水を入れる場合

図 12 に流量、稼働ゲート数、上流設定水位の実験条件とゲート上下流の水深とゲート開度の実測値と計算値の時間変化を比較して示す。

7.3.1 上流水深

ゲートの上流水深については、実測値と計算値はほぼ一致しており、東浦揚水機場のポンプ運転あるいはゲート移動台数の変更によって変化することなく、設定した水深に制御されている。また、2.5hr 以降で設定水深を 2.0m と 1.8m に変更する場合では、計算水深の値は実測値とよい一致を示しているが、計算水深の変化傾向は実測値より急となっている。

7.3.2 下流水深

ゲートの下流水深についても、実測値と計算値はよい一致を示している。しかし、2.5hr 以降で上流設定水深を変更する場合に、計算値の方が一時的な変動幅が大きくなっているが、これは実験では注水堰の高さを手動のハンドルで変更するのに対して、計算では瞬時に変更したために生じた違いであると考えられる。

7.3.3 ゲート開度

ゲート開度については、ゲートが 2 台稼働し、設定水深を変更しない 1.5hr までは、実測値と計算値はよく一致している。その後、稼働ゲートを 1 台に減らす場合と上流設定水深を 1.8m に変更する場合に、計算値が実測値より大きくなっている。

計算は 1 次元流であるので隔壁が水没した状況の 2 連水路断面について、平均的な流速と水深を用いて流量を求めており、2 連水路の流れに直角方向の水の動きはないものと仮定し、上流からの流量がすべて稼働ゲート側に到達するとしている。従って、1.5hr においてゲートを 1 台閉鎖する状況は、2 台分のゲート幅を 1 台分に減少させているため、同一流量が流下して

図 10: 現地水理実験結果

きた場合は、ゲート開度が約 2 倍になる結果となっている。

現地実験では、稼働中のゲート 2 台の中の 1 台を閉鎖したため、2 連水路の片側の水路の流れが閉鎖したゲートで堰き止められて水位が上昇し、ゲートが稼働している隣の水路へ流入してきて、稼働ゲートの直上流で渦を巻くような状況であった。実験では 2 台のゲートの直上流部では 3 次元的な流れの形態を示しているの、計算のようにゲート開度の増加が顕著に現れない結果となったと考えられる。

また、2.5hr 以降では上流設定水深を 2.0m から 1.8m に急激に変更しているため、ゲート開度が一時的に大きくなる傾向にある。これは上流設定水深を低く設定することにより、ゲート上下流での水位差が小さくなるので、ゲート開度が大きくなったものと考えられる。これについても、計算値が実測値を上回る結果が得られているが、上流設定水深を下げたため、隔壁をはさんだ両側の水路の水の行き来が弱くなって、ゲート通過流量に影響を与えたのではないかと推察される。

7.3.4 フロートの作動機構

間接型フロート式上流水位一定ゲートの特徴は、フロート内へ水を入れることにより、所定の喫水差が確

図 12: 水深・流量変化図 (ケース A)

保できれば、フロートは任意の位置に保持することができるので、フロート室の小さな水深変化でも、大きなフロート移動量を得ることができる点にある。図 13 にケース A のフロート内外の水深とフロート室・内への流入流出を示し、流量が増減する場合のゲートの作動機構を数値モデルのプロセスで以下に記述する。また、流量が減少する場合は、増加する場合と逆のプロセスをたどる。図 13 の上段に水深の時系列変化を示しているが、この中に流量が増加する場合を○印で、減少する場合を□印で示している。

1. 流量が増加する場合は、上流水面が上昇し、フロート室への流入量が増加して、フロート室の水深が増加する。
2. フロート室水深の増加により、フロート室からの流出量が増加する。
3. 数値モデルでは、喫水差を保持するためにフロート内の水面位置を上昇させ、一時的にフロート内からの流出が発生する。
4. フロート内の水深が低下することにより、フロート底と水路底間の水深が増加し、フロートが上昇する。

図 13: フロート室水深・流量変化図 (ケース A)

5. フロートが上昇することにより、ゲート開度が増加して、通過流量が増加する。
6. ゲート上流水面が低下し、ゲート下流水面は上昇する。
7. フロート室への流入流出は少し減少し、やがて均衡して、ゲート開度は安定する。

7.4 フロート内へ水を入れない場合

フロート内へ水を入れない場合は、喫水差がフロート室の水面とフロート底の差になるため、フロートの位置は、フロート室の水深に対して一か所しか選択できない。そのため、以下に示すような現象を生じる。

1. ゲートの開度がフロート室の水深に連動する。
2. 静水時においてゲートが全閉するために、大きな喫水差が必要なためフロートが大きくなる。喫水差の設定が不適切だと、ゲートが閉まらない状況が発生する。
3. ゲート上下流の水位差が小さくなった場合、所定の流量を流下させるためには、喫水差の大きなフロートと短いフロートアームを用いて、大きなゲート開度を得なければならない。

図 14: フロート室水深・流量変化図 (ケース B)

図 15: 流量・ゲート開度変化図 (ケース A・B)

4. フロート室の水深は、水槽 A、B からの流入量のみ依存するため、注水堰と流出オリフィスの規模を適切に設定する必要があるが、すべての流量範囲で満足する選択はできない。

図 14 にフロート内へ水を入れないケース B のフロート室の水深とフロート室への流入量を示した。また、図 15 にフロート内へ水を入れるケース A とケース B のゲート開度、ゲート上下流の水深およびゲート流量を比較して示した。

東浦揚水機場のポンプ揚水量のみが変動する 1.5hr までは、ケース B の上流水位の制御精度がケース A に比べて僅かに悪くなる結果となっているが、フロート室の水深、ゲート開度、ゲート流量等は両ケースでは大きな違いはない。

稼働ゲートが 2 台から 1 台に減少し、ポンプ揚水が停止する 1.5hr 付近で、ゲート 1 台当たりの流量が増加している。そのため、ゲート上流水深が上昇し、フロート室への流入が増加して、フロート室の水深が上昇する。

1~1.5hr で上流水深が上昇すると、注水堰の越流水深が大きくなり、フロート室との間で一時的にオリフィス流となるので、流況が完全越流とオリフィス流

の間を行き来する不安定な状況となり、流入量の増減を生じる。さらに、1.5~2hr でゲート上下流の水位差が小さくなり、流入量と流出量が釣り合う位置までフロート室の水深が上昇し、流況は一旦安定する。その後、2~2.5hr で下流水深が低下し、完全越流とオリフィス流が交互に現れる不安定な流況が発生する。

2.5hr 以降に上流制御水深を変更しているが、ケース B ではゲート上流水深が設定水深を逸脱し、ゲート開度とゲート流量はケース A に比べて大きく変動しており、流況の安定性を欠いている。

フロート内へ水を入れない場合は、設定条件の範囲内での運用には制御精度の若干の低下以外の大きな支障は認められないが、上流制御水深の変更、稼働ゲート数の変更など運用状況が設定条件から逸脱する場合は、所定の水位制御は期待できないと考えられる。

8 おわりに

間接型フロート式上流水位一定ゲートは、現地水理実験の結果からは、実際の運用時において上流水位について十分な安定性と制御精度が得られる。このゲートではフロート内へ水を入れることが機構上の特徴となっているが、運用状況が当初の設定条件から変更される場合においても、この機構により上流水位が所定

の水位に制御される。

間接型フロート式上流水位一定ゲートの作動機構について、数値モデルにより実測値を再現したところ、ゲート上下流の水深については計算値は実測値を十分に近似できると考えられる。なお、ゲート開度については通常の運用をする限りにおいては、実測値と計算値は一致しているが、隔壁を有する2連水路の複雑な水理状況が影響するような特別な状況下において、実測値と計算値が一致しない場合がある。

これまでは、フロート式上流水位一定ゲートを連続して設置した一貫した開水路システムの構築を目指す場合に、アミルゲートでは愛知用水における設置条件や水理環境に制約を受ける面があったが、間接型フロート式上流水位一定ゲートを導入することにより、

その実現性が増すものと考えられる。今後は、ゲートを連続して設置した場合の安定性について、現地実験と数値実験の両面から検討を加える必要がある。

引用文献

- [1] 白石英彦 (1969) : 長方形断面水路における不定流解析, 農林研究計算センター報告, A4, pp.217-225.
- [2] 白石英彦・中道 宏・岩崎和己 (1972) : 水位調節ゲートを含む用水系における非定常シミュレーション手法, 農土試技報, F7, pp.21-29.
- [3] 土木学会 (1971) : 水理公式集, pp.276-277.
- [4] 農林水産省構造改善局 (2001a) : 土地改良事業計画設計基準設計「水路工」技術書, pp.559-560.
- [5] 農林水産省構造改善局 (2001b) : 土地改良事業計画設計基準設計「水路工」技術書, pp.560-561.

〔この論文に対する公開の質疑または討議は2003年6月30日まで受付けます。〕