

ゲート操作に伴う開水路非定常流に関する研究

—多段に配置された自動ゲートと制御要素の検討—

竹 山 光 一*

Kouichi TAKEYAMA

Study on the Unsteady Flow in Open Channels under Gates Operation

—Transients in Series Channel with Automatic Gate

and some Effects of its Control-Elements—

ま え が き

農業水利システムが広域なそしてより複雑なものになりつつある今日、施設が経済的・機能的であることが要求されるとともに、水管理を合理的なものにすることが一層求められてきている。用水路にゲートを設置して水位や分水量の自動制御を行うとき、各ゲート分水においてその安定性は大体表1のように表わすことができる。従って多段にゲートが配置された水利システムの下では、制御系は著しく複雑なものとなる。さらにゲートより下流側の水位を一定にする制御方式は用水の伝達とし

て水路内の貯留機能や、水面勾配を取込むことができるが、水路壁を高くすることが求められる¹⁾²⁾。

ここでは、多段に配置された頭首工群の下で、それぞれが minor-loop 型でゲート上流側水位を一定とする方式で制御されるときに水位変動の概略的特性について、まず統計的解析を行ってみる。つぎにこのような流れを表現する数値モデルを検討し、最後にゲートで水位の自動制御を行うときの各種の制御要素の影響について、実験的に調べてみたものである。

1. 多段に配置されたゲートシステムの自動制御

図1に示した幅 47cm, 高さ 50cm, 全長約 53m の水路 (I) は、最上流部に設けた直角三角堰より最大約 20 l/sec の通水が可能である。いずれも 60cm 上流側で、水深が一定となるように制御された4つのゲート点に容量式波高計を置き、水深の時間的変動をレコーダーに記録し、これをカーブリーダーでテープに変換した。水路末端部の貯水槽の入口前には堰を設けて水面が常流

表1 ゲートによる分水の安定性

ゲート	水路内	流出	自由度 (成分)	安定性	自動制御
射流	水路内	射流	2 (H_1, O)	不安定	困難
		常流	3 (H_1, H_2, O)	不安定	困難
射流	広域水面	射流	2 (H_1, O)	安定	容易
		常流	3 (H_1, H_2, O)	不安定	困難

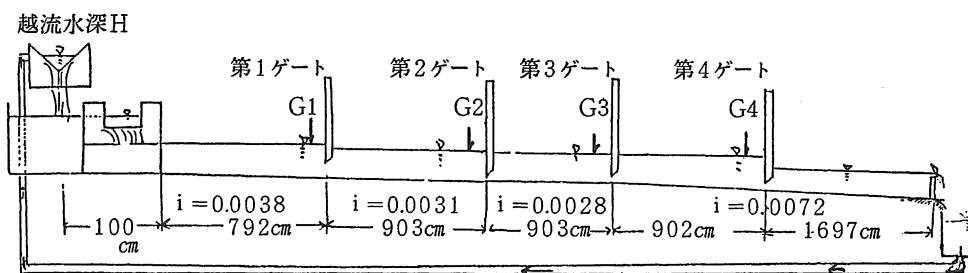


図1 実験水路 (I) の概要

* 農業水利工学研究室

となるようにされている。上流側より測定点とゲートを順にG1, G2, G3, G4とする。制御対象である水深は(I)5cm, (II)10cm, (III)15cm, (IV)25cmの4通りである。

データ処理の手法

水深の時系列変動の諸特性を、振幅・周期・伝播時間・波の増幅・減衰などで表わし、以下の統計的解析を用いる。³⁾⁴⁾

まず平均値・分散値・ヒストグラムがあり、さらに、Gi点での水深変動を $x_i(t)$, $t=1\sim N$, Gj点での水深変動を $x_j(t)$, $t=1\sim N$ として(1)式によって自己相関関数($i=j$ のとき)、および相互相関関数($i\neq j$ のとき)を求めた。

$$R_{x_i x_j}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} (x_i(t+\tau) - \bar{x}_i)(x_j(t) - \bar{x}_j) dt \quad (1)$$

($i, j=1\sim 4$)さらにこれを $R_{x_i x_j}(0)$ を分母にして正規化したものはそれぞれ自己相関係数、相互相関係数と呼ばれる。これらより水深変動の大きさと、最大相互相関の現われる時間 τ_0 、現象 $x_i(t)$ に対する $x_j(t)$ の全体的な遅れがわかり、これらの自己相関関数や相互相関関数をそれぞれFourier変換してパワースペクトル、クロススペクトルを求めることができる。前者は各周期成分の変動への寄与分を表わし、後者はその位相の角度により2現象あるいは入出力の時間おくれを各周波数成分ごとに表わすもので、これらは次式のようになる。

$$P_{x_i x_j}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{x_i x_j}(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (2)$$

$$R_{x_i x_j}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{x_i x_j}(f) e^{i2\pi f \tau} df \quad (3)$$

$i=j$ のときがパワースペクトルであり、 $i\neq j$ のときがクロススペクトルである。位相角 $\theta_{x_i x_j}(f)$ は(4)である。

$$\theta_{x_i x_j}(f) = \tan^{-1} \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} R_{x_i x_j}(\tau) \sin 2\pi f \tau d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} R_{x_i x_j}(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau} \right] \quad (4)$$

計算と結果

上流3角堰の越流水深 H を一定となるようにした。G1~G2~G3~G4と順に水面上昇が開始され、6mmの不感帯を越えるとゲートの昇降が開始し、目標とされる水深の周囲を変動する。ゲートの昇降速度は、0.175 cm/secである。制御対象である目標水深が高くなると、複雑な波の干渉・反射が生じ、変動幅が拡がる。この一例が図2である。

このように、流速・波速・ゲートの昇降時間、水位センサーからゲート昇降までの時間遅れ、水路内の水の貯留などが水深の変動に寄与する。G1, G4は流量の少ないときG2, G3よりも変動がやや大きい、流量が大きいときにこれが逆転した。この自己相関関数を示し

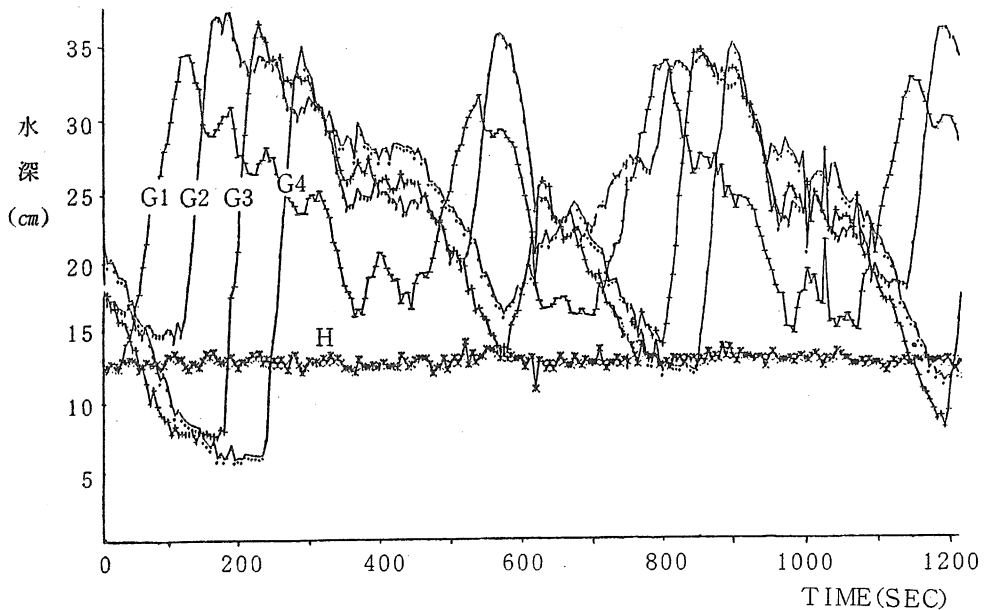


図2 水深変動の例 (Q=7.8 l/sec, 目標水深 25cm)

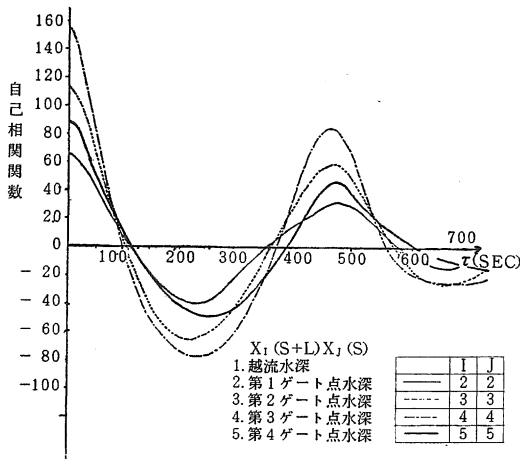


図3 各地点での自己相関関数(目標水深 25cm) ($Q=12.2 \text{ l/sec}$)

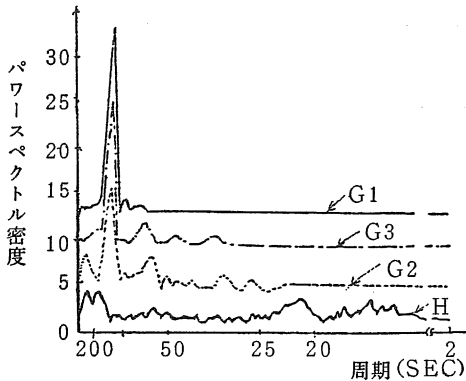


図4 目標水深 5cm, $Q=2.5 \text{ l/sec}$ のときのスペクトル密度

たのが図3である。

次に目標水深を 5cm $Q=2.5 \text{ l/sec}$ と 15cm $Q=4.2 \text{ l/sec}$ について(1)(2)の比較を行った。前者は各ゲート点で減衰型単一周期的変動とみなされ、このパワースペクトルは図4である。後者には複合調和波がみられ、このパワースペクトルは図5のようになり、G2では約90秒、150秒などの周期変動に加えて長周期成分が一部混入している。G3では90秒よりも短い成分と120秒前後の成分とさらに200秒をこえる長周期成分の混入が見られるなど、水深、流量により、ゲートの位置の違いによって水深の変動が異なってくる事が確認される。図6は相互相関係数である。変動の位相を知ることができる。

2. ゲート操作に伴う非定常流とシミュレーション

図7の実験水路(II) (幅 40.7cm, 高さ 50.3cm)

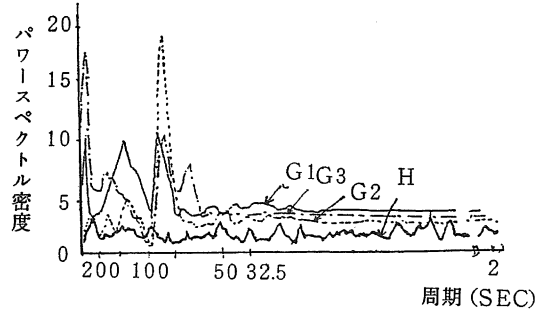


図5 目標水深 15cm $Q=4.2 \text{ l/sec}$ のときのスペクトル密度

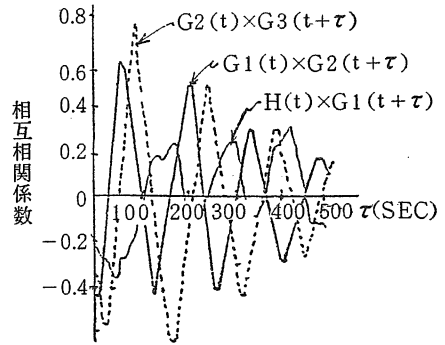


図6 目標水深 5cm $Q=2.5 \text{ l/sec}$ のときの相互相関係数

の水路床勾配 $i=0$ とし、ゲートより上流側 18m の地点に垂直壁を設け、下流側のゲートを閉じて水を貯留し、水面が安定したときの水深を H として、ゲートを Hd だけ急開し、しばらくして急閉したときの水面変動を調べた。ゲート直上流、8m, 16m とそれぞれ(1), (2), (3)と記した3地点の水深の変動は図8となった。

これにより全体に H が高いものほど段波の速度は速いものであり、一連の減衰振動の間隔(水路内で反射することによる)は短かく、波高がやや高く、減衰する時間が長い。即ちこの条件では2秒前後の周期で最大10~30mmの波高から始まる減衰振動は15~20秒持続している。そこで、(a)ゲート間隔が長かったり、ゲートの昇降が緩やかであり、波動は上流に伝わる時、無限遠で等流水深となるケース、および(b)水路内の bore や hydraulic jump など shock 現象が保存されるとするケースについてシミュレーションモデルを検討した。

(a) 河川潮汐理論の適用

緩やかなゲート操作が行われ、かつこれによる水面変動が、隣接するゲートなどによって水理学的に増幅され

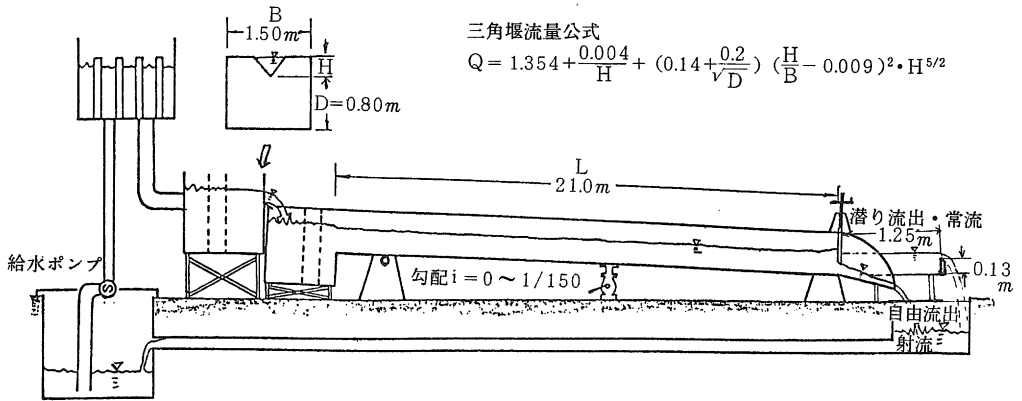


図7 実験水路(Ⅱ)の概要

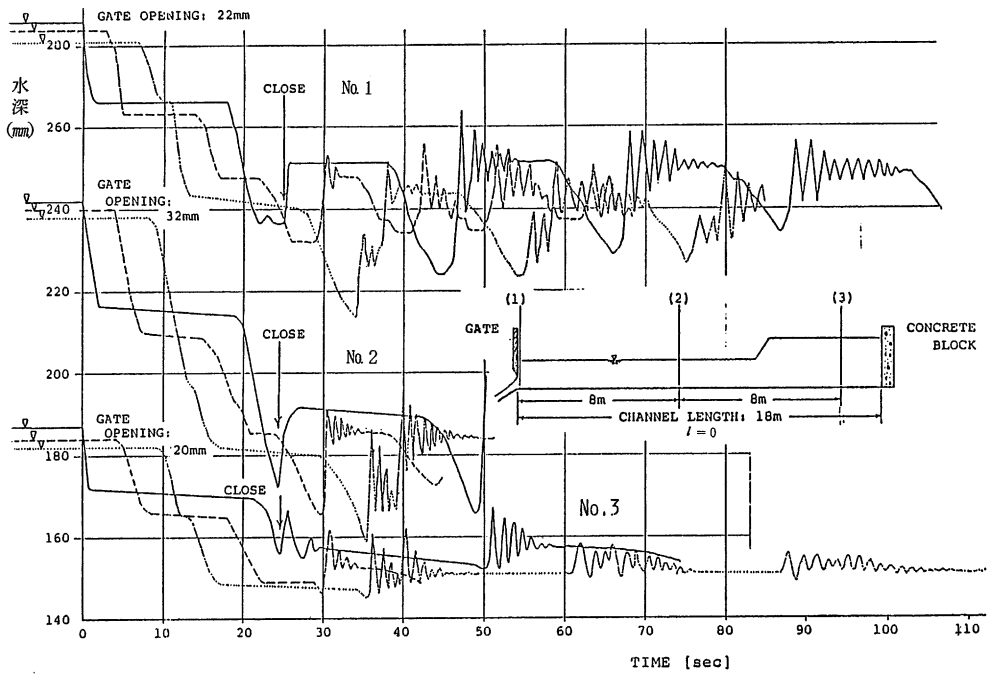


図8 ゲート開閉に伴う水深変動

ないと仮定できるとき、以下の感潮河川の理論が適用できる。

これは水路内に波動がないときの固有流速 u_0 、等流水深 h_0 、水面勾配 i_0 、溯上流速を u 、 h_0 からの高さを ζ として、

$$v = u - u_0 \quad i = i_0 + \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad u_0 = \sqrt{Ri_0}, \quad fu_0 = gi_0 \quad \text{とすると}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u - u_0) \frac{\partial u}{\partial x} = -fu - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} [(h + \zeta)(u - u_0)] \quad (6)$$

これらを連立して

$$x=0 \text{ で } |\zeta|_{x=0} = a \cos \sigma t$$

$$|\zeta|_{x=\infty} = 0$$

として解くものである。⁵⁾

(b) 微小段波ならびに力積が保存される F・D・M モデル

ゲート操作によって生じる波を微小段波⁶⁾と近似して扱うとき、段波通過前の水深を h_1 、流速を u_0 、段波の水深を h_2 、として波速 ω は(7)式となる。

$$\omega = u_0 \pm \sqrt{g h_1} \left\{ \frac{1}{2} \frac{h_2}{h_1} \left(\frac{h_2}{h_1} + 1 \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

FDM モデルとして bore & hydraulic jump のような shock 現象の記述にも有効な Two Steps Lax Wendroff⁶⁾ モデルを用いた。上流側は Box scheme を用いたが、ゲート点では予備実験で流量係数を、水深・ゲート開度等の関数として近似し、これを用いた。

実験と計算結果

水路(II)で $i = 1/1000$ 、 $Q = 5.26 \text{ l/sec}$ の下で図9の微小波を生じさせ、上流側への伝播を調べた。これを周期20秒の sin カーブの半周期成分と近似し、潮汐理論で波の位相と振幅の減衰を示すと図10を得た。これと微小段波の扱いとの対照は表2となった。このデータから、最大変動成分 0.8 cm/sec を含む $Q = 14.92 \text{ l/sec}$ について $\Delta T = 1 \text{ 秒}$ 、 $\Delta x = 2.0 \text{ m}$ とし、上・下流水深を境界条件として TSLW 法で中央点水深のシミュレーションを行った。一例が図11である。相対水深誤差(実測-計算値)/実測値)は $0.019 \sim 0.04$ の精度となった。この様に変動成分の高低に応じ数値モデルを使って概括的の把握ができるが、波の衝突による急上昇波については、今後の検討課題である。

3. ゲート制御要素に関する実験的検討

ゲートの昇降操作時において発生する過渡的な非定常波動が、不感帯幅(W)を短時間だけ越えるとき、直

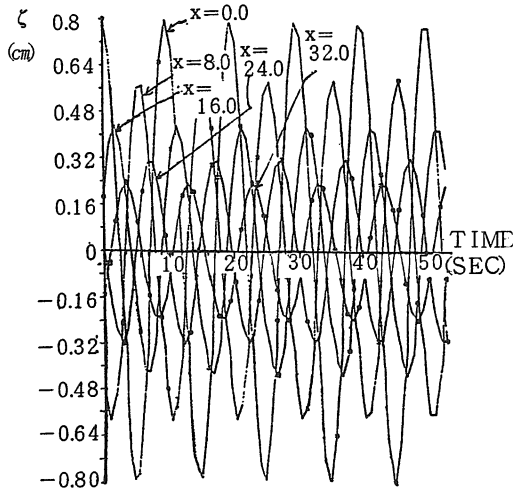


図10 潮汐計算による各地点 ζ (振幅 0.8 cm 、周期 20 SEC) (x は、ゲートより上流側の距離(m))

表2 ピークの時差と振幅の減衰に関する検討

諸条件	$i: 1/1000$		幅 $B: 0.407 \text{ m}$		$Q: 5.26 \text{ l/sec}$		
ゲート上流からの距離(m)	(cm) h_0	(cm) 振幅	ピークの時差(実測)(sce)	段波計算(sec)	汐潮計算(sec)	振幅減衰比(実測)	潮汐計算
0	7.8	0.6	11	10	12	1.2	0.74
8	7.5	0.7	13	11	12	0.71	0.74
16	6.9	0.5					

(周期20秒)

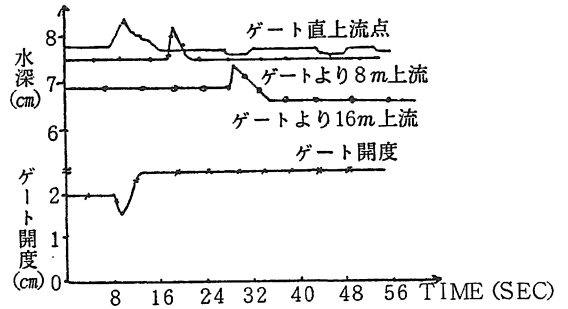


図9 ゲートの昇降による上流側への伝播 $Q = 5.26 \text{ l/sec}$

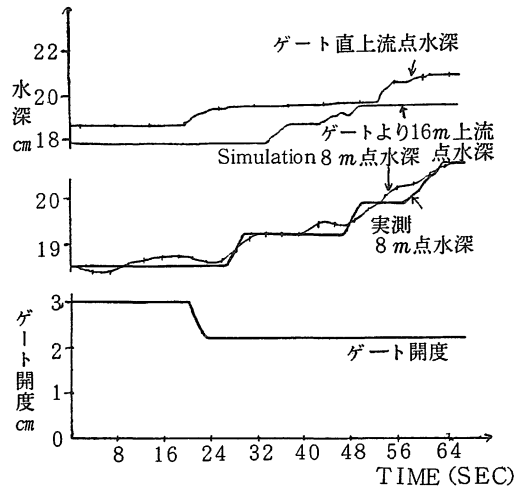


図11 Two Steps Lax Wendroff によるシミュレーション (自由流出の例)

ちにゲート操作を行うことは、これまでの波動にさらに二次的な波動を加えることになる。そこで水位不感帯の上限・下限からの一時的なみ出しを無効とする時間要素 PT_1 、 PT_2 、を1回毎のゲートの休止時間 (PT_3)、と操作時間(昇降距離)に加えて、とくに PT_1 、 PT_2

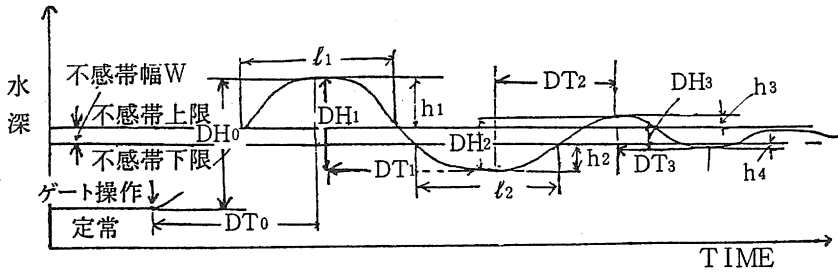


図12 ゲート直上流点における水面変動と (DT_i, DH_i) と (l_i, h_i) の概要

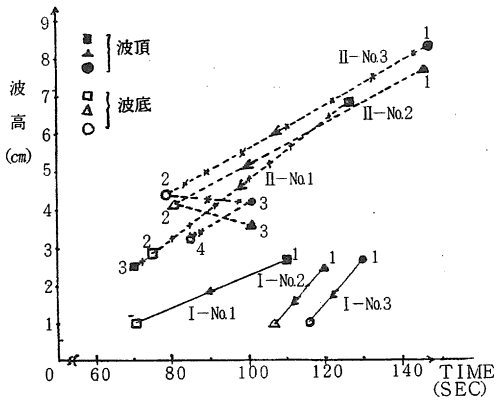


図13 ゲート直上流点における波頂～波底の時差と波高 (添字は i)

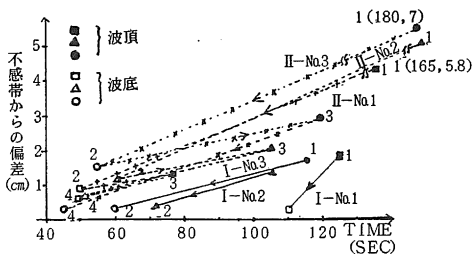


図14 ゲート直上流点における不感帯からはみだし時間とその偏差 (l_i, h_i) (添字は i)

とセンサーの位置について実験的検討を行った。これらの制御要素の対照は表3に示した。センサーはゲート直上流に設置し、この水深が制御対象である。

ここで水面変動の安定化に関する考え方を図12に示す。ここでは波高の変動を表現するものとして、波高とその時間 $(DT_i \sim DH_i)$ 、制御を評価するものとして、

表3 ゲート制御要素対照表

	上昇速度 cm/sec	下降速度 cm/sec
$PT_i (i=1,2,3)=0$	0.369	0.382
$PT_4=0.3$ sec $PT_3=6$ sec	0.058 (平均)	0.130 (平均)
流量 Q	10.91 l/sec	不感帯幅 W 6mm
	case I	case II
不感帯下限	22 cm	25 cm
sec	PT_1	PT_2
No. 1	3.0	3.0
No. 2	6.0	6.0
No. 3	9.0	9.0
初期条件	ゲート開放	ゲート開放
流出形態	常流・潜り	常流・潜り

不感帯からはみ出した時間と、最大偏差 $(l_i \sim h_i)$ について、収束性を調べた結果、図13、図14を得た。これらにより PT_1, PT_2 を短くするほど収束する時間は速くなるが、水深が低いとき (I のケース) は不感帯からはみ出ている時間帯が長く、不感帯の周辺で撻動する回数は少ないことが分った。

以上のことより、2次の変動による変動の増幅を抑制するためには、

①流量・水深など物理量の最大変動幅を設定する。

②一定時間におけるゲートの最多操作回数を設定する。

①、②の条件の下で、ゲートの操作によって生じる段波高を考慮しつつ、制御要素として、不感帯幅 W 、 $PT_1 \sim PT_4$ を調整することが効果的と考える。

あ と が き

自動制御を行うゲート群によって生じる水深の過渡的非定常変動について、全体的諸特性を統計的手法で把握し、サブシステムとしてのゲートの流れと上流側への影響について、数値モデル化を検討した。さらにこの様な下での制御要素の影響について実験的に検討し、制御による2次の波動の抑制について定性的理解を得た。これらはさらにより現実的データを加え、水理学的一般的形式化を今後なされなければならないものとする。

本研究を進めるにあたり、京都大学農学部南勲教授・河地利彦助手より貴重な助言・指導をいただいた。実験ならびにデータ整理については、農業水工学研究室の専攻生諸氏の助力を得た。水位感知センサー・自動制御ゲートならびに配電盤などは、昭和55年度科学研究費補助金「奨励研究A」によって備え研究することができた。記して心より謝意を表す。なお計算は本学計算センターF270-20, M140Fと京都大学M200を利用した。

引 用 文 献

1. K. MAHMOOD and V. YEVJEVICH : Unsteady Flow in Open Channels II Water Resources Publications Fort Collins 1975 p. 510-514.
2. 白石英彦・岩崎和己・伊藤喜一：幹線開水路系における用水管理の形態とその機能解析 農土試報13 : 1-44, 1977
3. 赤池弘次・中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御 サイエンス社 東京 1972, p. 38-45
4. 石原藤次郎・本間仁：応用水理学下II 丸善東京 1971, p. 82-84
5. 野満隆治・瀬野錦蔵：新河川学地人書館東京1976, p. 112-115
6. 伊藤剛：数値解析の応用と基礎アテネ出版東京1971 p. 89-99

Summary

This study was the mathematical simulation and the experimental results on the time series of the water depth of hydraulic transient phenomenon.

The phenomenon was caused by the series of automatic gates, though those should be operated their upstream water depth in constant. And the synthesized components were existed in high depth. For such a time series, the statistical analyses like auto and cross-correlation and coefficient were very useful for analyzing the amplitude, the damping ratio, the phase and the cycle of them, respectively.

Next, it was successful with sufficient accuracy to simulate such transients by digital computer with mathematical models. When the undulations were very small (max. 0.8cm/10sec, when mean depth was 7~8cm), it could be simulated by simple tidal river model or small surge one. But when the undulations were moderate (max. 0.8cm/sec, when mean depth was 25~30cm), the F.D.M. model (the Two Steps Lax Wendroff model) had to be used.

Then, as one of the control elements of the automatic gate system, some roles of the neutral time-zone of its depth-detector were examined besides its neutral depth-zone, the ascending or descending speed of the gate, and the time lag between the depth detector and gate-motion.

Consequently, it became clear qualitatively that the neutral time-zone as a control element was very effective against meaningless motions of gate which might amplify the undulations.