

洪水調節の自動化に関する研究 (I)

— プロセスの水力特性 —

石原安雄・佐藤 寛

STUDY ON AUTOMATIC OPERATION OF GATE FOR FLOOD CONTROL

— Hydraulic Behaviour of Water Flow Controlled by Gate —

by Yasuo ISHIHARA and Hiroshi SATO

Synopsis

A number of problems remain unsolved in performing the whole control system of stream flow in a river, especially during a flood. As the first step of studies on these problems, this paper describes the hydraulic behaviour of water flow controlled by a gate for flood control. The water flow in a downstream channel after controlled by a gate is classified as two groups. One of them is that in a channel with no weir, and the other in a channel with a weir. It is theoretically shown that the hydraulic behaviour of the former is characterized by the uniformly progressive flow and the latter approximately by the hydraulic bore. Moreover, several experiments are carried out to ascertain the results of theoretical consideration.

1. ま え が き

洪水処理の有力な方策の一つとして、貯水池による洪水流量の調節が大きくとりあげられ、各所に大ダムが建設されている。これらの洪水調節池によって洪水災害を未然に防止し、または軽減しつつあることは周知のとおりである。その調節機能は貯水容量を利用して、洪水流出量の一部または全部を一時貯水し、下流部の洪水流量を低減させるものであることはいうまでもない。この場合、利用できる貯水容量に一定の限度があるために、貯水池が満水すればその後の調節能力は皆無となり、また調節操作はゲートによって行なわれるので、悪いゲート操作を行なえば下流部の洪水危険度をかえって増大させるなどの基本的な問題がある。現在、このような洪水調節のためのゲート操作は主として手動で行なわれており、果して最適の状態での調節操作が行なわれているかどうか甚だ疑問である。

近年、自動制御に関する学問の進歩は目覚しく、社会の進展に大いに貢献しているが、洪水調節の分野においてもこうした制御工学ないしはオートメーションの知識が導入され、水系を一貫とした最適な洪水処理体制がとられるべき時代にきているように思われる。現在でもゲートの自動操作を行なっている例がないわけではないが^{1), 2)}、水系一貫のオートメーションには未だ道遠しといった感が深い。

ところで、このようなオートメーションを実施するためには、制御工学上の問題を別にしても、洪水の流出機構と洪水流の流下特性の解明がもっとも基本となることはいうまでもない。洪水の流出機構ないしは洪

水予知に関しては多くの研究が行なわれ実用的流出計算法も提案されており、こうしたオートメーション化に必要な知識はかなり蓄積されている³⁾。一方、洪水流の流下特性に関してもかなり研究が行なわれているが⁴⁾、ゲート操作の自動制御に際してもっとも重要なゲート操作時の流水の水理特性に関しては未解明の点が少ない。こうした意味において、本文は洪水調節操作の自動化に関する研究の第1段階として、ゲート操作時の放流水の水理特性について研究したものである。

2. ゲート操作と流量検出

放流水の水理特性について述べる前に、本文の意義を明らかにするために、ゲートの自動操作を行なう場合の2、3の問題点を指摘しておく。

さて、洪水調節のもっとも基本的操作は、流入する洪水の状況に基づいてたてられたプログラムにしたがって、貯水池からの放流量を調節することである。したがって、この場合の自動制御で対象となるもっとも基本的な事項は、与えられた放流量を忠実に具現するようにゲートを自動的に操作することとなる。

このようなゲート操作の自動制御を実施する場合には二つの形式が考えられる。その一つは、放流量が貯水位とゲート開度とによって一義的に定まることを利用するもので、**Fig. 1 (a)**に示すように、放流量を直接検出せずに、貯水位、ゲート開度および放流量の関係図から所定の放流量となるようなゲート開度を見出したのち、ゲートを上下させる方式である。したがって、制御系の中に水流が含まれず、ゲートの位置調整だけが問題となるので比較的簡単である。他の一つは制御系の中に水流が直接含まれる場合である。すなわち、**Fig. 1 (b)**に示すように、放流量を何らかの方法によって下流部で検出し、それと所定の放流量とを比較しながらゲート開度を調節する方式である。この場合にはダムの下流部で流量を直接測定するので、放流量が的確に把握できるという特徴があるが、その反面、制御系の中にゲートから流量検出点までの流水プロセスが含まれるのでそれだけ複雑となる。この場合にはプロセスの水理特性を知ることがもっとも重要となるが、**Fig. 2 (a)**に示すように、下流部河道の水位・流量曲線を用いて流量検出を行なうときと、**Fig. 2 (b)**に示すように、副ダムのようなせきを利用して流量検出を行なうときとは、水理特性すなわち応答特性がかなり異なるものと思われる。

つぎに、上述のいずれの制御形式をとるにしても、プログラムの設定法、流量の検出法、ゲートの操作機構などを勘案すると、連続制御とするよりはむしろ不連続制御とする方がより効果的な制御が行なえるように思われる。すなわち、ゲートはステップ的に操作されることになり、結局のところ、ゲートをステップ的に操作したときの放流水の挙動の解明がもっとも重要な基本事項となるわけである。またこうした水理特性の研究結果は、ゲート操作を手動によって行なう場合に対しても、下流部に思わぬ災害をもたらさないためにはゲートの急開閉によって変動する流量の変化分をどの程度に押えるべきかの基準をも与えるものと

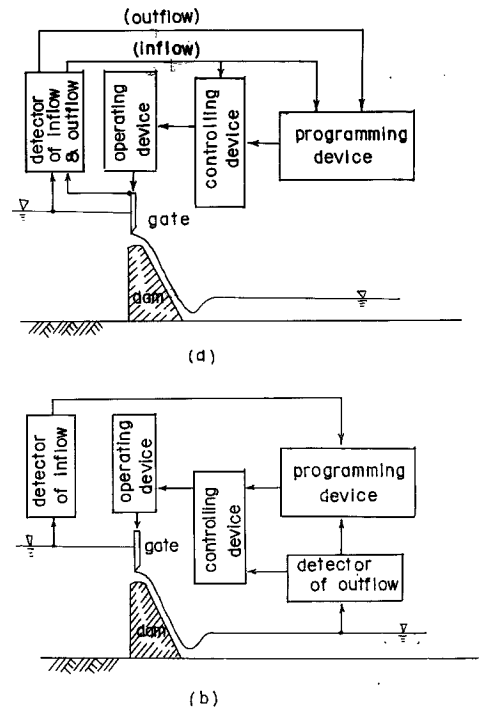


Fig. 1 Two types of automatic control system of gate for flood control.

なる。

以上の考察によって、ゲート操作の自動制御を考える場合に必要とする水理特性としては、ゲートを急開閉して放流流量を急増減させた場合に下流へ流下していく水流の特性であり、さらに、下流部が単純な河道である場合と、流量検出用せきが設けられている場合とに分けられることが明らかになった。

3. 水位・流量曲線を利用する場合の水理特性

洪水調節用ゲートを急開閉して放流流量を変化させた場合に、その下流部の河道が一様断面でかつ緩こう配でかなり長く続いていると、放流された水はダム直下で跳水したのちほぼ等流状態となって流下する。したがって、**Fig. 2 (a)** に示したようにダムの下流の河道部における水位・流量曲線を利用して流量検出を行なうことができることになる。しかし、この場合ダム直下では流量、したがって水深が時間的に段状に変化するの、流量検出点における水深は時間的にかなり複雑な変化、すなわち応答を示すものと考えられる。この応答は河道の状態やダムと流量検出点までの距離などによって変化するが、こうした場合の水理特性を知るために、河道が無制限まで続いている場合の流況を調べておく必要がある。

(1) 一様進行流の水面形の分類

水流の縦断面形が変化せず流下していく流れを一様進行流というが、ゲートを急開閉した場合に生ずる流れはこれに近い流況を呈するものと考えられる。そこで、**Fig. 2 (a)** に示した水理系において、放流量を Q_1 から Q_2 に変化させた場合の一様進行流について考えてみる。

流れの鉛直方向の加速度を無視すると、運動方程式および連続方程式は広幅長方形断面水路の場合、次式で与えられる。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - i + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V^2}{C^2 H} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (V \cdot H) = 0 \tag{2}$$

ここに、 V は流速、 H は水深、 i は底こう配、 C は Chézy の係数、 t は時間、 x は下流方向に測った距離である。

さて、permanent 型の流れが存在する場合には、その伝播速度を ω とすると、

$$X = x - \omega t \tag{3}$$

の変数変換によって定常化することができるはずである。(3) 式より、 $\partial/\partial t = -\omega \partial/\partial X$ 、 $\partial/\partial x = \partial/\partial X$ であることを考慮すると、(2) および (1) 式はそれぞれつぎのようになる。

$$H(\omega - V) = K = \text{const.} \tag{4}$$

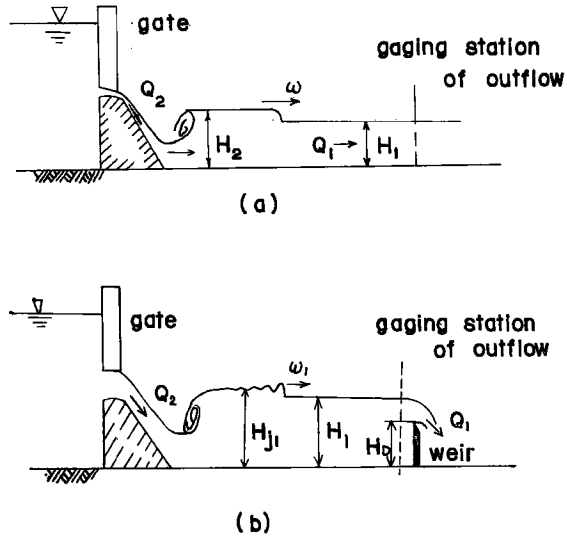


Fig. 2 Methods of measurement of controlled water flow

$$\frac{dH}{dX} = i \frac{H^3 - (\omega H - K)^2 / i C^2}{H^3 - K^2 / g} \equiv i \frac{f_1(H)}{f_2(H)} \quad (5)$$

ここに、 K は overrun discharge (過流流量) と呼ばれている。(4) および (5) 式からわかるように、この場合には波動解が存在せず、いわゆる背水曲線と同じような水面形状を呈することが予想される。これらの式に基づく水面形については 2, 3 研究されているが^{5), 6), 7)}, 流量を段状に変化させた場合の流況についての系統的な説明は未だ行なわれていないようである。

すなわち、つぎの条件の場合である。

$$\left. \begin{aligned} X = \infty \text{ において, } \frac{dH}{dX} = 0, H = H_1 = Q_1 / V_1 \\ X = -\infty \text{ において, } \frac{dH}{dX} = 0, H = H_2 = Q_2 / V_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 Q_1 および Q_2 はそれぞれ初期および最終の水路単位幅当りの流量である。

まず、(5) 式において、 $f_2(H) = 0$ の根から、critical depth of overrun (過流限界水深) H_c が定義される。

$$H_c = \sqrt[3]{K^2 / g} \quad (7)$$

さらに、(6) 式の条件を (4) 式に用いると、よく知られているつぎの二つの式がえられる。

$$\omega = \frac{Q_2 - Q_1}{H_2 - H_1} = C \sqrt{i} \frac{H_2^{3/2} - H_1^{3/2}}{H_2 - H_1} \quad (8)$$

$$K = \frac{C \sqrt{i} H_1 H_2}{\sqrt{H_2} + \sqrt{H_1}} \quad (9)$$

つぎに、(5) 式において、 $f_1(H) = 0$ は 3 次方程式となるが、(6) 式の条件から H_1 および H_2 はその根とならなければならない。したがって、第 3 番目の根 l は、

$$l = \frac{K^2}{C^2 i H_1 H_2} = \frac{H_1 H_2}{(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2})^2} \quad (10)$$

で与えられる。 H_1, H_2 は共に零より大きいから、(10) 式の関係より、

$$l < H_1 \text{ or } H_2 \quad (11)$$

の関係がえられる。

最後に、この場合の水面形状を検討するために、 H_1, H_2 と H_c との大小関係を調べる必要がある。そのためには (9) 式を (7) 式に代入してえられる次式を用いよう。すなわち、

$$H_c^3 = \frac{i}{g} \left(\frac{H_1 H_2}{\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}} \right)^2 \quad (12)$$

ここに、 $i_0 = g / C^2$ は限界こう配である。したがって、

$$\left. \begin{aligned} H_2 > H_1 \text{ のとき, } H_2 = r H_1 \\ H_2 < H_1 \text{ のとき, } s H_2 = H_1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

とおくと、この場合に対する H_1, H_2 および H_c の間の関係がつぎのようにえられる。

$$\left. \begin{aligned} U_1 : 0 < \frac{i}{i_c} < \left(\frac{1+\sqrt{r}}{r} \right)^2 \text{ のとき} & , \quad 0 < H_c < H_1 \\ U_2 : \left(\frac{1+\sqrt{r}}{r} \right)^2 < \frac{i}{i_c} < r(1+\sqrt{r})^2, & H_1 < H_c < H_2 \\ U_3 : r(1+\sqrt{r})^2 < \frac{i}{i_c} & , \quad H_2 < H_c \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} D_1 : 0 < \frac{i}{i_c} < \left(\frac{1+\sqrt{s}}{s} \right)^2 \text{ のとき} & , \quad 0 < H_c < H_2 \\ D_2 : \left(\frac{1+\sqrt{s}}{s} \right)^2 < \frac{i}{i_c} < s(1+\sqrt{s})^2 & , \quad H_2 < H_c < H_1 \\ D_3 : s(1+\sqrt{s})^2 < \frac{i}{i_c} & , \quad H_1 < H_c \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

これらの関係において、U および D はそれぞれ step up および step down を示し、また添字 1, 2, 3 は水路こう配が緩から急になる順序を示している。なお、(14) 式と (15) 式とが全く同形であることは、(12) 式から容易に理解される。

以上の諸関係は Chézy 型の抵抗則を適用した場合であるが、Manning 型の場合にも同様に計算することができる。すなわち、Manning の粗度係数を n とすると、(5) および (9) 式に対応してつぎのようになる。

$$\frac{dH}{dX} = i \frac{H^3 - n^2(\omega H - K)^2 / i H^{1/3}}{H^3 - K^2/g} \quad (5)'$$

および、

$$K = \frac{\sqrt{i}}{n} \frac{H_1 H_2 (H_2^{2/3} - H_1^{2/3})}{H_2 - H_1} \quad (9)'$$

また、(14) 式に対応する過流限界水深 H_c の存在範囲については次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} U_1 : 0 < \frac{i}{i_{c1}} < \left\{ \frac{m^2+m+1}{m^3(m+1)} \right\}^2 \text{ のとき} & , \quad 0 < H_c < H_1 \\ U_2 : \left\{ \frac{m^2+m+1}{m^3(m+1)} \right\}^2 < \frac{i}{i_{c1}} < m^3 \left(\frac{m^2+m+1}{m+1} \right)^2 & , \quad H_1 < H_c < H_2 \\ U_3 : m^3 \left(\frac{m^2+m+1}{m+1} \right)^2 < \frac{i}{i_{c1}} & , \quad H_2 < H_c \end{aligned} \right\} \quad (14)'$$

ここに、 $m = \sqrt[3]{H_2/H_1}$ 、 $i_{c1} = n^2 g / \sqrt[3]{H_1}$ である。

以上によって、(6) 式で表わされる条件の場合の一樣進行流の性質が明らかとなったので、(5) または (5)' 式によって可能な水面形状を検討することができる。すなわち、たとえば流量を急増させた場合の H_1 , H_2 および H_c の関係は (14) または (14)' 式で与えられている。それらの大小関係によって、 U_1 , U_2 および U_3 の三つの場合が存在することとなるが、それらに対応する水面形が Fig. 3 の右半分に示されている。 U_1 は比較的緩こう配の場合で、水面は連続的に H_1 から H_2 に変化する。水路こう配が大略限界こう配より大きくなると、 H_1 と H_2 との間に過流限界水深 H_c が存在し、水面形は不連続となり、いわゆるポアーを伴った形を呈する。すなわち U_2 の場合であるが、 H_1 に対する過流共役水深 H_{j1} と最終水深 H_2 との大小関係によってさらに二つの場合に分けられる。 $H_{j1} < H_2$ のときはポアーに続く水面で $dH/dX > 0$ となるが、 $H_{j1} > H_2$ のときは $dH/dX < 0$ となり、これらは Fig. 3 で U_2 , U_2' で示されている。水路こう配

がさらに大きくなると、 U_3 のような水面形が存在することになるが、こう配が急なため転波列の発生条件^{5), 6)}を満足する領域となり、実際には図示のものとはかなり変わった流況を呈するものと考えられる。

流量を急減させた場合の可能な水面形も

Fig. 3 に同時に示されており、 D_1, D_2, D_3, D_3 はそれぞれ U_1, U_2, U_2', U_3 に対応している。ただし、流量急減の場合には負のボア-が発生することになるが、実際の流れでは鉛直加速度の効果によって、その形状が多少くずれ、波状を呈する場合も考えられる。

これらの図において問題となるのは過流共役水深である。たとえば H_{j1} は質量および運動量の保存則から次式で与えられる。

$$\frac{H_{j1}}{H_1} = \frac{1}{2} [\sqrt{1+8F_{\kappa 1}^2} - 1],$$

$$F_{\kappa 1} = (\omega - V_1) / \sqrt{gH_1} \quad (16)$$

または、

$$\omega = V_1 + \sqrt{\frac{gH_{j1}}{2H_1} (H_{j1} + H_1)} \quad (17)$$

なお、流量急減の場合の H_2 に対する共役水深 H_{j2} もこれらと同様な式で与えられることはいうまでもない。

(2) 特性曲線法による解法

ゲートを急閉した場合の最終的な水面形状が明示されたが、こうした水面形になるまでには多少の時間を要するはずである。このようにゲートから放流された水流が最終的な(一様進行の)水面形状まで変形していく様子調べるために、特性曲線法による解析法について若干述べておく。

周知のように、(1)および(2)式よりつぎの二組の方程式がえられる。

$$\frac{dx}{dt} = V+c \text{ において, } \frac{D}{Dt} (V+2c) = E \quad (18)$$

$$\frac{dx}{dt} = V-c \text{ において, } \frac{D}{Dt} (V-2c) = E \quad (19)$$

ここに、 $c = \sqrt{gH}$, $E = g(i - V^2/C^2H)$ である。特性曲線法を用いて解析する場合、問題は $x=0$ の境界とボア-の front とで起る。つぎに、こうした場合を、**Fig. 4** に示したように、 $t=t_0$ における諸量が既知として検討しよう。

まず、境界については、**Fig. 4** の C 点を既知としているので、C 点から出発した負の特性曲線が t 軸と交わる点を R とすれば、この特性曲線に関して(19)式が成立する。一方、 t 軸上で満足すべき条件は、

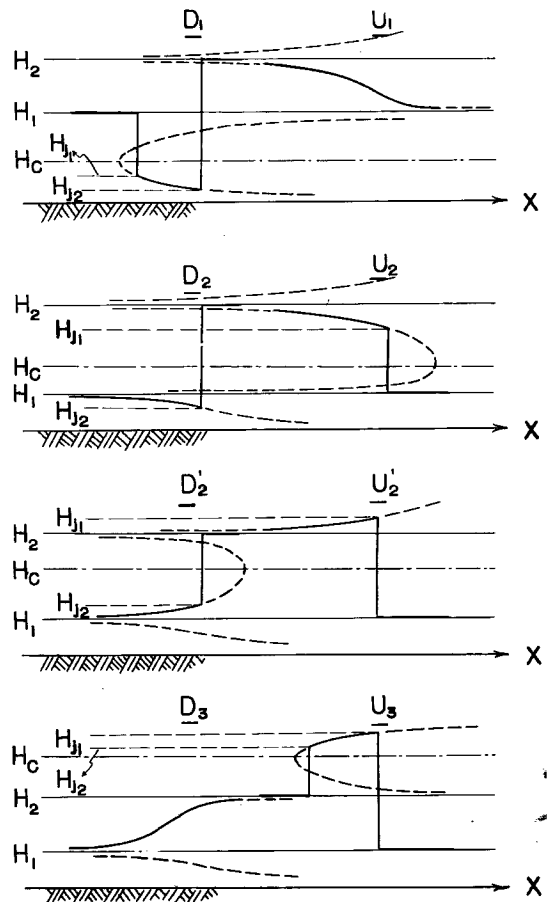


Fig. 3 Possible water profiles of uniformly progressive flow.

$$VH = Q_2 = \text{const.} \quad (20)$$

である。そこで、(19)式を階差式とすると、未知量は R 点における x , V および H であり、一方、方程式の数は (19)式からえられる2つと (20)式との合計3つである。したがって境界上の点 R におけるすべての量が決定される。

つぎにボアの front 上の点 P について考えてみる。P 点を B 点から出発した正の特性曲線の伝播を示す線と front との交点とすれば、(18)式が成立するはずである。一方、ボアの front の伝播速度は、連続条件から求められる(8)式で表わされる形と、連続式および運動量の保存則から求められる(17)式との2つの形式で与えられる。すなわち、ボアの front を表わす曲線 AP は次式を満足しなければならない。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= V_1 + \sqrt{\frac{gH}{2H_1}(H+H_1)} \\ &= \frac{HV - H_1V_1}{H - H_1} \end{aligned} \quad (21)$$

(18)および(21)式を階差式で表わすと、それぞれ2つの互に独立した式がえられる。したがって、これらの合計4つの式を用いれば、P 点における未知量 x , t , H および V が決定できるわけである。

4. 越流せきを利用する場合の水理特性

Fig. 2 (b) に示すような水理系において、ゲートを急開閉して流量を増減さす場合である。初期の水流は下流のせきによってせき上げられているので、前節のような一様進行流は考えられない。しかも、このせき上げによって流速がかなり遅くなっているの、厳密には鉛直加速度を考慮しなければならない。このような場合の水理現象については、Favre の実験、Keulegan and Patterson⁸⁾ や Sandover and Taylor⁹⁾ などの理論的解析的研究がある。

ゲートを急開閉したときに生ずる波については、これらの研究結果と同じ現象がみられるが、それが下流にあるせきで反射された後では非常に複雑な水面変動をすることが観測される。このような場合の理論的取り扱いには非常に困難であろう。そこで、ここでは制御工学上要求される精度において、せきの越流水深の平均的な意味での変化の模様を知る方法について述べる。

さて、ゲートの急開閉によって段波が生ずると仮定すると、その伝播速度は(21)式と同じ式で与えられる。すなわち、初期水深を H_1 、初期流量を Q_1 、はじめに上流から下流に向う段波の水深を H_{j1} 、急変後の流量を Q_2 とすると、

$$\left. \begin{aligned} \text{伝播速度: } \omega_1 &= \frac{Q_1}{H_1} + \sqrt{\frac{gH_{j1}}{2H_1}(H_{j1} + H_1)} \\ \text{段波の波高: } H_{j1} - H_1 &= (Q_2 - Q_1) / \omega_1 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

これらの式から、 H_{j1} および ω_1 が決定される。

つぎに、この段波がせきに到達すると部分反射されて新しい段波が生じて上流側に向う。このときの伝播速度 ω_2 および波高は、

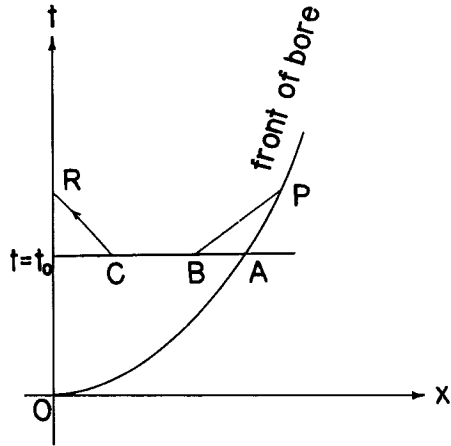


Fig. 4 Characteristic plane of x and t .

$$\left. \begin{aligned} \omega_2 &= -\frac{Q_2}{H_{j1}} + \sqrt{\frac{gH_{j2}}{2H_{j1}}(H_{j2}+H_{j1})} \\ H_{j2}-H_{j1} &= (Q_2-Q_{j1})/\omega_2 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

で与えられる。さらに、 Q_{j1} は越流の条件から、長方形せきとすと、

$$Q_{j1} = C_D(H_{j2}-H_D)^{3/2} \quad (24)$$

とならねばならない。したがって、(23)および(24)式から、反射後の水深 H_{j2} 、伝播速度 ω_2 および越流流量 Q_{j1} が求められる。以下同様の手続きによって、はじめに生じた段波がゲートとせきとの間を往復するときの水面変動や越流流量の時間的変化の様態を計算することができる。

さらに、初期水深がかなり大きく $\omega_1 \approx \omega_2 \approx \dots \approx \sqrt{gH_1}$ とみなしうる場合には、(22)および(23)式のそれぞれの下式から、

$$H_{j2}-H_1 = \{2Q_2 - (Q_1+Q_{j1})\}/\sqrt{gH_1} \quad (25)$$

がえられる。したがって、(24)および(25)式から、 H_{j2} および Q_{j1} を求めることができる。

5. 実験的考察

洪水調節用ゲート操作の自動制御を行なう場合に必要なる水流の挙動に関する水理学的考察を行なったが、えられた結果を検証するために若干の実験を行なった。

実験水路は長さ 85 m、幅 0.5 m、高さ 0.6 m のモルタル仕上げで、底こう配は 1/300 である。水路のほぼ中央に高さ 13 cm のせきを設置し、その上にスルースゲートを設けて放流量が調節できるようにした。実験は、はじめある放流量となるようにゲートを固定し、定常状態になったのちにゲートを少量急開または急閉した。下流に放流された水流は、電気抵抗式水位計を用いて自記記録させた。なお、水路の粗度係数は $n=0.0114$ である。

(1) せき上げ効果のない場合

この実験は、下流側水路の水位・流量曲線を利用して流量検出を行なう場合に対応し、3節の理論結果の検証である。水路こう配が固定されているので、広い範囲の実験を行なうことができず、Fig. 3 の U_2 、 D_2 の場合である。水位測定点はゲートの下流 10 m、20 m および 30 m の位置に設けたが、測定結果の 1 例

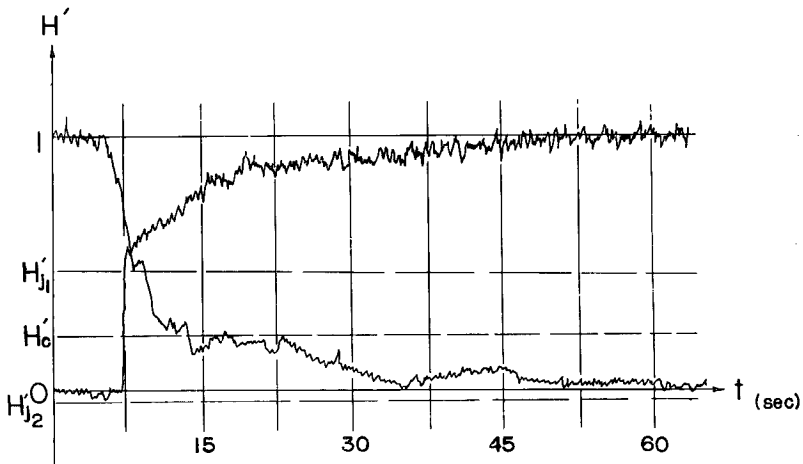


Fig. 5 Observed results in the case of non-existence of weir.

を示したものが Fig. 5 である。

図の縦軸は無次元表示されており、

$$H' = (H - H_1) / (H_2 - H_1) \tag{26}$$

で示されている。図からわかるように、流量を急増させた場合には Fig. 3 の U_2 の水面形に近づくが、流量を急減させた場合には D_2 のような水面とはならず、水位低下部がくずれて漸变的な変化となる。ただし、この場合でも平均的な意味での伝播速度は流量急増の場合と同じと考えてよいようである。なお、図中 H'_{j1} および H'_{j2} はそれぞれ H_1 および H_2 に対する過流共役水深の無次元表示である。

さて、自動制御を考える場合に問題となる遅れの時間は、この場合には伝播速度で間接的に表現することができる。実験の範囲で、縦軸に観測値を、横軸に同様進行流としての理論値をとって比較した図が Fig. 6 である。図において 45° の直線は両者が一致した場合を示すわけであるが、図では観測した伝播速度が大きくなっている。これは、図が U_2 に対するものであるため、ダム直下で生ずる段波の高さが最終的なものより大きく、したがって伝播速度も大きくなるためと考えられる。換言すると変化過程の観測値であって、その発達具合によって 45° の直線に近づいたり、遠ざかったりしているわけである。

こうした実験結果と、3節で述べた解析結果とを勘案すると、特別の場合を除き、ゲートを急開閉したときの応答特性は、制御工学上からすれば同様進行流として取り扱って差支えないように思われる。ただし、変化の模様を細かく知るには特性曲線法によるべならないことはいうまでもない。

(2) せき上げ効果のある場合

これはダムの下流側にせきを設けて流量検出を行なう場合に対応している。せきはダムより下流 18 m の地点に設置し、その高さは 20 cm、越流幅は 40 cm であり、水位測定点はせきより上流 8 m と 1 m に設け後者を越流水深測定点とした。

Fig. 7 は観測結果の 1 例を示したもので、(a) 図は 8 m 地点、(b) 図は越流点におけるものを示している。これらの図の表示方法は Fig. 5 と同様である。(a) 図では流量の急増減によって生ずるクノイド波が非常に明瞭に認められる。しかしながら、時間が経過して反射が繰り返えされると非常に複雑な形の波が発生している。一方 (b) 図では明瞭なクノイド波は認められず、反射点における複雑な水面変動を示しており、とくに、最初の変動が到達したときには異常に大い水面変動を示すことがわかる。また、(a) 図と (b) 図とを比較してみると、流量変化によって発生した水面変動がせきとダムとの間を往復しながら最終状態に近づいていく様子がよく理解されるであろう。

つぎに、Fig. 8 は越流点における水面変動の観測値と、(22)、(23) および (24) 式による計算値、および普通の貯水池計算による結果とを比較したものである。ただし、 C_1 、 C_2 の曲線はそれぞれ初期および最終水深で一定の時定数を仮定した場合である。前述したように、この場合にはクノイド波が発生して複雑な変動を

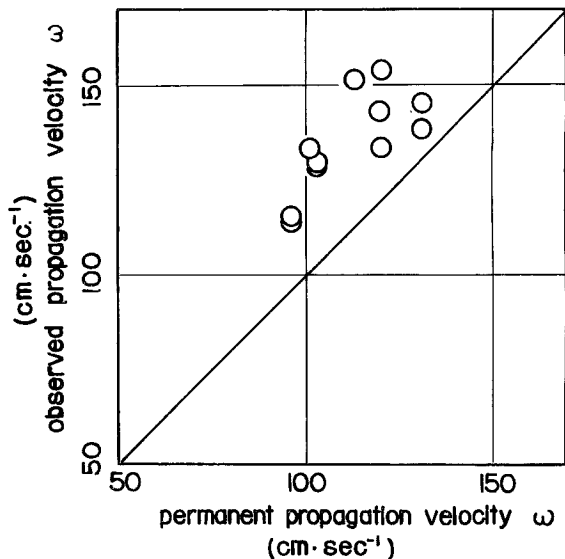


Fig. 6 Comparison with observed and permanent propagation velocities of progressive flows.

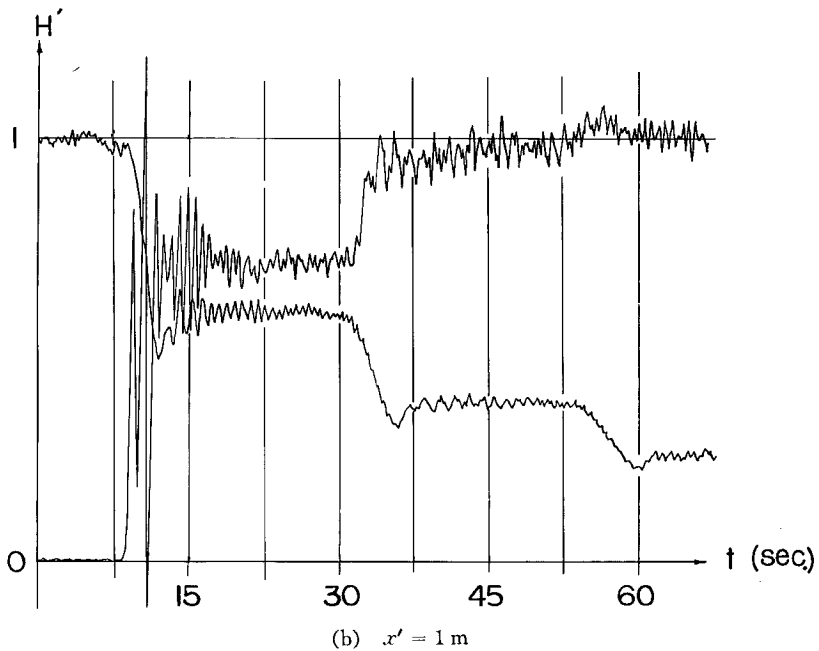
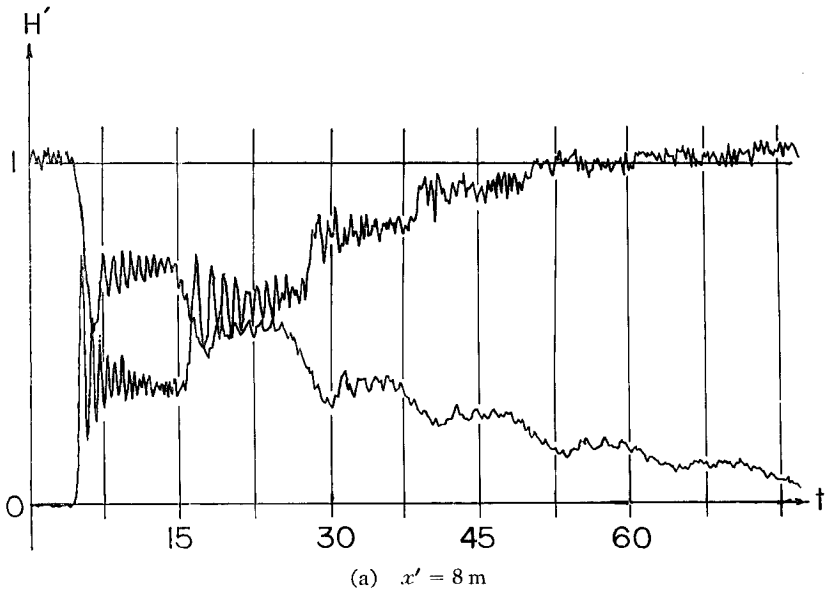


Fig. 7 Observed results in the case of existence of weir.

伴なうが、平均的な水面変化を問題とするときは4節で述べた計算法(図中の階段状の線)の妥当性を示すものと考えてよいだろう。

なお、流量急減の場合は Fig. 7 にみられるように、最初に水位の急激な低下を生ずる。この現象についてはよくわからないが、Fig. 3 の D_1 の場合の水位低下に対応しているように思われる。また、せき上げ

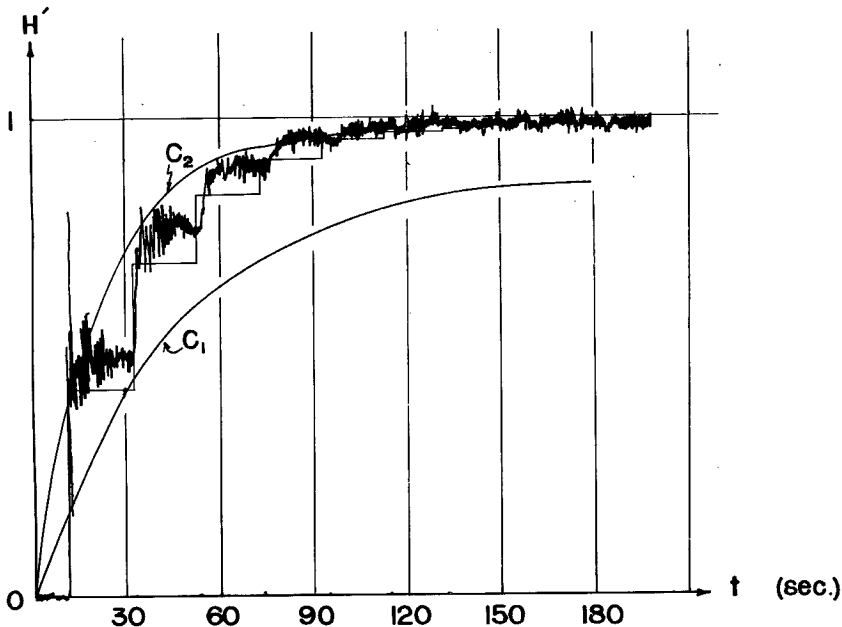


Fig. 8 Comparison with observed and calculated variations of water surface.

効果がある場合の詳細な水面変化の計算は、鉛直加速度の効果が無視できないので、(1)および(2)式に基づく一次元解析では不可能であって、はじめに述べた Sandover and Taylor⁹⁾と同様に、摩擦と鉛直加速度の者を同時に考慮した高次の解析法によらなければならないことはいうまでもない。

6. む す び

本文においては、水系を一貫とした洪水処理のオートメーションを行なう場合のもっとも基本的な単位となる洪水調節操作の自動制御に関する水理学的ないしは水文学的問題点を指摘したのち、自動制御系の設計に必要な水理特性について考察した。

まず、ダムの下流側にせきを設けない場合の水理特性について研究し、それが一様進行に近づく流況を示すところから一様進行流について論議した。その結果、一様進行流は流量の急増減に対してそれぞれ3つの異なった形式の流況が存在すること、およびそれらの限界の条件を明らかにした。さらに、そうした permanent 型の流況に到達するまでの変化過程を、特性曲線法によって計算することができることを示した。

つぎに、ダムの下流側にせきを設けた場合の水理特性は非常に複雑で、厳密には摩擦と鉛直加速度を考慮しなければならないが、平均的な意味での水面変化の様子は段波として解析することによって求められることを示した。

最後に、これらの理論的な考察結果を検証するために若干の水理実験を行なってその妥当性を示した。これらの成果は、ゲート操作の自動制御を設計するうえに非常に有用なものと考えられる。現在われわれは文部省機関研究費で製作された貯水池における洪水調節操作のモデルプラントを用い、本研究でえられた成果に基づいて、最適制御条件や最適制御系などについて研究中である。

参 考 文 献

- 1) 愛知用水技術誌, 幹線水路編, 愛知用水公団, 昭 37.4, pp. 33~60.

- 2) 中山稔, 森田孝之亮: 瀬田川洗せきについて, 土木学会誌, 47巻, 4号, 昭 37.4, pp. 20~25.
- 3) 水理公式集, 土木学会編, 昭 38.8, pp. 21~38.
- 4) 同上, pp. 92~100.
- 5) Stocker, J. J.: *Water Waves*, Interscience Publishers, 1957, pp. 461~469.
- 6) 岩垣雄一, 岩佐義朗: 転波列の水理学的特性について—薄層流に関する研究, 第7報一, 土木学会誌, 40巻, 1号, 昭 30.1, pp. 5~12.
- 7) Chow, V. T.: 石原藤次郎訳: 開水路の水理学(II), 昭 37.12, pp. 495~499.
- 8) Keulegan, C. H. and Patterson, G. W.: *Mathematical Theory of Irrotational Translation Waves*, *Journal of Research of N. B. S.*, Vol. 24, 1940, pp. 95~100.
- 9) Sandover, J. A. and Taylor, C.: *Cnoidal Waves and Bores*, *Houille Blanche*, No. 3, 1962, pp. 443~455.