

取水施設の流入量に関する研究

渡辺 忠・岡田 純治

Studies on the Discharge at Water-intake Structure

Tadashi WATANABE, Junji OKADA

This head work is the water-intake structure, by which irrigation water has been carried to the reservoir constructed in the other catchment basin. We always have intaken water from the river by this head work, even at the time of flood.

To design such structure, we have to know the relationship between the gate opening and the discharge of water or the discharge coefficient which varies widely according to the river water level. That orifice formula could be used in calculation to obtain the amount of discharged water from the gate has experimentally been confirmed by Toch, Honma and others.

The discharge coefficient of the intake gate Cq is shown in its relationship to parameters expressing the gate geometry. Any agreement between actual gate discharge and Toch's experimental results could never be found when the gate geometry is different. Therefore, we can only obtain Cq value through a specific model study for a particular project. Specially in this intake mention should be made here to the fact that the loss of head ϕ in the uniform flow sections upstreams and downstreams from the gate is ignored, and the value of ϕ related to the Cq value.

Relation between Cq and ϕ can be obtained by the following equation using the Bernoulli's energy theorem, in which ψ , ϕ are head loss parameters,

$$Cq = \frac{H_1 \cdot H_2}{a} \sqrt{H_1^2 (1 + \psi) + H_3^2 (\phi - 1)}$$

and Cq value can be obtained by calculating head loss. On the other hand, if the systematic graphical representation of the relationship between the value q and the elements is obtained by the experimental measurements of hydraulic model tests, $q \sim H_1/h \sim H_3/h$, in which H_1 , H_3 are the depths of flow in the upstream and downstream from the gates, should be considered applicable to the practical work and useful in checking up the experimental values with theoretical solution.

1. 緒 言

この頭首工は他の流域に設置された貯水池へ導入するための取水施設であって、洪水時にも取水することになっている。したがって、洪水位が大きく変動する場合の開度と流入量、すなわち流量係数の関係を知っておく必要がある。

水門を通過する水量を求めるときの流量係数については、HENRY および WILSON の模型実験による図表が高く評価されており、テンターゲートについては TOCH, METZLER, ダムからの流出水については岩崎, 本間, RHONE などの実験によって既に衆知されているところ

である。

しかし、流量係数は水門の構造と水理条件によって異なるものであって、現実に設計された水門において直ちに上記諸氏による数値が利用できるものではない。そこで、実際に設計された構造物における流入状況を知るために、模型施設について実測しその結果を検討したものである。

2. 水理条件

取入れ水門の流況はオリフィスに近似しているので、水門の流出量を求めるには一般にオリフィスの式が用いられる。しかし、実際に取入れ口の構造を定めオリフィスの式を用いてゲート取水量を求める場合には、多くの水理上の問題点が提起されるのが普通である。ここで、図2-1に平面図、図2-2に縦断面図を示し、あわせてこの実験における水理上の特殊条件を挙げるとつぎの通りである。

(1) 一般にバーチカルスルースゲートの場合上下流の水位によって、自由流出と潜り流出に区分されるが、この施設では下流の土砂吐せきの影響によって、水位の如何にかかわらず潜り流出である。

(2) 潜り流量 q を求めるには、ゲート上下流の水位 H_1 , H_3 、および流量係数 C が必要であるが、 H_1 , H_3 については測定が容易でかつその数値をチェックするのに都合のよい位置で実測した。したがって、この水位を用いて q を求める場合の C 値には、取入れ施設の構造によって生ずる各種の損失水頭などの特殊な水理条件が包括され、 C 値はきわめて複雑なものとなっている。

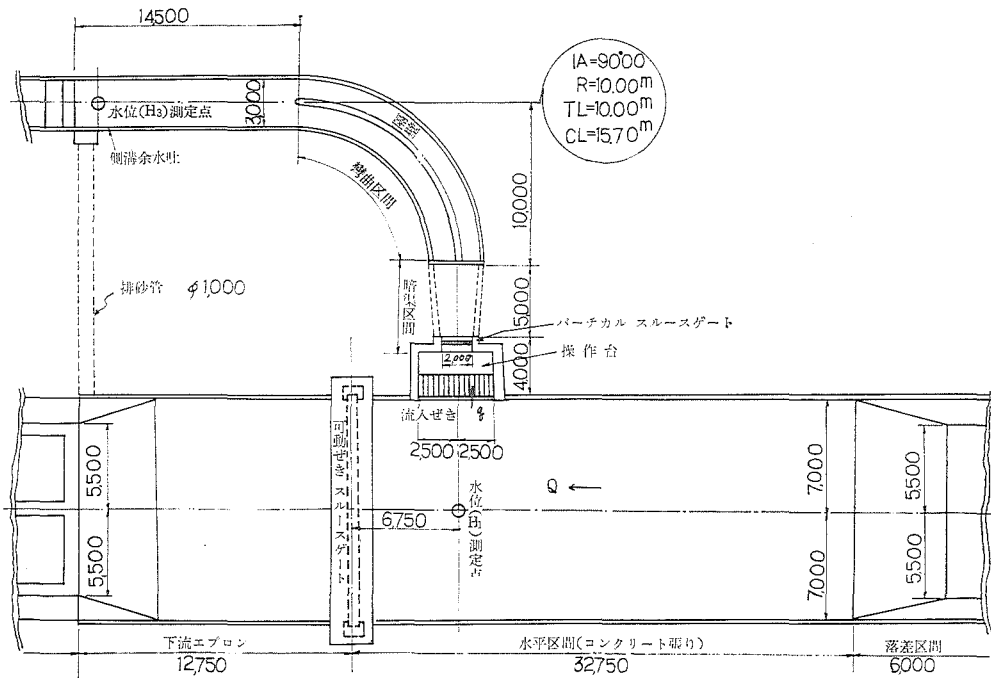


図2-1 取入れ口平面図

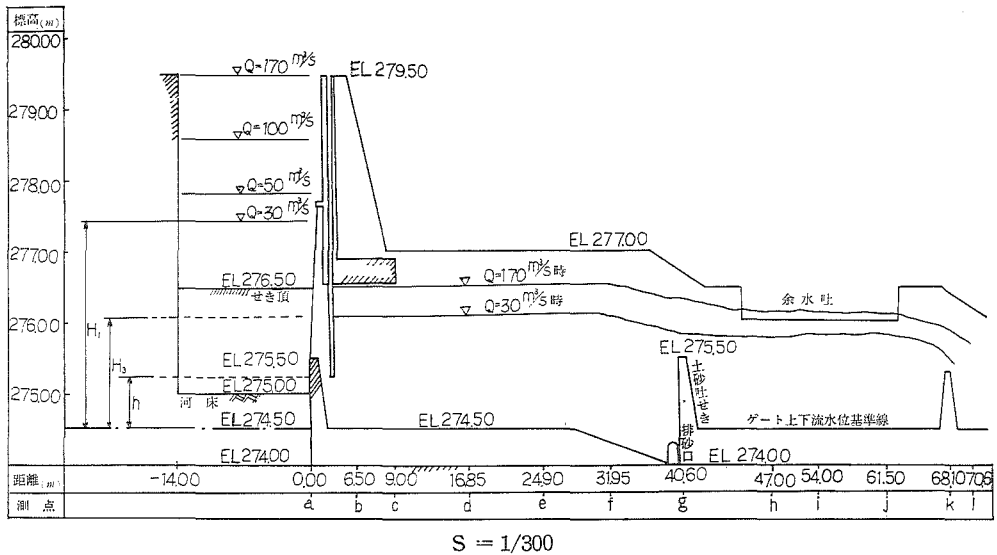


図 2-2 取入れ施設の縦断面図 (一次計画案)

(3) 損失水頭として、取水庭付近の通水断面の変化、取入れ口先端のスクリーン、ゲート下流の暗渠、彎局水路および $H_1 \sim H_3$ 間の摩擦損失がある。

(4) 取入れ口は落差 1 m のせきになっているので、流線彎曲による遠心力による圧力低下など、せきによる C への影響。

(5) 一般にオリフィスの流量計算では、ゲートは流心に直角に設置されている。しかし、この場合はゲートは河川の流心に平行に設置され、取入れ方向は河川に対して直角方向であって、直角分岐水頭を考慮する必要がある。

(6) 取入れ水路の通水能力の限界は $5 \text{ m}^3/\text{sec}$ であって、流入量が $4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以上になると波立ちや側壁からの越流などの損失を考慮しなければならない。

3. ゲート上下流の水位

頭首工エプロン床上的水位 H_1 と河川流量 Q との関係における実測値を示したのが図 3-1 における ×印である。せきにおける流量は、

$$Q = KBH^{3/2} = 2.35 \times 14.00 \times H^{3/2} = 32.9H^{3/2} \dots\dots\dots 1$$

また、せきにおける接近速度水頭は、

$$hv = \frac{v^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g \times B^2 \times H^2} = \frac{Q^2}{19.6 \times 14^2 \times H^2} = 0.0002603 \frac{Q^2}{H^2} \dots\dots\dots 2$$

であって、2式の関係は図 3-2 に示してある。1, 2式から $(H - hv) \sim Q$ 曲線を求めて実測値を修正した。したがって $(H \sim h_0)$ はゲート上流水位 H_1 であって、ゲート敷高をゼロとしたときの水深である。

取入れ水路内の水位は、土砂吐せきで次式によって流入量との関係を用いてチェックした。その結果、図 3-3 におけるような実測点 ×印と理論値実線の関係が得られる。流入量 q はつぎの式で表わされる。

$$q = KBh^{3/2} = 1.62 \times 3 \times h^{3/2} = 4.86 h^{3/2} \dots\dots\dots 3$$

この水位をゲート敷高においてゼロとした水深で表わしたのが、ゲート下流水深 H_3 である。

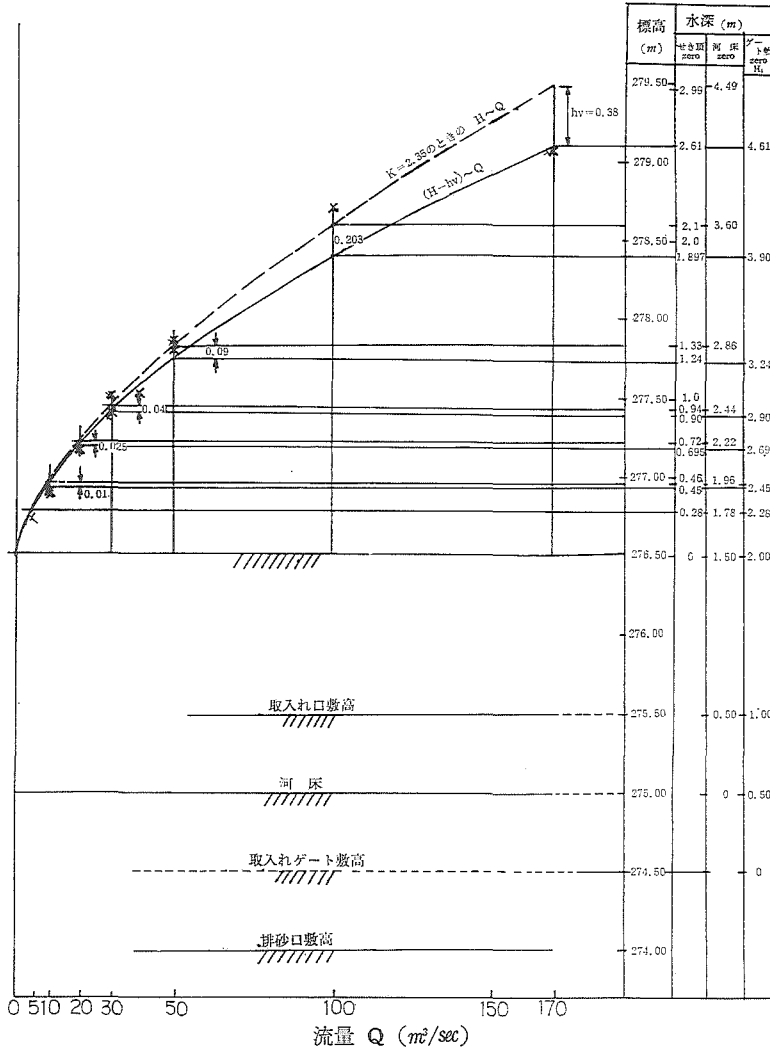


図3-1 河川における水位～流量曲線

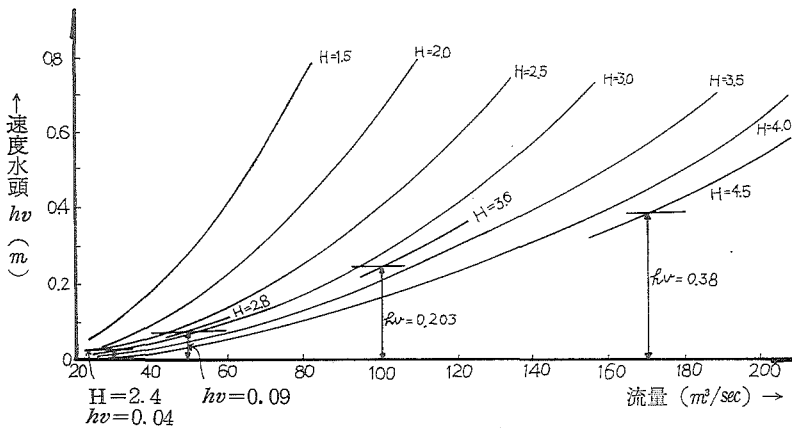


図3-2 河川の可動ぜきの接近速度水頭

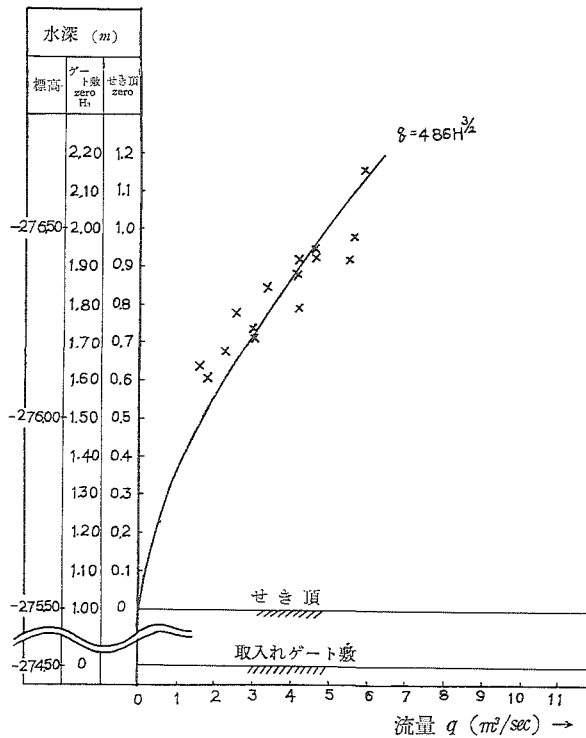


図3-3 取入れ水路の h~q 曲線

4. 流入水量および潜りオリフィスの流量係数

河川流量 Q が $170 \text{ m}^3/\text{sec}$, $100 \text{ m}^3/\text{sec}$, $50 \text{ m}^3/\text{sec}$, $30 \text{ m}^3/\text{sec}$ のとき、頭首工の可動せきを全閉した場合における取入れゲートの開度 h (m) と、流入量 q (m^3/sec) に関する実測値を示したのが図4-1である。この図にゲート開度を H_1/h で表わして挿入したが、 H_1/h をもって q 値を律するには変化の中が大き過ぎることを示している。

そこで、図4-1の $q \sim h$ 曲線の q に含まれている流量係数が q に対してどのような働きを与えているかということを知るために、つぎの図4-2におけるような図化を試みた。潜りオリフィスの式を $q = Cq \cdot B \cdot h \cdot \sqrt{2gH}$ (ここで $H = H_1 - H_3$) で示すと、水門巾 B は同一施設について論ずるときは一定値でかつ $\sqrt{2g}$ は定数である。ここで、流量係数 Cq と上下流水位差 H を一定値と仮定すれば、上式は $q = (Cq \cdot B \sqrt{2gH}) \cdot h = K_1 \cdot h = F_1(h)$ となり、 $Cq = 0.660$, $H = 3.24 \text{ m}$ と仮定すれば、図の a 直線が得られる。

つぎに、 $B \cdot \sqrt{2g}$ に加えてさらに各 Q (各 H_1) ごとには Cq は一定であると考え、各 Q ごとに $q = Cq \cdot B \cdot \sqrt{2g} \cdot h \cdot \sqrt{H} = K_2 h \sqrt{H} = F_2(h_1 \sqrt{H})$ によって算出された図の b 曲線が得られる。ここで、 $Q = 170 \text{ m}^3/\text{sec}$, $100 \text{ m}^3/\text{sec}$, $50 \text{ m}^3/\text{sec}$, $30 \text{ m}^3/\text{sec}$ に対して Cq は 0.660 , 0.632 , 0.597 , 0.575 を用いた。

つぎに、 B と $\sqrt{2g}$ だけを定数と考えると、 $q = B \cdot \sqrt{2g} \cdot Cq \cdot h \cdot \sqrt{H} = K_3 Cq h \sqrt{H} = F_3(Cq, h, \sqrt{H})$ の式で示されるのが C 曲線である。この b , c 曲線を比較することによって $q \sim h$ の関係における Cq 値の変化の状態を知ることができる。図によれば、各 Q の曲線において、 $Q \leq 3 \sim 4 \text{ m}^3/\text{sec}$ に達するまでは、 h (m) が増加するにつれてすなわち H_1/h 値が減少

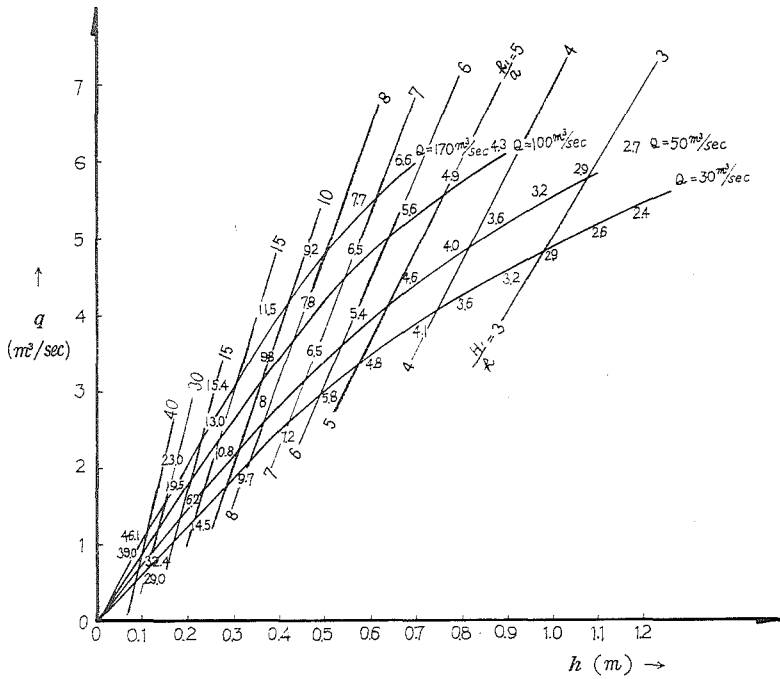


図4-1 ゲート開度 (h) と流入量の関係

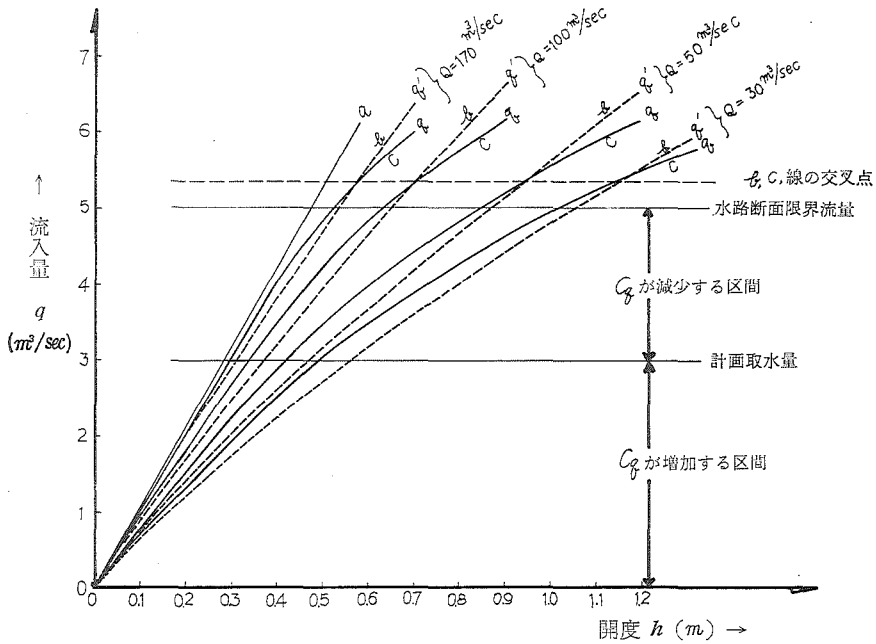


図4-2 $H_1 \sim q \sim h$ 曲線

するにつれて Cq が増大することを示しており、 $Q > 3 \sim 4 \text{ m}^3/\text{sec}$ を超過すると Cq は減少することを示している。この後者の原因については、今回の実験では詳細に追求していないが、直角分水による影響が表われておるものと思われる。

5. 潜りオリフィスの流量係数

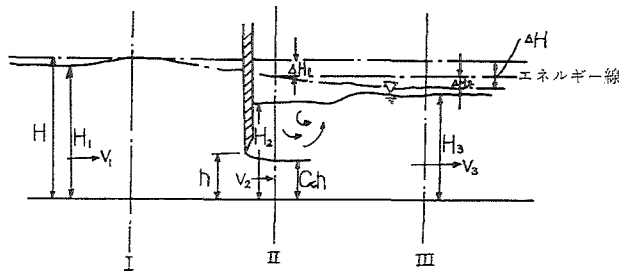


図5-1 オリフィスの潜り流出

図5-1のように、上下流水位測点区間において潜りオリフィス以外の損失水頭が考えられない場合、潜りオリフィスの式¹⁾は Bernoulli の定理を用いてつぎのように示される。

$$Q = Cq' h B \sqrt{2g(H_1 - H_3)} \dots\dots\dots 4$$

$$C'q = (H_3/h) / \sqrt{\psi + 1 - (H_3/H_1)^2} \dots\dots\dots 5$$

また、 $\alpha = H_3/\varepsilon h$ 、 $\beta = H_1/H_3$ 、 $\tau = (H_3/C_0 h)^2 - (H_3/H_1)^2$ とおけば、潜りオリフィス損失係数 ψ は次式となる。

$$\psi = (1/\beta)^2 + \tau^2 (\beta^2 - 1) / (\tau\beta - 2(\alpha - 1) \pm \sqrt{\{2(2-1) - \tau\beta\}^2 - \tau^2(\beta^2 - 1)}) - 1 \dots\dots\dots 6$$

また、 $\Delta H_2 = \Omega v_2^2 / 2g$ とおけば

$$\Omega = \psi (v_3/v_2)^2 = \psi (C_0 h/H_3)^2 = \psi/\alpha^2 \dots\dots\dots 7$$

上式における Cq' は取入れ施設におけるゲートのみすなわち潜りオリフィスのみに基因する流量係数であると考えられ、ゲート形式の種別、刃先の形、ゲートと流水方向の角度およびゲート開度によって支配されるもので、ゲート構造が決定されると開度のみによって支配されると考えられる。

上式によれば、 ψ 、 Ω が増大すれば、 $C'q$ は小さくなることを示している。また ψ 、 Ω の値については Toch¹⁾ が実験値と理論計算値の図化を行なっている。この図によれば、 $H_3/C_0 h$ が小さいほど、 H_3/H_1 が小さいほど $C'q$ は大きくなることを示している。(C_0 : 縮流係数)

いま、実験値と Toch の図表を比較するために、 $Q = 100 \text{ m}^3/\text{sec}$ および $50 \text{ m}^3/\text{sec}$ について $H_3/C_0 h$ および H_3/H_1 と $C'q$ の値を計算すると(計算数表は省略)、 h が大きくなるにつれて $H_3/C_0 h$ は小さくなるが、 H_3/H_1 は大きくなっている。このことを Toch の図表から判断すると、 $C'q$ は $H_3/C_0 h$ の影響によって増大し、 H_3/H_1 によって減少することを意味し、 $C'q$ は開度の増大につれて増加する要因と減少する要因をともに含んでいて、この計算の範囲では $C'q \sim h$ の関係を詳しくすることはできない。

いま、この計算数値を Toch の図表に挿入すると、 $H_3/C_0 h$ が小さくなるにつれて Ω はその影響を受けて小さくならうとするが、 H_3/H_1 の影響によって小さくなる程度が抑制されていることが分る。結局、 $H_3/C_0 h$ の影響が H_3/H_1 の影響より強いために $H_3/C_0 h$ が小さくなる。すなわち開度 h が大きくなるほど Cq' は大きくなるという傾向を示している。さきに、

$Q \leq 3 \sim 4 \text{ m}^3/\text{sec}$ において h が大きくなれば Cq' が大きくなるという実測結果を示したのであるが、このことは TOCH の実験結果と一致することを示すものである。いま、計算値と TOCH の図表を用いて、 $Cq' \sim H_3/C_0h$, H_3/H_1 の関係を示すと図5-2 のようになり、上記の傾向を示している。

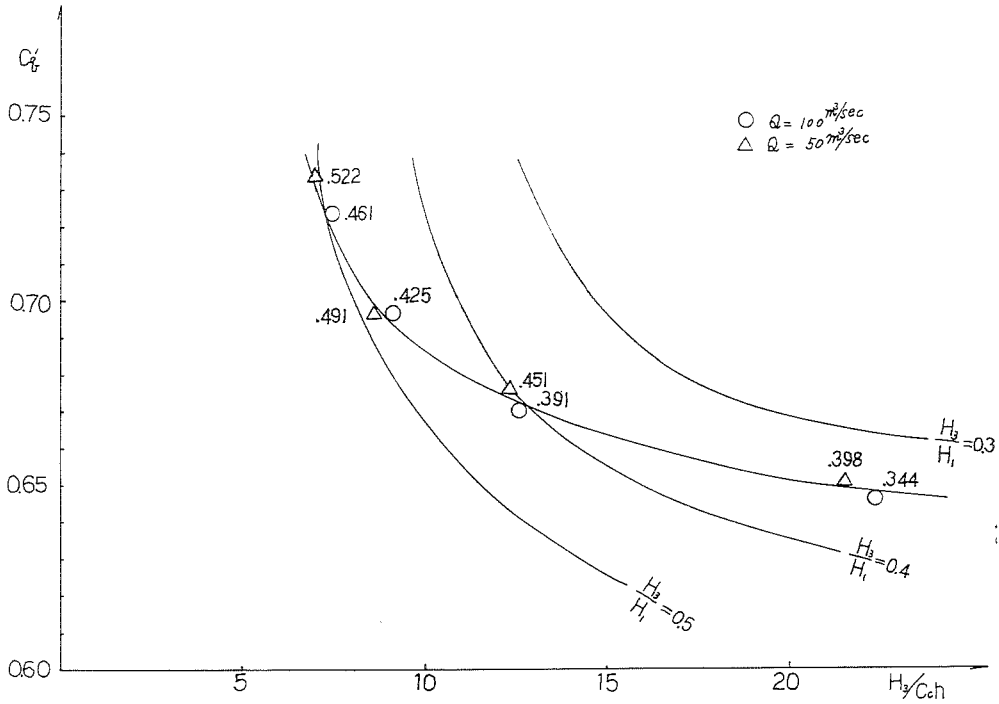


図5-2 潜りオリフィスの流量係数 Cq'

6. 取入れ施設の流量係数

流量係数 $C'q$ に関する限りでは、図5-1におけるI, II断面間の他の損失水頭を無視している。しかし、実際的な取入れ施設においては、かなり複雑な損失水頭を生じているので、それらを総括して v_1 の関数として表わせば、図5-1において $\Delta H_1 = \phi v_1^2/2g$, したがってI ~ III断面間の全損失水頭 ΔH は次式となる。

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 = \phi \cdot v_1^2/2g + \psi \cdot v_3^2/2g$$

この値を Bernoulli の定理に適用すれば

$$H_1 + (1 - \phi) (Q/H_1 B)^2/2g = H_3 + (1 + \psi) (Q/H_3 B)^2/2g \dots\dots\dots 8$$

$$\therefore Q = H_1 \cdot H_3 \cdot B \sqrt{2g (H_1 - H_3) / \{H_1^2 (1 + \psi) + H_3^2 (\phi - 1)\}} \dots\dots\dots 9$$

$$\left. \begin{aligned} Q &= Cq h B \sqrt{2g (H_1 - H_3)} \\ Cq &= \frac{H_1 H_3}{a} \sqrt{H_1^2 (1 + \psi) + H_3^2 (\phi - 1)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots 10$$

あるいは,

$$Cq = 1 \left/ \sqrt{\frac{1+\psi}{\left(\frac{H_3}{h}\right)^2} - \frac{1-\phi}{\left(\frac{H_1}{h}\right)^2}} \right. \left. \right\} \dots\dots\dots 11$$

$$Cq^2 \frac{1+\psi}{\left(\frac{H_3}{h}\right)^2} - 1 = Cq^2 \frac{1-\phi}{\left(\frac{H_1}{h}\right)^2}$$

取入れ施設におけるオリフィス以外のすべての各種損失水頭をφで表わすと、Cqはφとψをもって10, 11式で表わされることを示したもので、上式においてφ=0とおいて求めたCqは、ТоСНの5式の値に等しい。

実測結果を10式に適用して求めたCqとさきに計算したψを用いるとφ値を求めることができる(計算数表は省略)。これによればH₁/hが小さくなるにつれてφは大きくなり、したがってφに対応する流量係数Cf₁'は小さくなることを示している。このことは川村らの放流管ゲートの流量係数に関する実験結果²⁾とその傾向が一致していることを示している。いま、φを加味しないときの流入量q₁は、q₁ = C'q h B √2gH、また、φを加味した流入量q₂を、q₂ = C'q h B √2g - φ $\frac{v_1^2}{2g}$ で与えて、q₂/q₁ = Cf₁とおくと、Cf₁は次式で表わされる。

$$Cf_1 = \sqrt{\frac{H - \phi \frac{v_1^2}{2g}}{H}} \dots\dots\dots 12$$

12式を用いQ = 100 m³/sec, Q = 50 m³/sec についてCf₁値を計算(計算数表は省略)すると、開度が大きくなり、流量が増加するにつれて損失水頭係数φは小さくなるが、損失水頭φ $\frac{v^2}{2g}$ は大きくなり、その結果流量係数は小さくなることを示している。数表によればエネルギー損失水頭は、94~78%に減少させていることが分る。いま、11式のCqと5式のCq'の比をCf₁とおいて、Cf₁ = Cq/C'qを求めるとCf₁ = 97~88%にあって、さきに求めたCf₁'とほとんど一致している。

取入れ施設において、オリフィスの損失水頭ψ、およびそれ以外のすべての損失水頭の総括値φを求めることができれば、10式によってCqを、さらに9式によってqを計算によって求めることができる。

7. 流量係数の総括値 Cq

9式からCqの式はつぎのようになる。

$$Cq = \frac{q}{h B \sqrt{2g(H_1 - H_3)}} = \frac{q}{B \sqrt{2g} h \sqrt{H_1 - H_3}}$$

$$= \frac{q}{2 \times 44.3 \times h \sqrt{H_1 - H_3}} = \frac{q}{8.86 \times h \sqrt{H_1 - H_3}} \dots\dots\dots 13$$

実測値を用い13式によってCqを計算(数表は省略)し、開度(H₁/h)との関係を示すと図7-1, Cq~h/H₁を示すと図7-2となる。さきに示したように、q < 3~4 m³/secではH₁/hが小さくなるにつれてCqは大きくなり、q = 3~4 m³/sec 付近でピークを示している。また、Cq ~ H₃/H₁ ~ H₁/h の関係は図5-2のCq' ~ H₃/H₁ ~ H₃/C'h の関係と相似している。

8. 上下流水頭差を包括した流量係数 C

図2-2に示すとおり、H₁とhが与えられるとqを定めることができ、qと水路構造が与

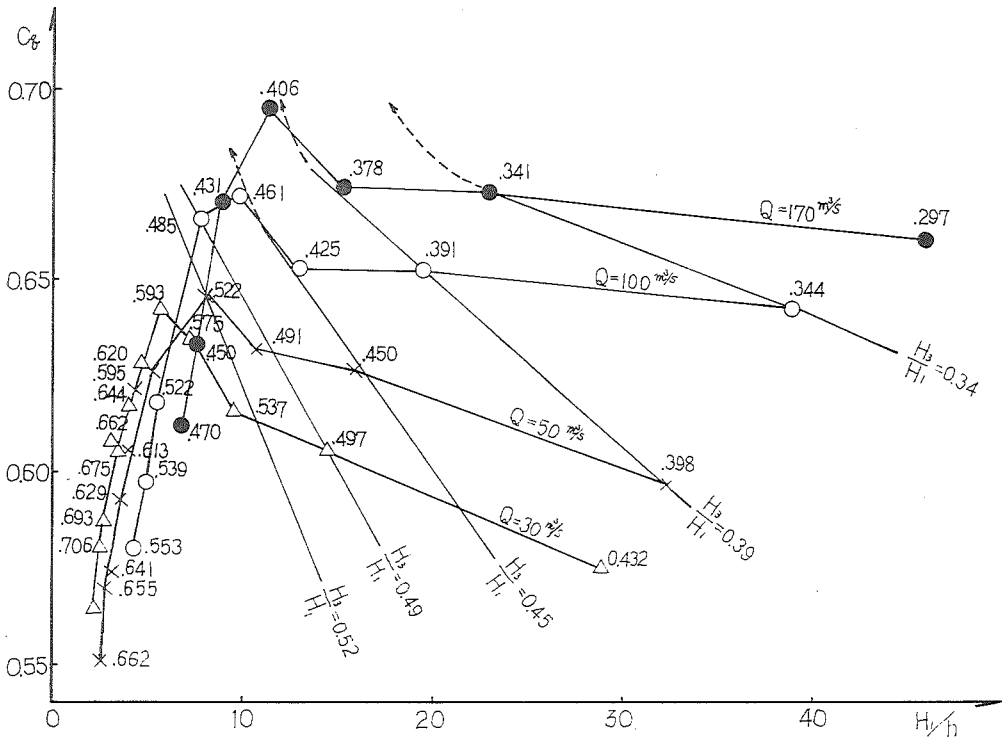


図7-1 Cq と開度 (H_2/h) の関係

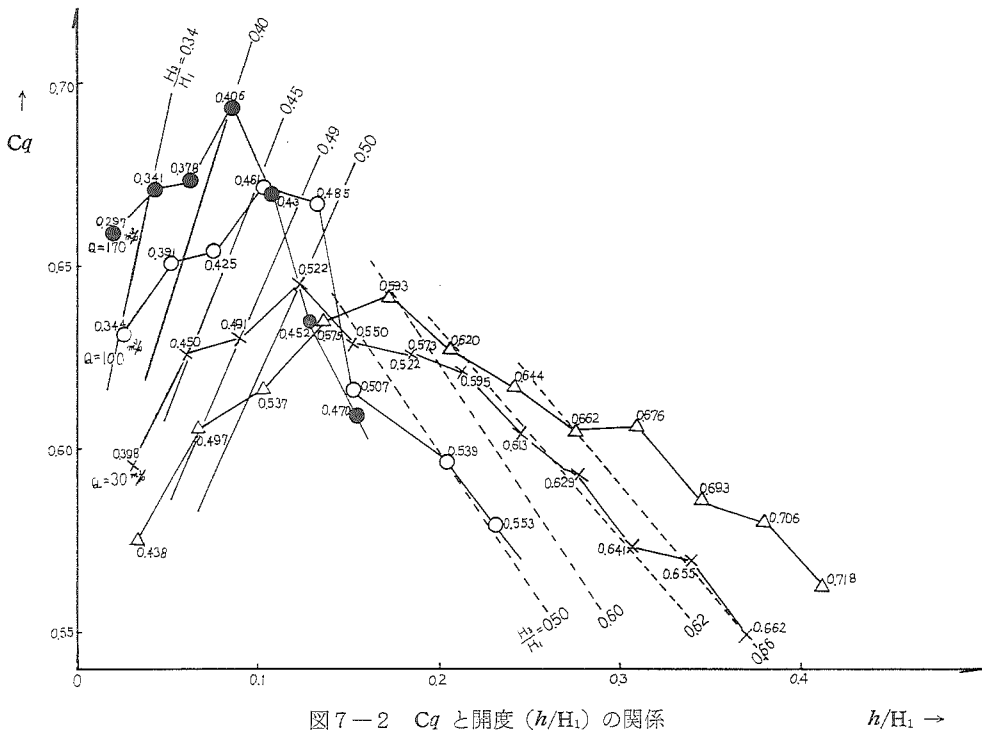


図7-2 Cq と開度 (h/H_1) の関係

$h/H_1 \rightarrow$

えられると H_3 を定めることができるから、 H_3 は H_1 と h の関数である。そこで潜りオリフィスの式における H_3 の影響を流量係数に包括させその値を C とおくならば、取水量の式は次式となる。

$$q = CBh\sqrt{2gH_1} \dots\dots\dots 14$$

この式は自由流出と同じタイプの式であって、本間などによって一般化されている。実験の結果から次式によって C 値を求め(計算数表は省略)、 $C \sim H_1/h \sim H_3/H_1$ および $C \sim H_1/h \sim H_3/h$ の関係をそれぞれ図 8-1, 8-2 に示す。

$$C = \frac{q}{Bh\sqrt{2g}\sqrt{H_1}} = \frac{q}{2 \times 4.43 \times h\sqrt{H_1}} \dots\dots\dots 15$$

図 4-2 の C 値を $Toch$, 本間らの実験結果と比較すれば、いくらか数値が小さくなっているが、これは著者らの取入れ施設は損失水頭が大きい構造であることを示すものである。

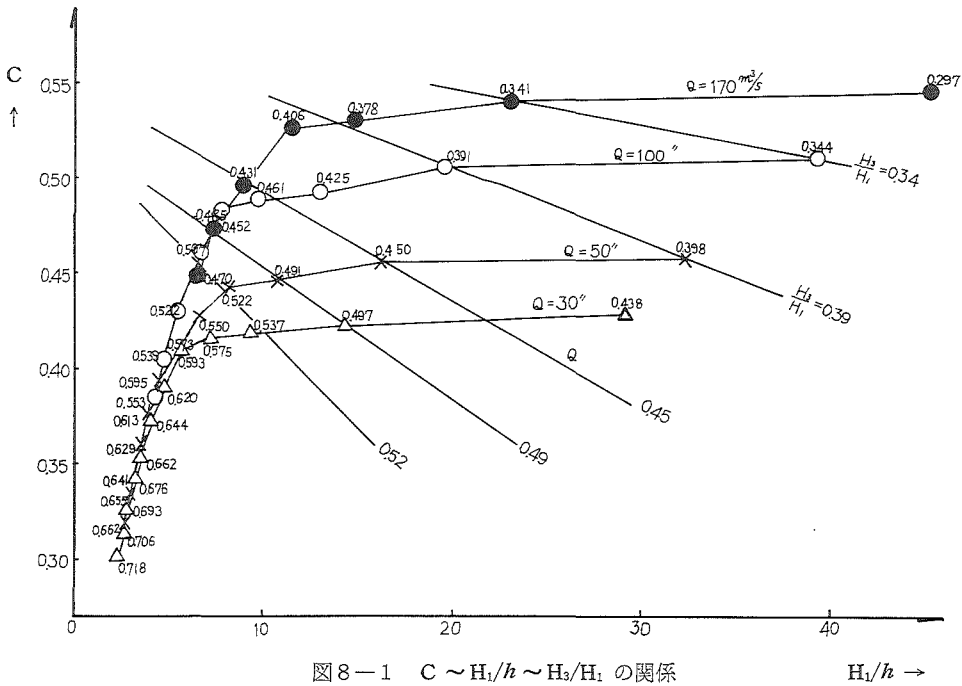


図 8-1 $C \sim H_1/h \sim H_3/H_1$ の関係

9. $q \sim H_1/h \sim H_3/h$ 曲線

潜りオリフィスだけによる流量係数 $C'q$, その他の一切の損失水頭を包括した流量係数 Cq , 上下流水位差までを包括した流量係数 C について論じてきたのであるが、流量係数を省略して直接 $q \sim H_1/h \sim H_3/h$ の関係が求められるならば、この方が実用的である。この関係を示したのが図 9-1 である。 $q \sim H_1/h \sim H_3/h$ の関係は Cq' , Cq , $C \sim H_1/h \sim H_3/h$ の関係と類似した曲線群を示しているのでチェックするのに便利であり、とくに水理模型実験の結果を整理する場合には図 4-1 の整理方法に比べるとはるかに有利な方式である。

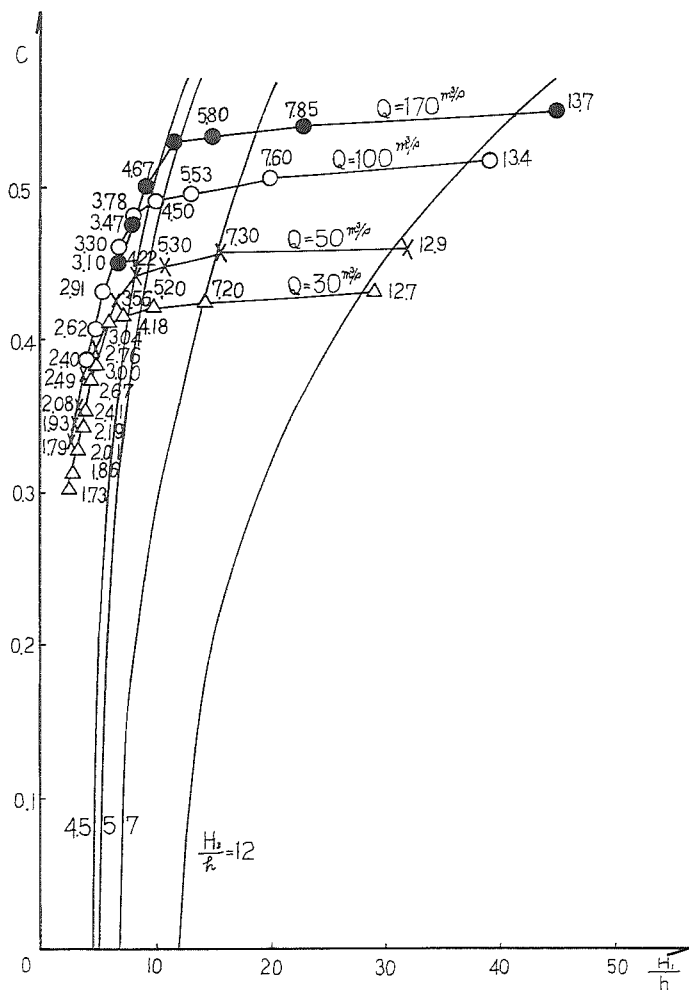


図8-2 C~H₁/h ~ H₂/h の関係

10. 結 言

取入れ施設の流入量の式が一般の潜りオリフィスの式と異なるのは、その構造に由来する各種の損失水頭を見込まなければならないことである。このような損失水頭の値を知ることができるならば、その総括損失係数 ϕ 値を著者の式 9 ~ 11 に適用することによって流量係数 Cq 、流量 q へと誘導することができる。一方、このような計算による方法とは別に、水理模型によって実測値を整理する場合は、むしろ $q \sim H_1/h \sim H_2/h$ の関係として整理した方が、上記計算値とチェックするのに便利であり、かつ他の整理方式に比べて優れている。

この実験結果を公表するに当たって、農林省勝英開拓建設事業所の御厚意に対し謝意を表します。なお、ページ数の関係で本題に関する多くの数表の掲載を省略しているので御了承下さい。

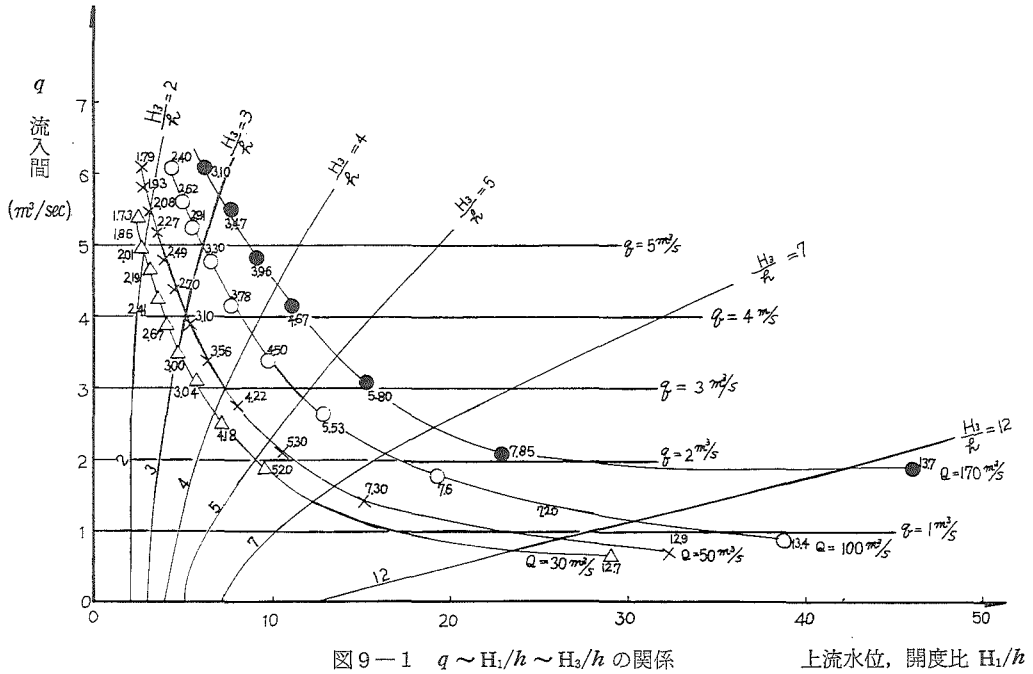


図9-1 $q \sim H_1/h \sim H_2/h$ の関係

上流水位，開度比 H_1/h

参考文献

- 1) ARTHUR TOCH (1953) : Discharge Characteristics of Tainter Gates, *Proc. Asce*, 79 (169), 1~20
- 2) 川村幸司ほか (1971) : 放流管ゲート操作時における放流量の推定方法, 土木技術資料, 13 (7), 348 ~ 345