

◆ 報文 ◆

ドロップゲートの水理特性

宮脇千晴*

1. はじめに

ダムの非常用洪水吐き(計画を上回る洪水に対するための放流設備)として越流頂に設置されるクレストゲートは、引上げ式ゲートと越流式ゲートに大別される。引上げ式ゲートは、扉体を上方に引上げる開操作をするゲートであり、ゲート開きにより放流断面が固定されるゲート半開流から自由越流へと流れが変化する。一方、越流式ゲートは、扉体を倒すあるいは下降させる開操作を行うものであり、放流時の流れの形態が常に自由越流状態となっていることに特徴がある。常に、越流状態で放流できることから、ゲート半開時の水位上昇に伴う放流量の増加が大きく、水位制御に適したゲート形式である。

本報文で対象とするドロップゲートは図-1に示すように通常のローラゲートと同じシンプルな構造をもち、高い扉高への対応が容易な形式のゲートである。下方にゲートを格納するスペースが必要であるが、ダム越流頂では比較的容易にこのスペースを確保することが可能であり、今後の発展が期待されている。

本報文では、越流式ゲートの中からドロップゲートを対象にその水理特性について調査した。ドロップゲートでは、アップリフト¹⁾と閉空間への給気対策が問題となる。ゲートを上向きにあげようとする力をアップリフトと呼んでおり、図-1に示すように、水密ゴムをゲート下流の堤体に設置する場合には、ゲート底面に水圧が作用してアップリフトが生じる。このアップリフトは越流水深が大きくなるほど、大きくなることが予想され、アップリフトの推定方法及びその軽減方法を検討する必要がある。なお、ゲートの上流にコンクリート構造物を設置して水密ゴムを設置する場合には、ゲート底面に水圧が作用しないため、アップリフトは生じない。また、ゲート部分開時には、ゲートを越流する水脈が下流のダム堤体に落下し、ゲート下流に閉空間が生じるため、

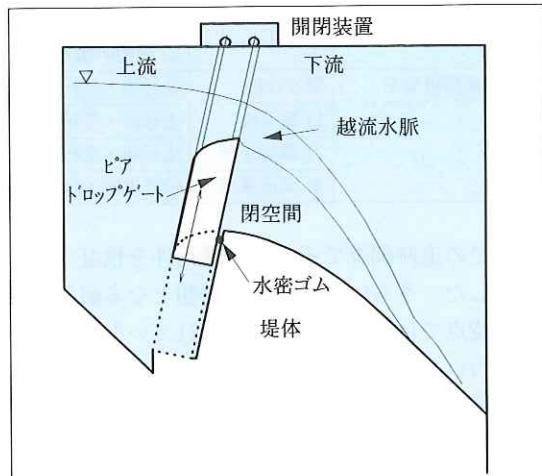


図-1 ドロップゲート概要

安定した放流状況となるようにこの閉空間への安定した給気が必要となる。

本報文では、給気対策として戸溝位置でのオフセット等を施す方法についてその効果を明らかにするとともに、ゲート形状と放流特性及びアップリフト特性の関係を把握した。

2. ドロップゲートの検討形状と検討方法

ドロップゲートの検討は、図-2に示すようにAダムの非常用洪水吐きとして計画されているものについて、扉体形状3ケースについて実施している。このため、以下の検討では、実機寸法で表示することとした。ケース1, 2は、通常、越流頂縦断形状でよく用いられているハロルドの標準越流頂形状の一部をゲート形状に用いた場合で、このうちケース2はケース1のゲート上面下流端にリップを設置してゲートに作用する圧力を大きくさせようとしたものである。なお、ケース2では、ゲート全開時にも、リップ先端が越流頂天端より0.2m突出している。ケース3は、ケース1, 2よりゲートの扉体厚を小さくし、かつゲート設置位置をハロルドの標準越流頂前面に設置したものである。また、越流ゲート1門と両側のピア2つを抽出して縮尺1/25の模型を製作し、水理模型実験を行った。実験では、

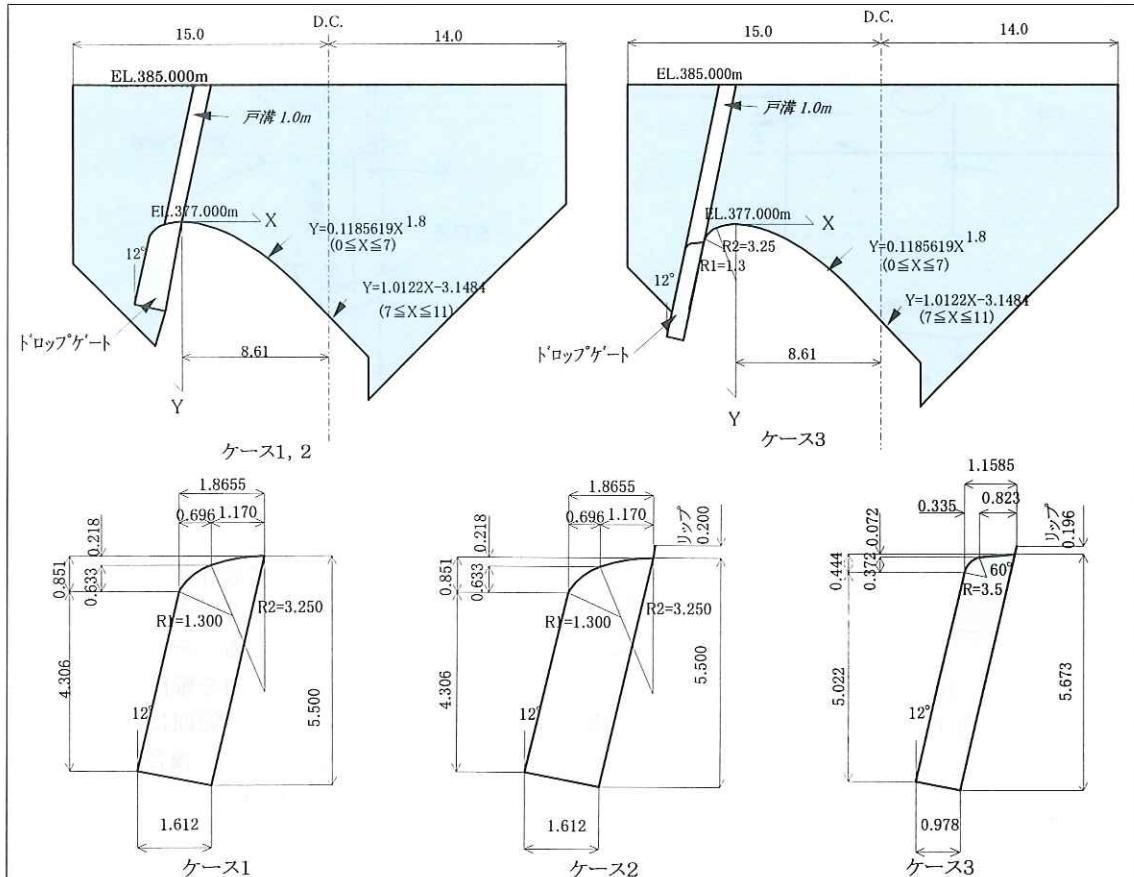


図-2 検討形状 (単位:m)

ゲートの操作範囲の中で、設計条件の放流能力を確保しているか、越流面に危険な負圧が生じていないか、あるいはあらゆるゲート開度で安定した流況を呈しているか等を調査するために、観測項目としては、放流能力、ゲート作用圧力、越流水面形及び流況について実施している。

3. 検討結果

3.1 流況

越流式ゲートの流況は、ゲート全開時とゲート部分開時の2つに区分される。ゲート全開時は、リップが突き出しているケース2を除くケース1, 3とも標準越流頂となり、流れも安定している。一方、ゲート部分開時には、ゲート先端とゲート下流部分に段差が生じるためにゲート下流に越流水脈とゲート下流部分からなる閉空間が形成される。この越流水により閉空間内の空気が下流に連行され、閉空間内の圧力低下によるゲート振動等が生じる場合があり、安定した越流状況を確保するために閉空間内に適切に給気を行う必要がある。

本検討では、戸溝下流にオフセットを設置することにより、流水がオフセット下流で側壁に接地するようにして、流水と側壁との間に空気が通る空間を形成し、ここから給気する。

まず、ゲート全開時、ゲート部分開時に共通な戸溝部の流況について述べる。この戸溝は、ゲートを開閉する場合に必要なワイヤロープ・ローラや水密部を納める場所である。

戸溝付近の流れは、図-3に示すように、戸溝を飛び越すほどの流速がないため、戸溝内に流水が回り込み、縦渦が発生し、下流へ流れしていく流況を呈している。この縦渦は、越流水深が大きくなるほど規模・流速とも大きくなる。また、ゲート部分開時に、ゲート開きと越流水深の関係でオフセット下流で水脈と側壁の空間がなくなり、ゲート下流に給気されない場合も見られた。この縦渦は、ゲート全開時の設計洪水位で最大となり、戸溝内に設置するゲート引き上げ用のワイヤロープやひいてはゲート自体を振動させる恐れがあるため、これを解消する必要がある。また、ゲート

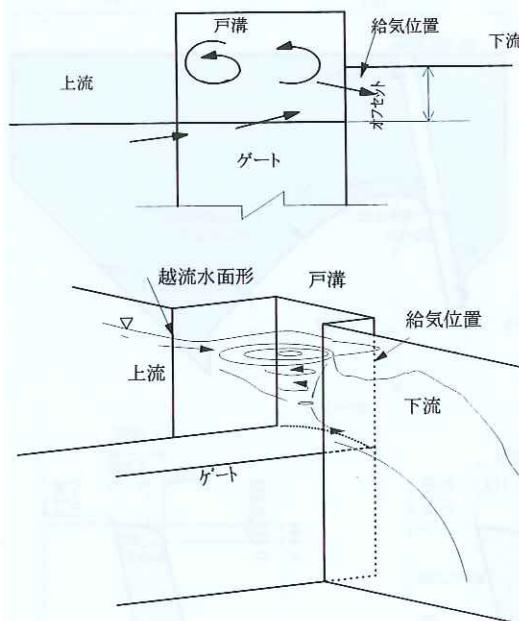


図-3 戸溝部での流況

部分開時に戸溝下流オフセットからの安定した給気を確保し、かつ、戸溝内に流水が巻き込まないようにするために、戸溝部分を埋めた整流板（図-4 参照）を設置する。整流板の設置高さは、越流頂天端標高（EL. 377.0m）を基準にとると、ダム計画上の最大水位である設計洪水位（EL. 383.5m）の越流水面形から判断して、5m程度必要となる。

標準越流頂の一部をゲートとして用いているケース1, 2における部分開時のゲート越流水脈は必ず下流側へと落下する。従って、戸溝に設けたオフセットから常に給気がなされており、流れは安定している。しかし、ゲート開度が小さい場合は越流頂部下流側に落下した水が上流側への戻り流となり、閉空間に少しとどまる流況を示した。このため、ゲート下流に給気管を設置して、流況を確認したが、給気管を設置したことによる流況の変化は見られず、オフセットからの給気が十分であるものと考えた。次に、ケース3であるが、ゲート設置位置を標準越流頂の前面に設置したことにより、ゲート開度と越流水深の条件によっては、ゲート越流水脈が上流側への戻り流となり、標準越流頂の複合円弧部に背水がみられた。これにより、給気されない状態となるため、給気管を設置した。全開時も含む全てのケースで給気されていることがわかったが、その給気量はかなり小さいものとなっている。

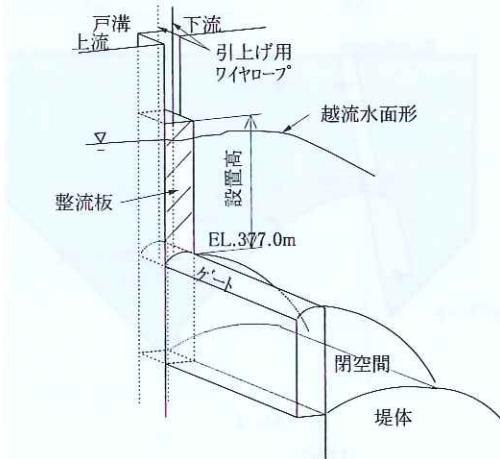


図-4 整流板説明図

本ゲートは桁構造として設計される止水線となるゲート下流面及び急変流となる越流面に板状のスキンプレートが設けられる。そこで、ゲート全開時の標準越流頂の放流能力を確保するのに必要な越流部のスキンプレートの範囲について検討した。検討は図-5に示すように、複合円弧始端から上流側へ上流面長さを0.5mづつ長くして、放流能力や流況の変化を判断基準として検討した。なお、この時、ゲート作用圧力については、標準越流頂としているため、調査していない。

ここでは、ゲートの放流能力として、式(1)に示す流量係数 C を用いて上流長さ L との関係を調査した。調査結果を図-6に示す。

$$C = Q/(Bh^{1.5}) \quad (1)$$

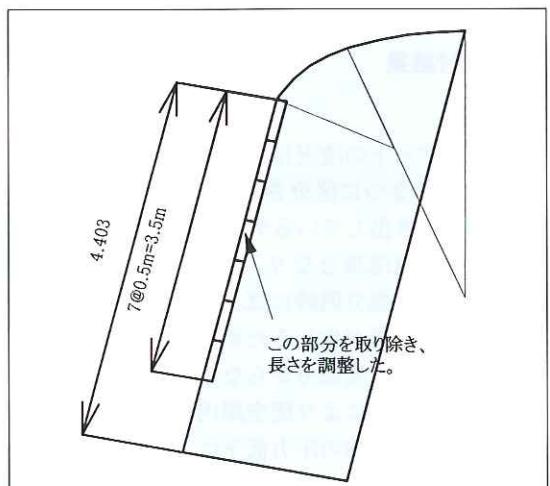
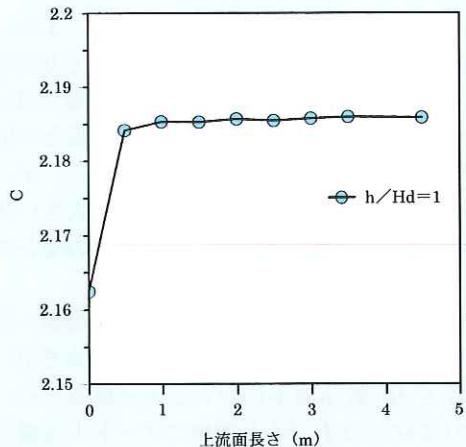


図-5 上流面形状の検討

図-6 上流面長さ L と流量係数 C

ここに、 Q : 流量 (m^3/s), B : 越流幅 (m),
 h : 越流水深 (m), Hd : 設計水頭 (6.5m)

図-6 より、上流面の長さは、0.5m 以上あれば放流能力に影響がないことがわかった。なお、0.5m でも放流水脈の乱れは強くなつておらず、それほど大きな影響は見られなかつた。

3.2 放流能力

放流能力の検討は、式(1)の流量係数 C を用いて検討する。また、標準越流頂の流量係数は、石井・藤本²⁾による流量公式もこの C の算定法として式(2)で提示している。

$$C = 1.7041 \{0.704(h/Hd)\}^{0.5} \quad (2)$$

式(1)を用いて、流量係数 C を算定し、越流水深 h を設計水頭 Hd で無次元化した h/Hd との関係を図-7 に示す。図-7 中の実線は式(2)を表している。図-7 より、放流能力は流れの区分とともに、全開時と部分開時に区分され、ケース 1 では、全開時で式(2)とほぼ同程度となっており、部分開時には式(2)より 10% 程度大きくなっている。ケース 1 にリップをつけたケース 2 は、全開時と部分開時の放流能力に差は見られず、ともに式(2)から 8% 程度小さい値となっている。この理由は、全開時に天端標高より 0.2m リップが出ているためである。

次に、ケース 3 の放流能力であるが、ゲート先端標高が、越流頂天端標高と一致している $G = 0\text{m}$ (G : ゲート先端標高と越流頂天端標高の差) では、ケース 2 と同じとなり、図-7 に示すように式(2)から 8% 程度小さくなっている。式(2)と同

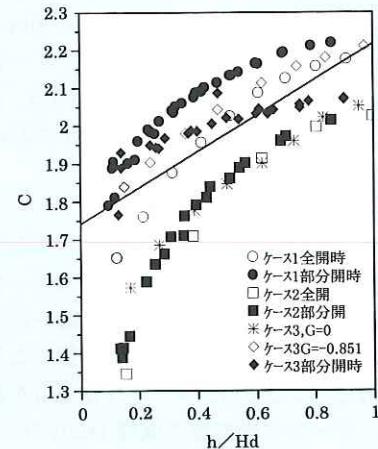


図-7 放流能力調査結果

程度の放流能力が得られたのは、ゲート先端標高が越流頂天端標高より約 $0.13Hd$ (-0.851m) 下がりの場合であった。これは、ケース 1 の標準越流頂の円弧始端部下方の必要長さの検討とほぼ同じ (この場合では 0.5m 以上) 結果となつてゐる。また、部分開時 (\blacklozenge : $G = 1, 2, 3, 4\text{m}$ のデータを示してゐる) では、ゲート先端が越流頂天端標高と同じ場合 ($G = 0\text{m}$) を除いて、他のゲート開度では、越流水深が同じであれば、ほぼ同じ放流能力となつてゐる。

3.3 越流水面形

標準越流頂の越流水面形を求める式は、石井・藤本らにより、式(3)が提案されている。

$$-Y/Hd = A/Hd + B(X/Hd) + CHd(X/Hd)^2 \quad (3)$$

$$A/Hd = -0.743(h/Hd)^{1.042}$$

$$B = 0.361(h/Hd)^{0.176}$$

$$CHd = 0.232(h/Hd)^{-0.275}$$

適用範囲 $-0.4 \leq X/Hd \leq 0.4, 0.3 \leq h/Hd \leq 1.1$

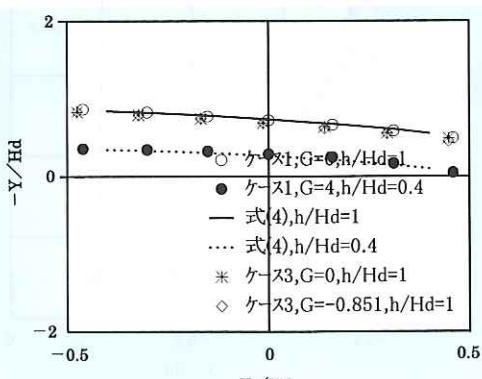


図-8 越流水面形

図-8 にケース 1 のゲート全開及び部分開の越流水面形の代表例とケース 3 の $G = 0m$, $G = -0.851m$ の場合を示す。図-8 より、ゲート開度に関係なく $-0.4 \leq X/Hd \leq 0.4$ の間は、式(3)でよく表されている。また、ケース 3 においても同様である。

3.4 ゲート作用圧力とアップリフト

このタイプのゲートでは、越流水による上向力を設計条件に追加する必要がある。つまり、ゲート下流に水密があるために、越流面下面からゲートを押し上げる力 F_8 (アップリフト) が働くことになるためである。ここでは、ゲート作用圧力を調査するために、ゲートに模型値で直径 1mm の穴 (ピエゾ) を開けて、その位置に働く圧力を調査した。 F_8 は、通常式(4)で表され、貯水池水位 H (EL. m) から扉体に作用するピエゾ水頭 P_i (EL. m) (圧力水頭 P (m) にピエゾ標高 H_p (EL. m) を加えたもの) を差し引いたものを、扉体厚分積分して、越流幅 B (m) を乗じて求める。

$$F_8 = B \sum (H - P_i) = Kp \cdot B \cdot D \cdot h \quad (4)$$

ここに、 Kp : アップリフト係数, B : 越流幅 (m),
 D : 扉体厚 (m), h : 越流水深 (m)

ここで、ケース 1 について、縦軸に圧力水頭 P (m) (各ピエゾ水頭からピエゾ標高を引いたもの) を設計水頭 Hd ($=6.5m$) で除した P/Hd と横軸にゲート上流端を基準に下流方向の水平距離 X を Hd で除した X/Hd について、整理して図-9 に結果を示す。図-9 より、上流傾斜部

分 ($X/Hd < -0.3$) の圧力は、ゲート開き G に関係なく、ほぼ一定勾配で低下している。また、円弧部分では h/Hd が大きいほど急激に圧力が低下しており、 $h/Hd = 1$ ではゲート下流端でほぼ 0 となっている。また、 $h/Hd = 0.6$ の場合の圧力分布はほぼ同じとなっている。これから、ゲートに作用するアップリフトは、 h/Hd が大きいほど大きくなることが分かり、 $h/Hd = 1$ の場合に最大となることが分かる。

次に、ゲート作用圧力の調査から、縦軸に圧力水頭 P (m) (各ピエゾ水頭からピエゾ標高を引いたもの) を H' (貯水池水位からピエゾ標高を引いたもの) で除した P/H' と横軸にゲート上流端を基準に下流方向の水平距離 X を D で除した X/D について、整理して図-10 に結果を示す。縦軸の P/H' はゲート作用圧力と静水圧の比を表しており、この圧力分布と $P/H' = 1$ で囲まれた面積に越流幅 B を乗じるとアップリフトが求まることとなる。図-10 より、上流傾斜部分 (ケース 1, 2 で $X/D = -0.7$, ケース 3 で $X/D = -0.56$) では緩やかな低下傾向となっており、ケースの差はあまりない。次に、リップの有無の違いだけのケース 1, 2 を比較すると、円弧始端部では、同様に急に低下しているが、リップのないケース 1 ではゲート下流端で $P/H' = 0$ に向かって低下しているのに対して、リップをつけたケース 2 では、途中から徐々に大きくなっており、アップリフトがこのリップにより低減できていることがわかる。このケース 2 と同じリップをもつケース 3 でもほぼ

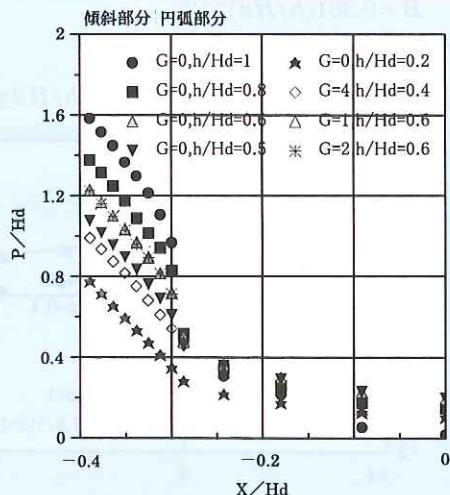


図-9 $P/Hd \sim X/Hd$ 関係

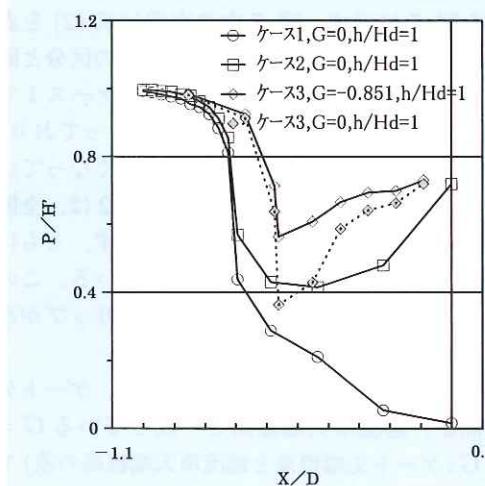


図-10 $P/H' \sim X/D$ の関係

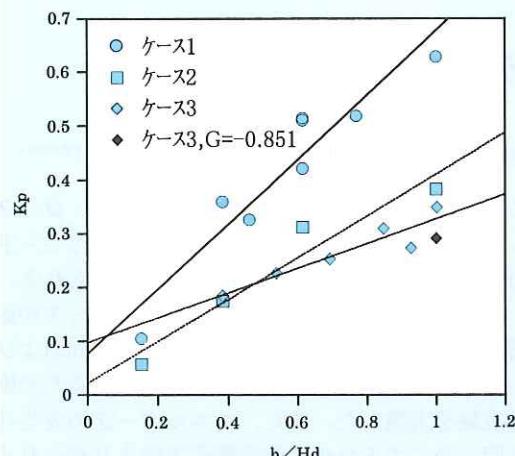


図-11 アップリフト係数

ケース2と同じ傾向である。ここでは、示していないが、ゲート部分開時もほぼ同じ傾向を示しており、ゲート先端にリップを設置することは、アップリフト対策に効果的である。

次に、式(4)を用いて、アップリフト係数 K_p を算定し、 h/Hd との関係を求めたのが図-11である。なお、図-11中の実線は、各ケース毎に K_p と h/Hd の関係を最小自乗法で求めたものである。ここで、アップリフト係数の算定には、上流傾斜部分も含めている。ゲート開度でややばらつきがあるものの、 K_p は H/Hd に比例する関係が認められる。また、リップの有無の違いのみのケース1, 2について比較すると、リップをつけることで、 $H/Hd = 1$ で K_p は、約 55%程度低下しており、 H/Hd が小さくなると、 K_p が約 40%低下している。また、上流傾斜面でのアップリフトは、かなり小さくなっている ($H/Hd = 0.5$ 以下の場合は逆にゲートを押す方向に働いている)、上流傾斜面を除いた場合のアップリフト係数は、扉体厚 D が小さくなる比率で K_p は増加する。次に、リップ高をケース2と同じにしたケース3では、ケース2よりさらに小さくなっている。

4. まとめ

ドロップゲートの水理機能について、検討した結果をまとめると以下に示すとおりである。

- (1) 越流ゲートの流況では、大きくゲート全開時とゲート部分開時の2つに区分される。両方に共通するものとして、戸溝部の流況改善が必要となり、本検討の結果より、ゲート操作水頭範囲内の

水面形を考慮してそれ以上になるように戸溝部に整流板を設置する必要があることがわかった。

ゲート部分開時には、この他に、ゲート下流に閉空間が生じ、越流水脈による空気連行に見合う給気が必要であり、本検討のように戸溝下流にオフセットを設置する他、給気管も設置した方がよい。また、整流板を設置することにより、このオフセットからの給気が改善されることがわかった。ゲート全開時には、戸溝部の流況改善のみ問題となる。

(2) 放流能力の検討結果より、標準越流頂の前面にリップをつけたゲートを設置する場合(ケース3)には、ゲート先端標高が越流頂複合円弧始端標高より 0.5m より下の位置でほぼ標準越流頂の放流能力が得られる。

(3) 越流水面形は、石井・藤本らによる式(3)でほぼ推定可能である。

(4) アップリフトは、越流水深に比例しており、設計条件としては、ゲート全開時の設計水頭時について調査する。ゲート形状に標準越流頂の複合円弧を採用する場合(ケース1)には、アップリフトがかなり大きくなるために、何らかの対策が必要となる。今回検討した中では、ゲート全開時に標準越流頂と同じ放流能力を有し、かつアップリフトがケース1の約半分程度となっているケース3が一番良い結果となった。

本検討では、ドロップゲートを非常用洪水吐きとして使用することで検討しているが、これを常用洪水吐きあるいは水位維持用に使用する場合には、ここで検討したものの他に、越流水深が小さい場合に発生することが知られている水脈振動防止対策を施す必要がある。

参考文献

- 1) 水理公式集(社)土木学会、平成11年版、p258。
- 2) 石井文雄、藤本成：越流余水吐きの水理機能に関する研究(1)，土木研究所報告、第127号、1966。

宮脇千晴*



建設省土木研究所ダム部水工水资源研究室主任研究员
Chihiro MIYAWAKI