

ウォールを用いた流入濁水の 流動制御とその排除効果

CONTROL OF DENSE INFLOWS
IN A WELL-MIXED RESERVOIR BY A WALL

秋山 壽一郎¹・重枝 未玲²・山崎 佳祐³

Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA and Keisuke YAMASAKI

¹ フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 工学研究院建設社会工学研究系
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

² 正会員 博士(工学) 九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系(同上)

³ 学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻(同上)

As a countermeasure to water quality control as well as sedimentation due to turbid water inflows in a well-mixed reservoir, downstream control of inflowing dense water by means of placing a wall near a dam, is investigated experimentally. Effects of a fence placed upstream of the reservoir on plunge flows, controlled by a wall, are examined as well. It is found that the wall is capable of efficiently displacing the inflowing dense water out of the reservoir and maintaining the position of plunge point in stable condition. It is also found that the fence does not contribute to the displacing inflow water, but may contribute to stabilizing plunge point, dependent on the installed position and submerged depth of the fence.

Key Words : well-mixed reservoir, plunge flow, water quality, turbidity, sedimentation, wall, fence

1. はじめに

ダム貯水池の流動現象や水質は、流入・流出水の影響を強く受ける。このため、池内に流入してくる濁質や栄養塩を滞留させることなく、適切な方法により池外に速やかに放流させることが、池水水質とダム機能の保全を図る上で効果的である¹⁾²⁾。

ダム貯水池の池内対策としては、①曝気により循環流を発生させる「循環流制御設備」、②フェンスやパイプライン等の選択流入施設により、河川からの流入水を所定の水深位置に潜り込ませる「選択流入設備」、③ダム堤体に設けられたゲート付き放流管により出水時に中・底層から放流する「選択放流設備」がある²⁾³⁾。これらは、池内の流動制御により水質保全を図る方法であり、まとめて「流動制御法」と呼ばれる。

「流動制御法」のひとつである「選択放流」は、ダム堆砂の原因となる高濃度のウォッシュロードを池外に放流するので、水質保全対策としてだけではなく、ダム機能の保全対策としても効果的である。

ところが、わが国の全てのダムに「選択放流設備」が

設けられているわけではなく、集水面積が比較的小さな重力式ダムの多くでは、クレストゲートを持たない常用洪水吐きが設置されているのが実情である。そのようなダム貯水池では、自然越流による表層放流が行われるので、出水時に池内に流入してくる濁質や栄養塩の排除が困難となり、土砂の捕捉率も大きくなりやすい。

この対策として、洪水吐き前面にカーテンウォールを設置し、出水時に池内を流下してきた高濃度濁水を貯水池底部からウォールで導き、洪水吐きから放流する方法が取られることがある⁴⁾。また、より積極的なダム機能保全対策として、堤体前面にバップルウォールを設け、貯水位とバップルウォール内側の水位差を利用した上昇流により、堤体付近の底部堆積層を除去する方式も提案されている⁵⁾。

ところが、そのような目的で設けられたカーテンウォールやバップルウォール(以下、選択放流設備を持たない重力式ダムの洪水余水吐前面に設けたカーテンウォールやバップルウォールをまとめて「ウォール」と呼ぶ)を設置することで、ウォールが池水の流動・拡散現象にどのような影響を及ぼし、またどのようにウォールを設置すれば、流入濁水を効果的に排除できるのかはよくわかつ

ていない。

そこで著者ら⁶⁾は、模型実験により、①ウォールを設置することで、流入濁水が速やかに池外へ排除されると同時に、潜入点の安定化が図れること、②潜入点が安定化することで、池水の清水域が保全されること、などを明らかにした。

本研究は、①ウォールによる濁水の排除効果、②ウォールが池内流動に及ぼす影響の検討を目的として、前報⁶⁾を更に発展させたものである。

前報では、ウォールの設置深さを流動層の界面と界面の上方/下方に設定し、界面位置程度とした場合に最も効果的であるとの結論を得たが、それは比較的短い流入継続時間から得られた知見であった。本報では前報の約20倍の流入継続時間におけるウォールの設置効果の発現状況を調べるとともに、ウォールの設置位置の影響、流入流量の変動を考慮した設置深さの影響について検討を加え、さらには貯水池上流側に設けたフェンスの影響とその効果を併せて検討したものである。

2. 実験

実験装置は、表層放流を行うダム貯水池を模したアクリル製水路(長さ7.6m、深さ0.4m、幅0.1m)をほぼ一定温度に保たれた清水を満たした両面ガラス張りの大型水槽(長さ10m、深さ1.2m、幅0.6m)中に設置したものである。このような設定とした理由は、潜入密度流が室温変化の影響を受けやすいからである。

潜入密度流とその下流の下層密度流の流動特性は、水路勾配 I に支配され^{1),7)}、連行特性に規定されるので^{8),9)}内部限界勾配 I_c がどのような値を取るのかを明確にしておく必要がある。ちなみに、Lee & Yu¹⁰⁾は $I=1/50$ では緩勾配、福岡ら¹¹⁾は $1/10$ では急勾配、 $1/60$ では緩勾配としており、実験室スケールでは概ね $I_c=1/60\sim 1/50$ の範囲にあると考えられる。秋山ら⁷⁾は水路勾配 $I=1/150\sim 1/30$ の範囲における下層密度流の実験結果に基づき $I_c \approx 1/50$ のように推定した。本研究では、この基準に基づき、 $I=1/60$ の緩勾配に設定した。

実験では、塩水(密度 ρ_0 、単位幅流量 q_0)を水路上流端(水深 h_0)から模型貯水池に満たした池水(ρ_a)に流入させ、流入内部Froude数 $F_0=(q_0^2/\epsilon_0 g h_0^3)^{1/2}$ の自然な潜り込み状態の潜入密度流を発生させた。池水と希釈混合した流入水は、下流端に設けた越流堰(高さ T)から自然越流するようになっている。ここで、 $\epsilon_0=(\rho_0-\rho_a)/\rho_a$ =相対密度差(=0.0007)、 g =重力加速度である。実験装置の概要および重要な諸量を図-1に示す。

実験内容は、①ウォール無設置のCASE N、②ウォールの設置位置 x_w/T と設置深さ z_w/h_u を変化させたCASE W、および③ウォールに加え、貯水池上流側にフェンスを設置したCASE WFである。ここで、 x_w は越流堰とウ

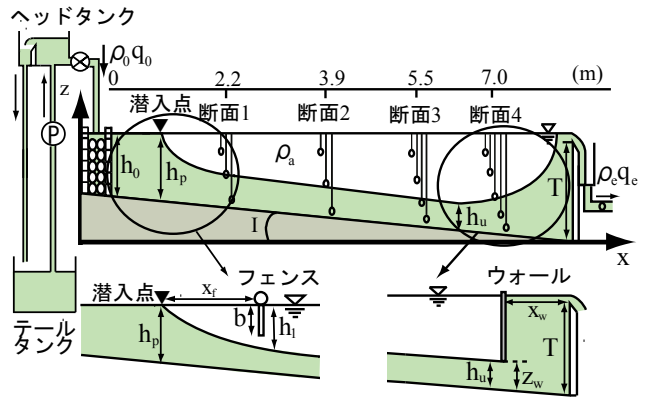


図-1 実験装置と重要な諸量

表-1 実験条件

| CASE | I | ϵ_0 | q_0 (cm^2/s) | F_0 | x_w/T | z_w/h_u | x_f/h_p | b/h_1 | | |
|--------|------|--------------|-------------------------------------|-------|---------|-----------|-----------|---------|-----|------|
| N-1 | 1/60 | 0.0007 | 6.5 | 0.70 | / | / | / | / | | |
| N-2 | | | 8 | 0.86 | | | | | | |
| N-3 | | | 10 | 1.08 | | | | | | |
| W-A-1 | | | 6.5 | 0.70 | 0.84 | 0.84 | 1.50 | / | / | |
| W-A-2 | | | | | | | 1.25 | | | |
| W-A-3 | | | | | | | 1.00 | | | |
| W-A-4 | | | | | | | 0.75 | | | |
| W-A-5 | | | | | | | 0.50 | | | |
| W-B-1 | | | 6.5 | 0.70 | 0.42 | 0.42 | 1.50 | / | / | |
| W-B-2 | | | | | | | 1.25 | | | |
| W-B-3 | | | | | | | 1.00 | | | |
| W-B-4 | | | | | | | 0.75 | | | |
| W-B-5 | | | | | | | 0.50 | | | |
| WF-A-1 | | | / | / | / | / | / | / | / | |
| WF-A-2 | | | | | | | | | | 8 |
| WF-A-3 | 10 | 1.08 | | | | | | | | |
| WF-B-1 | / | / | / | / | 0.84 | 1.00 | 10.0 | 1.0 | | |
| WF-B-2 | | | | | | | | | 6.5 | 0.70 |
| WF-B-3 | | | | | | | | | 8 | 0.86 |
| WF-B-3 | 10 | 1.08 | 0.5 | | | | | | | |

ールとの距離、 z_w はウォールの開き、 h_u は自然な潜り込み状態におけるウォール設置位置での流動層厚である。

CASE Wでは、 x_w/T と z_w/h_u をそれぞれ2通りと5通りに変化させた。 z_w/h_u は、出水時等の流入流量の変動性を考慮するために、 $z_w/h_u=1.0\pm 0.5$ の範囲で大幅に変化させた。CASE WFでは、CASE Wでウォールの設置効果が高かった $x_w/T=0.84$ と設置深さの基準となる $z_w/h_u=1.0$ について、潜入点から測って $10h_p$ 下流地点にフェンスを設置し、その影響と効果を調べた。また、その設置深さ b は、設置位置での上層水深 h_1 の1.0倍(界面位置)あるいは0.5倍(界面上方)とした。

フェンスを潜入点の下流側の自然な潜り込み状態における界面位置以上としたのは、フェンスによる潜入密度流の流動制御に関する秋山らの結果¹²⁾を踏まえたものである。実験条件を表-1に示す。

測定項目は、デジタルビデオカメラによる水路側面からの流況観察、および①導電率計による水路縦断方向の断面1~4での鉛直相対密度差分布、②サーマル式微流速計と導電率計によるウォール直上流での流速と密度の鉛

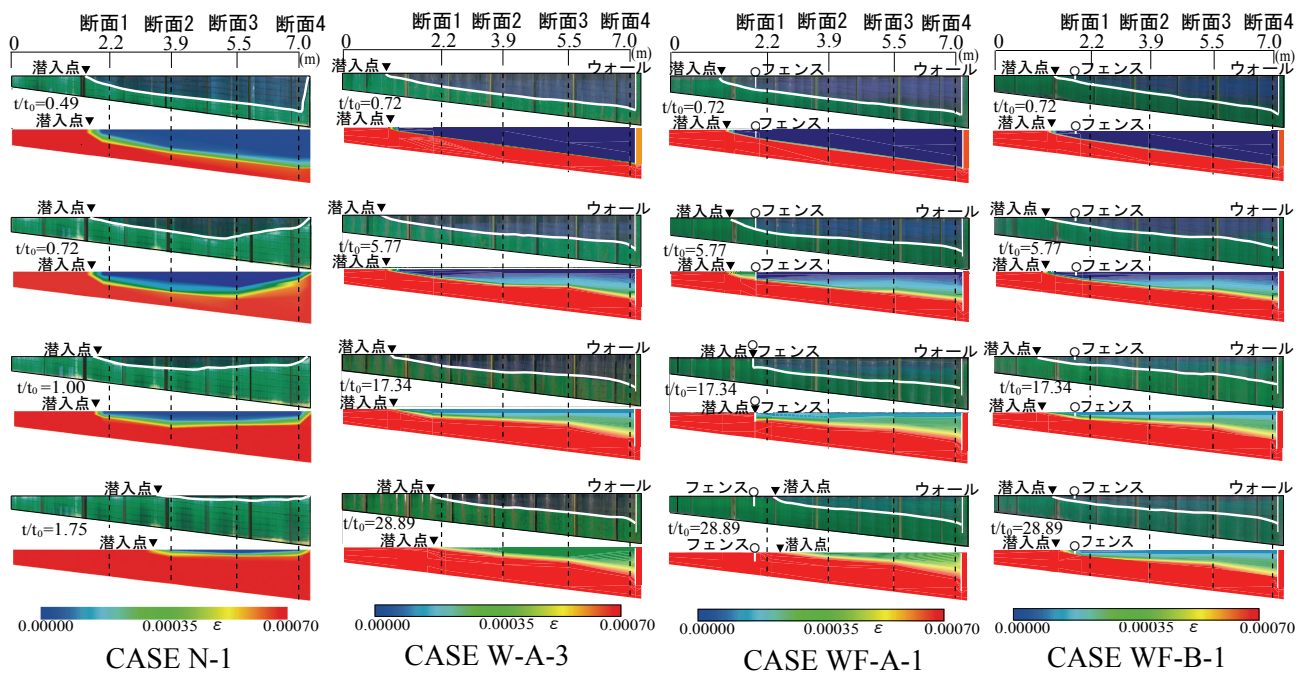


図-2 流況と相対密度差の空間分布

直分布, ③流量計測と導電率計による流出水の流量 q_e と密度 ρ_e の計測である。

3. 実験結果と考察

図-2は、デジタルビデオカメラによる流況観察結果と池水全体の相対密度差の空間分布の計測結果の一例(CASE N-1, W-A-3, WF-A-1, WF-B-1)を示したものである。これらのケースの流入条件とウォールの設置はいずれも同一であり、図中の t/t_0 は無次元経過時間である。ここで、 t_0 は総入れ替え時間(=貯水池の全容量/流入流量)あるいは $1/t_0$ は回転率であり、 $t_0=1246s$ である。

これより次のことが確認できる。

①ウォールやフェンスの有無にかかわらず、 t/t_0 の増加とともに、流入水が池内に滞留・拡散し、池水と流入水が入れ替わる。

②ウォール設置により、流入水が速やかに池外へ排除され、また長時間にわたって池水の清水域が保全される。

③ウォールにフェンスを加えた場合では、基本的にウォール設置と同様であるが、フェンスの設置深さによって流入水の遮蔽効果が異なってくるなどの理由により、流動状況が変化する。

図-3と図-4は、それぞれ流出水の相対密度差 $\epsilon_e(=(\rho_e-\rho_a)/\rho_a)$ と ϵ_0 との比 ϵ_e/ϵ_0 と、ウォール直上流での流入水の希釈混合率 $\gamma(=\epsilon_0/\epsilon_w-1)$ の時系列を示したものである。フェンス設置の結果につい

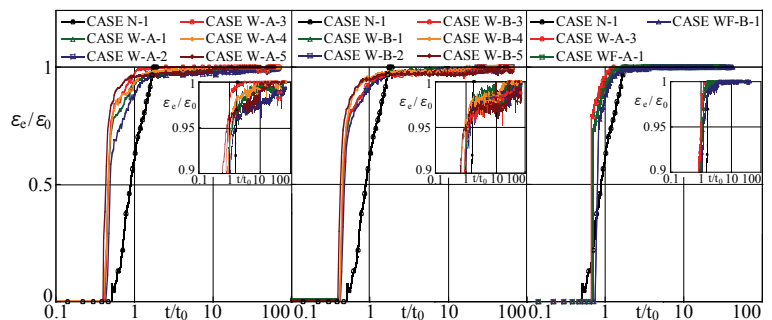


図-3 流出水の相対密度差の時系列

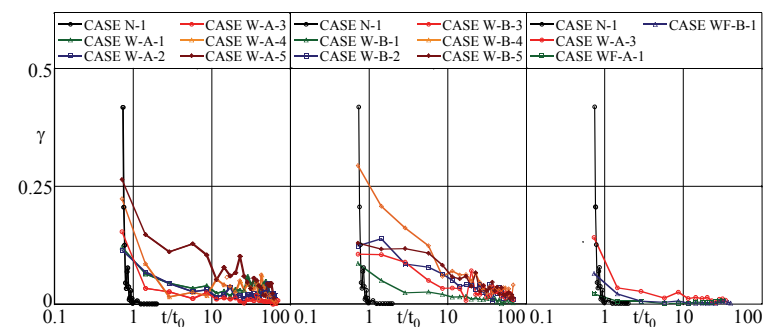


図-4 ウォール直上流での γ の時系列

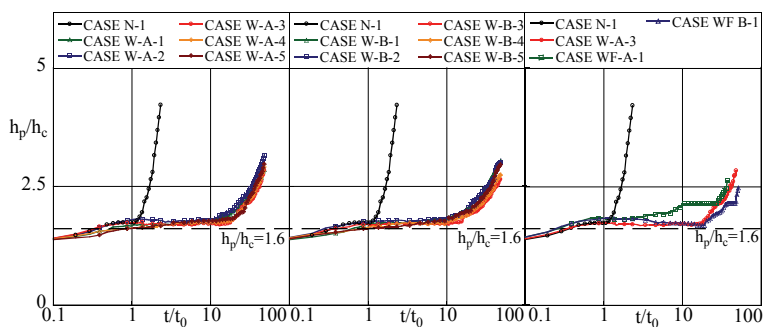


図-5 h_p/h_c の時系列

ては、図-2と同様に、流入条件とウォール設置条件が同一のものを示している。

これより次のことがわかる。

ウォール無設置では、① $t/t_0 \approx 1.0$ 付近を境にして、 $\varepsilon_s/\varepsilon_0$ と γ の特性が急変する。

② γ が大きく、また t/t_0 に対して γ は急激に、 $\varepsilon_s/\varepsilon_0$ は徐々に変化することから、流入水が池水と希釈混合しつつ、池水の一部も池外に直接流出している。

ウォール設置の場合では、① γ より、流入水と池水の希釈混合が抑制されている。また、流出水と流入水の密度が同じ($\varepsilon_s/\varepsilon_0=1.0$)となる t/t_0 から、流入水はウォール無設置の1.2~2.0倍程度早く池外に排除される。

②流入水が最も効果的に排除される z_w/h_u は、CASE W-Aでは $z_w/h_u=1.00$ 、CASE W-Bでは1.50である。

③ γ が最も小さいのは、CASE W-Aでは $z_w/h_u=1.00$ 、CASE W-Bでは1.50であり、流出水の結果と一致している。

フェンス設置では、①ウォール無設置の1.5~1.7倍程度早く流入水が排除される。

②フェンスの設置深さ別で比較すると、より効果的に流入水が排除されるのはCASE WF-Bである。

③ γ が小さいのはCASE WF-Bであり、流出水の結果と一致している。

以上を総合すると、ウォールとフェンスには次のような働きや影響があることがわかる。

①ウォールの設置により、流入水が速やかに池外へ排除される。

②ウォールの設置位置と深さによって、流入水と池水との希釈混合状態が変化する。

③ウォールの設置位置 x_w/T については、 $x_w/T=0.42\sim 0.84$ であれば、流入水の排除効率に大きな違いはない。

④ウォールの設置深さ z_w/h_u については、 $z_w/h_u \geq 1.0$ とした方が効果的に流入水の排除効率が高い。

⑤基準となる $z_w/h_u=1.0$ では、フェンスを設置することで、ウォール設置と比較して、更に流入水と池水の希釈混合が抑制されるとともに、流入水の排除も同等か若干向上する。

図-5は、潜入水深 h_p と流入条件に基づく内部限界水深 $h_c(=(q_0^2/\varepsilon_0 g)^{1/3})$ との比 h_p/h_c の時系列を示したものである。図中の $h_p/h_c=1.6$ の破線は、平衡状態の潜入密度流の h_p/h_c 値⁷⁾である。また、図-6は界面形状の経時変化一例(CASE N-1, W-A-3, WF-A-1, WF-B-1)を示したものである。

これより次のことがわかる。

①ウォール無設置では F_0 に、ウォール設置では $F_0, x_w/T$ および z_w/h_u にかかわらず、 h_p/h_c は t/t_0 に対してほぼ同様な挙動を示す。

②ウォールの有無にかかわらず、 h_p/h_c は $t/t_0 < 0.5$ で微増した後に、 $h_p/h_c \approx 1.6$ の一定値を取り、その後急増する。 h_p/h_c が急増するのは、ウォール無設置では $t/t_0 \approx 1.0$ を超えたとき、ウォール設置ではCASE W-Aで $t/t_0 \approx 15$ 、CASE

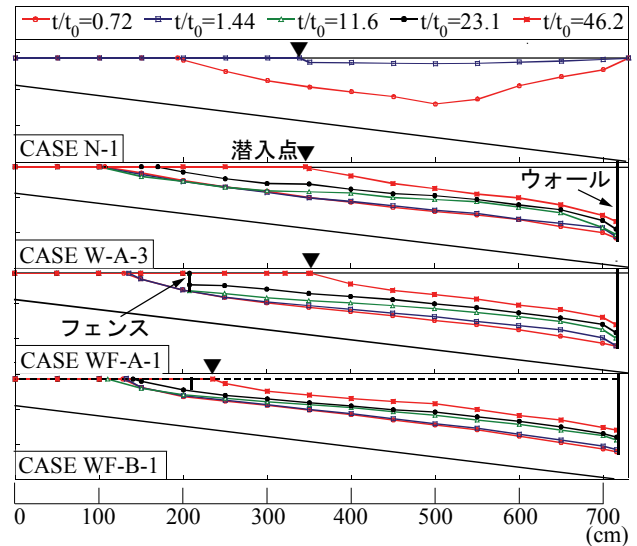


図-6 界面形状の経時変化

W-Bで $t/t_0 \approx 10$ を超えたときである。

③ウォールの設置深さで比較すると、CASE W-AとW-Bのいずれも顕著な違いはない。また、設置位置で比較すると、CASE W-Aの方が $h_p/h_c \approx 1.6$ に近い。 $h_p/h_c \approx 1.6$ となる継続時間は、CASE Nを基準とすると、CASE W-Aでは約23倍、CASE W-Bでは約14倍にもなる。

④フェンスを追加した場合には、 h_p/h_c の傾向に変化が現れる場合(CASE WF-A-1)とそうでない場合(WF-B-1)がある。このような変化は、流入水が一時的にフェンス上流側に止められることから生じる(図-2の $t/t_0=17.34$ 、図-6の $t/t_0=11.6\sim 23.1$)。

CASE N-1を基準とすると、 $h_p/h_c \approx 1.6$ となる継続時間は、CASE W-A-3では約23倍、CASE WF-A-1では約20倍、CASE WF-B-1で約29倍になる。

h_p/h_c がこのような複雑な挙動を取る理由は、次のように考えられる。

① h_p/h_c が微増している時間帯では、流入水が先端部を有する非定常重力密度流として流下している。このことは、流入水が池外に流出し始めた時刻と h_p/h_c の微増がほぼ終了する時刻が一致していたことから確認できる。

② h_p/h_c がほぼ一定値を取る時間帯は、平衡状態の潜入密度流とほぼ同様な流動状態となっている。つまり、ウォールの働きにより、池内を流下してきた流入水がダム底部に設けられた放流施設から安定的に排水されているような状態となっている。

このことは、 $h_p/h_c=1.6$ が平衡状態の潜入密度流の h_p/h_c 値⁷⁾であることから確認できる。 $h_p/h_c=1.6$ とはならず、 t/t_0 に対して緩やかに増加するのは、潜入密度流が平衡状態に達するには時間を要すること⁷⁾や、対象とする現象そのものが弱い非定常性を有しているためである。

③ウォール無設置の場合に h_p/h_c が急増するのは、流入水が池外にほとんど排出されず、その大部分が池内に滞留することと、表層放流により清水の一部が池外に流出

することが主因である。また、わずかではあるが、次の④で触れる潜入点の移動メカニズムも関係している。

このことは、図-2 と図-6 から容易に確認できる。また、 $\varepsilon_c/\varepsilon_0$ 、 γ および h_p/h_c の特性が、 $t/t_0 \doteq 1.0$ 付近を境にして急変していることから確認できる。

④ウォール設置では、その働きにより底層放流に近い流動状態となっているために、平衡状態の潜入密度流に近い状態が長時間維持される。

ただし、流入水と池水との希釈混合は避けられないので、混合水の一部が池外に排除されず、ウォール直上流付近に徐々に残留していく。この残留した混合水は、下流端付近の流動層の層厚上昇をもたらし、その影響が潜入点に向かって徐々に伝播していく。これが潜入点に達した時点で、それまで保たれていた潜入点での平衡状態が失われ、潜入点が徐々に下流側へ移動する(図-2、図-6)。このメカニズムにより急速に清水域が消滅する。

このことは、先述した $\varepsilon_c/\varepsilon_0$ の時系列や、上昇した層厚が潜入点に及ぶ時刻と h_p/h_c が急増する時刻がほぼ一致していることから確認できる。

⑤フェンスを追加した場合には、 h_p/h_c の傾向に変化が現れるのは、その設置深さが界面位置のときである。

図-5 からわかるように、 $t/t_0 \doteq 1.0 \sim 10.0$ では h_p/h_c は徐々に変化している。これは潜入点がフェンスに向かって移動している時間帯とほぼ対応している(図-2、図-6)。

$t/t_0 \doteq 10.0 \sim 27.7$ では h_p/h_c は一定値を取っており、これは流入水がフェンス上流側に止められる時間帯にほぼ対応している。

$t/t_0 \doteq 3.2$ から h_p/h_c は急増しているが、これはフェンス下端付近で池水と希釈混合した流入水の一部がフェンス背面側に徐々に拡散・滞留し、フェンスの遮蔽効果が失われてしまうからである。ただし、フェンスは流入水が持つ運動量が直接池水に働かない機能は果たしている。

また、ウォール単体の場合と同様に、この時点では下流端付近での層厚上昇の影響が水表面に及んでいるため、潜入点が下流へ移動し、一気に清水域が消滅する。

一方、界面上方に設置した場合には、 h_p/h_c はウォール単体の場合と同様な傾向を示す一方、 $t/t_0 > 19.5$ の挙動はフェンスを界面位置とした場合と類似している。

h_p/h_c がこのような挙動を示すのは、層厚上昇の影響が水表面まで及んでくるまでは、ウォール単体と同様な状態となり、その後は CASE WF-A-1 と同様に、潜入点がフェンスに向かって移動し、フェンス上流側に止められた後、フェンスの機能が失われるからである。

図-7 はウォールの直上流断面での内部 Froude 数 $F_w (= (q_w^2 / \varepsilon_w g h_w^3)^{1/2})$ の時系列を示したものである。なお、層厚 h_w 、流量 q_w および層平均相対密度差 ε_w は、同地点

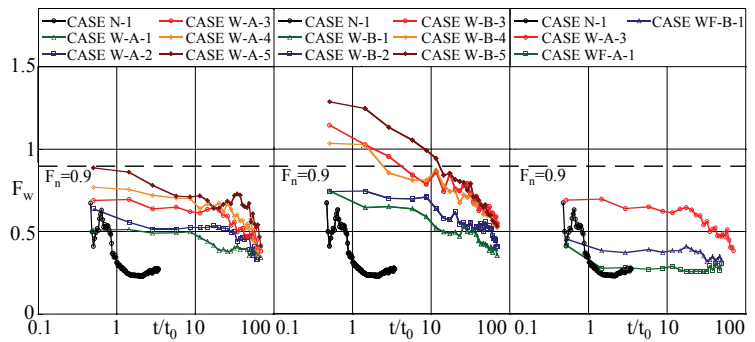


図-7 ウォール直上流での F_w の時系列

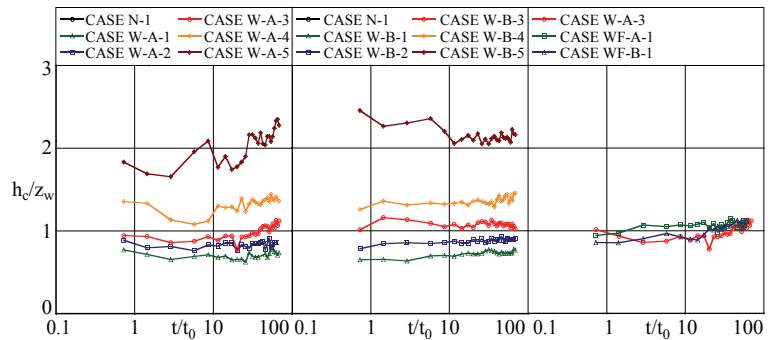


図-8 ウォール直上流での h_c/z_w の時系列

で計測した流速および密度分布を用いてモーメント法で求めた。また、図中の $F_n = 0.9$ の破線は、 $F = 1/60$ における定常下層密度流の内部 Froude 数である。

図-8 は h_c/z_w の時系列を示したものである。ここで、 h_c はウォールの直上流断面での内部限界水深 ($= (q_w^2 / \varepsilon_w g)^{1/3}$) である。 h_c/z_w と F_w との間には、 $h_c/z_w = F_w^{2/3}$ なる関係がある。また、 $\gamma = \varepsilon_c / \varepsilon_w - 1$ 、 $q_w = (1 + \gamma) q_0$ なる関係があるので、 $F_w = F_0 (1 + \gamma)^{3/2} (h_0/h_w)^{3/2}$ である。

これより次のことがわかる。

①CASE W-B-5 の一部と、W-B-4 と W-B-3 のごく一部の時間帯を除き、 $h_p/h_c \doteq 1.6$ の一定値を取る時間帯では、 $F_w < 1.0$ となっており、 $F = 1/60$ が緩勾配であることが確認できる。また、CASE W-B-5 等で $F_w > 1.0$ となるのは、ウォールの設置位置が越流堰に近く、また設置深さも小さいために、ウォール直上流で流動層が加速し、局所的に射流状態になっているためである。

② $h_p/h_c \doteq 1.6$ の一定値を取る時間帯での F_w は、 F_n とは異なった値を取る。これは、定常下層密度流とは混合特性が異なっているためだと考えられる。

③CASE W では、 $z_w/h_u > 1.00$ で $z_w/h_c > 1.0$ 、 $z_w/h_u = 1.00$ で $z_w/h_c \doteq 1.0$ 、 $z_w/h_u < 1.00$ で $z_w/h_c < 1.0$ 、CASE WF では、 $z_w/h_u = 1.00$ で $h_c/z_w \doteq 1.0$ となっている。 $F = 1/60$ は限界勾配に近い緩勾配であるので、 h_u は h_c に概ね対応していることが確認できる。

④CASE W と WF を比較すると、WF の方が γ と F_w が小さくなっている。これは、先に触れたように $F_w \sim (1 + \gamma)^{3/2}$ なる関係があるためである。

潜入密度流では池水に潜り込む時に初期混合¹⁾が発生し、潜入点下流域の池水が補償流として潜入点に向か

ってゆっくりと流動する。フェンスがこの補償流を遮断する働きをしているために、水表面付近での初期混合が抑制され、 γ と F_w が小さくなっていると考えられる。また、先に見たように、CASE WFではWと同等か若干それ以上の効率で流入水が排除されているのも、フェンスによって水表面付近での初期混合が抑制されているためだと考えられる。

4. まとめ

本研究により、以下のような知見が得られた。

①自然越流による表層放流では、流入水の排除が困難であり、総入れ替え時間程度で池水は流入水と入れ替わってしまう。

②洪水吐きの前面にウォールを設置することで、池内清水の流出を遮断するとともに、流入濁水を速やかに池外へ排除できる。また、この効果により、ダム下流端での下層の層厚の増加も抑制され、潜入点も安定化される。その結果、池水の清水域も長時間保全される。

③ウォールの設置位置としてはダム堤体高さ～その半分程度であれば、流入水の排除効率に大きな違いは生じない。また、設置深さとしては、界面～界面上方がより効果的であるが、出水時の流入流量の変動を勘案すれば、ウォール下端が界面位置程度に設定しておけばよいと考えられる。

④上流側にフェンスを追加あるいは既設の場合では、流入水の排除効率については、ウォール単体の場合と比較して大きな違いはない。ただし、その初期混合抑制効果のため、池水の水質保全に若干寄与する。

清水域の保全に関しては、流入水がフェンス上流側に止められる時間、フェンス下端付近での混合水がフェンス背面側に拡散・滞留し、フェンスの遮蔽効果が失われてしまうまでの時間、ウォール直上流付近に残留した混合水の層厚上昇が水表面に及んでくるまでの時間などが、フェンスの設置位置と設置深さに応じて様々に変化するので、これらの複合的な流動拡散現象が池水の水質と清水域の保全に悪影響を及ぼす可能性がある。したがって、富栄養化対策等の必要性がない場合は、フェンスは設けないほうがよいと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、本学大学院生栢木 伸幸君、本学学部4年生廣田 豊君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 秋山壽一郎：流入型密度流の水利特性とその予測，湖沼，貯水地の管理に向けた富栄養化現象に関する学術研究のとりまとめ，土木学会水理委員会，環境水理部会，pp.69-167，2000.
- 2) 丹羽薫：ダム湖の水質対策について，大ダム，No.144，pp.41-63，1993.
- 3) 荒井治，高須修二：ダム湖の水質対策の動向，ダム工学，Vol.7，No.2，pp.90-97，1997.
- 4) 塚原千明，角哲也，宮井貴大，柏井条介：カーテンウォール付常用洪水吐きの土砂放流特性，土木技術資料40-11，pp.56-61，1998.
- 5) 日本国土開発(株)：ダム堆砂除去(河川還元)システム，ダム技術提案，<http://www.nilim.go.jp/lab/fdg/k-gijyututeian.htm>.
- 6) 秋山壽一郎，重枝未玲，安藤祐馬，小野修平：ダム前面に設置したウォールによる流入濁水の排除効果，水工学論文集，第51巻，pp.1337-1342，2007.
- 7) 秋山壽一郎，片山哲幸，西恭太，土居正明：混合型・成層型貯水地での潜入密度流の水利特性について，水工学論文集，第48巻，pp.1375-1380，2004.
- 8) Ellison, T.H. and J.S.Turner.: Turbulent entrainment in stratified flow, *J. of Fluid Mechanics*, Vol.6, pp.423-448, 1959.
- 9) 石川忠晴，長尾正之：Galerkin法による傾斜ブルーム連行則の近似解析，水工学論文集，第43巻，pp.935-940，1999.
- 10) Lee, H.Y & Yu, W.S.: Experimental study of reservoir turbidity current, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.123, No.6, pp.520-528, 1997.
- 11) 福岡捷二，福嶋祐介，中村健一：2次元貯水池潜入密度流の潜り込み水深と界面形状，土木学会論文報告集，第302号，pp.55-65，1980.
- 12) 秋山壽一郎，重枝未玲，安藤祐馬，小野修平，小川真由子：フェンスによる貯水池潜入密度流の流動制御，水工学論文集，第50巻，pp.1285-1290，2006.

(2010. 9. 30受付)