

高密度ラビリンス堰放流特性への下流水位の影響について

常住直人*・高木強治*・後藤眞宏**・浪平 篤*

目 次

I 緒 言	179	V 下流セキ上げを考慮した洪水吐水利設計	185
II 実験方法	181	1 セキ上げを見込んだ水利設計図表, 設計式	185
III ラビリンス堰の実験形状・水理諸元	182	2 セキ上げを見込んだ水利設計	186
IV 下流セキ上げによる放流特性, 流況の変化	182	VI 直下落水による放流特性, 流況の変化	186
1 セキ上げによる流量係数, 流況変化の状況	182	VII 結 言	187
2 セキ上げによる流量係数に関する考察	184	参考文献	187
3 セキ上げ時の下流流況	184	Summary	188
4 遷移状態卓越流況での放流安定性	185		

I 緒 言

ラビリンス堰 (Fig.1) については, これまで, 水平水路内にラビリンス堰を設置し, かつ水平水路下流端でセキ上げが無い条件 (水平床かつ下流セキ上げ無し) で, 放流特性の解明が成されてきた (Hay, *et al.*, 1970; Taylor, 1968; Lux, 1985; Lux, 1989; 常住ら, 2002)。しかし, 下流セキ上げ時の放流特性把握は, フィルダム, ため池の洪水吐や水路系など, 下流水位の影響が顕著にならないを得ない適用条件下では重要である。

例えば, 現状, ラビリンス堰はため池洪水吐への適用事例が多く, しかも, 老朽ため池改修時の設計洪水流量適正化に伴い採用される場合が多い。この場合, 設計洪水流量増大となるので, 越流部の敷地確保と下流水路への接続のため, 側水路式のように下流セキ上げが高まりやすい洪水吐形式になる場合が多く見られる (Fig.2)。殊に側水路上流部では下流水位が高くなりやすい。一方, 改修時の設計洪水流量増大が顕著でなく, 従前の正面越流式洪水吐のまま, ラビリンス堰を適用出来たとしても, ため池では洪水吐下流水路が概して小規模, 狭幅なので, 下流水路への接続, 経済施工, (堤体上下流が緩勾配なフィルダムゆえ) 緩勾配放水路の長さ, 放流減勢の点から, 洪水吐水路幅を緩勾配放水路上で縮小せざるを得ない。この場合も, 堰直下で水路幅漸縮となり, ある程度のセキ上げは回避できない (Fig.2)。

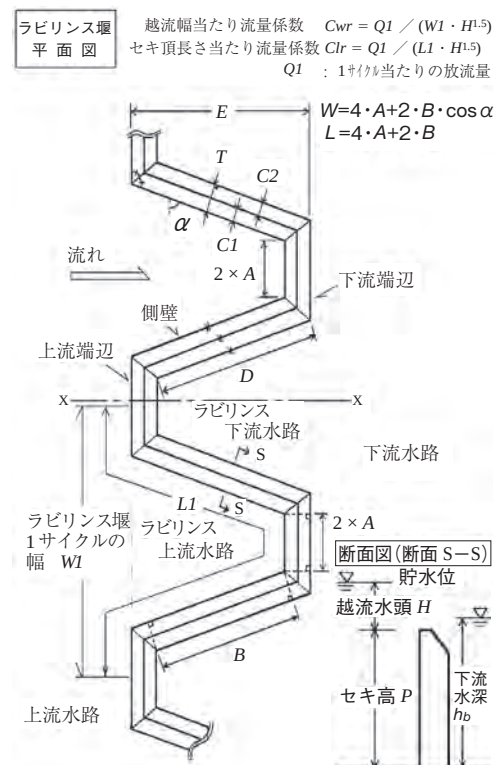
* 施設資源部部水源施設水理研究室

** 施設資源部部上席研究員

平成21年11月4日受理

キーワード: 堰, ラビリンス堰, 流量係数, セキ上げ背水, 低下背水, 水理実験

現在の設計指針 (農水省, 2006) では, 以上のような場合, セキ上げが顕著にならないように堰下流の水路敷高を下げるか, 側水路幅を広げるが, 改修時の設計洪水流量増大が大きい場合もしくは洪水吐側の地山が迫っている場合や圃場・宅地が近接している場合はそれらが困難になることもありうるし, ある程度, セキ上げを許容した設計のほうが改修費等の点で有利になる場合もある。しかし, ラビリンス堰の場合, 従来型直線堰のよう

Fig.1 ラビリンス堰の模式図と記号
Symbols of a labyrinth weir

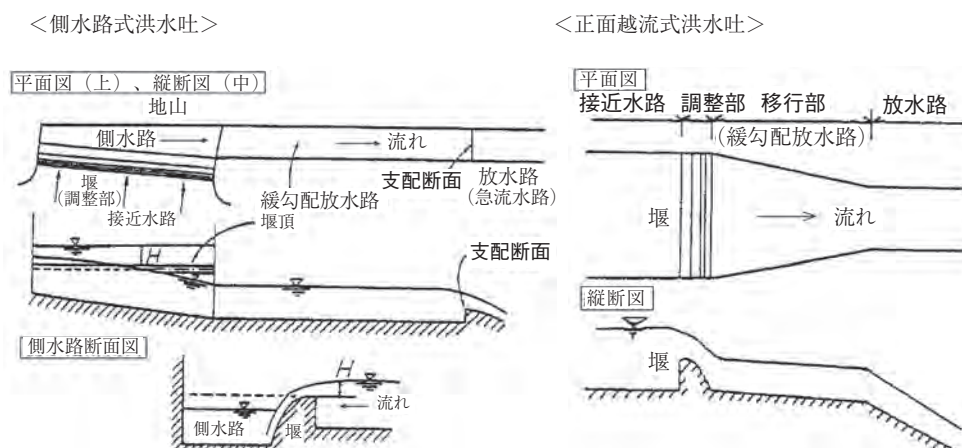


Fig.2 ため池の洪水吐形式
Spillway types of small fill dams

に堰頂標高以上の下流セキ上げを見込んだ設計図表がないため、高めのセキ上げ水位を許容した場合との比較検討が出来ない。

下流水位によるラビリンズ堰放流特性への影響については、Taylor (1968) により、下流セキ上げ水位が堰頂を越えない限り放流特性への影響はほぼ無い、と言及されており、現行の設計指針もその範囲での記述となっている。すなわち、下流セキ上げがあっても、それによる下流水位がラビリンズ堰堰頂標高以下であれば、その際の流量係数は水平床かつ下流セキ上げ無しの条件での流量係数と変わらないとされている。

しかし、Taylor (1968) の検討は縦横比 $W/P \geq 2$ (以下、記号については Fig.1 参照) の低密度形状 (平面的にラビリンズ堰のジグザグの密度が低い形状、Fig.3 参照) を中心としたものである。ため池洪水吐等、狭小スペースに設置して放流能力を上げるには $W/P < 2$ の高密度形状も有効となり得るうえ (常住, 2003)、水路系 (調整池、水位調整施設など) で既設水路幅に間断なく効率的にラビリンズ堰を配置する場合も、1 サイクル幅を縮小出来る高密度形状 (低 W/P 形状) が望ましい。このような形状はユニット型のラビリンズ堰として現地適用されているが (常住, 2001)、その下流セキ上げの影響を調べた事例はほとんどない (常住, 2004)。

$W/P < 2$ など、低 W/P 形状は、ため池洪水吐では、常時満水位、地形・地質条件から決まる堰高 P に対し、ラビリンズ堰 1 サイクルの幅 W が狭い形状であり、平面的にラビリンズ堰のジグザグの密度が高い高密度形状である。また、所定の越流水頭比 H/P に対し H/W が大きい形状でもある。すなわち、水理的にも高密度ゆえ、セキ上げ等、下流水位による影響は低密度形状 ($W/P \geq 2$) よりも顕著となりうる。なぜなら、ラビリンズ堰では、両側壁 (Fig.1 参照) からの放流水脈の衝突により、ラビリンズ下流水路 (Fig.1 参照) 内で水位上昇しやすいえ、放流特性にはナップ背面エア域の放流阻害等に依るとされる変化も見られるからである。このため、

ラビリンズ下流水路が狭小で、同一越流水頭での単位幅当たり放流量が大きくなる高密度形状 (常住, 2002) では、セキ上げによる下流水位 (下流水路水位、Fig.1 参照) が堰頂標高より低くても、下流水位が放流特性に影響を及ぼす可能性がある。これは、逆に言えばラビリンズ堰直下で流れを自由落下させた場合 (コンクリートダム洪水吐クレストに設置した場合に相当) も放流特性が変化する可能性がある、ということでもある。

セキ上げ等、下流水位による放流特性への影響解明は、ダム洪水吐と異なり、費用面の制約から机上設計がそのまま最終設計となるため池洪水吐や水路系では、その必要性が高い。ただ、ラビリンズ堰での流れは三次元的で複雑で、かつ攪乱しており、その放流特性は解析的には解明困難で (柏井ら, 1988; Indlekofer et al., 1975)、実験的に検討されてきた経緯がある。

本報文では以上のことから、水理実験により、高密度

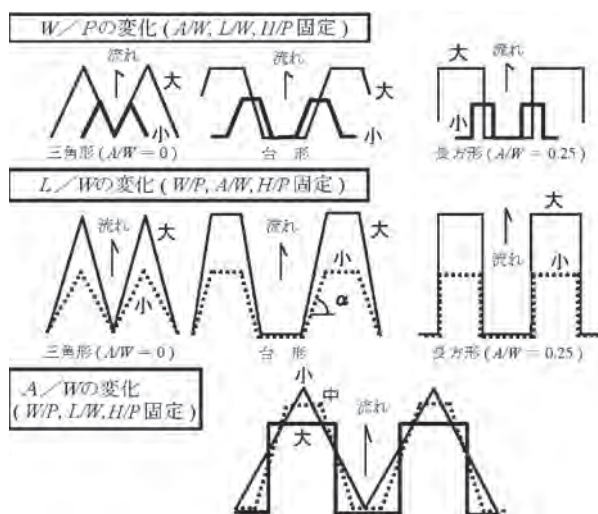


Fig.3 形状諸元の変化によるラビリンズ堰の平面形の越流水頭 H に対する相対的な変化
Relation between a relative plan shape of a labyrinth weir to overflow head and W/P , L/W , A/W

ラビリンス堰の放流特性に対する下流水位（セキ上げもしくは直下落水）の影響解明を試みたものである。以下、本報文における記号は **Fig.1** で、また、流量係数は特に断りが無い限り、(1) 式の単位幅当たり流量係数 C_{wr} で定義している。

$$C_{wr} = Q_i / (W_i \cdot H^{1.5}) = Q / (Wt \cdot H^{1.5}) \quad \cdots (1)$$

Q_i, Q : 各々、ラビリンス堰 1 サイクル当たりの放流量、ラビリンス堰の全放流量

W_i, Wt : 各々、ラビリンス堰 1 サイクル当たりの越流幅、ラビリンス堰の総越流幅

H : 越流水頭

なお、本研究に際しては農村工学研究所業務管理課（現、農村技術支援チーム）の方々から実験水路の補修、改造において多大なるご協力を頂いた。ここに記して深謝の意を表します。

II 実験方法

実験は **Fig.4** に示す実験水路で行った。実験水路は内幅 0.5m、深さ 0.6m、全長 12.3m、水路床は水平で、水路下流端にはセキ上げ用のフラップゲートを設置した。下流セキ上げの実験では、ラビリンス堰上流の水路長を 9.4m とし、その上流端 0.9m は整流区間とした。堰上流水路長は、従前の実験結果（常住ら、2002）を参考に堰への接近流の影響が無くなる長さ以上、下流はセキ上げ

により生じる跳水長以上としている。但し、堰直下で自由落下の実験ではラビリンス堰位置を実験水路下流端とした。各実験での堰設置位置は **Fig.4** 右下図に示すとおりである。

越流水位測点は、接近流の影響、実験水路への流入縮流の影響の低減を考慮して、ラビリンス堰上流端から 3m 上流の水路幅中央とした。越流水位変動はサーボ式波高計で計測し、越流水位は同位置からマンメータで取り出したうえ、1/10mm 読みポイントゲージで計測した。実験では粘性の影響が卓越しないように、越流水頭が概ね 2cm 以上となるようにし（村ら、1956; 柏井ら、1988）、各越流流況における放流特性曲線を滑らかに描けるような間隔で、実験越流水頭を設定した。

一方、流量は上流計量水槽の四角セキ（セキ幅 0.6m、計量水槽内幅 2.01m、計量水槽底～四角セキ天端の高さ 2.51m）で計測した。流量係数はこの流量と越流水位から越流水頭を求め、**Fig.1** 中の式により算出した。

越流流況は目視による観察とビデオ画像により記録した。ビデオ画像は模型セキ各部の越流水脈背面の空洞域の有無、空洞域の発生・消失とその動きが明確に分かるように記録した。

また、下流水位測点は、各実験流量における堰直下の攪乱、実験水路下流端の低下背水の影響抑制の点から設定した。具体的にはラビリンス堰下流端から下流 68.8cm（堰高の約 4.5 倍）地点とし、横断方向に左右岸から 1cm、水路中央、水路左右岸と水路中央測点の間点の 5 点で計測した。計測機器は、サーボ式波高計（下

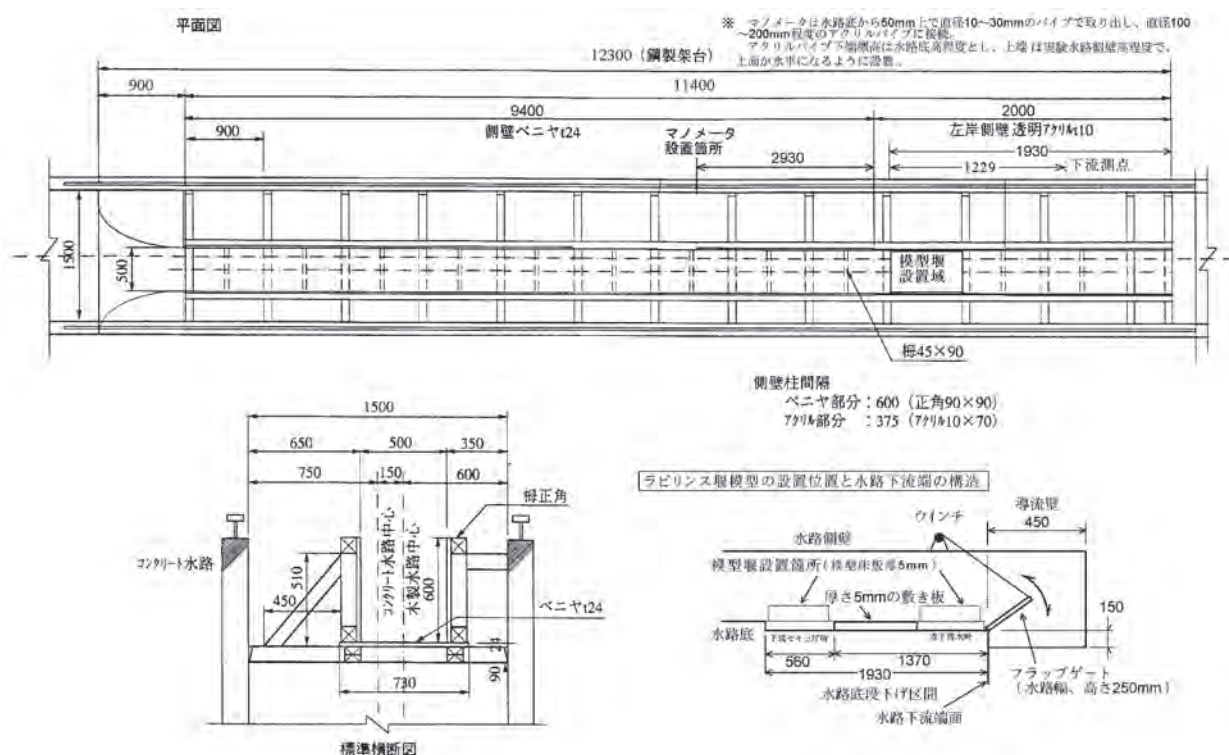


Fig.4 ラビリンス堰の実験水路と堰設置位置

The experiment flume and model weir arrangements of this investigation.

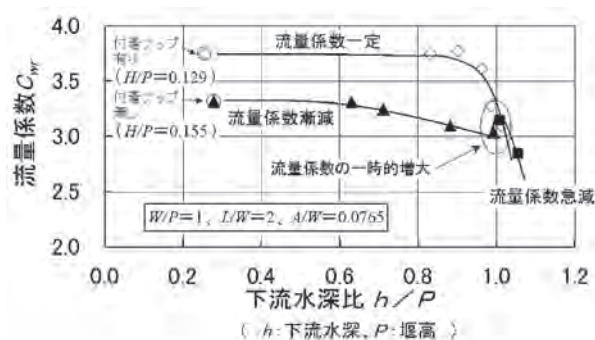


Fig.5 付着ナップによるラビリンス堰の流量係数変化
Change of discharge coefficient on labyrinth weir by clinging nappe

流水深3.5cm以上で使用)及び1/10mm読みポイントゲージであり、サーボ式波高計では計測時間を3分とし、ポイントゲージでは同じ時間中の最高、最低水位から針先潜没、露出時間が概ね同一となる水位を計測した。いずれでも、水路横断方向各測点の計測時間中平均水位の平均値を下流水位とした。さらに、下流整流区間長を、模型セキ直下から水路横断水位が概ね一定化する横断面までの区間長(目視による)として1mm読みスケールにより計測した。

上記の計測は下流セキ上げ有・無、堰直下自由落水のいずれのケースでも行い、いずれの計測も流量、流況が十分、安定してから行った。また、放流特性にヒステリシスは見られなかったものの、洪水増水時を鑑み、実験は流量ゼロから流量を上げる方向で行った。実験流量への調整初期に付着ナップ(現地規模では極く低越流水頭でしか発生せず)が生じた場合は、付着ナップを人為的に切ってから流量設定を行った。これは、下流セキ上げの影響を検討した従前実験(常住, 2004)において、現地規模の堰、越流水頭では殆ど生じない付着ナップにより、下流セキ上げ時の流量係数変化が影響されることが確認されたためである(Fig.5)。一方、下流セキ上げ高は、下流セキ上げにより変化する越流流況各々で、下流セキ上げによる放流特性曲線を滑らかに描けるような設定間隔とし、現地で問題となる増水時を想定して、セキ上げ無しの状態からセキ上げ高を上げていく方向で実験を進めた。この際、越流流況変化時の下流セキ上げ水位も計測した。

なお、各部の測定に先立って、ポイントゲージを設置する水路側壁天端の不陸に対する標高補正をラビリンス堰を潜没させた静水面を基準に行った。また、流量係数等の算定の基礎となるセキ頂標高には、ラビリンス堰各端辺中央の頂部標高の平均値を用い、ラビリンス堰セキ頂標高の微妙なズレを補正した。

III ラビリンス堰の実験形状・水理諸元

下流水位を考慮した場合、ラビリンス堰の放流特性は、水理条件たる越流水頭 H 、下流水深 h_b と形状諸元たる

堰高 P 、堰厚 T 、堰断面形状、1サイクルの堰頂長さ・越流幅・端辺長(L , W , A)(Fig.1)や堰上下流の水路底の標高差により規定される。堰断面形状が刃形堰で、水平床水路の場合、 H , h_b , P , T , L , W , A の7諸元により放流特性が規定され、これらは H/P , h_b/P , T/P , L/W , W/P , A/W の6無次元パラメータに集約出来る。

$W/P < 2$ の高密度なラビリンス堰に関しては、特段小さい H/P を設計水頭にしなければ、すなわち、設計水頭に比し、堰高を相対的に大きく出来る場合以外は、従来型直線堰に対する放流能力(単位幅当たり流量係数 C_{wr})の大きさ、単位放流量当たりの堰体体積の小ささ、施工性等、費用対効果の点から、有効なラビリンス堰形状は、 $A/W \approx 0.0765$, $W/P = 1 \sim 2$, $L/W = 2 \sim 8$ の限られた範囲に存在することが分かっている(常住, 2003)。

また、直線堰に対する流量係数比は低下するものの、絶対的な放流量を高めるには、 L/W をある程度大きくする必要がある。 L/W を5~8と高めた場合には、 $W/P = 1.5 \sim 2$, $A/W = 0 \sim 0.0765$ の形状が、遷移状態の越流流況(Fig.6)がラビリンス堰に現れる流況Ⅱ~Ⅳ(Fig.7)となる H/P の範囲($A(H/P)_{IIIV}$)が小さく、流況安定に優れることが分かっている(Fig.8, 常住, 2001)。すなわち、 A/W が過大な形状や W/P が過小な形状(平面的に長方形に近い、過度に高密度な形状、前出Fig.3参照)は遷移状態となる越流水頭比の範囲が広い、もしくは遷移状態での越流流況の攪乱が激しい等、流況安定の点で問題があり、このことも勘案すると $A/W \approx 0.0765$, $W/P = 1.5 \sim 2$, $L/W = 5 \sim 8$ が比較的有効な形状と考えられる。

さらに、 W/P が小さい形状のほうが、所定の敷地に対し、余り幅なくラビリンス堰を効率的に敷設しうること、 L/W が過大な形状では直線堰に比し、堰頂長さ、堰体容積、堰体コストが増大する割に放流能力が伸びなくなることを考慮し、ここでは実験形状を $A/W = 0.0765$, $W/P = 1.5$, $L/W = 5$ に設定した(模型堰高15.3cm、堰断面形状は刃形で水平床水路に設置)。

実験の上流水位条件は、ラビリンス堰の直線堰に対する放流能力が比較的大きくなる $H/P \leq 0.8$ とし、これらの条件下でセキ上げによりセキ上げ比 h_b/P を変えて下流水位の影響を調べた。

IV 下流セキ上げによる放流特性、流況の変化

1 セキ上げによる流量係数、流況変化の状況

下流セキ上げ時の放流特性、越流流況の変化はFig.9のようになった。ラビリンス堰の越流流況は下流セキ上げにより流況Ⅴ(Fig.7)から流況Ⅰの方向に変化した。図中、「給気状態卓越」、「遷移状態卓越」、「非給気状態卓越」とあるのは、各々、流況ⅣもしくはⅤ、流況Ⅲ、流況ⅠもしくはⅡとなる領域である。

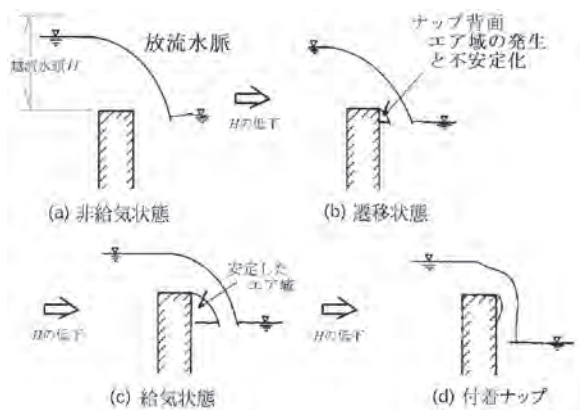


Fig.6 H/P の低下によるラビリス堰各断面の越流流況変化
Change of sectional overflow regimes on labyrinth weir by H/P

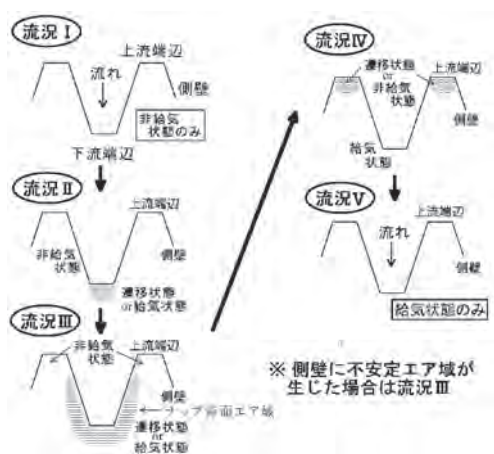


Fig.7 H/P の低下によるラビリス堰の流況変化
Change of plan overflow regimes on labyrinth weir by H/P

流量係数 C_{wr} (単位幅当たり流量係数) は、給気状態卓越流況時は概ね横横いで、遷移状態卓越流況ではセキ上げ比 h_b/P に応じて漸増、非給気状態卓越流況時はセキ上げ比 h_b/P に応じて低下していく傾向が見られた。

但し、どのケースでもセキ上げ水位がラビリス堰天端高を越えるまでは、流量係数の低下はほとんど生じず、セキ上げ水位がラビリス堰天端と同高での流量係数低下は、非セキ上げ時流量係数 (C_{wr})₀ に対し 3% 減未満に留まった。それ以降、セキ上げ水位が堰天端高を越えてからは流量係数低下が著しくなり、セキ上げ水深が堰高の概ね 2 倍になるまでには、全てのケースで直線堰(非セキ上げ時)と同程度まで流量係数は低下した。

セキ上げによる越流流況の変化は、下流セキ上げ無しでの越流水頭比 ($(H)_o/P$) が小さいケースほど緩慢で、セキ上げ比 h_b/P が増大しても中々、遷移状態卓越流況、非給気状態卓越流況へと移行しなかった。反面、遷移状態卓越流況での流量係数増加、非給気状態卓越流況での流量係数低下は、 $(H)_o/P$ が小さいケースほど急激であり、 $(H)_o/P$ が特に小さいケースでは、堰頂標高以上の

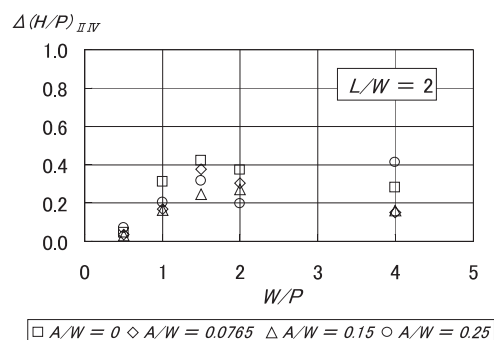
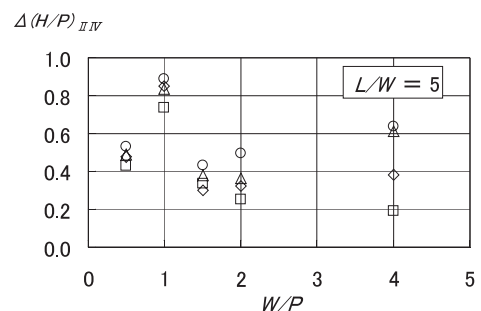
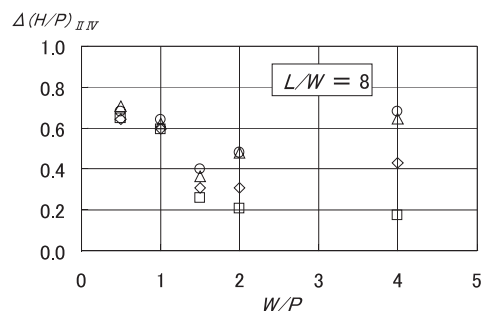


Fig.8 形状諸元による $\Delta(H/P)_{IIIV}$ の変化
Relation between W/P , L/W , A/W and $\Delta(H/P)_{IIIV}$

セキ上げで急激に直線堰(非セキ上げ時)の流量係数に近づいていった。

以上より、ラビリス堰の効果(流量係数(C_{wr})の大きさ)を高く維持するには、設計水頭(想定最大水頭、非セキ上げ時)での越流水頭比 ($(H_d)_o/P$) が小さい場合、設計水頭時のセキ上げ比 ($h_b)_d/P$ を 1 以下に抑えるのが望ましい。反面、 $(H_d)_o/P < 0.19$ となる場合には、 $(h_b)_d/P = 0.94 \sim 0.99$ で C_{wr} が非セキ上げ時の 5% 以上増大する場合もあり (Fig.10)、非セキ上げ時の流量係数推計式(常住, 2002; 常住, 2003)で設計している洪水吐では過放流(最大約 10%)の問題を生じうることが分かる。

一方、 $(H_d)_o/P$ が大きい場合には、セキ上げ比 ($h_b)_d/P$ が 1.5 まで大きくなっても流量係数の低下は 15% 未満に留まる場合もある (Fig.10)。このようにセキ上げでの流量係数低下が顕著でない場合は、堰高増大で $(H_d)_o/P$ を下げるよりも、 $(h_b)_d/P > 1$ の比較的大きいセキ上げでの設計が有利になりうる。

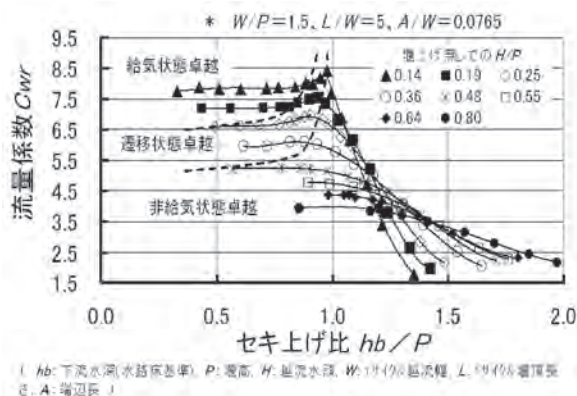


Fig.9 セキ上げによるラビリンズ堰の流量係数, 流況の変化
Relation between discharge coefficient,
plan overflow regimes and h_b/P on labyrinth weirs

2 セキ上げによる流量係数変化に関する考察

セキ上げによる流況変化は、セキ上げに伴うナップ背面水位の上昇、ナップ背面エア域 (Fig.6, 7) の縮小により生じており、セキ上げ時の流量係数変化もこれに起因すると考えられる。すなわち、遷移状態卓越流況ではセキ上げによりナップ背面水位が上昇し、ナップ背面エア域が気泡化して消失していくが、この際、エア域の消失とともにそれによる放流阻害も減じていくため、これが流量係数増大方向に作用すると考えられる。さらにセキ上げ水位が上昇し、エアが概ね消失して非給気状態卓越流況化すると、エア域消失による放流阻害低減効果よりもセキ上げ水位自体による放流阻害効果が上回り、流量係数低下に転じると見られる。

この際、下流セキ上げ無しでの越流水頭比 ($(H)_0/P$) が小さいケースでは、流量が小さくラビリンズ下流水路 (ジグザグ下流の凹部, Fig.1) の水位が低いこと、両側壁からの放流水脈の衝突が穏やかでナップ背面水位も低いこと、ナップ厚が薄いこと等に依り、 $(H)_0/P$ が大きいケースと比べ、セキ上げ比 h_b/P 増大時にナップ背面エア域が消失しにくく、中々、遷移状態卓越流況、非給気状態卓越流況へと移行しなかったのだと思われる。反面、セキ上げ増大で、下流水位が堰高近くになった時 ($h_b/P \approx 1$) には、急激にナップ背面エア域が消失するため、遷移状態卓越流況下での流量係数増大は顕著になるであろう。また、低越流水頭、低流量ゆえ、ラビリンズ堰からの放流が下流セキ上げで潜没しやすく、非給気状態卓越流況下での流量係数低下は急激になるのだと思われる。

すなわち、下流セキ上げによる h_b/P 値、 $(H)_0/P$ に応じた単位幅当たり流量 q_{wr} によって決まるラビリンズ下流水路水位、ナップ背面水位と $(H)_0/P$ に応じたナップ厚の3つによって変化する「ナップ背面エア域の大きさ」が下流セキ上げ時の流量係数、流況変化の原因と考えられる。

なお、付着ナップ有無の影響を検討した前出 Fig.5 で

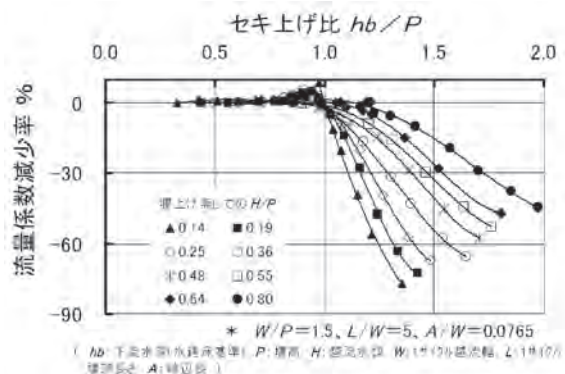


Fig.10 セキ上げによるラビリンズ堰の流量係数変化率
Relation between discharge coefficient
increase rate and h_b/P on labyrinth weirs

は、セキ上げ時の流量係数低下が早期に現れているが、これは $W/P = 1$, $L/W = 2$ の短堰頂・超高密度形状ゆえ、ラビリンズ下流水路が狭く、ラビリンズ下流水位よりもナップ背面水位が大きく上がる傾向があったためと思われる。ゆえに、セキ上げ時に、ナップ背面エア域による放流阻害の影響が大きく現れ、早期に流量係数が漸減した可能性がある。さらにセキ上げが増しエア域が消失する際には、一時的に流量係数反発となるが、以降は流量係数が急激に低下しており、この経過は $W/P = 1.5$ の形状の Fig.9 と同様である。

一方、前出 Fig.5 の付着ナップ有りのケースでは、負圧の流量係数増大効果で下流セキ上げでも流量係数低下が起きない反面、ナップ背面エア域が無いのでエア域消失による流量係数増大もないのだと考えられる。この場合は、下流セキ上げが堰頂近くになり、負圧域を喪失してから、付着ナップ無しのケースに流量係数が急速に近づいていったと見られる。

3 セキ上げ時の下流流況

ラビリンズ堰下流水位測点での流れは、下流セキ上げの増大に応じて、射流、跳水、動揺跳水、常流 (更に潜り越流に続く常流、堰潜没に続く常流へ) と移行し、跳水位置はセキ上げにより上流へ移動した。この際、下流水位測点位置の水位は、跳水の通過時に大きく上がり、通過後に低下、以後、漸増という経過を辿った。跳水はラビリンズ堰下流で生じる交叉波 (ラビリンズ堰の各下流端辺を起点に、左右岸に向け斜めに走り、互いに交叉する波立ち) の下流端付近で生じるが、下流セキ上げ無しでの越流水頭比 ($(H)_0/P$) が小さい場合は、セキ上げ無しでも交叉波が見られず常流下となり、 $(H)_0/P$ が大きい場合は、ラビリンズ下流水路内で両側壁からの放流水脈衝突による跳水状の流れを経て交叉波が生じた。

なお、今回実験の下流水位測点位置は、堰直下の流れの攪乱による測定誤差を回避すべく、堰からある程度離して設定している。しかし、ため池洪水吐の場合、下流

水路長は今回実験の下流水位測点位置より総じて短くなる。したがって、今回実験の下流水位測点位置に基づく設計図表で設計した場合、ラビリンス堰下流で射流、交叉波跳水和続く水面形になる「低セキ上げかつ高 (H_0/P)」のケースでは、実験での下流水位測点位置の水位と実際の洪水吐下流水路内の水位に齟齬を生じ（後者の水位は、交叉波跳水位より上流に位置するので、より低位）、実際と異なる流量係数を与える場合もある。すなわち、両者の水位が一致する、より低セキ上げ時の流量係数（Fig.9 参照）で設計してしまう懸念がある。

しかし、これに依る流量係数の誤差は最大で5%未満であるうえ（Fig.9 より推計）、農業用フィルダム、ため池では、どのような洪水吐形式であれ、一般には緩勾配放水路内で整流化させるので、低セキ上げの設計条件になることは稀である。特に設計水頭時にそうなることは稀である。よって、今回の下流水位測点位置と実際の洪水吐下流水路長（緩勾配放水路長もしくは側水路幅）の差異による流量係数推計誤差の実用上の問題は大きくないと考えられる。

4 遷移状態卓越流況での放流安定性

遷移状態卓越流況では、実験で用いた近三角形ラビリンス堰形状の場合、堰頂の大半を占める側壁部でナップ背面のエア域が側壁沿いを不安定に上下流に動いたり、エア域が細かいエア溜まりに分裂し不安定に上下流に動く、もしくはエア域底面の水面が上下動する等の流況になる。このため、エア域上を流下する越流ナップも動揺し、流量係数が不安定化することも想定される。これを確認すべく、経時的な越流水位変動を観測したのが Fig.11 である。

しかし、本図を見る限り、越流水位の経時変動は水位上昇、流量上昇に応じており、遷移状態卓越流況時に特段大きくはななかった。流量増大による波立ち増大の中に埋没している状況であった。実験における経時変動計測時間（3分）は、現地ラビリンス堰高が1mとすれば現地では約8分相当なので、設計洪水ピーク流

量の持続時間がこの範囲に収まるならば、遷移状態卓越流況に設計水頭をとっても特段の問題は生じないと考えられる。

V 下流セキ上げを考慮した洪水吐水理設計

前出 Fig.9 のように、下流セキ上げ無しでの越流水頭比 (H_0/P) が大きいケースでは、下流セキ上げによる流量係数低下は緩慢である。このような場合には下流セキ上げ水位が堰頂標高以上でも直線堰より費用対効果で有利となる場合も有りうる。また、高密度ラビリンス堰では下流水位が堰頂標高未満の場合も、放流特性への下流水位の影響が見られる（Fig.9）。よって、以下では、下流水位を見込んだ高密度ラビリンス堰の水理設計について、ため池、フィルダムの洪水吐を対象に論述する。

1 セキ上げを見込んだ水理設計図表、設計式

下流セキ上げによる越流水頭増大率は Fig.12 のようになる。越流水頭の増大率は下流セキ上げ無しでの越流水頭比 (H_0/P) が大きいほど小さくなる。なお、本図では $h_b/P < 1$ の範囲は除いてあるが、これは、この範囲では越流水頭が概ね横這いか、若干低下するので、堤体余裕高の設定上、問題にならないからである。

一方、下流セキ上げによる流量係数変化は、越流水頭・下流水位間の落差 η で整理すると、(H_0/P) に依らず Fig.13 のような類似の曲線になる。これより流量係数比 $C_R (= C_{wr}/(C_{wr})_0)$ は下記 (2) の近似式で表され、その精度は概ね $\pm 5\%$ 未満に収まる ($\eta/H = 0.32 \sim 2.0$)。低密度形状に関する Tullis et al. (1995), Waldron (1994), 高密度形状に関する常住 (2003) 等のラビリンス堰流量係数式（下流セキ上げ無し）と同様、比較的高次の多項式で近似させたのはデータ数の多さとデータ分布への整合に依る。なお、ここでは WES 標準型越流頂と同様、流量係数定義式自体は下流セキ上げ有無に依らず同一（前出 (1) 式）とし、下流水位の影響は C_R 式で見込むものとした。

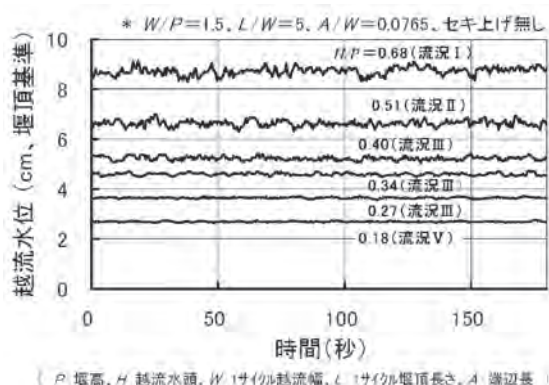


Fig.11 流況とラビリンス堰越流水位の経時変動
Fluctuation of head on labyrinth weirs by plan overflow regimes

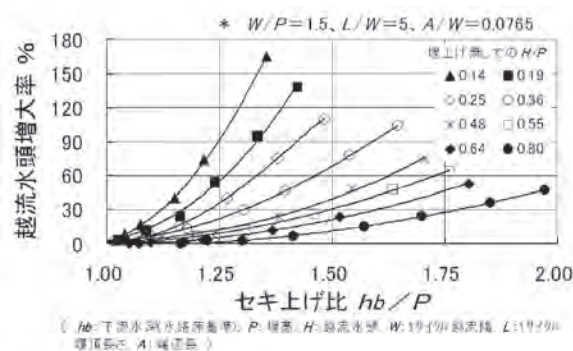


Fig.12 セキ上げによるラビリンス堰越流水頭変化率
Relation between head increase rate and h_b/P on labyrinth weirs

$$C_R = C_{wr} / (C_{wr})_0 = 0.116 \cdot (\eta/H)^6 - 0.644 \cdot (\eta/H)^5 + 1.12 \cdot (\eta/H)^4 - 0.161 \cdot (\eta/H)^3 - 1.66 \cdot (\eta/H)^2 + 2 \cdot (\eta/H) + 0.22 \quad \dots (2)$$

2 セキ上げを見込んだ水理設計

前節の 流量係数式 (2) 式より下流セキ上げを考慮したラビリンス堰の水理設計手順を Fig.14 のように示す。図中 (3) 式, (4) 式は次のとおりである。

$$H_R = C_R^{-2/3} \quad \dots (3)$$

$$(C_{wr})_d = Q_d / (Wt \cdot H_d^{1.5}) \quad \dots (4)$$

H_d , Q_d , $(C_{wr})_d$, $(h_b)_d$: 越流水頭, 流量, 流量係数, 下流水深 (いずれも設計洪水放流時, セキ上げ有り)

Wt : 洪水吐の総越流幅

ラビリンス堰を洪水吐規模の縮小 (総越流幅 Wt の縮小), 堤高の低減もしくは貯水量の増大 (越流水頭 H の低減), 洪水吐安全度の向上 (設計洪水量 Q の増大) など, いずれの目的で用いるかにより, Fig.14 中の試算対象, 最終出力種別 (Wt か Q か H か) は異なるが, いず

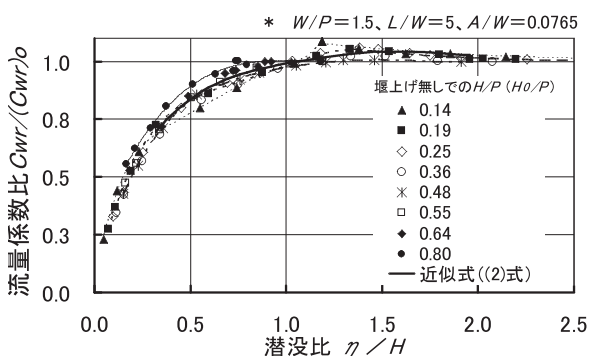


Fig.13 潜没比と流量係数比の関係
Relation between $C_{wr}/(C_{wr})_0$ and η/H on labyrinth weirs

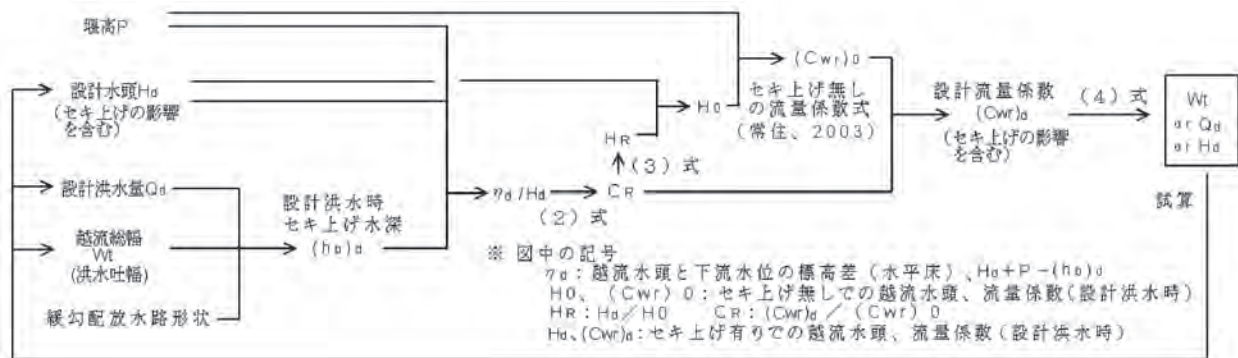


Fig.14 セキ上げを考慮したラビリンス堰の水理設計手順
Hydraulic design routine of labyrinth weirs in backwater

れにせよ基本的な設計手順は同一である。(2) 式を用いた場合, $\eta/H = 0.32 \sim 2.0$ ((2) 式の適用範囲) では下流セキ上げを考慮した水理設計, $\eta/H > 2.0$ では下流セキ上げを考慮しない水理設計と区分され, 下流セキ上げを考慮しない水理設計では, Fig.14 で $(h_b)_d$ を算出せず, $C_R = H_R = 1$ とすれば良い。一方, $\eta/H < 0.32$ では下流セキ上げに伴う流量係数低下が 30% 以上と著しいので, ラビリンス堰の適用性は低いと考えられる。以上のいずれの場合も (2) 式の代わりに Fig.13 による水理設計が可能だが, Fig.13 を用いる場合, H_0 導出のための試算と, Fig.13 中の曲線間の内挿計算を要するので設計は煩雑化する。なお, 事前にセキ上げ考慮での貯水位・堤頂間の余裕高変化, 流量係数変化等, ラビリンス堰適用の効果を概略推計するには Fig.12, 前出 Fig.10 も用いる。

VI 直下落水による放流特性, 流況の変化

前出の高密度ラビリンス堰形状につき, 堰直下で流れを自由落下 (ラビリンス堰模型床版の下流側張り出しにより堰下流端から堰高の 0.42 倍下流地点から落下) させた場合の流量係数 C_{wr} (単位幅当たり流量係数), 流況の変化を示すと Fig.15 のようになる。このように堰直下で落水させた場合, 堰下流が水平床の場合 (常住, 2002) と比べ, H/P が上がっても遷移状態卓越流況が維持されるものの, 流量係数はほとんど変わらなかった。また, 遷移状態卓越流況への移行 H/P もほとんど変わらなかった。

これは, Fig.15 で検討しているような近三角形形状 (端辺比 $A/W \approx 0$) のラビリンス堰では, その流量係数が, 主として側壁部の越流流況に左右されるためであり, かつ近三角形形状では側壁部の越流流況は下流水路長さにあまり影響されないためと思われる。すなわち, 近三角形形状では, 下流水路長さに越流流況が影響されやすい下流端辺の, 全堰頂長さに占める比率が大きいというえ, 下流端辺がほとんどないため, 近長方形形状のように下流端辺のナップ背面エア域が側壁側に貫入して越流流況に影響を及ぼす度合いも低い (常住, 2001)。さら

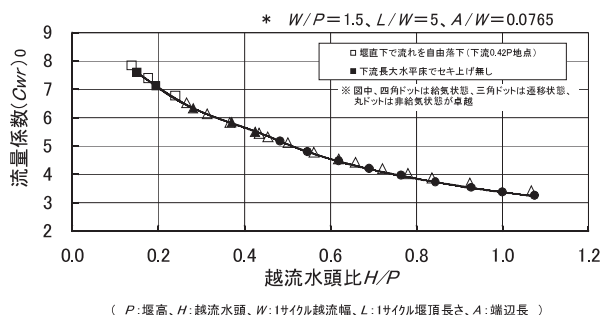


Fig.15 直下落水における流量係数と流況
Relation between discharge coefficient (C_{wr})₀, plan overflow regimes and H/P on labyrinth weirs in free overfall

に、側壁部の越流流況は、堰頂長さが相対的に長ければ (L/W が極端に小さくなければ)、ラビリンス下流水路 (Fig.1) の流況のみに大方左右され、ラビリンス下流水路の流況には、ナップ厚さや両側壁からのナップ衝突跳水の影響が大きいので (常住, 2001)、下流水路末端で自由落下であれば、下流水路長さの側壁部越流流況への影響は大きくないのだと考えられる。それゆえ、堰直下落水でも下流水平床の場合と比べ、流量係数、遷移状態卓越流況移行時 H/P に差異が生じなかったのであろう。

ただし、直下落水ゆえ、下流端辺からのエア貫入は、頻度は低くなるものの高 H/P 時まで時折見られ、それが完全な非給気状態卓越流況には移行し難い原因であった。

以上より、実用上有用 (Ⅲ章より) な「 L/W がある程度大きい近三角形形状」のラビリンス堰では、直下落水による流量係数への影響は考慮不要と考えられる。

Ⅶ 結 言

ラビリンス堰は、通常の直線標準型越流頂より高い放流能力を持ち、要改修数が多いため池洪水吐に有用と見込まれるものの、その放流能力 (単位幅当たり流量係数) に対する下流水位の影響については、これまで十分検討されていなかった。特に放流能力増大に有効な高密度 (低 W/P) のラビリンス堰については、下流水位の影響が大きくなると想定されるものの既往データがほぼ皆無であった。そこで、本研究では、放流能力、流況安定性の点で有用な近三角形形状 (低 A/W) の高密度ラビリンス堰について、下流水位による放流特性への影響を検討した。

その結果、高密度ラビリンス堰 (近三角形形状) であっても越流水頭が小さい場合は、下流セキ上げにより必ずしも放流能力低下とならないこと、すなわち流況変化により放流能力が上下すること、比較的設計水頭が高い場合は高密度形状でもセキ上げによる放流能力低下が抑えられること、堰直下で落水させた場合も放流能力がほと

んど変わらないこと等が明らかとなった。

また、これらの知見から下流水位の影響を考慮した流量係数推計式、水理設計手法を呈示した。

今後は以上の結果を、より低コストなため池改修工法の開発へ活用していきたい。

参考文献

- Indlekofer, H., Rouve, G. (1975): Discharge over the Polygonal Weirs, *Journal of the Hydraulics Division, Proc. of the A.S.C.E.*, **3**, 385-401
- Hay, N., Taylor, G. (1970): Performance and Design of Labyrinth Weirs, *Journal of the Hydraulics Division, Proc. of the A.S.C.E.*, **11**, 2337-2357
- 柏井条介・中西 徹 (1988): ラビリンス型越流部の放流特性, 土木技術資料, **30** (1), 14-19
- Lux, F., Hinchliff, D. (1985): Design and Construction of Labyrinth Spillways, *15th Commission Internationale des Grands Barrages*, 249-274
- Lux, F. (1989): Design and Application of Labyrinth Weirs, *International Symposium on Design of Hydraulic Structures(2nd)*, 205-215
- 農林水産省 (2006): 土地改良事業設計指針 「ため池整備」, 58-87
- 村 幸雄・荒木正夫 (1956): ダム越流部形状に関する実験的研究, 土木研究所報告, **93**
- Taylor, G. (1968): The Performance of Labyrinth Weirs, *Thesis Presented to The University of Nottingham in Partial Fulfillment of The Requirements for The Degree of Doctor of Philosophy*
- 常住直人 (2001): ラビリンス堰のユニット化, *H.12 農業工学関係研究成果情報*, 49-50
- 常住直人 (2003): 刃形ラビリンス堰の形状と効果に関する一考察, *農業土木学会論文集*, **224**, 135-143
- 常住直人 (2004): 下流水位によるラビリンス堰の流況変化, 平成 16 年度農業土木学会大会講要, 812-813
- 常住直人・久保成隆 (2001): 刃形ラビリンス堰の越流流況について, *農業土木学会論文集*, **214**, 119-125
- 常住直人・久保成隆 (2002): 刃形ラビリンス堰の流量係数について, *農業土木学会論文集*, **218**, 283-289
- Tullis, P., Amanian, N., Waldron, D. (1995): Design of Labyrinth Spillways, *Journal of Hydraulics Engineering*, **121**(3), 247-255
- Waldron, D. (1994): Design of Labyrinth Weirs, *MSc thesis, Utah State University, Logan, Utah*

Influence of Backwater, Free Overfall on Discharge Coefficients, Overflow Regimes of High-density Labyrinth Weirs

TSUNESUMI Naoto, TAKAKI Kyoji, GOTO Masahiro and NAMIHIRA Atsushi

Summary

Labyrinth weirs have higher discharge capability than straight standard weirs. Therefore, it is useful for repair works of small fill dam spillways required increase of discharge ability for safety of their downstream areas. Nevertheless discharge capability of labyrinth weirs wasn't clear in imperfect or submerged overflow which hydraulic designs of these conditions can be effective for reduction of downstream channel volume in fill dam spillway, especially on high-density labyrinth weirs which have high discharge ability and a good effect on efficient repair works by those compatible units in spite of long crest length.

In this study, we investigated discharge coefficient, overflow regimes of a high-density and semi-triangular labyrinth weir which had relatively high discharge capability and stable overflow state in our former study. The results in hydraulic experiments indicated below.

- 1) Discharge coefficients per unit width (C_{wr}) of labyrinth weir are not necessarily decreased to increase of backwater in case of low head in spite of high-density plan form.
- 2) C_{wr} change by plan overflow regimes of labyrinth weirs. Namely, C_{wr} are relatively flat in free nappe regime, increase in transitional regime, and decrease in imperfect or submerged nappe regime to increase of backwater.
- 3) Decrease of C_{wr} in case of high head is low, which has capability of hydraulic design in imperfect overflow state.
- 4) Hydraulic design routine in imperfect overflow regime was proposed using a regressive formula of discharge coefficient from the above results.
- 5) C_{wr} in case of drop right downstream of the labyrinth weir are nearly same with those in case of flat bed in spite of difference of plan overflow regime at the same heads.

Keywords : weir, labyrinth weir, discharge coefficient, backwater, drop down, hydraulic experiment