

ラビリンス堰の放流特性および 小規模ダム洪水吐への適用効果について

常住直人*

目次

I 緒言	67	2 実験結果	80
II ラビリンス堰の構造と特徴	68	3 ラビリンス堰の越流流況に関する考察	81
1 ラビリンス堰の構造	68	4 ラビリンス堰の流量係数に関する考察	84
2 ラビリンス堰を洪水吐に適用する意義	68	V ラビリンス堰の効果と応用	88
III 既往の研究成果と小規模ダムへの適用上の 問題点	70	1 限定スペース下における高密度化・近長 方形化の効果	88
1 ラビリンス堰の放流特性に関わる パラメータ	70	2 溜池（小規模ダム）洪水吐への適用	94
2 既往の研究成果	71	VI 結言	98
3 本研究での検討項目（検討の目的）	76	参考文献	100
IV ラビリンス堰の放流特性・越流流況の解明	77	Summary	102
1 研究の方法	77	付録	103

I 緒言

高さ 15 m 未満の小規模ダムは、工学分類上、「溜池」と呼ばれる。我が国では古来より米が主食とされたため、水田の灌漑用に多くの溜池が造られてきた。溜池づくりの歴史は古く、遠く古墳時代まで遡れる。これら古墳時代から造られ続けてきた溜池は、今でも水田や畑の水源として重要な役割を果たしており、その総数は現在、約 20 万個といわれている。

しかし、溜池は土石材を盛り立てて造られているうえ、造られた時代も古いため、老朽化し、漏水が激しいものも多く見られる。このような老朽溜池は全国におよそ 2 万カ所あると言われ、大雨の時に度々、決壊被害を起こしている。これを防ぐため、現在、各地で老朽溜池の改修が行われている。その際、問題になるのは溜池の数が非常に多いことである。小規模ゆえ、1 カ所当たりの改修コストは小さいものの、総数が多いので、全体の改修コストが莫大になるという問題がある。

溜池の改修では普通、溜池堤体と溜池付設の放流水路（洪水吐）の強化が一体で行われる。これは、決壊を防ぐには、堤体の強化は勿論のこと、大雨時の堤上越水による破堤を防ぐ必要があるからである。

この際、一般にフィルダム型式となる溜池では、洪水

吐の改修費用が嵩むことが多い。特にダム規模が小さいほど、洪水比流量が増し（農水省、2003）全改修コストに占める洪水吐改修コストが増す傾向があり、場合によっては堤体改修コストと同程度になる（中島、1989）。また、溜池は比較的古い時代に築造された施設ゆえ、その洪水吐の放流能力が過小なものが多く、改修に際し、洪水吐を拡充して放流能力を高め、洪水に対する安全度を高める必要があるものも多い。この点からも洪水吐の改修コストは増大する。したがって、溜池改修コスト低減のためには、洪水吐部分の改修コストを低減することが重要となる。

本論文では洪水吐改修コストの低減に資すべく、洪水吐越流頂平面形の改良型である「ラビリンス堰 (Fig.1)」について検討を行った。ラビリンス堰は、その放流能力

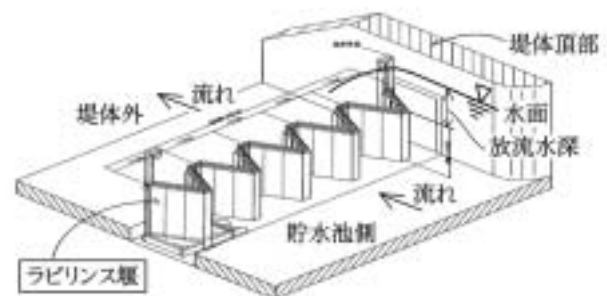


Fig.1 ラビリンス堰の模式図
A labyrinth weir.

* 水工部水源施設水理研究室

平成 17 年 2 月 23 日受理

キーワード：ダム・洪水吐・堰・ラビリンス堰・水理設計

の高さゆえ、洪水吐の所定放流量（設計洪水量）に対する洪水吐幅の縮小（洪水吐の小規模化）に役立つと考えられる。

ラビリンス堰を洪水吐に適用する場合、まず、その流量係数（放流能力）を把握することが必要である。また、ラビリンス堰のように、ジグザグの平面形ゆえ、薄厚断面とならざるを得ない越流頂の場合、越流流況の安定性も問題になるので、この点についても検討する必要がある。

本論文では、これら諸点について水理実験により解明を試みると共に、その結果を踏まえ、小規模ダム（溜池）における洪水吐規模縮小効果を検証した。同時に以上の成果を踏まえ、現地適用に資すべく、ラビリンス堰の水理設計法の呈示も試みた。

以下、本文中の記号については巻末の付録（記号表、記号説明図）を参照されたい。

なお、本研究は筆者が農業工学研究所水工部水源施設水理研究室に在任した平成2年に始め、これまで引き続き行ってきた特殊型放流施設の放流特性に関する研究を取りまとめたものである。

本論文の取りまとめに際しては、東京農工大学農学部助教久保成隆博士に取りまとめ構想の段階から懇切なご指導を頂き、また、東京農工大学農学部教授加藤誠博士、東京農工大学農学部教授島田清博士、茨城大学農学部教授木ノ瀬紘一博士、宇都宮大学農学部教授後藤章博士には、論文のご校閲とともに多くのご指導とご助言を頂いた。

本研究は農業工学研究所元水工部長植田昌明博士の指導の元に始めたものであり、その後も元水工部長大西亮一博士、元造構部長中島賢二郎博士、元水源施設水理研究室長関谷剛博士、中達雄博士、加藤敬博士より多くのご助言、ご指導を頂き、研究遂行上のご支援も賜るとともに、元水源施設水理研究室主任研究官の中西憲男氏、元研究員の桐博英氏からも研究遂行上のご助言、ご協力を頂いた。

また、農林水産省構造改善局設計課、東北農政局会津農業水利事業所並びに八戸平原開拓建設事業所、東海農政局豊川総合用水農業水利事務所からは特殊型放流施設の水利特性に関する研究の機会を与えられ、関係諸氏から多くのご便宜とご協力を頂いた。

本研究の一部は特別研究「溜池の機能向上技術の開発」、交流共同研究「ラビリンス堰ユニットの開発」の一環として行ったものであり、その遂行に当たっては当時の主査を始め関係された多くの方々にご指導、ご便宜を図って頂いた。

ここに記して厚く御礼申し上げ、心から感謝の意を表します。

なお、本論文は連合大学院（東京農工大学、宇都宮大学、茨城大学）審査学位論文であることを付記する。

II ラビリンス堰の構造と特徴

1 ラビリンス堰の構造

ラビリンス堰（Labyrinth weir）とは、前出 Fig.1 に示すようにジグザグの平面形状をした堰である。このため、従来の平面的に直線型の堰よりも同一越流幅でのセキ頂長さを長くでき、単位越流幅当たりの放流量を大きく出来る。一般に、平面形状は、台形もしくは三角形を横方向に連続させただけの単純なものである。

ラビリンス堰と類似の堰は、従来からダックビル（Duckbill）、マーガレット型洪水吐（Marguerite spillway）、多角形堰（Polygonal weirs）などの名称で経験的に用いられてきた（Fig.2）。いずれの形状もある特定の平面形状を横方向に連続させてセキ頂長さを伸ばし、限られたスペースで放流量の増大を図ったものである。

2 ラビリンス堰を洪水吐に適用する意義

前節に記した特徴から、ラビリンス堰の適用効果として次のことが挙げられる。

①洪水吐の小規模化：ラビリンス堰は、通常の直線堰より高い放流能力を有するので、所定放流量を所定越流水頭で流下させる場合、その越流幅をより縮小しうる。このため、ダム洪水吐（非常用放流施設）に適用すれば、その小規模化が可能となる。

このような洪水吐の規模縮小は、フィルダム（土石材で築造されたダム）のように洪水吐が堤体と別途設けられ、洪水吐施工費が高む場合にとりわけ重要となる。洪水吐の越流総幅の縮小により洪水吐部分の地山掘削土工量を減らせる他、地山掘削コストや法面整形・法面維持管理コストなどの関連コストも節減できるからである（Fig.3）。

②ダム規模の低減：ラビリンス堰は、通常の直線堰より

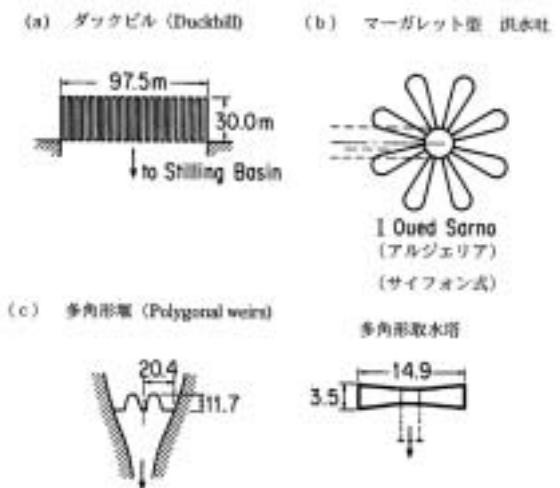


Fig.2 様々なラビリンス堰
Various types of labyrinth weirs.

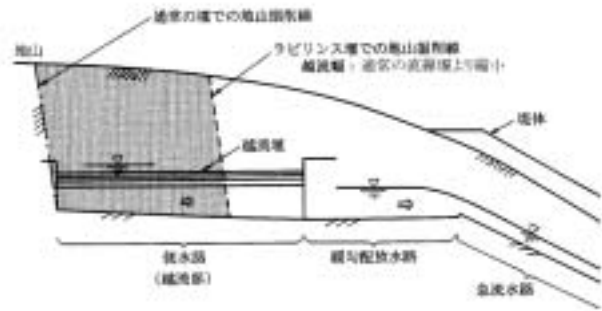


Fig.3 ラビリス堰による洪水吐越流幅の圧縮と洪水吐施工時の掘削土量の低減

Decrease in spillway inlet width and excavation volume for spillway construction by a labyrinth weir.

高い放流能力を持つので、所定放流量を所定越流幅で流下させる場合、その越流水頭（越流水深）を通常の直線堰よりも小さくできる。このため、（洪水流下時の最高水位（設計洪水水位））+（余裕高）であるダム高（ダム非越流部高）を低減でき、それに伴い堤体体積も小さくしうる（Fig.4）。すなわち、ラビリス堰は、ダム規模の低減、築堤もしくは堤体改修のコスト低減に有効と考えられる。

③貯水容量の増大：ダム天端標高を一定としてラビリス堰により洪水吐越流水深を下げた場合、越流水深低減によりラビリス堰のセキ頂標高を引き上げることが可能となる。ゲートレス洪水吐では、セキ頂標高は最大貯水位（常時満水位）と一致するので、セキ頂標高の引き上げによりダムの貯水容量を高めることが出来る（Fig.4）。この貯水容量の増大分を治水容量（洪水に備えた空き容

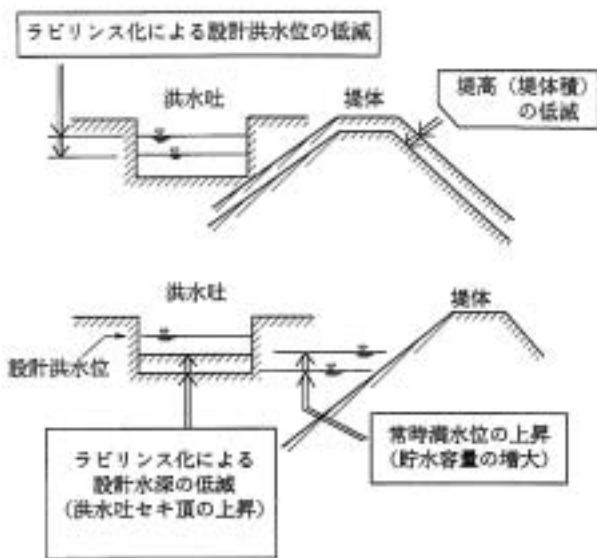


Fig.4 ラビリス堰による堤体積低減、貯水容量増大効果
Decrease in dam volume or increase in reservoir capacity by a labyrinth weir.

量)に充てれば、ダムの洪水時安全度を高められると共に、ダムに防災的役割（治水機能）を付与することも可能となる。

④ダムの費用対効果の向上：ラビリス堰のダム洪水吐への適用は、堤体積の低減や貯水容量の増大につながるため、それらの貯水効率（＝（貯水容量）/（堤体積））の向上に資する。すなわち、築堤やダム改修において、その費用対効果を高めるのに有効と考えられる。

⑤設計洪水量の増大（ダム安全度の向上）：通常の直線堰よりも放流能力が高いため、洪水吐幅、越流水頭を低減させずに洪水吐に適用した場合、設計洪水量（洪水吐の最大放流量）を高められる。これによりダムの洪水時安全度を高めることが出来る。

⑥洪水吐の維持管理の簡便化（操作の不要化）：ゲートレスで放流能力を高められるので、洪水時のゲート操作の不要化、維持管理の労力・コストの低減を図りうる。また、ゲート形式から（ラビリス堰など）ゲートレス形式に変えた場合には、（ゲートによる浮遊流下物閉塞の危険が減るため）堤高余裕高を縮小できるので、その分、貯水容量（もしくは治水容量）を増やしうる（Fig.5）。

⑦洪水吐の施工工期、部材、工費の節減（ユニット化）：ラビリス堰は長方形や台形、三角形等、単純な平面形状の薄厚の直壁を横方向に連続させたものである。このため、通常の堰に比べ工期、部材、工費が節減できることがユテダム（米）の事例で報告されている（Lux et al., 1985）。さらにプレキャスト化、ユニット化を図ればこの効果が一層増すと考えられる。

⑧土砂分離施設、曝気施設としての利用：低越流水頭（低越流水深）で十分な放流量を確保できるので、放流時の流水と土砂の分離に有効と考えられる。また、セキ頂長さが長いので通常の堰より越流水脈が薄く広く放流されること、越流水脈が自由落下で、かつ下流導流路内で衝突攪乱されることにより曝気効果が高くなる可能性がある。曝気施設としてはアメリカ、TVAで利用実績がある（Hauser et al., 1992）。

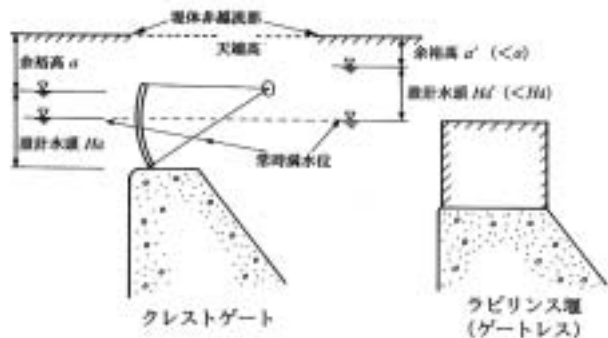


Fig.5 ラビリス堰によるゲートレス化
Conversion from a gated spillway to a weir spillway by a labyrinth weir.

Ⅲ 既往の研究成果と小規模ダムへの適用上の問題点

本論文におけるラビリンス堰の主対象は、前章で記したように小規模フィルダムの洪水吐である。フィルダム洪水吐にラビリンス堰を適用する場合、ラビリンス堰の形状諸元、越流水頭と流量係数の関係の把握が必須となる。また、前章で記したようにジグザグの平面形ゆえ、薄厚断面と成らざるを得ないラビリンス堰では、条件によっては越流流況が乱れやすいことが想定されるので、ラビリンス堰の形状諸元、越流水頭と越流流況の関係の把握も必要となる。本節ではこれらに関する既往の研究成果について論じる。

1 ラビリンス堰の放流特性に関わるパラメータ

ラビリンス堰の放流特性に影響するのは、ラビリンス堰の1サイクルの形状を規定する1サイクルの幅 W 、1サイクルのセキ頂長さ L 、堰の端辺幅 A 、セキ高 P 、セキ厚 T (Fig.6 参照)、堰の断面形状 (円半径 R , Fig.7 参照) とサイクル数 i 、堰の配置 (Fig.8 参照)、下流水路落差 d 、並びに水理条件としての越流水頭 H 、下流水深 h_d (セキ頂標高基準) の11 諸元である (ラビリンス堰1サイクルに係る他の形状諸元は、 W 、 L 、 A 、 P 、 T の5 形状諸元から一意に定まり、例えば側壁角度 α は W 、 L 、 A から定まる)。この他、ラビリンス堰の各辺を平面的に屈曲もしくは湾曲させる、セキ体に傾斜を付ける、ラビリンス上下水路に底勾配を付ける等の形状も考えられるが、ここでは、施工が煩雑化するこのような形状は基本的に対象とせず、水路底は水平、セキ体は垂直、セキの各辺は平面的に直線とする。

以上の条件下でパラメータの無次元化を行うと上記11 諸元は次の10 諸元に整理される。

W/P (縦横比)、 A/W (端辺比)、 L/W (セキ長さ比)、 T/P (セキ厚比)、 R/P 、サイクル数 i 、堰の配置、 d/P (下流落差比) 及び H/P (越流水頭比)、 h_d/P (下流水深比)

上記のうち、ラビリンス堰の断面形状が刃形堰形状 (Fig.7 参照) ならば、 R/P の影響は無くなる。また、下流水路に段差を設けなければ d/P の影響は無視でき、下流セキ上げが無ければ、下流水深は越流水頭に応じて従属的に定まるので、 h_d/P の影響も無視できる。

したがって、放流特性に影響するパラメータは、

W/P 、 A/W 、 L/W 、 T/P 、サイクル数 i 、堰の配置及び H/P

の7 諸元となる。

このうち、 W/P は堰高に対する1サイクルの幅を示し、単位幅あたりに設置されるサイクル数 (設置密度) を規定するものである。 W/P が小さいほど単位幅あたりのサイクル数が増し、ジグザグの密度が高くなる。なお、 W 固定条件下では、 W/P の低減は高セキ高化とも見なせるが、 W/P 低減による P の増大に伴い、同一 H/P に対する

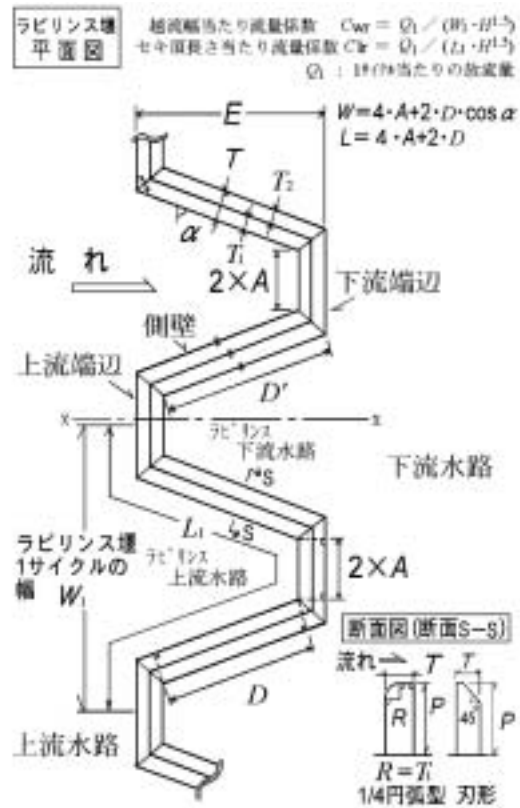


Fig.6 ラビリンス堰の模式図と記号
Symbols with a labyrinth weir in this paper.

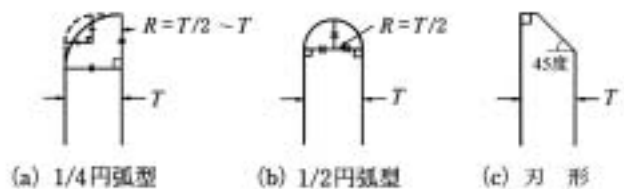


Fig.7 ラビリンス堰の断面形状

A variety of sectional shapes of a labyrinth weir.

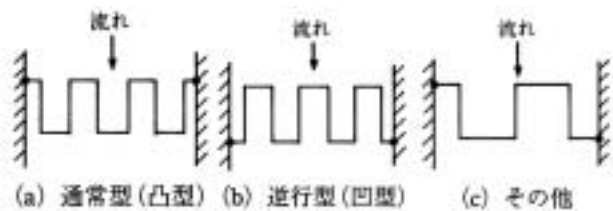


Fig.8 ラビリンス堰の配置

A variety of orientations of a labyrinth weir.

越流水頭 H も増大して H/W が増すので、水理的には高密度化と同じ効果になる。

一方、 A/W はラビリンス堰の平面形状を規定するパラメータである。 A が W に対し相対的に低下し A/W が0 になった場合は、平面形状が三角形となり、逆に A が相対的に増して A/W が0.25 になった場合は、長方形の平面形状となる。その間では台形の平面形状となるが、 A/W が

頃から、我が国では1950年代以降のことであり、その頃にはゲートの技術も進歩していたので、あえて、ラビリンズ堰のような工法を採用する意味は小さかったと考えられ、これもラビリンズ堰に関する研究が進まなかった原因と推測される。

すなわち、この頃以降、近年までは、通常の設計条件では、越流流況の安定性が高いハロルド型などの標準型越流堰を直線もしくは円弧状の平面線形で用いることが多く、放流能力を高める必要がある設計条件では、ゲート構造物を採用するのが一般的であった。放流能力を高めたいが、現地の施工条件、維持管理上の問題からゲート構造物を採用しがたいということは稀だったと考えられる。

このため、ラビリンズ堰の放流特性について論じた研究はKozák et al. (1961), Gentilini (1940), Tison et al. などごく散発的なものに限られる。これらの研究結果については次節のTaylor (1968), Hay et al. (1970)の研究にも取り込まれているので、ここでのその概略を記すに止める。

Kozák et al. (1961)の研究では12形状のラビリンズ堰について放流曲線が明らかにされている。その平面形はいずれも台形であり、模型セキ厚は0.006mでその頂部両端に0.00075mの面取りが施されている。セキ厚が薄いので、ほぼ $L_1/W_1 \doteq L/W$, $W_1/P \doteq W/P$ である。この研究では、セキ長比(L/W)の増大により直線堰に対する相対的な放流能力が増大すること、縦横比(W/P)を下げてその効果は維持されうることなどを記しているが、検討形状に限られていること、 W/P を低下させた形状では L/W が増大している等、実験諸元が体系的に組まれていないこと、越流水頭比(H/P)の検討範囲が0.25以下と小さいものみの結果であること、セキ長比(L/W)の検討範囲も概ね4以下と限られていることなど、確たる結論を導き出すには不十分な点が多い。

一方、Gentilini (1940)の研究では、平面形が三角形の刃形断面ラビリンズ堰について、側壁角度(α)が30, 45, 60度のものにつき、水路内のサイクル数(i)を変化させ、その各々について放流特性を確認している。

しかし、実験における L/W の最大値は2と小さいこと、堰高が水路幅に比して高いので W/P が非常に小さく、かつサイクル幅が小さいので H/W が大きい(放流特性には H/P よりも H/W の影響が強い)という限られた特殊な条件の実験結果であることから、洪水吐の設計など実用に供するには不十分なものである。

また、Tison et al.の研究では、平面形が台形の薄板で構成されたラビリンズ堰についてその放流特性を示している。この研究でも実験ケースは限られ、 L_1/W_1 , W_1/P (L/W , W/P)は小さい。しかし、Tison et al.の研究では、 L_1/W_1 (L/W)が一定な場合、 W_1/P (W/P)の低下により Q_1/Q_n (C_w)が低下すること、 H/P が0に近づくとき $Q_1/Q_n \rightarrow L_1/W_1$ となることが確認されている。さらに、実験模型規模を

変更しても放流特性に変化がないことも確認されている。

b Taylor の研究成果

Taylor (1968)は従前の散発的な研究成果に個々の現地設計事例における模型実験のデータも加え、ラビリンズ堰の放流特性について体系的な検討を加えた。

その検討諸元、実験形状はFig.9に示すとおりであり、セキ配置は通常型(前出, Fig.8参照)、セキ高は0.1270~0.2032m、セキ断面形状は基本的に薄厚の刃形(厚さ0.0127m)であるが、一部、1/2円弧型(前出, Fig.7参照。厚さ0.0127m)についても検討を行っている。さらに、サイクル数(1~3)、下流水路落差(0~ ∞)、下流セキ上げ($h_0/P = 0 \sim 0.375$)の影響や堰部分の水路底に勾配を付けた形状(エプロン, $a_1/P = 0 \sim 0.75$, $a_2/P = 0 \sim 0.75$, Fig.10)についても検討を行っている。

この研究からTaylor (1968)はラビリンズ堰の放流特性について次のような知見を得た。

- ・ $H/P \rightarrow 0$ により $Q_1/Q_n \rightarrow L_1/W_1$ となった(Fig.11)。この場合には、ラビリンズ堰の各部で直線堰と近い流況になったと考えられる。
- ・ H/P の増大により Q_1/Q_n は低下した。特に L_1/W_1 が大きいケースでこの傾向が顕著だった(Fig.11)。
- ・ H/P の増大途中で Q_1/Q_n が一時的に増大する場合があった(Fig.11)。これは堰直下の水位の増大により放流が阻害され(downstream interference), Q_1/Q_n は低

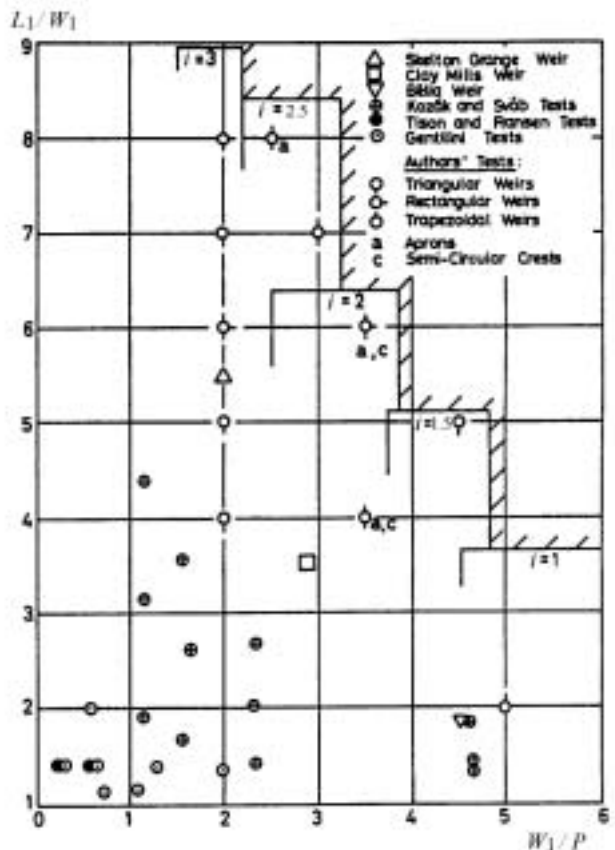


Fig.9 Taylorによる検討諸元 (Taylor, 1968)

Diagram defining the scope of Taylor's investigation (Taylor, 1968).

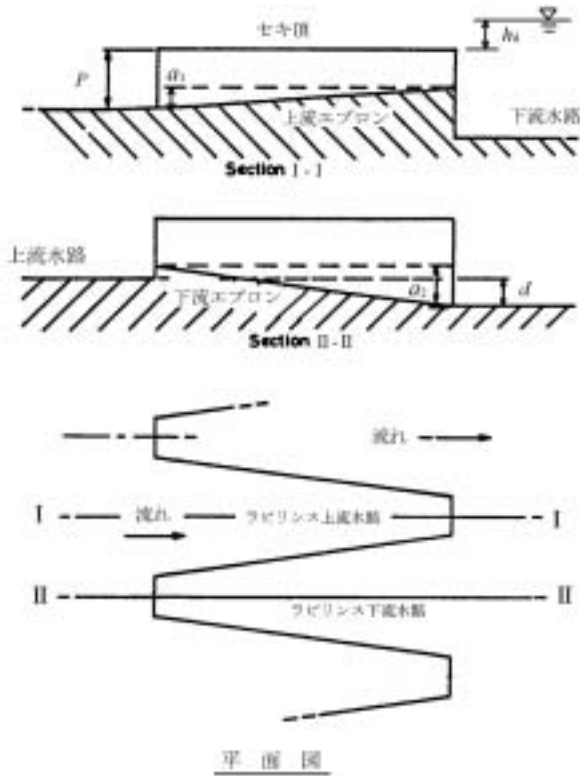


Fig.10 エプロン勾配・下流段差付きのラビリンズ堰 (Taylor, 1968)

A labyrinth weir with aprons and bed drop (Taylor, 1968).

下するが、ある程度、その水位が上昇するとナップ背面のエアが消えていくためと考えられる。これを過ぎると Q_1/Q_n は急激に低下した。

- ・ L_1/W_1 の増大により Q_1/Q_n は増大した。しかし、 L_1/W_1 が大きいほど、その増大ほどに Q_1/Q_n は増大しなくなった (Fig.11)。 $L_1/W_1 = 2$ までは $L_1/W_1 \approx Q_1/Q_n$ だったが、 $L_1/W_1 > 8$ では L_1/W_1 を増大させる意味がないと考えられる。
- ・ W_1/P が十分大きい場合は、平面形が三角形に近いほど、 Q_1/Q_n は大きくなった (Fig.12)。三角形ほど Q_1/Q_n が大きくなる傾向は他の L_1/W_1 でも同様であった。これは、三角形化により上流端辺が小さくなり、入り口での縮流効果を減じるためと考えられる。
- ・ W_1/P による Q_1/Q_n の変化は小さかった (Fig.11)。しかし、より小さい W_1/P ($W_1/P < 2$) を対象とした既往実験結果では W_1/P の Q_1/Q_n への影響は大きい (W_1/P 低下により Q_1/Q_n 低下)。これは W_1/P が過度に小さくなると、同一 H/P での越流水頭に対しサイクル規模が過小化し、この影響が著しくなるためと考えられる。特に上流端辺がない三角形形状では、これによりラビリンズ下流水路上流端付近での両側壁からの水脈衝突による放流阻害 (nappe interference) も顕著になるので、 W_1/P 縮小による影響は大きくなると考えられる。
- ・ 上記の W_1/P 縮小効果 (nappe interference の効果) は、

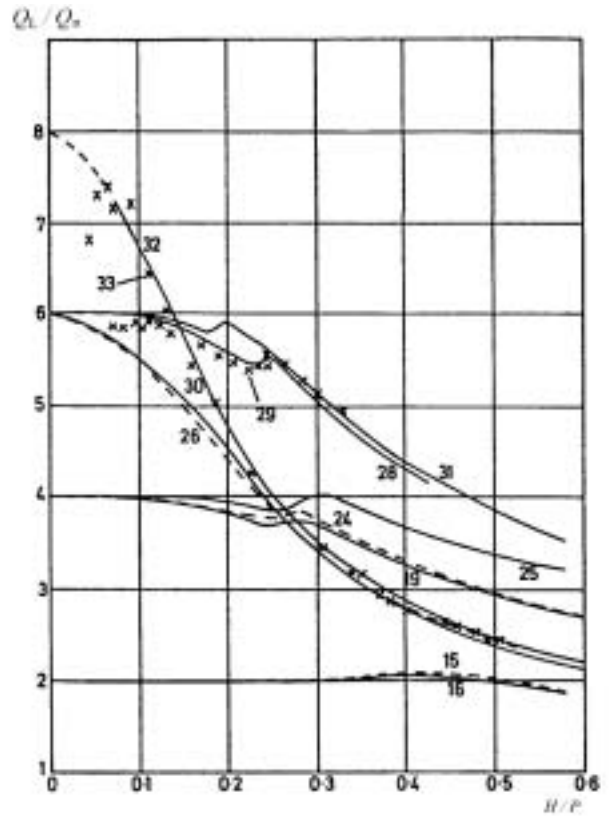


Fig.11 代表的な実験形状の放流曲線 (Taylor, 1968)
Typical test results by Taylor (Taylor, 1968).

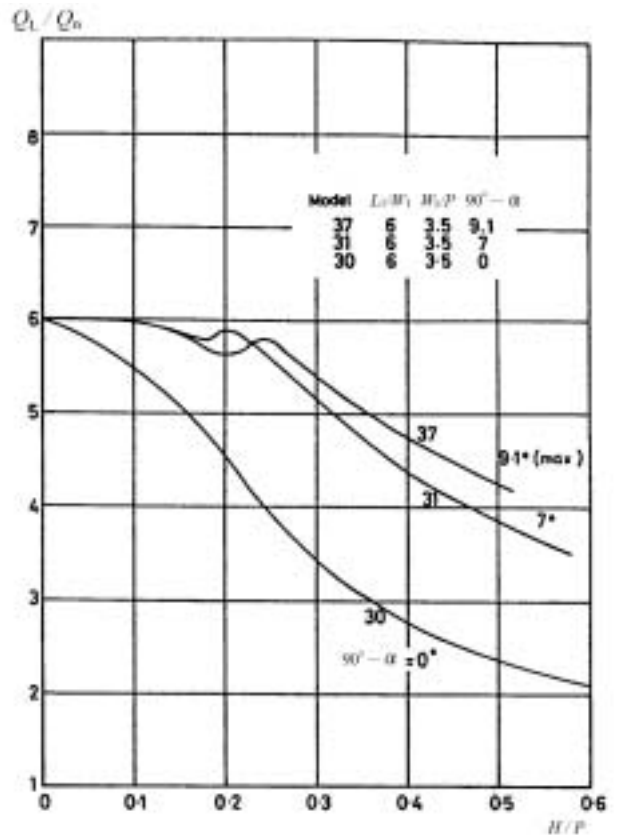


Fig.12 平面形による放流能力の変化 (Taylor, 1968)
Variation of discharge magnification ratio by side angles (Taylor, 1968).

$W_1/P \geq 2.5$ では無視できた。これより小さいと三角形形状ほど Q_L/Q_n 増大とは必ずしも限らない。 W_1/P がさらに過小になると直線堰の流況に近づくと考えられる。

- ・サイクル数はラビリス堰の放流曲線に影響しなかった。
- ・ $H/P \geq 0.5$ において下流底高を下げ、上流底高と下流底高（ラビリス下流水路から下流水路の底高）の標高差を $0 \sim \infty$ にしても、それによる Q_L/Q_n の増加（downstream interference の除去による増加）は最大 5% 程度に止まった。downstream interference 除去の為の下流底高の下げは H と同程度あれば十分であった。
- ・下流セキ上げがあっても、下流水位がセキ頂標高以下ならば直線堰と同様、ラビリス堰の放流能力はほとんど影響されなかった。しかし、潜没が著しくなると Q_L が低下した。
- ・エプロンの設置は堰上下流問わず、 Q_L/Q_n を低下させた。
- ・1/2 円弧堰の流量係数は直線堰として用いた場合、刃形堰より約 20% 高くなる。ラビリス堰化した場合の越流量も概ね増えるが、 Q_L/Q_n は刃形堰よりも小さくなった。

しかし、Taylor (1968) の実験結果には、検討 H/P の範囲がほぼ aerated condition (Lux et al., 1985) に限られること、 Q_L/Q_n 算出の元となる Q_n の導出式 (Kindsvater・Cater 式 (Kindsvater et al., 1959) 及び Villemonte 式 (Villemonte et al., 1947)) が fully aerated condition (Lux et al., 1985) に対応した完全ナップの越流流況にしか適用できないこと等の問題があり (Lux et al., 1985)、上記の検討結果についてもこれらの点からの再検証が必要である。加えて、 Q_L/Q_n 算出に際し、直線堰、ラビリス堰の接近速度水頭を同一としたことによる系統的誤差があり、それゆえ、実際より過大な Q_L を与えることが Cassidy et al. (1985)、Houston (1982)、Mayer (1980) により後に明らかにされている（特に $H/P > 0.4$ での誤差が顕著で Q_L が約 25% ずれる (Lux, 1989)）。したがって、Taylor (1968) の研究からはラビリス堰の放流特性に関する定性的傾向は分かるが、それを定量的に実用に供すには限界がある。

また、Taylor (1968) の研究では L_1/W_1 , W_1/P , α (もしくは A_1/W_1) の実験パラメータが系統的に設定されており、間の欠落が多い点も実用上からは問題であり、このデータのみから最適設計を行うのは無理がある。

c Lux の研究成果

1970 年代以降、アメリカでは、ダムの洪水安全度向上のため、洪水吐越流頂にかなりの数のラビリス堰が採用されている。

この背景には、アメリカでは日本の設計洪水量に相等する「想定最大洪水量」(P.M.F., Probable maximum flood) として数百～一万年確率洪水量が設定されており、この流量を主として非常用洪水吐に相等する「予備洪水吐」

(auxiliary spillway) から放流するのであるが、現状ではアメリカ国内で 3 万以上のダムが上記基準に照らし問題ありとされている事情がある (Asfer, 1988)。すなわち、このような大規模洪水ではゲート式洪水吐を採用するのは現実的でないため、ゲートレス型式の中でも比較的放流能力が高いラビリス堰を採用せざるを得なくなっているのである。この過程において Lux et al. (1985)、Lux (1989) によりラビリス堰の放流特性の再検討、水理設計法の呈示がなされている。

Lux et al. (1985)、Lux (1989) の研究におけるラビリス堰の検討諸元は以下のとおりである。

$$L_1/W_1 = 2 \sim 8$$

$$W_1/P = 2 \sim 5$$

$$A_1/W_1 = 0, 0.0765$$

$$T/P = 0.066 \sim 0.105$$

セキ断面形状は刃形と 1/4 円弧形状(前出 Fig.7 参照)

セキ厚 0.0127m (0.5inch)

セキ高 0.120 ~ 0.191m

サイクル数 1 ~ 3

セキ配置は通常型と逆行型 (前出 Fig.8 参照)

上下流水路底は水平で底標高は同一

下流セキ上げ無し

この研究から Lux はラビリス堰の放流特性について次のような知見を得た。

- ・ラビリス堰の越流流況は、 H/P の増大により fully aerated condition, partially aerated condition, transitional condition, suppressed condition と変化していく
- ・fully aerated condition では堰全域で越流水脈が自由落下し、ナップの厚さや堰直下の水位が放流能力に影響しない。
- ・partially aerated condition では堰直下の水位上昇やナップ厚の増大によりラビリス堰の上流端辺付近からナップ背面への給気が困難になっていく (nappe interference の発生)。これによりラビリス堰の放流能力は低下していく。しかし、側壁や下流端辺のナップ背面には安定したエア域が存在する。
- ・transitional condition では堰直下の水位上昇やナップ厚の増大によりラビリス堰の各部でエア域が寸断される。小さくなったエア域が側壁沿いに動いたり、同一断面でエア域が発生したり消失したりと不安定な状態になる。partially aerated condition と transitional condition の見かけ上の判別は困難だが、流量係数曲線の不連続化により容易に判別出来る。
- ・suppressed condition では堰直下の水位上昇やナップ厚の増大により堰背面のエア域が消失する。
- ・サイクル数、堰の配置は放流特性に影響しない。
- ・ W_1/P の違いによる C_w の差異は一定である (Fig.13 参照)。
- ・ラビリス堰の 1 サイクル当たりの放流量は、次式と Fig.14 等により推算出来る。なお、セキ厚 (T/P)

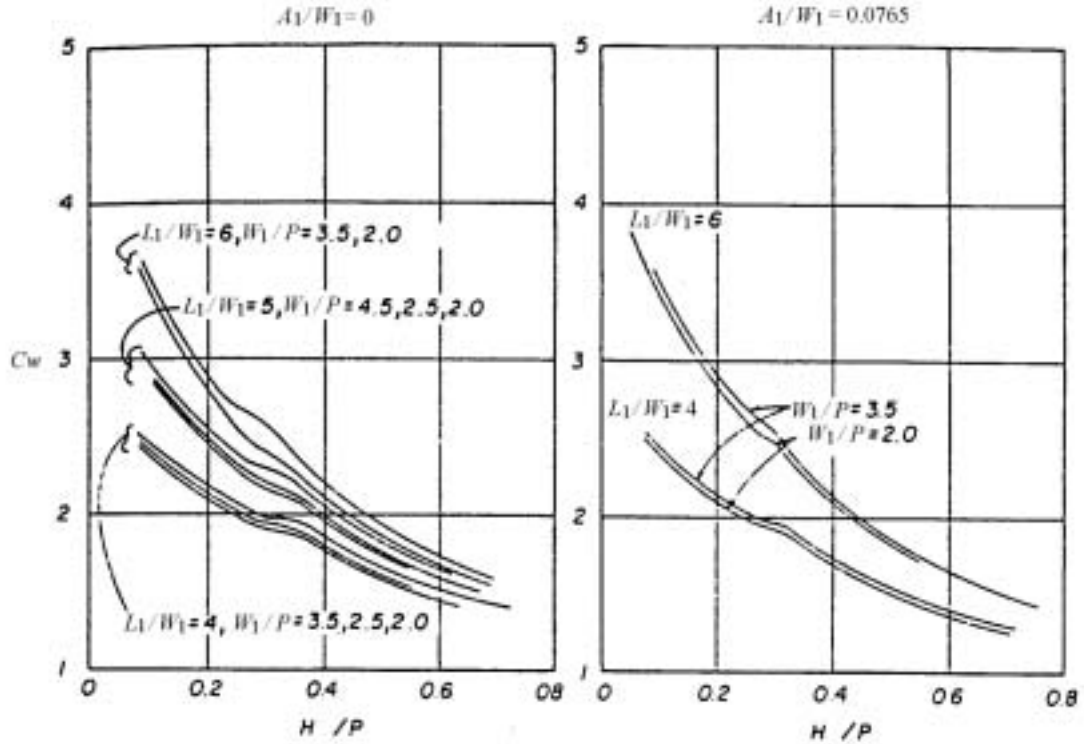


Fig.13 W_1/P による C_w の変化 (Lux et al., 1985)
Variation of C_w by W_1/P (Lux et al., 1985).

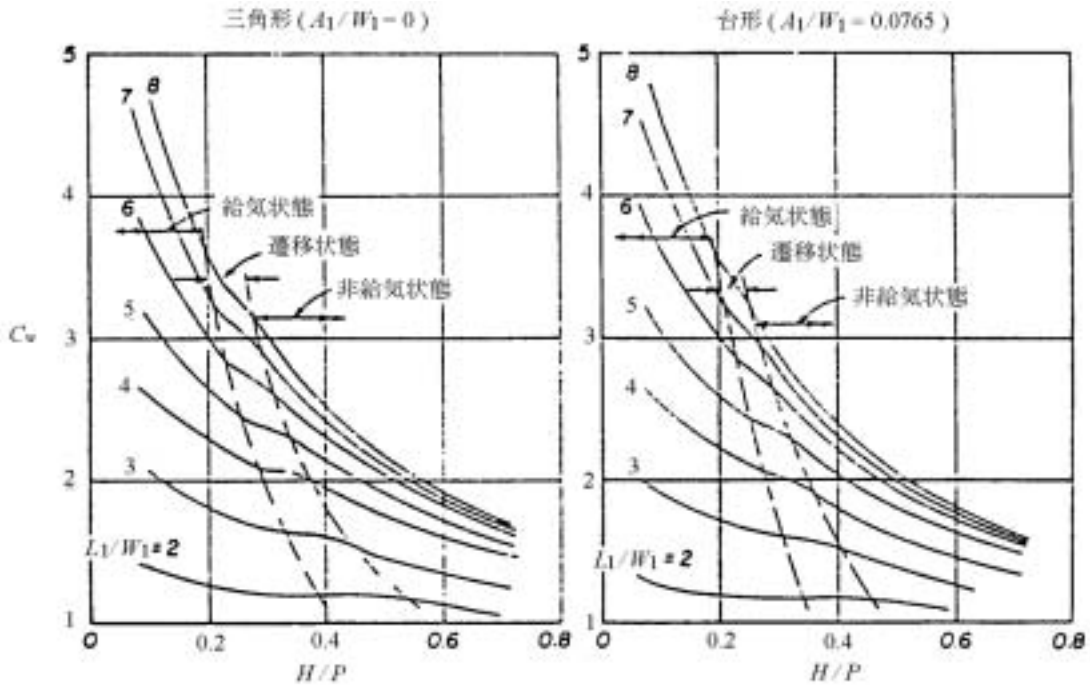


Fig.14 刃形ラビリンズ堰の C_w 値 (Lux et al., 1985)
Variation of C_w with a sharp crested labyrinth weir (Lux et al., 1985).

の影響は上記条件下では表れなかった。

$$Q_1 = C_w \cdot \{(W_1/P)/(W_1/P+k)\} \cdot W_1 \cdot H \cdot (g \cdot H)^{0.6} \dots\dots(1)$$

Q_1 : ラビリンズ堰 1 サイクル当たりの放流量

C_w : ラビリンズ堰の越流幅当たり流量係数 (無次元値。Fig.14 より)

W_1 : ラビリンズ堰 1 サイクルの幅

P : セキ高

k : 定数 (平面形状が三角形で 0.18, $A_1/W_1 = 0.0765$ の台形 (A_1 : 端辺上流側の幅) で 0.10)

H : 越流水頭

g : 重力加速度

・ aerated condition での C_w の急減は, nappe interference

の発達に依ると考えられる (Fig.14 参照)。

- ・nappe interference は A_i/W_i の低減 (三角形化), T/P の増大 (相対的なセキ厚の増大) により著しくなると考えられ, 平面形による係数 k の違いにも nappe interference の影響が含まれていると考えられる (nappe interference の影響が大きい三角形で定数 k の値が大きく, 放流量に対しマイナスに作用している)。
- ・suppressed condition ではラビリンス堰全体が広頂堰的な流況になるので C_w 曲線が平坦化していくと考えられる。
- ・transitional condition における C_w 曲線の不連続化は, ナップ背面エア域のある流れから無い流れへの移行に伴うものと考えられる。
- ・ L_i/W_i 増大につれ C_w 値はそれほど増大しなくなる。

しかし, Lux の研究成果は, ラビリンス堰の設置スペースに比較的余裕がある大規模洪水吐を主対象にしたものであるためか, ジグザグの密度が低い低密度形状や近三角形の平面形状のラビリンス堰のみを対象としたものになっており, 高密度形状 ($W/P < 2$) や近長方形形状 ($A/W > 0.0765$) のラビリンス堰の放流特性は明らかにされていない。

3 本研究での検討項目 (検討の目的)

Taylor (1968), Hay et al. (1970) により, ラビリンス堰の平面形がごく三角形に近い場合を除けば Q_i/Q_n は大きく低下すると示されたこと (Fig.12), Lux (1989) により $W/P \geq 2.5$ が望ましいと指摘されたこともあり, 既往の研究成果では, 近長方形形状 ($A/W > 0.0765$) や高密度形状 ($W/P < 2$) のラビリンス堰の放流特性はごく断片的にしか明らかにされていない (Fig.15)。すなわち, 近長方形化, 高密度化それ自体は, 往々にして放流能力 (流量係数 C_{wr}) の低減に作用するので, それら形状の放流特性は体系的に検討されてこなかった。

しかし, 溜池など小規模ダムの洪水吐等, 設置スペースが限られている条件下 (E/P 固定) では, ラビリンス堰の近長方形化, 高密度化は L/W の増大 (単位幅当たりのセキ頂長さの増大) につながる (Fig.16), むしろ, 放流能力 (流量係数 C_{wr}) が増す場合もあると考えられる。

また, 既存溜池の洪水吐改修では, 既設洪水吐幅内にラビリンス堰を設置せざるを得ない場合も想定され, その場合, 比較的低密度なラビリンス堰を対象にした既往設計図表 (前出 Fig.14) では, サイクル数を増しにくく (総セキ頂長さを増しがたく) 効率的な設計がし難い。このような場合も, ラビリンス堰を高密度化すれば, 既存の洪水吐総幅内にラビリンス堰を間断なく効率的に配置出来る。

無論, 以上の高密度化, 近長方形化による L/W 増大 (相対的なセキ頂長さの増大) は, 堰体体積の増大, すなわち, 堰体コスト増大のデメリットも惹起する。しか

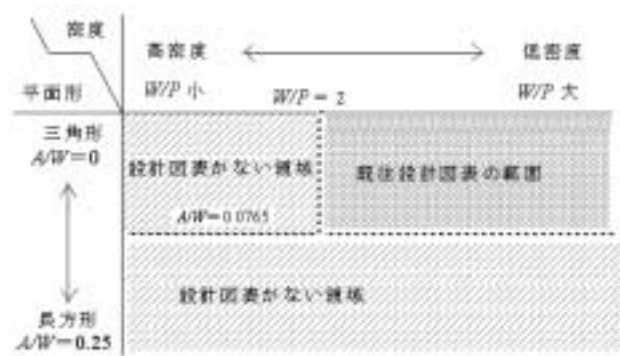


Fig.15 ラビリンス堰の検討諸元
Diagram defining the scope of this investigation.

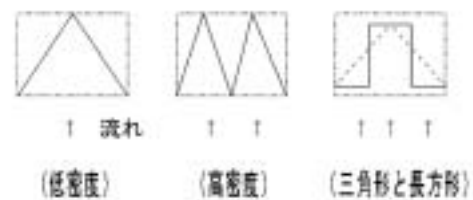


Fig.16 平面スペース固定条件下 (もしくは単位幅で流下方向長固定) でのラビリンス堰の高密度化, 近長方形化によるセキ頂長さの増大
Increase of crest length per unit width in restricted longitudinal space by a high density or rectangular labyrinth weir.

し, これは, ラビリンス堰の量産化 (ユニット化など), 型枠の共用化等による堰体コスト低減によって相殺しうる。特に溜池改修など, 比較的, 総数が多い工種にラビリンス堰を適用する場合は, 量産化 (ユニット化など) や型枠の共用化を図りやすく, 相殺出来る可能性が高い。

以上から, 本研究では, $A/W > 0.0765$ の近長方形形状や $W/P < 2$ の高密度形状について, その放流特性を明らかにし, それに基づき, ラビリンス堰適用による従来形状に対するコスト低減効果 (洪水吐規模, 堤体規模の低減), 機能向上効果 (貯水容量の増大) の解明を試みた。

なお, ラビリンス堰はその平面形状がジグザグであることから, これまで直線堰で用いられてきた標準型越流頂のようにセキ厚を厚くしにくく, 堰断面形状は, 薄い直壁状になる。このため, 越流水脈は, 堰下流面に沿わせて流下させるのでなく, 空中に自由落下で放流させることになり, これにより堰上流水位や下流水位の高さによっては不安定流況が発生することが予測される。ダムや溜池の洪水吐における設計水頭など, その設計の基礎となる越流水位においてこのような不安定流況が発生するのは問題である。これに対し給排気装置など, 不安定流況を強制的に消失される工法も考えられるが, そのためには不安定流況の状況や発生条件を解明する必要がある。しかし, これが発生する条件は, 高密度形状や近長方形形状のラビリンス堰に関しては十分に解明されていない。

そこで本研究では、高密度形状や近長方形形状のラビリンス堰における不安定流況の発生状況、発生条件についても解明を試みた。

以上より本論文におけるラビリンス堰の検討項目（検討の目的）をまとめると次のようになる。

- ① 高密度形状、近長方形形状を含むラビリンス堰の放流特性（流量係数）の体系的把握
- ② ラビリンス堰の小規模ダム（溜池）洪水吐への適用効果の定量的把握
- ③ 高密度形状、近長方形形状を含むラビリンス堰の流況の体系的把握

IV ラビリンス堰の放流特性・越流流況の解明

前章における既往成果の論述に示したように、ラビリンス堰を小規模フィルダムの洪水吐に適用するには、高密度や近長方形のラビリンス堰を中心にラビリンス堰の形状諸元、越流水頭と流量係数の関係が十分把握されていない問題がある。また、ラビリンス堰の形状諸元、越流水頭と越流流況の関係、特に各形状において不安定流況が発生する水理条件が十分把握されていないことも問題である。そこで本章ではこれらの点の解明を試みた。

1 研究の方法

ラビリンス堰の放流特性を解明するには水理実験による方法と数値解析による方法が考えられる。ラビリンス堰では放流特性に影響する要因が多く、水理実験に依る場合、実験ケース数が莫大になる。しかし、ここでは、数値解析を行うにも解析手法確立のための実験が必要となること、このための実験ケース数は、水理実験により（実用上必要な範囲での）放流特性を解明する場合よりもむしろ多くなると見られること、また、数値解析手法確立の難易度も高いと見られること等を鑑みて水理実験による方法を採用した。ラビリンス堰放流特性の数値解析手法確立の難易度が高いと見られるのは、ラビリンス堰の越流流況が自由水面を持った三次元の急変流であることに依る。

また、以下で水理実験の結果を現地換算する場合は、ラビリンス堰の主たる適用工種たる洪水吐の流況が主として重力と慣性力により規定されることからフルード相似則に基づき行うものとする。

a 実験施設

実験水路幅を狭めれば所定の実験施設流量に対し模型堰上の越流水頭 H を大きくでき、実験における H/P の範囲を広げられると共に粘性の影響排除のための最小越流水深も確保しやすくなる。模型幅も小さくでき、実験作業も容易になる。反面、水路水深に対し水路幅が過小になると水路側壁の影響が増すと考えられる。これらの点を勘案して実験水路幅（内幅）は 0.5m とした。この水路幅に対し、水路長さ、深さは極力大きくし、各々、

11.4m 、 0.6m の水平床とした（Fig.17）。

実験水路の材質は耐水ベニヤを使用し、内面は粗度の影響を出来るだけ抑えるべく極力平滑になるように塗装を二度塗りした。また、十分な水密・強度を有し、満水流下時の水圧や径年変化による変形・漏水を生じないように側面を角材により補強した。実験水路の模型付設置上流端から下流 1.5m 区間は、水路側面（左岸）を越流水位変動、流況の視認・ビデオ記録ができるように透明アクリル板で製作した。

ラビリンス堰の模型上流端は実験水路上流端から 4.5m の地点に流れに直交して敷設するものとし、ラビリンス堰の模型を敷設する部分は、ラビリンス堰模型の床版厚さ分（後述）だけ段下げした構造とした。この段下げによりラビリンス堰模型の床版上面と水路床が同一標高（水平）になるようにしている。

この際、ラビリンス堰の模型毎に模型床版の流下方向長さは当然異なるが、その最大値を水路段下げ部の流下方向長さとし、模型床版の流下方向長さがそれ未満の模型を敷設する場合は、模型床版厚と同厚の板（耐水ベニヤ）により埋め戻し、かつ隙間にはシリコンシーラントを充填して模型床版上面と水路床間の水密を確保した。なお、模型床版、埋め戻し板とも、その水路床への固定方法はネジ止めに依る。

また、実験水路上流端の上流側には波立ち・偏流・流れの乱れなどを消散させ整流すべく水路幅を漸縮させた構造（側面バルマウス）とし、下流側は、ラビリンス堰模型にセキ上げ背水の影響が及ばないように落差を設け自由落下状態とした。この落差を確保すべく実験水路は鋼製架台上に設置した（Fig.18）。

実験水路の流量は、ダックビルにより一定水位に保たれたヘッドタンクの水位と上流水槽水位との水位差に応じ、ヘッドタンク・上流水槽間の流入管に付設されたバルブ開度で調節され、それらの流量は実験水路下流の帰還水路から貯水槽、ポンプを通じて再びヘッドタンクに循環される構造となっている（Fig.18）。本実験水路の最大流量は約 $0.15\text{m}^3/\text{s}$ である。

b 実験諸元（形状諸元、水理諸元）

ラビリンス堰の放流特性は水平床の場合、Ⅲ、1.で記したように L/W （セキ長比）、 W/P （縦横比）、 A/W （端辺比）、 T/P （セキ厚比）、 R/P 、サイクル数 i 、堰の配置、 d/P （下流落差比）及び H/P （越流水頭比）、 h_d/P （下流水深比）により規定される。ここではラビリンス堰の設置スペースが限定された条件下において、その平面形（ A/W に関連）、密度（ W/P に関連）と放流特性の関係を把握することを主眼としているので、実験ケースが莫大にならぬよう、それ以外のパラメータは一定とした。すなわち、ラビリンス堰の断面形状を刃形堰形状（Fig.7参照）として R/P の影響を除去し、下流水路に段差を設けないことにより d/P の影響を除去した。また、実験水路末端を自由落下状態（セキ上げ無し）とし、 h_d/P の影響も除去

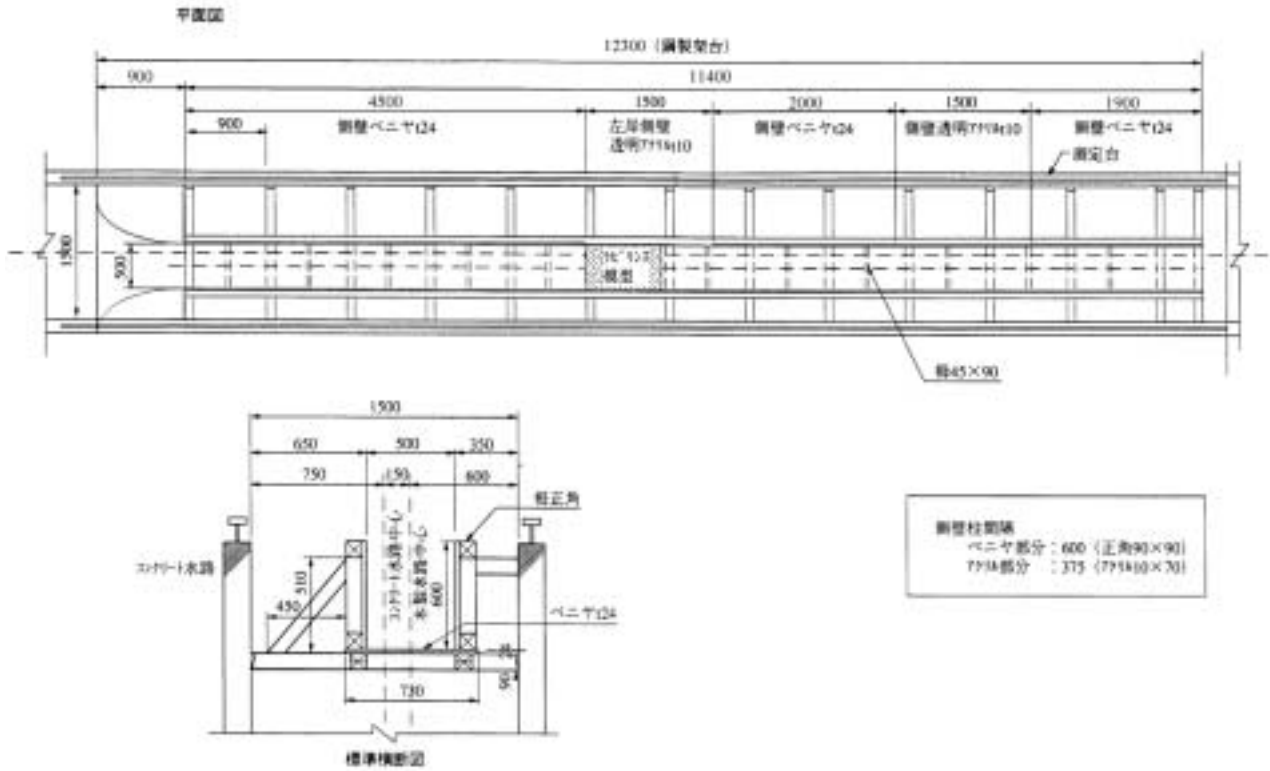


Fig.17 ラビリス堰の実験水路図
The experiment flume of this investigation.

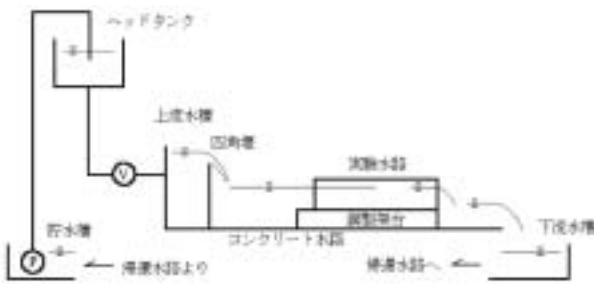


Fig.18 ラビリス堰の実験施設図
The experiment facilities of this investigation.

した。

d/P については、ラビリス堰適用の主対象と目される溜池、ダム等の洪水吐や用排水路では通常、ラビリス堰を水平水路床へ設置すると見込まれること、施工の便からあえて段差を設けたりしないこと（側水路式洪水吐では下流水路に段差を生じうるが堰直下の水位は堰天端近くまでセキ上げられる）、洪水吐等ではラビリス堰の堰直下で急傾斜水路（急流水路）に接続させる設計も一部されているが、これについては交叉波の発生とそれによる下流減勢の不良の問題が指摘されていること（Babb et al., 1976 及び Cassidy et al., 1985）、 d/P の増大による放流能力の増大は大きくないとされること（Taylor, 1968）等からここでは検討対象に加えなかった。

また、本研究では、 W/P 、 A/W の検討諸元は広くとるものの、放流能力を大きく左右する L/W については後述の

理由により既往研究成果の範疇に止まるので、総じて、 d/P 、 h_d/P の放流特性への影響も既往成果（Ⅲ、2.）とほぼ同様と推定される。

一方、堰の断面形状については、ナップ下縁形状に近い 1/4 円弧型（Fig.7）が放流能力、施工性の両面で有利であるが、堰頂各部でナップ下縁形状が変化するラビリス堰では、1/4 円弧型にした場合、セキ厚の影響が生じてしまいパラメータが増し、平面形 (A/W に関連)、密度 (W/P に関連) と放流特性の関係が判然としなくなる。これでは検討目的の主眼たる平面形 (A/W に関連)、密度 (W/P に関連) と放流特性の関係が把握し難いので、断面形状は刃形セキに単純化した。

以上より、本研究におけるラビリス堰の放流特性に影響するパラメータは、 L/W 、 W/P 、 A/W 、 T/P 、サイクル数 i 、堰の配置及び H/P の 7 諸元となる。しかし、これらのうち、堰の配置、サイクル数 i は放流特性に影響しないことが既に既往成果（Ⅲ、2）で示されている。また、刃形堰形状なので T/P の影響はほとんど生じないと推測される。したがって、残された主要諸元は W/P 、 A/W 、 L/W 、 H/P のみである。本研究では、これらについての検討範囲を次のように設定した（前出 Fig.15 参照）。

形状諸元

$W/P = 0.5, 1, 1.5, 2, 4$ (5 ケース)

: W/P を過度に高めると相対的にラビリス堰 1 サイクルの幅が広くなり、放流施設幅が既定された工種（水路、固定堰や既設洪水吐の改修）

への適用に際し、余幅が大きくなる、もしくは所定堰高に対し H/P が過大になり放流能力が低下する、等の難点が生じる（ラビリス堰の適用効率が低下する）。このことと W/P を過度に高めても同一 L/W , A/W のラビリス堰の流量係数はそれほど上がらないと見られること（前出 Fig.13 より）、既往成果との比較も考慮して W/P の検討最大値は 4 とした。

一方、 W/P の最小値は、前述（Ⅱ, 2）のように限定スペース下（ E/P 固定条件下）で高密度形状（低 W/P ）が有効な可能性があるものの越流水頭 H との関係でその下限が制約される。

すなわち、 W/P を低減させると、所定 H に対する H/W が増し、縮流効果、ナップインタフィアレンスが增大して C_{ir} , C_{wr} は大きく低下する（Ⅲ, 2. 及び Fig.19 より）。このことと既往成果での検討 H/W が概ね 0.5 以下なこと（ $H/P \leq 1$, $2 \leq W/P$ より）から H/W を 0.5 より過度に大きくしてもラビリス堰の効果は期待できないと推測される。 H/W を 0.5 以下とすると、 W/P を小さくするにつれ、ラビリス堰が有効な H/P の上限値は低下していく。これに対し、後述のように現地へのラビリス堰適用では多くの場合、 $H/P \geq 0.2$ となるので、この H/P に対し $H/W \geq 0.5$ の条件を確保するため、 W/P の検討最小値は 0.5 とした。

$A/W = 0, 0.0765, 0.15, 0.25$ (4 ケース)

: 三角形 ($A/W = 0$) から長方形 (0.25) まで全範囲を網羅させた。0 ~ 0.25 の間では、既往の設計図表が呈示されている最大値である $A/W = 0.0765$, 及びそれと長方形形状の中間付近の値として $A/W = 0.15$ を採用した。

$L/W = 2, 5, 8$ (3 ケース)

: L/W が過小では形状的に直線堰に近づきラビリス堰の効果はほとんどなくなる。比較的小さい H/P から水理的に直線堰的な流況に近づく。一方、 L/W が過大でも相対的にセキ頂長さが伸びる割に C_{wr} が増えずラビリス堰の効果はなくなっていく（前出 Fig.14 より）。また、設置に際し敷地上の制約が大きくなる。これらのことから既往成果（Ⅲ, 2.）を参考にして、 L/W の検討範囲を 2 ~ 8 とした。

以上より形状諸元からは計 $5 \times 4 \times 3 = 60$ 形状ケースとなる。

水理諸元

$H/P = 0.2 \sim 0.6$

: H/P は、実験施設の最大流量の制約があるものの、その計測最大値として、どの実験形状についても少なくとも 0.6 以上を網羅させた。一方、計測最小値としては、例えば、溜池の洪水吐で

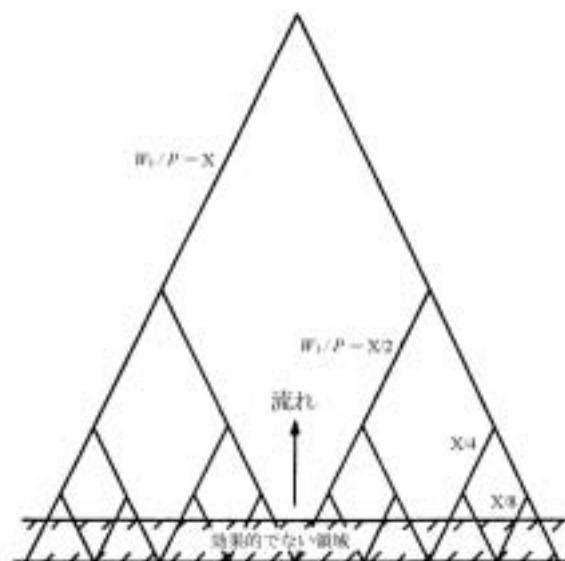


Fig.19 Nappe interference による放流阻害 (Taylor, 1968)
Discharge obstruction by nappe interference (Taylor,1968).

は、浮遊流下物に対する閉塞防止のための最小 H として数十 cm を確保すること、それに対する堰高は多くの場合、1m 以下であることから概ね 0.2 程度まで計測することとした。

なお、既往成果のラビリス堰形状は Fig.20 上図に示すごとくセキ上流面で L 等、ラビリス堰の基本諸元が定義されているが、この形状では密度、セキ厚が増すとラビリス堰下流凹部（ラビリス下流水路、前出 Fig.6 参照）が狭幅化し、構造上、比較的セキ厚が厚くなる場合や高密度形状では施工困難となる。そこでここではこの点と後々、厚手形状との放流特性比較を通じてセキ厚の影響を解明することも考慮し、密度、セキ厚、断面形に依らず適用しうるラビリス堰形状、すなわち Fig.20 下図のように隅角部を除いた部分で W, L, A 等、基本諸元が定義されるラビリス堰形状について検討を行った。このような形状では、密度 (W/P に関連) やセキ厚 (T/P に関連) が増しても有効セキ頂長さ L の短縮やラビリス下流水路の狭幅化を来さない。Fig.20 のような形状変更を行ったため、その影響を確認する意味で本研究では上記のように既往成果と重複する $W/P, A/W$ も実験範囲に含めた。

c 実験模型およびケース No.

実験模型の諸元とケース No. は Table 2 のようにまとめられる。

諸元中、セキ厚比 T/P は、同一水路での実験であること、ラビリス堰の形状諸元 ($W/P, A/W, L/W$) にばらつきがあることから、完全に統一は出来ない。すなわち、たとえセキ厚 T を統一したとしても、水路幅が固定なこと、形状諸元の多様性から堰高 P までは統一化出来ず、 T/P 値にばらつきが生じる（実験水路幅を変化させられれば T/P 値を一定化できるがこれは現実的ではない）。

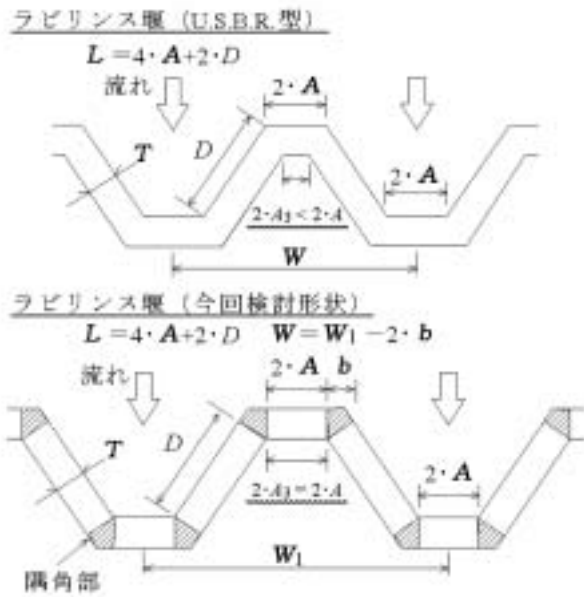


Fig.20 従来のラビリンス堰(上)と今回検討のラビリンス堰(下)の平面形状の比較

Comparison of a labyrinth weir model between Lux's (upper) and this thesis (lower).

しかし、各模型間の T/P 値の差異は極力小さくし、かつ T/P の放流特性への影響を極力除去すべく、ラビリンス堰模型の断面形状たる刃形堰頂点で放流水脈を剥離させるように T/P 値自体も極力小さくした。すなわち、全模型平均の $(T/P)_{av} < 0.074$ とした。この T/P 値は直線刃形堰で $(H/P)_{min} \approx 0.05$ においても放流水脈の剥離が十分見込める値である(土木学会, 1985より。ナップ内外の圧力差の影響が無視できる場合において)。

d 計測方法

流量は JIS に準拠した形状・構造の四角堰により計測した。計量堰越流水位はマンメータにより取り出し 1/10mm 読みのポイントゲージで計測した。同様にラビリンス堰の越流水位もマンメータにより取り出しポイントゲージ (1/10mm 読み) で計測した。測定地点は堰上流端から 3m 上流地点である。

なお、模型セキ頂標高の微妙なズレに対し平均的なセキ頂標高を算出するため、模型を実験水路に敷設後、1/10mm 読みポイントゲージにより堰の上下流各端辺の中央のセキ頂標高を計測した。

また、各セキ頂標高の測点の実験水路側壁の微妙な不陸、それら測点とマンメータによる越流水位測点間のポイントゲージ架台標高のズレ、ポイントゲージ架台上の微妙な凹凸等に対し、実験データを静水面を基準に補正するため、静水面と模型セキ頂高さ、静水面とマンメータのポイントゲージ読みの関係を把握した。すなわち、各模型形状毎に実験水路内の模型セキ頂高さ測点の直上流(平均9点程度)とラビリンス堰越流水位測点(マンメータ取り出し)において静水面計測を行った。

Table 2 実験諸元及び実験模型の諸元とケース No. The scope and the model number of this investigation.

実験諸元			
L/W (セキ長比)	2, 5, 8	P (セキ高)	0.101 ~ 0.297m
W/P (縦横比)	0.5, 1, 1.5, 2, 4	T (セキ厚)	0.008, 0.010m
A/W (端辺比)	0, 0.0765, 0.15, 0.25	T_1	0.002m
T/P (セキ厚比)	0.0336 ~ 0.0883	セキの材質	アクリル
H/P (越流水頭比)	0.0714 ~ 1.904	(模型下流水路長)/ P	22.7 ~ 58.9

実験模型の設定 L/W の一覧 (括弧内は模型ケース No. を示す)

模型 No. と諸元の分布		W/P				
		0.5	1	1.5	2	4
A/W	0	2(1)	2(29)	2(30)	2(31)	2(5)
		5(9)	5(13)	5(14)	5(15)	5(11)
		8(3)	8(45)	8(46)	8(47)	8(7)
	0.0765	2(32)	2(33)	2(34)	2(35)	2(36)
		5(16)	5(17)	5(18)	5(19)	5(20)
		8(48)	8(49)	8(50)	8(51)	8(52)
	0.15	2(37)	2(38)	2(39)	4(40)	2(41)
		5(21)	5(22)	5(23)	5(24)	5(25)
		8(53)	8(54)	8(55)	8(56)	8(57)
	0.25	2(2)	2(42)	2(43)	2(44)	2(6)
		5(10)	5(26)	5(27)	5(28)	5(12)
		8(4)	8(58)	8(59)	8(60)	8(8)

ラビリンス堰の越流水位計測は、流量を増大させる方向で実験を行った場合、模型規模では低流量時に現地規模では見られないセキ表面へのナップ付着の影響が生じうるので、流量を大きい方から漸次下げて行った。

計測したデータは下式により整理した。

$$\text{セキ頂長さ当たりの越流係数 } C_{tr} = Q_1 / (L_1 \cdot H^{3/2}) \quad \dots(2)$$

$$\text{ここで } L_1 = 2 \times (B_1 + D' + T \cdot \tan(\rho \times \pi/180)) \quad \dots(3)$$

$$\text{越流幅当たりの越流係数 } C_{wr} = Q_1 / (W_1 \cdot H^{3/2}) \quad \dots(4)$$

$$\text{ここで } W_1 = 2 \times (B_1 + T \cdot \tan(\rho \times \pi/180) + D' \times \cos(\alpha \times \pi/180)) \quad \dots(5)$$

2 実験結果

a 越流流況

ラビリンス堰の各断面における越流流況は、従来の結果(Lux et al., 1985)と同様、越流水頭(もしくは H/P)の低下に伴い Fig.21 のように「非給気状態」、「遷移状態」、「給気状態」と変化した。「遷移状態」では、ナップ(放流水脈)背面の水位やナップの動揺によりナップ背面エア域が圧迫されて不安定化した。この際、圧迫されたエア域は小さいエア溜まりとなって側壁沿いを移動した。また、ナップ背面水位の上下動が見られる場合もあり、それが著しくなるとナップ背面エア域が消失、発生を繰り返すようになった。なお、エア溜まりが側壁沿いに移動する場合もエア域が生滅を繰り返す場合も同一断面で見ればナップ背面にエア域有り、無し「給気状態」、「非給気状態」の流況が経時的に繰り返される状況であった。

b ラビリンス堰の形状による流況の変化

ラビリンス堰の越流流況は、 H/P 低下に伴い下流端辺

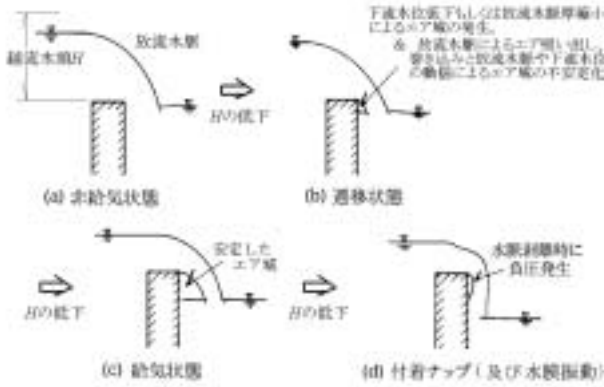


Fig.21 H/P の変化によるラビリンス堰断面の越流流況変化
Variation of sectional overflow state on a labyrinth weir to H/P.

から給気状態化していった。一方、H/P 増大時には逆に上流端辺から非給気状態化していった（ただし、一部の形状についてはラビリンス下流水路内に跳水状の流況を生じ、側壁上流部と下流部で流況変化の順序に逆転が見られた）。総じて L/W の小さい形状は、その堰頂の長さゆえ、堰頂全体で越流水頭、堰直下水位、越流流況の均一度が高く、このため、流況変化も劇的に、H/P の小さい変動で起きる傾向が見られた。これに対し、L/W の大きい形状は、その放流量が大きいため、下流水位の上昇が早く、堰直下水位が上昇しナップ背面エア域が縮小する時には既に下流水位も高くなっているため、背面エア域縮小に伴うナップの振動が抑えられる傾向が見られた。

ここでは、セキ頂全長で非給気状態となる場合を流況 I、上流端辺から側壁は全て非給気状態だが下流端辺には遷移状態や給気状態が見られる場合を流況 II、側壁に遷移状態が見られる場合もしくは給気・非給気状態が混在する場合を流況 III、側壁から下流端辺は全て給気状態だが上流端辺で遷移状態や非給気状態となる場合を流況 IV、セキ頂全長で給気状態となる場合を流況 V と区分する。上述の結果よりラビリンス堰の越流流況は H/P 低下に伴い流況 I から流況 V へ変化することになる。

これら各流況の境界 H/P と各形状諸元 W/P, A/W, L/W の関係を整理すると Fig.22 のようになった。なお、境界 H/P は正確に特定するのが困難なため、本図のそれはビデオデータから得られたその近辺の H/P から内挿推定したものである。また、図中の注釈(*)に示したデータは、粘性力の影響が卓越すると見られる微少な H/P（模型上で $H < 0.02\text{m}$ ）で流況境界が生じたため特定不能だったものである。図中には Lux et al. (1985), Lux (1989) による流況境界も併示した。

c 流量係数

実験結果の一例を縦横比 W/P, 端辺比 A/W 毎に H/P - C_{wr} により整理すると Fig.23 のようになる。図中及び以下の本文中の「不安定流況」は、 $A/W \leq 0.0765$ の近三角形形状では流況 III, $A/W > 0.0765$ の近長方形形状では流況 II ~ IV に相当するものである。近三角形形状で不安定

流況の範囲を狭くしているのは、これらの形状では上下流端辺（前出 Fig.6 参照）の長さが極めて短く、そこでの越流流況の不安定さがラビリンス堰全体の放流能力にさほど影響しないと見られること、それゆえ実用上問題ないと見られることによる。

3 ラビリンス堰の越流流況に関する考察

a 遷移状態

ラビリンス堰の各断面における越流流況は、前出 Fig.21 のように「非給気状態」、「遷移状態」、「給気状態」と変化した。

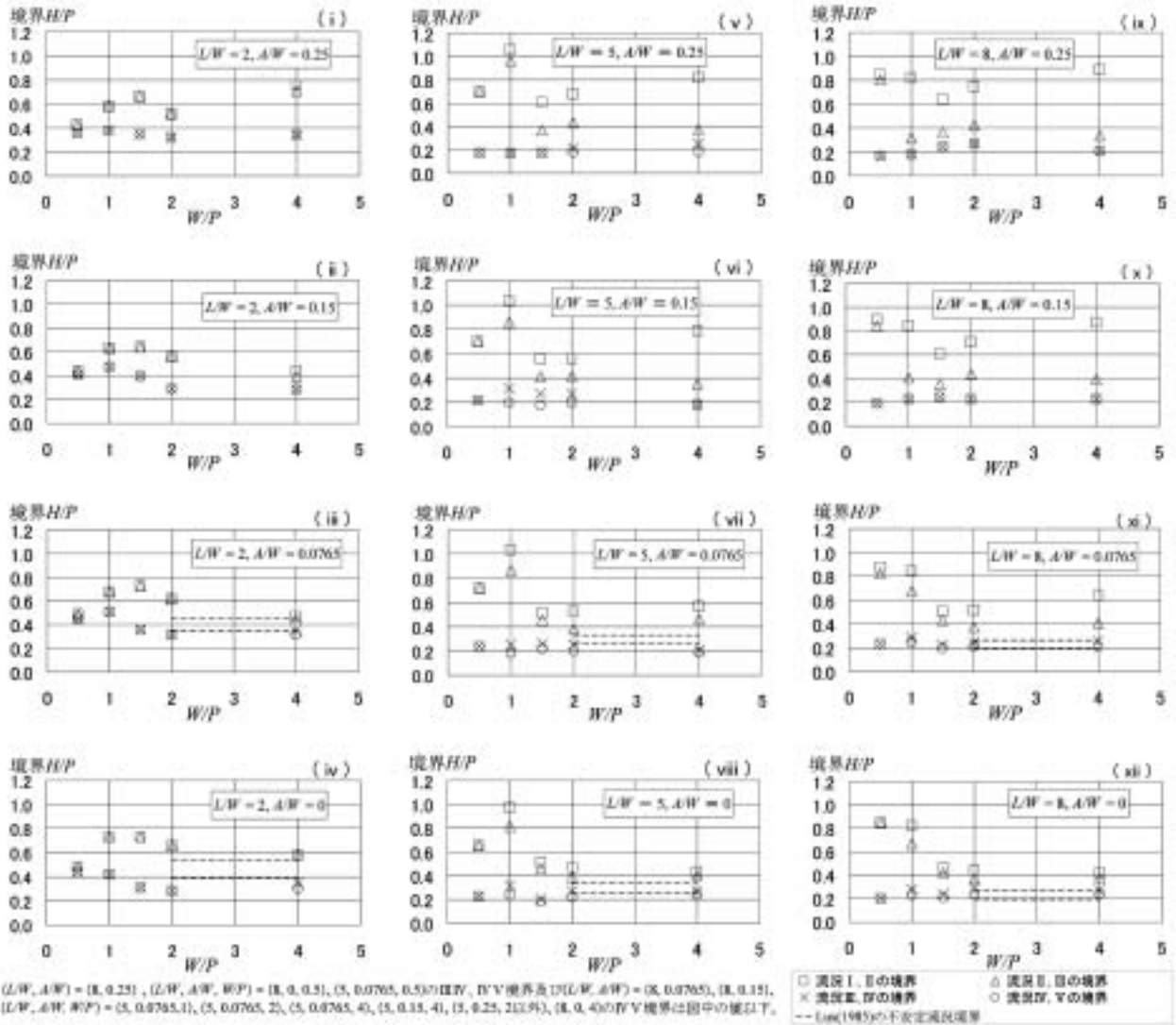
「遷移状態」では、ナップ（放流水脈）背面の水位やナップの動揺によりナップ背面エア域が圧迫されて不安定化した。このように「遷移状態」においてナップ背面水位が上下動するのは、ナップによるナップ背面エアの吸い出し（もしくは巻き込み）とナップ落ち口からのエアレーションのバランスが崩れることに依ると考えられる。すなわち、ナップ背面において排気が給気を上回り、ナップ背面エア域の圧力降下が顕著になるためと考えられる。

この流況にはエア域（気泡）が関連するので、模型規模による影響が生じる可能性もあり、それによりこのような不安定流況（遷移状態が卓越する流況）が発生する越流水頭比 H/P の範囲も模型規模により変わる可能性がある。しかし、エア域の生滅は越流水深、ナップ厚さ、堰直下の水位に左右され、これらについては模型規模に依らずフルード相似が成立するので、その程度は自ずと限定されると推測される。

いずれにせよ、ラビリンス堰を現地適用する場合は、不安定流況となる越流水頭を設計水頭にしない、下流堰上げによってこのような越流水頭でのナップ背面エア域を強制的に消失させ遷移状態の卓越を解消する等の対策が必要と思われる。これらの方策を採るためには、各流況の境界 H/P と各形状諸元 W/P, A/W, L/W の関係を整理した先の Fig.22 に基づき遷移状態が発生する水利条件を把握する必要がある。なお、前節の結果からすれば、急激な流況変化に伴う騒音を回避するには、L/W が大きい形状が有利と見込まれる。

b 形状変化と境界 H/P の変化の関係

H/P 固定条件下でラビリンス堰の各形状諸元 (W/P, L/W, A/W) を変化させた場合、ラビリンス堰の平面形状が、越流水頭 H に対し相対的にどのように変化するかを示すと Fig.24 のようになる。例えば、A/W, L/W, H/P 固定条件下で W/P を変化させると、ラビリンス堰の平面形状は、越流水頭 H に対し相対的に Fig.24 上図のように変化する。この変化は A/W の値により左図から右図のように異なるが、いずれの形状でも W/P 増大により W や流下方向長さ E が越流水頭 H に対して相対的に大きくなる（相対的に低密度化）。また、三角形形状 (A/W = 0) 以外ではラビリンス下流水路幅（前出 Fig.6 参照）も相対的に



(L/W, A/W) = (8, 0.25), (L/W, A/W, W/P) = (8, 0, 0.2), (5, 0.0765, 0.5)のIV, IV-V境界及び(L/W, A/W) = (8, 0.0765), (8, 0.15), (L/W, A/W, W/P) = (5, 0.0765, 1), (5, 0.0765, 2), (5, 0.0765, 4), (5, 0.15, 4), (5, 0.25, 2)以外, (8, 0, 4)のIV-V境界は図中の破線で示す。

※ 上図中, Lux et al. (1985) の不安定流況境界においては L/W , A/W , 横軸 W/P は, L/W_1 , $(A_1)/W_1$, W_1/P である。

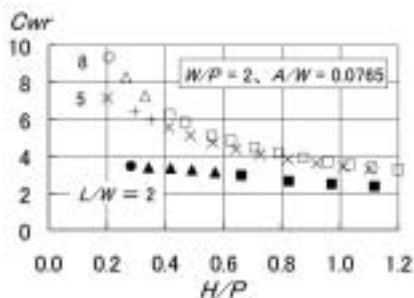
Fig.22 形状諸元による各越流流況の境界 H/P の変化
Relation between boundary H/P of overflow states and L/W , A/W , W/P .

大きくなる。

前出 Fig.22 は以上のような平面形の変化に対し, 各流況の境界となる H/P 値がどのように変化するかを示したものと云え, これより以下のことが考察される。

- ① 流況 I・II 境界 (H/P)_{I-II} は L/W , A/W が同一の場合, W/P が大きくなるにつれ増大, 低下, 増大と変化している。流況観察よりこれらの原因は各々, 次の 1), 2), 3) のように推測される。

- 1) W/P が小さい形状, すなわち E/P が小さい形状ほど, 比較的小さい H/P で「越流水深によりラビリンス堰各サイクルが潜没した状態 (各サイクルが判然とせず直線堰のような越流状態)」となる。このため, W/P が小さい形状では, 越流水頭 H が低下してもナップ背面エア域を生じ難く (H/P)_{I-II} は小さくなると考えられる。例えば Fig.22 (i) ~ (iv) では $W/P < 1 \sim 2$, Fig.22 (v) ~ (viii) では $W/P < 0.5 \sim 1.5$ でこのような傾向が見られる。



○, ×, ●: 各々, $L/W = 8, 5, 2$ において給気状態が卓越する流況。 $A/W \leq 0.0765$ の近三角形形状で流況IV~V, $A/W > 0.0765$ の近長方形形状で流況Vに相当。
△, +, ▲: 各々, $L/W = 8, 5, 2$ において過縁状態が卓越する不安定な流況。 $A/W \leq 0.0765$ の近三角形形状で流況III, $A/W > 0.0765$ の近長方形形状で流況III~IVに相当。
□, ×, ■: 各々, $L/W = 8, 5, 2$ において非給気状態が卓越する流況。 $A/W \leq 0.0765$ の近三角形形状で流況I~II, $A/W > 0.0765$ の近長方形形状で流況Iに相当。

Fig.23 刃形ラビリンス堰の放流特性の一例
An instance of discharge coefficient curves of a sharp crested labyrinth weir.

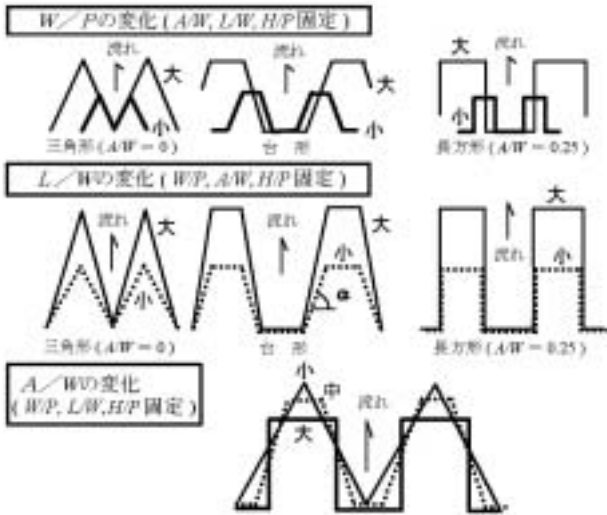


Fig.24 形状諸元の変化によるラビリス堰の平面形の越流水頭 H に対する相対的な変化

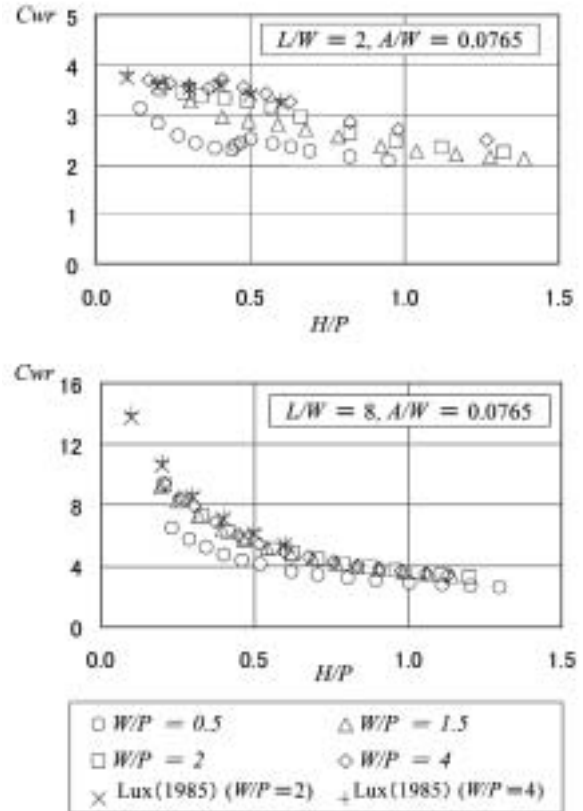
Relation between a relative plan shape of a labyrinth weir over flow head and W/P , L/W , A/W .

しかし、Fig.22(ix)～(xii) ($L/W = 8$) に示すように L/W が大きく相対的に E/P が大きい形状では、極度に W/P が小さくならない限り ($W/P < 1$)、上述の傾向は生じにくいと考えられる。

2) Fig.25 に示すように W/P 増大(縮流ロスの低下)により同一 H/P での流量係数 (C_{wr}) は増大する傾向がある。これにより下流水深も増すので、比較的小さい H/P までナップ背面エア域が生じにくくなる。したがって、 W/P がある程度大きくなると、 W/P が増すほど (H/P)_{II} が低下するようになる。例えば Fig.22(i)～(iv) では $W/P > 1 \sim 2$ 、Fig.22(v)～(viii) では $W/P > 0.5 \sim 1.5$ 、Fig.22(ix)～(xii) では $W/P > 0 \sim 1$ でこのような傾向が見られる。

3) W/P がさらに大きい形状では E/P 増大の効果により下流端辺(前出 Fig.6 参照)での放流水脈厚の低下が顕著となる。このため、比較的大きい H/P でも下流端辺ではナップ背面エア域が残存するようになる。したがって、 W/P が一定以上に大きくなると 2) とは逆に W/P 増大に対して (H/P)_{II} が高まるようになる。例えば Fig.22(i) では $W/P > 1.5 \sim 4$ 、Fig.22(v)～(vii) 及び (ix)～(xi) では $W/P > 1 \sim 2$ でこのような傾向が見られる。

しかし、下流端辺での放流水脈厚の低下は、 L/W が小さく E/P が小さい形状、もしくは A/W が小さくラビリス上流水路(前出 Fig.6 参照)内での拡幅ロスが小さい形状では著しくない。これらの形状では Fig.22(ii)～(iv)、(viii)、(xii) に示すように $W/P > 2 \sim 4$ と大きくなければ上述の傾向は生じないと考えられる。



※ 上図中、Lux (1985) においては L/W , A/W , W/P は、 L_i/W_i , $(A_i)_{av}/W_i$, W_i/P である。

Fig.25 W/P による流量係数 (C_{wr}) の変化
Difference of C_{wr} by W/P .

② 流況Ⅱ・Ⅲ境界 (H/P)_{III} は、Fig.22(i)～(iv)、(viii)、(xii) に示すように L/W が小さい形状 (E/P が小さい形状) や A/W が小さい形状(ラビリス下流水路出口幅が広い形状)では (H/P)_{III} に近い。これは、これらの形状ではラビリス下流水路末端付近の水位と下流水位の差が小さくなるためと推測される。

なお、 L/W が大きくとも W/P が極度に小さければ E/P は当然低下する(前出 Fig.24 参照)。この場合にも (H/P)_{III} は (H/P)_{II} に近づく。

例えば Fig.22(v)～(vii)、(ix)～(xi) はいずれも $L/W \geq 5$ と比較的大きいが、 W/P が 0.5 と小さい場合には (H/P)_{III} \doteq (H/P)_{II} となっている。

③ 流況Ⅲ・Ⅳ境界 (H/P)_{IV} は、 L/W , W/P 共に小さい形状 (E/P が極度に小さい形状) では (H/P)_{IV} に近い。例えば、Fig.22(i)～(iv) ($L/W = 2$) では $W/P = 0.5$ の場合、(H/P)_{IV} \doteq (H/P)_{III} である。これは、 E/P が極度に小さいこれらの形状では、上流端辺、下流端辺間の放流水脈厚、セキ直下水位の差異が小さいためと推測される。

一方、 L/W もしくは W/P が増すと (E/P が増大すると) (H/P)_{IV} は (H/P)_{III} から乖離し低下するが、これは E/P 増大に伴い上流端辺での放流水脈厚、セキ

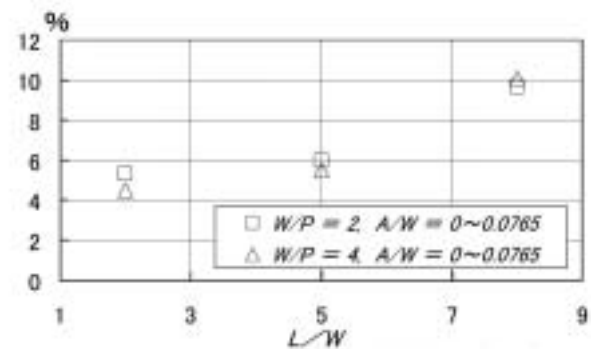
直下水位が下流端辺のそれより増大するためと推測される。

- ④ どの形状でも流況Ⅳ・Ⅴ境界 (H/P)_{ⅣⅤ} と (H/P)_{ⅢⅣ} にはそれほど差異が見られない。これは上流端辺の両端と中央の放流水脈厚さ、セキ直下水位が大きく違わないためと推測される。
- ⑤ (H/P)_{ⅣⅤ} は L/W , W/P 共に小さい形状 (Fig.22(i)~(iv)) で $W/P < 1 \sim 2$ の形状を除けば 0.2 ~ 0.3 以下の低位で安定しており、遷移状態が発生する H/P 範囲 ((H/P)_{ⅣⅤ} ~ (H/P)_{ⅠⅡ}) は主として (H/P)_{ⅠⅡ} の大きさで規定される。
- ⑥ 従前の Lux et al. (1985) の実験では、セキ高 P , T/P 共、今回と同程度なものの, transitional condition の H/P 範囲 (Fig.22(iii), (vii), (xi) 及び Fig.22(iv), (viii), (xii) の各図における点線間の範囲) は, 今回実験の「不安定流況」(流況Ⅱ~Ⅳ) の H/P 範囲 (同図中の (H/P)_{ⅠⅡ}, (H/P)_{ⅣⅤ} 間の範囲) よりも若干狭く, かつその範囲も L/W が大きい形状ほど下方にずれている。前者の原因は次の 1) ~ 3), 後者は次の 3) に依ると推測される- 1) Lux の実験における transitional condition は流況Ⅲのみに限定されている (今回実験の「不安定流況」よりも狭く定義されていると思われる), 2) Lux の実験形状はラビリンス下流水路長が短くその幅もやや狭いので (前出 Fig.20 参照), 同一 H/P でのラビリンス下流水路内の水位が今回実験形状と異なる, 3) Lux の実験形状は隅角部 (前出 Fig.20 参照) がない分, Fig.26 に示すように同一 L/W , W/P , A/W での流量係数 (C_{wr}) がやや高く, その差が L/W が大きい形状ほど開く。

c 流況安定上有効な形状及び各形状における不安定流況の H/P 範囲

Fig.22(v)~(xii) に示したように $L/W = 5, 8$ の場合, $W/P = 1.5 \sim 2$ の形状は A/W に依らず「遷移状態が生じる H/P 範囲 ((H/P)_{ⅠⅡ} と (H/P)_{ⅣⅤ} の差。以下 $\Delta(H/P)$ _{ⅣⅤ})」が安定して狭い。遷移状態が卓越すれば放流能力が不安定化する懸念があるので, $\Delta(H/P)$ _{ⅣⅤ} が狭い形状は, こと流況に関する限り洪水吐等への適用に有利と考えられる。特にラビリンス堰の効果を高めるには L/W の増大が重要になるので, L/W が比較的大きい場合にも, 安定して $\Delta(H/P)$ _{ⅣⅤ} が狭い $W/P = 1.5 \sim 2$ の形状は有効である。

これら $W/P = 1.5 \sim 2$ の形状の中では, $A/W \leq 0.0765$ のものは $A/W > 0.0765$ の場合と比べ, L/W 増大に伴う $\Delta(H/P)$ _{ⅣⅤ} の拡大もほとんど見られない(前出 Fig.22 参照)。ただし, Fig.22(viii), (xii) に示すように $A/W = 0$ の場合には, $W/P > 2$ の形状でも $\Delta(H/P)$ _{ⅣⅤ} が狭くなるが, この場合には三角形形状化 ($A/W \rightarrow 0$) による施工性の悪化や W/P 増大 (低密度化) によるラビリンス堰設置効率の低下 (所定の現地洪水吐幅に対する余り幅の増大) という別の問題が顕著になる。これらの点も勘案すれば, 本研究で検討した形状中では「 $W/P = 1.5 \sim 2$ かつ A/W



● 本図は $H/P = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ での C_{wr} 値 (実験結果の内挿値) から算出した。($L/W, A/W, W/P = (5, 0, 4), (8, 0, 4)$ の形状については $H/P = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ での C_{wr} 値から算出)

※ 上図中, Lux (1985) においては $L/W, A/W, W/P$ は, $L_i/W_i, (A_i)_{av}/W_i, W_i/P$ である。

Fig.26 Lux (1985) における C_{wr} の増加率
Relation between increase rates of C_{wr} and $L/W, A/W, W/P$ in Lux's investigations (1985).

= 0.0765」の形状が, 流況面からは実用上最も有効と考えられる。

なお, 本研究で検討した各形状の不安定流況 H/P 範囲は Table 3 のようにまとめられる。本表は, ラビリンス堰を現地適用する場合において不安定流況となる越流水頭を設計水頭にしない, もしくは下流堰上げによってこのような越流水頭でのナップ背面エア域を強制的に消失させ遷移状態の卓越を解消する等の対策をとる際の設計図表として適用しうる。また, 給気状態ではナップ内外の差圧により水膜振動, 騒音の問題が生じうるが, 本表は, それを防ぐために設けるスポイラの突き出し高さ設定の算出にも適用出来る。この場合, スポイラ突き出し高さは, 最大でも不安定流況発生 H/P (給気状態の最大 H/P) 相当の越流水頭分があれば十分と考えられる。

4 ラビリンス堰の流量係数に関する考察

a ラビリンス堰の放流特性の特徴

Fig.27 よりラビリンス堰の流量係数 (C_{wr}) は H/P が小さいほど大きくなるのがわかる。この傾向は, Swamee (1988) により示された直線刃形堰の放流特性とは逆である。これは, H/P が小さいほど, ラビリンス堰上流端付近での縮流効果が低減するためと考えられる。したがって, それらの効果が無くなる $H/P \rightarrow 0$ では, その際の直線刃形堰の流量係数が 1.7 ~ 1.8 付近にあることから $C_{wr} \rightarrow (1.7 \sim 1.8) \times L_i/W_i$ 程度に収束すると推測される。一方, H/P が大きくなりラビリンス堰全域がほぼ水没すると, 直線堰に近い越流状態になるので, C_{wr} は当該 H/P での直線堰の流量係数付近に低減していくと考えられる ($H/P = 2$ で概ね 1.90)。

なお, セキ頂長さ当たり流量係数 (C_v) は, $C_{wr}/(L_i/W_i)$ であるから $H/P \rightarrow 0$ で 1.7 ~ 1.8 程度, $H/P \rightarrow 2$ で 1.90/(L_i/W_i)

Table 3 不安定流況の境界 H/P 及び不安定流況発生範囲 ($\Delta(H/P)$)
Ranges of H/P that unstable overflow state occurs and
boundary H/P of the state.

(上段：不安定流況となる H/P , 下段：不安定流況が発生する H/P の範囲 (= $\Delta(H/P)$)

A/W	W/P	L/W		
		2	5	8
0	0.5	0.437 ~ 0.484 0.048	0.223 ~ 0.65 0.429	(0.20) ~ 0.850 0.65
	1	0.42 ~ 0.73 0.310	0.318 ~ 0.81 0.497	0.278 ~ 0.668 0.39
	1.5	0.31 ~ 0.731 0.421	0.203 ~ 0.46 0.259	0.237 ~ 0.421 0.18
	2	0.283 ~ 0.655 0.372	0.267 ~ 0.39 0.121	0.287 ~ 0.370 0.08
	4	0.348 ~ 0.58 0.236	0.266 ~ 0.401 0.136	0.269 ~ 0.378 0.11
0.0765	0.5	0.448 ~ 0.4855 0.038	0.239 ~ 0.72 0.478	(0.23) ~ 0.828 0.60
	1	0.510 ~ 0.68 0.169	0.248 ~ 0.87 0.618	0.284 ~ 0.675 0.39
	1.5	0.36 ~ 0.73 0.376	0.260 ~ 0.45 0.195	0.223 ~ 0.431 0.21
	2	0.314 ~ 0.62 0.304	0.249 ~ 0.38 0.134	0.237 ~ 0.374 0.14
0.15	0.5	0.406 ~ 0.4365 0.031	0.215 ~ 0.703 0.488	(0.189) ~ 0.895 0.71
	1	0.471 ~ 0.6325 0.162	0.198 ~ 1.031 0.833	(0.225) ~ 0.846 0.62
	1.5	0.393 ~ (0.638) 0.245	0.178 ~ 0.558 0.380	(0.244) ~ 0.606 0.36
	2	0.288 ~ 0.560 0.272	0.198 ~ 0.561 0.363	(0.225) ~ 0.704 0.48
0.25	0.5	0.354 ~ 0.424 0.071	(0.173) ~ 0.704 0.531	(0.168) ~ 0.847 0.68
	1	0.379 ~ 0.583 0.205	(0.170) ~ 1.057 0.887	(0.179) ~ 0.819 0.64
	1.5	0.348 ~ 0.666 0.318	(0.173) ~ 0.607 0.434	(0.245) ~ 0.643 0.40
	2	0.324 ~ 0.520 0.197	0.180 ~ 0.675 0.495	(0.266) ~ 0.745 0.48
0.5	0.5	0.344 ~ 0.757 0.413	(0.182) ~ 0.819 0.637	(0.208) ~ 0.888 0.68

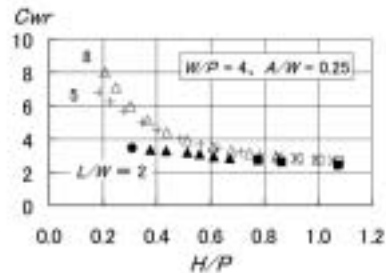
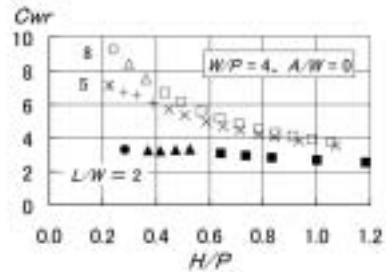
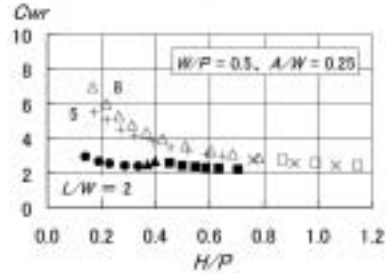
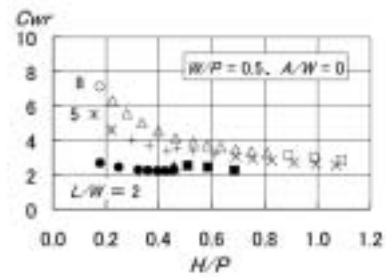
*1 上表の「不安定流況」は、 $A/W \leq 0.0765$ の近三角形形状では流況Ⅲ、 $A/W > 0.0765$ の近長方形形状では流況Ⅱ～Ⅳに相当する。

*2 上表中、() のカ所では、不安定流況の下限 (上限) H/P は、この値以下 (or 以上) となる。

程度に収束する傾向が見られた (Fig.28)。

b 放流特性と L/W の関係

Fig.27 のいずれでも W/P , A/W が同一な場合、 L/W に応じて C_{wr} は大きく (C_r は小さく) なるものの、その差異は L/W が大きくなるほど縮小した。これは、 L/W が大きい形状 (すなわち側壁角 α や E/P が大きい形状) ほどラビリンス上流水路 (前出 Fig.6 参照) での拡幅効果が大きくなり、有効に機能しないセキ頂長さの割合が増すこと、下流側ほど局所的な H/P , C_r が小さくなり、1 サイクル平均での C_r が低下して (Fig.28), L/W 増大に伴う C_{wr} の伸びが抑えられること、この傾向は L/W が大きい形状 (すなわち、 E/P が大きい形状) ほど顕著になるこ



○, ×, ●: 各々、 $L/W = 8, 5, 2$ において給気状態が卓越する流況。 $A/W \leq 0.0765$ の近三角形形状で流況Ⅲ～Ⅳ、 $A/W > 0.0765$ の近長方形形状で流況Ⅱ～Ⅳに相当。
△, +, ▲: 各々、 $L/W = 8, 5, 2$ において遷移状態が卓越する不安定な流況。 $A/W \leq 0.0765$ の近三角形形状で流況Ⅲ、 $A/W > 0.0765$ の近長方形形状で流況Ⅱ～Ⅳに相当。
□, ×, ■: 各々、 $L/W = 8, 5, 2$ において非飽気状態が卓越する流況。 $A/W \leq 0.0765$ の近三角形形状で流況Ⅰ～Ⅱ、 $A/W > 0.0765$ の近長方形形状で流況Ⅰに相当。

Fig.27 L/W による刃形ラビリンス堰の放流特性の変化
Difference of C_{wr} by L/W in sharp crested labyrinth weirs.

とによると考えられる。また、Fig.27 のいずれでも形状に依らず H/P が高まるにつれ C_{wr} が同程度になっていくが、これは H に対し各サイクルが潜没していき直線堰的な越流流況に近づくためと考えられる。

なお、 L/W が小さい形状では放流曲線の中に不連続な箇所が見られるが (Fig.27), これは、このような形状では、セキ頂長さの相対的な長さゆえ、堰全頂で越流流況の均一度が高く、不安定流況が急激に (H/P の小さい変化で) 発生・消滅するためと考えられる。

すなわち、不安定流況では、ナップ背面とセキ直下の水面の間にこれらに圧迫されたエア溜まりが発生し、こ

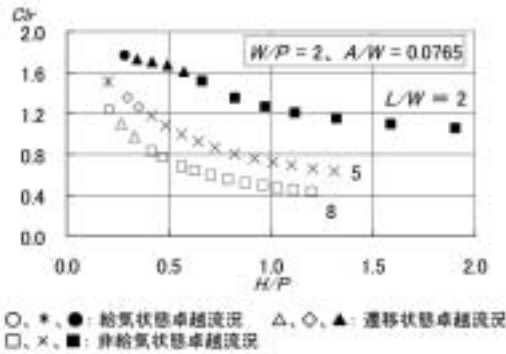


Fig.28 刃形ラビリンス堰のセキ頂長さ当たり流量係数 (C_w)
An instance of C_w curves in a sharp crested labyrinth weir.

のエア溜まりが放流阻害を引き起こすと見られるが、 L/W が小さい形状(すなわち、 E/P が小さい形状)では、 H/P の増減に伴うエア溜まりの消失・発生が急激に起き、かつセキ頂長さに占める「エア溜まり発生域の長さ」も相対的に大きくなるため、 H/P 増大(低下)時の「エア溜まり消失(発生)による C_{wr} 増大(低減)効果」が大きくなる。これが H/P 増大(低下)時の「拡縮効果の増大(低減)による C_w 低減(増大)効果」を上回って、 C_w が増大(低減)し、放流曲線が不連続化すると考えられる。

c 放流特性と W/P の関係

$L/W, A/W$ が同一な場合、 W/P が小さい形状ほど(極小な H/P の範囲を除き) C_w が小さくなる傾向が見られた(Fig.29)。これは、 W/P が小さいと同一 H/P での H/W が増し、ナップインタフィアレンスやラビリンス堰入り口での縮流効果が大きくなること、 H に対し各サイクルが潜没しやすくなり直線堰の越流況に近づくことによると考えられる。一方、 W/P による C_w の差異は W/P (及び L/W)が大きくなるにつれ縮小するが、これは、 W/P (及び L/W)がある程度以上に大きくなるとナップインタフィアレンス、縮流効果、サイクル潜没の影響がほとんど無くなることによると考えられる。

なお、Fig.29でもFig.27と同様、 L/W が小さい場合に放流曲線が不連続化する傾向が見られる。しかし、その度合いは W/P が小さい形状や大きい形状で顕著である。これは、 W/P が小さい形状は、 E/P が小さいので、不安定流況が急激に発生・消滅するためと推測される。一方、 W/P が大きい形状は、 E/P が大きいので、不安定流況は緩やかに発生・消滅するものの、それ以上に「 W/P 増大に伴う拡縮効果の縮小」が大きくなるためと考えられる。

d 放流特性と A/W の関係

$L/W, W/P$ が同一な場合、 A/W が小さい形状ほど C_w が高くなる傾向が見られた。ただし、 L/W もしくは W/P が小さい場合は、 A/W による差異はあまり見られず、 A/W が非常に小さい場合には、むしろ A/W が低下するほど C_w が低下する傾向が見られた。以上の一例をFig.30に示す。このような結果になったのは、 A/W が小さいほど

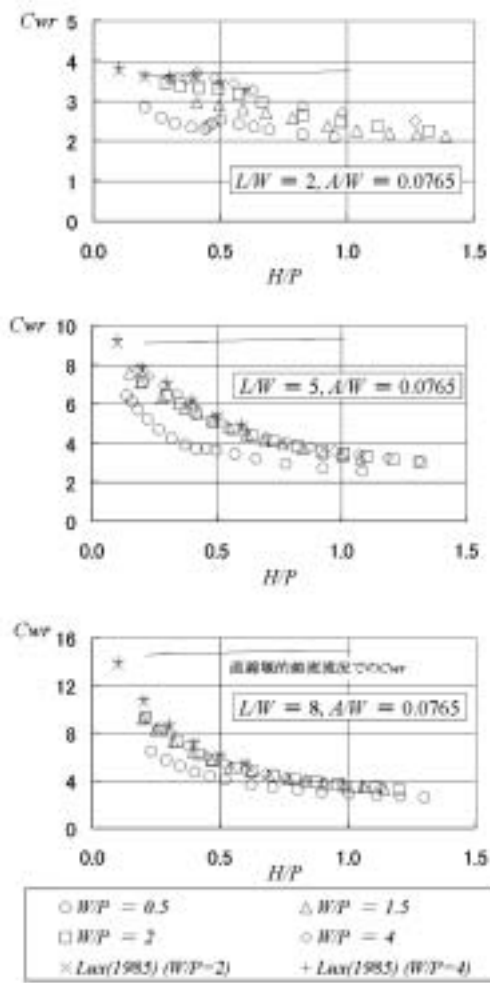


Fig.29 W/P による刃形ラビリンス堰の放流特性の変化
Difference of C_w by W/P in sharp crested labyrinth weirs.

ラビリンス上流水路での縮流効果、拡幅効果が減少すること、しかし、 L/W もしくは W/P が小さい場合(E/P が小さい場合)は、縮流効果、拡幅効果よりも A/W 低減に伴うナップインタフィアレンスの影響が相対的に高まることによると思われる。

e 放流特性に関する実験結果の検証

本実験では模型全幅(実験水路幅)を固定したこと、模型厚さを極力統一したこと等により各実験模型のセキ厚比 T/P や規模(セキ高 P)にバラツキがある。本節では、これらの流量係数等、実験結果への影響が十分小さいものとなっているか否かを前述の放流特性に関する傾向に基づき検討する。また、本実験結果の妥当性を検討するため、類似条件の既往実験結果との比較も行った。
実験結果への T/P の影響：各模型の T/P のずれにより $L/W, W/P, A/W$ が同一でも隅角部の相対的な大きさ(b/P , 前出 Fig.20 参照)が異なり、 $L_1/W_1, W_1/P, E/P$ など隅角部を含む諸量にずれを生じる。これより流量係数等、実験結果が影響を受ける可能性がある。

しかし、本実験での平均 T/P 値は $(T/P)_{av} = 0.07351$ と小さく、かつ多くの実験形状は $(T/P)_{av}$ の±20%の範囲内に

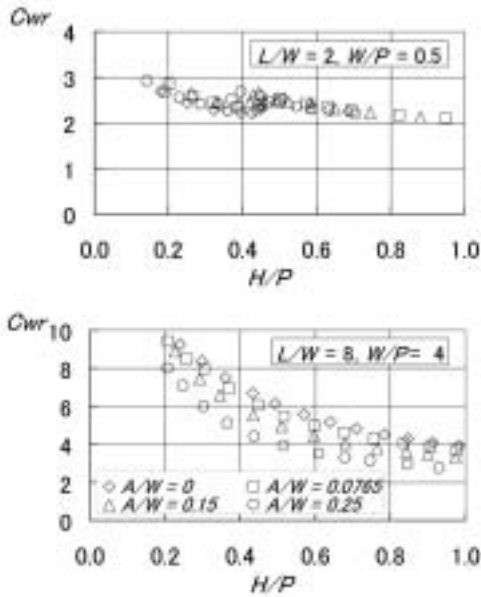


Fig.30 A/Wによる刃形ラビリンズ堰の放流特性の変化
Difference of C_{wr} by A/W in sharp crested labyrinth weirs.

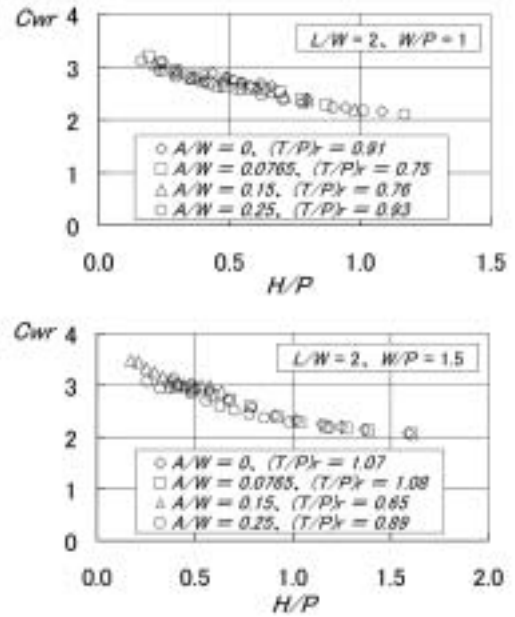


Fig.31 T/Pによる刃形ラビリンズ堰の放流特性の変化
Difference of C_{wr} by T/P in sharp crested labyrinth weirs.

ある。 T/P 自体がナップ剥離が成されるほどに小さく、かつその模型間差異も大きくないことから隅角部規模の差異の影響もさほど大きくないと推測される。

実際、 $(W/P, L/W, A/W) = (0.5, 2, 0.0765 \sim 0.15)$, $(1, 2, 0.0765 \sim 0.15)$ の4形状、 $(0.5, 2, 0)$, $(0.5, 2, 0.25)$ の2形状、 $(1.5, 2, 0.15)$ の形状では、各々、 $(T/P)/(T/P)_{av} = (T/P)_r = 0.74 \sim 0.76, 0.46 \sim 0.47, 0.65$ と $(T/P)_{av}$ から20%以上外れているが、これらの形状についても、その放流特性は本章 a ~ d 節と同様の傾向を示す (Fig.30 上図及び Fig.31)。また、実験結果に模型諸元 ($W/P, A/W, L/W$) に応じた規則性が明瞭に見られることから本実験に関する限り、 T/P の差異が放流特性に与える影響は小さいと考えられる。

実験結果への模型規模 (P) の影響： 不安定流況付近では、模型規模 (セキ高 P) により流量係数や流況区分が影響を受ける可能性がある。これは、不安定流況ではエア吸い出しのためと見られるナップ背面水位の上下動があり、この現象には模型規模が影響する可能性があると思われるからである。

この点、本実験の模型セキ高 P には、前節の T/P と同様の理由によりばらつきを生じており、平均セキ高 $P_{av} = 0.1413\text{m}$ に対し $P/P_{av} = 0.71 \sim 2.1$ の範囲に分布している。すなわち、おおかたの形状では平均セキ高の $\pm 20\%$ に収まる程度なもの、 $(W/P, L/W, A/W) = (0.5, 2, 0 \sim 0.25)$, $(1, 2, 0.0765 \sim 0.15)$, $(1.5, 2, 0.15)$ の7形状、 $(1.5, 2, 0 \sim 0.0765)$ の2形状では、それぞれ $P/P_{av} = 1.27 \sim 2.1, 0.71 \sim 0.72$ とやや外れた値となっている。

しかし、これら形状を含む放流特性は Fig.30 上図及び Fig.31 のようになっており、実験模型セキ高 P の差異にも関わらず、その放流特性は本章 4-1 ~ 4-4 と同様の傾向を示している。したがって、本実験に関する限り、その

セキ高 (模型規模) やセキ高の差異が放流特性に与える影響は小さいと考えられる。

既往データとの比較： Lux et al. (1985) による既往の実験結果は、実験形状の定義が本実験と異なるとはいえ (前出 Fig.20 参照)、共に薄厚堰での実験であるため、低密度や近三角形の形状では、本実験結果と比較的近い値になると推測される。この点から、本実験結果の妥当性を検討すべく、既往実験結果との比較を試みると前出の Fig.29 のようになる。

Fig.29 から形状諸元がほぼ同一の Lux (U.S.B.R.) 形状 (前出 Fig.20 参照 (Lux et al., 1985)) と本実験形状では、双方のセキ厚が極めて薄いこともあり C_{wr} 値の差はほとんどないことがわかり、本実験結果は妥当なものと思わせる。ただし、Lux 形状の方が C_{wr} 値がやや高く、 L/W が大きい形状ほど、その差が広がる傾向は見られる。これは、Lux 形状では隅角部を付加していない分、 L_i/W_i (Lux 形状では L/W と同一) が大きく、 L/W が増すにつれその差異が広がるためと考えられる (Fig.32)。反面、 L/W の増大により Lux 形状の $W/P, W_i/P$ は相対的に低減していき (Fig.32)、これは C_{wr} を低下させる方向に作用する。一部の形状で Lux 形状の C_{wr} の方がやや小さくなったのはこのためと推測される。

実験結果への堰背面の負圧の影響： 前出の Fig.29 から本論文の実験結果でも Lux et al. (1985) による既往の実験結果でも低 L/W 形状の C_{wr} 値は「ラビリンズ堰の全セキ頂で直線堰的な越流流況とした場合の C_{wr} 値 (川田ら (1979), 土木学会 (1985) より Rehbock 式から算出)」よりも大きくなる傾向が見られた。これはラビリンズ堰の C_{wr} 値が直線堰のそれを上回ることを意味し、セキ背面の負圧の影響が生じていることが推測される。

ここで、低 L/W 形状ほど C_{wr} (C_{lr}) 値が高めとなったのは、低 L/W 形状ほど、全セキ頂で越流流況が同一化しやすく、負圧による影響が一気に表れること、それゆえ負圧による C_{wr} (C_{lr}) 増大効果が高 L/W 形状よりも顕在化しやすかったためと考えられる。

また、高 W/P 形状、中 A/W 形状でも、低 L/W 形状と同様、 C_{wr} (C_{lr}) 値が高めになる傾向が見られたが、これは、これらの形状では C_{wr} (C_{lr}) 値を低減させる縮流効果、ナップインタフィアレンスの効果が相対的に小さく、負圧による C_{wr} (C_{lr}) 値増大効果が顕在化しやすかったためと思われる。

f 流量係数式

前節の考察より、各実験模型のセキ厚比 T/P 、規模（セキ高 P ）のバラツキは、流量係数等、実験結果に影響していないと考えられた。そこで、実験結果に基づき流量係数回帰式を多項式近似により導出した。その係数は

Table 4 に示すとおりであり、最高次数は4次、寄与率 $R^2=0.810 \sim 1.00$ となった。

なお、給気状態、遷移状態、非給気状態の各越流流況の卓越状況が変化することにより放流特性は変わるので、それに応じて同一形状でも複数の回帰式を設定せざるを得ない場合が多く、特に L/W が短い形状では流況が急激に変わるので、その傾向が強かった (**Table 4**)。

回帰式の次数は寄与率が高く、かつ既往の研究結果及び今回のデータ全般に照らして不自然でない(合理的な)曲線となるように設定した。すなわち、主として給気状態や非給気状態の流況となる H/P の範囲の回帰式では上に凹となる曲線とした。また、 $H/P \rightarrow \infty$ では堰全体が潜没し、ラビリンス堰全体で直線堰の流況に近くなるので、 C_{wr} がその H/P における直線刃形堰の C_{lr} (概ね 1.95) に近づくような曲線とした。さらに $H/P \rightarrow 0$ ではラビリンス堰各部分が直線刃形堰の流況に近づき C_{lr} が $H/P \rightarrow 0$ における直線堰のそれと同一化 ($C_{wr} \doteq 1.785 \times L_i/W_i$) していくので、これに整合した曲線とした。なお、直線刃形堰では H/P の増大に伴い C_{lr} が増大するので、この効果が、ラビリンス堰における H/P 増大による拡縮効果よりも卓越すれば、 H/P 増大の過程で $C_{wr} > 1.785 \times L_i/W_i$ となることも考えられ、回帰式導出に当たっては必ずしも $C_{wr} < 1.785 \times L_i/W_i$ という制約条件は設けなかった。

V ラビリンス堰の効果と応用

本章では、前章で導出した高密度、近長方形形状を含むラビリンス堰の流量係数回帰式に基づき、改修溜池、小規模ダム洪水吐のような限定スペース条件下における高密度、近長方形ラビリンス堰の効果を検討する。また、溜池洪水吐の設計条件下における高密度、近長方形ラビリンス堰の適用性、適用手法についても検討を行う。

1 限定スペース下における高密度化・近長方形化の効果

本研究で検討した刃形ラビリンス堰の放流特性に影響するパラメータは、IV, 1, b節で論じたように W/P , A/W , L/W , H/P のみである。これらのうち、ラビリンス堰形状に起因する W/P , A/W , L/W の3パラメータは、堰設置スペースが限定された条件下では E/P (流下方向長比), W/P (縦横比), A/W (端辺比) に変換することも出来る。この場合、 L/W (セキ長比) はこれらのパラメータより従属的に決まる。したがって、単位幅当たりの流量係数(放流能力)等、放流特性は E/P , W/P , A/W と水理条件 (H/P) から定まることになる。

以上のパラメータのうち、越流水頭比 H/P は、実際の現場設計では自ずと規定されてしまう。これは、設計上所要の設計水頭、設計洪水量(もしくは設計取水量)、越流総幅などの現地条件から越流水頭 H が、堰付設時の掘削深や堰頂標高などの現地条件から堰高 P がほぼ決ま

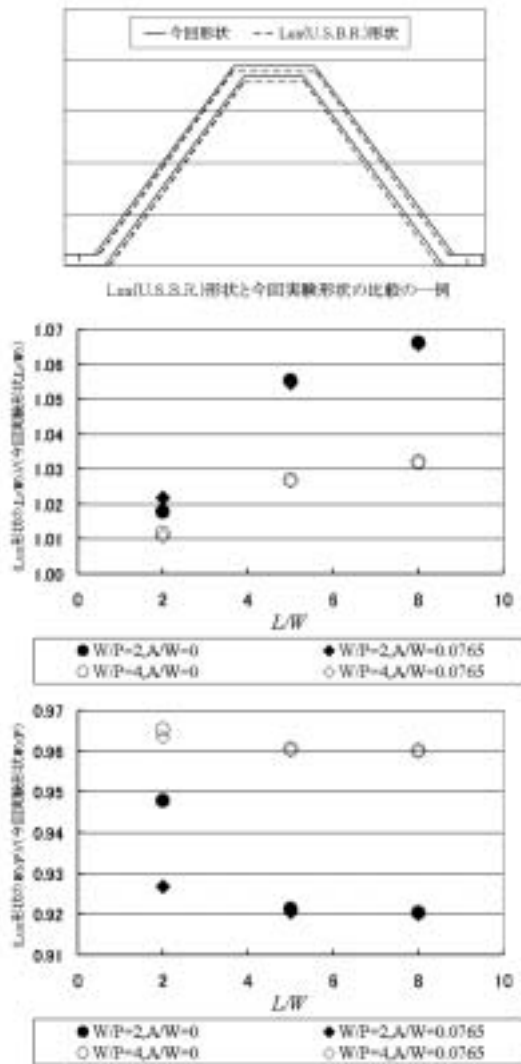


Fig.32 Lux (U.S.B.R.) 形状 (Lux et al., 1985) と今回実験形状の形状諸元の比較
Comparison of labyrinth weir model shapes between Lux's and this investigation.

Table 4 流量係数 C_{wr} の回帰式
Regression formulas of C_{wr} in sharp crested labyrinth weirs including high density or quasi-rectangular shapes.

($H/P - C_{wr}$ 回帰式 $C_{wr} = a \cdot (H/P)^4 + b \cdot (H/P)^3 + c \cdot (H/P)^2 + d \cdot (H/P) + e$ の定数 a, b, c, d, e / 左記回帰式の適用 H/P)

A/W	W/P	L/W		
		2	5	8
0	0.5	0, 0, 8.30, -6.87, 3.64 / 0.178 ~ 0.4286 0, 0, -48.89, 49.70, -10.10 / 0.4286 ~ 0.5064 0, 0, -3.301, 2.398, 2.163 / 0.5064 ~ 0.6853	0, 0, 20.9, -19.7, 8.02 / 0.154 ~ 0.427 0, 0, -16.4, 15.7, -2.94 / 0.427 ~ 0.504 0, 0, 1.59, -4.07, 5.10 / 0.504 ~ 1.069	14.4, -48.4, 60.8, -35.7, 11.8 / 0.177 ~ 1.093
	1	0, 165, -150, 42.2, -0.671 / 0.241 ~ 0.411 -18.8, 55.4, -60.4, 27.6, -1.66 / 0.411 ~ 0.705 0, 0, 1.94, -4.48, 4.74 / 0.705 ~ 1.083	0, 0, 14.0, -16.8, 9.17 / 0.180 ~ 0.350 0, -31.02, 53.33, -32.65, 11.23 / 0.350 ~ 0.608 0, 0, 1.75, -5.19, 6.63 / 0.608 ~ 1.042	9.669, -33.13, 45.00, -31.35, 13.30 / 0.206 ~ 1.124
	1.5	0, 3.55, -6.23, 2.08, 3.06 / 0.389 ~ 0.637 0, 0, 0.937, -2.74, 4.14 / 0.637 ~ 1.368	0, -44.2, 56.1, -27.5, 10.4 / 0.146 ~ 0.486 0, 0, 3.28, -8.36, 8.50 / 0.486 ~ 1.076	2.82, -14.4, 27.9, -26.2, 13.6 / 0.190 ~ 1.213
	2	0, 66.4, -60.1, 17.1, 1.74 / 0.257 ~ 0.438 0, 19.7, -37.7, 21.8, -0.693 / 0.438 ~ 0.581 0, 0, 1.26, -3.45, 4.69 / 0.581 ~ 1.052	0, -77.0, 84.6, -35.9, 11.6 / 0.237 ~ 0.375 0, 0, 3.66, -8.94, 8.81 / 0.375 ~ 1.095	2.767, -13.29, 25.37, -24.21, 13.16 / 0.207 ~ 1.329
	4	53.5, -117, 89.5, -28.7, 6.56 / 0.283 ~ 0.520 0, 0, 0.787, -2.51, 4.39 / 0.520 ~ 1.418	0, -27.84, 25.41, -13.66, 9.21 / 0.225 ~ 0.344 0, 0, 4.06, -9.58, 9.20 / 0.344 ~ 1.071	4.575, -20.64, 36.27, -31.28, 14.96 / 0.240 ~ 1.055
0.0765	0.5	0, 0, 9.22, -8.15, 4.11 / 0.202 ~ 0.443 0, 0, -40.5, 41.8, -8.26 / 0.443 ~ 0.508 0, 0, 1.18, -2.70, 3.59 / 0.508 ~ 0.9494	0, 0, 24.6, -23.4, 9.21 / 0.139 ~ 0.333 73.72, -174.7, 152.4, -60.27, 12.86 / 0.333 ~ 0.553 0, 0, 2.03, -5.09, 5.68 / 0.553 ~ 1.084	6.44, -25.2, 37.8, -27.1, 11.0 / 0.232 ~ 1.298
	1	0, 1.36, 2.31, -4.04, 3.89 / 0.194 ~ 0.6307 0, 0, 0.7168, -2.407, 3.835 / 0.6307 ~ 0.8712	0, -28.5, 43.3, -26.0, 10.4 / 0.182 ~ 0.608 0, 0, 2.61, -6.86, 7.40 / 0.608 ~ 1.125	11.60, -39.86, 53.74, -36.20, 14.13 / 0.247 ~ 1.117
	1.5	0, -2.17, 2.93, -2.10, 3.47 / 0.408 ~ 0.651 0, 0, 0.810, -2.53, 4.05 / 0.651 ~ 1.612	0, -42.9, 50.7, -25.3, 10.4 / 0.151 ~ 0.358 0, 0, 3.61, -8.80, 8.56 / 0.358 ~ 1.075	7.63, -29.6, 45.0, -33.9, 14.4 / 0.196 ~ 1.141
	2	0, -7.23, 8.03, -3.77, 4.04 / 0.284 ~ 0.526 0, 0, 1.05, -3.22, 4.63 / 0.526 ~ 1.500	0, -2.11, 8.47, -12.2, 9.33 / 0.201 ~ 1.101	9.60, -36.5, 53.7, -38.5, 15.3 / 0.209 ~ 1.201
0.15	0.5	0, 0, 10.7, -8.88, 4.23 / 0.263 ~ 0.408 0, 0, 74.9, -57.3, 13.3 / 0.408 ~ 0.444 0, 0, 2.06, -3.87, 3.94 / 0.444 ~ 0.8798	0, -35.22, 55.25, -31.07, 9.676 / 0.137 ~ 0.6297 0, 0, 1.910, -4.839, 5.515 / 0.6297 ~ 1.049	8.162, -30.36, 43.24, -29.46, 11.20 / 0.189 ~ 1.239
	1	0, 0, 2.73, -3.45, 3.67 / 0.214 ~ 0.450 0, 114.5, -202.3, 116.8, -19.36 / 0.450 ~ 0.515 0, 0, 1.38, -3.30, 4.11 / 0.515 ~ 0.9799	0, -6.72, 18.4, -18.5, 9.91 / 0.165 ~ 0.767 0, 0, 2.34, -6.25, 6.93 / 0.767 ~ 1.109	12.7, -45.6, 62.0, -40.0, 14.2 / 0.225 ~ 1.220
	1.5	0, 15.0, -12.5, 1.34, 3.55 / 0.174 ~ 0.444 0, -57.7, 87.6, -44.2, 10.4 / 0.444 ~ 0.6383	0, -5.71, 16.0, -17.0, 9.91 / 0.16 ~ 0.8644 0, 0, 2.89, -7.32, 7.65 / 0.8644 ~ 1.137	14.5, -49.9, 65.9, -42.0, 14.8 / 0.244 ~ 1.139
	2	0, -33.4, 35.7, -12.9, 5.03 / 0.262 ~ 0.458 0, 0, 1.10, -3.23, 4.65 / 0.458 ~ 1.282	0, -6.03, 17.2, -18.2, 10.4 / 0.164 ~ 0.621 0, 0, 3.197, -7.748, 7.862 / 0.621 ~ 1.062	11.70, -43.18, 60.77, -40.74, 14.77 / 0.225 ~ 1.210
0.25	0.5	0, 0, 15.4, -10.1, 4.05 / 0.142 ~ 0.338 0, 0, 49.3, -31.2, 7.31 / 0.338 ~ 0.3967 0, 0, 4.009, -6.003, 4.442 / 0.3967 ~ 0.7068	8.35, -27.5, 34.9, -21.7, 8.37 / 0.173 ~ 1.065	39.5, -103, 102, -48.2, 12.7 / 0.168 ~ 0.815 0, 0, 1.072, -3.246, 4.761 / 0.815 ~ 1.324
	1	0, 0, 10.8, -7.38, 4.05 / 0.166 ~ 0.401 0, 0, 1.12, -2.70, 3.73 / 0.401 ~ 1.17	15.8, -49.9, 59.7, -34.1, 11.2 / 0.170 ~ 1.081	32.61, -92.86, 100.3, -50.99, 14.02 / 0.179 ~ 0.8296 0, 0, 1.39, -4.14, 5.65 / 0.8296 ~ 1.195
	1.5	0, 0, 15.1, -10.8, 4.86 / 0.258 ~ 0.414 0, 0, 1.21, -2.95, 3.99 / 0.414 ~ 1.186	11.3, -38.5, 49.8, -30.9, 11.1 / 0.173 ~ 1.154	0, -27.9, 54.7, -38.5, 13.1 / 0.245 ~ 0.551 0, 0, 1.85, -5.02, 6.03 / 0.551 ~ 1.183
	2	0, 0, 11.8, -8.45, 4.61 / 0.257 ~ 0.420 0, 0, 1.82, -3.95, 4.48 / 0.420 ~ 1.012	0, -7.816, 20.82, -19.75, 9.694 / 0.163 ~ 0.8130 0, 0, 1.243, -3.652, 5.346 / 0.8103 ~ 1.086	0, -31.3, 61.5, -43.1, 14.1 / 0.266 ~ 0.729 0, 0, 1.52, -4.28, 5.55 / 0.729 ~ 1.185
0.3	0.5	0, -28.4, 36.5, -16.6, 5.94 / 0.310 ~ 0.599 0, 0, 0.781, -2.49, 4.20 / 0.599 ~ 1.546	0, -8.250, 21.89, -20.85, 9.961 / 0.182 ~ 0.790 0, 0, 1.86, -4.87, 5.77 / 0.790 ~ 1.055	36.38, -106.3, 119.6, -63.77, 16.99 / 0.208 ~ 0.616 0, 0, 2.76, -6.47, 6.42 / 0.616 ~ 1.080

* 本表の回帰式の R^2 の多くは 0.960 ~ 1.000 だが、不安定流況での回帰式、中でも $L/W = 2$ もしくは $W/P = 0.5$ の形状の回帰式のうち、7 式については $R^2 = 0.810 \sim 0.946$ と低下。

るためである(設計水頭, 設計洪水量(もしくは設計取水量), 越流総幅のいずれを優先して越流水頭 H が規定されるかは, 各現場におけるラビリス堰の使用目的(Ⅱ, 2節参照), 現地条件により異なる。同様に堰高 P についても掘削深, 堰頂標高のいずれを優先して規定されるかは各現場で異なる)。

また, 地形からラビリス堰の敷設スペースが制約されるので, これにより E/P の上限も規定される。

すなわち, 刃形ラビリス堰の設計要素のうち, 現地条件に依らず比較的任意に決められるのは W/P , A/W の2つである。

したがって, ラビリス堰設計の要点は, 各現地条件, 設計要件によりほぼ既定される H/P と主として現地条件から定まる最大 E/P の条件に対し, W/P , A/W を調整しつつ, ラビリス堰化によるメリット, デメリットを比較検討して最適な W/P , A/W を確定することと考えられる。

この際, 直線堰に換えてラビリス堰を適用するメリットには, 放流量の増大, 越流幅(流入断面)の縮小, 越流水頭の低減, 越流水位変動の縮小などがあるが, これらは「流量係数 C_{wr} の増大」に集約される。一方, デメリットはラビリス堰化に伴い(直線堰に比し)セキ頂長さ, 堰高が増大することによる「堰体容積(堰体コスト)の増大」である(なお, 堰高増大により堰付設のための掘削深も増大するが, 掘削深増大のデメリットは越流幅縮小のメリットに比し概して小さく, これは流入断面縮小効果の低減として評価しうる)。

本節では以上の見地から, 各 H/P , E/P において W/P (縦横比), A/W (端辺比) を変化させた場合の(ラビリス堰化によるメリットに関わる)流量係数 C_{wr} の変化特性, (デメリットに関わる)単位幅の堰体体積当たり流量 q/v の変化特性を検討した。

なお, 流下方向長 E は堰厚 T によっても変化するので, E/P は T/P により変化するが, 以下での検討図作成に際しては隣接する L/W の形状の T/P の内挿値から E/P を算出した。

a W/P , A/W の差異による流量係数 (C_{wr}) の変化

流下方向長比 E/P (ラビリス堰敷設スペース) が固定された条件下における「各形状諸元 (W/P , A/W) による流量係数 (C_{wr}) の変化」を Fig.33 に示す(一例)。

Fig.33 から E/P が固定された場合, W/P (密度) による C_{wr} の変化は A/W (平面形) のそれに比し大きいこと, W/P に関しては低 W/P (高密度形状) ほど C_{wr} が高まるが, A/W を変化させた場合は一定の傾向が見られないことがわかる。

これは, A/W を変化させた場合と比べ, W/P の低減(高密度形状化)に伴う L_i/W_i (もしくは L/W) の増大が大きいこと, それによる C_{wr} 増大効果が「 W/P 低減(高密度化)による C_{wr} 低減効果(拡縮効果)」を大きく上回るためと考えられる。

すなわち, 密度変化では, それに伴う L_i/W_i の変化が大きい割に拡縮効果の変化は小さい。よって, 高密度化による L_i/W_i 増大に応じて C_{wr} も増大する。一方, 平面形の変化では, それに伴う L_i/W_i の変化に対する拡縮効果の変化が(密度変化の場合と比べ)相対的に大きい。したがって, ある程度, 長方形化した段階で C_{wr} が逆に低下していく。また, L_i/W_i の変化が小さいため, 三角形から長方形まで平面形を変化させても C_{wr} はそれほど変化しないと考えられる。

なお, H/P 増大により, W/P , A/W いずれを変化させた場合でも, それらによる C_{wr} の差異は小さくなった。これは, H/P 増大により堰が潜没し, 直線堰的な流況に近づくためと思われる。

b 高密度化による流量係数 (C_{wr}) 増大効果

W/P の低減(高密度化)による流量係数 (C_{wr}) 増大効果を Fig.34 に示す。Fig.34 中, 縦軸は, 直線刃形堰に対する相対流量係数 (C_{wr}/C_n , C_n : 直線刃形堰の流量係数 (Ishihara et al., 1951)) である。

本図から W/P 低減による C_{wr} (C_{wr}/C_n) 増大効果が見られること, その効果は E/P , H/P の増大につれ縮小し, それらがある程度大きくなると無くなるのが分かる。

C_{wr} 増大効果が E/P , H/P の増大につれ縮小する傾向は, A/W が大きい形状で顕著である。これは, E/P が過度に増大すると, E/P 増大に伴う L_i/W_i (もしくは L/W) の増大よりも拡縮効果の増大が顕著になり, C_{wr} が増大しにくくなること, 低 W/P 形状(高密度形状)ほどこの傾向が著しいこと, H/P が大きい場合(高水頭時)もしくは A/W が大きい形状(近長方形形状)では, 拡縮効果の増大が大きいため, 以上の傾向が一層強まることに依ると

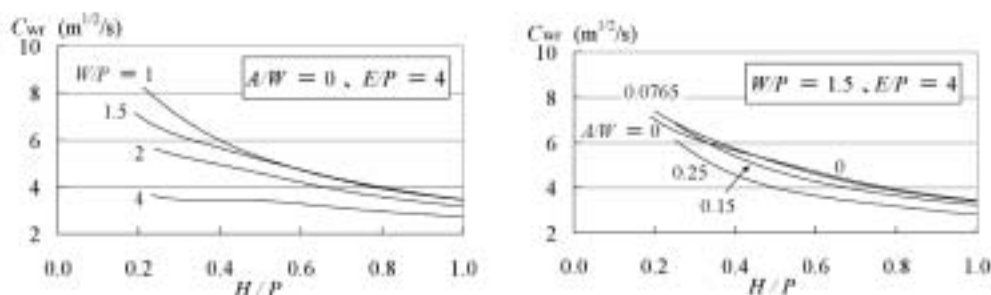


Fig.33 限定スペースでの W/P , A/W による刃形ラビリス堰の放流特性の変化
Difference of C_{wr} curves of sharp crested labyrinth weirs by W/P , A/W in limited longitudinal space.

考えられる。

したがって、流下方向長 E を過度に伸ばすのは C_{wr}/C_n が一定になることから意味がなく、特に高 HP もしくは高 A/W (近長方形形状) では C_{wr}/C_n が増大しにくくなるので、 W/P 低減 (高密度化) のメリット (C_{wr}/C_n の増大) をデメリット (堰体容積の増大) が上回りやすくなる。

なお、 E/P が極めて小さい場合にも、 W/P 低減による

C_{wr} 増大効果は縮小するが、これは、密度に依らず直線堰的な越流流況になるためと考えられる。この傾向は、(おそらく同様の理由から) HP が大きいほど顕著であった (Fig.34)。

c 近長方形化による流量係数 (C_{wr}) への効果

A/W (平面形) を変化させた場合の E/P に対する相対流量係数 (C_{wr}/C_n) の変化は Fig.35 のようになった。

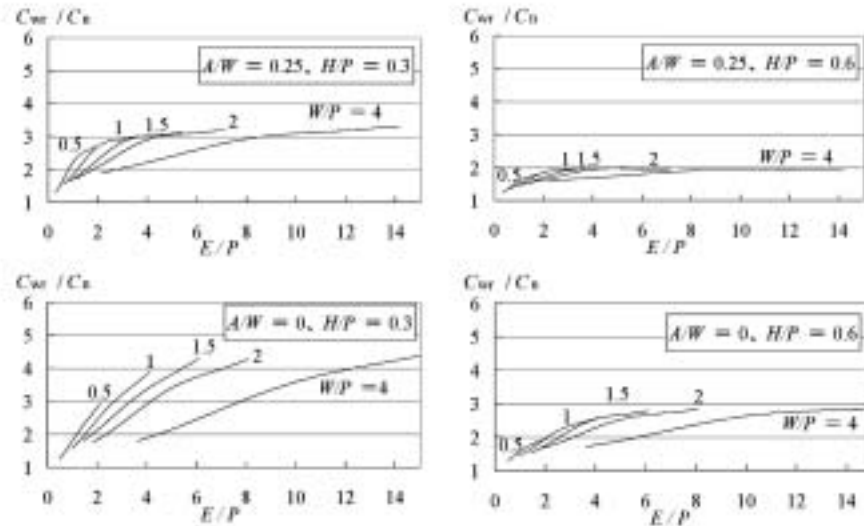


Fig.34 限定スペースでの W/P による C_{wr}/C_n 増大効果
Difference of C_{wr}/C_n by W/P in limited longitudinal space.

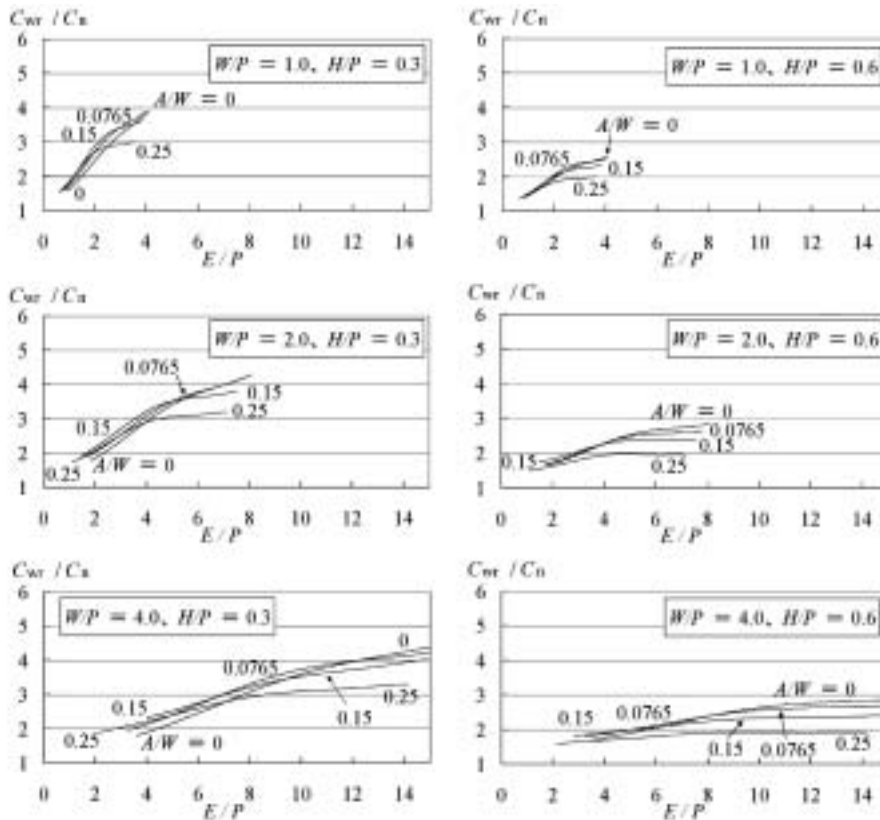


Fig.35 限定スペースでの A/W による C_{wr}/C_n 値の変化
Difference of C_{wr}/C_n by A/W in limited longitudinal space.

Fig.35 から W/P , H/P が固定では, E/P が小さくなるにつれ, A/W が小さい形状 (近三角形形状) ほど C_{wr}/C_n が小さくなり, E/P が大きくなるにつれ, A/W が大きい形状 (近長方形形状) ほど C_{wr}/C_n が小さくなる傾向が見られる。また, このような「平面形による C_{wr}/C_n 値の逆転」は, W/P が小さい形状 (高密度形状) もしくは高 H/P (高水頭時) ほど, 低 E/P から生じる傾向が見られる。

以上は, 高 E/P , 低 W/P , 高 H/P ほど, A/W 増大 (近長方形化) に伴う拡縮効果の増大 (C_{wr} が低減する方向に作用) が L_i/W_i 増大の効果 (C_{wr} が増大する方向に作用) を上回りやすくなるためと推測される。

流量係数 (C_{wr}) 増大のためには, E/P が過小でない限り, 低 A/W (近三角形形状) が有利と言え, 低 W/P (高密度形状), 高 H/P (高水頭条件) ほど, この傾向が強まると言える。

d 高密度化による堰体体積当たりの放流量 (q/v) の変化

W/P (密度) を変化させた場合の E/P に対する相対 q/v_r (q/v_r) の変化は Fig.36 のようになった。

ここで q/v_r は直線刃形堰の「単位幅のセキ体積当たり放流量 (q/v)」に対する刃形ラビリンス堰の q/v の比であり, 直線刃形堰と刃形ラビリンス堰のセキ厚, 越流水頭 H , 堰高 P を同一として算出している。

堰高 P を同一としたのは, ダムや溜池の洪水吐では, 下流の整流のため, セキ上げの設計が成されるので, 直線堰でもラビリンス堰でも堰高自体はほとんど変わらないからである。すなわち, ラビリンス堰は「所定放流量, 所定越流水頭 H に対する総幅 W_i の低減」, 「所定総幅 W_i , 所定越流水頭 H に対する総放流量の増大」, 「所定放流量, 所定総幅 W_i に対する越流水頭 H の低減」のいずれかの目的で用いられるが, 直線堰よりも単位幅当たり放流量が増大する前2項の目的で用いた場合でも, 下流の

緩勾配水路末端では直線堰の場合と同一の水路幅, フールド数 (約 0.44) とされるので, 堰直下の水深は直線堰の場合と同程度になり, 堰高もほぼ同一となる。ただし, 堰の上流高さは H/P に依らず流量係数がほとんど変化しない直線堰のほうが低く出来るので, 堰上流の前庭部掘削深は直線堰の方が低減できる。

なお, セキ厚は, 一般に Ogee 形状で設計される直線堰のほうが厚くなるが, ここでは既往の設計法と異なり, 直線堰もラビリンス堰と同様, 薄厚化出来るものとした。

以上のように, Fig.36 及び以下の図中の (q/v_r) は直線堰, ラビリンス堰の H , P を同一と単純化して算出し, 堰体体積 (堰体コスト) の比較のための指標とした。一方, ラビリンス堰化による総幅 W_i の低減, 総放流量の増大, 越流水頭の低減等の効果は前述の相対流量係数 (C_{wr}/C_n) により検討した。

Fig.36 より (q/v_r) は低 W/P (高密度形状) ほど低くなる事が分かる。これは, W/P 低減 (高密度化) に伴う L_i/W_i 増大の効果 (流量係数 C_{wr} , 単位幅流量 q が増大する方向に作用) が拡縮効果の増大 (C_{wr} , q が低減する方向に作用) によりある程度阻害され, q がさほど増大しない反面, 単位幅当たり堰体体積 v はセキ頂長さ (L_i/W_i に関連) の増大に応じて増すためと考えられる。

また, 高 E/P , 高 H/P , 高 A/W (近長方形形状) ほど (q/v_r) は低下するが, これは, これらの場合に拡縮効果の増大が著しくなるためと推測される。

したがって, 過度に E/P を高めたり (E を伸ばしたり), 高 A/W (近長方形) にするのは, (q/v_r) 低減のデメリットを増す点からも好ましくないと言える。

一方, どのような平面形状 (W/P , A/W), 越流水頭でも E/P 低下により (q/v_r) は増すと共に各々の (q/v_r) 差は縮小するが, これは E/P が小さいほど, 同一 H/P , P に対し H/E が増大し直線堰の越流流況に移行していくためと

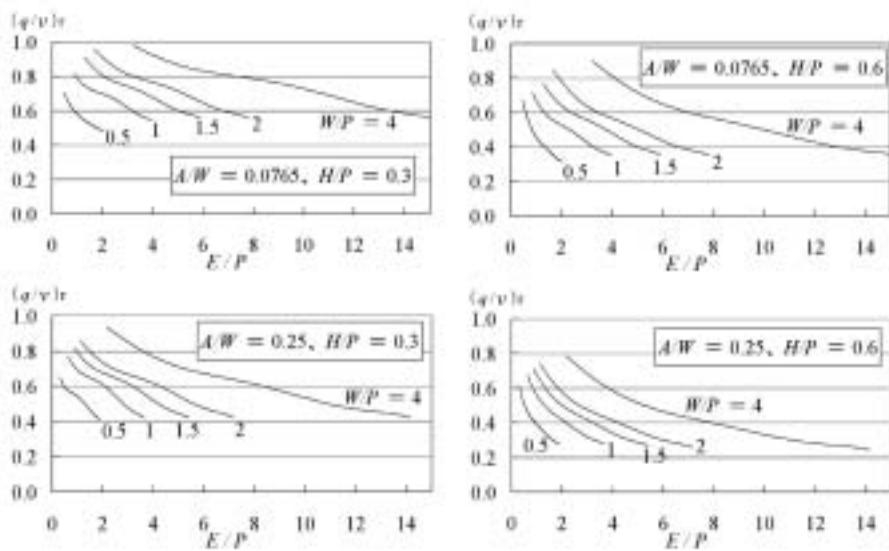


Fig.36 限定スペースでの W/P による (q/v_r) 値の変化
Difference of (q/v_r), by W/P in limited longitudinal space.

見られ、 q 自体も低下する。よって、 E/P の低減が基本的に好ましくないことは言うまでもない。また、高 A/W (近長方形) ほど、各 W/P 形状間の $(q/v)_r$ の差異は小さくなるが、これも近長方形化に伴い q (もしくは q/v) が低下するためと思われ、この点からも高 A/W 形状 (近長方形形状) は好ましくないと言える。

e 近長方形化による q/v の変化

A/W (平面形) を変化させた場合の E/P に対する $(q/v)_r$ の変化は Fig.37 のようになる。

Fig.37 より概して高 A/W (近長方形形状) ほど $(q/v)_r$ が低くなるのが分かる。これは、高 A/W (近長方形形状) ほど拡縮効果 (C_{wr} , q が低減する方向に作用) が大きく、 A/W 増大 (近長方形化) に伴う L_i/W_i 増大の割に C_{wr} や q が増えない、もしくは低下すること、その一方、単位幅当たり堰体体積 v は A/W 増大 (近長方形化) に伴う L_i/W_i 増大 (セキ頂長さの増大) に応じて増すためと考えられる。

低 E/P , 低 H/P では、「高 A/W (近長方形形状) ほど $(q/v)_r$ が低下」という傾向が緩和されるが、これは、低 E/P , 低 H/P ほど A/W 増大 (近長方形化) に伴う拡縮効果の増大が小さくなり、かつ低 A/W (近三角形形状) ほど顕著に見られるナップインタフィアレンス (Hay et al., 1970) の影響 (C_{wr} , q が低減する方向に作用) が相対的に高まるためと考えられる。すなわち、低 E/P では全セキ頂長

さ L_i に占めるナップインタフィアレンス発生部位の割合が高まり、特にナップインタフィアレンスが顕著な低 A/W 形状 (近三角形形状) での $(q/v)_r$ 増大傾向が弱まると推測される (L_i/W_i や v が小さくともそれ以上に $(q/v)_r$ が伸び悩む)。また、低 H/P では近長方形化による拡縮効果増大が小さくなり、相対的に近三角形化に伴う (上流端辺付近での) ナップインタフィアレンス増大効果の方が増すので、同様に低 A/W 形状 (近三角形形状) での $(q/v)_r$ 増大傾向が弱まると推測される。特に完全な三角形形状ではナップインタフィアレンスが著しいので他形状との $(q/v)_r$ 差は大きく縮小すると考えられる。

一方、低 W/P (高密度形状) では拡縮効果の増大が著しくなるためか、より低い E/P 値まで、「高 A/W (近長方形形状) ほど $(q/v)_r$ が低下」という傾向が顕著になると共に、低 H/P でも上記の傾向が明瞭に表れる。すなわち、低 W/P (高密度形状) では、高 A/W 形状 (近長方形形状) の $(q/v)_r$ と低 A/W 形状 (近三角形形状) の $(q/v)_r$ が逆転する E/P 値がより小さくなると共に、低 H/P 化に伴う逆転 E/P 値の増大が小さくなる (低 H/P でもなかなか逆転しなくなる。Fig.37 より)。

以上から流下方向長 E を伸ばしたり (E/P を大きくしたり)、低 W/P (高密度化) とする場合には、高 A/W (近長方形形状) は不利と言える。

なお、過度に低 W/P 化 (高密度化) すると A/W (平面

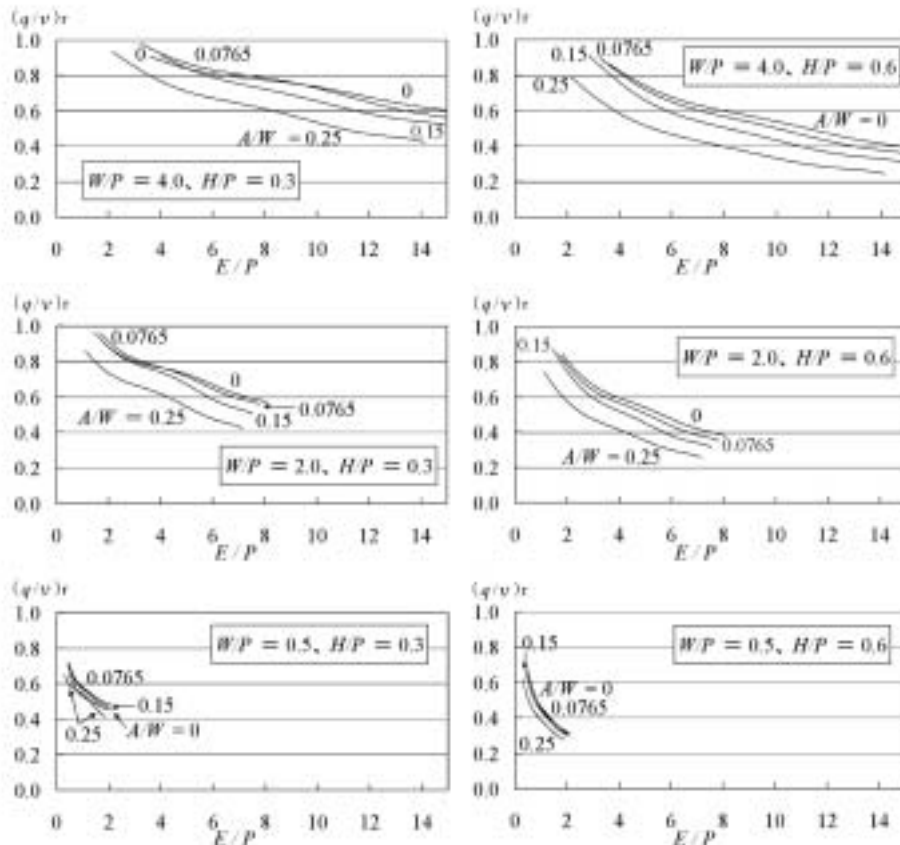


Fig.37 限定スペースでの A/W による $(q/v)_r$ 値の変化
Difference of $(q/v)_r$ by A/W in limited longitudinal space.

形)による $(q/v)_r$ 差は全体に小さくなる。これは、過度の低 W/P (高密度形状)では拡縮効果が著しくなっており、どのような A/W (平面形)でも A/W 増大(長方形化)による L_1/W_1 増大(v 増大)の割に $C_{wr}(q)$ が増えなくなるため、 A/W (平面形)による $(q/v)_r$ 差が無くなっていくのだと考えられる。

f 有効な密度(W/P)と平面形(A/W)

高密度化(低 W/P 化)、近長方形化(高 A/W 化)による流量係数(C_{wr})、堰体体積当たりの放流量(q/v)の変化の原因は以下のように総括できる。

- ① L_1/W_1 の変化: E/P 固定では、高密度(低 W/P)、近長方形(高 A/W)ほど L_1/W_1 が増大する。なお、長方形化による L_1/W_1 の増大率は、 E/P に依らず一定だが、高密度化による L_1/W_1 の増大率は、 E/P に応じて増大する。
- ② 拡縮効果の変化: 高密度(低 W/P)、近長方形(高 A/W)、高 E/P 、高 H/P ほど拡縮効果が増大する。
- ③ 直線堰的流況への移行: E/P が小さいほど、 H/P が大きいほど、相対的に H/E が増大し、直線堰的流況へ移行しやすい。
- ④ ナップインタフィアレンス: 近三角形ほどナップインタフィアレンスは増す。特に、高密度(低 W/P)、低 E/P 、高 H/P (高 H/E)では全セキ頂長さに占めるナップインタフィアレンス部分の割合が高まり、これによる放流阻害(C_{wr} 、 q を下げる方向に作用)が顕著になる。

前節までの結果から低 W/P (高密度形状)ほど流量係数 C_{wr} が高まること(本章1, a節)、 A/W (平面形)に関してはそのような一定の傾向は見られないこと(本章1, a節)、高 A/W (近長方形形状)ほど、 W/P 低減(高密度化)に伴う C_{wr} の増大が抑えられること(本章1, b, 及び1, c節)が分かった。また、高 A/W (近長方形形状)ほど、 W/P 低減(高密度化)による $(q/v)_r$ 低下傾向が強まるので(本章1, d及び1, e節)、この点からも高 A/W (近長方形形状)は不利なことが分かった。

以上より刃形ラビリンス堰の平面形(A/W)としては施工上問題ない範囲で極力、三角形に近いもの(低 A/W)が望ましいと言える。一方、密度(W/P)については、高密度形状(低 W/P)ほど、 $(q/v)_r$ の低下が顕著になること(本章1, d節)から過度の高密度化も好ましくない。現地の H/P 、 E/P (現地条件)により(ラビリンス堰化のメリットに関わる)流量係数 C_{wr} 、(デメリットに関わる) $(q/v)_r$ の兼ね合いが変化するので両者を勘案して最適な密度(W/P)とする必要がある。

2 溜池(小規模ダム)洪水吐への適用

本節では、前節の結果に基づき、溜池洪水吐の現地条件に刃形ラビリンス堰を適用した場合において有利な形状について検討する。

a 溜池(小規模ダム)洪水吐の現地条件

溜池洪水吐の設計水頭 H_d は概ね0.3~1.2mであること(農水省, 2000a)、 H_d/P が0.8以上では直線堰的な流況に近づきラビリンス堰化する意味が小さくなること(本章1, a節)から溜池洪水吐に刃形ラビリンス堰を適用する場合、その堰高 P は0.375~1.5m以上と見込まれる。しかし、堰高2mを超えるケースは堤高15m未満の溜池洪水吐では少ないと考えられることから H_d/P の下限は0.15と推測される。

一方、溜池洪水吐における E/P は、上記の設計水頭 H_d (0.3~1.2m)、堰高 P (2m以下)、 H_d/P (0.15~0.8)と堤頂幅(2~4m)、余裕高(1~1.4m)、堤体勾配(1:1.5~1:2.1)、側水路地山勾配(1:0.7~1:3)などの設計条件、現地条件(農水省, 2000a)から概ね6.7以下と考えられる(Fig.38)。これは、現状では堰直下に下流整流区間を設けるのが一般的だからであり、それを設けないとしても E/P の上限値は10.9程度と見込まれる(Fig.38)。

なお、Fig.38では堤体から離して付設されるような大規模な正面越流式洪水吐は想定していない。側水路式(Fig.38下)もしくは堤体上や堤体に隣接して設けられる小規模な正面越流式洪水吐(Fig.38上)を対象としている。

これは、大規模な正面越流式洪水吐は、緩勾配地山があり、かつ設計洪水量が大きい大規模溜池でのみ適用されるもので、我が国のような急傾斜地形では、この規模の洪水吐は往々にして側水路式で施工されることになるからである。そうでない比較的、小規模な正面越流式洪水吐については、溜池の場合、堤体設置式となることが多く、堤上に設置させないケースでも一般に堤体隣接型となり堤体脇を通して下流に放流するため、ラビリンス堰体を敷設可能な緩勾配直線水路区間長は、堤体設置の洪水吐のそれに準じるからである。したがって、Fig.38上図の正面越流式洪水吐の現地条件は、堤体設置式として作成した。

b 溜池(小規模ダム)洪水吐に有利なラビリンス堰形状

2-1節の考察に基づき、 $E/P \leq 10$ の条件下で、本章1-6節の検討結果から施工性への配慮と q/v の低減抑制(Hay et al., 1970)の両者を勘案して有利と見られる $A/W=0.0765$ の近三角形形状について、密度(W/P)毎の C_{wr}/C_n 、 $(q/v)_r$ を比較したのがFig.39である。Fig.39では、刃形ラビリンス堰の効果(流量係数 C_{wr})が H/P 増大に伴い急減することから(前出Fig.33)、 H/P を堰高1mでの最小値相当の0.3及び0.5とした。なお、Fig.33の縦軸は C_{wr} であり、直線堰の流量係数に対する相対値(C_{wr}/C_n)ではないが、 C_n は H/P に依らずほぼ一定値なので、ここでは C_{wr} で表示されたFig.33から適用 H/P を選定した。

Fig.39上図より、 E/P が概ね2~5であれば高密度化(W/P 低減)に応じた C_{wr} 増大効果が比較の見込めること、 E/P が7を越えると $W/P < 2$ の高密度形状はほぼ無効化することが分かる(C_{wr}/C_n が増えない一方、 $(q/v)_r$ は低

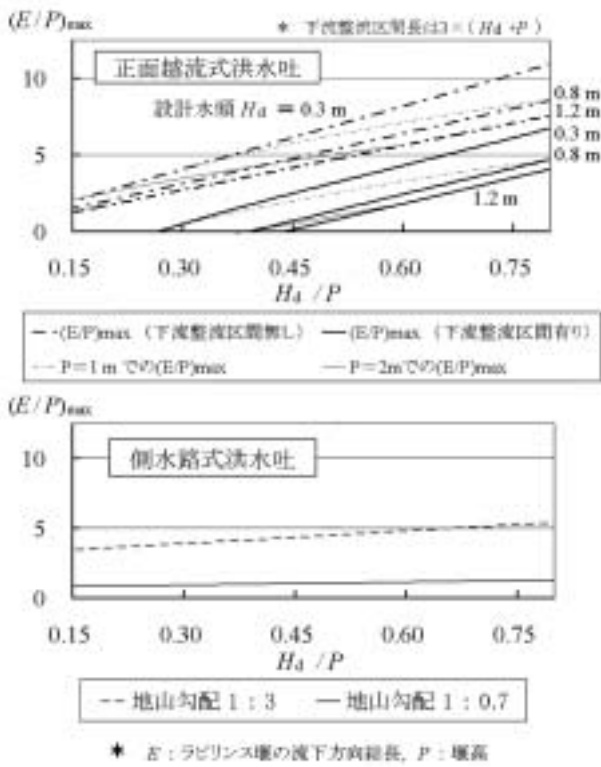


Fig.38 溜池洪水吐における H_d/P と $(E/P)_{max}$
Relation between H_d/P and $(E/P)_{max}$ in small dam spillways.

下)。

E/P の増大は基本的に C_{w1}/C_n 増大につながるが (Fig.39 上図), 概して E が長大化するため, 現地における堰敷設スペースの制約やスペース確保のための掘削費増大からラビリス堰の適用が有利な溜池洪水吐数を減じさせる (E/P の増大により堰体コストも増す)。また, Fig.39 下図のように E/P 増大に伴い $(q/v)_r$ (堰体容積当たりの単位

幅放流量) も低減するので (ラビリス堰化によるデメリットが増すので), ラビリス堰化による C_{w1}/C_n 増大効果が打ち消されやすくなる。さらに, 溜池洪水吐の型式によっては, E/P の増大により比較的高い H_d/P とせざるを得なくなり, ラビリス堰の効果が上がらなくなる (Fig.38)。以上と溜池洪水吐における E/P が概ね 6.7 以下なこと (前述) を考慮すれば, 刃形ラビリス堰の E/P は 6.7 よりもある程度低いことが望ましい (実際には下流整流区間有り, 堰高 1m 以下という一般的な条件であれば, E/P が 3 付近になる場合が多いと推測される (Fig.38))。

E/P がこのように低い範囲にある場合, 前述のように $W/P < 2$ の高密度形状でも高密度化 (W/P 低減) に応じた C_{w1}/C_n 増大効果が見込めること, 高密度化 (W/P 低減) により (同一 P に対する) セキ幅 (W) の縮小, すなわちラビリス堰の小規模化が図れること, 小規模化に伴い施工時の余幅縮減や搬送コスト低減が図れることから, $W/P < 2$ の高密度形状がコスト的に有利になる可能性が高くなる。

最終的にどの W/P を用いるかは, 堰体の容積当たり単価に依る。それが低いほど, 高密度化 (W/P 低減) による $(q/v)_r$ 低減 (Fig.39 下図) のデメリットが打ち消され, 高密度形状 (低 W/P) が有利になる可能性が高まる。

また, 高 H/P でも, 高密度形状 (低 W/P 形状) と同様, $(q/v)_r$ が低くなる一方, C_{w1}/C_n も低減するが (Fig.40 上図), 堰体の容積当たり単価が下げられれば $(q/v)_r$ 低減 (Fig.40 下図) のデメリットが打ち消されるので, 比較的高い H/P までコスト的に見合う可能性が高まる。

c 溜池 (小規模ダム) 洪水吐におけるラビリス堰の規模, 放流能力, 効果

溜池洪水吐における一般的な条件は前述 (本章 2, a 節)

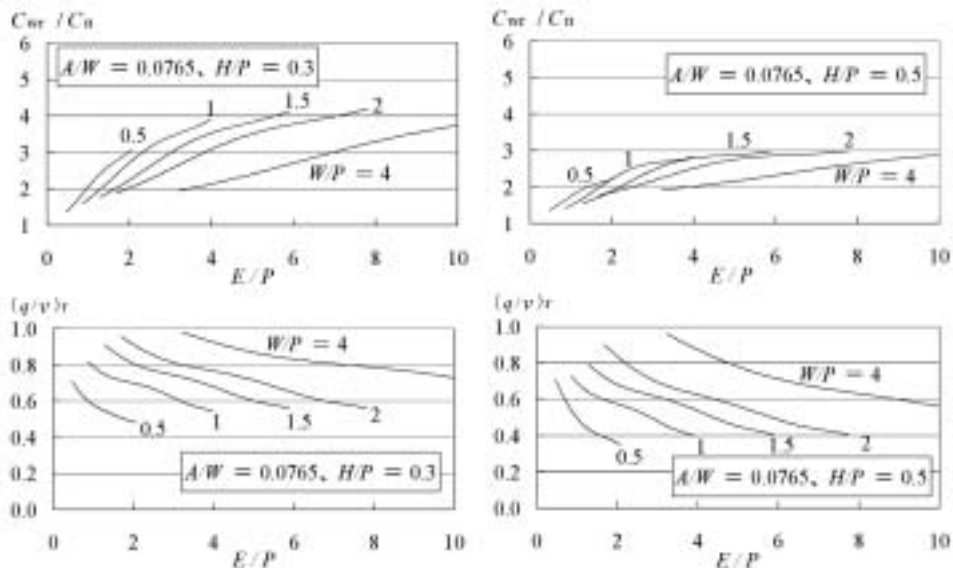


Fig.39 溜池洪水吐における W/P と C_{w1}/C_n , $(q/v)_r$ の関係
Difference of C_{w1}/C_n , $(q/v)_r$ by W/P in small dam spillways.

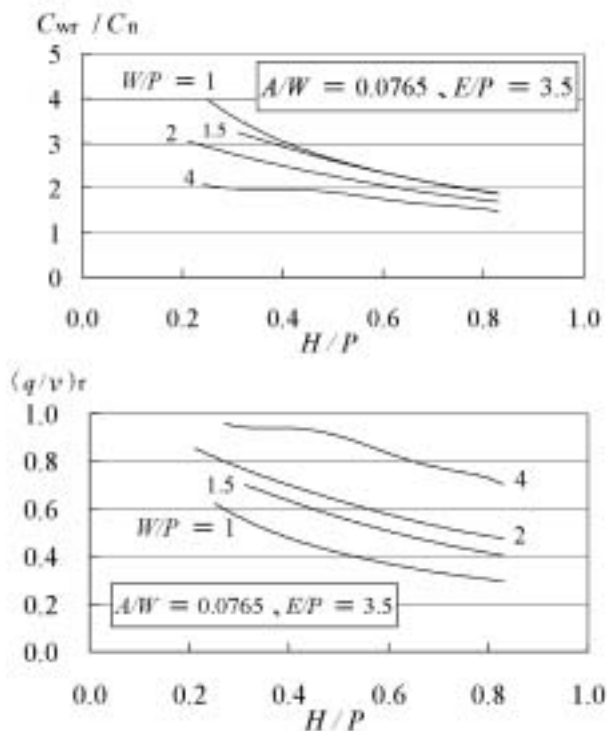


Fig.40 溜池洪水吐で一般的な流下方向長比 ($E/P = 3.5$) の近三角形ラビリンス堰 ($A/W = 0.0765$) の C_{wr}/C_n , $(q/v)_r$ Relation between H/P and C_{wr}/C_n , $(q/v)_r$ in a quasi-triangular sharp crested labyrinth weir ($A/W = 0.0765$) on the condition that $E/P = 3.5$.

のように $P \leq 2\text{m}$ である。また、 H_d は溜池 (小規模ダム) を含む農業用ダムの洪水吐では、所定堤高に対する貯水容量増大のため、 H_d を極力下げる設計をすること、堤高 15m 超のダムの洪水吐 (ゲートレス式) でも大方、 $H_d = 0.5 \sim 2\text{m}$ であること (農工研, 1999)、溜池改修の設計指針での H_d の仕切値として 0.8m が採用されていること (農水省, 2000a)、一方、浮遊流下物に対する洪水吐閉塞防止の観点から H_d は概ね 0.3m 以上 (農水省, 2000a) とされること等から通常、 $H_d = 0.3 \sim 0.8\text{m}$ の範囲になると推測される。

一方、本章 1, a 節より H_d/P が 0.8 以上では直線堰的な流況に近づきラビリンス堰化する意味が小さくなること (前出 Fig.33) から $H_d/P = 0.3 \sim 0.5$ とした場合、上記の溜池洪水吐における一般的条件 ($P \leq 2\text{m}$, $H_d = 0.3 \sim 0.8\text{m}$) では、 $H_d = 0.3 / 0.8\text{m}$ で各々、 $P \doteq 1 \sim 0.6 / 2.7 \sim 1.6\text{m}$ となることから、溜池洪水吐におけるラビリンス堰はセキ高 $P = 0.6 \sim 2\text{m}$ 程度の規模となると考えられる。

また、 $H_d/P = 0.3 \sim 0.5$ の条件、及び溜池洪水吐では概ね $E/P < 6.7$ (本章 2, a 節) となることからすれば、 W/P を低減させ高密度化しても $(C_{wr}/C_n)_{\max} \doteq 3 \sim 5$ (Fig.39) なので、これと $H/P = 0.3 \sim 0.5$ での刃形堰流量係数 $C_n \doteq 1.84$ (Govinda Rao et al., 1963) から刃形ラビリンス堰の単位幅当たり流量としては約 $3.9 \sim 6.6\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($H_d \leq 0.8\text{m}$, $H_d/P = 0.3 \sim 0.5$) が上限になると考えられる。

ただし、堰体容積当たり単価を低減できれば、より高

H/P (高 H もしくは低 P) でもラビリンス堰が既往直線堰に比し有利になりうる (本章 2, b 節)。この場合は、所定堰高に対し H_d を更に取り上げられ単位幅当たり放流量の上限値を更に高めること、もしくは、所定 H_d に対し堰高 P を更に下げることが可能となる。堰高の低減は堤体構造上、高堰高が困難な堤体設置式の洪水吐には有効と思われる。

$(C_{wr}/C_n)_{\max} \doteq 3 \sim 5$ の場合、ラビリンス堰化により放流量は $3 \sim 5$ 倍、越流幅は $20 \sim 33\%$ に圧縮、越流水頭は $34 \sim 48\%$ に低減となる。溜池洪水吐では、「放流量増大比に応じた洪水吐幅の抑制」、「越流幅圧縮率に応じた洪水吐幅の圧縮」、「越流水頭低減率に応じた堤高及び堤体積の低減もしくは貯水容量の増大 (新規水源の節減)」のいずれかとラビリンス堰化による「堰体コスト変動 (セキ頂長さ、部材単価の増大に伴うコスト増とセキ厚低減によるコスト減)」、「堰上流の掘削コスト増大」を総和し、既往直線堰よりもコスト減となれば、ラビリンス堰の適用が有利と言える。なお、洪水吐では堰下流の緩勾配水路末端の水位をフルード数 0.44 程度にセキ上げる設計が成されるため (農水省, 2000b)、堰下流水位、堰下流掘削深や堰高は、直線堰とラビリンス堰でほとんど変わらない (堰上流の前庭部の掘削深は直線堰の方が浅くなる)。

d 洪水吐におけるラビリンス堰の水利設計

洪水吐におけるラビリンス堰の設計は、使用目的の明確化 (越流幅の低減、越流水頭の低減等)、現地条件の明確化 (許容される総越流幅・流下方向長さ・掘削深など現地地形・土質により決まる条件および施工条件等)、これら目的・条件にあった形状候補の絞り込み、コスト比較による最終形状の決定 (一般に洪水吐や堤体の土工費低減と貯水容量増大の効果が見込める反面、堰体コストは増す) という手順で成しうると考えられる。

この見地から本論文の実験結果に基づき、ダム、溜池、調整池などの洪水吐にラビリンス堰を適用する際の具体的な水利設計手順を次のように呈示する。

- ① ラビリンス堰の用途を明確化する。すなわち、1) 既設洪水吐の放流量増大 (安全度向上) に対する洪水吐幅の抑制、2) 新設洪水吐の越流幅圧縮による洪水吐幅の圧縮、3) 越流水頭低減による堤高及び堤体積の低減もしくは貯水容量の増大 (新規水源の節減)、のうち、いずれを目的とするかを明確にする。
 - 1), 2) の場合は、設計洪水量 Q_d 、設計水頭 H_d が既定値であり、3) では設計洪水量 Q_d 、洪水吐幅 W が既定値である。
- ② 現地地形・地質 (洪水吐部分の掘削深) から採用可能な堰高 P の上限と (既定の設計洪水量 Q_d と下流の緩勾配放水路末端幅の可能最大値から決まる) 堰下流最小水深に対する潜没回避の点から採用可能な堰高 P の下限を算出し、その範囲で幾つかの P を設定する。

この際、堰高 P は、設計洪水量 Q_d での堰下流水位が堰天端標高より十分低くなるように設定する。 $W/P \geq 2$ の比較的低密度なラビリンズ堰では、堰下流水位が堰天端標高と同高まで下流セキ上げによる流量係数 C_{wr} への影響は無視しうるので (Hay et al., 1970 及び Taylor, 1968), 設計洪水での越流流況の安定化 (非給気状態化) の点からある程度セキ上げるほうが望ましい。

③ 施工が困難となる 1 サイクル当たり越流幅 W (隅角部を除いた値。Fig.20, Fig.6 参照), 端辺長 A の各々の下限値を設定し、各堰高 P について $W/P = 0.5 \sim 4$, $A/W = 0.0765$ の条件でそれら下限値を下回る堰高 P , W/P を求める。これらの堰高 P , W/P は設計対象から除外する (A/W については、本論文の結果 (本章 1, f 節) から洪水吐のように低 H_d/P と成り難い工種にラビリンズ堰を適用する場合, 0.0765 付近が放流能力, 堰体体積, 施工性から最も有利となる。よって、ここでは $A/W = 0.0765$ を設計値とした)。

④ ラビリンズ堰の流下方向長さ E の許容最大値と洪水吐総幅 W_t の関係 (関係式) を現地地形から設定する (①で 3) の場合, W_t は既定値で固定)。この際、ラビリンズ堰下流端～急流水路始端 (側水路式洪水吐では側水路末端～急流水路始端) までの最小区間長としては H_d+P 程度が目安となる。

⑤ ③で残った各堰高 P , W/P について $L/W = 2 \sim 8$, $A/W = 0.0765$ として下式より流下方向長さ E を算出する。

$$E = T + \{(L - 4 \cdot A) / 2 + T \cdot \tan(\alpha / 2)\} \cdot \sin \alpha \quad \cdots \cdots (6)$$

$$\alpha \text{ (度)} = \cos^{-1}\{(1 - 4 \cdot A / W) / (L / W - 4 \cdot A / W)\} \quad \cdots \cdots (7)$$

⑥ ①で 1), 2) の場合, ③で残った各堰高 P , W/P について $L/W = 2 \sim 8$, $A/W = 0.0765$ として既定 H_d と Table 4 の回帰式より流量係数 C_{wr} を求め、更に下式より洪水吐総幅 W_t を求める。

この際、Table 4 中の L/W 値, W/P 値の間の L/W 値, W/P 値を採用したラビリンズ堰形状では、 C_{wr} 算出に際し、Table 4 の回帰式から算出される値の内挿値を当該形状の C_{wr} とする。

$$W_t = Q_d / C_{wr} / H_d^{3/2} \quad \cdots \cdots (8)$$

一方、①で 3) の場合, W_t は既定値とする。

⑦ ⑤, ⑥で算出した流下方向長さ E , 洪水吐総幅 W_t が④の条件を満たさない (算出 W_t に対し算出 E が過大な) 堰高 P , W/P , L/W は設計対象から除外する。

⑧ ⑦で残った各ラビリンズ堰形状 (A/W , L/W , W/P), 各堰高 P について、下記の形状設計式、Fig.6 からラビリンズ堰の詳細な形状を求める。

この際、サイクル数 i が 0.5 の倍数となる C_{wr} 値になるように②, ③, ④の条件を満たす範囲で L/W , W/P , 堰高 P のいずれかを適宜調整する。調整に際して設計条件 (②, ③, ④) への影響が小さく、設

計作業の手戻りが少ないのは、 $L/W > W/P >$ 堰高 P の順である。

なお、サイクル数が 0.5 の倍数で無い場合は設計放流量の誤差が大きくなる。これはラビリンズ堰の C_{wr} が堰頂の各部で異なるため、 C_{wr} は上流短辺に近い部分で大きく、そこから離れるほど小さくなる。

この誤差が設計上問題ない場合には、サイクル数を 0.5 の倍数にする必要はない。例えば、サイクルの端数部分が上流短辺側であれば、実際の放流量は設計放流量より大きくなるが、これは堤体の安全上はプラス要因である。設計洪水以下における過大放流が下流治水上、問題ない程度と見込まれるならばこのような設計も許容される。

<ラビリンズ堰の形状設計式>

堰断面形状 刃形 (Table 4 の実験条件より)

$$\text{サイクル数 } i = W_t / W_1 \quad \cdots \cdots (9)$$

$$\text{洪水吐総幅 } W_t = Q_d / C_{wr} / H_d^{3/2}$$

(①で 3) の場合は既定値)

$$\cdots \cdots (10)$$

$$1 \text{ サイクルの越流幅 } W_1 = 4 \cdot A + 2 \cdot T \cdot \tan(\alpha / 2)$$

$$+ 2 \cdot D' \cdot \cos \alpha \quad \cdots \cdots (11)$$

$$\alpha \text{ (度)} = \cos^{-1}\{(1 - 4 \cdot A / W) / (L / W - 4 \cdot A / W)\}$$

$$\cdots \cdots (12)$$

$$D' = D + T \cdot \tan(\alpha / 2) \quad \cdots \cdots (13)$$

$$D = (L - 4 \cdot A) / 2 \quad \cdots \cdots (14)$$

$$T_1 = 0.2 \cdot T \text{ (Table 4 の実験条件より)}$$

$$\cdots \cdots (15)$$

ここで、 Q_d : 設計洪水量 (m^3/s),

H_d : 設計水頭 (m) (設計洪水時の越流水頭)

C_{wr} : 設計洪水時の流量係数 ($m^{1/2}/s$)

(A/W , L/W , W/P , H_d/P から Table 4 の回帰式より算出)

A : 短辺幅

W : 越流幅 W_t から隅角部を除いた幅

L : 隅角部を除いたセキ頂長さ

P : 堰高

T : 堰厚。ここでは Table 4 の実験条件と洪水吐設計水頭での刃形セキの越流流況維持の点から $T/P \leq 0.1$ とする。構造上の必要からセキ厚をさらに厚くせざるをえない場合は、セキ下流面に傾斜を設けてセキ厚を確保する。なお、米国開拓局では、セキ下流面勾配として、直 \sim 16:1 (もしくは 10:1) の急勾配を推奨している (U.S.Bureau of Reclamation, 1987)。

(以下、①で 1), 2) の場合)

⑨ ⑧の各詳細形状につき、「洪水吐流入部～緩勾配放水路部分の工事費」, 「堰体コスト」を算定する。それらの合計額が最小化される詳細形状をラビリン

ス堰の設計形状とし、その合計額が既往直線堰のそれを下回るならば、それを最終形状（施工形状）とする。

（以下、①で3）の場合）

- ⑨ ⑧の各ラビリンス堰形状（ A/W , L/W , W/P ）, 各堰高 P について、Table 4 の回帰式に基づき下式を満たす設計水頭 H_d を求める。

$$H_d^{3/2} \cdot C_{wr} = Q_d / W_i \quad (Q_d, W_i \text{ は既定値})$$

……………(16)

C_{wr} : 設計洪水時の流量係数 ($m^{1/2}/s$)
 (A/W , L/W , W/P , H_d/P から Table 4 の回帰式より算出)

この際、Table 4 中の L/W 値, W/P 値の間の L/W 値, W/P 値を採用したラビリンス堰形状では、 C_{wr} 算出に際し、Table 4 の回帰式から算出される値の内挿値を当該形状の C_{wr} とする。

- ⑩ ⑧の各詳細形状と各々の詳細形状に対応して⑨で算出された設計水頭 H_d につき、「洪水吐流入部～緩勾配放水水路部分の工事費」、「堰体コスト」及び「築堤コストもしくは貯水容量増大効果（新規水源の節減によるコスト減）」を算定する。それらの合計額が最小化される詳細形状をラビリンス堰の設計形状とし、その合計額が既往直線堰のそれを下回るならば、それを最終形状（施工形状）とする。また、最終形状に対応した設計水頭が H_d の最終的な設計値となる。

e 水理設計上の留意点

本論文での検討結果及び従前の成果から水理設計上の留意点は次のようにまとめられる。

- ① ラビリンス堰では低越流水頭時（主として給気状態時）にナップ背面の空洞域と外気圧との差異により、水膜振動、騒音の問題が顕著になることがある。このような問題が発生した場合には、鋸刃板（先端が鋸刃状の薄板）を堰頂下流端沿いに堰頂下流面になじみよく取り付ける等の措置を採る。
- ② 流入水路始端～ラビリンス堰末端は水平水路床とする（∵ Table 4 の C_{wr} 回帰式は水平水路床の条件で導かれたものである）。なお、ラビリンス堰下流の底高を下げた場合も C_{wr} の増大は最大5%程度とされており（Hay et al., 1970 及び Taylor, 1968），そうであっても、洪水吐のように設計洪水時の堰下流水位を堰天端標高程度にセキ上げて設計する場合は、段下げによる C_{wr} 増大はほとんど無くなると推測される（農水省, 1981a）。
- ③ ラビリンス堰は、流下方向長が概して長大になるので、貯水池側に堰体を寄せて、下流整流区間を確保する配置とする。堰上流端が貯水池に近接する場合は、流入水路入り口の形状を損失の少ない形状（ゲート付き洪水吐のそれと同様のベルマウス等）とするのが望ましい。

- ④ 流入流向はラビリンス堰のセキ軸に直交させる。

VI 結 言

農業用のダムは現在、全国に20万個以上あるとされ、その大多数は比較的古い時代に築造された小規模なもの（「溜池」）であるため、時折、決壊被害を起こすなど、改修の必要性が高い。この際、問題になるのは小規模ダムゆえ、一個当たりの改修費用は小さい反面、総数が多いため、全体としての改修コストは莫大になることである。

本論文では、溜池など農業用小規模ダムの改修に際し、その改修コスト低減に資するべくダム洪水吐越流頂形状の検討を行った。ここでの検討対象は、越流頂形状の平面形状の改良型としての「ラビリンス堰 (Fig.1)」である。

ラビリンス堰は、その平面形ゆえ、セキ頂長さを延ばせ、放流能力を高めやすい。そのため、洪水吐の所定放流量（設計洪水量）に対する洪水吐幅の縮小が可能で、改修ダムの洪水吐の小規模化、低コスト化に応用しうる。洪水吐改修費が全体のかなりの割合を占めるフィルダム（土石材のダム）の改修に有効な技術と目される。

本論文でラビリンス堰の主たる適用対象として想定した洪水吐越流頂形状において、実用上、求められる事項は次の6点である。

- ① 所定の設計洪水流量に対し、十分かつ適正な放流能力（単位幅当たり流量もしくは流量係数）を持った形状であること
- ② 管理橋など、上部構造物との間に十分余裕がある越流水面形となる形状であること
- ③ 越流面上にキャビテーション損壊の原因となる過大な負圧を発生しない形状であること
- ④ 堤体へのすり付けや上部構造物の据え付けに支障のない形状であること
- ⑤ 施工が容易であり、かつ施工精度の確保が図れること（佐藤ら, 1989 及び日本ダム協会, 1987）。このためには、曲面施工長が短い形状、もしくは、放流能力が高い形状（所定の設計洪水量を放流するための越流頂長を短縮出来る形状）が望ましい。
- ⑥ 構造上問題のない形状であること（太田, 1989 及び農水省, 1981b, 中村, 1990）。すなわち、ミドルサードの条件を満たすこと（越流頂部の横断面積が過小でないこと）。

上記のうち、ラビリンス堰の主対象たるフィルダム洪水吐では管理橋など上部構造物が無いこと、越流頂が堤体上に設置されないことから②, ④, ⑥は問題にならない。コンクリートダム洪水吐の場合と比べ、⑤もそれほど重要ではない。さらに、ここでは薄厚刃形断面のラビリンス堰を検討対象としているので③（セキ表面のキャビテーション損壊）の問題も小さい。

したがって、フィルダム洪水吐への適用を主対象としたラビリンス堰では①が主として問題となる。これに加え、ジグザグの平面形状ゆえ薄厚断面と成らざるを得ないラビリンス堰では、越流水頭によっては越流流況が不安定化することが想定されるので、その不安定流況発生条件の解明も求められる。すなわち、ラビリンス堰形状と放流能力（流量係数）の関係（放流特性）、その放流能力による洪水吐規模縮小効果（低コスト化効果）、及び形状と越流流況の関係の把握が実用上必須となる。

しかし、ラビリンス堰については、その平面形状がジグザグなので、放流特性に関わるパラメータが多く、設計の基本となる放流特性が十分に把握されていない。特に溜池洪水吐のように比較的スペースが狭い工種に用いるには、ジグザグの密度が高い形状（高密度形状）や1サイクルの平面形が長方形に近い形状（近長方形形状）が有利と考えられるが、これらの放流特性は分かっていない。ラビリンス堰の形状や越流水頭と越流流況の関係も十分に把握されていない。

本論文では、水理実験に基づき以上の点を明らかにすると共に、それらの成果に基づきラビリンス堰の水理設計法、現地洪水吐への適用手法について呈示を行った。本論文の検討結果の要約は次のとおりである。

- ① 従来、体系的な検討が成されていなかった高密度形状、近長方形形状のラビリンス堰を含め、ラビリンス堰の各形状について越流流況と越流水頭比 (H/P) の関係を明らかにした (Table 2)。
- ② ①に基づき、ラビリンス堰の各形状諸元 W/P (縦横比), A/W (端辺比), L/W (セキ長比) と各越流流況の境界 H/P の関係を解明した (Fig.22)。
- ③ ①に基づき、ラビリンス堰の各形状について不安定流況が発生する越流水頭比 (H/P) の範囲を明らかにした (Table 3)。本表は、ラビリンス堰を現地洪水吐に適用する場合において、不安定流況となる越流水頭を設計水頭にしない、もしくは下流堰上げによって不安定流況となる越流水頭でのナップ背面エア域を強制的に消失させ遷移状態の卓越を解消する等の対策をとる際の設計図表となる。また、給気状態の越流流況では、放流ナップ内外の差圧により水膜振動、騒音の問題を生じうるが、本表は、それを防ぐために設けるスポイラの突き出し高さの算定に役立つ。この場合、スポイラ突き出し高さは、最大でも不安定流況発生 H/P (給気状態の最大 H/P) 相当の越流水頭分があれば十分と考えられる。
- ④ ②より縦横比 $W/P = 1.5 \sim 2$ かつ端辺比 $A/W = 0.0765$ のラビリンス堰形状は不安定流況が発生する越流水頭比 (H/P) の範囲が狭く、流況安定上、有効なことが明らかとなった (IV, 3, c節)。すなわち、縦横比 $W/P = 1.5 \sim 2$ の形状は、セキ長比 L/W を増大させた場合にも端辺比 A/W に依らず不安定流況の生じる H/P 範囲が安定して狭いこと、これらの形状の中では $A/W \leq$

0.0765 の形状が L/W 増大に対する流況安定性の点でさらに優れていることが明らかとなった。 L/W 増大に対する流況安定性のみ見れば $A/W = 0$, $W/P > 2$ の形状も優れているが、施工性やラビリンス堰の設置効果の向上 (所定の現地洪水吐幅に対する余り幅の低減) も勘案すれば $W/P = 1.5 \sim 2$, $A/W = 0.0765$ の形状が最も有効と考えられる。とりわけ、③に記したスポイラや下流堰上げによって強制的に不安定流況を消失させる等の流況安定化策をとれない現地条件下では、流況安定性が高い $W/P = 1.5 \sim 2$, $A/W = 0.0765$ 付近の形状を適用するのが流況安定の面からは効果的となる。

- ⑤ 従来、体系的な検討が成されていなかった高密度形状、近長方形形状のラビリンス堰を含め、ラビリンス堰の各形状について流量係数 (C_{wr} , C_{lr}) と越流水頭比 (H/P) の関係を明らかにした (Table 2)。
- ⑥ ⑤に基づき、ラビリンス堰の各形状諸元 W/P (縦横比), A/W (端辺比), L/W (セキ長比) と放流特性 (C_{wr} , $C_{lr} - H/P$) の関係を解明した (IV, 4, b ~ d節)。
- ⑦ ⑤に基づき、ラビリンス堰の各形状について流量係数回帰式を多項式近似により導出した (Table 4)。
- ⑧ ラビリンス堰の放流能力 (越流幅当たり流量係数 C_{wr}) が大きいほど、ラビリンス堰による洪水吐幅縮小効果等 (コスト低減効果) の絶対値が大きくなり、 C_{wr}/C_n (直線堰に対するラビリンス堰の放流能力比) が大きいほど、ラビリンス堰の従来型直線堰に対する洪水吐土工コスト低減等のメリットが高まる。一方、ラビリンス堰の q/v (単位幅のセキ体積当たり放流量) が小さいほど、ラビリンス堰化による堰体コスト増大の絶対値が大きくなり、 $(q/v)_r$ (直線堰の q/v に対するラビリンス堰の q/v の比) が小さいほど、ラビリンス堰の従来型直線堰に対する堰体コスト増大のデメリットが大きくなる。

本論文では、上記のラビリンス堰化によるメリット (C_{wr} , C_{wr}/C_n 増大効果), デメリット (q/v , $(q/v)_r$ 低減効果) が、ラビリンス堰形状の変化 (高密度化, 近長方形化) によってどのように変化するかを、溜池洪水吐のようにスペースが限定された条件下において解明した (V, 1, a ~ e節)。これよりスペースが限定された条件下、すなわち流下方向長比 E/P が制約 (固定) された条件下では、以下のようになることが明らかとなった。

- 1) 縦横比 W/P (密度の指標) による C_{wr} の変化は端辺比 A/W (平面形の指標) のそれに比し大きい (V, 1, a節)。
- 2) 越流水頭比 H/P が高い場合は W/P , A/W いずれを変化させた場合でも、それらによる C_{wr} の差異は小さくなる (V, 1, a節)。
- 3) 固定 E/P が大きくなるにつれ、低 W/P 化 (高密度形状化) による C_{wr} , C_{wr}/C_n 増加率は小さくなり、特に高 H/P もしくは高 A/W (近長方形形状) では

その傾向が顕著になる (V, 1, b 節)。

- 4) 固定 E/P が極めて小さい場合にも, 低 W/P 化 (高密度形状化) による C_{wr} , C_{wr}/C_n 増加率は小さくなり, 特に高 H/P ではその傾向が顕著になる (V, 1, b 節)。
 - 5) 低 A/W 化 (近三角形形状化) により C_{wr} , C_{wr}/C_n はやや高まるが, 固定 E/P が小さい場合はこの逆となり, 低 W/P (高密度形状), 高 H/P (高水頭条件) ほど, この逆転が起きる E/P 値は低下する (V, 1, c 節)。
 - 6) $(q/v)_r$ は低 W/P (高密度形状) ほど低くなり, 特に固定 E/P が大きい場合や高 H/P , 高 A/W (近長方形形状) ほど, この傾向が顕著になる。よって, 過度に E/P を高めたり (E を伸ばしたり), 高 A/W (近長方形) にするのは, $(q/v)_r$ 低減のデメリットを増す点から好ましくない (V, 1, d 節)。
 - 7) どのような平面形状 (W/P , A/W) でも, E/P 低下により, 越流水頭に依らず $(q/v)_r$ は増すが, q 自体も低下する (V, 1, d 節)。これより E/P の過度の低減は基本的に好ましくないと言える。また, 高 A/W (近長方形) ほど, 各 W/P 形状間の $(q/v)_r$ の差異は小さくなるが, q 自体も低下する (V, 1, d 節)。したがって, 過度の高 A/W 化 (近長方形形状化) も好ましくない。
 - 8) 概して高 A/W (近長方形形状) ほど $(q/v)_r$ が低くなるが, 低 E/P , 低 H/P ではこの傾向が緩和される (V, 1, e 節)。一方, 低 W/P (高密度形状) ではより低い E/P 値まで, この傾向が顕著になると共に, 低 H/P でもこの傾向が明瞭に表れる (V, 1, e 節)。これより流下方向長 E を伸ばしたり (E/P を大きくしたり), 低 W/P (高密度形状) とする場合には, 高 A/W (近長方形形状) は不利と言える。
 - 9) 過度に低 W/P 化 (高密度化) すると A/W (平面形) による $(q/v)_r$ 差は全体に小さくなる (V, 1, e 節)。
- ⑨ ⑧より低 W/P (高密度形状) ほど流量係数 C_{wr} が高まること, A/W (平面形) に関してはそのような一定の傾向は見られないこと, 高 A/W (近長方形形状) ほど W/P 低減 (高密度化) に伴う C_{wr} 増大が抑えられること, 高 A/W (近長方形形状) ほど W/P 低減 (高密度化) による $(q/v)_r$ 低下傾向が強まること, 低 W/P (高密度形状) ほど, $(q/v)_r$ の低下が顕著になることが明らかとなった。これらより溜池洪水吐のようにスペースが限定された条件下 (流下方向長比 E/P が制約された条件下) では, 洪水吐コスト低減の観点から, 施工上問題ない範囲で極力, 三角形に近い平面形 (低 A/W) のラビリンス堰が望ましいこと, 一方, ラビリンス堰の密度 (W/P) については, 現地の H/P , E/P (現地条件) によってラビリンス堰化のメリットに関わる流量

係数 C_{wr} とデメリットに関わる $(q/v)_r$ の兼ね合いが変化するので, 両者を勘案して適切な値とする必要があることが明らかとなった (V, 1, f 節)。

- ⑩ ④, ⑨の結果と溜池洪水吐の現地条件に関する考察から, 溜池洪水吐の現地条件では $A/W = 0.0765$, $W/P < 2$ の近三角形高密度形状が有利になる可能性が高いこと, この場合の単位幅当たり流量の上限は約 $3.9 \sim 6.6 \text{ m}^3/\text{s/m}$ になること ($H_d \leq 0.8 \text{ m}$, $H_d/P = 0.3 \sim 0.5$), ただし, 堰体容積当たり単価の低減次第では, より高 H/P (高 H) でも適用可能となるので, この上限値は更に上がりうる事が明らかとなった (V, 2, a ~ c 節)。
- ⑪ ②, ③, ⑥, ⑦の結果からラビリンス堰の水利設計法と設計時の留意点を呈示した (V, 2, d 節)。

参考文献

- 1) A. Afshar (1988): The development of labyrinth spillway designs, *Water Power & Dam Constructions*, 1988. 5., p.36-39.
- 2) Babb, A. F. (1976): Hydraulic Model Study of the Boardman Reservoir Spillway, The R. L. Albrook Hydraulics Laboratory, Washington State University.
- 3) Cassidy, J. J., Gardner, C. A. & Peacock, R. T. (1985): Boardman Labyrinth-Crest Spillway., *Jour. of Hydraulic Engineering*., A.S.C.E., Vol.111, No.3, p.398-416.
- 4) 土木学会 (1985): 低い刃形せき, 水利公式集, 284-285.
- 5) 土木学会 (1985): 越流頂, 水利公式集, 289-291.
- 6) Gentilini, B. (1940): Stramazzi con cresta a pianta obliqua e a zigzag, *Memorie e Studi dell Istituto di Idrauliche del Regio Politecnico di Milan*, 48.
- 7) Govinda Rao, N. S. and Muralidhar, D. (1963): Discharge characteristics of weirs of finite width, *La Houille Blanche*, No.5, Aout/Sept, 537.
- 8) G. Hauser, R. Shane, J. Niznik and G. Brock (1992): Innovative Regulation Weirs, *Civil Engineering*, 1992. 5, p.64-66.
- 9) Hay, N., Taylor, G. (1970): Performance and design of labyrinth weirs, *Jour. of the Hydraulics Division, Proc. of the A.S.C.E.*, 11, p.2337-2357.
- 10) Houston, K. L. (1982): Hydraulic Model Study of Ute Dam Labyrinth Spillway., Report No. GR-82-7., U. S. Bureau of Reclamation.
- 11) Ishihara, T., Ida, T. (1951): Supplemented formulas for rectangular weirs without end-contractions, Proc. the 1st Japan National Congress for Applied Mechanics, pp.381-384.
- 12) 川田裕郎, 小宮勤一, 山崎弘郎 (1979): せき, フリュームによる流量測定, 流量計測ハンドブック, 301-311.
- 13) Kindsvater, C. E., Cater, R. W. (1959): Discharge Characteristics of Rectangular Thin-Plate Weirs, *Transactions, A.S.C.E.*, 124, p.772-822.
- 14) Kozák, M., Sváb, J. (1961): Tort alaprojzú bukók laboratóriumi vizsgálata, *Hidrológiai Közlöny*, 5.

- 15) Lux, F., Hinchliff, D. (1985): Design and Construction of Labyrinth Spillways, *15th Commission Internationale des Grands Barrages*, p.249-274.
- 16) Lux, F. (1989): Design and Application of Labyrinth Weirs, *International Symposium on Design of Hydraulic Structures (2nd)*, p.205-215.
- 17) Mayer, P. G. (1980): Bartletts Ferry Project Labyrinth Weir Model Studies., Project No. E-20-610, Georgia Institute of Technology.
- 18) 中島克己 (1989) :ダム型式の選定, 農業土木ハンドブック改訂5版, 農業土木学会, 141.
- 19) 中村靖治 (1990) :越流部の形を決める, ダムのできるまで II, 44, 山海堂.
- 20) 日本ダム協会 (1987) :型枠, ダム施工の手引き 2巻 コンクリートダム本体施工, 103-136.
- 21) 農業工学研究所 (1999) :農業用基幹施設データベース.
- 22) 農林水産省 (1981a) :越流堰の流量計算, 土地改良事業計画設計基準 設計 ダム, 302-307.
- 23) 農林水産省 (1981b) :堤体及び基礎地盤の安定の検討, 土地改良事業計画設計基準 設計 ダム, 126.
- 24) 農林水産省 (2000a) :堤体の各種設計等, 土地改良事業設計指針 「ため池整備」, 28-33 & 52 & 82-83, 農業土木学会.
- 25) 農林水産省 (2000b) :移行部, 土地改良事業設計指針 「ため池整備」, 64-69, 農業土木学会.
- 26) 農林水産省 (2003) :ダム設計洪水流量, 土地改良事業計画設計基準 設計 ダム 基準書・技術書 (共通編), I -346-354, 農業土木学会.
- 27) 太田信介 (1989) :堤体および基礎地盤の安定, 農業土木ハンドブック改訂5版, 農業土木学会, 184.
- 28) 佐藤嘉正・為沢長雄・安養寺学 (1989) :台形越流頂の水力機能に関する一考察, ダム技術 30, 45-53.
- 29) Swamee, P. K. (1988): Generalized rectangular weir equations, *Journal of Hydraulic Engineering* 114, A.S.C.E., 945-949.
- 30) 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.
- 31) Tison, G. and Fransen, T.: Essais sur deversoirs de forme polygonale en plan, *Review C.*, III (3).
- 32) 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.
- 33) 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.
- 34) 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, 157-163.
- 35) U. S. Bureau of Reclamation (1987): Labyrinth Spillways, *Design of Small Dams*, 354.
- 36) Villemonte, J. R. (1947): Submerged-Weir Discharge Studies, *Engineering News-Record*, Dec.25, pp.866.

The Performance and Discharge Characteristics of High Density or Quasi-rectangular Labyrinth Weirs for Small Dam Spillways

TSUNESUMI Naoto

Summary

There are a large number of small dam, more than 200,000, in Japan for irrigation of paddy fields. Most of these small dams have been constructed before the modern period with old construction methods. Therefore, disasters of dam breakage sometimes occur in large rainfall. In order to prevent these disasters, a refurbishing project of old small dams have been conducted in recent years. A problem in the project is that total refurbishing costs will become large by numerous old small dams though refurbishing costs per one small dam is small.

In this thesis, I examined hydraulic performances of a labyrinth weir in order to reduce a spillway refurbishing costs which occupies large part of a dam refurbishing costs, especially in a fill dam.

A labyrinth weir is a zigzag plane shaped weir and it is expected to decrease a spillway size by its high discharge ability. Especially, a high density or quasi-rectangular labyrinth weir can be preferable in limited space, e.g., on a refurbished spillway of a small fill dam because the crest length of the labyrinth weir is relatively long even if the longitudinal space is limited. But discharge coefficient, overflow state of a high density or quasi-rectangular labyrinth weir was not clear enough for its application to a dam spillway. Its overflow state can be a problem because the overflow state often becomes unstable by its thin sectional shape which is inevitable for its zigzag plane shape.

From the above considerations, I examined discharge ability, overflow states with sharp crested labyrinth weirs including them of high density zigzag shape or rectangular shapes.

Results of this thesis are summarized in the following.

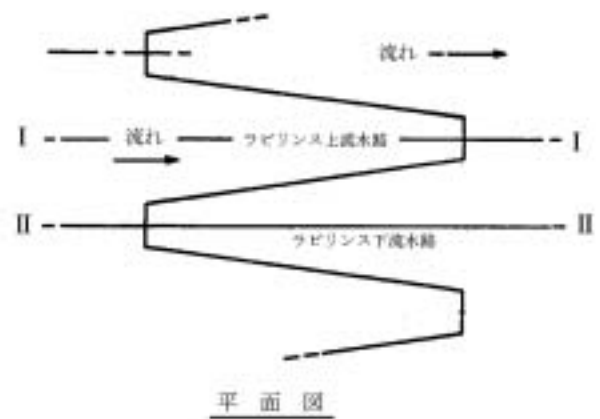
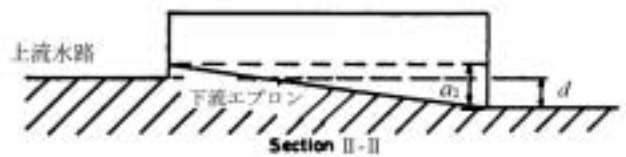
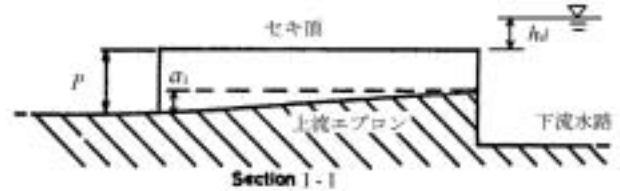
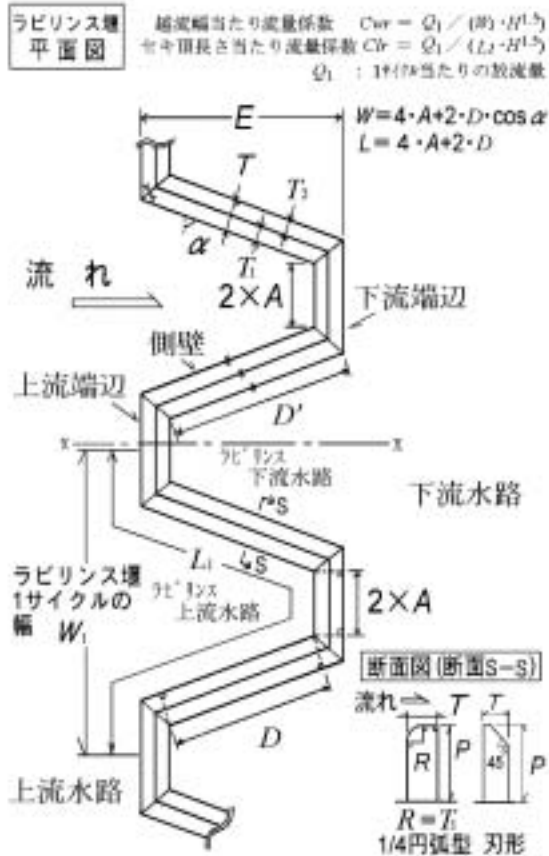
- 1) Relations between H/P (H : overflow head, P : Weir height at upstream side) and discharge coefficient, overflow states became clear with sharp crested labyrinth weirs including them of high density or quasi-rectangular shapes. And discharge coefficient formulas of them were proposed (see **Table 4**).
- 2) H/P range of unstable overflow became clear from 1) (see **Table 3**). It is useful to decide the design head for overflow stability by splitter piers, increase of tailwater level.
- 3) It became clear from 2) that H/P range of unstable overflow was narrow in shapes of $W/P = 1.5 \sim 2$ in spite of change of A/W , L/W (W : width of 1 cycle of a labyrinth weir except its elbow, L : crest length of 1 cycle of a labyrinth weir except its elbow, A : apex half length of a labyrinth weir).
- 4) It became clear that labyrinth weirs of $W/P \leq 2$ and $A/W \doteq 0.0765$ had the advantage by both their discharge ability and overflow stability on the condition of small dam spillways.
- 5) Hydraulic design procedures were proposed with sharp crested labyrinth weirs.

Keywords: *dam, spillway, weir, labyrinth weir, hydraulic design*

付 録
(記号表および記号図)

- A : ラビリンス堰の端辺幅 (隅角部を除く)
- A_1 : ラビリンス堰の上流端辺の上流側の幅
- $(A_1)_{av}$: A_1 と B_1 の平均値
- A_2 : ラビリンス堰の上流端辺のセキ頂部の幅
- A_3 : ラビリンス堰の上流端辺の下流側の幅
- a : 設計洪水位からダム天端高までの余裕高
- a_1 : 上流エプロンの高さ
- a_2 : 下流エプロンの高さ
- B_1 : ラビリンス堰の下流端辺の上流側の幅
- B_2 : ラビリンス堰の下流端辺のセキ頂部の幅
- B_3 : ラビリンス堰の下流端辺の下流側の幅
- B_T : 計量堰の水槽幅
- b : ラビリンス堰の隅角部の幅
- C : 流量係数 ($m^{1/2}/s$)
- C_0 : 越流水頭 $H \rightarrow 0$ での流量係数 ($m^{1/2}/s$)
- C_d : 設計水頭 (H_d) での流量係数 ($m^{1/2}/s$)
- C_n : 直線堰の流量係数 ($m^{1/2}/s$)
- C_w : ラビリンス堰の越流幅当たりの流量係数 (無次元値)
- C_{wr} : ラビリンス堰の越流幅当たりの流量係数 ($m^{1/2}/s$)
- C_{lr} : ラビリンス堰のセキ頂長さ当たりの流量係数 ($m^{1/2}/s$)
- D : ラビリンス堰の隅角部を除いた斜辺の長さ
- D' : ラビリンス堰の斜辺の長さ
- d : 堰の上流水路底に対する下流水路底の落差
- E : ラビリンス堰の流下方向長さ
- g : 重力加速度
- H : 越流水頭
- H_d : 設計水頭
- h : 越流水深
- h_c : 限界水深
- h_d : セキ頂標高基準の下流セキ上げ水深
- i : ラビリンス堰のサイクル数
- k : 式 (1) における定数
- L : ラビリンス堰 1 サイクルのセキ頂長さ (隅角部を除く)
- L_1 : ラビリンス堰 1 サイクルのセキ上流面の長さ
- P : セキ高 (堰上流側)
- P_n : 直線堰のセキ高 (堰上流側)
- Q : 越流量
- Q_1 : ラビリンス堰 1 サイクル当たりの越流量
- Q_d : 設計洪水量
- Q_L : ラビリンス堰の越流量
- Q_n : 直線堰の越流量
- q : 単位幅当たりの越流量
- R : 円弧型断面形状の堰におけるセキ頂の円弧径
- T : セキ厚
- T_1 : 堰上流面からセキ頂までのセキ厚
- T_2 : セキ頂から堰下流面までのセキ厚
- v : 単位幅当たりの堰体体積

- W : ラビリンス堰1サイクルの幅 (隅角部を除く)
- W₁ : ラビリンス堰1サイクルの幅
- W_t : ラビリンス堰の全幅
- α : ラビリンス堰の側壁角度 (流入側)
- β : ラビリンス堰の側壁角度 (流出側) (= 90° - α)
- φ : (180 - α)/2
- ρ : 90 - φ



ラビリンス堰 (今回検討形状)

