

新たな展開に貢献できる既存ダム・貯水池の能力評価技術の開発

研究予算：運営費交付金

研究期間：令 5～令 7

担当チーム：水工チーム

研究担当者：竹崎奏詠、高田翔也、水草浩一

【要旨】

近年海外において放流能力を高める方法の1つとして研究開発が進められているピアノキー型越流堰（PKW）に着目し、国内ダム等への導入を念頭にその水理特性に係る文献レビューを行った上で、海外では検討事例の少ない天端橋梁橋脚が PKW の流量係数 C_{pkw} に与える影響を明らかにすることを目的に模型実験を実施した。その結果、橋脚配置によらず橋脚を設置することで C_{pkw} が低下したものの標準越流頂の 1.5～2.5 倍程度は確保されることを示した。また、橋脚設置による C_{pkw} の低下メカニズムを推定するとともに実務設計における橋脚配置に関する着眼点や留意事項を提示した。

キーワード：Piano Key Weirs、文献レビュー、天端橋梁橋脚、水理模型実験、流量係数

1. はじめに

近年、海外では非常用洪水吐きの放流能力を高める方法として、ラビリンス型越流堰（以下、LW）を改良したピアノキー型越流堰（以下、PKW:Piano Key Weir）が注目されている（図-1）¹⁾。図-2 に示すとおり、PKW の基本構造（1 サイクル）は Inlet Key（以下、流入部）、Outlet Key（以下、流出部）、Sidewall（以下、側壁）で構成されている。LW に比した PKW の大きな特徴として、一般的な PKW は下流へ張り出している構造であるため、LW に比べコンクリート量が大幅に削減できる可能性があること、更には、上流への張り出しがあるため、LW よりも越流頂長を長くすることができ、より高い放流能力が期待できることが挙げられる¹⁾。本報告書では、このような PKW の利点に着目し、まずはじめに PKW の水理特性に関する文献レビューを実施した。次に、国内ダム等への PKW の導入を念頭に、海外では検討事例の少ない天端橋梁橋脚が PKW の流量係数に与える影響を明らかにすることを目的に実施した実験結果、考察を述べ、橋脚配置に関する着眼点や留意事項を提示する²⁾。

2. 文献レビュー

2.1 流況

PKW の基本ユニットは、流入部、流出部および側壁で構成されるが、その流れは①流入部から流出部へ横越流する流れ、②流入部下流端を越流する流れ、③流出部上流端を越流する流れ、および④流出部内を下流に向かう流れ、の主に 4 種類の流れが存在し（図-3）、

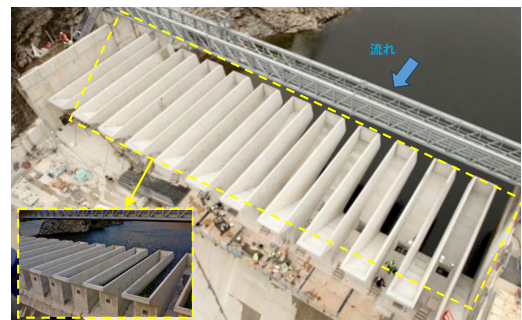


図-1 Malabre ダムの PKW（仏）²⁾

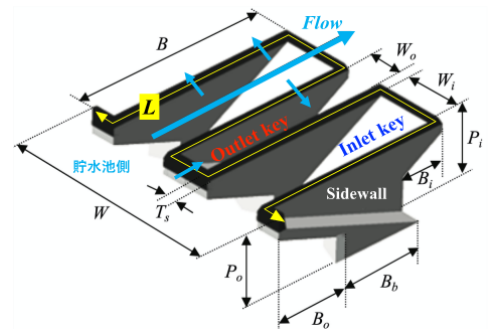


図-2 PKW の基本構造¹⁾

これらの流れの一部ないし全てが相互に干渉することで複雑な流れを呈する。また、越流水深（流速）が大きくなるにつれ①と③の越流水脈の飛距離が伸びると、①の水脈同士または①③の水脈が干渉するようになる。激しい水脈干渉が生じ、流入部から流出部への越流が潜り越流となる場合には横越流量が著しく減少する。横越流量が殆ど生じなければ PKW の越流頂長が見かけ上短くなり放流能力の低下に繋がる可能性がある。

2.2 水理特性（流量係数）

PKW の流量係数 C_{pkw} に影響するパラメータは非常に多く存在するが、それらのパラメータの内、越流頂

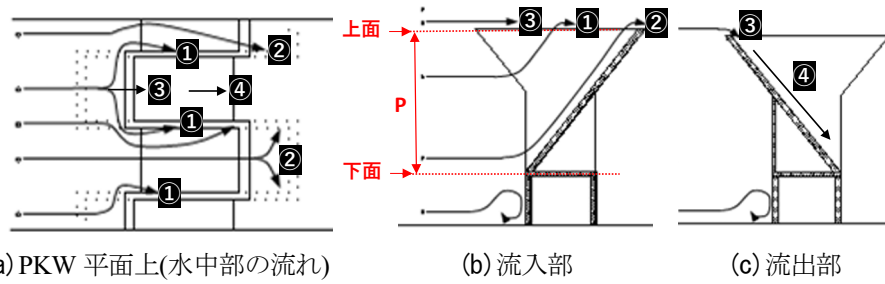


図-3 $H/P < 0.2$ (H : 越流水深, P : PKW の下面から上面までの高さ) における PKW の流れを示した模式図 (図中の①～④は本文 2.1 節の①～④に対応) ¹⁾

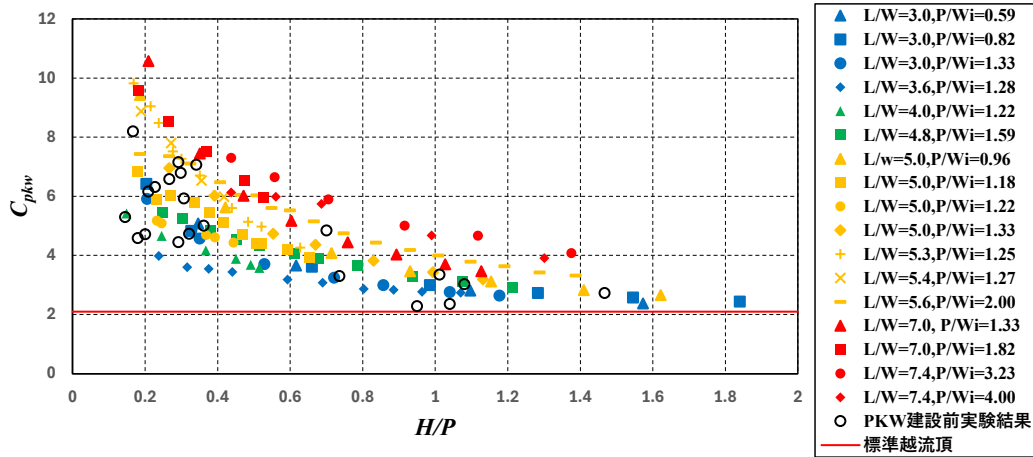


図-4 L/W を第3パラメータとした H/P と C_{pkw} の関係¹⁾

表-1 代表的な C_{pkw} 推定式と適用範囲¹⁾

推定式名	提案式	適用範囲
式① (Kadia et al. ¹⁾)	$C_{pkw} = 2/3 C_d \sqrt{\dots}$ $C_d = 0.327 (L/W)^{0.669} (H/P)^{-0.487} (W_i/W_o)^{0.276} (P/W_o)^{-0.171}$	$0.15 < H/P < 1.6$, $4.0 < L/W < 6.0$, $0.5 < P/W_i < 1.33$, $1.0 < W_i/W_o < 1.57$
式② (Leite Ribeiro et al. ¹⁾)	$C_{pkw} = r C_s \sqrt{\dots}$ C_s : 羽型堰の流量係数 $r = 1 + 0.24 \delta (\text{wabe})$ $\delta = ((L - W) P_i / (W H))^{0.9}$ $w = (W_i / W_o)^{0.05}$ $a = 1 + (R_o / P_o)^{2.0}$ $b = (0.30 + (B_o + B_i) / B) - 0.50$ $c = (P_o / P_i)^{0.25}$	$0.1 < H/P < 2.8$, $3.0 < L/W < 7.0$, $1.5 < B/P_i < 4.6, 0.7 < P_o/P_i < 1.4$, $0.2 < B_i/B = B_o/B < 0.4$, $0.5 < W_i/W_o < 2.0$
式③ (Kabiri and Javaheri ¹⁾)	$C_{pkw} = 2/3 C_d \sqrt{\dots}$ $C_d = 0.212 (H/P)^{-0.675} (L/W)^{0.377} (W_i/W_o)^{0.426} (B/P)^{0.386}$ $\times \exp(1.504 B_o/B + 0.093 B_i/B) + 0.606$	$H > 30 \text{ mm}$, $0.1 \leq H/P \leq 0.6$, $2.5 \leq L/W \leq 7$, $1 \leq B/P \leq 2.5$, $0.33 \leq W_i/W_o \leq 1.22$, $0 \leq B_o/B \leq 0.26$

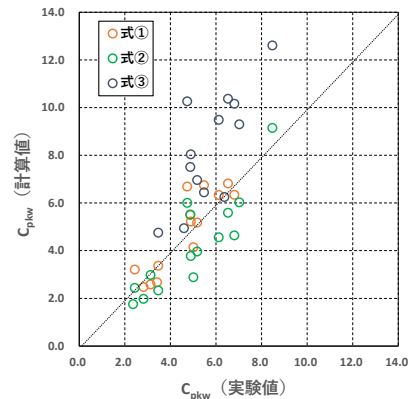


図-5 実験値と計算値の C_{pkw} の比較¹⁾

長 L 、越流水深 H 、PKW の高さ P (図-3 参照)、および流入部及び流出部幅 W_i 、 W_o が C_{pkw} に大きく影響することが知られている¹⁾。図-4 はこれらの主要パラメータと C_{pkw} の関係を整理したものであり、PKW の放流能力を Q_{pkw} として C_{pkw} (又は C_d) は下記式 (1) で表される。

$$C_{pkw} = 2/3 C_d \sqrt{2g} = Q_{pkw} / (W H^{1.5}) \quad (1)$$

図-4 に示すとおり、 $H/P \approx 0.2$ において C_{pkw} は標準越流頂の最大 5 倍程度となる。一方で、 H/P が大きくなるほど C_{pkw} が低下しており、前述の水脈干渉の影響

等が低下要因として考えられる。

2.3 代表的な C_{pkw} 推定式の推定精度

前節で示したパラメータが C_{pkw} に及ぼす影響については既に多くの知見が蓄積されるとともに、数多くの推定式が提案されている¹⁾。本節では、それらの内、一定の推定精度が担保されていることが確認され、かつ、 C_{pkw} に影響するパラメータの広範囲に適用可能な 3 式 (表-1 中の式①～③参照) を対象に、海外における 22 基の PKW の建設検討時の模型実験で得られた実験結果¹⁾を基に設計洪水位における C_{pkw} の推定精度を

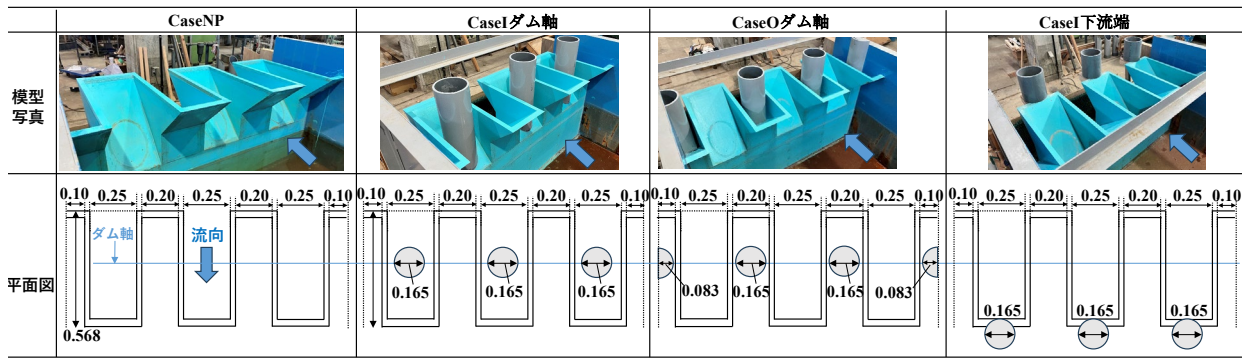


図-6 実験ケースと模型の構造諸元（上段：模型写真、下段：平面図、単位：m）²⁾

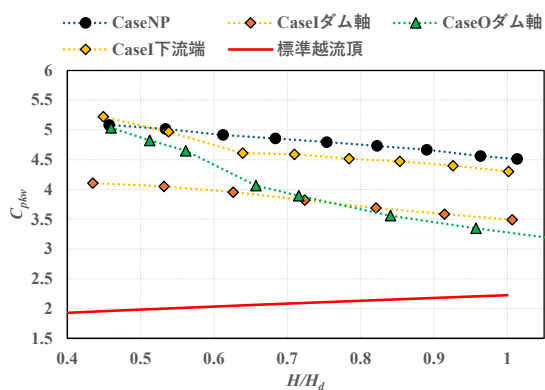


図-7 C_{pkw} と H/H_d の関係²⁾

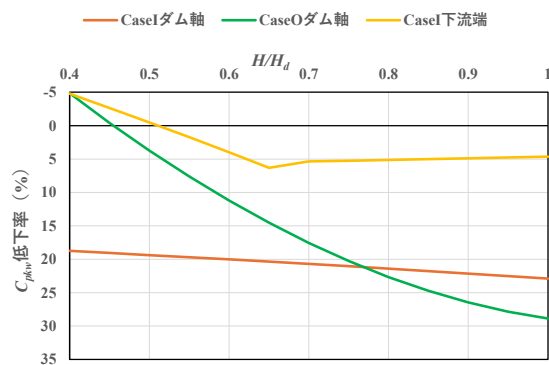


図-8 C_{pkw} 低下率と H/H_d の関係²⁾

検証した（図-5）。その結果、式①，②，③の MAPE はそれぞれ 14.4%、21.0%、44.6%であった。式①において最も高い精度が得られたが、概略検討時に求められる推定精度（約 10%未満）を勘案すると、推定式の精度をより高める必要があることが明らかとなった。

3. 天端橋梁橋脚に着目した水理模型実験

図-1 に示す PKW をはじめ、海外の PKW には天端橋梁橋脚（以降、橋脚）が無いものが多く、その水理特性に関する検討事例は筆者の知る限り存在しない。一方、国内ダムの場合、ブロック幅（約 15m）間隔を目安にダム天端に橋脚を設置することが一般的である。PKW 上に橋脚を設置すれば流況が変化することが考えられるため C_{pkw} も変化することが予想される。そこで、橋脚の配置条件が流況や C_{pkw} に及ぼす影響を明らかにすることを目的に模型実験を実施した²⁾。

3.1 実験方法の概要

幅 1.5m、長さ 10.5m、高さ 1.1m の矩形断面水路の下流端に、実規模の設計水頭 $H_d=1.3$ m を想定した PKW の縮尺 1/12 模型を設置し、 H - Q 計測や流況観察を行った。図-6 に実験ケースと模型の構造諸元を示す。実験は全てフルード相似則に基づき実施した。CaseNP は橋脚無しの基本形状であり、我が国では構造設計に

あたり地震動を考慮することが不可避であることを考慮のうえ、既存のダム構造形式で最も設計条件の厳しいと考えられる LW の L/W (3.0 程度) を参考に形状を設定した。CaseNP 以外の橋脚を有するケースとして、本検討では、橋脚が流入部ダム軸にある場合（CaseI ダム軸）と流出部ダム軸にある場合（CaseO ダム軸）のそれぞれのケースに対し実験を実施することとしたが、日本のダムでの橋脚配置に対する設計制約条件を踏まえることとした。具体的には、横継ぎ目（15m 打設ブロック間ジョイント）を避けるように橋脚を設置する必要があるため、全てのケースにおいて、サイクルの均等性を踏まえた模型の構造諸元とした。後述するとおり、 H_d では CaseO ダム軸に比べ CaseI ダム軸において高い C_{pkw} が確認されたことを踏まえ、橋脚を流入部の下流端に設置した追加実験（CaseI 下流端）も実施した。その他、実験方法の詳細については既往文献²⁾を参照されたい。

3.2 実験結果の概要

図-7 に各実験ケースにおける C_{pkw} と H/H_d の関係を示す。 H/H_d が大きくなるにつれて C_{pkw} が低下するものの、 H_d ($H/H_d=1$) においても、参考として示した標準越流頂に比べ 1.5~2.0 倍程度の高い C_{pkw} が得られた。次に、橋脚無し（CaseNP）と橋脚有（CaseI ダム軸、

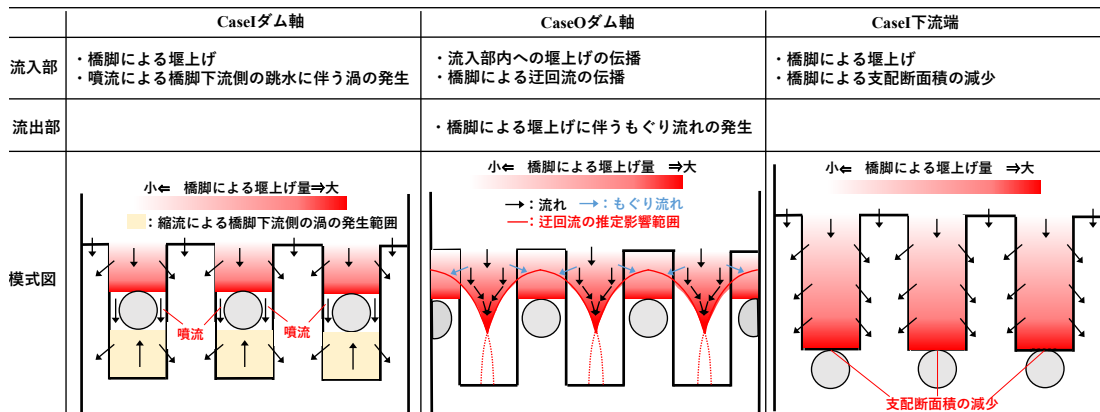


図-9 C_{pkw} の低下メカニズムの推定図 ($H/H_d=1.0$)²⁾

CaseO ダム軸、CaseI 下流端)の実験結果を比較すると、橋脚を設置することで、対象とした全ての H に対し C_{pkw} が低下した。図-8 に CaseNP の C_{pkw} を基準とした橋脚有のケースの C_{pkw} の低下率を示す。これを見ると、実験ケース (橋脚配置) によって C_{pkw} の低下率と H/H_d の関係が大きく異なっている。すなわち、CaseI ダム軸は H が小さい範囲で C_{pkw} の低下率が大きいものの、 H の増加に伴う低下率の増加量が小さい。一方、CaseO ダム軸は H が小さい範囲で C_{pkw} の低下率が小さいものの、 H の増加に伴う低下率の増加量が大きく H_d ($H/H_d=1$) の低下率は橋脚有の3ケース中最も大きな値 (約30%) を示した。ここで重要な点は、 $H/H_d=0.75$ 付近を境に CaseI ダム軸と CaseO ダム軸の C_{pkw} の低下率 (C_{pkw}) が逆転している点であり、 $H/H_d>0.75$ では CaseI ダム軸の方が CaseO ダム軸に比べ C_{pkw} の低下が抑えられる結果を得た。この結果を踏まえ実施した CaseI 下流端の結果を見ると、 C_{pkw} の低下率が全体的に小さく H_d ($H/H_d=1$) では5%程度の低下率に留まった。

3.3 H の増加に伴う C_{pkw} の低下メカニズムの推定

実験中の観察に基づくと、CaseI ダム軸では H が大きくなると橋脚上流部における堰上げが顕著になった。このため、堰上げにより橋脚下流背面の越流頂の機能を十分に活用できていないことが C_{pkw} 低下の主な要因として推定される。次に、CaseO ダム軸では設計水頭程度の大きな H において、橋脚上流部の堰上げによるもぐり流れの発生のみならず、橋脚周りの迂回流が流入部にまで伝播する様子が観察され、この影響で支配断面の長さが短くなった結果、 H の増加に伴い C_{pkw} が著しく低下したと推定される。一方、CaseI 下流端は CaseI ダム軸同様、流入部における橋脚上流側の堰上げが観察されたため、堰上げによる流速の低下に加え、橋脚によって流入部下流端の支配断面長が減少し C_{pkw} が低下した可能性があるが、橋脚による C_{pkw} の低下率

は5%程度であったため (図-8)、これらの影響は限定的であったと推察される。以上をまとめると図-9 のとおりとなり、橋脚を流入部と流出部に設置した場合で C_{pkw} の低下メカニズムが異なると考えられる。なお、本検討では、 $H/H_d=0.75$ 付近を境に CaseI ダム軸と CaseO ダム軸の C_{pkw} が逆転したが、この境界値及び逆転が発生する可能性は PKW や橋脚の諸元に応じて異なることが推定される。

4. まとめと今後の展望

本報告書では、近年海外において放流能力を高める方法の1つとして研究開発が進められている PKW に着目し、PKW の水理特性の文献レビュー¹⁾を行った上で、国内ダムへの導入検討にあたり水理設計上必要となるが海外の検討事例が少ない天端橋梁橋脚に着目し、橋脚の配置条件を変えた水理模型実験の実験結果²⁾について考察した。今後、実務設計において橋脚配置が必要な場合は上記メカニズムに留意し、1 ブロック毎 (橋脚+PKW 数サイクル) の最適配置を目指すものと考えられ、設計水頭に基づく PKW の最適諸元と一般的な橋脚 2m 幅の組み合わせでのさらなる検討が必要である。その際には海外研究事例で多く見られるように、3次元数値流体解析を用いた C_{pkw} の低下メカニズムの詳細検討等が有効と考えられる。

参考文献

- 1) 竹崎奏詠, 高田翔也, 水草浩一: PKW (Piano Key Weirs) の国内適用へ向けた水理特性に関する分析と今後の課題, 河川技術論文集, 31 巻, pp. 163-168, 2025.
- 2) 竹崎奏詠, 高田翔也, 水草浩一: 天端橋梁橋脚が PKW (Piano Key Weir) の水理特性に与える影響, 河川技術論文集, 32 巻, 2026.

DEVELOPMENT OF NEW TECHNIQUES FOR EXISTING DAMS AND RESERVOIRS TO ADAPT TO CLIMATE CHANGE

Research Period: FY2023-2025

Research Team: Hydraulics and Sediment

Transport Engineering Team

Author: TAKEZAKI Souei

TAKATA Shoya

MIZUKUSA Koichi

Abstract: In recent years, Piano Key Weirs (PKWs) have been investigated overseas as a method for increasing discharge capacity of emergency spillways. With the future application of PKWs to Japanese dams in mind, a literature review on their hydraulic characteristics was conducted. After the literature review revealed that the hydraulic effect of management-road bridge piers on the discharge capacity of PKW has been rarely studied before, some hydraulic model experiments were conducted to clarify them. The results showed that the piers reduced discharge coefficient C_{pkw} regardless of pier arrangement; however, C_{pkw} remained approximately 1.5–2.5 times greater than that of a standard ogee spillway. In addition, the mechanism of the reduction in C_{pkw} caused by piers was discussed, and some considerations for pier arrangement in practical design were presented.

Keywords: Piano Key Weirs, Literature review, Management-road bridge pier, Hydraulic model experiment, Discharge coefficient

論文リスト

● 学術誌等による成果普及

査読付論文・国内（計 3 本）

- a-1) 竹崎奏詠、高田翔也、水草浩一：PKW（Piano Key Weirs）の国内適用へ向けた水理特性に関する分析と今後の課題、河川技術論文集第 31 巻、2025.6
- a-2) 竹崎奏詠、高田翔也、水草浩一：ピアノキー型越流堰の海外動向と国内ダムへの適用に向けた水理特性に関するレビュー、ダム技術、2025.11
- a-3) 竹崎奏詠、高田翔也、水草浩一：天端橋梁橋脚が PKW（Piano Key Weir）の水理特性に与える影響、河川技術論文集、32 巻、2026.6、（アクセプト済）

査読無し論文・国内（計 1 本）

- c-1) 竹崎奏詠、高田翔也、水草浩一：PKW（Piano Key Weirs）の水理特性・放流能力推定式の分析、土木技術資料、2025.11

学会発表等その他（計 1 本）

- e-1) 竹崎奏詠、高田翔也、水草浩一：PKW（Piano Key Weirs）の国内適用へ向けた水理特性に関する分析と今後の課題、2025 年度河川技術シンポジウム、2025.6