

建設省土木研究所 ○矢島重美
水山高久
山田 孝

1. はじめに

大きな出水時に上流から多量の土砂が流入する場合には河床が上昇するが、平時は上流における土砂生産抑制が進んだこともあって河床が低下傾向にある河川もある。そのような河川で、中小洪水時には土砂を流下させ、大きな出水時に、土砂を捕捉できるスリット砂防ダムが計画されている。そのような砂防ダムでは、既設の土石流対策の砂防ダムと異なり計画流量が2000m³/sec程度と大きい場合もあり、今までこのような条件下でスリット砂防ダムを計画した事例はなく設計にあたり未知な点も多い。とくに、スリット砂防ダムでは、スリット部に流水が集中するため、落下する水脈の流速が通常のクローズタイプの砂防ダムよりも大きくなると考えられ、前庭保護工について、これまでのクローズタイプとは異なった設計方法が必要になると考えられる。この研究は、大流量を対象として、スリット砂防ダム前庭部での落下水脈の挙動を把握し、減勢工法を検討して、前庭保護工の設計指針を作成することを目的としている。

2. 実験の概要

実験には幅1.5m、長さ12mの矩形水路を使用し、水路勾配は現河床勾配と同じ1/28とした。スリット砂防ダムの模型は3タイプで、縮尺は現地の1/100とした。スリットの形状はタイプIが幅30cm、深さを5cm、タイプIIは幅16.4cm、深さ7.5cm、タイプIIIは幅10.7cm、深さ10.0cmであり、各タイプともスリットを2つ設定した(図-1)。副ダムの有効高は、3cm、4cm、5cmの3タイプとした(図-2)。流量は、20 l/sec, 14 l/sec, 10 l/sec, 7 l/secの4種類の定流とし、給砂は行わなかった。実験は、流量、スリット砂防ダムの形状、本副間距離、副ダムの高さの組合せにより行い、スリット天端からの落下水脈の飛距離、副ダムによる落下水脈の減勢効果、本副間距離と副ダム直下流での洗掘について検討した。

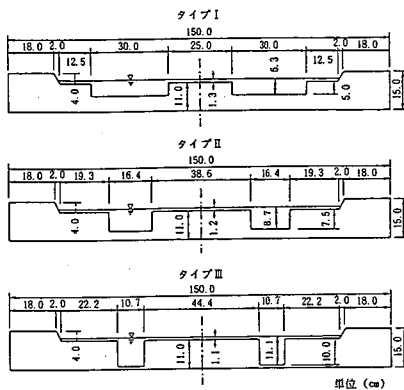


図-1 本ダムの形状

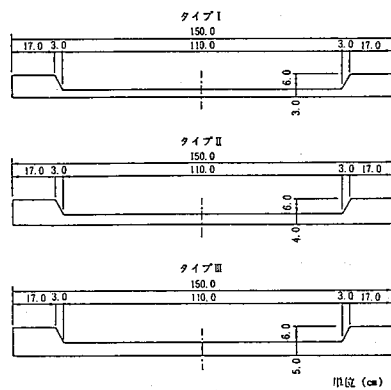


図-2 副ダムの形状

3. 実験結果と考察

3.1 減勢効果

副ダムによる減勢効果を定量的に表現する方法は今のところ確立されていないが、今回の実験では、

減勢の程度を表す量として副ダム側面の水深から副ダム高を引いた水深(h_2)を考え、本副間距離との関係を調べた。その結果を図-3に示す。 h_2 は各ダムタイプ共本副間距離50cmの場合が、他の28cm, 70cmの場合と比較して若干ではあるが大きくなっている。また、本ダムタイプ I, IIでは本副間距離が50cm, 副ダム高4cmの場合に、本ダムタイプIIIでは本副間距離が50cm, 副ダム高5cmのときに h_2 が最大となる。したがって、今回の実験ケースの中では、本副間距離が50cm, 副ダム高はダムタイプ I, IIでは4cm, ダムタイプIIIでは5cmの場合が最も減勢効果が高いと考えられる。

3.2 スリット部を流れる流量, スリット部での越流水深
スリット天端を越流しない場合($h \leq H$)は、スリットは矩形堰と考えられるため、スリット部の流量は①式によって求められる。

$$Q = 2 \times \frac{2}{3} C \sqrt{2gh}^{3/2} \dots \dots \textcircled{1}$$

ここに、Q:流量, C:流量係数, b:スリット幅, h:スリット部の水深, H:スリットの深さ

一方、スリット天端を越流する場合($h > H$)はスリット部を矩形堰、その他の部分を逆台形堰と考え、②式によって求める。

$$Q = 2 \times \frac{2}{3} C \sqrt{2gh}^{3/2} + \frac{2}{15} C \sqrt{2g} (3B_1 + 2B_2) (h-H)^{3/2} \dots \dots \textcircled{2}$$

ここに、 $B_1 = B - 2b$, $B_2 = B_1 + (h-H)$, B:水通し幅

本ダムの流量係数Cは本ダムタイプ I 及びIIIで $C=0.6$, タイプIIでは $C=0.65$ の場合、実験値と計算値がよく一致した。

3.3 落下水脈の飛距離

スリット部からの落下水脈の飛距離をRandの式, 半理論式, スリット部の流速を $v_0 = \sqrt{2gZ}$ で与える方法で算出し、実験値と比較した(図-4)。Rand式では実験値に対して計算値がかなり大きくなり、半理論式では逆に小さくなった。今回の実験の結果では、スリット部の流速を $v_0 = \sqrt{2gZ}$ ($Z=h/3$)とした場合の計算値が実験値とよく一致した。

3.4 水叩き上での流速, 射流水深, 跳水対応水深

水叩き上の流速及び射流水深を半理論式とWhiteの式を用いて算出し、実験値と比較した。実験値の流速及び水深はばらつきが大きかったが、半理論式よりもWhiteの式を用いた

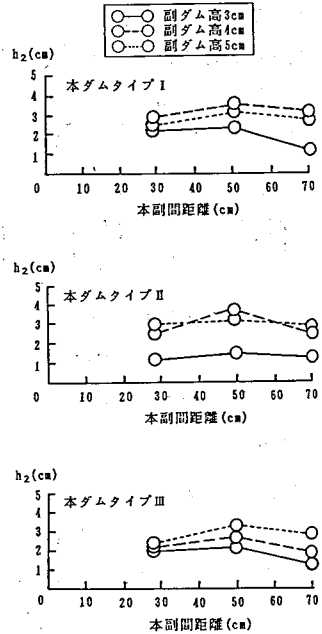


図-3 本副間距離と(h_2)の関係

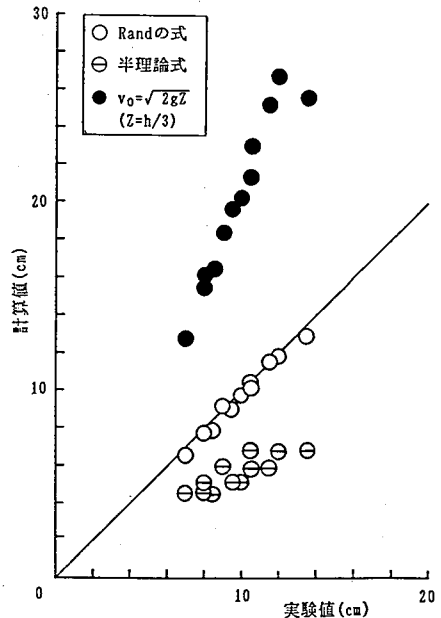


図-4 落下水脈の飛距離の比較

計算値の方が実験値に近い。

一方、水路床および壁面に働く摩擦損失を小さいとして無視すると次式が成立する。

$$\rho Q(V_j - V_1) = \rho g \left(\frac{B_1 h_1^2}{2} - \frac{B_j h_j^2}{2} \right) \quad \dots\dots ③$$

$$Q = B h_1 V_1 = B_j h_j V_j \quad \dots\dots ④$$

これらを連立させて得られる式

$$\left(\frac{B_j}{B_1} \right)^2 \left(\frac{h_j}{h_1} \right)^3 - (2F_1^2 + 1) \left(\frac{B_j}{B_1} \right) \left(\frac{h_j}{h_1} \right) + 2F_1^2 = 0 \quad \dots\dots ⑤$$

によって跳水対応水深(h_j)を求めることができる。

ここに、ρ；水の密度、V₁；跳水前の流速、V_j；跳水後の流速、B₁；跳水前の水脈幅、B_j；跳水後の水脈幅、h₁；跳水前の水深、h_j；跳水対応水深

ただし、跳水後の水脈幅(B_j)としては、スリットを落下した水脈が副ダムいっばいに広がっていないため跳水に対して有効に作用する幅を与える必要があるものと思われる。そこで、跳水後の水脈幅B_jを求めるにあたり、3次元壁面噴流（角型壁面噴流）に関するRajaratnam and Pani(1974)の実験結果⁴⁾を参考に、スリットから放出される水脈の平面形状を図-5に示すようにモデル化した。流速が最大流速の半分となる位置を図-5の・印とし、1つのスリットから放出された副ダム上での水脈幅として4b₂、水脈幅の合計B_jを8b₂としている。計算結果を表-1に示す。上述の方法で求めた跳水後の水脈幅B_jならびに跳水対応水深h_jは実験値に比較的近くになっている。

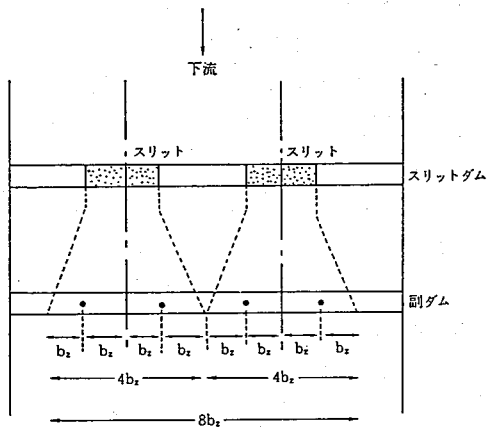


図-5 跳水後の水脈幅(B_j)の与え方

表-1 3次元壁面噴流の実験図を用いて求めた跳水後の水脈幅(B_j)と跳水対応水深(h_j)

ダムタイプ	水脈幅(B _j) の実験値(cm)	3次元壁面噴流の実験図 から求めた水脈幅 (cm)	跳水対応水深(h _j) の計算値 (cm)	跳水対応水深(h _j) の実験値 (cm)
タイプ-I	103.2	120.0	6.9	7.3
タイプ-II	98.0	88.0	7.8	7.6
タイプ-III	86.0	80.0	7.7	8.2

3.5 本副間距離

跳水長(X)については、これまで提案されている実験公式のうちSafranezの方法(X=4.5h_j)によって求めた値が実験値と良く一致した。本副間距離(L)はL=ρw+X+b₂によって求めた。ここで、ρwは落下水脈の飛距離、b₂は副ダムの天端幅である。この式によって、減勢に必要な本副間距離(L)を計算すると実験での最適な本副間距離とほぼ一致した。参考までに、各本ダムタイプごとにRand式、経験式、半理論式、今回の実験で得られた方法で求めた本副間距離の比較を表-2に示す。Rand式では大きめの値となり、

半理論式では少し小さな値となる。また、経験式ではかなり小さめとなる。

表-2 計算によって求めた本副間距離の比較

本ダムのタイプ	適用した式	本副間距離 (L) (cm)	実験での本副間距離 (cm)
I	Rand式	57.6	50.0
	経験式	25.0 ~ 32.9	
	半理論式	42.0	
	今回の実験で得られた方法	42.3	
II	Rand式	70.8	
	経験式	25.0 ~ 32.9	
	半理論式	42.0	
	今回の実験で得られた方法	47.2	
III	Rand式	66.4	
	経験式	25.0 ~ 32.9	
	半理論式	42.0	
	今回の実験で得られた方法	47.1	

• Rand式では落下高(W)をスリット底高と河床高の差としている。
 経験式、半理論式を用いる場合、クローズタイプのダムとして計算した。

3.6 副ダムの高さ

副ダムの高さ(H_2)は $H_2=h_j-h_2$ で求められる。ここで、 h_2 は副ダム水深である。副ダム水深は逆台形堰の越流公式に

より求める。今回の実験では流量係数を0.8とすると実験値と計算値が比較的よく一致するが、副ダムの流量係数はスリットダムの形状、本副間距離によって変化すると考えられる。

3.7 本副間距離と副ダム直下流の洗掘の関係

図-6に最大洗掘深と跳水距離との関係を示す。図-3から本副間距離を50cmとした場合が今回の実験ケースの中で最も減勢効果が高いと思われたので、50cm以下の場合について検討した。ここに、 X ; 跳水長, h_j ; 跳水対応水深, Z_{smax} ; 最大洗掘深, σ/ρ ; 砂礫と水の密度, d_m ; 移動床の土砂の平均粒径である。この図によると、 $\beta (=X/h_j)$ が約2以下では洗掘深が急激に大きくなる。流況を観察すると、落水水脈が本副間でほとんど減勢されることなく副ダム上流側壁面にはねあがり、副ダムの直下流にほとんど鉛直に落下している。 β が約2より大きい場合は β の増加に伴い、最大洗掘深が徐々に小さくなっている。どの程度、最大洗掘深を許容できるかについてはそれぞれの現場条件で異なるため、 β の最適値を一律に

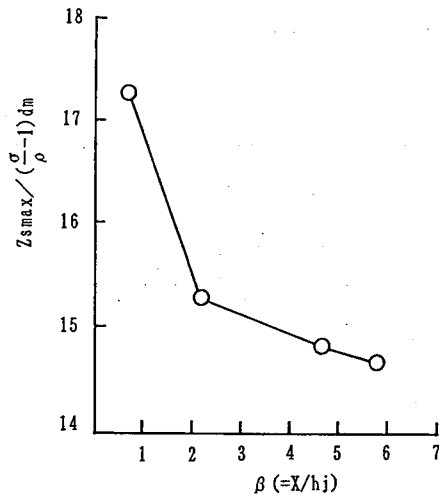


図-6 最大洗掘深と跳水距離の関係

決めることはできないが、副ダム直下流域での洗掘を極力軽減するためには、 β の値として最低限、約2よりも大きくし、許される範囲で出来るだけ大きな値とするのが好ましいと考えられる。

4. まとめ

跳水後の水脈幅(B_j)の値については今後とも実験によって検討していく必要がある。また、今回の実験では検討しなかったが、強制跳水減勢工として主に河川、ダムの分野で採用されているシル、バップル・ピア、段上がり等の適用についても検討していくことが今後の課題である。

参考文献

1) N.ヲヂヲトム; 噴流, 野村安正訳, 森北出版, pp.288~297, 平成元年7月