

土 木 研 究 所 資 料

砂防ダムの前庭保護工に関する 水理模型実験報告書

平成3年7月

建設省土木研究所
砂防部砂防研究室

Copyright © (1991) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

砂防ダムの前庭保護工に関する 水理模型実験報告書

砂防研究室 室 長 石 川 芳 治

主任研究員 井 良 沢 道 也

福 本 晃 久

【要 旨】

砂防ダムの前庭保護工は、砂防ダムの水通し天端からの落下水、落下砂礫による基礎地盤の洗掘防止、落下した流水が現況河川の水利条件に戻るまでの河床低下の防止の目的で設置されるものである。

前庭保護工についての従来の実験的研究においては、副ダム天端が下流の河床面と同じ高さの条件において検討が行われ、水叩き長、副ダム高について半理論式の適用性が確認されている。しかし、実際の砂防ダムにおいては、副ダム天端は河床より高い位置にある場合が多い。そこで、本研究では、河床面を水叩き天端面と同じ高さにし、水叩き長、副ダム高を変化させた実験を行い、副ダム下流の洗掘深に対して適切な水叩き長、副ダム高を求めることを目的とする。

キーワード：砂防ダム、前庭保護工、水理模型実験

Experiments Study on Aprons of Sabo Dams

Sabo Division, Sabo Department

Head of Division : Yoshiharu ISHIKAWA

Senior Researcher : Michiya IRASAWA

Akihisa FUKUMOTO

Synopsis

Protection in aprons of sabo (erosion control) dams is installed for the purpose of preventing scouring of the foundations by water falling from the spillways of the sabo (erosion control) dams, and to stabilize the level of the riverbed until the stream returns to the normal hydraulic state of river. In experimental research on the protection of aprons of the dams in the past, investigations were conducted under the condition that the crown of the counter dam is at the same elevation as the riverbed downstream, and the semi-theoretical applicability of the length of apron and the height of the counter dam has been established. But there are many erosion control dams where the crown of the counter dam is situated higher than the riverbed. In this report, we conducted experiments in which the riverbed is made the same height as the crown of the apron, and the length of apron and the height of the counter dam were varied. The purpose is to determine appropriate height of counter dam and length of apron to minimize the scouring downstream of counter dam.

Key Word : Sabo dam, preventive work for apron, hydraulic model test

はじめに

砂防ダムの前庭保護工は、砂防ダムの水通し天端からの落下水、落下砂礫による基礎地盤の洗掘防止、落下した流水が現況河川の水利条件に戻るまでの河床低下の防止の目的で設置されるものである。

前庭保護工についての従来の実験的研究においては、副ダム天端が下流の河床面と同じ高さの条件において検討が行われ、水叩き長、副ダム高について半理論式の適用性が確認されている。しかし、実際の砂防ダムにおいては、副ダム天端は河床より高い位置にある場合が多い。そこで、本研究では、河床面を水叩き天端面と同じ高さにし、水叩き長、副ダム高を変化させた実験を行い、副ダム下流の洗掘深に対して適切な水叩き長、副ダム高を求めることを目的とする。

目 次

はじめに

1. 目的	1
2. 前庭保護工に関する経験式、半理論式等による諸元の比較	2
2.1 経験式	2
2.2 半理論式	3
2.3 Whiteの式	4
2.4 Randの式	4
2.5 経験式と理論式との比較	5
3. 実験概要	6
3.1 実験条件及び実験ケース	6
3.2 測定項目と測定方法	9
4. 実験結果	11
4.1 結果の概要	11
4.2 各ケースの水位及び移動床の縦断面図	11
4.3 副ダムにおける跳水	11
4.4 従来の研究との比較	19
5. 考察	23
おわりに	25
参考文献	26
参考資料	27

1. 目 的

砂防ダムの前庭保護工は、砂防ダムの水通し天端からの落下水、落下砂礫による基礎地盤の洗掘防止、落下した流水が現況河川の水理条件に戻るまでの河床低下の防止の目的で設置されるものである。砂防ダムの前庭保護工を設計する上で水叩き長、副ダム高については、経験式、半理論式などが提案されている。しかし、各式によって求められる前庭保護工の諸元には差異があり実験的に検討する必要がある。

また、従来の実験的研究¹⁾においては図-1.1に示す河床条件、つまり副ダム天端が下流の河床面と同じ高さの条件において検討が行われ、水叩き長、副ダム高について半理論式の適用性が確認されている。しかし、実際の砂防ダムにおいては、図-1.2の条件で設置されるケースが多いことから、副ダム下流の洗掘深に対して適切な水叩き長、副ダム高を求めることを目的とする。

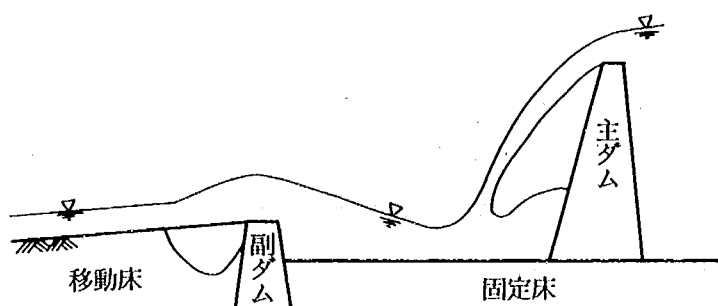


図-1.1 従来の実験的研究における条件

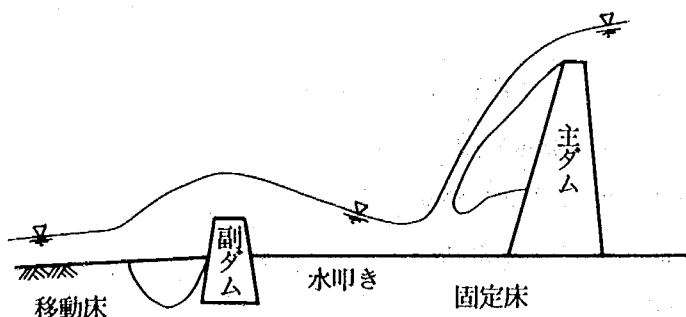


図-1.2 今回の実験での条件

2. 前庭保護工に関する経験式、半理論式等による諸元の比較

ここでは従来から前庭保護工の諸元を求めるために用いられている経験式、半理論式等の各式の差異を検討する。本実験に用いた本ダム高25cmにおける前庭保護工の諸元を各式により求める。

2.1 経験式²⁾

1) 副ダムの位置

本、副ダム間の長さは、式(2.1)で与えられる。

$$L = (1.5 \sim 2.0) \cdot (H_1 + h_3) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

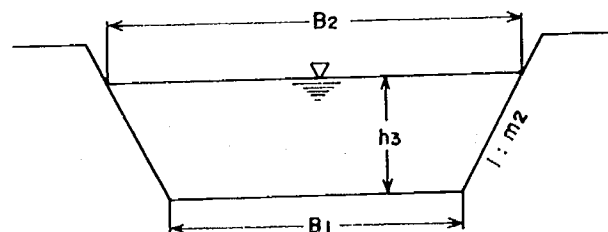
ここに、L : 本、副ダム間の長さ(本ダム天端下流端から副ダム天端下流端までの長さ)

H_1 : 水叩き天端、または基礎岩盤面からの本ダムの高さ

h_3 : 本ダムの越流水深

である。

式(2.1)で、本ダムの越流水深は、式(2.2)の逆台形堰の越流公式より求めることができ、今回の実験条件では $Q = 50 \text{ l/sec}$ 、 $B_1 = 125 \text{ cm}$ 、 $m_2 = 0.5$ 、 $c = 0.6$ の条件を与えると、 $h_3 = 7.9 \text{ cm}$ を得る。しかし、ここでは実験での実測値 $h_3 = 5.4 \text{ cm}$ を越流水深として与える。



$$Q = \frac{2}{15} c \sqrt{2g} (3B_1 + 2B_2) h_3^{3/2} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Q : 対象流量 c : 流量係数

g : 重力加速度 B_1 : 水通し底幅

B_2 : 越流水面幅 h_3 : 越流水深

m_2 : 袖小口勾配

今回の実験での本ダム高さ H_1 は25cmであるので、本、副ダム間の長さは、式(2.1)より

$L = 45.6 \sim 60.8 \text{ cm}$ となる。

2) 重複高

重複高 H_2' は式(2.3)によって与えられる。

$$H_2' = (1/3 \sim 1/4) \cdot H \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

ここに、 H_2' ：本、副ダムの重複高

H ：砂防ダム水通し天端から水叩き底面までの高さ

今回の実験での本ダム高は25cmであるので、式(2.3)より重複高は、

$$H_2' = (1/3 \sim 1/4) \cdot 25 \\ = 6.3 \sim 8.3 \text{ cm} \quad \text{となる。}$$

ただし、これは水叩き底面からの高さである。

2.2 半理論式²⁾

半理論式による本副ダム間の長さは、図-2.1に示す記号を用いて式(2.4)で求めることができる。

今回の実験条件では、 $Q=50\ell/\text{sec}$ 、 $B=125\text{cm}$ 、 $H_1=25\text{cm}$ 、 $h_3=5.4\text{cm}$ (実測値)を与えて式(2.4)より、本副ダム間の長さを計算する。ここに、 Q ：流量、 B ：水通し幅、 h_3 ：越流水深である。

副ダムの高さは、跳水対応水深 h_f に副ダムの越流水深との差によって求められる。

$$L \geq \ell w + X + h_2 \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

1) 水脈飛距離 ℓw は、次式によって求める。

$$\ell w = V_0 \{ 2 (H_1 + 0.5 h_3) / g \}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

V_0 は本ダム越流部流速(m/sec)で次式で求める。

$$V_0 = q_0 / h_3 \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

ここに、 q_0 ：本ダム越流部単位幅流量(m^3/sec)

2) 跳水の距離 X は次式によって求める。

$$X = \beta \cdot h_f \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

ここに、 β ：係数で($\beta=4.5 \sim 5.0$)で与えられるが、ここでは $\beta=4.5$ として計算する。 h_f は、式(2.8)で求まる跳水対応水深である。

$$h_f = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1) \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$h_1 = q_1 / V_1 \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$V_1 = \sqrt{2 g (H_1 + h_3)} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

$$F_1 = V_1 / \sqrt{g \cdot h_1} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

ここに、 h_1 ：水脈落下地点の跳水前の射流水深、 F_1 ：水脈落下地点の跳水前の射流フルード数、 q_1 ：水脈落下地点の単位幅流量、 V_1 ：水脈落下地点の流速である。

3) 式(2.5)と式(2.8)より $\ell w=17.3\text{cm}$ 、 $h_f=13.2\text{cm}$ となり、 $\beta=4.5$ を用いると、本副ダム間の距離 $\ell w + X=76.7\text{cm}$ となる。

4) 副ダムの高さは式(2.12)によって求める。

$$H_2 = h_f - h_2 \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

$h_f=13.2\text{cm}$ 、 h_2 (副ダムの越流水深) $=7.9\text{cm}$ を代入して 5.3cm を得る。

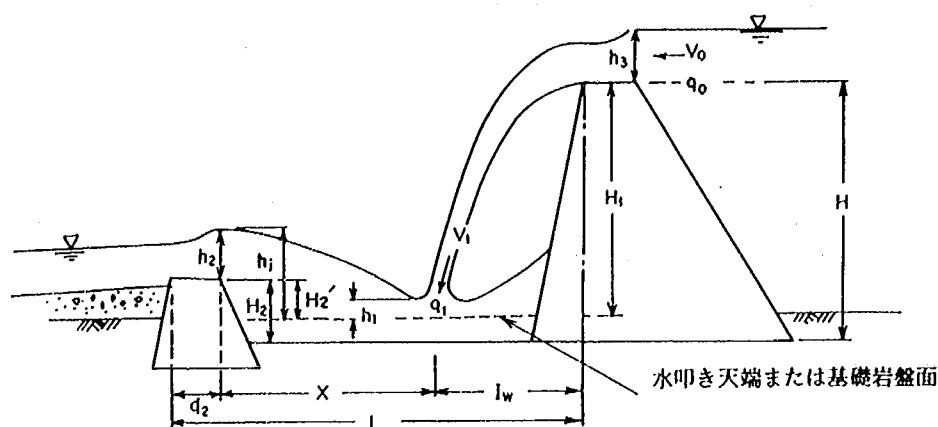


図-2.1 半理論式における記号の説明

2.3 Whiteの式³⁾

本式は、自由落下水脈が水面（水叩き面）に突入することによる減勢を考慮し下流に流出する流れの流速を補正した式である。

$$V_1' = V(1 + \cos \theta) / 2 \quad (2.13)$$

$$V = \frac{q}{V_1'} = \frac{2g}{V_1(1 + \cos \theta)} \quad (2.14)$$

V_1 : 落下水脈の水面への突入速度

V_1' : 水路床への衝突速度

θ : 水脈の水面への突入角度

h_1 : 水路床での射流水深

q : 単位幅流量

式(2.13) (2.14) に $\theta = 78^\circ$ 、 $V_1 = 2.44 \text{ m/sec}$ 、 $q = 0.04 \text{ m}^3/\text{sec}$ を代入して $V_1' = 1.47 \text{ m/sec}$ 、 $h_1 = 2.7 \text{ cm}$ を得る。以後は半理論式に従いこれらを式(2.11) に代入し $F_1 = 2.87$ したがって式(2.8) より $h_2 = 9.7 \text{ cm}$ となる。また、 $lw = 17.3$ 、 $\beta = 4.5$ を用いると $lw + X = 61.0 \text{ cm}$ となる。

副ダム高は、式(2.12) に $h_2 = 9.7 \text{ cm}$ 、 $h_2 = 7.9 \text{ cm}$ を代入して $H_2 = 1.8 \text{ cm}$ を得る。

2.4 Randの式³⁾

高段落水路の跳水に基づいた本副ダム間の距離はRandの実験式を適用すると、図-2.2 に示す記号を用いて、式(2.15)で求めることができる。

$$X = L_d + L \quad (2.15)$$

$$L_d = 4.30 D^{0.27} W \quad (2.16)$$

$$L = 4.5 h_2 \quad (2.17)$$

$$h_2 = 1.66 D^{0.27} W \quad (2.18)$$

ここに、 L_d ：水脈飛距離、 L ：跳水長、 $D = q^2 / g W^3$ ：落下指数 (Drop Number), q ：単位幅当りの流量、 g ：重力加速度 ($=9.8\text{m/sec}^2$)、 W ：落下高、 h_2 ：跳水対応水深である。

副ダムの高さは式 (2.19) によって求めることができる。

$$H_2 = h_2 - h_3 \quad (2.19)$$

ここに、 h_3 ：副ダム越流水深で式 (2.2) より求められる。式 (2.16)、(2.18) に $Q = 50 \ell / \text{sec}$ 、 $B = 1.25\text{m}$ 、 $W = 25\text{cm}$ を代入すると、 $L_d = 31.0\text{cm}$ 、 $h_2 = 12.0\text{cm}$ となり、これを式 (2.15) に代入すると水叩きの長さは、 $X = 85.0\text{cm}$ となる。

また、副ダムの高さは、式 (2.2) より $h_3 = 7.9\text{cm}$ を得て、式 (2.19) より $H_2 = 4.1\text{cm}$ となる。

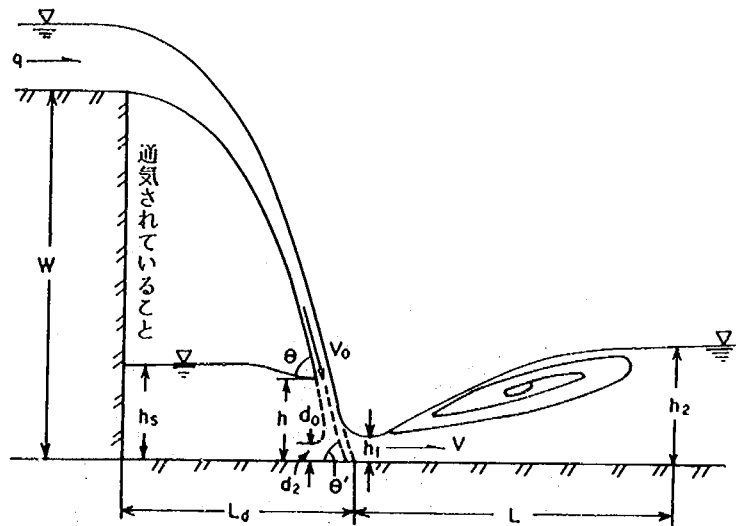


図-2.2 Randの式における記号の説明

2.5 経験式と理論式との比較

経験式、理論式等によって求められる前庭保護工の諸元を表-2.1に示す。各式の対象とする条件が異なっているため、各式によって求められる前庭保護工の諸元には大きく差異があることがわかる。今回は実験により下流洗堀深を最小にする前庭保護工について検討を行う。

表-2.1 経験式と半理論式及び理論式との比較

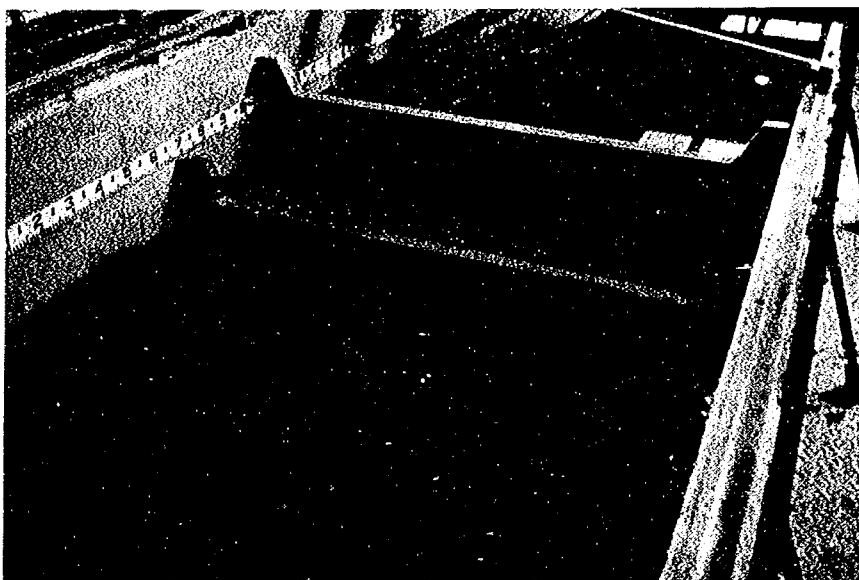
	水脈飛距離	水叩き長 ℓ_{w+X}	副ダム高 H_2
経験式		45.6~60.8 cm	(6.3~ 8.3 cm)
半理論式	17.3 cm	76.7 cm	5.3 cm
Whiteの式	17.3 cm	61.0 cm	1.8 cm
Randの式	31.0 cm	85.0 cm	4.1 cm

() 内は水叩き底面からの高さ (図-2.1の H_2') である。

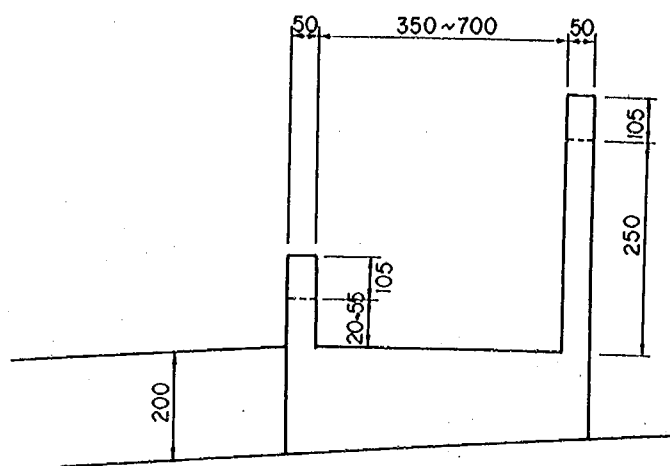
3. 実験概要

3.1 実験条件及び実験ケース

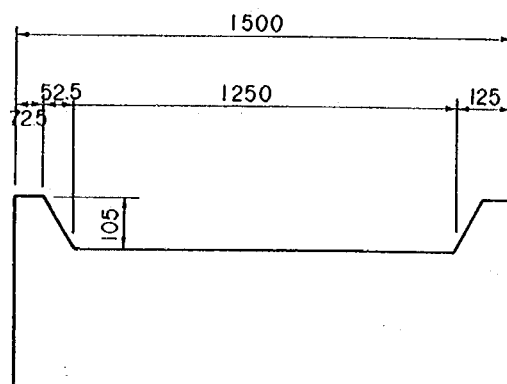
実験には、長さ20m、幅1.5mの直線水路を使用し、本ダム、水叩き、副ダムからなる砂防設備の模型を設置し実験を行った（写真－3.1、図－3.1）。本ダムの高さは25cmとし、水叩き長を35、45、70cm、それぞれの水叩き長において副ダム高を2.0、3.5、5.5cmと変化させ実験を行った。また、比較のため副ダムを設置しないケースも行った。表－3.1に実験ケースを示す。流量は50ℓ/secとし、副ダム下流の河床勾配は1/30とした。実験に用いた河床材料は、平均粒径 $d_m=11.6\text{mm}$ のほぼ一様な砂礫である。前庭保護工の効果については、副ダム下流の洗掘深で評価することとした。なお、各諸元に関する記号は図－3.2に示すとおりであり、以後これらの記号を用いる。



写真－3.1 実験に用いた模型



縦断面図



水通し断面図

図-3.1 実験模型 (単位: mm)

表-3.1 実験ケース

C a s e	本ダム高 H_1 (c m)	水叩き長 ℓ_{w+x} (c m)	副ダム高 H_2 (c m)
1	25	80	0
2	"	70	2.0
3	"	"	3.5
4	"	"	5.5
5	"	45	2.0
6	"	"	3.5
7	"	"	5.5
8	"	35	2.0
9	"	"	3.5
10	"	"	5.5

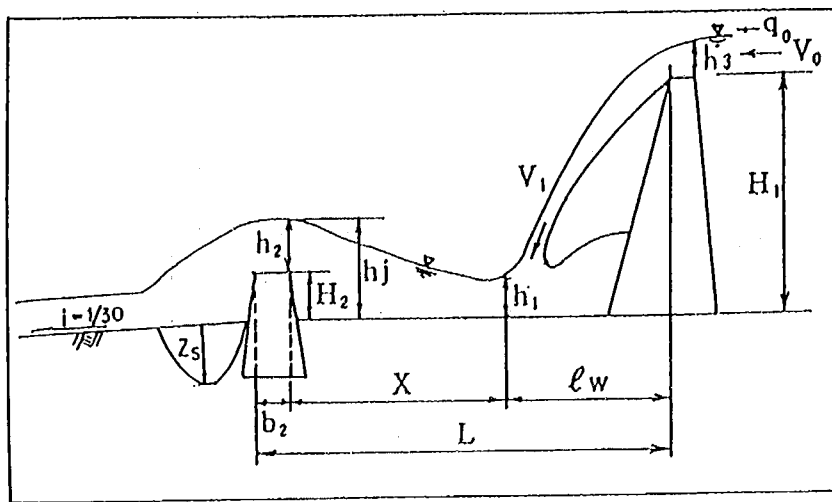


図-3.2 前庭保護工における流水の挙動に関する各記号の説明

H_1 : 本ダム高

Q : 流量

q_0 : 本ダム越流部単位幅流量

V_0 : 流入速度

h_3 : 本堤上での水深

V_1 : 水脈落下地点流速

h_1 : 水脈落下地点の跳水前の射流水深

F_1 : 水脈落下地点の跳水前の射流フルード数

ℓ_w : 水脈飛距離

X : 跳水の距離

L : 本、副間の長さ

h_j : 跳水の高さ

h_{j1} : 計算値

h_{j2} : 実測値

H_2 : 副ダム高

h_2 : 副ダム上での水深

z_s : 最大洗掘深

3.2 測定項目と測定方法

水位 水位の測定は本ダム上流50cmから副ダム下流3mまでの区間を行った。測点は縦断方向に20～24点、各横断方向に3点とし、ポイントゲージを用いて測定した。(写真-3.2)

河床高 河床高の測定は副ダム下流3mの移動床区間について行った。測点は、縦断方向に15点、横断方向に3点とし、河床が安定した後にポイントゲージを用いて測定した。(写真-3.3)

流況観察 本ダムからの越流状況や、前庭保護工での流況及び副ダム下流の洗掘状況を観察した。(写真-3.4)



写真-3.2 水位の測定

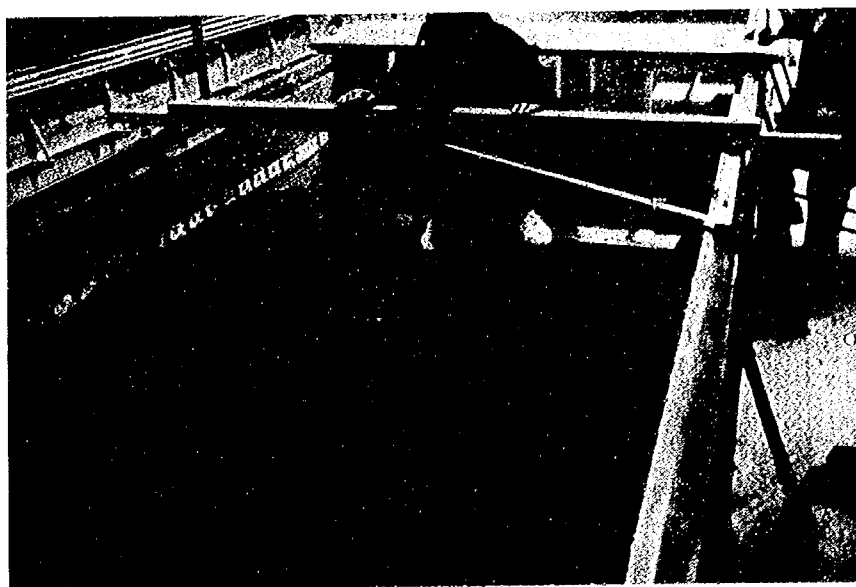


写真-3.3 河床高の測定



写真-3.4 流況観察

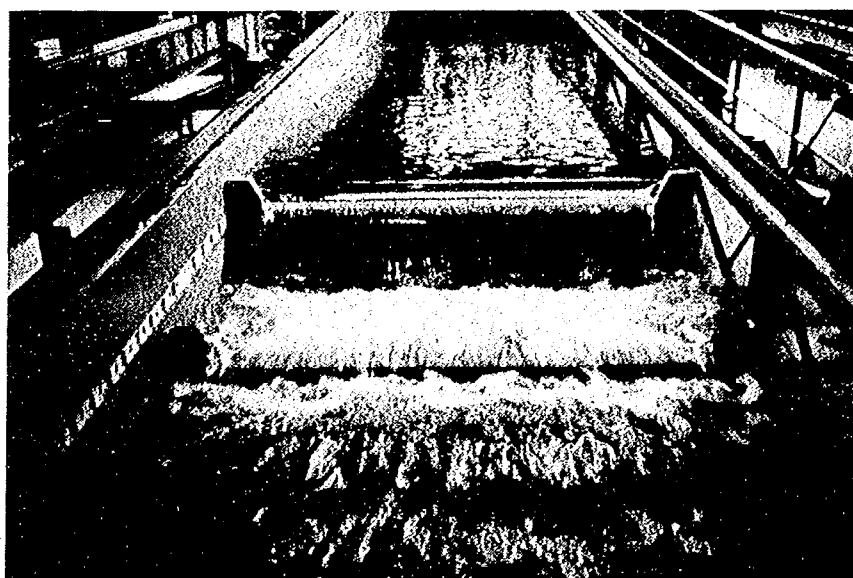


写真-3.5 流況観察

4. 実験結果

4.1 結果の概要

実験は、流量を一定とし、水叩き長、副ダム高を変化させ、本ダム下流の水位及び下流の洗掘状況を測定した。表-4.1に横断方向に測定した3点の平均値による副ダムの越流水深、下流の最大洗掘深の一覧表を示す。

表-4.1 各ケースの副ダム越流水深、最大洗掘深

Case	副ダム高 H_2 (cm)	水叩き長 ℓ_{w+X} (cm)	副ダム越流水深 h_2 (cm)	最大洗掘深 Z_s (cm)
1	0	80	1.9	11.4 <15.2>
2	2.0	70	4.7 (6.7)	5.0 <9.3>
3	3.5	"	4.7 (8.2)	7.2 <9.8>
4	5.5	"	5.3 (10.8)	7.6 <13.0>
5	2.0	45	4.7 (6.7)	3.2 <3.9>
6	3.5	"	5.9 (9.4)	4.1 <6.1>
7	5.5	"	7.2 (12.7)	5.3 <7.2>
8	2.0	35	6.0 (8.0)	4.7 <6.8>
9	3.5	"	7.8 (11.3)	5.2 <7.2>
10	5.5	"	9.0 (14.5)	6.0 <8.1>

* () 内は水叩き面からの水深 (図-3.2の h_1)

* < > 内は局所的な最大洗掘深

4.2 各ケースの水位及び移動床の縦断面図

各ケースの水位及び移動床の縦断面図を図-4.1(1)~図-4.1(10)に示す。また、これらは3点の平均値である。水位は、安定した後に測定した水位であり、移動床は通水後の断面である。

4.3 副ダムにおける跳水

跳水とは、流れが射流から常流に移り変わるときに、表面に渦を発生しながら急激に水深が増加する現象である。

一般に砂防ダム前庭部において副ダムを用いた場合の跳水の形態は強制的な跳水と考えられる。跳水の内部にシルまたはバップル・ピア (跳水を起こすための補助構造物) を置き (図-4.2)、これに動水圧を分担させて、跳水の下流側水深の減少及び跳水長の短縮をはかるのが強制的な跳水の目的である。シル

またはバッフル・ピアの形、及び跳水内部に置かれる位置によって、跳水の下流側水深や流況は種々に変化する。Rajaratnam (ラジャラトナム) はこれを図-4.3 に示すような6つの型に分類した。1型はシルの高さが小さく、 x_0/L が比較的大きい場合で、跳水形状は通常の跳水の場合と大差ないタイプである。ここに、 x_0 は跳水始端からシルまでの距離、 L は水平水路の跳水長である。2型はシル高を高めた場合で、シルはせきの作用をし、2*型の場合は自由越流、2型の場合はもぐり越流のタイプである。3型はシルを上流に移動した場合で、シルの下流側には、もぐり跳水に類似した水平渦が形成される。4型はさらに x_0/L を小さくした場合で、3型に類似しているが、水面隆起は大きくなり、シル上流側の水平渦の発達が不十分になる。5型(図-4.3には示されていない)は不安定領域であり、3ないし4型と6型の跳水状況が不規則に出現する。シルをある程度以上に跳水始端に近づけると跳水は形成されず、射流がシルに衝突して飛散する。これが6型であり、6*型は下流水深を限界水深よりも小さくした場合である。

今回の実験では、図-4.1(1)に示すとおり副ダム下流水深は限界水深よりも小さくしたがって6*型に当てはまるものと考えられる。

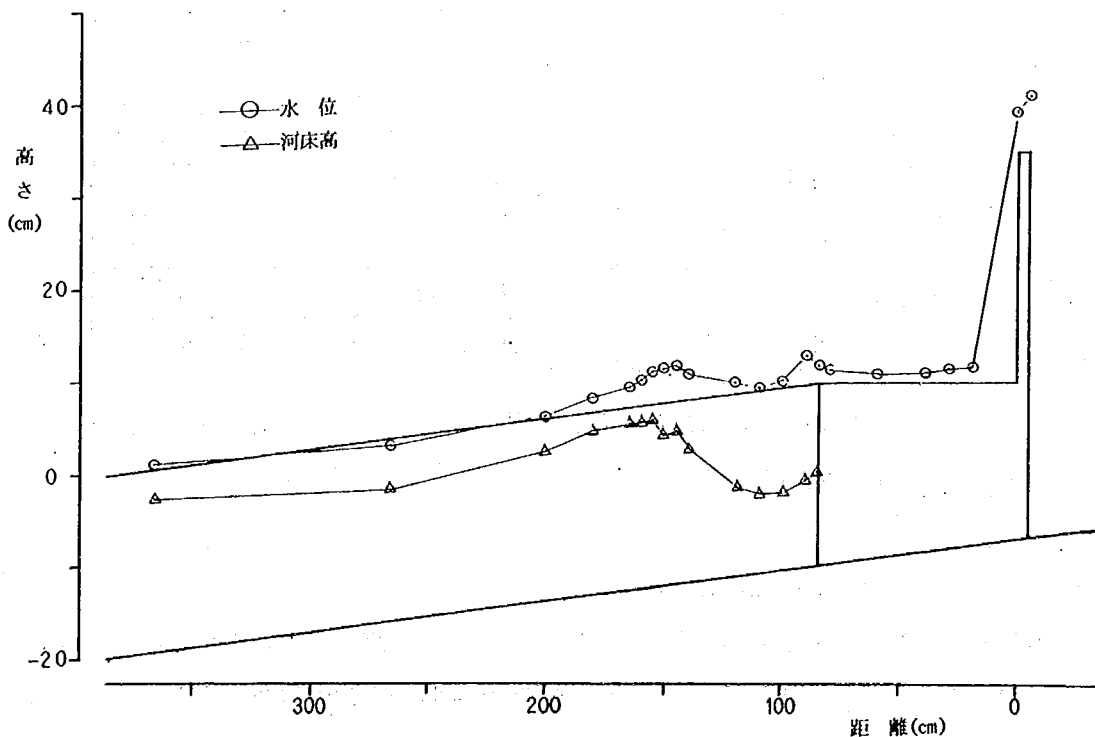


図-4.1(1) 水位及び移動床の縦断面図(ケース1)

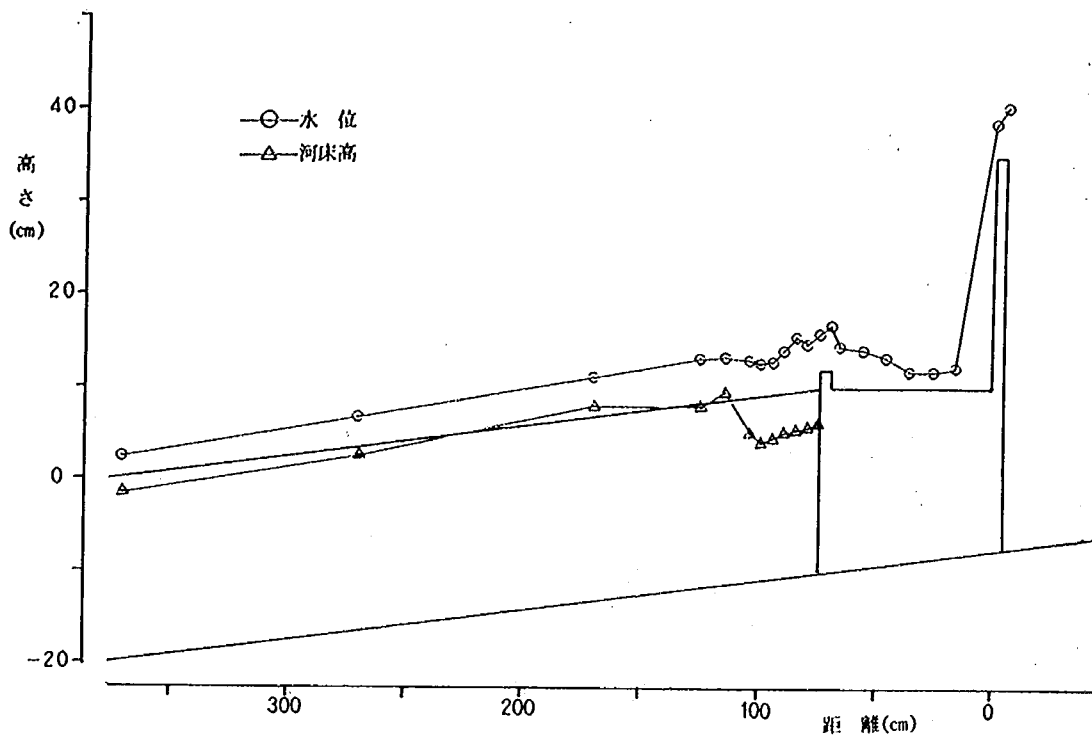


図-4.1(2) 水位及び移動床の縦断面図 (ケース 2)

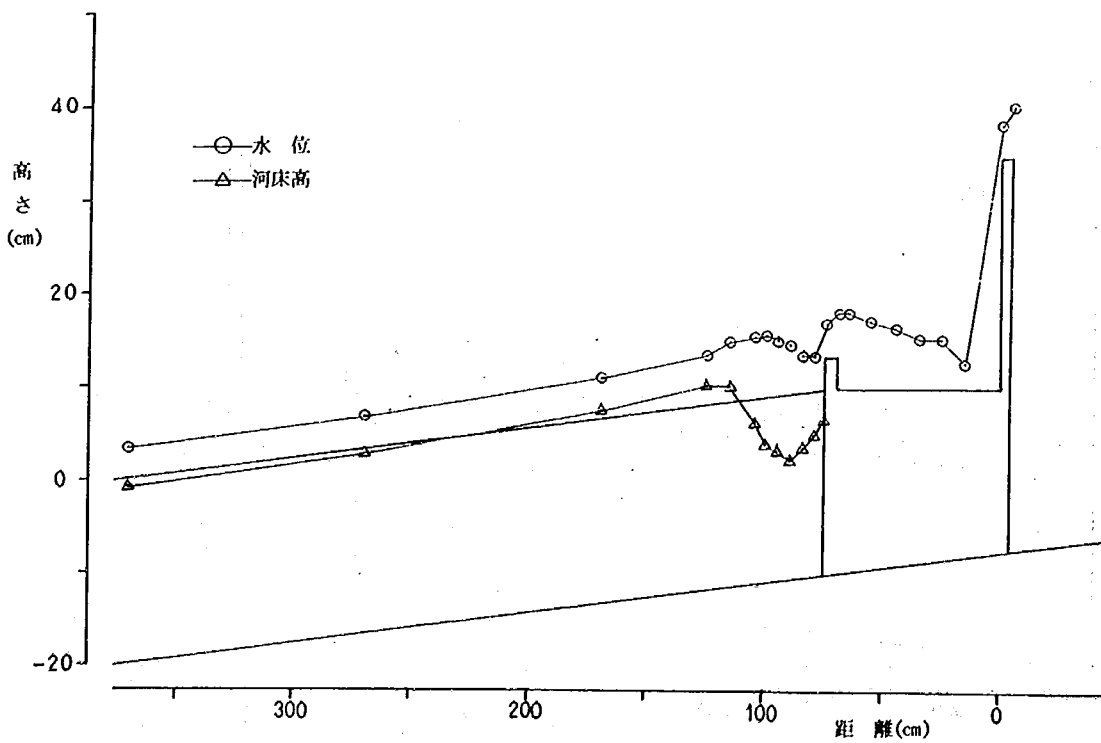


図-4.1(3) 水位及び移動床の縦断面図 (ケース 3)

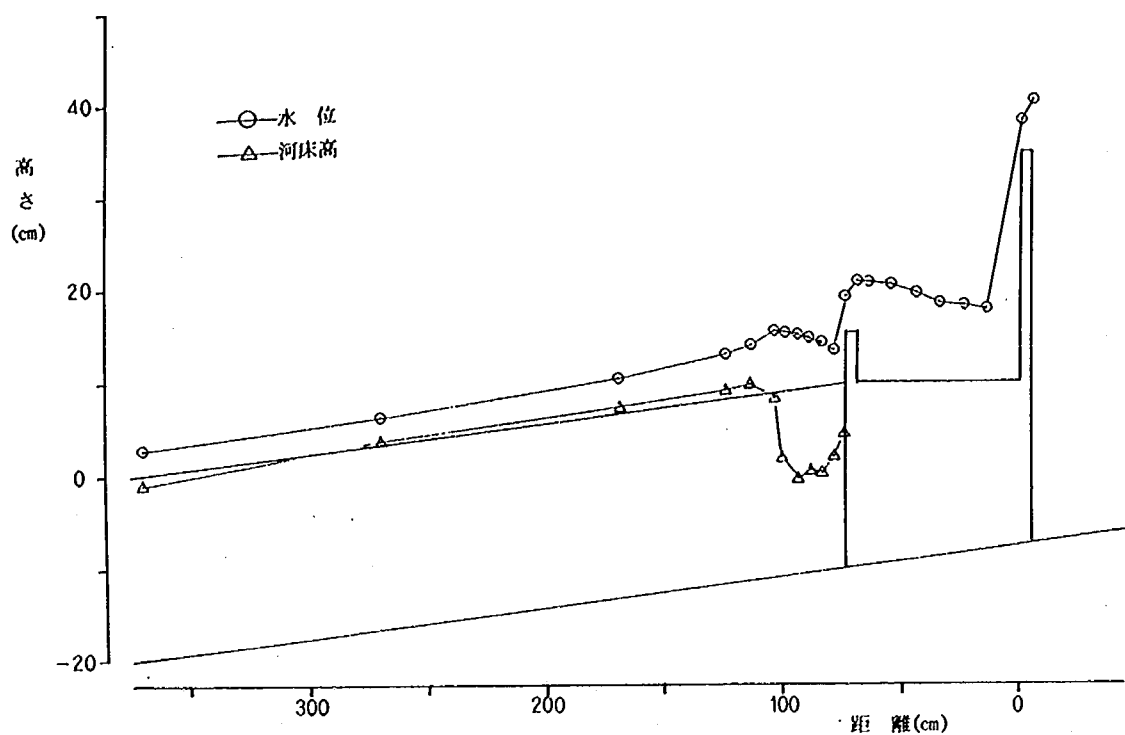


図-4.1(4) 水位及び移動床の縦断面図 (ケース 4)

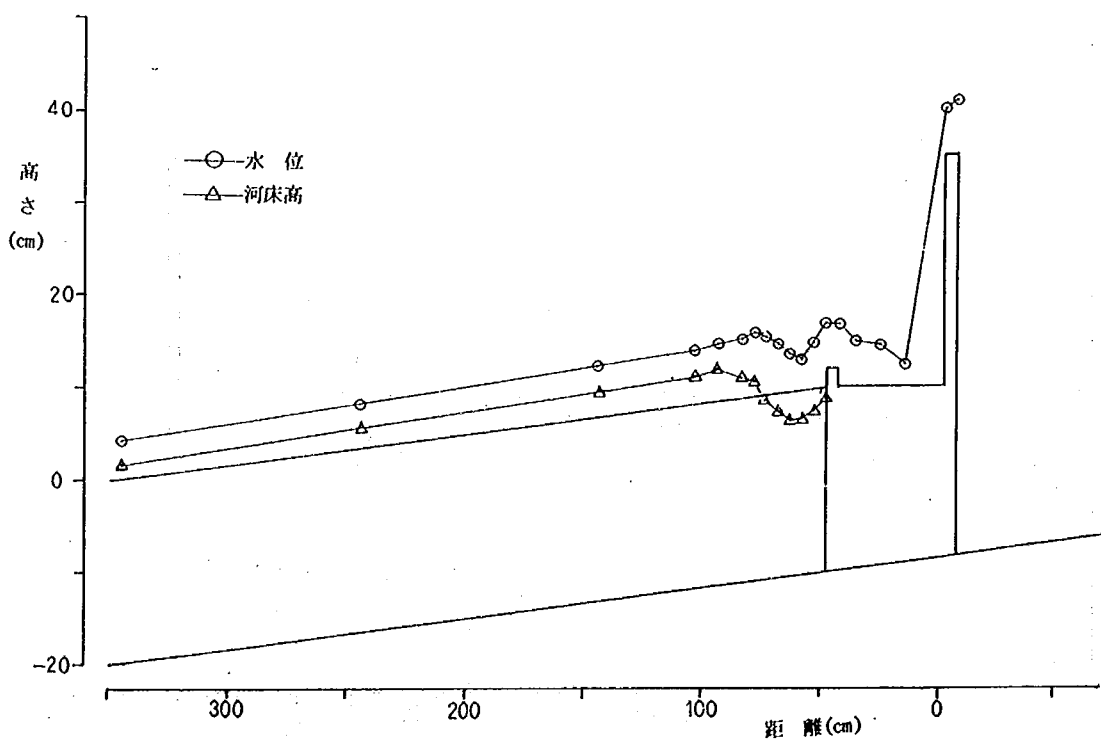


図-4.1(5) 水位及び移動床の縦断面図 (ケース 5)

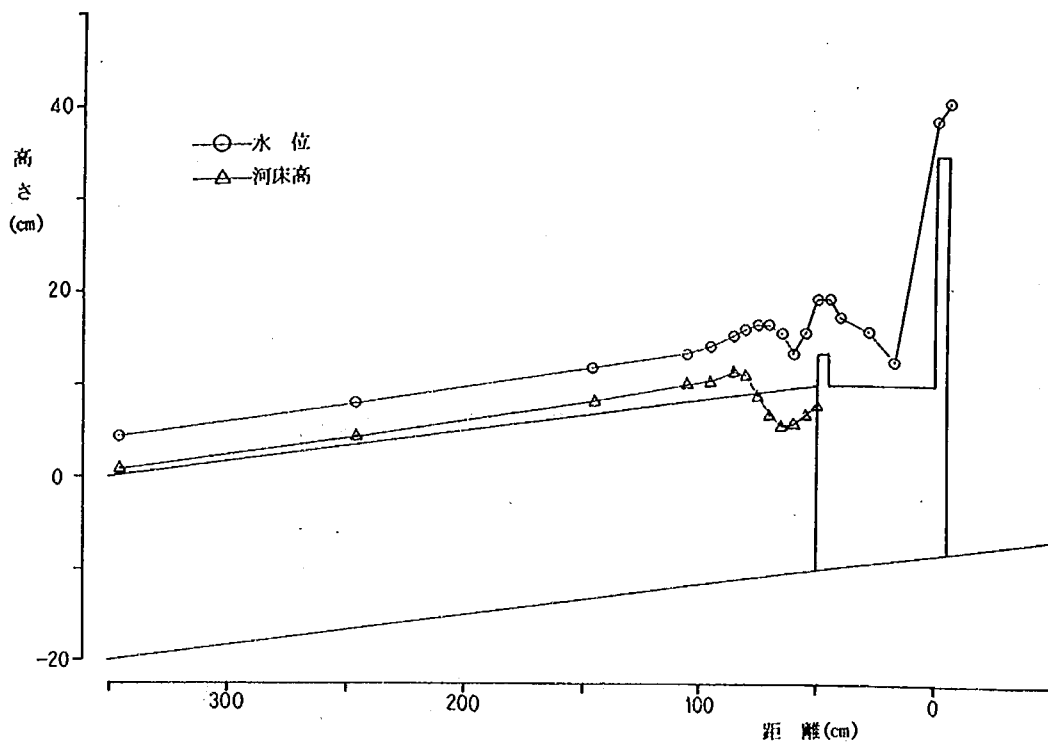


図-4.1(6) 水位及び移動床の縦断面図 (ケース 6)

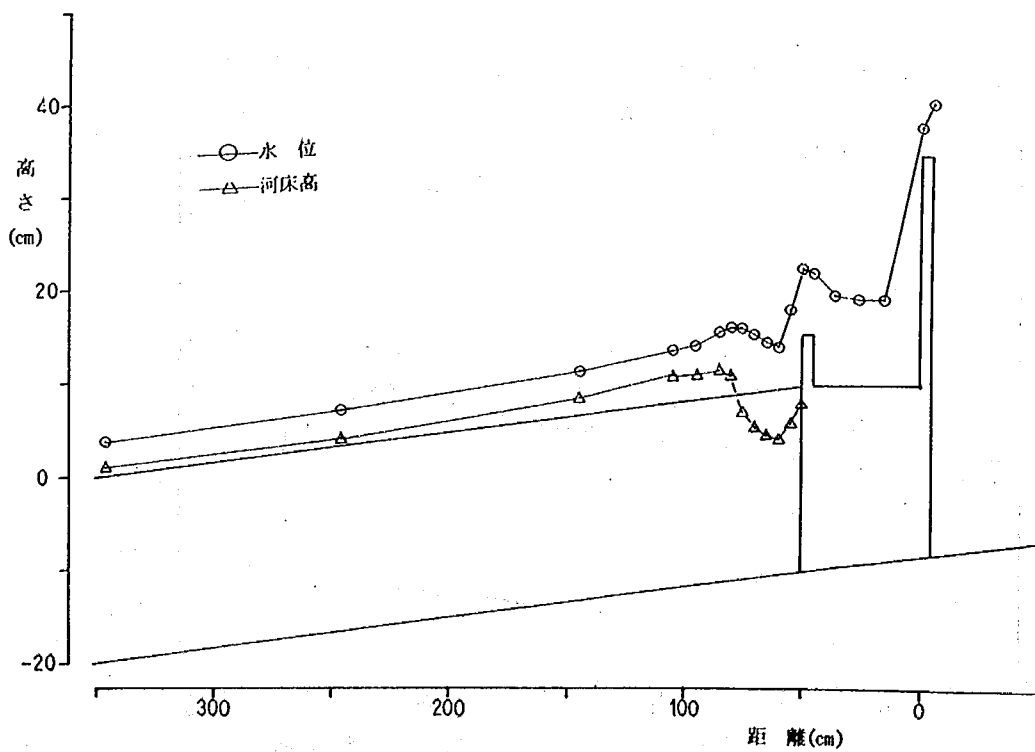


図-4.1(7) 水位及び移動床の縦断面図 (ケース 7)

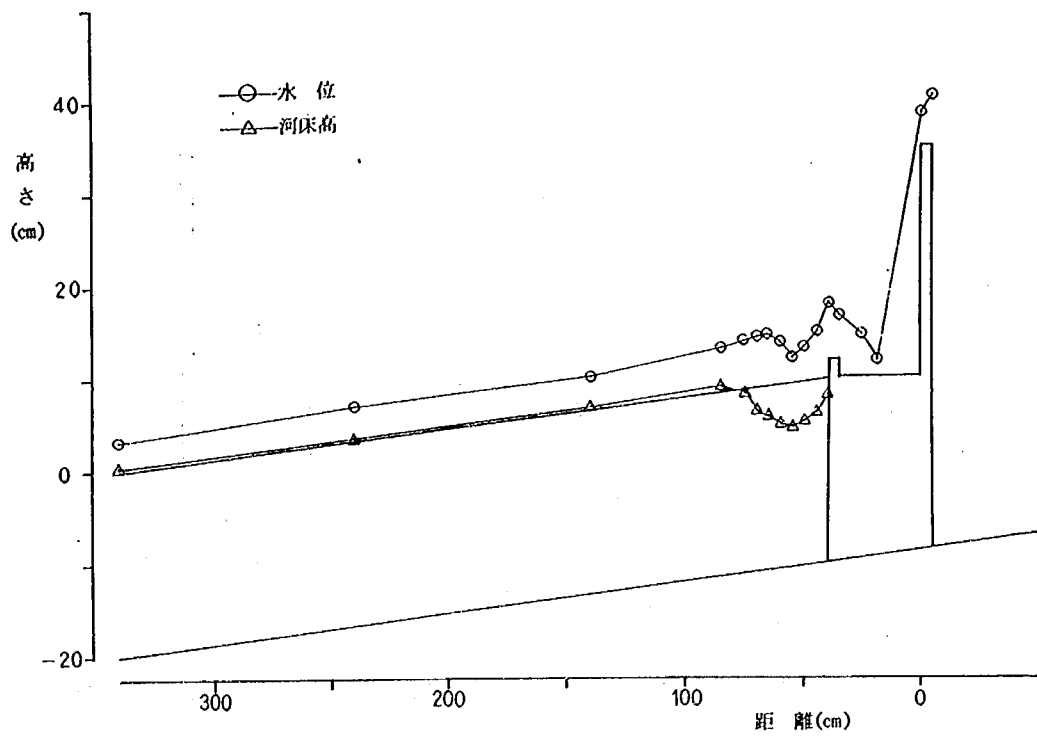


図-4.1(8) 水位及び移動床の縦断面図 (ケース 8)

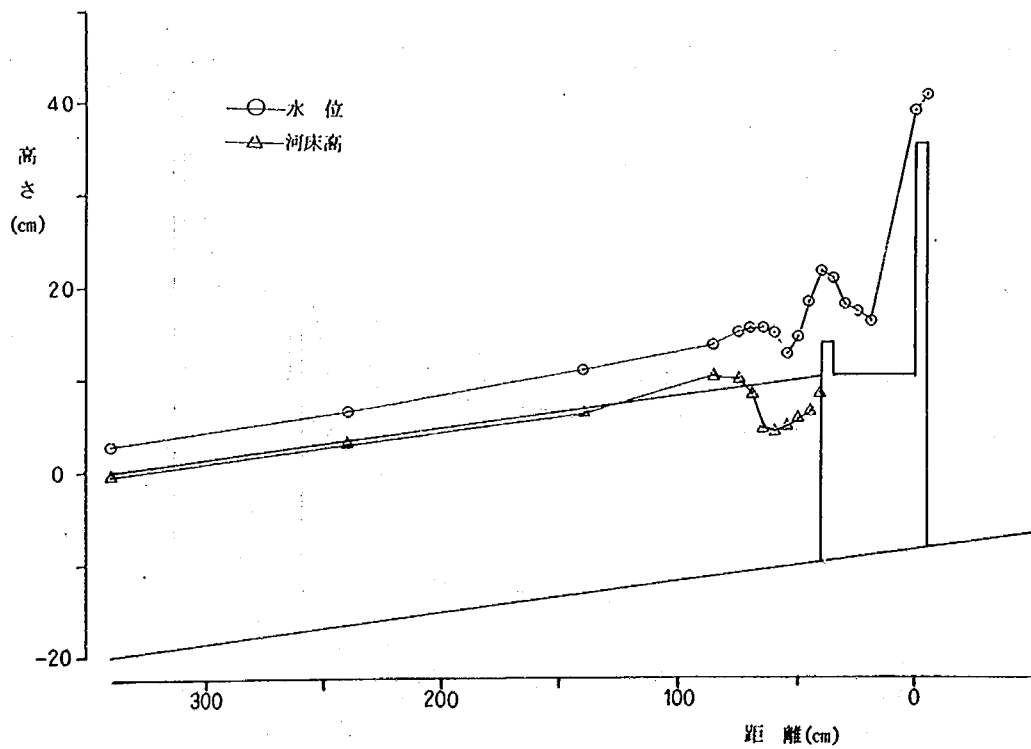


図-4.1(9) 水位及び移動床の縦断面図 (ケース 9)

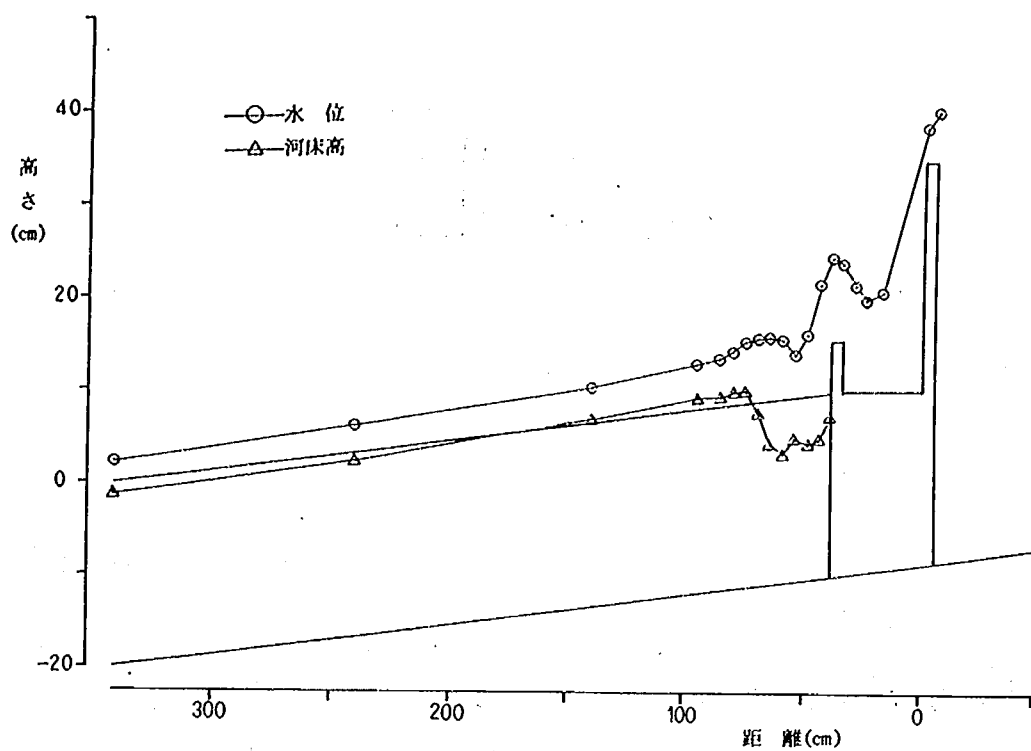


図-4.1(10) 水位及び移動床の縦断面図 (ケース10)

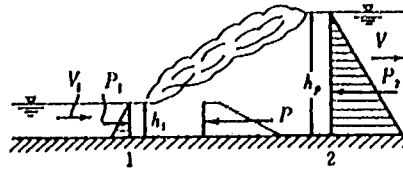


図-4.2 強制的な跳水

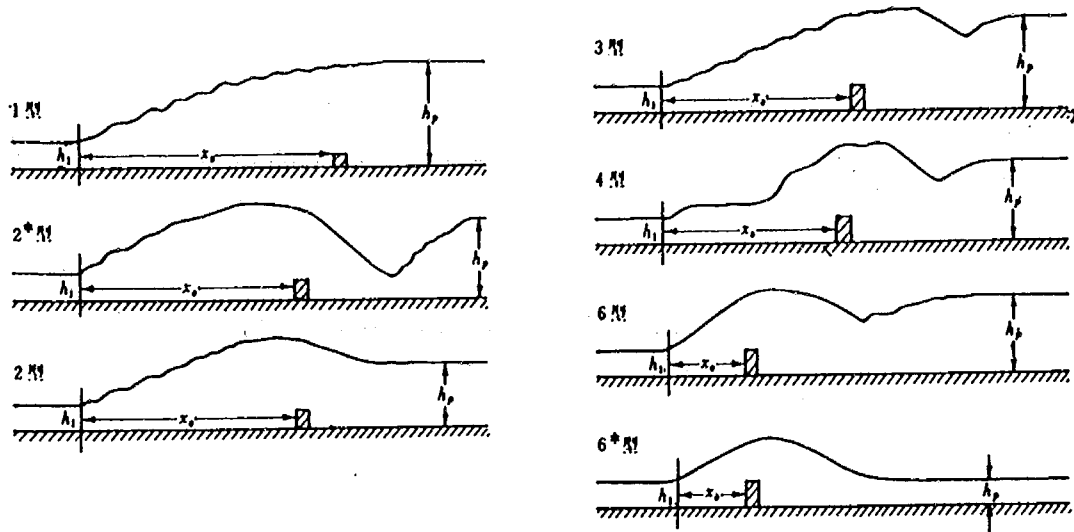


図-4.3 シルによる強制跳水 (Rajaratnam による分類)

4.4 従来の研究との比較

今回の実験結果について、副ダム天端面と河床面を同一の高さにして行った第42回建設省技術研究会「砂防施設の設計、施工に関する研究」¹⁾で報告された前庭保護工に関する実験的研究との比較を行う。以後、この実験を従来の実験（的研究）と呼ぶ。実験条件の違いを表-4.2に示す。

表-4.2 実験条件の比較

	今回の実験	従来の実験的研究
本ダム高	25 cm	15 cm
単位幅流量	40 l/sec	10 l/sec
移動床勾配	1/30	1/70
平均粒径	11.6 mm	3 mm
下流河床面	水叩き天端	副ダム天端

(1) 水叩き長と跳水対応水深

水叩き長は、半理論式で $\ell w + X$ で示される。今回の実験では流量と本ダム高は一定なので、水脈飛距離 (ℓw) は変わらない。また、跳水の距離 $X = \beta \cdot h_{j1}$ において h_{j1} も一定であることから、水叩き長を跳水の距離の係数 β で表す。

ここでは、跳水の発生の程度を検討する目的として h_{j2} の値の変化を検討する。 h_{j2} は副ダム直上流での水深であり水叩き上で完全跳水が起これば計算値 h_{j1} に等しくなる。図-4.4 は、 h_{j2}/h_{j1} （水叩き天端面から副ダムの越流水面までの高さの実測値 h_{j2} と計算値 h_{j1} の比）と β との関係を示したものである。図中の破線は従来の実験的研究において得られた結果を示したものである。従来の研究では、 $\beta = 4 \sim 5$ のとき跳水対応水深

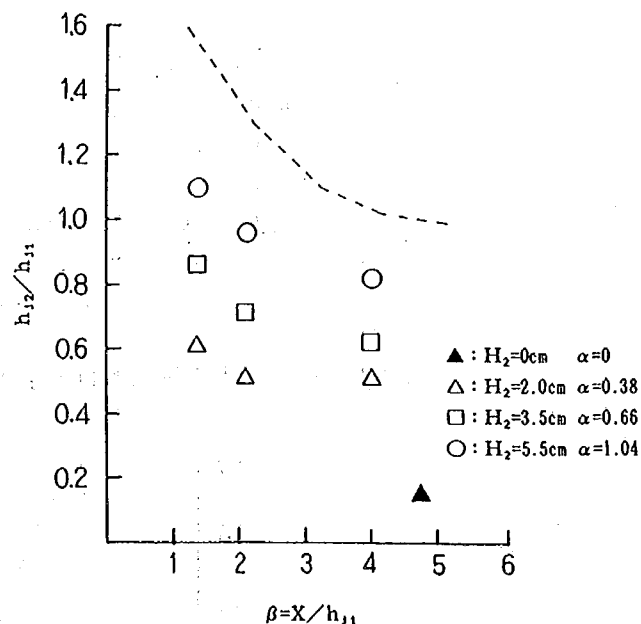


図-4.4 跳水の距離と水叩き天端面から副ダム越流水面までの高さの関係

h_{j1} にほぼ等しい h_{j2} となり、安定した跳水現象を示し、 $\beta = 3$ より水叩き長が短いと水面隆起が顕著になる。今回の実験では、 $H_2 = 3.5, 5.5\text{cm}$ の場合 $\beta = 4$ より水叩き長が短いと h_{j2} は大きくなる。 $H_2 = 2.0\text{cm}$ では、 $\beta = 2$ より水叩き長が長くなると h_{j2} は一定になる。ここで、多くのケースにおいて h_{j2} は理論値 h_{j1} より小さい値をとっている。これは4.3で示したように跳水の形状が6*型であるため完全な跳水が起こらないからである。

(2) 跳水長と最大洗掘深

図-4.5 は今回の実験、図-4.6 は従来の実験的研究の $Z_{smax}/(\sigma/\rho-1)d_m$ (副ダム下流の局所洗掘深の最大値の無次元量) と β との関係を示したものである。ここに、 Z_{smax} : 局所洗掘深の最大値、 σ : 砂礫の密度、 ρ : 水の密度、 d_m : 河床材料の平均粒径である。従来の実験的研究では、 β が 4 より小さいと洗掘深は大きくなり、 $\beta = 4 \sim 5$ の洗掘深の差は小さく β を 5 以上としても洗掘深はほとんど変化しないものとする。従って、半理論式における跳水長 X を求める β の値を 4.5 とすると実用的には Z_s は最小値をとり、経済的な水叩き長を与えられと考えられる。本実験では副ダムの高さに関係なく $\beta = 2$ 付近で洗掘深は最小となり、 β が半理論式で示される値である 4.5 に近い場合には洗掘深は大きくなると考えられる。

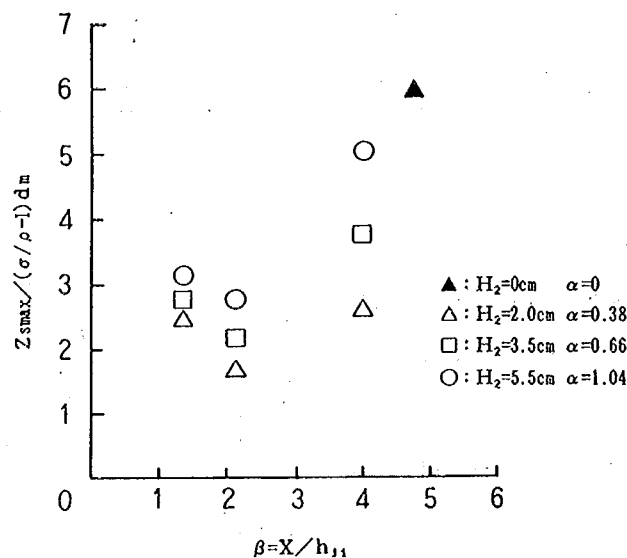


図-4.5 本実験における最大洗掘深と跳水距離の関係

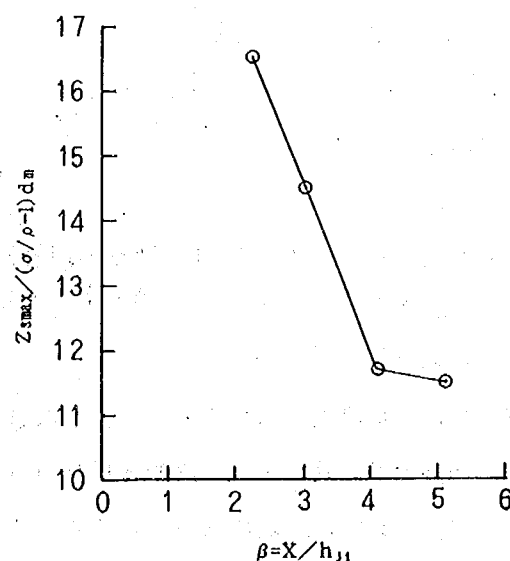


図-4.6 従来の実験における最大洗掘深と跳水距離の関係

(3) 副ダム高と跳水対応水深

図-4.7は、 h_{j2}/h_{j1} と $\alpha = H_2/(h_{j1} - h_{j2})$ （実験に用いた副ダムの高さ H_2 と半理論式で求められる副ダムの高さ $h_{j1} - h_{j2}$ との比）との関係を示したものである。破線で示した従来の実験の結果においては、 α が1に近づくと実測値 h_{j2} は式(2.8)による計算値 h_{j1} に近づき、落下水は減勢されるが、副ダムの高さを式(2.12)による計算値よりも低くすると、 h_{j2} は低くなり、十分な減勢は行われていない。今回の実験でも同様の結果が得られた。

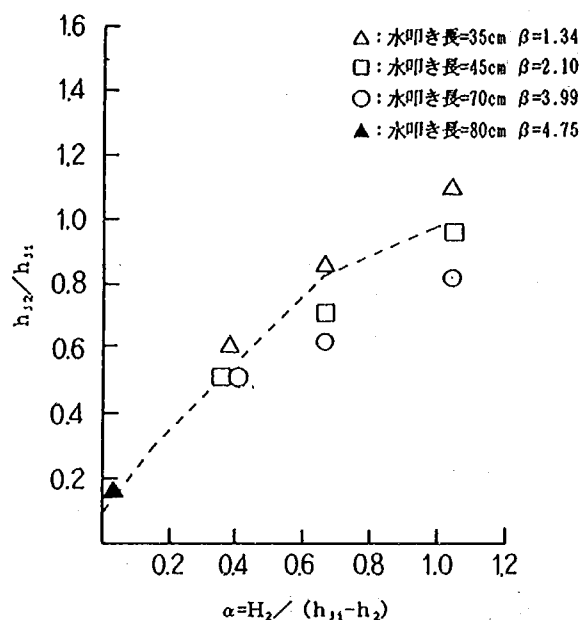


図-4.7 副ダムの高さ h_j の関係

(4) 副ダム高と最大洗掘深の関係

図-4.8は今回の実験、図-4.9は従来の実験的研究の $Z s_{max}/(\sigma/\rho - 1) d_m$ と α との関係を示したものである。従来の実験的研究においては、副ダムの高さが、半理論式による値に比べて低いと、局所洗掘深が大きくなることを示している。今回の実験では、逆に副ダム高が低くなるに従って洗掘深は減少している。また、副ダムがない場合に洗掘が著しく大きくなることは従来の実験結果と同様である。したがって、 $\alpha = 0 \sim 0.4$ の間で洗掘が極小となる副ダム高が存在すると推測される。

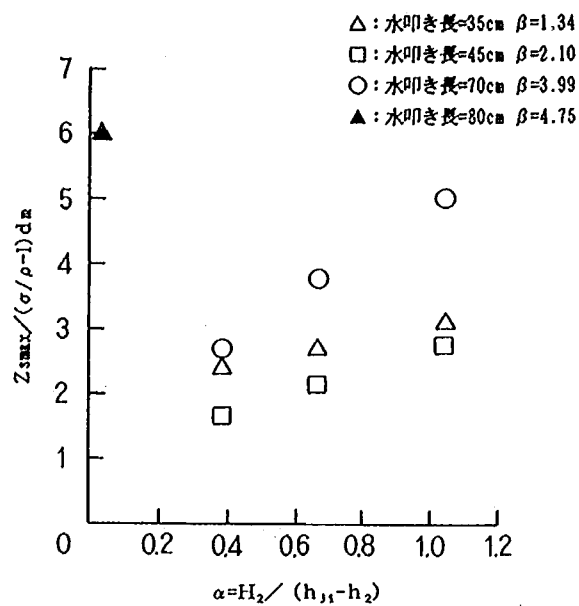


図-4.8 本実験における最大洗堀深と副ダムの高さの関係

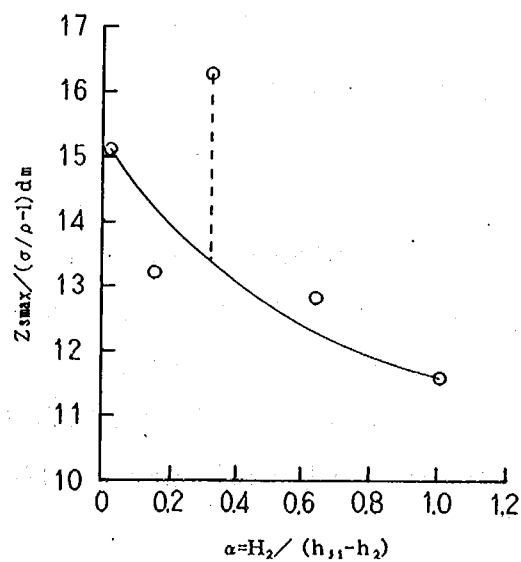


図-4.9 従来の実験における最大洗堀深と副ダムの高さの関係

5. 考 察

従来の実験の結果による副ダム下流洗掘深と水叩き長との関係と今回の実験結果の相違について考察する。

水叩き長は、半理論式では水脈飛距離 ℓ_w と跳水長 $X = \beta \cdot h_f$ ($\beta = 4.5$) で求められる。この跳水長 X において $\beta = 4.5$ は自然跳水における跳水長を与える値である。副ダム下流において常流水深が与えられる場合は跳水長 $\beta = 4.5$ を与えることによって、跳水が起こり本ダムからの落下水脈の減勢効果は期待できる。しかし、今回の実験のように副ダム下流が射流水深である場合には、完全な跳水は起こらず、跳水長を長くすることによる減勢効果は期待できない。一方、副ダム高を一定とした場合、副ダム下流河床の洗掘深は副ダム越流水の水平方向の速度 V_x 、鉛直方向の速度 V_y の合成速度 V に支配されると考えられる。ここで、図-5.1 に V_x と水叩き長 β との関係を示す。この図より、水叩き長を短くすれば、副ダム上越流水深は大きくなり越流流速 V_x は小さくなる。しかし、ここで V_x が小さくなることによる水深の増加とともに流水の位置エネルギーは大きくなり V_y は V_x と逆の傾きをとる。ここで、副ダム下流の水脈落下地点の流下速度 $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ と β の関係を図-5.2 に示す。この図より副ダム高 5.5cm の場合のみであるが、 $\beta = 2.1$ で V は極小値をとる。これは図-4.5 の洗掘と水叩き長の関係とほぼ同じ傾向を示す。このように、副ダム下流の洗掘は、越流水脈の落下地点の流速に左右される。ここでは、水脈落下地点の流速のみで洗掘深との関係の評価したが、実際には、水脈の突入角度、突入地点の水深なども考慮に入れる必要がある。

これまで述べてきたように、下流河床が副ダム天端より低い場合、洗掘深は河床と天端の高低差に相当する位置水頭と速度水頭に支配されることになる。本ダムからの落下水の減勢効果だけで副ダム高を決定することは、副ダム下流の洗掘を考慮した場合適当でない。ここで、副ダム天端上での比エネルギー E と副ダム高 α の関係を調べる。ここで比エネルギーは次式で定義される。

$$E = Z + h + V^2 / 2g$$

E : 比エネルギー、 Z : 位置水頭(副ダムと下流河床との落差)、 h : 副ダム天端での水深、 $V^2 / 2g$: 速度水頭

図-5.3 に示すように、図-4.8 に示す副ダム高と洗掘深との関係と同様の傾向にある。従って、副ダム下流の洗掘深は、副ダム天端上での比エネルギーによって決まると考えられる。今回の実験では、特定の最小値は示されなかったが、実験結果から $\alpha = 0.3$ の近傍で洗掘深は最小値をとることが推測できる。

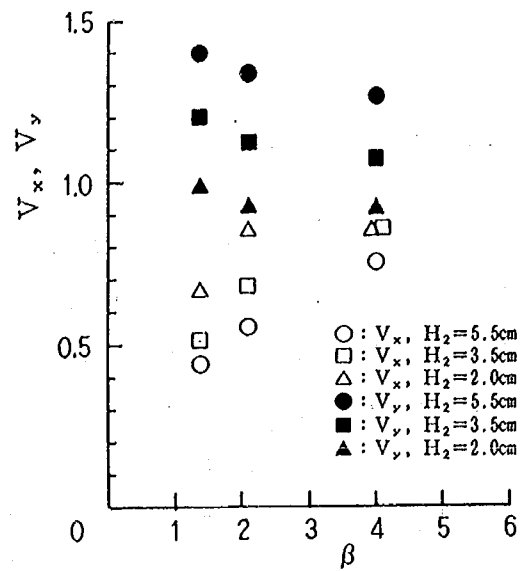


図-5.1 V_x 及び V_y と β の関係

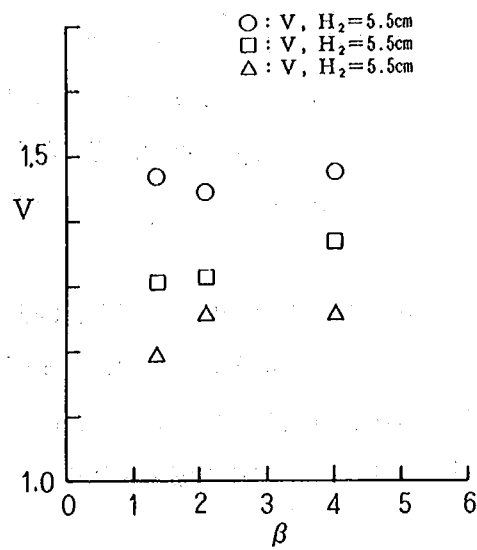


図-5.2 V と β の関係

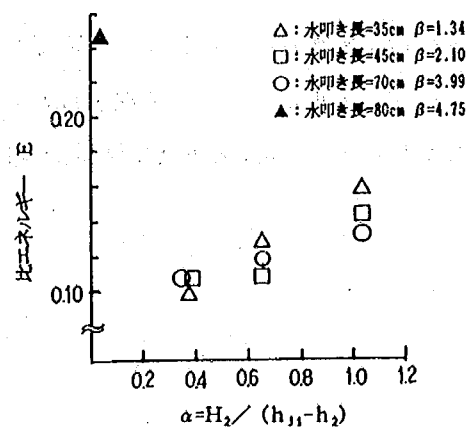


図-5.3 比エネルギー E と α の関係

おわりに

半理論式では、跳水を起こさせる水叩き長として $\beta=4.5$ を与えている。一方、副ダム下流の条件を変えた今回の実験では跳水が起こらない場合であるが、下流洗掘を最小にする水叩き長は $\beta=2$ 付近にある。また、副ダム高について従来の研究では $\alpha=1$ で下流洗掘が小さくなるという結果が得られていたが、今回の実験では、洗掘を最小にする副ダム高はより低いもので良いという結果になった。これは、副ダム下流の河床の高さの違いによって起こり、砂防ダムの設計に当たっては副ダム下流の河床の高さを考慮した設計が必要である。ただし、今回の検討は副ダム下流の河床洗掘を最小にすることのみを検討した場合であり、実際の副ダムには水叩き面の保護の効果も期待されているので、このような場合には別途水叩きの保護効果も考慮して設計する必要がある。

最後に、実験及びとりまとめにあたっては筑波大学農林工学系天田高白助教授より様々な御指導を頂いた。さらに実際に実験をする際には筑波大学環境科学研究科北村兼三氏の協力を得た。記して感謝します。

参考文献

- 1) 建設省：第42回建設省技術研究会、砂防施設の設計・施工に関する研究、砂防ダム前庭保護工の設計
- 2) (財)日本河川協会編：建設省河川砂防技術基準（案）設計編II、PP.13～14
- 3) (財)全国治水砂防協会：改訂版砂防設計公式集（マニュアル）、PP.125～129
- 4) 土木学会編：水理公式集昭和46年改訂版、土木学会、P.296
- 5) 土木学会編：水理公式集昭和46年改訂版、土木学会、P.302

参 考 資 料

(水位・河床高縦断一覽表)

表一 Case 1 水位・河床高縦断一覧表

単位: cm

測点No	通水前河床高	通水後河床高				洗掘・堆積深				水位				水深			
		左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均
50																	
8																	
5	22.1									28.1	28.1	28.1	28.1	6.0	6.0	6.0	6.0
0	22.3(-2.7)									26.7	26.7	26.8	26.7	4.4	4.4	4.5	4.4
-19	-2.0									-0.4	-0.1	-0.4	-0.3	1.6	1.9	1.6	1.7
-30	-1.7									-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	1.5	1.4	1.5	1.5
-40	-1.3									-0.3	-0.1	-0.2	-0.2	1.0	1.2	1.1	1.1
-60	-0.7									0.2	0.2	0.1	0.2	0.9	0.9	0.8	0.9
-80	0.0									1.4	1.3	1.5	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4
-85	0.0									2.0	1.7	2.0	1.9	2.0	1.7	2.0	1.9
-85	0.0					-14.0	-3.0	-12.2	-9.7	2.0	1.7	2.0	1.9	16.0	4.7	14.2	11.6
-90	0.0					-15.2	-4.3	-11.3	-10.3	3.9	1.2	4.7	3.3	19.1	5.5	16.0	13.5
-100	0.0					-15.1	-9.2	-9.8	-11.4	1.3	-1.9	2.4	0.6	16.4	7.3	12.2	12.0
-110	0.0					-9.8	-12.9	-10.5	-11.1	-0.7	1.2	-0.2	0.1	9.1	14.1	10.3	11.2
-120	0.0					-12.2	-10.0	-7.7	-10.0	0.0	3.0	0.6	1.2	12.2	13.0	8.3	11.2
-140	0.0					-7.3	-3.1	-5.7	-5.4	2.3	3.5	3.0	2.9	9.6	6.6	8.7	8.3
-145	0.0					-3.5	-3.0	-3.5	-3.3	3.5	4.4	3.7	3.9	7.0	7.4	7.2	7.2
-150	0.0					-3.2	-3.0	-4.2	-3.5	4.0	2.5	4.3	3.6	7.2	5.5	8.5	7.1
-155	0.0					0.8	-3.0	-2.5	-1.6	4.0	1.8	5.0	3.6	3.2	4.8	7.5	5.2
-160	0.0					0.0	-4.1	-1.0	-1.7	3.1	1.3	4.1	2.8	3.1	5.4	5.1	4.5
-165	0.0					-1.0	-3.0	-1.0	-1.7	2.0	1.3	3.1	2.1	3.0	4.3	4.1	3.8
-180	0.0					-0.7	-4.3	-0.7	-1.9	2.1	0.5	2.3	1.6	2.8	4.8	3.0	3.5
-200	0.0					-5.3	-4.3	-0.9	-3.5	-1.7	0.0	1.9	0.1	3.6	4.3	2.8	3.6
-265	0.0					-2.3	-12.4	-1.5	-5.4	-1.8	-1.4	1.3	-0.6	0.5	11.0	2.8	4.8
-365	0.0					0.5	-9.3	-0.5	-3.1	1.5	-0.1	0.5	0.6	1.0	9.2	1.0	3.7

表一 Case 2 水位・河床高縦断一覽表

単位: cm

測点No	通水前河床高	通水後河床高				洗掘・堆積深				水位				水深			
		左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均
50										27.4	27.5	27.9	27.6				
8										28.3	28.6	28.6	28.5				
5	22.5									28.0	28.0	28.0	28.0	5.5	5.5	5.5	5.5
0	22.7(-2.3)									26.4	26.5	26.4	26.4	3.7	3.8	3.7	3.7
-17	-1.8									0.0	0.8	0.4	0.4	1.8	2.6	2.2	2.2
-27	-1.4									0.3	0.3	0.3	0.3	1.7	1.7	1.7	1.7
-37	-1.1									0.6	1.0	0.5	0.7	1.7	2.1	1.6	1.8
-47	-0.8									3.4	0.8	3.5	2.6	4.2	1.6	4.3	3.4
-57	-0.4									4.8	1.3	5.0	3.7	5.2	1.7	5.4	4.1
-67	-0.1									5.1	2.1	6.0	4.4	5.2	2.2	6.1	4.5
-70	2.0									5.1	8.7	6.2	6.7	3.1	6.7	4.2	4.7
-75	2.0(0.0)					-3.3	-4.4	-4.1	-3.9	3.4	10.7	4.0	6.0	6.7	15.1	8.1	10.0
-76	0.0					-3.2	-3.7	-4.4	-3.8	3.2	10.2	3.2	5.5	6.4	13.9	7.6	9.3
-80	0.0					-2.9	-4.4	-4.7	-4.0	2.0	11.5	1.8	5.1	4.9	15.9	6.5	9.1
-85	0.0					-3.1	-4.3	-5.0	-4.1	2.8	11.8	3.3	6.0	5.9	16.1	8.3	10.1
-90	0.0					-3.1	-4.1	-5.6	-4.3	3.2	7.6	3.2	4.7	6.3	11.7	8.8	8.9
-95	0.0					-2.5	-6.9	-4.3	-4.6	3.6	3.7	3.7	3.7	6.1	10.6	8.0	8.2
-100	0.0					-2.0	-9.3	-3.6	-5.0	3.7	3.1	4.2	3.7	5.7	12.4	7.8	8.6
-105	0.0					-0.8	-9.1	-1.1	-3.7	3.8	5.3	4.2	4.4	4.6	14.4	5.3	8.1
-115	0.0					-0.3	2.0	1.1	0.9	4.0	7.1	3.9	5.0	4.3	5.1	2.8	4.1
-125	0.0					0.2	-1.9	0.9	-0.3	4.0	7.2	4.0	5.1	3.8	9.1	3.1	5.3
-170	0.0					1.7	-0.4	2.0	1.1	4.4	4.6	4.1	4.4	2.7	5.0	2.1	3.3
-270	0.0					-0.6	-1.8	0.1	-0.8	3.2	3.1	3.6	3.3	3.8	4.9	3.5	4.1
-370	0.0					-1.2	-3.3	-0.6	-1.7	2.2	2.5	2.0	2.2	3.4	5.8	2.6	3.9

表一 Case 3 水位・河床高縦断一覽表

単位: cm

測点No	通水前河床高	通水後河床高				洗掘・堆積深				水位				水深			
		左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均
50										27.3	27.5	27.7	27.5				
8										28.5	28.7	28.6	28.6				
5	22.5									28.0	28.1	28.1	28.1	5.5	5.6	5.6	5.6
0	22.7(-2.3)									26.3	26.2	26.4	26.3	3.6	3.5	3.7	3.6
-16	-1.8									1.5	0.4	1.1	1.0	3.3	2.2	2.9	2.8
-26	-1.5									3.4	4.3	3.3	3.7	4.9	5.8	4.8	5.2
-36	-1.1									3.6	4.9	4.1	4.2	4.7	6.0	5.2	5.3
-46	-0.8									4.4	7.6	5.2	5.7	5.2	8.4	6.0	6.5
-56	-0.5									4.8	9.0	6.3	6.7	5.3	9.5	6.8	7.2
-66	-0.1									6.9	9.7	7.7	8.1	7.0	9.8	7.8	8.2
-70	3.5									7.1	9.6	8.0	8.2	3.6	6.1	4.5	4.7
-75	3.5(0.0)					-3.1	-3.7	-3.1	-3.3	5.8	8.5	6.7	7.0	8.9	12.2	9.8	10.3
-76	0.0					-2.4	-4.5	-2.2	-3.0	4.0	7.2	5.4	5.5	6.4	11.7	7.6	8.6
-80	0.0					-4.2	-6.3	-4.3	-4.9	3.3	4.5	3.2	3.7	7.5	10.8	7.5	8.6
-85	0.0					-4.9	-8.2	-5.2	-6.1	3.9	3.8	4.5	4.1	8.8	12.0	9.7	10.2
-90	0.0					-5.7	-9.8	-6.1	-7.2	5.3	5.3	5.5	5.4	11.0	15.1	11.6	12.6
-95	0.0					-5.0	-8.9	-6.0	-6.6	5.7	5.7	6.2	5.9	10.7	14.6	12.2	12.5
-100	0.0					-3.0	-7.4	-4.9	-5.1	6.2	6.6	6.9	6.6	9.2	14.4	11.8	11.8
-105	0.0					-0.3	-5.5	-1.9	-2.6	6.5	6.9	7.0	6.8	6.8	12.4	8.9	9.4
-115	0.0					1.6	0.7	2.7	1.7	5.4	7.3	6.8	6.5	3.8	6.6	4.1	4.8
-125	0.0					2.0	1.3	2.8	2.0	5.3	5.4	5.6	5.4	3.3	4.1	2.8	3.4
-170	0.0					0.8	0.1	1.4	0.8	4.4	4.7	4.2	4.4	3.6	4.6	2.8	3.7
-270	0.0					-1.1	0.3	-0.5	-0.4	3.0	3.8	3.5	3.4	4.1	3.5	4.0	3.9
-370	0.0					-0.6	-1.0	-0.5	-0.7	3.5	2.9	3.2	3.2	4.1	3.9	3.7	3.9

表一 Case 4 水位・河床高縦断一覧表

単位: cm

測点No	通水前河床高	通水後河床高				洗掘・堆積深				水位				水深			
		左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均	左岸	中心	右岸	平均
50										27.3	27.4	27.7	27.5				
8										28.4	28.5	28.6	28.5				
5	22.5									28.0	28.1	28.0	28.0	5.5	5.6	5.5	5.5
0	22.7(-2.3)									26.1	26.2	26.2	26.2	3.4	3.5	3.5	3.5
-16	-1.8									5.5	6.7	5.5	5.9	7.3	8.5	7.3	7.7
-26	-1.5									6.3	6.8	7.1	6.7	7.8	8.3	8.6	8.2
-36	-1.1									6.8	8.2	7.5	7.5	7.9	9.3	8.6	8.6
-46	-0.8									8.2	9.6	8.9	8.9	9.0	10.4	9.7	9.7
-56	-0.5									9.6	11.3	9.5	10.1	10.1	11.8	10.0	10.6
-66	-0.1									9.9	11.8	10.4	10.7	10.0	11.9	10.5	10.8
-70	5.5									10.3	11.6	10.6	10.8	4.8	6.1	5.1	5.3
-75	5.5(0.0)					-4.7	-7.4	-4.5	-5.5	8.8	10.1	9.0	9.3	13.5	17.5	13.5	14.8
-76	0.0					-5.2	-8.0	-5.2	-6.1	7.4	8.9	6.7	7.7	12.6	16.9	11.9	13.8
-80	0.0					-6.1	-10.5	-6.8	-7.8	3.7	4.5	3.6	3.9	9.8	15.0	10.4	11.7
-85	0.0					-8.5	-12.4	-7.3	-9.4	4.4	5.1	5.1	4.9	12.9	17.5	12.4	14.3
-90	0.0					-7.8	-13.0	-7.4	-9.4	5.3	5.4	5.4	5.4	13.1	18.4	12.8	14.8
-95	0.0					-8.7	-12.8	-7.2	-9.6	6.0	5.3	6.7	6.0	14.7	18.1	13.9	15.6
-100	0.0					-5.7	-12.6	-2.8	-7.0	6.4	6.4	6.7	6.5	12.1	19.0	9.5	13.5
-105	0.0					1.3	-4.9	1.7	-0.6	6.5	7.2	6.4	6.7	5.2	12.1	4.7	7.3
-115	0.0					1.7	0.3	2.0	1.3	5.3	6.9	5.2	5.8	3.6	6.6	3.2	4.5
-125	0.0					1.1	0.3	1.5	1.0	4.6	5.1	5.1	4.9	3.5	4.8	3.6	4.0
-170	0.0					0.6	0.1	1.0	0.6	3.8	3.8	4.1	3.9	3.2	3.7	3.1	3.3
-270	0.0					-0.5	0.4	0.4	0.1	3.2	3.2	3.0	3.1	3.7	2.8	2.6	3.0
-370	0.0					-0.9	-0.9	-1.4	-1.1	3.0	2.7	2.5	2.7	3.9	3.6	3.9	3.8

砂防ダムの前庭保護工に関する
水理模型実験報告書

ISSN 0386-5878

土研資料 第3017号

平成3年7月(1991)

砂防部砂防研究室 室 長 石 川 芳 治

主任研究員 井 良 沢 道 也

福 本 晃 久

要 旨 砂防ダムの前庭保護工は、砂防ダムの水通し天端からの落下水、落下砂礫による基礎地盤の洗掘防止、落下した流水が現況河川の水理条件に戻るまでの河床低下の防止の目的で設置されるものである。

前庭保護工についての従来の実験的研究においては、副ダム天端が下流の河床面と同じ高さの条件において検討が行われ、水叩き長、副ダム高について半理論式の適用性が確認されている。しかし、実際の砂防ダムにおいては、副ダム天端は河床より高い位置にある場合が多い。そこで、本研究では、河床面を水叩き天端面と同じ高さにし、水叩き長、副ダム高を変化させた実験を行い、副ダム下流の洗掘深に対して適切な水叩き長、副ダム高を求めることを目的とする。

キーワード：砂防ダム、前庭保護工、水理模型実験

郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十一円切
手をはって
下さい。

建設省土木研究所

砂防部砂防研究室 行

茨城県つくば市旭一番地

No. _____

No. _____

配布先住所

配布先氏名

○

土木研究所資料 第 3 0 1 7 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

○