

圖書室印

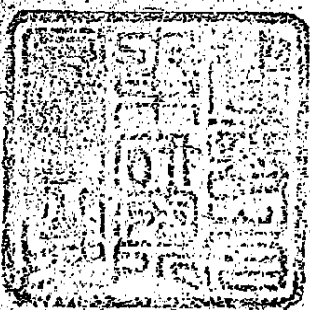
1071-77

土木試驗所報告

第七十一號

溢流堰堤下流部河床洗掘
輕減に關する水理實驗

內務技師 竹 內 俊 雄



昭和十八年七月

內務省土木試驗所

溢流堰堤下流部河床洗掘 軽減に關する水理實驗

内務技師 竹 内 俊 雄

要 旨

溢流堰堤の下流部河床洗掘を軽減するのに必要な工法を求める目的で本實驗を行つた。此の實驗によつて次の諸點を明かにした。

- (1) 水跳ねを用ふる事によつて水叩部直前の河床洗掘は軽減され、而も平均最大洗掘箇所は水叩部より下流に遠ざかる。
- (2) 發電所が河幅の一部を占め堰堤の全幅より溢流させる事が出来ない様な場所に於ては、溢流部と非溢流部との間から下流に向つて掃流堤を突出す事により此の部分の河床洗掘が著しく軽減される。
- (3) 堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形狀如何によつて河床は次の様な洗掘傾向を生ずる。即側壁を用ひて絞ると水束を生じ、階段狀を用ひて絞らないで導くと逆流により渦を生じ、此等水束及渦は右岸寄りの河床洗掘の原因となる。

目 次

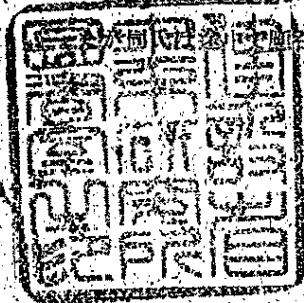
第1部 總 論	(3)
I. 實驗の目的と方針	(3)
(1) 實驗の目的	(3)
(2) 實驗の方針	(4)
II. 堰堤下流部河床洗掘の意義	(5)
(1) 洗 掘 力	(5)
(1) 洗掘力の分類	(5)
(i.) 水束の直接衝擊による岩盤の破壊	(6)
(ii.) 垂直軸渦による洗掘力	(6)
(イ) 發電所前に生ずる垂直軸渦	(6)
(ロ) 堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形狀により生ずる垂直軸渦	(6)
(iii.) 水平軸渦による洗掘力	(6)
(iv.) 掃流による洗掘運搬力	(6)
(2) 洗掘力の大小	(7)
(2) 河床洗掘に影響を及ぼす諸要素	(7)
(1) 下流水位	(7)
(2) 堰堤下流跣端形狀	(9)
(3) 河床材料	(9)
(3) 河床洗掘に對する水跳ね (deflector) の作用	(9)

[4] 河床洗掘程度の判断.....	(10)
第2部 實驗的考察.....	(10)
Ⅲ. 實驗設備と實驗事項.....	(10)
(1) 實驗設備.....	(10)
(2) 流 量.....	(12)
(3) 河床材料.....	(14)
(4) 實驗操作及測定.....	(15)
(1) 實驗操作.....	(15)
(i) 流 量.....	(15)
(ii) 溢流繼續時間.....	(16)
(2) 測 定.....	(16)
(i) 洗 掘.....	(16)
(ii) 流 向.....	(16)
(iii) 水跳ね現象の縦斷形狀.....	(16)
(5) 實驗事項.....	(17)
Ⅳ. 水跳ねの河床洗掘に及ぼす影響.....	(17)
(1) 水跳ねの角度の河床洗掘に及ぼす影響.....	(17)
(1) 實驗裝置と實驗結果.....	(17)
(2) 實驗結果に對する考察.....	(19)
(3) 水跳ねの必要.....	(21)
(2) 水跳ねの有無の河床洗掘に及ぼす影響.....	(21)
Ⅴ. 導流堤の河床洗掘に及ぼす影響.....	(22)
(1) 導流堤の長さの河床洗掘に及ぼす影響.....	(22)
(1) 河床材料に砂を用ひた場合.....	(22)
(2) 河床材料に豆砂利を用ひた場合及河床を固定河床とした場合.....	(24)
(2) 導流堤の方向の河床洗掘に及ぼす影響.....	(25)
(1) 河床材料に砂を用ひた場合.....	(25)
(2) 河床を固定河床とした場合.....	(26)
(3) 導流堤の高さの河床洗掘に及ぼす影響.....	(26)
(4) 導流堤の長さと發電所前の水位との關係.....	(26)
(5) 實驗結果に對する考察.....	(26)
(1) 導流堤の長さ.....	(26)
(2) 導流堤の方向.....	(28)
(3) 導流堤の高さ.....	(28)
(4) 河床洗掘に對する導流堤の作用.....	(28)
Ⅵ. 堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形狀の河床洗掘に及ぼす影響.....	(29)

[1] 取付部形状	(29)
(1) 階段状	(29)
(2) 側壁直線状	(31)
(3) 側壁曲線状	(32)
[2] 取付部形状に対する考察	(32)
(1) 階段状	(32)
(2) 側壁直線状	(32)
(3) 側壁曲線状	(33)
Ⅵ 溢流条件の河床洗掘及流況に及ぼす影響	(33)
(1) 溢流深の相違の河床洗掘に及ぼす影響	(33)
(2) 溢流欄間時間による河床洗掘の変化	(33)
(3) 溢流深と水叩部附近の流況との関係	(35)
(4) 水門一部閉鎖による堰堤下流部流況の変化	(35)
第3部 結 語	(36)

(本実験は横田技師御指導の下に昭和16年5月より昭和17年7月まで行つた。高田技師、佐藤技師よりは種々有益な助言を賜つた。実験には八木技手、高山龍雄君を煩はした。茲に此等各位に對し深甚なる謝意を表するものである。

(本報告中「水跳ねの角度の河床洗掘に及ぼす影響」に関する実験は堀尾山本弘之氏が擔當されたものであつたが、山本氏は途中に他郷に赴かれたので筆者が此所に取り扱めた。)



第1部 總 論

I. 實驗の目的と方針

(1) 實驗の目的

堰堤及其の下流部に亘る全體の模型について洪水時溢流による下流部河床洗掘状態を視測し、河床洗掘を可及的に軽減せしめるに必要な工法を求める目的で實驗を行つた。

本實驗の主要目的は次の3つである。

(1) 水跳ね (deflector) の河床洗掘に及ぼす影響

堰堤を縦斷方向に2次元的に取出した模型につき水跳ねの角度が河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるか實驗により求め、更に堰堤及其の下流部に亘る全體の模型につき水跳ねの有無が河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるかを確かめんとした。

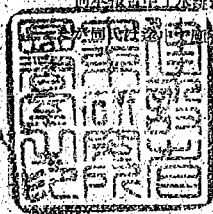
(2) 發電所が河幅の一部を占め堰堤の全幅より溢流させる事が出来ない様な場合に、溢流側に在る水叩部と非溢流側に在る發電所との間から下流に向ひ突出する導流堤の河床洗掘に及ぼす影響

本堰堤の様に發電所が左岸寄りて河幅の一部を占め堰堤の全幅より溢流させる事が出来ない様な地形に在つて

(1) 取付部形状	(29)
(1) 階 段 状	(29)
(2) 側壁直線状	(31)
(3) 側壁曲線状	(32)
(2) 取付部形状に対する考察	(32)
(1) 階 段 状	(32)
(2) 側壁直線状	(32)
(3) 側壁曲線状	(33)
Ⅶ. 溢流条件の河床洗掘及流況に及ぼす影響	(33)
(1) 溢流深の相違の河床洗掘に及ぼす影響	(33)
(2) 溢流継続時間による河床洗掘の変化	(33)
(3) 溢流深と水叩部附近の流況との関係	(35)
(4) 水門一部閉鎖による堰堤下流部流況の変化	(35)
第3部 結 語	(36)

(本実験は横田技師御指導の下に昭和16年5月より昭和17年7月まで行つた。高田技師、佐藤技師よりは種々有益な助言を賜つた。実験には八木技手、高山龍雄君を煩はした。茲に此等各位に對し深甚なる謝意を表するものである。

尙本報世出「水跳ねの角度の河床洗掘に及ぼす影響」に関する実験は堀尾山本弘之氏が擔當されたものであつたが、本報には遂に公開されたので筆者が此所に取觸れた。



第1部 總 論

I. 實驗の目的と方針

(1) 實 驗 の 目 的

堰堤及其の下流部に亘る全體の模型について洪水時溢流による下流部河床洗掘狀態を观测し、河床洗掘を可及的に軽減せしめるに必要な工夫を求める目的で實驗を行つた。

本實驗の主要目的は次の3つである。

(1) 水跳ね (deflector) の河床洗掘に及ぼす影響

堰堤を縱斷方向に2次元的に取出した模型につき水跳ねの角度が河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるか實驗により求め、更に堰堤及其の下流部に亘る全體の模型につき水跳ねの有無が河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるかを確かめんとした。

(2) 發電所が河幅の一部を占め堰堤の全幅より溢流させる事が出来ない様な場合に、溢流側に在る水叩部と非溢流側に在る發電所との間から下流に向ひ突出する導流堤の河床洗掘に及ぼす影響

本堰堤の横に發電所が並列せりて河幅の一部を占め堰堤の全幅より溢流させる事が出来ない様な地形に在つて

は、溢流部と非溢流部との間から下流に向つて此の不連続部に導流堤を出す必要が有るのではなからうか。此の導流堤の有無が河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるかを求めんとした。導流堤を用ふる事によつて河床洗掘が軽減されるとすれば其の長さ、方向、高さ等は如何に決めるのが適當であるかを求めんとした。

(3) 堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形状が河床洗掘に及ぼす影響

堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形状は河床洗掘に對して如何なる洗掘傾向を示すものであるかを求めんとした。

以上の主要實驗によつて洪水時溢流による河床洗掘を可及的に軽減せしめるに必要な堰堤構造物形状を求めた。

次に溢流條件を種々變へてこれが河床洗掘及淤況に及ぼす影響を確かめた。

(4) 溢流深の相違の河床洗掘に及ぼす影響

最大溢流深以外の溢流深に對しても河床洗掘の傾向を確かめんとした。

(5) 溢流繼續時間による河床洗掘の變化

溢流繼續時間を種々變へてこれにより河床の洗掘傾向がどう變るかを求めんとした。

(6) 溢流深と水叩部附近の流況との關係

溢流深を種々變へて水叩部附近の流況を観測せんとした。溢流深の小さい間は潜流を示し、溢流深を増すと或る溢流深で水平水叩部上に於て完全跳水を生じ、更に溢流深を増すと此の水平水叩部の長さでは不足となり射流は水平水叩部を越へこれに續く河床上に於て常流に復する。此等の現象を観測せんとした。

(7) 水門一部閉鎖による堰堤下流部流況の變化

水門を一部閉鎖した場合に堰堤下流部の流況はどう變るかを求めんとした。

〔2〕 實驗の方針

洪水時溢流による河床洗掘實驗を行ふに當り、堰堤構造物形状として河床洗掘に影響を及ぼす諸要素

(1) 水 跳 ね

(2) 導 流 堤

(3) 右岸取付部形状

等は夫々單獨に取出す事が出来、此等の諸要素は河床洗掘に對して互に干渉する事は殆んど無いものと假定して實驗を行った。例へば導流堤の河床洗掘に及ぼす影響を求める際に、水跳ね、右岸取付部形状を夫々或る形状に保ち導流堤のみ長さ、方向、高さ等を種々變へて河床洗掘を可及的に軽減するに必要な導流堤形状を求め、これは水跳ね、右岸取付部形状を夫々別な形状に變へても河床洗掘を可及的に軽減する様な導流堤形状であると假定したのであるが、本堰堤の様に河幅の廣い場所に築造した堰堤に於ては此の假定の成立する事が實驗により確かめられた。

實驗は専ら最大洪水量を對象とした。中位の洪水量によつても最大洪水量と同様な洗掘傾向を生ずるから、此等の組合せによる河床洗掘實驗は行はなかつた。

河床洗掘實驗に於て重大な問題は河床洗掘の對象となる河床材料の選擇である。本堰堤の様に河床が被覆砂礫の多い岩盤の場合には殊に其の選擇が困難である。即ち岩盤がどう破壊され、どう洗掘されるかの問題であり、將來の岩盤の破壊まで假定せねばならぬ事になる。依て筆者は流況による河床材料の移動の難易に應ずる様に次の3種類の河床材料を選定した。

- (i) 固定河床
- (ii) 豆砂利
- (iii) 砂

現在の河床岩盤が破壊されるまでは大體固定河床とした場合に近い流況を示すものと假定して河床をモルタルで固めて実験を行った。將來河床岩盤が大きく剝離した場合の河床洗掘傾向は本実験に於て岩と幾何學的相似に選んだ豆砂利を河床材料に用いた場合の河床洗掘傾向に相當するものと假定した。岩が更に砂礫にまで破砕され河床材料が移動され易い状態になった場合の河床洗掘傾向は本実験に於て砂礫と幾何學的相似に選んだ砂を用いた場合の河床洗掘傾向に相當するものと假定した。

本実験は洗掘状況の比較実験であるから、洗掘傾向が顯著に現れる事を望むのである。依て河床材料としては最も移動され易い砂を用い、豆砂利及固定河床によつて洗掘傾向を確かめるといふ方針を採つた。

河床洗掘の原因となる洗掘力は甚だ複雑であるが、此等の力は現象的に次の4つに大別される。

- (1) 水束の直接衝撃による岩盤の破壊
- (2) 垂直軸周による洗掘力
- (3) 水平軸周による洗掘力
- (4) 掃流による洗掘抵抗力

斯様に洗掘力は複雑であるから、本実験に於ては岩盤の破壊は実験外として河床岩盤に深く隙が入り岩盤としての抵抗力を全然示さない状態の下で岩盤の破壊された大きさを假定し、これを幾何學的に相似に縮めた大きさの砂及豆砂利を河床材料として洗掘実験を行った。実験に河床材料として用いた砂及豆砂利は夫々粒徑が一樣であるが、實際の河床材料の粒徑は非常に廣範圍に亘つて居る。従つて模型実験より河床洗掘を量的に推定する事は甚だ困難な状態に在るが、比較実験によつて質的に論ずる事は可能である。何れの堰堤構造物形狀が河床洗掘を軽減せしむるに有効であるかは解るが、河床洗掘程度が幾何で安定するかは本実験外である。洗掘実験は専ら比較実験の方法による事とした。

實際の河床は場所によつて岩盤の強弱、割れ目等が有り強度は一樣でないであらうが、模型に於てはそれまで再現出來ず、現在の河床の標高に合せて砂或は豆砂利を敷いた。依て河床洗掘の傾向を求めようといふのである。

II. 堰堤下流部河床洗掘の意義

(1) 洗掘力

(1) 洗掘力の分類

洗掘力を求めるには先づ與へられた境界條件で流れ自體の運動が明にされねばならない。次に水と河床材料との間の相對運動の機構が説明されねばならぬ。此の2つを理論的に求めるのが根本問題ではあるが、此所では實驗的な推論にとどめる。

河床材料が洗掘され移動する場合には、洗掘と堆積とが聯關して流況が時局的に急變するので、我々の實驗では河床を固定河床として

圖-1 洗掘力の分類



流れが將に洗掘を始めようとする時の流水の運動をも確かめて置いた。

水自體の運動から言ふと洗掘力は動水壓として一括して考へ可きものであらうが、此所では洗掘現象に注目して洗掘力を次の4つに大別して考へる。(圖-1)

(i) 水東の直接衝突による岩盤の破壊

本堰堤の様に右岸寄りの溢流幅が堰堤下流水叩部幅より大きい場合には、此の部分の洪水時溢流は溢流部右端と堰堤下流水叩部右端とを結ぶ或る形状の側壁に沿ひ導くか、或は右岸溢流部より下流側山腹を削つて階段状として導くかの2方法が考へられる。側壁によつて溢流を導く場合は此の部分の溢流は落下に際し相當絞られ、溢流深が此所で局部的に増大したのと同じ結果となり、写真-67 に見る様に水東となり、他の部分に比べて著しく勢力強く下流に向つて突入して居る。此の水東は低い下流水面を押し分けて河床を攻撃し、河床材料に砂及豆砂利を用ひた場合には、写真-68 及 写真-37 に見る様な洗掘形状を示し、岩盤河床に對する破壊の大きい原因となると思はれる。

(ii) 垂直軸周による洗掘力

(イ) 發電所前に生ずる垂直軸周

堰堤を溢流した水脈が水跳ねによつて抛られ落下した地點には大きい洗掘を生じ、其の洗掘箇所の下流の流速の衰へた場所には、写真-27 に見る様な大きい堆積を生ずる。

此の堆積は時間の経過と共に大きくなり、導流堤の無い場合には水叩部左端前の流れはこれにより一部流向を變せしめられて左岸に向ひ、次いで左岸に沿ひ逆流し、發電所直前を右岸に向ひ、水叩部上に流れ込む大きい垂直軸周即發電所前に循環流を生ずる事になる。(写真-24) 此の傾向は時間が経つにつれて著しくなり、此の爲發電所直前から水叩部左端直前にかけて大きい洗掘を生ずる。

河床が洗掘を受けない固定河床の場合には下流水深が横方向から押すので渦の發生が見られる。写真-40 に示す様に左岸に沿ひ逆流が生じて居る。

以上述べた2つの傾向が存在する爲に、導流堤の無い場合には、写真-20 に見る様に發電所直前から水叩部左端直前にかけて垂直軸周による洗掘を受ける事になる。

(ロ) 堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形状により生ずる垂直軸周

水叩部より下流に向ふ流れの勢力が水叩部幅に一樣に分布して居るならば問題は無いのである。取付部形状を階段状にした場合には此の階段を落下する際に右岸寄りの流勢が局部的に殺滅された事になり、此の爲下流水位は此の勢の弱い所に向つて逆流して渦を生ずる。取付部形状に直接狀側壁を用ひ水東として迎へた場合、水東と右岸との爲す角度が大きいと下流水深を堰堤中心線に直角な方向に押す力が弱められ右岸沿ひの渦の發生を許す事となる。

(iii) 水平軸周による洗掘力

後に述べるが水跳ねを用ひない場合に水叩部直前に生ずる洗掘は専ら水平軸周によるものである。水跳ねを用ひた場合に跳ね上げられた流れが落下した位置の前後に水平軸周を發生し洗掘を生ずる。

發電所前幅の一部を占めて居る本堰堤に在つては水平水叩部直前に於て流れの斷面は急に擴大する事となり、此所で射流は下流水深の爲に横方向から斜に押されて、写真-40 に見る様に跳水を伴ふ振れた斜右岸に向ふ流れとなつて居る。写真-35 の水叩部左端直前より斜右岸に向ふ洗掘は此の振渦によつて生じたのである。

(iv) 掃流による洗掘運動力

水束の直接傾襲及渦によつて生じた早い流速が未だ衰へず残つて居る様な所では河床材料は更に掃流によつて運ばれ、流が最早これ以上運びきれないといふ場所に運搬して来た河床材料は堆積する。

現場の砂礫と幾何学的相似に選んだ砂を河床材料として用ひた場合には、洗掘された河床材料の堆積は洲となつて延び、これによつて本実験に於ては洗掘傾向が明瞭に現はれる。

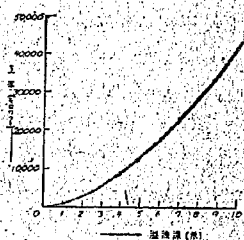
(2) 洗掘力の大小

河床洗掘とは溢流の河床に對して爲す仕事である。依つて河床洗掘に對しては堰堤によつて堰上げられた流れが下流常流水深に復するまでに失はねばならぬ勢力の大小と此の勢力を受ける河床材料の性質の双方及洗掘量となると洪水時間をも考慮せねばならないのであるが、此所では流水の失はねばならぬ勢力にのみ注目する事とする。

溢流が或る落差を落下すれば此の落差に相當する勢力を毎秒必ず失はねばならないのである。此の落差によつて與へられる水頭は堤體面上及堤體面上外で殺滅されるが、河床洗掘の對象となるのは後者である。失はねばならない勢力の中で河床との摩擦によつて消耗される量が幾何であるかを明示する事は出来ないが、本堰堤の際に溢流量及落差の大きい堰堤に於て多量の勢力が失はねばならない事を次に示さう。

流れは連続運動を爲して居るので失はねばならぬ勢力は毎秒當りの仕事の大小即工率の單位キロワットで表はされることになる。水平水叩部單位幅當りの流量、重力による加速度、落差の相乗積で表はされる。此の値を、圖-2 に示す。本堰堤に於ては洪水時堰上げられた流れが下流常流水深に復するまでに必ず失はねばならぬ勢力が如何に大きいかわかるであらう。而も本堰堤地點に於ては洪水時下流常流水深が小さく落差とならないから河床洗掘軽減に對して特に考慮が拂はねばならない明になるのである。

圖-2 洪水時水平水叩部單位幅當り毎秒殺滅せねばならぬ勢力 (キロワット)



[2] 河床洗掘に影響を及ぼす諸要素

(1) 下流水位

堰堤地點に於ける堰堤築造以前の水位流量曲線が測定されて居る。堰堤を建設した場合に洪水時堰堤を溢流落下した射流は堰堤築造以前其の流量に對して示された水位まで水深を回復して常流となる。

幅一様にして水平な底を有する水路に於て或る流量に對して射流水深が與へられた場合に、これに完全跳水を生じさせるのに必要な下流常流水深は次式に依つて計算出来る。

$$h_2 = \frac{h_0}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{q^2}{gh_0^3}} \right)$$

茲に h_2 : 與へられた射流に完全跳水を生じさせるのに必要な下流常流水深

h_0 : 與へられた射流水深

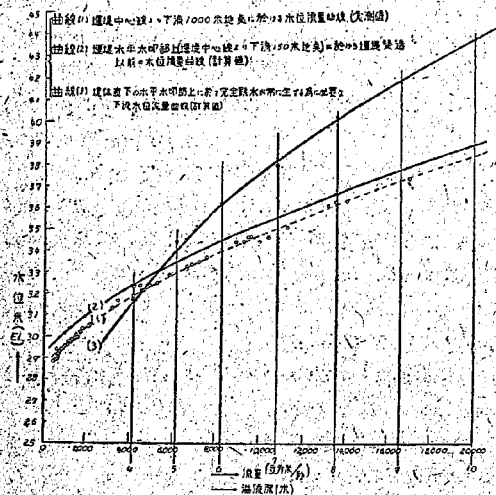
q : 單位幅當りの流量

g : 重力による加速度

本堰堤地點の河幅は水叩部幅よりも大きく水路幅は此所で急増して居り、河床勾配も此所で不連続であるが、幅一様にして底の水平な水叩部上の流況にのみ注目するとして上式を用ひ完全跳水を生じさせるに必要な下流常流水深を計算する。

堰堤を溢流して落下した水脈が水平水叩部上に於て示す射流水深 h_0 を測定し、これに完全跳水を生じさせるのに必要な下流常流水深 h_2 を上式を用いて計算し、此の常流水深 h_2 と流量 q との関係 $q = g(h_2)$ を描くと圖-3 に示す曲線 (3) となる。曲線 (3) は堰堤直下に於て常に完全跳水を生ぜしむるに必要な水位流量曲線である。

圖-3 水位流量曲線



各流量に對して此の下流常流水深が得られるならば堰堤直下の水平水叩部上に於て常に完全跳水を生ずる事を示して居る。

次に模型に於て溢流落下する射流の損失水頭と貨物に於て溢流落下する射流の損失水頭とが相似であるといふ大きい假定の下に h_0 を用いて居る。曲線 (2) は堰堤中心線より下流 1,000 米地點に於ける實測水位流量曲線より水平水叩部上 (即堰堤中心線より下流 150 米地點) の堰堤築造以前の水位流量曲線 $q = f(h_2)$ を推定したものである。 h_2 は測定した下流常流水深を示す。

此等の曲線 (2) と曲線 (3) とを比較して次の事がわかるのである。溢流深約 5 米以下の溢流時には、堰堤を溢流した射流が水平水叩部上で常流に復するのに必要な水深は堰堤築造以前其の流量に對して示された常流水深よりも小さいから落下水脈は直ちに充分な水深の有る下流水深に突入して潜流となる。溢流深が約 5 米を越へると、堰堤を溢流した射流が水平水叩部上で常流に復するのに必要な水深は堰堤築造以前其の流量に對して示された常流水深よりも大きい。即或る流量が與へられるとこれが流下するに必要な下流常流水深は決つてしまひ、此の常流水深に相當する水深まで射流水深は勢力を失つて初めて完全跳水を生ずるのである。此の現象は水平水叩部上で起る事が望ましいのであるが、斯様な溢流量及落差の大きい堰堤に於て洪水時各流量に對し射流をして常に此の上で完全跳水を生ぜしめる爲には相當の長さの水平水叩部を與へねばならぬ事となり、經費の上から實際には困難の様である。従つて射流の勢力を失ひつゝ水深を増加する現象とこれに續く跳水現象とが水平水叩部を越えて河床に於て生ずる事になる。かかる場合に射流は河床に對して洗削を逞しうするのである。而も此の堰堤築造直前から洗削される。故に溢流深が 5 米を越へると我々の場合下流水位は低く河床洗削の恐れが急激に増大するといふ事が此の圖より推察されるのである。

堰堤を溢流して落下した水脈の水平水叩部上に於て示す射流水深 h_0 を計算する方法は未だ明でない様である。依て既に述べた様に模型に於て溢流落下する射流の損失水頭と貨物に於て溢流落下する射流の損失水頭とが相似であるといふ大きい假定の下に測定した h_0 より曲線 (3) を計算して居るのである。落下水脈形状に關する性質が明にされて居ない限り致し方ないと思ふ。溢流が堰堤下流側傾斜面に沿ひ落下する場合働く力の中で重力に比べて摩擦力は無視出来ると一應認察されるのではあるが、我々の行つた総長 $\frac{1}{160}$ の實驗に於ては摩擦力の影響は相當顯著變化した。これに關しては溢流堰堤の堤頂に於ける溢流、堰堤下流側傾斜面に沿ひ落下水脈、跳水等

の一連の現象の模型と實物間の相對關係を考へるのが根本問題ではあるが、本實驗に於ては堰堤上流側水位と下流側水位とを縮尺で縮めたが途中の落下水脈に關しては縮尺 $\frac{1}{160}$ の唯一の場合しか觀測を行つて居ない爲に實驗的にも此の點を明にする事が出来ず以上述べたところの大きい假定を残して居る。

但し模型について曲線 (2) と曲線 (3) との關係より溢流深約 5 米附近に潛流と露出流との境界の有る部分計算上推定されるのであるが、寬真-90, 91 に示される實驗によつても溢流深約 5 米附近に此の境界の有る部分が確かめられた。

我々が以下論じようとする洪水とは溢流深約 5 米以上の場合であるから、下水水位から言ふならば曲線 (5) が曲線 (2) より大きい部分に相當し、溢流量及落差が大きい爲に堰堤を溢流して落下して來た水平水叩部上の射流水深が此の上で常流に復するのに不十分な下流常流水深の存在する場合である。斯様な場合を洪水時下水水位は低いと稱するのである。我々は下水水位の低い場合の溢流堰堤下流部河床洗掘軽減工法を研究しようとするのである。

(2) 堰堤下流趾端形狀

洪水時堰頂を溢流し堰堤下流側傾斜面に沿ひ落下して來た水脈は堰體が基本三角形のままならば直接河床に衝突して堰體の安全に對して最も重要な堰體直前を洗掘する危險がある。依て基本三角形より下流に向つて彎曲部或は水平水叩部を接続して此の落下水脈を導く必要が生じて來る。

此の落下した射流を常流に復するのに充分な下水水深の有る場合即潛流となる場合には彎曲した水承 (bucket) を基本三角形より下流に直接接続し此の方向を轉換する事によつて河床洗掘を軽減する事が出来る。

然し下水水位の低い場合に下水水深を増加する工法を採用しないとすれば、基本三角形より下流に水平水叩部を設けて河床洗掘を軽減する。此の目的は

- (i) 落下水脈が直接河床に衝突する事を防ぎ方向を水平に轉換する
- (ii) 此の上に於ける射流の波勢
- (iii) 洗掘箇所を基本三角形より遠ざける

此の水平水叩部に於て完全跳水が常に生ずるならば河床洗掘は極めて軽減されるのであるが、長い水平水叩部を造る事は經費の上から許されないから、或る長さの水叩部では洪水時跳水はこれより下流の河床上に於て生ずる事となる。此の際水叩部直前が劇しい洗掘を受ける。依て下水水位の低い場合には落下水脈をそのまま跳水せしめず水叩部の先端に水跳ねを附じこれによつて或る角度跳ね上げて堰堤より遠くに抛る工法を採用する。

(3) 河床材料

河床洗掘の對象となるのは河床材料であるから河床洗掘と河床材料とは密接な關係を有する事は言ふまでもない。本堰堤地點の河床は被覆砂礫の少い岩盤である。斯様な場合には如何にして河床洗掘が起るであらうか、河床は前に述べたところの種々な洗掘力を受けるのであるが、岩盤を被ふ砂礫を無視すれば現在の河床岩盤が如何に破壊するであらうかといふ可成り問題となる。岩盤は洪水時溢流によつて直接に或は氣象作用によつて龜裂が入り剥離するであらう。然しながら斯様な岩盤の破壊は模型實驗に於ては再現出来ない。依て岩盤の破壊は實驗外として、河床岩盤に深く隙が入り岩盤としての抵抗を全然示さない状態の下で其の破壊された大きさを假定し、これを幾何學的相似に——形狀は無視し粒徑のみ——縮めた大さの砂及豆砂利を河床材料として用ひ、之を現在の河床の標高に敷き其の洗掘傾向を求める事を主眼目とした。

[8] 河床洗掘に對する水跳ねの作用

水跳ねが特に問題となるのは本堰堤の様に下水水位の低い場合である。水平水叩部を越へた射流は水叩部直前

より河床洗掘を避しうする。斯様な事は堤體に危険であるから、河床洗掘を受ける事は免れられないとしても其の位置を水叩部より遠ざけようといふ目的で水平水叩部の尖端に水跳ねを附し水叩部上の射流を跳ね上げて遠くに抛る。これによつて

(i) 水叩部直前の河床洗掘が軽減される

(ii) 平均最大洗掘箇所が水叩部より下流に遠ざかる

といふ良い結果が得られる。

〔4〕 河床洗掘程度の判断

水跳ねの角度の河床洗掘に及ぼす影響に関する諸實驗(寫眞-12, 13, 14, 15, 16)に於て此等相互の河床洗掘程度を比較するのに次の方法が考へられる。

(i) 平均最大洗掘箇所の深さ

(ii) 水叩部より平均最大洗掘箇所への距離

(iii) 平均最大洗掘箇所の深さと水叩部より平均最大洗掘箇所への距離との比

河床洗掘寫眞を見ると左右岸沿ひに大きい洗掘を生じて居るが、此の場合には堤體を2次元的に取出して河床洗掘を研究するのが目的であるから此の點には觸れず、此の影響の及ばないと考へられる中央縱斷方向の河床洗掘状況についてのみ論じ、此所に於ける平均最大洗掘箇所を對象として考へた。

上に述べた河床洗掘程度判断の基準となる3方法の中第1の平均最大洗掘箇所の深さ即洗掘量に關しては模型に於ける河床材料の選擇に於て河床が岩盤である事を無視して居るので貨物に於て洗掘が幾何で安定するであらうかといふ定量的な推定は出来ない。

水叩部より平均最大洗掘箇所への距離に關しては拋物運動が相似であるとすれば大體に於て相似であると考へてよい。

第3の平均最大洗掘箇所の深さと水叩部より平均最大洗掘箇所への距離との比は第1及第2の方法の比であるが、前者は河床材料の選擇に於て上に述べた假定が有るので此の方法は河床洗掘程度判断の基準とはなり得ない。

斯様に堤體を2次元的に取出した模型についても河床洗掘程度の判断には複雑な問題が入つて來るのであるから、堤體全體を取り入れた模型實驗に於ては更に導流堤、右岸取付部形狀等の影響も入り河床洗掘程度の比較が増々困難となつて來る。従つて最も重要な場所である堤體直前に大きな洗掘を生じて居ないものを定性的に良好であると判断するにとどめた。依て河床洗掘程度の判断には其の原因となる洗掘力にまで一應立戻つて考へる事が必要になる。

第2部 實驗的考察

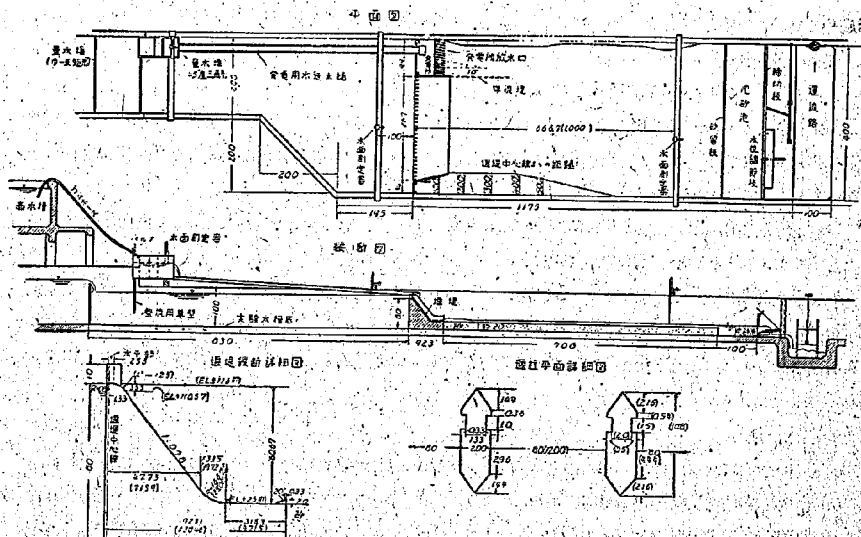
III. 實驗設備と實驗事項

〔1〕 實驗設備

本實驗に用ひた模型は當所赤松分所内幅4米工法試驗池(土木試驗所彙報第2號參照)内に設けた。(寫眞-1, 圖-4)

堤體の全幅と堤體下流水面上南岸に多少の陸地を取入れて實驗する爲模型縮尺は $\frac{1}{160}$ とした。河床は堤體の

図-4 模型実験設備図 (単位: 米)



上下流で概ね直線状をして居るので、模型では直線状として堰堤中心線より上流 300 米、下流 1,200 米を取入れた。堰堤地盤に於ては堤體と同時に河床洗掘に對して問題となる堰堤下流右岸山腹、堰堤下流左岸山腹、發電所放水口等を模型に取入れた。

堰堤より上流の河床は概ね直線状を爲し、此所で考慮すべきは接近流速であるが、本堰堤の様な高堰堤に於てはこれが無視出来るから結局堰堤より上流の地形は大して問題とならぬことになる。

堰堤の上流面は垂直とした。(図-4 堰堤縦断詳細図参照) 堤頂は、EL. 110 米とし、上流側垂直面と EL. 110 米線との間は半径 1.2 米の 1/4 圓弧で結んだ。堤頂部には 3.8 米の水平部を設け、此の水平部の端に頂點を有し 1:0.78 の勾配をなす堰堤下流面傾斜面に EL. 110.67 米に於て接する $x^2=12y$ なる拋物線を挿入した。此の堰堤下流側傾斜面と EL. 25 米の水平水叩部との間を円弧に接する半径 25 米の圓弧で結んだ。水平水叩部の長さは EL. 25 米上で水跳ねを含めて 47.16 米とした。水平水叩部の尖端には 圖-5 に示す様な角度 20° の水跳ねを附した。水跳ねは高さ 8 米、水平部の長さ 8.74 米とし、尖端に長さ 0.5 米の水平部を設けた。

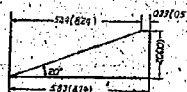
堰堤の溢流幅は 40.2 米、純溢流幅は 39.4 米である。

溢流部には 27 の水門が有り、水門の純徑間 12 米に對して堰堤幅 3 米であるから絞り度は 0.8 になる。

堤體にはモルタルを用ひ面は滑に仕上げた。堰柱は杉材を用ひ 圖-4 に示す様な屏藩を附した。水跳ねには堤體同様モルタルを用ひた。

堰堤下流の河床は概ね直線状をなし、山腹形状は堰堤中心線より下流兩岸とも約 600 米を取入れた。

圖-5 模型に使用した水跳ね詳細図・單位: 米 (括弧内は實物寸法、單位: 米)



洗掘傾向を求める爲に河床に砂或は豆砂利を填充した。此の際山腹に護岸線を假定してそれより河側に河床横断面形状に合せて河床材料を敷いた。尚河床はモルタル仕上げの固定河床としても流況を観測した。

左岸に發電所放水口を取入れ裏物の14の放水口に相落する様に短い導流壁によつて堰堤中心線に直角なる方向より10°右岸に向けて發電流量を放流した。

堰堤中心線より下流1,300米の地點に排水口を設け、此所に在る水位調節板によつて堰堤中心線より下流1,000米の地點の水位調節を行つた。模型の排水口は右岸寄りに設けたが此の位置は流心を變へる程の影響は有して居ない事を實驗により確かめて置いた。

堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形状は圖-14, 15に示す様な種々なる形状について實驗を行つた。主としてモルタル仕上げとしたが改造に容易な爲にゴムネンドも壓を用いた。

堰堤水平水中部左端と發電所との間から下流に向つて導流堤を突出した。導流堤は板で造り長さ、方向、高さ等を種々變へてこれが河床洗掘に及ぼす影響を調べた。導流堤に水平目盛を附し縱斷水位形状の側方からの觀測を容易ならしめた。導流堤の數箇所に硝子を挿入して右岸側より觀測すると其の左右に水位差の有る事が認められる。

〔2〕 流 量

實驗値は重力に關して導いた相似律が成立するものと假定して實物値に換算して記す事とした。但し溢流欄柵時間及河床材料は模型に於ける値を用ひた。

模型堰堤の上流150米の地點に水位計を設置して此所の溢流深が實物の溢流深に相當する様に溢流量を調節した。

圖-6 溢流深と溢流量との關係

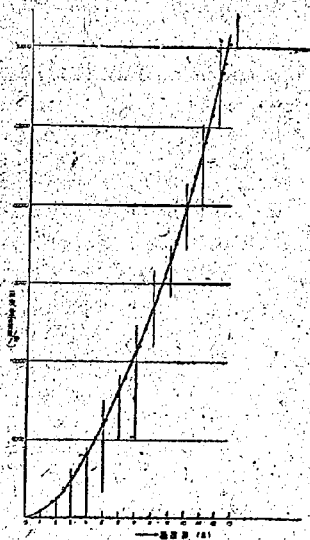
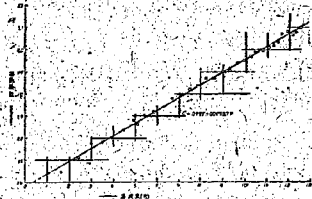


圖-7 溢流深と溢流係數との關係



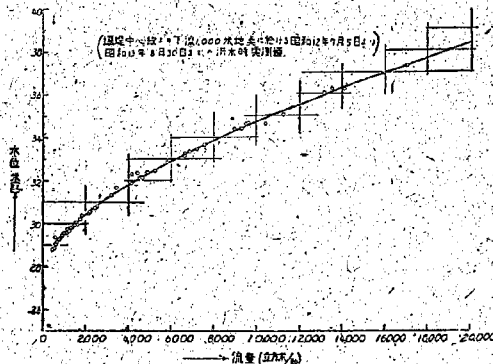
此の溢流深と溢流量との關係を圖-6に示す。これより溢流深と溢流係數との關係を求めると、圖-7に見る様な直線的關係の有る事がわかつた。此等の値を表-1に表示する。河床洗掘實驗の前後に於て溢流深と溢流量との關係を測定した。溢流係數の計算には本堰堤が高堰堤である事を考慮して接近流速を無視した。

模型發電流量 3.59 立/秒を溢流量とは別に、圖-4に示す發電用水送水隨で導いて發電所放水口より放流した。本堰堤水位流量測定地點に於て洪水時實測した水位と流量との

表-1 溢流深と溢流量及溢流係数との関係

実験年月日	実験番號	溢流深 (米)	溢流量 (立方米/秒)	溢流係数	実験年月日	実験番號	溢流深 (米)	溢流量 (立方米/秒)	溢流係数
昭和16-7-3	1	5.13	6,255	1.66	昭和17-5-8	18	3.99	4,134	1.60
	2	5.65	7,807	1.72		19	4.49	5,043	1.64
	3	6.69	9,976	1.78		20	4.95	5,994	1.68
	4	7.50	12,007	1.82		21	5.42	6,944	1.70
	5	8.28	14,426	1.87		22	5.82	7,867	1.72
	6	9.00	16,617	1.90		23	6.32	8,928	1.74
	7	9.63	18,739	1.94		24	7.11	10,995	1.79
	8	10.25	20,916	1.97		25	7.11	10,995	1.79
	9	10.80	22,927	1.99		26	7.89	13,172	1.83
	10	11.31	24,829	2.01		27	8.03	15,335	1.87
	11	11.67	26,716	2.07		28	9.32	17,526	1.90
	12	12.18	28,411	2.06		29	9.95	19,800	1.95
	13	12.67	30,257	2.10		30	10.49	21,853	1.99
17-5-7	14	1.68	1,020	1.45		31	11.10	24,029	2.01
	15	2.45	1,874	1.51		32	11.51	25,710	2.03
	16	3.02	2,673	1.58		33	11.94	27,777	2.08
	17	3.63	3,380	1.58		34	12.33	29,100	2.07

図-8 水位流量曲線



関係を 図-8 に示す。水位と流量とは滑らかな曲線関係が有る。其の値は 表-2 に表示する。

溢流量に發電流量を加へた洪水量に對する水位を 図-8 より求め此の水位に相當する堰二堰堤中心線より下流

表-2 本堰堤水位流量測定地點に於ける昭和12年7月5日より
昭和13年8月30日までの洪水時實測値

實測年月日	水 位 (EL. 米)	流 量 (立方米/秒)	實測年月日	水 位 (EL. 米)	流 量 (立方米/秒)
昭和12 7 5	29.29	709	昭和12 8 20	29.70	1,298
〃 〃 6	29.38	884	〃 〃 21	29.56	1,148
〃 〃 7	29.50	1,034	〃 〃 22	29.61	1,189
〃 〃 8	29.40	910	〃 〃 23	29.75	1,331
〃 〃 9	29.25	782	〃 〃 24	29.89	1,407
〃 〃 10	29.14	692	〃 〃 25	29.69	1,282
〃 〃 11	29.13	670	〃 〃 26	29.83	1,349
〃 〃 12	29.24	763	〃 〃 27	29.84	1,360
〃 〃 13	29.43	927	〃 〃 28	29.72	1,269
〃 〃 14	29.75	1,184	〃 〃 29	29.91	1,510
〃 〃 15	29.53	1,000	〃 〃 30	30.37	1,895
〃 〃 16	29.32	852	〃 〃 31	30.09	1,599
〃 〃 21	28.87	542	〃 9 1	30.15	1,742
〃 〃 23	29.97	1,521	〃 〃 2	30.21	1,824
〃 〃 24	29.39	874	〃 〃 3	30.80	2,600
〃 〃 27	29.00	611	〃 〃 4	30.53	2,204
〃 8 2	32.29	4,182	〃 〃 5	30.22	1,774
〃 〃 3	34.00	10,418	〃 〃 6	29.97	1,642
〃 〃 〃	34.61	9,501	〃 〃 7	29.74	1,307
〃 〃 〃	34.40	9,320	〃 〃 8	29.54	1,091
〃 〃 4	33.16	6,628	〃 〃 9	29.41	907
〃 〃 5	33.20	6,717	〃 〃 10	29.28	886
〃 〃 〃	33.64	7,588	〃 〃 11	29.21	773
〃 〃 6	33.44	7,217	〃 〃 13	29.05	654
〃 〃 7	34.35	10,084	〃 〃 22	28.80	480
〃 〃 〃	35.02	11,187	13 7 14	36.03	13,180
〃 〃 8	35.07	11,248	〃 〃 15	36.21	14,115
〃 〃 〃	34.60	9,635	〃 〃 〃	36.21	13,555
〃 〃 9	33.23	6,035	〃 〃 〃	37.28	17,035
〃 〃 10	32.32	4,431	〃 〃 16	34.36	8,080
〃 〃 11	32.16	4,046	〃 8 21	33.34	6,845
〃 〃 12	32.36	4,892	〃 〃 23	31.88	4,165
〃 〃 13	32.11	4,525	〃 〃 24	31.30	3,205
〃 〃 14	31.52	3,460	〃 〃 26	30.49	2,143
〃 〃 16	30.73	2,477	〃 〃 29	32.84	5,845
〃 〃 18	30.14	1,812	〃 〃 30	32.48	5,220

1,000米の地點の水位調節を行った。

〔3〕河 床 材 料

山腹護岸線より河側に河床材料を 充填した。堰堤中心線より 200, 300, 400, 500 米の 4 箇所に 寫眞-2 に示す様な河床横断面形状に定規を作り、実験毎に河床を此の形状に均し、定規と定規との間は直線的變化を爲すものとした。堰堤中心線より 600 米以下は E.L. 25 米に一樣に均した。固定河床の場合にも同様な方法で仕上げた。寫眞-3 は固定河床の場合出来上り河床に等高線を入れたものである。砂及豆砂利を用いた場合にもこれと同様な河床形状に仕上げたわけである。豆砂利は量不足の爲に寫眞に見る様に堰堤中心線より 600 米までしか填充せず其の下流は流水とした。

模型に於て移動され易い河床材料として砂を選んだ。此の砂の篩分析結果は 圖-9、表-3 に示す。平均粒径を約 0.6 糎とすればこれは實物に於ける徑約 8 厘の礫に相當する。

表-3 同 分 析 表

粒 徑	百 分 率
2.5 糎以下	0.04
2.5~1.2 糎	0.78
1.2~0.6	8.13
0.6~0.3	55.80
0.3~0.15	32.30
0.15~0.075	2.01
0.075 糎以下	0.34

比重 2.70

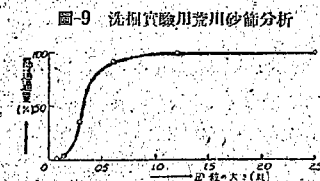


圖-9 洗掘實驗用荒川砂篩分析

模型に於て移動されにくい河床材料として豆砂利を選んだ。此の粒径は 5~7.5 糎であるからこれは徑約 90 厘の岩に相當する。

尙固定河床としても流況を観測した。

模型に於て移動河床材料に砂及豆砂利を用いたのは岩盤が大小に破壊された場合の河床洗掘傾向を求むる爲である。前にも述べた様に模型に用いた移動河床材料は夫々粒径が一樣であり實物と此の點も條件を異にして居る。河床材料は厚さ約 20 厘に敷いた。大きい渦の爲に河床材料が底まで洗掘される事も數回有つたが、此の程度の実験に對しては充分な厚さであつた。

表-4 溢流深と溢流量との關係

た。	溢 流 深		溢 流 量	
	實 物 (米)	模 型 (糎)	實物(立方/秒)	模 型 (立/秒)
実験毎に河床材料は良くかき混ぜて粒径が局部的に不均一になる事を防いだ。 [4] 實驗操作及測定 (1) 實 驗 操 作 (i) 流 量 實物溢流深を縮尺 $\frac{1}{150}$ に縮め、	5	3.33	6,086	16.13
	5.5	3.67	7,084	21.91
	6	4.00	8,208	29.70
	7	4.67	10,688	38.70
	8	5.33	13,478	48.91
	9	6.00	16,585	60.19
	10	6.67	20,012	72.62

模型堰堤を此の溢流深で溢流する様に流量を調節した。溢流深と溢流量との關係を 表-4 に示す。

溢流時には最大流量を爲すものと考へ、破堰所放水口から最大使用水量に相當する模型流量 3.50 立/秒を放流し

た。

溢流量に發電流量を加へた洪水量に對する水位を 圖-8 より求め、此の水位に相當する様に堰堤中心線より下流 1,000 米の地點の水位調節を水位調節板により行つた。此の際下流に於ける渦の發生、河床材料の運搬堆積等の爲に實驗の途中から水位調節地點の水位が變化する事があったが、途中でこれを修正する事はしなかつた。固定河床にした場合には下流に波が相當に立ち水位調節に困難を感じた。

水位調節板により下流排水口を堰止めて靜に河床に一應湛水してから溢流を開始し、實驗の終りには溢流を減じて行くのと並行して下流水位を除々に高めて湛水せしめる等下流の流況の急激に變化するのを防いだ。

(ii) 溢流繼續時間

水位調節板により下流排水口を堰止めて河床に一應湛水して居るところに溢流を開始しこれが概ね定常状態に達した頃下流水位を速に調節し此の時を溢流繼續時間の初めとした。急速に給水を停止しこれと並行して下流水位調節板を堰止めた時を溢流繼續時間の終りとした。

溢流繼續時間は河床洗掘状況の比較によつて検討した。洪水時間は縮尺によつて縮める事が出来るが、河床材料の選擇に於て假定が有るので洗掘量に關しては洪水時間を論ずる事は出来ない。依て本實驗に於ては種々なる溢流繼續時間後の河床洗掘状況を比較し、或る一定の河床洗掘傾向を明に示し而も最も短くて済む溢流時間として 30 分を實驗により求め、河床洗掘實驗に於ては概ね此の溢流繼續時間 30 分に對して洗掘傾向を比較した。

(2) 測定

(i) 洗掘

所定の溢流時間が経過し終ると下流に水を湛へ後徐々に排水しながら水位を下げて水面測定器で水位を測定し一定水位 (EL. 2 米即模型では 1.33 種) を減ずる毎に排水を中斷して水面上に露出した河底の水際線に軟い白線を置いて等高線とし、之に其の高さを記した數字板を置き上方より寫眞に撮つて記録した。

前にも述べた様に河床材料の選擇に假定が有るので、洗掘量に關しては定量的に論ずる事が出来ない。従つて模型に於ける洗掘深 EL. 10 米とは此の洪水時間に對して貨物河床に於て EL. 10 米まで洗掘の生ずる事を意味しない。便宜上貨物に換算した等高線を用ひたに過ぎないものである。實驗は定性的な洗掘傾向を求めようとするに在る。

(ii) 流向

1 種角の白紙片を水面に撒布して流向寫眞を撮つた。此の際露出は 1 秒とし、此の時間内の紙片の動きによつて流向及流速が記録された。

白紙片を用ひない場合には 1 秒よりも短い露出を與へた。泡の動きによつて流向が推知される。

流向寫眞によつて垂直軸渦及旋渦の存在を示す事が出来るが、河床洗掘に大きい影響を及ぼす水平軸渦の存在はこれによつて遺憾ながら認める事が出来ない。

堰裾下流右岸山腹と溢流部との取付部形状による流況の詳細を記録する爲に此の部分の流況を特に寫眞に撮つた。

(iii) 水跳ね現象の縦斷形状

水跳ねを用ひた場合の跳上げ現象の縦斷形状を求める爲に水平目盛りの有る導流堤を背景として側面より寫眞を撮つた。又此の形状を水面測定器によつても測定した。水位は基だ動揺して居るから何れの記録も或る瞬間の形状に過ぎない。

〔5〕 試 験 事 項

本実験の主要目的は溢流による河床洗掘を可及的に軽減せしめるに必要な堰堤造物形状を求める事である。次いで溢流条件を種々變へてこれが河床洗掘及流況に及ぼす影響を確かめた。

- (1) 堰堤構造物形状の河床洗掘に及ぼす影響
 - (i) 水跳ねの河床洗掘に及ぼす影響
 - (ii) 導流堤の河床洗掘に及ぼす影響
 - (iii) 堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形状の河床洗掘に及ぼす影響
- (2) 溢流条件の河床洗掘及流況に及ぼす影響
 - (iv) 溢流梁の相違の河床洗掘に及ぼす影響
 - (v) 溢流継続時間による河床洗掘の變化
 - (vi) 溢流深と水叩部附近の流況との關係
 - (vii) 水門一部閉鎖による堰堤下流部流況の變化

既に述べた様に堰堤構造物形状の河床洗掘に及ぼす影響を求める際に (i) (ii) (iii) の各要素は夫々單獨に取出す事が出来、此等の諸要素は河床洗掘に對して互に干渉しないと假定して實驗を行った。

IV. 水跳ねの河床洗掘に及ぼす影響

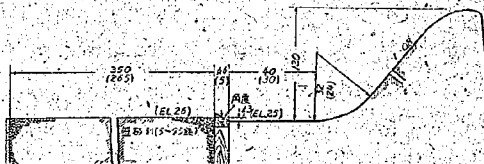
堰堤を縦斷方向に2次元的に取出した模型につき水跳ねの角度が河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるかを實驗により求め、更に堰堤及其下流部に亘る全體の模型につき水跳ねの有無が河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるかを確かめた。

〔1〕 水跳ねの角度の河床洗掘に及ぼす影響

(1) 實驗裝置と實驗結果

本堰堤に於ては河幅が狭く横斷方向に河床が略水平であるから、溢流現象を2次元的に取扱ふ事が出来ると考へられる。依て堰堤溢流部を或る幅程度より取出し、圖-10 に示す様な縮尺 $\frac{1}{76}$ の模型を幅1米の硝子張り工法試驗槽 (土木試験所規程第2號参照) 内に製作し、特に水跳ねの角度の河床洗掘に及ぼす影響を實驗により求めた。

圖-10 模型縱斷圖 單位裡 (括弧内は實物寸法 單位米)

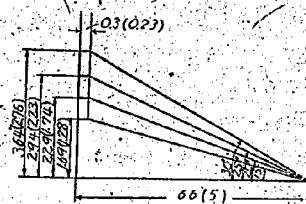


模型にはモデルを用ひた。堰堤下流側

傾斜面は1:0.8の勾配とし、これとE.L. 25米の水平水叩部との間を兩面に接する半徑24米の圓弧で結んだ。水平水叩部は其の長さを一定に保ち水跳ねを含めて35米とした。

水平水叩部の先に水跳ねを附し此の角度 $0^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ の5種類について河床洗掘實驗を行った。圖-11 は此の實驗に用ひた水跳ねの詳細圖である。此の水平部の長さは5米に一定に保ち、其の高さを變へる事により水跳ねの角度を變へた。水跳ねの天端には何れも同長0.23米の水平部を散置した。水跳ねは杉材を用

圖-11 模型に使用した水跳ね詳細圖 (括弧内は實物寸法 單位米)



ひ滑らかな仕上げとした。

河床の標高は現場では相高高低があるが、模型に於ては一律に E.L. 20 米とし、直径 5~7.5 粒の豆砂利を敷均した。此の大きさは貨物に於ける直径約 40~60 厘の岩に相當する。此の一種類の河床材料について洗掘實驗を行つた。寫眞-4 は通水前の河床の形狀を示す。

模型の大きさの關係より水脚は下流 205 米を取入れ、此所に河床材料を敷いて洗掘實驗を行つた。

溢流深は 7.5 米の場合について實驗を行つた。下流水位は堰堤築造以前の水位流量曲線より求めた水位に相當する様に調節した。

溢流継続時間は一律に 30 分とした。

試驗法は硝子張りであるから側方より水跳ねの現象を寫眞に撮る事が出来た。河床の洗掘狀況は洗掘箇所を等高線を入れて比較した。等高線には便宜上水平水叩部 E.L. 25 米を基準とした貨物標高の値を用ひたが、前にも述べた様に河床材料の選別に於て假定があるので其の洪水時間で其の標高まで貨物に於て洗掘される事を示して居るのではない。洗掘傾向を求め洗掘狀況を比較しようといふのである。

實驗は次の 5 種類について行つた。

(i)	水跳ねの角度	0°
(ii)	〃	15°
(iii)	〃	20°
(iv)	〃	25°
(v)	〃	30°

各場合について現象を説明する。

(i) 水跳ねを用ひない場合 (寫眞-5, 6, 7, 12)

下流水深は溢流深 7.5 米で落下して來た射流が常流に復するのに充分な水深ではない。射流は此の長さの水平水叩部に於て完全跳水を生ずる事無く、そのまゝ水叩部を越へて下流に向ひ河床上で劇しく勢力を失ひ下流常流水深に復する。若し河床が硬いモルタルのまゝならば射流は下流常流水深に相當する水深まで勢力を失ひつゝ水深を増加し初めて完全跳水を生ずるが、我々の實驗の様な水平水叩部より移動河床に移る場所では次に述べる様な複雑な流況を呈し、(イ) (ロ) (ハ) に示す様な周期的な變動を繰返す。

(イ) 寫眞-5

射流は水叩部より河床に移るところで上方に向けられ、落下するところには大きい水平軸渦を生ずる。

(ロ) 寫眞-6

射流は下流水深を充分遠くまで押しやり、(イ) の場合に比べて水叩部よりずっと遠くの河床を攻撃する。

(ハ) 寫眞-7

(ロ) の状態で下流水深を充分押しきると、水平方向に向いて居た射流は下に向き始め、水叩部直前の河床を攻撃する。此の狀態が河床洗掘に最も好ましくない。やがて下流水深は再び押し返して來て (イ) の流況に戻るのである。

河床洗掘程度の進行につれて此の周期も増加する事から實驗に於て認められた。

寫眞-12 の河床洗掘狀況を見ると水叩部直前より河床洗掘を生じて居り、而も平均最大洗掘箇所は水叩部に極めて近い。

(ii) 水跳ねの角度 15° の場合 (写真-8, 13)

水跳ねによつて射流が水平より向上に偏倚される角度は餘り大きくないから、此の抛られた流れは其の下側に在る水面を引張り大きい水平軸渦を發生する。これは河床洗掘の原因となる。水跳ね下流側には、写真-8 に示す様な白い部分を生じ、水跳ね下流面に低壓を生ずる恐れがある。

写真-13 の河床洗掘状況を見ると水跳ねを用ひない場合に比べて水叩部直前の河床洗掘は著るしく軽減され、平均最大洗掘箇所は水叩部より下流に遠ざかった。

 (iii) 水跳ねの角度 20° の場合 (写真-9, 14)

水跳ねによつて射流が水平より向上に偏倚される流況にのみ注目すれば水跳ねの角度 15° の場合と殆んど變らない。写真-9 に示す様に抛られた流れは其の下側に在る水面を引張り大きい水平軸渦を發生し、水跳ねの下流面に白い部分を生じて居る。

写真-14 の河床洗掘状況を見ると水跳ねの角度 15° の場合に比べて水叩部直前の河床は殆んど洗掘を受けなくなり、平均最大洗掘箇所が水叩部よりずっと遠くなり、洗掘傾向はむしろ次の水跳ねの角度 25° の場合に近づいた。

 (iv) 水跳ねの角度 25° の場合 (写真-10, 15)

水跳ねによつて水平より向上に偏倚された水脈は水叩部直前の水位とはつきり分離し、此の抛られた流れの下側に下流常流水位より低い水位が存在して居る。写真-10 に示す様に水跳ねの下流面に低壓を生ずる恐れが無く、跳上げられた流れが落下するところでは下流水面を押しわけて大きい水平軸渦を生じて居る。

写真-15 の河床洗掘状況を見ると水叩部直前の水位が安定して來た爲に此所の河床材料が相當の距離殆んど移動しなくなつたのは著るしい特徴である。抛られた流れが落下して大きい水平軸渦を生じて居るところでは河床は劇しく洗掘を受けて居る。平均最大洗掘箇所は水跳ねの角度 20° の場合に比べて水叩部より下流に遠ざかった。

 (v) 水跳ねの角度 30° の場合 (写真-11, 16)

水跳ねによつて水脈が水平より向上に偏倚される流況のみに注目すれば水跳ねの角度 25° の場合と殆んど變らない。写真-11 に示す様に水叩部直前の抛られた流れの下側に下流常流水位より低い水位が存在し、水跳ね下流面に低壓を生ずる心配は無くなり、跳上げられた流れが落下するところでは下流水面を押しわけて大きい水平軸渦を生じて居る。

写真-16 の河床洗掘状況を見ると洗掘傾向は水跳ねの角度 25° の場合と殆んど變らないが、水叩部直前の洗掘を受けない長さが長くなり而も平均最大洗掘箇所が水叩部より更に下流に遠ざかった。

(2) 実験結果に對する考察

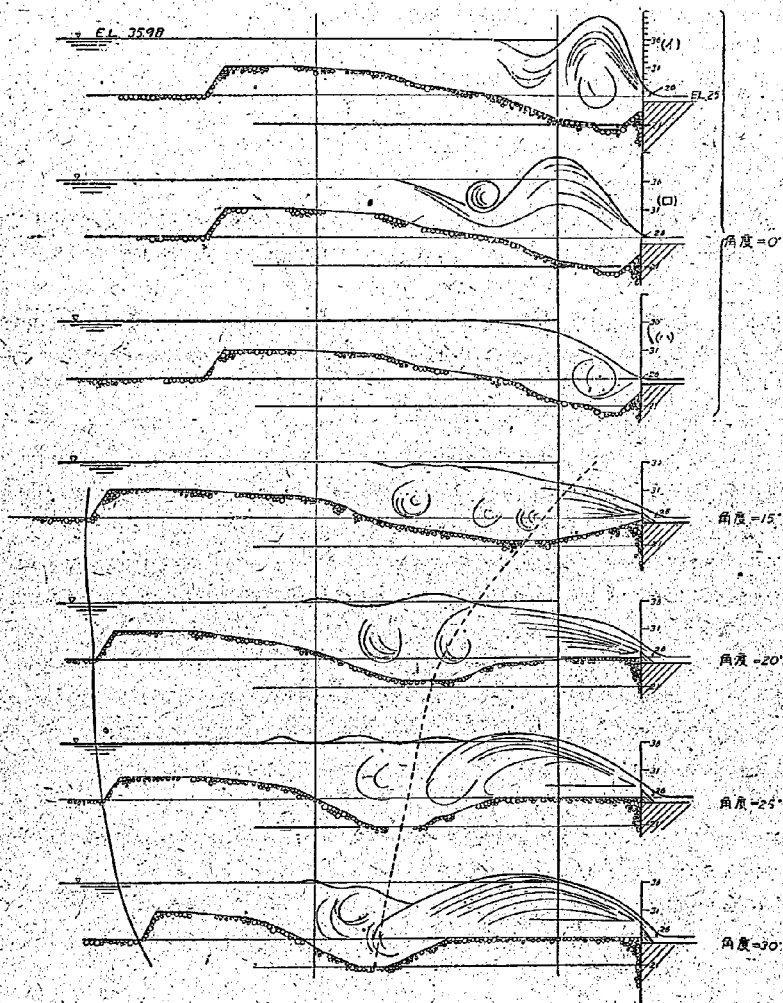
溢流深 7.6 m の溢流の場合に水跳ねの角度が河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるかを求めた以上の 5 実験を次の様に分類して考へることにする。

- | | | |
|-------|--------------|-------------------------|
| (i) | 水跳ねを用ひない場合 | 角度 0° |
| (ii) | 水跳ねの角度の小さい場合 | 角度 15° |
| (iii) | 水跳ねの角度の大きい場合 | 角度 $25^\circ, 30^\circ$ |

水跳ねの角度 20° の場合は (ii) (iii) の中間と見做される。各実験に於ける跳上げ及河床洗掘の状況を 圖-12 に略圖で示す。

(1) 水跳ねを用ひない場合

図-12 種々なる角度の水跳ねによる跳上げ及河床洗掘の状況



- (イ) 流況が甚だ変動する。
- (ロ) 水叩部直前から河床洗掘を生ずる。
- (ハ) 平均最大洗掘箇所は水叩部に近い。
- (ii) 水跳ねの角度の小さい場合
 - (イ) 水跳ねによって抛られた流れは其の下側に在る水面を制限り大きい水平輪渦を發生する。

- (ロ) 水跳ねの下流面に低基を生ずる恐れがある。
- (ハ) 平均最大洗掘箇所が水叩部より下流に遠ざかる。
- (iii) 水跳ねの角度の大きい場合
 - (イ) 水跳ねによつて抛られた流れは其の下側に在る水面と明に分離し抛物運動をして水叩部より遠くに落ち、落下地盤の前後に大きい水平軸渦を発生する。
 - (ロ) 水跳ねの下流面に低基を生ずる恐れは無い。
 - (ハ) 平均最大洗掘箇所が水叩部より更に下流に遠ざかる。

小さい角度の水跳ねを用いた場合の河床洗掘状況 写真-13 と水跳ねを用いない場合の河床洗掘状況 写真-12 とを比較してみる。何れの場合に於ても流量一定にして水平水叩部上の射流水深及下流常流水深は夫々一定に保たれて居るにも係らず、小さい角度の水跳ねを用いた場合の方が水跳ねを用いない場合よりも洗掘された豆砂利が掃流によつて洲となつて延びた長さが長い。洲が延びたとは早い流速が速くまで残つて居た事を意味する。これは射流の持つて居た勢力が下流常流水深にまで殺滅される際に其の流れの方向への殺滅の割合が2つの場合で異なる事を表はすものと考へられる。

勢力は次の2つの方法によつて殺滅されると考へる。

- (イ) 内部摩擦
- (ロ) 河床との摩擦

河床洗掘の對象となるのは(ロ)の河床との摩擦の場合である。水跳ねを用いない場合には 写真-7 に示す様に射流は水叩部近くで河床を劇しく攻撃し勢力は直に消耗してしまふが、小さい角度の水跳ねを用ふと抛られた流れの下側に水平軸渦を発生し、写真-8 に示す様に相當の長さ延び従つて流速の流れの方向への減勢が速くなる。

大きい角度の水跳ねを用いた場合には抛られた流れは一應水叩部直前の水位と明に分離して抛物運動を爲し、落下地盤には大きい河床洗掘を生じ、河床洗掘は此の地盤附近に集中する。従つて角度が大きくなるにつれて水叩部直前の河床洗掘を受けぬ長さは延び、平均最大洗掘箇所の下流側に生ずる洲の延び方は減する傾向を示す。(圖-12)

(3) 水跳ねの必要

以上の考察によつて水跳ねの角度の河床洗掘に及ぼす影響を明にする事が出来た。殊に木堤堰の様に下流水位の低い場合に水跳ねを用ふると次の様な利點の有る事がわかつた。

水跳ねを用ひても用ひなくても河床洗掘は避けられない。又此の實驗では洗掘量について定量的に判別出来なない。然しながら水跳ねを用ふる事によつて

- (i) 水叩部直前の河床洗掘が軽減される。
- (ii) 平均最大洗掘箇所が水叩部より下流に遠ざかる

依て縮尺 $\frac{1}{150}$ の全體を取入れた模型に於ては水跳ねを用ふる事とした。水跳ねの角度を大きくする事によつて平均最大洗掘箇所を水叩部より下流に遠ざける事が出来るが、それによつて水跳ねの構造物としての破損の恐れも増す事を考慮して此所では角度 20° を採用した。

(2) 水跳ねの有無の河床洗掘に及ぼす影響

水跳ねの有無が河床洗掘に及ぼす影響に關して堰堤を横斷方向に2次元的に取出した場合については[1]に於

て詳しく述べたから、此所では全體的模型について水跳ねの有無が河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるかを確かめた。

實驗條件

(イ)	右岸取付部形状	側壁直線狀
(ロ)	溢流深	10 米
(ハ)	溢流継続時間	30 分
(ニ)	河床材料	砂

を一定に保つて導流堤の有無につき河床洗掘状況を比較した。

實驗 30 に於ては導流堤も水跳ねも用ひて居ない。導流堤が無いので 寫眞-17 に示す様な大きい垂直軸渦を發生し、これによつて 寫眞-18 に見る様な發電所直前から水叩部左端直前にかけて大きい河床洗掘を生じて居る。水跳ねを用ひない爲に水平軸渦を生じ、之によつて水叩部直前は河床洗掘を受ける。

垂直軸渦、水平軸渦双方の影響によつて水跳ねを用ひない場合の平均最大洗掘箇所が河所であるか叩部に并出し、程に不規則な洗掘状況を呈して居る。

實驗 32 に於ては導流堤は無いが水跳ねを使用した。導流堤を用ひて居ない爲に 寫眞-19 に示す様に發電所直前に垂直軸渦を生じ之によつて大きい河床洗掘を受ける。水跳ねを用ふる事によつて 寫眞-20 に見る様に水叩部直前の河床洗掘は非常に軽減され、水叩部前の河床洗掘は横斷方向に一様になり平均最大洗掘箇所の位置も實驗 30 に比べてはつきりして來た。

實驗 38 に於ては導流堤は用ひたが水跳ねは用ひなかつた。導流堤によつて垂直軸渦の發生を防止する事が出来たので導流堤の無い場合に比べて 寫眞-21 の河床洗掘状況は安定して來た。水跳ねを用ひて居ない爲に水叩部直前から河床洗掘を生じ、平均最大洗掘箇所も水叩部に近い。

導流堤及水跳ねを併せ用ひた實驗 39 に於ては河床洗掘状況が更に安定して來た。寫眞-22 には流況、寫眞-23 には河床洗掘状況を示す。此の場合の特徴を挙げると

- (イ) 水跳ねを用ふる事によつて水叩部直前の河床洗掘が軽減され、而も平均最大洗掘箇所が水叩部より下流に遠ざかる。
- (ロ) 導流堤を用ふる事によつて發電所直前から水叩部左端直前にかけての河床洗掘は軽減され、而も水跳ねによる河床洗掘状況が横斷方向に一様になつて來る。

以上の 4 實驗によつて水跳ねを用ふる事により水叩部直前の河床洗掘を軽減させる事が出来、導流堤を用ふる事により發電所直前から水叩部左端直前にかけての河床洗掘を軽減させる事が出来るといふ事が明瞭にわかつた。

V. 導流堤の河床洗掘に及ぼす影響

(1) 導流堤の長さの河床洗掘に及ぼす影響

(1) 河床材料に砂を用ひた場合

導流堤の長さの河床洗掘に及ぼす影響を求める爲に先づ河床材料に砂を用ひて實驗を行つた。

実験条件

(イ)	水跳ね	20° 使用
(ロ)	右岸取付部形状	側壁山線状
(ハ)	溢流深	10 米
(ニ)	溢流継続時間	30 分
(ホ)	河床材料	砂

を一定に保ち、導流堤を堰堤中心線に直角に種々な長さ突出し、此の長さが河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるかを一定時間溢流後の河床洗掘状況を比較して考査した。

出験は次の 5 種類について行つた。

導流堤の長さ	実験番号
なし	9
600 米	10
350	11
300	12
250	15

實驗 9 に於ては導流堤を用ひなかつた。溢流を始めてから暫く経過すると水叩部左端寄りの水跳ねによつて抛られた流れが落ちる地點の流向は左岸に向けられ大きい垂直軸渦即 寫眞-24 に示す様な循環流を生ずる。流向を左岸に向けられ、左岸に沿ひ逆流し、發電所直前を右岸より右岸に向ひ水平水叩部の低い射流部に向つて落ち込む垂直軸渦を生ずる。此の爲に、寫眞-25 に見る様に發電所直前から水叩部左端直前にかけて大きい河床洗掘を生じ堰堤に危険を及ぼす事になる。溢流部よりの早い流れが左岸に向を變へる發電所前に河床材料の大きい堆積を生ずる。實驗 9 に現はれる垂直軸渦の發生を防止し河床洗掘を軽減する爲に實驗 10, 11, 12, 15 に於ては導流堤を堰堤中心線に直角に夫々 600, 350, 300, 250 米突出した。

此の垂直軸渦の發生を完全に防ぎ得るものとして實驗 10 に於ては堰堤中心線よりの長さ 600 米の導流堤を採用した。導流堤と左岸との間には靜かに發電流量が流れて居る。寫眞-26 に示す様に導流堤の尖端に於て垂直軸渦を生ずる事が全然無く、流向は其の左右で平行である。従つて導流堤の尖端は河床洗掘を受ける事が無い。堰堤中心線より 300 米附近は水跳ねにより抛られた流れが落下して平均最大洗掘を生ずる所であるが、其の形状は寫眞-27 に見る様に堰堤の取幅を縦斷方向に 2 次元的に取出して實驗しても良い横斷方向に一樣な河床洗掘を示して居る。平均最大洗掘箇所左岸寄りの導流堤沿ひに於ては特に洗掘が大きくなつて居り、側壁に沿ひ堰堤に大きい洗掘を生ずるのは堰堤を 2 次元的に取出した水跳ねの實驗に於ても見られた現象であつた。此の平均最大洗掘箇所より上流側の河床は水跳ねまで一樣な勾配を爲し、下流側は前者よりも急な勾配を爲し河床材料の大きい堆積を生じて居る。早い流速によつて洗掘された河床材料は流速がもはや運びきれない所に落ち、初めの河床の上に洲を形成して居る。

實驗 10 の流況より導流堤の長さは 350 米に短縮しても導流堤尖端のところの河床洗掘を生ずる様な流れは生じないであらうと想像して實驗 11 を行つた。導流堤尖端のところで溢流部よりの早い流れは寫眞-28 に示す様に河床洗掘形状が時間の経過について變化した爲に左岸に向つて擴大し始めたが垂直軸渦の發生にまでは到らなかつた。これによつて寫眞-29 に見る様な導流堤尖端の河床洗掘傾向を生じた。

導流堤の長さを 300 米に短縮して實驗 12 を行つた。導流堤尖端のところに寫眞-30 に示す様な垂直軸渦が現れ始めた。此の垂直軸渦によつて導流堤尖端のところに大きい河床洗掘を生じて居るのが寫眞-31 に見られるが、これは此の附近が水跳ねによつて抛られた流れの落下地點と略一致して居るので河床洗掘が更に助成された。

ものと思はれる。導流堤の長さは水跳ねによつて抛られた流れが落下して常流に復する地點まで必要である事がわかる。

實驗15に於ては導流堤の長さを更に縮めて250米とした。寫眞-32に示す様に導流堤先端に於ける垂直軸渦の發生は著しくなつた。導流堤を用ひなかつた場合と同様な傾向が見られる。即時間の経過につれて河床が洗掘され變形して來ると、左岸に向ひ、左岸に沿ひ逆流し、此の導流堤先端のところに流れ込む垂直軸渦が現れて來る。これによつて寫眞-33に見る様な導流堤先端のところに甚だしい河床洗掘を生じて居る。

實驗10, 11, 12, 15を通じて水跳ねによる平均最大洗掘箇所の狀況は導流堤の長さの影響を受けない部分に在つては何れも等しいと見做す事が出来る。

(2) 河床材料に豆砂利を用いた場合及河床を固定河床とした場合

河床材料に砂を用いた場合には時間の経過に對する河床洗掘の變化が餘り急であつて忽ちにして在來の河床形狀を失ふので、河床材料を移動されにくい豆砂利及移動しない固定河床にして實驗を行つた。

實驗條件

(イ) 水跳ね	20° 使用
(ロ) 溢流深	10 米
(ハ) 溢流継続時間	30 分

を一定に保ち、導流堤の長さ及河床材料を種々變へて河床洗掘狀況を觀測した。此の際右岸取付部形狀は必ずしも一定に保たれては居ない。

河床材料	實 驗 番 號		
	砂	豆 利	固 定 河 床
導流堤の長さ			
なし	43	46	32
350 米	40	47-2	29
250 米 (寫眞河床)	42	47-6	15

次の3種類の實驗を比較する。

河床材料に豆砂利を用いた實驗43に於ては導流堤を用ひなかつた。此の處に發電所前に大きい垂直軸渦を生ずるから、河床材料に砂を用いた場合左岸沿ひ及發電所直前に見

られた様な河床洗掘は生じなかつた。下流水深が横方向から押して居るので溢流部よりの早い流れは水叩部左岸寄り前のところで極端に狭められ寫眞-34に見る様に此の部分の流向は著しく右岸寄りとなる。此の狭められた振渦では右岸取付部形狀により生じた水束の場合と同様に流量が局部的に非常に増加して居り、これによつて水叩部左端直前より斜右岸方向への劇しい河床洗掘を生じて居る。

實驗40に於ては長さ350米の導流堤を用ひた。これによつて横方向よりの押す力は防がれ垂直軸渦の發生が許されなくなつた。(寫眞-36) 河床洗掘狀況は寫眞-37に示す様に甚だ穩となつて來た。導流堤先端は河床洗掘を受けて居ない。水跳ねによつて抛られた流れの落下地點附近の河床洗掘狀況は水跳ねの作用を横斷方向に略2次元的に取出せる程一様である。

實驗42に於ては導流堤の長さを250米に縮めた。河床形狀が洗掘の進むにつれて變形して來ると溢流部よりの早い流れは一部導流堤先端のところで左岸に向ひ擴大し傾向を示し始める。(寫眞-38) 河床材料に砂を用いた實驗15と同様に此の場合も導流堤の長さが水跳ねによつて抛られた流れの落下地點よりも遠くまで下流に延び、

て居ない事に 寫眞-39 に示す様に導流堤先端のところに大きい河床洗掘を生じて居る。此の影響の及ばない水叩部前の洗掘状況は導流堤の長さ 350 米の場合と殆んど同様であつて、水跳ねの作用を横斷方向に略 2 次元的に取出せる點一様である。

更に固定河床に對して流況の観測を行つた。

實驗 46 に於ては導流堤を用ひなかつた。水跳ねによつて抛られ落下した流れが水叩部左岸寄りて完全跳水を生ずる位置は下流水深によつて横方向から押されて居るので堰堤中心線に平行でなくなり、水叩部左端直前から振渦となり斜め岸方向に向ひ流心も著しく右岸に寄る。此の現象は河床材料に豆砂利を用ひた場合には見られしたが、河床材料に砂を用ひた場合には観測出来なかつた。固定河床の場合には水跳ねによつて抛られて居る状況とこれが落下してから完全跳水を生ずるまで射流で勢力を失ひつゝある状況とが 寫眞-40 に示す様にはつきり分離して見られるが、實際の場合には河床の状態が平坦と違ひ射流は河床との摩擦により急激に勢力を失ひ従つて上に述べた 2 つの部分は明瞭に分離して現はれる事は無い。

實驗 47-2 に於ては導流堤の長さを 350 米とした。導流堤を用ふる事によつて下流水深の横方向から押すのが軽減出来たので振渦の位置を水叩部より下流に遠ざける事が出来た。導流堤と振渦との間に更に垂直軸渦が發生して居る。(寫眞-41。)

實驗 47-6 に於ては導流堤の長さを縮めて 200 米とした。此の程度の導流堤の長さの短縮は振渦の位置に變化を與へない事がわかる。(寫眞-42)

〔2〕 導流堤の方向の河床洗掘に及ぼす影響

(1) 河床材料に砂を用ひた場合

實驗 10, 11, 12, 15 に於ては導流堤を堰堤中心線に直角に出した。此の方向より導流堤を左岸或は右岸に偏倚せしむる事が河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるかを實驗した。

實驗條件

(イ)	水 跳 ね	20° 使用
(ロ)	導流堤の長さ	300 米
(ハ)	溢 流 深	10 米
(ニ)	溢流継続時間	30 分
(ホ)	河 床 材 料	砂

を一定に保つたが、右岸取付部形状は同一に保たれて居ない。

次の 2 實驗を比較する。

實驗 14 に於ては導流堤を堰堤中心線に直角な方向より 10° 左岸に偏倚せしめた。此の事は溢流部よりの早い流れが斷面を急に擴大した事になり 寫眞-43 に示す様に導流堤に沿ひ大きい垂直軸渦が發生する。此の垂直軸渦は 寫眞-44 に見る様な極めて深く大きい河床洗掘を生ずる。

實驗 30 に於ては導流堤を堰堤中心線に直角な方向より 10° 右岸に偏倚せしめた。寫眞-45 に示す様に溢流部左岸沿ひの流れは導流堤により絞られ、従つて局部的に流量が増加した事になる。此の流れは劇しい流速を示し 寫眞-46 に見る様に導流堤先端のところに著しい河床洗掘を生じて居る。右岸取付部形状によつて水束を生じた場合の河床洗掘と同じ傾向を示して居る。絞られる水束が導流堤に衝突するから此の形状は好ましくない。

方 向	實 驗 番 號
10° 左岸に	14
10° 右岸に	30

(2) 河床を固定河床とした場合

導流堤の方向の河床洗掘に及ぼす影響を更に詳しく知らんが爲に河床を固定河床とし導流堤の長さ200米及350米の2種類について実験を行った。

実験47-8に於ては長さ200米の導流堤を用いた。下流水深が横方向から押すのを防ぎ溢流部よりの早い流れによつて生ずる振盪の位置を水叩部から最も遠ざける様に方向を調節したところ、写真47に示す様に堰堤中心線に直角の方向に對して導流堤は 0.5° 右岸に寄つて居た。

実験47-4に於ては長さ350米の導流堤を用いた。前の場合と同様堰堤中心線に直角な方向に對して 0.5° 右岸に向けた。これによつて下流水深の横方向より押す力は充分に防がれ導流堤沿ひの振盪は消へ、完全跳水の位置は水叩部より下流に遠ざかり堰堤中心流に平行となつた。(写真48)

導流堤の方向を堰堤中心線に直角な方法に對して右岸に向ける際に、導流堤の長さを長くすると導流堤沿りの完全跳水の位置は堰堤中心線に平行となり従つて河床洗掘は水叩部より下流に遠ざかる。但し此の場合に導流堤を或る長さ以上に延ばすと流心が右岸寄りより左岸寄りに振向けられ、右岸との間に大きい垂直旋渦の發生するのが観察された。斯様な流心の移動は水跳れにより抛られ落下した射流が不安定な爲に生じたものと想像する。實際の河床では河床の狀態が波型と違ふ可成り前にも述べた通りである。

(3) 導流堤の高さの河床洗掘に及ぼす影響

導流堤を用いた場合溢流深10米の洪水時に發電所直前の水位は、圖-13に示す様に、EL.30米程有り、此の水位に對して溢流部よりの流れを横から押さえない様に導いて落下させる爲には導流堤の高さを少くとも、EL.30米程必要になる。実験37に於ては導流堤の高さをEL.35米とし發電所直前の水位より約4米低くした。斯様にすると溢流部よりの早い流れに對して直角に發電所前より導流堤を溢流して注ぎ込む大きい循環流を生ずる事になる。(写真49) 流況より判斷すると大して河床洗掘を生じて居ると思はれないが、写真50では導流堤沿ひに大きい河床洗掘を生じて居る。従て導流堤の高さを低くして溢流させるならば導流堤沿ひに河床洗掘を生ずる傾向の有る事は免れられないと考へられる。

(4) 導流堤の長さと發電所前の水位との關係

水跳れを用いた場合の跳上げ現象の縦斷形狀を求める爲に水平目盛りの有る導流堤を背景として側面より寫眞を撮つた。又此の形狀を水面測定器によつて記録した。水位は甚だ動搖して居るから何れの記録も或る瞬間の形狀に過ぎない。

写真51は導流堤の長さ600米の場合水跳れ現象を側面より観察したものである。此の値は圖-13に示してある。充分長い導流堤を用いた場合の導流堤と左岸との間の縦斷水位形狀(2)と溢流部中央に於て測定した縦斷水位形狀(1)とを比較してみれば次の事がわかる。即ち此の2つの水位差の間に流れが生ずるのを防ぐ爲には水跳れによつて跳上げられた流れが落下して下流常流水位に復する位置迄導流堤の長さが必要であるといふ事である。

導流堤を短くすると發電所前から導流堤尖端附近にかけての流れが次第に早くなるといふ事同時に於て認められる。

(5) 實驗結果に對する考察

(1) 導流堤の長さ

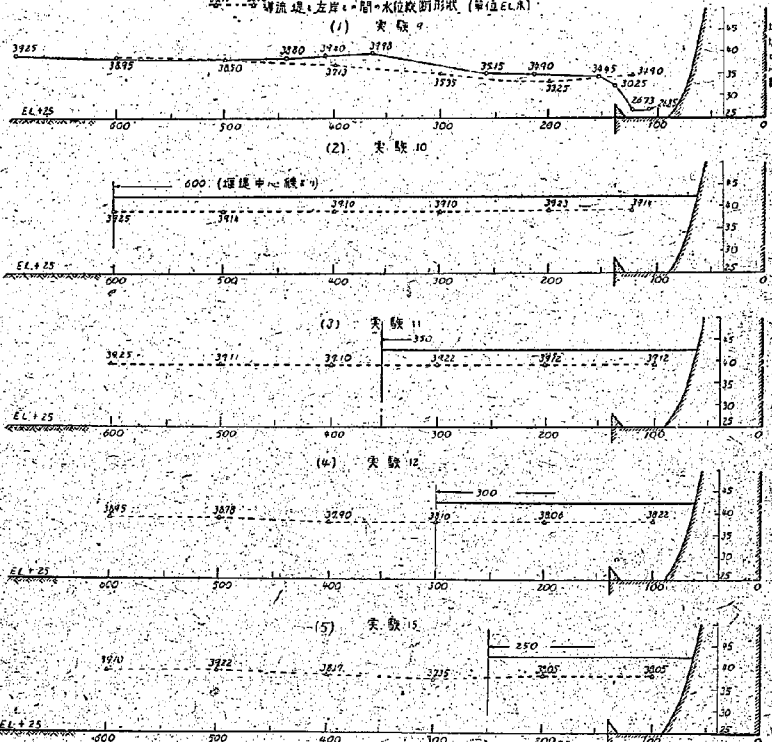
河床材料の選擇によつて導流堤の長さの河床洗掘及流況に及ぼす影響が如何に變化するかを比較検討しよう。以上の諸實驗結果を要約すると次の様になる。

溢流堰下流部河床洗掘軽減に関する水理実験

図-13 導流堤の長さと發電所前の水位との關係

2770 為200 溢流部中央より頂上へ向ての河床洗掘形状(単位ELM)

2512 為250 導流堤・左岸・間・水位形状形式(単位ELM)



導流堤	河床材料	砂	豆砂利	固定河床
なし	0	大きい垂直軸渦	43	46
350 米	11	垂直軸渦はとめられる	40	47-2
250 (四流河床の割合は20%)	15	垂直軸渦はとめられる	42	47-6
			42	

先づ上の表を縦方向に考へる事にする。河床材料に砂を用ひた場合に導流堤が長いと發電所前に大きい垂直軸渦が形成され、これに依つて發電所直前から水叩部左端直前にかけて深く大きい河床洗掘を生ずるのである。長さ350米、250米の導流堤を出すと此の大きい垂直軸渦の發生はとめられ従つて發電所直前から水叩部左端直前にかけての河床洗掘は無くなるが、水跳ねによつて跳上げられた流れの落下する位置より遠くまで導流堤が延び

て居ないと其の尖端のところに深い河床洗掘を受ける。次に河床材料に豆砂利を用いた場合に導流堤が無いと下流水深が横方向から押す爲に振渦を生じこれによつて水叩部左端直前に大きい河床洗掘を生ずる。長さ 350 米、250 米の導流堤を出すと下流水深が横方向から押すのが弱くなり河床洗掘は軽減される。固定河床の場合に導流堤を用ひないと振渦がはつきり現はれる。導流堤を用ふると振渦の位置は堤體より遠ざかるが、其の長さが 350 米でも 200 米でも其の遠ざかる程度の差は殆んど認められない。

次に上の表を横方向に見る。導流堤を用ひない場合に河床材料を移動され易い砂とすると垂直軸渦によつて発電所直前から水叩部左端直前にかけて堤體に危険な河床洗掘を生ずる。河床材料を豆砂利とすると固定河床にした場合と同様に振渦を生じ、これによつて水叩部左端直前から斜右岸に向ふ特徴有る河床洗掘を生じて居る。河床材料が移動され易い場合には砂を用ひた場合の洗掘状況が、河床材料が移動されにくい場合には豆砂利を用ひた場合の洗掘状況が實際に於ても現はれるものと考へる。次に導流堤を用ひた場合に河床材料を砂及豆砂利とすると垂直軸とか振渦と言つた様な現象は防がれる。水跳ねによつて跳上げられた流れが落下する位置よりも遠くまで下流に導流堤が延びて居ないと其の尖端附近に於ける河床洗掘は軽減されない。固定河床の場合に導流堤の長さを 350 米にしても 200 米にしても振渦の位置を堤體より遠ざける程度に變りないといふ結果を得た。

(2) 導流堤の方向

導流堤を堰堤中心線に直角な方向より左右岸に偏倚すると次に述べる様な結果になる。

(i) 左岸に向ける。

溢流部よりの早い流れの斷面を急に擴大した事になり導流堤沿ひに大きい垂直軸渦が發生し、これによつて極めて深く大きい河床洗掘を生ずる。

(ii) 右岸に向ける。

溢流部よりの早い流れは導流堤に沿ひ絞られて水束を生じ、之は導流堤尖端のところに劇しい河床洗掘を生ずる。

(3) 導流堤の高さ

導流堤の高さを発電所直前の水位より低くして溢流部よりの早い流れに對し直角に発電所前より溢流させると導流堤右岸沿ひに河床洗掘を生ずる事になる。

(4) 河床洗掘に對する導流堤の作用

堰堤下流水叩部左端と発電所との間から導流堤を下流に向ひ突出する事によつて河床洗掘が軽減される事は以上の種々なる實驗によつて確かめられた。次に導流堤の作用を要約しよう。

(i) 導流堤を用ひぬ場合に河床材料を砂とすると水跳ねによつて跳上げられた流れの落下地點の下流側に洗掘された河床材料の堆積を生じ、これにより水叩部左端前の流れは左岸に向けられ、左岸に沿ひ逆流し、発電所直前を右岸に向ひ射流部に流れ込む大きい循環流を生ずる。導流堤は此の循環流を防ぐ作用をする。

(ii) 導流堤を用ひぬ場合に河床材料を移動されにくい豆砂利とすると溢流部よりの早い流れは下流水深によつて横方向から押されて狭められ振渦となつて居るのと同様に現はれる。導流堤は下流水深が横方向から押すのを防ぐ作用をする。

本堰堤と同様に発電所が河幅の一部を占め堰堤の全幅より溢流させる事が出来ない Madden Dam の模型實驗報告 ("Hydraulic tests on the spillway of the Madden Dam" Proceedings of A. S. C. E. 1937 May, No. 5, p. 851~882) に於て Richard R. Randolph は導流堤に關し同僚と同意見を述べて居る。即

其の高さは横押し（寫眞-34, 40 に見られる振渦）を防ぐに充分なものを要求して居る。落水水脈が下流常流水位に復するまで其の長さが必要であると言つて居る。平面圖を見ると導流堤は堰堤中心線に直角に出して居る。導流堤の長さ、方向、高さに関して筆者の求めた結果と同意見である。斯様に設け所が河幅の一部を占め堰堤の全幅より溢流させる事が出来ない様な場合の導流堤の作用（勿論下流常流水位の高さも考慮に入らねばならないが）は以上で充分明にされたと思ふ。

VI. 堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付形状の河床洗掘に及ぼす影響

(1) 取付部形状

堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形状は河床洗掘に對して大きい影響を及ぼすものであるが、本実験により確かめられた。

本堰堤の様に右岸寄りの溢流幅が堰堤下流水叩部幅より大きい場合には、此の部分の洪水時溢流は溢流部右端と堰堤下流水叩部右端とを結ぶ或る形状の側壁に沿ひ導くか、或は右岸溢流部より下流側山腹を削つて階段状として導くかの2方法が考へられる。取付部形状を次の様に分類する。

- (1) 階段状
- (2) 側壁直線状
- (3) 側壁曲線状

此等の形状は圖-14, 15 に詳細に示してある。

各型式の河床洗掘に及ぼす影響を比較検討しよう。

実験条件

- (イ) 溢流深 10 米
- (ロ) 溢流継続時間 30 分

を一定に保つた。実験7以外は角度 20° の水跳ね及堰堤中心線に直角な方向に突出した長さ 350 米の導流堤を用ひ、実験 40, 45 以外は河床材料に砂を用ひた。

(1) 階段状

実験7に於ては取付部形状を寫眞-52 に見る様な階段状として実験を行った。此の場合階段水平部の長さは各段共に水平水叩部と同じ長さとし、段の終端は 60° 傾斜の壁状にした。階段上の流れが此の山腹の壁に衝突して方向を轉じ水東

となつて下流に突入して居る状況を寫眞-53 に示す。此の水東は寫眞-54 に見る様な大きい特徴有る河床洗掘を生じて居る。階段上の流れが山腹の壁に斯様に劇しく衝突すれば山腹破壊の原因になると思ふ。

圖-15 堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形状 (2)

型式	断面圖	説明	実験番号	備考
型式-1 階段状 (1)		階段水平部の長さは各段共に水平水叩部の長さと同じ長さとし、段の終端は 60° 傾斜の壁状にした。全長 - 52 米。	7, 8	
-2 曲線状		全長 - 72 米。	9, 10, 11, 12, 15	
-3 直線状 (1)		溢流部右端と堰堤下流水叩部右端とを結ぶ直線状の側壁。全長 - 14 米。	16	実験-14, 15, 16 に比較。
-4 直線状 (2)		$R_1 < R_2$ 全長 - 14 米。	17	
-5 直線状 (3)		$R_1 > R_2$ 全長 - 14 米。	18	
-6 2水門閉鎖直線状		右岸 A 2 水門閉鎖。側壁 1 直線状。全長 - 14 米。	19	
-7 階段状 (2)		階段水平部の長さは各段共に水平水叩部の長さと同じ長さとし、段の終端は 60° 傾斜の壁状にした。全長 - 52 米。	20, 21, 22, 23	
-8 曲線状		全長 - 72 米。	24	
-9 右岸閉鎖		右岸 A 2 水門閉鎖。全長 - 52 米。	25	
-10 階段状 (3)		型式-1 の階段状 (1) の構造。全長 - 52 米。	26	
-11 直線状 (4)		型式-1 の直線状 (1) の構造。全長 - 52 米。	27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43	型式-21 に比較。
-12 直線状 (5)		型式-1 の直線状 (1) の構造。全長 - 52 米。	33	

階段上の流れが山腹の壁に衝突するのを防ぐ爲に實驗 20 に於ては階段の水平部の長さを山腹より取れる丈取つて 寫眞-55 に見る様な構造とした。寫眞-56 に示される様に階段上の流れは次第に落ち従つて水東は生じない。然し右岸寄りの流れは階段を落下する際に弱まりこれは右岸寄りに於て下流水深を堰堤中心線に直角方向に押す力が局部的に弱まつた事になり垂直軸渦の發生を許して居る。此の垂直軸渦によつて右岸沿ひに特徴ある河床洗掘を生じた。(寫眞-57)。

此の河床洗掘傾向は實驗 45 に於て河床材料に豆砂利を用ひた場合にも同様に現はれた。但し河床材料が移動されにくい爲に 寫眞-58 に示す洗掘状況は砂を河床材料に用ひた 寫眞-57 に比べて僅かである事が分かる。堰堤中心線より 300 米下流の右岸に谷が有るが、これが右岸沿ひの垂直軸渦の發生を助成するのではないであらうかと思ひ此の谷口を 寫眞-59 に示す様に締切つて實驗 25 を行つた。此の河床洗掘状況 寫眞-60 を谷を締切る前の河床洗掘状況 寫眞-57 と比較して見るに河床洗掘程度に殆んど差異は認められない。依つて此の谷の存在は垂直軸渦の發生を助成して居るとは考へられぬ事になる。

實驗 26 に於ては實驗 20 の階段状と實驗 16 の直線状とを組合せ 寫眞-61 に示す様な形状とした。側壁によつて絞められた水東の流れは階段を落ちる間に弱められ 寫眞-62 に見る様な垂直軸渦の發生を許して居る。此の垂直軸渦によつて 寫眞-63 には極めて深く大きい河床洗掘を生じて居る。

實驗 21 に於ては實驗 20 に於ける階段の稜線を通つて 寫眞-64 に示す様な曲面状とした。此の部分の流れは曲面を滑り落ちながら甚だしく絞られる事になり、従つて右岸との間に 寫眞-65 に見る様な大きい垂直軸渦が發生した。此の垂直軸渦によつて 寫眞-66 には全實驗を通じて最も好ましくない河床洗掘状況が現はれて居る。に右岸と水叩部との隅角にも甚だしい河床洗掘を生じて居る。水東によつて流心が著しく左岸に偏向した。

(2) 側壁直線状

堰堤溢流部右端と水叩部右端とを直線狀の側壁で結び溢流をこれに沿ひ導き流す様にするのが最も簡単な取付部形状であつて實驗 16 に於ては此の形状を採用した。絞られた水東は 寫眞-67 に示す様に勢よく下流面に突入して居る。此の水東によつて 寫眞-68 には右岸寄りに深く長く延びた特徴ある河床洗掘を生じて居る。河床材料に豆砂利を用ひた實驗 40 寫眞-37 に於ても小さいが同様な河床洗掘傾向が現れて居る。

實驗 29 に於ては直線狀の側壁の外側の山腹に 寫眞-69 に示す様な階段が現つて居るがこれは實驗の都合上獲したものに過ぎず、實驗 29 の河床洗掘状況 寫眞-23 と實驗 16 の河床洗掘状況 寫眞-68 とを比較してみれば此の存在が河床洗掘に對して何等影響を及ぼさない事がわかる。又此の事は逆に堰堤構造物形状が同一であれば各實驗毎の河床材料の均し方、溢流の操作等の差異は河床洗掘に對して殆んど影響を及ぼさないといふ證明にもなる。

實驗 19 に於ては溢流部右岸寄りの水門を 2 門閉鎖し、右岸より第 3 門の右端と水叩部右端とを直線狀の側壁で結んだ。寫眞-70 に示す様に右岸寄りで絞られて居らず従つて水東も垂直軸渦も發生して居ない。流況は斯様に良好であるにも係らず、河床洗掘 寫眞-71 に於ては目玉の様な孤立した 2 つの洗掘箇所が水勢によりて掘られた流れの落下する地點に生じて居るのが見られる。此の際流量は 2 門閉鎖しない場合の溢流深 10 米に相當する量流して居る。

實驗 33 に於ては側壁は實驗 20 と同じ形状としたが、溢流部右岸より第 1 及第 2 水門を閉鎖した。溢流した右岸寄りの落下水頭は一應擴大しこれは側壁によつて除々に絞られるのであるが、此の部分の流れは弱く 寫眞-72 に見る様に水東は著しくない。河床洗掘 寫眞-73 は實驗 19 の河床洗掘 寫眞-71 と良く似ては居るが、右岸と水叩部との隅角に深い河床洗掘を生じて居るのは好ましくない。

(3) 側壁曲線状

側壁を山線状にした場合に河床洗掘は如何なる影響を受けるものであるかを求める豫備実験として竈真-74に示す様な形状について実験9を行った。右岸沿ひの落下水脈が急な曲線で絞められると、それより下流の主流は曲線に沿ふといふよりも竈真-24に見る様に此所でまわられて切線方向に水束となつて向を轉じて居る。此の水束による河床洗掘形状は竈真-25に明かに現れて居る。右岸と水叩部との隅角にも堰堤に危険な河床洗掘を生じて居る。

依て此のS字状曲線の上下の半徑の大小が河床洗掘に對して如何なる影響を及ぼすものであるかを知らんが爲に實驗17, 18を行った。S字状曲線の上下の半徑 R_1, R_2 を實驗17に於ては $R_1 = 50$ 米, $R_2 = 200$ 米, 實驗18に於ては $R_1 = 200$ 米, $R_2 = 50$ 米とし2つの圓は相接せしめた。 R_1 が大きいといふ事は溢流して來た落下水脈を除々に絞るといふ事であり, R_1 が小さいといふ事は急に絞るといふ事である。竈真-75は實驗17の流況, 竈真-76は實驗18の流況を示す。何れの場合にも流れが R_1 に在る間は側壁に沿ふて流れるが, 轉向して R_2 に入ると主流は側壁によりまわられ水束を生ずる。此の2つのS字状曲線程度では水束による河床洗掘及右岸と水叩部との隅角の河床洗掘の何れを比較しても殆んど差異が認められない。(竈真-77, 78)

(2) 取付部形状に對する考察

以上の諸實驗に對し各取付部形状の河床洗掘に及ぼす影響の特徴を述べる。

(1) 階段状

階段の水平部の長さを山腹より取れる丈取つた場合には其他の場合の様に絞られるといふ事はないので水束



は生じないから、下流水深を押し下げ右岸寄りで局部的に弱まった事となり此所に垂直軸渦の發生を許す。これによつて圖-16(1)に示す様な特徴ある河床洗掘を生ずるので

ある。此の傾向は河床材料に豆砂利を用ひても確かめた。河床材料が移動され易い場合には此の垂直軸渦によつて右岸寄りに相當の河床洗掘を生ずるであらう。

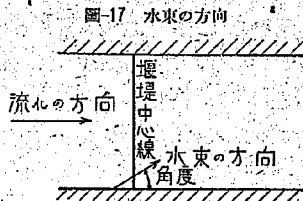
(2) 側壁直線状

溢流部右端と水叩部右端とを直線状の側壁で結ぶと溢流した落下水脈は絞られ水束を生ずる。此の場合の河床洗掘は水束の問題となる。此の絞つて居る側壁と右岸との爲す角度に關して次の2つが考へられる。

- (イ) 水束の方向
- (ロ) 水束の大きさ

水束の方向は圖-17に示す側壁と右岸との爲す角度による。此の角度を大きくすると溢流して來た流れの堰堤中心線に直角方向への流勢が弱まり従つて下流水深の横方向より押すのを許し右岸寄りに

垂直軸渦が發生する事となる。側壁が右岸と或る角度を爲して居て水束の方向と大きさといふ2つの要素が適當で



あれば実験 16 の様に下流水深を押しつけて垂直軸渦の発生を防止する事が出来る。角度が零の場所即ち実験 10 の絞られない場合には垂直軸渦の発生は無く最も好ましい流況を呈する。

水東の大きさとは絞られた爲に局部的に流量の増加する事を言ふのである。角度と共に絞られる量も増す事になる。

水東によつて 圖-17 (2) に示す様な特徴有る河床洗掘を生じて居る。此の傾向は河床材料に豆砂利を用ひても確かめた。此の種の洗掘力は非常に大きいから岩盤河床に對しても大きい破壊力を示すものと思はれるのである。

(3) 側壁曲線状

溢流して来た落下水脈を絞る場合に側壁を曲線状にして置けば之に沿ひ除々に絞られると普通考へて居る様であるが、実験 17, 18 に見る様に絞られたところで水脈はまくられそこから水東となつて河床を攻撃するから S 字状曲線の後の部分に此の程度の曲線を用ひたのでは水東の主流の方向を轉じて之は沿はせる事は出来ない。

曲線状の側壁を用ふと落下水脈は勢よく之に衝突する。圖-17 (4) に示す様に此の場合には水東に於る河床洗掘及右岸と水叩部との隅角の河床洗掘を生ずる。

VII. 溢流條件の河床洗掘及流況に及ぼす影響

(1) 溢流深の相違の河床洗掘に及ぼす影響

以上の實驗は主として溢流深 10 米の最大洪水量に對してのみ行つたが、中位の洪水時の河床洗掘狀況を溢流深のみ異なる最大洪水時の河床洗掘狀況と比較する事にした。

實驗 31 に於ては溢流深 8 米とした。此の場合の河床洗掘 寫眞-79 には溢流深 10 米の場合の河床洗掘 寫眞-23 に見られなかつた目玉の様な孤立した洗掘箇所が平均最大洗掘箇所に見れた。此の發生は表面流向からは推察出来ない。溢流深が減じた爲に平均最大洗掘箇所は堤壁に近づいた。

取付部形狀を階段狀として實驗 8, 7 を行つた。此の場合に水跳ねは附して居ない。實驗 8 に於ては溢流深を 5 米とした。此の程度の溢流に對しては堰堤を溢流した射流を常流に復するのに充分な下流常流水深があり、寫眞-80 に示す様に水平水叩部上に於て完全跳水を生じ、河床洗掘は 寫眞-81 に見る様に水叩部直前が極く僅か洗掘されて居るに過ぎず、溢流深 10 米の場合の河床洗掘 寫眞-54 に比ぶれば殆んど問題とならない。

(2) 溢流繼續時間による河床洗掘の變化

河床洗掘を比較する際に溢流繼續時間を如何に決めるか問題である。既に述べた様に洪水時間は縮尺によつて縮める事が出来るが、河床材料の選擇に於て假定があるので洗掘量に關しては洪水時間を論ずる事が出来ない。依て本實驗に於ては種々なる溢流繼續時間後の河床洗掘狀況を比較し、或る一定の河床洗掘傾向を明に示し而も最も短くて済む溢流繼續時間を實驗より求める事にした。

實驗條件

(イ)	水 跳 ね	20° 使用
(ロ)	導流堤の長さ	350 米
(ハ)	右岸取付部形狀	側壁直線狀
(ニ)	溢 流 深	10 米

を一定に保つた。河床材料には實驗 27, 28, 29, 30 に於ては砂、實驗 40, 41 に於ては豆砂利を用ひた。

溢流継続時間(分)	実験番号	溢流継続時間	実験番号
5	27	30分	40
15	28	4時間30分	41
30	29		
60	30		

実験27に於ては溢流継続時間を5分とした。河床洗掘 写真-82に見る様に平均最大洗掘箇所は横断方向に一樣であり、水跳ね直前の EL. 26米まで河床材料が盛上つて居る状況は溢流継続時間を更に長くした場合と同様である。右岸取付部形状による水東の生ずる河床洗掘傾向も此の溢流継続時間で充分に現はれて居る。

実験28に於ては溢流継続時間を15分とした。河床洗掘 写真-83は溢流継続時間5分の場合に比べて水跳ね直前の河床洗掘状況には變りないが、溢流時間を長くした爲に平均最大洗掘箇所が水叩部より遠ざかり水東による洗掘傾向も著しくなつて來た。

実験29に於ては溢流継続時間を30分とした。河床洗掘 写真-23は溢流継続時間15分の場合に比べて平均最大洗掘箇所及水東による洗掘傾向は僅か進行したに過ぎない。

実験30は溢流継続時間を更に延長して60分とした。此の場合の河床洗掘 写真-84を溢流継続時間30分の場合の河床洗掘 写真-23と比較するに、平均最大洗掘箇所の洗掘傾向及水東による河床洗掘に殆んど差異が認められない。

次に河床材料を變へた場合の溢流継続時間の相違は河床洗掘に如何なる影響を及ぼすものであるかを確かめる爲に河床材料に豆砂利を用ひて実験40、41を行つた。

実験40に於ては溢流継続時間を30分とした。此の場合の河床洗掘 写真-37は河床材料に砂を用ひ溢流継続時間5分の場合の河床洗掘 写真-82と洗掘傾向も洗掘程度も非常に良く似て居る。水跳ねによる平均最大洗掘箇所は明に現れ而も横断方向に一樣である。

実験41は溢流時間を増し4時間30分とした。此の場合の河床洗掘 写真-85は河床材料に砂を用ひ溢流継続時間60分の場合と良く似て居る。

以上の事を要約すると次の事と言へる。河床材料に砂或は豆砂利の何れを用ひても此の範圍の實驗では洗掘傾向が急變するものではなく、河床材料の相違は溢流継続時間の相違に該当するものである事がわかつた。依て河床材料に砂を用ひた場合に溢流継続時間30分で一定の河床洗掘傾向が得られると考へて差支ない。

これまで述べて來た事は導流堤が充分長く河床洗掘傾向が横断方向に略一樣であり従つて河床洗掘を横断方向に2次元的に取出して論ずる事が出来る場所について考へた。次に導流堤の長さが短い場合に導流堤尖端附近の流況が溢流継続と共に如何に變化して行くかについて説明する。実験16の導流堤の長さ250米の場合について溢流開始より5、10、20、30分後の流況について述べる事とする。5分後の流況 写真-86では溢流側の早い流れは導流堤尖端のところで下流水深に横から押されて狭められて居るのがわかる。10分後の流況 写真-87では左岸寄りの逆流が現れ始めて居る。溢流開始後20分になると水跳ねによつて跳上げられた流れの落下地點の下流側に洗掘された河床材料がそろそろ堆積を生じ始めたので導流堤沿ひの早い流れは此の爲左岸に向を轉ぜられ導流堤尖端のところに大きな垂直輪渦を生じて居るのが 写真-88に見られる。30分後の流況 写真-89では此の垂直輪渦の傾向は20分後と殆んど變りなく落着いて居る。斯様にして溢流開始當初は見られなかつた垂直輪渦が

河床洗掘の進行するにつれて発達したのである。これは河床の状態が溢流を始めると急激に変形した為であると考えられるが、河床洗掘と流況とが互に原因結果となり遂に或る落ち着いた洗掘傾向が形成されたものと考へる。故に溢流開始直後の流況の變化を更に詳しく観測せねばならぬ事となり、此の目的の爲に河床を移動されない固定河床として流れが常に河床洗掘を開始しようとする時の流水の運動を一観察してみた。

〔3〕 溢流深と水叩部附近の流況との關係

溢流深を種々變へて水叩部附近の流況を観測した。溢流深の小さい間は潜流を示し、溢流深を増すと或る溢流深で水平水叩部に於て完全跳水を生じ、更に溢流深を増すと此の水平水叩部の長さでは不足となり射流は水平水叩部を越へてこれに續く河床上に於て常流に復する。此等の現象を観測した。

寫眞-90 に於ては溢流深を5米とした。此の長さの水平水叩部に於て完全跳水を生じて居るのが見られる。溢流深を5.5米にするともはや射流は水平水叩部に於て完全跳水する事無く水跳ねにより抛られ河床を洗掘しながら下流常流水深に復して居る。溢流深を増す程水跳ねにより抛られた流れの落下する位置が水叩部より下流に遙かたる狀況が 寫眞-92, 93 よりよくわかる。

〔4〕 水門一部閉鎖による堰堤下流部流況の變化

堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形状如何によつて河床洗掘は大きい影響を受けたことからして水門を一部閉鎖して堰堤の全幅から一様に溢流させないといふ事もやはり同様に河床洗掘に大きい影響を及ぼすものであらうといふ事は推定されるのである。

此の場合河床は固定河床として流況を観測した。

右岸より水門を順次1門づつ閉鎖した場合の流況を示す。右岸1門閉鎖した場合の流況 寫眞-95 は1門も閉鎖せぬ場合の 寫眞-94 流況に比べて殆んど流況の變化は認められない。右岸2門閉鎖した 寫眞-96 に於ては絞られ方が少くなつたので水深はぐつと弱まり、そろそろ右岸寄りに漩渦が発生し始めて居る。右岸3門閉鎖した 寫眞-97 に於ては殆んど絞られるといふ事は無くなり水深は消へてしまつたが、右岸寄りの漩渦は大きくつて來た。更に閉鎖水門を増し右岸4門を閉鎖すると 寫眞-98 に見る様に下流水深の押すのが優勢となり、下流水位は水平水叩部上に入り込み、漩渦は増々大きくなって居る。

次に左岸より水門を順次1門づつ閉鎖した場合の流況の變化を示す。左岸1門閉鎖した場合の流況 寫眞-99 に於ては導流堤との間に漩渦の発生が見られる。左岸2門閉鎖した場合の流況 寫眞-100 に於ては下流水位は水平水叩部上に入り込み、漩渦は増々大きくなって居る。

最後に中央附近の水門を順次閉鎖した場合の流況の變化を示す。中央の1門閉鎖した場合の流況 寫眞-101 に於ては中央附近の流勢が變へ始めたのが認められた。中央の3門を閉鎖した場合の流況 寫眞-102 に於ては下流水位は水平水叩部上に入り込み、從つて大きい2つの漩渦が生じて居る。

以上の實驗は表面流況にのみ注目し河床洗掘については一々測定して居ない。然しながら此の漩渦の発生といふ事は前の諸實驗結果からわかる様に基たしい河床洗掘の原因を爲す事は明であつて河床洗掘を軽減する爲にはかかる原因は避けたい。堤體近くの河床が一部洗掘されたからと言つて其所に流下する流量を局部的に調節する目的で水門を一部閉鎖しても此の爲に反つて渦を發生し河床洗掘を生ずる事があるから溢流は全溢流幅より一様に流下せしめたい。

第3部 結 語

以上の諸実験によつて明にされた洪水時溢流による河床の洗掘軽減工法は次の通りである。

(1) 水 跳 ね

溢流堰堤に於て落差が小さいと洪水時溢流は潜流となり河床洗掘はずつと軽減されるが、木堰堤の様に溢流量及落差が大きい場合には洪水時溢流によつて河床は甚だしい洗掘を受ける。此の場合水叩部尖端に水跳ねを附しても附さなくても河床洗掘は避すられないから、水跳ねを用ふる事によつて、

(i) 水叩部直前の河床洗掘が軽減され、

(ii) 平均最大洗掘箇所が水叩部より下流に遠ざかり、

以て堤體の河床洗掘による危険を軽減し得るといふ事ゆゑ堰堤を縦斷方向に2次元的に取出した實驗に於て認められた。(寫眞-12~16)更に堰堤全體を取り入れた構型に於て水跳ねの有無が河床洗掘に及ぼす影響を削減したところ上に述べたと同様な結果が得られた。(寫眞-18, 20, 21, 23)

(2) 導 流 堤

木堰堤の様に發泡所が河幅の一部を占め堰堤の全幅より溢流させる事が出来ない様な地形に在つては、洪水時溢流によつて非溢流側に在る發泡所直前から溢流側に在る水叩部左端直前にかけて垂直渦渦により河床洗掘を受ける。此の河床洗掘を軽減する爲に溢流部と非溢流部との間から下流に向つて此の不連續部に導流堤を突出す必要の有る事分明にされた。(寫眞-25, 27)

其の長さは水跳ねによつて抛られた流いが落下して常流に復する位置までほしい。(寫眞-29, 31, 33) 方向は堰堤中心線に直角に出さねばならぬ。(寫眞-31, 44, 46) 高さは發泡所前の水位以上必要である。(寫眞-23, 50)

(3) 堰堤下流右岸山腹と溢流部との取付部形状

堰堤を溢流落下した射流を右岸取付部によつて絞る場合に此の絞られた溢流量は溢流幅に一樣に擴がるものではなく右岸沿ひに局部的に流量が集中し此所に水束を生ずる。側壁を直線状とした場合に生ずる水束は大きく河床岩盤破壊の原因になると思ふ。(寫眞-61, 69, 37)階段状にすると絞られるといふ事は無くなるが、階段を下りる間に流勢は弱まり従つて垂直渦渦の發生を許す事となり、河床材料が移動され易い場合にはこれにより大きい河床洗掘を生ずる。(寫眞-56, 57, 58)

(4) 水門一部閉鎖による堰堤下流部流況の變化

溢流によつて堰堤近くの河床が一部洗掘されたからと言つて其所に流下する流量を局部的に調節する目的で水門を一部閉鎖しても此の物に反つて渦を發生し河床洗掘を生ずる事があるから溢流は全溢流幅より一樣に流下せしめたい。

(18, 5, 2)

表-5 實驗寫眞説明

實 驗 番 號	寫 眞 番 號	堰 堤 構 造 物 形 狀			溢 流 條 件		河床材料	試 驗 事 項
		水跳ね	導流堤(米)	右岸取付部形狀	溢流深(米)	溢流継続時間(分)		
7	52, 53, 54	なし	なし	型式-1 階段狀(1)	10	30	砂	豫備實驗
8	80, 81	〃	〃	〃	5	〃	〃	〃
9	74, 24, 25	角度 20°	〃	型式-2 曲線狀	10	〃	〃	導流堤の長さ
10	26, 27	〃	長さ 600	〃	〃	〃	〃	
11	28, 29	〃	長さ 350	〃	〃	〃	〃	
12	30, 31	〃	長さ 300	〃	〃	〃	〃	
14	43, 44	〃	長さ 300 10° 左岸に向ける	〃	〃	〃	〃	導流堤の方向
15	32, 33	〃	長さ 250	〃	〃	〃	〃	導流堤の長さ
〃	86, 87, 88, 89	〃	〃	〃	〃	5, 10, 20, 30	〃	溢流継続時間による河床洗掘の變化
16	67, 68	〃	長さ 350	型式-3 直線狀(1)	〃	30	〃	右岸取付部形狀
17	75, 77	〃	〃	型式-4 S字狀曲線(1)	〃	〃	〃	
18	76, 78	〃	〃	型式-5 S字狀曲線(2)	〃	〃	〃	右岸取付部形狀
19	70, 71	〃	〃	型式-6 2. 水門閉鎖直線狀	溢流量實驗 7. に向き	〃	〃	
20	55, 56, 57	〃	〃	型式-7 階段狀(2)	10	〃	〃	〃
21	64, 65, 66	〃	〃	型式-8 曲面狀	〃	〃	〃	〃
25	59, 60	〃	〃	型式-9 右岸側谷締切	〃	〃	〃	〃
26	61, 62, 63	〃	〃	型式-10 階段狀(2)と直線狀との組合	〃	〃	〃	〃
27	82	〃	〃	型式-11 直線狀(2)	〃	5	〃	溢流継続時間
28	83	〃	〃	〃	〃	15	〃	
29	69, 22, 23	〃	〃	〃	〃	30	〃	
30	84	〃	〃	〃	〃	60	〃	
31	79	〃	〃	〃	8	30	〃	溢流深
〃	90, 91, 92, 93	〃	〃	〃	5, 5.5, 7, 9	〃	〃	溢流深と水叩部附近の流況との關係
〃	94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102	〃	〃	〃	溢流量實驗 7. に向き	〃	〃	水門一部閉鎖せる場合の流況の變化
32	19, 20	〃	なし	型式-12 直線狀(2)と2. 水門閉鎖	10	〃	〃	導流堤
33	72, 73	〃	長さ 300	型式-11 直線狀(2)	〃	〃	〃	右岸取付部形狀
36	45, 46	〃	10° 右岸に向ける	〃	〃	〃	〃	導流堤の方向
37	49, 50	〃	長さ 350 高さ 11. 35	〃	〃	〃	〃	導流堤の高さ
38	21	なし	長さ 350	〃	〃	〃	〃	水跳ね
39	17, 18	〃	なし	〃	〃	〃	〃	水跳ね, 導流堤
40	36, 37	角度 20°	長さ 350	〃	〃	〃	豆砂利	河床材料
41	85	〃	〃	〃	〃	4 時間 30 分	〃	〃
42	38, 39	〃	長さ 250	〃	〃	30	〃	〃
43	34, 35	〃	なし	〃	〃	〃	〃	〃
45	58	〃	長さ 350	型式-7 階段狀(2)	〃	〃	〃	〃
46	40	〃	なし	〃	〃	—	固定河床	〃
47	41, 48	〃	長さ 350	〃	〃	—	〃	〃
〃	42, 47	〃	長さ 200	〃	〃	—	〃	〃

写真-1 模型全景写真



写真-2 河床の均し方

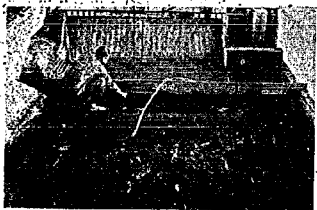
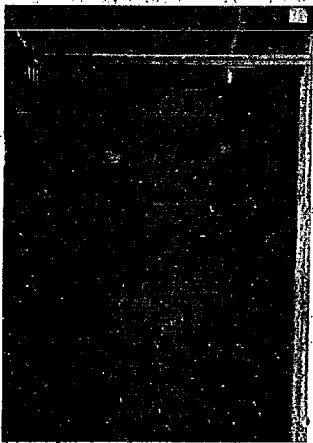


写真-3 固定河床の標高



水形装置の治水用設備

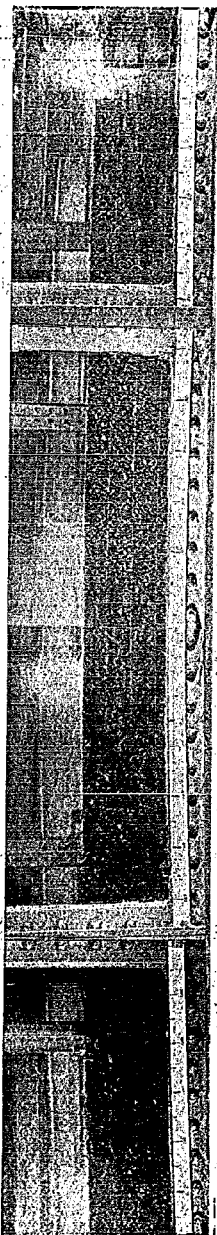


写真-5 水路の傾度 0° 流況 (4)



写真-6 水跳ねの角度 0° 流況 (ロ)

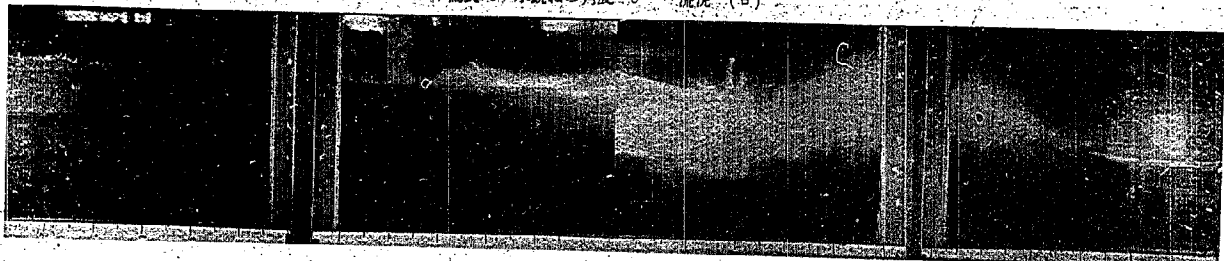


写真-7 水跳ねの角度 0° 流況 (ハ)

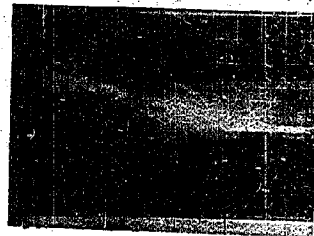


写真-8 水跳ねの角度 15° 流況

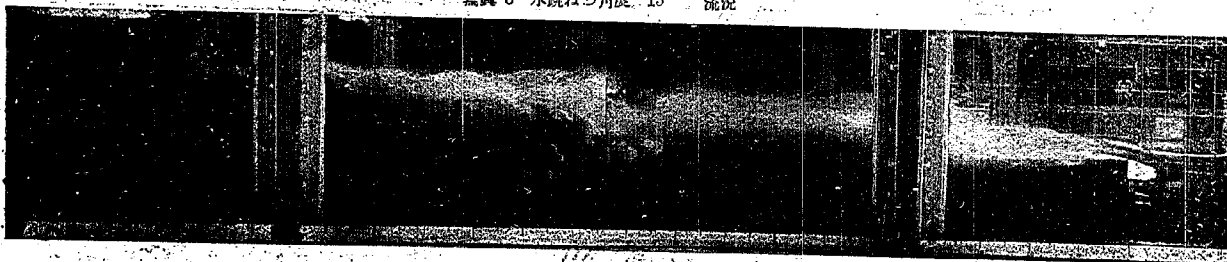


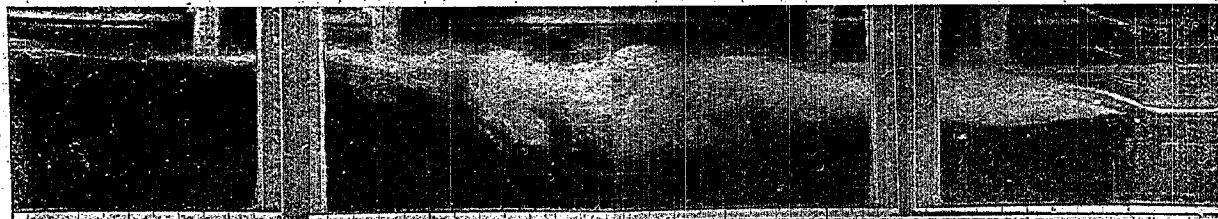
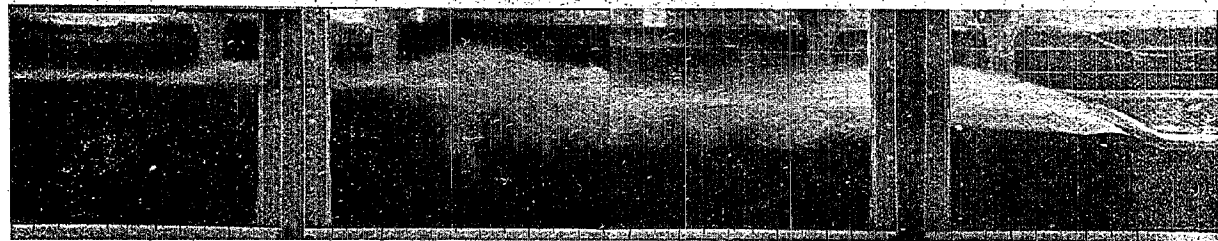
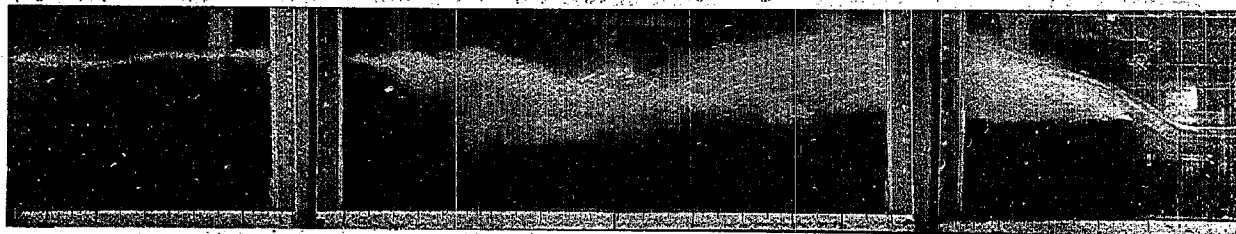
写真-9 水跳ねの角度 20° 流況写真-10 水跳ねの角度 25° 流況写真-11 水跳ねの角度 30° 流況

写真-16 水跳ねの角度 30°
河床洗掘状況

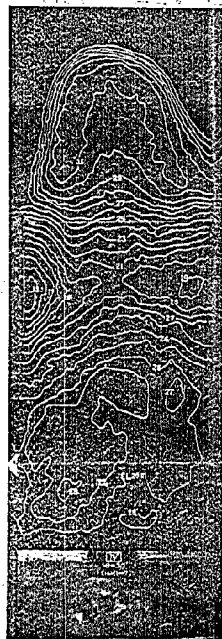


写真-15 水跳ねの角度 25°
河床洗掘状況

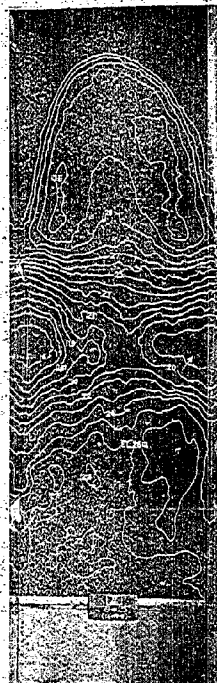


写真-14 水跳ねの角度 20°
河床洗掘状況

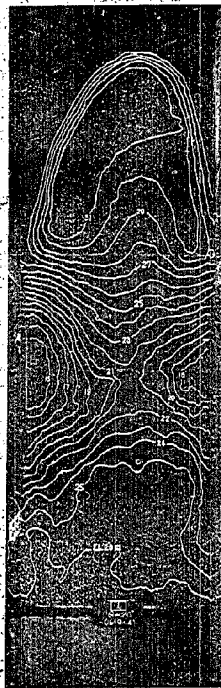


写真-13 水跳ねの角度 15°
河床洗掘状況

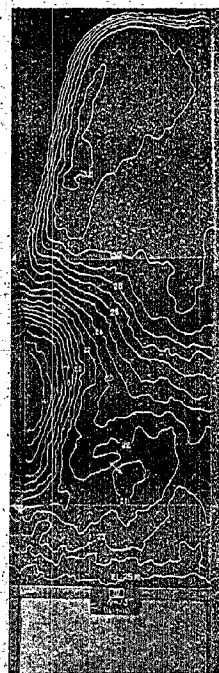


写真-12 水跳ねの角度 0°
河床洗掘状況

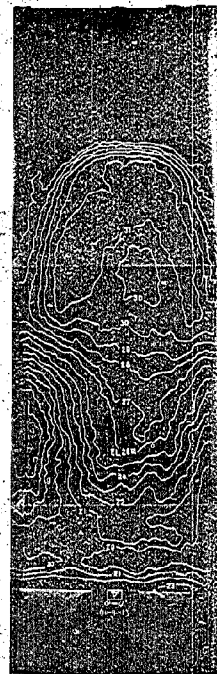


写真-17 実験 30 流況

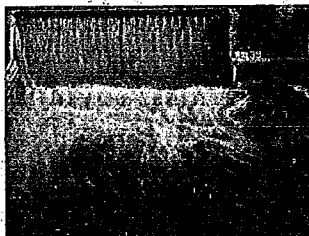


写真-19 実験 32 流況

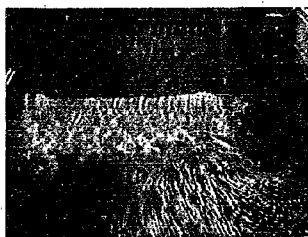
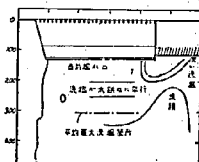
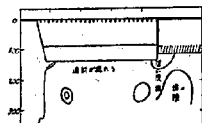
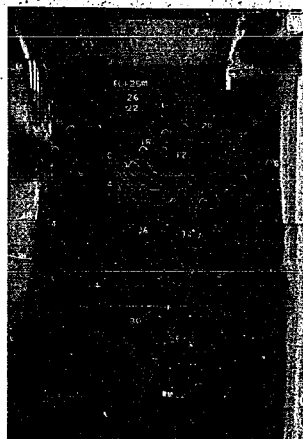
写真-18 実験 30 河床洗掘状況
導流堤、水跡ね其に用ひない写真-20 実験 32 河床洗掘状況
導流堤は用ひないが、水跡ねを用ふ

写真-21 実験 38 河床洗刷状況
導流堤は用ひたが、水跳ねは用ひない

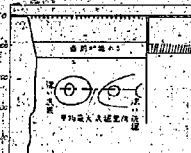


写真-22 実験 29 流況

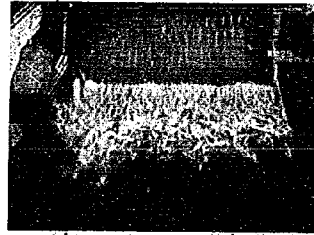


写真-23 実験 29 河床洗刷状況
導流堤、水跳ね共に用ひた

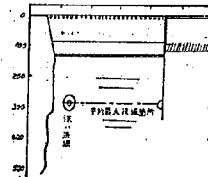
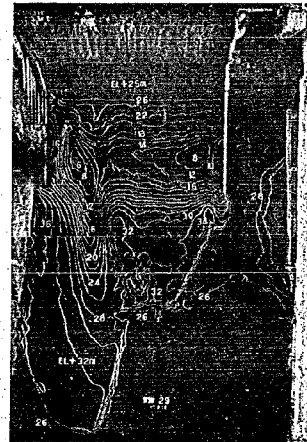


写真-24 実験 9 流況

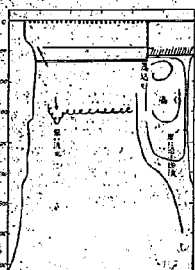
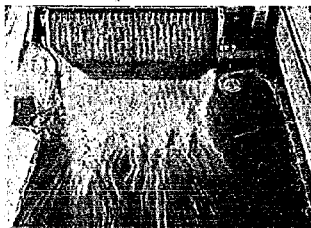


写真-26 実験 10 流況

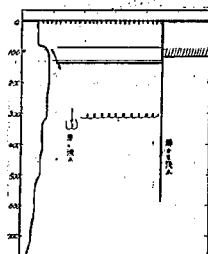
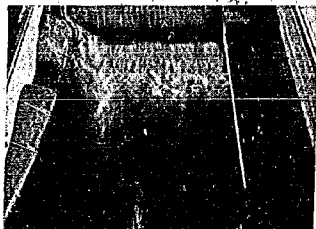
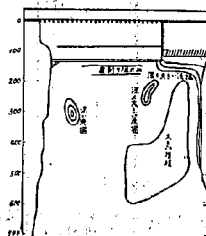
写真-25 実験 9 河床洗掘状況
導流堤を用いない

写真-27 実験 10 河床洗掘状況
導流堤の長さ 600 米

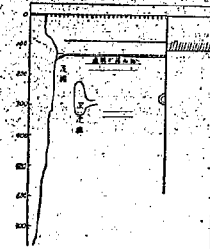


写真-29 実験 11 河床洗掘状況
導流堤の長さ 350 米

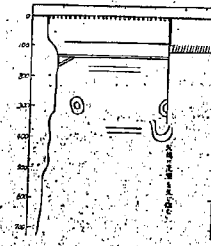
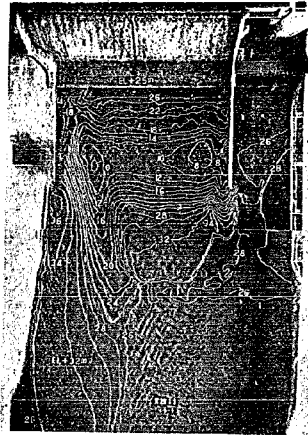


写真-28 実験 11 流況

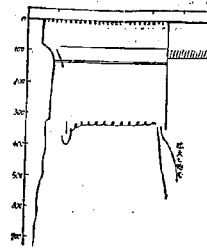
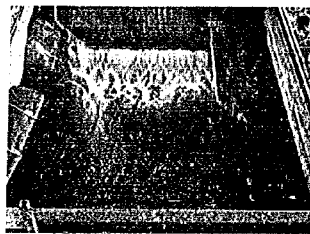


写真-30 実験 12 流況

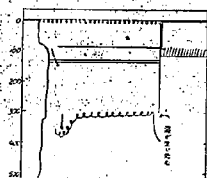


写真-32 実験 15 流況

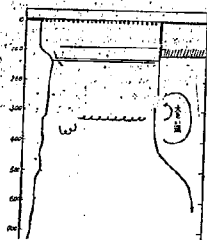
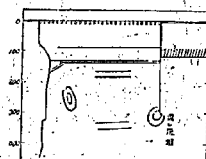
写真-31 実験 12 河床洗掘状況
導流堤の長さ 800 米

写真-33 実験 15 河床洗掘状況
導流堤の長さ 250 米

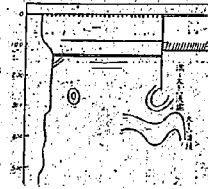
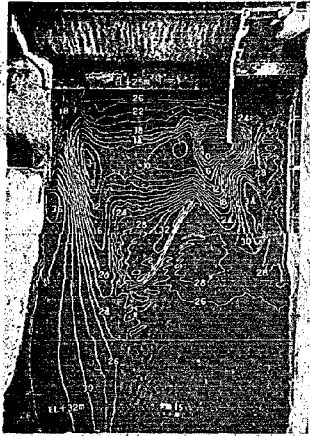


写真-34 実験 43 流況

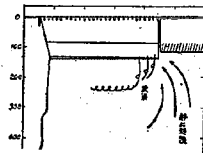
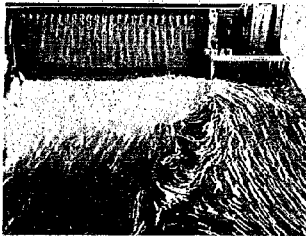


写真-35 実験 43 河床洗掘状況
河床材料は互砂利とし、導流堤を用ひない

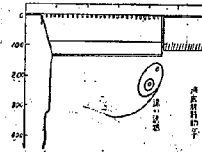


写真-36 実験 40 流況

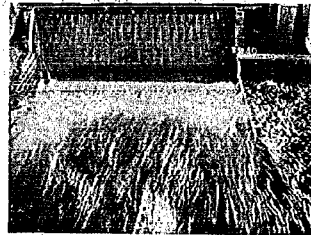


写真-37 実験 40 河床洗掘状況
河床材料は豆砂利とし、導流堤の長さ 350 米

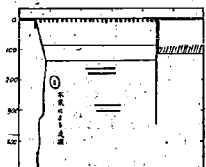
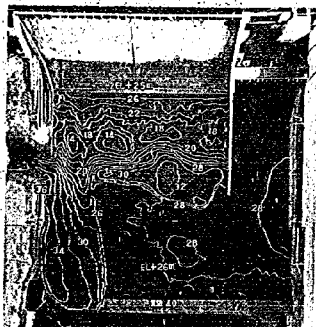


写真-38 実験 42 流況

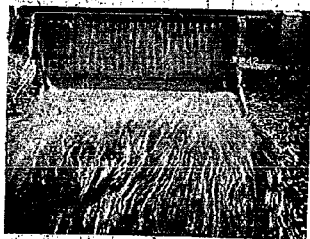


写真-39 実験 43 河床洗掘状況
河床材料は豆砂利とし、導流堤の長さ 250 米

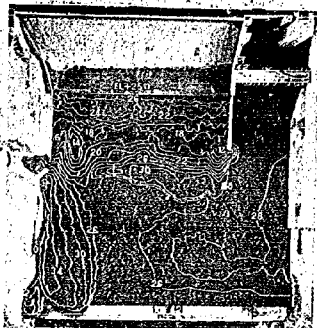


写真-40 実験 46 流況

河床は固定河床、導流堤を用いない

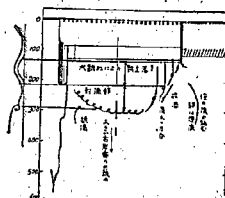
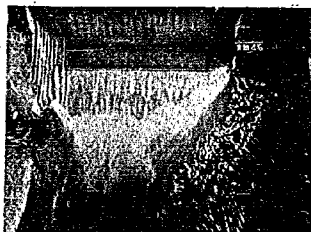


写真-41 実験 47-2 流況

河床は固定河床、導流堤の長さ 350 米

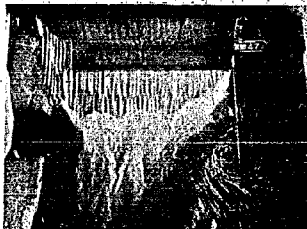


写真-42 実験 47-6 流況

河床は固定河床、導流堤の長さ 200 米

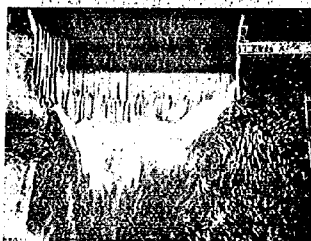


写真-43 実験 14 流況

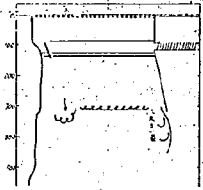
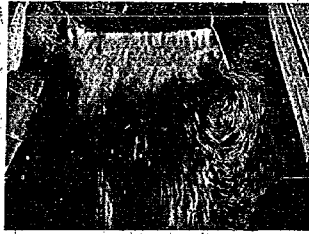


写真-45 実験 36 流況

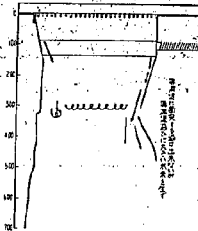
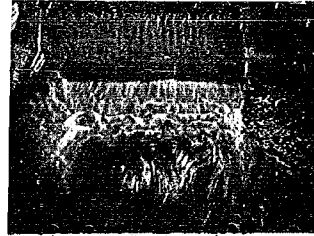


写真-44 実験 14 河床洗掘状況
導流堤を左岸に向ける

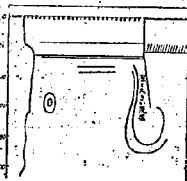


写真-46 実験 36 河床洗掘状況
導流堤を右岸に向ける

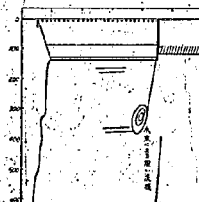


写真-47 実験 47-8 流況

河床は固定河床、長さ 200 米の
導流堤を右岸に向ける

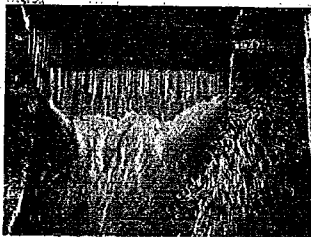


写真-48 実験 47-4 流況

河床は固定河床、長さ 350 米の
導流堤を右岸に向ける

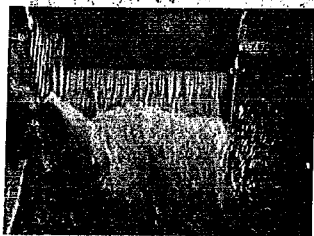


写真-49 実験 37 流況

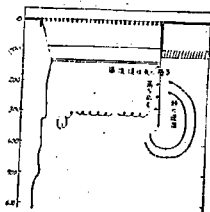
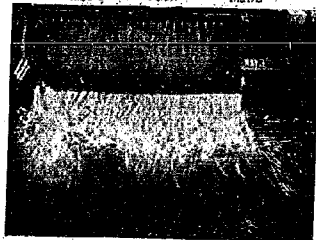
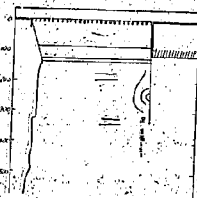
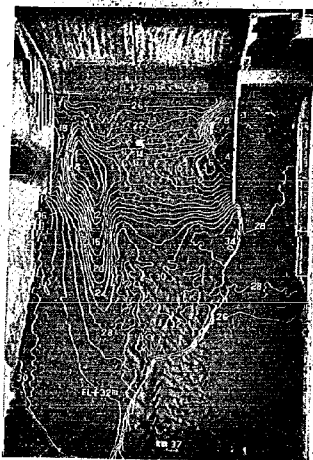
写真-50 実験 37 河床洗掘状況
導流堤の高さを低くする

写真-51 水跳ねの現象

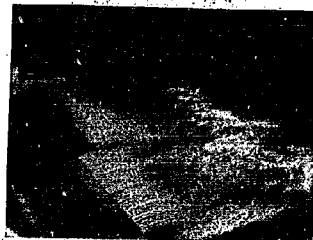


写真-52 実験 7 右岸取付部形状

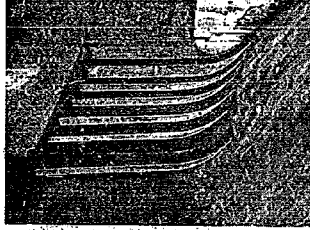


写真-53 実験 7 流況

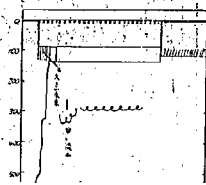
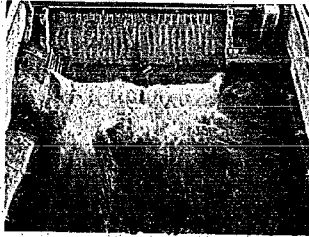


写真-54 実験 7 河床洗掘状況
水束による洗掘



写真-55 実験 20 右岸取付部形状

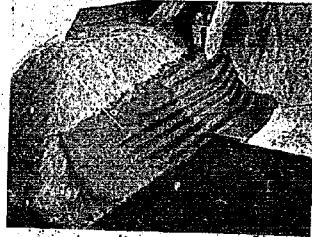


写真-56 実験 20 右岸取付部附近流況

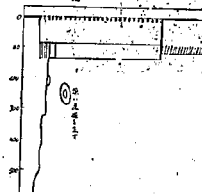


写真-57 実験 20 河床洗掘状況
垂直軸渦による洗掘

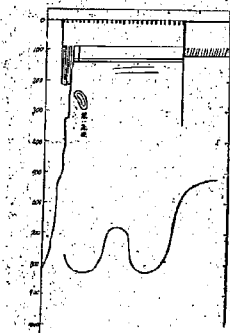


写真-58 実験 45 河床洗掘状況
河床材料を豆砂利とした場合の垂直
軸渦による洗掘

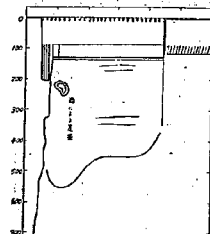
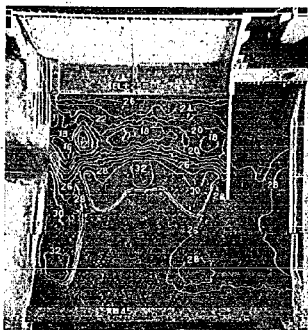


写真-59 実験 25 右岸取付部形状



写真-60 実験 25 河床洗掘状況
右岸寄りの谷口を締切る

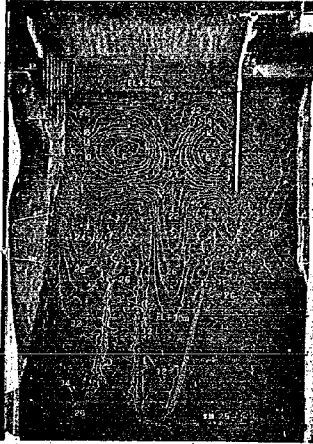


写真-62 実験 26 右岸取付部附近流況

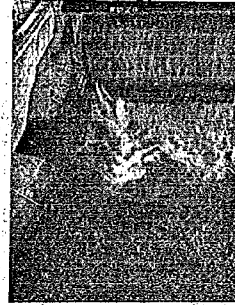


写真-63 実験 26 河床洗掘状況
垂直軸渦による洗掘

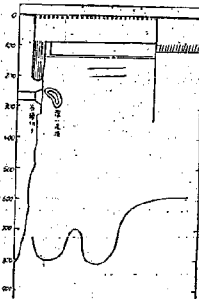


写真-61 実験 26 右岸取付部圧状

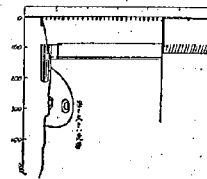


写真-64 実験 21 右岸取付部形状

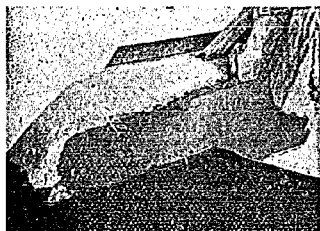


写真-65 実験 21 右岸取付部附近流況



写真-67 実験 16 右岸取付部附近流況



写真-66 実験 21 河床洗掘状況 水束による洗掘、右岸と水叩部との隅角の洗掘

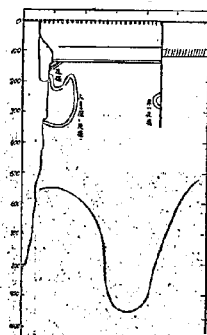


写真-68 実験 16 河床洗掘状況
水東による洗掘

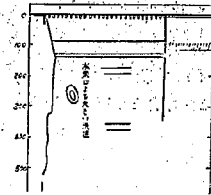
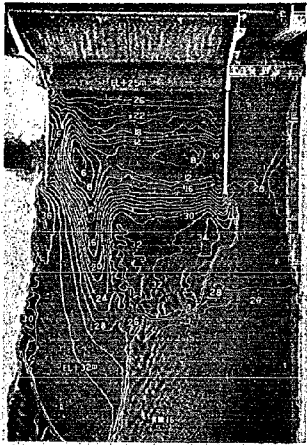


写真-69 実験 20 右岸取付部形状

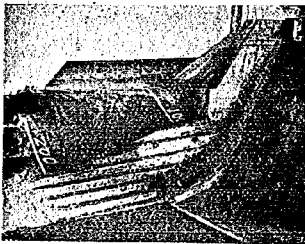


写真-70 実験 19 右岸取付部附近流況

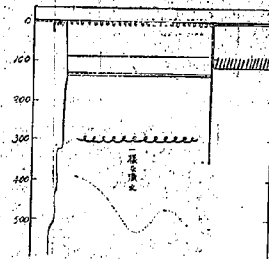
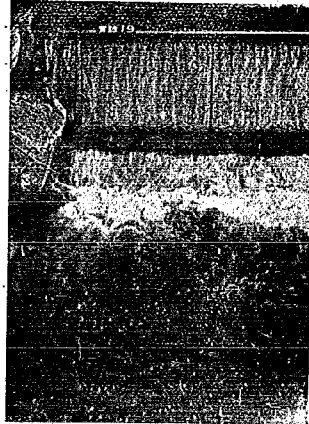


写真-71 実験 19 河床洗掘状況

水車、垂直軸渦をまいて居る



写真-72 実験 33

右岸取水部附近流況

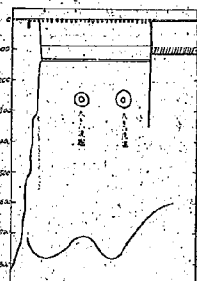
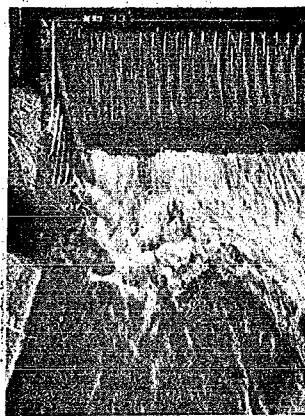


写真-73 実験 33 河床洗掘状況

右岸と水明部との間角の洗掘

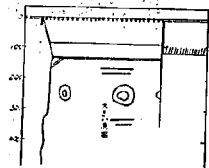


写真-74 実験 0 右岸取付部形状

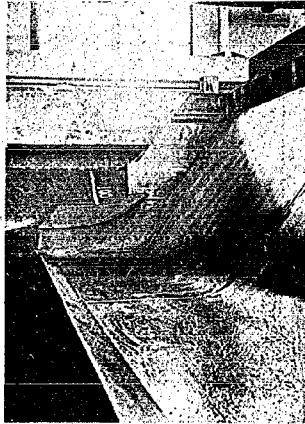


写真-75 実験 17 右岸取付部附近流況



写真-77 実験 17 河床洗掘状況
水束による洗掘、右岸と水叩部との
隅角の洗掘

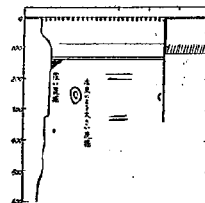


写真-76 実験 18 右岸取付部附近流況

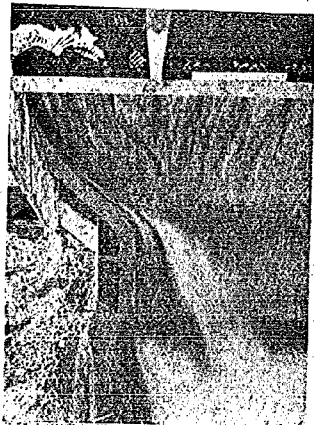
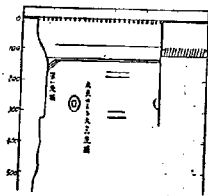
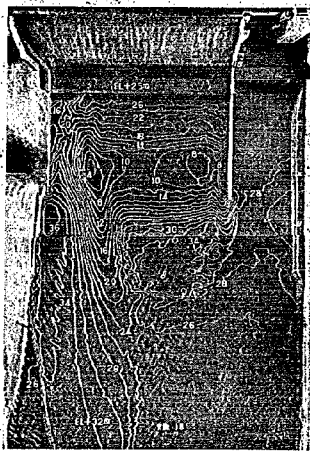
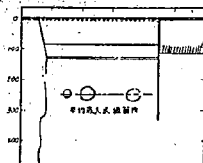
写真-78 実験 18 河床洗掘状況
水車による洗掘、右岸と水車部との
隅角の洗掘写真-79 実験 31 河床洗掘状況
淀流深 8 米

写真-80 実験 8 流況

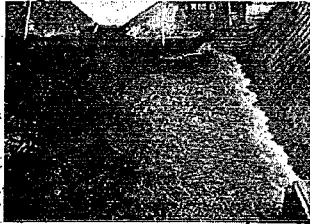


写真-82 実験 27 河床洗掘状況
溢流継続時間 5 分

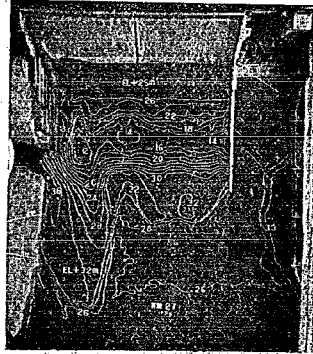
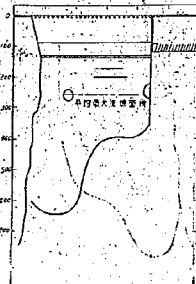
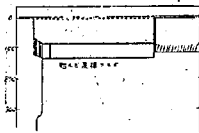
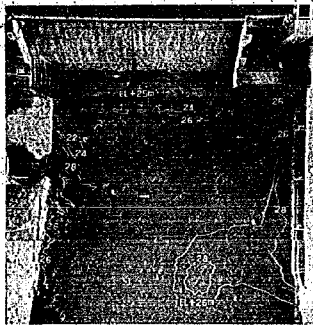
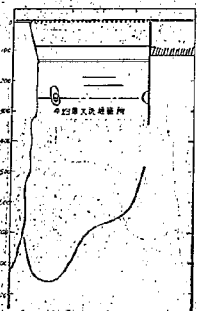


写真-81 実験 8 河床洗掘状況
溢流深 5 米



寫真-83 實驗 28 河床洗掘狀況
溢流繼續時間 15 分



寫真-84 實驗 30 河床洗掘狀況
溢流繼續時間 60 分

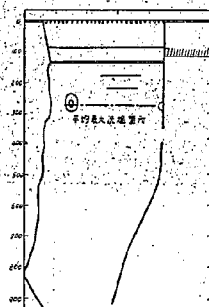


写真-85 実験 41 河床洗掘状況
河床材料に互砂利を用ふ。
溢流継続時間 4 時間 30 分



写真-86 実験 15 5 分後 流況

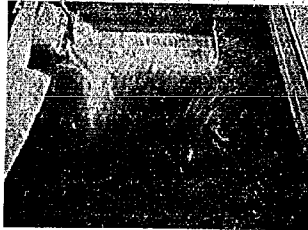


写真-87 実験 15 10 分後 流況

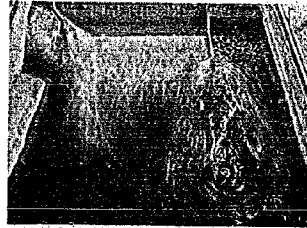


写真-88 実験 15 20 分後 流況

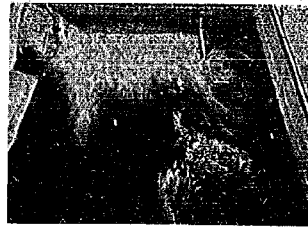
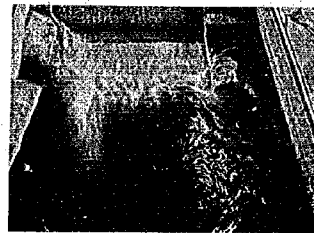
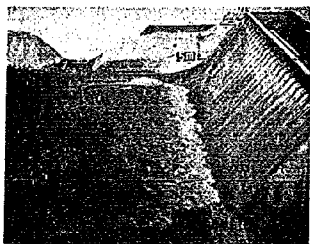


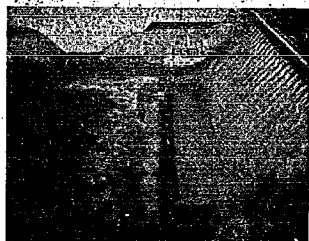
写真-89 実験 15 30 分後 流況



寫真-90 溢流深 5 米 流況



寫真-91 溢流深 5.5 米 流況



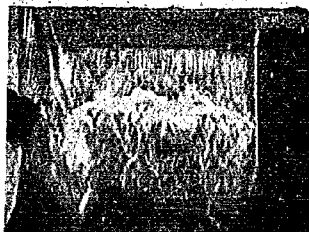
寫真-92 溢流深 7 米 流況



寫真-93 溢流深 9 米 流況



寫真-94 水門全開 流況



寫真-95 右岸 1 門閉鎖 流況

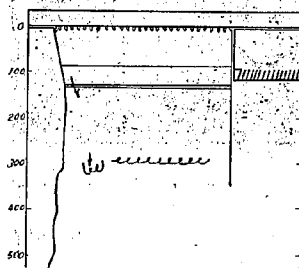
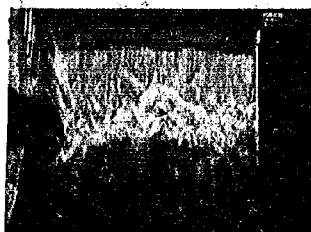


写真-96 右岸 2 門閉鎖 流況

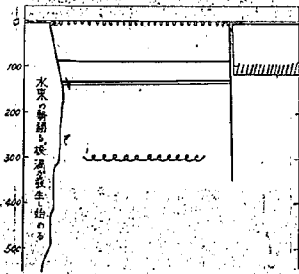
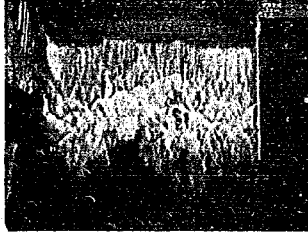


写真-98 右岸 4 門閉鎖 流況

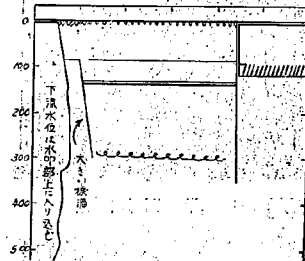
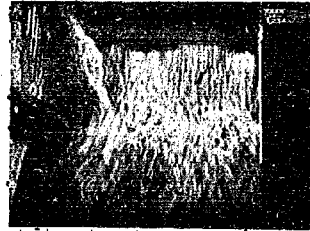


写真-97 右岸 3 門閉鎖 流況

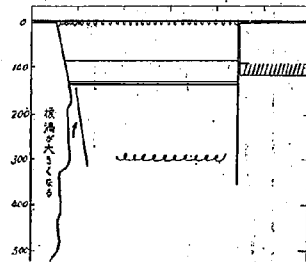
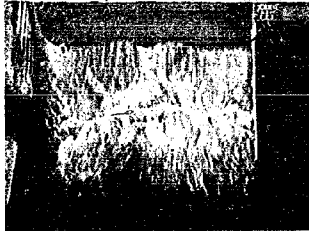


写真-99 左岸 1 門閉鎖 流況

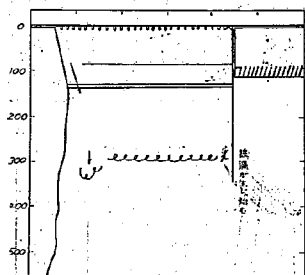
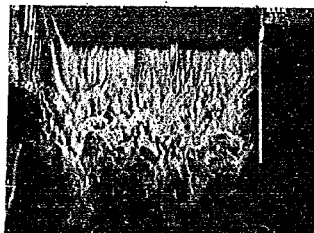


写真-101 中央 1 門閉鎖 流況

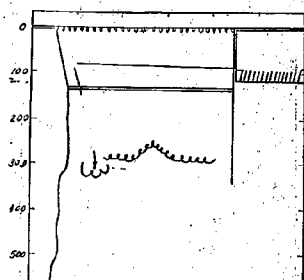
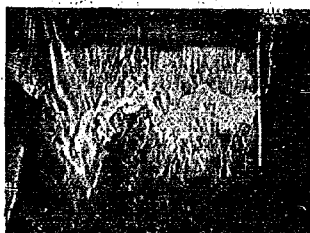


写真-100 左岸 2 門閉鎖 流況

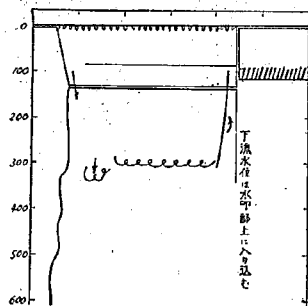
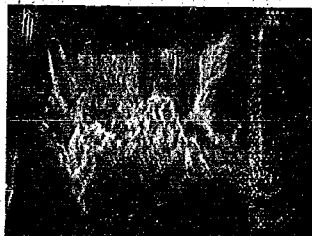


写真-102 中央 3 門閉鎖 流況

