

# 論 說 報 告

第 28 卷 第 9 號 昭和 17 年 9 月

## 橋脚による河床洗掘に関する實驗的研究 (第 2 編)

### —橋脚配置の河床洗掘に及ぼす影響—

正會員 工學博士 石 原 藤 次 郎\*

**要 旨** 本文は著者が日本學術振興會の補助を受け、京都帝國大學工學部中央實驗所に於て、平野教授指導の下に昭和 12 年夏より約 2 箇年半にわたつて行つた實驗結果をまとめたもので、本誌第 24 卷第 1 號に發表された論文<sup>50)</sup>の續編をなすものであるから、圖、表等は何れも前論文よりの通し番號を用ひることとした。

最初に橋脚配置が河床洗掘に對し極めて重要な影響を與へることを述べて、本實驗の主要項目を明かにした。次いで第 1 項目たる流水方向に對する橋脚軸の傾斜角の影響を詳述し、更に第 2 項目たる橋脚軸間の距離、從つて橋梁徑間の影響と、第 3 項目たる新、舊兩橋梁を接近して並列せしめる場合の影響とを論じた。最後に以上の結果より結論として、橋脚配置上から見た河床洗掘軽減の諸對策を列擧したものであつて、<sup>51)</sup> 少くも定性的には信頼するに足る結論を與へ得たものと考へられる。

#### 目 次

4. 橋脚配置の河床洗掘に及ぼす影響 .....	787
(17) 概 説 .....	787
(18) 流水方向に對する橋脚軸の傾斜角の影響 .....	789
(19) 橋脚軸間の距離、從つて橋梁徑間の影響 .....	808
(20) 新、舊兩橋梁を接近して並列せしめる場合の影響 .....	818
(21) 結 論 .....	820

#### 4. 橋脚配置の河床洗掘に及ぼす影響

##### (17) 概 説

一般に河川に於て、河幅のあまり小ならざる直線部分を選んで架橋地點とし、なるべく斜橋を避けて橋脚數を少くし、且橋脚の軸方向を流水方向に平行ならしめることは、橋脚による背水高を減じて流水の疏通を良好ならしめ、河床洗掘を軽減して橋脚の安全を確保するものであるから、河川、橋梁何れの側から云つても極めて緊要なことである。之等の橋脚配置上注意すべき事項として、宮本博士<sup>51)</sup>が列擧された諸點は次の通りである。

1. 河川狹窄部又は屈曲部の橋梁はなるべく避けて橋脚數を少くすること。
2. 橋脚は洪水時の流水方向を考慮して築造すること。
3. 流木の多い河川に於ける橋脚はなるべく其の數を減じ、且その柱間に流木の懸らない構造とすること。
4. 幅員の狭い河川の河身にはなるべく橋脚を設けないこと。
5. 橋臺は有堤河川では高水法線から突出せしめず、無堤河川では治水上支障のない様に其の位置を決定すること。
6. 流路の一定しない河川又は低水路の部分の徑間長はなるべく大きくすること。

\* 京都帝國大學助教授

50) 石原藤次郎：“橋脚による河床洗掘に関する實驗的研究”，土木學會誌，1938，頁 23~55。

51) 宮本武之輔：“河川工學”，1936，頁 427~428。

7. 橋梁が上下流に隣接する場合には、同一徑間割を採用して橋脚を亂立せしめないこと。

併し乍ら、實際上は地形、地質、工事費其他各種の事情に支配され、以上の諸要件を十分に満足せしめ難い場合が尠くない。而も斯かる場合の河床洗掘に対する諸影響に就いては、参照すべき適切な資料は極めて少い。従つて技術者は合理的な根據に基く適確な斷定を下し難く、單に從來の經驗に基く不確實な判斷によつて、然るべく設計、施工を行つてゐる現状である。唯嘗つて Th. Rehbock<sup>28), 37)</sup>が Wiesent 河の鐵道橋梁架設に際し、圓壩型橋脚を河中に斜に並列せしめた場合の影響に就て模型實驗を行ひ、次の如く計算を決定したことは、此の問題に對する新しい解決方法として大に注目すべき事柄である。即ち洪水が左岸に偏流して左岸寄の橋脚及橋臺の安定を著しく害することを實驗的に確め、從來の低水路を圖-23 (前論文參照) の如く變更することとし、更に橋脚周圍の洗掘防止の爲に圖-25 (a) の如き基礎を用ふべきことを提唱した。併し實施に際しては、圖-25 (b) の如く 4 角形の中空壩を沈下し、其の上に 8 角形の上部基礎を造つて圓壩型橋脚を立て、其の周圍の河床に積圓形石張工を施して萬全を期したのである。

圖-25. Wiesent 河橋梁に於ける橋脚基礎及河床防護工

橋脚配置に就ては、上述の如く模型實驗を行ひ慎重な對策を講ずることが最も望ましいが、實際には經費其他の關係から仲々實施困難である。此の意味から橋脚配置上の諸要件を満足せしめ難い場合の種々の惡影響を詳細に検討し、以て橋脚配置上から見た河床

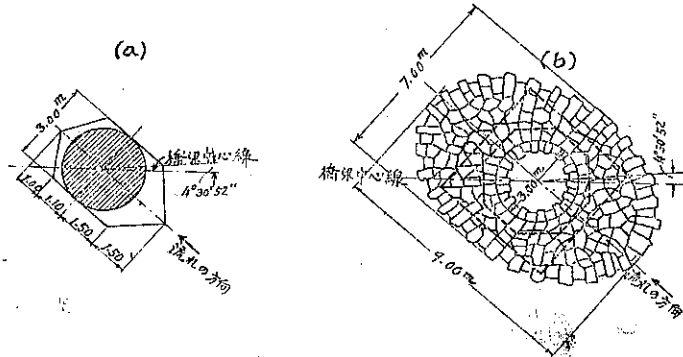


表-13. 橋脚配置の影響に関する主要實驗項目

實驗の目的 及記號	橋脚 形狀	橋脚寸法		橋脚數	橋脚軸間の距離	流水方向に對する 橋脚軸の傾斜角	限界 流況	水 間
		腹部	全長					
橋脚軸の 傾斜角の 影響	G <sub>1</sub>	I	30×15	65	1	182	0°, 5°, 10°, ..., 40°, 45°	(a)
	G <sub>2</sub>	II	"	45	"	"	"	"
	G <sub>n</sub>	II	"	"	"	"	"	(b)
	G <sub>4</sub>	2圓壩建	圓壩の直徑15cm 其の中心間の距離30cm		"	"	"	(a)
橋脚軸間 の距離の 影響	H <sub>1I</sub>	I	30×15	65	1, 2	182, 91	0°	(a)
	H <sub>1II</sub>	II	"	45	"	"	"	"
	H <sub>2I</sub>	I	15×7.5	32.5	1, 2, 3	182, 91, 60.7	"	"
	H <sub>2II</sub>	II	"	22.5	"	"	"	"
	H <sub>3I</sub>	I	10×5	21.67	1, 2, 3, 4	182, 91, 10.7 45.5	"	"
	H <sub>3II</sub>	II	"	15	"	"	"	"
	H <sub>4I</sub>	I	7.5×3.75	16.25	"	"	"	"
	H <sub>4II</sub>	II	"	11.25	"	"	"	"
	H <sub>5I</sub>	I	6×3	13	1, 2, 3, 4, 5	182, 91, 60.7 45.5, 36.4	"	"
	H <sub>5II</sub>	II	"	9	"	"	"	"

洗掘軽減の諸対策に対する一般的指針を明かにする必要を痛感し、表-13 に示す如き実験を行つたのである。

実験の設備及方法、橋脚と河床の模型等は前論文(9)に詳述した通りであつて、定性的には充分信頼するに足る結論を得べく、更に進んで定量的な考察に對しても相當有力な指針を與へるものと考へられる。

### (18) 流水方向に對する橋脚軸の傾斜角の影響

1. 概 説 橋脚軸を流水方向に對し傾斜せしめて設置した場合、其の周囲の河床洗掘を激増し且不規則ならしめ、著しく橋脚の安定を害することは周知の事實である。従つて従來は相當の犠牲を拂つても、なるべく橋梁中心線を河川の方に直角として橋脚軸を流れて平行ならしめ、以て流水が橋脚軸に斜に當ることを避けると共に、橋梁延長を短縮し橋脚數を減ずる様に努めて來たのである。併し乍ら地形、地質の關係並に工事費の制限に支配されて、已むを得ず斜橋とすることがあり、殊に近時の交通量の躍進的な増加及高速化に伴ひ、橋梁前後の取付路線の屈曲を避けて交通の安全を期する必要上、漸次斜橋は増加する傾向にあるものと考へられる。此の場合橋脚軸を流水方向に對して傾斜せしめるや否や、又其の橋脚形状として如何なるものを採用すべきやの問題に就ては、橋梁上部構造、河床の性質及河川の流況等に應じて慎重な考慮を必要とする。一方河川に於ては、一般に流量、従つて水位に應じて流水方向を變化することが多いから、洪水時の流水方向と推定される堤防法線と低水路の流水方向とは屢々一致しないし、又相當の長區間にわたつて河川が直線流路をとることも稀である。従つて橋脚軸を堤防法線に平行にした場合、洪水時には流水方向と一致するとしても、流量、水位の變化に應じて多少の無理を生ずるのは當然のことであつて、流水は多少なりとも必ず橋脚軸に斜に當つて來ることを覺悟しなければならぬ。

著者は以上の諸問題に對する適切な指針を得る爲に、實驗  $G_1 \sim G_4$  を行つたが、表-13 に示す如く種々の橋脚模型を流水方向に對し  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, \dots, 40^\circ, 45^\circ$  の各角度に傾斜せしめて設置し、何れも限界流況には 20 分間掃流して洗掘狀況を比較検討したのである。

此の内實驗  $G_1$  は著者が前論文(15)に於て實用上理想の橋脚形状として提唱したものの一つとして、前、後頭部を共に 2 圓弧型とし、尖端の接角値を夫々  $2\alpha = 73^\circ 44'$  (No. 9),  $123^\circ 52'$  (No. 5)<sup>52)</sup> としたものを、長さ  $l_1 = 30.0$  cm, 幅  $b = 15.0$  cm の矩形函の前後に取付けた橋脚模型(以下 I 型橋脚と稱する)に就て行つたものである。

次に橋脚軸の傾斜角の影響が、橋脚形状によつて著しく異なることは、容易に推察される所である。此の意味に於て、現今一般に廣く採用せられる橋脚形状として、前、後頭部を共に半圓形 (No. 3)<sup>52)</sup> とし、之等を夫々長さ  $l_1 = 30.0$  cm, 幅  $b = 15.0$  cm の矩形函の前後に取付けた橋脚模型(以下 II 型橋脚と稱する)に就て實驗  $G_2$  を行ひ、前述の I 型橋脚に就ての實驗  $G_1$  と比較することにした。

更に實驗  $G_2$  は  $G_1$  と同じく II 型橋脚を採用し、唯限界流況のみを異にして行つたものであり、( $G_2$ : 勾配 1/800, 水深 5.2 cm;  $G_1$ : 勾配 1/600, 水深 3.9 cm),  $G_2$  の結果と比較検討することによつて、此の種實驗結果を實際河川に適用する際の一資料とする考へである。

最後に河床洗掘軽減の立場から云へば、 $G_1, G_2, G_3$  の實驗に用ひた様な一體の壁體式橋脚が有利であることは、前論文(15)に述べた通りであるが、實際には工事費節減其の他の事情から已むを得ず 2 圓壩建橋脚を採用することが尠くない。此の場合圓壩中心間の距離を圓壩直徑の 2 倍程度とすることが、河床洗掘軽減の上から最も都合なるは、既に著者の提唱した所である。實驗  $G_4$  は斯くの如く圓壩中心間の距離を圓壩直徑の 2 倍、即ち 30 cm とした 2 圓壩建橋脚に就て、橋脚軸傾斜の影響を調べる爲に行つたものである。

以上著者の行つた諸実験の結果は、2. 以下に於て詳述することとし、先づ此の方面に於ける従來の研究の内、殆ど唯一の權威ある研究と考へられる Keutner<sup>59)</sup> の実験結果を略述して、参考に資したいと思ふ。

Keutner は前頭部を 2 圓弧型 (接角値  $2\alpha = 101^\circ$ )、後頭部を半圓形とした橋脚模型を、圖-26<sup>59)</sup> の如く流水方面に對し種々の角度  $\theta$  に傾けて設置し、何れも 150 分間通水して実験したが、其の場合の洗掘幅  $k_0, k_{fr}, k_{fl}$  と傾斜角  $\theta$  との関係は圖-27 の様であつた。又橋脚側壁の内、洗掘により新に河床から露出した部分の壁面積を測定し、之を右、左兩岸側に屬する部分に分割して夫々  $f_r, f_l$  とすれば、此の洗掘壁面積  $f_r, f_l$  並に最大洗掘深  $t_{max}$

圖-26. Keutner の實驗：橋脚軸を傾斜せしめた場合の洗掘狀況の記號的表示

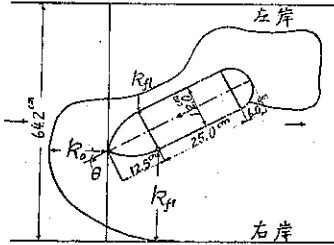


圖-27. Keutner の實驗：洗掘幅と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との関係

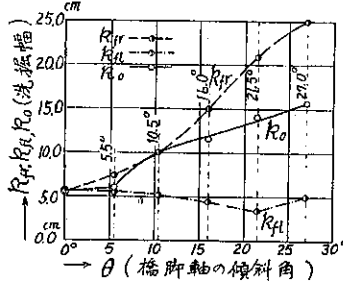
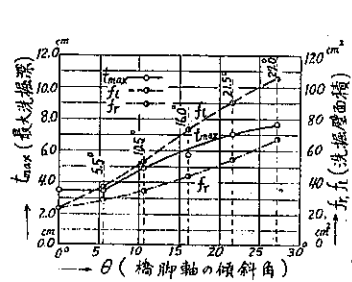


圖-28. Keutner の實驗：最大洗掘深及洗掘壁面積と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との関係



と傾斜角  $\theta$  との関係は、圖-28 の様であつた。之等の實驗結果より、Keutner が橋脚軸の傾斜角  $\theta$  の影響として結論した所は次の通りである。

1. 流水に當らない所の右岸側の洗掘幅  $k_{fr}$  は、 $\theta$  の増加と共に激増するが、其の洗掘壁面積  $f_r$  の増加は緩慢である。斯くして右岸側の洗掘は廣範圍にわたるが、極めて浅いので、橋脚を不安定ならしめる惧がない。殊に右岸側後頭部附近の堆積は、 $\theta$  の増加と共に愈々高まり且廣範圍に擴がるから、橋脚右岸側の安全性を益々高めるものである。

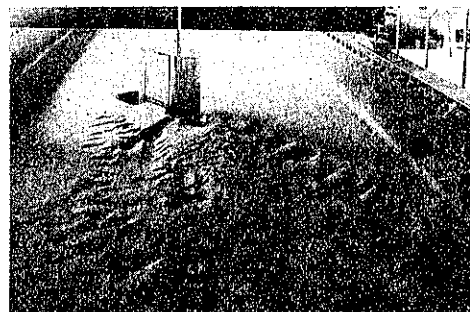
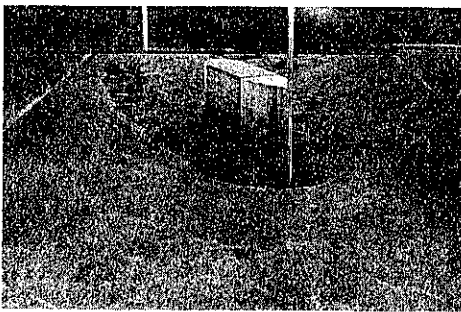
之に反して、直接流水に當る所の左岸側の洗掘幅  $k_{fl}$  は、 $\theta$  の増加と共に寧ろ漸減する傾向にあるが、洗掘壁面積

圖-29. 實驗 G<sub>1</sub> に於ける洗掘及堆積狀況の一例

(I 型橋脚, 傾斜角  $\theta = 25^\circ$ ; 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

(a) 前頭部側

(b) 後頭部側



59) Keutner の論文では橋脚尖端を左岸に偏せしめてゐるが、著者の實驗との比較を容易ならしめる爲に、圖-26 の如く右岸に偏せしめたものとし、それに應じて符號を書改め圖-27, 28 を描いたのである。

$f_l$  の増加は頗る顯著である。尙前頭部尖端の洗掘深  $t_s$  は一般に最も大きくして最大洗掘深  $t_{max}$  を與へ、 $\theta$  の増加と共に愈々著しくなるが、 $\pi=21.5^\circ$  以上になると左岸後頭部附近の洗掘深が目立つ様になり、遂に  $\theta=27.0^\circ$  にては  $t_{max}$  は前頭部尖端の代りに後頭部左側附近に惹起され、 $\theta=0^\circ$  の場合の  $t_s$  の約 2 倍に達する。従つて傾斜角  $\theta$  の小さい間は、前頭部の方に傾く危険があるが、 $\theta=21.5^\circ$  以上となると、橋脚軸に直角に左岸側に倒壊する惧が大きくなるから、前頭部の周囲のみならず、後頭部左岸側の河床をも充分防護する必要がある。

2. 傾斜角  $\theta$  が  $5.5^\circ$  以下の場合の洗掘状態は、 $\theta=0^\circ$  の場合と大差がない。此の意味から如何なる流況に於ても  $5.5^\circ$  以上の傾斜角をなさない様に、相當の犠牲を拂つても努力することが、河床洗掘軽減の上から極めて大切なことである。

表-14. 實驗  $G_1$  に於ける洗掘幅及洗掘深  
(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	$k_o$	$k_o'$	$k_{sr}$	$k_{sl}$	$k'_{sr}$	$k'_{sl}$	$k_{jr}$	$k_{jl}$	$k'_{jr}$	$k'_{jl}$	$k_{jrl}$	$k'_{jrl}$
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
0	7.8	7.8	14.0	14.0	14.0	14.0	13.9	13.9	13.9	13.9	—	—
5	9.9	9.2	14.5	18.3	15.2	17.8	16.4	18.7	17.2	17.7	31.2	31.1
10	11.3	10.5	15.4	22.4	17.0	19.7	19.3	20.5	20.7	20.3	27.4	26.1
15	13.7	12.6	17.9	25.8	22.0	22.5	24.2	22.3	26.1	21.2	23.9	23.5
20	15.0	14.4	18.4	28.8	23.6	24.3	26.3	23.9	28.6	21.7	22.7	20.4
25	17.7	16.3	19.3	32.1	25.5	25.2	28.6	24.6	33.0	22.4	22.3	20.5
30	19.0	17.3	19.6	35.2	28.0	26.5	31.0	25.6	39.0	22.2	22.5	20.8
35	20.9	19.3	20.5	37.6	32.1	27.8	33.7	26.8	45.2	23.1	22.3	20.7
40	22.3	20.1	21.6	40.1	37.1	28.2	37.0	27.6	57.2	22.7	22.6	19.5
45	22.7	21.3	22.7	42.2	46.6	28.2	41.4	29.0	66.4	22.5	24.8	20.2

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	$t_s$	$t_{max}$	$t_{jr}$	$t_{jl}$	$t_{mr}$	$t_{ml}$	$t_{jrr}$	$t_{jrl}$	$t_s'$
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
0	4.8	6.1	6.0	6.0	3.4	3.4	1.6	1.6	-1.7
5	5.8	8.5	5.5	7.2	3.3	4.9	1.2	3.1	-2.3
10	6.8	9.4	3.7	7.8	1.1	5.3	-0.4'	3.7	-2.0
15	7.8	9.9	1.1	8.2	-1.6	5.7	-2.1	4.2	-1.5
20	8.3	10.5	-0.3	9.0	-2.2	6.2	-2.6	4.6	-0.6
25	8.7	11.4	-0.7	9.5	-2.6	6.6	-2.7	5.4	1.1
30	9.5	12.4*	-1.0	9.8	-2.4	6.8	-2.7	5.8	2.1
35	9.9	13.6*	-1.5	10.0	-2.3	6.9	-3.0	6.3	3.1
40	9.9	14.0*	-1.8	10.2	-2.0	6.9	-3.0	6.9	4.1
45	11.4	13.8*	-2.6	9.7	-2.2	8.2	-3.2	9.5	6.7

○表中、負號を附けた數字は原河床以上に堆積せる高さを表す (以下同様)。

○ $\theta=30\sim45^\circ$  に於ては、前頭部左側附近の洗掘著しく、一部水路底を露出した。従つて已むなく附近の河床洗掘形状より最大洗掘深  $t_{max}$  を推定した。表中 \* 印を附した數字は斯かる推定値を表す。

以上の Keutner の實驗結果に就ては、6. に於て著者の實驗結果と比較検討して見解を述べる積りである。

2. I 型橋脚: 實驗  $G_1$  實驗  $G_1$  に於ける洗掘狀況は左右不對稱であり、其の程度は橋脚軸の傾斜角  $\theta$  によつて著しく異なつてゐるが、其の一例を示すと圖-29 の通りである。之等の洗掘狀況と傾斜角との關係を考究

する爲に、橋脚周壁の主要個所に關する測定値のみを表示すれば、表-14 の様である。圖-30 は表中の各記號の意義を圖示したものであるが、一般に洗掘幅  $l$  は其の右下添字に相當する個所より流水の方向に或はそれと直角に左右に測り、又洗掘幅  $l'$  は同じく所要の個所より橋脚軸の方向に或はそれと直角に左右に測るものとする。尙洗掘深  $t$  の測定個所は夫々其の右下に附した添字にて表されてゐる。

圖-31, 32 は夫々表-14 に示す洗掘の幅、深さと傾斜角との關係を圖示したものであるが、洗掘幅は傾斜した橋脚を基準として測定したから、傾斜角の影響を比較検討する場合に少しく不便である。従つて傾斜角に拘らず常に一定に保たれてゐる橋脚中心點及水路中心軸を基準として、圖-33 の如く洗掘幅を測るものとすれば、表-15、圖-34 の様になる、茲に記號 ( $l$ ) は斯かる場合の洗掘幅を意味したものである。

以上圖-30~34 から、特に注目すべき

圖-30. 實驗  $G_1$  ( $G_2, G_3$ ) に於ける洗掘及堆積の記號的表示

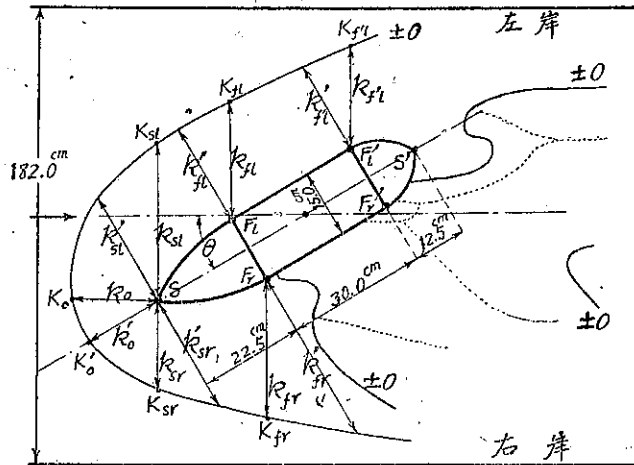


圖-31. 實驗  $G_1$  に於ける洗掘幅  $l, l'$  と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との關係

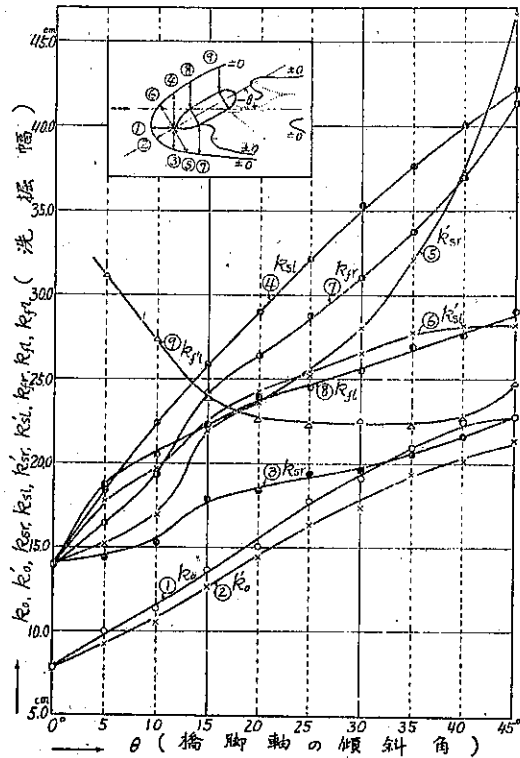
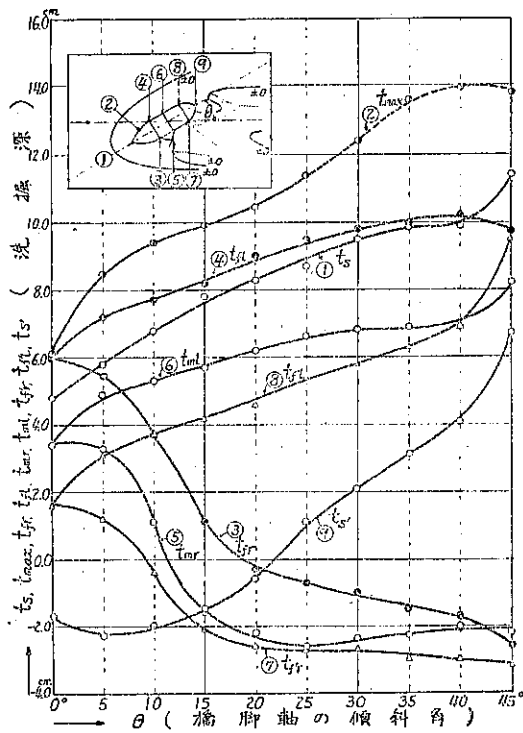


圖-32. 實驗  $G_1$  に於ける洗掘深  $t$  と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との關係

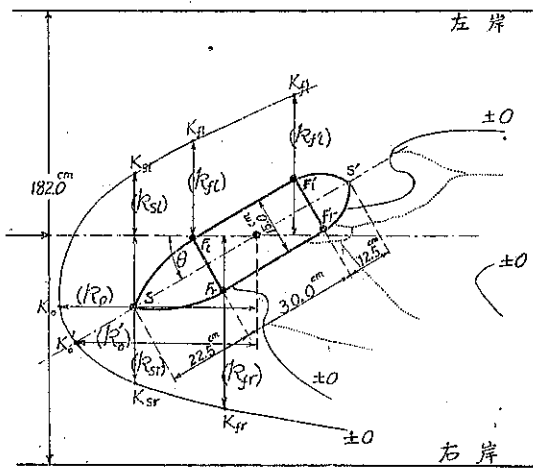


性質として列挙し得る諸點は、次の通りである。

i) 前頭部附近の洗掘  $k, k'$  は一般に傾斜角  $\theta$  の増加につれて激増するが、其の程度は圖-31 に見る如く、左右兩岸及測定の個所、方向によつて著しく相違してゐる。先づ尖端  $S$  に於ける洗掘幅  $k_s$  (流水方向) 及  $k'_s$  (橋脚軸方向) は  $\theta$  に比例して殆ど直線的に増大し、唯前者のみ約  $40^\circ$  以上に於ける増大傾向が稍緩慢となる。次に流れに當らない右岸側の洗掘幅  $k_{sr}, k'_{sr}$  は  $\theta$  の小さい間の増加は微弱なるも、 $10\sim 15^\circ$  にて急増し、更に約  $30^\circ$  以上に於ける増加が著しい。又流れに當る左岸側の洗掘幅  $k_{sl}, k'_{sl}$  は最初より激増するが、其の傾向は  $\theta$  の増加と共に弱くなり、特に約  $35^\circ$  以上にて目立つて緩慢となることは、上の  $k_s$  の場合と同様である。

前頭部から腹部への移行點  $F$  に就ては、右岸側の  $k_{yr}$  の變化に  $k_{sr}$  に似てゐるが、其の程度は遙かに強く、

圖-33. 實驗  $G_1 (G_s, G_n)$  に於ける洗掘幅  $(k)$  の記號的表示



又左岸側の  $k_{yl}$  の變化は  $k_{sl}$  に稍く近きも、其の程度は  $k_{sl}$  よりずつと弱く、而も約  $35^\circ$  以上にて増加傾向を弱める様なことはない。

次に腹部から後頭部への左岸側移行點  $F'$  の洗掘幅  $k_{yrl}$  は、以上の各曲線とは全く趣を異にし、 $15^\circ$  近く迄は激減するが、 $20\sim 30^\circ$  の間にては殆ど一定であり、 $40^\circ$  以上にて相當の増加を示す様である。

ii) 橋脚壁線を基準とした洗掘範圍の變化は上述の通りであるが、之等を要約すると次の様である。先づ流れに當らない右岸側にては、圖-30 に示す洗掘境界線  $K_s, K_{sr}, K_{sr}'$  が最初は前頭部右側壁線  $SF_r$  に近い形状をとるに拘らず、 $10\sim 15^\circ$  以上では  $K_{sr}, K_{sr}'$  以下の部分が速かに壁線から遠ざかり、更に  $30^\circ$  以上では特に其の傾向が著しい。之は尖端  $S$  によつて右側に分れた流れが、 $\theta$  の小さい間は流向の偏倚を受けること少く壁面に沿うて洗れるが、 $\theta$  が或程度以上となると  $S$  點通過後の流路幅の急擴によつて、流れが壁面から全く離れてしまふためであると考へられる。

圖-34. 實驗  $G_1$  に於ける洗掘幅  $(k)$  と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との関係

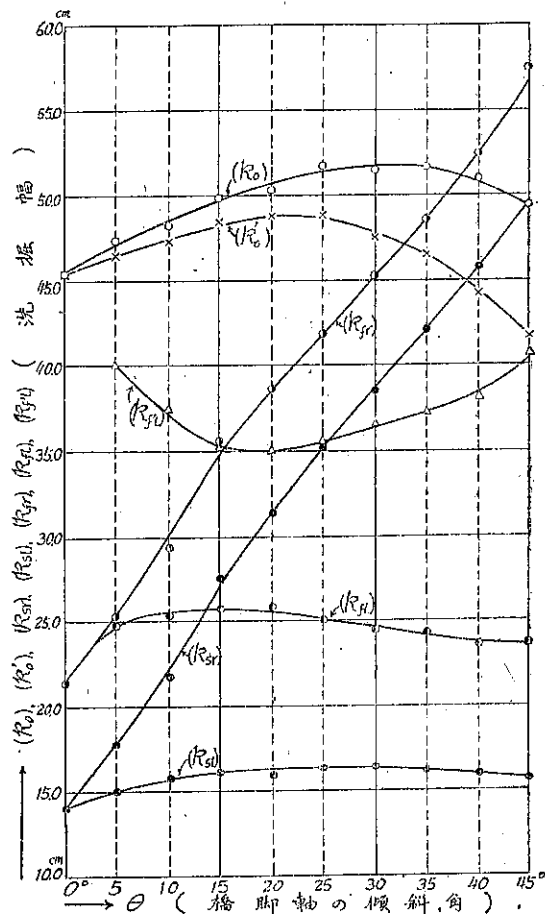


表-15. 實驗 G<sub>1</sub> に於ける洗掘幅 (I<sub>0</sub>)  
 橋脚中心點又は水路中心軸より測つた値 (圖-33 参照) (限界流況 (a)).

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	(k <sub>0</sub> )	(k <sub>0</sub> ')	(k <sub>sr</sub> )	(k <sub>sl</sub> )	(k <sub>sr</sub> )	(k <sub>sl</sub> )	(k <sub>sr</sub> )
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
0°	45.3	45.3	14.0	14.0	21.4	21.4	—
5	47.3	46.5	17.8	15.0	25.2	24.9	40.0
10	48.2	47.3	21.9	15.9	29.3	25.3	37.4
15	49.9	48.4	27.6	16.1	35.6	25.7	35.1
20	50.2	48.8	31.2	16.0	38.6	25.8	35.0
25	51.7	48.8	35.1	16.3	41.8	25.0	35.5
30	51.5	47.5	38.4	16.4	45.1	24.5	36.6
35	51.6	46.5	42.0	16.1	48.5	24.3	37.1
40	51.0	44.1	45.7	16.0	52.4	23.7	38.0
45	49.2	41.6	49.2	15.7	57.3	23.7	40.7

次に流れに當る左岸側にては、境界線 K<sub>0</sub>'K<sub>0</sub>K<sub>sl</sub>K<sub>sr</sub> が最初は速かに左側壁線 SF<sub>l</sub> から遠ざかるが、約 35° 以上では上部の K<sub>0</sub>K<sub>sl</sub> の移動が僅かとなり、更に約 40° 以上では K<sub>sr</sub>K<sub>sr</sub> 以下の部分が腹壁線より離れて行き、後頭部左側の洗掘範囲が擴大する。之は尖端 S によつて左側に分れた流れの流向偏倚が、最初より急増してゆくと共に、次第に其の影響が下流側に移動し、左側流路中央部の流速増加と相俟つて、約 40° 以上に於て後頭部附近の洗掘範囲を急増するものと考へられる。

iii) 實驗中常に一定に保たれた橋脚中心點及水路中心軸を基準とすれば、上の洗掘範囲の變化は次の如く要約される。即ち 圖-33, 34 に見る如く、洗掘境界線の殆ど最上流端とも考へられる K<sub>0</sub> 點は、 $\theta$  が 25° 附近迄は漸次橋脚中心點から遠ざかり、其の後は殆ど移動しないが、35° 前後から逆に中心點に近づく。之に對し尖端 S に相當する K<sub>0</sub>' 點は、上の K<sub>0</sub> 點に似た移動をするが、25° 附近から相當速かに中心點に近づくことが注目される。次に右岸側の K<sub>sr</sub>, K<sub>sr</sub> 點は急速に水路中心軸から遠ざかるが、左岸側の K<sub>sl</sub>, K<sub>sl</sub> 點の移動は僅かであり、唯 K<sub>sr</sub> 點が 5~20° に於て少しく遠ざかるに過ぎない。併し乍ら下流側の K<sub>sr</sub> 點は 15° 附近迄は中心軸に近づくに拘らず、其の後は漸次離れて約 40° から更に其の程度を増す様であつて、左側後頭部附近の洗掘範囲の擴大を如實に示してゐる。

iv) 洗掘深は 圖-32 に見る如く、左右兩岸に於て著しく其の趣が異つてゐる。即ち流れに當らない右岸側に於ては、 $\theta$  の増加に應じて洗掘深を激減し、t<sub>sr</sub>, t<sub>mr</sub>, t<sub>sr</sub> は夫々 18.5°, 11.5°, 9° 附近にて負號に變じ堆積となる。而して 20° 以上に於ける堆積高の變化は何れも比較的僅かであるが、夫々其の變化狀況を異にする。この事實は  $\theta=0^\circ$  の時尾端 S' を圍んで小半圓形に生ずべき最大堆積高線 (圖-30, 33 に於て微細な點線で示したものが)、 $\theta$  の増大につれて漸次 F<sub>sr</sub>' 點の方に移動するためであつて、次の如く考察される。即ち此の堆積高線の前端は 20° 附近にて F<sub>sr</sub>' 點に達し、45° では M<sub>sr</sub> 點より更に前進するに對し、其の後端は 35° 附近で F<sub>sr</sub>' 點に達し、其の後はあまり前進しない様である (圖-29 参照)。

次に流れに當る左岸側に於ては、 $\theta$  の増大に伴ふ洗掘深の増加著しく、殊に後頭部尾端の t<sub>sr</sub>、次いで移行點の t<sub>sl</sub> の激増が目立つてゐる。而も之等が 40° 以後に特に顯著な増加を示すことは、尾端を少し尖らしたことにもよるが、先に洗掘幅に就て述べた事實と相俟つて、後頭部左側附近の洗掘の急増を意味し、注目すべき事柄である。尙 t<sub>sr</sub> が約 5° にて最小となり最大の堆積高を呈するのは、上述の S' 點周圍の最大堆積高線の後端が此の傾斜角



にて  $S'$  點に來る爲である。

最後に前頭部尖端  $S$  の洗掘深  $t_s$  は最大洗掘深  $t_{max}$  と共に、 $\theta$  の増加に應じて相當の激増を來すから、橋脚安定上特別の考慮を要する。此の場合約  $40^\circ$  以上に於て  $t_s$  が激増し、移行點  $F_2$  の洗掘深  $t_{fr}$  が却つて減少するのは、 $t_{max}$  の點が  $F_2$  點附近から漸次  $S$  點に近接し、遂に殆ど  $S$  點に一致して來る爲であつて、 $50^\circ$  附近では  $t_s = t_{max}$  となるものと考へられる。

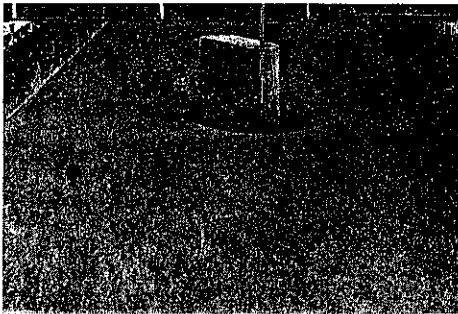
v) 以上を綜合するに、前頭部を尖らした I 型橋脚は、 $\theta = 0^\circ$  の場合は實用上理想の橋脚形状と認められるに拘らず、 $\theta$  の増大につれて河床洗掘上の悪影響は加速度的に増加するものと考へねばならない。此の内、流れに當らない右岸側にては、 $10 \sim 15^\circ$  以上に於て洗掘幅を急増するが、一般に洗掘深僅小にして腹部より下流側は寧ろ堆積となるから、橋脚安定上何等の心配を要しない。之に反して流れに當る左岸側にては、橋脚の安定を支配する前頭部附近の洗掘の幅及深さを激増し、約  $40^\circ$  以上では尖端の洗掘深の急増の外に、後頭部附近の洗掘が特に目立つて來る。之等は橋脚兩側に於ける流れの流向偏倚が、前後頭部を尖らしたことによつて一層激化されることに基くものと考へられ、次に述べる II 型橋脚の如く尖端を圓くしたものに比べ著しく趣を異にするわけである。

3. II 型橋脚: 實驗  $G_1$ , 實驗  $G_2$  に於ける洗掘狀況は前項  $G_1$  の場合と相當趣を異にするが、其の 1 例を示

圖-35. 實驗  $G_2$  に於ける洗掘及堆積狀況の一例

(II 型橋脚, 傾斜角  $\theta = 45^\circ$ ; 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

(a) 前頭部側



(b) 後頭部側

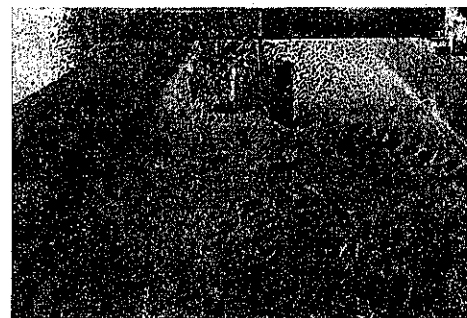


表-16. 實驗  $G_2$  に於ける洗掘幅及洗掘深

(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	$k_0$	$k'_0$	$k_{sr}$	$k_{sl}$	$k'_{sr}$	$k'_s$	$k_{fr}$	$k_{fl}$	$k'_{fr}$	$k'_{fl}$	$k_{frl}$	$k'_{frl}$
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
$0^\circ$	17.7	17.7	24.3	24.3	24.3	24.3	17.8	17.8	17.8	17.8	—	—
5	18.0	18.0	23.1	25.5	24.2	24.4	18.6	20.4	19.2	19.0	30.0	28.1
10	18.5	18.5	22.8	26.9	25.8	25.0	20.1	21.5	21.5	19.3	26.5	24.0
15	19.0	18.5	23.2	27.5	26.1	25.5	20.4	21.6	23.6	19.2	24.8	23.3
20	19.0	19.1	22.7	28.1	27.4	25.4	21.1	21.8	25.4	19.8	22.7	21.5
25	19.6	19.7	22.1	29.9	28.6	26.3	21.3	22.6	25.9	19.6	21.8	19.8
30	20.3	20.0	21.9	32.8	31.5	36.3	21.5	24.7	27.7	19.7	20.9	18.7
35	20.7	20.0	21.8	36.2	34.9	26.6	23.9	26.6	33.6	20.7	21.4	20.0
40	21.2	20.0	21.5	39.0	37.5	26.7	25.1	29.6	36.5	20.8	22.5	20.6
45	22.7	20.1	22.2	44.0	42.6	28.3	25.6	32.4	40.4	31.4	24.8	20.4

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	$t_s$	$t_{max}$	$t_{fr}$	$t_{ft}$	$t_{mr}$	$t_{ml}$	$t_{fr}$	$t_{fl}$	$t_{sr}$
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
0°	10.1	10.1	8.0	8.0	4.1	4.1	1.9	1.9	-1.4
5	10.5	10.5	8.0	8.6	4.2	4.9	1.2	3.0	-1.6
10	10.8	10.8	7.6	9.3	3.3	5.7	0.3	3.9	-1.3
15	10.9	10.9	7.7	9.9	2.8	7.3	-0.3	6.0	1.1
20	11.2	11.2	7.6	10.3	2.1	8.7	-1.0	7.9	3.0
25	11.3	11.3	7.7	10.8	1.3	9.5	-1.6	9.2	4.7
30	11.2	11.3	7.7	10.6	0.5	9.6	-1.9	9.9	6.3
35	11.2	11.3	7.4	10.7	-0.5	9.7	-2.6	10.6	7.1
40	10.9	11.2	7.2	11.0	-1.2	9.8	-2.8	11.0	7.9
45	10.8	11.3	6.6	11.1	-1.5	10.5	-1.7	11.4	8.2

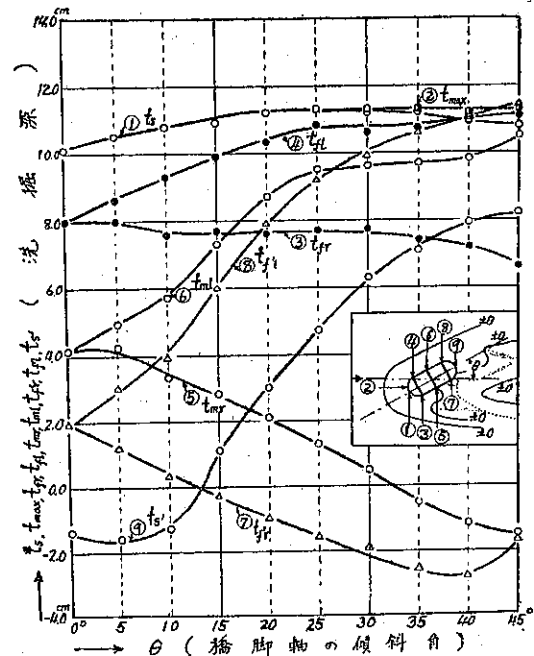
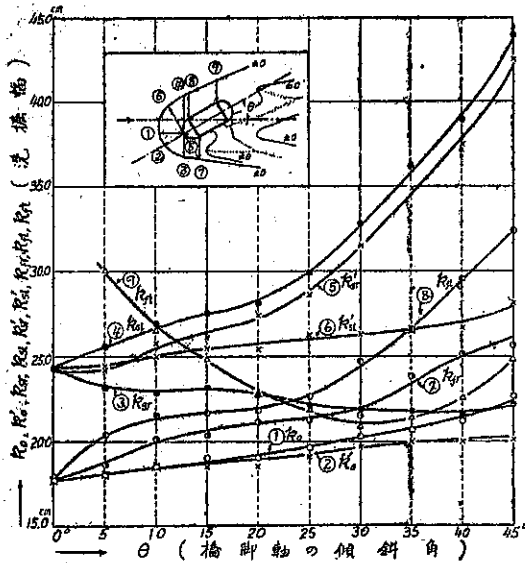
すと 圖-35 の通りである。表-16 は 圖-30 に示す記號 (橋脚の形状は前、後頭部共に半圓形を用いたから、此の圖とは異なつてゐる) を用ひて、橋脚周壁の主要個所に関する洗掘の幅及深さの測定値のみを表記したものであり、之等を圖示すれば 圖-36, 37 の様になる。又圖-33 (勿論橋脚形状は異なつてゐる) の如く橋脚中心點及水路中心軸を基準として洗掘幅を測定した結果は表-17 及 圖-38 の如く表される。

以上圖-36~38 から、特に注目すべき諸點を前項 2 の場合と比較して列挙すれば、次の通りである。

1) 前頭部附近の洗掘幅  $k, k'$  は一般に傾斜角  $\theta$  の増加につれて増大するが、其の程度は圖-36 に見る如く概して僅少である。即ち尖端 S に於ける洗掘幅  $k_s$  及  $k'_s$  は  $\theta$  と共に微増するが、後者が約 35° 以上に於て大差な

圖-36. 實驗 G<sub>2</sub> に於ける洗掘幅  $k, k'$  と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との関係

圖-37. 實驗 G<sub>2</sub> に於ける洗掘深  $t$  と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との関係



きに對し、前者は約 25° 前後から稍、明かな増加傾向を呈する。次に流れに當らない右岸側では  $k_{sr}$  が最初少し減少するも 20° 近く迄は大差なく其の後漸減するに對し、 $k'_{sr}$  は最初大差なきも 5~10° にて稍、急増し更に 20~25° 以上に於ける増加が特に著しい。又流れに當る左岸側では、 $k_{sl}$  の變化が  $\theta$  の小さい間を除き  $k'_{sl}$  の變化に酷似してゐるに對しは殆ど直線的に微増し約 40° 以上に於て少しく急増するに過ぎない。

圖-38. 實驗 G<sub>2</sub> に於ける洗掘幅 ( $l_0$ ) と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との關係

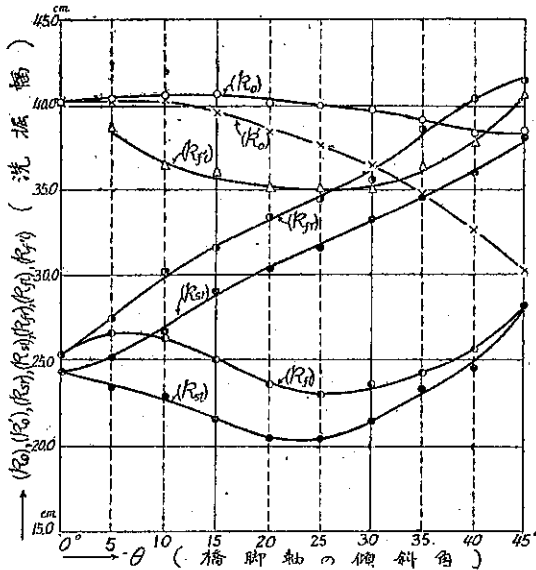


表-17. 實驗 G<sub>2</sub> に於ける洗掘幅 ( $l_0$ ): 橋脚中心點又は水路中心軸より測つた値(圖-22 参照)(限界流況(a)).

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	( $k_0$ )	( $k'_0$ )	( $k_{sr}$ )	( $k_{sl}$ )	( $k'_{sr}$ )	( $k'_{sl}$ )	( $k'_r$ )
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
0°	40.2	40.2	24.3	24.3	25.3	25.3	—
5	40.4	40.3	25.1	23.5	27.4	26.6	38.8
10	40.7	40.4	26.7	23.0	30.1	26.3	36.5
15	40.7	39.6	29.0	21.7	31.6	25.0	36.0
20	40.1	38.5	30.4	20.4	33.4	23.7	35.0
25	40.0	37.7	31.6	20.4	34.5	23.0	35.0
30	39.8	36.5	33.2	21.5	35.6	23.6	35.0
35	39.1	34.8	34.7	23.3	38.7	44.1	36.2
40	38.4	32.7	36.0	24.5	40.5	25.7	37.9
45	38.6	30.1	38.1	28.1	41.5	28.1	40.7

移行點に就ては、右岸側の  $k'_{sr}$  の變化は 20° 附近迄は  $k'_{sr}$  に似てゐるが、其の後は相當趣を異にし、30~35° に於ける急増の前後は大きい變化がなく、又左

岸側の  $k_{sl}$  は終始  $k_{sl}$  に酷似した變化を呈する。更に F' 點に對する  $k'_{sl}$  は、以上の各曲線と著しく趣を異にし、約 30° 迄は激減するが、其の後は却つて相當の増加を生ずることが認められる。

ii) 洗掘範圍に關する上述の變化は次の如く要約されるが、先端を尖らした I 型橋脚の場合と著しい相違のあることを注意しなければならない。即ち右岸側にては、圖-30 に示す洗掘境界線  $K_0, K_{sr}, K_{sl}$  が常に前頭部右側壁線  $SF_r$  に酷似した形状をとりつゝ徐々に壁線から離れ、上部の  $K_{sr}$  點附近は寧ろ壁線に近づく傾向があるが、唯  $K_{sl}$  點以下の部分が 30° 附近から相當速かに壁線より遠ざかる様である。之は前頭部によつて右側に分れた流れが、前頭部が圓い爲に  $\theta$  に拘らず大差なき流向偏倚を受けて壁面に沿つて流れるからであり、30° 附近から  $K_{sl}$  點以下の境界線が壁線より相當離れてくるのは、F' 點通過後の流路幅急擴の影響が著しくなつたものと考えられる。

次に左岸側にては、境界線  $K_0, K_{sl}, K_{sl}$  が最初は左側壁線  $SF_l$  に近い形状をとつて徐々に壁線から離れるが、20~25° 以上では  $K_{sl}, K_{sl}$  の前後の部分が著しく壁線より遠ざかることになり、更に約 30° 以上では  $K_{sl}, K_{sl}$  以下の部分が腹部壁線から離れて、後頭部左側の洗掘範圍が擴大する。之は前頭部によつて左側に分れた流れの流向偏倚が、上と同様  $\theta$  に拘らず大差なきためであり、約 30° 以上に於ける後頭部附近の洗掘範圍の擴大は、上記前頭部附近の流向偏倚の影響が次第に下流側に及ぶと共に、左側洗路中央部の流速増加に影響されたものと考えられる。

iii) 橋脚中心點及水路中心軸を基準とした洗掘範圍の變化を要約すると、圖-38 に見る如く洗掘範圍の最上流端に近い K<sub>0</sub> 點は、最初は橋脚中心點から少し離れるが、約 15° 以上では中心點に漸近する。之に對し橋脚軸線

上の点  $K_0'$  は初め殆ど移動せず、 $10^\circ$  附近から相當速かに中心點に近づく。次に右岸側の  $K_{0r}, K_{1r}$  點は急速に水路中心軸から遠ざかるが、其の程度は I 型橋脚の場合より遙かに弱い。然るに左岸側の  $K_{0l}, K_{1l}$  點に最初の少しの間を除くと、 $20 \sim 25^\circ$  附近迄は中心軸に近づき、其以上では逆に離れてゆくのであつて、I 型橋脚の場合と著しく趣を異にする。尙下流側の  $K_{2l}$  點は約  $10^\circ$  以下の場合を除くと、 $K_{1l}$  點に近似した移動をなし、約  $30^\circ$  以上では左岸腹部以下の洗掘範圍が殆ど腹部壁線に平行した形で漸増することが認められる。

iv) 洗掘深も 圖-37 に見る如く、I 型橋脚の場合と相當異なつた變化を呈する。即ち右岸側の洗掘深  $t_{lr}, t_{rr}$  は共に  $\theta$  の増加に應じて減少するが、其の程度は  $t_{lr}$  に比べて  $t_{mr}$  及  $t_{rr}$  の方が著しく、後 2 者は夫々  $32.5^\circ, 13^\circ$  附近にて負號に變じ堆積となる。而して堆積となつてからの變化は、 $\theta = 0^\circ$  の時尾端  $S'$  を圍んで小半圓形に生ずべき最大堆積高線が、 $\theta$  の増大と共に漸次  $F_r$  點の方に移動し、 $35 \sim 40^\circ$  にて  $F_r$  點に、 $45^\circ$  にて  $M_r, F_r$  の殆ど中央に達するためである (圖-35 参照)。

次に左岸側の洗掘深は  $\theta$  の増大に伴つて激増するが、特に  $t_{sl}$  次いで  $t_{yl}$  の増加が著しい。而も  $t_{sl}$  及  $t_{yl}$  が  $30^\circ$  以上にて比較的緩やかな増加傾向に變ずるのは、後頭部を圓くしたことによつて、其の附近の流向偏倚に大差を生じないためである。尙  $45^\circ$  にて  $t_{yl}$  が他の何れの點の洗掘深よりも大きくなることは特に注目すべき事柄であり、又  $t_{sl}$  が  $5^\circ$  附近にて最小となり最大の堆積高を示すのは I 型橋脚に於けると同様である。

最後に前頭部先端  $S$  の洗掘深  $t_s$  は、約  $30^\circ$  迄は漸増するが其の後は却つて漸減する。之は最大洗掘深  $t_{max}$  が  $S$  點より移行點  $F_l$  の方に移動する傾向を生じ、約  $30^\circ$  以上にて特に著しくなるためであつて、大體に於て前頭部の流れに直面した部分に近く  $t_{max}$  を生じ、其の値は約  $20^\circ$  以上は殆ど一定と看做される。此の事實は  $t_{sl}$  の  $\theta$

圖-39. 實驗  $G_2$  に於ける洗掘幅  $k_l, k_r$  と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との関係

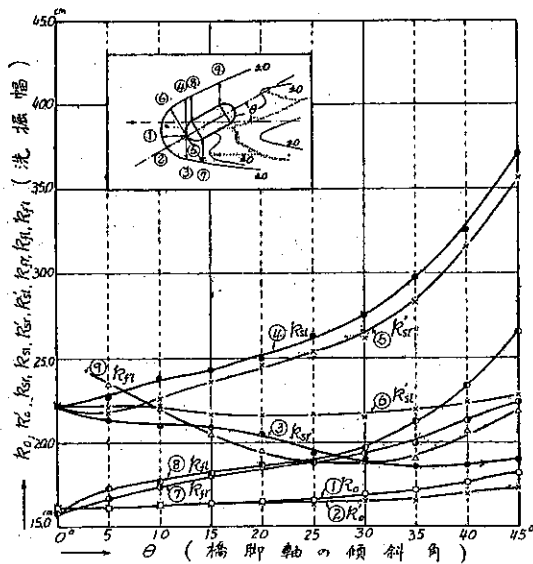
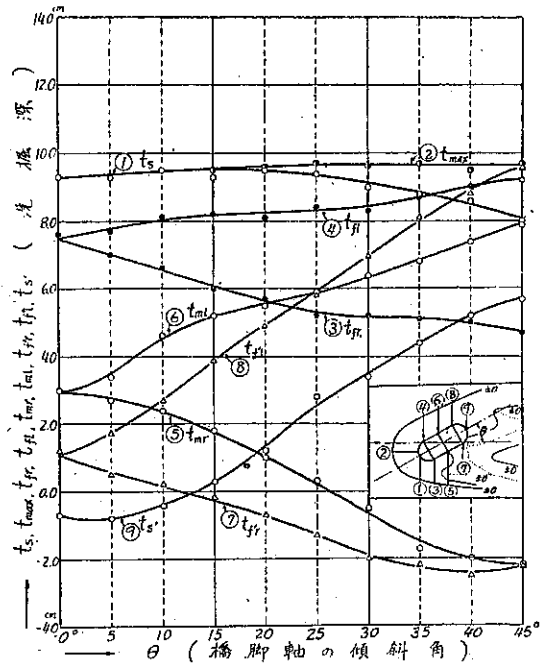


圖-40. 實驗  $G_2$  に於ける洗掘深  $t$  と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との関係



に伴ふ變化からも容易に諒解される所である。

v) 以上を綜合するに、前、後頭部を圓くした II 型橋脚は、 $\theta=0^\circ$  の場合は洗掘軽減上頗る不利なるに拘らず、 $\theta$  の増大に伴ふ河床洗掘上の悪影響は比較的少いものと云はねばならない。此の内、洗れに當らない右岸側にては、約  $30^\circ$  以上にて相當洗掘幅を増すが、一般に洗掘深小にしに腹部より下流側は既に堆積となつてゐるから、I 型橋脚と同様に橋脚安定上何等の不安もない。之に反して洗れに當る左岸側にては、橋脚の安定を支配する前頭部附近の洗掘の幅及深さを増加するが、其の程度は比較的少い。又後頭部附近の洗掘深は約  $30^\circ$ 迄の間に相當激増するが洗掘幅の増加は少く、而も其の後の深さ及幅の増加傾向は緩慢である。唯約  $45^\circ$  になると前頭部よりも後頭部左側の洗掘を注意する必要がある。之等は I 型橋脚の場合と著しく異なる性質であつて、前後頭部を共に圓くしたことによつて、先端にて兩側に分れる流れの流向偏倚が  $\theta$  の増大に伴つてさしたる變化を生ぜず、又後頭部を廻つて合一する兩側の流れも之と同様の性質を示すことに基くものと考へられる。

4. II 型橋脚: 實驗 G<sub>2</sub>。此の實驗は G<sub>2</sub> と同じく II 型橋脚を用ひ、單に限界流況のみを異にして行つたもので、其の洗掘狀況は G<sub>2</sub> の場合と非常によく似てゐる。表-18 は圖-30 の記號を用ひ主要個所の洗掘の幅及深

表-18. 實驗 G<sub>2</sub> に於ける洗掘幅及洗掘深  
(限界流況 (b); 水深 3.9 cm, 勾配 1/600, 流量 26.5 l/sec)

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	$k^0$	$k'_0$	$k_{rr}$	$k_{rl}$	$k'_{rr}$	$k'_{rl}$	$k_{fr}$	$k_{fl}$	$k'_{fr}$	$k'_{fl}$	$k_{fu}$	$k'_{fu}$
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
$0^\circ$	16.1	16.1	22.2	22.2	22.2	22.2	15.8	15.8	15.8	15.8	---	---
5	16.1	16.1	21.3	22.7	21.8	22.1	16.7	17.3	17.0	17.1	23.5	23.3
10	16.3	16.3	21.0	23.8	22.6	22.2	17.4	17.7	18.0	16.5	22.0	21.6
15	16.4	16.3	20.9	24.3	23.6	21.6	18.0	18.2	19.9	16.5	20.5	19.8
20	16.5	16.4	20.5	25.0	24.6	21.6	18.6	18.7	22.1	16.4	19.5	18.5
25	16.6	16.3	19.4	26.3*	25.4	21.7	18.8	18.8	24.0	16.2	18.9	17.1
30	17.0	16.5	19.0	27.5	26.2	21.5	19.4	19.7	25.3	16.0	18.9	18.0
35	17.2	16.5	18.6	29.8	28.3	22.0	20.0	21.3	27.9	17.0	19.1	17.9
40	17.7	17.0	18.7	32.6	31.6	22.4	21.3	23.4	32.6	17.4	20.7	18.0
45	18.2	17.3	19.0	37.1	35.7	22.8	22.4	16.6	38.5	17.5	21.9	18.2

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	$t_s$	$t_{max}$	$t_{fr}$	$t_{fl}$	$t_{mr}$	$t_{ml}$	$t_{fr}$	$t_{fl}$	$t'_s$
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
$0^\circ$	9.3	9.3	7.6	7.6	3.0	3.0	1.2	1.2	-0.7
5	9.3	9.3	7.0	7.7	2.7	3.4	0.5	1.7	-0.8
10	9.5	9.5	6.6	8.1	2.4	4.6	0.2	2.7	-0.4
15	9.8	9.5	6.0	8.2	1.8	5.2	-0.2	3.9	0.3
20	9.5	9.6	5.7	8.1	1.0	5.5	-0.7	4.9	1.2
25	9.4	9.7	5.2	8.4	0.3	5.9	-1.3	5.8	2.8
30	9.0	9.6	5.2	8.3	-0.5	6.4	-2.0	7.0	3.4
35	8.8	9.7	5.1	8.7	-1.7	6.8	-2.2	8.1	4.4
40	8.6	9.5	5.0	9.0	-2.0	7.4	-2.5	8.8	5.2
45	8.0	9.7	4.7	9.2	-2.2	7.9	2.2	9.6	5.7

圖-41. 實驗 G<sub>1</sub> に於ける洗掘幅 (k) と橋脚軸の傾斜角 θ との關係

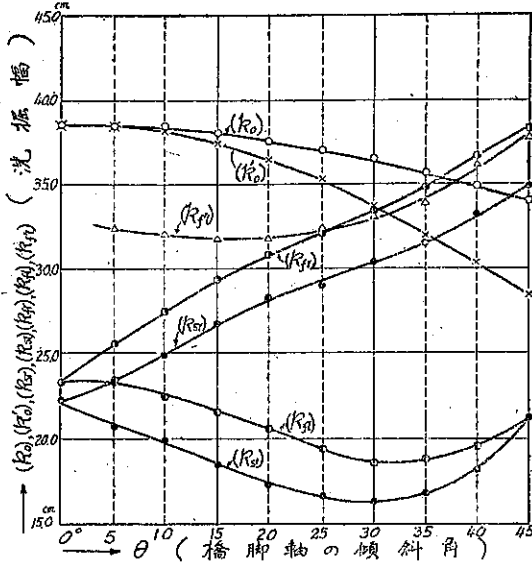


表-19. 實驗 G<sub>1</sub> に於ける洗掘幅 (k); 橋脚中心點又は水路中心軸より測つた値 (圖-33 参照) (限界流況(b)).

橋脚軸の傾斜角 θ	(k <sub>0</sub> )	(k' <sub>0</sub> )	(k <sub>r</sub> )	(k <sub>r1</sub> )	(k <sub>r2</sub> )	(k <sub>r3</sub> )	(k <sub>r4</sub> )
0°	cm 38.6	cm 38.6	cm 22.2	cm 22.2	cm 23.3	cm 23.3	cm —
5	38.5	38.5	23.3	20.7	25.5	23.5	32.3
10	38.5	38.2	24.9	19.9	27.4	22.5	32.0
15	38.1	37.5	26.7	18.5	29.2	21.6	31.7
20	37.6	36.5	28.2	17.3	30.9	20.6	31.8
25	37.0	35.2	28.9	16.8	32.0	19.2	32.2
30	36.5	33.8	30.3	16.2	33.5	18.6	33.0
35	35.6	31.9	31.5	16.9	34.8	18.8	33.9
40	34.9	30.3	33.1	18.1	36.7	19.5	36.1
45	34.1	28.4	34.9	21.2	38.3	21.2	37.8

この測定値のみを表記したものであり、之等を圖示したものが圖-39, 40 である。又圖-33 の如くして洗掘幅を測定した結果は、表-19, 圖-41 の様である。以上

圖-39~41 と實驗 G<sub>2</sub> の結果を示す圖-36~38 とを比較し特に注目すべき點を列挙すると、次の通りである。

i) 實驗 G<sub>1</sub> と G<sub>2</sub> 比較するに、洗掘の幅及深さ(負號となつて堆積を示す場合も含めて)が、橋脚軸の傾斜角 θ に應じて變化する有様は互によく酷似してゐる。此の事實は、限界流況を異にしても、洗掘に對する傾斜角 θ の影響が殆ど相似なることを實證するものである。故に本實驗に得た傾斜角の影響に關する定性的資料を、流況の異なる實地河川に適用するに際し相當の確實性を附與するものと考へられ、先に橋脚形状の影響に關する實驗 A<sub>1</sub> 及 B から得た結論と全く一致するものである(前論文(10)3. 参照)。

ii) 實驗 G<sub>1</sub> に於ける洗掘の幅及深さは、總べての傾斜角に對し、夫々實驗 G<sub>2</sub> に於けるものより小さくなつてゐる。尙洗掘深が負號となり堆積高を表する場合も其の絕對値を考へると、後頭部の尾端及右側移行點に對する  $k_{r3}$  及  $k_{r4}$  に就ては同様の性質が認められる。従つて結局小なる水深の限界流況程、洗掘の幅及深さ並に堆積高を減ずるものと云ふことが出來、此の點も上記 A<sub>1</sub> 及 B の實驗結果と一致する。唯腹部右側の中央  $k_{r1}$  のみは之等と趣を異にし、水深の小さい實驗 G<sub>1</sub> の方が G<sub>2</sub> よりも大きい堆積高を與へたが、本實驗の性質上水深以上の堆積高を與へることは有り得ないから、或程度以下の水深にては矢張水深の減少につれて、 $k_{r1}$  の絕對値も減じてゆくものと考へてよい。

而して此の水深の減少に伴ふ洗掘の幅及深さ(堆積となる場合も含めて)の輕減程度は、傾斜角 θ に應じて多少目立つた變化を呈する。今實驗 G<sub>1</sub> と G<sub>2</sub> とに於て同一の傾斜角に對する洗掘の幅及深さの差異を夫々  $k_{1}$  及  $k'_{1}$  とすれば、大體次の事實が認められる。即ち表-16~19 からわかる如く、約 30° 迄は θ の増大につれて  $k_{r1}$  及  $k'_{r1}$  が漸減し  $k_{r2}$  が殆ど一定である以外は、何れの  $k$  及  $k'$  も一般に漸増してゆくが、約 30° 以上になると何れ θ に拘らず大差を生じない様である。之等は橋脚周圍に於ける流面の偏倚其他極めて複雑な水理現象に基くものと考へられ、其の機構を考察することによつて、此の種實驗に於ける相似律に對しても或程度の曙光を見出し得る筈であるが、現在の所適確に解決は相當困難な様であり、第 3 編に於て改めて考察を加へたいと思ふ。

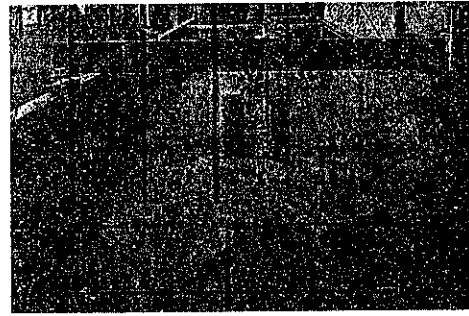
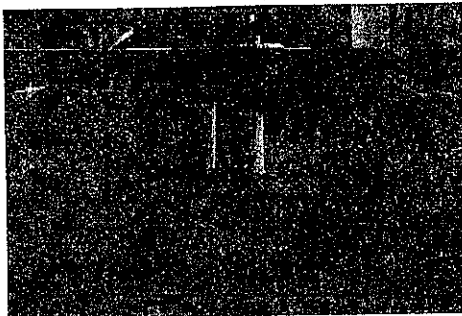
5. 2 圓壩建橋脚: 實驗 G. 實驗 G<sub>1</sub> に於ける洗掘状況は、前圓壩前端附近が實驗 G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub> に於ける前頭部附近と或程度趣を等しくする以外は、G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub> と相當異なつたものであり、其の一例を示すと圖-42 の通りである。表-20, 21 は橋脚周壁の主要個所に關する洗掘の幅及深さの測定値のみを表記したものである。表中の各記號の意義は圖-43 に示す如く、洗掘幅  $k, k'$  と洗掘深  $i$  に就ては圖-30 の場合と同様であるが、右上に添字 0 を附した  $k^0, i^0$  に就ては少しく説明を要する。即ち 2 圓壩建橋脚に於ては、傾斜角の増大と共に兩圓壩の前面に夫々流

圖-42. 實驗 G<sub>1</sub> に於ける洗掘及堆積狀況の一例

(2 圓壩建橋脚, 傾斜角  $\theta = 45^\circ$ ; 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

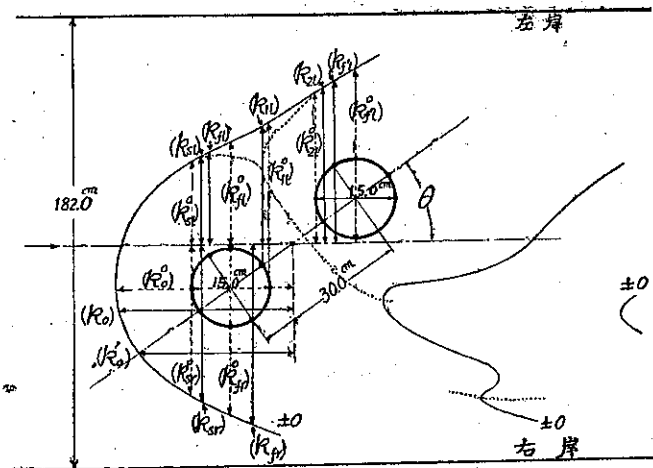
(a) 上流側

(b) 下流側



水が直接當ることになり、兩圓壩は漸次別々の獨立した橋脚として作用する様になる。之等の關係を一層具體的に考察する爲に、兩圓壩を夫々獨立した橋脚と考へ、共に流水方向に平行に設置されたものとして其の前端、後端及移行點の位置を定め、之等の諸點に關する洗掘の幅及深さを測定したのが夫々  $k^0, i^0$  であつて、圖-43 には細い破線を以て表し其の意義を明かにした。圖-44, 46 は表-20 に示す洗掘幅を、又圖-45, 47 は表-21 に示す洗掘深を圖示したものである。

圖-43. 實驗 G<sub>1</sub> に於ける洗掘及堆積の記號的表示



尚傾斜角に拘らず常に一定に保たれた橋

脚中心點 C 又は水路中心軸を基準とし、圖-48 の如く洗掘幅を測るものとすれば、表-22, 圖-49, 50 の様になる。茲に記號  $(k), (k^0)$  が此の場合の洗掘幅を意味することは、圖-33 の場合と同様である。

以上 2 圓壩建橋脚に關する實驗の結果を示す圖-43~50 から、特に注目すべき性質として列擧し得る諸點は次の通りである。

1) 前圓壩前端 S に於ける洗掘幅  $k_0$  及  $k'_0$  は圖-44 に見る如く最初は傾斜角  $\theta$  に比例して漸増するが、 $20 \sim 25^\circ$  以上では前者は増加傾向を弱め後者は寧ろ漸減する。次に右岸側にては、 $k_{sr}$  が最初稍急減し其の後は大體直線的に漸減するに對し、 $k'_{sr}$  は最初大差なきも次第に急増し、特に約  $25^\circ$  以上に於ける増加が著しい。又右岸側にては、 $k_{sl}$  が最初の少しの間を除き略々直線的に増加するに對し、 $k'_{sl}$  は殆ど大差を生じない。

表-20. 実験 G<sub>1</sub> に於ける洗掘幅 (圖-43 参照)  
(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	$k_0$	$k_0'$	$k_0''$	$k_{rs}$	$k_{sl}$	$k'_{sr}$	$k'_{sl}$	$k''_{sr}$	$k''_{sl}$	$k_{jr}$	$k_{jt}$	$k'_{jr}$	$k'_{jt}$
0°	17.3	17.3	17.3	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	18.6	18.6	18.6	18.6
5	17.3	17.3	17.5	23.3	25.0	24.6	24.2	23.9	24.2	19.2	19.1	20.0	18.9
10	17.8	17.5	17.8	22.4	25.3	24.9	23.8	23.4	23.8	20.0	19.2	22.4	18.5
15	18.1	17.7	18.1	22.0	26.2	26.0	23.7	23.6	23.9	20.7	19.2	24.6	17.9
20	18.2	17.8	18.0	21.5	27.0	27.6	23.7	23.8	24.0	21.2	19.3	27.4	17.7
25	18.3	17.6	18.0	21.2	27.8	28.5	23.8	23.9	24.2	21.9	19.4	29.0	17.8
30	18.5	17.5	18.0	20.9	28.7	31.5	24.1	23.9	24.2	22.9	19.7	32.0	17.8
35	18.6	17.4	17.8	20.5	29.4	35.4	24.1	23.8	24.2	23.5	19.9	37.6	17.8
40	18.8	17.4	17.7	20.2	30.6	40.1	24.0	23.9	24.4	24.2	20.4	43.5	17.6
45	19.1	17.4	17.7	20.0	31.6	47.7	24.1	24.3	24.3	24.7	21.0	52.5	17.5

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	$k''_{jr}$	$k''_{jt}$	$k_{jt}$	$k'_{jt}$	$k''_{jt}$	$k_m'$	$a_m$	$k_{sl}$	$k'_{sl}$	$k''_{sl}$	$k_{jrl}$	$k'_{jrl}$	$k''_{jrl}$
0°	18.6	18.6	28.9	28.9	28.9	—	5.8	32.6	32.6	32.6	27.0	27.0	27.0
5	19.0	19.3	28.7	28.0	29.3	—	6.6	31.0	30.2	30.4	25.0	24.2	25.1
10	19.3	19.5	28.1	26.9	29.5	—	7.5	29.4	28.2	28.1	22.5	21.6	23.0
15	19.5	19.6	27.5	26.2	29.6	7.5	7.5	27.8	26.6	25.7	19.7	19.2	20.2
20	19.7	19.7	27.1	25.7	29.8	7.5	7.0	25.9	24.4	23.1	17.9	17.2	18.4
25	20.0	19.8	26.8	25.1	30.3	7.3	5.9	26.2	23.7	22.6	18.0	15.6	19.0
30	20.4	20.1	27.5	24.6	31.9	7.0	5.2	27.4	23.0	23.0	18.6	15.8	20.0
35	20.5	20.5	28.6	24.5	33.8	5.6	5.8	28.8	23.0	23.6	19.5	16.6	20.4
40	20.7	22.4	31.6	24.1	38.0	4.0	6.1	29.7	23.4	23.7	19.8	17.2	20.8
45	20.6	26.0	35.5	23.7	42.2	3.0	6.7	30.7	23.4	24.0	20.1	17.4	20.8

表-21. 実験 G<sub>1</sub> に於ける洗掘深 (圖-43 参照)  
(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	$t_s$	$t''_s$	$t_{jr}$	$t_{jt}$	$t''_{jr}$	$t''_{jt}$	$t_1$	$t''_1$	$t_m'$	$t_c$	$t_m$	$t_2$	$t''_2$	$t_{jrr}$	$t_{jrl}$	$t''_{jrr}$	$t''_{jrl}$	$t_{sr}$	$t''_{sr}$
0°	9.9	9.9	8.2	8.2	8.2	8.2	2.2	2.2	—	2.0	2.0	5.0	5.0	3.2	3.2	3.2	3.2	-2.8	-2.8
5	10.0	10.1	8.2	8.8	8.4	8.5	3.6	3.1	—	3.5	3.5	4.9	5.1	2.9	3.8	3.1	3.3	-2.2	-2.3
10	10.2	10.3	8.1	9.1	8.6	8.7	4.4	3.6	—	4.8	4.8	6.0	6.6	1.9	5.6	2.5	4.8	-0.6	-1.5
15	10.3	10.4	7.9	9.5	8.5	8.8	5.4	3.9	—	6.0	6.0	7.8	8.0	1.2	7.0	2.4	6.2	0.7	-0.8
20	10.3	10.4	7.6	9.5	8.5	8.6	5.7	3.8	6.3	6.3	6.2	8.3	9.0	1.2	7.8	3.0	6.9	2.0	0.2
25	10.2	10.4	7.2	9.5	8.6	8.5	5.8	3.6	6.6	6.5	6.4	8.6	9.3	2.1	8.3	4.1	7.3	3.0	1.0
30	10.0	10.3	6.8	9.6	8.5	8.5	5.8	3.4	6.6	6.5	6.4	8.7	9.3	2.9	8.5	5.3	7.6	3.9	1.7
35	9.9	10.1	6.6	9.7	8.5	8.6	5.8	3.2	6.6	6.4	6.2	8.7	9.3	3.7	8.6	6.0	7.5	4.5	2.3
40	10.0	10.2	6.4	9.8	8.6	8.6	5.9	3.3	7.0	6.3	6.0	8.7	9.4	3.8	9.0	6.5	7.8	5.2	2.6
45	9.9	10.2	6.0	9.9	8.5	8.8	6.5	3.4	7.5	6.3	6.0	8.7	9.8	3.6	9.5	6.7	8.3	5.7	3.3



圖-44. 實驗 G<sub>1</sub> に於ける洗掘幅  $k$  と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との関係

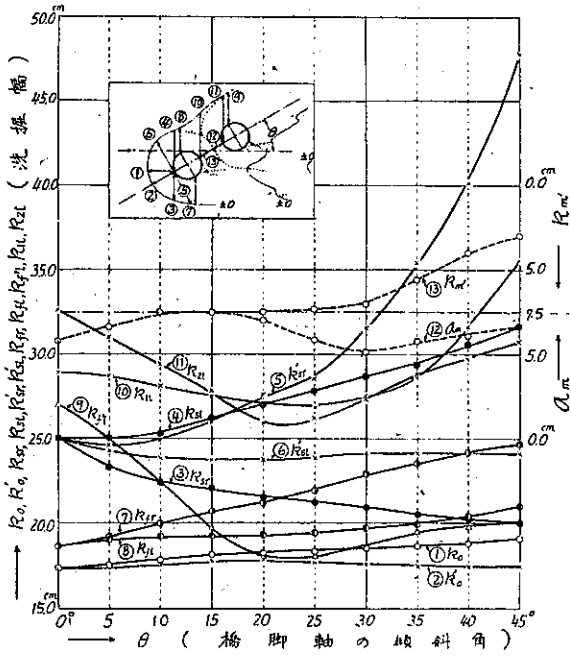


圖-45. 實驗 G<sub>1</sub> に於ける洗掘深  $t$  と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との関係

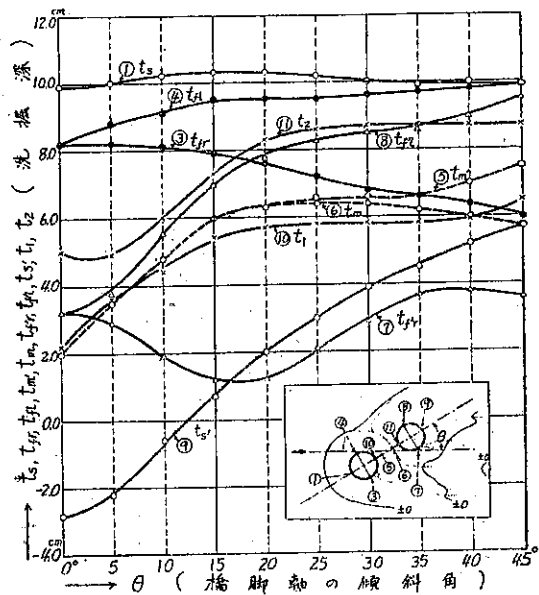


圖-46. 實驗 G<sub>1</sub> に於て 2 個の獨立圓溝橋脚と看做した場合の洗掘幅  $k_0$  と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との関係

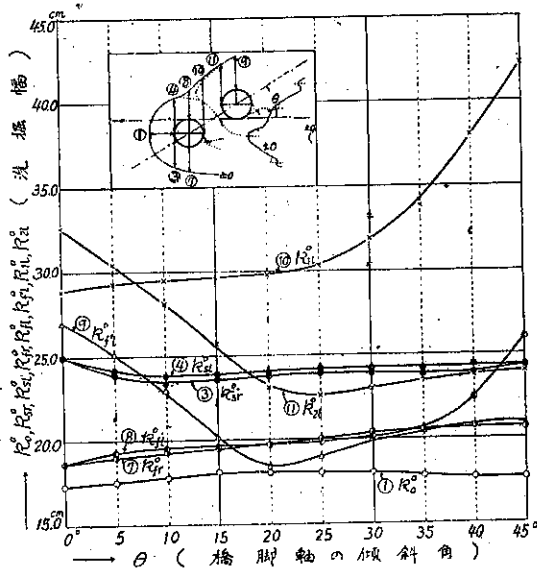


圖-47. 實驗 G<sub>1</sub> に於て 2 個の獨立圓溝橋脚と看做した場合の洗掘深  $t_0$  と橋脚軸の傾斜角  $\theta$  との関係

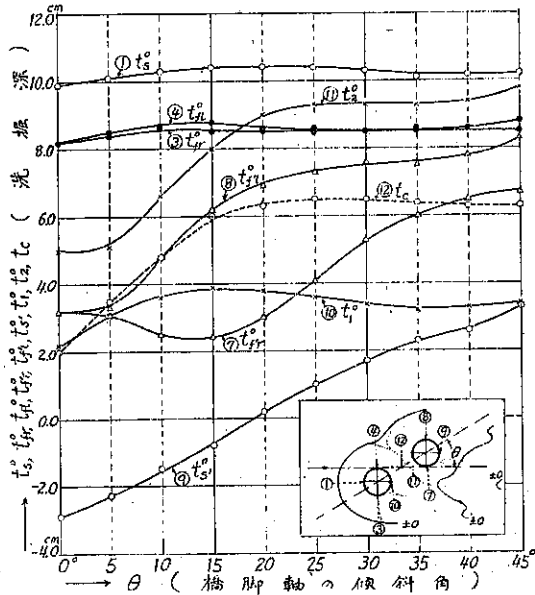


表-22. 実験 G<sub>1</sub> に於ける洗掘幅 (k):  
橋脚中心点又は水路中心軸より測つた値 (圖-48 参照) (限界流況 (a))

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	(k <sub>0</sub> )	(k <sub>0'</sub> )	(k <sub>0''</sub> )	(k <sub>0r</sub> )	(k <sub>0s</sub> )	(k <sub>0sr</sub> )	(k <sub>0sl</sub> )	(k <sub>0rr</sub> )	(k <sub>0rl</sub> )	(k <sub>0rr'</sub> )	(k <sub>0rl'</sub> )
0°	39.8	39.8	39.8	25.0	25.0	25.0	25.0	26.1	26.1	26.1	26.1
5	39.9	39.6	39.9	25.3	23.0	25.2	22.9	28.0	25.3	27.8	25.5
10	40.0	39.4	40.1	26.3	21.4	21.2	21.3	30.0	24.0	29.6	24.4
15	39.8	38.8	40.1	27.8	20.4	27.7	20.0	31.9	22.6	30.9	23.2
20	39.3	37.9	39.6	29.2	19.3	29.0	18.9	33.5	21.2	32.3	22.1
25	38.7	36.3	39.0	30.7	18.3	30.2	17.9	35.1	19.8	33.8	21.1
30	38.0	34.6	39.5	32.2	17.4	31.4	16.7	37.0	18.6	35.4	20.1
35	37.0	32.7	37.6	33.4	16.5	32.4	15.6	38.3	17.4	36.6	19.2
40	36.0	30.6	36.7	34.7	16.1	33.5	14.8	39.6	16.5	37.8	20.3
45	35.0	28.2	35.8	35.9	15.7	34.9	13.7	40.6	15.7	38.7	22.9

橋脚軸の傾斜角 $\theta$	(k <sub>1l</sub> )	(k <sub>0'1l</sub> )	(k <sub>2l</sub> )	(k <sub>0'2l</sub> )	(k <sub>rrl</sub> )	(k <sub>0'rrl</sub> )
0°	28.9	28.9	32.6	32.6	34.5	34.5
5	28.0	28.0	31.7	31.7	33.8	33.9
10	26.8	26.8	30.7	30.7	32.5	33.1
15	25.5	25.7	29.8	29.6	30.9	31.6
20	24.5	24.7	28.5	28.2	30.2	31.0
25	23.6	24.0	29.4	28.9	31.2	32.8
30	23.7	24.4	31.2	30.5	32.7	35.0
35	24.3	25.2	33.1	32.2	34.3	36.5
40	26.8	28.4	34.5	33.3	35.2	37.9
45	30.2	31.6	36.0	34.6	36.0	38.9

圖-48. 実験 G<sub>1</sub> に於ける洗掘幅 (k) の記號的表示

前圓橋横端 F に就ては、右岸側の  $k_{rr}$  が殆ど直線的に増加するに對し、左岸側の  $k_{rl}$  の増加は極めて弱く僅かに約 25° 以上にて少し目立つて來るに過ぎない。又後圓橋の左岸横端の  $k_{rl}$  は、最初急減するが、約 25° 以上にて再び漸増し次第に  $k_{rl}$  に近づく傾向が認められる。

兩圓橋の中間部分に就ては、前圓橋後端 1 に對する左岸側の  $k_{1l}$  は、約 25° 迄は漸減するが其の後は再び増加し、殊に約 35° 以上に於ける増加傾向が著しい。之に對し後圓橋前端 2 に對する左岸側の  $k_{2l}$  は、

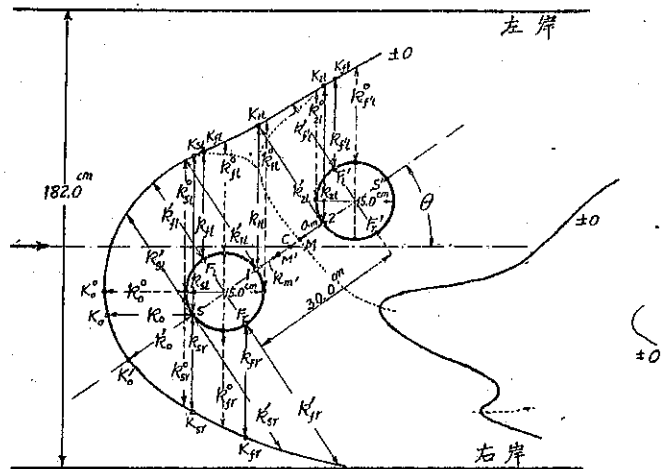


圖-49. 實驗 G<sub>1</sub> に於ける洗掘幅 (k) と橋脚軸の傾斜角 θ との関係

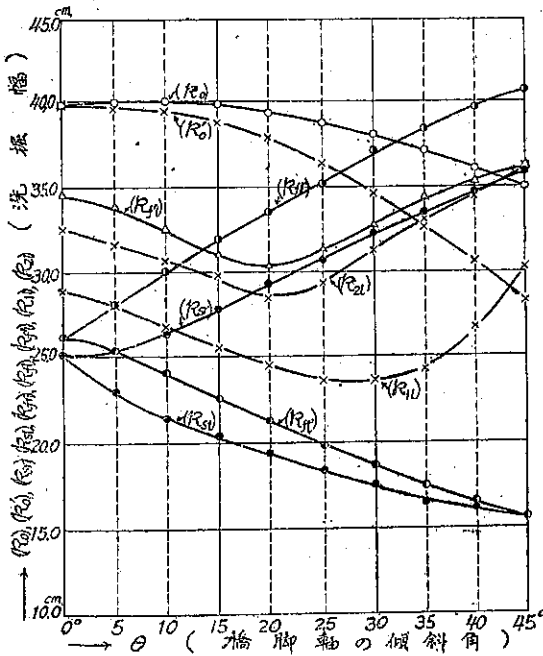
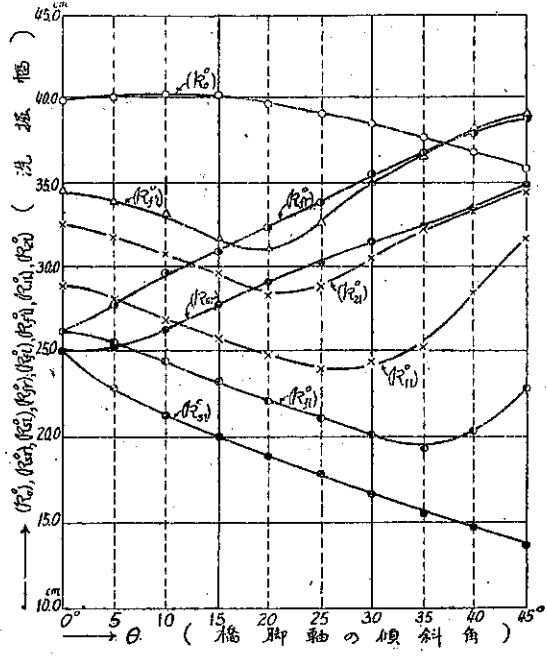


圖-50. 實驗 G<sub>1</sub> に於て 2 個の獨立圓橋脚と看做した場合の洗掘幅 (k) と橋脚軸の傾斜角 θ との関係



最初急減し 20~25° から却つて増加するが、約 35° 以上では増加傾向を弱めて k<sub>51</sub> に近づく様である。

一般に前圓橋前側に於ける洗掘砂粒は、兩圓橋中間部分に相當堆積する筈であるが、之等が後圓橋前側に於ける流向偏倚に基く洗掘作用と、前圓橋の周壁に沿ふ速い流れに基く掃流作用とによつて、或程度更に下流側に流し去られることは、既に前論文 (13) に略述した通りである。圖-43 に示す橋脚軸線 1-2 上に於て、M 點は前者の洗掘作用が直接影響する範圍に相當し、又 M' 點は後者の掃流作用 (主として前圓橋左側より後圓橋右側に出る流れによるもの) が最も著しく現れる個所に相當するが、 $\overline{M2} = a_m$ ,  $\overline{M'1} = k_{m'}$  として、傾斜角 θ に伴ふ M 及 M' 點の位置の變化を考へると、大體次の事實が認められる。即ち圖-44 に見る如く、M 點は漸次點 2 より離れて約 15° の場合に點 1, 2 の中央に達するが、其の後は逆に點 2 に近づき、更に約 30° 以上に於て再び點 2 より遠ざかる。之に對し M' 點は約 15° 以上に於て明瞭に現れ、約 30° 迄は殆ど移動しないが、其の後は次第に點 1 に近づく。

ii) 前論文 (13) に於て  $l_1/b = 1 \sim 2$  なる 2 圓橋建橋脚を流れに平行に置いた場合は、兩圓橋の中間部分が鉛直軸の渦で充滿され、壁體式橋脚と酷似した現象を呈することを明かにした。而して實驗 G<sub>1</sub> は  $l_1/b = 2$  とし傾斜角 θ を變化して行つたものであるから、θ の小さい間は當然  $l_1/b = 2$  なる壁體式橋脚に似た性質を表すものと豫想される。此の意味に於て、壁體式の II 型橋脚に関する實驗 G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub> と比較し、i) に述べた洗掘範圍の變化を要約すれば次の通りである。

先づ前圓橋の前端 S に對する洗掘幅  $k_0, k_0'$ ;  $k_{2r}, k_{2l}$ ;  $k'_{2r}, k'_{2l}$  は、少くも 5~10° 迄は II 型橋脚の場合に酷似した變化をなし、其の後も前方及右岸側のものには大した相違を認め難いが、左岸側は相當趣を異にし特に約 25° 以上の  $k_{2l}$  に於て顯著である。前圓橋横端の  $k_{3r}, k_{3l}$  は最初から II 型橋脚と異つた變化をするが、此の内右岸側

の  $k_{fr}$  に於ける相違はさしたるものでなく、約  $25^\circ$  以上の場合の左岸側の  $k_{fl}$  に於ける相違が目立つてゐる。之等は兩圓橋の中間部分を充滿する鉛直軸の渦と密接な關係があり、次の如く考へられる。即ち  $\theta$  の小さい間は上記の渦はさしたる變化をなさないが、 $\theta$  の増大と共に漸次橋脚軸線 1-2 の右側に移動して、後圓橋前面に對する影響を軽減し、特に其の程度が約  $25^\circ$  以上にて顯著となるので、兩圓橋が夫々獨立した橋脚としての性質を明かに表す様になるからである。尙約  $25^\circ$  以上に於ける  $k_{fl}$ ,  $k_{sl}$ ,  $k_{st}$  の變化も、 $k_{mr}$  及  $a_m$  の變化と共に、上と同様の機構によるものと考へられるが、之等は iii) 以下に於て洗掘幅  $k^0$ ,  $(k)$ ,  $(k^0)$  並に洗掘深  $t$ ,  $t^0$  を論ずる際に、自ら明かに諒解出来る筈である。

iii) 兩圓橋を夫々獨立橋脚と看做した場合の洗掘幅  $k^0$  の變化は、圖-46 から次の如く要約される。

先づ前圓橋前端  $S^0$  に就ては、約  $15^\circ$  迄は  $k_{s0}^0$  が微増するに對し、 $k_{sr}^0$  及  $k_{st}^0$  は共に僅かに減少し而も  $k_{st}^0 < k_{sr}^0$  である。又其の横端  $F^0$  に就ては、 $k_{fr}^0$  及  $k_{fl}^0$  は共に僅かに増加し、而も  $k_{fr}^0 < k_{fl}^0$  となつてゐる。之等は  $\theta$  の増大と共に前圓橋が漸次獨立橋脚としての性質を表し、同時に左岸側にて後圓橋の影響が幾分現れてゐることを示すものである (後述の vi) 参照)。

次に約  $25^\circ$  以上にて先づ  $k_{st}^0$  が激増し始め、次いで約  $30^\circ$  以上にて  $k_{fl}^0$  が激増することは、後圓橋が獨立橋脚としての性質を明かにし、其の前面に於ける著しい洗掘作用の影響が現れるためであり、 $k_{st}^0$  が漸増して  $k_{sr}^0$  に近づくことも之と同じ原因に因く筈である。尙之と同時に少くも前圓橋の前側及右側は後圓橋の影響を免れると考へられるが、之等は圖-46 に於て  $k_{s0}$ ,  $k_{sl}$ ,  $k_{sr}$  及  $k_{fr}$  が夫々一定値に近づくことによつて明かに實證される。

iv) 橋脚中心點及水路中心軸を基準として洗掘範圍の變化を示す圖-49 を見るに、壁體式の II 型橋脚に關する實驗  $G_2$ ,  $G_3$  と比較することにより、ii) に於けると同様の關係が認められる。即ち前圓橋前端  $S$  に對する洗掘幅  $(k_{s0})$ ,  $(k'_{s0})$ ;  $(k_{sr})$ ,  $(k_{sl})$  は、 $\theta$  の小さい間は II 型橋脚の場合と酷似した變化をなし、其の後も前方及右岸側のものには横端の  $(k_{fr})$  と共に大した相違を認め難いが、左岸側は相當趣を異にし特に  $25\sim 30^\circ$  以上の  $(k_{sl})$  及  $(k_{fl})$  に於て顯著である。之等は  $\theta$  の増大と共に兩圓橋が夫々獨立橋脚としての性質を明かにする爲であり、 $20\sim 30^\circ$  以上にて  $(k_{fl})$ ,  $(k_{sl})$ ,  $(k_{st})$  が漸次激増し始め、而も  $(k_{st})$  が  $(k_{sr})$  に近づくことによつても容易に諒解される筈である。

尙兩圓橋を獨立橋脚と看做した場合の洗掘幅  $(k^0)$  を表す圖-50 を見ても、 $20\sim 35^\circ$  以上に於て  $(k'_{fl})$ ,  $(k'_{sl})$ ,  $(k_{st})$ ,  $(k_{fr})$  が漸次激増し始め、而も  $(k'_{fl})$  は  $(k'_{fr})$  に、 $(k_{st})$  は  $(k_{sr})$  に近づくから、後圓橋が獨立橋脚としての性質を愈々明かにして來ることが認められる。

v) 圖-45 に示す洗掘深  $t$  の變化も、洗掘幅  $k$  に關する上述の考察によつて略々説明がつくが、茲に其の要點を述べよう。

先づ前圓橋の前端及横端の洗掘深  $t_s$ ,  $t_{fr}$ ,  $t_{fl}$  は、壁體式の II 型橋脚に關する實驗  $G_2$ ,  $G_3$  と大體一致した變化をするから、少くも前橋前面の洗掘深は壁體式橋脚の場合と大差がない。次に  $\theta$  の小さい間は、後圓橋横端の  $t_{sr}$ ,  $t_{sl}$  が II 型橋脚の場合に似た變化をなし、而も同じく前端の  $t_s$  に大差がないから、橋脚全體としても凡そ壁體式橋脚の性質を示す様である。併し乍ら  $t_s$ ,  $t_m$  が最初より激増し始めることは、前圓橋左側から後圓橋右側に出る流れの掃流作用が、極めて僅かの  $\theta$  の場合でも相當の影響を及ぼすことを意味し、注目すべき事實である。

$15\sim 35^\circ$  に於て  $t_s$ ,  $t_m$  が凡そ一定値を保つのは、上記の掃流作用と前圓橋後側の渦に基く堆積作用とが大體釣合ふからであるが、約  $35^\circ$  以上にては再び掃流作用の影響が強くなつて  $t_s$ ,  $t_m$  を増加せしめる。次に約  $20^\circ$  以上に於て  $t_s$ ,  $t_{fl}$  が凡そ一定値を保つのは、上記の堆積作用と後圓橋前面の流向偏倚に基く洗掘作用とが大體釣合

ふからであるが、更に  $\theta$  を大きくすると  $F'_{12}$  點に對する洗掘作用の影響を増加し、 $t_{1r}$  を漸増して  $t_1$  に近づかせることになる。一方  $t_{1r}$  は上の堆積作用によつて最初は激減してゆくが、約  $20^\circ$  から洗掘作用の影響を受けて増大し、更に約  $35^\circ$  以上にては後圓壩後側の渦に基く堆積作用によつて再び漸減する。尙後圓壩尾端の  $t_{1s}$  は壁體式橋脚の場合に似た變化を示す様であるが、 $\theta$  をずつと大とすれば漸次  $t_1$  に近づくべきものである。何れにしても後圓壩が獨立橋脚としての性質を表すに應じて、後圓壩周圍の洗掘深を愈々増加せしめ、橋脚の安定を著しく害することになる。

vi) 兩圓壩を夫々獨立橋脚と看做した場合の洗掘深  $t'$  を示す圖-47 を見ると、v) に述べた關係が一層明瞭となる。即ち  $\theta$  に應じて  $t'_{1s}$ ,  $t'_{1r}$ ,  $t'_{1l}$  及  $t'_1$  が共に増加することは、壁體式橋脚にて腹部の長さを漸減した場合の變化(前論文圖-18)に相應し、前圓壩が漸次獨立橋脚としての性質を表して來ることを意味する。此の場合  $t'_{1l} > t'_{1r}$  なることは、左岸側に對し後圓壩が幾分の影響を與へるためと考へてよい。次に約  $5^\circ$  以上に於ける  $t'_{1s}$ ,  $t'_{1r}$  及  $t'_{1l}$  の増加は、後圓壩が漸次獨立橋脚としての性質を表したことを示すが、前圓壩後側の堆積作用が影響するので、 $20 \sim 35^\circ$  の間に於ける  $t'_{1s}$ ,  $t'_{1r}$  の變化を微小ならしめてゐる。所が約  $35^\circ$  以上に於ては後圓壩が愈々獨立橋脚として作用し、 $t'_{1s}$ ,  $t'_{1r}$  を漸増して夫々  $t'_{1s}$ ,  $t'_{1r}$  に近づけると共に、 $t'_{1l}$  を  $t'_1$  に一致せしめる様になる。一方  $t'_{1r}$  は約  $35^\circ$  迄は v) に述べた  $t_{1r}$  に似た變化をするが、其の後は後圓壩後側の渦に基く堆積作用が影響しないので  $t_{1r}$  の如く漸減せず、 $\theta$  をずつと大とすれば前圓壩後側の堆積の影響も減ずるから漸増して  $t'_{1r}$  に近づくと等である。

vii) 以上を綜合するに、傾斜角  $\theta$  が約  $5^\circ$  以下の場合のみ、壁體式の II 型橋脚に似た性質を示して殆ど悪影響を見ないが、 $\theta$  がそれ以上になると先づ前圓壩後側の洗掘深を増大し、更に後圓壩の前面及左側の洗掘深を増すので、橋脚の安定を害することになる。尤も之等の洗掘深は  $15 \sim 20^\circ$  附近から約  $35^\circ$  迄は凡そ一定値を保つので、橋脚の安定上大差を認め難いが、約  $35^\circ$  以上となると後圓壩が獨立橋脚としての性質を明かにし其の周圍の洗掘深を増し、更に  $45^\circ$  位になると愈々其の程度を著しくすることにする。斯くして 2 圓壩建橋脚に於ては、其の中間部分の河床洗掘深に對する傾斜角の影響極めて大きく、茲に此の種橋脚の最大の缺點があるわけである。

式に洗掘幅に就ては、約  $25^\circ$  迄は II 型橋脚の場合と大差なく寧ろ輕減される位であるが、其の後は後圓壩が獨立橋脚としての性質を明かにするに應じて、其の左岸側の洗掘幅を激増し始め、其の影響が次第に前圓壩左岸側にも及んで來ることが認められる。

6. 結 語 茲に説明して實驗  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  及  $G_4$  は、何れも前論文(9)に詳述した様な獨自の實驗的基礎の下に行はれたから、實驗にて得た洗掘狀況の差異は全く傾斜角の變化のみに基くと考へてよい。此の事實は限界洗況のみを異にした實驗  $G_5$  及  $G_6$  の結果が酷似してゐることからも、容易に諒解される所である。従つて實驗結果は少くも定性的には充分信頼するに足るものと考へられ、次の如く結論される。

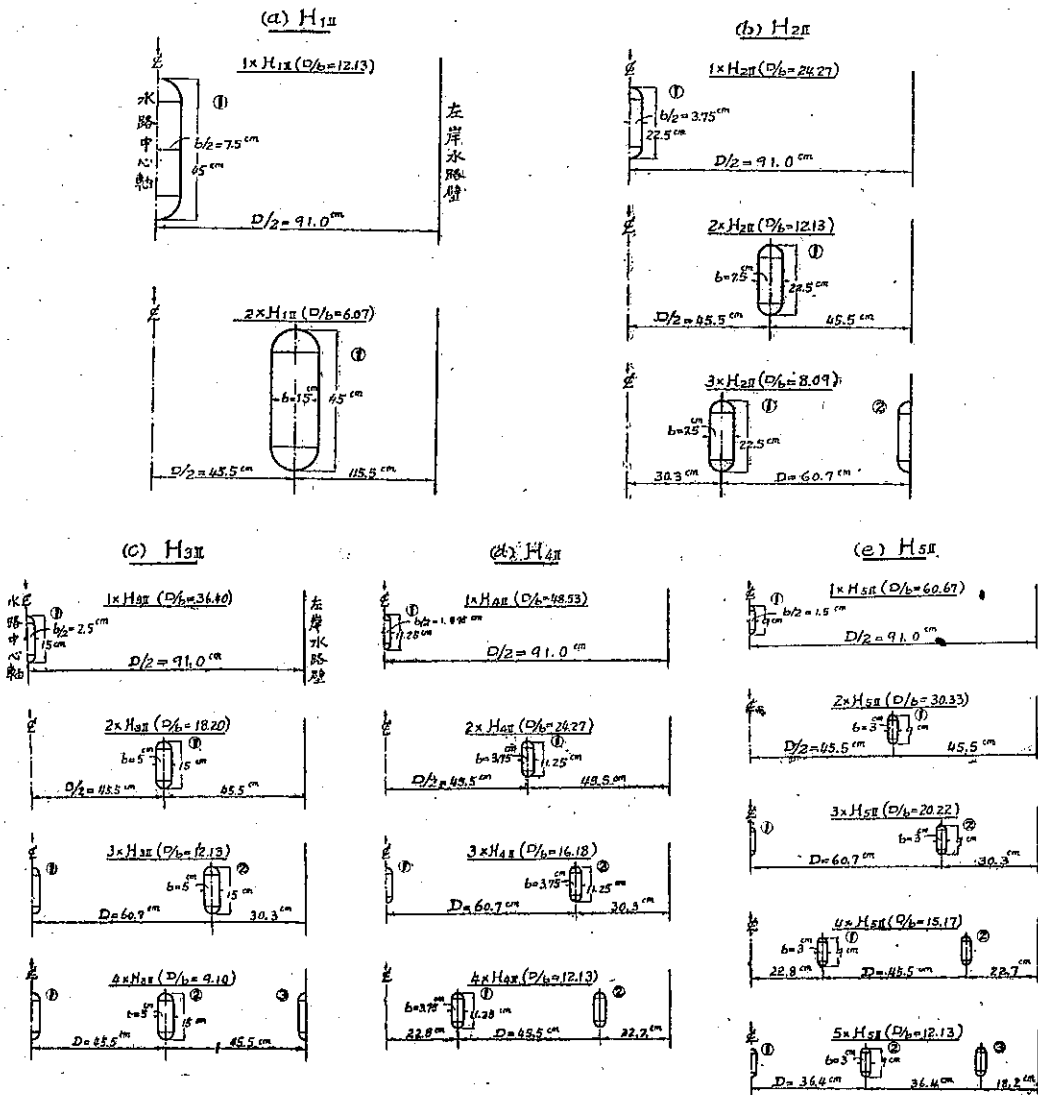
一般に傾斜角  $\theta$  の河床洗掘に及ぼす悪影響が比較的少いのは、 $\theta$  が頗る小なる場合に限られる。 $\theta$  が増大すれば愈々悪影響を増加し、遂には前頭部附近のみならず後頭部左岸側の洗掘を激増し、橋脚の安定を著しく害する様になる。併し乍ら  $\theta$  の増大に伴ふ悪影響の増加程度は、橋脚形状によつて著しく支配され、壁體橋脚では前、後頭部を共に圓くした II 型橋脚の方が、尖端を有する I 型橋脚に比べて、悪影響の増加が比較的輕微である。尙 2 圓壩型橋脚では、前圓壩前面の洗掘にはあまり悪影響を生じないが、 $\theta$  の増大に伴つて兩圓壩中間部分の洗掘深を増し、後圓壩が獨立橋脚としての性質を明かにするに應じて、前面及左岸側に大きい悪影響を惹起する。

之等の諸事實に對しては、洗掘の主原因を橋脚兩側の流れの流向偏倚に基くとした著者の論旨によつて、詳細な水理學的考察を加へて置いた。而して 1. に述べた Keutner の實驗結果(圖-26~28)は、著者の實驗と橋脚形狀を異にする關係上直接比較し難いが、 $\theta \leq 5.5^\circ$  の場合の洗掘狀況が  $\theta = 0^\circ$  の場合のそれと大差なきは、著者の實驗と大體に於て一致する。所が  $k_{r1} > k_{r2}$  なる點及  $t_{max}$  の位置等に就ては、著者の實驗と著しく趣を異にする。之等は Keutner 河床材料と流況との關係に就き詳細な考察を欠いたために、實驗によつて得た洗掘狀況の差異が橋脚軸の傾斜角の影響のみに基因しなかつたことによるものと考へられる。

(19) 橋脚軸間の距離、從つて橋梁徑間の影響

1. 概説 河川に於ては流水の疏通を良くし河床洗掘を軽減するために、相當の犠牲を拂つてもなるべく

圖-51. 實驗  $H_{nII}$  ( $H_{nI}$ ) に於ける橋脚の配置



径間を大にすべきものと考へられる。併し乍ら径間割は架橋地點の地形、地質並に上部構造及工事費等によつて多大の制限を受け、更に橋梁の美觀等にも影響されるから、仲々理想通りにゆかない場合が多い。

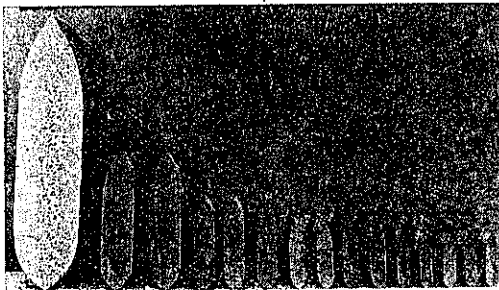
従つて河床洗掘に對する橋梁径間の影響を明かにすることは、實際上極めて大切な問題であるが、從來歐米に於ては何等見るべき研究が行たれず、又我國にても單に径間縮小による悪影響を重大視するのみで、確たる結論に到達してゐない。尤も之は我國に急流河川多く、倒壊橋脚の實例に徴するに、多數の流木等が引懸つたことに基くものが少くないためでもあるが、倒壊の大きい原因が橋脚周囲の河床洗掘にあることを忘れてはならない。

此の意味に於て、著者は次の實驗  $H_n$  を實施し、橋梁径間と河床洗掘との關係を詳細に検討することにした。一般に橋脚中心間の距離  $D$  と橋脚幅員  $b$  との比  $D/b$  があまりに大きい場合は、唯 1 個の橋脚がある場合と何等の差異はなく、又  $D/b$  があまりに小さい場合は實用上適用し難い筈であるから、本實驗にては  $D/b=60.67\sim 6.07$  の範圍に就て研究することにした。而して  $D/b$  を種々に變へる必要上、橋脚の縮尺を 5 種類として  $n=1, 2, 3, 4, 5$  としたが、此の内  $n=1$  の場合即ち  $H_1$  は今迄に取扱つた標準寸法のものに相當し、橋脚腹部の寸法は幅  $b=15.0$  cm、長さ  $l_1=30.0$  cm である。上記の  $H_n$  は腹部寸法を幅  $b=15/n$  cm、長さ  $l_1=30/n$  cm とした場合を意味し、例へば  $H_3$  に對しては  $b=15/3=5$  cm、 $l_1=30/3=10$  cm としたわけである。圖-51 は各縮尺の横型に就て行つた實驗に於ける橋脚の配置を示したもので、例へば  $3\times H_3$  は上記の  $b=5$  cm、 $l_1=10$  cm なる橋脚 3 個を等間隔にならべた場合を意味する。

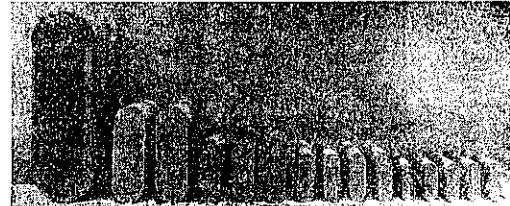
次に橋脚形狀としては、最初實用上理想のもの一つとして、前、後頭部を夫々 No. 9, No. 5 の 2 圓弧型とした。之は前節に用ひた I 型橋脚に相當するから、實驗記號  $H_n$  に第 2 添字 I を附けた  $H_{nI}$  を以て表すことにした。併し乍ら此の種の先端を尖らした橋脚では、一般に洗掘少く径間の影響を確實に把握し難い懸念があつたので、更に前、後頭部を共に半圓形 (No. 8) とした II 型橋脚に就ても全く同様の實驗を行ひ、之を實驗記號  $H_{nII}$  にて表したものである。以上の橋脚横型の主要寸法は表-13 に列記した通りであるが、之等を取りまとめた寫眞が圖-52 である。

圖-52. 實驗  $H_{nI}$  及  $H_{nII}$  に於ける橋脚模型一覽

(a) I 型橋脚：實驗  $H_{nI}$



(b) II 型橋脚：實驗  $H_{nII}$



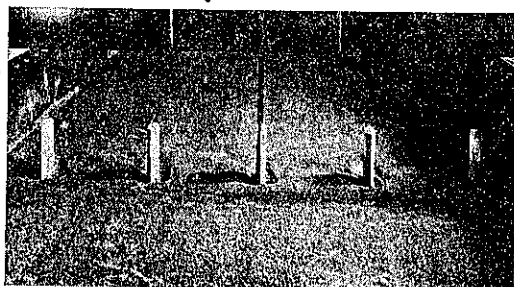
實驗に際しては、所定の橋脚横型を必要數だけ等間隔に横に 1 列にならべ (勿論橋脚軸の方向は流れに平行とする、詳細は圖-51 参照)、何れも限界流況 (a) にて 20 分宛掃流し、洗掘狀況を比較検討したのである。

2. I 型橋脚：實驗  $H_{nI}$  實驗  $H_{nI}$  に於ける洗掘狀況の一例を示すと圖-53 の通りであるが、何れも水路中心軸に對して左右對稱であるから、以下水路中央より左岸側半分の橋脚に就て考究することにする。

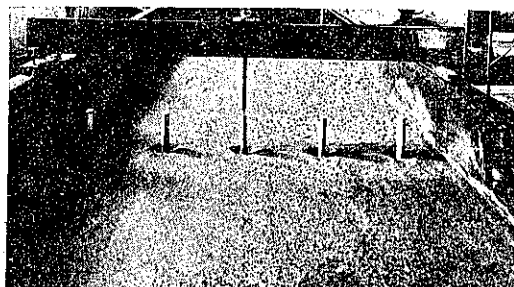
表-23~27 は橋脚周壁の主要箇所に関する洗掘の幅及深の測定値のみを表示したものであるが、表中の橋脚番號は圖-51 に示す如く水路中央から順に左岸側に數へて附けた番號であり、又各橋脚周囲の洗掘を表す記號は、

圖-53. 實驗  $H_{61}$  に於ける洗掘及堆積狀況の一例(I 型橋脚,  $5 \times H_{61}$ ; 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

(a) 前頭部側



(b) 後頭部側

表-23. 實驗  $H_{11}$  に於ける洗掘幅及洗掘深

(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚配置		橋脚 番 號	$k_0$	$k_s$	$k_f$	$t_s$	$t_f$	$t_{f'}$	$t_{s'}$
記 號	$D/b$								
$1 \times H_{11}$	12.13	①	cm 7.8	cm 14.0	cm 13.9	cm 5.0	cm 5.8	cm 1.9	cm -2.0
$2 \times H_{11}$	6.07	①	8.0	14.0	14.1	5.2	5.9	2.0	-2.0

表-24. 實驗  $H_{21}$  に於ける洗掘幅及洗掘深

(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚配置		橋脚 番 號	$k_0$	$k_s$	$k_f$	$t_s$	$t_f$	$t_{f'}$	$t_{s'}$
記 號	$D/b$								
$1 \times H_{21}$	24.27	①	cm 6.3	cm 10.5	cm 11.3	cm 4.4	cm 5.2	cm 3.4	cm 0.3
$2 \times H_{21}$	12.13	①	6.3	10.4	11.1	4.4	5.3	3.5	0.3
$3 \times H_{21}$	8.09	①	6.4	10.4	11.4	4.7	5.5	3.7	0.6
		②	6.1	9.4	10.1	4.2	3.9	1.2	-1.2

表-25. 實驗  $H_{31}$  に於ける洗掘幅及洗掘深

(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚配置		橋脚 番 號	$k_0$	$k_s$	$k_f$	$t_s$	$t_f$	$t_{f'}$	$t_{s'}$
記 號	$D/b$								
$1 \times H_{31}$	36.40	①	cm 5.3	cm 8.3	cm 9.0	cm 3.8	cm 4.5	cm 3.5	cm 1.4
$2 \times H_{31}$	18.20	①	5.3	8.3	8.8	3.8	4.5	3.5	1.4
$3 \times H_{31}$	12.13	①	5.4	8.4	9.0	3.8	4.6	3.4	1.5
		②	5.1	7.9	8.4	3.6	4.3	3.2	1.2
$4 \times H_{31}$	9.10	①	5.5	8.4	9.1	3.9	4.6	3.6	1.5
		②	5.1	8.1	8.9	3.6	4.5	3.4	1.3
		③	4.7	6.7	7.7	3.1	3.3	1.6	-0.2



表-26. 実験 H<sub>41</sub> に於ける洗掘幅及洗掘深

(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚配置		橋脚 番 號	$k_0$	$k_s$	$k_f$	$t_s$	$t_f$	$t_f'$	$t_s'$
記 號	D/b								
1×H <sub>41</sub>	48.53	①	cm 4.3	cm 6.6	cm 7.7	cm 3.4	cm 4.1	cm 3.2	cm 1.6
2×H <sub>41</sub>	24.27	①	4.3	6.7	7.5	3.3	4.1	3.2	1.5
3×H <sub>41</sub>	16.18	①	4.4	6.9	7.7	3.4	4.1	3.2	1.7
		②	4.3	6.3	7.3	3.2	3.8	3.0	1.4
4×H <sub>41</sub>	12.13	①	4.5	6.7	7.6	3.4	4.0	3.2	1.8
		②	4.3	6.4	7.2	3.1	3.8	2.9	1.4

表-27. 実験 H<sub>51</sub> に於ける洗掘幅及洗掘深

(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚配置		橋脚 番 號	$k_0$	$k_s$	$k_f$	$t_s$	$t_f$	$t_f'$	$t_s'$
記 號	D/b								
1×H <sub>51</sub>	60.67	①	cm 3.6	cm 5.9	cm 6.7	cm 2.9	cm 3.4	cm 3.0	cm 1.7
2×H <sub>51</sub>	30.33	①	3.7	5.7	6.4	2.8	3.4	2.9	1.7
3×H <sub>51</sub>	20.22	①	3.6	6.1	6.7	2.9	3.3	3.0	1.8
		②	3.4	5.7	6.3	2.5	3.2	2.7	1.8
4×H <sub>51</sub>	15.17	①	3.6	5.9	6.6	2.9	3.4	2.9	1.9
		②	3.3	5.7	6.5	2.4	3.4	2.9	1.8
5×H <sub>51</sub>	12.13	①	3.8	6.0	6.7	2.9	3.4	3.0	1.8
		②	3.7	5.9	6.5	2.6	3.3	2.9	1.7
		③	3.4	5.6	6.4	2.4	3.2	2.9	1.6

前論文圖-11 に於けると全く同様である。尙個々の橋脚に就ては、其の左右兩岸側に於て  $k_s$  及  $k_f$  に微細な不同を認めたと、其の程度は縮尺の大きい実験 H<sub>11</sub> 及 H<sub>21</sub> にて稀に  $k_s$  に 0.5 cm,  $k_f$  に 0.8 cm に達するものがあつたに過ぎないから、之等は左右兩岸側の平均値をとることとした。

圖-54 に於て實線にて表した關係は、実験 H<sub>41</sub> に於ける洗掘狀況を示す代表的の値として、水路中央に最も近い橋脚 ① の前頭部先端 S より流水方向に上流側に測つた洗掘幅  $k_0$  に對するものである。此の場合圖の横距としては、比較検討の便宜上橋脚中心間の距離 D と橋脚幅 b との比 D/b を用ひることとした。尙実験 2×H<sub>41</sub> の如く橋脚 ① が水路中心軸上にない場合には、水路横断面に於ける流速分布の關係上 (前論文圖-9 参照)、水路中心軸上に橋脚 ① がある場合に比べ幾分  $k_0$  を減ずることは、圖-23~27 から明から事實である。此の意味に於て、圖-54 にて測定値を曲線にて連絡する場合、橋脚 ① が水路中心軸上にない実験 2×H<sub>41</sub> の如きものに對しては、測定値より少し上を通る様にして、なるべく橋脚 ① が水路中心軸上にある際の關係を表す様に努めたのである。

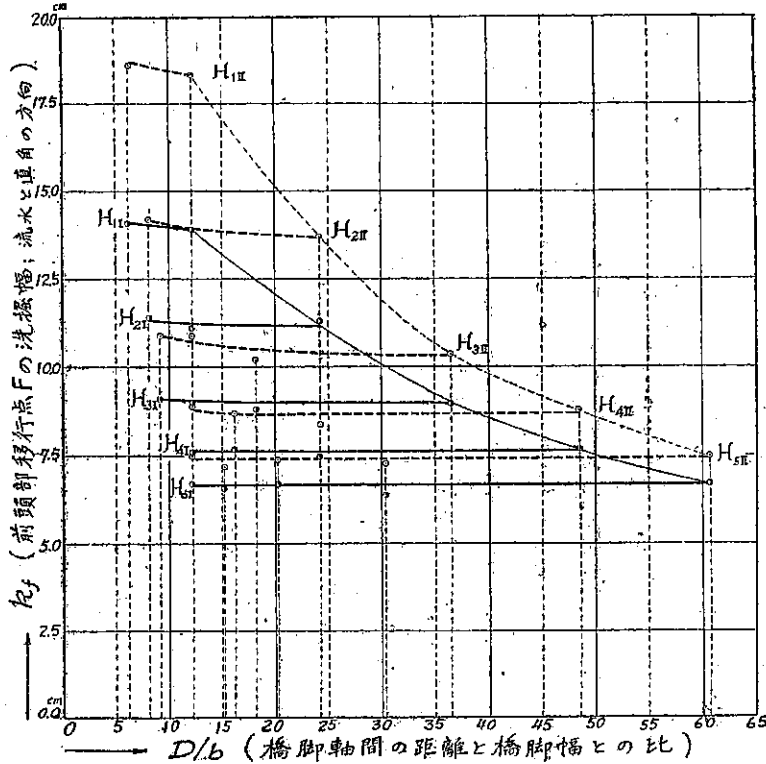
次に橋脚 ① の先端 S 及移行點 F から、夫々流水方向に直角に測つた洗掘幅  $k_s, k_f$  の關係を、上と同様に表したものが圖-55, 56 であり、又點 S 及 F の洗掘深  $t_s, t_f$  の關係を同じく圖-57, 58 に示すことにした。

以上圖-54~58 に於て、實線にて畫いた關係は何れも I 型橋脚に就ての実験 H<sub>41</sub> に對するものであるが、之

等から特に注目すべき性質として、列挙し得る諸點は次の通りである。

圖-54. 實驗  $H_{nI}$  及  $H_{nII}$  に於ける洗掘幅  $k_0$  と  $D/b$  との関係

(實線: 實驗  $H_{nI}$  (I 型橋脚), 點線: 實驗  $H_{nII}$  (II 型橋脚))



1) 橋脚軸間の距離と橋脚幅との比  $D/b$  の減少に応じて、洗掘幅  $k_0, k_s, k_f$  及洗掘深  $t_s, t_f$  は共に少し増加するが、其の程度は一般に極めて微弱である。特に模型の小さい  $H_{1I}$  及  $H_{4I}$  に対しては殆ど影響なく、僅かに模型の大きい  $H_{1I}$  及  $H_{2I}$  に對し、 $D/b$  が凡そ 10 以下の場合に稍々目立つた増加を示すに過ぎない。従つて前頭部附近の顯著な洗掘に對する橋梁徑間の影響は、 $D/b$  が凡そ 10 以上ならば殆ど問題とするに足らないことが認められる。此の事實は橋梁徑間の減少によつて、橋脚前面の背水高を増して流水の疏通を妨げ、橋脚周囲の河床洗掘を増大して橋脚を危くすると豫想された從來の見解に比し、著しく趣を異にするものであるが、之に對する著者の見解は次の様である。

一般に前頭部附近の洗掘が其の先端よつて兩側に分れる流れの流向偏倚の程度に支配されることは、既に屢々説明した通りである。而して只今の場合  $D/b$  があまり小でない限り、此の流向偏倚の程度に大差を生ぜざること容易に想像さるべく、先端 S に對する  $k_0, k_s$  及  $t_s$  の變化が微弱なことは、茲に主要原因をもつものと考へられる。

次に  $D/b$  の減少につれて、橋脚間に於ける流速を増加する筈であるが、圖-53 より認め得る如く、橋脚を離れた河床部分は殆ど洗掘されてゐない。之は限界流況にて掃流したことによるべく、更に強い流況にては茲に幾分の洗掘を見るかも知れないが、只今の場合には考慮の外に置いて差支へない。唯問題となるのは、此の流速増大に伴

圖-56. 實驗  $H_{nI}$  及  $H_{nII}$  に於ける洗掘幅  $k_{nI}$  と  $D/b$  との関係

(實線: 實驗  $H_{nI}$  (I 型橋脚), 點線: 實驗  $H_{nII}$  (II 型橋脚))

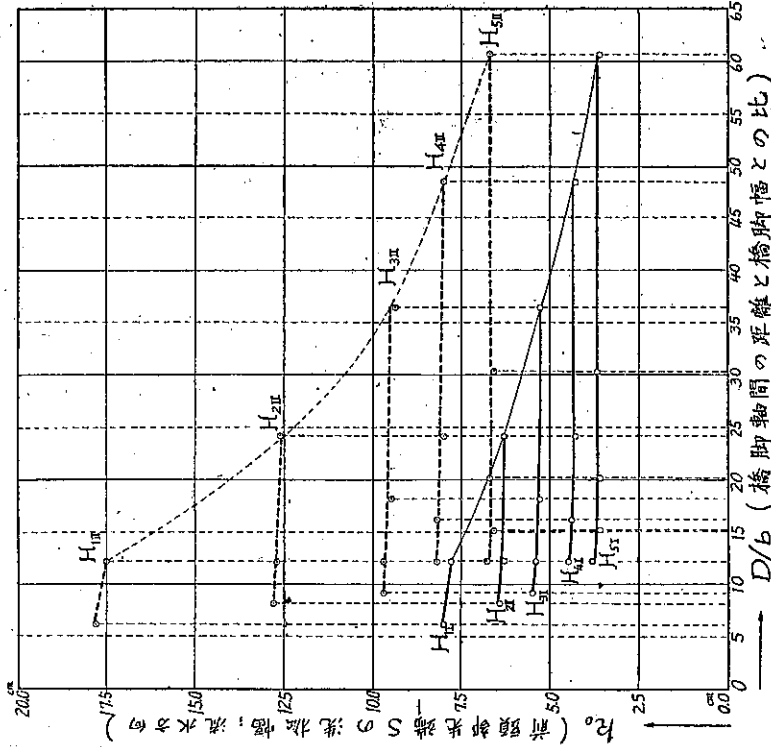
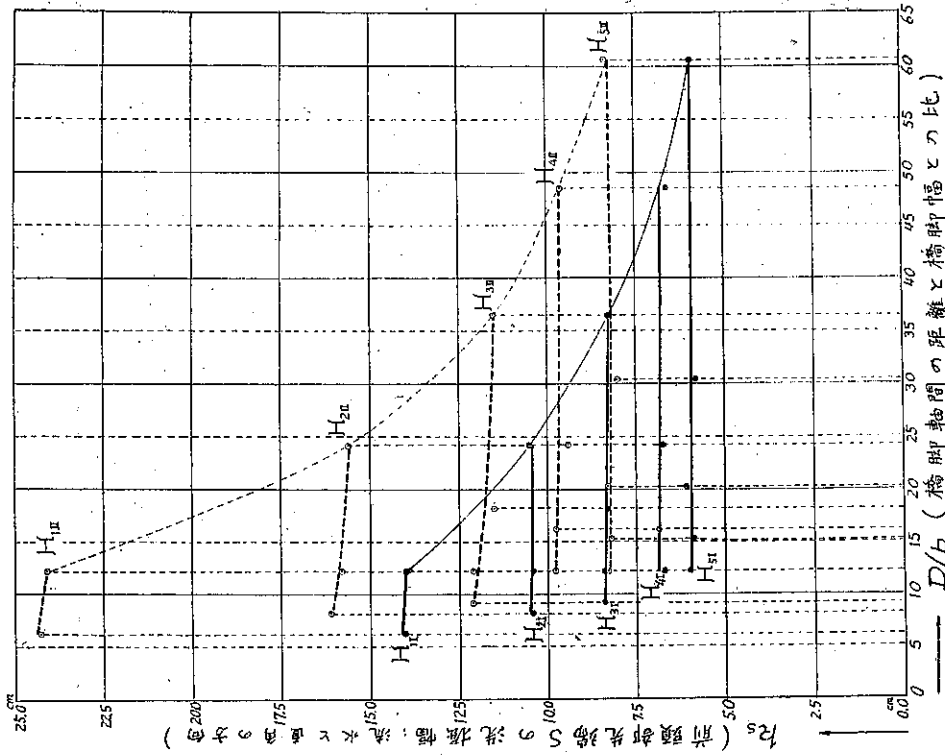


圖-55. 實驗  $H_{nI}$  及  $H_{nII}$  に於ける洗掘幅  $k_{nS}$  と  $D/b$  との関係

(實線: 實驗  $H_{nI}$  (I 型橋脚), 點線: 實驗  $H_{nII}$  (II 型橋脚))



ひ、前頭部周壁に沿つて流下する流れが、移行点 F 附近の河床洗掘を助長して  $t_f$  及  $k_f$  を増加する傾向にあることである。所が一方前頭部先端に於けるとは反対方向の流向偏倚によつて、F 点前後から下流側腹部側壁に接して鉛直軸の渦を生ずべく、茲に堆積作用の影響が現れる。而して此の反対方向の流向偏倚は、 $D/b$  が小なる程橋脚間の流れに影響されて急激に行はるべく、従つて堆積作用を助長して  $t_f$  及  $k_f$  を減少する傾向を生ずる。 $D/b$  による  $t_f$  及  $k_f$  の變化の少いことは、上の 2 つの相反する作用が略々釣合ふためと考へられ、後頭部移行点 F' の  $t_f$  に就ても同様に説明される。唯尾端 S' の  $t_{sr}$  の變化の少いのは、後頭部後側の渦に大差がない爲と見てよい。

何れにしても  $D/b$  の減少に伴ふ洗掘増加の微小なことは特に注目する必要があるが、 $D/b$  があまり小さいと先

圖-57. 實驗  $H_{nI}$  及  $H_{nII}$  に於ける洗掘深  $t_s$  と  $D/b$  との関係  
(實線: 實驗  $H_{nI}$  (I 型橋脚), 點線: 實驗  $H_{nII}$  (II 型橋脚))

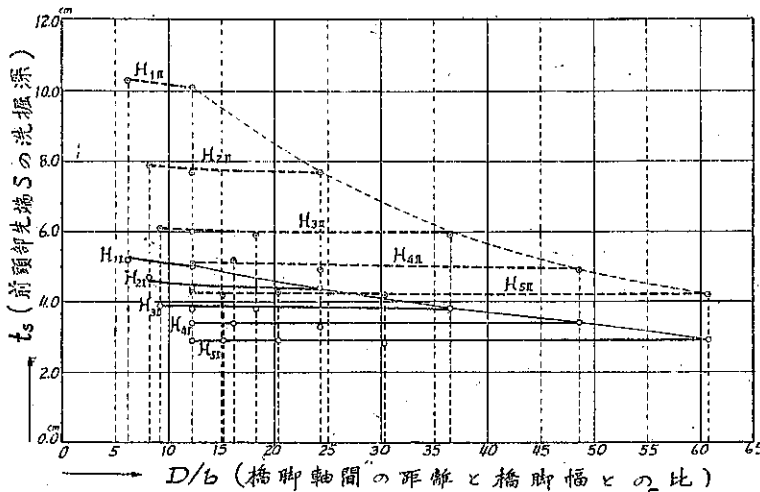
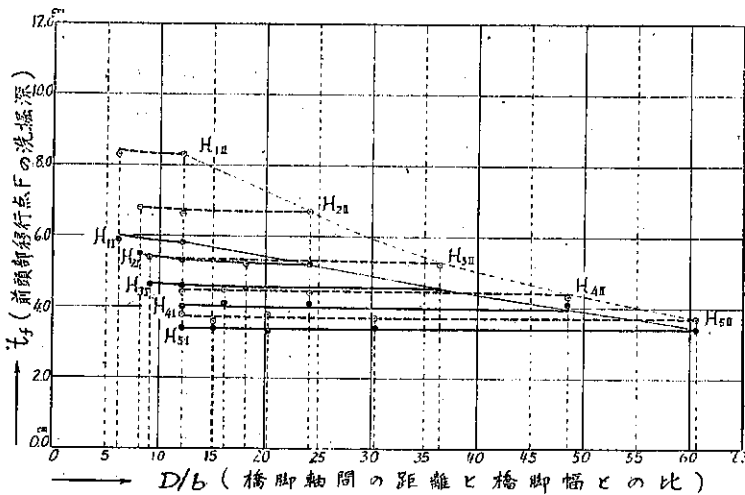


圖-58. 實驗  $H_{nI}$  及  $H_{nII}$  に於ける洗掘深  $t_f$  と  $D/b$  との関係  
(實線: 實驗  $H_{nI}$  (I 型橋脚), 點線: 實驗  $H_{nII}$  (II 型橋脚))



端の流向偏倚を急激にし且橋脚間の流速を増すので、或程度の洗掘増加は免れない。

ii) 水路横断面に橋脚 2 つ以上を設置した場合の洗掘は、水路中央に近い橋脚に對するものほど幾分大きくなつてゐる。此の事實は表-23~27 から明かに認められ、水路横断面に於ける流速の分布状態(前論文 圖-9 参照)と近似した關係にある。之によつて河床洗掘に對する流速の影響は推論し得べく、改めて第 3 編に於て説明する積りである。尙 圖-54~58 に於て測定點を曲線にて連絡する場合、以上の關係を考慮したことは始めに述べた通りである。

iii) 表-24, 25 に見る如く、水路側壁に接して設置した橋脚(實驗  $3 \times H_{II}$  に於ける ②,  $4 \times H_{II}$  に於ける ③)に對する洗掘の幅及深さは、然らざる橋脚に比べてあまりに小さく、前論文 圖-9 に示す流速分布と比較して、單に側壁附近の流速が小さいことのみを以ては、到底説明し難い様である。

一般に亂れた流れに於ては、各點の流速は其の大きさ、方向を一定とせず、絶えず複雑な脈動を續けてゐるから、我々が或點の流速と云つても、それは或時間の間に於ける其の點の流速の平均値を意味し、瞬間的の値ではない。従つて橋脚の場合に於ても、流れは先端より兩側に左右對稱に整然と分れるわけではなく、或瞬間に右側に強い流れが行けば、次の瞬間には左側に強い流れと行くものと考へられる。斯くして強い流れが來た際に其の部分の河床を洗掘して砂粒を運び去り、結局に於て最後には左右對稱な洗掘状況を呈するわけであつて<sup>54)</sup>、此の事實は實驗中に於ける砂粒の動き及尾端に生ずる渦の状態によつても容易に確認し得る所である。而して水路壁に接した橋脚に於ては、側壁に妨げられて上述の流れの脈動は極めて少く、此の部分の流速が比較的小なることと相俟つて、洗掘を著しく弱めたものと考へられ、始めに述べた實驗事實を的確に説明することが出来るのである。

3. II 型橋脚: 實驗  $H_{nII}$  前、後頭部を共に圓くした II 型橋脚に就て、前項と全く同様にして實驗  $H_{nII}$  を行つたが、圖-59 は其の洗掘状況の一例を示したものである。

圖-59. 實驗  $H_{II}$  に於ける洗掘及堆積状況の一例

(II 型橋脚,  $4 \times H_{II}$ ; 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

(a) 前頭部側

(b) 後頭部側

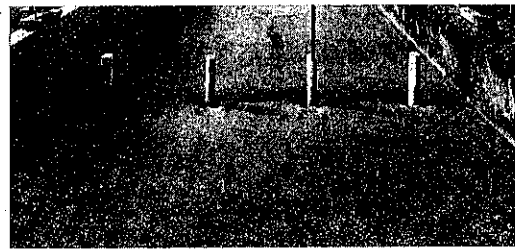
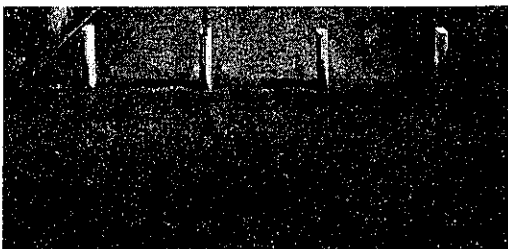


表-28~32 は前項と同様にして、水路中心軸より左側の橋脚に對する主要個所の洗掘の幅及深さの測定値のみを表記したものである。此の内洗掘幅  $k_x, k_s, k_f$  及洗掘深  $t_s, t_f$  と  $D/b$  との關係を明かにし、I 型橋脚の場合との比較を容易ならしめるために、之等の測定値を夫々 圖-54~58 に圖示して破線に連絡したが、特に注目すべき性質として次の諸點が列挙される。

54) L. J. Tison; "Blancs de sable et ripple-marks dans les cours d'eau." Ann. Soc. Sci. de Bruxelles, Sér. B, V. 59, 1939, p. 41-51.

表-28. 実験 H<sub>1II</sub> に於ける洗掘幅及洗掘深  
(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚配置		橋脚 番 號	$k_0$	$k_s$	$k_f$	$t_s$	$t_f$	$t_r$	$t_{s'}$
記 號	D/b								
1×H <sub>1II</sub> <sup>55)</sup>	12.13	①	cm 17.5	cm 24.1	cm 18.3	cm 10.1	cm 8.3	cm 2.3	cm -1.8
2×H <sub>1II</sub>	6.07	①	17.8	24.2	18.6	10.3	8.3	2.3	-1.9

表-29. 実験 H<sub>2II</sub> に於ける洗掘幅及洗掘深  
(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚配置		橋脚 番 號	$k_0$	$k_s$	$k_f$	$t_s$	$t_f$	$t_r$	$t_{s'}$
記 號	D/b								
1×H <sub>2II</sub>	24.27	①	cm 12.6	cm 15.6	cm 13.7	cm 7.7	cm 6.7	cm 3.8	cm 0.8
2×H <sub>2II</sub>	12.13	①	12.7	15.8	13.9	7.7	6.6	3.8	0.8
3×H <sub>2II</sub>	8.09	①	12.8	16.1	14.2	7.9	6.8	3.8	0.8
		②	10.0	11.5	9.4	5.9	5.8	2.0	-0.3

表-30. 実験 H<sub>3II</sub> に於ける洗掘幅及洗掘深  
(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚配置		橋脚 番 號	$k_0$	$k_s$	$k_f$	$t_s$	$t_f$	$t_r$	$t_{s'}$
記 號	D/b								
1×H <sub>3II</sub>	36.40	①	cm 9.4	cm 11.5	cm 10.4	cm 5.9	cm 5.2	cm 3.7	cm 1.7
2×H <sub>3II</sub>	18.20	①	9.5	11.5	10.2	5.9	5.2	3.6	1.6
3×H <sub>3II</sub>	12.13	①	9.7	12.1	10.9	6.0	5.3	3.7	1.8
		②	9.3	11.5	10.3	5.9	5.2	3.6	1.6
4×H <sub>3II</sub>	9.10	①	9.7	12.1	10.9	6.1	5.4	3.6	1.8
		②	9.4	11.7	10.3	6.0	5.2	3.4	1.6
		③	8.2	9.5	8.1	5.0	4.3	2.1	0.1

表-31. 実験 H<sub>4II</sub> に於ける洗掘幅及洗掘深  
(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚配置		橋脚 番 號	$k_0$	$k_s$	$k_f$	$t_s$	$t_f$	$t_r$	$t_{s'}$
記 號	D/b								
1×H <sub>4II</sub>	48.53	①	cm 8.0	cm 9.6	cm 8.8	cm 4.9	cm 4.3	cm 3.1	cm 1.8
2×H <sub>4II</sub>	24.27	①	8.0	9.4	8.4	4.9	4.4	3.1	1.6
3×H <sub>4II</sub>	16.18	①	8.2	9.8	8.7	5.2	4.5	3.3	2.0
		②	8.0	9.6	8.5	5.1	4.4	3.2	1.6
4×H <sub>4II</sub>	12.13	①	8.2	9.8	8.9	5.1	4.4	3.3	1.9
		②	7.8	9.4	8.8	5.0	4.3	3.1	1.5

55) 前論文表-7 に示す圓弧型 No. 3 の場合と微細な相違があるが, 前論文圖-12~15 を検討すると, 本表の値の方が妥當な様に考へられる。

表-32. 實驗 H<sub>3II</sub> に於ける洗掘幅及洗掘深  
(限界流況 (a); 水深 5.2 cm, 勾配 1/800, 流量 35.9 l/sec)

橋脚配置		橋脚 番 號	$k_0$	$k_s$	$k_f$	$t_s$	$t_f$	$t_r$	$t_{sr}$
記 號	$D/b$								
			cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
1 × H <sub>3II</sub>	60.67	①	6.7	8.3	7.5	4.2	3.7	2.9	1.6
2 × H <sub>3II</sub>	30.33	①	6.6	8.0	7.3	4.2	3.7	2.8	1.6
3 × H <sub>3II</sub>	20.22	①	6.7	8.3	7.4	4.3	3.8	2.9	1.8
		②	6.5	7.9	7.0	4.1	3.6	2.8	1.8
4 × H <sub>3II</sub>	15.17	①	6.6	8.2	7.2	4.2	3.6	2.9	1.8
		②	6.4	7.9	7.0	4.1	3.5	2.7	1.5
5 × H <sub>3II</sub>	12.13	①	6.8	8.3	7.5	4.3	3.8	3.0	2.0
		②	6.7	8.2	7.2	4.2	3.7	2.9	1.9
		③	6.5	7.9	6.9	4.1	3.5	2.8	1.8

i) 橋脚軸間の距離と橋脚幅との比  $D/b$  の減少に伴ふ洗掘の増加傾向は、前項の I 型橋脚の場合に比べて幾分強く、特に模型の大きい H<sub>1II</sub>, H<sub>2II</sub> 及 H<sub>3II</sub> の洗掘幅に於て、 $D/b$  が凡そ 15 以下の場合に稍々目立つた増加を呈する。併し乍ら此の II 型橋脚に於ては、洗掘そのものが最初から大きいから、 $D/b$  の減少による洗掘の増加率 % をとれば、I 型橋脚の場合と大差がない筈である。従つて橋脚形状の如何に拘らず、前頭部附近の洗掘に對する  $D/b$  の影響は微弱なものと考えてよく、此のことは後頭部の洗掘深  $t_r$  及  $t_{sr}$  に就ても同様である。尙前項 ii), iii) に述べた事實は、本實驗に於ても其の儘成立することが確認される。

ii) 圖-54~58 より明かな如く、先端を尖らした I 型橋脚 (H<sub>3I</sub>) に對する洗掘の幅及深さは、何れの縮尺の模型に於ても、先端を圓くした II 型橋脚 (H<sub>3II</sub>) に對するものに比べて著しく小である。此の事實は、前論文 (15) に於て I 型橋脚を實用上理想の形状の 1 つとした著者の提唱の確實性を、愈々明かにするものと考へてよい。

而して I 型及 II 型橋脚に於ける洗掘状況の差異は、一般に先端に於ける流向偏倚の程度に直接支配されると考へられる洗掘幅  $k_0, k_s$  及洗掘深  $t_s$  に對して極めて著しく、移行點前後の鉛直軸の渦による堆積作用並に壁面に沿ふ速い流れによる掃流作用の影響を受ける  $k_f$  及  $t_f$  に對しては比較的少い様である。又後頭部の洗掘深  $t_r$  及  $t_{sr}$  に對しては、僅かの差異を呈するに過ぎない。之等の諸事實に就ては、第 3 編に於て更に詳細に考察を加へたいと思ふ。

4. 結語 茲に説明した實驗 H<sub>3I</sub> 及 H<sub>3II</sub> は、 $D/b$  の値を種々に變化し一定の限界流況 (a) にて 20 分間宛掃流したものであるから、實驗にて得た洗掘状況の差異は全く  $D/b$  の變化のみに基くと考へられ、橋梁径間の影響に關し少くも定性的には充分信頼するに足る結論として次の如く要約される。

即ち橋脚軸間の距離と橋脚幅との比  $D/b$  は、橋脚の安定を支配する前頭部附近の洗掘に對しては勿論、後頭部附近の洗掘 (堆積となる場合も含めて) に對しても、さしたる影響を與へず、唯大きい模型に於て  $D/b$  が凡そ 10~15 以下となつた場合に、稍々目立つた増加傾向を呈するに過ぎない。而も此の事實は、一般に橋脚形状の如何に拘らず成立することが認められ、之等に對して適切な水理學的考察を加へて置いた。斯くして多數の流木等を引懸かる俱のない河川にては、径間縮小による河床洗掘への悪影響を過大視した從來の一般の見解の妥當ならざることを知り得べく、架橋地點の地質及地形、上部構造との關係並に美觀等に應じて、適宜有利な径間割を決定し得

るものと考へられる。此の場合徑間縮小による背水高の増加等に就ても、慎重な考慮を要するは勿論であるが、河床洗掘の立場のみから云へば、(17)に述べた宮本博士の提唱に對し或程度の參酌を加へて差支へない。

又河川横断面に於ける流速分布と洗掘との關係並に水路壁に接した橋脚に對する洗掘の小なること等に就ても適切な考察を行ひ、更に先端を尖らした I 型橋脚が洗掘軽減上極めて有利なることを愈々明確ならしめることが出來た。尙圖-54~58 に示す諸關係は、模型縮尺の影響を論ずる際の適切な資用として利用されるが、之等は第 3 編に於て改めて論じたいと思ふ。

#### (20) 新舊兩橋梁を接近して並列せしめる場合の影響

圖 1. 概説 近來鐵道、道路等の躍進的發展に伴ひ、舊橋梁に接近して新橋梁を並列せしめること多く、殊に市街地又は山間等で架橋位置が制限される場合に屢々見受ける所である。斯かる場合新橋梁の橋脚を在來橋梁の橋脚軌線中に流水方向と平行に設置し、同時に之等兩橋梁の前後の間隔其の他に就て慎重な考慮を拂つて、河床洗掘を軽減せしめなければならない。併し乍ら實際上は地質、地形並に上部構造の相違等に影響されて、仲々理想通りには行き難いものである。之等に就ては從來あまり組織的な研究が行はれてゐないが、唯 Timonoff<sup>35)</sup> が Lenin-Grad の水理實驗所で行つた實驗によると、次の諸點が擧げられる。

1. 橋脚の安定は前頭部附近に生ずる顯著な洗掘に支配されるから、在來橋脚が根入充分で丈夫な場合は、新橋脚を施工可能な範圍内でなるべく之に接して下流側に築造すべく、之によつて新橋脚に對する河床防護工の費用を相當節約することが出来る。之に反し若し在來橋脚が根入不充分で不安定な場合は、新橋脚を上流側に接して築造すべく、之によつて根入充分な新橋脚の前頭部が不安定な在來橋脚を大に保護することが出来る。
2. 新橋梁の徑間が在來橋梁の徑間よりも大きい場合は上流側に築造し、逆に小さい場合は下流側に築造して、以て在來橋脚に悪影響を與へない様にすべきである。此の場合にも新、舊兩橋脚をなるべく接近せしめると共に流水方向に平行ならしめる必要がある。

著者は此の問題に就ては別に實驗しなかつたが、前論文(13)及本論文(18)に述べた 2 圓壩建橋脚に關する實驗 F, G, 等の結果に徴して、上記 Timonoff の提唱は極めて注目すべきものと考へられ、以下に更に私見を明かにしたいと思ふ。

2. 實驗 F 及 G, 等の結果による考察 著者の實驗 F 及 G, は何れも 2 圓壩建橋脚に關するものであるから、一般の壁體式橋脚を前後に並列せしめた場合に其の儘適用し難いが、大體の狀況を推察するに足るものと云ひ得べく、之等を參照した考察の結果は次の通りである。

i) 實驗 F の結果に徴するに、兩圓壩中間部分の河床に相當の洗掘を見ることが此の種橋脚の大きい缺點であつたが、圓壩中心間の距離と直徑との比  $l/b$  が 2 前後の場合に、前圓壩後側の堆積作用と後圓壩前側の洗掘作用とが比較的よく釣合を保ち、中間部分の河床を割合原河床に近い状態に保ち得ることを明かにした。此の意味に於て前橋脚が後橋脚を保護すると云ふ論旨の下に Timonoff の與へた結論 1. は、頗る妥當で實用的價值多きものと云はねばならない。併し乍ら茲に注意すべきは、兩橋脚をあまりに接近せしめた場合、後橋脚前側に起る顯著な洗掘作用が前橋脚後側に影響し、其の尾端附近の河床洗掘を著しくすることである。従つて兩橋脚間には少くも或程度の隔りを置くべきであるが、之に對して次の様に考へたいと思ふ。

即ち 2 圓壩建橋脚にては、兩圓壩間に其の直徑従つて橋脚幅に相當した隔りを置くのを最も適當とした。而して普通の壁體式橋脚にては、實驗 E に見る如く尾端附近の堆積が相當著しいから、後橋脚前側に於ける洗掘作用を或程度減殺し得べく、前後の兩橋脚の隔りを 2 圓壩建橋脚の場合に比べて少しく加減しても中間部分の洗掘を



さして増大しないものと考へてよい。併し乍ら兩橋脚を餘りに接近さす事は施工上の困難を伴ふ筈であるから<sup>56)</sup>、兩橋脚の隔りを 2 圓橋脚の場合より少しく大きく、大體に於て橋脚幅の 1~2 倍程度とすることを提唱する。

次に一般に橋脚前頭部を尖らすほど、洗掘を軽減することは屢々力説した所である。而して 2 圓橋建橋脚の場合、後圓橋が獨立橋脚としての性質を明かに表し始めるのは、圓橋中心間の距離と直徑の比  $L/D$  が凡そ 3 以上の時であつた。従つて兩圓橋の隔りが直徑の 2 倍以上となると、後圓橋を尖らすことによつて其の前面の洗掘軽減上大きい効果が期待される。所が普通の壁體式橋脚の場合は、前橋脚後側の堆積が著しいから、前後の橋脚間の隔りを橋脚幅の 3~4 倍以上とした時、始めて後橋脚の前頭部を尖らすことの結果が明かになるものと考へられる。

ii) Timonoff は其の結論 2. に於て、洗掘に及ぼす橋梁徑間の影響を重大視し、新橋梁の徑間が舊橋梁に比べて大又は小なるに應じて、夫々新橋梁を舊橋梁の上流側又は下流側に接近して築造すべきものとした。此の方法は河床洗掘軽減上確かに有効ではあるが、前節に述べた實驗 H<sub>1</sub> によると、橋脚軸間の距離と橋脚幅との比  $D/b$  が凡そ 10~15 以上の場合には、 $D/b$  の減少による河床洗掘上の悪影響が輕微であつた事實に鑑み、著者は次の様に考へてゐる。即ち  $D/b$  があまりに小さい時を除いては、架橋地點の地形、地質其の他を考慮して適當な設計をすればよく、相當の犠牲を拂つてまでも上記 Timonoff の提唱に従つて新橋梁の位置を定める必要はない。

iii) 新、舊兩橋梁の橋脚軸線を重ね合はすことは、流水の疏通を良好にして且河床洗掘を軽減する上に極めて望ましいが、實際は種々の事情に支配されて實行し難い場合が尠くない。而して 2 圓橋建橋脚に於ける傾斜角  $\theta$  の影響を検討した實驗 G<sub>2</sub> によると、 $\theta$  が約  $5^\circ$  以下の場合にのみ、河床洗掘上の悪影響が輕微であつた。従つて新、舊兩橋梁を接近して並列し橋脚軸線を重ね合はし難い場合にも、兩橋脚の中心を結ぶ線が流水方向となす角を約  $5^\circ$  以下とすれば、前橋脚は後橋脚を相當保護し得べく、上記 Timonoff の結論 1. は其の儘適用してかなり有效なものとして考へてよい。併し乍ら實驗 G<sub>2</sub> に於ては、傾斜角の増大に應じて先づ兩圓橋中間部分の河床洗掘を増し、更に後圓橋が獨立橋脚としての性質を表すほど愈々、其の悪影響を激増した。従つて只今の場合に於ても、新舊兩橋脚の中心を結ぶ線が流水方向に對し  $5^\circ$  以上の角度をなすことは、努めて避くべきであり、此のことは (18) に述べた Wiesent 河橋梁の實例に徴しても明かな所である。而して普通の壁體式橋脚にては其の長さを増すほど、橋脚軸線を重ね合はさないことによる悪影響は、愈々著しくなるものと見なければならぬ。若しやむを得ず  $5^\circ$  以上の角度をなす場合は、其の前後の隔りをなるべく大きくして (少くも橋脚幅の 4 倍以上)、之等を互に獨立した橋脚たらしめ、新橋脚の築造により舊橋脚への悪影響を出来るだけ軽減すべきである。此の場合は新橋脚の先端を尖らすことにより、其の前頭部附近の洗掘を激減し得ることは云ふまでもない。

3. 結語 新、舊兩橋梁を接近して並列する場合に就き Timonoff の與へた結論は甚だ注目すべきものであるが、著者は之に對し實驗 F 及 G<sub>2</sub> 等による信頼すべき定性的資料によつて詳細な考察を加へ、次の諸點を明かにした。

先づ橋脚軸線を重ね合はす場合、前橋脚が後橋脚を保護すると云ふ理由の下に、舊橋脚の強弱に應じて新橋脚を其の下流側又は上流側に接近して築造すべきことを確認すると共に、前後の橋脚間の隔りを橋脚幅の凡そ 1~2 倍程度とすることを提唱した。次いで橋梁徑間の大小に應じて新橋梁の位置を定めることは確かに有效なるも、徑間縮小による悪影響を過大視して、多大の犠牲を拂つて迄も此の方法に従ふ必要はない。

最後に新、舊兩橋脚の軸線を重ね合はし難い場合には、兩橋脚の中心を結ぶ線が流水方向と  $5^\circ$  以下の角度をなす様に努むべきである。而して此の角度の範圍ならば軸線を重ね合はした場合と同様に兩橋脚を接近して築造す

56) 近藤健武、兼島方牙：“早月橋改修工事”土木工學，1940，頁 258-266。

べきも、之以上の角度ならば兩橋梁の隔りを大きくして、相互に悪影響を及ぼさない様になければならない。

### (21) 結 論

著者は橋脚配置の河床洗掘に及ぼす影響を、主として橋脚軸の傾斜角、橋梁の徑間及新、舊兩橋梁の並列と云ふ3つの立場から詳細に検討し、以て橋脚配置上から見た河床洗掘軽減の諸對策に對する一般的指針を把握することに努めた。此の爲に行つた實驗  $G_1 \sim G_4$  及  $H_{m1}, H_{m2}$  は、何れも前論文と同様に独自の實驗的基礎の下に一定限界流況にて20分宛掃流したものであるから、夫々橋脚軸の傾斜角又は橋梁徑間の影響のみを確實に具現し得た筈である。従つて實驗結果が少くも定性的には充分信頼するに足る結論を與へ、更に進んで定量的な考察に對しても有力な指針を得べきことは、前論文に於ける橋脚形狀の影響に關する諸實驗と全く同様であり、第3編に於て改めて具體的に検討したいと思ふ。

而して本實驗によつて得た結果は夫々各節の末尾に要約して置いたが、結論として橋脚配置上から見た河床洗掘軽減に關する一般的對策を列擧すれば次の通りである。

i) 橋脚軸の傾斜角  $\theta$  の極めて小さい場合は、河床洗掘上あまり悪影響はないが、 $\theta$  の増大と共に愈々悪影響を明かにし、遂には前頭部附近のみならず後頭部の流水に當る側の洗掘を激増し、橋脚の安定を著しく害する。従つて實際橋脚の築造に際しては、橋脚軸を少くも洪水時の流水方向と平行ならしめ、たとへ水位、流量の變化によつて多少流水方向を變じて、流れに對する橋脚軸の傾斜角が約  $5^\circ$ 、多くとも約  $10^\circ$  以上とならない様に心掛ければならない。

名橋錦帶橋の橋脚が、急流錦川の度々の大洪水に耐へ、現在迄略々原狀を維持し來たつたことは、其の橋脚形狀の優秀性に基くことは勿論であるが、橋脚軸の方向に對し慎重な考慮を拂つたことにも大きい原因があると考えてよい<sup>57)</sup>。

ii) 傾斜角  $\theta$  の増大に伴ふ河床洗掘上の悪影響の増加傾向は、橋脚形狀によつて著しく左右される。一般に壁體式橋脚にては、前頭部を尖らすほど  $\theta=0^\circ$  の時の河床洗掘を軽減するに拘らず、 $\theta$  の増大に伴ふ悪影響は加速度的に激増する。従つて洗路一定せず相當の變化をなす河川では、寧ろ前頭部を圓くして置く方が安心であり、此の意味に於て我國にて屢々圓壩型橋脚が採用されるのも相當の利點があるものと云つてよい。次に2圓壩建橋脚にては、 $\theta$  の増大によつて兩圓壩中間部分の洗掘深を激増するから、茲に此の種橋脚の大きい缺點がある。殊に  $\theta$  が或程度以上に大となつて、後圓壩が獨立橋脚としての性質を明かにするに應じて、後圓壩周圍の洗掘が愈々激増する。従つて2圓壩建橋脚を流れに傾斜して設置することは最も避くべきであり、少くも約  $5^\circ$  以下の傾斜角におさめる必要がある。

iii) 橋脚軸間の距離と橋脚幅との比  $D/b$  は、橋脚周圍の洗掘に對しあまり悪影響を與へず、唯橋脚の大きい時のみ  $D/b$  が凡そ  $10 \sim 15$  以下となつた場合、僅かに目立つた増加傾向を示すに過ぎない。この事實は橋脚形狀の如何に拘らず成立するから、從來の如く徑間縮小による河床洗掘上の悪影響を過大視する必要なく、架橋地點の地形、地質並に上部構造の型式美觀等に應じて、或程度自由に經濟的な徑間割を行つてよい。併し背水高を特に減少するを要するか又は多數の洗木等の引懸かる惧のある河川では、相當の犠牲を拂つても徑間長を大とすべきは云ふ迄もない。

iv) 水路の1横斷面に多數の橋脚を並べた場合、水路中央に近い橋脚ほど稍々著しく洗掘されるが、之は橋脚

57) 大野唯翔：“錦帶橋の沿革と構造”土木學會誌，1936，頁515-533。

に當る流速を増すほど洗掘を増加することを意味する。次に水路壁に接した橋脚に對する洗掘は、然らざる橋脚に對するものに比べて著しく少いが、之は橋脚に當る流れの脈動が洗掘と大きい關係をもつためである。

v) 新、舊兩橋梁を接近して並列する場合、兩橋脚の軸線を重ね合はすべきは勿論、舊橋脚の強弱に應じ新橋脚を其の下流側又は上流側に築造することによつて、經濟的に兩橋脚の安定を期することが出来る。此の場合前後の橋脚の隔りを大體橋脚幅の倍程度とすることが望ましく、斯くすることによつて兩橋脚中間部の河床が比較的原河床に近い状態に保持されるわけである。

若し兩橋脚の軸線を重ね合はし難い場合にも、之等の中心を結ぶ線が流水方向となす角を約  $5^{\circ}$  以下にすべく、之が不可能ならば兩橋脚を離して相互に影惡響を及ぼさしめないことが必要である。

本研究に就き絶えず御懇篤な御指導を賜つた京都帝國大學名譽教授平野正雄博士、實驗製圖に一方ならぬ御手数を煩した同助手上田正夫及沈胤燮兩君、並に研究費を補助された日本學術振興會に對し深甚な謝意を表する次第である。