

橋脚周囲の洗掘作用について(一)

鈴木清一

I 緒論

橋梁の安危を支配するものはその下部工事である。上部構造に関しては幾多の理論が確立し、整然たる示方書に基いて行ふ計算により明確に設計をなし得るのである。然るに下部工事に至つては老練なる技術家の判断に俟つべき部分が多い。而してこの判断が上部構造の死命を制すべき下部構造の決定を左右するのであって實に重大事項である。橋梁の大部分は河川と不可分なものであつて橋梁の技術家は一面河川のよき理解者でなければならぬ、然るに橋梁と河川との密接なる關係を取扱つた著書、論文は多くその例を見ないのである。

河川と橋梁とを聯想して考ふるに次の三つの重大な事項を包含してゐる。

- (1) 河川の流況と橋梁の徑間割。
- (2) 河床の安定度と橋脚根入及び桁下空間。
- (3) 流下物と橋脚の安定度。

以上の中（1）及（3）は大體適切な假定をして計算を行ふ事が出来るし又（2）についても河床の安定せるや否やも大體各河川について推定をなし得る。桁下空間を如何にすべきかは河床の安定度及適切な高水位の推定によつて定めることが可能である。橋脚の根入の問題については橋脚周圍に生ずる洗掘作用を明かにする必要があるものであるが此問題を理論的に解決することが困難なるためと實際については橋脚周圍に生ずる洗掘作用を明かにする必要があるものであるが此問題をねられてゐたものである。筆者は昭和九年度、十一年度の全國的大災害に於て最近架設せられたる耐久的橋梁の破壊の原因の殆ど大部分が下部工事にあり、然もその大多數は洗掘作用によるものなるを知り、此處に一文を草して各位の御注意を喚起し、多少なりとも御参考に資する所あらば幸甚とする次第である。

橋脚周圍の洗掘作用を明かならしむるには現在の所模型試験による方法と理論的に解く方法との二つが考へられる。後者に就いては他日稿を改めて述ぶることとし此處に於ては各國の水理實驗所に於て行はれたる模型試験の結果を説述しが防護方法について考察してみたいと思ふ。

洗掘の防護方法としては次の各項が考へられる。

- (1) 徑間を大にし且つ根入を深くすること。
- (2) 特別な抵抗力を有する防護工事を施すこと。
- (3) 洗掘を小ならしむる橋脚断面を採用すること。

(1)に關しては河川の流況其他により充分大なる徑間とし洪水流量を充分疎通し得るものとする事が先決問題であつて次に洗掘作用によつて橋脚周圍に深掘を生じても橋脚の安定に何等危険を及ぼさざるだけの深さに根入をするのであ

る。然るに實際橋梁工事費充分ならざる場合多く且つ又洗掘によつて如何なる深さまで掘らるるやも技術的判断による場合多きため支持力十分なる深さに於て止めらるる事が多い。支持力を充分ならしむる深さに加ふるに洗掘による深さを考慮して根入を決定すればよいのであるが尙ほ所は第三として掲げたる洗掘作用を最小ならしむる橋脚断面型を採用することである。従来は橋脚の前頭部及後頭部單に水切りの宜しき様半圓型を附し他の部分は上部構造を支承すべき力学的考慮を拂ふと同時に美觀上よりの考慮をなして決定せられたものである。以下述べる所によつて知らるゝ如く洗掘作用を最小ならしむる橋脚断面型であつて同時に力学的に満足せられ美觀上支障なきものとすることは稍困難であるが、之等を折衷して理想的な一斷面型を提案したいと思ふ。

(2)に舉げたる方法は橋脚周囲の河床地盤が洗掘力を之に及ぼされても掘れぬ方法を講ずるのであつて例へば橋脚周囲にある深さ、ある廣さに適當な大きさの捨石をするか又は石張をする方法、又は沈床、^{モルタル}等の方法を用ふるものであつて此方法のみに頼る時は屢々思はざる危険を生ずる懼がある。

II 模型試験

(1) 橋 説

橋脚周囲の洗掘作用を模型試験を行つて創めて明確ならしめたものは 1894 年 H. Engels 氏の研究である。

(Engels—Schutz der Strompfeilerfundamente gegen Unterspülung. Z. f. Bauwes. 1894. S. 407.) 同氏の行つた實験は橋脚の前頭部及後頭部に對し、三角形、四角形、圓形の三種を種々に組合せて洗掘の模様を研究し結論として最も有効な

して簡単なる防護方法は洗掘の生ずる廣さ以上に涉つて深さは洗掘深以上に橋脚開闊に放射馬蹄形に捨石をなす事を提議したのである。(第1圖参照)

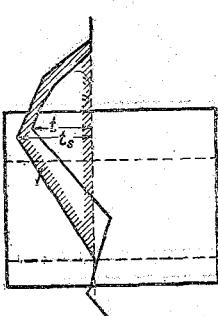
然るにこの實驗からは捨石の廣さ及深さに關しては何等近似的の量をも示されてゐないのである。單に橋脚開闊の捨石のみによつて橋脚の安定を計ることは困難である。若し第1圖に於て $S < r$ なる場合には次第に捨石の効果を殺ぐ事となる。故に橋脚の断面形を最も合理的な形狀とし洗掘作用を最小限度に止むる事が先決問題である。

次に各國の水理實驗所に於て行はれた實驗を示し、各場合に於ける洗掘状態を比較して最も良の橋脚断面を得たいと思ふ。但し此模型實驗の結果から實際の場合における洗掘量等を引出す事は出來ないが只如何なる傾向にありやを察知し得るに過ぎないのである。模型實驗の縮尺は流速、河床の地質構成、橋脚形状、流滯時間等種々の事情を入れて定めるのが比等に關してはこゝに記述しないが詳しく述べは J. R. Freeman—Hydraulic Laboratory Practice P. 743. を参照されたい。

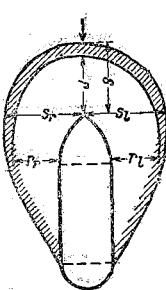
(2) 橋脚断面形狀に關する研究

1930年 Danzig の水工學實驗所で行はれた洗掘作用に關する模型實驗の一部を述ぶる事とする。

橋脚の模型は亞鉛板製の箇で巾 $d = 12\text{ cm}$, 長さ $l = 25\text{ cm}$, 高さ $h = 50\text{ cm}$ の寸法のものを砂を以て満し之を閉ぢた



第 1 圖

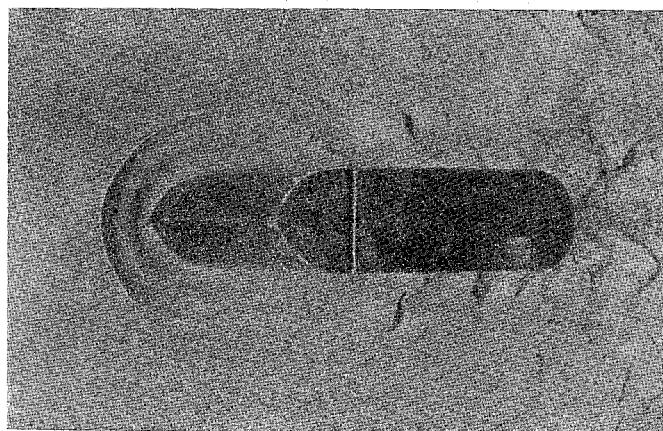


のであるが、此四角の函に互に異なる 8 個の前頭部及後頭部がハンダ付けとせられた。此模型を水路のコンクリート底上に建て非常な注意をして橋脚周圍に砂を水平にならしたのである、模型の縮尺は 1:50 であつてこれは幅 6 m、全長 20 m の實際橋脚に相當する。水路の幅員は 0.65 m、河床は深 0.2 m の砂層を置き橋脚による背水なき場合の水深 $t = 0.12 m$ とし、實驗中は水深、流量、河床の砂、流埽時間等は常に同じ大きさとし各試験相互の比較を容易ならしめたのである。

1. 種々の前頭部形狀を有する場合

橋脚は正しく流水の方向に平行せしめ水路の中央に置き、通水は特別の場合に 480 分、主として 150 分續けられたのであるが最大の洗掘深は常に前頭部尖端に近く生じ後頭部尾端には沈澱を生じたのであるが、流水の方向に正しく置かれた場合は常に河床の變化の模様は橋脚に對し左右對稱であり、且つ最深の洗掘箇所は橋脚面に沿ふて起る事が判つたのである。(第 2 圖参照)

此場合の水面状態及河床の模様は尖頭測定器によつて橋脚の縱軸内を上流部より測て前頭の尖端に至つて橋脚側面に沿ふて測り尾端に至つて又縱軸内に復るもの測定したのである。(第 3

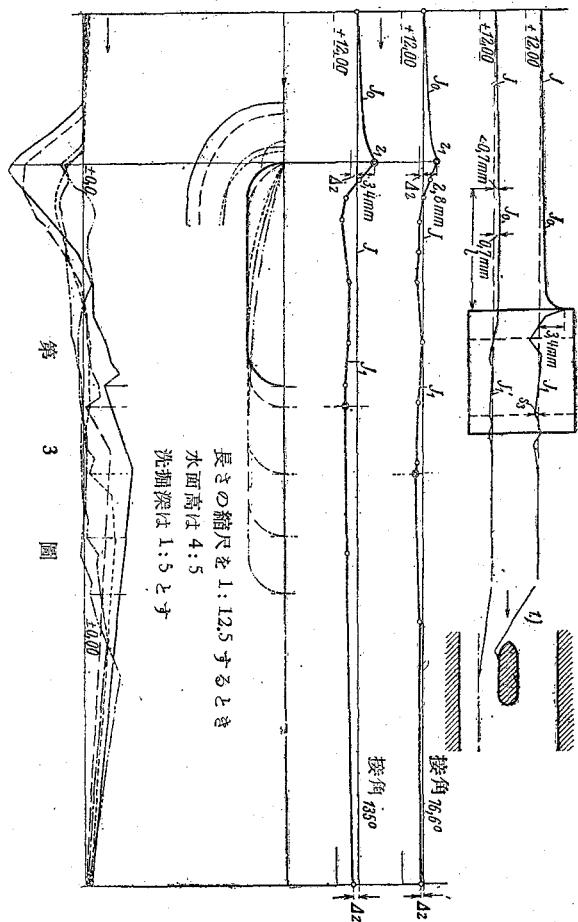


第 2 圖

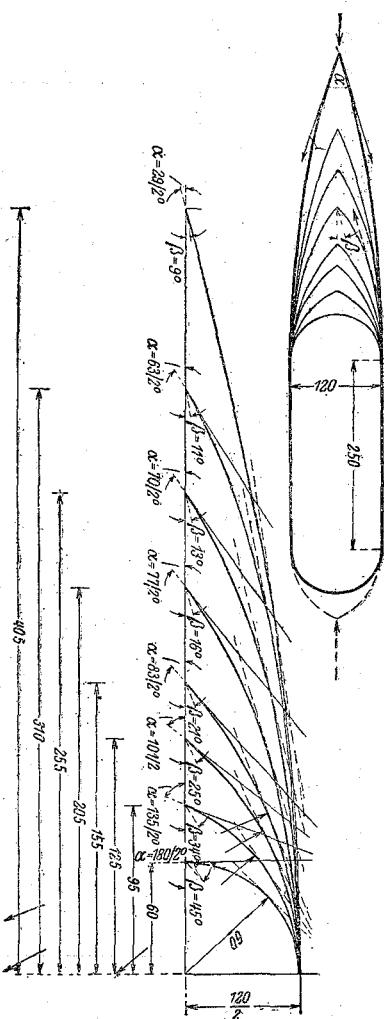
圖參照)

第4圖は種々の凹凸形状とその尖端の捲角を示したもので、第5圖は形鋼の結果を曲線にして示したものである。

此圖は水不動前に前頭部尖端の接角値をとり、級的に沈没深 t 及 t_0 或は沈没幅 r を長さの単位にてとめたものである。



第三圖



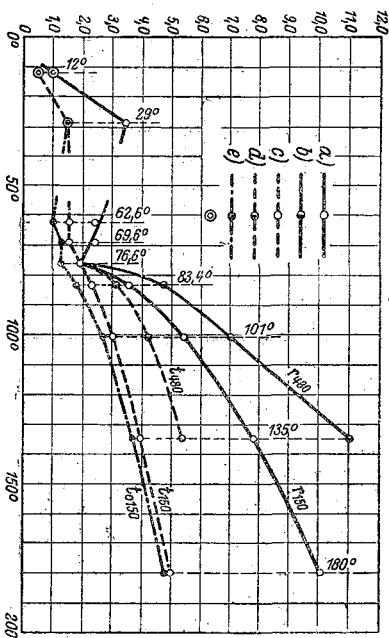
のものより稍大なる r を示してゐる。曲線 (c)

は實驗継
續 150 分

の場合の
最深の洗

掘深さを
示し、曲
線 (d) は

480 分の
ものを示



第 5 圖

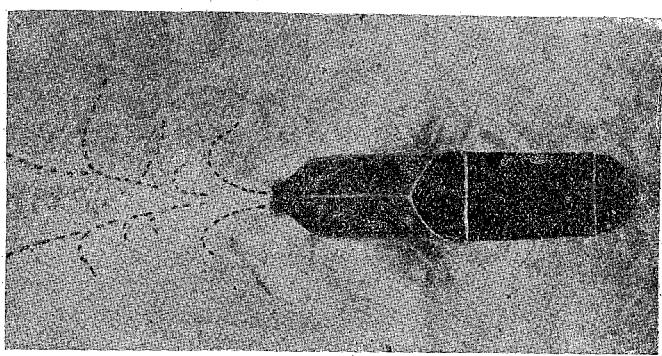
すのであ

るが之も亦 r と同様な關係を示して 76.6° では r とも近い値となつてゐる。

此の最深部の生ずるのは 180° の接角及これに近い値の場合は前頭部尖端であ

るが接角が之等より小なる場合にはこれが稍下流に移る事がある。橋脚側壁の平行部から圓への移行が圓滑に行はれる爲であると想像し得るのであるが、

Engels 氏の實験によれば前頭部角形なる時はその綾角部に、三角形なる時も



第 6 圖

三角形から側壁平行部に移る絞角の箇所にて最深部を生ずることが確められてゐる。

曲線(c)は前頭尖端部に於ける洗掘深 t_0 を示してゐる。又此等の観測から橋脚上流部の堰上高と橋脚断面形状による洗掘深とは同一の関係にある事が判る。(第3圖参照)

2. 種々の後頭部形狀を有する場合

後頭部の形狀が前頭部に生ずる洗掘の幅及深に對して如何なる影響を及ぼすべきかを調査したのであるが、從來一般に前頭部には深洗掘を生じ後頭部尾端には沙灘を生ずると信せられたのである。併し實際にはこの沙灘中につても後頭部

尾端に接する箇所のみは一部

小なる洗掘が生じて居るが、

之が橋脚の安危に關する事は

稀である。此現象は第3圖か

ら觀取することが出来る。只

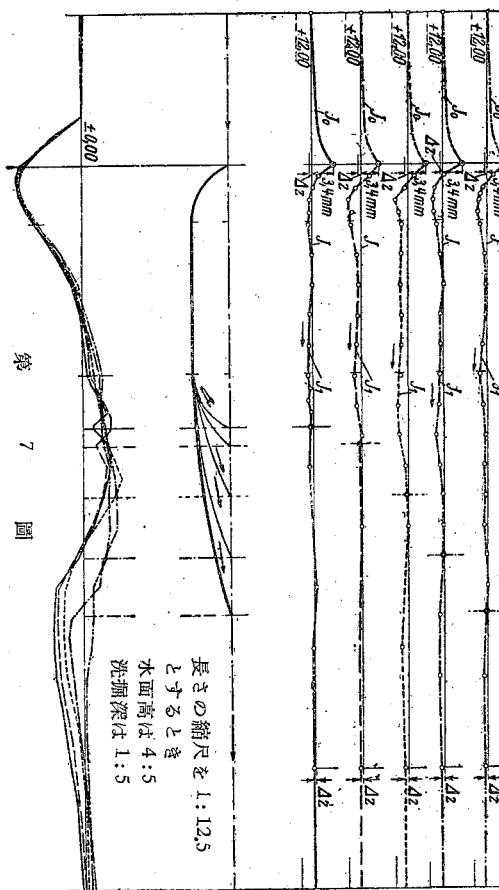
此現象によつて後頭部尾端の

形狀が河床にある作用を及ぼ

すものなることが判るのであ

るが、橋脚下流に於ける洗掘

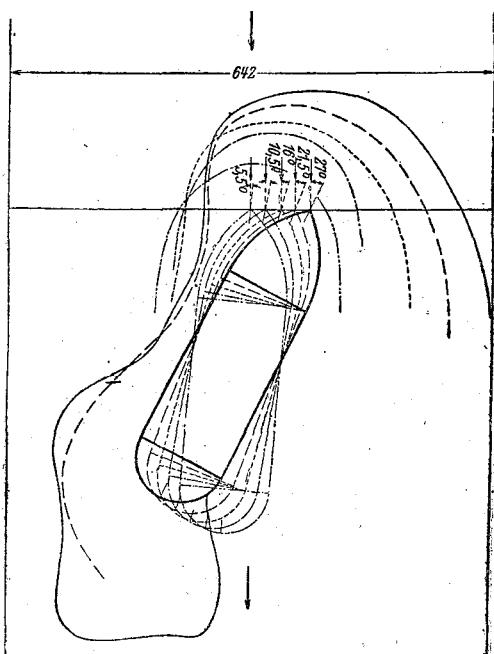
は二つの部分に分れ橋脚の中



第 7 圖

心を通る縦軸方向に下流に向つて洗掘が起り平たく
可なり廣い面積を占めるものである。(第6圖参照)
此場合には第4圖に見る接角 α の影響はなく β
の角度によつて洗掘状態が變化する。

第7圖は種々なる後頭部形狀を有する場合の水面

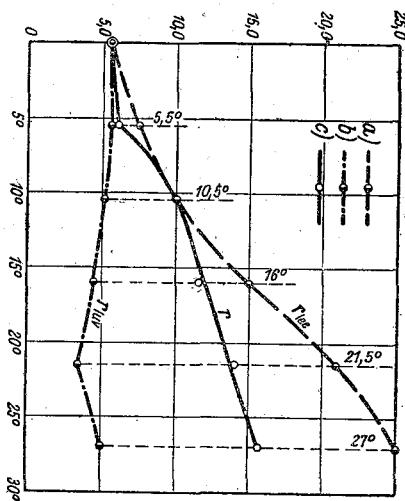


第 8 圖

状況及河床状況を橋脚綫輪廓線内及橋脚側面に沿ふて測定した
ものであり、此結果から後頭部の形狀は Engels 氏が已に實驗
せらる如く前頭部の洗掘には何等影響なき事が判つたのである。

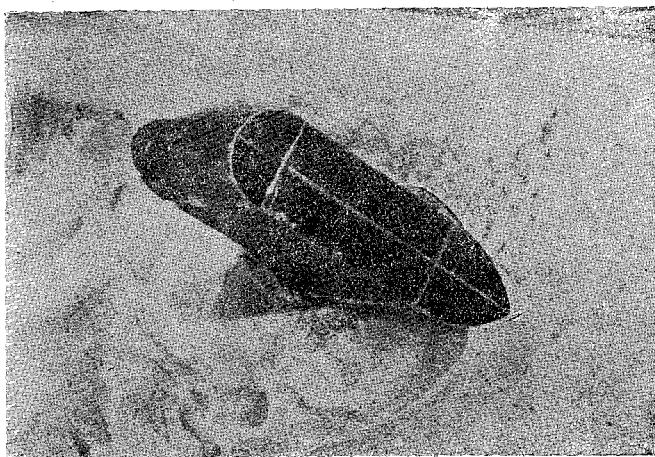
3. 流水が橋脚に斜に當る場合

既改修河川にしても天然河岸を有する未改修河川にしても時

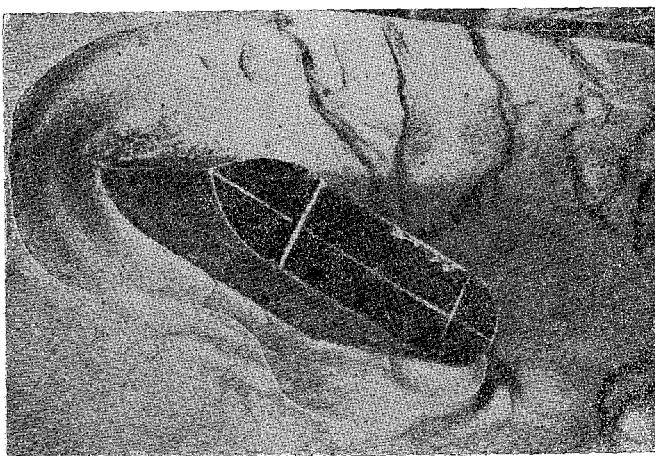


第 9 圖

々刻々に變化する流水の方向に對して橋脚を常に平行ならしむる事は不可能である。低水路の流水方向と洪流時に於ける

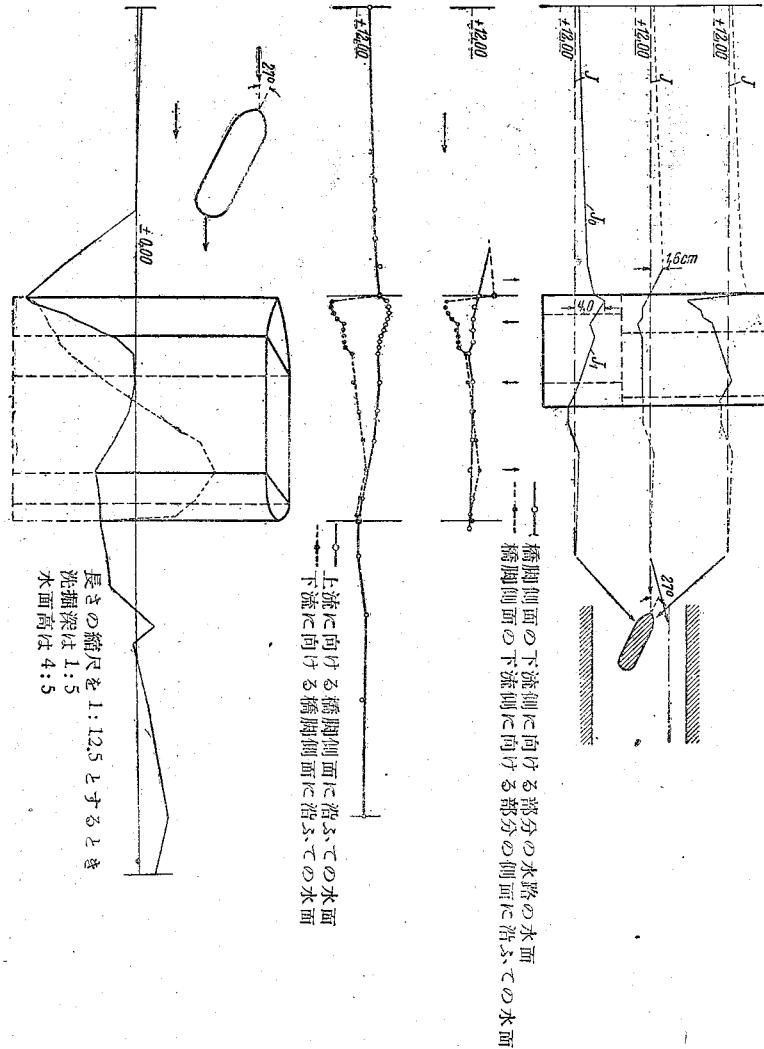


第 10 圖



第 11 圖

第 12 圖

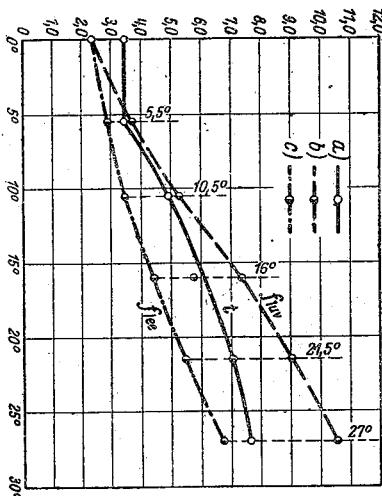


流水方向と想像し得る堤防法線とは屢々一致しないし長い區間河川が直線である事は極めて稀であつて、最大洪水時に於ける流水方向を最も合理的に判断する事は極めて困難であるが勘して堤防法線に一致するものとして橋脚方向を定める。こゝに於て各個の場合に多少の無理を生ずるのは極めて當然の事であつて事實流水が常に橋脚軸に平行に流れれる事は少なく多少なりと必ず斜に當つて来る。

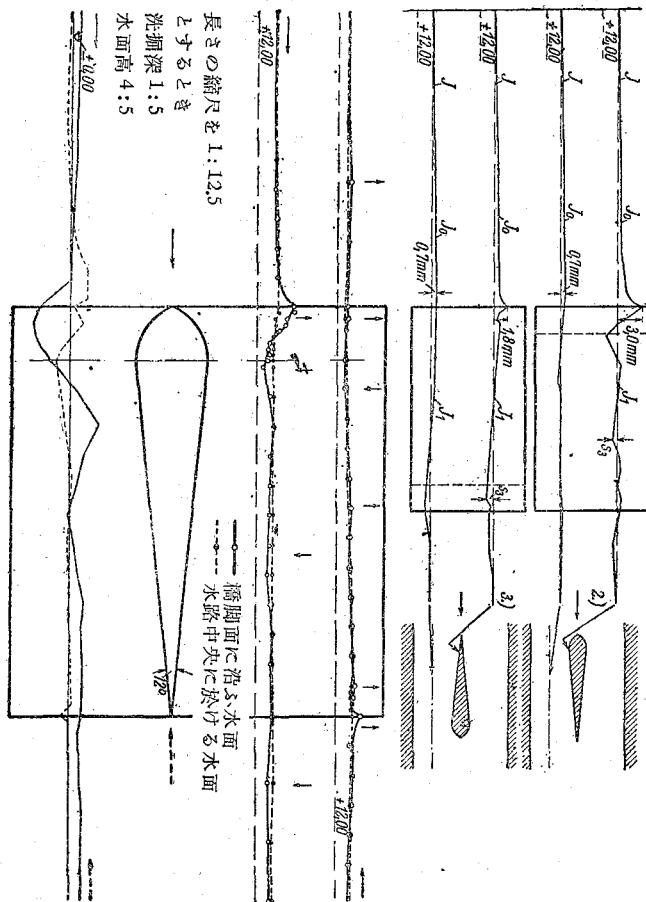
架橋地點の選定に當つては河川の方から言つても橋梁維持の方面から言つても斜橋を成る可く避くる事、河川の彎曲箇所を避くる事等が必要である。

模型試験は橋脚型として前頭部圓弧、後頭部半圓形のものを用ひ第8圖の如く流水の方向に對し種々の角度に傾けたのであるが、此場合は前項の各試験の結果の如く橋脚軸の左右對稱に洗掘は生ぜず洗掘の廣さとして r を橋脚先端から流水方向に測りたる距離、 r_{lee} を下流側、 r_{buo} を上流側、即第8圖の左と右に測つた距離とする。

流水の方向と橋脚軸の角度を 0° 、 5.5° 、 10.5° 、 16° 、 21.5° 及 27° の6種としたのであるが、 0° の場合は勿論 $r_{lee} = r_{buo}$ であつた。併し下流側の洗掘幅は傾斜角の増大と共に著しく大となり、第9圖曲線(a) 27° では 0° の場合の5倍に達



するが、上流側では大きな變化は見られず、曲線(b)、後頭部に於ては大きな斜角であつては洗刷幅著しく大となり後頭部



第 14 圖

基礎を危険ならしむるのである。

第 10 圖は角度 27° の場合 下流より見たる河床洗掘状況であり、第 11 圖は上流より見たるものである。第 12 圖は水面状況を測定したる結果である。

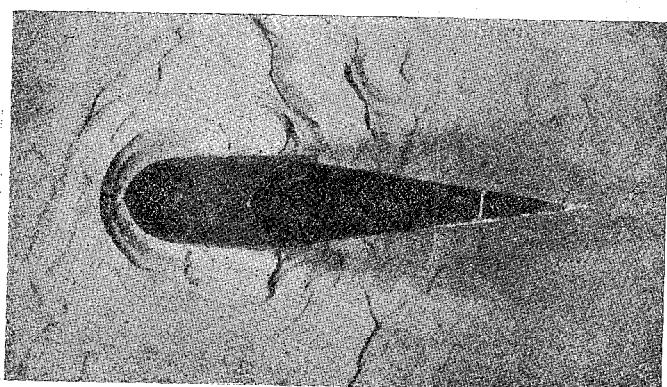
第 13 圖は最大の洗掘深 t 及上流側洗掘面積 f_{lue} 、下流側洗掘面積 f_{lee} を示したものであつて、角度 0° なるときは兩側の洗掘面は等しく、 27° に至つては上流側はその 5 倍となるのである。

以上の結果を総合すれば傾斜角 5.5° までは 0° の場合に比して大なる變化は生じないが角度の増大と共に前頭部の洗掘は危険となり遂に橋脚は多分上流側の方向に橋脚軸に直角に倒れることとなる。

4. 魚形についての考察

流水に最も抵抗の小なるものとして第 14 圖に示す如く前頭部を圓弧とし之に接して後頭部を接角 12° なる所謂魚形について考察しよう。此型は各國の學者によつて種々研究せられたるも橋脚としては他の力學的考證から實際問題としては役立つことは出來ない。

此場合の洗掘の廣さ及洗掘の深さは同一の前頭を有するものより稍小であり、下流部については既述の測定に反して何等洗掘を生じなかつたのであって洗掘に對しては他の前述のすべての橋脚斷

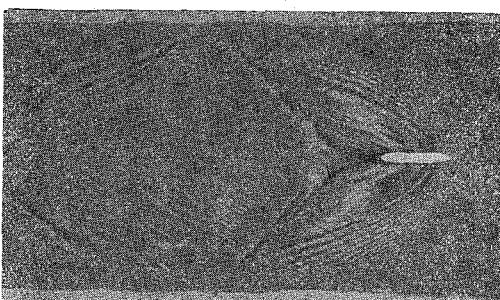


第 15 圖

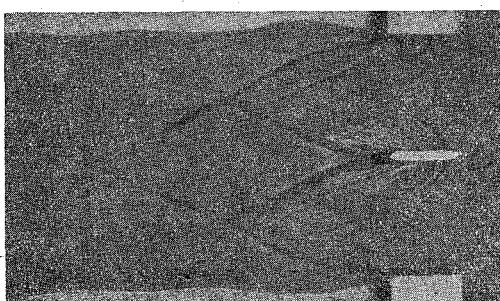
面に優るものである。第2の實驗として流水方向を逆にした場合は洗掘狀態は實驗では最も良好であつた。

(3) 其の他の研究

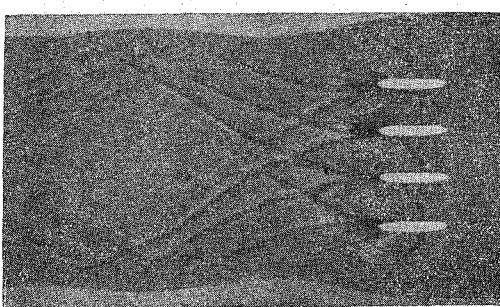
(a) 以上(2)の1~4は水路の中央に只一個の橋脚が置かれた場合の水面狀態及河床の洗掘状況を取扱つたものであるが、Karlsruheの河川水理實驗所にて行はれた橋脚の並列數と水面の模様に關するものがあり、本文の目的たる洗掘状況を詳かにすることは出来ないが参考資料として第16圖乃至21圖を御覧願ひたい。



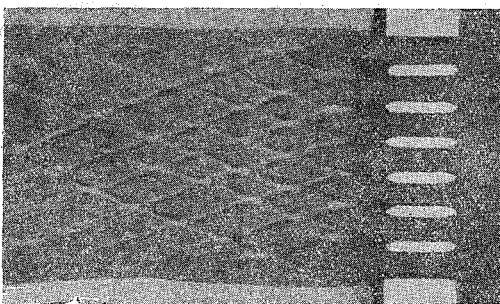
第 16 圖



第 17 圖



第 18 圖

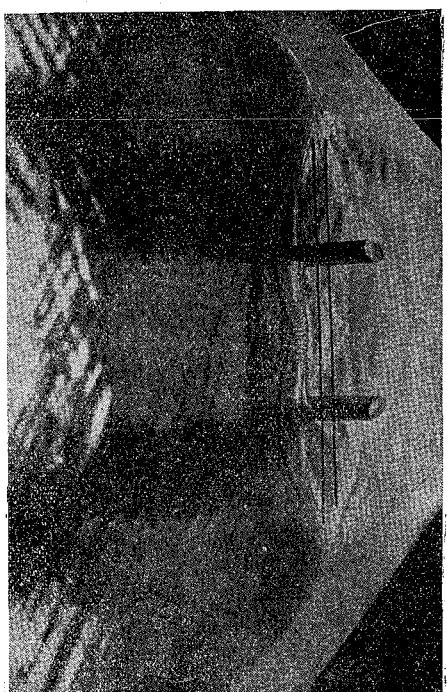


第 19 圖

(b). 次に在來橋梁に接して新橋梁を建築する場合橋脚は勿論流水断面を支撑ながらしむるため在來橋脚軸線中に流水と平行に設置すべきであるがその間隔は如何にすべきかの問題を取扱つた実験が Le-ningrad に於ける水理實驗所にて行はれたが實際我々は僅々此の問題に行當ることがある。第 22 圖は上下流の橋脚の純間隔を 1 橋脚長だけあけた場合であつて、第 23 圖は大なる距離を隔てた場合の河床洗掘状況を示したものである。

即洗掘の方面のみより論すれば洗掘は橋脚の前頭

第 20 圖



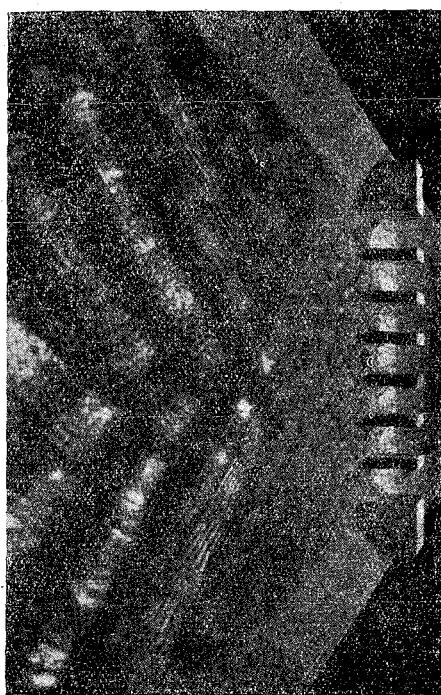
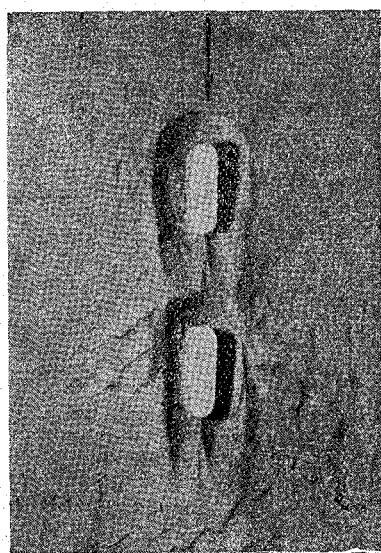
部に大なる洗掘深を生ずる故に若し在來橋が根入十分なる場合は新橋脚を施工可能なる範囲内に於て出来るだけ之に接して下流部に製造するが利益である。但し在來橋の根入不十分なる場合は新橋脚を勿論上流側に接して設くべきである。かくして根入適切なる橋脚は新設の根入十分なる橋脚の前頭部によりて保護されるのである。第 22 圖の下流側橋脚は幾分上流側橋脚の庇護の下にあることが見られ、第 23 圖では互に大した影響なきものと見られる。

第 24 圖は新橋梁が在來橋よりも徑間小なる場合は上流側に設くべき事を實驗上明かならしめたものである。この反對に新橋梁が在來橋よりも徑間小なる場合は下流側に設くべきであつて(後述のⅢ 参照)いづれの場合にしても新舊の橋

脚は成る可く橋脚縱軸線内に置き而も之を接して設くべきである。

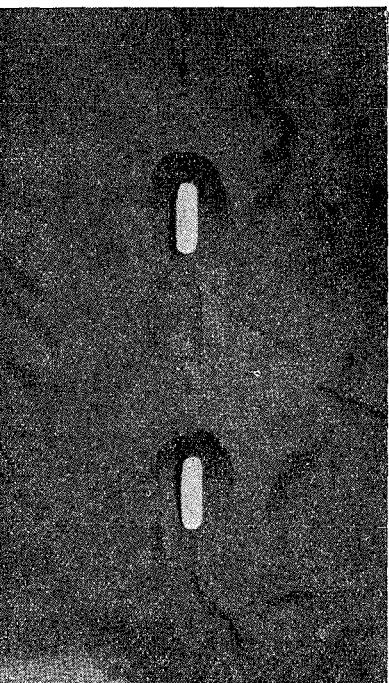
第 25 圖は一列に並べたる大小の橋脚とその洗掘状態の比較を参考に示したものである。

(c) 前述の橋脚は孰れも一體の壁體より成る構造であつたが、若し之が二本建の構造の橋脚の場合、更に進みて樁構式の構造の場合は如何なる洗掘



第 21 圖

状態となるべきか、又壁體式のものと比較して橋脚の安定及河床、流水等に如何なる影響ありやを論じたいのであるが十分な資料が得られない。たゞ前述の壁體構造の場合から大體の想像をなし得らるゝと信ずるのであるが之等は決論に於て述べることとする。第 26 圖乃至第 30 圖は米國の Iowa 大學の水理實驗所に於て行はれたものであるが詳細な記録を得られる爲

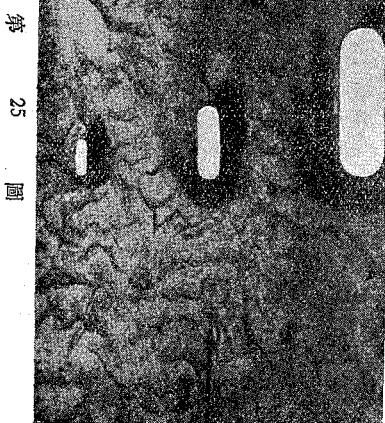


第 25 圖

第 23 圖

單に水面状況のみを示したものである。

第 26 圖は圓筒型二本建の橋脚を水路中に置きたる場合の水面状況を示したもので、第 27 圖は第 26 圖の場合と流量を變へたる場合、第 28 圖は同形の橋脚 2 個を設けたる場合である。第 29 圖は圓筒型二本建より成る橋脚二個の場合、



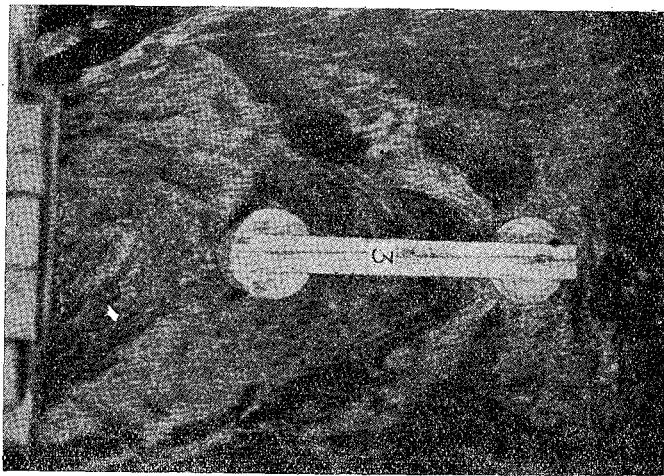
第 24 圖

技

術

26

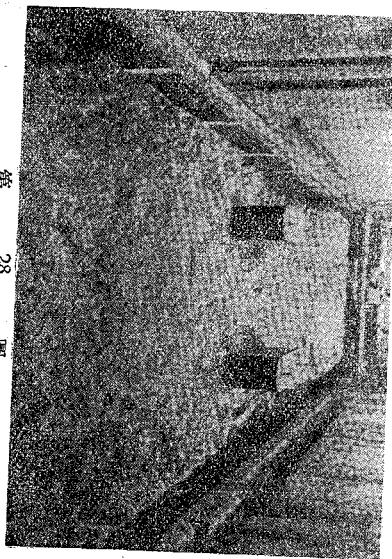
圖



第

28

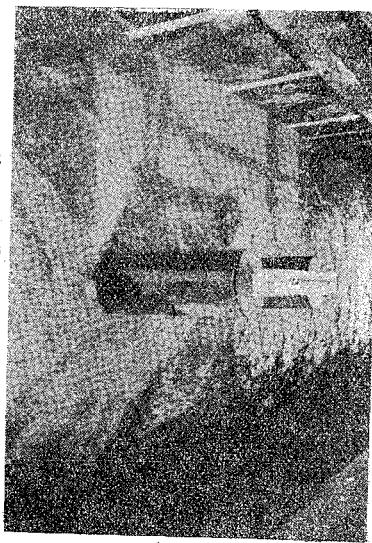
圖

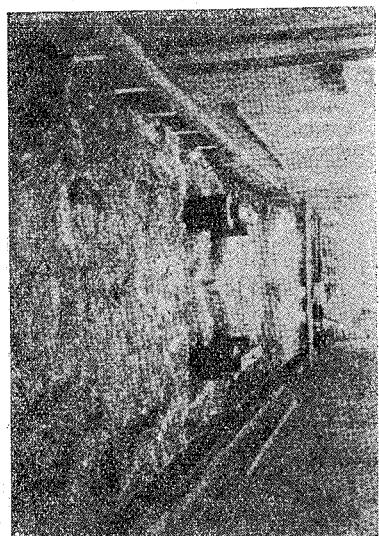


第

27

圖



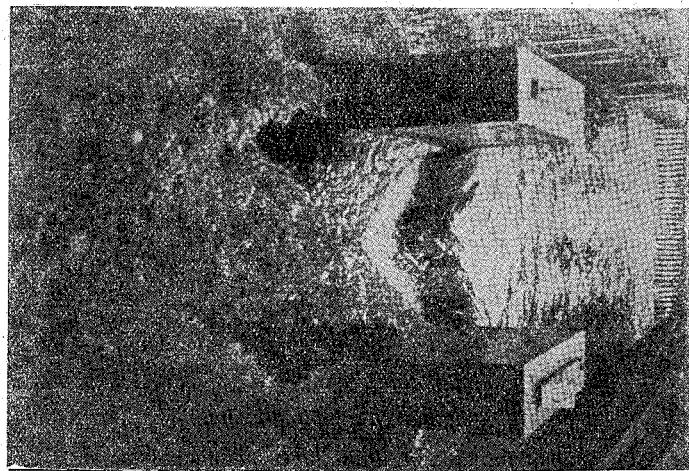


第 29 圖

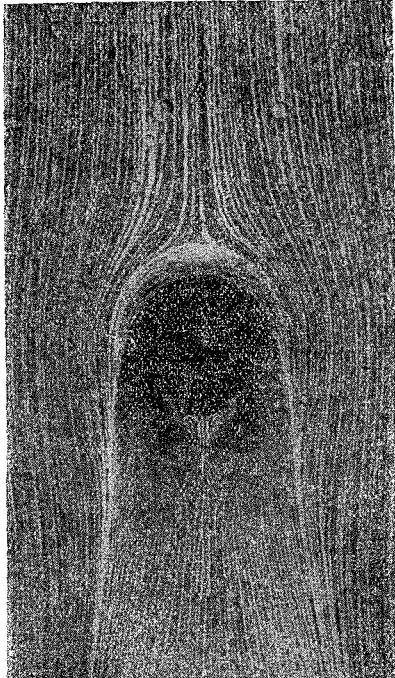
第 30 圖は矩形橋脚 2 個を設けたる場合の水面運動量の状況を示す

ものである。

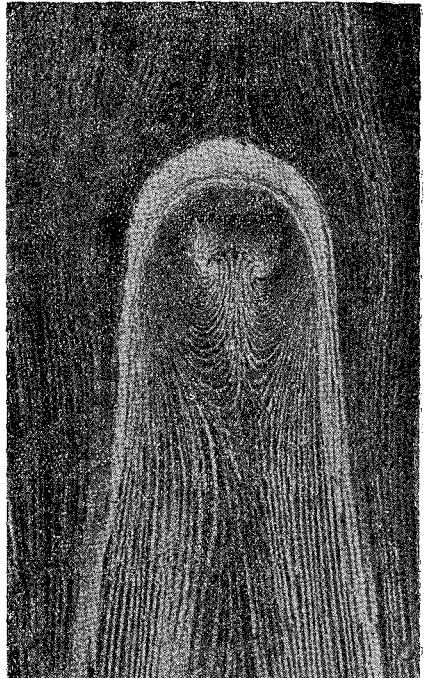
(d). 第 31 圖乃至第 34 圖は Hanover に於ける水理實驗所で行はれた水中障害物の周りの水流状況を示すものであつて後述の橋脚周囲の水面運動の模様を推論するに好資料と思考してこゝに収録した次第である。



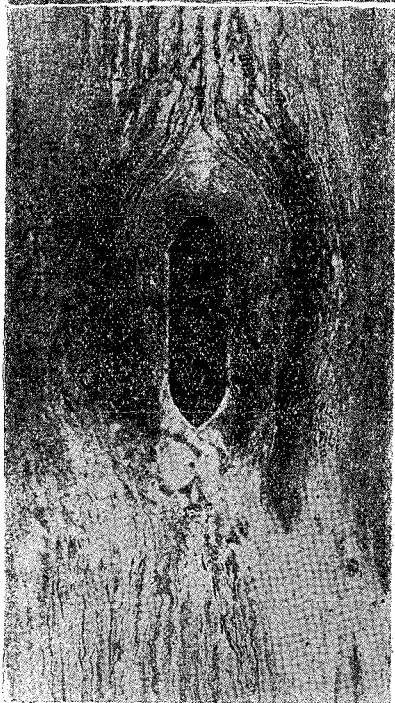
第 30 圖



第 31 圖



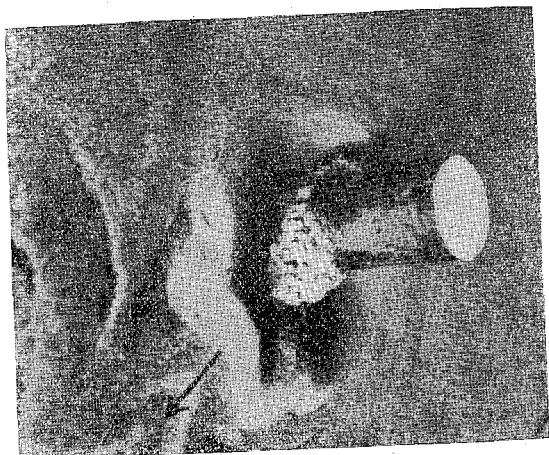
第 32 圖



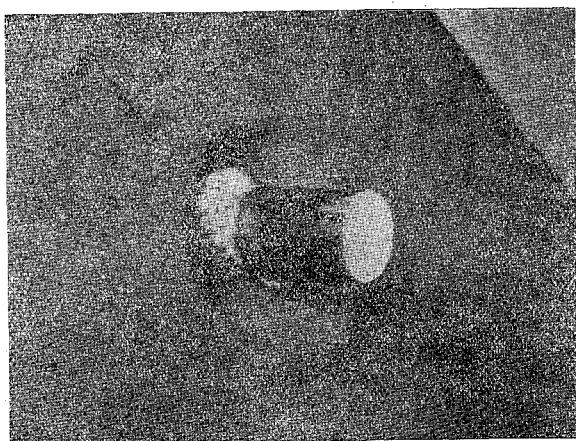
第 33 圖

第 31 圖は流水中に板を置いた場合の水面運動を示し、第 32 圖は圓筒の周りの水面運動を示す。

第 33 圖及第 34 圖は前頭及後頭部に同型の圓弧を有する橋脚の周りの流水運動を示すものであるが、第 33 圖の方は



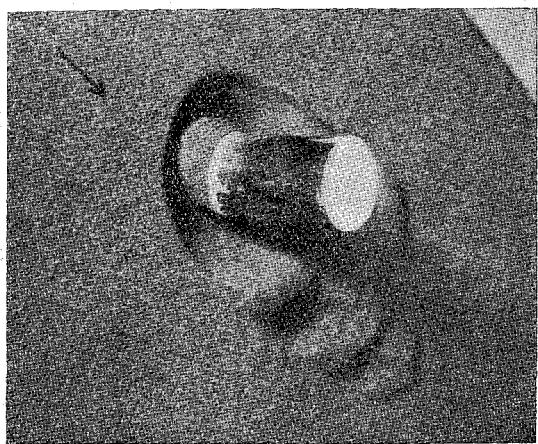
第 35 圖



第 36 圖

開水路にして流速大なる場合の状況を示し、第 34 圖は開水路の流速小なる場合を示したものである。

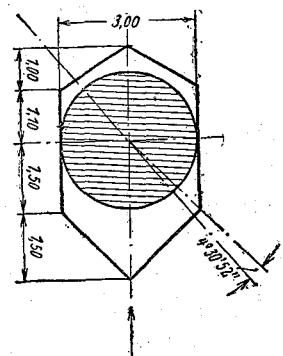
(e) 道路橋では多くその例を見ないが、鐵道橋では山間の河川上流部等にあつて圓筒型の橋脚を河川の流水方向に斜



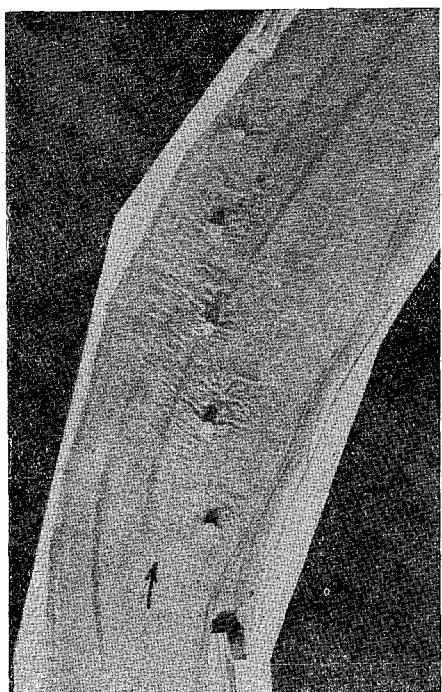
第 37 圖



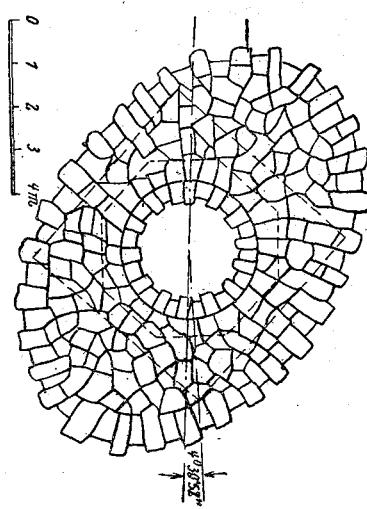
第 38 圖



第 39 圖



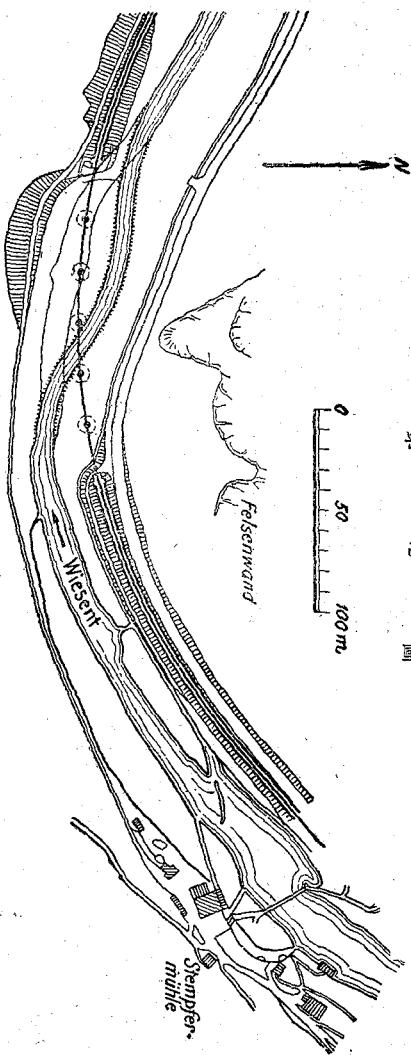
第 41 圖



第 40 圖

に横切つて並列する場合がある。此場合は一體の橋脚群は幾分河川に斜に設けられた堤壙の作用をなし河岸に面白からざる作用をなすものと思はれるのであって、河川上流部の周圍が岩盤等の露出し居る箇所の外は思はしからざる型式なりと考へ

第 42 圖



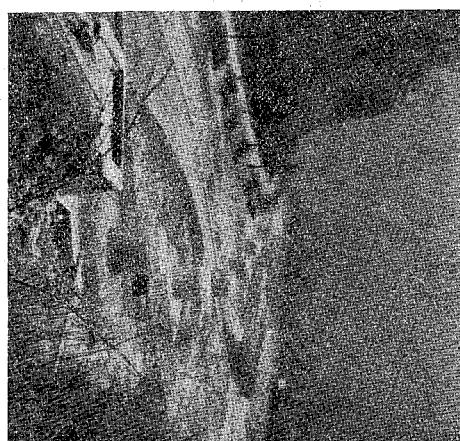
第 43 圖

られてゐたのである。

獨乙の國有鐵道が 1930 年に竣工した Wiesent 河の橋梁を架設するに當り此圓筒型橋脚を斜に河中に並列したのであるがその河川に及ぼす影響及び橋脚周囲の洗掘作用を顧慮して、Karlsruhe の水工學實驗所で橋脚洗掘作用に關する縮尺 1:50 なる模型と、橋梁全體及河川の上下流を含む河川に及ぼす影響に關する縮尺 1:100 なる模型を作製して試験したのである。

第 35 圖、第 36 圖は圓筒型橋脚の洗掘防止に捨石をなしたる場合の洗掘状況を試験し下流部分の捨石はその効用大ならざるを確め、第 37 圖は基礎工として上流部を情圓型としたる場合、第 38 圖は第 39 圖の如き 6 角形基礎を有する場合等に就きてその洗掘状況を試験し、結局 4 角形又は 8 角形の基礎を採用しその上部に根固工として第 40 圖の如き情圓形石張工を採用したのである。

第 41 圖は洪水量 $330 m^3/sec$ を流したる場合の模型試験で第 42 圖は $113 m^3/sec$ の流量を 20 分間繼續したる場合の洗掘状況を見たものである。結果として左岸寄に洪水が偏るために低水路を第 43 圖の如く變更し、左岸寄り橋臺、橋脚の安全を計つたもので、第 44 圖は下部工事の竣工した時の寫真である。



第 44 圖