

河川と橋梁

京都帝大助教授 石原藤次郎氏講演

康徳六年四月二十一日午後五時

於日滿軍人會館

今回の滿洲旅行に就きましては感想も種々御座いますが、本日はその方は一寸さしひかへまして、大學で私が實驗研究致しました Pier, Abutment の事項につき申し上げたいと存じます。

元來橋梁は上部構造と下部構造とに分けることが出来ませんが、上部構造については今迄幾多の理論的及び實驗的研究が完成されて居り、或程度の確信を以て明確な設計が行はれてゐます。所が下部構造に至つては、上部構造と殆ど同額の工費を要するに拘らず、今迄之に關する充分な實驗もなく、唯經驗のある土木屋さんが大丈夫だらうの判斷の下にやつてゐる位であります。その中でも構造學的研究は比較的進んでゐるやうですが、水理學上の問題になると殆ど研究が行はれてゐないといつた状態であります。

従つて橋脚に關する水理學上の問題は今後の研究に俟つべきものが極めて多いのでありますが、この複雑な問題を唯數學的理論を主とした流體力學の立場から取扱ひますことは非常に困難であり、たとへ或種の結論を得たとしましても、それは必ずしも實際と合はないのであります。そこで或結論を得たならどうしても一度實驗にかけて理論と實際との相違を確め、之に適切な補正を行つて實用的價值あるものを導くや

うにしなければなりません。此の意味から從來の研究は専ら實驗を主とします水理學の立場から行はれて來ましたが、今までの水理學は流體力學との緊密な連結を缺いておりました、その間に大きな溝がある事が痛感されるのであります。

この溝を少なくする爲には先づその間に相似律を確立すること、即ち理論と實際との間にある緊密なる關係を確立し、模型實驗の實用的價值を愈々大ならしめる事が必要であります。私がやつております河床洗掘問題の實驗に於きましても先づこの相似律を確立して初めて、實地の場合に確信を以て適用し得る確な資料が得られるわけであります。

さて相似律としては普通次の三つの場合が考へられてゐます。即ち何れも水は壓縮性がないものとし、各微小流體に働く惰力と重力のみを考へた時の Fraude の相似律、惰力と摩擦力のみを考へた時の Reynald の相似律、惰力と毛細管引力のみを考へた時の Weber の相似律であります。處が水の運動に於きましては惰力以外に重力と摩擦力と毛細管引力の三つの力が作用して居るのを常としますから、上の三つの相似律を同時に成立せしめなければなりません、かうした關係といふのは理論的に成立せぬことが證明されてゐます。そこで普通は惰力以外の

最も重要な役割を演ずる他の1つの力を仮定し、其の力に相當する相似律を採用するのが最もよい方法とされて居ります。

例へば自由面をもつ開水路等では惰力以外に重力が重要視されますから、Fraudeの相似律を用ふればよいといふことになるのであります。

以上は大體河床の固定してゐる場合ですが、洪水等の時は流速の爲に砂が移動することを考へに入れねばならず、私の河床洗掘に關する實驗に於きましても、この砂の問題を取扱はねばなりませんので、完全な相似律を成立せしめる事は愈々面倒になつて來ます。私の實驗結果に關しても未だ相似律をしつかりきめて居りませんので、模型實驗の結果から直ちに實地の場合にかうだといふ精密な結論を御話し出來ないのは遺憾であります。唯實驗に於て斯すればかうなるといふ状態を申し上げるにとどめたいと存じます。

現在私達が河底の洗掘を防ぐ爲に取つてゐる對策としましては、

(1) 橋脚數を出来るだけ少くして、橋脚中心線を河の流れに並行に置き、成るべく河流状態を亂さないやうにする。

(2) 橋脚前面の水位上昇並に橋脚周圍の洗掘を小にするやうな橋脚形狀を採用する。

$F = W_0 H I$; 茲に F は掃流力 (Kg/m^2)、 H は水深 (m)、

I は水面勾配 = 河床勾配、 W_0 は單位容積の水の重量 (Kg/m^3)、

そして河床は掃流力 F の増加と共に次第に其の安定を失ひ、河床安定の限度に於ける掃流力、即ち限界掃流力 E_0 は一定河床構成材料に對しては一定値であると云ふのが、掃流力理論による一般的な考へ方でありませぬ。従つて各河

(3) 橋脚周圍の洗掘の深さ並にその支持力を充分ならしめるに必要な深さ等を考慮して、橋脚の根入を充分にする。

(4) 橋脚周圍の河床が洗掘の爲に荒される事のないやうに、周圍に石張或は捨石等をする。

以上の諸方法は互に密接な關係があり、經濟的關係等を充分考慮に入れて適宜之等の方法を併用して安全を期してゐるわけでありませぬが、此の場合もはつきりどうすればよいかといふ適當な資料は極めて少なく、單に從來の經驗に基いて不明確な判斷をしてゐるに過ぎないのであります。

私は之等の點に關し幾分でも明確な結論を得ようと思つて、昭和9年以來實驗的研究を續けてゐるのですが、これから只今迄に得ました結果をとりまとめて簡単に申し上げたいと思ひます。

(1) 河床の強さ

河床に於ける砂礫の運動、特に河床の強さを論じます爲には、底流速の衝力による方法と掃流力理論による方法の二つがありますが、實用的見地から見ますと後者の方が極めて便利でありますから、以下之によつて話を進めたいと思ひます。

一般に河床の砂礫を洗ひ流そうとする力、即ち掃流力は次式にて興へられます。

床に就き豫めこの E_0 の値を計算して置く事が出來ますと、洪水時に於ける其の河床の安定、不安定を判斷しますのに非常に好都合なわけがあります。

限界掃流力を興へる實驗式としては色々のも

のがありますが、最近 H. Kramer (1934) は次の式を興へて居ります。

$$E_0 = \frac{100}{6} \frac{dm (w - w_0)}{M}$$

茲に E_0 は限界掃流力 (gr/m^2)、 d_m は砂の平均經 (mm)、 M は砂の均等保數、 W は單位容積の砂の重量 (Kg/m^3)

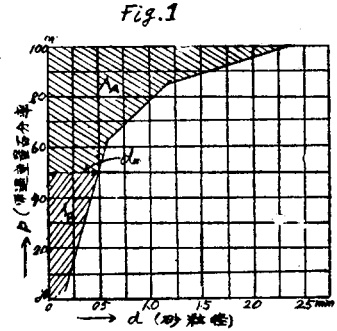
であり、 dm 及び $M = \frac{d_B}{d_A}$ は河床を構成する砂の節分曲線

Fig.1 から容易に算出することが出来ます。E. Indri (1936) の式も之と極めてよく似たものでありますし、又私がやつて居ります實驗に於ても此の式の妥當性が非常に明確に證明されて居ります。

従つて各河床に就いて豫め Kramer 式により限界掃流力 E_0 を求めて置きますと、其の河床の安定を次の様にして判断することが出来ます。即ち洪水時に水深 H 及び勾配 I の兩方又は一方が大きくなり掃流力 F を増して來ますと、河床は次第に不安定となりますが、上の E_0 を越さない限りは河床は大丈夫であり洗掘などを惹起しないと云ひ得るのであります。此の意味から河床の強さを考へる上に、水深及び勾配の兩者が同程度の重要さをもつてゐること、従つて單に勾配のみを考へ水深を度外視することの極めて危険であることが容易に御諒解願へると存じます。

(II) 河床洗掘の時間的關係

橋脚の實驗にて掃流時間を増しますと次第に洗掘が進んで來ますが、其の進捗状態は最初の5分間位が極めて著しく、次の10分間位で大體釣合の状態に達し、それ以後はあまり掘れ方を一定にして一定時間掃流したのであります。其の結果は次の様であります。即ち橋脚の安

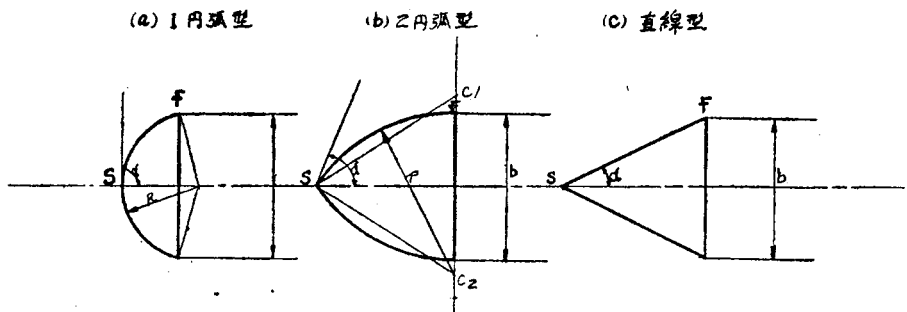


増大しない様であります。所が水がひく時には逆に掘れた個所に相當砂がたまと云ふ現象を認め得たのであります。之から考へますと實際河川にて洪水のひいた後の状態があまり掘られてゐないからと云つて安心するわけにゆかず、洪水の最中には相當掘られてゐることを考へねばなりません。

洪水最中の洗掘状況を實測することは頗る困難であります。何とかして實測する様に心懸けるべきものであります。

(III) 橋脚の形狀

先づ橋脚の前、後頭部の形狀によつて如何に洗掘状況が變化するかを調べる爲に、300m の長さの矩形涵の前後に Fig.2 の如き前、後頭部を取付けて流心に平行に設置し、河床及び流況



定を最も多く支配するのは前頭部附近に生ずる著しい洗掘であります。其の状況は前頭部接角値の半分によつて支配され、後頭部の形状には殆ど影響されないであります。そして此の値を小さくする程洗掘を軽減してよい結果を得ますが、或程度迄行くとそれ以上 α を小さくしてもさして効果がありません。一方あまり前頭部を尖らすと其の尖端の強度を減じますから、河川流下物の衝突によつて破壊する懼があります。此の意味から實用上最も効果的で推賞するに足る形状として、2 圓弧型では $\alpha = 35^\circ \sim 40^\circ$ 、直線型では $\alpha = 20^\circ \sim 30^\circ$ を選んだのであります。尙 1 圓弧型は洗掘著しく、他の 2 者に比べて結果がよくありません。

次に 2 圓弧型と直線型の比較であります。同一の α に對しては一般に直線型の方が洗掘程度が大きい様であります。併し乍ら上に述べた角度の範圍では兩者の洗掘程度に大差なく、何れを採用してもよいと考へてゐます。唯此の場合に注意すべきことは、2 圓弧型では尖端 S 附近の洗掘深が最も大なるに拘らず、直線型では橋脚側壁への移行點 F 附近の洗掘深が著しいことでありまして、洗掘に對する河床防護を行ふに際し餘程慎重な考慮を拂ふべき點であります。

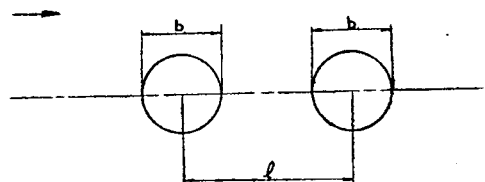
前にも一寸云ひました通り、橋脚後頭部の形状は橋脚の安定を支配する前頭部附近の洗掘には何らの影響も興へませんが、橋脚前面に生ずる背水高及び橋脚の流水抵抗には相當大きい影響を興へるものであります。従來一般の考へ方によりますと、此の背水高及び流水抵抗が小になれば、それに比例して前頭部附近の洗掘も減少し橋脚の安定を増大すると云はれて居たので

すが、私は實驗の結果に徴し次の様に考へるべきものと思つてゐます。即ち後頭部を尖らして流線形状とするのは望ましいことあります。前頭部を尖らすのとは自ら目的が異つてゐる。換言すれば前者は背水高及び流水抵抗を減ずる爲であり、後者は前頭部附近の著しい洗掘を減ずる爲でありまして、兩者相俟つて橋脚の安定を愈々増大し理想的橋脚形状となると云ふべきであります。

次に橋脚の長さの影響を調べる爲に、橋脚腹部の幅を一定にして長さを變化し、前、後頭部には最も著しい洗掘を惹起すると考へられる半圓型のものを取付けて實驗してみたのであります。其の結果は橋脚の長さによつて、後頭部附近に生ずる堆積には多少の變化を興へる様ですが、橋脚の安定を危くする前頭部附近の洗掘には殆ど何等の差異も認められなかつたのであります。近來道路交通の急速な發展に忘じて橋梁幅員が益々大きくなり、橋脚の流水方向の長さが増大する傾向にあります。此の實驗によつて橋脚の長さの影響に就いては先づ心配の必要がないものと考へてゐます。

橋脚は一般に壁體式がよい様であります。經濟上其の他の理由から 2 圓壩建を採用することがあります。此の場合の關係を調べる爲に、Fig. 3 の如く圓壩の直徑 b を一定とし前後の圓壩中心間の距離 l を變化して實驗をやりまし

平面圖



た。それによると前圓礮の前及び横の洗掘状況は壁體式のものとは大差ありませんが、兩圓礮の中間部分にても相當の洗掘が惹起されますので、此の型式はなるべく用ひない方が良いと思ひます。併し乍ら已むを得ず此の2圓礮建を用ひる際には、兩圓礮の中間部分の洗掘を軽減する爲に、 $l/b \doteq 2$ 、即ち圓礮中心間の距離を直徑の約2倍程度とすることが望ましい様であります。之は前圓礮後側の堆積と後圓礮前側の洗掘とが $l/b \doteq 2$ の時に殆ど相殺することになり、良結果を興へるものと考へられます。尙此の場合にも前圓礮の代りに先端を適當に尖らした柱を用ひますと、前柱附近の洗掘を餘程軽減せしめ得る筈であります。

(III) 橋脚の配置

河川に於て河幅あまり小ならざる直線部分を選んで架橋地點とし、成るべく斜橋を避けて橋脚數を少くし且つ橋脚方向を流れに平行にすることは、河川の方からは勿論、橋梁維持の方からも極めて大切なことであります。所が實際には地勢經費其の他の事情に支配されて、之等の要件を充分に満足せしめることは仲々困難であります。殊に一般の自然河川では水位によつて流れの方向が變化し、屢々低水時と高水時とで相當の相違を生ずることがあります。普通は最大洪水時の流れの方向が堤防法線と一致すると考へ、之に應じた橋脚方向を決定するわけですが、地勢上已むを得ず橋脚方向を流れに或程度傾斜せしめることも多いのであります。それで先づ橋脚軸の傾斜の影響に就いて實驗してみたのですが、その結果は橋脚の形狀によつて相當の變化を呈することがわかりました。一般に廣く用ひられる前、後頭部共に半圓型の橋

脚では、大體傾斜角 θ (Fig. 4) が 5° 以下の場合は殆ど悪影響がない様ですから、如何なる流況にても橋脚軸が流水方向に對し約 5° 以上の傾斜角をなさない様に、多少の犠牲を拂つても努力することが、橋脚の安定を期する上に非常に大切なことと考へられます。尙其の他の橋脚形狀の場合に就いては目下とりまとめ中でありますから、他日發表し度いと考へてゐます。

又山間の河川上流部の鐵道橋等では、多數の圓礮型橋脚を斜に河川を横切つて並列することがありますが、(Fig. 4) 之は或程度斜堰堤の作用をなし、河川に對しても橋梁に對しても甚だ面白くない結果を生じますから、充分の注意が必要であります。

次に在來橋梁に接近して新橋梁を設ける場合、

例へば單線鐵道橋を複線にする時等には、兩橋梁の橋脚軸を重ね合はして流水の疎通を妨げない様にすべきことは勿論ですが、之等兩橋梁の相互位値及び間隔に就いてもよく考慮を拂はねばなりません。之に關して Timonoff (1911) の行つた實驗結果は次の様であります。

(1) 在來橋脚が根入充分で丈夫な際は、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洗掘防護工の費用を相當節約する事が出来る。之に反し若し在來橋脚が根入不充分で不安定な際は、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保護する事が出来る。

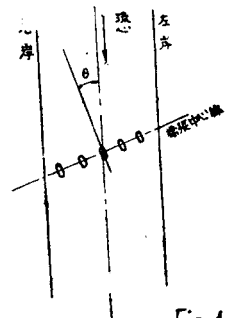


Fig. 4

(2) 新橋梁の徑間が在來橋梁の徑間よりも大なる際は上流側に設け、逆に小なる際は下流側に設けて、以て在來橋脚に悪影響を興へない様にすべきである。此の場合にも新舊兩橋脚はなるべく接近せしめ、流水方向に平行ならしめる事が必要である。

此の實驗は相當古く吟味の餘地もありますが、只今私が行つてゐる實驗にても殆ど同様の結果を得て居りますので、注目すべき結論と考へられます。

(V) 河床洗掘の機構

此の洗掘機構に就いては多くの權威者が夫々見解を發表して居りますが、其の代表的なものとして Keutner (1932) の説を述べますと次の様であります。即ち橋脚軸及び橋脚側面に沿ふ水面高の變化が通水路中央のものと異なつて居りますので、横勾配を生ずることになります。此の横勾配の爲に水平軸をもつた渦巻が出来、底流と共同して河床を洗掘する、而も水面が水流方向と逆勾配をなす前頭部尖端が最も著しい渦運動の出発点であつて、茲に大きい洗掘が惹起されることになります。尚かくして洗掘された砂礫は下流に流されますが、橋脚側面及び後頭部下流側に生ずる鉛直軸の渦によつて順次沈澱推積されると云ふのであります。此の説明に就いては尙研究の餘地もありませんが、私の實驗に於きましても之と殆ど同様な現象を明かに認め得ましたので、最も注目すべき見解と考へて居ります。私は只今實驗中に得た各種の資料をもとにして詳細な考察を加へて居るのでありますが、他日其の結論を發表して皆様の御叱正を乞ふと共に、此の洗掘問題の模型實驗の基礎を確立する最も有力な資料としたいと思つてゐま

す。

(VI) 橋脚による河床洗掘の防護法

以上述べました所に従つて、先づ橋脚の配置を合理的に決定し、理想的断面形状を採用して根入を十分にしますと、橋脚による河床洗掘を軽減し橋脚の安定度を増進することが出来ると思ひます。併し乍ら何れにしましても、多少の洗掘は免れませんが、又種々の事情に支配されて洗掘に対する合理的対策を採用し難い場合も少くありません。此の意味から第 2 段の方法として根固捨石又は石張、沈床等の床固め方法が考へられ、實際上屢々用ひられて居ります。此の場合沈床の如きものでは、1 端からめくれ始めると之が流水にあふられて全體に影響し大事を起す懼がありまから、どちらかと云へば捨石等の相當重量のものがよい様であります。尙 Engels は捨石工の外に基礎しきを行ふことを提唱し、又 Keutner も種々有益な対策を擧げて居りますが、其の内橋脚の前面を鉛直にするより $1:2.5$ 位の勾配をもたせた方がよいと云ふ説は特に注目すべき点と考へられます。

以上で私の講演を終ることゝしますが、幸に皆様方の御参考になれば非常に結構かと存じます。何分にも未だ相似律をしつかり定めて居りませんので、唯實驗の結果報告と云ふ形になりましたのは遺憾であります、他日全部をとりまとめて發表し皆様の御批判を仰ぐつもりであります。長時間にわたる御清聴を厚く感謝致します。

〔完了〕