

土木水理試験の意義及現況

松 尾 春 雄*

I 水理模型試験の意義

水理模型試験は小型模型内の流れから實際を推定する目的で行ふもので與へられた種々の條件を満足する方程式を解く爲の一手段とも言へる。現場の諸種の複雑した條件の爲に水理學で簡単に解法を得られない場合に模型では有利な解法を得る事が多い。現場で10年20年といふ長い経験を経なければ豫想出來難いやうな事が屢々起るが之を模型から容易に知り得る場合もある。ある工作物の竣工後の状況を豫め知る事が出來、數種の設計を比較検討する事も割合容易である。土木工事は莫大な金額を要するものが多いから豫め十分な検討を経た後に着手しなければ非常な不經濟に終る事がある。ある工事が完成した後に特別に事故を起さなかつたとしても出來上つたものよりも尙經濟な設計がないと断言が保證出來やう。今日出來上つてゐる多くの工事の中には斯の如き結果になつてゐるものが相當にあるのではあるまいか。今日の如く國民の資材が總動員されてゐる非常時に於ては模型により比較試験を行ひ最も經濟的な計畫を樹てる事は緊要の事であると思ふ。日本内地では本年6月末から7月の初めにかけて關東及關西に於て非常な水災を受けた。

不慮の災といふけれども尙我々技術の未熟が原因に非常な災を及ぼしてゐる事を考へ技術者として内省の機を與へられたやうに思ふ。之等も模

型により研究して解決が得られる事もあると思ふ。又漂砂の多い海岸の築港が全然失敗に歸し港内が全部砂で埋つたといふ記録の残つてゐる港は日本では一二に止らない。之等は多くは當時の技術の總動員を行つて計畫されたものであつて夫等先輩の拂はれた苦心に對しては満腔の敬意を惜む者でないが、ただ當時に模型試験が發達してゐたならばその失敗の多少は救はれた様に思ふ。此等の有能な技術者にこの最新の武器が與へられず赤心が顯揚されなかつた事を與々も惜しいと思ふ。

模型試験に於て最も必要な事は試験者が實際の現場をよく知り又實際の設計者乃至工事擔當者が試験の性質をよく知るといふ事である。工事擔當者が試験の結果だけを見てすべてその通りと速断して施工することには危険が伴ふから試験の途中に於ても之をよく觀察して實際と一致する點と相違する點とを知る事が必要である。

模型試験を行ふ爲には現地に於ける地形、深淺圖は勿論地質、流速、流向及風に關する資料等が必要で新らしく之を實地に於て調査しなければならぬ事が多い。しかも此等の資料は模型試験にだけ必要なものであつて従來之を備へない事は一般に資料の蒐集が必ずしも十分でなかつた事を示す場合もある。この資料によつて實地に於ても新らしい眼を以て現象を眺める様になり初めは模型試験の爲の資料が實地に於ても重要な資料となるのである。之は模型試験の重

* 内務省土木試験所内務技師

要な副産物と言つてよいと思ふ。ある場合には試験をしないでこの資料だけで大體結論が得られる事もある。模型試験は尙發展の途上にあり現在の處尙搖籃時代の域を脱せず現地の資料によつて試験結果を参照しつゝ結論を得るの實情にあるから此の實地の資料は模型試験の將來の發展の爲に實際の工事竣功後に於ても必要なものであつて實地技術者と模型試験者の協力によつて將來の利用價值が尙一層大になると思ふ。

模型試験に要する費用は實際工事に比し極めて小であつて最近内務省土木試験所で行つた利根川河口の試験は $1/2000$ 及 $1/600$ の2種類の平面縮尺に就いて行つたが兩方で約2000圓を要した。河口工事は利根川全體に大なる影響を與へるのであつて利根川及河口の改良工事の全工費約7,000萬圓に比すれば極めて小さい割合である。試験所設立に要する費用は特に大なるものでない限り50萬圓程度であらうから大工事を初める場合には先づこの設備を置いて取掛るべきであると思ふ。

近世物理學の大家で水理實驗の開祖とも言ふべき英國の Osborne Reynolds が Mersey 河口の模型試験の報告の結語として次の如き注意すべき言を述べてゐる。

“I have called attention to these results, because this method of experimenting seems to afford a ready means of investigating and determining beforehand the effects of any proposed estuary or harbour works; A means which, after what I have seen, I should feel it madness to neglect, before entering any costly undertaking.”

大工事に模型試験をやらないで直ちに着手す

るのは氣狂沙汰といふ同氏の言葉は大いにすべき言だと思ふ。

II 土木水理試験發達の徑路及現況

近世水理學の開祖とも言ふべき伊太利の Leonardo da Vinci は畫家乃至彫刻家として知られ又飛行機の考案を最初に試みた技術家として知られてゐるが彼の水理學に於ける功績も亦て見落す事は出来ない。西曆1400年に發行された「水流及量水に就て」と題する論文の中彼が當時計畫された Milano 附近の閘室を有する運河に關する水理試験を行つた事が記されており其他水理學上の種々の検討が彼によつてはれたらしくある。彼以後暫く水理學の發展著しいものがなく有名な物理學者 Galileo によつて「天に懸る日月星辰の運行の理を窮める事易いが足の下を流れる水流の理を窮むるは難い」との歎聲を發せしめたのは Da Vinci 以後130年を経過した頃である。1740年比の Beoulli 以後の水理學の發達の歴史は即ち水理實驗發達の歴史であつてその中有名なもの3、4挙げれば

Chezy による $V=C\sqrt{RI}$ なる水流の基本式の發見 (1775年)

Du Buat による溢流潛堰及流水に依る土の移動に關する實驗 (1786年)

Humphrey 及 Albot に依る Mississippi 川の量測量による流速公式の發表 (1861年)

Darcy 及 Bazin の實驗水路による結果からの流速公式の發表 (1865年)

Ganguillet 及 Kutter の Mississippi 川の量測量に依る流速公式の發表 (1869年)

等何れも實驗を伴ふものである。

近世の土木水理試驗は普通獨逸の Engels が Dresden で行つたのが初めの様に考へられてゐるが、夫以前に佛國の Targue が Garonne 河の改修に就て行つた模型試驗 (1875年) 及び英國の Osborne Reynolds が Mersey 河口の改良に關して行つた模型試驗 (1888年) は之に先立つものであつて其についで H. Engels が Dresden に水理試驗所を設立したのが1891年、H. Krey が Berlin に土木船舶水理試驗所を設立したのが1901年である。即ち佛英兩國の先覺者に依つて始められた土木水理模型試驗は20世紀の初頭に於て獨逸の學者によつて廣く應用されるやうになつた。米國の土木及機械學界の指導的立場にあつた John R. Freeman が獨逸の水理試驗の隆盛なるに比し米國が遙に劣つてゐる事を見て自費を投じて獨逸版 (1926) 及米國版 (1929) の「水理試驗の現況」なる大冊を出版するや果然米國內輿論を惹起し米國內に水理試驗設備が續々に新設され Mississippi 河の改修工事に關する Vicksburg (Mississippi洲) の水理試驗所を初めとして現今主なる試驗所だけでも40箇所以上に及んでゐる。附圖1は Vicksburg の試驗所の平面圖であるが模型試驗に使用し得る面積は14ヘクタール、所屬研究員助手合計 350人に及び世界最大を誇つてゐる。獨逸の水理試驗所は室内試験を主としその中でも Karlube のものは建設費僅かに40萬マークであるに拘らず内容は非常に充實して26の試験装置を有し現今の水理試験界の牛耳を執つてゐる觀がある。

此の外佛、英、伊は勿論の事埃、洪、露、チエツコ、スエーデン、スイス、オランダ等に相當な設備がある。支那では天津に1935年に設立

された第一水工試験所の立派な設備がある外南京にも更に新設中であつた筈である。此等は黄河や揚子江の問題を解決する際には是非とも利用すべきであると思ふ。

日本に於ては昭和3年に内務省土木試験所が設けられ土木工事の實際問題の解決の爲盛んに利用されてゐる。寫真 1—4 にその概要を示し附圖2—3はその中主な水路の平面圖を掲げた。

屋外 8 米水路には最大 $28\text{m}^3/\text{秒}$ の水を流す事が出来延長約 120m に亘つて模型を作り得る。又之に接してゐる幅 2 米延長 156m の水路は流速計の檢定を行ふにも用ひる。

最も盛んに利用されるのは屋内の工法試験槽であつて之は幅 4m 延長 37m の部分に亘つて模型を作り最大 $150\text{ }^3/\text{秒}$ の水を流す事が出来る。この外に幅 1m の硝子張水路、幅 80cm の鋼製水路、回流水槽、波壓測定用ガラス張水槽がある。總工費約45圓を以て昭和9年末に完成を見たものである。

尙附圖 4—5 に天津の水工試験所の大體を示した。同試験所は總工費45萬弗 (支那弗) の計畫の中約20萬弗に相當する工事だけが完成し餘は將來擴張出来るやうに計畫されて附圖3の中に特に太く記入した線の部分の建物及内部設備が完成してゐる、この設備の使用水量は最大 $2.0\text{m}^3/\text{秒}$ で現在までには $450\text{ }^3/\text{秒}$ だけの用意が出来てゐた筈である。今度の事變以前には溢流堰下游の洗堀狀況等に關する模型試験が相當行はれてゐた。

特に黃土に關する水理試験を行ふ爲に特別の水槽及暗渠が計畫されてゐる。

事變の爲損傷されてゐるが多少修理すれば使へると思ふ。

III 實際との相似關係

模型での流れが實際のものを縮少して表はすか否かよこの試験の最も大切な點であるが一般的に言へばすべての現象に對し模型と實際とが相似である事は期待出来ない。即ち最も主要な現象に對して相似關係が成立するやうにして他の事柄に對しては又別の試験を行つてその影響を見るといふのが最も普通の行き方である。例へば河口の模型試験を行ふ場合に川の流れを主とする場合と波による影響を見る場合とでは一般には支配する相似律が異なる爲に兩者で各々相似律が成立つ様に試験して後に組合はせて考へるといふ方法を採らなければならぬ事が多い。

初めに Bernoulli の整流に關する式

$$Z + h + \frac{v^2}{2g} + hf = e \dots \dots \dots (1)$$

に就て考ふるに模型と實際との水流に相似律が成立つ爲には模型と實際との各項の比が常に一定にならなければならない。今大文字は實物小文字は模型を示すものとすれば

$$\frac{z}{Z} = \frac{h}{H} = \frac{v^2}{V^2} = \frac{hf}{Hf} = \frac{e}{E} \dots \dots \dots (2)$$

この條件が相似律成立の爲に必要なのである。即ち流速の自乗の比が鉛直の縮尺の比になるので之を普通 Froude の相似律といつてゐる。之は波の試験を行ふ場合等には他の相似律の事は考へないで之だけに依つて差支ない。例へば土木試験所で行つた大坂灣の津浪に關する試験では鉛直の縮尺を實際の 1/50 としたので波の傳はる速さは實際の $\frac{1}{\sqrt{50}}$ 即ち約 1/7 となつた。

(2)式に於て hf は流體と壁との間の摩擦に依る損失水頭であるが之は川の流水の場合には重要な役をする。その時に尙 Froude の相似律が成立する爲には hf/Hf の比が模型の鉛直縮

尺の比にならなければならない。その爲にはんな關係が生ずるかの一例を Manning の流公式 $v = \frac{1}{n} v^{2/3} i^{1/3}$ に採つて考へる。即ち

$$\frac{h_f}{H_f} = \frac{h}{H} = \frac{i}{I} = \frac{\ln^2 v^2 R^{4/3}}{L N^2 V^2 v^{4/3}} = \frac{no^{1/3}}{mo} = \frac{n}{N}$$

即ち $\frac{N}{n} = \frac{no^{2/3}}{mo^{1/2}}$ となる

茲に l 及 L は模型及實際の平面の長さ

1/mo は模型の平面の縮尺

1/no は ” 鉛直の ” を表はす。

即ち $\frac{h}{H} = \frac{1}{no}$, $\frac{l}{L} = \frac{1}{mo}$

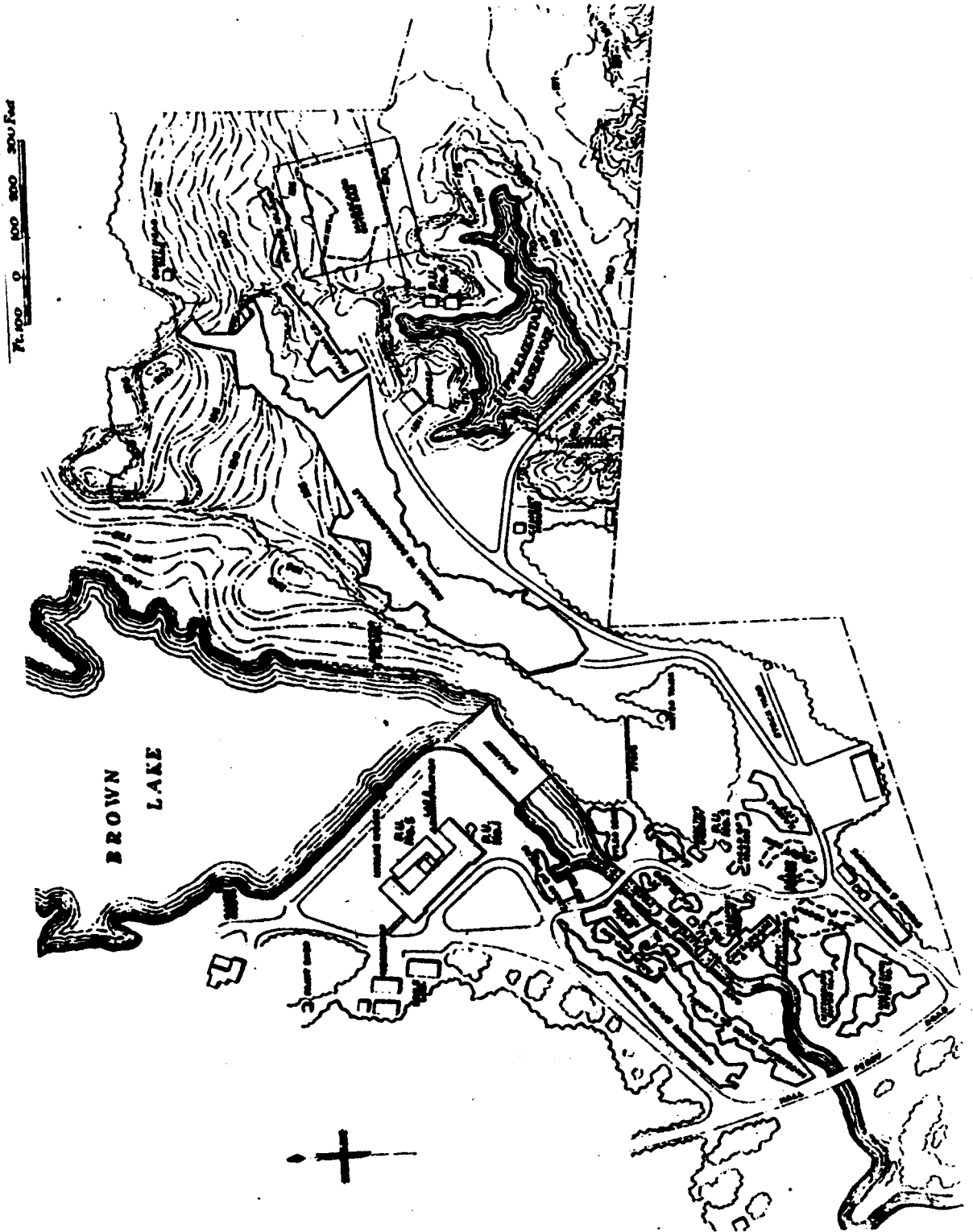
$h_f = i$ となる

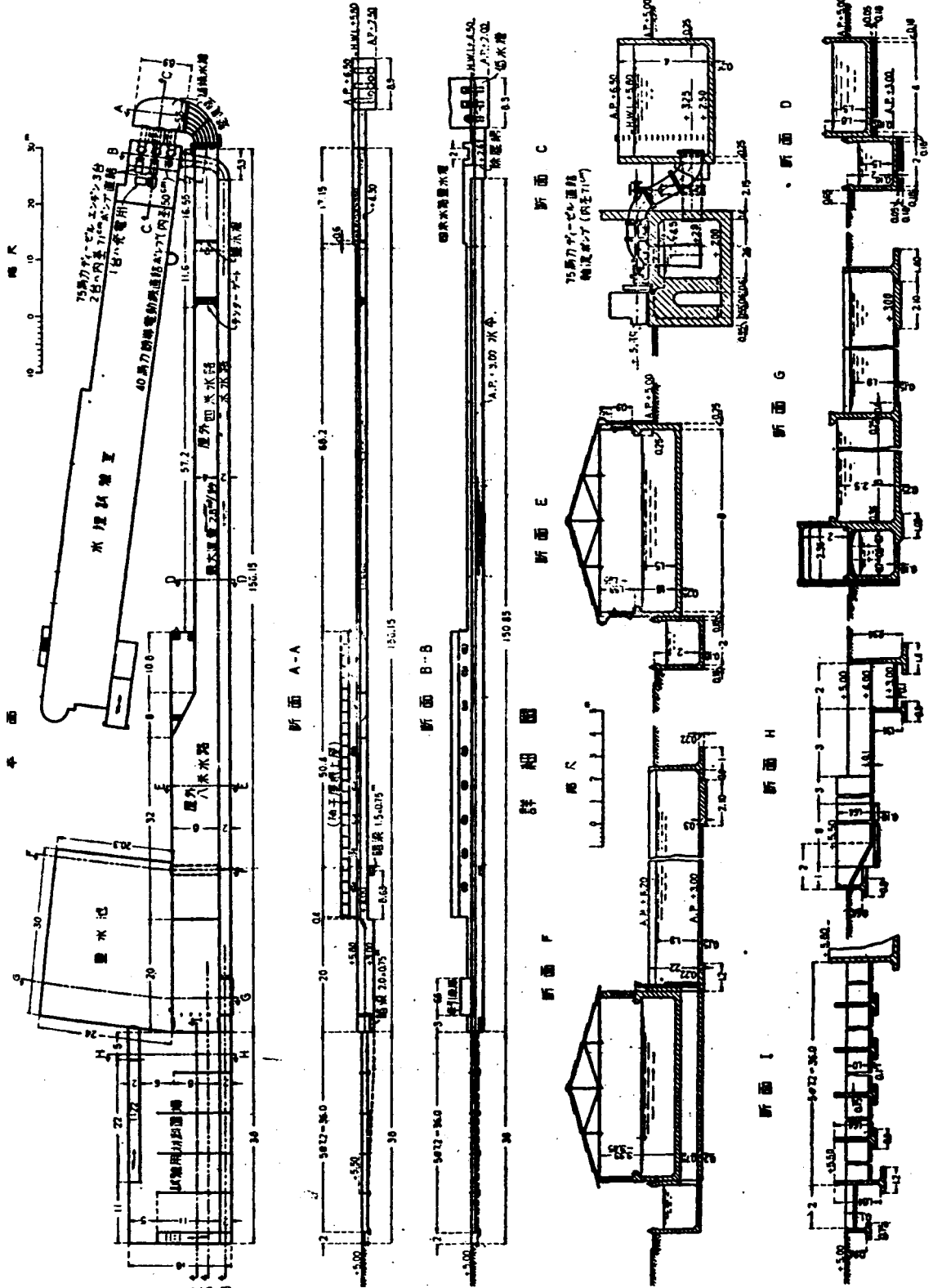
n 及 N は水路の粗度を表はす Kutter の係数であるからその比が模型の縮尺と關係づけられる試験所で行つた利根川河口の試験では平面の尺 1/600 鉛直の縮尺 1/60 であつてその場合に Tude の相似律が成立つ爲には $\frac{N}{n} = \frac{60^{2/3}}{600^{1/2}} = 0.6$

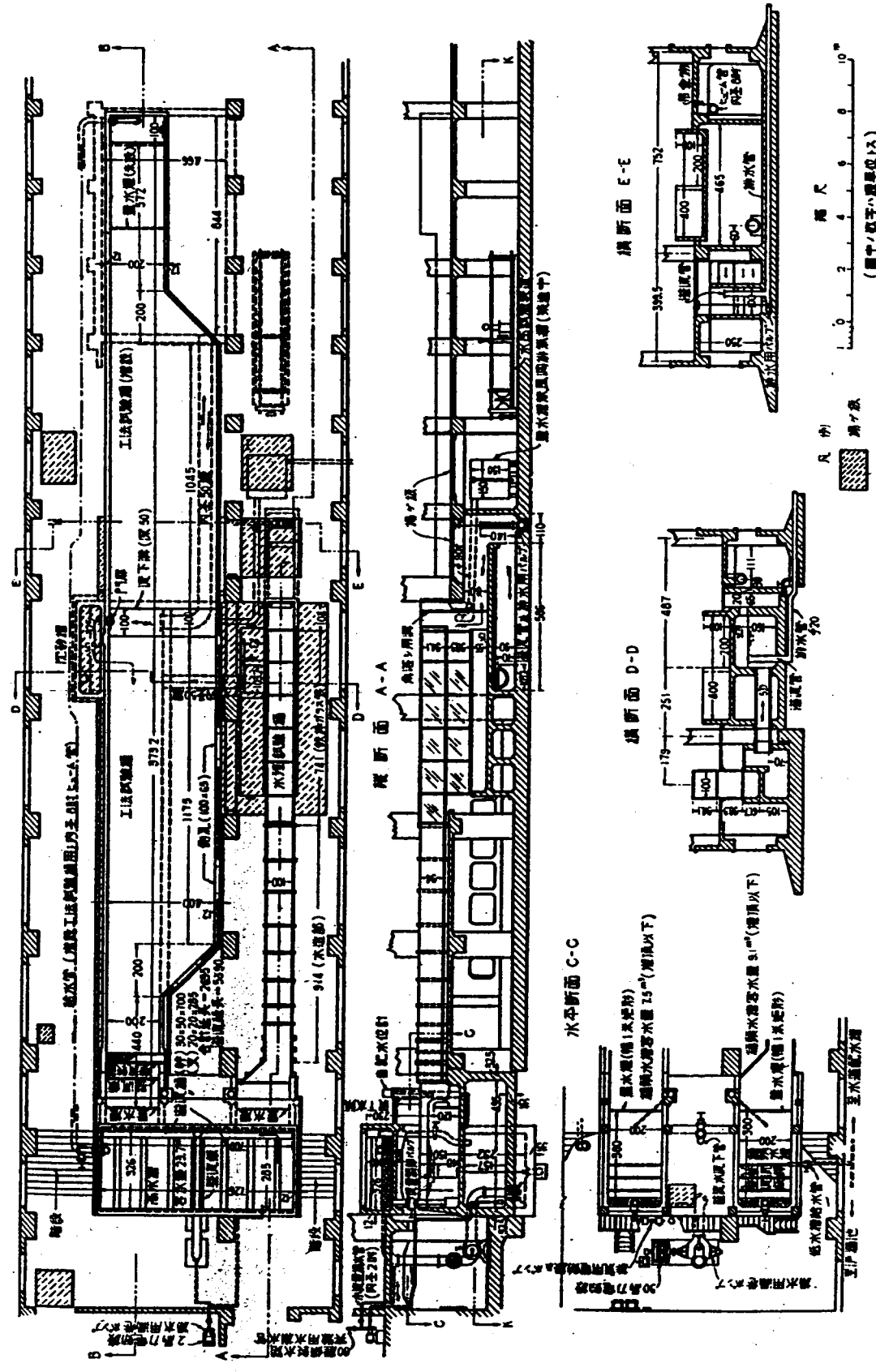
なる關係が必要である。即ち實際よりも模の粗度の方が大でなければならぬ、然るに n 0.012 N=0.045 であつて此の條件が満足されぬ。川の流水に關する場合にはこの摩擦による損失水頭が最も大きい要素であるから上のやうな時には Froude とは異つた相似律の配を受けるやうになる。

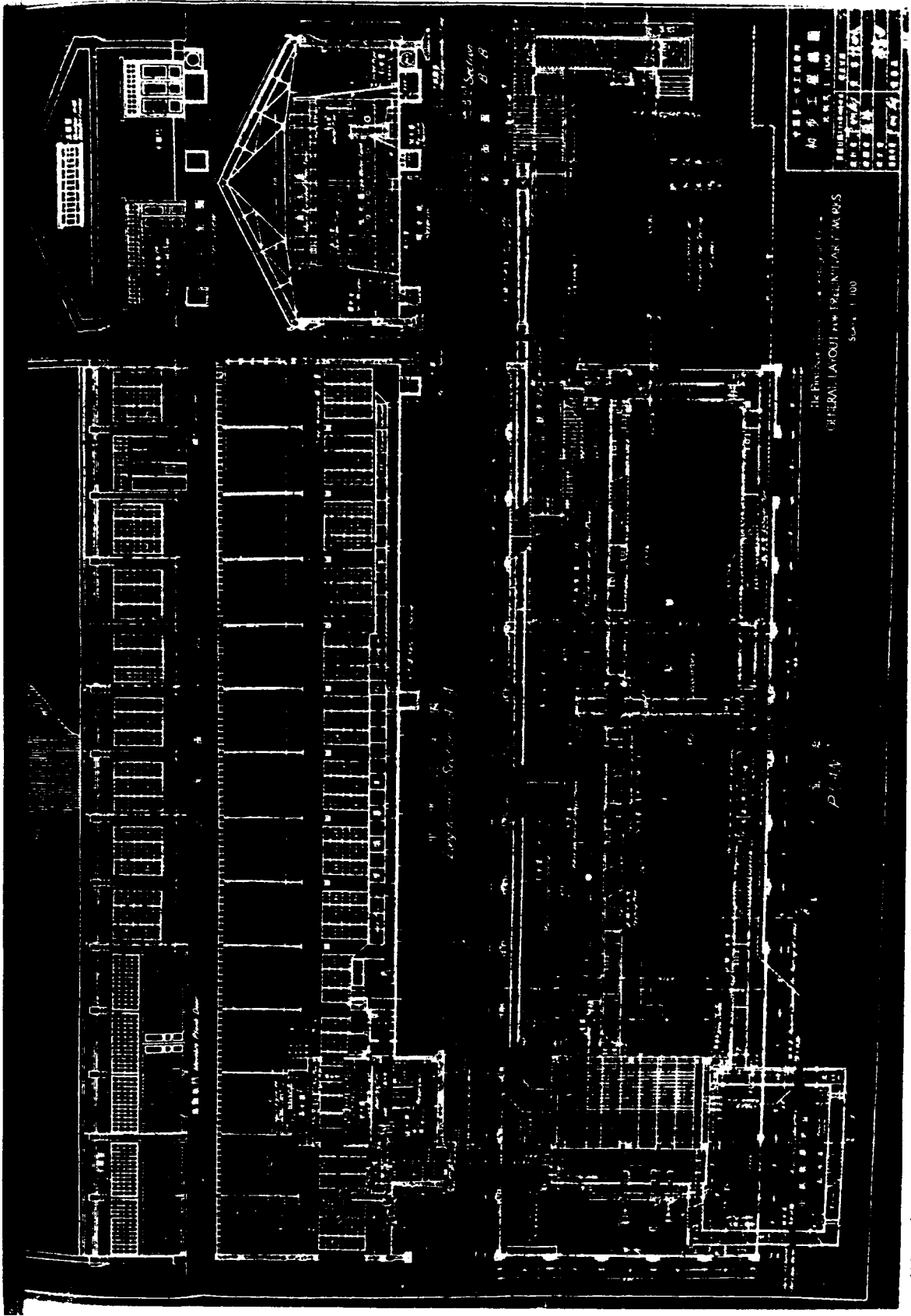
Froude と Manning の相似律が同時に成つやうに粗度或は縮尺率を撰ぶべきであるが可能の場合には何れが主として支配するかをて實際との關係を明らかにしなければならぬ。砂の移動を試験する場合には又異つた相似に就て考へなければならない。模型と同じ箱で土砂の粒徑を云々する事は一般に困難であるが又さうなつたとしても砂の動く相似律が成つ譯ではない。ある場合には砂粒に相當する

附圖 1

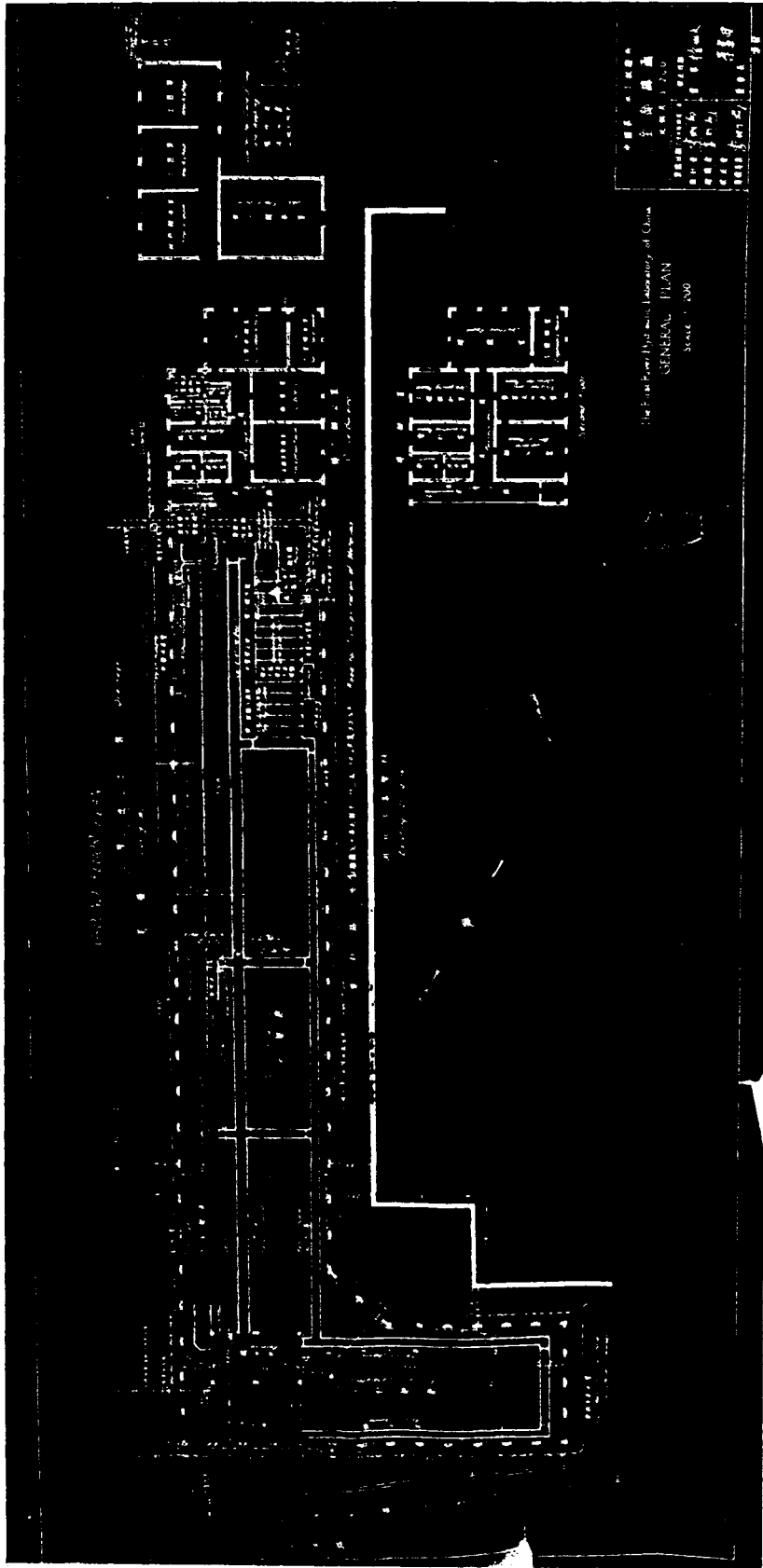








附圖 4 中國第一水工試驗所設計大綱(民國23年5月)



附圖 5 中國第 1 水工試驗所設計大綱(民國24年 5 月)

比重のものを用ひ、或る場合には流速を變へて相似關係を得るに努める。

一般に各試験毎に何が最も大切な事項であるかを定め之によつて模型の作り方、縮尺の選び方等を定めなければならぬ。

模型の、平面と鉛直との縮尺を異にした場合には時間の關係は兩方の縮尺に支配される事は勿論である。一例を前記大阪灣の津浪試験に採れば、この模型では鉛直 $\frac{1}{300}$ 、平面 $\frac{1}{4000}$ の縮尺にした爲波の傳はる速さが $1/\sqrt{50}$ になつた事は既に述べた通りであるが時間の關係は

$$\frac{t}{T} = \frac{v}{L/V} = \frac{V}{Lv} = \frac{\sqrt{50}}{4000} = \frac{1}{566}$$

となる。紀淡海峡から大阪港まで波が傳播するに要する時間は模型では約 6.5 秒と觀測されたが之を實際に換算すれば 61.3 分となる。實際よりも時間が著しく短縮される爲に河口の潮汐による砂の移動試験の如きは長い年月のものを短期間で反覆して見る事が出来る。英國の Mersey 河口の試験では 3 年間の潮の出入による影響が約 44 時間で試験された。

模型の縮尺の影響を明にする爲に異つた縮尺の模型を 2 種類或は 3 種類作つて比較試験をする事がある。かくすれば大小の模型の結果から實地との關係を推定する有力な資料が得られる

IV 安東港及營口模型試験

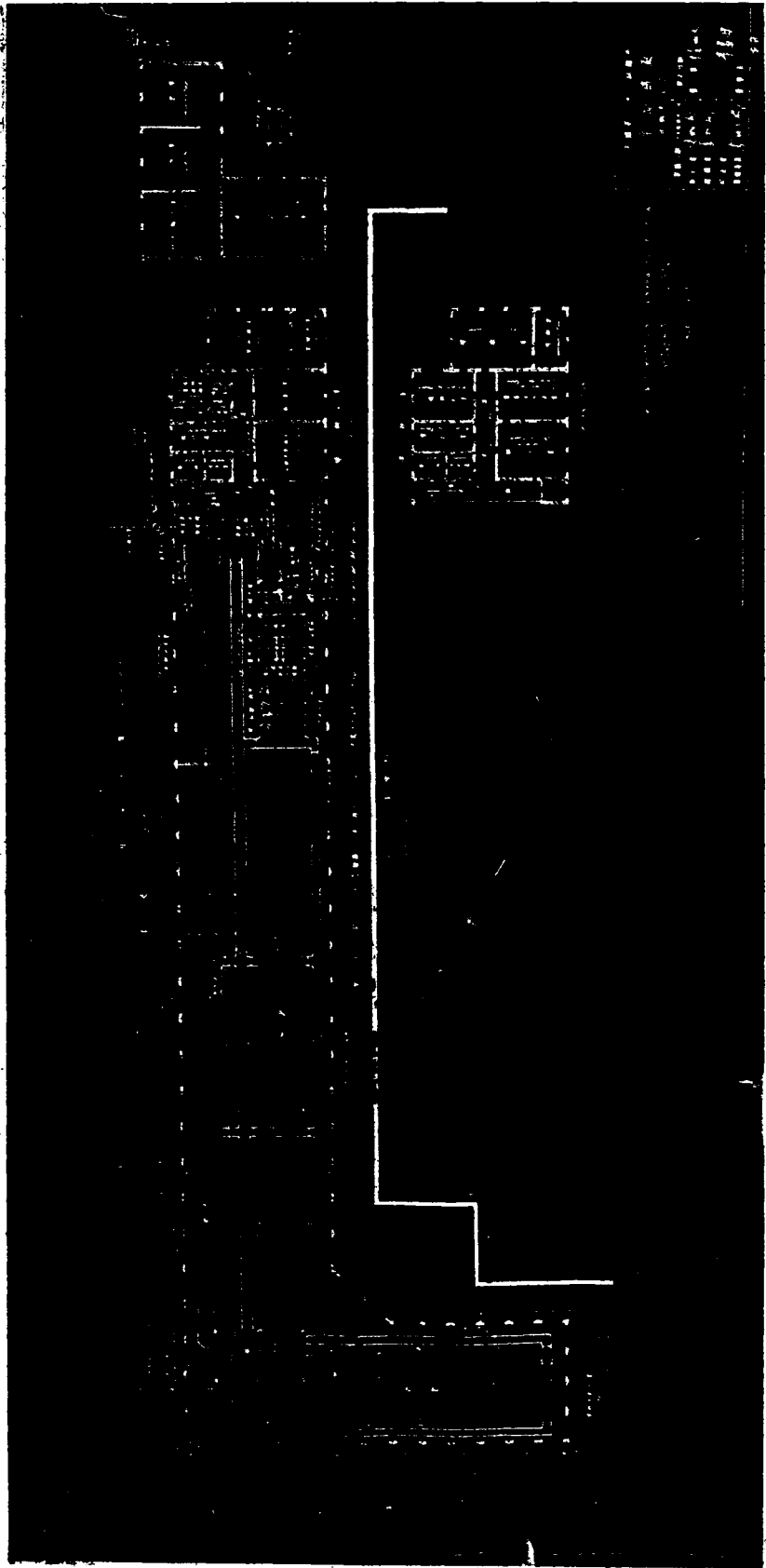
滿洲國交通部の依頼により目下安東港の試験が試験所で行れてゐるが之は鴨綠江下流の改修工事に關聯して安東の鐵橋下流乃至三道浪頭間の舟運が便なる様水深を維持し且つ洪水時に支障なくする爲には此の附近の改修計畫を如何にすればよいかに就き試験を行ふものである。本年 1 月以降之に對する準備をし 5 月模型竣工の上試験を開始し既に現状での試験を完了し目下

縮切堤及水制工のある場合につきその最も好ましい配置を研究中である。この模型は寫眞(寫眞 5 及 6)に見る通り鐵橋下流から蚊子溝下流までの間約 17.5km の長さを平面縮尺 $\frac{1}{3000}$ 鉛直縮尺 $\frac{1}{350}$ にしてモルタルで作つた。模型は幅 4 m 長さ 11m の範圍に收められてゐる。その製作は平面圖を模型の寸法に精密に作る事と約 60 ヶ所の断面圖を厚紙で切抜き之に合はせて作る事が必要な爲非常に手数を要する。

試験は平水時に於ける潮汐の爲の水の出入状況を見る爲に先づ正流を安東航務局前の水位と三頭浪道の水位とを縮尺によつて大潮退潮時の状態に合せて定め 4 ヶ所流速分布を測定し又表面に紙片を流して流向寫眞をとる。次に逆流状態即ち大潮漲潮時の状態に水位を合せたものに就き同様の測定を行ひ最後に洪水時一主として康徳 4 年 8 月資料により一の正流に就て試験する

以上を一組とし之を水制及左分流縮切堤及下流合流點の背割堤の有る場合、之等の更に配置を換へた場合、水路を一部浚深した場合等 5 組の場合に就て試験を進めてゐる。大體本年 8 月未には完了の豫定である。

營口では河口からの航路の水深維持と Duck Island 附近の河岸の侵蝕を防ぐ事が重大問題であり之を模型によつて試験しやうといふのである。以上二つの問題の中導流堤の延長或は増設更に West Channel の利用により水深の維持を考へる事が最も大切な問題と思ふから主としてこの後者に就て試験を行ふ事とし安東の試験に引續いて行ふ豫定である。平面縮尺 $\frac{1}{300}$ 鉛直 $\frac{1}{350}$ 航務局下流から導流堤先端部迄約 30km の部分を模型に收め平水時の順流及逆流、又洪水時に就て試験し特に West Channel を利用し水深維持の工夫を進めたいと考へてゐる。



附圖 5 中國第 1 水工試驗所設計大綱(民國二十八年 5 月)

い比重のものを用ひ、或る場合には流速を變へて相似關係を得るに努める。

一般に各試験毎に何が最も大切な事項であるかを定め之によつて模型の作り方、縮尺の選び方等を定めなければならぬ。

模型の、平面と鉛直との縮尺を異にした場合には時間の關係は兩方の縮尺に支配される事は勿論である。一例を前記大阪灣の津浪試験に採れば、この模型では鉛直 $\frac{1}{50}$ 、平面 $\frac{1}{4000}$ の縮尺にした爲波の傳はる速さが $1/\sqrt{50}$ になつた事は既に述べた通りであるが時間の關係は

$$\frac{t}{T} = \frac{v}{L/V} = \frac{V}{Lv} = \frac{\sqrt{50}}{4000} = \frac{1}{566}$$

となる。紀淡海峡から大阪港まで波が傳播するに要する時間は模型では約 6.5 秒と観測されたが之を實際に換算すれば 61.3 分となる。實際よりも時間が著しく短縮される爲に河口の潮汐による砂の移動試験の如きは長い年月のものを短期間で反覆して見る事が出来る。英國の Mersey 河口の試験では 3 年間の潮の出入による影響が約 44 時間で試験された。

模型の縮尺の影響を明にする爲に異つた縮尺の模型を 2 種類或は 3 種類作つて比較試験をする事がある。かくすれば大小の模型の結果から實地との關係を推定する有力な資料が得られる

IV 安東港及營口模型試験

滿洲國交通部の依頼により目下安東港の試験が試験所で行れてゐるが之は鴨綠江下流の改修工事に関聯して安東の鐵橋下流乃至三道浪頭間の舟運が便なる様水深を維持し且つ洪水時に支障なくする爲には此の附近の改修計畫を如何にすればよいかに就き試験を行ふものである。本年 1 月以降之に對する準備をし 5 月模型竣工の上試験を開始し既に現状での試験を完了し目下

締切堤及水制工のある場合につきその最も好ましい配置を研究中である。この模型は寫眞(寫眞 5 及 6)に見る通り鐵橋下流から蚊子溝下流までの間約 17.5km の長さを平面縮尺 $\frac{1}{4000}$ 鉛直縮尺 $\frac{1}{50}$ にしてモルタルで作つた。模型は幅 4 m 長さ 11m の範圍に收められてゐる。その製作は平面圖を模型の寸法に精密に作る事と約 60ヶ所の断面圖を厚紙で切抜き之に合はせて作る事が必要な爲非常に手数を要する。

試験は平水時に於ける潮汐の爲の水の出入状況を見る爲に先づ正流を安東航務局前の水位と三頭浪道の水位とを縮尺によつて大潮退潮時の状態に合せて定め 4ヶ所流速分布を測定し又表面に紙片を流して流向寫眞をとる。次に逆流状態即ち大潮漲潮時の状態に水位を合せたものに就き同様の測定を行ひ最後に洪水時一主として康徳 4 年 8 月資料により一の正流に就て試験する

以上を一組とし之を水制及左分流締切堤及下流合流點の背割堤の有る場合、之等の更に配置を換へた場合、水路を一部浚深した場合等 5 組の場合に就て試験を進めてゐる。大體本年 8 月未には完了の豫定である。

營口では河口からの航路の水深維持と Duck Island 附近の河岸の侵蝕を防ぐ事が重大問題であり之を模型によつて試験しやうといふのである。以上二つの問題の中流流堤の延長或は増設更に West Channel の利用により水深の維持を考へる事が最も大切な問題と思ふから主としてこの後者に就て試験を行ふ事とし安東の試験に引續いて行ふ豫定である。平面縮尺 $\frac{1}{600}$ 鉛直 $\frac{1}{50}$ 航務局下流から導流堤先端部迄約 30km の部分を模型に收め平水時の順流及逆流、又洪水時に就て試験し特に West Channel を利用し水深維持の工夫を進めたいと考へてゐる。