

水 理 模 型 実 験 の 意 義 と そ の 実 際

正 員 北 大 工 学 部 尾 崎 晃
同 鈴 木 洋 二

内 容

1. 概 説
2. 相似法則
 - i) 相似法則一般について
 - ii) フルードの相似法則
 - iii) レノーズの相似法則
 - iv) ウェーバーの相似法則
3. 水理模型実験の計画に当つて特に注意せねばならぬ事項について
 - i) 模型の設計と製作一般
 - ii) 縦横の縮尺比の異なる(所謂歪ませた)模型について
 - iii) 測定用の器械、器具類について
 - iv) 実験の方法について
4. 各種型式の模型実験に特有の取扱ひ方について
 - i) 管路の模型実験
 - ii) 開水路の模型実験
 - a) ダムの余水路、水路断面変化部の流れ等に関する模型実験
 - b) 固定床による河川の模型実験
 - c) 可動床による河川の模型実験
 - iii) 波浪に関する模型実験(港灣の実験)
5. 実験設備及び器具類について

1. 概 説

ふだん一般の場合に我々が用いる相似という言葉は、もしこれを実物と模型との関係に対して使用するならば、其の物体の形状から運動の諸現象及び其処に作用する一さいの力の関係等総てが定められたある縮尺によつて夫々皆同じ比例関係になるものという意味に取られ勝であるが、水理模型実験の場合に相似という言葉が持つ意味は従来別段何等の説明も註釈も無しに用いられてはいるけれども、上述の様な相似とは多少その趣を異にしている。我々が複雑な流体運動の諸現象を模型実験によつて解明しようとする際にその実物と模型との間に適用される相似という言葉は次の様な意味を持つものであると言うことが出来よう。即ち実物と模型とは其の形状が幾

何学的に全く相似な場合もあるし、又そうでない場合もある。(と言うのは縦横の縮尺が異つて、一方が拡大される場合がある。)そしてその様な境界(boundary)の中に於て実物と模型とについて比較さるべき諸要素の中のある特殊な部分だけが相似になるという非常に制限された意味を持つ言葉である。何故そうなるかということについては以下の項に於て順次述べて行くが、これは要するに実物と模型とではその境界の大きさ、流れる水の量は非常に異つてゐるにも拘らず、水はどちらに於ても全く物理的に同一のものであり、又その比較が行われる場所も等しい重力の加速度を受ける同じ地表面上であるという事実起因するのである。従つてあらゆる場合について総ての要素の間に常識的に用いられる相似を成立させることは実際問題として殆ど不可能であり、その為に以下に述べる如きレノーズの相似律とかフルードの相似律とか呼ばれるような、ある限られた関係のみを律するところの相似法則が導かれたのであつて相似という言葉を用いるに当つて特にこの点について誤解のないようにしておく必要がある。

その様なわけで水理の模型実験に於ける相似法則というのは、言葉の意味通りの完全な法則があるわけではなくて必要に応じて現象中のある特殊の部分だけを大きくクローズアップして考えた時、これについてのみ当てはまる若干の不完全な相似の法則が存在する。そして実物に於て起りうるいろいろな流れの現象を模型実験の結果から推測するに当つてはこれら幾つかの夫々異つた意味を有する相似法則の中の最も適当なものを用いて、模型より得られた結果を換算するのである。過去の長い年月に亘つて積上げられた経験と理論的裏付とによつて、現象を支配する諸々の力の中よりその現象に最も著しい影響を及ぼす二つの力を取り出し、これらの二つの力の比が模型と実物の両者に於て夫々一定の値を持つようにするという考え方が最も基本的な相似の法則として用いられている。此の方法によつて上にも述べたように数個の異つた相似法則が作られているのである。更に問題の性質によつてはこれ等の法則ではどうしても取り扱ひ得ない場合も出て来る。(例えば後に述べる可動床の模型の如き場合)この様な時には又別に特殊の方法を考えなくて

はならない。

2. 相似法則

i) 相似法則一般について

現在主として用いられている数個の相似法則について簡単に述べる。今例えば水の流れについて考えることとし、ここにある一つの流れの状態があり、一方にこれと全く同じ形をしているがその規模は数分の一、或いは数十分の一という小さい流れがあるとする(図-1)。

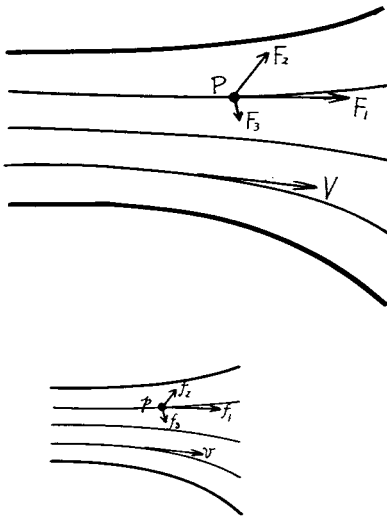


図-1

これら大小二通りの流れに於て、そこに現われている流れの現象があらゆる意味で相似になり得る為には如何なる条件が満足されねばならぬかを見るに、先ず第一に境界の形が幾何学的に正しく相似でなくてはならない。これは実物と模型とで夫々相対応する部分の長さの比がある一定値を取らねばならぬということに他ならない。第二には運動学的相似が成立しなくてはならない。これは実物と模型との両方に於て夫々対応する流線の形が幾何学に相似にならなくてはならないということである。即ち幾何学的に相似な境界の内(或いは外)の夫々対応する二点に於て流速の各方向成分の比が夫々相等しくなることを必要とする。第三には両者の間に力学的相似が成立しなくてはならない。これは第二の場合と同様に実物と模型とで相対応する二点(図-1の中の点P及びp)に作用しているあらゆる力の間の比が実物と模型とは於て夫々一定の値を取らねばならないということである。

上記の三つの条件が若し同時に満足されるならば、真の意味での相似が実物と模型との間に成立するわけである。ところが第三の条件即ち力学的相似が実際には完全には成立たないのである。今仮りに図-1の如く相対応する点P及びpに於て実物の方で作用する力を $F_1, F_2, F_3, \dots$ 、模型の方で作用する力を $f_1, f_2, f_3, \dots$ 、とする時に

力の関係が完全に相似になる為には

$$\frac{F_1}{f_1} = \frac{F_2}{f_2} = \frac{F_3}{f_3} = \dots \quad (1)$$

の関係が成立たなくてはならない。流体の運動を起す力、或いは逆に言つて流体の運動に伴つて現われる力としては慣性力(inertia force)、重力(gravity force)、粘性に基づく剪断力(shearing force)、表面張力(surface tension)、水の弾性変形に基づく圧縮力等いろいろ考えられるが、実物及び模型に於けるこれらの諸力を今仮りに夫々 $F_1, F_2, F_3, \dots, f_1, f_2, f_3, \dots$ 、とするならば、これらの中には(1)式の関係がなくてはならない。ところが、慣性力は流体の質量とその速度に比例し、重力は質量に比例する。従つて規模の大きな実物に於ける慣性力、及び重力は小さな模型に於けるそれ等よりも当然大である。又一方流体の粘性に基づく粘性力(或いは剪断力)の方は、質量が小で速度が小さい程大きく現われて来るから小さな模型に於ける粘性力の方が、実物と模型とで同一の流体を使用する限りに於ては実物に於けるよりも大きな割合で現われて来る。この様に尺度の大きな実物と小さな模型とで同一の流体が使用され、又同一の地上で比較が以われるならば(1)式の関係は満足されない。完全な相似が成立たないというのはこれに起因しているのである。

然し実際の流れの現象を見ていると、ごく近似的な言い方ではあるが、上記の如き数々の力を、その流れの現象に対して特に大きな影響を持つ力と、それ程でもないその力を考慮しなくても運動の大勢にはあまり大きな変化を及ぼさないといつたような力との二種類に分けることが出来る。或る流れ(流体運動)に於ては慣性力と重力とがその運動の模様を支配する決定的な要素であるが、他の種類の運動に於ては重力の影響は問題ではなくて、粘性力或いは剪断力が決定的な要素となる。或いは又縮尺が非常に小さくなつて来ると表面張力が重要な役割をするようになつて来る。そしてここに挙げた主作用力と共に他の色々な力がどの場合にも一緒に働いているのであるが、然しそれは主作用力との比較に於てのみその影響が小さいものとして近似的に無視出来るという程度のものなのである。実際問題として長い過去の経験に照らして見ても、工学上の問題に関して行われる水理模型実験中殆ど90%までは表面張力及び弾性変形に伴う力は全く考慮しなくとも済むものである。従つて主要な力としては慣性力、粘性力、重力、の三つを考えれば先ず充分である。そしてこれらの三つの力については上に述べた様な理由によつて実物と模型とでこれらの力を夫々同時に一定の比に保つようにはすることは実際問題として不可能であるから、この中から二つだけを選び出し流体運動があたかも慣性力と重力だけ、或いは慣性力と粘性力だけの影響を受けているかの如く近似的に仮定して夫

々の場合に対し別個に相似関係を定めるという便法を採用している。次にこれらの別々に組立てられた相似法則について述べる。

ii) フルードの相似法則

自由水面を持つた流れで特に水面勾配が急に変化するような種類の流れ、例えばダムの余水路とか、水路断面の遷移区間に於ける流れの問題とか、波浪現象を取扱う問題等に於ては重力の影響が特に大である。自由水面の形は重力の影響によつて決定される。従つてこの種の流体運動では慣性力と重力だけを主作用力と見做して取出し、粘性力、その他の力はこの二つに比較してあまり重要でないものと考えて、実物と模型とに於ける慣性力と重力との比がそれぞれ一定の値になるように (1) 式流速とか流量とか、その他の諸量の比を定める。この様にして力学的相似を成立せようとするのがフルードの相似法則と呼ばれるものである。今慣性力を $Ma = \rho L^2 V^2$ で表わし、重力を $F_g = w_0 L^2$ で表わす時は (1) 式の関係は次のようになる。

$$\frac{v^2}{gl} = \frac{V^2}{gL} \quad \dots\dots\dots (2)$$

或いは $\frac{v}{\sqrt{gl}} = \frac{V}{\sqrt{gL}}$ の形で表わしてもよい。この $\frac{v}{\sqrt{gl}}$ なる量は流れの流速 (ふつう平均流速を用う)、その時の水深 (又はその他の、境界の寸法に比例するある長さ)、及び重力の加速度 g を用いて組立てられた一つの無次元の数であつてこれをフルード数 (Froude Number) と呼び、 F_r で表わす。(2) 式中の小文字は夫々模型、大文字は実物に於ける諸量を表わす。従つて (1) 式及び (2) 式より明かなように、幾何学的に相似に作られた実物及び模型の両者に於て夫々のフルード数が等しい時に始めて両者の間に力学相似が成立つとするのがフルードの相似法則である。

此の場合の流速、流量、力、時間、等種々の量の間の関係は (2) 式より直ちに導かれる。

即ち、実物の寸法は模型の α 倍 (模型の縮尺は実物の $1/\alpha$ であると言う) とすると、(2) 式より

$$\frac{V}{v} = \sqrt{\frac{L}{l}} = \alpha^{\frac{1}{2}}, \quad V = \alpha^{\frac{1}{2}} v.$$

$$Q = A \cdot V = L^2 V = (\alpha l)^2 (\alpha^{\frac{1}{2}} v) = \alpha^{\frac{5}{2}} q$$

(但し v は流速、 q は流量、 α は面積、小文字は模型、大文字は実物を表わす、

これと同様にして他の量も求めることが出来る。表一にはこの様にして求められた各種の量間の関係が示してある。

従つてフルードの相似法則によれば実物の $1/\alpha$ の縮尺で模型を作つた場合には、模型に於ける流量、流速等は直ちに求まる。然しここで大切な事項は、フルードの法則に於ては流体に固有の粘性の影響を重力に比して小さ

表一 縮尺比率

	相 似 法 則		
	R_e	F_r	W
体 積	$1 : \alpha^3$	$1 : \alpha^3$	$1 : \alpha^3$
面 積	$1 : \alpha^2$	$1 : \alpha^2$	$1 : \alpha^2$
時 間	$1 : \alpha^2$	$1 : \alpha^{\frac{1}{2}}$	$1 : \alpha^{\frac{3}{2}}$
長 さ	$1 : \alpha$	$1 : \alpha$	$1 : \alpha$
仕 事	$1 : \alpha$	$1 : \alpha^{\frac{1}{2}}$	$1 : \alpha^2$
流 量	$1 : \alpha$	$1 : \alpha^{\frac{5}{2}}$	$1 : \alpha^{\frac{3}{2}}$
流 速	$1 : \alpha^{-1}$	$1 : \alpha^{\frac{1}{2}}$	$1 : \alpha^{-\frac{1}{2}}$
加 速 度	$1 : \alpha^{-3}$	$1 : \alpha^0$	$1 : \alpha^{-2}$
力	$1 : \alpha^0$	$1 : \alpha^3$	$1 : \alpha$

いものとして無視していることであつて、本当に粘性の影響が小さい時にのみこの相似律はその精確さを増して行くものであるから、フルードの相似法則によつて処理すべき模型実験を行うに當つては模型の縮尺の決定、模型を作る材料の選定、製作に際してこの事実を充分念頭においてかからなければ正しい結果は得られない。縮小率の小さい (縮尺の大きい)、表面の滑かな模型ほど、フルードの法則に関してはより正しい結果を与える。又我々が土木工学上で主として取扱わねばならぬ問題は自由水面を有する流れに関するものが殆ど大部分を占める現状では、フルードの相似法則を適用する場合は甚だ多いのである。

iii) レノーズの相似法則

前の ii) の場合の反対で、これは重力の影響は問題にならず、粘性による剪断力が運動に大きな影響を及ぼすような種類の流体運動に適用される法則である。例えば管路の流れとか、又は非常に深い水中におかれた物体のまわりの流れなどの様に自由水面の影響の全く無い流体運動の場合には流体の自重は浮力とちようど均合つてしまうので、重力の影響は全く無くなる。実物と模型の両者に於て慣性力と粘性力との比が夫々一定の値を取る場合に両者の間に力学的相似が成立つものと考え、(1) 式より次の関係が得られる。即ち粘性力は $F_v = \mu LV$ と表わされるから

$$\frac{\rho l v}{\mu} = \frac{\rho L V}{\mu} \quad \dots\dots\dots (3)$$

但し、 l 及び L は管の時には夫々模型及び実物の直径、その他の場合には境界のある固有の長さを表わす。 ρ, μ は同一流体を使用する限り実物でも模型でも同じ値である。或いは $\frac{\mu}{\rho} = \nu$ (動粘性係数) として

$$\frac{\rho v}{\nu} = \frac{L V}{\nu} \quad \dots\dots\dots (4)$$

としてもよい。この $\frac{l v}{\nu}$ もやはり F_r と同様に無次元の

数であつてこのことをレノーズ数 (Re) と呼ぶ。

実物及び模型の両者に於て夫々の管径、又は境界のある部分の長さ、流速、粘性係数、密度の値を用いて組立てたレノーズ数の値が等しければ、この場合に始めて両者の力学相似が成立つとするのがレノーズの相似法則である。この関係より導かれる流速、流量、力等の値はさきの Fr 場合と同様に表一に示されている。レノーズの相似法則はその性質より明かな様に、模型の縮尺が小になればなる程流速が大にならなくては満足されぬので、実際には管路等の実験に於ても実物と模型とで等しい Re を得るということは困難である。然しこの場合にはいろいろと実際的な補助手段を用いて、この法則に従うことが出来る。

iv) ウェーバーの相似法則

表面張力の影響が非常に大きく作用するような模型実験では重力も粘性力も除外して(1)式に表面張力と慣性力とを入れる。これは表面波の問題、水滴或いは水中に在る気泡等の問題について実験する場合に必要なつて来る。表面張力を F_t とすると $F_t = \sigma L$ で表わされる。ここに σ は単位面積当りの表面張力である。前の場合と同様にして

$$\frac{v}{\sigma/\rho \cdot l} = \frac{V}{\sigma/\rho \cdot L} \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{v}{\sigma/\rho \cdot l} = W$$

この W なる組合わせをウェーバー数 (W) と言う。これもやはり無次元の数である。

実物と模型とで W の値が等しくなつた時に両者の相似が成立つとするのがウェーバーの相似法則である。然しこの法則を適用する場合は普通の工学上の問題に於てはあまりひんぱんに現われて来ないようである。

これ等の他に更に水の圧縮性を考慮した場合に考えられる無次元のパラメーターとしてマッハ数 (M) がある。これは

$$\frac{v}{\sqrt{E/\rho}} = M$$

なる形であつて慣性力と、水の弾性変形に基づく力のみを考え、他の一さいを無視した場合に作られる相似関係である。この考え方は水槌作用等管路に於て急激に速度が変動するような現象を取扱う場合に必要となつて来るが、然しこの相似法則によらねばならぬような場合は、これも又我々の現在の問題にはあまり多くは出て来ないので此処では省略する。

3. 水理模型実験の計畫に當つて特に注意せねばならぬ事項について

i) 模型の設計と製作一般

水理学上の諸問題を模型実験によつて解決しようとする

時、特にダムとか河川工事とか港湾の計画とかに際して実際の設計方針を決定する資料を得る為の模型実験を計畫する際に先ず最初に決定しなければならぬことは模型の縮尺についてである。模型の縮尺はふつう 1/10 の模型とか或いは 1/50 の模型という言葉で表現される様に、これは実物と模型とで夫々相對應する部分の長さの比で表わされる。

この模型の縮尺を如何に定めるかということに、その模型実験を行わんとする問題の性質により、又実験室の設備、面積、ポンプの能力等により種々制限を受ける。然し実物に於ける流体運動と本質的に異つた性質の現象が現われる様な縮尺では、その模型実験は全く無意味なものとなるからこの点には特に注意しなくてはならない。例えば縮尺があまり小さ過ぎると、模型に於ける流れは整流 (laminar flow) になつて、これは実物の乱流 (turbulent flow) とは本質的に異つた流れである。

フルードの相似法則を適用するような問題の場合には模型の縮尺があまり小さいと粘性の影響が大きく現われるようになって相似が成立たなくなる。或いは又ダムの余水路の溢流頂 (crest) に関する模型等では、縮尺が小さ過ぎると表面張力の影響が現われるようになる。

レノーズの相似法則を適用するような問題ではこれも又縮尺があまり小さいと、相對粗度の関係も実物と同一に保たせることは困難になるし、又レノーズ数が実物に較べてあまりにも異つて来てレノーズの相似法則を満足させることが次第に困難になる。然しそれかと言つてあまり大きな縮尺を採用することは設備、模型の製作等の面から見て經濟的に成立たなくなり、又あまり大き過ぎる模型では測定が面倒で、不正確にもなり易く模型実験としての意味がなくなつて来る。

以上のようなわけで小さ過ぎず又大き過ぎない (但しある程度以下ではなるべく大きい方が好ましい) 適當な限界があるのである。従来よりの經驗によれば、堰堤の余水路に関する模型実験等の場合には大体 1/30 ~ 1/100 程度の縮尺が普通に用いられており、又河川港湾等のように広い地域にわたるものの模型実験では 1/100 ~ 1/1000 くらいの縮尺が用いられているようである。更に特殊の構造物、例えば水門、弁、サイフォン等の模型実験には、上記のものに比して遙かに大きい縮尺例えば 1/5、1/10 等が用いられる。これはその構造の細部について特に詳しく流れの現象を研究する為のものである。更に又注意すべきことは管路の模型実験等の場合にはなるべく市販の管、継手類をそのまま用い得るように縮尺を考慮すべきで、これにより模型製作の時間とか費用を大いに節約することが出来る。

更にこれは言うまでもないことであるが、河川の実験でも、堰堤の余水路に関する実験の場合でも、その工事

の実際の状況或いは建設されようとする構造物自体に関して充分な予備知識を持つことである。工事の設計図及び仕様書をよく研究してそれにより模型製作の詳細な計画をたてることが必要である。それから模型で実験することによつて、どの点とどの点を明かにすることが必要なのか、或いは如何なる資料を現場では要求しているのか等を直接その工事の設計者或いは現場担当者によく連絡協議しすべしに手落ちのないようにしておくことが大切である。水理模型実験の性質から見ても実験開始後に必ずいろいろの点で判断に迷つたり、或いは単に前述の如き各種相似法則の適用だけでは解決出来かねる様な問題が生じて来るが、その際に前もつて現地或いは実さいの構造物についての充分な予備知識があれば迷うことなしに実験が進められるのである。

縮尺が決定されたなら次にこれに基づいて模型の設計図を精密に製図しなくてはならない。模型は小さい構造物だからと軽く考えて、単に実物の図面から記憶に頼つて模型を作ることは思わぬ誤りの元となることが多い。縮尺が小さいだけに少しの寸法の狂いでも実験結果に非常に大きな影響を及ぼすのである。又模型の製作組立に当つては特にこの様な仕事に経験のある大工とか左官に製作させることが一番望ましいが、そのような職人の得られぬ場合には実験担当者が常に厳重に注意しながら製作を見守つていなければならない。何故ならば普通の大工さん達の寸法に対する観念で模型を作られたのでは我々が本当に必要とするような精度は中々得られぬであろう。特に流速が限界流速以上になるような部分の模型は、一耗の何分の一までも注意して正確に測り、又模型に使用する材料も特によく吟味してかからなくてはならない。例えば木材等であれば出来るだけ狂いの少ない木目の良い良質のものを選び、又実験開始後に狂いが生じた場合それがどの程度になり、実験結果にどのくらい影響を及ぼすか等、又金属板等では少しでも折目があつたり凹凸があつたりするものは用いないようにする等々ごく細かい点まで予めよく考えておかななくてはならない。

更に又大切な事は、模型は一度作られたら最後までそのまま使用するという場合はごく稀で、多くは実験の途中で幾度も改造されるものである。従つてあまり頑丈に作り過ぎたり、又ダムの水叩のような部分は実験室の床面上に直接作つたりすると、実験の結果によつては水叩の高さを下げなければならぬ様な場合も生じて来るから、その時に非常に困難をする。時によつては全部の模型を作り変えなくてはならぬ様な場合も起り得るわけである。従つて最初から充分の注意を払つてこんな事態にならぬ様、周到な設計をしなくてはならない。幾度も模型実験を行つて経験を積むにつれてこの様なことは次第になくなるが、最初は往々にして失敗を犯し易い。

ダム溢流部の模型とか、水路断面の遷移区間 (transition section) の模型は精密に、設計図通りに組立てた枠の上に鉄板とか真鍮板等を張つたり、或いは又中に砂利等を填充し、表面をセメントモルタルで仕上げたりして作られる。水が流れる表面の粗さは出来るだけ滑かな方がよい。若し十分に滑らかでないとそれだけフルードの法則から遠ざかることになる。そしてその為にいろいろと厄介な問題が派生して来る。

河川、港湾等の模型を作る場合には、先ず所定の縮尺で書かれた平面図をこれから模型を組立てようとする、実験室の床面上に写すことが望ましい。次に地形図によつて一定距離をへだてた断面毎に、ベニヤ板等を用いて断面形の定規を形作り、これを平面図上の所定の位置に、レベルを合わせて据つけて行く。この時の精度は非常に大切で、殊に緩勾配のものにおいては誤差が入り易いから充分慎重にしなければならぬ。此の据着けに用いるレベルとしては水レベルとポイントゲージを併用する方法が一番正確のように思われる。

この様にして念入りに仕上げられた模型ではあるが、出来たものを測定して見ると必ず何処かに具合の悪い点が発見される。製作上一番困難を感じるのとはなんと言つても本当に平らな、凹凸のない表面を仕上げるということであろう。流速の遅い流れで実験を行う場合にはさほど問題にならぬような程度の微小な凹凸であつても、余水路などの様な射流の流れになる所では、圧力分布を測定するような場合には結果に大きな影響を及ぼす。金属板を表面構成材料として用いる場合には加工可能な限度内であるべく厚目のものを用いるとか、又モルタル仕上げの場合には表面をし細に点検しながら（これには写真による判定が非常に有効である。接写装置によつて拡大して表面を撮影すると粗滑の程度が明瞭に判定出来る。）金剛砂で研磨して仕上げるのである。これには相当の時間を見ておくことが必要である。

河川や港湾の模型では型板を据付ける時にどうしてもレベルが狂い易いから、出来上つた後よく注意しながら測つて誤差をなるべく少なくする様に修正を加える。

ii) 縦横の縮尺比の異なる (所謂歪ませた) 模型について

模型は出来るならばなるべく縦横共同じ縮尺の幾何的相似なものを作ることが望ましいが、取扱う問題の種類によつては縦横の縮尺比を変えねばならぬ場合が生じて来る。普通、河川、港湾等の模型実験ではその包含する地域が相当広範囲にわたる場合が多い。この様なものをふつうの実験設備で実験する為には実験室の床面積、流し得る流量などから制限を受けて 1/100 或いは 1/1000 等の小さい縮尺を用いなくてはならない。そうすると水深が非常に小さくなつて来て、場合によつては模型に於ける流れは実物とは全く別の laminar flow になつたり、

又それ程でなくとも例えば可動床の実験のような場合には水深が小さい為充分な掃流力が得られないという様なことが起つて来る。そこでこの様な場合には模型の縦の縮尺を横の縮尺の数倍に拡大して、所謂歪ませた模型を使用するのやむなきに至る。幾何学的に歪ませた模型(distorted model)を使用する場合には利点と欠点が夫々伴うが、これらを一括して見ると次の様に言える。先ず利点と考えられる事項は、a) かなり小縮尺の模型でも充分な掃流力が得られる。b) 水面勾配が実物よりも急になり、又港湾の実験等では波の高さが拡大されるので観測、測定が容易になる。c) 水深が大になることによつて模型のレノーズ数が小さくなり過ぎるのを防ぎ、従つて表面抵抗が過大になるのを防ぐ。これ等に対して欠点と考えられることは、a) 流速分布、圧力分布が実際のものと非常に異つて来る。b) 勾配が急になる為水路の側壁の傾斜が急になる。この為可動床模型の場合には模型材料の安息角以上の勾配となる為、セメント等で固めなくては製出来なくなる。c) 波の実験の場合には模型に起る波がその形も性質も実際のものと異つて来る。

iii) 測定用の器械、器具類について

模型実験の計画に当つては、模型の設計にかかると同時に測定器具の準備を整え、これ等の使用法、配置を考えておかななくてはならない。普通に用いられる測定器械としては、先ず各種のピトー管、ポイントゲージ、フックゲージ、及び量水用の堰、ヴェンチュリメーター、マノメーター等の装置でこれらはいかなる場合にも必要な最小限である。模型の中に予め作りつけるものとしてはピエゾメーター孔がある。このピエゾメーター用の小孔の位置或いは配置は問題の性質を良く吟味してかからないと後になつて不足したり不要になつたりするものが出来て来る。又その製作技術は、特に流れが射流になる部分に於ては非常に測定結果に影響する。技術がまずい場合には正確な値が読取れないこともある。これ等の他にカセットメーター、測量用のレベル、トランシット、写真器、オシログラフ、映画撮影器等いろいろ必要になる場合も生じて来る。ピトー管についても市販の既製のものだけでは間に合わず実験の目的に応じて特に製作しなくてはならぬ場合もある。水理模型実験に必要な測定装置は既製の物理実験用測定装置だけでは間に合わない場合が多くその都度実験担当者が必要に応じて自ら考案しなければならぬことが屢々起る。ともかくこれらの装置の良否、配置の適不適は実験結果に大きく影響することには注意しなくてはならない。

iv) 実験の方法について

水理模型実験に対する根本的態度としては他の一般の研究の場合と同様に旺盛な科学的精神と忍耐力とを必要とすることは言うまでもないが、特に水理模型実験の場

合に考慮せねばならぬ二、三の点について注意する。先ず設計図通りに模型が一応完成すると、これに所定の相似法則によつて計算された流量の水を流して実験を開始するわけであるが、最初のしばらくの期間はいろいろと不備な個所が次々と発見されて、模型の補修とか改造、例えばある部分から水がもるとか、塗装がまずいというような模型それ自身として具合の悪い点の改造が行われる。最初から一つの故障もなくうまく行くという場合はめつたにない。計画に従つて配置しておいた測定器具の位置が適当でなかつたり、数が不足であつたり、通水して見て始めて気のつくようなことが多数起つて来る。

又可動床の模型の場合にはこの期間に実際の河川に起つている状態との照合(この事については後に又述べる)が行われる。即ち実物の河川に於ける洗掘とか堆積が模型の上でその対応する個所にその通り生ずるかどうかが、水位、勾配などの関係はどうなるか等を、いろいろと模型の粗度を変えたり、勾配を変えたりしながら修正して行くのである。この様な仕事に時間を費している中に実験者は次第に其処に起りつつある種々の現象に本当にしつくりとなじむようになり、それ迄に修得した知識、経験の助けを借りて、不完全な相似法則だけでは解決のつかぬ、複雑微妙な点に關しても妥当な判断、解釈を下しうようになるのである。

更に又此の期間内に、詳細な測定を行う迄もなく明かに設計が不適当な為に起るような大きな欠点が目につくことがある。此の様な場合には初めに実際の現場の設計通りに製作された模型も、この始めの準備期間内に大きく設計変更を加えることがある。然しこれには勿論、他のいろいろの要素が含まれることであるから現場の設計者と協議してよく事情を知り検討を加えての上でのことである。

それからいよいよ本格的実験に入るわけである。実験はふつう幾つかの段階に分けて行われる。ある構造物のまわり、又は内部に於ける流れの現象を模型実験によつて確認しようとする場合には実際に起り得る流量の範囲内で種々に流量を変えて(勿論この場合に適用されるいづれかの相似法則によつて模型に換算された流量)水深、流速及び圧力分布等を精密に測定しこれらの一連の変化を系統的に調べる。又いろいろと場合に応じて工夫をこらし写真による測定も行う。これらの資料は直ちに検討を加えて、それから設計の不適當な点を発見し、実際の工事の設計者と共にその改良に努めるのである。直接実験によつて改良すべき部分のみでなく他の点についてもいろいろ現場の参考になると思われるような資料が得られたならば、それらについても報告すべきである。実験を行うに当つて大切なことは或る一連の実験を終了したならば、直ちにそのデータを整理し、計算すべき量

はすぐに算出しておくようにする。そうでなくて若し最初の系列から発展して行く次の段階の実験をも行つてしまつて最後に一括してデータの整理にかかるという方法を取ると、若しその実験の方法なり、着眼点なりに不備や誤りがあった場合にはその実験を全部にわたつてやり直さなくてはならなくなり、時間と労力との非常な損失となる。又ある一つの実験を終つて、次に模型の一部を作り変えるような場合には最初の実験の結果を迅速に整理して十分に調べておくことが肝要で、一度模型を改造してしまつてから不完全なデータや、実験の誤りが発見されても最初のもので全く同じ模型を再び作るということは相当に面倒である。実験野帳記載上の注意としては、あらゆる記録を詳細に誌しておくことが大切である。気温、水温等は言うまでもなく、若し出来るならば実験時のあらゆる環境条件をも記入しておくべきである。又実験時の流量は種々の原因によつて時々微小な変動をすることがあるから、堰、ヴェンチュリー管等の読は最初に一応読んでおき、適当な時間々隔をおいて読み、記録しておくことが必要である。この様な些細なことでも後でいろいろの状況を判断して結論を出す場合に思わぬ役に立つことがある。

最後に実験報告についてであるが、数々の測定、観測の結果から実物に起り得る現象を正しく推定する為には、唯単に適用した相似法則から(表一1参照)模型で得た値を実物に換算するだけでは不十分で(尤もごく簡単なもの場合にはそれだけでも大凡の目的は達せられるが)模型の縮尺、模型表面の粗滑の程度、取扱つている問題の種類等に応じて、理論を加味してその場合々々に対して最も妥当と思われる解釈を下し、其処に実験担当者の流体力学上の理解と豊富な経験に基く主観を混えて、模型より得た実験値を実物に換算しなくてはならない。例えばフルードの相似法則によつて換算する場合には摩擦力の影響は全然考慮されていない結果が出るが、実際には必ず、たとえ小さくとも摩擦力が働いているのであるからその点について修正を加えなくてはならない。此の辺が他の物理学上の実験等と多少趣を異にする所でこの事は又一面より見れば模型実験そのものが、最初に述べた相似法則その他の関係より考えても理解される如く本当に完全無欠なものではないという事実を明かに示している。換言するならばいかに注意を払つて正確に作られた模型といえども、それから得られた生の値そのままでは実物に適用出来ない。実験担当者の適確な判断を必要とするということであつて、この事が模型実験に於て最も重要な点である。

4. 各種型式の模型実験に特有の取扱い方について

i) 管路の模型実験

管路(上水道の配管とか、その他一般のポンプによる給排水設備、及び圧力隧道等)についての実験では、先に相似法則の所でも述べたように自由水面をもたない。従つて重力も表面張力も考慮しないレノーズの相似法則によつて取扱われる。但し管内の不定流、特にサージタンクの問題などのように流速の非常に急激な変化を生ずるような現象の場合にはこの他に水の弾性変形によつて発生する力をも考慮しなくてはならない。

二つの幾何学的に相似な管路に於て、もし管壁面の粗さの関係も全く相似であれば、換言すれば両者の相対粗度が全く等しければ、実物と模型とで Re_c が等しくなつた時に完全な力学的相似が成立する。然し相当に小さい縮尺の模型を用いるのであるから、通常の場合には大抵、実物と等しい大きな Re_c を模型の流れに於て得ることは出来ない。が、現実には全く等しいレノーズ数を得られなくても可なり正確に実物の値を推定することが出来る。

管路の模型実験に於て一番困難な点は、実物の抵抗と相似な抵抗を再現させることである。一般に Re_c と抵抗係数 f^* との間の関係は次の三つの領域に大別される。即ち、(i) laminar flow の領域、(ii) 滑管で乱流の領域、(iii) 粗管で乱流の領域、である。実物に於ける抵抗が例えば(i)の領域で生じているとすれば模型でも同様にこの領域が出現するように粗度と流速を調整してやらなくてはならない。若しこれが異つて、実物では(ii)、模型では(iii)の領域が生じているとすれば、例えばかりにどこかある一つの Re_c の値に対して両者の抵抗係数が一致したとしても、これは単なる偶然の一致であつて、決して Re_c 増減に伴う系統的な一致の傾向は示さない。我々が普通に取扱う工学上の問題、殊に土木技術の分野にて取扱う管路の問題では上記の(ii)に相当する場合は殆ど稀であつて、大抵は非常に大きなレノーズ数、例えば実物の Re_c が 10^6 、或いはそれ以上になる場合が多い。従つて大部分は(ii)の領域に属する問題である。即ち管壁の相対粗度が実験結果に一番大きな影響を与える要素となる。先にもちよつと触れたように、通常使用される程度の、1/10 或いはそれ以下の小さい縮尺の模型では実物と等しい Re_c を得ることは殆ど出来ないから、そのような場合の便法としては、次の様な方法が屢々行われる。即ち数種の順次縮尺を異にする模型(勿論粗度の点も充分考慮して)を用いて順々に実験を行い、 Re_c の増加と共に抵抗係数 f の変化して行く状態を注意深く観察すると、 Re_c がある一定

$$* \quad h_f = f \frac{v^2 l}{2gD}, \quad f = \varphi \left(Re_c, \frac{k}{D} \right)$$

h_f : 損失水頭

k : 粗度を表わすある長さ

D : 管の直径

限度以上になった場合に、 f の変化に一定の傾向が現われて来て、これによって大きな実物の R_e に相当する f を相当程度正確に推定することが出来、実用に供することが出来る。

又管路の途中に設けられる弁とかその他の装置に関する実験を行う場合には、そのような物の設置されている部分では普通の表面抵抗 (surface resistance) よりも流線の急激な変曲、その他による形状抵抗 (form resistance) の方が大きな値を占める。従つてその様な時には一応この形による抵抗と表面の摩擦による管路の部分の抵抗とを分離して取扱う。模型もそのような弁等を含めた長い管路を作らずに、その一部だけを大きな縮尺で拡大して作ったものを用いることが多い。但しこの場合には接近流速、圧力分布の状態が実際の配管の時と全く同様になる如く考慮を払うことが必要である。そして管の部分の抵抗は別途に算出して加えるのである。

次に管路の形状、流速の如何によつては管路内のある部分に空洞現象 (cavitation) を生ずることがある。これは管路だけに限らず後に述べる開水路に於てもダムの溢流部の頂部 (crest) 附近に、その形状が流れに対しよく合っていないと低圧を生ずることがある。この空洞現象に関する実験はその技術が相当面倒であるから簡単にふれておくに留めるが、大別してふつうの気圧の下に於て実験する場合と一気圧以下の低圧の下で行う場合との二通りがある。単に管内或いは構造物のどこかの部分に空洞現象が発生するか否か、その程度がどの位になるか、或いは又どの様に設計変更をすれば空洞現象の発生を防止出来るか等について調べる場合にはふつうの気圧の下で実験して差支え無いが、実験で空洞現象による破壊の様子を定量的に求めようとする為には、気圧の相似を考りよして減圧された特殊の装置の中で実験を行う必要がある。

ii) 開水路の模型実験

a) ダムの余水路、又は水路断面の変化する区間等の場合

開水路に関する模型実験は管路の場合と異つて、その位置と形を自由に變える自由水面に至る所でその圧力が大気圧に等しい、流れの一つの境界 (boundary) である。この場合には摩擦力の影響よりも重力の影響の方が大であると考えられるので、主として用いられる相似法則はフルードの相似法則となるが、単にそれだけでは不十分で前にも述べたように問題の種類に応じていろいろと特殊の調整や実験値の補正を必要とする。例えば流量が大で比較的縮尺も大きい、ダムの余水路の模型実験及びこれに附隨する水叩の勢力減殺装置等についての実験とか、水門、取水口、低溢流堰、或いは水路断面の遷移区間についての模型実験等の様に、そこに現われる慣性力

が相当に大で、境界面に於ける摩擦損失の影響はあまり問題にならぬと考えられるような種類のものについては、フルードの法則が比較的良好に当嵌り、かなり満足すべき結果が得られるが、これに対して縮尺の小さい河川の模型のような場合には、重力の影響と同時に摩擦力の影響も同程度に考慮しなくてはならないので、この場合にはいろいろと経験に基づいて作られた実験式等を併用し、又実験担当者の熟練と経験による判断を必要とする場合も大になつて来る。

縮尺が 1/30 から 1/60 くらい迄の範囲であれば、ダムの余水路等の模型は、よく注意して滑かに仕上げられたモルタル面、金属板、或いは耐水ペーパーに塗装したもの等で作つて差支えない。実際の構造物の表面の粗さとは相対的にはかなり異なるけれども、これ等の材料が持つ程度の滑かさと大体に於てフルードの相似法則からあまりはずれない結果が得られる。然しよい結果を得る為には縮尺はなるべく大きい方が (勿論最初に説明した範囲内でのこと) よい。又いかなる場合でも模型に於ける水深は最小限 2 cm 以下にならぬようにする。この程度以下の小水深が現われる場合には複雑な他の要素が入つて来て今述べたようなことは成立たなくなつて来る。又これらの種類の実験に於ては物理的な測定その他に、全体の流れの状況を概観して、流況をよく調べることも大切な一つの要素である。

開水路の実験の中でも特に射流の流れの中で水路の形 (主として側壁が縮小したり拡大したりする場合) が變るような場合の実験は眞の意味で設計の為の重要な手段となるものである。此の様な部分の流況は計算より求めることは非常に面倒で、複雑な定常波の発生模様等はどうしても実験以外には求められない。(全く不可能ではないが近似的なものでも大層面倒である)。例えばダムの余水路に於て、下流の地勢上の制約から導流壁を絞るような場合がこれのよい一例である。更に射流に関する実験で問題になるのは、水流中に気泡の混入する現象である。この現象についての研究は未だ現在の段階では不十分で、実物の高速の射流に於ける気泡捲込みの状態を模型に再現することは、普通の模型に於てはむづかしい。空氣の混入によつて水の実質だけによる水深よりも実際の水深は大となるのであるから、模型で得られた結果を実物に換算する場合には此の点を充分念頭におくことが大切である。

余水路に関する実験では水叩に於ける跳水現象或いは水勢減殺装置としての種々の形の構造物が流水に及ぼす影響について実験する場合が多いが、この時には水叩の末端から下流相当の距離に亘つて現地の地形を再現することが大切である。現地での測量より得られた水位流量曲線によつて、実際に於けると同じな下流の水位を再現

させなくてはその実験は無意味なものとなる。この種の実験に於ては水面が非常に波立ち動揺する為、ポイントゲージによる測定には相当熟練を要する。写真観測を利用することもこの場合には多いに有効である。特に水叩下流部の洗堀を問題とする場合には模型河川の一部を砂、石炭粒、又は小砂利等の材料で作し、可動床とする。然しこれらによつても定性的な大体の結果が得られるに過ぎない。特にこの場合には一つの実験の為に通水する時間を決定することが問題となつて来る。又砂等を用いて実際の洗堀の傾向を見る他に河床の一部を石膏等の弱い材料で形造りそれによつて何処が破壊され易いかを比較して見る場合もある。

b) 固定床による河川の模型実験

河川の模型は a) の時と同様に、自由水面を有する流れに関するものであるが、ただこの場合には縮尺は大抵 1/100、或いはそれ以下で a) に比較すると水路のかなり長い部分、又は広い面積を包含している。従つてこの時には重力は勿論影響を及ぼしてはいるが、水面勾配の変化は a) の場合に較べると非常に小さいので重力が作用する割合もそれに依りて a) よりは小となる。而るに一方境界面に於ける摩擦力は今度は大きな影響を持つようになるので、も早や a) の時のように無視出来なくなる。河川についての模型実験でも水路の長い区間に対して流量と水位との関係を調べるとか、洪水の通過状況を研究するとか、或いは又捷路その他の水路の改修工事に伴う水面勾配の変化等を見るような場合には水路を全部モルタルで固めて作つた所謂固定床とする。一般に縮尺が小さいので普通の規模の実験設備によつて実験する場合には、水深が小さくなり過ぎるのを防ぐ為に縦横の縮尺比を変え、模型を歪ませることは前にも述べた通りである。これによつて摩擦抵抗が大きくなり過ぎるのを防ぎ R_e を出来るだけ大きく保つようにするのである。然し彎曲部の流況を調べるような時にはごく近似的な結果より期待出来ない。

この様な固定床河川模型と実物との関係をつける相似法則としてはふつう Manning の流速公式が用いられている。この公式は実際の河川に於ける抵抗法則を表わす一つの実験式であるが、この場合にはこれを利用して次の様にしている。

Manning の公式は

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}},$$

但し v : 平均流速, n : 粗度係数, I : 水面勾配
今、実物の流速を V , 模型の流速を v とすると縦と横で縮尺比の異つた模型に対しては

$$\frac{V}{v} = \frac{D_r^{\frac{2}{3}}}{L_r^{\frac{1}{3}} n_r}$$

ここに

$$S_r = \frac{D_r}{L_r},$$

$$\text{但し} \begin{cases} S_r \text{ は実物と模型との水面勾配の比} \\ D_r \text{ は水深の比} \\ L_r \text{ は水平距離の比} \end{cases}$$

従つて流量の比は

$$Q_r = v_r A_r = \frac{D_r^{\frac{7}{6}}}{L_r^{\frac{1}{3}} n_r} \times L_r D_r = \frac{L_r^{\frac{1}{3}} D_r^{\frac{13}{6}}}{n_r}$$

重力と摩擦力を同時に考えなくてはならぬ場合には実物と模型の両者に対する流速比が等しくなくてはならぬという条件により

$$L_r^{\frac{1}{3}} = \frac{D_r^{\frac{7}{6}}}{L_r^{\frac{1}{3}} n_r}, \quad \text{これより } n_r = \frac{D_r^{\frac{7}{6}}}{L_r}$$

即ち粗度の比がこの関係になくなくてはならないということになる。この場合に若し縦横の縮尺が同一であれば $n_r = L_r^{\frac{1}{3}}$ となる。上記の式中 V, Q, D, L, n は夫々流速, 流量, 水深, 水平の長さ, 及び粗度を表わす。然しこれ等の関係を適用するに當つて注意せねばならぬことは、Manning の n は粗度を表わす (長さのデイメンションを持つた) 一つのパラメーターであつて Manning の抵抗法則は R_e が充分に大きな、即ち粗面で乱流の領域に於て始めて成立つ関係であるという点である。

c) 可動床による河川の模型実験

河川、運河等に関する実験の中でも特に流水の掃流力による河床の洗堀、沈澱堆積、又は砂澱の形成等に関する問題を研究することが主眼となる場合には、a) でも触れておいたが、河床を砂、石炭粒、或いはその他の比重の軽い適当な物質を用いて、河床材料が流れによつて移動を生じ得るもの、即ち可動床の模型を作る。然しこの様な目的に対しても、前記の固定床の模型で流速分布を詳しく測り、理論的計算を併用して掃流力とか底の材料(砂)を捲き上げ浮遊させる力等を計算して、一部可動床の実験に代え得る場合もある。

可動床模型による実験が前記の a), b) 等の場合に比較して特に困難である理由はその相似法則が前二者に較べて非常に複雑極まる、或いは見方によつては相似法則などはないと迄言ひ得るようなものであるという点にある。可動床模型実験に於ける相似法則は前記のダムの溢流部に関するものとか、或いは其の他の構造物、又は固定床模型の場合のように、たとえ多少不十分であつても合理的な数学的手法によつて求めることは全く不可能である。此の場合には、例えば重力とか摩擦力と言つた特定の主作用力を取り出して、それによつて相似の関係を満足させる如き数個の物理量の組合わせを作ろうとしてもそれは無駄で、種々の力が全部混然一体となつて河床

の移動にあずかるのであつて、現在の段階では以下に述べる様な非常に時間と根気を要するたどたどしい方法を取る以外にはやり方がない。

可動床の河川模型実験を行うに当つて今迄に述べて来た種類の実験に於ける場合とは、特に違つた点が一つある。それは既述の、可動床模型以外の模型実験に於ては実物に於ける流況が判明しなくとも、又実物の流れに関するデータが無くとも、模型実験はそれ自体独立して遂行出来たのであつたが、然しこの可動床の実験では実際の河川に於ける相当長期間の詳細な資料が無くては全く手を着けることが出来ないし、模型の設計すらも行えないという点である。今ある河川の河床変動の模様を模型実験で究明せんとする場合に、適当な縮尺を用いて、この河川のある区間を模型に作るのであるが、境界(boundary)の寸法が縮小されると同時にそこに作用する力も縮小されて、前にも述べた様に模型の掃流力では模型の河床を構成する材料、即ち砂、石炭粒等を移動させることが出来なくなる。模型に用いられる砂はやはり実際の河川の砂であつて、この砂粒を縮尺比通りに縮小することは不可能であり、仮に 1/100 に粒径を縮小された砂が得られたとしてもそれはも早や顕微鏡的微粒に過ぎず、物理的には実際の河床の砂とは全く別な性質のものとなつていて、用いることは無意味である。そこで模型の縦の縮尺を大にして水深を大きくし、河床の砂粒を移動させ得る程度の掃流力を得ようとするのである。然し一方に於ては、この為に縦方向の長さは皆大きく拡大されて模型の勾配は実際よりも遙かに急になる。そして前に記した如き数々の欠点が現われて来る。横断方向の勾配が急になつて可動床の材料の安息角以上になつた時には、水路の側壁に当る部分はモルタル等で固めなければ製作不可能となる。又縦断方向の勾配も実物に比して相当大になる為に、模型に於ける流速は、縮尺の割合から考えると非常に速いものとなる。そこでこれを防ぐ為に、河床の粗度を増さねばならないが、その為には、河床構成材料を変えなくてはならぬことになり、この面では実物と全く異つた状態になつて来る。即ち流速という一つの要素に対して都合よいような調整を行うと、それが他の流量とか、粗度とかいうような総ての要素に皆影響し、互にむじゆんした結果を生じ結局、歪ませた模型に於ける水面勾配は全く無意味なものとなつてしまう。更にまた断面全体の流速分布の形が実際と非常にかけ離れたものとなる為、全断面のエネルギーを計算せねばならぬような問題、例えば河川の合流とか急激な彎曲部の流況を取扱うような問題に於ては、この歪の程度はどうしても最大限 4~5 倍以下に制限されるというような事態も生ずる。

このような次第で、河動床模型実験では、先ず最初、

全体の縮尺及び縦横の縮尺比が一応決つたならば従来の経験によつて、先ず大体妥当と思われる如き模型を作り、これに、実際に起り得る範囲内の流量で通水しながら、諸種の力の関係を除々に調整し、又模型を操作する方法をもいろいろ工夫して変えながら、入念に実際河川より得られたデータと照し合わせて、全体的に見た流況がある許容誤差の範囲内で実際と等しくなるように幾度も幾度もやり直しながら模型を改造して行くのである。例えば時間の縮尺の相似を定めるには、実際の河川で、ある期間の始めと終りにおける河床の洗掘或いは堆積の状態を詳しく測量しておき、模型ではその最初の状態を先ず作つておいて、これに所定流量の通水を行い、やがてある時間後に後の状態が模型にも生じたとすると、この間の時間を実際の河川で測量した二つの時期の間の長さと比較して時間の縮尺を定める。

このような繰返し試算法的な模型自体及びその操作法の調整に当つては、その場合場合に依じて、時間の縮尺、流量の縮尺、河床材料の構成等を状況に応じて巧みて変えながら取扱つて行くことが必要である。そしてこれらの関係は決して一つの模型に固定されたものではなくて、水位或いは流量が変るに従つてこれらの縮尺も変つて行く性質のものである。

可動床の模型実験に於ては実際の河川についての知識と併せて、この様な特殊の操作法に関する充分な経験がなくては、実験を行うことがむづかしいと先に言つたのは、この様な事情によるものである。可動床の模型実験の実際面についての詳細な解説は、この限られた紙面に尽すことは到底出来ないからここでは、どの様な性質のものであるかという概念的な記述にとどめた。詳しくは文末に掲げた参考文献によつていただきたい。特に文献 3) と 4) には詳細に書かれており、4) には可動床模型の作り方がくわしく書いてある。

iii) 波浪に関する模型実験

波浪の現象を模型実験で取扱う場合に、本質的に波そのものの性質に重大な影響を及ぼすものは、模型の縦横の縮尺比である。波浪を取扱う場合は主として港灣の模型に於てであるが、先に述べたように、港灣の模型は河川と同様に相当広い面積に亘る部分を取入れて作らなくてはならぬ為、水深が極端に浅くならぬようにする為に普通、縦縮尺は横縮尺の 10 倍くらいまで拡大して模型を製作する。従つて、模型の歪ということが大きな問題となる。重力波の伝播速度は

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi y}{\lambda}}$$

で表わされる。但し、 C は波の伝播速度、 λ は波長、 y は平均水深を表わす。

y/λ が約 0.5 以上の波長の短い波の場合には $\tanh \frac{2\pi y}{\lambda}$ は 1 に近づく。従つてこの時の C は主として波長に支配される。然るに、 y/λ が 0.1 以下の長波に於ては $C = \sqrt{gy}$ となる。波長の長い波とか短い波という波の型は y/λ の比(言いかえれば縦横の長さのデメンションの比)に関係するから、縦縮尺の拡大が余り大であると、必然的に、そこに生ずる浪の型をかえてしまう結果になるから、縦横の縮尺比を決める場合には、実物に於ける波の性質をよく確かめ、上記のような点を充分考慮して、同じ性質の波が起りうるような範囲に模型の歪を制限せねばならない。孤立波とか、潮汐のような波長の非常に長い波を取扱う場合にはただ波の恰好が余りひどく変らぬ程度である限り、縦縮尺は相当拡大されても大丈夫である。

港湾の模型で波浪に対する防波堤の効果を実験するような場合には、実際の波の周期は数秒から数分の範囲内で変化する。そして周期の短い波ではその波高は数十種から数米にまでも及ぶが、周期の長い波(1~5分位)では波高は通常 1m 以下位である。従つて、短周期の波高の高い波に関する実験を目的とする場合には原則としては歪ませない模型によるべきである。波の周期が長くなり、波高が低くなるにしたがつて、模型に許される歪の程度は増してもよいことになる。若し実験の主目的が長周期の波に関するものであり、短周期の波についての結果は二次的な重要さのものであるという場合には、あまりひどくない程度のものならば歪ませた模型を用いてもよい。

然し何れにしても、縮尺のかなり小さい模型による波

浪の実験では、前の可動床河川の模型実験の時と同じ程度に、問題が複雑で、定性的な結果以外はあまり期待出来ない。但し 1/20~1/40 程度の縮尺で作られた防波堤等に対する波力の研究の場合にはフルードの法則が適用出来る。

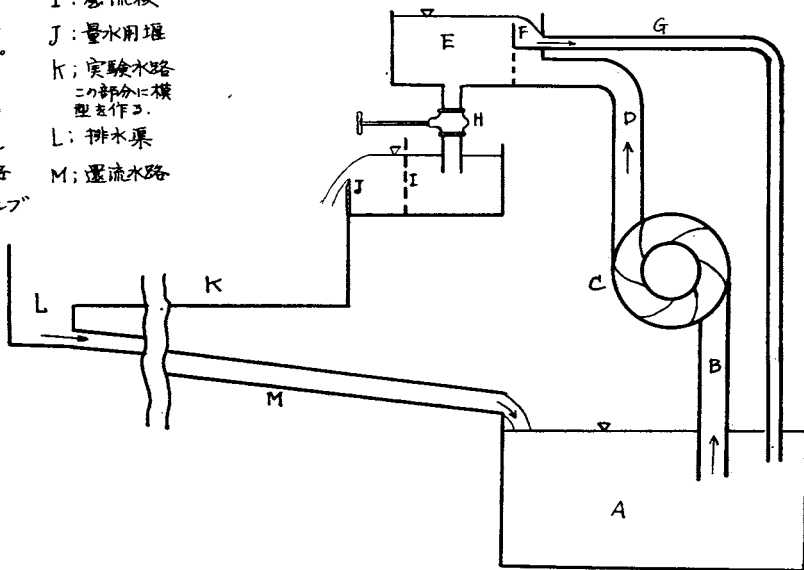
5. 実験設備及び器具類について

i) 実験設備

水理模型実験と言つてもその種類はいろいろであつて、基本的な流体力学上の理論を研究する様な場合の実験設備は、最も合理的に設計された精度の高いものであることを必要とするが、工事等に附帯して単に一つの簡単な実験だけを行うような場合ならば既設の実験室のような完備した施設が無くとも行うことが出来る。原則として給水、排水、量水の設備がありさえすれば良いということになる。

給水にはポンプを使用するのが一番良く、又これが最も普通であるが、特殊な場合、例えば近くに水流のある現場等では、落差が得られさえすれば樋又は管等で水を引いても足りるわけである。然しこの場合には流量を任意に調節し且つそれを常に一定に保たせるようにする為の工夫が必要である。ポンプを用いる場合には、ポンプの流量は電圧の変動又は負荷の変動によつて完全に一定には保ち得ないからこれを一定にする為に、実験に必要なよりも多小過大の流量を揚水しておいてこれを高い所の水槽に一たん流入させ、この水を絶えず溢流させて水槽内の水位を一定に保たせ、下部のオリフィスから取水し、途中のバルブによつて所要量の調節を行うので

- | | |
|------------|-------------|
| A: 貯水槽 | I: 整流板 |
| B: 吸水管 | J: 量水用堰 |
| C: ポンプ | K: 実験水路 |
| D: 送水管 | この部分に模型を作る。 |
| E: 高水槽 | L: 排水渠 |
| F: 溢流堰 | M: 還流水路 |
| G: 溢流水路 | |
| H: スレースバルブ | |



圖—2

ある。水位を一定に保たせる為に、高水槽内の溢流樋の長さを出来るだけ長くすると同時にこれを均等に配置し又流水を静かに流入させる為に適当な場所(水槽内の)に止水板を置く等、種々工夫をこらしている。

排水設備は模型に流した水を収容する設備であつて、河川の水等を利用する場合にはそのまま放流してかまわない。然しポンプによつて給水する場合には、還流水路を設けて同じ水を循環させて使用するのが普通である。(図-2参照)

量水の方法として流量が非常に少ない時(例えば2~3 l/sec程度以下)には大型バケツと、ストップウォッチと計量器を使用する。即ち単位時間内の流量を重量で表すわけである。この方法は堰の検定にも用いられる。流量が4~5 l/sec以上になると鋭縁堰が量水装置として使用される。大体30 l/sec程度までならば直角三角堰によるのが便利である。それ以上の場合には矩形堰を使用する。又ヴェンチュリーメーターも使用されている。20 l/sec くらい迄の流量を測れる小型のものであれば簡単に自作することも出来る。又図の如く可搬式のものを作つておくのも実際に使用して見て便利である。図示の可

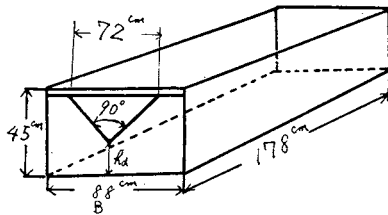


図-3 直角三角堰

搬式量水箱は現在使用中のものであるが、その製作について簡単に説明すると、三角堰の部分は厚さ1 mm、幅10 cm、長さ60 cmの真鍮板を45°に面取りしたものを板に木ネジで取りつけている。箱の部分は8分内至1寸の厚板で作り漏水を防ぐ為、内側にトタン板を張り、三角堰の真鍮板にハンダ附してある。

流量は沼知公式

$$Q = \left[1.85 + \frac{0.004}{h} + \left(0.13 + \frac{0.2}{0.27 + h_a} \right) \left\{ \frac{h}{B} - \left(0.1 - \frac{0.003}{0.024 + h_a} \right) \right\} \right] h^{\frac{3}{2}}$$

但し Q : 流量(m^3/s) h : 水深(m) B : 水槽の幅(m)
 h_a : 三角堰の下端から水槽の底までの深さ(m)

によつて計算し、実測によつて check したが非常に良く合つていた。

ii) 器具について

a) ポイントゲージ

水面の高さを測定する為のもので、製作所によつていろいろ型の異つたものが作られているが原理は皆同一で

ある。ふつう 1/10 mm 迄読める幅尺がついている。大がいの実験はこれで間に合うが特に精密に水面を測る必要のある射流の実験等の場合にはもつと精度の高いものが望ましい。針先が水面に触れた瞬間を容易に知る為に電気回路を作つておいて小型のアmmーターの針の振れによつて、水面に接した時を知るという方法がとられている。

b) ビトー管

この原理は周知の通りであつて動水圧と静水圧の差をマノメーターで読み取りこれより流速を計算する。ふつうのビトー管は2~3 mm くらいの外径があるが、もつと細い、外径1 mm 以下のものを用いると非常に水深の小さい射流の流速分布等をも詳しく測ることが出来る。

c) ピエゾメーターオリフィス

各種模型につき、模型表面の各部に於ける流れの静水圧を測定する為に設けるもので壁に小孔をあけ、ここに受ける圧力をゴム又はビニール管でマノメーターに連結して計る。

以上の他にカメラ、映画撮影器、オッシログラフ等が必要に応じて使用される。ふつうのカメラは全般的な状況を記録しておく為に、又跳水等の実験では他の方法では記録出来ない jump の状況を写真に撮つて判定する。港湾の模型実験で波の運動を調べるには映画の撮影機を利用するのが便利である。洪水の実験とか、孤立波等の波の実験、又管路のサージング等の現象を記録するには電磁オッシログラフが利用される。

iii) 測定に際しての具体的注意事項

a) ポイントゲージの読み方について

上方から次第に尖端を水面に近づけ、水面近くになつたらごく徐々に針先を下げて水面にタッチさせ、水面が下から針先に吸い着いたように見える時にパーニヤ目盛を読む。静水面の場合はこの操作は簡単であるが、波立っている場合とか、射流の様に流速が早い場合にはこのふつうの方法ではタッチの瞬間を知ることがむづかしいのでゲージと水面とで電気の回路を作つて電流計によつて読み取る。

b) マノメーターの読み方

硝子管は必ず垂直に立てメニスカスの面を読む、すべてこれに連結した圧力を測ろうとする部分の圧力は常に変動しているのでマノメーター内の水柱も全く静止する場合は稀である。平均の位置を早く読み取るように慣れなくてはならない。ガラス管は太すぎても細すぎても具合が悪い。大体内径4 mm 前後のものがよいようである。

c) ピエゾ用小孔の作り方

ピエゾ用の小孔は製作の巧拙が非常に実験結果に影響することは前の実験に関する注意の中にも述べた通りで

あるが、これは先ず第一の条件として、図示の如く小孔のまわりが本当に平面でなくてはならない。ごく微小な凹凸でも非常に影響を及ぼす。大抵0.5mm 或いはそれ以上の厚さの真鍮板等の金属板を用いて作り、模型をモルタル

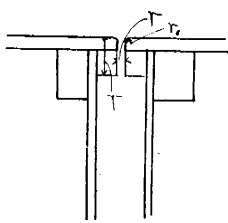


図-4 ピエゾ

で作る場合にはこれをモルタル面にはめ込む様にする。尚又この小孔をあける真鍮板があまり小さいとモルタル面等にはめ込む時に全体として傾き勝ちであるからこの点注意を要する。真鍮板にパイプを取付ける時には表面の孔を明ける板の裏面に、ちょうどパイプの外径だけの大きさの孔をあけたもう一枚の板を半田づけしそれにパイプを埋込んで半田づけする。半田づけした部分は充分気密になるように注意する。

最後に模型製作用の材料についてであるが、先にも述べたように材料自身の良否が結果に大きく影響するから材料の選定にはよく気を配らなくてはならない。縮尺が多少大であつても模型自体に必要な材料はごく僅かなものであるから、この点には費用にかまわず最良の質のものをを用うべきである。それからモルタルで固める模型の場合には砂を用いず鋳屑を使用した方がよいのである。模型では強度はあまり必要でなく、表面が滑かで仕上げ易いものの方がよいが鋳屑モルタルはこの目的に適うようである。又亀裂が入り難いという特徴もある。又模型の製作は急ぐことが多いのでセメントにはペロセメントを用いる。実験の途中で模型の改造をするような時にはセメントに石膏を混ぜて用いる。

もう一つ写真撮影についてであるが水面を写す場合には光線のあて方が一番むづかしい。この点についてはいろいろやつて見て要領を会得する必要がある。又偏光フィルター等を用いることも効果があるようである。速い運動現象を撮る時にはライトを相当用いてもどうしても露出時間に無理があるが最近では強力現象液も出てくるからこの点にはあまり心配はない。更にそれ以上の速い流れの場合には高速電気閃光装置の使用が考えられる。

以上とりとめもなく模型実験に関するいろいろの事を記述して来たが、紙数の都合もあり一つ一つの事項について十分な説明をすることは到底出来なかつた。個々の場合についての具体的な詳細は又別の機会に改めて書きたいと思う。模型実験とはどんなことかという一つの概観程度のもので、筆者等日常水理実験にたずさわっている者のメモである。次に模型実験に関する参考文献の中最も実用的と思われるものを二、三紹介してこの項を終わりたいと思う。

文 献

- 1) 大坪喜久太郎：水理模型実験の相似律。(昭11年7月)土木学会講演集。
- 2) 佐藤清一：相似律について。(昭16.3)内務省土木試験所報告。
- 3) 安藝皎一：河相論。
- 4) J. Allen: Scale Models in Hydraulic Engineering (1947).
- 5) Langhaar: Dimensional Analysis and theory of Models (1951).
- 6) H. Rouse: Engineering Hydraulics.

技 術 資 料 第 十 号

シ ョ ッ ト ク リ ー ト の 施 工

正員 北海道大學工學部教授 板 倉 忠 三

最近コンクリート構造物の修理にショットクリートが用いられるようになった。この際これに関する米国の技術を紹介することも無意義ではないと考えられる。ここにACIの標準と米国内務省開拓局の指針とを述べることにする。

I. ACI標準, ACI 805-51 (805委員会報告)

吹きつけモルタルの施工に関する推奨工法

概 概

このACI標準は、圧搾空気で打つモルタルの利益と不

利益を簡略に述べ、且つショットクリートの打込みおよび練り混ぜ、労務者の資格と義務、ショットクリート施工前の表面の準備、補強工法、施工順序、および良質のショットクリート施工に含まれるその他の諸項目に関する推奨工法を確立している。

緒 言

コンクリート、煉瓦、メーソソリーおよびある種の鋼構造物の新設および修理と維持の種々の様式の工事に便