

建設省土木研究所 正員 須賀亮三

1. はじめに

河川水理模型実験は、特に三次元的な問題と考察するうえに大変効果的な手段と認められ、古くより数多く実施されてきた。その多くは土木研究所河川部門が担当してきているので、その発展の歴史をたどることにより、模型実験技術の推移とみる事ができよう。表-1は大略的にのみ実験規模のうつりかわりであるが、極く大ざっぱなものであることと断つておきたい。赤羽の水理実験施設は昭和7年に完成しているが、始めの本体

格的な模型実験は昭和5年に発表された北上川降雨式転動堰であった。昭和10年代は国策に沿った大陸関係

表-1 実験規模の推移

実施場所	実験船舶	規模	対象	模型鋼	河床	実施件数	備考
赤羽支所	T.15	小	構造物中心	1	移動床	少量	室内
保崎試験所	S.27	中	河道中心	1	固定床	3~5件/年	屋外
鹿島試験所	S.36	大	河道中心	1~2	移動床	8~10件/年	屋外

の実験が注目され、20年代は外国技術の導入と基礎確立期とすることができよう。昭和30年代は災害の多発と大型模型実験の時代であり、以降経済力の発展と共に実験寸算の増大が目立つ。表-2は鹿島試験所において実施された昭和46年度の河川関係模型実験の課題名と模型規模を示す。鹿島試験所における寸算は海岸関係および基礎

表-2 河川模型実験諸元 (S.46年度の鹿島試験所担当分)

課題名	模型範囲 km	縮尺		固定床・移動床の別	新計画流量 %
		水平	鉛直		
淀川河道掘削 三川合流 大堰	7~40	$\frac{1}{100}$ $\frac{1}{60}$	$\frac{1}{40}$ $\frac{1}{60}$	固定 (砂) 移動 (炭粉)	12,000
利根川佐原地区低水路	35~46	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{40}$	移動 (炭粉)	8,000
利根川八斗島低水路と合流	175~186.5	$\frac{1}{70}$	$\frac{1}{35}$	移動 (砂)	14,000
信濃川長岡地区低水路	13~23	$\frac{1}{100}$ $\frac{1}{50}$	$\frac{1}{70}$ $\frac{1}{40}$	移動 (砂) 移動 (炭粉)	11,000
長良川低水路河道	2~14	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{40}$	移動 (炭粉)	7,500
大湫川河口処理工 (海部)	1.6~3	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{50}$	移動 (炭粉)	8,000
最上川河口処理工 (海部)	2.0~3.4	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{60}$	移動 (炭粉)	9,000
北止川一ノ宮遊水池	24.8~38.2	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{20}$	固定	11,000
旧淀川河水排水 (淀川固定床模型)		$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{40}$	固定	330
長良川河口堰仮締切	2~14	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{40}$	移動 (炭粉)	7,500

研究を含め、昭和40年度には約6千トンであったものが、46年度には1億4千トン(17課題)と増大している。

このように、河川関係の模型実験にも著しい発展がみられるが、ここでは実験技術上の内容について、最近の主なトピックスの紹介と二三の問題点の考察を行なう。

2. 模型実験内容および方法の推移

模型実験は河川改修事業に直接関係する。古くは、ヒサヤ水門、床固、水刺などの構造物、および分合流、捷水路関連などの河道に関する模型実験が多く行なわれた。最近では、大規模河道掘削、大規模仮締切、砂利採取、河口処理、および水質などの複雑な問題を包含する模型実験の増大が顕著である。初期の実験は、越流係数や構造物周辺の局所流況の問題が中心で小規模に行なわれた。これは計算や現地調査資料とついでになって、あるいは補足するがたう河道計画に資した。やがて構造物と河道の中で抱える必要から、固定床の大型模型による実験が開始された。流砂が河道計画上の中心問題と考えられるようになると、固定床の実験から河床変動と推定する試み、あるいは砂を用いた移動床実験が行なわれた。移動床実験が本格的に行なわれるようになったのは、模型の河床材料として石炭粉を用い始めからで、比較的最近のことである。模型は大規模であり、長さが150~300mは普通である。模型実験を行なう目的が多岐複雑になるにつれて、模型範囲の拡大、および水質・流況・河床

変動などの再現性の精度が要求され、それが模型の大型化に拍車をかける。そこで、水平の縮尺を小さくして模型と金ませることも多くなってきた。しかし、いっぽうでは実験結果に対して定性的なもの（従来は素の比較や量的なものへの判断材料とした）から、定量的なものへと期待される内容に変化がみられ、新たな問題も生じている。

3. 実験計画上の主な問題点

実験の目的により、実験規模および内容が定まる。全くの物理現象と模型上に再現することは相似律により不可能であるから、目的に応じて焦点の合わせ方が異なり、犠牲となるものが定められる。実験計画には当初の判断が重要である。計画上の模型規模、種類およびその問題点の現況と列挙すれば次のようになるであろう。1) 模型範囲：問題区間の上流へは上流流線とその変動（資料により交互砂礫堆の流下状況の把握）および補給砂の状況と補給方法により左右されるが、川中の3~6倍程度（蛇行の影響と考慮）が望まれ、下流側へは川中の2~5倍程度で基準量木標地帯が含まれることが望ましい。これは河川の状況や実験目的にもよるが、現状はかなり短い模型で実験が行なっている。2) 模型縮尺：大きい方が望ましいことが多いが、敷地、給水能力、予算および時間上の制約がある。下限は水深3cm以上とし、粘性の影響と無視し得、乱流域とする。限界掃流力と流砂量の相似、および測定精度と能力（流速10%、水位Hの精度0.1mm、河床変動量1mm）などにより判断され、これらの条件と満たし得ない場合には金み模型とする。移動床実験では金ませる場合が多く、種々の問題がある（後述）。3) 固定床と移動床模型：水量の変化による形状損失、流速分布、および流況の変化とみるためには固定床実験がすぐれているが、河床変動が激しくないので前提である。いっぽう、洗堀と堆積の現象と調べるには移動床実験が直接的であるが、粗度と経済性に難点がある。4) 実験水理条件：実験の種類によって平衡量と時間変化量が要求され、定流および不定流実験がある。要求される現象に対して流量と水位の実験条件は表-3のようである。実験河床材料としては均一粒径のものが用いられるが、混合粒径の現象、限界掃流力、流砂量、流砂型式（掃流、浮遊流、Washload）、粗度および砂れん現象などに未解決の問題がある。水理模型実験にはこの他にも種々の問題点があり、模型の検証には重大な意義が課せられる。以下に、模型実験実施上特に問題となる時間縮尺、検証法、および歪の影響について記す。

4. 移動床実験における時間縮尺の問題点

模型の相似律は実験の目的による。いま仮りに、Froude則に従うとすれば、時間縮率 $t_r = x_r \cdot A_r^{-1/2}$ である。ここに、 x_r および A_r は水平および鉛直方向の縮率を表わす。固定床実験の場合は特に問題はない。移動床実験の場合はこの他に流砂の連続の条件より、 $t_{sr} = (1-\lambda)_r \cdot A_r \cdot q_{Tr}^{-1}$ 。ここに、 t_{sr} は流砂量から定められる時間縮率、 λ は河床移動率の空隙率、 q_T は流砂量である。この場合、非定常性が強く貯留量が問題となる場合には t_r と重視する必要があるが、河床変動に重点が置かれる場合は t_{sr} が意義を持つ。ただし、 t_{sr} は採用する流砂量関数によってかなり異なった計算結果が得られる。模型における流砂特性は多くの場合に、二次元的な基礎実験の範囲内であるので、よく把握することができる。模型河床材料として砂を用いる場合には例えば佐藤・吉川・芦田公式、石灰粉の場合には浮遊が含まれているので Brown 公式などの適合性のよいことが確かめられている。したがって、河川の現地における流砂関数が実験等によって把握されている場合には t_{sr} の精度を相当高めることが出来る。しか

表-3 実験水理現象と現象

下流水流量	計画流量	小出水係時間
最高 (l/min)	計画水位、堆砂	堆砂
平均	———	蛇行 流況
最低 (l/min)	洗堀、堆砂、流況	洗堀

しながら、現地と模型とで流砂関数形が異なる場合には tsr は一般に流量の関数となる。長良川下流部の実験では現地実測式と模型における石炭粉の実験式とを用いて時間縮尺を定め、かなりよい結果を得た。最上川河口部河道の実験(表-2 参照)では $tsr=7.75$ 、 $tsr=25.6$ (佐藤吉川・芦田公式)、 $tsr=4.24$ (Brown 公式、 $d_p=0.6mm$ 、 $d_m=0.2mm$)、 $tsr=244$ (現地に佐藤吉川・芦田公式、模型に Brown 公式)であった。現地 $Q=6000m^3/s$ のとき、Brown 式による流砂量の計算値は佐藤吉川・芦田公式による計算値の約100倍であり、実験検証が必要である。 $tsr=25$ 、および 40 のとき、

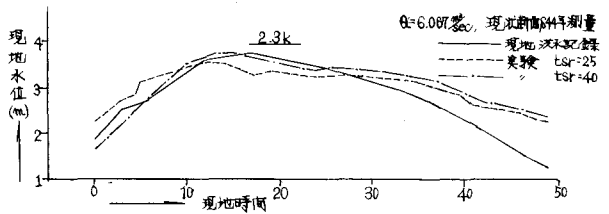


図-1 最上川河口部河道の水位-時間曲線

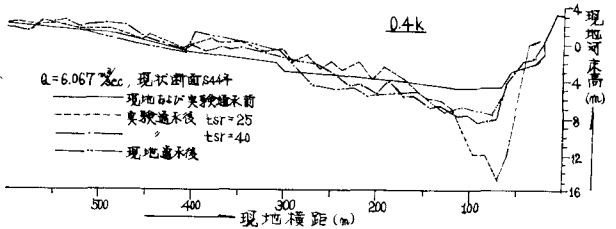


図-2 最上川河口部河道の出水前後河床変化

き、水位の時間変化および河床変動量と模型と現地とと比較すると図-1 および図-2 のようである。移動床実験では水位が合わないのはやむを得ないこととして主として河床変動に注目するのであるが、水位もその最高値などに対する要請が強い。水位時間曲線に対する影響要素としては、 tsr によらないときに貯留、砂れんの発達による粗度の変化(通常減水時には模型水位が高い)、粗度変化に伴う流砂量の変化、流砂関数の不適による河床変動量の相違、流量変化に伴う tsr の変化などがあり、これらを考慮しておく必要がある。図-1 で初期水位が異なるのは予備通水の影響である($tsr=25$ のとき30分、 $tsr=40$ のとき15分間、現地量で2000%通水した)。最上川実験の場合、 tsr の影響は河床変動量に対しては入さいが、水位に対してはそれほど大きくないことが判明した。なお、砂れんが発達した状態で実験を行えば、あらかじめ把握された粗度の式を用い、模型の歪度を適当に定めることによって水位まで合わせることが理論上可能である。あるいは、砂れんの発生を妨げるために比重の小さい人工材料を用いることも一法であろう。

5 歪模型の問題点

模型と歪ませた影響が明らかとなり、その補正法が確率されれば、模型は歪ませる方が得策である。また、河川の状況や実験の目的によって歪の限界が存在するはずである。表-4 は鹿児島試験所において45年度以前に終了した模型実験の歪度と示す。目的によってはかなり歪ませることもできるが、洗掘量や洗掘位置などと問題とするときにはあまり歪ませたくない。歪模型では三次元の現地基礎寸法を満足することができなく、特に水平軸荷の影響が入り込む

表-4. 模型の歪度(45年以前・鹿児島)

模型	目的	河床	α_r	η_r	歪度
利根川下流部	従流河床	固定床	100	20	5
〃	わん曲部	移動床	100	50	2
多摩川下流	橋脚	移動床	60	60	1
不曹川川島	分流・合流	移動床	60	60	1
琢磨川流	わん曲部	固定床	50	50	1
長良川	堆砂・低橋	移動床	100	50	1.56
富士川流	橋脚・護岸	移動床	50	50	1
久慈川	河川処理	移動床	40	40	1

ときには好ましくない。実験上の問題点として、河床砂の安息角、粗度係数(通常、模型の粗度が小さい)、流量係数(形状損失) および構造物周辺の局所流と局所洗掘などが挙げられる。歪模型により実験を行なう場合は、洗掘特性などについて別個に小水路にて実験を行ない、模型実験の結果の補正を行なっている。このような基礎的な実験の一例として、わん曲部の河床変動におよぼす歪の影響については

③ すでに報告した、交互砂礫堆などの蛇行の問題は水深の効果が効いてくるようであるから、全模型は極力避けるべきであろう。

6 模型の検証

実験の目的に応じ、必要とする現象および水理量の範囲

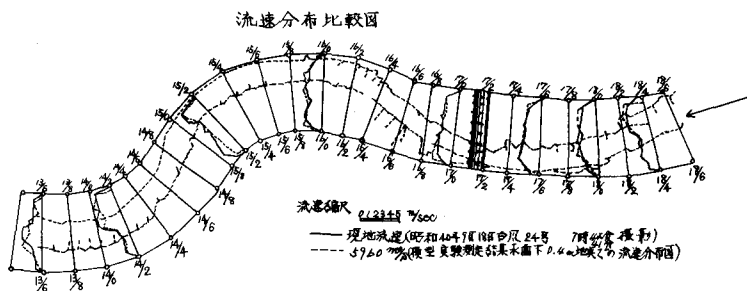


図3 淀川河道部における表面流速分布の比較(検証)

が存在するので、模型における現象の再現性と検証する方法およびその範囲が定まる。固定床実験では、通常出水時における水位または粗度係数と合わせることで検証としていた。昭和44年度に行われた淀川河道の固定床実験では、出水時の航空写真による表面流速分布の測定結果に基づき、始めて表面流速分布の検証が行われた。図3にその一部を示す。実験によると、水位が合っている状態でも河床におく粗度石の配列の仕方により流速分布が異なることが判明した。このことは特に、高水深において顕著に現われ、低水深と高水深の境界付近の現象に着目するときは、粗度石の配列の仕方に工夫が必要である。出水時の航空写真によると、表面流速分布の他にも、流況、水深の2倍の間隔で生ずるといわれるテラ滑、浮遊流砂濃度の定性的な分布など、各種の興味深い現象が観察される。そこで、利根川佐原地区移動床実験(46年度)では木下良作博士の御指導によりヘリコプターによる模型の航空撮影が行われ、現地航測結果と比較して良好な結果を得た。移動床実験では、河床変動状況や洗堀深が比較される。河床材料として細かい粒全のものが使用される場合には、通常砂れんが発生する。Ripple や dune は流速分布の不均一性に基つき、河道内に様々に発達するものではなく、粗度や流砂量の分布、および乱流構造に影響すると思われる。しかし、大局的にみれば全体としての模型の流れと大きく変えるものではなく、ほとんどその影響を無視できる場合が多い。小さな砂れんは交互砂礫堆の上にある。このような砂れんの上の流れにおいても、現地河川において観察されるようなたてじまが発生している。その他の検証法として、流砂量分布と比較するものなどもある。

7 おわりに

実施された河川の水理実験は相当の数にのぼり、計画より大なる成果をあげてきた。出水時には実験と同様の現象が観察され、その信頼度が高まるにつれて実験依頼件数も増加している。事業費の21%前後の経費にて、水理現象を理解し、安全性を高め、かつ安全度を均一にできるものと、実験の効果に対する認識の深まりのあらわれであろう。それと共に実験に対する要求内容も厳しいものとなろう。今後は現地観測資料の充実と基礎的な研究結果の活用により一層の発展が期待される。特に、経費節減と時間短縮のため模型の小型化と全模型の活用は促進されるであろうし、それに伴い、測定精度向上、測定自動化、資料の電算処理(添付図を含む)などが必要と、汎用としてのためにも室内実験とすることが要求される。実験用河床材料の開発、材料の団結度、間隙率などの研究も必要である。また、今後は海外河川の実験の増加も考えられ、少い資料の原始河川に対する実験法の検討が要請される。

【参考文献】(1) 河部長徳、青木橋孝、伊藤令一：北上川降雨式移動床模型実験、土木研究所報告15号、A5.2 (2) 須賀・喜場：わん間部露岸の水理模範に関する二、三の実験的考察、斗槽 46.10 (3) 須賀・喜場：わん間部全模型の水理特性、斗槽 46.10

(4) 木下良作：航空写真による洪水時の流況測定、土木学会 水工学シリーズ、A43.8、