

第9章 水理模型実験

関連条項[基準 5、運用 5]

頭首工の機能、施工に伴う河道への影響を検討するために、設計の段階において水理模型実験を企画する場合が多い。ここでは、頭首工の水理模型実験を実施する上での留意事項や課題などについて解説する。

9.1 水理模型実験の意義

自然河川の現象は種々の要素から成り立っており、非常に複雑であるため問題を純理論的に単純化して取り扱うことによって、その目的を達成することができない場合が多い。例えば、流水の力によって砂礫が移動し、砂礫の移動によって河床が変化する。その河床の形状変化によって粗度係数が変化し、水位も変化してくる。これらの現象には洪水量の規模や発生の確率的要因が加わり、一層複雑さを増してくる。さらに河川には蛇行があり、その湾曲部の水の流れは河床の変化に影響を与える。さらに、水位は横断方向に水平ではなく、また、部分的には水の流れない貯留領域のあることも忘れてはならないし、水深の大小、樹木の繁茂状況によって変化してくる。このように要素が多元的で複雑である自然現象を解明するために、水理模型実験は有力な手段となってくる。

9.2 水理模型実験における主な検討事項

水理模型実験は、頭首工の機能検討、建設に伴う河道への影響調査に加えて、実施案形状の抽出を行うもので、そこにおける検討事項は次のとおりである。

9.2.1 頭首工の取水機能に関する検討

(1) 取入口とミオ筋

ミオ筋の安定性、取水時における土砂流入を極力防止できる位置の選定及び土砂吐き、可動堰、固定堰の機能が十分発揮できるよう検討することが最も重要であり、さらに河川の平水量と河床材料の大きさから取水条件の適性について検討する。

(2) 堰構造の安全性

水理的には堰上流の局所洗掘防止工法と、下流護床工法について検討する。特に堰下流の洗掘防止に関しては洪水時及び取水時における流水現象を十分把握する。

(3) 堰敷上の堆砂防止とゲート操作

河川の洪水流況と土砂の移動状態、現河床と堰の通水横断面形状及び流水抵抗の関係から検討する。

また、ゲート操作は、出水時における堰及びゲートの安全性を考慮すると同時に取入口前庭に土砂が堆積しないように検討する。

なお、洪水後に堰敷上に堆砂が生ずるような場合は、これの掃砂方式も考える。さらに取水位の保持とともに取水時の防砂にも注意し、かつ責任放流のある場合にはこれの計量方法についても検討する。

(4) 魚道及び舟通しの位置

魚類の習性、舟運の利用度を考慮し、河川の洪水現象とミオ筋及び取水方法からその位置を検討する。

(5) 沈砂池の必要性の有無と排砂方式

河床材料の大きさ、取水条件及び地形条件から検討する。

9.2.2 頭首工建設に伴う河道への影響の検討

(1) 頭首工計画地点の堆砂状況を含む河道の特性

現地と模型との相似性に関連して、頭首工計画地点付近の河道特性、堆砂状況、水理特性等を把握する。

(2) 頭首工建設に伴う河川への水理的影響

頭首工建設に伴う河道への治水上の影響を検討する。

(3) 将来の河川計画の検討

頭首工の建設により、頭首工上下流では河川改修が必要となる。このとき暫定的な河道への影響も併せて検討する。

9.2.3 治水上の諸問題に関する検討

(1) 洪水時の堰上げ背水

堰の敷高、堰柱間隔と流水に対する方向及び現河床の横断面形と堰の断面形状との関係が影響する。

(2) 取水時の堰上げ背水

堰上流耕地の排水及び堤防からの浸透水についても十分検討する。

(3) 下流河川への影響

現河床の横断面形と堰の断面計画、堰の断面形状との関係が重要であり、さらに堰による締切り方向も下流の蛇行路が変化しないよう考慮する。

9.3 水理模型実験に必要な資料

水理模型実験を行う場合は、その目的をあらかじめ実験担当者と打ち合わせを行い、表-9.3-1に示す必要資料のうちから当該実験に必要な資料を整える。

表-9.3-1 実験に必要な諸資料

① 模型製作に必要な資料			② 実験に必要な資料			③ その他の資料		
番号	資料名	内 容	番号	資料名	内 容	番号	資料名	内 容
1	平面図	縮尺：1/1,000-3,000 範囲：当該河川の模型製作に必要な範囲は実験の目的によって異なるため、あらかじめ実験担当者との協議する。	1	既往洪水表	模型下流端に相当する箇所のものである。 最近の洪水については (a)洪水直前の河床横断面図 (b)洪水時の流量—水位—時間曲線 (c)水面勾配 (d)洪水直後の河床	1	河床材料	粒度分布と比重を求める。 採取場所 500m ごと。 採取場所の位置と標高を平面図に明示する。
2	横断面図	縮尺：縦 1/100、横 1/1,000 範囲：上流 1.5 蛇行長、下流 1.0 蛇行長程度 間隔：模型で 50～100cm 程度 現地ではほぼ 50m 程度 横断面図には露出した岩、コンクリート構造物などについて明記し河床の固定部分と移動部分とを区別する。 また、模型製作を考えた、基準点から追加距離とその点の標高を数値で示す。	2	計画洪水量		2	写真とスケッチ	主要な箇所
3	縦断面図	縮尺：縦 1/100、横 1/100 最深河床高、堤防高、既往最大痕跡水位、計画高水位を記入する。	3	流量—水位—時間曲線（洪水波型）		3	航空写真	河川の蛇行路がよく分かるもの。
4	河中構造物の位置、形状、標高測量図	護岸、水制、樋管、水門、井堰、橋梁及び岩などを模型を再現できるようにする。	4	既往最大洪水時の痕跡水位と水面勾配	河床の安定をどのように考えて治水計画を立てているか。			
			5	年度ごとの実測横断面図				
			6	粗度係数 (n) の実測資料				
			7	河川改修計画の考え方				
			8	聞き込み調査資料				
			9	流域面積				

(注) 模型区域に横断杭を設ける場合は、直角座標系で杭位置を与えるのが最も便利で効率がよい。したがって、現地での模型製作のために測量を行う際は、あらかじめこのことを考慮し、直角座標系で求めておけば機械的に縮尺できて精度向上に役立つ。

9.4 河川実験の相似率

自由水面を持つ河川の流れは主として重力と慣性力に支配されるため、フルードの相似率が適用できる。通常用いられている原型と模型の縮尺比は次のとおりである。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{長さ} : (L_p / L_m) = L_r & \text{面積} : (A_p / A_m) = L_r^2 \\ \text{流速} : (v_p / v_m) = L_r^{1/2} & \text{流量} : (Q_p / Q_m) = L_r^{5/2} \\ \text{粗度係数} : (n_p / n_m) = L_r^{1/6} & \text{体積} : (M_p / M_m) = L_r^3 \\ \text{掃流力} : (\tau_{0p} / \tau_{0m}) = L_r \end{array} \right\} \dots\dots\dots (9.4-1)$$

ここに、添字 p は原型、 m は模型を表す。

移動床実験では、河床面の形が時間の経過とともに変化する。水流の他に砂の移動も含んだ移動床実験の場合には、河川の流れとともに、それに伴い時々刻々と変化する河床変形も現地と模型で相似にすることが要求される。

移動床実験では、河床状態の時間的变化が重要な観測対象となるが、河床の変形、土砂の移動などはフルード則で表すことはできない。

河床物質移動の相似条件として次のものがある。

- (1) 流砂の移動限界水深の相似
- (2) 流砂量に関する相似
- (3) 河床断面形状に関する相似
- (4) 底質の移動状態に関する相似

これらをすべて同時に満足させることはできないが、従来、限界掃流力に着目した以下の方法で頭首工付近の洗掘、堆積などの現象を含む河床の状態変化の解析、予測などのための実験を行い、よい結果を得ている。

河床物質に対する縮尺比は限界掃流力比と等しくすることから、岩垣の限界掃流力公式を用いて与えられ、その一般形は次のように示される。

$$\frac{\tau_{0p}}{\tau_{0m}} = L_r = \frac{\phi_p d_p}{\phi_m d_m} \dots\dots\dots (9.4-2)$$

ここに、 ϕ は岩垣公式の関数形であり、粒径によって異なった形となる。

また、流砂量に関する時間縮尺比 T_{sr} は次式で示される。

$$T_{sr} = \frac{Q_{Br} / B_r}{q_{Br}} = \frac{L_r^2}{q_{Br}} \dots\dots\dots (9.4-3)$$

ここに、 Q_{Br} : 全量砂量比、 B_r : 河川幅の比、 q_{Br} : 単位幅当たりの流砂量比

いま、流砂量公式としてブラウン (Brown) のものを用いれば、次のように表すことができる。ブラウンの流砂量公式は

$$q_B = 10(Sgd^3)^{1/2} \phi^{2.5} \dots\dots\dots (9.4-4)$$

$$\text{ここに、} \phi = \frac{U_*^2}{Sgd}$$

U_* : 流水の摩擦速度

S : $\{(\sigma / \rho) - 1\}$

σ : 河床材料の密度

ρ : 水の密度

g : 重力の加速度

d : 河床材料の粒径

流砂量比 q_{Br} は、

$$q_{Br} = \frac{q_{Bp}}{q_{Bm}} = \left(\frac{S_p}{S_m} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{d_p}{d_m} \right)^{3/2} \left(\frac{\phi_p}{\phi_m} \right)^{2.5} = \frac{L_r^{5/2}}{\left(\frac{S_p}{S_m} \right)^2 \cdot \left(\frac{d_p}{d_m} \right)} \dots\dots\dots (9.4-5)$$

となる。

9.5 実験結果の評価

従来の実験においては、縮尺比 L_r は 100 程度が最も多かった。具体的には河床の平均粒径が 2～3 cm 以上、河川勾配が 1/1,000 以上の条件であり、実験による定量的評価が可能と考えられる。

上記の条件より粒径が小さく、河川勾配が緩やかになると、河床材料に対する慣性力等の物理的現象が再現不能となり、定性的な評価にならざるを得ない。このような領域では数値解析を補うことにより解決することとなる。模型の縮尺比 L_r は 50 程度まで大きくし、模型の移動床材料に石炭粉を利用した例がある。

9.6 水理模型実験事例

事例 1

農村工学研究所（現国立研究開発法人農研機構 農村工学研究部門）が国営事業所から依頼されて行った水理模型実験の事例を紹介する。本事例では、模型は頭首工の上流側に約 2,350 m、下流側に約 850 m、併せて約 3,200 m の区間を 1/80 の縮尺で再現するように作製された。模型における移動床として、市販の硅砂のうち現地の河床材料の平均粒径 14.4 mm の 1/80 に最も近い平均粒径を有するものが敷き詰められた。

以下に実験の一部状況写真（写真-9.6-1・写真-9.6-2 洪水発生前、写真-9.6-3 洪水発生後）を掲載し説明する。

写真中で発生させている洪水の規模は既往最大流量（5,500 m³/s）であるが、現場の状況に応じて、様々な規模の洪水を発生させて検討を行う必要がある。

本事例では、ゲート開放時流量（100 m³/s）～平均年最大流量（1,000 m³/s）までの洪水についても実験の対象としている。

なお、水理模型実験では、これらの流量に対して上記で説明している相似率を乗じた値を用いている。

実験後の河床形状を計測し、実験前の河床状況と比較することにより、頭首工周辺の河床が将来どのように変化するか定量的に評価できる。

(1) 実験装置全景

写真-9.6-1 は実験の初期条件である洪水発生前の状況であり、頭首工の上流では砂を敷き詰めた移動床としている。この敷き詰められた砂が洪水発生後にどのように移動するかを評価する。特に、頭首工上流の中州が洪水によってどのような影響を受けるかが、本事例における焦点の一つである。

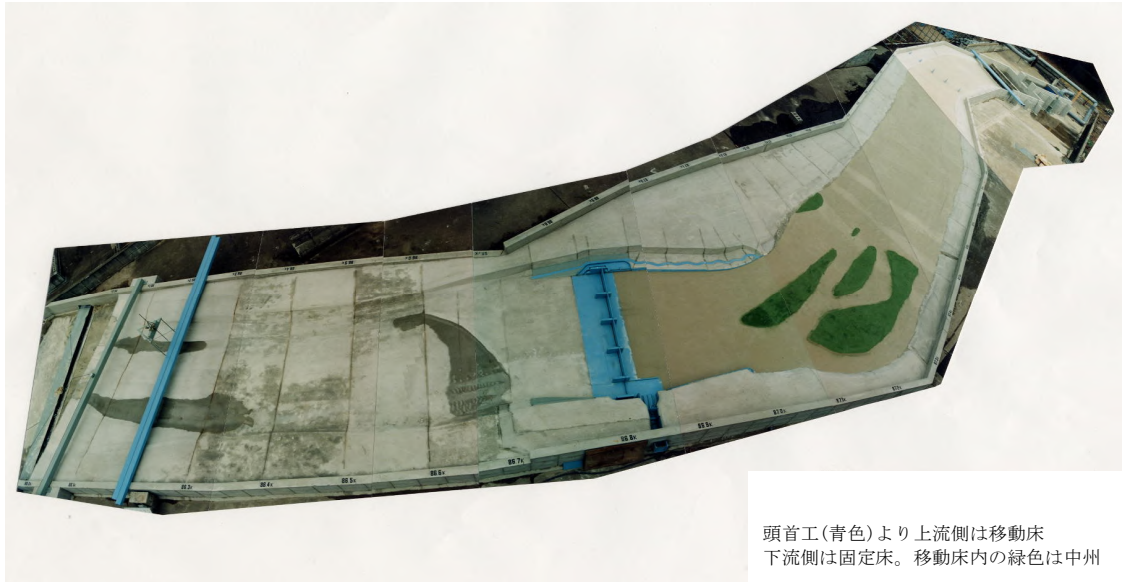


写真-9.6-1 洪水発生前

(2) 下流側から見た頭首工周辺

写真-9.6-2 は洪水発生前の状況である。頭首工の堰柱等が写真中央に、頭首工上流の中州が写真上方に写っている。

写真-9.6-3 は洪水発生後の状況である。頭首工上流の中州は洪水により流され、頭首工付近に堆積している。写真左側（右岸側）と写真右側（左岸側）で土砂の堆積状況が異なっている。



写真-9.6-2 洪水発生前

写真-9.6-3 洪水発生後 (5,500 m³/s)

上記以外にも上流にある中州の状態や取入口付近の堆砂状況やフラッシュによる掃砂効果等が実験により確認できる。

事例 2

農村工研究所（現国立研究開発法人農研機構 農村工学研究部門）が国営事業所から依頼されて行った水理模型実験の事例を紹介する。本事例は洪水に伴って河道湾曲部内岸側に発生した大規模な堆砂を取水口に近づけないようにする水制工の検討である。

本実験で使用した模型は、頭首工の上流側に約 1,400 m、下流側に約 2,200 m、併せて約 3,600 m の区間を 1/50 の縮尺で再現するように作製された。模型における移動床は、平均粒径 0.8 mm の粒径加積曲線を有するものが敷き詰められた。ただし、現地における頭首工上流の湾曲部外岸側では岩盤が露出していたため、模型における該当部分は固定床として砂を敷き詰めなかった。

この模型に水制工を配置して堆砂抑制効果を検証した。

検証方法は掃流砂の堆砂位置及び限界掃流力から推定される浮遊砂の堆砂状況によって評価した。以下に模型及び現地状況の写真を示す。



写真-9.6-4 洪水発生後の模型状況（水制工なし）



写真-9.6-5 洪水発生後の模型状況（水制工あり）

上記の水理模型実験をもとに現地で水制工を設置した。

その結果、水制工が機能していることが現地状況からもわかる。



写真-9.6-6 上流側から見た現地状況（水制工施工中）



写真-9.6-7 上流側から見た現地状況
（水制工完成後の状況）