

泥沙模型试验技术经验交流会



1978

# 泥沙模型报告汇编

中国 / 北京

SYMPOSIUM  
ON  
SEDIMENT MODEL TESTS  
(BEIJING, CHINA)

1978

# 目 录

## 《泥沙模型试验技术经验交流会》资料汇编

|                                         |                                    |                   |
|-----------------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| 全沙模型相似律及设计实例 .....                      | 水利电力部<br>交通部                       | 南京水利科学研究所 ( 1 )   |
| 低水头枢纽悬沙模型设计及试验中的若干问题 .....              | 武汉水利电力学院<br>三三〇工程局设计院<br>长江流域规划办公室 | ( 19 )            |
| 钱塘江动床模型浑水试验小结 .....                     | 浙江省钱塘江工程管理局                        | ( 41 )            |
| 潮汐河口悬沙淤积和局部动床冲淤模型试验——射阳河闸下裁弯实例<br>..... | 水利电力部<br>交通部                       | 南京水利科学研究所 ( 54 )  |
| 关于塑料沙和核桃壳颗粒的物理力学性能 .....                | 清华大学水利系                            | ( 79 )            |
| 水利枢纽下游附近动床模型试验的几个问题 .....               | 华东水利学院                             | ( 89 )            |
| 论悬沙水流模型试验的相似律 .....                     | 水利电力部<br>交通部                       | 南京水利科学研究所 ( 100 ) |
| 电站断面泥沙模型试验 .....                        | 长江水利水电科学研究院                        | ( 106 )           |
| 映秀湾电站引水防砂试验总结 .....                     | 水电部成都勘测设计院                         | ( 126 )           |
| 红水河大化水电站厂房排沙模型试验初步总结 .....              | 广西水电局设计院科研所                        | ( 152 )           |
| 小比尺泥沙模型研究河床演变 .....                     | 中国科学院地理研究所                         | ( 162 )           |
| 河工模型试验中人为拐弯和轻质沙的应用 .....                | 清华大学水利系                            | ( 176 )           |
| 动床河工模型实践经验 .....                        | 水利电力部<br>交通部                       | 南京水利科学研究所 ( 189 ) |
| 动床河工模型试验经验点滴 .....                      | 水利电力部黄<br>河水利委员会                   | 水利科学研究所 ( 218 )   |
| 岷江都江堰河段变态动床模型验证及推移质输沙率试验报告 .....        | 成都工学院等                             | ( 234 )           |
| 梅花形糙率的确定 .....                          | 交通部天津水运工程科学研究所                     | ( 258 )           |
| 几种模型沙的起动流速试验 .....                      | 长江水利水电科学研究院                        | ( 265 )           |
| 线性数字光电测沙仪 .....                         | 华东水利学院                             | ( 270 )           |
| 泥沙模型测淤厚仪试制报告 .....                      | 长江水利水电科学研究院                        | ( 281 )           |
| 新型流量计在河工模型的应用 .....                     | 长江水利水电科学研究院                        | ( 290 )           |
| 应用电阻应变仪测量河工模型中泡水涌高水位的方法<br>.....        | 交通部天津水运工程科学研究所                     | ( 301 )           |

# Contents

|                                                                                                              |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Similarity Laws of Total Load Model, with Practical Example                                                  |         |
| Nanjing Institute of Hydraulic Research.....                                                                 | ( 1 )   |
| Some Problems on the Design and Operation of the Suspended Load Models for the Low-head Diversion Structures |         |
| Wuhan College of Hydraulic                                                                                   |         |
| and Electric Engineering, et al.....                                                                         | ( 19 )  |
| Preliminary Report on the Mobile-bed Model Test of the Qiantang River                                        |         |
| Bureau of Water Conservancy of Qiantang River.....                                                           | ( 41 )  |
| Sedimentation Investigations on the Partial Mobile-bed Model of a Tidal Estuary                              |         |
| Nanjing Institute of Hydraulic Research.....                                                                 | ( 54 )  |
| Studies on the Physical Properties of Polystyrene and Ground Walnut-shell Particles                          |         |
| Department of Hydraulic Engineering,                                                                         |         |
| Qing Hua University.....                                                                                     | ( 79 )  |
| Problems on the Mobile-bed Model Tests Downstream of Hydraulic Structures                                    |         |
| East China College of Hydraulic Engineering.....                                                             | ( 89 )  |
| Similarity Laws of Modelling the Suspended Sediment Laden Flow                                               |         |
| Nanjing Institute of Hydraulic Research.....                                                                 | ( 100 ) |
| Two Dimensional Model Tests on the Sedimentation of Hydro-power Plants                                       |         |
| Institute of Hydraulic and Hydroelectric Engineering                                                         |         |
| Research of Yangtze River.....                                                                               | ( 106 ) |
| Summary of the Model Test on Sedimentation of the Yingxiuwan Hydro-power Plant                               |         |
| Chengdu Design Institute of Hydraulic and Hydroelectric Engineering                                          |         |
| .....                                                                                                        | ( 126 ) |
| Review on the Sediment-ejection Model Tests of the Dahua Hydro-power Plant, Hongshui River                   |         |
| Design Institute of Guangxi                                                                                  |         |
| Hydroelectric Engineering Bureau .....                                                                       | (152)   |
| Utilization of Small Scale Sediment Model for the Study of Fluvial                                           |         |



Processes

Institute of Geography, Academia Sinica..... ( 162 )

The Imposing of Artificial Bends and the Use of Light-weight Material  
on Model Tests

Department of Hydraulic

Engineering, Qing Hua University..... ( 176 )

Experiences on the River Model Tests with Movable Bed

Nanjing Institute of Hydraulic Research ..... ( 189 )

Some Considerations on the River Model Tests with Movable Bed

Institute of Hydraulic Research, Yellow River Water  
Conservancy Commission..... ( 218 )

The Verification of Model and the Determination of Bed-load Rate for the  
Distorted Mobile-bed Model of Dujiangyan Reach, Min River

Chengdu College of Engineering, et al..... ( 234 )

Investigations of Artificial Roughness

Tianjin Institute of Navigation Engineering Research..... ( 258 )

Experiments on the Critical Velocity of Several Model Materials

Institute of Hydraulic and Hydroelectric Engineering

Research of Yangtze River..... ( 265 )

Linear Digital Photo-electric Turbidity Meter

East China College of Hydraulic Engineering..... ( 270 )

Electronic Profile-indicator for Sediment Models

Institute of Hydraulic and Hydroelectric Engineering

Research of Yangtze River..... ( 281 )

New Types of Flow-meter for River Models

Institute of Hydraulic and Hydroelectric Engineering

Research of Yangtze River..... ( 290 )

Utilization of the Strain Gage for Measuring the Fluctuations of Water  
Surface in River Models

Tianjin Institute of Navigation Engineering

Research..... ( 301 )

# 全沙模型相似律及设计实例\*

水利电力部  
交通部 南京水利科学研究所

## 提 要

本文提出了在一个模型中同时进行推移质、悬移质和异重流试验的相似准则,以及按照这些相似准则进行全沙模型设计的实例。在研究各种运动形式的泥沙相似律时,引用了作者近年来在泥沙运动理论方面所获得的一些尚未发表成果。

文中试图给出为保证模型能同时满足重力相似和阻力相似所必需的模型最小比尺的判断,探讨悬沙的扬动、沉降和含沙量的相似条件,底沙的起动、沉降和输沙率的相似条件以及异重流相似条件。研究表明,只要水流同时满足重力相似和阻力相似,底沙和悬沙都满足起动相似、沉降相似和输沙率相似,那末底沙、悬沙和异重流的冲淤时间比尺就一致,从而有可能在一个模型中进行悬沙和底沙的综合试验。

根据本文中的全沙模型相似律,设计了某工程坝区全沙模型。文中给出了模型比尺和模型沙的各种特征值。模型试验结果表明,按这种相似律设计的模型,可以使模型的水流条件、悬沙、底沙和异重流的运动规律,河床的冲淤部位、冲淤数量和淤沙粒径与原型基本相似。

## 一、前 言

天然河道中泥沙的颗粒分布很广,常常从0.005毫米以下直到100毫米以上。这些泥沙的运动形式也很不相同,有悬沙输移,也有底沙包括卵石推移,在某些情况下还有异重流形成。在河道中各种粒径泥沙的冲淤是一个统一的整体,互相影响,互相制约。在模型中单独试验某一部分颗粒的泥沙,只复演其某一种运动形式,不可能很好地解决水利工程中的泥沙问题。为了更好地解决工程实际问题,需要在一个模型上同时复演各种粒径泥沙的运动,即在一个模型上进行悬沙和底沙的综合试验。

然而由于泥沙运动规律极为复杂,我们对它的认识还很有限,在一个模型中同时复演悬移质和推移质,困难很大,尚无这方面的成熟经验可供参考。我们决心迎着困难上,探讨全沙模型相似律及其设计,进行悬沙和底沙的综合试验,为更好地解决水利工程中的泥沙问题创造条件。

在研究全沙模型相似律时,引用了我们自己近年来在泥沙运动理论方面所获得的一些成

---

\* 参加此项工作的为某工程坝区泥沙模型试验小组,本文由窦国仁编写。

果。由于这些成果尚未正式发表，故在此文中做了一些介绍。在本文中着重阐述了平面水流相似条件，底沙的起动和沉降相似条件，悬沙的扬动和沉降相似条件，异重流的相似条件，各种泥沙的输沙量和冲淤相似条件以及时间比尺。研究表明，不管是在正态模型中还是在变态模型中，只要水流同时满足重力相似和阻力相似，底沙和悬沙同时满足起动（或扬动）、沉降和输沙率相似，那末底沙、悬沙和异重流的冲淤时间比尺就一致，从而就有可能在一个模型中进行悬沙和底沙的综合试验。对相似律的论述也表明，在满足异重流相似条件下，采用轻质沙也可以做到异重流相似。

根据本文中得到的全沙模型相似律，我们设计了某工程坝区全沙模型。几年来的模型试验表明，按这种相似律选择模型沙和确定模型比尺，是可行的，可以使模型的水流条件，包括回流和泡漩得到与原型基本相似的结果，可以复演悬沙和底沙包括异重流和卵石的运动规律，达到冲淤部位、冲淤数量和淤沙粒径的基本相似。

## 二、模型相似律

为了使模型能够较好地与原体情况相似，模型比尺必须依据一定的相似准则。在总结前人经验的基础上，特别是根据我们自己近年来进行泥沙模型试验的实践，导得以下一些相似判据。

### 1. 水流条件的相似

在研究大范围内的泥沙淤积问题时，必须保证水流在平面上的相似，即垂线平均流速沿程和沿河宽的相似，主流和回流的相似。至于流速沿水深的分布，虽然严格说来在变态模型上会有所偏离，但对于变率较小的模型来说，其偏离程度是很小的，基本上在误差范围之内。

河道平面水流的运动方程式可以写做如下形式：

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = g i_x - \frac{v_x^2}{C_o^2 H} \quad (1-1)$$

$$v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = g i_y - \frac{v_y^2}{C_o^2 H} \quad (1-2)$$

式中： $v$ 为垂线平均流速， $g$ 为重力加速度， $i$ 为水面比降， $C_o$ 为无尺度谢才系数， $H$ 为水深， $X$ 和 $Y$ 分别为纵向和横向坐标轴。

由上述二式可求得其相似的比尺条件：

$$\frac{\lambda^2 v_x}{\lambda_L} = \frac{\lambda v_x \lambda v_y}{\lambda_L} = \frac{\lambda_H}{\lambda_L} = \frac{\lambda^2 v_x}{\lambda_{Co}^2 \lambda_H}$$

$$\frac{\lambda v_x \lambda v_y}{\lambda_L} = \frac{\lambda^2 v_y}{\lambda_L} = \frac{\lambda_H}{\lambda_L} = \frac{\lambda^2 v_y}{\lambda_{Co}^2 \lambda_H}$$

很明显上述连等式成立的条件是：

$$\lambda v_x = \lambda v_y \quad (1-3)$$

$$\lambda_v = \lambda^{\frac{1}{2}} \lambda_H \quad (1-4)$$

$$\lambda_{Co} = \left( \frac{\lambda_L}{\lambda_H} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-5)$$

在长度和宽度比尺相同，即均等于 $\lambda_L$ 的情况下，(1—3)式是自动满足的。因为平面水流的连续方程式为：

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (1-6)$$

由此可知

$$\frac{\lambda v_x}{\lambda_x} = \frac{\lambda v_y}{\lambda_y}$$

因而当 $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_L$ 时，即可得到

$$\lambda v_x = \lambda v_y$$

这是水流连续条件所导致的必然结果。

因此确定平面水流相似的必要和充分条件是满足(1—4)和(1—5)二式，前者通常简称为重力相似，后者通常简称为阻力相似。

关于上述结论的可靠性，我们曾利用三个不同宽度的水槽进行了正态，变态模型回流相似情况的试验。试验结果表明，只要同时满足重力和阻力相似，不论是正态模型还是变态模型（变率小于5）回流情况，就都能相似，否则不论是正态还是变态，回流情况就均有偏离（关于这一试验的详细情况见专题报告）(8)。

如果利用满宁公式确定无尺度谢才系数，即

$$C_o = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{1}{n} H^{\frac{1}{6}}$$

则有

$$\lambda_n = \lambda_H^{\frac{1}{6}} \left( \frac{\lambda_H}{\lambda_L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-7)$$

式中 $n$ 为满宁糙率系数。

然而应当指出，不是在任何阻力形态的模型中都能真正同时满足重力和阻力相似的。如果原体水流处于阻力平方区，模型中的水流也必须处于阻力平方区，否则就不可能真正满足重力相似和阻力相似。如果模型处于光滑区，即使在某级流量下水位可能偏离不大，但在其它流量级时就将有较大偏离，更严重的是将影响滩槽的流速分布。因此我们必须使模型水深不至过小，以保证模型也处于阻力平方区。根据紊动水流的基本规律，我们可以求得确定最小水深比尺的判据如下。

尼古拉兹和杰格什达等人的试验表明，<sup>(1)</sup>，圆管和水槽中水流进入阻力平方区的条件是：

$$\frac{v_* \Delta}{\nu} \geq 60$$

式中： $v_*$ 为摩阻流速， $\Delta$ 为壁面糙率凸起高度， $\nu$ 为水的运动粘滞系数。

因此模型上的雷诺数必须满足：

$$\frac{v_{*m} \Delta_m}{\nu_m} \geq 60 \quad (1-8)$$

或者

$$\frac{V_m H_m}{\nu_m} \geq 60 C_{om} \frac{H_m}{\Delta_m} \quad (1-8)$$

式中的注角符号 $m$ 表示模型量， $p$ 表示原体量。



原型的雷诺数为  $Re_p = \frac{V_p H_p}{\nu_p}$

因此 
$$\lambda_{Re} = \frac{\frac{V_p H_p}{\nu_p}}{\frac{V_m H_m}{\nu_m}} = \frac{\lambda_V \lambda_H}{\lambda_\nu}$$

当满足重力相似时, 则有

$$\lambda_{Re} = \frac{\lambda_H^{\frac{3}{2}}}{\lambda_\nu} \quad (1-9)$$

另一方面

$$\lambda_{Re} = \frac{\frac{V_p H_p}{\nu_p}}{\frac{V_m H_m}{\nu_m}} \leq \frac{\frac{V_p H_p}{\nu_p}}{60 c_{om} \frac{H_m}{\Delta_m}}$$

或 
$$\lambda_{Re} \leq \frac{V_p \Delta_m}{60 c_{om} \nu_p} \lambda_H \quad (1-10)$$

联结 (1-9) 和 (1-10) 二式, 得

$$\lambda_H \leq \left( \frac{v_p \Delta_m}{60 c_{om} \nu_m} \right)^2$$

当满足阻力相似时

$$\lambda_{Co} = \left( \frac{\lambda_L}{\lambda_H} \right)^{\frac{1}{2}}$$

又因张有龄公式给出

$$C_o = 6.75 \left( \frac{H}{\Delta} \right)^{\frac{1}{16}}$$

故 
$$\lambda_{Co} = \left( \frac{\lambda_H}{\lambda_\Delta} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (1-11)$$

或 
$$\lambda_\Delta = \frac{\lambda_H}{\lambda_{Co}^8} = \frac{\lambda^4 H}{\lambda^3 L}$$

又因 
$$\Delta_m = \frac{\Delta p}{\lambda_\Delta}, \quad c_{om} = \frac{C_{op}}{\lambda_{Co}}$$

由此得最小水深比尺判据如下:

$$\lambda_H \leq \left( \frac{v_p \Delta p}{60 c_{op} \nu_m} \right)^{\frac{1}{8}} \lambda_L^{\frac{7}{10}} \quad (1-12)$$

对于正态模型, 则因  $\lambda_H = \lambda_L$  而有

$$\lambda_H \leq \left( \frac{v_p \Delta p}{60 c_{op} \nu_m} \right)^{\frac{10}{3}} \quad (1-13)$$

上述二式即为确定同时满足重力相似和阻力相似的最小水深比尺判据。

综上所述, 确定水流相似的条件是 (1-4)、(1-5) 和 (1-12) 三式。

## 2. 底沙运动的相似

目前文献中关于确定底沙流量的公式虽然很多, 但都难于用其确定底沙模型律。一部分公式系纯经验公式, 运用范围很小; 另一部分公式虽然具有一定的理论基础, 但不仅其结构异常复杂, 而且与室内及现场实测资料的符合程度还很不理想。因此为了解决底沙的模型

律, 必须探求新的底沙公式。

单位时间内在单位面积上水流具有的能量为  $\rho g i H v$ , 其中  $\rho$  为水的密度,  $g$  为重力加速度,  $i$  为比降,  $H$  为水深。水流的能量在运动过程中一部分消耗于克服河床阻力, 一部分通过脉动能量悬浮泥沙, 另一部分则用以输移底沙。  $K$  表示总能量中用以输移底沙的部分, 则单位时间内在单位面积河床上作用于底沙的能量  $E_{底}$  则为:

$$E_{底} = K \rho g i H v \quad (2-1)$$

式中  $v$  为流速, 当  $v$  小于临界起动流速  $v_k$  时, 水流能量不足以冲动床沙, 因而底沙输移量为零。只有当水流能量超过  $K \rho g i H v_k$  时才有底沙输移。当我们讨论河床上某一范围, 其中具有  $n_1$  颗沙粒, 则其面积为  $\frac{n_1}{m} \frac{\pi}{4} d^2$ , 其中  $m$  为沙粒平面密实系数,  $d$  为粒径。如果从讨论范围的床面上移走的泥沙颗粒数目用  $n_2$  表示, 跳离床面时的速度用  $v_s$  表示, 则可以写出:

$$K \rho g i H (v - v_k) \frac{n_1}{m} \frac{\pi}{4} d^2 = n_2 \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g v_s \quad (2-2)$$

式中:  $\rho_s$  为沙粒密度。

当底沙正常输移时, 即床面不发生冲刷和淤积时, 单位时间内从床面上冲起的泥沙数量应当等于同时间内落到床面上的数量, 即:

$$n_2 v_s = n_3 w \quad (2-3)$$

式中  $n_3$  为讨论范围内在床面上运动的泥沙颗粒数目,  $w$  为沉速。

如果  $k_1 v$  表示运动着的底沙的移动速度, 则底沙单宽输移量应为:

$$q_{sb} = \gamma_s \frac{n_3}{n} \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\pi}{6} d^3 k_1 v \quad (2-4)$$

其中  $\gamma_s$  为泥沙颗粒容重。

联解 (2-2) 和 (2-3), 求出  $n_3$ , 再代入 (2-4), 化简后得底沙单宽流量公式如下:

$$q_{sb} = k k_1 \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{g i H (v - v_k) v}{g w} \quad (2-5)$$

或者写做:

$$q_{sb} = \frac{k_0}{c_0^2} \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} (v - v_k) \frac{v^3}{g w} \quad (2-6)$$

式中:  $k_0$  为综合系数 ( $k_0 = k k_1$ ),  $c_0$  为无尺度谢才系数 ( $c_0 = \frac{v}{\sqrt{g H i}}$ ),  $\gamma_s$  和  $\gamma$  分别为泥沙颗粒和水的容重,  $v$  为平均流速,  $v_k$  为用平均流速表示的泥沙起动临界流速 (即基本不动时的临界流速),  $g$  为重力加速度,  $w$  为泥沙颗粒沉速。

式中无尺度谢才系数  $c_0$ , 根据我们对紊动水流结构的研究结果, 对于阻力平方区得到如下的公式:

$$c_0 = 2.5 \ln \left( 11 \frac{H}{\Delta} \right) \quad (2-7)$$

式中  $\Delta$  为床面糙率高度, 对于平整河床当底沙粒径大于 0.5 毫米时近似取  $\Delta = d_{50}$ , 当底沙粒径小于 0.5 毫米时, 取  $\Delta \approx 0.5$  毫米。当然在已知糙率系数  $n$  的情况下, 也可以用满宁公

式予以确定。

$$\text{即 } C_o = \frac{1}{\sqrt{g n}} H^{\frac{1}{6}} \quad (2-7)$$

为了检验底沙流量公式(2-6)，我们引用了盖勃特和岗恰洛夫等人的水槽试验资料，得到了较好的结果。根据这些水槽资料得到式中的综合系数 $K_o=0.1$ 。

应当指出，从河床上冲起的泥沙，一部分在床面上推移，另一部分跳离床面以临底悬浮状态输移。在水槽中测得的底沙流量，实际上是这两部分的总和，即全部底沙输移量。在现场测验中，推移质采样器则往往只能测得床面上推移的那一部分沙量，而以临底悬移的那部分底沙，则往往包括在悬移质中，即组成所谓的床沙质部分。因此在使用现场实测资料对公式(2-6)进行检验时，必须引用床沙质和推移质两部分资料。用长江宜昌、青山等测站的床沙质资料对公式(2-6)进行的检验表明，点据基本上成 $45^\circ$ 线分布，说明公式结构反映了实际规律。公式中的系数为0.09。利用宜昌站推移质采样器测得的资料与公式(2-6)进行的对比表明，点据分布也较好，系数为0.01。很明显，将这两部分泥沙综合在一起，系数即为 $0.09+0.01=0.1$ 与室内试验资料完全一致。由此可见，公式(2-6)不仅与水槽情况符合，而且与宜昌站实测资料一致，说明可以利用公式(2-6)来确定底沙比尺。附带指出，这个底沙公式同我们以前通过统计理论导得的底沙公式，在数量上很接近<sup>(2)</sup>。

$$\lambda_{usb} = \frac{\lambda_{ys}}{\lambda_{ys} - \gamma} \frac{\lambda_v^4}{\lambda_{co}^2 \lambda_w} \quad (2-8)$$

$$\lambda_v = \lambda_{vk} \quad (2-9)$$

由于底沙而引起的河床变形方程为

$$\frac{\partial q_{sb}}{\partial x} = -\gamma_o \frac{\partial z}{\partial t}$$

式中： $\gamma_o$ 为泥沙的干容量， $z$ 为床面高程， $t$ 为变形时间。

由此底沙冲淤时间比尺 $\lambda_{t1}$ ：

$$\lambda_{t1} = \frac{\lambda \gamma_o \lambda_H \lambda_L}{\lambda q_{sb}} \quad (2-10)$$

式(2-6)所表明的起动相似，是底沙运动相似的基本前提，没有这一相似，输沙量也就不可能相似。为了确定起动相似，需要引用起动流速公式。根据我们以前的研究，从理论上导得用瞬时流速表示的起动条件为<sup>(3)</sup>：

$$v_k = \sqrt{\frac{2\alpha_1 l_3}{\alpha_2 l_1 \lambda_x + \alpha_3 l_2 \lambda_y}} \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d + \frac{k_P k_A}{\alpha_1} \left( \frac{l_4}{l_3} \frac{c_c}{\rho d^2} + \frac{l_5}{l_3} \frac{F_{*e}}{\rho d^2} \right)} \quad (2-11)$$

$$\text{其中 } \alpha_1 = \frac{\pi}{6}, \alpha_2 = \frac{\pi}{4} \times \frac{2}{3} = \frac{2\pi}{9}, \alpha_3 = \frac{\pi}{4} \times \frac{3}{3} \times \frac{4}{3} = \frac{\pi}{3}$$

$$l_1 = \frac{1}{2} \times \frac{2}{3} d = \frac{d}{3}, l_2 = \frac{1}{2} d, l_3 = k_4 = l_6 = \frac{d}{2}$$

$$K_P = K_A = 0.25, C_o = p e_k d, F_{*e} = \gamma H d \delta$$

将上述各值代入后得

$$v_k = 1.9 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d + 0.19 \frac{e_k + g H \delta}{d}}$$

式中 $\gamma_s$ 和 $\gamma$ 分别为泥沙颗粒和水的容重， $g$ 为重力加速度， $d$ 为粒径，对于非均匀沙用

$d_{60}$ 表示,  $\epsilon_k$ 为粘结力参数,  $\delta$ 为薄膜水参数。

根据起动的不同情况可以写出时均底流速与瞬时底流速间之关系。由于脉动流速为其均方根的三倍时, 即  $v' = 3\sqrt{v'^2}$  实为最大脉动流速, 故当  $V_{AK} = \bar{v}_{Ak} + 3\sqrt{v'^2}$  时, 为泥沙除个别颗粒可动外, 处于基本不动的将动未动的临界状态 (用  $v_k$  表示), 此时输沙量接近于零。由此得:

$$V_{AK} = \bar{V}_{AK} + 3\sqrt{\bar{V}_{AK}^2} = \bar{V}_{AK} + 3 \times (0.3\bar{V}_{AK}) = 2.11\bar{v}_{Ak}$$

其中脉动流速均方根约等于 0.37 时均底流速。

$$\text{当 } V_{AK} = \bar{V}_{AK} + 2\sqrt{\bar{V}_{AK}^2} = \bar{V}_{AK} + 2 \times (0.37\bar{V}_{AK}) = 1.74\bar{V}_{AK} \text{ 时}$$

由于出现的频率增大, 泥沙已有少量起动, 用  $v_{1k}$  表示, 水槽试验中常常将此种状态的流速称之为起动流速。

当  $v_{Ak} = \bar{v}_A + \sqrt{v'^2} = \bar{v}_{Ak} + 0.37\bar{v}_{Ak} = 1.37\bar{v}_{Ak}$  时, 泥沙已显著移动, 或称普遍动的阶段 (用  $v_{2k}$  表示), 试验中有时亦将此种状态下的流速定为起动流速。

根据我们导得的流速分布公式, 在距床面  $\Delta$  点的流速  $\bar{v}_A$  与垂线平均流速  $v$  间的关系为:

$$\bar{V}_A = 8.50 v_* = \frac{8.50}{c_v} v$$

$$\text{而 } c_v = 2.5 \ln 11 \frac{H}{\Delta}$$

故可写出

$$v_k = m \left( \ln 11 \frac{H}{\Delta} \right) \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d + 0.19 \frac{\epsilon_k + g H \delta}{d}} \quad (2-13)$$

当泥沙颗粒处于将动未动的临界状态时,  $m = 0.265$

当泥沙颗粒处于少量动的起动状态时,  $m = 0.320$

当泥沙处于普遍动的起动状态时,  $m = 0.408$

底沙公式中的临界起动流速  $v_k$  相应于  $m = 0.265$  时的情况, 而通常所说的起动流速  $v_{1k}$  或  $v_{2k}$  则分别相应于  $m = 0.320$  和  $m = 0.408$  时的情况。

对于天然沙  $\epsilon_k = 2.56 \text{ 厘米}^3/\text{秒}^2$ , 对于无明显粘性的颗粒, 如塑料,  $\epsilon_k = 0$ , 对于电木粉, 当未露出水面固结时, 基本无粘性,  $\epsilon_k$  也等于零。

$\delta$  为薄膜水厚度, 其值为  $0.21 \times 10^{-4} \text{ cm}$

为了便于写成比尺形式, (2-13) 式又可改为

$$v_k = 0.265 \varphi \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} \quad (2-14)$$

其中:

$$\varphi = \left( \ln 11 \frac{H}{\Delta} \right) \sqrt{1 + 0.19 \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{\epsilon_k + g H \delta}{g d^2}} \quad (2-15)$$

因此起动流速比尺为:

$$\lambda_{v_k} = \lambda_\varphi \lambda_{\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma}}^{\frac{1}{2}} \lambda_d^{\frac{1}{2}} \quad (2-16)$$

其中:

$$\lambda_\varphi = \frac{\left[ \left( \ln 11 \frac{H}{\Delta} \right) \sqrt{1 + 0.19 \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{\epsilon_k + g H \delta}{g d^2}} \right]_{\text{天然}}}{\left[ \left( \ln 11 \frac{H}{\Delta} \right) \sqrt{1 + 0.19 \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{\epsilon_k + g H \delta}{g d^2}} \right]_{\text{模型}}} \quad (1-17)$$

综上所述, 确定底沙相似的基本条件为起动相似 (2—9) 和 (2—16), 输沙量相似 (2—8) 和冲淤时间相似 (2—10)。由于沙质底沙有可能处于半悬浮状态, 最好还能满足落淤部位相似 (详见下文), 即  $\lambda_m = \lambda_v \frac{\lambda_H}{\lambda_L}$  (2—18)

由于卵石基本上在床面附近运动, (2—18) 式则可以不考虑。

### 3. 悬沙运动的相似

由于悬移质泥沙在运动过程中有超饱和和不饱和问题。它的挟沙能力与真实输沙量间往往有很大差别。因此在模拟悬沙运动时, 单纯模拟挟沙能力是不够的。根据我们以前对悬沙运动的研究, 恒定流的悬沙输移方程式具有如下形式<sup>(4)</sup>:

$$\frac{\partial(QS)}{\partial x} = \alpha w S_* B - \alpha w S B \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial(QS)}{\partial x} = -\gamma_o B \frac{\partial z}{\partial t} \quad (3-2)$$

式中:  $Q$ —流量,  $S$ —用重量比表示的含沙量,  $\alpha$ —沉降机率,  $S_*$ —挟沙能力,  $B$ —河宽,  $z$ —床面高程, 其它符号同前。

根据 (3—1) 式得悬沙相似条件如下:

$$\lambda_m = \lambda_v \frac{\lambda_H}{\lambda_o \lambda_L} \quad (3-3)$$

$$\lambda_S = \lambda_{S*} \quad (3-4)$$

前者可以称之为沉降相似, 后者为挟沙能力相似。

应当指出, 沉降相似和挟沙能力相似, 只是悬沙运动相似的必要条件, 还不是充分条件。为了使模型与原体悬沙运动相似, 还必满足扬动相似。后者意味着原型中泥沙能够悬浮时模型中泥沙也应当悬浮。如果用  $v_f$  表示扬动流速, 则扬动的相似条件为:

$$\lambda_{v_f} = \lambda_v \quad (3-5)$$

目前关于扬动流速的研究还较少, 根据我们的认识, 可以由下式确定:

$$v_f = 1.5 \ln 11 \frac{H}{\Delta} \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} \quad (3-6)$$

式中:  $H$  为水深;  $\Delta$  为糙率, 对于平整床面当  $d \leq 0.5 \text{ mm}$  时,  $\Delta = 0.5 \text{ mm}$ , 当  $d > 0.5 \text{ mm}$  时,  $\Delta = d$ ;  $\gamma_s$  和  $\gamma$  分别为泥沙颗粒和水的容重,  $g$  为重力加速度;  $d$  为粒径 (不均匀沙用  $d_{50}$  表示)。当按上式计算扬动流速时, 如果其值小于按起动流速公式 (2—13) 所得的  $v_{2k}$  值时, 则扬动流速即应取其等于  $v_{2k}$  值, 即  $v_f = v_{2k}$ , 并按 (2—13) 式计算。在这种情况下, 泥沙只要显著起动就能悬浮。在通常遇到的河道输沙情况下, 沉降机率  $\alpha$  在模型中与在原型中接近, 即  $\lambda_o \approx 1$ , 因此在多数情况下 (3—3) 式可以写做

$$\lambda_m = \lambda_v \frac{\lambda_H}{\lambda_L} \quad (3-3)$$

由 (3—2) 式可以得到悬沙冲淤时间比尺  $\lambda_{t2}$

$$\lambda_{t2} = \frac{\lambda_{\gamma_o} \lambda_L}{\lambda_v \lambda_s} \quad (3-7)$$

关于悬移质挟沙能力相似问题, 也很难利用现有公式确定, 但我们可以沿用维立干诺夫<sup>(6)</sup>和巴连布拉特<sup>(6)</sup>的理论途径, 进行探讨。按照维立干诺夫的观点, 水流在悬浮泥沙时要消耗



一部分能量，其值等于泥沙的悬浮功。因而可以写出：

$$k\rho giv=(\rho_s-\rho)g\omega s_v \quad (3-8)$$

式中之 $s_v$ 系用体积浓度表示的含沙量（ $s=\gamma_s s_v$ ）， $k$ 为系数。公式左边表示单位水体在单位时间内在悬浮泥沙上所消耗的能量，公式右边为单位水体在单位时间内的悬浮功。由上述可以得到用重量比含沙量表示的挟沙能力：

$$S_* = k \frac{\gamma \gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{iv}{w} \quad (3-9)$$

或者写做

$$S_* = \frac{k}{c_0^2} \frac{\gamma \gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{v^3}{gHw} \quad (3-10)$$

此式与维立干诺夫挟沙能力公式 $S_* = k \frac{v^3}{gHw}$ 相比，后者中的系数 $k$ 应不是常值。巴连布拉特的理论较为严密，他获得的方程式如下：

$$-\rho \overline{v_x' v_z'} \frac{d\overline{v_x}}{dy} = \frac{1}{2} \overline{T' \epsilon_{ij}} + (\rho_s - \rho) g \omega s_v \quad (3-11)$$

式中左边项表示时均水流提供的脉动能量，右边第一项表示脉动水流为克服阻力所消耗的能量，第二项表示脉动水流为悬浮泥沙而消耗的能量。

我们如将（3-11）式沿水深积分，仍可得到与维立干诺夫公式相近的结果，即：

$$\rho givH = \int_0^H \frac{1}{2} \overline{T' \epsilon_{ij}} + (\rho_s - \rho) g \omega s_v H \quad (3-12)$$

利用（3-10）和利用（3-12）式，我们均可得到

$$\lambda_{S*} = \frac{\lambda \gamma_s}{\lambda_{\gamma_s - \gamma}} \frac{\lambda_i \lambda_v}{\lambda_w} \quad (3-13)$$

在重力和阻力相似条件下 $\lambda_i = \frac{\lambda_H}{\lambda_L}$ 在沉降相似条件下 $\lambda_w = \lambda_v \frac{\lambda_H}{\lambda_L}$ ，故知 $\frac{\lambda_i \lambda_v}{\lambda_w} = 1$ ，因而有

$$\lambda_{S*} = \frac{\lambda \gamma_s}{\lambda_{\gamma_s - \gamma}} \quad (3-14)$$

沉速与颗粒间的统一关系可由下式确定：

$$w = \sqrt{\frac{4}{3C_d} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} \quad (3-15)$$

式中之 $C_d$ 为颗粒沉降阻力系数，其值随雷诺数 $\frac{wd}{v}$ 的变化而变化，根据我们的研究，其表述为<sup>(7)</sup>

$$C_d = 0.43 \sin^2 \theta + \frac{12(1 + \cos \theta)}{\frac{dw}{v}} \left( 1 + \frac{3}{16} \frac{wd}{v} \right) \quad (3-16)$$

其中 $\theta$ 为绕流分离角，其值随雷诺数而变化。

此式是从理论上导得的一个较为精确的表达式，然而用其直接确定模型比尺尚感不便。在近似表述中， $C_d$ 值可用如下的简单的指数关系表示：

$$C_d = \frac{\alpha}{\left( \frac{wd}{v} \right)^\beta} \quad (3-17)$$

式中  $\theta$  和  $\beta$  均随雷诺数的变化而改变, 但在一定的雷诺数变化范围内, 可近似取其为常值。 $\beta$  值的变化范围为  $1 \sim 0$ 。对于球体颗粒, 当  $\frac{wd}{v} < 0.25$  时, 亦即当比重为 2.65 之颗粒小于 0.1 毫米时,  $\alpha = 24, \beta = 1$ 。当  $\frac{wd}{v} > 850$  时, 亦即当比重为 2.65 之颗粒大于 2 毫米时,  $\alpha = 0.43, \beta = 0$ 。

由 (3—15) 可以写出沉速比尺表述式:

$$\lambda_w = \frac{\lambda^{\frac{1}{2}}_{\gamma_s - \gamma} \lambda_d}{\lambda^{\frac{1}{2}}_{\omega}} \quad (3-18)$$

由 (3—17) 可以写出阻力系数  $C_d$  的比尺表述式:

$$\lambda_{cd} = \frac{\lambda^{\beta}_v}{\lambda^{\beta}_{\omega} \lambda^{\beta}_d} \quad (3-19)$$

将 (3—19) 代入 (3—18) 后得粒径比尺与沉速比尺之关系如下:

$$\lambda_d = \frac{\lambda^{\frac{\beta}{1+\beta}}_{\frac{1}{v}} \lambda^{\frac{2-\beta}{1+\beta}}_{\frac{1}{\omega}}}{\lambda^{\frac{1}{1+\beta}}_{\frac{1}{\gamma_s - \gamma}}} \quad (3-20)$$

对于细颗粒泥沙, 由于  $\beta = 1$  而有

$$\lambda_d = \frac{\lambda^{\frac{1}{2}}_{\frac{1}{v}} \lambda^{\frac{1}{2}}_{\frac{1}{\omega}}}{\lambda^{\frac{1}{2}}_{\frac{1}{\gamma_s - \gamma}}} \quad (3-21)$$

对于粗颗粒泥沙由于  $\beta = 0$  而有

$$\lambda_d = \frac{\lambda^2_w}{\lambda_{\gamma_s - \gamma}} \quad (3-22)$$

对于过渡区之颗粒, 则可根据具体情况确定  $\beta$  值后得出粒径比尺。

综上所述, 确定悬沙运动及其冲淤相似的基本条件有四, 即沉降相似 (3—3'), 扬动相似 (3—5), 挟沙能力相似 (3—14) 和冲淤时间相似 (3—7)。

#### 4. 异重流相似

长江的悬沙颗粒较细, 水深较大, 在一定区域能够形成异重流。因此模型需要满足异重流输沙的相似条件。根据我们对异重流的认识, 其发生条件为

$$\frac{v^2}{\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma'} gH} = K \quad (4-1)$$

异重流速度为

$$V_s = C_{\text{reg}} \sqrt{\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma'} gH_s i_s} \quad (4-2)$$

异重流输沙量的沿程变化为

$$\frac{\partial(V_s S H_s)}{\partial x} = w s \quad (4-3)$$

异重流的淤积时间比尺为

$$\frac{\partial(V_s S H_s)}{\partial x} = -\gamma_s \frac{\partial z}{\partial t} \quad (4-4)$$

在上述公式中:  $\gamma'$ —浑水容重,  $V$ ,  $V_e$ —异重流速度,  $C_{os}$ —异重流无尺度谢才系数,  $H_e$ —异重流厚度,  $i_e$ —异重流比降。  $\gamma_o$ —淤积泥沙干容重, 其它符号同前。将(4—1)写做比尺形式, 则有

$$\lambda_v^2 = \frac{\lambda_{\gamma'} - \gamma}{\lambda_r} \lambda_H \quad (4-1')$$

在满足重力相似条件下, 由(4—1')得异重流发生的相似条件为

$$\lambda_{\gamma'} = 1 \quad (4-5)$$

由于  $r' = r + \left(\frac{r_s - r}{r_s}\right)S$ , 故异重流发生的相似条件也可以写做

$$\lambda_s = \frac{\lambda_{\gamma_s}}{\lambda_{\gamma_s - \gamma}} \quad (4-5')$$

在异重流相似时, 异重流速度的比尺应与水流速度比尺相同, 并考虑到(4—5), 得异重流的阻力相似条件为

$$\lambda_{C_{oe}} = \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_H}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-6)$$

$$\lambda_w = \lambda_v \frac{\lambda_H}{\lambda_L} \quad (4-7)$$

由(4—4)得异重流的淤积时间比尺  $\lambda_{ts}$  为

$$\lambda_{ts} = \frac{\lambda_{\gamma_o}}{\lambda_s^{3/2}} \frac{\lambda_L}{\lambda_{r_s - r}^{1/2}} \frac{\lambda_{\gamma_s}^{1/2}}{\lambda_H^{1/2}} \quad (4-8)$$

(4—5)~(4—8)四式是决定异重流相似的四个条件, 其中关键的一个是(4—5)式, 即要求模型与原型浑水容重相同。

### 5. 悬沙与底沙统一问题

悬沙与底沙, 包括异重流和卵石在内, 能否在同一个模型上复演的问题, 关键在于冲淤时间比尺能否一致。底沙悬沙和异重流的冲淤时间比尺分别由(2—10)、(3—5)和(4—8)三式确定。问题在于探求在什么条件下三者可以统一起来。

将(2—8)代入(2—10)后可以写出底沙(包括卵石)的时间比尺:

$$\lambda_{t1} = \frac{\lambda_{\gamma_o} \lambda_H \lambda_L \lambda_{C_{oe}}^2 \lambda_w \lambda_{\gamma_s - \gamma}}{\lambda_{\gamma_s} \lambda_v^4} \quad (5-1)$$

在满足重力相似情况下,  $\lambda_H = \lambda_v^2$ , 在满足阻力相似条件下

$$\lambda_{C_{oe}}^2 = \frac{\lambda_L}{\lambda_H}$$

因有

$$\lambda_{t1} = \frac{\lambda_{\gamma_o} \lambda_L \frac{\lambda_L}{\lambda_H} \lambda_w \lambda_{\gamma_s - \gamma}}{\lambda_{\gamma_s} \lambda_v^2} \quad (5-2)$$

当悬沙的含沙量用(3—14)确定时, 悬沙的冲淤时间比尺为

$$\lambda_{t2} = \frac{\lambda_{\gamma_o} \lambda_L \lambda_{\gamma_s - \gamma}}{\lambda_{\gamma_s} \lambda_v} \quad (5-3)$$

而在利用(3—14)确定含沙量的情况下异重流的淤积时间比尺  $t_s$  由(4—8)式得:

$$\lambda_{ts} = \frac{\lambda_{\gamma_o} \lambda_L \lambda_{\gamma_s - \gamma}}{\lambda_{\gamma_s} \lambda_v} \quad (5-4)$$

即异重流时间比尺与悬沙时间比尺相同。由此可知, 含沙量比尺  $\lambda_s = \frac{\lambda_{rs}}{\lambda_{rs}-\gamma}$  是悬沙和异重流同时相似的必要条件。

从 (5—2) 和 (5—3) 的对比中可以看到, 如果底沙的沉降比尺也同悬沙的沉降比尺 (3—3) 一样, 即  $\lambda_{\frac{\lambda_L}{\lambda_H}} = \lambda_v$ , 则底沙与悬沙的冲淤时间比尺就完全一致。

由此可见, 只要水流、悬沙、底沙都能满足相似要求, 即同时满足重力相似、阻力相似、起动相似, 沉降相似和输沙量相似时, 底沙、悬沙和异重流的时间比尺就完全一致, 因而就可以在一个模型中同时复演全部泥沙及其冲淤情况。

### 三、模型设计实例

根据前边获得的水流和泥沙相似的一系列条件, 我们设计了某工程坝区全沙模型。上述相似条件是选择模型沙和确定模型比尺时的基本依据, 但由于天然情况非常复杂, 完全满足上述要求是困难的只能尽量满足主要条件, 照顾次要条件。

#### 1. 模型比尺

由于本模型要复演长16公里河段的水流和泥沙情况, 且又是一个有枢纽的模型, 所以重力和阻力相似, 需要同时满足。河段的悬沙级配分布较广, 多年平均中值粒径为0.034毫米, 其中大于0.1毫米的床沙质部分约占10%以上, 这部分泥沙处于临底悬浮状态。此外有沙质推移质和卵石推移质沿床面运动。临底悬移和滚动的细沙以及卵石, 均可以看做是底沙输移。沙质推移质的多年平均中值粒径约为0.175毫米, 而卵石的平均中值粒径约为24.0毫米。本河段的河床糙率, 沿程逐渐减小, 以下洄为最小, 其汛期满宁糙率系数  $n \approx 0.025$ 。

根据原型的上述情况, 我们首先对模型沙进行了选择, 其中特别注意其粒径级配要广泛, 起动流速要小。经过对数种模型沙进行试验后, 认为电木粉能够基本满足要求, 其比重为  $1.47/m^3$  中值粒径约为0.14毫米的电木粉, 起动流速约为6~7厘米/秒, 糙率系数约为0.016。电木粉的级配分布很广泛, 粗的可达10毫米以上, 细的可以做到0.01毫米以下, 这种起动流速小, 级配广的模型沙有可能模拟包括悬沙、底沙、卵石在内的全部泥沙, 关键在于选择合适的模型比尺。

在确定模型平面比尺时, 既考虑场地条件, 也考虑到模型不宜过大, 否则操作将十分困难。因此初步确定  $\lambda_L = 200$ 。

汛期本河段在15000立米/秒流量时 (相当于多年平均流量), 河段的原体情况是:  $V_p \approx 1.75$ 米/秒,  $H_p \approx 11$ 米,  $n_p \approx 0.025$ ,  $C_{s,p} \approx 19.0$ ,  $\Delta p \approx 2.2$ 厘米。将这些数值代入确定最小水深比尺的 (1—12) 式后得

$$\lambda_H < \left( \frac{1.75 \times 2.2}{60 \times 19 \times 0.01} \right)^{1/5} (200)^{7/10} = 90.2 \approx 100 \text{ 因而为了保证水流相似, 水深比尺不能}$$

过小, 先取极限情况  $\lambda_H = 100$ 。

按此比尺校核模型沙的糙率能否符合要求。其标准是, 模型沙的糙率要小于或等于模型床面要求的最小糙率, 否则将无法保证阻力相似。因为当模型沙小于要求糙率时模型中可以加糙, 而大于要求时, 减糙是难于做到的。根据式 (1—7) 的条件, 得  $\lambda_n = 1.52$ , 即要求的模