

文章编号: 1001-6791(2001)03-0418-06

# 河工动床模型存在问题及其解决途径

张红武, 冯顺新

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

**摘要:** 河工模型是解决江河治理及大型水利水电工程泥沙问题的主要手段。本文研究了河工动床模型设计与试验过程中存在的几何变态、推移质泥沙级配选配、时间变态等问题, 并提出了相应的解决途径和建议。

**关键词:** 河工模型; 推移质模拟; 起动相似; 变态; 含沙量比尺

**中图分类号:** TV 152      **文献标识码:** A

从 1885 年 O. Reynolds 运用弗劳德相似律进行 Mersey 河相似模型试验起, 河工模型用于江河治理的历史已愈百年, 并发挥了巨大作用<sup>[1]</sup>。我国泥沙问题严重, 且相当普遍, 河工动床模型试验成为解决江河治理及大型水利工程泥沙问题的主要手段, 并大有日益倍加受到重视的势头。由于现有泥沙运动基本理论的不完善, 若以较高的标准来衡量, 相当一部分已经完成的和正在进行的泥沙动床模型, 在设计及试验过程中都存在这样或那样的问题。本文针对几何变态、泥沙起动相似、推移质泥沙模型阻力相似及进口加沙、泥沙悬移相似、含沙量比尺确定、时间变态等问题开展讨论, 并试图给出相应的解决途径及建议。

## 1 几何变态问题

以往书本上关于几何变态对流速场相似影响的讨论所依据的都是些理论上不十分成熟的方程和公式, 例如对数流速分布公式和谢才公式。由半经验公式推导相似条件所得出的结论有一定的局限性。我们的研究表明, 对于模型变率不可简单地限制为某一数值, 几何变率大小主要取决于原型河道宽深比和河床糙率。宽深比越大和糙率越小, 变率就可大一些, 否则, 变率就应小一些<sup>[2]</sup>。由大量试验资料看出, 只要适当选取变率, 模型变态对流速分布的影响是有限的<sup>[2]</sup>。同时也发现, 即使是正态模型, 当河床减糙后, 其流速沿垂线的分布与原型也有明显出入(某单位开展的葛洲坝水利枢纽模型验证结果就有类似情况)。

由于黄河模型必须做成变态的, 因而对几何变态影响问题有了较多的认识<sup>[3]</sup>。近几年来, 黄河水利科学研究院及清华大学完成的黄河花园口至东坝头河道整治模型<sup>[4]</sup>、小浪底至苏泗庄

收稿日期: 2000-01-07; 修订日期: 2000-11-18

基金项目: 全国高等院校优秀博士论文作者专项基金资助。

作者简介: 张红武 (1958 -), 男, 河南淮阳人, 清华大学教授, 博士生导师。主要从事河工模型相似理论及河流动力学研究。

河段模型、黄河宁夏河段模型等许多大型试验，其几何变率都大于6，由研究成果看，模型都较好地满足了原型水流泥沙运动相似、河床冲淤变形相似等条件。另一方面，随着三峡工程泥沙问题研究的不断深入，对模型变率问题开展了研究总结<sup>[5]</sup>，认为针对不同的模型试验研究目的要求和河道特性等因素采用变率为2~8.33，模型宽深比为5~30的变态模型，其流速、流态和河床冲淤规律与原型有可能达到基本相似。这一研究进展显然突破了传统的框框。

严格的正态模型，模型沙也应遵守几何相似的原理，原型泥沙较细时如模型沙粒径按几何比尺缩小，则会使模型沙的物理化学性质发生变化，并且粒径过细的粉末在紊动水流中会为最小涡体挟运，与原型悬沙中的粗颗粒沉浮有着质的差别，即存在着模型沙中床沙质及冲泻质比例失真等问题，从而很难保证悬移运动的相似性。因此对于悬移质泥沙动床模型，若不变态，模型沙很难选择。不少试验，由于模型悬移质运动的失真，难以保证研究成果的可靠性。这是动床模型变态确实必要的原因之一。笔者运用自然模型试验方法开展的一系列模型观测结果表明<sup>[3]</sup>，自然塑造成的模型小河，与天然河道的河相关系不是正态关系，而是变态关系，从而说明一般冲积河流的动床模型变态不仅是客观需要，也是必然产物。

## 2 泥沙起动相似条件把握难度问题

现有代表性的动床模型相似律，均把泥沙起动相似条件作为必要的组成部分<sup>[1]</sup>。然而由于推导起动流速比尺关系所依据的起动流速公式均是半经验半理论的，不仅没有得到天然河流资料的检验，而且即使是应用于水槽中的轻质沙，公式计算也会有较大出入，更不能同时适用于原型与模型。对卵石夹沙河床，问题相对简单；对沙质河床，起动流速公式中水深指数原型如为 $1/4 \sim 1/5$ ，而模型往往为 $1/6 \sim 1/7$ 。相似分析时若考虑两者差异，求得的粒径比尺将明显变小，常常与悬移质相似的要求值接近。因此，一般建立的比尺关系并不成熟，甚至出现所选出的模型沙起动流速随粒径的变化规律同原型沙相悖的错误。从这一角度看，严格做到泥沙起动相似是困难的。

大江大河河床泥沙起动与否无法确切判定，其模型泥沙起动相似与否实际上也无法确切判断。因此应借助其他手段大致确定原型起动流速，如①对于底沙模型，可点绘推移质输沙率与流速的关系线，顺延至输沙率为零时所对应的流速即为起动流速；②对于悬沙模型，可点绘床沙质含沙量与流速的关系线，同样含沙量为零时的流速为起动流速；或者借助求不同土质渠槽不冲流速的办法确定。至于模型沙起动流速应参照室内试验结果确定。再由两者之比，才能初步得出不太确切的起动流速比尺。这正是推移质泥沙模型实际上只能做到定性相似的原因之一（另一个原因是推移质输沙率测验精度不高）。

张俊华、张红武在试验中发现，模型沙起动流速与粒径并不是一一对应的，有的材料制成的模型沙的起动流速随着时间加长而有所增加。因此，进行模型设计时，不仅要根据初始状态来考虑泥沙起动相似，而且还要考虑模型长系列运转的需要。刘海凌、董年虎、赵新建等在开展黄河三门峡水库拦沙期下游冲刷验证试验时发现，即使人们认为电厂粉煤灰容重大，起动流速不会太小，但模型河床冲刷仍比原型严重。表明低估了天然河流泥沙的起动流速。50年代黄河下游河道计算曾采用了常见的泥沙起动流速公式，其结果认为，在桃花峪下游冲刷9年后，河床将冲深27 m，比后来实际发生的情况夸大甚多。综上所述，不管在设计时对模型沙起动流速的相似性如何论证，最终还要根据验证试验中河床冲淤的相似性来综合判断，起动相

似如只有少量偏差,对于河床变形的影响也可以通过其他比尺的调整得到弥补。尤其是悬移质运动造成的河床变形为主的多沙、细沙河流模型,更是如此。

### 3 推移质泥沙模型阻力相似及进口加沙问题

按照常规的办法开展推移质泥沙模型比尺计算是不困难的。特别是对于沙卵石河床组成的山区河流,有条件采用天然粗沙组成的粒径比尺等于比尺的完全正态模型,许多麻烦都可能自动消除。而遇到的主要问题往往是:对于大型平原沙质河流,当模型几何变率较大时,即使模型沙发生沙波,仍无法同时满足水流重力相似条件及阻力相似条件对糙率的要求。在这种无奈情况下,李昌华认为只有满足阻力相似条件而容许重力相似条件有偏差,亦即模型比尺主要按阻力相似、起动相似、单宽输沙率相似及河床变形相似4个条件来计算,设计完成后再验算偏离重力相似条件的程度,一般容许偏离20%~30%。这个于20世纪50年代中提出的近似解决办法<sup>[6]</sup>,直到今天,仍时有应用。其它则是一些技术细节处理上的问题。例如,模型沙为非均匀沙时的动床糙率的确定,对试验操作影响很大。模型沙一旦确定下来,在试验操作中再进行减糙或加糙都是极为困难的。以往非均匀模型沙的沙粒糙率的计算,往往选择级配曲线上的某一特征粒径(如 $D_{50}$ 、 $D_{65}$ 或 $D_{95}$ 等)。进一步的研究结果表明<sup>[3]</sup>,模型沙级配的不均匀性对于模型沙糙率的影响比较明显,级配曲线上某一特征粒径不易较为全面地反映非均匀沙的沙粒糙率变化。鉴于级配的不均匀性对平均粒径 $D_{cp}$ 的影响是敏感的,因而采用 $D_{cp}$ 代替 $D_{50}$ 或 $D_{65}$ 等,更能反映模型沙不均匀性对于模型沙糙率的影响。于是沙粒糙率公式的形式可以表示为

$$n = cD_{cp}^{1/6} \quad (1)$$

式中 $c$ 为一些与颗粒表面形状等因素有关的系数。根据张红武的有关试验资料,一般取 $c = 0.014$ ,但对于煤屑或其它棱角较多的模型沙,取 $c = 0.017$ 。 $D_{cp}$ 为平均粒径,mm,该式适用于 $D_{cp} = 0.5 \sim 12.5$  mm。

另一棘手的问题是模型试验时各流量级下如何加沙。一般讲,泥沙运动以推移为主要形式的河段,床沙粒配范围较广。对于枯水、中水、洪水每一级流量,所能输移的推移质泥沙的粒径及其组成有所差异,模型试验在各级流量的加沙量,如果加同一种模型沙,则在较小流量时,就会出现河床淤积偏多的情况(水流强度较低时,有些粗颗粒将因输移困难而淤积在河床上),表明各级流量的推移质泥沙的粒径及其级配是不同的,而实际上一般又缺少原型各流量级的实测推移质级配资料。曾有试验拟制了一个解决方法<sup>[3]</sup>,该法假定各流量级的推移质泥沙的级配应等于河床泥沙级配中在该流量能起动的最大粒径以下的全部颗粒。具体计算方法是,首先按梅叶—彼德的公式计算原型各级流量的最大起动粒径,并按粒径比尺 $\lambda_D$ 算出模型沙的最大起动粒径 $D_{max}$ ,然后在模型河床质级配曲线上,以各级流量的最大起动粒径值为上限,截取曲线下段作为该流量级的推移质级配曲线。亦即最大起动粒径值的含量视为100%,求其它粒径所占的百分比。

上述方法比常见的模型试验进口加同一种推移质甚至加床沙的作法前进了一步,但却未能考虑颗粒之间的隐蔽或制约作用。水槽试验发现,即使水流强度较大,一些粗颗粒也已起动,但仍有不少较小的颗粒因相互间的制约作用或受大颗粒的隐蔽作用而不能在水流的作用下位移<sup>[3]</sup>。人们获取的河床质泥沙级配资料,实际上又是床面下一定深度的泥沙资料,水流作用更

难将位于床面下一定深度的那部分细颗粒带走。所以，按上述方法选配各级流量下的推移质颗粒配曲线与实际有一定出入。为此，在前人方法的基础上，张红武提出了新的方法<sup>[3]</sup>。即首先按照下式求出各级流量下的原型床面颗粒平均粒径<sup>[7]</sup>

$$D_{cp} = 11.137 \frac{HJ}{(\gamma_s - \gamma)/\gamma} \quad (2)$$

式中  $H$  为平均水深； $J$  为水流能坡； $\gamma_s$ 、 $\gamma$  为泥沙及水流容重。

大量实测资料的验证结果表明，上式适用于冲积河流的上游河段。例如，黄河兰州河段刘家堡附近平均水深  $H = 4.75$  m，河床比降为 1‰，能坡  $J$  约为 1.2‰，河床表层(0-2 m)颗粒的平均粒径  $D_{cp} = 35.96$  mm， $\gamma_s = 2.74$  t/m<sup>3</sup>，由上式计算得到的平均粒径等于 36.48 mm，其结果与实际颇为接近。如计算值与河道实测值有偏差时，可根据原型资料，对式(2)中的系数进行率定后再予采用。

以计算得到的平均粒径除以实测的河床质平均粒径，其值作为确定推移质粒径的系数，继而用此值同乘以河床质各组粒径值，对应的级配百分数不变，可得到该条件下的推移质级配曲线，由粒径比尺  $\lambda_D$  换算，即求出模型沙的级配曲线。按新方法得到的级配曲线与河床质级配曲线平行，能够反映出推移质诸粒径组所占百分数与原河床组成状况的密切关系，这一实际状况也反映了颗粒之间的制约作用或隐蔽作用。采用实例计算后表明，经上述两个方法得到的推移质粒配曲线上部相差不多，但在  $D_{50}$  以下的颗粒，前者所得结果与后者差别较大，表现在同一粒径所对应的沙重百分数大于后者，而且随着粒径的减小，这种差距就越大，显然这一差距是没有考虑或考虑了颗粒之间的制约作用及隐蔽作用造成的。经笔者开展的洛河寻峪沟泥沙治理模型试验检验，该方法与实测资料颇为接近。刘有录等在黄河上游兰州河段河道整治模型试验中，成功地使用了这一方法<sup>[8]</sup> (图1)。最近，曹丰生、李远发、姚振华及王仲梅等开展的伊河、洛河动床模型试验，对此也进行了初步检验。

这个问题比较复杂，除了上述方法外，彭润泽等<sup>[9]</sup>还提出了水槽试验模拟法，直接从水槽试验得出不同流量级的推移质粒配及输沙率。

#### 4 含沙量比尺确定问题

悬移质泥沙模型试验另一个重要而且十分棘手的问题是如何确定含沙量比尺  $\lambda_s$ ，在国内开展的少沙河流的悬移质动床模型试验中，无论正态或变态，广泛采用下式计算  $\lambda_s$  和挟沙力比尺  $\lambda_{sc}$ ，即：

$$\lambda_{s_c} = \lambda_{\gamma_s} / (\lambda_{\gamma_s} - \gamma) \quad (3)$$

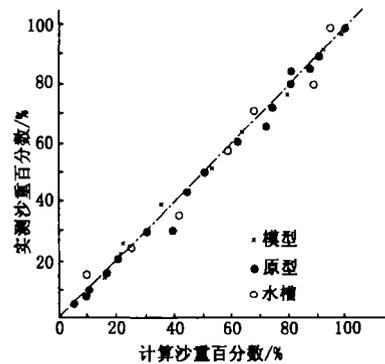


图1 推移质模型进口泥沙级配确定方法与实测资料的比较

Fig.1. Comparison between the filed observed and the computed compositions of bed load material by the approach proposed in this paper.

对于轻质沙,由该式计算得到的 $\lambda_s$ 或 $\lambda_{s'}$ 小于1(意味着要求模型中的含沙量比原型的大)。轻质沙容重越小, $\lambda_s$ 愈小,采用河床冲淤相似条件求出的时间比尺愈大,模型放水历时大大缩短,从而提高工效很多,为开展若干年的长系列模型试验提供了方便。长江科学院为检验三峡工程库尾变动回水区泥沙模型试验成果的可靠性,利用丹江口水库变动回水区油房沟河段泥沙模型,间接开展了验证试验。结果表明,采用根据上式确定的含沙量比尺 $\lambda_s$ ,其试验结果能够较好地复演河段的冲淤变化规律。不过,对于多沙河流的模型,由李保如、屈孟浩、张红武、彭瑞善、刘有录、姚文艺、刘海凌、张俊华、陈书奎的试验结果表明,多沙河流模型的含沙量比尺必须大于1。河海大学及西北水科所在开展黄河壶口通航工程有关泥沙模型的率定试验时,也不得不将含沙量比尺由小到大进行调整,最后甚至确定为5,表明多沙河流悬沙模型,不能采用式(3)求含沙量比尺。

此外,少沙河流模型也有不采用上式确定含沙量比尺的,例如长江科学院唐日长等在开展葛洲坝工程坝区泥沙模型设计时,正确地指出利用水流挟沙力公式推求比尺关系式,不能简单地取挟沙系数等于1。选株州精煤为模型沙,在难以确切推求的前提下,确定的含沙量比尺 $\lambda_s = 1$ 。近些年梁中贤、魏国远等开展的三峡泥沙模型也采用了与上述葛洲坝枢纽坝区模型相同的设计方法和模型沙,取 $\lambda_s = 1$ ,取得了较好的试验结果。而长江科学院殷瑞兰等在南水北调中线穿黄工程研究进行的多沙河流模型试验,证明 $\lambda_s$ 大于1。

挟沙能力相似是多沙河流模型的关键,以往书本上导出的 $\lambda_s$ ,往往是依照半经验的水流挟沙力公式,并引入挟沙系数比尺等于1和指数等于1的假定<sup>[1]</sup>,所得含沙量比尺局限性很大,容易形成误解。因此对于上式应留有很大的余地。模型设计时建议由 $\lambda_s = \lambda_{s'} = S_{*p}/S_{*m}$ 的途径确定含沙量比尺( $S_*$ 为水流挟沙力)或用同时适用于原型和模型的水流挟沙力公式求 $\lambda_s$ 。含沙量 $S$ 是求 $S_*$ 的重要条件,充分考虑含沙量的影响是计算水流挟沙力公式成功的关键。目前,与实际资料较为符合的水流挟沙力公式无一不是如此。

严格进行过验证试验的多沙河道泥沙模型,其 $\lambda_s$ 基本上都大于1。水库泥沙模型往往由于原型为拟建工程而很难经过验证,故很多学者运用上式开展水库模型试验,试图满足水流挟沙相似条件和异重流发生相似条件。张俊华及笔者的研究表明, $\lambda_s$ 与时间比尺有密切关系,以淤积为主的水库模型,即便 $\lambda_s$ 有误,也可通过时间比尺的相应调整来减少误差,但可能会影响到淤积量的沿程分布。而对于水库库区泥沙冲淤交替的库区模型, $\lambda_s$ 错了是很难补救的,且异重流发生方面也不相似。

## 5 时间变态问题

轻质沙的引进为河工动床模型试验带来了一定的方便,但采用轻质沙容易使模型浑水中的固液体积比相对于原型严重失真,致使模型中达不到流态相似,特别是由于按照式(3)所求含沙量比尺甚小,带来了水流运动时间比尺同河床变形时间比尺相差过多的时间变态问题。但严格地讲,河工动床洪水模型试验不允许时间变态,以免洪水运行不相似,进而影响其造床作用的相似性。河流数学模型最大弱点是难以模拟河势摆动及河底成型淤积体的消长衰亡,而长河段河工动床模型最致命的弱点则是时间变态问题。无论如何,水流过程不相似必然影响到河床冲淤变形过程的相似性。不少学者已经认识到这一点并试图给出校正措施。李保如及笔者认

为，对于长河段模型而言，任何校正措施都难以奏效，且还容易产生新的偏差。正因为如此，在开展河工泥沙模型设计时，必须对所选的几何比尺、模型沙材料反复比选，尽量使两个时间比尺相近，以回避时间变态所带来的一系列麻烦。

## 6 结 语

由于现有描述泥沙运动基本规律的方程尚不完善，泥沙模型试验最终需经过原型冲淤实测资料的验证。尽管同十多年前的水平相比，目前对于动床模型存在问题的认识及其解决途径，都有了长足的进步，但是，动床泥沙模型试验技术的进一步完善仍有赖于泥沙运动基本理论的进展。

### 参考文献：

- [1] 谢鉴衡. 河流泥沙工程学(下册)[M]. 北京:水利出版社,1981.212-223.
- [2] 张红武. 河工模型变率及弯道环流的研究[A]. 黄科所科学研究论文集[C]. 第1集. 郑州:河南科学技术出版社.1989.185-201.
- [3] 张红武. 论动床变态河工模型的相似律[A]. 黄科所科学研究论文集[C]. 第2集. 郑州:河南科学技术出版社,1990.269-284.
- [4] 张红武, 江思惠, 白咏梅, 等. 黄河高含沙洪水模型的相似律[M]. 郑州:河南科学技术出版社,1994.
- [5] 潘庆荣, 杨国录, 府仁寿. 三峡工程泥沙问题研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.252-293.
- [6] 李昌华, 金德春. 河工模型试验[M]. 北京:人民交通出版社,1981.84-113.
- [7] 张红武. 冲积河床糙率模拟问题的探讨[J]. 武汉水利电力学院学报. 1986,(3):36-42.
- [8] 刘有录. 桥渡[M]. 郑州:黄河水利出版社.1995.180-188.
- [9] 彭润泽, 常德礼, 等. 用水槽模拟试验求卵石河床推移质输沙率[J]. 泥沙研究. 1984,(3):27-38.

## Problems and Their Solutions in Physical Modeling of River Process in Alluvial Streams

ZHANG Hong-wu, FENG Shun-xin

(Dept. of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The physical modeling is still a main approach to solve the sedimentation problems existing in the large stream training and hydraulic projects. In this paper, some key problems, usually found in the designing of physical model and conducting physical modeling, such as geometrical distortion, time distortion, and modeling of composition of bed load are discussed, and also the feasible solutions to them are proposed in this paper.

**Key words:** physical model; modeling of bed load transport; similarity law of incipient; geometry and time distortion; concentration scale of suspended sediment