

河工动床模型研究述评

毛 野¹,王勇华²

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.镇江市水利局,江苏 镇江 212001)

摘要 以河工动床模型相似准数分析、模拟试验条件和典型情况下关键相似准则的选用为基础,比较河工动床模型校验方法的优缺点,总结了动床模型的研究水平和发展趋势,指出河工动床模型尚处在主要进行定性相似模拟研究的水平,若理论没有突破而仅靠加大模型尺度则不能明显提高研究成果的可信度,微尺度河工动床模型值得认真关注和积极探索.

关键词 河工动床模型;尺度;相似性;量化分析;述评

中图分类号 TV83

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2003)02-0124-04

河流演变与人类社会的发展密切相关,但人们对河流自然规律的理解还不深刻.河流长短不同,流量丰沛各异,地理地质环境千差万别,泥沙运动错综复杂,水流与河床都在变化且相互作用,河流演变十分复杂.牛顿经典相似理论为河工模型试验奠定了基础,300 多年来人类不懈地探索河工模型试验规律^[1~5].至今,数值模型虽有长足进步但远不能满足需要,人们不得不借助于河工模型研究水流作用下河床的变化规律,模拟河流原型,反演自然现象,揭示客观规律.因此,提高河工模型试验水平意义重大.

1870 年, W. Froude 船模试验提出了 Froude 准则,这标志着人类已开始科学地进行模型试验. 1885 年, O. Reynolds 运用该准则进行了 Mersey 河的模型试验. 1914 年, J. Backingham 提出了相似准则的 π 定理. 1898 年, H. Engels 在德国建立了第一个河流水力学试验室^[5]. 20 世纪 70 年代,苏联和美国在河工模型试验方面已处于领先地位.近半个世纪以来,我国借鉴苏联的方程分析法和 Einstein 的模型相似律广泛开展了河工模型试验.由于开发黄河和长江等大规模经济建设的需要,国内专家学者以大型水利工程为契机潜心研究,在河工模型的理论 and 实践方面均取得长足进步,有些已达到世界领先水平.河工模型被广泛应用于河道整治、枢纽布置、水库淤积、水工建筑物周围的冲淤变化、取水口的防沙问题以及河口与海岸的淤积和防护问题的研究.由于河工模型可预测河流变化规律,可进行工程方案比较,因此它是进行河流河势规划、沿岸防洪规划、流域国民经济可持续发展规划不可或缺的有力工具.

1 关于河工模型尺度的思考

我国包括江河整治在内的大规模基本建设方兴未艾,水利、航运交通和环境保护都要求大量进行河工模型试验.现河工模型研究的视角逐渐从局部研究向整体研究过渡、从关注短期变化向注意长远趋势转变,试验技术有了长足进步,自动控制水平和量测分析水平也有了提高.另一方面,我国河工模型试验有加大模型规模的趋势,有的单个河工模型的投资即逾亿元.早在 20 世纪 50 年代,为研究三门峡库区淤积问题就制作过两个长达 1 km 多的大模型.实践表明,河工模型试验的规模愈大则难度愈高,特大尺度的河工模型使得成本投入急剧增加而成果质量却难以大幅度提高.1985 年在论证三峡枢纽方案时,钱宁教授在三峡工程泥沙科研工作协调会上就指出:“我得到一个教训,我觉得动床大模型不是一个方向.不要以为大就好,很多实际困难在工作中是难以克服的.”^[3]

科学技术的迅猛发展使得多种学科的试验研究水平普遍得到提高.人类的科学研究已经进入微观研究的阶段,纳米材料的惊人特性和基因工程初步应用所展示的前景表明人类可能控制分子级甚至原子级化学反应,化工生产也出现微型化趋势.因此,动床河工模型的尺度,即超大规模动床河工模型是否最佳、动床河

工模型可否实行小型化或微型化的问题值得思考^[8]. 为此,有必要研究河工动床模型相似准则及其在模拟中的应用问题.

2 河工动床模型的相似准则

河床演变涉及水流、泥沙与河床的运动和变化,水流和泥沙受重力和粘滞力等外力作用后在河床边界里运动,含沙浑水基本遵循不可压缩粘性流体连续方程和 Navier-Stokes 方程,泥沙做沉浮运动仍要满足自身连续方程,最终河床则随时间推移发生变形. 河床演变的基本控制方程具有复杂性和普适性,仅考虑二维问题并忽略 Coriolis 力和风应力的影响也十分复杂,无论原型还是模型都应遵循河床演变基本方程^[5]. 相似准数是同类物理量的原型值与模型值之比,即二者的比例尺. 将各物理量相应的相似常数关系式代入水流与泥沙基本方程组可得到无因次相似准数^[5]. 除 St, Fr, Re 及其组合外,控制方程可导出众多相似准数,可见河床演变同时受多个自然因素的约束,参见表 1.

表 1 相似准数及其物理含义
Table 1 Similar figures and their physical meanings

相似准数	$n = \frac{h^{1/6}}{\sqrt{gRe}}$	$\frac{\varepsilon_x}{Ul}, \frac{\varepsilon_y}{Vh}$	$\frac{u}{\omega}, \frac{v}{\omega}, \frac{w}{\omega}$	$\frac{\varepsilon_x}{\omega l}, \frac{\varepsilon_y}{\omega l}, \frac{\varepsilon_z}{\omega l}$	$\frac{\omega_b S_b}{\varepsilon_z \left(\frac{\bar{S}}{z} \right)_b}, \frac{\omega_b S_b}{\rho' \frac{z_0}{t}}$	$\varepsilon_x \left(\frac{\bar{S}}{z} \right)_b / \left(\rho' \frac{z_0}{t} \right)$
物理含义	阻力相似: 曼宁系数与水深的 1/6 次方成正比,与 Re 的 1/2 次方成反比	紊动相似:紊流扩散系数与水流尺度及流速有关	沉降相似:水流对流与泥沙重力沉降的关系	悬浮相似:紊动扩散与泥沙重力沉降及水流尺度的关系	近底沉降相似:近底泥沙沉速与近底含沙量及其梯度、垂向紊流扩散、河床泥沙干密度及河床底部高程变化率有关	近底悬浮相似:垂向紊流扩散与近底时均含沙量梯度、河床底部高程变化率及河床泥沙干密度有关

相似准则就是要求原型与模型中起主导作用的同种物理量的相似准数保持同量. 若参数均遵循各自的相似准则,则可望实现模拟完全相似,但实验条件的限制无法实现完全相似. 水工模型由于难以改变重力加速度、试验不宜采用水体以外的流体介质而无法同时遵循 Fr 重力相似准则和 Re 阻力相似准则^[2],常不得不舍弃 Re 准则而坚持 Fr 准则. 河工动床模型试验因模拟泥沙时颗粒介质的粒径和比重均不能随意选择更无法实现完全相似模拟.

基于对河床演变的认识和理性思维,有学者认为:动床河工模型要达到河床变形相似就要水流运动相似、泥沙输运相似和输沙量沿程变化相似. 由水流与河床的相互作用涉及的泥沙运动全过程可得到若干必须遵守的相似准则. 由于认识差别及对影响因素比较分析和权衡处理的区别,各家推出的相似准则不同. 例如,窦国仁全沙模型理论提出的相似条件包括 5 大类 11 种(其中独立的相似条件为 8 个),各相似准则由相应的理论或经验公式导出,但还不能解决全部河工模拟问题.

3 河工动床模拟处理方法

河床演变受众多影响因素的制约,诸如表面张力、表面糙率和泥沙颗粒的限制确定了试验的极限条件,定性相似的要求对流态和变态不得有所限制(表 2). 除用原型进行自我模拟外,无法要求模型严格相似,人们在设计试验模型时不得不根据目标和条件而有所取舍,最终确定关键性相似准则(表 3).

表 2 河工动床模型试验限制条件
Table 2 Limiting factors for loose-bed hydraulic models

限制条件	实验要求	条件分析
表面张力	水深应大于 1.5 cm	通常忽略,但在水深小于 1.5 cm 时明显增大,必须考虑
表面糙率	固体表面糙率为 0.01 ~ 0.30	改变糙率的手段有限,降低表面糙率比提高糙率更难
泥沙颗粒	避免用很细的泥沙颗粒	细颗粒之间薄膜水作用随粒径减小而增强,絮凝作用亦明显增加
水流流态	模型流态需与原型相同	原型多为紊流,有时强调同为急流或缓流
几何变态	变态率 ζ_L 宜小,即 $\zeta_L \leq 5$	ζ_L 为水平比尺 λ_L 与垂向比尺 λ_h 之比, ζ_L 愈大则流态等愈不相似

表 3 典型情况的关键相似准则^[1,2,4,5]

Table 3 Key similarity criteria under typical conditions

模型特点	相似思路及依据
平面比尺不宜小,垂向比尺不宜大	采用比尺变态模型
山区河段及有水工建筑物等边界剧烈变化的河段	尽量采用正态模型,不宜采用比尺变态模型
水流剧烈变化河段	宜严格遵循重力相似
水流变化缓慢河段	宜严格遵循阻力相似
水流含有推移质和悬移质泥沙,山区河段与平原河段有显著差别	平原河段主要模拟悬移质,特别是床沙质;山区河段主要模拟推移质
无法兼顾重力相似与阻力相似	宜严格遵循阻力相似
平原河段	允许 Fr 相似有偏差
流量变化幅度大,难以全模拟	以关键流量满足相似为主

4 河工动床模型的校核与评估

河工动床模型的设计方案有多种,可通过检验与校核来选择最佳方案,并将模型调整到最佳.常用河工动床模型校验方法,从校验水面线相似到校验关键特征相似,校验难度逐渐增加(表 4).通常实际操作时大多从调整水面线相似入手,特别关注河床冲淤相似,尽可能注意关键特征相似.实践证明,要求河工动床模型与原型完全相似是不可能的.要使河工动床模型与原型尽量达到定量相似,模型与原型间的定性相似最重要.动床模型的优劣首先取决于关键特征特别是冲淤特征的模拟差异程度.目前对河工动床模型主要进行定性评估,因此常难确切认定某个河工模型的优劣程度及其与原型的相似程度.不惜代价地提高河工动床模型的精度,最终结果仍好不了多少.笔者认为,河工动床模型模拟局限性较大,研究目的应是用较小的投入得到相对较好的模拟成果.

表 4 河工动床模型常用校验方法

Table 4 Practical methods for verification of loose-bed hydraulic models

校验方法	校验目的	难易程度	校验效果
水面线相似	保持模型与原型之间沿程阻力相似	调整局部形状及表面糙率,调整相对比较容易	水深较大时水位不能严格相似,但对相似程度影响较小
进出口流态相似	进出口部位流态相似程度,特别是垂向平均流速沿河宽分布,决定了原型河床变化的相似程度	可调整局部形状及糙率,调整相对不难	不能明显提高河工动床模型试验成果的可信程度
流速场相似	保持模型与原型之间水流运动状态相似	调整效果不直观,比调整水面线、进出口流态相似要难	会对河床冲淤及演变趋势产生重要影响
河床冲淤相似	保持模型与原型之间河床冲淤状态及变化趋势相似	调整效果比较直观,但比调整流场相似更困难	直接影响到河工动床模型试验成果的可信程度
关键特征相似	保持回流、涡流、表面流场、底部流场及冲淤等特征定性相似,以实现与原型变化趋势相似	调整效果更直观,但比调整河床冲淤相似更困难	可明显提高河工动床模型试验成果的可信程度

5 微尺度模型

由于密西西比河弯曲河道水流与泥沙运动的复杂性使得用二维或三维数值模型进行模拟和分析尚不能令人信服,因此美国陆军工程兵团(USACE)1993年起开始研制微尺度动床河工模型(microscale loose-bed hydraulic model)^[6,7].USACE以 $2\text{ m}\times 1\text{ m}$ 微尺度模型作为工具,研究密西西比河的港口码头和河道整治工程.因河工动床模型的关键在于定性相似,模型与原型间的相似程度首先不取决于模型尺度,所以发展微尺度模型至少能解决一部分问题.微尺度模型的大比尺(如USACE模型达 $1:20\,000$)使原先的动床大模型成为台式模型,使变态技术得以充分发挥,变态率可能达到20,使轻合成材料模型沙得到应用,例如USACE模型采用了密度为 1.48 g/cm^3 的甲醛树脂.在对微尺度模型进行校核时应重点考虑使模型关键部位的关键特征与原型观测特征相同,努力保持回流、涡流、表面流场、底部流场及冲淤状况等基本特征定性相似,从而实现变化趋势相似.

微尺度模型需要解决表面张力、表面糙率、泥沙颗粒、水流流态和模型几何变态等问题.这些问题虽不是微尺度模型所独有的,但微尺度使问题更加突出.为此,可能得改变泥沙颗粒起动临界 F_r ,模拟时流量过程也要变化.为确保量测精度,相关仪器与软件的研制成本也很可观.微尺度模型尚无定论,要努力建立可接受的量化评估体系.实际上微尺度模型已可为水利、航运交通和环境保护等部门服务,所以应用恰当,则可系统地研究各种参数对河道的影响以及参数间的关系,可将有关研究由定性分析向定量分析推进,还可将工程措施的效果具体化并进行比较.鉴于我国至今尚未见微尺度模型研究成果的报导,笔者认为,有必要研究有关理论并将其应用于国民经济建设.

6 结 语

河工动床模型受众多因素的影响,故其无法全部满足由基本控制方程导出的相似准数.客观现实制约着模拟试验条件,实际操作时必须抓主要矛盾校验河工动床模型,一般针对典型情况选用关键性相似准则来指导试验.目前河工动床模型的研究水平虽有很大提高,但仍主要是进行定性相似的模拟研究.大尺度模型试验并非最佳选择,并不能明显改进试验成果,故微尺度河工动床模型值得关注和探索.

参考文献：

[1] 李昌华,金德春.河工模型试验[M].北京:人民交通出版社,1981.83—184.
[2] 左东启.模型试验的理论与方法[M].北京:水利电力出版社,1984.96—136.
[3] 钱宁.在三峡工程泥沙科研工作协调会上的讲话[A].见:水利部科技教育司,三峡工程论证泥沙专家工作组主编.长江三峡工程泥沙研究文集[C].北京:中国科学技术出版社,1990.654—662.
[4] 谢鉴衡.河流模拟[M].北京:中国水利电力出版社,1990.191—237.
[5] 惠遇甲,王桂仙.河工模型试验[M].北京:中国水利电力出版社,1999.96—144.
[6] DAVINROY R. River replication [J]. J of Civil Engineering,1999,69(7): 61—63.
[7] GAINS R A, MAYNORD S T. Microscale loose-bed hydraulic models[J]. J of Hydraulic Engineering,2001,127(5): 335—339.
[8] 毛野.水工定床模型相似度的研究[J].水利学报,2002,(7): 64—69.

Review of loose-bed hydraulic models

MAO Ye¹, WANG Yong-hua²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Zhenjiang Bureau of Water Conservancy, Zhenjiang 212001, China)

Abstract : A summary is made of the level of research on the loose-bed hydraulic model and its trend for development based on an analysis of the similar figures of models and the limiting factors for model tests, the determination of key similarity criteria under typical conditions, and comparison of advantages and disadvantages of the methods for model verification. It is indicated that the research on the loose-bed hydraulic model is still at the level of qualitative analysis, and that without a breakthrough in basic theories, it is impossible to obviously improve the accuracy and reliability of experimental results only by increase of the scale of model tests. The loose-bed hydraulic model is worth more attention and efforts.

Key words : loose-bed hydraulic model ; scale ; similarity ; quantitative analysis ; review