

河工模型变态问题研究进展

虞邦义, 俞国青

TV83

TV131.61

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:对河工模型几种变态问题及其对水流运动、泥沙运动和河床变形的影响进行了回顾与评述。几何变态对顺直河段、弯曲河段和分汊河段的水流运动影响程度是有差别的。几何变态对推移质和悬移质泥沙运动的影响也不一致。应根据实际情况选择合适的几何变率。时间变态对水流运动和河床变形的影响十分复杂, 时间变率应受到严格控制。

关键词:河工模型; 几何变态; 时间变态; 比降变态; 推移质; 悬移质

中图分类号:TV131.61+2

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2000)05-0023-04

在河工模型中, 由于试验范围内平面尺度和水深尺度相差悬殊, 受场地条件的限制, 平面比尺不能太大; 同时, 垂直比尺又不能太小。若模型垂直比尺过小, 使模型的水深过小, 就有可能导致模型水流的流速过小, 模型水流的雷诺数太小, 不能保证模型水流的充分紊动, 也不能保证模型流态、阻力等与原型相似, 模型沙选择较为困难, 模型测量精度也难以提高。因此, 不得不降低几何相似的要求, 将模型做成几何变态模型。但从理论上讲, 变态模型并不完全满足相似理论的要求, 特别是在水流三度性强的河段, 例如弯道、汊道、窄深河段和局部拓宽或缩窄的河段, 不论在流场或泥沙运动方面均可能产生不同程度的误差。为此, 对于变态模型的适用范围和变率限制, 长期以来成为从事实体模型试验的科技人员探讨的重要课题之一。

1 几何变态对模型水流运动的影响

研究河工模型变率问题最直接的方法是设计不同变率的概化模型^[1]。张红武^[2]、颜国红^[3]、姚仕明^[4]、梁斌^[5]先后进行了变率 $e = 2 \sim 10$ 的概化模型试验研究, 得出了一些规律性的成果。

对于顺直河段变率小于 10, 水流动力轴线及垂线平均流速沿横向与沿流程的分布基本一致, 相对误差小于 10%。变率加大, 模型糙率加大, 纵向流速垂线分布偏离正态模型加大, 变态模型表层流速较正态模型增大, 而底层流速较正态模型小, 即流速梯度增大。笔者的试验发现^[6,7], 对于淮河干流这样的平原河流, 变率加大到 8~10 后, 纵向垂线流速分布

指数关系从 $1/6 \sim 1/7$ 变到 $1/3 \sim 1/4$ 。

对于分汊河段, 姚仕明^[4]的试验表明, 变率小于 10, 且模型宽深比 B/H 大于 2 的变态定床模型, 只要满足重力相似与阻力相似, 当两汊分流角较小, 过水断面相差不大时, 其汊道分流比基本一致。变率对汊道内纵向垂线平均流速沿流程及沿河宽分布以及水流动力轴线的影晌甚微。

变率对弯道水流结构的影响更为显著和复杂。变率小于 10, 模型宽深比 B/H 大于 1.9, 弯道水流动力轴线及垂线平均纵向流速沿横向与沿流程与正态模型的误差一般小于 10%, 与顺直段类似, 但弯道段纵向流速剖面的影响较顺直段更明显。变率大于 3, 失真严重, 弯道下半部失真较上半部显著。弯道环流受模型变态的影响最严重, 且环流充分发展部位随变率的增大而下移, 出弯道后环流的衰减规律也受模型变态的影响, 变率越大, 环流衰减越慢, 环流的衰亡长度相应增加。

同时, 模型变态后, 弯道内水面形状、横向比降及弯道水流的流向都将偏离正态模型, 而且偏离的程度随变率增大而趋向明显, 表现为弯道凹岸侧高水位等值线随变率增大而向下游延伸, 弯道凸岸侧水位线等值线向上延伸, 模型横比降随之增大^[8]。

2 几何变态对推移质泥沙运动的影响

与变率对水流运动及水流结构影响的研究相比, 变率对推移质泥沙运动的影响研究较小。

吕秀贞^[9]从理论上作了阐述, 认为模型几何变态后, 河床纵横坡降均加大了一个变率的倍数。在模

型沙水下休止角等于或小于天然沙的水下休止角情况下,顺坡河床上泥沙输移速度加快,逆坡河床上泥沙输移速度减慢,甚至停止输移。即顺坡输沙量偏大,逆坡输沙量偏小,但两者绝对误差并不相等,两者并不能互相抵消,变率越大,这个偏离越大。动床模型模型沙的水下休止角应尽可能与原型相似。当床面坡降由于变态而大于模型沙的水下休止角时,模型沙无法停留在床面上,深坑中淤积量增多,边坡上淤积量减小,将会使平面上河床冲淤分布不相似。

姚仕明^[4]利用概化模型研究变率对推移质泥沙运动的影响。天然弯道断面,试验范围变率1~6,宽深比4.5~27.3。变率3的模型水流动力轴线与正态模型基本相似,变率6的模型明显偏离;变率3的模型深泓线相似良好,变率6的模型偏离较大;变率3的模型断面冲淤基本相似,但深槽展宽,变率6的模型偏离较大。对于弯道(梯形断面),变率大于6的模型,弯道冲淤部位偏离较大,冲淤量偏大30%以上。

3 几何变态对模型悬沙输移的影响

根据河工模型试验规程^[10],悬沙模型应满足:泥沙沉降相似

$$\alpha_\omega = \frac{\alpha_h}{\alpha_t} \alpha_v = \alpha_h^{0.5} \left(\frac{\alpha_h}{\alpha_t} \right) \quad (1)$$

泥沙悬浮相似

$$\alpha_\omega = \alpha_u = \alpha_h^{0.5} \left(\frac{\alpha_h}{\alpha_t} \right)^{0.5} \quad (2)$$

写成一般形式则为

$$\alpha_\omega = \alpha_v \left(\frac{\alpha_h}{\alpha_t} \right)^m \quad (3)$$

即式(1) $m=1$,式(2) $m=0.5$,对于正态模型 $\frac{\alpha_h}{\alpha_t}=1$,式(1)与式(2)同时满足。对于变态模型一般 $\alpha_t > \alpha_h$,式(1)与式(2)不能同时满足,这一矛盾给模型沙沉速比尺的设计造成困难,是变态模型相似律研究的重要课题。

李昌华^[11]曾提出,当 $\frac{\omega}{ku_*} < \frac{1}{16}$,泥沙颗粒较细,紊动作用相对较强,含沙量沿垂线分布较均匀时,采用式(1)是可行的;对于 $\frac{\omega}{ku_*} > 1$ 的较粗泥沙,式(2)是主要的。对于 $\frac{1}{16} < \frac{\omega}{ku_*} < 1$ 的部分泥沙,如何处理,需要在模型试验实践中进一步积累经验才能确定。

与李昌华的研究刚好相反,朱鹏程^[12]认为,对于粗沙采用式(1)更为合适。而对于细沙,因悬移质在水流中悬浮,一方面有赖于水流流速的脉动作用,还必需有含沙量浓度梯度,才能完成扩散作用, $\frac{\omega}{ku_*}$

恰是悬沙垂线分布的指数, $\frac{\omega}{|v'|}$ 与 $\frac{\omega}{u_*}$ 的关系也比与 $\frac{\omega}{v}$ 的关系更为直接,是泥沙沉速与使泥沙运动流速的比值,是泥沙运动的重要参数,因此,细沙宜采用式(2)。

彭瑞善在对文献^[12]的讨论中指出^[13,14],单独满足式(1)泥沙淤积部位偏近,单独满足式(2),则模型泥沙的淤积部位偏远,且变率越大,其偏离程度越大。为达到平均淤积部位相似,建议将式(1)中代表泥沙沉降距离的水深比尺 α_h 改为含沙量垂线分布重心高度的比尺 α_{Z_g} (Z_g 实质上是以含沙量为权重的加权平均沉降高度,代表全垂线泥沙沉降到河底的平均距离),即

$$\alpha_\omega = \frac{\alpha_{Z_g}}{\alpha_t} \alpha_v \quad (4)$$

张红武^[15]认为比尺关系式(1)及式(2)对保证悬移质泥沙运动的相似性都是重要的,为近似满足这一对矛盾的相似条件,可采用式(3),则能够同时兼顾时均流速和紊流扩散对悬沙运动影响的相似。在实际运用中,可利用实测资料计算 $\left| \frac{S-S_*}{S_*} \right| > 1$ 的资料组数占全部资料组数的百分数来确定对应的 m 值(S 为河段实测含沙量, S_* 为河段的水流挟沙能力)。建议一般情况下取 $m=0.75$,特殊情况下,可取 $m=0.5$ 或 $m=1.0$ 。

吕秀贞和彭润泽^[16]根据一维扩散方程的理论,分析了几何变态模型悬沙输移和淤积及其沿程分布的偏离性,指出按式(3)取 $m=1.0$ 比取 $m=0.5$ 设计精确性要高些,前者使淤积量沿程有所偏大,但偏离度较小,后者使淤积量显著偏小,两者的偏离程度都随变率 e 和 $k_1=15\frac{\omega}{u_*}$ 的增大而增大,当变率较小(如 $e<4$)或 k_1 也较小(如 $k_1<0.1$),取 $m=0.5$ 或 $m=1.0$ 误差均有限。变态模型沉速比尺的设计应依据试验目的而定,当模型主要保证悬沙沿程输移和冲淤相似,从而保证河床变形相似时,合理的 m 取值是 $0.5 < m < 1.0$,并给出了 m 的推求关系式和关系图。

林秉南^[17]从泥沙扩散的原始形式进行推导,只能得出一个泥沙扩散或掺混相似条件,即

$$\frac{\alpha_u}{\alpha_x} = \frac{\alpha_v}{\alpha_y} = \frac{\alpha_\omega}{\alpha_z} = \frac{\alpha_\omega}{\alpha_y} \quad (5)$$

它是保证泥沙在紊流中扩散或掺混相似的必要条件,它的应用不限于泥沙沉降。

所谓泥沙悬浮相似条件,即 $\alpha_u = \alpha_\omega$ 在变态模型中是不能成立的,它本身便是一个不等式,问题的

症结在于在条件中应用了

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_* \cdot 0}{ky} \quad (6)$$

式(6)在变态模型中不能保持相似,即式(2)是不成立的。

林秉南^[17]的研究引起了人们对这个问题的重新思考。张红武^[18]对此提出疑问,认为文献[17]中假定 $\alpha_s = \alpha_S = \alpha_s'$, $\alpha_u = \alpha_U = \alpha_u'$, $\alpha_v = \alpha_V = \alpha_v'$, $\alpha_w = \alpha_W = \alpha_w'$, $\alpha_\omega = \alpha_\Omega = \alpha_\omega'$, 即要求水体中含沙量、流速分量、泥沙沉速及时均值、脉动值的比尺各自相等,也就是要求模型中的各系动场与原型相似,在变态模型中能否做到,是值得进一步探讨的问题。

综上所述,众多学者对这一问题进行了长时间、大量的研究,各自根据模型实践经验,或从概念上或从理论上,力图解决这一对矛盾,一方面反映该课题的重要性,另一方面又反映了问题的复杂性,除朱鹏程^[12]认为应采用式(2),林秉南^[17]认为式(2)不成立,应采用式(1)外,多数学者^[11,13,15,16]认为应同时兼顾时均流速和紊动扩散对悬移质运动相似性的影响,较一致的观点是式(3)是一种相对可靠的做法, m 的取值应在 0.5~1.0 之间。但对 m 值的具体确定,仍没有统一的方法和标准。因此,下阶段在进一步进行理论探讨和积累模型实践经验的同时,应按照不同比尺、不同变率及不同的河型、不同的泥沙组成和来水来沙组合情况进行系列概化模型试验,为泥沙河工模型设计提供一套相对统一的标准或方法。

4 泥沙河工模型中时间变态问题及其影响

在泥沙模型中,为满足泥沙运动相似要求,常采用轻质沙,从而产生了水流运动时间比尺和泥沙冲淤时间比尺不一致。

对水流运动

$$\alpha_t = \frac{\alpha_l}{\alpha_v} = \frac{\alpha_l}{\alpha_h^{1/2}} \quad (7)$$

对推移质泥沙

$$\alpha_{t1} = \frac{\alpha_{\kappa h} \alpha_{\gamma 0}}{\alpha_G} \quad (8)$$

对悬移质泥沙

$$\alpha_{t2} = \frac{\alpha_{\kappa h} \alpha_{\gamma 0}}{\alpha_s \alpha_s} = \frac{\alpha_{\gamma 0}}{\alpha_s} \alpha_t \quad (9)$$

其中 α_G 为推移输沙率比尺, $\alpha_{\gamma 0}$ 为淤积物干容重比尺, α_s 为含沙量比尺。窦国仁的全沙模型相似律使时间比尺达到统一^①,文献[19,20]推荐采用 $\frac{\alpha_{\gamma 0}}{\alpha_s} \approx 1$,

使水流运动时间比尺和悬移质冲淤时间比尺一致。但目前较普遍的做法仍是遵守泥沙冲淤时间比尺而放弃水流运动时间比尺,即采取时间比尺变态,以尽可能保持河床冲淤的相似性,并缩短试验历时,提高工效。

当水流为恒定流时,模型中水力要素基本不随时间而改变,矛盾被掩盖住了。当水流为非恒定流,特别是试验河段槽蓄作用明显,如淮河中游、有大量行蓄洪区,由于试验历时缩短,而使模型沿程水位、流速、流量、挟沙能力与原型发生偏离,而造成模型河床的冲淤量发生偏离,这个问题虽然早已提出,但进行系统研究的并不多。

王兆印、黄金池对推移质泥沙模型时间变态问题进行了研究,对水流连续方程进行分析并用试验资料验证^[21]。模型试验的进口流量和尾门水位的变化都是按 α_{*t} 计算控制,而水流运动的变化过程则以 α_t 为时间比尺相似于原型,流量、水位的调整时间应为时间不变态时的 $\frac{1}{m_1}$ ($m_1 = \frac{\alpha_{t1}}{\alpha_t}$)。落峰过程,尾门处流速加大,涨峰过程尾门处流速减小。落水时输沙率的偏大比涨水时输沙率的偏小要显著得多,输沙率增大,但来沙不增,就会冲刷河床,所以时间变态主要造成模型试验的非相似性冲刷。

吕秀贞、戴清^[22]通过水流连续方程和运动方程的数值求解,对悬移质泥沙模型的时间变态所引起的沿程水力要素和河床冲淤偏离性质和程度作了定性和定量分析计算。

从性质上看,涨峰过程使沿程水位偏低,进口段流速偏大,中、下游段流速偏小;降峰过程则相反,时间变态使沿程水位偏高,上游进口段流速偏小,中下游段流速偏大;从涨落峰全过程来看,在相应于天然洪峰时段内,时间变态影响的结果主要受涨峰过程控制,落峰过程还来不及反映,则往往又开始受接踵而来的下一个洪峰的影响。因此,误差总趋势为进口段淤积量偏小,下游出口段淤积量偏大。

王兆印等还对校正时间变态影响的方法和效果进行了分析,认为采取措施在模型中各处均匀补水或抽水,即当流量和水位增加时各处均匀补水,当水位降低时,则各处均匀抽水,是能产生一定的纠偏效果,但实际很难操作。吕秀贞等认为适当滞后尾门调节时间,也能产生一定的纠偏效果。但同时指出,不论哪种校正方式,都难以使水位、流速和挟沙力同时得到有效的校正。

考虑到天然河道峰型和涨落变化幅度差异很

① 窦国仁,全沙模型相似律设计实例。见:泥沙模型技术经验交流会资料汇编,1978,1~18。

大,河槽的槽蓄变化也较大,时间变态的影响是十分复杂的,需要进一步进行分析研究和试验验证。

5 比降的二次变态问题

对于变态河工模型

$$\alpha_{J1} = \frac{\alpha_h}{\alpha_l} \quad (10)$$

$$\alpha_{J2} = \frac{\alpha_{J1}}{\beta} = \frac{\alpha_h}{\beta \alpha_l} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\alpha_h^{7/3}}{\alpha_l^2 \alpha_{\rho}^2} \quad (12)$$

α_{J1} 称比降的一次变态比尺, α_{J2} 称比降的二次变态比尺, β 是系数。 α_{J1} 是由于几何变态而产生的,对正态模型 $\alpha_{J1} = 1$ 。比降的二次变态是为了避免模型加糙困难,或模型加糙后造成垂线流速分布严重失真而放弃重力相似准则而遵循阻力相似准则,允许弗劳德数有所偏离。采用比降二次变态的另一种情况是当模型沙起动流速偏大,不满足起动相似要求时,人为加大模型流速,满足起动相似要求,人为地增添了一个附加比降。附加比降的确定可按式(12)计算。

比降二次变态的实质是模型遵循阻力相似条件,而允许重力相似有所偏离。虽然这种做法已积累了丰富的经验^[10,11,13],但对重力相似偏离影响的系统研究,尚未见报道。

6 结 语

河工模型作为研究河道水流、泥沙运动和河床演变规律最重要的手段,仍然在水利水电工程建设中发挥重要的作用。河工模型试验本身是一个人力、物力投入较多的研究项目,要提高河工模型的试验可靠性和精度,减小试验投入,提高工效,模型试验理论和技术需要进一步完善。河工模型试验较棘手的技术问题是一系列变态问题,变态问题的深入研究对完善河工模型试验技术至关重要。

几何变态对水流结构和泥沙运动都产生不同程度影响,选择模型变率应该考虑到这些影响。时间变态对水流、泥沙运动的影响较为复杂,时间变率应受到严格限制。

参考文献:

- [1] 潘庆. 三峡工程泥沙问题研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999. 254~293.
- [2] 张红武. 河工模型变率及弯道环流研究[D]. 武汉:武汉水利电力学院,1986.
- [3] 颜国红. 模型变率对弯道动力轴线影响的试验研究[D]. 武汉:武汉水利电力大学,1996.

- [4] 姚仕明,张玉琴,李会仁. 实体模型变率研究[J]. 长江科学院院报,1999,16(5):1~4.
- [5] Liang Bin. Experimental study of the effect of model distortion on compound river flow simulation [A]. In: Proceedings of International Symposium on Hydraulic Research in Nature and Laboratory [C]. Wuhuan, China, 1992. 124~129.
- [6] Yu Bangyi. Flow resistance of large-scale roughness in open channel [A]. In: Proceedings of International Symposium on Hydraulic Research in Nature and Laboratory [C]. Wuhan, China, 1992. 35~40.
- [7] 虞邦义. 几种明渠非密布糙体的水力阻力试验研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1992(增刊):1~6.
- [8] 段文忠,詹义正,张政权. 河工模型变态问题[A]. 见:李义天. 河流模拟理论与实践[C]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1998. 11~14.
- [9] 吕秀贞. 河工模型几何变态对坡面上推移质输移相似性的影响[J]. 泥沙研究, 1992(1):9~20.
- [10] SL 99-95, 河工模型试验规程[S].
- [11] 李昌华,金德春. 河工模型试验[M]. 北京:人民交通出版社,1981. 104~110.
- [12] 朱鹏程. 论变态动床河工模型及变率的影响[J]. 泥沙研究, 1986(1):14~29.
- [13] 彭瑞善. 论变态动床河工模型及变率的影响[J]. 泥沙研究, 1986(4):94~96.
- [14] 彭瑞善. 关于动床变态河工模型的几个问题[J]. 泥沙研究, 1988(3):86~94.
- [15] 张红武. 复杂河型河流物理模型的相似律[J]. 泥沙研究, 1992(4):1~13.
- [16] 吕秀贞,彭润泽. 几何变态模型中悬沙输移相似性的研究[J]. 泥沙研究, 1996(1):37~47.
- [17] 林秉南. 对悬移质变态动床模型中掺混相似条件的剖析[J]. 人民长江, 1994, 25(3):1~6.
- [18] 张红武. 悬移质泥沙相似律的研究现状[A]. 见:李义天. 河流模拟理论与实践[C]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1998. 1~9.
- [19] 李保如. 我国河流泥沙物理模型的设计方法[J]. 水动力学研究与进展, 1991(增刊):113~122.
- [20] 张耀哲. 悬移质动床模型设计中的时间比尺和含沙量比尺[J]. 西北水资源与水工程, 1996, 7(6):44~48.
- [21] 王兆印,黄金池. 泥沙模型试验中的时间变态问题及其影响[J]. 水利学报, 1987(10):48~53.
- [22] 吕秀贞,戴清. 泥沙河工模型时间变态的影响及其误差校正途径[J]. 泥沙研究, 1989(2):12~23.

(收稿日期:2000-04-26 编辑:熊水斌)

