

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.01.004

潮汐河口泥沙物理模型若干问题探讨

熊绍隆,曾 剑,韩海骞

(浙江省水利河口研究院,浙江 杭州 310020)

摘要 探讨了不同类型泥沙物理模型的主要相似准则、模型沙选择、时间变态的处理、冲淤验证资料的选取、局部动床的范围、动床模型试验的重复性等问题,并以杭州湾大桥动床模型试验为例予以进一步说明。

关键词 泥沙物理模型 相似准则 模型沙 时间变态 冲淤验证 局部动床

中图分类号 :TV149.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)01-0019-05

Various problems of sediment physical models of tidal estuaries//XIONG Shao-long, ZENG Jian, HAN Hai-qian (Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract :The major similarity criteria for different kinds of sediment physical models, the selection of model sand, the treatment of time distortion, the selection of verification data for erosion and siltation, the range of local movable bed and the test repeatability of movable bed models were studied. Further explanation was depicted by the physical movable bed model for Hangzhou Bay Bridge.

Key words :sediment physical model ; similarity criterion ; model sand ; time distortion ; erosion-siltation verification ; local movable bed

1 泥沙物理模型简介

根据水流和泥沙运动的力学规律,按照相似理论,制作与原型几何相似的实体模型,以动态与动力相似为准则,试验研究河流、湖泊、河口、海岸的水流、波浪、泥沙运动和河床演变规律(包括工程前后的相应变化)的过程称为实体模拟,所制作并据以进行试验的相似模型叫实体模型(physical model),俗称物理模型,简称物模。

河口规划、大型工程可行性研究和中小型工程可行性研究阶段,可应用速度快、费用低、水流模拟已较为成熟可靠的平面二维水流数学模型,分析、比较不同方案实施后的流路特征和流场变化,初步筛选或初步确定(对中小型工程可行性研究)方案。对于大型工程可行性研究,初步筛选后的工程方案往往还需进行河口整体或局部河段的定床物理模型试验,研究工程前后的流路特征和流场变化,结合数学模型成果确定初步推荐方案,再应用整体模型局部动床试验,进一步了解初步推荐方案或初步筛选后的几个方案的实施、对河床的冲淤和流路与河势的影响。这不仅因为变态物理模型在一定程度上能反

映水流的三维特征,相对精确地模拟工程对水流的局部阻力,尤其重要的是河口泥沙运动因径、潮流交互作用更为复杂,数学模型方程中有关泥沙运动的重要物理量如水流挟沙力 S_* 和推移质输沙率 g_s 均借鉴单向流的公式,经验性成分更多,虽也经冲淤验证,但只是获得 S_* 或 g_s 的系数,再按前述公式进行方案计算,从而使平面二维潮流泥沙数学模型关于河床冲淤的计算结果可靠度不高;而泥沙物理模型可根据所论河口或河段河床演变的主要动力和物质因素,考虑适宜的动床模型(悬移质动床、推移质动床或全沙模型),遵循起动、悬移等泥沙运动的主要相似条件选择模型沙,挟沙率或推移质输沙率相似通过冲淤验证试验予以满足,从而可在不确定 S_* 和 g_s 表达式的前提下较好地模拟河口实际的水流、泥沙运动。欧美诸国特别是美国,现已较少应用泥沙物理模型,更多地采用泥沙数学模型,一则它们的河口大规模治理多近尾声,二则美国等发达国家野外观测的仪器设备较为先进,常通过建立所论河口的泥沙数学模型,经可靠实测资料验证,也能满足工程需要,但主要物理量表达式的经验成分更多一些,难以应用于其他河口。

作者简介 熊绍隆(1942—),男,湖北汉川人,教授级高级工程师,从事河口海岸工程科研及设计工作。E-mail :xlxiong@163.com

2 泥沙物理模型若干问题探讨

2.1 泥沙物理模型主要相似准则

由于河口宽深比较大,常不得不做成平面比尺与铅直比尺不等的变态模型。变态模型铅直方向的物理量及水平方向的物理量沿铅直方向的分布不可能相似,变率越大,模拟的误差越大,但各物理量沿铅直方向的垂线平均值仍然相似。因此,可应用平面二维非恒定流运动方程和连续方程,根据相似现象各物理量组成的无量纲综合体—相似准则为常数,通过相似变换,得到模型水流必须遵循的惯性力重力比、惯性力阻力比和水流连续相似条件如表 1 所示(表中比尺 $\lambda_x = x_p/x_m$ 为物理量 x 的原、模型量值之比)。

涉及泥沙运动,问题就更为复杂。不仅模型几何变态会导致悬移相似出现 2 个无法同时满足的相似条件,更有为同时满足起动和悬移相似特别是起动相似而不得不采用轻质沙时产生水流运动与河床变形的时间比尺不等($\lambda_{t1} \neq \lambda_{t2} \neq \lambda_{t3}$, λ_{t2} 和 λ_{t3} 分别为悬移质与推移质模型的河床变形时间比尺)的时间变态问题。为此,只能根据影响所论河口河床演变的主要物质条件(悬沙还是底沙),选择相应的泥沙运动相似条件^[1]。

当河口河床变形主要取决于悬移质运动(如钱塘江河口)时,可采用悬移质动床模型,由不平衡输沙方程和河床变形方程运用相似变换,可以得到悬

移相似、挟沙相似与河床变形相似条件。

$$\frac{\partial hS}{\partial t} + \frac{\partial huS}{\partial x} + \frac{\partial hvS}{\partial y} = \alpha\omega(S_* - S) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hE_x \frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hE_y \frac{\partial S}{\partial y}\right) \tag{1}$$

$$\rho' \frac{\partial z_0}{\partial t} = \alpha\omega(S - S_*) \tag{2}$$

式中: h 为水深; t 为时间; u, v, E_x, E_y 分别为 x, y 方向的垂线平均流速和泥沙扩散系数; S, S_* 分别为垂线平均含沙量和水流挟沙力; $\omega, \alpha, z_0, \rho'$ 分别为泥沙沉降速度、泥沙沉降几率、河底高程与泥沙干密度。

河口河床冲淤交替还需遵循起动相似准则(表 1)。研究悬移质的运移,扬动是不可忽视的因素,但对于冲淤交替的悬移质动床模型,悬移与起动的模拟明显比扬动重要。其次,扬动流速所表达的临界状态至今尚无公认的明确认识。再次,河口泥沙一般较细,常具有能起动便可悬扬的特点,采用轻质沙后,粒径显著粗于原型沙,黏结力的影响常不再处于主导地位,导致模型沙的扬动流速多大于起动流速,即悬移与扬动相似条件往往难以同时满足。因此,河口悬移质动床模型一般只需遵循悬移和起动相似准则,而不再考虑扬动相似条件^[1]。

若河口河床变形主要取决于推移质运动(如鸭绿江口),可采用推移质动床模型,遵循床沙起动相似和推移质输沙率相似准则,并由推移质运动河床变形方程(式(3))导出推移质运动河床变形时间比

表 1 潮汐河口实体泥沙模型主要相似准则

	相似条件	悬移质模型	推移质模型	全沙模型	
				悬移质	推移质
水流运动	水流运动时间比尺	$\lambda_{t1} = \lambda_t / \lambda_u$	$\lambda_{t1} = \lambda_t / \lambda_u$	$\lambda_{t1} = \lambda_t / \lambda_u$	$\lambda_{t1} = \lambda_t / \lambda_u$
	流速比尺	$\lambda_u = \lambda_v = \lambda_h^{1/2}$	$\lambda_u = \lambda_v = \lambda_h^{1/2}$	$\lambda_u = \lambda_v = \lambda_h^{1/2}$	$\lambda_u = \lambda_v = \lambda_h^{1/2}$
	糙率系数比尺	$\lambda_{n_b} = \lambda_h^{2/3} / \lambda_l^{1/2}$	$\lambda_{n_b} = \lambda_h^{2/3} / \lambda_l^{1/2}$	$\lambda_{n_b} = \lambda_h^{2/3} / \lambda_l^{1/2}$	$\lambda_{n_b} = \lambda_h^{2/3} / \lambda_l^{1/2}$
	紊流限制条件	$Re_m > 1000 \sim 2000$ 或 $\lambda_h \leq \left(\frac{v_p \Delta p}{60 C_{0p} \nu_m}\right)^{1/5} \lambda_l^{7/10}$	$Re_m > 1000 \sim 2000$ 或 $\lambda_h \leq \left(\frac{v_p \Delta p}{60 C_{0p} \nu_m}\right)^{1/5} \lambda_l^{7/10}$	$Re_m > 1000 \sim 2000$ 或 $\lambda_h \leq \left(\frac{v_p \Delta p}{60 C_{0p} \nu_m}\right)^{1/5} \lambda_l^{7/10}$	$Re_m > 1000 \sim 2000$ 或 $\lambda_h \leq \left(\frac{v_p \Delta p}{60 C_{0p} \nu_m}\right)^{1/5} \lambda_l^{7/10}$
	表面张力限制	$H_m > 1.5 \text{ cm}$	$H_m > 1.5 \text{ cm}$	$H_m > 1.5 \text{ cm}$	$H_m > 1.5 \text{ cm}$
泥沙运动	沉降速度比尺(悬移相似)	$\lambda_\omega = \lambda_h \lambda_u / \lambda_l$		$\lambda_\omega = \lambda_h \lambda_u / \lambda_l$	
	起动流速比尺	$\lambda_{V_c} = \lambda_u$	$\lambda_{V_c} = \lambda_u$		$\lambda_{V_c} = \lambda_u$
	扬动流速比尺			$\lambda_{V_f} = \lambda_u$	
	含沙量或输沙率比尺	天然沙 $\lambda_S = \lambda_{S_*} = 1$ 轻质沙 冲淤验证试验确定	$\lambda_{g_b} = \lambda_h^{3/2}$ 冲淤验证试验确定	$\lambda_S = \lambda_{S_*} = 1$ 冲淤验证试验确定	$\lambda_{g_b} = \lambda_h^{3/2}$ 冲淤验证试验确定
	河床变形时间比尺	$\lambda_{t2} = \lambda_\rho \lambda_l / \lambda_S$	$\lambda_{t3} = \lambda_\rho \lambda_l \lambda_h / \lambda_{g_b}$	选对造床更重要的 λ_{t2} 或 λ_{t3}	选对造床更重要的 λ_{t2} 或 λ_{t3}

注: Re 为雷诺数; v 为断面平均流速; Δ 为床面糙度,对于平整河床,当 $d > 0.5 \text{ mm}$ 时,取 $\Delta = d_{50}$,当 $d \leq 0.5 \text{ mm}$,取 $\Delta = 0.5 \text{ mm}$; C_0 为无量度舍齐系数; ν 为水的运动黏滞系数^[2]。

尺(表 1)^[1]。

$$\frac{\partial g_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial g_{by}}{\partial y} + \rho' \frac{\partial z_0}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

式中： g_{bx} 、 g_{by} 分别为 x 、 y 方向的单宽输沙率。

当悬沙与底沙粒径差异较大且对河口河床演变均起着不可忽视的作用,从而不得不考虑全沙模型时,悬移质遵循悬移与扬动相似准则,推移质则服从起动相似条件(表 1)。

2.2 模型沙的选择

模型沙的选择合理与否是动床模型试验成败的关键。悬移质动床模型主要由悬移与起动相似选沙,河口悬沙级配多较均匀,在按 d_{50} 模拟的同时,使原、模型沙的拣选系数 $\varphi = \sqrt{d_{75}/d_{25}}$ 接近便可基本满足要求。推移质动床模型按起动相似(适当兼顾悬移相似)选沙。全沙模型悬移质由悬移与扬动相似选沙,推移质按起动相似选沙。

含盐度的絮凝影响常以下述方式解决。原、模型沙沉速试验分别按实际含盐水与清水考虑,从而可避免盐度的模拟。也可运用 Rouse 公式,由实测含沙量过程线推导原型沙起动流速的沉降速度,同样能避免含盐度对絮凝沉降影响的模拟。

模型沙的起动流速最好采用水槽试验值,原型沙的起动流速则取实测含沙量曲线拐点处(即含沙量曲线由较平缓至突然增大的起始时刻)或推移质输沙率接近零时相应的垂线平均流速,如不得不采用公式计算,则应注意以下 2 点^[3]：①河口泥沙的起动流速明显小于相同粒径的河流泥沙起动流速。而各公式均只适用于河流,如泥沙粒径较细且水深较大时,对于河口泥沙起动流速,计算值常比实际值大。当 $d < 0.03 \text{ mm}$, $H > 5 \text{ m}$ 时,张瑞瑾、沙玉清公式相对较为可靠。②刘家驹认为,若原、模型沙起动流速均用公式计算,则不得运用不同公式,否则既有悖于相似理论,又将导致较大误差。笔者赞同上述观点,根据秦山核电二、三期取水口、杭州湾北岸深槽冲淤变化等工程科研项目模型选沙的经验,发现只要原、模型沙起动流速采用相同的计算式,尽管起动流速计算值各不相同,但各公式的选沙结果往往差异不大。

不同的模型沙各有优缺点,只要密度、粒径与级配选择合理,采用不同的模型沙不会产生大的差异。但下列情况除外^[3]：①研究边坡较陡的深槽或深潭的冲淤变化且模型变率较大时,最好不用一般的塑料沙(长江科学院新近研制的密度不同、棱角峥嵘的塑料沙除外,其水下休止角明显增大),因为其水下休止角较小。②冲刷变幅较大(动床铺沙因此较厚)且模型沙颗粒较细时,最好不用电木粉,因为细颗粒

电木粉厚度较大易板结。③长期进行的同一项目试验最好不用煤粉,除非适时更换,因其较易磨损细化。④未经防腐处理的木粉只能应用于极短时间的试验,否则腐烂变质特性不一。经 CCA 防腐剂处理的木粉用量较大时,必须充分晾干(固化),否则有损人体健康。

2.3 时间变态的处理

如前所述,采用轻质沙后,将会出现河床变形时间比尺远大于水流连续时间比尺的时间变态问题。如下边界潮汐按 λ_{t2} 或 λ_{t3} 均匀缩短,则潮型将变得极其尖瘦,流速过程会受到极大歪曲,泥沙运动更难以相似,为此各单个潮汐过程仍由 λ_{t1} 控制以保证水流运动相似。考虑到悬移质和推移质运动的河床变形方程为较严谨的理论方程,由其导出的河床变形相似准则必须满足,而河口模型的挟沙相似或推移质输沙率相似现阶段只能取决于冲淤验证试验^[1]。为此,取代表性较好的由若干个潮组成的基本单元,基本单元数即试验总潮汐数服从 λ_{t2} 或 λ_{t3} ,以满足泥沙运动相似的要求,即假定若干 λ_S 或 λ_{g_b} ,得到相应的 λ_{t2} 或 λ_{t3} ,根据假定的 λ_S 或 λ_{g_b} 及原型含沙量 S_p 或推移质输沙率 g_{bp} (若河口缺乏实测单宽输沙率资料,可由窦国仁公式^[2]、结构较为合理的岗恰洛夫公式或实测资料较多的梅叶-彼得公式估算),求得模型含沙量 S_m 或推移质输沙率 g_{bm} ,以 λ_{t1} 与 λ_{t2} 或 λ_{t3} 分别控制单个潮汐与试验时段总潮数,采用冲淤与实际吻合较好之 λ_S 或 λ_{g_b} 及相应的 λ_{t2} 或 λ_{t3} 值进行方案试验^[4-5]。

径流随时间的变化比潮流缓慢得多,而且没有潮流那样短的变化周期,故可按河床变形的时间比尺统一缩短。

2.4 冲淤验证资料的选取

实体泥沙模型冲淤验证的目的在于获得河床变形时间比尺及相应的含沙量或推移质输沙率比尺。根据刘家驹、罗肇森等的经验^[6],如在河口治理工程附近水域已建有局部工程并有实施前后的水下地形图及相应的水文测验资料,其前后测图用于验证最佳。若无已建局部工程或相应资料,可用工程河段或水域 2 次测图进行验证。

河口各河段常因年内径、潮流的不同特征表现出不同的冲淤规律,验证时段最好既包括冲刷也含有淤积过程,水流为冲刷和淤积时段的相应径、潮流组合。

2.5 动床范围

泥沙模型试验的动床范围应略大于工程冲淤影响所及区域,动床范围过大会给试验带来诸多困难

甚至影响试验精度。工程冲淤影响甚微的上、下游河段及工程河段单向累积性淤积的高边滩等均可做成定床,当采用水下休止角较小的一般塑料沙模拟时,工程河段非重点研究水域的局部深潭亦可以定床代替。

2.6 动床模型试验的重复性与试验精度

根据实测水下地形图,分析所论河段验证与方案试验时段的冲淤总量,按照总量控制、含沙量或单宽输沙率随潮变化的原则,涨潮时下游加沙,落潮时上游加沙,则动床模型试验的重复性较好,精度也有保证。

3 杭州湾大桥动床模型试验实例

3.1 大桥水域自然地理概况

杭州湾大桥北起海盐县郑家埭,南至慈溪市水路湾,全长 36 km,是跨越杭州湾的第 1 座,也是迄今世界上最长的跨海公路桥梁。

杭州湾系钱塘江入海的强潮河口海湾,其口门开阔,水浅潮强,涌潮汹涌。湾口南汇至镇海宽达 100 km,湾顶澈浦至西三宽约 20 km,总水域面积约 5 000 km²,平均水深 8 ~ 10 m。杭州湾北部澈浦至金山近岸为北岸深槽,南部为巨大的、向北突出的庵东浅滩,湾中部相对较为平坦。外海潮汐传入杭州湾后,潮波逐渐由前进波向驻波转变,从湾口向内至湾顶澈浦,高潮位沿程递增、北岸略高于南岸,低潮位则相反,向内沿程递减且北岸略低于南岸,致潮差向内沿程递增且北岸潮差略大于南岸,至澈浦实测最大潮差达 9.0 m。

钱塘江流域来沙较少,杭州湾泥沙主要由长江口入海泥沙经杭州湾口输入。湾内泥沙以细颗粒悬移质为主,中值粒径在 0.004 ~ 0.016 mm 之间。水体平均含沙量 0.5 ~ 4.4 kg/m³,湾顶澈浦断面附近、庵东滩地与南汇边滩前沿含沙量较高,北岸深槽与金塘水道含沙量较低,大潮含沙量高于中、小潮,冬、春季节含沙量高于夏、秋季。杭州湾河(海)床变化主要取决于悬移质的运动,且与上游交换频繁,呈现出“冬冲夏淤”的季节性变化特征。

3.2 模型设计与主要相似条件

模型上、下游边界应在建桥影响特别是潮位影响以外,为此,选取钱塘江老盐仓和曹娥江马山闸为模型上边界,金山为下边界,模拟总水域面积约 2 200 km² (图 1)^[7]。下边界金山断面宽度超过 40 km,桥位上游的尖山河湾低潮位时大范围露滩,因而不得不采用变率相对大一些的变态模型,以适应这类极其宽浅河口的模拟,遵循河口整体模型平面比尺不超过 1 000、变率一般不超过 10 的相关规定^[8],取 $\lambda_1 = 1\,000$, $\lambda_h =$

100. 模型按实测水下地形制作。

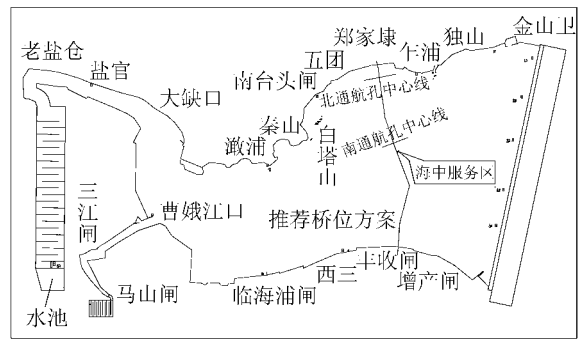


图 1 杭州湾大桥实体模型示意图

钱塘江河口底、悬沙粒径差异不大,河口河床变形主要取决于悬移质的运动,因此按悬移质动床模型设计^[7]。水流运动遵循重力、水流连续相似准则,并满足阻力相似条件,包括局部动床的动床阻力相似准则。泥沙运动遵循起动、悬移和河床变形相似准则,挟沙相似由冲淤验证试验确定。

3.3 模型沙选择

对悬移质动床模型,由悬移和起动相似条件进行模型选沙。经塑料沙、木粉、电木粉等综合比较(比较时,原、模型沙的沉降速度和起动流速分别采用相同的公式计算),选取稳定性较好且环境较为洁净、 $d_{50} = 0.25\text{ mm}$ 的塑料珠体作为模型沙。应用水槽试验和前述实测含沙量曲线拐点相应的垂线平均流速得到塑料沙和原型沙的起动流速,桥位水域含沙盐水和取沙样清水沉降试验获取原、模型沙的沉降速度, $\lambda_w, \lambda_{VC}, \lambda_{nb}$ 的理论值和实际值相应为 1.0, 10, 0.68, 和 0.72, 10.0 ~ 12.5, 0.64, 模型沙的沉降速度略大而起动速度略小,两者的偏离起着相互抵消的作用,基本满足悬移、起动和动床阻力相似条件。

3.4 模型水流验证和定床方案试验下边界潮型的选择

模型下边界采用潮位控制,上边界采用流量控制,利用 2000 年 9 月实测大、中、小潮 18 条垂线全潮水文测验及同步潮位资料进行了较高精度的验证,还应用 2001 年 6 月南、北航道 10 条船同步表层漂流观测资料,进行了漂流迹线的成功验证。

应用定床模型试验进行桥轴线优化(结合数学模型计算),探讨建桥影响。在潮汐河口特别是强潮河口,潮差越大,潮流越强劲,潮差与涨、落急流速的相关性较好。为此,对设计潮流,选用数学模型计算得到的潮差频率 $p = 0.33\%$, $p = 1\%$, $p = 2\%$, $p = 5\%$ 的特大潮和 2000 年 9 月实测大、中、小潮潮位过程作为下边界金山的设计控制条件,上边界为富春江电站多年平均流量。探讨建桥对涌潮的影响,则根据水利部门的要求,下边界为潮差频率 $p = 1\%$ 的

特大潮,上边界为杭州闸口秋季(大潮期)多年平均流量。

3.5 动床验证资料和动床范围的选择

由于大桥水域缺乏已建工程前后的水下地形与相应的水文测验资料,因此,利用 2000 年 9 月与 2001 年 4 月的实测水下地形资料,以及相应的实测水沙过程对海盐湾河床冲淤变化进行验证。验证动床范围上至五团,下至乍浦,长 13 km,离岸 6.5 ~ 7.5 km,总水域面积为 100 km²(图 2)。动床模型试验将要探讨建桥对乍浦港及南、北航道的冲淤影响,为此,方案试验动床范围适当扩大,宽距北岸 20 km(包括南通航孔和庵东滩地前沿深槽),南岸庵东滩地基本处于单向淤积环境,因此以定床代替。方案试验模拟总水域 300 km²,如图 2 所示,初始地同样选 2000 年 9 月实测水下地形。

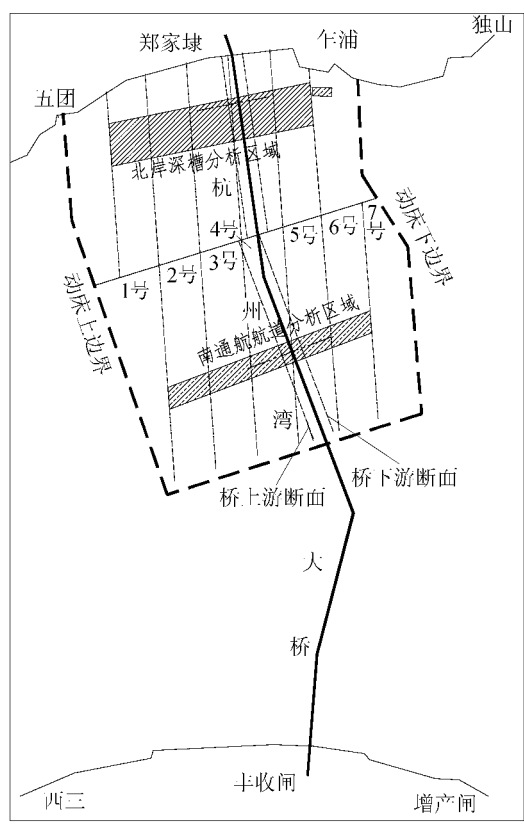


图2 验证与方案试验动床范围示意图

3.6 时间变态的处理和冲淤验证及动床方案试验潮型的选择

选用塑料沙后,将会出现河床变形时间比尺远大于水流连续时间比尺的时间变态问题。大桥所在的杭州湾主要受潮流控制,径流影响不大,河床冲淤变化系大、中、小潮交替作用的结果。为此,下边界潮型取 3 ~ 4 d 连续大、中、小潮的组合作为基本单元,由 λ_{t1} 控制,以保证水流运动的相似;基本单元的个数如前所述取决于冲淤验证试验即受制于 λ_{t2} ,从而满足河床变形相似条件。验证初始地形选 2000

年 9 月实测水下地形,同年 9 ~ 11 月海床以冲为主,11 月至翌年 4 月以淤为主。为此,分别选用与相应秋季大潮期与冬季小潮期平均潮差基本一致的两类潮型(上游来流为相应的平均径流,按 λ_{t2} 统一缩短),先后连续进行冲刷与淤积验证。经冲淤验证试验,当 $\lambda_s = 0.25$, $\lambda_{t2} = 727$ 时,其验证结果与实际吻合较好(冲淤分布验证图略),不仅冲淤部位一致,且量级基本相同。相对误差全河段冲刷和淤积时段分别为 16% 和 2%、分河段一般不超过 15%,最大相对误差也仅 26%。实测断面原、模型深泓冲淤厚度,换算成原型,验证误差基本在 0.5 m 以内。

杭州湾潮汐季节性变化较大,方案试验下边界潮型可按梅汛(4 ~ 7 月)、秋季大潮(8 ~ 12 月)、冬季小潮期(12 月至翌年 3 月)多年平均潮差原、模型大致相当的原则选择连续组合潮型,进行相应于原型 1 a 的试验,上游径流取相应季节的平均下泄流量。

3.7 含沙量模拟与加沙的总量控制

含沙量按半潮平均进行控制与验证,涨潮时下游加沙,落潮时上游加沙。通过微机自动控制半潮加沙历时,以模拟大、中、小潮和不同潮次含沙量的不同。以建桥河段 2000 年 9 月实测含沙量为依据,建立半潮平均含沙量与乍浦潮差的关系,再由验证和试验潮型的乍浦潮差,便可得到桥位上游与下游含沙量控制过程和相应的加沙历时。

桥位河段近年来总体表现为淤积,根据钱塘江河口每年 3 次水下地形测量资料,分析方案试验动床河段近年来年净淤积量及梅汛、秋季大潮、冬季小潮期的差异,确定 1 年的加沙总量和不同季节的分配。采用这种总量控制结合上述自动加沙系统的研制与运用,可大幅度提高泥沙物理模型试验的重复性。杭州湾北岸深槽冲淤变化研究,扫沙量体积的准确测量表明,2 次重复性试验河段冲淤量的相对误差均小于 10% [9]。

3.8 模型试验的主要结论

通过定床模型试验结合数学模型计算,不仅优化了杭州湾大桥桥轴线与桥跨布设方案,而且得到了建桥对水流的影响主要发生在桥位近区、对潮量影响较小、对涌潮基本没有影响的可靠结论 [10];动床模型试验进一步表明,建桥对乍浦港和南、北航道无明显不良影响 [10],从而为杭州湾大桥的立项扫清了建桥对涌潮、对乍浦港影响的两大障碍,为大桥的顺利开工和成功建设打下了坚实的基础。

4 结 语

对不同类型泥沙物理模型的主要相似准则、模型沙的选择、时间变态的处理、冲淤 (下转第 64 页)

有限元计算,南岸现状防汛墙承受的最大弯矩为 325.3 kN·m,经对现状防汛墙的配筋复核,现状防汛墙的承载力能够满足要求。

由于二期围护施工时南侧水闸已经建成,侧向刚度大,因此二期围护结构计算不存在一期围护计算中导流墙的侧向位移问题,可按照常规的基坑围护计算方法,采用同济启明星深基坑支护软件计算。计算结果表明,各项指标均能够满足规范要求。

4 施工及监测结果

该工程的施工重点是导流墙结构及支撑的施加,为保证导流墙 U 形槽下两侧板桩之间的接缝严密,考虑采用成排打桩方法,成排打桩方法是以约 20 根桩为一批预先插在导向架中,先打两端头的 1~2 根板桩,一直打到设计高程后再打中间其余板桩,按顺序打到设计高程。如发现板桩沿轴线方向向前倾斜时,采用修凿桩尖斜度的方法逐渐调整和边打边用卷扬机反向施加拉力的方法来进行纠正。板桩打设完毕后,采用细石混凝土灌板缝止水,抽干墩箱内的水,清淤回填素土夯实,再在板桩顶现浇钢筋混凝土 U 形槽锁口结构,浇筑与泵房室内地坪相平的槽顶盖板。

支撑施工分陆上及水上施加 2 种情况。第 1 道施工为水上施加,第 2 道支撑待围堰形成、基坑内水抽干、干地掏槽后施加。支撑采用钢支撑,钢支撑安装时确保支撑端头与围檩均匀接触,并采用防止钢支撑端部移动脱落的构造措施。

由于该导流措施在施工过程中受地质差异、荷

载、材料、施工工艺及环境等诸多因素的影响和制约,设计中难以准确预测各种可能存在的不确定因素,尤其是在一期导流实施时,结构体系较为复杂,因此在理论分析的基础上进行施工监测是十分必要的^[3]。该工程在施工时重点监测的项目有围护结构变形、孔隙水压力、坑外土体侧向变形和支撑轴力。监测表明,在施加对岸支撑的情况下,围护结构最大侧向变形发生在泵房侧板桩出土泥面处,该位置与计算显示的一致;最大侧向变形为 0.89 cm,略小于计算值 1.03 cm,表明计算值与监测值基本吻合,施工期监测项目数据均在允许范围内,目前泵闸主体结构已完工。

5 结 语

针对大型城市泵闸在难以采用一次拦断河道围堰导流及土石纵向围堰的条件下,提出了采用泵闸导流墙作为纵向围堰的施工导流方案。该方案尽管施工难度较大,但在诸多条件限制的前提下可能是首选方案。该方案在上海多个大型泵闸已成功实施,可为类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 康世荣,陈东山.水利水电工程施工组织设计手册[K].北京:中国水利水电出版社,1996.
[2] 张曙光.长江三峡水利枢纽导流明渠截流与三期围堰工程[K].北京:中国水利水电出版社,2006.
[3] 刘建航,侯学渊.基坑工程手册[K].北京:中国建筑工程出版社,2000.

(收稿日期 2009-02-16 编辑 方宇彤)

(上接第 23 页)

验证资料的选取、局部动床的范围、动床试验的重复性等问题进行了深入探讨,并以杭州湾大桥动床模型试验为例予以进一步说明。

参考文献:

[1] 熊绍隆.潮汐河口泥沙物理模型设计方法[J].水动力学研究与进展,1995,10(4):398-404.
[2] 窦国仁.全沙河工模型试验的研究[J].科学通报,1979,24(14):659-663.
[3] 熊绍隆,胡玉棠.潮汐河口悬移质动床实物模型的理论与实践[J].泥沙研究,1999(1):1-6.
[4] 罗肇森.潮汐河口悬沙淤积和局部动床冲淤模型试验

——射阳河闸下裁弯模型实例[C]//罗肇森.河口治理与大风骤淤.北京:海洋出版社,2009:288-311.

[5] 谢鉴衡.河流模拟[M].北京:水利电力出版社,1990:247-248.
[6] 刘家驹.海岸泥沙运动研究及应用[M].北京:海洋出版社,2009:152.
[7] 熊绍隆,曾剑,韩海寰,等.杭州湾跨海大桥河工模型设计与验证[J].东海海洋,2002,20(4):50-56.
[8] JTJ/T233—98.海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S].
[9] 熊绍隆,陶圭棣,卢祥兴,等.杭州湾北岸深槽冲淤变化试验研究[J].水利学报,1994(10):69-76.
[10] 韩海寰,熊绍隆,朱军政,等.杭州湾跨海大桥对钱塘江河口水流的影响[J].东海海洋,2002,20(4):57-63.

(收稿日期 2009-05-01 编辑 方宇彤)