

文章编号:0559-9350(2017)07-0791-08

河床溯源冲刷影响下的桥墩冲刷

齐梅兰^{1,2}, 郅艳荣¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 结构风工程与城市风环境北京市重点实验室, 北京 100044)

摘要: 主要针对河床采沙所致的溯源冲刷对水下结构物周围冲刷影响的问题, 研究冲刷演变及预测方法, 为结构物安全防洪提供参考。通过水槽试验观测了床面突降条件下的溯源冲刷和墩柱局部冲刷耦合发展规律及其主要影响因素, 建立了溯源与局部耦合冲刷的实时计算方法。溯源冲刷耦合下的局部冲刷与平床时的冲刷之比呈上凸曲线变化, 与距离、流量及跌水水头差有关; 局部冲刷和溯源冲刷对总冲刷深度的贡献比是墩柱与采沙坑距离、跌水水头差及流量的函数; 在河床采沙的一定影响范围内, 溯源冲刷到达时的瞬间冲刷速率远大于局部冲刷速率。本文的计算方法, 可用于预测溯源与局部耦合冲刷时结构物总冲刷深度的发展。

关键词: 墩柱耦合冲刷; 采沙坑; 跌水水头; 溯源冲刷; 局部冲刷

中图分类号: TV147

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slx.20160820

1 研究背景

河道内大范围的采沙, 有时形成床面全河宽长距离明显降低, 在跌水形成和水流输沙量低或清水冲刷条件下, 将形成河床冲刷向上游发展, 称溯源冲刷, 并增大水下结构物周围河床冲刷, 威胁结构物的安全, 如造成跨河桥梁基础的不稳定或桥墩倾斜、倒塌^[1-2]。研究河床采沙引起的溯源冲刷及其对桥墩等水下结构物冲刷的影响和预测, 对结构物防洪管理具有重要意义。

国内外将天然河流水下结构物如堤坝、桥墩的冲刷, 分为一般冲刷和局部冲刷^[3-5]。局部冲刷由墩柱局部流场的改变引起^[6], 通常认为是墩柱冲刷的主要部分^[7], 多以一般冲刷后的床面为参照, 用经验公式^[3-5]计算其冲刷平衡值或随时间的发展^[8-9]。河道采沙引起的溯源冲刷, 具有局部水面比降大^[10-11]、输沙量低的特征^[11], 属于非均匀、非恒定流流态, 导致上游桥址河床全断面冲刷, 即溯源冲刷, 并与桥墩局部冲刷发生耦合演变。其演变规律与天然河床的洪水冲刷^[12]具有明显不同的规律, 与流量、采沙坑尺度及墩柱的位置等有关^[2,13], 其机理目前尚不十分清楚, 与桥墩局部冲刷耦合的发展过程还缺少研究。

本文针对存在大面积采沙的河床, 研究床面突然降低产生的溯源冲刷和桥墩局部冲刷的耦合演变的影响因素、发展规律及计算方法。通过实验室水槽试验, 观测分析床面陡降的几何尺度、水力因素对溯源冲刷和局部冲刷的影响规律, 基于水动力演变与河床动态响应原理, 建立耦合冲刷发展预测的数值模拟, 提出溯源冲刷影响下桥墩冲刷的定量演变关系。

2 试验与数值方法

2.1 水槽试验设计 试验在可调坡的矩形水槽中进行, 用底部铺中值粒径 d_{50} 为0.6 mm的均匀石英沙

收稿日期: 2016-08-08; 网络出版日期: 2017-07-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20170713.0911.003.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578062); 中国铁路总公司科技研究开发计划资助项目(2014G009-H)

作者简介: 齐梅兰(1956-), 女, 河北石家庄人, 教授, 博士, 主要从事河流海岸动力学及泥沙研究。E-mail: mlqi@bjtu.edu.cn

塑造高度为 D 的跌坎，以模拟采沙坑的上游端，圆柱墩位于跌坎上游。试验布置如图 1 所示。其中，计算域坐标原点设为跌坎坡脚处， u_1 表示上游流速， h_1 表示来流水深， d 为圆柱墩直径 (0.02 m)， L 为墩柱面与跌坎边缘距离， α 为跌坎坡度， h_2 表示跌坎下游水深， Δh 为跌水水头差。

试验条件及参数设置如表 1。 q 表示来流单宽流量， $Fr=u_1/\sqrt{gh}$ 为上游来流的弗劳德数， g 为重力加速度。水槽流量用电磁流量计控制，入口处采用格栅稳定水流，末端设可调节尾门控制水位，在跌坎上游形成初始均匀流。调节尾门控制跌坎处跌水水头，观测局部跌水作用下跌坎的溯源冲刷。水位和床面均采用精度为 ± 0.1 mm 的无接触式超声仪进行实时自动测量。

在表 1 中给出的水流条件下，试验所用床沙的起动流速 u_c 约为 0.22 ~ 0.24 m/s，在无采沙跌坎引起溯源冲刷时，满足 $u < u_c$ 的墩柱清水冲刷条件。

表 1 试验条件及参数设置

组次	$q \times 10^{-3}/(\text{m}^2/\text{s})$	h_1/m	h_2/m	$u_1/(\text{m}/\text{s})$	$\Delta h/\text{m}$	Fr	D/m	L/m
1—3	5.56	0.037	0.005	0.150	0.132	0.249	0.1	0.29~0.69
4	7.78	0.047	0.005	0.165	0.142	0.244	0.1	0.49
5	10.00	0.056	0.007	0.179	0.149	0.241	0.1	0.49
6	12.22	0.062	0.007	0.197	0.155	0.253	0.1	0.49
7—8	5.56	0.037	0.008~0.010	0.150	0.036~0.055	0.249	0.1	0.49
9—10	10.00	0.056	0.007	0.179	0.131	0.229	0.06~0.08	0.49

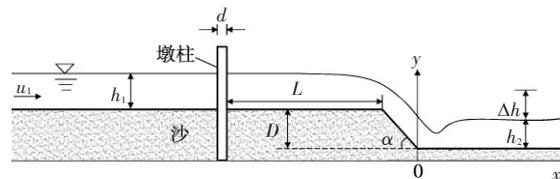


图 1 试验布置示意图

2.2 耦合冲刷计算原理及方法

2.2.1 溯源冲刷模型 由于溯源冲刷过程中水流随时间和空间变化、并具有清水冲刷特征，考虑采用一维非恒定流 Saint-Venant 方程组和推移质运动的泥沙方程描述水、沙运动，并用床面泥沙连续方程^[14]描述河床变形。具体方程为：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_0 + S_f) \quad (2)$$

$$q_s(q, h) = 8 \sqrt{g \Delta d_{50}^3} \left(\max(0, \tau_* - \tau_{*c}) \right)^{3/2} \quad (3)$$

$$(1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

式中： h 为水深； $q = uh$ ，即单宽流量； u 为水深平均流速； S_0 和 S_f 分别为床面坡度和摩阻坡度， S_f 用下式计算：

$$S_f = \frac{n^2 q^2}{h^{10/3}} \quad (5)$$

式中： n 为床面糙率系数，本文取 0.017； q_s 为单宽输沙率； $\nabla = (\rho_s - \rho)/\rho$ ，即床沙相对密度， ρ_s 为泥沙颗粒密度， ρ 为水的密度； τ_* 为量纲一床面切应力：

$$\tau_* = \frac{n^2 q^2}{\nabla d_{50} h^{7/3}} \quad (6)$$

τ_{*c} 为量纲一临界泥沙起动切应力, 本文取0.047; λ 为河床孔隙率, 取 $\lambda=0.4$; z_b 为床面高程。

式(1)–(4)采用数值法求解, 水流方程采用Godunov格式并用HLL黎曼算子处理采沙跌坎处的水流急变^[15]。水流方程和河床变形方程的数值离散方法分别为有限体积和有限差分法, 计算速度快并且可得到二阶精度计算结果。设 Δt 时段的溯源冲刷厚度为 d_z , 则 t_{i+1} 时刻冲刷的床面高程为

$$z_b|_{t_{i+1}} = z_b|_{t_i} - d_z \quad (7)$$

式中: i 为时间循环指标。

2.2.2 局部冲刷发展过程计算 针对桥墩局部冲刷最大点的深度, 采用如下公式^[8]预测其随时间的发展:

$$d_s = d_{sm} \exp \left(-0.03 \left| \frac{u_c}{u} \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right) \quad (8)$$

式中: d_s 为随时间发展的局部冲刷深度, d_{sm} 为冲刷平衡最大深度^[3,5], t 为时间; t_e 为冲刷达到平衡状态所需时间, 在满足 $u/u_c > 0.4$ 的条件下, t_e 如下计算:

$$t_e = \begin{cases} 48.26 \frac{d}{u} \left(\frac{u}{u_c} - 0.4 \right) & \frac{h}{d} > 6 \\ 30.89 \frac{d}{u} \left(\frac{u}{u_c} - 0.4 \right) \left(\frac{h}{d} \right)^{0.25} & \frac{h}{d} \leq 6 \end{cases} \quad (9)$$

2.2.3 冲刷的耦合计算方法 在溯源冲刷过程中, 由式(1)–(2)可见桥址断面水流流速和水深随时间不断变化, 因而, 全断面冲刷和桥墩局部冲刷随之变化, 见式(3)–(9), 并且二者相互影响, 耦合发展。考虑受水流作用的床沙动态响应, 采用时间分步法处理耦合冲刷的计算, 在每一时间步对方程(1)–(9)进行计算, 对床面边界进行处理, 进入下一时间步的计算, 循环计算直至溯源冲刷达到平衡。计算过程中, 可根据需要随时输出计算结果。具体计算步骤如图2, 其中 t_0 为初始时刻, j 为空间循环指标, k 表示桥址断面位置, nx 为空间节点总数, Δd_s 为 Δt 时段的局部冲刷深度, ϵ 为控制精度。

2.2.4 计算条件 数值计算共进行37组次, 其中10组次同表1, 目的用试验结果验证数值计算结果, 其余27组次用于延伸影响因素及冲刷发展规律的研究, 即分别在表1中组次1–3、6中增加18组 L 变化, 组次5–6和7–8中增加9组 Δh 和 D 的变化。

3 结果及验证

3.1 冲刷过程 由图3给出的组次5–6和9–10条件下, $L/d=24.5$ 的墩柱断面溯源冲刷和局部冲刷的演变过程, 可见以下特征: (1)两种冲刷的发展趋势及大小明显不同; (2)溯源冲刷虽滞后于局部冲刷, 但保持了较长时间的高冲刷速率; (3)后期的溯源冲刷远大于局部冲刷。图3(a)和3(b)表明, 相同跌坎高度下, 单宽流量增加约22%或表示水流强度的弗劳德数 $Fr(=u_1/\sqrt{gh})$ 增大5%, 可使最大时刻的溯源和局部冲刷深度分别增大约5%和11%。图3(a)、(c)和(d)反映同流量条件下, 不同跌坎高度引起溯源和局部冲刷的变化。图3(a)与图3(d)的跌坎高度之比为1.67, 溯源冲刷的最大深度之

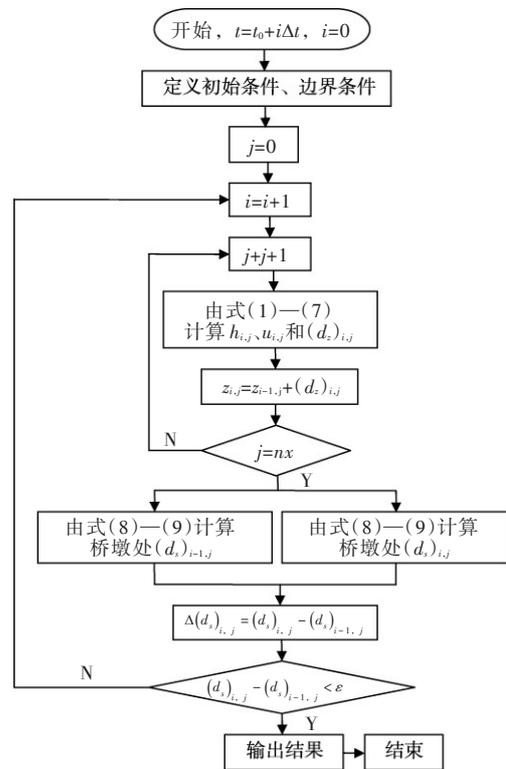


图2 溯源与局部冲刷耦合计算流程

比为 1.9，而局部冲刷深度之比仅为 1.05 或变化甚微。表明局部冲刷随流量增长较大，而溯源冲刷随采沙跌坎高度明显增大。

3.2 数值计算的验证 溯源冲刷过程的计算结果与试验观测结果的对比验证可见图 3，图中散点为溯源冲刷试验数据。比较可知，计算与试验结果的最大误差为 10.8%，出现在图 3(b)中，表明计算结果与试验吻合较好。

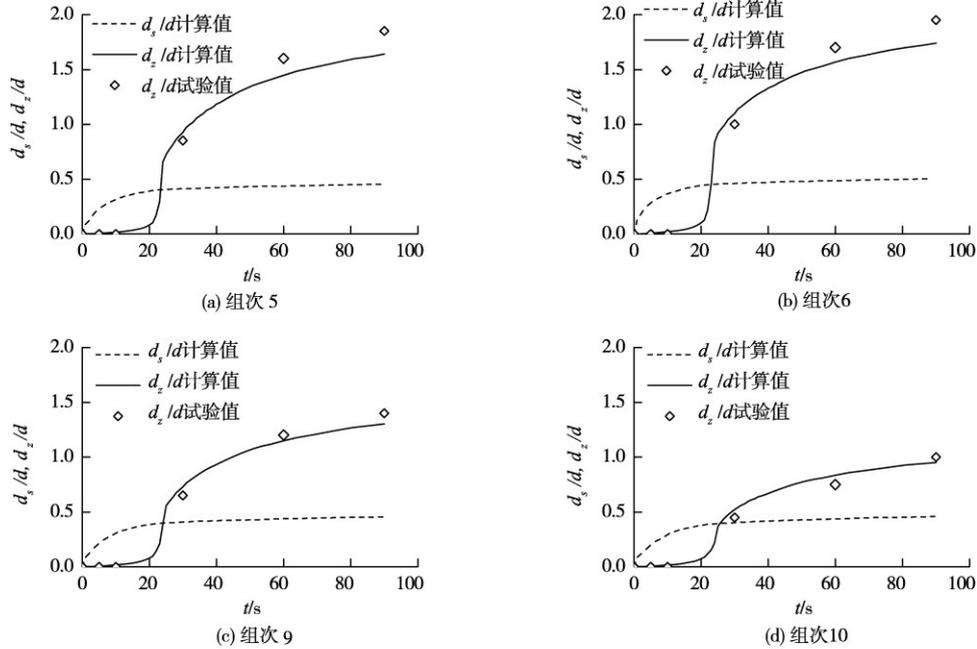


图 3 溯源冲刷和局部冲刷的变化过程

局部冲刷深度由于与溯源冲刷耦合而发展迅速，且水流含沙量高，仪器感应欠准确，其过程的试验观测难以实施，仅试验停止时 ($t=90s$) 的局部冲刷，记为 d_{se} ，观测值精度高，可用于计算结果的验证，见图 4。图 4 中虚线为 $\pm 20\%$ 误差线，而计算与试验值的最大误差为 $\pm 16\%$ ，不超过该范围。

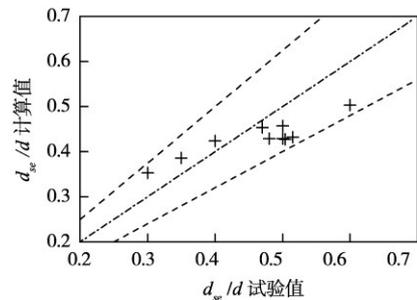


图 4 局部冲刷深度计算值与试验值对比

4 冲刷深度的影响因素及变化趋势

4.1 局部冲刷 用本文提出的数值计算方法，对溯源冲刷影响的桥墩局部冲刷进行了多种条件的计算。采用计算时段末 $t=90s$ 的值 d_{se} ，并与无溯源冲刷的同时刻局部冲刷 (记为 d_{nse}) 作对比，分析流量、跌水水头差的作用。图 5 表示溯源冲刷条件下，流量和跌水水头对局部冲刷深度的影响。由图可见， d_{se}/d_{nse} 随相对单宽流量 q/q_0 (图 5(a)) 和相对跌水高差 $\Delta h/h_1$ (图 5(b)) 的增加均变小， q_0 取为本试验中的最小流量 $5.56 \times 10^{-3} m^2/s$ 。即是说，在本试验范围内，由于溯源冲刷的作用，随流量和跌水高差的增大，墩柱局部冲刷坑的深度相对于同水流条件、无溯源冲刷时是减小的。因此，当大流量、有溯源冲刷发生时，如用不考虑采沙坑时文献 [3, 5] 的公式计算局部冲刷深度，计算值将偏大，但应用中则偏于安全。

溯源冲刷耦合下桥墩局部冲刷相对值的增减关系，与墩柱距采沙坑跌坎距离 L 有关。图 6 绘制的两条 d_{se}/d_{nse} 与 L/d 关系曲线均呈上凸型，存在极大值。流量大、跌水高差较小时，极值较小但出现的距离较远，相反则极值较大且出现的距离较近。极值点向左， d_{se}/d_{nse} 随距离减小，甚至小于 1，即越

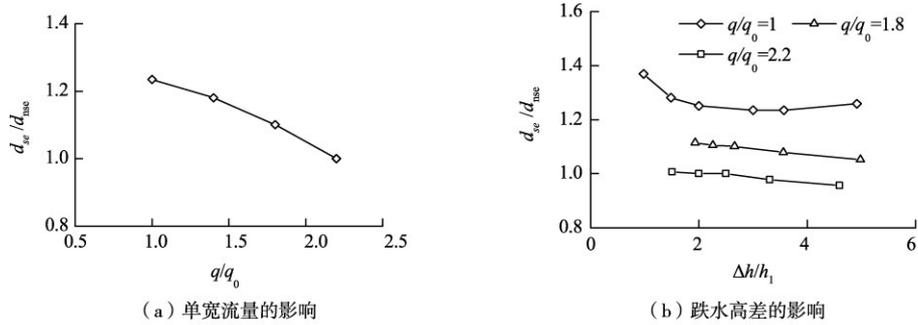
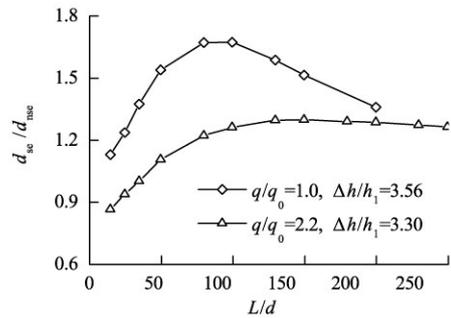


图5 相对局部冲刷深度的影响因素

靠近采沙跌坎，局部冲刷深度较无坑时越小。由极值点向右， d_{se}/d_{nse} 随距离增大而减小，直至趋于1，即距采沙跌坎越远，局部冲刷深度越与无坑时接近，缘于溯源冲刷随距离减小(下节分析)。

4.2 溯源冲刷 采沙对上游桥墩冲刷的影响，主要在于溯源冲刷明显增大，见图3。这里取计算时段末 $t=90s$ 时的溯源冲刷深度，记为 d_{ze} ，与同时刻局部冲刷深度 d_{se} 之比，对溯源冲刷作深入分析。针对与采沙坑相同距离(相应于图6中各曲线的 $L/d=24.5$) 处的两种冲刷，在图7(a)和图7(b)中分别绘出了 d_{ze}/d_{se}



随流量和跌坎处跌水高差的变化关系。图7(a)中 $\Delta h/h_1$ 很接近的两数据点(分别为3.560和3.568)，流量比 q/q_0 由1增大至1.8， d_{ze}/d_{se} 由3.44增大至5.53，增长斜率约为2.61。图7(b) d_{ze}/d_{se} 随 $\Delta h/h_1$ 以0.80~2.13的斜率增长，流量越大，斜率越大。故由图7可知，(1)本研究范围内同一位置处，溯源冲刷深度随流量和采沙坑跌水高差均呈增长趋势，但前者的影响大于后者；(2)溯源冲刷的深度是局部冲刷的1.88~8.59倍，是对桥墩冲刷贡献最主要的部分；(3)溯源冲刷的大幅增加，是局部冲刷深度相对于无采沙坑时减小的原因。

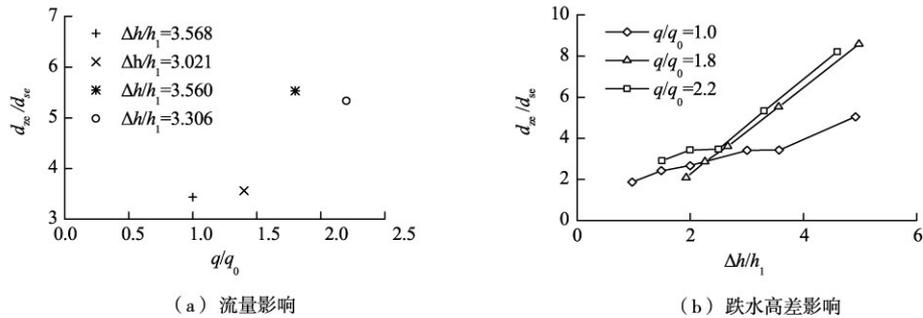


图7 d_{ze}/d_{se} 随流量和跌水高差的变化

溯源冲刷随距采沙坑距离迅速衰减，如图8。 d_{ze}/d_{se} 随距离 L/d 的衰减关系与流量和跌水高差有关，图中流量增大时，溯源冲刷距离明显增大。本文仅计算了变化强烈的时段，计算时段末的冲刷远未达到平衡，当计算时段增长时，溯源冲刷还将继续延伸。比较图8和图6，在 d_{ze}/d_{se} 变化趋缓的拐点位置处，如 $L/d \approx 60$ ($q/q_0=1.0$) 和 $L/d \approx 120$ ($q/q_0=2.2$)， d_{se}/d_{nse} 达到最大；近距离处 d_{ze}/d_{se} 较大而 d_{se}/d_{nse} 较小， d_{ze}/d_{se} 随 L/d 减小时 d_{se}/d_{nse} 增大；拐点右侧 d_{ze}/d_{se} 随 L/d 趋于0时， d_{se}/d_{nse} 趋于1。

4.3 总冲刷深度 桥墩的总冲刷深度，记为 d_T ，是溯源和局部冲刷之和。在各种影响因素下， d_T 在本文计算时段内的变化见图9。图9(a)给出了不同流量增值的总冲刷深度变化过程，其中 $\Delta h/h_1$ 较接近，并辅以无采沙坑时的局部冲刷 d_{ns} 过程线。比较 d_T 和 d_{ns} 曲线可知，流量增大对 d_T 的影响远大于 d_{ns} 。图9(b)是组次1—3的总冲刷和同水流条件无采沙坑的局部冲刷过程，随距跌坎距离增大，总冲

刷明显减小。图9(c)和图9(d)分别表示跌坎高度即采沙深度 D/d 和跌坎处的跌水水头差 $\Delta h/h_1$ 的影响, $\Delta h/h_1$ 与 D/d 及流量相关, 所以, 两图中的 d_T 变化趋势相近。

某种条件下桥墩冲刷主要是局部的^[6], 但在溯源冲刷影响下, 桥墩总冲刷深度很大, 而局部冲刷深度占比可能很小, 此时, 仅以局部冲刷坑深度衡量墩柱的稳定性是不安全的。图9中 $d_T/d_{ns} \gg 1$, 即是说, 对总冲刷的贡献主要是溯源冲刷。如流量和距跌坎的距离对 d_T 的影响大, 是因为对 d_z 影响大的缘故, 可见图10(a)和图10(b)。图10(b)中溯源冲刷随距离衰减明显, 与图9(b)中总冲刷深度随距离明显减小吻合。

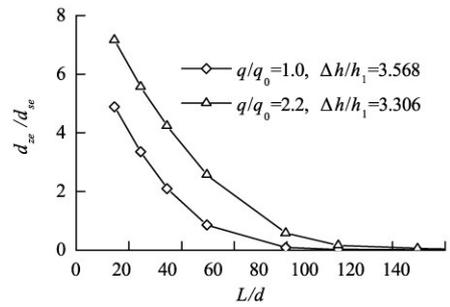


图8 溯源冲刷的影响距离

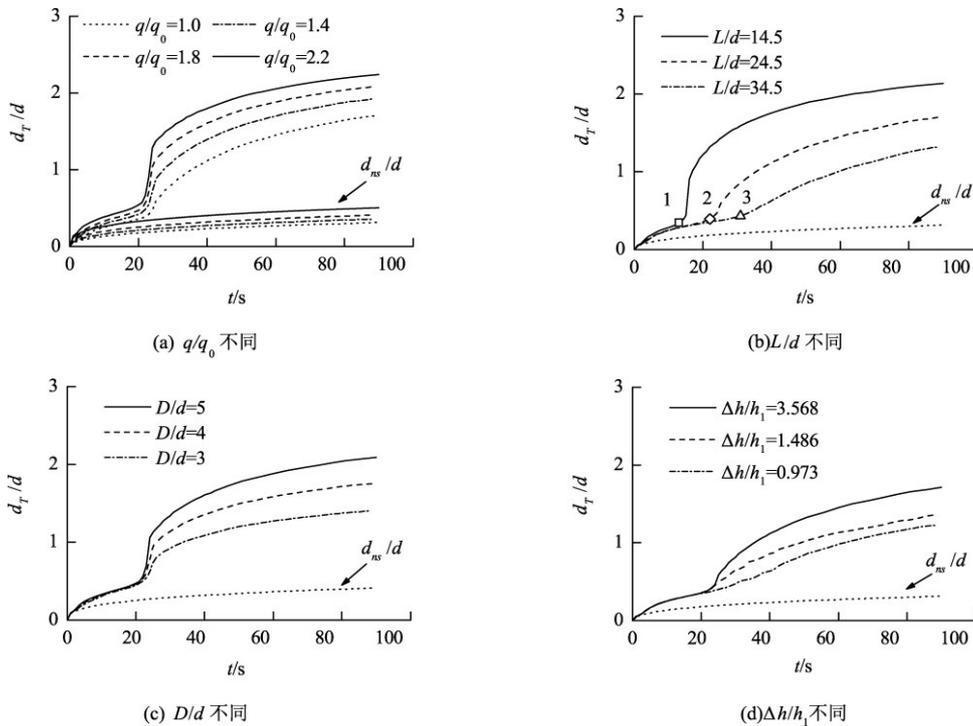


图9 总冲刷深度的发展过程

图9中的总冲刷深度变化曲线存在一个增长率变化的拐点, 该点之左侧, 溯源冲刷尚未到达或刚临近墩柱, 局部冲刷占主要成分; 右侧则由于溯源冲刷在墩柱处陡增, 以数倍于局部冲刷的比例成为总冲刷深度主要成分。图9(b)中“1、2、3”点明显显示了 L/d 越大, 溯源冲刷到达的时间越晚, 从

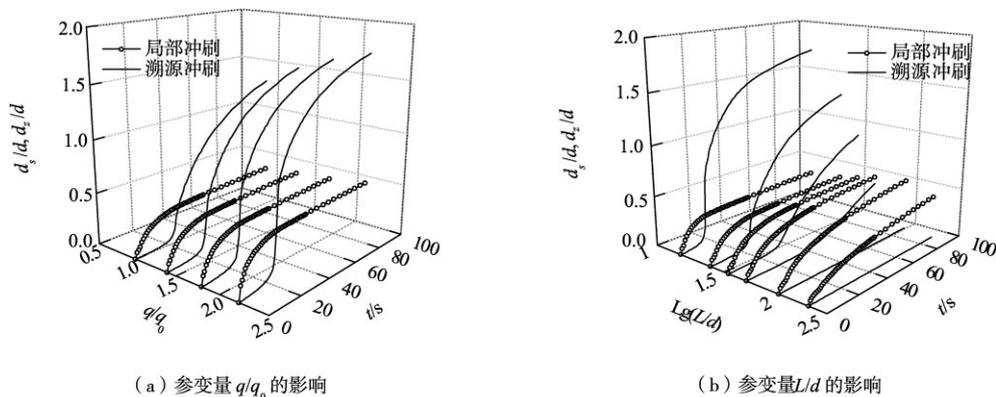


图10 流量影响下的局部和溯源冲刷

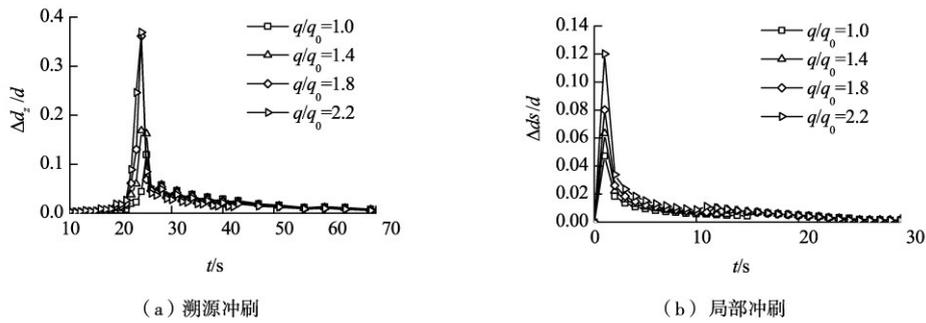


图 11 冲刷增长速率

而拐点出现越滞后。比较图 9(a)和图 11(a)可知, 拐点处溯源冲刷陡增与溯源冲刷速率激增同时刻出现, 并且流量越大, 则溯源冲刷速率达到峰值和出现拐点的时间越短。图 11(b)所示 $L/d=24.5$ 的局部冲刷速率与图 11(a)相比具有两个特点: (1)冲刷速率峰值于水流开始作用的瞬间即可达到, 溯源冲刷速率峰值较之滞后; (2)其峰值远小于溯源冲刷。因此, 溯源冲刷是后期墩柱总冲刷的主要部分。

5 结论

采用试验和数值计算方法, 研究了采沙坑溯源冲刷影响上下游墩柱的冲刷规律、影响因素, 分析了墩柱周围河床溯源冲刷、局部冲刷以及总冲刷深度随时间的发展。结论如下: (1)采沙坑引起的溯源冲刷, 对其影响范围内水下结构物的总冲刷有贡献, 其占比与流量、桥墩位置及跌坎处水头差有关, 最大可达 80%; (2)溯源冲刷耦合下, 桥墩局部冲刷深度与无采沙时冲刷深度之比, 在近距离处随距离增大至大于 1 的极值、远距离处随距离增大而减小并趋于 1, 极值所处的拐点位置随流量减小而减小, 极值的大小则随流量减小而增大; (3)一定范围内的桥墩, 当遭遇河床采沙引起的高速率溯源冲刷时, 总冲刷深度将瞬间增大至数倍于局部冲刷, 应引起河道及水下结构物安全管理的重视。应当指出, 本文目的在于建立溯源冲刷与结构物局部冲刷的耦合演变的预测计算方法, 仅仅考虑了采沙的河床长距离全断面降低的特殊情况, 作了一维水沙输移和床沙均匀假设, 相对于非均匀沙而言计算结果可能偏大, 且不适用于采沙坑于床面呈明显三维分布的状况。本文仅计算了冲刷演变较强时段内的变化规律, 计算时间较短, 但本文提出的计算方法可用于对长时间冲刷发展的模拟研究, 有待深入进行。

参 考 文 献:

- [1] MOSSA J, MARKS S R . Pit evulsions and plan form change on a Mined River floodplain: Tangipahoa River, Louisiana[J] . Physical Geography, 2011, 32(6): 512-532 .
- [2] 齐梅兰 . 采沙河床桥墩冲刷研究[J] . 水利学报, 2005, 36(7): 835-839 .
- [3] 中华人民共和国铁道部 . TB 10017—99 铁路工程水文勘测设计规范[S] . 北京: 中国铁道出版社, 1999 .
- [4] SHEPPARD D M, MELVILLE B W, DEMIR H . Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers [J] . Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(1): 14-23 .
- [5] MELVILLE B W . Pier and abutment scour: integrated approach[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(2): 125-136 .
- [6] KIRKIL G, CONSTANTINESCU S G, ETTEMA R . Detached eddy simulation investigation of turbulence at a circular pier with scour hole[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(11): 888-901 .
- [7] 梁森栋, 张永良 . 大桥复合桥墩局部冲刷深度的计算分析[J] . 水利学报, 2011, 42(11): 1334-1340 .
- [8] MELVILLE B W, CHIEW Y M . Time scale for local scour at bridge piers[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(1): 59-65 .
- [9] GUO J K . Semi-analytical model for temporal clear-water scour at prototype piers[J] . Journal of Hydraulic Re-

search, 2014, 52(3): 366-374.

- [10] 陈建国, 周文浩, 韩闪闪. 三门峡水库水沙运动的若干规律—兼论水库溯源冲刷对黄河下游河道的影响[J]. 水利学报, 2014, 45(10): 1165-1174.
- [11] 任杰, 曾学智, 贾良文. 东江下游河段溯源侵蚀特征与机理[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 84-88.
- [12] HONG J H, GOYAL M K, CHIEW Y M, et al. Predicting time-dependent pier scour depth with support vector regression[J]. Journal of Hydrology, 2012(468/469): 241-248.
- [13] LI JINZHAO, QI MEILAN. Local scour induced by upstream riverbed level lowering[J]. Natural Hazards, 2015, 77(3): 1811-1827.
- [14] 张大伟, 权锦, 何晓燕, 等. 堰塞坝漫顶溃决试验及相关数学模型研究[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 979-986.
- [15] 毕胜, 周建中, 陈生水, 等. Godunov 格式下高精度二维水流—输运耦合模型[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 706-714.

Pier scour under influence of headcut erosion of sand pit

QI Meilan^{1, 2}, KUAI Yanrong¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment, Beijing 100044, China)

Abstract: Considering the influence of retrogressive erosion on total scour at underwater structure, the study of scour evolution and prediction was conducted to provide a reference to the flood protection of structure. Based on the flume experiments, the evolution and influential factors of retrogressive and local scour were observed. In addition, a time-dependent calculation method was proposed for the coupling scour. The ratio of local scour with or without retrogressive erosion varies with the distance between the pier and sand pit in an up-convex shape curve, of which increase or decrease is related to the flow discharge and hydraulic drop at the pit. Furthermore, the contribution ratio of local scour and retrogressive scour to the total scour depend on distance between pier and sandpit, hydraulic drop and discharge. In a featured location, the rate of retrogressive erosion is instantly times larger than that of the local scour at pier. The coupling calculation method proposed in this paper is capable to predict the total scour depth at a pier including retrogressive erosion and local scour.

Keywords: pier coupling scour; sand pit; hydraulic drop; retrogressive scour; local scour

(责任编辑: 李福田)