

采用拦沙坝防护的浅基桥梁墩台局部冲刷研究*

伊廷军¹, 吴清波², 赵海镜³

(1. 胜利油田胜利工程建设(集团)有限责任公司第一工程处, 山东 东营 257000; 2. 郑州市水利建筑勘测设计院, 郑州 450007; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 采用水力模型试验的方法, 针对典型工程, 对桥墩周围河床的局部冲刷及拦沙坝的防护作用进行研究。初步研究表明, 在桥墩下游修建拦沙坝作为遏制浅基桥梁附近河段溯源冲刷的工程防护形式是可行的, 拦沙坝减缓桥墩附近局部冲刷的作用非常明显。通过研究提出的采用拦沙坝防护的桥墩局部冲刷公式为浅基桥梁工程防护设计提供了参考依据。

关键词: 桥梁墩台; 局部掏刷; 拦沙坝; 防护底坡

中图分类号: TV131.63

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)03-0150-03

Study on Local Scour Around Piers Protected by the Sediment Storage Dam

YI Ting-jun¹, WU Qing-bo², ZHAO Hai-jing³

(1. No. 1 Project Section of Shengli Oil Field Shengli Engineering Construction Co. Ltd., Dongying, Shandong 257000, China; 2. Zhengzhou Institute of Design and Surveying for Water Conservancy, Zhengzhou 450003, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Aimed at the representative project in the piers, which is protected by the downstream sediment storage dam, this paper has studied local scour in piers and defensive function of the sediment storage dam by means of hydraulic model tests. In primary conclusions, as a kind of protective measure, the sediment storage dam is feasible, which can control backward erosion near these bridges have no enough buried depth, and its function of alleviating scouring depth is very obvious based on the study. The formula of local scour depth near piers protected by the sediment storage dam, deduced from the paper, will provide references for practices.

Key words: bridge pier; local scour; the sediment storage dam; defensive gradient

交通的发展经常需要跨河修建桥梁, 由于桥梁墩台阻挡水流而产生水流冲击和涡流作用使得桥墩周围河床发生的局部冲淤变形叫做桥墩的局部冲刷。近年来, 由于基建规模扩大, 沙石料需求量猛增; 利益的驱动使河道的挖沙处于无序、难于管理的状态。河道内大量挖取沙石, 造成铁路、公路桥梁附近的河床发生溯源冲刷, 多数河床的下切速度加剧, 使得桥梁墩台的基础埋置深度不断减小, 原本埋深足够的一些桥梁也变为浅基桥梁, 一些先天不足的浅基桥梁墩台基础则存在更大的安全隐患, 部分桥梁的墩台基础已悬于河床之上。基础埋置深度的减小一方面削弱了桥梁墩台的稳定性, 另一方面造成部分桥梁墩台的承载力不足, 发生墩顶横向震动幅值超限或晃动, 这些都威胁到桥梁建筑物的安全与稳定。为此, 交通部门设法采取各种防护措施来保护桥梁。防护工程施工通常受到地理条件、施工技术、工程造价等因素的限制。经过工程实践验证, 在桥墩下游适当位置修建拦沙坝是一种较好的防护形式。但是, 受到桥墩局部冲刷问题的复杂性和现有研究条件的限制, 目前对于拦沙坝的防护效果

及其与桥墩冲刷之间的相互影响尚未搞清楚, 与之相关的文献也较少, 缺乏细致系统的研究。因此, 开展该方面的研究对于减轻桥梁墩台附近河床遭受的水力侵蚀, 进而指导浅基桥梁墩台防护工程设计具有重要意义。

1 典型河道桥梁工程的选择和模型设计

选择陇海线上距西安 5 km 的浐河铁路桥为典型桥梁。桥宽约 140 m, 5 孔, 单孔净宽 25 m, 墩厚 2.5 m, 墩长 7.5 m, 桥墩承台顶高程 391.58 m。铁路桥上游约 100 m 处有一座公路桥, 距铁路桥下游 75 m, 修有拦沙坝, 用来防护下游河道冲刷不致向上发展影响桥墩安全。根据研究对象、河道特性和试验任务要求, 水力概化模型分为整体试验(变态模型: 水平比尺 $\lambda_L = 60$, 垂直比尺 $\lambda_H = 40$)和单体系列试验(正态模型, 几何比尺分别为: 25, 35, 45)。在整体模型试验中, 为研究拦沙坝形式尺寸及平面布置对铁路桥防护作用的影响, 优化拦沙坝设计, 采用两类试验方案: 一类是改变拦沙坝坝顶高程, 一类是改变拦沙坝与桥梁间的距离(表 1)。

* 收稿日期: 2007-08-22

基金项目: 郑州铁路局科技攻关项目

作者简介: 伊廷军(1972-), 男, 山东沂源人, 工程师, 主要从事水利工程管理及施工工作。E-mail: yuwei1111@163.com

通信作者: 赵海镜(1976-), 男, 河南巩义人, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: zhaohaijing019@163.com

表 1 整体模型试验中各方案具体参数

方案名称	拦沙坝堰型	拦沙坝 坝顶高程/m	坝墩间距/ m
设计方案	曲线型实用堰	390	75
修改方案 1	曲线型实用堰	390. 5	75
修改方案 2	折线型实用堰	390	45

注: 1. 坝墩间距为坝前沿至桥墩中心线的距离; 2. 曲线型实用堰上游坝面为铅直面, 顶部为宽 1. 5 m 的水平面, 下游坝面为半径 2. 35 m 的圆弧面。圆弧面末端平接挑流鼻坎; 3. 折线型实用堰坝上 游立面仍保持铅直面, 顶面保持水平面不变, 下游坝面为 1∶ 1. 25 的倾斜面, 下部接长度> 1. 0 m 的水平段。

表 2 实测桥墩局部冲坑形态特征值(坝墩间距 75 m)

单宽流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	坝顶 高程/ m	$h_s/$ m	$l_1/$ m	$l_2/$ m	i_1	i_2
2. 76	390	2. 75	5	31	0. 550	0. 089
	390. 5	2. 3	3. 8	23	0. 605	0. 100
5. 59	390	4. 1	5. 2	33. 5	0. 788	0. 122
	390. 5	3. 7	4. 7	31. 5	0. 787	0. 117
	391	3. 25	5. 1	26. 5	0. 637	0. 123
	391. 5	2. 65	5. 1	24. 5	0. 520	0. 108
7. 05	390	4. 43	5. 3	34	0. 836	0. 130
	390. 5	4	4. 9	29. 5	0. 816	0. 136
8. 4	390	5. 4	6. 3	34. 5	0. 857	0. 157
	390. 5	4. 25	6	34. 5	0. 708	0. 123
	391	3. 95	5. 8	36. 5	0. 681	0. 108
	391. 5	3. 35	5. 5	37	0. 609	0. 091

注: 1. h_s 为局部冲坑最大深度; 2. l_1 、 l_2 分别表示冲坑最深点距冲坑上游坡、下游坡边缘的距离; 3. i_1 、 i_2 分别表示冲坑上游坡、下游坡的坡度。下表同。

表 3 实测桥墩局部冲坑形态特征值(坝墩间距 45 m)

单宽流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	坝顶 高程/ m	$h_s/$ m	$l_1/$ m	$l_2/$ m	i_1	i_2
2. 76	390. 14	2. 93	5	32	0. 586	0. 092
	390. 5	2. 63	4. 5	27	0. 584	0. 097
	390. 75	2. 4	4. 5	22. 5	0. 533	0. 107
	391	2. 35	4. 9	22	0. 480	0. 107
	391. 25	1. 8	4. 7	22	0. 383	0. 082
	391. 5	1. 7	3. 9	17	0. 436	0. 100
5. 59	390. 5	3. 88	5. 5	34. 5	0. 705	0. 112
	390. 75	3. 63	4. 8	29. 5	0. 756	0. 123
	391	3. 6	5	29. 5	0. 720	0. 122
	391. 25	2. 9	4. 9	26	0. 592	0. 112
	391. 5	3. 18	4. 8	24. 5	0. 663	0. 130
7. 05	390. 14	4. 43	5. 5	34. 5	0. 805	0. 128
	390. 5	4. 375	5. 7	34. 5	0. 768	0. 127
	390. 75	4. 13	5. 1	34. 5	0. 810	0. 120
	391	4	5. 5	32	0. 727	0. 125
	391. 25	3. 4	5. 25	27	0. 648	0. 126
	391. 5	3. 4	5. 5	27	0. 618	0. 126
8. 4	390. 14	5. 37	6. 5	34. 5	0. 826	0. 156
	390. 5	4. 925	6. 3	34. 5	0. 782	0. 143
	390. 75	4. 25	5. 3	34. 5	0. 802	0. 123
	391	4. 3	5. 7	34. 5	0. 754	0. 125
	391. 5	3. 8	5. 75	32	0. 661	0. 119

2 拦沙坝对上游桥墩的防护作用分析

2. 1 拦沙坝对桥墩局部冲刷的影响

试验结果表明: 同级流量下, 一方面随着坝顶高程的增加, 桥墩附近局部冲刷程度相应减弱(表 2, 3); 另一方面随着拦沙坝与桥墩之间距离的加大, 桥墩附近局部冲刷程度相应减轻(表 4, 5)。

由试验成果可见: 单宽流量一定时, 改变拦沙坝坝顶高程及拦沙坝与桥墩之间的距离, 可以改变河床纵坡、调整墩前断面水流的速度、控制桥墩局部冲坑的深度和范围。

因此, 可引入防护底坡的概念, 用 i_c 表示, $i_c =$ (桥墩中心线处原始床面高程– 拦沙坝坝顶高程) / 两者的间距, 作为指标来反映拦沙坝对桥墩附近流场及局部冲刷的影响。在比尺 25 的修改方案中, 坝顶高程 390. 14, 390. 75 m 的防护底坡, 分别与比尺 25 设计方案中坝顶高程 390. 0, 390. 5 m 的防护底坡相近, 即 i_c 分别为– 0. 01 和 0, 在同级流量下, 桥墩局部冲刷深度及范围则十分接近; 对比尺 35, 45 的单体模型试验, 防护底坡 i_c 值分别变化在– 0. 008 9~ 0. 013 3, – 0. 02~ 0. 013 3, 随着防护底坡 i_c 值(反坡程度) 的增大, 桥墩局部冲刷深度逐渐减小。

表 4 比尺 35 实测桥墩冲坑深度值

坝顶 高程/ m	$q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	$h_s/$ m	实测墩前 水位/ m	行近水流 深度/ m
390	2. 76	3. 185	391. 427	1. 295
	5. 59	3. 43	391. 6545	1. 82
	7. 05	3. 675	391. 7735	1. 925
	8. 4	3. 815	391. 966	2. 03
390. 5	2. 76	2. 345	391. 882	1. 47
	5. 59	2. 695	392. 246	1. 89
	8. 4	3. 255	392. 3685	2. 31
	11. 0	3. 465	392. 7675	2. 555
391	2. 76	1. 365	392. 211	1. 33
	5. 59	1. 9775	392. 729	1. 96
	8. 4	2. 345	393. 058	2. 345
	11. 0	3. 01	393. 1875	2. 555

表 5 比尺 45 实测桥墩冲坑深度值

坝顶 高程/ m	$q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	$h_s/$ m	实测墩前 水位/ m	行近水流 深度/ m
390	5. 59	2. 43	391. 4085	1. 52
	11	3. 195	391. 9485	2. 16
	13. 75	3. 3975	392. 124	2. 385
	16. 5	3. 825	392. 385	2. 79
390. 5	5. 59	1. 44	392. 358	1. 395
	11	1. 71	392. 88	2. 16
	13. 75	1. 8	393. 15	2. 52
	16. 5	2. 205	393. 303	2. 745
391	5. 59	0. 7875	392. 9925	2. 07
	11	1. 0575	393. 6135	2. 34
	13. 75	1. 305	393. 582	2. 475
	16. 5	1. 44	393. 7935	2. 61

试验研究表明, 防护底坡 i_c 能够反映拦沙坝坝顶高程、拦沙坝与桥墩之间的距离对桥墩局部冲刷共同作用的效果, 随着防护底坡 i_c (反坡程度) 的增大, 下游控制边界抬高, 引

起桥墩附近水面比降减小,有效降低了墩前流速,改善了桥墩局部冲坑内的马蹄形漩涡强度,从而减小了局部冲刷。

2.2 拦沙坝对桥墩局部冲刷的防护作用分析

为研究拦沙坝及河床泥沙粒径对桥墩附近冲刷的影响,还采用比尺 35 和 45 进行不同流量和不同坝顶高程组合的单体模型试验。受试验条件和设备限制,采用非均匀散粒体沙,原型中值粒径 d_{50} 分别为 10.15~11.2、13.05~14.4 mm,不考虑拦沙坝下游的局部冲刷。与比尺 25 单体模型试验相比,在同级流量下,随着床沙粒径的增大,桥墩局部冲刷深度相应减小。很好地符合了蒋焕章^[1]在对桥墩局部冲刷自然观测资料($d_{50}=0.17\sim 70$ mm)的单因素分析时,得到的冲刷深度随床沙中值粒径 d_{50} 的增大而减小的结论。

3 采用拦沙坝防护的桥墩局部冲刷研究

3.1 采用拦沙坝防护的桥墩局部冲刷分析

单体系列模型试验观测结果表明:采用拦沙坝防护桥墩,稳定了桥墩至拦沙坝间河段的侵蚀基面,抬高了拦沙坝上游河道的水位,减少了桥墩下游河床的一般冲刷;桥墩至拦沙坝间河段的一般冲刷不大,与流量成正比;桥墩绕流形成的局部冲刷依然存在,但受拦沙坝的壅水作用及对河床一般冲刷的控制,在一定程度上降低了墩前来流的流速,使桥墩局部冲刷坑深度明显减少。

采用拦沙坝防护的桥墩局部冲刷总体呈现出下述规律:一方面随着单宽流量的增加,桥墩局部冲坑深度相应增加,另一方面在同级流量下,如果下游水流边界条件以“防护底坡”作为指标的话,桥(墩)–(拦沙)坝之间存在同样的“防护底坡 i_c ”值时,在同级流量下,桥墩局部冲坑深度及形态一致;随着桥(墩)–(拦沙)坝之间的“防护底坡 i_c ”值反坡程度的增大,在同级流量下,桥墩局部冲坑深度和范围减少。设置拦沙坝后,桥墩局部冲坑深度及范围均有所减少。

3.2 采用拦沙坝防护的桥墩局部冲刷公式的确定

根据以往学者研究,影响桥墩局部冲刷的因素是多方面的。假定水流为恒定流、均匀流,且与桥墩正交,那么桥墩局部冲刷深度取决于^[1-3]:(1)流体特征因素:流体密度(ρ)、流体运动黏滞系数(ν)、重力加速度(g);(2)河床质特征因素:泥沙密度(ρ_s)、泥沙粒径(d)、粒径级配、土壤黏性;(3)流动特征因素:行近水流深度(h_0)、行近流速(v_0);(4)桥墩特征因素:桥墩形状系数(K_ξ)、桥墩计算宽度(B)。

应用布金汉定理^[4](the Theorem of Vashy Buckingham)即 π 定理,并考虑控制底坡 i_c 的影响,结合 60 多个组次试验结果进行多元回归分析,最终得到采用拦沙坝防护的宽级配非均匀散粒体沙桥墩局部冲刷深度计算公式为

$$h_s = K_\alpha K_\xi B F r_c^{0.43} \left(\frac{h_0}{B} \right)^{0.65} \left(\frac{d}{B} \right)^{-0.068} (ei_c + f) \quad (1)$$

式中: h_s ——桥墩局部冲刷深度; $K_\alpha = e^{a \cdot (a \cdot d_{50} + b)}$ (参考文献[5-7]),对试验选用的散粒体沙,有 $a = -0.00969$, $b = 0.03568$ (此时,泥沙中值粒径 $d_{50} = 7.25\sim 14.4$ mm, $q_g = 8.696$ 7); B ——桥墩计算墩宽(与桥墩形状尺寸及行近水流深度有关,可查用相关手册^[2,8]); h_0 ——行近水流深度(按一

般冲刷后水深选取)(单位 m); K_ξ ——桥墩形状系数,与桥墩形状有关,查相关手册^[2,8],典型工程取 1.0; d ——河床泥沙粒径,取中值粒径 d_{50} (单位以 mm 计);对试验成果分析, $e = 36$, $f = 2.63$; i_c ——控制底坡,意义同前。

令 $K_1 = f$, $k = e/f$, 上式又可写作

$$h_s = K_1 K_\alpha K_\xi B F r_c^{0.43} \left(\frac{h_0}{B} \right)^{0.65} \left(\frac{d}{B} \right)^{-0.068} (ki_c + f) \quad (2)$$

为更方便工程设计参考,考虑对实际的宽浅河道有 $q = v_0 h_0$, 则式(2)还可化为

$$h_s = K_1 K_\alpha K_\xi g^{-0.215} B^{0.418} d^{-0.068} q^{0.43} h_0^{0.005} (ki_c + 1) \quad (3)$$

式中: $K_1 = f = 2.63$, $k = e/f = 13.69$; q ——冲向桥墩的单宽流量,单位 $m^3/(s \cdot m)$; g ——重力加速度,取 $9.8 m/s^2$ 。其余符号意义取值同前。

3.3 冲刷公式的评价

3.3.1 误差分析

通过计算,式(3)的复相关系数 $R = 0.92$ 。式(3)相对误差在 $\pm 10\%$ 以内所占百分比为 43.94%,相对误差在 $\pm 20\%$ 以内所占百分比为 75.76%,相对误差在 $\pm 30\%$ 以内所占百分比为 90.91%,其它占百分比为 9.09%。由上分析可以看出,桥墩局部冲深的计算值与实测值的拟合程度较高,式(3)可以用来计算采用拦沙坝防护的桥墩的局部冲刷深度,为工程设计提供参考。

3.3.2 公式适用条件

由误差分析得知,公式的拟合度较高,可为浅基桥梁墩台防护工程的设计提供参考。但在使用中必须注意以下几点:(1)公式适用于下游存在拦沙坝防护的浅基桥梁桥墩局部冲刷问题,且河床组成为宽级配非均匀散粒体沙,该种河床条件多存在于山前区河流;(2)对于河床为黏性土质的桥墩局部冲刷问题,本公式不适用,该种河床条件多存在于平原区河流;(3)对于此种条件下的桥墩局部冲刷深度的预测,应在结合当地实测资料,认真分析影响桥墩局部冲刷的各因素及其关系的基础上,建立计算公式。

4 结 语

拦沙坝对浅基桥墩局部冲刷的防护作用非常明显,采用适宜的拦沙坝形式、尺寸及布置位置,能够遏制下游溯源冲刷,有效减轻桥墩局部冲刷。针对典型工程的河床条件、洪水资料,考虑建筑物安全可靠性及运行管理,系列试验研究表明:拦沙坝位置(前沿)距桥墩中心线 40~45 m,拦沙坝坝顶高程高于墩轴线河床原始高程 0.5~1 m 为宜,桥墩与拦沙坝之间河床的防护底坡 i_c 值应在 $-0.011 \sim -0.022$ 。

本次试验得出的采用拦沙坝防护的桥墩局部冲刷公式是根据典型工程得出的,可供条件相近的桥梁设计参考。对于河床条件、洪水资料等差别较大的河道,需要对所得结果做适当调整后采用,必要时需做更大范围的研究。拦沙坝对上游桥墩防护的前提是坝体自身的安全稳定,因此必须遏制拦沙坝坝趾淘刷,并使拦沙坝下游局部冲刷不致危及拦沙坝自身稳定。另外,仅靠拦沙坝难以彻底解决问题,应采用综合工程措施对河道和桥墩加以防护,包括控制整个河道冲刷

(下转第 156 页)

表 3 密云县 1992– 2006 年土地利用转移矩阵

hm²

1992 年	2006 年						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总 计
耕地	30260. 35	8909. 11	62. 7	0	1467. 64	296. 96	40996. 76
林地	0	138315. 83	0	0	68. 1	0	138383. 93
草地	0	0	14575. 92	260. 03	1426. 8	0	16262. 75
水域	98. 11	2195. 25	1146. 27	15153. 78	0	13. 67	18607. 08
建设用地	117. 91	0	0	0	7076. 73	0	7194. 64
未利用地	0	0	0	0	0	741. 8	741. 8
总计	30476. 37	149420. 19	15784. 89	15413. 81	10039. 27	1052. 43	222186. 96

三期遥感影像分析得到水库轮廓明显退缩。1992 年 9 月到 2006 年 5 月,密云县植被覆盖面积先减少后增加,尤其是 1999 年以后较低和中覆盖率的植被面积增加较多。水文数据分析得出密云水库水源地入库径流量呈总体下降趋势,但近几年有所增加,降雨量变化波动无一致性减少趋势。综合分析说明径流对降雨量有一定影响,而植被覆盖变化不是影响径流的主要因素。从植被覆盖分布看,覆盖率高的部分在密云水库白河上游处,而密云水库的西南– 东北方向较低,此处也是人口活动影响的最大区域。土地利用分析得到,耕地连续减少,主要变成了建设用地和林地。整个土地利用的变化与水源地保护相关,相关的资料也证实了这样的分析。为了使水库得到更好的保护,政府在空间上划定一定的管制区域,北部为地表饮用水源保护区,南部为水源八厂地下饮用水源补给区,水库上游地区近年来大力发展林牧业,积极植树种草,使林草地面积增加较快,同时加强对上游地区发展乡镇企业和旅游业的限制,使工矿用地面积增加速度远远低于其它地区,以水土保持和水源涵养林为主,形成林地利用占绝对优势的土地利用结构。此次遥感调查的结果也反映出随着北京市人口和经济的增长,一些措施从供水和保水两方面出发,通过减少耕地的面积可以有效减少农业用水,

在水库上游进行退耕还林以扩大水源涵养林而有效保水。

参考文献:

[1] 李成茂,马履一,王小平. 密云水库集水区区域可持续发展评价及其调控对策研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(6): 50-55.

[2] 赵超,包为民,孟永国. 遥测降雨的抗差修正研究[J]. 水电能源科学, 2005, 23(6): 21-24.

[3] 北京宇视蓝图信息技术有限公司. 北京一号小卫星在轨测试总结报告[R]. 北京: 2006.

[4] 王经武,王娟. 水土保持是生态环境建设的主体[J]. 水土保持研究, 2000, 7(3): 11-12.

[5] 李永贵,刘大根,刘振国,等. 密云水库周边水土保持与水源保护探讨[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 13-17.

[6] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, 7(4): 153-159.

[7] 陈晋,陈云浩,何春阳,等. 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用[J]. 遥感学报, 2001, 5(6): 416-422.

(上接第 152 页)

的护底工程、护坡工程以及控制桥墩附近发生局部冲刷的防护工程,如铅丝笼抛石防护措施等。

参考文献:

[1] 蒋焕章. 对桥墩局部冲刷影响因素的分析[C] // 桥墩冲刷学术讨论会论文集. 北京交通部科学研究院, 1964: 15-21.

[2] 陆浩,高冬光. 桥梁水力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.

[3] Arved J,傅松林,译. 桥墩局部冲刷深度函数的趋向[J]. 世界桥梁, 1990(2): 13-19.

[4] 惠遇甲,王桂仙. 河工模型试验[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[5] Arved J Raudkivi, Robert Ettema. Clear water scour at cylindrical piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(3): 338-349.

[6] 何文社,曹叔尤,张红武,等. 清水冲刷河床稳定粗化层级配计算[J]. 水力发电学报, 2003(2): 39-45.

[7] 李诚,李梦成,蒋焕章. 桥台局部冲刷的计算方法[J]. 长沙铁道学院学报, 2001, 19(1): 103-109.

[8] 熊广忠. 桥涵水力水文计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1992.