

国内河工模型地形测量方法研究综述

陈 诚 ,唐洪武 ,陈 红 ,黄建通

(河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 通过对国内河工模型地形测量方法的回顾 ,系统地介绍激光技术、超声波技术、光学技术、计算机技术以及图像处理技术等先进技术在河工模型地形测量中的应用及发展 ,详细介绍光电反射式地形仪、电阻式地形仪、跟踪式地形仪、超声地形仪、激光扫描仪等仪器及近景摄影测量技术的优点及存在的问题 ,指出结合各种测量技术的优点实现河工模型地形的大范围非接触测量将是今后的研究方向。

关键词 河工模型 地形测量仪器 地形测量方法 大范围非接触测量 综述

中图分类号 :P21 ;TV83 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)02-0076-04

Review of the research on topographic survey methods for physical river models in China//CHEN Cheng ,TANG Hong-wu ,CHEN Hong ,HUANG Jian-tong College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :Based on a review of the methods for topographical survey of riverbeds in physical river models , the application and development of advanced technologies , such as laser techniques , ultrasonic technology , optical techniques , computer techniques and image processing techniques , are systematically introduced. The advantages and existing problems of photoelectric reflecting topographic apparatuses , resistance-type topographic apparatuses , tracing topographic apparatuses , ultrasonic topographic surveying , laser scanners , and digital close-range photogrammetric techniques are described in detail. It is pointed out that wide-range non-contact measurement , which combines the advantages of various measurement technologies , is a future research direction.

Key words : river model ; topographic surveying instrument ; topographic measurement method ; wide-range non-contact measurement ; review

实体河工模型是根据实际河流地形资料并按照一定的比尺缩小的模型 ,用以研究河流在自然情况或在建筑物作用下的水流结构及河床变形^[1]。模型地形稍有误差就有可能对试验产生较大影响、降低模型的相似性 ,因此必须尽可能提高模型制作的精度。高性能的地形量测仪器正是提高模型制作精度的基本保证。只有利用高性能的地形量测仪器才能发现模型制作中的误差 ,进而进行修补纠正 ,保证模型拟真度 ,使试验结果能够反映真实情况。在试验过程中 ,需要准确量测模型地形参数和河势变化。地形参数在研究河床冲刷及淤积问题中有不可替代的重要作用 ,河势量测则对研究河道、平面变形等问题具有重要意义。另外 ,为了将实体模型试验与数字模型相结合 ,地形量测仪器要为数学模型提供大量必要的模型空间地形信息 ,要求地形量测仪器能

够快速、准确地完成模型地形的测量。而且因为模型表面一般为轻质模型沙 ,易变形 ,这也给河工模型地形测量提出了更高的要求。由于河工模型地形数据的重要性和采集精度以及采集效率的高标准要求 ,传统的采用测针或钢尺测量法 ,以及采用经纬仪和水准仪的地形测量方法已经不能满足需要 ,近年来 ,随着激光技术、超声波技术、光学技术、计算机技术以及图像处理技术等先进技术的发展 ,逐渐发展了光电反射式地形仪^[2]、电阻式地形仪^[3]、跟踪地形仪^[4]、超声地形仪^[5]、激光扫描仪^[6]等仪器以及近景摄影测量技术^[7-8]。河工模型地形测量技术正从人工测量向自动测量、从接触式测量向非接触式测量、从单点向多点测量发展 ,笔者将对这些新发展的地形测量技术进行介绍 ,并结合河工模型的具体特点对未来的研究方向进行探讨。

基金项目 :国家自然科学基金(50479068) ;江苏省研究生科技创新计划(1306014)

作者简介 :陈诚(1982—),男 ,贵州贵阳人 ,博士研究生 ,从事河流动力学及水利量测技术研究。E-mail :chencheng1010@yahoo.com.cn

1 河工模型地形测量技术的发展

1.1 光电反射式地形仪

光电反射式地形仪的工作原理是从光电传感器探头射出一束强度(I_0)一定的调制红外光,经界面(固体表面、淤积面及水面)反射,反射光被同一探头接收,接收到的光强 I 与探头距离界面之间的距离 l 存在如下关系^[1]:

$$I = I_0BK_2 \frac{1}{l^2 + r^2} e^{-K_1 l} \tag{1}$$

式中: B 为光导纤维的集光度; r 为探头截面半径; K_1 为探头与界面之间的水对红外光的接收系数; K_2 为界面对红外光的散射系数。 K_1 和 K_2 随界面材料的不同而取不同值。

在测量过程中,对于同一界面材料, K_1 、 K_2 、 B 及 r 都为常数,因此探头接收到的反射光强 I 是距离 l 的单值函数。当探头与界面间距离减少时,接收到的反射光强急剧增加, $l=0$ 处有一最大值;当探头与界面稍接触,接收到的反射光强迅速下降, $l=-\Delta$ (Δ 为界面的绝对粗糙度)时,反射光强也降为零。随着 l 的减少,取反射光强由最大值突变下降时的探头位置为界面位置。

光电反射式地形仪由发射、接收控制及位移传感器3部分组成,其探头结构如图1所示^[1]。

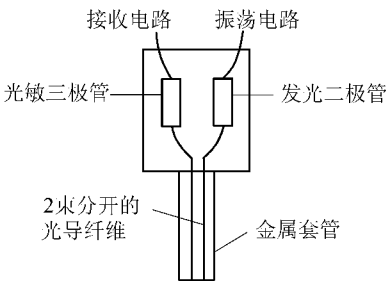


图1 光电反射式地形仪探头结构

传统的测针法或钢尺测量法只能在试验结束后把模型水全部放空的条件下才能进行测量,但光电反射式地形仪可实现地形的自动测量,它不仅可用来测量放干水后的河床地形,还可以测量水下地形,其自身理论控制精度可达0.01 mm,对1 mm以下的淤积层也可以测量。但该方法的不足之处在于仍属于接触式测量,测量时探头需要接触床面,对地形有一定的干扰。

1.2 电阻式地形仪

电阻式地形仪是利用电阻式探头在不同介质中电阻值的变化来反映模型中淤积(或冲刷)面的高程。模型沙与水混合成具有一定浓度的水体,其电阻率随着含沙量的变化而改变。在含沙水流中,沙的质量浓度沿垂线分布是渐变的,只有在冲淤界面

处才会发生急剧变化,因而也只有在淤积界面处才会导致其电阻率发生相应的突变。电阻式冲淤界面仪主要是测量水体电阻率,当电阻率达到设定值时仪器发出光电报警,即可判断该处为临界淤积层。同时从与仪器配合使用的测针上读出该处高程,从而达到判别冲淤的目的。

如图2所示,常见的电阻式地形仪^[4]探头是探针式探头,由2根平行的不锈钢丝封焊在金属套管和尼龙端头的圆柱体中,在端头约有1 mm的电极露在外面。这种探头的优点是细小的探针对水流干扰相对较小,但2根针间存在一定距离,在测量不同坡度的复杂形态断面时由于接触条件不相同,会导致测量误差,另外,探针强度较低,测量过程中很难避免探针变形所带来的误差。后来出现了平端套管式探头,其优点是量测时探头不易变形,但是其相对较粗的测杆对水流的干扰较针式要大得多。姚晓明等^[3]结合探针式及平端套管式探头的优点,设计了锥式探头,该探头既具有类似于探针式探头对水流干扰相对较小的优点,又具有平端套管式探头的强度。

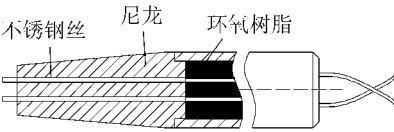


图2 电阻式地形仪探针式探头结构

与光电反射式地形仪相比,电阻式地形仪电路及仪器制作简单,耗电省,质量小,携带和操作方便,精度可达 ± 1 mm,但也仍是一种接触式测量仪器,效率不高,可靠性不足。然而电阻式地形仪应用于推移质泥沙的动床模型中,由于水和泥沙界面分明,使用效果较好。但在研究悬移质泥沙的浑水模型中由于淤积面不分明,电阻率随淤积面密度的变化而变化,可能产生较大的测量误差。

1.3 跟踪式地形仪

为了提高地形测量效率,国内外研究者对电阻式(或光电式)地形仪进行改进,研究了具有连续地自动测定河床高程功能的跟踪式地形仪^[9]。跟踪式地形仪利用平衡电桥的基本原理,当电阻式(或光电式)淤面探头在水中不同位置时,它输出的电流不同。因此当电阻式探头的尖端在河床以上某个预置的距离时,将电桥调节平衡,测量时仪器随测量车在测桥上运动,淤面探头随着横扫过断面,河床高程有变化时由于探头感应到水和河床间电导的不同,使探头的输出电流发生相应的变化,电桥失去平衡,从而通过控制电路驱使电机运转,使探头返回到离河床的预置位置,这样探头始终沿河床面而升降,探头的高程变化即表示水下地形的变化情况。荷兰德尔

夫特水工研究所使用的跟踪式地形仪,其电阻式探头离河床的距离可预置在 0.5 ~ 2.5 mm 之间,最大跟踪速度可达 50 cm/s;日本计测技研株式会社生产的一种连续式砂面计也是一种跟踪式地形仪,采用光电探头,探头可不接触淤积面而把水下地形测出来,该仪器跟踪速度为 50 mm/s,测量精度为 ± 0.5 mm;国内王雅丽等^[10]研制的 ABF2-2 地形仪通过面板上的按键进行手动操作,也可通过内置微核嵌入式网络(MKELAN)接口,与其他具 MKELAN 接口的仪器构成网络分布式测控系统,在 PC 计算机控制下自动测量,在测量地形的同时也测出了水面高程和水深,不仅可测量水下地形,也可测量洲面地形,测量精度高,自动化程度高,已经在香港理工大学及黄河水利科学研究院等科研单位得到应用。

1.4 超声地形仪

超声地形仪是根据回声定位原理制成的,其采用液介超声探头,利用超声波的发射、传播、穿透和反射等性能探测泥沙模型的地形。利用电脉冲激发使超声探头发出超声波,然后用同一探头接收从反射面反射回来的超声波,当传播速度为已知时,只要测出超声波从发射到反射回来所经历的时间,即可求得探头到反射面的距离^[11]:

$$H = \frac{1}{2} vt \tag{2}$$

式中: v 为超声波在水中的传播速度; t 为超声波从发射到反射回来所经过的时间。

王振先等^[5]提出了实验室超声地形仪的设计方案并申请了实用新型专利。超声地形仪的工作原理如图 3 所示^[5]。

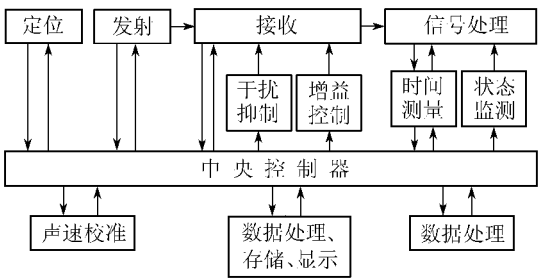


图 3 超声地形仪工作原理示意图

超声地形仪实现了地形的无接触测量,对地形的干扰小,在一般情况下,绝对误差不大于 ± 1 mm,可在实验室快速、精确地测量地形,但其抗干扰和抗水声混响影响的能力不够强,对于回波信号信噪比偏小等情况不能很好地适应。针对这些问题,林海立等^[12]研制了一种利用数字信号处理技术完成超声回波信号处理的超声地形仪。该仪器可以在地形复杂、外界干扰信号较大的条件下快速测量水下地形。

1.5 激光扫描仪

近年来,三维激光扫描技术^[13]逐渐用于模型地形量测工作,黄河水利科学研究院引进法国 MENSIS 公司研制的 GS200 激光扫描仪来解决模型地形量测问题。三维激光扫描是利用发射和接收脉冲式激光原理,以大量空间点的方式真实再现被测物体彩色和三维立体景观测量的新技术。三维激光扫描仪通过向物体表面发射激光束,以激光定位原理精确测量物体表面点的三维坐标。与普通的激光测距仪或其他激光测量装置相比,三维激光扫描仪能够以极快的扫描速率生成由大量的点组成的数据模型,这些带有三维点坐标的数据被称为点云。

三维激光扫描原理如图 4 所示^[6],每一个扫描点云的测量都是基于三角测量原理进行的,并且根据激光扫描的传感驱动进行三维方向的自动步进测量。该激光技术提供了人工辅助的自动合并功能,只要在扫描目标前规划好扫描内容并且设置好定标球便可进行扫描。

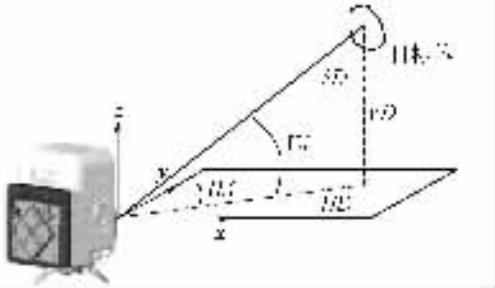


图 4 三维激光扫描原理示意图

三维激光扫描仪可实现大范围的三维地形测量,测量精度和效率都非常高,是目前在河工模型地形测量中较为先进的测量仪器,但其无法实现水下地形的测量。此外该仪器价格昂贵,而且需要对大量的数据点云进行后处理才能实现模型试验人员关心的地形剖面生成和套绘,对测量结果的后处理操作比较复杂。

1.6 近景摄影测量

近景摄影测量是通过近距离目标的影像信息获取目标点群三维空间坐标的一门技术,它作为摄影测量的一个重要分支,近 20 年来获得了很大的发展,在高精度三维测量以及变形监测等领域有了不少成功的经验。与传统测量手段相比,近景摄影测量体现出非接触性量测及信息容量高等优点。

近景摄影测量基于双目视差原理,由 2 幅图像平面与被测物体构成一个三角形,已知 2 个摄像机的相对位置,便可以获取公共视场内物体上特征点的三维坐标。近景摄影测量原理如图 5 所示。

毛野等^[14]运用基于普通相机的近景摄影测量

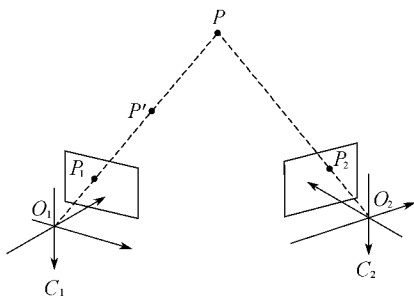


图5 近景摄影测量原理示意图

三维图像解析技术,针对河道采砂对长江镇江段河床演变的影响进行了试验研究。在河工模型中布置特征点,通过对特征点采用极线约束^[15]等立体匹配方法实现特征点的配对,再利用基于计算机视觉的三维重建方法^[16-17],便可实现河工模型中的多点地形同时测量。该方法是一种多点的非接触测量方法,测量效率较高,装置简单,但无法实现水下地形测量。其测量精度主要取决于摄像机标定^[18]及立体匹配的精度。

2 存在问题分析

在河工模型试验中,河床地形的测量对于研究河流的水流结构及河床变形至关重要。在模型制作阶段需要精确的地形测量手段来保证模型制作的精度,在模型试验阶段要求对水上及水下地形进行快速准确的测量。因此,河床地形测量是最重要也是最困难的任务之一。

从上面的分析可以看出,能实现水下地形测量的仪器包括光电反射式地形仪、电阻式地形仪、自动跟踪地形仪以及超声地形仪。其中,光电反射式地形仪、电阻式地形仪以及自动跟踪地形仪使河工模型地形测量从传统的测针法、钢尺测量法以及利用经纬仪和水准仪等仪器进行的人工测量方法发展到自动测量,但由于需要探头接触测量面,所以都属于接触式的单点测量方法,对地形有一定的干扰,测量效率比较低。超声地形仪采用超声波技术实现了地形的无接触测量,但其抗干扰能力不强,并且仍是一种单点式测量方法,测量效率不高。

激光扫描仪和近景摄影测量技术可实现多点自动测量,但无法实现水下地形的实时测量。其中,激光扫描仪测量精度和效率都非常高,但价格昂贵,而且对地形数据的后处理操作较复杂。近景摄影测量是一种多点的非接触测量方法,测量效率较高,装置简单,但测量精度主要取决于摄像机标定及立体匹配的精度,为了能适应河工模型地形测量的高精度要求还需要做更进一步的研究。

综上,目前河工模型三维地形测量存在的主要

问题可归结为以下2点:①能实现水下地形测量的仪器大都属于单点测量,测量效率较低,浑水地形的测量精度不高;②能实现多点快速测量的仪器无法实现水下地形的测量。

3 结 语

从对现有地形测量方法的探讨中可以发现现有的测量方法还不能很好地适应模型地形测量对测量精度和测量效率的高标准要求,但若结合各种测量方法的优点,则可以更好地完成测量任务,如马志敏等^[19]利用超声波实现水下地形无接触快速扫描测量和利用激光与CCD光学成像原理实现水上地形的无接触快速测量相结合的方法,实现了水上、水下地形的同时测量。另外,随着科研水平的不断进步和研究问题的不断深入,对河工模型地形测量方法的要求将会越来越高,如何结合激光技术、超声技术、光学技术、计算机技术以及图像处理技术等先进技术,实现河工模型水上地形和水下地形的大范围实时测量,将是今后研究的方向。

参考文献:

- [1] 谢鉴衡.河流模拟[M].北京:水利电力出版社,1990:166-167.
- [2] 唐洪武,李瑾,周浩祥.光电反射式地形仪的研制及应用[J].河海大学学报:自然科学版,1995,23(1):80-84.
- [3] 姚晓明,李旺兴,肖方祥.实用性冲淤界面判别仪[J].泥沙研究,1996(2):109-112.
- [4] 华东水利学院.模型试验量测技术[M].北京:水利电力出版社,1984:148-149.
- [5] 王振先,金欢阳.实验室用超声地形仪[J].海洋工程,2001,19(1):94-98.
- [6] 王锐.河流动床模型激光三维扫描数据应用研究[D].南京:河海大学,2007.
- [7] 王建雄,张辅霞.数字近景摄影测量在河工模型试验中的应用[J].云南农业大学学报:自然科学版,2006,21(4):528-530.
- [8] 陈建华,程栋,王伟.微尺度模型试验的数字近景摄影测量[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(1):88-91.
- [9] 缪集泉.数字控制地形仪软件设计[J].水利水电技术,1985(2):3-7.
- [10] 王雅丽,李旺兴.ABF2-2地形仪[J].港口科技动态,2006(3):16-19.
- [11] 唐懋官,曲本泉,陆安国.超声地形淤厚仪[J].泥沙研究,1981(1):85-91.
- [12] 林海立,曲兆松,王兴奎.河工模型超声地形仪的数字信号处理[J].水力发电,2004,30(11):78-80.

(下转第94页)

between sand and various construction materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering ,1987 ,113(9) :1035-1039.

[19] 朱泓 ,殷宗泽 .土与结构材料接触面性能研究综述[J]. 河海科技进展 ,1994 ,14(4) :1-8.

[20] 张建民 ,张嘎 .土体与结构物动力相互作用研究进展[J]. 岩石力学与工程学报 ,2001 ,20(增 1) :854-865.

[21] 俞培基 ,秦蔚琴 .粗糙接触面上土的动剪模量[J]. 水利学报 ,1992(11) :37-42.

[22] 吴军帅 ,姜朴 .土与混凝土接触面的动力剪切特性[J]. 岩土工程学报 ,1992 ,12(4) :61-66.

[23] 张嘎 ,张建民 .粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报 ,2004 ,26(1) :21-25.

[24] 张嘎 ,张建民 .粗粒土与结构接触面受载过程中的损伤[J]. 力学学报 ,2004 ,36(3) :322-327.

[25] 张嘎 ,张建民 .循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报 ,2004 ,26(2) :254-258.

[26] 张嘎 ,张建民 .粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证[J]. 岩土工程学报 ,2005 ,27(10) :1175-1179.

[27] 张嘎 ,张建民 .粗粒土与结构接触面静动本构规律[J]. 岩土工程学报 ,2005 ,27(5) :516-520.

[28] 张嘎 ,张建民 .粗粒土与结构接触面三维本构关系及数值模型[J]. 岩土力学 ,2007 ,28(2) :288-291.

[29] 张嘎 ,张建民 .接触面弹塑性损伤模型在面板堆石坝应力变形分析中的应用[J]. 水力发电学报 ,2005 ,24(4) :5-10.

[30] 杨旭毅 ,支喜兰 .地形对路堤沉降影响的有限元分析[J]. 路基工程 ,2007(3) :6-8.

[31] 包承纲 ,饶锡保 .土工离心模型的试验原理[J]. 长江科

(上接第 79 页)

[13] SLOBAND S , HACK R . 3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique[J]. Lecture Notes in Earth Sciences ,2004 ,104 :179-189.

[14] 毛野 ,黄才安 ,陈建华 .长江镇江段河道采砂的影响及其控制利用的试验研究[J]. 泥沙研究 ,2004(3) :41-44.

[15] 马颂德 ,张正友 .计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京 :科学出版社 ,1998 :72-74.

[16] 孙凤梅 .摄像机标定与三维重建[D]. 北京 :首都师范大

(上接第 88 页)

[21] JTG C30—2002 ,公路工程水文勘察设计规范[S].

[22] RICHARDRON E V ,RICHARDRON J R ,LAGASSE P F . Bridge scour evaluation in the Unite States[C]//BRAUD J L . Scour of Foundations Proceedings of an International Symposium.[S.l.] 2000 :69-72.

[23] BREUSERS H N C ,RAUDKIVI A J . Hgdraulic structure design manual[M].[S.l.] :Notherlands Rotterdam ,1991 :43-51.

[24] 朱炳祥 .黏性土桥渡冲刷天然资料分析报告[J]. 铁道工程学报 ,1984(2) :122-123.

[25] 朱炳祥 .黏性土桥渡冲刷计算[J]. 武汉水利电力学院学

学院院报 ,1998 ,15(2) :1-4.

[32] BRANDT J R T . Behavior of soil concrete interface[M]. Alberta , Canada :The University of Alberta ,1985.

[33] 陈慧远 .摩擦接触单元及其分析方法[J]. 水利学报 ,1985(4) :44-50.

[34] 殷宗泽 ,朱泓 ,许国华 .土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报 ,1994 ,16(3) :14-22.

[35] GOODMAN R E , TAYLOR R L ,BREKKE T L . A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics And Foundation Division , ASCE ,1968 ,94(3) :637-659.

[36] DESAI C S ,ZAMAN M M . Thin-layer-element for interface and joints[J]. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics ,1984 ,8(3) :19-43.

[37] 雷晓燕 ,SWOBODA G ,杜庆华 .接触摩擦单元的理论及其应用[J]. 岩土工程学报 ,1994 ,16(3) :23-32.

[38] 雷晓燕 .大位移接触摩擦单元在工程设计中的应用[J]. 华东交通大学学报 ,1994 ,11(1) :1-10.

[39] 雷晓燕 .三维接触问题新模型研究[J]. 土木工程学报 ,1996 ,29(3) :24-33.

[40] 汪召华 ,高莲士 ,宋文晶 .三维摩擦接触的有限元分析[J]. 清华大学学报 :自然科学版 ,2002 ,42(S1) :93-96 ,104.

[41] ZHANG Bing-yin , WANG J G , SHI Rui-feng . Time-dependent deformation in high concrete-faced rockfill dam and separation between concrete face slab and cushion layer[J]. Computers and Geotechnics ,2004 ,31 :559-573.

(收稿日期 2008-04-07 编辑 高建群)

学 2006.

[17] SAITO K ,MIYOSHI T . Development of non-contact 3-D digitizing and machining system for free-form surface[J]. Annals of CIRP ,1991 ,40 :483-486.

[18] ZHANG Zheng-you . A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence ,2000 ,22(11) :1330-1334.

[19] 马志敏 ,范北林 ,许明 ,等 .河床模型地形的无接触快速测量技术[J]. 无损检测 ,2006 ,28(4) :185-188.

(收稿日期 2008-09-23 编辑 高建群)

报 ,1981(2) :60-61.

[26] 朱炳祥 .黏性土桥墩局部冲刷计算[J]. 公路 ,1985(12) :19-20.

[27] 赵全安 .散粒体泥沙、黏性土和岩石河床桥墩局部冲刷计算的通用公式[J]. 中南公路工程 ,1986(3) :65.

[28] HAN Yu-fang , CHEN Zhi-chang . Experimental study on local scour around bridge piers in tidal current[J]. China Ocean Engineering ,2004 ,18(4) :2-3.

[29] 房世龙 ,陈红 ,王岗 .桥墩局部冲刷防护工程特性研究综述[J]. 水利水电科技进展 ,2007 ,27(4) :84-89.

[30] 黄崇佑 ,王群 ,林桂宾 ,等 .分层土壤桥墩局部冲刷的计算[J]. 泥沙研究 ,1993 ,2(1) :22-27.

(收稿日期 2008-01-14 编辑 高建群)