

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.02.021

桥墩局部冲刷公式研究进展

李 奇,王义刚,谢锐才

(河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要 :总结国内外桥墩局部冲刷的研究成果,分类列举了单向流情况下非黏性土桥墩的局部冲刷公式,对比讨论了中国、前苏联及美国关于桥墩局部冲刷的规范公式。介绍了受潮流作用的桥墩和黏性土桥墩冲刷的最新研究进展。

关键词 :桥墩冲刷 ;局部冲刷公式 ;黏性土冲刷 ;潮流冲刷 ;综述

中图分类号 :U443.22 ;TV135 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)02-0085-04

The research development of the formulae of local scour around bridge piers//LI Qi, WANG Yi-gang, XIE Rui-cai(*Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Hohai University, Ministry of Education, Nanjing 210098, China*)

Abstract : A summary of the research on local scour around bridge piers at home and abroad is given. Formulae for non-clay local scour around bridge piers in the unidirectional flow are provided. Codes for local scour around bridge piers from China, the former USSR, and the United States are compared with each other. The progress of research on local scour around bridge piers in clay soil subjected to tidal currents is described.

Key words : scouring around bridge piers ; local scour formula ; clay scour ; tidal scour ; review

1 桥墩局部冲刷研究概况

桥墩的冲刷包括自然演变冲刷、一般冲刷和局部冲刷。局部冲刷受水流状态、桥墩墩形、床沙组成、河床形态等因素共同影响。按照是否有上游来沙分为清水冲刷与动床冲刷^[1]。按照冲刷的水流情况,分为单向流冲刷、潮汐往复流冲刷以及潮汐河口混合水流冲刷。

单向流情况下,圆柱形单墩周围的水流结构由墩前向下水流、墩前水面涌波以及墩周围和墩后的旋涡体系组成。单向流群桩局部冲刷时,水流变化为“穿桩水流”和“两侧水流”两股水流,穿桩水流在墩前最大,由于后面的桩体阻力作用而逐渐减小,桥墩前的旋涡和掀沙最严重,在桥墩后水流减弱,输沙能力也减小,泥沙在桥墩后方淤积。

在 2000 年以前研究较多的是单向流冲刷计算公式,1873 年 Durand-Claye 通过模型试验对比研究了方形、圆形、三角形墩的冲刷深度,发表了第 1 篇有关桥墩冲刷的论文^[2]。印度通过印度河桥墩的实测资料,得到了桥墩冲刷深度公式^[3] :

$$h_b + h = k \left(\frac{Q}{f} \right)^{1/3} \tag{1}$$

式中: h_b 为局部冲刷水深; h 为墩前水深; k 为系数,Lacey, Inglis 以及印度铁道委员会分别在 1924 年、1949 年、1967 年认为 $k = 0.473$, $k = 0.95$, $k = 1.34$; Q 为流量; f 为淤积系数, $f = 1.76 d^{1/2}$, d 为泥沙平均粒径。与 3 个不同 k 值相对应的公式并未考虑墩形及水流交角的影响,只能做粗略估算。近年孟加拉国科技大学学者还对 Lacey 公式进行了修正^[4]。Laursen 与 Toch 在 1953 年、1956 年通过试验研究了水流交角、墩形、流速和泥沙粒径对冲刷深度的影响^[3]。1957 年朱炳祥^[5]等对桥墩局部冲刷机理进行了更加深入的研究,指出墩前缘的冲刷坑是水流流速在墩前的动能变成压能、形成压力差,使水流垂直向下,从而在墩周形成旋涡淘刷形成的。Engeldinger 和 Chabert 在 1956 年最早阐明了圆柱墩冲刷时间和流速的发展过程^[6]。1975 年, Toset-Haugen 通过试验得出了冲刷深度与历时之间的关系公式^[2]。马蹄形旋涡是冲刷的结果,又是继续冲刷的动力因素。清水冲刷的深度随着粒径分布不均匀性的增大而减小^[7]。2005 年张兰丁^[8]推导出多个桥墩绕流的复变函数理论解,文献[9-11]采用数值计算方法模拟桥墩壅水。由于三维水流,特别是紊流、旋涡的模拟计算难度很大^[12-13],因此经验公

式、半经验半理论公式的得出多是采用理论分析与实测资料相结合^[14],或者理论分析与模型试验相结合^[15]的方式。

黏性土具有特殊的物理化学作用,固结作用和絮凝现象对黏性土桥墩的冲刷有很大的影响。20世纪80年代,我国引入表示土壤物理力学性质的液性指数 I_L ,得到黏性土冲刷的局部冲刷公式,但研究清楚黏性土的冲刷机理和冲刷过程困难很多。

由于潮流的涨落作用,往复流对桥墩的冲刷涉及更加复杂的水流过程。我国在2000年才逐渐开始研究往复流的冲刷计算公式,对潮流作用下的桥墩冲刷问题还处于研究的初级阶段,基本上没有得出潮流作用下的桥墩冲刷计算公式。

2 单向流非黏性土桥墩冲刷公式

2.1 经验公式

2.1.1 由实测资料或模型试验资料建立的公式

沈学汶通过试验研究得到冲刷公式^[6]:

$$\frac{h_b}{b} = 11.0 Fr_p^2 \quad (2)$$

$$h_b = 0.000059 Re_c^{0.512} \quad (3)$$

式中: b 为墩宽; Fr_p 为墩宽弗劳德数, $Fr_p = \sqrt{\frac{h}{b}} Fr = \frac{v}{\sqrt{gb}}$, Fr 为弗劳德数, v 为墩前流速;

Re_c 为墩雷诺数, $Re_c = \frac{vb}{L}$, L 为墩长。

2.1.2 因次分析方法结合试验或实测资料得出的公式

张佰战等^[16]用量纲平衡方法推算出公式(4),并用试验和实测资料验证了该公式,认为其精度高于规范公式。

$$h_b = 4.37 k_2 d \left\{ k_{1D} \left[\left(\frac{v - v_0'}{\sqrt{gd}} \right) \left(\frac{D}{d} \right)^{0.45} \left(\frac{h}{d} \right)^{0.1} \right]^{1.08} + k_{1B} \left[\left(\frac{v - v_0'}{\sqrt{gd}} \right) \left(\frac{b}{d} \right)^{0.45} \left(\frac{h}{d} \right)^{0.1} \right]^{1.08} \right\} \quad (4)$$

其中 $\alpha = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$

式中: v_0' 为泥沙起冲流速; D 为桩直径; k_2 , k_{1D} , k_{1B} 为系数; ρ_s 为沙的密度; ρ 为水的密度。

2.2 半经验半理论公式

随着研究的深入和成熟,人们开始以一定的理论为基础,通过推导建立冲刷深度计算公式,再通过试验资料或实测资料来确定公式中的各项参数。主要有:绕流挤压流动模式^[17]、墩周旋涡束紊流合流理论、墩周清水环流切线流速理论、纵向泥沙平衡理论、马蹄形旋涡理论等建立起的冲刷公式。

2.2.1 中国的桥墩局部冲刷行业规范公式

1964年,桥渡冲刷学术会议假定清水冲刷深度 h_b 与行近流速呈线性关系,动床冲刷深度随行近流速呈下凹曲线^[18]。1965年,中国讨论制定了局部冲刷65-2式来计算桥墩局部冲刷^[5],随后总结了多年使用的经验,并进行了补充试验^[19],对65-2式进行修正,得出65-2修正式并成为JTJ062—91的规范公式。但是,65-2修正式在 $v > v_0$ 后出现冲刷深度随墩前行近流速增大而减小的情况,以至于精度不高^[20],在JTJ030—2002《公路工程水文勘察设计规范》^[21]中,桩墩局部冲刷建议采用65-2式和65-1修正式计算。

65-2局部冲刷计算公式如下:

$$h_b = \begin{cases} K_\xi K_{\eta 2} b^{0.6} h_p^{0.15} \frac{v - v_0'}{v_0} & v \leq v_0 \\ K_\xi K_{\eta 2} b^{0.6} h_p^{0.15} \left(\frac{v - v_0'}{v_0} \right)^{n_2} & v > v_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $K_{\eta 2} = \frac{0.0023}{d^{2.2}} + 0.375 d^{0.24}$
 $v_0 = 0.28(d + 0.7)^{0.5}$
 $v_0' = 0.12(d + 0.5)^{0.55}$

式中: K_ξ 为墩形系数; $K_{\eta 2}$ 为河床颗粒影响系数; h_p 为一般冲刷后的最大水深; n_2 为指数。

2.2.2 前苏联的行业标准

1972年,穆洛莫夫(MyJOMOB)的局部冲刷公式被列入前苏联HMIП—72《铁路公路桥梁勘测设计规程》,成为前苏联的行业标准。其公式如下:

$$h_b = \begin{cases} \left(h_0 + 0.014 \frac{v - v_0}{\omega} b \right) K_\xi K_2 & \text{(有底沙补给)} \\ h_0 \left(\frac{v - v_0'}{v_0 - v_0'} \right)^{3/4} K_\xi K_2 & \text{(无底沙补给)} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $h_0 = \frac{6.2\beta h}{\left(\frac{v_0}{\omega} \right)^\beta}$ $\beta = 0.18 \left(\frac{b}{h} \right)^{0.36}$

$$v_0 = 3.6(hd_{cp})^{1/4} \quad v_0' = v_0 \left(\frac{d_{cp}}{b} \right)^y$$

式中: h_0 为圆柱桥墩的极限冲刷深度,m; ω 为泥沙沉速; d_{cp} 为床沙平均粒径。 y , ω , K_ξ , K_2 均可由相应的图表查出。

2.2.3 美国现行规范推荐的桩墩局部冲刷公式

2000年以Richardson为首的专家组发表“Bridge scour evaluation in the United States”,详细介绍了联邦公路局所推荐的有关桥梁冲刷预测的河流稳定性估算方法^[22]。美国水力工程通报(HEC-18)推荐的桥梁局部冲刷公式^[6]如下:

$$\frac{h_b}{h} = 2.0 K_{\xi} k_2' k_3 k_4 \left(\frac{b}{h} \right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (7)$$

式中: k_2' 为水流冲击角系数; k_3 为河床状况系数; k_4 为床沙粒径系数。

国内外的各种桩墩局部冲刷典型公式,按照其形式可以归为 4 类: ① $\frac{\text{冲刷深度}}{\text{墩宽}} = f\left(\frac{\text{水深}}{\text{墩宽}}\right)$; ② $\frac{\text{冲刷深度}}{\text{墩宽}} = f\left(\frac{\text{水深}}{\text{墩宽}}, \text{弗劳德数}\right)$; ③ $\frac{\text{冲刷深度}}{\text{墩宽}} = f\left(\frac{\text{水深}}{\text{墩宽}}, \text{弗劳德数}, \text{泥沙特性参数}\right)$; ④ 其他,如包尔可达夫公式:

$$h_b = h_p \left[\left(\frac{v}{v_{\text{不冲}}} \right)^n - 1 \right] \quad (8)$$

前 3 类中,水深/墩宽、弗劳德数、泥沙特性参数分别代表墩形特征、水流特征和泥沙特征这 3 个最主要的影响因素。前苏联与中国的公式都考虑了 h_b/b 与 v/ω 的函数关系在泥沙起动和未起动时有所不同,分动床冲刷、清水冲刷 2 种情况分别计算,这是与美国公式的主要差别。美国公式考虑清水冲刷时只乘以系数 1.1 或 1.2,公式中采用了弗劳德数, k_4 包含了起冲流速,但是只在 $d_{50} \geq 2 \text{ mm}$ 或 $d_{95} \geq 20 \text{ mm}$ 时考虑。国际水利协会(IARH)的专家 Breusers 等^[23]在 1991 年编制的国际性设计手册中建议计算完一般冲刷后,局部冲刷也分类计算。因此,桥墩冲刷的研究历史和进展表明,分清水冲刷和动床冲刷,并考虑墩形、泥沙特性的公式更加全面合理。

国外的非规范公式考虑的因素少,不够全面,半经验半理论公式在推导过程中有诸多假设,未知参数一般通过试验确定,试验的条件和试验范围有限,而且试验精度有限。另外,利用各国规范公式对温福铁路大云特大桥桥墩、润扬长江公路大桥南汉北塔桥墩及 40 号支墩、黄河下游京广铁桥桥墩的局部冲刷进行计算,美国公式计算中国桥梁桥墩局部冲刷的结果比模型试验和实测值偏小,也比中国与前苏联公式计算的结果小。中国公式的计算结果是偏安全的,在美国和前苏联的计算值之间,而且经过多年实际应用的验证,所以在计算国内桥墩的局部冲刷时中国公式比较合适。

3 黏性土桥墩的局部冲刷公式

黏性土与非黏性土相比,表面的物理化学作用比较突出,黏性土胶体带电,吸引异号离子和水分子,在颗粒表面形成双电层。黏性土之间的黏结力越大,抗冲能力越强。黏性土颗粒还有絮凝现象,研究清楚其机理更加困难^[24]。因此,黏性土条件下的桥墩冲刷需要考虑表示土壤物理力学性质的液性指

数 I_L 。

黏性土局部冲刷公式一般由实测资料分析得到,其研究的焦点在于水深对冲刷深度的影响。1981 年,朱炳祥^[25]绘出了局部冲深 h_b/b 与一般冲深 h_p/b 的关系图,认为当 $h_p/b > 2.5$ 时局部冲刷不受水深的影响,当 $h_p/b < 2.5$ 时局部冲刷受水深的影响,此外,给出了黏性土局部冲刷的一般关系式为 $h_b = K_{\xi} b^{0.6} I_L^{1.25} V h_p^n$ 。朱炳祥^[26]经研究又认为 $h_p/b = 2.5$ 处关系曲线有间断现象,建议改成以 $h_p/b = 3.0$ 为局部冲刷受水深影响与否的分界线。赵全安^[27]考虑几个主要影响因素,采用相关分析法建立了散粒体泥沙、黏性土及岩石河床桥墩局部冲刷的通用公式,并用系数在不同土质下的取值来区分。

1972 年,前苏联在 HМИИ—72《铁路公路桥梁勘测设计规程》中规定了黏性土局部冲刷按 $h_b = 6.2 \beta h \left(\frac{\omega}{v_1} \right)^{\beta} \left(\frac{2v}{v_1} - 1 \right)^{3/4} K_{\xi} K_2$ 计算,其中 v_1 为黏性土冲刷速度, $\beta = 0.18 \left(\frac{b}{h} \right)^{0.86}$ 。

我国的 JTG C 30—2002《公路工程水文勘测设计规范》^[21]规定黏性土局部冲刷计算公式为

$$h_b = \begin{cases} 0.83 K_{\xi} b^{0.6} I_L^{1.25} V & \frac{h_p}{b} \geq 2.5 \\ 0.55 K_{\xi} b^{0.6} h_p^{0.1} I_L^{1.25} V & \frac{h_p}{b} < 2.5 \end{cases} \quad (9)$$

式中: V 为一般冲刷后的垂线平均流速; I_L 为黏性土液性指数,适用范围为 0.16 ~ 1.48。

公式(9)采用黏土、黏沙土、沙黏土情况下的桥墩冲刷实测资料进行了验证,目前在国内普遍使用。

4 潮流作用下的双向流桥墩冲刷

潮汐双向流条件下的桥墩局部冲刷过程更加复杂,与单向流相比,在一个潮周期内水流是不断变化的,而且涨潮时相反方向的水流会使冲刷最大深度变小,单向流桥墩墩前迎水面的水流冲刷作用明显,墩后水流减弱,泥沙沉积形成沙脊,是明显的前深后浅冲刷坑形态,由于潮流的双向性,桥墩的两端都成了迎水面,都产生冲刷,形成马蹄形的冲刷坑,而且墩两侧冲刷坑的深度和范围都比单向流的小。

2000 年美国制定了行业规范《潮汐河道冲刷》,是世界上首次提出的潮汐水流下桥墩局部冲刷的应用规范。该规范认为潮汐水道与单向河流有着同样的冲刷机理,现行公式虽然不能预测历时演变过程,但能够预测冲刷深度,虽然潮汐水道的水流条件有所不同,但是对水流条件进行评价以后,认为非潮汐河流的相应公式可以用来预测潮汐河流的局部冲刷。

我国对于潮流作用下桥墩局部冲刷机理和冲刷特性方面的研究还处于起步阶段。韩玉芳等^[28]通过水槽试验研究指出:潮汐往复流作用下的冲刷过程在一个潮周期内有相当长时间的小流速和憩流时间,冲刷坑形成比较慢,冲刷过程需要更长的时间,还对比研究了圆形桥墩与尖头盾形桥墩在单向流和往复流作用下冲刷坑平面形态的差别,认为当涨落潮最大流速与单向流平均流速接近时,两者的最大冲刷深度是基本一致的。但是,铁道科学研究院在汕头妈屿跨海大桥和钱塘江二桥等研究中,以及南京水利科学研究院卢中一等对苏通大桥的研究发现,潮流最大冲深比单向流冲深要小,折减系数为75%~90%。

由于对潮流冲刷认识不够深入,现在很多潮汐河口的大型桥梁和跨海大桥(如东海大桥、杭州湾大桥)都通过物理模型试验来分析冲刷。现在还没有潮流作用下的单独的冲刷公式,只是认为潮流的最大冲刷深度可借鉴单向流的冲刷深度,在文献[16] 65-1式和65-2式的基础上,以潮流涨落急最大流速代替单向流的平均流速,或把系数进行适当调整,以预测潮流的冲刷。

5 研究展望

桥墩冲刷作为重要的理论和工程问题,各国都已对其进行了大量的试验和实测研究。非黏性土桥墩的局部冲刷研究已有很多公式,冲刷机理、冲刷过程及防护特性^[29]越来越受到人们重视,对黏性土以及潮流作用下桥墩冲刷的研究也逐渐深入。但是,仍有一些问题需要更加深入的探讨和研究。

a. 桥墩冲刷是一个结构和水流相互作用并包含泥沙起动的变化过程,其机理、冲刷过程和冲刷历时是桥墩冲刷计算和合理设计的基础,各种参数对桥墩冲刷的影响需要更加深入的探讨和研究。

b. 黏性土由于其黏结力、固结作用和絮凝现象,其起动和冲刷过程很复杂。现行的黏性土冲刷公式有局限性,黏性土的冲刷形态、冲刷深度以及岩石、漂石河床的冲刷都需深入研究。实际工程中,多层土的冲刷^[30]也是难点。

c. 众多的新型桥梁处于感潮河段,潮流等双向流作用下桥墩前后都会形成冲刷坑,冲刷机理和冲刷坑的形状和深度尚不清楚,计算公式几乎没有,亟待深入的试验和理论研究。

d. 变态物理模型中,在模型物体周围的水流能否准确地模拟真实水流,改进试验方法以及提高模拟的精确度也是亟待解决的问题。

参考文献:

- [1] SHEPPARD D M, ASCE M, WILLIAM M. Live-bed local pier scour experiment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(7): 1-2.
- [2] 黄建维, 高正荣, 卢中一, 等. 大型群桩基础局部冲刷防护技术专题报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006: 38-43.
- [3] 朱炳祥. 国外桥墩局部冲刷计算研究主要成果与进展[J]. 中外公路, 1985(5): 49-57.
- [4] RAHMAN M M, HAQUE M A. Local scour estimation at bridge site: modification and application of Lacey formula[J]. International Journal of Sediment Research, 2003, 18(4): 3-4.
- [5] 朱炳祥. 国内桥墩局部冲刷研究的主要成果[J]. 中南公路工程, 1986(3): 40-41.
- [6] 高正荣, 黄建维, 卢中一. 长江河口跨江大桥桥墩局部冲刷及防护研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 3-8.
- [7] DEY S, BARBRBHUIYA A K. Clear water scour at abutments [C]//Proceedings of the Institution of Civil Engineers. London: ROYAUME-UNI, 2004, 157(2): 14-16.
- [8] 张兰丁. 桥墩群体绕流的复变函数理论解[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(1): 14-16.
- [9] 方神光, 吴保生. 南水北调中线工程输水渠道桥梁影响分析[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 61-63.
- [10] 解鸣晓, 张玮. 桩墩影响下的水动力数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 20-24.
- [11] 张玮, 解鸣晓. 桩墩壅水数值计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(5): 25-28.
- [12] LI Yuan-ya. 3-D numerical modeling of local scour around bridge pier [C]//Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation. Beijing: Water Power Press, 2004: 1492-1493.
- [13] 刘德良, 李玉成, 李林普, 等. 波流作用下大尺度圆柱周围局部冲刷深度简化数值模拟[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(6): 867-868.
- [14] ЖУПАВЛІЕВ М М. 非黏性土桥墩局部冲刷计算[J]. 戚立德, 译. 国外公路, 1980(3): 60-62.
- [15] 董文虎, 段文忠. 国内外非黏性土桥墩局部冲刷计算方法综述[J]. 郑州工业大学学报, 1997(2): 94-97.
- [16] 张佰战, 李付军. 桥墩局部冲刷计算研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(2): 3-4.
- [17] 詹义正, 王军, 谈广鸣, 等. 桥墩局部冲刷的试验研究[J]. 武汉大学学报, 2006, 39(6): 3-4.
- [18] 高冬光. 桥涵水文[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 87-89.
- [19] 尹桂莲. 桥墩局部冲刷经验公式的制定[J]. 铁道工程学报, 1989(4): 4-5.
- [20] 詹海玲. 浅谈计算桥墩局部冲刷 65-2 原式与 65-1 修正式[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2006, 5(2): 1.

(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)