

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.035

水压计用于河床冲刷的实时监测研究

陈柏麟, 郭力纶, 张达德

(中原大学 土木工程学系, 台湾 中坜 32023)

摘 要: 台湾西部河川的中下游主河道均有严重下降的情况, 台风、洪水侵袭期间由于水位和冲刷深度的变化严重影响桥梁安全。桥梁管理单位常以水位高程作为封桥决策的依据, 这虽然简单, 但缺乏强而有力的技术支撑。因此, 在洪流冲击下仍能稳定应用冲刷深度监测系统十分重要。在国内外已实施的冲刷自动化观测方法中, 仪器设备受河道冲淤形态、高含沙量、高盐度、装置固定困难和在现场布置时与施工发生冲突等局限, 往往不能实时反映涉水桥基的局部冲刷性态。因此, 研究引用苏通大桥冲刷监测技术, 通过沉底式水压计对河床面与水位(水头)实时量测, 比对相对水头差异, 以求取冲刷面的深度。苏通大桥属泥砂质河床, 研究桥段属卵石河段, 但台湾地形狭长, 河川坡陡、水流湍急, 对于监测设备的建置与保存较苏通大桥更为困难。研究特别考虑适用于现场环境恶劣的土建工程安全监测, 采用了坚固且密封的钢箍, 使水压计能在长期监测过程中保持极高的可靠性与稳定性, 并且可在恶劣环境中正常运作的监测仪器十分必要。

关 键 词: 冲刷深度; 水压计; 实时监测; 跨河桥梁

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)08-2448-08

A study of piezometer real-time measurement of the riverbed scour

CHEN Po-lin, GUO Li-lun, DAVE CHANG Ta-teh

(Department of Civil Engineering, Chung Yuan University, Chung Li, Taiwan 32023, China)

Abstract: The middle stream and upstream of main rivers in western Taiwan exists serious subsidence situation. The changes in the real-time water level and scour depth during flood and typhoon seasons influence the safety of bridges significantly. Bridge management unit often use water level elevation as a bridge closure decision basis. Although simple, but this is lack of a strong technical support. Therefore, scour depth monitoring system capable of functioning in the floods impact is very important. Among existing automatic observation methods for scour, the instruments and equipments are limited to the river course silting form, high sand content, high salinity, difficult device installation and conflict between onsite laying and construction. They may not reflect local scour behavior of submerged bridge foundation in a timely manner. Therefore, this study cited the Sutong Bridge scour monitoring technology, through the sunk piezometer under riverbed and water level real-time measurement to comparison of the head difference to find the scour depth. However, the Sutong Bridge is a sandy riverbed. In this study, the bridge is a gravel riverbed. Due to the long and narrow terrain of Taiwan, the river is steep and fast. For the construction and preservation of monitoring equipment is more difficult to measure than the Sutong Bridge. This study has considered the safety monitoring of civil engineering suitable for the harsh environment. The use of a sturdy and sealed steel hoop helped the piezometer not only maintain a high degree of reliability and stability in the long-term monitoring process, but also can be operation in the harsh environment.

Keywords: scour depth; piezometer; real-time scour monitoring; river-crossing bridge

1 引 言

本研究所针对的案例是位于台湾大甲溪下游的东势大桥, 且对两墩执行全面监测计划。东势大桥为跨越大甲溪进入台中县东势镇必经的重要桥梁, 此桥原名为东丰大桥。后遭遇九二一大地震严重受

损, 而于原桥址新建长 564.6 m、净宽 30 m 标准双向三车道新桥。为了加速缩短复建时间及增加耐震功能, 将原钢筋混凝土梁改为钢梁结构, 因而减少了桥梁上部结构重量, 并且加装防落桥拉杆及隔减震支承, 防震系数达 0.33, 可耐 7 级地震。桥墩则为直径 2.6 m 门架式桥墩, 基桩为直径 1.5 m 全套

收稿日期: 2015-09-29

基金项目: 高科技桥梁实时监测系统建置试办计划 (No. 9808)。

This work was supported by the Construction Pilot Project of High-tech Bridge Real-time Monitoring System (9808).

第一作者简介: 陈柏麟, 男, 1974 年生, 博士, 副总经理, 主要从事土工合成材料、大地工程技术及防灾科技应用研究。E-mail: hauer45680@yahoo.com.tw

通讯作者: 郭力纶, 男, 1986 年生, 博士, 主要从事土工合成材料、大地工程技术及防灾科技应用研究。E-mail: g0921819577@yahoo.com.tw

管基桩、深 25 m。桥址地层自地表以下约 1.8~7.9 m 范围内为卵砾石夹砂层。卵砾石层以下则为由胶结疏松的砂岩、粉砂岩、页岩及泥岩组成的岩层，且各岩层分布并不甚规律；地下水位于地表下 0~3.6 m 左右。

本研究主要工作为冲刷监测，而过去桥梁管理单位常以水位高程作为封桥决策的依据，虽然简单，但缺乏强而有力的技术支撑。因此，研究在洪流冲击下仍能稳定运作的冲刷深度监测系统是现今台湾公路桥梁最重要的课题之一。

2 桥墩冲刷回顾

2.1 冲刷机制

公路过河桥梁其桥墩结构系统的安全性及稳定性，取决于桥墩基础受河流长期冲刷而淘空的严重程度，引起冲刷的机制见图 1、2^[1-2]。冲刷程度则取决于河流的流量、流速、挟带砂石数量、河床土质及组成和水流通过的截面积等因素，在河流丰水期这些因素影响明显，洪峰来临时大量洪水挟带砂石对桥墩基础产生持续性冲击，在桥基边壁附近产生涡流并持续向下掏空基础外围的土层，在持续反复的洪水作用下，桥墩基础底部河床将产生严重的局部冲刷，进而影响高架桥梁基础的稳定与安全，然而目前局部冲刷计算公式并不可靠，主要还是依赖于现场实测。这些现象所导致的涉水桥基周围床面的变化，因发生在水下皆无法以目视检测加以反映，而如何克服现场实测的困难，能有效实时监测冲刷深度变化的方法正是本文研究的课题。

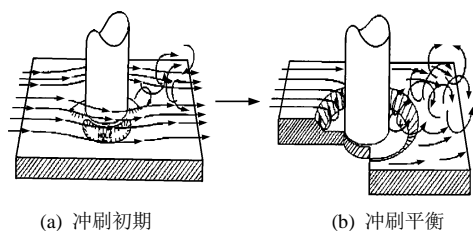


图 1 局部冲刷变迁图^[1]
Fig.1 Variation of local scour^[1]

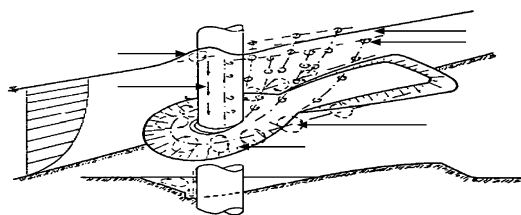


图 2 河床重力式结构物水流流况示意图^[2]
Fig.2 Schematic of stream conditions around gravitational structure on river bed^[2]

2.2 桥墩最大可能冲刷深度

一般估算河川桥桥墩最大可能冲刷深度受桥墩局部冲刷深度、河床土质移动厚度及长期移动冲刷深度、河槽束缩冲刷深度等综合影响，因此，最大可能冲刷深度应以上述冲刷深度的和计算，见表 1^[3-23]。目前最大可能冲刷深度众多，但大多为试验所得经验公式、半经验公式，不同公式采用的试验方法、运用不同，很难说哪一套公式最可靠。

表 1 桥址附近冲刷种类与相关评估方法^[3-22]
Table 1 Types of scour nearby bridge sites and related evaluation methods^[3-22]

桥墩（基）的 局部冲刷	桥基保护工程 （堰坝）下游侧的 局部冲刷	桥墩（基）或河 道窄缩导致的 束缩冲刷	一般冲刷
Laursen ^[3-4] (1958, 1962)	Veronese ^[12] (1937)	Laursen ^[4] (1962)	Blench ^[20] (1969)
Shen 等 ^[5] (1966)	Laursen and Flick ^[13] (1983)	Gill ^[17] (1981)	Maza Alvarez and Echavarria Alfaro ^[21] (1973)
吴建民 ^[6] (1967)	Schoklitsch ^[14] (1932)	Komura ^[19] (1966)	Holmes ^[22] (1974)
Shen 等 ^[7] (1969)		Les Hamill ^[18] (1999)	
Coleman ^[8] (1971)			
Jain and Fischer ^[9] (1980)	Mason and Arumugan ^[15] (1985)		
Melville ^[10] (2000)			
Ettma 等 ^[11] (1998)	Bormann and Julien ^[16] (1991)		

3 桥梁实时监测系统

3.1 国外相关信息

参考国外已发表的冲刷自动化观测方法，包括水下声纳、多波束测深、超声波、磁套环、压电薄膜、光纤光栅、无线电波漂浮装置等^[23-26]，这些方法原理上都是可行的。但台湾河川具有坡陡流急的特点，经济性及如何使传感器在洪峰时期仍可安稳地运作与存活是目前最重要的考虑。综合国外诸多的研究成果与实践经验可知，就冲刷的实时监测系统而言，至今仍无有效的解决方案。

3.2 国内相关成果

苏通大桥为目前世界上规模最大的双塔斜拉桥，主跨有 1 088 m，位于长江入海口南通河段，由于长江河口段属感潮河段，水文条件复杂，河床地质条件不稳定、抗冲刷性差，而主塔墩基础位于江中心靠近主航道区域，水深流急，这就使得苏通大桥主塔墩基础的冲刷问题异常突出。因此，桥墩采用群桩基础，以 131 根灌注桩组成主塔桥墩基础，且对桥位区河床冲刷进行实时监测十分必要。

为能监测桥墩冲刷深度真实情况,在桥墩桩体施工的同时埋设水压力传感器,考虑到不均匀冲刷问题,于主塔与外围区共装设 80 多支冲刷监测传感器,其监测系统安装见图 3,最终呈现 3D 冲刷监测成果,效果卓越,如图 4 所示^[27-29]。

本研究引用苏通大桥冲刷监测技术,通过沉底式河床面与水位(水头)实时量测,当洪水产生冲刷行为时,水压计将会因重力作用沉降至不断变动的河床面。而水位变化可直接反应其冲刷深度,并通过自动化实时记录数据可得知河床动态变化,并进行远程监测,亦可作为分析桥梁安全及封桥决策的重要参考因子。另苏通大桥属泥砂质河床,本研究桥段属卵砾石河段,且台湾河川坡陡、河流湍急,对于监测设备的建置与保存更为重要。因此,本研究旨在建立一套在长期监测过程中能恶劣环境并保持可靠性与稳定性和正常运作的冲刷监测仪器。

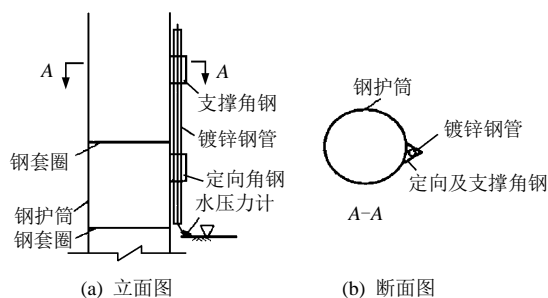


图 3 苏通大桥冲刷监测安装示意图

Fig.3 Sutong Bridge scour monitoring installation on the pier of diagram

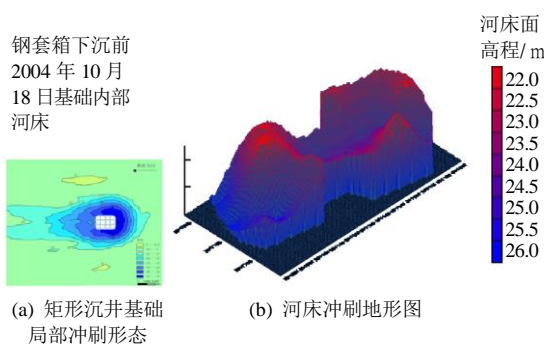


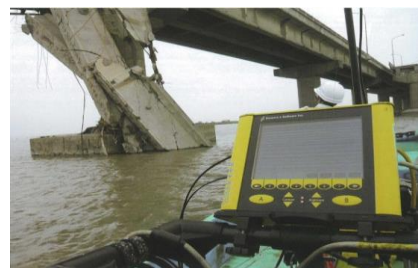
图 4 苏通大桥冲刷监测成果^[27-29]

Fig.4 Sutong Bridge scour monitoring results^[27-29]

3.3 台湾相关研究成果

2009 年莫拉克台风断桥事件中,以高屏溪出海口的双园大桥坍塌 450 m 最引人注目。在断桥后曾以透地雷达、水下声纳、水下地电阻等检测设备进行部分河道断面扫描,原检测重点是期望能调查河床深度变化情形等,但由于河道淤积分布、部分水

深不足回淤、水中盐分过高等因素的影响,出现地雷达讯号解析不佳,船只无法靠近等情形,见图 5^[30]。另声纳方法与都卜勒方法均被多次试用,但因固定困难和含砂量高无法有效辨识。



(a) 邻近桥墩处检测



(b) 水上测量情形

图 5 双园大桥透地雷达检测情形^[30]

Fig.5 Ground penetrating radar detection at Shuangyuan Bridge^[30]

4 沉底式水压(水位)感测联合机构系统建置

本研究使用沉底式水压(水位)传感器,采用振弦式水压计为感应机制(见图 6),长度约 13.3 cm,直径约 1.91 cm,电缆线为四芯遮蔽,藉由水压力感测来得知水压计沉降深度(冲刷深度),适用范围为约 350 kPa,即约适用 35 m 深度内。其性能优于传统的电阻式、半导体式测试仪器,其主要原因在于使用频率作为输出讯号,较采用电流作为远距离输送讯号所产生的误差较小,即使频率在传递超过 2 000 Hz 的情况下也衰减甚微,一般可持续使用 5~10 年,但需定期校验。

本研究于东势大桥(大甲河流域)选定一主河道 P7 墩及一次河道 P3 墩为量测标的,为了监测河床冲刷深度的变化,又必须确保水压力计在高度方向可自由移动。结合考虑水压力计电缆的保护,其安装和埋设方法选择的原则是:最能反映桥基发生最大冲刷的位置,即单向流情况下安装在桥基迎水面的两近边侧;最有利于水深传感器及其电缆的保护;最有利于埋设状态,尤其是平面位置的有效控制,并确保水深传感器在竖向活动自由;在桥台不

易受洪水冲刷位置安装转盘设施，以连接预留的电缆线与不锈钢缆，通过滑轮组装置和保护措施，将水压计+重锤沉降于河床底面，当洪水产生冲刷行为时，水压计将会因重力作用沉降至不断变动的河床面，安装示意图见图 7~10，建置完成后的实物如图 11 所示。

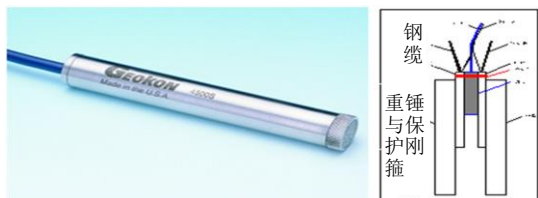


图 6 水压计与重锤示意图
Fig.6 Schematic of piezometer

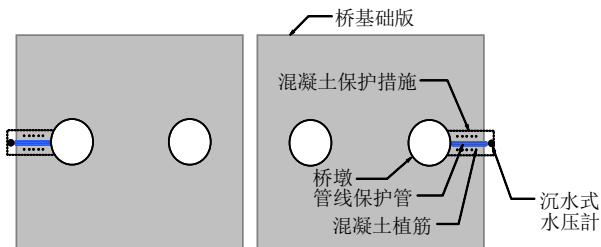


图 7 沉水式压计安装平面示意图(P3/P7)
Fig.7 Schematic plan of fixing of sunk piezometer (P3/P7)

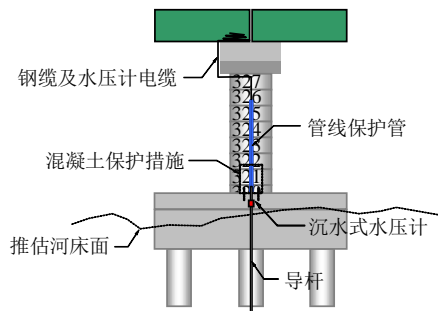


图 8 沉水式压计安装断面示意图
Fig.8 Diagrammatic sectional drawing of fixing of sunk piezometer

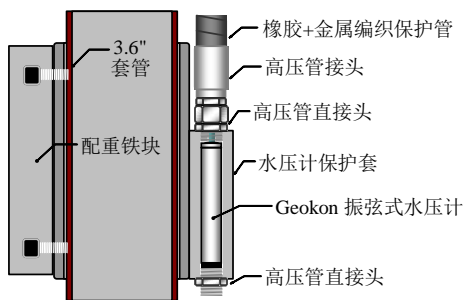


图 9 沉水式水压计与配重装置断面设计断面
Fig.9 Design section of sunk piezometer and counterweight device

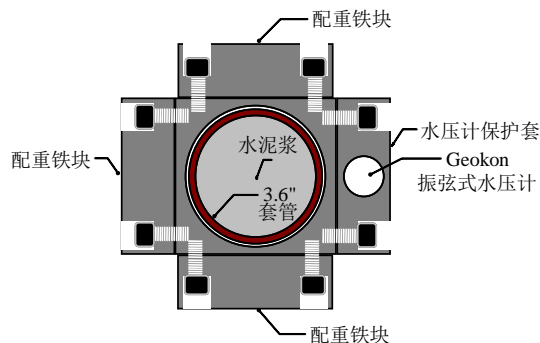


图 10 沉水式水压计与配重装置平面配置设计
Fig.10 Plane configuration design of sunk piezometer and counterweight device



图 11 沉水式水压计建置完成图(P3/P7)
Fig.11 Finished construction of sunk piezometer (P3/P7)

5 沉底式水压（水位）感测联合机构系统监测成果

5.1 水压计监测数据

P3 墩上、下游侧水压计由于布测期间均无明显水位，因此，不能提供冲刷计算数据。P7 墩上游侧因施工时正逢密集雨期，导致水位高、水量大，而未能确实固定与安装监测系统。因此，本研究主要量测以 P7 墩下游侧的水压计读数来计算其冲刷量，P7 墩初始水压计埋设的高程为 318.359 m，而 P7 墩下游侧水压计读数见图 12。

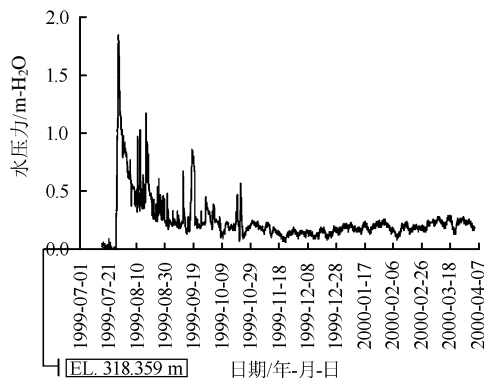


图 12 P7 下游侧水压计读数
Fig.12 Readings of piezometer at downstream side of P7

5.2 冲刷量计算分析

利用沉底式水压的数据进行人工计算与分析, 计算与分析思路如下:

水位 - 水压力换算的水头 = 水压计所在的深度 (高程)
(1)

初始水压计埋设的高程 - 此次时间点水压计所在的高程 = 水压计埋设后至此时的冲刷深度(ΔS)
(2)

人工计算基本思路有以下几点:

(1) 对水位、水压、变动明显的点以及平稳时段取点计算。

(2) 上、下浮动太大不易确定其读数者, 不宜选用。

(3) 桥址的土层上层多为砂砾石层, 下部为粉砂岩、砂岩等分布。冲刷过程中, 水中的含砂量 (泥量) 不高, 以水重度 $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ 计算水压的水头应属合理。

(4) 当流速减缓稳定时, 即使有回淤, 水压计一定会留置于最深的冲刷处, 相关的关系式能更清楚得到此位置的最大冲刷深度。

研究期间冲刷深度计算与分析见表 2, 表中已计算出各人工选点的冲刷深度。结合研究期间雨量、水压、水位的历时曲线, 各算式的计算成果可以显示冲刷深度的变化 (见图 13~15)。再利用软件程序自动计算绘图, 其结果与其比较, 见图 16。因人工选点计算点数较少, 但仍可清楚看出其成果趋势的一致性, 研究期间, 冲刷深度最终稳定于约 $\pm 1.2 \text{ m}$ 。

6 冲刷监测成果评估与分析

本研究使用沉底式水压 (水位) 传感器, 其冲刷监测成果卓越, 然而针对监测期间数据稳定性仍有进步空间, 通过水位与流速监测数据可发现, 有部分跳跃值产生, 如图 14 所示。此现象非确实读值, 而是因水位与流速监测仪器为非接触式的测量, 较易受到外界环境因素影响, 如水面浪花太大而造成水位、流速忽然变高, 并使后续冲刷计算亦产生误值, 如图 16 中 2011 年 1 月 21 日的跳跃值, 冲刷深度突然减小的现象, 但在常规监测曲线数据中仍可明显辨识其区别, 此问题可透过调整记录器的取样频率来改善。

而针对本研究监测仪器在恶劣环境的保存能力, 通过监测期间所遭遇的洪水台风侵袭 (见表 3)。除经由监测数据上可以真实反应现况外 (见图 14), 在遭受高水位、高流速、巨量滚石、泥砂、河中异

物的冲击下, 在洪水台风过后于现场观测其现况, 河道上堆积卵砾石、枯木, 且河岸遭淘刷, 感测仪器周围遭卵砾石围束、钢筋混凝土磨耗严重 (见图 17~20)。感测仪器在如此恶劣的环境下, 仍维持良好的运作状态, 并持续监测计读, 表明感测仪器性能优越可靠。

表 2 人工选点冲刷计算
Table 2 Artificial siting scour calculation

项次	日期	冲刷深度计算 / m
1	2010.07.28 14:01	$319.6 - 1.8 = 317.8$, $\Delta S_1 = 318.36 - 317.8 = 0.56$
2	2010.08.02 02:39	$318.55 - 0.9 = 317.65$, $\Delta S_2 = 318.36 - 317.65 = 0.71$
3	2010.08.03 15:49	$318.4 - 0.85 = 317.55$, $\Delta S_3 = 318.36 - 317.55 = 0.81$
4	2010.08.11 03:29	$317.8 - 0.30 = 317.5$, $\Delta S_4 = 318.36 - 317.5 = 0.86$
5	2010.08.25 02:02	$317.7 - 0.24 = 317.46$, $\Delta S_5 = 318.36 - 317.46 = 0.9$
6	2010.09.11 09:08	$318.08 - 0.63 = 317.45$, $\Delta S_6 = 318.36 - 317.45 = 0.91$
7	2010.09.15 06:04	$317.6 - 0.11 = 317.49$, $\Delta S_7 = 318.36 - 317.49 = 0.87$
8	2010.09.26 02:16	$317.562 - 0.165 = 317.397$, $\Delta S_8 = 318.36 - 317.397 = 0.963$
9	2010.09.29 10:49	$317.7 - 0.22 = 317.48$, $\Delta S_9 = 318.36 - 317.48 = 0.88$
10	2010.10.80 05:27	$317.4 - 0.1 = 317.3$, $\Delta S_{10} = 318.36 - 317.3 = 1.06$
11	2010.10.15 17:07	$317.5 - 0.19 = 317.31$, $\Delta S_{11} = 318.36 - 317.31 = 1.05$
12	2010.10.25 0:09	$317.426 - 0.131 = 317.295$, $\Delta S_{12} = 318.36 - 317.295 = 1.065$
13	2010.11.03 01:00	$317.4 - 0.17 = 317.23$, $\Delta S_{13} = 318.36 - 317.23 = 1.13$
14	2010.11.11 01:03	$317.426 - 0.131 = 317.295$, $\Delta S_{14} = 318.36 - 317.295 = 1.065$
15	2010.11.24 01:49	$317.289 - 0.115 = 317.174$, $\Delta S_{15} = 318.36 - 317.174 = 1.186$
16	2010.12.02 21:34	$317.221 - 0.148 = 317.073$, $\Delta S_{16} = 318.36 - 317.073 = 1.287$
17	2010.12.14 10:55	$317.26 - 0.131 = 317.129$, $\Delta S_{17} = 318.36 - 317.129 = 1.231$
18	2011.01.03 01:27	$317.277 - 0.198 = 317.079$, $\Delta S_{18} = 318.36 - 317.079 = 1.281$
19	2011.01.18 11:03	$317.243 - 0.182 = 317.061$, $\Delta S_{19} = 318.36 - 317.061 = 1.299$
20	2011.02.02 01:50	$317.26 - 0.188 = 317.072$, $\Delta S_{20} = 318.36 - 317.072 = 1.288$
21	2011.02.10 13:10	$317.259 - 0.131 = 317.128$, $\Delta S_{21} = 318.36 - 317.128 = 1.232$
22	2011.02.22 02:01	$317.285 - 0.148 = 317.137$, $\Delta S_{22} = 318.36 - 317.137 = 1.223$
23	2011.03.04 17:35	$317.444 - 0.265 = 317.179$, $\Delta S_{23} = 318.36 - 317.179 = 1.181$
24	2011.03.14 16:01	$317.43 - 0.249 = 317.181$, $\Delta S_{24} = 318.36 - 317.181 = 1.179$
25	2011.03.21 15:05	$317.377 - 0.198 = 317.179$, $\Delta S_{25} = 318.36 - 317.179 = 1.181$
26	2011.04.03 00:12	$317.411 - 0.232 = 317.179$, $\Delta S_{26} = 318.36 - 317.179 = 1.181$

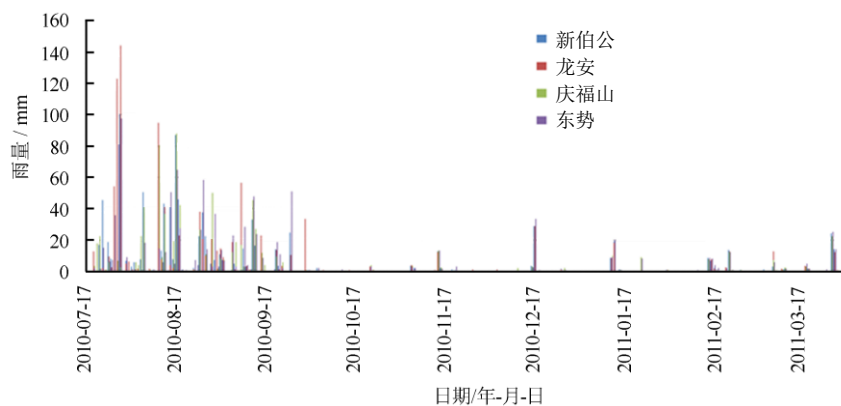
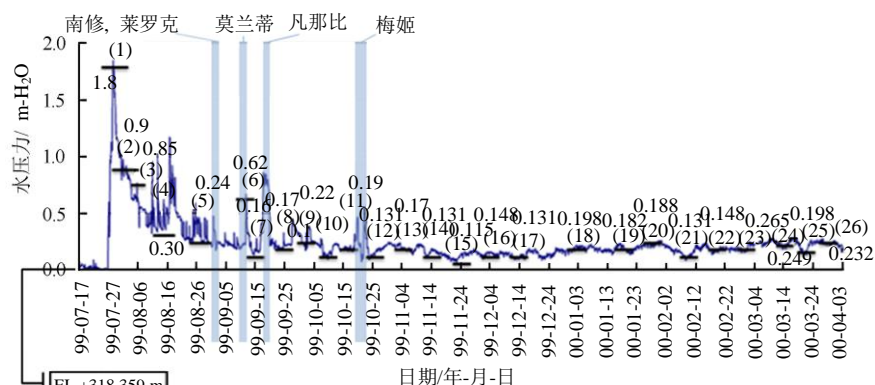
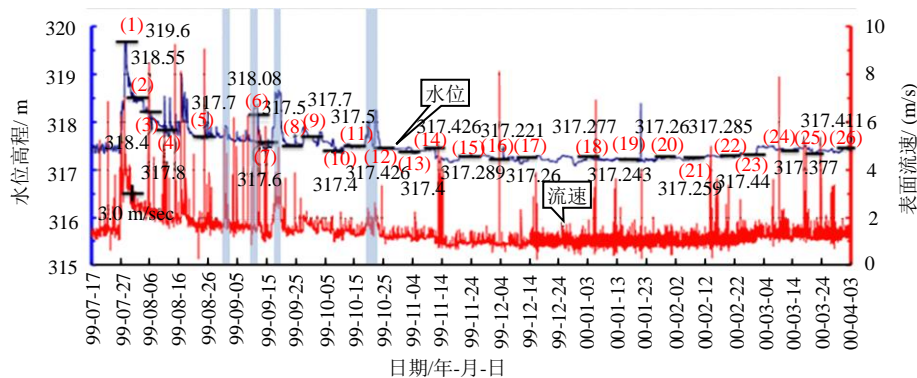


图 13 雨量图
Fig.13 Rainfall



(a) P7 下游侧水压计读数



(b) P7 水位/流速读数

图 14 P7 水位/流速、下游侧水压计读数

Fig.14 Water surface level, flow rate, readings of piezometer at downstream side

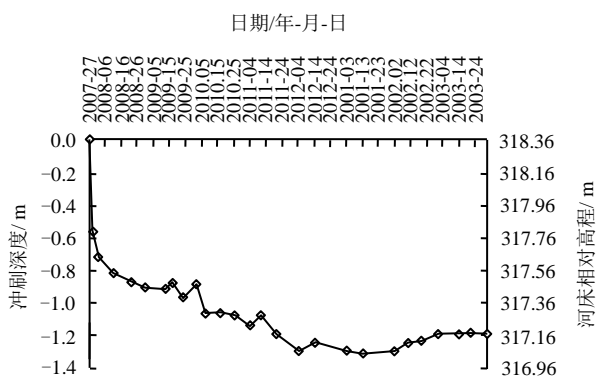


图 15 判读后的冲刷深度
Fig.15 Identified scour depth

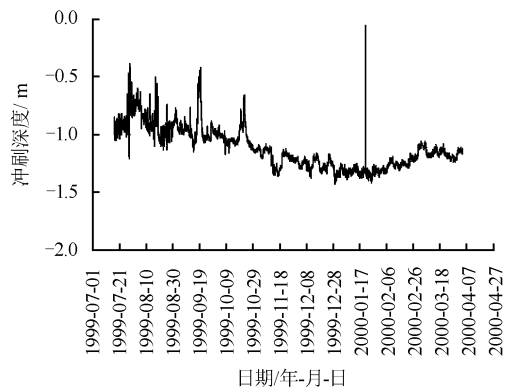


图 16 实时比对自动计算的冲刷深度历时变化曲线
Fig.16 Real-time comparison of curve of automatically calculated time-varying scour depth

表 3 监测期间遭遇台风
Table 3 Typhoons during the monitoring

年份	编号	台风名称	警报期间	强度
2010	201013	梅姬(MEGI)	2010-10-21 02:30 2010-10-23 23:30	中度
2010	201011	凡那比(FANAPI)	2010-09-17 23:30 2010-09-20 14:30	中度
2010	201010	莫兰蒂(MERANTI)	2010-09-09 10:00 2010-09-10 11:30	轻度
2010	201008	南修(NAMTHEUN)	2010-08-30 22:30 2010-08-31 20:30	轻度
2010	201006	莱罗克(LIONROCK)	2010-08-31 20:30 2010-09-02 14:30	轻度



图 17 卵砾石围束
Fig.17 Pebbles confinement



图 18 卵砾石堆积
Fig.18 Pebbles stacked



图 19 河岸冲刷
Fig.19 Riverbank scour

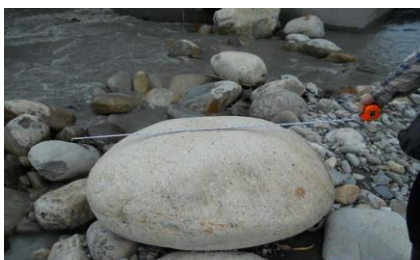


图 20 大于 100 cm 的卵砾石随处可见
Fig.20 Greater than 100 cm of pebbles everywhere

7 结 论

(1) 在国内外已实施的冲刷自动化观测方法中, 仪器设备受河道冲淤形态、高含沙量、高盐度、装置固定困难和在现场布置时与施工发生冲突等局限, 往往不能实时反映涉水桥基的局部冲刷性态, 从既有研究成果看, 对桥基的实时监测至今仍无有效的解决方案。

(2) 本课题研制的沉底式水压(水位)传感器, 具有实时反映并监测桥基局部冲刷变化的功能, 特别适用于坡陡流急、高流速、大流量等现场条件恶劣的河道, 经过多次现场考验, 即使受到汛期洪水冲击, 其传感器仍可安稳运作, 确保了数据的完整连续性。

(3) 监测仪器具有实时监测的功能, 能够实时监测水压力和自动计算其冲刷深度, 并完整呈现历时曲线变化, 能及时地为有关部门提供决策依据。

(4) 该感测联合机构讯号传输稳定、数据量测精确; 传感器有持续的电源供应, 具备不断电功能保障。仪器具备操作简单、经久耐用、易维护、维修等特点。

参 考 文 献

- [1] MELVILLE B W, CHIEW YEE-MENG. Time scale for local scour at bridge piers[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1999, 125(1): 59—65.
- [2] BREUSERS H N C, RAUDKIVI A J. Scouring: Hydraulic Structure Design Manual, Vol.2[S]. Belkema: IAHR, 1991.
- [3] LAURSEN E M. Scour at bridge crossings[J]. **Journal of the Hydraulics Division**, 1958.
- [4] LAURSEN E M. Scour at bridge crossings[J]. **Transactions**, 1962, 127(1): 116—119.
- [5] SHEN H W, SCHNEIDER V R, KARAKI S S. Mechanism of Local Scour[R]. Colorado, Fort Collins: Colorado State University Engineering Research Center, 1966.
- [6] WU J M. Experimental study of bridge pier scour[J]. **Resume Publication of Water Conservancy**, 1967, 5: 38—49.
- [7] SHEN H W, SCHNEIDER V R, KARAKI S S. Local scour around bridge piers[J]. **Journal of the Hydraulics Division**, 1969, 95: 1919—1940.
- [8] COLEMAN N L. Analyzing Laboratory Measurements of scour at cylindrical piers in sand beds[C]//Proceeding of the 14th IAHR Congress. [S. l.]: [s. n.], 1971, 3: 307—

- 313.
- [9] JAIN S C, FISCHER E E. Scour around bridge piers at high flow velocities[J]. **Journal of the Hydraulics Division**, 1980, 106(11): 1827—1842.
- [10] LAUCLAN C S, MELVILLE B W, COLEMAN S E. Sizing riprap to protect against local scouring at bridge piers[C]//Proceeding of the International Symposium on Scour of Foundations. [S. l.]: [s. n.], 2000, 60—68.
- [11] ETTMA R, MOSTAFA E A, MELVILLE B W, et al. Local scour at skewed piers[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1998, 124(7): 756—760.
- [12] VERONESE A. Erosioni de Fondo a Valle di uno Scarico[J]. **Annali dei Lavori Pubblici**, 1937, 75(9): 717—726.
- [13] LAURSEN E M, FLICK M W. Scour at sill structures[R]. Avenue, Phoenix: Arizona Department of Transportation, 1983.
- [14] SCHOKLITSCH A. Kolkbildung unter ueberfallstrahlen[R]. Wasserwirtschaft: [s. n.], 1932.
- [15] MASON P J, ARUMUGAM K. Free jet scour below dams and flip buckets[J]. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, 1985, 111(2): 220—235.
- [16] BORMANN N E, JULIEN P Y. Scour downstream of grade-control structures[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1991, 117(5): 579—594.
- [17] GILL M A. Bed erosion in rectangular long contraction[J]. **ASCE Journal of Hydraulics Division**, 1981, 107(3): 273—284.
- [18] HAMILL L. Bridge Hydraulics[M]. London: E & FN SOPN. 1999.
- [19] KOMURA S. Equilibrium depth of scour in long contractions[J]. **ASCE Journal of Hydraulic Division**, 1966, 92(5): 17—37.
- [20] BLENCH T. Mobile-bed fluviology[M]. Edmonton, Canada: University of Alberta Press, 1969.
- [21] MAZA A J A, ECHAVARRIA A F J. Contribution to the study of general scour[C]//Proceeding of the International Symposium on River Mechanics, IAHR. [S. l.]: [s. n.], 1973, 795—803.
- [22] HOLMES P S. Analysis and prediction of scour at railway bridges in New York[R]. [S. l.]: New Zealand Engineering, 1974, 11: 313—320.
- [23] LAGASSE P F, RECHARDSON E V, SCHALL J D, et al. Instrumentation for Measuring Scour at Bridge Piers and Abutments[R]. Washington, D.C: National Academy Press, 1997.
- [24] LIN Y B, CHEN J C, CHANG K C, et al. Real-time monitoring of local scour by using fiber bragg grating sensors[J]. **Smart Materials and Structures**, 2005, 14: 664—670.
- [25] LIN Y B, LAI J S, CHANG K C, et al. Flood scour monitoring system using fiber bragg grating sensors[J]. **Smart Materials and Structures**, 2006, 15: 1950—1959.
- [26] SUZUKI O, SHIMAURA, M. Development of New Scour Monitoring Devices for Railway Bridges[C]//International Symposium on Scour of Foundations. Melbourne, Australia: Geo Engineering, 2000: 329—336.
- [27] GAO C R, HUANG J W. Final report on scour protection works for King Tower Pier of Sutong Bridge[R]. Nanjing: Jiangsu Sutong Bridge Construction Headquarters, Nanjing Hydraulic Research Institute, 2004.
- [28] Report on Monitoring Results of Scour at Nanjing Bridge III on Yangtze River[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2004.
- [29] GAO C R, HUANG J W. Final report on monitoring of scour protection works for King Tower Pier of Sutong Bridge[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2004.
- [30] China Engineering Consultants Incorporated. Typhoon Morakot 88 flood damaged bridges investigation records[M]. Taiwan: Techbook Press, 2009.