

水压力传感器系统在河床冲刷深度 实时监控中的应用研究

陈志坚¹, 刘大伟¹, 张雄文^{1,2}

(1. 河海大学土木工程学院, 南京 210098; 2. 江苏省苏通大桥建设指挥部, 江苏 南通 226009)

[摘要] 阐述了桩基础范围内的河床冲刷实时监控的必要性; 介绍了水压力传感器监测系统的应用、技术难点和解决方案。通过潮位监测点的设置, 有效解决了水位波动的修正问题, 采用依托于基桩的单点定位埋设法实现了传感器可靠定位和传感器信号的可靠传输, 苏通大桥的工程实践表明, 该方法具有实时性、连续性、长期性和精度高的特点。根据实测结果分析了桩基础范围内河床局部冲刷的机理。

[关键词] 水压力传感器; 感潮河段; 群桩基础; 局部冲刷; 实时监控

[中图分类号] P332.4; TP212.9 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)05-0017-05

1 引言

在水利、取排水、海岸(堤)防护以及跨江桥梁等工程中, 因建筑物的修建改变了工程场区的径流条件和流场结构, 从而导致建(构)筑物地基产生普遍的局部冲刷问题。对于跨江桥梁工程, 桥墩或基桩所在的河床经冲刷后, 墩台基础的埋置深度较小, 承载力和基础结构的刚度显著降低, 沉降和基础的固有周期增大, 从而严重影响桥梁工程的安全稳定性和抗震能力。因此, 桥位区冲刷深度的确定对于跨江桥梁建设十分重要^[1,2]。然而由于桥位区水文条件的多变性、桥梁基础形式的复杂性以及对局部冲刷机理认识的不足, 使得数学模型计算结果和物理模型试验结果往往难以客观反映实际的冲刷深度。鉴于冲刷作用对跨江桥梁工程以及其他水工建筑物安全施工和安全运营的重要影响, 建立实时、有效的冲刷监测系统十分必要。

河床冲刷深度的确定可以采用水下地形测量方法^[3], 目前主要有地形尺测深、测深杆测深、测深锤测深。但对于处在水深流急环境中的工程, 上述方法常受到测量深度的限制。此外, 对于桥墩等工

程的桩基础, 当承台浇注完成后, 对桩基础范围内的河床冲刷深度的监测, 上述方法无法实施。若采用多波束回声探测仪等现代测深手段, 对墩台外围区域效果较好, 但对桥墩桩基础范围内的核心区域, 由于基桩的障碍作用, 测深往往达不到预期效果, 当承台浇注完成后, 这些方法同样无法实施。日本采用冲刷传感器监测冲刷深度, 将传感器按一定间距沿竖向埋入河床, 当河床冲刷至某一高程, 传感器浮出水面, 由岸上接收器接收信号^[4]。该方法只能一次性监测河床冲刷, 而且冲刷实际时间与接收时间存在时间差, 精度不高。笔者所介绍的水力传感器冲刷监测技术具有实时性、连续性、长期性、精度高的特点。实践表明, 该技术可有效监控河床的动态变化。

2 冲刷监测传感器系统

2.1 水深传感器

振弦式水压力传感器是一种业已成熟的水深监测技术^[5]。在实用中, 可以方便地根据传感器初始参数(率定系数和初始频率)和实测频率由式(1)计算测点位置的水深。

[收稿日期] 2005-12-01; 修回日期 2006-01-22

[基金项目] “九七三”国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412707); 江苏省交通科学研究计划项目(04Y029)

[作者简介] 陈志坚(1963-), 男, 福建福清市人, 河海大学土木工程学院教授, 博士生导师

$$h = K(f_0^2 - f^2)/9.8 \quad (1)$$

式中 h 为实测的水深 (m); K 为传感器系数 (kPa/Hz²); f_0 为初始频率 (Hz); f 为实测频率 (Hz)。

为了监测不同位置的冲刷深度,可按需要布置由一系列监测点组成的监测网,对于水位恒定的静水环境,可以容易地根据水深变化换算河床的冲刷深度。但冲刷问题突出的河床、海床均处于水流湍急、流向多变的动水环境,欲将水压力传感器用于冲刷深度的监测,必须解决水位波动实时修正、传感器可靠定位和传感器信号可靠传输问题。

2.2 水位波动的修正方法

由于大江大河下游的感潮河段水位始终处于动态变化之中,水深传感器的观测结果不能客观反映河床冲刷深度的变化。为此,在开展河床水深观测的同时,还需进行潮位联动观测,对水位波动进行修整。可根据式(2)换算实测的河床冲刷面高程。

$$H = h_0 + h_1 - h \quad (2)$$

式中 H 为水深传感器埋设位置的河床面(冲刷面)标高 (m); h_0 为潮位点水深传感器埋设位置的标高 (m); h_1 为潮位点水深传感器的实测水深 (m),可按式(1)确定; h 为冲刷监测点水深传感器的实测水深 (m),可由式(1)确定。

河床冲刷监测水域的潮位可由固定于桥梁墩台基础周边的振弦式水压力传感器联测。在潮位监测传感器安装埋设时,必须确保其始终淹没于江水之中,即潮位监测点的埋设高程必须低于监测河段的最低水位。此外,为了避免大气温度变化对观测结果的影响,潮位监测点淹没于水中的深度应适当大一些(如8m)。

2.3 冲刷监测传感器定位技术

对于水深流急、漩涡较多,且水流流向和流速多变的河段,冲刷监测点平面位置的有效控制十分重要。为了监测河床冲刷深度的变化,必须确保水压力传感器在高度方向可自由移动。对多种安装、埋设方案的反复实验和比较,结果表明:对于大型桩基础范围内的河床冲刷监测传感器的定位,可采用如下技术。

在基桩施工完成后(对于水深环境下的大型高桩承台基础,可在钢护筒插打后)、承台施工前,先将传感器固定于直径比基桩直径大的钢圈,然后将安装有传感器的钢圈套入基桩,并细心沉入江底。由此,传感器在平面上的漂移范围受控制于基

桩。在竖向上,传感器可沿基桩上下自由移动。当河床产生冲刷时,传感器的位置高程随之降低,从而实现河床冲刷深度的实时有效监控。

综上所述,河床冲刷深度的传感器监测系统是由一系列沉入江底、单点平面位置受控的水压力传感器(冲刷监测点)和1个固定于水面下一定深度的潮位传感器(潮位监测点)组成。

3 工程应用实例

3.1 工程概况

苏通大桥为目前世界上规模最大的双塔斜拉桥,主跨1088m,位于临近长江入海口的南通河段,以雨洪径流为主,所在河段为中等强度的感潮河段。桥位区河床覆盖层较厚,河床底质不稳定,抗冲性能差。跨江大桥的桥墩均采用群桩基础方案,其中主桥索塔的桩基础规模巨大,由131根直径2.8m/2.5m的变径钻孔灌注桩组成,承台采用平面形态为哑铃形的变厚度异形结构,长117.35m,宽51.7m,厚8.0m~16.4m(含厚3m的封底混凝土),且承台的主体淹没于江水中,故对径流和冲淤条件造成一定影响。为了防止冲刷,采用底层砂袋+中层碎石+面层块石的冲刷防护体系。

与传感器安装埋设有关的桩基础施工工序为:首先插打钢护筒(每桩1根),并进行钻孔和桩身混凝土浇注,当基桩施工完成后,再制作钢套筒和封底混凝土浇注,最后进行承台钢筋混凝土施工。

3.2 监测点的布置

由于索塔桩基础范围内的水流条件复杂,故河床存在不均匀冲刷的可能。为了验证索塔地基的冲淤演变规律,桩基础范围内河床冲刷监测点的布置密度应满足一定的要求。但考虑到索塔桩基桩周边可采用多波束定时扫测。故桩基础范围内河床冲刷监测点的布置遵循少而精的原则,并确保测点成活率大于90%。结合承台平面形态,均匀布置了19个冲刷监测点和1个潮位联测点。冲刷监测点的平面布置如图1所示。

3.3 传感器选型

为了减少水流冲击力,采用小尺寸的水压力传感器。由于传感器埋设后将长期处于水深流急的复杂环境,且承台浇注完成后即无法对传感器进行维护和更换,故尽可能选择质量高、性能好的传感器(本次采用美国基康公司生产的GK4500S型水压力传感器)。先前的大量实验表明,监测点成活率在

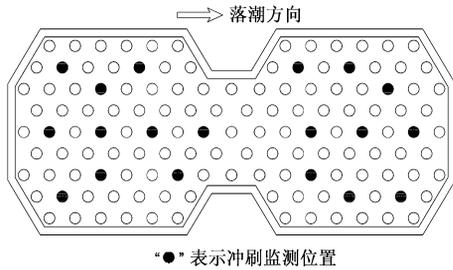


图1 冲刷监测点平面布置图

Fig.1 Plan of observation point

很大程度上取决于信号传输电缆。为此，应避免电缆接长。所以在传感器选型时，需要根据测点埋深和预估的冲刷深度确定传感器的量程和电缆长度。

3.4 冲刷监测点的安装与埋设

经过试桩防护冲刷监测点安装埋设的实践，在对比了剖面埋设法和单点埋设法后，肯定了单点埋设法的优越性和适用性。所以，本次桩基础范围内的河床冲刷监测点均采用“单点定位埋设法”。考虑传感器电缆的保护，安装埋设充分利用了钢套筒沉设施工环节，具体步骤为：**a.** 在钢套筒沉设前，将传感器可靠固定（如采用不锈钢卡箍锁固）于直径比基桩直径大（为利于沉设，通常大1 m以上）的特制钢套圈。**b.** 由于桥位区水深流急，所以电缆采用镀锌钢管保护。根据施工方案和流程，承台钢套筒就地制作、整体沉放，其底面高程为-10 m。电缆的保护充分利用钢套筒沉放工序，即在钢套筒沉放前将保护电缆的钢管可靠焊接于钢套筒底板主梁，在钢套筒沉设过程中随之沉入江中。考虑到冲刷因素，在传感器埋设时需在江底预留与预测冲刷深度等长的电缆。预留电缆以防锈钢丝绳为承重依托，钢丝绳的两端分别可靠固定于镀锌钢管的下端和传感器定位钢圈。**c.** 在钢套筒沉设前，将安装有冲刷传感器的钢套圈细心套入基桩并沉入江底。**d.** 将潮位传感器可靠固定于钢套筒底板主梁。**e.** 在钢套筒沉设以及承台浇注过程中，将传感器电缆引出承台，冲刷监测系统的安装埋设即告完成。传感器安装示意如图2所示。

实践表明，这种安装埋设方法具有如下优点：**a.** 传感器的平面位置可得到有效控制，并可确保其竖向活动自由。**b.** 安装埋设以钢套筒沉放为依托，不仅避免了钢套筒沉放施工可能造成的损坏，而且大大缩短了保护钢管的长度，最重要的是：保护钢管低于钢套筒底板，从而避免了保护钢管对套

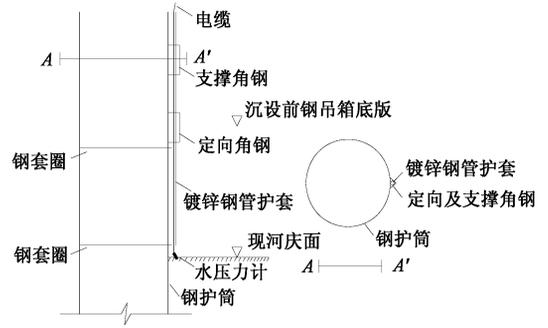


图2 冲刷监测系统安装示意图

Fig.2 Sketch of scour monitoring system

箱底板止水的不良影响（导致封底混凝土漏水）。

c. 河床面以上的电缆被置于镀锌钢管内，有利于电缆的保护。**d.** 不影响钢套筒施工和封底混凝土浇注。

值得指出的是，应在现场江水条件下修正传感器初始参数，并仔细填写完整的埋设考证表。在埋设过程中，必须进行连续的跟踪观测，以便及时发现问題，并获取完整的初始资料，评价水压力传感器的埋设状况。

3.5 观测结果与分析

根据工况或径流条件，采用便携式数据采集仪采集数据（容易实现数据的自动采集），计算出各监测点和潮位点的水深。由于潮位点传感器埋设高程已知，据此可计算消除潮位影响后各监测点的河床标高，进而生成河床冲刷面等深线图。

由于体积巨大的钢套筒的沉设将在较大程度上改变径流断面和流态。所以，钢套筒沉设和径流的季节性变化是跟踪观测的重点。图3和图4为钢套筒沉设前后的河床冲刷面等深线图，图5示出桩基础范围内河床的冲刷深度。图示结果表明，桩基础范围内的河床呈现高低起伏的特点，在上游侧和系梁区存在2个低凹的区域，在上游承台中心部位和下游承台的北东侧存在2个凸起区域。实测到的最大高差为5.01 m，最低处位于西北角（河床面高程-25.77 m），最高点位于上游承台的中部（河床面高程-20.76 m），坡度最陡的区域位于上游承台的上游侧，约为36%。由于钢套筒的沉放，在一定程度上改变了桩基础范围内的江水流态。但由于钢套筒沉设后，即进入长江枯水期。所以，桩基础范围内的河床形貌并未发生改观。突出的变化是：在下游承台的东南侧冲深了2.78 m。此外，上游承台上游侧的低凹区域有向下游扩展的趋势。

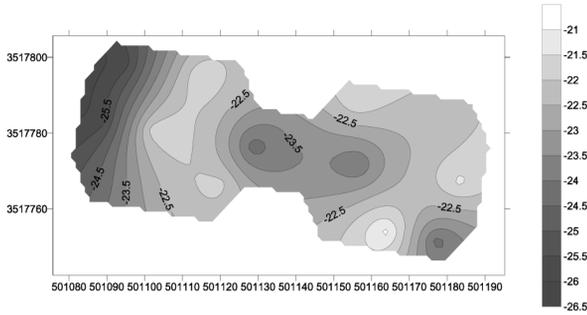


图 3 钢套箱下沉前桩基础范围内河床地形图
Fig.3 Relief map of riverbed before sinking the steel boxed cofferdam

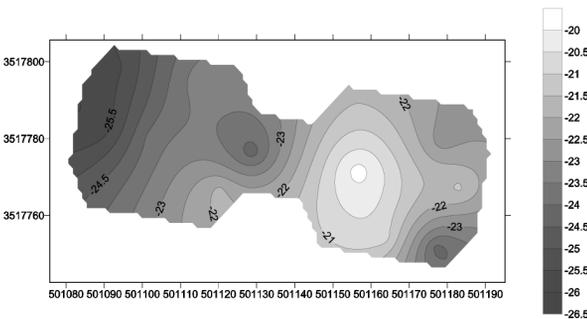


图 4 钢套箱沉设后桩基础范围内河床地形图
Fig.4 Relief map of riverbed after sinking the steel boxed cofferdam

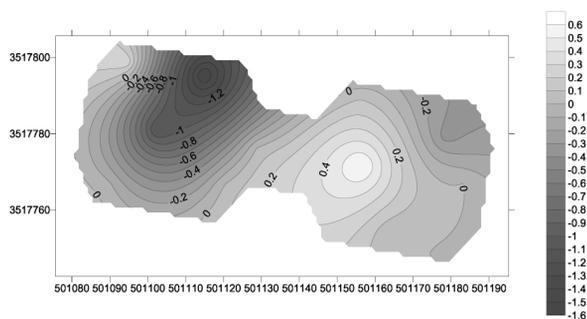


图 5 钢套箱沉设引起的河床冲刷等深线图
Fig.5 Isobath map of riverbed change due to sinking the steel boxed cofferdam

物理模型试验表明^[6,7]，河床在单向流作用下的冲刷形态为勺形，在双向流作用下的冲刷形态为马鞍形。桥位区靠近长江入海口，为中等强度感潮河段，水流呈双向流特征，且涨、落潮均较强劲，但相对而言以落潮流为主。桩基础范围内由于桩群的消能作用，使中心部位的能量消散较快而产生泥沙堆积，导致桩基础内部河床面呈马鞍形。从实测

的河床地形图上可以看出，在桩基础上、下游迎水面均以冲刷为主，并且由于长江主流方向并非垂直于承台迎水面，因此河床最大冲刷在承台西北角和东南角。

3.6 冲刷机理分析

桩基础施工后，在桥位区形成收缩断面，导致桩基础上、下游床面的冲刷，称为一般冲刷。当水流急剧流入桩基础范围内，在其前缘和周边形成绕流，流速和流向急剧变化，引起漩涡并向下游传播和发展，产生很大的床面切力，形成冲刷坑，称为局部冲刷^[8]，引起桩基础地基冲刷的水流结构如图 6 所示。当水流行进桩基础时，因桩基础阻水，一部分绕流而过，一部分冲击桩基础前端，水流转为向上和向下流动两部分。向上流动的水流形成与流向相反的漩涡（使桩基础前端出现涌高）。向下流动的水流直至河底，在床面形成与行进水流方向相反的指向河底的漩涡。这一底部的反向漩涡（即漩涡）是导致局部冲刷的主要动力。在桩基础两侧的江底，还有斜轴漩涡。由底部漩涡搅起的河底泥沙，被上部水流夹带向下游输送，河底逐渐出现冲刷坑。对于群桩基础，其阻水作用是明显的，但桩间亦可过水。当基桩呈梅花形布置，水流从 2 根桩间流过时，必然会受到另外一根桩的阻挡，而后又绕过该桩流向下游。因此，群桩基础内部的冲刷机理十分复杂，长期的实时监测十分必要。

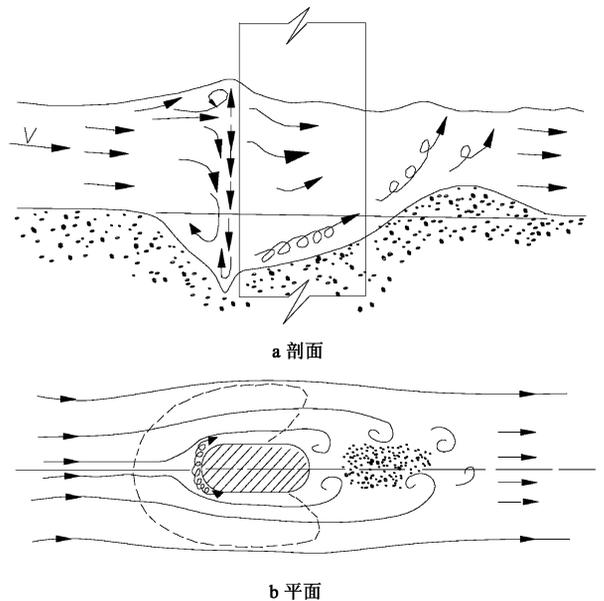


图 6 桥墩局部冲刷示意图
Fig.6 Sketch of local scour of bridge pier foundation

4 结论

1) 感潮河段桥墩桩基础之地基的冲刷机理十分复杂,基础埋深对桥梁工程的安全运营至关重要。因此对于大型桥梁工程,开展桥位区河床冲刷监测十分必要。

2) 实践表明,水压力传感器系统可以实现对河床冲刷的实时有效监控,但必须解决水位波动实时修正、传感器可靠定位和传感器信号可靠传输等问题。

3) 单点定位埋设法是水深流急环境下水压力传感器的理想安装埋设方法。

4) 实测结果表明,在桩基础上、下游迎水面均以冲刷为主,且上游迎水面冲刷剧烈。因此在进一步实测中,须在测点均匀布置的基础上,加密靠近迎水面处的测点数量。

参考文献

- [1] 尚久骊编. 桥渡设计[M]. 北京:中国铁道出版社, 1980.122~123
- [2] 罗 韧. 桥梁工程导论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.13~14
- [3] 袁维德. 水深测量及精度分析[J]. 江苏测绘,1996,(2):44~47
- [4] 陈晓飞,刘晓洲,都 洋,等. 日本采用冲刷传感器监测洪水过程中的河床演变[J]. 水土保持科技情报,2003,(3):13~15
- [5] 吴中如 沈长松,阮焕祥. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 南京:河海大学出版社,1990.3~4
- [6] 周玉利,崔洪才. 桥墩局部冲刷护坦防护的试验研究[J]. 西安公路交通大学学报,1999,19(3):36~38
- [7] 齐梅兰,崔广臣,张世伟. 桥墩基础施工河床局部冲刷研究[J]. 水动力学研究与进展,2004,A 19(1):1~5
- [8] 钱 宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1986.243~245

Application of Hydraulic Pressure Sensore System on Riverbed Erosion Depth for Real-time Monitoring

Chen Zhijian¹, Liu Dawei¹, Zhang Xiongwen^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Provincial Su-Tong Bridge Construction Headquarters, Nantong, Jiangsu 226009, China)

[Abstract] The problem of groundsill eroding is general and important for deep-water foundation in tidal reach. Application, technical difficulty and its settlement scheme of hydraulic pressure sensors system are introduced based on expounding the essentiality of riverbed erosion for real-time monitoring within group piled foundation. Amendment of fluctuant water level is realized by setting a sensor to monitor the tide. The sensors are fixed on the side of the piles reliably and sensor signal is transmitted smoothly with single point setting method. This method shows the characteristics of real-time, continuity, long-term and high precision when applied to the Su-Tong Bridge Project. Based on the results of monitoring, the mechanism of local scour within group piled foundation is analyzed.

[Key words] hydraulic pressure sensor; tidal reach; group piled foundation; local scour; real-time monitoring