

文章编号: 1673-9469 (2017) 02-0050-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.02.010

## 苏通大桥深水群桩基础冲刷防护实测分析

林明惠, 陈志坚

(河海大学 地球科学与工程学院, 南京 210098)

**摘要:** 桥墩建在流水中的桥梁几乎都面临墩周冲刷的问题, 为了研究桥墩发生冲刷方式及冲刷防护方法, 通过对处于长江下游的苏通大桥主4号大型群桩基础水深传感器及桩身轴力实测数据的分析, 发现该桥梁工程采用的冲刷防护方案不仅有效地防止了主墩处河床冲刷, 而且在河床铺设砂袋后, 进行钢护筒插打时, 砂袋被挤入到松软的河床底质层一定深度范围内, 对河床底质层和桩周土起到挤密、增密和固结作用。大大提升了河床表层松散体的极限摩阻力, 提高了群桩基础的承载力。

**关键词:** 苏通大桥; 深水群桩基础; 冲刷防护; 水深监测; 桩身轴力监测

**中图分类号:** U446

**文献标志码:** A

## Experimental analysis of scour protection of deep water group pile foundation of Su Tong Bridge

LIN Minghui, CHEN Zhijian

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100 China)

**Abstract:** For those bridge piers built in water, almost all faced with the problem of pier scour. Based on the analysis of water depth sensor and axial force sensor test data of the No.4 main pile of Sutong Bridge in the Yangtze Rive downstream, we found that the scour protection scheme used on the bridge not only prevented the pier scour, and many protective sand bags had been squeezed into the soft riverbed material layer within a certain depth when the steel tube was inserted, which greatly enhanced the ultimate friction resistance of loose bed surface, improved the bearing capacity of pile foundation. The practice proved that the scour protection scheme is scientific and effective, and has important reference value for the design of construction engineering.

**Key words:** sutong bridge; deep water pile; foundation scour protection; the water depth monitoring system; pile shaft force monitoring system

在我国公路、铁路桥梁建设的过程中, 建成了一批在国际桥梁工程界都十分突出的跨海、江、河大桥, 然而这些桥都或多或少的面临墩周冲刷稳定性问题。据资料统计, 在所有桥梁损毁事故中, 水毁的比例最高, 占事故的70%以上。河流中桥墩的建造使其附近的水流断面面积减小, 改变了原来的水流及泥沙运动规律, 桥墩周围水流速度增大, 会引起对河床的冲刷。冲刷通常是由自然演变的冲刷、过水断面的减小而引起的一般冲刷以及桥墩周围产

生的局部冲刷三个部分组成<sup>[1]</sup>。桥墩冲刷不仅对桥梁本身存在危害, 而且对桥墩附近岸坡稳定性也有潜在威胁。当主桥墩离岸较远、地质条件较好时危害较小, 但当主桥墩离岸较近、地质条件较差时, 冲刷可能会导致岸坡失稳<sup>[2]</sup>。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<sup>[3]</sup>。目前国内外在这方面

收稿日期: 2016-08-28

基金项目: 江苏省政策引导类计划 (BY2015002-05)

作者简介: 林明惠 (1991-), 男, 福建宁德人, 硕士, 研究方向为地质工程与地质资源。

的研究方式主要是通过室内小比例尺模型试验和数值模拟等手段, 受限于以上两种方法自身的局限性——无法完全考虑实际工程活动所受的复杂环境因素影响, 试验中将一些影响因素进行概化而影响研究结论的准确性, 如地层的不均匀性、河床防护层的不均匀性等。鲜见针对已建大型桥梁工程进行跟踪观测以研究河床冲刷防护的实用性和耐久性。本文讨论的苏通大桥进行了严密的河床冲刷防护和监测工作, 弥补了上述研究的不足, 经过实践证明了该桥梁的河床冲刷防护工作不仅很好地防止了桥墩附近的冲刷, 还改良了主桥墩位置浅层地层性状, 增大了承载力。

## 1 工程概况

苏通大桥位于江苏省南通市和常熟市之间, 是沈海高速过长江的重要通道。其南北两座塔柱高300.4 m, 主跨达1 088 m, 是全世界第二大跨径的悬索桥。主桥两个主墩基础分别采用131根直径2.5 m至2.85 m, 长约120 m的灌注桩, 每个主桥墩平面尺寸为113.75 m×48.1 m, 是世界最大规模的群桩基础。

苏通大桥所处水域位于长江下游澄通河段的徐六泾附近, 桥位区江面宽约6 km, 主槽居中偏靠南岸。水文气象条件恶劣, 风暴潮问题突出, 江面宽阔, 水深流急。河床底质层为新近沉积的易冲河流淤积物, 河床覆盖层深厚, 基岩面在-287 ~ -276 m, 基桩属于典型的摩擦桩。由于摩擦桩主要依靠基桩与桩周土之间的摩擦力提供承载力, 且每个主桥墩大约需要承担10万吨的巨大荷载, 所以该群桩基础对于河床整体或局部冲刷非常敏感。如若冲刷过大, 导致沉降过大或不均匀沉降都会危及大桥整体稳定性, 因而对主桥墩处进行冲刷防护和监测十分必要。

桥位区的地层组成主要是上第三系的半胶结、半成岩状态的粉质粘土、砂土、砾石以及三叠系下统(T1)的棕红色灰岩。第四系地层为一套滨海相、河流相、湖相沉积的淤泥质粘土、粉质粘土、细砂、中砂、粗砂、砾砂等组成。

## 2 河床冲刷机理及防护方案

### 2.1 墩周冲刷机理

桥墩建成必然改变了原有的水流特征, 使原有

的河床冲刷环境发生改变。当水流流经桥墩时, 因为桥墩阻滞了水流, 将使得水流结构发生变化。桥墩周围水流结构主要包括墩前水表面涡流、墩前向下切流、马蹄形涡流和尾迹涡流<sup>[4-5]</sup>, 如图1所示。

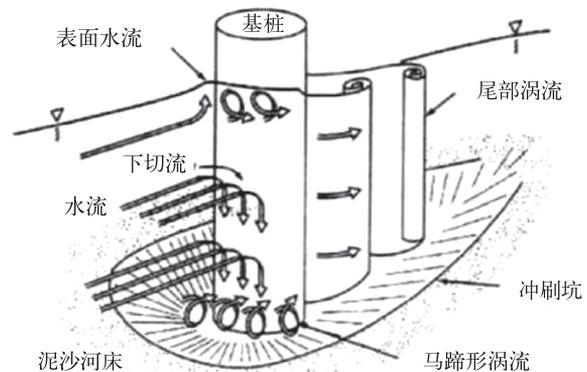


图1 墩周冲刷示意图

Fig.1 Schematic diagram of pier scour principle

#### 2.1.1 墩前表面涡流

迎面水流遇到桥墩的阻挡, 分成向上和向下两股水流。向上的一股水流动能转化成势能。向下的一股水流在桩前形成局部的涡流, 不断将桩前一定范围内的土体淘离河床被水流带走。

#### 2.1.2 墩前下切水流

当水流冲击桥墩时, 会在桥墩面上产生一定的停滞压力, 且由于垂直流速分部由水面向下递减, 故压力亦向下递减而造成压力梯度, 因而形成下切流, 造成墩前冲刷<sup>[6]</sup>。

#### 2.1.3 马蹄形涡流和尾旋涡流

水流遇到桥墩的阻挡后, 在竖直面上也分成两股水流, 分别在墩前及两侧与土接触面上形成马蹄形涡流和尾旋涡流, 是造成墩周冲刷的原因之一<sup>[7]</sup>。

### 2.2 冲刷防护方案

苏通大桥规模宏大的群桩基础处于主流深水区, 明显改变了桥墩附近的水流结构, 桩群阻水引起的水流下切和绕流淘刷将产生剧烈的河床面冲刷。局部冲刷试验表明, 苏通大桥主桥墩冲刷在20年和300年一遇的水流作用下冲刷深度可分别达到21.5 m和27.2 m, 且最大冲刷有可能在一次水流的作用下形成<sup>[8]</sup>。因而主桥墩的冲刷防护方案的提出必须建立在对桥位区长江水文、地质条件及冲刷机理充分认识的基础上, 大桥建设者们为此做了大量工作。

传统的冲刷防护方法有: 桥墩底部铺设粗颗粒或抛石防护层, 在河床中铺设延伸板或护圈<sup>[9]</sup>。以

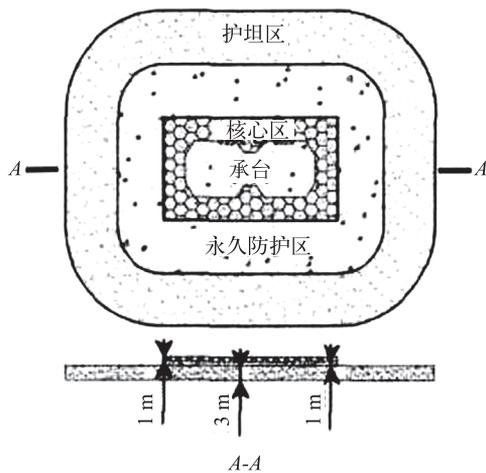


图2 冲刷防护层结构

Fig.2 Structure of sScour protection layer

达到消减水流能量和巩固河床的效果。苏通大桥最终采取的防护措施：通过抛投砂袋、级配碎石、护面块石等材料，改变基础区域河床底质，减小冲刷深度，达到抵抗冲刷的目的。将河床分成核心区、永久防护区和护坦区，根据水流特性对不同区域防护采用不同防护结构，分层进行防护，保证防护工程的耐久性<sup>[10]</sup>，防护层结构示意图如图2所示。

### 3 主4号墩监测方案

#### 3.1 水深传感器布置

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。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。该技术可有效监控河床的动态变化<sup>[3]</sup>。

布置水深传感器的目的是为了监测河床面高程的动态变化。由于桥位区水深流急、漩涡较多，且水流流向和流速多变，存在形成不均匀冲刷的可能性。所以监测点平面位置的有效控制是必要的。而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，水深传感器安装如图3所示。

为了更好的监测主4号墩的冲刷演变，在墩桩基础内部布置河床冲刷监测剖面3条，每条剖面布置3个监测点，共布置监测点13个，如图4所示。为了根据水深监测结果换算河床面的高程，还布置潮位监测点1个。

根据水深传感器和潮位传感器的实时观测值，

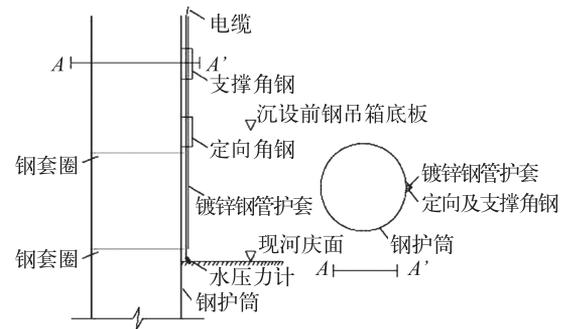


图3 水深传感器安装示意图

Fig.3 Schematic diagram of installation of water depth sensor

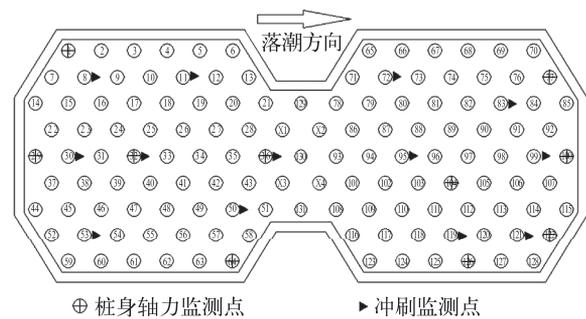


图4 桩身轴力与水深监测点平面布置图

Fig.4 Pile shaft force and water depth monitoring point plan

可按式(1)确定水深传感器设置区域的河床面高程。

$$H = h_0 + h_1 - h \quad (1)$$

式中， $H$ 为水深传感器埋设位置的河床面(冲刷面)标高(m)； $h_0$ 为潮位传感器设置点的标高(m)； $h_1$ 和 $h$ 分别为潮位传感器和水深传感器的实测水深(m)，均由式(2)确定。

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

式中， $h$ 为实测的水深(m)； $K$ 为传感器系数(kPa/H<sup>2</sup>)； $f_0$ 和 $f$ 分别为初始频率和实测频率(Hz)。

#### 3.2 桩身轴力传感器布置

需要指出的是，布置桩身轴力传感器的最初目的并不是为了监测河床冲刷，而是为了了解轴力沿桩身方向的分布。以达到监测基桩各个桩段荷载分布情况、桩身是否发生破坏以及不同深度土层的摩阻力。笔者在分析桩身轴力监测数据时，发现该监测数据对于定性分析桩周是否发生大深度冲刷和防护层是否失效具有一定的参考价值。

主4号墩的基桩桩身轴力监测系统由10根监测桩组成，即上游承台的1#、29#、64#边桩以及承台中心的32#桩和临近系梁区的36#桩，下游承台的77#、100#、122#、126#边桩以

及承台中心部位的 104 号桩，如图 4 所示。每个基桩设置监测 8 个监测断面，断面高程分别为 -12.0、-25.0、-30.0、-45.0、-55.0、-75.0、-95.0 和 -123.0 m，断面编号由上至下为第一至八断面。

### 4 监测数据分析

#### 4.1 水深传感器数据分析

苏通大桥从 2008 年 7 月 1 日通车运营到 2013 年 12 月底，北主墩群桩基础内部河床共进行 1.6 万次跟踪观测。结果表明，在通车运营过程中核心区河床冲淤总体处于平衡状态，下面仅给出 2012 年 3

月 17 日、2013 年 9 月 15 日、2013 年 12 月 21 日、2013 年 3 月 17 日观测结果，如图 5 至图 8 所示。

由图 5 至图 8 可知，主 4 号墩桩基础内部未出现大深度冲刷，在每年长江处于汛期的春夏季节，桩基础内部大多存在 1.2 m 左右的冲刷，但是在枯水季节的秋冬季被冲刷的位置又会出现 1 m 左右的回填。使得主 4 号墩桩基础内部总体处于平衡状态。下面给出处于承台中心区的 32 号桩 2012 年一整年每隔 10 天的监测数据图，如图 9 所示。

从图 9 可以看出，32 号桩所处河床面高程在 -25 ~ -27 m。整体上看 32 号桩年冲刷变化趋势和图 6 至图 8 所给出的观测结果相一致。可见该桥墩

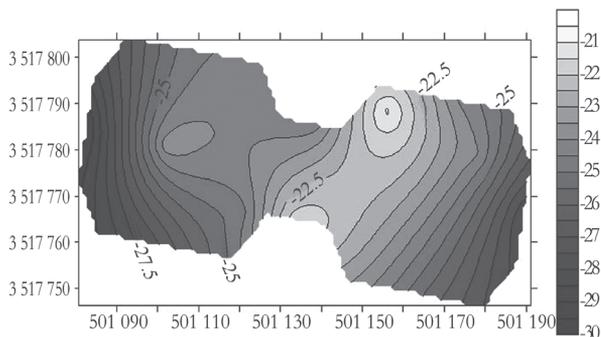


图 5 2012 年 3 月 17 日主 4 号墩桩基础内部河床等值线图  
Fig.5 River contour map of main pier No. 4 in March 17, 2012

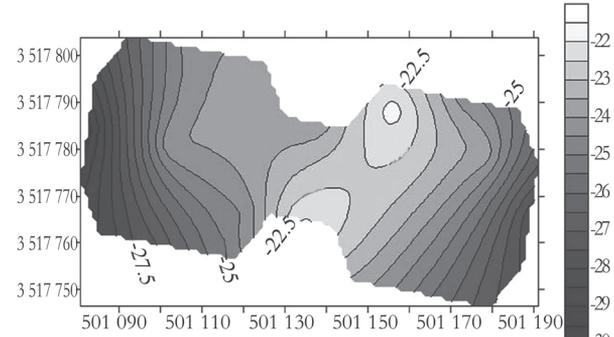


图 7 2012 年 12 月 21 日主 4 号墩桩基础内部河床等值线图  
Fig.7 River contour map of main pier No. 4 in December 21, 2012

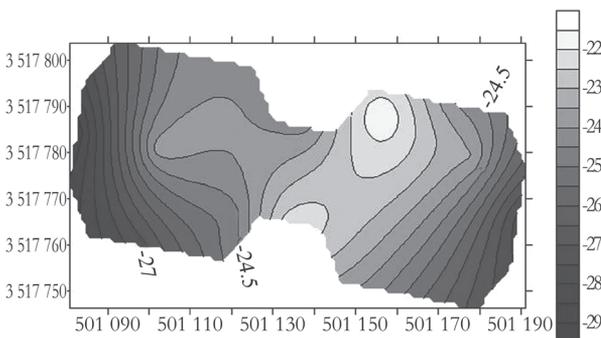


图 6 2012 年 9 月 15 日主 4 号墩桩基础内部河床等值线图  
Fig.6 River contour map of main pier No. 4 in September 15, 2012

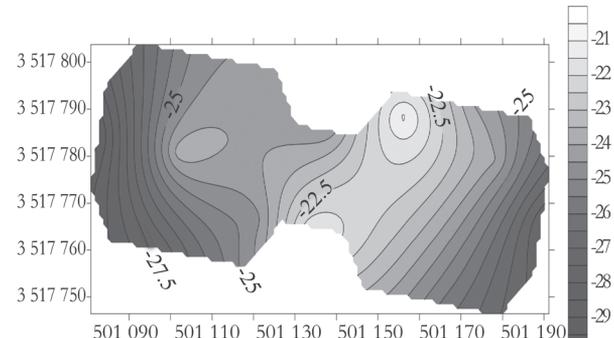


图 8 2013 年 3 月 17 日主 4 号墩桩基础内部河床等值线图  
Fig.8 River contour map of main pier No. 4 in March 17, 2013

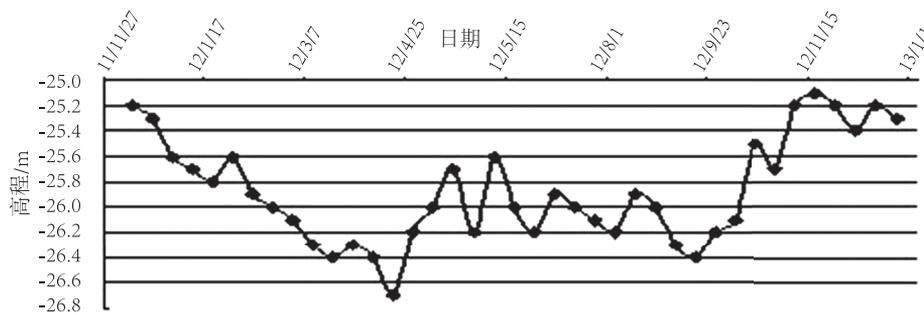


图 9 2012 年主 4 号墩第 32 号桩冲刷实测图  
Fig.9 The main pier No. 4 pier No. thirty-second pile scour in 2012

冲刷防护方案有效地避免了河床的大深度冲刷,确保了群桩基础的稳定性。但是在长江的汛期,还存在小的波动。考虑到长江中下游的气候条件——春夏多雨,且雨量集中出现在诸如台风、暴雨天气中,造成长江水量在短时间内变化较大,因而出现波动。

#### 4.2 桩身轴力观测数据分析

从 10 根处于承台不同位置的桩身轴力观测数据上看,沿桩长方向轴力分布规律基本相同。只是由于所处位置不同,受群桩效应的影响,不同桩相同断面间的轴力值大小有所差异。由于位于承台中心 32 号桩即布置了水深传感器又布置有桩身轴力观测仪器,便于两个监测系统数据的相互对比。故这里给出 2012 年 32 号桩的轴力观测结果,如图 10 所示。

结合图 9 可知,第二断面位于河床面以上的自由段,第三断面已经穿过河床防护层。桩身轴力在穿过河床防护层后迅速减小。在第二断面至第三断面这 5 m 范围内的土层承担了大量荷载,由此换算得到的摩阻力值远远大于河床表面松散体极限摩阻力值。因而可知防护层对河床表面的松散体有明显的改良作用,大大提高了松散体的极限摩阻力值。

#### 4.3 32 号桩水深传感器实测数据和桩身轴力实测数据对比分析

以 32 号桩为例,理论上来说,当桩周发生冲刷时,则第二和第三断面间的持力土层变薄,该层的承载力降低,此时两者间所测的轴力差将变小。当桩周发生淤积时,第二和第三断面间的持力土层变

厚,承载力提高,两者间轴力差值将变大。然而实测数据并没有表现出上述特点。第二和第三断面实测轴力值及二者的差(第二断面轴力值减去第三断面轴力值)如图 11 所示。

结合图 9 水深传感器的实测数据,不难发现在

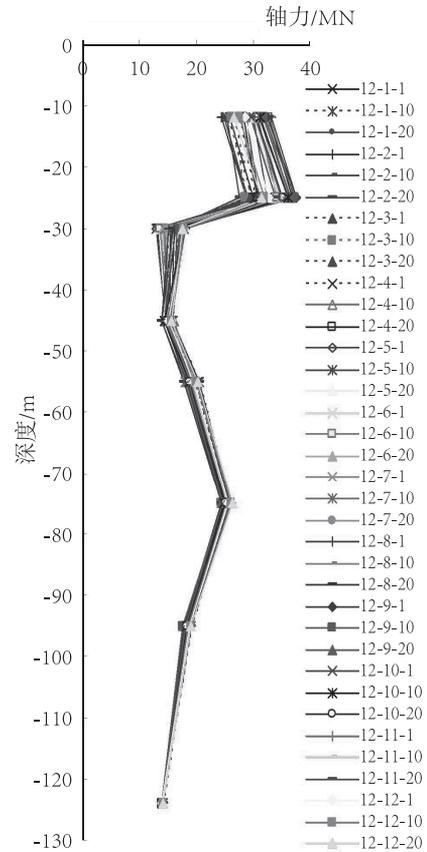


图 10 主 4 号墩 32 号桩桩身轴力实测图  
Fig.10 The main pier No. 4 of No. 32 pile shaft axial force test chart

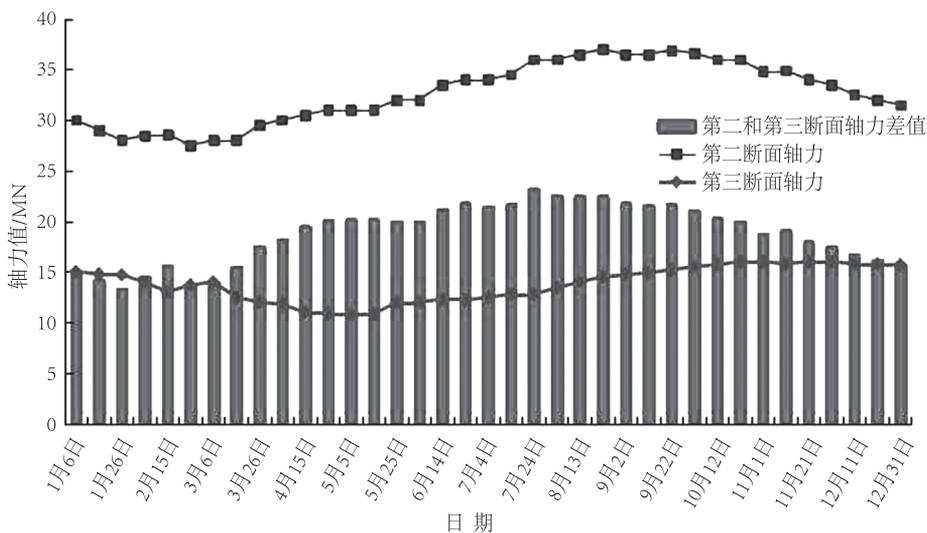


图 11 第二和第三断面实测值  
Fig.11 Measured values of second and third sections

春夏汛期冲刷变深的情况下,第二和第三断面的轴力差反而变大。分析认为在汛期发生的冲刷并没有发生在防护层内,而是防护层上部松散河流淤积层发生冲刷。由于防护层对河床表面松散层承载性的改良作用,增加了其极限摩阻力,当上部荷载增加时,桩与桩周土的相对位移增大,摩阻力变大,使得第二和第三断面间的轴力差增大。这也证明了防护层有效的防止桩基础内发生冲刷。由此可知,可以通过分析河床上自由断面轴力值和穿过防护层的第一个断面的轴力差值来定性的分析桩基础内是否发生涉及防护层的冲刷,防护层是否已经失效。例如:当两者的差值变为负值时,则说明防护层以下的第一个断面已经被冲刷揭露而变成自由面。此时荷载必然向更深的地层传递,沉降量也将相应增大。随着冲刷的不断发展,最终可危及整个桥梁的安全。

## 5 结论

1) 2008年至2013年这段时间内,苏通大桥主4号墩桩基础内部总体上处于冲刷平衡状态,未发现危及桩基安全的冲刷。在长江汛期水量增大,流速加快的情况下,防护层也未见破坏。

2) 苏通大桥所使用的分层次大面积冲刷防护方案,经过实践证明了其是科学、有效的。效果显著地防止了群桩基础内部的冲刷,对于维持桩基础稳定性有突出效果。

3) 先进行防护层袋装砂袋抛投,再进行钢护筒的插打。这种施工方法将砂袋较深的挤入松软的河床底流层,从而确保了防护砂袋的着床效果和冲刷防护效果。同时大量的成片的砂袋被机械挤入,是桩周土层产生强烈的挤密和增密作用,透水性良好的砂袋也增强、加快了地基土的排水固结作用,从而在较大程度上提高了群桩基础的承载性和整体性。

4) 水深感应器监测系统,能够快速、较高精度地观测埋设桩底部一定范围内冲刷情况。能够克服多波束雷达等高科技观测技术无法在成桥后准确观

测桩基础内部的弱点。

5) 桩身轴力监测系统,能够实时、高精度的观测桩身各桩段的轴力大小。能够定性地了解河床防护层是否发生较大冲刷,且该系统多布置在承台边缘的边桩或者角桩,这些桩位应该是最容易发生大深度冲刷的,是对水深观测系统的补充。

## 参考文献:

- [1]俞艳,何思明.河流桥墩冲刷分析[J].中国水运,2014(10):227-231.
- [2]缪士彬.桥墩冲刷对岸坡稳定的影响及防护工程设计[J].人民长江,2015(8):31-33.
- [3]陈志坚.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[J].中国工程科学,2007(5):17-21.
- [4]MELVILLE B W. Chiew Yee - Meng. Time scale for local scour at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(1):24-27.
- [5]BREUSERS G Nicolle, H W Shen. Local scour around cylindrical piers[J], Journal of Hydraulic Research, 1977, 15(3):219-220.
- [6]薛小华.桥墩冲刷的试验研究[D].武汉:武汉大学,2005.
- [7]高正荣,黄建维,卢中一,等.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,2005:8.
- [8]游庆仲,董学武,张雄文,等.苏通大桥挑战与创新[J].东南大学学报:自然科学版,2006(Z2):15-22.
- [9]方奕.桥墩冲刷的防护[J].中外公路,1994(3):32-35.
- [10]游庆仲,董学武,吴寿昌.苏通大桥基础工程的挑战与创新[J].中国工程科学,2007,9(6):22-26.

(责任编辑 王利君)