

苏通大桥索塔深水群桩基础冲刷 防护工程的设计与施工

何平, 管义军, 张雄文, 张群, 周建华

(江苏省苏通大桥建设指挥部, 南京 210006)

[摘要] 从苏通大桥深水群桩基础结构方案出发, 分析了冲刷及防护对大桥安全性的影响, 进而从防护工程理念、结构设计与施工、防护效果监测等方面阐述了苏通大桥基础冲刷难题的解决方法。

[关键词] 苏通大桥; 深水群桩; 冲刷防护; 设计与施工

[中图分类号] U443.26 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)03-0044-07

1 前言

河床冲刷及防护是一个关系到桥梁建设成败的重要问题, 国内外已有很多因冲刷导致桥梁毁坏例子。19世纪70年代, 铁道部铁道科学研究院在对60余座大中型桥梁毁坏原因进行调查后指出, 桥梁的破坏大多数是由于洪水冲刷严重或桥梁基础埋深不足引起的。英国桥梁总工程师 D. W. Smith 在对全世界出现重大破坏事故的143座桥梁的事故原因进行统计和分析后发现, 有近一半桥梁重大事故是由洪水冲刷所引起的。2000年 E. V. Richardson 等在“美国桥梁冲刷计算”报告中指出, 美国每年在桥梁事故维护方面花费巨大, 美国现有桥梁超过57.5万座, 其中84%是过水桥梁, 有60%过水桥梁损坏的主要原因是河道失稳和河床冲刷。对于桥梁工程师来说, 河床冲刷已成为一个世界性难题。苏通大桥位于长江河口地区, 水文条件复杂, 地质条件差, 冲刷非常严重, 冲刷防护是一个影响大桥成败的决定性因素。

2 水文和地质条件

苏通大桥桥位区水流动力强劲。大桥上游约

480 km 的大通水文站为长江下游干流径流控制站, 1950—1997年统计资料表明, 该站多年平均流量为 $28\ 255\ \text{m}^3/\text{s}$, 最大洪峰流量为 $92\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$, 最小流量为 $4\ 620\ \text{m}^3/\text{s}$ 。一年内最大流量一般出现在七八月份, 最小流量出现在一二月份。径流在年内分配不均匀, 5月至10月为汛期, 汛期平均流量为 $39\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$, 汛期水量和输砂量分别占年径流总量和输砂总量的70.6%和87.5%。桥位河段处于长江潮流界, 随径流强弱和潮差大小等因素的变化, 长江潮流界上溯下退, 枯季潮流界可上溯到镇江附近, 洪季潮流界则下移至西界港一带。多年实测水文和地形资料表明, 落潮流是塑造本河段主槽河床形态的主要动力。南塔处300年一遇的涨潮与落潮流速分别为 $3.03\ \text{m/s}$, $3.40\ \text{m/s}$; 20年一遇的涨潮与落潮流速分别为 $2.73\ \text{m/s}$, $2.89\ \text{m/s}$ 。北塔处300年一遇的涨潮与落潮流速分别为 $2.95\ \text{m/s}$, $3.28\ \text{m/s}$; 20年一遇的涨潮与落潮流速分别为 $2.62\ \text{m/s}$, $2.75\ \text{m/s}$ 。

苏通大桥北塔墩位于主航道深槽北侧, 河床高程在 $-27\ \text{m}$ 左右, 该区域土质以散粒体为主, 自河床面向下依次为亚砂土、厚 $28.5\ \text{m}$ 的粉砂、厚 $2.1\ \text{m}$ 的亚黏土和粉细砂。南塔墩位于主航道深槽南侧边

[收稿日期] 2008-11-15

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2006BAC04B05)

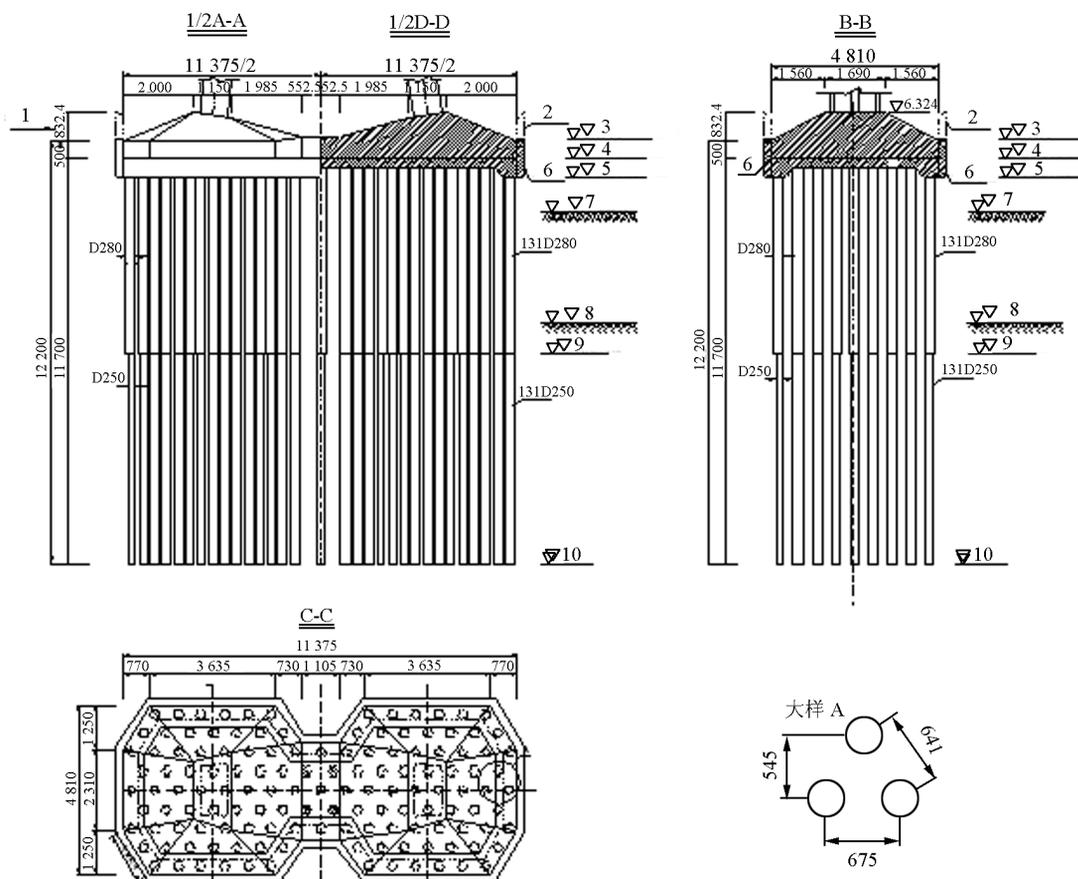
[作者简介] 何平(1963-), 男, 江苏江阴市人, 江苏省苏通大桥建设指挥部研究员级高级工程师, 苏通大桥建设现场副总指挥, 主要从事大型复杂工程建设技术和管理方面的研究; E-mail: hepings@stbridge.com.cn

坡上,河床高程在-15 m左右,土质自河床面向下依次为厚6.5 m的淤泥质亚黏土、厚28.0 m的亚黏土和粉细砂。虽然淤泥质亚黏土具有较好的抗冲性能,但南塔墩附近床面淤泥质亚黏土厚度较小。桥区河床质泥砂较细,粒径分布不均匀,主要由中值粒径平均在0.12~0.16 mm之间的细粉砂组成,起动流速小,为高活动性易冲底床,在桥位区水流条件下,具有局部冲刷深度大,范围广的特点。一旦亚黏土冲开,局部冲刷将急速加大。

3 索塔深水群桩基础方案^[1]

苏通大桥索塔基础采用钻孔灌注桩群桩基础

(如图1所示)。每个塔基础桩数131根,桩长117 m,桩径2.85 m/2.5 m(钢护筒外径2.85 m,混凝土桩直径2.5 m),桩距6.75 m,因为考虑钢护筒参与受力,所以呈梅花形布置。承台采用哑铃形,每个塔柱下承台平面尺寸为51.35 m×48.1 m,其厚度由边缘的5 m变化到最厚处的13.324 m,两承台间采用11.05 m×28.1 m的系梁连接,系梁厚6 m。局部冲刷试验表明,大桥北塔墩冲刷深度很大,20年一遇水流作用下冲刷深度达21.5 m,300年一遇水流作用下冲刷深度达27.1 m,而且最大冲刷有可能在一次大水作用下就形成,对基础安全造成较大威胁。



1—行船方向;2—吊箱切除部分;3—-1.800(吊箱切割线);4—-7.000(承台底面);5—-12.500(封底底面);6—仓壁混凝土;7—-26.423(地而线);8—-52.190(最大冲刷线);9—-62.20(钢护筒底标高);10—-124.000(桩底标高)

图1 苏通大桥索塔基础总体设计(单位:cm)
Fig.1 General design of pylon in Sutong Bridge

基础设计的关键在于保证钢护筒的入土深度。若不考虑河床冲刷的影响,则需将钢护筒打入到-64.0 m高程处,但由于在高程-52.0~-54.0 m处有一层厚约2.0~4.0 m的硬砂层,钢护筒打设非

常困难。因此,需进行冲刷防护,避免河床过大冲刷,这样钢护筒只需打入到-52.0 m高程,避免了钢护筒插打卷曲的风险。

钻孔灌注桩施工平台搭设和超大型钢吊箱下放

是苏通大桥索塔深水群桩基础施工的两个关键工序。在施工过程中,由于支撑桩较密,且钢吊箱规模巨大,会造成水流流态改变,河床冲刷加剧,从而导致钢管桩与钢护筒入土深度减少、承载力降低,进而危及基础安全。为检验冲刷对基础施工安全的影响,开展了施工期局部冲刷试验。试验针对南塔墩进行,墩前流速取为 $v=2.5\text{ m/s}$ (5年一遇),水位取为 3.0 m (水深约 18 m)。试验表明:钢管桩打设完成后,最大冲刷深度达到 17.4 m ,冲深大于 5 m 的范围达到 $215\text{ m}\times 180\text{ m}$,钢护筒入土深度减少近 50% ;钢吊箱沉放到位后,最大冲深达到 21.5 m ,冲深大于 5 m 的范围达到 $235\text{ m}\times 180\text{ m}$ 。河床冲刷严重影响基础施工安全,有必要进行施工期河床预防护。

4 索塔深水群桩基础防护理念

根据基础设计方案,为使河床在大桥运营期不遭受过大冲刷,保证基础安全,需进行河床永久防护;为保证基础施工期安全,要进行河床预防护。苏通大桥采取了施工预防护与永久防护相结合的工程理念。

冲刷防护理念主要有消能减冲和护底抗冲两种。消能减冲可有效降低流速,将冲刷坑位置前移,从而减小基础范围内的冲刷深度。但由于苏通大桥索塔处水深流急,水流对防护结构的冲击力较大,防护结构局部冲刷也十分严重,稳定性也难以维持;此外,消能减冲措施尚缺乏工程实践经验。因此,苏通大桥采用的是护底抗冲理念^[2~7]。

根据护底抗冲理念,河床有开挖与不开挖两种措施。针对这两种措施,曾开展过试验研究,试验方案分别为与河床面平齐的护底方案(河床开挖)、低于河床面的护底方案(河床开挖)和潜岛方案(河床不开挖)。试验表明:防护措施作用非常明显,群桩间冲刷大为减弱或消除,桥墩边侧冲刷远离桥墩区;河床面开挖和不开挖的工程效果差别不明显,但河床面不开挖,铺设类似水下潜岛的结构对河床的防护效果优于床面开挖的方案。试验同时也表明,护底结构与河床的结合处出现不同程度的塌陷沉降,必须采取合理的结构措施,适应护底结构与河床结合处的塌陷变形。因此,苏通大桥工程采用了河床面不开挖,直接铺设护底结构的方案来实现护底抗冲目的;采取下沉护坦结构,来实现外推最大冲深区和适应河床塌陷变形的目的。

下沉护坦的原理是利用护坦与防护床面柔性接触和重新分布等特性,在护坡顶端或结构周围布设某种数量的散粒体材料(如石料),当冲刷发生时,散粒体在冲刷形成的坡上重新分布而挡住原来的河床材料,从而避免进一步冲刷。为验证护坦的作用,曾进行过比较试验(有护坦和无护坦)。试验表明:无护坦时,基础边侧绕流比较集中,冲刷深度较大;铺设护坦后,最大冲刷区外推到较远处,最大冲深得以降低。根据试验流速测定,铺设护坦后最大流速区域外推到护坦外侧 $30\sim 70\text{ m}$ 的位置;在300年一遇水文条件下,最大冲深降低到 10 m 左右;20年一遇水文条件下,最大冲深降低到 8 m 左右。

5 索塔深水群桩基础防护方案

5.1 冲刷防护工程的平面分区

根据群桩基础与土体共同作用机理和基础局部冲坑形态特征,可将基础周边分为3个区。

1)核心区。该区域位于承台以外约 20 m 的范围内,是保证桩入土深度和承载力的核心区域,也是基础局部冲刷深度最大的区域,必须进行重点防护;

2)桩-土共同作用区域。该区域位于承台以外一定距离内,是桩-土共同作用比较强烈的区域,是保证基础受力、传力机理不发生重大变化的重要区域,必须进行永久防护;

3)桩-土共同作用外区域。该区域对群桩基础受力的影响不大,但采取措施可以减小桩-土共同作用区的河床冲刷,是采取护坦结构进行防护的区域。

5.2 冲刷防护工程的结构选型

苏通大桥冲刷防护工程结构必须要具备适应河床变形、反滤和防冲等三种功能,同时,要简单、耐久。此外,由于受到施工场地限制,冲刷防护工程应能划分成小块进行分散施工,分散施工的散体结构组合起来要能起到防护作用,即使施工中出现了不可避免的不精确性,也能起到充分的防护作用。根据这些要求,确定防护结构由反滤层和护面层组成。

反滤层可采用袋装砂、级配石料或软体排等。软体排是一种效果好、经济的护底反滤结构,但考虑到苏通大桥索塔基础的施工条件,最终没有采用。袋装砂也是一种有效的护底结构,即使施工中少量砂袋破坏也不会影响结构的功能,能与基础施工中钢护筒插打工序相协调,且易于施工,因此被选作预防护的护底结构。级配石料也是一种理想的反滤材

料,它施工方便,沉放质量容易控制,且稳定性高,被选作永久防护工程的反滤层。

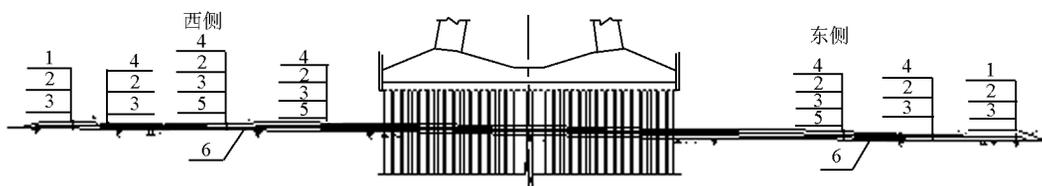
常用的护面压载材料有块石、土枕、石笼、联锁混凝土板块等多种形式。块石具有施工快、造价低、适应变形能力强、与索塔基础施工矛盾小等优点,且能对反滤层袋装级配石料和袋装砂起到有效的压载作用,因此被选用。

因此,苏通大桥索塔基础冲刷防护采用如下结构(如图2所示)。

1)核心区。因同时要满足施工期预防护和运

营期永久防护的要求,结构由3层组成。第一层是直接铺设于河床面上的袋装砂,主要起预防护作用;第二层是级配石料,铺设于袋装砂上,主要起反滤和找平作用;第三层是块石层,铺设于级配石料层上,起压载作用。

2)永久防护区和护坦区。冲刷防护工程结构可由级配石料和块石两层组成。但级配石料的抛投试验表明,其冲埋深度较大,成型率较低。因此,在铺设级配石料反滤层前抛投袋装砂,以利于级配石料防护层的形成。



1—块石五层; 2—散抛级配石料; 3—袋装级配石料; 4—块石三层; 5—袋装砂预防护; 6—天然泥面线

图2 基础防护结构

Fig. 2 Foundation protection structure

5.3 冲刷防护工程结构设计

根据基础尺寸和基础与土体共同作用范围,确定冲刷防护核心区范围为 $100\text{ m} \times 210\text{ m}$,永久防护区范围为核心区外围 $40 \sim 45\text{ m}$ 的范围。为确定护坦区边坡坡度,进行了冲刷稳定边坡试验(如图3所示)。试验按300年一遇的水文条件进行,试验表明,护坦除迎水面因受边侧绕流影响坡度稍缓外,护坦其余部位的稳定边坡均在 $1:2.1 \sim 1:2.6$ 之间,按 $1:3.0$ 进行设计。护坦区宽度按最大冲刷深度的1.5倍进行计算。北塔基础最大冲刷深度约为 30 m ,护坦区宽度取为 45 m 。南塔基础南侧最大冲刷深度约为 20 m ,护坦区宽度取为 30 m ;北侧最大冲深 30 m ,另考虑深槽摆动可能带来 10 m 的冲刷,因此护坦区宽度确定为 60 m 。防护工程平面布置尺寸见表1。



(a)试验前



(b)试验后

图3 主墩冲刷稳定边坡试验示意图

Fig. 3 Sketch of scour test of edge slope

表1 冲刷防护平面布置

Table 1 Plan layout of scour protection

主塔墩	施工平台 平面尺寸/ m^2	核心区 平面尺寸/ m^2	上下游永久 防护区宽度/ m	南北侧永久 防护区宽度/ m	上下游护坦 区宽度/ m	南侧护坦区 宽度/ m	北侧护坦 区宽度/ m
北塔	60×170	100×210	40	45	45	45	45
南塔	60×170	100×210	40	45	30	30	60

各防护区各防护层的厚度是根据试验确定的。试验的结构方案为:

1)核心区防护高度为 4.5 m,从底部向上分别为 2.0 m 袋装砂、1.0 m 袋装碎石和 1.5 m 块石;

2)永久防护区防护高度为 3.5 m,从底部向上分别为 1.0 m 袋装砂、1.0 m 袋装碎石和 1.5 m 块

石;

3)护坦区防护高度 2.5~3.0 m,从底部向上分别为 1.0 m 袋装碎石和 1.5~2.0 m 块石。试验表明,采用该方案能有效起到护底抗冲作用。实施中,根据现场测试情况,对方案进行了优化。优化后各区分层厚度见表 2。

表 2 各区分层厚度

Table 2 Thickness of each layer

墩位	核心区			永久防护区			护坦区			
	袋装砂	级配石料	块石	袋装砂	级配石料	块石	袋装砂	级配石料	内侧块石	外侧块石
北塔/m	2.0	1.0	1.5	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0	1.89	3.15/20
南塔/m	1.5	1.0	1.5	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0	1.89	3.15(3.78)/15(20)

注:括号内为南塔墩北侧数字。

为确定防护工程砂袋大小及块石重量,进行了防护材料的稳定性试验,试验采用 300 年一遇的水文条件。试验表明:相同区域、同一重量砂袋,方形砂袋比矩形砂袋稳定;永久防护区和护坦区砂袋尺寸宜为 1.6 m × 1.6 m × 0.6 m,稳定重量为 4.3 t;核心区砂袋尺寸宜为 1.3 m × 1.3 m × 0.6 m,稳定重量为 2.1 t;块石的稳定性较好,单块稳定重量为 50 kg;级配石料的粒径宜为 3~25 cm,其中粒径 3~10 cm 和 10~25 cm 各占约 50%。

6 索塔深水群桩基础冲刷防护工程施工

6.1 袋装砂施工

抛填袋体或石料的位移情况将直接影响防护质量。因此,施工前进行了抛投试验以检测袋体或石料在不同的断面、水位、流速、流向下抛填的成型情况及漂距等。试验在南主塔墩核心区域,采用两艘 280 m³ 开体驳进行,共抛投了袋装砂 1 000 m³,采用多波束仪对 5 个点进行了检测。试验表明,袋装砂防护采用 280 m³ 开体驳抛投防护效果明显,砂袋落底后扩散成较为规则的椭圆形,横船方向扩散为 4~5 倍的开口宽度,顺船方向基本不发生扩散;1.5 m/s 以内的流速下,漂距基本控制在 10 m 以内;单次抛填量达 100~200 m³ 时,抛投效果较好,基本扩散为长 20~25 m,宽 8~10 m 的规则椭圆形。根据试抛结果,采取如下措施进行大面积施工:将防护区域根据设备情况划分成若干网格,南、北主墩网格大小分别为 25 m × 20 m 和 15 m × 10 m;核心区采取高强度,全覆盖式施工,先防护一层,然后根据检测结果进行下一步施工;在每个网格内采用两条开体驳并联施工,每个单元格内抛投两次,总抛投量为

400 m³。

袋装砂的施工采用定位船进行,定位船平行于水流布置,采用全球定位系统 GPS 配 RTK (real-time kinematic) 系统进行定位。砂袋直接置于开体驳内,采用砂泵进行人工充灌,砂袋充填率保证在 75% 左右。抛投前要根据实时水流、流向计算漂距,移动开体驳进行精确计算,然后进行投放。抛投过程中每天采用单波束测深仪观测河床变化情况,分析抛投效果。同时,每周采用多波速测深仪全面观测抛投效果。开体驳抛投完毕后,根据测得的水下地形图,对局部没有抛足的区域进行补抛,补抛选择在水流速度小于 1 m/s 时进行。

6.2 级配石料施工

在级配石料施工前也进行了抛投试验,试验在南主塔墩平台下游防护区域,采用 4 组开体驳进行,试验方法与袋装砂的抛投试验类似。试验表明:水流速度在 1 m/s 以内时,漂距一般在 10 m 以内,在施工过程中可以较好地进行控制;流速较小时,抛投材料扩散的离散性较小。永久防护区和护坦区级配石料的施工流程及施工工艺也与袋装砂的施工基本相同,不同的是由于采用散抛石料,上料方式采用定位船上自带的抓斗吊进行,单套设备工作效率达 200 m³/h。

对于核心区的级配石料,大部分施工区域位于主墩平台正下方,因此结合主墩平台底板的结构形式,在底板设计时进行了考虑:在底板每个钢护筒间预留净空为 2.6 m × 3.7 m 的空口,平台施工时用活动盖板封盖;级配石料施工石揭开,上料可利用平台上作业半径为 17 m 的吊车进行,下料则可采用人工斗车。平台周围的区域直接采用吊车或动臂吊机定点吊抛。

6.3 块石施工

块石施工采用定位抛投和游抛两种方案。定位抛投是在石料场挑选规则的块石用 $\phi 12$ cm 的钢丝绳网包装包(每网包装 $1.5 \sim 2.0 \text{ m}^3$),水运至施工现场,在定位船(自带吊机)旁挂靠,用吊机吊放入开体驳后定位抛投。游抛是采用自航深舱驳将块石运至施工现场,停靠在定位船旁,用吊机将石料吊至自航式开体驳后运到指定位置,采用 GPS 定位后抛投。此方法能有效解决距主墩施工平台较近区域的防护施工。

核心区的块石施工分别采用了定点吊抛和轨道施工两种方案,其中定点吊抛的方法与级配石料施工方法类似。轨道施工方法则是利用主墩施工平台的下平联,安装两套单轨电动葫芦进行抛投施工,每套单轨电动葫芦配两个网兜,每个网兜为 1 m^3 ,在安装时将单轨伸出平台外侧 2 m 以便上料。在施工前先进行试抛,测定核心区内散抛块石的漂移规律,作为施工依据。

7 冲刷防护效果监测

在苏通大桥北塔墩和南塔墩桩基工程结束后,

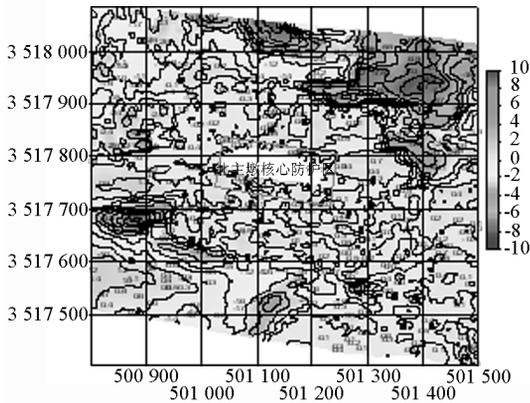


图4 北塔基础防护后地形

Fig. 4 Topography of north pylon with scour protection implemented

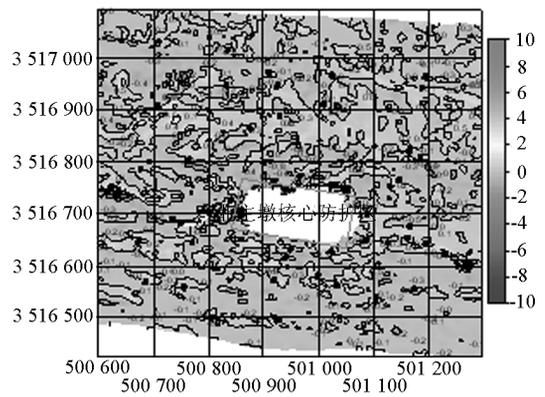


图5 南塔基础防护后地形

Fig. 5 Topography of south pylon with scour protection implemented

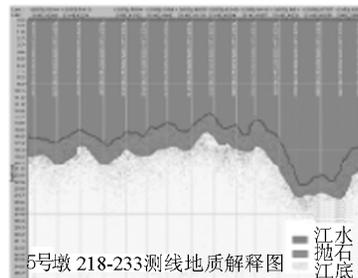
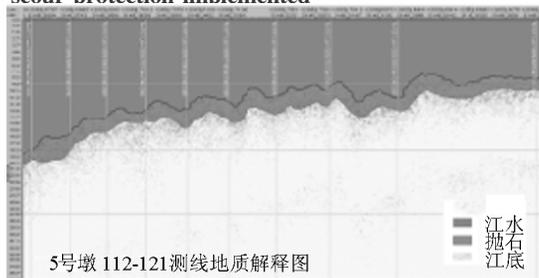


图6 某测线浅地层变面积剖面图

Fig. 6 Various cross section profiles of shallow stratum

先后进行了4次1:1 000的多波束水下地形扫测,扫测范围以核心防护区为中心,南北方向各600 m,东西方向各700 m。测试结果表明,冲刷防护工程有效地保护了基础周边地形,取得了预期效果。图4和图5分别给出了南、北主墩桩基施工结束后周边局部冲刷状况。

从图4、图5中可以看出,北主墩周边最大局部冲刷深度约为8 m,南主墩周边最大局部冲刷深度仅1~2 m左右,小于试验预测值(10 m);北主墩桩基防护体淤积有效宽度仅190 m,小于防护工程总宽,约等于永久防护区宽度。这一现象一方面说明防护工程在施工期就对永久防护区起到了有效的保护作用,另一方面说明护坦区已在施工期发生了一定的局部冲深,这再次说明冲刷防护工程的必要性。护坦的存在限制了局部冲刷向主墩方向的发展,在防护工程外侧最大冲深部位出现1:3冲刷稳定边坡,这与模型试验结果一致,这种冲刷形态证实了主墩基础冲刷防护中设计理念的正确。图6是采用浅地层剖面仪测得的防护后某区域地层剖面图,它也证明了冲刷防护层的作用。

8 结语

苏通大桥索塔基础工程的冲刷防护是我国河口地区易冲底床上超大型群桩基础局部冲刷防护工程的首次实践。通过实践,可以得出以下三点结论:

1) 对于冲刷严重的大型深水基础,采取永久冲刷防护措施来保证结构安全是一种可行的方案;

2) 对于水文条件复杂,施工场地受到制约的深水基础工程,可以采取护底抗冲的防护理念,并根据结构受力和局部冲刷形态,采取分区、分层进行防护的方案;

3) 对于深水基础,采用施工预防护与运营期永久防护相结合的方案,既能保证基础的施工安全,又能保证基础的运营安全,具有较强的经济性。

参考文献

[1] 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

[2] Partheniades E. Erosion and deposition of cohesive soils [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1965, 91 (HY1): 105 - 139

[3] Grissinger E H, Asmussen L E. Discussion of "Channel Stability in Undisturbed Cohesive Soils" by E M Flaxman [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1963, 89: 259 - 264

[4] Martin T R. Discussion of "Experiments on the Sour Resistance of Cohesive Sediments" [J]. Journal of Geophysical Union, 1941, 262 - 284

[5] Altheaefl A G. Discussion of "Erosion and Deposition of Cohesive Soile" by E Partheniades [J]. Journal of the hydraulics Division, ASCE, 1953, 91(34): 77 - 88

[6] Sundborg A. The river Klareilven study of piuvial processes - Geografist [J]. Annaler Stokholm, 1956, 38(2 - 3): 125 - 316

[7] Dunn J S. Tractive resistance of cohesive channels [J]. Journal of Soil Mech and Foundation Division, ASCE, 1959, 85: 1 - 24

Design and construction of scour protection for deep-water group pile foundation structures of two pylons in Sutong Bridge

He Ping, Guan Yijun, Zhang Xiongwen, Zhang Qun, Zhou Jianhua

(Jiangsu Provincial Sutong Bridge Construction Commanding Department, Nanjing 210006, China)

[Abstract] Starting from structural description of deep-water group pile foundation, the paper analyzed impact to the bridge safety introduced by scour and its protection and further presented different solutions of scour protection for foundation structures of the bridge.

[Key words] Sutong Bridge; deep-water group piles; scour protection; design and construction