

# 钱塘江北岸老海塘塘脚防冲工程技术

周素芳

(浙江省钱塘江管理局, 浙江 杭州 310016)

**摘要:**介绍钱塘江北岸明清老海塘概况和工程自然条件,提出运用板桩防冲墙技术解决塘脚防冲技术难题,并研制出可以遥控操作的多功能打桩机.该技术在海宁明清海塘塘脚防冲工程中应用9.9 km,节省投资5200万元,并已在类似工程中推广应用.

**关键词:**钱塘江;涌潮;海塘;塘脚防冲

**中图分类号:**U656.3

**文献标识码:**B

**文章编号:**1006-7647(2004)03-0036-03

钱塘江北岸海塘临江一线塘长约160 km,其中有长约33 km为海宁明清老海塘,与杭州、海盐、平湖等地海塘共同组成北岸防洪潮封闭线,保护着浙江杭嘉湖平原和江苏、上海南缘地区 $4.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 耕地、700余万人的生命财产安全.

海宁明清老海塘大多是清代康熙、乾隆时期修建的重力式鱼鳞条石塘,至今已有200余年历史.该古海塘具有雄伟的古朴特色,石塘采用条石纵横交错迭砌,条石间以铁榫相连,高达6 m,绵延数十里,在社会经济中的历史地位显著,人们称之为与长城、运河相媲美的三大古代土木工程之一.保护该古老水利工程使之继续发挥防潮防洪作用意义重大.

老海塘石塘高5~6 m,下有木基桩支承,内侧附土于20世纪70年代加高建土埝,高约3 m,在石塘外侧建有靠砌条石护坦,并在护坦外口侧打设长约4 m的双排木桩护脚防冲保护(图1).

在历史上海宁老海塘曾多次发生石塘崩坍、倾覆,造成保护区内咸潮侵入,灾情惨重.究其原因,主要是塘脚滩地冲刷严重,以致护坦冲失,石塘基桩出露,石塘外倾或底脚外游,直至石塘倾覆坍失.

## 1 技术方案

### 1.1 工程自然条件

海宁河段位于钱塘江河口段,受自东海经杭州湾传入的潮波影响,每日有两次潮汐涨落.该河段最高潮位受台风暴潮控制,伴有大风大浪作用;潮差大,最大潮差可达7 m以上;又属涌潮动力强烈作用区,实测最大涌潮高达3 m以上,其流速为6~8 m/s,最大可达12 m/s,涌潮流势猛,冲击破坏力强.

海宁河段河宽水浅,涨落潮流路常有分歧,河床质由容易冲淤的均匀细粉砂组成,冲淤幅度可达4~6 m.海塘地基土层主要由粉质粘土和淤泥质粉质

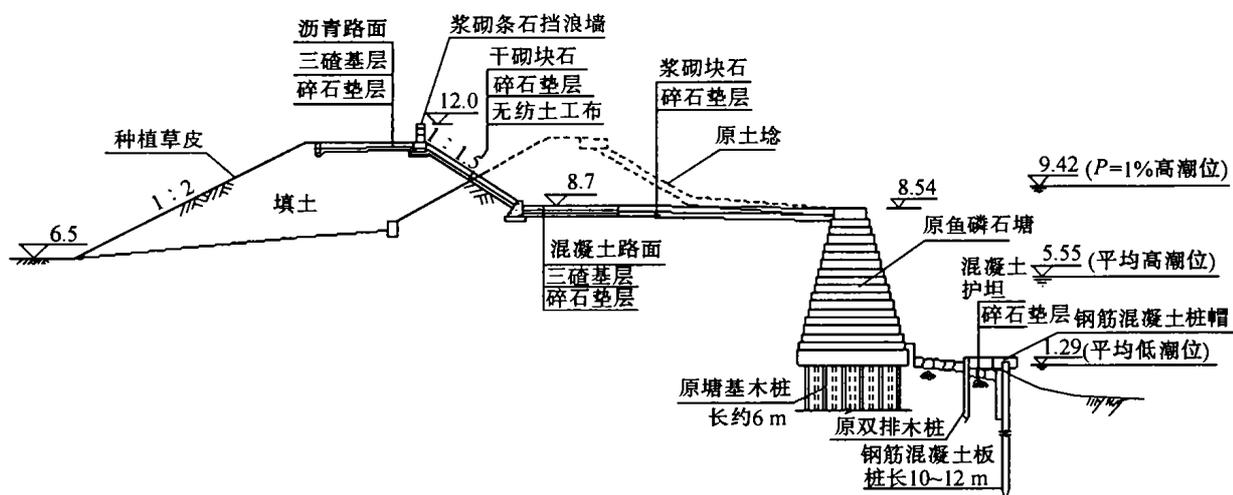


图1 海宁标准塘剖面图

粘土层组成,后者厚度大,具有高压缩、低强度的特点.塘外地表因历年抢险抛石等原因,在浅层 1~2 m 深度范围块石分布较多,成为基础加深加固的施工障碍.该河段施工无一般河流有枯水季节可以利用,也难以修筑施工围堰,只能趁低潮位时期约 2~3 h 抢潮作业.因石塘顶较塘前护坦高出 5 m 以及避涌潮安全作业需要,机械设备难以下塘,故水下作业难度大;又因海塘堤线长,加固量大,除充分考虑施工上的可行性外,还需力求降低工程造价.鉴于上述原因,古海塘的加固成为长期以来有待攻克的难题.

## 1.2 塘脚防冲工程方案

根据海宁海塘原堤的稳定计算分析,在塘前滩地冲刷和处在低水位的不利工况下,海宁老海塘原有的整体抗滑稳定最小安全系数为 1.00~1.14,不能满足百年一遇 I 级海塘的设计规范要求,又塘脚防冲工程结构本身在滩地发生严重冲刷时屡有失稳破坏,因此塘脚防冲工程的加固应兼顾整体抗滑稳定和防冲刷.

### 1.2.1 以往塘脚防冲工程试验小结

针对海宁海塘塘脚防冲要求,近 10 多年来进行了多种方案试验研究,先后采用过丁坝、模袋混凝土护坦、装石钢筋笼护脚、抛异形块体护坦等工程措施,现小结如下:

丁坝用于钱塘江河口保滩护岸已有较长历史,尤其是在潮流方向与岸线平行的堤段,丁坝保滩促淤效果较好,能达到解决海塘基础防冲和提高海塘整体抗滑稳定的双重作用.但在强潮、涌潮冲刷下,抛石丁坝坝头、坝根等部位损毁频繁且严重,维修工作量大.此外,在江道弯曲,海塘承受较大潮流顶冲时,丁坝促淤保滩效果差,不能起到应有的护岸保塘作用.

模袋混凝土护坦属于塘脚防冲的水平防护结构.模袋混凝土可在水下施工,能适应不平整床面,并在浇筑刚完成后即能承受涌潮急流的冲刷.其缺点是因护坦前趾基础开挖困难,模袋混凝土底脚仅在河床现有滩面上浇筑,在岸滩进一步刷深时,模袋混凝土前端会形成挂空,甚至断裂损毁.

装石钢筋笼护脚是海塘防汛抢险的常用应急措施,钢筋笼采用钢筋编织而成,笼内装石顶面浇混凝土封面保护,以提高笼体刚度减少变形.该方案由于底脚难以做低,在滩地继续刷深和涌潮作用下仍有可能发生倾覆破坏.此外,在涌潮作用时,笼内块石会撞击笼体,加上急流、泥沙、咸水对钢筋的腐蚀,极易导致钢筋断裂及笼子解体,不能耐久.

抛混凝土异形块体建成防冲护坦曾进行扭王字体和四面体两种形式分段试验,单块重量分别为

3.61 t 和 4 t,试图利用抛筑块体防护塘前滩地冲刷和增加塘前压载以提高海塘整体抗滑稳定性.试验中发现异形块体外江侧的单块较难稳定,在滩地刷深及涌潮冲刷下,易失稳冲走.

由上述已做的塘脚防冲工程试验可见,装石钢筋笼、模袋混凝土和抛异形块体护坦等方案防冲效果差,不宜选用.丁坝方案虽有不足,但可改进成为顺直河段海塘护脚防冲较理想的方案,但在河道弯曲、潮流顶冲堤段,尚需研究改用其他有效的护脚防冲方案.

### 1.2.2 防冲板桩墙方案

总结以往经验,对于海宁河道弯曲或涌潮顶冲段底脚防冲方案进行了多种方案比较,有板桩方案、灌注桩方案、模袋混凝土护坦加抛异形块体方案等.经技术经济比较,认为在护坦外侧打钢筋混凝土长板桩较符合当前实际情况.板桩方案利用板桩嵌入土中足够的深度,既可解决滩地冲刷后板桩自身的稳定,又能通过板桩加长穿过滑弧面,提高海塘整体抗滑能力.但是由于该老海塘的特殊性及其恶劣的施工条件,要利用板桩达到上述目的,就必须对板桩长度、位置、板桩作用及打桩工艺等进行多方面研究.

经计算分析,在塘前滩地可能出现最大刷深时(约比护坦顶面低 3.5 m),取用板桩长 9~10 m 便可维持板桩自身稳定和有效地保护塘脚,但由于海宁海塘上部结构为重力式条石塘和塘顶土埝组成,塘身高大,塘前滩地刷深时整体抗滑稳定偏低,因此,拟通过板桩加大入土深度以提高海塘整体抗滑稳定度.

桩长增大或板桩位置外移后对打桩机具及其配重要求增大,当板桩重量或桩外移超过一定限度后,桩机增大增重后设置上有困难.原因是海宁石塘塘基淤泥质粘土承载能力较低,在古代修建该条石塘时为了塘身稳定就采用了木群桩基础支承.根据现有石塘的周围地形条件及塘基承载能力分析(表 1),打桩机具以不超过 40 t 为宜,故板桩重量或桩长及打桩位置外移长度将主要受打桩机具重量的制约.

表 1 石塘地基承载力及稳定安全系数计算

类别	打桩机总重/t	石塘地基承载力(群桩基础)/kPa	安全系数	
			水平抗滑	抗倾
计算值	40	163.0	1.20	1.78
规范允许值	/	168.2	≥1.20	≥1.50

综合现有桩机及打桩工艺等实际情况,取用在二坦外口侧打桩长 10~12 m 的板桩较为适宜,控制提高整体抗滑安全系数在 10% 以内,不足的海塘稳定度则结合塘顶土埝后移予以补偿,以最终达到海

塘整体抗滑稳定安全的规范要求。

## 2 打桩工艺与板桩结构改进设计

### 2.1 打桩工艺

钱塘江是有名的强潮区域,水动力强,涨落潮潮差大,老海塘又高大,需在石塘顶面架驱桩机进行塘前落差 5~6 m 滩地上打桩,以实现前述板桩墙防冲的设计方案,故必须对打桩工艺进行专门研究。

根据试验目的,对打桩方式和桩机形式进行认真分析比较。在桩机试验中,克服了桩机导向架不够长、需加送桩器和悬臂结构震动大等难题,研制了采用滑移卷扬式导向架和折叠式液压支腿支撑相结合方式,以及在桩机悬臂上增设起重吊臂,使之形成吊桩、就位、施打、回转避潮等独立的整套操作系统,工程中采用遥控操作技术的多功能打桩机(图 2),成功地解决了海宁老海塘塘脚打板桩防冲的技术难题。

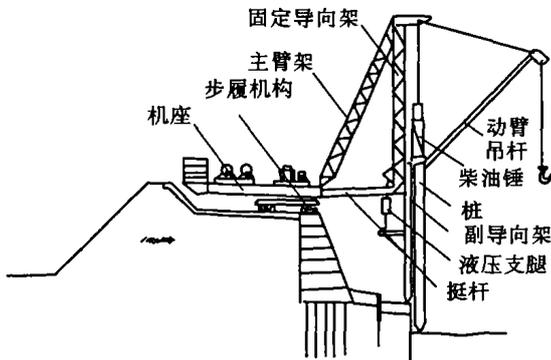


图 2 多功能桩机打桩示意图

### 2.2 板桩结构改进试验

由于地基表层含有块石,开始打桩时较为困难,并发生桩位偏转、桩头严重破损等,故对板桩结构进行了多种试验,最后确定采用 C35 钢筋混凝土预制桩,桩尖由偏心改为正中、桩顶由钢纤维混凝土加强改为四周设角钢及顶端加铁板加强,桩间衔接由榫式改为平面相接,尺寸为 35 cm × 28 cm × 1 200 cm。

通过以上板桩结构和打桩工艺,经动测,不但沉桩质量好、桩头完整,而且效率高,板桩间隙一般均控制在 25 mm 以内,较好地形成了板桩防冲墙。

## 3 打桩动力响应理论

由于打桩对地表面的振动波及相当远,尤其是异常打桩,打桩锤的力直接传到桩底,打桩力越大,波传播越远。为了保证海宁老海塘打桩施工中的安全,利用有限单元法来模拟打桩振动过程,对打桩振动进行定性分析,从而确定本工程中打桩的影响范围(包括水平向和垂直向),以及振动幅度大小,指导海塘施工。

a. 常规打桩(即打桩顺利)。打桩过程中落锤击

在桩顶的能量一部分由于桩身与桩周土的摩擦而损耗,一部分由于桩身与桩周土的摩擦产生振动而向桩周土传播,桩端受力较小。从计算分析可知,最大加速度不大,影响范围也不大。

b. 异常打桩(即桩很难打下去)。桩身与桩周土之间产生的相对位移很小,可不计,落锤击在桩顶上的能量绝大部分传至桩端,桩端对桩端土产生巨大的冲击力。从计算分析可知,最大加速度值较大,水平方向影响范围也大。

常规打桩时,最大加速度和最大位移都不大,打桩次数(土体循环振动次数)又较少,打桩引起的超静孔隙水压力小且消散较快,对土体不产生破坏作用,只是将土体振实,产生一定沉降;异常打桩时,最大加速度和最大位移都很大(比常规打桩大 10 多倍),水平方向的影响范围也很大,打桩次数又很多,对于某些土体打桩引起的超静孔隙水压力大且消散不快,从而使这类土体中的有效应力减小,引起抗剪强度降低。为了保证海塘安全,建议在该工程打桩施工中应对打桩次数加以控制,每根桩打桩次数宜控制在 800 击以内。

## 4 打桩对老海塘影响的监测成果

a. 老海塘。打桩过程中会引起地表面的振动,对打桩附近土体性质有一定影响。根据打桩前后石塘变形观测,打桩后海塘存在少量沉降,打桩完成一年后经实测累计沉降值约为 0~2 cm。究其原因主要是海塘地基土受振动影响出现局部液化,产生超静孔隙水压力,使得土体抗剪强度略有降低,但随着打桩后土体孔隙水压力消散,且地基土振实后,地基强度恢复,不再出现沉降,石塘更趋稳定。

b. 塘上古建筑。在打桩过程中,为保证塘上古建筑(占鳌塔、天风海涛亭)的施工安全,对其进行了振动和侧移的监测。通过实地建筑物沉降观测、倾斜观测、振动监测及建筑物周围深层土体位移监测,结果表明海塘打桩对建筑物的影响均不大,打桩对塘面上的塔体的振动符合相应抗振规范要求,表明在打桩施工过程引起的地表面振动中,塘上建筑物均是稳定、安全的。

## 5 结 语

a. 钱塘江明清老海塘加固工程于 1998 年列入国家基建项目和省重点工程。在海宁强涌潮顶冲段采用建防冲板桩墙方案,设计构思新颖,方案科学合理,解决了长期以来存在的防冲技术难题。

b. 首次研制出了具有移位、避潮、冲抓、吊桩、施打等特点的多功能打桩机,打桩质(下转第 53 页)

式向中心站发送水位信息数据.管理处中心站无线数据接收终端模块接收遥测站发送的水情数据,并传送给监控计算机,供闸门调度运行和管理使用,并根据上下游水位、闸门开度,以及水位流量关系,进行过闸流量估算.中心站监控计算机同时把实时水位数据下传给现场各 PLC,由 HMI 显示,供闸门现场调度时使用.

### 3 系统软件设计

系统软件设计包括主站监控软件设计和从站 PLC 程序设计. PLC 完成单台启闭机的控制、闸门开度和运行工况信息的采集以及和主站上位机的通信,编程采用 Modicon 的 PL707WIN 编程软件. PL707WIN 编程软件是一个图形开发环境,具有中文版 Windows 界面,通过它可以方便直观地编写和调试 TSX Neza PLC 的应用程序. Neza PLC 的扩展 RS-485 终端口直接支持 Modbus 协议,可以使用编程软件的“扩展端口”菜单功能进行 PLC 从站通信参数配置. 人机界面 HMI 利用汉化配置软件 Neza HMI Configurator 进行组态,下载使用.

主站上位机操作系统采用 Microsoft Windows 2000 Professional; 支撑运行平台: Microsoft ODBC Driver for ACCESS; 监控软件开发平台: Borland Delphi 6.0, PComm Pro 2.0, Microsoft Access 2000. 其中 PComm Pro 2.0 提供开发上位机与从站的 Modbus 协议通信驱动.

主站测控软件系统的开发采用了面向对象技术和多线程技术. 面向对象技术的引入,大大提高了程序设计的质量和开发速度,便于系统的维护和升级. 系统采用构件技术,提高了软件的可扩展性、可维护性和可靠性. 系统采用了多线程技术,接收从站 PLC 的数据通信线程在后台运行,以确保在接收 PLC 数据的前提下,对用户操作作出快速响应,提高了系统实时性和交互能力.

主站监控软件系统实现的主要功能有:①实时

与各个 PLC 交互,自动监测和显示闸门的开度和运行工况,出现故障时报警;②自动监测闸门上、下游水位,并进行过闸流量估算,水位越限报警,同时向各 PLC 发送水位值;③根据管理调度给定的闸门开度值,自动控制闸门的开度,动态显示闸门运行过程;④水位、闸位数据的维护、查询和特征数据的统计,各种相关报表的生成;⑤数据库中数据的增、删、改等维护管理操作;⑥闸门的调度运行操作和系统的维护管理采用授权机制,对各操作员授予不同的权限,并提供运行操作跟踪日志,以排查故障、定位责任;⑦在网络服务器上安装了“裕溪闸实时水情工情信息”网页发布软件,网络用户通过互联网可以随时随地浏览裕溪闸实时水情工情信息.

### 4 结 语

随着计算机、通信、自动化控制、视频监控等技术的发展,以信息化手段提高水利工程的自动化管理水平,保证工程安全运行,增强防汛调度能力是必然趋势.

巢湖裕溪闸枢纽工程计算机监控与监视系统采用了先进成熟的技术、稳定可靠的设备和器件,具有技术先进、使用方便、扩展性好、安全可靠等特点. 系统已稳定可靠地连续运行了 1 年多,实现了闸门运行现场无人值守、监控中心少人值守的目标,汛期闸门调度运行一次的时间由过去的 40 min 以上减少到 10 min 以内. 系统减少了值班管理人员数量,减轻了管理人员的劳动强度,特别是提高了闸门运行效率和运行安全性,在防汛调度中发挥着重要的作用,具有很好的推广应用前景.

#### 参考文献:

- [1] 阳宪惠. 工业数据通信与控制网络[M]. 北京:清华大学出版社,2003. 79~83.
- [2] 邱公伟. 可编程控制器网络通信及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000. 5~15.

(收稿日期:2003-08-04 编辑:张志琴)

(上接第 38 页)

量好、效率高、成本低,对堤防、港口等类似工程均具有广泛的推广应用前景.

c. 经过打桩动力响应理论分析,提出了打桩振动的控制标准,经现场检测,证明正常打桩方式所引起的振动对老海塘的影响很小,该项成果为具有重要文物意义的明清海塘加固施工提供了依据.

d. 该项成果已在海宁明清海塘成功应用 9.9 km,节省投资达 5 200 万元,经济效益显著,并已在类似工程中推广应用. 利用该成果建成的钱塘江北岸险段标准塘工程已获 2002 年度国家优质工程鲁班奖和浙江省优秀设计钱江杯奖.

(收稿日期:2004-02-14 编辑:张志琴)