

DOI: 10.11779/CJGE2016S1035

河口海岸管袋裸坝信息化施工技术研究

刘欣欣¹, 束一鸣¹, 吴兴元², 沈达怡², 吴海民¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中交上海航道局有限公司, 上海 200136)

摘要: 土工充填管袋筑堤技术广泛应用于河口海岸工程中。受施工环境和施工技术的影响, 管袋裸坝容易发生失稳破坏。在管袋裸坝施工领域引入信息化施工技术以保证施工安全, 提升施工效率。以影响施工期管袋裸坝安全性的指标因素入手, 通过筛选重点影响指标并分析影响机理, 建立管袋裸坝施工期稳定性指标体系; 在指标体系的基础上, 开发管袋裸坝信息化施工系统; 最后, 结合围垦工程提出系统的现场应用方法, 并开展现场试验对系统运行状况进行检验, 试验结果表明, 系统能够满足现场施工正常运行的要求。

关键词: 管袋裸坝; 信息化施工; 稳定; 现场试验

中图分类号: U656.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0181-08

作者简介: 刘欣欣(1989-), 男, 河南驻马店人, 博士研究生, 从事沿海围垦与堤防工程施工研究。E-mail: withion@hhu.edu.cn。

Information construction technology for flat geotube embankments in estuarial and coastal areas

LIU Xin-xin¹, SHU Yi-ming¹, WU Xing-yuan², SHEN Da-yi², WU Hai-min¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. CCCC Shanghai Dredging

Co., Ltd., Shanghai 200136, China)

Abstract: Flat geotextile sand tube (geotube) embankments are widely used for estuarine and costal structures. The structures are prone to collapses for the reason of complex construction environment. It is of significance to improve the safety and efficiency of construction by introducing information construction technology. In the first step, the factors which have influence on the stability of flat geotube embankments during construction period are screened, then stability calculation methods for the geotube embankments are proposed for each factor. In the second step, an information construction system (software and hardware) is developed based on the proposed formulae. Finally, field application of the system and filed experiment are presented based on a typical project. According to the results of field experiment, it is indicated that the proposed system can satisfy the requirements of normal operation in the process of construction.

Key words: flat geotube embankment; information construction technology; stability; field experiment

0 引言

信息化施工即是在施工过程中, 通过设置各种测量元件和仪器, 实时收集现场实际数据并加以分析, 根据分析结果对原设计和施工方案进行必要的调整, 并反馈到下一施工过程, 对下一阶段的施工过程进行分析和预测, 从而保证工程施工安全经济地进行^[1]。目前, 信息化施工技术应用比较广泛的领域有公路、地铁隧道工程, 深基坑工程, 路堤工程, 边坡工程等^[2-4]。孟陆波等结合公路隧道建设实例, 开发了公路隧道信息化施工与计算机辅助决策系统, 具有围岩类别智能判别, 围岩应力分析与预测, 围岩变形分析与预测和围岩支护结构安全性判别四大功能, 极大提高了工程建设水平^[5]。张惠东等利用地铁车站深基坑开挖监测结果对

数值模拟结果进行验证, 克服了实际施工中不可预见性因素对理论计算结果的影响, 在保证施工安全性的基础上很好的实现了施工经济型的目的^[6]。

近年来, 土工编织布管袋充填泥砂筑堤技术在海堤、河口蓄淡水库、河口航道整治、滨海机场、港口码头、围垦等工程中得到了广泛应用^[7-8]。然而, 由于环境条件复杂, 管袋坝施工难免出现问题甚至事故: 例如江苏东台条子泥一期围堤合龙过程中, 截流堤地基被水流冲刷发生失稳^[9]; 浙江某围垦工程围堤由于施工速率过快和地基处理质量等原因, 围堤地基发生

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179065); PAPD项目

收稿日期: 2015-11-30

滑坡失稳破坏^[10]; 还有一些工程因遇台风或大风, 在波浪冲击下顶层管袋失稳倾覆时有发生。引起管袋坝安全事故的因素繁多, 施工技术人员仅凭经验或单一人工监测数据(如位移)判定堤坝安全性, 显然难以满足要求。基于上述状况, 在管袋坝施工领域引入信息化施工技术, 以信息化监测手段代替人工监测, 提高监测效率; 以管袋坝稳定安全评价体系代替个例经验, 提高判断精度; 以专家知识系统辅助技术人员决策, 提高安全问题处理措施的及时性、科学性和针对性。

1 管袋坝信息化施工系统

1.1 管袋坝施工安全主要因素指标体系

建立指标体系, 首先需要从影响管袋坝稳定性的众多因素中筛选出可用于信息化监测的指标。主要的筛选原则主要有以下 4 种。

(1) 对结构稳定影响程度大

指标异常更容易造成结构失稳。通过实际考察和研究, 初步确定了对管袋坝稳定性影响程度较大的因素指标: 堤坝结构形式、地质条件、施工速率、充填土料脱水特性、波浪要素、潮位、风速、基床面流速、坝基变形和坝基渗流等^[12], 而管袋坝内侧吹填土压力因各工程情况而异。

(2) 指标为变量

指标随时间变化明显。符合该原则的有施工速率、管袋坝内侧吹填土压力、充填土料脱水特性、波浪要素、潮位、风速、基床面流速、坝基变形和坝基渗流。

(3) 指标可信息化

指标具有对应监测设备, 容易实现自动化监测。符合该原则的有管袋坝内侧吹填土压力、充填土料脱水特性、波浪要素、潮位、风速、基床面流速、坝基变形和坝基渗流。

(4) 监测易实施

指标对应监测设备在施工现场应易于安装和布设, 能够适应现场环境条件, 对施工干扰小。符合该原则的有波浪要素、潮位、海流流速、风速、坝基变形和坝基渗流。筛选过程与结果如表 1 所示。

1.2 施工安全主要评价指标的建立与体系组成

针对筛选出的监测指标, 分别提出相应的管袋坝施工期的稳定性计算指标, 从而建立施工安全评价指标体系。

(1) 抗波浪作用稳定指标

该计算指标用到的监测指标有波高、波长、周期等。由潮位和波浪要素可计算出波浪沿管袋坝斜坡面的爬升高度 Z_1 , 通过修正苏规范公式能够得到管袋坝斜坡面的波浪荷载大小和分布, 依据受力平衡原理判别顶层管袋的抗滑动稳定性^[13]。

(2) 抗冲刷稳定指标

该计算指标相应的监测指标为坝前基底附近的海流流速 u 。采用临界流速计算公式计算坝前基底泥沙临界起动流速 u_{cr} , 当 $u > u_{cr}$ 时, 基底泥沙发生起动, 管袋坝基底可能发生冲刷破坏^[14]。

(3) 抗风浪作用稳定指标

对应监测指标为海面上 10 m 处的风速。利用风浪计算公式能够计算出与风速相应的波浪要素^[15]。由波浪要素计算管袋坝稳定性的计算方式如前所述。计算结果可与(1)的结果比对, 完善通过风速计算波浪压力的方法。

(4) 变形稳定指标

相应监测指标为坝基水平侧向变形。当一定时间段内最大变形数值或变形速率超过临界值时, 结构将发生失稳。

(5) 渗流稳定指标

监测指标为坝基孔隙水压力。通过孔隙水压力数值绘制基底流网, 利用出逸坡降判别渗流出口渗流稳定性。具体计算过程如表 2 所示。

表 1 施工安全主要影响因素筛选原则及结果

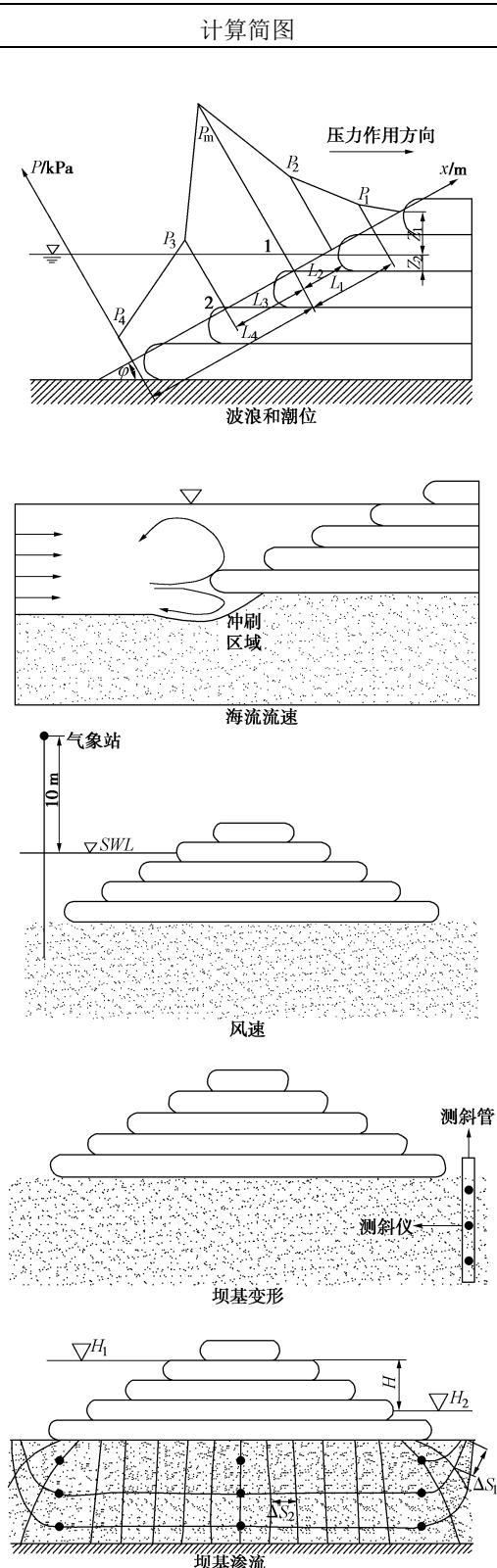
Table 1 Screening principles and results of main factors for construction safety

影响因素	筛选原则					处置情况	筛选结果
	对结构稳定影响程度大	变量	可信信息化	易于实施			
堤坝结构形式	√	×	√	√		信息可预先一次性输入	
地质条件	√	×	√	√		信息可预先一次性输入	
施工速率	√	√	×			可通过位移指标反映	
内侧吹填土压力	/	√	√	√		一般对管袋坝稳定有利	
充填土料脱水特性	√	√	√	×		因成本高而作为检查指标	
波浪要素	√	√	√	√			▲
潮位	√	√	√	√			▲
基床面流速	√	√	√	√			▲
风速	√	√	√	√			▲
坝基变形	√	√	√	√			▲
坝基渗流	√	√	√	√			▲

注: 表中“√”表示符合, “×”表示不符合, “/”表示因工程而异, “▲”表示选中。

表 2 管袋坝稳定性判别式及计算公式

Table 2 Stability identification and calculation formulae for geotube embankments



稳定判别式及计算公式

抗风浪作用稳定指标 $F_w = \frac{\mu(G' - U)}{kP}$ ；式中， $P = plh$ ， $U = \frac{1}{2}ulb$ ， $u = p$ ，波浪荷载按照图中分布型式计算，最大波浪力 $p_m = \xi k_1 k_2 k_3 C_w h$ ， $Z_2 = A + \frac{1}{m^2}(1 - \sqrt{2m^2 + 1})(A + B)$ ， $A = h\left(0.47 + 0.023\frac{L_m}{h}\right)$ ， $\frac{1+m^2}{m^2}$ ， $B = h\left[0.95 - (0.84m - 0.25)\frac{h}{L_m}\right]$ ， $k_1 = 0.86 + 4.8\frac{h}{L_m}$ ， $m\left(0.028 - 1.15\frac{h}{L_m}\right)$ ；坡面分布波浪力 $p_i = \beta_i p_m$ ，($i = 1, 2, 3, 4$)；其中， $L_u = \frac{L_m}{\sqrt[m^2-1]{}}$ ， $L_i = \alpha_i L_u$ ($i = 1, 2, 3, 4$)

抗冲刷稳定指标 $F_c = \frac{u_{cr}}{ku_i}$ ($i = 1, 2, \dots$)。式中，临界启动流速 u_{cr} 见文献[14]

抗风浪作用稳定指标 $F_w = \frac{\mu(G' - U)}{kP}$ ；式中， $P = plh$ ， $U = \frac{1}{2}ulb$ ， $u = p$ ，其中波浪要素由风速计算得出，计算方法参考文献[15]

变形稳定指标： $F_{1L} = \frac{L_{1cr}}{L_{1s}}$ ； $F_{3L} = \frac{L_{3cr}}{L_{3s}}$ ； $F_v = \frac{v_{cr}}{v_{max}}$ 。

式中，连续 1 d 的坝基水平向变形数值 $L_{1s} = |\max(L_{H1}, L_{H2}, \dots, L_{HN_1})|$ ，

$(N_1 - 1) \cdot \Delta t = 1$ d；连续 3 天的坝基水平向变形数值

$L_{3s} = |\max(L_{H1}, L_{H2}, \dots, L_{HN_3})|$ ， $(N_3 - 1) \cdot \Delta t = 3$ d：

坝基最大水平向变形速率 $v_{max} = \max\left(\frac{L_{H1}}{\Delta t}, \frac{L_{H2}}{\Delta t}, \dots, \frac{L_{HN}}{\Delta t}\right)$ ；

渗流稳定指标 $F_J = \frac{J_{cri}}{kJ_i}$ ($i = 1, 2$)。式中，坝基某点渗透坡降

$J_1 = \frac{H}{(m-1)\Delta S_1}$ ；某渗流出逸处渗透坡降 $J_2 = \frac{H}{(m-1)\Delta S_2}$ ；上下游水位差 $H = H_1 - H_2$

1.3 信息化施工系统的架构

管袋裸坝信息化施工包含信息采集阶段、信息分析处理阶段、信息反馈阶段和控制决策阶段^[16]4 个阶段。信息采集阶段除采集管袋坝的初始（基础）信息外，主要采集波浪、潮位、风速、坝基渗流和坝基变

形等信息；信息分析处理阶段对各种信息进行分析计算，依据指标体系分析判别管袋坝的稳定性；信息反馈阶段的任务是将实时监测结果和分析结果通过一般方式或预警的方式反馈给技术人员；控制决策阶段对超出临界值的指标因素提出适当的安全处置措施建

议, 辅助技术人员决策^[17-18]。

1.4 管袋坝信息化施工系统的信息技术

管袋坝信息化施工系统(以下简称系统)所采用的信息技术主要有信息自动采集技术、无线通信技术和自动分析预警技术3种。

(1) 信息自动采集技术

自动采集技术指能有效扩展人类感觉感官的感知域、灵敏度、分辨率和作用范围的技术^[20]。系统采集终端为全自动无人值守设备, 内置时钟芯片联网同步时间, 按照设定频率(10, 50, 100次/d)定时采集数据, 由通信网络反馈回控制终端, 实现信息的自动化采集。

(2) 无线通信技术

无线通信网络是系统信息传输的道路, 把地理分散、种类繁多、信息量大的监测信息传输到控制端, 控制端的指令也通过无线通信网络发送到各个采集终端^[21]。利用无线电台在现场构建475 MHz大功率通信网络, 有效无障碍传输可达10 km。电台与终端、控制端间采用RS232和RS485串口实现数据交换, 实现局部物联网功能。

(3) 自动分析预警技术

系统软件采用多线程编程技术, 实现多指标多任务同时段运算分析, 并对出现的异常状况实时预警; 专家知识系统采用模糊算法搭建, 后台由内置专家知识数据库提供管袋坝施工相关知识及数据, 依据分析运算结果实时给出合理的处理措施和建议^[22]。

2 管袋坝信息化施工的实施方法

2.1 监测设备的现场布设

以沿海某围垦施工为例, 场地的总平面布置多为“口”字形结构, 如图1所示, 即利用一段海堤与三段管袋坝共同将围垦规划区匡围起来。在不与海堤相接的坝段之上预留纳潮口, 形成带有缺口的近似“口”字形状。需根据施工现场状况, 制定合适的施工监测断面布置方案, 将整套系统的监测设备布置到选定的监测断面位置处。监测断面的选取遵循“重点监测”的原则, 即针对容易发生失稳的坝段(如坝轴线转折点、纳潮口一端、地基条件差和水流流速大的坝段)布置监测断面。纳潮口坝头位置受涨落潮往复水流的影响, 水流流速大, 坝体容易发生破坏, 可作为监测断面之一。

系统监测设备安装布设需要遵循以下原则: 必须保证监测数据准确可靠, 具有代表性; 监测过程对施工的影响较小, 且设备安装稳固, 尽可能少受环境因

素影响。

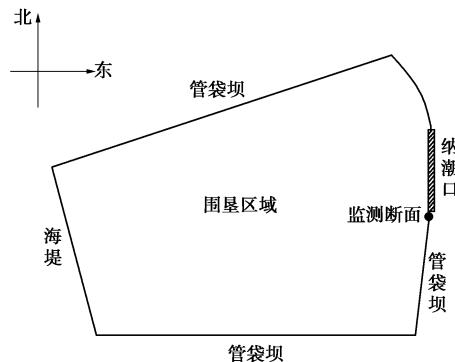


图1 围垦工程管袋坝监测断面

Fig. 1 Typical monitoring section of geotube embankments in reclamation project

监测断面的监测设备安装位置如图2所示。

(1) 渗压计

在坝轴线及坝身两侧、尤其靠近坝脚的位置设3~5孔, 孔直径不小于5 cm, 孔深根据地质条件深入坝基面以下至少3 m。每个孔中放置3~4支渗压计, 下部渗压计接近孔底放置, 上部渗压计距离地基表面约50 cm放置。渗压计和数据采集箱之间通过电缆连接, 均由太阳能电池板供电。数据采集箱可将采集到的数据临时储存到采集箱中, 也可直接传输到控制电脑中。

(2) 测斜仪

在坝基一侧(一般在滩面较低、坝坡较陡的一侧或地质条件较差的一侧)靠近坝脚约1 m的位置钻孔并埋设测斜管, 测斜管至少要插到地基较为坚硬的土层内部1 m。3~5支测斜仪在测斜管内部等长均匀布置, 最上部测斜仪距离地基表面约50 cm。测斜仪和数据采集箱之间通过电缆连接。

(3) 气象站及波潮仪

在坝体近海一侧设立监测桩台, 监测桩台应保证在较大风浪作用下保持稳定且不被海水淹没。气象站、数据采集箱、无线数传电台和太阳能电池板全部放置于监测桩台上, 均需固定; 波潮仪传感器固定于伸出平台的支架上。

(4) 流速仪

在靠近纳潮口坝头或坝线转角处的基床面位置放置高约50 cm的三角钢架, 钢架以重物固定。流速仪利用锚固部件固定于钢架中心焊接的垂向钢管上, 其高度可上下调节; 流速仪工作时距离底部滩面高度不能低于20 cm, 以防止传感器被泥沙覆盖。

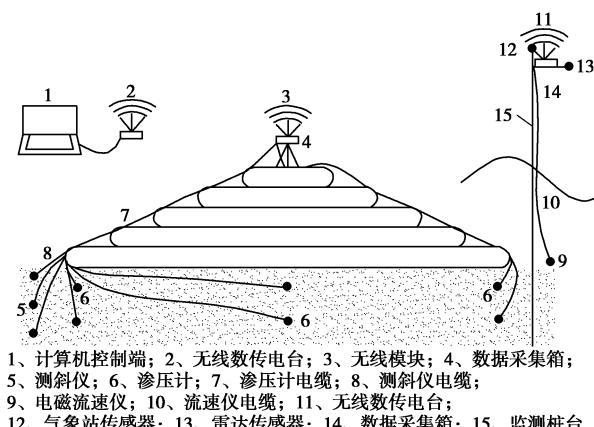


图 2 监测设备监测断面布置示意图

Fig. 2 Layout of equipments on typical monitoring section

2.2 现场实施步骤

管袋坝信息化施工实施始终伴随管袋坝施工过程进行, 实施过程按系统参数设定、监测设备安装与布设、监测设备连接与调试和系统运行 4 个步骤开展。

(1) 系统参数设定

系统参数设定在管袋坝施工准备阶段完成。需要设定的系统参数主要有设计参数, 指标临界值参数和监测参数 3 种。设计参数包括堤坝横断面几何参数、地质物理力学参数和充填管袋土料力学参数等, 指标临界值包括波高、潮位、渗流坡降等指标的临界值, 监测参数包括监测断面位置、设备通信参数和采集频率等。

(2) 监测设备安装与布设

在插打塑料排水带和软体排铺设工序完成后, 在监测断面按设计位置钻孔布设渗压计和测斜仪, 此前在堤外适当位置处架设监测平台, 安装布设相应监测设备。由于此时管袋坝尚未开始施工, 图 2 中数据采集箱 4 需固定于监测平台上。监测断面处管袋坝出水后, 也可将该数据采集箱转移到坝顶。

(3) 监测设备连接与调试

监测设备连接与调试工作应选择在管袋充填施工前进行, 按照图 2 所示连接各监测设备, 完成之后, 检查各个传感器的工作状态以及无线通信网络是否稳定可靠。

(4) 系统运行

系统运行贯穿于充填施工的全过程, 管袋充填时开始实施监测, 坝体坡面防护施工完成后结束监测。若监测过程中系统提示坝体将出现不稳定状况, 需及时采取防护措施, 直至系统预警解除。

3 现场系统布设调试运行试验

3.1 现场试验条件

系统开发后短期内无合适的即将开工的管袋坝施工工地, 只能联系正在施工中的工地。由于信息化施工现场试验并未列入该工程计划与施工组织设计之中, 故不能影响原有管袋坝施工进度。而信息化施工系统安装、调试等工作对正在进行中的各项施工程序必然产生干扰和滞后, 所以直至管袋坝的防护设施和坝顶道路完成后才得以进场试验。至此, 原有的管袋坝信息化施工现场试验完整的实施过程和意义转变为检验信息化施工系统是否能在现场环境中正常运行的初步现场试验。与完整的现场试验相比, 本次初步现场试验的主要差异有以下 4 个方面。

(1) 试验监测断面选取

选择某围垦工程的南侧永久管袋坝为试验坝, 试验断面选择距原海堤约 4 km 较接近堤端的断面, 未选择堤端断面是因为堤端仍堆积一些建筑材料, 且为车辆掉头场所, 系统难以布设和实施。该断面堤高度接近南侧堤最大高度, 但海流、风浪不如堤端复杂。选择断面如图 3 所示。

(2) 监测设备安装与布设

渗压计和测斜仪的埋设均在已建成的管袋坝堤顶、坡面及堤脚处钻孔。因堤内侧坡面施工尚未完成, 钻孔机械和舢舨不能进场, 堤脚处渗压计和作为水位计使用的渗压计未埋设和放置。根据初步现场试验的意义, 架设长久使用的雷达波潮仪和气象站放置平台已无必要, 改用渔船作为放置平台。预先在港内渔船上安装波、潮监测仪和气象站, 安装完成后按预定时间开赴试验现场连接调试。

(3) 监测设备连接与调试

监测渔船到达施工现场后, 将电磁流速仪及其附属架安置在船靠近堤脚一侧的水下滩面上; 将引出监测孔的渗压计、测斜仪的电缆通过舢舨与放置在监测渔船上的数据采集箱连接。

(4) 监测实施

经调查现场天气状况无异常后, 计划监测实施周期为 7 d, 但由于监测渔船为平底船, 在 5~6 级风作用下便大幅度摇摆, 船主终止了双方的合作协议, 故现场实施工作只持续了 1 d 时间。

3.2 初步试验过程

(1) 设置基础信息

通过查阅工程设计资料确定坝顶宽度、坝底宽度、坝高、充填管袋长度、迎浪面坡比、坝体两侧基底高程; 通过采集监测断面处充填泥砂和坝基部位泥砂进行土工试验, 确定充填泥砂密度、坝基部位泥砂颗粒; 采集管袋袋体材料进行直剪试验确定袋体之间的摩擦系数; 通过查阅工程设计资料和相关规范、现场勘查、本系统所采用的计算分析方法等方式确定浪高、风速、

潮位、坝基渗流坡降、坝基水平位移的临界值。将以上信息输入到信息化施工系统软件中保存，完成基础信息设置。

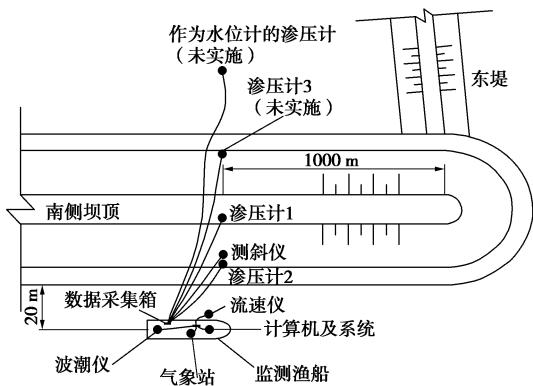


图3 系统现场试验实施方案

Fig. 3 Implementation program of system in filed experiment

(2) 监测设备安装与布置

在现场试验实施前一周完成渗压计、测斜管的钻孔与传感器安装，并将电缆线引出孔口加以安全保护；在现场试验实施前一天完成监测渔船上的雷达波潮仪、气象站的安装，其中雷达传感器通过支架延伸至船舷以外 1.5 m 左右；试验当天完成传感器电缆线与数据采集仪的连接、流速仪的现场安装与整个信息化系统的现场调试。部分监测设备现场安装布置如图 4 所示。

(3) 实施现场监测

打开监测设备自带的上位机软件，设定采集频率 2 min/次（2, 30, 60, 180 min/次可选）、串口通信方式（串口属性：9600, 8, 1, NONE）和数据传输方式（无线数传电台），并进行测试与采集，以检查连通性。测试完成之后，即可进行监测，监测过程全程自动。

3.3 系统运行状态

(1) 基础信息设置模块

基础信息设置模块中的信息全部在现场试验前完

成，主要包含监测现场地质参数、各项指标临界值、管袋裸坝结构几何参数等一些列数值。现场检验该模块运行状态良好，能够实现数据顺利读取和存储。

(2) 信息实时采集模块

信息实时采集模块用于对信息化设备检测数据的实时采集，现场检验进行过程中，该模块采集频率为每 2 分钟一次，由于数据量较大，且多数设备为无线电台传输，出现问题的可能性较大。但经过检验，该模块能够实现对监测数据的实时采集。

(3) 信息实时分析处理模块

信息实时分析处理模块用于对监测信息的实时处理与分析，由于波潮仪传感器安装在渔船上，船体摆动较大，波浪、潮位和风速等数据随船体摆动而不断变动，由该模块分析所得稳定系数曲线也呈现出剧烈波动，表明该模块能够正常运行。

(4) 异常信息实时预警模块

异常信息实时预警模块用于对分析结果进行判别，对于异常的状况进行预警。监测过程中系统曾数次预警顶层管袋将会发生失稳，主要是由于监测渔船左右摆动，造成波高监测数值偏大，并不能代表实际状况。经检验证明，该模块功能正常。

(5) 专家知识系统模块

专家知识系统模块的作用是对出现的异常状况给予辅助建议和处理措施。该模块目前只实现了手动搜索功能，现场检验前进行了调试，调试结果正常。

现场初步试验结果表明，系统各模块运行基本正常，模块之间能够实现数据传递，监测数据采集、分析、存储功能基本完善，能够满足施工现场正常运行的要求。

4 结语

针对目前河口海岸管袋裸坝施工过程中难免出现的坝体失稳问题，通过筛选并分析管袋裸坝稳定安全性影响因素，提出了管袋裸坝施工期稳定性指标体系，

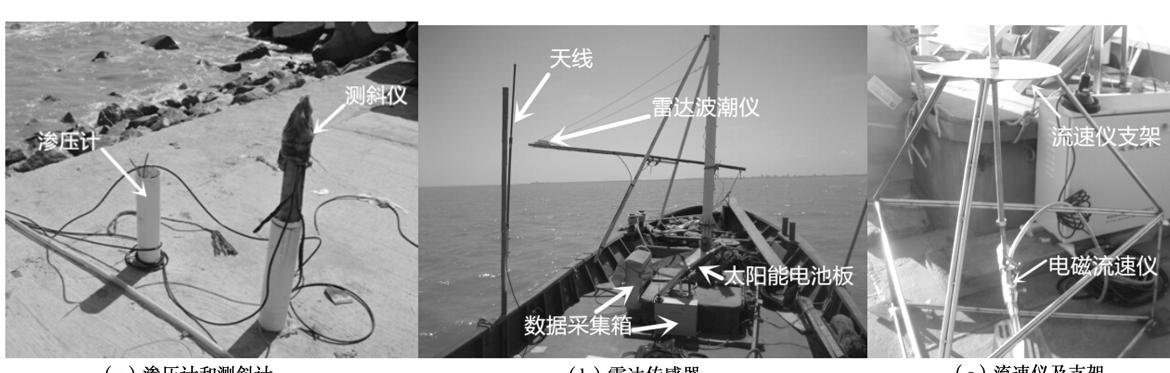


图4 部分监测设备现场安装布置图

Fig. 4 Layout of part monitoring equipments in field experiment

并以此开发了管袋裸坝信息化施工系统，并开展了初步现场试验。结果表明，系统能够满足施工现场正常运行的要求。实现管袋裸坝信息化施工技术的深入发展，需要进一步完善管袋裸坝施工期稳定性指标体系，现场试验需与实际工程施工无缝对接及默契配合。

参考文献：

- [1] 陈向东, 杨茂忠. 信息化施工及其应用[J]. 北京工业大学学报, 2001, 27(1): 57 - 60. (CHEN Xiang-dong, YANG Mao-zhong. Information construction and its application[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2001, 27(1): 57 - 60 (in Chinese))
- [2] 刘国辉. 深基坑动态设计及信息化施工技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005. (LIU Guo-hui. Dynamic design of deep foundation pit and informationization construction technology research[D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese))
- [3] 孟 磊. 地下工程信息化施工及信息反馈技术研究[D]. 重庆: 西南交通大学, 2010. (MENG Lei. Research on the technology of information construction monitoring and back-analysis in underground engineering[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [4] 王 源, 刘松玉, 谭跃虎, 等. 南京长江隧道浦口深基坑信息化施工与分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1784 - 1791. (WANG Yuan, LIU Song-yu, YAN Yue-hu, et al. Analysis and information construction of Pukou deep foundation pit of Nanjing Yangtze River tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1784 - 1791. (in Chinese))
- [5] 孟陆波. 公路隧道信息化施工与计算机辅助决策系统研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2004. (MENG Lu-bo. On the highway tunnel information construction and computer assistant decision-making system[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004. (in Chinese))
- [6] 张慧东, 刘 钟, 李志毅. 地铁车站深基坑支护监测与信息化施工[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S1): 441 - 446. (ZHANG Hui-dong, LIU Zhong, LI Zhi-yi. Case study of informative construction in deep excavation of subway stations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 441 - 446. (in Chinese))
- [7] 张国泉, 陈小刚. 充泥管袋在青草沙水库工程中的应用[J]. 人民长江, 2009, 40(12): 47 - 48, 52. (ZHANG Guo-quan, CHEN Xiao-gang. Application of sandbags in reservoir engineering of Qing Cao Sha[J]. Yangtze River, 2009, 40(12): 47 - 48, 52. (in Chinese))
- [8] SHU Y M, LIN G, XIA Y. Structural stability and filling materials on geotube dams[C]// Proceedings of 12th International Conference on Engineering, Science, Construction and Operations in Challenging Environments. Hawaii, 2010: 720 - 728.
- [9] 王海华, 陈德春, 亢 扬. 条子泥一期围截流堤失稳与接面抗渗破坏对策方案[J]. 江南大学学报, 2014, 13(5): 576 - 582. (WANG Hai-hua, CHEN De-chun, KANG Yang. Unstability analysis and junction permeability damage countermeasure research of Tiaozini first-phase closure dike[J]. Journal of Jiangnan University, 2014, 13(5): 576 - 582. (in Chinese))
- [10] 黄世昌. 浙江沿海超强台风引发的潮浪及其对海堤作用[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (HUANG Shi-chang. Storm tide level and wave due to a super typhoon and its action on seawall in coastal region of Zhejiang province[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [11] 丁烈云, 吴贤国, 骆汉宾, 等. 地铁工程施工安全评价标准研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 121 - 127. (DING Lie-yun, WU Xian-guo, LUO Han-bin, et al. Research on standard for construction safety assessment of metro engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11): 121 - 127. (in Chinese))
- [12] 林 刚, 束一鸣. 土工管袋填筑的设计原理[C]// 全国第六届土工合成材料学术会议论文集. 西安, 2004: 489 - 496. (LIN Gang, SHU Yi-ming. Design principles of filling process of geotextile bags[C]// The 6th Association for Geosynthetic Materials. Xi'an, 2004: 489 - 496. (in Chinese))
- [13] 朱朝荣, 束一鸣, 汪 军, 等. 扁平管袋坝在波浪作用下稳定性试验研究[J]. 人民长江, 2008, 39(1): 94 - 96. (ZHU Chao-rong, SHU Yi-ming, WANG Jun, et al. Study on the test of stability of flat geotube embankment under the distribution of wave force[J]. Yangtze River, 2008, 39(1): 94 - 96. (in Chinese))
- [14] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999, 6: 1 - 9. (DOU Guo-ren. Incipient motion of coarse and fine sediment[J]. Journal of Sediment Research, 1999, 6: 1 - 9. (in Chinese))
- [15] 邵守良. 深水和浅水风浪要素的计算[J]. 港工技术, 1997, 2: 12 - 15. (SHAO Shou-liang. The calculation on wind wave factors of deep water and shallow water[J]. Port Engineering Technology, 1997, 2: 12 - 15. (in Chinese))
- [16] 曹显春. 深基坑支护优化设计与信息化施工研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006. (CAO Xian-chun. Study on

- optimized design of deep foundation-ditch support and information construction[D]. Qingdao: China Ocean University, 2006. (in Chinese))
- [17] 陈修国. 面向问题分析与决策专家系统的知识库系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009. (CHEN Xiu-guo, Research on knowledge base system of problem oriented analysis and decision expert system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese))
- [18] 蔡 阳. 现代信息技术与水利信息化[J]. 水利水电技术, 2009, **40**(8): 133 – 138. (CAI Yang. Modern information technology and water resources informatization[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, **40**(8): 133 – 138. (in Chinese))
- [19] 李德仁, 张良培, 夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘[J]. 测绘学报, 2014, **43**(12): 1211 – 1216. (LI De-ren, ZHANG Liang-pei, XIA Gui-song. Automatic analysis and mining of remote sensing big data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, **43**(12): 1211 – 1216. (in Chinese))
- [20] 韩春鹏, 何东坡, 程培峰, 等. 寒区公路路基温度场的自动监测与特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, **31**(3): 21 – 26. (HAN Chun-peng, HE Dong-po, CHENG Pei-feng, et al. Automatic measure and character of highway subgrade temperature field in cold region[J]. Journal of Chang'an University, 2011, **31**(3): 21 – 26. (in Chinese))
- [21] 林长星, 张 健, 邵贝贝. 高速无线通信技术研究综述[J]. 信息与电子工程, 2012, **10**(4): 383 – 389. (LIN Chang-xing, ZHANG Jian, SHAO Bei-bei. Survey of research on high speed wireless communication technology[J]. Information and Electronic Engineering, 2012, **10**(4): 383 – 389. (in Chinese))
- [22] 王 雪, 肖人彬, 史铁林, 等. 面向对象专家系统中知识的不确定性[J]. 华中理工大学学报, 1993, **21**(1): 20 – 24. (WANG Xue, XIAO Ren-bin, SHI Tie-lin, et al. The uncertainty of knowledge in an object-oriented expert system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1993, **21**(1): 20 – 24. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)