

我国管袋坝工程技术进展

束一鸣

(河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:通过回顾 20 世纪 80 年代以来我国具有代表性的管袋坝工程,分析了管袋坝工程设计、工艺装备、技术措施等方面的进展,梳理了伴随工程建设的应用性基础研究成果,展示了我国管袋坝工程取得的技术进步。借鉴国外高强度椭圆形管袋形式,我国工程界因陋就简地走出了以普通强度扁平管袋填筑管袋坝的中国之路,管袋坝在河口蓄淡水库、深水航道整治、沿海港口码头、沿海机场、海堤及防波堤、滩涂围垦等重要基础设施建设中已成为重大或重要工程的组成部分。筑坝区域从潮间露滩处到深水潮流复杂区域;施工操作从以人工为主到以装备为主,直至当前多装备完成深水区域复杂的水下控制施工;管袋坝匡围区域从小到大,以至能实现超大龙口的顺利合龙。

关键词:管袋坝;扁平管袋;深水施工;超大龙口;技术进展

中图分类号:TV641.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)01-0001-11

Advances in technology of geotube dam engineering in China//SHU Yiming (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The technological progress of geotube engineering in China was demonstrated through reviewing the representative geotube dams since 1980s. The development of project design, process equipment and technical measures was analyzed and the results of fundamental research for engineering applications were also summarized. Taken the widely used high strength elliptical geotubes abroad as reference, simplified ordinary strength flat geotubes were developed in China. They have been important components in the construction of huge infrastructures such as fresh water reservoirs in estuaries, deep-draft channel improvement, harbors, airports, dikes in coastal areas, wave breakers, beach reclamation, etc. The regions of geotube dam construction range from intertidal zones to complex areas with deep tidal currents. The construction operation of geotube dams has been changed mainly from manpower to equipment and until recently underwater construction in complex deep-water regions can be accomplished by multi-integrated equipment. The encircled area by geotube dams is becoming larger and super large closure gaps can be closed successfully.

Key words: geotube dam; flat geotube; construction under deep water; super closure gap; advances in technology

由于管袋坝建造工艺适合我国河口近海的多种基础设施的建设,自 20 世纪 80 年代以来被广泛采用,发展迅速。本文对近 10 多年来国内重大或重要工程所含涉水施工的扁平管袋坝工程进行梳理阐述,对管袋坝应用性基础研究成果以及笔者团队在国家自然科学基金等资助下取得的一些初步研究成果作一概述,展示我国涉水施工的管袋坝工程的技术进步,以利于今后取得更高层次的发展。

1 管袋坝及其特点

管袋(geotube or geotextile tube)亦称土工管袋,是以拉伸强度较高的机织织物缝制成尺度较大袋体、在坝址现场以水力充入泥砂浆脱水后形成的构

筑物。管袋坝(geotube dam or dam with geotextile tube),亦称管袋堤坝,是在坝址以充填泥砂的管袋堆叠围堰后吹填形成支撑主体的堤坝。

由机织织物制成约 1 m 尺度、装填土料形成的构件称作土袋;由机织织物制成数米或更大尺度、装填或充填土料后放置到构筑现场的构件称作土工包。虽然它们都以机织织物作为袋布装填土料,但不应称作管袋,以示区别。

管袋坝通常有单棱体、双棱体以及下部通长棱体等断面布置形式。单棱体形式需在棱体内侧吹填形成堤坝,双棱体形式需在外侧大棱体和内侧小棱体之间吹填形成堤坝,地基较弱、水深较大时将内外两个棱体下部以通长管袋连成一体,如图 1 所示。

管袋坝特别宜建于基础较软弱、附近具有合适充填泥砂的河口和近海海岸地带,作为河口蓄淡水库的堤坝、抵御风暴潮的海堤、围滩造陆的匡围堤坝等。

管袋坝与由碾压或抛投等工艺建筑的土石坝相比具有以下主要特点:

a. 低碳节能。除外侧坝脚防止冲刷需要少量抛石外,坝身无须块石及其他粗颗粒料,对于河口、近海滩涂坝址,可节省大量外购材料及长距离运输的成本,符合当前低碳绿色发展潮流。

b. 工艺简单。利用附近合适泥砂由高压水枪即时制备泥浆,由泥浆泵直接充灌至由工厂制作、铺设到位的机织织物管袋中,浆中之水由袋布孔隙析出,浆中之土则留于袋中,脱水固结后的管袋成为管袋构筑物。干滩或浅水施工只需高压水枪、泥浆泵及动力设备,较大水深施工需增加船只作为施工平台;管袋围堰内的坝芯由吹填泥砂固结后形成。所以,管袋坝施工所需的装备少且价格低,施工工艺极其简单。

c. 技术可靠。河口近海的管袋坝基础多为软弱地基,不仅承载能力与抗剪强度低,而且水力稳定性差,极易被冲刷侵蚀。扁平管袋袋体面积大、整体性强,不仅能较均匀分散地基的集中受力、适应地基不均匀沉降,而且袋布及与地基接触的软体排均为土工织物,与软土的交界面比较符合水力稳定条件,可避免软弱土层被冲刷侵蚀。

d. 节省造价。由于施工装备成本、建筑材料成本和施工人员成本都低,所以管袋坝的造价低。

e. 工期可控。水力充填管袋的施工流程受天气影响小,除台风暴雨、大风大雨天气外,一般天气

均可施工,工期保证率较高。

2 我国管袋坝工程技术发展

在潮间带以上区域填筑管袋坝基本上属于陆上筑坝,对管袋充填材料、充填工艺、工期安排等要求均较宽松,所以本文主要阐述潮间带及以下区域填筑管袋坝的工程技术发展情况。

2.1 因陋就简兴起管袋坝工程

我国用泥砂充填机织织物袋体的工艺最初用于制作软体排的砂肋作为排体镇压构件,真正意义上管袋坝作为基础设施构筑物出现于1985年。华东电力设计院与华东水利学院(现河海大学)等单位在上海石洞口电厂长江口江滩灰库建设中,自1983年起经过2年多的试验研究,直至坝址现场长75m的试验坝段经受了11级台风袭击后仍完好无损,再将该项技术用于该灰库建设^[1]。灰库围坝断面设计见图2。从图2可见,该管袋坝工程断面布置和结构设计是我国管袋坝工程的最早范本。

荷兰、美国等欧美国家以土工管袋作为海岸防护的一种设施,其管袋采用高强高滤的袋布经特殊缝制而成,直径一般2~3m,最大可达5m。袋布由聚合物“强丝”和“滤丝”复织而成(暂且称作“强滤布”)。聚丙烯材质管袋布的拉伸强度可达70~107kN/m,承受的内压大,可使充填的管袋呈椭圆状,且袋布呈细观空间结构,滤水性强。受限于织造工艺与投资成本,我国工程界因陋就简,从20世纪80年代起采用裂膜丝普通织法织造管袋袋布(通常称“编织布”),强度低于国外的强滤布,此外由于编织布为平面结构,滤水性能也低于强滤布,但通过管

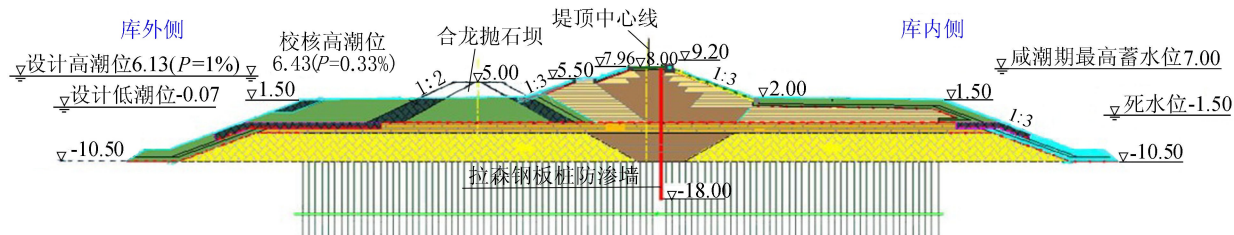


图1 长江口上海青草沙蓄淡水水库东堤横剖面(单位:m)

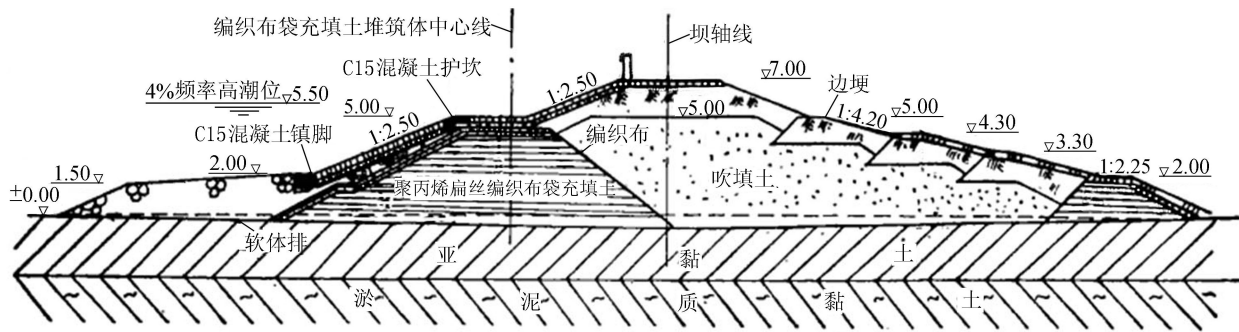


图2 上海石洞口电厂长江口江滩灰库围坝断面布置(单位:m)

袋尺度结构布置(管袋扁平化)和充填土料级配调适(控制黏粒及粉粒含量)同样可使普通织法制成的裂膜丝管袋具备筑坝功能:管袋扁平化即管袋的平面尺度大、高度小,一方面可降低充灌屏浆压力,另一方面可增加抗滑稳定性;控制黏粒及粉粒含量可使裂膜丝袋布也可有效滤水。所以,扁平管袋不仅具有时代印记,而且具有中国地域特色。

2.2 河口海岸及内河基础设施中广泛应用

2.2.1 河口蓄淡水库

继石洞口电厂灰库后,1992年由上海勘察设计院设计采用管袋坝工艺建成了上海月浦水厂陈行蓄淡水水库^[2],使水厂能在一日两潮工况下保证全天候取到氯化钠达标的供水原水,这是长江口第一个原水水源地蓄淡水水库。以后在长江口相继建成太仓第二水厂浪港口水库^[3]、上海青草沙水库、上海东风西沙水库等多个长江原水水源地蓄淡水水库。蓄淡水水库因其库内库外双向水位交替作用而运行条件复杂,对管袋坝工程技术要求尤为严格。

上海青草沙蓄淡水水库是世界上最大的河口蓄淡水水库,环库坝堤总长约48.4 km,水库总面积66.15 km²,水库最高蓄水位7.00 m,设计最低水位-1.50 m(吴淞零点),水库总库容5.27亿 m³,有效库容4.38亿 m³^[4]。水库东堤深泓处堤基高程-10.50 m,堤顶防浪墙高程9.20 m,采用下部抛填土工包、中部通长管袋、上部双棱体管袋坝的结构形式(图1)。

2.2.2 长江南京以下深水航道整治

a. 长江口深水航道整治。长江口深水航道治理工程一、二期工程中导流堤(管袋堤芯)的总长度达25.15 km,总工程量为53.02万 m³。通过在航道南北侧填筑导堤,利用水力刷深并维持航道,替代以前的单一疏浚措施。以水下插打排水带为软弱基床固结提供排水通道,在基床铺设的合成材料排体上逐层充填管袋形成梯形堤芯,外设防风浪设施后构筑成导堤^[5]。而逐层充填的管袋对基床而言,也是逐级加载的过程,使基床淤泥质土排水固结,提高承载能力和抗剪强度。导堤横断面见图3,从基床下的排水带到基床面的软体排,再到基床上的管袋坝,直至坝顶的土工模袋,形成了一个完整的合成材料构件系统。若采用传统抛石筑堤方式,工程造价和

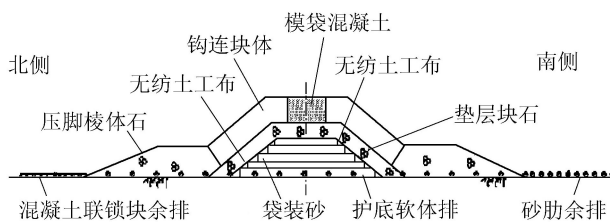


图3 长江口深水航道导堤横断面

施工难度都将倍增。

b. 南京以下12.5 m深水航道整治。长江南京以下12.5 m深水航道二期工程建筑物施工已完工^[6],主要实施长江干线南通至南京河段洲滩守护工程,维持较为有利的航道形态,初步实现12.5 m深水航道由南通上延至南京,全长227 km。2002年曾经在和畅洲左汊潜坝采用GPS定位抛投长10 m、直径为1.2 m的砂枕填筑高度最大达30 m的潜坝^[7],并进行了一些抛投物沉落距离的研究^[8],本次工程由中交第三航务工程勘察设计院和中交水运规划设计院设计的镇扬段和畅洲左汊控流工程,设置2道拦江潜堤以调整分流比,两堤间隔1 km。潜堤顶面高程从深水航道的-18 m至接岸段的4 m,而河道深槽段处最大水深达50 m。高程-5 m以上的潜堤堤芯采用充填土工管袋,-5.0 m以下采用尺寸4 m×6 m×0.5 m的充砂土工包抛填,外加防护设施后形成上游坡比1:2.5、下游坡比1:3的潜堤断面。潜堤的绝大部分结构均在水下施工形成,对于施工装备、施工工艺、质量控制的要求甚高。迎水面和堤顶的土工管袋采用230 g/m²丙纶长丝机织织物与150 g/m²涤纶短纤针刺无纺布的组合型土工织物缝制,其余土工管袋采用230 g/m²丙纶长丝机织织物缝制;抛填的土工包采用350 g/m²丙纶长丝机织织物缝制。充填砂采用粉细砂,粒径大于0.075 mm的颗粒含量大于50%(质量分数,下同),黏粒含量小于10%。

2.2.3 近海交通设施

2.2.3.1 近海港口及道桥

上海洋山深水港已完成1~3期建设,在港区和航道建设中大量采用、发展了管袋坝技术。一期工程北围堤(小洋山一钹盖塘)的实施是整个工程的关键,在平均约20 m深海域、流速达2.4 m/s的汉道水域,设计采用充砂管袋堤芯结构^[9]。大管袋的尺寸为120 m×20 m与70 m×38 m,成型后管袋厚度一般为60~70 cm,袋布大多采用230 g/m²丙纶长丝机织布;充灌砂料要求粒径 $d > 0.075$ mm的含量应大于总量的85%,黏粒含量小于5%。管袋充盈率约80%,采用集充灌、铺设、抛填功能于一体的专用船舶施工^[10]。图4为施工隔堤典型断面。

港珠澳大桥岛隧工程及珠海口岸人工岛填海工程岛壁区采用了充填管袋技术^[11],图5为岛壁区临时围堰断面。

在南沙岛礁建设及其机场、码头等基础设施构筑中,管袋坝技术因地制宜,就地取材,填海拓地十分适合。美济岛吹填后的面积达6 km²,渚碧礁面积达到4.3 km²,永暑礁的面积达2.8 km²,岛上建有有机场、灯塔和通信网络等设施。

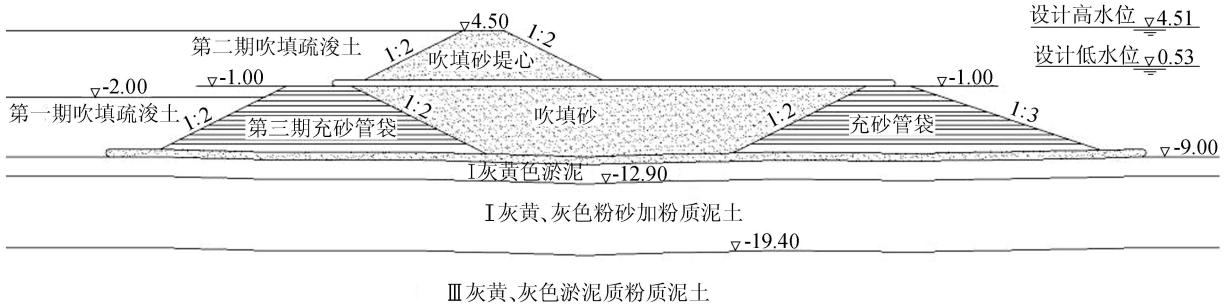


图4 洋山港一期工程北围堤施工隔堤典型断面(单位:m)

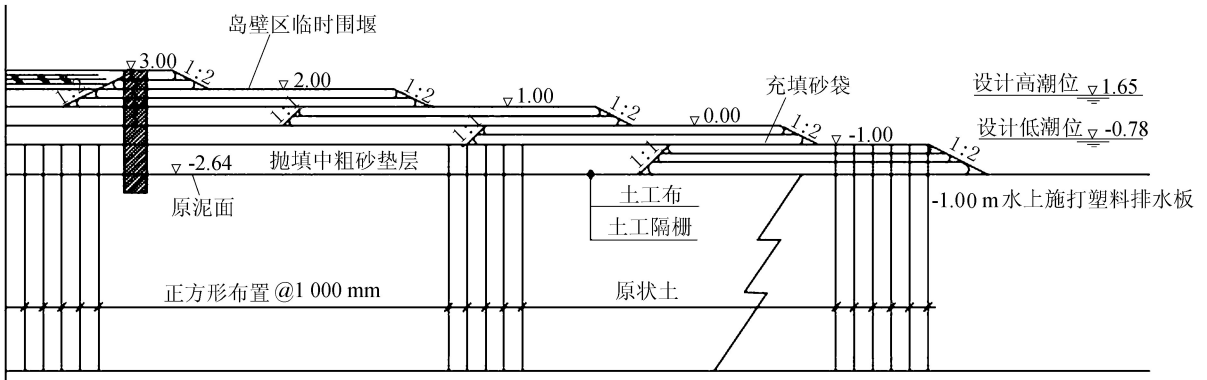


图5 珠澳口岸人工岛填海工程岛壁区临时围堰典型断面(单位:m)

2.2.3.2 沿海机场

我国沿海从南到北的澳门国际机场、香港国际机场和上海浦东国际机场,大多与填海拓地有关,其中管袋坝围堰与促淤为建造工艺之一。

香港国际机场现有总面积 1 248 hm^2 , 75% 为填海而成,填筑量约 1.8 亿 m^3 。2016 年香港国际机场扩建第三跑道的初期填海工程开建,由中交集团中标承建的香港机场填海拓地项目,拓地 650 万 m^2 ,建造海堤长 15 km,工期 58 个月^[12]。

已经开工建设的厦门新机场翔安国际机场为区域性枢纽机场,将建设 2 条满足 A380 飞机起降要求的跑道、56 万 m^2 的航站楼,位于大嶼岛与小嶼岛之间海域,利用周边海域淤泥吹填造地^[13],新增土地面积 10 km^2 ,围堰 12 km,吹填面积 12 km^2 ,填筑量 6 000 万 m^3 。

2.2.4 沿海土地开发

我国从渤海湾到北部湾,滩涂资源丰富,给沿海经济发达地区土地储备提供了良好条件。滩涂造陆采用管袋坝促淤围堰再吹填成陆,已成为普遍成熟的建造工艺。

河北唐山曹妃甸沙岛北侧与大陆岸线之间发育大片潮间浅滩,为典型的粉砂淤泥质滩涂^[14],自 2004 年至 2012 年已完成围海造陆 198 km^2 ,主要采用管袋坝围堰吹填土造陆的方法(图 6)。

上海临港地区(地处南汇嘴)作为国家新型工业化产业示范基地、国际航运中心和国际贸易中心的所在地,规划总面积 315.6 km^2 ^[15],其中管袋坝围



图6 曹妃甸管袋坝围堰吹填造陆

堰充填填海约 140 km^2 ,经过 10 多年建设已取得明显成效。

江苏东台弼港前沿水域的条子泥是辐射沙脊群中最靠近陆岸的大型沙洲,先期启动条子泥 2.67 万 hm^2 的沙洲管袋坝围堰,作为至 2020 年江苏沿海规划滩涂围堰 18 万 hm^2 的示范工程^[16]。

2.2.5 内河设施及整治

管袋坝在内河设施建设和整治工程中应用日益增多,例如作为岸堤、丁坝、顺坝及潜坝的坝芯等,也有作为内河码头堆场及其他设施的围堤等。

在赣江南昌红谷沉管隧道建设中,为了实现江中沉管与岸上匝道水下互通立交,在赣江东岸一侧施工高度为 20 m、填筑方量达 80 万 m^3 的管袋坝围堰,围堰大部分采用充砂长管袋堆叠而成,中间小部分堤芯为吹填砂,以设置塑性混凝土防渗墙阻断渗流,围堰边坡防护采用砂卵石垫层+块石格宾,如图 7 所示。施工围堰内明挖浇筑结构。

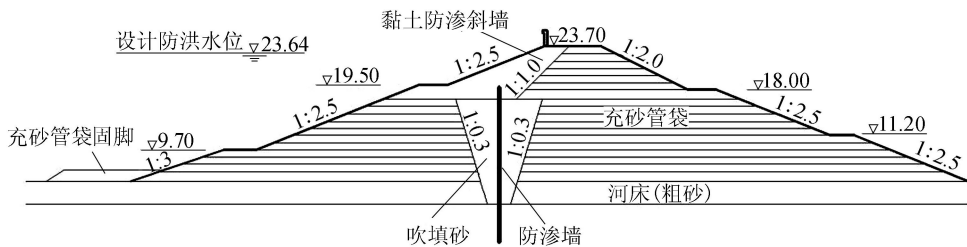


图7 南昌红谷沉管隧道管袋坝围堰横断面布置(单位:m)

围堰伸入赣江主航道,围堰处从河床至岸滩高程为2.8~18 m,百年一遇设计防洪水位23.64 m。施工过程中克服了赣江水位落差大、航道范围流速大和水位高等复杂的水文条件,5个月完成了充砂长管袋堰体的填筑施工,保证了围堰底部深度达10 m的深基坑施工安全^[17]。主体工程完工后,围堰拆除,由于堰体充填砂全部来自赣江,拆除的砂料弃之于赣江,最大限度地降低了施工成本和围堰施工及拆除过程中对赣江的污染。

2.3 工程技术发展

我国管袋坝工程技术的发展主要体现在施工装备、施工工艺以及与之配套的设计方法等方面,而新型袋体材料、多细颗粒充填料的快速脱水等技术相对滞后。可见,直接解决重大工程施工难题和效率方面的技术进步快,而需要前期投入、短期内难以见效的技术方面进步慢。然而,正是这些需长期积累的技术的突破,更具有普遍意义,经济效益更大。

2.3.1 深水筑坝(深水铺袋、深水铺排、深水抛投)

长江口水域宽阔,风大、浪高、流急、远离陆地,施工水深2~10 m,深水航道导流堤(结构形式参见图3)的深水填筑通过水下充灌铺设工艺创新与装备革新达到工程设计要求:①管袋充灌口为上下双袖口,待达到充盈度时,下袖口自然被挤压封闭,无须水下人工结扎袖口;②多层管袋+堤芯两侧无纺布过滤组合施工,减少了管袋充填、铺设移船次数,工效且质量保证率都得到提高;③特制能抗6级风浪和1.2 m波高的专用施工船舶和采用GPS-RTK定位技术,确保管袋定位及搭接质量^[5]。

洋山港一期工程筑堤长度约5.0 km,水深在10 m以上,最深处达23 m,采用先抛后铺的筑堤方法,网兜吊放装砂土工包(2.8 m×2.8 m)、导架铺放装砂土工包(10 m×5 m)和铺排船翻板抛投装砂土工包(4 m×6 m或6 m×8 m)等施工方法。导架铺放装砂土工包的就位较佳,适用于两侧边坡的控制;抛投装砂土工包适用于堤芯中部;网兜吊放装砂土工包速度较快,既适用于堤芯中部,也适用于边坡补缺;其中铺排船翻板抛投土工包体积较大,效率最高^[18-19]。深水抛填断面见图8。此外,一期工程港区陆域吹填量达

2355万m³,吹填最大厚度约47.0 m,平均吹填厚度21.0 m,高程-8.0 m以下工程量近1200万m³,通过施工装备革新,工程中采用大型耙吸式挖泥船,并将两泥泵低-高串联组合,使400 mm口径喷嘴的喷射距离达130 m,确保了洋山港一期陆域工程全面完成^[20]。

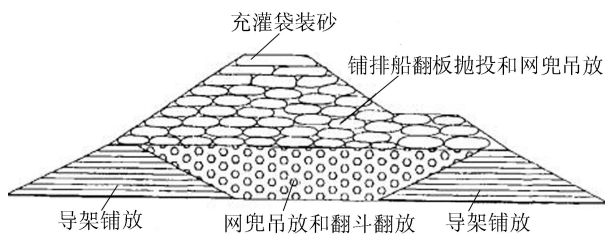


图8 洋山港一期工程深水抛填断面示意图

2.3.2 潮间带至-2.00 m 高程处筑坝

管袋坝最早在潮上带或潮间带利用落潮时铺设充填管袋,经过工程经验积累与施工装备的提升,较大水深铺设充填管袋的技术日臻完善。然而,对于潮间带至-2.00 m 高程处充填管袋效率较高的铺设工艺相对滞后。

长江口长兴岛滩涂圈围工程堤基为淤泥质土,压缩性大、强度低,除软土地基处理外还需增大围堤断面,使高程-2.00~1.00 m 水域变动区充砂管袋长度达140 m,现有的翻板抛填和网兜抛填工艺均受到砂驳吃水深度限制,低潮水深条件也不适合人工摊铺。然而,采用铺排船和平板驳船对超长管袋实施对拉定位铺设的工艺不仅可避免施工船舶搁浅,而且工效大增。该工艺实施参见图9和图10,主要流程为:①铺排船移船进点到位,利用丙纶绳套系袋体预留拉环,将设于滚筒的袋体卷通过人工筏牵引至对面平板驳船或铺排船。启动平板驳船或铺排船电机,按GPS系统的定位将袋体展铺对拉到位。②利用人工小筏将吹砂管路分流阀处的皮龙软管插入袖口之中,开启电吹船泥浆泵实施充灌砂作业。③充砂过程中通过袋体袖口分布和预留皮龙软管情况,计算各皮龙管路覆盖区域所需砂量,根据电吹船施工效率及时调整阀门开关,合理控制充灌时间进而控制充灌质量。

实践表明,该工艺不仅避免了抛投作业船舶易搁

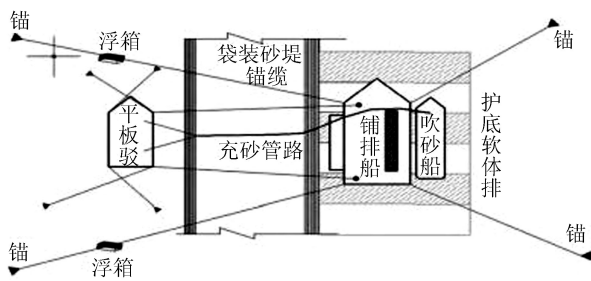


图9 对拉铺设工艺设施布置



图10 对拉铺设管袋操作

浅的问题,而且单个作业面筑堤量达到 $5500\text{ m}^3/\text{d}$,施工效率较常规铺排船水下铺设提高1.5倍^[21]。

2.3.3 宽大龙口合龙

经方案比较论证,确定青草沙水库主龙口布置在东侧深槽段,宽度达900 m。龙口范围在施工期的设计最大流速达到 7.5 m/s ,河床为粉砂土和淤泥,坝身为吹砂管袋,极易受涨落潮水流冲刷^[4]。针对船机施工水下结构的特点,龙口护面采用多层复合保护结构:第一层,大型土工织物充填砂袋尺寸为 $220\text{ m}\times 35\text{ m}$,袋布为 410 g/m^2 规格复合土工布,采用大型铺排船赶潮施工;第二层,超强砂肋软体排顺水流方向通常约为200 m,宽度约35 m,排布采用 1300 g/m^2 丙纶长丝机织土工布,其经纬向抗拉强度分别为 360 kN/m 和 260 kN/m ,砂肋直径30 cm,间距150 cm,采用 260 g/m^2 丙纶长丝机织布;第三层,混凝土块连锁排,基布采用 380 g/m^2 复合土工布,混凝土块规格为 $160\text{ mm}\times 400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,由丙纶绳均匀系在排布上,排体的平面尺度与超强砂肋软体排相同;第四层,网兜石单块质量10 t,6个联成一组,整体吊装,定点沉放,安放后的整体厚度为 $0.6\sim 1.2\text{ m}$,可满足 $6.5\sim 8.0\text{ m/s}$ 流速的抗冲稳定。在堤坝的防渗墙位置,用30 t混凝土块代替网兜石,截流后吊出并用充填砂袋置换^[22]。龙口900 m范围分两种戗堤截流断面,在龙口中间底宽800 m、底高程 -4.00 m 范围全线采用框笼抛石截流,即在小潮汛期安放框笼并压载,但大潮汛期仍可过水,再乘小潮或大潮平潮时段向已安放稳定的框笼内抛石形成戗堤。两侧各50 m(底高程 -4.00 m)段采用网兜石戗堤截流。框笼为型钢结构,立面(水流进出方

向)采用有利于自身稳定的梯形断面,顶宽10 m,底宽12 m,高7.5 m。施工顺序为:①放笼;②笼内高程 -2.00 m 以下压重抛石;③笼两侧各5 m范围内高程 -2.00 m 以下网兜压重固笼;④笼内分层抛石至笼顶;⑤笼两侧抛石加固。上述第①②③步相当于平堵过程,第④步可根据需要既可立堵也可平堵。东侧主龙口保护与截流框笼结构如图11所示。

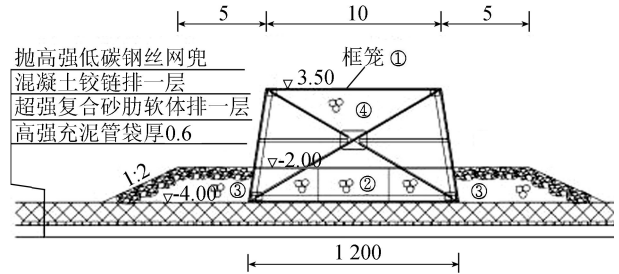


图11 青草沙水库东侧主龙口保护与截流框笼结构(单位:m)

青草沙水库主龙口的成功截流创造了圈围 49.8 km^2 水域不分仓、一潮龙口过水量达1.5亿 m^3 的纪录^[4]。

2.4 应用基础性研究进展

2.4.1 波流作用下管袋坝稳定研究

河海大学水利水电学院自21世纪初开展了扁平充填管袋结构分别与波浪、水流相互作用的稳定性机理研究。

通过模型试验方式获得扁平管袋裸坝结构波浪作用力,进而分析管袋所受拖拽力、惯性力以及上抬力系数。通过测力传感器获取不同裸坝结构中不同位置管袋波浪力,分析管袋受力状态,进行波浪力实测值与计算值比较。试验与分析结果表明,不同波浪要素组合对扁平管袋波浪力影响很大,相邻管袋所受波浪力大小也不相同;波浪-结构相互作用管袋所受水平波浪力明显占支配地位,对扁平管袋裸坝结构的位移和变形影响最大^[23-24]。

主要考虑了边坡系数、坝高、坝顶宽度以及水深4种影响因素,通过模型试验研究施工期管袋堤坝在深水流作用下的稳定性,确定以顶层管袋发生滑动失稳作为管袋堤坝失稳的判断标准,得出了管袋堤坝的临界滑动失稳流速公式。研究表明:失稳临界垂线平均流速随边坡系数以及坝顶宽度的增大而增大,随坝高与水深比的增大而减小;临界作用流速随坝顶宽度的增大而增大,其余几个因素对临界作用流速的影响不显著^[25]。

南京水利科学研究院河流海岸研究所2001年对不同尺寸沙袋充填度、基于水槽光面底部及袋布底部的沙袋在水流作用下稳定性试验研究结果表明,沙袋充填度达极限充填度的85%时较为合适;

沙袋失稳流速与其在水中的摆放位置有关,沙袋长度方向顺水流摆放时最难失稳,垂直水流方向摆放时最易失稳,一般以移动失稳为主,偶见滚动失稳;推导的沙袋失稳的计算公式表明,失稳流速与沙袋容重、摩擦系数、沙袋尺寸及摆放方位有关^[26]。

2.4.2 潮间带管袋坝填充料与充填工艺研究

管袋坝填充料就地取材是其一大优点,但前提是附近具有满足施工进度要求的充填土料。除深水区外,在潮间带一般要求一个潮水涨落期内管袋充填土料脱水至可以承受其上一个管袋的荷载并维持稳定,所以相关规范要求充填土料的黏粒含量小于10%。然而,坝址附近的土料并不都能满足要求,如何经济有效地利用附近土料成为需要解决的技术问题。

具备一定条件时可通过泥库筛选充填土料,此处不再引申阐述。较多研究机构在利用含黏量或含粉量较高的土料充填管袋方面作了相当多的试验研究。

2002年9月河海大学水利水电学院在长江口的浪港口蓄淡水水库现场作了管袋充填试验,充填300 cm×300 cm×70 cm的小型管袋12个、2000 cm×1500 cm×60 cm的大型管袋2个,分别充填库区高含黏(粉)粒土料、周边的细砂料以及两者不同比例的掺合料。结果表明,细砂料尽管细粒含量约35%(其中含黏量约为14%),但还是能够在半潮过程内基本脱水,其他含砂量较低的高含黏(粉)粒土料均不能满足潮间带以下区域的施工要求^[27]。

2011年10月南京水利科学研究院岩土工程研究所在连云港徐圩港区开展以疏浚土充填管袋筑坝试验,试验段总长60 m、宽30 m。分别充填两种土料:疏浚土含黏量约30%,含砂量约23%;细砂料含黏量约11%,含砂量约55%。采用两种充填料管袋互层等方式堆筑。结果表明,以疏浚土堆筑的管袋坝断面与两种土料管袋互层堆筑的断面均可形成稳定的堤坝断面^[28]。然而,脱水时间都是以若干天计,难以满足潮间带及以下区域的管袋坝施工要求。

2012年1月河海大学水工结构研究所在室内单元管袋充填脱水试验的基础上,在上海南汇东滩开展了现场高含粉量土料充填管袋脱水试验。充填土料含砂量约40%,含粉量约52%,含黏量约8%,管袋布的等效孔径适当大于计算孔径,结果表明,采用边充灌边排水的方法,充灌后管袋内留下的土料6 h的固结度可以满足上层管袋继续施工的要求。具体实施方法:①管袋除设置充灌袖口外,管袋顶部边缘对应设置直径为10 cm的排水口,沿管袋长度方向的间隔为5 m;②土料造浆后的土水比例达到1:3,25%的低浓度泥浆充灌后沉淀过程中更利于不同粒径土料的分离;③对于尺寸较小的管袋,每次

充灌可以在0.5~1 h的时间内达到屏浆状态,每次充灌结束后沉淀10 min,解开排水袖口,排除管袋内上层的水与粉粒及黏粒浆液;④对于尺寸较大的管袋,充灌至屏浆状态时间需数小时,充灌后放水排泥费时较多,效率低下,应采用管袋充至60 cm高后解开排水口边充灌边排水的方式^[29]。

2003年天津大学在室内试验的基础上与有关单位研制淤泥固化土搅拌设备,整合淤泥挖掘机、固化土喂泵螺旋机、混凝土泵等形成固化土充灌管袋系统,如图12所示。依托天津港北大防波堤工程一期西内堤工程开展坝址淤泥固化土充填管袋筑坝实践。固化土配方为:土35 kg,水8 kg,水泥2.92 kg,合计45.92 kg。

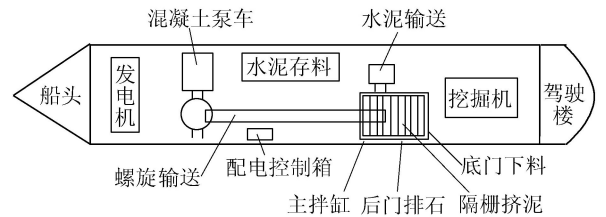


图12 固化土充填管袋系统示意图

管袋高度0.5 m,长度20~30 m,宽度为所处高程的堤宽度,充灌袖口一般呈正方形布置,间距约2.5 m,袖口的直径约30 cm,袖长40 cm。固化土应在搅拌后10 min内充灌,固化土含水量75%~85%时,泵送充灌效果较好,泵送最远距离50 m。每套固化土充灌系统每天赶两个潮水作业,日平均生产能力为230 m³。经施工后的现场观测与计算分析表明,固化土管袋作为堤心是可行和稳定可靠的^[30]。

2.4.3 充填管袋力学特性研究

2012年浙江大学市政工程研究所开展的室内模型试验表明,袋布织物经向受拉时透水率显著减小后趋于稳定,纬向受拉时透水率持续增大,由此推导了透水率计算公式;将透水率引入到理论计算,发展了充填管袋特性计算方法^[31]。

2007年天津大学岩土工程研究所结合天津港南疆围埝工程以粉土充填管袋作为堤心开展了试验与计算分析研究。袋布厚度0.52 mm,底部管袋周长38 m,单位面积质量131 g/m²,等效孔径0.145 mm,渗透系数3×10⁻³ cm/s,强度26 kN/m;管袋底部高程约为1.00 m。通过数值分析由袋布受力分析建立的控制方程得知,大尺度管袋对充填压应力十分敏感,其周向拉力随尺寸增加的速度非常大。为保证大型管袋强度满足要求,控制较小的充填压应力,这样充填高度也小,管袋呈扁平形状^[32]。该数值计算过程已编制了程序,可用于计算扁平充灌袋的形状、尺寸、泵送压力、泥浆容重和拉应力的关系^[33]。

2014年河海大学岩土工程研究所针对刚性水平地基上3个对称堆叠的高强度椭圆形充填管袋(充水、充泥或充浆),分别考虑两底袋接触和分离堆放时的管袋与管袋、管袋与地基之间接触面的摩擦作用,推求管袋拉力、摩擦力和几何形状的解析解答,分析充填压力和底袋的堆放距离对管袋受力的影响以及管袋堆叠的稳定性。结果表明:底袋的堆放距离固定时,存在临界充填压力,使得管袋与管袋、地基之间可动用的摩擦力较小;管袋的充填压力固定时,底袋的堆放存在临界距离,使得管袋的拉力和摩擦力均达到最小值,对应于最稳定的堆叠结构^[34]。

3 管袋技术研究新进展

在国家自然科学基金和国家“十二五”科技支撑课题等资助下,笔者团队在以往研究的基础上,开展了扁平管袋在波浪作用下的变形及稳定、高含黏(粉)粒土料充填管袋高效脱水、波浪水流作用下坝芯吹填砂经袋间接缝流失及管袋侧壁破损口土料冲刷破坏、管袋坝施工信息化与深水抛投充砂袋筑坝等研究,取得初步成果。

3.1 波浪作用下管袋变形及其稳定^[35-36]

鉴于国外有关椭圆形管袋结构研究理论成果不适于国内扁平管袋结构,而国内有关管袋在波浪作用下变形引起受力变化及相应的结构稳定等应用基础性问题的探究不多,因此有必要对此开展深入探讨。

依据大尺度结构波浪载荷分析方法——奇点分布法中关于海洋结构波浪压力分析方法,推导出波浪作用在扁平管袋裸坝结构上的波浪力分布;在前期对扁平管袋裸坝结构试验研究的基础上,分别建立考虑管袋不变形和变形两种情况下的稳定性公式;对于滑动和倾覆两种失稳形式,分别根据力和力矩平衡原理,提出稳定性公式,若相关波浪要素及影响管袋稳定的变形因子已知,该组公式可用于工程设计和施工参考;在推导稳定性公式基础上,探讨了管袋变形对裸坝结构稳定性影响,对变形因子作定性和定量分析,通过对多种管袋裸坝结构形式的一系列试验,获得管袋失稳方式和相应的变形参数;通过分析顶层管袋和斜坡管袋所受水平力、上抬力及抵抗力作用下影响管袋稳定性的变形因子,探讨管袋抵抗力变形因子与扁平管袋裸坝结构坡率之间的关系。

3.2 高含黏(粉)粒土料充填管袋高效脱水技术^[37]

我国沿海地区大量存在的含砂率为30%~50%、含黏量达到10%~20%或含粉量达到60%的高含黏(粉)粒土料,针对其充填管袋存在脱水固结速度慢的问题,通过管袋材料排水效率试验、充填泥

浆沉降规律试验以及室内单元管袋脱水模型试验相结合的方法对不同充填土料管袋脱水规律及高效脱水方法进行了系统研究,并通过现场大尺度管袋充填试验来验证高效脱水方法的可行性及实际效果。提出了一种充排结合、边充边排的管袋充填高黏(粉)粒含量土料高效脱水技术,有望使沿海围垦施工现场区域大量存在的高黏(粉)粒含量土料(黏粒含量高达20%或粉粒含量高达60%,含砂量低至30%)得到有效利用,避免异地取土,同时短施工工期,可较大幅度地节省工程造价。

3.3 管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失破坏^[38-39]

蓄淡水库管袋坝两侧下部由管袋构成,管袋之间的接缝处理十分重要,否则可能成为施工期或运行期坝芯吹填砂颗粒流失的通道,所以有必要针对管袋坝坝芯吹填砂沿袋间接缝流失破坏开展研究。

利用自行研制的管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失模型试验研究装置,进行了单向流和波浪作用下管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失试验;针对单向流工况,从水力学的角度定性分析了“槽沟式”颗粒流失的过程及机理,并建立了该工况下的稳定性判别标准;针对波浪工况,探究出了不同工况下坝芯吹填砂的运移规律,波浪水流作用下的坝芯吹填砂流失过程分为冲击、成拱、稳定3个阶段,以接缝内砂堆长度 $L_{堆}$ 为表征管袋坝袋间接缝内砂堆稳定性的目标参数,分析其稳定性影响因素,建立管袋坝坝芯吹填砂经袋间接缝流失稳定性的判定标准,并提出了相应的判定方法。

3.4 管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷^[40-41]

扁平管袋所用编织物会由于施工不慎造成侧壁破损,由此可能造成袋装砂体颗粒被渗流水流和波浪水流冲刷流失,所以有必要对单向流和波浪水流对管袋坝接缝侧壁损漏处充填砂的不同影响进行分别研究,以期工程实践提供参考。

自主研发了一套管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定性试验研究装置,并结合试验模型探索了相应的试验方法;利用该装置进行了单向流和波浪作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷试验,总结了冲刷过程及接缝管路内砂颗粒的运移规律。

单向流作用下的冲刷过程可以概括为扇面冲刷、出砂和稳定3个阶段,该工况下的冲刷稳定与否取决于最粗砂颗粒的起动流速与接缝破损口处引起的束窄水流流速的关系,破损口越大、水流流速越大、最粗砂颗粒起动流速越小,越容易发生冲刷破坏。

波浪作用下的冲刷过程分为冲击、成拱、稳定3个阶段;选择临界峰值水压力 P_c 作为表征管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定性的判定指标,通过比

较接缝内峰值水压力 P 与 P_0 值可以判断对应工况下的冲刷稳定性^[40-41]。

3.5 信息技术应用于管袋坝施工^[42-43]

从信息化角度考量当前管袋坝的施工尚处于目测或简单观测阶段,技术人员主要通过现象以经验判断施工过程的安全性,或者简单安置观测仪器,事后进行测试结果分析。由于信息技术(IT)是一门发展极快的科学技术,信息化技术应用于管袋坝工程将渐成趋势,可概括为通过设置各种测量元件和仪器,实时采集管袋坝施工现场数据并加以分析,依据分析结果对原设计和施工方案进行合理调整,并反馈到下一阶段的施工,充分保证工程的安全性、高效性与经济性。

结合东海某围垦管袋坝工程开展了信息化施工技术在管袋坝工程中的初步实践,包括监测指标选取、监测仪器与现场布设、监测数据分析与处理以及反馈与决策等内容。①管袋坝信息化施工技术主要分为4个流程:信息采集、信息分析处理、信息反馈以及控制与决策;②依据管袋坝工程自身特点与监测原则,管袋坝施工监测的主要指标包括波浪要素、潮位、基床面海流流速、风速、坝基变形和坝基渗流等;波浪要素、潮位等指标通过雷达波潮仪监测,风速可通过气象站采集,基床面海流流速的监测则采用电磁流速仪,坝基变形和坝基渗流则分别通过测斜仪和渗压计监测;此外,为保证监测可靠性,需因地制宜,选择合适的监测设备现场布设安装;③信息分析处理是管袋坝信息化施工技术的核心,对应每种监测指标,采用合适的计算方法,定量分析管袋坝的安全性,以此作为系统预警、控制的依据;④根据系统反馈和人工现场巡检发现的异常现象,采用专家系统分析问题,给出处理措施建议,以辅助现场施工技术人员处理决策。

3.6 深水抛投土工包沉落技术原理^[44-46]

深水区域填筑管袋坝通常需要抛投土工包作为管袋坝的基础,所以该项技术也可归属于管袋坝技术。国内多采用船舷翻板充填投放土工包,以试抛的方法粗略判断土工包落域,由于受土工包体积、充填率、滑落长度、翻板角度、水深和流速等因素的影响,抛投土工包的落点随机性很大,效率低下。因此,需要研究翻板抛投土工包的沉落机理,并总结出土工包落域的定量计算方法。

课题组对翻板投放的“块枕状”土工包的沉落规律进行了研究,主要内容包括:①利用力的平衡原理建立了沉落运动方程,并推导出了土工包的沉落速度、沉落轨迹的计算公式;②以实际工程中的施工参数为基础,开展了25组不同水深和流速组合工况

下的规律试验,并计算出每种工况下的阻力系数数值;③提出了一种阻力系数的计算模型。

首先,对翻板抛投的土工包进行了受力分析,提出了落点平面坐标的计算公式;其次,基于实际工程中的施工参数,在水槽中进行规律探索试验,研究了不同水深和流速条件下的土工包沉落规律,从而得到了土工包阻力系数的变化范围。分析试验结果发现:①浅水条件下由落点坐标公式得到的沉落轨迹与试验结果吻合度较好;②深水条件下土工包容易发生翻转,落点离散程度稍大。深入的试验研究表明,创新性的品字形三联体土工包由于其相对优越的水动力条件,沉落过程中较为平稳,沉落规律性更佳。

4 结 语

我国的管袋坝工程在过去的三四十年间,因陋就简,从无到有,逐渐发展成为河口、海岸基础设施工程的重要组成部分;筑坝区域从潮间露滩处到深水潮流复杂区域;施工操作从以人工为主到以装备为主,直至当前多装备集成完成深水区域复杂的水下控制施工;管袋坝匡围区域从小到大,以至能实现超大龙口的顺利合龙。

纵观管袋坝工程建设、工程技术及应用基础性研究的发展历程,可谓工程建设如火如荼,工程规模日趋扩大;伴随工程建设中技术难题的应对措施日益成熟,相应装备及工艺逐渐配套完善;应用性基础研究相对滞后,研究领域不够系统、深入,致使研究成果难以转化为工程实用的工艺技术。

管袋坝工程技术研究主要集中在施工期的建造技术和安全控制以及为服役期安全控制奠定可靠基础等方面,由于施工期环境的复杂性,使应用性基础研究面临较大的挑战性。尽管如此,在今后10~20年间,仍应在水深流急条件下管袋坝施工的装备及工艺技术、复杂环境下扁平管袋力学稳定及水力学稳定控制、欠理想充填材料的脱水技术、非常规充填材料的技术经济适用性、施工及服役期全过程管袋坝损伤破坏机理及安全评价、全过程的施工信息化技术等方面开展较为系统、深入的研究,并以付诸工程实施为目的。相信今后管袋坝工程在应用领域和应用性基础研究领域成果的相互促进下,将产生由量大到质强的巨大跨越,更着力贡献于国家战略目标的实现。

参考文献:

[1] 程琦. 上海石洞口电厂贮灰场筑坝新技术[J]. 电力建设, 1987(9): 36-37. (CHENG Qi. New technology for

- dam construction of ash storage field in Shanghai Shidongkou Power Plant[J]. Electric Power Construction, 1987(9):36-37. (in Chinese))
- [2] 迟景魁,白建颖,沈建强. 编织袋充填技术应用[C]//全国第三届土工合成材料学术会议论文集. 天津:天津大学出版社,1992:380-385.
- [3] 束一鸣,张乃国,史海珊,等. 长江口复杂软土地基上堤坝的设计:太仓市第二水厂蓄淡避咸水库围堤设计[J]. 水利水电科技进展,2003,23(6):33-36. (SHU Yiming, ZHANG Naigu, SHI Haishan, et al. Design of reservoir dike on complex soft foundation at Yangtze River Estuary; dike design for Taicang fresh water reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003,23(6):33-36. (in Chinese))
- [4] 陆忠民,吴彩娥. 上海长江水源大型水库规划建设关键技术[J]. 水利规划与设计,2013(12):1-6. (LU Zhongmin, WU Cai'e. Planning and construction key technologies of Yangtze River Estuary large reservoirs in Shanghai[J]. Water Resources Planning and Design, 2013(12):1-6. (in Chinese))
- [5] 楼启为. 长江口深水航道治理工程袋装砂堤心成型及砂被铺设施工工艺[J]. 水运工程,2006(B12):74-77. (LOU Qiwei. Formation of bagged sand dike core and placing of sand cushion [J]. Port & Waterway Engineering, 2006(B12):74-77. (in Chinese))
- [6] 吕妍. 长江南京以下 12.5m 深水航道明年交工[N]. 新华日报,2017-04-07(3).
- [7] 镇江长江河道管理处. 镇江市长江镇扬河段和畅洲左汉口门控制工程[J]. 江苏水利,2003(7):49. (Zhenjiang Yangtze River Management Office. Control engineering at left branch entrance of Hechang islet on Zhenyang segment of the Yangtze Rive in Zhenjiang City [J]. Jiangsu Water Resources, 2003(7):49. (in Chinese))
- [8] ZHU Lijun, WANG Jianzhong, CHENG Niansheng, et al, Settling distance and incipient motion of sandbags in open channel flows[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2004, 130(2):98-103.
- [9] 程泽坤. 洋山深水港区工程设计关键技术[J]. 水运工程,2008(10):23-29. (CHENG Zekun. Key technology for design of Yangshan Deepwater Port Project[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(10):23-29. (in Chinese))
- [10] 阮学成. 大型土工织物充灌袋在上海洋山深水港海堤建设中的应用[J]. 水运工程,2006(11):31-33. (RUAN Xuecheng. Application of large-size geotextile bags in dams' construction in Shanghai Yangshan Deepwater Port [J]. Port & Waterway Engineering, 2006(11):31-33. (in Chinese))
- [11] 董志良,刘嘉,朱幸科,等. 大面积围海造陆围堰工程关键技术研究及应用[J]. 水运工程,2013(5):168-175. (DONG Zhiliang, LIU Jia, ZHU Xingke, et al. Key technology research and application [J]. Water Resources Engineering, 2013(5):168-175. (in Chinese))
- [12] 冯良记. 中交集团中标香港机场填海拓地项目[EB/OL]. (2016-10-09) [2017-09-15]. http://www.cccnews.cn/zjxw/gsyw/201610/t20161009_50464.html.
- [13] 罗辉,卢超健. 综合岩土工程勘察方法在翔安国际机场填海工程中的应用[J]. 工程建设与设计,2016(3):52-56. (LUO Hui, LU Chaojian. Application of comprehensive geotechnical investigation method in reclamation project of Xiang'an International Airport [J]. Construction & Design for Project, 2016(3):52-56. (in Chinese))
- [14] 索安宁,张明慧,于永海,等. 曹妃甸围填海工程的环境影响回顾性评价[J]. 中国环境监测,2012,28(2):105-111. (SUO Anning, ZHANG Minghui, YU Yonghai, et al. Post project environmental retrospective evaluation of reclamation in Caofeidian [J]. Environmental Monitoring in China, 2012,28(2):105-111. (in Chinese))
- [15] 上海市人民政府. 临港地区中长期发展规划[Z]. 上海:上海市人民政府,2013.
- [16] 王义刚,陈橙,黄惠明. 江苏省条子泥滩涂匡围相关问题研究[J]. 浙江水利科技,2012(1):4-8. (WANG Yigang, CHEN Cheng, HUANG Huiming. Beach reclamation related issues of Tiaozini in Jiangsu [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2012(1):4-8. (in Chinese))
- [17] 郭小龙,李志军. 特高特大型充砂长管袋围堰在红谷沉管隧道工程中的应用[J]. 隧道建设,2016,36(9):1147-1154. (GUO Xiaolong, LI Zhijun. Application of large-scale sandbag cofferdam to Honggu immersed tunnel in Nanchang [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(9):1147-1154. (in Chinese))
- [18] 黄明毅,马俊. 上海国际航运中心洋山港一期工程北围堤设计[J]. 上海建设科技,2003(4):8-9. (HUANG Mingyi, MA Jun. The north embankment design of Yangshan Port First-Phase Project in Shanghai International Shipping Center [J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2003(4):8-9. (in Chinese))
- [19] 刘若元,张剑. 预制袋装砂在洋山深水筑堤工程中的应用[J]. 水运工程,2007(6):117-120. (LIU Ruoyuan, ZHANG Jian. Application of prefabricated sandbags in deep water dike engineering at Yangshan [J]. Port & Waterway Engineering, 2007(6):117-120. (in Chinese))
- [20] 洋山同盛港口建设有限公司. 洋山港深水建港技术[J]. 中国水运,2007(9):6-8. (Yangshan Tongsheng Port Construction Co., Ltd. Technology of deep-water construction in Yangshan Port [J]. China Water Transport, 2007(9):6-8. (in Chinese))
- [21] 张浩栋,谭必五. 超长土工织物充灌袋对拉筑堤施工工艺[J]. 中国港湾建设,2017,37(5):73-76. (ZHANG Haodong, TAN Biwu. The opposite-pulling construction technology of long geotextile bag in embankment [J].

- China Harbour Engineering, 2017, 37 (5): 73-76. (in Chinese))
- [22] 陆忠民,吴彩娥. 青草沙水库堤坝工程关键技术研究与实践[J]. 人民长江, 2013, 44 (21): 28-31. (LU Zhongmin, WU Cai'e. Key technology and practice of dike engineering design of Qingcaosha Reservoir [J]. Yangtze River, 2013, 44(21): 28-31. (in Chinese))
- [23] LIN Gang, SHU Yiming, LÜ Xin, et al. Laboratory studies on wave force of coastal structures made of flat geotubes [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(6): 820-825.
- [24] ZHU Chaorong, SHU Yiming, JIANG Junhong. Study on the experiment of stability of unarmored flat geotube dike under wave action [C]//LI Guangxin, CHEN Yunmin, TANG Xiaowu. Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008: 625-629.
- [25] 刘海笑,束一鸣,王晓娟. 管袋堤坝在深水水流作用下的稳定性试验[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 67-69. (LIU Haixiao, SHU Yiming, WANG Xiaojuan. Experimental study on geotube embankment stability with deep currents[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 67-69. (in Chinese))
- [26] 应强,张岱峰,朱立俊,等. 沙袋充填度与稳定性的试验研究[J]. 泥沙研究, 2003(2): 44-47. (YING Qiang, ZHANG Daifeng, ZHU Lijun. An experimental study on the percentage filling and the stability of geo-textile sandbag [J]. Journal of Sediment Research, 2003 (2): 44-47. (in Chinese))
- [27] SHU Yiming, YANG Wei, WU Liangjin, et al. Field experiment for dike soil at Yangtze River Estuary [C]// Proceedings of the International Symposium on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, 2-4 June, 2004, Osaka, Japan. Osaka: Yodogawa Kogisha, 2004: 457-461.
- [28] 谢荣星,何宁,周彦章,等. 土工织物充填泥袋筑堤现场试验研究[J]. 工程勘察, 2013, 41(6): 6-11. (XIE Rongxing, HE Ning, ZHOU Yanzhang, et al. In-situ experimental study on the embankment with mud-filled geotextile bags [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(6): 6-11. (in Chinese))
- [29] 常广品. 管袋充填高黏(粉)粒含量土料高效脱水试验研究[D]. 南京:河海大学, 2013.
- [30] 付海峰. 模袋固化土海上围埝建造方法及理论研究[D]. 天津:天津大学, 2006.
- [31] 刘伟超. 土工织物管袋充填特性及计算理论研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [32] 邱长林,闫澍旺. 大尺度土工织物充填袋受力特性分析[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 92-97. (QIU Changlin, YAN Shuwang. Mechanical behavior analysis of large scale geotextile bags [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 92-97. (in Chinese))
- [33] 闫玥,闫澍旺,邱长林,等. 土工织物充灌袋的设计计算方法研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 327-330. (YAN Yue, YAN Shuwang, QIU Changlin, et al. Design and calculation methods of geotextile tubes filled with soil slurry [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 327-330. (in Chinese))
- [34] 刘欣,雷国辉,张坤勇. 考虑外部接触面摩擦的堆叠土工管袋的力学分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4281-4291. (LIU Xin, LEI Guohui, ZHANG Kunyong. Mechanical analysis of stacked geosynthetic tubes with external frictional interface [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11): 4281-4291. (in Chinese))
- [35] 林刚. 扁平管袋裸坝结构在波浪作用下的动力稳定性研究[D]. 南京:河海大学, 2012.
- [36] 林刚,束一鸣,毛文龙. 扁平管袋裸坝基于波浪作用的稳定性公式推导[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1): 12-18. (LIN Gang, SHU Yiming, MAO Wenlong. Derivation of structural stability formulae for unshield flat geotubes under wave action [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 12-18. (in Chinese))
- [37] 吴海民,束一鸣,常广品,等. 高含黏(粉)粒土料充填管袋高效脱水技术[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1): 19-27. (WU Haimin, SHU Yiming, CHANG Guangpin, et al. Efficient dewatering technology of geotextile tubes filled with high clay (silt) particle-content soil [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 19-27. (in Chinese))
- [38] 蔚成亮,束一鸣,曹明杰,等. 管袋坝芯砂体沿袋间接缝流失的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(10): 1231-1238. (WEI Chengliang, SHU Yiming, CAO Mingjie, et al. Experimental research between on core sand losses through seam tubes of geotube dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(10): 1231-1238. (in Chinese))
- [39] 满晓磊,束一鸣,曹明杰,等. 管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1): 28-35. (MAN Xiaolei, SHU Yiming, CAO Mingjie, et al. Experimental study on dam core sand scouring through seams between tubes of a geotube dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 28-35. (in Chinese))
- [40] 满晓磊,束一鸣,李少鹏,等. 管袋坝接缝侧壁损伤冲刷试验方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊1): 238-243. (MAN Xiaolei, SHU Yiming, LI Shaopeng, et al. Experimental apparatus and methods for scour of seams between tubes of punctured geotube dam [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (Sup1): 238-243. (in Chinese))

(下转第 18 页)

- embankment[J]. Yellow River, 2016, 38(7): 114-118. (in Chinese))
- [3] RESTALL S J, JACKSON L A, HEERTEN G, et al. Case studies showing the growth and development of geotextile sand containers; an Australian perspective[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, 20(5): 321-342.
- [4] ALVAREZ E, RUBIO R, RICALDE H. Beach restoration with geotextile tubes as submerged breakwaters in Yucatan, Mexico [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(4): 233-241.
- [5] FOWLER J. Geotextile tubes and flood control [J]. Geotechnical Fabrics Report, 1997, 15(5): 28-37.
- [6] 陆忠民. 土工合成材料在潮汐河口地区水库建设中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 39-41. (LU Zhongmin. Application of geosynthetics to reservoir construction in tidal estuary area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 39-41. (in Chinese))
- [7] 张俊平. 土工织物充填袋在黄骅神华港一期工程中的应用[J]. 中国港湾建设, 2002(2): 46-48. (ZHANG Junping. Use of stuffed geotextile container in phase one of Shenhua Port in Huanghua [J]. China Harbour Engineering, 2002(2): 46-48. (in Chinese))
- [8] 吴海民, 束一鸣, 常广品, 等. 高含黏(粉)粒土料充填管袋高效脱水技术[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1): 19-27. (WU Haimin, SHU Yiming, CHANG Guangpin, et al. Efficient dewatering technology of geotextile tubes filled with high clay (silt) particle-content soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 19-27. (in Chinese))
- [9] RECIO J, OUMERACI H. Effect of deformations on the hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2007, 25(4/5): 278-292.
- [10] SHIN E C, OH Y I. Analysis of geotextile tube behaviour by largescale field model tests [J]. Geosynthetics International, 2003, 10(4): 134-141.
- [11] RECIO J, OUMERACI H. Process based stability formulae for coastal structures made of geotextile sand containers [J]. Coastal Engineering, 2009, 56(5/6): 632-658.
- [12] 朱朝荣. 管袋堤坝施工期稳定性试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [13] 易进蓉, 黄荣. 管袋堤坝波浪作用下波浪压力的数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(6): 97-99. (YI Jinrong, HUANG Rong. Numerical simulation of wave pressure under waves of geo-tube dam [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(6): 97-99. (in Chinese))
- [14] 戴林军, 束一鸣, 林刚. 管袋结构在波浪作用下的稳定尺度试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(1): 56-58. (DAI Linjun, SHU Yiming, LIN Gang. Stability scale test of geotube structure under wave action [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(1): 56-58. (in Chinese))
- [15] 满晓磊, 束一鸣, 曹明杰, 等. 管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1): 28-35. (MAN Xiaolei, SHU Yiming, CAO Mingjie, et al. Experimental study on dam core sand scouring through seams between tubes of a geotube dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 28-35. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-09-15 编辑: 熊水斌)

(上接第 11 页)

- [41] 满晓磊, 束一鸣, 李少鹏, 等. 管袋坝袋间接缝侧壁漏冲刷模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1): 36-43. (MAN Xiaolei, SHU Yiming, LI Shaopeng, et al. Experimental study on scouring along seams between tubes of a punctured geotube dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 36-43. (in Chinese))
- [42] 刘欣欣, 束一鸣, 吴兴元, 等. 河口海岸管袋裸坝信息化施工技术研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊1): 181-188. (LIU Xinxin, SHU Yiming, WU Xingyuan, et al. Information construction technology for flat geotube embankments in estuarial and coastal areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup1): 181-188. (in Chinese))
- [43] 刘欣欣, 束一鸣, 顾克. 管袋坝信息化施工设计与初步实践[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1): 44-49. (LIU Xinxin, SHU Yiming, GU Ke. Design for informatization construction technology in geotube embankment engineering and its preliminary practices [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 44-49. (in Chinese))
- [44] 刘欣欣. 深水滑抛土工包沉落机理与棱体成型研究[D]. 南京: 河海大学, 2017.
- [45] LIU Xinxin, SHU Yiming, GU Ke, et al. Settling mechanism for ternary-type geocontainers dumped from a bevel [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2017, 143(5): 04016024-1-04016024-12.
- [46] 刘欣欣, 束一鸣, 顾克, 等. 翻板抛投土工包沉落轨迹与落域[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1): 50-54. (LIU Xinxin, SHU Yiming, GU Ke, et al. Settling trajectories and placement for geocontainers dumped from a bevel [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 50-54. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-10-13 编辑: 熊水斌)