

DOI: 10.11779/CJGE201503007

# 大型疏浚土充填袋筑堤技术研究

何 宁<sup>1</sup>, 沈雪松<sup>2</sup>, 周彦章<sup>1</sup>, 杨守华<sup>1</sup>, 朱群峰<sup>1</sup>, 黄康理<sup>1</sup>, 高长胜<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 连云港港 30 万吨航道建设指挥部, 江苏 连云港 222046)

**摘 要:** 为缓解砂石资源紧缺、保护生态环境、降低工程造价和高效利用航道疏浚土, 以大型疏浚土充填袋筑堤技术应用于连云港港徐圩港区围堤建设为工程实例, 通过稳定性分析计算、离心模型试验开展了大型疏浚土充填袋筑堤技术的理论可行性研究, 并结合原型试验提出了新型配套施工工艺, 形成了相关成套技术。研究表明: 袋体土工织物加筋作用良好, 堤体及地基稳定性能够满足安全设计; 控制疏浚土充填料初始含水率、采用泥浆泵与浓浆泵串联接力的施工工艺, 能够提升大型疏浚土充填袋筑堤施工效率, 满足正常围堤建设强度需要; 低含水率疏浚土充填料排水较快、袋体实际有效厚度较为理想、堤体地基较为稳定, 大型疏浚土充填袋筑堤具有其技术可行性。

**关键词:** 疏浚土; 充填袋; 筑堤技术; 稳定性分析; 原型试验

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)03-0440-06

**作者简介:** 何 宁(1969-), 男, 江西高安人, 教授级高级工程师, 主要从事软土地基处理技术和岩土工程安全监测检测的理论研究与实践。E-mail: nhe@nhri.cn。

## Embankment construction technology using large geotextile bags filled with dredged soil

HE Ning<sup>1</sup>, SHEN Xue-song<sup>2</sup>, ZHOU Yan-zhang<sup>1</sup>, YANG Shou-hua<sup>1</sup>, ZHU Qun-feng<sup>1</sup>, HUNAG Kang-li<sup>1</sup>,  
GAO Chang-sheng<sup>1</sup>

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Construction Headquarters of Lianyungang 300,000-Ton Waterway, Lianyungang 222046, China)

**Abstract:** The application of embankment construction technology using large geotextile bags filled with dredged soil in Xuwei port area of Lianyungang is discussed in order to solve the lack of rock and sand resources, to protect the eco-environment, to reduce the project cost and to utilize the dredged soil from channel efficiently. The theoretical feasibility of this technology has been proved by numerical modeling of stability and centrifugal model tests. The complete new construction technology is proposed based on the prototype tests. During the construction and operation periods, the embankment construction using large geotextile bags filled with dredged soil and the embankment foundation stability satisfy the safety requirements. The water pressure in the geotextile bags dissipates quickly in the whole construction process. The compression and ratio of filling bags can satisfy the requirement of embankment construction. The stress of geotextile bags is less than the strength of its allowable range. The geotextile bags can be maintained completely.

**Key words:** dredged soil; filling bag; embankment construction technology; stability analysis; prototype test

## 0 引 言

围海造陆、航道工程等海堤建设需要填筑大量砂石, 随着全社会环保意识的日益增强, 国家政策已不允许大规模开山采石, 筑堤工程所需的砂石料资源难以满足要求。同时, 沿海航道疏浚工程中产生的大量疏浚土被弃置, 开展利用航道疏浚土作为筑堤材料的研究对于解决资源短缺和环境制约等问题具有重要工程实践价值。

现行国家及行业标准中有关充填袋筑堤技术的应用, 均规定应选用含泥量小于 10% 的砂性土作为充

填材料, 中国沿海航道疏浚土的天然含泥量大多超过该技术限制。若直接采用高含泥量疏浚土作为充填袋筑堤填筑材料, 将会因疏浚土充填料渗透性差、排水时间长、固结较慢, 袋体结构压缩率大、强度低, 而影响围堤结构稳定性及运营安全。在砂石料资源紧缺、环保政策限制, 航道疏浚土大量弃置却又难以利用的工程背景下, 有必要开展包括理论分析计算、室内离

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2012AA112509);  
江苏省科技支撑计划项目 (BE2011718)

**收稿日期:** 2014-07-18

心模型试验及现场原型试验等在内的有关大型疏浚土充填袋筑堤的系统性即成套技术研究,以满足沿海围堤建设的工程需要。

在采用高黏粒含量充填材料的土工织物充填袋技术应用研究方面,田庆利等<sup>[1]</sup>开展了以固化水泥土为材料的大型充泥袋堤心结构在天津港南疆围堰工程中的应用研究;孟凡琳<sup>[2]</sup>介绍了充泥袋在杭州湾北岸漕泾围海造陆工程中封堵龙口的应用;马燕<sup>[3]</sup>开展了黄骅港引堤工程大型充泥袋结构的应用研究;在袋体受力方面,Leshchinsky等<sup>[4]</sup>研究了由数块土工织物缝在一起所形成的封闭增压泥浆的土工织物充填袋,提出了计算充填袋几何形状和周向应力、轴向应力的分析方法;邱长林等<sup>[5-6]</sup>通过大尺度扁平土工充填袋在充填时力学特性和粉土沉积特性分析,提出了当泥浆重度随深度线性增加时充填袋形状和力学特性的分析方法;Seay等<sup>[7-8]</sup>、Plaut等<sup>[9-10]</sup>、Shin等<sup>[11]</sup>和Namias<sup>[12]</sup>采用有限元法对充填袋变形和受力特性进行了分析研究。

上述成果分别从高黏粒含量大型充填袋筑堤技术的某些方面开展了相关研究,为大型疏浚土充填袋筑堤技术的应用及理论研究提供了基础。本文以大型疏浚土充填袋筑堤技术应用于连云港港徐圩港区围堤建设为工程实例,通过稳定性分析计算、室内离心模型试验论证了大型疏浚土充填袋筑堤技术的理论可行性,并结合现场原型试验研究提出了合理的配套施工工艺,形成了大型疏浚土充填袋筑堤的系统性即成套技术成果,对于缓解砂石资源紧缺、降低工程造价、保护生态环境以及典型淤泥质海岸航道疏浚土高效利用等具有重要的理论价值和实践意义。

## 1 工程概况

连云港港30万吨级航道全长71 km,航道规划由外航道内段、徐圩航道、外航道外段和推荐航线组成。

作为典型淤泥质浅滩海岸,连云港港30万吨级航道工程建设场区砂石资源较为缺乏,其中航道二期准备工程新建#3围堤长831 m、#4围堤长1557 m,徐圩港区二港池港区围堤反滤压载结构长2341 m,设计为充填袋斜坡堤和充砂袋反滤压载结构,共需填筑用砂约48.50万m<sup>3</sup>。连云港港徐圩港区10万吨级新开辟航道长24.9 km,总量超过8000万m<sup>3</sup>的航道疏浚土将做吹填造陆和外抛弃置处理,航道疏浚土及整治废弃土资源极为丰富。

根据前期工勘成果,连云港地区④层粉质黏土具有较好的颗粒组成及物理力学性质(如表1),疏浚该层产生的航道疏浚土可作为充填材料采用大型充填袋筑堤技术用于连云港港30万吨级航道围堤等堤体建设。但本地区④层粉质黏土厚度较薄,疏浚该层产生的航道疏浚土将不可避免的扰动并夹杂临近的高含泥量淤泥层,使得疏浚土含泥量超过土工织物充填袋技术规范中充填材料含泥量小于10%的技术限制。为解决航道围堤建设筑堤材料难题,连云港港30万吨级航道建设指挥部、南京水利科学研究院联合组织开展了有关大型疏浚土充填袋筑堤的系统性即成套技术研究工作,主要包括理论分析计算、室内离心模型试验及现场原型试验等内容。现场原型试验断面如图1所示。

## 2 大型疏浚土充填袋筑堤稳定性分析

### 2.1 理论分析计算

根据徐圩现场原型试验断面设计,利用加筋土准黏聚力原理,将袋体织物抗拉性能等效为土体强度、充填袋堤体转化为均质材料,采用Bishop法计算大型疏浚土充填袋筑堤施工稳定性,并分析袋体织物抗拉强度、堤体坡度对大型疏浚土充填袋堤体结构整体稳定性的影响。稳定性分析中堤体地基为20 m厚的①-2淤泥层;堤体下部为2层砂被护底,上覆2层软体排,堤体上部为8层疏浚土充填袋结构,设计低水位0.54

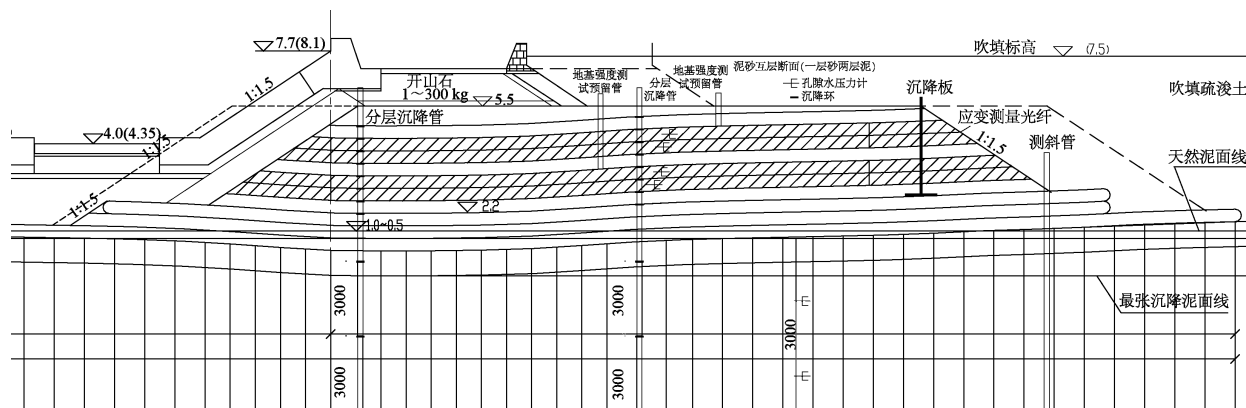


图1 徐圩试验段原型试验断面图

Fig. 1 Test section of embankment in Xuwei port area of Lianyungang

表 1 ④层粉质黏土层原状土土性参数表  
Table 1 Parameters of undisturbed soil of silty clay layer

层号	岩土名称	指标类别	天然含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		天然孔隙比 <i>e</i>	76 克锥稠度				固结快剪		黏粒含量( <i>M<sub>c</sub></i> )<0.005 /%	标准贯入试验 <i>N</i> /击
				天然 $\rho$	干燥 $\rho_d$		液限 $w_L$ /%	塑限 $w_p$ /%	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)		
④	粉质黏土	最大值	27.8	2.09	1.73	0.765	33.5	18.6	14.9	0.98	78	26.0	36.1	8.6
		最小值	20.7	1.97	1.54	0.571	23.1	12.2	10.1	0.62	28	11.7	15.1	6.4
		平均值	23.7	2.04	1.65	0.653	26.6	14.5	12.1	0.77	50	18.8	23.1	7.5

m,天然泥面线 0.0 m。因砂被及软体排所使用的袋体织物及砂料的强度均高于充填泥袋,将砂被及软体排作为充填泥袋堤体的一部分,该简化分析将使结果偏于安全。地基土①-2 淤泥层的强度参数参考工勘实测值,黏聚力 12 kPa,摩擦角 6°,重度 16.6 kN/m<sup>3</sup>。因施工期内每层袋体充填结束后初期,袋体内充填料呈泥浆状态,尚未形成土体结构,强度较低、承载力较小,为工程安全考虑,可认为充填料不存在强度,仅由袋体织物的抗拉作用提供承载力,即充填料的黏聚力和摩擦角均为零,充填料重度取值 16 kN/m<sup>3</sup>,袋体织物抗拉强度(断裂强度)按照设计参数取值 50 kN/m,垂向渗透系数 1.0×10<sup>-3</sup> cm/s,防老化强度保持率(168 h)≥70%。

由此计算得徐圩试验段原型断面施工期稳定安全系数为临海侧  $F_s=1.744$ ,背海侧  $F_s=1.686$ ,能够说明徐圩试验段大型疏浚土充填袋原型堤体施工期稳定性满足要求。采用上述方法和参数,计算得到不同袋体织物抗拉强度下堤体稳定安全系数计算结果如图 2,不同坡度堤体的安全系数结果如表 2。计算结果表明,徐圩试验段大型疏浚土充填袋筑堤技术形成堤体结构,袋体织物抗拉强度和堤体坡度均弱于设计指标要求时,其稳定安全系数  $F_s>1.4$ ,施工期堤体仍处于稳定状态。

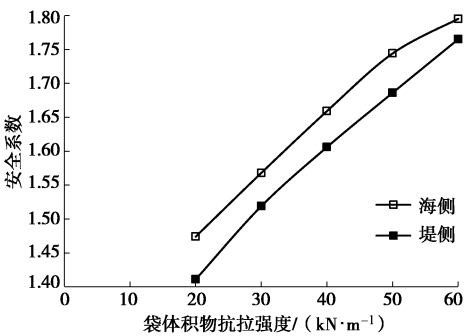


图 2 袋体土工布抗拉强度对堤体稳定的影响

Fig. 2 Effects of strength of geotextile bags on embankment stability

2.2 离心模型试验研究

按照徐圩现场原型试验断面设计,通过提高离心加速度的方法研究大型疏浚土充填袋堤体结构与地基

的整体破坏型式。当充填料为黏粒含量为32.5%的疏浚土时,离心机加速度小于59.62g时,堤顶中心、堤肩、坡脚泥面的沉降均随加速度的增加而以一定斜率增大;当离心机加速度大于59.62g时,堤顶中心的沉降随加速度的变化斜率未变,堤肩、坡脚泥面的沉降随加速度的变化斜率发生改变,堤肩的沉降随加速度的变化斜率增大,坡脚泥面随加速度的增加而缓慢隆起(图3)。因此,当离心机加速度等于59.62g时,充填袋堤体与地基开始出现整体失稳破坏迹象,根据开始出现整体失稳破坏时的加速度(59.62g)与设计加速度(50g)之比可以确定堤体稳定安全系数为  $F_s=1.19$ 。

表 2 堤体坡度对堤体稳定的影响

Table 2 Effects of slope on embankment stability

坡度	安全系数	
	临海侧	背海侧
1 : 0.5	1.703	1.668
1 : 1.0	1.718	1.673
1 : 1.5	1.744	1.686
1 : 2.0	1.768	1.702

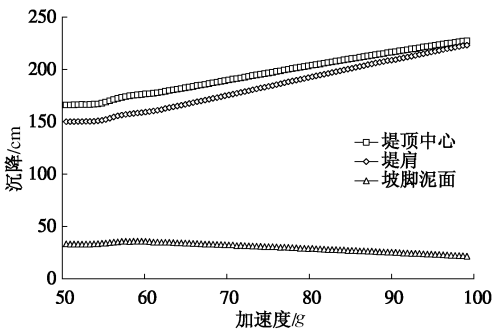


图 3 大型疏浚土充填袋筑堤离心模型破坏试验中沉降与离心加速度关系曲线

Fig. 3 Relationship between settlement and centrifugal acceleration in centrifugal model tests on embankment construction using large bags filled with dredged soil

离心模型试验结果表明以徐圩原型试验断面的堤体结构和袋体织物强度等相同的设计指标,及充填料黏粒含量高达 32.5%的疏浚土,采用大型疏浚土充填袋技术形成的疏浚土充填袋堤芯结构能满足整体稳定要求。

根据设计和实际情况,疏浚土充填袋堤芯结构完成后,临海和背海侧均设置有抛石镇压平台和块石等材料的护面结构,临海侧还设置有扭王字块防波体,此类结构将提高大型疏浚土充填袋堤体的稳定性和抗风浪冲刷能力,理论计算分析和离心模型试验成果表明大型疏浚土充填袋筑堤技术的施工期和运营期整体稳定性均能够满足堤体稳定要求。

### 3 大型疏浚土充填袋筑堤原型试验研究

#### 3.1 原型试验概况

大型疏浚土充填袋筑堤现场原型试验位于连云港徐圩港区规划西边界西护岸西段,西护岸西段作为徐圩港区西侧永久性防护建筑物,为一线防汛大堤,施工期作为吹填围堰和建设期道路。依托西护岸西段(桩号 XX0+440 至 XX0+500)设计试验段总长 60 m,均布 4 个试验方案断面,充填料采用含泥低的航道疏浚土(含泥量 10.4%,简称“疏浚砂”)和含泥量高的疏浚土(含泥量控制在 20%左右,简称“疏浚土”),袋体织物采用 230 g/m<sup>2</sup> 的机织布,单层充填袋的经向、纬向断裂强度≥50 kN/m。试验断面布置方案及其结构型式如表 3,每层袋体的长度均为 15 m,袋体宽度按照 1:1.5 的坡比,自下而上相应的缩短其每层袋体宽度。

表 3 试验段方案表

Table 3 Schemes of field tests

方案	桩 号	长度/m	方案内容
A	XX0+485~+500	15	一层砂二层土
B	XX0+455~+470	15	一层砂一层土
C	XX0+470~+485	15	一层砂四层土
D	XX0+440~+455	15	纯疏浚土

#### 3.2 充填袋堤体施工加载

根据原型试验方案设计,自 2011 年 10 月 12 日施工开始至 11 月 15 日结束,共完成 4 个试验方案断面,每断面共 8 层充填袋,各断面填筑厚度约 5.0 m,利用疏浚土筑堤总方量约 5156 m<sup>3</sup>。根据实测及统计结果,疏浚土充填袋堤体施工加载过程曲线如图 4。

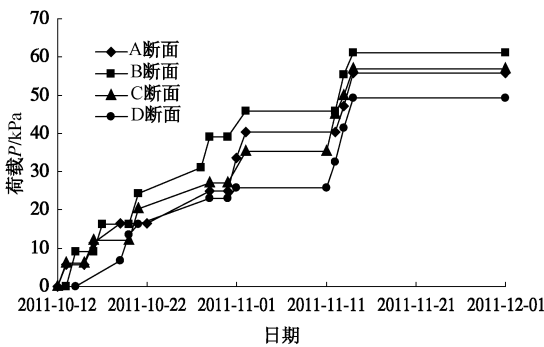


图 4 原型试验段施工加载过程曲线

Fig. 4 Loading curves of field tests

原型试验中通过控制疏浚土充填料初始含水率,采用泥浆泵与浓浆泵串联接力的施工工艺进行充填,泥浆泵置于存放低含水率的疏浚土泥浆池(仓)中,抽吸池中搅拌好的充填料并送入浓浆泵,大功率浓浆泵将含水率低的牙膏状疏浚土充填料通过刚性管道送至充填袋袖口进行袋体充填。现场原型试验施工期共计 36 d,从加载过程线可以看出,施工过程分为 3 个过程:10 月 12 日~11 月 2 日,充填各断面第 1~5(或 6)层,施工速度较快;11 月 2 日~11 日,因受降雨和海上风浪影响,运泥船回港避风,无法运送疏浚土充填料,施工暂停;11 月 11 日~15 日,充填各断面第 6(或 7)~8 层,并加快施工进度,施工速度较快。原型试验实际有效施工时间 26 d,实际施工效率与充填砂袋筑堤的施工效率相当,表明前期研究提出的施工工艺可以保证大型疏浚土充填袋筑堤技术的施工效率和围堤建设强度需要。

#### 3.3 充填袋内水压力变化

现场原型试验中,大型疏浚土充填袋施工开始后在袋体内埋设振弦式孔隙水压力计,以观测袋体内的充填水压力和上部加载时袋体内水压力消散变化过程,以典型试验方案 B 断面袋体内水压力消散变化过程线为例(图 5)。

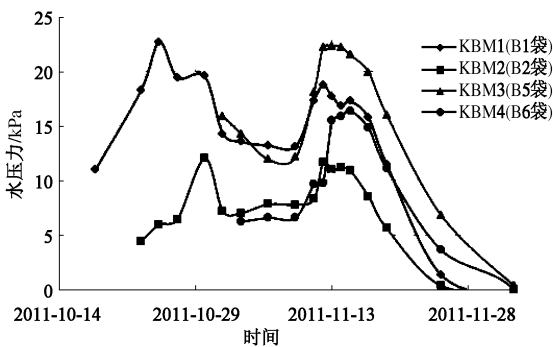


图 5 B 断面充填袋内水压力过程线

Fig. 5 Water pressure curves of filled bags with dredged soil

典型试验方案 B 断面袋体内水压力观测结果表明:充填施工时,“疏浚土”充填袋(B1、B5 袋)袋体内形成的水压力为 10~15 kPa,“疏浚砂”充填袋(B2、B6 袋)袋体内形成的水压力约为 5 kPa;上部加载时,高含泥量“疏浚土”充填袋体内水压力增量明显高于低含泥量的“疏浚砂”充填袋体内的水压力增量。原型试验中采用泥浆泵与浓浆泵串联接力的施工工艺,可以较好的控制疏浚土充填料的初始含水率,施工后袋体内形成的充填水压力得到较好控制,且利于上部加载时袋体内水压力的消散。施工结束 20 d 左右,B 断面袋体内水压力基本消散完成,有利于袋体内疏浚土充填料的排水固结和强度增长,能够保证大

型疏浚土充填袋堤体的整体稳定性。

3.4 充填袋体压缩特性

现场原型试验大型疏浚土充填袋筑堤施工过程中采用分层沉降监测技术,在每层袋体表面安装沉降磁环,以监测充填袋体的沉降和压缩变形。根据分层沉降监测资料计算得到C断面各层充填袋体的压缩率变化过程线(图6)。

上覆荷载作用下,大型疏浚土充填袋体内水被挤压排出、袋体压缩,袋体内水排出较快,袋体压缩主要发生在上部加载过程中,每级加载结束后袋体大部分压缩量很快完成。上覆荷载增加,袋体压缩量相应增加,但压缩量的增长速率随上覆荷载的增加而降低。上覆6层袋体荷载全部施加完成后,C断面第2层袋体最终压缩率为21%,断面完成后C断面4层充填袋体平均压缩率为16%,实测得到C断面充填袋体压缩后的实际厚度约为初始高度的80%。

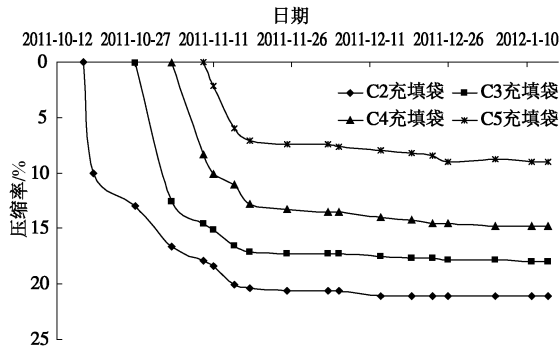


图6 C断面充填袋体压缩率过程线

Fig. 6 Compression ratio of filled bags with dredged soil in section C

大型疏浚土充填袋筑堤技术采用控制疏浚土充填料初始含水率的施工工艺,能够保证充填袋堤结构的实际有效厚度,提升该筑堤技术的经济性能。分层沉降监测成果也表明充填体的压缩变形稳定较快,有利于袋体内疏浚土充填料固结和强度增长,能够保证大型疏浚土充填袋堤体的整体稳定性。

3.5 充填袋体受力及变形

现场原型试验中,采用分布式传感光纤测量技术以监测施工期间土工织物袋体的受力分布及变形情况(详见另文),在袋体底面(或顶面)缝制安装一条分布式传感光纤,引至观测平台后接入瑞士产DiTest光纤解调仪,测得上部充填袋施工加载时典型袋体的受力分布及变形情况(图7),以D断面第2层袋体底面土工织物受力情况为例。

上部加载一层袋体后,D断面第2层袋体底面土工织物最大受力4 kN/m;加载两层袋体后,最大受力10.6 kN/m。后期因上部充填袋继续施工加载,使得光

纤被拉伸、超出其受力极限而损坏,无法继续测量,以前期加载测值推算该断面全部八层充填袋施工加载完成后,底部袋体织物受力约40 kN/m,仍小于袋体土工织物的设计抗拉强度50 kN/m。

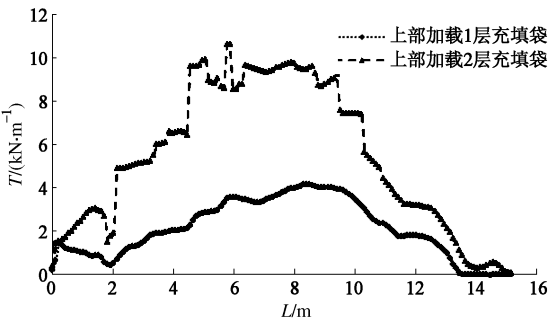


图7 D断面第2层袋体底面受力分布图

Fig. 7 Stress distribution at bottom of 2nd layer of section D

袋体受力及变形监测成果表明,设计选用的袋体土工织物的抗拉强度可以满足加筋和堤体结构稳定的要求,施工期和运营期间巡视检查未发现袋体土工织物发生拉裂破坏现象,能够说明由于袋体土工织物加筋作用良好,保证了充填高含泥量航道疏浚土的大型疏浚土充填袋筑堤技术得以成功实施。

3.6 堤体软土地基稳定性分析

现场原型试验中B,C两个试验断面临海侧埋设测斜管,采用伺服加速度式活动测斜仪对地基水平侧向位移进行监测,以实时监控分析施工期及运营期间大型疏浚土充填袋堤体软土地基的稳定性,B断面地基水平侧向位移监测成果如图8。

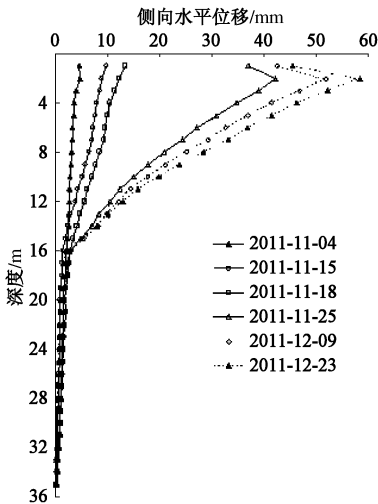


图8 B断面地基水平侧向位移

Fig. 8 Horizontal displacements in foundation of section B

大型疏浚土充填袋堤体地基水平侧向位移主要发生于堤体下部淤泥质软土层,11月2日前,第5层袋体充填完成后地基侧向位移较小;11月11至15日,

其上部3层充填袋施工加载较快,地基软土深层水平位移开始较快发展,11月25日后逐渐减速。最大水平位移速率为11月15至25日3.5 mm/d、11月25日至12月9日0.7 mm/d、12月9至23日0.5 mm/d。施工加载结束后,地基水平位移发展逐渐趋于稳定。

采用大型疏浚土充填袋筑堤技术建设完成的徐圩原型试验段完工后已正常运营超过两年,堤体各方面性能与两端抛石堤始终保持良好,说明连云港港徐圩港区利用高含泥量航道疏浚土,采用大型疏浚土充填袋技术筑堤取得了成功,具有其技术可行性,能够实现典型淤泥质海岸地区高效利用航道疏浚土及整治废弃土资源的社会、经济及环保目标。

## 4 结 论

为实现缓解砂石资源紧缺、降低工程造价、保护生态环境以及典型淤泥质海岸航道疏浚土高效利用等目标,本文以大型疏浚土充填袋筑堤技术应用于连云港港徐圩港区围堤建设为工程实例,通过稳定性分析计算、室内离心模型试验开展了大型疏浚土充填袋筑堤技术的理论可行性研究,并结合现场原型试验研究提出了合理的配套施工工艺,形成了大型疏浚土充填袋筑堤的系统性即成套技术成果,主要结论如下:

(1)通过理论分析计算、离心模型试验的大型疏浚土充填袋筑堤稳定性分析结果表明,袋体织物可以起到较好的加筋作用,施工期和运营期堤体及地基稳定性能够满足安全设计。

(2)通过控制疏浚土充填料初始含水率,采用泥浆泵与浓浆泵串联接力的施工工艺,能够提升充填高含泥量航道疏浚土的大型充填袋筑堤的施工效率,可以保证该技术满足正常围堤建设强度需要。

(3)原型试验中充填袋内水压力变化、袋体压缩特性、袋体织物受力及变形、堤体地基稳定性监测分析成果表明,低含水率疏浚土充填料排水较快、袋体实际有效厚度较为理想、土工织物袋体加筋作用良好、堤体地基较为稳定,大型疏浚土充填袋筑堤具有其技术可行性,能够实现高效利用航道疏浚土及整治废弃土资源的社会、经济及环保目标。

## 参考文献:

[1] 田庆利, 李宝华, 祝业浩. 大型固化土充泥模袋的研究及在天津港南疆围堰工程中的应用[J]. 中国港湾建设, 2002(4): 50 - 53. (TIAN Qin-li, LI Bao-hua, ZHU Ye-hao. Research on large geotextile tubes containing hardened cement-soil mixture and its use in cofferdams in Nanjiang

area of Tianjin port[J]. China Harbor Engineering, 2002(4): 50 - 53. (in Chinese))

[2] 孟凡琳. 充泥管袋在围海造地工程封堵龙口中的应用[J]. 山西建筑, 2007(19): 364 - 368. (MEN Fan-lin. Application of mud-bag in sea land-creation project sealing entrance[J]. Shanxi Architecture, 2007(19): 364 - 368. (in Chinese))

[3] 马 燕. 大型充泥袋结构在黄骅港一期工程引堤工程中的应用[J]. 港工技术, 1999(4): 21 - 24. (MA Yan. Application of big filled bags to the approach embankment of phase one project, Huanghua Port[J]. Port Engineering Technology, 1999(4): 21 - 24. (in Chinese))

[4] LESHCHINSKY D, LESHCHINSKY O, LING H I, et al. Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(8): 682 - 690.

[5] 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 Chang-lin, YAN Shu-wang. Mechanical behavior analysis of large scale geotextile bags[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 92 - 97. (in Chinese))

[6] 邱长林, 闫 玥, 闫澍旺. 泥浆不均匀时土工织物充填袋特性[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 760 - 763. (QIU Chang-lin, YAN Yue, YAN Shu-wang. Behavior of geotextile bags filled with non-uniform silty slurry[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 760 - 763. (in Chinese))

[7] SEAY P A, PLAUT R H. Three-dimensional behavior of geosynthetic tubes[J]. Thin-Walled Structures, 1998(32): 263 - 274.

[8] SEAY P A. Finite element analysis of geotextile tubes[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.

[9] PLAUT R H, SUHERMAN R. Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes[J]. Acta Mechanica, 1998, 129(3): 207.

[10] PLAUT R H, KLUSMAN C R. Two-dimensional analysis of stacked geosynthetic tubes on deformable foundations[J]. Thin-Walled Structures, 1999, 34(3): 179 - 194.

[11] SHIN E C, OH Y I. Analysis of geotextile tube behaviour by large-scale field model tests[J]. Geosynthetics International, 2003, 10(4): 134 - 141.

[12] NAMIAS V. Load-supporting fluid-filled cylindrical membranes[J]. Journal of Applied Mechanics, 1985, 52(4): 913 - 918.