# 分布式传感光纤测量疏浚土大型充填袋变形

何 斌,汪璋淳,何 宁,钱亚俊,周彦章

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要**:港工建设中采用航道疏浚土作为新型筑堤材料的关键技术研究,对于解决资源短缺和环境制约等问题 具有重要意义。由于无法应用传统点式监测技术测量充填袋充填、加载中袋体的受力及变形过程,针对高含泥 量疏浚土大型充填袋袋体受力及变形监测等工程实践问题,通过室内标定试验和现场原型试验,开展了传感光 纤选型、胶结固定及保护方式、测量精度及误差分析、工程原型应用测试等分布式光纤传感技术应用于高含泥 量疏浚土大型充填袋受力及变形测量的可行性研究。试验研究表明,疏浚土大型充填袋袋体受力及变形监测 中应选用柔性护套应变传感光纤,以柔性胶固定;选择合适的传感光纤能够使袋体受力及变形的测量精度达到 ±30 με,监测空间分辨率 0.1 m,最大应变测量范围 30 000 με;分布式光纤传感技术是疏浚土大型充填袋袋体 受力及变形监测的可靠新型测量方法。

**关 键 词**:分布式光纤传感技术;大型疏浚土充填袋;变形;室内标定试验;现场原型试验 中图分类号:TU41 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-640X(2014)05-0061-06

围海造陆、航道工程等海堤建设中需要大量的砂石料资源,但生态环境保护政策已不再允许大规模开山 采石,筑堤工程所需的砂石料资源难以得到满足;同时围海造陆、航道建设的疏浚工程中产生的大量疏浚土 被弃置,开展利用疏浚土作为筑堤材料的关键技术研究对于解决资源短缺和环境制约等问题具有重要意义。 传统充填袋应用技术规范要求充填料黏粒含量小于 10%,而疏浚土含泥量远远超过规范要求,航道疏浚土 作为充填土料的大型充填袋筑堤过程中,目前还缺乏针对土工布袋体受力-变形方面的科学合理的监测技 术和手段。开展利用高含泥量疏浚土大型充填袋筑堤工程中袋体受力-变形监测的研究能够为疏浚土充填 袋筑堤技术的推广应用提供重要的理论依据。

基于布里渊散射的监测技术与常规监测技术存在根本区别,具有分布式、长距离、实时性、精度高和耐久 性长等特点,能做到对工程设施的各个部位进行监测与监控。相比于传统监测技术,分布式光纤传感技术具 有以下特点:(1)分布式光纤集传感器和传输介质于一身,安装方便,性价比高;(2)可以进行光纤沿线任意 点空间连续测量,测量距离长、范围大、信息量大,大幅降低传统点式方法检测的漏检率;(3)分布式光纤传 感器的结构简单,体积小,对安装埋设部位的物理性能影响很小,适合于测量变形模量较小的充填袋土工布 袋体的受力和变形。

疏浚土大型充填袋筑堤工程中,无法应用传统的点式监测技术测量充填、加载过程中袋体的受力-变形 过程,如土工布袋体材料的加筋作用能否满足施工充填压力的强度要求、确定抗拉强度与上覆荷载间的关系 等,需要借助新型的线性分布式监测技术手段。

1 分布式光纤传感技术原理

光在光纤中传播时会发生散射。散射光主要有3种:瑞利散射光、拉曼散射光和布里渊散射光。布里渊

收稿日期: 2014-04-03

基金项目:国家高新技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA112509)

作者简介:何 斌(1978-),男,江西高安人,工程师,主要从事水利、岩土工程安全监测和试验检测的研究与实践。 E-mail: bhe@nhri. cn

散射由光子与声子的非弹性碰撞产生,散射光的频率发生变化,变化的大小与散射角和光纤的材料特性有 关<sup>[1]</sup>。与布里渊散射光频率相关的光纤材料特性主要受温度和应变的影响,因此通过测定脉冲光的后向布

里渊散射光的频移就可实现分布式温度、应变测 量。研究证明,光纤中布里渊散射信号的布里渊频 移和功率与光纤所处环境温度和承受的应变在一 定条件下呈线性关系。与传统测量技术相比,它独 特的分布式测量为使用者提供了更加丰富的数据 来源,它可以在一个连续结构上以0.1 m 为间隔连 续采样(图1)<sup>[2]</sup>。这种由点式测量向分布式测量 的突破,尽管在目前技术发展阶段会降低单点测量 精度,如一般点式传感器的应变测量精度为1 με, 而分布式光纤传感器的应变测量精度约为 30 με, 但这种精度损失可以通过连续积分来弥补<sup>[3]</sup>。



Fig. 1 Principle of distributed optical fiber sensing technology

## 2 室内标定试验

为探讨分布光纤传感技术用于大型充填袋袋体受力和 变形监测的测量可行性、光纤选型及其布设方法的正确性, 采用瑞士产 DiTest 分布式光纤测量系统(量程 $\pm$ 30 000  $\mu\varepsilon$ ), 开展分布式传感光纤传感测量袋体受力和变形的室内标定 试验。标定试验采用数控万能拉力机,传感光纤分别选用 0.9 mm塑料护套光纤、2 mm 柔性护套光纤和6 mm 塑料护 套铠装光纤3种单模紧套传感光纤,袋体材料选用单位面积 质量为230 g/m<sup>2</sup>的机织土工布。标定试验将传感光纤采用 不同结构型式固定在160 mm×900 mm(宽×长)的标定试验 土工布的中部位置,土工布两端各预留 100 mm 固定段用于 特殊试验夹具夹牢。0.9 mm 塑料护套光纤和2 mm 柔性护 套光纤先用柔性胶粘贴固定在 80 mm×700 mm(宽×长)、单 位面积质量为130 g/m<sup>2</sup>的机织土工布中部,然后缝制固定 在标定试验用 230 g/m² 袋体材料土工布中部;6 mm 铠装传 感光纤直接胶接和缝制固定在标定试验用 230 g/m<sup>2</sup> 袋体材 料土工布中部。室内标定试验中3种传感光纤布置和安装 固定方法如图 2。采用光纤熔接技术将光纤两端与专用测量 光纤接头熔接连接后,分别接入 DiTest 分布式光纤测量系统 "From"和"To"端口。

室内标定试验采用数控万能拉力机对土工布进行拉伸 变形,试验过程中由万能拉力机自动控制、测量和记录土工 布变形。700 mm长的土工布试样按最大变形 15 mm 控制,



分8级,前7级每级2mm,最后一级1mm。每级加载稳定3min后,采用DiTest分布式光纤测量系统对传感 光纤测量3次,测量空间分辨率设置为0.1m。接入DiTest分布式光纤测量系统的光纤总长度为10m,考虑 到试验中有效应变测量范围,只对有效位置1m范围内传感光纤进行应变测量。每级加载后对传感光纤测 量3次历时约10min,测量完成后继续进行下一级加载。因测量系统受环境温度变化的影响较为微弱,本次

			Tab. 1      Strain measured data from calibration tests						με	
拉力机变形示值/mm			2	4	6	8	10	12	14	15
传感光纤 应变测值		0 m 处测值	2 769	5 527	8 269	10 904	13 812	16 649	19 380	20 742
	0.9 mm 传感光 纤第1 组试验	0.1 m 处测值	2 772	5 517	8 253	10 911	13 803	16 635	19 366	20 729
		0.2 m 处测值	2 787	5 518	8 266	10 920	13 807	16 650	19 367	20 731
		0.3 m 处测值	2 774	5 525	8 271	10 907	13 828	16 650	19 375	20 747
		0.4 m 处测值	2 766	5 530	8 266	10 905	13 817	16 660	19 381	20 744
		0.5 m 处测值	2 770	5 515	8 272	10 927	13 802	16 657	19 358	20 746
		0.6 m 处测值	2 782	5 522	8 253	10 904	13 821	16 650	19 365	20 722
		0.7 m 处测值	2 763	5 530	8 274	10 929	13 816	16 640	19 368	20 748
		平均值	2 773	5 523	8 265	10 913	13 813	16 649	19 370	20 739
	2 mm 传 感 光 纤 第 2 组 试验	0 m 处测值	2 773	5 542	8 252	10 857	13 822	16 593	19 388	20 746
		0.1 m 处测值	2 767	5 556	8 271	10 857	13 829	16 587	19 396	20 752
		0.2 m 处测值	2 769	5 544	8 256	10 866	13 839	16 593	19 389	20 759
		0.3 m 处测值	2 761	5 535	8 265	10 879	13 829	16 618	19 393	20 755
		0.4 m 处测值	2 768	5 559	8 250	10 856	13 825	16 597	19 388	20 744
		0.5 m 处测值	2 775	5 559	8 255	10 866	13 831	16 588	19 408	20 742
		0.6 m 处测值	2 760	5 549	8 257	10 873	13 826	16 602	19 388	20 746
		0.7 m 处测值	2 760	5 564	8 266	10 879	13 816	16 590	19 391	20 751
		平均值	2 767	55 51	8 259	10 867	13 827	16 596	19 393	20 749
	6 mm 传 感 光 纤 第 3 组 试验	0 m 处测值	1 682	3 539	5 128	7 015	8 375	9 966	11 435	13 988
		0.1 m 处测值	1 678	3 509	5 124	7 007	8 367	9 945	11 454	14 000
		0.2 m 处测值	1 688	3 516	5 155	6 995	8 361	9 946	11 443	14 003
		0.3 m 处测值	1 681	3 508	5 130	7 006	8 391	9 963	11 436	14 016
		0.4 m 处测值	1 691	3 521	5 128	7 014	8 377	9 961	11 431	13 995
		0.5 m 处测值	1 690	3 521	5 156	7 006	8 381	9 974	11 450	14 012
		0.6 m 处测值	1 687	3 532	5 157	6 997	8 371	9 948	11 434	14 003
		0.7 m 处测值	1 703	3 528	5 126	7 019	8 383	9 977	11 444	14 005
		平均值	1 688	3 522	5 138	7 007	8 376	9 960	11 441	14 003

#### 表1 标定试验传感光纤应变测值

表 2 标定试验传感光纤试验数据统计

Tab. 2 Satistics of measure	d data from calibration tests
-----------------------------	-------------------------------

拉力机变形示值/mm		2	4	6	8	10	12	14	15
土工布对应应变量/με		2 857	5 714	8 571	11 429	14 286	17 143	20 000	21 429
0.9 mm 传	3 组试验平均/με	2 773	5 533	8 276	10 961	13 840	16 648	19 368	20 749
感光纤	误差(%)	3.0	3.2	3.4	4.1	3.1	2.9	3.2	3.2
2 mm 传	3 组试验平均/ με	2 767	5 534	8 277	10 957	13 810	16 640	19 388	20 751
感光纤	误差(%)	3.2	3.1	3.4	4.1	3.3	2.9	3.1	3.2
6 mm 传	3 组试验平均/με	1 690	3 523	5 140	7 007	8 377	9 962	11 443	14 002
感光纤	误差/ %	40.8	38.3	40.0	38.7	41.4	41.9	42.8	34.7



试验结果表明,试验选用 DiTest 分布式光纤测量系统及试验用传感光纤测量技术的系统综合应变测量 误差约为 30 με,系统误差与前期试验研究成果一致<sup>[4]</sup>。根据要求,疏浚土充填袋袋体变形技术指标不大于 30%<sup>[5-6]</sup>,即 300 000 με,分布式传感光纤测量技术系统精度为疏浚土充填袋袋体最大允许变形的 0.01%, 试验表明,分布式光纤传感技术测量精度可以满足疏浚土大型充填袋的土工布袋体变形测量要求。

根据表 2 中标定试验数据统计结果及图 3 中 3 组试验测量成果可以看出:对于 0.9 mm 塑料护套光纤和 2 mm 柔性护套光纤,采取合理的胶结安装方法,传感光纤基本能够与胶结为一体的充填袋土工布同步变形; 传感光纤应变测值与拉力机示值换算得到的土工布应变值之间的误差小于 5%,可以满足测量充填袋土工 布前期变形的工作要求;且分布式传感光纤技术的应变测量范围为±30 000 με,相当于 3% 的变形量,较传 统应变计(最大量程 3 000 με)<sup>[7]</sup>等监测技术更适合于变形量较大的充填袋的变形测量。而对于 6 mm 的塑 料护套铠装光纤,由于护套变形模量远大于被测土工布,传感光纤与胶结为一体的充填袋土工布不能发生同 步变形,传感光纤应变测值与拉力机示值换算得到的土工布应变值之间的误差超过 40%;在现场条件下,胶 结情况很难达到与室内标定试验中相同的理想状况,因此选用 6 mm 塑料护套铠装光纤测量充填袋变形适 用性较差。另外,采用 0.9 mm 塑料护套和 2 mm 柔性护套传感光纤,两者标定试验结果基本相似,测量误差 均小于 5%,两种分布式传感光纤技术测量充填袋变形的测量精度都可满足原位监测需要。但 0.9 mm 塑料 护套光纤较细、较脆,现场安装保护困难,采用胶结方法固定在较薄的土工布后运输到现场安装的过程中很 容易受到损坏,因此,选择以 2 mm 的柔性护套传感光纤为宜。

### 3 原位试验

为进一步验证分布式光纤传感技术测量大型充填袋土工布的变形状态和监测大型充填袋变形的可靠性<sup>[8]</sup>,在连云港港 30 万 t 航道建设的疏浚土大型充填袋筑堤技术试验研究现场试验段工程中,开展了分布式光纤传感技术监测大型充填袋变形的现场试验研究。工程中大型充填袋平面尺寸为 20 m×16 m(宽×长),传感光纤采用 2 mm 的柔性护套传感光纤,在室内先用 703 胶(柔性胶)以回路型式沿长度方向胶结在 16 m×0.2 m

703 胶(柔性胶)以回路型式沿长度方向胶结在 16 m×0.2 m (长×宽)的 130 g/m<sup>2</sup>的机织土工布中央,传感光纤以 0.1 m 间距、平行回路型式胶结其上,大型充填袋铺设完成以后将 胶结着传感光纤的 130 g/m<sup>2</sup>机织土工布条缝制固定在充填 袋土工布的上(或下)表面,测量时将光纤两端与专用测量光 纤接头熔接连接后,分别接入 DiTest 分布式光纤测量系统 "From"和"To"端口。该现场试验段工程某断面第二层充填 袋上表面固定的传感光纤在 2011 年 1 月 6 至 8 日的 3 组应 变测值曲线如图 4,其中 1 月 6 日为充填袋首次充填施工过



现场试验段工程中传感光纤测量结果表明:同一时刻两条平行的分布式传感光纤测得沿袋体长度方向 的变形规律一致性较为良好,且对应位置沿长度方向间距为0.1 m的各测点应变测值非常接近或吻合。现 场试验段工程监测资料分析也说明:随上覆荷载增加,疏浚土充填袋的变形也逐渐增大,且充填袋变形沿长 度方向中间大、两端小,符合柔性袋体受力变形的一般规律,其实测应变量值与理论计算分析结果<sup>[9]</sup>及离心 模型试验中应变片测量结果<sup>[10]</sup>也较为吻合;测得最大应变超过30 000 με,相当于3%的变形量,是大型充填 袋土工布大变形监测的一种理想监测技术,是对传统变形监测方法的有益补充和技术创新。

4 结 语

针对高含泥量疏浚土大型充填袋筑堤技术袋体受力和变形监测等工程实践问题,通过室内标定试验和现场原型试验,开展了传感光纤选型、胶结固定及保护方式、测量精度及误差分析、工程原型应用测试等分布式光纤传感技术测量疏浚土大型充填袋受力和变形可行性和适用性的应用研究,主要结论如下:

(1)因袋体土工布变形模型较小, 疏浚土大型充填袋袋体受力变形监测中应选用模量较小的柔性护套 应变传感光纤, 并采用柔性胶胶结固定的安装方式, 辅以可靠的保护措施。

(2)选择合适的分布式传感光纤能提高疏浚土大型充填袋袋体的应变测量精度,可使精度在±30 με 内, 传感光纤测值与拉力机示值换算应变值间的误差值小于 5%。

(3)室内标定试验和现场试验段原型试验测量结果均表明,分布式光纤传感技术监测袋体受力变形的 空间分辨率为0.1 m,最大应变测量范围可达到 30 000 με。

(4)分布式光纤传感技术具有分布式、长距离、实时性等特点,是疏浚土大型充填袋袋体受力变形监测的可靠的、理想的新型测量方法。

#### 参考文献:

- UCHIYAMA H, SAKAIRI Y, NOZAKI T. An optical fiber strain distribution measurement instrument using the new detection method[J]. ANDO Technical Bulletin, 2002, 10: 52-60.
- [2] 王辉, 吕月兰, 吕志伟. 光纤中受激布里渊散射的应用及研究进展[J]. 传感器技术, 2005, 24(4): 8-10. (WANG Hui, LV Yue-lan, LV Zhi-wei. Application and development of stimulated Brillouin scattering in fiber[J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24(4): 8-10. (in Chinese))
- [3] 王其富,乔学光,贾振安,等. 布里渊散射分布式光纤传感技术的研究进展[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(7): 7-9.
  (WANG Qi-fu, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, et al. Development of research on Brillouin scattering distributed optical fiber sensing technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(7): 7-9. (in Chinese))
- [4] 何宁, 王平, 丁勇, 等. 分布式光纤传感技术应变测量试验研究[J]. 中国测试, 2011, 37(2): 92-96. (HE Ning, WANG Ping, DING Yong, et al. Experimental research of distributed fiber optic sensing techniques in the measurement of strain[J]. China Measurement & Test, 2011, 37(2): 92-96. (in Chinese))
- [5] JTJ 239-2005, 水运工程土工合成材料应用技术规范[S]. (JTJ 239-2005, Technical code for application of geosynthetics for port and waterway engineering[S]. (in Chinese))
- [6] GB 50290-98, 土工合成材料应用技术规范[S]. (GB 50290-98, Technical standard for applications of geosynthetics[S]. (in Chinese))
- [7] 王永年,殷世华,李迪,等. 岩土工程安全监测手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999. (WANG Yong-nian, YIN Shi-hua, LI Di, et al. Handbook of geotechnical engineering safety monitoring[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1999. (in Chinese))
- [8] 贾振安,张童,刘颖刚,等. 基于 BOTDR 的分布式光纤温度传感测量实验研究[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(4): 35-

37. (JIA Zhen-an, ZHANG Tong, LIU Ying-gang, et al. Experimental study on distributed optical fiber temperature sensing and measurement system based on BOTDA[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(4): 35-37. (in Chinese))

- [9] 范哲, 冯新, 周晶. 基于分布式应变监测的大跨度斜拉桥结构损伤探测[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(1): 46-50, 72. (FAN Zhe, FENG Xin, ZHOU Jing. Damage detection of long-span cable-stayed bridge based on the distributed strain monitoring[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(1): 46-50, 72. (in Chinese))
- [10] 卢毅,施斌,席均,等. 基于 BOTDR 的地裂缝分布式光纤监测技术研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 8-12. (LU Yi, SHI Bin, XI Jun, et al. Field study of BOTDR-based distributed monitoring technology for ground fissures[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 8-12. (in Chinese))
- [11] 孙义杰,张丹,童恒金,等. 分布式光纤监测技术在三峡库区马家沟滑坡中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014,24(4):97-102. (SUN Yi-jie, ZHANG Dan, TONG Heng-jin, et al. Research of distributed fiber optic sensing technology in monitoring of Majiagou landslide of Three Gorges[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 24(4):97-102. (in Chinese))
- [12] 朱鸿鹄, 施斌, 严珺凡, 等. 基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 821-828. (ZHU Hong-hu, SHI Bin, YAN Jun-fan, et al. Physical model testing of slope stability based on distributed fiber-optic strain sensing technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 821-828. (in Chinese))

# Experimental studies of distributed optic fiber sensor for measuring deformation of large filling bag with dredged soil

HE Bin, WANG Zhang-chun, HE Ning, QIAN Ya-jun, ZHOU Yan-zhang (Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** It is very significant to study the key technology in taking the dredged soil as new construction material in the port engineering considering the resources shortage and environmental restriction. The traditional point-supporting measurement technology could not be utilized to measure the deformation of a large filling bag in its filling and loading process. The engineering practical problems such as measuring the deformation of large filling bag with dredged high clay content soil have received much concern at the present stage. Based on the laboratory calibration tests and filed prototype tests, the selection of the optic fiber sensor, cemented fixation and protection, measurement accuracy and error analysis, and application testing studies in the filed works have been carried out. The application feasibility of the distributed optic fiber sensor to measure the deformation of the large filling bag with dredged soil is discussed. The research results show that the optic fiber sensor with flexible sheath should be adopted for measuring the deformation of the large filling bag with dredged soil. And the measurement accuracy would be up to  $\pm 30 \ \mu\varepsilon$  with the apposite optic fiber sensor, the monitoring spatial resolution could be 0.1 m, and the maximum strain measurement range could be within 30 000  $\ \mu\varepsilon$ . The distributed optic fiber sensor could be adopted as a new reliable method to monitor the deformation of the large filling bag with dredged soil.

Key words: distributed optic fiber sensor; large filling bag with dredged soil; deformation; laboratory calibration tests; filed prototype tests