

合成孔径雷达干涉测量技术在水利工程 形变监测应用方面的研究进展

王茂枚¹, 王刘宇¹, 蔡 军¹, 朱 昊¹, 方 波²

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 2. 张家港市水资源管理处, 江苏 苏州 215600)

摘要:有效监测水利工程的安全稳定至关重要,合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术具有全天时、全天候、高精度和低成本等优点,已在水利工程中得到了广泛应用。介绍 InSAR 技术监测地表形变的基本原理和当前常用的 SAR 影像基本参数,综述近年来 InSAR 技术在水利工程形变监测应用方面的研究现状和进展,并探讨 InSAR 技术在长江沿线大型线状堤防工程稳定性监测应用中存在的问题。随着 SAR 卫星系统的不断发展,InSAR 技术能够获取更加精细准确的形变信息,其在水利工程形变监测方面的应用会更加成熟、广泛。

关键词:水利工程; InSAR; 形变监测

中图分类号:TV22

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2021)S2-0066-06

Research Progress of the Application of InSAR Technology in the Deformation Monitoring of Water Conservancy Project

WANG Maomei¹, WANG Liuyu¹, CAI Jun¹, ZHU Hao¹, FANG Bo²

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;

2. Zhangjiagang Water Resources Management Office, Suzhou 215600, China)

Abstract: Effective monitoring is of vital importance in the water conservancy project safety and stability. Interferometric Synthetic Aperture Radar technology has the advantages of all-day, all-weather, high-precision and low-cost. It has been widely used in water conservancy projects. Firstly, the basic principle of InSAR technology for monitoring surface deformation and the basic parameters of SAR images in common use are introduced. The research status and progress of InSAR technology in monitoring deformation of water conservancy project in recent ten years are reviewed, and several problems existing in the application of InSAR technology in monitoring stability of large linear dikes along the Yangtze River are discussed. With the continuous development of SAR satellite system, InSAR technology can obtain more precise and accurate deformation information, and its application in deformation monitoring of linear water conservancy project will be more mature and more extensive.

Key words: water conservancy project; Interferometric Synthetic Aperture Radar; deformation monitoring

江苏湖泊众多,河网密布,省内的水域面积为 1.69 万 km²,约占国土面积 17%。江河湖库在带来丰富水资源的同时,也给水利安全保障工作带来巨大的挑战。全省堤防工程线长、点多、面广、类型

多,主要有河(江)堤、湖堤、海堤、渠堤等,而且堤防运行的自然环境和经济社会条件差异大,渗水、塌方、失稳等堤防险情时有发生。江河湖库等的堤防稳定性不仅关系到水资源的调度,也关系到水利工

收稿日期:2021-09-09

基金项目:江苏省水利科技项目(2020007);江苏省水利科技项目(2019001);江苏省水利科技项目(2018005)

作者简介:王茂枚(1983—),男,高工,硕士,主要从事河湖治理与保护研究工作。

程的安全运行,其对洪涝预警和排洪泄洪起着关键性的作用。江苏境内长江干流总长 432.5 km,涉及南京、镇江、扬州、常州、泰州、无锡、苏州、南通等 8 市,流域面积 3.86 万 km² (含太湖流域),约占全省国土面积的 40%,承载了全省 60% 的人口,创造了全省 80% 的经济生产总值,人口、产业、资产、基础设施高度密集,具有十分重要的战略地位。长江沿江堤防作为保护沿江经济带发展的一道重要屏障,在防洪减灾、保障居民生活和工农业生产等方面发挥着重要的作用。因此有效地监测江苏省长江沿岸堤防的安全稳定并及时排查隐患,对保障省内水利安全至关重要^[1-2]。

常规的监测方法如水准测量、全站仪测量、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)具有精度高等特点,但存在测点稀疏、作业效率低等缺点^[3-4]。针对较长的长江沿岸堤防岸线,利用常规的监测方法,受人力、物力、财力等因素的限制,在监测频次、监测指标、监测范围上往往受限,无法实现对沿江堤防进行整体、有效、综合的量化分析,这也为堤防安全埋下了隐患。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术具有全天时、全天候、连续空间覆盖、高度自动化、高精度和低成本等优点,其理论监测精度可达亚厘米级,能够从面域获取大面积地表沉降信息,已成为目前发展迅速、极具潜力的对地观测及测绘新技术之一^[5],已在滑坡^[6]、地震^[7]、水利工程^[3]、地面沉降^[8]等领域得到了广泛的应用。

InSAR 技术在长江沿岸堤防稳定性监测方面具有广阔的应用前景,但目前 InSAR 技术在水利工程中的应用主要体现在水库、大坝、桥梁稳定性监测方面,对于大型线状堤防工程的稳定性监测却鲜有研究。

1 InSAR 基本原理及常用的 SAR 影像

InSAR 技术通过 2 次 SAR 影像的距离差(相位差)来提取目标地物的高程或者形变。雷达在经过目标地物时以一定的角度向地物发射电磁波,电磁波接触到地物发生反射,再由接收机接收发射的电磁波。如图 1 所示, P_1 和 P_2 表示卫星在不同时刻 2 次发射电磁波成像的位置, H 为卫星到地面的距离, h 为地面目标点 O 的高程, θ 为雷达波的侧视角,地面点 O 在 2 次成像期间发生了形变, O 点沿矢量 r 方向移动到了 O' 点, R_1 、 R_2 为卫星从位置 P_1 、 P_2 到 O 点的斜距,形变量 r 在雷达视线 P_1O 上的投影为

Δr , 此时 O 点的干涉相位 $\Delta\varphi$ 为:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2) \quad (1)$$

式中, λ 为雷达波波长。

O 点的干涉相位中包含地平相位、地形相位、大气相位、噪声相位和形变相位 φ_{def} , 从干涉相位中去除地平相位、地形相位、大气相位和噪声相位后即可得到形变相位 φ_{def} , φ_{def} 表示为:

$$\varphi_{\text{def}} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta r \quad (2)$$

得到形变相位 φ_{def} 后,由式(2)即可反算出 O 点的形变量 Δr 。

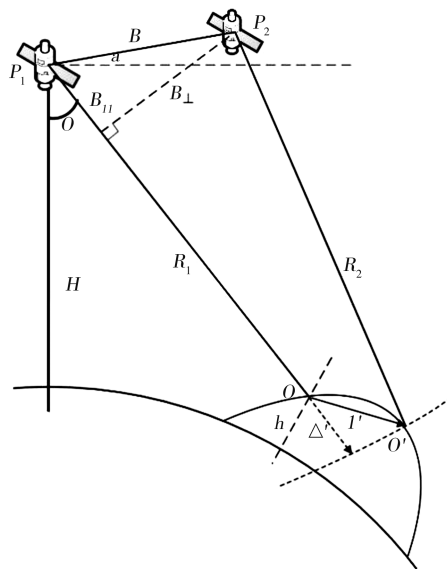


图 1 InSAR 原理示意图

当前的 SAR 卫星系统种类繁多,常用的主要包括意大利 Cosmo-SkyMed、德国 TerraSAR-X、加拿大 RadarSat-2、日本 ALOS-2、欧空局 Sentinel-1、中国高分三号等。以上 6 种 SAR 卫星影像的主要参数如表 1 所示。

表 1 6 种 SAR 影像常见参数

传感器	最高分辨率/m	波段	波长 λ /cm	重返周期/d
Cosmo-SkyMed	1	X	3.1	16
TerraSAR-X	0.25	X	3.1	11
RadarSat-2	1	C	5.6	24
ALOS-2	1	L	25	14
Sentinel-1	1.5	C	5.6	12
高分三号	1	C	5.6	<3

2 时序 InSAR 技术发展现状

InSAR 技术早期主要应用于地形测绘。1989 年, Gabriel、Goldstein 和 Zebker 利用 SEASAT 影像对美国加州的 Imperial Valley 地区进行差分干涉测量实验, 论证了 D-InSAR 技术可以探测厘米级的地表形变。此后, D-InSAR 技术被广泛用于监测各种地表形变。但是 D-InSAR 技术易受大气相位延迟、地形相位以及时空失相干等因素的影响, 为此, 各国学者提出了对使用多幅 SAR 影像提取的永久散射体进行时间序列分析的 (Time series InSAR, TS-InSAR) 技术, 最具有代表性的就是永久散射体时序干涉测量 (Persistent Scatterers InSAR, PS-InSAR) 技术^[9] 和小基线集干涉测量 (Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR) 技术^[10]。PS-InSAR 最早由 Ferretti 等人提出, 只对具有高强度后向散射特性的 PS 点 (人工建筑物、裸露岩石等) 进行形变反演, 能够有效减弱大气、DEM、轨道与时空失相干等因素的影响, 被广泛应用于城市失水沉降、火山等微小形变的提取^[11]。SBAS-InSAR 是采用多个主影像, 先对时空基线较短的干涉对进行组合, 再对高相干点进行时序分析获取地表形变, 在地表微小形变监测中得到了广泛应用。为了弥补 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 在非城区测点稀疏的缺陷, Rocca 提出了分布式目标干涉处理技术 (Distributed Scatterer InSAR, DS-InSAR)^[12], DS-InSAR 能够提取后向散射特性中等的目标点, 如农田、沙漠、裸地等, 大大增加了相干点的密度。除了 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR, 还有一些学者提出了相干点目标分析 (Interferometric Point Target Analysis, TPTA)^[13]、时域相干点干涉 (temporarily coherent point InSAR, TCP-InSAR)^[14]、相位叠加 (phase stacking) 技术^[15] 等 TS-InSAR 技术。

3 TS-InSAR 技术在水利工程中的应用现状

TS-InSAR 技术能够减弱大气相位、地形相位以及时空失相干的影响, 有效获取线性或近似线性的小量级形变, 各国学者将其应用于大坝、桥梁及线状水利工程等的形变监测, 并取得了较好的效果。

3.1 TS-InSAR 技术在大坝水库中的应用现状

2011 年, 王腾等^[3] 提出了准永久散射体干涉测量技术, 并结合 PS-InSAR 技术获取了三峡大坝及

其周边区域的 2003—2008 年的形变信息, 验证了 TS-InSAR 在大坝形变监测中的应用潜力。2016 年, Neokosmidis 等^[16] 提出了一种混合干涉 InSAR 方法, 利用该方法监测了由大地震引起的希腊 Morinos 土坝的变形, 结果表明, 大坝形变与特定的地震事件在时间上具有一致性; Michoud 等^[17] 利用 Envisat 影像, 使用 InSAR 技术监测了 Potrerillos 大坝水库的形变, 发现了 2 处朝向水库并受水库季节性水位变化影响的大型边坡变形区。2017 年, 杨潇潇^[18] 利用 TS-InSAR 技术监测了小湾大坝和三峡大坝的形变, 研究了 2 座大坝上游与大坝形变的关系, 分析了大坝未来的形变趋势, 验证了 InSAR 技术在大型水利工程形变监测中的可行性; Emadali 等^[19] 利用分辨率为 1m 的 TerraSAR-X 影像对 Masjed-Soleyman 大坝施工后的变形进行了有效监测, 结果表明高分辨率影像能够提供更加详细的变形信息, 其监测到的厘米级位移与坝顶上的错位裂缝吻合; Aminjafari^[20] 使用 ENVISAT 影像对 Masjed-Soleyman 大坝进行了 SBAS-InSAR 处理, 结果表明, InSAR 技术是监测黏土大坝变形的有效方法。

2019 年, 肖儒雅等^[21] 针对水库大坝地质条件复杂难以建立形变模型的问题, 改进了 TS-InSAR 数据处理流程, 监测了广南水库大坝的形变信息, 验证了 TS-InSAR 监测水工建筑物形变的有效性; Li 等^[22] 使用高分辨率 SAR 影像对公明黏土芯石坝在施工结束后的沉降进行了监测, 并详细分析了雷达局部入射角和坝体坡向等因素在雷达坐标中的变化, 结果表明坝顶沉降速率最高, 与黏土芯体收缩过程一致。2020 年, Wang 等^[23] 使用 Sentinel-1A 影像对苏丹最长的土石坝进行了时序分析, 结果表明坝顶最大位移为 190 mm, 其监测精度为 2 mm/a。

3.2 TS-InSAR 技术在桥梁中的应用现状

2017 年, 黄其欢等^[24] 利用 InSAR 技术监测了大胜关大桥的纵向位移, 结果表明, 桥梁纵向位移主要是由热膨胀引起的。2018 年, Selvakumaran 等^[25] 研究了如何利用 InSAR 技术监测面临冲刷风险的桥梁, 以英国 Tadcaster 大桥为例, 使用 SBAS-InSAR 方法分析了桥梁坍塌前两年的形变, 在桥梁实际坍塌前一个多月的数据中观察到了桥梁破坏的前兆, 表明了 InSAR 能对有冲刷风险的桥梁进行早期预警。2019 年, 段伟等^[26] 提出了一种能够减少解缠误差的 InSAR 相位解缠算法, 并将该算法应用于洞庭湖大桥形变监测。2020 年, 朱茂等^[27] 采用随季节和温度变化的形变模型, 利用 PS-InSAR

技术对胶州湾跨海大桥进行了时序形变分析,结果表明,随季节变化的周期形变是桥梁的主要形变。

3.3 TS-InSAR 技术在大型线状水利工程中的应用现状

2011年,裴媛媛等^[28]使用24景Envisat ASAR影像进行了时序InSAR分析,获取了上海及杭州堤坝2007年10月至2010年2月的形变信息,监测精度达到了mm级。2014年,马超等^[29]利用InSAR技术对南水北调总干渠中线工程豫北段基础稳定性进行了350d的监测,获取了沿线126km渠段的时序形变信息。2019年,黄其欢等^[30]利用PS-InSAR技术提取了某港区东防波堤的时序形变,结果表明PS-InSAR技术能够满足防波堤形变监测的精度要求;张健等^[31]采用PS-InSAR技术监测了下荆江大堤2018年4月至2019年4月的形变信息,结果表明大堤在丰水季节沉降,在枯水季节抬升,并证明了InSAR技术能够高效监测大范围长江堤防的形变。2020年,刘朋俊等^[32]利用TS-InSAR技术对南水北调中线工程辉县段湿陷性黄土区进行了为期4年的形变监测,分析了研究区域内沉降量与降水量及土壤湿度的关系,为研究区域的稳定性治理提供了科学依据。

4 TS-InSAR 监测长江沿线堤防稳定性存在的问题

由上可知,各国学者将TS-InSAR技术主要应用于大坝水库及桥梁形变监测,对于大型线状堤防工程的应用较少,对于长江沿线堤防的应用却鲜有研究。结合TS-InSAR技术的发展现状及长江沿线大型堤防工程的实际概况,笔者认为TS-InSAR技术在长江沿线大型堤防工程稳定性监测应用中存在以下几个问题。

不同的TS-InSAR方法适用于不同的研究对象,多种SAR影像的波长、重返周期及空间分辨率均不同,其对地物的监测能力也存在较大的差异,只有充分了解多种TS-InSAR方法和多源SAR影像在大型堤防工程稳定性监测的能力和存在的问题,才能更好选择合理的TS-InSAR方法和SAR影像,进而对大型堤防工程稳定性进行高精度的时序监测。而目前对多种TS-InSAR方法和多源SAR影像在大型堤防工程稳定性监测方面的能力和存在问题的研究较少。

堤防工程一般宽度较窄,且其宽度会随水位高低而发生变化,由于SAR影像是侧视成像,而堤防

背水坡和迎水坡存在一定的坡度,因此堤防在SAR影像上可能会存在一定的叠掩与阴影,而目前对雷达入射角与堤防坡度角对线状堤防提取及稳定性监测精度的影响研究仍然较少。

由于长江沿岸堤防工程空间跨度较大,且长时间序列中电离层与对流层延迟会有较大差异,进行大型堤防工程稳定性监测时需精确去除大气相位。目前存在多种大气相位去除方法,然而大气相位多变且较为复杂,目前并没有一种方法能够精确去除大气相位,针对长江沿岸堤防工程稳定性监测中的大气相位去除方法也需要进行系统研究。

目前SAR影像种类越来越多,为堤防工程稳定性监测提供了丰富数据的同时,也为多源数据的时空融合带来了挑战。不同SAR影像的时空分辨率、雷达入射角及波长各不相同,如何将多源SAR信息进行有效整合,达到大型线状堤防工程稳定性有效监测的目的,是当前InSAR技术面临的又一个问题。

5 结 论

本文总结归纳了近年来InSAR技术在水利工程中的应用现状,大量研究表明InSAR技术在水利工程形变监测中具有较高的有效性与可靠性,其在长江沿岸大型现状堤防工程的稳定性监测方面具有广阔的应用前景,但SAR影像及各种TS-InSAR方法在长江沿线大型堤防工程稳定性监测中的适用性、雷达入射角与堤防坡度角对线状堤防提取及监测精度的影响,针对大型线状堤防工程形变监测的大气相位去除方法及多源SAR数据的时空融合仍需要进行系统研究。随着多种SAR卫星的发射和使用,高时空分辨率SAR影像的使用及TS-InSAR技术的完善,会使TS-InSAR技术能够更加成熟地应用于长江沿岸大型堤防工程稳定性监测,在获取长江江苏段沿线堤防精确形变信息的同时,完善InSAR信息提取理论和堤防稳定性监测体系,分析堤防时空演变规律,为全省水利安全保障工作提供数据与理论支撑。

参考文献:

- [1] 张清明,王荆,汪自力,等.我国典型堤防工程管理现状调查分析[J].中国水利,2020,892(10):46-48.
- [2] 张建云,刘九夫,金君良.关于智慧水利的认识与思考[J].水利水运工程学报,2019,178(6):3-9.
- [3] 王腾,PERISSIN DANIELE,ROCCA FABIO,等.基于

- 时间序列 SAR 影像分析方法的三峡大坝稳定性监测[J]. 中国科学(地球科学), 2011, 41(1):110-123.
- [4] 孙建勋, 郑会歌. 关于地基 InSAR 新技术及水利工程变形监测应用的研究[J]. 水利建设与管理, 2017(11):7-10.
- [5] 廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [6] LI M, ZHANG L, DONG J, et al. Characterization of pre- and post-failure displacements of the Huangnibazi landslide in Li County with multi-source satellite observations[J]. Engineering Geology, 2019, 257:105-140.
- [7] RAUCOULES D, RISTORI B, MICHELE M D, et al. Surface displacement of the Mw 7 Machaze earthquake (Mozambique): Complementary use of multiband InSAR and radar amplitude image correlation with elastic modeling[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(10):2211-2218.
- [8] NIJATI M, JIE Y, YANBING W, et al. Temporal and spatial evolution characteristics analysis of Beijing Land subsidence based on InSAR[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 658(1):012050.
- [9] A F, C P, F R. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1):8-20.
- [10] P B, G F, R L, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002, 40(11):2375-2383.
- [11] 刘媛媛. 不同尺度综合地表形变 InSAR 时序监测与机理分析[J]. 测绘学报, 2020, 49(7):935.
- [12] DONG J, ZHANG L, TANG M, et al. Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiaju landslide in Danba[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 205:180-198.
- [13] 曹群, 陈蓓蓓, 宫辉力, 等. 基于 SBAS 和 IPTA 技术的京津冀地区地面沉降监测[J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(3):381-391.
- [14] ZHANG L, DING X, LU Z. Ground settlement monitoring based on temporarily coherent points between two SAR acquisitions[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 66(1):146-152.
- [15] SANDWELL D T., SICHOUX L.. Topographic phase recovery from stacked ERS interferometry and a low-resolution digital elevation model[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000, 105(B12):28211-28222.
- [16] NEOKOSMIDIS S, ELIAS P, PARCHARIDIS I, et al. Deformation estimation of an earth dam and its relation with local earthquakes, by exploiting multitemporal synthetic aperture radar interferometry: Mornos dam case (Central Greece)[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(2):1-16.
- [17] MICHOUD C, BAUMANN V, LAUKNES T R, et al. Large slope deformations detection and monitoring along shores of the Potrerillos dam reservoir, Argentina, based on a small-baseline InSAR approach[J]. Landslides, 2016, 13(3):451-465.
- [18] 杨潇潇. 时序 InSAR 技术用于大坝形变监测与变形模式研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
- [19] EMADALI L, MOTAGH M, HAGHIGHI M H. Characterizing post-construction settlement of the Masjed-Soleyman embankment dam, Southwest Iran, using TerraSAR-X SpotLight radar imagery[J]. Engineering Structures, 2017, 143:261-273.
- [20] AMINJAFARI S. Monitoring of Masjed-Soleiman embankment dam's deformation using a combination of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and finite element modeling[J]. Geodesy and Cartography, 2017, 43(1):14-21.
- [21] 肖儒雅, 何秀凤. 时序 InSAR 水库大坝形变监测应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9):1334-1341.
- [22] LI T, MOTAGH M, WANG M, et al. Earth and Rock-Filled Dam Monitoring by High-Resolution X-Band Interferometry: Gongming Dam Case Study[J]. Remote Sensing, 2019, 11(3):246.
- [23] WANG Q, HUANG H, HE N, et al. Displacement monitoring of upper Atbara dam based on time series InSAR[J]. Survey Review, 2020, 52(375):485-496.
- [24] 黄其欢, 丁幼亮, 王一安, 等. 基于 InSAR 的南京大胜关大桥纵向位移监测与分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(3):584-589.
- [25] SELVAKUMARAN S, PLANK S, GEIB C, et al. Remote monitoring to predict bridge scour failure using interferometric synthetic aperture radar (InSAR) stacking techniques[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2018(73):463-470.
- [26] 段伟, 吕孝雷. 一种新的桥梁区域时序 InSAR 相位解缠方法[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(2):251-258.
- [27] 朱茂, 沈体雁, 吕凤华, 等. 青岛胶州湾跨海大桥 InSAR 形变数据分解和信息提取[J]. 遥感学报, 2020, 24(7):883-893.
- [28] 裴媛媛, 廖明生, 王寒梅. 时间序列 SAR 影像监测堤坝形变研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(3):266-269.

- [29] 马超,屈春燕,孟秀军. 南水北调总干渠中线工程豫北段基础稳定性的 InSAR 时序分析[J]. 地震地质, 2014, 36(3):749-762.
- [30] 黄其欢,王青青,何宁,等. PSI 技术应用于防波堤沉降监测研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4):761-768.
- [31] 张健,潘斌,陈文龙,等. 基于雷达卫星时序分析技术的荆江沿岸堤防形变研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(10):23-27.
- [32] 刘朋俊,张璐,陈元申,等. 南水北调中线湿陷性黄土区 InSAR 时序分析[J]. 人民长江, 2020, 667(6):129-132.

(上接第 52 页)

兜内填充具有一定的级配块石,从而形成一个整体的方式,将小粒径块石转变成一个巨大的整体,可以缩短落距,减少水流对抛石的影响。同时每次抛石施工都是采用单个网兜定点抛投施工工艺,可以更好地提升抛投精准率,提高施工效率和降低工程成本。

5.3 抗冲性能强

工程范围内大部分岸坡陡于 1:2,最陡处仅为 1:1.34,斜坡上的单个块石受水流冲刷后易发生滚动流失,而网兜块石是聚丙烯网兜包裹块石形成的一个整体,单个网兜块石自重达到 5.1 t,不会轻易受水流冲刷影响,同时网兜无固定形状,所以在落入水下岸坡坡面时,网兜块石的形状会随着坡面形状变化,能很好的与坡面紧紧贴合,快速的在水下岸坡上形成相对平整、连续的水下网兜块石防冲体。不仅如此,由于网兜的柔韧性,随着时间的推移,网兜块石的形状会随着水下地形变化而变化,可以更好地适应河床变形,从而达到对岸坡长期防护的效果。

6 结 语

长江南京河段八卦洲汊道河道工程于 2018 年

12 月正式开工,至 2020 年 12 月全部工程完工,期间经受了 2020 年特大洪水冲击的考验,根据水下地形检测结果显示,汛后护岸结构总体完好,运行情况良好,断面检测点合格率在 80% 以上,证明网兜块石工艺在长江护岸加固应用中防护效果显著,抗冲性强。随着长江上游河势的变化,中下游水下地形都在不断变化,选择适用和经济的结构形式,是维护岸坡稳定,保障防洪安全的关键,相信网兜块石工艺在堤防护岸加固中的应用会越来越广泛。

参考文献:

- [1] 李铭华,陈磊,樊昆澎,等. 长江南京新济洲河段河道整治工程效果分析[J]. 水利技术监督, 2020(1):265-268.
- [2] 朱相丞,陆凤,刘孟洲,等. 网兜抛石在河道整治工程中的应用及优势分析[J]. 中国水运(下半月), 2017,17(2):158-160, 163.
- [3] 刘常全. 网兜抛石法在长江航道整治中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2013,13(10):271-272.
- [4] 伏洲,周宏萍,曹驰宇. 浅析长江干流崩岸治理抛石护岸质量控制[J]. 江苏水利, 2020(12):61-64.