

DOI: 10.11779/CJGE2017S1017

施工阶段斜坡堤地基沉降实时监测技术的开发应用

王 伟¹, 徐 锴¹, 王海龙², 李禄禄²

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 东营港建设投资有限责任公司, 山东 东营 257091)

摘要: 近年来中国港口建设朝着大型化、深水化的格局发展,许多港口的海堤建设类型也各不相同。在开敞式无掩护水域进行斜坡堤的抛石施工,受外界不利影响的因素多而复杂。尤其沿海区域内大量分布深厚软泥土层,随着抛填量的加大和斜坡堤堤身的加高,实时监测地基沉降变形对于控制抛石施工速度和地基稳定极其关键。根据抛填施工和GPS测试技术的特点,提出一种斜坡堤地基沉降变形的实时监测方法,包括沉降监测设备的制作、埋设和观测。通过工程实例的应用表明,该方法能够适应现场抛石施工的复杂环境,所得沉降监测信息能够为施工单位调整抛填强度提供可靠的依据,确保了斜坡堤工程的安全。

关键词: 斜坡堤; 沉降; 实时监测; GPS; 沉降盘

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0085-06

作者简介: 王 伟(1979-),男,汉族,江苏高邮人,博士,高级工程师,主要从事大坝安全监控理论、海岸工程监测技术研究。E-mail: wwgj555@163.com。

Application of real-time monitoring technology to foundation settlement of sloping breakwaters in construction

WANG Wei¹, XU Kai¹, WANG Hai-long², LI Lu-lu²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Dongying Port Construction Investment Co., Ltd., Dongying 257091, China)

Abstract: In recent years, China's port construction exhibits the development trend of large scale and deep water, and many ports are not the same type of seawall construction. Riprap construction of sloping breakwaters in open waters endures many complex factors from the external environment. Especially, coastal regions have distribution of deep and soft soil layers. With the increase in riprap amount and breakwater size, the real-time monitoring of settlement deformation is critical to control construction speed and project quality. According to the project situation and the characteristics of GPS technique, a real-time monitoring method for foundation settlement of sloping breakwater is proposed, including manufacture, laying and observation of subsidence monitoring equipments. The application of engineering example shows that the proposed method is suitable for the complex environment of riprap construction, and the settlement monitoring information can provide reliable basis for adjusting the intensity of riprap so as to ensure the safety of sloping breakwaters.

Key words: sloping breakwater; settlement; real-time monitoring; GPS; settlement plate

0 引言

随着中国经济的快速发展,港口建设的规模和标准不断地提高,尤其朝着大型化、深水化的格局发展。在开敞海岸、海湾或岛屿的港口,常采用防波堤等水工建筑物形成有掩护的水域,因此防波堤具有防御波浪对港口内部侵袭的能力,保证内港池的水域相对平稳,便于船舶停靠及货物、人员的安全^[1]。许多大型港口的建设采用了适应当地施工条件的筑堤工艺或新式防波堤结构,如爆破挤淤法筑堤等^[2]。由于斜坡堤施工简单,波浪反射小,对地基沉降变形的适应性较强,因此斜坡堤是主要的结构形式,其断面形式一般

为梯形,主要采用天然块石或人工混凝土块体抛筑而成^[1]。

鉴于开敞式无掩护水域的施工复杂性,尤其中国沿海区域大量分布物理力学指标较差的淤泥土层,且软土层厚度较厚,随着上覆荷载的增加所引起的压缩变形量加大,地基土层的稳定性对于评价筑堤工艺的可行性至关重要,因此防波堤地基沉降的实时监测数据为判断防波堤抛填施工是否处于受控状态提供参考

基金项目: 水利部公益性行业科研经费项目(sg315002); 水利部公益性行业科研经费项目(20141006)

收稿日期: 2016-11-28

依据就显得极其关键。本文基于已有防波堤工程的监测经验，考虑本工程的施工特点对沉降盘的制作和埋设提出改进措施，并结合 GPS 建立防波堤地基沉降的实时监测技术。

1 沉降盘的制作和埋设

1.1 沉降盘的制作

由于施工现场的干扰影响因素多而复杂，一般常以现场加工的沉降盘作为斜坡堤地基沉降观测设备，沉降盘主要由底板和沉降杆构成，如天津港东疆北防波堤工程的沉降盘底座采用 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0.02\text{ m}$ 钢板，沉降杆采用直径 150 mm、厚度 5 mm 的钢管^[3]。另有些工程利用工字钢和螺纹钢作为骨架，底板采用 10 mm 厚的钢板^[4]。为了提高沉降盘的稳固性，本工程加大底板尺寸，使沉降盘底部受力更加均匀，底板的边长宜为 2.2~2.5 m，厚度宜为 14~16 mm。

沉降盘在沉入海水过程中，由于底板隔断了接触面水流的自由活动，随着水深的增加沉降盘所受海水的阻力越大，因此需要在底板打设透水孔便于水流的畅通，以减少海水对沉降盘的阻力，从而保持沉降盘在埋设过程中的平衡。基于反复的现场试验结果，透水孔的直径宜在 30~40 cm，一方面保留底板最大的有效面积使其保持一定的支撑力，另一方面便于水流的畅通减小沉降盘所受的阻力。

在抛填施工过程中，为了保证沉降杆的整体性尽量减少接头，沉降杆采用直径 168 mm、壁厚 10 mm 的无缝钢管，杆长一次加工成型。每个沉降盘杆长的长度依据各沉降监测点所在位置的水深和防波堤堤顶的设计高程确定。随着抛填量的加大，防波堤地基依据不同软土层的工程特性，其沉降量的变化幅度可能较大。为了保证沉降观测的连续性，沉降杆顶部焊接规格一致的法兰盘，以便后期加接沉降杆，确保沉降杆的顶部部分始终在海平面以上便于观测。

沉降杆与底板通过焊接的方式相连。首先在底板的中心部位切割略大于沉降杆直径的孔洞，再将沉降杆底部插入孔洞，最后实施焊接。为了加强沉降杆与底板之间的牢固性，在底板对角线方向焊接 4 个三角钢板，增加沉降杆与底板之间的支撑面。沉降盘的结构示意图如图 1 所示。

沉降杆顶部 2 m 内采用红白双色反光漆间隔涂刷，并在沉降杆顶部设置警示标语牌，无论在白天、夜晚使沉降盘更加醒目，提高其识别度，同时降低与船只碰撞的风险。为了控制沉降盘的埋设速率，从沉降杆顶部开始往下每间隔 100 mm 标识一个刻度。

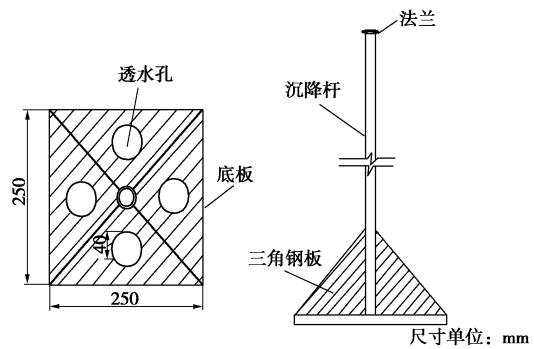


图 1 沉降盘结构示意图

Fig. 1 Diagram of settlement plate

1.2 沉降盘的埋设

为了尽早掌握防波堤地基的沉降变形规律，一般在防波堤地基实施排水板打设工序后，需要埋设沉降盘。由于水下情况难以掌握以及海平面以下存在涌浪运动，易导致土工格栅的铺设量及二片石的抛填量分布不均和地基表层不平整，从而加大了沉降盘的埋设难度。针对该问题，本工程采用袋装砂（中粗砂）等柔性载体填筑沉降盘的埋设区域，抛填范围大致为 5 m × 5 m，尽量整平地基表层。根据斜坡堤分级填筑的特点和沉降观测的要求，一般在防波堤堤轴心处及二级填筑平台中部实施沉降盘的埋设，其中由于防波堤堤轴心处的沉降量最大，因此是沉降观测的关键部位。

以堤轴心处沉降观测点的埋设为例，沉降盘的埋设采用两船对抛方式，首先利用海上浮标初步定位观测点的桩号，即两艘船舶沿堤轴线方向布置，以防波堤轴线为基准沿双侧移动适当的距离，测量人员通过手持 GPS 对船头和船尾同时定位，保持两船相对距离满足沉降盘的埋设空间需求，且每艘船须搭载 2 台反铲挖掘机。埋设沉降盘时，采用油丝穿过钢环捆绑沉降盘，并将沉降盘水平放置于船体，底板指向埋设区域。一台挖机握住油丝，另一台挖机托住底板缓慢地将沉降盘吊入海中。

沉降盘置于防波堤地基待平稳时，两船的挖机根据分级加载的设计要求相向同步抛填料石。为了避免体积较大的料石碰撞沉降盘或抛填量分布不均匀，须控制料石的规格，料石重量需小于 100 kg，料石直径需小于 450 mm。因此，本工程中采用铁丝网包住一定数量的料石，利用反铲挖掘机将其在沉降盘四周区域内均匀抛填，一方面避免料石被水流或涌浪冲散，另一方面避免沉降盘被料石挤压造成其观测点位置偏移或沉降杆倾斜。

沉降盘埋设后，在每级加载期间抛填船只应在沉降盘四周均匀抛填，并注意料石的规格。另外，由于涌浪运动造成局部区域流速过大经常发生船舶走锚现

象, 极易导致船锚刮倒沉降盘。针对这个问题, 本文采取两项预防措施以提高沉降盘的埋设存活率: ①沉降盘的端头绑扎一个由 PVC 材质的浮球, 若沉降盘倒入海中, 可通过浮球的位置打捞沉降盘; ②沉降杆管内放置钢筋条等刚性材料, 同时灌注粗砂加强沉降盘的自稳定性。

2 防波堤地基沉降的实时监测技术

2.1 GPS 测量原理

GPS(全球定位系统)主要有空间卫星星座、地面监控站及用户设备三部分构成, 是以卫星为基础的无线电卫星导航定位系统, 具有测量精度高、测站间无需通视、观测时间短、自动化程度高、全天候作业、实时提供三维坐标等特点, 已广泛应用于精密工程测量、控制测量、工程测量等测量工作中^[5-6]。

GPS 利用空间多颗卫星同步发出信息时的准确位置计算出 GPS 接收机在空间的三维坐标信息。设 GPS 接收机的空间坐标为 (X, Y, Z) , 已知某时刻卫星 S_1 所在空间坐标为 (X_1, Y_1, Z_1) , 则该时刻接收机与卫星 S_1 的距离 D_1 为

$$D_1^2 = (X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 \quad (1)$$

通过接收机信息的发出与接收的时间差 Δt 也可确定距离 D_1 , Δt_1 为已知值。

$$D = C\Delta t_1 \quad (2)$$

式中, C 为光速。若接收机同时接收卫星 S_2, S_3 所发出的坐标信息, 则相应的 D_2, D_3 为

$$D_2^2 = (X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 \quad (3)$$

$$D_3^2 = (X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2 \quad (4)$$

通过式(1)~(4)可得 GPS 接收机的空间坐标 (X, Y, Z) , 因此确定其坐标信息至少需要 3 颗卫星^[7]。

2.2 基于 GPS 的防波堤地基沉降实时监测技术

在 GPS 定位中测定的是点的大地高, 而观测点高程对应的是正常高或正高。由于目前难以确定足够精度的高程异常值, 所以测点高程须将大地高转换为正常高或正高, 从而造成较差的测量精度, 这也是 GPS 应用于高程测量的不足^[8]。对于防波堤沉降观测, 累加各时刻的沉降变化量即为防波堤的累计沉降量, 无需各时刻高程系统的精确转化, 因此 GPS 用于沉降观测是有精度保证的。另外, 港口施工区域开阔, 各观测点周围高度角 15° 没有障碍物, 信号通讯路径通畅及没有大功率无线电发射源和高压电线, 且栈桥延伸处于施工区域内中部, 这些现场条件均符合 GPS 的应用条件。

对于抛填区域内已有的测量控制点, 从其精度要求、点位密度、点位分布等方面都无法满足变形监测

的高精度要求。为了保证观测具有牢固可靠的基准系统, 需在港区重新建立适用于本工程的专用测量控制网。根据拟建防波堤的形状、施工特点及设计要求, 在栈桥及其侧面岸上布设控制点, 其中基准站设置于栈桥。在抛填施工过程中, 为了避免控制点受到破坏, 且满足控制点的稳定要求和监测精度要求, 适当地加固控制点的基础, 确保控制点的基础顶部不会遭到破坏, 同时结合水准测量每月定期对控制点进行复测保证其观测精度。

根据建设方提供的 G01、G08、G11 基准点和后期埋设的 KZD1、KZD2、KZD3、KZD4 等 4 个控制点建立测量控制网, 并以控制网的网平差、基线解算来解得控制点坐标。在防波堤的运行期, 将在其再埋设 5 个永久变形观测点, 和前期的 7 个控制点进行布网联测。测量控制网如图 2 所示。

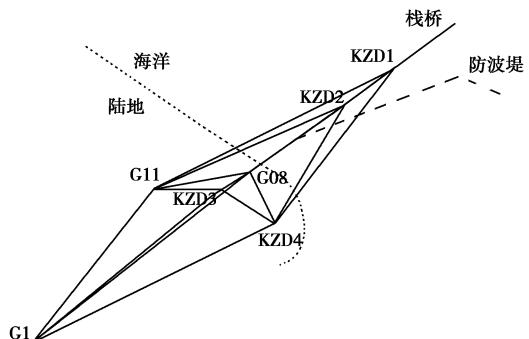


图 2 测量控制网示意图

Fig. 2 Diagram of surveying control network

对于沉降观测, 每个沉降盘就相当于一个观测点。本工程根据 GPS 设备的特点, 自制了固定装置将 GPS 固定于沉降盘, 仅需一次水平、对中操作就可完成 GPS 流动站的设置。考虑抛填施工的特点, 尤其在抛填料石期间现场危险因素较多, 测量时间不宜过长, 因此该阶段采用 GPS-RTK 动态测量模式。在抛填施工的间隔期或暂停期, 现场测量条件相对安全, 沉降盘受外界干扰影响较小, 此阶段采用快速静态模式, 通过网平差求得各观测点的坐标信息。为了提高沉降监测的精度, 本文采用双基站测量方法, 以 KZD1、KZD2 作为基准站, 单次 10 min 测一数据, 3 次对应一个基准站, 即每个观测点测量 6 次, 取平均值作为输出测值能够有效地减小测量误差。

3 工程应用

3.1 工程概况

某防波堤工程采用斜坡式结构, 港区内原泥面标高为 $-8.90 \sim -9.90$ m, 总施工长度为 4963 m, 堤顶标高为 5.0 m, 堤顶宽 5 m。港区抗震设防烈度为 7 度,

设计基本地震加速度为 $0.15g$ 。抛填施工前, 对防波堤地基进行加固处理, 首先抛填 1.5 m 的袋装砂, 在形成的基槽内抛填 1.5 m 的中粗砂垫层, 并打设原生B型塑料排水板, 排水板呈正方形布置, 间距为 1.0 m , 排水板打至 $-26.0\sim-27.5\text{ m}$ 。处理后铺设 200 kN/m 高强土工格栅及 50 cm 厚二片石, 二片石垫层上抛填 $10\sim500\text{ kg}$ 堤心石。堤心石料共分三级抛填, 第一级抛填至高程 -6.49 m , 第二级抛填至高程 -2.26 m , 第三级抛填至高程 $+1.44\text{ m}$ 。抛石边坡坡度为 $1:1.5$, 其上为 1.30 m 厚 $600\sim800\text{ kg}$ 垫层块石, 堤身内外侧垫层块石上安装 12 t 扭王字块护面。堤心石内、外两侧坡脚处抛填 $600\sim800\text{ kg}$ 棱体块石。棱体块石外侧抛填护底块石。内侧规格为 $60\sim100\text{ kg}$, 外侧规格为 $100\sim150\text{ kg}$ 。防波堤典型断面结构如图3所示。

根据地质勘察报告, 港区内土层分布特点略有起伏, 在勘察深度范围内自上而下主要有第一大层①₁淤泥、①₂淤泥质粉质黏土、①₃淤泥质黏土及①₄粉土, 分布底高程约为 $-9.28\sim-16.94\text{ m}$; 第二大层②₁粉质黏土、②₂淤泥质粉质黏土、②₃淤泥质黏土及黏土夹层, 分布底高程约为 $-17.6\sim-23.8\text{ m}$; 第三大层③₁粉质黏土及③₂粉土, 分布底高程为 $-24.99\sim-33.32\text{ m}$; 第四大层④₁粉细砂。其中第一大层和第二大层的工程地质性质较差, 淤泥层分布较厚。第三大层分布较连续, 层位较稳定, 第四大层分布连续并且层面高程起伏较大, 但土层承载力高, 工程地质性质好, 可作为良好的基础持力层。各大土层的主要物理力学参数如表1所示。

3.2 沉降观测点的布置

根据设计要求, 防波堤工程共设置 19 个沉降观测

断面, 间隔 300 m 设置, 其中控制性断面 6 个, 非控制性断面 13 个。对于控制性断面, 分别在二级棱台海侧、陆侧和堤轴心处各设置一处沉降观测点。非控制性断面须在堤心处设置沉降观测, 其二级棱台两侧根据现场施工条件可适当设置沉降观测点。

表1 土层的主要物理力学参数

Table1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层	含水率 $w/\%$	重度 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_p	压缩系数 $a_v/(MPa^{-1})$
① ₁	57.9	16.4	45.5	21.4	1.36
① ₂	41.9	17.6	33.8	14.4	0.61
① ₃	48.1	17.1	41.0	19.4	1.01
① ₄	25.7	19.2	29.5	7.3	0.20
② ₁	29.8	18.9	31.3	13.1	0.43
② ₂	38.6	17.9	33.4	14.4	0.60
② ₃	44.4	17.5	40.6	19.3	0.74
③ ₁	25.1	20.0	28.8	12.1	0.34
③ ₂	22.7	20.0	25.3	5.2	0.17

3.3 沉降监测结果分析

由于受天气、波浪、现场施工等外界因素的不利影响, 自 2014 年 10 月随着抛填施工进度埋设沉降盘, 所以各断面地基沉降监测的起始时间不一致。

其中断面 K2+830、断面 K3+620、断面 K4+020、断面 K4+300 和断面 K4+600 断面沉降观测点的埋设进度与抛填施工进度基本一致, 因此能够真实地反映抛填施工过程中防波堤地基的沉降变化过程(图4)。2015 年 9 月初防波堤工程的抛填施工基本结束, 至 2016 年 3 月上述各断面的累计沉降量如表 2 所示。综合对比加载层厚度和沉降量的关系, 可知各断面地基的沉降速率随着抛石加载厚度而变化, 最大沉降速率均发生在第三级加载施工阶段的初期, 最大值一般在 10 mm/d 以上, 超出设计要求的预警指标值(15 mm/d)

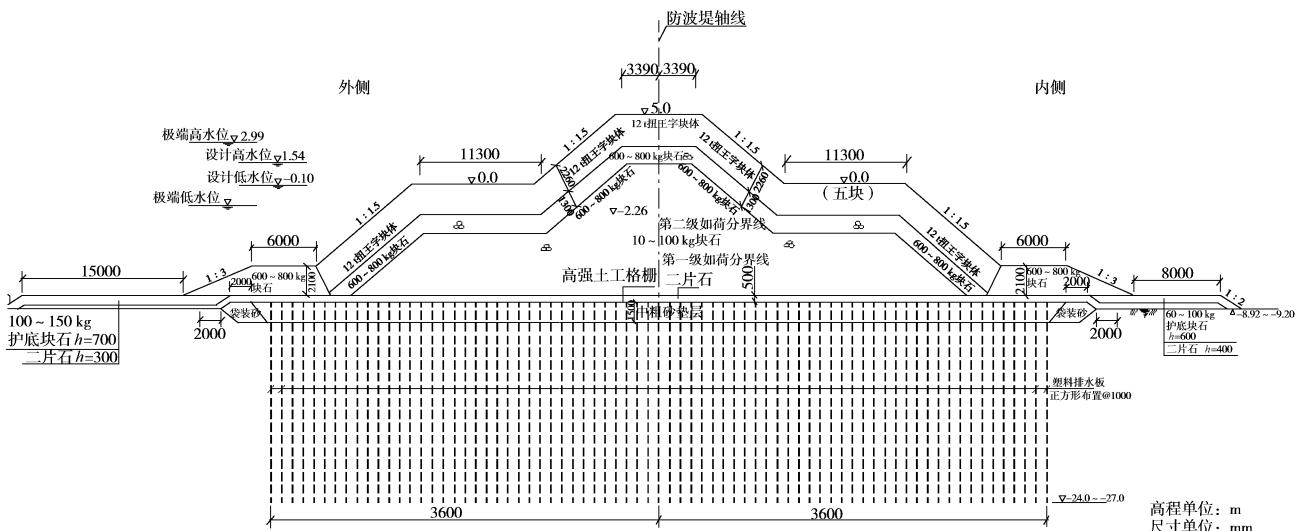


图3 防波堤典型断面结构图

Fig. 3 Diagram of breakwater section

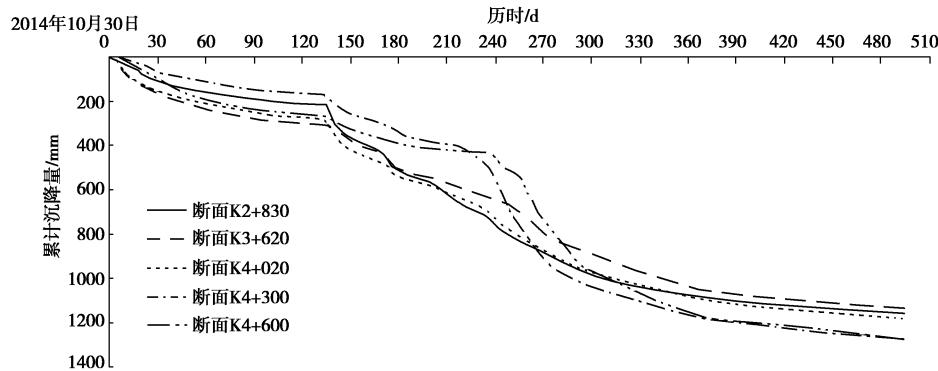


图 4 防波堤地基累计沉降量过程线

Fig. 4 Process curves of total settlement of breakwater foundation

表 2 截至 2016 年 3 月沉降观测结果

Table 2 Settlement observation results of breakwater foundation

断面号	沉降盘埋设日期	累计沉降量/mm
K2+830	2014-10-18	1154.9
K3+620	2014-10-19	1132.2
K4+020	2014-10-17	1182.5
K4+300	2014-10-29	1275.5
K4+600	2014-10-29	1276.9

的现象有所增加。为了确保防波堤地基沉降变形的稳定, 一旦沉降速率超出预警指标值, 均建议施工单位暂停施工。随着抛填强度的降低或填筑施工停止后, 沉降速率也逐渐减小。若间隔期越长, 随着时间的推移各断面的沉降速率呈现减缓变化过程, 一般约在 1~3 mm/d。目前, 防波堤地基累计沉降量在 1.1~1.3 m 之间, 其中第三级加载层对应的地基沉降量最大, 几乎占到总沉降量的 55%~65%, 因此第三级加载过程是整个项目的监测关键点。

由于防波堤的附加段(桩号 K4+963—桩号 K5+099)抛填施工任务紧迫, 因此采用抛石挤淤方式筑堤, 未实施地基表层的初步加固措施。2015 年 8 月 11 日—8 月 16 日期间, 断面 K5+030 呈现出明显的挤淤现象, 地基表层日水平位移量最大达到 200.9 mm, 表明抛石引起土体表层变形极不稳定, 块石体挤压地基表层的挤淤量较大。

相应的地基表层沉降速率达到 20~40 mm/d, 甚至更大远远超出预警指标值(15 mm/d)。为了便于分析沉降变化规律, 将附加段的地基沉降量划分两部分: ①抛石挤淤阶段抛填挤淤所引起的沉降量; ②抛石挤淤后阶段, 即地基挤淤变形相对稳定阶段对应的沉降量。因此对于断面 K5+030, 抛石挤淤阶段对应的地基表层沉降量为 2022.7 mm, 至 2016 年 3 月抛石挤淤后阶段对应的沉降量为 593.4 mm, 附加段地基的

累计总沉降量为 2616.1 mm, 抛石挤淤阶段所引起的沉降量约占目前附加段地基累计总沉降量的 80%。综合对比防波堤主堤段和附加段的施工方式, 在抛填施工前对防波堤地基采取加固措施能够有效地减少挤淤量, 地基沉降变形相对平缓, 抛填料石量与抛石挤淤方式相比较少。尤其在抛石挤淤阶段, 地基表层沉降速率往往是预警指标值(15 mm/d)的 2~5 倍, 若依据设计要求暂停施工不符合现场的实际施工情况, 而在抛石挤淤后阶段若沉降速率超出预警指标值, 则应引起施工单位的重视, 并根据现场实际施工情况决定是否暂停施工。

4 结语

港区水文地质、天气和波浪条件复杂, 且施工区域内难以建立直接用于观测防波堤地基沉降的观测点和观测平台, 因此如何实施沉降实时监测是对抛填施工过程加以控制的首要难题。根据防波堤工程的施工特点, 基于已有海堤工程的监测经验, 制作适用于本工程沉降监测的沉降盘, 并针对埋设过程中的难点提出相应的改进措施, 同时结合 GPS 建立沉降实时监测技术。通过某防波堤工程的应用表明: 对于分级填筑, 第三级抛填加载过程中易出现超出预警指标值的现象, 因此该阶段是沉降监测的重点。对于未实施排水板打设的抛石挤淤筑堤, 施工初期依据预警指标值(15 mm/d)控制抛填施工的速率有待商榷。

本工程的实时沉降监测方案根据抛石填筑过程采集沉降变形数据, 能够及时反映沉降速率是否超出预警指标, 表明该沉降监测方案合理, 所得观测数据可靠, 对抛填施工过程的动态控制起到了关键性作用, 施工单位能够根据反馈的沉降观测信息及时调整抛填速率, 保证了防波堤地基的稳定, 满足了工程需求和设计要求。

参考文献：

- [1] 韩理安. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. (HAN Li-an. Harbor engineering structure[M]. Beijing: China Communication Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 陈 勇. 爆破挤淤法处理某防波堤工程的长期沉降规律分析[J]. 港口技术, 2013, 50(2): 58 - 60. (CHEN Yong. Analysis of long-term settlement rule on breakwater project treated by blasting compaction[J]. Port Engineering Technology, 2013, 50(2): 58 - 60. (in Chinese))
- [3] 戴 鹏, 李 鑫. 斜坡式防波堤中抛石施工工艺及质量控制[J]. 中国水运, 2014, 14(7): 314 - 315. (DAI Peng, LI Xin. Construction technology and quality control for sloping breakwater[J]. China Water Transport, 2014, 14(7): 314 - 315. (in Chinese))
- [4] 苏 冰. 某深水防波堤施工中的预留沉降控制[J]. 建材与装饰, 2015(12): 292 - 293. (SU Bing. Settlement reservation control in construction of a deepwater breakwater[J]. Construction Materials & Decoration, 2015(12): 292 - 293. (in Chinese))
- [5] 董昌周, 黄 甫, 段贻民. GPS 在工程测量中的应用[J]. 浙江科技学院学报, 2004, 16(1): 14 - 16. (DONG Chang-zhou, HUANG Fu, DUAN Yi-min. Application of GPS in engineering survey[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2004, 16(1): 14 - 16. (in Chinese))
- [6] 章红平, 温宇斌, 张志勇, 等. 静态 GPS 测量与 RTK 测量实例分析[J]. 测绘通报, 2006(1): 28 - 31. (ZHANG Hong-ping, WEN Yu-bin, ZHANG Zhi-yong, et al. Analysis of examples of GPS static surveying and RTK surveying[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2006(1): 28 - 31. (in Chinese))
- [7] 李益恒. GPS 定位系统在隧道施工控制测量中的应用[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2006, 5(3): 45 - 47. (LI Yi-heng. Application of GPS orientation system in the survey construction of tunnels[J]. Journal of Guang Dong Communications Polytechnic, 2006, 5(3): 45 - 47. (in Chinese))
- [8] 李征航. GPS 定位技术在变形监测中的应用[J]. 全球定位系统, 2001, 26(2): 18 - 25. (LI Zheng-hang. GPS technology in the application of deformation monitoring[J]. Gnss World of China, 2001, 26(2): 18 - 25. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)