



未经夯实堆石结构蠕变沉降估算

黄胜，邓振洲，李存兴，李博名

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司，湖北 武汉 430060)

摘要：在以往的水运工程设计中、仅考虑软土地基的沉降和蠕变，忽略堆石体自身的蠕变沉降。引堤、防波堤、岸壁式码头后方回填等堆石体结构不能有效夯实且结构较厚时，其长期蠕变沉降可能影响使用功能。结合巴基斯坦某引堤、防波堤工程，应用反馈分析法及室内试验研究法，对堆石体蠕变量进行计算，并结合沉降观测数据与计算结果进行对比分析。结果表明，反馈分析法对于水运工程堆石体蠕变沉降计算的适用性较强，与实际观测数据吻合较好，可为类似工程提供参考。

关键词：未夯实堆石结构；蠕变沉降；估算；沉降观测

中图分类号：U 655.54

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)02-0144-06

Estimation of creep settlement for uncompacted rockfill structure

HUANG Sheng, DENG Zhen-zhou, LI Cun-xing, LI Bo-ming

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: In the design of previous water transport projects, the settlement and creep of the soft ground are considered, and the creep settlement of the rockfill itself is ignored. When the rockfill structures such as breakwaters, causeways, and backfills at the back of quayside piers cannot be effectively compacted and the rockfill structure is thick, its long-term creep settlement may affect the function of the structure. Based on a dike and breakwater project in Pakistan, we apply the feedback analysis method and laboratory test method to calculate the creep variable of rockfill, and compare and analyze the observation data of settlement and calculation results. The results show that the feedback analysis method has strong applicability to the calculation of creep settlement of rockfill in water transportation projects, and it is in good agreement with the actual observations. It can provide references for similar projects.

Keywords: uncompacted rockfill structure; creep settlement; estimation; settlement observation

随着社会经济的快速发展以及施工技术的提高，大型水运工程的施工周期不断缩短，工序之间的衔接更加紧密，未经夯实的引堤、防波堤、岸壁式码头后方回填等堆石结构在施工结束后长达几十年的持续沉降问题愈发突出。对深水防波堤，沉降过大将导致越浪量增加，影响港池的泊稳条件；当未夯实堆石结构上部存在钢轨、皮带机、油气管线等附属基础结构时，长期沉降可能影响使用功能，甚至造成安全隐患。

堆石结构的工后沉降变形主要由堆石料本身

的蠕变引起。目前关于堆石结构蠕变的研究多集中于水利工程领域，特别是针对面板堆石坝蠕变的研究成果较多；水运工程领域的蠕变研究刚刚起步，研究成果相对较少。我国水运工程行业的设计标准主要针对土体变形引起的工后沉降做出了规定，而未考虑堆石结构本身的蠕变效应，因此设计人员在设计实践中通常对蠕变效应不做考虑。对于顶面高程及平整度控制要求较高的工程，施工中通常采取预压载的方式提高堆石结构的密实度，控制工后蠕变沉降。结合结构特点，可将

面板堆石坝蠕变的研究成果应用于引堤、防波堤及岸壁式码头墙后回填料等堆石结构的蠕变计算。

目前蠕变理论、蠕变断裂的微观机制以及蠕变和工程失效形式的相互作用的研究仍不成熟, 堆石结构蠕变的研究方法主要包括室内试验研究法和反馈分析法这两种宏观研究方法。室内试验研究法常用大型三轴仪对堆石料的蠕变特性进行分析, 建立蠕变模型并确定蠕变参数^[1-3]; 反馈分析法则利用实测资料对模型参数进行反馈计算, 从而得到堆石结构的相应蠕变模型参数^[4-5]。

本文结合巴基斯坦某引堤、防波堤工程, 应用 Hunter 等^[6]基于 36 座混凝土面板堆石坝的实测资料分析归纳得出的堆石料轴向蠕变速率-时间经

验关系及李海芳等通过三轴蠕变试验总结的轴向蠕变-时间关系, 对引堤蠕变沉降进行计算, 并结合沉降观测数据对计算结果进行对比分析。

1 概况

1.1 工程概述

工程位于巴基斯坦 Baluchistan 省 Hub 河河口地区, 为专用煤炭进口码头, 停靠 1 万 t 驳船, 码头年煤炭进口量为 440 万 t。水工结构主要包括引堤、引桥、变电所墩台、码头和防波堤等; 引堤和防波堤均采用堆石堤结构, 其中引堤长 488 m, 堤顶设挡浪墙及铺面, 其上铺设管道及皮带机栈桥; 防波堤长 727 m。总平面布置见图 1。

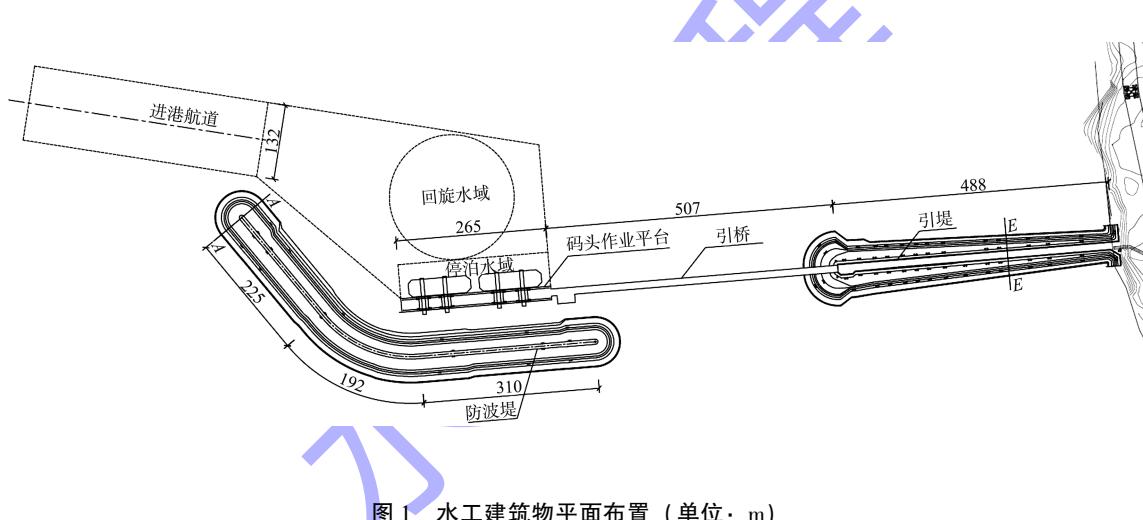


图 1 水工建筑物平面布置 (单位: m)

1.2 水文条件

设计水位为: 极端高水位(50 a 一遇)为 4.2 m, 设计高水位为 3.0 m, 设计低水位为 0.4 m, 极端低水位(50 a 一遇)为 -0.6 m。

波浪条件为: 防波堤区域 1 a 一遇有效波高为 2.9~3.2 m, 100 a 一遇有效波高为 5.7~6.1 m; 引堤区域 1 a 一遇有效波高为 2.0~2.3 m, 100 a

一遇有效波高为 4.3~5.1 m。

1.3 地质条件

根据引堤区域 BH28~BH32 钻孔揭示, 地层构造从上至下依次分布②₁ 中粗砂砾、②₄ 砂质中粗砂、②₇ 硬质黏土、③₁ 强风化砾岩、④ 中微风化砂泥岩等, 见表 1。

表 1 引堤区域钻孔地层揭示

地层编号	地层描述	厚度/m	顶高程 /m	平均标准贯入击数/击
② ₁	松散-中等密实的中粗砂砾	0.4~3.1	-4.60~-2.40	51.4
② ₄	密实-非常密实的轻砾质中细砂	3.1~3.8	-4.20~1.74	47.7
② ₇	硬质黏土	1.1~1.8	-7.70~-5.90	30.3
③ ₁	极软-很软的强风化砾岩	2.3~6.0	-9.40~-3.66	125.5
④	很软-软的中风化砂泥岩	4.5~9.2	-11.70~-9.66	-

1.4 引堤典型断面

本工程引堤区域典型地质和典型断面 E-E 如图 2 所示, 结构形式为挡墙式斜坡堆石堤, 挡墙顶高程为 10.00 m, 堤顶道路高程 7.60 m。引堤

北侧和南侧护面均采用 7 t 扭王字块, 坡度为 1:1.5; 垫层采用 500~1 000 kg 块石; 护脚采用 2 800~3 900 kg 块石; 港内、外两侧护底均采用 200~300 kg 块石; 堤心石采用 5~450 kg 块石。

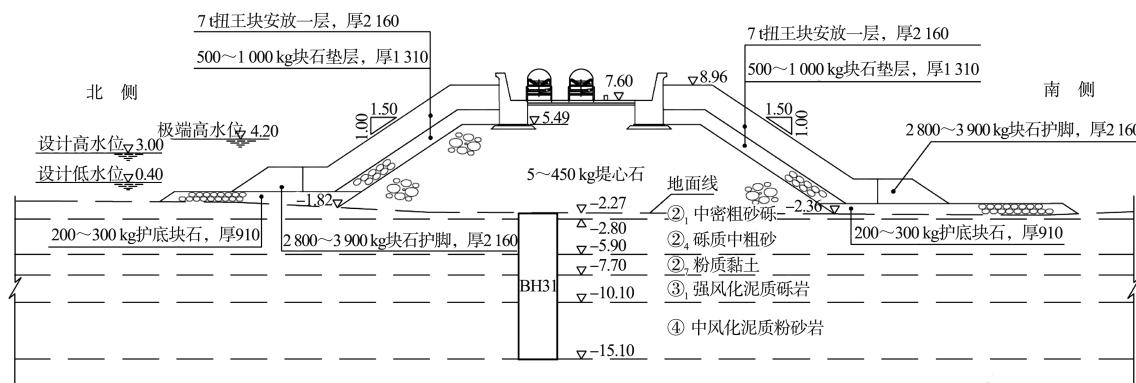


图 2 引堤 E-E 断面结构 (尺寸: mm; 高程: m)

2 堆石体的蠕变沉降估算

2.1 影响堆石体蠕变沉降的因素

堆石材料常采用较好的石料, 一般强度在 30~50 MPa, 石块材料的弹性模量及堆石体的压缩模量均较大, 弹性变形沉降量非常小, 而且施工完成后主沉降即可完成。堆石体自身的蠕变沉降成因复杂, 影响因素较多, 主要因素为:

1) 块石形状: 表面棱角多的块石, 块石之间接触面积小、接触点应力大, 容易压碎, 工后蠕变沉降大; 卵石等表面圆滑的石料由于接触面积大、接触应力小不易破碎, 工后沉降小。

2) 块石颗粒大小及级配分布: 级配均匀的工后沉降大、级配良好的工后沉降小。

3) 施工方法: 人工堆放、分层施工、分层碾压夯实, 不同施工方法堆石结构的密实度不同, 密实度越小, 工后沉降越大。

4) 坝体高度、围压应力: 坝体高度越高、应力越大, 工后沉降越大。

5) 抛石体内部的水流情况: 水位变化或降雨波浪等环境因素引起的渗流, 水体流动可带走由于应力集中而破碎的粉末, 水位变化大、降雨大或波浪大等导致堤身内部水体运动强烈时, 沉降更大。

6) 堆石结构所在相对位置: 一般情况下, 堤心地区碾压夯实效果更好, 沉降更小; 边坡区域密实效果差, 沉降更大。

7) 其他因素如坝体形状、地基形状等对工后沉降也有一定影响。

但以上因素仅仅是定性分析, 不同工程的石料产材不同, 不可控因素较多, 并没有足够的工程案例进行定量分析。

2.2 Hunter 法预测蠕变沉降

Hunter 等基于世界多国 36 座堆石坝的 47 组实测资料, 对影响堆石坝应力-应变特性以及外部应力条件的因素进行了分析和评估, 并结合其中对于堆石坝蠕变影响显著的因素, 归纳总结了用来估算工后沉降的方法。

依据的不同堆石坝工程的条件范围为:

1) 坝体高度 38~185 m; 内坡比 1:1.5~1:1.0, 外坡比 1:1.3~1:2.5。

2) 基础为大部分工程为良好的基岩, 少数工程地基为碎石或岩溶条件。

3) 坝体填筑石料为开山石(无特定级配)、卵石、级配块石等; 石料材质为花岗岩、玄武岩、砾岩、砂岩、粉砂岩、板岩、千晶石、流纹岩、石英岩、石灰岩、片麻岩、花岗闪长岩等; 石料中值粒

径 D_{50} 平均值为 100 mm 左右, 最大 1 500 mm, 最小 26 mm; 不均匀系数 C_u 为 7~85, 曲率系数 C_c 为 1.4~9.9; 主要块石强度为 25~180 MPa。

4) 主体部分施工周期 4 个月至 6 年。

5) 工程区域年均降雨量为 600~3 150 mm。

6) 不同工程坝体渗流速率为 1~2 000 L/s。

针对未经密实的堆石体, Hunter 等总结出以下蠕变沉降计算公式:

$$\Delta H = \alpha \cdot \lg \frac{t_2}{t_1} \quad (1)$$

式中: ΔH 为堆石堤堤顶沉降量与堆石堤高度的比值(%); α 为单位对数时间内堆石堤的沉降量与堆石堤高度的百分比值(%), 即沉降速率, 取值范围见表 2; t_1 、 t_2 为堆石堤竣工后的沉降开始时间、结束时间(月)。

表 2 Hunter 法蠕变沉降速率取值

堆石堤竣工后时间/a	第一次堆石后堤顶沉降速率 (单位对数时间内堆石堤的沉降量与堆石堤高度的百分比值)/%	
	范围	平均值
0.5~5	0.10~0.58	0.27
5~20	0.25~1.14	0.66
20 以上	0.33~1.44	0.85

对于本工程, 平均水位取设计高水位和设计低水位的平均值, 则:

$$Z_0 = \frac{(Z_{\text{DHWL}} + Z_{\text{DLWL}})}{2} \quad (2)$$

式中: Z_0 为平均水位; Z_{DHWL} 为设计高水位; Z_{DLWL} 为设计低水位。计算出 $Z_0 = 1.70$ m。

$E-E$ 断面堆石等效高度:

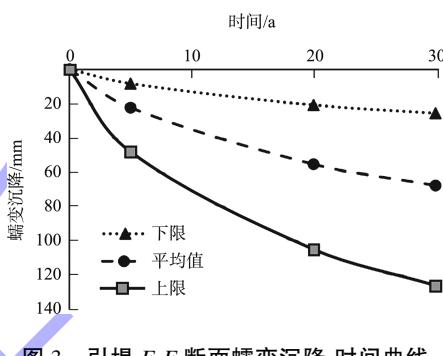
$$H_E = (Z_T - Z_0) + \frac{\rho'}{\rho} (Z_0 - Z_B) \quad (3)$$

式中: H_E 为堆石等效高度; Z_T 为堤顶高程; Z_0 为平均水位; Z_B 为海底高程; ρ 为堆石体天然密度; ρ' 为水下堆石体有效密度, 取浮密度。计算出 $H_E = 8.33$ m。

$E-E$ 断面使用期 30 a 内的蠕变沉降量, 根据表 2 推荐的参数, 计算出的结果见表 3, 蠕变沉降-时间曲线的预测结果见图 3。

表 3 引堤 $E-E$ 断面蠕变沉降量计算结果

项目	竣工后时间/a	沉降速率 $\alpha/\%$	沉降量		累计沉降量/mm
			$\Delta H/\%$	$\Delta h/\text{mm}$	
下限	0.5~5	0.10	0.100	8.33	8.33
	5~20	0.25	0.151	12.58	20.91
	20~30	0.33	0.058	4.83	25.74
平均值	0.5~5	0.27	0.270	22.49	22.49
	5~20	0.66	0.397	33.07	55.56
	20~30	0.85	0.150	12.50	68.06
上限	0.5~5	0.58	0.580	48.31	48.31
	5~20	1.14	0.686	57.14	105.46
	20~30	1.44	0.254	21.16	126.62



2.3 李海芳法预测最终蠕变沉降

李海芳等通过三轴蠕变试验, 采用式(4)的幂函数公式来拟合两河口电站堆石料的轴向蠕变-时间关系, 并得到主应力比 $R = 3.0$ 时, 最终轴向、体积变化量与轴向应力的关系, 见表 4。

$$\varepsilon = \alpha \left(\frac{t}{t_0} \right)^b \quad (4)$$

式中: ε 为轴向蠕变; α 为 $t = t_0$ 时的试样蠕变, 称之为轴向(或体积)初始蠕变; t_0 为初始参考时间, 对于试验结果分析, 可取 $t_0 = 1$ min; t 为试验过程的时间; b 为该时间点至试验结束之间拟合曲线的斜率, 表征试样的蠕变速率, 称之为轴向(或体积)蠕变指数。 α 、 b 与材料及其所受应力状态有关, 根据蠕变试验确定。

表 4 李海芳法应力与最终蠕变的关系

轴向应力/MPa	轴向变化率/%	体积变化率/%
3.00	3.9	3.30
2.00	2.5	2.00
1.50	1.7	1.70
1.00	1.0	1.10
0.50	0.4	0.50
0.25*	0.2*	0.25*

注: * 为插值计算结果。

根据试验拟合结果, 轴向变化率随轴向应力的降低而减小。经计算, 本工程堆石堤 E-E 断面堆石自重产生的最大轴向应力约为 0.25 MPa, 线性插值得轴向变化率约为 0.20%, 据此估算最终沉降量, 结果 ΔH 为 0.2%、 Δh 为 16.66 mm。

3 实测结果对比验证

本工程引堤区域, 基岩较浅、覆盖层好, 总沉降小, 且沉降可在施工期完成, 可忽略由于土

体变形导致的工后沉降; 对于局部 1.1~1.8 m 厚的硬质黏土层②, 采用通用岩土有限元计算软件 PLAXIS 进行土体变形计算, 得到工后总沉降量约为 4 mm, 完成 96.65% 的地基自身沉降只需要 2 个月。

为避免土体变形导致的工后沉降对堆石堤蠕变观测造成干扰, 沉降观测自堆填施工完成约半年后开始, 沿引堤北侧挡浪墙布置沉降观测点 5 个, 如图 4 所示。

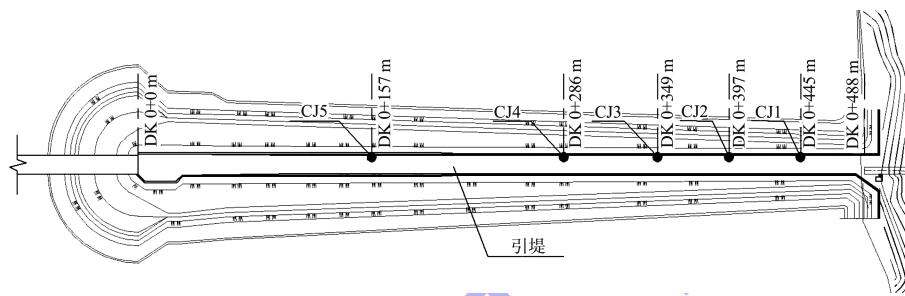


图 4 引堤沉降观测点布置

测量仪器采用 DS 自动安平水准仪, 水准尺为铝合金塔尺, 对引堤堤心石堆填完成后的沉降量进行持续的观测, 结果见表 5。

表 5 沉降观测结果

观测点	施工完成日期 D_0	观测开始日期 D_1	观测截止日期 D_2	沉降量 $\Delta h/\text{mm}$
CJ1	2017-01-21	2017-08-20	2018-03-26	3
CJ2	2017-01-26	2017-09-13	2018-03-26	2
CJ3	2017-02-02	2017-09-13	2018-03-26	3
CJ4	2017-02-12	2018-01-09	2018-03-26	1
CJ5	2017-09-17	2017-11-22	2018-03-05	3

由 Hunter 法蠕变计算公式变形得到:

$$\alpha = \frac{\Delta H}{\lg(t_2/t_1)} \quad (5)$$

根据沉降观测点的沉降量数据对沉降速率 α 进行反算, 结果见表 6。

表 6 沉降速率计算结果

观测点	$\Delta H/\%$	$t_1 (=D_1-D_0)/\text{月}$	$t_2 (=D_2-D_0)/\text{月}$	沉降速率 $\alpha/\%$
CJ1	0.036	7.03	14.30	0.117
CJ2	0.024	7.67	14.13	0.090
CJ3	0.036	7.43	13.90	0.132
CJ4	0.012	11.03	13.57	0.134
CJ5	0.036	2.20	5.63	0.088

经验证, 实测蠕变前期的沉降速率与 Hunter 法的 0.5~5 a 下限值 0.1 较为接近, 也与文献[5]的蠕变沉降速率随堆石体高度减小而降低的趋势吻合。可以预测, 引堤堆石体竣工后 5、20、30 a 后的累计蠕变沉降量约为 8、21、26 mm。根据该沉降量, 设计时采取了适当的措施, 使皮带机基础能够适应引桥和引堤的沉降差, 确保电厂运营期间皮带机的使用安全。

李海芳法采用幂函数拟合的蠕变-时间关系对于堆石体的材料性质及所受应力状态敏感性强, 仅对试验范围内的数据具有较好的拟合效果。本工程引堤、防波堤的堆石高度远小于水利工程堆石坝高, 堆石体围压较小, 公式不再适用; 只能通过插值方法估算得到最终的轴向蠕变沉降量, 无法预测蠕变沉降随时间变化的规律, 反之也无法用沉降观测结果对其进行验证。

4 结语

1)未经夯实的堆石结构, 由于孔隙率较大、块石之间多为点接触, 接触点应力较大, 随着时间推移、接触点发生破碎, 导致块石颗粒位置重

新排列, 从而发生沉降, 当堆石结构厚度较大时, 其长期蠕变沉降不可忽略。现行规范对堆石自身的蠕变沉降没有规定, 当堆石体厚度较大、上部有钢轨、设备基础、油气管线时, 可能影响使用, 应引起设计人员的重视。

2) 本工程地质条件极好, 地基变形导致的工后沉降极小, 避免了对堆石体蠕变沉降观测的干扰, 观测结果可信度较高。

3) Hunter 法对于水运工程领域堆石体蠕变沉降计算的适用性较强, 沉降速率与实际观测吻合较好, 可用于预测类似工程的堆石体工后沉降; 李海芳法得到的拟合公式对材料性质、应力状态等影响因素敏感, 一般应用于高度大的水利工程堆石坝结构, 而普通的水运工程堆石结构一般不超过 40 m 高、应力较低, 只能插值估算得到最终蠕变沉降量, 对水运工程实践指导性不强。

4) 由于观测时间最长仅到堤心完成后的第 14 个月, 需要更长期的观测数据对上述结论做进一步验证。

5) 对于类似的不能夯实的堆石结构, 如岸壁式码头的墙后抛石棱体、回填块石, 都存在不同

(上接第 125 页)

2) 对于多个交界面相互衔接设计时, 常规的二维设计方法难以准确地设计出各交界面之间的衔接和过渡。本文通过采用 Civil 3D 三维建模功能, 提出一种通过三维建模对二维设计进行辅助的设计方法, 该方法可以准确地体现出各交界面之间的衔接和交接轮廓, 为二维设计提供了准确的可视化参考和轮廓参考。

3) 本文基于 Civil 3D 的三维设计方法, 提出一种基于三维模型的横断面和三维相关交界面的轮廓线进行准确的二维出图的设计方法, 为类似复杂过渡断面的设计提供了参考。

程度的堆石料长期蠕变, 而且存在轨道和管线等附属设施基础, 对码头正常使用的影响更为明显, 解决堆石体蠕变沉降计算的问题更为迫切, 是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 李海芳, 张茵琪, 金伟, 等. 堆石料蠕变特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 212-217.
- [2] LI H F, ZHANG Y Q. Creep rate and creep model of rockfill[J]. Procedia engineering, 2012, 28: 796-802.
- [3] 王琛, 詹传妮, 何鹏, 等. 堆石蠕变与颗粒破碎特性三轴试验[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5): 57-62.
- [4] 朱叶. 面板坝堆石体蠕变量数学模型的原型验证[J]. 水电能源科学, 2015, 33(7): 92-93, 203.
- [5] SHARP N B. Consolidation settlement of quay walls, quay aprons and crane rails involving rockfill[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy, 1996, 118(3): 177-188.
- [6] HUNTER G, FELL R. The deformation behaviour of rockfill[R]. Sydney: University of New South Wales, 2002.

(本文编辑 王璁)

参考文献:

- [1] CIRIA, CUR, CETMEF. The rock manual-the use of rock in hydraulic engineering: CIRIA C683[S]. London: CIRIA, 2007.
- [2] 谭斌, 许万胜, 杨易. 复杂水文条件下防波堤拆除与重建施工技术[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(7): 183-184.
- [3] 勾贺, 李瑞杰, 董啸天, 等. 防波堤平面布置对建设用海区波浪场影响的数值模拟[J]. 水运工程, 2019(6): 15-20, 45.
- [4] 许万胜, 谭斌. 长周期波影响的河口防波堤施工技术[J]. 水运工程, 2019(S1): 16-20, 25.
- [5] 任耀. AutoCAD Civil 3D 2013 应用宝典[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.

(本文编辑 王璁)