

白鹤滩水电站移民区高填方工程现场监测与分析

顾晓强^{1,2}, 梁玉珍^{1,2}, 周奇辉³, 刘尊景³, 范志强³, 荆子菁³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 为了保障高填方地基的稳定性和后期使用的安全性, 开展了白鹤滩水电站高填方工程沉降变形的现场监测, 分析了原地基和填筑体在施工期及竣工后的沉降规律, 探讨了填筑高度、地基综合压实度、时间和水位变化对高填方地基沉降的影响。结果表明, 以砾石填料为主的高填方工程, 原地基和填筑体对总沉降均有较大贡献, 其中原地基沉降占总沉降量的 39.7%, 填筑体沉降占总沉降量的 60.3%。适当提高地基综合压实度是控制地基沉降的有效措施。使用不同拟合模型预测了高填方地基的沉降, 结果表明指数模型能够较好反映此类高填方工程的沉降变形规律。水库蓄水引起填筑区域地下水位上升, 土体发生的瞬时湿化变形占总体湿化变形量的 60.9%。孔隙水压力的增长和消散主要受地下水位和填筑荷载的影响, 填筑施工期孔压增量与上覆荷载增量呈线性关系, 其孔隙水压力系数等于 0.021, 土体在填筑期间始终处于稳定状态。竣工后超静孔隙水压力逐渐消散, 地基开始固结沉降。

关键词: 高填方工程; 沉降监测; 沉降预测; 湿化; 孔隙水压力

中图分类号: TU44

文献标志码: A

Settlement Monitoring and Analysis of High Filling Project for Resettlement Area of Baihetan Hydropower Station

GU Xiaoliang^{1,2}, LIANG Yuzhen^{1,2}, ZHOU Qihui³, LIU Zunjing³, FAN Zhiqiang³, JING Zijong³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: In order to ensure the stability and the serviceability of high filling foundations, the field monitoring of the high filling project of Baihetan

Hydropower Station is introduced, and the settlements of the original foundation and the filling are analyzed in this paper. The influencing factors such as the height of filling, compaction degree, time, and variation of groundwater on the settlement are discussed. The results indicate that the settlement of the high filling project with gravel filler is caused by the original foundation and the compression of the filling. The settlements of the original foundation and the filling account for 39.7% and 60.3% of the total settlement, respectively. The proper increase of foundation compaction degree is an effective measure to control the foundation settlement. Different fitting models are used to predict the settlement of high fill foundations, and it is found that the exponential model can successfully predict the settlement of the high filling project. The impoundment in the reservoir causes the groundwater level in the filling area to rise, and the instantaneous wetting deformation of the soil accounts for 60.9% of the total wetting deformation. The increase and dissipation of pore water pressure are mainly affected by groundwater level and filling load. A linear relationship between the magnitude of excess pore water pressure and the filling load is observed and the coefficient is 0.021, indicating that the soil is stable. The excess pore water pressure gradually dissipated after completion.

Keywords: high filling project; settlement monitoring; settlement prediction; wetting deformation; pore water pressure

随着我国的基础设施建设蓬勃发展, 越来越多的公路、机场甚至新城等建设在山区, 这些工程涉及大量的填方问题, 部分工程具有填筑高度大、土石方量巨大、填筑难度大等特点。在高填方工程的建设中, 地基的稳定和变形是最核心的问题。为保证填

收稿日期: 2022-10-06

基金项目: 国家自然科学基金(51822809)

第一作者: 顾晓强, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土动力学及宏微观土力学。

E-mail: guxiaoliang@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

筑过程中的稳定性及填方工程以后的正常使用,需对实际高填方工程进行沉降监测,并将填方地基的沉降控制在合理的范围内。同时,基于高填方地基实际沉降监测数据建立沉降预测模型来合理预测长期沉降,对有效掌握高填方地基的沉降变化规律并指导工程建设具有重要意义。

高填方地基的沉降包括原地基沉降和填筑体沉降。原地基沉降主要是既有土体的压缩和固结过程,填筑体沉降则是非饱和填料的自重压密过程。高填方地基的沉降主要受填料性质(力学性质、初始含水率、应力水平)、填筑时间、填筑方式(冲碾、振碾、未处理)^[1-2]以及地下水等影响。现场实测资料可综合反映这些影响因素对沉降的影响,具有较高的客观性与真实性。同时,工程中常基于实测数据进行地基长期沉降的预测。常用的预测方法按其原理可分为两大类,即曲线拟合法和系统分析法^[3]。曲线拟合法将沉降近似成按某种已知函数变化的过程,通过实测沉降数据建立具体的沉降函数方程和参数,再利用得到的函数方程预测未来任意时刻的沉降量。因其参数简单易确定,应用比较广泛。有学者^[4-6]分别应用双曲线法、指数曲线法和Asaoka法对地基沉降进行预测,并提出了改进的指数曲线拟合法,提高了预测精度。系统分析法通过结合太沙基理论和数学方法来预测地基沉降,常见的有灰色模型法、神经网络法和遗传算法等^[7-10]。冯震等^[7]基于灰色理论GM(1,1)对铁路高填方路基的沉降进行预测,并用验差法进行精度校验。潘国兵等^[8]认为GM(1,1)的预测模型能较好地预测高填方地基的初期沉降。伍素兰和张发明^[9]、郭云开等^[10]采用神经网络预测地基沉降。

本文以白鹤滩水电站移民区高填方工程为研究背景,在长期现场监测工作基础上取得大量的监测数据,并从原地基和填筑体两方面分析高填方地基沉降的主要影响因素。采用曲线拟合方法建立地基沉降预测模型,为揭示白鹤滩高填方地基的变形机理、掌握地基变形趋势及工后沉降的合理预测等提供重要的参考依据。基于地基孔隙水压力的动态监测,获得填筑施工期和竣工后水库蓄水过程中孔隙水压力增长和消散的规律。

1 工程概况

白鹤滩水电站位于四川省宁南县和云南省巧家县境内,是金沙江下游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家

坝4个梯级水电站中的第二级。电站正常蓄水位825 m,总库容206亿 m^3 ,总装机容量1600万kW。水电站大坝于2017年4月开始浇筑,2021年5月31日大坝全线浇筑到顶。白鹤滩首次下闸蓄水是在2021年4月7日,同年6月实现了首批机组发电,2022年8月30日白鹤滩水库水位首次达到正常蓄水位825 m。白鹤滩水电站的蓄水过程如图1所示。

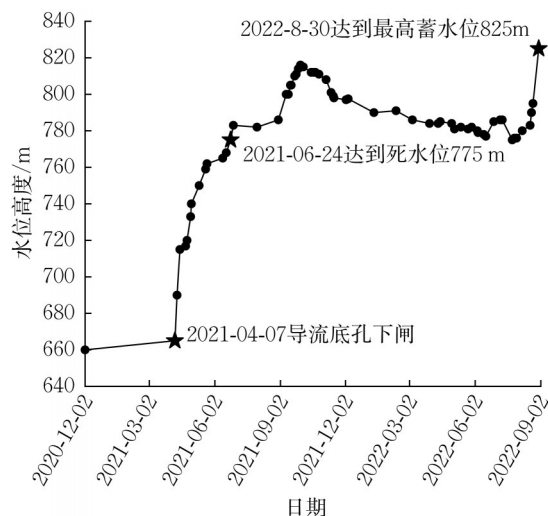


图1 白鹤滩水电站蓄水过程

Fig. 1 Variation of water level in Baihetan Hydro-power Station

白鹤滩水电站蓄水后,水位上升将淹没巧家县移民安置区的局部区域,为了防止库水位的周期性涨落、水面的冲刷、塌岸对北门居住区沿江地带的不良影响,在移民安置区西侧修建北门防护堤。工程场地内高程低于830 m的区域将进行分层碾压回填,最大回填高度达35 m。图2为工程场地典型的地质剖面图,原地基土层从上往下依次为黏土或含砾黏土、有机质土、粉砂和碎石混合土。表1给出了原地基土层的物理力学性质。填方工程的填料主要来源于场地附近的水碾河料场,该料场的砾石土料主要为冲洪积碎石混合土,其力学特性可见文献[11],填筑体及防护堤土体的物理力学性质如表2所示。

2 现场监测方案

本工程的填方高度大,原地基中存在有机质土等软弱土层,因此在施工过程中需特别关注地基变形的监测与分析,掌握填筑区的沉降变形、孔隙水压力的增长和消散规律,确保填筑过程中场地的稳定和变形控制达到要求。为此,从2019年9月27日开

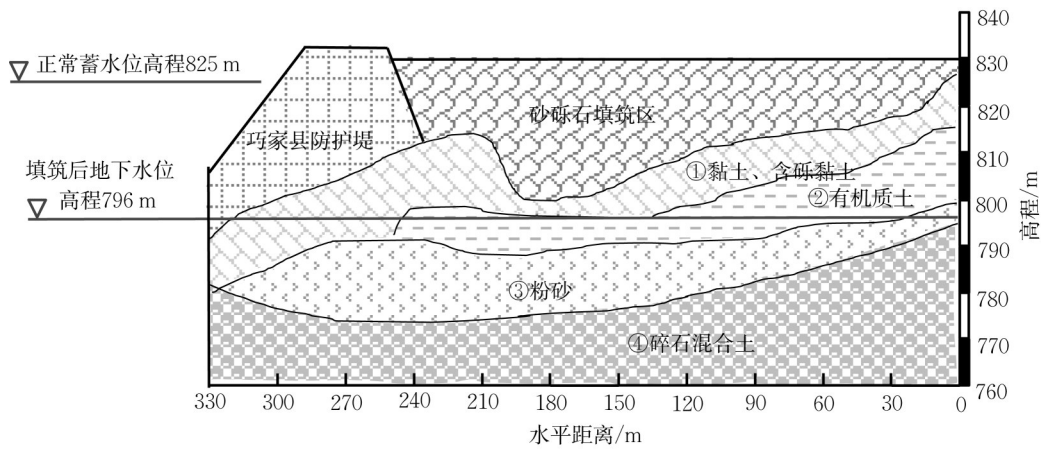


图 2 高填方地基的典型地质剖面

Fig. 2 Geological sections of high filling project

表 1 原地基土层的物理力学性质

Tab. 1 Physical and mechanical properties of original soil

土层名称	天然状态的物理指标						压缩试验	现场注水试验	
	含水率/ %	天然密度/ (g·cm ⁻³)	干密度/ (g·cm ⁻³)	土粒比重	孔隙比	饱和度/ %	压缩模量/ MPa	渗透系数/ (cm·s ⁻¹)	渗透性分级
黏土、含砾黏土	27.0	1.9	1.5	2.73	0.785	88.9	6.0	7.2×10 ⁻⁵	弱透水
有机质土	56.0	1.6	1.1	2.70	1.725	91.3	3.3	5.3×10 ⁻³	中等透水
粉砂	22.9	2.0	1.6	2.69	0.68	93.9	7.0	3.5×10 ⁻³	中等透水
碎石混合土	11.0	2.0	1.8	2.65	0.503	60.8	—	1.7×10 ⁻¹	强透水

表 2 填筑体及防护堤土体的物理力学性质

Tab. 2 Physical and mechanical properties of filling soil and protective soil

石料	物理性质参数					压缩模量/MPa	
	不均匀系数	曲率系数	土粒比重	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	渗透性分级	非饱和	饱和
填筑体砂砾石料	117	0.029	2.72	8.12×10 ⁻⁴	中等透水	93.6	72.1
防护堤堆石料	7.18	1.25	2.72	2.09×10 ⁻²	强透水	210.8	193.4

始对填筑区域开展地表沉降、分层沉降、孔隙水压力等监测项目,共计埋设 162 个各类型监测传感器,典型监测断面见图 3。地表沉降使用压差式静力水准仪对布设在地表的沉降监测点进行监测,以测点初次测定的高程值为基准值,通过测点后续高程测值与基准值进行比较,计算地表沉降量。分层沉降通过埋设不同土层的沉降磁环监测,监测深度间隔为 3 m。以孔口的磁环作为基准磁环,其沉降量 S_0 即为该测点处的地表沉降量,可通过钻孔附近的水准监测仪测得。其余分层沉降磁环测得的沉降 $S_1, S_2, \dots, S_n, S_{n+1}, \dots$ 即为每层填土相对于基准磁环的沉降。其中, S_n 为埋设在原地基面的分层沉降磁环相对于基准磁环的沉降,则填筑体的沉降量为 S_n ,原地基的沉降量为 $S_0 - S_n$ 。孔隙水压力监测点用于观测填筑过程中地基孔隙水压力的增长及消散以及水库蓄水过程中地基的孔隙水压力变化情况,埋设位置与分层沉降监测点一一对应。

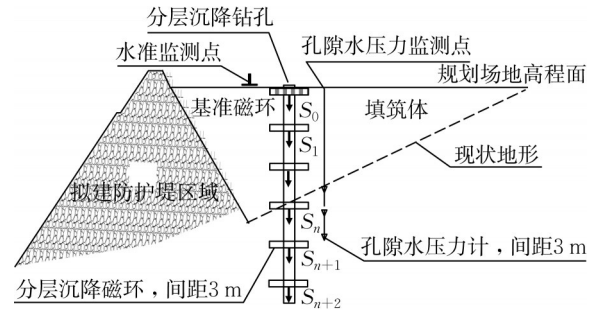


图 3 典型监测断面示意

Fig. 3 Schematic diagram of monitoring section

本工程场地共分为 5 个区域进行填筑施工,填筑体采用分层碾压施工,压实系数通过现场重型击实试验确定,其中区域 I 的整体压实系数为 0.97,其他 4 个区域根据竖向回填高度分区进行压实。现场压实分区及测点布设情况见图 4,不同区域的压实标准见表 3。

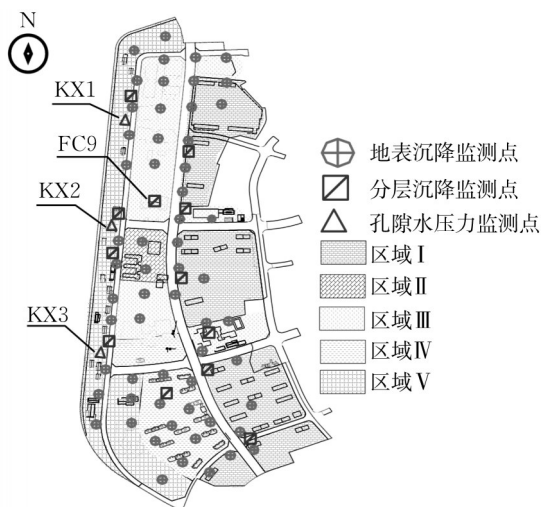


图4 高填方压实分区及原位监测系统平面布置

Fig. 4 Layout of compaction zones and field monitoring system

表3 高填方不同分区压实度控制标准

Tab. 3 Compaction degrees of different zones

平面区域	竖向分区	回填高度分区	压实系数
区域I	①	填筑表面至原始地面之间	0.97
区域II—V	①	填筑表面以下0~1.5 m	0.92
	②	填筑表面以下1.5~6.0 m	0.97
	③	填筑表面以下>6.0 m	0.95

3 填方地基沉降规律分析

高填方地基的沉降可以分为2个部分,即原地基沉降和填筑体沉降。选取填筑高度较高且监测结果比较稳定的分层沉降监测点FC9作为研究对象,将填方地基顶部测得的总沉降分为原地基沉降和填筑体沉降,其填筑曲线及相应的沉降监测曲线如图5所示。

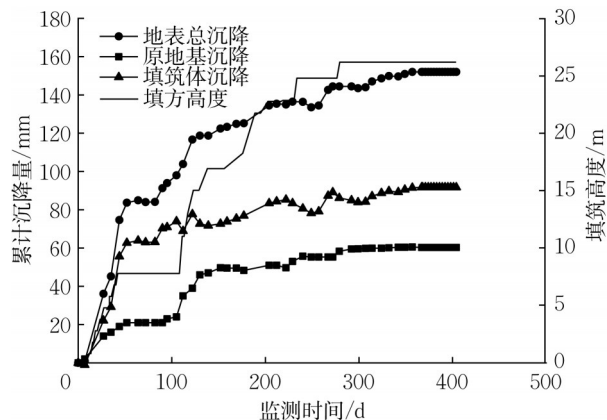


图5 地表及原地基沉降曲线

Fig. 5 Settlement curves of surface and original foundation

由图5可见,沉降曲线随着填筑高度的增加表现出坡度较陡的上升过程,在填筑完成后,沉降变形曲线逐渐趋于平缓,沉降从快速增长转化为缓慢变化。现行的《建筑变形测量规范》^[12]中指出,建筑沉降是否进入稳定阶段,应由沉降量与时间的关系曲线判定。当最后100 d的沉降速率小于 $0.01\sim 0.04\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时可认为已进入稳定阶段,即沉降已经趋于完成,此时的沉降量可认为是最终的沉降量。该标准也可作为高填方地基沉降稳定的判别依据^[13]。本工程的监测结果显示,最后100 d时对应的沉降速率在 $0.02\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 左右,可认为沉降已达到稳定状态。由图5可知,当填筑完成且沉降达到稳定时,地表的总沉降量为152 mm。其中,原地基的累计沉降量为60.3 mm,占总沉降量的39.7%。在填筑期原地基的沉降量为55.3 mm,占原地基总沉降量的91.71%,竣工后的沉降量为5 mm,占原地基总沉降量的8.29%。可见填筑施工期是沉降快速变化的阶段,沉降量随时间变化比较明显。填筑体在自重作用下的压缩固结沉降量为91.7 mm,占总沉降量的60.3%,填筑体自身沉降占其厚度的0.35%,结果表明,填筑体和原地基变形对总变形均有较大贡献。

3.1 填筑高度对原地基沉降的影响

填筑高度直接决定了原地基上部的静荷载,随着填筑高度的增加,地基土体受到的荷载越大,沉降量也越大。将场地内其他分层沉降监测断面测得的原地基沉降结果进行总结分析,得到原地基的沉降量与填筑高度的关系曲线如图6所示。由图6可知,当竣工后沉降达到稳定状态时,原地基的累计沉降量与上覆填土高度呈线性增长关系,表明高填方的填土荷载越大,引起原地基的固结压缩变形量越大。

3.2 平均压实度对填筑体沉降的影响

高填方地基的填方量巨大,其填料大多是就地取材。该场地的填料主要为粗粒碎石土料,击实试验表明天然级配下填料的最优含水率为6.2%,最大干密度为 $2.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。在填筑施工过程中,合理的压实方法对高填方地基的沉降有较好的控制作用。通过分层填筑且充分夯实的地基,其压实度较大,填筑完成后在自重作用下的沉降较小。

工程场地中不同区域的压实标准不同,为了统一描述高填方地基的压实程度,引入综合压实度 $k^{[2]}$,其大小可用式(1)表示。

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n h_i k_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (1)$$

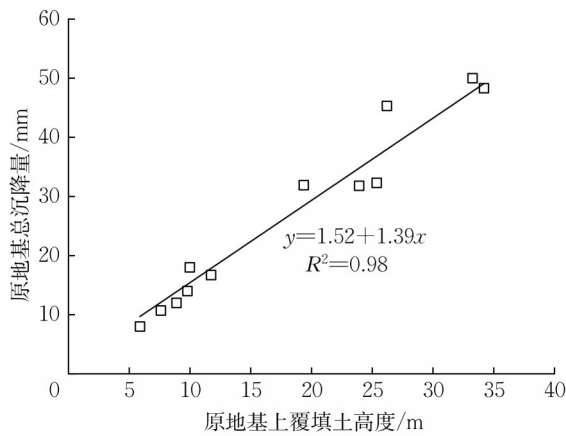


图 6 原地基土总沉降量与填筑高度的关系

Fig. 6 Relationship between settlement and filling height of original foundation

式中: k_i 为任意单位厚度填土的压实度, i 为土层的编号; h_i 为某一压实度 k_i 下的填土体厚度。定义填筑完成后地表的总沉降量 S 与填筑高度 H 之比为单位厚度沉降量, 得到不同压实度 k 下单位厚度沉降量与填筑高度的关系如图 7 所示。由图 7 可知, 在同一压实度下, 单位厚度沉降量随着填筑高度的增加逐渐减小并趋于稳定。同时, 在同一填筑高度下, 随着填筑土体压实度的增大, 单位厚度沉降量逐渐减小, 表明在高填方地基的施工过程中, 提高填筑体的压实度可有效减小填筑地基的沉降量。

3.3 时间对填方地基沉降的影响

高填方地基的沉降受多种因素的影响, 在工程应用中, 这些因素的影响大小和程度是无法定量分析的。实测数据是对高填方地基沉降的直接反映, 因此以高填方地基的实测数据为依托, 结合常用的曲线拟合方法, 对高填方地基的沉降量进行了预测, 并对预测值和实测值进行了分析。

选取累计沉降量较大且具有代表性的监测点 FC9 作为研究对象进行沉降预测。该监测点于 2019 年 10 月 30 日开始监测, 至 2021 年 2 月 18 日结束监

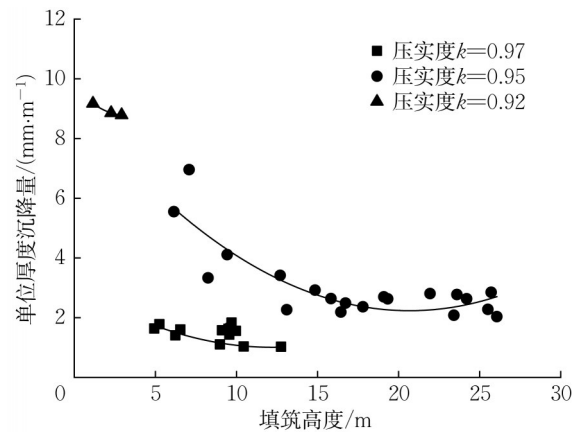


图 7 不同综合压实度下单位厚度沉降量与填筑高度的关系
Fig. 7 $H-S/H$ curves at different compaction degrees

测, 共计观测 477 d。按变形机理将沉降分为 2 个阶段, 监测开始的第 0—282 天作为高填方填筑的施工期, 第 285—477 天作为填筑完成后的竣工期。分别对施工期和竣工期的沉降进行双曲线^[14]、对数曲线^[15]、指数曲线^[16]拟合, 建立了相应的预测模型, 如表 4 所示, 表中, t 为任意时刻, d; S_t 为任意时刻 t 的沉降量, mm。图 8 为 3 种曲线预测模型对施工期沉降的预测值和实测值的对比。由图可见, 双曲线预测模型和指数曲线模型对施工期的沉降预测吻合度较高, 可以作为施工期沉降预测的模型。同理, 图 9 对比了竣工期沉降的预测值和实测值。由图 9 可知, 双曲线模型和指数模型关于高填方地基竣工期沉降的预测效果较好。对数曲线法预测的最终沉降量不具有收敛性, 随着时间的增长, 预测值会大于实测值, 可见对数曲线模型不适用于长期沉降的预测。由于指数曲线模型的波动范围最小, 随着填方加载完成, 地基的变形速率减慢, 最终变形趋于收敛, 可以较好地拟合高填方工程的变形发展规律, 即施工期沉降速率大、竣工期沉降速率逐渐减小并最终趋于稳定。因此, 建议选取指数模型作为本高填方工程地基沉降的预测模型。

表 4 FC9 监测点不同时间段曲线预测模型表达式

Tab. 4 Prediction expressions of curve fitting model in different periods of FC9 point

预测模型	施工期				竣工期			
	预测公式	沉降实测值/mm	沉降预测值/mm	误差/%	预测公式	沉降实测值/mm	沉降预测值/mm	误差/%
双曲线模型	$S_t = \frac{t}{2.52 + 0.01t}$	55.7	52.81	5.19	$S_t = 55 + \frac{t - 285}{5.83 + 0.15 \cdot (t - 285)}$	60.3	60.54	-0.40
对数曲线模型	$S_t = -40.54 + 16.5 \cdot \ln t$	55.7	52.55	5.65	$S_t = 9.36 + 8.40 \cdot \ln t$	60.3	61.17	-1.44
指数曲线模型	$S_t = 90.9 - 79.0 \cdot e^{-(t-37.7)/308.8}$	55.7	52.70	5.38	$S_t = 60.9 - 5.7 \cdot e^{-(t-289.8)/64.3}$	60.3	60.31	-0.02

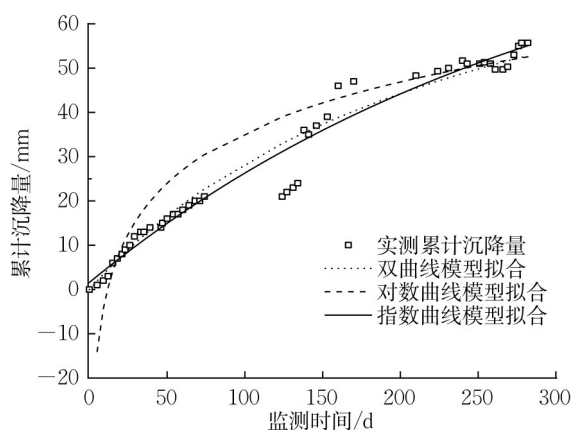


图8 施工期沉降曲线拟合结果

Fig. 8 Fitting results of settlement during construction

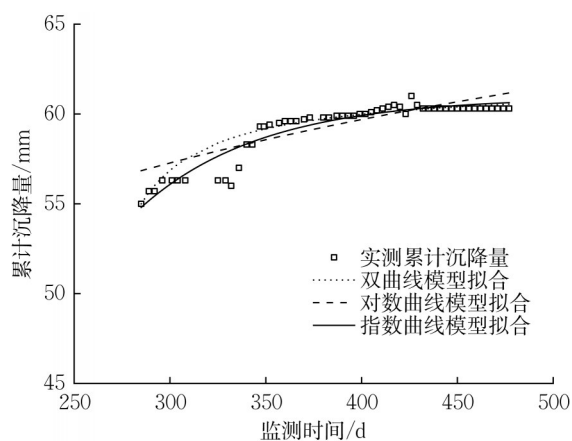


图9 竣工期沉降曲线拟合结果

Fig. 9 Fitting results of settlement after completion

3.4 蓄水对填方地基沉降的影响

白鹤滩库水位的上升对工程场地土体的稳定性和变形会产生一定的影响。当场地填筑完成后,随着白鹤滩水库的蓄水,填筑区域下方的地下水位迅速抬高,土体内部的孔隙水压力明显增大,随着库水位的稳定,场地下方地下水位的上升趋势也有所减缓并最终趋于稳定。通过对蓄水前和蓄水后的典型沉降监测数据进行统计,得到竣工期蓄水前后的沉降对比结果,如图10所示。由图10可见,由于水库蓄水后填筑区域的地下水位抬升,引起原地基的沉降显著增大。这可能是由于原地基土体浸水后,由不饱和状态变为饱和状态,土颗粒间的基质吸力消失,土体强度和模量降低,同时颗粒间受到润滑作用,致使地基土在上覆荷载的作用下产生明显的湿化变形。湿化变形是土工界长期关注的一个问题,许多人工填土都具有不同程度的湿化变形性能,许多国内外的工程实例^[17-18]也表明,水库的初次蓄水、

地下水位的上升和地表水的入渗等都会引起湿化变形。土体在由干态变化为饱和湿态的过程中发生的湿化变形称为瞬时湿化变形,土体在饱和湿态条件下发生的湿化变形称为湿态流变变形^[19]。在白鹤滩水库蓄水至一定的高度时,场地的地下水位也逐渐趋于稳定,原地基土体处于饱和状态,此时发生的湿化变形为湿态流变变形,由图10可知,原地基的瞬时湿化变形量为13.4 mm,湿态流变变形量为8.6 mm,水位上升过程中土体发生的瞬时湿化变形所占的比例可达60.9%。

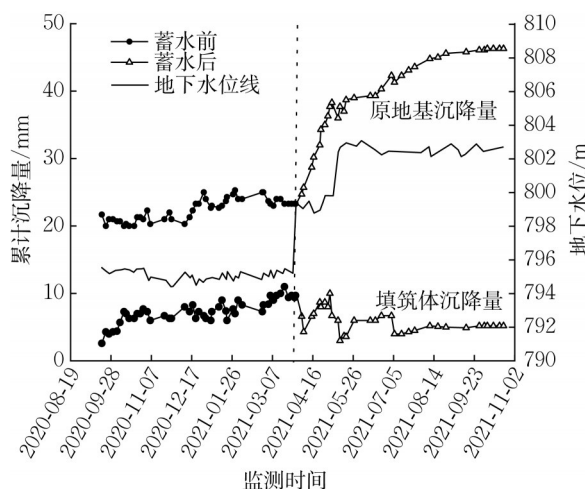


图10 水库蓄水前后沉降对比

Fig. 10 Settlement before and after reservoir impoundment

相对于原地基土,蓄水后的填筑体沉降变化并不明显,这是由于在监测周期内地下水位才抬升至原地基土与填筑体的交界处,此时的地下水对填筑体变形的影响不大。后续随着白鹤滩水库的继续蓄水,填筑体的地下水位还会大幅上涨,地下水位变化对填筑体的变形影响还需进一步监测研究。

4 孔隙水压力的监测分析

为了监测高填方工程在填筑施工期和竣工后的孔隙水压力变化以及水库蓄水期地下水位的变化,沿巧家县防护堤布置了3个孔隙水压力监测钻孔,分别为KX1、KX2和KX3。由于监测区域内的孔隙水压力变化具有共性特点,所以选取KX3监测点为例进行说明。在该监测点的不同深度处共埋设了3支孔隙水压力计,分别记为 P_1 、 P_2 和 P_3 。其中, P_1 、 P_2 埋设在原地基中, P_3 埋设在原地基和填筑体的交界层的位置,如图11a所示。 P_1 和 P_2 在原地基处理完成

后及填筑体施工前进行埋设,采取钻孔埋设法埋设在碎石混合土中。钻探成孔后将孔隙水压力计吊放在孔中相应的深度,孔隙水压力计周围以中粗砂填充,并对钻孔分层回填夯实。 P_3 采取探井埋设法,埋设时在探井侧壁上开挖安装槽,将孔隙水压力计测头放置于安装槽中心,四周填充中粗砂,分层回填夯实探井,并将电缆引至探井上部预留段保护。当填筑施工达到设计高程后,开挖探井引出已埋设孔隙水压力的电缆并观测数据,从而获得填筑施工全过程中的孔隙水压力监测数据。具体埋设实施方法可见文献[20-21]。

在高填方地基的填筑过程中,孔隙水压力计测得的为总孔隙水压力 U ,包括静水压力 u_w 和由上覆填筑荷载引起的超静孔隙水压力 Δu ,如式(2)所示:

$$U = u_w + \Delta u \quad (2)$$

在填筑施工的过程中,土体在上覆填筑荷载的作用下产生压缩沉降,导致孔隙水压力计的埋设位

置下移。此外,填筑施工期间地下水位也可能会发生变化。孔隙水压力计探头埋深位置的变化和地下水位的变化均会引起静水压力的改变,其计算示意图如图 11a、11b 所示。静水压力变化值为

$$\Delta u_w = u_{wt} - u_{w0} \quad (3)$$

$$u_{wt} = \gamma_w (h_w - h_t) \quad (4)$$

$$h_t = h_0 - S_t \quad (5)$$

式中: Δu_w 为孔隙水压力计探头埋深位置的变化和地下水位的变化引起静水压力的变化值; u_{w0} 、 u_{wt} 分别为填筑施工前、后的静水压力值,kPa,本项目中 $u_{w0} = 0$; γ_w 为水的重度(一般取 $9.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$); h_w 、 h_t 分别为填筑施工前、后地下水位相对于高程基准面的高度,m; h_t 为填筑施工后孔隙水压力计的埋设点高程,m; S_t 为填筑施工引起的孔隙水压力计的下沉量,m,通过分层沉降监测确定。将式(5)代入式(3)中,可得

$$\Delta u_w = \gamma_w ((h_w - h_0) + S_t) \quad (6)$$

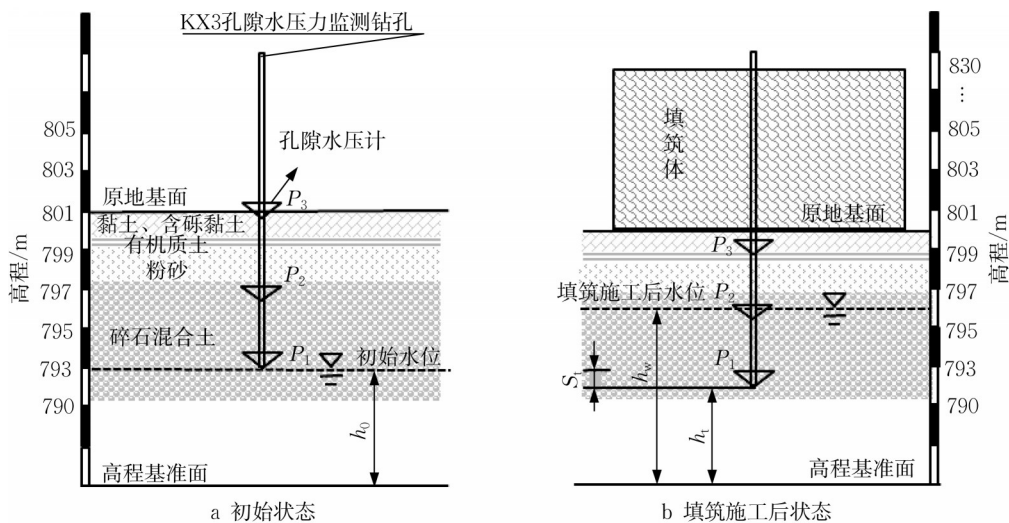


图 11 土体压缩沉降和地下水位变化引起静水压力变化计算示意

Fig. 11 Calculation diagram of pore water pressure affected by compression settlement and groundwater variation

孔隙水压力计 P_1 埋设在渗透系数较大的碎石混合土中,在填筑荷载的作用下,其超静孔隙水压力 Δu 很快消散,可认为 P_1 测得的总孔隙水压力 U 即为静水压力。根据式(6)可通过 P_1 的孔压监测结果反算场地内地下水位变化情况。图 12 给出了地下水位高程和库水位高程线的变化。由图 12 可知,该监测点填筑施工前的地下水位高程为 793.0 m,填筑完成后的地下水位为 796.3 m,白鹤滩水库蓄水期间该监测点处的地下水位上升至 802.7 m。

为了准确计算水库蓄水前各个测点的超静孔隙

水压力值,需考虑孔隙水压力计探头埋深位置改变和地下水位改变引起的静水压力的变化,并对测得的孔隙水压力进行修正,修正后的超静孔隙水压力时程曲线如图 13 所示。由图 13 可知,在填筑过程中,随着填筑高度的增大,超静孔隙水压力增大,当填筑完成后,超静孔隙水压力开始消散,土体产生固结变形。 P_3 测点在水库蓄水前位于地下水位以上的毛细区,孔隙水压力呈现负值,其增长和消散趋势受填筑施工的影响明显。这是由于随着上覆荷载的增加,土体产生压缩变形,临近地下水位面土体的饱和

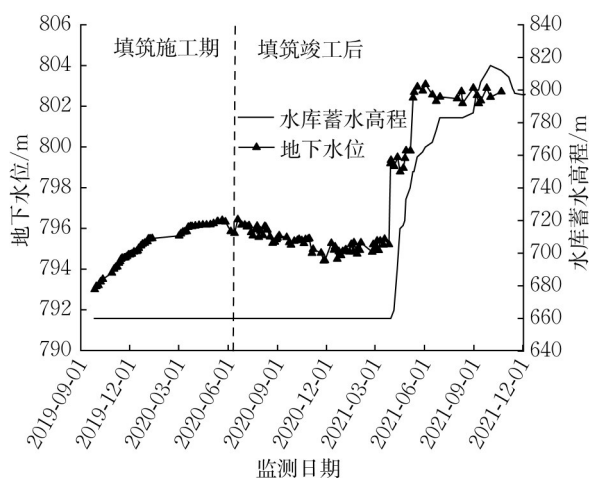


图12 地下水位和库水位时程线

Fig. 12 Curves of underground water and reservoir water

度逐渐增大。当土的饱和度增大至一定程度后,土的压缩变形会引起超静孔隙水压力的变化^[22]。

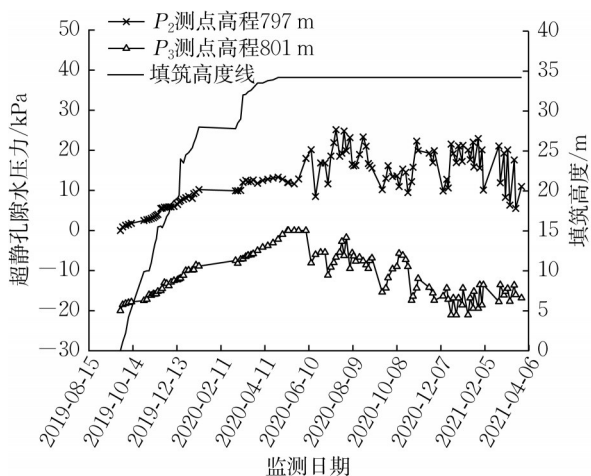


图13 蓄水前KX3测点超静孔隙水压力时程曲线

Fig. 13 Curves of excess pore water pressure of monitoring point KX3 before impoundment

在平面应变状态下,当地基处于稳定状态时,孔隙水压力增量 Δu 可表示为^[23]

$$\Delta u = K_u' \Delta p \quad (7)$$

式中: Δu 为孔隙水压力增量,取为超静孔隙水压力增量,去除了由于地下水位变化和土层压缩变形引起的静水压力的变化; Δp 为上覆填土荷载增量,近似等于单位面积上土柱的重量,即 $\Delta p = \gamma \Delta h$,其中 γ 为填土重度, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$,根据现场密度实验结果,取填土重度 $\gamma = 19.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$; Δh 为填筑高度的增量,m; K_u' 为孔隙水压力系数,根据Skempton提出的孔隙水压力理论,为了保证工程的安全,在实际监测中一

般控制 $K_u' < 0.6$ ^[24]。

工程中常用 Δu 与 Δp 的关系来定性评价地基的稳定情况。研究表明,在填筑施工的过程中,当填方地基处于稳定状态时, Δu 与 Δp 近似呈线性关系。当地基中的孔隙水压力增量与荷载的关系出现非线性转折时,地基可能发生失稳破坏^[25]。 P_3 测点高程为801 m,其 Δu 与 Δp 的关系曲线如图14所示。由图14可知,填筑施工期孔隙水压力增量与上覆填土荷载增量呈线性关系,没有出现明显的非线性转折,孔隙水压力系数 K_u' 的值为0.021,表明原地基在填筑施工全程处于稳定状态,未发生剪切破坏。

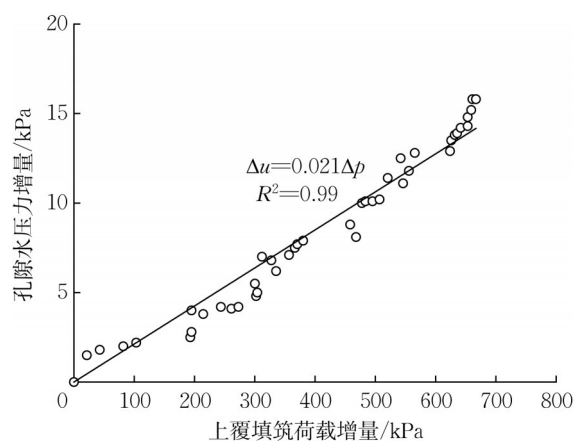


图14 孔压增量与荷载增量的关系

Fig. 14 Relationship between pore water pressure increment and loading increment

5 结语

开展了白鹤滩水电站高填方工程沉降变形的现场监测,分析了原地基和填筑体在施工期、竣工后及蓄水期的沉降规律,探讨了孔隙水压力增长和消散的规律。初步结论与建议如下:

(1)高填方地基沉降由原地基沉降和填筑体沉降两部分组成,通过分层沉降监测数据表明,该高填方工程的总变形为152 mm,其中原地基的累计沉降量为60.3 mm,占总沉降量的39.7%;填筑体的压缩沉降量为91.7 mm,占总沉降量的60.3%。填筑体和原地基变形对总变形均有较大贡献。

(2)在高填方工程中,压实度和填筑高度会明显影响填方地基的沉降。原地基的总沉降与填筑高度呈线性增长关系。在填筑高度相同时,随着压实度的增加,单位厚度沉降量逐渐减小,可见高填方地基的施工过程中提高填筑体的压实度可有效减小地基沉降。

(3)双曲线模型、对数模型及指数模型都能对高填方地基的沉降数据进行预测。综合考虑误差波动范围和最终沉降量等因素,推荐使用指数曲线模型预测本高填方工程的地基沉降变形规律。

(4)白鹤滩库水位的上升对工程场地土体的稳定性和变形会产生一定的影响。白鹤滩水库蓄水后引起填筑区域地下水水位升高,原地基发生明显的湿化变形。其中,原地基的瞬时湿化变形量为13.4 mm,湿态流变变形量为8.6 mm,水位上升过程中土体发生的瞬时湿化变形比重可达60.9%。地下水位变化对填筑体的变形影响还需进一步监测研究。

(5)在填筑施工过程中,原地基土体产生超静孔隙水压力,孔压增量与上覆填土荷载呈线性关系,孔隙水压力系数 K_u' 的值为0.021,表明土体始终处于稳定状态。填筑竣工后,孔隙水压力较快消散,地基土产生固结沉降。

作者贡献声明:

顾晓强:提出研究选题,获取研究经费,设计研究方案,为课题研究提供指导,论文修改。

梁玉珍:实施研究过程,收集整理与分析数据,设计论文框架,撰写论文。

周奇辉:工作支持,获取研究经费,参与试验结果分析与解释。

刘尊景:工作支持,技术和材料支持,参与试验结果分析与解释。

范志强:指导现场监测,整理试验数据。

荆子菁:指导现场监测,整理试验数据。

参考文献:

- [1] 徐明,宋二祥.高填方长期工后沉降研究的综述[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(6):786. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2009.06.011.
- XU Ming, SONG Erxiang. Review of long-term settling of high fills [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(6): 786. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2009.06.01.
- [2] 朱才辉,李宁,刘明振,等.吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析[J].岩土工程学报,2013,35(2):293. DOI: CNKI:SUN:YTGC.0.2013-02-015.
- ZHU Caihui, LI Ning, LIU Mingzhen, *et al.* Spatiotemporal laws of post-construction settlement of loess-filled foundation of lvliang airport [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 293. DOI: CNKI:SUN:YTGC.0.2013-02-015.
- [3] 闫俊.机场高填方沉降变形分析与预测及数据可视化研究[D].成都:成都理工大学,2015.
- YAN Jun. Airport high fill settlement deformation analysis and prediction and data visualization research [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [4] 刘兵.机场二通道服务区高填土路基沉降预测研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
- LIU Bing. Research on prediction of settlement of high fill embankment in service area of the second highway of airport [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [5] 王志亮,黄景忠,李永池.沉降预测中的Asaoka法中的应用[J].岩土力学,2006,27(11):2025. DOI: 10.16285/j.rsm.2006.11.033.
- WANG Zhiling, HUANG Jingzhong, LI Yongchi. Study on application of Asaoka's method to settlement prediction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2025. DOI: 10.16285/j.rsm.2006.11.033.
- [6] 张成良,刘小泉.三次样条插值曲线在Asaoka法中的应用[J].岩土工程技术,2006,20(1):21. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2993.2006.01.005.
- ZHANG Chengliang, LIU Xiaoquan. Application of cubic spline interpolation in Asaoka's method [J]. Geotechnical Engineering Technology, 2006, 20(1): 21. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2993.2006.01.005.
- [7] 冯震,阎文发,姚海波,等.路基沉降的灰色理论预测及实例验证[J].华北科技学院学报,2003,5(3):23. DOI: CNKI:SUN:HBKJ.0.2003-03-006.
- FENG Zheng, YAN Wenfa, YAO Haibo, *et al.* Prediction of subgrade settlement based on grey theory and case study [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2003, 5(3): 23. DOI: CNKI:SUN:HBKJ.0.2003-03-006.
- [8] 潘国兵,李灵爱,李华蓉.基于关联度分析的高填方初期沉降预测模型的对比研究[J].中国科技论文,2016,11(9):1021. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2016.09.010.
- PAN Guobing, LI Ling'ai, LI Huarong. Reliability investigation on prediction model of high embankment settlement based on correlation degree analysis [J]. Chinese Science and Technology Papers, 2016, 11(9): 1021. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2016.09.010.
- [9] 伍素兰,张发明.大同市地面沉降预测预报系统的设计[J].西北地质,1995,16(4):72. DOI: CNKI:SUN:XBDI.0.1995-04-012.
- WU Sulan, ZHANG Faming. Design of land subsidence prediction and forecast system in Datong City [J]. Northwestern Geology, 1995, 16(4): 72. DOI: CNKI:SUN:XBDI.0.1995-04-012.
- [10] 郭云开,崔晓如,李亮.基于小波神经网络组合模型的高填方地基沉降预测[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2010,7(2):6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2010.02.002.
- GUO Yunkai, CUI Xiaoru, LI Liang. Combined forecasting model based on wavelet neural network for prediction of high fill subgrade settlement [J]. Journal of Changsha University of

- Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 7 (2): 6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2010.02.002.
- [11] 顾晓强, 梁玉珍, 周奇辉, 等. 白鹤滩水电站高填方工程砾石填料的物理力学特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 528. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.21180. GU Xiaoqiang, LIANG Yuzhen, ZHOU Qihui, *et al.* Physical and mechanical properties of gravelly soils used in high fill project of Baihetan Hydropower Station [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50 (4) : 528. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.21180.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑变形测量规范: JGJ 8—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for deformation measurement of building and structure: JGJ 8—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [13] 郑文诗. 高填方路堤沉降预测研究及数值模拟分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018. ZHENG Wenshi. Study on settlement prediction and numerical simulation analysis of high fill embankment [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [14] 杨涛, 李国维, 杨伟清. 基于双曲线法的分级填筑路堤沉降预测[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1551. DOI: 10.16285/j.rsm.2004.10.008. YANG Tao, LI Guowei, YANG Weiqing. Settlement prediction of stage constructed embankment on soft ground based on the hyperbolic method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1551. DOI: 10.16285/j.rsm.2004.10.008.
- [15] 李帅, 宋振柏, 张胜伟, 等. 基于曲线拟合法的沉降分析与变形可视化[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2012, 26(5): 72. DOI: 10.13367/j.cnki.sdgc.2012.05.007. LI Shuai, SONG Zhenbai, ZHANG Shengwei, *et al.* Settlement analysis and visualization based on curve fitting [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 26 (5) : 72. DOI: 10.13367/j.cnki.sdgc.2012.05.007.
- [16] 杨涛, 戴济群, 李国维. 基于指数法的分级填筑路堤沉降预测方法研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5): 92. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2005.05.017. YANG Tao, DAI Jiqun, LI Guowei. Settlement prediction of stage-constructed embankment on soft ground using the exponent fitting method [J]. Journal of Civil Engineering, 2005, 38 (5) : 92. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-131X. 2005. 05.017.
- [17] NOBARI E S, DUNCAN J M. Movements in dams due to reservoir filling [C]//Performance of Earth and Earth Supported Structures. New York: American Society of Civil Engineers, 1973.
- [18] 崔晓如. 高填方路基沉降变形分析与预测及其控制标准研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010. CUI Xiaoru. Study on settlement of high embankment on analysis and forecast and settlement control standards [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2010.
- [19] 殷殷, 刘盈斐, 吴永康, 等. 堆石料湿化试验变形过程分析[J]. 水利学报, 2022, 53(11): 1361. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20220504. YIN Yin, LIU Yingfei, WU Yongkang, *et al.* Analysis of wetting deformation process of rockfill [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(11): 1361. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20220504.
- [20] 张继文, 于永堂, 郑建国, 等. 与黄土高填方同步施工的监测仪器先埋后引式分步埋设法: CN103410181A [P]. 2013-11-27. ZHANG Jiwen, YU Yongtang, ZHENG Jianguo, *et al.* Burying before guiding type step-by-step burying method for monitoring instruments in synchronous construction with loess high fill: CN103410181A [P]. 2013-11-27.
- [21] 于永堂, 郑建国, 张继文, 等. 黄土高填方场地孔隙水压力的变化规律[J]. 土木与环境工程学报, 2021, 43(6): 10. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.051. YU Yongtang, ZHENG Jianguo, ZHANG Jiwen, *et al.* Variation behavior of pore water pressure in loess deep filled ground [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(6): 10. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.051.
- [22] 李广信, 李学梅. 土力学中的渗透力与超静孔隙水压力[J]. 岩土工程界, 2009, 12(4): 11. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7801.2009.04.00310. LI Guangxin, LI Xuemei. Permeability and excess pore water pressure in soil mechanics [J]. Geotechnical Engineering World, 2009, 12 (4) : 11. DOI: 10.3969/j.issn. 1674-7801. 2009.04.003.
- [23] 王立忠. 岩土工程现场监测技术及其应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000. WANG Lizhong. Geotechnical engineering monitoring technology and its application [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000.
- [24] 王祥. 粉喷桩在深厚软基处理中的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 513. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2001.04.029. WANG Xiang. Experiment study on treating deep soft soil with dry jet mixing pile. Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 513. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2001.04.029.
- [25] 张继文, 于永堂, 李攀, 等. 黄土削岭填沟高填方地下水监测与分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(4): 477. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2016.04.003. ZHANG Jiwen, YU Yongtang, LI Pan, *et al.* Groundwater monitoring and analysis of high fill foundation in loess hilly-gully region [J]. Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2016, 48 (4) : 477. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2016.04.003.