

# 黄土削崩填沟高填方地下水监测与分析

张继文<sup>1,3</sup>, 于永堂<sup>1,2,3</sup>, 李攀<sup>1,3</sup>, 杜伟飞<sup>1,3</sup>, 刘智<sup>1,3</sup>

(1. 机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;  
3. 陕西省特殊土工程性质与处理技术重点实验室, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 为研究黄土削崩填沟高填方地基的地下水变化规律, 对某黄土高填方工程施工期和竣工后的地下水位、孔隙水压力、盲沟水流量、地表水入渗情况进行了监测和分析。监测结果显示: 填方施工抬高了局部地下水排泄基准面, 工后形成稳定的排水通道后, 地下水可通过沟道内敷设的盲沟排出; 盲沟水流量与降雨量的季节分配具有响应关系, 地下水以降水补给为主, 随季节周期性变化; 填土施工使饱和土中产生超静孔隙水压力, 孔压增量与上部荷载增量存在线性关系, 表明地基土处于稳定状态, 停荷恒载, 孔压逐步消散; 填方区地下水埋藏深度大, 压实黄土的抗渗能力强, 短时地表径流和积水难以通过重力下渗方式形成对地下水的补给, 但场地内发育的裂缝易成为地表水下渗通道, 应引起足够重视。

**关键词:** 黄土; 高填方; 地下水监测; 孔隙水压力

中图分类号: TU411.91

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)04-0477-07

## Groundwater monitoring and analysis of high fill foundation in loess hilly-gully region

ZHANG Jiwen<sup>1,3</sup>, YU Yongtang<sup>1,2,3</sup>, LI Pan<sup>1,3</sup>, DU Weifei<sup>1,3</sup>, LIU Zhi<sup>1,3</sup>

(1. China JK Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, China;

2. College of civil engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Engineering Behavior and Foundation Treatment for Special Soil, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** In order to identify the dynamic variation regularities of groundwater of high fill foundation project in loess hilly-gully region, the underground water level, pore water pressure and water infiltration depth of a specific engineering are monitored during construction and post-construction periods. The variation of the groundwater and its influence factors are analyzed. The monitoring results show that the groundwater level is raised in local area during the construction periods, but when the stability drainage path is set up, the water can be discharged by blind ditches in the gully bottom. The water flow of the blind ditches is in a response relation to the seasonal distribution of rainfall and mainly supplied by atmospheric precipitation. The excess pore water pressure increased with the increasing thickness of earth filling and dissipated gradually after the loading stop. There is a linear relationship between pore pressure increment and load increment, which means a stable state. The buried depth of groundwater in filling area is deep, and the compacted loess is of low-permeability, thus the short-term surface runoff and surface water infiltration can't recharge the groundwater, but the fissure in construction site may become the route for surface water infiltration, which requires more attention.

**Key words:** loess; high fill foundation; groundwater monitoring; pore water pressure

近年来,随着我国西部黄土丘陵沟壑区经济社会的快速发展,受地形、空间限制,可供城镇发展、基础设施建设的土地资源越来越少,为了解决建设用地问题,通过“削崩填沟”方式形成的大面积高填方工程越来越多。这类工程的原始地形地貌、水文地质、工程地质条件往往较为复杂。填方工程建设后,地形地貌改变将引起地下水补给、径流和排泄条件改变,使土体的强度和应力状态发生变化,进而对高填方体的变形和稳定产生影响。工程实践表明,地下水对高填方的影响,主要体现在

浸泡软化、渗透变形、动水压力和冻融等方面<sup>[1-4]</sup>,国内一些填方工程因水的问题未处理好,已出现了边坡滑塌、大变形及失稳等问题<sup>[5-7]</sup>。针对高填方工程的地下水变化问题,国内学者通过模型试验<sup>[8]</sup>、数值模拟<sup>[9-10]</sup>等方法进行定性分析和预测,但由于高填方场地的环境地质条件往往较为复杂,上述方法常常难以反映真实情况。鉴于地下水变化情况及其工程效应,是关系到高填方边坡稳定、填方地基变形速率和稳定时间的重要因素,开展复杂水文地质条件下,大面积黄土高填方工程地下原位监测



及填筑体内部的地下水动态变化规律,本次设置了地下水位、盲沟水流量、孔隙水压力、地表水下渗深度监测点,建立了一套地下水监测网。由于高填方工程监测尚无专门规范,本次监测工作主要参照《地下水动态监测规程》<sup>[11]</sup>进行。地下水位采用电接触悬锤式水位计法监测;出露泉流量和盲沟水流量,采用堰槽法及流速仪面积法测量;孔隙水压力采用埋设孔隙水压力计法测量;地表水下渗深度采用钻探取样、烘干法测定。

## 2.1 地下水位监测结果及变化规律

地下水位监测断面分为顺沟方向和横剖面方向两类,以顺沟方向为主。地下水位观测孔主要布置在边坡、主盲沟与次盲沟中心线附近、主盲沟与次盲沟交汇处、地下泉露头部位、淤地坝区域等,用于监测盲沟、排水通道附近的地下水位变化情况,判断盲沟排水设施的有效性和地基土的固结排水情况。水位观测孔孔底穿过土层进入基岩以内,以实现了对原地基和填筑体内的地下水位监测。除专门设置水位观测孔外,还利用场地中的监测抽水井、测斜孔、分层沉降孔等进行水位观测。

图2为锁口坝填方边坡顺沟方向的地下水位分布剖面图。该区域位于整个填方场地的沟口位置,是监测地下水位变化的重点部位。图2中,填方施工前,地下水位顺沟谷地势逐步降低,地下水位高程为961.76~964.11 m,平均水力比降为1.23%,较为平缓。填方竣工后,地下水位略有抬高,但仍处于原地面以下。锁口坝边坡后缘的地下水位变化很小,表明原地基中修建的地下排水盲沟系统使上游的地下水压力顺利宣泄,保持了边坡后缘地下水基本处于稳定状态。

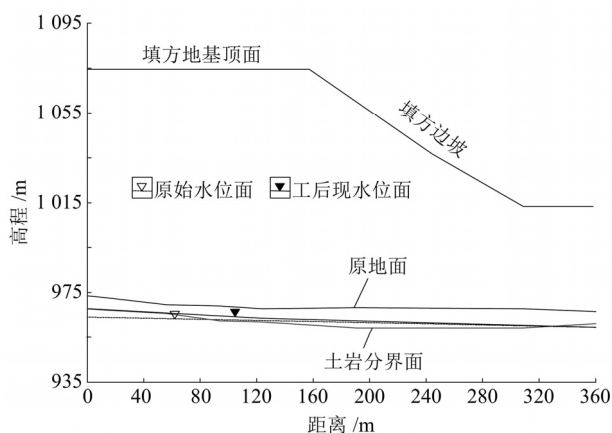


图2 锁口坝填方边坡顺沟方向地下水分布图  
Fig.2 Distribution of underground water in the high fill slope

建设场区内典型支沟的地下水位监测点布置如图3所示,地下水位变化的历时曲线如图4所

示。由图4可知,该支沟内地下水位有升有降,其中位于沟谷上游的监测点SW-1,水位持续下降,位于沟谷中下游和沟口的监测点SW-2和SW-3,水位先上升后小幅波动(水位升降小于1m)。监测点SW-4位于主沟中,竣工一年后,地下水位已降低至土岩分界面以下,因水位观测孔孔底高于水位面,此后该孔中一直无水。图4中SW-1监测点位于淤地坝中部,与排水盲沟相邻,地下水位持续降低,已从施工前的1039.95 m(2012年3月1日)降低至工

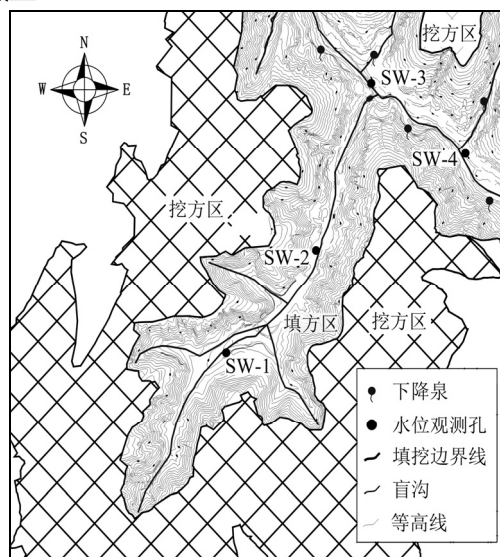
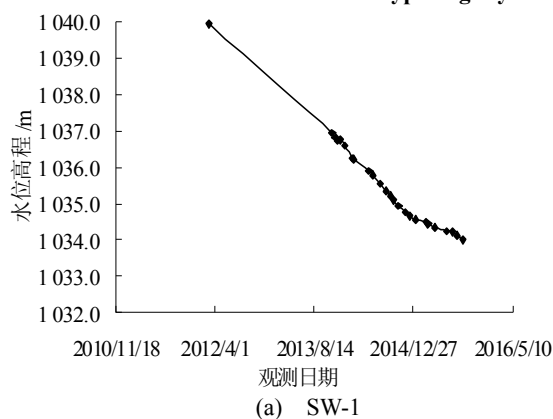
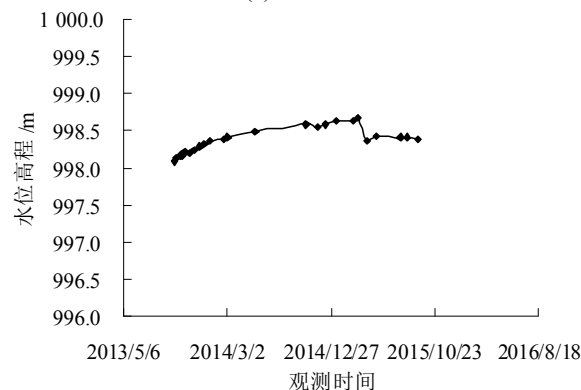


图3 某典型沟谷填方区地下水位观测孔布置图  
Fig.3 The locations of underground water observation wells in the fill section of a typical gully



(a) SW-1



(b) SW-2

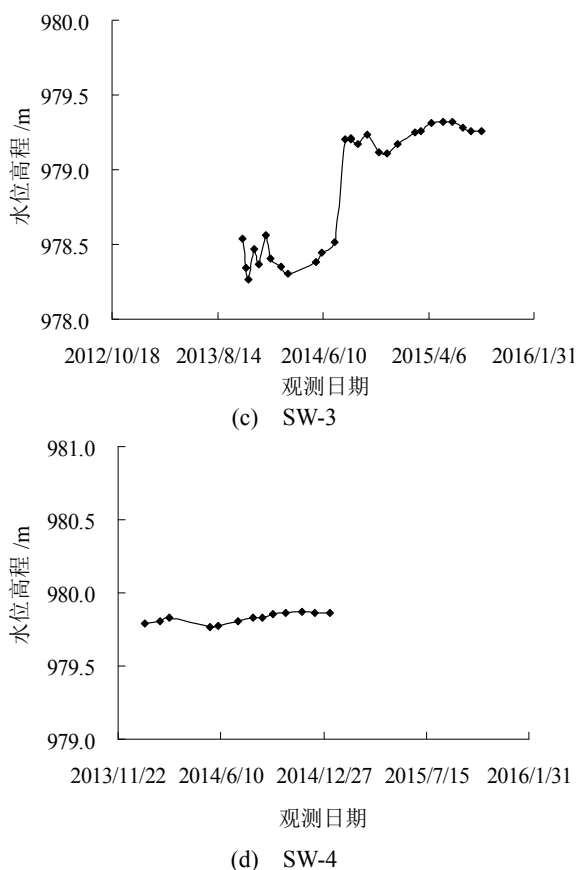


图4 地下水位变化历时曲线

Fig.4 Curves of groundwater level vs. observation time

后的 1 034.19 m (2015 年 9 月 4 日)。填方施工前,淤地坝区域在原始自然淤积后,地下水位上升,上部含水量不大,呈可塑状态;地下水位附近及其下的淤积土多呈软塑~流塑状态。填方竣工后,通过采取碎石垫层强夯加固地基,铺设方格网状的碎石排水盲沟等方式进行地下水疏排,加速地基土的排水固结。填方竣工后,上游淤积坝中地下水补给量下降,使地下水位不断下降,通过地下盲沟等排渗设施不断排出,表明坝内设置的排渗设施对促进淤积土的排水固结起到较好的作用。下游地下水位上升的现象表明,填方施工改变了地下水渗流场,人工填土在一定程度上抬高了部分沟谷下游的地下水排泄基准面,以保证有足够的水力梯度使地下水流出。场区地下水位的变化表明,高填方地基的地下水系统正逐步从分散局部的第四系孔隙潜水和侏罗系基岩裂隙水转变为具有稳定水位的地下水系统。

## 2.2 盲沟水流量监测结果及变化规律

本次在主沟锁口坝坡脚盲沟出水口处设置了水流量监测点,用于监测整个填方场地主盲沟总排水量(图 5)。除水流量监测外,同时搜集同时期当地气象部门发布的降雨资料,对比二者关联性。

盲沟水流量监测工作自 2012 年 10 月 29 日开始,此时上游填方体施工已开始进行,监测点上游的地下盲沟排水系统已经建设完成。盲沟水流量和当地降雨量监测结果如图 6 所示。由图 6 可知,水流量高值一般出现在 6 月至 8 月间,低值一般出现在 11 月至次年 4 月间,降水量的季节分配影响着盲沟水流量的变化,地下盲沟水流量响应降水的时间略有滞后。滞后的原因在于地下水在土体或基岩裂隙中运动,属于介质流,渗透速度较为缓慢;大面积填方场地的地下水系统具有较大的储容空间,渗透、排泄能力有限,集中或间断性的降水补给可作为储蓄量,在季节变动时缓慢释放。



图5 主盲沟水流量监测

Fig.5 Water flow monitoring of the main blind ditch

图6中,填筑施工期间,盲沟水流量变化主要经历四个显著的阶段:①2012年10月底至2013年2月底,冬歇停工期间,水流量从最初监测时的 $32.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 降低至 $18.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。②2013年3月初至2013年5月底,水流量进一步降低,本阶段水流量维持在低值范围内,平均值为 $14.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ,水流量变化与上游施工抽取地下水及该时期大气降水较少等因素有关。③2013年6月至2013年9月间,大气降水较多,地下水获得补给,且施工抽水量减少,盲沟出水量逐步增大至峰值流量 $21.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 。④2013年10月后,填方施工大部分已经完成,大气降水减少,水流量又开始逐步降低,但变化幅度明显低于施工期,水流量随季节变化的规律更加明显。

填方施工前,监测点上游出露的26处泉眼在枯水期总排水量为 $9.1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,河流断面的地表流量为 $9.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ,流域面积约 $7.84 \text{ km}^2$ 。枯水期河流流量可看作是降水入渗补给量。竣工后,2014年枯水期最小水流量出现在2月18日,实测水流量为 $17.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,大于填方施工前监测点上游同期各泉总流量。全年平均水流量为 $20.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ,年径流量约为 $17.7 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,是填方施工前年径流量的53.8%。综合地下水位和盲沟水流量监测结果可知,高填方竣

工1年后,盲沟水流量随季节变化呈现周期性波动,地下水顺利渲泄,表明地下排水设施可有效排出高填方体内部的地下水,地下水的补给、径流、排泄逐步趋于平衡和稳定。水流量未发生持续性陡增或陡降,出水口水质仅在2013年施工期雨季期间偶见浑浊,经踏勘发现是沟口锁口坝处地表径流冲刷临时边坡坡面,水沿裂隙流入地下造成,经及时加固处理,消除了隐患。工后期水质持续保持清澈,无明显泥沙流出。

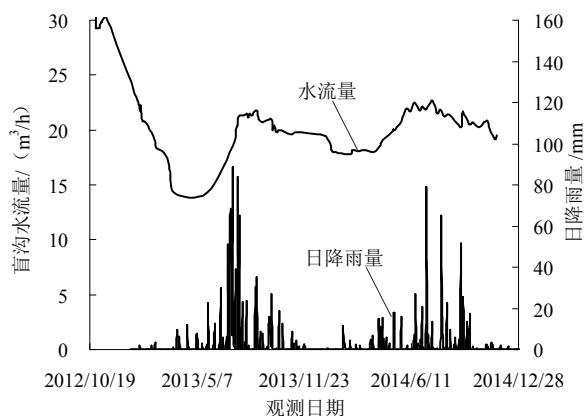


图6 2012-2014年盲沟水流量与降雨量关系曲线

Fig.6 Water flow of main blind ditch in relation to precipitation between 2012 and 2014

### 2.3 孔隙水压力监测结果及变化规律

本次在沟谷中心部位,填筑体和原地基内不同深度土层中布设了孔隙水压力计,用于监测施工期和工后的孔隙水压力变化情况。孔隙水压力计的埋设采取一孔多测点的形式,即在同一钻孔内安装多个孔隙水压力计,测点之间采用膨润土密封隔离。由于监测区域内的孔隙水压力变化具有共性特点,这里选取J1号监测点为例进行说明。J1号监测点共设置了4支孔隙水压力计, $P_1$ 、 $P_2$ 设置在原地基中,在原地基强夯处理完成后埋设, $P_3$ 、 $P_4$ 设置在填土中,随填土施工同步埋设。J1号监测点填方前地下水位为964.11 m,原地基强夯处理完成后,水位升至967.46 m,填筑体施工完成后地下水位进一步升至970.32 m。根据孔隙水压力监测结果,绘制孔隙水压力增量、填土厚度与观测时间的关系曲线如图7所示。孔隙水压力增量与填土荷载增量关系曲线如图8所示。

图7中, $P_1$ 测点在填土施工前已位于地下水位以下,土中的孔隙水压力在随填土厚度的增大而快速增大,连续加载后出现峰值,停荷恒载后,孔隙水压力开始逐步消散。 $P_2$ 测点初始阶段位于地下水位以上,在填方施工过程中,地下水位缓慢抬升,使 $P_2$ 测点位于地下水位以下,该测深处的孔隙水压

力增量随填土厚度的增大与 $P_1$ 测点有着类似的变化规律。施工完成后,地下水位基本稳定,孔隙水压力逐步消散。 $P_3$ 、 $P_4$ 测点位于填土中,处于地下水水位以上非饱和土中,孔隙水压力未发生明显变化,也间接表明地下水未发生继续向上的渗流。

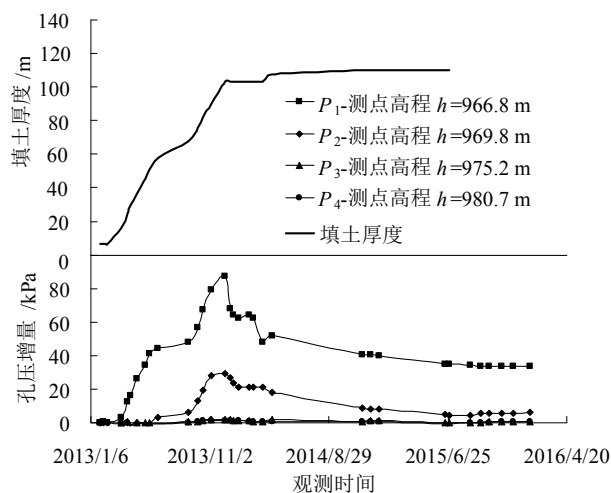


图7 填土厚度-孔隙水压力增量-观测时间关系曲线

Fig.7 Curves of fill thickness vs. pore water pressure increment vs. observation time

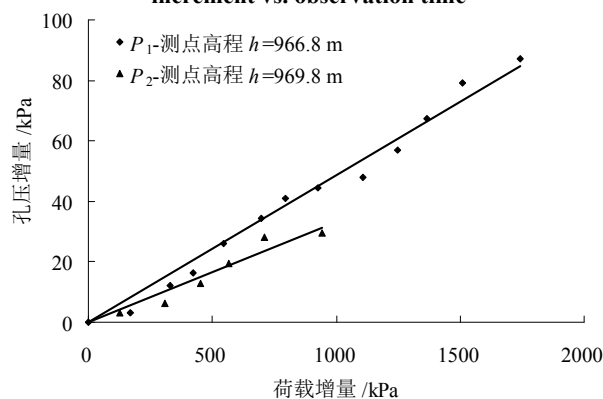


图8 孔隙水压力增量-荷载增量关系曲线

Fig.8 Curves of pore water pressure increment vs. load increment

研究表明,当地基处于稳定状态,孔隙水压力增量与荷载呈线性关系;当地基中孔隙水压力与荷载关系出现非线性转折,表示地基出现局部剪切破坏,当其发展到一定程度时,地基将发生失稳<sup>[12]</sup>。因此可以用实测孔隙水压力增量与荷载的关系判定地基稳定情况。图8中, $P_1$ 、 $P_2$ 测点在施工加载期间,孔隙水压力增长与荷载增量成线性关系,未发生非线性转折(即曲线斜率未发生突然增大),表明原地基未发生剪切破坏,处于稳定状态。

### 2.4 地表水入渗特征

2013年7月以来,建设场地经历多次连续强降雨,其中自7月1日至8月12日,出现了一次长达11天的连阴雨天气。为了确定降水在填方区的



下渗深度,6月25日在填方区沟谷中心线低洼地带,选择了两处含水率测试点,测定填土的含水率,并与8月19日现场取土测定降雨后地表水下渗深度,期间共发生降雨25天,累计降雨量达599.6 mm.降雨前后的填土含水率测试结果如图9所示.降雨前,填土表层和深层的变化趋势基本一致;降雨后,一部分地表水以地表径流和蒸发的形式排泄,另一部分地表水在重力的作用下通过黄土孔隙以渗透重力水的形式下渗,上层土体的含水率明显增大.与6月25日测定的 $W_1$ 、 $W_2$ 点的含水率测试数据相比,实测降雨的影响深度为2.0~3.0 m.

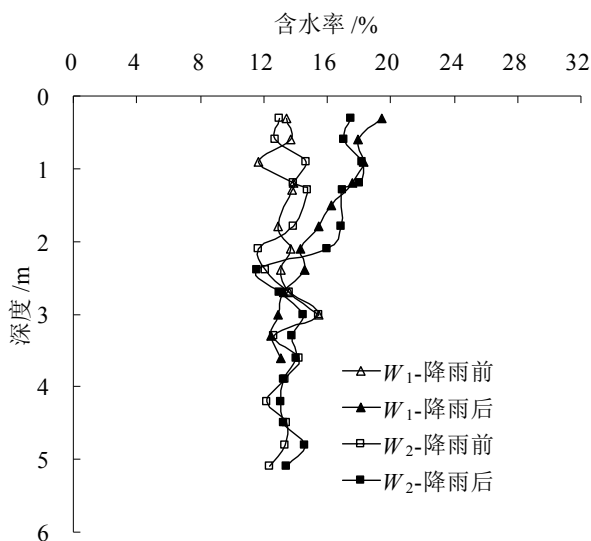


图9 降雨前后填土含水率测试结果

Fig.9 Variety of water content in the typical fill areas before and after rainfall

为了获得极端条件下,地表积水的入渗情况,从2013年7月初至9月末,在防洪坝前填方区局部进行了专门蓄水试验,通过在防洪坝坝顶紧邻积水区水面边缘2.5 m处设置两个钻探取样孔,测定土体含水率沿深度方向的变化情况,测试结果如图10所示.根据图10中的含水率测试结果并结合现场钻探揭示,填方区地表经受近3个月的长期蓄水,测试点处积水的下渗深度约为7 m.

此外,通过室内试验研究发现,天然黄土渗透系数一般为0.02~0.30 m/d,经压实或夯实后,渗透系数一般为0.001~0.110 m/d,个别点的渗透系数很小,达 $1.1 \times 10^{-5}$  m/d,天然土和压实土的渗透系数均表现出明显的离散型,压实填土的渗透性低于天然黄土1~2个数量级.压实填土较低的渗透系数,使填方区地表积水在短时期内入渗较困难.因地下水埋藏深度大,短时期的地表积水尚无法通过包气带达到潜水面,难以形成对地下水的有效补给.但是在黄土高填方工程中,因不均匀沉降等

原因常会引发填方区裂缝出现,在裂缝地带容易形成冲沟或低洼地带,而这些负地形又成为地表水的良好汇聚点,由于裂缝自身的特点,使其成为地表水入渗的良好通道,当地表水沿裂缝下渗时,易形成落水洞.裂缝以及落水洞一旦形成,将成为地表水汇集入渗的良好通道.因此,在黄土高填方工程建设过程,应加强巡查,注意裂缝、落水洞等不良地质现象,及时发现处理,切断地表水直接下渗的通道.

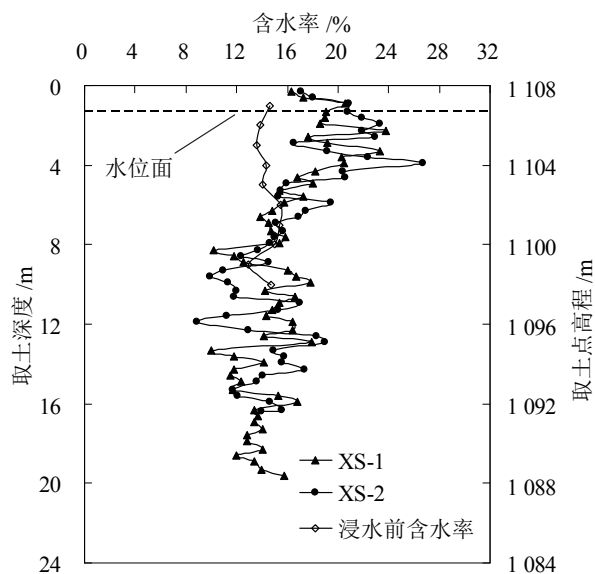


图10 积水浸润深度测试结果

Fig.10 Infiltration depth of surface accumulated water

### 3 结 语

本文通过对黄土丘陵沟壑区某“削岭填沟”高填方工程施工前、施工中及竣工后长达2年的地下水监测,得到了以下认识:

(1) 以现阶段既有数据判断,场地内施工前后的地下水排泄基准面升降不一,当形成逐步稳定的排水通道后,水位将趋于稳定.盲沟排水水质清澈,水流量与降雨量的季节分配具有一定响应关系,其流量与降水量正相关,并随季节周期性变化,可研判盲沟排水系统目前运行正常.

(2) 施工期,饱和土中的孔隙水压力增量与上部荷载增量存在线性关系,表明地基土处于稳定状态;竣工后,超静孔隙水压力可较快消散,表明地基土固结变形正逐步趋于稳定.此外,非饱和填土中的孔隙水压力未发生明显变化,表明在监测深度处,地下水未发生向上渗流.

(3) 填筑体地表水入渗途径是以孔隙渗入为主,填土经充分压实后,3个月的长期浸水,下渗深度仅为7 m,表明短时期的地表积水尚无法通过

包气带达到潜水面,难以对地下水产生直接补给。

(4) 黄土丘陵沟壑区通过“削崩填沟”方式形成的高填方工程,不免会对建设区域的水文地质环境产生影响,地下水系统通过自身内部调整,需要长时期才能达到稳定的平衡状态,因此地下水的监测需长期进行,并与变形、应力监测相结合,以便于把握地下水的动态变化规律及其对工程的影响。

## 参考文献 references

- [1] 谢春庆, 钱锐. 大面积高填方工程地下水后评价探讨[J]. 勘察科学技术, 2014(6):1-4.  
XIE Chunqing, QIAN Rui. Discussion on post evaluation of groundwater in large area high-fill project[J]. Site investigation and Technology, 2014(6):1-4.
- [2] 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): 786-789.  
XU Ming, SONG Erxiang. Review of long-term setting of high fills[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(6): 786-789.
- [3] 沈细中, 刘隆斌, 陈敏, 等. 恶劣环境条件下高填方设计关键技术问题[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(2): 67-72.  
SHEN Xizhong, LIU Longbin, CHEN Min. Key Technical Issues in Project Design of Tall Earth Fill under Abominable Surroundings[J]. Journal of Chongqing Jiangzhu University, 2003, 25(2): 67-72.
- [4] 张洪举, 凌天清, 杨慧丽. 山区填方路基的地下水渗流防治[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(1): 61-64.  
ZHANG Hongju, LING Tianqing, YANG Huili. The prevention and cure of the filling sub-grade groundwater seepage in the mountain area[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2006, 25(1): 61-64.
- [5] 李攀峰, 刘宏, 张倬元. 某机场高填方地基的地下水问题探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 136-139.  
LI Pan-feng, U Hong, ZHANG Zhou-yuan. Discussion on the underground water problem of high basement in an airport[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(2): 136-139.
- [6] 刘桂琴, 王子玉, 高振鲲. 贵州某高填方滑塌变形监测分析[J]. 人民长江, 2007, 38(11): 146-147.  
LIU Guiqin, WANG Ziyu, GAO Zhenkun. Slump deformation monitoring and analysis of a high fill foundation in Guizhou [J]. Yangtze River, 2007, 38(11): 146-147.
- [7] 龚志红, 李天斌, 龚习炜, 等. 攀枝花机场北东角滑坡整治措施研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 237-243.  
GONG Zhihong, LI Tianbin, GONG Xiwei, et al. Remediation measures on the landslide in fill slopes in north-east part of Panzhihua airport[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(2): 237-243.
- [8] 宋德朝, 王庭博, 刘宏. 高填方机场地下水潜蚀模型试验研究[J]. 路基工程, 2013, (2): 108-110.  
SONG Dechao, WANG Tingbo, LIU Hong. Experimental study on model of underground erosion at high-fill airport[J]. Subgrade Engineering, 2013, (2): 108-110.
- [9] 何建东. 延安市新区造地工程地下水流数值模拟研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.  
HE Jiandong. Numerical simulation of groundwater flow by the land creation in Yan'an new district[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [10] 陈立. 山区人工填土对地下水水位影响及治理措施[D]. 西安: 长安大学, 2011.  
CHEN Li. The impact of artifical fill on the water table and countermeasures in a mountainous area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [11] 中华人民共和国地质矿产部. 地下水动态监测规程: DZ/T 0133-1994 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.  
The Ministry of Geology & Mineral Resources, PRC. The ules for groundwater dynamic monitoring: DZ/T 0133-1994 [S]. Beijing: China standard Press, 1994.
- [12] 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 mornitoring technology and Its application[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000.

(编辑 沈波)