

DOI: 10.11779/CJGE201809024

黄土沟壑高填方工后地下水与土体含水率变化研究

段旭^{1,2}, 董琪³, 门玉明², 常园⁴, 叶万军¹

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

3. 陕西科技控股集团有限责任公司, 陕西 西安 710003; 4. 陕西省核工业地质调查院, 陕西 西安 710100)

摘要: 近年山区城市通过高填方工程扩展城市空间的实例越来越多, 关于填方后地下水位的变化一直备受关注。以陕西某高填方工程为依托, 对填方场地工后 15 个月里地下水位、填筑土体含水率的变化进行了持续的监测。监测结果表明填方后主沟下游地下水位上升幅度明显大于两侧支沟达到 1.3 m。主沟下游位置地下 15 m 以下的深层填土含水率随着深度递增。黄土沟壑高填方工程中主沟位置的地下水排水措施应进一步加强, 防止地下水位持续上升, 主沟下游位置进行工程建设时应考虑深层填土含水率增加带来的不利影响。

关键词: 黄土高填方; 地下水; 压实黄土; 含水率; 监测

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编码: 1000-4548(2018)09-1753-06

作者简介: 段旭(1991-), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 主要从水文地质工程地质研究工作。E-mail: duanxutim@163.com。

Change of groundwater and water content of loess high fill in gully regions

DUAN Xu^{1,2}, DONG Qi³, MEN Yu-ming², CHANG Yuan⁴, YE Wan-jun¹

(1. School of Architectural and Civil Engineering, University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Geological and

Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Science & Technology Holding Group Co., Ltd., Xi'an

710003, China; 4. Shaanxi Nuclear Industry Geology Surveying Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In recent years, the construction space of some cities in mountainous areas has been expanded by high fill projects, and the change of groundwater level after filling has attracted much attention. On the basis of a high fill project in Shaanxi, the groundwater level and the change of water content of soils in filling site are monitored continuously. The monitoring results show that the rise of the groundwater level at the lower reaches of the main channel after filling is obviously larger than that of the minor channel, and the maximum value is about 1.3 m. At the downstream position of the main channel, the water content of the deep fill increases with the depth. The measures for the main groove of loess gully high embankment in the groundwater drainage should be further strengthened to prevent the rise of groundwater level, and the construction at the downstream position of the main channel should be cautious considering the adverse effects of the increasing rate of water content of deep soils.

Key words: loess high fill; ground water; compacted loess; water content; monitoring

0 引言

随着中国经济的飞速发展, 西部山区建设用地的需求越来越大, 土地资源日益紧张, 在各地政府的引导和支持下, 重庆、十堰、宜昌、兰州、延安等地都开展了大规模的削山填沟、建造新城的工程。国内外学者对黄土高填方工程的讨论主要集中在大厚度填方体的沉降量及稳定时间预测等问题^[1-5]。Sower 等^[6]、Athanasios 等^[7]针对对碎石坝、废弃露天煤矿等大粒径填料以及细粒土的路基高填方工程的工后沉降, 开展了一些长期监测和研究。关于黄土高填方工程沉降的研究并没有考虑到填方后地下水位以及土体含水率变化带来的影响, 而且填方后地下水位的变化还会对建

筑物基础^[8-9]和填方边坡的稳定性有明显的影响^[10], 同时可能诱发工程土洞、地面沉降等问题^[11-13]。

山区高填方地下水的问题逐渐引起人们的重视, Yin等^[14]通过数值模拟手段对山区高填工程结束 50 a 内地下水的变化进行过预测, 预测的结果也显示, 沟壑地区高填方施工后地下水位会出现明显的抬升。张继文等^[15]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

基金项目: 陕西省重点项目 (2017ZDXM-SF-078); 陕西省重点产业链项目 (2015KTZDSF03-02); 黄土地区土木工程与地质环境协调研究创新团队项目 (2016KCT-13); 国家自然科学基金面上项目 (41672305)
收稿日期: 2017-06-13

进行了监测和分析,但其研究范围较小,没有覆盖一个完整的沟谷地形。

从检索的结果来看,关于山区高填方工程工后地下水位以及土体含水率变化的研究很少。笔者在新区现场进行了持续 15 个月的地下水位和土体含水率监测,揭示了黄土沟壑高填方工程结束后地下水的变化趋势,为进一步研究提供现场资料,并提出几点工程建议。



图 1 挖填方前后研究区卫星照片

Fig. 1 Satellite photos of study area before and after excavation

1 填方前后水文地质条件

挖填方工程施工完成后原始地形被完全改变,形成了“人工平原”,挖填方前后研究场地地貌变化如图 1 所示。研究场地属黄土梁峁、沟谷区,地表为低山—中山地貌。挖填方工程施工前,地貌单元主要为黄土梁峁、黄土沟壑冲蚀和桥沟沟谷地貌。桥沟主沟两岸支沟、冲沟发育,属侵蚀、冲积地貌。沟谷区上游

较宽阔、沟坡稍缓,下游狭深、沟坡较陡,谷坡呈斜坡状,两侧支沟、岔沟发育。工程施工后,研究区地形较施工前平坦,总体呈现西北高东南低的趋势,研究区最南端高程在 1075 m 左右,最北端高程约为 1120 m,在桥沟沟口高程在 1070 m 左右,地形坡度一般在 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$,局部在 5° 以内。研究区内多年平均降水量最大为 959.1 mm,最小为 330 mm。年内降水主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 70% 左右。其间,日最大降水量为 139.9 mm。3—10 月均有阴雨天出现,其中 3—6 月短期阴雨较多,7—10 月以 8~15 d 的中期阴雨为主研究区多年年平均蒸发量为 1605.8 mm,历年最高蒸发量为 1929.5 mm,最低蒸发量为 1265.7 mm,多集中在 4—8 月,占全年蒸发量的 66%。其中,月平均最高蒸发量出现在 6 月份,蒸发量为 244.4 mm,其次为 7 月份。

如图 2 所示,研究区地层主要为上更新统马兰黄土、中更新统离石黄土、侏罗系砂泥岩。填土来源于中、上更新统黄土,原始土的结构性被破坏,重塑后 $w_p=17.3\%$, $w_L=31.1\%$, $I_p=13.8$, $I_L>10$,土粒相对密度 $d_s=2.71$,土样天然含水率为 $9.3\% \sim 14.7\%$,天然干密度 $1.35 \sim 1.51 \text{ g/cm}^3$ 。水文地质结构总体表现为上部透水不含水层与含水层,下部相对完整基岩隔水层的展布特征。透水不含水层分布于黄土梁峁区,由第四系上更新统风积黄土、中更新统风积黄土组成;含水层由河谷区局部的第四系全新世冲洪积层及侏罗纪延安组砂泥岩风化壳构成,为双重介质的统一含水水体。隔水层为含水层基底,由延安组微风化砂泥岩构成。

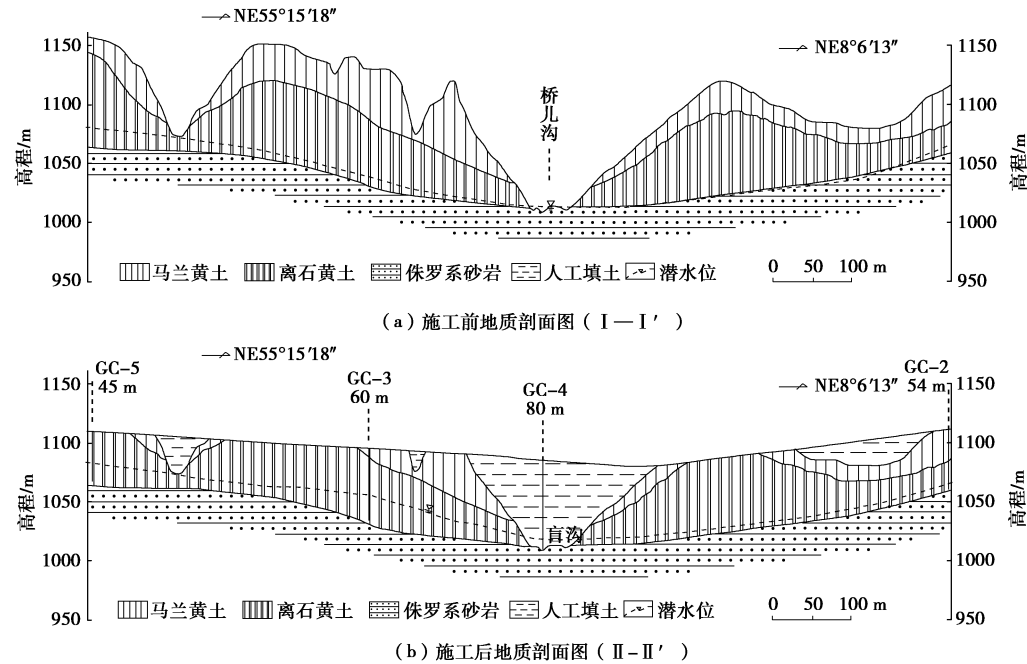


图 2 挖填方后水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological structure of study area

地下水类型为第四系孔隙潜水和侏罗系基岩裂隙水两大类。第四系孔隙潜水主要分布于河谷区, 基岩裂隙水全区分布, 二者在河谷区水力联系密切, 构成双层介质统一含水体系。第四系含水层主要为洪积层, 厚度一般小于 10 m; 基岩含水层主要为砂岩风化层, 强风化带的厚度一般小于 4 m, 地下水补给来源为大气降水, 以泉水溢出、蒸发及人工开采等方式排泄, 下降泉的地质结构与照片如图 3 所示。工程建设后, 回填土层与沟谷两侧的黄土层结为一体, 阻塞了地下水的排泄通道。填方后地下水唯一的补给来源是大气降雨入渗补给, 地下水排泄主要有蒸发排泄、民井开采和向延河、沟谷、盲沟的排泄。图 4 为研究区内盲沟分布图, 排水盲沟断面尺寸根据冲沟大小(汇水排水面积)确定, 主盲沟下游段断面尺寸一般不小于 5.0 m×2.0 m (宽度×高度, 下同), 上游断面尺寸一般不宜小于 3.0 m×2.0 m; 次盲沟下游断面尺寸一般不小于 1.5 m×1.5 m, 上游断面尺寸一般不小于 1.2 m×1.2 m; 支盲沟下游断面尺寸在现场根据其流量确定, 一般不小于 0.5 m×0.5 m。主、次盲沟采用粒径 5~30 cm 的块碎石, 支盲沟采用 3~7 cm 的碎石, 顶部设反滤层, 外覆无纺土工布。下游主盲沟内设置 2 根钢筋混凝土管, 上游主盲沟内设置 1 根钢筋混凝土管, 管径Φ800 mm。次盲沟设置 1 根软式透水管, 管径Φ200 mm。

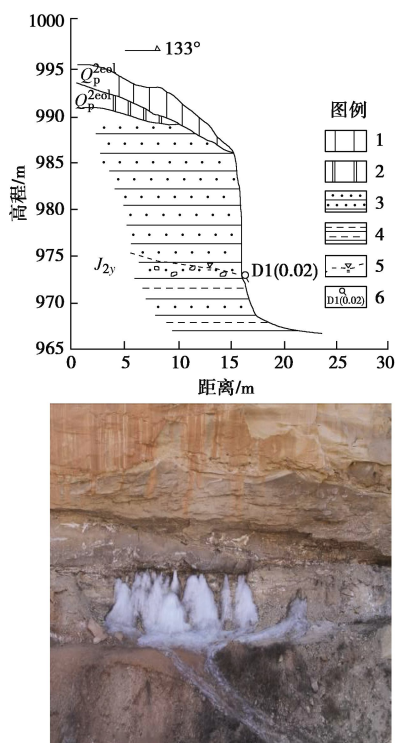


图 3 原沟谷两侧泉水剖面及出露照片
Fig. 3 Profile and photo of spring water leakage at both sides of original valley

填方完成后, 原始地形发生了很大的改变, 原沟谷处设有盲沟可以排泄地下水, 在相当长的时间内, 地下水的径流方向会与原地形下基本一致, 即总体由

挖方区向填方区汇流, 同时也会存在由上游向下游、由上层到下层的径流。在自然沟谷和盲沟处排出系统。

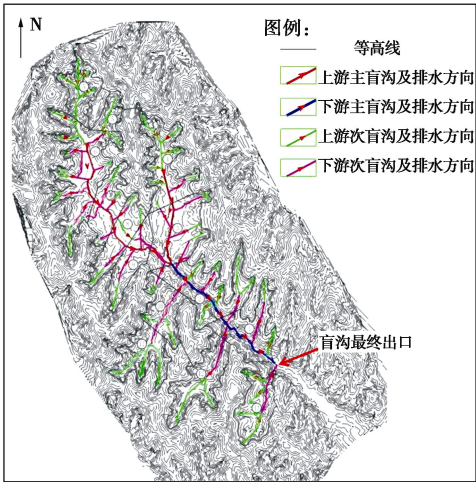


图 4 研究区排水盲沟分布图
Fig. 4 Distribution of blind drainage ditch

2 监测方案

在研究区的原主沟及支沟位置布设了 5 个地下水位监测点(图 5), 在 2014 年 3 月至 2015 年 7 月期间通过水文地质钻孔进行地下水位动态监测工作, 其中 #1, #2, #3 监测点位于主沟中部, 由上游至下游依次排列。#4, #5 监测点均位于两侧支沟中。最受关注的是主沟下游位置以及上游支沟位置的地下水位变化情况, 这些位置原始地形沟底基岩出露, 填方土体厚度大, 填方体对沟内水分径流以及沟侧泉水的排泄的影响最明显。

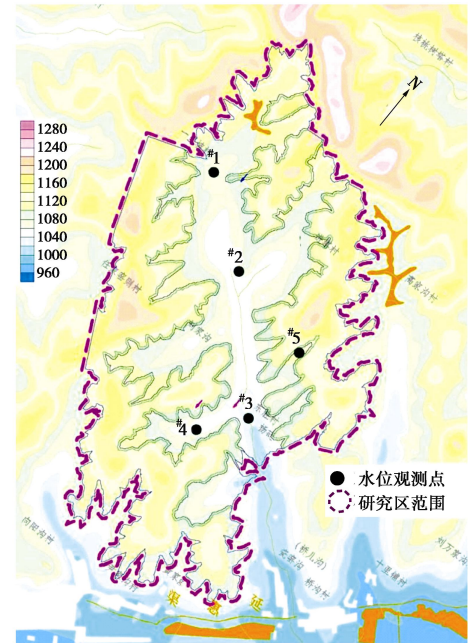
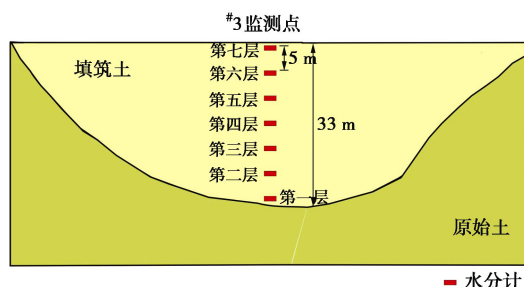


图 5 地下水位监测点布置图
Fig. 5 Layout of monitoring points for groundwater
监测地下水位的同时, 选择主沟下游的监测点#3 与

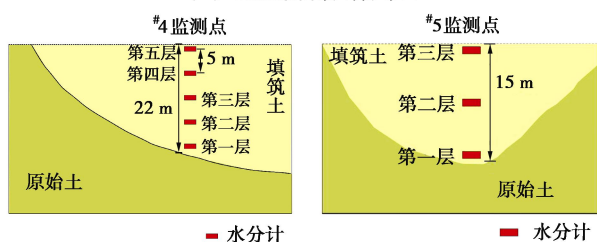
位于两侧支沟的#4, #5 监测点 3 个位置开挖探井穿透填土层, 设计通过专用机械进入井内, 埋设水分计对不同深度土体含水率进行监测, 如图 6 (a) 所示。垂直方向每隔 5 m 埋设一组水分计来监测填筑体内部含水率的变化, 各测点水分计的布置如图 6 (b)、(c) 所示。



(a) 探井内水分计埋设过程



(b) #3 监测点水分计分布图



(c) #4, #5 监测点水分计分布图

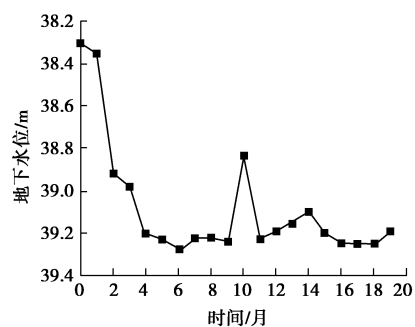
图 6 水分计布置过程与剖面图

Fig. 6 Profile of monitoring instruments for moisture

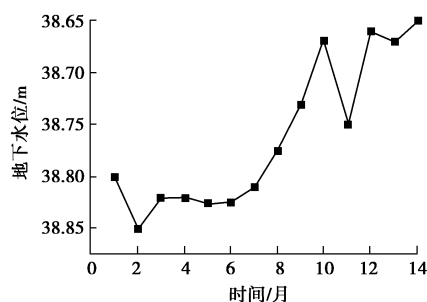
3 地下水位变化

地下水位在监测期间变化明显, 且不同位置的变化趋势与幅度有明显差异。如图 7 所示, 位于桥儿沟主沟上游的#1 监测点地下水位在观测的前 6 个月时间里有所下降, 由 38.3 m 降至 39.2 m 左右, 并在后面的监测中在 39.2 m 附近小范围波动。原因可能由于其所处在主、次盲沟的位置, 地下水能较好的排泄, 故水位在监测结束时与开始时相比, 总体有下降的趋势。#2 监测点地下水位在填方后 6 个月时开始上升, 变化幅度 20 cm 左右, 最终稳定在 38.6 m 左右。位于主沟下游的#3 监测点在成孔监测的第一个月里下降 10 cm 至 64.1 m, 随后成线性状态上涨, 在第十个月后逐渐稳定至 62.8 m 左右, 上涨幅度达到 1.3 m。主沟地下水位的涨幅明显大于两侧支沟, 这与 Yin 等^[14]预测的趋势相近, 但主沟位置地下水位上升的幅度明显大于

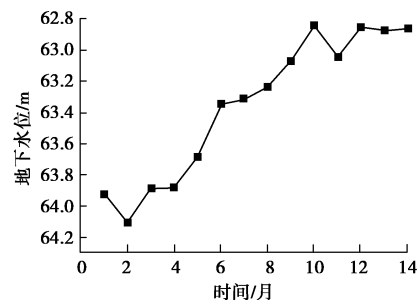
模拟结果。且主沟中心位置填土厚度大, 地下水位的上升对填筑体的影响会更加明显。



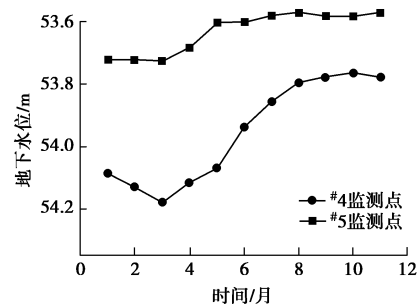
(a) #1 监测点地下水位变化曲线



(b) #2 监测点地下水位变化曲线



(c) #3 监测点地下水位变化曲线



(d) #4, #5 监测点地下水位变化曲线

图 7 地下水位时程变化曲线

Fig. 7 Curves of groundwater level

位于下游支沟的#4, #5 监测点的地下水位在观测开始后的第一个月里均有所下降, #4 监测点在前 3 个月内水位小幅下降, 随后开始上升, 至 10 个月时共上升 40 cm。#5 监测点变化趋势与#4 监测点基本一致, 但变化幅度较小, 主要在工后 3~5 个月期间上升 10 cm, 随后保持稳定。

4 土体含水率变化

黄土梁峁区大面积填方后, 地表水和地下水的补、

径、排条件发生变化,填方工程中虽然布设有排水盲沟用于排导地下水,但排水量仍小于原地形的径流总量^[15],填筑体内部有大量水分滞留。如图8所示,在土方填筑期完成后,不同位置不同深度土层的含水率变化显现出不同特征。

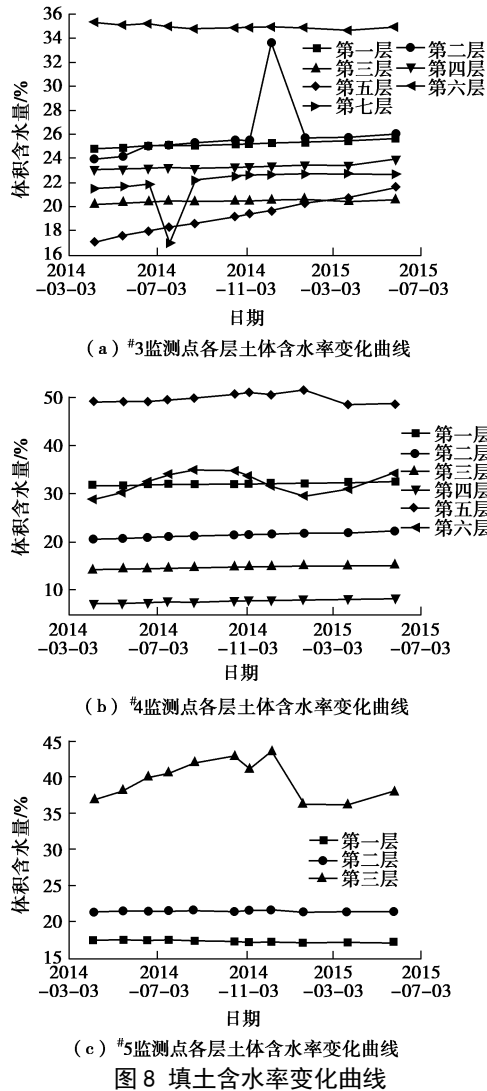


图8 填土含水率变化曲线

Fig. 8 Curves of water content of soils

#3 监测点位于主沟下游,含水率最高的是浅层的第六层土体,但由于主沟下游地下水条件较为复杂,土体含水率的分布与变化情况较为特别。原始地面附近的深层填土含水率均较高,特别是深层土体的含水率有一定的增长趋势,位于地下10 m处的第五层土体含水率增大趋势最为明显,监测期间以近乎线性的趋势由17%增大至21%,这与地下水分的毛细上升、地表水分入渗都有一定的关系。水分由地表入渗的影响范围达到地下10 m的位置,这与相关地表积水试验中地表水的入渗深度不超过7 m的结论有一定差异^[16],但由于本文中水分计埋深范围大,相临距离也较大,无法精确得到地表水分的最大入渗位置。从第三层土体向下,接近原始土体填土的含水率逐级增大,这与

地下水位的上升有直接关系。

#4 监测点位于支沟中部,地表(第六层)土体的含水率较高且有规律性波动,是受地表降水的直接影响。第五层土体的含水率高达48%,且较为稳定,主要是地表水分通过入渗后滞留于此位置。从第4层土体向下,土体的含水率随深度逐级增大,最深位置即原始地面处土体的含水率已达到35%左右。位于东侧支沟的#5 监测点所处位置填土深度较浅,仅为15 m左右,由图8(c)可以看出浅层土体含水率较高,且波动较大,最大值达到45%左右,中层和深层土体的含水率变化微弱,这表明地表水在压实黄土中的垂直入渗能力较弱。从侧面说明#3 监测点和#4 监测点中深层填土含水率的增长主要是由于地下水分的运移造成的。

5 讨 论

黄土高填方工程建设中,大面积的削方填方导致原始地形以及水文地质条件已发生改变,监测结果表明主沟下游地下水位的上升幅度明显大于两侧支沟,地下水位上升的过程中位于底层的填土逐渐浸水饱和,会对高填方的稳定产生影响。这与某机场高填方地基的地下水问题较为相似^[11]。填方后地下水位的上升以及深层填土的湿化变形有可能诱发工程土洞、地面塌陷等问题。

李旭东等^[16]、黄雪峰等^[17]的研究表明压实黄土压实度越高,总变形量越小,遇水增湿变形量占总变形量的比例越大,地下水上升导致深层填土含水率的明显提高后,会对填方场地的最终沉降量产生影响,这一因素以往的高填方沉降研究中并没有被考虑,这也是作者下一步的研究方向。

6 结 论

本文对填方前后研究区的水文地质条件进行了分析,并对工后15个月里沟谷高填方场地的地下水位、土体含水率变化情况进行了持续的监测,得出以下结论:

(1) 黄土沟壑地区高填方工程改变了局部的地下水补径排条件,是地下水位上升,土体含水率升高的直接原因。

(2) 填方后主沟上游盲沟排水效果较好,地下水位略微下降,主沟下游及两侧支沟地下水位均有所上升,主沟下游位置上升达1.3 m,明显大于两侧支沟,需要综合的防、排水措施,控制地下水位的抬升。

(3) 填方后各层土体含水率与初始状态有明显差异,深层土体的含水率随深度递增,局部达到饱和状态,会直接影响填方场地的最终沉降量、沉降稳定时间以及填方场地的长期稳定性,在山区高填方工程的沉降量预测中应考虑深层土体的湿化变形。

参考文献:

- [1] 董琪, 李阳, 段旭, 等. 黄土梁峁区高填方地基变形规律研究[J]. 工程地质学报, 2016, **24**(2): 309 - 314. (DONG Qi, LI Yang, DUAN Xu, et al. In-situ tests on deformation laws of high foundation in loess plateau area[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, **24**(2): 309 - 314. (in Chinese))
- [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 - 301. (ZHU Cai-hui, LI Ning, LIU Ming-zhen, et al. Spatiotemporal laws of post-construction settlement of loess-filled foundation of Lüliang Airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(2): 293 - 301. (in Chinese))
- [3] 宋二祥, 曹光棚. 山区高填方地基蠕变沉降特性及简化计算方法探讨[J]. 岩土力学, 2012, **33**(6): 1711 - 1718+1723. (SONG Er-xiang, CAO Guang-xiang. Characteristics and simplified calculation method of creep settlement of high fill foundation in mountain area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(6): 1711 - 1718+1723. (in Chinese))
- [4] 刘宏, 李攀峰, 张倬元, 等. 山区机场高填方地基变形与稳定性系统研究[J]. 地球科学进展, 2004, **19**(增刊 1): 324 - 328. (LIU Hong, LI Pan-feng, ZHANG Zhuo-yuan, et al. A systematic research on the deformation and stability of high embankment of airport in mountainous area[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, **19**(S1): 324 - 328. (in Chinese))
- [5] 景宏君. 振动压实与黄土高路堤沉降变形[D]. 西安: 长安大学, 2004. (JING Hong-jun. Vibratory compaction and settlement-deformation of loess highway embankment[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese))
- [6] SOWERS G F, WILLIAMS R C, WALLACE T S. Compressibility of broken rock and the settlement of rock fills[C]// Proc 6th Int Conf on Soil Mech and Foundation Eng. Montreal, 1965: 561 - 565.
- [7] ATHANASIU C, SIMONSEN A S, SOEREIDE O K, et al. Elastic and creep settlements of rock fills[C]// Proc 16th Int Conf Soil Mech Geotech Eng. Osaka: Balkema, 2005: 1837 - 1843.
- [8] 王茂. 黄土地区地下水上升对地基基础影响的模型试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008. (WANG Mao. Model test research about influencing on foundation when the underground water rising in loess area[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2008. (in Chinese))
- [9] 霍晨琛. 地下水位上升对黄土高填方边坡稳定性的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2016. (HUO Chen-chen. Study on the Stability of high-filled loess slope under the rise of groundwater level[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese))
- [10] 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, LIU 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. (in Chinese))
- [11] 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, 64. (XIE Chun-qing, QIAN Rui. Discussion on post evaluation of groundwater in large area high-fill project[J]. Site Investigation Science and Technology, 2014(6): 1 - 4, 64. (in Chinese))
- [12] 谢春庆, 廖梦羽, 廖崇高. 西南某大面积高填方体局部破坏特征及原因分析[J]. 勘察科学技术, 2015(6): 27 - 32. (XIE Chun-qing, LIAO Meng-yu, LIAO Chong-gao. Analysis of local damage characteristics and reasons of a large area high-fill project in southwest China[J]. 2015(6): 27 - 32. (in Chinese))
- [13] 朱才辉, 李宁. 黄土高填方地基中暗穴扩展对机场道面变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(1): 198 - 206. (ZHU Cai-hui, LI Ning. Analysis of airstrip deformation due to expansion of hidden cavities in loess filled high embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(1): 198 - 206. (in Chinese))
- [14] YIN X, CHEN L, HE J, et al. Characteristics of groundwater flow field after land creation engineering in the hilly and gully area of the Loess Plateau[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, **9**(14): 646.
- [15] 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 - 483. (ZHANG Ji-wen, YU Yong-tang, LI Pan, et al. Groundwater monitoring and analysis of high fill foundation in loess hilly-gully region[J]. J Xi'an Univ of Arch & Tech (Natural Science Edition), 2016, **48**(4): 477 - 483. (in Chinese))
- [16] 李旭东, 黄雪峰, 杨宝山, 等. 延安新区压实 Q2 黄土增湿高压压缩变形特性[J]. 后勤工程学院学报, 2015(1): 11 - 16. (LI Xu-dong, HUANG Xue-feng, YANG Bao-shan, et al. Moistening or demisting compression deformation characteristics of compacted Q2 loess under high pressure in Yan'an New District[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2015(1): 11 - 16. (in Chinese))
- [17] 黄雪峰, 孔洋, 李旭东, 等. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. 岩土力学, 2014, **35**(增刊 2): 37 - 44. (HUANG Xue-feng, KONG Yang, LI Xu-dong, et al. Study and application of deformation characteristics of compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S2): 37 - 44. (in Chinese))