

黄土高填方地基水分运移规律与浸水变形特性研究

杨校辉^{1,2}, 潘国杰^{1,2}, 郭楠^{1,2}, 黄雪峰^{1,3}, 陈鹏山^{1,2}

(1. 兰州理工大学 土木与水利工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;

3. 联勤保障部队工程大学 军事设施系, 重庆 401311)

摘要: 为研究黄土高填方地基水分运移规律与浸水变形特性, 依托兰州某分层碾压回填的高填方工程开展现场浸水试验, 监测 364 d 浸水过程中填方地基土体含水率、地表沉降变形及试坑周围裂缝变化, 分析填方地基中水分运移规律、竖向及水平向渗透系数变化及增湿变形特征。结果表明: (1) 填方地基浸水期间, 日耗水量具有明显的阶段性特征; 填方地基上部可采用黄土混合填料以及提高压实度的方法提高地基的防渗效果。(2) 现场浸水试验必须考虑蒸发作用, 日入渗量可稳定于 2.5~3.0 m³/d, 日蒸发量为日耗水量的 2/3~1/2。(3) 填方地基湿化变形的充分发挥需要多次完成, 随着填土深度的增加, 深部土体湿化的发生时间将向后推迟, 导致填方地基工后长期沉降变形。(4) 水分竖向渗透速率随填土深度的增加逐渐减小, 水平向渗透速率基本一致, 水分扩散形态呈现扁椭圆形特征。(5) 填方地基浸水变形的“边界效应”与原状黄土地基明显不同, 对于临近水源的填方地基, 建构筑物与水源之间至少应设置 10 m 的安全距离。(6) 填方地基浸水过程中, 可将最后 1 个月地表沉降速率不大于 2.5 mm/d 作为停止浸水标准。研究成果可为黄土区填方地基处理及增湿变形问题防治提供科学依据。

关键词: 土力学; 黄土填方地基; 浸水试验; 体积含水率; 增湿变形; 水分入渗; 沉降速率

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)12-3443-12

Moisture migration law and water immersion deformation characteristics of loess high-fill foundations

YANG Xiaohui^{1,2}, PAN Guojie^{1,2}, GUO Nan^{1,2}, HUANG Xuefeng^{1,3}, CHEN Pengshan^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. Department of Military Facilities Engineering, Engineering University of the Joint Logistics Support Force, Chongqing 401311, China)

Abstract: To investigate the moisture migration and immersion-induced deformation characteristics of loess high-fill foundations, a field immersion test was conducted on a layered compacted high-fill project in Lanzhou. Over a period of 364 d, the volumetric water content, surface settlement deformation, and crack development around the test pit were monitored. This study analyzed the moisture migration patterns, variations in vertical and

收稿日期: 2025-05-29; **修回日期:** 2025-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52368049); 甘肃省联合科研基金项目 (25JRRL007); 兰州市青年科技人才创新项目 (2023-QN-27)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52368049), Gansu Joint Research Fund (Grant No. 25JRRL007) and Lanzhou Youth Science and Technology Talent Innovation Project (Grant No. 2023-QN-27)

作者简介: 杨校辉 (1986-), 男, 博士, 2010年毕业于榆林学院土木工程专业, 现任副教授、硕士生导师, 主要从事非饱和土地基处理、支挡结构及滑坡防治等方面的教学与研究工作。E-mail: 20170031@lut.edu.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2025.0361

horizontal permeability coefficients, and the wetting deformation characteristics of the fill foundation. The results indicate the following: (1) During immersion, daily water consumption exhibited distinct stage-wise characteristics. The upper section of the fill foundation can enhance anti-seepage effectiveness by employing loess mixed fill and increasing compaction. (2) Evaporation must be accounted for in field immersion tests. Daily infiltration stabilized at $2.5 - 3.0 \text{ m}^3/\text{d}$, with evaporation constituting approximately $2/3$ to $1/2$ of the daily water consumption. (3) Full development of wetting deformation requires multiple cycles. As fill depth increases, the onset of deep soil wetting is delayed, resulting in long-term post-construction settlement. (4) The vertical permeability rate decreases with increasing fill depth, while the horizontal permeability rate remains consistent, leading to an oblate elliptical moisture diffusion pattern. (5) The “boundary effect” of immersion deformation in fill foundations differs significantly from that in undisturbed loess foundations. For fill foundations located near water sources, a minimum safety distance of 10 m should be maintained between structures and the water source. (6) During the immersion process of the fill foundation, the surface settlement rate in the last month should not exceed 2.5 mm/d as the criterion for ceasing immersion. These findings provide a scientific basis for the treatment of fill foundations and the mitigation of wetting deformation issues in loess regions.

Key words: soil mechanics; loess fill foundation; immersion test; volume water content; humidification deformation; water infiltration; sedimentation rate

1 引 言

随着新型城镇化规划、交通强国与重大水利工程等项目深入实施,西部山区产生了大量填方地基。填方地基中的填筑黄土自身既是荷载又是受荷体、通常处于非饱和状态,受降雨、灌溉或地下水位抬升等因素影响,其含水率会有不同程度增加,同时产生较大增湿变形^[1-2],严重时导致黄土填方地基沉降或失稳,给人民财产安全和重大工程建设带来危害。因此,深入研究黄土填方地基中水分运移规律、渗透系数变化、渗透范围及地基浸水变形特性等,可为解决黄土填方地基变形问题提供科学依据。

现场浸水试验是研究湿陷性黄土地基中水分入渗和增湿变形特性的重要方法,相较于室内模型试验^[3-4],其能够更加真实地反映土体在浸水条件下的变化情况^[5]。黄雪峰等^[6]通过大规模浸水试验,揭示了大厚度自重湿陷性黄土的湿陷变形特征;王小军等^[7]分段评价了郑西客运专线沿线黄土湿陷性;马 闫等^[8]根据山西晋中浸水试验,揭示了黄土浸水自重湿陷过程中的水分运移、土体位移等规律;Y. Q. Lv 等^[9]在渭河三级阶地和咸阳也开展了原位浸水试验,对黄土湿陷性进行了评价。杨校辉等^[10]通过兰州和平镇现场浸水试验发现大厚度湿陷性黄土水分的入渗存在一个临界深度,在临界深度以下黄土不会达到饱和或含水率增加十分缓慢;刘德仁等^[11]

在甘肃靖远进行的浸水试验也发现了类似现象。黄雪峰和杨校辉^[12]的研究成果为黄土湿陷性评价、地基湿陷变形规律的认识提供了重要依据;但是以上现场浸水试验主要针对原状黄土场地,而填方地基中的填筑黄土具有新的初始结构^[13-14],该结构在应力和水力路径作用下均会发生变化^[15],进而引起非饱和填土宏观力学、水力行为的不同反应,因此,填方地基在浸水条件下的相关问题研究亟待开展。

甄平福等^[16-17]在延安科研试验区康家沟进行了填方场地大型浸水试验,初步揭示了填方场地和既有原状黄土地基浸水变形的不同;但是该试验在大面积浸水前通过深层注水孔对填土进行预浸水,故而试验结果不完全是原位浸水入渗产生增湿变形;同时在满坑浸水一周后因地面出现塌陷和土洞等,改为分区浸水,由此影响了增湿变形和水分入渗规律的实用性。因此,完整的有代表性的填筑黄土现场浸水试验未见报道,填方地基水分运移规律、浸水稳定时平均入渗量及停止观测的变形速率等尚不明晰。

综上,本文依托兰州某填方工程,伴随填方施工过程分层埋设水分传感器、沉降监测系统及蒸发量传感器等,进行了为期 364 d 的现场浸水试验;测试浸水过程中试坑内外不同深度填方地基中水分运移规律及影响范围,增湿变形规律等。研究成果可有力提升对填土增湿变形特性的认识,同时为黄土填方地基的工程设计和灾害防控提供重要依据。

2 试验概况

2.1 场地条件

本试验依托兰州市城关区某削山造地项目进行,场地地貌在平整前为黄土丘陵沟壑区,试验区填方厚度为 58.44~60.14 m,属于典型的高填方场地。试验区挖方主要为马兰黄土和离石黄土,前者土质均匀,孔隙较发育,颜色呈褐黄色,天然状态下干强度低;后者土质较均匀,孔隙发育较少,干强度中等,基本物理指标见表 1。为了保护生态环境和减少土方工程造价,对马兰黄土、离石黄土及二者不同质量比混合料的力学、渗透特性进行了大量室内试验^[18],根据试验结果同时考虑填方地基变形和防渗问题,最终确定在浸水试坑底向下 5 m 范围内的填料为马兰黄土与离石黄土混合料(质量混合比为 6:4),压实系数为 0.96,基本物理指标见表 1。浸水试坑底向下 5 m 以下范围填料为开挖的马兰黄土或离石黄土,压实系数不小于 0.93。

表 1 不同黄土及其混合填料的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties index of different loess and their mixed filler

名称	天然密度/ (g·cm ⁻³)	干密度/ (g·cm ⁻³)	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	天然含水 率/%	最优含 水率/%
马兰黄土	1.52	1.42	1.88	6.9	13.2
离石黄土	1.80	1.61	1.80	11.9	14.0
混合填料	-	-	1.90	-	11.3

填筑过程为:首先,快速均匀地使运料车倾倒混合填料,使用平地机对现场堆积的混合填料进行均匀摊铺;其次,使用冷再生机器进行搅拌、增湿,待填料分层填筑完成后,使用羊角碾压路机进行振动碾压,振动碾压分层厚度均为 40 cm;最后,使用洒水车对填料层进行保湿,最后使用平碾压路机进行平整处理。

2.2 现场浸水试验方案

参考《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025—2018)和现场浸水试验相关经验^[10-12],选择典型填方区进行现场浸水试验,浸水试坑布置为圆形(见图 1),试坑直径为 40 m,深约 2 m。试验采用 TDR-3 型水分计测试土体体积含水率,该传感器的精度在含水率 0~50% 范围内为±2%,在含水率 50%~100% 范围内为±3%;具有受土壤含盐量影响较小,可长期埋入深层土体,耐长期电解、完全防水等特点。依据高填方变形无线远程综合监测系统及安

装监测方法^[19],伴随填方施工过程分层埋设水分计,水分计导线预留 2 m 额外线长(弯曲布置),防止填方地基沉降时将导线拉断,待填至坑底标高后布设沉降监测系统。

如图 1 所示,沿浸水坑圆心布设 3 个夹角互为 120° 的监测轴,即轴 1、轴 2 和轴 3,沿轴布置编号依次为 S1-1~S1-7, …, S3-2~S3-7 的地面沉降观测点,其中坑内 13 个,坑外 6 个。其中 S1-1 为试坑中心地表沉降标;S1-2 为试坑内地表沉降标,距离试坑中心 5 m;S1-7 为试坑外地表沉降标,距离试坑边缘 10 m,其余类推。沉降观测采用高精度水准仪,每日测量一次,按照二等水准测量控制,精度为 0.1 mm。

在距浸水坑坑底-0.5 m 处、-2 m 处和-5 m 处,按轴 1、轴 2 和轴 3 布置 TDR 水分计。第一层 TDR 水分计编号为 1-1~1-6, …, 3-1~3-6, 第二层 TDR 水分计编号为 1-1'~1-6', …, 3-1'~3-6', 第三层 TDR 水分计编号为 1-1''~1-4'', …, 3-1''~3-4'', 水平间距为 5, 10 m, 具体埋设位置见图 2。将水分计接入 PC-2SQ 型数据采集仪后即可实现定时采集,每日采集一次,供电系统由蓄电池和太阳能板保障。

2.3 浸水过程

为测试填方地基中真实的水分运移规律,本试验坑底未布置渗水孔,即为自然入渗。试验从 2022 年 11 月 13 日开始蓄水,2023 年 11 月 13 日观测结束,历时 364 d;浸水期间水位下降至 1.1 m 时,及时补水,保持水头高度为 1.1~1.5 m,现场浸水试验坑实景见图 3。浸水期间当地气温、降雨量变化见图 4。

3 耗水量与入渗结果分析

3.1 耗水量分析

根据浸水坑面积、水位下降高度可计算出试坑中水分减少量,简称为耗水量。试验从 2022 年 11 月 13 日开始蓄水,截止 2023 年 11 月 13 日观测结束,浸水时间共 364 d,试验期间耗水总量、日耗水量随浸水时间变化图见图 5。

分析图 5 可知,随着浸水时间增加,耗水总量持续增加,总计耗水量为 2 933 m³。日耗水量具有明显的阶段性特征,总体呈现“初期大→前期缓降→中期波动→末期稳定”的变化规律:(1) 试验初期最大日耗水量为 19 m³/d,出现在浸水第 2 d,逐渐降为日耗水量 13 m³/d 左右,这是由于初期填方黄

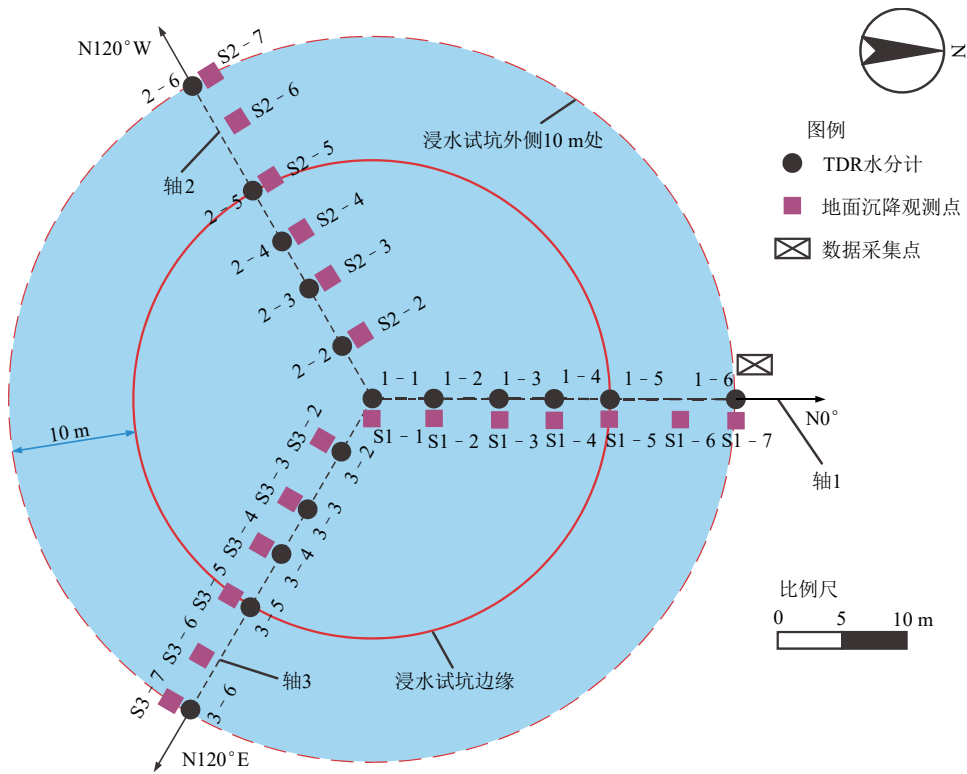


图 1 浸水试验坑及监测点平面布置图

Fig.1 Plan layout of the immersion test pit and monitoring points

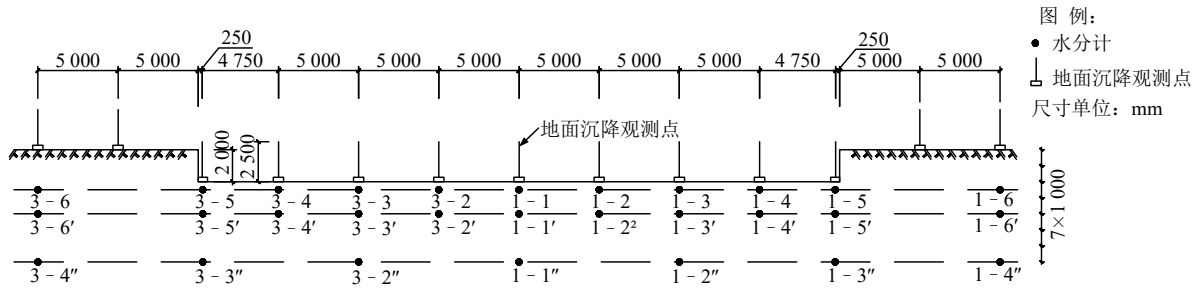


图 2 传感器布置方案图

Fig.2 Sensor layout scheme diagram



图 3 现场浸水试验实拍照片

Fig.3 Photo graphs of field immersion test

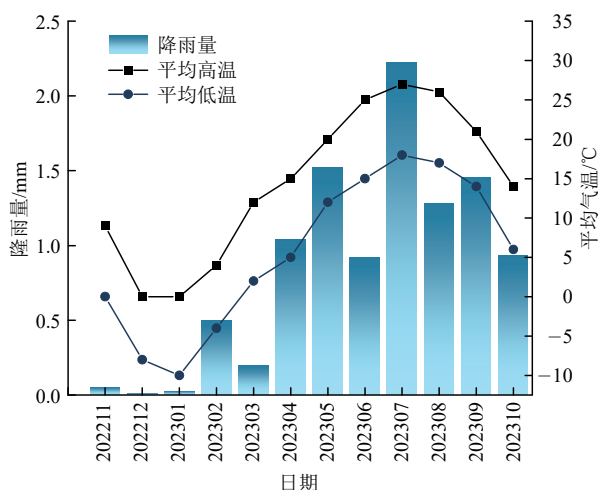


图4 浸水期间当地降雨、气温变化图

Fig.4 Local rainfall and temperature change chart

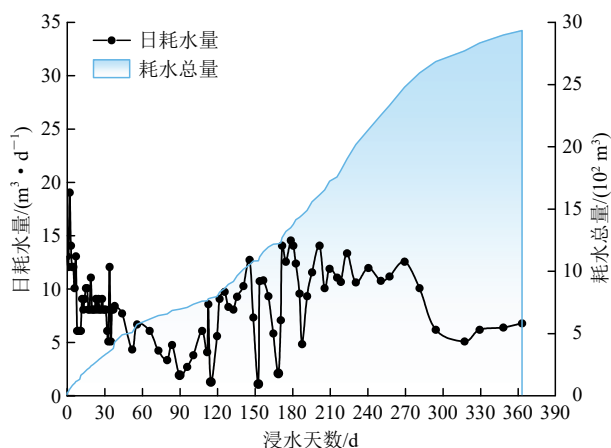


图5 耗水总量、日耗水量随浸水时间变化图

Fig.5 Changes of total water consumption and daily water consumption with soaking time

土含水量相对较低,水分迅速渗透和扩散,使得日耗水量在初期较大。(2)随着冬季气温下降,浸水前期(25~75 d)日耗水量逐渐下降为 $7 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,之后进一步降低。因为气温下降,浸水试坑表面结冰,环境温度降低,使得日耗水量降低^[20]。(3)浸水至105 d时,气温回升、浸水坑表面冰面融化,使得日耗水量逐渐开始增加,浸水中期(125~200 d)日耗水量存在 $2\sim 6 \text{ m}^3/\text{d}$ 的波动,且最小日耗水量为 $1.2 \text{ m}^3/\text{d}$,出现在试验的第151 d。这表明随着水分入渗,上部土体发生湿化变形,使得土体压密孔隙减小,地基土中空气未及时排出,对水流的阻力增大^[5],日入渗量下降;而当地基土中气体排出后,水分入渗速度又开始恢复,使得日耗水量又逐渐上升,因此该阶段日耗水量有一定波动。(4)浸水末期,日入渗量逐渐由 $9 \text{ m}^3/\text{d}$ 降低为 $6 \text{ m}^3/\text{d}$,趋于稳定,最终稳定于 $5.5 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,曲线整体基本稳定,此时黄土填方地基浅层趋于饱和、渗透性能逐渐稳定。

总体而言,本填方场地日耗水量远小于原状黄土地基^[6, 10-11],证明提高填土压实度可显著降低水分入渗速度、进一步减少日耗水量。

为有效辨析蒸发作用对浸水试验的影响,2023年4月7日(浸水第145 d)开始使用蒸发量传感器与广口蒸发皿测试试验场地蒸发量,取二者平均值可换算出日蒸发量,用日耗水量减去日蒸发量,则可以得到日入渗量,日耗水量、日入渗量随浸水时间变化见图6。

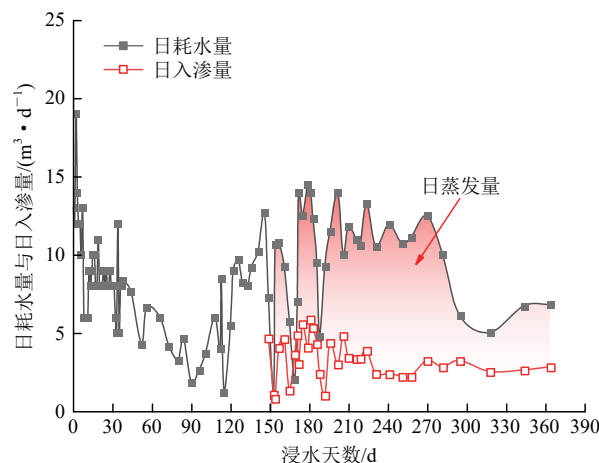


图6 日耗水量、日入渗量随浸水时间变化图

Fig.6 Diurnal water consumption and diurnal infiltration volume variation graphs with soaking time

分析图6可知,除浸水中期日入渗量出现波动外,浸水200 d以后,日入渗量逐渐降低,并稳定于 $2.5\sim 3.0 \text{ m}^3/\text{d}$ 。日耗水量与日入渗量差值即为日蒸发量(图中红色阴影区),从浸水153~285 d(2023年4月中旬~8月底),日蒸发量约为日耗水量的 $2/3$,286 d~试验结束,日蒸发量约为日耗水量的 $1/2$,春夏季节日蒸发量明显大于秋冬季节。因此,既有浸水试验若不考虑蒸发作用,将日耗水量记为日入渗量明显不妥;试验得到的浸水稳定时实际日入渗量、日蒸发量可为类似工程水分入渗量评价、蒸发量估算提供依据。

3.2 黄土高填方地基中水分竖向入渗规律分析

(1) 同一位置不同深度填土体积含水率变化

以1~5TDR(第一层传感器、距坑底0.5 m)、1~5'TDR(第二层传感器、距坑底2.0 m)、1~3''TDR(第三层传感器、距坑底5.0 m)测试结果为例,同一位置不同深度处填土体积含水率变化如图7所示。

由图7可知,随着浸水时间的增加,第一层填土体积含水率变化显著大于第二层填土、第三层填土。限于篇幅,以下选择1~5TDR测试结果进行深入分析;随着浸水时间的增长,该处填土

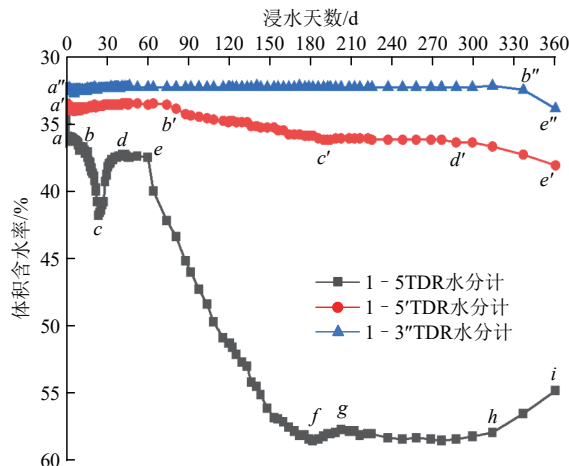


图7 同一位置不同深度处填土体积含水率对比图

Fig.7 Comparison chart of volume moisture content of filling soil at different depths at the same position

体积含水率变化大致有3个阶段：3个平稳段(*ab*, *de* 和 *gh*)；2个急速增加阶段(*bc* 和 *ef*)，3个降低阶段(*cd* 陡降, *fg* 和 *hi* 逐渐降低)。

① 浸水初期的 *ab* 段，该点体积含水率基本不变、即为初始体积含水率 35.8%，直至浸水 8 d 时(*b* 点)试坑底 0.5 m 处填土体积含水率骤增，表明湿润锋在 8 d 到达坑底 0.5 m 处，历时远大于原状黄土中水分到达此深度的时间^[6, 10]，可以佐证提高填土压实度可显著降低水分入渗速度。② 在 *bc* 段，填土体积含水率迅速增加，浸水 23 d 时(*c* 点)达到 41.9%，表明水分大量渗入该处土体。③ 在 *cd* 段，填土体积含水率迅速下降，表明在上部填土自重及水压作用下，0.5 m 处土体被压密，孔隙变小，土颗粒之间的水分被挤出，类似于原状黄土浸水发生湿陷变形时的体积含水率变化^[10]，即此时该处土体发生湿化变形。④ 在 *de* 段，体积含水率维持在 37.5% 左右；究其原因，结合图 4 中气温变化可知，此时正处冬季，气温降低可能减小湿润锋运移速度，同时这与上部填土发生湿化变形密切相关，*cd* 段发生的湿化导致上部土层压密，孔隙变小这也进一步阻止了水分的渗入^[21]。⑤ 在 *ef* 段(浸水 61~195 d)，填土体积含水率再次增加、最终达到峰值 58.6%；结合图 5, 6 可知，虽然在此阶段日耗水量、日入渗量有一定波动，但是该处土体体积含水率增大趋势基本一致。⑥ 在 *fg* 段，土体体积含水率逐渐降低，同理可知，此时该处土体再次发生湿化变形，但是体积含水率减小值小于 *cd* 段减小值。⑦ 随后进入平稳变化阶段(*gh*)，此时土体达到饱和。⑧ 最后在 *hi* 段，土体体积含水率再次降低，表明该处土体再次发

生湿化变形。由此可知，填方地基自身既是荷载，又是受荷体，在上部填土自重及水压作用下，填方地基湿化变形的充分发挥需要多次完成。

对于埋深为 2 和 5 m 的填土，由于深度增加，水分到达监测位置的时间延长。对于坑底以下 2 m 处填土，随着浸水时间的增长，体积含水率变化大致有 2 个阶段：2 个平稳段(*a'b'* 和 *c'd'*)；2 个逐渐增加阶段(*b'c'* 和 *d'e'*)。在 *a'b'* 段，该处土体在初始体积含水率 33.8% 基础上略微减小，表明在上部应力作用下，填土孔隙逐渐变小，土颗粒之间的水分被挤出。从浸水第 65 d(*b'* 点)开始，湿润锋到达该处，填土体积含水率逐渐增大。到浸水第 197 d(*c'* 点)该处填土体积含水率增加至 36.2%。随后进入平稳变化阶段(*c'd'*)，土体体积含水率基本不变。从浸水 291 d(*d'* 点)开始至试验结束，体积含水率再次逐渐增大至 38.1%，增幅为 4.3%。由此表明，坑底以下 2 m 处土体体积含水率远没有达到饱和状态、也未发生湿化变形，即随着土体深度的增加，深部土体具有较高的密实度和结构稳定性，填土湿化短期内不明显，湿化的发生时间将向后推迟，导致填方地基工后多年仍会发生沉降变形^[2, 22]。

对于坑底 5 m 处填土，从浸水开始到第 341 d(*b''* 点)，体积含水率基本维持初始体积含水率 32.3% 不变；试验结束时，该处填土体积含水率为 33.9%。由此可知，高压实度填土地基中，较深的土体中水分入渗非常缓慢，主要是填土湿化变形导致上部土层压密，孔隙变小进一步阻止水分的渗入；同时随着时间的推移、深度的增加，土体内部变成了封闭系统，先期水的渗入，使孔隙中的气体压力增大势必阻止后继水的渗入^[21]。因此，类似填方地基顶部采用黄土混合填料以及提高压实度的方法，能显著提高地基的防渗效果。

(2) 竖向渗透速率

参考原状黄土地基现场浸水试验分析方法^[5, 21]，通过计算相邻 2 个湿润锋测点之间的距离与水分在 2 个测点运移时间之差的比值，得到土层不同埋深的平均渗透速率，见表 2。

表2 不同埋深填土的竖向渗透速率
Table 2 The vertical penetration rates of different buried depths of filling soil

距坑底距离/m	水到达天数/d	渗透速率/($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
0.5	23	2.52
2.0	192	1.92
5.0	341	1.70

从表 2 可知,随着深度的增加,竖向渗透速率逐渐减小;本试验渗透速率远小于原状黄土地基中竖向渗透速率^[5, 21],进一步佐证填方地基顶部采用黄土混合填料以及提高压实度的方法,可显著降低水分入渗速度。将不同深度处的渗透速率通过指数函数进行拟合,公式为

$$V_w = 1.67 + 1.24 \times 0.47^h \quad (1)$$

式中: V_w 为渗透速率(cm/s), h 为深度(m)。

3.3 黄土高填方地基中水分水平向入渗规律分析

(1) 同一深度不同位置填土体积含水率变化

限于篇幅,以第二层 2 轴 TDR 传感器(埋深距浸水坑底为 2 m)测试结果为例进行分析;其中 2-2'TDR(距试坑中心 5 m), 2-3'TDR(距试坑中心 10 m), 2-4'TDR(距试坑中心 15 m), 2-5'TDR(距试坑中心 20 m), 2-6'TDR(距试坑中心 30 m), 如图 8 所示。

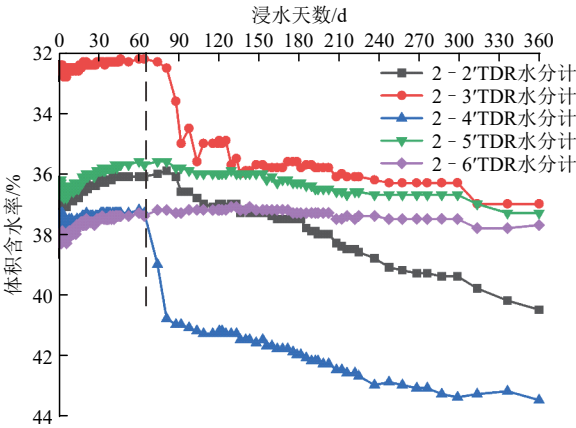


图 8 坑底 2 m 处 2 轴测点体积含水率变化曲线
Fig.8 Change curves of volume water content of 2 axis measuring points at 2 m pit bottom

分析图 8 可知,除 2-3'TDR 测得初始体积含水率为 32.6%,其余 TDR 测得初始体积含水率为 36.7%~38.3%,表明填土初始含水量基本均匀。随着浸水时间的增长,位于试坑内部的 2-2'TDR, 2-3'TDR 和 2-4'TDR 测试体积含水率总体变化趋势一致,从开始浸水至浸水 65~70 d 时,体积含水率略微降低;浸水 65~70 d 以后,湿润锋到达该处,填土体积含水率逐渐增大,增幅分别为 3.6%, 4.5%, 5.8%, 平均增大 4.6%,由此佐证,坑底以下 2 m 处土体体积含水率远没有达到饱和状态、也未发生湿化变形。2-5'TDR 测试结果与图 7 中 1-5'TDR 测试结果基本一致,限于篇幅,不重复分析。

2-6'TDR 处在浸水试坑边缘 10 m 处,体积含水率基本不变,在一年的浸水期间体积含水率下降

了 0.5%,由此表明湿润锋尚未到达该处,该处填土体积含水率降低主要是上覆填土自重作用下,孔隙减小所致。与浸水试坑边缘 10 m 处 1-6TDR, 2-6TDR, 3-6TDR(埋深距浸水坑底为 0.5 m)测试结果基本一致,由此说明在整个浸水过程中水分的水平影响范围尚未超过 10 m。

(2) 水平向渗透速率

参考原状黄土地基现场浸水试验分析计算方法^[5, 21],可得水分在水平方向的渗透速率见表 3。

表 3 不同水平位置填土的水平渗透速率

Table 3 Horizontal penetration rates of filling soil at different horizontal positions

测线	水平位置/cm			水平渗透速率/ ($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
	浸水 178 d	浸水 225 d	浸水 251 d	
测线 1	265	430	488.5	2.26
测线 2	348	427	491.0	2.20
测线 3	333	439	484.0	2.25

通过表 3 可以看出,随着浸水时间的增加,水分在平面的入渗距离增量逐渐减少,同节 3.2 同一位置不同深度填土体积含水率变化分析一致,高压实度填土地基中,较远的土体中水分入渗非常缓慢,主要是填土湿化变形导致土层逐渐压密,孔隙变小进一步阻止水分的渗入。

实测的水平向渗透速率为 $2.20 \times 10^{-5} \sim 2.26 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,同一深度不同测线水平向渗透速率相近,平均为 $2.24 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。对比表 2 可知,填方地基中随着深度的增加,竖向渗透速率逐渐减小,而水平向渗透速率基本一致,由此可以佐证西北地区采用分层碾压填筑的黄土地基具有横观各向同性^[22-23]。

3.4 水分扩散形态的探讨

结合现场浸水试验的方案,采用 COMSOL 软件构建轴对称的圆柱体入渗模型。浸水试坑底部与侧壁施加压力水头 $H_{p0} = 1.5 \text{ m}$,设置入渗边界为:模型底部设置为透水、透气边界,模型顶部与外侧设置为不透水、不透气边界,模拟持续时长 300 d。该浸水模型在计算中所涉及的基本物理力学参数及非饱和土水特性参数见表 4。根据数值计算所得浸水过程中的体积含水率变化情况,绘制湿润锋扩散形态剖面(见图 9)。

分析图 9 可知,随着浸水时间的推移,水分开始逐步沿竖向和径向入渗土体。在浸水初期(浸水 30 d),湿润峰基本上以直线入渗,入渗剖面相对均匀,这表明水分到达各处的时间差异不大。随着浸水时间

表 4 水分入渗数值模拟所用模型参数

Table 4 Model parameters used in the numerical simulation of water infiltration

泊松比 ν	水密度 $\rho_w /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	多孔介质 模型孔隙 率 e_s	杨氏模量 E/MPa	水力传导 率 $K_s /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水头高度 H_{p_0} / m	饱和体积 含水率 θ_s	动力黏度 $\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	VG 模型 拟合参数 α / m	VG 模型 拟合参数 m	VG 模型 拟合参数 n	土体密度 $\rho_s /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	标准大气 压 p_a / kPa	残余体积 含水率 θ_r
0.3	1 000	0.25	18.56	4.62×10^{-7}	1.5	0.4	0.001	0.019 1	0.3	0.5	1 743	101.3	0.23

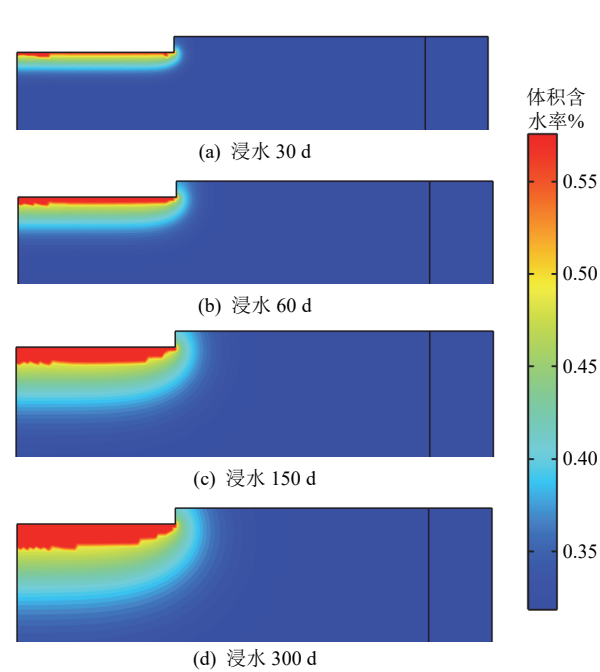


图 9 湿润锋扩散形态剖面图

Fig.9 Wetting front diffusion profiles

的进一步增加(浸水 60 d),湿润峰变为椭圆状入渗,入渗剖面的边缘与中心部分开始呈现出明显的不同,即湿润锋沿竖直方向的扩散速率大于沿水平方向的扩散速率。浸水中期时(浸水 150 d),湿润峰逐渐呈现出上下宽、中间窄的形态。最终,在长时间的浸水作用下(浸水 300 d),湿润峰的最终形态呈现出类似扁椭圆形的特征,这种水分扩散形态与既有研究不同。应当指出,以往原状黄土地基开展了多个浸水试验,关于水分浸润形态尚存在一定争论,如“梨”形^[5]、“倒扣碗”形^[8]、“南瓜”形^[5, 21]分布。因此,考虑到大面积填方地基初始压实度、初始含水量及填料种类等因素影响,填方地基中湿润峰的具体形态仍需更多原位浸水试验探索。

将现场浸水试验测试与数值模拟计算不同深度填土体积含水率结果绘于图 10,由图可知,在浸水初期,距浸水试坑坑底 0.5 m 的体积含水率实测值表现为非单调增长,而模拟值则是随着浸水的开始出现单调增长阶段。这是因为实测值的非单调的变化反映了实际环境中复杂的水分迁移和蒸发过程;

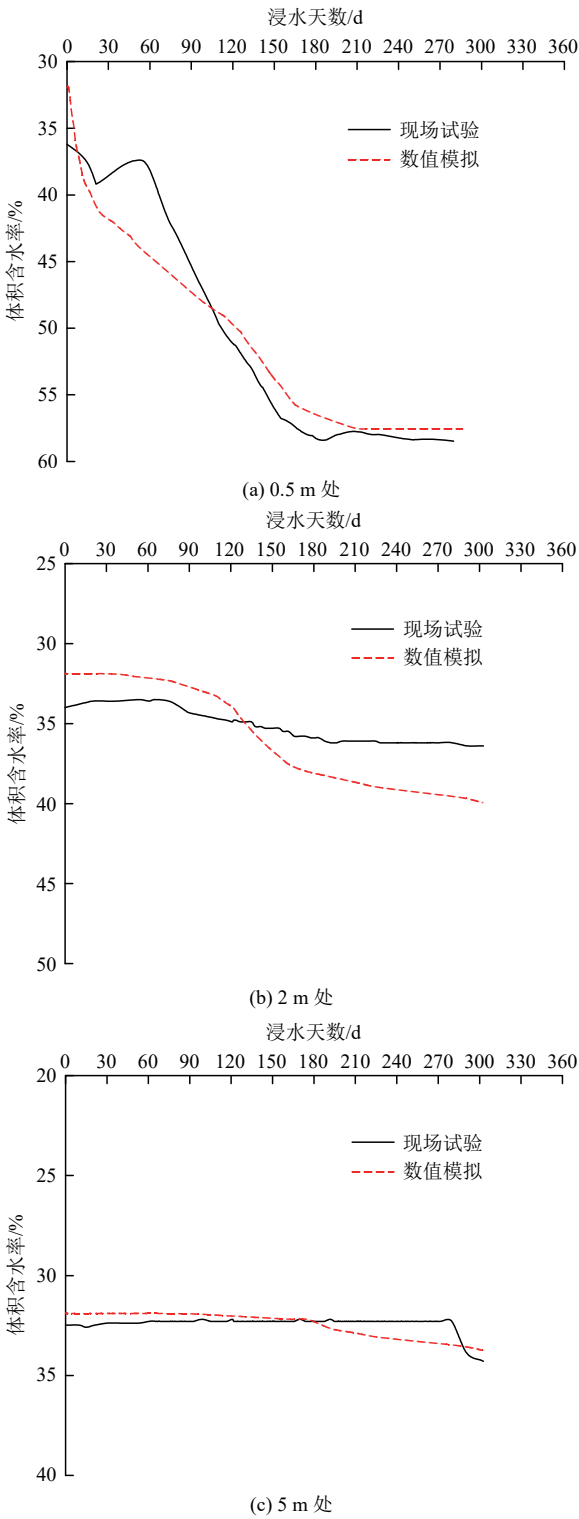


图 10 不同深度处填土体积含水率对比

Fig.10 Comparison of volume moisture contents of filling soil at different depths

而数值模型在设定时基于简化的假设和方程, 无法完全模拟现场环境的所有细节和动态变化, 因此在浸水 25~50 d 出现了与实测值不同的变化趋势。在数值模拟中水头恒定的设置, 使得水头压力也保持恒定, 该差异也导致在距浸水试坑坑底 2 m 范围内的土层中, 模拟体积含水率的开始增大时间早于现场实测值。随着深度的增加, 距浸水试坑坑底 5 m 处实测体积含水率与模拟值吻合程度较高。总体来看, 不同深度处填土体积含水率模拟结果和现场试验数据基本吻合, 说明在填方黄土水分入渗过程中, 水分扩散并非沿着某一固定的浸润角向下入渗, 结合图 9 分析可知, 湿润峰的扩散形态分析是合理的。

4 黄土高填方地基变形过程分析

4.1 浸水过程中地表沉降变形分析

依据试坑内、外地表沉降量沉降监测结果, 20 个地面沉降观测点的累计沉降量呈现相似的变化规律, 此处仅以轴 1 部分典型测点为例, 绘制试坑内、外地表累计沉降量随时间变化曲线, 如图 11 所示。

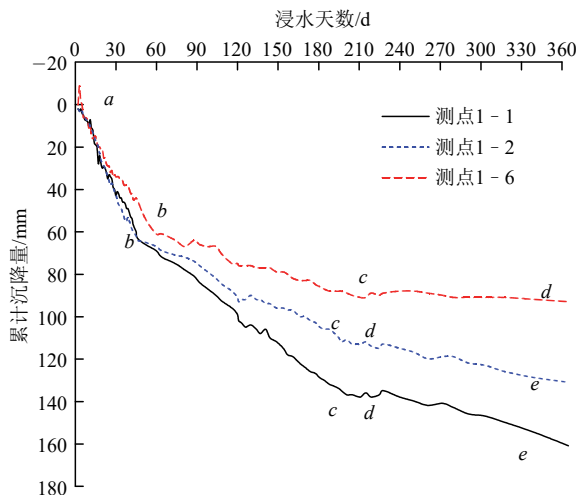


图 11 试坑内、外地表累计沉降量随时间变化曲线

Fig.11 Variation curves of surface settlement with time inside and outside the test pit

由图 11 可知, 测点 1-1, 1-2 的累计沉降曲线大致可以划分为 4 个阶段: 在浸水初期, 曲线处于初期快速下降阶段(ab), 此时水分通过土体孔隙向下渗透, 导致浅层土体含水量增加, 填土初始结构破坏, 进而引起地表沉降。随着时间推移, 沉降曲线进入平稳缓降阶段(bc), 究其原因, 在上覆填土和水压作用下, 土体变得更加密实, 孔隙减少, 同时冰冻期间, 水分入渗速度变慢, 进而土体湿化变形缓慢。随后进入平稳发展阶段(cd), 沉降逐渐

趋于稳定。最终再次进入平稳缓降阶段(de), 同上文分析, 填方地基湿化变形的充分发挥需要多次完成、随着土体深度的增加, 深部土体具有较高的密实度和结构稳定性, 填土湿化短期内不明显, 湿化的发生时间将向后推迟, 因此地表沉降量显著减缓。

试验结束时, 1-1 处的地表累计沉降量最大, 达到 161 mm; 1-2 处为 137 mm; 1-6 处的地表累计沉降量最小(为 100 mm), 试坑内测点的地表累计沉降量大于试坑外, 试坑内测点的沉降速率也要大于试坑外, 坑外沉降观测点发生沉降的时间明显落后于试坑内。根据实测地表沉降量随时间变化数据, 绘制了地表沉降变形过程图(见图 12)。从图 12 中可以看出, 浸水试坑的中心部位地表沉降变形最为显著, 而当距离试坑中心越远, 地表沉降变形程度逐渐减小, 至试坑最外围时降至最低, 呈现明显的“边界效应”。

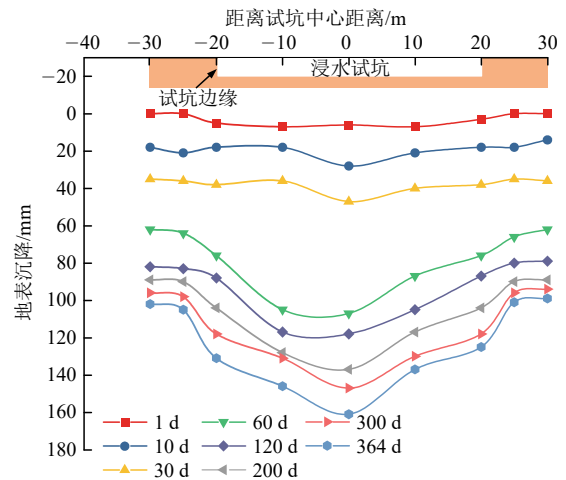


图 12 地表累计沉降等值线图

Fig.12 Contour map of the cumulative surface settlement

根据图 12, 从水平距离对沉降变形影响范围来看, 当距离试坑边缘超出 5 m 时, 地表沉降变形相对较小。这表明在黄土填方场地的设计和施工中, 若能合理选用填料并且确保压实质量达标, 浸水时黄土填方场地沉降变形的水平影响范围不超过 5 m; 结合图 8 分析, 对于临近水源的填方地基, 若预留 5~10 m 的缓冲带(安全储备), 则建构筑物与水源之间至少应设置 10 m 的安全距离, 以减小水分入渗对黄土填方地基带来的不利影响。

4.2 浸水过程中地表沉降速率分析

限于篇幅, 本节以沉降量最大的 1-1 处累计沉降量与单日沉降速率为例分析浸水过程中地表沉降速率, 如图 13 所示, 其中单日沉降速率的负值表示上升, 正值表示下降。

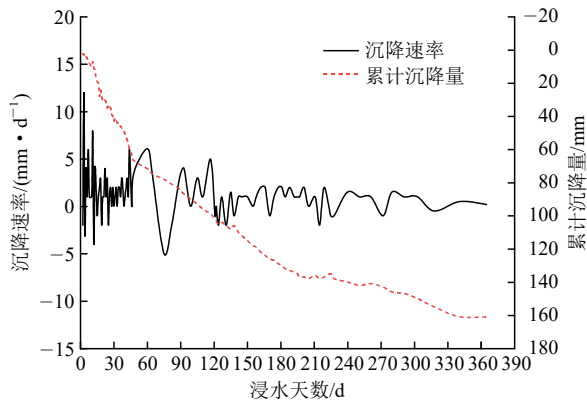


图 13 测点 1-1 处累计沉降量与单日沉降速率变化曲线
Fig.13 Change curves of cumulative settlement amount and daily settlement rate at measuring point 1-1

由图 13 可知,浸水初期,1-1 处沉降较为显著,单日沉降速率为 3~14 mm/d。这是因为水分透过填土孔隙逐步向下渗透,导致表层土体孔隙结构遭到破坏,从而引发较为明显的沉降现象。随着浸水时间延长,水分继续向下入渗,浅层土体含水率逐渐增加,土体开始变形。同上文分析,填土初始结构较为密实,在上覆填土和水压作用下,土体变得更加密实,这在一定程度上减缓了水分的入渗速度,进而也降低了土体的沉降速率。如浸水 61 d 时,单日沉降速率为 6 mm/d;浸水 117 d 时,单日沉降速率为 5 mm/d,单日沉降速率逐渐下降。浸水 230 d 后,单日沉降速率降低到 0~2.5 mm/d,且趋于平稳,

这与水分计监测到的水分入渗情况基本吻合。

《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB50025—2018)要求现场试坑浸水试验的停止标准为最后 5 d 的平均下沉量不大于 1 mm/d,该规定是参照兰州和平镇原状黄土现场浸水试验资料确定的^[10]。黄雪峰和杨校辉^[12]曾提出,考虑试验周期和造价等影响,大厚度自重湿陷性黄土场地停止试验的标准可放大至沉降量不大于 2 mm/d。因此,对于填方地基而言,考虑湿化变形的充分发挥需要多次完成,随着土体深度的增加,深部填土湿化短期内不明显、即湿化的发生时间具有滞后性,初步建议填方地基浸水过程中最后 1 个月地表沉降速率不大于 2.5 mm/d,可停止浸水。

4.3 浸水过程中试坑周边裂缝发展

为说明填方地基浸水试验与原状黄土地基浸水试验试坑周边裂缝发展的不同,给出了浸水初期与浸水 330 d 时试坑周边裂缝实拍图,见图 14。图 14(a)为浸水初期试坑侧壁及周边土体表面没有裂缝的情况,图 14(b)~(e)分别为浸水试坑周边北、东、南、西 4 个方位的裂缝发展情况。

在浸水初期,试坑周边未出现裂缝,只有坑侧壁靠近水面处有局部坍落。浸水 30 d 后,试坑侧壁出现明显裂缝、坍落;浸水试坑局部区域开始出现肉眼可见裂缝,但正值冬季,增幅尚不明显。浸水至 105 d 时,气温回升、浸水坑表面冰面融化,日

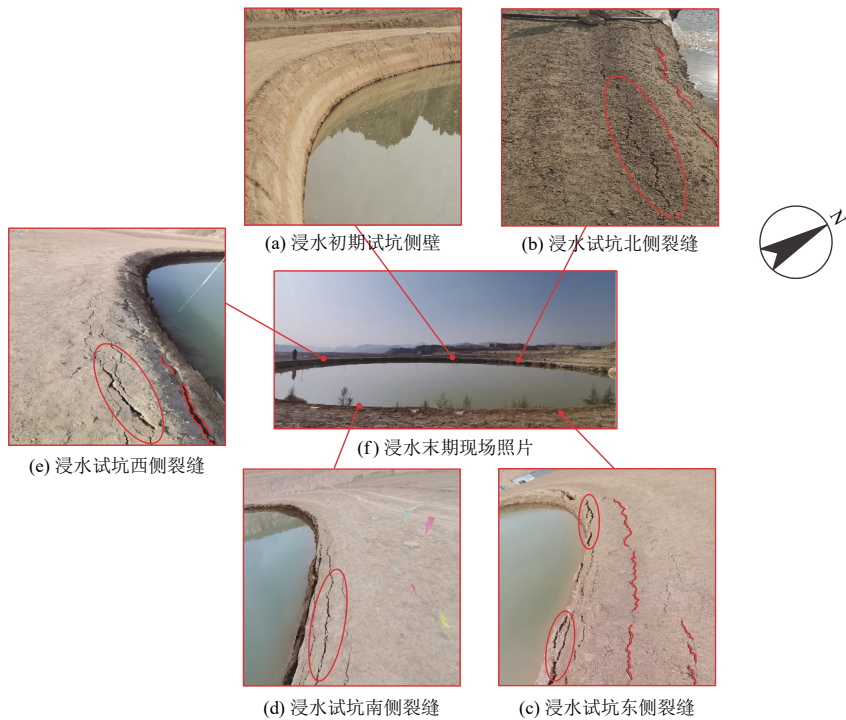


图 14 试坑浸水后裂缝发展实拍图

Fig.14 Real pictures of crack development after immersion in test pit

耗水量逐渐开始增加,这些局部裂缝逐渐相互连接,最终形成了完整的环形裂缝。这些裂缝交织在一起,间距各不相同:靠近试坑的地方裂缝较密;而远离试坑的地方裂缝间距则较大;随着浸水时间的增加,裂缝逐渐增大,与水分日入渗量、地表沉降变化基本一致。通过对浸水坑周边裂缝量测,裂缝距离场地浸水边缘距离范围为20~230 cm,其中靠近试坑边缘1 m以内,裂缝宽度主要为1~2 cm;在距离试坑边缘1 m以外,裂缝宽度均小于1 cm。

应当说明,等直径的原状黄土浸水试验结果显示^[5-6],浸水坑周围地面陆续出现环形裂缝,且呈现出逐渐向外部扩散的特点,裂缝最远距离可达36.25 m;同时,裂缝之间还存在明显的错台现象,高差最大可达60 cm。因此,填方地基浸水增湿变形具有明显的“边界效应”,结合上文分析可知,对于临近水源的填方地基,建构筑物与水源之间至少设置10 m安全距离是合理的。

5 结 论

综上所述,本文通过为期364 d的现场浸水试验,系统揭示了黄土高填方地基在浸水条件下的水分运移规律与浸水变形特性。试验结果表明:

(1) 填方地基浸水期间,日耗水量具有明显的阶段性特征,总体呈现“初期大→前期缓降→中期波动→末期稳定”的变化规律;类似填方地基顶部采用黄土混合填料以及提高压实度的方法,能显著提高地基的防渗效果。

(2) 现场浸水试验必须考虑蒸发作用,40 m直径填方地基浸水坑日入渗量可稳定于2.5~3.0 m³/d;日蒸发量为日耗水量的2/3~1/2,该值可为类似工程水分入渗量评价、蒸发量估算提供依据。

(3) 填方地基自身既是荷载,又是受荷体,在上部填土自重及水压作用下,填方地基湿化变形的充分发挥需要多次完成;随着填土深度的增加,深部土体湿化的发生时间将向后推迟,导致填方地基工后长期沉降变形。

(4) 经过1 a的浸水,坑底以下2 m处土体体积含水率远没有达到饱和状态、也未发生湿化变形;随着填土深度的增加,竖向渗透速率逐渐减小,而水平向渗透速率基本一致,水分扩散形态呈现扁椭圆形特征,水分的水平影响范围尚未超过10 m。

(5) 试坑内测点的地表累计沉降量、沉降速率

均大于试坑外,坑外沉降观测点发生沉降的时间明显落后于试坑内,填方地基浸水变形的“边界效应”与原状黄土地基明显不同;对于临近水源的填方地基,建构筑物与水源之间至少应设置10 m的安全距离。

(6) 建议填方地基浸水过程中,将最后1个月地表沉降速率不大于2.5 mm/d作为停止浸水标准。

参考文献(References):

- [1] 朱才辉,李 宁. 降雨对沟谷状黄土高填方地基增湿影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 845 - 854.(ZHU Caihui, LI Ning. Influence of rainfall on moisture increase of valley-shaped high loess fill foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 845 - 854.(in Chinese))
- [2] 杨校辉,钱 豹,郭 楠,等. 某黄土填方地基不均匀沉降影响因素及长期变形规律研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增 1): 207 - 212.(YANG Xiaohui, QIAN Bao, GUO Nan, et al. Influencing factors of uneven settlement and long-term deformation law of a loess fill foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(Supp.1): 207 - 212.(in Chinese))
- [3] 姚志华,陈正汉,黄雪峰,等. 非饱和和原状和重塑 Q₃ 黄土渗水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1 020 - 1 027.(YAO Zhihua, CHEN Zhenghan, HUANG Xuefeng, et al. Seepage characteristics of unsaturated intact and remolded Q₃ loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1 020 - 1 027.(in Chinese))
- [4] 胡海军,王 晨,吕彤阳,等. 一维荷载浸水下重塑黄土的水分入渗和增湿变形模型及试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 1 020 - 1 030.(HU Haijun, WANG Chen, LYU Tongyang, et al. Water infiltration and wetting deformation model of remolded loess under one-dimensional loading and immersion and its experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(5): 1 020 - 1 030.(in Chinese))
- [5] 姚志华,黄雪峰,陈正汉,等. 自重湿陷性黄土的水气运移及力学变形特征[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017: 20 - 31.(YAO Zhihua, HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, et al. Water-air transport and mechanical deformation characteristics of self-weight collapsible loess[M]. Beijing: China Communications Press, 2017: 20 - 31.(in Chinese))
- [6] 黄雪峰,陈正汉,哈 双,等. 大厚度自重湿陷性黄土场地湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 382 - 389.(HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, HA Shuang, et al. Large-scale field immersion test on collapsibility deformation characteristics of self-weight collapsible loess site with large thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,

- 28(3): 382 – 389.(in Chinese))
- [7] 王小军, 屈耀辉, 魏永梁, 等. 郑西客运专线湿陷性黄土区试验路堤的沉降观测与预测研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增 1): 220 – 231. (WANG Xiaojun, QU Yaohui, WEI Yongliang, et al. Settlement observation and prediction of test embankment in collapsible loess area of Zhengzhou—Xi'an passenger dedicated line[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Supp.1): 220 – 231.(in Chinese))
- [8] 马 闫, 王家鼎, 彭淑君, 等. 大厚度黄土自重湿陷性场地浸水湿陷变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 537 – 546.(MA Yan, WANG Jiading, PENG Shujun, et al. Research on characteristics of immersion collapsibility deformation of self-weight collapsible loess site with large thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 537 – 546. (in Chinese))
- [9] LV Y Q, DENG L S, FAN W. Loess collapsibility characteristics of railway engineering sites using large-scale trial immersion pit experiments[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(4): 3 271 – 3 291.
- [10] 杨校辉, 黄雪峰, 朱彦鹏, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度和湿陷性评价试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 1 063 – 1 074.(YANG Xiaohui, HUANG Xuefeng, ZHU Yanpeng, et al. Experimental study on treatment depth and collapsibility evaluation of large thickness self-weight collapsible loess foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 1 063 – 1 074.(in Chinese))
- [11] 刘德仁, 安政山, 徐硕昌, 等. 靖远地区大厚度黄土地基浸水湿陷过程及土中竖向应力特征试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 268 – 278.(LIU Deren, AN Zhengshan, XU Shuochang, et al. Experimental study on immersion collapsibility process and vertical stress characteristics of large thickness loess foundation in Jingyuan area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 268 – 278.(in Chinese))
- [12] 黄雪峰, 杨校辉. 湿陷性黄土现场浸水试验研究进展[J]. 岩土力学, 2013, 34(增 2): 222 – 228.(HUANG Xuefeng, YANG Xiaohui. Research progress of field immersion tests on collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Supp.2): 222 – 228.(in Chinese))
- [13] LI Y, WANG Y, AYDIN A. Loess structure: Evolution and a scale-based classification[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 249(1): 104665.
- [14] WEI Y, FAN W, YU B, et al. Investigation of the collapse potential of Malan loess from different regions on the Loess Plateau in terms of pore size distribution and clay distribution form[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(12): 6 595 – 6 613.
- [15] 蔡国庆, 王亚南, 周安楠, 等. 考虑微观孔隙结构的非饱和土水 - 力耦合本构模型[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 618 – 624.(CAI Guoqing, WANG Ya'nan, ZHOU Annan, et al. Hydro-mechanical coupled constitutive model for unsaturated soils considering microstructure of pore space[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 618 – 624. (in Chinese))
- [16] 甄平福. 黄土高填方场地大型现场浸水试验研究[硕士学位论文][D]. 西安: 长安大学, 2018.(ZHEN Pingfu. Study on the large area field immersion tests in loess high fill ground[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.(in Chinese))
- [17] 李 阳, 刘 魁, 刘双承, 等. 黄土高填方场地挖填结合区桩基础浸水试验研究[J]. 工程地质学报, 2025, 33(2): 794 – 801.(LI Yang, LIU Kui, LIU Shuangcheng, et al. Immersion test study on pile foundation in excavation-fill interface zone of high loess fill site[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(2): 794 – 801.(in Chinese))
- [18] RAN G, ZHU Y, YANG X, et al. Permeability characteristics of improved loess and prediction method for permeability coefficient[J]. Applied Sciences, 2024, 14(17): 8 072.
- [19] 朱彦鹏, 杨校辉, 王秀丽, 等. 高填方变形无线远程综合监测系统及安装监测方法[P]. 中国: CN201510555457.3.(ZHU Yanpeng, YANG Xiaohui, WANG Xiuli, et al. Wireless remote comprehensive monitoring system and installation monitoring method for high fill deformation[P]. Chinese: CN201510555457.3.(in Chinese))
- [20] ZHANG Y, QIAN H, HOU K, et al. Investigating and predicting the temperature effects of permeability for loess[J]. Engineering Geology, 2021, 285(1): 106050.
- [21] 姚志华, 黄雪峰, 陈正汉, 等. 兰州地区大厚度自重湿陷性黄土场地浸水试验综合观测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 65 – 74. (YAO Zhihua, HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, et al. Comprehensive observation and study on field immersion tests of large-thickness self-weight collapsible loess ground in Lanzhou region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 65 – 74.(in Chinese))
- [22] 杨校辉, 赵子毅, 郭 楠, 等. 横观各向同性非饱和黄土蠕变特性及沉降预测[J]. 岩土力学, 2025, 46(5): 1 489 – 1 500.(YANG Xiaohui, ZHAO Ziyi, GUO Nan, et al. Creep characteristics and settlement prediction of transversely isotropic unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(5): 1 489 – 1 500.(in Chinese))
- [23] 郭 楠, 陈正汉, 杨校辉, 等. 各向同性土与横观各向同性土的力学特性和持水特性[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(6): 1 235 – 1 243. (GUO Nan, CHEN Zhenghan, YANG Xiaohui, et al. Mechanical properties and water holding characteristics of initially isotropic soils and transversely isotropic soils[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(6): 1 235 – 1 243.(in Chinese))