

DOI: 10.11779/CJGE202209016

降雨作用下黄土填方区交界面水分迁移及沉降规律研究

赵文赫^{1, 2}, 杨秀娟^{1, 2}, 王宝仲^{1, 2}, 樊恒辉^{*1, 2}, 孟敏强^{1, 2}, 朱振^{1, 2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学岩土工程研究所/特殊岩土博物馆, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对黄土高原地区治沟造地实践中由于填方区新老交界面及不同压实度交界面等而引起的管涌、塌陷、滑坡、不均匀沉降、裂缝等灾害, 通过建立黄土填方区新老交界面及不同压实度交界面实体物理模型, 研究了降雨作用下黄土填方区交界面水分迁移及沉降规律。试验结果表明: ①雨水下渗速率随着填土压实度的降低而增快, 低压实度填土体积含水率和孔隙水压力在峰值附近存在“骤增骤减”现象, 孔隙水压力具有明显滞后性; ②湿润锋在交界面附近出现明显过渡区, 交界面存在雨水优势流通道; ③交界面上方土体总沉降与交界面上方填土高度成非线性关系, 不同压实度交界面上缘的局部倾斜值远大于交界面下缘, 局部倾斜最大值靠近交界面上缘; ④交界面两侧压实度差越大, 土体的差异沉降越大, 交界面发生破坏趋势越大; ⑤填土的大幅沉降以及土体的不均匀沉降往往伴随着表面裂缝的产生, 最大裂缝出现在填方区不同压实度交界面上缘附近。研究结果表明, 在治沟造地等岩土工程实践中, 提高回填土压实度对降低不均匀沉降及防止交界面出现裂缝具有重要意义。

关键词: 压实度; 交界面; 不均匀沉降; 降雨入渗; 优势流

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)09-1710-11

作者简介: 赵文赫(1996—), 男, 硕士, 主要从事特殊土的工程性质及其改良技术方面的研究工作。E-mail: zhaowenhe1201@163.com。

Laws of water migration and settlement at interface in loess filled areas under rainfalls

ZHAO Wen-he^{1, 2}, YANG Xiu-juan^{1, 2}, WANG Bao-zhong^{1, 2}, FAN Heng-hui^{1, 2}, MENG Min-qiang^{1, 2}, ZHU Zhen^{1, 2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of

Geotechnical Engineering /Museum of Problematic Rock and Soil, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The new-old interfaces and those with different compaction degrees often cause disasters such as piping, collapse, landslide, uneven settlement and crack in the duration of gully control and land creation projects in the Loess Plateau areas. The relevant physical models are established to reveal the laws of water migration and settlement at interface in loess filled areas under rainfalls. The results show that: (1) The velocity of rainwater seepage increases as the compaction degree of fill decreases. The volumetric moisture content and pore water pressure under low compaction degrees fill increase and decrease sharply near the peak. Besides, the pore water pressure has obvious hysteresis. (2) The wetting front has an obvious transition zone near the interface, where a rainwater dominant flow channel is available. (3) The total settlement of soils is nonlinearly related to the fill height above the interface. Besides, the local incline of the upper edge of the interface with different compaction degrees is much larger than that of the lower edge of the interface, and the maximum local incline appears near the upper edge of the interface. (4) The difference in settlement between soils correlates positively with the difference in compaction degree between the two sides of the interface. Meanwhile, the trend of failure at the interface becomes larger as the difference in compaction degree between the two sides of the interface increases. (5) The large settlement of fill and uneven settlement of soils are often accompanied by surface cracks, and the largest crack appears near the upper edge of the interface with different compaction degrees in soil fill area. Therefore, increasing the compaction degree of fill soils is of great significance for reducing the uneven settlement and preventing the cracks at interface in gully control and land creation projects.

Key words: compaction degree; interface; uneven settlement;
rainfall infiltration; dominant flow

0 引言

随着经济发展, 用于发展的土地供应短缺, 特别

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079116); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504703)

收稿日期: 2021-08-16

*通信作者(E-mail: yt07@nwafu.edu.cn)

是在山区沟壑等地^[1]。为解决延安丘陵沟壑区农田面积匮乏问题, 延安市政府采取“治沟造地”战略, 即在流域的宽阔部位削山脚边坡, 取土填沟筑坝, 辅以排洪区和边坡生态治理等措施, 建造良田, 这种方法有利于发展现代农业, 并且挖填方高差小, 土方工程量小, 工程造价低^[2]。但是, 由于黄土填方区在分段施工、分批施工中存在填方区新老交界面及不同压实度交界面, 加之部分黄土地区雨季集中, 填筑体、新老填方过渡区、边坡和填筑体的临空面等部位容易出现管涌、塌陷、崩塌、滑坡、不均匀沉降、裂缝等次生灾害^[1], 特别是压实度低的填土在降雨时更容易发生破坏^[3], 对人民生产生活造成了一定影响(图1)。



图1 “治沟造地”工程管涌与裂缝破坏

Fig. 1 Piping and crack destruction in "gully control and land creation" projects

目前国内外学者对填方工程的研究主要集中于重塑黄土的变形和渗水特性、黄土填方工程的工后蠕变沉降、湿陷沉降以及不均匀沉降, 研究方法多为室内试验、现场原位试验、离心机模型试验、数值模拟、理论方法等。重塑非饱和黄土的变形、强度、渗水特性与干密度、基质吸力、饱和度有关^[4-5]。张豫川等^[6]、

葛苗苗等^[7]分析了含水率、压实度、固结压力对压实黄土蠕变特性的影响, 建立了黄土高填方填筑体蠕变沉降本构模型。湿陷沉降导致的工后沉降比蠕变沉降大得多, 主要受填方料类型、填方高度、填筑压实度及均匀度、初始含水率等的影响^[8-9]。张瑞松等^[10]指出不均匀沉降的主要影响因素为填方厚度和原始地形坡度, 并提出压实填土地基差异沉降敏感度的概念来定性评价填土工程不均匀沉降程度。

在填方工程中, 交界面带来的影响不容忽视, 原状土-重塑土交界面的抗剪强度和抗渗强度均较小^[11-12]。甄平福^[13]在大型基坑浸水试验中发现挖填交界面和分层填筑面为填方体内水分的主要渗流通道, 陡坡区的挖填交界面易受渗流侵蚀, 从而使交界面两侧产生不均匀沉降。朱才辉等^[14]指出强降雨条件下挖填交界面处会产生明显的差异沉降和剪切应变突变。

由于现场监测周期长、工作量大, 相较于原位试验, 土工模型试验的模型尺寸按照一定比例减小, 大大节省了投入成本^[15]。本文以武功黄土为研究对象, 采用模型试验方法, 通过建立不同压实度的黄土填方区物理模型, 探究不同回填土压实度下黄土丘陵沟壑区治沟造地工程中的沉降变形及降雨入渗规律。研究结果对解决黄土区治沟造地等岩土工程实践中不均匀沉降问题提供较强的指导作用。

1 降雨模型试验

1.1 试验用土

本试验用土取自陕西省武功县香尧村, 取土深度3~5 m, 其基本物理性质见表1。

表1 土样基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soils

颗粒相对质量密度	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	最优含水率/%
2.72	33.7	18.9	14.8	1.76	17.5

1.2 试验装置

本试验采用自制人工降雨试验装置, 由模型箱、人工降雨系统和监测系统3部分构成(见图2)。模型箱内壁净尺寸为1.6 m(长)×0.8 m(宽)×1.2 m(高)。人工降雨系统包括降雨架、降雨雾化喷头、转子流量计、控制阀等, 整个降雨系统需在试验前进行降雨强度和均匀度的调试, 保证85%的降雨均匀度。监测系统(见图3)包括土壤温湿度传感器、环境监测主机、孔隙水压力传感器、静态应变测试仪。

1.3 试验方案

本试验降雨强度为0.4 mm/min, 属于暴雨级别, 降雨4.5 h后停止降雨, 随后自由入渗24 h, 总共监

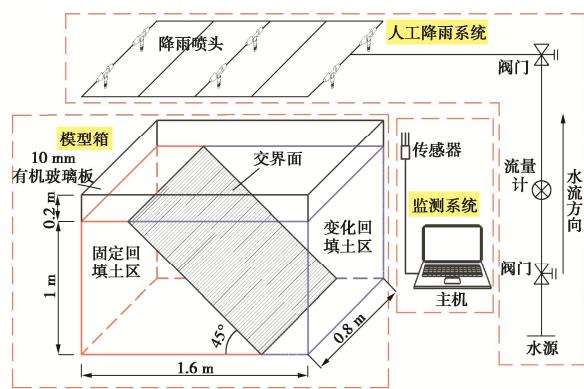


图 2 降雨试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rainfall test device

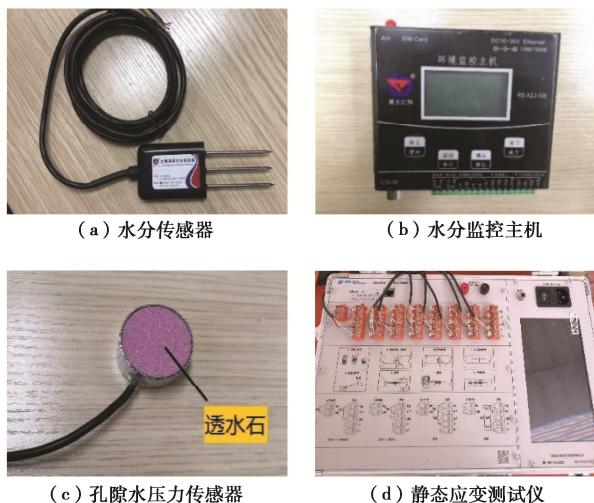


图 3 监测系统

Fig. 3 Monitoring system

测 28.5 h。模型四周及底部为不透水边界。初始填方区交界面坡度设置为 45°，模型高度设置为 1 m，固定回填土一侧压实度设置为 80%，变化回填土一侧压实度分别取 60%，70%，80%。具体试验方案见表 2。

表 2 降雨模型试验方案

Table 2 Test programs for rainfall model

试验方案 编号	固定回填土 压实度/%	变化回填土 压实度/%	初始地形 坡度/(°)
1	80	60	45
2	80	70	45
3	80	80	45

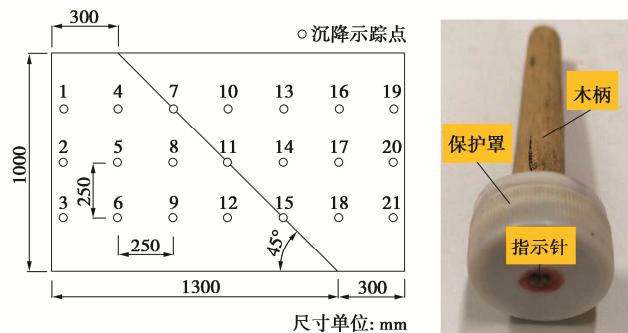
试验开始前，调整各个喷头的间距以及喷水角度，以保证 85% 的降雨均匀度^[16]。将土样过 10 mm 筛，除去植物根系、树叶等，筛后按四分法取不同位置土样测定含水率，然后以最优含水率配制土样。

模型填筑采用夯实器械进行击实。试验开始前，先将凡士林均匀地涂抹在模型箱内壁，减少土体与模型箱之间的摩擦。变化回填土区一侧箱门可拆卸，将箱门打开后先填筑固定回填土区边坡，计算相应压实

度所需土的质量，将按最优含水率配制的土样用铁锹铲入模型箱中，分层填筑夯实，以使土层密度保持均匀，每填筑 5 cm 进行一次夯实，层与层之间进行刮毛处理，以利于层间结合。每填筑 25 cm 进行一次传感器和示踪点的埋设。固定回填土区边坡填筑完成后进行削坡，随后安装箱门，按照相同步骤填埋变化回填土。

1.4 监测点位布置

监测内容为降雨条件下模型土体内部体积含水率和孔隙水压力变化、湿润锋发展、填方总体及分层沉降情况。通过分别测量降雨前、降雨结束及降雨结束 24 h 后模型土体表面距模型箱顶部距离来计算填方总体沉降；通过观测侧面沉降示踪点在不同时间节点的位置变化测定分层沉降，其中沉降示踪装置由保护罩、指示针、木柄组成。保护罩紧贴有机玻璃内壁，木柄与土体视为整体，跟随土体沉降产生移动。沉降示踪装置及其点位布置如图 4 所示。

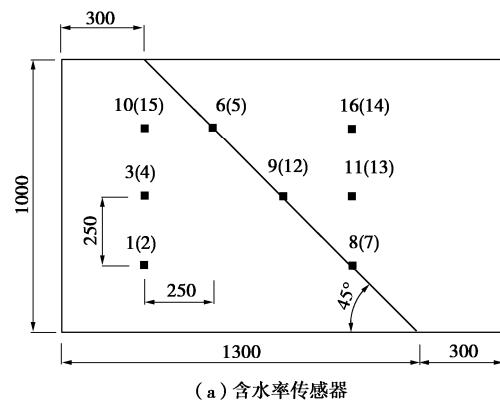


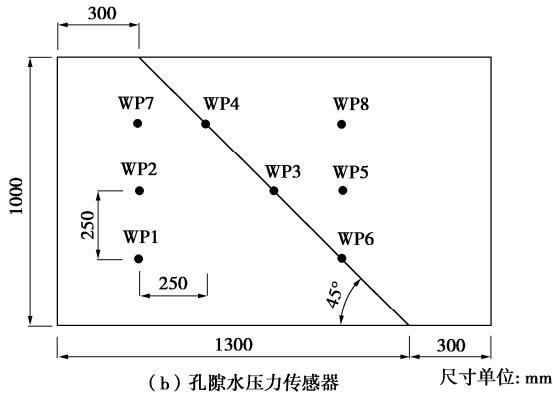
注：1~21 为示踪点编号。

图 4 沉降示踪装置及点位布置

Fig. 4 Settlement tracer device and layout of measuring points

模型内土体体积含水率采用建大仁科公司生产的 RS485 土壤温湿度一体传感器进行测量，并通过监控主机进行储存及上传。土体孔隙水压力变化采用 DMKY-4 微型孔隙水压力计测量，将孔隙水压力传感器与静态应变测试仪和电脑主机连接来进行实时监测。所用传感器试验前均进行了标定。体积含水率传感器和孔隙水压力传感器点位布置如图 5 所示。





注: 1~16为含水率传感器编号(括号内外分别距两侧有机玻璃板20 cm, 对称分布), 后文用W1~W16代替; WP1~WP8为孔隙水压力传感器编号(居中放置)

图 5 体积含水率及孔隙水压力传感器点位布置
Fig. 5 Layout of measuring points for volumetric moisture content and pore water pressure sensors

2 试验结果分析

2.1 水分迁移规律

首先以试验方案 1 为例对降雨条件下交界面两侧填土区压实度不同时的水分迁移规律进行探究。固定回填土区体积含水率时程曲线如图 6 所示, 体积含水率传感器垂直方向由上至下依次为 W15、W4、W2。由图 6(a) 可知, 水分在降雨 1 h 后达到 25 cm 深度处 W15, 随后在 1~2.5 h 内 W15 的体积含水率由 18.3% 迅速上升至 34.6%, 湿润锋附近体积含水率出现急剧变化^[5], 2.5 h 后体积含水率上升速率变小, 降雨结束前仅增加 1.5% 并达到峰值体积含水率 36.1%。降雨结束后, 由于该层土体上方没有持续的水分补给, 而水分又在向上蒸发的同时继续向下方入渗, W15 的体积含水率在 24 h 内逐渐下降至 24.8%。降雨后 3 h 水分到达第二层 50 cm 深度处 W4, 之后该处体积含水率快速上升, 停止降雨时该层土体体积含水率没有平缓的迹象, 说明上层土体继续为该层补给水分, 降雨结束后土体体积含水率增加是上层土体自由入渗的结果, 但体积含水率增加速率明显减少, 在试验开始后 5 h 体积含水率达到 27.2%, 降雨结束 24 h 内逐渐下降至 25% 左右。虽然本层土体的水分会继续向下层入渗, 但是由于 W4 上方有来自上层土体持续的水分补给, 体积含水率下降比 W15 少, 最终两个传感器的体积含水率趋于一致。在降雨结束时土体内水分未到达 W2 所在层土体, W2 水分的上升依靠降雨结束后模型土体内水分的自由入渗, 该层土体体积含水率在试验开始 5 h 后逐渐上升并在 7 h 时逐渐稳定, 最终体积含水率达到 25.7%, 与 W15、W4 体积含水率趋近。

图 6(b) 为变化回填土区体积含水率时程曲线。变化回填土区与固定回填土区一侧相比, 水分到达相应土层深度所需时间缩短, 雨水入渗速率提高。雨水在降雨开始后 1 h 入渗至 W14, 即变化回填土区 25 cm

深度处, 降雨 4 h 后达到峰值体积含水率 33.9%, 停止降雨后体积含水率逐渐在 24 h 内下降至 27%。在降雨 2 h 时, 50 cm 深度处 W13 体积含水率开始出现明显上升, 在随后的 2 h 内逐渐达到峰值体积含水率 36.1%, 最终在停止降雨 24 h 后降至 29.3%。在降雨过程中, W14 和 W13 峰值体积含水率附近都存在“骤增骤减”现象。与固定回填土区不同, 降雨结束时水分已入渗至 75 cm 深度处土体, 降雨 3.5 h 后, W7 体积含水率开始上升, 降雨结束后体积含水率基本保持不变, 稳定在 28.4% 左右。

对比图 6(a) 和图 6(b) 可知, 在降雨条件下交界面两侧填土区压实度不同时, 固定回填土区 25 cm 深度处土体的入渗较变化回填土区相同深度滞后 0.5 h 以内, 50 cm 和 75 cm 相同深度处土体, 固定回填土区滞后 1.5~2.0 h, 入渗速率明显小于变化回填土区。固定回填土区和变化回填土区 25 cm 深度处传感器在降雨结束前均达到峰值体积含水率, 但固定回填土区一侧出现了 36.1% 的异常体积含水率, 并且在降雨结束后出现了 10% 以上大幅体积含水率下降, 这是因为在降雨过程中交界面上缘(即 W15 正上方) 出现了由于沉降导致的裂缝并逐渐扩大, 导致雨水沿裂缝入渗至土体内部, W15 附近出现水分聚集, 并在降雨结束后由于蒸发和入渗作用逐渐迁移。降雨停止后, 固定回填土区和变化回填土区的 50 cm 深度处传感器体积含水率变化出现差异, 固定回填土区一侧下降了 2.1%, 而变化回填土区一侧下降了 5.6%, 原因为变化回填土区一侧的干密度较小, 土颗粒之间的孔隙较大, 雨水的渗流路径变短, 雨水在土体中更容易找到渗流通道。

图 6(c) 为不同压实度交界面体积含水率时程曲线。由图 6(c) 可知, 雨水入渗至交界面 25 cm 深度处 W5 的时间为降雨后 0.5 h, 并且在之后先迅速上升至 22.8%, 随后以约 4% 每小时的速率均匀上升至峰值体积含水率 33.8%。在降雨过程中, 水分入渗至 W5 所需时间较短, 并且 W5 和 W12 单位时间体积含水率增加量均比两侧回填土大, 说明在交界面附近存在优势流。降雨结束后, 交界面 50 cm 深度体积含水率传感器水分流失速率比变化回填土区要大, 主要是因为交界面上方水分在下渗至交界面时渗流路径发生了改变, 其中一部分水分向固定回填土方向斜向入渗, 一部分沿着交界面斜向下入渗形成优势流(如图 10 所示)。

图 7 为方案 3 体积含水率时程曲线。从图 7(a)~(c) 可以看出, 固定回填土区、变化回填土区、交界面 25 cm 深度处传感器的体积含水率均在降雨 1.5~2.0 h 开始上升, 4.5 h 达到峰值体积含水率并在降雨后下降约 4%。在降雨 3 h 后, 雨水入渗至 50 cm 深度处传感器。降雨结束 0.5 h 内, 雨水入渗至 75 cm 深度。

当两侧填土区压实度相同时,除了部分点位的初始体积含水率及峰值体积含水率有所差异,水分迁移规律大致相同。

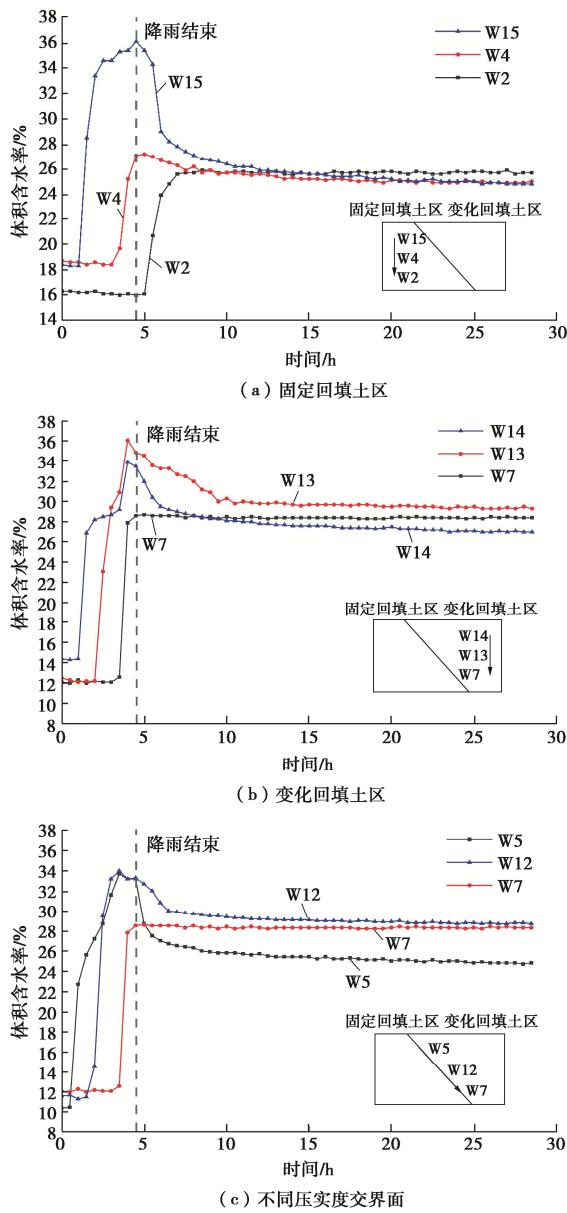


图 6 方案 1 体积含水率时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of volumetric moisture content in scheme 1

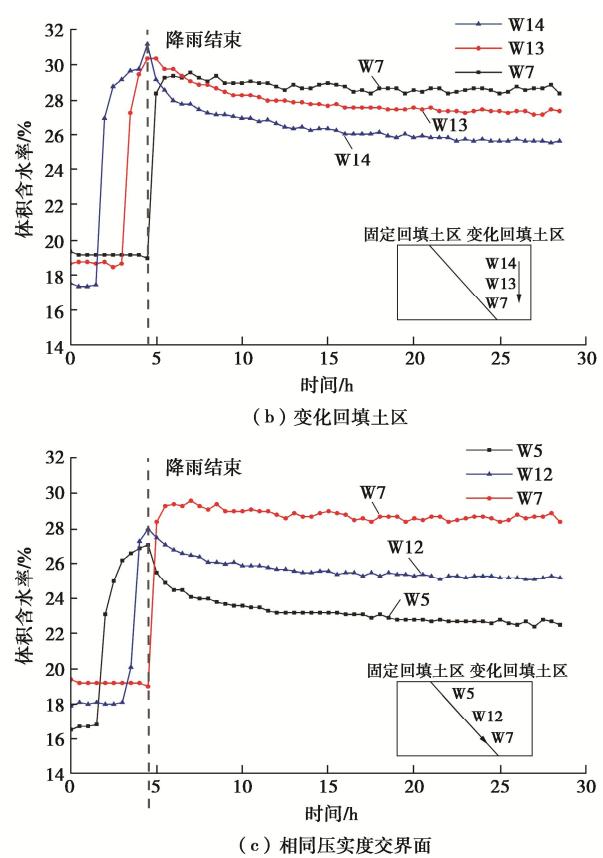
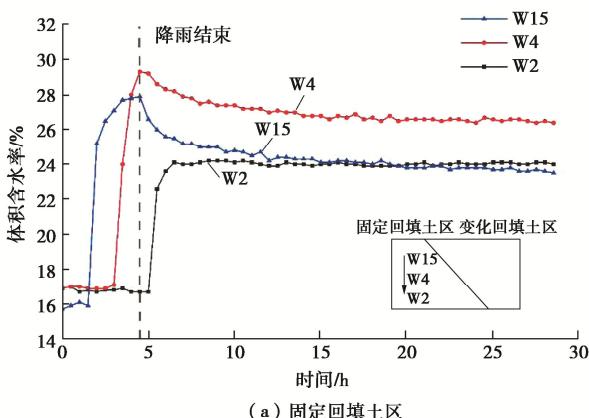


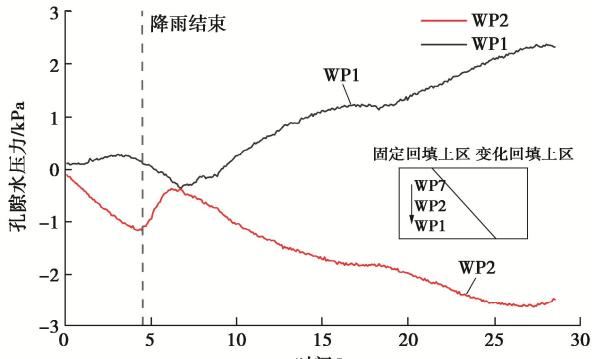
图 7 方案 3 体积含水率时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of volumetric moisture content in scheme 3

图 8 为方案 1 孔隙水压力时程曲线。对比图 8(a)~(c) 可知,在降雨开始前,土体为非饱和状态,降雨开始后,随着水分的不断入渗,土颗粒间的孔隙逐渐被水填充,土体饱和度增加,孔隙水压力增加,此时的孔隙水压力主要为静孔隙水压力^[17]。伴随着降雨的继续入渗,上层土体自重应力增加,发生固结,此时土体被压缩,内部孔隙减小,孔隙水压力继续增大,此时的孔隙水压力主要为超静孔隙水压力。降雨结束后,伴随着上层土体的水分蒸发及向下渗流,孔隙水压力缓慢消散,土体继续发生固结沉降。由于模型下方没有设置排水,因此下层土体的孔隙水压力仍会有小幅度的增加。

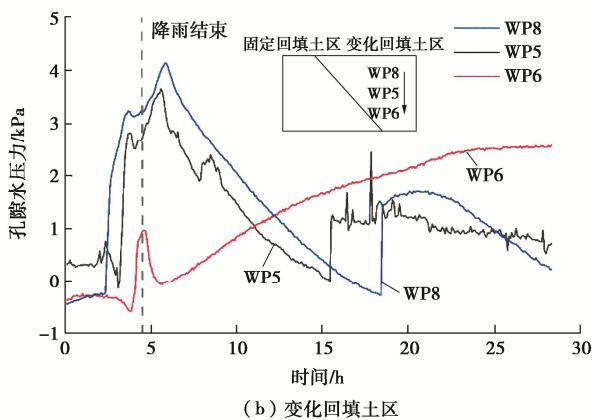
值得注意的是,方案 1 中低压实度变化回填土区一侧 3 个不同深度处孔隙水压力传感器同样出现“骤增骤减”现象,对比图 6(b) 和图 8(b) 可知,相较体积含水率的“骤增骤减”现象,孔隙水压力的“骤增骤减”现象峰值滞后 1.5~2.0 h,这是因为在非饱和土降雨入渗过程中,土体中的孔隙逐渐被水填充,体积含水率先升高达到峰值,随后土体由于自重应力的增加不断压缩,土体在压缩过程中孔隙水不断承受

并传递压力, 孔隙水压力才逐渐达到峰值, “骤增骤减”现象与土体固结有关。



(a) 固定回填土区

注: 因WP7传感器监测过程中数据数据常, 故舍掉



(b) 变化回填土区

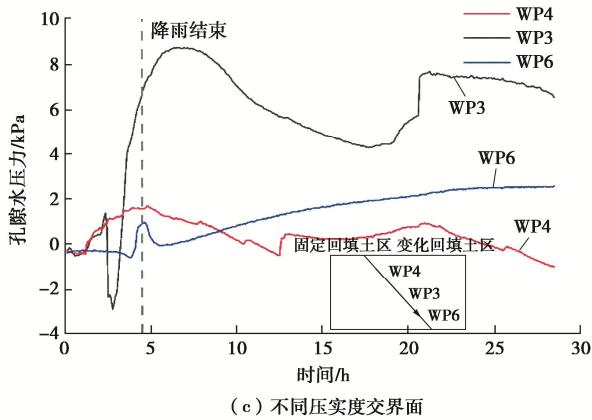


图8 方案1的孔隙水压力时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of pore water pressure in scheme 1

图9为方案3的孔隙水压力时程曲线。对比图9(a), 9(b), 9(c)中50 cm深度处孔隙水压力传感器, 发现固定回填土区WP2传感器、变化回填土区WP5传感器、交界面WP3传感器在降雨过程中孔隙水压力增长值分别为3.2, 3.2, 4.1 kPa, 这说明虽然交界面两侧填土压实度相同, 但是在交界面附近依然存在优势流, 使交界面孔隙水压力增大, 具有管涌、

塌陷等破坏潜势。

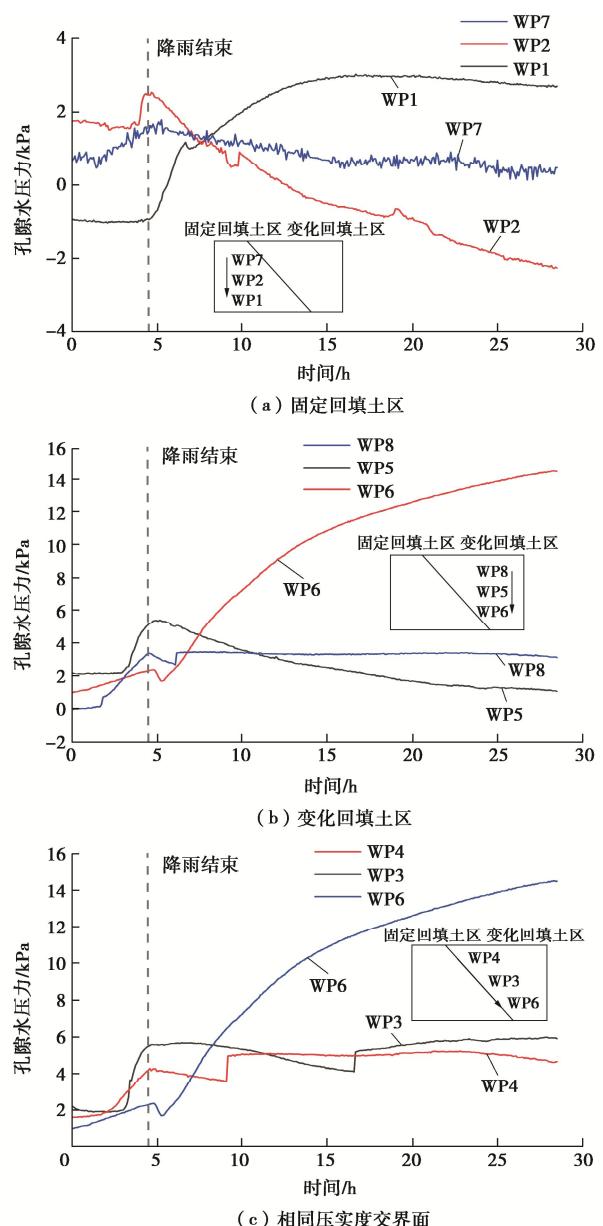


图9 方案3的孔隙水压力时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of pore water pressure in scheme 3

对比两组试验的孔隙水压力, 方案1中60%压实度变化回填土一侧WP8、WP5传感器孔隙水压力变化值明显大于方案3中80%压实度变化回填土, 这是因为静孔隙水压力主要取决于地下水位的高度和无固结时的渗流, 而超静孔隙水压力是由土体变形的趋势引起的, 并常常伴随着土体的渗流固结^[18]。两组试验除了压实度以外, 其他初始条件相同, 因此初始静孔隙水压力相差不大, 但方案1中低压实度土体由于渗流产生的静孔隙水压力以及由于土体固结变形所产生的超静孔隙水压力值更大, 因此孔隙水压力也更大。两组试验在交界面都出现了孔隙水压力的急剧增长, 进一步证实了交界面存在优势流。

3 组试验中各个点位传感器的水分迁移规律在试验时程内基本相同，在降雨过程中经历体积含水率上升阶段、饱和阶段、稳定阶段，由于压实度和回填形式不同导致各个阶段的体积含水率变化也不尽相同，低压实度土体内部孔隙数量更多，孔隙直径更大，渗流速率更快，同时孔隙水压力增幅也更大。土体由于固结沉降导致的超静孔隙水压力会使孔隙水压力峰值比体积含水率峰值滞后。

2.2 湿润锋运移

湿润锋是水分下渗过程中，土壤被湿润的先头部与干土层形成的明显交界面，湿润锋运移是研究降雨入渗的一项重要指标。湿润锋运移受到土体的密度、初始含水率、降雨入渗补充等条件的影响。方案 2 中湿润锋运移如图 10 所示。由图 10 可看出，低压实度变化回填土区一侧的湿润锋运移快于固定回填土区，雨水在变化回填土区一侧先接触交界面，其中一部分水分沿交界面继续向下渗流，另一部分透过交界面向固定回填土区方向渗流，交界面处出现明显的过渡区。

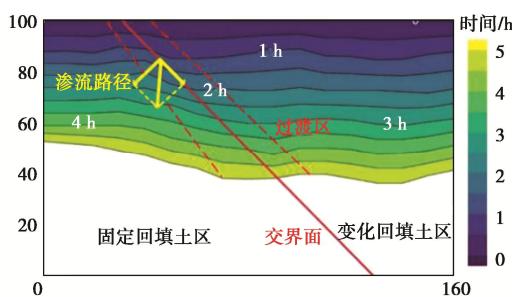


图 10 湿润锋运移图

Fig. 10 Developement of wetting front

图 11 为湿润锋最大深度时程曲线。由图 11 可知，整个降雨过程可分为 3 个阶段，降雨结束前 I、II 阶段湿润锋最大深度与时间成线性关系，试验初期 I 阶段湿润锋运移速率较快，在降雨 0.5 h 后运移速率降低并逐渐稳定，这主要是因为试验初期土壤含水率较低，湿润锋与入渗边界之间的水势梯度较高，湿润锋运移速率较快，随着降雨不断入渗，湿润体含水率增大，入渗边界水势梯度降低并保持稳定^[19]。降雨结束后 III 阶段成指类型关系非线性增长，最终趋于稳定，湿润锋运移公式如下：

$$D = \begin{cases} at_1 + h_i & t_1 \in [0, t_{I}] \\ bt_2 + h_m & t_2 \in [0, t_{II}] \\ -c \times e^{-dt_3} + h_f & t_3 \in [0, t_{III}] \end{cases}$$

(仅适用于本研究条件)。 (1)

式中 D 为湿润锋最大深度 (cm); t_1 , t_{II} , t_{III} 分别为 I、II、III 阶段持续时间 (h); h_i , h_m 为 I、II 阶

段初始湿润锋深度 (cm); h_f 为最终湿润锋深度 (cm); a , b , c , d 为拟合参数， a , b 表示 I、II 阶段湿润锋运移速率 (cm/h)， c 表示降雨结束后初始状态湿润锋深度距最终深度的大小 (cm)， $1/d$ 为弛豫时间 (h)，代表降雨结束后湿润锋运移减缓速率， $1/d$ 越大减缓速率越小。各拟合参数与土体的密度、初始含水率、降雨入渗补充等条件有关。在本试验研究条件下 $a=22.61$, $b=13.96$, $c=23.21$, $d=0.42$, $h_i=0$, $h_m=9.13$, $h_f=82.46$ 。

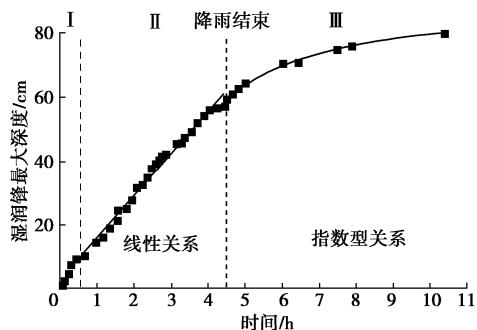


图 11 湿润锋最大深度时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of maximum depth of wetting front

2.3 不均匀沉降规律

以两侧压实度差距较大的方案 1 和两侧无差距的方案 3 为例，分别讨论不同压实度差异情况下两侧土体的沉降规律。试验开始前对模型表面的高度进行测定，顶面高度在 100±2 cm。方案 1 降雨开始前模型顶面等高线图及表面形态图见图 12 (a), 13 (a)。试验开始 4.5 h 后停止降雨，再次对模型表面高度进行测定，图 12 (b) 为降雨过程沉降差等值线图。从图 12 (b) 中可知，垂直方向均为固定回填土的各个点位几乎没有沉降，而在填方交界面上方进行回填的各个点位均有不同程度的沉降，沉降量在 0~13 cm 之间，并且沉降量与该点位垂直方向的回填高度成非线性关系，关系式可用式 (2) 表示，填土高度与沉降量关系见图 14。在纯变化回填区域内，模型表面出现小型凹坑。降雨结束时模型顶面等高线图及表面形态图如图 12 (c), 13 (b) 所示，降雨结束 24 h 时模型顶面等高线图及表面形态图见图 12 (d), 13 (c)。对比图 12 (c), 12 (d) 发现，降雨结束后至自由入渗 24 h，土颗粒之间的孔隙水压力逐渐消散，土体进一步发生固结，沉降量在 0~2 cm 之间。综上可知，黄土填方的沉降主要发生在降雨期间，由于雨水的不断下渗，低压实度回填土颗粒之间的大孔隙逐渐被填充，土体由非饱和状态向饱和状态转化，土颗粒间吸力减小，发生错动、滑移、重新排列等变形^[3]，同时孔隙水压力增加，自重应力增加，上部土层逐渐压密，

产生不均匀沉降。降雨结束后, 土体由于自重应力产生的沉降影响较小, 这部分的沉降主要来自孔隙水压力的消散。

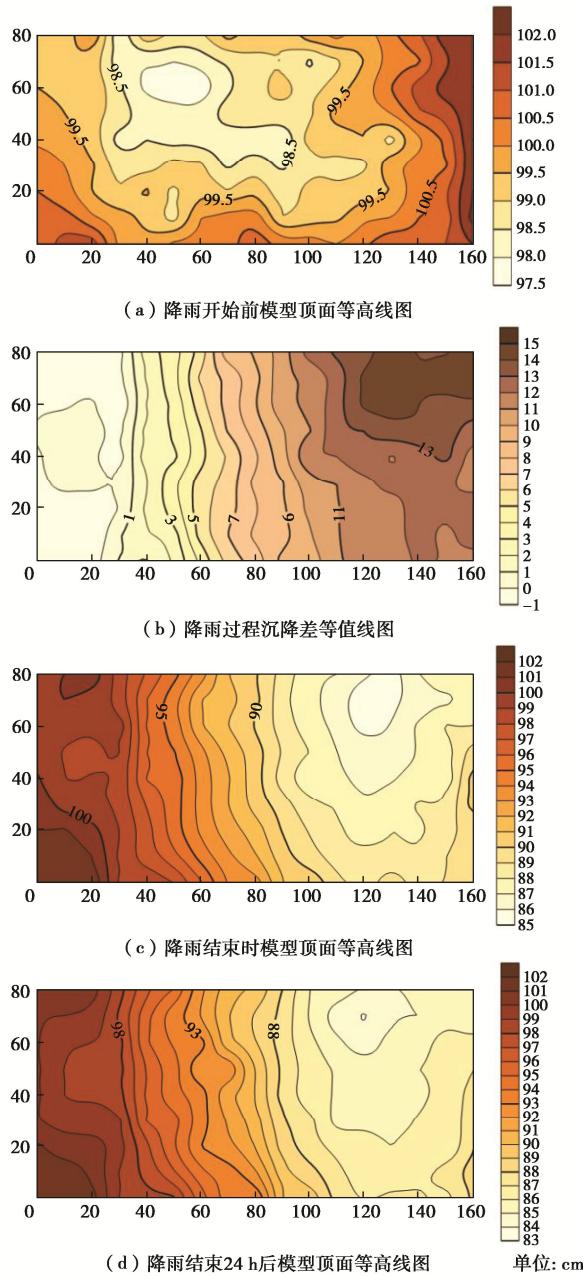


图 12 方案 1 各阶段模型顶面等高线图

Fig. 12 Contour map of top surface of model at each stage in scheme 1

$$s = A \ln(H + B) + C \quad (\text{仅适用于本研究条件}) \quad (2)$$

式中 H 为填土高度; s 为沉降量; A , B , C 为拟合参数, 式中物理量按量纲为一处理。本试验研究中 $A=14.3$, $B=62.1$, $C=-59.3$, 拟合优度 $r^2=0.9944$ 。

方案 3 模型填筑高度仍为 100±2 cm, 总体来说, 降雨前后模型顶面高度相差不大, 但是整个模型顶面高度出现 0~0.8 cm 大小不一的升高, 这可能与土体成分有关, 在关中地区一些浅层无、弱自重湿陷性 Q3

黄土地场浸水后同样出现类似隆起变形现象^[20]。

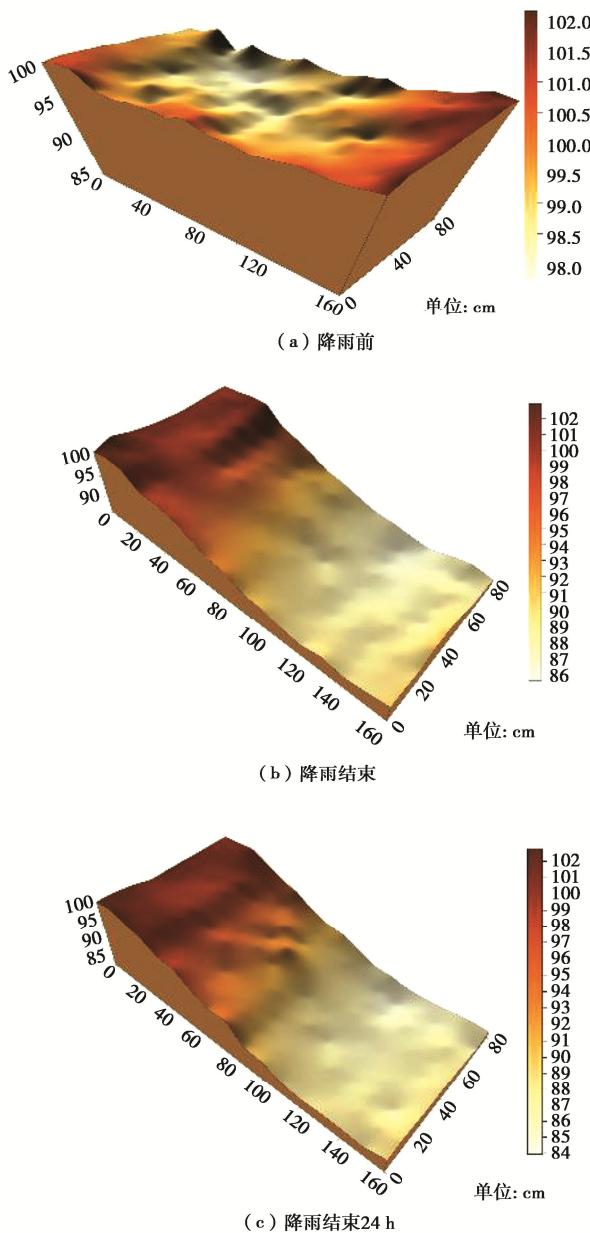
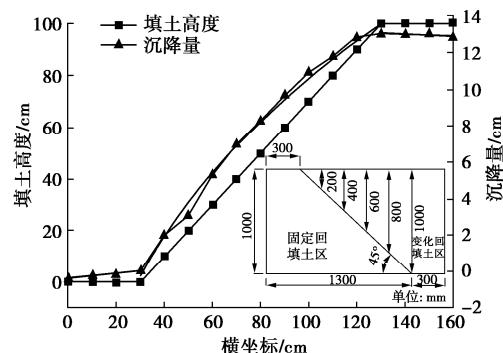


图 13 方案 1 降雨结束前后模型表面形态图

Fig. 13 Surface morphologies of model before and after rainfall in scheme 1



注: 右下方为填土高度示意图

图 14 填土高度与沉降量关系

Fig. 14 Relationship between fill height and settlement

通过建立方案 1、方案 3 填方区局部倾斜与填土高度的关系(见表 3),发现方案 1 中随着不同压实度交界面上方填土高度的增加,局部倾斜值先增加后降低,局部倾斜最大值靠近交界面上缘,并且交界面上缘(填土高度为 0 cm)的局部倾斜值远大于交界面下缘(填土高度为 100 cm),易发生交界面的破坏。而方案 3 中新老交界面上方填土局部倾斜值均小于 1%,说明提高两侧回填土均匀度可有效减小填方工程中的不均匀沉降。

表 3 填方区局部倾斜
Table 3 Local incline of fill areas

方案 1		方案 3	
填土高度/cm	局部倾斜/%	填土高度/cm	局部倾斜/%
0	11.11	0	0.67
10	15.67	10	0.44
20	16.17	20	0.67
30	19.39	30	0.33
40	15.06	40	0.06
50	13.50	50	0.39
60	13.06	60	0.67
70	10.78	70	0.83
80	9.28	80	0.33
90	5.22	90	0.94
100	1.44	100	0.44

由于方案 1 降雨后沉降规律最为明显,因此利用示踪点研究方案 1 中土体内部的位移变化,采取#10, #14, #18, #7 共 4 个典型位置的示踪点进行讨论,其中#10, #14, #18 示踪点与交界面的水平距离相等(见图 4)。图 15 为降雨结束 24 h 后的典型示踪点位置图,图中#10, #14, #18 示踪点均有着不同程度的垂直位移与水平位移,并且随着土体深度的增加,其垂直位移与水平位移逐渐减小,到最下层#18 示踪点时水平位移已接近 0。出现水平位移说明回填土有沿着交界面发生剪切破坏的趋势。在固定回填土-变化回填土交界面附近的#7 示踪点由于交界面的摩擦阻力,既没有产生水平位移也没有产生垂直位移。

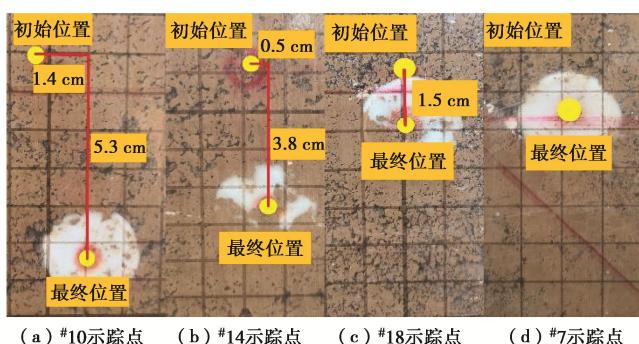


图 15 典型示踪点位置图

Fig. 15 Location map of typical tracer points

图 16 为降雨前后模型俯瞰对比图,从图中可发现方案 1 降雨后土体表面出现大小、长短不一的裂缝,这是由于交界面上方产生了不同程度的沉降,差异沉降和拉张应变是裂缝产生的直接原因^[21]。降雨结束后最大裂缝宽度达 3.6 cm,最大裂缝长度 80 cm,贯穿整个模型顶部横截面,位置在固定回填土区-变化回填土区交界面上缘附近。方案 2 和方案 3 在降雨后未出现明显裂缝,说明提高回填土压实度可以明显改善填土过渡区由于降雨导致的不均匀沉降裂缝。

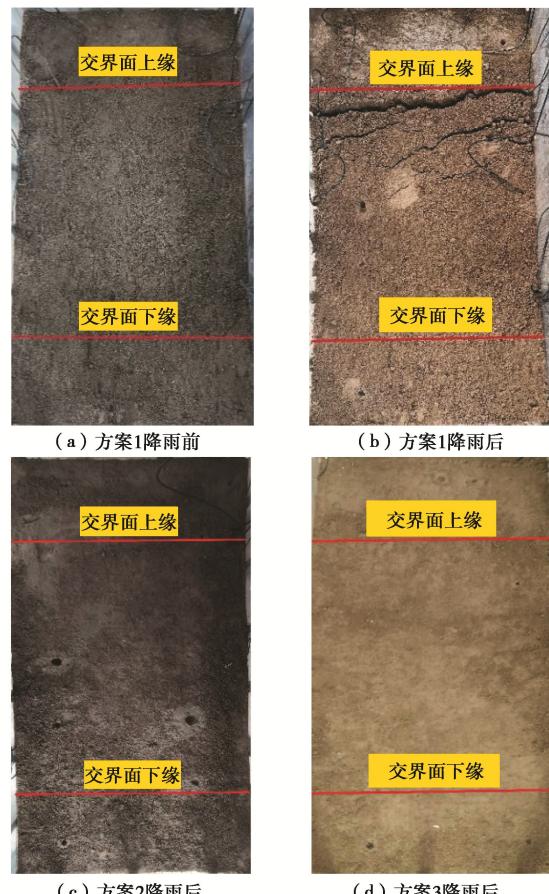


图 16 降雨前后模型俯瞰图

Fig. 16 Vertical views of model before and after rainfall

3 结 论

本文针对治沟造地工程建设中填方区新老交界面及不同压实度交界面的不均匀沉降及降雨入渗问题,采用降雨模型的试验方法,对不同压实度黄土填方区水分迁移规律、湿润锋运移以及不均匀沉降规律开展了相关研究。主要结论如下:

(1) 回填土压实度越低,其雨水下渗的速率越快。由于压缩固结的原因,低压实度填土的体积含水率和孔隙水压力在峰值附近存在“骤增骤减”的现象,孔隙水压力的升降明显滞后于体积含水率。

(2) 在暴雨条件下,降雨期间湿润锋最大深度与

时间成线性关系, 降雨结束后成指数型关系, 湿润锋在交界面附近出现明显的过渡区, 交界面附近存在雨水渗流通道, 孔隙水压力值增幅较大, 具有管涌、塌陷等破坏潜势。

(3) 交界面两侧填土区压实度差越大, 土体的差异沉降越大。交界面上方土体总沉降与填土高度成非线性关系, 随着交界面上方填土高度的增加, 局部倾斜值先增加后降低, 并且不同压实度交界面上缘的局部倾斜值远大于交界面下缘, 局部倾斜最大值靠近交界面上缘。

(4) 固定回填土区-低压实度填土区交界面附近土体同时出现垂直位移与水平位移, 随着土深的增加, 垂直位移和水平位移逐渐减小。交界面存在剪切破坏的趋势, 方向沿交界面斜向下, 填土压实度越低, 发生这种破坏的趋势越大。

(5) 低压实度填土区的大幅沉降以及填方交界面两侧土体的不均匀沉降往往伴随着表面裂缝的产生, 裂缝宽度可达3~4 cm, 最大裂缝出现在交界面上缘附近。增大回填土压实度可有效改善黄土填方区不均匀沉降以及裂缝问题, 建议黄土区填方工程中提高回填土压实度及交界面两侧均匀度。

参考文献:

- [1] LI P Y, QIAN H, WU J H. Environment: accelerate research on land creation[J]. Nature, 2014, **510**(7503): 29 – 31.
- [2] 高建中. 延安新区黄土丘陵沟壑区域工程造地实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. (GAO Jian-zhong. Engineering Practice of Land Recclamation in Loess Hilly Gully Areas in Yan'an New District[M]. Beijing: China Architecture & Building Press. (in Chinese))
- [3] 郭楠, 陈正汉, 杨校辉, 等. 重塑黄土的湿化变形规律及细观结构演化特性[J]. 西南交通大学学报, 2019, **54**(1): 73 – 81, 90. (GUO Nan, CHEN Zheng-han, YANG Xiao-hui, et al. Research on wetting-deformation regularity and microstructure evolution characteristics of remoulded loess in triaxial soaking tests[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, **54**(1): 73 – 81, 90. (in Chinese))
- [4] 高登辉, 陈正汉, 郭楠, 等. 干密度和基质吸力对重塑非饱和黄土变形与强度特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(3): 736 – 744. (GAO Deng-hui, CHEN Zheng-han, GUO Nan, et al. The influence of dry density and matric suction on the deformation and the strength characteristics of the remolded unsaturated loess soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(3): 736 – 744. (in Chinese))
- [5] 张龙, 陈正汉, 虞胜霞, 等. 延安某工地填土的渗水和持水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊1): 183 – 188. (ZHANG Long, CHEN Zheng-han, HU Sheng-xia, et al. Seepage and water retention characteristics of fill in a construction site in Yan'an[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S1): 183 – 188. (in Chinese))
- [6] 张豫川, 高飞, 吕国顺, 等. 基于黄土蠕变试验的高填方地基沉降的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2018, **18**(30): 220 – 227. (ZHANG Yu-chuan, GAO Fei, LÜ Guo-shun, et al. Numerical simulation of high fill foundation settlement based on creep test of loess[J]. Science Technology and Engineering, 2018, **18**(30): 220 – 227. (in Chinese))
- [7] 葛苗苗, 李宁, 郑建国, 等. 基于一维固结试验的压实黄土蠕变模型[J]. 岩土力学, 2015, **36**(11): 3164 – 3170, 3306. (GE Miao-miao, LI Ning, ZHENG Jian-guo, et al. A creep model for compacted loess based on 1D oedometer test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(11): 3164 – 3170, 3306. (in Chinese))
- [8] 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(6): 786 – 789. (XU Ming, SONG Er-xiang. Review of long-term settling of high fills[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009(6): 786 – 789. (in Chinese))
- [9] ZHU C H, LI N. Ranking of influence factors and control technologies for the post-construction settlement of loess high-filling embankments[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **118**: 103320.
- [10] 张瑞松, 唐辉, 高建中. 延安新区大厚度压实填土地基均匀性评价[J]. 岩土工程技术, 2020, **34**(1): 24 – 26, 52. (ZHANG Rui-song, TANG Hui, GAO Jian-zhong. Uniformity evaluation of compacted fill foundation with large thickness in Yan'an new district[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2020, **34**(1): 24 – 26, 52. (in Chinese))
- [11] 刘家伟, 樊恒辉, 杨秀娟, 等. 原状黄土-压实黄土接触面抗剪强度特性研究[J]. 人民黄河, 2021, **43**(2): 127 – 130. (LIU Jia-wei, FAN Heng-hui, YANG Xiu-juan, et al. Characteristics of shear strength of the interface between disturbed loess and undisturbed loess[J]. Yellow River, 2021, **43**(2): 127 – 130. (in Chinese))
- [12] 李博. 重塑黄土接触面渗透破坏研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. (LI Bo. Research on the Seepage Failure of the Remolded Loess Interface[D]. Yangling:

- Northwest A & F University, 2020. (in Chinese))
- [13] 甄平福. 黄土高填方场地大型现场浸水试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2018. (ZHEN Ping-fu. Study on the Large Area Field Immersion Tests in Loess High Fill Ground[D]. Xi'an: Changan University, 2018. (in Chinese))
- [14] 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 Cai-hui, LI Ning. Moistening effects of high-fill embankment due to rainfall infiltration in loess gully region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 845 - 854. (in Chinese))
- [15] 方磊, 李广信, 黄锋. 室内土工模型试验的新方法: 桩基渗水力土工模型试验[J]. 高校地质学报, 1997, 3(4): 451 - 457. (FANG Lei, LI Guang-xin, HUANG Feng. A new indoor model test of soil-the hydraulic gradient similitude model test for piled foundation[J]. Geological Journal of China Universities, 1997, 3(4): 451 - 457. (in Chinese))
- [16] 徐向舟, 刘大庆, 张红武, 等. 室内人工模拟降雨试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 52 - 58. (XU Xiang-zhou, LIU Da-qing, ZHANG Hong-wu, et al. Laboratory rainfall simulation with controlled rainfall intensity and drainage[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(5): 52 - 58. (in Chinese))
- [17] 李广信. 静孔隙水压力与超静孔隙水压力: 兼与陈愈炯先生讨论[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 957 - 960. (LI Guang-xin. Static pore water pressure and excess pore water pressure—a discussion with Mr.CHEN Yu-Jiong[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 957 - 960. (in Chinese))
- [18] 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 - 12. (LI Guang-xin, LI Xue-mei. Seepage force and excess pore water pressure in soil mechanics[J]. Geotechnical Engineering World, 2009, 12(4): 11 - 12. (in Chinese))
- [19] 高朝侠. 黄土区土壤大孔隙流试验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014. (GAO (CHAO Zhao-xia). The Experimental Study on Macropore Flow in Loess Region[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese))
- [20] 邵生俊, 李骏, 李国良, 等. 大厚度自重湿陷黄土湿陷变形评价方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 965 - 978. (SHAO Sheng-jun, LI Jun, LI Guo-liang, et al. Evaluation method for self-weight collapsible deformation of large thickness loess foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 965 - 978. (in Chinese))
- [21] 乔建伟, 夏玉云, 郑建国, 等. 黄土湿陷地裂缝发育特征与成因机理研究[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 71 - 76. (QIAO Jian-wei, XIA Yu-yun, ZHENG Jian-guo, et al. Research on development characteristics and formation mechanisms of collapsible earth fissure[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 71 - 76. (in Chinese))

彩色插图索引

- DOI: 10.11779/CJGE202209002 一文彩色插图 (后插 1)
- DOI: 10.11779/CJGE202209005 一文彩色插图 (后插 2)
- DOI: 10.11779/CJGE202209006 一文彩色插图 (后插 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202209007 一文彩色插图 (后插 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202209009 一文彩色插图 (后插 5)
- DOI: 10.11779/CJGE202209012 一文彩色插图 (后插 8)
- DOI: 10.11779/CJGE202209014 一文彩色插图 (后插 9)
- DOI: 10.11779/CJGE202209015 一文彩色插图 (后插 9)
- DOI: 10.11779/CJGE202209016 一文彩色插图 (后插 10)
- DOI: 10.11779/CJGE202209017 一文彩色插图 (封 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202209020 一文彩色插图 (封 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202209021 一文彩色插图 (封 2)