

【工程应用】

水位抬升下黄土高填方地基增湿变形试验研究

周涛¹, 木林隆^{1*}, 王乐², 张继文^{3,4}, 曹杰⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系 / 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 3. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049;

4. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 地下水位抬升影响下, 黄土高填方地基的增湿变形沉降灾害频发, 给人民的生命安全和经济建设造成了巨大的损失, 成为湿陷性黄土地区平山造地工程亟需解决的问题。对于黄土的变形, 可分为由力作用造成的压缩变形和水作用下引起的增湿变形。地下水位上升, 黄土体中含水量增加, 引起的黄土增湿自下而上发展, 浸水面积大, 湿陷均匀, 浸湿速率一般较慢, 湿陷变形的过程较长。本文通过 1 g 模型试验, 对吸湿条件下黄土高填方地基的沉降特性展开研究, 分析了高应力下重塑黄土在不同的地下水位抬升高度等不利条件下的变形特性。试验结果表明, 3 组实验工况 (液面低于土面、液面与土面齐平、液面高于土面) 中, 当水头与黄土体表面齐平时, 其稳定沉降最大。黄土浸水后初期, 黄土地表沉降发展速率较快, 当黄土浸水饱和后, 基本达到稳定沉降。

关键词: 高填方黄土地基; 增湿变形规律; 地下水上升; 1 g 模型试验; 重塑黄土; 沉降

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0128-06

Experimental study on wetting deformation of high loess-filled foundations caused by groundwater level rise

ZHOU Tao¹, MU Lin-long^{1*}, WANG Le², ZHANG Ji-wen^{3,4}, CAO Jie⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering / Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group, Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China;

3. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

4. China JIKAN Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China)

Abstract: Wetting deformation disasters of loess high fill foundation occur frequently caused by groundwater rise, which has caused great losses to economic construction and people's lives, and has become a problem that needs to be solved urgently in the project of levelling hills and creating land in collapsible loess areas. For the deformation of loess, it can be divided into compression deformation caused by the forces and wetting deformation caused by water. When the water table rises, the water content in the loess increases, causing the development of loess humidification from the bottom, with a large and uniform wetting area, the rate of wetting is generally slow and the process of wetting deformation needs long time. In this paper, the settlement characteristics of loess high fill foundation under unfavourable conditions of groundwater rise were investigated through 1g model tests. The results show that when the water table is at the same level as the loess surface, settlement is greater than both water table below the loess surface and above it. At the initial stage after the loess is saturated with water, the rate of development of loess settlement is rapid, and when the loess is saturated with water, it reaches stable settlement.

Key words: high loess-filled foundations; wetting deformation; underground-water level rise; 1 g model experiment; remolded loess; settlement

0 引言

随着我国经济飞速发展, 国民经济增长与城

市化用地紧缺之间的矛盾在我国多山地、丘陵的中西部尤为突出。现有城镇空间逐渐不能满足城市发展的需求, 因而解决城市发展用地问题愈发重要。

收稿日期: 2022-02-28

作者简介: 周涛 (1998—), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事海上风电研究。E-mail: 1932395@tongji.edu.cn。

*通信作者: 木林隆 (1984—), 男, 浙江温州人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: mulinlong@tongji.edu.cn。

其中,平山造地工程成为解决该问题的重要途径。

湿陷性黄土地区进行的平山造地工程,建设环境极其的复杂。以我国黄土高原沟壑区延安新区为例,高填方地基总面积达到了 78.5 km^2 ,最大填方高度达到了 120 m ,填方体的压实度在 0.93 以上^[1]。由于建设工程地基土属于特殊的结构性土,具有“水敏性”,通常采用了碎石加涵管结合的方案来控制地下水。然而,碎石排水体在高应力下渗透排水特性的降低将极易引发填方体地下水位抬升、造地工程整体浸水,导致土体强度和吸力快速降低,极大的降低黄土体结构的稳定性,从而引发高填方地基出现不均匀沉降、湿陷、塌方等工程灾害现象,这些工程灾害给人民的生命安全和经济建设造成了巨大的损失。每年发生增湿变形沉降灾害中,高填方地基在降雨入渗及地下水位抬升影响下导致的灾害问题比率最高,占到了 70% 。因此,对黄土高填方地基增湿变形沉降规律进行研究,成为平山造地工程亟需解决的问题。

段旭等^[2]通过对陕西高填方工程工后 15 个月的地下水位、填筑土体含水率变化持续的监测,发现地下水位抬升后,填土体内部含水量会迅速增加,并且对黄土地基的沉降量产生影响。王茂等^[3]以西安地区黄土为例,发现地下水位抬升后会使得黄土中的附加应力和地基承载力迅速减小。王衍汇等^[4]以延安新区 13 标段北端 110 m 黄土高填方边坡为研究对象,利用有限元软件 GeoStudio 数值模拟分析不同地下水位工况下边坡的稳定性、变形特征及应变分布规律,发现随着地下水位的升高,高填方地基稳定性降低。杨校辉等^[5]采用有限元软件对高填方地基进行地下水位升降分析,认为高填方沟谷底部需采取有效的导渗排水措施,减小因水位升降导致土体黏聚力降低、应力场改变而产生的过大变形。XU 等^[6]采用离心模型试验,研究了兰州黄土地区地下水位上升不同高度后条形基础的沉降。离心机试验结果表明,随着地下水位的上升,地基沉降显著增加。WU 等^[7]对黄土高填方地基进行了大量的离心模型试验,研究了天然含水率和地下水抬升的情况下地基的沉降变形。试验结果表明,当填土体中的地下水位抬升时,黄土会产生额外的增湿变形,这很容易导致基础的失稳。曹杰等^[8]开展不同边界条件下,填筑体施工期和工后下重塑黄土离心模型试验,系统研究了黄土高填方沉降的影响因素。试验成果表明,施工速率、填方高度、沟谷形状、填筑压实度、时间等因素对填筑体沉降

均存在影响,高填方土体的沉降和变形与边界条件密切相关,填筑体自身沉降在“柔性”和“刚性”两种沟谷地基模型中存在明显差异。HU 等^[9]通过对山西太原中东部的实际工程中高填方黄土地基进行了一系列的土工试验和原位观察后,认为黄土不能过干或过湿,建议将黄土的含水量控制在 $12\% \sim 14\%$,可以减少黄土路堤的沉降,提高施工质量。ZHAO 等^[10]通过固结和增湿室内土工试验,总结了重塑黄土在自重应力和含水率变化下的沉降规律。他将黄土高填方地基的沉降分为施工中由荷载引起的沉降和施工后由黄土中含水率变化引起的沉降,并提出了黄土高填方地基沉降变形的计算方法。

在黄土增湿变形问题研究中,模型试验在反映现象规律上具有较大的优势,因而被广泛运用。本文通过 1 g 模型试验来研究不同地下水位抬升下高填方黄土体的地表变形、土压力随时间的变化规律,分析研究地下水位抬升等不利情况下,填方重塑黄土湿化变形特性,为今后高填方地基工程的工后增湿变形沉降问题预测提供参考。

1 模型试验简介

1.1 重塑黄土的制配

如图 1 所示,本文取延安地区的黄土来进行试验,将黄土晒干,用碎土机破碎黄土后,可作为模型试验的填料。对重塑黄土开展室内击实、界限含水率等基本物理力学性质的试验。试验获得重塑黄土的塑限为 16.77% ,液限为 29.89% 。击实曲线如图 2 所示,该黄土的最优含水率为 15.81% ,最大干密度 1.814 g/cm^3 。



图 1 破碎黄土过程

Fig. 1 Process of breaking up the loess

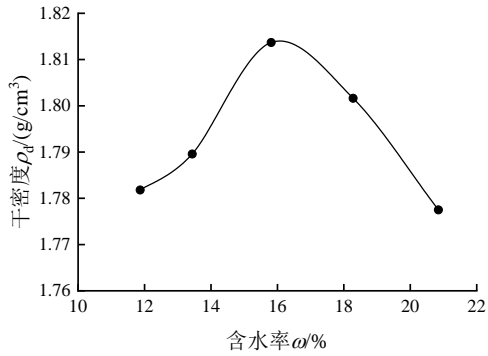


图 2 击实曲线图
Fig. 2 Compaction curve

1.2 试验装置

模型箱实物图如图 3 所示。试验箱整体为长方体，尺寸为 1 000 mm×400 mm×1 100 mm。为便于实验过程中观察水位抬升过程中重塑黄土浸润情况，正面采用较厚的钢化玻璃。试验箱其余 3 个侧面和底面采用高强度耐腐蚀的钢板焊接而成，保证箱壁不至于在土压力作用下发生较大的变形。在模型箱的钢板内壁涂抹工业凡士林，以减小黄土与箱壁之间的摩擦。模型箱的每一个侧面底端都安装进水或排水的阀门。如图 3 所示，为了模拟地下水位的抬升，模型箱底部布置 1 根进水管，管上共钻取 3 排进水孔，孔径大小为 2 mm，每排进水孔间距 20 mm，并在试验过程中用滤网包裹进水管，防止黄土细颗粒堵塞进水孔。



图 3 模型箱实物
Fig. 3 Real object of model box

如图 4 所示，为模型试验设计简图。采用激光位移计对填方土体表面不同位置进行监测，以获得地下水水位抬升下土体的沉降变化情况；采用土压力计测量地下水水位抬升下填方内部土压力随时间的变化规律。图 4 中，LDS1-LDS7 为 7 个激光位移传感器，固定在距离土体表面一定位置处，除中间 3 个激光位移传感器间距为 100 mm，其余相邻传感

器间距为 150 mm。EPT 为土压力传感器，在模型箱中部距离黄土底面 0.1 m 处布置。

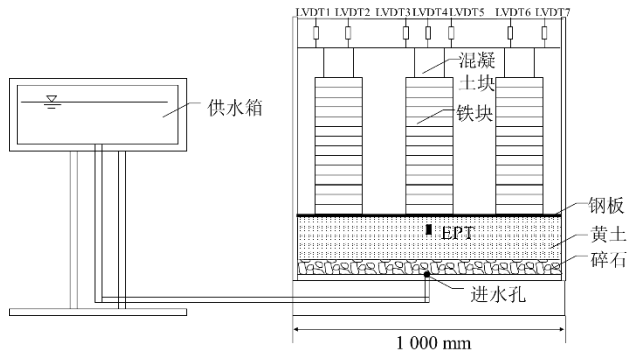


图 4 模型实验设计简图
Fig. 4 Sketch of model test design

本文所采用的激光位移计量程 30 mm，精度 1%；土压力计量程 50 kPa，误差±3%。使用高精度数据采集器 Data Taker DT85 采集数据。电源使用 ATTEN TPR3003T 直流稳压电源，输出电压 0~30 V，输出电流 0~3 A，试验测量仪器如图 5 所示。



图 5 试验测量仪器
Fig. 5 Measurement equipment

2 试验方案与步骤

2.1 试验方案

本文研究不同水位抬升高度下诱发黄土增湿变形的规律。如图 6 所示，每组工况均先在模型箱底部铺设 50 mm 厚的碎石作为渗流通道，随后填筑 150 mm 的黄土，填土的压实系数为 0.93。填方上部放置与 800 mm 黄土填方等重的铁制压块。

由于非饱和重塑黄土具有较强的基质吸力，通常会形成很高的浸润区，很难分辨地下水水位，较难控制水位高度。因此，本文提出在模型试验中用相同质量的铁制压块来代替上覆黄土体能够更容易控制地下水水位抬升高度。

本文共设置了 3 组试验工况。工况一的水头调整为距黄土底面 0.1 m，工况二的水头调整为距黄土底面 0.15 m，工况三的水头调整为距黄土底面 0.35 m。



图 6 实验模型实物图

Fig. 6 Real object of test model

2.2 试验步骤

(1) 制土: 将黄土晒干, 用碎土机破碎黄土。

(2) 填土: 先在模型箱底部铺设 50 mm 厚的碎石作为渗流通道, 随后将黄土按照最优含水率每 50 mm 分层铺设到模型箱中, 共填筑 150 mm 的黄土, 同时需在模型箱中部距离黄土底面 100 mm 的位置埋设薄膜土压力计。

(3) 压重: 填方上部放置大刚度钢板, 并堆载与 800 mm 黄土填方等重的铁制压块。

(4) 安装激光位移传感器: 在铁块上方放置混凝土块, 并固定好 LVDT 传感器, 连接激光位移传感器探头信号线, 测试采集系统。

(5) 水位抬升: 将外部供水箱提升至工况指定的水头高度, 连接模型箱底部, 打开阀门, 水流自下而上渗流, 每隔一定时间拍照。试验需要注意维持供水箱水头恒定。

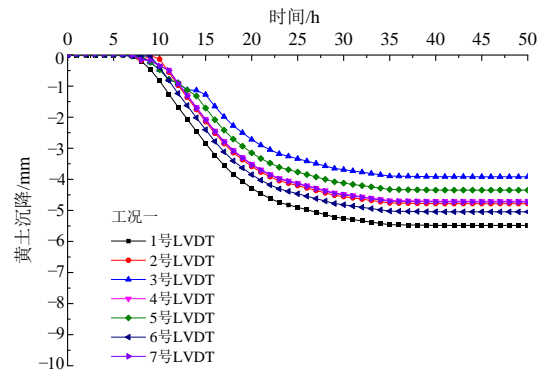
(6) 记录试验结果: 在各工况下详细观察模型箱中黄土在水位抬升后的变化情况, 并记录 LVDT 传感器的读数, 做好记录分析。

3 试验结果与分析

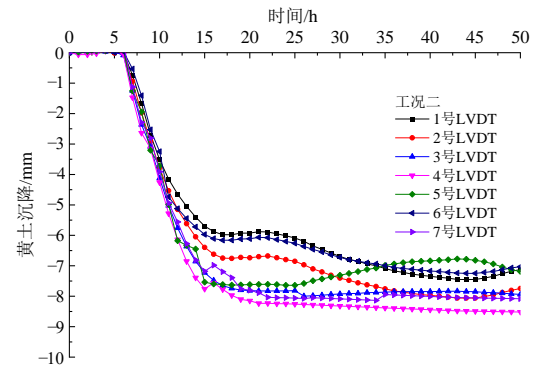
不同工况下重塑黄土的地表沉降量随时间的变化曲线如图 7 所示。如图 7 (a) 所示, 为水头调整为距黄土底面 0.1 m 时, 不同时刻黄土的地表沉降。由于水头高度较低, 填筑的黄土底部铺有碎石层, 水浸没石头开始渗透需要的时间约为 8 h。黄土浸水后, 黄土地表变形发展速率较快, 当沉降达到 4~5 mm 后, 黄土浸水饱和, 变形缓慢, 稳定时间约为 35 h。

如图 7 (b) 所示, 为水头调整为距黄土底面 0.15 m 时, 不同时刻黄土的地表沉降。此时, 水浸

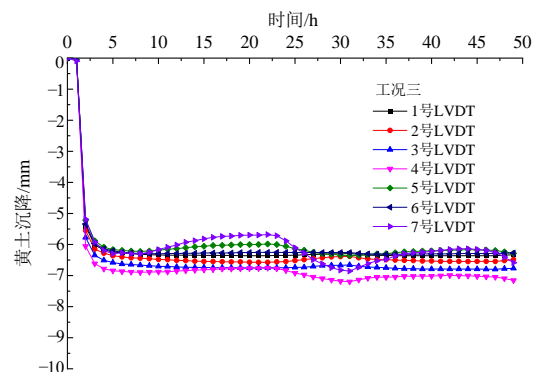
没碎石到开始渗透黄土需要的时间约为 5 h。黄土浸水后, 黄土地表变形发展速率更快, 当沉降达到 7~8 mm 时, 黄土浸水饱和, 变形缓慢, 稳定时间约为 23 h, 较之为水头为 0.1 m 的 35 h 时间更短。原因是水头高时黄土渗透速率高, 黄土更易达到浸水饱和状态, 从而最终沉降稳定更快。个别 LVDT 位移计变形值出现波动的原因是黄土沉降后期, 填方体的不均匀沉降引起的, 从而引起上方土体铁块倾斜, 位移计读数发生较小的波动。如图 7 (c) 所示, 为水头调整为距黄土底面 0.35 m 时, 不同时刻黄土的地表沉降。黄土浸水后, 黄土地表变形发展速率很快, 较之水头为 0.1 m 和 0.15 m 达到沉降稳定 6~7 mm 所需的时间更短, 约为 3 h。



(a)



(b)



(c)

图 7 不同工况下黄土沉降量随时间的变化曲线

Fig. 7 Curve of loess settlement with time under different working conditions

从黄土的最终稳定沉降来看，水头调整高度与黄土稳定沉降值并非线性规律。图8为LVDT4（土体中间）在不同水头作用下黄土稳定沉降值。可见，当水头位于土体表面（工况二）时，其稳定沉降达到最大值。水头调整为距黄土底面0.15 m时的沉降值均大于水头为0.1 m和水头为0.35 m的沉降值。大于前者的原因是水头为0.15 m时，黄土全部增湿变形，沉降较大；而大于后者的原因是水头为0.35 m时，过大的水头导致渗透力加强，对黄土具有抬升作用。

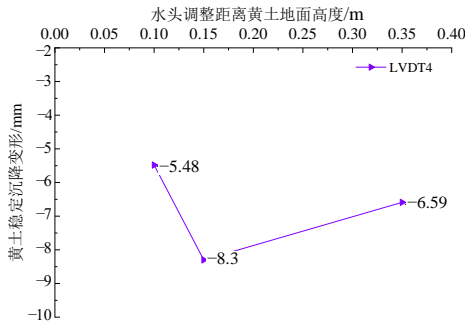


图8 不同水头下黄土稳定沉降值

Fig. 8 Loess stable settlement at different water heads

不同工况下沿黄土横断面长边方向的地表沉降量随时间的变化曲线如图9所示。如图9(a)、(b)所示，为水头为0.1 m、0.15 m时，沿黄土横断面长边方向随时间变化的地表沉降量。同一时刻，不同位置上土体的沉降量基本相同，地基沉降差异较小，浸水前期地基沉降量较大，浸水后期变形基本稳定。如图9(c)所示，为水头为0.35 m时，沿黄土横断面长边方向随时间变化的地表沉降量。从图9(c)可以看出，高水头下浸水4 h，最终沉降就已经稳定。

图10为实验过程中测得的距离黄土底面0.1 m处的土压力随时间的变化关系曲线。从图10可以看出，对于工况一和工况二，由于水位上升，下层黄土被浸湿，土体逐渐饱和，因而土压力总体随着时间增大而增大。因为土层有一定程度的不均匀沉降，并随着时间自我调整，所以造成了土压力一定程度的波动。对于工况三，过大的水头导致了在黄土体中产生的竖直向上的渗透力，黄土体受到抬升作用，因而随着时间的推移，土压力不断减小。

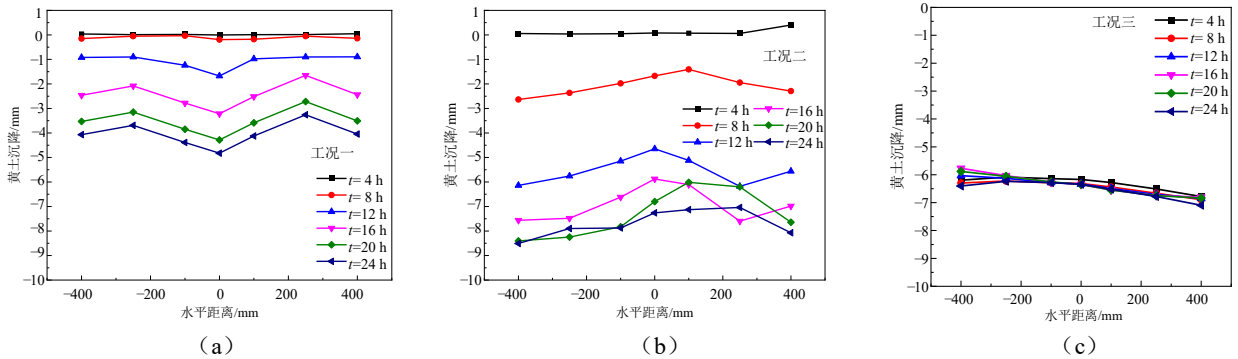


图9 不同工况下沿长边方向的黄土沉降量随时间的变化曲线

Fig. 9 Curve of loess settlement with time along longitudinal side under different working conditions

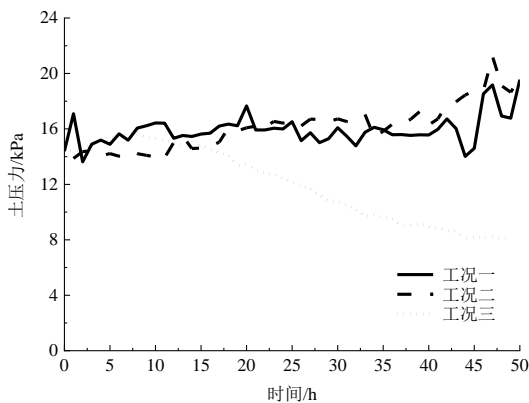


图10 不同工况下土压力随时间的变化曲线

Fig. 10 Curve of soil pressure with time under different working conditions

4 结论

本文针对高填方黄土地基的增湿变形沉降特性开展了模型试验研究，得出了以下结论：

- (1) 黄土浸水后初期，黄土地表沉降发展速率较快。当黄土浸水饱和后，基本达到稳定沉降。
- (2) 当水头与黄土体表面齐平时，其稳定沉降达到最大值。若地下水头低于黄土体表面，黄土未能完全饱和。随着水位的上升，土体逐渐饱和，黄土体中土压力不断增大，但是水头以上的黄土体不能产生增湿变形，此时稳定沉降较小；而地下水头过高时，超过了黄土体表面，则黄土体受到向上的
