

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.051

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 黄土高填方场地孔隙水压力的变化规律

于永堂<sup>1,2</sup>, 郑建国<sup>1,2</sup>, 张继文<sup>1,3</sup>, 梁小龙<sup>1</sup>

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 3. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安 710049)

**摘要:** 孔隙水压力是评价黄土高填方场地变形与稳定的重要参数。为探讨沟谷地形中黄土高填方场地孔隙水压力增长和消散规律, 对陕北某黄土高填方工程进行了施工期和工后期的孔隙水压力监测和分析。结果表明: 在分析超静孔隙水压力的增长和消散规律时, 须扣除因土层压缩和地下水位变化而引起的静水压力变化值; 孔隙水压力的增长和消散主要受地下水位和填土荷载的影响; 土方填筑快, 孔隙水压力增长快, 反之, 孔隙水压力增长慢, 甚至消散; 施工期的孔隙水压力增量与填土荷载增量呈近似线性关系, 多级荷载的孔隙水压力系数小于0.2, 土体始终处于稳定状态; 工后期孔隙水压力消散缓慢, 沉降达到完全稳定需要较长时间。

**关键词:** 黄土; 高填方场地; 孔隙水压力; 监测

**中图分类号:** TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)06-0010-07

## Variation behavior of pore water pressure in loess deep filled ground

YU Yongtang<sup>1,2</sup>, ZHENG Jianguo<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiwen<sup>1,3</sup>, LIANG Xiaolong<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Behavior and Treatment for Special Rocks and Soils, China Jikan Research Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 3. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China)

**Abstract:** Pore water pressure is an important parameter to evaluate the deformation and stability of loess deep filled ground. In order to explore the law of pore water pressure increase and dissipation in the loess deep filled ground in the valley terrain, the pore water pressure monitoring and analysis were carried out during and after the construction period of a loess deep filled project in Northern Shaanxi. The results show that when analyzing the law of the increase and dissipation of the excess pore water pressure, the change of the hydrostatic pressure caused by compression of the soil layer and the change of the groundwater level must be deducted; the increase and dissipation of pore water pressure are mainly affected by groundwater level and filling load; when the filling speed of earthwork construction is fast, the pore water pressure

**收稿日期:** 2020-05-27

**基金项目:** 国家自然科学基金(41790442); 陕西省“三秦学者”创新团队支持计划(2013KCT-13); 陕西省技术创新引导专项(基金)计划(2020CGHJ-002)

**作者简介:** 于永堂(1983-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程监测与测试、湿陷性土地基处理技术研究, E-mail: yuyongtang@126.com。

**Received:** 2020-05-27

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 41790442); Shaanxi “San Qin Scholar” Innovation Team (No. 2013KCT-13); Special (Fund) Program of Technology Innovation and Guidance of Shaanxi (2020CGHJ-002)

**Author brief:** YU Yongtang (1983-), senior engineer, PhD, main research interests: geotechnical engineering monitoring and testing technology, collapsible soil foundation treatment technology, E-mail: yuyongtang@126.com.

increases fast. On the contrary, the pore water pressure increases slowly or even dissipates; The increase in pore water pressure during construction period has an approximately linear relationship with the increase in filling load. The pore water pressure coefficient of multistage load is less than 0.2, and the soil is always in a stable state; the dissipation of pore water pressure is slow in the following stage of construction, and it takes a long time for the settlement to reach complete stability.

**Keywords:** loess; deep filled ground; pore water pressure; monitoring

黄土丘陵沟壑区以“削崩填沟”方式开发建设用地,形成了一些厚度达几十米甚至上百米的黄土高填方工程。这些黄土高填方工程的原始沟谷中常分布有一定厚度的冲洪积土和淤积土层,这些土层具有结构松散、含水量高等特点,在上部大厚度填土荷载作用下,容易产生较大的变形和较高的孔隙水压力。高孔隙水压力的存在,会使土中有效应力降低,进而控制和影响高填方场地的变形与稳定,因此,有必要在黄土高填方工程中进行孔隙水压力监测和分析。

学者们已对土体固结变形过程的孔隙水压力性状有了深入认识<sup>[1-3]</sup>,并通过现场的孔隙水压力监测资料,获得了边坡<sup>[4]</sup>、基坑<sup>[5]</sup>、路堤<sup>[6]</sup>、土石坝<sup>[7-9]</sup>、强夯地基<sup>[10]</sup>、真空预压地基<sup>[11-12]</sup>、堆载预压地基<sup>[13-14]</sup>、桩基<sup>[15]</sup>等工程中孔隙水压力的变化规律。然而,黄土高填方工程中孔隙水压力监测资料积累不多,研究报道较少。笔者基于陕北某黄土高填方工程试验场地孔隙水压力监测资料,分析了孔隙水压力增长和消散的规律和模式,探讨了孔隙水压力与固结沉降的关系,以期更深入地理解黄土高填方场地中孔隙水压力特征及其形成机制,为黄土高填方工程的填筑施工控制和工后变形稳定性评估提供参考依据。

## 1 孔隙水压力监测概况

### 1.1 试验场地概况

陕北某黄土高填方工程地处黄土丘陵沟壑区,是为开发城市建设用地而实施的“削崩填沟”造地工程。原始场地出露地层主要为第四系、新近系和侏罗系。第四系包括全新统冲洪积层粉土、上更新统马兰黄土、中更新统离石黄土;新近系岩性为棕红色、暗紫色红黏土;侏罗系岩性为砂岩、泥岩互层。在该工程场地内共选择了两处试验场地,其中试验场地Ⅰ位于填方区主沟下游的沟口区域,谷底原始地层自上而下依次为冲洪积土、砂泥岩;试验场地Ⅱ位于填方区主沟上游区域,谷底原始地层自上而下

依次为冲洪积土、淤积土、砂泥岩。原始场地的地下水类型主要分为第四系孔隙潜水和侏罗系基岩裂隙水两大类,第四系含水层主要为冲洪积层,基岩含水层主要为砂岩风化层。地下水补给来源为大气降水,地下水以泉水溢出、蒸发及人工开采等方式排泄。天然条件下,地下水自周边分水岭地带顺地势向沟谷径流汇集,转化为地表径流排泄于区外。

为了加速沟底原地基土层的固结,对原地基土采取强夯加固处理,并在沟底设置排水盲沟对地下水进行疏排。填筑体的填料主要来自黄土梁峁区挖填线以上各土层,主要为 $Q_3$ 黄土及古土壤、 $Q_2$ 黄土及古土壤,其中黄土层以粉土为主,古土壤层以粉质粘土为主,填筑体采用分层碾压施工,压实系数采用重型击实试验控制,要求大于0.93。

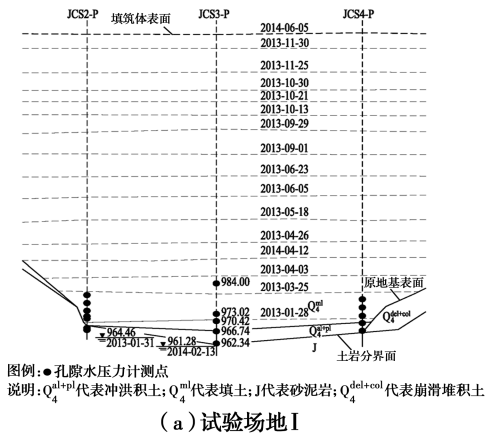
### 1.2 监测仪器与测点布置

孔隙水压力监测采用差动变压式孔隙水压力计,量程为0.6 MPa,分辨率为0.1 kPa,精度为0.1% F.S。试验场地内孔隙水压力监测点的布置情况如图1所示,图中给出了不同观测日期的填土层厚度变化。在孔隙压力监测点旁设置了分层沉降和地下水位监测点,孔隙水压力计在原地基和填筑体内的埋设方法如下:

1)原地基中的孔隙水压力计采取压入埋设法与钻孔埋设法相结合,埋设时机选择在原地基处理完成后,土方填筑施工前。当原地基为淤积土层时,钻孔易发生缩孔,采用压入埋设法,通过压杆将孔隙水压力计压至设计深度。当原地基为不易塌孔、缩孔的地层时,钻探成孔后将孔隙水压力计吊放至孔中预定深度,孔隙水压力计周围以中粗砂填充,相邻孔隙水压力计之间用黏土隔离,并对钻孔分层回填夯实。

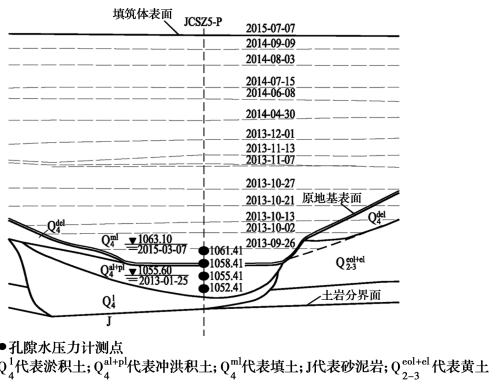
2)填筑体中的孔隙水压力计采取探井埋设法。埋设时在探井侧壁上开挖安装槽,将孔隙水压力计测头放置于安装槽中心,四周填充中粗砂,分层回填夯实探井,并将电缆引至探井上部预留段保护。当填土施工至安装下一个孔隙水压力计后,开挖探井引出已

埋设孔隙水压力计的电缆并观测数据。如此循环,直至达到设计高程,从而获得填筑施工全过程的孔隙水压力监测数据,具体实施方法可参见文献[16]。



图例: ● 孔隙水压力计测点  
说明:  $Q_4^{pl}$ 代表冲洪积土;  $Q_4^{del+col}$ 代表填土; J代表砂泥岩;  $Q_4^{del+col}$ 代表崩滑堆积土

(a) 试验场地 I



图例: ● 孔隙水压力计测点  
说明:  $Q_4^{pl}$ 代表淤积土;  $Q_4^{del+col}$ 代表冲洪积土;  $Q_4^{del+col}$ 代表填土; J代表砂泥岩;  $Q_{2-3}^{del+col}$ 代表黄土

(b) 试验场地 II

图 1 孔隙水压力监测点布设图

Fig. 1 Cross-sectional drawings of pore water pressure monitoring points

## 2 监测成果的分析与讨论

### 2.1 孔隙水压力观测值的处理方法

在高填方场地饱和土层中,孔隙水压力计测得的总孔隙水压力  $U$  包括两部分:静水压力  $u_w$  和由附加荷载引起的超静孔隙水压力  $u$ 。一般情况下可按式(1)计算超静孔隙水压力。

$$u = U - u_w \quad (1)$$

一方面,在大厚度填土荷载作用下,土体产生压缩沉降,使孔隙水压力计测头的埋设位置下移;另一方面,土方填筑施工引起沟谷填方区的地形地貌和地质条件改变,地下水位也可能发生变化。上述情况均会引起静水压力的变化,因此,需要考虑土体压缩和地下水位变化对超静孔隙水压力的影响。孔隙水压力计测头因埋深和地下水位变化引起的孔隙水压力变化计算简图见图 2,计算方法如下:

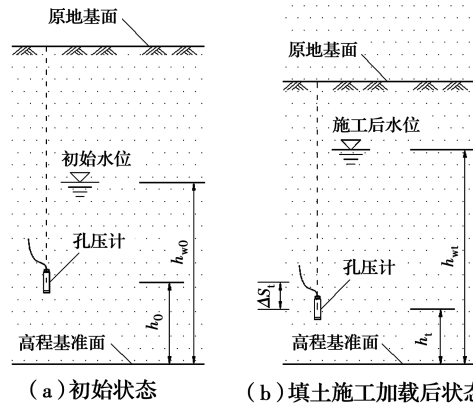


图 2 土体压缩和地下水位变化引起的孔压变化计算简图  
Fig. 2 Calculating diagram of pore water pressure affected by compression settlement and groundwater variation

$$\Delta u_{wt} = u_{wt} - u_{w0} \quad (2)$$

$$u_{wt} = \gamma_w (h_{wt} - h_t) \quad (3)$$

$$u_{w0} = \gamma_w (h_{w0} - h_0) \quad (4)$$

$$h_t = h_0 - \Delta s_t \quad (5)$$

式中:  $\Delta u_{wt}$  为孔隙水压力计测头因埋深和地下水位变化而引起的孔隙水压力变化量, kPa;  $u_{w0}$ 、 $u_{wt}$  分别为填土施工加载前、后的静水压力值, kPa;  $\gamma_w$  为水的重度, kN/m<sup>3</sup>;  $h_0$ 、 $h_t$  分别为填土施工加载前、加载后的孔隙水压力计埋设点高程, m;  $h_{w0}$ 、 $h_{wt}$  分别为填土施工加载前、后的地下水位高程, m, 通过地下水位观测确定;  $\Delta s_t$  为孔隙水压力计的下沉量, m, 通过分层沉降观测确定。将式(3)、式(4)带入式(5)可得

$$\Delta u_{wt} = \gamma_w [(h_{wt} - h_{w0}) + \Delta s_t] \quad (6)$$

式(6)即为孔隙水压力计测头因埋深和地下水位变化引起的孔隙水压力变化值。试验场地 II 中监测点 JCSZ5-P 位于饱和土层中的一个测点, 高程为 1 052. 41 m, 实测地下水位高程的变化范围为 1 055. 81~1 063. 10 m, 考虑土层压缩和地下水位变化前后的超静孔隙水压力曲线如图 3 所示。

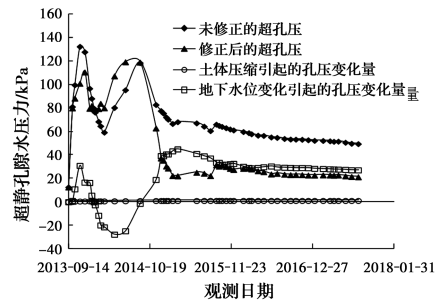


图 3 土体压缩和地下水位变化引起的孔压变化  
Fig. 3 Pore water pressure changes due to compression settlement and groundwater variation

图 3 中,地下水位变化引起的孔压变化值,负值表示水位下降,正值表示水位上升。在孔隙水压力观测时段内,孔隙水压力计测头的埋深变化引起的超静孔隙水压力变化值较小,该测点处最大影响值为 1.1 kPa,而地下水位变化引起的超静孔隙水压力变化值较大,该测点处的最大影响值为 45.1 kPa。由此可知,为获得较为真实的超静孔隙水压力增长和消散规律,应对孔隙水压力计测头埋深处的沉降变形和地下水位进行观测,以确定实际静水压力值。

### 2.2 孔隙水压力的变化特征

试验场地 I 在 2012 年 11 月原地基处理完成,2013 年 3 月开始进行填筑体施工,至 2014 年 11 月填筑达到设计标高。试验场地 II 在 2013 年 7 月原地基处理完成,2013 年 8 月开始进行土方填筑施工,至 2015 年 9 月填筑至设计标高。试验场地 I 和试验场地 II 中典型监测点不同深度处的孔隙水压力时程曲线分别如图 4、图 5 所示。根据前文所述的孔隙水压力修正方法,计算各测点的超静孔隙水压力值,并绘制超静孔隙水压力时程曲线,如图 6、图 7 所示。从图中可看出,在土方填筑施工前,原地基饱和和土中各测点的初始孔隙水压力值与静水压力基本相等,表明原地基处理时,由强夯引起的超静孔隙水

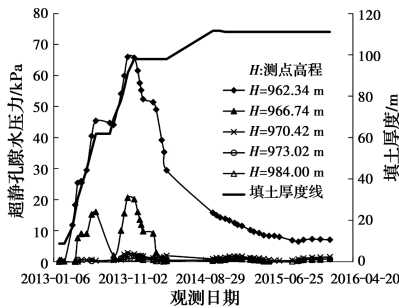


图 4 试验场地 I 中 JCS3-P 的孔隙水压力时程曲线  
Fig. 4 Curves of excess pore water pressure of monitoring point JCS3-P in site I

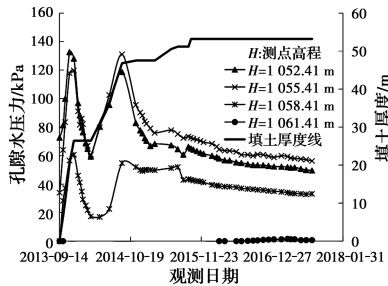


图 5 试验场地 II 中 JCSZ5-P 的孔隙水压力时程曲线  
Fig. 5 Curves of excess pore water pressure of JCSZ5-P in site II

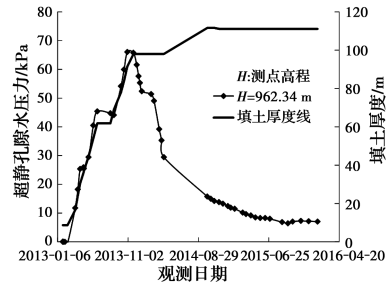


图 6 试验场地 I 中 JCS3-P 的超静孔隙水压力时程曲线  
Fig. 6 Curves of excess pore water pressure of monitoring point JCS3-P in site I

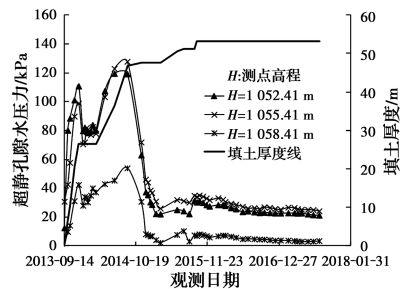


图 7 试验场地 II 中 JCSZ5-P 的超静孔隙水压力时程曲线  
Fig. 7 Curves of excess pore water pressure of monitoring point JCSZ5 in site II

压力已基本消散完毕。各测点的孔隙水压力总体趋势为:荷载增大,孔隙水压力增大;停荷恒载,孔隙水压力消散。图 4 中位于地下水位以下的饱和土层中测点高程  $H=962.34\text{ m}$  处的孔隙水压力计埋设后即开始增长,其增长和消散速率与土方填筑速率有良好的相关性。在施工时段,土方填筑速率快时,孔隙水无法在较短的时间内全部挤出,孔隙水压力迅速增大,经连续施工后达到孔隙水压力峰值;土方填筑速率慢时,超静孔隙水压力增长变缓甚至发生消散;在临时停工时段和工后时段,超静孔隙水压力均表现出先快速消散后缓慢消散的特点,这符合超静孔隙水压力的一般增长和消散规律。图 4 中监测高程为 966.74 m 的测点,位于地下水位(水位变化范围:961.28~964.46 m)之上,初期并未观测到孔隙水压力,但随着填土厚度增大,上覆荷载增加,土体逐步压缩,土中孔隙减小,土的含水率在远离地下水位面深度处变化不大,但受地下水位以上毛细水上升高度影响,在临近地下水位面的深度处有所增加,均会使土的饱和度逐步增大。当土的饱和度增大至一定程度后,土的变形趋势会引起类似饱和土的超静孔隙水压力<sup>[17]</sup>。当观测到孔隙水压力后,其增长和消散模式受土方填筑施工的影响明显,其变化过程表现出增长快、消散快的特点。选用的孔隙水压

力计测头采用粗孔滤水石,根据文献[18]可知,该型孔隙水压力计在非饱和土中的观测值应是孔隙气压力与孔隙水压力的综合压力,与土体完全饱和后的孔隙水压力不同。因此,不能按饱和土理论将该孔隙水压力观测值用于分析计算地基固结度或评估地基稳定性。此外,图 4 中多个测点在整个施工期和工后期的孔隙水压力观测值几乎一直是 0,处于无变化状态。这是因为,当孔隙水压力测点位于地下水水位毛细水上升高度影响范围之外时,由于地表水下渗量小,填土的含水率变化较小,在饱和度较低的情况下,无法引起类似饱和土的超静孔隙水压力。

### 2.3 孔隙水压力观测结果反映的地基稳定状态

根据土力学理论,在平面应变状态下,当地基处于稳定状态时,饱和黏性土中孔隙水压力增量可表示为<sup>[19]</sup>

$$\Delta u = K'_u \Delta p \quad (7)$$

式中: $\Delta u$  为孔隙水压力增量,考虑黄土高填方场地的孔隙水压力受地下水位变动和土层压缩变形影响大,取为超静孔隙水压力,kPa; $K'_u$  为单级荷载孔隙水压力系数,与测点的附加应力系数和孔隙水压力系数有关; $\Delta p$  为荷载增量,取近似等于单位面积上土柱的重量,即  $\Delta p = \gamma \Delta h$ ,其中  $\gamma$  为填土重度,kN/m<sup>3</sup>,根据 JCS-3 测点旁 1.8~97.5 m 深度范围内,共 58 组土样的密度试验结果,取填土重度平均值  $\gamma = 19.88$  kN/m<sup>3</sup>;  $\Delta h$  为填土厚度增量,m。测点 JCS3-P 处土方填筑速率为 0.24~0.66 m/d,  $K'_u = 0.03 \sim 0.08$ ; 测点 JCSZ5-P 处土方填筑速率为 0.10~0.40 m/d,  $K'_u = 0.05 \sim 0.10$ 。

当分析土方连续填筑多级加载时,多级荷载孔隙水压力系数  $K_u$  值可由式(8)计算。

$$K_u = \sum \Delta u / \sum \Delta p \quad (8)$$

工程上常利用孔隙水压力累计增量  $\sum \Delta u$  与荷载累计增量  $\sum \Delta p$  的关系来判断地基的稳定状态。当地基处于稳定状态时,孔隙水压力累计增量与填土荷载累计增量近似呈线性关系,当地基处于失稳状态时,二者的关系曲线会出现非线性转折<sup>[19]</sup>。孔隙水压力累计增量  $\sum \Delta u$  与填土荷载累计增量  $\sum \Delta p$  间的关系曲线如图 8、图 9 所示。

图 8 中测点 JCS3-P 位于主沟锁口坝边坡区域,图 9 中测点 JCSZ5-P 位于沟谷中游,由监测点在饱和土层中的  $\sum \Delta u$ - $\sum \Delta p$  关系可知,孔隙水压力累计增量与填土荷载累计增量之间近似呈现线性关系。根据斯开普顿(Skempton)提出的孔隙水压力理论,

实际监测中,为保证工程安全,一般控制荷载孔隙水压力系数  $K_u < 0.6$ <sup>[20]</sup>。各监测点的多级荷载孔隙水压力系数  $K_u$  值均小于 0.2,地基沉降变形也未发生突变,高填方体(含边坡)在填筑施工全程处于稳定状态。

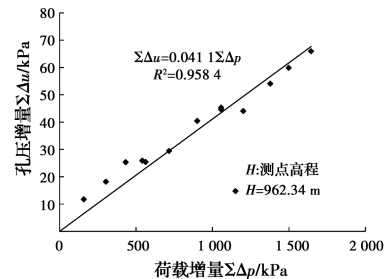


图 8 试验场地 I 中监测点 JCS3-P 的  $\sum \Delta u$  与  $\sum \Delta p$  关系曲线  
Fig. 8 Relationship between  $\sum \Delta u$  and  $\sum \Delta p$  of monitoring position of JCS3-P in the test site I

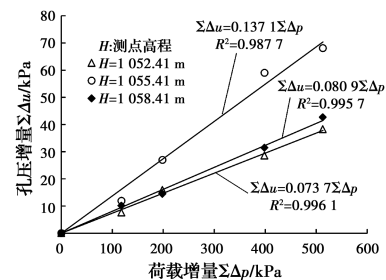


图 9 试验场地 II 中监测点 JCSZ5-P 的  $\sum \Delta u$  与  $\sum \Delta p$  关系曲线  
Fig. 9 Relationship between  $\sum \Delta u$  and  $\sum \Delta p$  of monitoring position of JCSZ5-P in the test site II

### 2.4 孔隙水压力增长和消散引起的原地基沉降变形分析

黄土高填方原地基是由上部非饱和土和下部饱和土构成的特殊地质体。原地基的上覆填土荷载将由水、气和土骨架共同承担,其沉降变形机制复杂与土中孔隙水压力、水分变化、土骨架结构、孔隙气的演化规律等有关,主要从孔隙水压力增长和消散的角度对该过程进行分析。原地基饱和黄土的固结与一般土体的固结过程类似,非饱和黄土的孔隙中同时包含有水和气,在上覆填土荷载作用下,土中的水和气要产生相互作用,由于上覆填土荷载大,加之气体的压缩性高,部分气体将溶于水<sup>[21]</sup>。此外,还有部分气体将在分层填筑施工过程中排出,在施加荷载瞬间,孔隙瞬间减小,使得沉降变形迅速增大。试验场地 II 中典型监测点 JCSZ5-P 的填土厚度-超静孔隙水压力-沉降-时间关系曲线如图 10 所示。原地基饱和土的孔隙中仅有水存在,在施工期加载条件下,土骨架和孔隙水共同承担上覆填土荷载,此

时超静孔隙水压力增长较快。在土方填筑施工过程中,饱和土中孔隙水也会发生排出,地基土排水固结,若增加的填土荷载全部传递至原地基,则增加的上覆填土荷载将由土骨架和孔隙水共同承担,且以土骨架承担为主。土中有效应力的增大必然产生较大的压缩变形,此时原地基沉降在施工期增大较快。在工后期恒载条件下,原地基冲洪积、淤积土的孔隙比减小,土层渗透性降低,土中孔隙水排出、超静孔隙水压力消散需要更长时间,有效应力增大也随之放缓,加之土体模量增大,超静孔隙水压力消散变慢,沉降速率逐渐变小。2015年9月至2017年8月共24个月,试验场地的监测点JCSZ5-P在高程1 052.41、1 055.41、1 058.41 m处,超静孔隙水压力消散了3.5~9.9 kPa,此时原地基土层的压缩沉降量仅为1.0 mm(原地基土层厚度11.6 m)。从图中超静孔隙水压力消散的趋势情况判断,工后期超静孔隙水压力完全消散将超过1年,且时间越久消散速率越慢,原地基土层达到沉降完全稳定需要耗费较长时间。

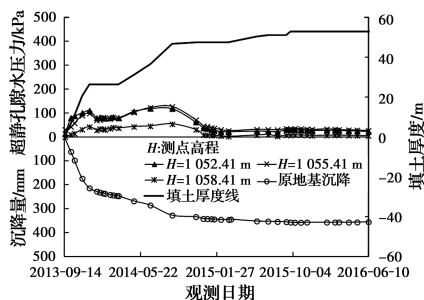


图10 原地基超静孔隙水压力、沉降量、填土厚度与时间关系曲线

Fig. 10 Curves of excess pore water pressure, settlement and filling thickness vs. time of original ground

### 3 结论

1) 土层压缩和地下水位变化对孔隙水压力的影响可达46.2 kPa,在分析黄土高填方场地的超静孔隙水压力增长和消散规律时,须扣除因土层压缩和地下水位变化而引起的孔隙水压力变化值。

2) 黄土高填方场地的孔隙水压力增长和消散主要受地下水位和填土荷载影响,若土方填筑快,饱和土中的孔隙水压力增长较快;反之,孔隙水压力增长变缓甚至消散。

3) 孔隙水压力的增长速率与填筑速率有良好的正相关性,土方填筑速率为0.10~0.66 mm/d时,单级荷载的孔隙水压力系数 $K_u=0.01\sim0.25$ ;多级

荷载的孔隙水压力系数 $K_u$ 值均小于0.2。

4) 沟口边坡区域及沟中部监测点的孔隙水压力累计增量 $\sum\Delta u$ 与填土荷载累计增量 $\sum\Delta p$ 之间呈近似线性关系,施工全程处于安全稳定状态。

5) 原地基饱和土中的超静孔隙水压力消散缓慢,从现有实测数据的发展趋势判断,原地基饱和土层达到沉降稳定将超过1年。

### 参考文献:

- [1] LOVISA J, READ W W, SIVAKUGAN N. Calculating  $C_v$  based on non-uniform initial excess pore pressure [J]. *Géotechnique*, 2012, 62(8): 741-748.
- [2] ZENG L L, HONG Z S, CUI Y J. On the volumetric strain-time curve patterns of dredged clays during primary consolidation [J]. *Géotechnique*, 2015, 65(12): 1023-1028.
- [3] ZENG L L, HONG Z S. Experimental study of primary consolidation time for structured and destructured clays [J]. *Applied Clay Science*, 2015, 116/117: 141-149.
- [4] 缪海滨, 王建国, 费晓欧, 等. 基于孔隙水压力消散的排土场边坡动态稳定性研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(9): 2302-2306.
- [5] MIAO H B, WANG J G, FEI X O, et al. Study on dynamic stability of dump slope based on the dissipation of pore pressure [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(9): 2302-2306. (in Chinese)
- [6] YING H W, XU D Y, ZHU C W. Experiment study on wave induced excessive pore pressure around near-sea foundation pit [M]//Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Cham: Springer International Publishing, 2018: 1072-1076.
- [7] GLENDINNING S, HUGHES P, HELM P, et al. Construction, management and maintenance of embankments used for road and rail infrastructure: implications of weather induced pore water pressures [J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(5): 799-816.
- [8] PAGANO L, FONTANELLA E, SICA S, et al. Pore water pressure measurements in the interpretation of the hydraulic behaviour of two earth dams [J]. *Soils and Foundations*, 2010, 50(2): 295-307.
- [9] GUO X, BAROTH J, DIAS D, et al. An analytical model for the monitoring of pore water pressure inside embankment dams [J]. *Engineering Structures*, 2018, 160: 356-365.
- [9] RASSKAZOV L N, YADGOROV E K, NIKOLAEV

- V B. Field observations of soil settlements, displacements, and pore pressure in dams [J]. *Power Technology and Engineering*, 2018, 51(6): 611-620.
- [10] 祝介旺, 李新年, 王思强, 等. 黄河冲洪积土强夯作用下孔隙水压力增长与消散规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(3): 500-504.
- ZHU J W, LI X N, WANG S Q, et al. Increasing and dissipation regularity of the pore water pressure under the dynamic compaction action to the alluvial and diluvium soil of Yellow River [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(3): 500-504. (in Chinese)
- [11] ZHUANG Y, CUI X Y. Evaluation of vacuum preloading with vertical drains as a soft soil improvement measure [J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2016, 53(3): 210-217.
- [12] YE G B, XU Y, ZHANG Z. Performance evaluation of PVD-reinforced soft soil with surcharge and vacuum preloading [J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, 16(4): 421-433.
- [13] 张功新, 莫海鸿, 董志良. 孔隙水压力测试和分析中存在的问题及对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(Sup2): 3535-3538.
- ZHANG G X, MO H H, DONG Z L. Issues and countermeasures for measurement and analysis of pore water pressure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Sup2): 3535-3538. (in Chinese)
- [14] 娄炎, 何宁. 地基处理监测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- LOU Y, HE N. Monitoring technology for foundation treatment [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [15] WANG Y H, LIU X Y, ZHANG M Y, et al. Field test of excess pore water pressure at pile-soil interface caused by PHC pipe pile penetration based on silicon piezoresistive sensor [J]. *Sensors*, 2020, 20(10): 2829.
- [16] 张继文, 于永堂, 郑建国, 等. 与黄土高填方同步施工的监测仪器先埋后引式分步埋设法: CN103410181A [P]. 2013-11-27.
- ZHANG J W, YU Y T, ZHENG J G, et al. Burying-before-guiding type step-by-step burying method for monitoring instruments in synchronous construction with loess high fill: CN103410181A [P]. 2013-11-27. (in Chinese)
- [17] 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 G X, LI X M. Permeability and excess pore water pressure in soil mechanics [J]. *Geotechnical Engineering World*, 2009, 12(4): 11-12. (in Chinese)
- [18] 司洪洋. 土石坝施工期的孔隙水压力观测: 关于《土石坝安全监测技术规范 SL60—94》的讨论意见[J]. *大坝观测与土工测试*, 2000(4): 1-4.
- SI H Y. Pore-pressure observation during construction of earth rockfill dams [J]. *Dam Observation and Geotechnical Tests*, 2000(4): 1-4. (in Chinese)
- [19] 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 L Z. Field monitoring technology of geotechnical engineering and its application [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000. (in Chinese)
- [20] 王祥. 粉喷桩在深厚软基处理中的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(4): 513-515.
- WANG X. Experiment study on treating deep soft soil with dry jet mixing pile [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 513-515. (in Chinese)
- [21] 葛苗苗, 李宁, 张炜, 等. 黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(3): 745-753.
- GE M M, LI N, ZHANG W, et al. Settlement behavior and inverse prediction of post-construction settlement of high filled loess embankment [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(3): 745-753. (in Chinese)

(编辑 黄廷)