

# 黑龙江干流工程吹填堤防固结特性及固结沉降研究

Study on the Consolidation Characteristics and Consolidation Settlement of Blow-fill Embankment in Heilongjiang Main Stream Project

魏平<sup>1</sup>, 何君<sup>1</sup>, 盛园园<sup>2</sup>, 张佳<sup>3</sup>, 郑华<sup>3</sup>

(1. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250100; 2. 山东省水文中心, 山东 济南 250002;  
3. 中国建筑土木建设有限公司, 北京 100071)

**摘要:** 吹填土固结特性及固结沉降对地基的稳定性具有重要影响。以黑龙江干流工程吹填砂性土为研究对象, 对现场土样进行了压缩试验和剪切试验, 研究吹填土在排水固结过程中的沉降变化规律。结果表明: 吹填砂性土在高含水率状态下会发生较大的沉降变形, 随着含水率的降低沉降变形会逐渐减小; 围压能够改变土体原来的内部结构, 使土颗粒间的排列发生变化, 并且围压越大, 土体的塑性破坏应力越大; 吹填砂性土体的沉降变形主要是由土体孔隙水排出引起的, 砂性土在高含水率状态下具有较大的压缩变形, 导致土体产生过大的沉降变形。

**关键词:** 吹填堤防; 砂性土; 固结特性; 固结沉降

中图分类号: TU43 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2024)05-0071-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.013

WEI Ping<sup>1</sup>, HE Jun<sup>1</sup>, SHENG Yuanyuan<sup>2</sup>, ZHANG Jia<sup>3</sup>, ZHENG Hua<sup>3</sup>

(1. Shuifa Planning & Design Co., Ltd., Ji'nan 250100, China; 2. Hydrological Center of Shandong Province, Ji'nan 250002, China; 3. China Construction Civil Engineering Co., Ltd., Beijing 100071, China)

**Abstract:** Blow-fill soil consolidation characteristics and consolidation settlement have an important impact on the stability of the foundation. In this paper, taking the sandy blow-fill soil of Heilongjiang main stream project as the research object, compression test and shear test were carried out on the soil samples on the site, and at the same time, the change rule of settlement of blow-fill soil in the process of drainage and consolidation was studied. The results show that the settlement deformation of blow-fill sandy soil will be larger in the state of high water content, and the settlement deformation will be gradually reduced with the reduction of water content; the perimeter pressure can change the original internal structure of the soil body, so that the arrangement of the soil particles changes, and the larger the perimeter pressure is, the larger the plastic destructive stress of the soil body is; the settlement deformation of the blow-fill sandy soil is mainly caused by the pore water drainage of the soil body, and the sandy soil has larger compression deformation in the state of high water content, the soil samples have larger compression deformation, and the sandy soil has larger compression deformation in the process of drainage consolidation in the dry stream project. The sandy soil has large compression deformation under high water content, which leads to excessive settlement deformation of the soil body.

**Keywords:** blow-fill embankment; sandy soil; consolidation characteristics; consolidation settlement

作者简介: 魏平(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 水利工程规划设计。

通信作者: 张佳(1986—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程施工管理。

收稿日期: 2024-07-03

## 岩土力学

### 0 引言

吹填技术以其适用范围广、工效高、材料来源广泛、工程造价低等独特的优势,在围海造陆、堤防等工程中得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>,然而,由于吹填材料多为疏松颗粒物,堤防在建设完成后的固结过程及其引发的固结沉降成为影响堤防结构稳定性的重要因素<sup>[3-4]</sup>。近年来,随着工程需求的不断增加,如何有效预测和控制吹填堤防的固结沉降问题,已成为工程技术人员关注的焦点。詹良通等<sup>[5]</sup>利用沉积柱试验研究了浙江海域淤泥的自重沉积固结特性,探讨了泥水混合物初始密度、海水中阳离子类型以及浓度对自重沉积固结特性的影响;雷华阳等<sup>[6]</sup>对天津滨海中心渔港地区真空预压处理和未处理两种类型吹填场地的地基土进行了一系列一维压缩次固结试验;陈正汉等<sup>[7]</sup>采用非饱和土直剪仪做了三组直剪试验和两组固结试验,对原状黄土的变形、强度和水量变化特性进行了分析;李涛等<sup>[8]</sup>以有效度最大为准则,建立了双曲线法和剩余沉降对数法的组合模型,并通过实例分析了该模型在推算沉降时的可行性和有效性,以及其中单一预测方法的加权系数时变特性;曾芳金等<sup>[9]</sup>采用室内模型试验加固后土体的含水率以及剪切强度进行了研究分析,得出真空-堆载联合预压技术对吹填土具有很好的加固效果;傅英坤<sup>[10]</sup>通过固结试验研究了原样淤泥及改性淤泥的固结效果,得出随着混凝土弃渣掺量的合理增加,可有效提高改性淤泥剪切强度。尽管国内外学者在吹填堤防的固结特性与沉降行为研究方面已取得了许多成果,但在应对不同填料类型和复杂工况下的固结沉降预测方面仍存在一定不足。因此,进一步研究吹填堤防的固结特性,揭示其固结沉降规律,并探索有效的控制措施,具有重要的理论意义和工程应用价值。

黑龙江省黑龙江干流堤防工程第二十二标段,抚远县抚远镇堤防工程(0+804~2+600)为吹填筑堤范围。吹填过程中,砂性土经历颗粒水中运移,颗粒在水流作用下冲撞、挤压,静水沉降和固结排水等阶段,这与摊铺、碾压的填筑方式存在较大的区别。为了更好地了解砂性土的固结变形特征,对黑龙江干流吹填堤防砂性土进行固结试验,以期

吹填堤防地基处理和工程施工提供参考。

### 1 试验概况

#### 1.1 试件制备

试验材料取自黑龙江省黑龙江干流堤防工程第二十二标段砂性土。压缩试验在试验过程中不同含水率的试样制备通过控制总体积(固相+液相)相等的方法,计算每种初始含水率下的所需试样质量填充到环刀内(环刀直径为61.8 mm,高为20 mm);三轴剪切试验试样直径61.8 mm,高度150 mm;排水固结试验试样尺寸为直径300 mm、高度355 mm的圆柱。

#### 1.2 试验设备

压缩试验采用固结(压缩)试验仪,三轴剪切试验采用三轴蠕变试验机,排水固结试验采用排水固结试验仪。

#### 1.3 试验步骤及方案

(1) 压缩试验 压缩试验恒荷载应力为25、50、100、200 kPa以及荷载应力增量为25 kPa条件下,800 min内初始含水率为17.8%、25.6%、30%和34%的砂性土体一维压缩变形量的变化规律以及恒荷载应力为25、50、100、200 kPa以及荷载应力增量为25 kPa条件下,初始含水率为17.8%、25.6%、30%和34%的砂性土体一维压缩变形量的变化规律。

(2) 三轴剪切试验 通过开展三轴试验,研究吹填砂性土剪切过程中变形及抗剪强度指标的变化规律。试验考虑初始含水率分别为17.8%、25.6%、30%和34%时对吹填砂性土变形和强度性能的影响。对土体在围压为25、50、100、200 kPa下进行三轴剪切试验(UU)。

(3) 排水固结试验 为了研究吹填砂土堤防在排水固结过程中的沉降变形,考虑了自重与外加荷载条件对砂土吹填后的土体排水固结特性影响<sup>[11-12]</sup>。具体为四种不同工况:自重作用下排水;25 kPa外加荷载下排水;50 kPa外加荷载下排水;100 kPa外加荷载下排水。

试验过程中对于每种工况,沿试样高度分三层埋设了沉降板,通过位移传感器实时监测土体排水固结过程中的沉降变形。试样在固结过程中的排水量进行定期称量,记录排出水的质量。

## 2 试验结果分析

### 2.1 压缩试验

#### 2.1.1 压缩变形量的变化规律

由图 1 可知,施加恒荷载 25、50、100、200 kPa,筑堤砂土的变形分别在 200、400、600、800 min 时变形趋于稳定。在荷载应力增量为 25 kPa 条件下,变形增量则随荷载增加逐渐增大,并且土体初始含水率越高,压缩变形量越大,表明吹填砂性土在高含水率状态下会发生较大的沉降变形,随着含水率的降低沉降变形会逐渐减小。

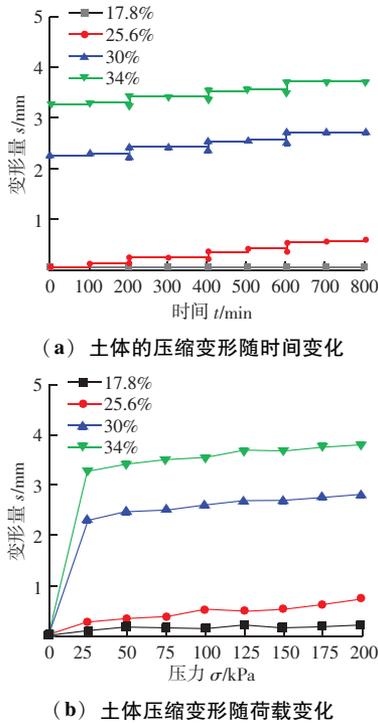


图 1 不同初始含水率土体压缩变形量变化曲线  
Fig. 1 Variation curve of compressive deformation of soil with different initial water content

#### 2.1.2 压缩过程孔隙比的变化规律

图 2 为不同初始含水率土体压缩过程孔隙比 - 压力变化曲线。对于不同初始条件的筑堤砂土试样的孔隙比 - 压力变化曲线的变化规律基本一致,即在试验荷载范围内,随着荷载应力的增加土体孔隙比逐渐减小,并且初始含水率越高,土体在相同压力下的孔隙比越大。孔隙比变化由试样初始含水率决定,当土体初始含水率较高时(30%以上),土体孔隙比在第一级压力为 25 kPa 作用下的下降幅度越大,这表明吹填后的砂性土处于高含水率状态下具有较

大的压缩变形,土体产生过大的沉降变形。随着含水率的降低,土体孔隙比随压力增加变化幅度较小,表明土体进入沉降准稳定状态。

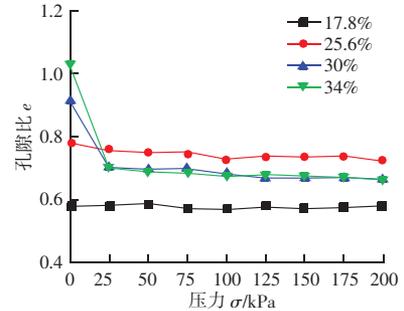


图 2 不同初始含水率土体压缩过程孔隙比 - 压力变化曲线  
Fig. 2 Pore ratio-pressure change curve during compression of soil with different initial water content

#### 2.1.3 压缩系数变化规律

通过土体压缩过程中的孔隙比与压力变化关系曲线可以得到土体在各级压力下的压缩系数,图 3 为土体在 0~25 kPa 压力下的压缩系数随初始含水率变化曲线。从图 3 可知,在第一级压力下初始含水率对土体的压缩系数影响较大,即随着初始含水率的不同具有不同斜率的线性变化趋势。当土体含水率达到 30% 时,土体压缩系数随初始含水率增加呈线性增大。

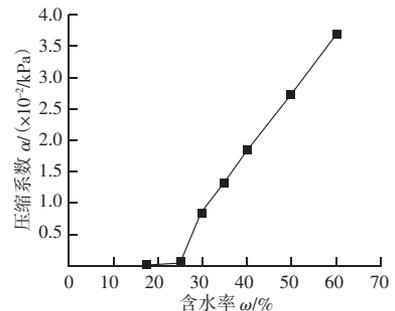


图 3 不同压力下的压缩系数随初始含水率变化曲线  
Fig. 3 Variation curve of compression coefficient with initial moisture content at different pressures

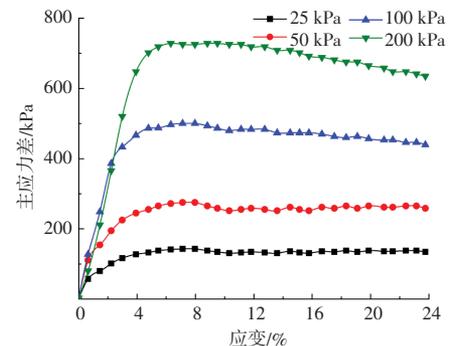
## 2.2 三轴剪切试验

### 2.2.1 应力 - 应变关系

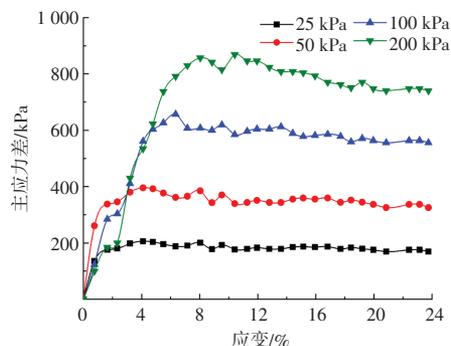
吹填土料室内三轴剪切试验,试样直径为 61.8 mm,高度 150 mm,剪切速率为 1%/min,施加 25、50、100、200 kPa 四级围压进行剪切,应力 - 应变关系如图 4 所示。不同含水率土体在三轴应力状态下的应力 - 应变关系具有不同的弹塑性变化形态,初始含水率为 8.8% 时表现为应变硬化型曲线;随着含水率

## 岩土力学

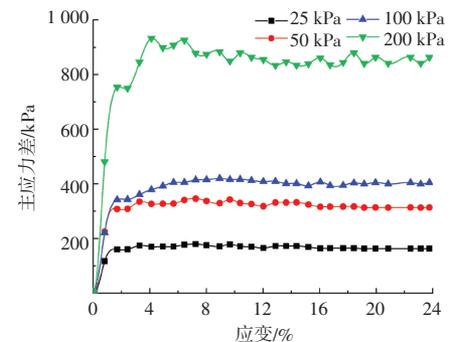
的增加, 逐渐变为应变硬化型曲线。土体在剪切变形过程中, 偏应力随围压的增加而增大, 最终破



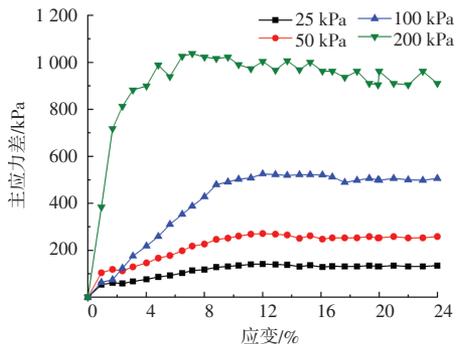
(a) 含水率 17.8%



(b) 含水率 25.6%



(c) 含水率 30%



(d) 含水率 34%

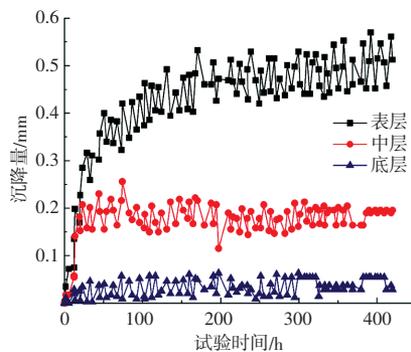
图4 应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain relationship curve

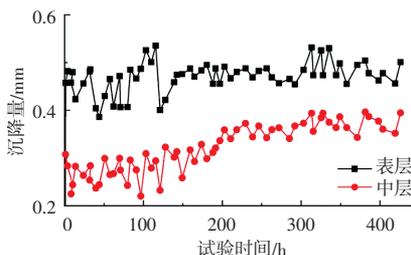
坏应力也随之增加。说明围压能够改变土体原来的内部结构, 使土颗粒间的排列发生变化, 在某种程度上抑制了土体结构发生膨胀软化效应, 提高土颗粒间相互作用的强度效应, 并且围压越大, 这种相互作用的强度效应越大, 从而提高土体的塑性破坏应力。

### 2.3 排水固结试验

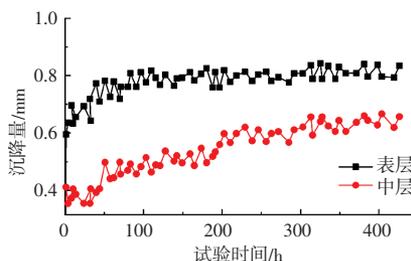
如图5所示, 吹填后的砂性土体在固结过程中随着水分的排出产生了沉降变形, 沿土体不同高度沉降不同, 表层土体沉降量最大, 中层次之, 底部沉降最小, 最终的沉降变形达到一个准稳定状态; 并且随着上覆荷载的增加沉降变形逐渐增大, 原因是荷载对土体产生了附加应力, 使土颗粒重新排列, 荷载越大, 孔隙水压力消散程度越大, 土颗粒间接触越紧密, 导致沉降变形增大。



(a) 自重



(b) 25 kPa



(c) 50 kPa

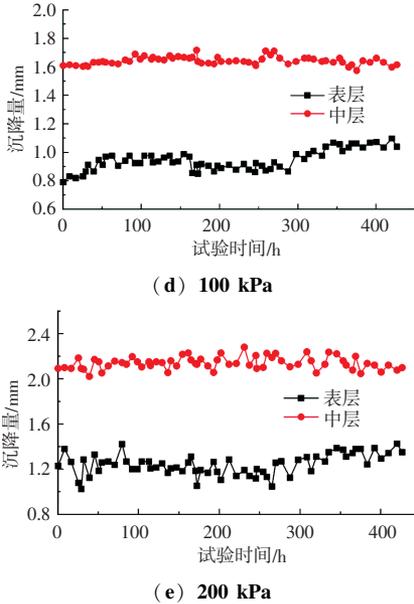


图 5 吹填砂性土沉降变形曲线

Fig. 5 Settlement and deformation curve of blown sandy soil

试样在固结过程中的累积排水量如图 6 所示。采用人工抽气排水法，土体累积排水量随时间呈现增长的变化，试样在荷载情况下，最终的排水总量相差不多，平均为 4 000 mL 左右，试样在无荷载情况下 (0 kPa) 的排水量稍有增加。说明吹填砂性土体的沉降变形主要是由土体孔隙水排出引起的。

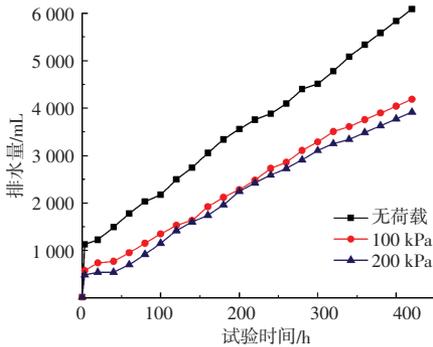


图 6 吹填砂性土固结过程中累积排水量随时间变化

Fig. 6 Variation of cumulative drainage with time during consolidation of blow-filled sandy soil

### 3 结论

对黑龙江干流工程吹填砂性土固结特性及固结沉降进行了试验，研究了砂性土固结的变形特征，

主要结论如下：

(1) 吹填砂性土在高含水率状态下会发生较大的沉降变形，随着含水率的降低沉降变形会逐渐减小。

(2) 围压可提高土颗粒间相互作用的强度效应，并且围压越大，土体的塑性破坏应力越大。

(3) 吹填砂性土体的沉降变形主要是由土体孔隙水排出引起的，试验荷载范围内，土体孔隙比与荷载应力成反比，且砂性土在高含水率状态下具有较大的压缩变形，导致土体产生过大的沉降变形。

### 参 考 文 献

- [1] 周坤, 丰土根. 海堤淤泥与海砂填筑料固结特性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (1): 47-51.
- [2] 陈科平, 任新开, 贺勇, 等. 吹填土砂井地基离心模型试验研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2021, 52 (4): 1222-1231.
- [3] 杨爱武, 杨少坤, 张振东. 基于不同卸荷速率与路径影响下吹填土力学特性研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41 (9): 2891-2900, 2912.
- [4] 张云鹏, 王宗琴, 宗梦繁, 等. 连续排水边界下成层陆域吹填地基一维固结解析解 [J]. 地质科技通报, 2023, 42 (3): 38-45.
- [5] 詹良通, 童军, 徐洁. 吹填土自重沉积固结特性试验研究 [J]. 水利学报, 2008, 39 (2): 201-205.
- [6] 雷华阳, 冯双喜, 郝琪, 等. 吹填土热力固结和强度特性试验研究 [J]. 天津大学学报, 2020, 53 (1): 17-26.
- [7] 陈正汉, 扈胜霞, 孙树国, 等. 非饱和土固结仪和直剪仪的研制及应用 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (2): 161-166.
- [8] 李涛, 杨腾宇, 刘波, 等. 基于 VMD-GRU 的地铁隧道台阶法施工地表沉降预测 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (7): 48-54.
- [9] 曾芳金, 石常鑫, 符洪涛, 等. 匀速等量堆载的真空联合堆载预压下吹填土工程特性试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18 (15): 137-142.
- [10] 傅英坤. 滨海港口吹填淤泥排水固结技术研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (2): 57-61.
- [11] 杨怡青, 李传勋. 自重固结下的吹填场地桩基负摩阻力解析解 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (1): 111-117.
- [12] 雷华阳, 冯双喜, 郝琪, 等. 吹填土热力固结和强度特性试验研究 [J]. 天津大学学报, 2020, 53 (1): 17-26.