

# 地下水位波动条件下粉土地基变形特性试验研究

杨 希<sup>1</sup>, 雷学文<sup>1</sup>, 孟庆山<sup>2</sup>, 秦 月<sup>2</sup>

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 针对我国沿海城市地下水波动引发地面沉降灾害频发的特点, 以上海第四纪沉积粉土为研究对象, 通过室内模型试验模拟地下水位波动和建筑物荷载变化, 取得了模型箱内粉土地基变形实测数据。在此基础上分析了在水位波动与荷载变化耦合作用下粉土地基的变形特点, 获取了水位波动下粉土地基变形及其与荷载、孔隙比、压缩模量、渗透系数间的相关关系。研究结论可为城市地面沉降危害的防治提供参考。

**关键词:** 粉土地基; 水位波动; 变形; 孔隙比; 压缩模量; 渗透系数

中图分类号: TU447; TU411 文献标志码: A

地面沉降是由于地下松散地层固结压缩, 导致地壳表面标高降低的一种局部下降运动。截至 2010 年, 长三角地区因地面沉降所造成的直接和间接损失已经达到 3 150 亿元, 上海地面每沉降 1 mm 就会造成 1 000 万元经济损失。我国东部沿海城市面临着地面沉降和海平面上升的双重压力, 两者耦合作用在我国沿海地区已引起一系列环境效应和灾害, 严重制约着我国沿海地区经济的繁荣和社会的可持续发展。

开采地下水可能导致地面沉降, 在地面沉降控制中, 过度开采或严格禁止开采地下水的做法都不科学, 应根据可持续发展战略确定合理的控制开采量。孟庆山、陈能远等探讨了地下水位波动及工程施工荷载作用下非饱和软土的变形强度规律以及淤泥质土释水后变形发展的过程和加荷后土样力学特性方面的变化<sup>[1-2]</sup>。王秀艳等研究超固结黏性土变形特征并确定了可持续开采水位降的室内试验方法<sup>[3]</sup>。就目前情况而言, 现有的理论和试验研究很难用标准的原理和模型统一起来。大多数学者的研究是关于地下水的下降而引发的地面沉降, 且以软土为研究对象。而关于处在地下水位波动带内的建筑物地基沉降问题目前研究较少, 缺乏可靠的研究手段和方法, 现行的规范也未就地下水位变化引起的建筑物地基沉降变形加以说

明。本文以上海地表广泛分布的第四纪沉积粉土为研究对象, 通过模型试验和常规土工试验相结合的方法, 研究水位反复波动引起的粉土地基沉降变形现象, 以及处在水位波动带内的粉土地基在减饱和-增饱和过程中的沉降变形及其与荷载、孔隙比、固结度、压缩模量之间的相关关系, 为城市地面沉降危害防治提供必要的参考依据。

## 1 试验土样

本次试验研究用土选用长江冲积平原粉土, 主要为新近沉积层和第四纪全新统沉积层, 由粉粒、细砂颗粒组成, 亲水矿物含量较少, 孔隙比较大, 所含水分以自由水为主。原状土样取自距地表 5~10 m 深度, 取样间隔 1 m, 共 6 组。常规土工试验得出的土样基本参数如表 1 所示。

## 2 试验方案

### 2.1 试验准备

试验设备采用特制的带有水位指示计的方形模型箱, 长、宽均为 1.0 m, 高为 2.0 m, 四周用有机玻璃和槽钢支撑, 箱体下部设有注水装置和排水装置, 注水装置外接常水头供水箱, 模型箱体顶部安装千斤顶用于

收稿日期: 2011-09-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40902092)“沿海地下水位波动带内软土性状与变形机理研究”

作者简介: 杨 希, 男, 硕士研究生, 主要从事软土地基和地下结构方面研究。E-mail: darkranger163@163.com

给土样施压。

表1 粉土物理性质指标

试样	天然密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	天然含 水率/%	塑限/ %	液限/ %	塑限 指数	孔隙 比	凝聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )
平均值	1.82	26.10	26.38	35.05	9.50	0.87	11.75	23

模型试验用土样采用扰动粉土土样,待土样自然风干捣碎后过0.5 mm筛,按照25%含水率加水闷湿24 h,以0.1 m为一层,将湿土样分层装入模型箱中,利用压实方法控制土样密度在 $1.80 \text{ g/cm}^3$ 左右,装填至1.5 m,在装填过程中分别在距离模型箱底部0.3 m处和1.2 m处各埋置2块深层沉降板用以测量试验过程中土层的变形,沉降板尺寸为边长0.10 m的正方形铁板,其上安装直径5 mm铜杆直至露出土体表面,铜杆外套内径为7 mm的铜管以减弱土体与铜杆间的摩擦。铜杆上部穿出土层部分架设百分表。试验装置如图1所示。



图1 试验装置实物

## 2.2 试验步骤

利用模型箱顶部架设的千斤顶给粉土层施加荷载来模拟地面建筑物荷载。承压板设置在千斤顶的正下方,深层沉降板穿过承压板布置,由于试验箱边长为1.0 m,故铁质承压板边长取0.8 m,厚度为2 cm。承压板上设立的传力柱为直径0.15 m混凝土块,承压板上设计两个直径2 cm小孔,用于沉降板铜杆穿出。同时承压板4个角点对称设有4个直径90 mm的取土孔,各试验阶段结束后利用直径70 mm薄壁取土器对不同深度的土样进行钻取,土样取出后,利用外径为90 mm的PVC管对钻孔进行填塞。

试验模拟水位波动过程如下。

(1) 打开常水头供水箱,将水从底部缓慢注入箱体中,当水位上升至1.5 m时关闭注水装置,此步骤是模拟自然环境中地基范围内水位上升过程,保持模型箱内水位不变,当土样变形稳定后(轴向变形小于 $0.75 \text{ mm/d}$ 认为稳定)开始排水。

(2) 开启排水装置排水,让箱体中的水在重力作用下缓慢排出,当水位降至0.5 m时关闭排水装置,此步骤是模拟自然环境中地下水下降过程。

试验分3组进行,试验前使用千斤顶分别给土样施加50,100,200 kPa的垂直压力,并使土样在恒压作用下变形至稳定状态。然后实现水位波动过程,即让水位在0.5~1.5 m范围内上升、下降循环波动3次,通过埋设的深层沉降板记录试验过程中土层的沉降变形规律。在整个试验过程中,保证千斤顶施加的压力不变,如出现土体变形导致千斤顶压力下降的情况,立即给千斤顶补压,维持荷载。

## 3 试验结果分析

本次模型试验根据粉土的密实度、渗透系数和前期试验所取得的物性参数,确定完成一次水位波动过程中的注水、持水和排水3个阶段的时间均为10 h,即前0~10 h为注水时间,中间的10~20 h为持水时间,后20~30 h为排水时间。试验共分3次水位波动,后两次波动过程以此类推。完成试验共需90 h,试验中每隔1 h记录1次数据。

### 3.1 水位波动过程中粉土的变形

粉土地基随水位波动的沉降关系曲线如图2所示,无论是在水位波动范围内(0.5~1.5 m)还是在恒水位以下(下部0.5 m范围内),土层都产生了压缩变形,且在水位下降的过程中压缩速率增大,在图中反映为此时曲线的斜率变大,在满箱持水不变和水位上升的过程中沉降量相对较小。这是由于在水位波动的0.5~1.5 m范围内,在水位上升过程中,土样和模拟的建筑物基础均受到浮力作用,土的有效应力减小,孔隙水压力增大,产生的沉降量较小;而当水位在下降过程中时,浮力慢慢消失,土的有效应力增大,孔隙水压力也随着水位下降而消失,产生的压缩变形量较大。

在水位波动的范围内,由于水位下降引起的附加应力(即由于失去的浮力转化而来的)与深度呈直线增长,呈三角形分布,这部分新增加的附加应力会产生附加的沉降。在水位波动范围以外的部分,附加应力不再随深度增长,理论上其数值随深度保持不变,但这部分土层也受到上部附加应力变化的作用,故也会产生附加的沉降。

对于处在不同上部荷载作用下的粉土地基,试验结果显示,当上部荷载大时沉降量小,上部荷载小时沉降量大。当上部荷载为200 kPa时,试验观测点两处的沉降量约为18 mm和5 mm,当上部荷载为50 kPa时,沉降量相应约为30 mm和8 mm。这是由于土样在上部荷载的作用下会发生固结作用,上部荷载大时

其固结压力也越大,故土样固结程度越彻底;其次,上部荷载越大时,由水位变化而引起的土中附加应力大小的变化幅度远远小于其土样自重荷载,故附加应力带给土样的影响也越小,所以上部荷载越大,土样压缩沉降越小。

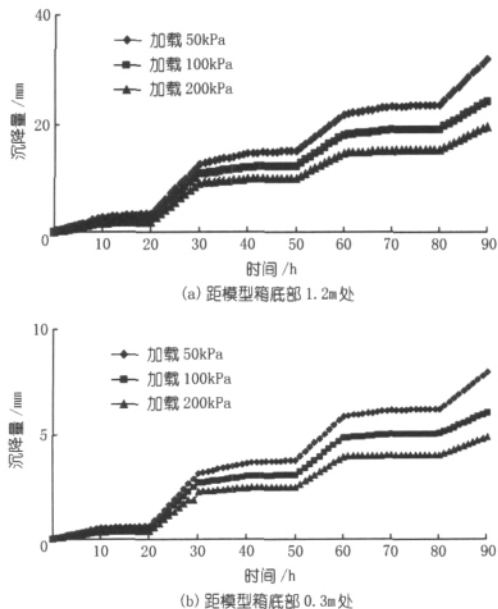


图2 水位波动与沉降关系曲线

### 3.2 水位波动过程中孔隙比、压缩模量变化

当水位在上升、持水和下降3个阶段时,分别在承压板的下方距模型箱底部1m(即上下两块沉降板之间土层)的地方取土做固结试验,测出孔隙比和压缩模量指标,观察水位波动与粉土地基孔隙比和压缩模量的变化规律如图3所示。

从图3可见,无论上部荷载大小如何,水位在上升和下降过程中,孔隙比 $e$ 并不是随着土样压缩变形呈现出不断减小的趋势,而是出现了不同程度的增大。这说明了在水位波动的过程中,在上部荷载的作用下,土颗粒受到垂直方向的“挤压”作用而存在水平移动的现象。这一结果也符合韩飞等人的研究结果,即粉土地区基坑开挖降水后会引引起土样孔隙比增大,产生剪胀变形特性<sup>[4]</sup>。由于孔隙比的增大,导致了压缩模量 $E_s$ 的减小。在实际工程中这也会进一步导致建筑物基础的最终沉降量增大。

### 3.3 水位波动过程中渗透系数变化

水位波动过程中粉土渗透系数变化如图4所示。由于模型试验选用粉土,粉土的孔隙较黏性土大,故水位在上升和下降过程中的流速也较高,较高的流速会产生一定的“侵蚀”作用,从而带走土层中的极细小颗粒,从而使粉土的孔隙比进一步增大,而孔隙比的增大

必然导致其渗透系数相应增大。其次,处在水位上升过程中的土颗粒受到浮力的作用,相当于给地基卸载,而水位下降过程中土颗粒所受到的浮力消失,相当于给地基加载,如此卸载和加载反复作用,也加速了粉土颗粒向约束较小的四周作水平挤压运动的趋势,间接导致了孔隙比和渗透系数的增大。

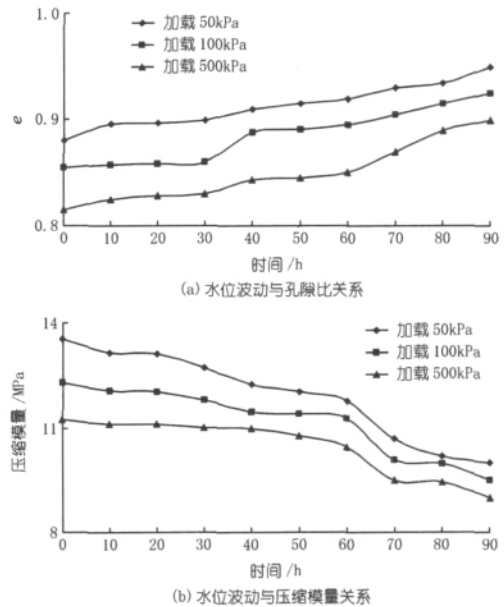


图3 水位波动与孔隙比、压缩模量关系曲线

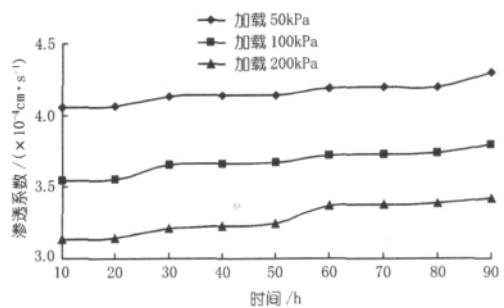


图4 水位波动与粉土渗透系数关系曲线

## 4 结论

- (1) 试验发现绝大部分的沉降量发生在水位下降的过程中,尤其是在水位波动范围内变形最为明显。在恒水位时也会产生很小一部分沉降。随着水位波动次数的增多,土样的垂直沉降量增大的趋势出现减缓。
- (2) 在局部荷载的作用下,水位波动对粉土样的压缩固结有明显影响,由于粉土的孔隙比较大,所含水分以自由水为主,随着水位波动次数的增多,由于侵蚀和向四周挤压的作用,粉土的孔隙比和渗透系数不断增大,压缩模量逐渐减小。
- (3) 在水位上升和下降过程中粉土的压缩模量均表现为减小的趋势,尤其是在水位下降过程中这种趋

势更为明显, 压缩模量的下降必然导致沉降量的增大。我国现行的地基基础设计规范中没有涉及到水位变化和基础的沉降量之间的关系, 根据本文试验的结果可以适当考虑通过压缩模量的变化来研究水位变化与地基最终沉降量之间的关系。

#### 参考文献:

[1] 孟庆山, 陈能远, 杨超. 地下水位波动带内滨海软土性状研究进展

[J]. 人民长江, 2011, 42(4): 29-32.

[2] 孟庆山, 杨超, 许孝祖, 等. 动力排水固结前后软土微观结构分析 [J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1759-1763.

[3] 王秀艳, 刘长礼, 张云. 超固结黏性土变形特征及可持续开采水位降的室内试验确定方法 [J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 875-879.

[4] 韩飞, 张士乔, 张仪萍. 粉土地区地下降水引起的土样变形特性与剪胀 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 753-755

(编辑: 郑毅)

## Test study on deformation characteristics of silt – soil foundation under condition of groundwater fluctuation

YANG Xi<sup>1</sup>, LEI Xuwen<sup>1</sup>, MENG Qingshan<sup>2</sup>, QIN Yue<sup>2</sup>

(1. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Considering the frequent ground subsidence events caused by groundwater fluctuation in coastal cities of China, a series of laboratory model tests taking Shanghai Quaternary sedimentary silt soil as the object are carried out for simulating the groundwater fluctuation and the building load variation. The deformation characteristics of silt – soil foundation under the coupling effect of groundwater fluctuation and building load are analyzed with collecting the deformation data of the silt – soil foundation in the model box. The deformation variation laws of silt – soil foundation with load, void ratio, compression modulus and permeability coefficient under the groundwater fluctuation are acquired. The result conclusion can be used as a reference for controlling the disaster of city ground subsidence.

**Key words:** silt – soil foundation; groundwater fluctuation; deformation; void ratio; compression modulus; permeability coefficient

(上接第54页)

## Application of digital filtering in runoff separation in small watershed in irrigation area

HAN Peili, DAI Junfeng

(School of Environmental Sciences and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541001, China)

**Abstract:** The study of runoff separation in the irrigation area is of great significance for understanding the runoff – producing process and characteristics, improving the utilization of water resources and implementing water resources management scientifically in the irrigation area. A small reservoir watershed in the irrigation area of Zhanghe River in Hubei Province is taken as a research object, and the headwater division of small watershed in the irrigation area is carried out based on the data of runoff yield from 2004 to 2006 with the digital filtering technique. Three channel filterings are provided in the technological approach, a base flow index  $F_r$  (base flow ratio of total runoff) is calculated by each of them. According to the actual situation of the study area, as the base flow index, the third  $F_r$  is selected. The parameters of base flow separation such as daily flow, base flow index of daily flow in the rice growth period and non – rice growth period are calculated. Moreover, the differences and reasons of the parameters such as the base flow index in different calculation periods are analyzed. The results show that the digital filtering technique has the advantages of objective, simple and fast, less parameters, as well as high precision in view of runoff separation in the small watershed of irrigation area.

**Key words:** filtering technique; base flow separation; small watershed in irrigation area; irrigation area of Zhanghe River