

# 自重湿陷性黄土与单桩负摩阻力离心模型试验

王长丹<sup>1</sup>, 王旭<sup>2</sup>, 周顺华<sup>1</sup>, 王炳龙<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为研究和分析黄土的湿陷变形性质与桩基的负摩阻力, 采用离心模型试验的方法分别对原状自重湿陷性黄土与重塑湿陷性黄土进行模拟浸水试验。试验研究表明: 原状和重塑湿陷性黄土浸水湿陷过程主要分为 3 个阶段, 即显著湿陷变形阶段、湿陷稳定变形阶段以及水位下降后土体的固结变形阶段。根据试验结果, 对于以沉降观测为目的的试验研究中, 用重塑黄土代替原状黄土进行离心模型试验模拟其湿陷变形的的方法是可行的。进而分析基桩负摩阻力分布规律及中性点位置的变化规律。单桩的负摩阻力分布及中性点位置是一动态变化过程, 中性点位置与桩长的比例为 0.68~0.82。

**关键词:** 土力学; 自重湿陷性黄土; 离心模型试验; 浸水试验; 负摩阻力; 中性点

**中图分类号:** TU 411.93; TU 444

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)增 1 - 3101 - 07

## CENTRIFUGAL MODEL TESTS ON SELF-WEIGHT COLLAPSIBLE LOESS AND NEGATIVE SKIN FRICTION OF PILE FOUNDATIONS

WANG Changdan<sup>1</sup>, WANG Xu<sup>2</sup>, ZHOU Shunhua<sup>1</sup>, WANG Binglong<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;*

*2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)*

**Abstract:** Collapse settlement, collapsibility of self-weight collapsible loess and negative skin friction of pile foundation are crucial issues in the basic research of collapsible loess ground. The centrifugal model test is used to simulate the immersion test with undisturbed and remolded collapsible loess foundations, to research and analyze the collapsibility of loess and negative skin friction of pile foundations. The research results show that the processing of undisturbed and remolded loess collapsibilities can mainly be divided into three stages, which are the stages of significant of collapsible deformation, stabilization stage of collapsible deformation and soil consolidation deformation stage after the dropping of water level. The method of centrifugal model test which uses remolded collapsible loess instead of undisturbed collapsible loess to research the self-weight loess collapsibility is practicable for the purpose of settlement study by analyzing the test data. Then the changing laws of negative skin friction and the position of neutral point are concluded. The movement of negative skin friction and the position of neutral point are a continuous changing process. The ratio of the neutral point position to length of pile is in the ranges of 0.68 - 0.82.

**Key words:** soil mechanics; self-weight collapsible loess; centrifugal model test; immersion test; negative skin friction; neutral point

**收稿日期:** 2009 - 02 - 23; **修回日期:** 2009 - 08 - 14

**基金项目:** 甘肃省自然科学基金项目(ZS031 - B25 - 010 - G)

**作者简介:** 王长丹(1982 -), 男, 2005 年毕业于兰州交通大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事高速铁路路基新结构形式和地基处理等方面的研究工作。E-mail: tjtwangcd@yeah.net

## 1 引言

黄土的自重湿陷性是岩土工程界长期关注的问题。黄土湿陷变形特性的研究方法主要是原位浸水试验和室内压缩试验<sup>[1]</sup>。由于压缩试验模拟的应力应变不完全符合地基情况,许多学者提出了改进意见。陈正汉和刘祖典<sup>[2]</sup>通过三轴等应力比试验和侧限压缩试验对黄土湿陷变形进行研究。李章泌等<sup>[3~6]</sup>进行了控制吸力条件下,通过固结仪、三轴仪等设备开展了对黄土湿陷试验的研究。骆亚生等<sup>[7]</sup>研究了黄土在压缩试验状态下结构变化特性。对于原状黄土,含水率对结构参数的影响明显;对于重塑黄土,黄土的结构参数受密度、含水率等因素的影响较为明显。胡再强等<sup>[8]</sup>通过室内侧限压缩试验,对原状黄土和重塑黄土测定了不同含水量下的结构强度、压缩曲线、湿陷系数等,指出用重塑黄土代替原状黄土来研究非饱和黄土是可行的。

桩基负摩阻力是湿陷性黄土地基桩基设计的重要课题。负摩阻力问题广泛存在于桩基工程中,在我国西北部自重湿陷性黄土地区尤为普遍,若处理不当,将导致严重的桩基功能失效<sup>[9~11]</sup>。试验证明,桩土相对位移量在几毫米之内便可产生可观的负摩阻力<sup>[9]</sup>。国内外关于桩基负摩阻力的研究主要集中在现场、室内模型试验和理论研究3个方面。现场试坑浸水试验可直接得出桩基的承载力及负摩阻力,比较准确可靠,但费用高,费工费时,因而试验资料很少<sup>[1, 12]</sup>。袁灯平等<sup>[13]</sup>建议对重大工程应采用先进测试仪器做负摩阻力的长期测试观测,包括桩、土体各控制断面点的沉降等。中性点深度的合理确定是正确计算负摩阻力导致的下拉荷载时首先需要解决的一个关键问题。陈显新和徐新跃<sup>[14]</sup>研究表明中性点深度受到桩-土相互作用的各种因素的影响而呈明显的动态变化。研究和分析可能影响中性点位置变化的因素对于负摩阻力桩的合理设计具有重要意义。

离心模型试验的基本原理是将模型置于特制的离心机中,使 $1/N$ 缩尺的模型在 $N \cdot g$ 离心加速度的空间进行试验。由于惯性力与重力等效,模型与原型土层性质相似,从而使模型与原型的应力应变相似、变形相似、破坏机制相同,能再现原型特性。离心模型试验能够再现原型以及重力有关的变形过程,在土体变形规律和土工研究领域得到了广泛的应用<sup>[15~19]</sup>。目前,尚鲜见基于离心模型试验对自重

湿陷性黄土地基的变形规律研究的文献报道。对土体与桩体之间相互作用及其机制等的研究尚不充分,有待进一步研究。

本文采用土工离心模型试验的方法对自重湿陷性黄土试坑浸水试验进行模拟,在对试验结果分析的基础上探讨了此方法模拟黄土湿陷性的可行性。同时进行了湿陷性黄土中单桩的承载性质试验,根据试验结果分析单桩的负摩阻力分布规律及中性点位置的变化规律,为理论研究及工程实践提供一种新的方法和手段。

## 2 试验设计

### 2.1 试验设备

本次试验采用同济大学 20 g·t 土工离心机(L-30)进行,该离心机的基本参数包括有效旋转半径 1.55 m,最大离心加速度 200 g,模型箱内壁尺寸为:415 mm×370 mm×230 mm,箱底有渗水孔。

### 2.2 试验模型

离心加速度:综合考虑离心机的技术参数和试验原型条件、测量精度的要求以及试验中模拟模型材料制作等因素的基础上,确定本次试验的离心加速度为 100 g。

试验模型:按照模型率 1:100 制作试验模型,土工模型试验中为使模型材料与原型材料的物理力学特性相似,取用现场土料来模拟实际土层<sup>[15, 16]</sup>。各土层的模拟满足几何相似的要求。试验土料取自兰州黄河 III 级阶地,为 IV 级自重湿陷性黄土。试验中对湿陷性黄土层的模拟通过采用原状湿陷性黄土(从原位采集整块试验土块,保持其天然结构性并在实验室按照试验的尺寸要求加工而成)和重塑湿陷性黄土的方法实现。保留原状湿陷性黄土的最大厚度,自重湿陷性黄土层模型尺寸:415 mm×230 mm×170 mm(长×宽×高),重塑湿陷性黄土层模型的尺寸:415 mm×230 mm×150 mm(长×宽×高)。稳定持力层材料采用砂土进行模拟,高度 20 mm。试验模型主要控制指标如表 1 所示。

表 1 试验模型主要控制指标

Table 1 Main controlling indices of testing model

岩性	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水量 w/%	孔隙比 e	孔隙率 n	饱和度 $S_r/\%$	土粒相对 密度 $d_s$
天然原状湿陷性黄土	1.53	7.7	0.91	0.48	23.0	2.71
重塑湿陷性黄土	1.60	19.0	1.02	0.50	50.7	2.71

刚性桩的模拟, 对于承受以竖向荷载为主的桩, 按桩身竖向抗压刚度相似要求选用模型桩<sup>[15]</sup>。试验中的刚性桩在满足几何相似的条件选用铝管模拟, 铝的弹性模量  $E = 7.1 \times 10^4$  MPa(钢筋混凝土预制桩的弹性模量  $E = 3.8 \times 10^4$  MPa), 长 18 cm, 直径 4 mm, 壁厚 1 mm, 试验中刚性桩体自身的压缩变形量忽略不计。桩基入土方式采用打入方式, 桩体打入稳定持力层 1 cm。桩体顶部未承受荷载。

2.3 试验方案

试验分为 2 组, 分别为原状湿陷性黄土试坑浸水试验和重塑湿陷性黄土层试坑浸水试验。试验模拟浸水试坑尺寸: 415 mm × 230 mm, 期间坑内保持水位为 3~4 mm<sup>[9]</sup>。模拟土层中设置少量微径注水孔, 以便于水渗透使土体充分饱和。

2.4 试验数据采集

边界效应来自模型箱边壁对模型的约束作用。试验中在模型箱侧壁涂抹凡士林来减小摩擦力, 且在距离箱壁一定范围内不观测数据, 以保证试验数据的可靠性和准确性。模型箱的一侧为透明可拆装的有机玻璃板, 在该侧土体中根据需要尺寸进行方格布置带大头针的塑料粒子作为模型观测点。塑料粒子的位移和该侧土体的位移同步, 通过定点高速同步摄影系统在试验的不同阶段对位移标志进行成像, 通过计算机图形处理软件来分析土体的位移和稳定情况。

2.5 试验过程

根据试验设计的几何尺寸和试验模型的参数, 在模型箱内制作试验模型。在布置好观测点后, 将模型箱固定在离心机上, 安装并检测定点高速同步摄影系统和视屏跟踪系统。离心加速度逐渐增大到 100 g, 过程中对每 20 g 加速度增量时刻土体变形进行观测, 离心加速度随时间的变化曲线如图 1 所示。并在保持 100 g 离心加速度条件下, 定时对土体变形进行观测。试验过程持续约 270 min(时间的换算按固结等问题  $T_M = \frac{1}{N^2} T_H$  进行换算, 其中  $T_M, T_H$  分

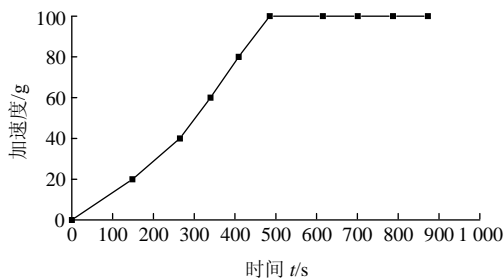


图 1 离心加速度随时间的变化曲线

Fig.1 Change curve of centrifugal acceleration with time

别为原型和模型时间)。

3 试验结果及分析

3.1 重塑湿陷性黄土层湿陷变形分析

重塑湿陷性黄土试坑浸水试验观测点位编号从左到右依次进行, 如图 2 所示。观测点位间距为 2 cm, 最近箱壁的观测点距箱壁距离约为 2 cm。考虑到边界效应的影响, 选取分析的观测点位为 4~16, 共 13 个观测点位。

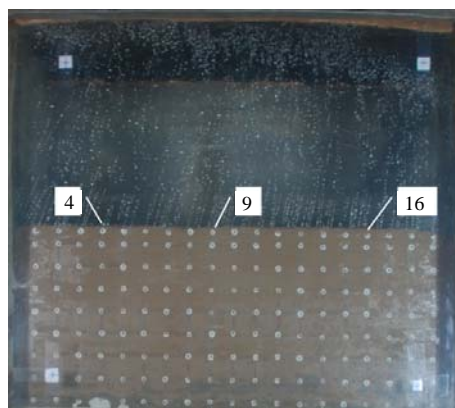


图 2 重塑黄土试坑浸水试验模型

Fig.2 Model of immersion test on remolded collapsible loess

重塑湿陷性黄土各观测点位湿陷量如表 2 所示, 靠近模型箱中部的观测点位 9 湿陷量最大, 为 11.98 mm; 靠近箱壁的观测点位 4 湿陷量最小, 有 10.08 mm。13 个观测点位的平均湿陷量为 11.25 mm。分布趋势以模型箱中部最大, 逐步向外递减。

表 2 重塑黄土各观测点位最大湿陷量统计表

Table 2 Statistical table of maximal settlement in each observation monument of remolded collapsible loess testing

观测点位编号	最大湿陷量/mm
4	10.08
5	10.79
6	10.82
7	11.00
8	11.54
9	11.98
10	11.39
11	11.14
12	11.25
13	11.48
14	11.74
15	11.72
16	11.52
平均	11.25

选取最大湿陷量的观测点位 9 进行分析，其不同深度处的湿陷量及湿陷速率的关系分别如图 3, 4 所示。其湿陷变形的过程可以分为 3 个阶段：(1) 显著湿陷变形阶段。这一阶段从试验开始到试验 8 min(原型时间 20 d, 下同)，湿陷量达到了 9.34 mm，占总沉降量的 77.96%。(2) 湿陷稳定变形阶段。时间从试验 8 min(20 d)到 23 min(120 d)，这一阶段湿陷变形速率趋于稳定。湿陷量为 1.00 mm，占总湿陷量的 8.35%。(3) 水位下降后固结变形阶段。这一阶段从试验 23 min(120 d)到试验 270 min(1 825 d)结束，水位逐步下降至地表下 2~4 cm 处。随着水位逐渐下降，有效应力增加，土体固结所形成的沉降速率大于水位未下降前的沉降速率。这一阶段的沉降量为 1.64 mm，约占总沉降量的 13.69%。

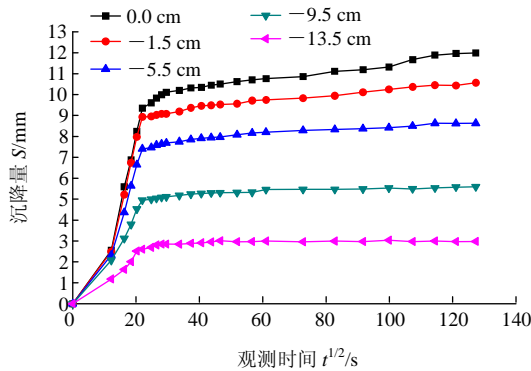


图 3 重塑黄土湿陷量变化曲线

Fig.3 Change curves of settlement on remolded collapsible loess

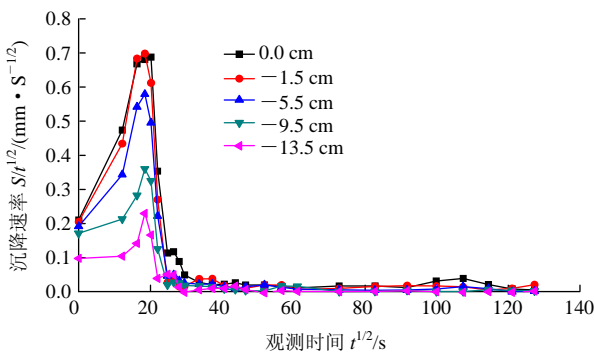


图 4 重塑黄土湿陷速率变化曲线

Fig.4 Change curves of settlement rate on remolded collapsible loess

### 3.2 原状湿陷性黄土层湿陷变形分析

原状湿陷性黄土试坑浸水试验的观测点位编号从左到右依次进行，如图 5 所示。观测点位间距为 2 cm。考虑到边界效应的影响，选取分析的观测点位为 6~9 和 13~16，共 8 个观测点。模型箱中部设置对单桩及桩侧土体(观测点位 11)的观测试验，

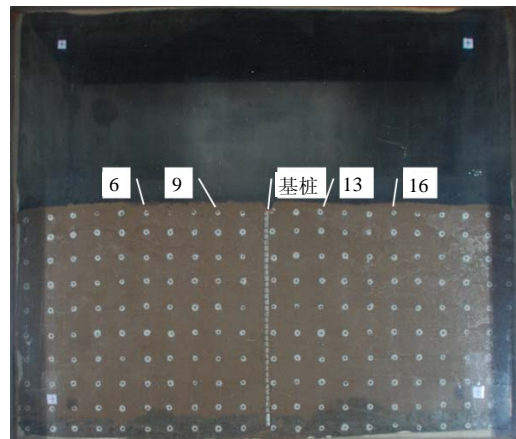


图 5 原状黄土试坑浸水试验模型

Fig.5 Model of immersion test on undisturbed collapsible loess

为避免对试坑浸水试验的影响，其左右 4 cm 范围内的数据未记入最大湿陷量的统计。

原状湿陷性黄土各观测点位湿陷量如表 3 所示，靠近模型箱左侧的观测点位 7 湿陷量最大，为 13.67 mm；靠近右侧箱壁的观测点位 15 湿陷量最小，为 10.40 mm。8 个观测点位的平均湿陷量为 11.87 mm。

表 3 原状黄土各观测点位最大湿陷量统计表

Table 3 Statistical table of maximal settlement in each observation monument of undisturbed collapsible loess testing

观测点位编号	最大湿陷量/mm
6	12.88
7	13.67
8	12.46
9	12.67
13	11.46
14	10.60
15	10.40
16	10.85
平均	11.87

选取最大湿陷量的观测点位 7 进行分析，其不同深度的湿陷量及湿陷速率与时间的关系分别如图 6, 7 所示。湿陷变形的过程可以分为 3 个阶段：(1) 显著湿陷变形阶段，该阶段从试验开始至试验 8 min(20 d)，这段时间的湿陷量达到了 10.17 mm，约占总沉降量的 76.81%。(2) 湿陷稳定变形阶段，观测时间从第 8 min(20 d)到 36 min(210 d)，湿陷量为 1.12 mm，占总湿陷量的 8.46%。(3) 水位下降后固

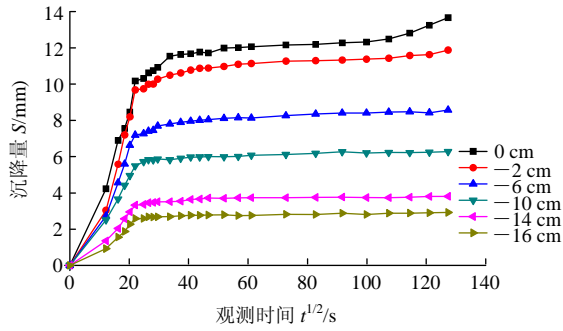


图 6 原状黄土湿陷量变化曲线

Fig.6 Change curves of settlement on undisturbed collapsible loess

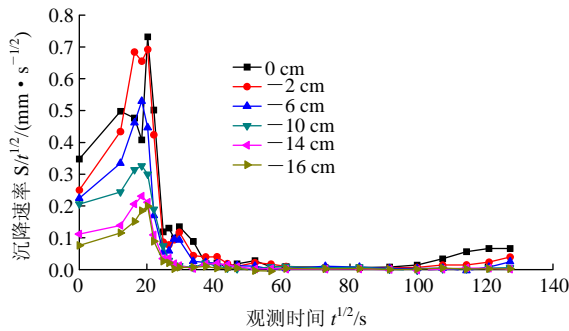


图 7 原状黄土湿陷速率变化曲线

Fig.7 Change curves of settlement rate on undisturbed collapsible loess

结变形阶段, 该阶段从 36 min(210 d)到试验结束, 在这一阶段水位逐步开始下降至地表下 2 cm 左右。沉降量为 1.95 mm, 约占总湿陷量的 14.73%。

### 3.3 2 组试验结果对比分析

通过对图 8, 9 及表 4 的试验结果分析。从最大湿陷量的比较来看, 重塑湿陷性黄土层的模拟厚度为 15 cm, 最大湿陷量为 11.98 mm。原状湿陷性黄土厚度为 17 cm, 最大湿陷量为 13.67 mm。重塑和原状土层的平均湿陷量分别为 0.799 和 0.804 mm/cm。

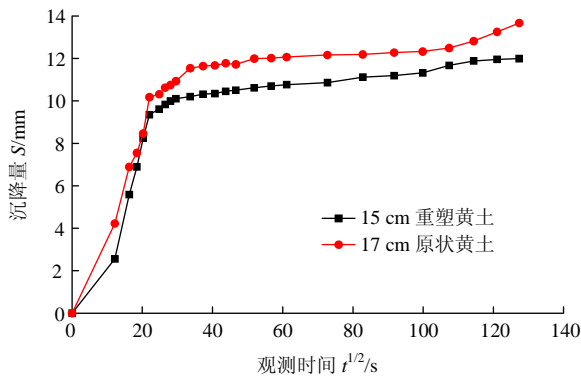


图 8 湿陷量变化曲线比较图

Fig.8 Comparison graph in change curves of settlement

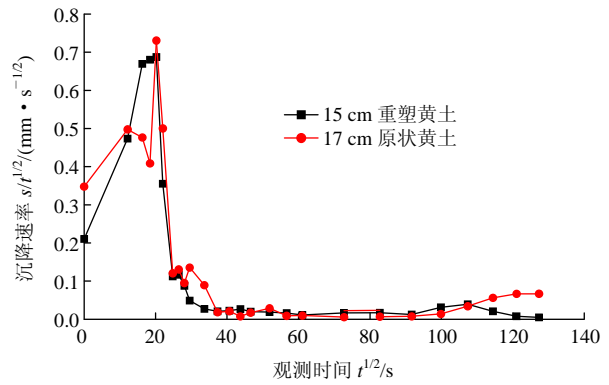


图 9 湿陷速率变化曲线比较图

Fig.9 Comparison graph in change curves of settlement rate

表 4 各阶段湿陷量变化统计表

Table 4 Statistical table of settlement in each stage

湿陷变形阶段	模型时间 /min		原型时间 /d		湿陷量 /mm		占总湿陷量的比例/%	
	重塑	原状	重塑	原状	重塑	原状	重塑	原状
显著阶段	8	8	20	20	9.34	10.17	77.96	76.81
稳定阶段	8~23	8~36	20~120	20~210	1.00	1.12	8.35	8.46
固结变形阶段	23~270	36~270	120~1 825	210~1 825	1.64	1.95	13.69	14.73

重塑与原状湿陷性黄土试坑浸水试验 3 个阶段的变化规律是相似的。重塑黄土的湿陷量变化, 由于其内部结构比较均匀, 沉降变化曲线也比较连续。原状黄土由于天然结构性存在, 土体密实度、含水率、孔隙分布等不均匀, 在湿陷量变化曲线上局部有突变, 属正常现象。建议对于以沉降为主要观测的试验研究中, 如原状湿陷性黄土不易保留其天然结构性时, 可以通过对重塑黄土物理指标的严格控制, 替代原状湿陷性黄土通过离心模型试验模拟其湿陷沉降的方法是可行的。

### 3.4 桩体负摩阻力的分布规律

试验的假定条件: (1) 桩体采用刚性桩, 对于桩体的观测认为其自身的压缩变形量忽略不计; (2) 桩体负摩阻力的产生是由于土体下沉速率大于桩体的下沉速率。通过土体下沉速率与桩体下沉速率的比较, 来分析桩侧负摩阻力的分布规律及中性点位置的变化。各深度土层与桩体沉降量和沉降速率变化曲线分别如图 10, 11 所示。

按照假定条件进行分析, 通过桩 - 土相对位移量反观测桩体负摩阻力及中性点位置变化如图 12 所示, 以 -11 cm 深度为界, 之上桩体的沉降量及沉降速率都要小于桩周土体, 相对变化量随着深度的增大而减小。认为起始阶段桩体 -11 cm 深度之上,



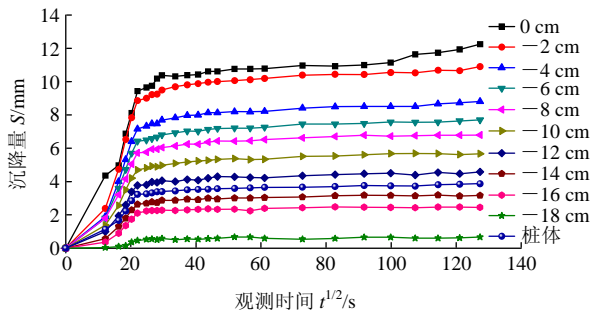


图 10 各深度土层与桩体沉降量变化曲线

Fig.10 Change curves of settlement in each depth of soil and pile

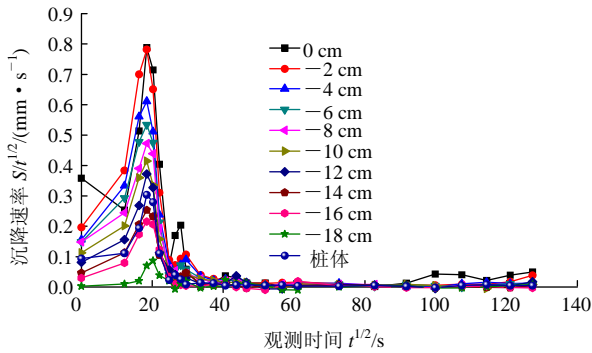


图 11 各深度土层与桩体沉降速率变化曲线

Fig.11 Change curves of settlement rate in each depth of soil and pile

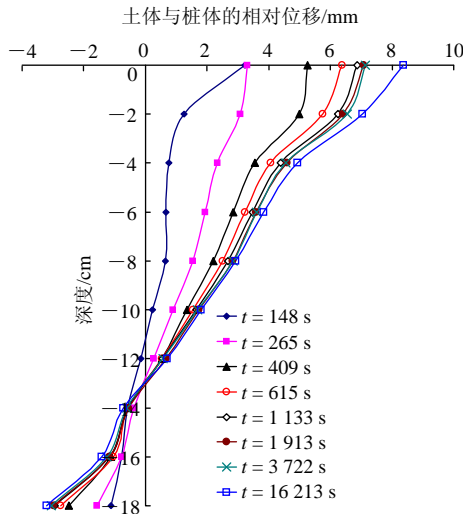


图 12 土体与桩体相对位移及中性点位置变化图

Fig.12 Change graph of position of neutral point and relative settlement of pile and soil

土体对桩体存在着负摩阻力的影响，负摩阻力的大小随着深度的增加而减小。-11 cm 深度以下的土体对于桩体为正摩阻力。在-11 cm 处存在着正摩阻力与负摩阻力的过渡的中性点，即桩土相对位移为 0。

随着深层土体饱和度的提高，从-12 cm 处观测点的沉降量与沉降速率开始增大，并逐渐大于桩体

的沉降量和沉降速率。起始阶段部分对桩体起一定支撑作用的土体，转变为对桩体施加荷载的负摩阻力。-14 和-16 cm 处观测点的沉降量和沉降速率相对于桩体的沉降量和沉降速率的差值有所减小，但仍大于桩体。中性点位置逐步由-11 cm(与桩长比例 0.68)深度区段内下降到-13 cm(与桩长比例 0.82)区段内，并趋于稳定。中性点位置的变化是一个动态的过程，会随着浸水时间长短、深层土体饱和度的变化、沉降的增加等因素而变化。

## 4 结 论

(1) 重塑和原状湿陷性黄土的湿陷量随时间的变化，主要可以分为 3 个阶段：① 显著湿陷变形阶段，该阶段时间较短，一般 8 min(20 d)左右的湿陷量就会达到总湿陷量的 75% 以上。② 湿陷稳定变形阶段，该阶段湿陷变形趋于稳定，整个过程约持续 15~27 min(100~190 d)。③ 水位下降后土体固结变形阶段，该阶段水位逐步下降，使得土的有效应力增大，土体产生固结变形。

(2) 通过对重塑和原状湿陷性黄土的最大湿陷量、平均湿陷量及湿陷各阶段的比较分析，建议对于以沉降为主要观测的试验研究中，如原状湿陷性黄土不易保留其天然结构性时，可以通过对重塑黄土物理指标的严格控制，替代原状湿陷性黄土通过离心模型试验模拟其湿陷沉降的方法是可行的。

(3) 负摩阻力的大小随着深度的增加而减小。随着浸水时间的增长、深部土体的饱和度的提高，沉降的增大等，使得一定深度范围内的土体沉降加大，中性点的位置有所下降并逐步趋于稳定。中性点位置与桩长的比例在 0.68~0.82 范围内。

(4) 采用离心模型试验的方法对黄土湿陷性的试验研究具有费用低，模拟观测时间长，湿陷变形情况便于观测和分析等优点，但对湿陷性黄土结构性的还原以及水在黄土中的渗流规律的模拟等也存在问题，需要进一步实践和研究。

## 参考文献(References):

[1] 黄雪峰, 陈正汉, 哈 双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土场地湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 383 - 389.(HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, HA Shuang, et al. Large area field immersion tests on characteristics of deformation of self weight collapse loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 383 - 389.(in

- Chinese))
- [2] 陈正汉, 刘祖典. 黄土的湿陷变形机制[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(3): 1 - 12.(CHEN Zhenghan, LIU Zudian. Mechanism of collapsible of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(3): 1 - 12.(in Chinese))
- [3] 李章泌. 非饱和和压实黄土的压缩与湿陷特性[C]// 中加非饱和土学术会议研讨会文集. [S.l.]: [s.n.], 1994: 220 - 227.(LI Zhangmi. Compression and collapse of compacted unsaturated loess[C]// Sino-Canada Symposium on Unsaturated Soils. [S.l.]: [s.n.], 1994: 220 - 227.(in Chinese))
- [4] FUTAI M M, ALMEIDA M S, CONCIANI W. Experimental and theoretical evaluation of maximum collapse[C]// Proceedings of the 11th Panamerican Conf. Soil Mech. Geotech. Eng., ISSMGE. [S.l.]: [s.n.], 1999: 267 - 274.
- [5] HABIBAGAH G, MOKHBERI M. A hyperbolic model for volume change behavior of collapsible soils[J]. Can. Geotech. J., 1998, 35(2): 264 - 272.
- [6] 朱元青, 陈正汉. 研究黄土湿陷性的新方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 524 - 528.(ZHU Yuanqing, CHEN Zhenghan. A new method of studying collapsibility of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 524 - 528.(in Chinese))
- [7] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 非饱和黄土的结构变化特性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, (8): 114 - 117.(LUO Yasheng, XIE Dingyi, SHAO Shengjun, et al. Variation characteristics of soil structure of unsaturated loess[J]. Journal of Northwest A and F University(Natural Science), 2004, (8): 114 - 117.(in Chinese))
- [8] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的结构研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(11): 775 - 779.(HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Research on structural behavior of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(11): 775 - 779.(in Chinese))
- [9] 钱鸿籍, 罗宇生. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.(QIAN Hongjing, LUO Yusheng. Collapsed loess foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1985.(in Chinese))
- [10] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 陕西: 科学技术出版社, 1997.(LIU Zudian. Mechanics and engineering of loess[M]. Shaanxi: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.(in Chinese))
- [11] 汪国烈, 明文山. 湿陷性黄土的浸水变形规律与工程对策[C]// 湿陷性黄土研究与工程(第四届全国黄土学术会议论文集). 北京: 中国建筑出版社, 2001: 21 - 32.(WANG Guolie, MING Wenshan. Immersion deformation of collapse loess and engineering technologies[C]// Research and Engineering of Collapsed Loess. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001: 21 - 32.(in Chinese))
- [12] 黄雪峰, 陈正汉, 哈 双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 338 - 346.(HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, HA Shuang, et al. Research on bearing behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 338 - 346.(in Chinese))
- [13] 袁灯平, 黄宏伟, 程泽坤. 软土地基桩侧负摩阻力研究进展初探[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 53 - 60.(YUAN Dengping, HUANG Hongwei, CHENG Zekun. Research progress of negative skin friction on piles in soft soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 53 - 60.(in Chinese))
- [14] 陈显新, 徐新跃. 桩负摩阻力的若干问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 22(7): 4 615 - 4 618.(CHEN Xianxin, XU Xinyue. Several issues about negative skin friction of piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 22(7): 4 615 - 4 618.(in Chinese))
- [15] 曾有金, 章为民. 桩基模型试验研究现状[J]. 岩土力学, 2003, 24(增 2): 674 - 682.(ZENG Youjin, ZHANG Weimin. Reviews of state-of-art of modeling simulation on pile foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Supp.2): 674 - 680.(in Chinese))
- [16] 黄志全, 王思敬. 离心模型试验技术在我国的应用概况[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 199 - 203.(HUANG Zhiquan, WANG Sijing. A study of application of centrifugal model testing in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 199 - 203.(in Chinese))
- [17] 杨 坪, 唐益群, 王建秀, 等. 基于大变形的充填土自重固结分析及离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1 212 - 1 219.(YANG Ping, TANG Yiqun, WANG Jianxiu, et al. Study of consolidation settlement of dredger fill under deadweight using lager strain theory and centrifuge model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1 212 - 1 219.(in Chinese))
- [18] LEE C J, CHEN C Z. Negative skin friction on grouped piles[C]// PHILLIPS R, GUO P J, POPESCU R, ed. Physical Modelling in Geotechnics-ICPMG - 02. Rotterdam: A. A. Balkema, 2002: 643 - 648.
- [19] 王长丹. 湿陷性黄土地基高速铁路桩承式路堤离心模型试验及沉降控制研究[硕士学位论文][D]. 兰州: 兰州交通大学, 2008.(WANG Changdan. The research on the settlement controlling and geotechnical centrifuge tests of piled embankment in collapsible loess ground of high-speed railway[M. S. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2008.(in Chinese))