

Centrifugal Model Tests of Consolidation Process of the Filled Soil in Geotextile Tubes

Huang Li, Liquan Xie*, Peipei Zhang

School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: 1630446@tongji.edu.cn, *xie_liquan@tongji.edu.cn, zpp_tj@163.com

Received: Oct. 22nd, 2018; accepted: Nov. 9th, 2018; published: Nov. 16th, 2018

Abstract

The consolidation process of the filled soil in geotextile tube was modeled by carrying out centrifugal model tests in this paper. The changing process of the geotextile tube height, the pore water pressure and soil stress within the tube was monitored during the centrifuge tests to study the soil consolidation characteristics. The results of centrifugal tests agree well with the test under statical (gravity) condition. The results show that: the pore pressure in the upper part of the soil-filled tube dissipates more slowly than the bottom part and the pressure change is much smaller; the soil stress at the bottom of the tube decreases gradually with the increase of drainage and the decrease of the tube height, and the change of vertical soil stress is larger than that of horizontal soil stress.

Keywords

Geotextile Tube, Consolidation, Centrifugal Model Test, Pore Water Pressure, Soil Pressure

土工管袋填充土体固结过程的离心模拟试验

李 煌, 谢立全*, 张培培

同济大学, 土木工程学院, 上海
Email: 1630446@tongji.edu.cn, *xie_liquan@tongji.edu.cn, zpp_tj@163.com

收稿日期: 2018年10月22日; 录用日期: 2018年11月9日; 发布日期: 2018年11月16日

摘 要

基于离心模型试验, 本文模拟了土工管袋内填充土体的固结过程。通过监测管袋高度以及袋内土体中的

*通讯作者。

孔隙水压力、土压力的变化过程, 探究了土工管袋土体的固结特性。离心试验结果与静力(重力加速度)条件下固结试验具有一致性, 且试验结果表明: 管袋充填土体中部孔压的消散速度要比底部要慢, 且最终消散值比底部要小; 袋底处的土压力随着排水增加、管袋高度降低而逐渐减小, 其垂直土压力减小值比水平土压力大。

关键词

土工管袋, 固结, 离心模型试验, 孔压, 土压

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

软土地基加固技术[1] [2]在岩土工程领域占有重要地位, 土工管袋可用于地基加固。土工管袋是以高强编织型土工织物缝制成的长管袋制品, 其袋内充灌泥沙后可堆积成坝体, 因施工方便而广泛应用于滩涂围垦、河海岸保护及港口建设等工程[3] [4] [5]。刘思宏等[6] [7]对土工管袋的加固原理及实际应用进行了深入的研究, 指出其加固原理为袋子张力对袋内土体的约束作用, 并论述了其广泛的工程适用性。

土工管袋充填土体的排水固结过程是重要的施工环节, 既是土工管袋工作过程的集中体现, 也是决定其力学性能的关键, 对土工管袋的设计及应用具有重要指导意义。Shin 等[8]进行的现场充填试验, 对土工管袋填充完成后排水固结过程进行了监测并记录了袋体高度变化的过程; 刘伟超等[9]通过模型试验对袋体受力、排水速率等特性进行了较为全面的研究。

然而, 室内模型试验受条件的限制, 多为小尺度研究, 使研究具有局限性。而现场试验工作量大, 时间长, 不确定因素多, 且不易进行细观研究, 因此, 采用离心机试验来研究接近实际应力场条件下土工管袋内土体的固结过程的机理是必要的。

离心机模型试验是将实际模型按照一定的比尺缩小放到离心机上, 施加一定倍数重力加速度的离心加速度, 能够得到与原型相近的应力状态、变形特征和运动规律等, 与通常在静力(重力加速度)条件下的物理模拟相比, 离心模型试验更接近于实际。土工离心模型试验研究范围几乎涉及到岩土工程的各个方面[10] [11] [12] [13]。

为了保证比例缩尺后模型中土单元的性状与原型相一致, 模型中的应力水平必须和原型相一致, 因此, 就要在模型中采用正确的比尺关系。公用的比尺关系的列表已经被 Fuglsang 等[14]人进行了总结, 如表 1 所示, 其中 N 为离心机的离心加速度。

Table 1. Scale relation of centrifugal simulation (model/prototype)

表 1. 离心模拟比尺关系(模型/原型)

物理量	量纲	比尺	物理量	量纲	比尺
长度, 位移	[L]	1/N	应变	/	1
质量	[M]	1/N ³	速度	[L/T]	1
时间	[T]	1/N	加速度	[L/T ²]	N
力	[ML/T ²]	1/N ²	振动时间	[T]	1/N
应力, 强度	[ML/T]	1	孔压消散时间	[T]	1/N ²

对于保持与固结过程相一致的离心模型试验，模型中孔隙水压的消散时间为原型的 $1/N^2$ 倍，因此，利用离心模型试验来模拟固结过程一般只需要几十分钟就可以达到实际情况数月才能达到的固结效果。目前，以离心机模型试验对土工管袋的力学行为进行模拟，研究成果鲜有报道，故本文研究土工管袋的离心模拟技术，并重点分析其填充土体的固结力学行为。

2. 土工离心机试验

2.1. 模型比尺

综合考虑各种影响因素，诸如边界效应、粒径效应、模型箱的尺寸、离心机自身设备、模拟精度等，本试验模型比尺 λ 取 50，即离心加速度取 50 g。

根据前文离心模拟比尺关系，模型试验主要物理量比尺如表 2。

Table 2. Scale of main physical quantity of model

表 2. 模型主要物理量比尺

物理量	离心加速度	长度	时间	孔压消散时间	应力、应变
比尺	50	50	50	2500	1

2.2. 离心机及测量设备

本次离心模型试验在同济大学 TLJ_150 复合型岩土离心试验机上进行，图 1 为实物图。该离心机最大可加载的加速度为 200 g，有效半径为 3 m，配有 6 条设摄像线路和 5 台照相机，可实现对离心试验全过程的监测。



Figure 1. Picture of real TLJ-150 centrifugal machine

图 1. TLJ-150 土工离心机实物图

2.3. 试验材料及试验准备

2.3.1. 试验材料

试验所用土工布物理和力学参数见表 3。

Table 3. Physical and mechanical parameters of geotextiles tube

表 3. 土工布物理力学参数

面密度	拉伸强度	延伸率	渗透系数
223 g/m ²	38 kN/m	18%	2.3×10^{-3} cm/s

填充料选用泥浆，浓度约为 1.6 g/cm^3 ，试验用土选择沙质粉土，其颗粒级配如图 2。

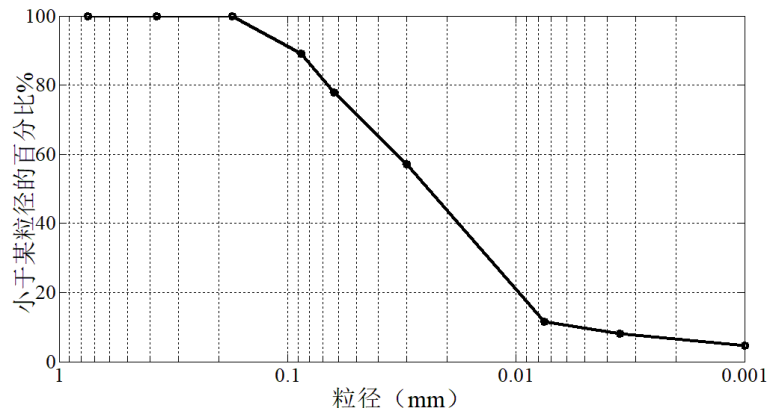


Figure 2. Grading curve of the soil used in test
图 2. 试验用土的颗粒级配曲线

2.3.2. 试验准备

离心模型试验的准备包括模型箱的制备、管袋及填料的制作、传感器的安放，管袋的充填、测量系统的安放等。具体内容如下：

本试验使用的模型箱的净空尺寸为 $80 \times 50 \times 52 \text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)，其中一面侧壁使用了透明的有机玻璃板，以便观察试验现象，实物图见图 3。管袋尺寸为 $50 \times 30 \text{ cm}$ (对应实际工程为 $25 \times 15 \text{ m}$)，无袖口，三面先缝好，留下一边用于充填和安放传感器。泥浆采用落雨法生成，充分搅拌后备用，经测泥浆浓度约为 1.6 g/cm^3 。

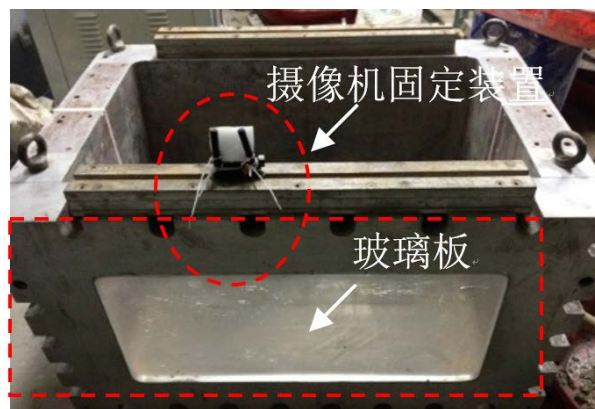


Figure 3. Picture of model box
图 3. 模型箱图

管袋充填后袋中央高度约为 15 cm (原型 7.5 m)，考虑到管袋排水固结过程，将孔压传感器布置在袋中央距离袋底 0 cm 、 4 cm 和 8 cm (对应原型 0 m 、 2 m 和 4 m) 三个位置，对应点 A、B、C，分别称之为底部、中部和上部，采用微小的支架将其固定在袋内，同时在点 A 处的垂直和水平方向各放置一个土压传感器。中央横断面处传感器布置位置示意图如图 4。

将预先搅拌好的泥浆缓慢倒入袋中，充填结束后绑扎好袋口将其放在模型箱内的支架垫板上。用一根带刻度的竹签固定在袋顶正中央，上面穿过塑料瓶盖的中部与导轨固定，竹签随着管袋的移动而垂直移动，通过摄像机读出管袋高度的变化量，如图 5。

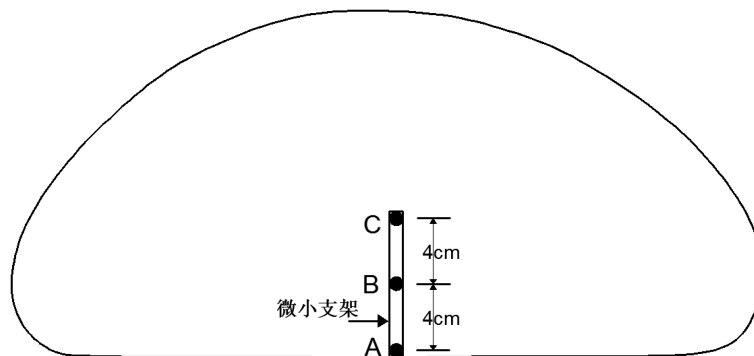


Figure 4. Schematic graph of the locations of sensors

图 4. 传感器布置位置示意图

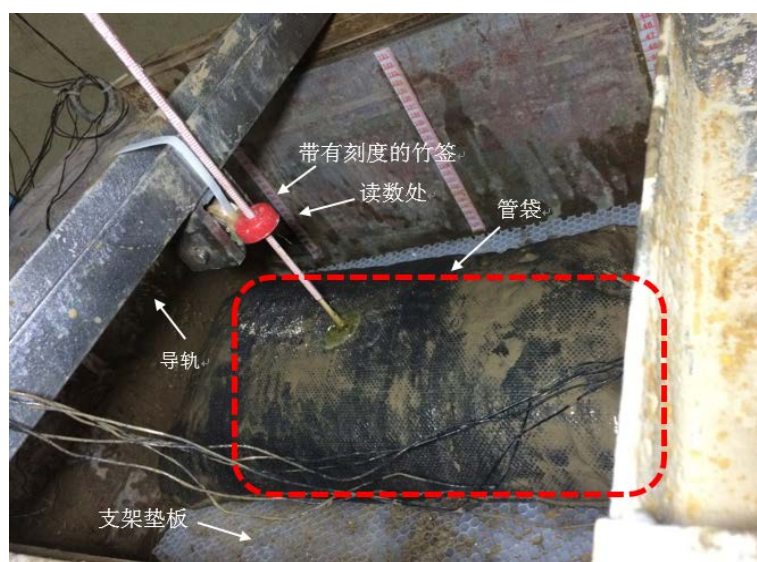


Figure 5. Picture of the centrifugal model test

图 5. 离心机模型试验图

3. 试验结果及分析

将充填好的土工管袋模型固定后，启动离心机，综合考虑到启动加荷的速度过快与时长过长均会对试验结果有一定的影响，本实验在 200 s 内逐渐线性加载至 50 g，监测土工管袋在 50 g 离心作用下固结特性。试验所得均为加载至 200 s (离心加速度达到 50 g) 之后管袋高度以及管内孔压、土压随离心作用时间的增量变化，结果均换算成原型。

3.1 管袋高度的变化

试验过程中管袋测点(袋顶中心处)高度随时间的变化如图 6 所示。由图 6 可知，由于袋内水排出以及土体的固结程度不同，高度随着时间呈现了两个阶段变化，在 30 d 时间内，袋内水较多且土体松散，高度随着时间快速下降，袋顶共沉降约 2.8 m，而随着排水过程的进行，袋中水变少，排水速度逐渐减小，土体变得密实，在之后的 20 d 时间内，管袋高度下降了约 0.7 m，之后由于土体排水固结过程的基本完成，管袋高度几乎不再下降。由此可见，土工管袋的沉降变形主要发生在土体充填后的一个半月内，这对于确保工程施工安全有着重要的指导作用。

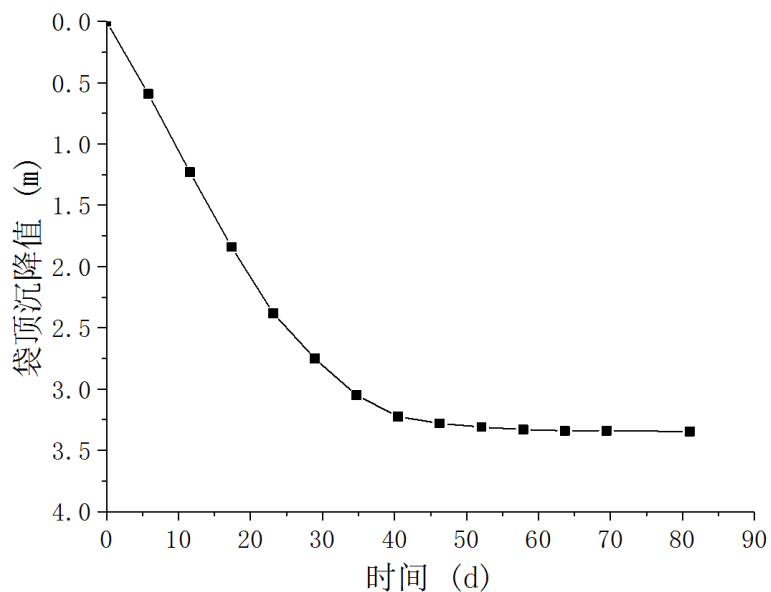


Figure 6. Variation curve of tube height

图 6. 管袋高度变化曲线

3.2. 不同位置孔压变化

孔压传感器记录了三个位置的孔压增量的变化过程, 如图 7 所示。由图 7 可知, 孔压的消散规律与高度变化相同, 消散速度由快至慢, 但不同位置孔压的消散速度和消散值不同。底部(A 处)和中部(B 处)孔压呈现了较为理想的下降关系曲线, 在 60 d 时间内, 中部孔压值下降了 15 kpa, 而底部孔压下降了约 20 kpa, 并且在开始阶段底部孔压下降速度大于中部孔压, 这与模型试验的结果相一致, 由于中部的排水路径较长, 下部的孔压消散速率和最终消散值都要比中部大, 之后两处孔压基本不再变化。上部(C 处)孔压的数值变化不大, 在下降 7 kpa 左右后便不再变化, 可能是因为此时水面已低于上部位置处的传感器所致。总体看, 孔压的消散降低过程持续时间较长, 但前一个月完成了近 90%。

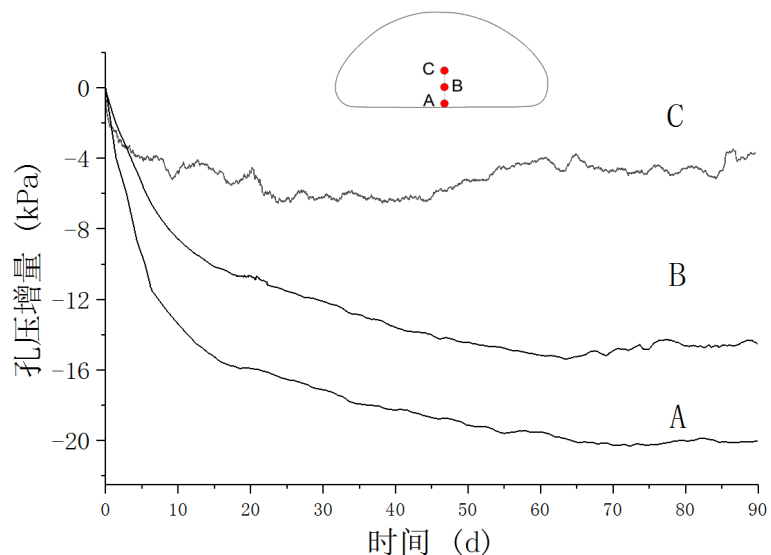


Figure 7. Variation curve of pore pressure at different location of tube

图 7. 管袋不同位置孔压变化曲线

3.3. 袋底土压力变化

图 8 为袋底部垂直和水平土压力随时间的变化曲线。从图 8 可以看出, 土压的变化趋势与孔压大致相同, 水平和垂直土压力先快速的线性递减, 而后较为缓慢的减小, 最后至平稳, 整个过程土压的减小越来越慢, 垂直土压力的减小比水平土压力快, 数值也比其大。土压的减小源自泥浆中水的排出和土颗粒向两侧的运动, 袋高减小, 宽度增加, 使得上覆压力减小。管袋中的土体受到管袋壁面的侧向挤压, 其力学行为非常复杂, 从监测结果已看出, 其压力降低的侧压力系数(水平压力与垂直土压力的变化值之比)是动态变化的。

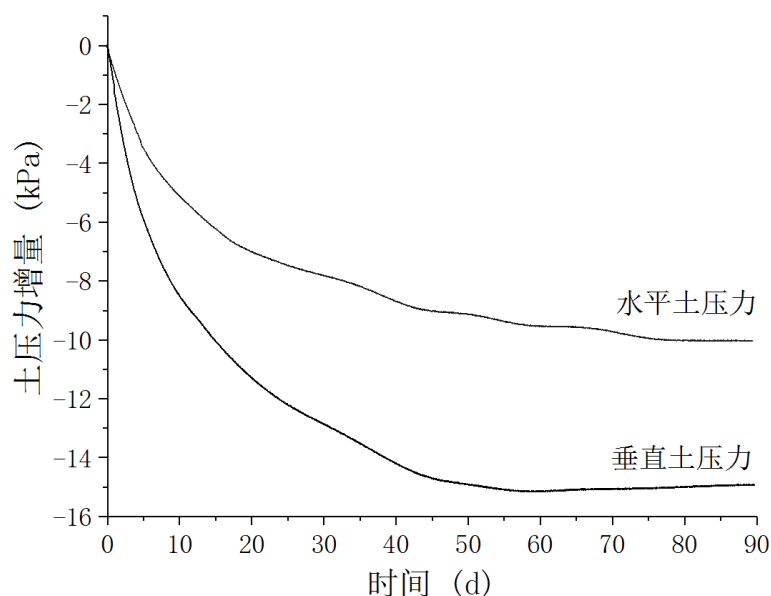


Figure 8. Variation curve of soil pressure at the bottom of tube
图 8. 管袋底部土压力变化曲线

4. 结论

本文采用离心机模拟方法开展了土工管袋固结过程试验, 将土工管袋充填泥浆后在 50 g 的离心加速度上进行试验, 通过监测管袋高度以及袋内土体中的孔隙水压力、土压力的变化过程, 探究了土工管袋土体的固结特性。得到如下结论:

1) 管袋高度随着时间呈现了两个阶段变化, 一开始管袋高度快速下降, 之后由于水的排除、土体的固结下降速度逐渐变缓直至基本不再变化, 土工管袋的沉降变形主要发生在土体充填后的一个月内。

2) 袋中部孔压消散较慢、消散值较小, 下部孔压消散较快且消散值较大, 孔压的消散降低过程持续时间较长, 但前一个月完成了近 90%。

3) 袋底处的土压力随着管袋高度的降低、排水的进行而逐渐减小, 垂直土压力减小值比水平土压力大, 管袋中的土体力学行为因受到管袋壁面侧向挤压而呈现为非常复杂的变化过程。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(51479137)。

参考文献

- [1] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115.

- [2] Prasanna, S. and Kumar, P. (2017) Soil Reinforcement Using Coconut Shell Ash: A Case Study of Indian Soil. *Journal of Civil Engineering and Construction*, **6**, 73-78.
- [3] 张文斌, 谭家华. 土工布充砂袋的应用及其研究进展[J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 98-104.
- [4] 包承纲. 堤防工程土工合成材料应用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [5] 杨智, 袁磊, 李淼, 等. 充泥管袋和模袋混凝土在堤防中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(2): 44-46.
- [6] 刘斯宏, 松冈元. 土工袋加固地基新技术[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1665-1670.
- [7] 刘斯宏, 汪易森. 土工袋加固地基原理及其工程应用[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(5): 221-225.
- [8] Shin, E.C. and Oh, Y.I. (2007) Coastal Erosion Prevention by Geotextile Tube Technology. *Geotextiles & Geomembranes*, **25**, 264-277.
- [9] 刘伟超, 张仪萍, 杨广庆. 土工管袋充填特性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2544-2549.
- [10] 侯瑜京. LXJ—4—450 土工离心机在岩土工程中的应用[J]. 北京水利, 1998(5): 55-56.
- [11] 蔡正银, 李景林, 徐光明, 等. 土工离心模拟技术及其在港口工程中的应用[J]. 港工技术, 2005(S1): 47-50.
- [12] 包承纲. 我国岩土离心模拟技术的应用与发展[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11): 55-66.
- [13] 李林昊, 赵宇飞, 汪小刚. 预应力锚索边坡加固作用的离心机试验研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(1): 143-148.
- [14] Fuglsang, L.D. (1988) The Application of the Theory of Modelling to Centrifuge Studies. *Centrifuge in Soil Mechanics*.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjce@hanspub.org