DOI：10.11779/CJGE2023S10032

软土地基堤防稳定性离心模型试验研究

张 楠[1,2]，李 波[1]，王天成[1]，江洎洧[1]，王汉武[1]

（1. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室，湖北 武汉 430010；2. 中国地质大学（武汉），湖北 武汉 430074）

摘 要：为探究软土地基堤防的稳定性及变形机理，以某软土地基堤防工程作为原型，提出了排水板+堆载预压排水固结处理优化方案，开展了 3 级堆载工况的 2 组堤防离心模型试验，从软基顶部沉降、孔隙水压力变化、地基强度变化等角度，对比分析了未处理与优化后软土地基堤防的稳定性。结果表明：处理后地基在 3 级堆载工况加载时均表现出更小的工后沉降，土压力在超重力场下快速稳定，孔隙水压力消散速度更快，塑料排水板+堆载预压地基处理方法能够提高软土地基固结效率及稳定性。研究成果可为软土地基的堤防断面设计和地基处理优化设计提供指导。

关键词：软土地基；堤防；离心模型试验；沉降；稳定性分析

中图分类号：TU472 **文献标识码**：A **文章编号**：1000−4548(2023)S1-0222-04

作者简介：张 楠(1991—)，女，河南南阳人，工程师，主要从事地基基础处理、岩土锚固等方面的研究工作。E-mail: 842305459@qq.com。

Centrifugal model tests on stability of embankment on soft soil foundation

ZHANG Nan[1, 2], LI Bo[1], WANG Tiancheng[1], JIANG Jiwei[1], WANG Hanwu[1]

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: To explore its stability and deformation mechanism, an optimized consolidation treatment scheme of drainage plate and preloading drainage for the embankment on soft soil foundation is proposed based on an embankment project. Two groups of centrifugal model tests are carried out under three levels of preloading conditions. The stability of untreated and optimized embankments on soft soil foundation is compared and analyzed from the perspectives of foundation settlement, pore water pressure and foundation strength. The results show that a smaller post-construction settlement for the treated foundation is observed under the loading conditions of three levels of preloading, and the earth pressure reaches a stable state in a short time under over-gravity field. Meanwhile, the dissipation capacity of pore water pressure is higher. The plastic drainage board and surcharge preloading foundation treatment method for the old embankment on soft foundation can improve the consolidation efficiency and stability. The research results may provide guidance for the section design of embankment and the optimization of foundation treatment on soft soil foundation.

Key words: soft soil foundation; embankment; centrifugal model test; settlement; stability analysis

0 引 言

软土具有压缩性高、强度低、透水性差及流变性高等特性[1-2]。软土物理力学性质和工程特征导致软基堤防易发生软土层剪切破坏，产生深层滑动[3-4]；若堤身填筑速率过快，软基未能完成排水固结，则易引发地基不均匀变形或新老堤身结合部错动，甚至产生滑塌现象[5]。因此，开展软基堤防稳定性和变形分析具有重要工程意义。

在软基堤防研究方面，高峰等[6]对 Hilf 分析法进行了改进，给出了考虑强度随孔隙气压和孔隙水压力变化的饱和土堤防稳定性理论分析方法。孔纲强等[7]建立了软土地基上新建堤防的数值模型，分析了填筑速率等施工控制指标对软基堤防沉降的影响规律。传统研究方法重点关注安全系数和破裂面位置，不能揭示软基堤防破坏机理、动态变形及强度变化规律，且存在参数选取准确度影响计算结果等缺陷，难以全面反映软基堤防演变过程。

近年来，土工离心模型试验已成为研究岩土工程地基稳定性问题的重要研究手段。Jin 等[8]通过动态离心模型试验，模拟江永大坝在地震荷载下的加速度和沉降变化；Wang 等[9]采用离心机模型试验，研究了地震作用下的土工织物加固路堤的加固机理和作用规

基金项目：国家自然科学基金项目（51979009）

收稿日期：2023-07-05

律。大多数学者用离心试验模拟地震作用下的建筑物沉降和变形情况，较少研究软基堤防问题。

本文以华阳河蓄滞洪区某软土堤防断面为例，在现场调查、原位试验的基础上，获取物理力学指标，采用离心模型试验的手段进行了设计方案对比分析，探究了软基堤防的稳定性、变形及强度增长规律，验证了地基处理优化方案的合理性。

1　工程背景

1.1　工程概况

工程原型选取自华阳河蓄滞洪区软土地基堤防建设工程。软土堤基断面设计方案如图 1 所示。

工程提出的地基处理优化方案为采用塑料排水板-砂垫层排水联合堆载预压，即先在地基上插打 15 m 深塑料排水板，以正方形布置，间距为 1.2 m，随后铺设 0.4 m 厚砂垫层，地基处理宽度为 16.8 m。

施工过程为三次逐级堆载：第 1 次堆载 1.5 m，施工和预压 60 d；第 2 次至 3 m，施工和预压 150 d；第 3 次至 7.6 m，施工和预压 315 d。

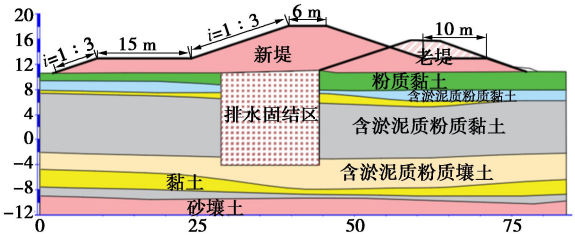


图 1　某典型软土地基堤防断面剖面图

Fig. 1 Section of a typical embankment on soft soil foundation

1.2　土体物理力学性质

本试验共在 4 个安全区布置了 11 个断面进行原位测试和室内试验，试验得出该区域土体的物理力学参数，见表 1。

表 1　工程原型土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of in-situ soils

土性	重度/(kN·m^{-3})	含水率/%	饱和固结快剪 黏聚力/kPa	饱和固结快剪 内摩擦角/(°)	十字板剪切强度/kPa
淤泥	17.0				10
淤泥质粉质黏土	18.4	38.9	17	12	18
砂壤土	20.0	30.0	9	27	

2　离心模型试验方案

2.1　离心机试验设备

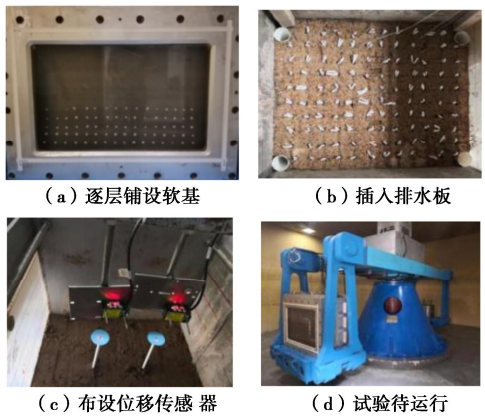
本试验采用 CZKY-200 土工离心机开展缩尺堤防模型试验，有效容量 200g·t，最大加速度 200g。

2.2　模型试验方案设计

试验加速度设定为 60g，则试验模型相似比 N_l=60，时间相似比 N_t=3600。拟模拟 2 种工况：T1 试验，地基不作处理；T2 试验，按照设定地基处理方案，采用塑料排水板+堆载预压进行地基处理。工程原型地层概化为 1 层软土地基，试验主要使用含淤泥质粉质黏土、路堤填土，均为现场取样。

由于原型排水板的尺寸限制，本次试验将塑料排水板换算成等效当量直径的砂井。换算后砂井的当量直径 d 为 60 mm，对应模型当量直径为 1 mm。原型间距约 1200 mm，模型排水板间距为 20 mm×20 mm，方形排列，有效排水直径 d_e 为 2.26 cm，排水体直径为 1 mm。

模型箱尺寸（长×宽×高）为 1.0 m×0.4 m×0.8 m，模型预固结完成后，将模型表层放样为 20 mm×20 mm 的方格网。塑料排水板处理的地基长度为 25 cm，共约 1000 根排水体。离心模型制作过程，如图 2 所示。



（a）逐层铺设软基　（b）插入排水板

（c）布设位移传感器　（d）试验待运行

图 2　离心模型制作过程

Fig. 2 Preparation process of centrifugal model

2.3　传感器布设

试验传感器测点布设如图 3 所示。激光位移传感器 L1～L4，用于监测老堤顶面、优化后堤防顶面、优化后堤平台及软土地基地表的沉降情况。老堤堤角处和堤身下分别布设孔隙水压力传感器 KY1～KY3、KY4～KY6，用于监测布设塑料排水板前后土体孔隙水压力消散情况。

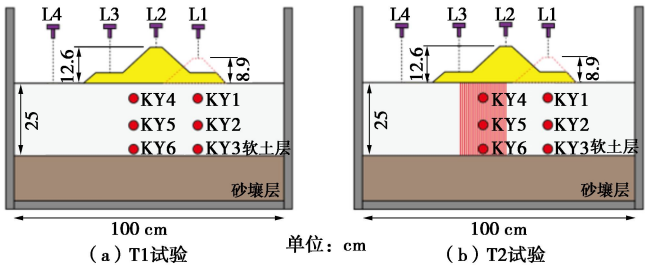


图 3　离心模型试验模型传感器布设

Fig. 3 Layout of sensors for centrifugal model

2.4　试验过程

开展 2 组离心模型试验，具体步骤如下：①模型

箱内壁均匀贴一层聚四氟乙烯以抑制边壁效应，分层慢慢铺设现场采集的原状土样，并在指定位置埋入传感器。②铺设地基土、砂垫层和堆载 1：将模型箱装入离心机室，加速度逐级提高至 60*g*，运行 0.4 h 后停机（模拟原型 60 d），测试十字板强度、含水率和密度；加载堆载 2：T1 试验直接施加堆载 2；T2 试验先进行塑料排水板施工，再施加堆载 2，运行 1 h 后停机（模拟原型 150 d），测试相应参数；加载堆载 3：施加堆载 3，2.1 h 后停机（模拟原型 315 d），测试相应参数，试验同时采集各传感器的数值。③记录固结后的模型沉降，绘制孔压随固结时间的消散曲线，取固结后土样进行常规三轴等试验。

3 试验结果分析

3.1 沉降时程响应

2 组模型各测点位置处的沉降时程响应如图 4 所示。由图 4 可知，T1、T2 试验土体沉降整体随荷载和运行时间增大而增大，分级荷载施加时，沉降量均产生轻微突变，运行时间 3.8 h（原型约 570 d）后，各测点沉降速率逐渐减小，沉降趋于稳定。

由于堤防填筑荷载作用，堤顶中心处（L2）沉降最大，新堤平台处次之（L3），在土的长期固结作用下，老堤所在位置（L1）沉降量小于新堤平台（L3）处，软基地表最小（L4），与实际相符。

T2 试验沉降值显著大于 T1 对应位置的沉降，说明在总沉降不变的情况下，排水板的施加有效减少了工后沉降。模型运行 3.5 h（对应原型 525 d）堆载至最大高度，T1 试验堤顶沉降量为 28.9 mm，对应原型沉降量为 1.73 m，占总沉降量（2.27 m）的 76.4%，工后沉降为 0.54 m；T2 试验堤顶沉降量为 33.9 mm，对应原型沉降量为 2.03 m，占总沉降量（2.27 m）的 89.2%，工后沉降为 0.24 m，工后沉降显著减小。

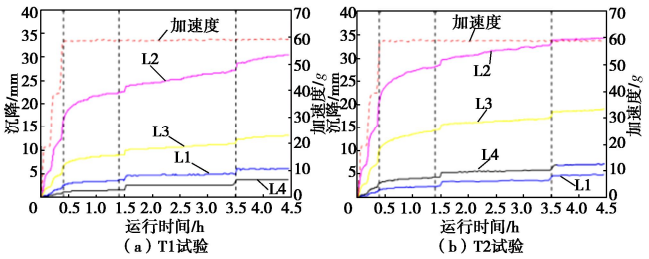


图 4 模型沉降-时间关系曲线

Fig. 4 Settlement-time curves of two models

3.2 孔隙水压力响应

2 组模型新、老堤防侧各测点位置处的孔隙水压力变化如图 5，6 所示。

由图 5 可知，布置于老堤侧 KY1、KY2、KY3 孔压计监测的孔隙水压力响应情况，在分级荷载施加时均产生了较大突变，离心机重力场运行稳定后超孔压逐渐消散，孔隙水压力减小，运行时间 3.8 h（原型约 570 d），孔压消散速率逐渐减小，土体固结趋于稳定。由于 KY1、KY2、KY3 设置于远离排水板的区域，因此，T2 试验模型（增设排水板）不同土层位置处的孔隙水压力未产生显著变化。

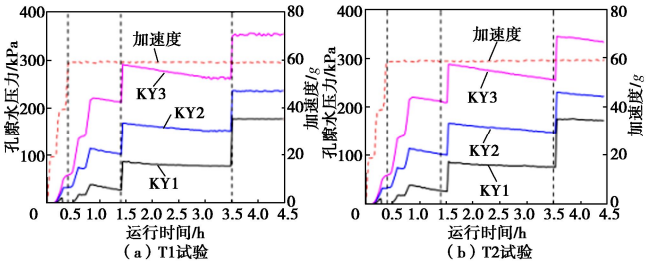


图 5 老堤侧模型孔压-时间关系曲线

Fig. 5 Pore pressure-time curves at old embankment sides

由图 6 可知，布设于新堤侧的 KY4、KY5、KY6 孔压计监测的孔隙水压力响应情况，呈现出与老堤侧孔隙水压力响应相似的三级阶梯发展规律，但 T2 试验中布设在排水板区域的测点（KY4、KY5、KY6）各孔隙水压力峰值均显著小于同一土层的 KY1、KY2、KY3 处孔隙水压力峰值，且显著小于未设置排水板的 T1 试验各测点峰值。未设置和设置排水板区域的最大孔隙水压力分别为 356，243 kPa。由此可见，增设塑料排水板能显著减小超孔隙水压力的涨幅，减少软土地基的沉降变形。

堤基最深处的 KY3、KY6 测点，由于排水路径最长，孔隙水难以消散，孔隙水压力消散时间较长，导致孔隙水压力最大；KY2、KY5 测点次之；靠近地表的 KY1、KY4 测点最小，与实际相符。

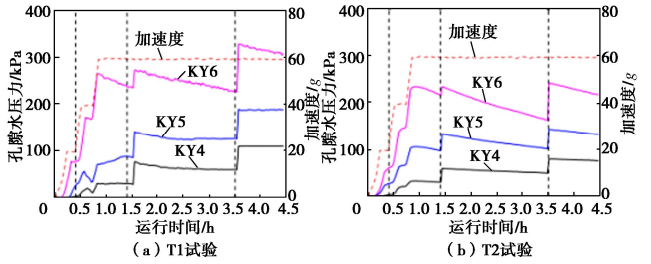


图 6 新堤侧模型孔压-时间关系曲线

Fig. 6 Pore pressure-time curves at new embankment sides

3.3 地基强度变化

2 组模型各测点位置处的微型十字板剪切强度变化如图 7 所示。由图 7 可知，T2 的十字板强度显著大于 T1 对应位置的强度，表明在增加塑料排水板后，软土地基强度显著增大，堆载至设定最大高度稳压后地基强度为 32.6 kPa，与未进行堆载和排水板处理的对应位置强度相比增大约 15 kPa，与未进行排水板地基处理的 T1 试验相比增大约 10 kPa。

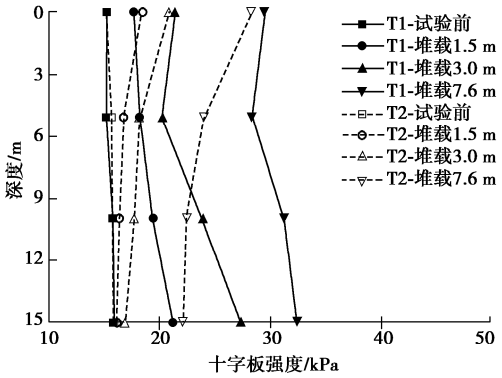


图 7 模型不同深度处地基强度

Fig. 7 Foundation strengths at different depths

4 结　　论

（1）处理后地基在 3 级堆载工况加载时均表现出更小的工后沉降，最大值为 0.24 m，土压力在超重力场下快速稳定，孔隙水压力消散速度更快。优化后软土地基堤防最终强度达到 32.6 kPa。

（2）离心模型试验在验证软土地基堤防稳定性和变形机理方面具有显著优势，针对堤防设计断面增加塑料排水板+堆载预压地基处理方法能够加快地基固结效率，建议在类似工程中进行地基处理。

参考文献：

[1] 林鸿州，于玉贞，李广信，等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报，2009，**28**(1)：198-204. (LIN Hongzhou , YU Yuzhen, LI Guangxin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(1): 198-204. (in Chinese))

[2] DELAGE P, LEFEBVRE G. Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, **21**(1): 21-35.

[3] 杨爱武，肖　敏，周玉明. 石灰粉煤灰固化天津滨海软土试验研究[J]. 地下空间与工程学报，2019，**15**(1)：60-67. (YANG Aiwu, XIAO Min, ZHOU Yuming. Experimental study on lime-fly ash to cure Tianjin marine soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, **15**(1): 60-67. (in Chinese))

[4] 张　宏，柳艳华，杜东菊. 基于孔隙特征的天津滨海软黏土微观结构研究[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2010，**38**(10)：1444-1449. (ZHANG Hong, LIU Yanhua, DU Dongju. Microstructure research based on pore characteristic of soft clay in Tianjin Binhai new district[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, **38**(10): 1444-1449. (in Chinese))

[5] 杨爱武，吴可龙，周玉明，等. 小偏应力作用下吹填土蠕变过程中微结构特征演变研究[J]. 水文地质工程地质，2015，**42**(2)：89-96. (YANG Aiwu, WU Kelong, ZHOU Yuming, et al. A study of the microstructure characteristics evolution of dredger fill in the process of creep[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, **42**(2): 89-96. (in Chinese))

[6] 高　峰. 一种施工期间堤防稳定性分析方法[J]. 岩土力学，2009，**30**(增刊 2)：158-162. (GAO Feng. An analysis method of stability of embankment during construction period[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S2): 158-162. (in Chinese))

[7] 孔纲强，张　弛. 填筑速率对软基上堤防沉降影响的现场试验与数值模拟[J]. 岩土力学，2014，**35**(S2)：343-349. (KONG Gangqiang, ZHANG Chi. Field test and numerical simulation of deformation characteristics of embankment on soft ground under different filling speeds[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S2): 343-349. (in Chinese))

[8] JIN J H, PARK S, TAMANG B, et al. A study on seismic behaviors of earth-filled embankment with intact and deteriorated core using centrifuge model tests[J]. International Journal of Civil Engineering, 2021, **19**(11): 1283-1297.

[9] WANG L P, ZHANG G, ZHANG J M. Centrifuge model tests of geotextile-reinforced soil embankments during an earthquake[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, **29**(3): 222-232.

（编校：孙振远）