

DOI: 10.11779/CJGE2024S20046

柱状和格栅状搅拌桩联合加固河堤变形特征离心模型 试验研究

沈晨^{1,2,3}, 章定文^{*1,2,3}, 宋涛⁴, 张国龙⁴

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 综合交通运输理论交通运输行业重点实验室(南京现代综合交通实验室), 中华人民共和国交通运输部, 江苏 南京 211100; 3. 江苏省低碳与绿色岩土工程重点实验室, 江苏 南京 211189; 4. 安徽省水利水电勘测设计研究总院有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 采用离心模型试验研究了柱状和格栅状搅拌桩联合加固河堤的变形特征。结果表明, 采用柱状和格栅状搅拌桩加固软土地基上河堤, 可有效控制地基的沉降和减小了软土地基的水平位移, 河堤边坡稳定性高。堤顶处沉降最大, 尽管施工完成一年后沉降尚未完全稳定, 但沉降速率放缓; 由于搅拌桩的应力集中效应显著加速了地基的固结速率, 根据实测沉降和超静孔隙水压力计算得到施工完成一年时搅拌桩加固地基的固结度分别达到了 80%, 75%以上。因桩土刚度差异, 桩土应力分配呈现模型的应力集中效应, 实测的水泥土搅拌桩桩土应力比介于 2~3。

关键词: 软土地基; 柱状搅拌桩; 格栅搅拌桩; 河堤; 离心模型试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S2-0210-06

作者简介: 沈晨(1992—), 男, 安徽蚌埠人, 博士研究生, 主要从事软基处理方面的研究工作。E-mail: ivans_shen@126.com。

Centrifugal model tests on deformation characteristics of river embankment improved by combined columnar and grid-form columns

SHEN Chen^{1,2,3}, ZHANG Dingwen^{1,2,3}, SONG Tao⁴, ZHANG Guolong⁴

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Key Laboratory of Transport Industry of Comprehensive Transportation Theory (Nanjing Modern Multimodal Transportation Laboratory), Ministry of Transport, PRC, Nanjing 211100, China;

3. Jiangsu Key Laboratory of Low Carbon and Sustainable Geotechnical Engineering, Nanjing 211189, China; 4. Anhui Survey & Design Institute of Water Resources & Hydropower Co., LTD, Hefei 230088, China)

Abstract: The centrifugal model tests are conducted to investigate the deformation characteristics of the river embankment on soft ground improved by the combined columnar and grid-form columns. The results indicate that reinforcing a river embankment on soft soil foundations with columnar and grid-form deep mixing columns can effectively control foundation settlement and reduce horizontal displacement, resulting in stability of high slopes. The maximum settlement occurs at the top of the river embankment, and although the settlement is not fully stabilized one year after construction, the settlement rate slows down. The significant stress concentration effects of the mixing columns accelerate the consolidation rate of the foundation. Based on measured settlement and excess pore water pressure, the degree of consolidation of the column-reinforced foundation one year after construction reaches over 80% and 75%, respectively. Due to the stiffness difference between the columns and the surrounding soil, the stress distribution exhibits stress concentration effects in the model. The measured column-soil stress ratio ranges between 2~3.

Key words: soft ground; columnar deep mixed column; grid-form deep mixed column; river embankment; centrifuge model test

0 引言

软土地基通常因具有高含水率、高压缩性和低渗透性等特点, 导致其承载力较低。水泥深层搅拌桩是一种常用的原位地基处理技术, 它能迅速提升软土地

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078129); 综合交通运输理论交通运输行业重点实验室(南京现代综合交通实验室)开放课题(MTF2023009); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX21_0031)

收稿日期: 2024-06-21

*通信作者 (E-mail: E-mail: zhang@seu.edu.cn)

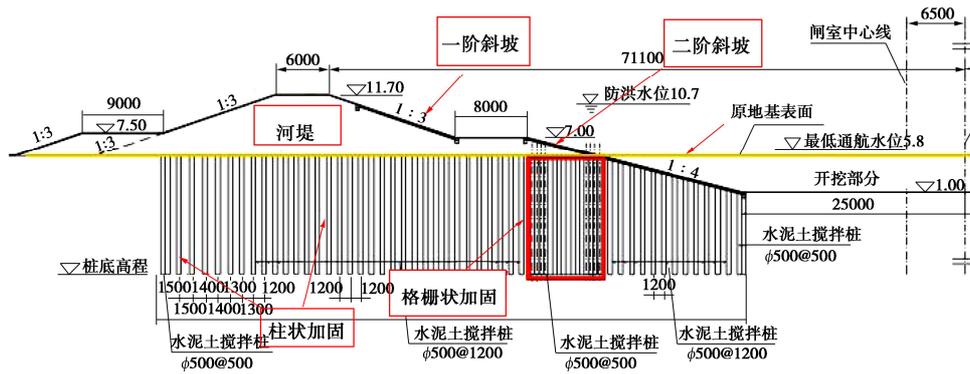


图 1 典型断面剖面图

Fig. 1 Profile of typical section

基承载能力并减少地基压缩性^[1], 因此工程中通常采用柱状水泥搅拌桩加固软土路堤。现有相关研究多集中于搅拌桩加固路堤的荷载传递机制、桩体应力集中和地基固结特征等方面^[2-4]。然而, 由于柱状水泥土搅拌桩加载地基的水平抗力较低, 仍时有高填路堤因水平变形过大而失稳的案例发生^[4]。

格栅状搅拌桩加固是一种提升地基承载力的有效方式^[6]。徐晗等^[7]推导了格栅状搅拌桩复合地基的平均桩端阻力和侧阻力。吕文志等^[8]进行了格栅状搅拌桩地基现场载荷试验, 指出“口字型”地基的极限承载力主要由砂性土剪切松散破坏后的残余强度控制。Yamashita 等^[9]认为格栅状深层搅拌墙可有效抵抗强地震下的水平力。上述研究主要聚焦在格栅状搅拌桩加固提升地基承载力等方面, 设计依据也主要为防止地震时砂土液化的要求。然而, 对于软土地基中采用格栅状搅拌桩加固以减小路堤变形, 提升路堤稳定性的机理等缺乏相应的研究。

因此, 本研究依托引江济淮工程(安徽段)白山枢纽工程中格栅状搅拌桩加固高填路堤实例, 采用离心机模型试验, 研究柱状和格栅状搅拌桩联合加固地基在河堤荷载作用下的变形性状。通过监测和分析河堤及地基的位移变形、孔隙水压力、桩体应力分配等, 揭示柱状和格栅状搅拌桩联合加固河堤的变形特征。

1 工程概况

白山节制枢纽工程沿线软土广泛分布, 主要的地质层包括: 人工填土、①层粉质黏土、①₂层粉质黏土、①₃层淤泥质粉质黏土、②层淤泥质粉质黏土、③层细、中砂、⑤₂层中细砂夹粗砂、小砾石、⑥₃层砂砾石夹黏土。其中淤泥质软土层的平均厚度约 12.0 m。该土层含水率 51.4%, 抗剪强度低, 新筑河堤抗滑稳定及沉降变形控制尤为突出。本研究设计的河堤包含两个斜坡, 总高度 10.7 m, 其中一阶斜坡高 4.7 m, 堤顶宽 6.0 m, 边坡斜率 1:3; 二阶斜坡包含填筑和开挖

两部分, 以原地面高程为基线向上填筑 2.0 m, 向下开挖 4.0 m, 坡高 6.0 m, 堤顶宽 8.0 m, 边坡斜率 1:4。现场采用搅拌桩对地基进行加固, 搅拌桩桩长 13.0 m, 桩径 0.5 m, 桩间距 1.2 m。水泥土桩穿过软土层后到达承载力较高的③层细、中砂层。图 1 是柱状和格栅状搅拌桩联合加固河堤的典型断面示意图。

2 离心模型试验

2.1 试验设备及方案

本试验在南京水利科学研究院的 400 g·t 大型土工离心机试验平台上进行。模型容器内部空间尺寸为 1200 mm (长) × 400 mm (宽) × 700 mm (高)。根据模型容器的尺寸, 确定相似比例(重力等级 n)为 1:50。

(1) 地基及河堤制备

模型地基由持力层和软土层组成, 底部持力层采用福建标准砂模拟, 层厚 (100 mm)。软土层厚 260 mm。软土地基所用土均取自施工现场, 经重塑后制成。首先, 在大型固结仪上对地基分级静压固结, 顶面设置排水板以加速固结, 最大固结压力 58.5 kPa, 直至沉降趋于稳定; 初步固结完成后将模型地基置于离心机中, 在 50g 离心加速度下运行约 30 min, 最后将地基表面削至设计平面。固结期间采用微型触探仪测量软土层不排水抗剪强度, 预固结后测得地基软土层的平均不排水抗剪强度介于 10.2~11.1 kPa, 与现场勘测得到的 9.8~12.8 kPa 接近。

河堤填土材料为粉质黏土, 主要控制指标为密度和含水率, 以保证压实度。其重度 $\gamma=19.8$ kN/m³, 含水率 $w=18.3\%$; 不均匀系数 $C_u=1.350$, 曲率系数 $C_c=1.104$, 最大干密度 1.74 g/cm³, 最小干密度 1.43 g/cm³。

(2) 模型桩制备

根据选定的相似比, 模型桩桩长 260 mm, 直径 10 mm, 桩间距 24 mm。水泥土桩强度 (1 MPa) 满足

相似比要求。首先,定制内径为 10 mm 的 PVC 管;其次,将配比后的水泥石倒入管中,振捣均匀密实;最后,在标准养护条件下养护 28 d 后拆模。采用引孔定位导向模具保证桩孔垂直度,引孔取土后,将预制好的水泥石桩精确压至设计平面。重复以上操作,直至完成复合地基的制作,见图 2。

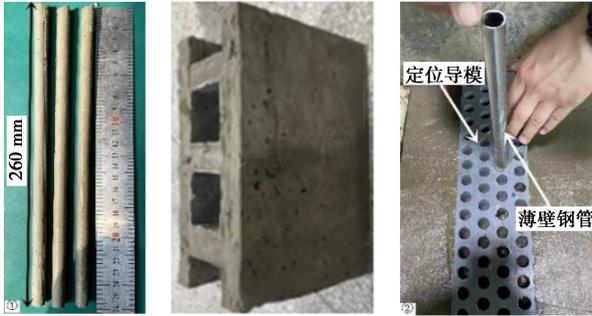


图 2 试验模型用柱状和格栅状搅拌桩

Fig. 2 Columnar and grid-form deep mixed column in model tests

2.2 数据采集

图 3 是监测仪器等具体布设示意图。如图所示,为测量河堤的沉降量,分别在一阶、二阶斜坡的坡肩、坡脚附近安装激光测距仪 (S1~S4)。为监测桩顶部和桩间土的压力变化,在一阶、二阶斜坡堤顶下方的桩和土 (桩顶、两桩中心、三桩中心) 分别埋设 3 个微型土压力计 (T1~T6)。此外,在一阶、二阶斜坡堤顶地表下 4, 13, 22 cm 处分别布置 3 个微型孔压力计 (P1~P6)。同时采用数字图像分析技术 (Geo PIV) 实时监测土体变形和位移。

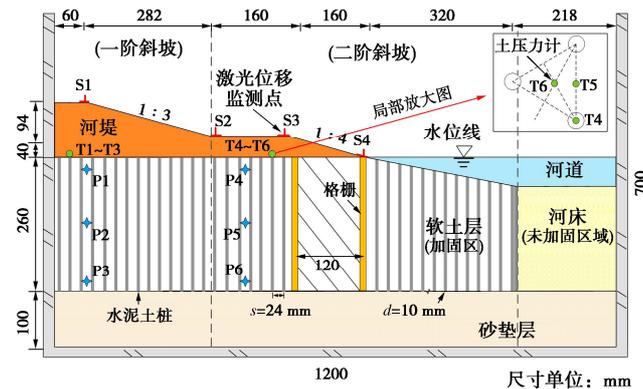


图 3 模型试验传感器布置图

Fig. 3 Arrangement of model tests

2.3 加载历程

加载阶段假设将河堤分三层填筑,分别模拟 2, 2.35, 2.35 m 填土,按等效荷载法换算每级加载的离心加速度,分别对应 27.6g (加载 6 min, 稳定 6 min)、42.7g (加载 3 min, 稳定 9 min) 和 50g (加载 1 min),为模拟河堤填筑完工后 365 d 内的工作状态,离心机在 $N=50g$ 的标准状态 (恒载阶段) 下运行 210 min。

离心机加载历程见图 4。

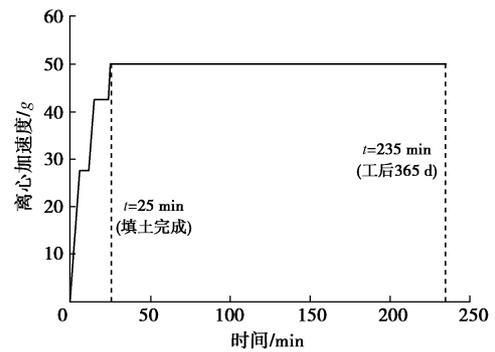


图 4 离心加速度加载历程

Fig. 4 Loading process of centrifugal acceleration

3 试验结果与分析

3.1 河堤沉降与固结

图 5 是河堤表面监测点 S1~S4 的竖向位移变化曲线。由图 5 可以知,在加载阶段,随着填土荷载增加,河堤不同位置处的竖向位移快速增加,S1~S4 沉降量随上部河堤荷载增加逐级增大。恒载排水固结期,S2~S4 沉降速率显著减小,沉降趋于稳定;其中 S2 和 S3 沉降逐渐接近,最大值分别达到 8.5, 7.1 mm。因一阶斜坡堤顶处上部荷载最大,所以监测点 S1 沉降最大,最大沉降达 25.1 mm。沉降直至结束时尚未完全稳定,但沉降速率呈放缓趋势。

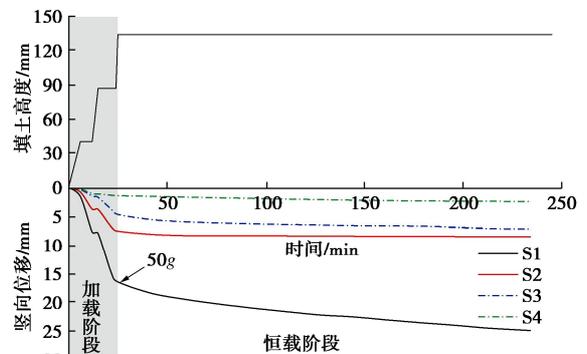


图 5 监测点竖向位移变化曲线

Fig. 5 Variation of vertical displacement

根据恒载阶段 S1 沉降曲线,以河堤填筑结束时刻 (加载阶段末) 为起点,采用局部坐标系法^[10]预测最终沉降 S_{∞} 。拟合中经比较发现对数据采用双曲线法拟合较为合理,假定 50g 下固结时间 t 与沉降 S_t 有如下双曲线关系,

$$S_t = \frac{t}{a+t} S_{\infty} \quad (1)$$

则 t/S_t 与 t 有线性关系,如下所示:

$$\frac{t}{S_t} = \frac{1}{S_{\infty}} t + \frac{\alpha}{S_{\infty}} \quad (2)$$

式中:斜率为 $1/S_{\infty}$,截距为 α/S_{∞} ,其中 α 为系数,拟

合结果如图 6 所示。

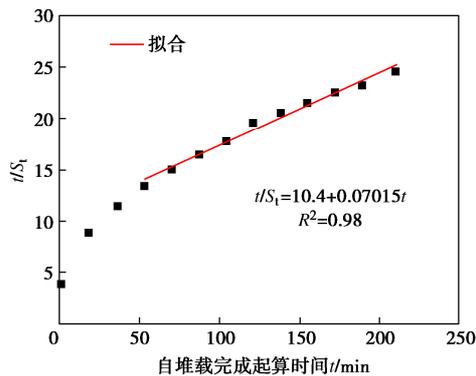


图 6 双曲线法预测沉降

Fig. 6 Predicted of settlements by hyperbola method

根据式(2)沉降数据拟合计算可得最终沉降 30.8 mm, 因此试验结束时刻固结度为 81.5%。

图 7 是模型中土体在恒载阶段结束时的位移矢量图, 为方便观察断面变形特征, 取 3 倍放大系数。

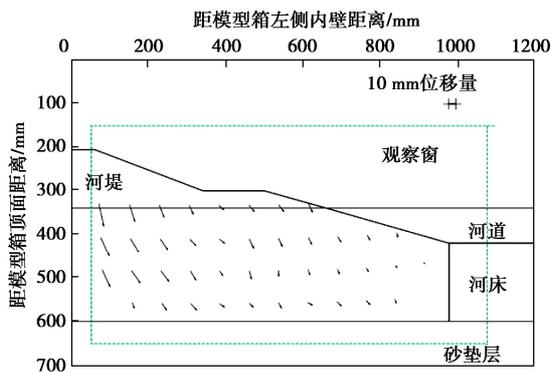


图 7 模型试验土体位移矢量图

Fig. 7 Displacement vectors of model soil

由图 7 可知, 工后 365 d 后河堤及地基土的中上部均有明显的位移变形。自地基表面向下观察到水平位移有减小的趋势。在可视化区域内, 一阶斜坡堤顶下方地基表面出现显著沉降, 但该区域内未观察到显著的水平位移, 此区域主要承担来自上部荷载的竖向应力。地基的下层水平位移相对较小, 未发现明显的圆弧形的滑动面。格栅状结构将地基分为了两个不同的部分, 有效减小了地基的水平位移, 因此河道斜坡及航道表面均未发现明显的隆起。

3.2 超静孔压分布

图 8 是典型位置处实测的超静孔压消散曲线。在 N 达到 50g 时, 埋深 22 cm 处孔隙水压力计 P3 的峰值达到 68.8 kPa, 恒载期结束消散至 16.5 kPa, 其消散量为 52.3 kPa, 该处地基土体的固结度 $U=76.1\%$, 小于前文由沉降数据计算所得地基固结度 81.5%。同理, 可得孔隙水压力计 P6 所在位置的地基土体固结度 $U=57.9\%$ 。

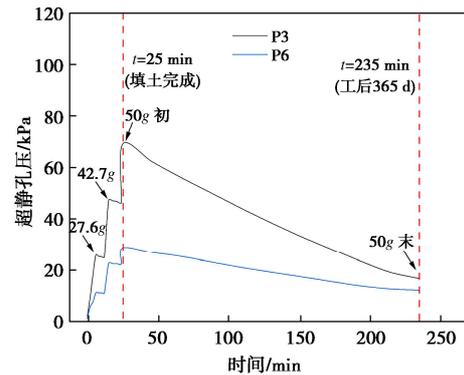


图 8 孔隙水压力随时间消散曲线

Fig. 8 Variation curves of pore water pressure

模型地基中淤泥质黏土地基为单面排水, 高度 $H=13$ m, 固结系数 $c_v=45$ m^2/a 。根据太沙基一维固结理论计算软黏土在 $N=50\text{g}$ 下运行一年地基可达到的平均固结度为 46.3%。离心模型试验中 P3 和 P6 埋深处的地基土固结度均显著高于未加固地基的平均固结度, 可见搅拌桩加速了地基的固结^[11]。

3.3 桩土压力

图 9 显示了加载及恒载阶段土压力计 T1~T6 所监测的桩土压力随时间的变化曲线。由图 9 (a) 可知, 一阶、二阶斜坡堤顶因桩土刚度差异, 桩体应力集中效应显著。当 N 达到 50g 时, 桩顶 T1 的峰值压力为 278.2 kPa。恒载初期桩顶应力明显下降, 可能是桩体所受垂直压力较大, 发生桩体沉降导致应力降低。因此, N 刚达 50g 时桩间土压力 T2 和 T3 并未达到峰值, 而是呈继续增长的趋势, 直至二者达到平衡。三桩中心的土压力峰值为 62.5 kPa, 略大于两桩中心土压力 58.6 kPa。随着地基土的逐渐固结, 桩顶压力略有增大趋势。图 9 (b) 则表明, 恒载阶段二阶斜坡堤顶下桩的竖向压力略有减小, 而桩间土压力基本保持稳定。三桩中心的土压力峰值为 36.1 kPa, 依旧略大于两桩中心土压力 26.9 kPa。

图 10 是离心加载中桩土应力比 (n) 的变化曲线。在加载初期 ($1\text{g}\sim 27.6\text{g}$), n 快速增加, 且在 $1\text{g}\sim 42.7\text{g}$ 之间增长差异较大, 可能是河堤填土 1g 下制模, 加载期自身沉降不均以及土压力计埋设时造成的误差所致。当 N 达到 42.7g 时, 一阶斜坡堤顶下方 n 达峰值 4.15, 并在 $N=50\text{g}$ 恒载阶段初期迅速下降至 2.0, 而后则随着时间有增大的趋势, 如图 10 (a) 所示。说明随着地基土的固结, 应力逐渐转移至桩顶; 一阶斜坡堤顶下的桩体几乎只承受竖向荷载, 没有发生大的水平变形, 因此 n 随时间增加可保持小幅稳定增长。 N 刚达 42.7g 时, 二阶斜坡堤顶下方 n 达峰值 3.98, 恒载阶段初期同样有明显下降。然而, 二阶斜坡堤顶 n 随着时间有持续下降的趋势。

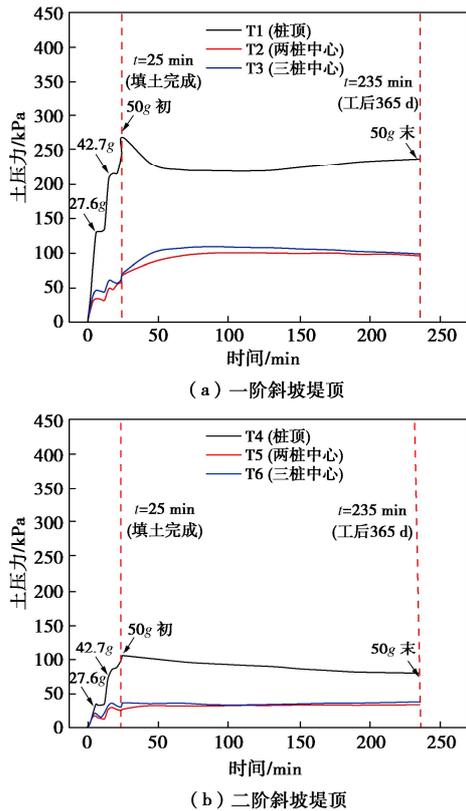


图9 地表处桩土压力变化曲线

Fig. 9 Variation of pressure of columns and soil at surface with time

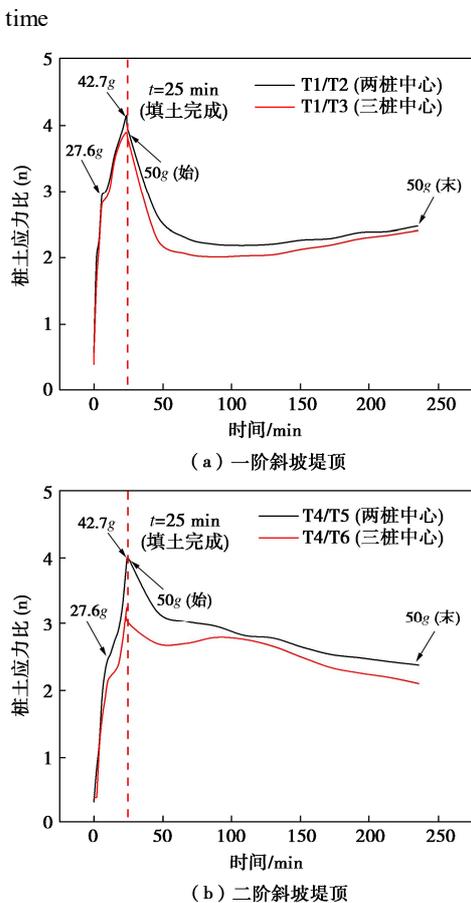


图10 桩土应力比变化曲线

Fig. 10 Variation of stress concentration ratio with time

4 结 论

(1)离心模型试验验证了采用柱状和格栅状搅拌桩联合加固软土河堤整体效果很好。一阶斜坡堤顶处上部荷载最大,根据双曲线法预测最终沉降为 30.8 mm;尽管施工完成一年时时尚未完全稳定,但沉降速率放缓。地基固结度达到了 80%以上。格栅状搅拌桩有效减小了地基的位移,50g 下河堤边坡稳定性良好。

(2)根据离心模型试验实测的超孔隙水压力消散数据,计算得到搅拌桩加固地基固结度分别为 76.1%, 57.9%。实测沉降和超静孔隙水压力估算的地基固结度都远大于未加固地基理论计算平均固结度 46.3%,可见,由于搅拌桩的应力集中效应,搅拌桩加速了地基的固结速率。

(3)因桩土刚度差异,桩土应力分配呈现模型的应力集中效应,实测的水泥土搅拌桩桩土应力比介于 2~3。河堤荷载施工完成后桩顶应力有所下降,土体应力则有一定增加量,直至达到平衡。

参考文献:

[1] 郑刚, 张军辉, 章定文, 等. 地基处理技术现状与发展[J]. 土木工程学报, 2024, 57(7): 51-70. (ZHENG Gang, ZHANG Junhui, ZHANG Dingwen, et al. State-of-the-art of ground improvement technologies[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(7): 51-70. (in Chinese))

[2] SEXTON B G, MCCABE B A. Numerical modeling of the improvements to primary and creep settlements offered by granular columns[J]. Acta Geotechnica, 2013, 8: 447-464.

[3] LU W, MIAO L. A simplified 2-D evaluation method of the arching effect for geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments[J]. Computer and Geotechnics, 2015, 65: 97-103.

[4] 王雪奎, 岳长喜, 黄思杰. DCM 和碎石基床联合承载特性的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(增刊 1): 143-146. (WANG Xuekui, YUE Changxi, HUNAG Sijie. Centrifugal model tests on combined bearing characteristics of DCM and gravel foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(S1): 143-146. (in Chinese))

[5] NGUYEN B, TAKEYAMA T, KITAZUME M. Internal failure of deep mixing columns reinforced by a shallow stabilized soil beneath an embankment[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2016, 2(4): 30-36.

- [6] KITAZUME M, TERASHI M. The Deep Mixing Method[M]. London: CRC Press, 2013.
- [7] 徐 晗, 饶锡保, 吕文志, 等. 格栅状搅拌桩复合地基静载试验数值模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(5): 102-104, 120. (XU Han, RAO Xibao, LÜ Wenzhi, et al. Numerical simulation on static load test of grid-structured cement mixing pile composite foundation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(5): 102-104, 120. (in Chinese))
- [8] 吕文志, 饶锡保, 徐 晗, 等. 格栅状搅拌桩复合地基静载试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(6): 65-69. (LÜ Wenzhi, RAO Xibao, XU Han, et al. Static load tests on composite foundation of grid-shaped CDM piles[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(6): 65-69. (in Chinese))
- [9] YAMASHITA K, SHIGENO Y, HAMADA J, et al. Seismic response analysis of piled raft with grid-form deep mixing walls under strong earthquakes with performance-based design concerns[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(1): 65-84.
- [10] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Zongze. Geotechnical Principle[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [11] YIN J H, ZHANG F. Physical modeling of a footing on soft soil ground with deep cement mixed soil columns under vertical loading[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2010, 28(2): 173-188.

(编校: 黄贤沙)

(上接第 154 页)

- [2] WANG Q, WANG L M, ZHONG X M, et al. Dynamic behaviour and constitutive relationship of saturated fly ash-modified loess[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, 25: 1302 - 1317.
- [3] 张 耀, 胡再强, 陈 昊, 等. 酸性溶液对黄土结构改良的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 681-688. (ZHANG Yao, HU Zaiqiang, CHEN Hao, et al. Experimental study on evolution of loess structure using acid solutions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 681-688. (in Chinese))
- [4] INDRARATNA B, MUTTUVEL T, KHABBAZ H. Modelling the erosion rate of chemically stabilized soil incorporating tensile force-deformation characteristics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(1): 57-68.
- [5] KONG X H, SONG S G, WANG M Y, et al. Experimental research of low liquid limit silt stabilized by lignin in the flooding area of Yellow River[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(6): 5211-5217.
- [6] YANG B, ZHANG Y, CEYLAN H, et al. Assessment of soils stabilized with lignin-based byproducts[J]. Transportation Geotechnics, 2018, 17: 122-132.
- [7] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [8] LIU C, TANG C S, SHI B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. Computers & Geosciences, 2013, 57: 77-80.

(编校: 胡海霞)