

搅拌桩加固河堤的变形破坏离心模型试验

沈晨¹, 章定文^{1*}, 宋涛², 张国龙², 杨泳³

(1. 东南大学 交通学院岩土工程研究所 / 道路交通工程国家级实验教学示范中心, 江苏 南京 211189;

2. 安徽省水利水电勘测设计研究总院有限公司, 安徽 合肥 230088;

3. 江苏盛泰建设工程有限公司, 江苏 连云港 222042)

摘要: 为验证南水北调工程安徽段-白山枢纽工程搅拌桩加固河堤的安全性, 采用离心模型试验方法研究了高重力场下河道水位、河堤表面沉降、不同位置桩土的受力与变形性状及河堤的变形破坏模式。结果表明, 土体中自由水通过破坏后的桩体排出导致河道水位上升。一级坡顶沉降最大, 最危险滑动面剪入口位于一级坡中部, 除最危险滑动面以外的地基中仍然有潜在的滑体和滑动面存在。离心加速度升至 80 g 时, 河堤发生深层滑动失稳破坏。失稳破坏过程中, 一级坡顶下桩体表现出受压受剪破坏, 一级坡面及二级坡顶下桩体表现为压弯和拉弯破坏, 二级坡面至河床下的桩体表现为剪切破坏。地基滑动面并未完全穿过桩体破坏位置。

关键词: 搅拌桩; 加固; 河堤; 离心模型试验; 失稳破坏; 破坏模式

中图分类号: TU94

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0058-07

Centrifugal model test on deformation failure of riverbank reinforced by mixing piles

SHEN Chen¹, ZHANG Ding-wen^{1*}, SONG Tao², ZHANG Guo-long², YANG Yong³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, School of Transportation / National Demonstration Center for Experimental Road and Traffic Engineering Education, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. Anhui Survey & Design Institute of Water Resources & Hydropower Co., Ltd., Heifei 230088, Anhui, China;

3. Jiangsu Shentai Construction Engineering Co., Ltd., Lianyungang 222042, Jiangsu, China)

Abstract: In order to verify the safety of the riverbank reinforced by mixing piles in Anhui section of the South-to-North water diversion project (Baishan junction project), centrifuge test was carried out to study the riverway water level, riverbank surface settlement, stress and deformation properties of piles and soil at different positions, and the deformation and failure modes of riverbank under high gravity field. The results show that the free water in the soil was discharged from the damaged piles and the water level of the riverway increased. The first crest of riverbank exhibited the largest settlement, and the shear entrance of the most dangerous sliding surface was located in the middle of the first slope. Besides the most dangerous sliding surface, there were still potential sliding bodies and sliding surfaces in the foundation. When the centrifugal acceleration rised to 80 g, the deep sliding instability failure of the riverbank occurred. In the process of riverbank failure, the columns under the first crest of riverbank were compressed and sheared to failure. The columns under the first slope and the second crest of riverbank presented bending failure. The columns under the second slope of riverbank were sheared to failure. The slip surface did not completely pass through the failure positions of columns.

Key words: mixing pile; reinforcement; riverbank; centrifuge model test; deformation failure; failure mode

0 引言

土工离心模型试验是将原型材料按一定比尺制成模型, 置于由离心机生成的高离心力场中, 通

过加大模型的土体或岩体自重体积力, 使模型的应力状态、水平与原型一致, 显示出与原型相似的变形和破坏过程。模型试验结果为建立和解释自然现象与复杂工程结构物的工作和破坏机理、比选验证

收稿日期: 2022-02-20

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。E-mail: ivans_shen@126.com。

*通信作者: 章定文 (1978—), 男, 湖南常德人, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理方面的工作。E-mail: zhang@seu.edu.cn。

优化设计方案和技术参数、数学模型检验及理论与计算方法验证等提供了可靠依据^[1]。

深层搅拌桩(CMD)是一种原位地基处理技术,可快速、有效处理软土地基而广泛应用于高速公路、铁路及堤坝等工程建设^[2-3]。水泥土搅拌桩加固地基的稳定性主要由桩和桩间土共同承担,搅拌桩桩体可提供较弱的抗弯拉、抗剪能力,具有一定的抗弯刚度,在路堤填筑及受荷过程中产生弯矩,可能会发生多种破坏模式,影响其对路堤稳定的贡献程度^[4]。现行稳定性计算方法均假设桩体发生剪切破坏,采用圆弧滑动法计算^[5-6]。实际工程中,搅拌桩群桩的抗水平阻力较低,路堤荷载作用下发生桩体破坏、失稳的事故时有发生^[7-8]。路堤失稳的破坏模式与桩体强度、桩身位置和桩周土强度等影响因素有关,不同位置的水泥土桩并不一定发生圆弧滑动破坏,其破坏模式包括整体滑动、倾斜、受压、弯曲等多种形式,在软弱土中还存在桩周土绕桩体发生绕流破坏的形式^[9-13]。CHAI等^[14]通过离心模型试验研究指出弯曲破坏是一个重要的破坏模式,但目前还没有合理实用的设计方法来计算路堤荷载作用下搅拌桩的弯曲破坏。周小文等^[15]通过离心模型试验对软土地基路堤失稳机制进行了研究,试验结果表明地基变形略呈马鞍形,建议将坡脚水平位移与堤顶中央沉降速率比值作为稳定性控制指标。郑刚等^[16-17]采用离心模型试验研究了刚性桩桩间距、桩体强度和抗弯刚度、桩端嵌入深度等条件对路堤失稳机理的影响规律,提出了路堤荷载下桩体的二次弯曲破坏理论,揭示了邻近桩发生渐进破坏的机理及引起整体失稳破坏的关键因素。此外,许多学者采用数值分析和极限平衡分析法对路堤的失稳破坏进行了定量分析,研究结果表明桩体发生了弯曲、转动、拉伸等多种破坏模式^[18-20]。

目前对路堤失稳的破坏模式研究多针对刚性桩,刚度相对较小的柔性桩不同破坏模式发生的条件及破坏形式尚不明确。本试验基于南水北调工程安徽段-白山枢纽工程实例工况,采用离心模型试验的方法,通过监测、分析高重力场下搅拌桩加固河堤的沉降变形、桩-土应力、位移场等变化规律,研究搅拌桩桩体破坏模式及地基变形破坏情况。

1 离心模型试验方案

1.1 试验设备

本试验利用南京水利水电科学研究院岩土工程研究所 400 g 的大型土工离心机完成,该离心机

的最大半径为 5.5 m,最大加速度 200 g,最大负载质量 2 000 kg。离心机配备不锈钢材质的主体模型箱,内部有效尺寸为 1 100 mm×400 mm×700 mm(长×宽×高),模型箱一侧为有机玻璃板,可较清晰的观测和采集模型纵断面的变形及破坏情况。

1.2 试验方案

(1) 模型设计

试验模型以路堤荷载下水泥土搅拌桩复合地基为例,原型工况地基水泥土搅拌桩平均长为 13.0 m,桩径 0.5 m,桩间距 1.2 m,桩身穿过软土层后到达持力层,桩端处于承载力较高的细、中砂层;河堤边坡采用二级放坡的形式,一级坡高 6.7 m,二级坡高 2 m。综合考虑模型箱尺寸等因素,相似比选定为 1:50,地基土由 260 mm 的软弱土层和 100 mm 福建标准砂持力层两层地基组成,模型河堤尺寸详见图 1(a)。对称取半幅河堤建立模型,具体试验方案见表 1。

表 1 试验模型工况

Table 1 Conditions of test model

桩间距/ mm	置换率/ %	软土层厚/ mm	持力层厚/ mm	河堤厚/ mm
24	1.48	260	100	134

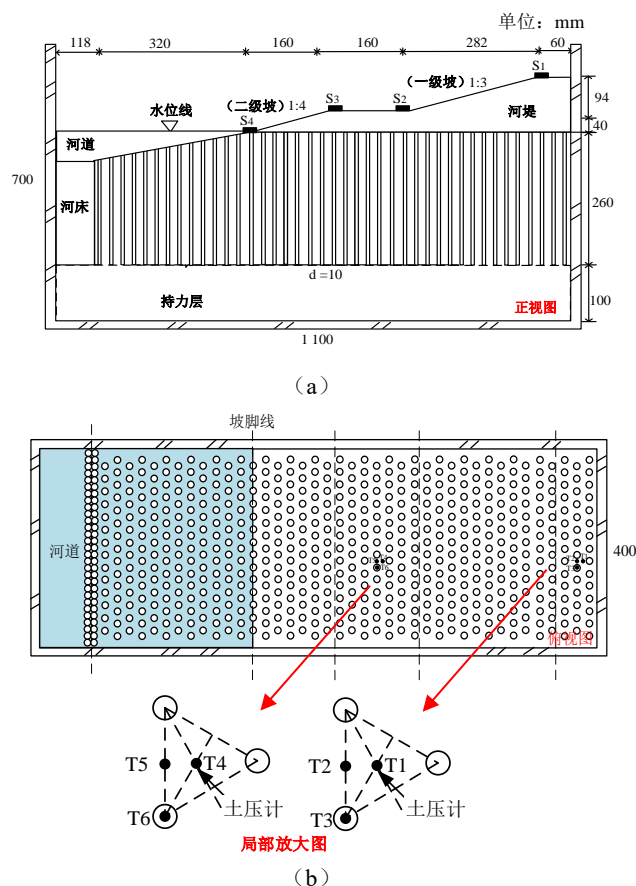


图 1 离心模型试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of centrifuge model test

(2) 模型地基、河堤土与模型桩制备

土样取自施工现场引航道边坡地表下 4 m 处, 根据土工试验方法标准 (GB/T 50123) 测得其基本物理指标见表 2。试验中地基土样均为重塑土样。

表 2 试验用土的基本物理指标

Table 2 Physical indexes of experimental soil

天然含水率/%	塑限/%	液限/%	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	渗透系数/(cm/s)
51.4	24.9	40.8	1.9	55.4	42.7	1.0×10^{-6}

河堤填料采用粉质黏土, 以密度及含水率为主要控制指标, 河堤土重度 $\gamma=19.83 \text{ kN/m}^3$, 含水率 $w=18.26\%$ 。持力层采用福建标准砂, 级配均匀, 比重 $G_s=2.643$, 最大干密度 $\rho_{dmax}=1.74 \text{ g/cm}^3$, 最小干密度 $\rho_{dmin}=1.43 \text{ g/cm}^3$, 不均匀系数 $C_u=1.542$, 曲率系数 $C_c=1.104$ 。原型水泥土搅拌桩桩长 $L_p=13 \text{ m}$, 直径 0.5 m, 弹性模量 120 MPa, 依据选定的相似比尺, 模型桩桩长 $L_m=260 \text{ mm}$, 直径为 10 mm。模型桩通过降低水泥掺量满足弹性模量相似比的要求, 按配比拌合水泥土灌入内径为 10 mm 的 PVC 管并振捣均匀密实, 标准养护 28 d 后拆模。

(3) 河堤沉降与桩土应力测试

采用激光测距仪分别测量河堤一级、二级边坡坡肩、坡脚的沉降 (图 1 (a) 所示 S1、S2、S3、S4)。在一级、二级河堤顶面中部下方的桩和桩间土分别布置 3 个微型土压力计, 量程为 0.2~10 MPa, 准确度误差 $\leq 0.3 \text{ F}\cdot\text{S}$ (图 1 (b) 所示)。

1.3 试验过程

模型地基在离心机上固结完毕后, 采用外径稍大于模型桩 1~2 mm 的引孔定位导向模具保证桩孔垂直度, 使用薄壁取土器进行引孔取土, 取土完成后同样通过引孔定位导向模具, 将预制好的模型水泥土桩精确压致设计平面。使用外径稍小于薄壁取土器内径的实心打土管将薄壁取土器管内废土取出, 完成一根模型桩的插桩, 重复以上操作, 直至完成地基模型的制作。传感器埋设完成后按设计的坡度尺寸制备路堤, 将制备好的河堤放置在地基上。模型制作完成后, 移至离心机进行试验。离心加速度达到 50 g 前采用 1 次加载的方式, 使模型试验与现场应力水平一致, 明确现场河堤施工过程的安全性; 达到 50 g 后采用每级 10 g 线性提高加速度, 分 5 次加载, 直至河堤发生破坏。离心机加载历程见表 3。

表 3 试验方案加载历程

Table 3 Loading process of test scheme

离心加速度/ g	加载时长/ min	持续时长/ min	对应现场 时间/d
50	16.0	33	57.0
60	2.5	5	8.5
70	2.5	5	8.5
80	2.5	5	8.5
90	2.5	5	8.5
100	2.5	5	8.5

2 试验结果与讨论

2.1 变形破坏宏观特征

(1) 河道水位变化

加载前后模型的河道水位变化如图 2 所示。

由图 2 可知, 试验加载前后航道水位略微上升, 加载前航道水位高度 92.7 mm, 加载后水位高度 106.5 mm, 水位上升幅度为 13.8 mm。有两个原因导致了这一现象, 首先加载过程中在河堤荷载作用下地基饱和土体孔隙受挤压变形导致孔隙率减小, 自由水受挤压排出迁移至河床表面, 但随着土体孔隙率的减小水分迁移路径变窄, 排水量减小; 其次由于水泥土桩的水力传导系数 κ 值与未改良地基土基本相同^[21], 加载过程中水泥土桩发生了鼓胀或破坏后, 为地基土体中自由水的迁移提供新的排水路径, 导致土体中自由水排出, 航道水位上升。

(2) 河堤和路基土体变形

水泥土搅拌桩加固河堤变形破坏的最终形态如图 3 所示。

由图 3 可知, 河堤边坡在 100 g 离心加速度作用下距离一级坡坡肩 1/3~1/2 间产生两条裂缝。最危险滑动面的入口位置距离一级坡肩约 1/2 处, 距离一级坡坡肩约 1/3 处的滑动裂缝表明仍然有潜在的滑体和滑动面存在。最危险滑动面内侧区域 (区域 1) 河堤和土体都发生了明显的滑移迹象, 外侧区域 (区域 2) 主要发生沉降变形, 河堤表面最大沉降为 67.2 mm, 发生在一级坡坡顶, 此处河堤堆载最大。此外一级、二级坡坡体及河道部分随坡顶发生整体沉降, 河床表面发生相对隆起, 最大值为 2.7 mm。



图2 河道水位变化
Fig. 2 Change of approach channel water level



图3 河堤的破坏形态
Fig. 3 Failure mode of riverbank

2.2 河堤表面竖向位移

图4是河堤表面监测点S1、S2、S3、S4沉降及隆起的变化量。

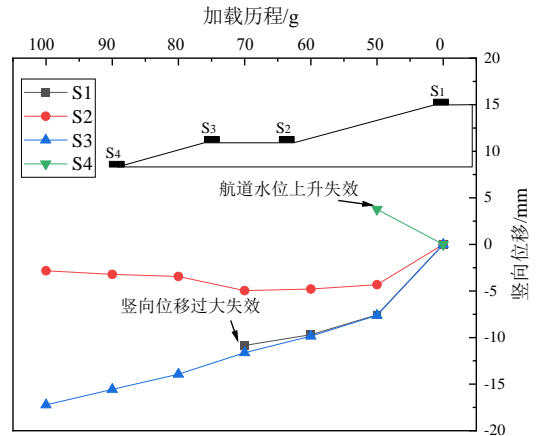


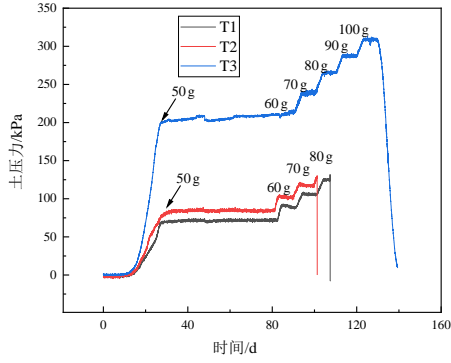
图4 河堤表面竖向位移曲线
Fig. 4 Vertical displacement curve of embankment surface

由图4可知,离心加速度达到70g前,S1、S2、S3监测点的竖向位移随离心加速度的增大持续增加,各监测点沉降数值和变化规律基本一致,S4监测点结果表明二级坡坡脚发生隆起,验证了河堤失稳破坏的宏观现象。离心加速度达到60g时,由于航道水位上升导致激光测距点淹没,S4监测点失效。离心加速度达到80g时,一级坡坡顶、坡肩沉降过大已超过激光测距仪量程,S1监测点失效。离心加速度从70g上升至80g的过程中,一级坡坡脚处S2的竖向位移由-4.96mm变为-3.44mm,此时河堤发生了滑动失稳,S2监测点落在一级斜坡上,导致监测结果显示出相对隆起,离心加速度70g时河堤未发生失稳。

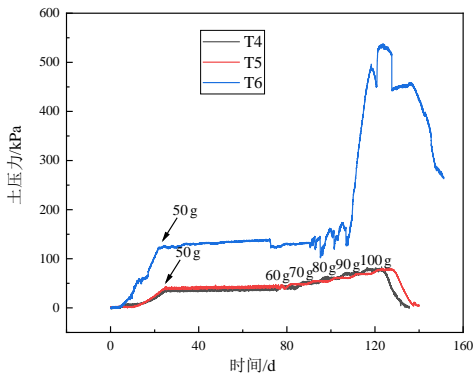
2.3 桩土应力

图5是一级坡坡顶中心处T1和T2(桩间土)、T3(桩顶)以及二级坡坡顶中心处T4和T5(桩间土)、T6(桩顶)的竖向应力变化曲线。

由图5可知,桩顶表面承受的土压力远大于桩间土。当加载至50g时土压计达到首个峰值,桩间土表面土压计T1和T2分别为72.1kPa和86.9kPa,桩顶表面的土压计T3峰值为210.1kPa,桩土应力比为2.92;土压计T4和T5分别为39.4kPa和45.1kPa,T3峰值为127.3kPa,桩土应力比为3.23。在50g离心加速度稳定运行过程中,各土压计的变化趋于稳定。随着离心加速度每10g为一级的分级加载,各监测点土压力呈台阶式增加。由图5(a)可知,加载至80g时,T1、T2失效,可能是由于路基发生了深层滑动失稳,T1、T2处于滑动面附近,其位置产生偏移而失效;由图5(b)可以发现加载至80g时土压计T6突然异常增大,此时桩顶承受了较大的荷载,这一结果验证了河堤表面沉降监测结果的推论,即离心加速度70g时河堤未发生失稳。



(a) 一级坡顶桩土压力



(b) 二级坡顶桩土压力

图5 桩-土应力曲线

Fig. 5 Pile-soil stress curve

2.4 滑裂面特性

通过 MATLAB 对 PIV 采集的图像进行数据分析 (如图 6 所示), 可以得到不同离心加速度下模型

土层各点的坐标变化量, 从而得到各点的位移矢量, 进而分析试验对象的位移变形情况。

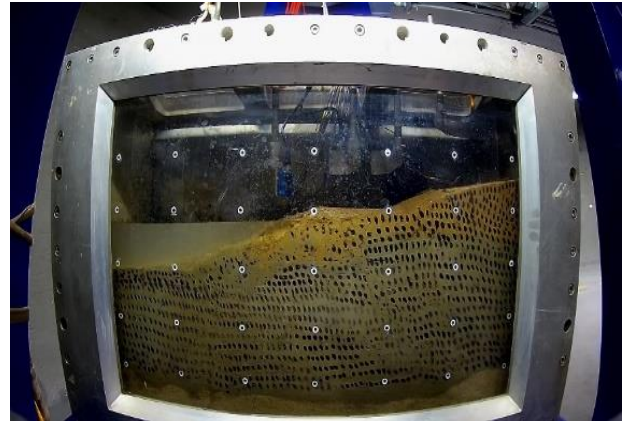
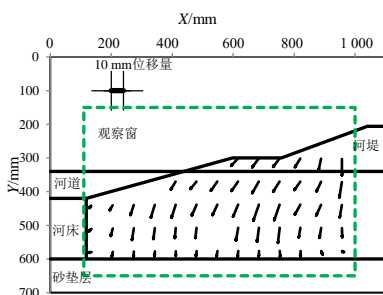


图6 鱼眼镜头效应图片

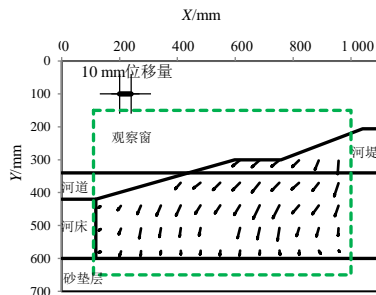
Fig. 6 Fisheye lens effect picture

图 7 (a)、(b)、(c)、(d)、(e) 和 (f) 分别为离心加速度在 50 g、60 g、70 g、80 g、90 g、100 g 时模型土体的位移矢量图。由图 7 可以看出, 随离心加速度的增加, 模型土体的位移变形量逐渐增大, 软土地基中发生水平位移的土体范围逐渐扩大。

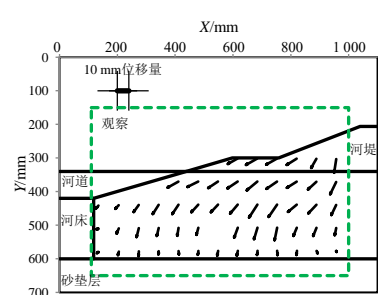
由图 7 可知, 靠近一级坡肩的土体主要发生竖向沉降, 土体下降明显; 离心加速度上升到 80 g 时, 河堤范围内软土地基发生了较大的水平位移, 二级坡脚外侧土体有斜向上发展的趋势, 导致河道表面



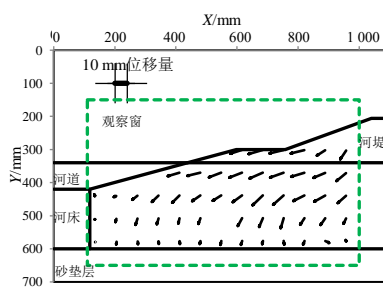
(a) 离心加速度 50 g



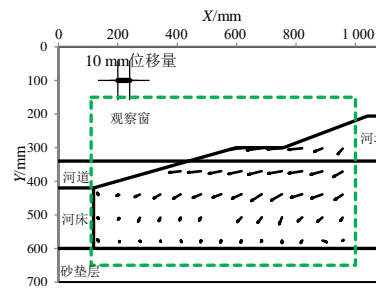
(b) 离心加速度 60 g



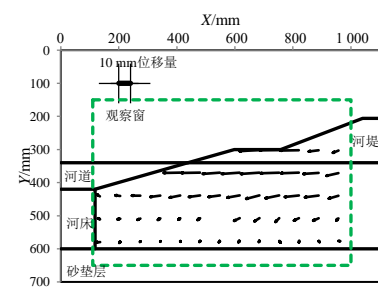
(c) 离心加速度 70 g



(d) 离心加速度 80 g



(e) 离心加速度 90 g



(f) 离心加速度 100 g

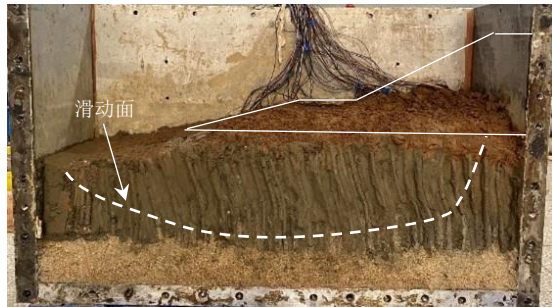
图7 模型位移矢量图

Fig. 7 Displacement vector map of model

隆起, 可以看出明显的圆弧滑动面, 故地基土体产生的变形主要包括沉降、水平位移和隆起变形。

2.5 桩土破坏形态

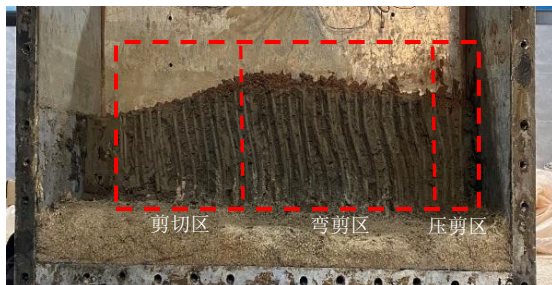
沿有机玻璃面纵深方向对地基进行逐层开挖, 分别取纵深方向 100 mm、200 mm、300 mm 处为开挖断面, 桩土的最终破坏形态如图 8。



(a) 距有机玻璃面 100 mm 处



(b) 距有机玻璃面 200 mm 处



(c) 距有机玻璃面 300 mm 处

图 8 桩土破坏形态

Fig. 8 Failure mode of pile and soil

由图 8 可知, 不同位置处搅拌桩发生的破坏模式差异较大。由图 8 (b) 中标记桩的变形可知, 一级坡坡顶下方 1 号桩为压剪破坏, 破坏形态表现为竖向变形, 桩身上部发生剪切破坏, 桩身无水平变形, 且桩土之间无相对错动。2、3 号桩的破坏形态较为接近, 均发现明显的水平变形, 上下部桩身存在明显的错动迹象, 且出现两个塑性破坏面。接近滑动面位置的塑性较破坏面内侧张开, 外侧闭合, 表现为由坡外侧向内侧发展的趋势, 且有贯通的潜在迹象; 桩身上部塑性较破坏面外侧张开, 内侧闭合, 表现为阻碍河堤边坡向外侧滑动的迹象, 由此

可以推断其滑动面应是较深的深层滑动; 4 号桩的端部位置存在剪切破坏, 剪切破坏面随桩身与二级坡脚距离的增加有逐渐向上发展的趋势。根据桩的破坏形态可将其分为压剪区、弯剪区和剪切区。

3 结 论

本文以南水北调工程安徽段-白山枢纽工程河堤堆载过程为原型, 进行了离心模型试验, 主要结论如下:

(1) 离心加载过程中, 地基饱和土体中自由水在离心力作用下主要通过桩体破坏后形成的通道排出, 迁移至河床地基表面, 导致航道水位上升。最危险滑动面的剪入口位于一级坡中部附近, 此外地基中仍然有其他潜在的滑体和滑动面存在。

(2) 离心加速度为 50 g 时, 模拟了原型河堤的堆载, 河堤未发生失稳; 离心加速度小于 70 g 时, 河堤和地基土主要发生竖向变形, 一级坡顶桩土应力比最大值为 2.92, 二级坡顶桩土应力比最大值为 3.23。离心加速度升至 80 g 后, 河堤逐渐发生变形破坏, 破坏形式为深层滑动破坏, 二级坡坡外发生隆起。

(3) 河堤在变形破坏过程中, 一级坡顶下桩体表现出受压受剪破坏, 一级坡肩至二级坡肩下桩体表现为压弯和拉弯破坏, 二级坡面至河床下的桩体表现为剪切破坏, 可将其分为压剪区、弯剪区和剪切区 3 个区域。地基滑动面并未完全穿过桩体破坏位置。

参考文献

- [1] 王年香, 章为民. 土工离心模型试验技术与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Geotechnical Centrifugal Model Test Technology and Application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [2] KITAZUME M. The Deep Mixing Method[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [3] BROMS B B. Lime and lime/cement columns[C]//The Proceedings of Ground Improvement. London, 2004: 252-330.
- [4] KIVELLO M, BROMS B B. Mechanical behaviour and shear resistance of lime/cement columns[C]//International Conference on Dry Mix Methods: Dry Mix Methods for

- Deep Soil Stabilization. Stockholm, 1999: 193-200.
- [5] CDIT(Coastal Development Institute of Technology). The Deep Mixing Method: Principle, Design, and Construction[M]. The Netherlands: A. A. Balkema, Lisse, 2002.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [7] KITAZUME M, MARUYAMA K. Internal stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading[J]. Soils Found, 2006, 46(3): 323-340.
- [8] 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 & Ground Engineering, 2016, 2(4): 30-36.
- [9] KITAZUME M, MARUYAMA K. External stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading[J]. Soils & Foundations, 2011, 46(3): 437-455.
- [10] TERASHI M, TANAKA H, KITAZUME M. Extrusion failure of the ground improved by the deep mixing method[C]//Proceedings of the 7th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation, 1983.
- [11] YU J L, ZHONG J N, LI J Y, et al. Centrifugal model tests on working behavior of composite foundation reinforced by rigid piles with caps under embankment[C]//Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Cham, 2018: 1077-1080.
- [12] JAMSAWANG P, YOOBANPOT N, THANASISATHIT N, et al. Three-dimensional numerical analysis of a DCM column-supported highway embankment[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 72: 42-56.
- [13] TOSHINARI Y, MATSUDA S, KITAZUME M, et al. Centrifuge model studies on external stability of column type deep mixing ground on inclined foundation[C]//American Society of Civil Engineers Grouting. Hawaii, 2017: 227-236.
- [14] CHAI J, SHRESTHA S, HINO T, et al. Predicting bending failure of CDM columns under embankment loading[J]. Computers and Geotechnics, 2017(91): 169-178.
- [15] 周小文, 程展林, 孙常青, 等. 软土地基路堤施工控制的离心模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1253-1256, 1263.
ZHOU Xiao-wen, CHENG Zhan-lin, SUN Chang-qing, et al. Centrifuge modeling construction of road embankment on soft clay ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1253-1256, 1263.
- [16] 郑刚, 李帅, 刁钰. 刚性桩复合地基支承路堤稳定破坏机理的离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 1977-1989.
ZHENG Gang, LI Shuai, DIAO Yu. Centrifugal model tests on failure mechanisms of embankments on soft ground reinforced by rigid piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 1977-1989.
- [17] ZHENG G, YANG X, ZHOU H, et al. Numerical modeling of progressive failure of rigid piles under embankment load[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(1): 23-34.
- [18] HAN J, CHEN J F, HONG Z S, et al. Mitigation of levee failures using deep mixed columns and geosynthetics[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2010, 5(1):49-55.
- [19] 张振, 陈云龙, 叶观宝, 等. 短芯劲芯水泥土桩承载路堤失稳破坏模型试验[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1063-1069.
ZHANG Zhen, CHEN Yun-long, YE Guan-bao, et al. Model test on stability failure of short-cored stiffened deep mixed column-supported embankment[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1063-1069.
- [20] ZHANG Z, XIAO Y, HAN J, et al. Modified equivalent-area method for calculating factors of safety against deep-seated failure of embankments over deep-mixed foundations[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(3): 1-16.
- [21] CHAI J C, ONITSUKA K, HAYASHI S. Physical modelling of consolidation behaviour of a composite foundation consisting of a cement-mixed soil column and untreated soft marine clay[J]. Géotechnique, 2006, 56(8): 579-582.