



湿陷性黄土地基大跨度桩基承载特性模型试验

刘小华^{1,2,3}, 廖红建^{2,3}, 李明泽³, 刘少华³, 李杭州³

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010; 2. 西安交通大学城市学院 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710018; 3. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要 城市车辆段上盖工程中的大跨度桩基具有单桩竖向承载较大、桩间大跨度范围内土体受荷较小的特点。以西安地铁某车辆段大跨度桩基为研究对象, 制备人工湿陷性黄土作为相似材料, 开展了湿陷性黄土地层大跨度桩基的室内模型试验, 研究大跨度桩基在湿陷性黄土地层中的荷载传递机制与变形规律。结果表明: 制备的人工湿陷性黄土与现场原状黄土性质接近, 将其应用于模型试验时可以得到良好的效果; 大跨度桩基在未浸水时, 荷载沉降曲线为陡降型, 桩身轴力在桩顶附近显著下降, 未达到极限承载力时, 桩顶沉降、桩端阻力线性增大; 在黄土浸水湿陷后, 桩身轴力沿埋深方向呈“D”字型分布, 随着浸水时间的增加, 桩顶沉降、桩端阻力先缓慢增加后显著增加, 中性点位置不断向桩身下部移动。

关键词 湿陷性黄土; 桩基; 模型试验; 负摩阻力

中图分类号: TU444 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-01-011

Model test on bearing characteristics of long-span pile foundation of collapsible loess foundation

LIU Xiaohua^{1,2,3}, LIAO Hongjian^{2,3}, LI Mingze³, LIU Shaohua³, LI Hangzhou³

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China;

2. School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Jiaotong University City College, Xi'an 710018, China;

3. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract The long-span pile foundation in the development project of the superstructure of the urban depot has the characteristics of larger vertical bearing of a single pile, and the soil within the large span between the piles is lesser stressed. Taking the long-span pile foundation of a depot of Xi'an Metro as the research object, artificial collapsible loess is prepared as a similar material. An indoor model test of long-span pile foundation in collapsible loess layer was carried out. The load transfer mechanism and deformation law of long-span pile foundation in collapsible loess layer were studied. The results show that the prepared artificial collapsible loess is close in nature to the original loess on site, which can achieve good results in the application of model tests. When the long-span pile foundation is not flooded, the load-settlement curve is steep, and the axial force of

收稿日期: 2023-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51879212, 41630639); 陕西省重点研发计划项目(2019KWZ-09); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2023KXJ-178)。

第一作者: 刘小华, 男, 博士生, 从事黄土特性与应用研究, liuxh2099@stu.xjtu.edu.cn。

通信作者: 廖红建, 女, 博士, 教授, 从事岩土本构关系、岩土工程减灾与防灾等研究, hjliao@mail.xjtu.edu.cn。

the pile body decreases significantly near the top of the pile. When the ultimate bearing capacity is not reached, the pile top settles and the pile end resistance increases linearly. After the loess is flooded, the axial force of the pile body is distributed in a “D” shape along the direction of burial depth. With the increase of water immersion time, the pile top settlement and pile end resistance first slowly increased and then increased significantly, and the neutral point position continued to move to the lower part of the pile body.

Keywords collapsible loess; pile foundation; model testing; negative friction resistance

随着“一带一路”倡议的持续推进,我国西部地区超大型建筑物日益增多,湿陷性黄土地场中的桩基负摩阻力对建筑物的不利影响也越来越受关注。模型试验是依据现场原位试验的桩基埋深方式、承载受荷工况等,通过室内模型的结果反推现场原位试验结果的一种方法,一直是学者们研究桩基的极限承载力、负摩阻力、中性点位置的主要手段^[1-3]。陆明生使用玻璃桩进行了室内模型试验,提出了修正 Kerisel 总应力法计算侧摩阻力,发现桩土界面土体应变软化会对结果产生误差^[4]。王兆辉和陈天镭通过室内模型试验,探究了减小桩侧负摩阻力的方法,认为套管桩在减小湿陷性黄土地层中产生的负摩阻力时非常有效^[5]。

在相似模型试验中,选择正确的相似材料决定着其与工程原型的相似程度^[6-11]。在涉及湿陷性黄土地层的相似模型试验中,若使用重塑的湿陷性黄土填筑模型,则会不可避免地破坏原状黄土的湿陷特征和结构特性,产生严重的试验误差。因此,正确选择合适的湿陷性黄土的相似材料对相似模型试验的成功至关重要。张延杰等人控制材料的物理参数、强度参数和湿陷系数,制备了人工湿陷性黄土^[12]。胡再强等人将熟石灰掺入烘干后的黄土颗粒中,随后通入二氧化碳形成了碳酸钙胶结物,得到的人工黄土试样具有较为完整的结构性特征^[13]。

地铁上盖物业开发的车辆段单体建筑占地面积大,其下的大跨度桩基具有单桩竖向承载较大、桩间大跨度范围内土体受荷较小的特点。然而目前针对带上盖物业开发的地铁车辆段的研究大多局限于列车运行时的振动对既有工程结构的影响以及处理措施上。这些研究认为列车在运行过程中会对轨道产生振动,这些振动的频率会随着轨道向周围的传播而逐渐衰减。其中,从地面到站台的衰减比从站台到建筑楼层的衰减更大,传播过程中振动频率会下降,如果轨道上的建筑物建在距离轨道 30 m 以内的咽喉平台上方,则需要考虑减震措施,使用隔振支座会使轨道的振动频率

继续下降^[14-18]。除此之外,还有一些研究表明地铁列车在运行时,在地下一层引起的振动大于地下二层,同时人体对中低频振动更加敏感,需要对中低频振动进行重点减振^[19-21]。在地铁车辆段结构及基础尤其是整跨桩基受力方面的研究较少。Peng 等人通过数值模拟研究了上部盖板结构对列车轨道沉降的影响,认为轨道最大沉降可达 4.63 mm^[22]。

以上针对地铁车辆段的研究并没有给出在上部结构的荷载下,桩基的受力和沉降规律。因此,本研究以西安地铁某车辆段大跨度桩基为研究对象,开展了湿陷性黄土地层大跨度桩基的室内模型试验,并用人工制备的湿陷性黄土填筑模型,揭示了大跨度桩基在未浸水与浸水湿陷状态下,湿陷性黄土地层中的荷载传递机制与负摩阻力变化规律。

1 人工湿陷性黄土制备及土性分析

1.1 人工湿陷性黄土制备

黄土的湿陷性对桩基承载特性有重要的影响作用,在模型试验中确保土体具有湿陷性是准确反映桩基承载特性的关键,因此,人工制备湿陷性黄土尤为重要。结合工程现场黄土的物理力学性质,基于对湿陷性黄土物质含量和结构组成的分析,考虑黄土的大孔隙特征、以及颗粒之间的胶结作用,通过对各种矿物材料性能的分析 and 比选,选取重晶石粉、河砂、高岭土、水泥、工业盐和氧化钙作为配比材料。

重晶石粉和河砂作为容重敏感材料能够调整土样的相对密度变化;河砂用于调整土样的内摩擦角和变形模量;水泥作为辅助性胶结性材料;高岭土和工业盐能够在土颗粒之间起到胶结作用;生石灰在与二氧化碳和水反应的过程中会形成碳酸钙,这能够形成湿陷性黄土的特殊结构^[23]。

基于工程现场黄土的湿陷性和力学特性特点,以及黄土中各种物质含量的比例,根据原状黄

土内黏粒、粉粒、砂粒的质量百分比,并且考虑了原状黄土的各个物理性质(相对密度、液限、塑限、塑性指数、黏聚力、内摩擦角、压缩系数、湿陷系数),以及所需制备的人工湿陷性黄土各矿物成分的主要特征,结合上述各种矿物材料的特性,

经过反复配比试验,与原状黄土的物理力学特性进行比较分析,从而确定了人工湿陷性黄土各成分的质量比(见表 1),制备出了不同性质的人工湿陷性黄土,在此基础上对比分析确定模型试验所用的人工制备湿陷性黄土。

表 1 人工湿陷性黄土各成分的质量百分比

Tab. 1 The mass ratio of each component of artificial collapsible loess							单位: %
材料	重晶石粉	河砂	高岭土	水泥	工业盐	氧化钙	
配比 1	25	35	30	3	5	2	
配比 2	30	30	30	3	5	2	
配比 3	30	35	25	3	5	2	
配比 4	35	30	25	3	5	2	

1.2 人工湿陷性黄土性质分析

开展不同配比的人工湿陷性黄土和原状黄土的相对密度试验、液塑限试验、直接剪切试验、固结试验和湿陷试验,结果如表 2 所示。人工湿陷

性黄土的相对密度、孔隙比、含水率、液限、塑限、塑性指数、黏聚力、内摩擦角、压缩系数、湿陷系数均与原状黄土接近。配比 1 的各项参数与现场取回的原状湿陷性黄土的性质参数最接近。

表 2 人工湿陷性黄土与原状黄土的物理力学性质

Tab. 2 Physical and mechanical properties of artificial collapsible loess and intact loess										
材料	相对密度	孔隙比	含水率 / %	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	压缩系数 / MPa ⁻¹	湿陷系数
配比 1	2.72	1.09	12	25.5	15.4	10.1	26.23	24.43	0.43	0.088
配比 2	2.68	1.06	12	25.5	15.7	9.8	19.65	24.94	0.45	0.083
配比 3	2.73	1.10	12	26.2	15.9	10.3	27.21	19.74	0.39	0.075
配比 4	2.76	1.12	12	26.5	15.8	11.7	22.18	22.11	0.45	0.077
原状黄土	2.71	1.08	12	26.3	15.8	10.5	28.34	23.71	0.38	0.083

注:含水率、液限、塑限的值都为质量分数,全文相同。

2 模型试验概况

以西安地铁某车辆段大跨度桩基基础为依托,通过相似比分析,考虑试验场地的模型尺寸限制条件和经济成本,建立了室内同比例相似模型,其中,几何模型的相似比为 1: 40。

2.1 模型箱填筑控制

模型箱主体由高强度角钢焊接成框,箱壁用高强度有机玻璃板封闭。经过试加载发现,模型箱在外力作用下自身形变的大小可忽略不计,且模型箱的尺寸满足模型试验的边界控制条件。

模型箱底部铺设 40 cm 压实重塑黄土作为持力层,上部铺设 35 cm 人工制备的湿陷性黄土,其干密度为 1.3 g/cm³,含水率为 12%。配比选用重晶石粉(25%)、河砂(35%)、高岭土(30%)、水泥(3%)、工业盐(5%)、氧化钙(2%),其中,配比值都为质量分数,此配比具有强烈湿陷性。模型共填筑 75 cm,桩端埋入压实重塑土层 20 cm,剩

余部分均处于人工湿陷性黄土层中,图 1 为模型填筑示意图。

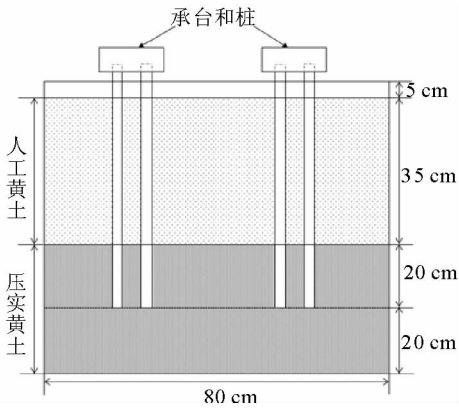


图 1 模型填筑剖面示意图

Fig. 1 Schematic of the section of the model fill

2.2 群桩基础制作

试验模型桩选取有机玻璃制作而成,桩长 65 cm,桩径 2 cm,弹性模量 3.1 GPa。承台采用亚克力板制作,尺寸为 10 cm × 10 cm × 3.2 cm。群桩基础由承台和 4 根中心对称的单桩组成,桩间距

3d(桩径)。在单根模型桩表面对称黏贴 10 个应变片进行桩身轴力测试,具体位置如图 2 所示。由于模型桩身表面过于光滑,为了增大侧摩阻力,模拟工程桩与黄土的相互作用,通过环氧树脂黏合剂在桩身表面黏结一层砂粒。

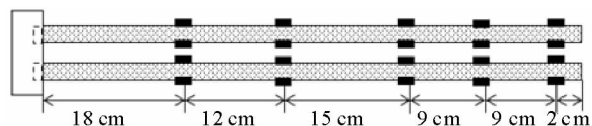


图 2 应变片黏贴位置

Fig. 2 Strain gauges application position

2.3 模型试验方案设计

2.3.1 未浸水状态下大跨度桩基极限承载力试验

参考《建筑桩基检测技术规范》^[24],分级对桩基进行加载,第一级加载 1 kN,后续每次加载 0.5 kN,共加载 5 kN。

单级荷载稳定标准:当桩基在每级荷载施加 0.5 h 后,连续 2 h 内沉降量不超过 0.1 mm 时,可施加下一级荷载。

终止加载条件:当加载至设计要求的最大加载值时,或当单级荷载下桩身沉降量大于上一级荷载下沉降量的 2 倍,且一天内沉降量未达到稳定状态时,即可停止加载。

2.3.2 浸水状态下大跨度桩基竖向静载试验

试验分级加载至未浸水状态下大跨度桩基极限承载力的 50%,单级荷载稳定标准与 2.3.1 节相同。

待桩体沉降达到稳定状态后,开始用洒水器向模型箱表层土体缓慢洒水,确保土体结构的完整性。每次洒水至高出土层表面 0.5 cm,待水面高度在 5 h 内不下降时,即可认为模型箱内土体已经达到饱和状态,此时停止注水。

2.4 试验数据处理原理

2.4.1 桩身轴力计算原理

根据采集到的桩身应变数据和材料自身的强度参数,桩身某截面的应力可按式(1)计算,

$$\sigma_z = \varepsilon_i \times E \quad (1)$$

式中: σ_z 为土层埋深 z 处的桩身应力,单位为 kPa; ε_i 为校正后的桩身应变值; E 为模型桩的弹性模量,单位为 kPa。

桩身某截面的轴力计算公式为

$$N_z = \sigma_z \times A \quad (2)$$

式中: N_z 为土层埋深 z 处的桩身轴力,单位为 kN; A 为模型桩的横截面面积,单位为 mm^2 , $A =$

$0.25\pi D^2$; D 表示模型桩桩径。

2.4.2 桩侧摩阻力计算原理

桩在埋深 z 处截面的侧摩阻力计算公式为

$$\tau_z = - \frac{dN_z}{\pi \times D \times dz} \quad (3)$$

式中: τ_z 为土层埋深 z 处的桩侧摩阻力,单位为 kPa; dN_z 为厚度为 dz 微段的桩身轴力,单位为 kN。

根据本试验模型桩黏贴应变片的位置,桩侧摩阻力的平均值计算公式为

$$\tau_i = \frac{N_i - N_{i+1}}{\pi \times D \times z_i} \quad (4)$$

式中: τ_i 为模型桩桩体第 i 段的桩侧摩阻力平均值,单位为 kPa; N_i 为模型桩桩体第 i 段的桩身轴力,单位为 kN; z_i 为第 i 段的厚度。

3 试验结果分析

3.1 未浸水状态下桩基极限承载力特性分析

3.1.1 荷载-沉降曲线分析

试验过程如图 3 所示,桩顶荷载最终加载至 5 kN,根据采集到的数据绘制荷载-沉降(Q-S)曲线,如图 4 所示。



图 3 试验过程图

Fig. 3 The process of the test

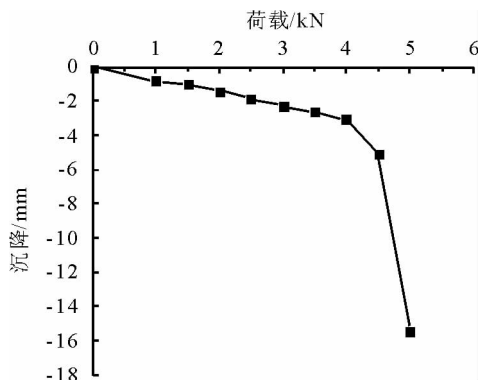


图 4 桩身荷载-沉降曲线

Fig. 4 Load-settlement curve of pile

在竖向荷载的作用下,Q-S 曲线为陡降型。在竖向荷载为 0~4 kN 时,桩顶沉降值随着竖向荷载的增大而线性增加;在竖向荷载为 4~5 kN 时,桩顶沉降值迅速增加,桩端土发生破坏。当竖向荷载为 4 kN 时,沉降值为 3.07 mm;当竖向荷载为 4.5 kN 时,沉降值为 5.07 mm;当竖向荷载为 5 kN 时,沉降值为 15.44 mm,超过了竖向荷载为 4.5 kN 时桩顶沉降量的 2 倍。桩基础的极限承载力为 4.5 kN。考虑安全系数 $K=2$,得到桩基础的竖向承载力特征值为 2.25 kN。

3.1.2 桩身轴力与桩侧摩阻力分析

图 5、图 6 分别为桩身轴力和桩侧摩阻力沿埋深方向的分布曲线。由图 5 和图 6 可知,随着上部荷载的增大,模型桩同一位置处的桩侧摩阻力和桩身轴力也逐渐增大;在桩身上部,轴力下降较缓,桩侧摩阻力发挥程度较小;在桩身下部,轴力减小程度较大,桩侧摩阻力逐渐增加。

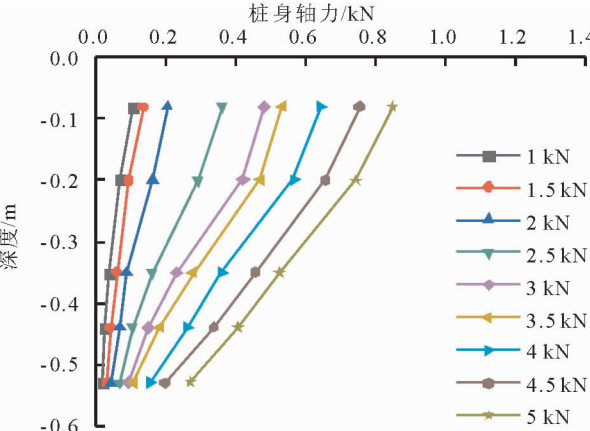


图 5 桩身轴力分布曲线

Fig. 5 Pile axial force distribution curve

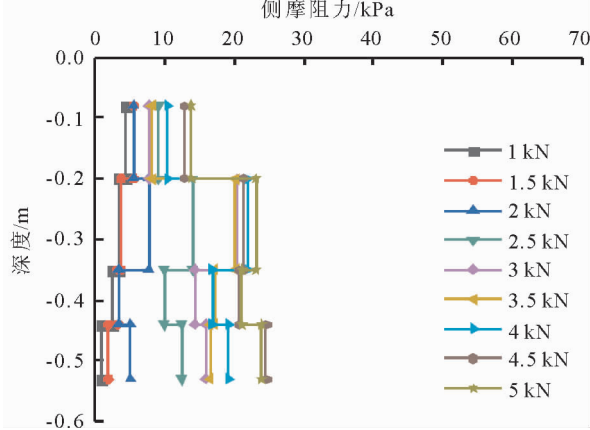


图 6 桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 6 Pile side resistance distribution curve

在上部荷载的作用下桩身产生了轴力,桩身受

压而向下沉降。桩身轴力通过桩侧摩阻力传递到周围土层中,桩顶荷载逐渐由周围土体承担,桩身轴力随深度而递减,产生桩-土相对位移,桩周土体受到桩侧表面向下的正摩阻力,产生剪切变形。

3.1.3 桩端阻力分析

图 7 为桩端阻力、桩侧阻力在上部荷载作用下的变化曲线。随着上部荷载的增大,桩侧阻力线性增大且占总竖向荷载值 80% 左右,桩端阻力线性增大且占总竖向荷载值 20% 左右。当桩基承受的荷载超过了自身的极限承载力时,桩侧阻力显著下降,桩端阻力显著增大,此时桩周土体已发生剪切破坏,承载能力下降。

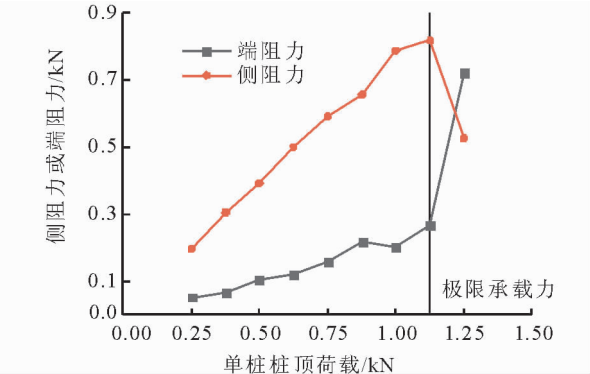


图 7 不同桩顶荷载时桩端阻力和侧阻力的关系曲线

Fig. 7 The relationship curve of pile end resistance and side resistance under different pile top loads

3.2 浸水状态下桩基荷载传递特征分析

3.2.1 浸水状态下荷载-沉降曲线分析

图 8 为浸水状态下桩顶沉降随时间的变化曲线。当桩顶分级加载至桩基的竖向承载力特征值 2.25 kN 后,桩顶沉降值稳定为 1.83 mm。在开始浸水的前 8 h,桩基沉降量较小,沉降量随时间线性增加且增长缓慢;从第 8 h 到 20 h,沉降量显著增加。20 h 之后桩基的沉降量未达到稳定,呈现剪切破坏特征。

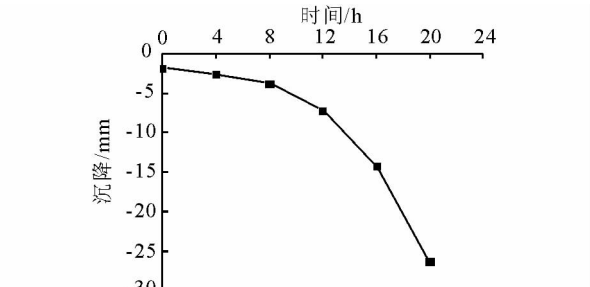


图 8 桩顶沉降与浸水时间曲线

Fig. 8 Pile top settlement and immersion time curves

3.2.2 浸水状态下桩身轴力、桩侧摩阻力与中性点分析

桩身轴力与桩侧摩阻力分布曲线分别见图 9 和图 10, 桩侧摩阻力为 0 处即为中性点位置。浸水 4 h, 桩身轴力随埋深的增加先增大后减小, 呈现出“D”字型分布; 桩侧摩阻力在桩顶范围内出现负值, 当达到最大值后沿桩体埋深方向逐渐减小, 直至出现正摩阻力; 中性点位置在埋深 0.08 m 处。随着浸水时间的增长, 桩侧负摩阻力存在的范围逐渐向下扩展, 中性点位置也向桩身下部移动。浸水 20 h 后, 模型箱内黄土全部浸水饱和, 负摩阻力范围达到最大, 中性点位置最深达到 0.35 m, 中性点深度比为 0.63。黄雪峰等人提到的中性点的位置与桩身入土长度之比为 0.34~0.85^[25], 与本试验得到的规律相同。

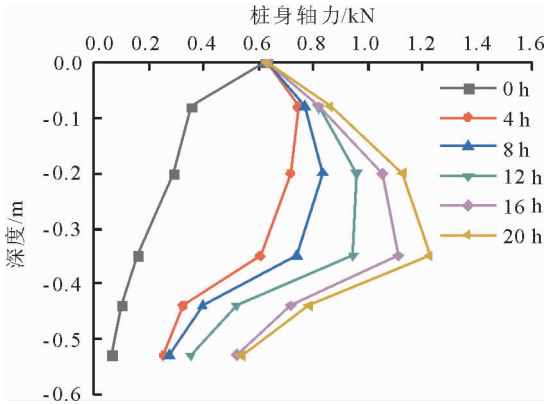


图 9 浸水状态下桩身轴力分布曲线

Fig. 9 Axial force distribution curve of pile body under water immersion

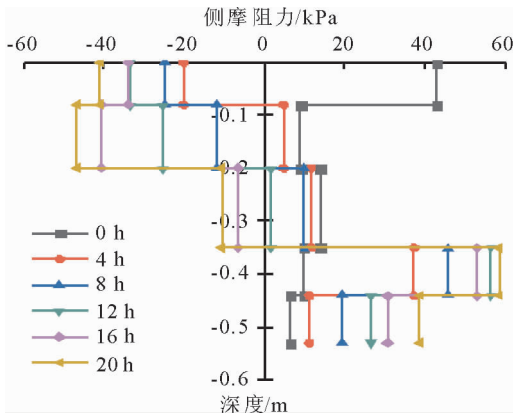


图 10 浸水状态下桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 10 Pile side friction resistance distribution curve under water immersion

在模型箱表面开始浸水后, 由于室内模型箱中的人工黄土具有强烈湿陷性, 遇水后会显著下沉, 因此, 表面附近土层的湿陷沉降量开始大

于桩基沉降量, 桩侧表面受到桩周土体向下的拉力, 产生负摩阻力, 桩身轴力也随着埋深逐渐增大。随着浸水时间的增长, 模型箱表面的水分逐渐向下方渗透, 模型箱下部的人工黄土逐渐发生湿陷变形, 土体的沉降量逐渐大于桩身沉降量, 因此, 桩侧负摩阻力的范围也随时间向下方扩张, 桩身轴力也逐渐增大。由于下方土体所受到的上覆压力随着埋深而增大, 但土体的湿陷性是随着压力的增大而减小的, 因此, 下方土体的湿陷性逐渐减弱, 土体因湿陷而发生的沉降也逐渐减小, 土体的沉降值逐渐小于桩身的沉降值, 桩侧摩阻力也就逐渐回归正值。

3.2.3 桩端阻力分析

通过桩端布置的土压力盒进行浸水期间桩端阻力测试, 结果见图 11。浸水前加载至 2.25 kN (单根桩的桩顶荷载为 0.562 5 kN) 时, 单根桩的桩端阻力占竖向荷载的 19.5%。随着浸水时间的增长, 浸水初期桩端阻力缓慢增大, 浸水后期则显著增大。当浸水至 8 h, 桩端阻力占竖向荷载的 35.6%; 当浸水至 20 h, 桩端阻力占竖向荷载的 92%。浸水 20 h 之后在较大的桩端荷载和负摩阻力作用下, 桩基产生较大的沉降, 呈现出破坏的特征。

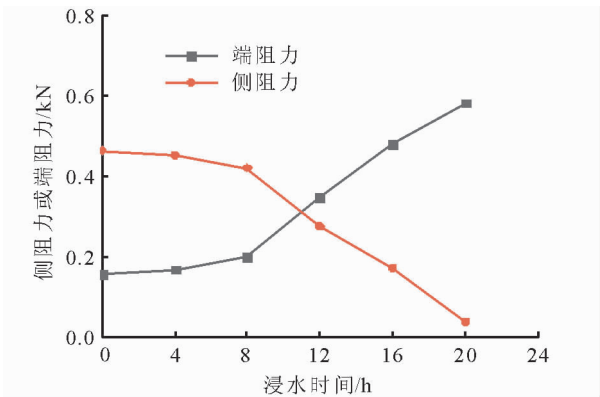


图 11 桩身侧阻力、端阻力随浸水时间变化的关系曲线

Fig. 11 The relationship curve of pile side resistance and end resistance with water immersion

4 结论

1) 选取重晶石粉、河砂、高岭土、水泥、工业盐、氧化钙为基本材料, 以原状黄土的相对密度、液限、塑限、塑性指数、黏聚力、内摩擦角、压缩系数、湿陷系数等参数为参考依据, 通过改变材料配比制备出与原状黄土物理力学性质和湿陷性高度

接近的人工湿陷性黄土。

2) 在无浸水试验中,桩身轴力在桩身上部下降较缓,在桩身下部减小程度较大。在未达到极限承载力时,随着上部荷载的增大,桩顶沉降、桩端阻力线性增大且变化较小;接近极限承载力时,桩顶沉降、桩端阻力显著增大。

3) 在浸水初期,桩基沉降量随时间变化较小且线性增加,桩顶在一定范围内产生负摩阻力;浸水中后期,桩基沉降量随时间迅速增加,中性点位置不断向桩身下部移动;浸水饱和后,中性点位置位于土中桩身长度约一半处,竖向荷载基本由桩端阻力承担,桩基的沉降量显著增加且24 h未达到稳定。表明在强烈湿陷的黄土地基中浸水对桩基承载力的影响显著。

参考文献

- [1] 于加云. 模筑钢筋混凝土支护与软岩相互作用机理研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.
- [2] TOMA T M. A model study of negative skin friction on a fixed base pile in soft clay[D]. Edinburgh: Heriot watt University, 1989.
- [3] 牛亚强,王旭,郑静,等. 侧向约束防渗路基新结构防渗效果试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(S2): 252-258.
NIU Y Q, WANG X, ZHENG J, et al. Experimental study on the anti-seepage effect of the new structure of lateral confinement anti-seepage subgrade[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 252-258.
- [4] 陆明生. 桩基表面负摩擦力的试验研究及经验公式[J]. 水运工程,1997(5):54-58.
LU M S. Experimental study and empirical formula of negative friction on pile foundation surface[J]. Water Transport Projects, 1997(5):54-58.
- [5] 王兆辉,陈天镭. 湿陷性黄土地基中主动减小负摩阻力新桩型的试验研究[J]. 工业建筑,2021,51(5):151-157,144.
WANG Z H, CHEN T L. Experimental study on a new pile type that actively reduces negative friction resistance in collapsible loess foundation[J]. Industrial Construction, 2021, 51(5):151-157, 144.
- [6] ASSALLAY A M, ROGERS C D F, SMALLEY I J. Formation and collapse of metastable particle packings and open structures in loess deposits[J]. Engineering Geology, 1997, 48(1/2):101-115.
- [7] 康向涛,黄滚,邓博知,等. 模拟原煤的相似材料试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(1):138-142.
- [8] KANG X T, HUANG G, DENG B Z, et al. Experimental study on similar material for simulating raw coal[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(1):138-142.
- [9] LAWTON E C, FRAGASZY R J, HARDCASTLE J H. Collapse of compacted clayey sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(9):1252-1267.
- [10] BASMA A A, TUNCER E R. Evaluation and control of collapsible soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(10):1491-1504.
- [11] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都:西南交通大学出版社,1998.
- [12] 王汉鹏,李术才,张强勇,等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9):1842-1847.
WANG H P, LI S C, ZHANG Q Y, et al. Development of similar materials for new geomechanical model tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9):1842-1847.
- [13] 张延杰,王旭,梁庆国,等. 湿陷性黄土模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2):4019-4024.
ZHANG Y J, WANG X, LIANG Q G, et al. Development of model test similar material of collapsible loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2):4019-4024.
- [14] 胡再强,沈珠江,谢定义. 结构性黄土的变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24):4142-4146.
- [15] HU Z Q, SHEN Z J, XIE D Y. Deformation properties of structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24):4142-4146.
- [16] WANG T T, JIANG B L, SUN X J. Train-induced vibration prediction and control of a metro depot and over-track buildings[J]. Buildings, 2023, 13(8):1995.
- [17] LIANG R H, DING D Y, LIU W F, et al. Experimental study of the source and transmission characteristics of train-induced vibration in the over-track building in a metro depot[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(7/8):1738-1751.
- [18] TAO Z Y, ZOU C, WANG Y M, et al. Vibration transmissions and predictions within low-rise buildings above throat area in the metro depot[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(5/6):1105-1116.
- [19] FENG Q S, ZHANG Y L, JIANG J, et al. Field measurement and evaluation of vibration in different

areas of a metro depot [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 21(2): 529-542.

[18] CHEN Y M, FENG Q S, LIU Q J, et al. Experimental study on the characteristics of train-induced vibration in a new structure of metro depot[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(30): 41407-41422.

[19] ZOU C, WANG Y M, ZHANG X, et al. Vibration isolation of over-track buildings in a metro depot by using trackside wave barriers[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 30: 101270.

[20] TAO Z Y, WANG Y M, SANAYEI M, et al. Experimental study of train-induced vibration in over-track buildings in a metro depot[J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109473.

[21] CAO Z L, GUO T, ZHANG Z Q. Vibration measurement in a metro depot with trains running in the top story[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(1): 502-519.

[22] PENG H, PANG F Y, LI Z C, et al. Study on the impact of a metro depot cover structure on the existing metro structure and additional settlement of tracks[J]. Buildings, 2023, 13(8): 1914.

[23] 陈昌禄, 邵生俊, 张喆. 人工制备结构性黄土的真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2231-2237.

CHEN C L, SHAO S J, ZHANG Z. Study of artificial structural loess under true triaxial tests[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2231-2237.

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[25] 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): 382-389.

HUANG X F, CHEN Z H, HA S, 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): 382-389.

(编辑 李 静)