

浸水状态下黄土地区长短桩基础 承载特性试验

马天忠^{1,2,3}, 杨嘉俊^{1,2,3}, 王正振^{1,2,3}, 陈璋佳^{1,2,3}, 郭保文^{1,2,3}

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防震减灾重点实验室, 兰州 730050; 3. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 兰州 730050)

摘要:为深化研究地基与浸水作用机制,通过模型试验探讨了浸水对黄土地区长短桩基础承载特性的影响。试验使用16根组合桩(8长8短),在竖向荷载和浸水条件下,全面分析湿陷变形、桩身承载力和变形特性。结果表明,长短桩基础在竖向荷载和浸水作用下的Q-s曲线呈典型的缓变型曲线,随着浸水和荷载的增加,桩端沉降逐渐增大。水浸入使桩周湿陷土层变形加剧,湿陷变形先缓后急再减缓,湿陷深度增大导致桩侧摩阻力发展,中性点下移。浸水10 d后,长桩负摩阻力最大值为61.27 kPa,短桩为53.85 kPa。浸水时,从负摩阻力减小速度和中性点深度变化范围来看,都是边桩最显著,中心桩和角桩接近;最大负摩阻力出现在角桩,中心桩次之、边桩最后。土体全部饱和后,长桩(边桩)中性点深度比为0.55,角桩、中心桩中性点深度比为0.64,短桩为0.62~0.64,试验结果与桩基规范推荐值较接近。最后,有限元模拟实验通过水力等效原理模拟浸水试验,结果与室内试验一致,表明试验可靠。

关键词:土木工程;长短组合桩;桩侧摩阻力;中性点;有限元模拟

中图分类号:TU473 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)12-3942-13

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240469

Experimental on bearing characteristics of short and long pile foundation in loess area under submerged condition

MA Tian-zhong^{1,2,3}, Yang Jia-jun^{1,2,3}, WANG Zheng-zhen^{1,2,3}, CHEN Zhang-jia^{1,2,3}, GUO Bao-wen^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Engineering Research Center for Disaster Prevention and Mitigation of Western Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To deepen the research on the mechanisms of foundation and inundation, the effect of inundation on the bearing characteristics of long and short pile foundations in loess areas was explored through modeling tests. Sixteen combined piles (8 long and 8 short) were adopted in the test, and the wet subsidence deformation was comprehensively analyzed, pile bearing capacity and deformation

收稿日期:2024-04-30.

基金项目:国家自然科学基金项目(52068048).

作者简介:马天忠(1979-),男,副教授,博士.研究方向:基坑、边坡支挡结构及地基处理.E-mail:matz0914@163.com

通信作者:王正振(1989-),男,副教授,博士.研究方向:支挡结构、基础工程.E-mail:wangzz@lut.edu.cn

characteristics under the conditions of vertical load and water immersion. The results show that the Q - s curve of the long and short pile foundation under vertical load and water immersion shows a typical slow-varying curve, and the settlement of the pile end gradually increases with the increase of water immersion and load. Water immersion intensifies the deformation of the wetted soil layer around the pile, and the wetted deformation is slowed down then sharply and then slowed down again, and the increase of the wetted depth leads to the development of pile lateral friction and the downward shift of the neutral point. After 10 days of water immersion, the maximum value of negative friction resistance of long pile is 61.27 kPa, and that of short pile is 53.85 kPa. When immersed in water, in terms of the speed of negative friction resistance reduction and the range of change of the depth of the neutral point, both are the most significant side piles, and the center piles and corner piles are close to each other; the maximum negative friction resistance occurs in the corner piles, and the center piles are second, and the side piles are the last. The maximum negative friction resistance occurs in the corner pile, followed by the center pile and the last one in the side pile. After the soil body is saturated, the neutral depth ratio of the long pile (side pile) is 0.55, the neutral depth ratio of the corner pile and the center pile is 0.64, and that of the short pile is in the range of 0.62–0.64, which is close to the recommended value of the pile foundation specification. Finally, the finite element simulation experiment simulated the water immersion test through the hydraulic equivalence principle, and the results were consistent with indoor tests, indicating the reliability of the experiment.

Key words: civil engineering; long-short composite pile; skin friction of pile; neutral point; finite element simulation

0 引 言

长短桩基础^[1-4]的应用在沿海地区分布范围较广,但在大厚度黄土区域,特别是西北的广袤地带,相关的研究却并不多见。同时,由于黄土的垂直节理发育特性,使群桩基础在西北地区的工程建设中得到广泛应用。

近年来,在湿陷性黄土场地桩基工程研究中,诸多学者通过理论分析、现场浸水试验、数值模拟等手段,针对桩基负摩阻力、中性点深度、下拉荷载等问题开展了大量研究,有效推进了湿陷性黄土地区桩基工程的开展^[5-9]。曹明等^[10]运用积分方程法,推导第二类 Fredholm 积分方程,并借助叠加原理,对长短桩基础进行分析。林本海等^[11]基于不同桩体长度、刚度和周围多层土体分布的长短桩相互作用计算模型,对长短桩复合地基进行分析计算。佟建兴等^[12]、葛忻声等^[13]通过试验对长短桩基础荷载与沉降关系、桩侧摩阻力分布、荷载分担比及桩身轴力进行了分析。杨桦等^[14]通过模拟对长短桩组合桩基础土中附加应力和沉降变化规律进行了研究。于光明等^[15]基于荷载传递法提出了大面积堆载下考虑非达西流固结和流变耦合效应时单桩下拉荷载的理论计算方法。Yan 等^[16]通过模型试验研究,分析和讨论基桩轴

力和负摩阻力的分布和变化规律,总结了浸水湿陷性对基桩轴力和负摩阻力发展的影响。叶观宝等^[17]结合现场试验研究了大面积填土场地单桩负摩阻力影响因素,建立了数值分析模型。陈天镭等^[18]、Zhao 等^[19]为研究湿陷性黄土区桩基负摩擦的变化和分布,设计并完成了考虑黄土湿陷性的桩基负摩擦模型试验。Di 等^[20]分析了湿陷性黄土地区高耸结构的地基处理、桩基优化设计,为湿陷性黄土地区高耸结构的施工提供了技术支持。范孟华等^[21]运用模拟技术分析了单桩堆载条件下桩侧负摩阻力与桩身轴力的分布特征。Chiou 等^[22]研究了结构荷载对固结地基中摩擦端承桩负摩阻力发展的影响,运用模拟软件建立了基于有效应力的分析模型。Liu 等^[23]开展模型试验,研究了土层厚度、桩顶荷载和桩半径对冲填土自重固结、桩体沉降的影响。

目前,关于长短桩基础在西北地区的研究主要集中在大厚度湿陷性黄土地区,重点探讨其在天然状态下的承载特性。查阅已有文献对浸水状态下长短桩基础角桩、中心桩、边桩等及侧摩阻力、桩身轴力和中性点变化等方面的特性尚未有深入的揭示。等长群桩基础虽然能够提供足够的承载力和地基沉降,但其高昂的造价无疑是其弊端。为了更

全面地探究浸水条件下湿陷性黄土地区长短桩基础的承载特性,本文在已有研究基础上设计了8根长桩+8根短桩室内模型试验,深入揭示了黄土地区在浸水条件下长短桩基础群桩的作用机理。

1 长短桩模型试验概况

1.1 试验方案确定

试验采用16根桩(8根长桩和8根短桩),桩基布置为梅花形(梅花形布置不仅可以使长短桩基础均匀受力,避免单一方向的应力集中,从而提高基础的稳定性和承载力,还能更有效地利用空间,减少桩基间的相互影响,有利于施工的方便和整体性能提升)。这种布置方式能更全面、准确地获取黄土地区长短桩基础的性能数据。试验桩位布置图如图1所示。

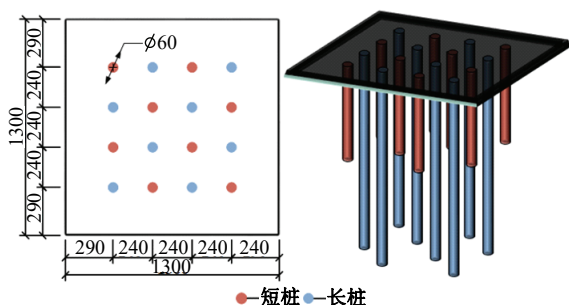


图1 试验桩位布置图(mm)

Fig. 1 Layout of test piles (mm)

试验分为两个阶段进行,先对长短桩基础进行竖向荷载的分级加载,这一阶段的主要目的是通过逐步增加荷载,观察桩基础在不同荷载条件下的反应,为后续的浸水试验提供参考。在分级加载完成后,保持荷载不变,进行浸水试验。试验过程中,详细记录模型试验的整个过程,从加载到完全浸水,搜集湿陷性黄土地区长短桩基础的总体沉降、桩身轴力、桩侧摩阻力等关键数据。

1.2 试验模型制作

1.2.1 模型箱和加载装置

试验用箱采用方箱,模型箱尺寸(长×宽×高)为2.1 m×2.1 m×1.8 m,承台尺寸为1.3 m×1.3 m,模型箱侧边及顶边采用角钢加以固定,四周采用12 mm厚的有机玻璃,底板采用20 mm的钢板,四面由1 cm厚的有机玻璃加钢管组成,缝隙处用膨胀胶灌满密封。实验加载装置采用自制竖向加载架,由工字钢梁焊接而成。试验加载采用桩顶传力,加载板为2 cm厚钢板,在千斤顶上放置量程为20 t的荷载传感器对总加载量进

行测量,利用加载量为20 t的千斤顶和40 cm×40 cm×40 cm的方形钢墩(提高千斤顶的位置,并传力至承台)将反力加至加载架的横梁以施加竖向力,对土层沉降采用自制沉降标测量。模型试验布置示意图如图2所示。

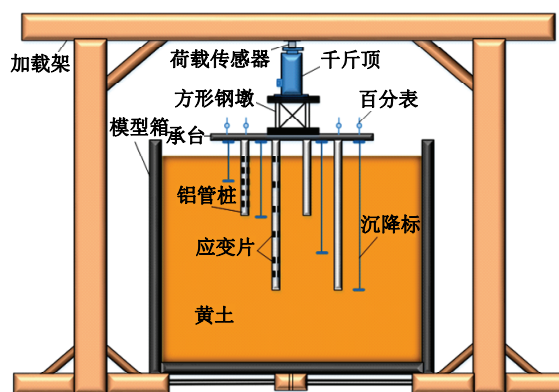


图2 模型试验布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of layout of model test

1.2.2 模型桩

试验采用预埋法成桩,结合模型箱尺寸,根据模型试验的相似准则,试验模型桩采用空心铝管,外径为60 mm,壁厚为2 mm,长桩桩长为1.2 m,短桩桩长为0.6 m,且短桩、长桩的桩径相同。

将空心铝管按试验所需的桩长尺寸进行预制,同时清洗铝管内、外侧。为了封堵铝管,桩端采用特制铝帽。使用砂布打磨铝管,清理表面灰尘和杂物,然后将AB胶均匀涂抹其表面,再粘上一层标准砂,晾干后备用。

1.2.3 应变片

通过粘在铝管桩表面的应变片测量桩身应力沿深度分布规律,应变片型号为BFH120-3AA-R-D150,电阻为120 Ω,灵敏系数为 $2.0 \pm 1\%$ 。应变片以1/4桥方式连接,短桩桩身应变片分别位于桩身15、25、35、45、55 cm,共粘5对应变片,长桩桩身应变片分别位于桩身15、35、55、75、95、105 cm,共粘6对应变片。

定位好铝管桩上需要粘贴应变片的部位,利用打磨机沿着桩轴线方向对铝管桩表面进行打磨。打磨完成后,利用砂纸、酒精、棉球对桩身打磨部位进行清洁再粘贴应变片。整个试桩的应变片粘贴完毕之后,即用万用表测量应变片电阻,若不满足要求,清除该部位应变片并对桩身进行清理,重新粘贴应变片。若满足要求,即粘贴其他试桩应变片。应变片粘贴完成后进行接线,以便连接数据采集仪。模型桩应变片的粘贴布置如图3所示。

体的湿陷变形达到相对稳定的状态。土层累积湿陷变形量随浸水时间关系曲线如图 6 所示

经过对不同浸水时间下土体湿陷变形的观察和分析,发现其过程可分为几个阶段。在初期,由于水分刚开始渗透,主要影响土体的上层,造成微小的湿陷变形,而中下层则基本保持原状。随着水分逐渐渗入,进入浸水陡降段,此时大、中孔隙迅速破坏,导致整个土层从表层至深层发生显著的湿陷变形。这是因为水分已渗入土体,与土粒发生化学反应,降低其黏结力,进而破坏土体结构。此外,水分排出土体中的空气,增加其密度,也加速了湿陷过程。

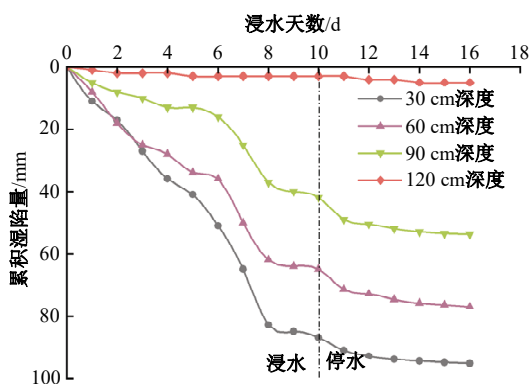


图 6 湿陷量随时间关系曲线图

Fig. 6 Collapsible amount over time

当浸水达到 8 d 时,总湿陷量已完成约 80%。随后进入中期平缓段,此阶段主要是少量中等孔隙和小孔隙的破坏,以及土颗粒位置的微调,导致湿陷过程相对缓慢。最后,当停止浸水时,由于模型箱的限制和底部压实黄土的低渗透性,土层不会发生明显的自重排水固结,曲线最终趋于稳定。

这一试验结果与现场浸水试验的结论相吻合,表明在自重黄土层较薄的情况下,土层的累计沉降量随时间的变化呈现出初期平缓、浸水陡降和中期平缓^[26]的典型阶段。

3 浸水状态长短桩基础荷载传递特征

3.1 浸水状态下桩顶有附加荷载时长短桩试验

浸水前,长短桩基础荷载-沉降曲线为渐变型曲线,沉降随着荷载的增大不断增大,无明显陡降破坏特征点,满足后续浸水试验要求。分级加载至承载力特征值为 42 kN,承台顶累积沉降为 3.98 mm。浸水前桩基沉降曲线如图 7 所示。

此时,维持稳定荷载 42 kN 开始浸水,与土体

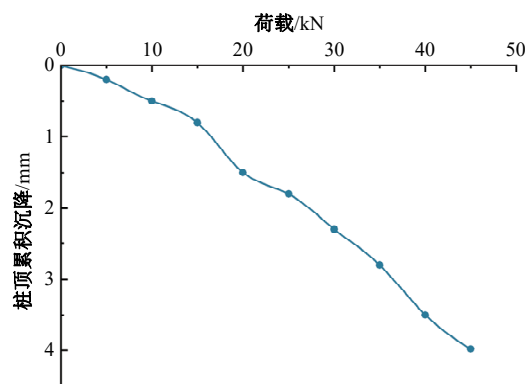


图 7 浸水前桩基荷载沉降曲线

Fig. 7 Settlement curve of pile foundation load before flooding

累计湿陷量随时间变化规律一致。桩顶沉降与浸水时间曲线如图 8 所示。分析图 8 可知,在开始浸水的 2~4 d,桩顶沉降量增幅较小,在 4~8 d,桩顶沉降量近似线性增加,8 d 累积沉降量占最终沉降量的 78%。桩周土体变形稳定时,承台顶的最终沉降量为 52.62 mm。第 8 d 开始至停水稳定期间,桩顶沉降量缓慢增加,最终达到稳定。

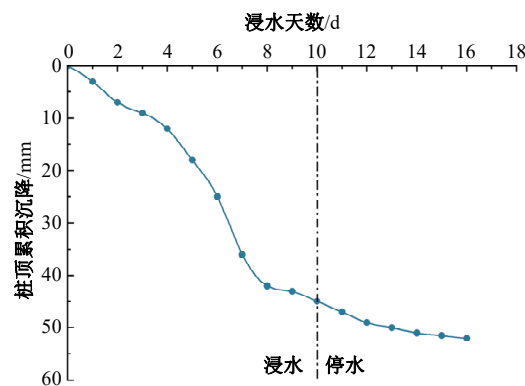


图 8 桩顶累计沉降与浸水时间曲线

Fig. 8 Relationship between settlement of pile top and time of water immersion

3.2 长短桩基础桩身轴力和侧摩阻力传递特征

3.2.1 浸水前长短桩基础桩身轴力分析

图 9 为浸水前长短桩基础长桩、短桩桩身轴力分布曲线。从图 9 可以看出,随着桩埋深的增加,桩身轴力逐渐减小,这与传统理论研究结论一致。两曲线对比可见,长桩的桩身轴力平均大于短桩,但是短桩在埋深范围内桩身轴力减小得较为均匀,长桩在 60 cm 埋深前轴力变化较为均匀,超过 60 cm 埋深后轴力减小较快,经分析,这一差异与桩侧摩阻力密切相关。

3.2.2 浸水前长短桩基础侧摩阻力分析

图 10 为浸水前长短桩基础长桩、短桩侧摩阻

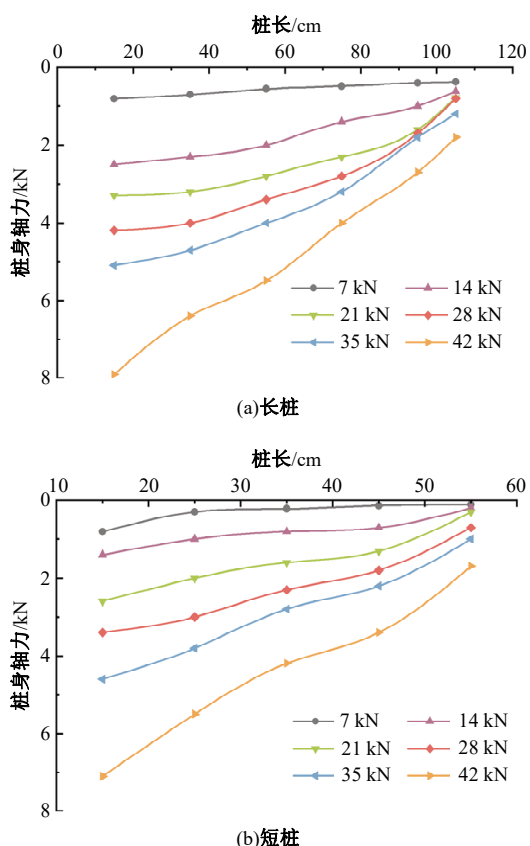


图 9 浸水前长短桩基础长桩和短桩桩身轴力分布曲线
Fig. 9 Axial force distribution curves of long and short pile foundations before flooding

力分布曲线。图中曲线呈 M 形,侧摩阻力先增大再减小。长桩在埋深 20 cm 处,每级荷载作用下桩侧摩阻力达到最大值,短桩在埋深 15 cm 位置处时,桩侧摩阻力也达到最大值。由于其侧摩阻力最大值都发生在桩身前端,说明此模型桩为典型的摩擦型桩,桩底承受荷载较小。

长桩、短桩正摩阻力最大值可达到 47.75 kN 和 42.44 kN,且都出现在桩身的上半部分。这一结果表明,桩的侧摩阻力并未得到充分发挥。

3.2.3 浸水后长短桩基础长桩桩身轴力分析

图 11 为浸水状态下长短桩基础长桩(边桩、中心桩及角桩)桩身轴力分布曲线图。分析图 11 可知,长短桩基础边桩在浸水下桩身轴力的分布在桩长范围内呈先增大后减小趋势,边桩整体桩身轴力是小于角桩和中心桩的,如浸水 10 d 时,边桩最大桩身轴力为 11.13 kN,而角桩的桩身轴力最大值为 12.21 kN。

中心桩、角桩分布形式与边桩类似,在桩长范围内呈先增大后减小趋势。但中心桩与角桩的区别在于中心桩桩身轴力最大深处随浸水时间变化

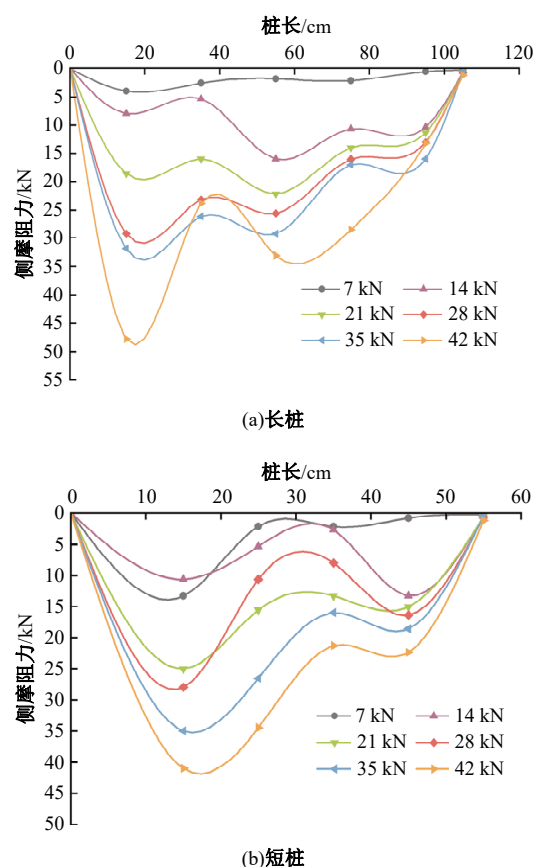


图 10 浸水前长短桩基础长桩和短桩侧摩阻力分布曲线
Fig. 10 Lateral friction distribution curves of long and short pile foundations before flooding

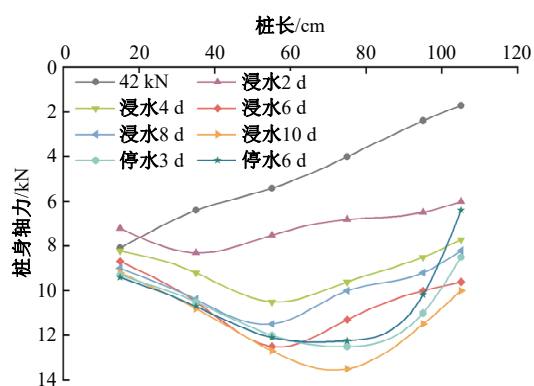
幅度不大,几乎在同一深度处。这与侧摩阻力中性点深度变化趋势相似,中心桩整体桩身轴力相比角桩较小一些。

分析其原因可知,在同等桩顶荷载作用下,中心桩和角桩桩身轴力均由上部荷载和中性点以上下拉荷载共同构成,而上部荷载角桩中心桩相同,因此角桩桩身轴力大于中心桩的核心因素在于下拉荷载不同。

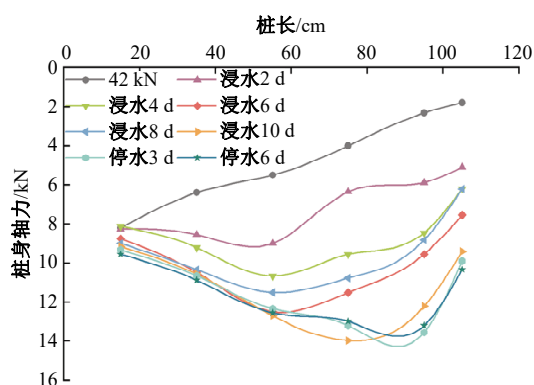
3.2.4 浸水后长短桩基础长桩侧摩阻力分析

图 12 为浸水状态下长短桩基础长桩(边桩、中心桩及角桩)侧摩阻力分布曲线图。由图 12 可知,边桩负摩阻力整体小于中心桩和角桩,但边桩负摩阻力随浸水压力的改变增幅十分明显,中性点深度分布在桩身 25~60 cm 范围内,且随浸水时间的延长深度缓慢下移。中心桩随着浸水,负摩阻力提升幅度参差不齐;中性点深度随浸水过程的进行在桩身 38~75 cm 范围内移动,中性点深度比边桩更深,变化较大。

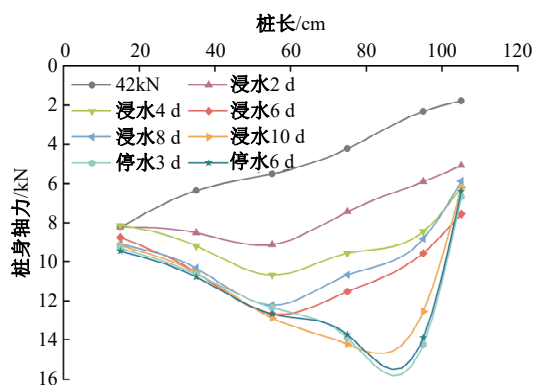
分析其原因可知,从浸水初期到浸水中后期中心桩所受到的负摩阻力逐渐增大。出现这一现



(a)边桩



(b)中心桩



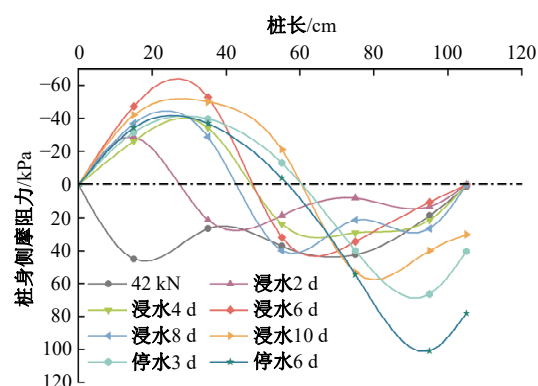
(c)角桩

图 11 浸水后长短桩基础长桩桩身轴力分布曲线

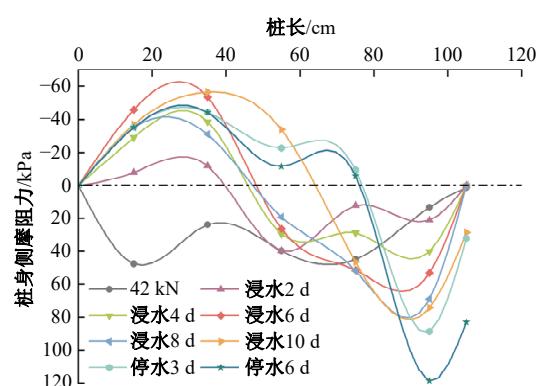
Fig. 11 Axial force distribution curve of long piles of long and short pile foundations after flooding

象主要是因为中心桩位于浸水范围的中心位置,受到的浸水压力较大,导致土体产生类似漏斗状的沉降。

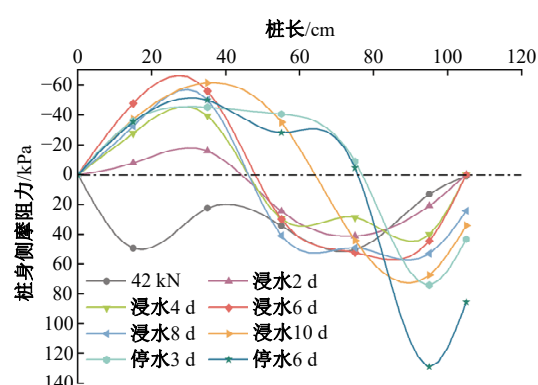
对角桩来说,在长短桩基础浸水过程中,其中性点深度与中心桩相似,也是导致其摩阻力增长的一个重要因素。在浸水后期,角桩的最大负摩阻力达到 61.72 kPa,最大正摩阻力为 128.76 kPa,比中心桩和边桩都要大。这是因为,角桩四周桩数最少,受其他桩影响最小,所以相较于边桩



(a)边桩



(b)中心桩



(c)角桩

图 12 浸水后长短桩基础长桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 12 Lateral friction resistance distribution curve of long and short pile foundation long piles after immersion

和中心桩,角桩的正摩阻力最大。浸水会导致土体饱和、软化,角桩周围土体受桩体约束最小,故变形最大,也使桩侧负摩阻力最大。

在实际工程应用中,可以根据这些特性优化桩基的设计,提高其抗浸水侵蚀的能力,从而保证桩基的稳定性和安全性。

3.2.5 浸水后长短桩基础短桩桩身轴力分析

图 13 为浸水状态下长短桩基础短桩(边桩、

中心桩及角桩)桩身轴力分布曲线。分析图 13 可知,短桩与长桩在受力特性上具有一定的差异。短桩桩身在桩长范围内的轴力变化趋势与长桩类似,都是先增大后减小。然而,短桩在桩埋深范围内的轴力减小程度相对较为均匀,这主要是因为短桩受到侧摩阻力的影响较小。相较之下,长桩在桩长前半程范围内轴力变化较为均匀,但在超过一半的桩长之后,轴力减小幅度明显大于短桩。这种现象主要与桩侧摩阻力有关,因为当长桩在

受到较大侧摩阻力作用时,轴力减小幅度会相应增大。

在长短桩基础中,虽然长短桩的承载力差异并不十分显著,但从总体上看,长桩的承载力要高于短桩。这是因为长桩在承载过程中,其抗弯抗压性能相对较好,能够承受更大的荷载。同时,长桩的刚度也相对较大,有利于提高整个群桩结构的稳定性和承载能力。在实际工程中,选择长桩或短桩需要综合考虑多种因素,如地质条件、荷载特性、施工条件等。因此,在桩基设计中,可根据具体工程需求选择合适的长度,以达到最优的承载效果。

3.2.6 浸水后长短桩基础短桩侧摩阻力分析

图 14 为浸水状态下长短桩基础短桩(边桩、中心桩及角桩)侧摩阻力分布曲线。由图 14 可知,桩身上半部分在浸水作用下会产生负摩阻力,短桩中性点深度分布在桩身 22~67 cm 范围内,且深度随浸水时间缓慢下移。最大负摩阻力出现在角桩,在浸水后期桩基负摩阻力最大值达到 53.85 kPa,最大正摩阻力达到 116.21 kPa,短桩的角桩侧摩阻力比中心桩和边桩都大,与长桩相似。

在浸水过程中,最大负摩阻力由大到小排序是角桩、中心桩、边桩。角桩、中心桩和边桩在桩长保持相等时,其综合侧摩阻力无论是负摩阻力还是正摩阻力,都是角桩最大。

这是因为,中心桩和边桩虽与角桩桩长相等,但在上部荷载作用下,长短桩基础协同作用下中心桩的沉降量明显大于其他桩,因此在同等浸水时间下中心桩桩土相对位移较小,所以负摩阻力小。而边桩承载协同作用较大,负摩阻力最小。

长桩与短桩在侧摩阻力方面呈现的差异具有重要研究价值。这是因为,长桩和短桩在承受荷载时的变形方式和应力分布有所不同,导致侧摩阻力的差异。首先,在变形方式上,长桩由于长度较大,桩身压缩量大,桩土相对位移较大,因此侧摩阻力较大;而短桩由于压缩量小,因此侧摩阻力相对较小。其次,在应力分布中,长桩由于长度较大,在桩顶刚性连接条件下承受竖向荷载时分配的荷载较大,桩身轴力沿桩长衰减较快,因此长桩的桩侧摩阻力整体大于短桩的桩侧摩阻力。

对此,需要深入研究长桩和短桩在各种受力条件下的表现,以便更好地理解和应用长短桩基础。

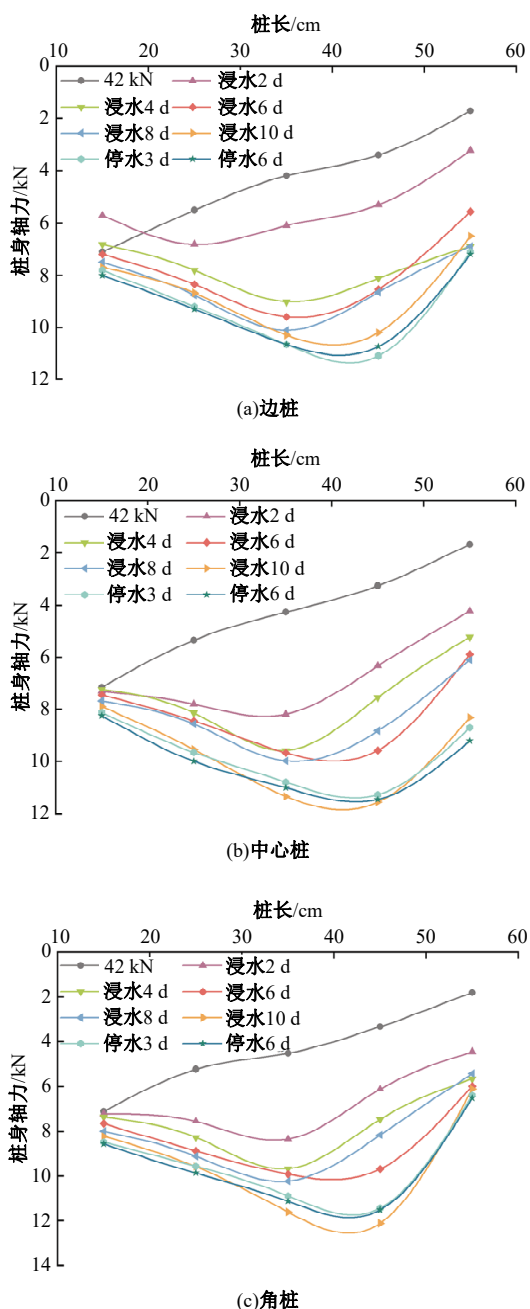


图 13 浸水后长短桩基础短桩桩身轴力分布曲线

Fig. 13 Axial force distribution curve of long and short pile foundation short pile after flooding

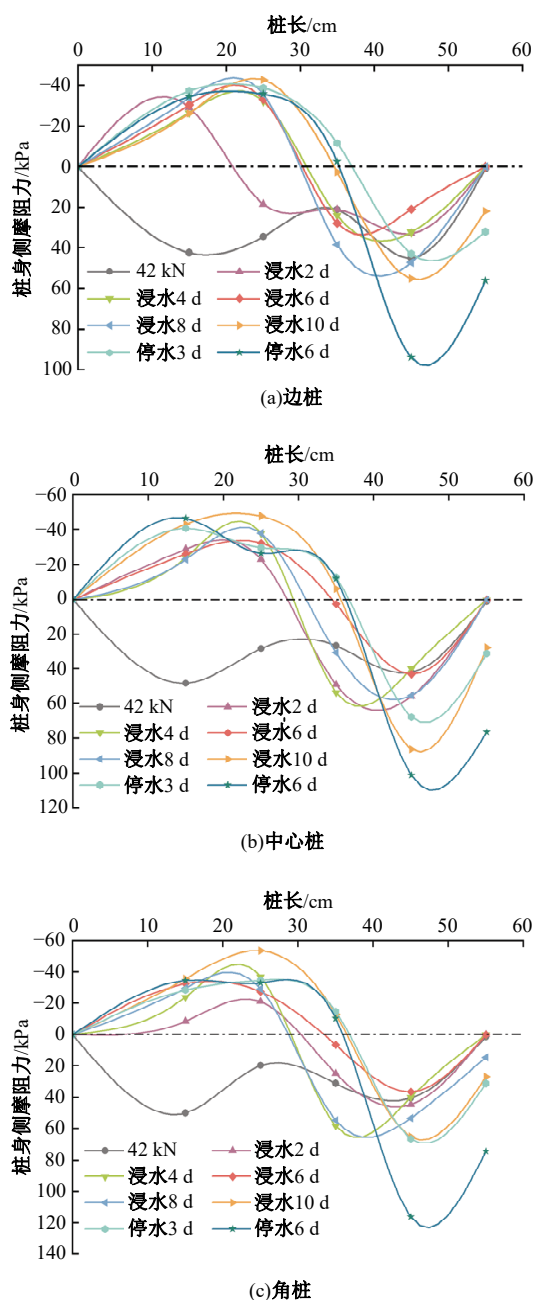


图 14 浸水后长短桩基础短桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 14 Lateral friction resistance distribution curve of long and short pile foundation short pile after immersion

3.3 中性点位置分析

在土体全面浸水饱和后,进行中性点深度分析。长桩(边桩)的中性点深度比为 0.55,长桩(角桩、中心桩)的中性点深度比为 0.64,短桩的中性点深度比为 0.62~0.64。这些数据与《建筑桩基技术规范》(JG 194—2108)^[27]中给出的推荐值比较接近,说明试验方法和数据分析是科学可靠的。然而,中性点深度的确定并非只受桩基设计本身的因素影响,还受到地表沉降、桩顶荷载、

桩径、土体湿陷性、浸水路径、桩侧摩阻力及桩端持力层性质等因素的综合影响。

这些因素在实际的工程环境中可能会产生复杂的变化,因此,各地试验现场浸水试验所得的中性点位置可能存在较大的离散性。离散性的存在意味着进行桩基设计时,不能仅依赖理论计算或者单一的试验数据,还需要根据实际情况,综合考虑各种因素的影响,进行细致的现场勘查和试验,以确保桩基的安全稳定。

4 试验结果验证

为验证试验结果的正确性,采用 ABAQUS 有限元软件对上述试验进行建模重现。

4.1 计算模型

4.1.1 黄土浸水后湿陷变形模拟

在数值模拟中,为精准复现黄土浸水后的湿陷变形现象,目前应用较为广泛的方法主要有两种:水力等效法和模量折减法。其中,水力等效法认为在黄土浸水和表面加载的情况下,均会使土层产生竖向变形。因此,可以通过模拟表面加载的方式等效地模拟浸水所产生的湿陷变形,其重点在于确保这两种方式所产生的变形效果在数值上能够一致。这样的处理方式不仅简化了模拟过程,还保证了模拟结果的准确性和可靠性。

通过模型试验分析可知,浸水湿陷并不是一次完成的,而是分阶段进行的,因此,综合考虑浸水湿陷的阶段性因素将本次模拟浸水压力分为 4 个层级,分别为浸水 0~3 d、3~6 d、6~10 d、停水 10~16 d,在 16 d 后浸水湿陷趋于震荡稳定状态,当湿陷趋于稳定不再发生显著变化时,计算浸水过程所等效浸水压力,可得浸水 0~3 d、3~6 d、6~10 d 的增湿等效力分别为 25、60、95、130 kPa。

4.1.2 模型尺寸及材料属性

建立与室内模型试验尺寸一致的三维长短桩基模型,需确保所有相关参数和设置都精确对应。根据室内模型试验的尺寸,设定土体的水平尺寸为 2.1 m,竖向尺寸为 1.8 m。承台的厚度设定为 20 mm,基桩的尺寸根据试验中的具体数据进行设定,确保模型的真实性和准确性。

承台和基桩在模拟中采用线弹性模型。线弹性模型假设材料在受力时遵循胡克定律,即应力与应变成正比。这种模型适用于描述在弹性范围内工作的材料,能够简化计算并快速得到结果。

土体采用摩尔-库伦模型。

对湿陷性黄土施加浸水条件时,土体结构被破坏,强度降低,承载力减小,并产生湿陷位移。而对土体施加一个相对应的附加荷载,土体同样也可以发生破坏,产生一定的位移。因此,在进行数值模拟时,可以把黄土浸水条件看作给土体施加一个竖向荷载,使土体承受荷载沉降结果与浸水湿陷结果一致,用以简化模拟黄土湿陷机理。由于现阶段缺少能真实反映黄土湿陷特性的本构模型,因此本文采用上述简化方法模拟黄土,即采用摩尔-库伦模型对黄土进行数值模拟。根据室内模型试验中的桩位布置,在三维模型中设置试验桩的位置,准确地模拟桩基与土体的相互作用。材料具体参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Table1 Material parameters

类型	弹性模量/ MPa	泊松比	摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	含水量/ %
承台	3×10^4	0.30	—	—	—
桩	3×10^4	0.34	—	—	—
土体	7.8	0.44	25.5	15.6	13.0

由于长短桩基础上的负荷对各桩的压缩影响极其微小,因此可被省略。桩体的弹性系数显著高于周边土壤的弹性系数,这意味着在受力时,桩基础保持线性弹性状态不变。在有限元分析软件中,这一特性通过设定桩的弹性模量和泊松比实现。

4.1.3 边界条件和网格划分

桩体网格划分如图 15 所示。

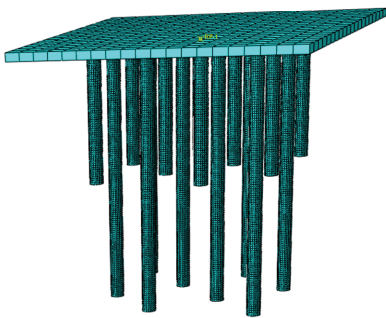


图 15 桩体网格划分

Fig. 15 Pile meshing diagram

对模拟浸水状态下长短桩基础来说,在划分网格时,可以将桩体部分的网格进行细化。离桩体较远的土体可适当增大网格的间距,这样既可以保证模型计算的精准、减少模型的单元数量,还可以使程序得以顺利运行。

对模型施加的荷载主要是重力荷载和表面荷载,其中,重力荷载直接作用在整个三维模型上,模拟浸水所等效浸水压力作用在土体上。设置多个分析步施加不同阶段浸水压力。三维模型中对长短桩基础 3 个侧面边界限制其水平位移,土体底部限制 3 个方向位移。模型边界条件图如图 16 所示。

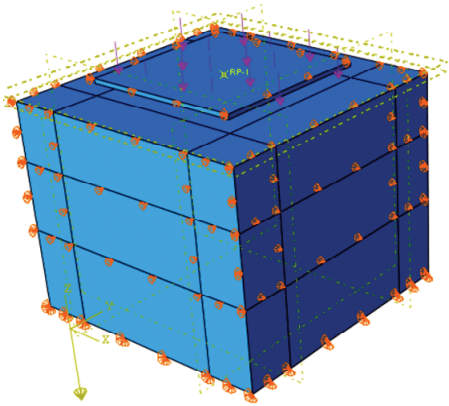


图 16 模型边界条件图

Fig. 16 Model boundary condition diagram

4.2 模拟结果与试验数据对比及分析

4.2.1 浸水后长短桩基础累积沉降对比分析

模型设置与试验工况完全一致,提取 4 个阶段下长短桩基础累积沉降值,桩顶累计沉降与浸水时间曲线对比如图 17 所示。

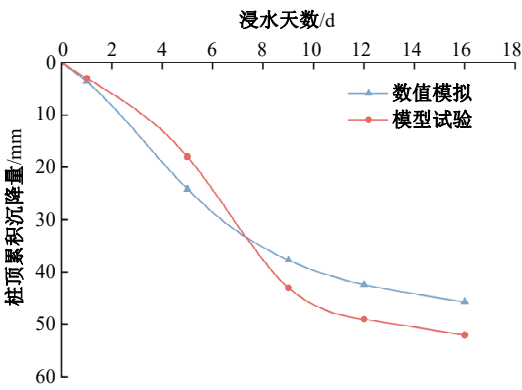


图 17 桩顶累计沉降与浸水时间曲线对比图

Fig. 17 Comparison of the cumulative settlement and water immersion time curve of the pile top

由图 17 可以看出,在加载浸水过程中,沉降量都是随着时间不断增大,浸水 0~10 天时,曲线有明显陡降段,停水后沉降逐渐趋于稳定,这与模型试验一致。采用浸水压力等效模拟实际浸水条件后,沉降量随浸水过程逐渐增大;随着土体趋于饱和,沉降量最终趋于稳定。

4.2.2 浸水后长短桩基础桩身轴力对比分析

由上述试验分析可知,在长短桩基础中,角桩作为主要承载桩,其在浸水过程中的最大负摩阻力比中心桩和边桩都大。因此,本文长桩和短桩都选取角桩与试验数据进行对比分析。浸水后选用浸水饱和阶段。长短桩基础桩身轴力对比如图 18 所示。

由图 18 可以看出,随着桩长的增大,桩身轴力不断减小。在模拟浸水后,曲线在桩身轴力最大深度处以上均呈增长趋势,在桩身轴力最大深度处以下均呈减小趋势。

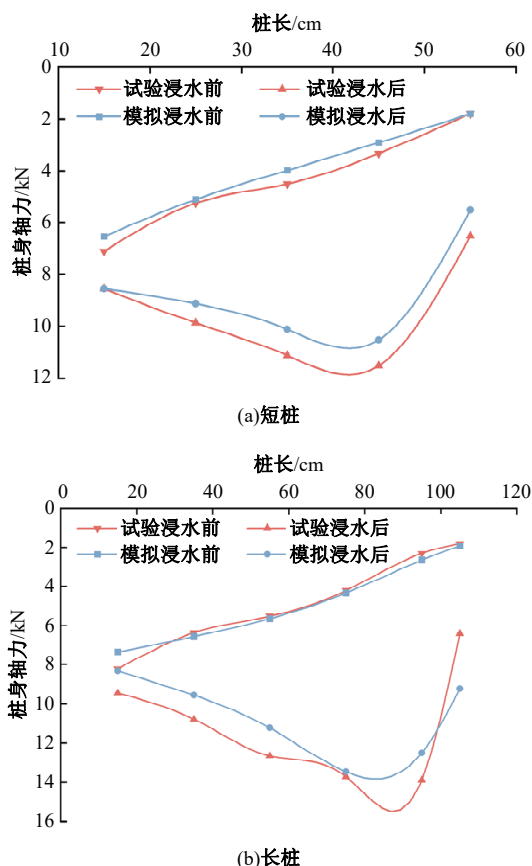


图 18 长短桩基础桩身轴力对比图

Fig. 18 Comparison diagram of axial force of long and short pile foundations

4.2.3 浸水后长短桩基础侧摩阻力对比分析

长短桩基础侧摩阻力对比如图 19 所示。从图 19 可以看出,未浸水时桩身侧摩阻力均为正值,不存在中性点;模拟浸水条件后,桩身上部负摩阻力增幅较大,桩身下部正摩阻力增幅较小。与模型试验相比,中性点稍向下移,短桩约为桩身 36 cm 处,长桩约为桩身 78 cm 处,这与规范规定的 0.5~0.6 L 相近。

综上所述,通过水力等效原理将浸水等效成

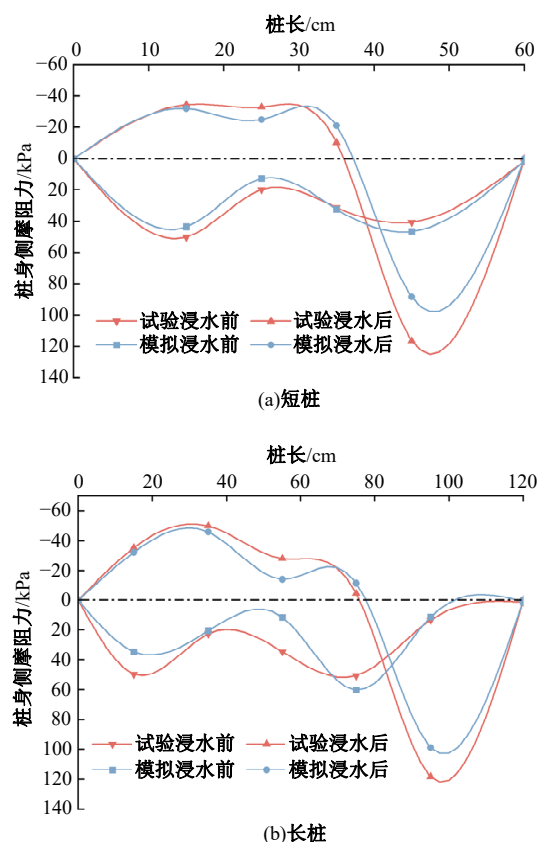


图 19 长短桩基础侧摩阻力对比图

Fig. 19 Comparison diagram of lateral friction resistance of long and short pile foundations

桩周土体的表面荷载作用模拟浸水试验是成立的。该模拟结果与室内试验结果一致,表明试验具有一定的可靠性。

5 结 论

(1)在湿陷性黄土地场,长短桩基础在竖向荷载和浸水作用下, $Q-s$ 曲线呈现典型的缓变型曲线。随着竖向荷载和浸水程度的增加,桩端沉降逐渐增大。相比等长桩,长短桩基础的沉降较小,且桩身轴力和侧摩阻力发挥具有异步性。这证明采用长短组合桩基设计符合减沉桩原理。

(2)随着水分的逐渐渗透,湿陷性土层围绕桩体发生变形,这一过程可以划分为多个阶段。在初始阶段,土层变形呈现缓慢增长趋势;然后,随着浸水时间的延长,变形速度开始显著加快,表现出急剧增加的特点;随后,进入一个中间阶段,在这个阶段中,变形的增速有所减缓;最终,停止浸水后,变形速度进一步趋于平缓。

(3)浸水状态下长短桩基础,角桩、中心桩、边桩负摩阻力都会产生相应的变化,只是变化的程

度不同。从负摩阻力减小速度来看,边桩最强、中心桩和角桩持平;从中性点深度的变化范围来看,也是边桩最强,中心桩和角桩接近;从最大负摩阻力来看,角桩最强,中心桩次之,边桩最后。

(4)在桩顶保持恒载条件下浸水,随土层浸水深度的增大,湿陷变形快速发生,负摩阻力自上而下发展,中性点深度下移,浸水 10 d 结束时,长桩负摩阻力最大值为 61.27 kPa,中性点深度比为 0.55。短桩负摩阻力最大值为 53.85 kPa,中性点深度比为 0.62~0.64,试验结果与桩基规范推荐值较为接近。有限元模拟通过水力等效原理模拟浸水试验,结果与室内试验一致,表明本文试验可靠。

参考文献:

- [1] 朱小军,杨敏,杨桦,等.长短桩组合桩基础模型试验及承载性能分析[J].岩土工程学报,2007,29(4):580-586.
Zhu Xiao-jun, Yang Min, Yang Hua, et al. Study on bearing behaviors and model tests of composite pile foundation with long and short piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 580-586.
- [2] 黄茂松,李波,程岳.长短桩组合路堤桩荷载分担规律离心模型试验与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2543-2550.
Huang Mao-song, Li Bo, Cheng Yue. Centrifugal model test and numerical simulation of pile load sharing law for embankment piles with long and short pile combinations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2543-2550.
- [3] 娄炎,何宁,娄斌.长短桩复合地基中的土拱效应及分析[J].岩土工程学报,2011,33(1):77-80.
Lou Yan, He Ning, Lou Bin. Soil arch effect and analysis in long and short pile composite foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 77-80.
- [4] 郭院成,张四化,李明宇.长短桩复合地基试验研究及数值模拟分析[J].岩土工程学报,2010,32(增刊2):232-235.
Guo Yuan-cheng, Zhang Si-hua, Li Ming-yu. Test research and numerical simulation analysis of long-short piles composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup. 2): 232-235.
- [5] 高登辉,赵宽耀,金松丽,等.大厚度自重湿陷性黄土场地桩基负摩阻力计算方法研究[J].岩土工程学报,2022,44(增刊1):231-235.
Gao Deng-hui, Zhao Kuan-Yao, Jin Song-li, et al. Calculation method of negative friction resistance of pile foundation in heavy weight collapsible loess site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(Sup. 1): 231-235.
- [6] Ye S H, Zhao Z F, Zhu Y P. Study on negative friction of pile foundation in single homogeneous soil layer in collapsible loess area of Northwest China[J], Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(12): 1-13
- [7] 马天忠,孙晨东,高玉广,等.浸水状态下湿陷性黄土场地螺旋灌注桩负摩阻力与土体湿陷规律试验[J].中国公路学报,2022,35(8):151-161.
Ma Tian-zhong, Sun Chen-dong, Gao Yu-guang, et al. Experiment on negative friction resistance of spiral cast-in-place pile and soil collapse rule in collapsible loess site under flood condition[J]. China Journal of Highway and Transportation, 2022, 35(8): 151-161.
- [8] 郑一峰,毛健,梁世忠,等.高填土地考虑土体固结的桩基负摩阻力[J].吉林大学学报:工学版,2017,47(4):1075-1081.
Zheng Yi-feng, Mao Jian, Liang Shi-zhong, et al. Negative frictional resistance of pile foundation considering soil consolidation in high fill sites[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(4): 1075-1081.
- [9] 张延杰,王旭,梁庆国,等.浸水条件下湿陷性黄土地基群桩基础承载特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(增刊1):219-223.
Zhang Yan-jie, Wang Xu, Liang Qing-Guo, et al. Model test of bearing capacity of pile group foundation on collapsible loess foundation under water immersion condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(Sup. 1): 219-223.
- [10] 曹明,陈龙珠,陈胜立,等.长短桩桩筏基础相互作用系数解法及分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(2):382-388.
Cao Ming, Chen Long-zhu, Chen Sheng-li, et al. An interaction factor approach and analysis for long-short-pile piled raft foundations[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 382-388.
- [11] 林本海,方辉.长短桩高强复合地基在高层建筑中的应用[J].岩土力学,2009,30(增刊2):302-307.
Lin Ben-hai, Fang Hui. Application of long and short piles high strength composite foundation to high-rise building[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30

- (Sup. 2): 302-307.
- [12] 佟建兴, 孙训海, 杨新辉, 等. 长短刚性桩复合地基桩、土承载性状与厚径比相关关系试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 955-960.
- Tong Jian-Xing, Sun Xun-Hai, Yang Xin-Hui, et al. Experimental study on the correlation between pile and soil bearing properties and thickness-to-diameter ratio of short and long rigid pile composite foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 955-960.
- [13] 葛忻声, 鹿宏伟, 李斌, 等. 长短桩复合地基荷载分担比的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(3): 362-367.
- Ge Xin-sheng, Lu Hong-wei, Li Bin, et al. Model test study on load sharing ratio of composite foundation with long-short piles[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, 43(3): 362-367.
- [14] 杨桦, 杨敏, 王伟. 长短桩组合桩基础地基中的应力场和位移分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 593-597.
- Yang Hua, Yang Min, Wang Wei. Stress and displacement in subsoil of long short pile foundation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2006, 34(5): 593-597.
- [15] 于光明, 龚维明, 戴国亮, 等. 考虑固结流变的软土地基单桩下拉荷载计算[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2020, 50(4): 606-615.
- Yu Guang-ming, Gong Wei-ming, Dai Guo-liang, et al. Calculation of pull down load of single pile on soft soil foundation considering consolidation rheology[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(4): 606-615.
- [16] Yan W B, Gao X L. Computer simulation and model test study on influence of water immersion degree on wind power generation pile stress[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2033(1): 1-12.
- [17] 叶观宝, 郑文强, 张振. 大面积填土地地中摩擦型桩负摩阻力分布特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 440-448.
- Ye Guan-bao, Zheng Wen-qiang, Zhang Zhen. Research on the negative friction resistance distribution characteristics of friction pile in large area filling site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Sup. 1): 440-448.
- [18] 陈天镭, 谢飒, 吴健. 自重湿陷性黄土地基中双向螺旋挤土灌注桩负摩阻力的浸水试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(6): 11-15.
- Chen Tian-Lei, Xie Sa, Wu Jian. Immersion of negative friction resistance of bidirectional spiral squeeze pile in self-weight collapsible loess foundation experimental research[J]. Industrial Architecture, 2020, 50(6): 11-15.
- [19] Zhao Zhunag-fu, Ye Shuai-hua, Zhu Yan-peng, et al. Scale model test study on negative skin friction of piles considering the collapsibility of loess[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(2): 601-611.
- [20] Di S J, Lyu J J, Gao X J, Research on optimize design of pile foundations in collapsible loess areas[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2021, 643(1): 1-6.
- [21] 范孟华, 闫保衡, 朱润朝, 等. 堆载作用下单桩中性点位置与负摩阻力特性研究[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2022, 52(3): 329-336.
- Fan Meng-hua, Yan Bao-heng, Zhu Run-chao, et al. Study on neutral point position and negative friction resistance of single pile under overload[J]. Journal of Henan University (Natural Science Edition), 2022, 52(3): 329-336.
- [22] Chiou J S, Wei W T. Numerical investigation of pile-head load effects on the negative skin friction development of a single pile in consolidating ground[J]. Acta Geotechnica: An International Journal for Geoengineering, 2021, 16(6): 1867-1878.
- [23] Liu Y H, Yang P, Xue S, et al. Influence of dredger fill self-consolidation on development of negative skin friction of piles[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(15): 1-8.
- [24] JGJ 106—2014. 建筑基桩检测技术规范[S].
- [25] GB 50025—2018. 湿陷性黄土地区建筑规范[S].
- [26] 钱鸿缙, 王继堂, 罗玉生, 等. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- [27] JG J94—2008. 建筑桩基技术规范[S].