

引文格式:朱彦鹏,李芳川,成 栋,等.湿陷性黄土地中单桩承载力与负摩阻力试验研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(6):140-151.  
ZHU Yanpeng, LI Fangchuan, CHENG Dong, et al. Test research on bearing capacity and negative friction force for single pile in collapsible loess ground[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(6): 140-151.

DOI:10.19815/j.jace.2022.12073

# 湿陷性黄土地中单桩承载力与负摩阻力试验研究

朱彦鹏<sup>1,2</sup>, 李芳川<sup>1,2</sup>, 成 栋<sup>1,2</sup>, 房光文<sup>3</sup>, 吴林平<sup>1,2</sup>, 韦正德<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 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, 甘肃 兰州 730050; 3. 兰州城市学院 环境与城市建设学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**为了研究湿陷性黄土地中土体湿陷引起的桩基承载力问题,在平凉市某工程现场利用机械成孔灌注桩(桩径0.8 m,桩长26 m)进行荷载-特殊浸水试验,对试验过程中不同深度处的桩身轴力和桩侧摩阻力进行分析。结果表明:天然状态下试验桩极限承载力大于13 200 kN,受力特性为典型的摩擦桩;由于前期泥浆护壁施工方式对孔壁的浸水影响以及桩周土沿桩长方向上物理力学性能分布的不确定性,侧摩阻力沿深度出现多个峰值,最大值均出现在泥浆护壁以上(桩身2~6 m)位置处;在渗水孔与渗水坑相结合的特殊浸水试验条件下,桩侧负摩阻力在浸水试验第8 d时趋于稳定,中性点在桩身8 m位置处,负摩阻力为107.6 kPa;试验过程中桩周土沿桩长分段发生湿陷,而不是随浸水自上到下逐渐湿陷;受到预浸水作用的试件SZH在静载试验结束后的中性点出现在桩身12 m位置处,负摩阻力为127.8 kPa,人工浸水试验主要使桩身8 m位置以上桩身轴力增大,中性点位置保持不变,表明负摩阻力受桩顶荷载、浸水方式和浸水固结时间影响显著。

**关键词:**桩基础;承载特性;试验研究;自重湿陷性黄土;负摩阻力;特殊浸水

中图分类号:TU473

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)06-0140-12

## Test research on bearing capacity and negative friction force for single pile in collapsible loess ground

ZHU Yanpeng<sup>1,2</sup>, LI Fangchuan<sup>1,2</sup>, CHENG Dong<sup>1,2</sup>, FANG Guangwen<sup>3</sup>,  
WU Linping<sup>1,2</sup>, WEI Zhengde<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;  
2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. School of Environment and Urban Construction, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** In order to study the problem of pile foundation bearing capacity caused by the collapsibility of loess in collapsible loess ground, a load-special immersion test was conducted using mechanically drilled cast-in-place piles (with a diameter of 0.8 m and a length of 26 m) at a construction site in Pingliang City. In the experiment, multiple sensors were installed on the pile body to analyze the axial force and lateral friction resistance of the pile body at different depths during the test process. The results show that the ultimate bearing capacity of the test pile in its

natural state is greater than 13 200kN, and its stress characteristics are typical of friction piles. Due to the influence of the mud wall protection construction method on the immersion of the hole wall in the early stage and the uncertainty of the physical and mechanical properties distribution of the soil around the pile along the length of the pile, there are multiple peaks in the lateral friction resistance along the depth, with the maximum values occurring above the mud wall protection (pile body is 2-6 m). Under the special immersion test conditions of combining seepage holes and seepage pits, the negative frictional resistance on the pile side tends to stabilize on the 8th day of the immersion test, with the neutral point at the 8 m position of pile body and a negative frictional resistance of 107.6 kPa. During the test, the soil around the pile collapses in sections along the length of the pile, rather than gradually collapsing from top to bottom with immersion. SZH was subjected to pre-immersion, after the static load test, the neutral point appeared at a position of 12 m of pile body, with a negative frictional resistance of 127.8 kPa. Manual immersion tests mainly increased the axial force of the pile body above 8 m, while the neutral point position remained unchanged, indicating that the negative frictional resistance was significantly affected by the pile top load, immersion method, and immersion consolidation time.

**Key words:** pile foundation; bearing characteristic; test research; self-weight collapsible loess; negative friction force; special immersion

**Author resume:** ZHU Yanpeng(1960-), male, PhD, professor, E-mail: zhuyp@lut. cn.

## 0 引言

湿陷性黄土是一种第四纪沉积物,天然状态下结构强度较高,压缩性小<sup>[1]</sup>,但遇水之后,在附加应力或着自重应力的作用下,结构强度显著降低,且自身结构发生明显坍塌<sup>[2-3]</sup>。随着社会经济的发展和“一带一路”倡议的实施,西部黄土场地上的建设项目规模也与日俱增。桩基础作为一种良好的基础形式,在西部地区黄土地区有着广泛应用,但在西北黄土地区易由于湿陷变形产生桩土相对位移,由此引起的桩侧负摩阻力效应给桩基带来了严重的不利影响,不仅使得桩基承载力下降,甚至造成桩基损伤,严重影响到居民的人身和财产安全。因此,为了避免黄土湿陷造成的严重不利影响,研究湿陷性黄土地区桩基承载力和负摩阻力问题显得极为重要。

目前在实际设计中,规定自重湿陷性黄土场地的单桩竖向承载力计算除不应计中性点深度以上黄土层的正侧阻力外,还应扣除桩侧的负摩阻力<sup>[4]</sup>;实际施工过程中往往需要灌注桩穿透湿陷性黄土层。以上方式虽然避免了黄土湿陷产生的不利影响,但也增加了大量的施工成本和难度。为此许多学者就湿陷性黄土场地中桩基承载特性和负摩阻理论和试验研究做了大量工作,同时也有学者研发桩侧涂层来削减负摩阻力<sup>[5]</sup>。目前对于灌注桩承载特性的研究中,文献<sup>[6]</sup>通过模型和现场试验指出:桩端阻力

和侧阻力存在“深度效应”,即并未随着深度线性增大,存在临界深度。华遵孟等<sup>[7]</sup>研究指出:黄土塬场地上基础设计中,单桩承载力特征值和各地层侧摩阻力都是通过勘查手段评估地基承载力,并结合现行《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)推荐取值,然而通过勘查手段评估地基承载力的方法存在较大偏差,且规范取值一般偏保守,造成较大的资源浪费。何颐华等<sup>[8]</sup>提出并初步研究了湿陷性黄土场地中的负摩阻力问题,并通过试验资料归纳,初步列出了负摩阻力数值表。经过数十年发展,理论研究方面;中国大量学者<sup>[9-11]</sup>所做的有关负摩阻力理论研究多针对软土地区桩周土固结沉降造成的桩基负摩阻力问题;高登辉<sup>[12]</sup>给出了自重湿陷性黄土场地侧限和三轴条件下增湿变形计算方法,结合桩-土间荷载传递规律,提出了黄土桩基负摩阻力计算方法。试验研究方面:张延杰等<sup>[13-14]</sup>通过室内模型试验,分别研究了浸水条件下群桩和堆载条件下不同下卧层的承载特性。由于湿陷性黄土地区桩基负摩阻力问题的特殊性和复杂性,现场浸水试验仍是测定负摩阻力最为有效的方法。黄雪峰等<sup>[15-18]</sup>通过现场原位浸水试验,对自重湿陷性黄土场地湿陷变形特性以及入渗规律、桩基负摩阻力、中性点位置做了大量研究,并指出负摩阻力实测值和中性点位置远高于规范建议取值范围;艾小平等<sup>[19]</sup>通过现场浸水试验模拟降水过程,试验表明短期浸水后,试桩极限承载力

下降约 40%，极限荷载下的桩身沉降量增大 1.73 倍；夏力农等<sup>[20]</sup>通过现场实测发现湿陷性黄土地中不同加载次序下的桩侧摩阻力和中性点位置也有较大区别；魏进等<sup>[21]</sup>通过现场原位浸水试验指出，按历史月最大降水量 3 倍浸水后，浸水影响区域深度约 8.5 m，桩侧负摩阻力呈“单峰”状态分布；叶朝良等<sup>[22]</sup>通过对大量现场测试数据的统计分析发现，在正常使用工况下，浸水湿陷量远不及现场浸水试验充分，负摩阻力取值在 15~35 kPa。以上的现场浸水试验单靠桩头位置处渗水坑向下部桩周土浸水，但传统的现场浸水试验随着桩身增加桩周土浸水效果呈减弱趋势，在大厚度自重湿陷性黄土地上难以保证全段浸水效果。为此，朱彦鹏等<sup>[23]</sup>在定西大厚度自重湿陷性黄土地上首次采用浸水坑与浸水孔相结合的特殊浸水方式进行了现场原位浸水试验，并由此提出了一种在桩基施工过程中对桩周土进行“微浸水”<sup>[24]</sup>来消除桩周土湿陷性以提高桩基承载力的思路。在分析和总结前人研究成果的基础上，相比以渗水坑为主的传统浸水方式，渗水管为主、渗水坑为辅的特殊浸水方式在浸水效果上有较明显的优势。由于两种浸水方式在主要渗水路径上有较大区别，为了研究自重湿陷性黄土地上的桩基承载力和特殊浸水方式对桩侧负摩阻力产生的影响，本文采用浸水坑与浸水孔相结合的特殊浸水方式，开展桩基承载力与负摩阻力的现场原位试验。

# 1 试验概况

## 1.1 场地条件

本次试验场地位于甘肃省崇信县，试验区域选择场地内最不利土层位置。地貌属洮河南岸Ⅲ级阶地，地形地貌较复杂，场地属中等复杂场地，场地岩土种类较多，较不均匀，性质变化较大，主要为黄土状粉土、粉质黏土、卵石层、强风化泥质砂岩、中风化泥质砂岩。该场地土层特性如表 1 所示。

表 1 土层特性	
Table 1 Characteristics of soil layer	
土层	埋深/m
黄土状粉土 $Q_3^{al+pl}$	0.0~14.2
粉质黏土 $Q_3^{al+pl}$	14.2~15.7
卵石层 $Q_3^{al+pl}$	15.7~20.3
强风化砂岩 $K_{ij}$	20.3~23.3
中风化砂岩 $K_{ij}$	23.3~26.5

由地勘资料以及室内土工试验得知，黄土自重陷量  $\Delta_{zs}=868.47\sim274.25$  mm，自重湿陷性系数

$\delta_{zs}=0.004\sim0.080$ ，黄土总湿陷量  $\Delta_{zs}=392.85\sim1741.25$  mm，湿陷性系数  $\delta_s=0.009\sim0.138$ ，湿陷深度最大为 16.5 m，该场地的地下水位深度为 17.3 m。依据《湿陷性黄土地区建筑标准》，勘察场地可划分为Ⅱ~Ⅳ级自重湿陷性黄土地。

## 1.2 试验方案

由于本次试验荷载较大，反力装置采用锚桩-横梁装置。试验现场桩孔采用机械旋挖成孔，现场制作 3 根试验桩和 8 根锚桩进行试验，试验桩桩长  $l=26$  m，锚桩桩长  $l=18$  m，桩径均为 800 mm。现场平面布置如图 1 所示。试验过程中首先采用慢速荷载维持法进行单桩静载试验，按照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)，加载时按逐级等量加载。每级荷载施加后按第 5、15、30、45、60 min 测读桩顶沉降量，以后每隔 30 min 测读一次。当静载试验结束后，桩顶荷载逐步卸载至 6 000 kN，进行原位浸水试验。

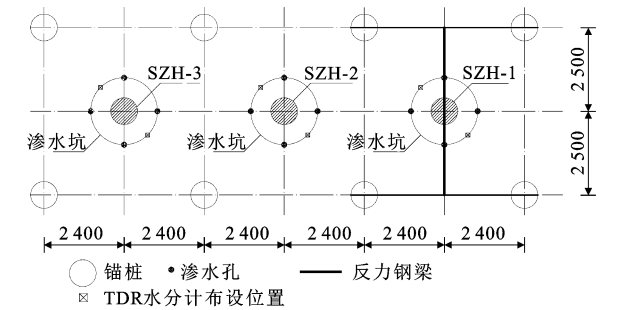


图 1 单桩静载-特殊浸水试验平面布置(单位:mm)  
Fig. 1 Plan layout of static load and special immersion test of single pile (unit:mm)

浸水试验时，为了使不同深度位置的桩周土体均取得良好的浸水效果，并加快不同深度位置土体的浸水饱和，本次试验采用以渗水孔与渗水坑相结合的浸水方法。在前期试验准备阶段，首先按照位置尺寸在渗水坑边缘处设置渗水孔，孔深 20 m，平面位置如图 1 所示。在渗水孔内放置由 PVC 管制成的渗水管，在管壁上沿长度方向呈螺旋状钻出小渗水孔。小渗水孔沿 PVC 管长度方向每 0.5 m 设置 1 层，不少于 3 层，每层不少于 4 个。为避免 PVC 管中水流下落过快，尽量避免小渗水孔在试验时被堵塞，或者造成桩周土体沿深度方向浸水程度减弱，PVC 管下放至钻孔后，在 PVC 管内以及管壁和钻孔之间的空隙中填砾。填砾的形状以近圆形的小卵石砂粒为宜，且不能含土过多。

为了测量试验过程中桩身轴力变化，在试验准备阶段沿钢筋笼竖向布设钢筋应力计(JMZ-

418HAT),两排共 14 个,埋入式应变计(JMZ-215HA),单排共 12 个;桩孔底部布设土压力盒(JMZ-508HA),共 2 个。另外,为了掌握浸水试验过程中桩周土体的体积含水率变化情况,在渗水坑边缘位置竖向对称布置 TDR-土壤水分计,两排共 8 个。钢筋应力计和混凝土应变计及 TDR 水分计的具体布设位置如图 2 所示。试验过程中,各种传感器布设以及相应的数据采集设备现场照片见图 3。

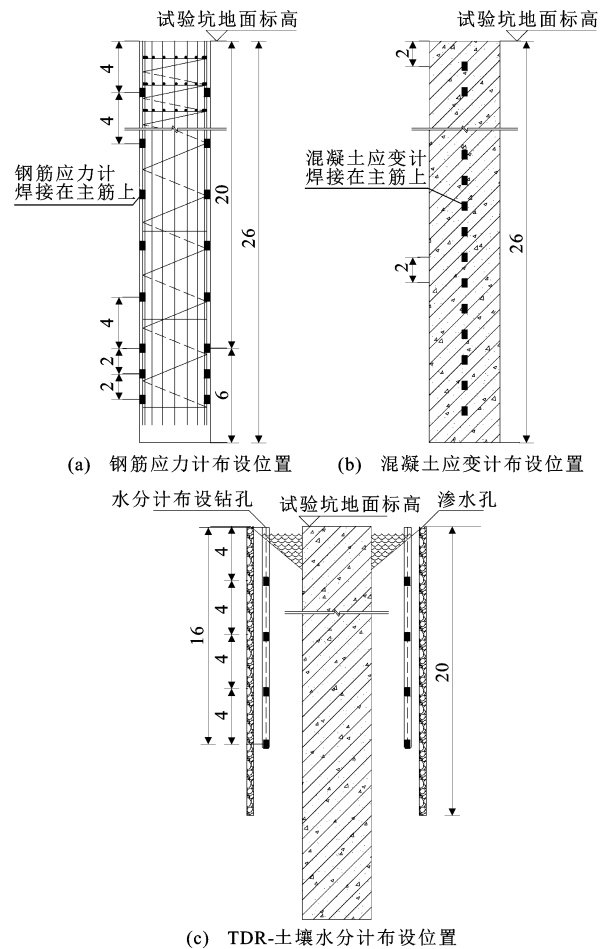


图 2 传感器竖向布置(单位:m)

Fig. 2 Vertical layout of sensors (unit:m)

## 2 天然状态下的桩基承载力与桩身轴力分布

### 2.1 单桩的荷载-沉降(Q-s)特性

本次试验严格依据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014),利用慢速荷载维持法对 3 根试验桩进行单桩竖向抗压承载力试验,试验现场照片见图 4。由于 SZH-3 在静载试验前桩周土受降雨影响较为显著,故天然状态下只分析 SZH-1、SZH-2 的荷载-沉降(Q-s)特性,实测所得 Q-s 曲线如图 5 所示。

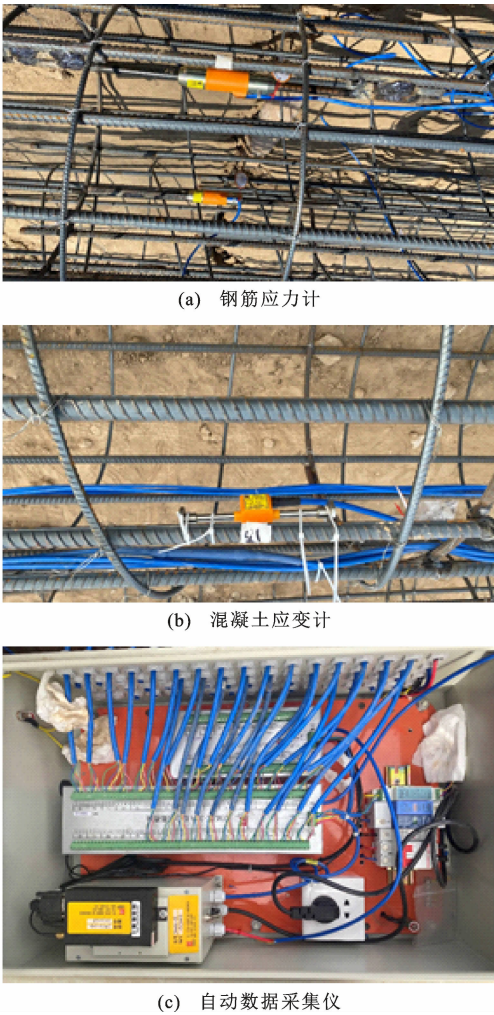


图 3 传感器和数据采集设备

Fig. 3 Sensors and data acquisition equipment



图 4 静载试验现场照片

Fig. 4 Site photograph of static load test

从图 5 可知,随着荷载的增加,SZH-1、SZH-2 的桩顶沉降量增加缓慢,沉降梯度变化缓慢,无明显陡降段,为缓变曲线。SZH-1、SZH-2 在加载到设计要求的最大加载值 13 200 kN 时,桩顶沉降分别为 11.57、9.90 mm,未发生极限破坏。观察图 5 中的荷载-沉降(Q-s)曲线可以发现,SZH-1、SZH-2 的 Q-s 曲线仍有继续发展的趋势,但考虑到计算后最

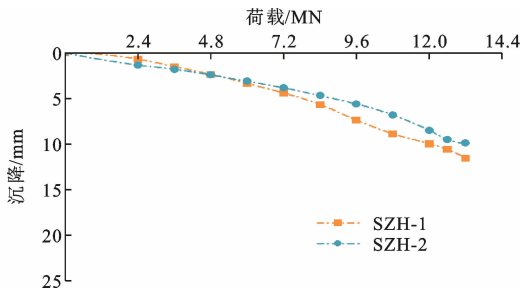


图5 单桩竖向静载试验的  $Q$ - $s$  曲线

Fig. 5  $Q$ - $s$  curves of single pile in vertical static loading test

大加载值 13 200 kN 已满足湿陷性黄土地区相关规范<sup>[4]</sup>和桩基设计中关于上部拟建建筑对单桩承载力的设计要求。根据《建筑基桩检测技术规范》给出的单桩竖向承载力特征值计算公式得

$$R_a = \frac{1}{K} Q_{uk} \quad (1)$$

式中:  $R_a$  为单桩竖向承载力特征值;  $K$  为安全系数, 取  $K=2$ ;  $Q_{uk}$  为单桩竖向承载力特征值。

静载试验表明, 天然状态下该场地上单桩竖向极限抗压承载力大于 13 200 kN, 满足设计中该场地内桩基单桩竖向承载力特征值, 且仍有较大富裕。

## 2.2 桩身轴力的分布规律

试验过程中, 通过在桩身不同深度位置布设的传感器, 可以直接测得某一深度桩身截面处的混凝土微应变和钢筋应力。桩身某一深度截面处轴力可由公式(2)~(4)间接求得。

$$N_i = N_{ci} + N_{si} \quad (2)$$

$$N_{ci} = E_c \epsilon_{ci} A_{ci} \quad (3)$$

$$N_{si} = \sigma_{si} A_{si} \quad (4)$$

式中:  $N_i$  为截面  $i$  处的桩身轴力;  $N_{ci}$ 、 $N_{si}$  分别为截面  $i$  处的混凝土与钢筋轴力;  $A_{ci}$ 、 $A_{si}$  分别为截面  $i$  处的混凝土与钢筋截面面积;  $E_c$  为混凝土弹性模量;  $\epsilon_{ci}$  为截面  $i$  处的混凝土应变;  $\sigma_{si}$  为截面  $i$  处的钢筋应力。

天然状态下, 各级荷载下 SZH-1、SZH-2 的桩身轴力分布曲线如图 6 所示。从图 6 可知, 在逐级加载的过程中, SZH-1、SZH-2 桩身轴力表现出随着深度增加而减小的规律, 桩身轴力分布比较理想。桩顶荷载主要由桩侧摩阻力抵消, 只有极小部分传递到桩端。静载试验中 SZH-1、SZH-2 桩身轴力分布规律整体一致, 当桩顶荷载达到 12 000 kN 时, SZH-2 在 8 m 桩身位置出现桩身轴力随深度增大的现象, 分析发现其他荷载等级下并无此现象, 可能是由于桩身轴力较大时传感器采集精度下降, 造成该位置处轴力数据异常。

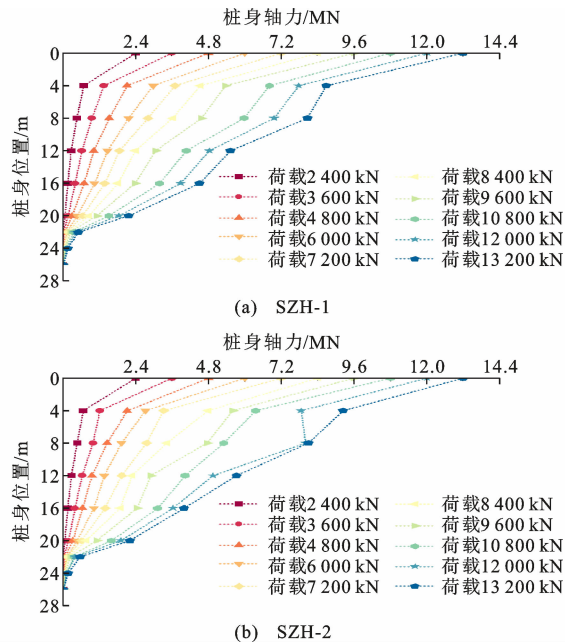


图6 桩身轴力沿深度的分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of axial force of pile with depth

由于现场采用的成桩工艺和成桩时间的影响, 在 7 m 深度以下的桩侧与孔壁间形成了膏状泥皮。图 6 中在泥皮影响范围(0~15.7 m)内, 桩身 0~4 m 位置无泥浆护壁影响, 该范围内桩身轴力曲线的斜率明显大于受泥浆护壁影响的位置。随着桩顶荷载的持续增加, 不同深度范围内的轴力随深度变化的斜率也趋于稳定。通过分析发现, 桩侧泥皮力学性质差且具有润滑性, 对桩侧摩阻力产生削弱, 进而对桩身承载力产生不利影响。SZH-1、SZH-2 中桩顶荷载基本由桩侧摩阻力传递, 说明此次试验中桩侧泥皮厚度尚未达到影响桩基承载力的“临界值”<sup>[25]</sup>。

## 2.3 桩侧摩阻力的分布规律

桩侧摩阻力通过传感器布设位置将土体分层考虑, 假定传感器位置为各层土体的中点, 且同一土层中各点侧摩阻力相同, 取平均侧摩阻力为该层侧摩阻力值。第  $i$  层土体(第  $i$  层土体的上下界面分别为截面  $i-1$  和截面  $i$ )的平均侧摩阻力  $q_{si}$  为

$$q_{si} = \frac{N_{i-1} - N_i}{A_i} \quad (5)$$

式中:  $N_{i-1}$ 、 $N_i$  分别为截面  $i-1$  和截面  $i$  位置的桩身轴力;  $A_i$  为截面  $i-1$  和截面  $i$  位置间的桩侧表面积。

按公式(5)求得的桩侧摩阻力沿桩身的变化曲线如图 7 所示。

由图 7 中 SZH-1、SZH-2 在各级荷载下桩侧摩阻力的分布曲线可以看出: SZH-1、SZH-2 桩侧摩阻



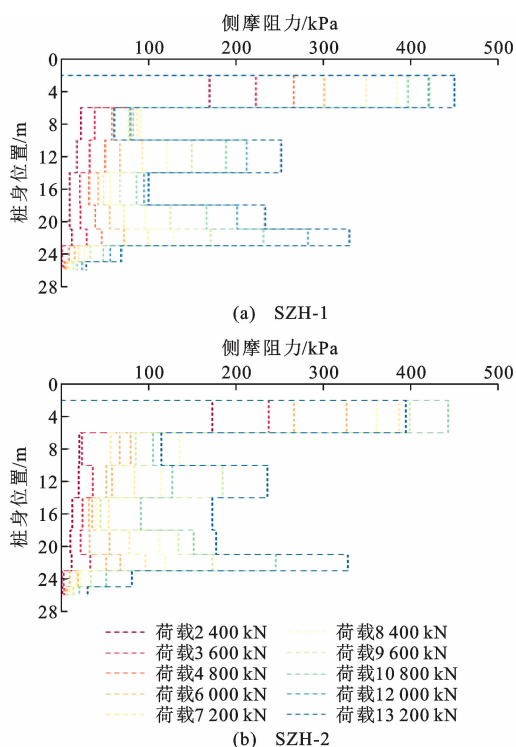


图7 桩侧摩阻力沿深度的变化曲线

Fig. 7 Change curves of frictional resistance of pile side with depth

力沿桩身分布趋势大致相同,桩侧摩阻力在桩身2~6、10~14、21~23 m位置出现3个正摩阻力峰值。单独来看:SZH-1桩侧摩阻力的3个峰值分别为449.9、252.3、330.1 kPa;当桩顶荷载小于4 800 kN时,桩身2~4 m处峰值最先出现,也体现出随着桩顶荷载不断增加,桩身荷载自上而下逐渐传递,因此桩侧正摩阻力自上到下逐渐发挥以抵消桩身内力和竖向压缩变形。SZH-2桩侧摩阻力在峰值处分别为442.9、303.3、327.5 kPa;SZH-2侧摩阻力峰值并不都出现在桩顶荷载最大时,在排除桩顶荷载为12 000 kN时8 m位置处轴力误差的影响后,10~14 m位置上侧摩阻峰值为235.8 kN,此时桩顶荷载为13 200 kN。

总的来说,SZH-1、SZH-2桩侧正摩阻力最大值均出现在桩身2~6 m位置上,主要原因为试验桩桩孔施工时,为防止塌孔,在7 m以下采用泥浆护壁方式施工。由于地层复杂,单个桩孔施工时间均在48 h左右,长时间的泥浆护壁在桩孔表面形成不同厚度的泥皮,与原状土相比泥皮土具有含水率高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低、摩擦力低等特点<sup>[26-27]</sup>。泥皮土形成了桩土间的一层薄弱层,影响了7 m以下桩侧正摩阻力的发挥。SZH-1、SZH-2在桩身6~10 m位置正摩阻力均存在明显衰减。

泥皮最直接影响便是对桩-土接触面上极限剪应力削弱使得桩侧摩阻力大打折扣,从而导致桩基承载力下降。相关研究表明,随着泥皮厚度的增加,桩侧极限摩阻力与单桩极限承载力随着泥皮厚度增加而减小,且在成孔24 h后,受到泥皮影响,桩侧摩阻力和单桩极限承载力分别下降5~10%和20%<sup>[28]</sup>。目前,针对桩侧泥皮土对桩侧摩阻力与单桩承载力的不利影响,主要的治理思路有在钻孔施工过程中不断控制泥浆比重与后注浆工艺两种,其中后注浆工艺效果较好。

SZH-1、SZH-2桩身21~23 m位置正摩阻力均出现了正的峰值点,且在同级荷载下普遍大于10~14 m位置的桩侧摩阻力,这是由于:①相对于卵石层,泥质砂岩有良好的整体性且与灌注桩表面可以更好贴合,有更高的极限侧阻力;②灌注桩在桩身23 m位置处进入中风化砂岩层,相比于其他地层有更高的强度和刚度,桩端土强度的提高对桩端附近的桩侧阻力有强化效果<sup>[29]</sup>。

## 2.4 桩侧摩阻力、端阻力与桩顶荷载关系

通过对加载过程中试桩桩身轴力变化进行分析后发现:SZH-1、SZH-2的受力特性为典型的摩擦桩特性。在整个加载过程中,桩侧阻力承担了99.83%~99.98%的桩顶荷载,可认为在桩顶荷载达到最大值(13 200 kN)时,桩端阻力尚未发挥,试验桩单桩承载力仍有较大富裕。以SZH-1为例,桩的侧摩阻力、端阻力与桩顶荷载关系曲线如图8所示。

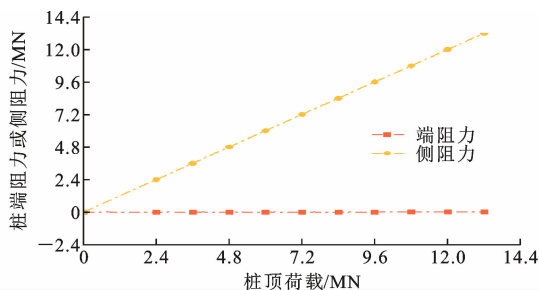


图8 SZH-1桩的侧摩阻力、端阻力与桩顶荷载关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of lateral frictional resistance, end resistance with load on pile top for pile SZH-1

## 3 浸水状态下桩身轴力的传递及负摩阻力的变化特征

### 3.1 特殊浸水状态下桩身轴力和负摩阻力分布

当单桩竖向静载试验完成后,逐步将桩顶荷载卸载至6 000 kN,并在桩头位置处的渗水坑和渗水管中浸水,现场照片如图9所示。通过在桩周土中布设的水分计监测浸水过程中桩周土体的含水率变

化。以 SZH-1 为例分析浸水后桩身轴力和负摩阻力的分布情况,结果如图 10~12 所示。



图 9 浸水试验现场照片

Fig. 9 Immersion test site photograph

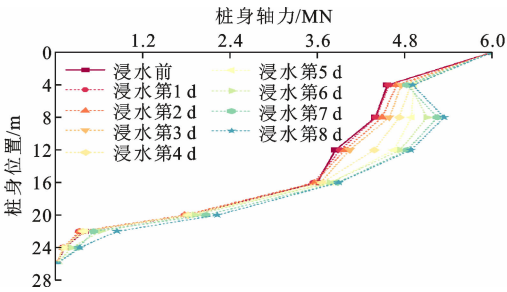


图 10 SZH-1 浸水状态下的桩身轴力沿深度的变化曲线

Fig. 10 Change curves of axial force of SZH-1 with depth in immersion state

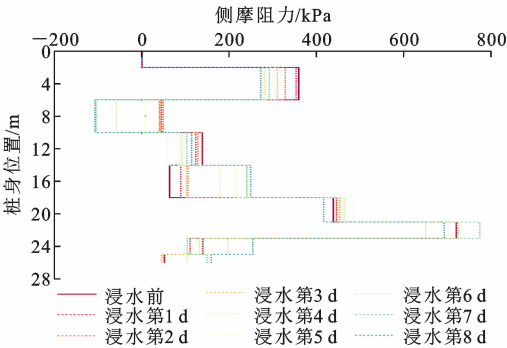


图 11 SZH-1 浸水状态下桩侧摩阻力沿深度的变化曲线

Fig. 11 Change curves of frictional resistance of SZH-1 with depth in immersion state

通过分析图 10~12 发现,在整个浸水试验过程中 SZH-1 桩身 0~16 m 范围内轴力增加显著,与地勘报告中提供的场地内最大湿陷深度(16.5 m)相符。由图 10 可知:在浸水试验第 7 d 和第 8 d 时桩身轴力趋于稳定,其中轴力增幅最大位置位于桩身 8~12 m 处;相比于浸水试验开始前,浸水结束时桩身轴力在桩身 8 m 和 12 m 位置分别增加了 945.98、1 043.58 kN。由图 12 可知:试验开始时在渗水坑和渗水管同时作用下,靠近地面位置的浅层土体

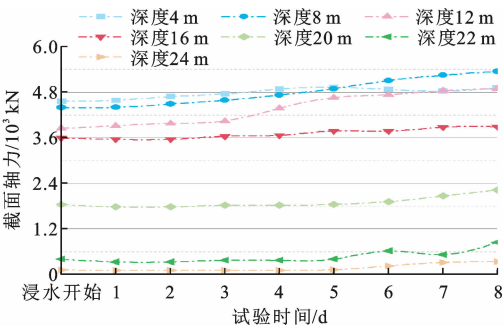


图 12 SZH-1 浸水状态下不同深度处的桩身轴力变化曲线

Fig. 12 Change curves of axial force of SZH-1 at different depths in immersion state

取得了较好的浸水效果,桩身 4 m 位置轴力在浸水试验第 2~5 d 明显增加,第 5~8 d 变化较小并趋于稳定,但在此期间桩身 8~12 m 范围内桩身轴力显著增加。结合 SZH-2 的浸水试验结果,产生这种现象的原因可能是:渗水孔中 PVC 管上交错分布的小孔在施工结束后部分堵塞,使得附近土体浸水效果差;另一方面可能是桩周土体的渗透性和湿陷性沿深度方向分布不均,浅层土体湿陷效果弱。通过以上分析说明,特殊浸水条件下,浸水效果在不同深度上并不同步,而是受到土层性质差异等因素影响分段发生。在此次浸水试验过程中,桩身侧摩阻力变化可分为 3 个阶段。第 1 阶段是浸水试验的第 1~3 d,桩身 4 m 位置附近土体随着浸水开始初步湿陷,桩身 2~6 m 位置范围内的桩侧正摩阻力开始缓慢减小,桩身 10~18 m 内侧摩阻力在第 1~3 d 内基本保持稳定,主要是由于浸水试验前桩身轴力处于较高水平,卸载后桩身部分内力尚未稳定。第 2 阶段是浸水试验的第 4~5 d,由于桩身 6~14 m 范围内桩周土随着持续浸水而产生了显著的湿陷,附加荷载使得桩身 8 m 和 12 m 位置处桩身轴力大幅增加;桩身 12 m 处的桩身轴力增幅远大于 8 m 处,桩身 4 m 处桩身轴力基本保持不变,因此计算得到的桩身 6~14 m 范围内的桩侧摩阻力显著减小,且桩身 6~10 m 范围内桩侧摩阻力逐渐减小并趋近于 0。第 3 阶段是浸水试验的第 6~8 d,由于桩周土持续湿陷,桩身 6~10 m 范围内桩侧摩阻力由正值变为负值,负摩阻力在浸水试验第 8 d 时基本稳定在 107.62 kPa。

通过观察图 10~12 可以发现,本次浸水试验使得 0~12 m 范围内土层产生了较为显著的湿陷沉降。桩侧摩阻力发展规律为:随着持续浸水,中性点以上桩侧正摩阻力逐渐减小并趋近于 0,最终变为负摩阻力。随着桩周土产生显著湿陷沉降,对桩身

产生附加荷载,使得桩身轴力中性点以下轴力增加,荷载向下传递使得对应位置范围内侧摩阻力增加。本次试验中 SZH-1 桩身 6~10 m 位置范围内产生负摩阻力,并且负摩阻力在浸水试验第 6~7 d 增幅明显,直至试验第 8 d 基本稳定,与以往学者进行的常规浸水试验中负摩阻力演化规律相符<sup>[15]</sup>。

3.2 天然降雨对桩基承载力和荷载传递规律的影响

在 SZH-3 进行单桩竖向静载试验前,试验现场正值当地 7 月中旬雨季,通过布设的水分计采集到的数据发现:试验前未进行人工浸水时,SZH-3 在 0~8 m 位置范围内桩周土的含水率明显偏大,如图 13 所示。因此区别于 SZH-1、SZH-2,SZH-3 的试验次序为天然降水作用、天然降水作用条件下桩基静载试验、大面积浸水。将 SZH-3 作为一个不同试验条件下的对照组,初步分析天然降水对桩周土产生预浸水效果时 SZH-3 的桩基荷载传递规律。

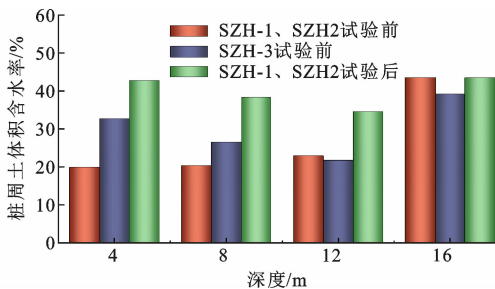


图 13 试验过程中桩周土体含水率

Fig. 13 Moisture content of soil around pile during test

另外,通过观察图 13 中 SZH-1、SZH-2 和 SZH-3 不同试验阶段中各深度处的土体含水率分布,可以发现各试验阶段 16 m 深度处的土体含水率均显著大于其他位置处的含水率。一方面是由于 16 m 处的土壤水分计靠近该场地的地下水位深度(17.3 m),该深度处卵石层具有良好的透水性且本身具有较高的含水率;为便于 16 m 深度处土壤水分计布置,施工时水分计布置钻孔实际孔深略大于 16 m,水分计布置时再按照不同的布置深度进行密实回填后布置。16 m 深度处卵石层中含水率高并向钻孔中的回填土中渗透,同时在施工结束后至试验开始过程中经过了较长的试验准备阶段(约 15 d),在这期间 16 m 深度处钻孔中土体含水率不断升高,直至与钻孔周边卵石层中含水率一致。因此,在试验中的各个阶段中可以发现 16 m 处的土体含水率远大于其他深度处,同时发现,由于深度大,在浸水试验过程中此处的含水率变化远不如其他深度

处显著。

静载试验中,SZH-3 在加载至 12 600 kN 时,由于锚桩与反力钢梁间的连接钢筋部分发生断裂,为了保证试验安全,未加载后续荷载。图 14 为 SZH-3 竖向静载试验的  $Q-s$  曲线。可以看出,SZH-3 在整个加载过程中累计沉降为 10.46 mm,在最后一级荷载下对应沉降为 0.19 mm,而且此时  $Q-s$  曲线仍在直线阶段,说明该试验桩承载力仍有冗余。SZH-3 在降雨对桩周土产生预浸水效果后,单桩竖向极限抗压承载力大于 12 600 kN,整体荷载-沉降特性与天然状态下无明显区别,满足设计中该场地内桩基单桩竖向承载力特征值。

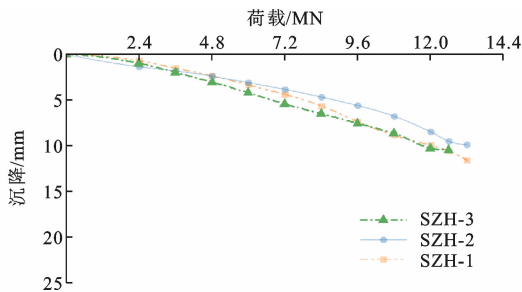
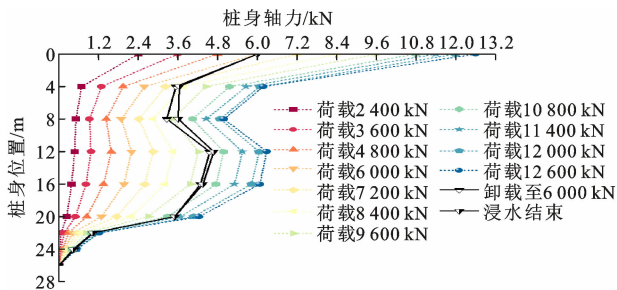
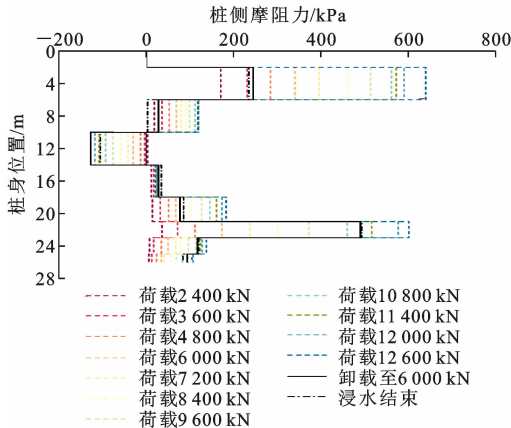


图 14 SZH-3 竖向静载试验的  $Q-s$  曲线

Fig. 14  $Q-s$  Curves of SZH-3 in vertical static loading test



(a) SZH-3 桩身轴力沿深度的变化曲线



(b) SZH-3 桩侧摩阻力沿深度的变化曲线

图 15 SZH-3 桩身轴力与桩侧摩阻力沿深度的变化曲线

Fig. 15 Change curves of axial force and frictional resistance of SZH-3 with depth



自然降水对桩周土产生预浸水效果后,通过分析竖向静载试验和人工浸水试验过程中 SZH-3 的桩身轴力和桩侧摩阻力分布规律(图 15),可以发现:各级荷载下, SZH-3 桩身轴力随深度呈“S 形”,随着桩顶荷载的不断增加,桩侧产生了较为显著的负摩阻力。桩顶荷载不断增加过程中桩身 10~14 m 范围内负摩阻力也在不断增加,桩顶荷载达到 12 600 kN 时负摩阻力达到最大值(127.8 kPa),说明桩侧负摩阻力受到桩顶荷载的影响更大。SZH-3 静载试验结束后,同样进行了浸水试验。由于前期降雨对桩周土的预浸水效果,后续人工浸水试验对桩身轴力和桩侧摩阻力产生的影响弱于 SZH-1、SZH-2。与 SZH-1、SZH-2 类似的是,此次试验采用特殊浸水方式对桩身 4~12 m 范围内土体浸水效果较明显;人工浸水试验结束时,桩身轴力变化最大位置在桩身 8 m 处,桩身轴力增加了 337.6 kN;人工浸水后,桩身 0~10 m 范围内正摩阻力减小,桩身 12 m 处桩身轴力增大了 123.3 kN,但由于人工浸水后桩身 8 m 处桩身轴力增幅较大,故人工浸水结束后负摩阻力反而减小。由于 SZH-3 在静载试验前,桩周土已经提前浸水,桩身 10~14 m 位置已有显著的负摩阻力,对该位置以下桩身产生附加荷载,使得桩身下部轴力和桩侧摩阻力明显大于 SZH-1、SZH-2。人工浸水过程中前期天然降水产生的负摩阻力已经趋于稳定,但人工浸水试验过程中桩身 6~10 m 位置范围内正摩阻力不断趋于 0;相比于 SZH-1,随着 SZH-3 浸水时间的增加和桩周土沉降的不断发展,桩身 0~10 m 位置范围内桩侧正摩阻力逐渐减小,有向负摩阻力发展的趋势。

### 3.3 中性点位置的确定

在湿陷性土层较厚的场地上,桩长往往需要穿透湿陷性土层,将桩端放置在较为坚硬持力层上。《桩基工程手册》<sup>[6]</sup>中指出:中性点是指桩身正摩阻力与负摩阻力分界点(摩阻力为 0 的位置),该位置处,桩土位移相等,桩身轴力最大,摩阻力为 0(图 10~11);该位置以上,桩周土的下沉量大于桩身下沉量,桩承受负摩阻力;该位置以下,桩身下沉量大于桩周土的下沉量,桩身承受正摩阻力。

常规浸水试验过程中,渗水过程主要由桩头位置向下渗透,桩周土随着浸水过程由上到下湿陷,桩周土竖向位移大于桩身位移,中性点位置随着湿陷区域向下发展而向下移动,直到桩周土的湿陷程度趋于稳定时,中性点深度趋于一个稳定值  $L_N$ 。本次试验由于现场条件和施工周期的制约,采用渗水孔

与渗水坑相结合的特殊浸水方式,导致浸水主要是在水平面范围内由远及近的近似水平渗透,随浸水中性点位置未出现由上到下最后趋于稳定的现象。本次试验结束时,中性点稳定深度  $L_N$  为 8 m(图 10~11),场地内湿陷性土层下限深度  $L_O$  为 16.5 m,中性点深度与湿陷性土层下限深度比值为 0.485。

SZH-3 在试验前桩周土受降雨影响,桩身 0~8 m 范围内浸水效果明显,在整个试验过程中桩身轴力和负摩阻力的最大值位置较为稳定,本次试验结束时,中性点稳定深度  $L_N$  为 12 m(图 14~15),场地内湿陷性土层下限深度  $L_O$  为 16.5 m。中性点深度与湿陷性土层下限深度比值为 0.727。可以发现随着浸水周期的增长,中性点位置变化存在“时间效应”。

中性点本质就是浸水试验结束时桩侧正负摩阻力的分界点,就此次试验而言,前期所采用的泥浆护壁成孔方式对中性点的影响主要体现在:一是成孔过程中泥浆会不可避免的对桩周土产生“预浸水”效果,提前消除了部分桩周土的湿陷性;二是成孔过程中桩-土接触面上形成的泥皮土会对桩侧摩阻力传递产生直接的不利影响。在泥浆护壁表面(桩身 7 m)以下位置的摩阻力会被泥皮土所削弱,在泥浆护壁表面 7 m 以上位置的摩阻力不受影响。因此,相对于无泥皮土影响的桩而言,这两方面的影响均使得传递至桩身的负摩阻力作用减弱,相对而言中性点稳定深度较深。因为此次浸水试验得出的负摩阻力分布较为特殊,桩侧泥皮对中性点的影响有待进一步研究。泥浆护壁作为一种常见的成孔方式,该场地工程桩成孔亦采用此种方式,因此此次试验结果对该场地内桩基设计仍具有参考价值。

### 3.4 本文试验的局限性分析

《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)中规定当湿陷性黄土层厚度不小于 10 m 时,单桩竖向承载力特征值应通过单桩竖向静载荷浸水试验确定。通过现场浸水试验来测试桩基负摩阻力和中性点位置主要有“先湿法”与“后湿法”两种方法。不同于规范要求,此次现场试验受制于现场试验周期,在静载试验结束后将桩顶荷载卸载至 6 000 kN,待桩身轴力重分布稳定后进行浸水试验,因此试验结果存在一定局限性。

图 16 为 SZH-1、SZH-2 各试验工况桩身轴力沿深度的分布曲线,通过观察图 16 可以发现:桩顶荷载从 13 200 kN 卸载至 6 000 kN 时,桩身轴力在

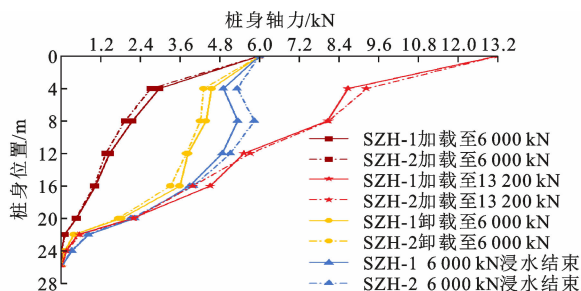


图16 SZH-1、SZH-2各试验工况桩身轴力沿深度的分布曲线

Fig. 16 Distribution curves of axial force of SZH-1、SZH-2 with depth in different tests conditions

桩身16 m以上位置回落明显,但仍保持在较高水平,明显大于桩顶荷载正常加载至6 000 kN时桩身轴力分布。桩顶荷载卸载至6 000 kN时,桩身16 m以上位置的桩身轴力随深度分布曲线明显变陡、衰减速度变缓,桩侧正摩阻力显著小于桩顶荷载正常加载至6 000 kN时桩身侧摩阻力分布,且桩身16 m位置以下桩侧摩阻力仍保持在较高水平。相比于规范中给出的“后湿法”,此次试验中先加载再卸载进行浸水试验的试验步骤类似于循环荷载作用。桩顶荷载卸载至6 000 kN后,桩身16 m以上桩侧摩阻力小于正常加载至6 000 kN。相比之下桩周土在浸水产生湿陷时,此时桩周土较小的湿陷沉降可以使桩侧摩阻力由正摩阻力转化为负摩阻力。SZH-3在静载试验前桩身10~14 m位置范围内已经产生了明显的负摩阻力,卸载至6 000 kN后,桩身中下部负摩阻力仍保持在较高水平,对后续浸水试验中轴力分布和桩侧摩阻力具体数值计算产生一定影响,但对负摩阻力和轴力最大值位置的定性分析影响不大。

分析可知,相对于规范中给出的“后湿法”,先加载再卸载后进行浸水试验更加有利于负摩阻力产生,所以此次浸水试验的局限性在于测得的负摩阻力可能偏大,使得湿陷性黄土地区桩基承载力计算偏于保守,对于浸水条件下桩基负摩阻力的分布情况掌握不够严谨。

## 4 结语

(1)SZH-1、SZH-2的极限承载力大于13 200 kN, SZH-3的极限承载力大于12 600 kN,根据荷载-沉降( $Q-s$ )特性判断,短时间预浸水未影响到桩基极限承载力,3根试验桩承载力仍有较大富裕,可作为建筑物基础来承受上部结构的自重荷载。

(2)本次试验中桩侧摩阻力承担了约99.2%以

上的桩顶荷载,最大桩端承载力为100.31 kN,试验桩属于摩擦桩。由于不同深度的桩周土性质不同以及泥浆护壁深度范围内泥皮的影响,试验桩侧摩阻力沿桩身均出现多个峰值,其中最大侧摩阻力出现在桩身2~6 m范围内。

(3)位于湿陷性土层范围内的桩侧摩阻力随着浸水呈现出正摩阻力逐渐减小并逐渐向负摩阻力发展的规律,由于部分渗水小孔堵塞或土体的渗透性和湿陷性沿深度分布不均,使得浸水后桩身正负摩阻力交错出现。

(4)SZH-3在桩周土预浸水后进行静载试验时,桩身负摩阻的大小受到桩顶荷载的显著影响,与SZH-1、SZH-2只进行人工浸水试验相比略大;由于静载试验过程中桩侧已经形成显著的负摩阻力,卸载后中性点位置仍保持在较深位置,说明浸水效果受到浸水方式和浸水固结时间的影响。

(5)本次试验采用渗水坑-渗水孔相结合的特殊浸水方式,桩周土分段发生湿陷,并非像传统浸水方式随着持续浸水,由上到下逐渐饱和而产生湿陷。由于此次试验是在静载试验结束后进行浸水试验,试验步骤较特殊,导致此次试验结论仍存在一定的局限性。

## 参考文献:

## References:

- [1] 陈正汉,刘祖典.黄土的湿陷变形机理[J].岩土工程学报,1986,8(2):1-12.  
CHEN Zhenghan, LIU Zudian. Mechanism of collapsible deformation of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2): 1-12.
- [2] 刘祖典.黄土力学与工程[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.  
LIU Zudian. Mechanics and engineering of loess [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.
- [3] 钱鸿缙,王继唐,罗宇生,等.湿陷性黄土地基[M].北京:中国建筑工业出版社,1985.  
QIAN Hongjing, WANG Jitang, LUO Yusheng, et al. Collapsible loess foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985.
- [4] 湿陷性黄土地区建筑标准:GB 50025—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.  
Standard for building construction in collapsible loess regions: GB 50025—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [5] 冯忠居,胡海波,董芸秀,等.削减桩基负摩阻力的室内模拟试验[J].岩土工程学报,2019,41(增2):45-

- 48.
- FENG Zhongju, HU Haibo, DONG Yunxiu, et al. Indoor simulation tests on reducing negative skin friction of pile foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2): 45-48.
- [6] 龚晓南. 桩基工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- GONG Xiaonan. Pile foundation engineering manual [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [7] 华遵孟, 张森安, 张恩祥, 等. 陇东黄土塬场地高层建筑地基基础设计方案分析[J]. 工程勘察, 2010, 38(增 1): 267-277.
- HUA Zunmeng, ZHANG Senan, ZHANG Enxiang, et al. Analysis of foundation design scheme of high-rise building in loess subsoil of Longdong [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(S1): 267-277.
- [8] 何颐华, 闵连太. 湿陷性黄土地基桩的负摩擦力问题[J]. 建筑结构学报, 1982, 3(6): 69-77.
- HE Yihua, MIN Liantai. Problems on negative friction of pile foundation in collapsible loess region[J]. Journal of Building Structures, 1982, 3(6): 69-77.
- [9] 王建华, 陆建飞, 沈为平. Biot 固结理论在单桩负摩擦研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 590-593.
- WANG Jianhua, LU Jianfei, SHEN Weiping. The application of Biot consolidation theory to the negative friction problem of single pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 590-593.
- [10] 陆建飞, 王建华, 沈为平. 考虑固结和流变的群桩的积分方程解法[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 650-653.
- LU Jianfei, WANG Jianhua, SHEN Weiping. The integral equation method to solve pile group problem considering the consolidation and rheology of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 650-653.
- [11] 赵明华, 贺 炜, 曹文贵. 基桩负摩阻力计算方法初探[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1442-1446.
- ZHAO Minghua, HE Wei, CAO Wengui. Study on calculation of negative skin friction resistance on piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1442-1446.
- [12] 高登辉. 大厚度自重湿陷性黄土增湿变形特性及桩基负摩阻力研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- GAO Denghui. Study on moistening deformation characteristics of large thickness self-weight collapsible loess and negative skin friction for pile[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.
- [13] 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 1): 219-223.
- ZHANG Yanjie, WANG Xu, LIANG Qingguo, et al. Model tests on bearing behavior of pile groups in collapsible loess ground under water immersion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 219-223.
- [14] 马学宁, 张沛云, 贾喜翠, 等. 不同桩端下卧层桩基负摩阻力模型试验研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(1): 11-15, 22.
- MA Xuening, ZHANG Peiyun, JIA Xicui, et al. Model test of pile negative friction for different pile-end underlying layers [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(1): 11-15, 22.
- [15] 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 Xuefeng, CHEN Zhenghan, HA Shuang, 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.
- [16] 黄雪峰, 陈正汉, 哈 双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 338-346.
- HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, HA Shuang, et al. Research on bearing behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 338-346.
- [17] 黄雪峰, 张广平, 姚志华, 等. 大厚度自重湿陷性黄土湿陷变形特性水分入渗规律及地基处理方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增 2): 100-108.
- HUANG Xuefeng, ZHANG Guangping, YAO Zhihua, et al. Research on deformation, permeability regularity and foundation treatment method of dead-weight collapse loess with heavy section [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 100-108.
- [18] 黄雪峰, 杨校辉, 殷 鹤, 等. 湿陷性黄土场地湿陷下限深度与桩基中性点位置关系研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增 2): 296-302.
- HUANG Xuefeng, YANG Xiaohui, YIN He, et al. Study of relationship between maximum collapsing

- depth and neutral point position of pile foundation in collapsible loess ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 296-302.
- [19] 艾小平, 吴亚平, 舒春生, 等. 降雨过程对兰州黄土中桩基负摩阻力的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(5): 27-33.
- AI Xiaoping, WU Yaping, SHU Chunsheng, et al. Effect of rainfall on negative frictional resistance of pile foundation in Lanzhou loess[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(5): 27-33.
- [20] 夏力农, 苗云东, 刘小平. 加载次序对湿陷性黄土中桩基承载力检测的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(增2): 318-322.
- XIA Linong, MIAO Yundong, LIU Xiaoping. Influences of loading sequences on bearing capacity test of piles in collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 318-322.
- [21] 魏进, 李哲, 郝忙利, 等. 自重湿陷性黄土场地的桩基浸水载荷试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(5): 63-67.
- WEI Jin, LI Zhe, HAO Mangli, et al. Submerged static load test of pile foundation in collapsible loess area[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2011, 31(5): 63-67.
- [22] 叶朝良, 梁凯芳, 王向阳. 湿陷性黄土区桩基负摩阻力统计分析和建议[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(1): 6-10.
- YE Chaoliang, LIANG Kaifang, WANG Xiangyang. Statistical analysis and proposal on pile negative friction in collapsible loess areas[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(1): 6-10.
- [23] 朱彦鹏, 赵天时, 陈长流. 桩基负摩阻力沿桩长变化的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增1): 265-272.
- ZHU Yanpeng, ZHAO Tianshi, CHEN Changliu. Field tests on changes of pile negative friction along its length[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 265-272.
- [24] 朱彦鹏, 杨奎斌, 王海明, 等. 微浸水对桩基负摩阻力影响的试验初探[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增1): 1-7.
- ZHU Yanpeng, YANG Kuibin, WANG Haiming, et al. Preliminary exploration of tests on effect of micro-immersion on negative skin friction of pile foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1): 1-7.
- [25] 杨彦丽. 泥皮对灌注桩竖向承载性状影响的数值模拟及试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- YANG Yanli. Numerical simulations and experimental studies of the effects of mudcake on the vertical bearing behavior of bored piles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [26] 戚蓝, 于泳. 泥皮对灌注桩承载能力的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(6): 133-138.
- QI Lan, YU Yong. An analysis of the effect of slurry skin of the bored piles and improvement measures[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(6): 133-138.
- [27] 张忠苗, 张广兴, 吴庆勇, 等. 钻孔桩泥皮土与桩间土性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 695-699.
- ZHANG Zhongmiao, ZHANG Guangxing, WU Qingyong, et al. Studies on characteristics of mudcake and soil between bored piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 695-699.
- [28] 张忠苗, 辛公锋, 吴庆勇, 等. 考虑泥皮效应的大直径超长桩离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2066-2071.
- ZHANG Zhongmiao, XIN Gongfeng, WU Qingyong, et al. Centrifuge model tests on super-long piles with large diameters considering mudcake effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2066-2071.
- [29] 张忠苗, 张乾青. 桩端土强度对桩侧阻力影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增2): 59-63.
- ZHANG Zhongmiao, ZHANG Qianqing. Influences of soil strength at pile end on friction of lateral surface of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 59-63.