

文章编号:1673-2049(2018)04-0105-08

## 特殊浸水下桩基负摩阻力试验研究

朱彦鹏<sup>1,2,3</sup>, 杨奎斌<sup>1,2,3</sup>, 王海明<sup>1,2,3</sup>, 杨校辉<sup>1,2,3</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 甘肃土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 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, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**为妥善解决湿陷性黄土地区负摩阻力引起的桩基承载力下降问题,以消除桩周黄土湿陷性为出发点进行新途径和新方法的探索,采用非传统的特殊浸水方式分别对混凝土灌注桩、微型钢管砂浆复合桩进行了现场试验。结果表明:桩顶受荷时采用注水孔与试坑相结合浸水量较大,浸水段桩侧以负摩阻力为主,最大值达 319.62 kPa,局部出现正摩阻力;成桩过程中采用泥浆循环浸水量较小,桩周土体在桩顶受荷前完成部分湿陷,受荷后桩侧以正摩阻力为主,局部出现负摩阻力,且数值较小,最大值为 32 kPa;特殊浸水条件下桩周土体沿桩身分段湿陷,桩侧出现多个负摩阻力峰值及中性点,正、负摩阻力交错分布;桩基负摩阻力的大小受浸水方式、加载方式、浸水固结时间的综合影响,建议在桩基施工过程中采用合理的施工工艺对桩周土体预先进行微量浸水,消除部分黄土湿陷,以避免由于地下水环境改变而引发的桩基承载力下降。

**关键词:**特殊浸水;湿陷性黄土;桩基;负摩阻力;试验研究

**中图分类号:**TU473 **文献标志码:**A

## Test Research on Negative Skin Friction of Pile Foundation Under Special Immersion

ZHU Yan-peng<sup>1,2,3</sup>, YANG Kui-bin<sup>1,2,3</sup>, WANG Hai-ming<sup>1,2,3</sup>, YANG Xiao-hui<sup>1,2,3</sup>

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

**Abstract:** In order to solve the problem of bearing capacity decrease of pile foundation caused by negative skin friction in collapsible loess areas, taking the elimination of collapsibility of loess around the pile as the starting point and exploring with new ways and methods, the field tests of concrete filled pile and micro steel pipe mortar composite pile were carried out respectively by using non-traditional special immersion methods. The results show that the immersion mode of water injection hole combined with test pit has a large amount of soaking water when the pile top is loaded. The negative skin friction of the pile side of soaking section is dominant, the max value is 319.62 kPa, and the local positive frictional resistance appears. The immersion mode of slurry circulation has a small amount of soaking water in the process of pile formation. The soil around the pile is partially collapsed before the pile top is loaded. The positive frictional resistance of the

pile side is dominant after the pile top is loaded, the negative skin friction occurs on part of the pile side, and the value is smaller, the maximum value is 32 kPa. Under the special immersion condition, the soil around the pile will collapse discontinuously along the pile body. Multiple negative skin friction peaks and neutral points occur on the pile side, and the positive and negative frictional resistances are staggered. The negative skin friction of pile foundation is mainly affected by the mode of immersion, the mode of loading and the time of immersion consolidation. In order to avoid the decrease of the bearing capacity of the pile caused by the change of the groundwater environment, it is suggested to use reasonable construction technology to presoak the soil slightly around the pile to eliminate some loess collapsibility during the construction of pile foundation.

**Key words:** special immersion; collapsible loess; pile foundation; negative skin friction; test research

## 0 引言

黄土湿陷所引起的桩基负摩阻力问题在西北地区广泛存在<sup>[1-2]</sup>,因其给桩基工程带来危害而备受关注。作为一种区域性特殊土,湿陷性黄土遇水后强度降低显著,在土体自重或上覆荷载的作用下会造成土骨架结构失稳而引发湿陷变形<sup>[3-4]</sup>。桩基工程中桩周土体湿陷则会引起桩土相对位移产生负摩阻力,对桩基承载力造成削弱,进而影响到建筑物的正常安全使用<sup>[5-6]</sup>。因此,为避免及减小由于黄土湿陷而产生的桩侧负摩阻力,开展有关负摩阻力问题的研究显得尤为重要。

目前,桩基负摩阻力问题的理论研究还不够成熟,相关解析解尚不能直接应用于实际工程<sup>[7-9]</sup>。在湿陷性黄土地区,现场浸水试验能够直接得出桩基负摩阻力,结果精确可靠,被普遍认为是在湿陷性黄土地区研究负摩阻力问题最为直接有效的方法<sup>[10]</sup>,并且很多学者在这方面做出了很大努力。通过现场浸水试验研究,魏进等<sup>[11]</sup>得出桩侧负摩阻力仅出现在地表以下一定深度范围内,并呈现单峰形态;夏力农等<sup>[12-13]</sup>指出随着桩顶荷载变化,负摩阻力及中性点位置也随之变化;黄雪峰等<sup>[14-15]</sup>测得实际桩侧负摩阻力远高于规范建议值,并且还揭示了黄土湿陷下限深度与桩基中性点位置确定的相互关系。董晓明等<sup>[16]</sup>分析了区域性黄土非均匀湿陷条件下的桩基承载特性,探索了桩基在浸水过程中桩侧摩阻力的传递规律;朱彦鹏等<sup>[17]</sup>在黄土塬地区分析了大直径长桩的承载性状,发现地基土夹层交互分布、湿陷性不连续等原因会导致桩身出现多个中性点。现有研究成果较为丰富,在不断加深人们对于负摩阻力的认识,但传统桩基现场浸水试验却很难实现桩身全段浸水,这样便使得浸水程度会随深度增加而

逐渐递减;杨校辉等<sup>[18]</sup>关于湿陷性黄土地基所建议的 22.5~25.0 m 作为大厚度自重湿陷性黄土地基处理和湿陷性评价的临界深度也印证了这一点。因此,为弥补传统桩基浸水试验所存在的不足,寻求一条妥善解决桩侧负摩阻力问题的出路,笔者认为在桩基施工过程中预先消除部分黄土湿陷应成为桩基工程领域探索的一个方向,通过减小桩基部分负摩阻力,势必能够使得桩基承载能力得到大幅提升。

朱彦鹏等<sup>[19]</sup>曾于 2011 年 7 月在甘肃省定西市采用注水孔与试坑相结合的方式进行了浸水试验,但仅对负摩阻力沿桩长分布规律进行了分析,并未意识到桩周注水孔浸水这一特殊浸水方式其实是消除桩周土体湿陷的一个有效途径。现进一步对试验现象进行分析,并以消除桩周土体湿陷性为出发点,再次探索新方法,对微型钢管砂浆复合桩采用循环注浆的方式进行浸水试验。通过试验对比,探究桩侧负摩阻力在特殊浸水条件下的分布特点、发展规律。以期对负摩阻力问题进行更加深入的分析,从本质上为消除湿陷性黄土地区桩基负摩阻力问题提供解决方案。

## 1 灌注桩注水孔与试坑结合浸水试验

### 1.1 试验思路 and 目的

为探究桩周土体在充分浸水情况下桩侧负摩阻力的发挥大小,掌握湿陷性黄土地区桩基建筑物在使用过程中地基土遇水湿陷后桩基负摩阻力的最不利情况。采用以注水孔为主、试坑为辅,相互结合的浸水方式对桩周土体进行充分浸水(图 1)。与此同时,在桩身埋设混凝土应变计和钢筋计(图 2),用于测量埋设点混凝土的应变和钢筋应力,进而获得在桩顶受荷以及桩周浸水情况下桩身轴力及桩侧摩阻力随时间的变化规律。钢筋计沿竖向在对称钢筋上

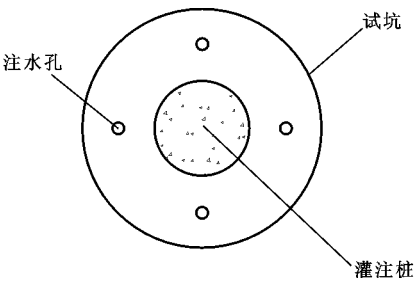


图 1 注水孔与试坑结合的浸水方式  
Fig.1 Immersion Mode Combined with Water Injection Hole and Test Pit

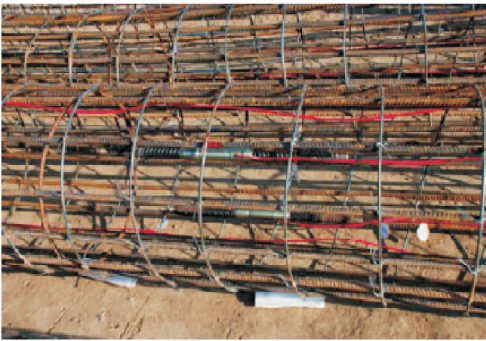


图 2 传感器布置  
Fig. 2 Layout of Sensor

左右间隔布置,从 0 m 开始每隔 1 m 布置 1 个,共计 22 个;混凝土应变计沿试验桩中心线埋设,由钢筋定位,沿竖向全长间隔 2 m 均匀布置,共计 15 个。

1.2 试验概况

依托中国移动甘肃定西分公司新城区移动通信综介楼项目,本试验场地选择在定西市新城区,地貌属西河右岸Ⅰ级阶地与洪积扇复合地貌单元,场地地形较为平坦,地层分布比较简单,主要以黄土状粉土层、阶地砂砾层和新第三系泥岩为主。该场地土层特性指标如表 1 所示。

表 1 土层特性指标 1  
Tab. 1 Characteristic Indices of Soil Layer 1

| 土层                 | 埋深/m      |
|--------------------|-----------|
| 填土 $Q_4^{pl}$      | 0.0~0.6   |
| 黄土状粉土 $Q_4^{l+pl}$ | 0.6~30.8  |
| 砂砾 $Q_4^{gl}$      | 30.8~34.3 |

黄土总湿陷量  $\Delta_s=541\sim1\,276$  mm;湿陷性系数  $\delta_{zs}=0.002\sim0.093$ ,自重湿陷量  $\Delta'_s=287\sim901$  mm,自重湿陷性系数  $\delta'_{zs}=0.001\sim0.06$ 。综合判定整个建设范围内场地具有Ⅱ~Ⅳ级自重湿陷性,湿陷深度为 12.5~17.5 m。

根据实际工程需要,试验桩桩径为 800 mm,桩长 26 m,浸水方式为注水孔与试坑相结合,其中

注水孔均匀布置于桩周,孔深 14 m,为便于水的渗透,在孔内设置 PVC 管,管壁钻取多个注水孔,注水管内填充石料;受场地所限,试坑的直径较小,约为 2 m,试坑深度也约为 2 m。

1.3 单桩荷载-沉降特性

鉴于试验桩预估单桩竖向承载力较大,加载装置选择能够提供较大反力的锚桩反力装置,如图 3 所示,并严格按照《建筑基桩检测技术规范》<sup>[20]</sup>采用慢速维持荷载法对试验桩进行了分级加载,实测荷载-沉降( $Q-s$ )曲线如图 4 所示。



图 3 浸水试验现场  
Fig. 3 Immersion Test Site

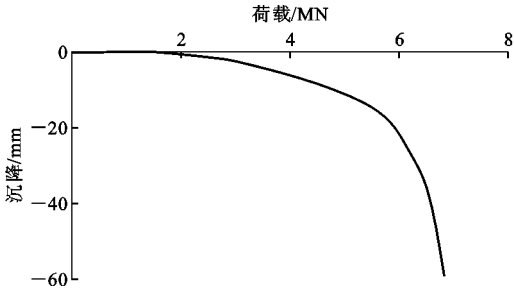


图 4 单桩竖向静载试验的  $Q-s$  曲线 1  
Fig. 4  $Q-s$  Curve of Single Pile in Vertical Static Loading Test 1

从图 4 可以看出,试验桩加载至 5 400 kN 时,沉降量明显增大,达到 26.136 mm,由此判断试验桩单桩竖向极限承载力为 5 400 kN。

1.4 桩身轴力和摩阻力分布规律

待试验桩测试完单桩竖向极限承载力后将桩顶竖向荷载卸载至 3 600 kN,并立即向注水孔及试坑内注水,对桩身轴力及桩侧摩阻力进行为期 20 d 的测试。

试验中通过均匀埋设在试验桩内的混凝土应变计和钢筋计直接测得埋设点混凝土微应变和钢筋应力,利用胡克定律求得桩身某一截面处的混凝土应力,将混凝土应力和钢筋应力分别乘以各自的截面积再求和即可得到桩身在该截面处的轴力;桩侧

摩阻力则是将混凝土应变计和钢筋计埋设位置作为每层土的中点分段进行计算,并假定桩身局部范围内侧摩阻力相同,摩阻力大小为平均摩阻力,经计算的桩身轴力沿桩深分布曲线和桩侧摩阻力沿桩深分布曲线如图 5,6 所示。

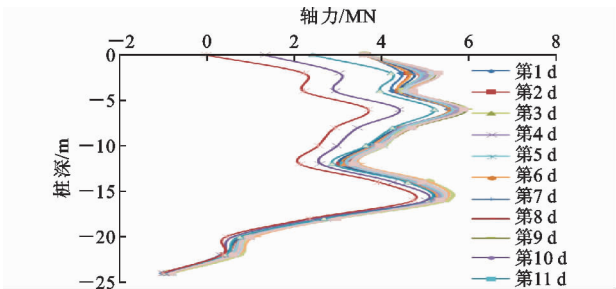


图 5 轴力 1  
Fig. 5 Axial Force 1

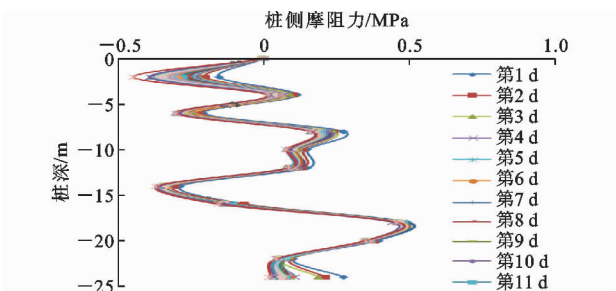


图 6 桩侧摩阻力 1  
Fig. 6 Skin Friction of Pile Side 1

从图 5 可以看出,从桩顶至桩底轴力逐渐减小至负值,表现出摩擦桩的特性,但浸水段整体桩身轴力却呈现出增长的趋势,其中-2~0 m,-6~-4 m 和-16~-12 m 范围内桩身轴力随桩深增加而增加。桩侧上部浸水段以负摩阻力为主,存在多个负摩阻力峰值,正负摩阻力呈现交错分布的形态;桩身下部未浸水段由于土体湿陷量较小或并未湿陷,在桩土相对位移的作用下产生的是正摩阻力。

分析认为,局部桩身轴力随桩深增加而增加是由于桩周土体浸水湿陷,桩土相对位移产生负摩阻力而导致的;正负摩阻力交错分布则是由于 PVC 管的注水孔间隔分布,部分注水孔堵塞致使桩周土体沿桩深浸水程度不均匀,仅部分注水孔附近土体浸水较为充分,而部分堵塞的注水孔附近并未充分湿陷,进而致使土体分段湿陷。

同时,注水孔与试坑浸水能够使得桩周土体充分浸水,进而产生较大负摩阻力,桩顶处土体浸水充分,负摩阻力在浸水 15 d 后达到最大值,为 314.35 kPa;注水孔孔底处,负摩阻力在浸水 20 d 时达到最大值,为 319.62 kPa。由此也表明在湿陷性黄土地

区,桩基建筑物在使用过程中若桩周土体遇水湿陷则会产生较大负摩阻力,对桩基承载力以及桩基建筑物较为不利。

## 2 微型钢管砂浆复合桩泥浆循环浸水试验

### 2.1 试验思路 and 目的

为在桩基施工过程中消除部分黄土湿陷性,自行设计一种新型的高压循环注浆成桩施工工艺,如图 7 所示,该工艺在成桩过程中通过泥浆循环同步实现桩周土体的微量浸水。该成桩工艺能够在提升微型钢管砂浆复合桩承载能力的同时,利用泥浆循环实现在成桩过程中同步完成桩周土体的微量浸水,而本文仅对泥浆循环浸水方式所产生的桩侧负摩阻力问题展开研究,对于水泥砂浆和钢管结合所形成的复合桩承载特性不做论述。

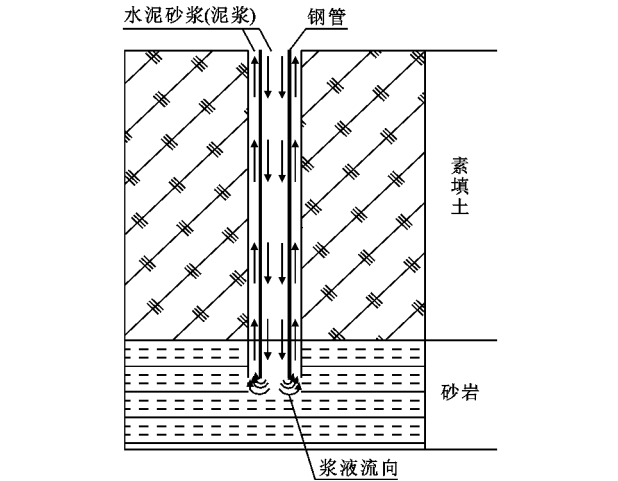


图 7 高压循环注浆成桩施工工艺  
Fig. 7 High Pressure Circulation Grouting Construction Technology

另外,在桩身埋设混凝土应变计,将混凝土应变计沿试验桩中心线埋设,由钢筋定位,沿桩身全长间隔 4 m 均匀布置,共计 9 个;待成桩完成并且养护一段时间后,进行静载试验,进而研究微浸水后桩侧负摩阻力的发挥情况。

### 2.2 试验概况

本试验依托甘肃省兰州市九州开发区合作小区 2 栋 12 层桩基建筑物纠偏加固工程,场地选择在倾斜建筑物所处的大厚度填方地基上,位于黄河北岸高阶地罗锅沟台地部位。场地原为罗锅沟支沟,南侧为山坡,北侧为深沟谷,后经人工挖填整平作为建筑场地,填土深度高达 30 m,主要由粉土及泥质砂岩组成,局部含有卵砾及极少量的生活和建筑垃圾,



素填土的湿陷系数在 0.015~0.062 之间,自重湿陷系数在 0.015~0.083 之间,从湿陷量计算结果判定,该场地为Ⅳ级自重湿陷性场地,可以作为本次试验的场地。该场地土层特性指标如表 2 所示。

表 2 土层特性指标 2

| Tab. 2 Characteristic Indices of Soil Layer 2 |                          |           |
|---|--------------------------|-----------|
| 土层  | 土层特性                     | 埋深/m      |
| 填土 1  | 三七灰土,夹杂卵石                | 0.0~3.5   |
| 填土 2  | 饱和粉土,土质均匀,软塑 17 m 处存在大块石 | 3.5~29.2  |
| 砂岩  | 强风化岩,岩芯呈松散状或短柱状          | 29.2~33.4 |

根据实际工程需要,试验桩桩径为 198 mm,桩长 33 m,钢管内填充水泥砂浆,钢管外被水泥砂浆包裹,如图 8 所示。

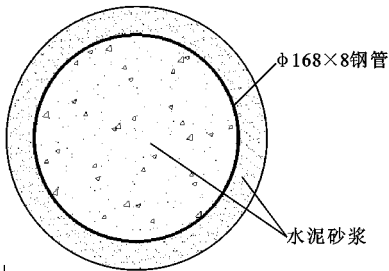


图 8 微型钢管砂浆复合桩截面

Fig. 8 Section of Micro Steel Pipe Mortar Composite Pile

2.3 单桩荷载-沉降特性

鉴于试验桩预估单桩竖向承载力并不是很大,本次试验加载装置采用压重平台反力装置,如图 9 所示,并严格按照《建筑基桩检测技术规范》<sup>[20]</sup>采用慢速维持荷载法对 4 根试验桩进行了单桩竖向抗压承载力试验,实测  $Q-s$  曲线如图 10 所示。

从图 10 可以看出,试验桩的  $Q-s$  曲线表现为缓变型,无明显陡降段,试验桩在加载 3 000 kN 时的桩身沉降量为 50.76 mm,依据《建筑基桩检测技术规范》取沉降量 40 mm 对应的荷载值为单桩竖向抗压极限承载力,即试验桩单桩竖向抗压极限承载力 2 800 kN。

2.4 桩身轴力和桩侧摩阻力分布规律

采用与第 1.4 节相同的方法对桩身轴力及桩侧摩阻力进行计算,得出桩身轴力沿桩深分布曲线和桩侧摩阻力沿桩深分布曲线,如图 11,12 所示,其中  $P$  为荷载。

从图 11 可以看出,试验桩桩端轴力接近 0 kN,呈现出摩擦桩的特性,桩身轴力分布并不严格按随桩深增加而逐渐递减的规律发生,在桩深-9~-5 m 和-21~-17m 范围内出现随深度增加而增加



(a) 试验装置



(b) 卸载后微型钢管砂浆复合桩

图 9 静载试验现场

Fig. 9 Static Loading Test Site

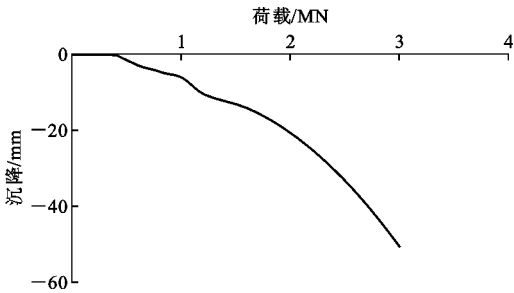


图 10 单桩竖向静载试验的  $Q-s$  曲线 2

Fig. 10  $Q-s$  Curve of Single Pile in Vertical Static Loading Test 2

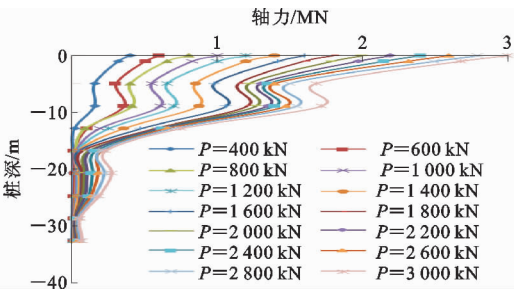


图 11 轴力 2

Fig. 11 Axial Force 2

的现象。同样,桩侧负摩阻力也表现出不连续分布的特征,呈现正负摩阻力交错分布的形态。

分析认为,成桩过程中泥浆循环在对桩周土体

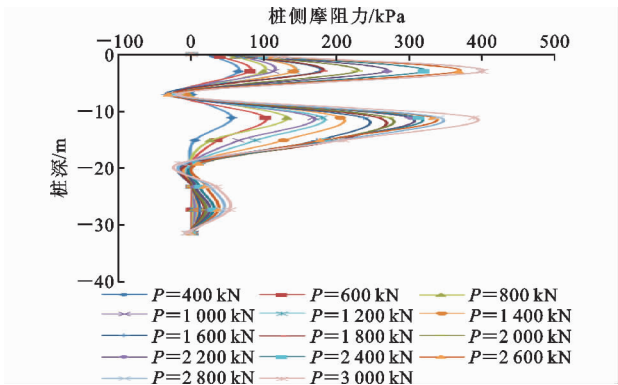


图 12 桩侧摩阻力 2

Fig. 12 Skin Friction of Pile Side 2

进行微量浸水的同时,也使漏浆层局部桩深范围内桩周土达到强浸水效果,形成了微浸水与强浸水相间分布的状态;微浸水使整个桩周土体预先发生部分湿陷,而强浸水段桩周土体会在桩顶受荷、桩体下移所产生的下拽力作用下再次发生湿陷,引起负摩阻力的产生,也就使得局部桩身轴力随桩深增加而增加。另外,漏浆层的不连续分布使得桩周土体再湿陷过程分段进行,进而导致负摩阻力分段不连续现象的发生,但桩侧以正摩阻力为主,负摩阻力仅在漏浆层浸水较强的局部出现。

局部浸水程度较强是由于循环注浆浸水过程中泥浆流入到了桩周土体中,浆液中水分对土体浸泡所致,其中-3.5~0 m 桩深处存在卵石,循环注浆浸水过程中泥浆可通过卵石空隙流入土体中,这一桩深以下一定范围内浸水较为充分,同时-17 m 桩深土层中存在大块石,泥浆也可通过块石间隙流入土体中,对这一桩深以下一定范围内土体产生影响。

虽然产生了 2 个负摩阻力段,但负摩阻力数值均不大,上段负摩阻力为 32 kPa,下段负摩阻力为 16 kPa。由此表明成桩过程中进行桩周土体的微量浸水可消除桩周黄土的部分湿陷性,其对于后期桩顶受荷是有利的,能够有效改善湿陷性黄土地区桩侧负摩阻力对于桩基承载力的不良影响。

3 特殊浸水试验对比分析

以上2个试验由于均依托于实际工程,故而试验

场地与桩型等存在较大差别,但本文所关注的核心问题是如何消除桩周黄土湿陷性进而解决桩侧负摩阻力难题。针对这一问题而言,最为直接、最为主要的影响因素是桩周水环境的改变,所以 2 个试验都只侧重于通过特殊浸水消除桩周土体湿陷性,而对桩基形式、地质情况、试验方式等次要因素未加考虑。

与此同时,两试验还有以下几点相同之处:①均采用自行设计的特殊浸水方式从桩周由近及远水平横向渗水实现桩周土体的浸水,与传统桩基浸水试验中桩顶周围开挖试坑蓄水,由桩顶土层逐渐向下渗水有着本质不同;②均可对桩周土体湿陷段进行全范围浸水,达到较好的浸水效果,这是传统浸水方式所不能及的;③均是消除桩周土体湿陷的途径。

因此,在进行负摩阻力问题的研究中,可通过对两试验的比较分析得出能够服务于实际工程的规律,为后期在湿陷性黄土地区进行有关负摩阻力研究提供指导。两试验情况对比如表 3 所示。

通过对 2 个试验的对比分析可以看出,特殊浸水条件下桩基负摩阻力大小及分布受浸水方式(浸水量)、加载方式及浸水固结时间综合影响。

浸水方式通过控制浸水量的大小直接影响负摩阻力,其中注水孔与试坑相结合浸水量较大,能使桩周土体浸水充分,泥浆循环只对桩周土体预先浸水,浸水量较小。

浸水固结时间则反映了桩侧负摩阻力产生后的一个逐渐消散过程,是影响负摩阻力发挥的重要因素,浸水初期桩周土湿陷,产生负摩阻力,随着土体的逐步固结,负摩阻力将逐渐减小。

对于加载方式,桩顶在恒载情况下进行桩周土体浸水,浸水段桩周土遇水湿陷出现竖向位移,在桩土相对位移的作用下桩侧主要以负摩阻力为主,仅局部注水孔堵塞段出现正摩阻力。预先浸水,经养护后再进行逐级加载,随着桩顶荷载的增大,桩身逐渐下沉,桩的竖向位移会大于桩周土体的位移,在桩土相对位移作用下桩侧产生的主要是正摩阻力,仅局部特殊区段出现负摩阻力。

表 3 特殊浸水试验对比

Tab. 3 Comparison of Special Immersion Tests

| 桩型        | 浸水方式                 | 土体固结时间/d | 荷载          | 负摩阻力情况                             |
|-----------|----------------------|----------|-------------|------------------------------------|
| 混凝土灌注桩    | 桩顶受荷情况下采用注水孔与试坑相结合浸水 | 0        | 恒载 3 600 kN | 浸水段桩侧以负摩阻力为主,且数值较大,极限值达 319.62 kPa |
| 微型钢管砂浆复合桩 | 成桩过程中采用泥浆循环进行浸水      | 28       | 逐级加载        | 浸水段桩侧以正摩阻力为主,且数值较小,极限值仅为 32 kPa    |

综合分析可以看出,湿陷性黄土地区桩基建筑物在使用过程中若地下水环境变化致使桩周土体湿陷对建筑物极为不利;建议在桩基建筑物施工过程中采用合理的施工工艺对桩周土体预先进行微量浸水,消除部分黄土湿陷,以避免由于地下水环境改变而引发的桩基承载力下降危害。

## 4 结 语

(1)桩顶受荷情况下采用注水孔与试坑相结合的浸水方式浸水量较大,浸水饱和段桩侧以负摩阻力为主,数值较大,最大值达 319.62 kPa,仅局部注水孔堵塞段桩侧出现正摩阻力,由此表明桩基建筑物在使用过程中若地下水环境变化致使桩周土体湿陷则对建筑物极为不利。

(2)成桩过程中采用泥浆循环方式浸水量较小,桩周土体能够预先完成部分湿陷,桩侧以正摩阻力为主,仅局部存在漏浆层的区段浸水较为充分,在逐级加载过程中由于桩体下移时下拽力的作用而发生再次湿陷,产生负摩阻力,但数值较小,最大值为 32 kPa。

(3)特殊浸水条件下由于注水孔堵塞或漏浆层的存在,桩周土体沿桩身会发生分段湿陷,桩侧负摩阻力出现多个峰值,正、负摩阻力呈现交错分布的形态,出现多个中性点。

(4)通过试验对比,说明浸水试验中桩基负摩阻力的大小受浸水方式(浸水量)、桩顶荷载、浸水固结时间的综合影响,并建议在桩基建筑物施工过程中采用合理的施工工艺对桩周土体预先进行微量浸水,消除部分黄土湿陷,以避免由于地下水环境改变而引发的桩基承载力下降危害。

## 参考文献:

## References:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.  
LIU Zu-dian. Mechanics and Engineering of Loess [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.
- [2] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 273-284.  
XIE Ding-yi. The Past, Present and Future of the Research on Mechanical Characteristics and Application of Loess[J]. Underground Space, 1999, 19(4): 273-284.
- [3] 杨运来. 黄土湿陷机理的研究[J]. 中国科学: B 辑,

1988, 19(7): 756-766.

YANG Yun-lai. Study on Collapse Mechanism of Loess[J]. Science in China: Series B, 1988, 19(7): 756-766.

- [4] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学: 数学, 1980(12): 1203-1208.  
GAO Guo-rui. Classification of Loess Microstructure and Its Collapsibility[J]. Scientia Sinica: Mathematica, 1980(12): 1203-1208.
- [5] 张晓健. 桩基负摩阻力研究现状[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 315-319, 324.  
ZHANG Xiao-jian. Recent Study on Negative Skin Friction of Pile Foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(2): 315-319, 324.
- [6] 夏力农, 柳红霞, 欧名贤. 垂直受荷桩负摩阻力时间效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1177-1182.  
XIA Li-nong, LIU Hong-xia, OU Ming-xian. Experimental Research on Time Effects of Negative Skin Friction Behaviors of Vertical-loaded Piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1177-1182.
- [7] 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(2): 69-77.  
HE Yi-hua, MIN Lian-tai. Problems on Negative Friction of Pile Foundation in Collapsible Loess Region [J]. Journal of Building Structures, 1982, 3(2): 69-77.
- [8] 赵锡宏, 张启辉, 张保良. 承受负摩擦力的桩基沉降计算的迭代法[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 17-21.  
ZHAO Xi-hong, ZHANG Qi-hui, ZHANG Bao-liang. Iterative Method for Calculating the Settlement of Pile Foundation with Negative Friction[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 17-21.
- [9] 康景文, 毛坚强, 许建, 等. 填土地基桩基负侧摩阻力设计计算方法试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增2): 25-29.  
KANG Jing-wen, MAO Jian-qiang, XU Jian, et al. Experiment Study of Calculation Method for Pile Negative Side Friction in Fill Site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 25-29.
- [10] 齐静静, 徐日庆, 龚维明. 湿陷性黄土地区桩侧负摩阻力问题的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增): 881-884.  
QI Jing-jing, XU Ri-qing, GONG Wei-ming. Experimental Study on Negative Skin Friction Resistance on Piles in Collapsible Loess Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S): 881-884.

- [11] 魏 进,李 哲,郝忙利,等.自重湿陷性黄土地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 Mang-li, 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.
- [12] 夏力农,雷 鸣,聂重军.桩顶荷载对负摩阻力性状影响的现场试验[J].岩土力学,2009,30(3):664-668.  
XIA Li-nong, LEI Ming, NIE Chong-jun. Field Test of Influences of Load at Pile Top on Negative Skin Friction Behaviors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 664-668.
- [13] 曹卫平,赵 敏.黄土地基中人工挖孔扩底灌注桩负摩阻力试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增 1):3167-3173.  
CAO Wei-ping, ZHAO Min. Experimental Study of Negative Skin Friction for Man-made Cast-in-situ Belled Piles in Loess Soil Foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3167-3173.
- [14] 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 Xue-feng, CHEN Zheng-han, 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.
- [15] 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 Xue-feng, YANG Xiao-hui, 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.
- [16] 董晓明,高仕赵,宋 军,等.非均匀湿陷条件下黄土地区桩基力学性状试验研究[J].公路交通科技,2016,33(6):32-39.  
DONG Xiao-ming, GAO Shi-zhao, SONG Jun, et al. Experimental Study on Mechanical Property of Pile Foundation in Loess Area Under Condition of Non-uniform Collapsibility[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(6): 32-39.
- [17] 朱彦鹏,杨校辉,马天忠,等.黄土塬地区大直径长桩承载性状与优化设计研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(4):1012-1023.  
ZHU Yan-peng, YANG Xiao-hui, MA Tian-zhong, et al. Bearing Behavior and Optimization Design of Large-diameter Long Pile Foundation in Loess Subsoil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 1012-1023.
- [18] 杨校辉,黄雪峰,朱彦鹏,等.大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度和湿陷性评价试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(5):1063-1074.  
YANG Xiao-hui, HUANG Xue-feng, ZHU Yan-peng, et al. Experimental Study on Collapsibility Evaluation and Treatment Depths of Collapsible Loess upon Self Weight with Thick Depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 1063-1074.
- [19] 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 Yan-peng, ZHAO Tian-shi, CHEN Chang-liu. Field Tests on Changes of Pile Negative Friction Along Its Length[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 265-272.
- [20] JGJ 106—2014,建筑基桩检测技术规范[S].  
JGJ 106—2014, Technical Code for Testing of Building Foundation Piles[S].