

DOI: 10.11779/CJGE2018S1001

# 微浸水对桩基负摩阻力影响的试验初探

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. 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;  
3. 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:** 为使湿陷性黄土地区桩基负摩阻力问题得到实质性的解决, 提出了一种在桩基施工过程中通过桩周土体浸水消除部分黄土湿陷以提高其承载能力的思想, 并以此为出发点, 阐述微浸水概念, 设计现场试验, 进而分别对不同地质条件下及不同微浸水程度后桩侧负摩阻力的分布特点、发展规律展开初步探索。研究结果表明: 高压循环注浆成桩工艺既能实现桩周土体的微浸水, 使其首先发生预湿陷, 又能使漏浆层以下一定深度范围内土体浸水程度明显增强形成强浸水段, 引发再湿陷, 产生负摩阻力; 土层中漏浆层的不连续分布, 致使桩周土体在桩体受荷后分段湿陷, 桩侧负摩阻力沿桩身呈现交错分布的形态; 随着微浸水程度的逐步增加, 桩侧正摩阻力逐渐受到削弱, 单桩极限承载力逐渐减小, 与此同时桩侧负摩阻力逐渐增大, 但增幅不大、数值较小。最后, 指出本次试验的不足之处, 并对后续研究提出建议。

**关键词:** 微浸水; 湿陷性黄土; 负摩阻力; 试验初探

**中图分类号:** TU473.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2018)S1-0001-07

**作者简介:** 朱彦鹏(1960-), 男, 教授、博士生导师, 主要从事支挡结构、地基处理和工程事故分析与处理等方面的研究与教学工作。E-mail: zhuyp1@163.com。

## Preliminary exploration of tests on effect of micro-immersion on negative skin friction of pile foundation

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

**Abstract:** In order to solve the problem of negative skin friction of pile foundation in collapsible loess areas, a new idea is proposed to improve the bearing capacity of pile foundation by immersion of the soil around the pile to eliminate part of the loess collapsibility in the process of pile foundation construction. Taking it as a starting point, the concept of micro-immersion is introduced, and the field tests are designed. A preliminary exploration is made on the distribution characteristics and development laws of negative skin friction of pile side under different geological conditions and the degree of micro-immersion. The results show that the high technology of pressure circulation grouting forming pile can achieve micro-immersion of soil around the pile to make it pre-collapse at first, and it can enhance the moisture content of soil significantly within the scope of certain depth below leakage layer and form strong immersion sections, and then it may lead to re-collapsibility and cause negative friction. The discontinuous distribution of the leakage slurry layer in the soil layer results in discontinuous collapsibility of the soil around the pile after the pile is loaded, and the negative skin friction of the pile side shows a staggered distribution along its length. With the gradual increase of the degree of micro-immersion, the positive friction resistance of the pile side is gradually weakened, and the ultimate bearing capacity of the single pile decreases gradually. At the same time, the negative skin friction of the pile side increases gradually, but the increase is small and the value is small. Finally, the shortcomings of this experiment are pointed out and the future research is prospected.

**Key words:** micro-immersion; collapsible loess; negative skin friction; preliminary exploration of test

## 0 引 言

负摩阻力问题因给桩基工程带来危害而备受关

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划项目 (IRT1368)

收稿日期: 2017-06-11

\*通讯作者 (E-mail: 594132500@qq.com)

注, 其在我国西北湿陷性黄土地区更是广泛存在<sup>[1]</sup>。湿陷性黄土作为一种区域性特殊土, 天然湿度下强度较高<sup>[2]</sup>, 遇水浸湿后强度则会显著降低, 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]</sup>。土体湿陷变形会引起桩土相对位移进而产生桩侧负摩阻力, 导致桩身沉降增大、桩基承载力降低。因此, 桩基工程中如何避免及减小由于黄土湿陷而产生的桩侧负摩阻力已成为人们关注的重点。

目前, 针对负摩阻力问题的理论研究尚不成熟, 在实际施工中往往需要将桩基穿过深厚湿陷性黄土层以达到避免湿陷的目的, 但这样势必会造成很大的浪费<sup>[4]</sup>。为此, 很多学者在桩基负摩阻力的理论计算<sup>[5-7]</sup>及现场试验<sup>[8-11]</sup>两方面做出了很大努力, 以期为实际施工提供指导, 尽量减小施工成本。但是理论计算的一些解析解尚无法直接进行应用<sup>[12]</sup>, 大多现场试验又仅仅只测得了整个桩基的平均桩侧负摩阻力<sup>[13]</sup>。相关研究成果只能从理论角度加深人们关于桩侧负摩阻力的认识, 实际工程中桩侧负摩阻力问题依旧普遍存在, 并未得到很好解决。现有负摩阻力问题的研究主要集中在均质土层中, 但实际土层条件错综复杂, 尤其对于填土地基, 土层湿陷性不连续问题普遍存在。郑建国等对黄土湿陷性不连续对湿陷变形的影响进行了研究<sup>[14]</sup>, 认为非湿陷土单元对湿陷土单元的湿陷性具有抑制作用。但在湿陷性分布不均匀的地基中进行负摩阻力问题研究却鲜有报道。针对上述目前研究的不足, 以消除桩基施工过程中部分黄土湿陷为出发点, 对桩在周围土体浸水情况下的负摩阻力以及湿陷性分布不均匀地基对桩负摩阻力的影响进行研究很有必要。

本文采用自行设计的成桩工艺, 在兰州市九州区大厚度黄土填方地基场地, 实现了中细长微型钢管桩成桩过程桩周土体的微量浸水, 并设置对比组, 借助现场静载荷试验, 分别对不同地层条件下及不同微浸水程度后桩侧负摩阻力的分布特点、发展规律进行研究。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验思路及概念解释

自行设计切实可行的新型成桩工艺, 使其能够在成桩过程中同步实现桩周土体的微浸水, 并在桩身埋设混凝土应变计, 待成桩完成后, 通过静载荷试验, 研究微浸水后桩侧负摩阻力的分布、变化情况。

与传统现场大型桩基浸水试验不同, 本试验采用成桩过程中对桩周土体进行渗水的特殊浸水方式, 并将桩周土体浸水程度较小的这一现象用微浸水概念加

以概括, 同时在微浸水过程中, 对于沿桩长可能出现的浸水程度明显增强的区段用强浸水段进行区分。

### 1.2 试验场地选择

甘肃省兰州市九州区某大厚度黄土填方地基位于黄河北岸高阶地罗锅沟台地。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, 素填黄土深度高达 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及建筑垃圾, 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。

### 1.3 成桩工艺选择

本次试验选用自行设计的细长微型钢管桩, 如图 1 所示, 试桩直径 168 mm, 钢管内填充水泥砂浆, 钢管外包裹 15 mm 厚水泥砂浆保护层。为实现顺利成桩及桩周土体的微浸水, 采用高压循环注浆施工工艺, 如图 2 所示, 即在跟管钻进的同时, 将配制好的泥浆经高压泵加压后, 通过高压管送至钻机并进入微型钢管内, 同时高压将微型钢管内泥浆持续从桩底位置沿微型钢管外侧返流至地面所挖筑的泥浆导流槽, 并流入泥浆池, 如此进行泥浆循环; 待试桩钻至桩底位置后, 立即将水泥砂浆经高压泵加压后, 通过高压管送至钻机并进入微型钢管内, 同时高压将微型钢管内水泥砂浆持续从桩底位置沿微型钢管外侧返流至桩顶设计标高, 形成内部填充水泥砂浆, 外部包裹水泥砂浆的新型微型钢管桩。显然, 通过水泥砂浆和钢管的有效结合能够使桩身承载力得到大大提高, 但本文对其承载特性不做论述; 同时高压循环注浆成桩过程中的泥浆循环, 一方面能使泥浆护壁防止塌孔、钢管抱死现象的发生, 另一方面泥浆中的水分渗入桩周土体中, 可对桩周湿陷性黄土达到微弱浸水的效果。

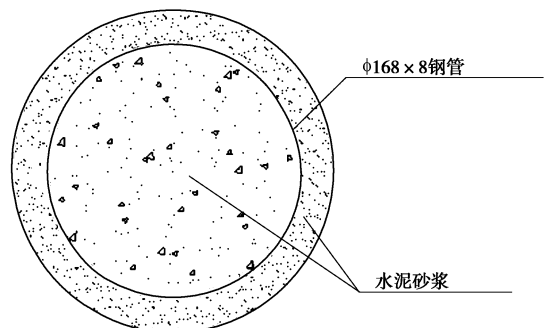


图 1 微型钢管桩截面图

Fig. 1 Section of micro steel tube pile

### 1.4 试验方案

按图 3 所示位置在现场布置 4 根试桩, 桩长均为 33 m。其中桩 1 和桩 2 形成对比组, 探究验证桩基微

浸水程度相同情况下桩侧负摩阻力沿桩长分布形态与地质条件之间的关系; 桩 2、桩 3、桩 4 位于同一地质条件且相距较近, 形成对比组, 探究桩基微浸水程度对桩侧负摩阻力及单桩承载力的影响。微浸水程度则是通过试验桩的成桩顺序进行实现, 先施工的桩会对后施工桩的周围土体水环境产生影响, 增大后者桩周土体的含水率, 故根据成桩顺序可知, 桩 2 至桩 4 桩周土体含水率依次增加, 微浸水程度逐渐增强。其中桩 1 所处场地土层特性指标如表 1 所示, 桩 2、桩 3、桩 4 所处场地土层特性指标如表 2 所示。

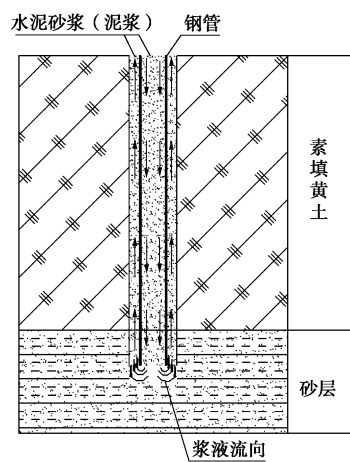


图 2 高压循环注浆施工工艺示意图  
Fig. 2 High-pressure circulation grouting construction technology

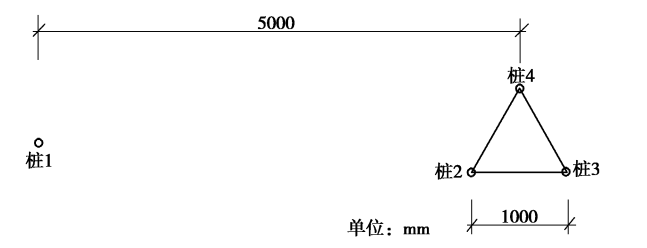


图 3 桩位布置图  
Fig. 3 Layout of pile position  
表 1 桩 1 试验场地的土层特性指标  
Table 1 Characteristic indices of soil layers in tests on pile No. 1

土层编号	土层特性	土层埋深/m
素填黄土 1	粉土, 土质均匀	0~3.5
素填黄土 2	饱和粉土, 土质均匀, 软塑 21 m 处存在大块石	3.5~35.0
砂岩	强风化岩, 岩芯呈松散状或短柱状	35.0~44.0

表 2 桩 2~4 试验场地的土层特性指标  
Table 2 Characteristic indices of soil layers in tests on pile No. 2~4

土层编号	土层特性	土层埋深/m
素填黄土 1	三七灰土, 夹杂卵石	0~3.5
素填黄土 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

为得到整个试验过程中桩身轴力及桩侧摩阻力沿桩身变化情况, 本试验将混凝土应变计沿试桩中心线埋设, 由钢筋定位, 沿桩身全长间隔 4 m 均匀布置; 采用高压循环注浆技术进行成桩, 并在成桩完成后立即对微型钢管内外水泥砂浆进行 28 d 的标准养护, 待养护期满及桩周土体完成初步固结后, 方可按照现行规范<sup>[15]</sup>进行静载荷试验, 即采用堆载反力装置进行慢速维持荷载法加载。

2 试验结果与分析

2.1 单桩荷载 - 沉降特性

本次试验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 4 所示。

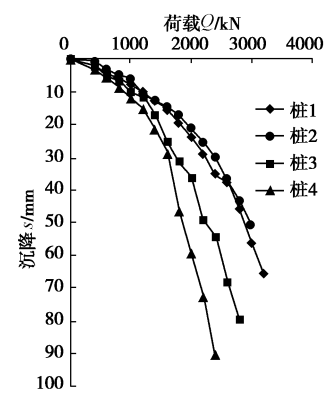


图 4 单桩竖向静载试验的  $Q-s$  曲线  
Fig. 4  $Q-s$  curves of single pile in vertical static loading tests

从图 4 中可以看出: 桩 1 和桩 2 的  $Q-s$  曲线表现为缓变型, 无明显陡降段, 桩 1 在加载 3200 kN 时桩身沉降量为 65.67 mm, 桩 2 在加载至 3000 kN 时桩身沉降量为 50.76 mm; 依据建筑基桩检测技术规范取沉降量等于 40 mm 对应的荷载值为单桩竖向抗压极限承载力, 即桩 1 和桩 2 的单桩竖向抗压极限承载力均为 2800 kN; 对于试桩 3 及试桩 4, 取单级沉降最大的那一荷载作为极限承载力, 桩 3 加载至 2000 kN 时, 沉降明显增大, 单级达 5.51 mm, 极限承载力为 2000 kN, 桩 4 加载至 1600 kN 时, 沉降明显增大, 达 7.17 mm, 极限承载力为 1600 kN。

对比 4 根桩的  $Q-s$  曲线可以看出, 微浸水程度相同的桩 1 和桩 2 单桩竖向抗压极限承载力相同, 而桩 2 至桩 4 随着微浸水程度的逐渐增强, 单桩竖向极限承载力依次减小, 且从桩 2 的 2800 kN 降低至桩 4 的 1600 kN, 降幅达 43%, 由此说明微浸水程度对桩身极限承载力影响极大, 分析认为这是由于微浸水后桩周土体并未完全固结, 以及先施工桩在成桩过程中对后施工桩的桩周土体造成扰动, 最终导致土体所能

提供的侧摩阻力受到削弱,从而使得单桩承载力下降。

## 2.2 桩身轴力的分布规律

试验中通过均匀埋设在试验桩内的混凝土应变计直接测得埋设点桩体的微应变,再利用胡克定律即可求得埋设点处桩身应力,进而根据桩身截面面积得到轴力,经计算桩1~4的轴力沿桩深分布曲线如图5所示。

从图5中可以看出,4根试验桩桩端轴力均接近0 kN,桩身轴力分布并不严格按照传统的随深度增加而逐渐递减的规律发生,桩1在21~25 m范围内出现轴力随深度增加而增加的现象,桩2、桩3、桩4均在5~9 m和17~21 m范围出现了该现象。

试验桩长径比较大,随着深度的增加,桩身侧阻发挥值逐渐降低,因此传递至桩端的荷载较小,最终端阻分担荷载比例趋于0,呈现出摩擦桩的特性。另外,局部范围内出现随深度增加而增加的现象说明了该区段内存在着负摩阻力。

## 2.3 负摩阻力分布规律

桩侧摩阻力按混凝土应变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,经计算桩1~4侧摩阻力沿桩身分布曲线如图6所示。

从图6中可以看出,桩侧出现负摩阻力,且表现出不连续分布的特征,其中桩1出现一个负摩阻力段,其负摩阻力平均值为-37 kPa,桩2~4均出现两个负摩阻力段,出现深度均在5~9 m和17~21 m范围内,其中桩2上段负摩阻力平均值为-32 kPa,下段负摩阻力平均值为-16 kPa,桩3上段负摩阻力平均值为-45 kPa,下段负摩阻力平均值为-30 kPa,桩4上段负摩阻力平均值为-60 kPa,下段负摩阻力平均值为-39 kPa。

对比桩1、桩2的侧摩阻力分布曲线可以看出在相同微浸水程度下桩1的侧摩阻力沿桩身仅出现一个负摩阻力发生段,而桩2的沿桩身呈现正负摩阻力交错出现的状态,存在不止一个负摩阻力极值点。结合两根桩所处地层差异及施工现场情况,初步分析认为这种现象的出现与泥浆循环过程中漏浆、跑浆情况密切相关。因为在施工过程中,桩1在跟管钻进至21 m时出现泥浆无法循环反流至地面,即发生了漏浆、跑浆,同样的现象桩2则发生在17~21 m范围内。另

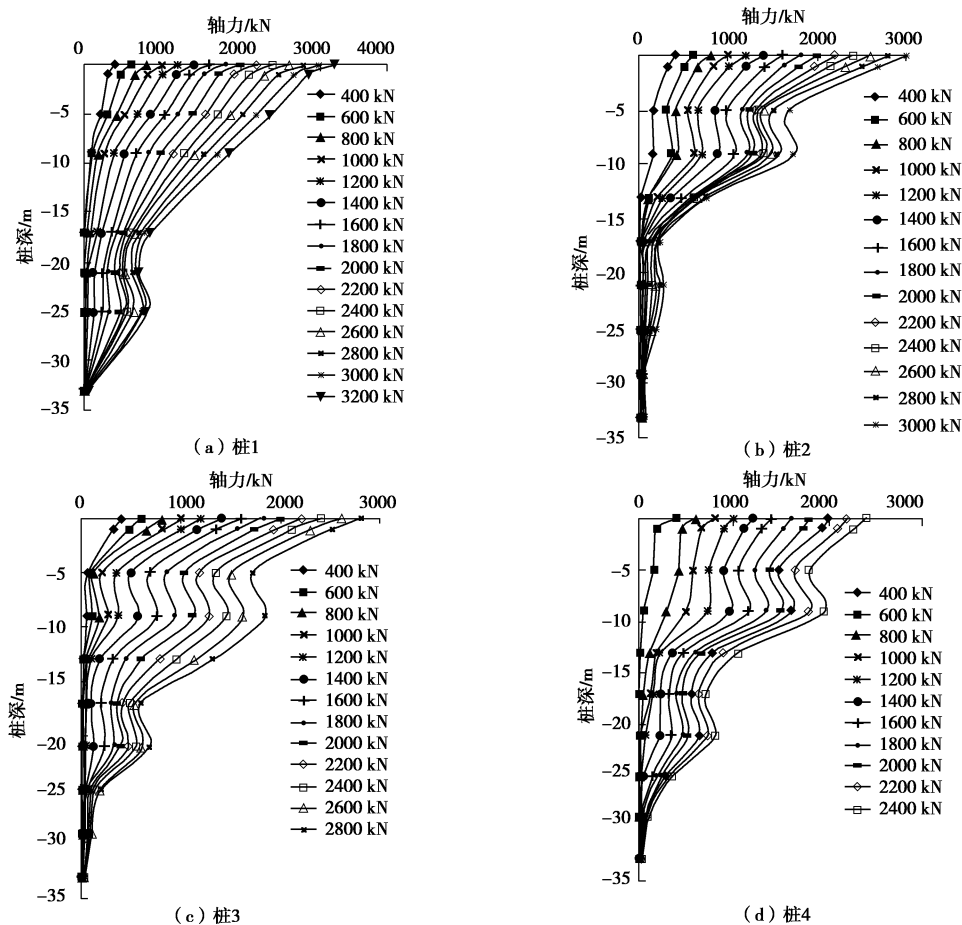


图5 桩身轴力沿深度的分布曲线

Fig. 5 Curves of axial force of pile with depths

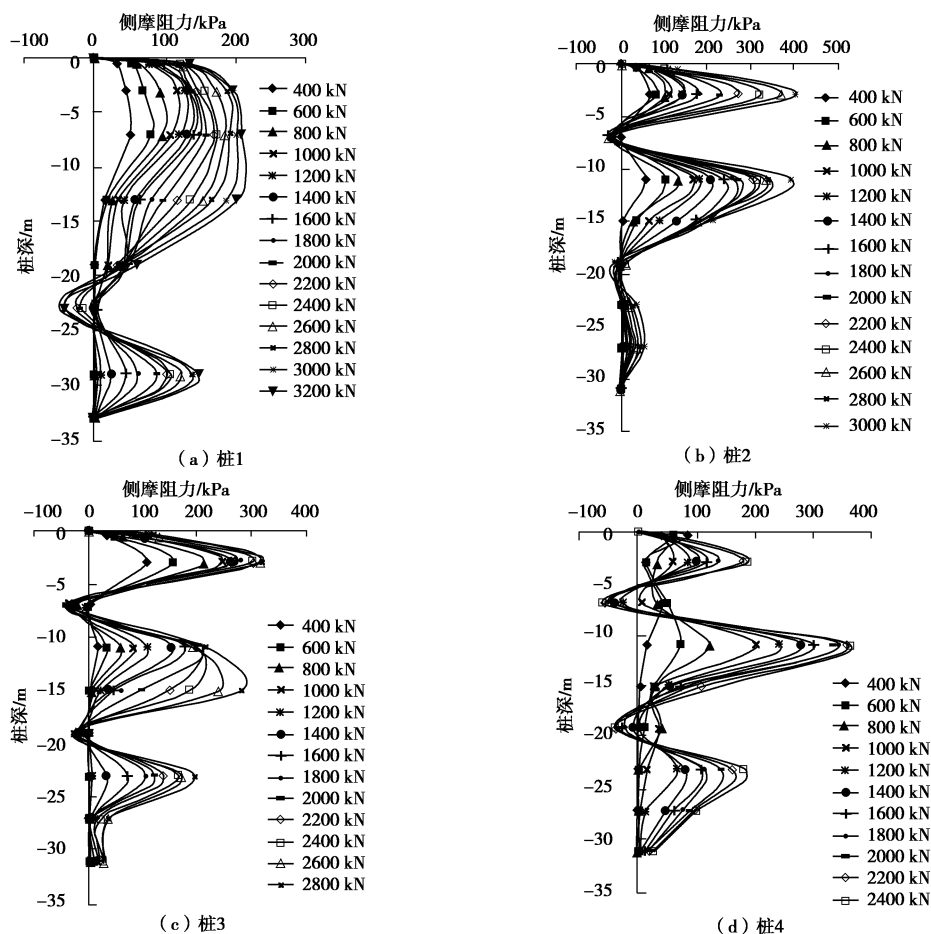


图 6 桩侧摩阻力沿深度的分布曲线

Fig. 6 Curves of frictional resistance of pile with depths

外根据桩 2 所处位置的土层信息可以看出 0~3.5 m 处存在卵石, 泥浆可通过卵石空隙流入土体, 说明此段也存在漏浆现象。

深入分析发现, 成桩过程中循环泥浆对桩周土体微浸水的同时, 也对漏浆层局部深度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, 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的作用下发生湿陷, 引起负摩阻力的产生, 所以漏浆层的不连续分布使得桩周土体分段湿陷, 从而导致负摩阻力分段不连续, 并使得局部桩身轴力随深度增加而增加。

对比桩 2、桩 3、桩 4 的侧摩阻力分布曲线可以看出, 桩侧负摩阻力值逐步增长但总值并不大, 原因是桩侧土体微浸水程度不同的结果。桩 2 在成桩过程中对桩 3、桩 4 周围的水环境也产生了影响, 增大了桩 3、桩 4 周围土体的含水率, 同样桩 3 成桩时也对桩 4 周围土体产生了影响, 使得 3 根桩在进行静载荷试验时周围土体含水率不同, 进而使得桩侧负摩阻力大小随微浸水程度的增强呈现递增的趋势。但桩侧摩阻力最大值仅为 -60 kPa, 数值并不大, 从宏观上分析其主要原因有以下两个: ①高压循环注浆施工工艺使得在成

桩过程中桩侧土体实现预浸水效果, 即在桩基施工过程中桩侧土体已经实现了部分湿陷; ②桩顶受荷所引起的桩周土体的分段湿陷使得桩侧土体实现了应力重分布, 进而使得负摩阻力相对较小, 这与郑建国等关于黄土湿陷性不连续进行的分析一致<sup>[14]</sup>, 即非湿陷土单元将对湿陷土单元湿陷的发生产生抑制作用。

### 3 试验不足及建议

#### 3.1 试验不足

由于此次试验尚无经验可循, 试验初探过程中面临诸多挑战, 试验完成后, 笔者针对现场试验效果进行了详细分析, 认为本试验存在以下几点不足。

(1) 在对浸水程度不同情况下桩侧负摩阻力问题的对比研究中, 三根试验桩设计的位置较近, 容易导致前面成桩过程对后面桩周土体形成扰动, 故建议试验桩之间的距离应加大。

(2) 本试验所采用控制浸水程度的方式是通过前面桩的微浸水对后面桩周土体水环境产生影响, 进而产生桩 2 至桩 4 桩周土体含水率依次增大的现象, 然而这种设计方案难以对具体浸水程度加以控制, 故建

议在成桩过程中以泥浆循环的时间长短对浸水程度进行控制。

(3) 试验中并未对微浸水及强浸水这类概念提出量化指标, 仅从宏观角度相对于现场试坑浸水对微浸水进行简单区分, 以及根据浸水强弱对强浸水和微浸水加以区别, 故建议在桩周沿竖向埋设水分计对微浸水及强浸水段进行含水率的量测。

### 3.2 后期试验建议

同时, 鉴于本次试验仅对微浸水后细长微型钢管桩桩侧负摩阻力问题进行了初步研究, 为全面深入进行桩侧负摩阻力的研究, 更好地服务于实际工程, 在本次试验初探的基础上, 笔者认为进一步研究应重点解决以下问题。

(1) 对桩周土体微浸水提出量化指标, 即浸水量达到何值, 桩周土体达到的预浸水效果最好。

(2) 对微浸水后桩周土体养护固结时间进行量化, 即在最优浸水量的前提下, 桩周土体经过多长时间才可以达到较好的固结效果, 即对最优浸水量下的最佳固结时间进行探索。

(3) 进行桩周为原状黄土、桩周黄土微浸水时以及浸水固结后桩侧负摩阻力及桩体承载特性的比较, 深入分析微浸水对桩体承载特性的改善情况。

(4) 工程中常见的钢筋混凝土灌注桩以及大直径桩应该被作为研究对象, 寻找能够在成桩过程中实现这些桩型桩周土体微浸水的施工工艺, 并展开相关方面的研究。

## 4 结 论

在兰州市九州区某大厚度填方地基中利用自行设计的成桩工艺对细长微型钢管桩桩周土体实现微浸水, 并对微浸水后的桩体通过现场静载荷试验研究其不同条件下桩侧负摩阻力的分布特点和发展规律, 得到以下几点研究结论。

(1) 高压循环注浆成桩工艺能够实现桩周土体的微浸水, 并由于黄土填方地基中漏浆层的存在, 还能使得在泥浆循环过程中漏浆层以下一定深度范围内土体浸水程度明显增大形成强浸水段, 而这些强浸水段的桩周土体在桩体受荷下移的过程中, 由于下拽力的作用会发生湿陷, 引起负摩阻力的产生。

(2) 土层中漏浆层的不连续分布, 使得桩周土体在下拽力的作用下分段湿陷, 进而形成桩侧负摩阻力沿桩身交错分布的现象。

(3) 微浸水程度越大, 桩周土体受桩体下沉影响越大, 桩侧负摩阻力也逐渐增大, 与此同时, 在土层扰动的共同作用下, 桩侧正摩阻力逐渐受到削弱, 单

桩极限承载力逐渐减小, 且降低明显。

(4) 桩周土体的预湿陷以及再湿陷时土中应力的重新分布使得桩侧负摩阻力随微浸水程度的增加呈现出增幅不大、数值较小的趋势。

(5) 由于桩土作用机理较为复杂及各地区地质条件多样, 本文研究主要针对兰州黄土填方场地中的细长微型钢管桩展开, 对于不同地区、场地条件、桩型的负摩阻力问题是否与本文研究成果相同还有待进一步验证和完善。

### 参考文献:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 陕西: 科学技术出版社, 1997. (LIU Zu-dian. Mechanics and engineering of loess[M]. Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [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. (in Chinese))
- [3] 杨运来. 黄土湿陷机理的研究[J]. 中国科学(B 辑), 1988, 39(7): 754 - 766. (YANG Yun-lai. Study on collapse mechanism of loess[J]. Science in China(Series B), 1988, 39(7): 754 - 766. (in Chinese))
- [4] 黄雪峰. 大厚度自重湿陷性黄土的湿陷变形特征、地基处理方法和桩基承载性状研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2007. (HUANG Xue-feng. Research on Collapsible deformation deformation, foundation treatment method and pile bearing behavior of dead-weight collapse loess with heavy section[D]. Chongqing: Logistical Engineering University of PLA, 2007. (in Chinese))
- [5] 何颐华, 闵连太. 湿陷性黄土地基桩的负摩阻力问题[J]. 建筑结构学报, 1982, 15(2): 1 - 11. (HE Yi-hua, MIN Lian-tai. Problems on negative friction of pile foundation in collapsible loess region[J]. Journal of Building Structures, 1982, 15(2): 1 - 11. (in Chinese))
- [6] 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[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 17 - 21. (in Chinese))
- [7] 康景文, 毛坚强, 许建, 等. 填土场地桩基负侧摩阻力设计计算方法试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 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. (in Chinese))
- [8] 魏 进, 李 哲, 郝忙利, 等. 自重湿陷性黄土地段的桩基浸水载荷试验[J]. 长安大学学报, 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, 2011, **31**(5): 63 - 67. (in Chinese))
- [9] 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**(增刊): 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**(S0): 881 - 884. (in Chinese))
- [10] 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. Study on bearing behaviors 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. (in Chinese))
- [11] 刘 飞, 郑建国. 湿陷性黄土地段 PHC 桩浸水试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **33**(增刊 2): 362 - 366. (LIU Fei, ZHENG Jian-guo. Immersion tests on PHC piles in collapsible loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **33**(S2): 362 - 366. (in Chinese))
- [12] 黄雪峰, 杨校辉, 殷 鹤, 等. 湿陷性黄土地段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**(增刊 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. (in Chinese))
- [13] 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**(增刊 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. (in Chinese))
- [14] 郑建国, 邓国华, 刘争宏, 等. 黄土湿陷性分布不连续对湿陷变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(1): 165 - 170. (ZHENG Jian-guo, DENG Guo-hua, LIU Zheng-hong, et al. Influence of discontinuous distribution of collapsible loess on its deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(1): 165 - 170. (in Chinese))
- [15] JGJ106—2014 建筑桩基检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (JGJ106—2014 Technical code for testing of building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014. (in Chinese))

(本文责编 明经平)

(上接第 164 页)

- [4] 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 - 10. (CHEN Zheng-han, LIU Zu-dian. Collapsible deformation mechanism of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, **8**(2): 1 - 10. (in Chinese))
- [5] 钱鸿缙, 涂光祉. 关中地区黄土的湿陷变形[J]. 土木工程学报, 1997, **30**(3): 49 - 54. (QIAN Hong-jin, TU Guang-zhi. Experimental study on collapsible deformation of loess foundation in Guanzhong Region of Shaanxi in China[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, **30**(3): 49 - 54. (in Chinese))
- [6] 邵生俊, 李 骏, 王永鑫, 等. 大厚度湿陷性黄土地层的现场砂井浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(9): 1549 - 1558. (SHAO Sheng-jun, LI Jun, SHAO Jiang, et al. In-situ sand well immersion tests on self-weight collapsible loess site with large depth[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(9): 1549 - 1558. (in Chinese))
- [7] 黄雪峰, 陈正汉, 哈 双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地段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 Xue-feng, CHEN Zheng-han, 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. (in Chinese))
- [8] 西安市地下铁道有限责任公司. 西安地铁穿越湿陷性黄土工程性质及应对措施研究成果报告[R]. 2013. (Xi'an Metro Co., Ltd., The research report on engineering behaviors and measures of tunnel passing collapsible loess strata in Xi'an Metro[R]. 2013. (in Chinese))
- [9] 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**(增刊 2): 100 - 108. (HUANG Xue-feng, ZHANG Guang-ping, YAO Zhi-hua, 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. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)