

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.014



不同组合下高喷插芯组合桩抗拔承载特性 试验研究

任连伟¹, 吕陈陈¹, 张建伟², 肖扬¹, 张敏霞¹

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475004)

摘要:基于自主研发的大型桩基模型试验加载系统,采用砂雨法施工,对 4 种不同组合形式的高喷插芯组合桩(JPP 桩)进行了抗拔承载性能对比试验研究。结果表明:1) JPP 桩的不同组合形式对抗拔承载力有较大影响,下组合抗拔承载能力最高,其承载能力是分段组合 II 的 1.1 倍,是分段组合 I 的 1.3 倍,是上组合的 1.4 倍。2) 极限荷载下,组合段所提供的总侧摩阻力中,下组合最高。3) 在桩体上拔过程中,桩身轴力沿桩身向下依次递减;随着荷载的增加,桩身上部侧摩阻力首先达到极限值并趋于稳定,然后桩身中下部侧摩阻力逐渐发挥。4) 侧摩阻力随桩土相对位移的增加而逐渐变大,在桩土相对位移较小时便达到较大值,桩身上部的侧摩阻力在达到较大值后趋于稳定,桩身中下部不同位置处的侧摩阻力在达到较大值仍有不同程度递增的趋势,总体上呈现出双曲线的分布形式。

关键词:组合桩;抗拔承载力;模型试验;桩土界面剪切

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)03-0094-08

Model test on uplift bearing behavior of JPP pile under different combinations

Ren Lianwei¹, Lyu Chenchen¹, Zhang Jianwei², Xiao Yang¹, Zhang Minxia¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, P. R. China)

Abstract: Model tests on the uplift bearing capacity of jet grouting soil-cement-pile strengthened piles (JPP for short) under four different combinations were carried out based on the self-developed large-scale pile foundation load test equipment system, the model piles were buried by sand pour method. The test results show that: 1) different combinations have a great effect on uplift bearing capacity of JPP piles, lower combination carries the highest uplift bearing capacity, its bearing capacity is nearly 1.1 times of three-segment combination, nearly 1.3 times of two-segment combination, nearly 1.4 times of upper combination. 2) the total side resistance of lower combination is the maximum in four combinations under

收稿日期:2017-08-13

基金项目:国家自然科学基金(51508166、51508163);河南省高等学校青年骨干教师资助项目(2015 GGJS—243);河南省重大科技攻关计划(14A560015)

作者简介:任连伟(1980-),男,博士,副教授,主要从事地基基础研究,E-mail:renhpu@163.com。

张建伟(通信作者),男,博士,副教授,E-mail:zjw101_0@163.com。

Received:2017-08-13

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51508166, 51508163); College Young Backbone Teacher Project of Henan Province(No. 2015GGJS-243); Key Scientific and Technological Project of Henan Province(No. 14A560015)

Author brief: Ren Lianwei (1980-), PhD, associate professor, main research interests: pile foundation and ground improvement, E-mail: renhpu@163.com.

Zhang Jianwei(corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: zjw101_0@163.com.

the ultimate uplift capacity. 3) in the process of uplifting test, axial force decreases along the pile depth under each load; the upper lateral resistance reaches firstly the ultimate value and tends to be stable, with the load increasing, the upper lateral resistance takes gradually a full play. (4) the lateral resistance increases gradually and reaches the ultimate value when the relative displacement is small for sand, upper lateral resistance tends to be stable after being ultimate value; lower lateral friction, however, has the increasing trend after reaching the ultimate. In the whole, the relationships between side friction and relative displacement show the hyperbolic model.

Keywords: pile; uplift bearing capacity; model test; interface shear between pile and soil

随着经济的发展、社会的进步,建(构)筑物规模不断扩大,抗拔桩应用也越来越多,在隧道、地铁、桥梁、输电铁塔、高耸建(构)筑物的地下室抗浮基础中得到了广泛应用。学者们对抗拔桩的承载特性进行了大量研究工作,并取得一定的研究成果。黄广龙等^[1]进行了软土地基中微型桩的抗拔试验研究,试验结果表明,采用二次注浆工艺能显著提高微型桩抗拔极限承载力,有效地减小抗拔桩位移。雍军等^[2]进行了等截面积X形桩和圆形桩抗拔性能对比模型试验研究,试验结果表明,在相同的桩头位移下X形桩的侧摩阻远大于圆形桩,其极限抗拔力高出圆形桩约16.7%。周佳锦等^[3]进行了静钻根植竹节桩抗拔静载试验,试验结果表明,静钻根植抗拔桩中水泥土与桩周土接触面摩擦性质比灌注桩中桩土接触面摩擦性质要好,静钻根植抗拔桩的桩侧摩阻力是钻孔灌注桩的1.47~2.11倍。王卫东等^[4]结合地下车库项目开展了扩底抗拔桩的极限承载力试验,有限元数值模拟分析表明,扩大头受周边土体法向力的竖向分量是扩大头抗力的主要组成部分,极限状态下,其可占扩大头抗力的70%左右。邵光辉等^[5]通过室内模型试验,对比分析了普通抗拔桩与托底抗拔桩在极限抗拔承载力、桩身轴力传递、桩侧摩阻力分布方面的差异及其原因。Gaaver等^[6]进行了钢桩的抗拔载荷模型试验,试验结果表明,单桩的抗拔承载力主要取决于桩体的埋置深度与桩径的比值以及土体的性质。Reddy等^[7]分别对受单向抗拔桩以及水平抗拔组合荷载的模型桩进行了对比模型试验,试验结果表明在组合荷载作用下,水平和抗拔极限承载力会有所提高。Nasr^[8]对油污染砂中竖向桩抗拔承载特性进行了研究,试验结果表明,油污染后抗拔摩阻力显著降低。Khatri等^[9]提出了一种确定抗拔承载力的方法,并分析了主要影响因素。Xu等^[10]对新型的旋喷注浆锚桩进行了抗拔试验研究,依据试验结果提出了荷载沉降简化计算方法。

由于承载力、环境保护的要求及工程地质与水文地质条件等的限制,采用单一工艺的桩型往往不能满足某些情况下的工程要求,因此,有向组合式工

艺桩方向发展的趋势。高喷插芯组合桩(JPP桩)^[11]结合了预应力管桩抗压强度高、刚度大和高压旋喷桩侧摩阻较大、穿透能力强的优点,兼具两种桩型的优势,是一种既经济又施工速度快的桩型。JPP桩在竖向及水平荷载作用下的承载机理,相关学者已进行了大量研究^[12-13],而对抗拔承载特性研究较少,但在实际工程中常用于高层建筑地下室的抗浮设计,因此,理论落后于实践。本文基于自主研发的大型桩基模型试验台,砂雨法施工,进行了不同组合形式下JPP桩抗拔承载特性模型试验研究,对JPP桩的抗拔承载性能、桩身轴力、界面剪切规律等进行了分析。

1 试验概况

1.1 模型槽

试验模型槽的尺寸为2 m×2 m×2.5 m(长×宽×高),模型槽西南三侧挡板均采用钢板拼接组装而成,模型槽的北侧部分使用了有机玻璃,便于观察土体变化情况。模型槽顶部有一个长方形钢梁,由螺栓固定在模型槽顶部,能够提供较大的竖向抗压承载力和抗拔承载力。试验使用机械式千斤顶进行手动加载,千斤顶量程为5 t,具有良好的稳载效果,通过荷载传感器以及马歇尔数显仪来手动控制每级施加荷载的大小。抗拔试验加载系统如图1(a)、(c)所示。



(a) 模型槽装置 (b) 砂雨法施工 (c) 抗拔加载装置

图1 模型试验系统实物图

Fig. 1 In-site pictures of model test system

1.2 试验土样

试验所用的土体为干砂,通过室内试验测得砂土的密度 $\rho=1.63\text{ g/cm}^3$,内摩擦角 $\varphi=31^\circ$,黏聚力

$c = 0$, 压缩模量 $E_s = 11.61 \text{ MPa}$, 对试验中所用的干砂进行颗粒筛分试验得到其颗粒级配曲线, 如图 2 所示。

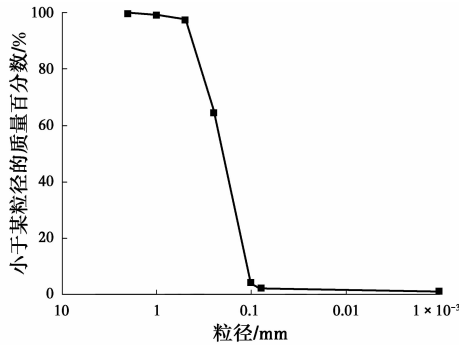


图 2 颗粒级配曲线
Fig. 2 Sand gravel test results

试验中采用砂雨法施工, 砂土填筑时通过控制砂土与地面之间的落距来保证密实度, 试验过程中采用的砂雨法成桩现场操作如图 1(b) 所示。在埋桩之前, 预先在模型槽内填 0.5m 厚砂性土, 找平后、将桩进行定位。在砂土填筑过程中控制堵头与土面的间的落距为 0.5 m, 通过室内土工试验测得土体的最大孔隙比为 0.827, 砂雨法后测得的最小孔隙比为 0.505, 天然孔隙比为 0.625, 从而得到密实度为 62.7%。

1.3 模型桩制作

首先, 确定实际工程中 JPP 桩常用的 4 种组合形式, 如图 3 所示。JPP 模型桩尺寸为: 桩长 2 m, 芯桩直径 70 mm, 水泥土厚度 15 mm, 组合段直径 100 mm, 模拟现场工程桩(桩长 20 m, 芯桩 700 mm, 水泥土厚度 150 mm, 组合段直径 1 000 mm)的承载性能。4 种组合形式下的 JPP 桩水泥土总长度均为 1 200 mm, 分段组合 I 分两段, 每段桩长 600 mm, 分段组合 II 分 3 段, 每段长 400 mm。

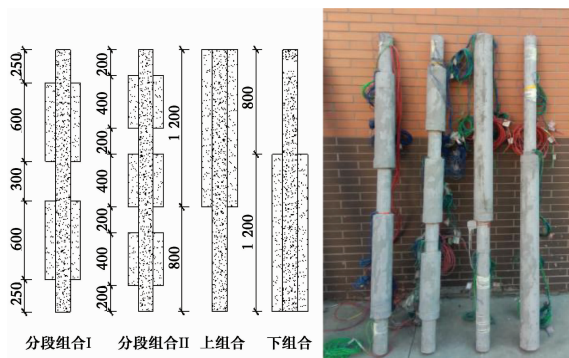


图 3 模型 JPP 桩尺寸图及实物图(单位: mm)

Fig. 3 Size of model JPP piles under different combinations

JPP 桩由芯桩和水泥土两部分组成、钢筋笼在芯桩内部, 主筋为 3 根 $\phi 6$ 的冷拉筋, 箍筋为 $\phi 2 @$

20, 用细铁丝绑扎。芯桩的模具为内径 70 mm, 长 2 m 的 PVC 管, 水泥土模具为内径 110 mm、长度与相应组合段对应的 PVC 管。芯桩采用 C40 的混凝土, 配合比为水泥:砂:碎石:水 = 1:1.35:2.62:0.43, 在浇筑前, 预制标准试块, 养护后测得试块无侧限抗压强度为 41.7 MPa。水泥土配合比为水:水泥:砂土 = 2:3:12, 所用的砂土与填筑时所用的砂土一致, 按照规范要求制作标准试块养护好, 测得其无侧限抗压强度为 4.26 MPa, 根据相关经验公式、水泥土的弹性模量取 800 MPa。

1.4 模型试验布置

模型试验中 4 种不同组合形式的 JPP 桩在模型槽中的布置如图 4 所示。

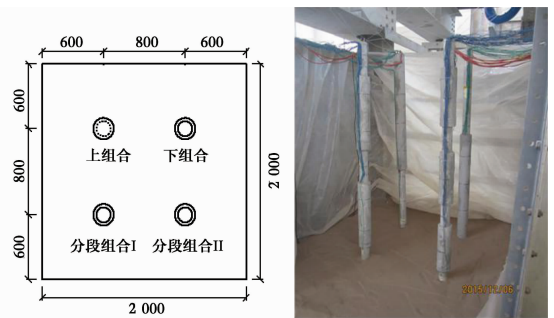


图 4 模型试验布置示意图(单位: mm)

Fig. 4 The layout of model piles

通过在芯桩表面粘贴应变片来测得不同位置处芯桩的应变, 从而得出芯桩轴力在相应荷载作用下沿桩身的变化情况。在模型试验中, JPP 桩水泥土的变形检测是一个难点。为了保证应变协调, 用弹性模量与水泥土相近的 PPR 管上粘贴应变片来实现。在保证垂直度的情况下, 将 PPR 管对称埋设在每段水泥土环壁中间, 这样就可以检测每级荷载作用下水泥土应变的变化, 从而求出水泥土轴力随荷载的变化情况。试验中, 采用 502 胶作为应变片的胶粘剂, 一般室温下固化 1 d, 检验贴片质量后, 用 703 胶做保护层。桩身测点贴片示意图如图 5 所示。

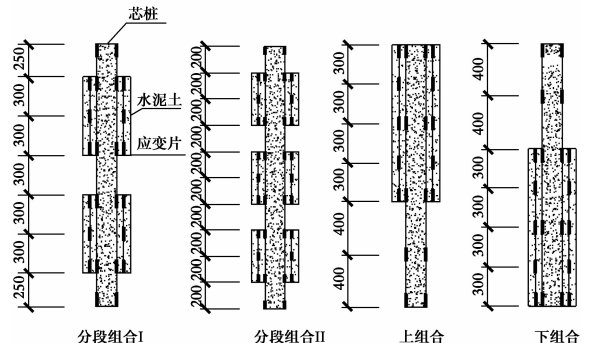


图 5 测点布设(单位: mm)

Fig. 5 Distributions of measuring equipment

试验采用维持荷载法分级加载,各级荷载下的稳定标准以及终止加载条件都参照相关规范^[14-15]中关于抗拔试验的内容来确定。试验中每级加载后,在维持荷载不变的前提下,进行桩顶竖向上拔位移及桩身应变片的测量,然后,再进行下一级荷载,直到试验终止条件出现。

2 单桩模型试验结果与分析

2.1 荷载与桩头上拔位移关系曲线的分析

进行了 4 种不同组合形式的 JPP 桩抗拔对比试验。试验采用快速维持荷载法,进行竖向加载后得到上拔荷载 U (上拔变形量) 与位移 Δ 曲线,如图 6 所示。4 根单桩的抗拔极限承载力分别为:下组合 1.9 kN、分段组合 II 1.7 kN、分段组合 I 1.5 kN、上组合 1.4 kN。下组合抗拔极限承载能力最大,其承载能力是分段组合 II 的近 1.1 倍,是分段组合 I 的近 1.3 倍,是上组合的近 1.4 倍。

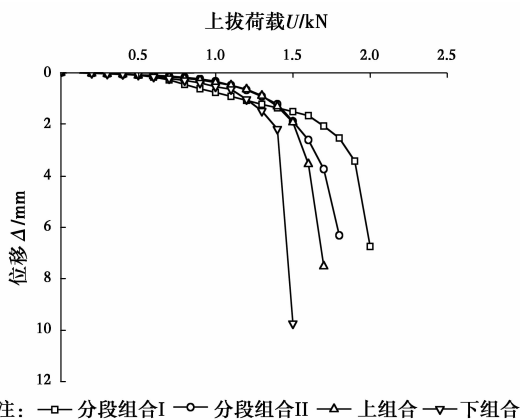


图 6 单桩竖向上拔荷载-位移曲线

Fig. 6 Uplifting load-displacement curves of four model piles

4 根单桩的上拔荷载-位移曲线为陡变型,在加载初期桩顶的位移增加都较为缓慢,上拔荷载-位移曲线近似线性变化。4 根单桩的桩侧表面积相同,但是,由于水泥土组合段位置的不同及组合段形式的不同,抗拔承载力差别较大。上组合的抗拔承载能力最差,这是因为,其他桩型与上组合相比,分段组合 I、分段组合 II 及下组合在上拔过程中的抗拔承载力除了有桩侧摩阻力提供外,还有组合段水泥土上部的土体重量阻止桩体的上拔。分段组合 II 与分段组合 I 相比,多了一个组合段的存在,上拔过程中水泥土上部土体所提供的端阻力要大于分段组合 I,分段组合 II 的抗拔承载能力大于分段组合 I。下组合与分段组合 II 相比,下组合由于其组合段位于桩身下部,桩侧摩阻力较大,在桩体上拔过程中,提供的侧摩阻力与端阻力比较大,其抗拔承载能力

大于分段组合 II。

在极限荷载下,分段组合 I 组合段处的桩侧摩阻力提供的上拔承载力为 1.14 kN,分段组合 II 组合段处的桩侧摩阻力提供的上拔承载力为 1.23 kN,上组合组合段处的桩侧摩阻力提供的上拔承载力为 1.0 kN,下组合组合段处的桩侧摩阻力提供的上拔承载力为 1.40 kN。可见,当组合段位于桩身中下部时,桩侧摩阻力发挥较充分,能够提供较大的上拔承载力。

2.2 芯桩桩身轴力

图 7 为各级荷载作用下,不同组合形式 JPP 桩的芯桩轴力沿桩身的分布情况。由图 7 可知,在各级荷载作用下,芯桩桩身轴力由上到下依次逐渐减小,在不同的加载阶段、不同的桩身位置,轴力曲线有着不同的减小速率,轴力曲线的斜率反映了桩侧摩阻力的大小。

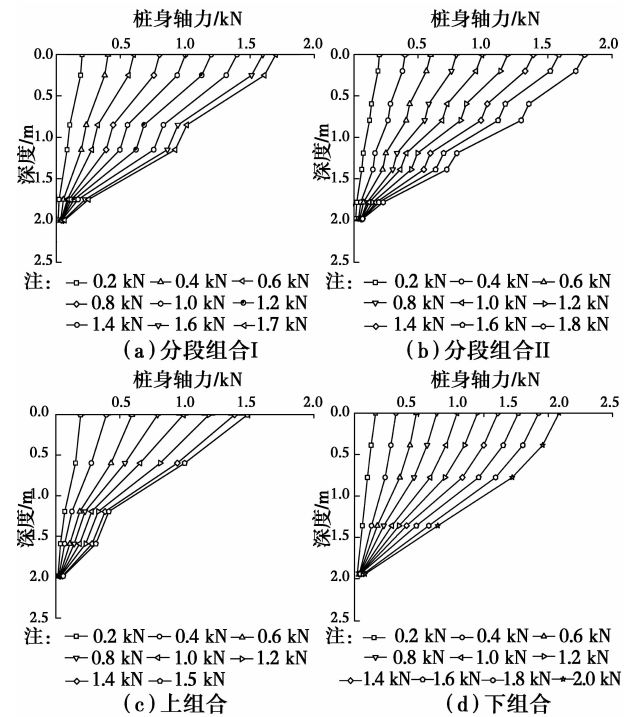


图 7 不同组合形式下的 JPP 芯桩轴力分布

Fig. 7 Axial force curves of core pile under different combinations

分段组合 I 在 0.25~0.85 m、1.15~1.75 m 区间内,分段组合 II 在 0.2~0.6 m、0.8~1.2 m、1.4~2.0 m 区间内,轴力沿着桩身递减比较迅速,说明在该区间内桩侧摩阻力发挥比较充分。分段组合 I 在 0.85~1.15 m 的区间内桩身轴力递减较为缓慢,这可能是由于该位置刚好处于相邻水泥土段的中间,组合段的桩径较芯桩而言较大,桩体在上抬过程中使位于组合段之间的土体形成一定的空穴,

导致该部位的土体产生应力松弛。该部位的侧摩阻力较小,在轴力变化曲线上体现为该段曲线斜率较小,同样的现象也在分段组合 II 的 0.6~0.8 m 以及 1.2~1.4 m 区间的轴力曲线斜率变化上得以体现。上组合在 0~1.2 m 桩身轴力曲线近似为线性分布,桩身轴力向下传递速率比较快,上部侧摩阻力发挥比较充分、且较为稳定。1.2~1.6 m 区间内轴力曲线斜率较小,这可能是因为组合段桩径较大,在桩体上抬过程中导致下部土体应力松弛,下部芯桩与桩周土体间的侧摩阻力较小,使得轴力曲线斜率较小,在该影响范围以外。1.6~2.0 m 区间内桩身轴力曲线斜率又开始变大。下组合的桩身轴力沿深度递减较为均匀,桩身上部轴力递减比较缓慢,桩身下部轴力递减明显加大,随着荷载的不断增大,逐渐由上部转移到桩身下部,使得下部桩侧摩阻力发挥较为充分。

2.3 桩侧摩阻力分析

由芯桩桩身轴力变化可得 4 种不同组合形式的 JPP 桩在各级荷载作用下桩侧摩阻力的变化情况,芯桩侧摩阻力由式(1)求得。

$$f_{si} = (N_i - N_{i+1}) / A_{si} \quad (1)$$

式中: f_{si} 为第*i*个断面与第*i*+1个断面之间的平均侧摩阻力; N_i 为第*i*个断面的桩身轴力; N_{i+1} 为第*i*+1个断面的桩身轴力; A_{si} 为第*i*个断面与第*i*+1个断面间的桩侧表面积。其中,组合段时用 JPP 桩组合段直径,非组合段用芯桩直径。JPP 桩在各级荷载作用下的桩侧摩阻力分布如图 8 所示。

参考相关文献^[16-17],由图 8 可知,分段组合 I 与分段组合 II 的侧摩阻力分布规律较为一致,沿着桩身自上至下侧摩阻力依次呈现出先增后减的变化趋势。分段组合 I 在 1.15~1.75 m 区间内侧摩阻力达到最大,分段组合 II 在 0.8~1.2 m 区间内侧摩阻力达到最大。对于分段组合而言,在相邻组合段的中间位置桩侧摩阻力较小,分段组合 I 的 0.85~1.15 m 区间内,分段组合 II 的 0.6~0.8 m、1.2~1.4 m 区间内的侧摩阻力都比较小。这与分段组合的桩型构造特点有关,位于相邻组合段中间的芯桩,桩径相较于组合段而言较小。桩体在上拔过程中,位于组合段之间的土体形成一定的空穴,导致该部位的土体产生应力松弛,且下部的组合段桩径较大,阻碍了芯桩部位土体的下移,使得桩土间的相对位移变化较小。而桩侧摩阻力的产生主要是由桩土之间产生的相对位移引起的,因此,限制了该处侧摩阻力的发挥,在该部位的侧摩阻力具有一定的弱化现象。上组合的侧摩阻力在 0~1.2 m 区间内由上到

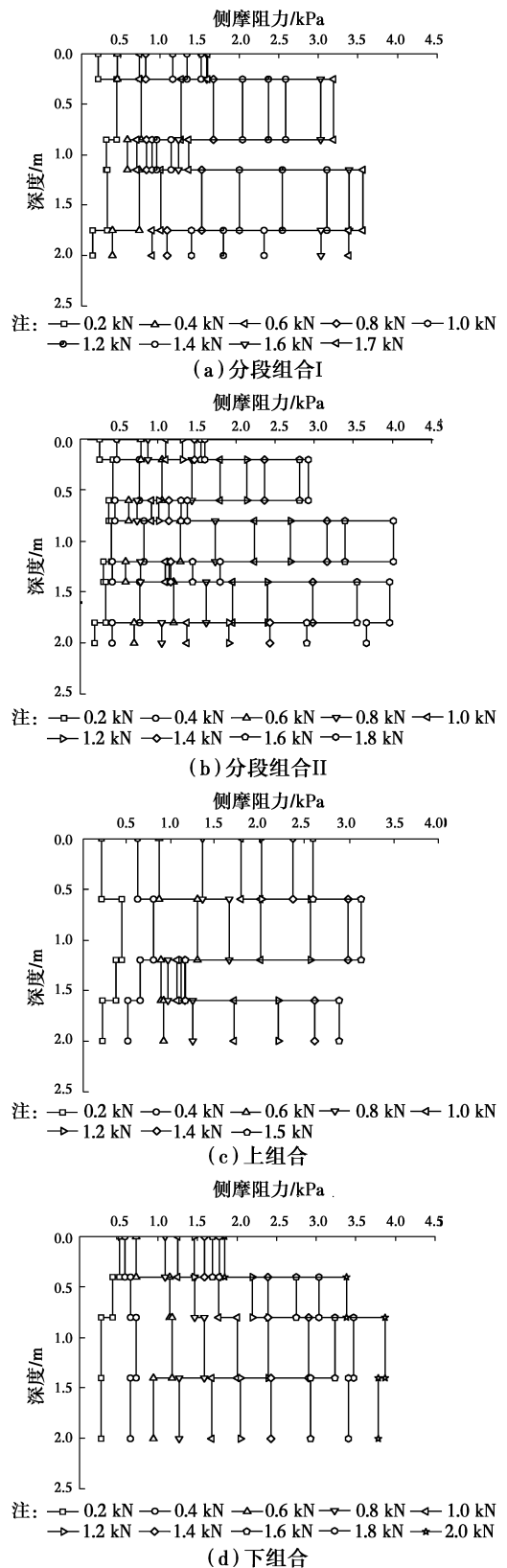


图 8 不同组合形式的 JPP 桩侧摩阻力的分布

Fig. 8 Side resistance distributions of different combinations

下逐渐递增,在 0.6~1.2 m 区间内侧摩阻力达到最大,呈现出在一定区间内逐渐递增的规律。在 1.2~1.6 m 区间内侧摩阻力值达到最小值,这可能是因

为组合段桩径较大,在桩体上抬过程中导致下部一定范围内土体应力松弛,使得下部桩径较小的芯桩与桩周土体间的侧摩阻力变小。在该影响范围之外的1.6~2.0 m区间内侧摩阻力又开始变大。下组合在0~1.4 m区间内侧摩阻力沿着桩身自上之下依次递增,在0.8~1.4 m区间内侧摩阻力达到最大,区间递增规律明显,在1.4~2.0 m区间内呈现小幅度的减小。

2.4 桩侧摩阻力与桩土相对位移

JPP桩作为一种组合桩基,在分析过程中将芯桩与水泥土作为一个整体,在荷载作用下芯桩与水泥土变形协调,在此基础上分析桩侧摩阻力与桩土相对位移的变化关系。

桩土相对位移由式(2)求出。

$$S_j = S - \sum_{i=1}^j l_i (\epsilon_{i+1} + \epsilon_i) / 2 \quad (2)$$

式中: S_j 为桩土相对位移; S 为桩顶上拔位移实测值; l_i 为第*i*断面和*i*+1断面之间的桩长; ϵ_i 和 ϵ_{i+1} 分别为第*i*断面和第*i*+1断面处应变片应变。

参考相关文献^[18-19],对桩侧摩阻力、桩顶位移及桩身变形相关数据进行分析、处理,得到4种桩型的各段桩侧摩阻力与桩土相对位移关系,如图9所示。

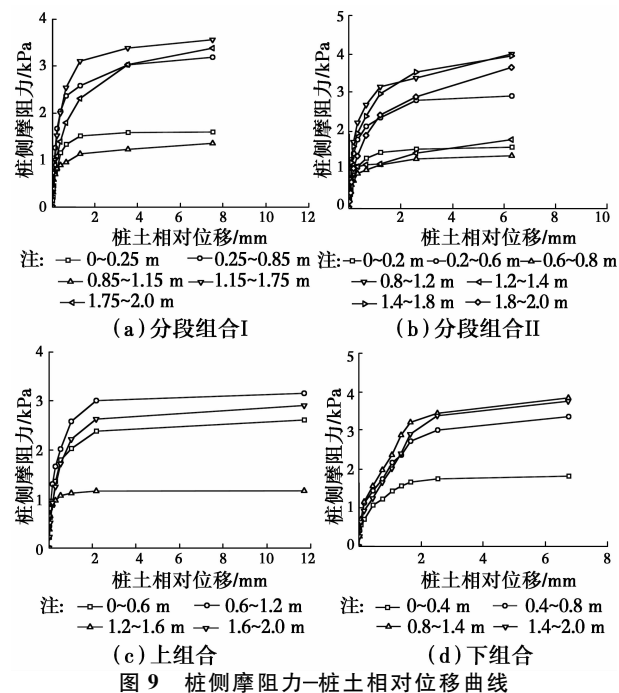


图9 桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线

Fig. 9 Relationships between side resistance and relative displacement for different combinations

从图9可以看出,不同组合形式的JPP桩侧摩阻力在桩土相对位移较小时便增长至较大值,在达到较大值之前,随桩土相对位移的变化曲线均表现出近似线性相关。随着桩土相对位移的继续增加,

不同组合桩型的桩身不同位置处的桩侧摩阻力的变化表现出一定的差异。分段组合I在桩身0~0.25 m区间处,桩土相对位移不足3 mm时,桩侧摩阻力便达到基本不变的状态,趋于稳定极限值1.6 kPa。在0.85~1.15 m区间处,当桩土相对位移达到1.3 mm之后,桩侧摩阻力随桩土相对位移的增加略有变大趋势,但变化较小。在桩身0.25~0.85、1.15~1.75、1.75~2.0 m区间处,桩侧摩阻力在达到较大值后并没有表现出软化现象,而是随着桩土相对位移的增加,桩侧摩阻力值仍有逐渐增大的趋势。分段组合II在桩身0~0.2、0.2~0.6、0.6~0.8 m的区间位置处,桩侧摩阻力在达到极限值后趋于稳定,不再随着桩土相对位移的增加而增大。在桩身0.8~1.2、1.2~1.4、1.4~1.8、1.8~2.0 m区间处,桩侧摩阻力在桩土相对位移达到6 mm以后并没有减弱的迹象,随桩土相对位移的增加,桩身各区间处的桩侧摩阻力表现出不同程度的增加。上组合桩侧摩阻力在达到极限值前,与桩土相对位移的变化曲线近似线性相关,桩侧摩阻力亦在桩土相对位移较小时便达到较大值。随着桩土相对位移的继续增加,桩侧摩阻力基本保持不变,表现出较为理想的弹塑性特征。下组合桩侧摩阻力随桩土相对位移的增加而增加,表现出间断的线性相关。在桩侧摩阻力0~1、1~3 kPa区间上,与之相对应的桩土相对位移曲线表现出线性变化关系。在桩身0~0.4 m区间处,桩土相对位移达到2.5 mm时,桩侧摩阻力便达到基本不变的状态,趋于稳定极限值1.8 kPa。在桩身0.4~0.8、0.8~1.4、1.4~2.0 m区间处,桩侧摩阻力在达到较大值后,随着桩土相对位移的增加,仍表现出不同程度的增加。

通过上述分析可知,4种不同组合形式的JPP桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线均表现出在桩身顶部随着桩土相对位移的增加,桩侧摩阻力比较容易达到极限值,然后趋于稳定。此时,桩身上部的桩侧摩阻力已达极限,桩侧土体发生剪切破坏。在桩身中下部的不同位置处,桩侧摩阻力随着桩土相对位移的增加,在达到较大值后并没有呈现出明显的软化现象,而是随着桩土相对位移的增加,仍有不同程度的增加。说明桩身中下部侧摩阻力并没有完全达到极限值,仍有发挥的潜力。

从图9中可以看出,桩侧摩阻力与桩土相对位移关系,均呈现出近似双曲线分布,可用式(3)近似表示。

$$\tau = s / (a + bs) \quad (3)$$

式中： τ 为桩侧摩阻力； s 为桩土相对位移； a 、 b 为拟合系数。

通过非线性拟合，得出各类型 JPP 桩组合段位置处水泥土与桩周土平均侧摩阻力与相对位移双曲线模型的拟合系数 a 、 b ，如表 1 所示。

表 1 拟合系数表

Table 1 Fitting coefficient for Eq. (3)

	位置/mm	拟合系数 a	拟合系数 b
分段组合 I	0.25~0.85	0.060 96	0.317 66
	1.15~1.75	0.078 18	0.270 06
分段组合 II	0.2~0.6	0.067 45	0.345 4
	0.8~1.2	0.059 78	0.260 31
	1.4~1.8	0.076 54	0.256 63
上组合	0.0~0.4	0.105 74	0.378 23
	0.4~0.8	0.076 84	0.313 12
下组合	0.8~1.4	0.158 66	0.232 73
	1.4~2.0	0.232 81	0.223 13

3 结论

基于自主研发的大型桩基模型试验系统，进行了不同组合形式下 JPP 桩抗拔模型试验，对上拔承载力、桩身轴力、桩侧摩阻力等进行了全面分析，得出如下结论：

1) 在抗拔试验中，不同组合形式对 JPP 桩抗拔承载力影响较大。下组合抗拔承载能力最大，是分段组合 II 的近 1.1 倍，是分段组合 I 的近 1.3 倍，是上组合的近 1.4 倍。并且，同长度组合段所提供的抗拔承载力中下组合也是最大，可见，组合段位于芯桩的下部能充分发挥 JPP 桩承受竖向上拔荷载的能力。

2) JPP 桩不同位置处的侧摩阻力随桩土相对位移的增加而逐渐变大，呈现双曲线形，并在桩土相对位移较小时，桩侧摩阻力便达到较大值。砂土中 JPP 桩侧摩阻力达到极限值所需要的位移在 2 mm 左右，JPP 桩上部的侧摩阻力较容易达到极限值，然后趋于稳定。在 JPP 桩中下部不同位置处，桩侧摩阻力随桩土相对位移的增加仍有递增的趋势，桩侧摩阻力并没有完全达到极限值，仍有发挥的潜力。

3) 上组合桩侧摩阻力发挥潜力较小，下组合发挥充分，在实际工程中 JPP 桩宜将组合段设置到桩身中下部，充分发挥 JPP 桩侧摩阻力，提高抗拔承载力。

参考文献：

[1] 黄广龙, 方乾, 苏荣臻. 软土地基微型桩抗拔试验研究

[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1788-1793.

HUANG G L, FANG Q, SU R Z. Field test on uplift behavior of micropiles in soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1788-1793. (in Chinese)

[2] 雍君, 陆晓敏, 刘汉龙. X 形混凝土桩抗拔特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3430-3434.

YONG J, LU X M, LIU H L. Model test study of anti-pulling property of X-shaped concrete pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3430-3434. (in Chinese)

[3] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩抗拔承载性能试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 570-576.

ZHOU J J, GONG X N, WANG K H, et al. Behavior of the static drill rooted nodular piles under tension [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 570-576. (in Chinese)

[4] 王卫东, 吴江斌, 王向军. 基于极限荷载试验的扩底抗拔桩承载变形特性的分析 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1330-1338.

WANG W D, WU J B, WANG X J. Ultimate load tests on bearing and deformation behavior of uplift piles with enlarged base [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1330-1338. (in Chinese)

[5] 邵光辉, 赵志峰, 吴正余. 托底抗拔桩承载特性的模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1140-1146.

SHAO G H, ZHAO Z F, WU Z Y. Model tests on shaft capacity properties of bottom uplift pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1140-1146. (in Chinese)

[6] GAAVER K E. Uplift capacity of single piles and pile groups embedded in cohesionless soil [J]. Alexandria Engineering Journal, 2013, 52(3): 365-372.

[7] REDDY K M, AYOTHIRAMAN R. Ayothiraman, experimental studies on behavior of single pile under combined uplift and lateral loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(8): 07016016.

[8] NASR A M A. Uplift behavior of vertical piles embedded in oil-contaminated sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(1): 162-174

[9] KHATRI V N, KUMAR J. Uplift capacity of axially loaded piles in clays [J]. International Journal of Geomechanics, 2011, 11(1): 23-28.

[10] XU H Y, CHEN L Z, DENG J L. Uplift tests of jet mixing anchor pile [J]. Soils and Foundations, 2014,

- 54(2): 168-175.
- [11] 任连伟,刘汉龙,雷玉华.高喷插芯组合桩技术及其应用[J].岩土工程学报,2008,30(Sup1):518-522.
REN L W, LIU H L, LEI Y H. Technology and application of jet grouting soil-cement-pile strengthened pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(Sup1):518-522. (in Chinese)
- [12] 刘汉龙,任连伟,郑浩,等.高喷插芯组合桩荷载传递机制足尺模型试验研究[J].岩土力学,2010,31(5):1395-1401.
LIU H L, REN L W, ZHENG H, et al. Full-scale model test on load transfer mechanism for jet grouting soil-cement-pile strengthened pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1395-1401. (in Chinese)
- [13] 郑浩,刘汉龙,雷玉华,等.高喷插芯组合桩水平承载特性大尺寸模型试验研究[J].岩土力学,2011,32(1):217-223.
ZHENG H, LIU H L, LEI Y H, et al. Large-scale model test analysis of behaviors of jet grouting soil-cement-pile strengthened pile under lateral load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 217-223. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国建设部.建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008 [S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
The People's Republic of China Ministry of Construction. Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [16] VOOTTIPRUEX P, BERGADO D T, SUKSAWAT T, et al. Behavior and simulation of deep cement mixing (DCM) and stiffened deep cement mixing (SDCM) piles under full scale loading [J]. Soils & Foundations, 2011, 51(2): 307-320.
- [17] 陈小强,赵春风,甘爱明.砂土中抗拔桩与抗压桩模型试验研究[J].岩土力学,2011,32(3):738-744.
CHEN X Q, ZHAO C F, GAN A M. Study of model test of uplift and compression piles in sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 738-744. (in Chinese)
- [18] 李永辉,王卫东,黄茂松,等.超长灌注桩桩-土界面剪切试验研究[J].岩土力学,2015,36(7):1981-1988.
LI Y H, WANG W D, HUANG M S, et al. Experimental research on pile-soil interface shear behaviors of super-long bored pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1981-1988. (in Chinese)
- [19] 钱建固,陈宏伟,贾鹏,等.注浆成型螺纹桩接触面特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1744-1749.
QIAN J G, CHEN H W JIA P, et al. Experimental study of mechanical behaviours of grouting-screw pile interface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1744-1749. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)