

# 大承载力端承摩擦桩承载性状试验研究

郅彬<sup>1</sup>, 任毅龙<sup>1</sup>, 周宁<sup>2</sup>, 武李和乐<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 宁夏世丰实业有限公司, 宁夏 银川 750000)

**摘要:** 以银川某超高层项目为背景, 采用现场静载荷试验方法, 探究端承摩擦桩在高应力作用下承载性状, 结果表明: 桩长 45 m、直径 1 m 的大承载力端承摩擦桩在该地区极限承载力可达 30 000 kN。应力分级加载下侧阻沿桩身长度发挥曲线近似呈抛物线状; 侧阻最佳发挥范围约为桩身 2/3 段; 单桩侧阻的发挥程度与土层性质相关, 该地区土层摩阻力较规范建议值提高 1.81~2.39 倍。大承载力端承摩擦桩承载机制为侧阻初期承担全部上部荷载, 随着应力增大, 端阻逐渐发挥, 而侧阻发挥至到极限值后, 由端阻承担上部剩余荷载直至极限, 即端阻与侧阻共同承担上部荷载, 达到极限承载力时侧阻作用占比 74%, 端阻作用占比 26%。上述结论为日后该地区工程建设乃至大承载力端承摩擦桩桩基研究提供参考与帮助。

**关键词:** 端承摩擦桩; 单桩极限承载力; 桩侧摩阻力; 端阻

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0669-07

## Study on the bearing behavior of friction bearing piles with large bearing capacity

ZHI Bin<sup>1</sup>, REN Yilong<sup>1</sup>, ZHOU Ning<sup>2</sup>, WULI Hele<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Ningxia Shi Feng Industrial Co. LTD., Yinchuan 750000, China)

**Abstract:** Based on a super high-rise project in Yinchuan, the static load test method was used to investigate the bearing behavior of the end-bearing friction pile under high stress. Results show that the bearing capacity of the large bearing capacity end bearing friction pile with a length of 45m and a diameter of 1m is in the region. The force can reach 30,000 kN. Under the stress grading loading, the side resistance along the length of the pile body is approximately parabolic; the best range of side resistance is about 2/3 of the pile body; and the degree of lateral resistance of the single pile is related to the nature of the soil layer. The resistance is 1.81 to 2.39 times higher than the recommended value. The bearing capacity of the bearing pile with large bearing capacity is assumed to bear all the upper load at the initial stage of the side resistance. As the stress increases, the end resistance gradually take place, and after the side resistance reaches the limit value, the upper residual load is taken up to the limit by the end resistance, ie the end resistance and the side resistance may share the upper load. When the ultimate bearing capacity is reached, the side resistance accounts for 74%, and the end resistance accounts for 26%. The above conclusions provide reference and help both for the future research of the project construction and even for the research on the large bearing capacity end bearing friction pile foundation.

**Key words:** end bearing friction pile; ultimate bearing capacity of single pile; side friction of pile; friction resistance of pile end

桩基在受荷条件下与桩周土体产生摩擦接触并相互作用, 桩侧摩阻力与桩端摩阻力共同承担上部荷载, 可有效的控制地基沉降变形, 提高基础承载力。特别是随着超高层建筑的广泛普及利用, 工程常建设在软土地区, 土层承载力不高, 沉降变形过大或者土质无法承担建筑物施加的过大荷载时, 桩基能够支撑于较硬的持力层, 具有高承载力和刚度, 发挥其良好的作用。目前国内对桩基的采用已经较为普遍, 也取得丰硕的研究

成果。我国 20 世纪 70 年代利用桩身内部安装测量元件来测土层和桩身轴力分析桩基荷载传递的机理。近年来, 王腾<sup>[1]</sup>建立了荷载传递函数模型, 利用函数法求出荷载-沉降的解析解; 曹卫平<sup>[2]</sup>改进了桩土荷载传递模型; 钟闻华<sup>[3]</sup>通过超长端承摩擦桩对比分析侧阻沿桩身长度发挥与规范值的区别; 李永辉<sup>[4]</sup>对超长灌注桩后压浆处理后计算出桩侧摩阻力的大小。唐俊巍<sup>[5]</sup>结合现场试验研究了桩侧摩阻力在桩端土部分发挥状况。以上成果使桩基理

收稿日期: 2018-11-08

修改稿日期: 2019-09-20

基金项目: 陕西省重点研发计划基金项目(2018SF-397)

第一作者: 郅彬(1962—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构性黄土研究及地基处理方面的研究。E-mail: 1368234950@qq.com

论研究得到丰富的同时对实际工程产生巨大影响,加快了现代城市建设步伐。然而目前尚缺乏针对端承摩擦桩的专项研究,特别是在高应力条件下的性能发挥,同时结合实际工程的案例也较少。譬如:高应力作用下端承摩擦桩的极限承载力到底可以达到多少;高应力条件下端承摩擦桩的端阻与侧阻如何发挥作用,且二者的承担比例如何;场地的土层对桩基侧阻的发挥有何影响;大承载力端承摩擦桩摩阻力的桩身最佳发挥范围是多少?上述问题目前尚未得到解决。然而随着超高层建筑的普及,特别是高应力条件下,既有理论已无法满足现阶段的工程实践,探究大承载力端承摩擦桩在高应力作用下承载机制为解决实际工程问题的重要途径之一。本文依托银川市某超高层项目静载荷试验(工程为该地区第一高建筑且具备最大的应力作用),探究大承载力端承摩擦桩在该地区最高应力条件下其极限承载能力的同时深入研究高应力下桩体的承载机制及变形性状。该项研究在当地具有一定代表意义,所得结论可为日后工程生产或课题研究提供借鉴。

## 1 静载荷试验

### 1.1 工程地质概况

拟建场位于银川市阅海湾中央商务区,项目包括北塔楼,北裙房,南塔楼,南裙房。根据地质勘报告,地层分为以下11层:①杂填土,黄褐色,稍湿~湿,土质不均,以粉质粘土为主,含砖瓦碎块、砂颗粒等,少量植物根系。经过夯实,局部见层状。层厚0.20~1.30 m。②粉粘,褐黄色,局部见灰黑色,可塑~硬塑,稍湿~湿。土质较均,见针状孔隙,见氧化铁条纹,属中压缩性土,层厚1.10~6.00 m。③粉砂,颗粒矿物成分主要为石英、长石,可见云母,级配不良,分选较好,实测标准贯入试验锤击数平均值28,厚1.70~6.40 m。④粉细砂,中密~密实,饱和,级配不良,层厚3.40~9.10 m。⑤粉土,褐黄色、灰黄色,可塑,密实,饱和。土质均匀,见云母碎片,含少量砂颗粒。压缩系数平均值 $\bar{a}_{1-2}=0.12 \text{ MPa}^{-1}$ ,属中偏低压缩性土,层厚0.30~3.40 m。⑥细砂,灰黄色,中密~密实,饱和,颗粒矿物成分主要为石英、长石,可见云母,级配不良,分选较好,实测标准贯入试验锤击数平均值73击,层厚5.10~8.80 m。⑦细砂,黄灰色,浅灰色,密实,饱和,层厚12.00~16.80 m。⑧粉粘,土质均匀,属中压缩性土,层厚3.80~8.50 m。

⑨细砂,灰黄色,中密~密实,饱和,级配不良,厚度6.10~18.00 m。⑩粉粘,灰黄色,可透,饱和,土质较好,含铁质条纹,厚度0.70~8.30 m;⑪细砂,黄灰色、浅灰色,密实,饱和。颗粒矿物成分主要为石英、长石,可见云母,级配不良,分选较好,实测标准贯入试验锤击数平均值151击。

综合考虑超高层建筑物基础埋深和荷载情况,⑪层细砂强度高、厚度大、层位稳定、无土夹层,其下分布的砂土密实,该层是良好的桩端持力层。

### 1.2 试验概述

试验采用锚桩梁反力装置,依据工况选取3根试桩进行静载荷试验,编号分别为S1, S2, S3。采用强度等级为C50的混凝土制备试桩,直径为1.048 m, S1桩单桩长45.38 m; S2桩单桩长45.06 m; S3桩单桩长44.78 m。桩端持力层控制在⑪细砂层。试验选用慢速维持加载法,待测试桩周围均布4根锚桩,锚桩提供反力,加荷设备选用油压千斤顶,观测设备为精确度0.01 mm的大量程百表。根据设计计算,每根试桩预加载值32 500 kN。首级加载5 000 kN,后每级加荷2 500 kN至32 500 kN。加载装置如图1所示,现场试验如图2。

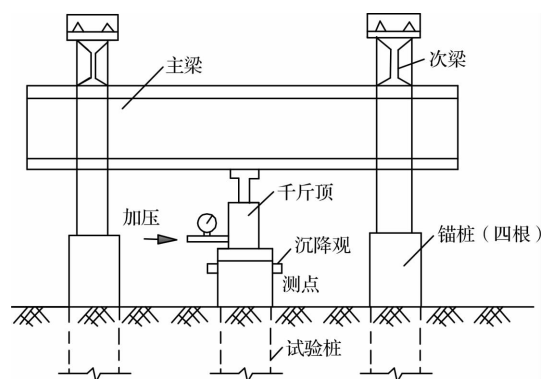


图1 静载荷试验加载装置图

Fig. 1 Static load test loading device



图2 现场试验图

Fig. 2 Field test chart

### 1.3 试验方法

进行静载荷试验同时于桩身方向每1米设置一个量测断面,各断面上均布3个振弦式钢筋应力

计,呈 $120^\circ$ 分布,如图3。

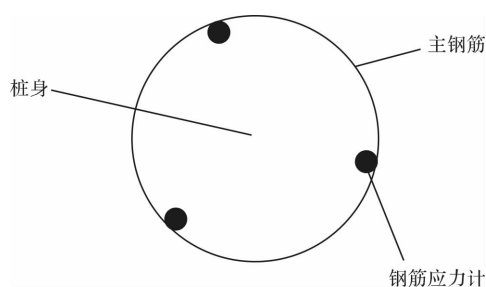


图3 应力计分布图

Fig. 3 Stress meter distribution map

(1)加载: 0 kN 开始, 第二级加载 5 000 kN, 后每级加荷 2 500 kN 至 32 500 kN. 每级加载后每隔约 15 min 测读一次沉降数据, 1 h 后隔 30 min 再读一次. (沉降相对稳定条件: 每 1 小时桩顶沉降量不超过 0.1 mm 且连续出现 2 次)

(2)卸荷: 每级卸荷值取加载时分级荷载量的 2 倍. 每级卸荷维持 1 h 同时分别按间隔 15 min 测读一次残余沉降, 2 次之后每隔 30 分钟读数一次, 即可卸下一级.

(3)沿 S1, S2, S3 桩身布设 45 个断面的钢筋应力计(各断面间隔 1 m), 进行桩周土阻力试验, 利用频率计测量初始频率值. 于分级加载后桩体稳定状态下读出相应钢筋应力计频率值.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 大承载力端承摩擦桩荷载-沉降曲线分析

静载荷试验结果绘制 Q-S 曲线如图 4 所示.

由图 4 可知, 当初期荷载较小的时候, S1 桩曲线基本呈线性增大, 曲线趋势较为稳定; 在桩顶荷载从 30 000 kN 达到 32 500 kN 时, 出现了明显的拐点特征, 沉降发生突变, 最大沉降量达到 61.67 mm,

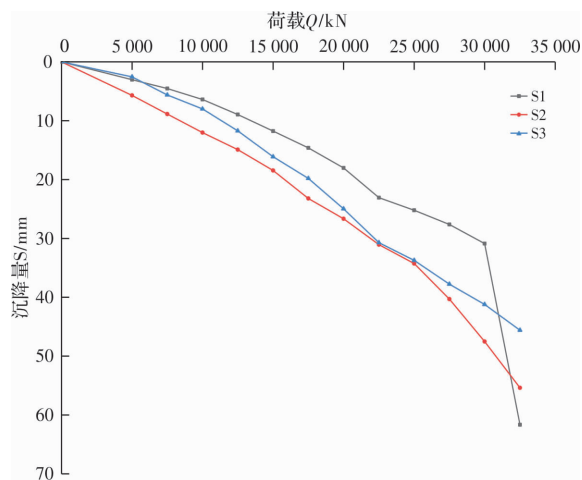


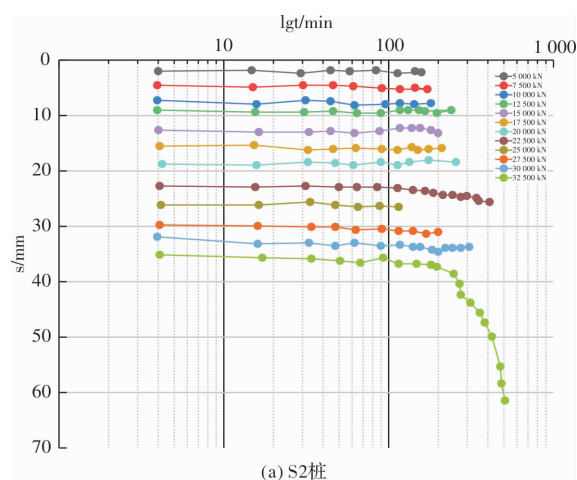
图4 静载荷试验 Q-S 曲线

Fig. 4 Q-S curve of under static load test

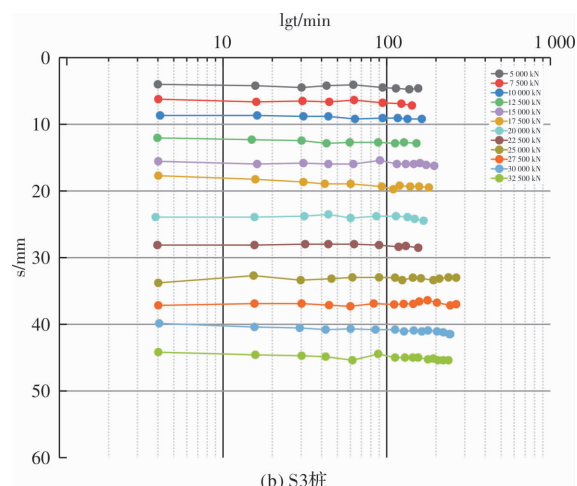
桩体发生破坏, 对应极限承载力值取 30 000 kN.

S2, S3 桩前期荷载量较小时, 各级加载量下的曲线趋势保持平稳, 随着荷载的不断增大, 曲线逐渐呈下滑趋势, 但总体依旧无明显变化, 需借助 S-lgt 图分析.

图 5(a)中 S2 桩加载至 32 500 kN 时, 曲线尾部出现弯曲, 考虑到试验设计最大加载量为 32 500 kN, 故 S2 桩的极限承载力取上一级加载值, 即 30 000 kN; 图(b)中 S3 桩加载曲线保持平稳无明显变化, 依据《建筑桩基技术规范》<sup>[6]</sup>判定 S3 桩的最大加载量作为极限承载力为 32 500 kN. 整理静载荷实验数据, 依据规范确定该地区 45 m 大承载力端承摩擦桩极限承载力为 30 000 kN.



(a) S2桩



(b) S3桩

图5 S-lgt 曲线图

Fig. 5 S-lgt graph

### 2.2 桩身轴力分析

利用各断面处钢筋应力计的实测应变值计算得到各级荷载情况下各量测断面的桩身轴力如图 6.

(1)由图 6 可知, 前期加载时轴力值沿桩身浮动不大, 视为相对线性状, 桩侧摩阻力未完全发挥作用. 随荷载值不断增大, 轴力分布图后面阶段呈现曲线状, 桩侧摩阻力开始逐渐发挥至极限.

同时加载量增大, S1、S2、S3 桩端存在轴力, 表明桩侧阻充分发挥同时端阻承担上部剩余荷载, 符合端承型摩擦桩特点。

(2) 3 根桩轴力曲线沿桩身方向减弱趋势相同, 桩身中下部为侧阻最佳发挥段<sup>[7]</sup>, 由轴力图可知, 各轴力曲线由上至下逐渐衰减, 深度在 25~35 m 处, 约桩身 2/3 段范围衰减速率最大, 即桩侧摩阻力发挥性最佳, 处于峰值范围, 即最佳发挥段。这是由于桩身与桩周土体作用, 荷载较小时侧摩阻力发挥不明显, 随着荷载的增大, 侧摩阻力发挥至极限, 且中下部土层相较于上部土层性质不同, 摩擦阻力更大, 桩身中下部在大荷载下侧摩阻力发挥更明显, 对应轴力递减越剧烈。

(3) 上部荷载达 7 500~10 000 kN 间开始产生桩端总阻力。由图 6 可得, 荷载达 5 000 kN 时 S1、S2、S3 桩 40 m 处轴力为 0; 7 500 kN 时 3 根桩 42 m 处轴力为 0, 说明前期上部荷载全部由侧阻承担, 无传递到桩端, 端阻不发挥。

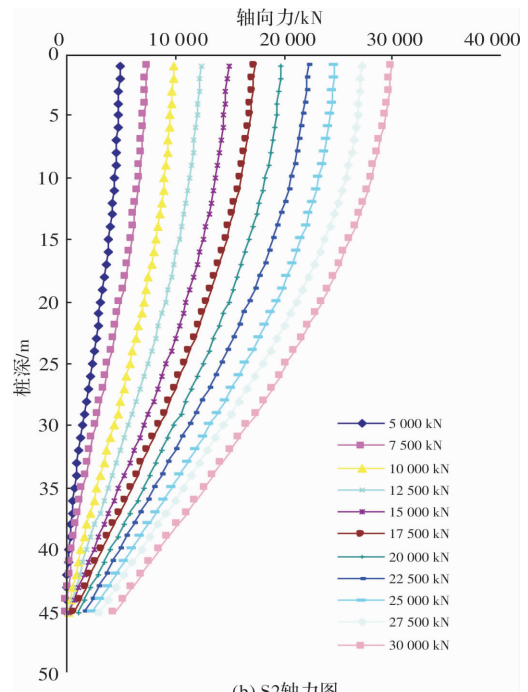
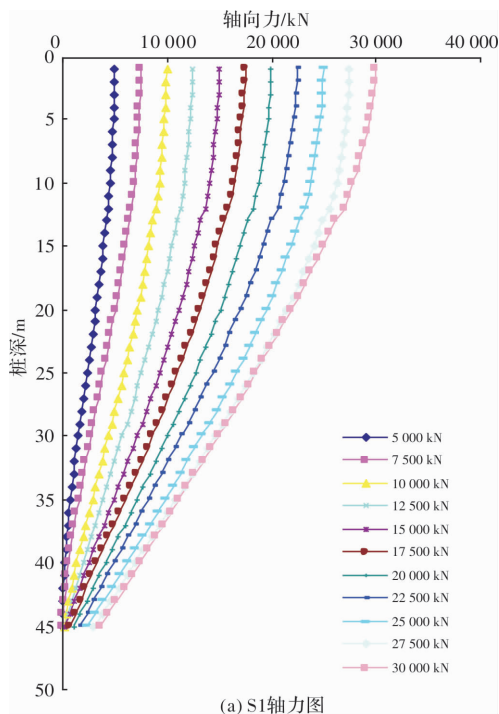
### 2.3 桩侧摩阻力分析

桩侧摩阻力由桩体轴力值推算得出, 计算式如下<sup>[8]</sup>:

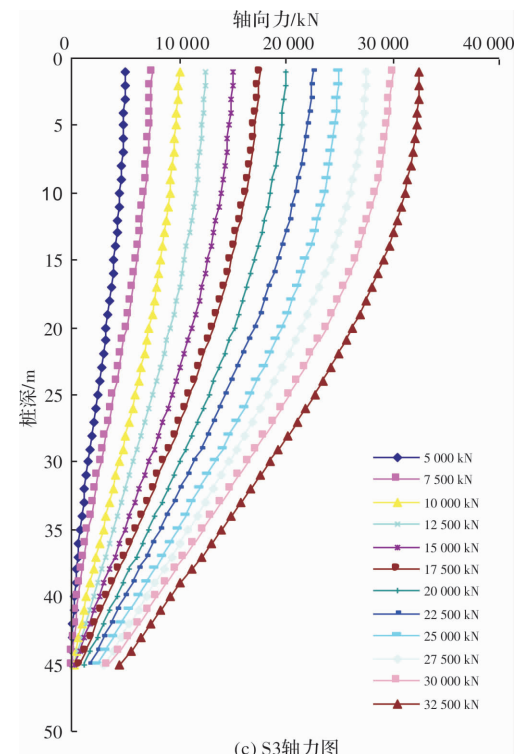
$$f_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{(i+1)j}}{A_i} \quad (1)$$

式中:  $P_{ij}$  为第  $i$  量测断面在  $j$  级荷载加载量下的桩身轴力值/kN;  $A$  为第  $i$  量测断面与第  $i+1$  断面间桩身面积大小/ $\text{mm}^2$ 。

选取加载量为 10 000 kN、20 000 kN、30 000 kN 的数据计算得到 S1、S2、S3 桩体侧摩阻力沿



(b) S2轴力图



(c) S3轴力图

图 6 桩身轴力随桩长变化图

Fig. 6 Pile body axial force with pile depth variation  
桩身长度分布, 如图 7。

分析桩侧摩阻力分布规律, 可得到以下结论:

(1) 各级荷载下大承载力摩擦桩侧阻沿桩身长度发挥曲线呈抛物线状。桩顶荷载不断增大, 导致桩身压缩变形, 桩身与土体发生相对位移产生剪切力即侧摩阻力。桩侧摩阻力随上部荷载增大而增加, 逐渐至完全发挥作用, 当其达到一定极限时侧阻保持平稳后最终出现衰减, 侧阻沿桩身



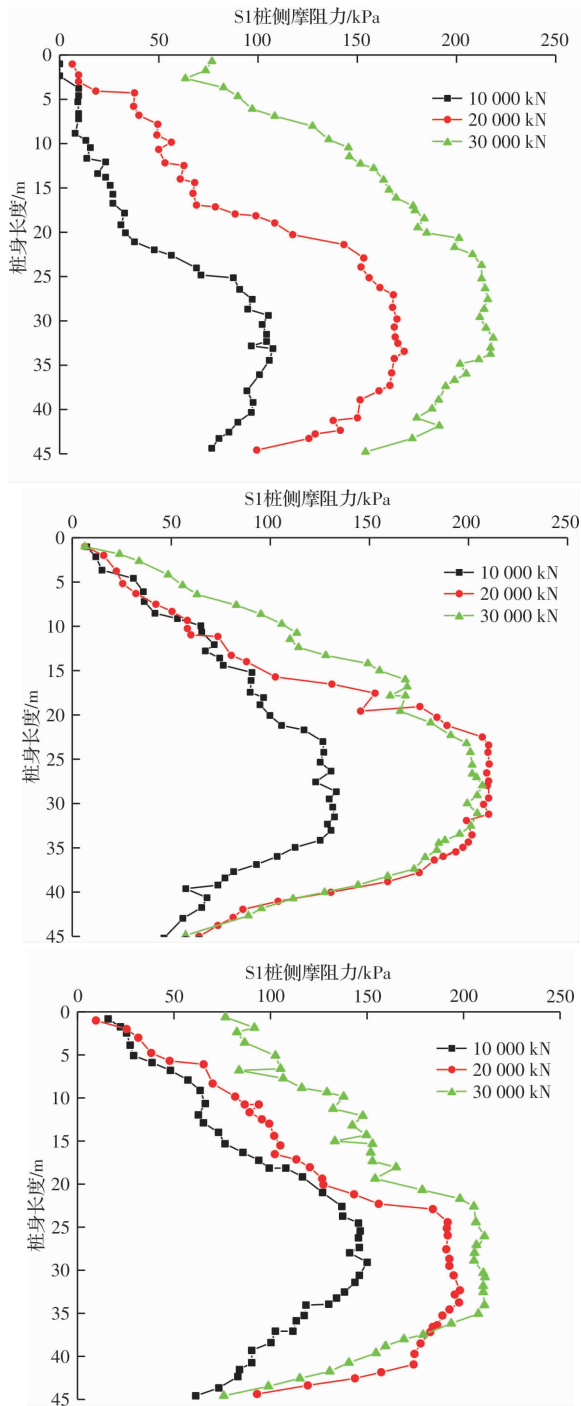


图 7 桩侧摩阻力沿桩身分布图

Fig. 7 Pile side friction resistance along the pile distribution map

长度作用曲线近似于抛物线状。

(2) 桩侧摩阻力先发挥作用至极限后端阻承担上部荷载。从图 7 中得 3 根试桩侧摩阻力达极限后递减, 是由后期桩端阻力发挥辅助支撑作用, 桩土间相对位移达最大值后逐渐减小, 符合端承型摩擦桩特性。

(3) 由图 7 的变化曲线更明显的观测出桩体侧摩阻力发挥趋势, 在桩身长度范围约 25~35 m 为曲线最凸出部位, 即侧摩阻力最佳发挥段, 验证

上文轴力分析所得结论, 即桩身 2/3 段。

(4) 对应图 7 中一定深度范围内曲线斜率不同, 即不同土层摩阻力发挥程度相异。桩侧摩阻力与土层属性具有相关性, 土层与桩身接触摩擦属性<sup>[9]</sup>不同导致各土层侧摩阻力发挥具有较大的差异, 存在摩阻力数值变化。

(5) 根据试验得到的桩身侧摩阻力, 划分地层并计算出最大荷载作用下各土层范围内摩阻力平均值即为该土层极限侧摩阻力值: ②粉质粘土 101.5 kPa, ③粉砂 103.9 kPa, ④细粉砂 138.3 kPa, ⑤粉土 146.3 kPa, ⑥细砂 205.4 kPa, ⑧粉粘 210.1 kPa, ⑨细砂 211.8 kPa, ⑩粉粘 200.4 kPa。

(6) 该地区土层侧摩阻力提高倍数。

表 1 土层侧摩阻力值  
Tab. 1 Soil friction resistance values

| 土层  | 土层厚度/m      | 实测极限侧摩阻力/kPa | 极限侧摩阻力规范建议值/kPa |
|-----|-------------|--------------|-----------------|
| 粉粘  | 1.10~6.00   | 101.5        | 72              |
| 粉砂  | 1.70~6.40   | 103.9        | 60              |
| 粉细砂 | 3.40~9.10   | 138.3        | 76              |
| 粉土  | 0.30~3.40   | 146.3        | 72              |
| 细砂  | 5.10~8.80   | 205.4        | 80              |
| 细砂  | 12.00~16.80 | 210.1        | 95              |
| 粉粘  | 3.80~8.50   | 208.8        | 90              |
| 细砂  | 6.10~18.00  | 211.8        | 92              |
| 粉粘  | 0.70~8.30   | 200.4        | 80              |

通过对桩侧摩阻力沿桩身长度变化的数据采取无量纲化处理, 即实测土层桩侧摩阻力与规范土层建议侧摩阻力值之比, 可认为是土层侧摩阻力较规范值提高倍数<sup>[3]</sup>。由表 1 可得极限侧摩阻力较规范均表现为提高, 约 1.41~2.57 倍, 平均值 2.10。桩侧摩阻力沿桩身长度变化曲线近似数理统计<sup>[10]</sup>中正态分布曲线, 故将其假定为正态分布。

进一步也可认为各土层侧摩阻力提高倍数也符合正态分布, 为得到提高数的可信程度, 估计出一个真实可靠范围, 即置信区间。采用 t 分布法, 根据置信区间计算式(2):

$$\bar{x} \pm \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \quad (2)$$

拟定  $\alpha = 0.05$ , 土层样本数  $n = 9$ , 置信水平为  $1 - \alpha = 0.95$ , 则  $\frac{\alpha}{2} = 0.025$ ,  $n - 1 = 8$ ,  $t_{0.025}(8) = 2.30$ , 标准差  $S = 0.38$ , 代入计算得 95% 的置信区间  $(2.10 \pm 0.29)$ , 故可建议该地区

土层侧摩阻力较规范提高数为 1.81~2.39 倍。

#### 2.4 桩端总阻力分析

通过轴力图可计算得桩端总阻力。

(1)分析得到桩端总阻力与沉降关系曲线如图 8。

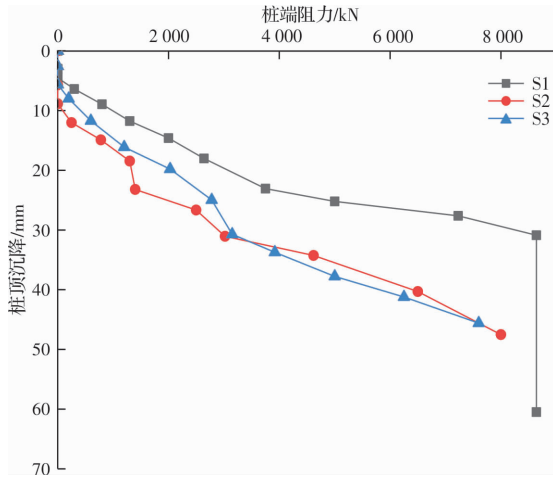


图 8 桩端阻力随沉降变化曲线

Fig. 8 Pile end resistance with settlement curve

3 根试桩初始产生桩顶位移时, 桩端阻力均为 0 即端阻未发挥作用, 说明桩侧摩阻力先发挥, 承担全部上部荷载, 端阻后发挥, 且端阻随桩顶位移增加而明显增大. S1 桩顶沉降达 6.4 mm 时端阻作用, 图 8 中 S1 桩端阻力发挥最为迅速, 桩端持力层明显发挥承载作用, 桩顶沉降达 29 mm 后产生突变即荷载超过桩身极限承载力后桩体破坏, 端阻发挥到极限, 其值为 8 640 kN; S2, S3 试桩桩端阻力随桩顶位移增大发挥较为缓慢, 仍为桩侧摩阻力承担大部分上部荷载, 端阻占总承载力少部。

(2)顶部荷载与端阻增量关系见图 9。

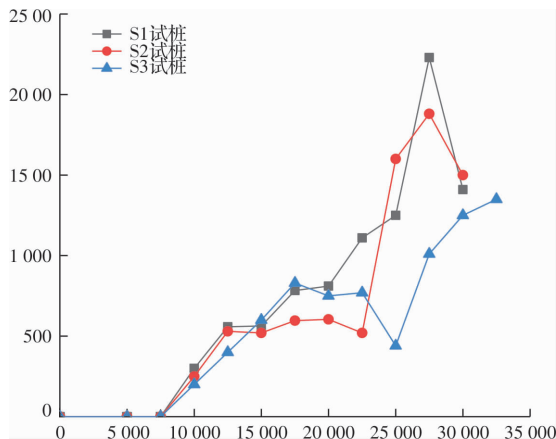


图 9 端阻增量随顶部荷载变化曲线

Fig. 9 End resistance increment with top load curve

端阻作用随顶部荷载增加而增大. 3 根试桩端阻增量在顶部加荷 7 500 kN 前都为 0, 端阻无作用. 之后产生变化, 初期 3 根试桩增量曲线斜率几

乎相同且增幅不大, 说明在上部荷载较小时桩侧摩阻力发挥主要承载作用, 桩底土层的阻力对承载机制影响不大. 随着荷载的增大, 三曲线随之增幅, 可以明显看出 S1 桩端阻增幅迅速, 一直保持增长趋势, 端阻发挥作用明显; S2 桩端阻增值曲线在荷载达 12 500~22 500 kN 间保持平稳, 随后出现陡升, 可认为是端阻充分发挥; S3 桩曲线先逐步上升后保持平稳, 在荷载为 25 000 kN 时出现陡升, 端阻作用明显。

(3)依据上述极限承载力结果, 得到 3 根试桩达到极限承载力时, 桩端阻力与桩侧阻力承载发挥比. 由表 2 可知, S1 桩达到极限承载力时桩侧摩阻力发挥 71%, 端阻发挥 29%; S2 桩侧阻发挥 73%, 端阻发挥占比 27%<sup>[11]</sup>; S3 桩达承载力特征值时, 侧摩阻力与端阻分别发挥 77% 和 23%. 由此表明, 3 根试桩均符合端承型摩擦桩特性, 在达极限承载力时, 平均由桩侧摩阻力承担 74% 的上部荷载同时端阻力发挥作用, 承担剩余荷载 8 080 kN, 比重约为 26%。

表 2 极限承载力端阻侧阻发挥

Tab. 2 Ultimate bearing capacity end resistance side resistance

| 桩号  | 极限承载力/kN | 桩侧阻力/kN | 侧阻比例/% | 桩端阻力/kN | 端阻比例/% |
|-----|----------|---------|--------|---------|--------|
| S1  | 30 000   | 21 360  | 71     | 8 640   | 29     |
| S2  | 30 000   | 22 000  | 73     | 8 000   | 27     |
| S3  | 32 500   | 24 900  | 77     | 7 600   | 23     |
| 平均值 | 30 833   | 22 753  | 74     | 8 080   | 26     |

### 3 结论

(1)依据现场静载荷试验, 该地区桩长 45 m 直径 1 m 的大承载力端承摩擦桩极限承载力可达 30 000 kN。

(2)大承载力端承摩擦桩侧阻发挥与土层性质相关, 该地区土层摩阻力较规范值均提高, 建议土层摩阻力提高倍数采用 1.81~2.39。

(3)大承载力端承摩擦桩在分级荷载下侧阻沿桩身长度发挥曲线近似呈抛物线状; 侧阻最佳发挥范围约为桩身 2/3 段。

(4)在高应力作用下, 端承摩擦桩承载机制如下: 前期桩侧摩阻力先发挥, 完全承担应力作用, 随着荷载增大, 端阻逐渐发挥, 侧摩阻力先发挥至极限后端阻承担剩余上部荷载. 最终达到单桩极限承载力时端阻承担作用占比 26%, 侧阻起到主导作用, 占比 74%。

## 参考文献 References

- [1] 王腾,卢淑芹,陈金霞,等. 基于多段荷载传递法的桩基荷载-沉降解析解[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(3):442-448.  
WANG Teng, LU Shuqin, CHEN Jinxia, et al. Analysis of pile foundation load-settlement based on multi-stage load transfer method[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2015, 31(3):442-448.
- [2] 曹卫平. 桩土界面荷载传递双曲线模型的改进及其应用[J]. 岩土力学与工程学报,2009,28(1):144-151.  
CAO Weiping. Improvement and application of hyperbolic model for load transfer in pile-soil interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1):144-151.
- [3] 钟闻华,石名磊,刘松玉. 超长桩荷载传递性状研究[J]. 岩土力学,2005(2):307-310,318.  
ZHONG Wenhua, SHI Minglei, LIU Songyu. Study on load transfer behavior of super long piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(2):307-310, 318.
- [4] 李永辉,王卫东,吴江斌. 桩端后注浆超长灌注桩桩侧极限摩阻力计算方法[J]. 岩土力学,2015,36(S1):382-386.  
LI Yonghui, WANG Weidong, WU Jiangbin. Calculation method of ultimate frictional resistance of piles with post-grouting super-long bored piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1):382-386.
- [5] 唐俊巍,赵春风,赵程. 桩端土对桩侧摩阻力影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(S2):454-459.  
TANG Junxi, ZHAO Chunfeng, ZHAO Cheng. Experimental study on the influence of pile end soil on pile side friction resistance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2):454-459.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范:JGJ 94-2008 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specifications for building pile foundation: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008.
- [7] 王陶,马晔. 超长钻孔桩竖向承载性状的试验研究[J]. 岩土力学,2005(7):1053-1057.  
WANG Tao, MA ye. Experimental study on vertical bearing behavior of super long bored piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(7):1053-1057.
- [8] 杜建华,于全胜. 结合消阻护筒的试验桩桩侧摩阻力和桩端阻力试验研究[J]. 隧道建设,2017,37(11):1387-1395.  
DU Jianhua, YU Quansheng. Experimental study on side friction and pile end resistance of test piles combined with resistance blocking[J]. Tunnel Construc-
- tion, 2017, 37(11):1387-1395.
- [9] 邹东峰. 北京超长灌注桩单桩承载特性研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(S1):388-392.  
ZOU Dongfeng. Study on bearing characteristics of single super-long piles in Beijing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1):388-392.
- [10] 龙永红. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2004,2.  
LONG Yonghong. Probability theory and mathematical statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004, 2.
- [11] 陈福江,马建林,朱林. 高速铁路桥梁桩侧摩阻力与桩端阻力分析[J]. 铁道建筑,2013(6):41-43.  
CHEN Fujiang, MA Jianlin, ZHU Lin. Analysis of side friction and pile end resistance of high-speed railway bridge piles[J]. Railway Construction, 2013(6):41-43.
- [12] ZHAO Zihao, KOURETZIS George, SLOAN Scott, et al. Ultimate lateral resistance of tripod pile foundation in clay[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 92:220-228.
- [13] 罗升彩,罗华. 桩基静载试验及承载特性分析[J]. 施工技术,2018,47(9):18-21,48.  
LUO Shengcai, LUO Hua. Static load test and bearing characteristics analysis of pile foundation[J]. Construction Technology, 2018, 47(9):18-21, 48.
- [14] RUBEN D. Tovar-Valencia, Ayda Galvis-Castro, et al. Effect of surface roughness on the shaft resistance of displacement model piles in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(4):69-76.
- [15] Saeed Yazdani, Sam Helwany, Guney Olgun. Investigation of thermal loading effects on shaft resistance of energy pile using laboratory-scale model[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(9):79-85.
- [16] Ai shkari. A simple critical state interface model and its application in prediction of shaft resistance of non-displacement piles in sand [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 95:40-43.
- [17] 吴鸣,彭雅洁,颜爽. 层状地基中大直径超长群桩的承载特性研究[J]. 汕头大学学报(自然科学版),2018,33(3):62-71.  
WU Ming, PENG Yajie, YAN Shuang. Study on bearing characteristics of large diameter super long piles in layered soil[J]. Journal of Shantou University (Natural Science Edition), 2018, 33(3):62-71.
- [18] YANG Haibin, Shazim Ali Memon, BAO Xiaohua et al. Design and preparation of carbon based composite phase change material for energy piles[J]. Materials, 2017, 10(4):391-400.

(编辑 沈 波)