

# 大直径超长混凝土灌注桩受力特性试验研究

王俊林<sup>1</sup>, 马 艳<sup>1</sup>, 苟利娟<sup>2</sup>

(1. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州煤炭工业集团芦沟矸石热电厂, 河南 郑州 450002)

**摘要** 选取郑州市某 32 层高 218.5 m 建筑物的 3 根大直径超长灌注桩进行静载荷试验, 并对桩的荷载与沉降的关系及桩身应力测试结果进行了分析. 结果表明, 大直径超长灌注桩为纯摩擦桩, 桩侧摩阻力大小取决于桩土相对位移大小和桩周土的种类、密实程度等因素, 桩顶沉降主要来自于桩身压缩和压屈变形, 无刚体位移. 采取无限制增加桩长的方法很难达到提高桩基承载力的目的.

**关键词** 大直径超长混凝土灌注桩; 摩阻力; 端阻力; 静载荷试验

**中图分类号** :TU473.1      **文献标识码** :A      **文章编号** :1000-198X(2008)01-0082-06

桩是一种垂直或微斜埋置土中的受力杆件<sup>[1]</sup>. 钻孔灌注桩是最常见的桩型之一, 其主要优点<sup>[2]</sup>是 (a) 可适用于各种地层, 桩长可随持力层起伏而变, 不需截桩, 没有接头. (b) 承受竖向轴力时不用配置钢筋, 需配置钢筋笼时, 按工作荷载要求布置, 不用接头, 可节约钢筋用量. (c) 可根据需要调整桩的直径. 采用大直径钻孔或挖孔灌注桩时, 单桩承载力大, 且一般情况下比预制桩经济. 因此, 钻孔灌注桩在基础工程中得到了广泛应用. 随着城市道路建设的发展, 高层建筑和大跨桥梁建设也越来越多, 大直径超长钻孔灌注桩的应用也日益广泛. 目前, 关于大直径超长灌注桩的试验研究较多. 例如, 赵明华等<sup>[3]</sup>研究了洞庭湖软土地区大直径超长钻孔灌注桩的承载性状, 得出了桩顶荷载主要有侧阻力承担的结论. 张帆等<sup>[4]</sup>认为, 在正常使用状态下桩端分担荷载比例占 10% ~ 35%, 在承载力极限状态下桩端分担比例占 35% ~ 40% 时具有端承摩擦桩性质. 魏峰先等<sup>[5]</sup>认为, 大直径超长灌注桩工作机理仍不明确. 蒋建平等<sup>[6]</sup>认为, 大直径超长钻孔灌注桩一般可看成是摩擦桩, 持力层好时也可看成是端承摩擦桩. 因此, 目前关于大直径超长钻孔灌注桩受力特性的研究还没有统一的结论. 鉴于此, 笔者选取郑州市某 32 层高层建筑的 3 根大直径(直径均为 1.0 m)超长(长度分别为 81.43 m、77.62 m 和 65.69 m)钻孔灌注桩进行静载荷试验, 并根据桩身应力的变化来确定桩身轴力, 同时从桩身沉降变形和桩身轴力、桩侧摩阻力沿桩身变化规律等方面分析了该地区大直径超长钻孔灌注桩的受力变形机理.

## 1 试验概况

郑州市某 32 层高层建筑主楼高 218.5 m, 其基础形式均为钢筋混凝土钻孔灌注桩基础. 对 3 组试验桩进行静载试验, 以测试该钻孔灌注桩的单桩承载力. 按照土层变化情况沿桩身埋设了钢筋应力计, 土层情况及应力计埋设位置如图 1 所示. 图中: ① ~ ⑥, ⑧, ⑩土层为粉土, 中等压缩性; ⑦, ⑨, ⑪土层为粉砂, 低等压缩性; ⑫, ⑬为粉质黏土, 中等压缩性; ⑭ ~ ⑰土层为粉质黏土, 低等压缩性.

试验采用锚桩横梁反力法, 加荷分 14 级, 每级荷载为 1 200 kN, 第 1 级 2 400 kN, 沉降测读时间每级加载后间隔 5 min, 10 min, 15 min 各测读 1 次, 以后每隔 15 min 测读 1 次, 累计 30 min 测读 1 次. 当每小时的沉降不超过 0.1 mm 并连续出现 2 次时, 即认为达到相对稳定, 加下一级荷载. 当出现下列 3 种情况之一时, 即停止加荷<sup>[7]</sup>: (a) 某级荷载作用下, 桩的沉降量为前一级荷载作用下沉降量的 5 倍; (b) 某级荷载作用下, 桩的沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 2 倍, 且经 24 h 尚未达到相对稳定; (c) 桩顶加载量已达到锚桩最大抗拔力的最大值时终止加荷.

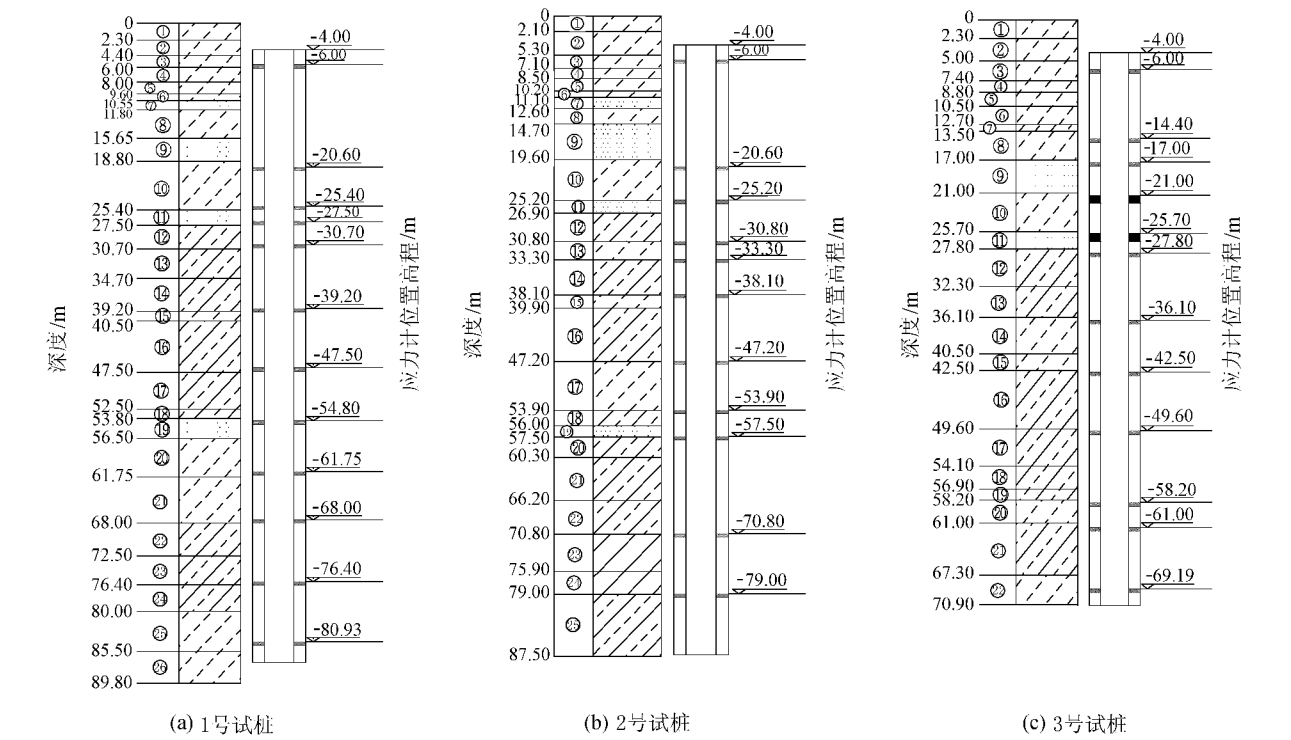


图 1 桩的典型地质剖面 and 钢筋应力计埋设位置

Fig.1 Typical geological profile and embedment sites of steel bar stress meters

2 试验数据处理

2.1 试验数据

通过静载试验得到了桩身轴力与桩长、荷载  $Q$  与沉降  $s$  的关系曲线 ,如图 2 3 所示.

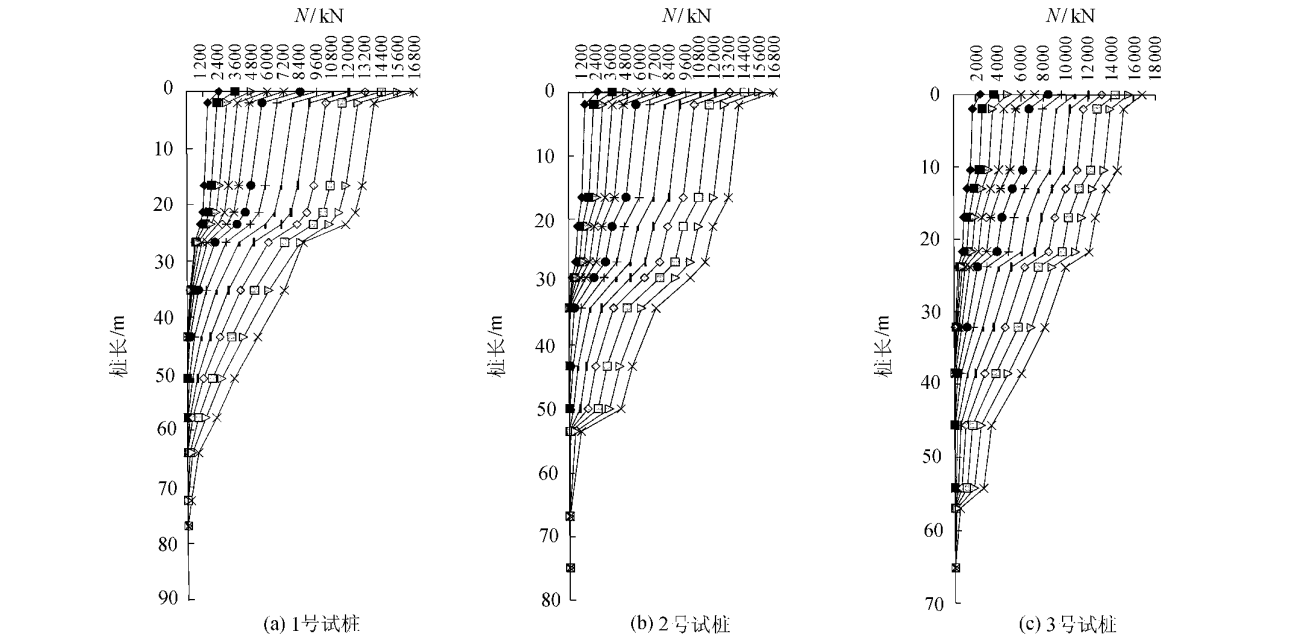


图 2 桩身轴力分布

Fig.2 Distributions of axial forces

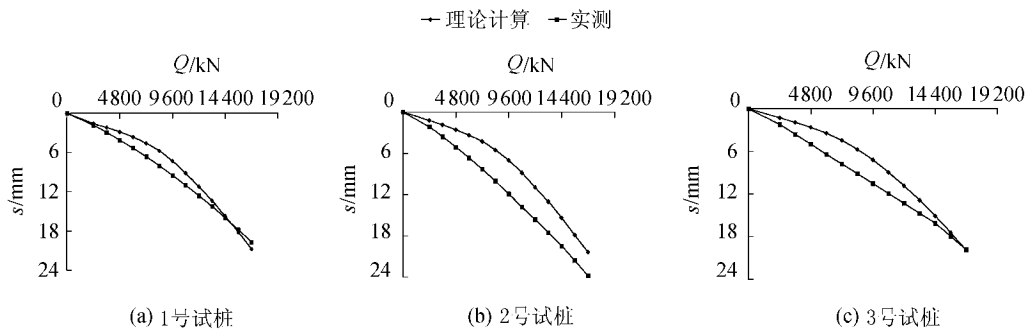


图3  $Q \sim s$  关系曲线

Fig.3  $Q \sim s$  curves

## 2.2 试验数据处理方法

### 2.2.1 $Q \sim s$ 关系曲线

桩顶沉降量按式(1)计算,即

$$s = s_1 + s_2 \tag{1}$$

式中: $s$ ——桩顶沉降量; $s_1$ ——桩身压缩变形量; $s_2$ ——桩身刚体位移。 $s_1, s_2$  分别表示为

$$s_1 = \int_0^l \frac{N_z}{A_p E} dz \quad s_2 = s - s_1 \tag{2}$$

式中  $N_z, A_p$  和  $E$  分别表示桩身轴力、桩身截面面积和弹性模量。

### 2.2.2 弹性模量

根据桩顶变形及桩身轴力大小计算轴力不为零的桩段的平均弹性模量:

$$E_l = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^n l_i \frac{N_i + N_{i-1}}{2A_p} \tag{3}$$

式中: $l$ ——轴力不为0处桩段的长度; $E_l$ —— $l$ 长桩段的平均弹性模量; $l_i$ ——第*i*段桩的长度; $N_i, N_{i-1}$ ——第*i*段桩的上端和下端轴力。

### 2.2.3 桩侧摩阻力和桩端阻力

桩身各段的侧平均阻力可由量测的各段轴力计算得到,其计算公式为

$$q_{si} = \frac{N_i - N_{i-1}}{u_p l_i} \tag{4}$$

式中: $q_{si}$ ——第*i*段桩侧摩阻力; $u_p$ ——桩身截面平均周长; $l_i$ ——第*i*段桩的长度。

桩端阻力计算公式为

$$q_p = \frac{N_{up}}{A_p} \tag{5}$$

式中: $q_p$ ——桩端阻力; $N_{up}$ ——桩端轴力。

## 3 试验结果分析

### 3.1 $Q \sim s$ 关系曲线

#### 3.1.1 实测位移和理论位移的对比

根据式(1)(2)和桩身轴力分布情况计算得到了桩身压缩量随荷载 $Q$ 的变化情况,如图3理论计算结果所示。

从实测曲线可以看出,当桩顶荷载为16800 kN时3根桩的桩顶沉降量分别为19.72 mm、23.81 mm和19.82 mm,且实测的 $Q \sim s$ 关系曲线均没有明显的拐点,数值较小,具有明显的缓变型特征。3根桩桩身下部的轴力为0,说明3根桩均未发生刚体位移,即 $s_2 = 0$ 。

从理论计算 $Q \sim s$ 关系曲线与实测 $Q \sim s$ 关系曲线的对比可以看出,实测位移与理论计算位移有一定的差距,荷载较小时理论计算值比实测位移值小。其原因可能有3种:(a)桩身混凝土弹性模量达不到设计要求(设计桩身混凝土强度等级为C40,相应弹性模量为 $3.25 \times 10^5 \text{ MPa}$ <sup>[8]</sup>),而理论计算时所采用的混凝土弹性模

量为  $3.25 \times 10^5 \text{ MPa}$  ( b )桩身质量存在某种缺陷,如断桩、缩颈、离析等 ( c )压屈变形<sup>[9]</sup>,由于 3 根桩的长径比都较大,分别为 81.43、77.62 和 65.69,在无约束的情况下,以轴力为 0 的桩段作为固定端,上部为自由端,其临界力

$$P_{li} = \frac{\pi^2 EI}{l_0^2}$$

( 6 )

式中:  $E$ ——弹性模量;  $I$ ——极惯性矩;  $l_0$ ——压杆的计算长度(一端自由一端固定时取  $l_0 = 2l$  )。以 3 600 kN 级荷载为例,3 根桩临界力分别为 1 523.02 kN、3 380.05 kN 和 2 651.62 kN,均小于相应桩顶加荷值 3 600 kN。当桩顶加荷值大于 3 600 kN 时,其临界力计算值更小。但由于土的约束作用,采用一端自由一端固定的计算模型进行计算,其临界力的计算结果会偏小。究竟如何计算压屈对桩顶变形的影响,有待进一步试验研究。建议沿桩身设置水平位移测试元件,以测试桩身挠曲值并用其来分析相对软弱土中的大直径超长钻孔灌注桩的压屈破坏机理。

3.1.2 桩身弹性模量

根据桩顶变形及桩身轴力大小计算得到的轴力不为 0 的桩段的平均弹性模量如图 4 所示。从图 4 可以看出,3 根桩的弹性模量均呈现增大趋势,这进一步说明超长钻孔灌注桩在相对软弱土层中会发生压屈失稳现象。

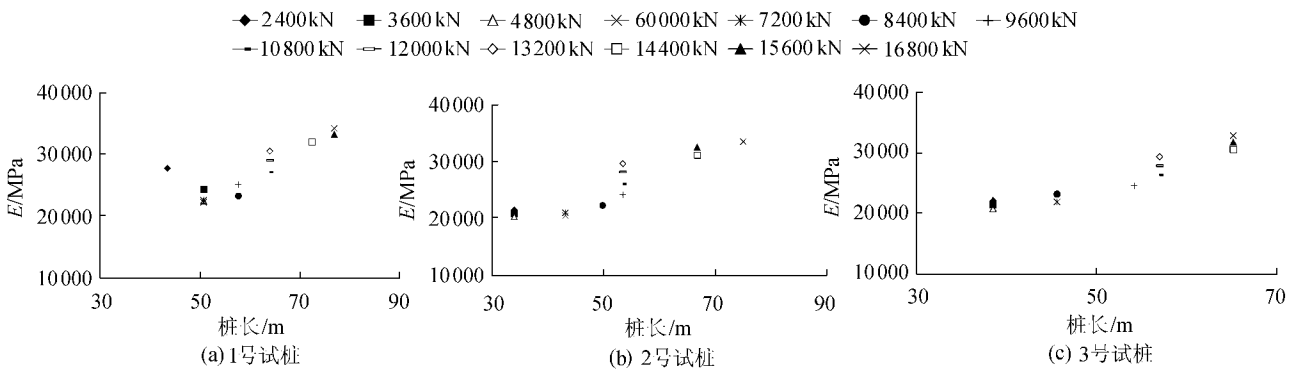


图 4 弹性模量  $E$  与桩长  $L$  的关系

Fig.4 Relationship between modulus of elasticity  $E$  and pile length  $L$

3.2 桩身轴力分布

3.2.1 荷载传递机理分析

由钢筋应力计测得的沿桩身轴力如图 2 所示。由图 2 可知,桩顶荷载沿桩身自上而下逐步传递,开始桩身上部因压缩变形而产生相对于桩土的向下的相对位移,与此同时,桩侧受到桩土向上的摩阻力作用。桩身荷载通过发挥出来的抗侧摩阻力而传递到桩周土层中,使桩身轴力和桩身压缩变形量随深度而递减。随着荷载的增加以及桩身压缩量和位移量的逐渐增加,桩身下部的摩阻力也逐渐被调动起来并得到部分发挥。由于 3 根试桩较长,均大于 50 m,即使桩顶荷载施加到最大值 16 800 kN,桩端阻力也没有得到发挥,近似为 0。因此,采取无限制增加桩长的方法来提高超长桩的承载力是很难实现的。

3.2.2 桩身各段侧摩阻力随桩土相对位移的变化情况

图 5 反映了 3 根桩桩身各段侧摩阻力随桩土相对位移变化的情况。从图 5 可以看出:1 号试桩的 0~2.00 m、21.40~23.50 m 和 23.50~26.70 m 3 段,2 号试桩的 0~2.00 m、16.60~21.20 m、26.80~29.30 m 和 29.33~34.10 m 4 段,3 号试桩的 0~2.00 m、10.40~13.00 m、13.00~17.00 m、17.00~21.70 m 和 21.70~23.80 m 5 段。由于桩土相对位移较大(1 号试桩分别为 0~19.72 mm、0~9.028 mm 和 0~8.084 mm,2 号试桩分别为 0~23.81 mm、0~15.17 mm、0~10.571 mm 和 0~9.573 mm,3 号试桩分别为 0~19.82 mm、0~13.764 mm、0~12.33 mm、0~10.307 mm 和 0~8.067 mm),桩侧摩阻力得到了充分发挥,达到了极值。

由  $q_s \sim s_u$  关系曲线可以看出,  $q_s$  和  $s_u$  之间的关系可以用下式<sup>[3]</sup>表示:

$$q_s = \begin{cases} ks_u & (s_u < s_{u0}) \\ q_{s0} & (s_u \geq s_{u0}) \end{cases}$$

( 7 )

式中 : $q_s$ ——桩侧摩阻力值 ; $s_u$ ——桩土相对位移 ; $k$ ——系数( 受到土的种类性质、桩身直径和土层埋深等因素的影响 )  $\text{kPa/mm}$  ; $q_{so}$ ——桩侧摩阻力最大值 ; $s_{uo}$ ——桩侧摩阻力发挥最大值所需的桩土相对位移<sup>[10]</sup> ( 一般黏性土  $s_{uo}$  为 5 ~ 10 mm ,砂土  $s_{uo}$  为 10 ~ 20 mm ) . 其余各段由于桩土间相对位移较小 ,桩侧摩阻力未得到充分发挥 ,其规律性也不强 .

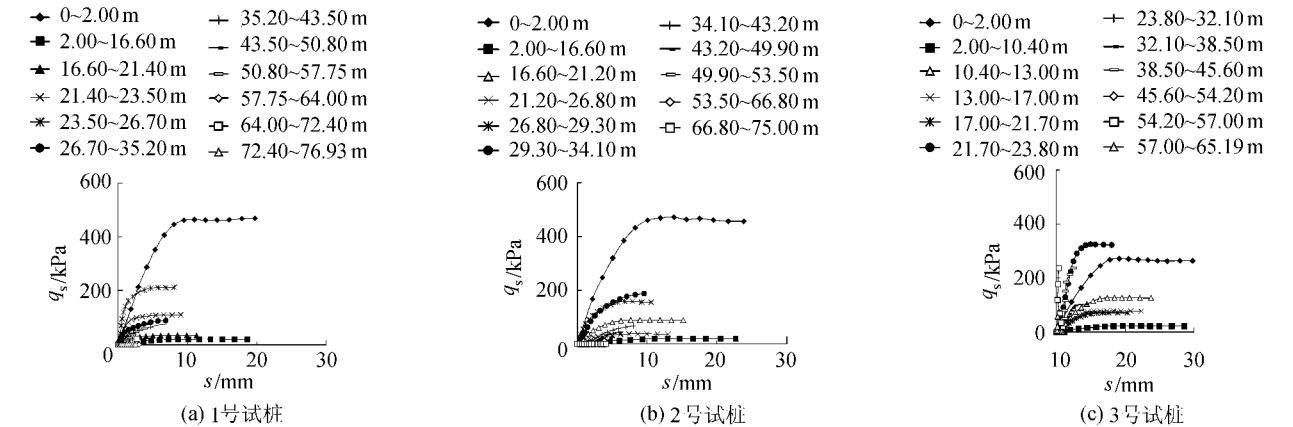


图 5  $q_s$  与  $s_u$  的关系曲线

Fig.5 Relationship between lateral friction  $q_s$  and relative displacement  $s_u$  of different piles

### 3.2.3 桩侧摩阻力沿桩身的分布

桩侧单位面积摩阻力大小  $q$  除与土的性质、桩的材料有关外 ,还与桩径、桩深 ,特别是施工方法有关 .随着桩顶荷载的增大 ,上部土层的摩阻力先于下部土层发挥出来 ,逐渐达到最大值而趋于稳定 .从桩侧摩阻力的计算结果可以看出 :任何深度处的单位摩阻力  $q$  大小都随着该处轴力  $N$  变化率的增加而增加 ,桩侧摩阻力沿深度的分布近似呈抛物线状 .当桩顶荷载为 16800 kN 时 ,1 号试桩的 0 ~ 2.00 m ,21.40 ~ 23.50 m 和 23.50 ~ 26.70 m 3 段侧摩阻力相对较大 ,分别为 468.79 kPa ,110.32 kPa 和 212.84 kPa ;2 号试桩的 0 ~ 2.00 m ,26.80 ~ 29.30 m 和 29.30 ~ 34.10 m 3 段侧摩阻力相对较大 ,分别为 469.59 kPa ,158.34 kPa 和 186.60 kPa ;3 号试桩的 0 ~ 2.00 m ,10.40 ~ 13.00 m ,21.70 ~ 23.80 m ,32.10 ~ 38.50 m ,38.50 ~ 45.60 m 和 54.20 ~ 57.00 m 6 段侧摩阻力相对较大 ,分别为 271.50 kPa ,126.71 kPa ,324.73 kPa ,103.58 kPa ,237.26 kPa 和 235.96 kPa .3 根桩的这些桩段处轴力变化率较大 .桩顶 0 ~ 2.00 m 段侧摩阻力较大的原因是 :钻孔进行灌注桩时 ,一部分水泥渗入周围土层与其反应形成水泥土而提高了周围土层的强度 ,而且基础开挖时由于机械重压、人工踩踏等原因将土层压密 ,也提高了其承载力 .深层桩侧摩阻力较大的原因有待进一步试验研究 .

## 4 结 语

本文根据郑州市某 32 层高层建筑的 3 根大直径超长钻孔灌注桩的静载荷试验结果 ,从桩身沉降变形和桩身轴力、桩侧摩阻力沿桩身变化规律等方面分析了该地区大直径超长钻孔灌注桩的受力变形机理 ,并得到如下结论 :

- a. 设置于粉土、黏土中的大直径超长灌注桩 ,其桩顶沉降主要来自于桩身压缩和压屈变形 ,无刚体位移 ,不能单纯地通过增加桩长的方法来提高桩基承载力 .
- b. 大直径超长灌注桩桩端反力很小甚至为 0 ,可认为大直径超长灌注桩为纯摩擦桩 .
- c. 桩侧摩阻力大小取决于桩土相对位移和桩周土的种类、密实程度等因素 .

### 参考文献 :

[ 1 ] 黄强 . 桩基工程若干热点技术问题 [ M ] . 北京 : 中国建材工业出版社 ,1996 .

[ 2 ] 《桩基工程手册》编写委员会 . 桩基工程手册 [ K ] . 北京 : 中国建筑工业出版社 ,1995 .

[ 3 ] 赵明华 , 邹新军 , 刘齐建 . 洞庭湖软土地区大直径超长灌注桩竖向承载力试验研究 [ J ] . 土木工程学报 ,2004 ,37( 10 ) :63-67 .

[ 4 ] 张帆 , 龚维明 , 戴国亮 . 大直径超长灌注桩荷载传递机理的自平衡试验研究 [ J ] . 岩土工程学报 ,2006 ,28( 4 ) :464-469 .

[ 5 ] 魏峰先 , 王健 , 冯俊福 , 等 . 大直径超长灌注桩受力机理的探讨 [ J ] . 浙江建筑 ,2006 ,23( 6 ) :38-41 .

[ 6 ] 蒋建平 , 章杨松 , 高广运 , 等 . 大直径超长灌注桩弹塑性有限元分析 [ J ] . 力学季刊 ,2006 ,27( 2 ) :354-358 .

[ 7 ]陈凡,徐天平,陈久照,等. 桩基质量检测技术[ M ].北京 :中国建筑工业出版社 2003 :46.  
[ 8 ]GB50010—2002 混凝土结构设计规范[ S ].  
[ 9 ]全国一级建造师执业资格考试用书编写委员会. 房屋建筑工程管理与实务[ M ].北京 :中国建筑工业出版社 2004 :1-2.  
[ 10 ]土木工程学会.注册岩土工程师专业考试复习教程[ M ].北京 :中国建筑工业出版社 2004 :219.

Experimental study on stress characteristics of  
super-long large-diameter bored piles

WANG Jun-lin<sup>1</sup>, MA Yan<sup>1</sup>, GOU Li-juan<sup>2</sup>

( 1. School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China ;  
2. Lugou Waste Rock Thermal Power Plant of Zhengzhou Coal Group, Zhengzhou 450002, China )

**Abstract** Static loading tests were performed on 3 super-long large-diameter bored piles of a 32-storey building with the height 218.5 m in Zhengzhou City. The analysis of the relationship between the loads and settlements of piles and the test results of pile stresses shows that super-long large-diameter bored piles are pure friction piles, the lateral friction along pile bodies depends on the relative displacement between soil and piles and the types and compactness of soils around piles, and that with negligible rigid body displacement, the settlement at the top of piles is mainly induced by compressive strain and buckling strain of pile bodies, therefore it is difficult to improve the bearing capacity of pile foundation only by increase of pile length unlimitedly.

**Key words** super-long large diameter bored pile ; friction ; end resistance ; static loading test

.....

《河海大学学报( 哲学社会科学版 )》征订启事  
( CN32 - 1521/C , ISSN1671 - 4970 , 季刊 , 自办发行 )

《河海大学学报( 哲学社会科学版 )》以马列主义、毛泽东思想、邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导,坚持实事求是的思想路线,贯彻“双百”方针,弘扬时代主旋律,理论联系实际,为社会主义物质文明与精神文明建设服务。

《河海大学学报( 哲学社会科学版 )》为哲学与社会科学类学术期刊,主要刊登哲学、政治学、文学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章。本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考。《河海大学学报( 哲学社会科学版 )》为中国学术期刊( 光盘版 )入编期刊与中国学术期刊网入编期刊。

《河海大学学报( 哲学社会科学版 )》由河海大学主办,每季末出版,国内外公开发行。2008 年每本定价 5 元,每本邮费 1 元,全年订费 24 元。欢迎广大读者直接向编辑部订阅。联系地址 :南京市西康路 1 号《河海大学学报( 哲学社会科学版 )》编辑部,邮政编码 210098。联系电话 025-83786376。