

文章编号:1673-2049(2017)06-0071-06

# 超大吨位基桩静载对桩周土的影响范围试验

胡贺松<sup>1</sup>, 杨卓<sup>1,2</sup>, 许丹<sup>3</sup>, 张程林<sup>1</sup>, 周恩海<sup>1</sup>, 陈航<sup>1,2</sup>

(1. 广州市建筑科学研究院有限公司, 广东 广州 510440; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006;  
3. 中铁十一局集团有限公司, 湖北 武汉 430066)

**摘要:**针对广州某中央商务区核心区地下空间钻孔灌注桩的超大吨位静载试验, 分析了静载试验加载卸载过程中荷载-沉降曲线和桩周土体的位移变化。结果表明: 当荷载小于试桩竖向承载力特征值时, 试桩的竖向刚度几乎保持不变; 荷载大于试桩竖向承载力特征值时, 刚度逐渐减小但幅度很小; 荷载达到试桩承载力极限值之前, 随着荷载增加, 桩顶沉降线性增加, 每级加载桩顶沉降增量也几乎线性增加; 试验加载时, 越靠近大梁的土体出现卸载回弹的现象越明显, 同时桩周土体由于剪切作用会发生沉降, 两者同时作用造成桩周一定范围内土体隆起; 加载过程对桩周土体的影响范围可定为  $4d$  ( $d$  为桩径); 卸载完成后距试桩中心  $1.67d \sim 2.22d$  范围内的土体出现隆起现象; 加载过程中距试桩中心  $2.78d$  范围以外的土体处于弹性阶段。

**关键词:**基桩; 超大吨位静载试验; 桩周土; 地面沉降

**中图分类号:** TU473

**文献标志码:** A

## Influence Range of Soil Around Pile by Extra-tonnage Pile Foundation Static Test

HU He-song<sup>1</sup>, YANG Zhuo<sup>1,2</sup>, XU Dan<sup>3</sup>, ZHANG Cheng-lin<sup>1</sup>, ZHOU En-hai<sup>1</sup>, CHEN Hang<sup>1,2</sup>

(1. Guangzhou Institute of Building Science Co., Ltd., Guangzhou 510440, Guangdong, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

3. China Railway 11th Bureau Group Co., Ltd., Wuhan 430066, Hubei, China)

**Abstract:** Based on extra-tonnage pile foundation static load test of bored pile in CBD underground space in Guangzhou, the load-settlement relationship curves and the displacement variation of soil around pile were analyzed. The results show that when the load value is lower than the eigenvalue of vertical bearing capacity of test pile, the vertical rigidity of test pile almost keeps unchanged. When the load value is higher than the eigenvalue of vertical bearing capacity of test pile, the rigidity of pile reduces gradually, but the reduction is less obvious. When the load is lower than the ultimate load-bearing capacity, the settlement of pile tip increases linearly along with the increasing of load, every increment of settlement almost increases linearly too. During the loading process, the closer to the beam of soil, the more obvious phenomenon of unloading rebound, at this time, the soil around pile starts settle due to the shear action. The simultaneous occurrence of both impacts causes upheaval of soil within certain limits around pile. The influence range of soil around pile during loading process can be set to  $4d$  ( $d$  is pile diameter). The soil

收稿日期: 2017-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678171, 51608139); 广东省科技计划项目(2015B020238014);

“广东特支计划”资助项目(2014TQ01Z014); 广州市科技计划项目(201604016021);

中国博士后科学基金项目(2016M592471)

作者简介: 胡贺松(1979-), 男, 河南上蔡人, 教授级高级工程师, 工学博士, E-mail: 39870229@qq.com。

within the scope of the 1.67*d*-2.22*d* away from the midpoint of pile behaves heaving after completion of unloading. The soil that beyond the range of 2.78*d* from the midpoint of pile is in elastic stage during loading process.

**Key words:** pile foundation; extra-tonnage static test; soil around pile; ground settlement

0 引言

桩基础能够提供较大的承载力,并且可以有效地减少上部结构的沉降,使其成为在民用与工业建筑、桥梁、港湾及海洋建筑物中应用最为广泛的一种基础形式<sup>[1-2]</sup>。基桩静载试验是目前为止检验基桩竖向抗压极限承载力最准确、可靠的方法<sup>[3]</sup>。随着科学技术和工程建设的高速发展,高层、超高层建筑、跨江跨海特大桥梁、大型深水码头等建设越来越多,上部结构对基桩承载力和变形的要求越来越高,迫使基桩向大直径、超大直径、长桩、超长桩等趋势发展,从而也促进了基桩静载试验由大吨位向超大吨位的方向发展<sup>[4]</sup>。

国内外许多学者通过理论分析和数值模拟研究了基桩大吨位静载试验的竖向承载特性,并取得了可观的成果。Meyerhof 等<sup>[5-7]</sup>研究了大吨位静载试验时桩端阻力和桩侧阻力的尺寸效应;胡庆立等<sup>[8]</sup>研究了大直径桩的竖向承载力性能;张广彬等<sup>[9]</sup>对超大吨位的自平衡法与静压法荷载试验结果进行了对比研究;由于基桩轴向承载力设计值不断增大,静载试验上覆重物的吨位也需要相应增大,随之产生的问题也逐渐突出,例如上覆重物堆载过高可能发生倾覆,堆载对地面沉降有很大影响,试验加载时出现明显的地面回弹现象<sup>[10]</sup>。现行的《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)中规定软土地压重平台堆载质量较大时,宜增加支墩边与基准桩中心和试桩中心之间的距离,距离具体增加多少,由于缺乏

相应的资料,规范未作说明,本文以广州市某中央商务区核心区地下空间钻孔灌注桩为例,研究超大吨位静载对桩周土竖向位移的影响范围。

1 工程概况

1.1 工程简介

广州市某中央商务区核心区地下空间位于番禺区南村镇,地表为市政道路,地下为商业建筑,以构筑立体的商业形态。该项目属超长、多层地下结构,根据结构的承载能力及正常使用极限状态的要求,地下室及基础设计主要解决构件承载力、抗裂及结构整体抗浮等问题。拟建的桩基础采用钻孔灌注桩,以中(微)风化岩层为持力层。场地岩性有花岗岩混合岩和砂岩 2 种,基底岩性为花岗岩混合岩地区,要求桩端持力层为微(中)风化岩层,桩端天然抗压强度为 29 MPa,要求孔深进入持力层以下不小于 3*d* (*d* 为桩径),且不小于 5 m。基底岩性为砂岩、粉砂岩、砂砾岩等地区,要求桩端持力层为微(中)风化岩层,桩端天然抗压强度为 9.6 MPa,要求孔深进入持力层以下不小于 3*d*,且不小于 5 m。桩侧土层为强、中风化岩时,桩周总极限侧阻力标准值  $Q_{sk}$  约占单桩竖向承载力特征值  $R_a$  的 60%。

1.2 场地工程地质条件

根据钻孔揭露,该区地层按地质成因依次分为第四系填土层( $Q^{ml}$ )、残积层( $Q^{el}$ )和基岩风化岩带。各土层、岩层分布如表 1 所示。

表 1 试桩场地土层分布  
Tab. 1 Site Soil Layer Distribution of Test Pile

深度/m	土层分类		岩土特性
—2.62	第四系填土层		黏质粉土、砂岩风化土
—9.93	残积层	粉质黏土层	泥质粉砂岩积土
—14.26		砂质黏土层	花岗岩风化残积土
—18.02	岩层	强分化粉砂岩层	风化强烈,岩质极软,岩土质量等级为Ⅴ级
—21.32		中分化粉砂岩层	岩质软,岩芯破碎,岩土质量等级为Ⅳ级
—27.41		微分化粉砂岩层	岩质硬,岩芯破碎,岩土质量等级为Ⅲ级
—29.48		全分化花岗混合岩层	岩芯风化,遇水软化
—38.94		强分化花岗混合岩层	风化强烈,岩芯风化破碎,遇水软化,岩土质量等级为Ⅴ级
—41.74		中分化花岗混合岩层	岩质稍硬,岩土质量等级为Ⅳ级
—46.72		微分化花岗混合岩层	岩芯破碎,岩土质量等级为Ⅲ级

## 2 试验设备安装与测试方法

### 2.1 试验设备安装

试桩的桩径为 1.8 m,桩长为 22 m,基桩竖向极限承载力设计值为 44 000 kN。试验前现场以试验桩为中心平整 14 m×18 m 的场地,试验桩两边垫层的极限承载力达到 350 kPa。此部分垫层承载力不满足要求时,对支墩下卧土层进行换填处理<sup>[11]</sup>。下卧土层换填处理前先把桩周 14 m×18 m 范围内的软弱土层挖除,换填石角、碎石或碎砖并经过分层铺填,分层压实,在压实后的垫层上现浇 0.5 m 厚的 C40 钢筋混凝土垫板,每侧垫板的长 18 m、宽 5 m,并将垫板振捣密实,完成后的垫板面比试桩帽面高 200 mm。图 1,2 分别为超大吨位静载试验现场和试验加载装置示意。



图 1 静载试验现场

Fig. 1 Static Loading Test Site

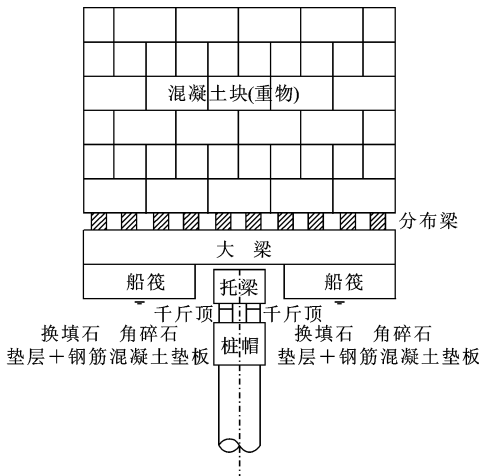


图 2 加载装置示意

Fig. 2 Schematic Diagram of Loading Device

图 3 为千斤顶与位移计布置。本文试验采用 10 个千斤顶并联同步加载<sup>[12]</sup>,为防止加载时偏心受压,布置千斤顶时,使其合力中心与上覆重物的重心和桩的横截面形心重合,并保证合力方向与桩和托

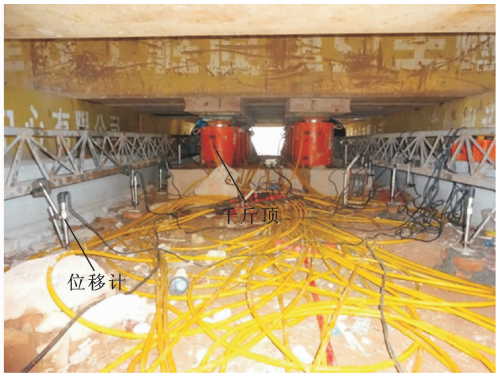


图 3 千斤顶与位移计布置

Fig. 3 Layout of Jack and Displacement Meter

梁垂直。

图 4 为静载试验桩周土变形监测点布置。桩帽上 S 点为基桩的位移监测点,对称布置在桩帽上,位移计连接在桩基静荷载测试分析仪上;1<sup>#</sup>~12<sup>#</sup>为桩周土体位移监测点,12 个位移计的数据同时通过前端机由物联网数字无线系统传输至位移分析仪上;G<sub>1</sub>~G<sub>4</sub> 四点为基准梁的位移监测点,由远离基准梁的全站仪监测;S<sub>1</sub>~S<sub>4</sub> 四点为基准梁以外土体的位移监测点,由全站仪监测。每条测线上相邻监测点的距离为 1 m,1<sup>#</sup>,4<sup>#</sup> 监测点离桩帽左边缘的距离为 0.2 m,7<sup>#</sup>,10<sup>#</sup> 监测点离桩帽右边缘的距离为 0.2 m;F<sub>1</sub>,F<sub>2</sub>,F<sub>3</sub> 三点为大梁的挠度监测点,由全站仪监测。

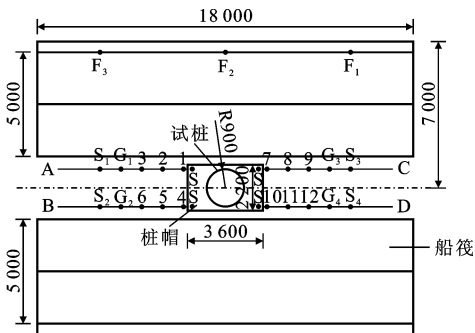


图 4 静载试验桩周土变形监测点布置(单位:mm)

Fig. 4 Deformation Monitoring Point Layout for Soil Around Pile in Static Load Test (Unit:mm)

### 2.2 测试方法

本文静载试验试桩竖向极限承载力设计值为 44 000 kN,根据行业标准《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014),加载方式采用慢速维持荷载法,逐级等量加载,分级荷载为最大加载值的 1/10,即 4 400 kN,前 2 级加载量为分级荷载的 2 倍,加载达到 44 000 kN 且桩顶沉降达到相对稳定时,终止加载。卸载时采用等量卸载,每级卸载量为加载时分

级荷载的 2 倍,即 8 800 kN。加卸载时,使荷载传递均匀、连续、无冲击,卸载至 0 后,测读桩顶残余沉降量。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 时间-沉降曲线与荷载-沉降曲线分析

试验加载时每级荷载施加后分别按第 5, 15, 30, 45, 60 min 测读桩顶沉降,卸载时每级荷载维持 1 h,并分别按 15, 30, 60 min 测读桩顶沉降。每级荷载施加后的时间-沉降关系曲线见图 5 ( $P$  为荷载),其中实线部分为加载时的关系曲线,虚线部分为卸载时的关系曲线。加载过程中每一级荷载加载后,前 30 min 的沉降会稍有变化,30~60 min 的沉降基本稳定,卸载过程中每一级卸载后,前 30 min 的回弹量很明显,30~60 min 的回弹基本稳定。

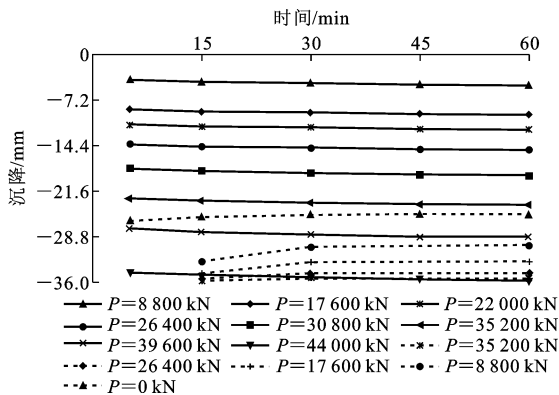


图 5 静载试验的时间-沉降关系曲线

Fig. 5 Time-settlement Relation Curves of Static Load Test

试桩的荷载-沉降曲线如图 6 所示。试桩最终加载至 44 000 kN,桩顶沉降维持稳定后,沉降量为 35.68 mm,卸载后回弹量为 10.44 mm,回弹率为 29.26%。当荷载小于 22 000 kN(试桩竖向承载力特征值)时,试桩的竖向刚度几乎保持不变;荷载达到 22 000 kN 时,刚度突然变小;当荷载大于 22 000 kN 时,刚度逐渐减小但减小量很小。

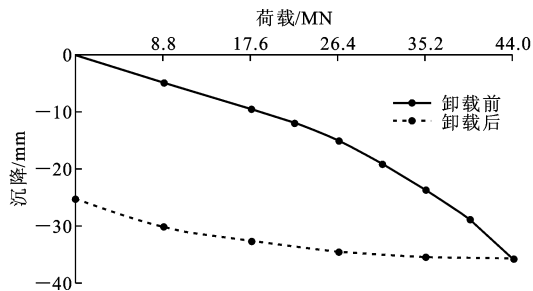


图 6 试桩的荷载-沉降曲线

Fig. 6 Load-settlement Curves of Test Pile

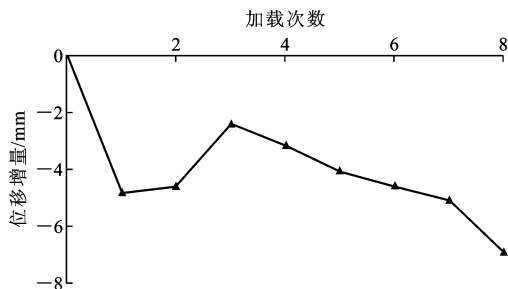


图 7 每次加载时试桩的竖向位移增量

Fig. 7 Vertical Displacement Increment of Test Pile at Each Time of Loading

第 1 级加载后位移增量较大,是因为桩侧摩阻力尚未发挥作用,桩端存在沉渣,桩端阻很小,导致桩端沉渣被压实,桩帽下土体压缩对桩产生负摩擦力;第 2 级、第 3 级加载后位移增量减小,由于桩身的刚度较大,在本级荷载下,桩身压缩量较小,桩端沉渣被进一步压实,桩端阻力逐渐变大,桩侧摩阻力开始发挥作用,第 3 级加载完成后桩端沉渣压实量达到最大。第 4 级到第 8 级加载完成后位移增量又逐渐加大,这是由于荷载量增大,导致桩的刺入量和弹塑性形变量增大。综上所述,当荷载达到试桩承载力特征值时,桩底沉渣被压缩到最为密实,桩端阻力和桩侧阻力开始发挥作用;当荷载达到试桩承载力极限值之前,随着荷载增加,桩顶沉降线性增加,每次加载桩顶沉降增量也几乎线性增加。

#### 3.2 加载过程中桩周土体位移分析

对于超大吨位静载试验,加载过程中基准梁会随着基准墩的沉降而下移,以测线 A 为例,那么 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 监测点的位移等于各测点位移计监测的位移加上该点处基准梁的位移( $G_1$  点的位移),根据各监测点的布置可计算出每次加载完成后的位移(图 8),结合图 4 试桩尺寸与各测点之间的距离分析可知:

(1)对比图 6 可得,每次加载完成后,桩身沉降(与桩帽下土体的沉降相同)与桩周土体沉降有较大差异。

(2)每级加载完成后,距试桩中心  $2.78d$  范围内的土体沉降均很明显,且同一测线上离桩帽越近的土体,沉降越大。第 1 级加载完成后,同一测线上各监测点的位移几乎相同,之后的每级加载各监测点的位移增量较前几级加载更为明显。

(3)测线 A 上 3<sup>#</sup> 监测点的沉降小于 2<sup>#</sup> 和  $G_1$  监测点的沉降,测线 B 上 6<sup>#</sup> 监测点的沉降小于 5<sup>#</sup> 和  $G_2$  监测点的沉降,即在桩帽左边,距试桩中心

每次加载时试桩的竖向位移增量如图 7 所示。

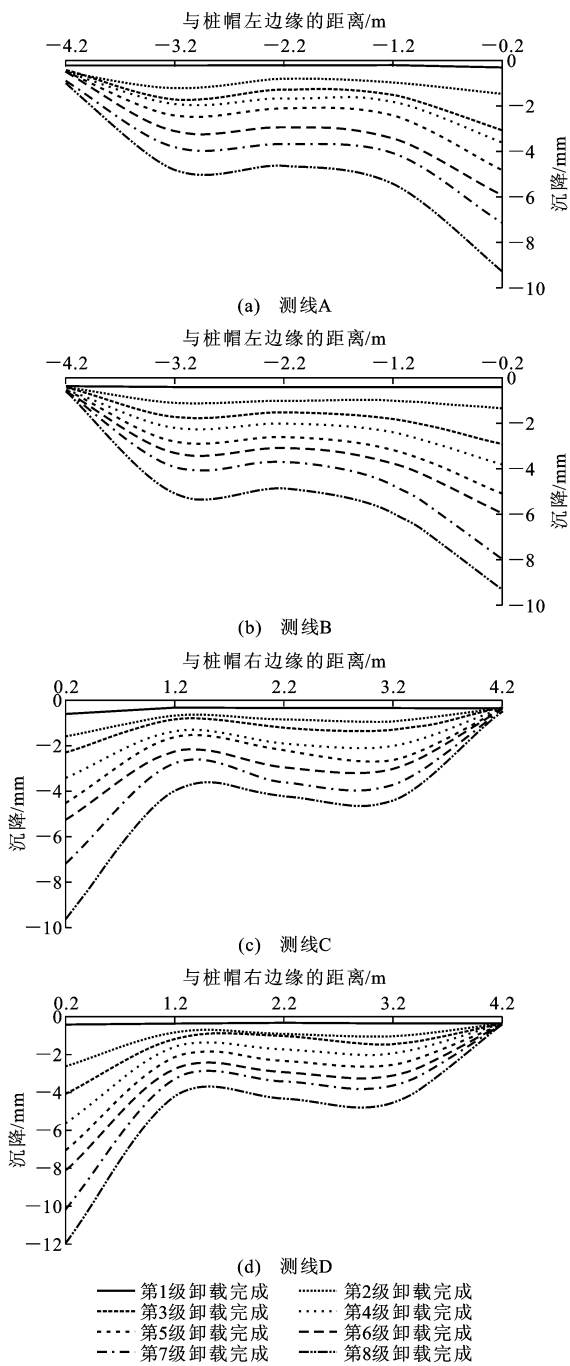


图 8 各监测点的竖向位移

**Fig. 8 Vertical Displacement of Each Monitoring Point**

2.22d处,土体出现隆起现象;同样可以观测到,在桩帽右边,距试桩中心 1.67d 处,土体出现隆起现象。第 8 级加载完成且桩顶沉降达到稳定状态后,测得大梁上  $F_1, F_2, F_3$  三点向上的挠度分别为 4.4, 8.3, 4.5 mm,这说明试验加载时,上覆重物被千斤顶顶起,越靠近千斤顶的位置,大梁被顶起的挠度越大,越靠近大梁的土体出现卸载回弹的现象就越明显,同时试桩加载过程中桩周土体由于剪切作用会发生沉降,两者同时作用造成桩周一定范围内土体

隆起。

(4)加载过程中距试桩中心 1.67d~2.78d 范围内的土体之间相对位移不大。

(5)距试桩中心 3.3d 范围以外的土体沉降很小,因此对于超大吨位静载试验,加载过程对桩周土体的影响范围可定为 4d。

### 3.3 卸载过程中桩周土体位移分析

每级卸载完成后各监测点的竖向位移如图 9 所示,结合图 4 分析可知:

(1)每级卸载完成后,离试桩中心 2.78d 范围

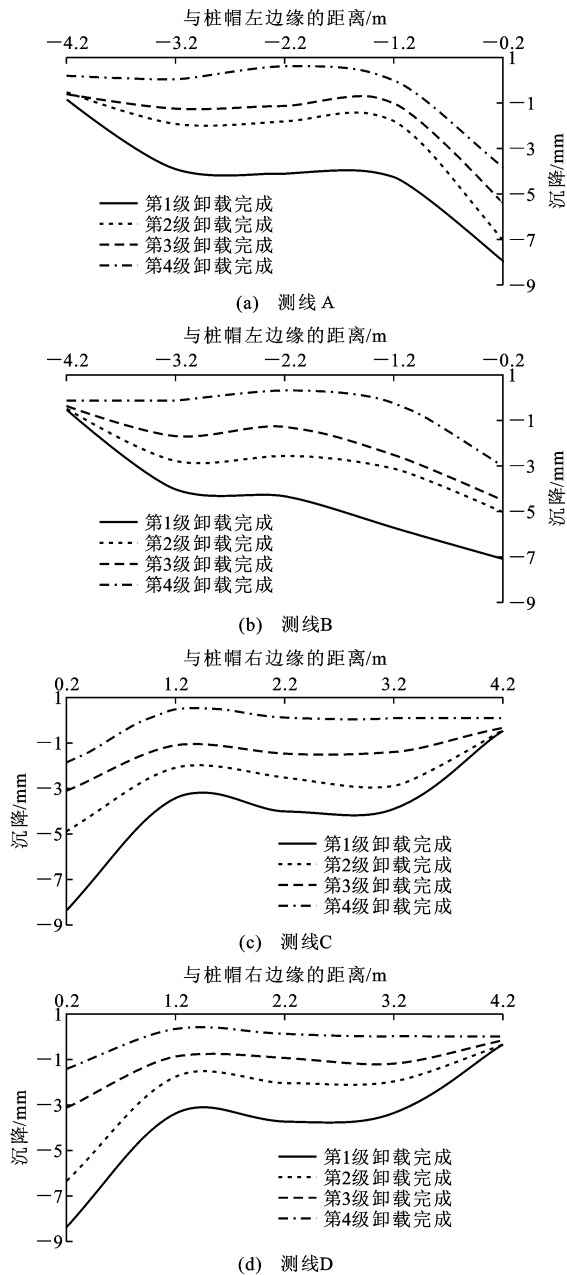


图 9 卸载时各监测点的竖向位移

**Fig. 9 Vertical Displacement of Each Monitoring Point when Unloading**

内的土体回弹量非常显著,但  $1.67d \sim 2.78d$  范围内土体之间的相对位移不大。

(2)第 4 级卸载完成后,靠近桩帽边缘 4 个监测点的残余量最大;桩帽左边距试桩中心  $1.67d \sim 2.78d$  范围内的土体出现隆起现象, $2.78d$  范围以外的土体残余量几乎为 0,即加载时  $2.78d$  范围以外土体处于弹性阶段;桩帽右边,距试桩中心  $1.67d \sim 2.22d$  范围内的土体出现隆起现象, $2.22d$  范围以外的土体残余量几乎为 0。

## 4 结 语

(1)当荷载小于试桩竖向承载力特征值时,试桩的竖向刚度变化可忽略不计;荷载大于竖向承载力特征值时,刚度逐渐减小但幅度相对较小;同时随着荷载增加,桩顶沉降线性增加,每级加载桩顶沉降增量也随着线性增加。

(2)每级加载完成后,距离试桩中心  $2.78d$  范围内的土体沉降均很明显,且同一测线上离桩帽越近的土体,沉降越大。第 1 级加载完成后,同一测线上各监测点的位移几乎相同,第 4 级加载完成后,各监测点的位移增量较前几级加载最为明显。

(3)试验加载时,地面堆载物被千斤顶顶起,越靠近千斤顶的位置,大梁被顶起的挠度越大,越靠近大梁的土体出现卸载回弹的现象就越明显,同时试桩加载过程中桩周土体由于剪切作用会发生沉降,两者同时作用造成桩周一定范围内土体隆起。

(4)对于超大吨位静载试验,加载过程对桩周土体的影响范围可定为  $4d$ 。卸载完成后离试桩中心  $1.67d \sim 2.22d$  范围内的土体出现隆起现象;加载过程中距试桩中心  $2.78d$  范围以外的土体处于弹性阶段。

## 参考文献:

## References:

- [1] IBARAKI S, OYAMA C, OTSUBO H. Construction of an Error Map of Rotary Axes on a Five-axis Machining Center by Static R-test[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3): 190-200.
- [2] SORENSEN C M, CAI J, LU N. Test of Static Structure Factors for Describing Light Scattering from Fractal Soot Aggregates[J]. Langmuir, 1992, 8(8): 2064-2069.
- [3] 刘明维. 桩基工程[M]. 北京:中国水利水电出版社,

2015.

LIU Ming-wei. Pile Foundation Engineering [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015.

- [4] VARLEY R J, ZWAAG S V D. Development of a Quasi-static Test Method to Investigate the Origin of Self-healing in Ionomers Under Ballistic Conditions [J]. Polymer Testing, 2008, 27(1): 11-19.
- [5] MEYERHOF G G. Scale Effects of Ultimate Pile Capacity [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(6): 797-806.
- [6] CLARK J I. The Settlement and Bearing Capacity of Very Large Foundations on Strong Soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(1): 131-145.
- [7] 赵春风, 李俊, 邱志雄, 等. 广东地区大直径超长钻孔灌注桩荷载传递特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 849-855.  
ZHAO Chun-feng, LI Jun, QIU Zhi-xiong, et al. Experimental Research on Load Transfer of Large-diameter and Super-long Bored Pile in Guangdong Area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 849-855.
- [8] 胡庆立, 张克绪. 大直径桩的竖向承载性能研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 491-495.  
HU Qing-li, ZHANG Ke-xu. Research on Axial Bearing Behavior of Large Diameter Piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 491-495.
- [9] 张广彬, 姬同庚, 李志斌. 超大吨位自平衡法与静压法荷载试验结果比对研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增 2): 471-474.  
ZHANG Guang-bin, JI Tong-geng, LI Zhi-bin. Comparison of Load Test Results Between Self-balanced Method and Static Pressure Method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 471-474.
- [10] SANAYEI M, ONIPEDE O. Damage Assessment of Structures Using Static Test Data [J]. AIAA Journal, 2012, 29(7): 1174-1179.
- [11] DEKKER R, BEENKER F, THIJSEN L. A Realistic Fault Model and Test Algorithms for Static Random Access Memories [J]. IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems, 1990, 9(6): 567-572.
- [12] SANAYEI M, SCAMPOLI S F. Structural Element Stiffness Identification from Static Test Data [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(5): 1021-1036.