

DOI: 10.11779/CJGE2018S1043

# 考虑堆载和桩载施加顺序的单桩负摩阻力模型试验研究

马学宁, 张沛云, 王旭, 王博林

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 通过室内模型试验, 研究堆载和桩载施加顺序对单桩负摩阻力的影响。试验结果表明: 先堆载后桩载工况下, 堆载完成后, 中性点位置离桩顶最远, 随桩载增加, 中性点位置逐渐上移, 最终中性点位置在桩顶以下 0.5l 附近, 桩身轴力呈先增加后减小的趋势, 单桩承载力发挥系数为 0.69。先桩载后堆载工况下, 先施加桩载时, 桩身轴力沿深度逐渐减小, 无中性点, 施加堆载时, 轴力呈先增加后减小趋势, 中性点出现并逐渐下移, 最终中性点位置在 0.41l 附近, 单桩承载力发挥系数为 0.86。先桩载后堆载较先堆载后桩载桩基承载力发挥系数大, 即桩基承载力安全储备小。以上分析表明, 荷载施加顺序对基桩的负摩阻力分布有很大的影响, 建议在实际工程中综合分析地质条件、桩基的受力特点及承载要求, 选取合适的加载顺序来减小桩身负摩阻力。

**关键词:** 堆载; 桩载; 施加顺序; 单桩; 负摩阻力; 单桩承载力发挥系数; 模型试验

中图分类号: TU411.93

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0266-06

**作者简介:** 马学宁(1974-), 男, 教授, 主要从事岩土、道铁等方面的教学与研究。E-mail: 65809626@qq.com。

## Model tests on negative skin friction of single pile considering applying sequence of pile load and surcharge loading

MA Xue-ning, ZHANG Pei-yun, WANG Xu, WANG Bo-lin

(College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Based on the laboratory model tests, the influence of the sequence of pile load and the soil load surrounding the pile on the negative friction of single pile is studied. The results show that under pile-soil load, after the applying of the soil load surrounding the pile, the neutral point is the furthest away from pile top. With the increase of pile load, the position of the neutral point gradually moves up, eventually, 0.5l far from the pile top. The axial force of pile body increases first and then decreases, the exert coefficient of bearing capacity of single pile is 0.69. When the pile load is first applied, the axial force of pile shaft gradually decreases along the depth, there is no neutral point. While the soil load is applied, the axial force increases first and then decreases, and the neutral point appears and gradually moves down, finally it is near 0.41l, and the exert coefficient of bearing capacity of single pile is 0.86. There is the greater exert coefficient of bearing capacity in the pile-soil load sequence, that is, the safety reserve of the bearing capacity of the pile is smaller. The above analysis shows that the bearing layer of the pile tip and the sequence of loading have great influence on the distribution of negative skin friction. It is suggested to select the appropriate loading sequence to reduce the negative skin friction of the pile by analyzing the geological conditions, stress characteristics of the pile foundation and bearing requirements in practical engineering.

**Key words:** surcharge loading; pile load; applying sequence; single pile; negative skin friction; exert coefficient of bearing capacity of single pile; model test

## 0 引言

竖向荷载作用下基桩的承载力由桩侧土产生的摩阻力和桩端阻力构成。当桩周有大面积堆载, 桩周土体的沉降大于桩体的沉降时, 在桩侧产生负摩阻力<sup>[1]</sup>。桩侧负摩阻力不能为承担上部荷载做出贡献, 反而要产生作用于桩侧的下拉荷载, 造成基桩沉降过大使桩端地基土屈服或破坏、桩身破坏、上部结构不均匀沉降等。因此, 负摩阻力已成为桩基础设计中必须考虑

的关键问题之一<sup>[2]</sup>。

关于基桩负摩阻力的研究, 在 1948 年 Peck 和 Terzaghi 就提出了桩基负摩阻力的概念<sup>[3]</sup>, 近年来国内外学者主要采用理论推导、现场实测、室内模型试验等方法对其进行研究。在理论分析方面, Cao 等<sup>[4]</sup>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41562014, 41402252)

收稿日期: 2017-06-11

通过建立双曲线模型, 考虑桩-土接触面上的初始剪切刚度, 分析了桩载和堆载作用下的桩侧负摩阻力; Ashour 等<sup>[5]</sup>基于竖向位移随时间的变化关系, 提出了一种计算轴向摩阻力的方法; 白敬等<sup>[6]</sup>建立了横观各向同性地基在堆载作用下桩土相互作用关系表达式, 并给出了其求解方法; 在现场实测方面, 张永宁<sup>[7]</sup>对湿陷性黄土场地两根抗拔桩和两根空底抗压桩的正摩擦力和负摩擦力进行测试, 得出湿陷性黄土地区钻孔灌注桩负摩擦力的分布规律; Xia 等<sup>[8]</sup>通过现场试验研究了先桩载后堆载作用下桩侧摩阻力的变化规律。在模型试验方面, 马学宁等<sup>[9]</sup>研究了不同下卧层情况下桩体、桩周土变形、桩身轴力分布及中性点的变化规律。杨庆等<sup>[10]</sup>通过粉土的单桩静载试验, 分析了桩周土堆载条件下, 桩侧摩阻力、桩端阻力及“中性点”位置和下拽力的变化规律。在数值模拟方面, Yao 等<sup>[11]</sup>、王鹏等<sup>[12]</sup>利用有限元软件模拟了单桩在堆载情况下的负摩阻力及中性点的变化规律。还有一些学者结合不同的方法(如试验和数值模拟相结合的方法), 对基桩负摩阻力进行了卓有成效的研究。

由于桩周土和桩体承受荷载后的沉降发展过程不同, 所以桩载与堆载施加顺序对桩体负摩阻力的影响较大。目前, 国内外在加载次序对桩基负摩阻力影响的研究还很少, 现行的规范中都没有论及这个问题。因此, 本文通过模型试验, 分别研究先堆载后桩载和先桩载后堆载对桩体沉降、中性点位置、桩身轴力分布以及桩基承载力发挥系数的影响, 为类似工程桩基的设计提供参考。

## 1 试验方案

本文通过缩小桩的直径, 选取合理的长径比, 不改变桩周土的性质, 通过调整桩周土堆载和桩体加载顺序的方式, 探讨桩身负摩阻力和中性点的分布规律。

### 1.1 试验装置

#### (1) 模型箱

模型箱长 120 cm, 宽 120 cm, 高 130 cm, 用厚 10 mm 的钢板和角钢焊接而成。桩载和堆载反力架交叉用螺栓连接在箱体上。模型箱内侧铺一层塑料薄膜并均匀涂抹凡士林, 以便消除模型箱侧壁摩擦力对土体变形的影响(图 1)。

#### (2) 测试原件及设备

在桩身按一定间距粘贴应变片, 如图 2, 采用静态应变仪采集桩身应变。为了记录加载过程中不同深度处桩周土层沉降, 分别在靠近桩体附近的桩周土不同深度(距填土面分别为 20, 40, 60 和 80 cm)处布

设分层沉降板并均匀铺撒一层白灰, 试验结束通过量测桩土接触位置白灰的变形和沉降板的变形, 建立一定的换算关系, 即可近似得到分级加荷过程中与桩接触的桩侧土的沉降; 桩体沉降采用百分表测试, 考虑到桩身荷载较小且桩体刚度较大, 本试验假设模型桩为刚性桩, 即取桩顶位移与桩底位移相等。

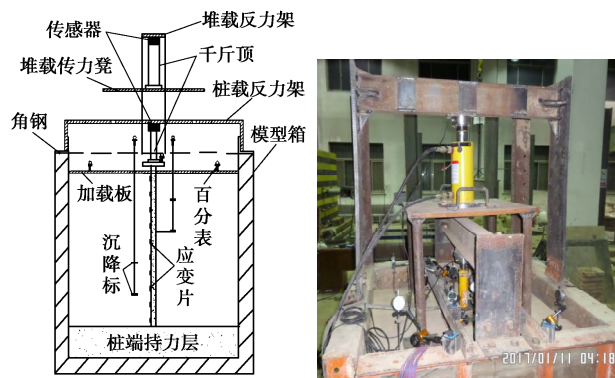


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

### 1.2 模型桩及桩周填土

模型桩采用亚克力棒模拟, 直径为 3 cm, 桩长为 105 cm, 其中入土长度为 100 cm。为模拟桩周土与混凝土桩的相互作用, 在桩体表面涂一层环氧树脂胶, 最后将粒径为 0.5 mm 和 0.2 mm 的干净砂分别均匀粘贴在桩身, 制作好的模型桩如图 2 所示, 模型桩长径比为 33, 桩周堆载宽度为桩长的 0.6 倍。通过室内试验测得模型桩的弹性模量为 3 GPa。

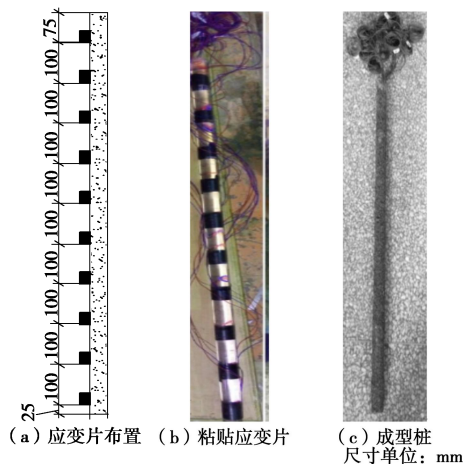


图 2 模型桩

Fig. 2 Model pile

试验采用兰州九州台黄土, 通过土工试验测得其最优含水率  $w_{opt}=14.7\%$ , 最大干密度  $\rho_{dmax}=1.86 \text{ g/cm}^3$ , 液限  $w_L=27.8\%$ , 塑限  $w_P=15.2\%$ , 塑性指数  $I_P=12.6$ 。通过颗粒分析试验, 得到表 1 所示的土粒粒组含量分布。

表 1 土粒粒组含量分布表  
Table 1 Distribution of contents of soil granule

粒径范围/mm	>0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	<0.005
百分比/%	41.22	53.01	3.77	2

1.3 试验工况

为模拟软弱地基，桩周土含水率取为 16%，压实系数为 0.7，桩端持力层为黄土（压实系数为 0.8，含水率为  $w_{opt}$ ，模拟摩擦桩）；加载方式为：工况一先堆载后桩载，工况二先桩载后堆载。

1.4 试验步骤

（1）按设定的压实系数填筑 20 cm 厚的持力层，然后再分层填筑桩周土，每层填土高度为 20 cm。填土过程中，在相应位置布设模型桩和分层沉降板，并铺撒白灰。

（2）填土完成，经测试各元器件工作状态良好后，用塑料薄膜封闭土样 48 h，待模型箱内土体含水率基本均匀，即可进行加载试验。

（3）桩周土加载，通过液压千斤顶配合压力传感器进行，分 5 级加载，每级 20 kPa，加载前、后分别记录加载板的沉降量，当一小时内沉降量小于 0.1 mm 时，认为沉降稳定，继续施加下一级荷载，最大加载值为 100 kPa。采用液压千斤顶施加桩顶荷载，每级 0.5 kN，最大加载值为单桩极限承载力的一半。加载示意图如图 1 所示。

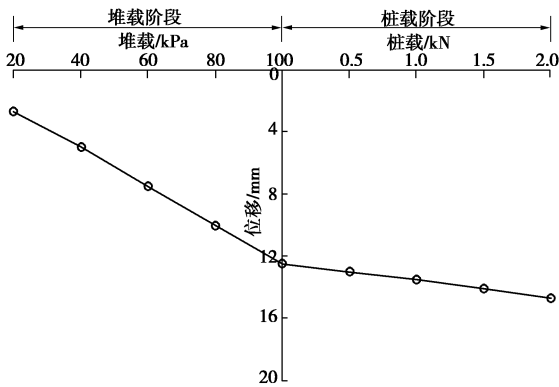


图 3 桩体荷载 - 沉降曲线

Fig. 3 Load-settlement curve of pile

2 试验结果分析

首先通过单桩竖向抗压承载力试验，确定了黄土持力层单桩竖向抗压极限承载力为 4 kN，取安全系数为 2，则单桩竖向抗压承载力特征值为 2 kN。

2.1 先堆载后桩载工况下桩体变形及承载特性分析

该工况模拟桩基施工完成后，在桩周均匀堆载，然后在桩体上施加工作荷载；加荷顺序为：先分 5 级，

每级 20 kPa 给桩周土施加荷载，变形稳定后，再分级施加 2 kN 的桩顶荷载。

（1）桩体沉降

图 3 为先堆载后桩载条件下的桩体荷载沉降曲线，可见，在堆载阶段，随荷载增大桩体沉降逐步增大，堆载稳定后的桩体沉降为 12.5 mm；随着桩顶荷载的逐步增大，桩体位移逐渐增大，且沉降速率较堆载阶段慢，当桩顶荷载达到 2 kN 时，桩体沉降增加至 14.6 mm。

（2）桩土相对位移及中性点位置

图 4 为桩土相对位移变化曲线，由图可知土体位移沿深度逐渐减小，而桩体位移随堆载和桩载的增大逐渐增大。

根据桩周土层沉降与桩沉降相等的条件确定中性点深度，从图 4 可见，在堆载阶段，由于土体沉降速率较桩体大，故中性点位置在堆载阶段逐渐下移，堆载稳定后距桩顶最深，随桩载的增大又逐渐上移。这是因为，施加桩载时，土体位移基本不变，桩体位移随桩载的增加而增加，导致沉降相同点逐渐上移。由图可知，堆载稳定时，中性点距桩顶 60 cm（约 0.6*l*，*l* 为桩长），随着桩载的增加，中性点的位置逐步上移，当桩顶荷载达到 2 kN 时，中性点位置距桩顶 49 cm（0.49*l*），比堆载稳定时上移了 11cm 即 0.11*l*。

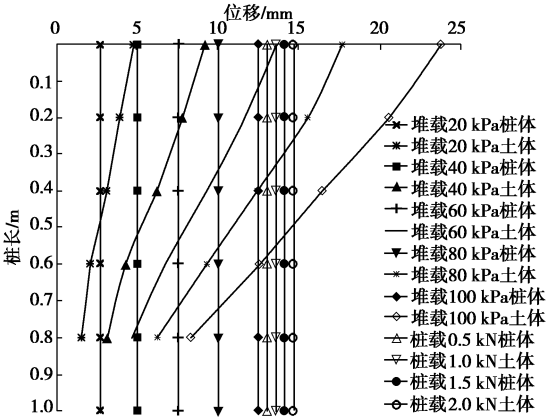


图 4 桩土相对位移

Fig. 4 Relative displacement between pile and soil

（3）桩身轴力

图 5 为先堆载后桩载桩身轴力分布图，从图中可见，桩身轴力沿深度呈现先增大至峰值然后逐渐减小的趋势，堆载稳定时，峰值轴力的位置离桩顶最远，随着桩顶荷载的增加，桩身位移增大，峰值轴力的位置也逐渐上移，曲线逐渐变缓，堆载 100 kPa 稳定时，桩身峰值轴力为 2.22 kN，该值也为负摩阻力引起的桩身下拉荷载，当桩载等于 2 kN 时，桩身峰值轴力为 2.77 kN，由负摩阻力引起的下拉荷载为 0.77 kN。

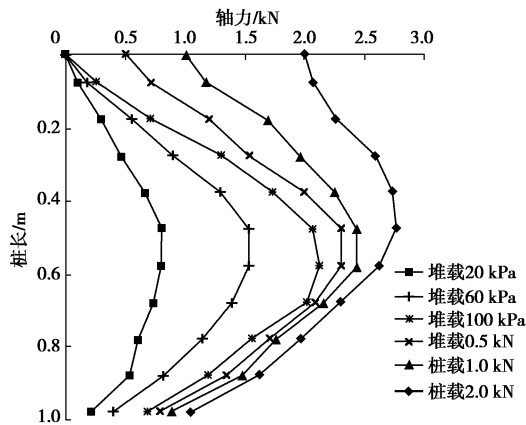


图5 桩身轴力分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of axial force of pile

#### (4) 桩身负摩阻力

图6为先堆载再桩载桩身摩阻力分布图, 根据负摩阻力为零的条件确定中性点位置。由图可知, 桩身摩阻力沿深度方向先呈负向增长, 达到峰值再呈正向增长, 超过中性点以后均为正摩阻力。堆载阶段, 正负摩阻力都随荷载增大而增大; 当堆载稳定时, 随着桩载增加, 桩身负摩阻力减小, 正摩阻力增加。这主要是由于桩顶荷载作用下桩体沉降逐渐增大致使桩-土相对位移重新分布, 因此桩侧摩阻力随之重新分布。堆载稳定时, 桩身最大负摩阻力为-60.4 kPa, 中性点位置距桩顶 62 cm (0.62 $l$ ) 处; 桩载等于 2 kN 时, 最大负摩阻力为-32 kPa, 中性点位置距桩顶 50 cm (0.50 $l$ ) 处, 最大正摩阻力在桩端附近, 最大值为 59.8 kPa。

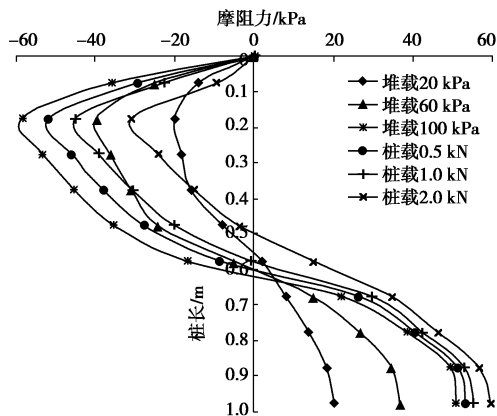


图6 桩身负摩阻力分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of negative skin friction of pile

由先堆载后桩载模型试验结果可知, 当桩顶荷载为 2 kN 时, 通过桩土相对位移确定的中性点位置为 0.49 $l$ , 通过桩身负摩阻力确定的中性点位置为 0.50 $l$ 。可见, 两种模式确定的中性点位置近似相等, 表明本文模型试验结果是可靠的。

## 2.2 先桩载后堆载工况下桩体变形及承载特性分析

该工况模拟桩基施工完成, 承担上部结构正常使用荷载后, 在桩周堆载; 该工况加荷顺序为: 先分级

施加 2 kN 桩顶荷载, 变形稳定后, 在桩周土上分 5 级施加堆载 100 kPa。

#### (1) 桩体沉降

图7为先桩载后堆载桩体荷载沉降曲线, 从图中可见, 施加桩载阶段, 桩体沉降随荷载的增大而增大, 然后保持桩顶荷载不变, 在桩周土上分级施加堆载, 此时桩体沉降不断增大。当施加 2 kN 桩顶荷载时, 桩体最大位移为 3.1 mm, 当堆载等级达到 100 kPa 时, 桩体沉降增大到 18 mm。

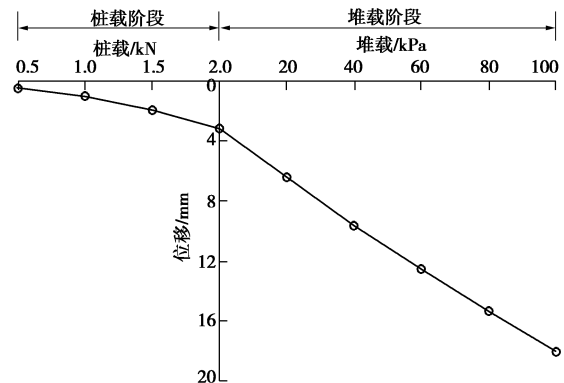


图7 桩体荷载-沉降曲线

Fig. 7 Load-settlement curve of pile

#### (2) 桩土相对位移及中性点位置

图8为先桩载后堆载工况下桩土相对位移变化曲线。由图可知, 施加桩载时, 桩体位移较桩周土位移大, 因此中性点未出现; 随着堆载的施加, 土体位移逐渐增大, 使桩-土相对位移逐渐调整, 中性点出现并逐渐向下移动, 当堆载等于 20 kPa 时中性点出现在桩顶以下 2.1 cm (0.021 $l$ ), 堆载 100 kPa 时中性点位置在桩顶以下 41 cm (0.41 $l$ ) 处。

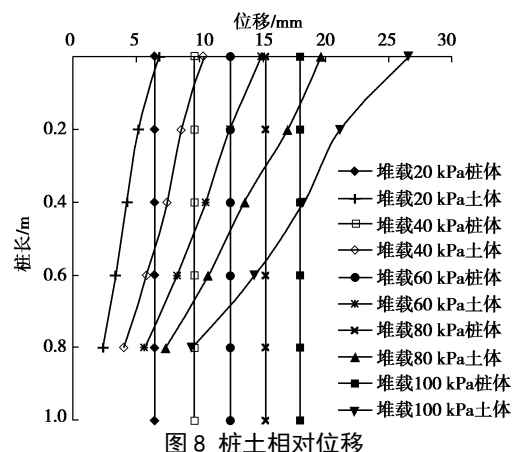


图8 桩土相对位移

Fig. 8 Relative displacement between pile and soil

#### (3) 桩身轴力

图9为先桩载后堆载工况下桩身轴力分布曲线。可见, 先施加桩载时, 桩周土对桩体产生正摩阻力, 因此每级桩载作用下桩身轴力沿桩身呈逐渐减小的趋势, 施加堆载时, 桩身轴力逐步呈现出先增大后减小

的趋势，且随堆载的增大峰值轴力逐渐增大且出现的位置逐渐下移，即中性点位置逐渐下移。堆载 100 kPa 时，桩身轴力峰值为 3.45 kN，由负摩阻力引起的下拉荷载为 1.45 kN。

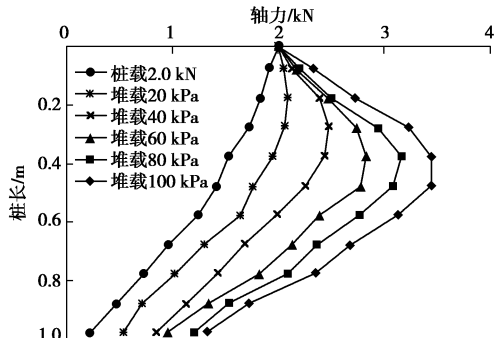


图 9 桩身轴力分布  
Fig. 9 Distribution curve of axial force of pile

(4) 桩身摩阻力

图 10 为先堆载再桩载工况下桩身摩阻力分布图，施加桩载时，由于桩身轴力沿桩身呈线性减小，摩阻力皆为正，施加堆载时，桩身有负摩阻力出现。堆载 100 kPa 时，桩身峰值负摩阻力为 -51.2 kPa，中性点位置距桩顶 44 cm (0.44l) 处。

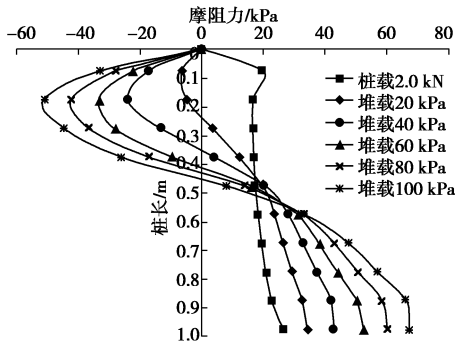


图 10 桩身负摩阻力分布曲线  
Fig. 10 Distribution curves of negative skin friction of pile

2.3 两种工况试验结果对比

(1) 桩体沉降

工况一作用下桩体累积沉降为 14.6 mm，工况二作用下桩体累计沉降为 18 mm；表明先桩载再堆载条件下桩体位移比先堆载再桩载条件下桩体位移大，继而影响桩身摩阻力的分布和中性点的位置。

(2) 中性点位置

两种工况下确定的中性点位置如图 11 所示。可见，工况一堆载完成后，中性点位于桩顶以下 0.6l 处，然后随桩载的增加，中性点逐渐上移，工况二桩载阶段无中性点，随堆载的增加出现并下移。由桩土相对位移确定的工况一和工况二的最终中性点位置分别位于桩顶以下 0.49l 和 0.41l 处，可见两种方法确定的中性点位置基本一致，表明模型试验结果的准确性；且由于工况二桩体位移大于工况一，所以最终工况二比工况一的

中性点位置距离桩顶更近。

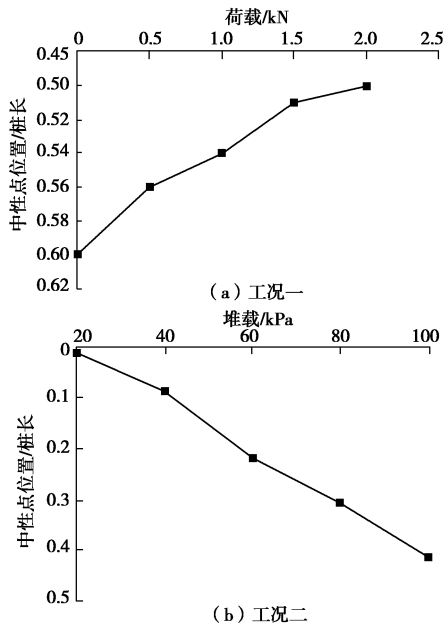


图 11 中性点位置随荷载变化曲线  
Fig. 11 Variation of neutral point with load

(3) 桩体承载力发挥系数

本文将桩体承载力发挥系数  $K_s$  定义为桩体最大轴力与桩体极限承载力之比。图 12 为两种工况下桩体承载力发挥系数随荷载变化曲线，由图 12 (a) 可见，随着荷载的施加，桩体的承载力发挥系数逐渐增大，但堆载阶段比桩载阶段增加幅度大。当堆载 100 kPa 时，桩基承载力发挥系数达到 0.56，桩载达到 2 kN 时，桩基承载力发挥系数增大了 0.13，达到了 0.69。图 12 (b) 为先桩载再堆载条件下桩基承载力发挥系数随堆载值的变化曲线。

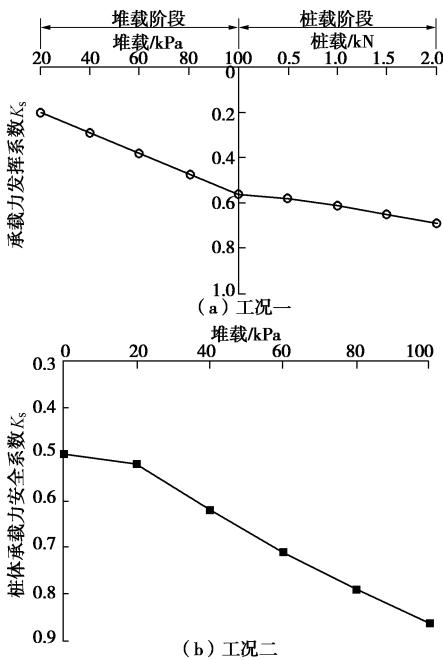


图 12 桩体承载力发挥系数变化曲线  
Fig. 12 Curve of exert coefficients of bearing capacity of pile

由图可见, 桩载 2 kN 时桩体承载力发挥系数为 0.5, 堆载稳定后桩体承载力发挥系数达到 0.86, 堆载阶段增大了 0.36; 对比两种工况下桩体承载力安全系数可知, 工况二的桩体承载力发挥系数更大, 即其桩基承载力安全储备更小, 且两种工况下堆载对桩体承载力的发挥作用都不容忽视, 由于堆载条件下负摩阻力的存在, 产生较大的下拉荷载, 该附加荷载甚至会大于桩体的承载力特征值, 导致桩基安全储备大大减少, 无形中会增大桩基的沉降, 继而影响桩基上部结构的安全使用。因此, 实际工程中, 应严格控制堆载宽度, 堆载集度以及堆载边缘距桩体中心的距离。

### 3 结 论

基于室内模型试验, 研究了先桩载后堆载及先堆载后桩载对桩体沉降、中性点位置、桩身轴力及承载力发挥系数等的影响, 得到如下结论:

(1) 工况一下, 堆载完成后, 中性点位置离桩顶最深, 随桩载的增加, 中性点位置逐渐上移, 桩载完成后, 中性点位置在桩顶以下 0.5*l* 附近。工况二下, 先施加桩载时, 无中性点, 随堆载的增大, 中性点出现并逐渐下移, 最终中性点位置在 0.41*l* 附近。即工况一比工况二中性点位置更深, 负摩阻力区更大。

(2) 工况二的桩基承载力发挥系数较工况一的大, 即桩基承载力安全储备小, 因此, 实际工程中, 为保证结构的安全性, 应严格控制桩周堆载宽度, 堆载集度以及堆载边缘距桩体中心的距离。

(3) 桩基础加载顺序可根据实际情况进行调整, 因此, 在工程中应根据实际条件以及桩基的承载能力, 选取合适的加载顺序来减小桩身负摩阻力。

### 参考文献:

- [1] 袁灯平, 黄宏伟, 程泽坤. 软土地基桩侧负摩阻力研究进展初探[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 53 - 60, 84. (YUAN Deng-ping, HUANG Hong-wei, CHENG Ze-kun. Research progress of negative skin friction on piles in soft soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 53 - 60, 84. (in Chinese))
- [2] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. (Compile Committee of Pile Foundation. Pile foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995. (in Chinese))
- [3] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: Wiley, 1948.
- [4] CAO Wei-ping, CHEN Yun-min, WOLFE W E. New load transfer hyperbolic model for pile-soil interface and negative skin friction on single piles embedded in soft soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(1): 92 - 100.
- [5] ASHOUR M, HELAL A. Contribution of vertical skin friction to the lateral resistance of large-diameter shafts[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(2): 289 - 302.
- [6] 白 敬, 王彦洋. 堆载对桩身轴力分布和承载能力的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2013(12): 1635 - 1638. (BAI Jing, WANG Yan-yang. Influence of overload on axial force and bearing capacity of pile in soft soil[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2013(12): 1635 - 1638. (in Chinese))
- [7] 张永宁. 湿陷性黄土场地钻孔灌注桩负摩擦力试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. (ZHANG Yong-ning. Negative friction test on bored pile foundation of collapsible loess area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese))
- [8] XIA L N, HU H T, ZHOU S L, et al. Test research on the development of negative skin friction on piles under vertical loads and surcharges[J]. Innovative and Sustainable Use of Geomaterials and Geosystems, 2014(245): 87 - 96.
- [9] 马学宁, 张沛云, 贾喜翠, 等. 不同桩端下卧层桩基负摩阻力模型实验研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(1): 11 - 15. (MA Xue-ning, ZHANG Pei-yun, JIA Xi-cui. Model test of pile negative friction for different pile-end underlying layers[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(1): 11 - 15. (in Chinese))
- [10] 杨 庆, 孔纲强, 郑鹏一, 等. 堆载条件下单桩负摩阻力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2805 - 2810. (YANG Qing, KONG Gang-qiang, ZHENG Peng-yi, et al. Model test study of negative skin friction for single pile under surface load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2805 - 2810. (in Chinese))
- [11] YAO Wen-juan, LIU Yi-min, CHEN Jun. Characteristics of negative skin friction for superlong piles under surcharge loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2012, 12(2): 90 - 97.
- [12] 王 鹏, 白兴蓉, 黄泽权. 桩在边载条件下的负摩阻力分析[J]. 交通科学与工程, 2013, 29(4): 57 - 60. (WANG Peng, BAI Xing-rong, HUANG Ze-quan. Negative friction analysis of pile on the side load conditions[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2013, 29(4): 57 - 60. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)