

垂直受荷桩负摩阻力时间效应的试验研究

夏力农, 柳红霞, 欧名贤

(长沙学院 土木工程系, 湖南 长沙 410003)

摘要: 在地面堆载作用下, 对3根施加不同荷载桩的负摩阻力性状的时间效应进行现场测试。试验结果表明, 负摩阻力随堆载作用时间的延续而变化; 堆载使土体沉降, 土体沉降就会引起负摩阻力。在堆载初期, 负摩阻力引起的桩附加沉降速率随着桩顶荷载的增大而加快, 且稳定的附加沉降随着桩顶荷载的增大而增加。在有桩顶荷载的2种情况下, 下拉力随着堆载作用的时间延续而增大, 稳定的下拉力随着桩顶荷载的增加而减小。在堆载作用下, 桩顶荷载推迟了负摩阻力出现的时间。桩顶荷载越大, 中性点初次出现的时间越晚、位置越浅。中性点出现的时间随着桩顶荷载的增加而延后, 桩顶荷载的增大会加剧这些现象。上述研究结果对于桩的负摩阻力性状的研究有一定参考价值。

关键词: 桩基工程; 桩顶荷载; 负摩阻力; 时间效应; 现场试验

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)06-1177-06

EXPERIMENTAL RESEARCH ON TIME EFFECTS OF NEGATIVE SKIN FRICTION BEHAVIORS OF VERTICAL-LOADED PILES

XIA Linong, LIU Hongxia, OU Mingxian

(Department of Civil Engineering, Changsha University, Changsha, Hunan 410003, China)

Abstract: Under the action of the ground surcharges, field measurements for time effects of negative skin friction behaviors of three piles with different vertical loads on the pile top are adopted. Test results show that negative skin friction behaviors change with the extension of time under the action of surcharges. Ground surcharges will cause the soil settlement surrounding the piles; and the soil settlement surrounding the piles can induce negative skin friction in piles. At the initial stage of surcharges, the additional settlement rate of piles caused by negative skin friction gets rapidly; and the final additional settlement in piles increases with the increase of load on the pile top. Drag forces caused by negative skin frictions in piles increase gradually with the extension of surcharges loading time; and final drag forces in piles decrease gradually with the increase of load on the pile top in both vertically loaded and unloaded piles. Under the action of surcharges, the load on the pile top postpones the arrival of negative skin friction in piles. The larger of the load on the pile top is, the later the appearance of the neutral point in pile is, and the smaller the length between the neutral point and the pile top is. The time of the neutral point in piles is delayed with the increase of the load on the pile top. Increase of load acted on pile top would promote above-mentioned phenomena. It may be useful for the research of negative skin friction behaviors of piles.

Key words: pile foundations; load acted on pile top; negative skin friction; time effects; field test

收稿日期: 2009-02-09; **修回日期:** 2009-03-09

基金项目: 长沙学院引进人才启动项目

作者简介: 夏力农(1964-), 男, 博士, 1984年毕业于浙江大学土木工程系建筑结构专业, 现任教授, 主要从事深基础及地基处理方面的教学与研究。E-mail: lnxia@126.com

1 引言

当桩周土体沉降大于桩基沉降时, 桩周将产生负摩阻力。负摩阻力对桩产生下拉作用, 使作用在基桩的荷载增加, 荷载抗力减少, 沉降增大。负摩阻力的影响严重时还会使建(构)筑物不能正常使用甚至危及结构安全。

负摩阻力是随着桩周土体的沉降而出现和发展的。大量的工程测试表明, 负摩阻力的发展过程是一个漫长的过程。在工程使用阶段, 负摩阻力仍然会有明显的变化发展^[1~4]。因此, 研究负摩阻力随时间发展变化的规律具有重要意义。

国内外对于负摩阻力性状做了很多理论和试验研究^[5~12]。不过, 关于负摩阻力时效性研究^[13~15]不多, 还需要对此做更深入的研究。本文通过不同桩顶荷载作用下负摩阻力的现场试验, 探求在不同桩顶荷载作用条件下桩的负摩阻力随着地面堆载作用时间发展变化的影响规律。

2 工程地质条件与试验方案设计

2.1 工程地质条件

基桩的现场试验场地内地形平坦, 场地标高为 31.68~32.46 m, 场地内最大高差为 0.78 m。场地地貌单元属于沅水左岸 I 级阶地范畴。在试验之前, 对场地做了工程地质勘查, 场区在桩长范围内土层^[3]分布主要为 3 层:

(1) 第 1 层为粉土: 黄褐色, 坚硬~硬塑状为主, 局部可塑状, 切面粗糙无光泽, 干强度中等, 韧性中等, 本层含少量细砂。该层土液性指数平均值为 0.16, 属于硬塑状土; 压缩系数平均值为 0.26 MPa⁻¹, 属于中压缩性土。压缩模量平均值为 6.9 MPa, 黏聚力标准值为 31 kPa, 内摩擦角标准值为 16.83°。

(2) 第 2 层为细砂: 黄褐色、灰黑色, 矿物成分主要为石英、云母, 饱和, 松散状, 本层含少量粉土。振动沉管灌注桩的极限摩阻力为 16 kPa。

(3) 第 3 层为圆砾: 由卵石、砾石、细砂组成, 粒径一般 8~15 mm, 最大 40 mm, 粒径大于 2 mm 的颗粒含量为 70.6%~79.6%, 磨圆度较好, 细砂填充, 母岩成分为石英、燧石等。密实度在垂直方向以稍密为主, 局部位松散状和中密状, 中间未见软

弱夹层。振动沉管灌注桩的极限摩阻力为 80 kPa。

场地周围无地表水, 地下水主要为孔隙潜水和孔隙承压水。孔隙潜水分布在表层土中, 主要由大气降水补给, 水量较小。孔隙承压水分布在细砂、圆砾层中, 与沅水呈互补关系。承压水水量丰富, 粉质黏土、粉土为相对隔水层。现场实测的地下水位埋深约为 1.0 m。经分析, 地下水对混凝土有弱腐蚀性。

2.2 试验方案设计

为了比较在不同桩顶荷载作用下负摩阻力基桩负摩阻力随时间发展变化的差异, 在相同场地上打下 3 根桩, 每根桩间隔 2.8 m。试验桩采用振动沉管灌注桩, 桩长为 10.50 m, 管径为 287 mm, 复打一次, 成桩的直径预计为 350 mm。钢筋为通长配置的 8 ϕ 12 mm, 上部 2 m 范围内箍筋为 ϕ 6 mm@100 mm, 其余部分箍筋为 ϕ 6 mm@200 mm。

在试验测试阶段, 连续的阴雨天气使试验场地上土体含水率很高, 若不采取排水措施, 预计桩周土体在地面堆载下沉较小, 可能会使负摩阻力变化不够明显。为了试验测试的方便, 在桩身混凝土强度已经达到 80%以后, 将试验桩周围上部 4 m 深的土体挖出, 开挖的平面尺寸为 10 m \times 5 m(长 \times 宽), 开挖部分采用建筑用砂置换回填。

桩周换填砂经过 40 d 自然堆积沉降之后, 在换填区域内的两个位置进行了标准贯入度试验。其中第一点在埋深 2.7~3.0 m 处测得 $N = 9$ 击, 但从现场测试过程来看, 测试方法不规范。在第二点测试中, 从地面下 15 cm 处直接测试, 测得 $N = 1$ 击, 这与换填砂的现场情况比较吻合。因此选择 $N = 1$ 击作为标准贯入度测试结果。根据经验公式计算得到: 换填砂的相对密实度 $D_r = 0.24$, 压缩模量 $E_s = 5.0$ MPa, 内摩擦角 $\varphi = 27.3^\circ$ 。

现场对换填砂取样一组进行室内试验, 得到土体物理参数: 湿重度为 17.5 kN/m³, 干重度为 13.8 kN/m³, 含水率为 26.2%, 孔隙比为 0.933, 相对密度为 2.68。

设计桩身混凝土强度等级为 C25, 桩身混凝土在浇注时每根桩提取了一组 3 个试样在自然条件下养护。根据混凝土强度检验结果, 3 根试验桩混凝土的平均抗压强度和弹性模量分别为 26.2 MPa 和 314.0 GPa(桩顶荷载为 0 kN, 试验桩 TP1), 27.1 MPa 和 32.6 GPa(桩顶荷载为 75 kN, 试验桩 TP2), 26.3 MPa 和 31.5 GPa(桩顶荷载为 125 kN, 试验桩 TP3)。

2.3 测试仪器与测点布置

试验桩的加载装置采用堆载平台反力装置, 堆载材料为砂袋, 所有堆载是一次性堆放在平台上的。为了防止堆载造成地面沉降而影响测试结果, 堆载平台的支点均在换填的区域之外。

为了测量桩身在各种条件下的应力应变情况, 在每根桩的钢筋笼上埋设了埋入式智能弦式数码应变计。应变计最低位置在桩端以上 75 cm, 每隔 1 m 埋设一个, 最上部的应变计为地面下 50 cm。每根桩埋设 9 个应变计。数据读取采用同一公司生产的综合测试仪, 直接读取应变值。应变计的主要技术参数: 量程: $\pm 1\ 500\ \mu\epsilon$; 灵敏度: $1\ \mu\epsilon$; 测量标距: 157 mm; 使用环境温度: $-10\ ^\circ\text{C}\sim+70\ ^\circ\text{C}$; 温度测量范围: $-20\ ^\circ\text{C}\sim+110\ ^\circ\text{C}$; 温度测量: 灵敏度 $0.5\ ^\circ\text{C}$; 精度 $\pm 1\ ^\circ\text{C}$ 。

综合测试仪的主要性能指标: (1) 测量范围。混凝土应变: $\pm 1\ 500\ \mu\epsilon$; 振弦频率: 600~3 500 Hz。(2) 测量精度。应变精度: $\pm 2\ \mu\epsilon$; 振弦频率精度: $(0.1\pm 0.1\%)\ \text{Hz}$ 。(3) 使用环境。温度: $-10\ ^\circ\text{C}\sim+40\ ^\circ\text{C}$; 相对湿度 $\leq 90\%$ 。

在每根桩的桩顶设置一个百分表, 对桩的沉降进行测量。从施加桩顶荷载开始对 3 根试验桩的沉降进行观测。由于施加地面堆载时对百分表产生了扰动, 在桩顶荷载作用下的沉降观测与施加地面堆载后的沉降观测不是连续的, 而是分为两个阶段进行的。

2.4 加载方式

试验中先施加桩顶荷载, 其中试验桩 TP1 不施加荷载, 试验桩 TP2, TP3 分别施加 75 和 125 kN 的桩顶荷载。桩顶荷载是一次性施加的, 直到试验终止。

地面堆载是在桩顶荷载作用下的基桩沉降稳定之后开始施加的。地面堆载直接堆在桩周围的地面上。为避免堆载对高出地面部分基桩的作用而影响测试结果, 在桩头高出地面部分与堆载之间采取了隔离措施。地面堆载的高度约为 1.2 m, 堆载材料重度约为 $15\ \text{kN/m}^3$ 。

3 试验结果与分析

负摩阻力是桩土相对位移的结果。土体沉降是随着地面堆载作用时间的延长而发展的。在不同的桩顶荷载作用下, 基桩负摩阻力的发展变化过程也是不相同的。

在应变仪安装之后, 正式测试之前, 桩基施工和桩周土体换填过程中的卸载与加载等因素, 以及换填砂层在自重作用下的沉降都会引起桩中应力应变的变化。这些应力应变的变化都会反映到应变仪上, 并对最终的测试结果产生影响。现在还不能准确评价以上过程对桩身应力产生的影响, 为了消除这些初始应力对于正式测试结果的影响, 在正式测试之前, 对全部的应变仪重新读数, 并以此读数为正式测试的初始读数。

3.1 沉降测试结果

在施加地面堆载之前, 桩顶的沉降已经稳定。试验桩 TP1, TP2 和 TP3 的沉降分别为 0.00, 9.14 和 16.1 mm。在施加地面堆载后, 3 根试验桩桩沉降随堆载作用时间的关系曲线见图 1。由图 1 可知, 地面堆载的作用使不同桩顶荷载作用下的桩都出现附加沉降。在堆载作用的初期, 附加沉降速率是随着桩顶荷载的增大而增加的。随着时间的延续, 沉降速率都慢慢地稳定下来。试验桩 TP1 的附加沉降为 3.81 mm, 试验桩 TP2 的附加沉降为 4.57 mm, 试验桩 TP3 的附加沉降为 6.50 mm。在负摩阻力作用下, 基桩的附加沉降呈现随着桩顶荷载的增加而增大的趋势, 附加沉降的速率也随着桩顶荷载的增大而加快。在地面堆载作用初期, 桩周土沉降最快, 然后逐步趋于稳定, 这与桩顶荷载无关。

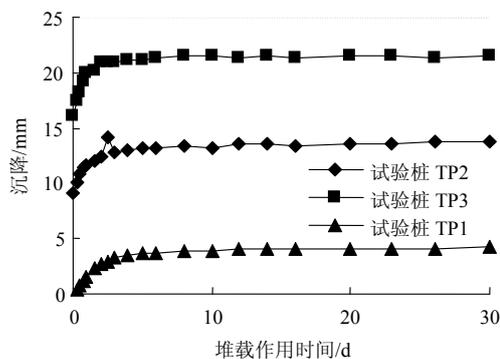


图 1 3 根试验桩沉降随堆载作用时间的关系曲线

Fig.1 Settlement-loading time curves of three testing piles

在堆载作用下, 试验桩的附加沉降和沉降速率随着桩顶荷载的变化而变化的趋势, 可以从桩的荷载-沉降曲线中找到答案, 见图 2(P 和 s_p 分别为桩顶荷载及对应的沉降; P_n 和 s_n 分别为下拉力和对应的沉降)。在无桩顶荷载时, 负摩阻力产生的沉降是从荷载-沉降曲线的直线段开始的, 其斜率较小; 而桩顶荷载较大时, 负摩阻力产生的附加沉降是从

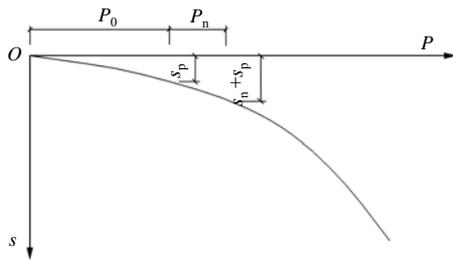
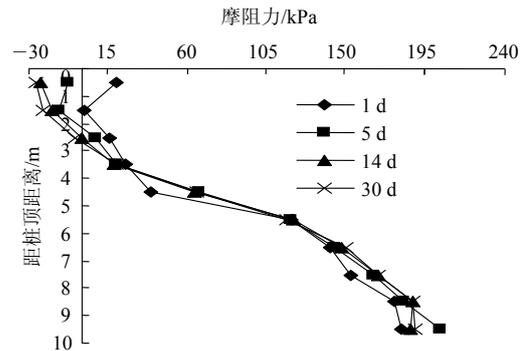


图2 试验桩的荷载-沉降曲线
Fig.2 Load-settlement curve of testing piles

曲线斜率较大的部分开始的，在相同的土体沉降引起的负摩阻力作用下，后者的附加沉降值更大些。同样的理由也可以用来解释在堆载作用的初期，基桩附加沉降的速率随着荷载的增加而加快。

3.2 负摩阻力出现与发展

桩顶荷载不同时，负摩阻力出现的时间不一样，见图3。在试验桩 TP3 中(见图 3(c))，在堆载作用初期，负摩阻力没有出现。随着堆载作用时间的延续，桩周土体沉降增加到一定程度，负摩阻力出现并逐渐加大。在试验桩 TP2 中(见图 3(b))，在地面堆载施加之初，负摩阻力就出现了，随着地面堆载作用时间的延续，桩周负摩阻力逐渐增大。在试验桩 TP1 中(见图 3(a))，地面堆载施加初期出现负



(c) 试验桩 TP3

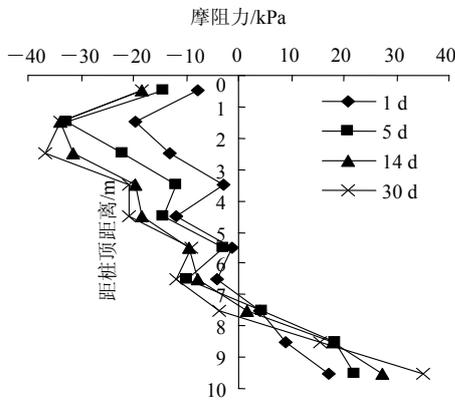
图3 3根试验桩摩擦阻力随时间的关系曲线

Fig.3 Relationship curves of friction forces with time for three testing piles

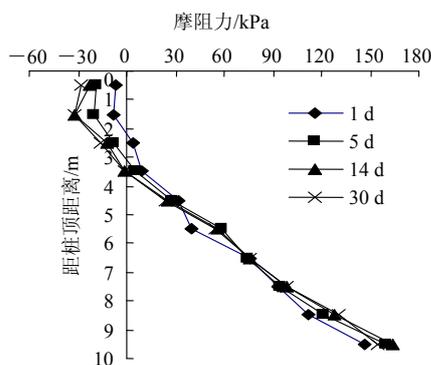
摩阻力，随着地面堆载作用时间的延续，桩周负摩阻力逐渐增大。随着地面堆载作用的延续，3根试验桩的负摩阻力值均呈现增长的趋势。在各个测试时间，试验桩 TP1 的负摩阻力是3根试验桩中最大的，TP2 的负摩阻力次之，TP3 的负摩阻力最小。在地面堆载作用下，负摩阻力出现的时间以试验桩 TP3 为最晚。尽管试验桩 TP1, TP2 在地面堆载作用初期就出现负摩阻力，但试验桩 TP2 的初期负摩阻力值明显比试验桩 TP1 要小。

3.3 下拉力随时间的发展结果

图4为3根试验桩桩身下拉力随时间的变化曲线。从图4可以看出，试验桩 TP1 和 TP2 的下拉力在堆载初期都很小，在试验桩 TP3 中甚至没有下拉力，随着堆载作用时间的延续，所有试验桩中的下拉力逐渐增大。在堆载作用下，负摩阻力引起的下拉力的增长速率是随着桩顶荷载的增大而减缓的。试验桩 TP1 的下拉力随着时间发展的速率最快，试验桩 TP2 次之，试验桩 TP3 下拉力增长速率最慢。随着桩顶荷载增大，下拉力增长的趋势逐渐变慢。所



(a) 试验桩 TP1



(b) 试验桩 TP2

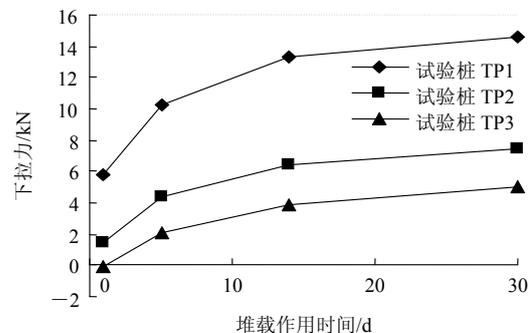


图4 3根试验桩桩身下拉力随时间的变化曲线

Fig.4 Variation curves of drag forces with time for three testing piles

有试验桩的下拉力在地面堆载作用的初期发展较快, 随着堆载作用时间的延续, 下拉力的发展速度逐渐慢下来, 直到稳定。

3.4 中性点位置随时间的变化

随着堆载作用时间的延续, 桩顶荷载不同的基桩中性点位置的变化特点也略有不同。图 5 为 3 根试验桩中性点位置随堆载作用时间的变化曲线。从中可以看出, 在不同桩顶荷载的试验桩中, 中性点位置都在一定的范围内变化。在试验桩 TP3 中, 中性点初次出现的时间最晚。随着堆载作用时间的延长, 中性点位置出现并逐渐下移, 最终稳定的中性点位置最浅。而且, 试验桩 TP3 中性点从出现到稳定的过程中的波动范围最小。试验桩 TP2 无论是中性点初始位置还是稳定的位置都在中间位置。试验桩 TP1 中性点初次出现的时间最早、位置最深, 最终稳定的中性点位置也是最深的。

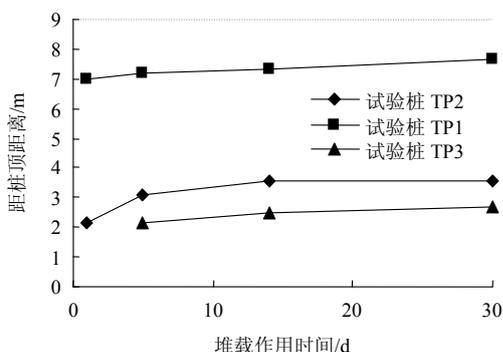


图 5 3 根试验桩中性点位置随堆载作用时间的变化曲线

Fig.5 Variation curves of neutral point location with loading time for three testing piles

负摩阻力会引起桩的附加沉降和下拉力, 而附加沉降与下拉力的大小不是彼此独立的, 而是相互关联的, 负摩阻力对基桩的影响是一个综合效应。地面堆载作用初期, 桩周土体的沉降较小, 在桩身中产生的负摩阻力值也较小, 中性点位置较高, 桩的附加沉降也较小。随着堆载时间的延续, 土体的沉降逐渐增大, 附加沉降随之增加, 中性点位置随之下降, 下拉力也随之增大。上述测试的结果与有限元分析的结果是相似的^[1]。

3.5 测试误差及影响测试结果的原因

在桩周土体的换填过程中, 桩周土体挖除之后, 基坑底面的回弹会使得桩身中产生摩阻力。桩周土体挖除之后作用在这部分桩身的侧压力解除了, 原来作用在桩身的摩阻力也消失了。而在换填材料重

新填满基坑之后, 又对桩产生了新的侧压力。基坑的回弹 - 压缩过程中侧压力的解除 - 施加的过程会引起桩身应力的变化。在正式测试之前, 换填砂在自重作用下已经产生一定的沉降。这部分沉降既会使换填土体参数有所改变, 也会在桩身上产生负摩阻力。负摩阻力使得桩身轴力有所增加, 还可能引起桩的沉降。在正式测试之前桩身中出现的这部分应力和沉降, 为避免对测试结果的影响, 在此次测试中均没有考虑这些前期应力。

4 讨论

在没有桩顶荷载作用时, 桩周土体沉降是桩土相互作用的惟一原因。而有桩顶荷载作用时, 桩顶荷载和桩周土体沉降都是桩土相互作用的主要原因。实际工程桩常常都是这样的荷载状况, 其加载次序一般是桩顶荷载先施加完毕, 然后施加负摩阻力。而引起负摩阻力的桩周土体的沉降出现、发展和完成需要很长时间。同时研究桩顶荷载和桩周土体沉降条件下的负摩阻力性状是十分复杂的工作。

基桩的负摩阻力不仅随着桩周土体沉降的发展而发展, 同时还受桩的长径比, 桩体刚度、桩侧剪切刚度及桩端持力层物理力学性能等诸多因素的影响。总之, 基桩的负摩阻力是复杂的课题, 本文所做的试验仅仅是对在不同荷载作用下, 负摩阻力随着地面堆载作用的时间发展变化的初步研究。要更准确地反映负摩阻力随土体时间发展变化的规律, 还要做更深入的研究。

5 结论

(1) 在桩顶荷载作用下的沉降稳定之后, 地面堆载使 3 根试验桩都产生附加沉降。附加沉降随着桩顶荷载的增加而增大。在堆载作用的初期, 试验桩的附加沉降速率随着桩顶荷载的增大而有所加快, 随着堆载作用时间的延续, 沉降速率都逐渐稳定下来。

(2) 在堆载作用下, 负摩阻力出现的时间随着桩顶荷载的增加而延后。在试验阶段, 桩身负摩阻力随着地面堆载作用时间的延续(桩周土体沉降在此过程中逐渐增大)而增长。稳定的负摩阻力值随着桩顶荷载的增加而减小。

(3) 在堆载作用下, 负摩阻力引起的下拉力随

着桩顶荷载的增大而减小。在各种荷载下, 下拉力随着堆载作用时间的延续而增大。下拉力增长的速度随着荷载的增大而放缓, 下拉力增长的趋势随着堆载作用时间延续逐渐变慢。

(4) 在堆载作用下, 中性点出现的时间随着桩顶荷载的增加而延后。桩顶荷载越大, 中性点初次出现的时间越晚、位置越浅。在各级荷载下, 中性点位置随堆载作用时间的延长而逐渐下移。稳定的中性点位置随着桩顶荷载的增加而上升, 中性点从初次出现到稳定的波动范围也随着桩顶荷载的增大而缩小。

参考文献(References):

- [1] 夏力农. 桩基负摩阻力特性的理论与试验研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2007.(XIA Linong. Theoretical and field test study on behavior of negative skin friction in piles[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2007.(in Chinese))
- [2] 陈福全, 龚晓南, 马时冬. 桩的负摩阻力现场试验及三维有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(3): 77 - 80.(CHEN Fuquan, GONG Xiaonan, MA Shidong. Field measurements and 3D FEM analysis of negative skin friction on piles[J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(3): 77 - 80.(in Chinese))
- [3] 夏力农, 杨秀竹. 桩顶荷载影响负摩阻力的现场试验与数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 25(5): 46 - 49.(XIA Linong, YANG Xiuzhu. Field test and numerical simulation of working load influences on negative skin friction behaviors of piles[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 25(5): 46 - 49.(in Chinese))
- [4] FELLENIUS B H. Results from long-term measurement in piles of down load and downdrag[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(4): 409 - 430.
- [5] FELLENIUS B H. Downdrag on piles in clay due to negative skin friction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1972, 9(4): 323 - 337.
- [6] FELLENIUS B H. Negative skin friction and settlement of piles[C]// Proceedings of the Second International Seminar on Pile Foundations. Singapore: Nanyang Technological Institute, 1984: 28 - 30.
- [7] POOROOSHASB H B, ALAMGI M, MIURA N. Negative skin friction on rigid and deformable piles[J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(2): 109 - 126.
- [8] POULOS H Q, Mattes. The development of negative skin friction with time in end-bearing piles[J]. Australian Geomechanics Journal, 1972, 2(1): 11 - 20.
- [9] 孙军杰, 王兰民. 桩基负摩阻力研究中几个基本理论问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 211 - 216.(SUN Junjie, WANG Lanmin. Discussion on some important theoretic problems of investigation for negative skin friction of pile foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 211 - 216. (in Chinese))
- [10] 夏力农, 王星华, 蒋春平. 桩顶荷载对桩基负摩阻力特性影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 24(4): 359 - 362.(XIA Linong, WANG Xinhua, JIANG Chunping. Influences of working load on negative skin friction characteristics of pile[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(4): 359 - 362.(in Chinese))
- [11] 高绍武, 王建华, 毛娜. 层状地基中单桩负摩擦问题积分方程解法[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1 456 - 1 460.(GAO Shaowu, WANG Jianhua, MAO Na. Integral equation method to analyze negative skin friction on single piles in layered deposits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1 456 - 1 460.(in Chinese))
- [12] 陈显新, 徐新跃. 桩负摩阻力的若干问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增1): 4 615 - 4 618.(CHEN Xianxin, XU Xinyue. Several issues about negative skin friction of piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.1): 4 615 - 4 618. (in Chinese))
- [13] 赵敏, 张玉, 刘银利. 桩负摩阻力时间效应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(7): 1 327 - 1 341.(ZHAO Min, ZHANG Yu, LIU Yinli. Analysis of negative skin friction of single piles considering time effect[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(7): 1 327 - 1 341.(in Chinese))
- [14] 陈仁朋, 周万欢, 曹卫平, 等. 改进的桩土界面荷载传递双曲线模型及其在单桩负摩阻力时间效应研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 824 - 830.(CHEN Renpeng, ZHOU Wanhuan, CAO Weiping, et al. Improved hyperbolic model of load-transfer for pile-soil interface and its application in study of negative friction of single piles considering time effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 824 - 830.(in Chinese))
- [15] 苗鹏, 肖宏彬, 张春顺. 膨胀土中桩的负摩阻力时程性研究[J]. 株洲工学院学报, 2006, 20(6): 98 - 100.(MIAO Peng, XIAO Hongbin, ZHANG Chunshun. Study on negative friction and time-related characteristics for pile in expansive soils[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2006, 20(6): 98 - 100.(in Chinese))