

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.04.011

负摩阻力引起的桩身下拽力和桩顶下拽位移研究进展

孔纲强^{1 2 3} 杨 庆¹ 杨 钢¹ 杨清雷¹

(1.大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116085;

2.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;

3.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要 :简要介绍了土体沉降引起的桩侧负摩阻力导致桩身下拽力和桩顶下拽位移的原因、力学机制以及工程危害性 ;总结了近年来国内外负摩阻力问题的现场试验、模型试验、数值模拟和理论计算方法等方面的研究现状 ;指出了目前存在的主要问题——针对考虑桩顶下拽位移、地基土固结时间效应等因素影响以及减少负摩阻力措施方面的研究相对较少 ;介绍了一种既可以提高桩基竖向承载力又能有效降低负摩阻力对桩基影响的新桩型——扩底楔形桩。

关键词 :桩基 ;负摩阻力 ;下拽力 ;下拽位移 ;扩底楔形桩

中图分类号 :TU473.1

文献标志码 :A

文章编号 :1000-1980(2010)04-0411-07

当由于地面堆载、地下水位下降、湿陷性黄土遇水以及桩周土体开挖等因素造成的土体沉降大于桩体沉降时,桩侧土产生作用于桩身且与荷载方向相同的下拽力和下拽位移^[1]。桩身下拽力作用在桩上,可能造成桩端地基的屈服或破坏、桩身破坏、上部结构物不均匀沉降等一系列工程问题,它给工程结构安全带来了严重的隐患。例如(a)上港二区在 $35.2\text{ m} \times 69.4\text{ m}$ 的拟建粮仓建筑物范围内打桩 604 根,其桩长约为 30.7 m ,穿过 20 m 软黏土后进入夹粉细砂层的亚黏土层约 10 m ,桩间距为 4.2 倍桩径。打桩时地面隆起总体积约为打入桩体积的 40% ,最大隆起高度达 50 cm ,桩群外 25 cm 处隆起 5 cm ,群桩中心土层 13 m 深处孔隙水压力达上覆土层孔隙水压力的 140% 左右。打桩完成后由于孔隙水压力消散引起土体固结沉降使桩侧产生很大的负摩阻力:在粮仓使用前下拽力约 600 kN ,投产 4 a 后下拽力仍约 400 kN ,这给建筑物的安全留下了严重隐患^[2]。(b)日本 1 座 3 层钢筋混凝土结构物的基础形式采用钢管混凝土桩,桩穿过砂层和较软弱的黏土层,支承在洪积砂层上,由于地下水位下降,上部黏土层固结压密产生地面沉降,由此形成的负摩阻力使桩体多承担一个附加下拽力。建筑物建成 2 a 后,由于下拽力导致的附加不均匀沉降最大约达 16 cm ;4 a 后,由于产生过大的裂缝并继续发展,最后只得拆除^[2]。

本文在总结近年来国内外负摩阻力问题的现场试验、模型试验、数值模拟和理论计算方法等方面研究现状的基础上,指出了目前研究存在的主要问题,并介绍了一种既可以提高桩基竖向承载力又能有效降低负摩阻力对桩基影响的新桩型——扩底预应力锥形管桩。

1 研究现状

20 世纪 40 年代后期,桩基负摩阻力问题才逐渐被人们所认识,并逐步提出负摩阻力、中性点等概念及其计算方法。近几十年来,桩基负摩阻力特性与计算、中性点位置的确定等问题已逐渐成为我国岩土学术界和工程界关注的热点和难点问题之一,许多学者对这些问题进行了研究并取得了一定的成果。

1.1 现场试验方面

国内外学者针对不同类型桩进行了现场单桩试验并取得了许多试验成果,典型类型桩情况及其主要研究内容如表 1 所示^[3-10]。国外针对群桩进行了一些试验,比如 Jeong^[11]针对地面堆载下 3×4 布桩形式的群桩

收稿日期:2009-07-22

基金项目:河海大学自然科学基金(2009423711);中国博士后基金(20090461062);中央高校基本科研业务费专项资金(2009B14514)

作者简介:孔纲强(1982—)男,浙江磐安人,博士,主要从事软土地基处理及桩基础研究。E-mail: gqkong1@163.com

基础进行了现场试验研究,结果表明:当桩-土相对位移达到 5 mm 时,桩侧负摩阻力就能达到其最大值。Little^[12]针对 2 组 3×3 群桩模型进行了现场试验研究,结果表明 2 种类型桩均存在群桩效应,摩擦型桩较端承型桩下拽位移问题更加突出。但是,国内至今尚未有针对群桩负摩阻力特性的试验研究。

表 1 典型类型单桩现场试验工况及主要研究内容

Table 1 Working conditions and items of field tests on typical single pile				
研究者	桩基类型	桩长 L/m	桩径 D/m	主要研究内容
Fellenius ^[3]	预制混凝土桩		0.30	打桩时桩周土中孔隙水压力上升,再固结过程中使桩身产生下拽力的现象
Walker 等 ^[4]	钢管桩	29	0.38(壁厚 1.1)	沥青涂层对减小桩身下拽力的作用效果
李大展等 ^[5]	扩底桩	32~40	1.0~1.2(扩大头 2.2~2.5)	湿陷性黄土场地中扩底桩的桩顶下拽位移问题
马时冬等 ^[6]	钢筋混凝土灌注嵌岩桩	28	1.5	桩身轴力及桩周土分层沉降的变化规律,桩身下拽力问题
律文田等 ^[7]	钻孔灌注桩	43	1.0	桥台台后填土引起桥桩的桩身下拽力问题
黄雪峰等 ^[8]	挖孔灌注桩	40	0.8	自重湿陷性黄土中负摩阻力及中性点位置与湿陷变形量之间的关系
王兰民等 ^[9]	人工灌注桩	20	0.8	黄土震陷情况下桩身下拽力问题
夏力农等 ^[10]	振动沉管灌注桩	10.5	0.35	桩顶荷载等级对桩侧负摩阻力和中性点位置的影响

1.2 模型试验方面

国内外学者开展了一系列室内群桩模型试验研究并取得了一定的成果。比如:Ergun 等^[13]针对桩间距、布桩形式等问题对穿越密实砂层和软黏土层的端承型群桩进行了研究,测得了群桩内外各土层沉降量随固结时间的变化规律,结果表明:群桩内外沉降比随着桩间距的增大而减小;当桩间距达到 5.0 倍桩径时,基本可以忽略负摩阻力群桩效应影响。Lee 等^[14]针对桩长为 0.45 m、桩径为 0.03 m 的模型桩进行了离心模型试验,结果表明:中性点位于 80 % ~ 85 % 的桩长处,土体内摩擦角的大小对桩侧负摩阻力值影响显著。孔纲强等^[15]针对考虑地基土固结沉降条件下,饱和黏土中倾斜群桩身下拽力问题进行了模型试验,研究了倾斜群桩中各位置桩的中性点位置、桩身下拽力以及土体分层沉降随地基土固结时间的变化规律,结果表明:桩基负摩阻力随着固结时间的增大而逐步发展并最终趋于一个稳定值;受群桩效应的影响,中心桩的桩身下拽力和桩顶下拽位移小于边桩、角桩和单桩情况,并随着桩间距的减小群桩效应越明显。

1.3 数值模拟方面

康立楷^[16]基于有限元方法,建立了地下水位下降引起土体沉降导致的单桩负摩阻力的数值模型,分析了地表沉降量、桩身负摩阻力随地下水位的变化规律,并将数值模型与离心模型试验结果进行了对比分析。Lee 等^[17]基于 ABAQUS 有限元软件,建立了考虑桩-土相对滑移的群桩负摩阻力特性分析的三维数值模型,分析了桩间距、桩基数目、桩基位置、打桩方法、地面堆载等级以及地基土刚度等因素对群桩效应、桩身下拽力以及桩顶下拽位移的影响,结果表明:地面堆载等级和桩-土摩擦因数是影响群桩效应的主要因素;对于摩擦型桩,首先需要考虑的是下拽位移问题;同等级地面堆载下,群桩效应对下拽力的影响大于对下拽位移的影响程度。Comodromos 等^[18]利用 FLAC^{3D}软件对层状地基中桩基负摩阻力以及下拽力进行了研究,并着重分析了桩顶荷载与地面堆载的施荷顺序对桩身下拽力和中性点位置的影响,结果表明:桩身下拽力受桩顶荷载和地面堆载的施荷顺序影响显著,当先施加桩顶荷载再进行地面堆载时,桩侧负摩阻力引起的桩身下拽力最大;随着地面堆载等级、桩-土摩擦因数和可压缩性土体厚度的增加,桩身下拽力增大。Hoque^[19]基于 PLAXIS 有限元软件建立了考虑地基土体固结沉降的单桩负摩阻力数值计算模型,分析了桩-土相对位移、中性点位置随土体固结时间的变化规律,结果表明:桩基负摩阻力、中性点位置随着土体固结时间的增大而增大,并逐渐趋于一个稳定值。赵明华等^[20]基于能量平衡与静力平衡条件列出平衡方程并导出相应的计算公式、桩身单元能量平衡方程与位移协调方程的矩阵表达式,最后通过矩阵表达式的联立迭代求解,计算得出多层地基土中单桩桩侧负摩阻力沿桩深方向的变化规律。Kong 等^[21]基于 FLAC^{3D}有限差分法软件,研究了地基土固结时间效应、加载速率、桩-土摩擦因数、桩间距以及桩基长径比等因素对群桩负摩阻力、桩身下拽力以及中性点位置特性的影响规律,结果表明:桩基负摩阻力随着固结时间的增大而逐步发展并最终趋于一个稳定值;桩身下拽力和桩顶下拽位移随着加载速率的减慢而减小并最终趋于一个稳定值。

1.4 理论分析方面

目前国内外研究桩基负摩阻力的理论分析方法主要有极限分析法、荷载传递法、弹塑性理论法、剪切位移法、混合法和变分法等。

1.4.1 极限分析法

极限分析法可以分为有效应力法和总应力法2种。目前常用的极限分析法经验公式有 Zeevaert 法公式、Bjerrum 法公式、Carlander 法公式和 Janbu 法公式等,这些公式计算过程简单,便于应用。我国 JGJ94—2008《建筑桩基技术规范》、美国相关规范和日本建筑基础构造设计规范等多项规范中都建议采用有效应力法来计算桩基负摩阻力值并推荐了确定中性点位置的经验方法。日本建筑基础构造设计规范采用的中性点估算方法比我国规范建议的估算方法相对更完善,可以考虑更多因素对中性点位置的影响,不过参数繁多导致在参数选取上存在一定误差。实践表明,利用极限分析法计算桩基负摩阻力是切实可行的,但极限分析法存在仅适于桩-土相对位移较小的情况、计算所得结果往往偏大、计算涉及的中性点位置等重要参数往往需采用经验方法确定等局限性。同时利用极限分析法计算所得的桩侧负摩阻力是负摩阻力的极限值,因此往往结果偏于保守。

1.4.2 荷载传递法

目前主要的传递函数模型有理想弹-塑性模型、硬化模型、双曲线模型、指数模型和软化模型等。荷载传递法理论清晰,计算简便,而且可考虑桩侧土的分层、变截面桩及应力应变关系的非线性特征,因此在实际工程中得到了广泛的应用。但是,该法忽略了土的连续性和应力场效应,从而导致无法考虑群桩效应,不能考虑软弱下卧层的影响,更无法反映桩侧阻力的强化或退化效应,在理论上存在一定的局限性,且计算结果的精度很大程度上取决于荷载传递曲线的选择。屠毓敏等^[22]利用 Terzaghi 一维固结理论和土体分层总和法得出堆载作用下土体沉降随着土体深度和固结时间的变化规律,从而建立了非均质地基中负摩阻力作用下桩的荷载传递弹性微分方程,由此求得均质地基中桩基负摩阻力微分方程的解析解。由于该微分方程考虑了土体沉降的时间效应,该法可以预测桩身轴力随着时间变化的规律。赵明华等^[23]通过对佐藤悟提出的双折线模型的改进,以荷载传递法建立了桩基负摩阻力的基本微分方程。研究结果表明,该基本微分方程可以准确地描述桩基负摩阻力的传递过程。陈仁朋等^[24]通过对双曲线模型的改进,考虑了地基土固结、桩侧土体初始剪切刚度随时间增长及桩-土界面加、卸载循环剪切特性的影响,并利用改进后的双曲线模型分析了大面积堆载下,不同桩顶荷载和桩侧土达到不同固结度时再施加桩顶荷载情况下的桩身摩阻力发展变化规律。结果表明,随着地基土固结时间的增加,中性点位置不断地发生变化,桩顶作用的荷载大小不同,中性点位置也不同。地基土固结一段时间后再打桩能减小桩侧负摩阻力。

1.4.3 弹塑性理论法

弹塑性理论法是根据桩身截面位移与相邻的土层位移相等的条件,考虑土的连续性,建立线性方程组并求解桩侧负摩阻力的分布的。该法基于桩-桩之间相互作用系数可用于群桩负摩阻力特性的分析。但是,该法把地基土看作理想的弹性体,并假定只通过变形特征值压缩模量 E_s 与泊松比 ν_s 就可以描述土对荷载的效应,很难考虑桩-土相对滑移的影响。该方法在理论上相对比较成熟,并得到了较多的应用。例如,上海的地基基础新规范就采用弹性理论法来调整分层总和法的修正系数。高绍武等^[25]基于 Biot 三维固结理论和积分方程方法研究了桩在表面圆形载荷作用下的负摩阻力问题,利用积分变换方法得出了表面圆形分布堆载作用下的单、群桩在时间域内的第2类 Fredholm 积分方程,进而通过相应的数值逆变换即可得出桩的变形、轴力和桩侧负摩阻力与时间的关系。该法可以直接求解任意时刻桩侧负摩阻力和中性点位置,采用的第2类 Fredholm 积分方程计算量小、计算精度高、数值结果稳定。Poulos^[26]通过部分桩体位于不沉降稳定层的假设,提出了一个负摩阻力作用下桩基础承载力的简便计算方法,并分析了桩基残余应力、桩顶荷载和群桩效应的影响。结果表明,打桩前对土体进行预压是减小桩基负摩阻力影响的有效方法之一。

1.4.4 剪切位移法

剪切位移法是在弹性理论法和荷载传递法的基础上发展起来的。剪切位移法在荷载传递法的基础上引进了一个变换矩阵,这样可考虑层状地基土的情况。对于均质地基土情况,无需对桩进行离散,从而可大大减少计算工作量。针对群桩计算问题,剪切位移法引入了弹性理论法的桩-桩相互作用系数,这不仅为数值计算提供了方便,而且计算中容易考虑群桩中桩对变形的遮拦等作用。但是,该法计算参数不易确定,目前国内还

较少使用。袁灯平等^[27]利用 Terzaghi 一维固结理论和 Cooke 的剪切位移法,并考虑桩-土相互作用影响,分析了桩体与土体特性、桩-土界面强度、堆载及土体结构性等因素对桩基负摩阻力特性的影响,结果表明:对于灵敏度较大的软土层,其原位结构遭到完全破坏后,桩身受到的下拉荷载显著减小,但中性点深度增大。赵明华等^[28]根据有效应力原理,推导并给出了不同桩-土相对位移条件下桩基负摩阻力计算的分段解析式。该解析式不仅充分考虑了土体竖向有效应力及桩-土剪切位移对摩阻力的影响,而且形式简单,所含参数较少,便于应用。

1.4.5 其他理论方法

Lee^[29]结合荷载传递法和弹性理论法各自的优点提出了混合元法。该法利用 Terzaghi 一维固结理论求解土体沉降,基于 Mindlin 解的弹性理论法求解桩-桩之间的相互作用。虽然该法在一定程度上弥补了荷载传递法和弹性理论法的不足,但计算过程更加复杂。Shen 等^[30]基于桩-土相互作用机制,利用荷载传递法来描述桩-土荷载传递关系并考虑地基土刚度沿深度方向的线性变化,建立了地面沉降情况下桩体系统的基本变分方程,同时根据最小势能原理,求解了各个参数,得到了桩侧负摩阻力沿桩深方向的分布和中性点位置。该法不仅求解结果与实测值及其他理论分析方法的结果吻合较好,而且计算效率更高,耗时更少。

2 存在问题

a. 针对负摩阻力引起的桩身下拽力问题的研究相对较多,而针对桩顶下拽位移的研究则相对较少。

b. 现场试验和理论分析针对单桩的较多,而针对群桩的相对较少。考虑地下水位变化、桩顶荷载和地面堆载的施荷顺序、施荷速率、施荷方式、桩基础施工过程中打桩引起的桩身残余应力以及土体受打桩扰动后重固结引起的负摩阻力等因素影响的研究相对较少。

c. 考虑地基土固结沉降时间效应的负摩阻力特性试验和理论研究相对缺乏。如何确定考虑负摩阻力发展的时间效应,合理评价负摩阻力作用下桩基承载力,在确保工期的前提下检测桩基负摩阻力值,从而保证工程安全,是目前实际工程中亟待解决的重要问题之一。

d. 在减小负摩阻力方法研究方面,过多地把精力集中在沥青涂层上,而忽视了其他方法(如楔形桩、套管法和隔离桩法等)的应用。因为沥青涂层主要适用于钢管桩,而我国目前仍以钢筋混凝土桩为主,沥青本身的化学成分在地下长期使用过程中容易对地下水造成污染,并且沥青涂层对减小负摩阻力影响的效果受温度、时间等因素影响明显,所以应重视其他减小负摩阻力方法的研究。

3 扩底楔形桩的施工工艺

目前,减小负摩阻力对桩基承载力和附加沉降影响的主要方法有:(a)涂层法,即在中性点以上承受负摩阻力作用桩身段涂沥青、润滑油或者其他混合物等,以减少桩与土之间的摩擦。该法处理效果好,但是主要适用于钢管桩。(b)套管法,即在中性点以上承受负摩阻力作用桩身段外套圆管并在圆管与桩身之间充填润滑油,以使地面沉降引起的负摩阻力作用在套管上而基本不传递到桩身上。该法处理效果好,但是成本高,不利于推广应用。(c)楔形桩法,即通过优化桩侧界面形式的方法来降低土体对桩体侧向压力,从而可达到减小桩侧负摩阻力的目的。该法通过改进桩体自身截面形式的方法来降低负摩阻力影响,既环保又经济。(d)隔离桩法,即在桩基础外围布置桩基,以使外侧土体沉降产生的负摩阻力主要作用在隔离桩上。该法处理成本相对较高。(e)换土置换法,即利用土性良好的回填土置换场地内的欠固结软弱土、自重湿陷性黄土等容易造成工程事故的不良土并压实回填土,以减少土体沉降。该法工程量大,工期会受影响。(f)提前预沉降法,即采用预压、抽排水等措施让场地土体先期沉降,以减少打桩后的土体后期沉降。该法施工周期较长,会影响工程整体工期。

上述减小负摩阻力影响的措施和方法,各有利弊。结合具体工程实际,开发能有效减小负摩阻力影响的新桩型具有一定的学术价值和经济效益。孔纲强等^[31]提出了一种扩底预应力锥形管桩及其施工方法。该桩型通过改变桩身竖向截面形式的方法来提高混凝土的单位承载力,结合了常规扩底桩和预应力楔形管桩的优点,既可以提高桩基承载力又能有效降低负摩阻力对桩基的影响。该桩型的施工步骤和方法如下:(a)采用静压法将带有桩靴的第1节预应力锥形管桩管节沉入土中,如图1(a)(b)所示;(b)采用端头板电焊联结法连接第2节预应力锥形管桩管节并使之沉入土中,如图1(c)所示;(c)依次完成后面几节管桩的沉管,使桩底

沉到设计标高处、桩长达到设计要求,如图 1(d)所示。(d)取出桩靴,利用取土设备(如空气吸土设备等)取出管桩内位于桩身下部的土塞(采用开口型桩靴时,土塞高度约为 1/3 桩长,采用闭口型桩靴时,土塞高度相对小些),检验管桩桩身质量以及复测沉桩长度等情况。(e)利用扩底设备对桩底进行扩底,使桩端底部形成一个大于下部桩径的底座空腔,并用空气吸土设备取出空腔内土,如图 1(e)所示。(f)下沉处于收缩状的变径放射状钢筋笼,当钢筋笼下沉至设计标高时,在钢筋笼上端施加一个荷载使其展开成放射状,完成钢筋笼的下放过程,如图 1(f)所示。(g)现浇混凝土在桩底形成扩大头并确保桩大头规则成型和现浇桩大头与预制预应力管桩相连良好,如图 1(g)所示。(h)成桩,如图 1(h)所示。

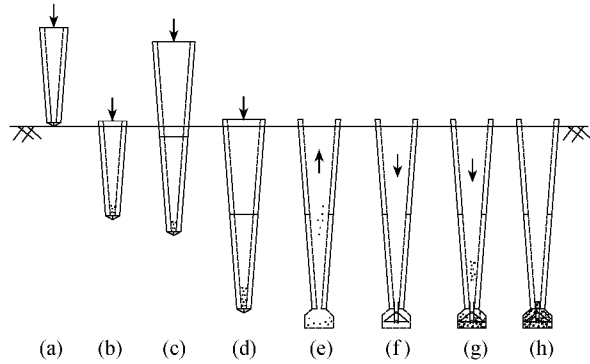


图 1 扩底楔形桩施工方法

Fig. 1 Construction technology of belled wedge piles

4 结 语

a. 桩基负摩阻力引起的桩身下拽力、桩顶下拽位移、中性点位置以及群桩效应系数等问题是工程设计、施工中必须考虑的重点问题之一。研究中应考虑地下水位变化、桩基础施工过程中打桩引起的桩身残余应力以及土体受打桩扰动后重固结引起的负摩阻力等因素的影响。

b. 由于土体沉降、桩基负摩阻力的产生和发展有一个时间过程,而具体工程又受到资金、工期等因素的制约,因此,如何在桩基础完成初期合理检测和评价负摩阻力作用下桩基承载力和沉降情况,如何在确保工期的前提下测定桩基负摩阻力,从而保证工程进度和安全,是实际工程仍需关注和解决的重要问题之一。

c. 从结构和受力机制可知,扩底预应力锥形管桩可以有效地提高桩基竖向承载力,减小负摩阻力对桩基的影响。该新桩型的力学特性以及施工工艺有待进一步研究和完善。

参考文献:

[1] FELLENIUS B H. Basics of foundation design[M]. British Columbia :BiTech Publishers Ltd. ,1999.

[2] 袁灯平,黄宏伟,程泽坤.软土地桩基侧负摩阻力研究进展初探[J].土木工程学报,2006,39(2):53-60.(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.(in Chinese))

[3] FELLENIUS B H. Downdrag on piles in clay due to negative skin friction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1972, 9(4):323-337.

[4] WALKER L K, DARVALL P, LE P. Drag down on coated and uncoated pile[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. New York: Springer, 1973:257-262.

[5] 李大展,滕延京,何颐华,等.湿陷性黄土中大直径扩底桩垂直承载性状的试验研究[J].岩土工程学报,1994,16(2):11-21.(LI Da-zhan, TENG Yan-jing, HE Yi-hua, et al. Vertical bearing behavior of large diameter belled pile in collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2):11-21.(in Chinese))

[6] 马时冬.桩身负摩阻力的现场测试与研究[J].岩土力学,1997,18(1):8-15.(MA Shi-dong. Study the field measurement of negative friction of piles[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(1):8-15.(in Chinese))

[7] 律文田,冷伍明,王永和.软土地区桥台桩基负摩阻力试验研究[J].岩土工程学报,2005,27(6):45-55.(LV Wen-tian, LENG Wu-ming, WANG Yong-he. In-situ tests on negative friction resistance of abutment piles in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6):45-55.(in Chinese))

[8] 黄雪峰,陈正汉,哈双,等.大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J].岩土工程学报,2007,29

- (3) 338-346.(HUANG Xue-feng ,CHEN Zheng-han ,HA Shuang ,et al. Research on beating behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2007 ,29(3) 338-346.(in Chinese))
- [9] 王兰民 ,孙军杰 ,黄雪峰 ,等. 黄土地震陷时桩基负摩阻力的现场试验研究[J]. 岩土工程学报 ,2008 ,30(3) :341-348. (WANG Lan-min ,SUN Jun-jie ,HUANG Xue-feng ,et al. Field tests on negative skin friction along piles caused by seismic settlement of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2008 ,30(8) 341-348.(in Chinese))
- [10] 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 ,5(5) :46-49.(XIA Li-nong ,YANG Xiu-zhu. Field tests and numerical simulation of working load influences on negative skin friction behaviors of piles[J]. Journal of Railway Science and Engineering 2008 ,5(5) 46-49.(in Chinese))
- [11] JEONG S. Nonlinear three dimensional analysis of downdrag on pile group[D]. Texas :Texas A & M University ,1992.
- [12] LITTLE J A. Downdrag on piles :review and recent experimentation[C]//Proceedings of Settlement 94 :Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankment ,ASCE. New York [s. n.],1994 :1805-1826.
- [13] ERGUN M U ,SONMEZ D. Negative skin friction from surface settlement measurements in model group tests[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1995 ,32(6) :1075-1079.
- [14] LEE C J ,CHEN H T ,WANG W H. Negative skin friction on a pile due to excessive ground water withdrawal[C]//International Conference Centrifuge 98. Tokyo [s. n.],1998 :513-518.
- [15] 孔纲强 ,杨庆 ,郑鹏一 ,等. 考虑时间效应的斜桩基负摩阻力室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报 ,2009 ,31(4) :617-621. (KONG Gang-qiang ,YANG Qing ,ZHENG Peng-yi ,et al. Model tests on negative skin friction for inclined pile considering time effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2009 ,31(4) 617-621.(in Chinese))
- [16] 康立楷. 降水引致单桩基础行为之有限元素分析[D]. 台北 :国立中央大学 ,2000.
- [17] LEE C J ,LEE J H ,JEONG S. The influence of soil slip on negative skin friction in pile groups connected to a cap[J]. Geotechnique ,2006 ,56(1) :53-56.
- [18] COMODROMOS E M ,BAREKA S V. Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis[J]. Computers and Geotechnics 2005 ,32(3) 210-221.
- [19] HOQUE M A. Coupled consolidation model for negative skin friction on piles in clay layers[D]. California :Concordia University ,2006.
- [20] 赵明华 ,刘思思. 多层地基单桩负摩阻力的数值模拟计算[J]. 岩土工程学报 ,2008 ,30(3) :336-340.(ZHAO Ming-hua ,LIU Si-si. Numerical simulation of negative skin friction on single pile in multiple layer deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2008 ,30(3) 336-340.(in Chinese))
- [21] KONG Gang-qiang ,YANG Qing ,LUAN Mao-tian. Study of loading rate effects on characteristics of negative skin friction for pile groups [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 2008 ,13 :1-12.
- [22] 屠毓敏 ,俞洪良. 负摩擦桩非线性分析[J]. 中国公路学报 ,2001 ,14(1) :31-34.(TU Yu-min ,YU Hong-liang. Nonlinear analysis of negative pile[J]. China Journal of Highway and Transport 2001 ,14(1) 31-34.(in Chinese))
- [23] 赵明华 ,贺炜 ,曹文贵. 基桩负摩阻力计算方法初探[J]. 岩土力学 ,2004 ,25(9) :1442-1446.(ZHAO Ming-hua ,HE Wei ,CAO Wen-gui. Study on calculation of negative skin friction resistance on piles[J]. Rock and Soil Mechanics ,2004 ,25(9) :1442-1446.(in Chinese))
- [24] 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 Ren-peng ,ZHOU Wang-hua ,CAO Wei-ping ,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))
- [25] 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) :1456-1460.(GAO Shao-wu ,WANG Jian-hua ,MAO Na. Integral equation method to analyze negative skin friction on single pile in layered deposits[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics 2005 ,26(9) :1456-1460.(in Chinese))
- [26] POULOS H G. A practical design approach for piles with negative friction[J]. Geotechnical Engineering 2008 ,16(1) :19-27.
- [27] 袁灯平 ,黄宏伟 ,马金荣. 软土地基桩侧表面负摩阻力解析模型[J]. 上海交通大学学报 ,2005 ,39(5) :731-735.(YUAN Deng-ping ,HUANG Hong-wei ,MA Jin-rong. An analytical model of negative skin friction of piles in soft soil[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University 2005 ,39(5) :731-735.(in Chinese))
- [28] 赵明华 ,雷勇 ,刘晓明. 基于剪切位移法的基桩负摩阻力计算[J]. 湖南大学学报 :自然科学版 ,2008 ,35(7) :1-6.(ZHAO Ming-hua ,LEI Yong ,LIU Xiao-ming. Settlement calculation of single piles negative skin friction with shear displacement method[J]. Journal of Hunan University :Natural Sciences 2008 ,35(7) :1-6.(in Chinese))

[29] LEE C Y . Pile group settlement analysis by hybrid layer approach[J]. Journal of Geotechnical Engineering , 1993 , 119 (6) : 984-997 .
[30] SHEN W Y , TEH C I . A variational solution for downdrag force analysis of pile groups[J]. The International Journal of Geomechanics , 2002 , 2 (1) : 75-91 .
[31] 孔纲强,杨庆.一种扩底预应力锥形管桩及其施工方法 :中国,200810011854.4[P]. 2008-06-16 .

Research progress of dragload and downdrag on piles by negative skin friction

KONG Gang-qiang^{1,2,3}, YANG Qing¹, YANG Gang¹, YANG Qing-lei¹

- (1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering , Dalian University of Technology , Dalian 116085 , China ;
2. Key Laboratory for Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
3. Geotechnical Research Institute , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The causes , mechanical mechanism and engineering hazards of dragload and downdrag on piles caused by negative skin friction owing to the settlement of soils were introduced . The worldwide research progress in the field tests , model tests , numerical simulation and theoretical calculation methods of the negative skin friction were summarized . The main problems in the present researches were put forward : that is , relatively scarce studies on the downdrag , consolidation time effect and measures for reducing the influences of negative skin friction . A new type of piles , belled wedge piles , which can improve the vertical bearing capacity of pile foundations and effectively reduce the influences of negative skin friction , were proposed .

Key words : pile foundation ; negative skin friction ; dragload ; downdrag ; belled wedge pile

· 简讯 ·

中国原水论坛将于 2010 年 10 月在宁波举行

由中国水利学会主办 ,宁波原水集团有限公司和河海大学承办 ,中国水利学会水资源专委会、浙江省水利学会、南京水利科学研究院、浙江大学等单位协办的中国原水论坛将于 2010 年 10 月 13—15 日在浙江省宁波市举行 . 中国原水论坛旨在汇聚国内外专家学者、水行业工程技术管理人员、水务企业管理者以及社会学家的学术和应用成果 , 共同促进企业、科研院校、政府之间的交流 , 探讨水行业的新课题 , 提升企业创新、创优能力 , 探寻保护水资源的健康发展之路 . 其主要议题为 (a) 水资源开发利用与管理 (b) 水资源保护与水生态修复 (c) 水工程与调度 (d) 水经济与水文化 .

有关中国原水论坛的内容 , 可访问 <http://www.rawwaterbbs.com> .

(本刊编辑部供稿)