

上拔荷载作用下斜桩承载变形性状数值分析

曹卫平^{1,2}, 高帅鹏¹, 秦强毅^{1,3}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 陕西建工第一建设集团有限公司七公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 通过有限元软件模拟了上拔荷载作用下斜桩的承载变形性状并与直桩进行比较, 分析了桩身倾角对桩顶位移、极限抗拔承载力、桩身弯矩、剪力及轴力的影响, 研究了斜桩-土接触压力、桩侧摩阻力的分布特征, 探讨了长径比与斜桩有效桩长的关系。结果表明: 在上拔荷载作用下, 斜桩桩顶的上拔位移均大于相应直桩。桩身倾角及上拔荷载越大, 上拔位移和水平位移越大; 斜桩极限抗拔承载力大于直桩, 且在 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间存在一个最佳倾角使斜桩的极限抗拔承载力达到最大; 桩身最大弯矩均出现在 $z/L=0.1$ 处, 最大剪力均出现在桩顶截面处。在 $z/L=0.4$ 以下区域, 桩身弯矩及剪力几乎全部为零。同一桩身相对深度处, 桩身剪力及弯矩都随着倾角的增大而增大; 直桩及各斜桩桩端存在真空吸力。倾角对桩身轴力的影响不大; 桩-土接触压力的大小与桩身倾角的大小有关。桩与土沿深度方向脱离的范围随着倾角的增大而增大; 斜桩左、右两侧摩阻力分布相差较大, 其大小与倾角的大小有关; 上拔荷载作用下斜桩存在有效桩长。倾角的大小对有效桩长影响不大。

关键词: 斜桩; 数值分析; 倾角; 上拔荷载

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)03-0321-06

Numerical analysis of deformation characteristics of batter piles under uplift load

CAO Weiping¹, GAO Shuai-peng¹, QIN Qiang-yi^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Key Lab of Geotechnical and Underground Engineering of Shaanxi Province, Xi'an 710055, China;

3. Shaanxi Construction Group First Construction Group Co., Ltd Xi'an 710075, China)

Abstract: The finite element software was used to simulate the load-bearing deformation behavior of the slanted piles under upward loading and compared with the vertical piles. The displacement of the pile top, ultimate pull-out capacity, bending moment, shear force and shaft of the pile were analyzed. The influence of force was studied on the distribution characteristics of slant pile-soil contact pressure and pile side friction resistance, and the relationship between length-diameter ratio and effective pile length of slanted pile was discussed. The results show that under the action of uplifting load, the uplift displacement of inclined pile top is larger than that of corresponding vertical pile. The greater the inclination angle and updraft load of the pile, the larger the uplift displacement and horizontal displacement; the ultimate pullout capacity of the inclined pile is greater than that of the vertical pile, and there is an optimal inclination angle between 10° and 20° so that the ultimate resistance of the inclined pile. Pulling load capacity reaches the maximum; the maximum bending moment of the pile appears at $z/L=0.1$, and the maximum shear force appears at the top of the pile section. In the area below $z/L=0.4$, the bending moment and shear force of the pile are almost zero. At the relative depth of the same pile body, the shear force and bending moment of the pile increase with the increase of the inclination angle; The vacuum suction force exists at the pile end of the vertical pile and each inclined pile. The dip angle has little effect on the axial force of the pile body; The pile-soil contact pressure is related to the size of the pile body inclination angle. The range of separation between pile and soil in depth direction increases with the increase of inclination angle; The distribution of friction resistance on the left and right sides of the inclined pile is quite different, and its size is related to the size of the inclination angle; Effective for the inclined pile under upward loading Pile length. The size of the dip has little effect on the effective pile length.

Key words: batter piles; numerical analysis; inclined angle; uplift load

收稿日期: 2017-04-08

修改稿日期: 2019-05-05

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(2019JM-006)

第一作者: 曹卫平(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程教学及研究工作. E-mail: caowp@xauat.edu.cn

斜桩由于具有良好的承载变形特性,近年来开始大规模运用在工程实例中^[1-4]。相比于直桩,斜桩与地平面之间存在一定的夹角,使其变形性状比直桩要复杂的多。在实际运用中,斜桩没有完善的设计理念,大多数情况下要参考直桩来设计,这并不能准确合理地反映斜桩的承载变形特性,因此开展对此项研究具有十分重要的工程实践意义。

魏鉴栋等^[5]通过现场试验得出,相同试验环境中斜桩比直桩更能抵抗上拔荷载,且在同一上拔荷载作用下,斜桩的上拔位移要比直桩小很多。吕凡任等^[6]在软土地基中进行了微型桩现场抗拔试验,发现相比于直桩,斜桩有更好的抵抗上拔荷载的能力。范书立等^[7]对海洋软土地基中的斜桩进行数值模拟,发现了不同加载方式及荷载循环次数等因素对斜桩承载力的影响规律。靳彩等^[4]提出了粘性土地基中新型复合式斜桩基础,通过现场试验分析了基础和桩身应力,以及承台、桩和土的联合受力情况,发现复合式斜桩基础可以更好的承受上拔-水平力作用。Nazir 等^[8]分别在松散,中等和致密砂中对钢斜桩进行模型试验,发现松散砂中斜桩的抗拔能力随着倾角的增大而减小,中等和致密砂中斜桩的抗拔能力随着倾角的增大先达到最大值(倾角为 20°时)然后再减小。Meyerhof^[9]通过模型试验对密砂中斜桩进行研究,认为斜桩的抗拔承载力随着桩身倾角的增加而增加。

从上述分析可以看出,目前对于斜桩在上拔荷载作用下的承载变形性状还缺乏统一认识,不同学者关于斜桩与直桩的抗拔承载力大小关系的见解各不相同甚至相互矛盾。本文通过有限元软件对承受上拔荷载的斜桩进行模拟,分析了斜桩桩身倾角对桩顶位移、极限抗拔承载力、桩身剪力、弯矩和轴力的影响,研究了斜桩-土接触压力、桩侧摩擦力的分布特征,在此基础上对长径比与有效桩长的关系做了进一步讨论。

1 有限元模型

运用 ABAQUS 做分析时,为得到更加精度和可靠的模拟结果,将土体模型半径和桩端土层厚度分别取为 25r 和 20r,其中 r 为桩身半径^[10-11],如图 1 所示。土体侧向边界竖向位移不受约束,径向位移及土体底面边界的竖向和水平向位移均为零。

桩侧和土体的接触通过接触对来模拟,采用主-从接触算法,其中桩体表面定义为主面,土体表面定义为从面。桩-土接触面法向作用直接采用硬接触的方法模拟,桩侧和桩侧土的接触面间的

摩擦系数采用库伦摩擦模型进行模拟,按照刘晋超等^[11]的建议,摩擦因数取 $\mu = \tan(0.75\varphi)$ 。桩与桩端土之间的接触采用硬接触,无摩擦。

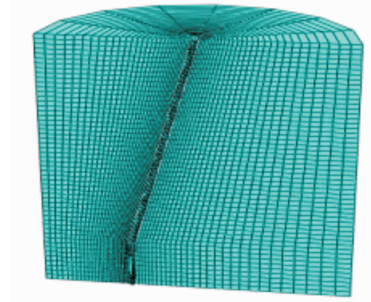


图 1 桩-土计算模型

Fig. 1 Pile-soil Calculation Model

桩体采用弹性模型,土体采用 Drucker-Prager 弹塑性模型(即 D-P 模型),此时 Data 数据列表中需设置 K 、 β 和 ψ 三个参数。其中 K 和 β 分别由式(1)和(2)计算得到,其中 c 、 φ 分别为土体黏聚力和内摩擦角, ψ 为土体剪胀角。D-P 模型硬化准则中的硬化参数 $\bar{\sigma}$ 取为单轴抗压强度 σ_c ,可由式(3)计算得到。按照蔡忠祥等^[12]的建议,用 4 倍的土体压缩模量来代替模型中所需要的弹性模量。

$$K = \frac{3 - \sin(\varphi)}{3 + \sin(\varphi)} \quad (1)$$

$$\tan\beta = \frac{6\sin\varphi}{3 - \sin\varphi} \quad (2)$$

$$\sigma_c = 2c \frac{\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (3)$$

2 与现场试验的对比

吕凡任等^[6]在软土地基上对斜桩进行现场抗拔试验,场地参数如表 1 所示。试桩为钢筋混凝土灌注桩,桩顶设在第 2 层土顶面处,计算参数 $L = 15 \text{ m}$, $d = 250 \text{ mm}$, $\alpha = 10^\circ$, $E_p = 20 \text{ GPa}$, $\rho = 2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\nu_p = 0.17$ ^[6]。根据地基土层参数,经试算调整得到淤泥质黏土和粉土的弹性模量 E 分别取 7.4 MPa 和 37.65 MPa,各层土的泊松比 ν 均取为 0.3。同时,按照孔位学等^[13]的建议,土体剪胀角 $\psi = 6.5^\circ$ 。

表 1 土层参数

Tab. 1 Soil parameter

土层	深度 范围 /m	重度 γ /kN · m ⁻³	粘聚 力 c /kPa	内摩 擦角 φ /°	压缩 模量 /MPa
塘泥	0~1.0	—	—	—	—
淤泥质黏土	1.0~10.0	16.7	11.0	13.0	1.85
粉土	10.0 以下	19.4	24.3	20.2	7.53

图2将数值模拟结果与现场试验结果做对比,可以看出,当桩顶上拔荷载不大于150 kN时,数值模拟和现场试验的Q-S曲线基本重合;当桩顶上拔荷载超过150 kN后,Q-S曲线开始表现出一定的差异,特别是在荷载超过225 kN后,差异表现的更加明显,但整体上吻合较好.此次数值模拟所施加的桩顶上拔荷载为100 kN,小于150 kN,说明该模型可以较好的模拟现场实际情况,计算结果有一定参考价值.

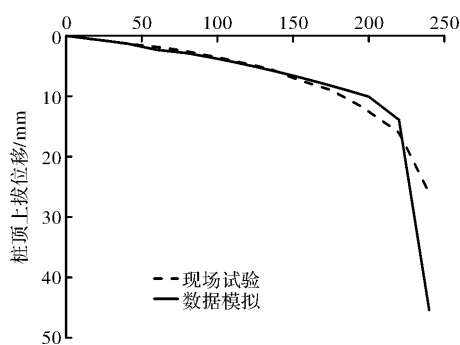


图2 现场试验与数值模拟的Q-S曲线

Fig. 2 Q-S Curve of Field Test and Numerical Simulation

3 数值模拟结果及分析

3.1 计算模型参数

数值模拟时,选取吕凡任等^[6]现场试验的土层分布及土层参数,各土层厚度及物理、力学参数如图3所示.桩体参数与吕凡任等^[6]现场试验使用的桩相同.除非特别说明,下文分析时,桩长、桩径分别取11.25 m及0.25 m.

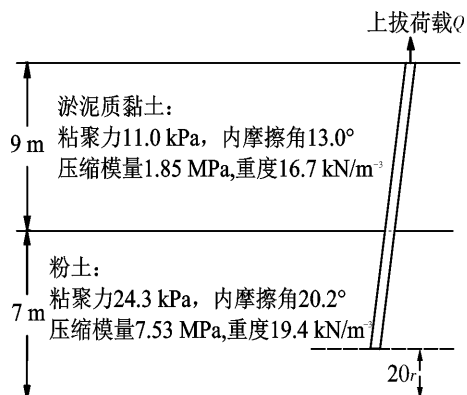


图3 土层剖面

Fig. 3 Profile of Soil

3.2 倾角对斜桩承载变形性状的影响

斜桩桩顶的Q-S-H曲线如图4所示,不难看出,桩顶上拔位移及水平位移随着桩身倾角的增大而增大,当上拔荷载达到120 kN时,桩顶上拔位移开始陡增,而桩顶水平位移逐渐稳定,这可能是由于土体受到桩身的挤压变得较为密实,抑

制了桩顶水平位移的增大.

从图4可以看出,除了5°斜桩外,10°、15°和20°斜桩的桩顶上拔位移均大于直桩,且这种现象随着荷载和桩身倾角的增大更加明显.另外,桩顶水平位移随着上拔荷载的增加而增加,且在相同的上拔荷载作用下,倾角越大,桩顶水平位移越大,尤其是当倾角大于5°以后,水平位移随倾角增大的更为明显.

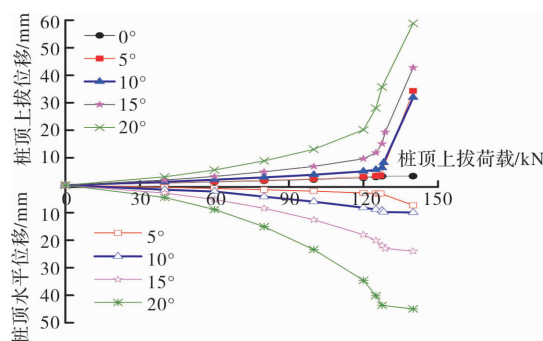


图4 斜桩桩顶Q-S-H曲线

Fig. 4 Q-S-H Curve of Batter Pile Top

图5给出了倾角对极限抗拔承载力(取Q-S曲线出现拐点时所对应的荷载)的影响曲线.可以看出,各斜桩的极限抗拔承载力均大于相应直桩,这是因为斜桩的极限抗拔承载力除了与桩侧摩阻力和桩自重有关以外,还受到桩体上部土体自重的影响.另外,倾角对极限抗拔承载的影响曲线在0~15°之间逐步增大,而在15°以后开始下降,可以得出在15~20°之间存在一个最佳倾角,使斜桩的极限抗拔承载力达到最大.

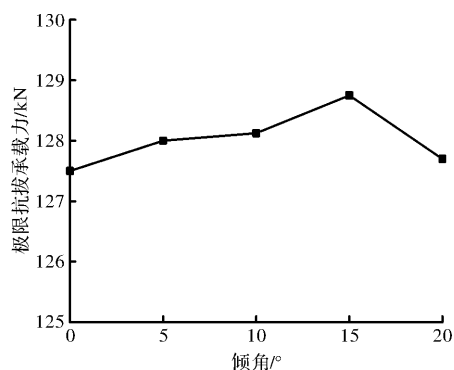


图5 倾角对极限抗拔承载力的影响

Fig. 5 Influence of Inclined Angle on Ultimate Uplift Capacity

3.3 倾角对斜桩桩身弯矩、剪力及轴力的影响

当桩顶上拔荷载为100 kN时,剪力沿桩身相对深度的分布如图6所示.可以看出,各斜桩的桩身剪力都集中分布在 $z/L=0.4$ 以上区段,且当桩身相对深度增加时,桩身剪力有个先减小至零,然后反向增大,达到负的最大值后再逐渐减小至

零的过程。从图6还可以看出,各斜桩桩身最大剪力均出现在桩顶截面处,说明倾角对桩身最大剪力所处的位置影响不大。另外,在同一桩身相对深度处,倾角越大,剪力也越大。

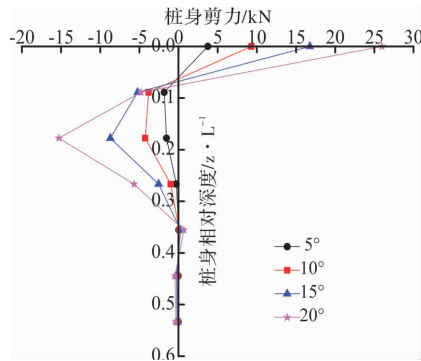


图6 桩身剪力随桩身相对深度分布曲线

Fig. 6 Distribution Curve of Shear Force of Pile Body with Relative Depth of Pile Body

当桩顶上拔荷载为100 kN时,弯矩沿桩身相对深度的分布如图7。可以看出,各斜桩的桩身弯矩都集中分布在 $z/L=0.4$ 以上区段,且均从0开始随桩身相对深度逐渐增加,达到最大值以后又逐渐减小至0。从图7还可以看出,各斜桩桩身最大弯矩均出现在 $z/L=0.10$ 处,说明倾角对桩身最大弯矩所处的位置影响不大。另外,在同一桩身相对深度处,倾角越大,弯矩也越大,这是由于桩顶上拔荷载在垂直于桩身方向上的分力随着倾角的增大而增大引起的。

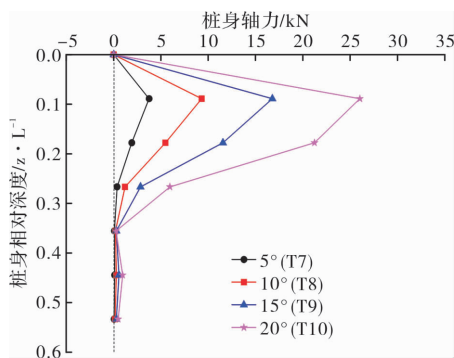


图7 桩身弯矩随桩身相对深度分布曲线

Fig. 7 Distribution Curve of Bending Moment of Pile Body with Relative Depth of Pile Body

图8给出了桩顶上拔荷载为100 kN时斜桩桩身轴力沿桩身相对深度的分布,可以看出,直桩及各斜桩桩身轴力随桩身相对深度均逐渐减小,在 $z/L=1$ 处,轴力减小到接近于0但不等于0,说明在桩端下部存在真空吸力,但是由于它的值很小,在总的抗拔承载力中所占比例不大,通常可以忽略不计。另外,直桩与各斜桩桩身轴力曲线基本重合,说明倾角并未对斜桩桩身轴力产生

明显影响。

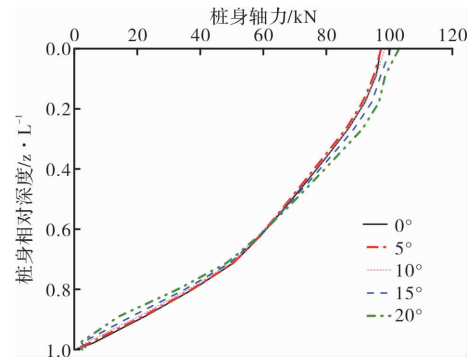


图8 桩身轴力随桩身相对深度分布曲线

Fig. 8 Distribution Curve of Axial Force of Pile Body with Relative Depth of Pile Body

3.4 桩-土接触压力

桩顶上拔荷载作用下,斜桩发生水平位移,引起桩身两侧分别出现桩-土挤密和桩-土分离现象,导致了桩-土接触压力发生变化,这是斜桩荷载传递规律区别于直桩的主要原因。下文将斜桩的挤压侧和分离侧分别定义为左侧和右侧来分析桩-土接触压力的变化规律。

当桩顶上拔荷载为100 kN时,桩-土左、右两侧接触面压力沿桩身相对深度的分布如图9所示。可以看出,左、右两侧桩-土接触压力沿桩身相对深度的变化均可分为三个区段,这里以左侧桩-土接触压力为例来说明。从图9(a)可以看出,在第一区段,斜桩左侧出现桩-土挤密现象,导致桩-土接触压力大于相应直桩;在第二区段,由于桩身反弯曲现象的存在,桩身产生了微量向右的位移,导致桩-土接触面的压力小于相应直桩;在第三区段,桩身向右的位移沿深度方向逐渐减小甚至消失,导致桩-土接触压力逐渐增大并接近于相应直桩。另外,会发现桩端的桩-土接触压力逐渐减小,这是由于在上拔荷载逐渐增大的过程中,桩身会产生轴线方向的微小移动,致使桩端与土接触部位产生隔离,附近的土体失去约束后缓慢滑入此区域,造成桩端周围的接触面压力减小。

从图9(a)还可以看出,在第一区段,桩身倾角越大,桩-土接触压力越大,如在 $z/L=0.1$ 处,直桩的桩-土接触压力为21.16 kN,而5°、10°、15°、20°斜桩的桩-土接触压力分别为29.20 kN、50.86 kN、84.41 kN、124.39 kN,分别为直桩的1.38倍、2.40倍、3.99倍、5.89倍;在第二区段,桩身倾角越大,桩-土接触压力越小,如在 $z/L=0.3$ 处,5°斜桩桩-土接触压力59.44 kN比直桩的61.18 kN减小了2.8%,而10°、15°和20°斜

桩-土接触压力比直桩减小了 8.1%、26.7% 和 40.6%，分别减小到 56.22 kN、44.86 kN 和 36.33 kN；在第三区段，直桩与各斜桩的桩-土接触压力曲线基本重合，说明倾角对该区段的桩-土接触压力影响不大。

从图 9(b)可以看出桩-土接触压力为零的区域随着桩身倾角的增大而增大，即桩与土沿深度方向脱离的范围随着倾角的增大而增大。

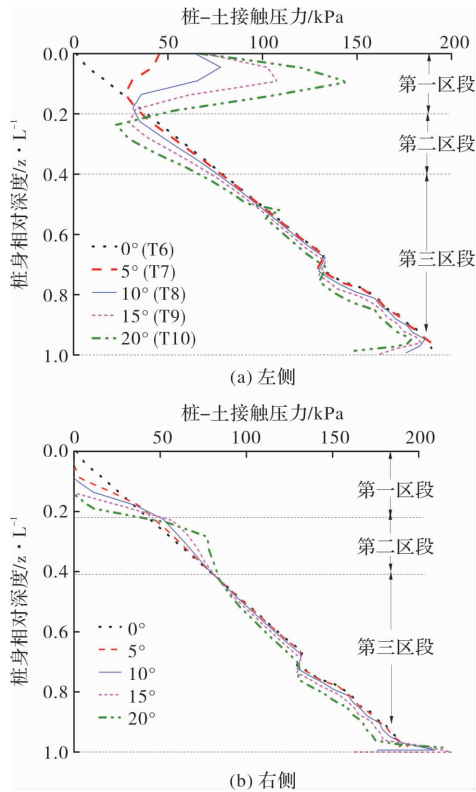


图 9 桩-土接触压力随桩身相对深度变化曲线

Fig. 9 Curve of Pile-soil Contact Pressure Varying with Relative Depth of Pile Body

3.5 桩侧摩阻力

图 10(a)给出了上拔荷载为 100 kN 时桩体左侧摩阻力沿桩身相对深度的分布。不难看出，在桩体上部区段，斜桩桩侧摩阻力均大于相应直桩桩侧摩阻力，但桩侧摩阻力随倾角的变化未表现出明显的规律，这可能是由于桩顶周围的土体在水平方向上的约束较小，上拔荷载使土体发生了松动，导致侧摩阻力的变化比较复杂；另外，当上拔荷载相同时，桩侧最大摩阻力随倾角的增大而增大。在桩体下部区段，由于反弯曲现象的存在，各斜桩桩侧摩阻力均小于相应直桩桩侧摩阻力。在 $z/L=0.7$ 时（两个土层交界处），桩侧摩阻力突然增大，这是由于下层土体的粘聚力和压缩模量均大于上层土体导致的。

图 10(b)给出了上拔荷载为 100 kN 时桩体右

侧摩阻力沿桩身相对深度的分布。在桩体上部区段，各斜桩桩侧摩阻力均为零，这是由于上拔荷载使桩侧发生桩-土脱离现象引起的。在桩体下部区段，各斜桩桩侧摩阻力明显小于相应直桩桩侧摩阻力，这是因为桩侧摩阻力除了与桩-土接触压力有关以外，还受到桩与桩侧土之间相对滑移的影响，由于直桩的桩-土接触压力与斜桩相差不大，而相对滑移却要比斜桩大很多，所以会出现直桩的侧摩阻力大于斜桩的现象。

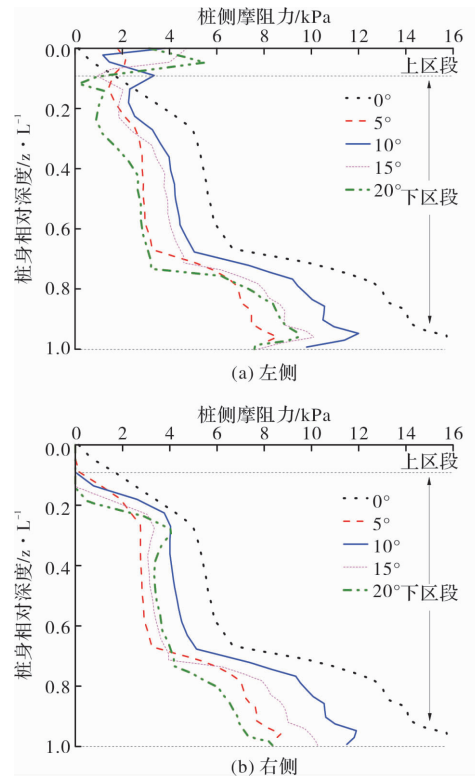


图 10 桩侧摩阻力随桩身相对深度变化曲线

Fig. 10 Curve of Pile Side Friction with Relative Depth of Pile Body

3.6 长径比对斜桩有效桩长的影响

通过 3.3 分析可知，当桩顶上拔荷载为 100 kN 时，斜桩在 $z/L=0.4$ 以下区段的剪力和弯矩均接近于 0，这说明此区段内的桩体对斜桩的抗拔承载力几乎没有影响，即斜桩存在一个有效桩长。

在土层状况为图 3 的情况下，建立上拔荷载为 100 kN 时不同长径比的桩土模型（其中桩径不变，为 0.25 m），并计算得到不同倾角下桩顶上拔位移随长径比的变化曲线，如图 11 所示。不难看出，随着长径比的增加，直桩的桩顶上拔位移表现出了与斜桩相同的规律，即当长径比小于 45 时，桩顶的上拔位移随着长径比的增大而迅速减小；而当长径比大于 45 时，桩顶的上拔位移随着长径比的增加未表现出明显的变化。这说明对于本文的

算例,斜桩存在有效桩长,为11.25 m。此外,倾角的大小不会明显影响斜桩的有效桩长,如在此算例中,直桩与不同倾角的斜桩有效桩长均为11.25 m。

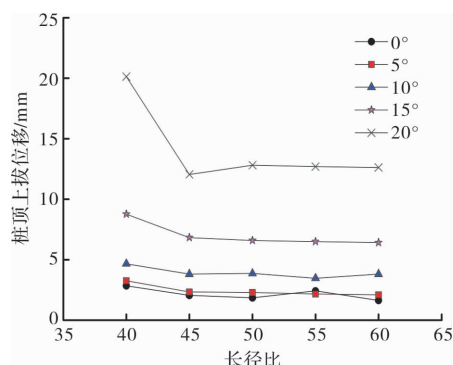


图11 桩顶上拔位移随长径比变化曲线

Fig. 11 Curve of Pile Top Uplift Displacement with Length-Diameter Ratio

4 结 论

本文通过数值模拟对斜桩在上拔荷载作用下的承载变形性状做了研究,得出以下结论:

(1)在上拔荷载作用下,斜桩桩顶不仅存在上拔位移,还存在水平位移。桩身倾角及上拔荷载越大,桩顶拔位移和水平位移随也越大。

(2)斜桩极限抗拔承载力大于直桩,且在15~20°之间存在一个最佳倾角使斜桩的极限抗拔承载力达到最大。

(3)在 $z/L=0.4$ 以下区段,斜桩桩身剪力和弯矩几乎全部为零。倾角对斜桩最大剪力和最大弯矩所处的位置影响不大。同一桩身相对深度处剪力和弯矩随着倾角的增大而增大。

(4)随着桩身相对深度的增加,直桩和斜桩的轴力均逐渐减小。倾角对轴力的影响不大。

(5)桩-土接触压力因斜桩桩身两侧分别出现桩-土挤密和桩-土分离现象而表现出了不同于直桩的分布,它的大小与倾角的大小密切相关。

(6)上拔荷载作用下,由于桩身出现反弯曲现象,导致斜桩两侧摩阻力分布相差较大。斜桩倾角越大,桩体左侧上部区段的最大摩阻力越大。

(7)上拔荷载作用下斜桩存在有效桩长,倾角的大小对其影响不大。

参考文献 References

- [1] COOPER S E. Ductile frames are tough for earthquakes[J]. Civil Engineering, 1991, 61(8): 61-63.
- [2] BENSLIMANE A, JURAN I, HANNA S. Seismic behavior of micropile systems[J]. ASCE, 2010, 30

(4): 239-258.

- [3] 徐斯林,韩劲松,赵利平. 海上嵌岩钻孔灌注斜桩施工技术[J]. 水运工程, 2009, 434(11): 167-170.
XU Silin, HAN Jingsong, ZHAO Liping. Construction technology of rock-socketed cast-in-place inclined pile on the sea[J]. Port & Waterway Engineering, 2009, 434(11): 167-170.
- [4] 靳彩,赵瑜,李凤兰,等. 送电线路铁塔复合式斜桩基础试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(9): 45-47.
JIN Cai, ZHAO Yu, LI Fenglan, et al. The experimental research on the complex inclined pile foundation for power line tower [J]. Industrial construction, 2001, 31(9): 45-47.
- [5] 魏鉴栋,陈仁朋,陈云敏,等. 微型桩抗拔特性原型试验研究[J]. 工程勘察, 2006 (8): 14-19.
WEI Jiandong, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin, et al. Prototype test study on pullout characteristics of micropile[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2006 (8): 14-19.
- [6] 吕凡任,陈仁朋,陈云敏,等. 软土地基上微型桩抗压和抗拔特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38 (3): 99-105.
LÜ Fanren, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin, et al. Field tests on compression and uplift behavior of micropiles in soft ground[J]. Chian Civil Engineering Journal, 2005, 38(3): 99-105.
- [7] 范书立,陈健云,张俊清. 波浪荷载作用下斜向抗拔桩的承载特性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 301-306.
FAN Lishu, CHEN Jianyun, ZHANG Junqing. Research on bearing capacity of inclined uplift pile under wave cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 301-306.
- [8] NAZIR A, NASR A. Pullout capacity of batter pile in sand[J]. Journal of Advanced Research, 2013, 4(2): 147-154.
- [9] MEYERHOF G G. Uplift resistance of inclined anchors and piles[C]//Proceedings of 8th international conference on soil mechanics and foundation engineering. Moscow:[s. n.], 1973.
- [10] 袁志林,段梦兰,陈祥余,等. 水平荷载下导管架平台桩基础的非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8):2551-1560.
YUAN Zhilin, DUAN Menglan, CHEN Xiangyu, et al. Nonlinear finite element analysis of jacket platform pile foundations under lateral loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8):2551-1560.

(下转第349页)

- 材料导报,2014(10):120-122.
- GOU Mifeng, HUANG Fei, GUAN Xuemao. The binding effect of slag on the chloride ions[J]. Materials Review,2014(10):120-122.
- [9] TANG L, NILSSON L O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars[J]. Cement and Concrete Research,1993,23(2):247-253.
- [10] ANDREJ Ipavec, TOMAŽ Vuk, ROMAN Gabrovšek. Chloride binding into hydrated blended cements: The influence of limestone and alkalinity[J]. Cement and Concrete Research,2013(48):74-85.
- [11] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土规程:SL352-2006 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- Ministry of Water Resources, People's Republic of China. Testing code for hydraulic concrete: SL352-2006[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press,2006.
- [12] 余红发,翁智财,孙伟,等. 矿渣掺量对混凝土氯离子结合能力的影响[J]. 硅酸盐学报. 2007. 35(6): 801-806.
- YU Hongfa, WENG Zhicai, SUN Wei, et al. Influences of slag content on chlorine ion binding capacity of concrete[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2007. 35(6):801-806.
- [13] CHEN Y, SHUI Z, CHEN W, et al. Chloride binding of synthetic Ca-Al-NO₃ LDHs in hardened cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93:1051-1058.
- [14] YANG Z, FISCHER H, POLDER R. Synthesis and characterization of modified hydrotalcites and their ion exchange characteristics in chloride rich simulated concrete pore solution[J]. Cement and Concrete Composites, 2014,47(0):87-93.
- [15] 段平. 层状双氢氧化物改善混凝土耐久性能的机理及其应用研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.
- DUAN Ping. Research on modification mechanism and the application of layered double hydroxides for durability of concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2014.
- [16] YOON S, MOON J, BAE S, et al. Chloride adsorption by calcined layered double hydroxides in hardened Portland cement paste [J]. Materials Chemistry and Physics, 2014,145(3):376-386.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 326 页)

- [11] 刘晋超,熊跟,朱斌,等. 砂土海床中大直径单桩水平承载与变形特性[J]. 岩土力学, 2015, 36(2):591-599.
- LIU Jinchao, XIONG Gen, ZHU Bin, et al. Bearing capacity and deflection behaviors of large diameter monopile foundations in sand seabed[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2):591-599.
- [12] 蔡忠祥,刘陕南,高承勇,等. 基于混凝土损伤模型的灌注桩水平承载性状分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(增 2):4032-4040.
- CAI Zhongxiang, LIU Shannan, GAO Chengyong, et al. Analysis of lateral response of bored piles based on concrete damaged plasticity model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (S2): 4032-4040.
- [13] 孔位学,芮勇勤,董宝第. 岩土材料在非关联流动法则下剪胀角选取探讨[J]. 岩土力学,2009, 30 (11): 3278-3282.
- KONG Weixue, RUI Yongqin, DONG Baodi. Determination of dilatancy angle for geomaterials under non-associated flow rule[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11):3278-3282.
- [14] AL-SHAKARCHI Y J, Fattah M Y, Kashat I K. The behaviour of batter piles under uplift loads[C]//Proceedings of international conference on geotechnical engineering. Sharjah:[s. n.],2004: 105-114.
- [15] HANNA A M, AFRAM A. Pull-out capacity of single batter piles in sand; Reply[J]. Revue Canadienne De Géotechnique, 1987, 24 (3):468-468.
- [16] CHATTOPADHYAY B C, Pise P J. Axial uplift capacity of inclined piles [J]. Indian Geotechnical J, 1986, 16(3): 197-214.

(编辑 吴海西 沈 波)