

水平受荷斜桩承载变形性状及荷载传递机理分析

曹卫平¹, 葛欣^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中铁二局第三工程有限公司, 四川 成都 610031)

摘要: 对水平荷载作用下斜桩的承载变形性状进行了数值模拟, 分析了桩身倾角、桩顶约束条件及竖向荷载等因素对斜桩水平承载力的影响。数值分析结果表明: 桩身倾角对斜桩水平承载力有较大影响, 正斜桩的水平承载力大于直桩的水平承载力, 而负斜桩的水平承载力小于直桩的水平承载力。桩顶竖向上拔荷载会提高正斜桩的水平承载力, 但会降低负斜桩的水平承载力; 桩顶竖向下压荷载会降低正斜桩的水平承载力, 但会提高负斜桩的水平承载力。与桩顶自由时相比, 桩顶设置承台会使斜桩桩顶水平位移明显减小。

关键词: 斜桩; 水平承载力; 水平位移; 竖向荷载

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)05-0624-06

Analyses of bearing capacity and load transfer mechanism of horizontally loaded batter piles

CAO Weiping¹, GE Xin^{1,2}

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

2. China Railway ERJU 3st Engineering Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Behavior of single batter piles under horizontal load was modeled by means of FEM, and the influence of shaft inclined angle, pile head constraints as well as vertical load applied on the pile head on the behavior of batter piles was analyzed. It was showed that the bearing capacity of batter piles is notably affected by the shaft inclined angle. The horizontal bearing capacity of vertical piles is less than that of the positive batter piles but greater than that of the negative batter piles. The existence of uplift load on pile head can improve the horizontal bearing capacity of positive batter piles but decrease the negative batter pile bearing capacity. On the contrary, the compression loads applied on pile head can decrease the horizontal bearing capacity of positive batter piles but increase that of the negative batter piles. Compared to the batter piles without cap, horizontal displacement could be efficiently reduced with the introduction of pile-cap embedded in soil.

Key words: batter piles; horizontal bearing capacity; horizontal displacement; vertical load

斜桩具有良好的抗压、抗拔及水平承载性能, 近年来在工程实践中得到越来越多的应用。斜桩主要以承受水平荷载为主, 但目前对水平荷载作用下斜桩承载性状的认识还不深刻, 因此研究斜桩的水平承载变形性状具有重要的工程实践意义。

云天铨等^[1]基于 Mindlin 弹性解给出了斜桩受任意平面荷载的数值解。Rajashree 等^[2]基于 Winkler 模型给出了斜桩荷载位移数值解。Reese 等^[3]将直桩的 $p-y$ 曲线修正得到了适合斜桩的 $p-y$ 曲线。龚健等^[4]利用 $p-y$ 曲线法计算了微型单桩及群桩的水平位移。Zhang 等^[5]进行了水平荷载斜桩离心机模型试验, 给出了不同倾角斜桩的水平荷载一位移曲线。郑刚等^[6-8]通过数值方法分析了竖向荷载

作用下斜桩的承载特性。杨剑^[9]等利用 ABAQUS 软件对不同倾角的斜桩进行模拟, 揭示了倾斜荷载对斜桩基础承载力和内力的影响规律。凌道盛等^[10]假定桩前浅层土体破坏区为三维楔形体, 提出了适用于斜桩水平承载特性的修正 $p-y$ 曲线。

上述研究都是针对单一荷载作用下的斜桩, 而实际工程中斜桩大多同时承受水平荷载和竖向荷载。另外, 桩顶承台对斜桩承载性状的影响目前也未见研究。本文通过 ABAQUS 软件建立了斜桩-土作用模型, 研究了桩身倾角、桩顶竖向荷载及桩顶承台等因素对斜桩水平承载力及桩身内力的影响。

收稿日期: 2016-10-08

修改稿日期: 2017-08-27

基金项目: 陕西省自然科学基金计划项目(2015JM5260)

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

1 有限元模型

1.1 模型基本信息

有限元计算模型为三维实体模型, 如图 1 所示.

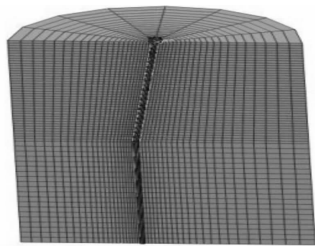


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

斜桩桩长 $L=20$ m, 桩径 $d=0.4$ m. 模型尺寸对计算结果有重要的影响, 因此计算时取桩端以下土层厚度为一倍桩长, 水平方向土体半径取 $R=L\sin\alpha+20d$ (d 为桩身直径, α 为斜桩倾角). 土的侧向边界径向位移为零, 底面边界竖向及水平位移均为零. 钢筋混凝土桩采用理想线弹性模型, 土体采用线性 D-P 模型, 其屈服面函数表示为 $F=t-P\tan\phi-d=0$; 塑形势面函数为 $G=t-P\tan\phi$, 采用非关联流动法则.

1.2 桩-土界面接触属性及有限元网格

合理设置桩-土界面接触属性是采用有限元分析桩-土相互作用的前提. 本文采用面对面的离散方法, 考虑了主控面和从属面的几何形状, 以刚度较大的桩身作为主控面, 以刚度较小的土体作为从属面. 接触跟踪方法采用有限滑动方法, 允许桩-土界面产生较大的相对滑移和转动. 桩与桩侧土接触面的法向模型采用硬接触, 当桩与土接触存在间隙时不传递法向压力. 接触面的摩擦模型采用罚摩擦计算方法. 桩端与桩端土接触采用 tie 连接. 为使计算容易收敛, 通过反复演算取桩-土界面摩擦系数 $\mu=0.4$. 桩与土均采用三维实体八节点缩减积分单元(C3D8R).

1.3 模型参数选取

模型参数对有限元计算结果有重要影响, 因此参数的选取至关重要. 有限元计算中使用的是杨氏模量, 而一般文献中给出的是土体的压缩模量, 根据已有学者的经验, 土体弹性模量取为压缩模量的 3~5 倍. 文献[4]中土层分布如图 2 所示, 由于该文献提供的参数有限, 本文通过大量试算逼近了实测值. 参数选取如下: 斜桩弹性模量 $E=27.2$ GPa, 泊松比 $\nu=0.2$, 密度 $\rho=2\,500$ kg/m³, 淤泥质黏土模量 $E_1=9.25$ MPa, 泊松比 $\nu_1=0.4$,

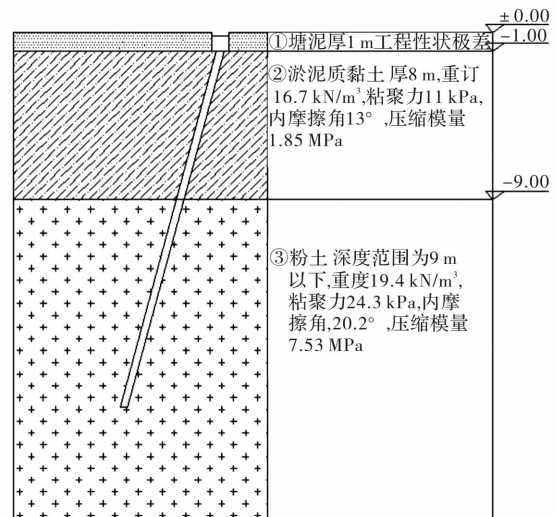


图 2 试验场地地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of test site

粉土模量 $E_2=37.65$ MPa, 泊松比 $\nu=0.4$.

2 计算结果及分析

2.1 模拟现场试验

图 3(a)为基于文献[4]中现场水平受荷 10° 斜桩 D-7 的拟合结果. 可以看出, 有限元计算结果与现场试验结果较为吻合. 当水平荷载小于 100 kN 时, 桩顶水平位移的计算值大于实测值, 这是现场孔径比设计桩径 250 mm 略大的缘故. 当水平加载大于 100 kN 后, 现场实测值大于计算值, 这是因为计算中桩身材料采用线弹性模型, 故荷载位移曲线呈缓变型, 而现场桩身在加载后期由于混凝土开裂而导致桩身刚度下降, 实测结果出现了明显的陡降段.

图 3(b)为基于文献[11]中竖向压荷载作用时 10° 斜桩 S1 拟合的结果, 计算值与实测值较为接近. 在整个加载过程中, 桩顶沉降的计算值均大于现场实测值, 这同样是现场孔径大于设计桩径 250 mm 的缘故.

以上有限元计算结果与现场试验结果整体上比较吻合, 这说明本文有限元计算模型可以较好地模拟水平荷载及竖向荷载下斜桩的承载变形性状, 因此下文在该模型的基础上对水平受荷斜桩性状进行数值分析. 除非特别说明, 下文均取斜桩桩长 $L=20$ m, 桩径 $d=0.4$ m.

2.2 竖向荷载对斜桩水平承载力的影响

图 4 给出了在 200 kN 的水平荷载作用下桩顶竖向荷载对斜桩桩顶水平位移的影响. 有限元计算时, 设置桩顶自由且与地面齐平, 桩顶截面竖向集中荷载等效为均布面荷载, 以竖向上拔荷载为

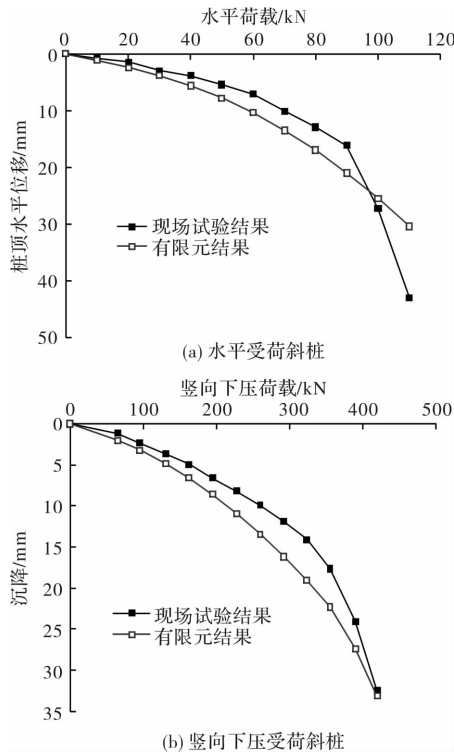


图3 位移实测值与计算值比较

Fig. 3 Comparison between measured and computed displacements

负, 竖向向下压荷载为正。从图4可以看出, 竖向荷载对直桩的桩顶水平位移几乎无影响。桩顶上拔荷载会减小正斜桩的桩顶水平位移, 但会增加负斜桩的桩顶水平位移。桩顶下压荷载会增加正斜桩的桩顶水平位移, 但会减小负斜桩的桩顶水平位移。

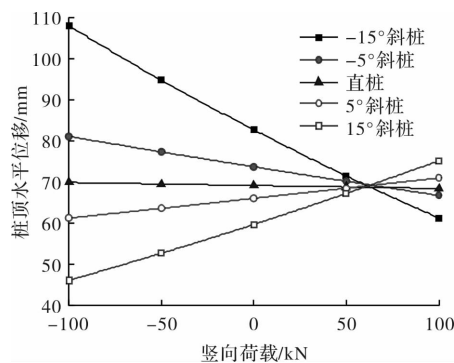


图4 竖向荷载对斜桩水平位移的影响

Fig. 4 Effect of vertical loads on the horizontal displacements of batter piles

下文以桩顶竖向荷载 $Q = -100$ kN、 $Q = 0$ kN 及 $Q = 100$ kN 下的 15° 斜桩为例进行分析。图5为 15° 和 -15° 斜桩荷载-位移曲线图, 可以看出, 在相同竖向荷载作用下, 正、负斜桩桩顶水平位移均随水平荷载的增加呈非线性增大。当水平荷载相同时, 桩顶竖向荷载越大, 15° 正斜桩桩顶水平位移越大, 而 -15° 负斜桩桩顶水平位移越小。如水平荷载为 120 kN 时, 桩顶竖向荷载 $Q = -100$ kN、 $Q = 0$ kN

及 $Q = 100$ kN 下 15° 正斜桩桩顶水平位移分别为 15.25 mm、23.24 mm 和 32.87 mm, 而 -15° 正斜桩桩顶水平位移分别为 45.11 mm、30.36 mm 及 18.97 mm。

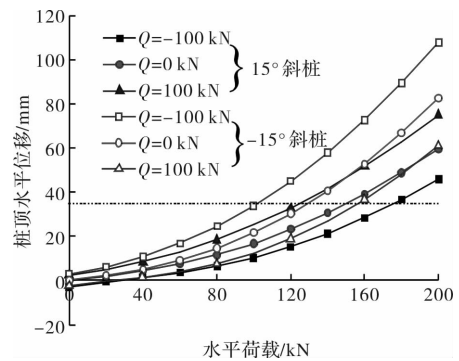
图5 $\pm 15^\circ$ 斜桩水平荷载-位移曲线

Fig. 5 Horizontal load-displacement curves for batter piles

目前我国规范中还缺乏斜桩水平承载力的确定方法, 因此本文借鉴文献[4]的方法确定斜桩水平承载力。当荷载-位移曲线呈缓变形时, 按控制桩顶水平位移确定斜桩水平承载力, 取桩顶水平位移为 35 mm 对应的荷载作为斜桩的水平极限承载力。从图5可以看出, 在竖向荷载 -100 kN、 0 kN 及 100 kN 作用下, 正斜桩水平承载力分别为 176.11 kN、150.39 kN 和 124.85 kN, 桩顶承受上拔荷载与无竖向荷载时相比较, 正斜桩水平承载力提高了 17.1%, 而桩顶承受竖向向下压荷载与无竖向荷载时相比较, 正斜桩水平承载力降低了 17%; 在竖向荷载 -100 kN、 0 kN 及 100 kN 作用下负斜桩水平承载力分别为 101.72 kN、128.9 kN 和 156.62 kN, 施加上拔荷载相比无上拔荷载时, 负斜桩水平承载力降低了 21.1%, 而施加竖向向下压荷载相比无竖向荷载时, 正斜桩水平承载力提高了 21.5%。桩顶竖向上拔荷载会提高正斜桩的水平承载力, 但会降低负斜桩的水平承载力; 桩顶竖向向下压荷载会降低正斜桩的水平承载力, 但会提高负斜桩的水平承载力。

图6为 15° 和 -15° 斜桩在水平荷载 200 kN 下的桩身水平位移沿深度的分布 (12 m 深度以下桩身水平位移为零, 故未示出)。可以看出, 正、负斜桩桩顶水平位移随深度变化表现出相似的规律, 即斜桩最大水平位移均发生于桩顶, 桩身水平位移随深度增加逐渐减小, 最后趋近于零。正斜桩在 4.1 ~ 8.5 m 范围内桩身出现反弯变形, 随竖向荷载的增加, 桩顶水平位移变大, 反弯点以下桩身的反向挠曲程度增加。竖向荷载 -100 kN、 0 kN、 100 kN 作用下正斜桩桩顶水平位移分别为 46.06 mm、

59.64 mm、75.1 mm. 负斜桩反弯点随竖向荷载增加有上移趋势, 在上拔荷载 100 kN 下桩身反弯点在 4.5 m 处, 在无竖向荷载及下压荷载 100 kN 下桩身反弯点在 4.2 m 处, 竖向荷载 -100 kN、0 kN、100 kN 作用下斜桩桩顶水平位移分别为 107.9 mm、82.65 mm、61.2 mm. 正、负斜桩在 8.5 m 以下桩身水平位移基本为零, 说明桩身存在有效桩长, 超出有效桩长的部分对斜桩水平承载力的贡献可忽略不计, 因此可以把深度 8.5 m 作为桩身水平位移的影响深度.

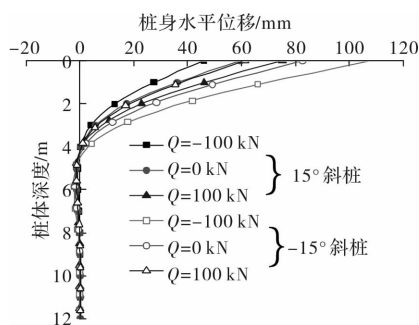


图6 ±15°斜桩桩身水平位移分布

Fig. 6 The distribution of the horizontal displacements of batter piles

2.3 竖向荷载对斜桩桩身弯矩和剪力的影响

图7给出了15°和-15°斜桩在200 kN的水平荷载下桩身弯矩沿深度的分布(12 m深度以下桩身弯矩为零, 故未示出). 分析发现, 在不同竖向荷载作用下, 正、负斜桩桩身弯矩随深度变化表现出相似的规律, 即桩身弯矩随埋深的增加先迅速增大至最大值, 随后逐渐减小趋于零. 随竖向荷载的增加, 正斜桩桩身相同截面处的弯矩增加, 而负斜桩桩身相同截面处的弯矩减小. 桩顶处自由, 弯矩为零. 在2.1 m约5倍桩径处, 各荷载下正、负斜桩弯矩均出现最大值, 表明桩身最大弯矩的位置与桩顶竖向荷载无关. 正、负斜桩弯矩集中区段在0~6 m, 约为桩长的1/3. 6 m以下桩身弯矩很小, 可忽略不计.

斜桩桩身剪力沿深度的分布如图8所示(12 m深度以下桩身剪力为零, 故未示出). 正、负斜桩桩身剪力随深度变化表现出相似的规律, 即桩身剪力先随深度增加而迅速减小至零, 然后剪力反向增加至最大值, 而后又逐渐衰减趋于零. 随竖向荷载的增加, 正斜桩桩身相同截面处的剪力增加, 负斜桩桩身相同截面处的剪力减小. 桩顶为水平荷载和竖向荷载作用点, 故斜桩及直桩桩身最大剪力均发生于桩顶, 因此桩基设计时, 桩顶应有足够的抗剪强度. 桩身最大反向剪力均发生约3.5 m

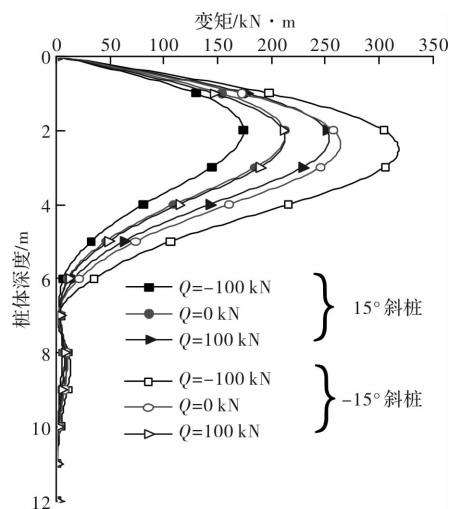


图7 ±15°斜桩桩身弯矩的分布

Fig. 7 The distribution of bending moment of batter piles 处, 竖向荷载对斜桩桩身最大剪力发生的位置基本无影响.

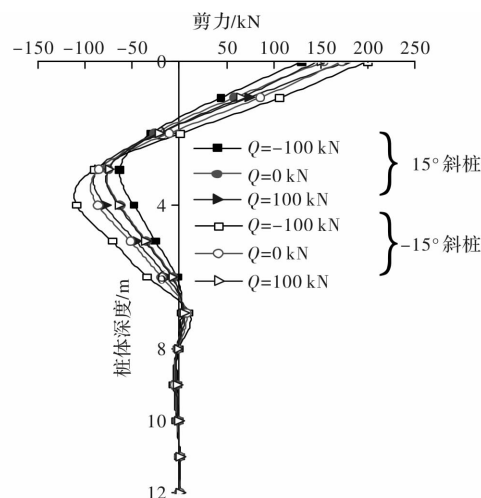


图8 ±15°斜桩桩身剪力的分布

Fig. 8 The distribution of shear force of batter piles

2.4 桩顶约束条件对斜桩水平承载力的影响

水平荷载分十级加载至200 kN, 桩顶自由并与地面齐平, 在桩顶截面施加均匀水平面荷载. 为便于网格划分使计算易于收敛, 承台取圆柱形承台, 高0.8 m, 半径0.45 m, 承台全埋土中且顶面与地面齐平, 水平荷载分十级在承台顶面均匀施加.

图9为水平受荷斜桩在不同桩顶约束条件下的荷载位移图. 可以看出, 随水平荷载的增加, 斜桩桩顶水平位移呈非线性增大. 取桩顶水平位移35 mm对应的荷载为斜桩水平极限承载力, 桩顶自由时, -15°斜桩、直桩及15°斜桩水平承载力分别为129.4 kN、140.27 kN和150.06 kN, 15°斜桩相比直桩承载力提高了7%, 而-15°斜桩相比直桩承载力降低了7.7%, 表明桩身倾角对斜桩水平

承载力有较大影响,正斜桩的水平承载力大于直桩的水平承载力,而负斜桩水平承载力小于直桩的水平承载力。

桩顶设置承台时, -15° 斜桩、直桩及 15° 斜桩水平承载力分别为 158.54 kN、177.03 kN 和 190.61 kN,相比桩顶自由时的水平承载力分别提高了 22.5%、26.2%、27%,这表明承台对斜桩水平承载力的有利作用受到桩身倾角的影响,即随着桩身倾角的增加,承台对斜桩水平承载力的提高作用越来越明显。工程实际中,当桩承受较大水平荷载时,可以优先考虑使用正斜桩,并将承台全埋土中以充分发挥承台的有利作用。

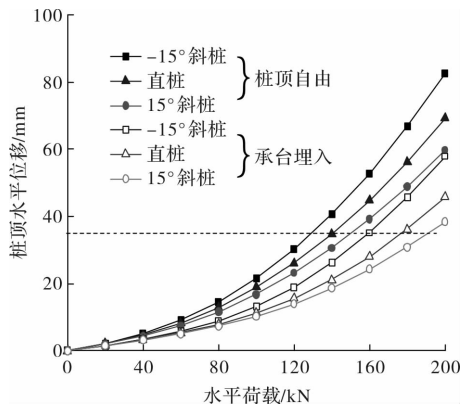


图9 斜桩水平荷载一位移曲线

Fig. 9 Horizontal load-displacement curves for batter piles

2.5 竖向荷载对斜桩桩-土接触压力的影响

图10以200 kN的水平荷载作用下的 15° 斜桩为例说明斜桩-土接触压力随深度的变化规律。本文规定以桩土接触压力被动侧为桩前,桩土接触压力主动侧为桩后。根据经验公式计算静止土压力系数: $k_0 = 1 - \sin\varphi$,静止土压力如图10虚线所示。

从图10可以看出,正、负斜桩桩-土接触压力表现出相似的规律。水平受荷斜桩由于桩身泥面处水平位移较大致使表层土体产生塑性屈服,表层土无法提供更大的土抗力继而将水平荷载传递给更深处土体,因此正斜桩、负斜桩桩前最大被动土压力并未出现在表层土,而是出现于桩身约5d深度处,该位置与正、负斜桩桩身最大弯矩出现的位置吻合。在8m土层分界处,接触压力产生了跳跃现象,这是由土层分界处土体强度的差异造成的。9m以下不论正、负斜桩其接触压力均相同,表明荷载传递到一定深度以下,桩土接触压力基本都为静止土压力,而由外荷载引起的土压力为零,故可将9m作为外荷载对桩土接触压力的影响深度。

在水平荷载作用下,斜桩向桩前发生水平位移,这使得桩前土受到挤压,故桩前土压力为被动土压力,大于静止土压力。此时桩后土体与桩身脱离,故在脱离深度范围内桩土接触压力为零。在桩身反弯点4.1m以上,随着竖向荷载的增加,桩前土压力越来越大,而桩后土体与桩身脱离深度由2.1m增至2.6m,在脱离深度至桩身反弯点处,桩后土压力随竖向荷载的增加而减小,表现出与桩前土压力相反的变化规律。在反弯点4.1m处,桩前土压力由被动土压力变为主动土压力,而桩后土压力由主动土压力变为被动土压力。在桩身反弯点至8.5m深度范围内,斜桩桩身发生了反弯变形,桩前与桩后土压力随竖向荷载的增加与反弯点以上土压力变化规律相反。

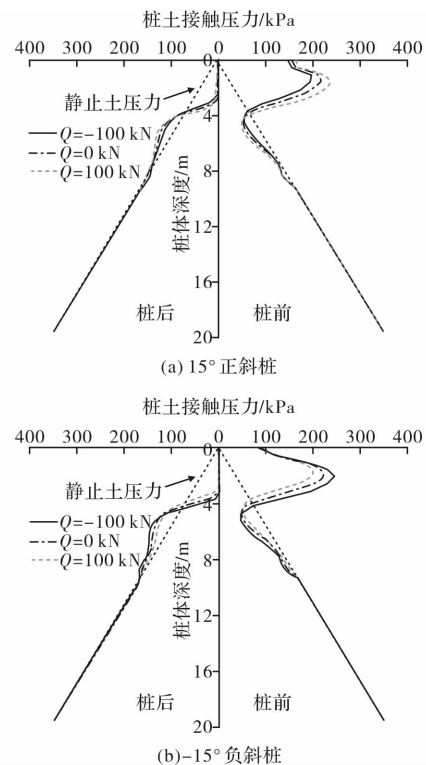


图10 桩-土接触压力

Fig. 10 Contact stresses between pile and soil

2.6 桩长对斜桩水平承载变形性状的影响

图11以水平荷载200 kN下 10° 正斜桩为例表明了桩长的变化对斜桩承载变形的影响。以斜桩桩底为土层的分界面,桩底以上为图2中的土层②,其下为土层③。可以看出,桩长为4m时,桩身位移基本呈线性分布,此时斜桩绕某一点刚性转动,表现出刚性短桩的受力特性,随桩长的增加,逐渐表现为弹性长桩的受力特性,桩身挠曲变形明显,桩身下段水平位移基本为零。当桩长小于6m时,随桩长的增加,斜桩桩顶水平位移明显减小;当桩长超过6m后,桩顶水平位移随桩长的增加

几乎不变.如桩长为4 m、5 m时桩顶水平位移分别为135.0 mm和72.1 mm,但当桩长达到6 m以后,桩顶水平位移均约为64.6 mm.还能看出,随桩长的增加,桩身水平位移曲线有逐渐重合的趋势,表明水平受荷斜桩存在有效桩长,超出此桩长的部分对斜桩水平承载力的贡献忽略不计.桩长4 m和5 m对应的反弯点深度分别为3.4 m、4.0 m,桩长达6 m以后反弯点深度均约为4.2 m,表明随桩长的增加,桩身反弯点逐渐下移,更深层的土体反力得以发挥.

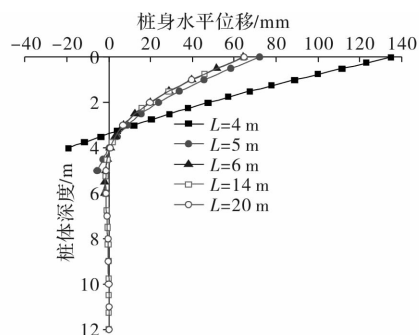


图 11 桩身水平位移

Fig. 11 Horizontal displacements of batter piles

3 结论

本文对水平载荷下斜桩承载变形性状及荷载传递性状进行分析,可以得到以下结论:

(1) 桩身倾角对斜桩水平承载力有较大影响,正斜桩的水平承载力大于直桩的水平承载力,而负斜桩的水平承载力小于直桩的水平承载力.

(2) 桩顶竖向上拔荷载会提高正斜桩的水平承载力,但会降低负斜桩的水平承载力;桩顶竖向下压荷载会降低正斜桩的水平承载力,但会提高负斜桩的水平承载力.

(3) 桩顶竖向荷载越大,正斜桩桩身相同截面处的弯矩及剪力越大,而负斜桩桩身相同截面处的弯矩及剪力越小;无论斜桩还是直桩,桩身最大剪力均出现于桩顶.

(4) 水平受荷斜桩桩前最大被动土压力出现于桩身约5d深度处,该位置与斜桩桩身最大弯矩出现的位置吻合;外荷载仅在一定深度内对斜桩桩—土接触压力产生影响,超出该深度的土压力均为静止土压力;斜桩桩身静止土压力、被动土压力、主动土压力间的转化与桩身位移及反弯变形密切相关.

(5) 与桩顶自由时相比,桩顶设置承台会使斜桩桩顶水平位移明显减小.

参考文献 References

[1] 云天铨. 线载荷积分方程法分析桩顶受任意荷载的弹

性斜桩[J]. 应用数学和力学, 1999(04): 24-30.

YUN Tianquan. Analysis of sloping elastic pile under arbitrary loads by line-loaded integral equation method [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1999(04): 24-30.

[2] RAJASHREE S S, SITHARAM T G. Nonlinear finite-element modeling of batter piles under lateral loads[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(7): 604-612.

[3] REESE L C, ISENHOWER W M, WANG S T. Analysis and design of shallow and deep foundations [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

[4] 龚健, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 微型桩原型水平荷载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(20): 3541-3546.

GONG Jian, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin, et al. Prototype testing study on micropiles under lateral loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(20): 3541-3546.

[5] ZHANG L M, MCVAY M C, LAI P W. Centrifuge modeling of laterally loaded single batter piles in sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(6): 1074-1084.

[6] 郑刚, 王丽. 竖向荷载作用下倾斜桩的荷载传递性状及承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2008(03): 323-330.

ZHENG Gang, WANG Li. Load transfer and bearing capacity of inclined pile under vertical load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(3): 323-330.

[7] 王丽, 郑刚. 局部倾斜桩竖向承载力的有限元研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3533-3538.

WANG Li, ZHENG Gang. Research on vertical bearing capacity of partially inclined pile with finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3533-3538.

[8] 郑刚, 李帅, 杜一鸣, 等. 竖向荷载作用下倾斜桩的承载力特性[J]. 天津大学学报, 2012, 45(7): 567-576.

ZHENG Gang, LI Shuai, DU Yiming, et al. Behavior capacity behaviors of inclined pile under vertical load [J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(7): 567-576.

[9] 杨剑, 高玉峰, 程永锋, 等. 输电线路掏挖式基础在倾斜荷载作用下的特性[J]. 工业建筑, 2008(6): 62-66.

YANG Jian, GAO Yufeng, CHENG Yongfeng, et al. Characteristic of digging foundations of transmission lines under inclined loading [J]. Industrial Construction, 2008(6): 62-66.

[10] 凌道盛, 任涛, 王云岗. 砂土地基斜桩水平承载特性 p-y 曲线法[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 155-162.

LING Daosheng, REN Tao, WANG Yungang. A p-y curve method for horizontal bearing characteristics of single batter pile in sands. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 155-162.

[11] 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(3): 99-105.

LV Fanren, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin, et al. Field tests on compression and uplift behavior of micropiles in soft ground [J]. China Civil Engineering Journal, 2005(3): 99-105.

(编辑 沈 波)