DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.04.39

# 竖向荷载作用下斜桩承载特性数值分析

杨磊

(杨凌职业技术学院,陕西杨凌712100)

摘 要: 近年来,斜桩在桥梁、码头、海上钻井平台及大型输电线路塔架基础等工程中得到广泛应用,研究不同倾角 斜桩的荷载传递及承载特性实用意义较大。基于 ABAQUS 软件,考虑桩土接触特性,模拟分析了不同倾角斜桩的 承载特性。结果表明:桩身倾角不大于 10°时,倾斜角对单桩的极限承载力影响不大,但会在桩身产生一定弯矩以 及桩顶产生一定的水平位移;桩身轴力沿桩长方向的衰减速率随桩身倾角的增大而增大;斜桩桩身弯矩主要分布 在桩顶下 1/2 桩长范围内,其最大值的位置不受桩身倾角以及桩顶竖向荷载的影响;斜桩桩身侧摩阻力沿桩长大 致呈"S"型分布,其桩顶以下 1/6 桩长范围内侧摩阻力远远大于直桩。

关键词: 竖向荷载; 斜桩; 轴力; 弯矩; 侧摩阻力; 数值分析

中图分类号:TU473.1<sup>+</sup>2 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2017)04-0229-06

## Numerical analysis of bearing characteristics of inclined piles under vertical load

#### YANG Lei

(Yangling Vocational and Technical College, Yangling 712100, China)

**Abstract**: In recent years, inclined pile has been widely used in foundation engineering like the bridge piers, offshore drilling platforms, and large transmission line tower. It is of great practical significance to study the load transfer and bearing characteristics of inclined piles with different angles. The bearing characteristics of different inclined piles were simulated and analyzed considering the pile – soil contact characteristics using the ABAQUS software. The finite element analysis results show that: When pile inclination was less than 10°, inclined angle of the single pile has neglectable effect on ultimate bearing capacity. But it may produce a certain bending moment in the body of the pile and a certain lateral displacement on top of the pile; Decay rate of axial force alone the length of piles increased as inclination increased; The bending moment of the pile shaft mainly occur in the lower one – halfof pile length. Inclination of batter piles and vertical load had no effect on the position where the maximum appears; The inclined pile skin friction along the pile length shows "S" type distribution. The skin friction of the inclined pile in the long range of 1/6 pile was far greater than that of the vertical pile under the pile head. **Key words**; vertical load; inclined pile; axial force; bending moment; lateral friction; numerical analysis

## 1 研究背景

近年来,斜桩在桥梁、码头、海上钻井平台及大型输电线路塔架基础等工程中得到广泛应用。目前 国内外对斜桩的合理设计方法还比较缺乏,常借用 直桩的设计方法来设计斜桩,这显然不能反映斜桩 的实际工作性状。因此,对斜桩承载变形形状的研 究具有重要的工程实践意义。

国内外学者关于斜桩工作特性的研究取得了不

少成果。苏子将等<sup>[1]</sup> 通过研究发现当桩身的倾角 在逐渐增大的过程中,容许承载力呈现出随着倾角 的增大先增大后减小的现象,当倾角为12°时容许 承载力取得最大值,当倾角大于12°时容许承载力 在逐渐减小。Sharma等<sup>[2]</sup>、Hanna等<sup>[3]</sup> 通过室内模 型试验对斜桩的竖向承载力进行了研究,这对于了 解斜桩的承载变形特性具有重要的意义。赵明华 等<sup>[4]</sup> 对倾斜荷载作用下的室内模型桩进行了试验, 发现在倾斜荷载下,斜桩的极限荷载随着桩身倾斜

收稿日期:2017-03-25; 修回日期:2017-05-13

作者简介:杨磊(1981-),男,山西天镇人,硕士,讲师,主要从事岩土工程数值计算研究。

角的增大而减小。郑刚等<sup>[5]</sup>通过现场载荷试验和 数值分析对天津地区不同倾斜度的斜桩在竖向荷载 作用下的荷载传递性状进行了研究,结果表明:当倾 斜度在一定范围内变化时,相同荷载下斜桩的沉降 反而小于直桩。文献[6-8]通过室内模型试验研 究了竖向荷载作用下抗压桩变形性状及其荷载传递 机理,这对认识斜桩承载力特性有一定的意义。文 献[9-10]提出了一种关于斜桩承载力的近似算 法,这对斜桩承载力的预估提供了一定的参考价值。

目前对斜桩的研究主要集中在桩身倾角不大情况下的承载特性上,对大倾角斜桩的承载特性研究 较少。为此,本文通过数值反演的方法从现场试验 的 *Q<sub>v</sub>* ~ *S* 曲线得到土层参数,进一步分析了不同倾 角及其相关条件的斜桩的荷载传递及其承载特性, 以期为相关工程建设提供参考。

## 2 有限元模型与土层参数反演

本文针对一个实际工程采用 ABAQUS 软件进 行模拟计算。由于工程中只有各个土层的基本物理 力学参数,缺乏桩土之间的摩擦参数和有限元计算 中的其他参数,计算中先利用倾角为 10°的斜桩现 场荷载试验 Q<sub>v</sub> ~ S 曲线结果进行了参数反演分析, 取得了计算参数,之后以反演得到的土层参数进一 步开展了数值模拟计算,来研究桩身倾角变化对斜 桩承载特性的影响规律。

### 2.1 工程基本情况

工程地层分布和基本物理力学参数见图 1。地 层有两层,分别为粉细砂和中粗砂。桩体倾角为 10°,桩长 *L* = 15 m,桩径 *d* = 500 mm,桩体打穿粉细 砂层,并深入中粗砂 0.5 m。桩顶作用垂直荷载。

$Q_{\nu}$	(1)粉土,厚度0.6m	$\frac{\bigtriangledown 0.00}{\bigtriangledown -0.60}$			
	(2)粉细沙,厚度13.8m y=17.2kN/m <sup>3</sup> φ=25.6° Es=18.5MPa	▽-14.40			
	<ul> <li>(3) 中粗沙</li> <li>y=19.2kN/m<sup>3</sup></li> <li>φ=31.8°</li> <li>Es=22.6MPa</li> </ul>				
图1 十层剖面图					

#### 2.2 有限元计算模型

2.2.1 材料模型参数 土体采用 D-P 模型,桩基

采用弹性模型。考虑砂土的剪胀性,数值模拟时粉 细砂的剪胀角取为 10.2°、中粗砂的剪胀角取为 4.5°。桩身混凝土材料参数选取如下:弹性模量值 为E = 27.2 GPa, 泊松比 $\nu = 0.2$ , 密度 $\rho = 2500$  kg/m<sup>3</sup>。

2.2.2 模型接触属性的设置及有限元网格划分 为了较好地模拟桩体的摩阻力和端承力的发挥程 度,在桩土之间设置接触单元。设置桩土接触属性 时考虑了主控面和从属面的几何形状,将刚度较大 的桩身作为主控面,刚度较小的土体作为从属面。 接触方法采用有限滑动方法,允许桩 - 土界面产生 一定的相对滑移和转动。桩与桩侧土的接触采用硬 接触,即当桩与土接触之间存在间隙时不传递法向 压力,接触面的摩擦行为采用罚摩擦计算方法,通过 反复试算将桩土界面摩擦系数设为 0.54。桩端与 桩端土接触采用系统默认。桩与土体均采用三维实 体八节点缩减积分单元(C3D8R),该单元对位移的 求解结果较为精确,需要划分较细的网格来克服沙 漏问题。土体单元则以距桩身远近由疏到密划分网 格,桩 - 土网格划分如图 2 所示。



图 2 斜桩分析有限元网格

2.2.3 模型边界条件的确定 为消除边界效应,取 土体半径为20倍的桩径即土体半径为10m,由于 是抗压桩,桩端影响深度较大故取土体高度为25 m。限制土体侧向边界 x、y方向的位移,底边界限制 x、y、z3个方向的位移。

2.2.4 初始地应力的平衡及其加载方式 有限元 计算中为了消除初始地应力对计算结果的影响,首 先应进行加荷前的地应力平衡,使模型在重力作用 下基本不产生位移,本文地应力平衡后的竖向位移 为10<sup>-6</sup>量级,表明地应力已平衡。然后对预估的斜 桩极限承载力分成7级进行逐级加载,在斜桩顶面 处均匀施加面荷载,加载面积为整个桩顶截面。加 载至斜桩桩顶位移急剧增长且有限元计算不收敛,

231

即达到破坏荷载时终止加载。

## 2.3 计算参数的反演分析

图 3 为经过反复试算后,有限元模拟与现场试验的 Q<sub>v</sub> ~ S 曲线图。由图 3 可以看出,数值模拟和现场试验结果吻合较好,现场试验结果偏大是因为在成桩过程中桩身部分区段存在扩径现象。反演得到的计算参数值汇总见表 1。



## 3 不同倾角斜桩计算结果与分析

以上述反演得到的基本计算参数为基础,开展 了进一步的数值计算,得到不同倾角的斜桩的承载 特性,结果分析如下:

## 3.1 桩顶荷载 - 沉降

图4为斜桩不同倾角桩顶荷载(Q<sub>v</sub>) - 沉降 (S)曲线。由图4可看出,随着桩身倾角以及桩顶 荷载的增大,斜桩桩顶沉降逐渐增大。当桩顶竖向 荷载不大于600 kN时,各斜桩的桩顶沉降相差不 大;当桩顶荷载超过600 kN时,沉降差异随着桩身 倾角的增大变化开始明显。结合桩基规范<sup>[11]</sup>取桩 顶沉降值为0.03倍的桩径即沉降值为15 mm所对 应荷载作为斜桩的竖向极限承载力,各斜桩的极限 承载力汇总见表2。由表2可知,桩身倾角不大于 10°时,单桩的极限承载力几乎不受桩身倾角的影 响,随着桩身倾角的继续增大,承载力减小幅度逐渐 增大。



表 1 桩身材料及土层的计算参数						
	平均厚	重度	内摩	剪胀角	近れい	弹性模
土层	(长)度/	$\gamma$	擦φ⁄	$\Psi$	们们们	量 E/
	m (]	kN ∙ m <sup>-3</sup>	) (°)	(°)	ν	MPa
粉细砂	13.8	17.2	25.6	10.2	0.3	48
中粗砂	6.4	19.2	31.8	4.5	0.3	62
桩	15.0	25.0			0.2	27200

表 2 斜桩极限承载力值

桩身倾角/(°)	极限承载力/ kN	相比直桩增幅/%
0	1645.7	
5	1638.4	-0.41
10	1630.7	-0.90
15	1608.5	-2.30
20	1434.6	- 12.83
25	1134.6	- 31.06

### 3.2 桩身水平位移

图 5 反映了桩顶竖向荷载为 1 500 kN 时,桩身 倾角对桩身水平位移的影响。由图 5 可以看出,桩 顶水平位移及其反弯点以下桩身反向挠曲现象随着 桩身倾角的增大愈加明显,倾斜角为 5°、10°、15°、 20°、25°的斜桩桩顶水平位移分别为 2.77、8.95、 16.04、21.5、29.8 mm。在地面以下 2.02~3.11 m 范围内斜桩出现了反向弯曲的现象,随着倾斜角的 增大反弯点逐渐下移,倾斜角为 5°、10°、15°、20°、 25°的斜桩反弯点分别出现在桩顶以下 2.02、2.54、 2.56、3.09、3.11 m 处。



## 图 5 $Q_v = 1500 \text{ kN}$ 时不同倾角斜桩桩身水平位移

### 3.3 桩身轴力

图 6 反映了桩顶竖向荷载为 1500kN 时桩身倾角 对桩身轴力沿桩长分布的影响。由图 6 看出,无论是 直桩还是斜桩都总体呈现出桩身轴力从桩顶至桩端逐 渐减小的趋势,不同的是在桩身倾角较小时,桩身轴力 沿桩长衰减较慢,随着桩身倾角的增大,桩身轴力沿桩 长衰减速率逐渐增大。可以发现斜桩的桩身轴力在桩 顶处的衰减速率较大,中间区段次之,桩端处最小。以 15°斜桩为例,桩顶以下 2m 范围内的轴力平均衰减速 率为122.6kN/m,中间区段的12m平均衰减速率为 74.7 kN/m,桩端1 m 区间内衰减速率为 63.6 kN/m。 另外,从图6还可以看出,斜桩桩身轴力总体上小于直 桩的桩身轴力,同一深度处的桩身轴力随桩身倾角增 大而减小。如在桩长9 m 处,5°、10°、15°、20°、25°斜桩 的桩身轴力分别为 999.9、909.24、828.05、763.89、 695.45 kN,分别占直桩桩身轴力 1055.1 kN 的 94.8%、 86.2% 78.5% 72.4% 65.9%



#### 3.4 桩身弯矩

图7(a)为桩顶竖向荷载为1500kN时,倾角对



斜桩桩身弯矩 图 7

#### 3.5 桩土接触压力

图8(a)为桩顶竖向荷载为1500kN时,桩身倾 角对桩身两侧土压力的影响。可以看出,斜桩两侧 土压力沿桩身分布大致可以分为3个区间。在第1 区段(0~3.11 m),斜桩左侧土压力呈现出零土压 力,并且随着桩身倾角的增大,零土压力的分布范围 越大;相对应的右侧土压力为被动土压力,随着桩身 倾角的增大被动土压力的分布范围越广,数值也越 大。在第2区段(3.11~6.8 m),斜桩左侧的土压

桩身弯矩的影响。图7(b)反映了15°斜桩桩顶荷 载对桩身弯矩的影响。由图7(a)可知,在竖向荷载 作用下,由于桩顶发生了水平位移,使得一定范围内 桩身截面产生了  $P - \Delta$  效应。同一截面位置处的弯 矩随着桩身倾角的增大而增大。桩身的弯矩主要集 中在0~7.5 m 范围内。桩身弯矩最大值出现在桩 顶以下1.5 m处,弯矩最大值出现的位置并不随着 桩身倾角的变化而变化。桩身弯矩在2~5 m 范围 内迅速减小,在5~7.5 m 范围内出现反弯现象,在 7.5 m 以下区段桩身弯矩几乎为零。另外,从图7 (a)可以看出斜桩桩身弯矩主要分布在 1/2 桩长范 围内。综合图7(a)和(b)可以看出,在弯矩存在的 范围内,桩身弯矩随着倾角及其桩顶荷载的增大而 增大。以桩长 2m 截面处为例,5°斜桩的桩身弯矩 67.5 kN·m, 而 10°、15°、20°、25°斜桩同一截面的 弯矩达到了 173.2、287.8、383.1、522.4 kN・m,比 5°斜桩分别增加了156.6%、326.4%、467.6%、 673.9%。在弯矩作用下,桩体一侧的钢筋处于受拉 状态,过大的拉应力会导致钢筋与混凝土剥离,因 此,在实际工程中应注意对桩身截面的验算。



力为被动土压力,相对应的右侧土压力为主动土压 力,并且随着桩身倾角的增大两侧土压力的分布范 围越广、数值越大。在第3区段(6.8~15 m),斜桩 左右两侧的土压力均呈静止土压力,不受桩身倾角 的影响。

图 8(b) 为桩顶竖向荷载对 15°斜桩桩身两侧 土压力的影响。可以看出桩身两侧土压力的分布规 律与倾角对斜桩两侧土压力的分布规律一致。也可 以分为3个区间。在第1区段和第2区段都呈现出 随着桩顶荷载的增大被动土压力、零土压力、主动土 压力的分布范围越广,数值也越大的现象。同样在 第3区段,斜桩左右两侧的土压力均呈静止土压力, 几乎不受桩顶荷载的影响。

综合图 8(a) 和 8(b) 来看, 倾角和桩顶竖向荷载对桩身两侧土压力的影响均呈现出与桩身反弯变形一致的规律性。

#### 3.6 桩身侧摩阻力

图9反映了在竖向荷载为1500kN时,桩身倾 角对桩侧摩阻力的影响。由图9可以看出,斜桩桩 身侧摩阻力沿桩长大致呈"S"型分布,在桩顶以下 0.5~2.5 m范围内,侧摩阻力沿桩长呈递减趋势; 在2.5~6.8 m范围内侧摩阻力沿桩长呈现出先增 大后减小的趋势;在6.8~13.5 m区间侧摩阻力沿 桩长逐渐增大;在13.5~14.5 m区间侧摩阻力沿桩 长逐渐减小。另外,还可以看出,斜桩桩侧平均摩阻



(a) Q<sub>v</sub>=1500kN时不同倾角斜桩桩土接触压力



力沿桩长分布均可以分为两个区段,在第1区段 (0.5~6.8 m), 桩侧平均摩阻力随桩身倾角增大而 增大;在第2区段(6.8~14.5 m)平均侧摩阻力随 桩身倾角的增大而减小。在桩顶竖向荷载作用下, 脱离,导致桩左侧土压力由静止土压力转变为主动 土压力,桩右侧土压力由静止土压力变为被动土压 力,使得该区段桩身平均法向应力增加,因此,出现 了第1区段桩身倾角越大桩侧平均摩阻力越大的现 象。而在第2区段不论桩身倾角的大小,斜桩两侧 的土压力都呈静止土压力,但在这个区段,相比于大 倾角桩,小倾角斜桩与桩侧土的相对滑移较大,使得 侧摩阻力的发挥较为充分,所以平均侧摩阻力随桩 身倾角的增大而减小。侧摩阻力的发挥性状与图5 桩身反弯变形以及图8桩-土接触压力的分布规律 呈现出一致性。



(b) 倾角为15°时不同Q<sub>#</sub>斜桩桩土接触压力

图 8 桩 - 土接触压力

了在桩顶竖向荷载逐渐增大过程中直桩及斜桩桩身 平均侧摩阻力的发挥性状。由图 10 可以看出在桩 身上部,直桩和斜桩桩侧平均摩阻力沿桩身的分布 性状不一样,直桩呈现出递增现象,而斜桩呈现出递 减现象。另外,随着桩顶竖向荷载的增大,直桩桩身 侧摩阻力的变化在上半段较小,而在下半段则增长 迅速,而斜桩则表现出桩身上部和下部增长迅速,而 中间部分增长缓慢,无论是直桩还是斜桩,桩身侧摩 阻力的传递都是从桩身上部开始发挥并向下传递。

对比图 10(a)和10(b)可以发现,斜桩在桩顶以下 1/6 桩长范围内侧摩阻力发挥要远远大于直桩,除此之 外,直桩桩身下部侧摩阻力的完全发挥所对应的桩顶 竖向荷载要小于斜桩所对应的桩顶竖向荷载。





(b) 不同Q<sub>v</sub>15°斜桩桩身平均侧摩阻力

图 10 桩身侧摩阻力

## 4 结 论

(1)与直桩不同,斜桩在竖直荷载作用下,在桩体上部一定范围内会产生水平位移和弯矩。斜桩的桩顶沉降差异、水平位移、反弯点以下桩身反向挠曲现象受桩身倾角的影响较大。

(2)斜桩的桩身轴力从桩顶至桩端逐渐减小, 在桩身倾角较小时,桩身轴力沿桩长衰减较慢,但是 桩身倾角增大后,桩身轴力衰减速率逐渐增大。斜 桩桩身轴力总体上小于直桩的桩身轴力。

(3)斜桩桩身弯矩主要分布在 1/2 桩长范围 内,最大值出现的位置并不受桩身倾角以及桩顶荷 载的影响。在桩身上半段的弯矩随倾角和桩顶荷载 的增大而增大。

(4)斜桩桩身侧摩阻力沿桩长大致呈"S"型分 布。在相同荷载作用下,斜桩在桩顶以下 1/6 桩长 范围内,侧摩阻力远远大于直桩,但是桩身下部的侧 摩阻力的发挥程度小于直桩。

### 参考文献:

- [1] 苏子将,罗书学,康 寅.软土地基中倾斜桩基承载力数值分析[J].岩土工程与地下工程,2008,28(5):75-76.
- [2] Sharma B, Zaheer S, Hussain Z. An experimental model for studying the Performance of vertical and batter micro-

piles [J]. Geo-congress 2014 Technical Papers, ASCE, GSP234, 2014;4252 – 4264.

- [3] Hanna A, Nguyen T Q. Shaft resistance of single vertical and batter piles driven in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129 (7):601-607.
- [4] 赵明华,侯运秋,曹喜仁.倾斜荷载下基桩的受力研究[J].湖南大学学报,1997,24(2):98-109.
- [5] 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,2008,30(3):323-330.
- [6] 陆清元,曹卫平,李升,樊文甫. 竖向荷载下斜桩承载变 形性状及荷载传递机理试验研究[J]. 建筑结构构, 2016,46(8):79-82.
- [7] 陈小强,赵春风,甘爱明. 砂土中抗拔桩与抗压桩模型 试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(3):738-744.
- [8] 陈小强,赵春风,甘爱明. 成层土中抗拔桩与抗压桩的 模型试验研究[J]. 地下空间与工程报,2009,5(S2): 1537-1541.
- [9] 张根双, 王科智. 工程桩倾斜偏位对桩承载力的影响 [J]. 江苏建筑, 2004(S1): 39-41.
- [10] 蔡明兴. 倾斜预制方桩的承载力分析及处理 [J]. 施工 技术,2004,33(9):35-37.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ94 2008 建 筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.