

水平荷载-扭矩耦合作用下斜桩承载变形特性数值模拟

曹卫平^{1,2}, 李贺¹, 陶鹏¹

(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)

摘要:利用 ABAQUS 数值软件分析了斜桩在水平荷载 H 和扭矩 T 耦合作用下的承载特性、桩身内力以及桩-土界面上的摩阻力等变化特征并与直桩进行了对比,探讨了桩-土刚度比、荷载偏心距和桩身長径比对斜桩受扭承载力的影响。分析结果表明:斜桩在水平荷载与扭矩耦合作用下,桩身为受扭破坏;斜桩的受扭承载力大于直桩,斜桩受扭承载力的大小与桩身倾角相关;桩-土刚度比、荷载偏心距和桩身長径比对斜桩受扭承载力也有一定的影响,而桩身長径比的影响较大。

关键词:斜桩;承载变形特性;水平荷载;扭矩;耦合作用;ABAQUS;数值分析

中图分类号:TU473.1⁺1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)06-0044-06

Numerical simulation of bearing and deformation behavior of batter piles under combined horizontal load and torque//CAO Weiping^{1,2}, LI He¹, TAO Peng¹ (1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China)

Abstract: The ABAQUS numerical software was used to analyze the bearing characteristics of batter piles under the coupling of horizontal load H and torque T , the variation characteristics of pile internal force and the friction on pile-soil interface. The changes in characteristics of batter piles were also compared to those of straight piles. The impact of pile-soil stiffness ratio, eccentricity of loading and length diameter ratio of the pile shaft on the torsional bearing capacity of batter piles was discussed. The results indicate that when subjected to the coupling the horizontal load and torque, batter pile is torsionally damaged. The torsional bearing capacity of batter piles is greater than that of straight piles. The torsional bearing capacity of batter piles is related to the inclination angle of the pile body. The pile-soil stiffness ratio, eccentricity of loading and length diameter ratio of the pile shaft also have a certain impact on the torsional bearing capacity of batter piles, and the length diameter ratio of the pile shaft has a greater impact.

Key words: batter piles; bearing and deformation characteristics; horizontal load; torque; coupling load; ABAQUS; numerical analysis

输电塔、码头和海洋工程中常用斜桩抵抗风、海浪、土壤压力等较大的横向荷载^[1]。与直桩相比,斜桩具有更高的侧向水平承载力^[2],但由于斜桩桩身的轴线与建筑物所在平面并不垂直,导致斜桩在受到外部荷载作用时的承载变形特性与直桩有较大的不同。因此,对斜桩开展在水平荷载 H 和扭矩 T 耦合作用(H - T 耦合作用)下的荷载变形特性和承载性能的研究对斜桩基础的设计具有重要意义。

桩基承载变形问题是国内外有关学者广泛关注的问题^[3-5]。例如:Zhang 等^[6]通过离心模型试验研

究了循环荷载作用下桩的变形特性,发现随着循环次数的增加,桩周土体的刚度逐渐减小;Ramadan 等^[7]通过对不同桩身倾角下受荷斜桩的桩身弯矩及位移分析,认为上拔荷载与水平荷载对桩身内力有着较明显的影响;Meyerhof 等^[8]通过模型试验研究了倾斜荷载作用下斜桩的变形性状,给出了桩顶水平位移的影响曲线;吕凡任^[9]通过模型试验和现场试验开展了对倾斜荷载作用下斜桩基础的承载性状研究;曹卫平等^[10-11]基于砂土中的斜桩模型试验和数值模拟软件,分别研究了竖向荷载和水平荷载

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2019-JM-006)

作者简介:曹卫平(1969—),男,教授,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail:caowp@xauat.edu.cn

通信作者:李贺(1999—),男,硕士研究生,主要从事桩基础研究。E-mail:lihe@xauat.edu.cn

作用下斜桩承载性状,分析了桩身倾角和长径比对斜桩承载力的影响;赵爽等^[12]基于数值模拟软件,研究了砂土中各方向水平荷载与倾斜面斜交作用下斜桩单桩的变形及承载特性。也有部分学者研究了H-T耦合作用下桩的承载特性。例如:邹新军等^[13]进行了H-T耦合作用下直桩的模型试验,并探讨了施加荷载的顺序对单桩的影响,得出无论是先施加水平荷载还是扭矩,都会使得单桩的扭矩或水平承载力降低,但先施加水平荷载对桩的承载力影响比先施加扭矩影响更大;郭沛翰等^[14]在邹新军等^[13]两种荷载作用的基础上添加了竖向荷载作用,完成了直桩室内砂土地基的模型试验,得到了3种荷载共同作用下对单桩的影响曲线和承载力计算公式。

目前对斜桩的承载变形研究大多只分析单个荷载作用下的变形情况,对涉及两个及多个荷载耦合作用下斜桩变形的研究较少,而H-T耦合作用对桩的影响研究大多只是针对直桩,对斜桩开展的相关研究较少。本文采用ABAQUS数值软件对斜桩在H-T耦合作用下的承载特性进行数值模拟,分析H-T耦合作用下桩身倾角对斜桩承载特性的影响,研究斜桩桩-土接触压力及摩阻力沿桩身的分布特征。

1 有限元模型

1.1 数值模型

本文所建立的数值模型如图1所示,为消除土体边界效应,桩周土计算范围取30D(D为桩径),桩端底部土层厚度取10D^[15-16]。桩顶承受H-T耦合作用,水平荷载和扭矩为等比例同时施加,其中水平荷载垂直作用于斜桩桩身倾斜面,即水平荷载作用于斜桩所在平面以外,扭矩方向为z轴正向。

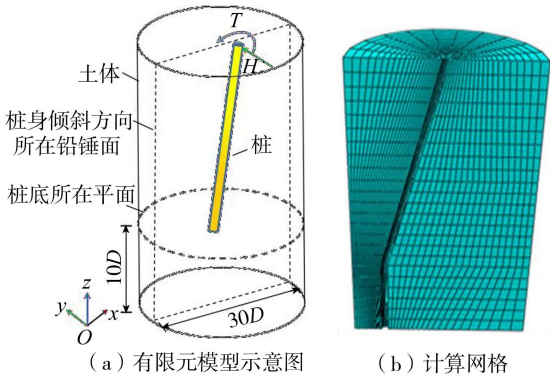


图1 有限元模型与计算网格

采用ABAQUS数值软件对H-T耦合作用下的斜桩承载性状进行模拟分析,选取线弹性模型模拟桩体,Drucker-Prager模型模拟土体变化。桩-土界面相互作用通过ABAQUS数值软件中桩-土界面接触算法实现,选择桩侧与桩端表面为主控面,土侧与

桩端土表面为从属面。桩-土接触界面法向作用采用硬接触的方法模拟,切向作用采用罚函数模拟,桩-土接触界面间的摩擦系数 μ 采用 $\mu=\tan(0.75\varphi)$ 计算,其中 φ 为桩周土的内摩擦角^[15]。桩身网格密度均匀布置,土体网格密度根据与桩身的距离由近至远沿径向由密到疏布置。桩身及土体单元均采用三维实体单元C3D8R^[17]。

1.2 数值模型验证

为验证数值模型材料本构关系选取和计算参数设置的合理性,分别选取吕凡任等^[18]和王书行^[19]进行的现场载荷试验和模型试验进行验证分析。

吕凡任等^[18]进行了软土地基上斜桩的现场试验研究,试验用斜桩桩长为15 m,桩径为0.25 m,桩身倾角为10°。在进行数值模拟时,参考文献[13-14],取钢管桩密度为7.9 t/m³;各土层的泊松比均取为0.3,土体剪胀角取6.5°。现场试验与数值模拟的对比结果如图2所示。

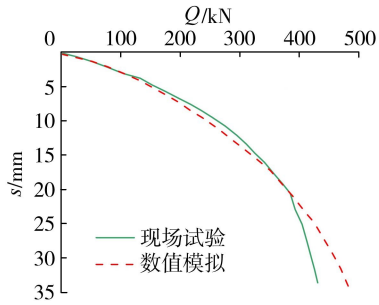


图2 现场试验与数值模拟结果对比

王书行^[19]开展了饱和粉土地基中扭矩作用下直桩室内模型试验。试验用直桩材料为钢管,桩长为6 m(入土深度为3.41 m),桩径为114 mm,壁厚为4.5 mm;土层密度为1.7 t/m³,有效内摩擦角为30°,有效黏聚力为1 kPa,取粉土地基的压缩模量为9.9 MPa,泊松比为0.3,模型土体弹性模量取压缩模量的4倍。模型试验与数值模拟的对比结果如图3所示。

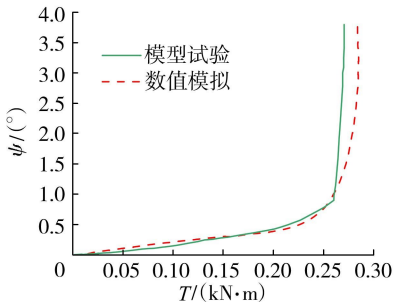


图3 模型试验与数值模拟结果对比

图2和图3分别为荷载(Q)-沉降(s)曲线和桩顶扭矩(T)-扭转角(ψ)曲线,结果表明,数值模拟结果与现场试验和模型试验的结果吻合较好,说明本

文建立的数值模型是合理的,能较好地反应桩基与地基土之间的相互作用。

1.3 数值模拟方案

本文基于吕凡任等^[18]的研究背景,对 H - T 耦合作用下斜桩的承载变形特性进行有限元数值模拟分析,模拟桩桩径为 0.5 m,桩长为 15 m,密度为 2.4 t/m³,泊松比为 0.2,弹性模量为 31.5 GPa。土层参数如图 4 所示,各层土的泊松比均取为 0.3,土体剪胀角可取为 6.5°^[11]。

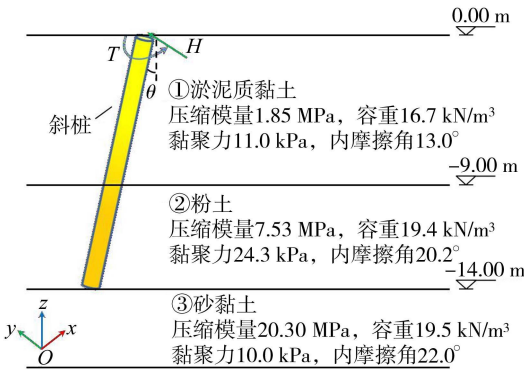


图 4 数值模拟土体示意图

斜桩数值模拟共分为 4 组,分别模拟桩身倾角、桩-土刚度比、荷载偏心距、桩身长径比等 4 种影响因素对斜桩承载变形特性的响应,模拟方案如表 1 所示,除第一组包含 4 根桩外,其他 3 组均只含 3 根桩。

表 1 数值模拟方案

组号	桩号	$\theta/(^{\circ})$	E_p/E_s	e	D/m	L/m	L/D
I	P11	0	4 300	2.5 D	0.5	15	30
	P12	10	4 300	2.5 D	0.5	15	30
	P13	15	4 300	2.5 D	0.5	15	30
	P14	20	4 300	2.5 D	0.5	15	30
II	P21	15	600	2.5 D	0.5	15	30
	P22	15	1 000	2.5 D	0.5	15	30
	P23	15	10 000	2.5 D	0.5	15	30
III	P31	15	4 300	D	0.5	15	30
	P32	15	4 300	2.5 D	0.5	15	30
	P33	15	4 300	5 D	0.5	15	30
IV	P41	15	4 300	2.5 D	0.4	8	20
	P42	15	4 300	2.5 D	0.5	15	30
	P43	15	4 300	2.5 D	0.6	24	40

注: θ 为桩身倾角, E_p/E_s 为桩身与桩侧第①层土的刚度比, e 为荷载偏心距, D 为桩径, L 为桩长。

2 直桩与不同桩身倾角斜桩的承载变形特性

2.1 桩顶扭转角和位移

图 5 为直桩和不同桩身倾角斜桩桩顶扭矩-扭转角曲线,当曲线出现急剧上升变化时即可认为桩顶扭矩达到极限扭矩而导致桩身破坏。由图 5 可见,桩身倾角越大,斜桩桩顶极限扭矩和极限扭转角越大。定义 α 、 β 分别为斜桩对直桩极限扭矩和极

限扭转角的提高幅度,表 2 为不同桩身倾角下斜桩的极限扭矩和极限扭转角相对直桩的提高幅度。图 5 和表 2 的结果表明,与直桩相比,斜桩能提高桩身受扭承载力,且桩身倾角越大,提高幅度越大。

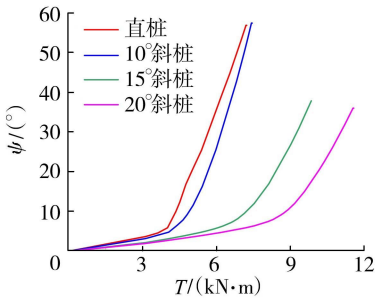


图 5 桩顶扭矩-扭转角曲线

表 2 桩身倾角对斜桩桩顶扭转承载变形特性的影响

$\theta/(^{\circ})$	极限扭矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	$\alpha/\%$	极限扭转角/($^{\circ}$)	$\beta/\%$
0	4.0		5.9	
10	4.4	10	6.5	10
15	6.6	65	7.2	22
20	8.7	118	9.6	63

从表 2 和图 5 中还可以看出,通过增大桩身倾角可以增加桩身极限扭矩,但同时要注意桩身倾角越大的斜桩其桩顶扭转角相比其他斜桩也越大,如 20°斜桩的极限扭转角相对直桩的提高幅度为 63%。在实际工程中可以通过增大一定的桩身倾角来增加桩的受扭承载力,但是要考虑扭转角的极限值,同时更要考虑更大变形的不利影响。

直桩和不同桩身倾角斜桩桩顶水平荷载 (H)-位移 (s) 曲线如图 6 所示。结合图 5 并分析曲线拐点可知,在桩身达到最大扭矩前,桩顶水平位移与桩顶水平荷载呈线性正相关关系;在桩顶水平荷载相同的情况下,桩顶水平位移与桩身倾角呈正相关关系。

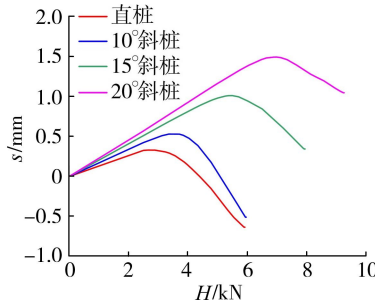


图 6 桩顶水平荷载-位移曲线

斜桩桩顶在受到 H - T 耦合作用时,参考赵春风等^[20]研究成果和 JGJ106—2014《建筑基桩检测技术规范》,取泥面处单桩水平位移达到 0.1 D 时的水平荷载为单桩水平极限承载力。由表 2、图 6 以及邹新军等^[21]的试验结果可知,斜桩达到极限扭矩时,相应水平荷载作用下的桩顶水平位移均远小于

0.1D,即此时尚未达到斜桩的水平极限承载力,因此在 H - T 耦合作用下,斜桩桩身为受扭破坏,即相对水平极限承载力而言桩身的受扭承载力较低。

2.2 桩身位移和内力

选取 $H=3.2\text{ kN}$ 、 $T=4\text{ kN}\cdot\text{m}$,得到 H - T 耦合作用下不同桩身倾角时桩身侧向水平位移沿桩身相对深度(桩身沿 z 轴入土深度与总桩长 L 的比值)的分布曲线如图 7 所示(位移以沿 y 轴正向为正)。从图 7 可以看出,随着桩身相对深度的增大,直桩和不同桩身倾角斜桩桩身侧向水平位移发展区均分布在桩顶部以下桩身相对深度 0.3 以内。另外,最大侧向位移均出现在桩顶,随后随着深度逐渐减小。直桩和不同桩身倾角斜桩的反弯区基本都处于 $3D\sim 9D$ 之间,斜桩反弯区沿桩身相对深度范围分布与直桩相近,范围基本一致,且反弯区最大位移与桩顶水平位移相比很小,可忽略不计。这表明在 H - T 耦合作用下,桩身侧向水平位移主要在桩周上部区域有变化。

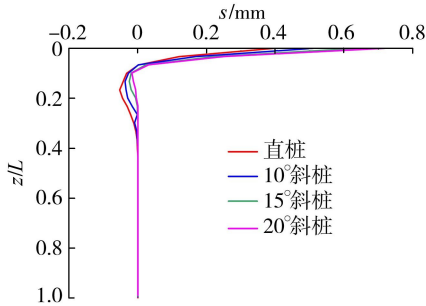


图 7 桩身侧向水平位移沿桩身相对深度的分布曲线

图 8 为 $H=3.2\text{ kN}$ 、 $T=4\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,在 H - T 耦合作用下直桩和不同桩身倾角斜桩桩身扭矩沿桩身相对深度的分布曲线。由图 8 可知,直桩和不同桩身倾角斜桩的扭矩沿桩身分布,且随着桩身相对深度的增大,桩身扭矩从桩顶的最大值一直逐渐减小,到桩端减到最小,接近于 0。这是由于桩侧摩阻力发挥抵抗作用使得桩身扭矩逐渐减小,在相同的深度下,桩身倾角越大,桩所受的扭矩越小。因此工程上可以通过提高一定的桩身倾角来增强桩身受扭能力。

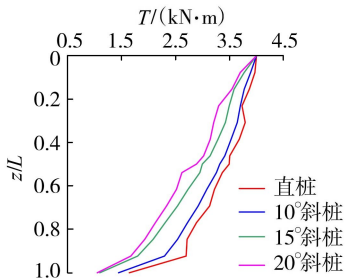


图 8 桩身扭矩沿桩身相对深度的分布曲线

图 9 为 $H=3.2\text{ kN}$ 、 $T=4\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,在 H - T 耦合作用下直桩和不同桩身倾角斜桩桩身弯矩沿桩身相对深度的分布曲线。由图 9 可知,斜桩的桩身弯矩均大于直桩,且桩身倾角越大,桩身弯矩越大。直桩和不同桩身倾角斜桩的桩身弯矩都是随着桩身相对深度的增大先迅速增大到最大值,20°斜桩桩身弯矩最大,最大值出现在 1.8D 左右处,随后桩身弯矩沿桩身相对深度急剧减小为 0。与图 8 结果对比可知,在桩身相对深度 0.15 范围内,桩身弯矩对桩的影响较大,而扭矩则沿全桩均有分布。

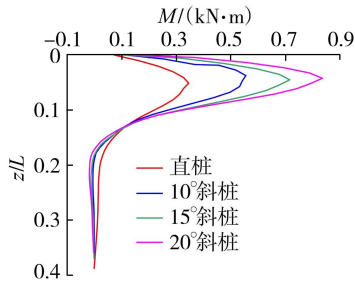


图 9 桩身弯矩沿桩身相对深度的分布曲线

2.3 桩-土接触压力

由于桩顶水平荷载作用在斜桩桩身倾斜平面外,同时桩顶受到扭矩的影响,故导致桩-土接触压力不是轴对称的,因此选择沿斜桩桩身深度方向上的 A、B、C、D 4 条路径(图 10)对桩-土接触压力进行有限元模拟。

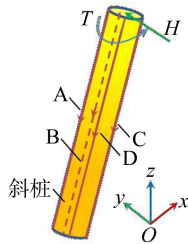


图 10 桩-土接触压力路径

图 11 为 15°斜桩在桩顶扭矩为 $4\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时桩-土接触压力(p)沿桩身相对深度的分布曲线,从图 11 可知,不同路径侧的桩-土接触压力有着较为明显的不同:在桩顶向下桩身相对深度 0.3 范围内,由于 H - T 耦合作用,沿 B、C 路径侧土体有脱离桩体的趋势,故 B、C 路径侧桩-土接触压力小于静止土压力,而沿 A、D 路径侧土体有受到挤密的趋势,故 A、D 路径侧的静止土压力小于桩-土接触压力。这表明在 H - T 耦合作用下,B、C 路径侧土体为卸荷,A、D 路径侧土体受挤压。从卸荷侧来说,路径 C 侧桩-土接触压力小于 B 侧,这说明相比较路径 B 侧来说 C 侧土体脱离桩体的趋势更大。从挤压侧来说,路径 A 侧的桩-土接触压力大于 D 侧,这说明相比较路径 D 侧来说 A 侧土体受到的挤压效应更大。

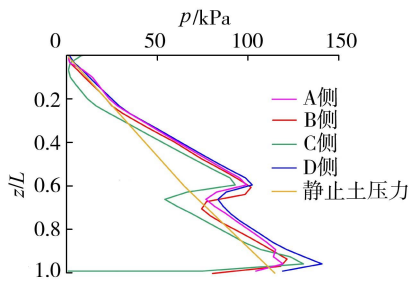


图 11 15°斜桩桩-土接触压力沿桩身相对深度的分布曲线

2.4 桩侧环向摩阻力

图 12 为桩顶在 $H-T$ 耦合作用下,直桩和不同桩身倾角斜桩的桩侧环向摩阻力 (q_{si}) 沿桩身相对深度的分布曲线,可以看出,斜桩桩侧环向摩阻力分布与直桩明显不同:直桩桩侧环向摩阻力一开始为 0,而斜桩在桩顶以下一开始就有较大的摩阻力;直桩桩侧环向摩阻力沿桩身相对深度逐渐增大,而斜桩桩侧环向摩阻力沿桩身相对深度增大先减小,在桩身相对深度 0.3 处又反向沿桩身相对深度逐渐增大。同一深度位置处,桩侧环向摩阻力与桩身倾角成正比,即 20°斜桩的桩侧环向摩阻力最大。这表明桩侧环向摩阻力的发挥程度与桩身倾角有关,倾角越大,发挥程度越大,且桩身上部区段的发挥程度要大于桩身下部区段。此外,对于桩身中下部区段 ($z/L=0.3 \sim 0.9$),桩侧环向摩阻力沿桩身相对深度增大的一个原因是桩-土接触压力增大。

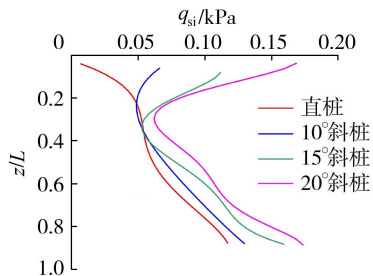


图 12 桩侧环向摩阻力沿桩身相对深度的分布曲线

2.5 不同因素对斜桩桩顶扭矩-扭转角曲线的影响

图 13 ~ 15 分别为不同桩-土刚度比、荷载偏心距和桩身长径比影响下 15°斜桩的桩顶扭矩-扭转角曲线,图中曲线均为陡升型,若以曲线急剧变化点对应的扭矩值作为斜桩的极限扭矩,可得到对应于不同影响因素的斜桩的最大扭转角。由此可知,在一定桩顶扭转角下,桩-土刚度比和荷载偏心距越大,斜桩所承受的扭矩越小,表明斜桩受扭承载力与桩-土刚度比和荷载偏心距呈负相关关系,但其影响程度较小。而在同一桩顶扭转角下,斜桩极限扭矩与桩身长径比呈正相关关系且影响较大,短桩的极限扭矩增幅较小,长桩的极限扭矩增幅较大。对于短桩,桩-土界面发生破坏,桩侧环向摩阻力为其提供

了受扭承载力,故短桩的极限扭矩增幅较小。对于长桩,土体内部发生破坏,其受扭承载力主要由桩侧土体的内部剪切作用和桩-土界面的扭转剪切作用共同提供。综上,桩-土刚度比和荷载偏心距对斜桩极限扭矩的影响不大,而桩身长径比则对其影响较为显著。

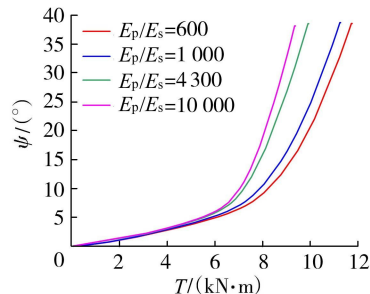


图 13 不同桩-土刚度比时的桩顶扭矩-扭转角曲线

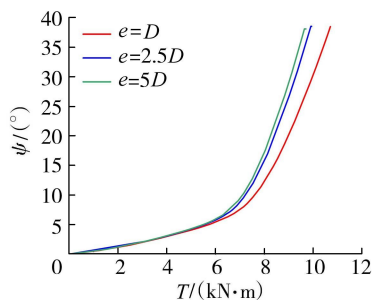


图 14 不同荷载偏心距时的桩顶扭矩-扭转角曲线

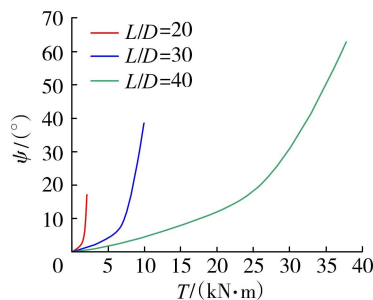


图 15 不同桩身长径比时的桩顶扭矩-扭转角曲线

如图 15 所示,对同一倾角 (15°) 的斜桩来说,若以同一桩顶扭转角作为极限值,则明显可以看出桩身长径比对受扭承载力的影响,即桩身长径比越大的斜桩其极限扭矩也越大,桩顶扭转角给定的前提下,扭矩与桩身长径比呈正相关关系。从图 15 还可以看出,虽然桩身长径比较大的桩其极限扭矩也较大,但其相应的桩顶扭转角也较大,即极限扭矩提高的同时也使得极限扭转角增大,因此在实际工程中可以通过增大桩身长径比来提高桩身受扭能力,但是要注意桩顶扭转角的极限值不能过大。

3 结论

a. $H-T$ 耦合作用下,斜桩桩身表现为受扭破

坏,斜桩相比直桩有更高的受扭承载力,且桩身倾角越大,承载力越高。

b. 在桩顶 $H-T$ 耦合作用下,斜桩桩身扭矩沿桩身分布,不存在临界桩长的问题。斜桩桩身扭矩小于直桩,最大值出现在桩顶,沿桩身向下逐渐减小,在桩顶下同一截面位置处,斜桩桩身扭矩与桩身倾角呈负相关关系。

c. 在桩顶 $H-T$ 耦合作用下,相比直桩,斜桩更有利于桩侧环向摩阻力的发挥,桩身倾角越大,桩侧环向摩阻力的发挥程度越大,且桩身上部区段的发挥程度要大于桩身下部区段。

d. 斜桩极限扭矩与桩-土刚度比和荷载偏心距呈负相关关系,但两者对极限扭矩影响程度较小;而桩身长径比与斜桩极限扭矩呈正相关关系且影响程度较大。

参考文献:

- [1] 周德泉,蔡强,王创业,等. 负斜桩顶部水平受拉响应及 $p-y$ 曲线特征试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(1):198-207. (ZHOU Dequan, CAI Qiang, WANG Chuangye, et al. Experimental study on tensile response and $p-y$ curve characteristics of negative batter pile under top horizontal tension[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2023,50(1):198-207. (in Chinese))
- [2] ASHOUR M, ALAAELDIN A, ARAB M G. Laterally loaded batter piles in sandy soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(1):06019017.
- [3] ROLLINS K M, LANE J D, GERBER T M. Measured and computed lateral response of a pile group in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(1):103-114.
- [4] 冯志焱,任子熊,李升. 砂土中抗拔斜桩模型试验研究[J]. 建筑结构,2017,47(15):93-96. (FENG Zhiyan, REN Zixiong, LI Sheng. Experimental study of model test of uplift inclined piles in sand [J]. Building Structure, 2017, 47(15):93-96. (in Chinese)).
- [5] 陆清元,曹卫平,李升,等. 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,2016, 46(8):79-82. (LU Qingyuan, CAO Weiping, LI Sheng, et al. Experimental study on bearing deformation and load transfer behavior of inclined piles under vertical loads [J]. Building Structure, 2016, 46(8):79-82. (in Chinese))
- [6] ZHANG C R, WHITE D, RANDOLPH M. Centrifuge modeling of the cyclic lateral response of a rigid pile in soft clay [J]. Journal of Geotechnical and

- Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(7):717-729.
- [7] RAMADAN M I, BUTT S D, POPESCU R. Offshore anchor piles under mooring forces: numerical modeling [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(2):189-199.
- [8] MEYERHOF G G, YALCIN A S. Behaviour of flexible batter piles under inclined loads in layered soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(2):247-256.
- [9] 吕凡任. 倾斜荷载作用下斜桩基础工作性状研究[D]. 杭州:浙江大学, 2004.
- [10] 曹卫平,陆清元,樊文甫,等. 竖向荷载作用下斜桩荷载传递性状试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11):3048-3056. (CAO Weiping, LU Qingyuan, FAN Wenfu, et al. Experimental study of load transfer behavior of batter piles under vertical loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11):3048-3056. (in Chinese))
- [11] 曹卫平,樊文甫. 水平荷载作用下斜桩承载变形性状数值分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9):34-43. (CAO Weiping, FAN Wenfu. Numerical analysis on bearing and deformation behavior of horizontally loaded batter piles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9):34-43. (in Chinese))
- [12] 赵爽,吴君涛,张日红,等. 砂土中斜桩单桩水平承载与变形特性数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2):579-588. (ZHAO Shuang, WU Juntao, ZHANG Rihong, et al. Numerical analysis of horizontal bearing capacity and deflection behaviors of single batter pile in sand [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(2):579-588. (in Chinese))
- [13] 邹新军,丁仕进,徐洞斌. 中密砂土地基中 $H-T$ 组合作用下单桩承载特性研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11):107-114. (ZOU Xinjun, DING Shijin, XU Dongbin. Bearing behavior of a single pile in ground of medium-dense sand under the combined $H-T$ loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11):107-114. (in Chinese))
- [14] 郭沛翰,邹新军. 均质砂土地基中竖向力-水平力-桩顶扭矩共同作用下单桩承载特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11):2593-2600. (GUO Peihan, ZOU Xinjun. Bearing capacity of a single pile in sand under combined vertical force-horizontal force-torque load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11):2593-2600. (in Chinese))
- [15] 刘晋超,熊根,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. (in Chinese))

(下转第 81 页)

26-30. (HE Teyan, WANG Anyuan. Application of sonar seepage detection technology in leakage detection of Dakusitai Reservoir dam [J]. Hunan Hydro & Power, 2020(1):26-30. (in Chinese))

[23] 樊哲超, 陈建生, 李世兴. 环境同位素和模糊聚类法研究堤坝渗漏[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 37-42. (FAN Zhechao, CHEN Jiansheng, LI Shixing. Application of environmental isotope and fuzzy clustering method to study leakage from embankment[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 37-42. (in Chinese))

[24] 蒋甫伟, 宋金平, 汪新健, 等. 地下水示踪技术在水库渗漏勘察中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(21): 79-80. (JIANG Fuwei, SONG Jinping, WANG Xinjian, et al. Application research of groundwater tracer technology in reservoir leakage investigation [J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4(21): 79-80. (in Chinese))

[25] 杨会峰, 白华, 程彦培, 等. 基于氯离子示踪法深厚包气带地区地下水补给特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(1): 30-39. (YANG Huifeng, BAI Hua, CHEGN Yanpei, et al. Characteristics of groundwater replenishment in deep and thick unsaturated zone based on chloride tracer method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 30-39. (in Chinese))

[26] 程和森, 王守家, 易瑞吉, 等. 利用 ICP 化学示踪法现场观测大坝渗漏[C]//第五届全国水利工程渗流学术研讨会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2006: 318-323.

[27] 邱辉阳, 黄勇, 王建平. 示踪技术和水化学分析在水库渗漏勘察中的综合应用[J]. 勘察科学技术, 2017(2): 45-50. (QIU Huiyang, HUANG Yong, WANG Jianping. Comprehensive application of tracer technique and hydrochemical analysis in reservoir leakage investigation [J]. Site Investigation Science and Technology, 2017(2): 45-50. (in Chinese))

[28] 韩文娟, 顾梅. 示踪试验在水库大坝渗漏检测中的应用[J]. 治淮, 2018(1): 19-21. (HAN Wenjuan, GU Mei. Application of tracer test in leakage detection of reservoir dams[J]. Harnessing the Huaihe River, 2018(1): 19-21. (in Chinese))

[29] 钟铨杰, 张彦兵, 黄勇. 基于示踪试验的水库坝体渗漏通道参数估算[J]. 勘察科学技术, 2021(1): 11-15. (ZHONG Quanjie, ZHANG Yanbin, HUANG Yong. Estimation of leakage passage parameters of reservoir dam based on tracer test [J]. Site Investigation Science and Technology, 2021(1): 11-15. (in Chinese))

[30] 沈添耀, 董海洲. 基于高密度电法和综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 63-69. (SHEN Tianyao, DONG Haizhou. Combined detection method of dam leakage channels based on high-density electrical method and comprehensive tracer method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2): 63-69. (in Chinese))

[31] 黄华龙. 有关水库渗漏检测的实例分析[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(2): 118-120. (HUANG Hualong. Example analysis of reservoir leakage detection[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2015, 21(2): 118-120. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-11-18 编辑: 熊水斌)

(上接第 49 页)

[16] 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(增刊 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(Sup2): 4032-4040. (in Chinese))

[17] ZHU Bin, WEN Kai, KONG Deqiong, et al. A numerical study on the lateral loading behaviour of offshore tetrapod piled jacket foundations in clay [J]. Applied Ocean Research, 2018, 75: 165-177.

[18] 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. (LYU 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, 38(3): 99-105. (in Chinese))

[19] 王书行. 水平偏心荷载下群桩受荷性状模型试验及设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[20] 赵春风, 王卫中, 赵程, 等. 砂土中竖向和弯矩荷载下单桩水平承载特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 184-190. (ZHAO Chunfeng, WANG Weizhong, ZHAO Cheng, et al. Lateral bearing capacity of single piles under vertical and moment load in sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 184-190. (in Chinese))

[21] 邹新军, 丁仕进, 赵灵杰. 水平力(H)-扭矩(T)组合受荷桩承载特性模型试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 126-133. (ZOU Xinjun, DING Shijin, ZHAO Lingjie. Model testing investigation on bearing behavior of a single pile under combined H - T loads [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(3): 126-133. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-11-11 编辑: 熊水斌)