

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.011

黏土斜坡水平受荷桩承载特性研究

麻坚¹, 郭林^{2,3}, 刘建生¹, 徐刚¹, 柳建超¹, 孙毅龙^{2,3}, 李辉^{2,3}

(1. 金华电力设计院有限公司; 2. 温州大学建筑工程学院; 3. 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室)

摘要:为解决黏土斜坡场地中桩基在水平荷载作用下的承载特性,明确斜坡不同角度这一关键因素对桩基工作性能的影响机制,通过黏土斜坡水平受荷桩模型试验,探究了斜坡角度对斜坡桩基水平位移、弯矩等的影响规律,揭示了水平荷载下斜坡单桩的水平承载特性,并采用数值模拟方法进一步分析了斜坡角度对桩基变形模式、 $p-y$ 曲线等的影响规律。结果表明:随着斜坡角度的增大,斜坡效应的影响逐渐凸显,桩基最大弯矩点位置上移,桩基水平位移增大,当水平荷载为 40 N 时,30° 斜坡单桩水平位移较平坦场地增大约 40%;桩基 $p-y$ 曲线的初始刚度和极限土抗力随着斜坡角度的增大而减小。

关键词:黏土斜坡;桩基础;水平承载特性;模型试验

Research on bearing characteristics of horizontally loaded piles on clay slopes

Ma Jian¹, Guo Lin^{2,3}, Liu Jiansheng¹, Xu Gang¹, Liu Jianchao¹, Sun Yilong^{2,3}, Li Hui^{2,3}

(1. Jinhua Electric Power Design Institute Co., Ltd.; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University;
3. Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation of Zhejiang Province)

Abstract: To investigate the bearing characteristics of pile foundations on clay slopes under horizontal loads and clarify the influence of a key factor, namely slope angle, on the performance of the pile foundations, model tests were conducted on horizontally loaded piles on clay slopes. The impact of slope angle on the horizontal displacement and bending moment of the pile foundations was explored, thereby revealing the horizontal bearing characteristics of the single pile under horizontal load on the slope. The numerical simulation method was used to analyze the influence of slope angle on the deformation mode and $p-y$ curve of pile foundations. The results show that as the slope angle increases, the influence of the slope effect becomes gradually prominent, and the depth of the maximum bending moment point of the pile foundation has shifted upward. The horizontal displacement of the pile foundation increases. Compared with that in the flat site, when the horizontal load is 40 N, the horizontal displacement of the single pile on a 30° slope increases by 40%. Additionally, the initial stiffness and ultimate soil resistance of the $p-y$ curve of pile foundations both decrease with the increase of the slope angle.

Key words: clay slope; pile foundation; horizontal bearing characteristic; model test

为满足电力大容量输送的需要,近几年东南沿海地区电力基础设施建设不断完善,越来越多的输电线路工程在东南沿海地区的山岭中建设。由于山区地形条件的限制,斜坡地形下的输电线路桩基会受到不均匀应力场分布的影响,与传统的水平桩基相比,斜坡桩基的水平承载特性显著不同^[1]。因此探究斜坡地形下水平受荷桩的承载特征具有重要的工程意义。

国内外众多学者通过模型试验和数值模拟研究,分析了斜坡地形条件下水平受荷桩的承载特性。例如:Yang 等^[2]通过不同斜坡角度条件下的单桩水平加载系列试验,探究了斜坡角度对坡顶单桩承载特性的影响机理;朱刘山^[3]采用数值模拟的方法分析了边坡角度对边坡单桩承载特性的影响及坡地条件下水平受荷桩的桩周土水平抗力与桩身水平位移曲线($p-y$ 曲线);高博雷等^[4-5]通过开展斜坡单桩水平加载模型试验,发现斜坡的存在会减小浅层土体水平抗力,随着桩与斜坡距离的减小和斜坡角度的增大,土体水平抗力削减效应更加明显;Sawant 等^[6]采用三维有限差分法分析了桩与斜坡的距离对桩基水平承载特性的影响规律;Jiang 等^[7-8]理论分析了斜坡坡顶处水平受荷桩的变形特性,并提出了桩基的水平位移简化分析方法;Chen

基金项目: 国网浙江电力有限公司科技项目(5211JH25000A)

作者简介: 麻坚(1983—),男,正高级工程师,硕士,主要从事输电线路基础工程研究。E-mail:38360025@qq.com

通信作者: 孙毅龙(1990—),男,副教授,博士,主要从事基础设计方法优化研究。E-mail:sunyilong@wzu.edu.cn

等^[9]基于楔形体理论,分析了斜坡角度对砂土斜坡下桩基水平抗力的影响;Sun 等^[10]基于数值计算结果,深入分析了黏土边坡上桩基的破坏模式。斜坡效应对桩基的水平承载特性影响显著,但上述研究主要关注斜坡桩基的水平承载特性。

针对斜坡地形中单桩的水平承载特性,喻豪俊等^[11]通过现场试验探究了碎石土斜坡角度对单桩临界水平荷载的影响;Peng 等^[12-13]基于土压力系数的理论假定,研究了斜坡桩基的非对称破坏模式;程刘勇等^[14]通过模型试验探究了临坡距对单桩水平承载特性的影响规律;Zhang 等^[15]通过模型试验和数值模拟分析了组合荷载作用下斜坡桩的承载特性;Jala 等^[16]通过数值模拟发现斜坡角度对砂土中桩基的 p - y 曲线具有显著的影响,并建立了适用于砂土斜坡桩基的 p - y 曲线模型;乃麟元等^[17]采用数值模拟方法研究了黏土边坡中单桩的水平承载特性;Khatri 等^[18]通过黏土斜坡的桩基系列模型试验研究了桩基长细比对其承载特性的影响。上述系列研究结果表明,斜坡角度对斜坡桩基的变形模式、承载特性有着显著的影响,但不同地基条件下斜坡角度对桩基承载特性的影响规律不尽相同,总体来讲,对于黏土斜坡桩基,其桩-土作用机理仍不明晰。

本文通过室内模型试验和数值模拟方法,分析桩基变形模式、 p - y 曲线和不同黏土斜坡角度对斜坡单桩的水平位移、弯矩等的变化规律,揭示水平荷载作用下斜坡单桩的水平承载特性,以为黏土斜坡桩基设计提供理论和数据支撑。

1 黏土斜坡单桩模型试验

1.1 模型试验装置

试验模型箱采用 45 号钢制作,箱壁厚度为 10 mm,箱体长 600 mm、宽 600 mm、高 800 mm,通过伺服电机作动器施加水平荷载,桩基的顶部位移通过激光位移传感器测定,应变片测定模型桩的桩身应变,加载方式为荷载控制方法。模型试验装置如图 1 所示。

1.2 试验模型及传感器布置

以浙江某输电塔基础为原型,进行试验桩的尺寸和刚度设计,考虑到模型箱尺寸(600 mm×600 mm)和边界效应,以 1 : 10 的比例进行试验桩缩尺;为保证试验桩与实际桩刚性一致,选用 PPR 材料制作模型桩。模型桩桩径 $D=36$ mm,桩基长度为 100 cm,桩基埋深为 45 cm。

通过在桩基顶部布置激光位移传感器监测试验过程中桩顶的水平位移,为了获得试验过程中不同深度的桩身弯矩分布规律,沿桩身均匀对称布置 7 对应变片,每对应变片之间的距离为 50 mm,传感器的整体布置如图 2 所示。

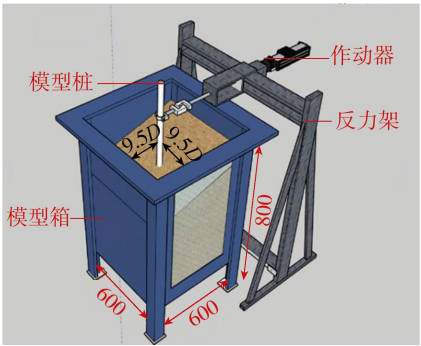


图 1 模型试验装置(单位:mm)
Fig.1 Device of model tests(unit:mm)

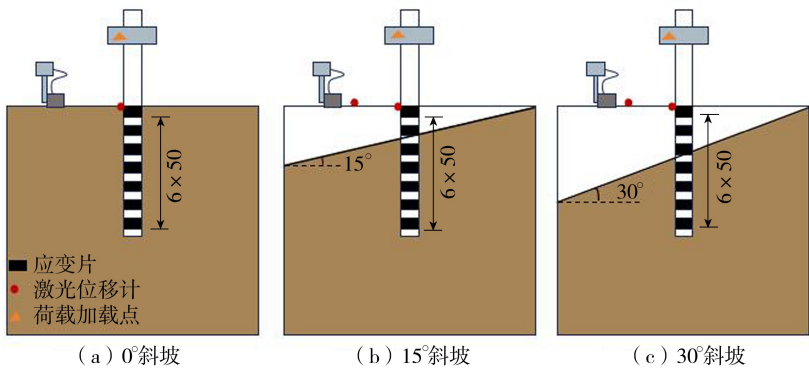


图 2 传感器布置示意图(长度单位:mm)
Fig.2 Diagram of sensor layout (length unit:mm)

1.3 地基土制备

试验地基土体取自温州山区坡积黏土,为确定试验土体的基本参数,开展了比重瓶试验、直剪试验等一系列土体基本试验,测得土体密度为 1.8 g/cm³、内摩擦角为 12°、黏聚力为 11 kPa、含水率为 25.5%。

试验采用分层填筑的方法制备试验地基土,每层 50 mm,模型箱填筑土体高度为 60 cm,通过控制土体最大干密度 1.31 g/cm^3 ,实现模型箱内土体 90%的压实度。填筑完毕后,将土体预压静置 3 d,此时土体竖向变形基本稳定,可以忽略土中应力、竖向变形对模型试验的影响。若为斜坡地形试验,填筑至最高处后,先削坡处理再进行预压静置。

1.4 试验方案

大量工程实践表明,当斜坡角度大于 30° 时,地基的水平抗力急剧下降,因此桩基斜坡角度主要控制在 30° 以下^[19]。基于此,试验中的斜坡角度取 0° 、 15° 、 30° ,如图 3 所示。试验过程中通过伺服电机作动器控制位移,加载速率为 0.2 mm/min ,加载点最大位移为 50 mm,加载方式为静力加载,试验土体的压实度为 90%。

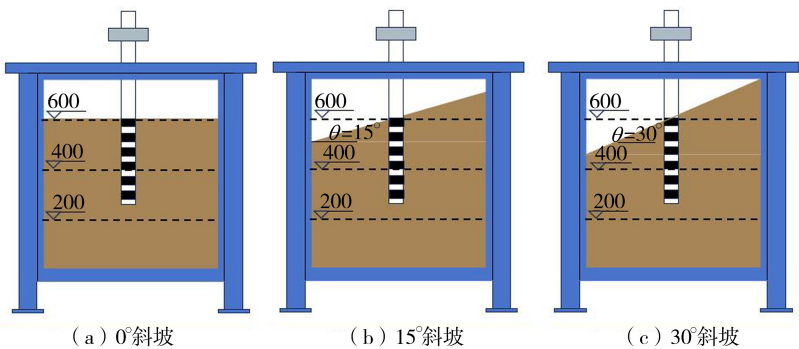


图 3 不同斜坡角度的模型试验示意图(地基土埋深单位:mm)

Fig. 3 Diagram of model test with different slope angles (burial depth unit of foundation soil: mm)

2 结果与分析

2.1 桩基水平位移

如图 4 所示,随着水平荷载的增加,泥面处桩基水平位移逐渐增大,且曲线的线性规律性随着斜坡角度的增大逐渐减弱;随着水平荷载的增大泥面处受斜坡角度的影响更为明显,即相同荷载情况下斜坡桩基的水平位移更大。水平荷载为 40 N、 30° 斜坡的泥面处桩基水平位移为 16.1 mm,较平坦场地(0° 斜坡)泥面处桩基水平位移增大了 4.6 mm,增幅为 40.0%; 15° 斜坡的泥面处桩基水平位移较平坦场地增大 2.4 mm,增幅为 20.9%。表明随着水平荷载的增大,斜坡效应对桩基水平承载特性的影响逐渐凸显。

2.2 桩基弯矩

如图 5 所示,随着桩基埋深的增大,在浅层区域存在一个最大弯矩点, 0° 斜坡最大弯矩点位置在 0.1 m 埋深处,斜坡角度为 15° 时和 30° 时最大弯矩点位置在 0.03 m 埋深处,可以看出斜坡角度的存在导致桩基最大弯矩点位置上移,说明浅层土体对桩基承载性能的影响更加显著。随着桩顶水平位移的增大,桩基弯矩均增大, 0° 、 15° 、 30° 斜坡桩基最大弯矩分别从 48、49、40 N·mm 增大到 146、128、105 N·mm,分别增大 2.04 倍、1.61 倍和 1.63 倍。

由图 5 可知,桩顶水平位移为 10 mm 时,桩基最大弯矩差异较小;随着桩顶水平位移的增大,桩基最大弯矩差异增大,桩顶水平位移为 40 mm 时, 0° 、 15° 、 30° 斜坡桩基最大弯矩分别为 146、128、105 N·mm,相比平坦场地, 15° 和 30° 斜坡桩基最大弯矩减小了约 12%、28%。可以看出,随着斜坡角度的增大,相同桩顶水平位移下,桩基弯矩随着斜坡角度增大而减小,这主要是由于相同桩顶水平位移下斜坡桩基水平承载能力较低,桩基水平抗力减小,因此此时桩基弯矩减小。但随着桩基埋深增加,在深层土体中,斜坡角度对桩基弯矩的影响逐渐减小,即斜坡效应随着桩基埋深增加而逐渐减小。

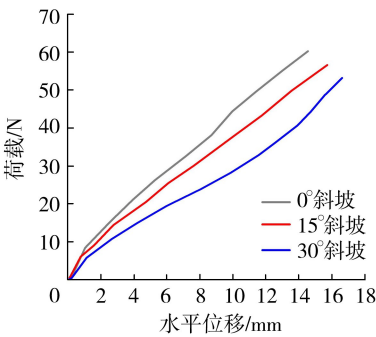


图 4 不同斜坡角度下桩基泥面荷载-位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of load-displacement curves for mudline at pile foundation under different slope angles

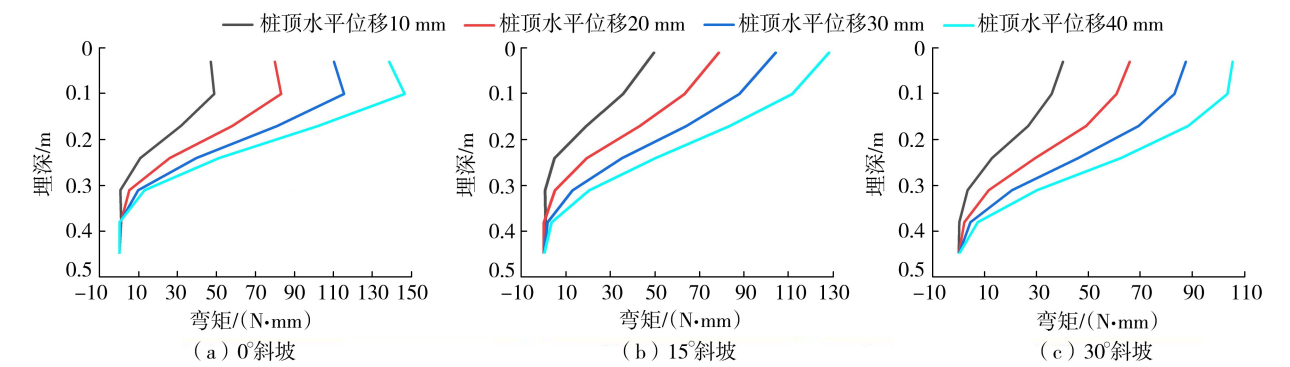


图 5 不同斜坡角度下桩基的弯矩分布曲线

Fig. 5 Bending moment distribution curves of pile foundation under different slope angles

2.3 桩身水平位移

如图 6 所示,随着桩顶施加的水位荷载增大,桩身水平位移整体均增大;随着桩基埋深的增加,桩身水平位移减小,但不同斜坡角度下桩身水平位移在 0.36 m 埋深附近处最小,该深度以下桩身水平位移继续增大。

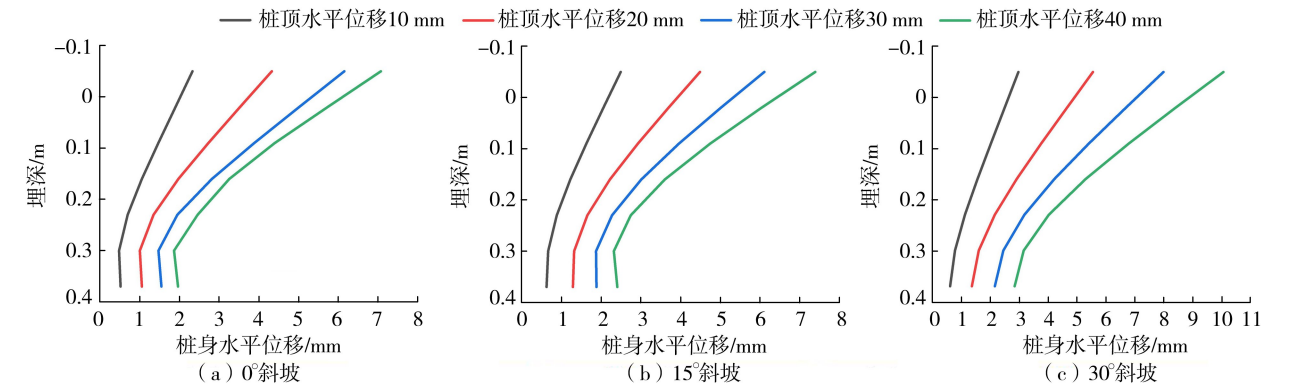


图 6 不同斜坡角度下桩身水平位移曲线

Fig. 6 Horizontal displacement curves of pile body under different slope angles

由图 6 可知,当桩顶水平位移为 10 mm 时,桩身水平位移随埋深增大线性减小,随着位移荷载增大,桩身水平位移分布发生改变,当桩顶水平位移为 40 mm 时,0°、15°斜坡桩基在 0.36 m 埋深以下为正向位移,30°斜坡桩基出现反向位移,表明随着斜坡角度增大,桩基变形模式发生改变,30°斜坡桩基在较大桩顶水平位移下呈现出刚性桩特征。

3 数值模拟分析

3.1 数值模型的建立及验证

由于模型试验监测手段的限制,桩周土抗力分布及变形模式、桩基 p - y 曲线等无法通过试验结果直接获得,为进一步分析不同斜坡角度下桩基承载特性的差异,在模型试验的基础上开展相应的数值模拟分析。

基于 FLAC3D 有限差分计算平台,建立模型试验的数值模型,整体模型均为实体结构化网格,桩基附近和浅层区域网格划分较细,深层和距离桩基较远区域网格划分较粗。土体采用摩尔-库仑本构模型模拟其非线性应力-应变关系,桩基采用弹性本构模型模拟,桩-土间的非线性相互作用采用接触面模拟,如图 7 所示。数值模型中土体的本构模型参数根据前面模型试验土体参数确定,桩基参数泊松比取 0.4,弹性模量取 700 MPa。

由图 8 可知,数值模拟的泥面处桩基水平位移与试验结果差异较小,桩顶水平位移差异较大,但最大差异约为 10%,

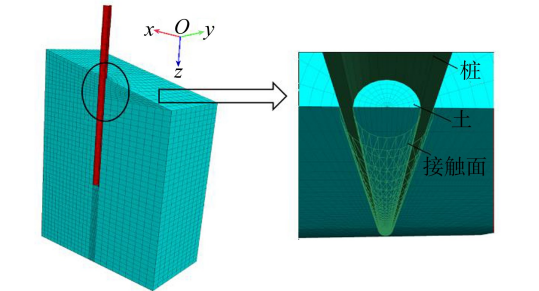


图 7 斜坡单桩数值模型及接触面设置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of numerical model of single pile on slope and contact surface setting

表明该数值模型应用于不同斜坡桩基承载特性分析是可行的。

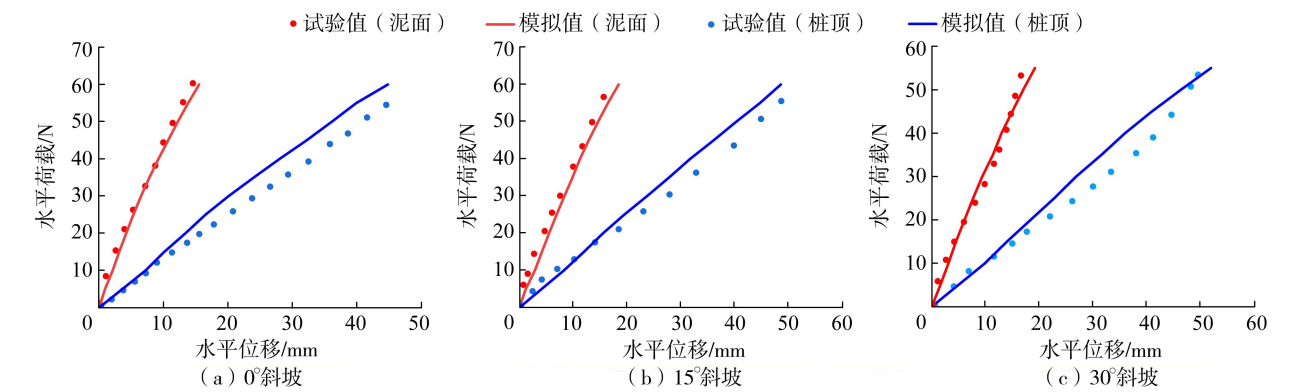


图 8 不同斜坡角度下数值模拟结果与试验结果对比

Fig. 8 Comparison of numerical simulation results and tests results under different slope angles

3.2 桩基水平抗力分布及变形模式分析

为分析不同斜坡角度下水平受荷桩的变形模式,将水平荷载 40 N 作用下的桩周水平抗力数值模拟结果进行对比分析,结果如图 9 所示。由图 9 可知,随着斜坡角度的增大,桩周的水平抗力减小,深层土体的水平抗力由 10 MPa 减小到 6 MPa,斜坡桩基需要更多的桩前土抗力抵抗水平位移发展,因此桩前土体的应力集中区域范围随着斜坡角度的增大而增大。

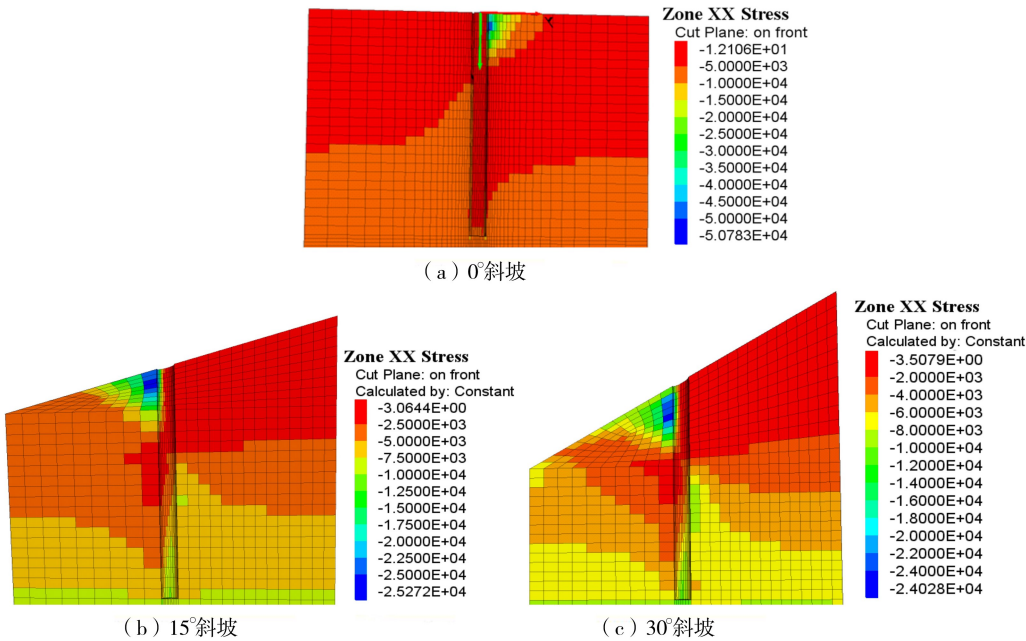


图 9 不同斜坡角度下桩周的水平抗力分布云图(单位:Pa)

Fig. 9 Distribution cloud maps of horizontal soil resistance around pile under different slope angles (unit: Pa)

水平荷载 40 N 作用下桩周水平位移数值模拟结果如图 10 所示,随着斜坡角度的增大,水平荷载对桩前土体的影响区域增大,但不同斜坡角度下桩周土体的位移主要集中在桩前区域,深层土体的变形较小或几乎无变形,说明不同斜坡角度下桩基的变形模式是一致的,均为柔性桩模式。

3.3 桩基 p - y 曲线

图 11 为不同埋深 0°、15°、30°斜坡的桩基 p - y 曲线,随着斜坡角度的增大, p - y 曲线的初始刚度和极限土抗力均减小,但随着土体深度的增加,斜坡角度引起的 p - y 曲线差异减小,表明斜坡效应在深层土体中的影响逐渐减小。由于浅层 p - y 曲线初始刚度和极限土抗力减小显著,因此斜坡桩基浅层的变形范围和水平位移增大。

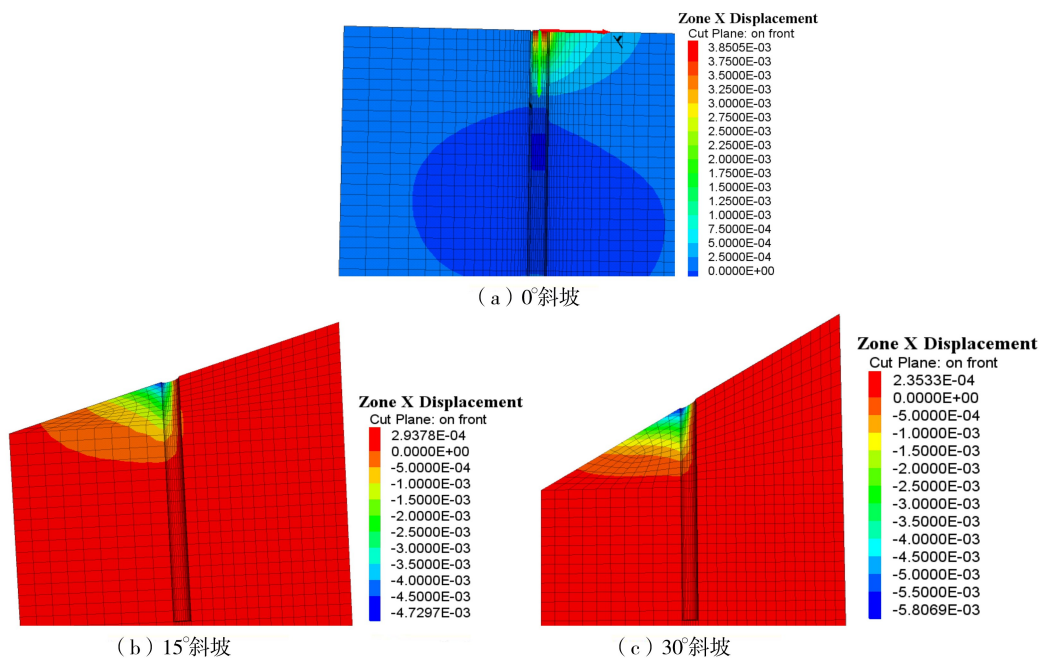


图 10 不同斜坡角度下桩周的水平位移分布云图(单位:m)

Fig. 10 Distribution cloud maps of horizontal displacement around pile under different slope angles (unit: m)

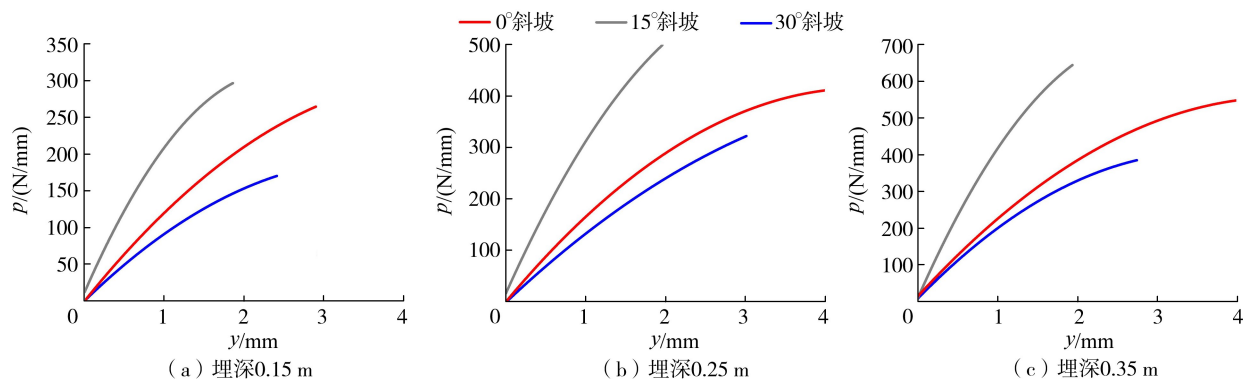


图 11 不同埋深处不同斜坡角度下桩基 p - y 曲线对比

Fig. 11 Comparison of p - y curves of pile foundation at different burial depths under different slope angles

4 斜坡桩基 p - y 曲线分析

为进一步分析斜坡效应对桩基 p - y 关系的影响,对数值模拟得到的桩基 p - y 曲线进行处理和分析,得到不同斜坡角度下桩基 p - y 曲线的初始刚度。为了方便对比初始刚度随斜坡角度的变化规律,以 0° 斜坡下桩基 p - y 曲线的初始刚度为基准,对 15° 和 30° 斜坡下桩基 p - y 曲线初始刚度的计算结果进行无量纲处理,结果如图 12 所示(横轴埋深比为桩基埋深与模型桩桩径的比值),可以看出桩基浅层 p - y 曲线的初始刚度减小最为显著, 15° 和 30° 斜坡下桩基 p - y 曲线的初始刚度最大分别降低了约 21% 和 28%。可见,随着埋深比的增加,斜坡角度对 p - y 曲线初始刚度的影响逐渐减小。

根据美国石油学会 API 标准规范中土体极限抗力计算公式^[20],确定土体的极限土抗力影响系数如图 13 所示。由图 13 可知,随着埋深比的增大,极限土抗力影响系数先增大后趋于稳定; 0° 、 15° 、 30° 斜坡的稳定值约分别为 12、10、9,即

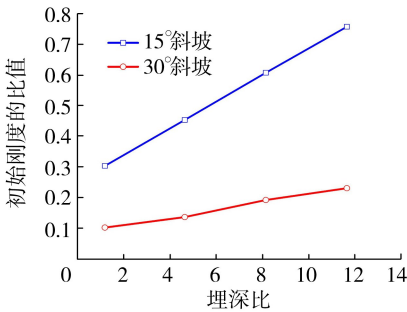


图 12 不同斜坡角度下桩基 p - y 曲线初始刚度的深度分布

Fig. 12 Depth distribution of initial stiffness of p - y curves of pile foundation under different slope angles

随着斜坡角度的增大,极限土抗力影响系数整体减小。进一步说明了斜坡效应引起桩基水平位移增大的原因。

5 结 论

- a. 随着斜坡角度的增大,斜坡效应的影响逐渐凸显,桩基水平位移增大。试验水平荷载为 40 N 时 30°斜坡的泥面处桩基水平位移较平坦场地泥面处桩基水平位移增大约 40%。
- b. 桩基的弯矩随着桩基埋深的增加先增大后减小,且存在一个最大弯矩点,随着斜坡角度的增大,桩基最大弯矩点位置上移。但桩基的变形模式并未改变,试验中桩基变形模式均为柔性桩模式。
- c. 随着斜坡角度的增大,桩基水平位移影响范围增大, p - y 曲线的初始刚度随着斜坡角度的增大而减小,但随着桩基埋深的增加,斜坡对初始刚度的影响减缓。
- d. 随着斜坡角度的增大,桩基 p - y 曲线的极限土抗力减小,极限土抗力影响系数随着土体深度的增大先增大后趋于稳定,该系数稳定值随着斜坡角度的增大而减小。
- e. 黏土斜坡桩基进行水平承载力设计时,应考虑斜坡效应对桩基水平抗力初始刚度及极限抗力的影响,本文只分析了 15°和 30°斜坡的计算结果,其他斜坡角度仍需进一步结合现场试验开展研究。

参考文献:

[1] 杨征宇,杨剑,王天慧,等. 输电塔基础斜桩非线性 p - y 曲线[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(1):104-108. (Yang Zhengyu, Yang Jian, Wang Tianhui, et al. Nonlinear p - y curve for batter piles in foundation of transmission towers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(1):104-108. (in Chinese))

[2] Yang Minghui, Deng Bo, Zhao Minghua. Experimental and theoretical studies of laterally loaded single piles in slopes[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2019, 20(11):838-851.

[3] 朱刘山. 坡地条件下水平受荷桩 p - y 曲线试验与数值模拟研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.

[4] 高博雷,张陈蓉,张照旭. 砂土中边坡附近单桩水平抗力的模型试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(11):3191-3198. (Gao Bolei, Zhang Chenrong, Zhang Zhaoxu. Model tests on effect of slopes on lateral resistance of near single piles in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11):3191-3198. (in Chinese))

[5] Yuan Juyun, Song Qingwen, Ma Xianfeng F, et al. Centrifuge tests on the bearing capacity of rock-socketed pile in slope area [C]//The 7th China-Japan Geotechnical Symposium. Sanya; Beihang University, 2018:415-421.

[6] Sawant V A, Shukla S K. Effect of edge distance from the slope crest on the response of a laterally loaded pile in sloping ground [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2014, 32(1):197-204.

[7] Jiang Chong, Liu Lin, He Jiali, et al. Effect of the proximity of slope and pile shape on lateral capacity of piles in clay slopes[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023, 27(1):16-30.

[8] Jiang Chong, Lin Mingke, Liu Pan. Study on calculation method of lateral characteristics of offshore pile near layered soil slope [J]. Ocean Engineering, 2023, 289:116245.

[9] Chen Lujie, Jiang Chong, Pang Li, et al. Lateral soil resistance of rigid pile in cohesionless soil on slope[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135:104163.

[10] Sun Bowen, Jiang Chong, Pang Li, et al. Effect of the pile diameter and slope on the undrained lateral response of the large-diameter pile[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 152:104981.

[11] 喻豪俊,彭社琴,赵其华. 碎石土斜坡水平受荷桩承载特性研究[J]. 岩土力学,2018,39(7):2537-2545. (Yu Haojun, Peng Sheqin, Zhao Qihua. Research on response of laterally loaded pile in gravel soil sloping ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7):2537-2545. (in Chinese))

[12] Peng Wenzhe, Zhao Minghua, Zhao Heng, et al. Effect of slope on bearing capacity of laterally loaded pile based on asymmetric failure mode[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 140:104469.

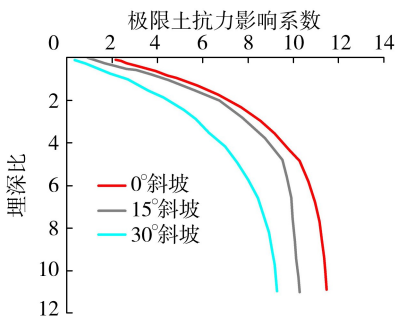


图 13 桩基 p - y 曲线极限土抗力影响系数与埋深的关系

Fig. 13 Relationship between influence coefficient of ultimate soil resistance of p - y curve of pile foundations and burial depth

[13] Beena K S,Kavitha P E,Narayanan K P. Model studies on laterally loaded piles in sloping clay bed[J]. Indian Geotechnical Journal,2018,48(1):114-124.

[14] 程刘勇,许锡昌,陈善雄,等. 斜坡基桩水平极限承载力及影响因素模型试验和数值模拟[J]. 岩土力学,2014,35(9):2685-2691. (Cheng Liuyong, Xu Xichang, Chen Shanxiong, et al. Model test and numerical simulation of horizontal bearing capacity and impact factors for foundation piles in slope[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(9):2685-2691. (in Chinese))

[15] Zhang Jianwei, Wang Xiaojun, Wang Hao, et al. Model test and numerical simulation of single pile response under combined loading in slope[J]. Applied Sciences,2020,10(17):6140.

[16] Jala Y,Sawant V A, Mishra A. Development of p - y curves from numerical study of long piles in sandy slope[J]. Ocean Engineering,2025,319:120275.

[17] 乃麒元. 黏土斜坡地基中水平受荷桩承载特性研究[J]. 路基工程,2021(3):128-133. (Nai Qiyuan. Load-bearing characteristics research on horizontal load pile in clay slope base[J]. Subgrade Engineering,2021(3):128-133. (in Chinese))

[18] Khati B S,Sawant V A. Variation in lateral load capacity of pile embedded near slope with ground inclination and edge distance[J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2020,14(7):740-751.

[19] 刘静. m 法计算斜坡桩水平承载力的适用性研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2019.

[20] 鲍金虎,苏静波,吴锋,等. 深厚软黏土地基中大直径单桩基础现场水平受荷试验及 p - y 曲线适用性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):127-134. (Bao Jinhui, Su Jingbo, Wu Feng, et al. Field horizontal loading test and p - y curve applicability of large-diameter single pile foundation in deep soft clay groundsill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):127-134. (in Chinese))

(收稿日期:2025-08-19 编辑:熊水斌)

(上接第 69 页)

[41] Xia Zhuge,Zhou Chao,Wang Wandu, et al. Collapse of Meilong expressway as seen from space: detecting precursors of failure with satellite remote sensing[J]. Journal of Earth Science,2025,36(2):835-838.

[42] Liu Xiaojie,Zhao Chaoying, Yin Yueping, et al. Refined InSAR method for mapping and classification of active landslides in a high mountain region: Deqin County, southern Tibet Plateau, China[J]. Remote Sensing of Environment,2024,304:114030.

[43] Zhou Lyu, Wei Bangding, Ma Jun, et al. Monitoring and analysis of side-slope deformation along Changgan high-speed railway based on time-series InSAR and BDS techniques[J]. Natural Hazards,2024,120(14):13469-13491.

[44] Gheorghe M, Armas I, Dumitru P, et al. Monitoring subway construction using Sentinel-1 data: a case study in Bucharest, Romania[J]. International Journal of Remote Sensing,2020,41(7):2644-2663.

[45] Qiu Dongwei, Wang Yuzheng, Zhang Yunlong, et al. Settlement monitoring data fusion approach for high-speed railways based on GNSS and InSAR[J]. Journal of Applied Remote Sensing,2023,17(3):034507.

[46] Li Bofeng, Feng Yanming, Shen Yunzhong. Three carrier ambiguity resolution: distance-independent performance demonstrated using semi-generated triple frequency GPS signals[J]. GPS Solutions,2010,14(2):177-184.

[47] Zhang Xiaohong, He Xiyang. Performance analysis of triple-frequency ambiguity resolution with BeiDou observations[J]. GPS Solutions,2016,20(2):269-281.

[48] Wu Zhipeng, Wang Teng, Wang Yingjie, et al. Deep learning for the detection and phase unwrapping of mining-induced deformation in large-scale interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2021,60:5216318.

[49] Jiang Mi, Guarnieri A M. Distributed scatterer interferometry with the refinement of spatiotemporal coherence[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2020,58(6):3977-3987.

[50] Zhou Chao, Ye Mingyuan, Xia Zhuge, et al. An interpretable attention-based deep learning method for landslide prediction based on multi-temporal InSAR time series: a case study of Xinpu landslide in the TGRA[J]. Remote Sensing of Environment,2025,318:114580.

[51] Kalla D, Smith N, Kuraku S, et al. Study and analysis of chat GPT and its impact on different fields of study[J]. International Journal of Innovative Science and Research Technology,2023,8(3):827-833.

[52] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):46-55. (Chen Xiaonan, Jin Yanguo, Xu Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):46-55. (in Chinese))

(收稿日期:2025-08-22 编辑:刘晓艳)