

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



斜坡地形单桩竖向承载特性模型试验与数值模拟研究

丁选明, 巫崇荣, 瞿立明, 龙永红

(重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:为探明斜坡地形条件对桩基竖向承载特性的影响,结合模型试验和数值模拟方法,设计多组斜坡工况和水平对照工况,对单桩竖向承载特性进行研究,在相同桩长条件下对比分析平地、不同坡度的单侧斜坡和连续斜坡地形中桩基的竖向承载力、桩身轴力及桩侧摩阻力的变化规律和荷载传递机理。研究结果表明:在相同坡度条件下,单侧斜坡工况的单桩承载能力小于连续斜坡工况,且桩基竖向承载力随着坡度增大而降低,斜坡影响度呈非线性增长;斜坡地形主要影响桩侧阻力峰值大小,当桩侧阻力出现峰值时,对应的桩端阻力大小接近相等;斜坡地形中,桩身前后存在应力分布差异,坡前位置竖向应力和剪应力大于坡后位置,但剪应力差异仅存在于0~4倍桩径的浅层区域。

关键词:斜坡;桩基;承载特性;模型试验;数值模拟

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)03-0001-09

Model test and numerical simulation of vertical bearing capacity for single pile in slope

Ding Xuanming, Wu Chongrong, Qu Liming, Long Yonghong

(Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education; School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In order to study the influence of slope on the vertical bearing characteristics of pile foundation, combined with model test and numerical simulation method, multiple groups of slope conditions and horizontal ground condition were designed to study the vertical bearing characteristics of single pile. The vertical bearing capacity, axial force, side friction and load transfer mechanisms during load-bearing of pile was compared and analyzed in unilateral slope and continuous slope with the same pile length. The results show that: 1. Under the same slope condition, the single-pile bearing capacity of unilateral slope is less than that of continuous slope, and the vertical ultimate bearing capacity of pile decreases with the increase of slope gradient, and the slope influence degree increases non-linearly; 2. The slope type mainly affects the peak value of the pile side resistance, and the pile tip resistance is close when the pile side resistance peaks.

收稿日期:2019-09-28

基金项目:国家自然科学基金(51622803, 51878103)

作者简介:丁选明(1979-),男,教授,博士,主要从事桩基动力学和软基处理研究, E-mail: dxmhhhu@163.com。

Received:2019-09-28

Foundation items:National Natural Science Foundation of China (No. 51622803, 51878103)

Author brief: Ding Xuanming (1979-), professor, PhD, main research interests: pile foundation dynamics and soft foundation treatment, E-mail: dxmhhhu@163.com.

3. In the slope, there is a difference in the stress distribution between the front and back of the pile body. The vertical stress and shear stress at the front of the pile body are larger than that at the position back of the pile body, but the difference in shear stress only exists in the area around 0~4 times the pile diameter.

Keywords: slope; pile foundation; bearing characteristic; model test; numerical simulation

随着山区基础设施建设的不断推进和城市建设用地的日益紧张,越来越多的城市建筑群以及配套的公路、铁路桥梁桩基被设置在山区斜坡等不良地形之上,形成斜坡桩基^[1-2]。与一般平地桩基相比,斜坡桩基周围土体的不对称分布使得桩基承受来自坡体的侧土压力,同时,影响桩周土体提供的竖向阻力的大小和分布,使得斜坡桩基的受力条件和承载特性更加复杂多变。

近年来,许多专家和学者从不同角度对斜坡地形中桩基的承载特性展开了研究,得到了一些有益的研究结果。赵明华等^[3]通过现场试验,采集和分析了某高陡横坡段在建桥梁桩基的应力数据,指出由于桩前土缺失,坡面以下2~5倍桩径范围内的土体所提供的摩阻力较小,设计计算时应考虑折减;牛富生等^[4]对黄土斜坡桩基的竖向承载特性开展现场试验研究,发现试桩上下坡面两侧的轴力与侧摩阻力分布存在差异,并根据分布规律的差异,提出将桩身划分为0~3D、3~10D、10D以上3个区域;尹平保等^[5]通过桥梁双桩基础室内模型试验,观察到复杂荷载作用下桩前坡面2~5倍桩径范围出现“八”字形裂缝,并提出斜坡桩基破坏模式主要为坡体横向侧移导致的墩柱偏斜和桩身变形过大等;龚先兵等^[6]通过模型试验发现,靠近边坡一侧桩侧摩阻力的发挥存在边坡效应,桩侧摩阻力传递深度更大,且随边坡坡度的增大而增大;高博雷等^[7]开展砂土单侧斜坡单桩水平抗力的模型试验,发现单侧斜坡的存在会减小浅层土体抗水平变形的刚度,且随桩与边坡距离减小和边坡角度增大,削弱作用越明显;程刘勇等^[8]开展数值研究,发现坡度较大时桩前斜坡上很容易出现塑性区并迅速发展、贯通,造成斜坡桩基极限承载力的减小,而增大临坡距可增加桩前承荷岩土体面积,提高斜坡桩基的承载能力;陈兆等^[9]采用非线性分析,研究坡角、桩土接触面系数对水平荷载作用下的斜坡刚性桩的承载影响;Jesmani等^[10-11]采用三维有限元分析,研究了在不排水竖向荷载下,土体缺失效应对软、中、硬土质坡地附近的桩基承载特性的影响,发现桩基的承载能力与桩的几何尺寸、斜坡坡度和桩距坡顶的距离有关,并以表

格的形式给出各地形条件下的极限荷载折减因子(RF),对不同地形条件对桩基承载特性的影响效果进行分析;Sawant等^[12]以三维有限元分析为基础编制计算程序,对于粘性土近坡面中埋设的横向受荷桩的响应进行数值模拟,研究了桩距边坡边缘距离和边坡坡度对桩身位移和弯矩的影响,并通过关系式预测给定边缘距离和坡角条件下桩身的横向位移;Charles等^[13]采用3D数值分析,研究倾斜地基中侧向受压套筒桩与倾斜地面的荷载传递机制。

上述研究表明,斜坡地形桩前土体部分缺失对桩基承载能力产生了不同的影响,但关于斜坡地形中桩基的承载特性和桩身荷载传递机理的研究尚不充分,且实际工程中桩后地形又可分为连续斜坡和平地工况,而考虑桩后地形影响和探讨斜坡桩基与平地桩之间的差异及产生原因的研究还相对较少。为此,笔者结合室内模型试验,利用有限元数值软件对斜坡中的单桩进行三维数值模拟,分析了平地、连续斜坡(桩后地形为连续斜坡)和单侧斜坡(桩后地形为平地)3类地形中单桩的荷载沉降响应、桩身轴力、桩侧摩阻力、桩身应力等的分布规律,并对比分析不同坡度下斜坡对单桩竖向承载能力的影响差异,探讨了斜坡地形对桩基竖向承载特性的影响机理。

1 室内模型试验

1.1 模型试验概况

试验模型槽的尺寸为2 m×2 m×2.5 m(长×宽×高),配备完善的加载控制系统^[14],如图1所示。加载设备采用数控油压作动器,加载过程可通过电脑精准控制,内置于作动器中的力传感器和位移传感器能及时反馈加载荷载和加载位移。

试验设计的对比工况分别为水平工况和连续斜坡工况,斜坡坡度设置约为30°,工况设计与应变片布置如图2所示。为降低边界效应,两次试验分开独立进行,桩侧到模型槽壁的距离大于10D,可忽略边界效应。试验所用模型桩为圆形混凝土预制桩,桩径 $D=10.6$ cm,桩长 $L=120$ cm,制桩所用混凝土为C30混凝土,其弹性模量按混凝土结构设计规

范^[15]取值为 30 GPa;钢筋笼主筋采用 4 根直径为 1.0 cm 的 HRB335 钢筋,并在每根钢筋上以 20 cm 为间距布置应变片,通过布置在桩身钢筋上的应变片量测桩身应力,并得到桩身轴力和桩侧摩阻力沿桩长的分布。地基土采用天然粉土,其天然含水率约为 6%,密度 1.8 g/cm³,经多组原样土直剪试验测定,内摩擦角 25°,粘聚力 10 kPa,试验前先将模型桩依照试验设计工况预先埋设在模型槽中心位置,如图 3 所示。

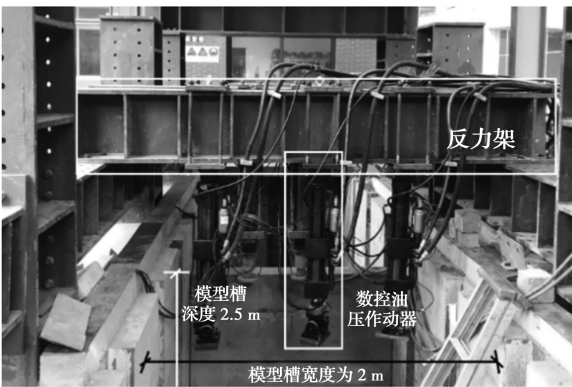
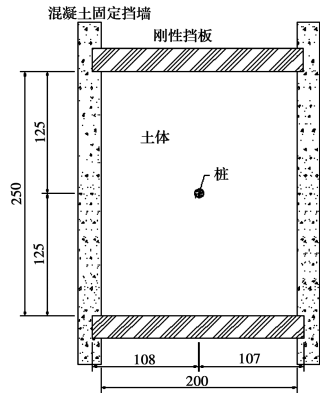
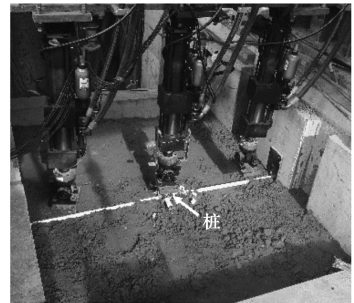


图 1 模型试验系统

Fig. 1 Model experiment system



(a) 定位俯视图



(b) 试验现场照片

图 3 模型桩定位俯视图与试验现场照片

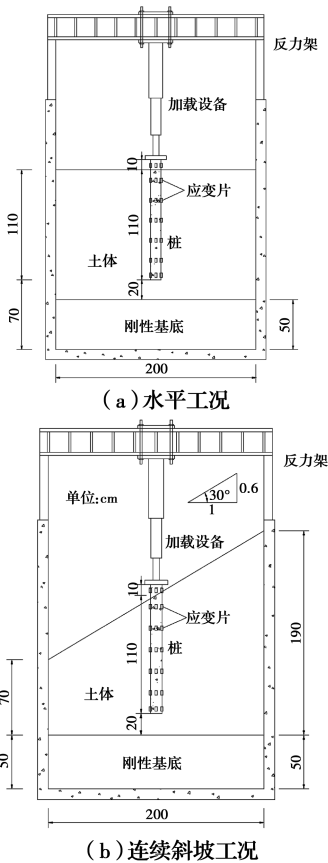
Fig. 3 Top view of model pile positioning

试验加载采用慢速维持荷载法在桩顶进行竖向加载,每级施加 0.5 kN,当持荷状态下桩顶沉降量小于 0.1 mm/h 时,则认为该级荷载已达到稳定^[16],然后施加下一级荷载,重复此操作直至荷载沉降曲线有明显拐点时视为模型已经破坏,终止加载。加载过程可通过计算机控制台精准控制,桩顶荷载和沉降结果均通过传感器反馈所得,桩身应变结果通过动态采集系统实时采集。

1.2 模型试验结果分析

提取模型试验所测结果,可绘制出两组对应工况的桩顶荷载沉降曲线见图 4。从图 4 可以看出,相同荷载下,连续斜坡工况的桩顶位移大于水平工况;两条曲线的线型较为相似,都出现了较为明显的拐点,可将拐点出现时对应的荷载作为桩基竖向极限承载力,则水平工况和连续斜坡工况的竖向极限承载力分别为 4.5、4 kN,地形条件造成的承载力降幅约为 11%。

图 5 为两工况下桩身轴力和侧摩阻力分布随桩顶荷载和变化。从图 5(a)中可以看出,当桩顶荷载较小时,水平工况与斜坡工况的轴力分布大致重合,都随埋深的增大而减小,且桩顶荷载的增大对桩端轴力的影响较小;而当桩顶荷载增大到大于其极限承载力后,水平工况与斜坡工况的轴力分布出现了



(a) 水平工况

(b) 连续斜坡工况

图 2 模型试验工况及应变片布置

Fig. 2 Model testing conditions and strain gauge layout

明显差异,表现为水平工况在桩身下半段的轴力小于斜坡工况,且不同荷载下的轴力分布趋于平行。图5(b)显示,沿深度方向桩侧摩阻力随埋深的增大而增大,相同荷载作用下桩顶附近区域有斜坡工况的侧摩阻力略大于水平工况,而在这个区域以下两工况的分布规律相似,这是由于斜坡上覆土层提高了局部区域的应力,增大了上部区域的侧摩阻力;观察桩侧摩阻力随荷载的变化规律可得,各高度的桩侧摩阻力会随荷载的增大而逐渐增大,直至达到稳定值,即桩侧摩阻力完全发挥,且有水平工况的桩侧摩阻力稳定值大于斜坡工况,这说明斜坡地形降低了桩侧摩阻力的发挥。

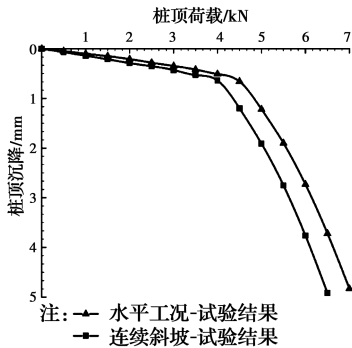


图4 模型试验桩顶荷载沉降曲线

Fig. 4 pile top load-settlement curves by model test

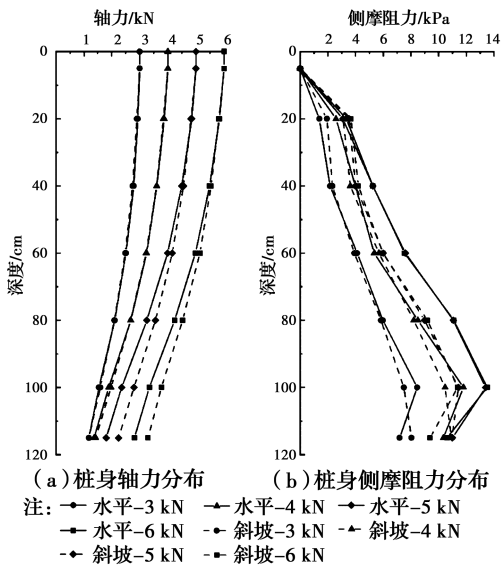


图5 不同荷载作用下桩身轴力及侧摩阻力分布

Fig. 5 Axial force and side friction of pile under different loads

结合试验结果可以看出,相比于常见的水平地形,斜坡地形会降低桩基的竖向承载力,影响其轴力和侧摩阻力分布,对桩基的竖向承载产生不利的影响。

2 有限元数值分析

2.1 数值模型建立

采用 ABAQUS 数值模拟软件建立三维有限元模型,模型土体选用 Mohr-Coulomb 模型模拟,桩体选用线弹性模型模拟,结合试验所测结果,桩体及土体材料参数选取见表1。为了与室内模型试验对比验证,数值模拟模型参照室内模型试验的工况和尺寸建立,并增加同尺寸下的单侧斜坡工况和不同坡度工况作为对比工况,计算工况如表2所示。

表1 数值模拟材料参数

Table 1 Material parameters of numerical simulation

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	剪胀角/($^{\circ}$)
土体	30	0.3	1.8	10	25	0.1
桩体	30 000	0.2	2.5			

表2 数值模拟计算工况表

Table 2 Numerical simulation conditions table

工况名	地形条件	坡度 α /($^{\circ}$)	示意图
工况 H	水平地形	0	
工况 S15 $^{\circ}$		15	
工况 S30 $^{\circ}$	连续斜坡	30	
工况 S45 $^{\circ}$		45	
工况 HS15 $^{\circ}$		15	
工况 HS30 $^{\circ}$	单侧斜坡	30	
工况 HS45 $^{\circ}$		45	

选用三维实体模型,C3D8 单元,为保证计算精度,对桩及桩周附近区域作网格加密。为降低计算时间成本,根据对称性建立了 1/2 模型分析。模型底部边界设置固定约束,对称面设置对称约束,侧面边界设置垂直平面方向的约束,顶面为自由边界。图6为3种地形条件下的有限元模型网格划分图。为方便结果分析,定义在桩基向下部分土体为坡前土体,另一半土体为坡后土体。

桩侧与桩侧土体的接触模拟选用库伦摩擦模型,结合费康等^[17] ABAQUS 应用中的计算算例和现场的土性条件,取土体内摩擦角为桩土间的摩擦角,故接触面间的摩擦系数为 $\tan 25^{\circ} = 0.47$,接触

形式选用计算精度比较高的面-面接触;为保证桩端与桩底土之间力的合理传递,桩端与桩底土采用“tie”连接;在加载过程中桩土界面会发生较大的相对位移,故接触跟踪算法选用有限滑移。

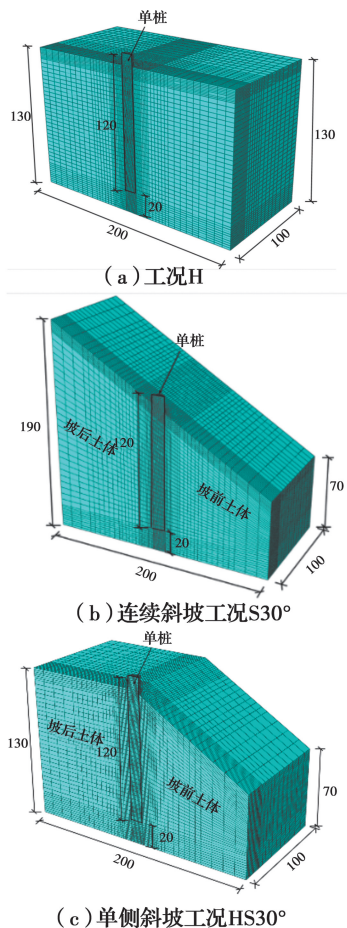


图 6 有限元模型尺寸及网格划分图(单位:cm)
Fig. 6 Size and meshing diagram of finite element model (unit: cm)

模型建好后依次通过预设地应力场、生死单元控制和导入应力结果的方法进行初始地应力平衡及成桩过程的模拟^[18],然后,对桩顶表面分级施加竖向均布荷载。

2.2 有限元数值结果分析

2.2.1 数值模拟与模型试验对比 提取对应室内模型试验的工况 H 和工况 S30°的结果,绘制桩顶荷载沉降曲线和桩身侧摩阻力分布,与室内模型试验结果对比见图 7 和图 8。

从图 7 中可以看出,数值结果中的桩顶竖向位移和拐点出现对应的荷载都与对应工况下的试验结果接近;从图 8 中可以看出,各级荷载作用下,数值计算和试验所得结果的趋势和大小都较为接近。综合对比可以看出,数值结果与对应工况下模型试验

结果拟合较好,表明数值模型参数选取合理,能够有效地反映真实工况。

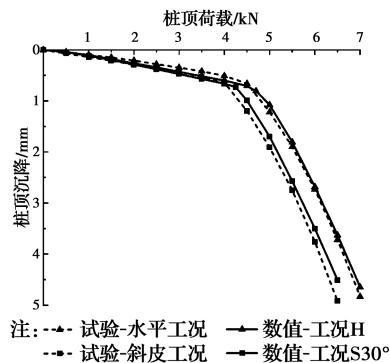


图 7 模型试验与数值的桩顶荷载沉降曲线对比

Fig. 7 Comparison of pile top load-settlement curves between model test and numerical simulation

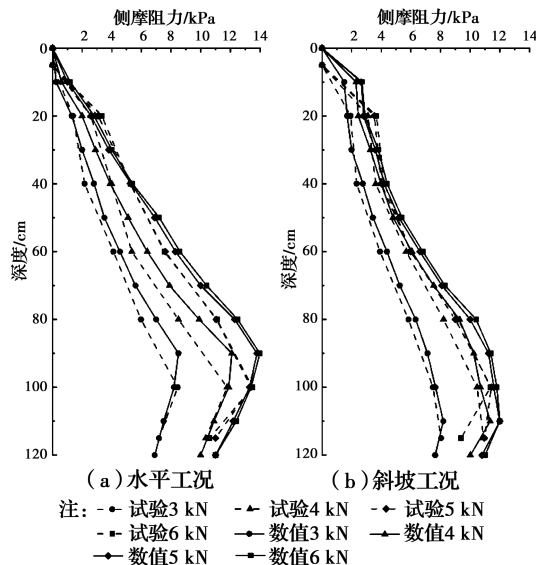


图 8 模型试验与数值的桩身侧摩阻力分布对比

Fig. 8 Comparison of side friction curves of pile between model test and numerical simulation

2.2.2 桩顶荷载沉降曲线分析 各数值模拟工况计算所得桩顶荷载沉降曲线对比如图 9 所示。从图 9 可以看出,所有曲线的线型大致相同,都可分为缓降段和陡降段,且有明显的拐点出现,拐点出现时对应的桩顶沉降差异较小,表明在材料属性和尺寸相同的条件下,不同斜坡坡度和斜坡类型下桩的竖向承载失效模式相似。从曲线陡降段明显可见,相同类型的斜坡工况中坡度越大,同一荷载作用下的桩顶沉降越大;而相同坡度的斜坡工况中,同一荷载作用下的桩顶沉降大小有单侧斜坡工况 HS 大于连续斜坡工况 S,且都大于水平工况 H。综上可以说明,斜坡的坡度越大,对桩基的承载越不利,而在坡度相

同的条件下,单侧斜坡地形对桩基承载的影响较连续斜坡地形更不利。

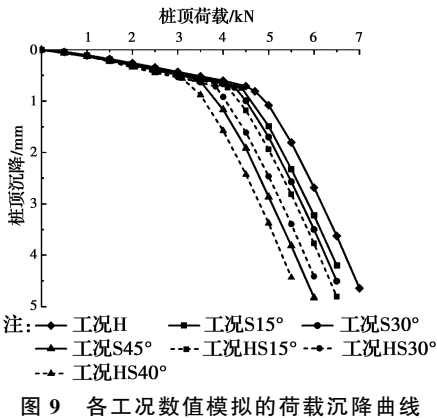


图 9 各工况数值模拟的荷载沉降曲线

Fig. 9 Pile top load-settlement curves of different conditions by numerical simulation

为进一步分析坡度对桩基承载的影响效果,将各工况拐点出现时对应的荷载作为该工况的桩基竖向极限承载力 P ,各工况下的竖向极限承载力结果汇总见表 3,并引入参数 $\alpha_s = (P_0 - P)/P_0$ 为斜坡地形对桩基竖向承载力的影响度^[19],以反映斜坡坡度对桩基竖向承载力的影响效果,其中, P_0 为水平地形工况下的单桩竖向极限承载力。从表 3 中可以发现,斜坡影响度随斜坡坡度的变化并非线性,在坡度较小时,影响度随坡度改变的变化较小,如 30° 连续斜坡工况的影响度仅为 5.32%,而当坡度从 30° 增长至 45° 时,影响度陡然上升至 23.40%,表明坡度较小时,斜坡地形对桩基的承载能力影响较小,而随着坡度增大,这个影响效果会急剧凸显,故实际工程中设立在陡坡坡段的桩基应充分考虑斜坡对桩基承载能力的削弱影响,对设计承载力进行折减。

表 3 不同工况下竖向承载力及影响度

Table 3 Vertical bearing capacity and influence degree of different conditions

坡型	工况	坡度/ $(^\circ)$	极限承载力/kN	斜坡影响度/ $\%$
水平	工况 H	0	4.50	0
连续 斜坡	工况 S15°	15	4.40	2.13
	工况 S30°	30	4.25	5.32
单侧 斜坡	工况 S45°	45	3.40	23.40
	工况 HS15°	15	4.10	8.51
单侧 斜坡	工况 HS30°	30	3.83	14.26
	工况 HS45°	45	3.10	29.79

2.2.3 桩土应力结果分析 为进一步研究地形影

响桩基竖向承载力的机理,现取 30° 连续斜坡和单侧斜坡工况与水平工况对比,即工况 H、工况 S30° 和工况 HS30° 进行以下对比分析。

1) 初始地应力场对比 图 10 分别是 3 种工况模型在受重力场作用下产生的初始竖向应力场。

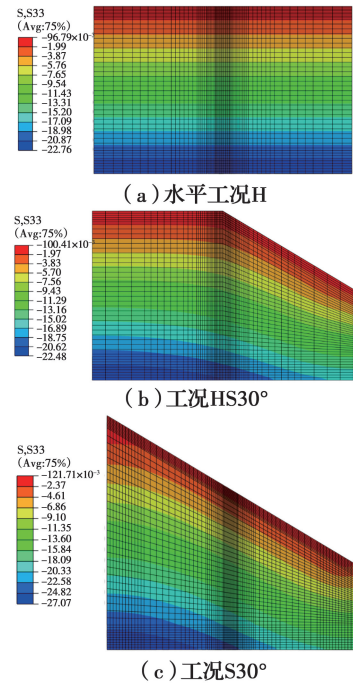


图 10 不同地形条件下的初始竖向应力场

Fig. 10 Initial vertical stress field of different ground conditions

从图 10 可以看出,工况 HS30° 中坡后平地的竖向应力分布与水平工况 H 相似,但由于坡前土体缺失,靠近斜坡处和坡前场地的竖向应力会沿坡面成层分布,同一高度平面的应力值有所下降,呈现出非对称应力场,这导致了工况 HS30° 中桩的竖向极限承载力相较于水平工况 H 更小。而与工况 HS30° 相比,工况 S30° 的桩后存在一部分附加土体,对坡后场地会产生竖向的附加应力,使得坡后场地的竖向应力也沿坡面成层分布,呈现出更强的非对称性,但这部分上覆土层会提高局部区域的应力,对桩基的竖向承载有利,故工况 S30° 的竖向极限承载力相较于工况 HS30° 更大。

不同地形条件生成的初始应力场作用在桩基上会对桩身产生不同的初始应力条件,亦会对后续加载过程中的荷载分布和传递规律产生影响。

2) 桩端桩侧承荷分布 为了对比不同工况下的桩端和桩侧土抗力随外荷载的变化,提取加载过程中的桩端阻力和桩侧阻力变化结果,分别按桩顶竖

向位移变化和桩顶竖向荷载变化作桩端、桩侧阻力分布图,如图 11 所示。

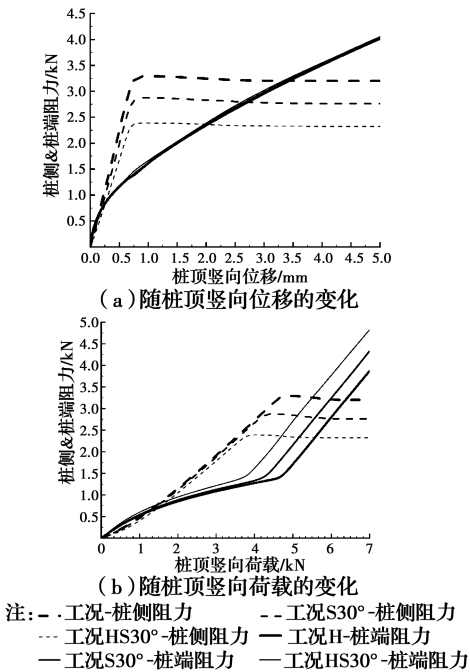


图 11 桩端阻力、桩侧阻力分布

Fig. 11 Tip resistance and side resistance of the piles

从图 11(a)可以看出,随着桩顶竖向位移增加,不同地形下的桩侧阻力变化规律相近,都是先增加到一个峰值后趋于稳定,且桩侧阻力达到峰值所需的竖向位移大致相等,地形差异的影响主要体现在桩侧阻力的峰值大小上,水平工况 H 最大,工况 S30°次之,工况 HS30°最小,其峰值分别为 3.30、2.88、2.39 kN。3 种地形下的桩端阻力均随桩顶竖向位移的增大而增大,且分布趋同,受地形差异影响较小。从图 11(b)可以看出,在桩侧阻力充分发挥之前,桩侧阻力和桩端阻力同时增长,但桩侧阻力的增长速率更快;桩侧阻力出现峰值时,对应的桩端阻力大小接近相等;桩侧阻力出现峰值之后,桩端阻力加速增长,斜率接近 1,而桩侧阻力几乎不变,表明新施加的荷载主要由桩端承担。可以看出,不同地形下桩端和桩侧阻力的发展规律是相似的,地形条件的影响主要体现在极限承载状态下桩侧阻力峰值的大小上。

3) 桩身荷载传递规律 提取不同荷载作用下桩身的轴力和侧摩阻力分布如图 12 所示。对比图 5 可以发现,数值计算所得的轴力和侧摩阻力分布与试验结果大致相同。由图 12 可知,当桩顶荷载较小时,各地形工况的轴力分布相近,随着荷载增大,桩

身上部的轴力增大,而桩身下部及桩端的轴力变化较小,此阶段各工况的桩侧摩阻力分布也大致相似,桩身侧摩阻力随荷载的增大而增大,但在相同荷载作用下桩顶附近区域的桩侧摩阻力有工况 S30°>工况 HS30°>工况 H;随着桩顶荷载逐渐增大,达到各自工况的极限承载力后,桩身下部的轴力分布出现明显的差异,同一埋深处水平工况 H 的轴力最小,工况 S30°次之,工况 HS30°最大,且随荷载增大,同一工况的轴力分布曲线表现为相互平行,与此对应,随着荷载达到各自工况的极限承载力后,桩侧摩阻力将趋于稳定,不再增大,此时同一深度的稳定值表现为工况 H>工况 S30°>工况 HS30°。综上分析可得,在荷载较小时,各工况的桩身荷载传递规律表现相似,而当荷载逐渐增大到各自的极限承载力后,随着桩侧摩阻力先后达到各自的稳定值,不同地形条件下桩身荷载传递规律的差别逐渐显现。

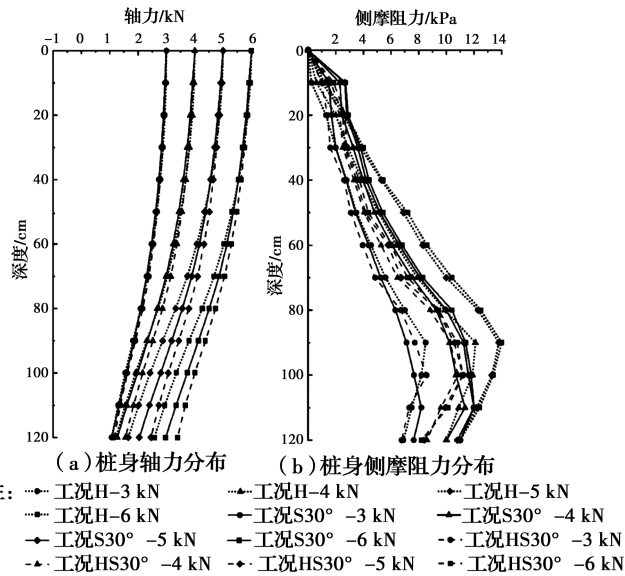


图 12 不同荷载作用下桩身轴力及侧摩阻力分布

Fig. 12 Axial force and side friction of pile under different loads

当荷载达到极限承载力后,除了不同地形间存在桩身应力分布差异,在斜坡地形中,桩身在坡前和坡后位置也存在应力分布差异。取桩顶荷载为 5 kN 时各工况对称界面处坡前和坡后位置的桩身竖向应力及剪应力沿深度分布如图 13,此荷载下 3 种工况的桩侧摩阻力都已经达到峰值。

由图 13(a)可以看出,3 对曲线的趋势与轴力分布相似,工况 H 两侧应力值几近相等,斜坡工况 S30°和 HS30°两侧竖向应力在坡面浅层区域开始出现了分叉,表现为同一埋深处的坡前应力大于桩后

应力。从图 13(b)可以看出,在桩身埋深为 0~40 cm(约 4D)范围内的浅层区域,桩身两侧剪应力存在明显差异,这与桩侧摩阻力在桩顶区域特殊分布区域相似;而随着深度增大,桩身两侧剪应力趋于相等,均随深度的增大而增大,且工况 S30°大于工况 HS30°,表明在一定深度以下,斜坡地形的差异不再影响桩身两剪应力的分布规律,而是主要体现在剪应力的的大小上。

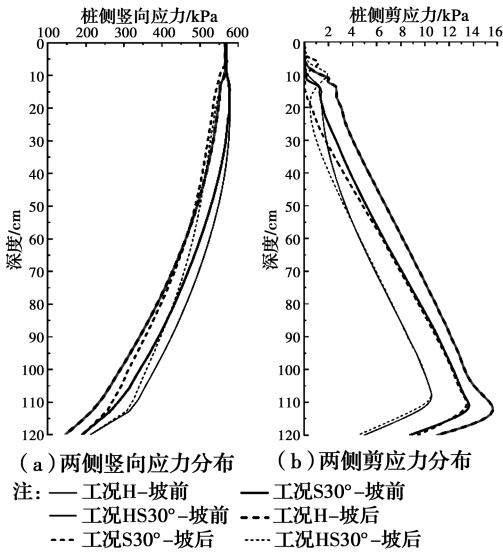


Fig. 11 Normal stress and shear stress on both sides of the pile

3 结论

结合模型试验和数值模拟方法,设计了相同桩长、不同斜坡类型和斜坡角度的单桩承载工况,并与水平工况对比,研究了斜坡地形单桩的竖向承载特性及其影响因素,得出如下结论:

1) 斜坡地形会对桩基承载能力产生削弱影响,在相同桩长和斜坡坡度的条件下,单侧斜坡工况的单桩承载能力小于连续斜坡工况;桩基的竖向承载能力随着坡度的增大呈降低趋势,斜坡影响度呈非线性增长,随着坡度增大,影响效果愈明显,45°单侧斜坡工况可达到约 30%。

2) 斜坡桩基桩端和桩侧阻力的发展规律与水平地形相似,桩侧阻力随荷载增大逐渐增大并达到稳定值,桩端阻力随荷载的增长先慢后快,斜坡地形主要影响桩侧阻力峰值大小,当桩侧阻力出现峰值时,对应的桩端阻力大小接近相等。

3) 斜坡地形中桩身前后存在应力分布差异,坡

前位置处的桩身竖向应力和剪应力大于坡后位置,但剪应力差异仅存在于 0~4 倍桩径的浅层区域,而 4 倍桩径以下区域桩身两侧剪应力的差异很小,趋近相等。

参考文献:

- [1] 冯忠居. 特殊地区基础工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- FENG Z J. Foundation engineering in special areas [M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 邓友生, 赵明华, 邹新军, 等. 山区陡坡桩柱的承载特性研究进展[J]. 公路交通科技, 2012, 29(6): 37-45.
- DENG Y S, ZHAO M H, ZOU X J, et al. Research progress of bearing characteristics of pile column at steep slope in mountain areas [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(6): 37-45. (in Chinese)
- [3] 赵明华, 杨超炜, 陈耀浩, 等. 高陡横坡段桩柱式桥梁双桩基础现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 329-335.
- ZHAO M H, YANG C W, CHEN Y H, et al. Field tests on double-pile foundation of bridges in high-steep cross slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 329-335. (in Chinese)
- [4] 牛富生, 许建聪, 马亢. 黄土斜坡桩基竖向荷载传递规律现场试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1899-1906.
- NIU F S, XU J C, MA K. Field experimental study of transmitted characteristics of pile foundation under vertical load in loess slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1899-1906. (in Chinese)
- [5] 尹平保, 赵明华, 杨超炜, 等. 复杂荷载下横坡段桥梁桩基承载特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(5): 110-117.
- YIN P B, ZHAO M H, YANG C W, et al. Experimental study on bearing capacity of bridge piles in cross slopes under complex loads [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(5): 110-117. (in Chinese)
- [6] 龚先兵, 杨明辉, 赵明华, 等. 山区高陡横坡段桥梁桩基承载机理模型试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 56-62.
- GONG X B, YANG M H, ZHAO M H, et al. Load-

- bearing mechanism model test for bridge pile foundation in high-steep transverse slope [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(2): 56-62. (in Chinese)
- [7] 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 B L, ZHANG C R, ZHANG Z X. 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)
- [8] 程刘勇, 陈善雄, 余飞, 等. 竖向荷载下斜坡桩基承载力及影响因素数值研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(18): 5399-5403, 5422.
- CHENG L Y, CHEN S X, YU F, et al. Numerical simulation for vertical ultimate capacity and influencing factors of oblique slope pile under vertical loads [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(18): 5399-5403, 5422. (in Chinese)
- [9] 陈兆, 陈骅伟, 蒋冲, 等. 水平荷载作用下斜坡刚性桩非线性分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(3): 47-52.
- CHEN Z, CHEN H W, JIANG C, et al. Nonlinear analysis of rigid pile in slope under lateral load [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(3): 47-52. (in Chinese)
- [10] JESMANI M, KASRANIA A, KAMALZARE M, et al. Undrained vertical bearing capacity of pile located near soft clay slope [J]. *Journal of Engineering Research*, 2015, 3(3): 21-38.
- [11] JESMANI M, KASRANIA A, KAMALZARE M. Finite element modelling of undrained vertical bearing capacity of piles adjacent to different types of clayey slopes [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 12(2): 147-154.
- [12] 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.
- [13] NG C W W, ZHANG L M. Three-dimensional analysis of performance of laterally loaded sleeved piles in sloping ground [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(6): 499-509.
- [14] QU L M, DING X M, WU C R, et al. Effects of topography on dynamic responses of single piles under vertical cyclic loading [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(1): 230-243.
- [15] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [16] 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106-2014 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [17] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- FEI K, ZHANG J W. Application of ABAQUS in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. (in Chinese)
- [18] 张建伟, 孔庆梅, 马金栋, 等. 复杂荷载共同作用下斜坡上单桩承载特性研究[J]. *建筑结构*, 2014(16): 96-98.
- ZHANG J W, KONG Q M, MA J D, et al. Study on bearing capacity of the single pile on slope under complex loads [J]. *Building Structure*, 2014, 44(16): 96-98. (in Chinese)
- [19] 冯忠居, 王航, 魏进, 等. 黄土冲沟斜坡桥梁桩基竖向承载特性模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(12): 2308-2314.
- FENG Z J, WANG H, WEI J, et al. Model tests on vertical bearing performance of bridge pile foundation in loess gulch slope area [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(12): 2308-2314. (in Chinese)