

文章编号:1671-8879(2016)06-0062-07

# 黄土沟壑地形斜陡坡对桩基承载力的影响

栾娟<sup>1</sup>,郝宪武<sup>1</sup>,赵宝俊<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通建设集团公司,陕西 西安 710075)

**摘 要:**随着穿越中国西部山区等复杂地形的公路桥梁越来越多,黄土沟壑地形桥梁桩基受到较复杂外荷载作用的问题也越来越凸显,同时由于桩周土体缺失效应,桩侧土体呈现出不对称性,侧摩阻力在靠近坡面侧土体中很难得到有效发挥,从而降低了桩基的竖向承载能力。结合西部黄土沟壑地形斜陡坡的工程地质特点,参考陕北黄土地区已建或在建桥梁工程项目的地勘资料,采用MIDAS FEA中桩土界面的接触分析进行有限元数值模拟,计算分析了黄土沟壑地形斜陡坡对桩基承载力的影响,总结了坡度、临坡距这 2 个主要因素对桩基极限承载力的影响规律。研究结果表明:桩基极限承载力与坡度呈反比例关系,坡度为 30°时,桩基承载力较平坡桩基承载力下降了 13.2%,桩侧摩阻力下降了 18.3%,桩端阻力下降了 2.3%;坡度为 70°时,桩基承载力较平坡桩基承载力下降了 46.7%,桩侧摩阻力下降了 64.0%,桩端阻力下降了 9.8%;随着临坡距的增加,桩端阻力变化微小,桩侧阻力增加明显,临坡距由  $D$ (桩基直径)增加至  $8D$  时,桩端阻力占极限承载力的比例由 59%下降到 49%,且基本保持稳定;而桩侧阻力在临坡距由  $D$  变为  $2D$  时,桩侧阻力增加了 25%。在工程实践中,坡度因素不容忽视,研究结果可为相关地区桥梁桩基设计和施工提供参考。

**关键词:**桥梁工程;桩基;黄土沟壑;坡度;临坡距;极限承载力

**中图分类号:**U443.15

**文献标志码:**A

## Effect of loess gully slope terrain on bearing performance of pile foundation

LUAN Juan<sup>1</sup>, HAO Xian-wu<sup>1</sup>, ZHAO Bao-jun<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

**Abstract:** With more and more highway bridges crossing complicated terrains in Western China, the problem that bridge pile foundation in loess gully terrain is influenced by relatively complex external loads is more and more obvious. Pile side soil is asymmetry due to the lack of effect of soil around pile. Side friction near the side slope soil is difficult to play an effective role, thereby reducing the vertical bearing capacity of pile foundation. For this problem, this paper combined with the engineering geological characteristics of the western loess gully terrain steep slope. Contact analysis of interface between pile and soil for studying the geological survey data of construction project in loess area of Northern Shaanxi through MIDAS FEA were conducted. Influence of loess gully terrain steep slope on pile foundation bearing force was studied, and the influence regularities of two main factors-slope and slope distance on it were summarizes. The

收稿日期:2016-07-25

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51308055);中国博士后科学基金项目(2013M532000)

作者简介:栾娟(1983-),女,陕西榆林人,工学博士研究生,E-mail:luanjuan@chd.edu.cn。

通讯作者:李子青(1954-),男,陕西榆林人,教授,博士研究导师,E-mail:20342862@qq.com。

results show that the ultimate bearing capacity of pile foundation is inversely proportional to slope. When the slope is  $30^\circ$ , the bearing capacity of pile foundation decreases by 13.2% compared with the bearing capacity of pile, the side friction resistance of pile decreases by 18.3%, and the resistance of pile end decreases by 2.3%; When the slope is  $70^\circ$ , the bearing capacity reduces by 46.7%, the friction resistance of pile decreases by 64%, and the resistance of pile decreases by 9.8%; With the increase of slope distance, the resistance change of pile is small, and the side resistance of pile increases significantly. When slope distance increases from  $D$  (pile diameter) to  $8D$ , the ratio of pile tip resistance to ultimate bearing capacity decreases from 59% to 49%, which is basically stable; When side resistance of pile increases from  $D$  to  $2D$ , side resistance of pile increases by 25%. Therefore, slope factor should not be ignored in engineering practice. The research results can provide references for design and construction of bridge pile foundation. 4 tabs, 11 figs, 23 refs.

**Key words:** bridge engineering; pile foundation; loess gully; slope; slope distance; ultimate bearing capacity

## 0 引言

随着国家“一带一路”战略的提出,进一步促进了西部地区高等级公路的大发展,穿越黄土沟壑地区的公路桥梁越来越多<sup>[1]</sup>。由于黄土沟壑地形坡陡沟深,桥梁结构按照标准跨径布孔后,造成诸多桥梁桩基修建在沟壑斜坡地段,甚至极陡坡地段。其下部桩基往往由于地形、地质、天气、施工等影响呈现沿高陡坡布设、桩基裸露、有效桩长减小等特点。加之桩基受到了比较复杂的外荷载作用,如横向、竖向及斜向荷载等<sup>[2-7]</sup>。针对无坡度地区桩基受力机理,一般将桩基周围土体在无坡度地区视为半无限空间体,而在斜坡上布设的桥梁桩基周围土体表现出不对称性,其不再是半无限体<sup>[8-10]</sup>。因此,由于桩周土体缺失效应,桩侧土体呈现出不对称性,侧摩阻力在靠近坡面侧土体中很难得到有效发挥,从而降低了桩基的竖向承载能力。冯忠居等以弹性理论为基础建立了力学模型,研究桥梁桩基承载力受黄土湿陷性影响,推导出桥梁桩基布置于湿陷性黄土地区的承载力计算公式<sup>[11]</sup>;陈帝江分析了平坡桩基与有坡度桩基在竖向荷载作用下受力特性的主要区别<sup>[12]</sup>;李晋等根据现场试验,揭示了黄土地区桥梁桩基承载特性受地面浸水的影响规律<sup>[13]</sup>;关晓静针对陡坡地区桥梁桩基的特殊性及桩端位置与陡坡坡脚的位置关系、桩基所在位置与陡坡的位置关系、桩与陡坡坡脚局部缺失的关系,研究了这些参数对桩基竖向承载力的影响<sup>[14]</sup>。

综上所述,目前对单桩竖向承载力的研究成果及工程经验大多针对平地桩基,鲜有斜陡坡地形桩基础数值分析的研究报道。从有限元模型的建立来

说,由于桩与土之间,以及土层与土层之间的相互影响非常复杂,对已有的各土层试验统计结果进行孤立地、简单地叠加是不准确的<sup>[15]</sup>。由于斜陡坡地形桩周土体缺失效应,其桩侧土体呈现出不对称性,这一力学模型很难实现。为此,本文利用数值模拟方法,不仅考虑土层与土层之间的相互作用,还考虑桩与土之间的相互作用,来进一步分析黄土沟壑地形斜陡坡对桩基承载力的影响,为黄土沟壑地区桥梁桩基的设计提供理论依据。

## 1 计算模型的建立

本文采用 MIDAS FEA 进有限元计算分析,因其在桩土界面的接触分析方面有优势。计算模型包括 2 种主要模型,即材料模型和几何模型。合理选择模型直接决定了真实受力情况模拟的准确度以及模型计算的精度。

桩-土体系共同作用是桩基础的工作机理,沟壑地形桩基由于所处环境单侧坡体缺失,其受力相当复杂,通过建立三维空间模型,可以更加合理准确地模拟桩-土之间的共同作用,从而实现分析其受力性状的目的。

采用以下基本假定<sup>[16-17]</sup>:

- (1)土层为各向同性、均质弹塑性材料;
- (2)不计入施工因素对桩基周围土体的影响;
- (3)钢筋混凝土桩基为均质、连续弹性体;
- (4)当接近极限荷载时,桩周土破坏,钢筋混凝土桩体自身不发生破坏;
- (5)在桩土接触面上设置接触单元,桩土界面摩擦因数在分析过程中保持不变。

1.1 几何模型

建立几何模型的顺序为从点到线再到面。定义控制点的坐标必须根据网格划分区域来确定。首先需要确定的是网格划分区域。根据土层的厚度等分布情况及桩的实际尺寸大小确定网格划分区域。结合对计算资源的要求和桩基础结构受力的特点,本文在综合试算及参考文献[18-19]后,斜坡土体的计算底面取桩底以下 1.5 倍桩长位置,桩侧取 50 倍桩径的土体进行分析,此时可认为所取土体范围超出了桩对土层的影响范围。斜坡地形桩基有限元模型如图 1 所示,有限元网络划分区域如图 2 所示。

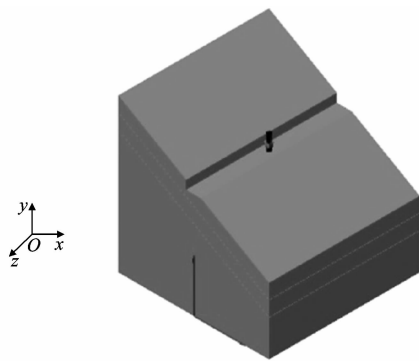


图 1 斜坡桩基有限元模型(30°斜坡)  
Fig. 1 Finite element model of steep slope pile foundation (30° slope)

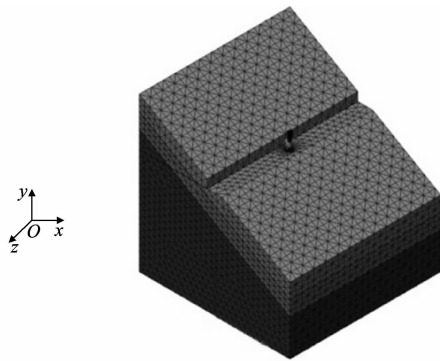


图 2 有限元网格划分  
Fig. 2 Finite element mash division

1.2 材料本构模型

本文对钢筋混凝土桩基采用线弹性本构模型进行计算分析,该本构模型能较好地描述混凝土受拉和低应力受压时的性能。对桩周土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型进行计算分析,该本构模型能较好地模拟岩土体材料的强度问题。

2 计算参数的选取

有限元计算模型包括 2 种计算参数:一种为材料相关参数;另一种为界面相关参数。

2.1 土体计算参数

参考陕北黄土地区已建或在建桥梁工程项目的地勘资料,沟壑地形土体浅层为黄土,中间为强风化砂岩,深层为中风化砂岩。依据《工程地质手册》和工程经验,材料具体参数见表 1。

表 1 沟壑地形土体物理参数  
Tab. 1 Physical parameters of gully terrain soil

| 材料名称  | 弹性模量/MPa | 泊松比  | 粘聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 重度/(kN·m <sup>-3</sup> ) | 土层厚度/m |
|-------|----------|------|---------|----------|--------------------------|--------|
| 黄土    | 5.8      | 0.35 | 29.4    | 25       | 16.6                     | 7.6    |
| 强风化砂岩 | 1 960.0  | 0.23 | 196.0   | 35       | 18.0                     | 5.3    |
| 中风化砂岩 | 5 880.0  | 0.20 | 2 940.0 | 40       | 23.0                     | 18.7   |

2.2 桩基计算参数

桩基采用线弹性模型,模型中所采用的参数如下:弹性模量  $E=30\,000\text{ MPa}$ ,泊松比  $\nu=0.25$ ,重度  $\rho=25\text{ kN/m}^3$ 。

2.3 桩-土接触面计算参数

桩-土接触面采用 Mohr-Coulomb 摩擦模型,根据桩-土的性质来确定摩擦因数<sup>[20-23]</sup>。法向刚度  $k_n\approx 100k_s$ ,其中  $k_s$  为切向刚度,即

$$k_s=10\max\left(\frac{k_n+4G/3}{\Delta z_{\min}}\right) \tag{1}$$

式中: $G$  为桩基承台和承台上土自重设计值; $\Delta z_{\min}$  为桩身最小变形值。

本次模型计算参数为:法向刚度  $k_n=39.8\text{ MPa/m}$ ,切向刚度  $k_s=0.4\text{ MPa/m}$ ,摩擦角  $\varphi=20^\circ$ ,内聚力  $c=20\text{ kPa}$ 。

3 影响因素计算与分析

3.1 影响因素

针对坡度、临坡距等因素对沟壑地形桥梁桩基竖向承载特性的影响进行仿真分析,总结坡度及临坡距对桩基承载力的影响及规律,为黄土沟壑地区桥梁桩基的设计提供理论依据。沟壑地区斜坡桩基承载力影响因素见表 2。

表 2 沟壑地区斜坡桩基承载力影响因素  
Tab. 2 Influence factors of bearing capacity of steep slope pile foundation in gully region

| 序号     | 1                                       | 2    | 3    | 4    | 5    |
|--------|---|------|------|------|------|
| 桩基尺寸   | 直径 $D=1.3\text{ m}$ ,桩长 $L=15\text{ m}$ |      |      |      |      |
| 坡度/(°) | 30                                      | 40   | 50   | 60   | 70   |
| 临坡距/m  | $D$                                     | $2D$ | $4D$ | $6D$ | $8D$ |

3.2 计算结果及分析

3.2.1 桩顶荷载-沉降曲线

使用极限承载力和荷载极限承载力构成单桩极

限荷载承载力。以不影响正常使用为前提,所能承受的最大荷载为使用极限承载力;在不考虑沉降量是否超限的情况下,桩基所能承受的最大荷载为荷载极限承载力。桩顶沉降一般不能超过 0.04~0.06 m,即桩顶下降达到 0.04~0.06 m 中的某个值时桩所承受的荷载即为其使用极限承载力。本文将桩顶沉降计算标准定为(3%~5%) $D$ ,通过桩顶沉降计算单桩极限荷载承载力。黄土沟壑地区斜陡坡桩基模型及单桩极限荷载计算模型如图 3、图 4 所示。

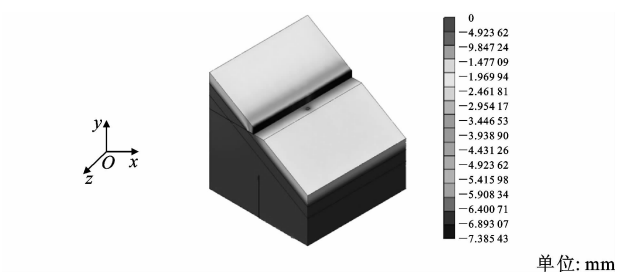


图 3 斜陡坡桩基模型

Fig. 3 Model of slope pile foundation

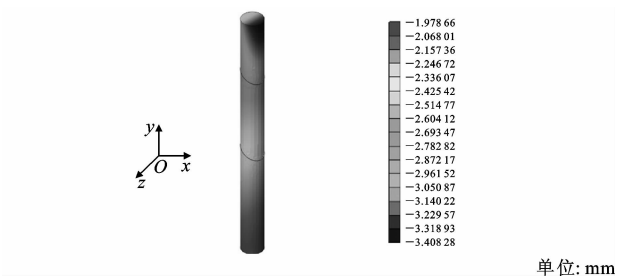


图 4 单桩极限荷载计算模型

Fig. 4 Calculation model of ultimate load of single pile

3.2.2 坡度对桩基承载力的影响

计算采用逐级加载的方法,共分为 5 步施力过程,每步施加 2 000 kN,总共施加荷载 10 000 kN。斜坡坡度分别为 0°、30°、40°、50°、60°、70°时桩基的  $P$  (荷载)- $S$  (沉降)曲线如图 5 所示。

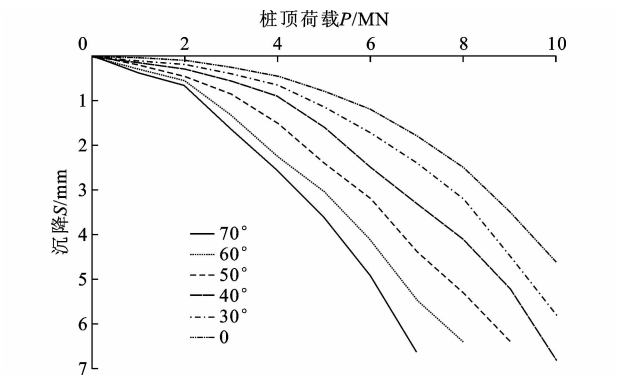


图 5 斜坡坡度对桩基承载特性的影响

Fig. 5 Influence of slope gradient on bearing characteristics of pile foundation

从图 5 中可以看出,桩顶竖向位移在相同荷载作用下,随斜坡坡度的增加逐渐增大,并且随坡度的增加位移增大趋势越来越快。表 3 为不同坡度下桩基极限承载力  $P_{\max}$ 、桩侧阻力  $P_c$ 、桩端阻力  $P_d$  的特征值,其对比如图 6、图 7 所示。

表 3 不同坡度下桩基承载特性

Tab. 3 Bearing characteristics of pile foundation under different slopes

| 桩径<br>$D/\text{m}$ | 桩长<br>$L/\text{m}$ | 承载<br>特性             | 不同坡度  |       |       |       |       |       |
|--------------------|--------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    |                    |                      | 0°    | 30°   | 40°   | 50°   | 60°   | 70°   |
| 1.3                | 15                 | $P_{\max}/\text{kN}$ | 9 746 | 8 460 | 7 259 | 6 485 | 5 832 | 5 196 |
|                    |                    | $P_c/\text{kN}$      | 6 628 | 5 415 | 4 280 | 3 569 | 2 973 | 2 385 |
|                    |                    | $P_d/\text{kN}$      | 3 118 | 3 045 | 2 979 | 2 916 | 2 859 | 2 811 |
|                    |                    | $P_c/P_{\max}$       | 0.68  | 0.64  | 0.59  | 0.55  | 0.51  | 0.46  |
|                    |                    | $P_d/P_{\max}$       | 0.32  | 0.36  | 0.41  | 0.45  | 0.49  | 0.54  |
|                    |                    |                      |       |       |       |       |       |       |

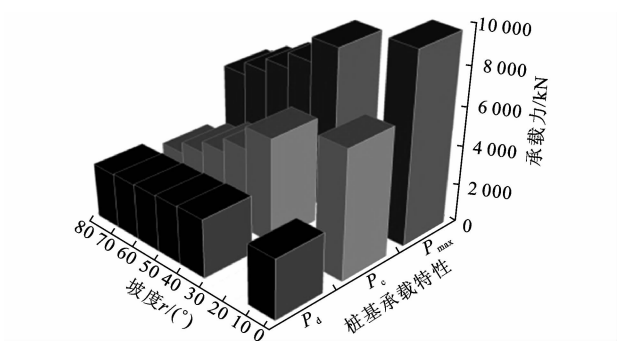


图 6 桩基承载特性对比

Fig. 6 Comparison of bearing capacity of pile foundation

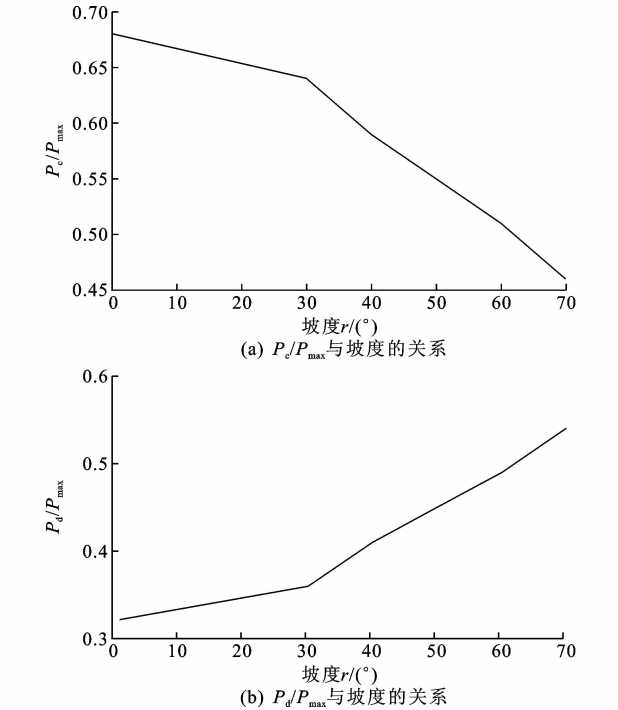


图 7 桩基承载特性比值

Fig. 7 Ratio of bearing capacity of pile foundation

从表 3 可以看出,沟壑地形桩基承载力随坡度的增大而减小。坡度为  $30^{\circ}$  时,桩基承载力较平坡桩基承载力下降 13.2%,桩侧摩阻力比平坡桩基侧摩阻力小 18.3%;占桩基承载力的比例也在下降,相比平坡的 68%,下降为 64%。桩端承载力随坡度的增大下降速度较缓, $30^{\circ}$  时,桩端承载力斜坡比平坡时仅仅下降 2.3%,但其在承载力中占的比例有所上升,从平坡的 32%提高到了 36%。随着坡度的增加,桩基承载力的变化更加剧烈。坡度为  $50^{\circ}$  时,较平坡桩基的承载力下降 33.4%,桩侧摩阻力下降 46.1%,桩端阻力下降 6.5%。坡度为  $70^{\circ}$  时,较平坡桩基的承载力下降 46.7%,桩侧摩阻力下降 64.0%,桩端阻力下降 9.8%。

从以上结果可以看出,斜坡一侧土体的缺失导致侧摩阻力不能发挥出来,致使桩基承载力降低,尤其是大于  $30^{\circ}$  的陡坡,桩侧摩阻力下降过快,桩基承载力也随之下降。因此,坡度的存在改变了桩基的承载特性,承载力随着坡度的变化而变化,在坡度较小时,与平坡桩基受力差异较小;在坡度较大时,桩侧土体的缺失改变了桩基的受力机理。在工程实践中,坡度因素不容忽视。

3.2.3 临坡距对桩基承载力的影响

与平坡相比,沟壑地形桩基两侧岩土体分布不对称,存在较大差异,尤其是坡度大于  $50^{\circ}$  时的陡坡,桩基临坡侧土体缺失效应更为明显。因此,分别在斜坡坡度为  $50^{\circ}$ 、 $70^{\circ}$  时,选取 5 种不同临坡距来模拟不同桩位设置情况,计算分析桩基极限承载力受临坡距变化的影响。其桩基  $P$ - $S$  曲线分别如图 8、图 9 所示,计算结果见表 4,其承载特性如图 10、下页图 11 所示。

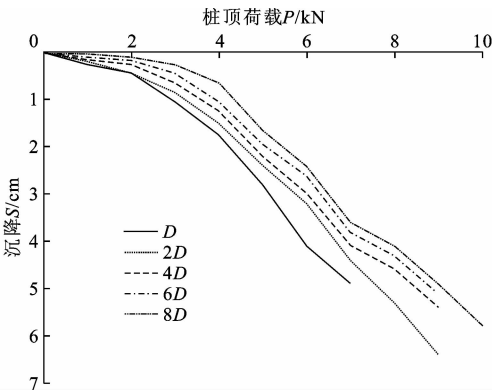


图 8 坡度  $50^{\circ}$  时桩基承载特性

Fig. 8 Bearing characteristics of pile foundation when slope is  $50^{\circ}$

从图 8 中可以看出,斜坡坡度为  $50^{\circ}$  时,随着临坡距的增加,桩基极限承载力呈增加趋势。从图 9

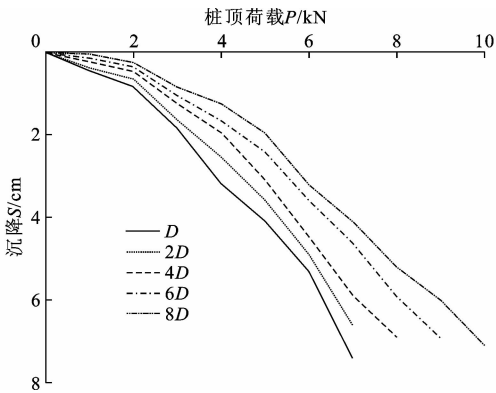


图 9 坡度  $70^{\circ}$  时桩基承载特性

Fig. 9 Bearing characteristics of pile foundation when slope is  $70^{\circ}$

表 4 不同临坡距下桩基承载特性

Tab. 4 Bearing characteristics of pile foundation under different slopes

| 临坡距/m        | $D$            | $2D$  | $4D$  | $6D$  | $8D$  |
|--------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| $50^{\circ}$ | $P_{\max}$     | 5 816 | 6 485 | 6 887 | 7 169 |
|              | $P_c$          | 2 952 | 3 569 | 3 922 | 4 173 |
|              | $P_d$          | 2 865 | 2 916 | 2 965 | 2 996 |
|              | $P_c/P_{\max}$ | 0.51  | 0.55  | 0.57  | 0.58  |
|              | $P_d/P_{\max}$ | 0.49  | 0.45  | 0.43  | 0.42  |
| $70^{\circ}$ | $P_{\max}$     | 4 681 | 5 196 | 5 492 | 5 706 |
|              | $P_c$          | 1 908 | 2 385 | 2 643 | 2 825 |
|              | $P_d$          | 2 773 | 2 811 | 2 850 | 2 881 |
|              | $P_c/P_{\max}$ | 0.41  | 0.46  | 0.48  | 0.50  |
|              | $P_d/P_{\max}$ | 0.59  | 0.54  | 0.52  | 0.50  |

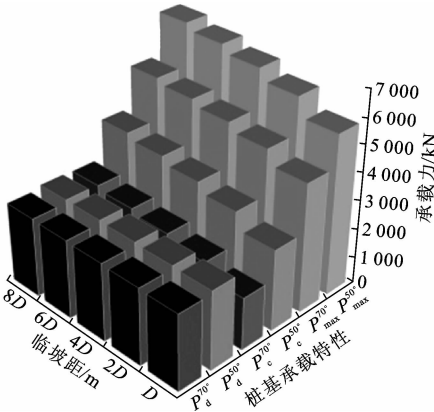


图 10 桩基承载特性对比

Fig. 10 Comparison of bearing capacity of pile foundation

中可以看出,斜坡坡度为  $70^{\circ}$  时,随着临坡距的增加,桩顶位移在每级荷载作用下逐渐减小,桩基极限承载力却表现出增加趋势。

从表 4 可知,坡度为  $50^{\circ}$  时,临坡距从  $D$  变化到  $2D$  时,桩基极限承载力增加了 11.5%;从  $2D$  变化到  $4D$  时,极限承载力仅增加了 6.2%,增幅减小;从  $4D$  增加到  $6D$  时,承载力只增加了 4.1%,增幅继续减小;从  $6D$  变化到  $8D$  时,极限承载力只增加了

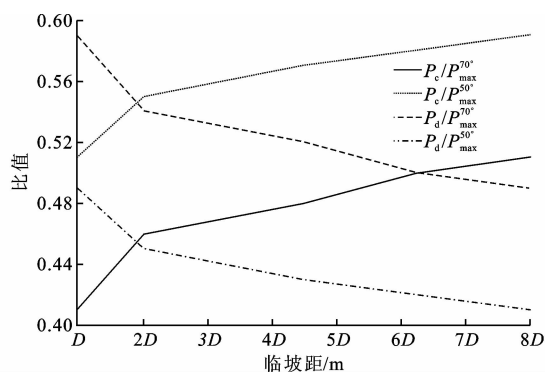


图11 桩基承载特性比值

Fig. 11 Ratio of bearing capacity of pile foundation

3.2%。坡度为70°时,临坡距从D变化到2D时,承载力增加了11.0%;从2D变化到4D时,极限承载力仅增加了6.0%,增幅减小;从4D变化到6D时,极限承载力仅增加了3.9%,增幅继续减小;从6D变化到8D时,极限承载力仅增加了3.1%。

随着临坡距的增加,桩端阻力变化微小,桩端阻力占极限承载力的比例由59%下降到49%,基本保持稳定;而桩侧阻力随临坡距的增大明显增加,临坡距从D变为2D时,桩侧阻力增加了25%;但临坡距从6D变为8D时,极限承载力仅增加了5.3%。因此随着临坡距的增大,桩基承载力也随之增加,但增幅随距离增大而减小,最终趋于平缓。

## 4 结 语

(1)坡度的存在导致桩基单侧土体缺失,侧摩阻力减小,致使桩基承载力降低,受沟壑地形坡度影响,极限承载力与坡度呈反比例关系,坡度越小,极限承载力越大。

(2)随着临坡距的增加,桩端阻力变化微小,桩端阻力占极限承载力的比例变化幅度不大,基本保持稳定。

(3)随着临坡距的增大,桩侧阻力增加明显,桩基承载力也随之增加,但增幅随距离增大而减小,最终趋于平缓。

(4)坡度的存在改变了桩基的承载特性,桩侧土体的缺失改变了桩基的受力机理,在工程实践中,坡度因素不容忽视,本文研究结果对相关地区桥梁桩基设计和施工具有指导意义。

(5)下一步研究可在考虑土质特性的基础上,进一步进行桥梁桩基承载性能的研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 王琴梅,曹琼.“一带一路”道路联通的现状、阻滞因素及推进建议[J].发展研究,2015(10):17-21.  
WANG Qin-mei, CAO Qiong. The status quo of road connection, hindering factors and promote suggestion of “B&R”[J]. Development Research, 2015(10): 17-21. (in Chinese)
- [2] 彭雪.黄土沟壑地形桥梁下部结构运营期间风险演变规律与管理方法[D].西安:长安大学,2015.  
PENG Xue. In loess ravine terrain bridge foundation structure evolution law and risk management during the operation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)
- [3] 何文秀,石云.黄土丘陵沟壑区地形复杂度分析[J].测绘科学,2015,40(10):146-152.  
HE Wen-xiu, SHI Yun. Analysis of terrain complexity in the hilly and gully area of loess plateau[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(10): 146-152. (in Chinese)
- [4] 蔡怀恩,张继文,秦广平.浅谈延安黄土丘陵沟壑区地形地貌及工程地质分区[J].土木工程学报,2015,48(增2):386-390.  
CAI Huai-en, ZHANG Ji-wen, QIN Guang-ping. Simple discuss on topography and engineering geology zoning in loess hilly gully region of Yan'an[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 386-390. (in Chinese)
- [5] LIN C, BENNETT C, HAN J, et al. Scour effects on the response of laterally loaded piles considering stress history of sand[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(7/8): 1008-1014.
- [6] 李晋.黄土地区桩基桩土共同作用性状仿真与试验研究[J].岩土力学与工程学报,2008,27(5):1081-1085.  
LI Jin. Simulation of pile-soil interaction behavior of bridge pile in loess area and its test study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1081-1085. (in Chinese)
- [7] 徐亚利.黄土地区大直径超长桩基的模型试验研究与非线性有限元分析[D].西安:西安建筑科技大学,2009.  
XU Ya-li. The model test of super-long large-diameter pile foundation in loess area and non-linear finite element analysis[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009. (in Chinese)
- [8] 姚悦.湿陷性黄土对梁桥桩基承载力的影响[D].

- 西安:长安大学,2012.
- YAO Yue. The influence of property of the collapsible loess on pile bearing performance[D]. Xi'an:Chang'an University,2012. (in Chinese)
- [9] 林新元. 湿陷性黄土地区桥梁桩基承载力性状试验研究[D]. 西安:长安大学,2004.
- LIN Xin-yuan. Experiment on bearing capacity of bridge pile foundation in collapsible loess area[D]. Xi'an:Chang'an University,2004. (in Chinese)
- [10] 张旭. 黄土冲沟区域桥梁桩基横轴向荷载下的承载特性分析[D]. 西安:长安大学,2014.
- ZHANG Xu. The analysis on the lateral load-bearing characteristics of bridge pile foundation in the loess gully area[D]. Xi'an:Chang'an University,2014. (in Chinese)
- [11] 冯忠居,冯瑞玲,赵占厂,等. 黄土湿陷性对桥梁桩基承载力的影响[J]. 交通运输工程学报,2005,5(3):60-63.
- FENG Zhong-ju, FENG Rui-ling, ZHAO Zhan-chang, et al. Effect of collapsible loess on pile foundation bearing capacity[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2005,5(3):60-63. (in Chinese)
- [12] 陈帝江. 斜坡地区大直径桥梁桩基竖向承载特性研究[D]. 西安:长安大学,2009.
- CHEN Di-jiang. Research on vertical load-bearing characteristics of the large-diameter bridge foundation[D]. Xi'an:Chang'an University,2009. (in Chinese)
- [13] 李晋,谢永利,冯忠居. 自重湿陷性黄土地区合理桩长初探[J]. 岩土力学与工程学报,2005,24(9):1629-1634.
- LI Jin, XIE Yong-li, FENG Zhong-ju. Study of the proper pile length in the self-weight collapsible loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(9):1629-1634. (in Chinese)
- [14] 关晓静. 秦巴山区陡坡桩基桩位变化对其竖向承载特性影响分析[D]. 西安:长安大学,2010.
- GUAN Xiao-jing. Analysis on the vertical load-bearing characteristics by pile position change in steep-slope area of Qinba mountain region[D]. Xi'an:Chang'an University,2010. (in Chinese)
- [15] 陈鹏,李文华,范涛,等. 土体冲刷对桥梁桩基影响的三维差分模拟计算分析[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2007,26(4):23-26.
- CHEN Peng, LI Wen-hua, FAN Tao, et al. Effect of river brush on bridge pile foundation with 3-D difference simulation[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 26(4):23-26. (in Chinese)
- [16] 程永舟,胡旭跃,沈小雄. 建筑物基础冲刷深度的可靠性分析[J]. 长沙交通学院学报,2004,20(3):48-52.
- CHENG Yong-zhou, HU Xu-yue, SHEN Xiao-xiong. Reliability analysis of structure foundation scouring depth[J]. Journal of Changsha Communications University,2004,20(3):48-52. (in Chinese)
- [17] LI F, HAN J, LIN C. Effect of scour on the behavior of laterally loaded single piles in marine clay[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2013, 31(3):271-289.
- [18] 宋兵. 桩侧摩阻力特性的研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
- SONG Bing. Study on the characteristics of shaft soil resistance of pile[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2010. (in Chinese)
- [19] 陈长流. 考虑湿陷的大厚度黄土地区桩基负摩阻力特性研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2014.
- CHEN Chang-liu. Study on the characteristics of pile negative friction in the large thickness loess area considering the collapsibility[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology,2014. (in Chinese)
- [20] MARC Analysis research corporation. Theory and user information,version K7[R]. Pedro Alto:MARC Analysis Research Corporation,1997.
- [21] 许斌,王大通,高大钊. 群桩沉降验算中接触单元模型应用的若干问题[J]. 同济大学学报:自然科学版,1998,26(2):149-152.
- XU Bin, WANG Da-tong, GAO Da-zhao. Some problems in application of contact element in settlement checking of the group pile[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1998, 26(2):149-152. (in Chinese)
- [22] 施健勇,赵维炳,周春儿. 钢桩负摩擦分析[J]. 岩土工程学报,1995,17(2):53-59.
- SHI Jian-yong, ZHAO Wei-bing, ZHOU Chun-er. Analysis of negative skin friction on a steel pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1995,17(2):53-59. (in Chinese)
- [23] 陈福全,龚晓南,马时冬. 桩的负摩阻力现场试验及三维有限元分析[J]. 建筑结构学报,2000,21(3):77-80.
- CHEN Fu-quan, GONG Xiao-nan, MA Shi-dong. In-situ test and finite element analysis of negative skin friction on piles[J]. Journal of Building Structures, 2000,21(3):77-80. (in Chinese)