

引用本文:解 刚,刘海鹏,赵宝俊,等.考虑冲刷效应的黄土沟壑区桥梁桩基极限承载力计算方法[J].建筑科学与工程学报,2020,37(4):108-115.

XIE Gang, LIU Hai-peng, ZHAO Bao-jun, et al. Calculation Method of Ultimate Bearing Capacity of Bridge Pile Foundation in Loess Gully Area Considering Scour Effect[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 108-115.

DOI:10.19815/j.jace.2020.04063

# 考虑冲刷效应的黄土沟壑区桥梁桩基极限承载力计算方法

解 刚<sup>1</sup>, 刘海鹏<sup>2,3</sup>, 赵宝俊<sup>3,4</sup>, 王旭东<sup>3</sup>, 王 鼎<sup>3</sup>

(1. 陕西路桥集团有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 陕西省铁路集团有限公司, 陕西 西安 710199;  
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 4. 陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:**针对黄土沟谷地形特点和依托工程桩型特征,建立了考虑边坡系数和临坡距以及冲刷深度的桥梁桩基竖向承载力计算模型,利用 FLAC3D 三维软件分析水流的冲刷深度、边坡土削切对桥梁桩基竖向极限承载力产生的不良影响;通过回归方程拟合,建立了考虑局部冲刷效应的黄土沟壑地区计算公式。结果表明:计算桩基承载力的边坡系数与对应坡距耦合关系显著,桥梁桩基侧向摩阻力与对应因素的关联性随其摩阻力降低而增强;局部冲刷作用和陡坡地形对桥梁桩基端部摩阻力影响较为微弱,对侧摩阻力影响相对较大;桩基的竖向极限承载力负相关于水流冲刷深度,水流冲刷深度越低,产生的影响越大;桥梁桩基的竖向承载力公式计算结果与模型试验结果相比影响度偏差较小,该公式具有较好的准确性与实用性,可为同类桩基设计计算提供参考。

**关键词:**桥梁工程;黄土沟谷地形;桩基;极限承载力;冲刷效应

**中图分类号:** TU443

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-2049(2020)04-0108-08

## Calculation Method of Ultimate Bearing Capacity of Bridge Pile Foundation in Loess Gully Area Considering Scour Effect

XIE Gang<sup>1</sup>, LIU Hai-peng<sup>2,3</sup>, ZHAO Bao-jun<sup>3,4</sup>, WANG Xu-dong<sup>3</sup>, WANG Ding<sup>3</sup>

(1. Shaanxi Road & Bridge Group Co., Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Province Railway Group Co., Ltd, Xi'an 710199, Shaanxi, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 4. Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

**Abstract:** According to the topographic characteristics of the loess valley and the pile type characteristics of the supporting project, the vertical bearing capacity calculation model of bridge pile foundation considering the slope coefficient, critical slope distance and scouring depth was established. Based on FLAC3D software, the adverse effects of water erosion and slope soil cutting on the vertical ultimate bearing capacity of pile foundation were analyzed. Regression equation fitting was carried out, and the calculation formula of vertical bearing capacity of pile foundation in loess valley area was established. The results show that the slope coefficient has a

收稿日期:2020-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51308055)

作者简介:解 刚(1971-),男,陕西西安人,高级工程师,E-mail:56602396@qq.com。

通信作者:赵宝俊(1980-),男,陕西神木人,高级工程师,工学博士,博士后,E-mail:397254022@qq.com。

significant coupling relationship with the slope distance in pile foundation bearing capacity calculation, and the correlation of the bridge pile foundation side friction to corresponding factor increases with its decrease. The effect of scour and steep slope topography on the pile end friction is weak, but the effect on the pile side friction is large. The vertical ultimate bearing capacity of the pile foundation has a negative correlation with the depth of water scour. The lower the depth value is, the greater the influence of each stage of scour is. Compared with the model test results, the influence degree deviation of the formula is smaller, and the formula has good accuracy and practicability, which can provide reference for the design and calculation of similar pile foundation.

**Key words:** bridge engineering; loess valley topography; pile foundation; ultimate bearing capacity; erosion effect

0 引言

黄土高原的土质多孔疏松,地表侵蚀作用强烈,沟壑纵横,降水分布不均,水土流失严重,形成了残塬、峁、梁和沟壑等多种地貌单元形态<sup>[1-2]</sup>。

黄土地区沟壑地形坡陡沟深,公路桥梁往往沿山体前缘布设,桥梁墩台设置在高陡坡甚至高急坡处,在桥梁运营期间,由于集中排水或山洪爆发极易使桩周土体遭受冲刷,导致有效桩长不足,桩基承载力降低,影响结构安全。针对桩基的竖向承载能力,国内外科研院所、专家学者开展了丰富而卓有成效的理论和实践研究。研究人员运用刚-塑性体理论,对不同形式滑动造成的破坏进行推导,得出对应的承载力计算方式<sup>[3-5]</sup>。Lin 等<sup>[6-8]</sup>通过考虑冲刷后的剩余沙土应力历史效应,研究分析冲刷对桥梁桩基承载能力的影响。汤虎等<sup>[9-10]</sup>通过对冲刷条件下单桩承载力进行理论与数值模拟分析研究,表明冲刷作用对单桩承载力影响极大。李飒等<sup>[11-12]</sup>通过对 131 根桩基的测试数据进行分析,对桩基承载力恢复规律进行研究,并提出评价桩基承载力恢复的指标。

综上所述,目前针对冲刷效应对斜陡坡桩基承载力的研究大多集中于冲刷对桩基的受力性能与影响因素方面,鲜有考虑冲刷效应后的斜陡坡桩基承载力计算方法的研究报道。本文针对黄土沟壑地区地形与水流冲刷效应,分析桥梁桩基的边坡系数、临坡距和局部冲刷深度等因素对黄土沟壑地形桥梁桩基竖向承载能力造成的影响,并进一步通过修正传统模式中的经验公式,设立一种更为有效的计算模式进行黄土陡坡桩基承载力测算。

1 工程背景

某高速公路穿越黄土高原腹地,沿线地形以沟

谷、峁、梁居多,多采用标准跨径桥梁。桥梁桩基多为摩擦桩,沿高陡坡布置,或临边一侧土体削切,在连续强降雨影响下,桥梁桩基容易出现冲刷病害(图 1),严重影响桥梁桩基承载能力。



图 1 桩基水毁病害  
Fig. 1 Water Damage of Pile Foundation

2 桩基竖向承载力计算模型

2.1 基本假定

针对黄土沟壑地区桥梁桩基设计问题,桩基的承载能力对桥梁结构安全至关重要,考虑经济效益,综合研究论证相关影响因素对桩基承载能力的影响程度,选取合理的设计方案显得尤为重要。本文分析计算采用如下假定<sup>[13-14]</sup>:①各层土体均为各向同性的弹塑性体;②不考虑施工因素对桩周土体的影

响;③不考虑桩基的塑性变形。

### 2.2 计算公式

极限状态下黄土沟壑地区桥梁桩基端部的摩阻力  $R_{pu}$  和侧部的摩阻力  $R_{su}$  共同构成该桥梁桩基的竖向极限承载力  $R$ ,即

$$R=R_{pu}+R_{su} \tag{1}$$

对于处于平坡地形时的桩端摩阻力  $R_{pu}$ ,计算公式为

$$R_{pu}=\begin{cases} A_p q_r=A_p m_0 \lambda \{ [f_{a0}]+k_2 \gamma_2 (h-3) \} & \text{摩擦桩} \\ c_1 A_p f_{rk} & \text{嵌岩桩} \end{cases} \tag{2}$$

式中: $A_p$  为桩端横截面面积; $q_r$  为桩端土承载力容许值; $m_0$  为清底系数; $\lambda$  为施工对桩端阻力的影响系数; $[f_{a0}]$  为桩端土的承载力标准值; $k_2$  为承载力标准值随深度的修正系数; $\gamma_2$  为桩端以上各层土的加权平均重度; $h$  为桩端的埋置深度; $c_1$  为桩阻发挥系数; $f_{rk}$  为桩底岩层的承载力标准值。

对于处于平坡地形时的桩侧摩阻力  $R_{su}$ ,其计算公式为

$$R_{su}=\mu \sum_{i=1}^n l_i q_{ik}+l_{si} q_{sik}=\mu \sum_{i=1}^n l_i [\sigma_h \tan (\delta)+c]+l_{si} q_{sik} \tag{3}$$

式中: $\mu$  为桩身长度; $l_i$  为桩侧第  $i$  层土体深度; $q_{ik}$  为桩侧第  $i$  层的侧摩阻力极限值; $l_{si}$  桩基的嵌岩深度; $q_{sik}$  为桩基嵌岩部分的侧摩阻力极限值; $\sigma_h$  为土的水平应力; $\delta$  为桩土之间的内摩擦角; $c$  为桩土之间的黏聚力。

## 3 数值模拟分析

### 3.1 数值模型

针对桩基与周边土体的作用效应研究,通过建立土体与桩基的接触面来模拟实际接触情形,并采用三维空间模型来更好地模拟桩基在土体中的受力状态<sup>[15-16]</sup>。

针对模型精度,综合考虑计算的精准性,采用FLAC3D三维分析软件建立1/2桩土的计算模型(图2),桥梁桩基的直径 $D$ 取值1 m,桩长 $L=15$  m,横向土体取10倍桩径,边坡系数变化直接导致边坡前土体结构取值变化,设定边坡后土体结构长度为20 m,桥梁桩周土体结构厚度为30 m。

#### 3.1.1 参数选取

土体采用摩尔库仑准则的弹塑性本构模拟,参考相关工程实例与《工程地质手册》<sup>[17]</sup>,选取土体与桩基的计算参数如表1所示。桩土接触通过在桩基

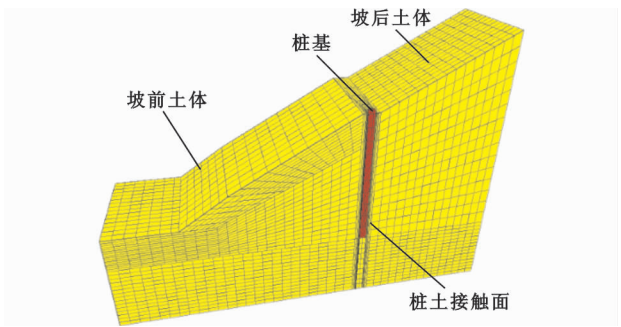


图2 斜陡坡桩基有限差分模型

Fig. 2 Finite Difference Model of Pile Foundation on Slope

表1 土体及桩基计算参数

Tab. 1 Calculating Parameters for Soil and Pile

参数	桩基	桩周土体
重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	25.0	18.3
弹性模量/MPa	30 000.0	19.0
泊松比	0.30	0.32
体积模量/MPa	24 000.0	17.5
剪切模量/MPa	14 000.0	7.2
黏聚力/kPa		15
内摩擦角/(°)		30

与土体之间设置的接触面来实现,参考文献[18]并经过试算后选取接触面法向刚度 $k_n=2\times10^8$  Pa·m<sup>-1</sup>,切向刚度 $k_s=2\times10^6$  Pa·m<sup>-1</sup>,黏聚力为10 kPa,内摩擦角为28°。

#### 3.1.2 计算方案

为分析边坡系数、临坡距及冲刷深度对斜陡坡桥梁桩基承载力的影响规律,制定如下计算方案:

(1)边坡的相关系数 $m$ 取值不同对桥梁桩基的承载特性影响也不同。 $m$ 分别取值为3.72,1.72,1,0.58。

(2)分析临坡距 $B$ 变化对桩基承载特性的影响。临坡距定义为桩基中心位置距坡前土体边缘的水平距离。临坡距取值为 $D,2D,4D,6D,8D,10D$ 。

(3)为研究局部不同冲刷深度对桥梁桩基承载能力所造成的影响,冲刷深度取值按照1 m递增,取值范围为1~10 m。

#### 3.1.3 极限承载力确定

对于本文所采用的模型,其桩径较小,土质为黄土,上部结构对不均匀沉降较为敏感。针对现有研究成果综合考虑后,极限状态下桥梁桩基的竖向承载力取值考虑采用桩沉降4 cm时的数值<sup>[19]</sup>。

### 3.2 斜陡坡对桩基承载能力的影响分析

针对斜陡坡桩基的受力特点,分析在临坡距与边坡系数变化时,桩基竖向承载力的变化趋势。

3.2.1 边坡系数的影响分析

计算分析在临坡距一定时,不同边坡系数下的桩基竖向极限承载力,汇总后得到的结果如图 3 所示。

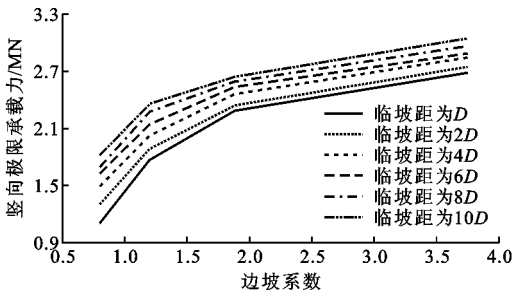


图 3 边坡系数对桩基竖向极限承载力的影响  
Fig. 3 Effect of Slope Coefficient on Vertical Ultimate Bearing Capacity of Pile Foundation

从图 3 分析可知,极限状态下桥梁桩基的竖向极限承载力随着边坡系数增加而增大,而坡距对其产生的影响程度逐渐减弱。当桥梁桩基的边坡系数取值为 0.58 时,不同临坡距下的桩基竖向极限承载力最大相差 723 kN;取值为 3.72 时,不同临坡距下的桩基竖向极限承载力最大相差 365 kN。

3.2.2 临坡距的影响分析

计算分析在边坡系数一定时,不同临坡距下的桩基竖向极限承载力,汇总后得到的结果如图 4 所示。

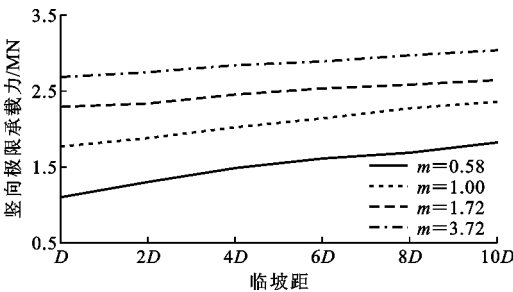


图 4 临坡距对桩基竖向极限承载力的影响  
Fig. 4 Effect of Slope Spacing on Vertical Ultimate Bearing Capacity of Pile Foundation

从图 4 分析可知,桩基竖向极限承载力随坡距增加,边坡系数对其影响降低。坡距取值为  $D$  时,不同边坡系数条件下桥梁桩基的竖向极限承载能力差值最大可达 1 500 kN;坡距取值为  $10D$  时,不同边坡系数条件下桥梁桩基的竖向极限承载能力差值可达 1 200 kN。

3.2.3 耦合影响分析

根据以上研究可知,边坡系数和坡距对桥梁桩基的承载能力影响呈现相关性。为了分析两者对桩

基承载能力的影响贡献程度,分别分析在不同临坡距与边坡系数下桩侧极限摩阻力与桩端极限摩阻力,计算结果如表 2,3 所示。

表 2 桩侧极限摩阻力

Tab. 2 Pile Side Ultimate Friction

边坡系数	不同临坡距时的桩侧极限摩阻力/kN					
	$B=D$	$B=2D$	$B=4D$	$B=6D$	$B=8D$	$B=10D$
平坡	2 972	2 972	2 972	2 972	2 972	2 972
3.72	2 256	2 320	2 415	2 458	2 540	2 614
1.72	1 857	1 910	2 030	2 107	2 157	2 210
1.00	1 339	1 450	1 593	1 712	1 846	1 925
0.58	676	869	1 052	1 184	1 264	1 395

表 3 桩端极限摩阻力

Tab. 3 Pile End Ultimate Friction

边坡系数	不同临坡距时的桩端极限摩阻力/kN					
	$B=D$	$B=2D$	$B=4D$	$B=6D$	$B=8D$	$B=10D$
平坡	430	430	430	430	430	430
3.72	428	428	428	428	429	429
1.72	428	428	428	428	428	429
1.00	426	426	426	427	428	428
0.58	425	425	426	426	426	427

从表 2,3 分析可知,桥梁桩基端部摩阻力受边坡计算和坡距变化影响不大,而桥梁桩基侧部摩阻力受边坡系数和坡距变化影响较明显。为进一步研究其影响变化程度及潜在的规律性,建立三要素耦合构架图,如图 5 所示。

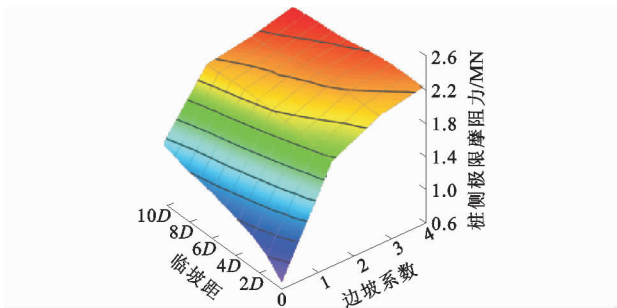


图 5 桩侧摩阻力耦合分析图

Fig. 5 Coupling Analysis Diagram of Pile Side Friction

耦合分析能够考虑边坡系数与临坡距 2 个参数直接的耦合影响。图 5 显示其三维关系为曲面,而采用正交分析其三维关系图必然为平面,因此进行耦合分析能够更准确反映 2 个因素对桩侧极限摩阻力的影响。从图 5 可以总结出极限状态下桥梁桩基侧部摩阻力在边坡系数和坡距两要素耦合关系作用下的发展规律:①桥梁桩基侧部摩阻力对应坡距的关联性随边坡系数增加而增加,反之降低,边坡系数取值超过 3.73 条件下,其关联性可忽略不计;②桥



梁桩基侧部摩阻力对应边坡系数的关联性随坡距增加而增加,反之降低,坡距取值超过  $10D$  条件下,其关联性可忽略不计;③桥梁桩基侧部摩阻力受边坡系数和坡距取值影响,该两要素的影响呈互相关联性,即该两者要素之中任一要素发生变化都会对桥梁桩基侧部摩擦力产生影响,坡距降低而边坡系数增大条件下,对桥梁桩基侧部摩擦力产生的影响性越大。

3.3 冲刷深度对桩基承载力的影响分析

本文在桩基设计研究过程中,选取对桩基承载力影响最大时的斜陡坡桩-土相互作用模型(边坡系数 3.72,临坡距为  $D$ ),考虑不同冲刷深度下的桩基竖向承载力并得到桩基荷载-沉降( $P$ - $S$ )曲线如图 6 所示。

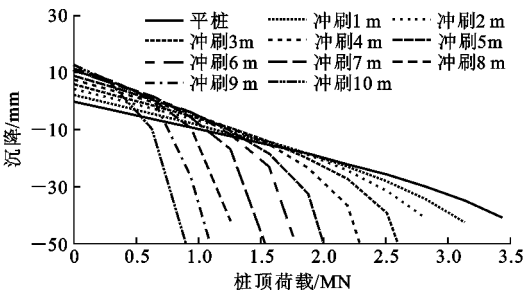


图 6 不同冲刷深度下桩基  $P$ - $S$  曲线

Fig. 6  $P$ - $S$  Curves of Pile Foundation Under Different Scouring Depths

极限状态下桥梁桩基竖向极限承载能力取值为桩基沉降量 4 cm 条件下桩顶荷载值,将得到的结果汇总,如图 7 所示。

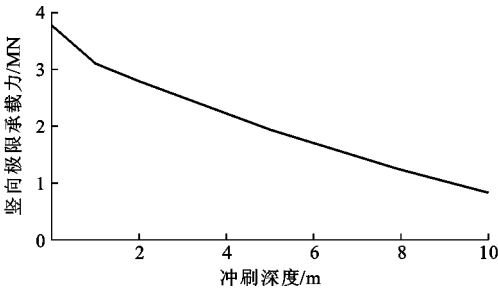


图 7 冲刷深度对桩基竖向极限承载力影响曲线

Fig. 7 Influence Curve of Scour Depth on Vertical Ultimate Bearing Capacity of Pile Foundation

从图 6,7 分析可知,随着冲刷深度的增加,桩基沉降速率不断加快,并与桩基竖向极限承载力呈负相关关系。在初始冲刷发生时,桩基竖向极限承载力下降最大,减少幅度为 14.67%;随着冲刷深度的增加,桩基竖向极限承载力下降程度逐渐趋缓,表明此时冲刷对桩基承载力的影响逐渐减弱,因此对桩

周土体的初始防护尤为重要。

3.3.1 冲刷深度对桩端极限摩阻力的影响

极限状态条件下桥梁桩基端部、侧部摩擦力共同构成桥梁桩基的极限承载能力,针对雨水冲刷产生的不利影响,通过计算研究得出局部冲刷的深度在竖向承载力极限状态下的桥梁桩端极限摩阻力(图 8)。

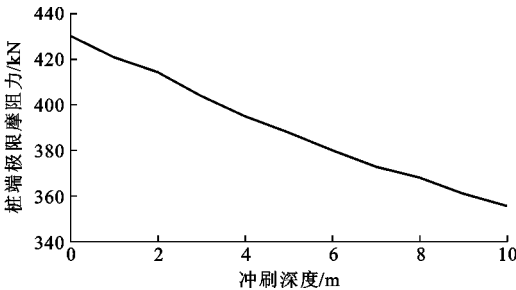


图 8 冲刷深度对桩端极限摩阻力影响曲线

Fig. 8 Influencing Curve of Scouring Depth on Pile End Ultimate Friction

分析可知,冲刷深度与桩端极限摩阻力负相关,且线性关系明显。冲刷作用对桩端摩阻力的影响较弱,当冲刷深度从 0 m 增加到 10 m 时,桩端极限摩阻力减少幅度为 15.1%,约为 75 kN;按照规范公式计算,每冲刷 1 m 桩端摩阻力减少量为 84.25 kN,两者计算结果较为接近。

3.3.2 冲刷深度对桩侧摩阻力的影响

针对桥梁桩基侧部单位面积在极限状态下摩阻力和桩土之间的剪切强度关系<sup>[20]</sup>,并结合 Coulomb 理论强度,可知

$$q_{ik} = \sigma_h \tan(\delta) + c \tag{4}$$

根据公式(4)可以看出,桩基侧摩阻力由土体侧压力及桩土之间的黏聚力这 2 个因素引起,因冲刷作用并没有对桥梁桩基侧部土体的稳定性产生不利影响,由此可以认为由桩土之间黏聚力引起的桥梁桩基侧摩阻力不受影响。

为直观反映极限状态下桥梁桩基侧部摩擦力受雨水冲刷产生的不利影响,分别探究冲刷深度对土体侧压力产生的侧摩阻力及桩土黏聚力产生的侧摩阻力的影响。现将关联的两要素条件下的计算结果进行统计分析,结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出,冲刷深度与桩侧摩阻力呈负相关关系。从桩侧摩阻力的构成来看,由侧压力引起的侧摩阻力占主要部分,冲刷深度从 0 m 增加到 10 m,其摩阻力减少 2 486 kN,减小幅度为 89.65%,侧压力引起的侧摩阻力随着冲刷深度的增

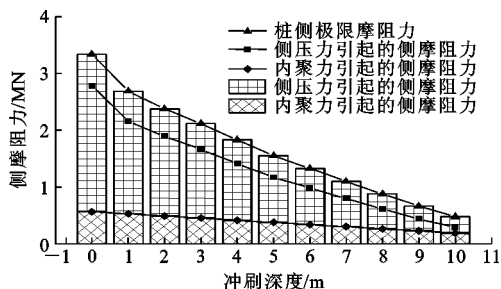


图 9 冲刷深度对侧摩阻力的影响曲线  
Fig. 9 Influence Curves of Scouring Depth on Pile Side Friction

加呈现显著降低,冲刷深度对侧压力的影响较大;由内聚力引起的侧摩阻力占总摩阻力的较少部分,冲刷深度从 0 m 增加到 10 m,其摩阻力减少 377 kN,减小幅度为 66.7%,内聚力产生的侧摩阻力减小程度占总体侧摩阻力减小程度的比例较低,说明冲刷深度对内聚力的影响较小。桥梁桩基的侧摩阻力在不同层级雨水冲刷条件下各不相同,并且随雨水冲刷深度增大而降低,主要原因是土体冲刷后,土体侧压力重分布,进而改变了侧压力引起的侧摩阻力。

## 4 考虑冲刷效应的斜陡坡桩基承载力计算方法

由前述分析可知,水流的局部冲刷作用及斜陡坡地形对桥梁桩基竖向极限承载力的影响较为突出,通过上述分析可得考虑冲刷效应的桥梁桩基竖向极限承载力计算公式如下

$$R = R_{pu}(h) + \mu\eta_1 \sum_{i=1}^n l_i [\eta_2 \sigma_h \tan(\delta) + c] \quad (5)$$

式中: $\eta_1$  为斜陡坡桩基侧摩阻力影响系数; $\eta_2$  为冲刷对侧压力引起的摩阻力的影响系数。

### 4.1 斜陡坡桩基侧摩阻力影响系数

因斜陡坡地形主要对桥梁桩基的侧摩阻力产生比较大的影响,端部摩阻力产生的影响较小,可以忽略不计。将斜陡坡对侧摩阻力的影响系数设定为  $\eta_1$ ,则  $\eta_1$  为斜陡坡桩基极限侧摩阻力与平坡桩基极限侧摩阻力的比值。计算不同工况下的  $\eta_1$ ,结果如表 4 所示。

采用麦考特法的通用全局优化算法<sup>[21]</sup>进行迭代回归,最终影响系数  $\eta_1$  ( $0 \leq \eta_1 \leq 1$ ) 可表示为

$$\eta_1 = \frac{-0.66 + 2.09m + 0.041B}{1 + 2.18m - 0.035B} \quad (6)$$

该公式仅适用于临坡距  $B < 20$  m 的情况,当  $B \geq 20$  m 时可近似认为  $\eta_1$  为 1;若  $\eta_1 < 0$ ,则  $\eta_1$  按 0 计算。

表 4 各工况下桩侧摩阻力影响系数

Tab. 4 Influence Coefficients of Pile Side Friction Under Different Working Conditions

边坡系数	不同临坡距时的桩侧摩阻力影响系数					
	$B=D$	$B=2D$	$B=4D$	$B=6D$	$B=8D$	$B=10D$
平坡	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3.72	0.759	0.781	0.813	0.827	0.855	0.880
1.72	0.625	0.643	0.683	0.709	0.726	0.744
1.00	0.451	0.488	0.536	0.576	0.621	0.648
0.58	0.227	0.292	0.354	0.398	0.425	0.469

### 4.2 冲刷对侧压力引起的摩阻力影响系数

由前述分析可知,由侧压力引起的桩侧摩阻力为桩侧摩阻力的主要组成部分,且对冲刷效应较为敏感,故将冲刷对侧压力引起的侧摩阻力影响系数设为  $\eta_2$ ,则  $\eta_2$  为雨水冲刷条件下桩基侧向受压产生的摩擦阻力与未受雨水冲刷条件下桩基侧向受压产生的摩擦阻力的比值。不同比值条件下的  $\eta_2$  汇总如表 5 所示。

表 5 不同冲刷比值下桩侧压力引起的摩阻力

Tab. 5 Friction Caused by Pile Side Pressure Under Different Scouring Ratios

$\eta_2$	0	1/15	2/15	1/5	4/15	1/3
侧压力造成的侧摩阻力/kN	1.000	0.769	0.677	0.587	0.518	0.424
$\eta_2$	2/5	7/15	8/15	3/5	2/3	
侧压力造成的侧摩阻力/kN	0.345	0.279	0.223	0.157	0.102	

使用基于麦考特法的通用全局优化算法进行迭代回归,确定参数  $\eta_2$ ,即

$$\eta_2 = 0.998 - 0.575\chi + 0.062\chi^2 - 0.666\sqrt{\chi} \quad (7)$$

式中: $\chi$  为冲刷深度与原桩长的比值,且  $\chi \leq 1$ 。

### 4.3 桩基承载力计算公式

根据前述理论及模型,考虑冲刷效应的黄土沟壑地形桥梁桩基的竖向极限承载力归纳为以下一般形式,即

$$R = R_{pu}(h) + \mu\eta_1 \sum_{i=1}^n l_i [\eta_2 \sigma_h \tan(\delta) + c] + l_{si} q_{sik} \quad (8)$$

### 4.4 桩基承载力计算公式验证

为了验证本文所提出的考虑冲刷效应的黄土沟壑地形桩基承载力计算公式的准确性,将研究得出的数据与现有相关研究成果<sup>[22]</sup>进行综合分析,并将研究结果进行比对和汇总。

文献<sup>[22]</sup>选取桩径 60 mm,桩长分别选取 40, 60, 80, 100 cm 的陡坡桩基为例进行试验,边坡坡度

分别选取平坡、 $30^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 、 $75^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ 进行试验。为了表示坡度变化对桩基承载力的影响程度,定义坡度变化影响度为平坡下桩基承载力和不同边坡系数下桩基承载力的差值与平坡下桩基承载力之比,试验数据与本文影响度对比如表 6 所示。

表 6 试验数据与本文影响度对比

Tab. 6 Comparison of Test Data and Influence Degree of This Paper

桩长/cm	平坡		$m=1.72$		$m=1.00$		$m=0.58$		$m=0.26$		$m=0.00$	
	试验影 响度	本文影 响度	试验影 响度	本文影 响度	试验影 响度	本文影 响度	试验影 响度	本文影 响度	试验影 响度	本文影 响度	试验影 响度	本文影 响度
40	0	0	0.065	0.105	0.107	0.152	0.187	0.209	0.231	0.276	0.276	0.276
60	0	0	0.063	0.105	0.104	0.152	0.184	0.209	0.229	0.276	0.276	0.276
80	0	0	0.060	0.105	0.105	0.152	0.179	0.209	0.223	0.276	0.276	0.276
100	0	0	0.058	0.105	0.094	0.152	0.176	0.209	0.219	0.276	0.276	0.276

5 结 语

(1)根据桥梁桩基受力特性,综合考量不同因素对桩端、桩侧摩阻力所造成的影响,依据不同因素的影响程度对计算公式中的参数进行修正,进一步提高桥梁桩基竖向承载力计算结论的精准性。

(2)桥梁桩基的侧摩阻力受斜陡坡地形影响显著,而端部摩阻力受该条件影响则偏低。桥梁桩基侧摩阻力受边坡计算和坡距取值影响,该两要素的影响呈互耦关联性,且桥梁桩基侧部摩阻力变化量随该两要素数值下降而减小,关联敏感性也同步减低。

(3)桥梁桩基侧压力、内聚力共同构成桩基侧向摩阻力,其中侧压力起主要作用;侧压力与水流局部冲刷深度表现为非线性关系,冲刷深度增加,其敏感性不断减弱。

(4)通过数值模拟研究,利用回归分析得到冲刷及斜陡坡的影响系数,提出考虑冲刷效应的斜陡坡桩基竖向承载力计算公式;计算结果与试验结果相比影响度偏差较小,且本文方法更偏于安全。所提出的计算公式可为同类工程提供参考。

(5)实践中桥梁桩基承载力受不同因素综合作用,后续可进一步研究桩基长度和直径等变量因素对桩基承载力的影响机理,促进桩基承载力计算公式的应用广度和准确性。

参考文献:

References:

[ 1 ] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985.  
LIU Dong-sheng. Loess and Environment[M]. Bei-  
jing:Science Press,1985.

从表 6 可以看出,本文所得结果与文献数据相比,两者影响度偏差较小,且本文所得结果更偏于安全。因此,本文提出的考虑冲刷效应的斜陡坡桩基承载力计算公式具有较好的准确性与实用性,可用于桩基承载力的安全评估工作。

[ 2 ] 刘东生. 黄土与环境[J]. 西安交通大学学报:社会科学版,2002,22(4):7-12.  
LIU Dong-sheng. Loess and Environment[J]. Journal  
of Xi'an Jiaotong University:Social Sciences,2002,22  
(4):7-12.  
[ 3 ] 李 静. 黄土坡面水蚀模拟的关键技术研究[D]. 杨  
凌:西北农林科技大学,2008.  
LI Jing. Research of Key Technology of Water Ero-  
sion Simulation in Loess Slope[D]. Yangling:North-  
west A&F University,2008.  
[ 4 ] VESIC A S. Expansion of Cavities in Infinite Soil  
Mass[J]. Journal of the Soil Mechanics and Founda-  
tions Division,1972,98(3):265-290.  
[ 5 ] BROWN S F. Soil Mechanics in Pavement Engineer-  
ing[J]. Geotechnique,1996,46(3):383-426.  
[ 6 ] 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 Geotech-  
nics,2010,37(7/8):1008-1014.  
[ 7 ] 赵明华,杨超炜,杨明辉,等. 基于有限杆单元法的陡  
坡段桥梁桩基受力分析[J]. 中国公路学报,2014,27  
(6):51-58,108.  
ZHAO Ming-hua, YANG Chao-wei, YANG Ming-  
hui,et al. Mechanical Analysis of Bridge Pile Founda-  
tion in High and Steep Slopes Based on Finite Bar El-  
ement Method[J]. China Journal of Highway and  
Transport,2014,27(6):51-58,108.  
[ 8 ] 赵明华,尹平保,杨明辉,等. 高陡斜坡上桥梁桩基受  
力特性及影响因素分析[J]. 中南大学学报:自然科学  
版,2012,43(7):2733-2739.  
ZHAO Ming-hua, YIN Ping-bao, YANG Ming-hui,  
et al. Analysis of Influence Factors and Mechanical  
Characteristics of Bridge Piles in High and Steep

- Slopes[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(7): 2733-2739.
- [9] 汤虎. 冲刷对海洋平台桩基水平承载性能影响的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- TANG Hu. Investigation of the Scouring Effect on Lateral Load Capability of Offshore Platform's Pile Foundation[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [10] 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 Zhong-ju, WANG Hang, WEI Jin, 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.
- [11] 李飒, 李婷婷, 张树德, 等. 基于实测数据的桩基承载力恢复计算与分析[J]. 工程力学, 2018, 35(6): 182-190.
- LI Sa, LI Ting-ting, ZHANG Shu-de, et al. A Study on Pile Setup Based on Measured in Situ Data[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(6): 182-190.
- [12] 黄生根, 龚维明. 大直径超长桩压浆后承载性能的试验研究及有限元分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 297-301.
- HUANG Sheng-gen, GONG Wei-ming. Test Study and Finite Element Analysis of Bearing Behavior of Large Diameter Overlength Piles After Grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 297-301.
- [13] 赵宝俊, 葛守飞, 郝宪武. 黄土地区沟谷地形梁桥下部结构病害与防护对策研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2013(11): 144-146.
- ZHAO Bao-jun, GE Shou-fei, HAO Xian-wu. Study on the Damage and Protection of the Bridge Lower Structure of Gully in Loess Region[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Applied Technology Edition, 2013(11): 144-146.
- [14] 栾娟, 郝宪武, 赵宝俊. 黄土沟壑地形斜坡对桩基承载力的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2016, 36(6): 62-68.
- LUAN Juan, HAO Xian-wu, ZHAO Bao-jun. Effect of Loess Gully Slope Terrain on Bearing Performance of Pile Foundation[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2016, 36(6): 62-68.
- [15] 王鼎. 沟谷地形桩基竖向极限承载力评价方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- WANG Ding. Research on Evaluation Method of Ultimate Vertical Bearing Capacity of Pile Foundation in Valley Terrains[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [16] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- CHEN Yu-ming, XU Ding-ping. FLAC/FLAC3D Foundation and Engineering Examples[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.
- [17] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- Editorial Board of Engineering Geology Manual. Engineering Geology Manual[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [18] 孙书伟, 林杭, 任连伟. FLAC3D 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- SUN Shu-wei, LIN Hang, REN Lian-wei. Application of FLAC3D in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011.
- [19] 郭莹, 董秀竹, 栾茂田. 《建筑地基基础设计规范》承载力的确定方法研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 474-477.
- GUO Ying, DONG Xiu-zhu, LUAN Mao-tian. Study on the Method for Determining the Bearing Capacity in "Code for Soil Foundation of Building"[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 474-477.
- [20] HU H S, TANG M X, ZHANG C L. Experimental Study on Side Friction of Uplift Bored Piles in Soft Rock[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405-408: 248-251.
- [21] MOMENI E, NAZIR R, JAHED ARMAGHANI D, et al. Prediction of Pile Bearing Capacity Using a Hybrid Genetic Algorithm-based ANN[J]. Measurement, 2014, 57: 122-131.
- [22] 高璇. 陡坡地段桥梁嵌岩桩基竖向承载特性模型试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- GAO Xuan. Model Test on the Vertical Load-bearing Characteristics of Bridge Rock-socket Pile Foundation in Abrupt-slope Area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.