

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.016

黄土山区冲沟地形对桥梁桩基有效桩长影响研究*

王磊¹, 刘晓健², 刘志华¹, 杨国俊³, 郭震山¹

(1. 山西交通科学研究院集团有限公司桥梁工程防灾减灾山西省重点实验室, 山西太原 030006; 2. 陕西省高速公路建设集团公司, 陕西西安 710075; 3. 兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃兰州 730050)

摘要:为全面了解黄土山区冲沟地形对桥梁桩基有效长度的影响,在对山西省典型黄土山区桥梁下部全面调查的基础上,依据黄土地区现场桩基静载试验,应用FLAC^{3D}建立黄土山区地形桥梁桩基有限差分模型,分析了不同坡度、临坡距、桩长变化对桩基有效桩长的影响,揭示了桩基承载力、桩侧摩阻力、桩端阻力及有效桩长变化规律,并依据计算结果提出相关工程技术建议。研究表明:一定桩长时,斜坡坡度、临坡距变化对桩侧摩阻力产生不同程度影响,对桩端阻力影响不大;坡度越大,临坡距越小,桩侧摩阻力减小幅度越显著,最大为70.89%;坡度较小、临坡距较大时,增长桩长使桩侧摩阻力从95.99%提高至99.71%;桩侧摩阻力变化的根本原因是桩基有效长度发生改变,桩基有效桩长折减程度同斜坡坡度及桩基临坡距有关,与桩长无关;建立的桩基有效长度计算公式可为黄土山区冲沟地形条件桩基设计提供技术借鉴。

关键词:黄土冲沟地形; 桥梁桩基; 有效桩长; 坡度; 临坡距

中图分类号: U443.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0614-09

Influence of Gulch Topography on Effective Length of Bridge Pile Foundation in Loess Hilly Area

WANG Lei¹, LIU Xiaojian², LIU Zhihua¹, YANG Guojun³, GUO Zhenshan¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Bridge Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shanxi Transportation Technology Institute Group Co., Ltd., Taiyuan 030006, China;

2. Shaanxi Expressway Construction Group Company, Xi'an 710075, China;

3. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on widely investigation on bridges foundation in loess area of Shanxi province and on-site pile static loading test, the parameters of slope gradient, slope distance and pile length were analyzed to study the influence of gulch topography on effective length of bridge pile in loess hilly area. By means of the FLAC3D finite analysis, the change rules of ultimate bearing capacity, pile lateral friction, tip resistance and effective pile length were obtained, and furthermore some suggestions for engineering were provided. The research shows that: with certain pile length, the slope gradient and slope distance have great influence on pile lateral friction, and has little influence on tip resistance. More-

* 收稿日期:2018-07-17;修回日期:2018-10-15

基金项目:山西省交通运输厅科技项目(2017-1-23)、山西交通控股集团有限公司科技项目(19-JKKJ-9)、甘肃省自然科学基金项目(2017GS10911)资助

作者简介:王磊(1988-),男,工程师,工学硕士。主要从事特殊地区桥梁防灾减灾与安全风险评估。

Email:741902424@qq.com

over, the lateral friction of the pile gradually reduces with increase of slope angle and decrease of distance to the slope. The reduction can reach 70.89%. The lateral friction can rise from 95.99% to 99.71% by elongating the pile length for the ground with small slope angle or long distance to the slope. The basic influence factor on lateral friction is the effective length of the pile. The reduction coefficient of the effective length of the pile is independent of pile length, and closely related to the slope gradient and the distance to the slope. Finally, the calculation formula of pile effective length is provided, which gives an effective technical reference for pile design in gulch topography of loess hilly area.

Keywords: loess gulch topography; bridge pile; pile effective length; slope gradient; slope distance

引 言

桥梁沟壑是黄土山区特有的地形地貌^[1],“一带一路”战略的实施,进一步促进了中西部山区高等级公路的大发展,穿越黄土山区的公路桥梁越来越多^[2];桥址黄土冲沟根据宽度和坡度可分为宽缓型、宽陡型和窄陡型3类^[3];采用标准跨径的山区桥梁,其下部结构主要以单排双柱式桥墩、摩擦桩为主,部分窄陡、宽陡地形冲沟底部为矩形或空心墩;桥梁下部结构沿黄土冲沟高低布设,桥墩台的边坡为高陡坡甚至为高急坡(图1)。

赵宝俊等^[4]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;陈帝江^[5]通过研究有效桩长与坡度、实际桩长、桩径的相关关系,回归分析得出有效桩长的计算公式;牛富生等^[6]在黄土斜坡现场桩基竖向荷载试验研究的基础上,认为失效桩长长度与坡度、坡体土质等因素有关,并建议将3倍桩径深度作为失效桩长计算;冯忠居等^[7]基于反映黄土冲沟区域桩基特点与工作性能的模型试验平台,分析了不同冲沟坡度、不同桩长的桩基承载特性变化规律,指出随着坡度增加,相同入土深度下的有效桩长逐渐减小;龚先兵等^[8]以现场工程为原型,设计了45°、60°和75°三种不同斜坡下桥梁桩基的室内模型试验,对竖向荷载作用下桩基的荷载传递规律及桩侧土压力分布规律进行了研究;栾娟等^[9]结合西部黄土沟壑地形斜坡的工程地质特点,采用有限元计算分析了黄土沟壑地形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;李晋等^[10]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。这些研究均表明斜坡外侧土体缺失对桩基承载力产生不同程度影响。但总体来看,针对黄土山区冲沟地形对桥梁桩基有效

长度影响的问题多是针对具体工程或经验性总结,至今鲜有系统的研究成果。需要特别指出的是,黄土山区桥址在桥梁建设阶段开挖施工平台及通道,以及运营阶段桥址水毁都使冲沟地形发生改变,尤其是边坡近似90°直角的地形条件,运营期内高陡边坡水毁导致桥台前黄土不断崩塌后退,桩基临坡距减小,这些问题都导致黄土山区冲沟地形桥梁桩基承载机理远较平坡情况复杂,采用现有技术规范对冲沟地形条件桩基础的设计存在明显盲目性。

因此,在山西省黄土山区运营高速桥梁全面调查基础上,以河运(河津—运城)高速典型黄土地区桥梁桩基现场静载试验为依据,应用FLAC^{3D}有限差分对黄土山区冲沟地形桥梁桩基的承载特性进行深入研究,分析其有效桩长变化规律,提出工程技术建议,以期指导黄土山区冲沟地形桥梁桩基础的工程设计。

1 控制因素分析

结合黄土区域分布、高速修建年代、桥址地形地貌、桥梁下部结构类型等因素的综合考虑,对山西省岢临(S85)、临离(G59)、太佳(S50)、汾离(G20)4条高速公路、174座桥梁下部进行了全面调查,调查高速线路具体分布情况如图2所示。4条高速全部地处吕梁山以西,该山区沟壑纵横,为典型的半干旱大陆季风气候,夏、秋季雨量集中。

实际调查过程中,95%以上桥梁为标准跨径小箱梁或T梁,如图1典型黄土山区桥梁下部结构沿桥址冲沟地形高低布设,桥台基础几乎全部为桩柱式摩擦桩,桥台前浆砌片石急流槽呈曲线、折线、人字形、八字形、之字形等形式沿台前斜坡地形布设,由于特殊的地质、地形、地貌及水文气候,急流槽设计标准不完善、施工操作不规范、管理养护不到位,桥址台前水毁普遍严重,桥址水毁演变过程如图3

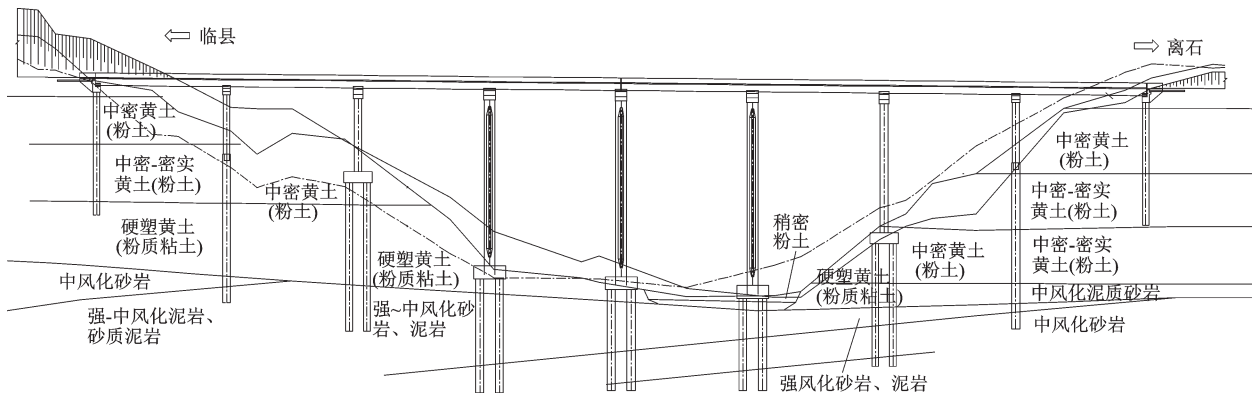


图1 典型黄土山区桥梁概貌

Fig.1 Topography and geomorphology of typical loess hilly area at bridge site



图2 调研高速公路分布

Fig.2 Distribution of surveyed expressway

所示。最为典型的是边坡近似90°直角的地形条件(图4),台前黄土不断崩塌后退,桩基临坡距减小。由此可见,黄土山区冲沟地形对桥台桩基影响最为显著,在设计阶段既要满足承载能力要求,还需充分考虑边坡水毁对桥台安全的影响。

文献[1]结合陕北吴定(吴起一定边)高速桥梁设计特点,指出黄土地区桥梁长度在控制上应“宁长勿短”,在陡坡段要求控制陡坡边缘与桥台间距(即临坡距)大于5 m;文献[9]研究表明,桩侧阻力随临坡距增大明显增大,从 D 变为 $2D$ 时,桩侧摩阻力最大增加了25%。文献[5]线性回归的有效桩长与实际桩长、坡度、桩径关系式,物理意义不明确;文献[6]提出斜坡桥梁桩基设计时,按《公路桥涵地基基础设计规范》^[11]中定义,对其桩侧摩阻力进行折减,计算结果本质上是对桩长进行了折减,其失效桩长计算依据特定条件下的试验结果,忽略了坡度、临坡距变化对失效桩长的影响;文献[7]给出了黄土斜坡地段桥梁桩基础有效长度计算公式, $L_v = h - \lambda_v \cdot d \cdot \tan\alpha$,其中 $\lambda_v \cdot d$ 为斜坡稳定距离, α 为斜坡坡度($30^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$);公式^[5-7]没有体现临坡距对有效桩长影响,不能直接应用于黄土山区冲沟地形

桥梁桩基有效长度的确定。

由以上分析可知,临坡距是影响桩基有效长度的重要因素,坡度是冲沟地形的显著特征,桩长是保证桩基承载能力的有效手段。本研究依据FLAC^{3D}有限差分重点分析坡度、临坡距、桩长对黄土山区桥梁桩基有效长度的影响。

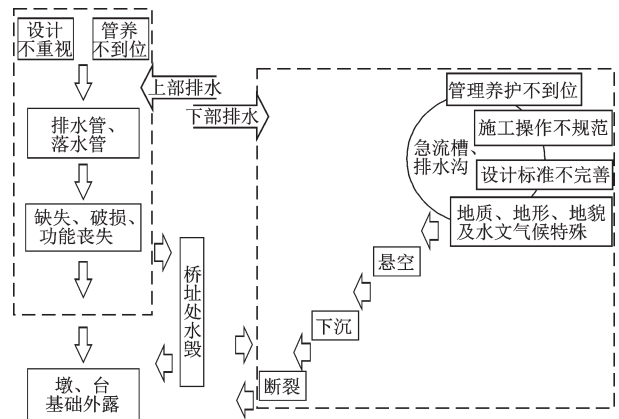


图3 桥梁下部水毁演变过程

Fig.3 Washout developing process of bridge substructure



图4 高陡边坡水毁崩塌

Fig.4 Washout and collapse of high & steep slope

2 黄土桩基静载试验

J.G.Potyondy^[12]和Y.B.Acer等^[13]的研究表明,FLAC^{3D}有限差分建立数值模型时,桩土界面之间的

摩擦参数是影响摩擦桩承载性能的关键因素。根据文献[14]的建议,依据河运高速典型黄土地区桥梁桩基现场静载试验结果,采用反演分析。先假定桩土界面的摩擦参数(摩擦角 δ 和黏聚力 c)是桩周土体摩擦参数小于1的一个倍数(α_1 、 α_2),模拟得出静荷载试验数据,并与现场静荷载试验数据对比,模拟 $P-s$ 曲线与现场 $P-s$ 曲线最接近的倍数值即

为桩土界面摩擦参数。

试验场地位于河运高速临猗北互通A匝道附近,地层完整,黄土厚度大,各土层的主要物理力学性能指标见表1。在除去地表土后挖20 m的桩孔,桩基弹性模量 $E=31.8$ GPa,泊松比 $\mu=0.25$,容重 $\gamma=25$ kN/m³。采用堆载法进行加载,桩顶沉降采用基准梁百分表进行观测,现场静载试验情况如图5所示。

表1 各土层主要物理力学性能指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil layers

岩性	层号	层厚/m	含水率 $\omega/\%$	容重/ (kN·m ⁻³)	孔隙 比 e	液限/ %	塑限/ %	饱和度 $S_r/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(\text{°})$	压缩模量 E_s/MPa	承载力基 本容许/ kPa
黄土	L ₁	7	9.1	14.2	1.12	27.7	16.8	31	18.0	22	10	125
古土壤	F ₁	1	12.0	14.8	0.89	26.8	17.0	51	43.8	24	21	128
黄土	L ₂	8	12.4	15.0	0.85	26.1	16.8	50	43.8	24	23	130
古土壤	F ₂	2	14.2	15.8	0.82	28.8	17.5	53	44.0	25	20	138
黄土	L ₃	5	15.5	15.8	0.84	27.8	17.3	55	44.0	25	16	142
古土壤	F ₃	3	15.5	15.1	0.83	27.8	17.4	51	49.2	22	21	155

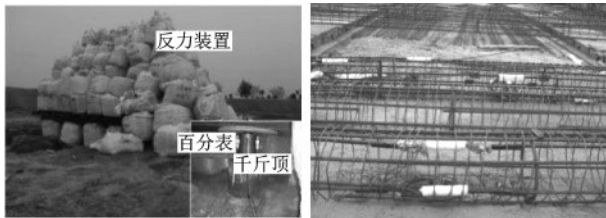


图5 现场桩基静载试验

Fig.5 On-site pile static loading test

结合现场静载试验建立FLAC^{3D}数值模型,模型如图6所示,几何尺寸取20 m×16 m×26 m,桩周土体采用Mohr-Coulomb模型,桩基本构为线弹性。桩土界面法向刚度 K_n 和剪切刚度 K_s 取值参照文献[15]。

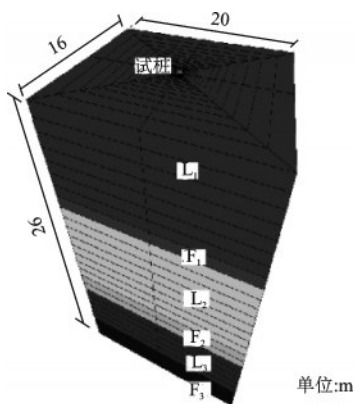


图6 桩基静载试验数值模型

Fig.6 Numerical model of pile static loading test

由桩基竖向极限承载力归一化结果(图7),FLAC^{3D}有限差分数值模型的桩土界面摩擦角 δ 和黏聚力 c 取0.80倍桩周土体摩擦参数值。

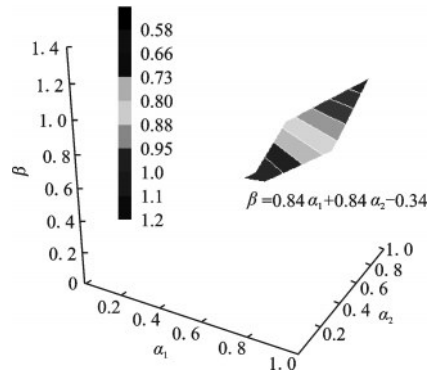


图7 桩基极限承载力归一化结果

Fig.7 Normalized result of pile ultimate bearing capacity

3 计算分析模型

根据文献[3]对黄土冲沟分类,桩基础设计过程中通过改变临坡距或桩长适应桥址边坡坡度和高度变化影响,桩径一般为定值。为分析坡度 r 、临坡距 S 及桩长 L 对桥梁桩基有效长度影响,拟定计算分析方案:坡度变化 r 为15°、30°、45°、60°、75°,临坡距变化 S 为 D 、 $2D$ 、 $4D$ 、 $6D$ 、 $8D$ 、 $10D$,桩长变化 L 为 $15D$ 、 $20D$ 、 $25D$ 、 $30D$, D 为桩基直径(本文 $D=1$

m),并以相应桩长对应的平坡条件为参照。

边坡桩基有限差分计算模型如图8所示,模型上表面设为自由边界,桩底土三向约束,桩侧及桩后土边界分别横向、纵向约束。为FLAC^{3D}有限差分模型特别是在高陡边坡条件下快速收敛,参考《工程地质手册》^[16]及工程经验^[17-19],桩侧土体不考虑层间差异,计算参数取表1黄土L₂,桩基计算参数见表2。桩土接触面法向刚度为260 MPa/m,剪切刚度为2.6 MPa/m,摩擦角 δ 、黏聚力 c 取L₂黄土摩擦参数的0.80倍。

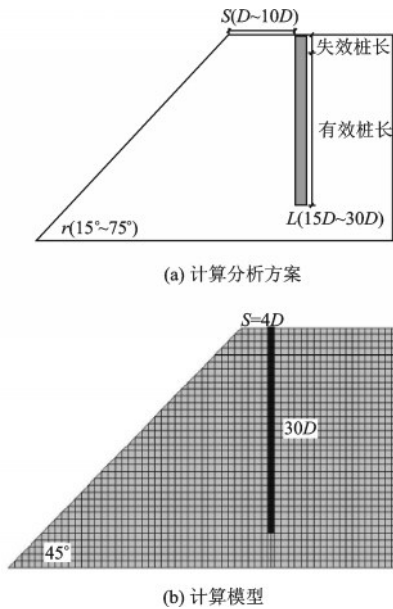


图8 边坡桩基有限差分模型

Fig.8 Finite difference model of slope pile foundation

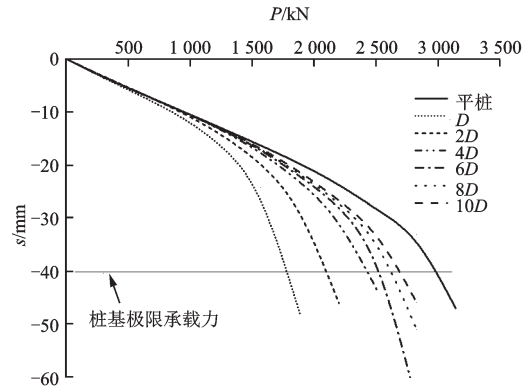
4 桩基有效长度变化规律分析

4.1 桩基极限承载力变化规律分析

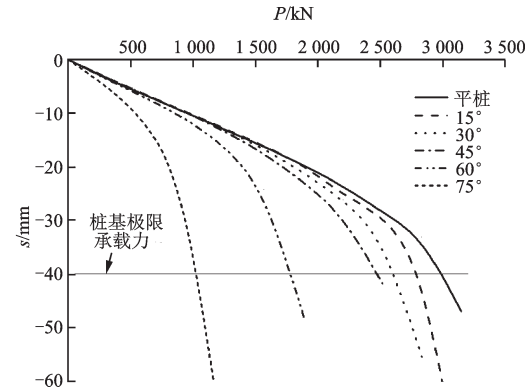
根据文献[6]的结论,有效桩长变化对桩基承载力影响显著。按桩顶沉降量控制桩基极限承载力,《公路桥涵地基基础设计规范》^[11]建议值取40~60 mm,本文取40 mm对应的荷载作为桩基极限承载力,不同参数条件下承载力变化 $P-s$ 曲线如图9所示。

从图9(a)可以看出,黄土冲沟边坡坡度、桩长一定条件下,增大临坡距,能显著提高桩基承载力,但增幅随距离增大而变小,最终趋于平缓;图9(b)表明,边坡坡度是影响冲沟地形桥梁桩基设计的主要因素, $r \leq 30^\circ$ 时,坡度变化对桩基承载力影响不大, $r > 30^\circ$ 时,桩基承载力大幅降低;特点地形条件

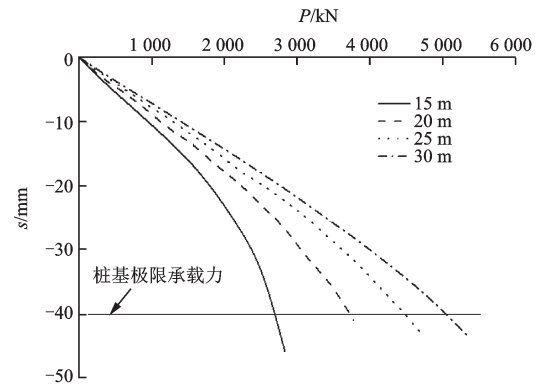
下,临坡距不变,桩长越长,桩基承载力越高;从图9(c)可以看出,桩长越长, $P-s$ 曲线越趋于线性,摩擦桩承载特性越明显。以上分析说明黄土山区冲沟地形桥梁桩基设计应充分考虑不同坡度、临坡距及桩长变化对桩基承载力的影响。



(a) 临坡距对桩基承载力影响($r=60^\circ L=15\text{ m}$)



(b) 坡度对桩基承载力影响($S=D L=15\text{ m}$)



(c) 桩长对桩基承载力影响($r=60^\circ S=10\text{ D}$)

图9 参数变化对桩基承载力影响 $P-s$ 曲线

Fig.9 $P-s$ curves of varied parameters to bearing capacity of pile foundation

4.2 桩侧摩阻力变化规律分析

利用定积分计算出参数变化下的桩基极限承载力对应的桩端阻力^[20],桩侧摩阻力用桩基极限承

承载力扣除相应的桩端阻力。一定桩长下,桩端阻力 P_d 分布见表2,随桩长变化的桩端阻力分布见表3,坡度、临坡距变化,及不同桩长对桩侧摩阻力 P_c 、桩端阻力 P_d 影响如图10所示。

由表2和图10可以看出,桩长不同时,坡度、临坡距变化对 P_c 影响显著, P_d 变化不明显,具体来看:

(1)随坡度增加,桩侧摩阻力呈减小趋势, $r \leq 30^\circ$ 时,坡度变化对桩侧摩阻力影响不大, $r > 30^\circ$ 时,桩侧摩阻力显著减小;临坡距越小,坡度变化的影响

越大。

(2)随临坡距增大,桩侧摩阻力不断增大, $D \sim 6D$ 时,临坡距变化对桩侧摩阻力影响显著,临坡距为 $6D \sim 10D$ 时,桩侧摩阻力变化不明显,逐渐趋于稳定;坡度越大,增大临坡距对提高桩侧摩阻力效果越明显。

(3)增加桩基长度能够显著提高桩侧摩阻力,桩长越长,桩侧摩阻力对小坡度($r \leq 30^\circ$)地形变化敏感性越低;不同桩长条件下,桩侧摩阻力在不同坡度、临坡距影响下的变化规律基本一致。

表2 临坡距、坡度变化时桩端阻力分布($L=30\text{ m}$)

Table 2 Distribution of pile tip resistance under varied slope distances and angles($L=30\text{ m}$)

单位:kN							
坡度	平坡	10D	8D	6D	4D	2D	D
15°	488	474	474	472	470	468	468
30°	488	469	467	465	463	461	460
45°	488	464	462	460	456	453	451
60°	488	455	452	450	448	447	445
75°	488	454	451	448	447	445	441

表3 桩长变化时桩端阻力分布($r=45^\circ$)

Table 3 Distribution of pile tip resistance under varied pile lengths ($r=45^\circ$)

单位:kN							
桩长/m	平坡	10D	8D	6D	4D	2D	D
15	398	386	383	379	375	367	366
20	445	425	424	421	418	416	416
25	471	451	448	444	442	441	440
30	488	464	462	460	456	453	451

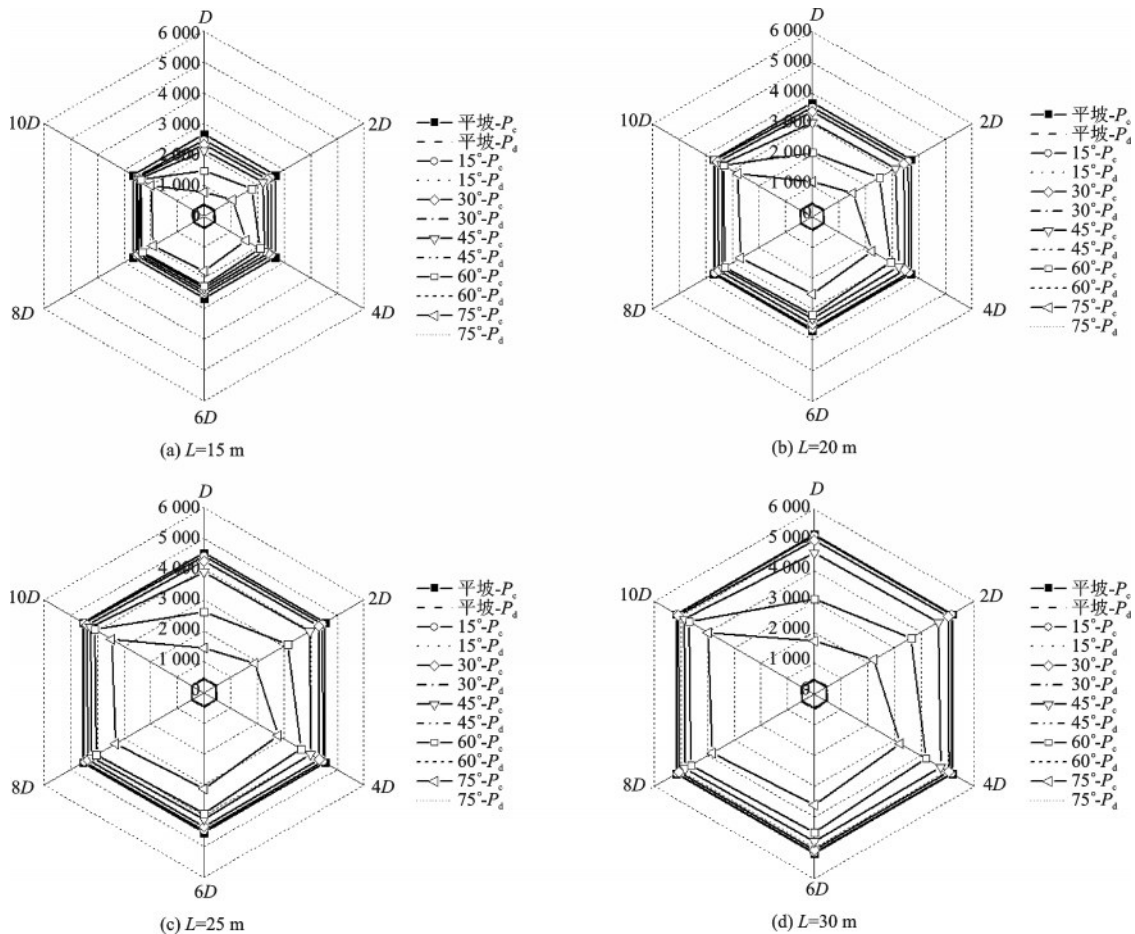


图10 参数变化对桩侧摩阻力及桩端阻力影响

Fig.10 Effect of parameters variation on pile lateral friction and tip resistance

由以上分析可知,黄土山区冲沟地形对桩侧摩阻力影响较大,桩侧摩阻力主要受地形坡度及临坡距耦合影响,一定桩长下,坡度及临坡距对桩端阻力影响不大,桩长增加能够有效提高桩侧摩阻力水平。

4.3 有效桩长变化规律分析

受坡度、临坡距影响,斜坡失效桩长以下到桩端为有效桩长,有效桩长范围内桩侧摩阻力发挥充分。已有研究^[5]通过将斜坡桩基承载力与同条件下的平坡桩基承载力进行对比得出斜坡桩基有效桩长,有效长度计算过程中没有考虑桩长变化对桩端阻力的影响。理论上,规范^[11]中摩擦桩承载能力计算考虑了长径比(L/D)变化对桩端阻力的影响,桩基长度增长,桩端阻力变大,这与表3计算结果一致。桩侧摩阻力计算表达式中桩身周长(本质上是桩径 D)、桩侧土层的摩阻力值都为定值,黄土山区冲沟地形桥梁桩基承载力关键问题在于确定桩侧摩阻力计算表达式中实际发挥作用的有效桩长。按文献^[5]的方法,计算10 m、11 m、12 m,直至30 m平坡桩基达到极限承载状态时的桩侧摩阻力,将不同坡度、临坡距和桩长条件的极限状态桩侧摩阻力与同条件下的平坡桩侧摩阻力对比,得出黄土山区冲沟地形条件下桩基的有效长度。不同坡度、临坡距及桩长变化对有效桩长影响如图11所示。

由图11总体来看,黄土冲沟地形桥梁桩基有效桩长(L_v)对不同坡度、临坡距,及桩长变化敏感性显著。

(1)随坡度增加,有效桩长变短, $r \leq 30^\circ$ 时,坡度变化对有效桩长影响不大,图11(b)临坡距为 D 时,15~30 m有效桩长分别为13.38 m、18.59 m、23.39 m和28.54 m,桩长折减系数 η ($\eta = L_v/L$)最小89.2%; $r > 30^\circ$ 时,有效桩长显著减小,30 m桩基临坡距为 D , r 在 $30^\circ \sim 75^\circ$ 变化时, η 从95.1%减小至34.9%,有效桩长减小幅度明显增大,临坡距越小,坡度变化的影响越大。

(2)随临坡距增大,有效桩长不断增大,坡度较小($r \leq 30^\circ$)时,有效桩长对临坡距变化不敏感,图11(b)15 m桩基,临坡距从 D 增大到 $10D$,有效桩长增加了0.79 m;坡度越大,增大临坡距对增加有效桩长效果越明显,图11(e)15 m桩基,在临坡距增大过程中, η 从39.4%增大至78.2%。

(3)增加桩基长度能够增大有效桩长,坡度 $r > 60^\circ$ 时,改变桩长一定程度上增加了有效桩长,但有效桩长并没有成比例增加, η 随桩长变化反而减小,图11(e)临坡距为 D 时,桩长从15 m增长至30 m, η 从39.4%减小至34.9%,可见桩长增长, η 并未如预期变大。

黄土山区摩擦桩由于地形条件复杂,在初期设计阶段主要还是在以往工程经验基础上考虑5 m左右有效桩长进行承载力计算,进行承载力计算时依

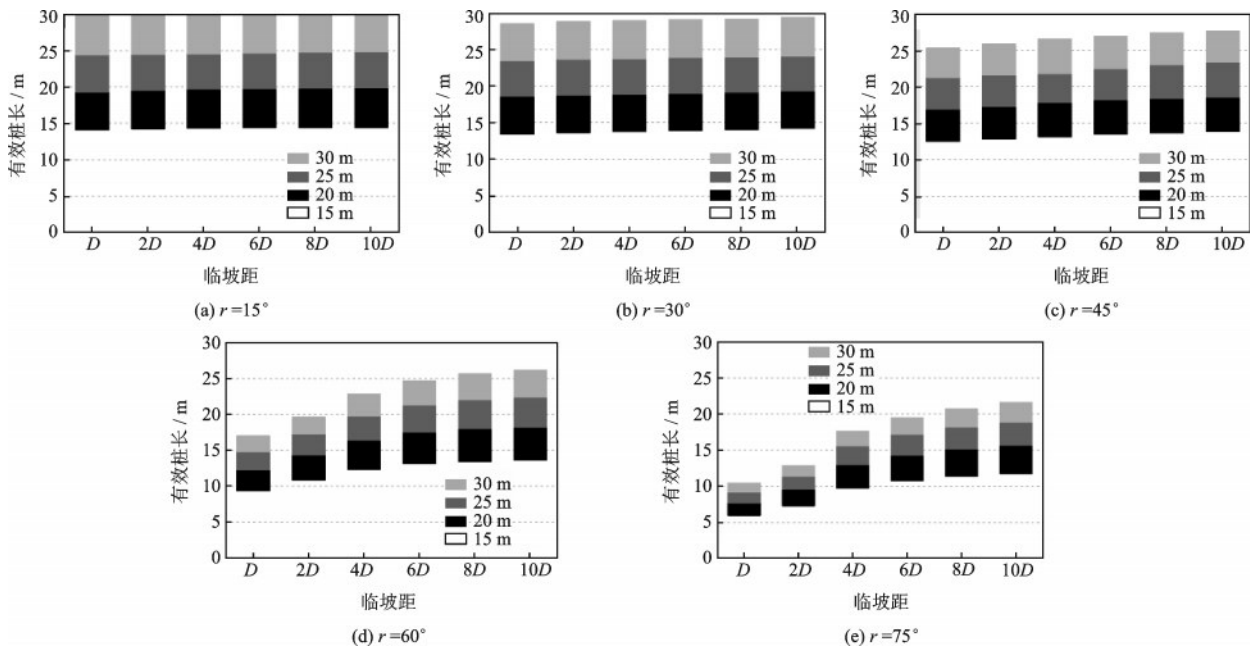


图11 参数变化对有效桩长的影响

Fig.11 Effect of parameters variation on effective pile length

靠增加桩长来满足下部结构的“绝对安全”,但由以上分析结果可知,黄土山区冲沟地形高陡边坡盲目的通过增加桩长来提高桥梁桩基承载力是不经济的,甚至是“劳而无功”。其根本原因在于目前规范^[11]中没有考虑斜坡条件对桩基承载力的影响,缺乏具体的规定。

4.4 桩基有效桩长计算方法

斜坡坡度、桩基临坡距变化本质上都是改变了平坡条件桩侧土体的半空间状态,斜坡坡度越大、临坡距越小,桩侧土体缺失量越大,与平坡半空间状态差异越显著,对有效桩长影响就越明显,这一规律不会随桩长变化而改变。黄土冲沟地形桥梁桩基长度折减系数 η 分布如图12所示,由图可见,不同桩基长度时,坡度、临坡距对桩长影响程度基本一致。

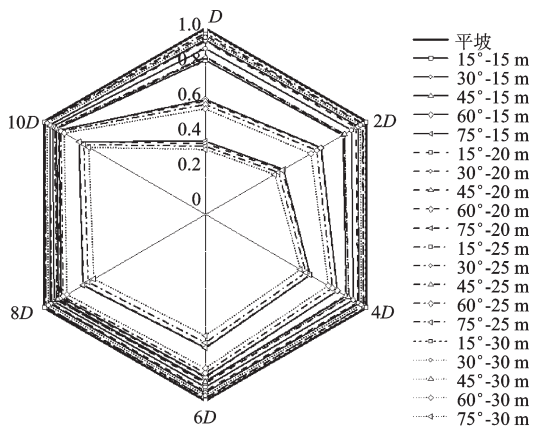


图12 参数变化对 η 的影响

Fig.12 Effect of parameters variation on η

从以上分析可以看出,冲沟地形有效桩长的折减程度同斜坡坡度及桩基临坡距有关,与桩长无关。 η 与坡度、临坡距的变化关系可近似用图13所示曲面表示。

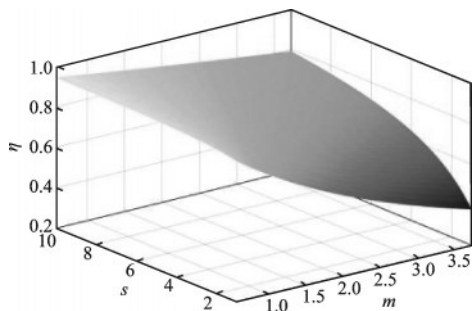


图13 η 拟合分布

Fig.13 The map of η fitting distribution

因此,通过上述分析,可确定黄土山区冲沟地形桥梁桩基有效长度计算公式为:

$$L_v = \eta L = \frac{1.179 - 0.211m + 0.995S}{1 + 0.437m + 1.041S} L \quad (1)$$

失效桩长:

$$L_v' = (1 - \eta)L = \frac{0.648m + 0.046S - 0.179}{1 + 0.437m + 1.041S} L \quad (2)$$

式中, $m = \tan(\alpha)$,其中 $30^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$; S 为桩径 D 的倍数, $S > 20$ 时,可近似取 $\eta = 1$; L 为设计桩长。

依据规范^[11]规定,若不考虑土层差异,钻(挖)孔灌注摩擦桩的承载力容许值为:

$$[R_a] = \frac{1}{2} \mu q_k \cdot \eta L + A_p q_r \quad (3)$$

式中各参数含义参照文献[11]。

式(3)可写为:

$$[R_a] = \frac{1}{2} \eta \cdot u q_k L + A_p q_r \quad (4)$$

由上式可见,桩基有效长度折减相当于对桩侧摩阻力进行了折减。所以,考虑桩侧土层间差异,黄土山区冲沟桥梁摩擦桩桩基承载力公式为:

$$[R_a] = \frac{1}{2} \eta \cdot u \sum_{i=1}^n q_{ik} L_i + A_p q_r \quad (5)$$

5 工程技术建议

根据黄土山区桥梁下部调查及计算分析结果,对冲沟地形桥梁设计提出以下3点建议:

(1) 冲沟坡度小于 30° 时,可不考虑坡度对有效桩长的影响;斜坡坡度为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时,可考虑增加桩长来提高桩基承载力;当坡度大于 60° 时,主要考虑临坡距变化对桩基承载力的影响,不能盲目增加桩长。

(2) 桩基设计在满足承载力要求的同时,要充分估计后期运营桥址地形改变对桩基功能的影响。

(3) 路线选线、桥梁选址尽量避开高陡边坡地形;难以避开时,优先考虑通过调整整体或局部路线纵坡改变路基边沟出水口位置;出水口位置难以改变时,桥台桩位应预留足够的临坡距,台前排水设计要因地制宜、立足长远、统筹规划。

6 结论

(1) 一定桩长时,斜坡坡度、临坡距变化对桩侧摩阻力产生不同程度影响,对桩端阻力影响不大;坡度越大,临坡距越小,桩侧摩阻力减小幅度越大;

坡度较小、临坡距较大时,增长桩长能够有效提高桩侧摩阻力。

(2) 桩侧摩阻力发生变化的根本原因是桩基有效长度发生改变,桩基有效桩长折减程度同斜坡坡度及桩基临坡距有关,与桩长无关。

(3) 利用计算结果建立的黄土山区冲沟地形桥梁桩基有效长度计算公式,一方面反映了坡度、临坡距变化对桩基功能的影响,另一方面为这种地形条件下桩基础设计提供技术借鉴。

参考文献:

[1] 张刚刚,宋宇鹏,卢洋.黄土梁峁沟壑区高速公路桥梁设计探讨[J].公路,2017(7):115-119.
Zhang G G, Song Y P, Lu Y. Study on bridge design of expressway in loess gully areas[J].China Journal of Highway, 2017(7):115-119. (in Chinese)

[2] 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 Q M, Cao Q. The status quo of road connection, hindering factors and promote suggestion of “B&R” [J].Development Research, 2015(10):17-21. (in Chinese)

[3] 冯忠居.特殊地区基础工程[M].北京:人民交通出版社,2008.
Feng Zh J. Foundation engineering in special areas[M]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd., 2008. (in Chinese)

[4] 赵宝俊,葛守飞,郝宪武.黄土地区沟谷地形桥梁下部结构病害与防治对策研究[J].公路交通科技,2013(11):144-146.
Zhao B J, Ge Sh F, Hao X W. Research on disease investigation and prevention measure of bridge pile foundation in loess valley terrains [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013(11):144-146. (in Chinese)

[5] 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 D J. Research on vertical load-bearing characteristics of the large-diameter bridge foundation[D].Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)

[6] 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):1 899-1 906.
Niu F Sh, Xu J C, Ma K. Field experimental study of transmitted characteristics of pile foundation under vertical load in loess slope[J].Chinese Journal of Geotechni-

cal Engineering, 2014, 35(7):1 899-1 906. (in Chinese)

[7] 冯忠居,王航,魏进.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):2 308-2 314.
Feng Zh J, Wang H, Wei J. Model tests on vertical bearing performance of bridge pile foundation in loess gulch slope area[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015,37(12):2 308-2 314. (in Chinese)

[8] 龚先兵,杨明辉,赵明华.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. Load bearing mechanism model test for bridge pile foundation in high steep transverse slope [J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2013,26(2):56-62. (in Chinese)

[9] 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,2016,36(6):62-68.
Luan J, Hao X W, Zhao B J. Effect of loess gully slope terrain on bearing performance of pile foundation [J]. Journal of Chang'an University, 2016, 36(6):62-68. (in Chinese)

[10] 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):1 629-1 634.
Li J, Xie Y L, Feng Zh J. Study of the proper pile length in the self-weight collapsible loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9):1 629-1 634. (in Chinese)

[11] 公路桥涵地基基础设计规范:JTGD63—2007[S].北京:人民交通出版社.
Code of design of ground base and foundation of highway bridges and culverts: JTGD63—2007 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2007. (in Chinese)

[12] Potyondy J G. Skin friction between various soils and construction materials [J]. Geotechnique, 1961, 11(4):339-353.

[13] Acer Y B, Durgunoglu H T, Tumay M T. Interface properties of sands[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1982,108(4):648-645.

[14] 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,2013.
Chen Y M, Xu D P. Foundation engineering example of FLAC and FLAC3D[M].Beijing: China Water & Power Press,2013. (in Chinese)

(本文责编:池营营)

(下转第 672 页)