

DOI: 10.11779/CJGE201512022

黄土冲沟斜坡桥梁桩基竖向承载特性模型试验研究

冯忠居¹, 王 航², 魏 进¹, 高 璇³, 贾彦武⁴, 张 旭⁵

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省高速公路建设集团公司, 陕西 西安 710075; 3. 陕西省西安市中交通力建设股份有限公司, 陕西 西安 710075; 4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 5. 中国科学院地球环境研究所, 陕西 西安 710075)

摘 要: 为了探明黄土冲沟地形条件对桥梁桩基础承载力的影响, 首次基于自主研发的能充分反映黄土冲沟区域桩基特点与工作性能的模型试验平台, 分析不同冲沟坡度、不同桩长桩基的竖向承载力, 桩身轴力及桩侧摩阻力的变化规律, 并结合试验结果提出相关的工程技术建议。研究结果表明: ①随着坡度的增大, 相同桩长的桩基承载力呈降低趋势, 承载力影响度逐渐增大, 变化范围在 7%~35%之间; ②在一定范围内, 桩基承载力随桩长增加增幅越大, 桩长增加到一定程度时, 承载力增幅逐渐变缓; ③随着坡度增加, 相同入土深度下的有效桩长逐渐减小; ④黄土冲沟斜坡区域桥梁桩基设计应充分考虑防止桩周土体流失的工程技术。

关键词: 岩土工程; 黄土冲沟; 桩基础; 模型试验; 竖向承载特性; 有效桩长

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)12-2308-07

作者简介: 冯忠居(1965-), 男, 山西万荣人, 教授, 博士生导师, 主要从事公路岩土工程方面的教学和科研工作。

E-mail: ysf@gl.chd.edu.cn。

Model tests on vertical bearing performance of bridge pile foundation in loess gulch slope area

FENG Zhong-ju¹, WANG Hang², WEI Jin¹, GAO Xuan³, JIA Yan-wu⁴, ZHANG Xu⁵

(1. College of Highway Engineering Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shaanxi Expressway Construction Group Company, Xi'an 710075, China; 3. Zhongjiaotongli Construction Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 4. Xibei Engineering Corporation Limited, Power Construction Corporation of China, Ltd, Xi'an 710065, China; 5. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to ascertain the effect of loess gulch on the bearing capacity of bridge pile foundation, for the first time, based on the self-developed platform model test, the model tests can fully reflect the characteristics and work performance of pile foundation in loess gulch area. The change rules of vertical bearing capacity, pile axial force and lateral friction force of the pile foundation with different slopes and pile lengths are analyzed, and some engineering technical advices are given based on test results. The results show that: (1) With the increase of slope, the bearing capacity of piles with the same pile length decreases, the influence degree of bearing capacity increases gradually, and the range varies from 7% to 35%. (2) The pile bearing capacity increases with the increase of pile length to some extent; when the pile length increases to a certain length, the rate of increase becomes slow. (3) The effective pile length with the same buried depth decreases with the increase of slope. (4) The design of bridge pile foundation should fully consider the engineering technology of preventing the soil around piles being eroded in the loess gulch area.

Key words: geotechnical engineering; loess gulch; pile foundation; model test; vertical bearing performance; effective pile length

0 引 言

黄土地区高速公路的修建, 大多采用桥梁结构跨越黄土冲沟区域, 其基础形式主要为桩基础, 其中部分桩基础位于黄土冲沟地形的斜坡上。桥梁穿越的冲沟地形根据沟谷宽度和沟坡坡度可分为宽缓型、宽陡型和窄陡型等 3 类。其中, 窄陡型冲沟沟顶宽度较窄,

两侧沟坡较为陡峭, 沟底地形狭窄, 沟深较深^[1-2]。

目前, 国内外学者对山区平坡区域桥梁桩基竖向承载机理及工作性状进行了深入的研究, 取得了大量

基金项目: 陕西省科技攻关项目 (09-04); 陕西省自然科学基金研究计划项目 (2013JM7016)
收稿日期: 2014-09-04

研究成果。与平坡桩基相比，黄土冲沟斜坡区域桥梁桩基因斜坡外侧土体缺失使其承载机理远较平坡情况复杂，尚有大量问题有待研究。龚先兵等以现场工程为原型，设计出了 45°，60°，75° 三种不同陡坡下横坡段桥梁桩基的室内模型试验，对竖向下桩基的荷载传递规律、内力分布规律及桩侧土压力分布规律进行了研究^[3]。李鹏等用人工模拟降雨装置对坡地系统降雨侵蚀问题进行了系统研究^[4]；冯忠居等基于弹性理论，建立了黄土湿陷性影响下桥梁桩基承载力的力学模型，分析了不同湿陷厚度下黄土区域桩基承载力的变化性状^[5]；陈鹏等通过建立三维冲刷模型，采用有限差分法计算冲刷导致边界条件的改变对桩基的影响，指出冲刷对桩体作用的竖向位移、水平位移和应力都有较大程度的改变^[6]；程永舟等利用可靠度理论，建立了桥台基础冲刷可靠性分析的数学模型，分析了受冲刷构造物基础埋置深度的可靠性以及水力条件的变化对基础冲刷破坏的影响^[7]。Lin 等在研究冲刷对桥梁桩基影响的过程中认为，以往的方法忽略了冲刷前后土的应力历史对桩基的影响，研究主要集中在考虑横向荷载作用下，冲刷后剩余砂土的应力历史效应对桩基设计的影响^[8]。Li 等通过数值模拟建立了桩基础模型，分析了影响冲刷的几个关键因素，并对比值分析、现场试验结果，得出了冲刷深度、宽度、坡度对单桩横向极限承载力的影响^[9]。这些研究均表明桩周土体部分缺失对桩基承载力有不同的影响，但至今鲜有系统研究黄土冲沟斜坡桥梁桩基承载特性的成果，致使采用现行技术规范、规程设计技术方法及其参数对冲沟地形条件下桩基础的设计明显存在盲目性。

基于笔者等的研究^[10-14]，本文采用自主研发的室内多功能模型试验平台^[15]，分析黄土冲沟区域斜坡桥梁桩基竖向荷载作用下的荷载传递机理及其承载特性，并确定其有效桩长，给出工程技术建议，以期用于指导黄土冲沟斜坡桥梁基础的工程设计与施工。

1 模型桩与模型箱设计

1.1 模型桩

本次模型试验根据相似理论对模型的各物理量进行确定。模型试验必须同时满足相似指标方程：

$$\frac{c_p \cdot c_h^2}{c_{EI}} = 1, \quad \frac{c_k \cdot c_d \cdot c_l^4}{c_{EI}} = 1 \tag{1}$$

原型与模型桩各物理量参数及相似比见表 1。

本试验采用桩径 63 mm（壁厚 2 mm）的铝合金管。桩长分别为 400，600，800，1000 mm；长细比分别为 6.3，9.5，12.7，15.9。模型试验选用陕西商洛

地区黄土。结合现场试验及室内模型试验，获得模型试验中所采用黄土的主要物理力学指标：含水率 w 为 15.0%，密度 ρ 为 1.85 g/cm³，液限 I_L 为 34.7，塑限 I_P 为 19.2，压缩模量 E 为 7.41 MPa。

表 1 原型与模型桩各物理量参数及相似比

Table 1 Material parameters and similarity ratios of prototype and

物理量	原型	模型	相似比
桩径 d/m	2.4	0.063	38.09
桩长 h/m	20	1	20.00
弹性模量 E/Mpa	3.20×10^4	1.17×10^4	2.73
惯性矩 I/m^4	1.63	7.73×10^{-7}	2.11×10^6
抗弯刚度 $EI/(\text{MN} \cdot \text{m}^2)$	5.21×10^4	9.05×10^{-3}	5.76×10^6
竖向荷载 P/kN	1.8×10^6	1.3	1.38×10^4

1.2 模型试验箱

模型箱为钢板组合结构，尺寸为 1.6 m×1.6 m×1.6 m，包括支座、箱体以及用于向箱体內的试验桩施加竖向力的加载装置。箱体由卡槽和钢板拼接而成，单板可拆装，钢板上下使用螺栓固定，能够使箱体內的土体形成不同坡度。模型箱示意如图 1 所示。

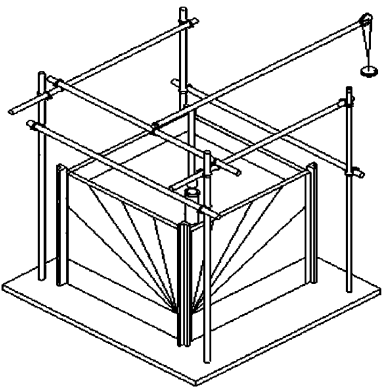


图 1 模型箱示意图

Fig. 1 Sketch of model box

1.3 加载装置

竖向加载装置采用反力梁法，该装置由固定装置、可调节高度竖杆、滑杆、杠杆（10：1）、加码装置组成。竖向加载示意及竖向加载实物分别如图 2,3 所示。

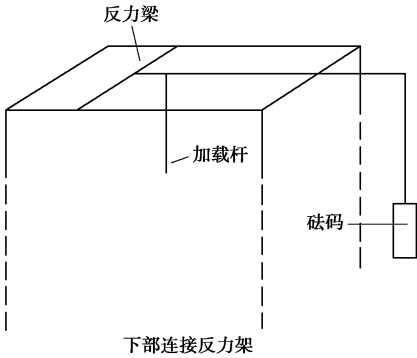


图 2 竖向加载示意图

Fig. 2 Sketch of vertical loading device



图 3 竖向加载实物图
Fig. 3 Photo of vertical loading device

2 试验研究方案

2.1 测试元件布设

每根模型桩身前后两面均对称布置有应变片，应变片布设示意如图 4 所示。

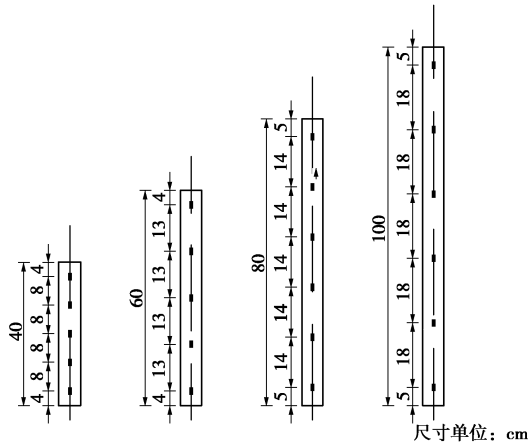


图 4 应变片布设示意图
Fig. 4 Layout of strain gages setting

应变片均采用 1/4 桥法连接，且每 10 个应变片共用一个补偿片。试验过程中，待每级荷载稳定后，由 DH3816 静态应变仪量取各测点应变，进而可测得桩上对应点的竖向应力，轴力，侧摩阻力及桩的荷载传递规律。

2.2 试验研究方案

试验模拟的斜坡坡度分别为 0° ， 30° ， 45° ， 60° ， 75° ， 90° ，桩长分别为 40，60，80，100 cm。由于黄土的直立性较好，因此实际中存在边坡近似呈 90° 直角的地形条件，而桩与直坡坡边的距离大小直接影响桩的竖向承载特性，因此本次模型试验增加斜坡坡度 90° 的工况，不同情况的斜坡坡度如图 5 所示。模型试验研究坡度变化、桩长变化下桩基的荷载传递机理及其竖向承载特性，并通过与平坡情况下桩基的竖向荷载传递机理及其竖向荷载特性进行对比，分析斜坡坡度变化对桩基竖向承载力的影响。



(a) 斜坡坡度为 45° 示意



(b) 斜坡坡度为 90° 示意

图 5 试验桩位置示意

Fig. 5 Location of test piles

3 黄土冲沟斜坡桥梁桩基竖向承载特性分析

根据室内模型试验对不同坡度、不同桩长桩基的竖向承载特性受力分析得出，同一坡度下，不同桩长桩基的竖向承载力，桩身轴力及桩侧摩阻力的变化规律基本相同。以 100 cm 长的桩基在不同坡度下的力学规律为例展开分析。

3.1 黄土冲沟斜坡桥梁桩基极限承载力的变化规律分析

黄土边坡坡度的变化下，100 cm 长的桩基的 $P-s_v$ 曲线变化规律如图 6 所示。

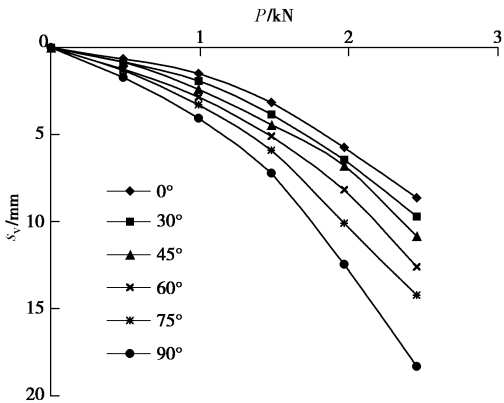


图 6 黄土冲沟边坡坡度变化的 $P-s_v$ 曲线

Fig. 6 $P-s_v$ curves of slope change in loess gully slope

从图 6 可以看出，在相同竖向荷载作用下，桩顶

位移随着冲沟边坡坡度增加逐渐增大。取位移为 10 mm 时相对应的荷载作为桩基极限承载力 P , 不同坡度的承载力计算成果汇总见表 2。 α_v 为冲沟斜坡变化对桩基承载力的影响度, $\alpha_v = (P_0 - P) / P_0$, 其中 P_0 表示对应的平坡桩基轴向极限承载力。

表 2 100 cm 桩长随坡度变化的极限承载力分布

Table 2 Distribution of ultimate bearing capacity with change of slope (pile length of 100 cm)

坡度 /(°)	0	30	45	60	75	90
P/N	2695	2502	2355	2168	1967	1735
α_v	0	7.22	12.64	19.60	26.99	35.66
ζ_v	100	92.78	87.36	80.40	73.01	64.34

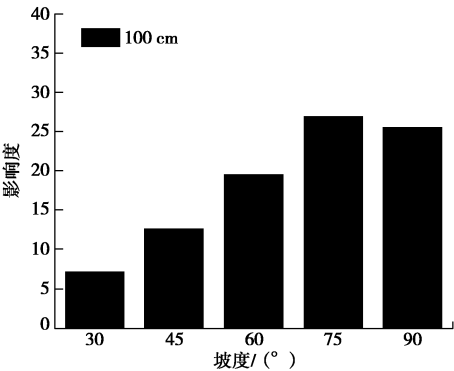


图 7 坡度变化对桩基承载力影响度 α_v 的影响

Fig. 7 Effect of gradient variation on influence degree α_v

由表 2 和图 7 可以看出, 随着坡度的增大其承载力的影响度 α_v 增大, 在斜坡坡度 30° 到 90° 的变化过程中, 影响度从 7.29% 增长到 35.75%, 说明坡度的增加改变了桩侧阻力的传递效应, 使得桩基承载力随着坡度的增加有着不同程度的降低。随着坡度增大, 极限承载力受坡度影响越大。

由极限承载力随坡度增加与平坡相比的承载力折减系数 ζ_v ($\zeta_v = 1 - \alpha_v$) 可知, 坡度在 0° 和 30° 变化时, 承载力降低程度并不十分显著; 当坡度大于 30° 时, 承载力降低程度明显增大, 当坡度为 90° 时, 减小到仅为平地桩的 64% 左右, 这说明黄土冲沟斜坡桥梁

桩基的设计应充分考虑坡度变化对桩基功能的影响。

3.2 黄土冲沟斜坡桥梁桩基竖向荷载下的轴力传递规律分析

在 1.25 kN 的竖向荷载作用下, 桩基埋置深度与边坡坡度的变化规律如图 8 所示。

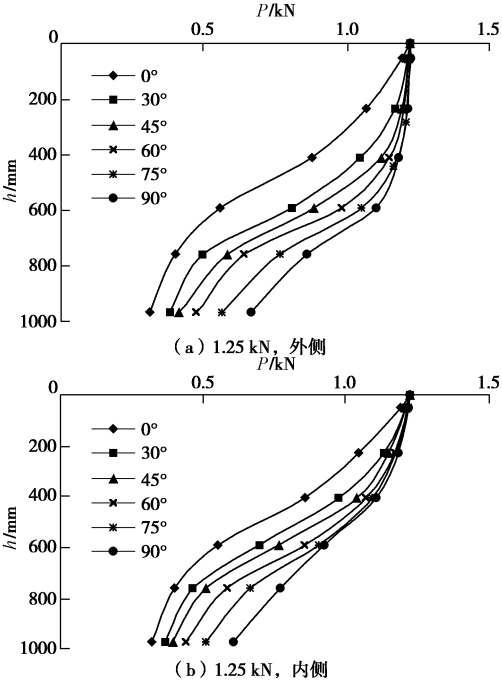


图 8 100 cm 桩长随坡度变化桩身轴力分布

Fig. 8 Distribution of axial force of pile body with change of slope (pile length of 100 cm)

由图 8 可以看出, 0° 桩身轴力变化幅度最大; 坡度越大, 桩身轴力变化越小, 90° 时最小。轴力变化的曲线外侧比内侧曲线较陡, 外侧曲线斜率大于内侧曲线斜率, 说明斜坡外侧土体缺失, 有效桩长减小, 降低或弱化了斜坡外侧一定范围岩土体的外侧摩阻力。

从表 3 可以看出, 在桩顶到 50 mm 埋置深度处, 桩身此处轴力随坡度变化影响很小, 在 230 mm 埋置深度以下, 随着坡度的增加, 桩身轴力影响度逐渐增大, 且各坡度的影响度增幅也逐渐增大。说明由于坡度增大, 土体的缺失越多, 自桩顶至桩端, 桩侧摩阻力受影响越大。桩基础设置在坡度较大位置处, 为保证桩基稳定与安全使用, 需要做必要的防护措施。

表 3 100 cm 桩随坡度变化的轴力分布

Table 3 Distribution of axial force of pile bodys with change of slope (pile length of 100 cm)

埋深 /mm	0°		30°		45°		60°		75°		90°	
	P/N	$\gamma / \%$	P/N	$\gamma / \%$	P/N	$\gamma / \%$	P/N	$\gamma / \%$	P/N	$\gamma / \%$	P/N	$\gamma / \%$
0	1470	0.0	1470	0.0	1470	0.0	1470	0.0	1470	0.0	1470	0.0
50	1417	0.0	1444	1.9	1449	2.3	1457	2.8	1460	3.0	1456	3.2
230	1274	0.0	1369	7.5	1401	9.9	1416	11.1	1430	12.2	1392	12.9
410	1092	0.0	1220	11.7	1265	15.8	1307	19.7	1332	22.0	1304	24.3
590	675	0.0	903	33.8	979	45.0	1057	56.6	1115	65.2	1150	71.9
760	381	0.0	511	34.1	611	60.4	667	75.1	765	100.8	856	124.7
950	276	0.0	330	19.6	367	32.9	426	54.3	531	92.4	655	137.3

表 4 不同坡度的桩侧摩阻力、桩端阻力分布 (桩长 100 cm)

承载特性	0°	30°	45°	60°	75°	90°
P_c/N	1975.45	1727.09	1587.47	1394.54	1084.04	928.57
$\frac{P_c}{P}/\%$	73.28	69.03	67.38	64.32	55.11	53.52
P_d/N	720.26	774.91	768.45	773.69	882.96	806.43
$\frac{P_d}{P}/\%$	26.72	30.97	32.62	35.68	44.89	46.48

表 5 随坡度变化的失效桩长

Table 5 Distribution of failure pile length with change of slope								
桩长 /cm	30°		45°		60°		75°	
	失效桩长 /cm	斜坡稳定距离 λ_v	失效桩长 /cm	斜坡稳定距离 λ_v	失效桩长 /cm	斜坡稳定距离 离 λ_v	失效桩长 /cm	斜坡稳定距离 λ_v
40	3.21	0.92d	6.91	1.15d	13.23	1.27d	31.32	1.40d
60	3.14	0.90d	7.26	1.21d	13.91	1.34d	31.17	1.39d
80	3.42	0.98d	7.18	1.19d	13.64	1.31d	31.51	1.41d
100	3.35	0.96d	7.02	1.17d	12.90	1.24d	32.04	1.43d

3.3 黄土冲沟斜坡桥梁桩基竖向荷载下的侧摩阻力分布规律分析

冲沟边坡桩基在同荷载同桩长下，不同坡度处的桩侧摩阻力随坡度变化的规律类似。100 cm 长的桩基在 1.25 kN 的竖向荷载作用下，桩侧摩阻力随坡度变化的规律如图 9 所示。

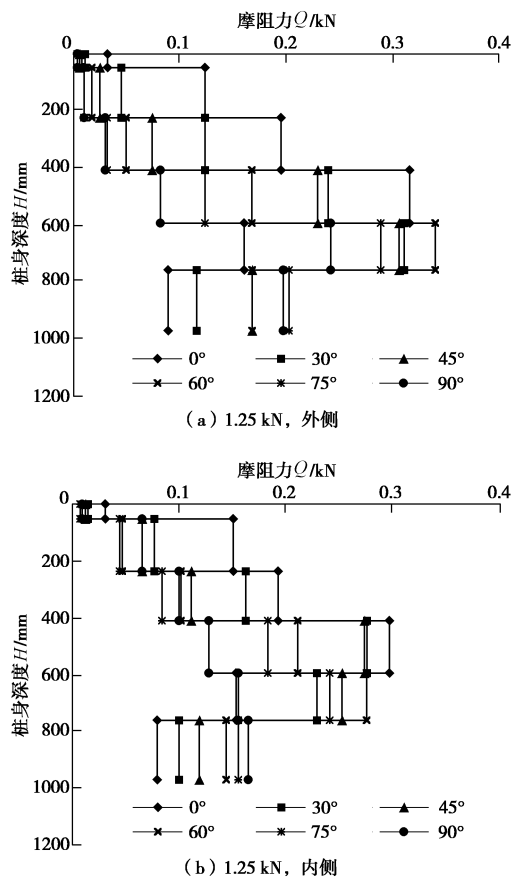


图 9 100 cm 桩侧摩阻力随坡度影响

Fig. 9 Effect of change of slope on pile lateral friction (pile length of 100 cm)

由图 9 可以看出，随坡度增加，桩侧摩阻力呈减小趋势，由此，桩端阻力占极限承载力的比重提高，90° 时，桩端阻力所占比例最大。从桩顶到桩底，外侧和内侧的竖向受力差，先增大后减小，说明由于桩侧土体缺失，侧摩阻力呈不对称扩散，桩侧摩阻力无法完全发挥。在斜坡稳定距离以下，桩周土体可近似看做半无限体，外侧摩阻力得到充分发挥，与内侧摩阻力趋近。

100 cm 桩长的桩侧摩阻力、桩端阻力随坡度变化的分布情况以及桩端阻力所占比重，桩侧阻力 P_c 、桩端阻力 P_d ，见表 4；同一坡度不同桩长的桩侧摩阻力、桩端阻力分布如图 10 所示。

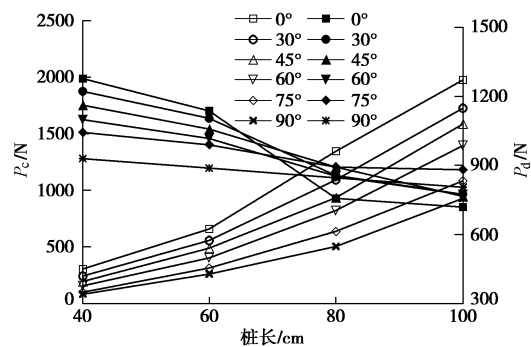


图 10 同一坡度不同桩长桩侧摩阻力、桩端阻力分布 (60°)

Fig. 10 Distribution of pile lateral friction and pile tip resistance under different pile lengths (60 degrees)

从表 4 可以看出，桩侧阻力随着坡度的增加逐渐减小，由此，桩端阻力占极限承载力的比重提高，90° 时，桩端阻力所占比例最大。从图 10 中可以看出，同一坡度不同桩长情况下，桩端阻力随桩长增加而降低，说明短桩或中桩在斜坡情况下会呈现端承桩的受力特性，当桩长增大后，逐渐向摩擦桩过渡，同一桩长，不同坡度下随坡度增长桩端阻力增大。

4 黄土冲沟斜坡桥梁桩基竖向荷载下的有效桩长确定

根据黄土冲沟斜坡桩基桩侧阻力随坡度变化和内、外侧荷载传递机理的分析, 在桩顶以下一段距离为斜坡失效桩长, 在此段范围内, 外侧摩阻力发挥很小, 与内侧摩阻力相比, 可以忽略不计。在斜坡失效桩长以下到桩端范围内, 外侧摩阻力开始逐渐发挥完全, 此段范围为斜坡有效桩长 L'_v 。通过室内试验成果分析可知, 同一坡度下, 随桩长增大, 失效桩长 L'_v 变化不明显, 可近为定值。通过室内试验成果分析, 计算出斜坡桩基础位于不同坡度下的失效桩长 L'_v , d 为桩基础直径, λ_v 为斜坡稳定系数并通过三角函数求得斜坡稳定距离 $\lambda_v d$ 。随坡度变化的失效桩长分别见表 5 和图 11。

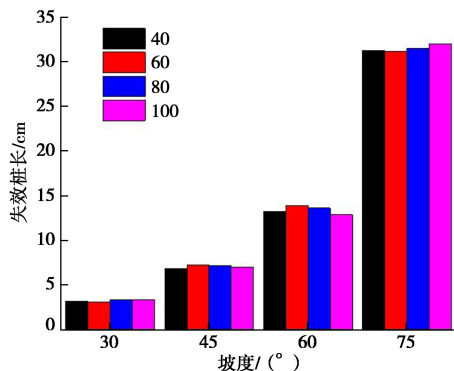


图 11 坡度变化对桩基失效桩长的影响

Fig. 11 Distribution of failure pile length with change of slope

从表 5 和图 11 可知, 同一桩长下, 随着坡度增大, 失效桩长增大, 且呈倍数增长。说明坡度越大, 斜坡所需的桩基入土深度越大; 斜坡稳定距离变化范围在 $0.92d \sim 1.43d$ 之间, 随坡度变化影响比较明显, 随桩长变化影响较小。

从以上分析可以看出, 斜坡地段桥梁桩基础的失效桩长同斜坡坡度有关, 与桩长无关。

因此, 通过上述分析, 可确定出斜坡地段桥梁桩基础有效桩长计算公式:

$$L_v = h - \lambda_v \cdot d \cdot \tan \alpha \quad (2)$$

式中 α 为斜坡坡度($^\circ$); 其中 $30^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$ h 为设计桩长 (m); λ_v 为斜坡稳定系数, 取值见表 5; d 为桩基础直径 (m)。

5 工程技术建议

根据室内模型试验的分析成果, 对黄土冲沟斜坡提出以下 3 点建议。

(1) 坡度小于 30° 时, 可不考虑坡度对桩基承载力的影响; 当桥梁桩基位于斜坡坡度介于 $30^\circ \sim 75^\circ$

之间, 在设计上可考虑增加桩长来增强桩基承载力; 当坡度大于 75° 时, 需要考虑斜坡外侧土体与桩距离变化对桩基承载力的影响。

(2) 当桩基础设置在坡度较大位置处, 优先考虑将桩位置于离坡边较远的位置, 以使桩基承载力能有效发挥; 如受到现场条件限制, 则可考虑增加桩长。在坡度较大的情况下, 必须对坡体进行防护工程设计, 以保证施工的顺利进行及后期的运营安全。

(3) 在实际工程中, 可针对陡坡桥梁桩基的桩前坡体进行局部防护设计和加固处理, 特别注意加强排水, 防止坡面水土流失。

6 结 论

黄土冲沟斜坡地区桥梁桩基受地形地貌及设置位置的影响, 其承载特性与平坡桩基础不同。模型试验反映模拟了黄土冲沟区域地形地貌, 综合考虑了桩基础与坡度间的关系。

(1) 竖向荷载作用下, 随着斜坡坡度的增大, 相同桩长的桩基承载力呈降低趋势, 承载力影响度增大, 变化范围 $7\% \sim 35\%$; 同坡度下的斜坡桩基, 承载力随桩长的增加线形增大, 并且在一定范围内, 随桩长增加增幅越大; 随着坡度的增加, 相同入土深度下的有效桩长逐渐减小。

(2) 利用试验成果建立的黄土冲沟斜坡区域桥梁桩基的有效桩长设计计算公式, 一方面反映了坡度变化对桩功能的影响, 另一方面为相应地形条件下桩基础的设计提供技术借鉴。

(3) 黄土冲沟斜坡区域桥梁桩基设计应增加桩周岩土体稳定的专项防护设计。

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 Zhong-ju. Foundation engineering in special areas[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 冯忠居, 乌延玲, 贾彦武, 等. 钢波纹管涵洞受力与变形特性模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 187 - 192. (FENG Zhong-ju, WU Yan-ling, JIA Yan-wu, et al. Model tests on force and characteristics of corrugated steel pipe culvert[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 187 - 192. (in Chinese))
- [3] 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(2): 56 - 62. (GONG Xian-bing, YANG Ming-hui, ZHAO Ming-hua, et al. Load bearing mechanism model test for bridge pile

- foundation in high steep transverse slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013(2): 56 - 62. (in Chinese))
- [4] 李 鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 444 - 449. (LI Peng, LI Zhan-bin, ZHENG Liang-yong. Hydrodynamics process of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 444 - 449. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 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))
- [7] 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 Transport Science and Engineering, 2004, 20(3): 48 - 52. (in Chinese))
- [8] LIN C, BENNETT C, HAN J, et al. Scour effects on the response of laterally loaded piles considering stress history of sand[J]. Comput Geotech, 2010, 37(7/8): 1008 - 1014.
- [9] 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.
- [10] JTG D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 2007. (JTG D63—2007 Code of design of ground base and foundation of highway bridges and culverts[S]. 2007. (in Chinese))
- [11] 冯忠居, 谢永利, 张宏光, 等. 地面水对黄土地区桥梁桩基承载力影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1758 - 1765. (FENG Zhong-ju, XIE Yong-li, ZHANG Hong-guang, et al. Experimental study on effect of surface water on bearing capacity of pile foundation in loess area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1758 - 1765. (in Chinese))
- [12] 冯忠居, 谢永利. 大直径钻埋预应力混凝土空心桩承载力的试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(2): 50 - 54. (FENG Zhong-ju, XIE Yong-li. Simulation test of large-diameter bored hollow pile of prestressing force concrete[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2005, 25(2): 50 - 54. (in Chinese))
- [13] 冯忠居, 谢永利, 李 哲, 等. 大直径超长钻孔灌注桩承载性状[J]. 交通工程运输学报, 2005, 5(1): 24 - 27. (FENG Zhong-ju, XIE Yong-li, LI-Zhe, et al. Bearing property of large-diameter over-length nonpacment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 24 - 27. (in Chinese))
- [14] 冯忠居, 谢永利, 张宏光, 等. “滇西红层”区大直径桥梁桩基承载力影响因素综合研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 28(5): 540 - 544. (FENG Zhong-ju, XIE Yong-li, ZHANG Hong-guang, et al. Comprehensive analysis on influencing factors of bearing capacity of large diameter pile foundation for red bed in West Yunnan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 28(5): 540 - 544. (in Chinese))
- [15] 冯忠居. 用于测量陡坡桥梁桩基承载力的试验装置: 中国, 201420092192.9[P]. 2014-07-03. (A test unit to measure the bearing capacity of bridge pile foundation in steep slope zone: China, 201420092192.9[P]. 2014-07-03. (in Chinese))