

文章编号: 1000 - 7598 (2014) 09 - 2685 - 07

斜坡基桩水平极限承载力及影响因素 模型试验和数值模拟

程刘勇, 许锡昌, 陈善雄, 余 飞, 谢剑铭, 李 剑

(中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 斜坡上的基桩具有承重和阻滑的双重功能, 其受力变形性状远比地面上的情形复杂。采用模型试验和数值模拟相结合的方法研究了其水平承载特性及影响因素。模型试验结果表明: 临坡距对基桩的水平承载变形性能有较大影响。同一级荷载下, 临坡距较大的桩身水平位移小于临坡距较小的基桩; 临坡距较大基桩的临界荷载和极限承载力也大于临坡距小的基桩。数值模拟研究结果表明: 基桩水平极限承载力随着斜坡坡比的增大而减小, 随着临坡距的增大而增大, 与模型试验的结果基本一致。对比分析了斜坡和平地基桩水平承载变形性能的差别, 得出了可考虑坡比和临坡距的斜坡基桩水平极限承载力简便计算方法, 可为有关规范的修订以及工程设计提供参考。

关 键 词: 水平荷载; 极限承载力; 斜坡基桩; 模型试验; 数值模拟

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Model test and numerical simulation of horizontal bearing capacity and impact factors for foundation piles in slope

CHENG Liu-yong, XU Xi-chang, CHEN Shan-xiong, YU Fei, XIE Jian-ming, LI Jian

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The foundation pile in the slope soil has the dual function of load-bearing and slip resistance. The horizontal force character of it is more complex than the pile in the flat ground. Numerical experiments and model tests are used to study bearing characters and influence factor. Results of the model test show that the distance from the top of the slope has a great impact on horizontal bearing deformation properties of the pile. Under the same level of the load, the horizontal displacement of the pile with a bigger distance is less than that of the pile with a smaller distance. The critical load and ultimate bearing capacity of the pile with a bigger distance is larger than that of the pile with a smaller distance. The result of numerical simulation shows that the horizontal ultimate bearing capacity decreases with the increase of the slope ratio and increases with the growth of the distance from the top of the slope, which is same as the result of model tests. Differences between horizontal bearing deformation properties of piles in the slope and piles in the flat ground are discussed and the calculation method of horizontal bearing capacity of pile in the slope is developed, which can provide a reference to specification revision and engineering design.

Key words: horizontal load; ultimate bearing capacity; foundation pile in slope; model test; numerical simulation

1 引 言

位于斜坡上的基桩, 具有承重和阻滑的双重功能, 其水平受力变形性状远比地面上的横向受荷桩复杂。

20世纪60年代以来, 国内外众多学者开始采用

多种手段和方法研究水平荷载作用下的基桩受力特性^[1], 如章连洋等^[2]开展了静载试验、循环荷载试验和循环荷载后再加载试验, 分别探讨了荷载大小、频率、循环次数和荷载历史等因素的影响, 并根据试验结果作出了沿桩身不同深度的 p - y 曲线, 探讨了黏性土侧向基床系数分布模式和影响因素。李彰明

收稿日期: 2013-05-31

基金项目: 十二五国家科技支撑计划资助项目 (No. 2011BAB10B02); 国家自然科学基金项目 (No. 51079142)。

第一作者简介: 程刘勇, 男, 1988年生, 博士研究生, 主要从事土体本构关系及地基稳定性方面的研究工作。E-mail: chengliuyong11@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 许锡昌, 男, 1972年生, 博士, 副研究员, 主要从事特殊土土力学研究。E-mail: yuanzesuperman@126.com

等^[3]结合工程实际,在土质边坡进行桩基水平荷载试验,研究了水平力作用下的桩体变形特征及承载力,并认为:在水平位移一定的条件下,基桩离坡脚愈近,水平承载力愈大。王梅^[4]等也通过模型试验研究了黏性土中基桩的水平承载特性。李桐栋等^[5]用有限元方法和 p - y 曲线对水平承载桩进行了桩-土共同作用的非线性分析研究,得出一个新的桩-土相互作用的单元计算模型;Karlsan等^[7]用有限元和边界元相结合的杂交元法研究了侧向承载桩的承载变形特性,并通过试验验证其正确性^[8]。Ng^[9]和Chae^[10]等分别采用数值模拟和室内模型试验相结合的方法,研究了斜坡顶面水平荷载作用下基桩的承载性能及其对边坡稳定性的影响。黄银冰^[10]、赵恒博^[11]等在现场进行水平静荷载试验,研究了水泥土桩增强灌注桩水平承载特性的效果。袁廉华等^[12]开展了轴向荷载对斜桩水平承载特性影响试验及理论研究,推导了考虑轴向荷载影响的斜桩水平极限土抗力计算公式,并通过模型试验及现场试验验证其合理性。

综上所述,目前国内外学者对水平荷载下基桩承载变形特性有一定研究,但这些研究大部分针对地面上的基桩,对置于斜坡中的基桩在水平荷载作用下的承载变形特性和作用机制研究较少,更鲜有考虑斜坡坡比和临坡距对基桩水平承载力影响的研究。由于斜坡中基桩两侧土体体积有较大差异,基桩两侧土体的约束力有明显差别,从而影响桩基的承载力,特别是在受水平向荷载时,基桩和两侧土体的相互作用机制更加复杂,斜坡坡比和桩基临坡距对水平极限承载力有明显影响。由此可见,对于水平荷载作用下斜坡基桩的水平承载特性和临坡距、斜坡坡比两因素对其的影响尚需进行深入的研究和探讨。

在众多研究方法中,模型试验是最为直观、可信的研究手段之一,但大批量的模型试验费时费力、造价高,因此,设计适量、高质量的模型试验,辅以数值仿真试验是一种行之有效的办法^[12]。本文拟采用室内模型试验和数值模拟相结合的方法,研究斜坡基桩的水平承载特性及影响因素,为斜坡基桩水平承载力的确定提供依据。

2 斜坡基桩模型试验

2.1 模型试验系统

该试验装置主体模型槽长为6.0 m、高为3.5 m、宽为3.0 m,试验系统如图1所示。

试验装置填筑用土为黏性土,在模型试验前,

对填筑土体进行了一系列物性试验以及力学试验,得到土体参数如下:黏聚力 $c = 35.5$ kPa,摩擦角 $\varphi = 24.18^\circ$,液限为45.0%,塑限为27.8%,最优含水率为20.2%,最大干密度为 1.63 g/cm³,压实度为0.95,围压为100 kPa时,土体弹性模量为60.2 MPa。

模型桩(见图1)采用截面尺寸为 0.1 m \times 0.1 m、壁厚为2 mm的空心铝管,长为3.0 m,在铝管表面对称粘贴应变片,为尽量减小应变片接线对桩的影响,接线从铝管内部穿过,试验过程中采用静态电阻应变仪采集数据。



图1 模型试验系统

Fig.1 Model experiment system

2.2 试验方案

针对斜坡基桩的受力特点,主要开展不同临坡距对斜坡基桩水平承载变形特性的影响试验,试验中选取两种不同临坡距,试验方案见表1。

表1 模型试验方案

Table 1 Model testing schemes

方案	模拟桩 编号	桩入土深度 /m	临坡距离 /m	边坡 坡比
1	A	1.9	0.6	1:1.5
2	B	1.9	1.2	1:1.5

2.3 试验准备与实施

模型试验箱内的土体按约30 cm松铺厚度,分12层填筑,干密度控制在 $1.6 \sim 1.7$ g/cm³之间,填筑到设计标高后统一刷坡到坡比1:1.5。

在试验槽内预先埋设两根模型桩之前,对桩身应变测试系统进行调试,系统完好后再开始埋设。

试验采用水平作动器加载,将2只大量程百分表对称布置于桩顶两侧,用以观测桩顶水平位移变形。加载分10级,每级荷载按约1.2 kN,进行单向5循环加载。

2.4 模型试验结果及分析

(1) 桩身水平位移随深度变化规律

为研究桩身水平位移随深度的变化规律，将桩身应变测试结果进行积分，获取桩 A、B 水平位移随深度的变化规律，见图 2。从图中可以看出：在各级荷载作用下，A、B 两桩水平位移的变化基本相同，均是沿桩深不断减小。当荷载水平较低(9.9 kN 以下)时，A、B 两桩沿桩身的水平位移大小相差不大；当荷载达到 11.25 kN 时，同一级荷载下桩 A 的水平位移大于桩 B；当加载到 12.51 kN 时，桩 A 顶部水平位移突然增大至约 26 mm，接近极限状态，而桩 B 顶部水平位移约 12.3 mm，尚未达到极限状态。这主要是因为桩 A 的临坡距较小，其临坡侧约束基桩变形的土体量相对桩 B 较少，土体对基桩的抗力也偏小，导致相同荷载作用下桩身各点的水平位移较大。

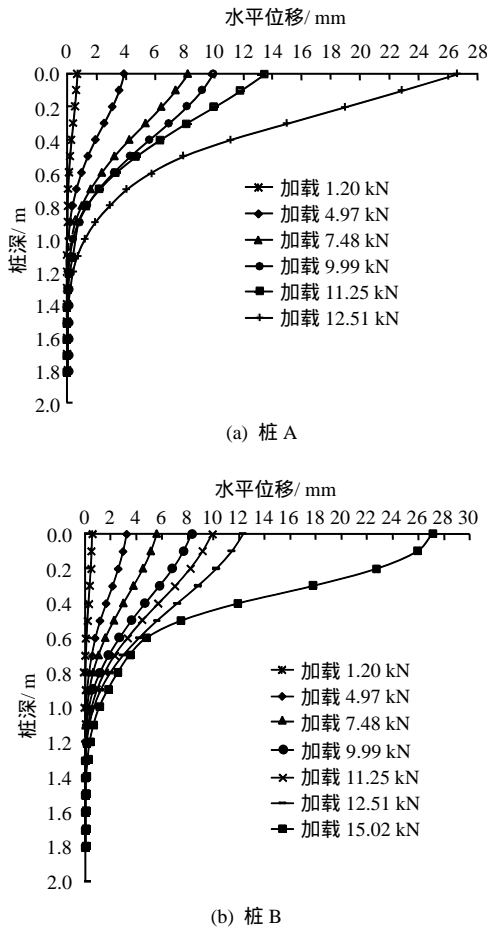


图 2 水平位移随桩深的变化规律

Fig.2 Variations of horizontal displacement with depth

(2) 临坡距对桩极限承载力的影响

图 3 给出了桩 A、B 的水平力-位移梯度曲线。从图中可以看出，A、B 两桩水平力-位移梯度变化规律基本相同，当水平力较小时，两桩的位移梯度增长速率较小；随着水平力的增加，增长速率逐渐变大。当两桩位移梯度相同时，除个别点外，桩 A

对应的水平力均小于桩 B，这与图 2 中水平位移的变化规律相一致。主要由于桩 A 的临坡距小于桩 B，其临坡侧用于抵抗桩身变形的土体较少。

从图 3 还可看出，曲线存在一拐点，拐点处的水平力大小分别为 9.98、13.76 kN。这说明临坡距大小对基桩的临界荷载和水平承载力有一定影响，临坡距大的基桩临界荷载和水平承载力较大。

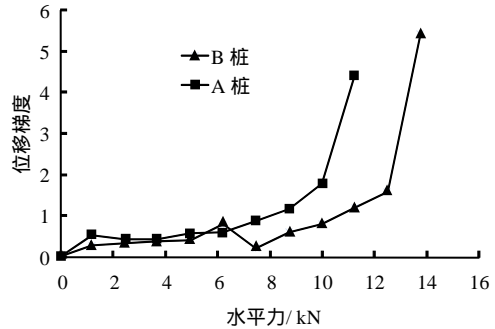


图 3 桩 A 和桩 B 水平力-位移梯度曲线
Fig.3 Horizontal force -displacement gradient curves of pile A and pile B

3 基桩水平承载特性数值模拟

受试验条件和经费限制，以上模型试验仅对两种临坡距的基桩水平承载力进行了研究。对于斜坡基桩而言，影响基桩承载力的因素较多，以下将首先对上述基桩水平荷载试验数值模拟结果进行对比，以验证数值模型的合理性，并在此基础上设计不同工况重点研究临坡距和斜坡坡比对承载力的影响。

3.1 基桩水平荷载试验的数值模拟

采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件，参照 A、B 两组模型试验中斜坡比例大小、坡比、基桩临坡距、桩径、桩长进行模型试验的对比数值计算，桩体采用弹性本构模型，土体采用摩尔-库仑本构模型，桩-土界面设置接触面。参照《工程地质手册》^[13]和上述试验结果，桩体、土体、结构面材料参数选取结果见表 2。

表 2 数值模拟参数
Table 2 Numerical simulation parameters

材料	弹性模量 / MPa	泊松比	密度 / (g/cm ³)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
土体	61	0.34	1.70	35	25
桩体	30 000	0.25	2.20		
接触面				20	15

计算过程中模型左、右侧边界 x 方向采用固定

边界，将整个模型 y 方向上的位移固定，模型地面采用固定边界，其他面均采用自由边界^[14]。数值计算模型网格剖分示意图如图 4 所示。

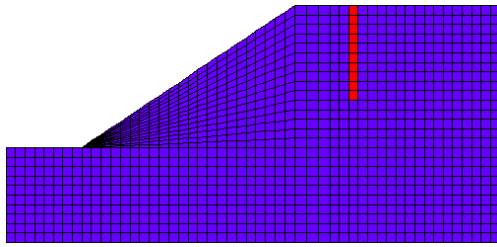
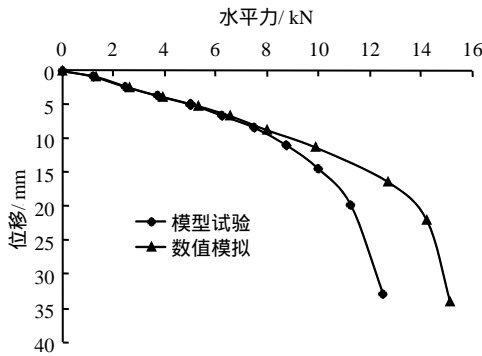


图 4 计算模型网格剖分示意图

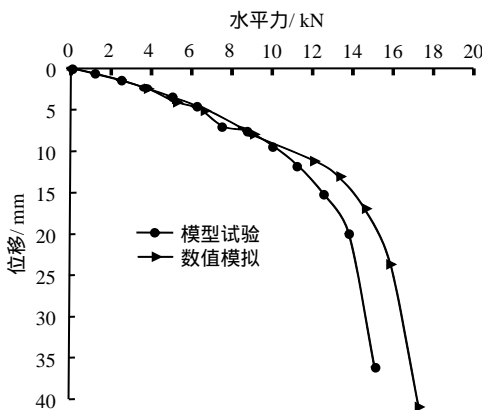
Fig.4 Element meshes of numerical simulation

3.2 数值模拟与模型试验对比

将上述数值模拟结果进行整理分析，并与模型试验基桩的水平力-位移曲线对比，见图 5。可以看出，数值模拟的水平力-位移曲线变化规律与模型试验基本一致。在未达到极限荷载前模型试验值与模拟值相差不大。当水平力增大到一定程度后，数值模拟确定的极限承载力略大于模型试验，这主要是由于模拟时每一级水平力都计算到稳定状态，而模型试验的位移未必发展完全，试验误差对结果也会有一定影响。



(a) 桩 A



(b) 桩 B

图 5 模型试验与数值模拟的水平力-位移曲线
Fig.5 Horizontal force - displacement curves of experiment and numerical simulation

3.4 数值模拟方案

由于室内试验条件有限，仅开展了两组不同临坡距的试验，为研究基桩在斜坡条件下的承载特性以及与平坡条件下承载特性的区别，在以上室内模型试验和对比数值模拟的基础上，使用上述对比数值模拟中的参数、边界条件、本构模型，选取临坡距和坡比作为主要控制因素，分别设计了多种工况进行数值计算和分析，数值模拟方案具体见表 3。

表 3 斜坡条件下基桩数值模拟方案

Table 3 Working conditions of numerical simulation of slope foundation

影响因素	斜坡地层	桩长 / m	桩径 / m	临坡距 / m	斜坡坡比
坡比	中硬	10	1	2	1:1, 1:1.5, 1:2, 1:2.5, 1:3
临坡距	中硬	10	1	1, 2, 4, 6, 8, 10	1:1

3.5 水平极限承载力影响因素分析

(1) 坡比对极限承载特性的影响

不同坡比条件下水平力-位移对比图见图 6。

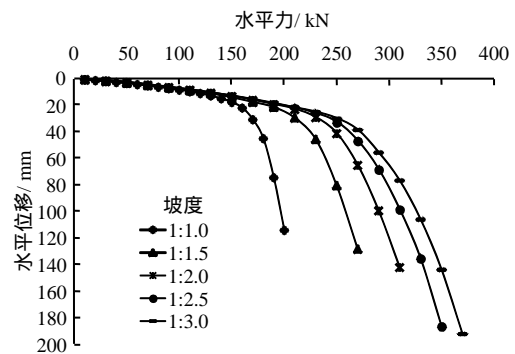


图 6 不同坡比下桩顶水平力-位移曲线

Fig.6 Horizontal load-displacement curves of pile top under different slope ratios

从图 6 可看出，不同坡比条件下的基桩水平位移随着水平力的增大而不断增大，且在达到某一水平力时，曲线明显陡降。参照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94 - 2008)^[15]中的规定，取水平力-位移曲线明显陡降的前一级荷载为水平极限承载力。

按照上述方法得到不同坡比条件下水平极限承载力(图 7)。从图中可看出，随着坡比的减小，桩极限承载力不断增大。当坡比为 1:1 时，极限承载力为 160 kN，而当坡比为 1:3 时，极限承载力为 272 kN，提高值为 112 kN，极限承载力提高为原值的约 1.7 倍。说明边坡的存在对水平承载力的影响很大，且这种影响随着坡比的减小而降低。

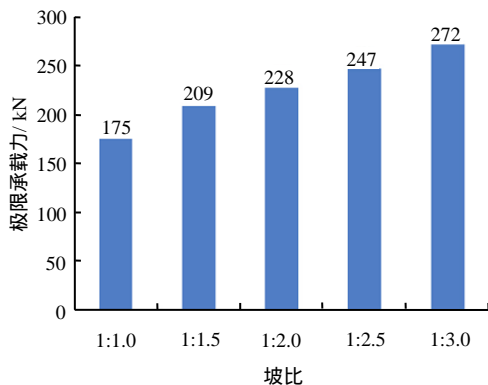


图 7 不同坡比条件下极限承载力
Fig.7 Ultimate bearing capacity under different slope ratios

水平力为 180 kN 时,不同坡比条件下基桩临坡侧水平应力随深度变化见图 8。从图中可看出,不同坡比条件下基桩临坡侧水平应力随深度变化趋势基本一致,均随桩深呈现先增大后减小的趋势,水平应力在深度约 4/5 桩身处出现反弯,之后随深度略微减小;除靠近地面的桩身部分,相同深度处的桩侧水平应力随坡比的减小而增大。这主要是因为坡比越小,临坡侧抵抗基桩变形的土体越多,对基桩的约束越大,相同荷载作用下基桩发生的水平位移越小,相应的水平应力越大。随着荷载不断增大,坡比越大的基桩水平位移首先达到极限状态,故其极限承载力较小,这也正好解释了图 7 中“随着坡比的减小,极限承载力不断增大”的现象。

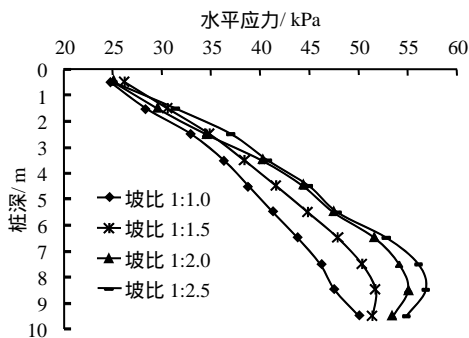


图 8 不同坡比条件下基桩临坡侧水平应力随深度变化图
Fig.8 Variations of horizontal stress with depth under different slope ratios

(2) 临坡距对极限承载力的影响

不同临坡距条件下各工况水平力-位移对比图见图 9。从图中可看出,不同临坡距条件下的基桩水平位移均随着水平力的增大而不断增大,且在达到某一水平力时,曲线明显陡降。参照上述水平极限承载力的确定方法,得到不同坡比条件下水平极限承载力(图 10)。从图中可看出,随着临坡距的

增大,水平极限承载力不断增大。当临坡距为 1 m (1 倍桩径) 时,基桩极限承载力为 127 kN,而当坡比增大至 10 m(10 倍桩径) 时,其值提高至 337 kN,提高值为 210 kN,约提高为原来的 2.7 倍。说明边坡的存在对水平承载力的影响较大,且这种影响随着临坡距的增大而降低。

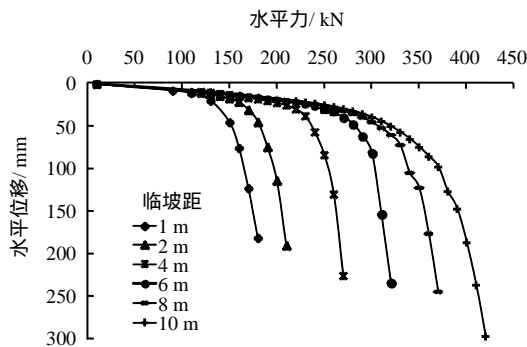


图 9 不同临坡距下水平力-位移曲线
Fig.9 Horizontal force - displacement curves under different distances to slope

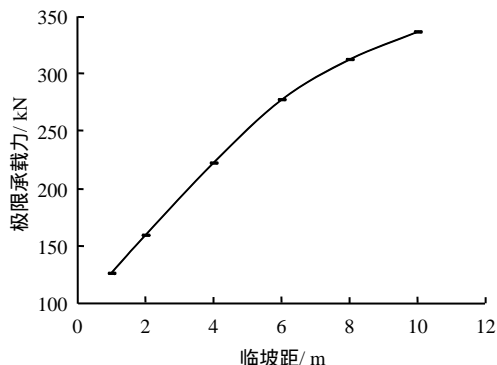


图 10 不同临坡距条件下极限承载力
Fig.10 Ultimate bearing capacity under different distances to slope

加载到 180 kN 时,不同临坡距条件下基桩临坡侧水平应力随深度变化见图 11。从图中可看出,不同临坡距条件下基桩临坡侧水平应力随深度变化趋势基本一致,均呈现随桩深增大而增大的趋势;但当临坡距增大时,水平应力在深度约 4/5 桩身处出现反弯,之后随深度略微减小;除靠近地面的桩身部分,相同深度处的桩侧水平应力随临坡距的增大而增大,这种变化趋势与上述试验中水平位移变化规律相对应。临坡距越大,临坡侧抵抗基桩变形的土体越多,对基桩的约束越大,相同荷载作用下基桩发生的水平位移越小,相应的水平应力越大。随着荷载不断增大,临坡距越小的基桩水平位移首先达到极限状态,故其极限承载力较小。

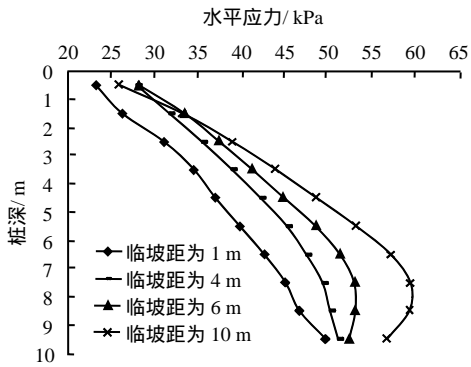


图 11 不同临坡距基桩临坡侧水平应力随深度变化图

Fig.11 Variations of horizontal stress with depth under different distances to slope

3.6 斜坡与平地承载力对比分析

为方便工程应用，计算了对应工况的平地桩基水平极限承载力，不同工况条件下斜坡基桩与平地基桩的水平极限承载力比值见表 4。

表 4 斜坡与平地桩基水平极限承载力比值表

Table 4 Contrast table of ultimate bearing capacity for oblique slope pile and plains foundation

坡比	临坡距固定为 2 m			坡比固定为 1:1			
	承载力/kN	斜坡与平地承载力比值/%	临坡距/m	承载力/kN	斜坡与平地承载力比值/%	承载力/kN	斜坡与平地承载力比值/%
1:1.0	160	358	44.69	1	127	358	35.47
1:1.5	191	358	53.35	2	160	358	44.69
1:2.0	228	358	63.69	4	223	358	62.29
1:2.5	247	358	68.99	6	278	358	77.65
1:3.0	272	358	75.98	8	313	358	87.43
				10	337	358	94.13

从表 4 可看出，当边坡坡比固定为 1:1 不变，临坡距为 1 m 时，斜坡基桩水平极限承载力为平地设计公式估算值的 35.47%；当临坡距增大至 10 m 时，其比值增大为 94.13%。当临坡距固定为 2 m 不变，斜坡坡比为 1:3 基桩水平极限承载力为平地设计公式估算值的 75.98%，而随着坡比的增大，该比值不断减小；当坡比为 1:1 时，减小至 44.69%。

为了探讨临坡距和边坡坡比与上述比值的关 系，可建立一种函数关系：

$$K = f_0(D, N) \quad (1)$$

式中： K 为斜坡桩基极限承载力与平地桩基承载力的比值； D 为临坡坡距； N 为边坡坡比。

式(1)代入相应的变量值，则可直接进行计算。为此，根据以上计算数据进行非线性回归分析，得出斜坡桩基 K 、 D 、 N 三者的关系式如下：

$$K = \frac{0.91D}{1 + 0.91D} \frac{1 + 1.37N}{1 + 1.78N} \quad (2)$$

式(2)相关系数 $R = 0.92$ ，拟合残差平方和 r^2 为 0.009。坡比 N 的适用范围为 1:0.5 ~ 1:5，临坡距的适用范围为 0.5 ~ 30 m。

图 12 反映的是源数据与回归曲面之间的对比图，可以看出，随着临坡距的增大或坡比的减小，上述比值呈收敛的发展趋势，且通过式(2)计算出的结果，可以较好地描述斜坡桩基极限承载力与平地桩基承载力的比值 K 。

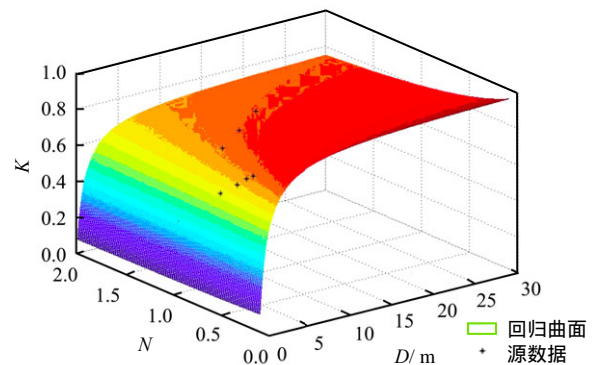


图 12 源数据与回归曲面对比图

Fig.12 Comparison chart of source data and regression surfaces

4 结 论

采用室内模型试验和数值模拟相结合的方法研究了斜坡基桩的水平承载变形特性及其影响因素，得出以下结论：

(1) 模型试验结果表明，临坡距对基桩的水平承载变形性能有较大影响。同一级荷载下，临坡距较大时，桩身水平位移小于临坡距较小的基桩；临坡距较大基桩的临界荷载和极限承载力也大于临坡距小的基桩。

(2) 数值模拟试验表明，可以通过降低边坡坡比或增大临坡距来增大斜坡基桩的水平承载力。当临坡距达到 10 倍桩径时，斜坡与平地桩基水平极限承载力比值大于 0.9，斜坡对水平承载力影响较小，可以基本忽略斜坡的影响。

(3) 实际工程中，若自然边坡的坡比以及容许施工的空间在上述研究范围之内，可首先通过规范中的计算公式确定平地条件下基桩的水平极限承载力，之后根据实际工程中的临坡距离和斜坡坡比，采用本文给出的拟合公式取相应的调整系数确定斜坡桩基水平极限承载力设计值。

参 考 文 献

- [1] 马志涛. 水平荷载下桩基受力特性研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(5): 546 - 553.
MA Zhi-tao. Study on behavior of pile foundation under lateral loading[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2006, 34(5): 546 - 553.
- [2] 章连洋, 陈竹昌. 黏性土中侧向受载桩的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(5): 40 - 45.
ZHANG Lian-yang, CHEN Zhu-chang. Study on the model test of laterally loaded piles in cohesive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 12(5): 40 - 45.
- [3] 李彰明, 全国权, 刘丹, 等. 土质边坡建筑桩基水平荷载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 930 - 935.
LI Zhang-ming, QUAN Guo-quan, LIU Dan, et al. In-situ testing study on pile foundation in soil slope under horizontal loadings[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(6): 930 - 935.
- [4] JUNIUS ALLEN, LYMON REESE. Small scale tests for the determination of p - y curves in layered soils[C]// Proceedings of 1980 Offshore Technology Conference, Houston: [s.n.], 1980.
- [5] 王梅, 楼志刚, 李建乡, 等. 水平荷载作用下单桩非线性 m 法试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 23 - 30.
WANG Mei, LOU Zhi-gang, LI Jian-xiang, et al. Nonlinear analysis of 'm' method for single pile under lateral loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(1): 23 - 30.
- [6] 李桐栋, 张力霆. 水平承载桩的有限元分析[J]. 河北工业大学学报, 2001, 30(5): 107 - 110.
LI Tong-dong, ZHANG Li-ting. The finite element method analysis of horizontally loaded pile[J]. **Journal of Hebei University of Technology**, 2001, 30(5): 107 - 110.
- [7] KUCUKARSLAN S, BANERJEE P K, BILDIK N. Inelastic analysis of pile-soil-structure interaction[J]. **Engineering Structures**, 2003, 25(9): 1231 - 1239.
- [8] NG C W, ZHANG L M, HO K K. Influence of laterally loaded sleeved piles and pile groups on slope stability[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2001, 38(3): 553 - 566.
- [9] CHAE K S, UGAI K, WAKAI A. Lateral resistance of short single piles and pile groups located near slopes[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2004, 4(2): 94 - 103.
- [10] 黄银冰, 赵恒博, 顾长存, 等. 考虑水泥土桩增强作用的灌注桩水平承载性能现场试验研究[J]. 岩土力学, 2013 34(4): 1109 - 1115.
HUANG Yin-bing, ZHAO Heng-bo, GU Chang-cun, et al. Field experimental study of lateral load capacity of filling pile enhanced by soil-cement pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013 34(4): 1109 - 1115.
- [11] 袁廉华, 陈仁朋, 孔令刚, 等. 轴向荷载对斜桩水平承载特性影响试验及理论研究[J]. 岩土力学, 2013 34(7): 1958 - 1964.
YUAN Lian-hua, CHEN Ren-peng, KONG Ling-gang, et al. Test and theoretical research on influence of axial load on lateral bearing capacity of batter piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013 34(7): 1958 - 1964.
- [12] 胡波, 赵海滨, 王思敬, 等. 隧道锚固岩拉拔模型试验研究及数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1575 - 1581.
HU Bo, ZHAO Hai-bin, WANG Si-jing, et al. Pull-out model test for tunnel anchorage and numerical analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1575 - 1581.
- [13] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [14] 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模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2013, (18): 5399 - 5403.
CHENG Liu-yong, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Numerical simulation for vertical ultimate capacity and influencing factors of oblique slope pipe under vertical loads[J]. **Science Technology and Engineering**, 2013, (18): 5399 - 5403.
- [15] 中国建筑科学研究院. 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94 - 2008)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.