

## 确定斜坡地基比例系数 $m$ 值的模型试验研究\*

尹平保<sup>1,3,4†</sup>, 赵明华<sup>2</sup>, 贺炜<sup>3,4</sup>, 赵衡<sup>2</sup>, 张建仁<sup>3,4</sup>

(1.长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心,湖南 长沙 410114;

2.湖南大学 岩土工程研究所,湖南 长沙 410082;3.长沙理工大学 土木与建筑学院,湖南 长沙 410114;

4.现代公路交通基础设施先进建养技术湖南省协同创新中心,湖南 长沙 410114)

**摘要:**为研究斜坡坡度及水平荷载作用角度对斜坡地基比例系数  $m$  值的影响,设计并完成了一系列斜坡地基刚性桩水平承载室内模型试验,测得了不同斜坡坡度及水平荷载作用角度下地基比例系数  $m$  值.试验发现:斜坡地基比例系数  $m$  值随地面处桩身水平位移  $x$ 、斜坡坡度  $\alpha$  及水平荷载作用角度  $\beta$  增加呈非线性减小,当  $x > 10$  mm 时,  $m$  值几乎保持为一定值,并据此建立了斜坡地基比例系数  $m$  值与坡度  $\alpha$  及荷载作用角度  $\beta$  之间的拟合关系式.理论与试验对比分析表明:根据考虑斜坡空间效应影响确定的斜坡地基比例系数  $m$  值,计算得到的桩身内力、位移与实测结果最接近,最大计算误差小于 10%;斜坡桩基设计时,建议取地面处桩身水平位移  $x = 10$  mm 对应的  $m$  值.

**关键词:**地基比例系数;模型试验;斜坡桩;斜坡空间效应;水平荷载

**中图分类号:** TU473

**文献标志码:** A

## Model Test Study on Identification of Foundation Proportional Coefficient $m$ in Slope Ground

YIN Pingbao<sup>1,3,4†</sup>, ZHAO Minghua<sup>2</sup>, HE Wei<sup>3,4</sup>, ZHAO Heng<sup>2</sup>, ZHANG Jianren<sup>3,4</sup>

(1.Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.Geotechnical Institute, Hunan University, Changsha 410082, China; 3.School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 4.Co-Innovation Center for Advanced Construction and Maintenance Technology of Modern Transportation Infrastructural Facility, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To examine the influence of slope angles and horizontal loading angles on the foundation proportional coefficient  $m$  in slope grounds, model tests of in-slope steel piles were designed and implemented, and the  $m$ -values under different slope angles and horizontal loading angles were then obtained. Model tests revealed that the  $m$ -value decreased nonlinearly with the increase of the slope angle  $\alpha$ , horizontal loading angle  $\beta$  and lateral displacement  $x$  of piles at the ground surface. The  $m$ -value almost kept the same when the value of  $x$  was more than 10 mm. Moreover, the relationship among  $m$ -value and slope angle  $\alpha$  and hori-

\* 收稿日期:2016-12-07

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51408066, 51478051, 51608540), National Natural Science Foundation of China(51408066, 51478051, 51608540);湖南省教育厅优秀青年项目(16B013), Outstanding Young Projects of Hunan Provincial Education Department(16B013);长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金项目(kfj140405), Open Fund of Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education (Changsha University of Science & Technology)(kfj140405);长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(16ZDXK02), Innovative Projects of Key Discipline in Civil Engineering of Changsha University of Science & Technolog(16ZDXK02)

**作者简介:**尹平保(1984—),男,湖南邵阳人,长沙理工大学讲师,博士

† 通讯联系人, E-mail: pingbaby921@163.com

horizontal loading angle  $\beta$  was established. The contrastive analysis showed that the theoretical calculation result under the consideration of the slope space effect when determining the  $m$ -value was close to the test result, and the maximum error was no more than 10%. It is suggested to adopt the  $m$ -value when the value of  $x$  is 10 mm for the design of in-slope piles.

**Key words:** foundation proportional coefficient; model tests; in-slope pile; slope space effect; horizontal load

对于弹性桩,《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)及《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10002.5—2005)建议采用“ $m$ ”法计算桩身内力与位移<sup>[1-3]</sup>。“ $m$ ”法是指在温克尔弹性地基模型的基础上,假定桩侧非岩石地基的水平抗力系数随深度成比例增大,“ $m$ ”即为斜率,也称地基水平抗力系数的比例系数<sup>[4-5]</sup>,以下简称地基比例系数  $m$  值。现有研究发现,地基比例系数  $m$  值对桩基受力与变形有显著影响,其取值的合理性将制约桩基设计的经济性和安全性。针对平坦场地,现行规范根据土体类别将  $m$  值划分为 5~6 大区间,以供设计人员取值参考。然而,实际工程中桩位处地基并非完全平坦,如设置在斜坡上的桩,边坡存在将导致桩侧土抗弱化,并影响桩与土的相互作用,此即所谓的斜坡效应<sup>[6-8]</sup>。若仍按平地参照现行规范取值,则很有可能造成设计误差,并带来安全隐患。

关于地基比例系数  $m$  值,已有学者对其展开了相关研究,如:邢恩桥等<sup>[9]</sup>利用静力触探参数对天津地区的比例系数  $m$  值进行勘探和回归分析,得到了静力触探参数与  $m$  值之间的关系式;劳伟康等<sup>[10]</sup>通过 2 根大直径钢管嵌岩桩水平静载试验,得到了大变形条件下地基比例系数  $m$  值与泥面处桩身位移间的关系式;吴锋等<sup>[11]</sup>根据现场实测资料发现地基比例系数  $m$  值与桩身泥面处位移呈指数变化关系;范秋雁等<sup>[12]</sup>通过室内静载试验和数值模拟对泥质软岩地基比例系数  $m$  值进行了研究,并给出了相应的参考值;楼晓明等<sup>[13]</sup>提出了根据  $p$ - $y$  曲线确定饱和黏土地基比例系数  $m$  值的计算方法,并分析了  $m$  值与饱和黏土不排水抗剪强度及桩身抗弯刚度之间的相关性;丁梓涵等<sup>[14]</sup>通过室内模型试验研究了地基土体强度对比例系数  $m$  值的影响,得到了  $m$  值与地基土体黏聚力  $c$  之间的关系式。然而,上述研究主要是针对平坦地基,而有关斜坡地基比例系数  $m$  值的研究鲜有报道。鉴于斜坡地基比例系数  $m$  值取值的盲目性和随意性,揭示和探索斜坡与平坦地

基比例系数  $m$  值间的内在联系及其斜坡空间效应显得尤其重要。

为此,拟以实际工程中的岸坡基桩为原型,通过室内模型试验,测试不同斜坡坡度和水平荷载作用角度下斜坡地基比例系数  $m$  值,据此建立相应的关系式,以期为斜坡桩基设计提供指导。

## 1 斜坡地基系数 $m$ 值试验测试方法

### 1.1 模型试验概况

本模型试验以张(家界)花(垣)高速公路泗溪河一桥某岸坡基桩为原型。该基桩桩径 2 m, 桩长 25 m(埋深约 18 m)。桩位处边坡坡度约 30°~50°, 其上覆土体为卵石、角砾、碎石, 下覆强风化-中风化砂岩、砂质板岩, 基桩穿过覆盖层嵌入稳定基岩中。试验采用外径 65 mm, 壁厚 6 mm 的钢管桩来测试模型边坡的地基比例系数  $m$  值。模型边坡由砂填筑而成, 其物理力学指标为: 含水率  $w=2.43\%$ , 重度  $g_s=15.65 \text{ kN/m}^3$ , 压缩模量  $E_s=36.98 \text{ MPa}$ , 孔隙比  $e=0.77$ , 内摩擦角  $j=39^\circ$ , 曲率系数  $C_c=1.05$ , 不均匀系数  $C_u=8.57$ , 其级配曲线如图 1 所示。

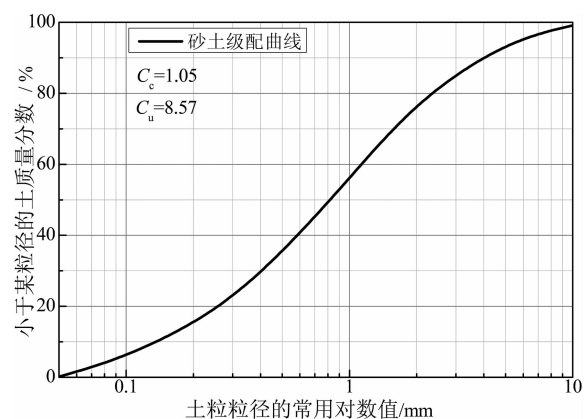


图1 试验砂级配曲线

Fig.1 The gradation curve of test sand

### 1.2 相似性设计

根据相似理论,若模型与原型各物理量满足单值条件(主要包括:几何条件、物理条件、边界条件

及初始条件)相似,并且满足相应的相似判据,则原型与模型发生的物理现象相似<sup>[15-16]</sup>.原型和模型间的相似关系可用相似比表示:

$$\lambda_i = \frac{i_p}{i_m} \quad (1)$$

式中: $\lambda_i$ 为物理量*i*的相似比,*i*为原型与模型间相同的物理量;下标p代表原型,m代表模型.

对于水平受荷桩,基桩挠曲微分方程为<sup>[4]</sup>:

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + mbzy = 0. \quad (2)$$

式中:EI为桩身抗弯刚度;*b*为有效计算宽度;*y*为桩身水平位移;*m*为地基抗力比例系数;*z*为桩顶到计算点截面的距离, $0 < z < l$ ,*l*为基桩入土深度.

由式(2)可知,本次模型试验须满足相似关系的单值条件有几何条件和物理条件.其中,几何条件相似比为:

$$\lambda_z = \frac{l_p}{l_m}, \lambda_b = \frac{d_p}{d_m} \quad (3)$$

式中:*l*为桩长;*d*为桩径.

而物理条件相似比为:

$$\lambda_{EI} = \frac{(EI)_p}{(EI)_m}, \lambda_m = \frac{m_p}{m_m} \quad (4)$$

经相似变换可得本模型试验的相似基本方程:

$$\frac{\lambda_{EI} \lambda_y}{\lambda_z^4} EI \frac{d^4 y}{dz^4} + \lambda_m \lambda_b \lambda_z \lambda_y m b z y = 0. \quad (5)$$

要使原型和模型的相似基本方程保持一致,则式(5)中的各项系数应该相等,即:

$$\frac{\lambda_{EI} \lambda_y}{\lambda_z^4} = \lambda_m \lambda_b \lambda_z \lambda_y \quad (6)$$

由式(6)可得本次模型试验的相似指标:

$$\kappa = \frac{\lambda_{EI}}{\lambda_m \lambda_b \lambda_z^5} = 1. \quad (7)$$

原型与模型各物理量及其相似比见表1.

表1 原型与模型相似比

Tab.1 The similarity ratios of prototype and model

物理量	原型	模型	相似比
桩径 <i>d</i> /m	2.0	0.065	30.8
桩长 <i>l</i> /m	18.0	1.00	18.00
弹性模量 <i>E</i> /GPa	29.6	1.68	17.62
惯性矩 <i>I</i> /m <sup>4</sup>	0.785	$2.18 \times 10^{-7}$	$3.61 \times 10^6$
抗弯刚度 <i>EI</i> /(kN·m <sup>2</sup> )	$2.32 \times 10^7$	0.366	$6.34 \times 10^7$
地基系数 <i>m</i> /(kN·m <sup>-4</sup> )	2 500	2 000	1.25

将表1中的相似比代入式(7)可得本试验的相似指标 $\kappa = 0.846$ ,说明原型与模型基本满足相似关系.

### 1.3 试验方案

为考虑斜坡坡度、水平荷载作用方向角度对斜坡地基*m*值的影响,特制定如表2所示的试验方案.

表2 测试方案表

Tab.2 The program of model tests

影响因素	编号	坡度 $\alpha$ /( $^\circ$ )	荷载作用角度 $\beta$ /( $^\circ$ )
斜坡坡度	M0	0	90
	M1	30	90
	M2	45	90
	M3	60	90
水平荷载作用角度	M2	45	90
	M4	45	60
作用角度	M5	45	30
	M6	45	0

测试斜坡地基比例系数*m*值的方法为:在距地面 $H_1$ 高度的桩顶处逐级施加水平荷载 $P_i$ ,并在该处架设一百分表1用于测试各级荷载下水平荷载 $P_i$ 作用点处钢桩水平位移 $y_i$ ;与此同时,在坡面处布置一百分表2以测试坡顶地面处钢桩的水平位移 $x_i$ ,如图2所示.通过水平荷载 $P_i$ 及对应的钢桩水平位移 $y_i$ ,即可算出斜坡地基比例系数 $m_i$ 值,其计算式为:

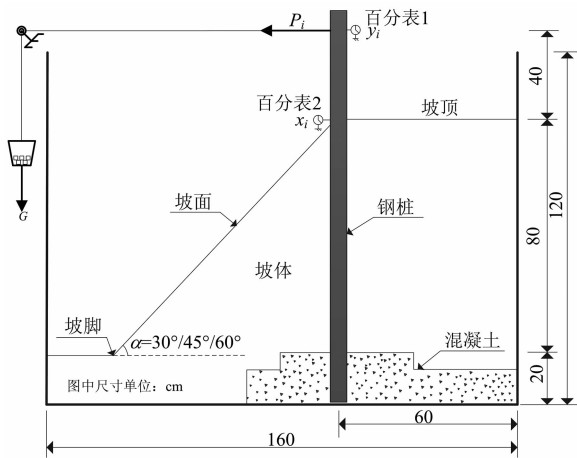
$$m_i = \frac{12(H_1 + H_2)^2 P_i}{H_2^4 y_i} \quad (8)$$

式中: $H_1$ 为水平荷载 $P_i$ 作用点距坡顶地面距离; $H_2$ 为钢桩埋入坡体内的长度; $P_i$ 为施加的水平荷载; $y_i$ 为水平荷载 $P_i$ 作用点处桩身水平位移.

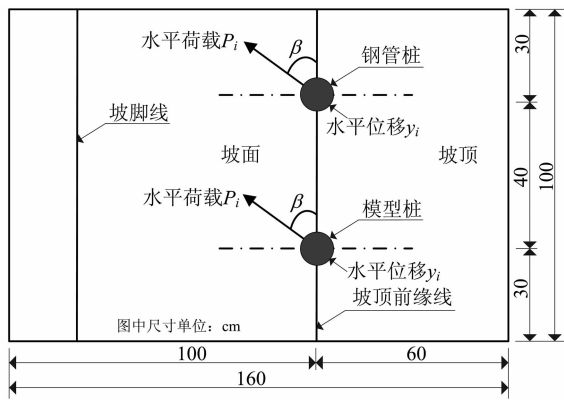
试验模型箱由型钢、有机玻璃板组合而成;水平加载系统由可移动支架、钢丝绳、承重篮、滑轮、砝码等组成.模型箱及加载系统如图2所示.为确保每次模型试验填砂的密度接近,试验采用落雨法进行填筑,每次试验的落距均为1 m.测试时采用慢速维持荷载法分级加载<sup>[16-19]</sup>,每级荷载为10 N,每级荷载按0 s,5 min,15 min,30 min,1 h的时间间隔分别读取百分表的读数,每级荷载的稳定标准为0.01 mm/5 min,累计0.1 mm/h;当坡面处钢桩水平位移 $x_i > 30$  mm时,即可终止加载.

## 2 斜坡地基系数*m*值测试结果与分析

通过模型试验可以测得M0桩( $\alpha = 0^\circ$ ,平地桩)、M1~M3桩(坡度 $\alpha$ 分别为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ,水平荷载作用角度 $\beta$ 均为 $90^\circ$ )以及M4~M6桩(坡度 $\alpha$ 均为 $45^\circ$ ,水平荷载作用角度 $\beta$ 分别为 $60^\circ, 30^\circ, 0^\circ$ )在各级荷载作用下的地基比例系数*m*值与地面处



(a) 立面布置图



(b) 平面布置图



(c) 实际布置图

图 2 斜坡地基比例系数  $m$  值测试方案图

Fig.2 The schematic diagram of model test for  $m$

桩身水平位移  $x$  间的关系曲线,如图 3 和图 4 所示。不同的  $x$  值对应的  $m$  值见表 3。

由图 3 和图 4 可看出,地基比例系数  $m$  值随地面处桩身水平位移  $x$ 、斜坡坡度  $\alpha$  及水平荷载作用角度  $\beta$  增大呈非线性减小,当  $x > 10$  mm 时,  $m$  值几乎为一定值,这与文献[10-11]的试验结果相同。

为探讨地基比例系数  $m$  值分别与斜坡坡度  $\alpha$ 、水平荷载作用角度  $\beta$  之间的关系,将 M1、M2 及 M3 桩测得的  $m$  值与 M0 平地桩进行比较,而将 M4、

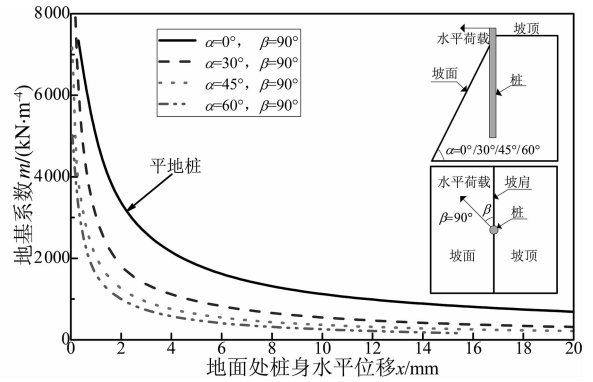


图 3 不同斜坡坡度下  $m-x$  曲线

Fig.3 The  $m-x$  curves under different slope angles

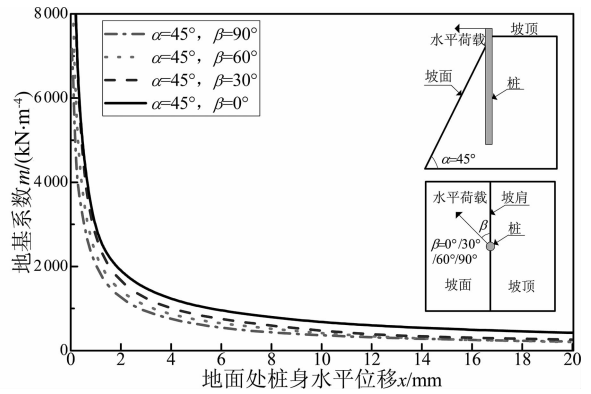


图 4 不同水平荷载作用角度下  $m-x$  曲线

Fig.4 The  $m-x$  curves under different loading angles

M5 及 M6 桩测得的  $m$  值与 M2 桩相比,即可得到  $x=6$  mm 及  $x=10$  mm 对应的地基比例系数比值  $\bar{m}_{\alpha,90}$  和  $\bar{m}_{45,\beta}$ ,如表 4 和表 5 及图 5 和图 6 所示。

表 3 不同  $x$  对应的  $m$  值

Tab.3 The  $m$ -value of slope ground under different  $x$

编号	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	地基比例系数 $m$ 值/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-4}$ )	
			$m_1(x=6 \text{ mm})^{[2-3]}$	$m_2(x=10 \text{ mm})^{[1]}$
M0	0	90	1 453	1 081
M1	30	90	713	548
M2	45	90	500	363
M3	60	90	357	249
M2	45	90	500	363
M4	45	60	586	418
M5	45	30	704	484
M6	45	0	898	649

表 4 不同斜坡坡度下地基比例系数比值  $\bar{m}_{\alpha,90}$

Tab.4 The ratio  $\bar{m}_{\alpha,90}$  under different slope angles

编号	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	$\bar{m}_{\alpha,90}$	
			$m_1(x=6 \text{ mm})^{[2-3]}$	$m_2(x=10 \text{ mm})^{[1]}$
M0	0	90	1.000	1.000
M1	30	90	0.491	0.507
M2	45	90	0.344	0.336
M3	60	90	0.246	0.230

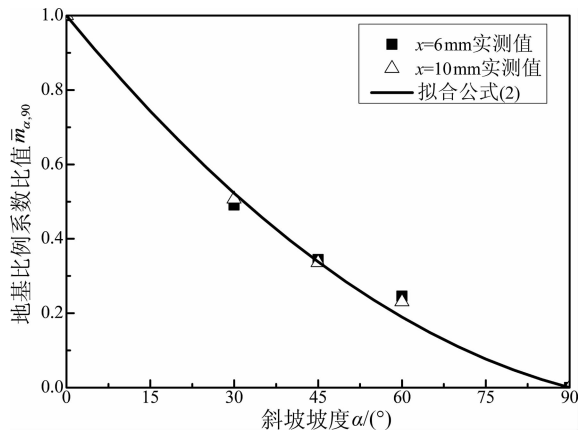


图5  $\bar{m}_{\alpha,90}$ - $\alpha$  关系曲线图

Fig.5 The relation curves of  $\bar{m}_{\alpha,90}$ - $\alpha$

根据表4和图5,可得地基比例系数比值  $\bar{m}_{\alpha,90}$  与斜坡坡度  $\alpha$  之间的关系式:

$$\bar{m}_{\alpha,90} = 8 \times 10^{-5} \alpha^2 - 1.83 \times 10^{-2} \alpha + 1. \quad (9)$$

式中:  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ ;  $\bar{m}_{\alpha,90} = \frac{m_{\alpha,90}}{m_{0,90}}$ ,  $m_{0,90}$  为平地地基比例系数  $m$  值.

表5 不同水平荷载作用角度下地基比例系数比值  $\bar{m}_{45,\beta}$

Tab.5 The ratio  $\bar{m}_{45,\beta}$  under different loading angles

编号	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\bar{m}_{45,\beta}$	
			$m_1(x=6\text{ mm})^{[2-3]}$	$m_2(x=10\text{ mm})^{[1]}$
M2	45	90	1.000	1.000
M4	45	60	1.172	1.152
M5	45	30	1.408	1.333
M6	45	0	1.796	1.788

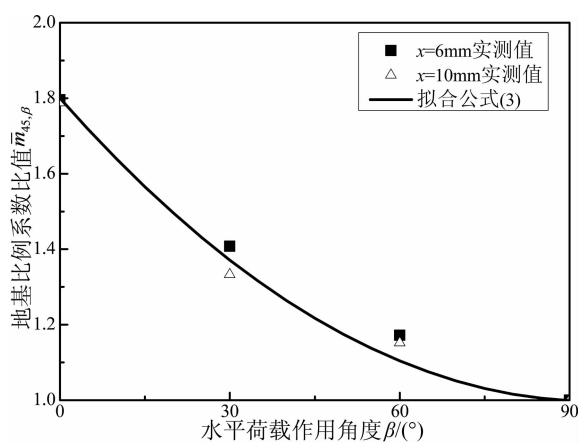


图6  $\bar{m}_{45,\beta}$ - $\beta$  关系曲线图

Fig.6 The relation curves of  $\bar{m}_{45,\beta}$ - $\beta$

根据表5和图6,可得地基比例系数比值  $\bar{m}_{45,\beta}$  与水平荷载作用角度  $\beta$  之间的关系式:

$$\bar{m}_{45,\beta} = 2 \times 10^{-5} \beta^2 - 4.6 \times 10^{-3} \beta + 0.62. \quad (10)$$

式中:  $0 \leq \beta \leq 90^\circ$ ;  $\bar{m}_{45,\beta} = \frac{m_{45,\beta}}{m_{45,90}}$ ,  $m_{45,90}$  为斜坡坡度  $\alpha$

$=45^\circ$ 、水平荷载作用角度  $\beta=90^\circ$  对应的  $m$  值.

### 3 理论与试验对比分析

#### 3.1 基桩内力与位移计算幂级数解答

根据温克尔弹性地基模型及  $m$  法假定,经推导可得水平荷载作用下基桩挠曲微分方程<sup>[4-5]</sup>:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + \lambda^5 z y = 0. \quad (11)$$

式中:桩土变形系数  $\lambda = \sqrt[5]{\frac{mb}{EI}}$ ;其他参数同前.

根据幂级数法,设方程式(4)的解答为<sup>[4-5]</sup>:

$$y = \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n. \quad (12)$$

式中: $a_i (i=0 \sim n)$  为待定系数.

对式(12)求导代入式(11)并结合相应边界条件进行求解,即可得到桩身位移的幂级数解答为:

$$y = y_0 A_1 + \frac{\varphi_0}{\lambda} B_1 + \frac{M_0}{\lambda^2 EI} C_1 + \frac{Q_0}{\lambda^3 EI} D_1. \quad (13)$$

桩身弯矩的幂级数解答为:

$$\frac{M}{\lambda^2 EI} = y_0 A_3 + \frac{\varphi_0}{\lambda} B_3 + \frac{M_0}{\lambda^2 EI} C_3 + \frac{Q_0}{\lambda^3 EI} D_3. \quad (14)$$

式中: $A_i, B_i, C_i, D_i (i=1 \sim 4)$  为无量纲系数,可通过查附表取值; $y_0, \varphi_0, M_0, Q_0$  分别为桩顶水平位移、转角、弯矩及剪力,可联立边界条件查相应规范的附表计算<sup>[1-3]</sup>.

#### 3.2 试验与理论对比分析

以 M6 桩(斜坡坡度  $\alpha=45^\circ$ ,水平荷载作用角度  $\beta=0^\circ$ )为例,通过试验可测得 M6 桩所处斜坡地基比例系数  $m_{45,0} = 649 \text{ kN/m}^4$ .利用上述幂级数法,取不同的  $m$  值,对 M6 桩(见图7)进行计算求解,即



图7 模型试验加载图

Fig.7 The loading chart of model test

可得到相应  $m$  值下的桩身水平位移与弯矩变化规律曲线,并将其与模型试验结果进行对比,如图 8 和图 9 所示.当桩顶水平荷载为 60 N 时,M0~M6 桩的实测桩身最大弯矩与计算结果对比见表 6.

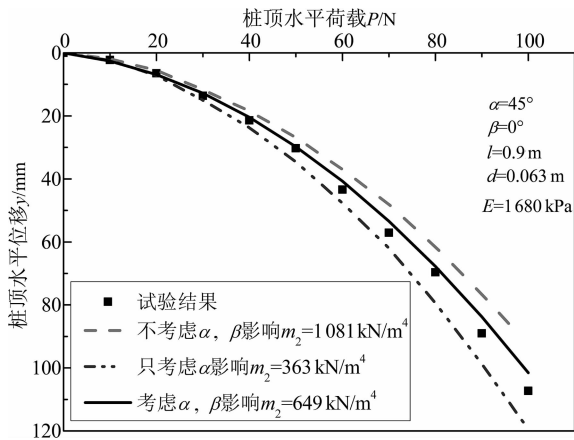


图 8 桩顶  $P$ - $y$  曲线

Fig.8 The  $P$ - $y$  curves of pile top

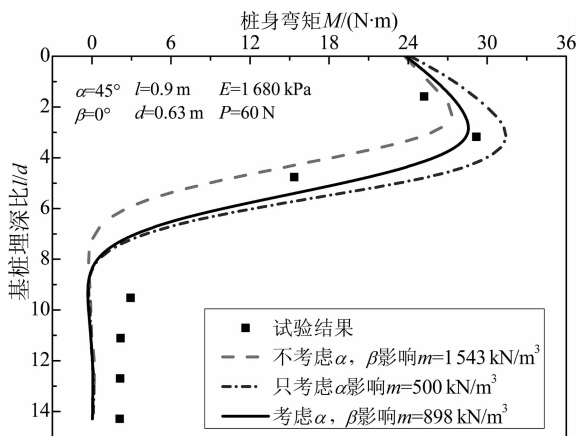


图 9 桩身弯矩图

Fig.9 The bending moment of piles

表 6 桩身最大弯矩  $M_{max}$  表 ( $P=60$  N)

Tab.6 The maximum bending moment  $M_{max}$  of piles ( $P=60$  N)

编号	$M_{max}/(N \cdot m)$			计算误差/%	
	试验值	计算值 1	计算值 2	误差 1	误差 2
M0	30.03	27.64	27.78	-7.95	-7.51
M1	35.13	30.19	32.74	-14.06	-6.81
M2	38.28	33.05	35.39	-13.67	-7.54
M3	45.61	38.04	42.09	-16.60	-7.72
M4	35.86	29.42	32.75	-17.96	-8.68
M5	32.64	27.93	30.35	-14.42	-7.01
M6	29.17	25.63	27.99	-12.15	-4.05

注:表中计算值 1 是根据《公路桥涵地基与基础设计规范》及《铁路桥涵地基和基础设计规范》<sup>[2-3]</sup>取地面处桩身水平位移  $x=6$  mm 对应的  $m$  值计算得到的桩身最大弯矩值;计算值 2 是根据《建筑桩基技术规范》<sup>[1]</sup>取  $x=10$  mm 对应的  $m$  值计算得到的桩身最大弯矩值.

由图 8 和图 9 可知,以桩顶水平荷载  $P=60$  N 为例,在确定  $m$  值时,若既不考虑斜坡坡度  $\alpha$  (斜坡效应)也不考虑水平荷载作用角度  $\beta$  (空间效应)的影响,计算得到桩顶水平位移及桩身弯矩均远小于试验结果,据此设计的斜坡桩偏危险;若仅考虑斜坡坡度  $\alpha$  的影响而忽略荷载作用角度  $\beta$  的影响,计算得到桩顶水平位移及桩身弯矩则均大于试验结果,据此设计的斜坡桩偏安全.而考虑斜坡坡度  $\alpha$  (斜坡效应)和水平荷载作用角度  $\beta$  (空间效应)相互影响得到的计算结果与实测结果最接近.另外,根据表 6 可以看出,理论计算得到的桩身最大弯矩比试验值小(计算误差均为负值).其中,取  $x=6$  mm 对应的  $m$  值得到的桩身最大弯矩计算值 1 与试验值误差范围为 8%~18%;而由  $x=10$  mm 对应的  $m$  值得到的桩身最大弯矩计算值 2 与试验值误差范围为 4%~9%.由此可见,根据《建筑桩基技术规范》<sup>[1]</sup>取斜坡地基地面处桩身水平位移  $x=10$  mm 对应的地基比例系数  $m$  值更合理;而以《公路桥涵地基与基础设计规范》及《铁路桥涵地基和基础设计规范》<sup>[2-3]</sup>建议的按地面处桩身水平位移  $x=6$  mm 确定的地基比例系数  $m$  值比实际情况偏大,据此设计的斜坡桩偏危险,应慎重.

### 4 结论

通过模型试验研究了斜坡坡度  $\alpha$  及水平荷载作用角度  $\beta$  对斜坡地基比例系数  $m$  值的影响,得到如下主要结论:

1)斜坡地基比例系数  $m$  值随地面处桩身水平位移  $x$ 、斜坡坡度  $\alpha$  及水平荷载作用角度  $\beta$  增大呈非线性关系减小.对试验结果进行拟合,得到了斜坡地基比例系数  $m$  值与斜坡坡度  $\alpha$ 、水平荷载作用角度  $\beta$  之间的拟合关系式,该关系式可用于稳定的无黏性土坡地基  $m$  值的计算与分析.

2)理论与试验对比分析表明,根据考虑斜坡空间效应影响确定的斜坡地基比例系数  $m$  值,得到的计算结果与实测结果最接近,最大计算误差小于 10%.斜坡桩基设计时,建议考虑斜坡坡度和水平荷载作用角度的相互影响,根据《建筑桩基技术规范》取斜坡桩地面处桩身水平位移  $x=10$  mm 对应的  $m$  值进行计算,由此设计的桩基最合理.

在缺少现场试验资料的情况下,上述结论及关系式可以为稳定的无黏性土质斜坡地基比例系数  $m$  值的确定及桩基设计提供参考.鉴于模型试验具

有一定的局限性,由此建立的斜坡地基比例系数  $m$  值与斜坡坡度及水平荷载作用角度之间的关系式,虽能反映一些定性的规律,但仍需继续开展更多的现场试验研究,以期对其进行修正和完善.

## 参考文献

- [1] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2008:33—36.  
JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 33—36. (In Chinese)
- [2] JTG D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S].北京:人民交通出版社,2007:83—98.  
JTG D63—2007 Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communication Press, 2007: 83—98. (In Chinese)
- [3] TB 10002.5—2005 铁路桥涵地基和基础设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2005:69—101.  
TB 10002.5—2005 Code for design on subsoil and foundation of railway bridge and culvert[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005: 69—101. (In Chinese)
- [4] 袁聚云,楼晓明,姚笑青,等.基础工程设计原理[M].北京:人民交通出版社,2011:135—148.  
YUAN Juyun, LOU Xiaoming, YAO Xiaqing, *et al.* Design principles of foundation engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2011: 135—148. (In Chinese)
- [5] 《桩基工程手册》编写委员会.桩基工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1995:236—257.  
Committee for Compiling the Pile Foundations Handbook. Pile foundations handbook [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995: 236—257. (In Chinese)
- [6] ZHAO Minghua, LIU Jianhua, LIU Daiquan, *et al.* Force analysis of pile foundation in rock slope based on upper-bound theorem of limit[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(3): 404—410.
- [7] 尹平保,赵明华,赵衡,等.考虑斜坡效应的桩柱式桥梁基桩稳定性分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2016,43(11):20—25.  
YIN Pingbao, ZHAO Minghua, ZHAO Heng, *et al.* Stability analysis of pile-column bridge pile considering slope effect[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(11): 20—25. (In Chinese)
- [8] ZHAO Heng, YIN Pingbao, LI Xibing. Mechanical response of bridge piles in high-steep slopes and sensitivity study [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(10): 4043—4048.
- [9] 邢恩桥,许国辉,杨俊杰.用静力触探参数确定地基土水平地基抗力系数的比例系数  $m$  值——以天津地区为例[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2005,35(4):683—686.  
XING Enqiao, XU Guohui, YANG Junjie. Determination of the values of proportional coefficient  $m$  of the horizontal resistance coefficient of foundation soils in terms of static CPT parameters: case studies in Tianjin[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(4): 683—686. (In Chinese)
- [10] 劳伟康,周立运,王钊.大直径柔性钢管嵌岩桩水平承载力试验与理论分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(10):1770—1777.  
LAO Weikang, ZHOU Liyun, WANG Zhao. Field test and theoretical analysis on flexible large-diameter rocksocketed steel pipe piles under lateral load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1770—1777. (In Chinese)
- [11] 吴锋,时蓓玲,卓杨.水平受荷桩非线性  $m$  法研究[J].岩土工程学报,2009,31(9):1398—1401.  
WU Feng, SHI Beiling, ZHUO Yang. Nonlinear  $m$  method for piles under lateral load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1398—1401. (In Chinese)
- [12] 范秋雁,杨钦杰,朱真.泥质软岩地基水平抗力系数研究[J].岩土力学,2011,32(S2):137—142.  
FAN Qiuyan, YANG Qinjie, ZHU Zhen. Study of foundation horizontal resistance coefficient for argillaceous soft rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 137—142. (In Chinese)
- [13] 楼晓明,吴昊,黄江枫.基于  $p$ - $y$  曲线确定饱和黏性土的地基比例系数[J].岩土工程学报,2012,34(12):2206—2212.  
LOU Xiaoming, WU Hao, HUANG Jiangfeng. Determination of slope coefficient of subgrade reaction of saturated clay based on  $p$ - $y$  curve[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2206—2212. (In Chinese)
- [14] 丁梓涵,赵其华,彭社琴,等.地基土强度对桩土水平作用特性及  $m$  值影响的模型试验研究[J].水文地质工程地质,2016,43(3):113—117.  
DING Zihan, ZHAO Qihua, PENG Sheqin, *et al.* Experimental study on the effect of strength of foundation soil on the pile-soil interaction and  $m$  value[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 113—117. (In Chinese)
- [15] 赵明华,尹平保,杨明辉,等.高陡横坡段桩柱式桥梁双桩基础模型试验研究[J].中国公路学报,2013,26(4):57—63.  
ZHAO Minghua, YIN Pingbao, YANG Minghui, *et al.* Model test of double-pile foundation for pile-column bridge in high and steep cross slopes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 57—63. (In Chinese)
- [16] 尹平保,赵明华,杨超炜,等.复杂荷载下横坡段桥梁桩基承载特性试验研究[J].土木工程学报,2014,47(5):110—116.  
YIN Pingbao, ZHAO Minghua, YANG Chaowei, *et al.* Experimental study on bearing capacity of bridge piles in cross slopes under complex loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(5): 110—116. (In Chinese)
- [17] 赵明华,李微哲,杨明辉,等.成层地基中倾斜偏心荷载下基桩位移特性室内模型试验研究[J].土木工程学报,2006,39(12):95—99.  
ZHAO Minghua, LI Weizhe, YANG Minghui, *et al.* A model test study on displacement of piles under inclined and eccentric loads in layered soils [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(12): 95—99. (In Chinese)
- [18] 程刘勇,许锡昌,陈善雄,等.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[J].岩土力学,2014,35(9):2685—2691.  
CHENG Liuyong, XU Xichang, CHEN Shanxiong, *et al.* Model test and numerical simulation of horizontal bearing capacity and impact factor for foundation piles in slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2685—2691. (In Chinese)
- [19] SAWWAF M E. Lateral resistance of short single pile located near geosynthetic reinforced slope [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(10): 1336—1345.