

# 高桩码头桩基在倾斜泥面中的水平承载性能研究

刘兹胜, 卓 杨, 时蓓玲, 周国然

(中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

**摘 要:** 现有的高桩码头设计方法在进行桩基水平承载力计算时通常是基于普通天然地基的水平泥面假设, 而对泥面倾斜情况下, 桩基的水平承载力计算至今没有一套成熟的计算方法可循。为揭示高桩码头排架在斜坡面上的工作机理, 通过室内模型试验系统研究了单桩在斜坡面上的水平承载特性。通过对室内模型试验结果分析, 提出了基于泥面水平时桩基水平受力性能来确定不同泥面坡度下桩的水平承载性能的修正计算公式, 包括桩身最大弯矩、桩身最大弯矩点位置、桩顶位移、泥面位移以及考虑泥面坡度和桩深度的土弹簧刚度修正公式, 为处于倾斜泥面的高桩码头桩基设计计算提供了理论依据。

**关键词:** 高桩码头; 桩基; 倾斜泥面; 水平承载性能

**中图分类号:** TU473.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2010)12-1861-07

**作者简介:** 刘兹胜(1981-), 男, 江苏徐州人, 硕士, 从事港口工程桩基研究。E-mail: liuzisheng@gmail.com。

## Horizontal bearing capacity of pile foundation in high-piled wharf with inclined ground surface

LIU Zi-sheng, ZHUO Yang, SHI Bei-ling, ZHOU Guo-ran

(Shanghai Third Harbour Engineering Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** For calculating the lateral bearing capacity of pile foundation, the existing high-piled wharf design method is always based upon the hypothesis of horizontal ground surface of common natural foundation. However, there has been no mature methods for the lateral bearing capacity of pile foundation with inclined ground surface. In order to reveal the working mechanism of high-piled wharf pile foundation on slope, the lateral bearing behavior of a single pile on slope through laboratory model tests is studied. Through analyzing the test results, a series of modified calculation formulas are put forward to confirm the lateral bearing capacity of different inclined grounds based on the pile performances with horizontal ground surface, including the maximum moment of pile and its location, displacement of pile-top and ground surface. Meanwhile, a modified formula of soil spring stiffness considering both ground surface slope and pile depth is derived, and it provides a theoretical basis for designing and calculating the foundation of high-piled wharf with inclined ground surface.

**Key words:** high-piled wharf; pile foundation; inclined ground surface; horizontal bearing capacity

## 0 引 言

高桩码头桩基通常都要穿过较厚的软弱土层, 桩尖到达较坚硬的持力层中, 同时高桩码头一般都是在岸坡土体中修建, 上覆抛石棱体, 并承受静力和水文动力因素的作用。高桩码头桩基不仅仅承受竖向垂直荷载, 而且往往还承受较大的水平荷载。对于水平荷载作用下高桩码头桩基的受力分析是一个相当复杂的问题, 因为必须考虑结构与桩、土的共同工作问题, 即三者需要同时满足静力平衡和变形协调条件, 其计算方法的研究受到国内外普遍重视。

模型试验是研究水平受荷桩承载性能的重要手段, 早在 20 世纪 70 年代, Davisson 等<sup>[1]</sup>就利用铝合金管在干标准砂中进行模拟桩基水平受力特性的模型

试验。后来, Mayne 等<sup>[2]</sup>、Caliendo 等<sup>[3]</sup>、Pan 等<sup>[4]</sup>又利用有机玻璃模型、钢管、及木质模型等进行过室内模型试验研究。王梅等<sup>[5]</sup>通过对大量模型试验结果的分析, 提出了一个简单合理的水平荷载作用下单桩的计算方法, 使计算结果可考虑单桩非线性响应的影响; 赵明华等<sup>[6]</sup>以合金铝管作为模型桩, 对轴、横向荷载联合作用下的桩受力特性进行分析。但以上关于桩基的水平承载性能的计算理论和计算方法均基于天然泥面水平的假设, 而对天然泥面倾斜时桩基的水平承载性能研究较为欠缺。目前的高桩码头设计中, 当有倾斜泥面计算时采用(JTJ291-98)《高桩码头设计与施工

规范》<sup>[7]</sup> 4.2.3 规定: 码头下面设抛石棱体, 在计算桩的水平承载力和垂直承载力时, 各桩的假想地表面在桩轴线上的位置, 可取码头前沿泥面与实际斜坡面交点的 1/2 处 (图 1)。然后从假想地表面处算起, 根据假想嵌固点法进行设计计算。但该规定最早出于 1973 年的日本港口规范中, 当时的码头规模较小, 码头平台宽度也很小, 一般在 20 m 左右, 采用该方法进行计算基本满足工程需要。但随着水运工程集装箱运输的发展, 码头平台宽度已经远远超过 20 m, 有时可达 40 m 甚至以上。如果仍然沿用该方法, 码头的后排桩基会受到很大影响, 假想泥面可能到桩顶甚至超过桩顶, 在进行桩的假想嵌固点计算时会出现明显异常。

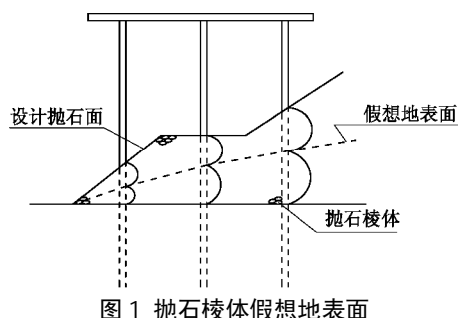


图 1 抛石棱体假想地表面

Fig. 1 Supposed ground surface of rock mound

本文研究的主要目的是通过室内模型试验探索桩基在不同坡度的倾斜泥面中的水平承载性能并与天然泥面水平时桩基水平承载性能进行对比分析, 并针对桩基计算中的关键参数建立相关关系, 使得倾斜泥面的桩基计算有据可依。

## 1 试验概况

试验在尺寸为 (长×宽×高) 2 m×1 m×2 m 的模型槽中进行。加载装置主要由滑轮和砝码组成, 通过钢丝绳和滑轮将砝码提供的自重荷载转变为施加于桩头的水平集中荷载, 通过增减砝码的个数来改变施加水平荷载的大小。位移采用百分表量测, 应变采用 TDS303 静态应变仪采集。

选用铝合金管作为模型桩材料, 其外径 40 mm, 壁厚 3 mm, 桩长 1.8 m, 试验桩入土 1.6 m, 悬臂 0.2 m。在管外壁对称粘贴电阻应变片, 测点布置方案为: 泥面以下 1 m 范围内, 每隔 5 cm 贴片; 泥面以下 1 m 外, 每隔 10 cm 贴片, 整个桩身共布置了 28 个测试断面。每次试验前需对模型桩进行抗弯刚度率定, 以保证试验测试数据准确。

试验用砂为天然风干河砂。不均匀系数  $C_u = 2.688$ , 曲率系数  $C_c = 1.140$ , 土的均匀性较好, 为级配不良中砂。填砂时要尽量保持每层砂土下落高度相同, 以保证均匀填砂。每填砂 300 kg 进行整平, 然后用平板振动器振动密实, 振动一次后, 间隔 30 min, 进行第 2 次振动密实并读取模型槽侧壁标尺的

读数, 计算每层土振动密实后的厚度。通过每层填砂质量和振动密实后的土层厚度控制土体密实度, 保证模型槽内土体均匀。

试验共进行了 5 组, 即泥面水平状态下桩的水平加载试验、泥面坡度 1:4 上坡向水平加载试验、泥面坡度 1:4 下坡向水平加载试验、泥面坡度 1:3 上坡向水平加载试验以及泥面坡度 1:3 下坡向水平加载试验。这里定义坡度角为  $q$ , 下坡向加载时,  $q$  按正值计算; 上坡向加载时,  $q$  取负值。图 2 为试验示意图。如泥面坡度 1:4 下坡向加载时, 取  $\tan q = 1/4$ , 泥面坡度 1:4 上坡向加载时, 取  $\tan q = -1/4$ 。

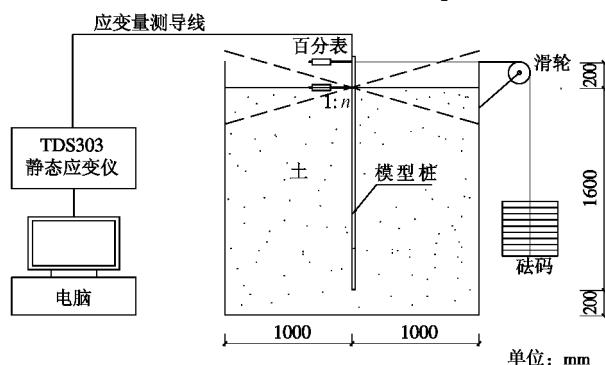


图 2 单桩模型试验示意图

Fig. 2 Sketch map of single pile model test

## 2 试验分析

桩身弯矩根据实测桩身弯曲应变计算; 桩身转角和挠度分别通过桩身弯矩曲线的一次积分、二次积分计算; 土抗力通过桩身弯矩曲线的二次微分求得。在进行桩身弯矩曲线的微分计算时, 需用 5 点滑移公式<sup>[8]</sup>对测试得到的桩身弯矩曲线进行磨光处理, 以对弯矩进行局部修正。

为了揭示更深层的规律, 提出能够在工程中实际采用的见解, 将桩身最大弯矩值、最大弯矩点位置、桩顶位移及泥面位移进行汇总, 并以泥面水平状态的桩身弯矩作为基准, 将桩身最大弯矩值大小、泥面以下桩身第一弯矩零点的位置随着坡度的变化进行数值拟合, 以研究泥面坡度对于这些因素的具体影响。

### 2.1 泥面坡度对桩身最大弯矩的影响分析

桩身弯矩是水平荷载作用下桩基设计的重要参数。表 1 为不同坡度不同加载等级下桩身最大弯矩值汇总表。由于试验数据与实际工程数据的差异性, 必须将测试数据无量纲化处理。考虑到泥面水平状态时单桩的水平承载性能计算理论比较成熟, 以泥面水平状态的水平承载性能为基准, 研究泥面坡度对于单桩水平承载性能的具体影响。将泥面水平状态的桩身最大弯矩值定为 1, 其它坡度的数据均与水平状态进行对比可得不同坡度不同加载等级桩身最大弯矩对比值, 如表 2 所示。

表 1 不同坡度不同加载等级桩身最大弯矩

Table 1 Maximum moment of pile with different inclined ground surfaces and different loads

<i>H/N</i>	桩身最大弯矩/(N·m)				
	$\tan q = 0$	$\tan q = -1/4$	$\tan q = 1/4$	$\tan q = -1/3$	$\tan q = 1/3$
100	23.82	23.37	23.47	23.17	27.10
200	51.27	49.76	53.69	48.15	58.72
300	83.40	78.17	88.34	74.44	91.86
400	108.68	105.76	122.59	101.94	126.31
500	138.22	134.17	153.81	129.54	161.27
600	170.33	161.47	189.87	158.04	200.35
700	205.45	192.29	229.36	185.24	240.04
800	236.70	223.72	266.83	215.46	281.54
900	270.86	260.08	305.11	244.77	318.30
1000	304.79	291.30	343.38	277.81	364.03
1100	338.94	329.58	—	310.65	—
1200	374.28	366.35	—	344.49	—

表 2 不同坡度不同加载等级桩身最大弯矩对比表

Table 2 Comparison of maximum moment of pile with different inclined ground surfaces and different loads

<i>H/N</i>	桩身最大弯矩/(N·m)				
	$\tan q = 0$	$\tan q = -1/4$	$\tan q = 1/4$	$\tan q = -1/3$	$\tan q = 1/3$
100	1	0.98	0.99	0.97	1.14
200	1	0.97	1.05	0.94	1.15
300	1	0.94	1.06	0.89	1.10
400	1	0.97	1.13	0.94	1.16
500	1	0.97	1.11	0.94	1.17
600	1	0.95	1.11	0.93	1.18
700	1	0.94	1.12	0.90	1.17
800	1	0.95	1.13	0.91	1.19
900	1	0.96	1.13	0.90	1.18
1000	1	0.96	1.13	0.91	1.19
1100	1	0.97	—	0.92	—
1200	1	0.98	—	0.92	—

表 3 不同坡度不同加载等级桩身最大弯矩点位置

Table 3 Location of maximum moment of pile with different inclined ground surfaces and different loads

<i>H/N</i>	桩身最大弯矩点离泥面深度/cm				
	$\tan q = 0$	$\tan q = -1/4$	$\tan q = 1/4$	$\tan q = -1/3$	$\tan q = 1/3$
100	11.22	10.21	11.99	8.82	13.50
200	13.27	11.98	15.44	10.59	17.14
300	15.86	13.34	18.30	11.88	19.52
400	16.68	14.18	20.17	12.86	21.30
500	17.91	14.97	21.17	13.56	22.65
600	18.82	15.60	22.37	14.25	23.94
700	19.61	16.28	23.42	14.78	25.00
800	20.40	16.90	24.12	15.37	25.88
900	21.17	17.55	24.92	15.81	26.58
1000	21.79	18.08	25.63	16.31	27.45
1100	22.33	18.65	—	16.82	—
1200	22.90	19.24	—	17.25	—

目前, 不同学者对桩基承载性能相关拟合函数形式主要有指数型、双曲线型和对数型等。笔者通过实测资料发现, 选用指数型函数拟合泥面坡角对桩水平承载性能的影响, 能得到较理想结果。下文对桩身最大弯矩进行指数型数值拟合。

以泥面坡角  $q$  为参数对表 2 拟合, 可得

$$M_{\max,q} / M_{\max,0} = [2 + \exp(\tan q)]/3 \quad , \quad (1)$$

式中  $M_{\max,0}$ ,  $M_{\max,q}$  分别为泥面水平及坡角为  $q$  时桩身最大弯矩 (N·m)。根据式 (1) 绘图得图 3。图 3 中的散点为实测数据点, 曲线为拟合曲线, 从图 3 中可以看出, 拟合结果与实测结果吻合较好。

2.2 泥面坡度对桩身最大弯矩点位置的影响分析

试验中桩身最大弯矩点深度实测值与实际值是有差异的, 其精度取决于应变片粘贴距离, 模型桩主要受力段贴片间距为 5 cm, 故实测误差在 ±2.5 cm 内。为得到较精确的桩身最大弯矩点位置, 必须通过数值拟合计算得到。将实测最大弯矩点及其上下 2 个测点 (共 5 点) 通过四次多项式拟合, 可以得到桩身最大弯矩点位置拟合值, 如表 3 所示。

类似于桩身最大弯矩的无量纲处理方式, 以泥面水平状态的最大弯矩点位置为基准, 将桩身最大弯矩点位置进行无量纲化处理发现, 桩身最大弯矩点位置

与  $\tan q$  的关系比较接近于直线。以泥面坡度角  $q$  为参数, 对表 3 进行拟合得

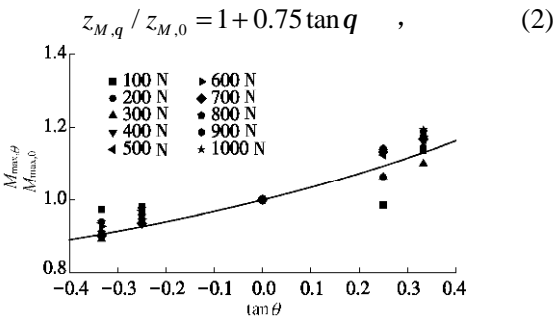


图 3 桩身最大弯矩拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of maximum moment of pile

式中  $z_{M,0}$ ,  $z_{M,q}$  分别为泥面水平及坡角为  $q$  时桩身最大弯矩点位置 (cm)。根据式 (2) 和实测数据绘图得图 4。图 4 中散点为无量纲化后的实测最大弯矩点位置, 直线根据式 (2) 绘制。从图 4 中可以看出, 拟合效果较好, 式 (2) 具有可行性。

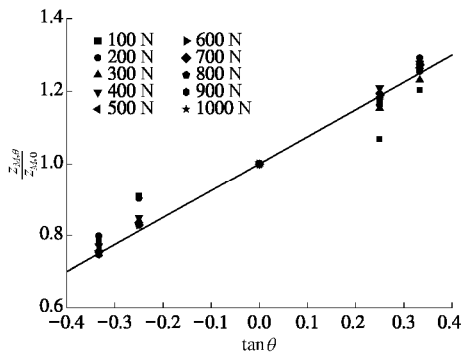


图 4 桩身最大弯矩位置拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of location of maximum moment of pile

从表 3 中可以看出, 在泥面水平时桩基的最大弯矩点位置基本在泥面以下  $3d \sim 6d$  之间, 这与一般高桩码头设计计算中所取的  $4d \sim 6d$  的假想嵌固点深度类同, 这对于确定倾斜泥面桩基的假想嵌固点深度有一定的借鉴意义。

2.3 泥面坡度对桩顶位移的影响分析

表 4 不同坡度不同加载等级桩顶位移

Table 4 Displacement of pile top with different inclined ground surfaces and different loads

H/N	桩顶位移/mm				
	$\tan q = 0$	$\tan q = -1/4$	$\tan q = 1/4$	$\tan q = -1/3$	$\tan q = 1/3$
100	0.52	0.53	0.41	0.47	0.75
200	1.42	1.32	1.50	1.18	1.97
300	2.60	2.26	2.95	2.00	3.42
400	3.81	3.26	4.54	2.96	5.12
500	5.19	4.38	6.08	3.94	6.89
600	6.73	5.53	7.96	4.99	9.02
700	8.50	6.85	10.08	6.05	11.32
800	10.18	8.16	12.17	7.30	13.84
900	12.11	9.80	14.52	8.55	16.16
1000	14.10	11.26	16.93	9.94	19.21
1100	16.09	13.06	—	11.39	—
1200	18.25	14.74	—	12.93	—

桩顶位移也是水平受荷桩设计的重要参数。为了研究泥面坡度对于桩顶位移的影响, 同样将各坡度下桩顶位移与泥面水平时的桩顶位移进行对比分析, 并针对模型试验中实际测量得到的桩顶位移与泥面坡角的关系进行数值拟合处理。

表 4 为不同坡度不同加载等级下的桩顶位移, 将泥面水平时桩顶位移定为 1, 将表 4 数据进行无量纲化处理, 并采用指数型函数进行拟合得

$$y_{H,q}/y_{H,0} = [1 + 4 \exp(\tan q)]/5 \quad , \quad (3)$$

式中  $y_{H,0}$ ,  $y_{H,q}$  分别为泥面水平及坡角为  $q$  时桩顶位移 (mm)。由式 (3) 可绘制桩顶位移拟合曲线如图 5 所示, 图 5 中散点为实测数据点, 曲线为拟合曲线。从图 5 可以看出, 拟合结果与实测结果吻合较好。

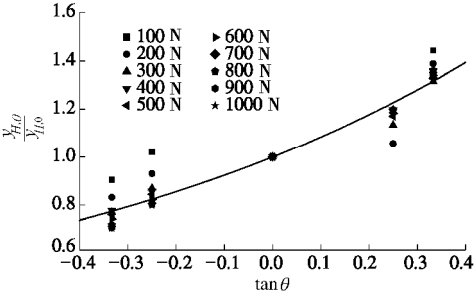


图 5 桩顶位移拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of displacement of pile top

2.4 泥面坡度对泥面位移的影响分析

根据实测泥面位移, 同样可以将泥面坡度对其影响进行数值拟合分析。表 5 为不同坡度不同加载等级下泥面位移。将泥面水平时泥面位移定为 1, 将表 5 中的数据进行无量纲化处理, 并进行数值拟合可得泥面位移的修正公式

$$y_{0,q}/y_{0,0} = [-1 + 6 \exp(\tan q)]/5 \quad , \quad (4)$$

式中  $y_{0,0}$ ,  $y_{0,q}$  分别为泥面水平及坡角为  $q$  时的泥面位移 (mm)。根据式 (4) 绘制拟合曲线如图 6 所示, 从图 6 中可以看出拟合结果与实测结果吻合较好 (图中的散点为实测数据点, 曲线为拟合曲线)。

表 5 不同坡度不同加载等级泥面位移

$H/N$	泥面位移/mm				
	$\tan q = 0$	$\tan q = -1/4$	$\tan q = 1/4$	$\tan q = -1/3$	$\tan q = 1/3$
100	0.22	0.19	0.27	0.03	0.33
200	0.64	0.55	0.85	0.30	0.93
300	1.20	1.00	1.61	0.64	1.71
400	1.86	1.47	2.47	1.07	2.62
500	2.62	2.03	3.33	1.53	3.61
600	3.45	2.62	4.39	2.03	4.83
700	4.43	3.33	5.63	2.55	6.17
800	5.37	4.02	6.85	3.17	7.66
900	6.47	4.93	8.26	3.80	9.06
1000	7.61	5.76	9.72	4.50	10.92
1100	8.75	6.75	—	5.27	—
1200	10.00	7.71	—	6.07	—

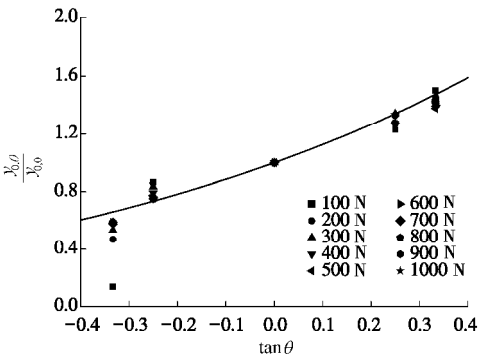


图 6 泥面位移拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of displacement of soil surface

3 倾斜泥面下水平桩计算方法研究

上文提出的修正公式都是基于水平受荷单桩计算，而工程中多需进行倾斜泥面中高桩码头排架甚至是码头整体计算。因此，研究倾斜泥面下桩基计算方法成了亟待解决的关键技术课题。下文将通过 ANSYS 有限元分析，研究倾斜泥面状态下土弹簧刚度变化，解决水平受荷桩在倾斜泥面的计算问题。

由于土体的力学性质具有很强的非线性和离散性，因此在实际工程中常将土体简化为土弹簧进行计算。土弹簧刚度  $k$  值表达式为

$$k_i = q_i h B / y_i \quad (5)$$

式中， $k_i$  为  $i$  节点土弹簧刚度 (N/m)， $q_i$  为  $i$  节点土抗力 (N/m<sup>2</sup>)， $h$  为土抗力作用高度 (m)， $B$  为桩宽或桩径 (m)， $y_i$  为  $i$  节点的横向位移 (m)。

表 6 加载 600 N 时土弹簧刚度  
Table 6 Soil spring stiffness for load of 600 N

$z/\text{cm}$	土弹簧刚度/(kN·m <sup>-1</sup> )				
	$\tan q = 0$	$\tan q = -1/4$	$\tan q = 1/4$	$\tan q = -1/3$	$\tan q = 1/3$
-5	36.72	85.09	19.67	134.17	18.68
-10	68.88	124.47	41.87	205.46	36.53
-15	117.53	176.07	75.16	333.66	67.99
-20	184.14	234.68	119.31	648.27	115.87
-25	263.76	285.82	173.32	1086.59	185.63
-30	340.10	318.97	228.99	1413.98	284.73
-35	386.32	328.15	273.72	1274.26	430.87

计算土弹簧刚度时发现，加载等级较小时，土弹簧刚度离散性很大；当计算深度超过 32 cm 即 8*d* 时，弹簧刚度离散性也很大。当加载量达 400 N，计算深度不超过 8*d* 时，各坡度弹簧刚度计算值规律性良好。为此，我们进行了以下简化处理：①由于弹簧刚度离散性较大，不考虑小荷加载段的弹簧刚度变化；②弹簧刚度计算深度在 8*d* 范围内，对 8*d* 以下桩段，弹簧刚度按 8*d* 深度处的弹簧刚度取值。

首先计算不同坡度不同荷载（400 N 及以后）作用下土弹簧刚度（如图 7 所示），然后进行数值拟合，提出计算方法，最后通过 ANSYS 有限元数值模拟分析验证计算方法的有效性、可行性。

由图 7 可见，土弹簧刚度不仅是  $q$  的函数，还与深度有关。下面以加载 600 N 为例，研究坡度及深度对弹簧刚度的影响。将各坡度泥面以下 8*d* 内弹簧刚度计算值汇总于表 6，表中  $z$  为计算点距泥面距离。

设泥面水平状态时弹簧刚度值为 1，将表 6 中数据进行无量纲化处理，以泥面坡度角  $q$ 、桩深  $z$  为参数进行拟合分析，可得

$$k_q / k_0 = 0.55 + 0.45 \exp[-\frac{2}{3}(10 - a) \tan q] \quad (6)$$

式中  $a = z/d$ ； $k_0$ ， $k_q$  分别为泥面水平和泥面坡角为  $q$  时对应  $z$  深度处土弹簧刚度 (N/m)。

根据式 (6)，以泥面以下 (1~4)  $d$  为例，绘图如图 8 示。图 8 中散点为计算无量纲弹簧刚度，曲线为按照式 (6) 计算所得的拟合曲线，从图 8 中可以看

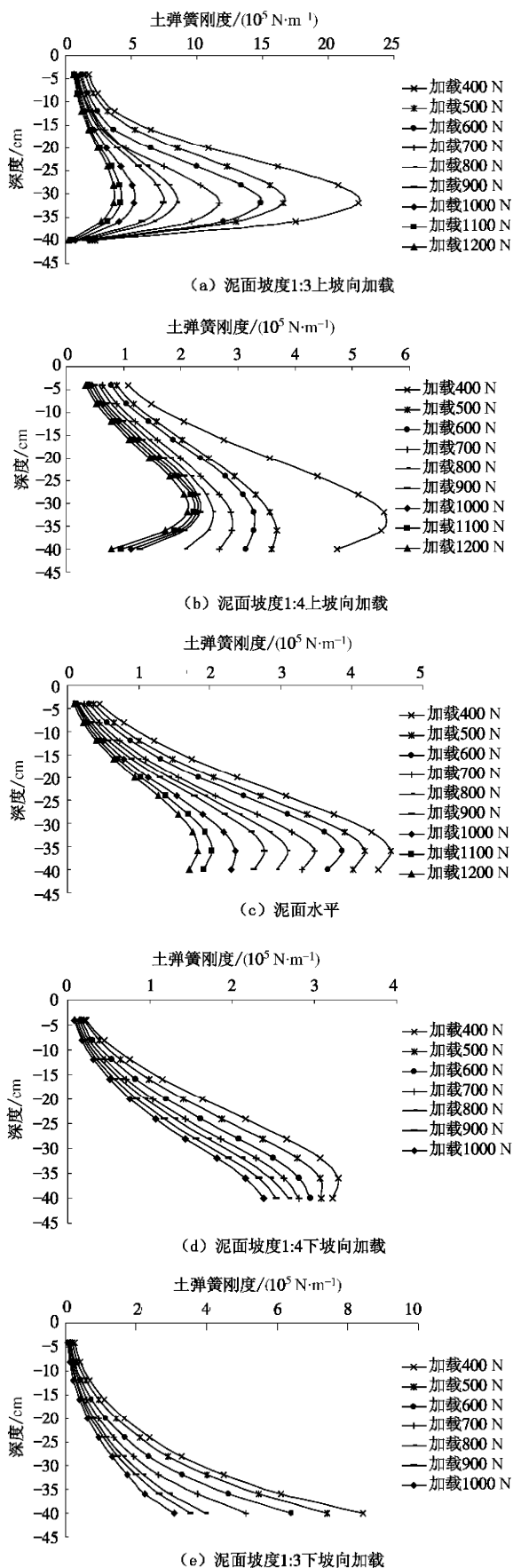


图7 不同坡度下土弹簧刚度

Fig. 7 Soil spring stiffness with different inclined ground surfaces

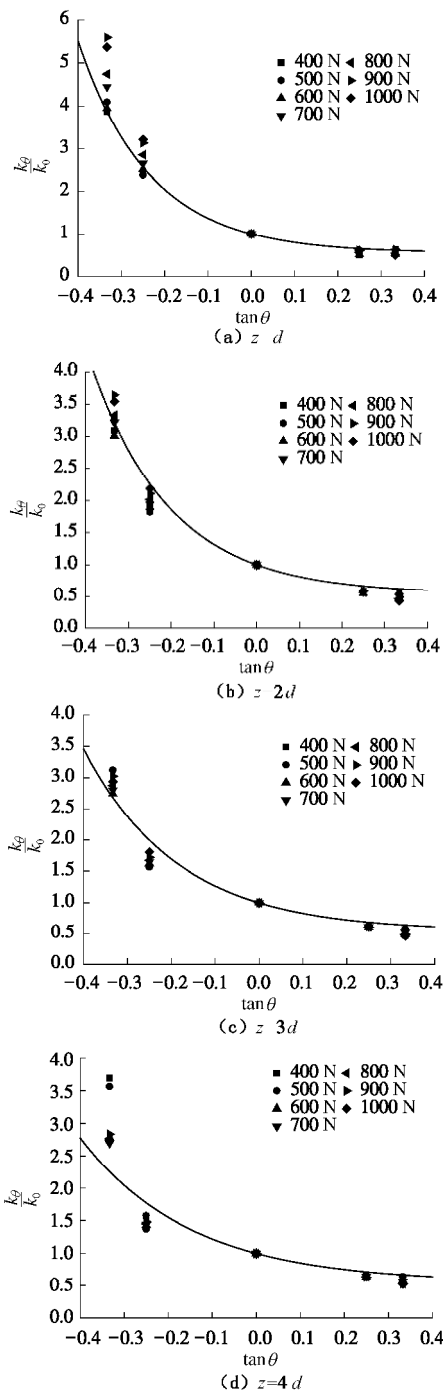


图8 土弹簧刚度拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of soil spring stiffness

出, 拟合的结果比较好。

以下通过 ANSYS 数值模拟验证式(6)的合理性。ANSYS 有限元分析采用线弹性假定, 桩身采用 BEAM3 单元, 土弹簧采用 COMBIN14 单元。桩顶受水平荷载, 桩底约束沿桩深度方向位移。以 600 N 外载为例, 在泥面水平的土弹簧刚度基础上, 根据式(6)重新计算各坡度土弹簧刚度, 代入 ANSYS 计算, 并与实测值比较, 如图 9 所示。从图 9 可知, 有限元模拟的结果与实测值基本一致, 由此可以认为式(6)基本正确, 具有实用性、可行性。

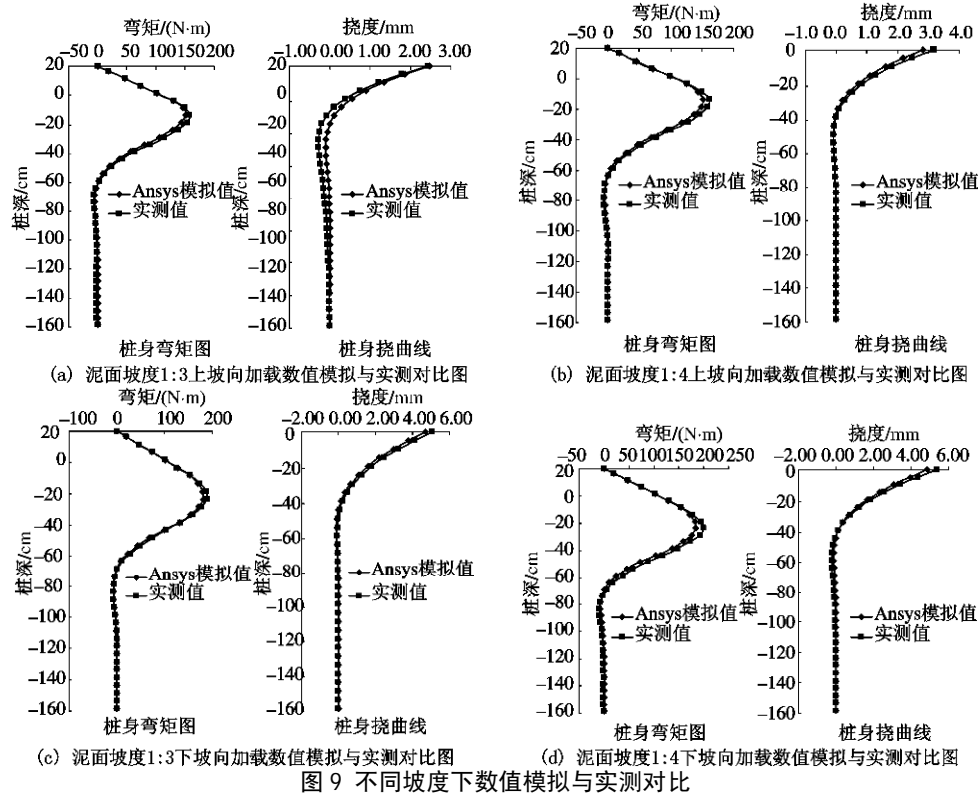


图 9 不同坡度下数值模拟与实测对比

Fig. 9 Comparison of numerical simulation and actual measurement with different inclined ground surfaces

## 4 结 论

(1) 通过各坡度的水平受荷桩室内模型试验, 针对泥面坡度对于桩身最大弯矩、桩身最大弯矩点位置、桩顶位移及泥面位移的影响进行了数值拟合分析, 并提出了基于泥面水平状态的修正公式。

(2) 结合 ANSYS 有限元数值模拟分析, 通过模型试验、数值拟合, 研究了泥面坡度对土弹簧刚度的影响, 提出了针对泥面坡度和桩深度的修正公式并进行了数值模拟与实测值的对比验证, 为倾斜泥面下水平桩的有限元计算提供了理论依据。

## 参考文献:

- [1] DAVISSON M T, SALLY J R. Model study of laterally loaded pile[J]. Soil Mech Found Div, ASCE, 1970, **96**(5): 1605 - 1627.
- [2] MAYNE P W, KULHAWY F H, TRAUTMANN C H. Laboratory modeling of laterally loaded drilled shafts in clay[J]. J Geotech Engng, 1995, **121**(12): 827 - 835.
- [3] CALIENDO J A, ANDERSON L R. Lateral load testing of model piles, Phase 1. Report No. 96-60 to the Mountain Plains Consortium[R]. Utah: Utah TransPortation Center, 1996.
- [4] PAN J L, GOH A T C, WONG K S, et al. Model tests on single piles in soft clay[J]. Can Geotech J, 2000, **37**: 890 - 897.
- [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]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **23**(1): 23 - 30. (in Chinese))
- [6] 赵明华, 吴 鸣, 郭玉荣. 轴、横向荷载下桥梁基桩的受力分析及试验研究[J]. 中国公路学报, 2002, **15**(1): 50 - 54. (ZHAO Ming-hua, WU Ming, GUO Yu-rong. Study of the behavior analysis and model test of bridge piles under simultaneous axial and lateral loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, **15**(1): 50 - 54. (in Chinese))
- [7] JTJ291—98 高桩码头设计与施工规范[S]. (JTJ291—98 Design and construction code for open type wharf on piles[s]. (in Chinese))
- [8] 《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: 764 - 778. (Compilation committee of pile foundation engineering manual. pile foundation engineering manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995: 764 - 778. (in Chinese))