

文章编号: 1000-7598-(2014)11-3191-08

砂土中边坡附近单桩水平抗力的模型试验研究

高博雷^{1,2}, 张陈蓉^{1,2}, 张照旭³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 中国石油西气东输管道公司, 上海 200122)

摘 要: 针对平地 p - y 曲线对临近边坡桩基的不适用性, 开展了砂土中边坡存在对单桩水平抗力影响的室内物理模型试验。依据边坡坡角及边坡到单桩距离的不同, 共进行了 11 次 3 组试验。采用分段 3 次多项式对实测桩身应变分布进行拟合, 以推算桩身变形和桩侧抗力, 有效克服了数据拟合点的奇异。对比无边坡时的试验 p - y 曲线、美国 API 规范曲线和双曲线模型, 确认了平地 p - y 曲线的计算表达式。其次获得了边坡条件下的单桩荷载-位移曲线, 揭示了边坡坡角和边坡到桩的距离对水平受荷单桩桩身弯矩分布的影响规律。根据试验结果采用折减系数修正浅层桩侧极限抗力, 并引入边坡对桩侧初始刚度的削弱表达式, 得到边坡条件下水平受荷单桩浅层区域双曲线 p - y 曲线表达式。最后通过与离心试验结果对比, 验证了给出的 p - y 曲线考虑边坡影响时的合理性。

关 键 词: 单桩; p - y 曲线; 水平极限抗力; 边坡影响; 模型试验; 砂土; 水平受荷
中图分类号: TU 473 **文献标识码:** A

Model tests on effect of slopes on lateral resistance of near single piles in sand

GAO Bo-lei^{1,2}, ZHANG Chen-rong^{1,2}, ZHANG Zhao-xu³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 200092, China;
3. PetroChina West-East Gas Pipeline Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: In light of the inapplicability of common method to get p - y curves near a slope, a series of model tests on lateral static loading is carried out for single flexible piles near a slope. There are totally 11 series tests of different slope angle and distance between slope and pile. The strain curves of pile are fitted with piecewise cubic polynomial, which avoids singular points effectively. p curves and y curves are gained through derivation and integration of strain curves. The load-displacement curves are drawn, and the influence of slope on the distribution of bending moment is analyzed. Existing expression is introduced and revised according to test results to get the ultimate lateral resistance near a slope. Other researcher's expression is employed to get the initial stiffness of p - y curves near a slope. The final expression of p - y curves put forward in this paper is approved reasonable by comparison with a typical centrifuge test results.

Key words: single pile; p - y curve; ultimate lateral resistance; slope effect; model test; sand; lateral loading

1 引 言

目前水平受荷桩的研究主要针对地表水平的情况, 然而实际工程中, 由于堤岸、冲刷等因素存在会出现水平受荷单桩基础布置在边坡附近。与平地不同, 边坡存在对桩基水平变形受力有明显的削弱作用。在设计中如何评估边坡对水平受荷桩的承载

影响, 是非常值得探讨的问题。

p - y 曲线是研究水平受荷桩土非线性相互作用最常见的方法, 并被美国石油协会 API 规范^[1]采用。Kim 等^[2]建议, 采用双曲线形式来模拟桩侧 p - y 曲线表达式。Reese 等^[3]由大型现场原位测试分别提出了砂土中浅层和深层单桩 p - y 曲线, 采用应变楔模型得到浅层土体极限抗力 p_u 值。朱斌等^[4]开

收稿日期: 2014-05-15

基金项目: 国家 973 计划课题 (No. 2013CB036304); 国家自然科学基金 (No. 51378392)。

第一作者简介: 高博雷, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 从事桩基工程科研工作。E-mail: 082287@mail.tongji.edu.cn

通讯作者: 张陈蓉, 女, 1982 年生, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事桩基工程科研与教学工作。E-mail: zcrong33@tongji.edu.cn

展了干砂和饱和砂土中大直径单桩静载和循环荷载离心模型试验,在修正初始刚度的基础上获得相应静载双曲线 p - y 曲线表达式。Zhang 等^[5]研究了砂土中桩侧极限抗力的产生机制,认为极限抗力由桩前土抗力和桩-土界面摩擦力两部分构成。针对边坡对水平受荷单桩的影响,Mezazigh 等^[6]开展了砂土中边坡附近单桩 p - y 曲线变化的离心试验,揭示了边坡对浅层地基的影响规律。Georgiadis 等^[7]采用三维有限元数值模拟得到黏土不排水条件下边坡附近单桩 p - y 曲线,并导入商业地基反力程序分析了边坡中单桩水平承载特性。由此可知,众多研究都集中在平地条件下的桩侧静载 p - y 曲线,针对存在边坡的情况研究成果非常有限,并且主要还是黏土地基。

本文通过物理模型试验,开展了边坡存在对水平受荷单桩桩侧抗力影响的试验研究,探讨了边坡坡角和边坡到桩的距离对单桩弯矩分布和桩侧 p - y 曲线的影响。在试验基础上,修正桩侧极限土抗力和初始刚度,提出了砂土中边坡附近浅层区域单桩双曲线 p - y 曲线修正公式,并与离心模型试验结果进行了对比验证。本文工作为边坡附近的桩基设计提供依据。

2 试验方案

2.1 地基土的制备

将河沙晾晒后过筛,去除粒径 1 mm 以上颗粒杂物,进行颗粒筛分试验得到砂土的级配曲线如图 1 所示。Oversen^[8]提出,模型试验中桩径与 d_{50} (小于该粒径的土粒质量占土的总质量的 50% 的粒径)的比值大于 40 时可以忽略模型土的尺寸效应,从级配曲线看,试验用砂 d_{50} 大约为 0.15 mm,试验用桩桩径 $D=25$ mm, D/d_{50} 大约为 160,远大于 40。采用落雨法制备土样,试验完成后取土样进行基本参数测定,结果见表 1,为中密砂。

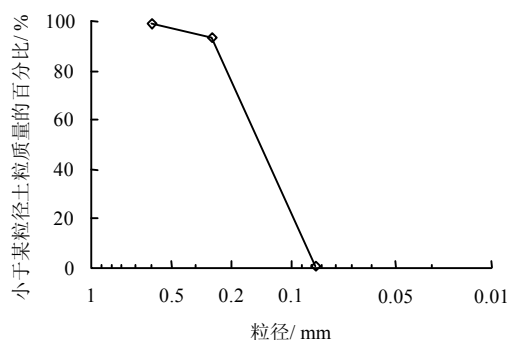


图 1 试验用砂筛分曲线

Fig.1 Calibration curve of relative density for test sand

表 1 模型试验用砂基本参数
Table 1 Parameters of sand in tests

内摩擦角 / $^{\circ}$	黏聚力 /kPa	砂粒相对密度 /%	天然孔隙比	最大干密度 /(g/cm^3)	最小干密度 /(g/cm^3)
32	0	60	0.727	1.573	1.322

2.2 模型桩的制作

模型桩由 ABS 空心塑料管加工而成,弹性模量为 2.51 GPa,泊松比为 0.39。桩顶和桩端用铝合金块封闭。桩身上布置一金属圆环,用于施加水平荷载。模型桩与原型桩的长度相似比关系为 1:80,依据桩的柔度系数确定单桩壁厚。模型桩与原型桩的尺寸对应参数见表 2。

表 2 模型桩与原型桩参数
Table 2 Parameters of model and prototype piles

桩型	桩径 D / mm	壁厚 / mm	桩长 H / m	抗弯刚度 EI /(N/m^2)
s 模型	25	2.5	0.69	28.42
原型	1 500	20.0	50.00	5.35×10^9

将模型桩对半剖开,在桩的内壁入土部分沿桩长均匀布置 10 对测量弯矩的应变片(见图 2)。在桩顶下方 3 cm 处设 2 个直径 10 mm 的圆孔,引出应变片连接线。采用悬臂梁法标定加工完成模型桩的弹性模量以及应变片系数,标定结果见图 3,材料弹性模量取 4 组数据平均值为 2.51 GPa。

2.3 试验布置与加载

试验区域(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为 1 m $\times$ 1 m $\times$ 1 m,试验采用的水平荷载加载方式以及边坡和单桩的相对位置关系示意图如图 4 所示。为消除边界效应,桩与箱壁距离大于 8D,桩端与箱底距离大于 4D。

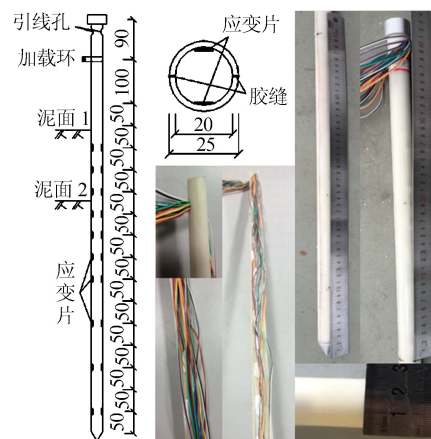


图 2 模型桩身应变片布置 (单位: mm)

Fig.2 Instrumented model pile (unit: mm)

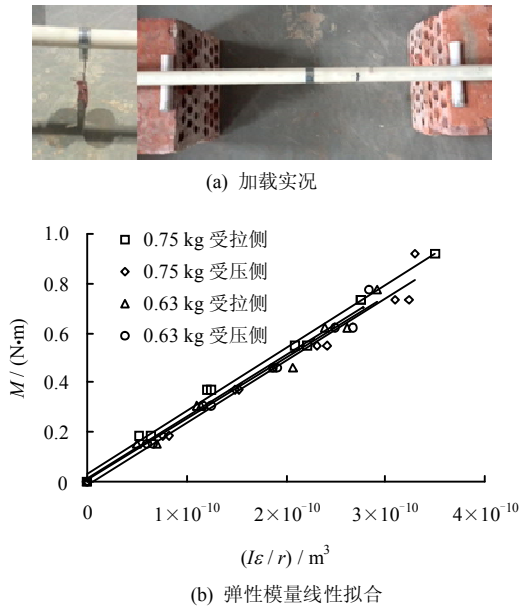


图 3 模型桩弹性模量标定图
Fig.3 Calibration of E

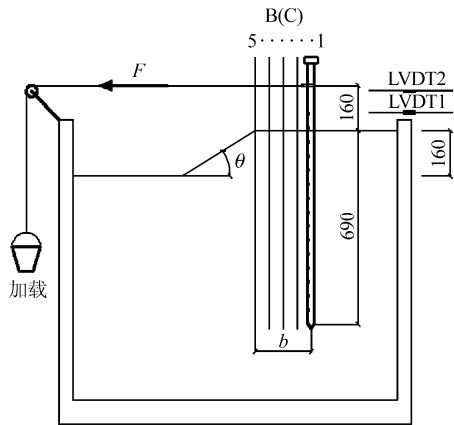


图 4 加载示意图 (单位: mm)
Fig.4 Loading diagram (unit: mm)

用固定于模型箱框架上的定滑轮施加桩顶水平荷载，加载高度控制在泥面以上 160 mm。每级加载用电子天平称量 400 g 砂缓慢倒入桶中，最后一级荷载下出现位移明显增大，停止加载。桩顶布置 2 个 LVDT 位移传感器，用以监测桩顶的位移和转角边界条件。使用 YE2539 应变采集仪采集桩身应变。

2.4 试验方案

为研究边坡存在对水平受荷单桩变形受力的影响，共进行了 11 次试验，分为 3 组。分组依据为边坡坡角 θ 的大小以及桩到边坡坡顶距离的远近 b 。A 组为基准试验，对应平地无边坡的情况。B 组 (B1~B5) 试验边坡坡角为 32° ，与试验砂土的内摩擦角相等；C 组 (C1~C5) 试验边坡坡角为 20° 。试验中埋深和加载高度均相同，B 和 C 组边坡高度为 160 mm，分组明细见表 3，图 4 中 B(C)、1~5 表

示各组别模型桩位置。

表 3 试验分组表
Table 3 Grouping of test

组别	坡角 θ / $^\circ$	桩到坡顶距离 b / mm	埋深 H / mm
A	0		690
B1		8D	
B2		6D	
B3	32	4D	690
B4		2D	
B5		0D	
C1		8D	
C2		6D	
C3	20	4D	690
C4		2D	
C5		0D	

3 试验结果分析

3.1 数据处理方法

为获得水平受荷单桩沿着深度的响应，试验研究多采用高次多项式^[9-10]对实测应变值进行沿桩长的拟合，得到分布函数 $\varepsilon(z)$ 。对应变拟合值分别进行 2 次积分和求导获得桩身位移 $y(z)$ 和桩侧土压力 $p(z)$ ^[6]，表达式为

$$y(z) = \iint \frac{\varepsilon}{r} dz dz + Ez + F \quad (1)$$

$$p(z) = \frac{d^2 M(z)}{dz^2} = \frac{d^2 \left(E_p I_p \frac{\varepsilon}{r} \right)}{dz^2} \quad (2)$$

式中： ε 为应变； r 为曲率半径； z 为深度 $M(z)$ 为对应深度 z 处的弯矩； $E_p I_p$ 为桩的抗弯刚度； E 、 F 为积分常数，由桩顶边界条件确定。实践发现，高次多项式的拟合易引起求导积分过程中的奇异拐点，数据无法用于分析。为解决该问题，本次试验采用了分段 3 次多项式对实测应变数据进行拟合，改善了数据的光滑程度，效果见章节 3.2。

3.2 A 组试验承载变形特性分析

图 5~7 为 A 组基准试验中水平受荷单桩在各级荷载下的桩身弯矩、位移以及桩侧土反力分布。为验证分段 3 次多项式数据拟合的合理性，对图 7 的桩侧土抗力进行积分得到桩顶水平荷载，发现与实际加载误差在 10% 以内，并且桩身位移曲线和桩侧土反力曲线的第一零点位置在荷载等级较小时都比较吻合。由于积分深层累积误差较大，导致荷载较大时 0 点位置有偏差。由图 7 可知，桩身最大弯矩作用点随着荷载的增大而出现下移趋势（如图 5 中虚线所示），从 4D 逐渐发展到 6D，说明浅层土体逐渐达到了极限抗力。

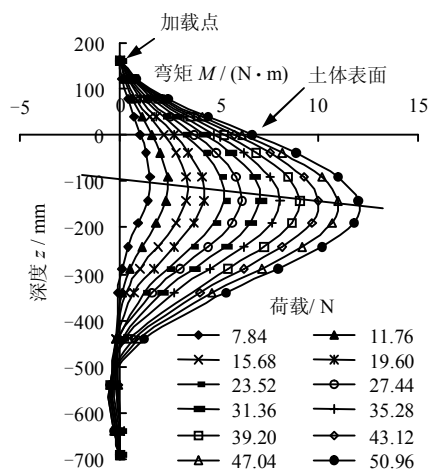


图5 桩身弯矩分布曲线(A组)
Fig.5 Bending moment curves(group A)

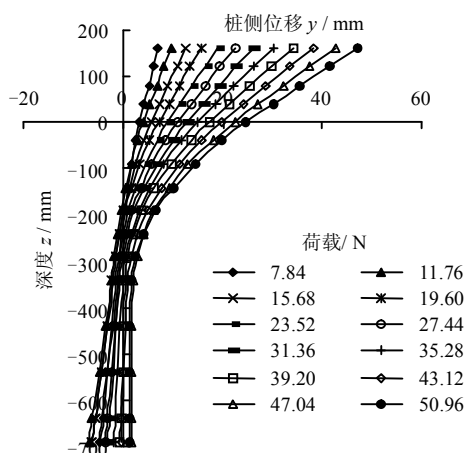


图6 桩身位移分布曲线(A组)
Fig.6 Displacement curves(group A)

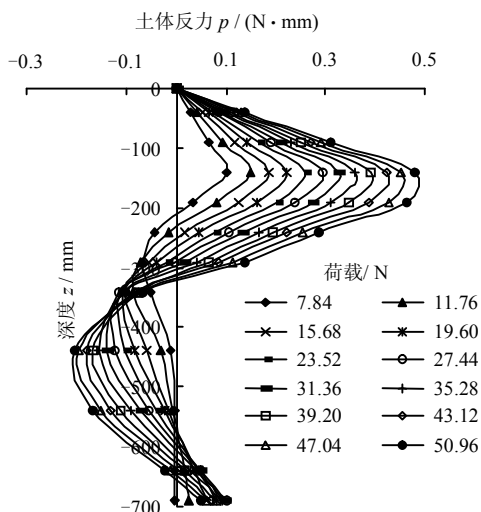


图7 桩侧土抗力分布曲线(A组)
Fig.7 Lateral resistance curves(group A)

常用的双曲线 p - y 曲线^[2]表达式为

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{\text{ini}}} + \frac{y}{p_u}} \quad (3)$$

式中: k_{ini} 为初始刚度; p_u 为桩侧极限抗力。API 规范^[1]给出砂土中桩侧极限土抗力计算公式为

$$p_u = a(C_1 z + C_2 D) \gamma z \quad (4)$$

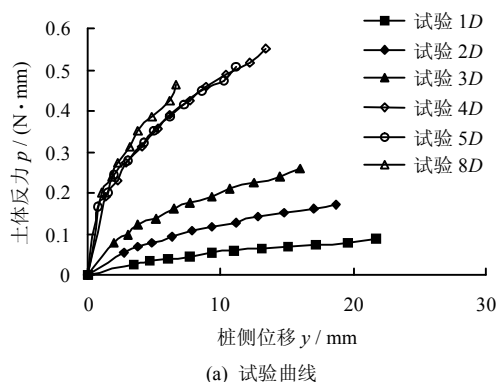
式中: C_1 、 C_2 分别为与砂土密实度及内摩擦角相关的系数, 查表确定; D 为桩的外径; z 为深度; γ 为土体重度; a 为与深度相关的修正系数, $a = \left(3.0 - 0.8 \frac{z}{D} \right) \geq 0.9$ 。

朱斌等^[5]基于砂土中大直径单桩模型试验认为桩侧 p - y 曲线初始刚度 k_{ini} 与深度 z 呈非线性关系:

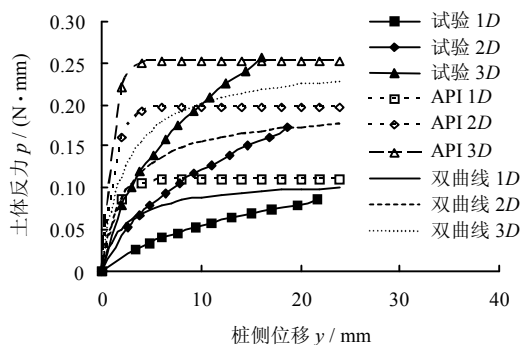
$$k_{\text{ini}} = n_h z^\beta \quad (5)$$

式中: 初始地基反力系数 n_h 与砂土的密实度、桩的打入方式以及桩头约束等条件有关; β 为经验系数, 建议取值 0.7, 其他符号意义同前。

图 8 为 A 组试验得到的砂土中水平受荷单桩 p - y 曲线以及浅层土体中 API 规范 p - y 曲线和双曲线 p - y 曲线。



(a) 试验曲线



(b) 试验曲线与理论曲线对比

图8 不同深度处的 p - y 曲线
Fig.8 p - y curves of different depth

由 8(a)试验曲线可见, 浅层 1D、2D 和 3D 深度, p - y 曲线的初始刚度和极限抗力随着深度增加明显, 而 4D、5D、8D 深度对应的 p - y 曲线刚度值趋于稳

定。对比图 8(b)浅层 API 规范 p - y 曲线和双曲线 p - y 曲线可知, API 规范计算的初始斜率误差较大, 而采用朱斌等^[5]得到的双曲线 p - y 曲线与试验值更加接近。

3.3 边坡对水平受荷单桩的影响

图 9 为 A、B 两组试验桩顶水平荷载-位移曲线。分别对应无边坡情况和边坡倾角 $\theta = 32^\circ$, 桩与坡顶距离 $0D$ 、 $2D$ 、 $4D$ 、 $6D$ 、 $8D$ 的 5 种情况。由图可见, 边坡的存在减小了荷载-位移曲线的刚度, 曲线偏离 A 组基准试验值 (无边坡), 随着桩与边坡距离 b 的增大, 边坡影响逐渐减弱。同样的荷载条件下, $b = 0D$ 时的桩顶位移最大, 而增大至 $b = 6D$ 和 $8D$, 荷载较小时, 有、无边坡存在对 p - y 曲线影响可忽略不计。 $\theta = 20^\circ$ 时组试验得到与此类似规律, 但差异有所减小。

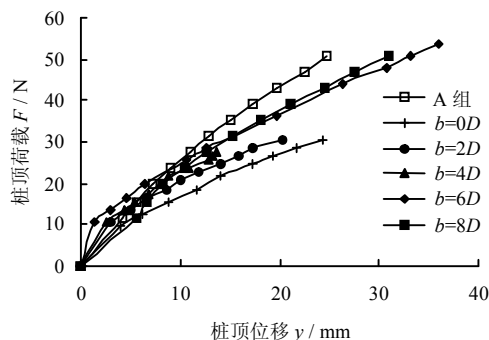


图 9 不同临坡距下的水平荷载-位移关系(B 组, $\theta=32^\circ$)
Fig.9 Load-displacement curves(group B)

图 10 为 B 组试验 (边坡坡角 32°), 桩与边坡距离 $b = 0D$ 、 $2D$ 、 $4D$ 、 $6D$ 和 $8D$ 5 个单桩位置, 所对应的桩顶水平荷载与 A 组无边坡时桩顶荷载的比值区间 (水平位移相同条件下)。

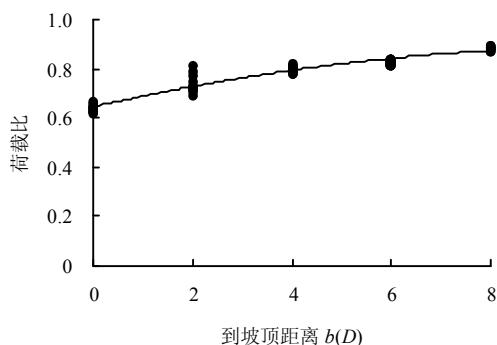


图 10 水平承载力荷载比 (B 组, $\theta=32^\circ$)
Fig.10 Load ratio line(group B)

从图 10 中可以发现, 当 $b = 8D$ 时, 荷载比基本稳定在 0.9, 从 $b = 4D$ 降至 $b = 0D$, 荷载比从 0.85

下降到 0.6 左右, 显然边坡存在对这一距离段最为敏感。

图 11 为 C 组试验 (边坡角度 20°), 桩顶水平荷载为 39.2 N 时, 距离边坡不同距离处的单桩桩身弯矩沿着深度的分布曲线。由图可见, 离边坡越近, 最大弯矩位置越深, 变化趋势如图中虚线所示。从平地的 $0.2L$ 降至 $b = 0D$ 时的 $0.28L$ (L 为桩长), 且 $b = 0D$ 时的桩身最大弯矩值比平地大 25%左右。对 B 组试验 (边坡角度为 32°) 进行类似分析, 得到桩身最大弯矩的位置与 C 组基本一致, 但最大值比平地时大约 30%。随着边坡与单桩距离减小, 桩身最大弯矩的位置下降以及量值增加, 说明浅层土体的抗力变小, 荷载逐步向深处传递, 土体中达到极限抗力的区域呈扩大趋势。鉴于此, 本文下面进行了相关的探讨。

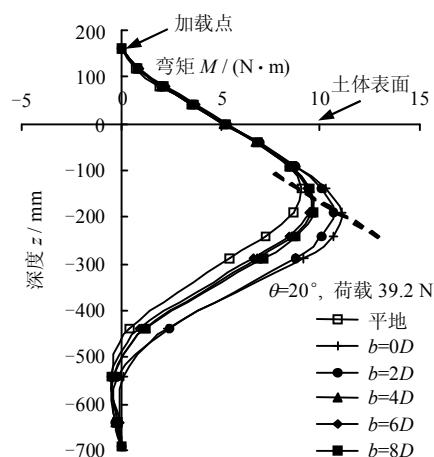


图 11 桩身弯矩曲线 (C 组)
Fig.11 Bending moment curves(group C)

3.4 考虑边坡影响的 p_u 值

由前文分析认为 (见图 8), 模型试验得到了浅层 $3D$ 范围内水平受荷桩的桩侧土抗力极限值。表 4 和表 5 分别给出了 B 组和 C 组试验中边坡附近单桩在 $1D$ 、 $2D$ 、 $3D$ 深度处桩侧极限抗力 p_u 的试验值, 以及平地条件下 A 组试验值和 API 规范计算值。

表 4 B 组试验中 p_u 值对比
Table 4 Comparison of p_u for group B

深度 / mm	不同组别的 p_u / (N/mm)						
	API ^[1]	A	B1	B2	B3	B4	B5
1D	0.11	0.09	0.09	0.07	0.05	0.05	0.04
2D	0.20	0.18	0.17	0.14	0.09	0.09	0.08
3D	0.28	0.27	0.26	0.20	0.14	0.13	0.12

表5 C组试验中 p_u 值对比
Table 5 Comparison of p_u for group C

深度 / mm	不同组别的 p_u / (N/mm)						
	API ^[1]	A	C1	C2	C3	C4	C5
1D	0.11	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.06
2D	0.20	0.18	0.16	0.16	0.16	0.13	0.12
3D	0.28	0.27	0.24	0.24	0.24	0.19	0.18

为了得到边坡角度和单桩位置对桩侧极限抗力 p_u 值的影响,绘制了归一化的桩侧极限抗力值和桩与边坡距离关系的折线图,如图12所示。因归一化值均小于1,表明与平地相比,边坡的存在确实削弱了 p_u 值。 32° 坡角的边坡对 p_u 值的影响整体大于 20° 坡角的边坡。随着距离边坡越近,土层越浅, p_u 值越小。单桩逐渐远离边坡时, p_u 值有所增加,且浅层位置增加速度略快。

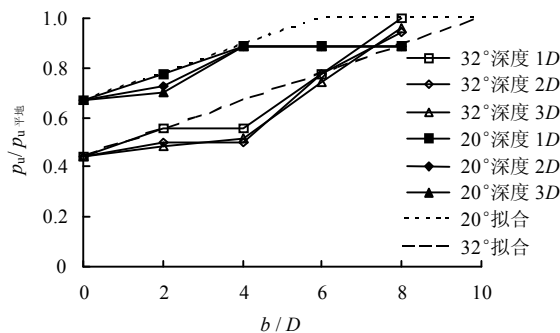


图12 桩侧土极限抗力比折线

Fig.12 Broken lines of ultimate lateral resistance ratio

目前尚没有文献给出砂土边坡条件下桩侧极限抗力的计算公式。本文在试验分析的基础上对现有的砂土平地条件下的桩侧极限抗力公式加以修正,以适应边坡的使用环境。式(4)给出的API规范 p_u 值表达式虽然使用简单,但没有与桩侧极限抗力的产生机制建立联系。Zhang等^[4]在全面回顾前人研究工作^[11-12]基础上提出了砂土中桩侧极限抗力的数学表达式为

$$p_u = (\eta p_{\max} + \xi \tau_{\max}) D \quad (6)$$

式中: η 、 ξ 为单桩截面的形状系数,圆桩建议取值分别为0.8和1.0。 $p_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$ 分别为桩前最大土抗力和桩-土界面最大摩擦力, $p_{\max} = K_p^2 \gamma z$, $\tau_{\max} = K \gamma z \tan \delta$, K_p 为被动土压力系数, K 为与侧向土压力系数 K_0 有关的影响系数, δ 为桩-土界面的内摩擦角。将各参数及表达式代入式(6),得到

$$p_u = (0.8 K_p^2 + K \tan \delta) \gamma D z \quad (7)$$

考虑边坡角度 θ 和边坡到单桩距离 b 对桩侧极限抗力的影响,对桩前最大土抗力 $p_{\max}$ 进行修正,引入折减系数 α ($\alpha \leq 1$),桩侧极限抗力表达式改为

$$p_u = (\alpha 0.8 K_p^2 + K \tan \delta) \gamma D z \quad (8)$$

因桩-土界面摩擦力影响较小,本文不做修正。

对图12中得到的2条趋势线进行处理,认为修正系数 α 与桩坡距离 b 近似线性相关:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \frac{b}{D} \quad (9)$$

式中: α_1 为图12中归一化曲线的纵坐标截距,与边坡坡角相关。试验结果得到,边坡坡角 $\theta = 32^\circ$, $\alpha_1 = 0.44$; $\theta = 20^\circ$, $\alpha_1 = 0.66$;平地时 $\theta = 0^\circ$, $\alpha_1 = 1$,发现坡角 θ 的正切与 α_1 线性相关,得到

$$\alpha_1 = 1 - 0.9 \tan \theta \quad (10)$$

系数 α_2 值基本一致,由最小二乘法拟合,建议 α_2 取值为1/16。经过上述修正,得到考虑边坡影响的浅层土中桩侧水平极限抗力计算公式为

$$p_u = \left[\left(1 - 0.9 \tan \theta + \frac{1}{16} \frac{b}{D} \right) 0.8 K_p^2 + K \tan \delta \right] \gamma D z \quad (11)$$

3.5 考虑边坡影响的初始刚度确定

对于双曲线 p - y 曲线,控制参数除了桩侧极限抗力 p_u 外,还有初始刚度 k_{i0} 。Georgiadis等^[7]根据有限元数值模拟和试验结果,给出了黏土中不排水条件下边坡附近单桩 p - y 曲线初始刚度修正公式为

$$\frac{k_i}{k_{i0}} = \cos \theta + \frac{1 - \cos \theta}{6} \left[\frac{z}{D} + \left(\frac{b}{D} - 0.5 \right) \tan \theta \right] \leq 1 \quad (12)$$

式中: k_{i0} 为平地下的 p - y 曲线初始刚度; k_i 为考虑边坡存在时的 p - y 曲线初始刚度。

尽管式(12)针对黏土条件,但初始刚度更多的是受土体的弹性力学特性影响,与土的黏聚性关系不大。表6为试验得到的 k_i/k_{i0} 比值以及由式(11)得到的计算值,对比发现两者误差未超过10%,认为式(11)适用于一般情况。

表6 K_i/K_{i0} 理论值与试验值对比
Table 6 Comparison between predicted k_i/k_{i0} and test data

K_i/K_{i0}	b				
	8D	6D	4D	2D	0D
理论	0.99	0.96	0.93	0.90	0.87
试验	1.00	0.99	0.97	0.9	0.81

3.6 计算方法验证

Mezazigh^[6]开展了砂土中边坡附近水平受荷单桩的 5 组离心模型试验, 并对试验 p - y 曲线进行了探讨, 5 组试验均得到了桩侧极限抗力。本文采用式 (12) 对这 5 组试验数据进行计算, 计算值与试验结果的对比如图 13 所示, 同时也给出了对本文的 11 次试验所对应的浅层 1D、2D 和 3D 深度处的桩侧极限土抗力计算结果与试验结果的对比。图中所有散点基本落在等值线周围, 吻合程度较好, 说明本文给出的计算表达式对边坡附近桩侧极限土抗力的估算有一定的参考价值。

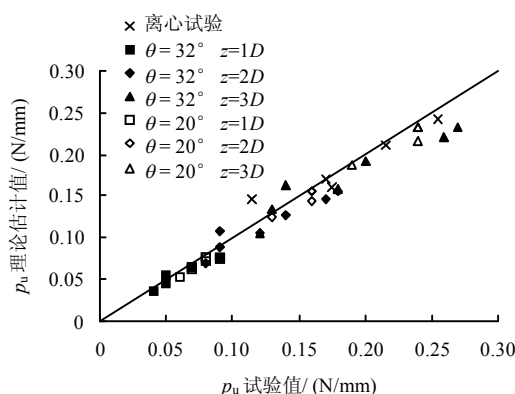


图 13 p_u 值理论和试验结果对比

Fig.13 Comparison between predicted p_u and test data

图 14 为 Mezazigh^[6]离心模型试验 p - y 曲线与式 (11)、(12) 计算得到的双曲线 p - y 曲线。

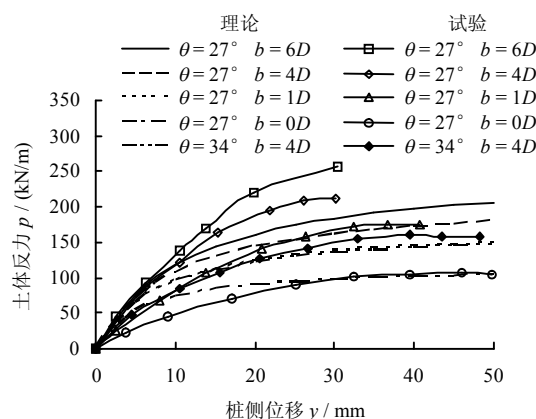


图 14 p - y 曲线理论值和离心模型试验结果的对比

Fig.14 Comparison between predicted p - y curves and test data

5 组 p - y 曲线对应的深度均为 1.2 m, 边坡坡角 θ 和单桩到边坡距离 b 图中均已标出。由图可见, 34° 坡角时两者吻合较好; 27° 坡角时, 桩与边坡距离较近的 0D 情况两者较吻合。随着距离的增加,

1D~3D 的情况在水平位移较大时两者误差增大, 且计算值小于试验值。原因可能有以下 2 个, 对比图 13 可知, 3 组离心试验 p_u 值的理论值均略小于试验值; 式 (12) 估算的初始刚度值偏小。但从工程应用角度, 本文的计算结果还是可接受的, 且偏于保守。

4 结 论

(1) 对于水平受荷桩, 采用分段 3 次多项式拟合桩身应变沿桩身的分布, 推导桩侧变形和桩侧土反力是合理的数据处理方法, 可以有效地消除数据奇异点。

(2) 对于砂土中的水平受荷单桩, API 规范 p - y 曲线给出的浅层地基初始刚度过大, 建议采用双曲线 p - y 曲线, 由朱斌等给出的表达式计算双曲线的初始刚度。

(3) 边坡的存在对单桩的水平抵抗有明显地削弱作用, 具体表现为浅层土体抗力减小, 桩侧弯矩增大, 最大弯矩作用点下移。随着边坡角度增大和桩与边坡距离越近, 削弱作用越明显。桩与边坡距离大小有一敏感区, 超过该区, 边坡影响可忽略。

通过折减系数修正 p - y 曲线的桩侧极限抗力和初始刚度来考虑边坡存在对桩基水平抗力的削弱作用, 本文提出了砂土中不同边坡角度和桩与边坡距离条件下桩侧双曲线 p - y 曲线的计算方法, 为边坡附近水平受荷桩的设计提供了依据。

参 考 文 献

- [1] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms[S]. USA: American Petroleum Institute, —Working stress design, 2000.
- [2] KIM B T, KIM N, LEE W J, et al. Experimental Load-transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong river sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(4): 416—425.
- [3] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Analysis of laterally loaded piles in sand[C]//Proceedings of 6th Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1974: 473—483.
- [4] 朱斌, 熊根, 刘晋超, 等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(10): 1807—

- 1815.
- ZHU Bin, XIONG Gen, LIU Jin-chao, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(10): 1807—1815.
- [5] ZHANG L Y, SILVA F, GRISMALA R. Ultimate lateral resistance to piles in cohesionless soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131(1): 78—83.
- [6] MEZAZIGH S, LEVACHER D. Laterally loaded piles in sand: slope effect on p - y reaction curves[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(3): 433—441.
- [7] GEORGIADIS K, GEORGIADIS M. Development of p - y curves for undrained response of piles near slopes[J]. **Computers and Geotechnics**, 2012: 53—61.
- [8] OVESEN N K. The scaling law relationship[C]// *Proceedings of the 7th European Conference on Mechanics and Foundation Engineering*. Brighton: [s. n.], 1979: 319—323.
- [9] 陈张林, 陈洪, 张忠苗. 抗水平力单桩 p - y 曲线计算公式研究[C]//浙江省第十届土力学及岩土工程学术讨论会, 北京:中国建材工业出版社, 2004: 10—15.
- [10] 章钊, 过超, 龚维明. 单桩水平承载性能研究[J]. **路基工程**, 2010, (5): 56—58.
- ZHANG Zhao, GUO Chao, GONG Wei-ming. Study on horizontal bearing capacity of single pile[J]. **Subgrade Engineering**, 2010(5): 56—58.
- [11] BRIAUD J L, SMITH T O, MEYER B J. Using the pressuremeter curve to design laterally loaded piles[C]// *Proceedings of 15th Offshore Technology Conference*. Houston: [s. n.], 1983: 495—502.
- [12] SMITH T D. Pile horizontal soil modulus values[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 113(9): 1040—1044.

软土地基上紧临建筑高填土设计技术研究

著译者: 李亚明 贾水钟 蔡兹红 李伟 版次: 第一版 出版时间: 2014-01 开本: 小 16 开 页数: 208

出版单位: 中国建筑工业出版社 标准书号: 978-7-112-15988-8 定价: 53.00 元

内容简介: 随着物质水平的提高与精神文化的要求不断发展, 需要营造地形地貌的特大型生态公建(例如园林、主题乐园)类建筑正向规模化方向发展, 地形中需要的高填土方与高度的增加, 成为对邻近建筑物不利影响考虑的重要因素, 给理论和实践都提出了新的挑战。上海辰山植物园建筑物邻近需要大规模的高填土工程, 这在上海软土地区尚属首次尝试, 没有成熟的经验借鉴。本书结合辰山植物园高填土设计与施工的实践过程, 针对软土地基上高填土对相邻建筑物的不利影响进行了详细研究; 通过现场原位试验和数值模型试验相结合研究, 系统深入地归纳了高填土对邻近桩基及地基的影响规律, 特别是提出了高填方影响范围; 提出了填土较高、工期较短时类似工程的地基处理方法及工序要求; 重点就相应的有效防治措施进行了深入分析, 与全过程工程监测结论对比及验证; 提出了路堤桩复合地基结合桩基托板加筋复合挡墙技术, 解决了高填土邻近建筑物不均匀沉降问题。本书可供结构工程专业的研究、设计人员以及大专院校师生参考, 也可为建筑师进行建筑创作提供结构工程师角度的视野。同时对业主、施工、监理、项目管理人员进行风险控制也有良好的借鉴作用。

目录: 第一章 软土地基上高填土对紧临建筑物的不利影响研究概述; 第二章 软土地基上高填土对紧邻建筑物的不利影响分析; 第三章 试验段工程研究及高填土对紧邻建筑物影响参数反演分析; 第四章 控制高填土对紧邻建筑物的不利影响措施研究; 第五章 高填土对相邻建筑物的不利影响措施的工程实践研究; 第六章 高填土对相邻建筑物的不利影响及措施研究与应用总结。

读者对象: 工程技术人员, 高校学生。