

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.133



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



大厚度人工填土地基中桩基的水平承载特性

刘德仁^{a,b}, 费岩^a, 安政山^a, 张延杰^{a,b}, 牛亚强^{a,b}, 朱哲超^a, 郭娅芳^a
(兰州交通大学 a. 土木工程学院; b. 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 兰州 730070)

摘要:为探究大厚度人工填土地基桩基水平承载特性及 m 法在实际工程中的适用性,进行了单桩水平承载现场试验与 m 法理论计算,得到了桩基在水平荷载作用下的位移和弯矩变化规律、水平荷载作用下的桩-土变形规律,并进一步得到了地基土水平抗力系数的比例系数 m 随荷载与位移的变化情况。结果表明:随着荷载的增加,水平位移不断增大,达到临界荷载 480 kN 后,桩基的水平位移和位移梯度均发生突变;在同一荷载下,桩基弯矩随深度的增加出现先增大后减小的规律,弯矩图呈现“两头小,中间大”的分布模式;同一深度时,随着荷载的增大,在一定深度处出现负弯矩,弯矩沿深度的影响范围约 10 m;水平抗力系数的比例系数 m 值随荷载和位移的增大呈幂级数减小,且当荷载与位移较小时,两桩 m 值相差较大,荷载与位移增大到一定值后,两桩 m 值接近,且最后稳定在一特定值附近。通过试验数据对 m 法计算结果进行验证与改进:对比发现 m 法计算最大位移与实测结果接近;当荷载较小时,计算最大弯矩与实测结果接近,超过临界荷载后,相差较大,说明荷载达到临界值时最大弯矩发生了突变,需要通过修正系数 β 对弯矩计算结果进行修正,修正后的弯矩与实测值更吻合, m 法更加符合工程实际。

关键词:人工填土地基;桩基;水平承载特性;现场试验;m 法;修正系数

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)01-0071-09

Horizontal bearing characteristics of pile foundation in large thickness artificial fill foundation

LIU Deren^{a,b}, FEI Yan^a, AN Zhengshan^a, ZHANG Yanjie^{a,b}, NIU Yaqiang^{a,b},
ZHU Zhechao^a, GUO Yafang^a

(a. School of Civil Engineering; b. Road and Bridge Engineering Disaster Prevention Technology National Local Joint Engineering Laboratory, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: In order to explore the horizontal bearing characteristics of pile foundations in large-thickness artificial fill foundation and the applicability of the m-method in engineering practice, the field tests of horizontal bearing capacity of single piles and the theoretical calculations of the m-method are carried out. The variation patterns of displacement and bending moment under horizontal loads are obtained, and the deformation characteristics of pile-soil under horizontal loads are presented. The variation of the proportional coefficient m of the horizontal resistance coefficient of the foundation soil with the load and displacement is further obtained. The results show

收稿日期: 2023-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(51868038); 甘肃省基础研究创新群体项目(21JR7RA347)

作者简介: 刘德仁(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程及特殊土与寒区工程研究, E-mail: liuderen@mail.lzjtu.cn.

Received: 2023-07-24

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51868038); Basic Research Innovation Group Project of Gansu Province (No. 21JR7RA347)

Author brief: LIU Deren (1978-), professor, PhD, main research interests: geotechnical engineering and special soil and cold region engineering, E-mail: liuderen@mail.lzjtu.cn.

that with the increase of loading, the horizontal displacement increases continuously, and after reaching the critical value of 480 kN, the horizontal displacement and displacement gradient of pile foundations change drastically. Under the same loading, the bending moment of pile foundations increases first and then decreases with the increase of depth. The bending moment diagram shows the distribution pattern of “small at both ends and large in the middle”. At the same depth, the bending moment increases with the increase of load, and negative bending moment appears at a certain depth. The influence range of bending moment along the depth is about 10 m. The proportional coefficient m of the horizontal resistance coefficient decreases exponentially with the increase of load and displacement. When the load and displacement are small, the m values of the two piles are quite different. When the load and displacement increase to a certain value, the m values of the two piles are close and finally stabilized near a specific value. The calculation results of the m -method are verified and improved by experimental data. It is found that the maximum displacement calculated by the m -method is close to the measured results. When the load is small, the calculated maximum bending moment is close to the measured results. After exceeding the critical load, the difference is large, indicating that when the load exceeds the critical value, the maximum bending moment does not show a linear elastic increase. It is necessary to correct the bending moment calculation result by the correction coefficient function β . The corrected bending moment is more consistent with the measured value, indicating that the m -method works well in engineering practice.

Keywords: artificial fill foundation ; pile foundation ; horizontal bearing characteristics ; field test ; the m -method ; correction coefficient

人工填土地基是解决工程建设场地不足的有效举措,但人工填土地基具有欠压密、不均匀,地基承载能力低、变形大等问题,无法满足现有工程建设需求。作为一种深基础型式,桩基础以承载力高、变形小、稳定性强等优点在填土地基中得到了广泛应用^[1-5]。在桩基工程设计中,对于填土地基,桩基础所受竖向荷载能传递到下部坚硬土层中,但填土地基水平约束较弱,探究填土地基中桩基的水平承载特性是目前面临的重要工程问题^[6-7]。

目前,研究水平承载特性的方法主要有3种:第1种是室内模型试验,利用模型箱和缩尺试验桩在室内进行模型试验,Wang等^[8]、刘建宇等^[9]、袁炳祥等^[10-11]取得了一些研究成果。室内试验易操作和观察,但桩基填土会破坏原有土体结构且模型箱的边界效应无法忽略,使得试验准确性难以保证。第2种是开展现场大型原位桩基水平载荷试验。在现场试验桩或原位桩上布置位移计、钢筋计、土压力盒等测试仪器,直接测量桩基在水平荷载作用下的位移、弯矩、土抗力等,以评价桩基的承载特性。Deng等^[12]、Li等^[13]、霍少磊等^[14]、郭沛翰等^[15]在不同土体上开展了现场原位试验,为研究桩基现场载荷试验提供了宝贵经验。现场原位试验准确性高,能真实反映桩基位移、弯矩等随外荷载的变化情况,是研究桩土作用机理最直接的手段,但成本高,耗时长,工作量大。第3种是理论计算,其中最常见

的理论计算方法是 m 法,该方法将桩侧土假设为多组弹簧,采用微分方程求解桩基水平承载能力。Wang等^[16]、Lyu等^[17]、徐家慧等^[18]、邓涛等^[19]、吴锋等^[20]采用 m 法计算了不同土体中水平受荷桩的承载能力。 m 法简单便捷,应用范围广,但在深厚填土地基中, m 法的应用可能会受到限制。

针对桩基水平承载特性,学者们在理论计算、模型试验、现场测试等方面虽然取得了一定的进展,但对于大厚度人工填土地基上桩基水平承载特性的研究还不充分。笔者通过大厚度填土地基上钢筋混凝土灌注桩水平载荷试验研究基桩的水平承载特性,用 m 法计算桩基水平承载能力,与现场试验结果进行对比,并对 m 法进行修正,使计算结果与实测结果更吻合。

1 桩基水平载荷试验

1.1 试验场地条件

某铁路工程桥梁桩基拟选场地地形起伏较大,沟谷切割较深,在后来的挖山造地工程中,在其原有地表上填筑了高达20 m的填方,填料为泥岩碎块。地层主要信息如表1所示。由于地质条件变化,回填土层的密实程度及桩基设计所需的地基参数不明确,不能按照原设计图纸进行桥梁基础的施工。因此,在该人工填土地基制作工程原型试验桩,进行桩基水平载荷试验,研究在水平

荷载作用下深厚填土地基中桩土相互作用过程, 为设计部门提供水平地基比例系数等桩基设计探究填土地基中桩基水平承载能力的发挥过程, 参数。

表1 试验场地各地层工程地质特征

Table 1 Detailed engineering geological characteristics of each layer in the test site

层号	层名	层厚/m	地层描述
①	人工填土	0~20	灰黑色,主要成分为碎砖块、煤渣及砂质黄土。稍湿,稍密,不宜做基础持力层
②	砂质黄土	0~3	浅黄色,土质较均一,潮湿,稍密-中密
③	细砂	0~2	呈透镜状,褐黄色,成分以石英、长石为主,颗粒较均,分选性一般,砂质不纯,含土量约为15%,夹砂砂质黄土薄层,稍湿,中密
④	砾砂	0~0.5	褐黄色,成分以石英、长石为主,砂质不纯,颗粒不均,含约35%粒径2~10 mm砾石,含土量约为15%。稍湿至饱和,中密-密实
⑤	泥岩夹砂岩	0~10	泥岩,棕红色,主要成分为黏土矿物,泥质胶结,成岩作用差,岩质较软,层状构造;砂岩,棕红色,成分以石英、长石为主,泥钙质胶结,成岩作用差,层状构造

1.2 试验方法

现场桩基水平荷载试验采用文献[21]规定的慢速维持荷载法,初步估计最大荷载为800 kN。试验荷载分10级施加,每级增加80 kN。当水平位移的变化率达到一个相对稳定的标准后,再施加下一级荷载。在荷载试验过程中,监测桩身钢筋计及桩身位移变化情况。荷载作用下桩身位移迅速增加且不能达到稳定标准时,可终止加载。卸载按200 kN荷载等级进行。

1.3 试验桩布置及设备安装

1.3.1 试验桩布置

为保证试验结果的准确性,试验桩的设计与工程桩一致,承载类型为端承摩擦桩。两桩间距为3.125 m,桩身直径为1.25 m,桩长为32.0 m,桩顶露出地面1.0 m,持力层为泥岩夹砂岩。桩身混凝土设计强度为40 MPa。为加快试验进度,在混凝土中添加早强剂,桩身强度达到设计强度的90%时方可进行试验。浇筑完成后,试验桩1混凝土强度达到40.4 MPa,试验桩2达到40.1 MPa,均满足桩身混凝土设计要求。试验桩现场布置图如图1所示。

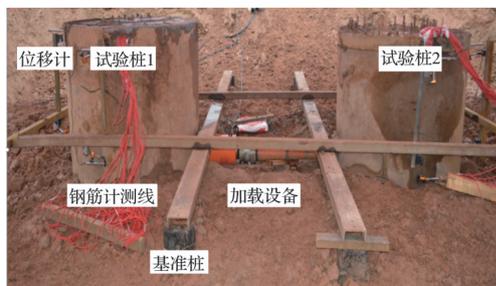


图1 试验桩现场布置图

Fig. 1 Site layout of test piles

1.3.2 钢筋计布置

为探究桩身应力及截面弯矩沿深度的分布情况,在桩身埋设钢筋计。钢筋计设置在桩身两根对

称分布的主筋上,在桩身截面上对称布设。地基土上层为人工填土,欠密实且不均匀,在该土层布设11组钢筋计,每组之间的间隔为1.5 m;下部土层为砂质黄土、砂石、泥岩夹砂石等原状土层,扰动较小且密实度较大,在试验过程中,应力与弯矩变化不大,布设4组间隔为3 m的钢筋计,在基桩底部布设1组钢筋计。钢筋计的分布如图2所示。

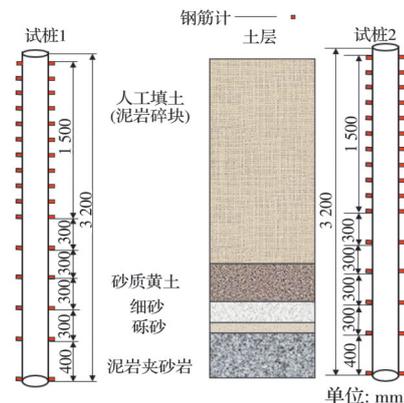


图2 钢筋计布置图

Fig. 2 Reinforcement meter layout

1.3.3 位移计布置

为了测量基桩在荷载试验过程中的水平位移,在桩端设置上下两层位移计。下层位移计贴近地面,上层位移计位于桩顶,两层位移计间距100 cm。加载点与下层位移计平行。

1.3.4 加载装置

两桩互为反力桩,因此将加载装置设置在两桩之间,由反力装置和加载装置组成,如图3所示。

1)反力装置。以试验桩1、试验桩2互为反力桩。

2)加载设备。加载设备为1台200 t的千斤顶,荷载值油压表测读。每一级的加载级差为80 kN,卸载级差为200 kN。水平静载试验采用两根试验

桩互为反力-千斤顶加载系统。为保证荷载的水平作用,在试验桩与千斤顶之间设置球铰。

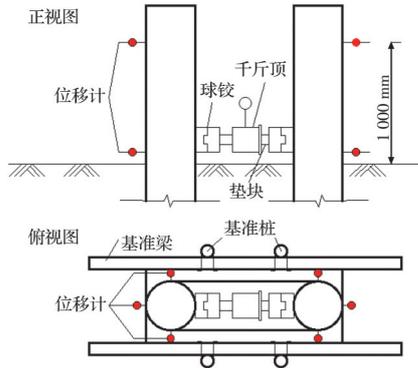


图3 加载装置及位移计的布置

Fig. 3 Layout of loading device and displacement meters

2 试验结果分析

2.1 水平荷载-位移变化规律

在水平荷载作用下,试验桩1和试验桩2的加载与卸载曲线如图4所示。由图4可知,在水平荷载作用下,两桩的水平位移随水平荷载的增加呈非线性增大。两桩均加载至最大荷载800 kN后终止加载,此时两桩实测位移分别为25.6、39.8 mm;卸载到零以后,残余变形分别为10.8、16.2 mm。

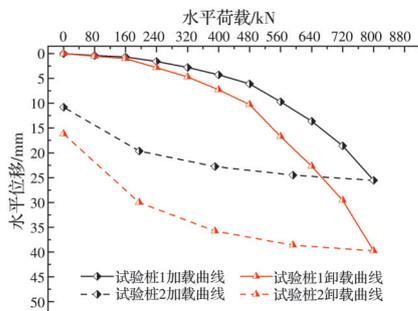


图4 试验桩的水平荷载-水平位移曲线

Fig. 4 Horizontal load-horizontal displacement curves of test piles

桩基水平临界荷载 H_{cr} 根据桩基水平荷载-位移梯度曲线($H-\Delta Y_0/H$)的第1拐点来确定。如图5所示,当荷载超过480 kN时,试验桩1和试验桩2的水平位移梯度均发生明显增大,所以,试验桩1和试验桩2的临界荷载均为480 kN。由图4可知,临界荷载对应的水平位移分别为6.1、10.2 mm。

2.2 桩身弯矩规律分析

根据图2所示钢筋布置图,测量出每个点的应力值,计算出桩身不同位置的拉应力 ϵ_1 、压应力 ϵ_2 ,通过式(1)计算截面弯矩。

$$M = \frac{E_c I_c (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{b} \quad (1)$$

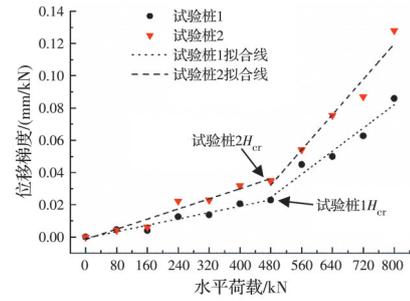
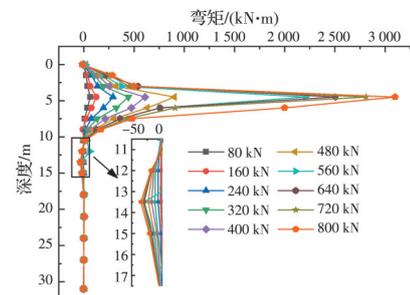


图5 水平荷载-水平位移梯度

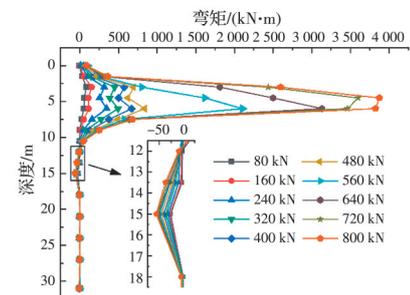
Fig. 5 Horizontal load-horizontal displacement gradients

式中: E_c 为桩身钢筋混凝土弹性模量,kPa; I_c 为观测截面惯性矩, $\text{kN}\cdot\text{m}^4$; b 为桩身直径,m。

图6为试验桩1和试验桩2在各级荷载作用下的弯矩随深度变化情况。在各级荷载作用下,两根试验桩弯矩沿深度的变化曲线表现出基本一致的规律。试桩弯矩主要集中在桩身上半部分,在水平荷载一定的情况下,随着深度的增加,弯矩呈先增大后减小的变化规律。当荷载增大到480 kN后,各试验桩弯矩峰值急剧增大,可以得出试验桩的临界荷载为480 kN。在临界荷载作用下,试验桩1、试验桩2桩身最大弯矩分别为901.8、839.4 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 。



(a) 试验桩1的弯矩



(b) 试验桩2的弯矩

图6 试验桩弯矩曲线

Fig. 6 Depth-moment curves of test piles

从图6可以看出,在试验过程中,试验桩1的弯矩峰值始终在4.5 m左右,而随着荷载的增加,试验桩2的弯矩峰值从最初的4 m左右增加到5.5 m左右;两根桩弯矩第一次为零的深度分别为9.5、12.5 m,此后出现了负弯矩。负弯矩最大值分别为

60、70 kN·m;两根桩弯矩分别在深度 12.5、17 m 以下稳定在零左右。

从图 6 还可以看出,弯矩的影响范围均在人工填土层。由于填土层密实度较低,使得土体抵抗水平荷载的承载能力较差,从而产生了较大弯矩,降低了桩基水平承载性能,因此,提升填土层密实度是保持桩基水平稳定性的有效办法。

2.3 桩侧土水平抗力系数的比例系数

桩基桩侧土水平抗力系数的比例系数 m 是研究桩基水平承载特性和桩身内力的重要参数。目前, m 值的计算主要依托于水平静载试验和规范计算。

如果桩的顶部自由,则在地面处施加水平力, m 值由式(2)、式(3)确定。

$$m = \frac{(\nu_y H)^{\frac{5}{3}}}{b Y_0^{\frac{2}{3}} (EI)^{\frac{2}{3}}} \quad (2)$$

$$b = \begin{cases} 0.9(d+1), d > 1 \\ 0.9(1.5d+0.5), d \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: ν_y 为水平位移系数; H 为水平荷载, kN; EI 为桩身抗弯刚度, kN·m²; b 为桩身计算宽度, m; d 为桩径, m; Y_0 为桩头水平推力作用点的位移, m。

根据测试结果计算出 m 值,可得到试验桩 1 和试验桩 2 的 m 值随水平荷载与水平位移的关系曲线,如图 7 所示。两桩的 m 值随水平荷载及水平位移增大而呈幂指数级减小,当荷载和位移较小时,两桩 m 值相差较大,随着荷载的增加,两桩 m 值逐渐减小并接近,最终趋于一较小值。在进行桩基设计时, m 值一般取临界荷载作用下所对应的值,分别取 11.3、6.87 MN/m⁴。

3 基于 m 法的桩基水平承载能力计算

3.1 基本假定

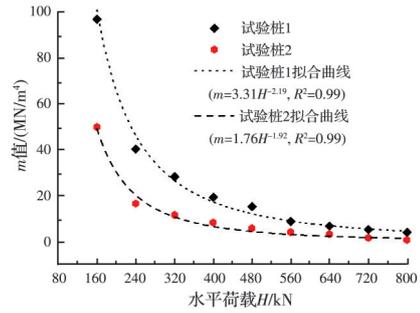
在桩基计算中, m 法是最常用的计算方法,基于 m 法假定可得到基桩的桩-土变形系数。

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb}{EI}} \quad (4)$$

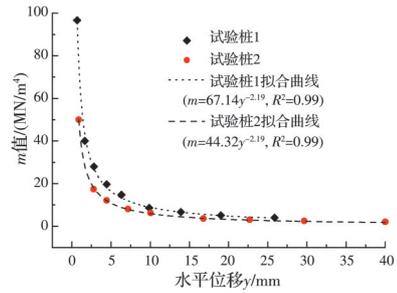
式中: m 为水平地基抗力系数的比例系数, MN/m⁴; b 的含义同式(3)。

根据桩-土变形系数 α 和桩基长度 h 的乘积 αh 可将其分为弹性长桩、半刚性桩和刚性短桩 3 种类型。本文基桩类型为弹性长桩,所以以下假定仅针对弹性长桩。

1) 试验中无竖向荷载作用,因此,可忽略桩身



(a) 试验桩水平荷载与 m 值的关系



(b) 试验桩水平位移与 m 值的关系

图 7 m 值与水平荷载及水平位移的关系

Fig. 7 Relationship between m values, horizontal loads and horizontal displacements

自重与桩身摩擦对水平作用的影响,即基桩 $P-\Delta$ 效应的影响。

2) 依据“Winkler”假定,作用于桩上的水平抗力按线性增加,即

$$P_x = mzx b \quad (5)$$

式中: x 为桩的水平位移, m; z 为沿桩方向的深度, m。

3) 试验桩的约束条件为桩顶自由、桩端固嵌。则其边界条件为

$$\begin{cases} EI(\ddot{x})_{z=0} = M_0 \\ EI(\ddot{x})_{z=0} = H_0 \\ x_L = 0 \\ \varphi(L) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

3.2 微分方程的建立

在弹性地基反力法中,通常假设桩侧土是由一系列离散的线性 Winkler 弹簧组成,且不考虑桩和土之间的摩擦力。如图 8 所示,在横向荷载和桩侧土阻力的共同作用下,截取桩基上的一小段,采用微元法建立挠曲线微分方程,如式(7)、式(8)所示。

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} = -P_x \quad (7)$$

根据幂指数函数求得

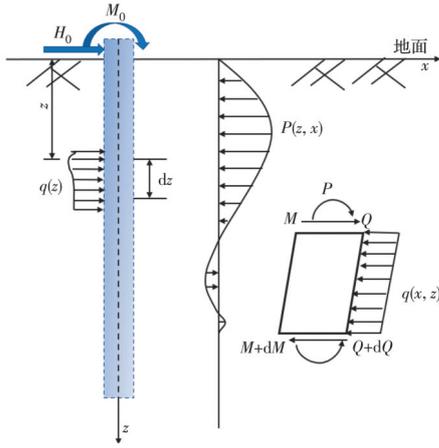


图 8 桩基微元受力分析示意图

Fig.8 Pile foundation micro-element stress analysis schematic diagram

$$\begin{cases} x_z = \frac{H_0}{\alpha^3 EI} A_x + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} B_x \\ M_z = \frac{H_0}{\alpha} A_M + M_0 B_M \end{cases} \quad (8)$$

式中： $A_x = \frac{B_1 D_2 - B_2 D_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1}$ 、 $B_x = \frac{B_1 C_2 - B_2 C_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1}$ 、
 $A_\varphi = \frac{A_1 C_2 - A_2 C_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1}$ 、 $B_\varphi = \frac{A_1 D_2 - A_2 D_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1}$ 、 $A_M =$
 $2 \frac{B_1(A_1 D_2 - A_2 D_1)}{A_1 B_2 - A_2 B_1}$ 、 $B_M = 2 \frac{B_1(A_1 C_2 - A_2 C_1)}{A_1 B_2 - A_2 B_1}$

对于弹性长桩, A_x 、 B_x 、 A_φ 、 B_φ 、 A_M 、 B_M 均为无量纲系数。

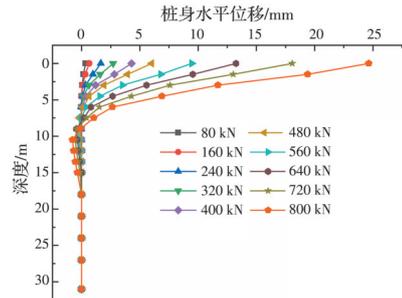
3.3 计算结果

3.3.1 桩身位移计算结果

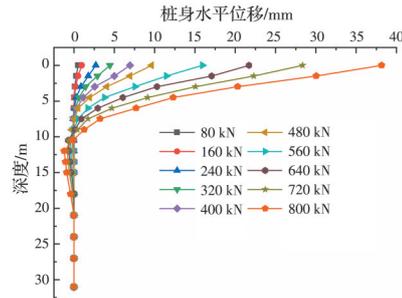
桩身水平位移计算结果如图 9 所示。试验桩展现了典型柔性桩的变形特征。在荷载相等的情况下,随着深度的增加,水平位移逐渐减小;在同一深度下,随着荷载的增加,水平位移逐渐增大。水平位移的影响在距地面 17 m 的范围内,桩身最大位移在加载点处。其中试验桩 1 和试验桩 2 的最大水平位移分别为 24.6、38.1 mm。

3.3.2 桩身弯矩计算结果

桩身弯矩计算结果如图 10 所示。桩身截面弯矩的影响主要集中在 15 m 以上的范围,从地面处向下,随着深度的增加,弯矩先增大、后减小;随着水平荷载的增加,桩身截面弯矩也逐渐增大,最大界面处向桩身深度方向移动;试验桩 1 和试验桩 2 的最大弯矩截面处均在 3.5~5 m 的范围内;最大界面处弯矩分别为 1905.8、2 427 kN·m;计算结果均小于实测最大值,偏于不安全,需要对结果进行修正,才能满足设计要求。



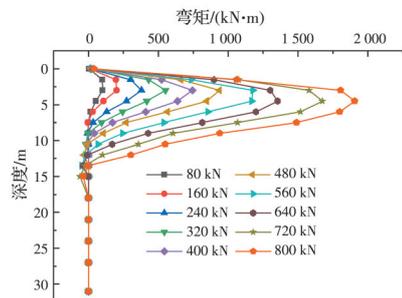
(a) 试验桩 1 桩身水平位移



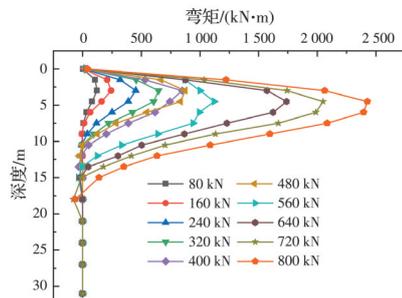
(b) 试验桩 2 桩身水平位移

图 9 桩身水平位移分布曲线

Fig.9 Horizontal displacement distribution curves of pile bodies



(a) 试验桩 1 桩身弯矩



(b) 试验桩 2 桩身弯矩

图 10 桩身弯矩分布曲线

Fig.10 Pile bodies bending moment distribution curves

4 试验与计算结果对比分析

在桩基水平承载试验中,随着外荷载的不断增大,桩基在最大弯矩处产生较大位移或发生断裂,因此,最大位移和最大弯矩是反应桩基稳定性的重要参数。

4.1 最大位移结果对比

试验桩 1 和试验桩 2 水平位移的实测值与 m 法计算值的对比如图 11 所示。现场试验与 m 法计算所得的最大水平位移均在受力点处,且两者相差不大,结果吻合较好。

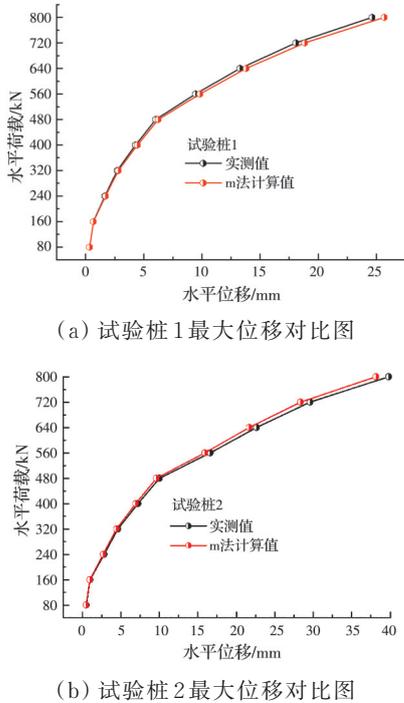


图 11 试验桩最大位移对比曲线
Fig. 11 Maximum displacement contrast curves of test piles

4.2 最大弯矩结果对比

图 12 为水平荷载作用下试验桩的最大弯矩实测值与 m 法计算值的对比。从图 12 可以看出,在 0~480 kN 范围内,实测值与计算值都近似线性增加,且相差不大;到达临界荷载 480 kN 时,弯矩最大值发生了突变;在 480 kN 后又呈线性增加。桩身最大弯矩是反映桩身水平稳定性的重要因素,实测与计算的最大弯矩值基本都近似呈线性增加,不同之处在于,当达到临界荷载时出现了突变点。原因为水平荷载增加到一定程度时桩身表面发生开裂,使得最大弯矩瞬间增大,稳定以后又随着荷载的增加近似呈线性增加,而 m 法计算时并未考虑到这一点。为能反映水平荷载作用下桩身弯矩的真实响应,需要对计算结果加以修正。

4.3 修正系数 β 的探讨

通过实测与计算结果对比可知,m 法计算的最大位移与实测结果接近,而最大弯矩在未达到临界荷载前结果符合,达到临界荷载后结果相差较大,需要修正。

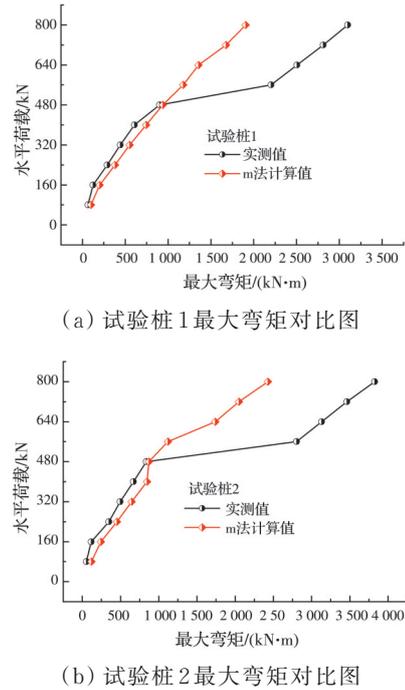


图 12 试验桩最大弯矩对比曲线
Fig. 12 Comparison curves of maximum bending moment of test piles

根据幂级数法求解桩基挠曲线微分方程所得桩基水平位移与弯矩计算公式为

$$M_z = 2 \frac{B_1(A_1D_2 - A_2D_1)}{A_1B_2 - A_2B_1} \frac{H_0}{\alpha} + 2 \frac{B_1(A_1C_2 - A_2C_1)}{A_1B_2 - A_2B_1} M_0 \quad (9)$$

从上述结果看,由于位移计算结果与实际情况相差不大,证明参数 $A_1 \sim D_1$ 与 $A_2 \sim D_2$ 选取准确,将弯矩计算的系数加以修正,得到修正公式

$$M_z = 2\beta \left[\frac{B_1(A_1D_2 - A_2D_1)}{A_1B_2 - A_2B_1} \frac{H_0}{\alpha} + \frac{B_1(A_1C_2 - A_2C_1)}{A_1B_2 - A_2B_1} M_0 \right] \quad (10)$$

$$\beta = 1.9 - \frac{H - H_0}{10F} \quad (11)$$

式中: H_0 为 560 kN; H 为不小于 560 kN 的水平荷载; F 为每级荷载数, $F=80$ kN。

采用 m 法计算出临界荷载作用下沿深度方向的弯矩值,用弯矩实测值除以计算值,得到不同深度的修正系数值,如表 2 所示。

从以上修正结果来看,临界荷载处最大弯矩实测与计算结果接近。增加一级荷载,当荷载达到 560 kN 时,出现巨大波动, β 达到 1.9;当荷载达到 560 kN 后,随着荷载的增加, β 呈线性减小趋势。修正后的弯矩计算结果如图 13 所示。

表 2 修正系数 β 随荷载变化情况
Table 2 Variation of correction coefficient β with load

水平荷载/kN	试桩 1			试桩 2		
	实测值/(kN·m)	计算值/(kN·m)	修正系数	实测值/(kN·m)	计算值/(kN·m)	修正系数
480	901.8	938.15	1.0	839.4	872.65	1.0
560	2 202.4	1 176.40	1.9	2 105.1	1 120.29	1.9
640	2 506.1	1 355.00	1.8	3 132.1	1 739.90	1.8
720	2 811.8	1 675.45	1.7	3 461.8	2 050.32	1.7
800	3 099.2	1 905.80	1.6	3 825.6	2 427.02	1.6

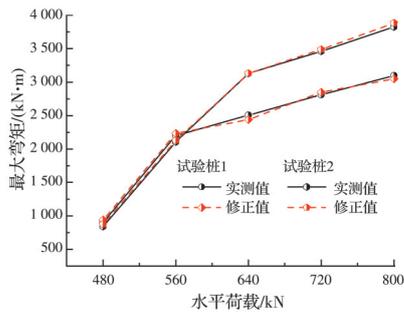


图 13 最大弯矩修正结果

Fig. 13 Correction results of maximum bending moment of test piles

5 结论

1)通过对深厚填土地基中的桩基进行水平静载试验,发现桩身弯矩沿深度变化的规律呈“先增大后减小”“两头小中间大”,且在约 10 m 后出现负弯矩。根据现场实测结果可知,两根桩的水平临界荷载均为 480 kN,其对应的水平位移分别为 6.1、10.2 mm。

2)桩侧土基床系数的水平抗力比例系数随水平荷载与水平位移的增大呈幂指数降低,表明桩基水平承载能力随外荷载增大而减小。

3)对比 m 法计算结果与现场实测结果发现,最大水平位移与实测结果接近,而最大弯矩在临界荷载之后相差较大,通过修正系数函数 β 对 m 法的计算公式进行修正,修正后的计算结果与实测值吻合较好。

参考文献

[1] 重大基础设施中桩基工程的理论与实践新进展专栏导语[J]. 中国公路学报, 2022, 35(11): 2.
Introduction to the new progress in theory and practice of pile foundation engineering in major infrastructure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(11): 2. (in Chinese)

[2] 朱洁静, 张宏鸣. 大面积填土的地基处理和桩基设计[J]. 建筑结构, 2017, 47(增刊 2): 454-457.
ZHU J J, ZHANG H. Foundation treatment and pile foundation design for large-area filling [J]. Building

Structure, 2017, 47(Sup 2): 454-457. (in Chinese)

[3] 周涛, 徐方, 杨奇, 等. 高速铁路桥梁桩基固结蠕变沉降计算方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 1968-1977.

ZHOU T, XU F, YANG Q, et al. A method for calculating the consolidation and creep-induced settlement of bridge pile foundation of high-speed railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(8): 1968-1977. (in Chinese)

[4] 吴江斌, 王卫东. 大面积填土对邻近桩基影响的分析与技术措施[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 582-587.

WU J B, WANG W D. Analysis of and engineering measures for the impact of large area fill on adjacent piles [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 582-587. (in Chinese)

[5] 邓立立. 深厚填土地基桩基施工工艺及受力性状研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(增刊 1): 260-264.

DENG L L. Research of construction technique and forcing behaviors of pile foundations in great thickness earth-fill site [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(Sup 1): 260-264. (in Chinese)

[6] 黄朝焯, 李俊杰. 置换硬壳层对成层软土中桩基水平承载特性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 2): 3472-3482.

HUANG C X, LI J J. Research on the influence of displacing hard shell on the horizontal bearing characteristics of pile foundation in layered soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Sup 2): 3472-3482. (in Chinese)

[7] 赵明华, 黄万江, 杨超炜, 等. 水平循环荷载下斜坡段桩基动力响应特性模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(8): 2268-2277.

ZHAO M H, HUANG W J, YANG C W, et al. Model test study on dynamic response characteristics of foundation piles in slope section under horizontal cyclic load [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(8): 2268-2277. (in Chinese)

[8] WANG C Y, LIU H L, DING X M, et al. Study on horizontal bearing characteristics of pile foundations in coral sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 58

- (12): 1928-1942.
- [9] 刘建宇,王春艳,刘冒佚,等.钙质砂中单桩水平承载特性模型试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(6): 74-81.
LIU J Y, WANG C Y, LIU M Y, et al. Horizontal loading model test of single pile in calcareous sand [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(6): 74-81. (in Chinese)
- [10] 袁炳祥,樊立韬,李志杰,等.层状地基中水平受荷桩-土相互作用试验[J].中国公路学报, 2022, 35(11): 62-72.
YUAN B X, FAN L T, LI Z J, et al. Experimental study on pile-soil interaction under horizontal load in layered foundation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(11): 62-72. (in Chinese)
- [11] 袁炳祥,李志杰,陈伟杰,等.基于PIV技术与分形理论的桩-土系统水平循环受荷模型试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 466-482.
YUAN B X, LI Z J, CHEN W J, et al. Experimental study on lateral cyclic loading model of pile-soil system based on PIV technique and fractal theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 466-482. (in Chinese)
- [12] 邓会元,戴国亮,龚维明,等.不同平衡堆载条件下桩基承载特性的原位试验研究[J].岩土力学, 2015, 36(11): 3063-3070.
DENG H Y, DAI G L, GONG W M Z, et al. In situ experimental study of bearing characteristics of pile foundation under different balanced surcharges [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3063-3070. (in Chinese)
- [13] LI L C, LIU X, LIU H, et al. Experimental and numerical study on the static lateral performance of monopile and hybrid pile foundation [J]. Ocean Engineering, 2022, 255: 111461.
- [14] 霍少磊,竺明星,龚维明,等.深厚软土区大直径桩水平承载特性现场试验研究[J].工业建筑, 2021, 51(5): 139-144.
HUO S L, ZHU M X, GONG W M, et al. Field tests of large diameter piles subjected to lateral loads in deep soft soils [J]. Industrial Construction, 2021, 51(5): 139-144. (in Chinese)
- [15] 郭沛翰,邹新军.均质砂土地基中竖向力-水平力-桩顶扭矩共同作用下单桩承载特性试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2593-2600.
GUO P H, ZOU X J. Bearing capacity of a single pile in sand under combined vertical force-horizontal force-torque load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2593-2600. (in Chinese)
- [16] WANG J P, SU J B, WU F, et al. Lateral dynamic load tests of offshore piles based using the m-method [J]. Ocean Engineering, 2021, 220: 108413.
- [17] LYU X Z, CHEN Z, ZHAO Z H, et al. Horizontal bearing test and optimization of m value for precast piles in alluvium stratum of the Yellow River [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 1-13.
- [18] 徐家慧,张石波,黄永辉,等.基于桩基m法的组合梁栓钉剪力件剪切刚度计算方法[J].应用力学学报, 2021, 38(4): 1690-1697.
XU J H, ZHANG S B, HUANG Y H, et al. Shear stiffness calculation method of shear connector in composite girder based on m method assumption for piles [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(4): 1690-1697. (in Chinese)
- [19] 邓涛,林聪煜,柳志鹏,等.大位移条件下水平受荷单桩的简明弹塑性计算方法[J].岩土力学, 2020, 41(1): 95-102.
DENG T, LIN C Y, LIU Z P, et al. A simplified elastoplastic method for laterally loaded single pile with large displacement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 95-102. (in Chinese)
- [20] 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 F, SHI B L, ZHUO Y. Nonlinear m method for piles under lateral load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1398-1401. (in Chinese)
- [21] 铁路工程基桩检测技术规程: TB 10218—2019[S].北京:中国铁道出版社, 2019.
Technical specification for testing of railway piles: TB 10218—2019 [S]. Beijing: China Railway Press, 2019. (in Chinese)