

桩靴抗拔承载特性模型试验及理论研究

周子健, 王梁志, 齐昌广*, 单艳玲, 赖文杰
(宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了研究桩靴抗拔承载特性, 通过自行设计桩靴抗拔模型试验装置, 测量桩顶向上位移量和桩身不同截面处的应变, 研究了桩靴的抗拔承载特性和荷载在桩身的传递规律. 以及对桩靴上拔过程中的弹性变形进行理论分析, 并与模型试验结果进行对比. 结果表明: 在上拔荷载作用下, 桩靴的轴力沿着桩身先递减, 最后在桩端处仍有部分轴力; 随着上拔荷载的逐渐增加, 桩靴在桩端处的阻力缓慢增加, 当上拔荷载达到一定阈值后, 突变为指数增长; 弹性理论分析方法预测的桩体上拔位移可适用于上拔荷载较小的情况.

关键词: 桩靴; 抗拔特性; 模型试验; 理论分析

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 05-0081-08

海上自升式平台广泛应用于海上能源开采^[1-3]. 桩靴一般应用于海上自升式平台, 平台在使用过程中, 需要将桩打入土体当中, 以桩基作为支撑, 待自升式平台作业完毕后, 需要将桩靴上升, 由于在上升过程中需要面临桩的上拔问题, 因而有必要对桩靴的抗拔承载特性进行研究.

Hossain 等^[4]通过离心机分别进行桩靴在多层、双层土的上拔试验, 研究了上拔阻力与土层的关系. Chen 等^[5]设计出可防沉垫的试验, 通过在沉垫上安装压力传感器跟踪记录桩靴下部的压力变化, 发现随着上拔速度的降低, 桩上的阻力会逐渐减小. 王懿等^[6]基于 CEL 方法建立桩靴拔出双层土的模拟, 分析桩靴上拔阻力的影响因素, 拟合出上拔的阻力预测公式. 赵军等^[7]根据桩靴试验结果产生的破裂面, 建立三维滑移破坏面模型, 通过静力平衡原理推导出桩靴的承载力理论解.

还有学者通过数值模拟对桩靴上拔机理进行研究, 并与理论和试验数据对比分析^[8-11]. 但是数值模拟是在理想的条件下对桩靴上拔进行研究, 与实际工程存在一些差距.

综上所述, 对于桩靴上拔机理大多是关于桩侧阻力的研究. 目前尚未发现国内学者对桩靴在

上拔荷载作用下的荷载-上拔位移的研究. 本文设计了桩靴抗拔模型试验装置, 对桩靴的抗拔承载特性进行研究, 通过测量桩顶的向上位移量和桩身不同截面处的应变, 研究桩靴的抗拔承载特性和荷载在桩身的传递规律.

1 模型试验设计

模型试验用土取自宁波某地的砂土, 相关砂土土性参数见表 1.

表 1 砂土土性参数

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	最小干密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	最大干密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水率/ %	相对密 实度
1.441	1.311	1.778	28.02	0.323

桩靴抗拔模型试验装置主要包括模型箱、桩靴、抗拔系统三部分. 试验模型箱尺寸为 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 1.0\text{ m}$, 由钢板焊接而成.

模型试验所用桩靴模型由钢材料预制而成, 便于将桩身应变转换成应力. 桩身直径分别为 50、100 mm, 桩长为 505 mm, 模拟桩身直径分别为 5、10 m, 桩长为 50.5 m, 故本次模型试验的相似比为 100. 具体桩型如图 1(a)所示, 从左至右桩尖角度分别为 75° 、 75° 、 45° 、 75° 、 60° 、 60° ; 桩靴模型

收稿日期: 2020-06-08.

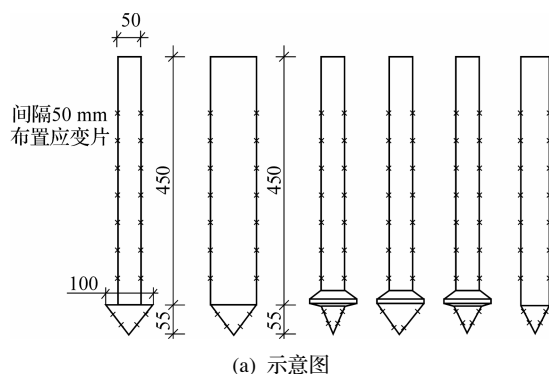
宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal1g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY21E080007, LQ18E080006).

第一作者: 周子健(1999-), 男, 浙江温州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 基础工程、地基处理. E-mail: 1012036508@qq.com

*通信作者: 齐昌广(1986-), 男, 山东济南人, 博士/副教授, 主要研究方向: 基础工程、地基处理. E-mail: qichangguang@163.com

实物如图 1(b)所示。



(a) 示意图



(b) 实物图

图 1 预制桩靴示意与实物图

抗拔桩的上拔力施加方式有多种^[12], 本试验桩靴抗拔荷载的施加方法采用定滑轮方式, 将荷载向下的力转化为对桩靴的上拔力。抗拔承载模型试验的抗拔系统由定滑轮、反力梁、钢绳、吊钩、工字钢立柱、挂盘、砝码组成(图 2)。在模型试验的反力梁上焊接多个定滑轮, 通过定滑轮的输入力与输出力相等原理可按试验要求施加抗拔荷载, 定滑轮两端连接的分别是砝码挂盘及吊钩, 两者用钢绳连接。为了能够获取桩靴在上拔荷载作用下的位移, 在桩靴侧面焊接一块平整的百分表承载板。

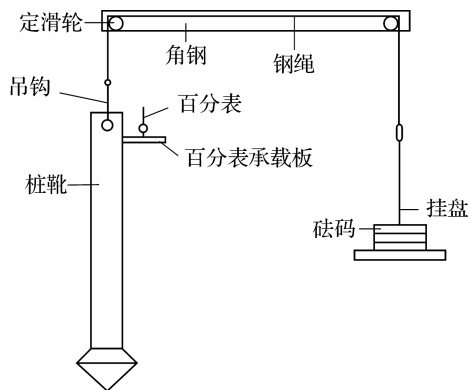


图 2 抗拔试验示意图

具体试验方案如下:

(1) 桩靴的抗拔试验包括桩身测点布置应变片、预埋桩身、施加抗拔荷载。

(2) 在桩身上每间距 50 mm 布设 2 组应变片, 以获取桩身在荷载作用下的应变数据, 再通过计算即可将应变数据转化为桩身轴力数据及桩侧摩阻力的分布规律。

(3) 粘贴应变片前, 应保证桩靴表面平整、光滑。由于本组试验所用桩靴由钢材预制而成, 为防止应变片上的导线与钢材接触而短路, 在贴片部位临近处粘贴绝缘黑胶布, 用 502 强力胶将应变片按要求粘贴到桩上, 再用 704 硅胶覆盖已固化的应变片及其外接导线。应变片的外接导线沿着桩身向桩顶方向牵引, 并连接在 DH3816N 静态应变测试系统的采集仪上, 系统将自动采集桩靴在抗拔荷载作用下产生的应变数据。

(4) 模型箱填入砂土前, 预先测量出试验桩桩尖与模型箱底部的竖直距离, 以确定砂土的第一次填埋高度。待砂土填埋高度达到预算桩尖埋置深度时, 将试验桩用钢丝绳固定在定滑轮正下方, 同时, 用重锤保证试验桩垂直度, 防止在砂土填埋过程中的试验桩倾斜。

(5) 抗拔试验桩的预埋与砂土填入模型箱同步进行, 桩身预埋高度 450 mm, 试验桩预埋位置为外侧定滑轮的正下方(图 3)。模型箱中砂土分层填筑, 每层砂土虚铺, 用砝码压实, 直到填土总高为 700 mm。砂土填筑完成后, 取土样进行室内土工试验, 得到土样的土性参数: 湿重度为 $16.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 含水率为 15.1%, 内摩擦角为 20.2° 。



图 3 抗拔桩靴预埋图

(6) 各试验桩靴的竖向抗拔静载试验采用慢速维持荷载法, 试验过程参照《建筑基桩检测技术规范 JGJ 106-2014》。根据试验砂土固有参数及桩靴

的直径、预埋深度等条件预估桩靴上拔至 40 mm 时的极限承载力,并取极限承载力的 1/10~1/15 作为抗拔试验的分级荷载,第一级荷载可取分级荷载的 2 倍.荷载施加后,在 5、10、15、30、45、60 min 时刻记录上拔位移,若相邻 2 次上拔位移相差小于 0.1 mm,即可认定在该级荷载作用下试验桩达到稳定,可进行下一级荷载的施加^[13].

2 试验数据分析

2.1 荷载—上拔位移曲线分析

试验桩的荷载—上拔位移曲线如图 4 所示.总体而言,6 根不同桩型的荷载—位移曲线都较为相似,在上拔荷载较小时,曲线形状接近直线段,发展较为平缓.随着荷载的进一步增加,曲线由原来的平缓型转变为陡峭型,斜率增大.在图中的 6 条曲线中,有桩尖角分别为 45°、60°、75°的桩靴在上拔荷载作用下,其上拔位移近乎一致,而另外 3 根不同类型试验桩的曲线差异较为明显.

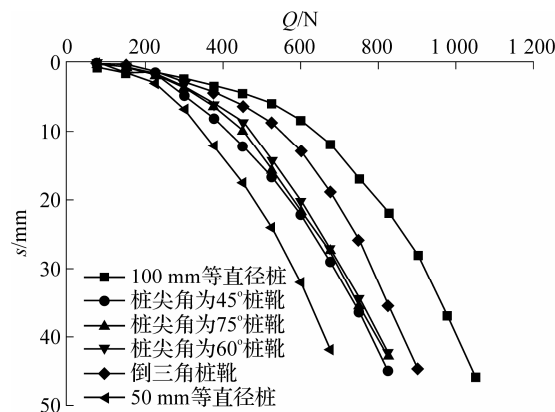


图 4 试验桩上拔荷载—位移曲线

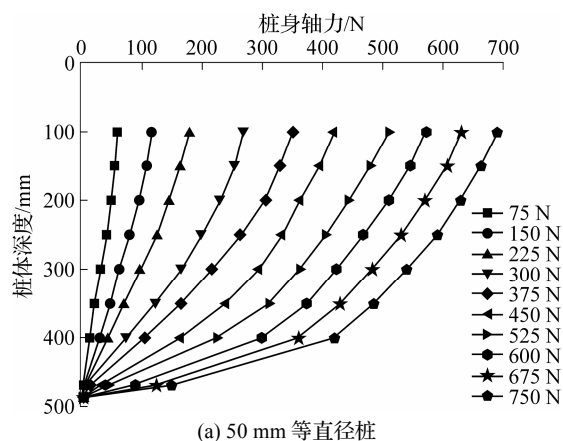
从整体上观测,50 mm 等直径桩靴的上拔位移最先达到 40 mm,其次是桩尖角不同的桩靴达到 40 mm,随后是倒三角桩靴,最后直径为 100 mm 的等直径桩上拔位移达到 40 mm.从这个结果可以发现影响桩抗拔特性的主要因素是桩直径,由于 50 mm 等直径桩的直径最小,且桩端尺寸与桩身相同,因而在较小荷载作用下即可达到终止条件.同理,100 mm 等直径桩的桩身直径比另外 5 根试验桩都大,因而达到终止条件所需的上拔荷载最大,原因是随着桩身直径增大,桩侧摩阻力与桩体本身重量也在不断增大,因而桩体上拔所需克服的阻力也就越大.影响试验桩上拔的另一个因素是桩

端形状,试验所用 6 根桩型中除 100 mm 等直径桩以外,其他 5 根试验桩桩身直径均为 50 mm.理论上,在上拔过程中,桩身侧摩阻力接近相等,但由于桩端形状的不同,导致其所需克服的上拔荷载也不相同.等直径桩桩端直径与桩身相同,因而所需上拔荷载最小.由于桩尖角为 45°、60°、75°的桩靴在桩端上部分处理相同,导致其抗拔荷载—位移曲线基本一致.另外,倒三角桩靴与桩尖角为 45°、60°、75°的桩靴在桩端处的结构存在差异,倒三角桩靴的桩端顶面可看成一个平整圆面,桩尖角为 45°、60°、75°的桩靴桩端上部可看成一个圆台.从结果上可发现,圆台形状的桩靴抗拔效果差于倒三角桩靴,也可以说圆台形状的桩靴相较于倒三角桩靴,其更加容易上拔.因而目前的自升式平台上所用桩均采用圆台型桩靴,当自升式平台作业完成后,方便上拔.

2.2 桩身轴力分析

由于桩尖角为 45°、60°、75°的桩靴轴力在上拔过程中,沿桩身的轴力分布规律相近,因而取桩尖角为 45°的桩靴作为分析对象,其各级上拔荷载作用下的桩身轴力如图 5 所示.

由图 5 可知,荷载作用下的 4 根试验桩桩身轴力随着桩体深度的增加而不断递减,在不同的桩身位置,轴力的递减速度不同.随着深度的增加,轴力的递减速度加快,而相邻两轴力的差值来源于试验桩的桩身抗拔阻力,说明随着桩体深度的增加,桩身侧摩阻力逐步发挥作用.在较小的上拔荷载作用下,桩身轴力的递减变化较为均匀,随着上拔荷载的不断增大,4 根试验桩的曲线斜率不断增大,且桩身下部的曲线斜率大于桩身上部,说明



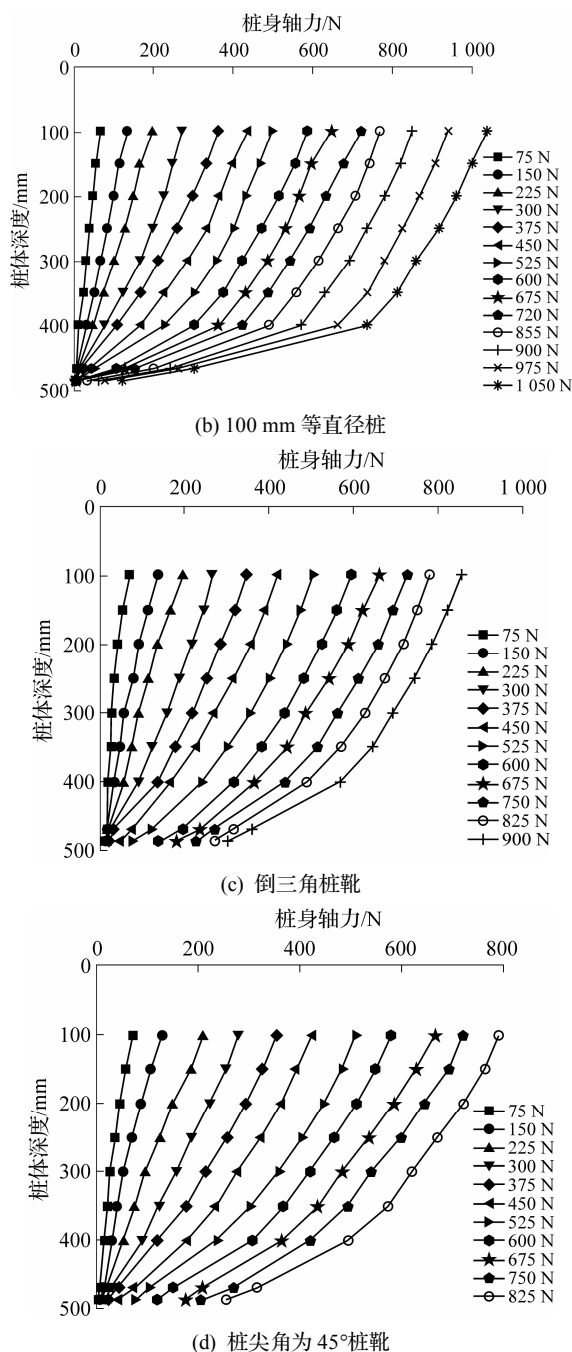


图5 桩身轴力沿桩身分布图

随着上拔荷载的增加, 桩侧摩阻力不断增大, 且在荷载下部阻力的增大速率比上部阻力大; 随着上拔荷载的增大, 各处的桩身轴力亦会增大。

等直径桩在桩端处的轴力最终会递减至“0”, 而倒三角桩靴与桩尖角为 45° 的桩靴在桩端处的轴力会随着上拔荷载的增加而不断增加, 说明倒三角桩靴与桩尖角为 45° 的桩靴随着上拔荷载的增大桩端阻力不断发挥作用。倒三角桩靴的桩端为倒

锥形, 而桩尖角为 45° 桩靴的桩端上部为圆台形状, 从轴力图中可发现圆台形状的抗拔效果弱于倒锥型。倒三角桩靴施加 900 N 荷载即可达到终止条件, 而桩尖角为 45° 的桩靴只需 825 N 上拔荷载即可, 桩端轴力倒三角桩靴达到 300 N, 桩尖角为 45° 的桩靴仅 195 N。

在加载初期, 桩靴的荷载曲线斜率不断增大, 桩端轴力较小, 说明此时桩侧摩阻力先于桩端阻力发挥作用, 且随着荷载的增大, 桩侧摩阻力不断增大; 加载至后期桩靴的荷载曲线斜率几乎不变, 而桩端阻力不断发挥作用, 造成桩端轴力不断增大, 说明此时桩侧摩阻力已发挥至极限。由此可见, 在上拔过程中桩端阻力与桩侧阻力的发挥时间并不是同步发生, 桩侧阻力要先于桩端阻力发挥作用, 且随着荷载的增大, 当桩侧阻力发挥至极限后, 此时主要才由桩端阻力来承担。

2.3 桩端阻力分析

桩靴的桩端阻力如图 6 所示。由图 6 可见, 桩靴桩端阻力曲线有 2 个明显的阶段, 在上拔荷载小于 450 N 时, 桩端阻力增长速度较慢, 且桩端阻力值较小, 说明此阶段的阻力主要由桩侧摩阻力承担, 桩端阻力则缓慢增长; 当荷载大于 450 N 时, 桩端阻力的荷载急速增长。结合图 5 分析, 可发现上拔荷载达到 450 N 后, 桩身轴力曲线几乎不发生变化, 此时桩侧摩阻力达到极限; 当上拔荷载继续增大时, 桩侧摩阻力不再增加, 而桩端阻力则随着上拔荷载的增大而迅速增加。

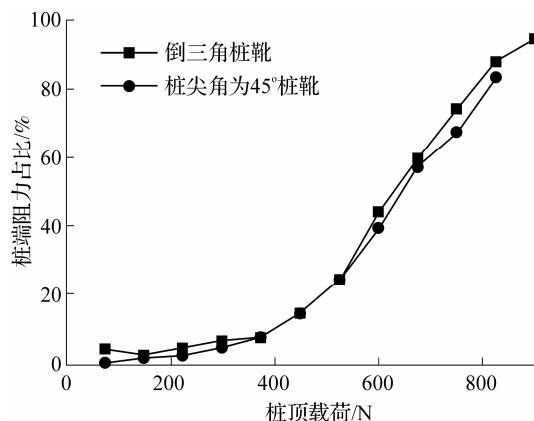


图6 桩靴桩端阻力占比图

2.4 桩侧摩阻力分析

由于在上拔过程中, 各类试验桩的桩身形状一致, 上拔时的桩身侧摩阻力变化类似, 因而选取

50 mm 等直径桩的桩侧摩阻力进行分析, 了解桩体在上拔过程中桩侧摩阻力沿桩身的变化规律, 图 7 即为 50 mm 等直径桩的侧摩阻力.

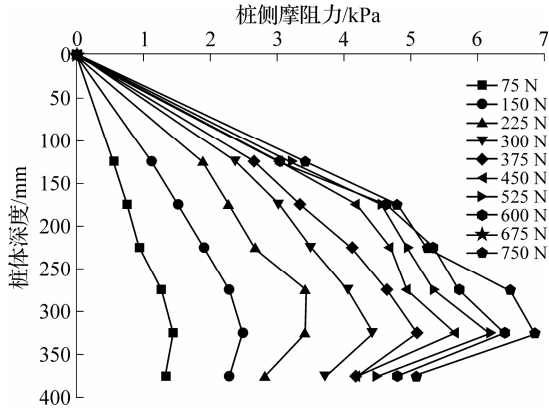


图 7 桩侧摩阻力沿桩身深度分布曲线

上拔荷载较小时, 桩的侧摩阻力较小, 且沿桩身分布较为均匀, 且随着上拔荷载的增大, 桩身侧摩阻力不断增大, 但是增大趋势并非沿着桩身均匀增加, 从图 7 中可见, 桩体中部的荷载增大速度大于桩体上部, 因而上拔过程中的侧摩阻力主要集中在桩体中部; 当上拔荷载增大到一定程度后, 桩体的侧摩阻力增加很缓慢, 说明此时桩侧摩阻力即将达到极限值, 其不会随着上拔荷载的增大而增大.

总体上, 桩侧摩阻力会随着深度的增加而不断增大, 但是从图中可发现在桩体下部的侧摩阻力小于桩体中部的侧摩阻力, 这是由于桩体在上拔过程中, 桩身向上移动, 导致桩体端部的土体发生松弛, 形成空穴, 致使靠近桩端的桩体侧摩阻力减小.

3 上拔桩靴的桩体变形理论分析

3.1 桩靴弹性变形分析

假设桩侧土体为弹性体, 并将桩端假设为刚性圆板, 模型如图 8 所示, 其中, P 为上拔荷载, τ 为桩侧土体对桩身的剪应力, 在刚性圆板处受到均布荷载 q .

由于桩侧土体对桩靴的剪应力随着距离的增加而逐渐减小, 故假设桩侧土体对桩身的剪应力与距离的平方成正相关, 算式如下:

$$\tau = \frac{\tau_0 r_0^2}{r^2}, \quad (1)$$

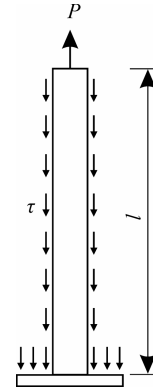


图 8 桩靴抗拔分析模型示意图

式中: τ 为桩侧土体对桩身的剪应力; τ_0 为桩侧的剪应力; r_0 为桩身半径; r 为土体单元到桩靴中心的水平距离.

引入弹塑性力学^[14]关于材料剪应变的公式:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}, \quad (2)$$

式中: γ 为剪应变; G 为桩侧土体剪切模量; u 为桩的径向变形; w 为桩的竖向变形.

如图 8 所示桩靴的计算模型中, 桩靴在上拔荷载作用下主要为竖向变形, 所以忽略剪应变中的径向变形.

因此式(2)简化为:

$$\frac{\tau}{G} = \frac{\partial w}{\partial r}. \quad (3)$$

对式(3)两边进行积分, 得到下式:

$$\int_{r_1}^{\infty} \frac{\tau}{G} dr = w = \int_{r_1}^{\infty} \frac{\tau_0 r_0^2}{G r^2} dr = \frac{\tau_0 r_0^2}{G} \int_{r_1}^{\infty} \frac{1}{r^2} dr,$$

解得:

$$w = \frac{\tau_0 r_0}{G}. \quad (4)$$

由式(1)与式(4)推导出桩侧土体剪应力与位移之间的关系, 下面对桩端土体的位移进行推导.

如图 8 所示, 桩端简化为在桩身底部放置刚性圆板, 半径为 r_1 , 其上存在均布荷载 q .

由弹性力学^[15]可得到在弹性表面作用半径为 r 的圆形均布荷载下, 圆中心的土体位移为:

$$w = \frac{2(1-\nu^2)qr}{E}, \quad (5)$$

式中: ν 为土的泊松比; E 为弹性模量.

在桩靴计算模型中桩端的均布荷载是半径为 $r_1 - r_0$ 的空心圆环, 因而可将式(5)变化为:

$$w_b = \frac{2(1-\nu^2)q(r_1-r_0)}{E}, \quad (6)$$

式中: w_b 为桩端位移.

均布荷载 q 与桩端阻力有如下关系:

$$q = \frac{P_b}{A_b} = \frac{P_b}{\pi(r_1^2 - r_0^2)}, \quad (7)$$

式中: A_b 为桩端圆环面积.

将式(7)代入式(6), 得到桩端位移:

$$w_b = \frac{P_b 2(1-\nu^2)}{\pi E(r_1 + r_0)} = \frac{P_b(1-\nu)}{\pi G(r_1 + r_0)}. \quad (8)$$

式(8)给出了桩端荷载与桩端的位移关系式, 对于完全刚性桩而言, 桩侧剪应力为常数, 则桩侧位移可由下式表示:

$$w_s = \frac{\tau_0 r_1}{G} = \frac{P_s}{2\pi l G}, \quad (9)$$

式中: w_s 为桩侧位移; P_s 为桩侧总摩阻力; l 为桩身长度.

在完全刚性桩中, 存在以下等式:

$$w_t = w_b + w_s, P_t = P_s + P_b, \quad (10)$$

式中: w_t 为桩顶位移; P_t 为桩顶上拔荷载.

由(10)式不难得出以下等式:

$$\frac{P_t}{Gr_0 w_t} = \frac{P_b}{Gr_0 w_b} = \frac{P_s}{Gr_0 w_s} = \frac{\pi(r_0 + r_1)}{(1-\nu_s)r_0} + \frac{2\pi l}{r_0}. \quad (11)$$

当桩为非完全刚性桩, 其在承受上拔荷载时, 桩身将发生变形, 导致桩侧剪应力发生变化, 因而此时不同深度的剪应力大小不同, 式(4)应用剪应力函数代替:

$$w_z = \frac{\tau_0(z)r_0}{G}. \quad (12)$$

若桩为弹性桩, 则在深度 z 处的微应变为:

$$\frac{dw(z)}{dz} = \frac{-P(z)}{\pi r_0^2 E_p}, \quad (13)$$

式中: $P(z)$ 为 z 处的轴力; E_p 为桩的弹性模量.

由微分单元的平衡易得:

$$dP(z) = -2\pi r_0 \tau(z) dz,$$

即可得到:

$$\frac{dP(z)}{dz} = -2\pi r_0 \tau(z). \quad (14)$$

将式(13)代入式(14), 得到位移的二阶导数:

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} = \frac{-1}{\pi r_0^2 E_p} \frac{dP(z)}{dz} = \frac{2\tau(z)}{r_0 E_p}. \quad (15)$$

联立式(15)和式(12), 可得:

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} = \frac{2G}{r_0^2 E_p} w(z). \quad (16)$$

式(16)为二阶常系数齐次线性微分方程, 可直接求解:

$$w(z) = C_1 e^{uz} + C_2 e^{-uz}, \quad (17)$$

$$u = \frac{1}{r_0} \sqrt{\frac{2G}{E_p}},$$

式中: C_1 和 C_2 为待定系数.

根据下列2个边界条件, 可求解待定系数 C_1 和

C_2 :

$$w(l) = w_b = \frac{P_b(1-\nu)}{\pi G(r_0 + r_1)}, \quad (18)$$

$$\left(\frac{dw}{dz} \right)_{z=l} = \frac{-P_b}{\pi r_0^2 E_p}, \quad (19)$$

解得:

$$C_1 = \frac{uP(b)(1-\nu) \cdot \pi r_0^2 E_p - P(b)\pi G(r_0 + r_1)}{u\pi G(r_0 + r_1) \cdot \pi r_0^2 E_p 2e^{ul}}, \quad (20)$$

$$C_2 = \frac{uP(b)(1-\nu) \cdot \pi r_0^2 E_p + P(b)\pi G(r_0 + r_1)}{u\pi G(r_0 + r_1) \cdot \pi r_0^2 E_p 2e^{-ul}}. \quad (21)$$

将式(17)代入式(13), 得到在上拔荷载作用下桩身轴力计算等式:

$$P(z) = (-C_1 u e^{uz} + C_2 u e^{-uz}) \pi r_0^2 E_p. \quad (22)$$

3.2 算例分析

采用上述抗拔试验的工况进行验证.

算例工况: 试验采用钢材料预制而成的桩靴, 选取桩尖角为 45° 的桩靴进行对比分析, 验证上述理论的准确性. 钢材弹性模量为 206 GPa, 桩长为 505 mm, 预埋深度为 450 mm, 桩身直径长 50 mm, 桩端最大直径长 100 mm. 土体性质为均质砂土, 泊松比为 0.3, 内摩擦角为 45° , 弹性模量 0.05 MPa, 剪切模量为 $G = E / (2(1+\nu)) = 19230$ Pa, 土体重量为 $20 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$.

由工况可得: 土体剪切模量 $G = 19230$ Pa, 桩弹性模量 $E_p = 206 \times 10^9$ Pa, 桩身半径 $r_0 = 0.05$ m.

将上述数据代入式(17), 解得:

$$u = \frac{1}{r_0} \sqrt{\frac{G}{E_p}} = \frac{1}{0.05} \sqrt{\frac{19230}{206 \times 10^9}} = 6.11 \times 10^{-3}.$$

根据桩靴抗拔承载特性模型试验结果可知, 桩侧摩阻力沿着桩身不断变化, 而且上拔荷载越大, 侧摩阻力越大, 因而目前没有统一的侧摩阻力

表达式. 为了验证上述的准确性, 通过试验桩中间位置(即埋置深度 225 mm 处)的侧摩阻力作为平均侧摩阻力进行算例分析.

当施加 75 N 的上拔荷载时, 根据图 7 所示, 在桩体深度 225 mm 处, 桩侧摩阻力为 0.95 kPa, 即 $\tau_0 = 0.95 \times 10^3 \text{ Pa}$:

$$P_s = \tau_0 \pi d l = 0.95 \times 10^3 \times \pi \times 0.05 \times 0.45 = 67.12 \text{ N}.$$

桩端阻力:

$$P_b = P_t - P_s = 75 - 67.12 = 7.88 \text{ N}.$$

将桩端阻力和 u 代入式(20)与式(21), 解得:

$$C_1 = 7.59 \times 10^{-5},$$

$$C_2 = 7.62 \times 10^{-5}.$$

将 $z = 0$ 代入式(17), 解得在 75 N 上拔荷载作用下的桩顶位移量:

$$w(0) = 7.59 \times 10^{-5} \times e^0 + 7.62 \times 10^{-5} \times e^0 = 0.1512 \text{ mm}.$$

同理, 计算余下几项位移量. 当施加 150 N 的上拔荷载时, 从图 7 获得桩体深度为 225 mm 处的桩侧摩阻力为 1.91 kPa, 即

$$\tau_0 = 1.91 \times 10^3 \text{ kPa},$$

$$P_s = \tau_0 \pi d l = 1.91 \times 10^3 \times \pi \times 0.05 \times 0.45 = 134.94 \text{ N}.$$

桩端阻力:

$$P_b = P_t - P_s = 150 - 134.94 = 15.06 \text{ N}.$$

将桩端阻力和 u 代入式(20)与式(21), 解得:

$$C_1 = 1.450 \times 10^{-4},$$

$$C_2 = 1.455 \times 10^{-4}.$$

将 $z = 0$ 代入式(17), 解得在 150 N 上拔荷载作用下的桩顶位移量:

$$w(0) = 1.450 \times 10^{-4} \times e^0 + 1.455 \times 10^{-4} \times e^0 = 0.2905 \text{ mm}.$$

根据相同的方法计算并绘制荷载—位移曲线(图 9). 根据图 9 可知, 在荷载较小时, 桩靴的弹性理论解与试验值是十分接近的, 当荷载增大时, 弹性理论解与试验值的差异逐渐增大, 说明桩靴的弹性理论解适用于上拔荷载较小的情况.

此外, 从图 9 可以看出桩靴的理论解为一条直线, 而试验值是一条斜率逐渐变小的曲线, 原因是随着上拔荷载的增加, 上部土体产生塑性区, 此时桩侧摩阻力达到极限值, 总侧摩阻力不再增加, 土

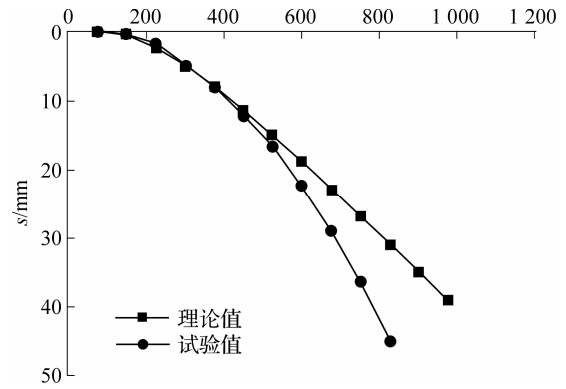


图 9 试验值与理论值对比

体位移比弹性理论解大. 因而本节的弹性理论解存在一定的局限性.

4 结论

(1)在相同的上拔荷载作用下, 等直径桩的上拔位移比桩靴大. 桩靴端部结构的不同会影响其上拔效果, 倒三角桩靴桩端顶面为平整圆, 上拔位移最小, 桩端顶面为圆台形状的桩靴上拔位移次之. 因此倒三角桩靴抗拔效果最好, 桩端顶面为圆台形状的桩靴次之, 等直径桩最差.

(2)在上拔荷载作用下, 桩靴轴力沿桩身分布与等直径桩不同, 等直径桩轴力沿着桩身不断递减, 最后在桩尖处变为“0”; 而桩靴轴力沿着桩身呈减小趋势, 最后在桩端处仍有部分轴力, 说明桩靴端部结构在上拔过程中产生了较大的阻力, 具有明显的抗拔效果.

(3)随着上拔荷载的逐渐增加, 桩靴在桩端处的阻力先缓慢增加, 当上拔荷载达到一定阈值后, 突变为指数增长.

(4)与模型试验结果对比可知, 本文的弹性理论分析方法预测的桩体上拔位移适用于上拔荷载较小的情况, 当上拔荷载超过 500 N 时, 理论预测的位移值与试验值存在较大的偏差.

(5)本文研究的不足之处在于桩靴抗拔承载力与应力场密切相关, 而本次模型试验无法反映应力场对桩靴影响.

参考文献:

- [1] 张宝平, 杨旭才, 王金明, 等. 带桩靴钻井平台插桩过程土压力变化规律研究[J]. 海洋石油, 2016, 36(4):88-93.

- [2] 贾斌. 海洋自升式平台桩靴基础上拔阻力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [3] 张兆德, 李俊来, 张心, 等. 自升式平台桩土作用机理的研究进展[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2014, 33(5):448-454.
- [4] Hossain M, Dong X, Hossain M. Extraction of spudcan foundations in single and multi-layer soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(1):170-184.
- [5] Chen R, Gaudin C, Cassidy M J. Corrigendum: Investigation of the vertical uplift capacity of deep water mudmats in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(8):1003.
- [6] 王懿, 臧孟, 宋林松, 等. 双层土中自升式钻井平台桩靴极限拔桩阻力计算新方法[J]. 中国海上油气, 2018, 30(5):141-148.
- [7] 赵军, 张爱霞, 段梦兰, 等. 自升式钻井平台方形桩靴地基极限承载力理论解[C]. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上), 太原, 2011.
- [8] 段梦兰, 张爱霞, 王建军, 等. 自升式钻井平台拔桩阻力预测的数值计算方法[J]. 机械强度, 2010, 32(6):961-966.
- [9] 吴文乐, 廖天岸, 唐文献, 等. 自升式钻井平台抗滑移能力分析[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(8):75-78.
- [10] 丁红岩, 乐丛欢, 张浦阳. 海上自升式钻井平台拔桩阶段桩靴上拔阻力的机理研究[J]. 天津大学学报, 2011(4):324-330.
- [11] 兰斐. 钻井船插桩对邻近平台桩基影响的数值分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [12] 刁钰, 郑刚, 许洁, 等. 不同加载条件下抗拔桩静载试验分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S2):464-470.
- [13] JGJ106-2014. 建筑基桩检测技术规范[S].
- [14] 李同林, 殷绥域. 弹塑性力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006.
- [15] 吴家龙. 弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1986.

Model test and theoretical research on uplifting bearing characteristics of spudcan

ZHOU Zijian, WANG Liangzhi, QI Changguang^{*}, SHAN Yanling, LAI Wenjie
(School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to study the uplifting bearing characteristics of spudcan, the uplifting model test device for spudcan was designed. By measuring the upward displacement of the pile and the strain at different sections of the pile, the uplift bearing characteristics and the load on the pile were studied. The theoretic analysis of the elastic deformation in the process of pulling up the pile shoe was carried out, and it was compared with the results of the model test of the pull-up resistance of the spudcan. The results show that: under the action of uplifting load, the axial force of the spudcan decreases first along the pile and remains even at the end of the pile. With the gradual increase of the pull-up load, the resistance of the spudcan increases slowly at first, while turns to increase exponentially when approaching a certain threshold. The uplift displacement of the pile can be predicted by the elastic theory analysis method when the uplift load is small.

Key words: spudcan; pull-out resistance; model test; theoretical analysis

(责任编辑 章践立)