

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.04.011

桩承载力反向自平衡试桩法数值模拟分析

刘永莉¹, 刘志杰¹, 巴军涛², 肖衡林¹, 郭 斌¹

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 中交二航局建筑工程有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 为推动反向自平衡试桩法在实践中的应用, 采用有限元分析方法对反向自平衡试桩法进行了数值模拟分析。以管桩为例, 运用 ABAQUS 有限元软件建立反向自平衡试桩法数值模型, 分别采用位移控制法和荷载控制法进行桩身和桩顶加载模拟, 得到了基桩抗压极限承载力, 进行了桩身轴力和桩侧摩阻力分析; 对建立的数值模型进行了位移控制法下的静载试验模拟, 并与反向自平衡试桩法模拟得到的极限承载力进行了对比分析。模拟结果表明, 反向自平衡试桩法确定的基桩极限承载力与静载试桩法结果较为接近, 不需要进行正、负摩阻力转换, 但也存在平衡点位置的确定问题。

关键词: 基桩; 静载试桩法; 自平衡试桩法; 反向自平衡试桩法; ABAQUS; 荷载-位移曲线

中图分类号: TU473.1⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)04-0081-07

Numerical simulation analysis of reverse self-balanced test method for pile bearing capacity

LIU Yongli¹, LIU Zhijie¹, BA Juntao², XIAO Henglin¹, GUO Bin¹

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
2. CCCC SHEC Construction Engineering Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: In order to promote the application of the reverse self-balanced pile test method in the practice engineering, the numerical simulation analysis of the reversed self-balanced pile test method is carried out by using the finite element analysis method. Taking the pipe pile as an example, the numerical model of reverse self-balanced test pile method is established by the ABAQUS software. The displacement control method and load control method are used to simulate the loading of pile body and pile top, and the ultimate compressive bearing capacity of the foundation pile is obtained, from which the pile axial force and the pile lateral friction resistance can be analyzed. The established numerical model is modeled by the static load test with the displacement control method and compared with the ultimate bearing capacity simulated by the reverse self-balance test method. The simulation results show that the ultimate bearing capacity of foundation pile determined by the reverse self-balance test method is relatively close to the result of the static load test method, and the conversion of positive and negative friction resistance is not necessary, but there is also the problem of determining the position of the balance point.

Key words: foundation pile; static load test method; self-balanced pile test method; reverse self-balanced pile test method; ABAQUS; *Q-s* curve

桩基础因其承载力高、沉降小、适应性强、抗震性能好等优点, 在各种高层建筑、桥梁和港口码头等工程领域中应用广泛^[1]。目前, 基桩承载力确定方法主要包括传统静载试桩法和自平衡试桩法^[2]。传统静载试桩法是检测基桩承载力最可靠的方法, 但因受到施工场地和试桩吨位等因素限制, 难以满足特殊场地和大吨位基桩承载力的测试^[3-4]。自平衡试桩法利用桩的自重和侧摩阻力作为桩端阻力的反力, 不需要在桩周设置反力架或进行重物堆载, 突破了试桩吨位的限制, 特别适用于施工场地受限的大吨位基桩试验^[5-6]。自平衡试桩法因具有省时省力、试验方便、适应性强等优点, 已在许多实际工程中得到应用^[7-8], 也相继出台了行业和部分省份的技术规程^[9-11]。由于自平衡试桩法的荷载作用位置及传递方向不同于传统静载试桩法, 在根

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608181, 52078194)
作者简介: 刘永莉(1984—), 女, 副教授, 博士, 主要从事基础工程研究。E-mail: maryroseli@126.com
通信作者: 肖衡林(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: xiaohenglin_0909@163.com
引用本文: 刘永莉, 刘志杰, 巴军涛, 等. 桩承载力反向自平衡试桩法数值模拟分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 81-87.
LIU Yongli, LIU Zhijie, BA Juntao, et al. Numerical simulation analysis of reverse self-balanced test method for pile bearing capacity[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(4): 81-87.

据测试结果确定基桩承载力时需将负摩阻力转换为正摩阻力,最常用的方法是通过选取合适的转换系数进行换算^[12],相关研究也给出了不同土层中的正、负摩阻力的转换系数建议值^[13-16],但由于各土层的不均匀分布和桩土相互作用机制的复杂性,难以精确给出实际工况下的转换系数。

为克服自平衡试桩法正、负摩阻力转换导致基桩承载力测试结果不直观的问题,刘永莉等^[17-19]提出了一种单桩竖向承载力反向自平衡试桩法,该方法在自平衡试验的基础上增加了一套桩顶竖向加载装置,与自平衡试桩法组合使用,可克服自平衡试桩法上段桩负摩阻力换算成正摩阻力时转换系数难以准确确定的问题,同时也可用于测试基桩的抗拉承载力。

目前,反向自平衡试桩法仅处于理论研究阶段,要将该方法应用到工程实践中还有很多问题亟待解决。现场原位试验是基桩研究中最可靠的方法,但需要耗费大量的人力、物力、财力和时间等;室内模型试验相对现场试验虽然可以降低试验费用,但模型试验由于是缩尺试验,如果试验参数设计不合理,试验结果往往与工程实际结果差别较大,且直接采用室内模型试验研究反向自平衡试桩法有一定的盲目性^[20-21]。为此,本文采用 ABAQUS 有限元分析方法,通过建立反向自平衡试桩法数值模型,分别采用位移控制法和荷载控制法进行桩身和桩顶加载模拟,以探究反向自平衡试桩法的可行性,进而推动反向自平衡试桩法在实际工程中的应用。

1 反向自平衡试桩法测试步骤

反向自平衡试桩法加载受力情况如图 1 所示。该方法加载时分别在桩顶位置和桩身平衡点位置处放置加载装置,并在上、下段桩之间增加一套反力锚固装置。具体测试步骤如下:①与自平衡试桩法原理一致,由桩身千斤顶进行桩身加载,可得到上段桩受力向上移动的极限承载力 $Q_{u,ul}^-$ 和下段桩受力向下移动的极限承载力 $Q_{u,dl}^+$;②桩身千斤顶卸载回油,重新调零位移测量仪;③由桩顶千斤顶进行桩顶加载,上段桩受压向下移动,下段桩由于反力锚固装置受拉向上移动,分别绘制两桩体荷载-位移(Q - s)曲线,可得到上段桩受力向下移动的极限承载力 $Q_{u,ul}^+$ 和下段桩受力向上移动的极限承载力 $Q_{u,dl}^-$;④将 $Q_{u,dl}^+$ 和 $Q_{u,ul}^+$ 叠加得到完整桩体的竖向极限承载力 $Q_u(Q_u = Q_{u,dl}^+ + Q_{u,ul}^+)$,同时还可得到对应工况下抗拔桩的竖向极限抗拔力 $Q'_u(Q'_u = Q_{u,ul}^- + Q_{u,dl}^- - G)$,其中 G 为完整桩体的自重)。

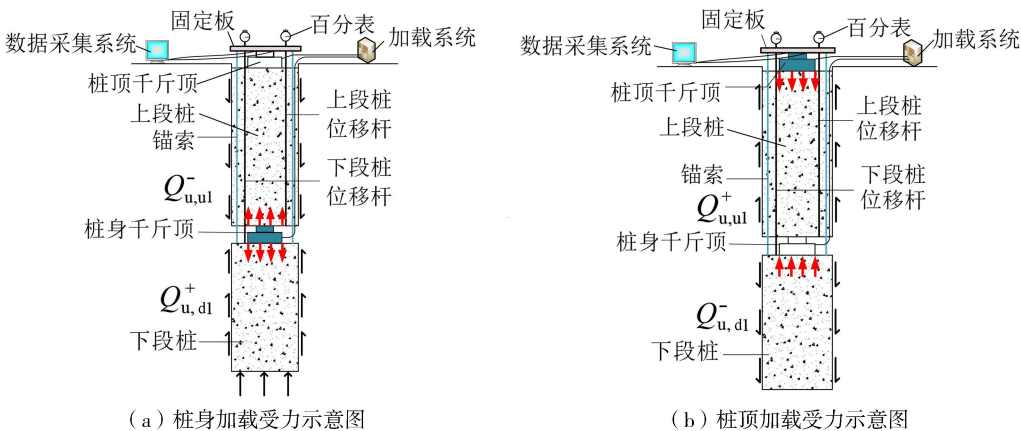


图 1 反向自平衡试桩法加载受力情况

Fig. 1 Loading force of reverse self-balancing pile test method

从测试技术上分析,反向自平衡试桩法充分继承了自平衡试桩法的优点,不需要额外的锚桩或堆载材料就可实现桩基承载力的检测;同时,相较于自平衡试桩法又避免了负摩阻力的转换问题,可直接通过荷载-位移曲线获取基桩抗压极限承载力,还可以得到对应桩的竖向极限抗拔力。

2 反向自平衡试桩的有限元模型

2.1 模型假设条件

为简化计算,在建立有限元模型时做如下假设:①桩体为均质理想弹性体,不考虑桩自身的弯曲变形;土体考虑为均质弹塑性材料,不考虑土的剪胀性;桩侧土体在桩长范围内为同一均质岩土层。②不考虑管桩土

塞效应对承载力的影响。③桩与岩土之间的摩擦系数保持不变。④土体采用总应力分析方法分析,不考虑孔隙水压力影响和岩层倾斜。⑤不考虑加载顺序对测试结果的影响。

2.2 模型构建

在研究土与结构物相互作用时,由于三维有限元模型单元设置数量多,计算时间长,而平面二维应变土体模型因其简单实用的优点得到广泛运用,且其简化模型基本可以满足工程应用的精度要求^[22]。本文考虑到桩-土结构及施加荷载均具有轴对称特点,采用以桩中心线为对称轴建立平面二维应变土体模型进行数值模拟分析。

数值模型的几何结构如图 2 所示,其中,上段桩桩长取 8 m,下段桩桩长取 4 m,桩径为 1.6 m,壁厚为 10 cm。考虑桩周土和桩端岩层的影响范围,土体宽度取 20 倍桩径,深度取 2 倍桩长^[23-24],即模型计算土体宽度取 32 m,计算深度取 24 m。其中土体模型顶部为自由边无约束,底部采用固定约束,外侧为径向的位移约束;桩顶部自由无约束。在单元网格的划分上,靠近桩体的地方网格密、远离桩体的地方网格稀疏。桩和土体均采用节点四边形线性平面应变减缩积分单元,此单元类型对位移的求解结果较精确。

桩体采用线弹性管桩模型,其弹性模量为 40 GPa,泊松比为 0.16;桩端基岩采用 Mohr-Coulomb 本构模型,其弹性模量为 1 100 MPa,泊松比为 0.25,黏聚力为 800 kPa,内摩擦角为 36°;填土为饱和黏性土,其不排水强度 c_u 为 24 kPa,为了模拟不排水加载条件,采用总应力分析方法进行分析,不排水强度可以采用 Mohr-Coulomb 模型或者小应变刚度硬化土体模型(HSS)模拟^[25],则其土体弹性模量为 $500c_u$,即 12 MPa,泊松比为 0.495,黏聚力为 24 kPa,内摩擦角为 0°。具体桩土参数如表 1 所示。

2.3 桩土相互作用

桩土接触问题通过设置接触对和定义接触性质来模拟,本文从桩生效的分析步开始,采用面面接触对类型来模拟桩与外侧岩土、桩与桩底基岩之间的接触面,由于桩相对岩土的刚度大,取桩为主控面,岩土为从属面,桩与土体接触跟踪均采用有限滑移方法。桩与岩土接触面的接触性质包括两个方面,一是法向采用“硬接触”且允许分离,二是切向采用库伦罚刚度算法来确定摩擦系数^[26]。

2.4 初始地应力平衡与加载步骤

由于在桩浇筑之前,土体自重产生的变形就已经完成,因此对创建的数值模型先进行地应力平衡。在 ABAQUS 软件中,常见的地应力平衡方法有 3 种:自动地应力平衡法、关键字定义初始地应力法和开源数据库(open data base)导入法^[27]。由于自动地应力平衡法相对更容易操作,故本文采用 ABAQUS 提供的自动地应力平衡法功能对土体进行初始地应力平衡。由于创建的数值模型是用于桩土相互作用分析的,则在地应力分析中土体不能有桩土接触对和桩单元。具体加载步骤为:

- 步骤 1 采用生死单元法“杀死”桩单元以及桩土接触对,并约束土体的水平位移,再施加土体重力,进行自动地应力平衡。
- 步骤 2 完成地应力平衡后,激活桩单元以及桩土接触对,取消桩孔的水平约束,施加桩重力。
- 步骤 3 当桩身加载时,钝化桩顶进行加载分析。
- 步骤 4 当桩顶加载时,钝化桩身进行加载分析。

2.5 加载方法与过程

ABAQUS 软件可提供两种荷载施加方法,一是荷载直接作用在桩顶,二是通过对桩顶施加位移,达到对桩施加荷载的目的。前者通过记录各级荷载下桩身的位移,得到最终的荷载-位移曲线;后者通过施加位移

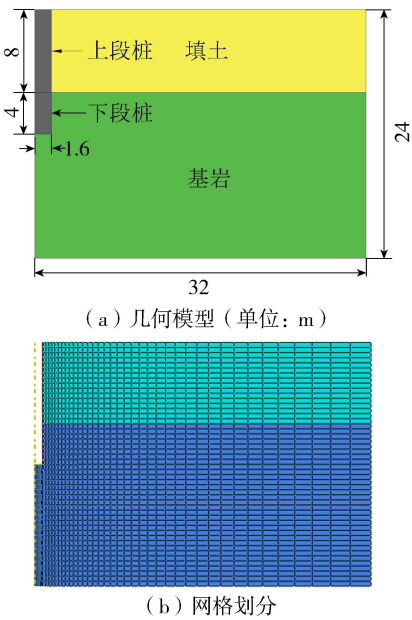


图 2 数值模型的几何结构
Fig. 2 Geometric model of numerical model

表 1 桩土参数 Table 1 Parameters of piles and soils					
类别	弹性模量/ GPa	泊松比	容重/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
填土	0.012	0.495	19	24	0
基岩	1.100	0.25	18.6	800	36
上段桩	40	0.16	24		
下段桩	40	0.16	24		

得到桩所受的对应该荷载,进而得到荷载-位移曲线。由于反向自平衡试验的平衡点难以精确确定,直接采用荷载控制法较为烦琐,为了使上、下段桩承载力均能达到极限状态,便于与传统静载试验进行极限承载力比较,本文首先采用位移控制法模拟上、下段桩的加载,得到上、下桩的极限承载力,然后根据得到的极限承载力,通过荷载控制法分级施加荷载,以模拟上、下段桩同时等量加载过程。

加载过程中,上、下段桩作为两个单元分别建模,两桩之间接触部位无相互作用。先在两桩之间接触部位分别施加桩底向上位移荷载和桩顶向下位移荷载,以模拟桩身加载;然后通过施加桩顶向上位移荷载和桩底向上位移荷载,以模拟桩顶加载。

3 模拟结果与分析

3.1 位移控制法的荷载-位移曲线

图 3 为反向自平衡试验桩身加载时,采用位移控制法得到的上、下段桩荷载-位移曲线(位移正值表示桩体向上运动,负值表示向下运动)。由图 3(a)可知,上段桩位移在 0~4.15 mm 之间时,桩体所受荷载随位移增大而逐渐增大;当位移增加到 4.15 mm 后,桩体所受荷载几乎不再发生变化,表明上段桩在位移等于 4.15 mm 时,其承载力已达到极限值,即 $Q_{u,ul}^- = 725 \text{ kN}$ 。由图 3(b)可知,下段桩荷载-位移曲线为典型的缓变型曲线,桩体所受荷载随位移增大而逐渐增大,其极限承载力取最终位移所对应的荷载,即 $Q_{u,dl}^+ = 19\,991 \text{ kN}$ 。

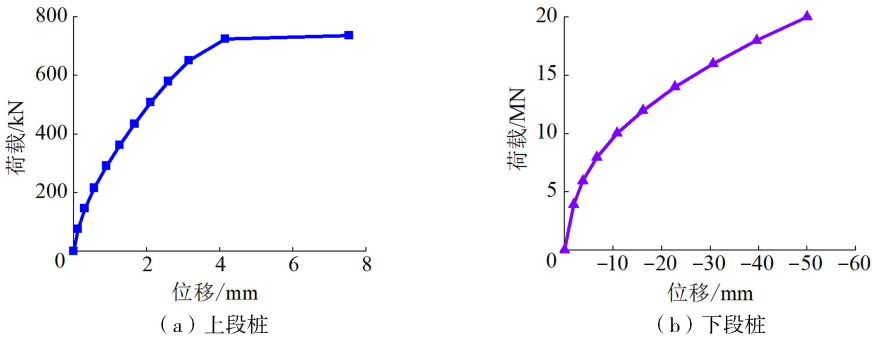


图 3 位移控制法下桩身加载时的荷载-位移曲线

Fig. 3 Curve for Q - s with loading on pile body under displacement control method

图 4 为反向自平衡试验桩顶加载时,采用位移控制法得到的上、下段桩荷载-位移曲线。由图 4(a)可知,上段桩荷载-位移曲线与桩身加载时上段桩荷载-位移曲线类似,当桩顶位移达到 4.62 mm 后,上段桩所受荷载不再随桩顶位移增大而增大,曲线出现明显拐点,故在桩顶加载时,上段桩极限承载力取其桩体位移等于 4.62 mm 所对应的荷载值,即 $Q_{u,ul}^+ = 960 \text{ kN}$ 。根据图 4(b),在桩顶加载时,下段桩极限承载力取其桩体位移等于 3.02 mm 所对应的荷载值,即 $Q_{u,dl}^- = 610 \text{ kN}$ 。

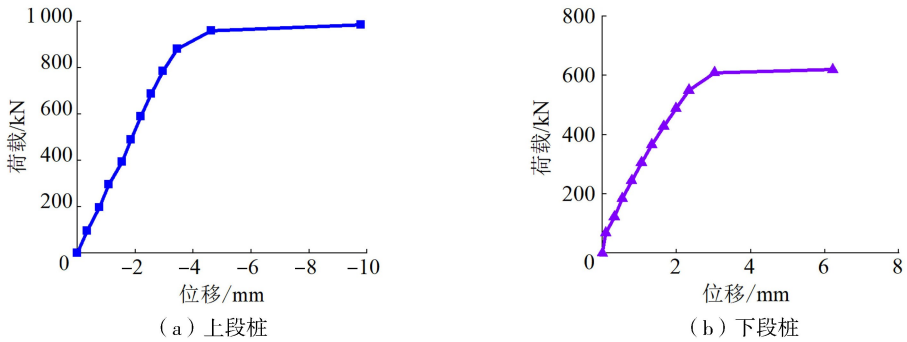


图 4 位移控制法下桩顶加载时的荷载-位移曲线

Fig. 4 Curve for Q - s with loading on pile top under displacement control method

图 5 为传统静载试验时,采用位移控制法得到的静压桩荷载-位移曲线,桩顶荷载随着桩顶沉降增大而逐渐增大,整个曲线未出现明显突变点,为缓变型曲线,其桩体竖向承载力极限值取最终施加位移对应的荷载,即 $Q_{ua} = 21\,235 \text{ kN}$ 。

结合图 4 与图 5 分析结果,可知反向自平衡试桩法得到的竖向极限承载力 $Q_{ub} = Q_{u,dl}^+ + Q_{u,ul}^+ = 20\,951\text{ kN}$,相较于 Q_{ua} 偏小 284 kN,说明反向自平衡试桩法能够有效判断基桩抗压极限承载力。

3.2 荷载控制法的荷载-位移曲线

图 6 为反向自平衡试验不同加载方式下,采用荷载控制法得到的上、下段桩荷载-位移曲线。在桩身加载时,上段桩变化曲线与采用位移控制法的变化曲线一致,而下段桩在荷载达到 725 kN 之前曲线呈现线性增长,说明下段桩的承载力还远未达到极限值,可判断桩身加载时,其加载位置相较于桩体真实平衡点位置偏上。在桩顶加载时,下段桩变化曲线与采用位移控制法的变化曲线一致,在 $Q = 610\text{ kN}$ 处,曲线出现明显陡降点,此时上段桩承载力并未达到极限,可判断桩顶加载时,桩顶平衡点相较于真实平衡点位置偏下。

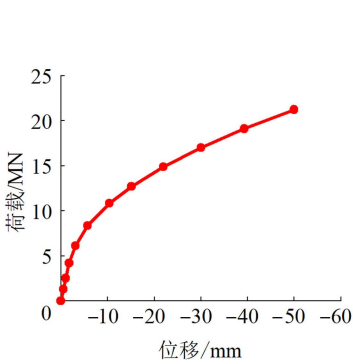


图 5 静压桩的荷载-位移曲线
Fig. 5 Curve for Q - s of the static pile

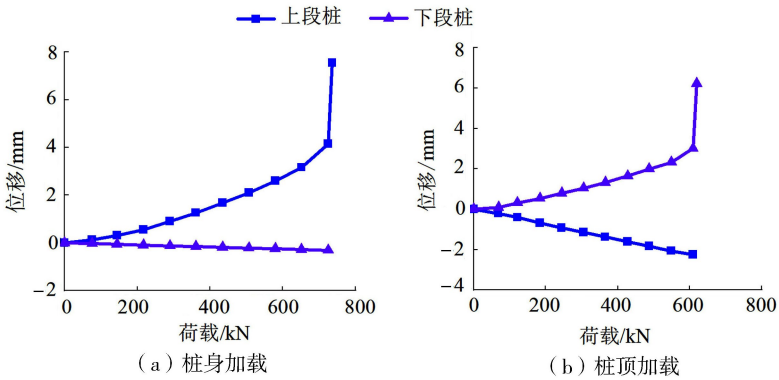


图 6 荷载控制法下桩体的荷载-位移曲线
Fig. 6 Curve for Q - s of pile body under load control method

因此,反向自平衡试桩法与自平衡试桩法一样,均存在平衡点难以精确确定的问题。对于反向自平衡试桩法,由于分桩身和桩顶两次加载,要确定两次平衡点。若不考虑桩体自重,第一次桩身加载时上段桩负摩阻力与下段桩正摩阻力及桩端阻力相平衡,第二次桩顶加载时上段桩正摩阻力与下段桩负摩阻力相平衡。若为摩擦桩或桩端阻力占比较小的情况时,平衡点位置的判断则主要由上、下段桩侧摩阻力所决定。

3.3 轴力分析

图 7 为反向自平衡试验不同加载方式下,桩身轴力随深度变化的曲线。荷载遵循从加载端向远端传递的规律。由图 7(a)可知,桩身加载时,荷载分别作用于上段桩桩底和下段桩桩顶,上段桩受到向上支撑作用,荷载自下而上传递,同一荷载下,离平衡点位置越近,轴力越大,并向桩顶方向逐渐衰减,轴力曲线整体向“下”侧凸起,且凸起程度随着荷载增大而趋于平缓,说明上段桩顶部随荷载增大开始逐渐受到侧摩阻力的作用。下段桩受到向下顶压作用,荷载自上而上传递,当荷载较小时,桩顶荷载和桩端荷载差别较小,此时桩所受侧摩阻力很小,随着荷载增大,桩端阻力增长显著,荷载主要由桩端阻力承担。由图 7(b)可知,桩顶加载时上段桩类似于纯摩擦桩,下段桩为抗拔桩。上、下段桩的轴力传递规律相同,都是自上而下进行传递,荷载全部由侧摩阻力承担,随着荷载的逐渐增大,下段桩桩周土层逐渐激发侧摩阻力,且下部土层轴力衰减逐渐增大,轴力变化主要集中在桩的上部。

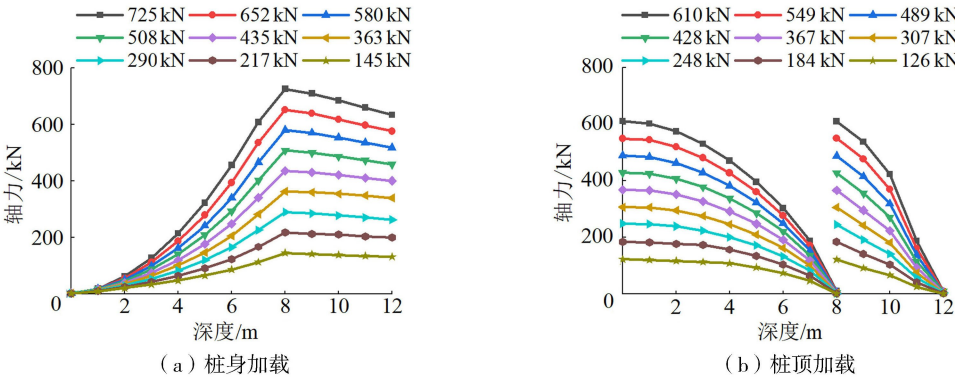


图 7 桩身轴力随深度变化曲线
Fig. 7 Variation curve of axial force of pile body with depth

3.4 侧摩阻力分析

图8为反向自平衡试验不同加载方式下,桩身侧摩阻力随深度变化的曲线。由图8(a)可知,桩身加载时,上段桩侧摩阻力随荷载增大而增大,且沿桩向下逐渐递增,侧摩阻力呈上大下小的分布形式,说明桩周的下部土层先于上部土层发挥侧摩阻力的作用。由图8(b)可知,桩顶加载时,上段桩侧摩阻力也沿桩向下逐渐递增,桩的最大侧摩阻力发生在桩底位置,随着荷载逐渐增大,桩侧摩阻力增加的幅度也逐渐增大。由图8(c)可知,桩顶加载时,下段桩侧摩阻力也沿桩向下逐渐递增,侧摩阻力呈下大上小的分布形式。

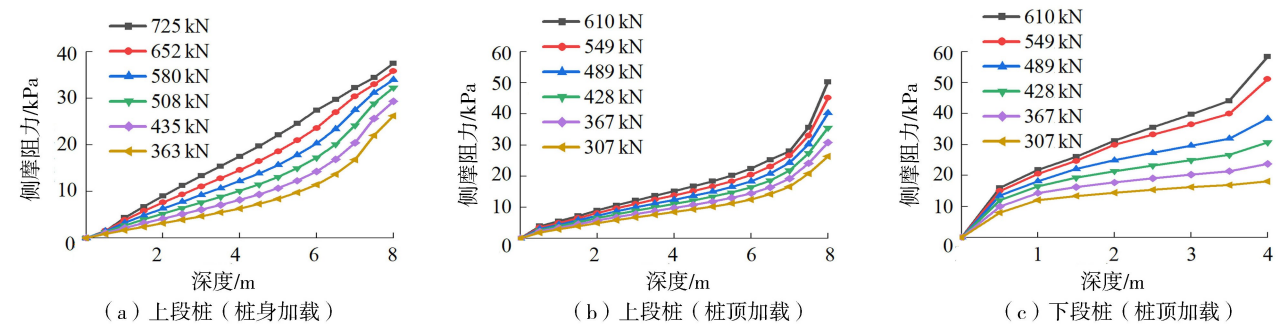


图8 桩侧摩阻力随深度的变化曲线

Fig.8 Variation curve of lateral friction resistance of pile with depth

4 结 论

- a. 反向自平衡试桩法可以克服自平衡试桩法正、负摩阻力转换的问题,相对于自平衡试桩法,其测试结果更为直观。
- b. 反向自平衡试验结果与静载试验结果较为一致,反向自平衡试桩法用于测试基桩承载力具有可行性。
- c. 反向自平衡试桩法和自平衡试桩法均存在平衡点位置确定的问题,对于反向自平衡试桩法,由于分为桩身和桩顶两次加载,导致其加载中需要确定两次平衡点位置。在不考虑桩体自重的情况下,第一次桩身加载时上段桩负摩阻力与下段桩正摩阻力及桩端阻力相平衡,第二次桩顶加载时上段桩正摩阻力与下段桩负摩阻力相平衡。若为摩擦桩或桩端阻力占比较小的情况时,平衡点位置的判断主要由上、下段桩侧摩阻力所决定。

参考文献:

[1] 景立平,汪刚,李嘉瑞,等. 土-桩基-核岛体系动力相互作用振动台试验及数值模拟[J]. 岩土工程学报,2022,44(1):163-172. (JING Liping, WANG Gang, LI Jiarui, et al. Shaking table tests and numerical simulations of dynamic interaction of soil-pile-nuclear island system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(1):163-172. (in Chinese))

[2] 史佩栋. 桩基工程手册:桩和桩基础手册[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,2015:59-60.

[3] 周明星,程宝辉. 桥梁基桩竖向承载力检测技术发展现状及展望[J]. 桥梁建设,2009(增刊2):1-6. (ZHOU Mingxing, CHENG Baohui. State-of-the-art and prospecting of inspection techniques for vertical bearing capacity of bridge foundation piles [J]. Bridge Construction,2009(Sup2):1-6. (in Chinese))

[4] RUSSO G. Experimental investigations and analysis on different pile load testing procedures[J]. Acta Geotechnica,2013,8(1):17-31.

[5] 龚维明,戴国亮. 桩承载力自平衡测试技术研究与应用[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[6] 龚维明,蒋永生,翟晋. 桩承载力自平衡测试法[J]. 岩土工程学报,2000,22(5):532-536. (GONG Weiming, JIANG Yongsheng, ZHAI Jin. Self-balanced loading test for pile bearing capacity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000,22(5):532-536. (in Chinese))

[7] 戴国亮,龚维明,王磊,等. 自平衡法在电建工程桩基中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(增刊1):407-412. (DAI Guoliang, GONG Weiming, WANG Lei, et al. Application of self-balanced test pile method toelectric power construction engineering[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2017,50(Sup1):407-412. (in Chinese))

[8] 穆保岗,肖强,龚维明. 自平衡法和锚桩法在高铁工程中的对比试验分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2012,13(4):414-418. (MU Baogang, XIAO Qiang, GONG Weiming. Research on in situ tests between self-balanced method and

- anchor pile method in high-speed railway[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012,13(4):414-418. (in Chinese))
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩自平衡静载试验技术规程:JGJ/T403—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [10] 四川省住房和城乡建设厅. 四川省基桩承载力自平衡法测试技术规程:DBJ51/T045—2015[S]. 成都:西南交通大学出版社,2015.
- [11] 浙江省住房和城乡建设厅. 基桩承载力自平衡检测技术规程:DB33/T1087—2012[S]. 杭州:浙江工商大学出版社,2012.
- [12] 戴国亮,龚维明,刘欣良. 自平衡试桩法桩土荷载传递机理原位测试[J]. 岩土力学,2003,24(6):1065-1069. (DAI Guoliang, GONG Weiming, LIU Xinliang. Experimental study of pile-soil load transfer behavior of self-balanced pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6):1065-1069. (in Chinese))
- [13] 陈小强,赵春风,甘爱明. 成层土中抗拔桩与抗压桩的模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(增刊2):1537-1541. (CHEN Xiaoqiang, ZHAO Chunfeng, GAN Aiming. Study on model test of uplift and compression piles in layered soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(Sup2):1537-1541. (in Chinese))
- [14] 张晓炜. 试桩测试方法对桩基承载特性的影响研究[J]. 岩土力学,2005,26(11):1819-1822. (ZHANG Xiaowei. Study on the influence of test methods on the bearing behaviors of piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11):1819-1822. (in Chinese))
- [15] 李小娟,戴国亮,龚维明,等. 砂性土中自平衡试验转换系数取值研究[J]. 岩土力学,2016,37(增刊1):659-668. (LI Xiaojuan, DAI Guoliang, GONG Weiming, et al. Research on conversion factor of self-balanced loading test in sandy soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup1):659-668. (in Chinese))
- [16] 李小娟,陈雪奖,戴国亮,等. 黏性土中钻孔灌注桩自平衡转换系数取值研究[J]. 岩土力学,2016,37(增刊1):226-232. (LI Xiaojuan, CHEN Xuejiang, DAI Guoliang, et al. Research on conversion coefficient of cast-in-situ pile in clay in self-balanced loading test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup1):226-232. (in Chinese))
- [17] 刘永莉,肖衡林,马强,等. 一种改进型桩基竖向承载力试验反向自平衡法及试验装置:CN105839678A[P]. 2016-08-10.
- [18] 刘永莉,巴军涛,肖衡林,等. 一种桩基承载力反向自平衡模型试验装置及其试验方法:CN111894051A[P]. 2020-11-06.
- [19] 刘永莉,肖衡林,李丽华,等. 一种桩基竖向承载力试验反向自平衡法及试验装置:CN105735378A[P]. 2016-07-16.
- [20] 戴民,周云东,张霆. 桩土相互作用研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(5):568-571. (DAI Min, ZHOU Yundong, ZHANG Ting. Recent researches on soil-pile interaction[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(5):568-571. (in Chinese))
- [21] 李文虎,李同春,李瑜. 基于EAS单元的薄壁筒桩与土相互作用的有限元分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005,33(6):658-662. (LI Wenhui, LI Tongchun, LI Yu. EAS element-based FEM analysis of interaction between thin-walled cylindrical piles and soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(6):658-662. (in Chinese))
- [22] 贺瑞,朱元张,张继生,等. 地震作用下大直径嵌岩单桩动力响应数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):66-76. (HE Rui, ZHU Yuanzhang, ZHANG Jisheng, et al. Numerical analysis of dynamic response of large-diameter rock-socketed monopiles under seismic loads[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1):66-76. (in Chinese))
- [23] LIANG F Y, CHEN L Z, SHI X G. Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(6):443-453.
- [24] 雷华阳,李肖,陆培毅,等. 管桩挤土效应的现场试验和数值模拟[J]. 岩土力学,2012,33(4):1006-1012. (LEI Huayang, LI Xiao, LU Peiyi, et al. Field test and numerical simulation of squeezing effect of pipe pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4):1006-1012. (in Chinese))
- [25] 梁发云,贾亚杰,丁钰津,等. 上海地区软土HSS模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(2):269-278. (LIANG Fayun, JIA Yajie, DING Yujin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2):269-278. (in Chinese))
- [26] 刘龙,丰土根,曹永勇. 基于极限平衡法的单桶多隔舱结构防波堤稳定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):539-544. (LIU Long, FENG Tugen, CAO Yongyong. Stability analysis of the breakwater with multi-compartment single-bucket structure based on the limit equilibrium method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(6):539-544. (in Chinese))
- [27] 代汝林,李忠芳,王姣. 基于ABAQUS的初始地应力平衡方法研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2012,29(9):76-81. (DAI Rulin, LI Zhongfang, WANG Jiao. Research on initial geo-stress balance method based on ABAQUS[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2012, 29(9):76-81. (in Chinese))