

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.02.009

装配式智能调平锚桩静载试验设备研发与应用

吴跃东^{1,2}, 毛伟^{1,2}, 刘坚^{1,2}, 刘辉^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098)

摘要: 针对堆载法碎石桩承载力检测方法的局限性, 通过引入智能调平系统, 研发了一种适用于碎石桩承载力检测的装配式智能调平锚桩静载试验设备。该设备将锚索埋设于试桩周围的锚桩中, 可提供锚桩法试验过程中所需的抗拔力; 智能调平系统能自动调整反力梁角度, 可有效防止其发生倾斜。工程现场试验结果表明, 采用该设备进行的锚桩法静载试验与传统堆载法静载试验得到的试桩沉降变化规律一致, 误差合理, 试桩承载力满足工程设计要求; 经锚索拉拔后的锚桩密实度并未大幅下降, 其承载力仍满足工程设计要求; 采用该设备进行锚桩法静载试验能缩短设备搭设时间, 减少试验所需场地, 可有效提高试验的安全性及稳定性。

关键词: 振冲碎石桩; 承载力; 静载试验; 锚桩法; 堆载法; 智能调平

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)02-0071-07

Development and application of static load test equipment for prefabricated intelligent leveling anchor pile

WU Yuedong^{1,2}, MAO Wei^{1,2}, LIU Jian^{1,2}, LIU Hui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the limitations in detecting the bearing capacity of gravel piles using the stacking method, a prefabricated intelligent leveling anchor pile static load test equipment suitable for detecting the bearing capacity of gravel piles has been developed by integrating an intelligent leveling system. The equipment capable of burying the anchor cable in the anchor pile around the test pile can provide pull-out force during the static load testing process. The intelligent leveling system is capable of automatically adjusting the angle of the reaction beam, effectively preventing it from tilting. The results of the field test demonstrate that the static load testing performed by the equipment for the anchor pile method aligns with the settlement change law determined from the static load test using the traditional stacking method. The error identified is reasonable, and the bearing capacity obtained meets the engineering design requirements. The compactness of the anchor pile after the anchor cable is pulled out does not significantly decrease, and its bearing capacity still meets the engineering design requirements. The use of this equipment for static load testing can effectively shorten the time required for equipment erection, reduce the site area needed for testing, and improve both the safety and stability of the test.

Key words: vibration impact gravel pile; bearing capacity; static load test; anchor pile method; stacking method; intelligent leveling

西部河谷地区普遍存在深厚覆盖层, 这给水能资源开发过程中的地基处理带来了巨大挑战^[1]。为提升地基承载力并解决土层液化问题, 工程中常采用振冲碎石桩技术^[2-5]。目前, 碎石桩承载力检测主要依赖堆载法静载试验^[6-7]。然而, 河谷地区施工场地狭小、工期紧张, 而堆载法检测不仅占用大面积场地, 还面临设备调运困难等问题, 严重制约了施工进度^[8]。

锚桩法静载试验以工程桩抗拔力作为反力施加于试验桩^[9], 无需使用大量试块提供压力, 试验所需场地小, 试验周期短, 一般不受试验现场条件和加载吨位限制, 是一种简便、省时、经济的桩承载力检测方法^[10]。赵明华等^[11]采用锚桩法静载试验研究了洞庭湖软土地基大直径超长桩的荷载传递规律和承载变形

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378337); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200204032, B200204036)

作者简介: 吴跃东(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事软土地基处理与岩土工程测试技术研究。E-mail: hhuwyd@163.com

通信作者: 毛伟(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理研究。E-mail: 221304010035@hhu.edu.cn

引用本文: 吴跃东, 毛伟, 刘坚, 等. 装配式智能调平锚桩静载试验设备研发与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 71-77.

WU Yuedong, MAO Wei, LIU Jian, et al. Development and application of static load test equipment for prefabricated intelligent leveling anchor pile[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(2): 71-77.

特性;刘捷等^[12]采用锚桩法对预应力混凝土管桩和钢管桩进行了试桩检测;鲍金虎等^[13]开展了某海上风电场锚桩法静载试验,分析了大直径单桩基础的水平受荷特性;周洪波等^[14]基于 Poulos 弹性理论分析了锚桩拉拔对试桩承载力检测结果的影响。

随着对桩基承载力要求的提高及现场检测技术的进步,众多学者对锚桩法反力装置进行了设计与改进。例如:张燃等^[15]针对场地狭窄、锚桩不能满足反力要求等工程难题,研发了锚桩压重联合反力装置,并在实际工程中得到成功应用;曾英杰等^[16]设计了一种适用于锚桩布置不均匀、不对称情况的锚桩压重复合反力装置;倪金华等^[17]对传统反力装置进行了改进,采用双横梁组装反力加载装置,设计出一种大吨位的抗拔力锚桩新型反力横梁加载装置;许涛^[18]设计了一种采用伞状反力装置连接锚桩以提供反力的新型管桩静载反力系统;陈雪峰等^[19]提出了一种不考虑桩端承力的锚桩法新工艺,为大吨位基桩静载试验提供了新思路;Zhou 等^[20]对钢螺杆锚桩静载试验反力平台钢梁结构进行了优化设计并将其应用于实际工程。

目前锚桩法静载试验大多采用工程桩或另外打设锚杆以提供抗拔力。然而,在深厚覆盖层地质条件下,尤其是针对碎石桩这类散粒体结构,现有锚桩法静载试验的实施面临显著的技术挑战。因此,开展基于碎石桩自身反力特性的锚桩法静载试验研究具有重要的现实意义和工程价值。本文以四川省硬梁包水电站项目为工程背景,结合碎石桩的施工特点,研发了一种适用于碎石桩承载力检测的装配式智能调平锚桩静载试验设备。该设备利用埋设在碎石桩中的锚索提供反力,可实现锚桩法在碎石桩复合地基上的应用。

1 设备设计

装配式智能调平锚桩静载试验设备主要由锚索、智能调平系统和装配式反力平台三部分构成。锚索主要用于解决振冲碎石桩本身无法提供反力的问题;自动调平系统主要用于解决静载试验过程中反力梁发生倾斜的问题;装配式反力平台主要用于解决设备在安装过程中耗时费力的问题,以提高设备安装效率。

1.1 锚索

1.1.1 构件设计

如图 1 所示,锚索主要由钢丝绳、承载板、双孔锚具以及夹片四部分组成,构件通过设置在钢丝绳端部的承载板与碎石之间的接触,提供试验所需的抗拔力。现场桩径为 130 cm,振冲器直径为 90 cm,振冲器与碎石桩边缘之间的距离为 20 cm,因此将承载板直径设置为 10 cm,以防止承载板与振冲器之间产生碰撞。由于锚索底部承载板受力最大,故将其直径设置为 20 cm 以提高其承载力。共布置 4 个承载板,其布置间距由底端向上依次为 5.0、1.5、1.5 m。

1.1.2 锚索埋设方式

振冲碎石桩打设过程中,当碎石骨料回填至锚索端部设计位置后,提出振冲器,沿桩壁放入锚索;随后再放入振冲器,继续振冲碎石桩体。为避免振冲过程中锚索向桩中心偏移,需人工在安全区域利用绳索拉住锚索上端,以确保锚索始终紧贴桩壁。

1.1.3 锚索埋置深度确定

为使锚索能够承受工程要求的 380 kN 拉拔力,需对其埋设深度进行设计。

在锚索拉拔过程中,位于承载板上方的碎石由于承载板的阻挡,随着锚索一同上移,故拉拔过程中锚索所受负摩阻力是承载板上方的碎石与其周围碎石之间的滑动摩擦力。根据试验场地的地质资料及相应土层参数(具体可见表 1),得出土层①、②的自重应力分布,再利用负摩阻应力计算公式(式(1))计算得出相应的负摩阻应力分布,结果如图 2 所示。

$$q = K\sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: q 为桩侧负摩阻应力标准值; K 为土的侧压力系数; σ 为土的竖向有效应力; φ 为土的有效内摩擦角。

假设锚索埋设深度为 x ,计算简图如图 3 所示,则根据负摩阻力的合力等于拉拔力设计值可列出平衡方程式:

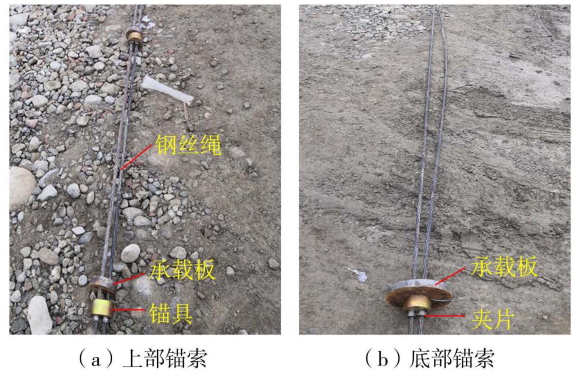


图 1 锚索外观

Fig. 1 Appearance diagram of anchor cable

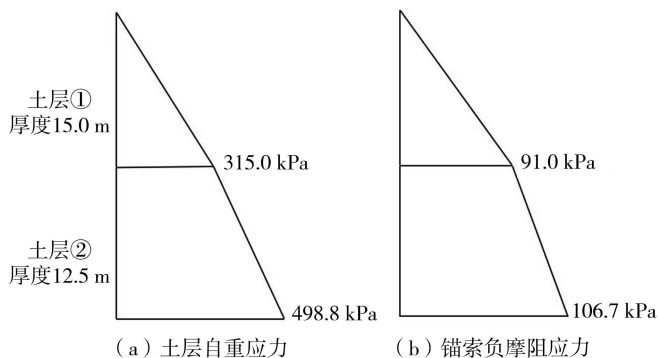


图 2 土层应力分布

Fig. 2 Stress distribution in the soil layer

$$Q = q_1 l_1 \pi d_1 + q_2 l_2 \pi d_2 \quad (2)$$

式中: Q 为拉拔力设计值; q_1 、 q_2 分别为中间承载板和底端承载板作用段等效负摩阻应力; l_1 、 l_2 分别为中间承载板和底端承载板作用长度; d_1 、 d_2 分别为中间承载板和底端承载板直径。

由式(2)计算得到埋设深度 $x = 18$ m, 保守起见将锚索埋设深度设定为 20 m。

1.2 智能调平系统

锚桩法静载试验过程中,通过反力梁对试桩施加荷载时,若试桩与反力梁中心不在同一条竖直线上,用千斤顶加载后易使反力梁两端受力不同而产生位移差,从而导致反力梁倾斜。另外,由于各锚桩中锚索的锚固程度不同,在受力相同的情况下反力梁两端的位移量可能不一致,会导致反力梁倾斜甚至发生侧翻。为避免发生侧翻事故研发了智能调平系统。

1.2.1 系统组成

智能调平系统由调平设备和外部设备(卷扬机等)组成,其中调平设备包括 GY-952 角度传感器模块、STM32 单片机和光耦隔离继电器。将各部件连接并安装于各反力梁两端。试验过程中各调平设备独立工作,通过编写单片机程序来实现反力梁两端智能调平系统的协同工作。

如图 4 所示,角度传感器将采集的数据传输给预先设置阈值的单片机处理,并判断角度是否超过阈值,若超过阈值则向继电器下达开启卷扬机指令,对反力梁进行调平;若角度未超过阈值,则向继电器下达关闭卷扬机指令。

1.2.2 角度阈值设置

根据现场试验布置,位于同一根反力梁两端的锚索间距最大为 6.0 m,千斤顶的最大起升高为 200.0 mm,设置的阈值需保证千斤顶正常运行,即确保其起升高在量程以内。角度阈值取千斤顶起升高为最大起升高度的 1/4 (50.0 mm) 时的角度。假设反力梁发生倾斜时一端固定,只另一端发生竖向位移,当千斤顶起升 50.0 mm 时,由三角形相似定理,反力梁非固定端应发生 100.0 mm 的竖向位移,此时的角度约为 1.0°,设置该角度为反力梁角度调节阈值。

在同一反力梁两端分别布置一个角度传感器,反力梁调平试验得到的反力梁角度变化情况如图 5 所示。可以看出,在调平过程中,两端的传感器收集到的角度数据基本一致,可确保两端卷扬机协同调平以防止反力梁倾斜过度发生侧翻事故。

1.2.3 系统优化

在反力梁调平的过程中,卷扬机一直处于“开”和“关”的工作状态,容易导致振荡和超调现象。从图 5 可以推断,反力梁状态调整至接近水平时,若卷扬机仍以额定转速工作,反力梁将有可能在惯性作用下再次发生倾斜(即超调),进而引起反力梁倾斜角度在上下限阈值之间振荡,降低智能调平系统的工作效率。

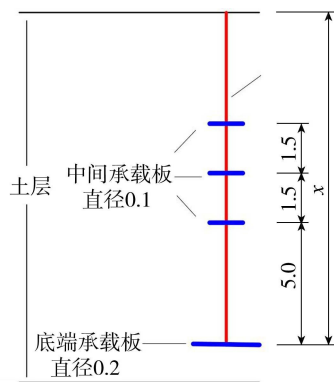


图 3 锚索埋设深度计算简图(单位:m)

Fig. 3 Calculation diagram of embedment depth of anchor cable (unit: m)

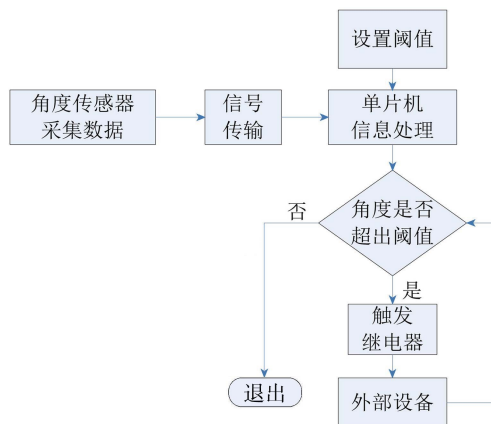


图 4 智能调平系统工作流程

Fig. 4 Workflow of the intelligent leveling system

为解决超调和振荡问题,在卷扬机的“开”和“关”的状态之间设置一“灰色区域”,在该区域内,卷扬机的转速小于额定转速,且会随反力梁角度的减小而减小。在卷扬机与单片机之间增加一个变频器并预先构建好控制曲线,让单片机在接收传感器角度信号后进行判定,若角度超出阈值,则控制变频器使其输出正常的频率,让卷扬机以额定转速工作;若角度低于阈值,则根据输出频率与角度的控制曲线控制变频器输出相应的频率,以确保反力梁在趋于水平时,卷扬机可平稳降速直至停止工作。

1.3 装配式反力平台

根据锚桩法静载试验需要,搭设如图6所示的装配式反力平台,该平台主要由托架、钢板夹、反力梁三部分组成,其中托架由螺栓、限位杆、钢板等构件组成。

反力梁需使用起吊设备搭设,搭设时严格控制千斤顶中心与主梁中点对齐,两根次梁中点位于主梁轴线上且对称布置,并保证千斤顶、主梁和次梁之间紧密接触,从而确保各锚桩同时且均匀受力。通过调整托架在反力梁上的位置可满足不同间距锚桩试验的需求,无需调整反力梁长度,能缩短试验时间。通过调整托架上的螺栓及限位杆,可满足不同尺寸卷扬机的安装,同时限位杆可快速拆卸。此外,可预先在地面上安装固定卷扬机,以避免空中安装作业,从而降低安装的难度和危险性。

2 现场试验研究

2.1 工程及地质概况

硬梁包水电站位于四川省甘孜藏族自治州泸定县境内大渡河干流上,该区域为山谷地区,含有较厚的覆盖层,覆盖层中软弱土层较多,地基承载力较低,受地震力作用时很可能发生液化,故需对地基进行处理以满足工程要求。

硬梁包水电站工程区河段河谷呈“U”形且较为开阔,河流纵坡降为5.8‰左右,相对较缓,河流受两岸冲沟洪积扇控制,河谷呈舒缓的深切曲流侵蚀地貌。

根据河床覆盖层区勘探钻孔数据,河床覆盖层的最大厚度为129.70m,分布有两层连续性较好的堰塞沉积细粒土层,其余为粗粒土层。覆盖层由新到老、从上至下大致可分为①、②、③、④、⑤共5层,其中①、③、⑤层总体为含漂砂卵石粗粒土层,以花岗岩、闪长岩为主,主要为冲积、冲洪积成因;②、④层为堰塞沉积细粒土层,②层以粉土、粉质黏土为主。各土层的主要物理力学指标见表1。

表1 土层物理力学指标

Table 1 Soil physical and mechanical properties

地质分层	土层类别	土层厚度/m	变形模量/MPa	允许承载力/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
①	含漂砂卵石粗粒土	15.0	48	0.57	30	0
②	粉土、粉质黏土	12.5	12	0.16	17	10
③	含漂砂卵石粗粒土	18.7	54	0.60	32	0
④-1	中细砂	1.3	23	0.25	23	0
④-2	粉土、粉质黏土	19.9	17	0.22	18	10
⑤	含漂砂卵石粗粒土	58.6	72	0.72	34	0

2.2 试验方案

试桩布置如图7所示,间距为3.2m,呈等边三角形布置,桩径1.3m,桩长28.5m,桩径1.3m,试桩设计承载力特征值为850kPa。选取同一试验区内参数相同的3根桩Z72、Z64、Z29进行承载力检测,试验中最大施加荷载2273kN。其中在与桩Z64相邻的6根桩的桩体中预先埋设锚索,用于提供锚桩法静载试验所需的反力。

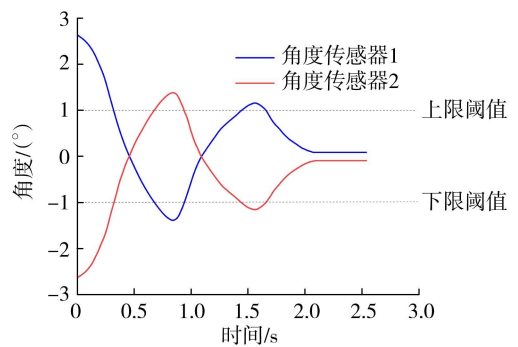


图5 反力梁角度变化试验结果

Fig. 5 Test results of reaction beam angle change

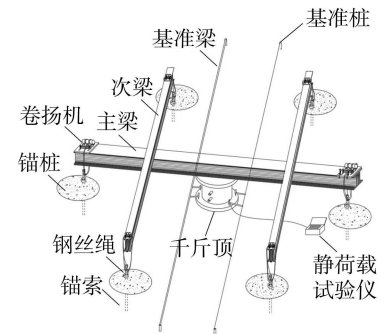


图6 装配式反力平台示意图

Fig. 6 Schematic diagram of assembled reaction platform

装配式智能调平锚桩静载试验设备用于检测桩 Z64 的承载力,而桩 Z72 作为锚桩,在试验过程受锚索拉拔,采用堆载法检测其承载力,用于检验其承载力是否受锚索拉拔影响。桩 Z29 承载力采用堆载法检测,用于与桩 Z64 和桩 Z72 检测结果对比分析,以保证试验结果的准确性。

2.3 试验结果

图 8 和图 9 为锚桩法与传统堆载法试验各级荷载下沉降变化曲线和荷载-沉降曲线,图 10 和图 11 为锚桩承载力检测试验各级荷载下沉降变化曲线和荷载-沉降曲线。根据 JGJ106—2014《建筑基桩检测技术规范》规定,对于桩径 $D>0.8\text{ m}$ 的桩,单桩竖向抗压极限承载力可取沉降等于 $0.05D$ 时对应的荷载值。由图 9 和图 11 可得,在最大荷载为 $2\ 273\text{ kN}$ 时,3 根试桩的沉降分别为 13.40 、 14.48 、 15.75 mm ,均未达到 $0.05D$ (即 65 mm),此时桩体极限承载力为最大施加荷载 $2\ 273\text{ kN}$,桩体承载力特征值为极限承载力的一半,即 $1\ 136.5\text{ kN}$ 。根据桩径计算可得 3 根试桩承载力特征值为 856 kPa ,均大于设计承载力特征值 850 kPa ,满足设计要求。

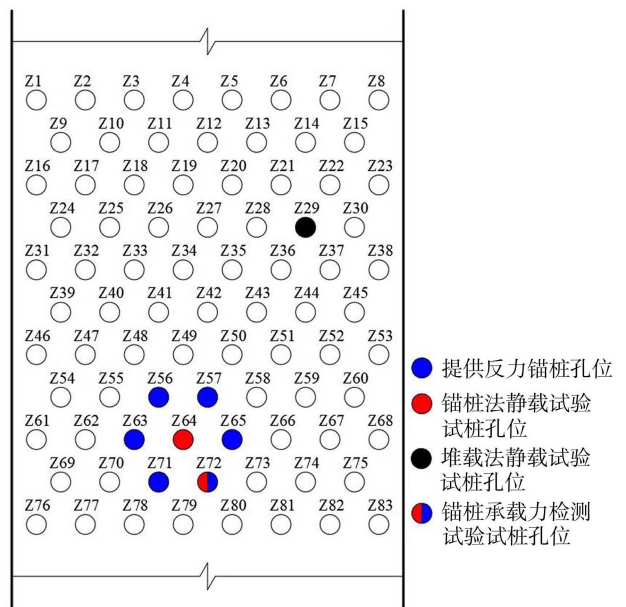


图 7 试桩布置示意图

Fig. 7 Test pile layout

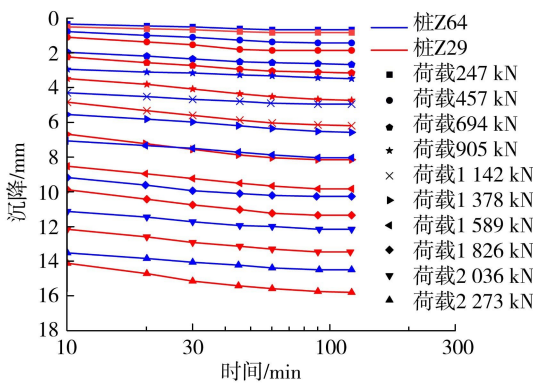


图 8 现场静载试验沉降变化曲线

Fig. 8 Settlement variation curve of static load test on site

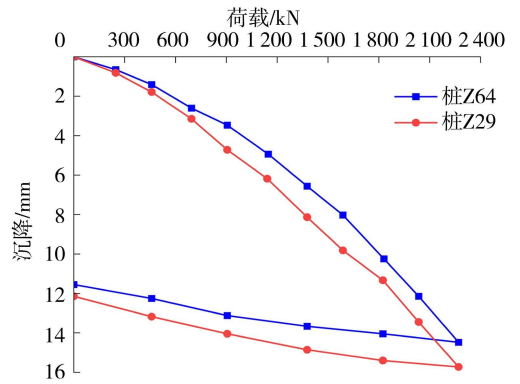


图 9 现场静载试验荷载-沉降曲线

Fig. 9 Settlement-load curve of static load test on site

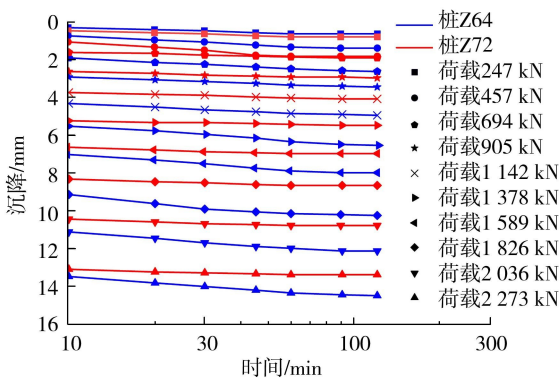


图 10 锚桩承载力检测沉降变化曲线

Fig. 10 Settlement variation curve of anchor pile bearing capacity testing

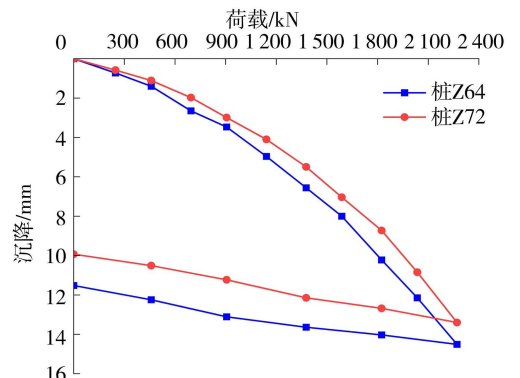


图 11 锚桩承载力检测荷载-沉降曲线

Fig. 11 Settlement-load curve in the bearing capacity detection of anchor pile

2.3.1 锚桩法与堆载法静载试验对比

从图 8 可以看出,在试验过程中,桩顶沉降总体变化平缓,未出现急剧陡降段。各级荷载作用下沉降量

均未大于前一级荷载的5倍,可知所施加的荷载并未达到试桩的极限承载力。

试桩的荷载-沉降曲线无明显的向下转折段以及第二拐点,为缓变型曲线。锚桩法静载试验结果显示,桩Z64最大沉降为14.48 mm,而采用堆载法检测的桩Z29最大沉降为15.75 mm,两者相差1.27 mm,考虑试桩位置及桩体施工质量误差等因素影响,该误差在合理范围内。由荷载-沉降曲线和沉降变化曲线可以看出,采用锚桩法和堆载法试验得到的桩顶沉降变化规律大致相同。

2.3.2 锚索拉拔对碎石桩承载力的影响

锚索拉拔主要会对碎石桩的承载力和密实度产生影响,由图10和图11可知,桩Z72和桩Z64沉降变化规律相同。不过在桩长、桩径以及最大荷载相同的情况下,堆载法静载试验结果曲线位于锚桩法静载试验结果曲线上方。二者沉降差值随荷载增大呈增大趋势,最大为1.78 mm。造成这种现象的成因为:①设备的精度、现场其他大型设备对试验环境的影响以及人员操作等因素导致的试验误差;②在对试桩加载之前,堆载法静载试验反力平台上堆加试块的全部重量由支墩承担,导致基准梁与基准桩下沉,因此同等试验条件下得到的沉降量比锚桩法小。

此外,在拉拔锚索的过程中,端部的承载板会使上方桩体碎石骨料移动,导致桩体局部密实度下降。在试桩承载力不受影响的前提下,桩体密实度下降可扩大土层中的排水通道,加快下方软弱土层超静孔隙水压力的排除。

3 结 语

本文结合碎石桩的施工特点,研发了一种适用于碎石桩承载力检测的装配式智能调平锚桩静载试验设备,该设备利用埋设在碎石桩中的锚索提供反力,可应用于碎石桩承载力检测。该设备上的智能调平系统能自动调整反力梁角度,可有效防止其发生倾斜。与堆载法静载试验相比,采用装配式智能调平锚桩静载试验设备的锚桩法静载试验仅需搭设反力梁,试验所需场地小,设备搭设时间短。辅助卷扬机安装的托架可实现快速安装和拆卸不同规格尺寸的卷扬机,以满足不同吨位的静载试验要求。试验时可预先在地面将卷扬机安装固定在反力梁上,从而减少空中安装作业量,降低安全隐患。工程现场试验结果表明,采用装配式智能调平锚桩静载试验设备进行的锚桩法静载试验结果与堆载法静载试验结果呈现一致的变化规律,误差也在允许的合理范围内;而采用堆载法对经锚索拉拔后的锚桩进行承载力检测,所得桩体承载力仍满足工程设计要求。

参考文献:

- [1] 罗守成. 对深厚覆盖层地质问题的认识[J]. 水力发电, 1995, 21(4): 21-24. (LUO Shoucheng. Cognition of geological problems of thick overburden layer[J]. Water Power, 1995, 21(4): 21-24. (in Chinese))
- [2] 周波, 李进元, 施裕兵. 西南某水电站深厚软弱覆盖层地基工程地质研究[J]. 水力发电, 2011, 37(3): 21-22. (ZHOU Bo, LI Jinyuan, SHI Yubing. Engineering geology research on the deep and soft overburden of a hydropower station in southwest china [J]. Water Power, 2011, 37(3): 21-22. (in Chinese))
- [3] DAS T, SHARMA M, CHOUDHURY D. Bearing capacity and liquefaction assessment of shallow foundations resting on vibro-stone column densified soil in Vallur oil terminal, India[J]. Indian Geotechnical Journal, 2023, 53(6): 1392-1413.
- [4] 张秀勇, 王海龙, 李杰. 碎石桩复合地基在大丽高速公路软土地基处理中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 455-459. (ZHANG Xiuyong, WANG Hailong, LI Jie. Application of gravel pile composite foundation in improving soft subgrade of Da-Li Highway[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5): 455-459. (in Chinese))
- [5] 樊旭, 王永志, 梁小丛, 等. 珊瑚礁砂场地碎石桩淤堵性离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(增刊1): 214-217. (FAN Xu, WANG Yongzhi, LIANG Xiacong, et al. Centrifugal model tests on clogging performance of stone columns in coral sand site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(Sup1): 214-217. (in Chinese))
- [6] GHAZAVI M, AFSHAR J N. Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 38: 26-36.
- [7] AFSHAR J N, GHAZAVI M. A simple analytical method for calculation of bearing capacity of stone-column[J]. International Journal of Civil Engineering, 2014, 12(1): 15-25.
- [8] 郭生根. 静载试验梁式反力系统设计方法研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊2): 246-250. (GUO Shenggen. Design of beam type reaction system for static plate load tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(Sup2): 246-250.

(in Chinese))

- [9] 卢毓昀. 锚桩反力法静载试验在桩基检测中的应用[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(3): 13-17. (LU Chengyun. Application of anchor pile reaction force method static load test in pile foundation inspection[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(3): 13-17. (in Chinese))
- [10] HE Chunlin, GONG Chengzhong. Comparison and analysis on self-balanced method and anchored pile method in qingdao gulf bridge[J]. Advanced Materials Research, 2013, 838-841: 1024-1027.
- [11] 赵明华, 邹新军, 刘齐建. 洞庭湖软土地区大直径超长灌注桩竖向承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(10): 63-67. (ZHAO Minghua, ZOU Xinjun, LIU Qijian. Loading test on the vertical bearing capacity of super-long and large-diameter bored piles in the soft soil area of Dongting Lake[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(10): 63-67. (in Chinese))
- [12] 刘捷, 顾章川, 俞先江. 锚桩法静载桩基检测在港口工程试桩中的应用[J]. 铁道建筑, 2014(6): 63-65. (LIU Jie, GU Zhangchuan, YU Xianjiang. Application of anchor pile method to static load pile foundation testing in port engineering[J]. Railway Engineering, 2014(6): 63-65. (in Chinese))
- [13] 鲍金虎, 苏静波, 吴锋, 等. 深厚软黏土地基中大直径单桩基础现场水平受荷试验及 $p-y$ 曲线适用性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 127-134. (BAO Jinhu, SU Jingbo, WU Feng, et al. Field horizontal loading test and $p-y$ curve applicability of large-diameter single pile foundation in deep soft clay groundsill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 127-134. (in Chinese))
- [14] 周洪波, 黄胜生. 锚桩法单桩静载试验中群桩相互作用及误差分析[J]. 岩土力学, 2004(10): 1613-1616. (ZHOU Hongbo, HUANG Shengsheng. Interaction and error analysis of pile groups in anchor-pile loading test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(10): 1613-1616. (in Chinese))
- [15] 张燃, 陈伏军, 蔡惠军. 锚桩压重联合反力装置在静载试验中的应用[J]. 施工技术, 2005(增刊1): 125-126. (ZHANG Ran, CHEN Fujun, CAI Huijun. Application of anchor pile loading combination counterforce device in static loading tests[J]. Construction Technology, 2005(Sup1): 125-126. (in Chinese))
- [16] 曾英杰, 朱文久, 吕景权, 等. 锚桩压重复合反力装置: CN201420288304. 8[P]. 2014-11-05.
- [17] 倪金华, 王文渊, 罗浩, 等. 新型反力横梁加载装置在锚桩法中的应用[J]. 施工技术, 2017, 46(21): 106-110. (NI Jinhua, WANG Wenyuan, LUO Hao, et al. Application of new reaction force beam loading device in anchor pile method[J]. Construction Technology, 2017, 46(21): 106-110. (in Chinese))
- [18] 许涛. 新型管桩静载反力系统在试桩工程中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(增刊1): 424-427. (XU Tao. Application of new pipe pile plate loading opposite force system to pile test work[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(Sup1): 424-427. (in Chinese))
- [19] 陈雪峰, 王京杭, 孙立山, 等. 不考虑桩端承力的锚桩法新工艺试验研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(11): 85-89. (CHEN Xuefeng, WANG Jinghang, SUN Lishan, et al. Experimental research on new technology of anchor pile method without considering pile end bearing capacity[J]. Railway Engineering, 2022, 62(11): 85-89. (in Chinese))
- [20] ZHOU Zhiguo, YANG Jun, SUN Xiaoli, et al. Development and application of static load test system for pile foundation based on steel screw anchor piles[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(10): 4309-4320.

(收稿日期: 2024-10-21 编辑: 熊水斌)

(上接第53页)

- [16] 肖莹莹. 雨水调蓄池各系统的论述及应用要点[J]. 科学技术创新, 2019(20): 93-94. (XIAO Yingying. Discussion and application points of each system of rainwater storage tank[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(20): 93-94. (in Chinese))
- [17] 孙斌, 王月萍, 吴天福, 等. 雨水调蓄池中双曲面搅拌机数值计算和工作特性研究[J]. 工程技术研究, 2020, 5(4): 7-10. (SUN Bin, WANG Yueping, WU Tianfu, et al. Study on numerical calculation and flow characteristics of hyperboloid stirrer in rainwater storage tank[J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(4): 7-10. (in Chinese))
- [18] 丁哲, 张睿, 陈毓陵, 等. 城市排水泵站水力特性及整流措施[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 7-14. (DING Zhe, ZHANG Rui, CHEN Yuling, et al. Hydraulic characteristics and rectification measures of urban drainage pumping station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 7-14. (in Chinese))
- [19] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.

(收稿日期: 2024-08-15 编辑: 刘晓艳)