

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.06.008

预成孔植入管桩竖向抗压承载性能试验研究

陈礼榕¹, 邱俊峰^{1,2}, 王坛华^{1,2}, 邓涛³, 赖鹏安^{2,3}

(1. 福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350004;

2. 近海公路建设与养护新材料技术应用交通运输行业研发中心, 福建 福州 350004;

3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 为探究新型桩基结构—预成孔植入管桩的竖向承载特性,以福建近海典型地区某公路桥梁工程为依托,开展竖向承载力现场试验,并采用 ABAQUS 数值模拟进一步探讨加固体参数对其竖向承载特性的影响。现场试验结果表明:在近海典型地层中,预成孔植入管桩表现出摩擦端承桩的工作性状,其桩顶荷载-桩顶沉降曲线呈缓降型变化,非极限状态下桩顶沉降略大于等外径的混凝土灌注桩;旋挖植入管桩与桩周土(岩)界面的抗剪性能最佳,其桩侧极限摩阻力普遍高于其他桩型 30% 以上。在工程设计中,应充分考虑加固体对桩端岩层的强化嵌固效应以及桩基承载特性的影响,采用 150 mm~200 mm、100 mm~200 mm 作为水泥土桩、细石混凝土桩的设计厚度;建议对粉质黏土、强风化凝灰岩层处的旋挖植入管桩侧摩阻力标准值调整系数分别取 1.3 和 1.4~1.7,并以《建筑桩基技术规范》中混凝土预制桩极限桩端阻力标准值为基数进行桩端阻力计算。

关键词: 桩基工程;预成孔植入管桩;现场试验;承载特性;数值模拟

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0052-09

Experimental Study on Vertical Compressive Bearing Performance of Pre-formed Implanted Pipe Pile

CHEN Lirong¹, QIU Junfeng^{1,2}, WANG Tanhua^{1,2}, DENG Tao³, LAI Peng'an^{2,3}

(1. Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350004, China;

2. Research and Development Center of Transport Industry of New Materials, Technologies Application for Highway Construction and Maintenance of Offshore Areas, Fuzhou, Fujian 350004, China;

3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: In order to explore the vertical load-bearing characteristics of the novel pile foundation structure, the pre-drilled and implanted pipe pile, based on a highway project in a typical offshore area of Fujian, field test was carried out to provide the load-bearing capacity and stress characteristics of this type of pile foundation. Additionally, numerical simulations based on ABAQUS were adopted to further investigate the influence of solidification parameters on its vertical load-bearing behavior. The field test results show that: in the typical offshore stratum, the pre-fabricated implanted pipe pile shows the working behavior of friction tip-bearing pile, and its $Q-S$ curve shows a slow-decreasing change, and the top settlement of the pile in the off-limit condition is slightly larger than that of the concrete piles of the same outside diameter; the rotary implanted pipe pile has the best shear performance at the interface of the pile and the periportal soil (rock), and the ultimate friction resistance of the pile is generally higher than that of the other pile types by more than 30%. In the engineering design, it should also need to fully consider the reinforced embedding

收稿日期: 2024-08-11

修稿日期: 2024-09-21

基金项目: 福建省交通运输科技项目(JC202312); 福建省住建行业科技项目(2022-K-207)

作者简介: 陈礼榕(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事路桥设计与加固工作。E-mail: 85602766@qq.com

通讯作者: 邱俊峰(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事桥梁工程技术研发及设计工作。E-mail: 346009308@qq.com

effect of added solid on the rock layer at the pile end and the influence of bearing characteristics of the pile foundation. 150 mm ~ 200 mm and 100 mm ~ 200 mm are adopted as the design thicknesses of cement pile and fine stone concrete pile; it is recommended that the adjustment coefficients of standard value of lateral friction resistance of rotary implanted pipe piles at the layers of pulverized clay and strongly weathered tuff should be taken as 1.3 and 1.4 ~ 1.7, and take the standard value of ultimate pile tip resistance of precast concrete piles in Technical Specification for Building Pile Foundation (JGJ94—2008) as the base for calculation of pile tip resistance.

Keywords: pile foundation engineering; pre-formed implanted tubular piles; field experiment; bearing characteristics; numerical simulation

钻孔灌注桩、预制桩等传统桩型由于其生产工艺成熟、承载性能可靠被广泛应用于各领域的基础工程中,但也因存在着诸如钻孔灌注桩成桩质量不易控制、桩底存在浮渣、施工不环保^[1-2]、管桩易挤土、爆桩、难以穿越硬土层^[3-4]等问题,在复杂地层或工程中的适用性较差。为解决上述问题,我国于 20 世纪末自日本引进了预成孔植桩工法^[5],目前,该工法已在安徽、湖北、广东等多个公路桥梁工程中得以应用。预成孔植入管桩是指通过钻机在桩位预先钻孔或采用搅拌、旋喷成桩,然后再将管桩植入其中,使之与桩周水泥土、细石混凝土等加固体形成共同受力的复合桩基。根据其成桩工艺的不同又可分为旋挖植入法和搅拌植入法两种^[6-7]。除成孔机械与方式不同以外,两者最主要的区别在于使用的加固体材料不同。即旋挖植入法一般和水泥砂浆、细石混凝土联合使用;而搅拌植入法则是通过压灌注入水泥并与原土充分混合、搅拌形成水泥土加固体,其组合结构及桩土界面特性与混凝土芯水泥土搅拌桩^[8-9]、劲性搅拌桩^[10-11]、高喷插芯组合桩^[12]等水泥土复合桩基本一致。

对于搅拌植入管桩承载性状方面,李俊才、张永刚等^[8-9,13]开展多组的抗压承载试验,探究了搅拌植入管桩的竖向沉降特性,认为管桩与水泥土具有相同的桩侧摩阻力分布规律。在承载力计算上,已有数部住建行业规范《水泥土复合管桩基础技术规程》^[14]、《劲性复合桩技术规程》^[15]等,在基于大量现场实测数据的基础上,提出了适用于不同破坏模式的搅拌植入管桩竖向承载力计算方法,但在桩端入岩条件下的端阻力计算方面仍有待完善。但就旋挖植入管桩而言,相关研究还尚处于起步阶段,成果较少。

综上所述,已有研究多是对或应用于砂土、粉土等地层条件下的预成孔植入管桩竖向承载力、荷载传递机理研究。然而,不同的地层特性势必会影响到桩的侧摩阻力发挥、荷载传递及承载特性,特别

是对于福建沿海地区上软下硬地层条件下尤其是如此,但目前未见有相关研究报道。另外,不同加固体材料及其强度大小亦会对管桩-加固体-桩周土的荷载传递以及界面特性造成影响,进而出现承载特性上的差异化表现。因此,有必要开展针对桩端入岩条件下,不同成桩工艺、加固体材料的预成孔植入管桩荷载传递机制和承载特性进行研究,为其进一步地推广应用奠定基础。

本文依托福建近海典型地层某公路桥梁工程,拟通过开展预成孔植入管桩现场载荷试验,以探究桩端入岩层条件下,不同成孔方式、加固体材料对预成孔植入管桩竖向承载特性的影响,以期为后续该工法桩的工程设计与推广应用提供有力的支撑。

1 现场载荷试验

1.1 工程概况

某公路桥梁项目拟建场地位于福建省沿海地区,属山前冲洪积地貌及海积阶地地貌,沿线表层主要为第四系填土、海积层、冲洪积层、残积层,下伏侏罗系上统南园组熔结凝灰岩及其风化层。试验场地地层以杂填土、(含碎石)粉质黏土,强风化凝灰岩为主。地基土物理力学参数见表 1。该公路设计标准按双向六车道、路基宽 49.5 m/36 m、设计速度 80 km/h 的一级公路标准建设,下部结构采用预制桩结构。桩身所穿越地层除浅表层(1 m ~ 3 m)外,其余各地层富水性均较差。

1.2 试验方案

为探究不同成桩工艺下预成孔植入管桩的竖向承载特性,开展持力层为碎块状强风化凝灰岩的预成孔植入管桩(旋挖植入法和搅拌植入法)的竖向抗压承载试验,并与等直径的混凝土灌注桩进行对比。两种预成孔植入管桩外桩(加固体)分别采用强度为 C30 的细石混凝土桩(旋挖植入管桩)和水泥土桩(搅拌植入管桩),内芯管桩型号均为 PHC-600-AB(130)。其中,旋挖植入管桩加固体的轴心

抗压强度标准值 f_{ck} 不低于 20.1 MPa; 搅拌植入管桩加固体水泥土现场掺灰量 15%, 且 28 d 无侧限抗压强度不低于 1.33 MPa。试验桩具体设计参数如表 2 所示。

为充分获得试验桩在竖向加载下的承载特性, 结合试验场地的地层分布情况, 自桩顶向下依次布设 11 个监测断面, 布设位置示意如图 1 所示。

表 1 土层物理力学参数

土层	厚度 /m	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	含水量 /%	压缩模量 $E_{s(1-2)}$ /MPa
杂填土	1.0~1.5	1820	11.1	11.9	32.0	3.5
含碎石粉质黏土	4.5~6.0	1880	19.8	21.9	26.3	5.8
粉质黏土	2.3~3.3	1880	23.9	16.9	27.5	6.3
砂土状强风化凝灰岩	1.7~2.5	2100	25.0	25.0	—	16.0
碎块状强风化凝灰岩	1.7~3.0	2200	30.0	30.0	—	20.0

表 2 试验桩设计参数

编号	试验桩类型	加固体材料	加固体直径/mm	管桩直径/mm	桩长 /m
CZ-1	混凝土灌注桩	—	800	—	14
JZ-1	搅拌植入管桩	水泥土	900	600	14
XZ-1	旋挖植入管桩	C30 细石混凝土	800	600	14

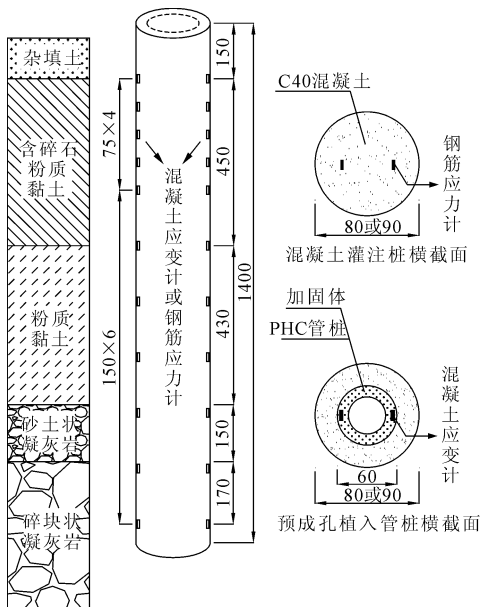


图 1 桩身传感器布设图(单位:cm)

本文试验严格按照《公路工程基桩检测技术规范》^[16] (JTG/T 3512—2020) 要求, 采用慢速维持荷载法对试验桩进行加、卸载试验, 试验中桩顶承压板

压力始终未与桩周土体或加固体发生接触。

2 试验结果与分析

2.1 荷载-沉降曲线

图 2 是各试验桩现场静载试验所得到的桩顶荷载与桩顶沉降 ($Q-S$) 曲线图。由图 2 可知, 混凝土灌注桩 (CZ-1)、搅拌植入管桩 (JZ-1), 以及旋挖植入管桩 (XZ-1) 的 $Q-S$ 曲线均呈“缓降”型变化, 并未出现明显的失稳拐点。当竖向荷载加载至最大试验荷载 (5 130 kN) 时, 混凝土灌注桩产生的桩顶沉降 (5.19 mm) 小于旋挖 (7.16 mm)、搅拌植入管桩的桩顶沉降 (14.40 mm)。进一步分析发现, 在试验加载的初期 (0~1 026 kN) 混凝土灌注桩与预成孔植入管桩 (搅拌、旋挖植入管桩) 的桩顶沉降变化并无明显区别; 随着竖向荷载的持续增大, 两类桩型桩顶沉降逐步呈现差异化发展。在卸荷阶段, 相较于混凝土灌注桩, 预成孔植入管桩 $Q-S$ 曲线呈指数型回弹, 平均回弹率高达 67.79%, 而混凝土灌注桩仅发生了 32.56% 的回弹。这主要是因为相比于灌注桩, 管桩桩身材料的弹性模量高, 且桩端阻力占比较小, 因此卸载后恢复的能力更强、平均回弹率更高。

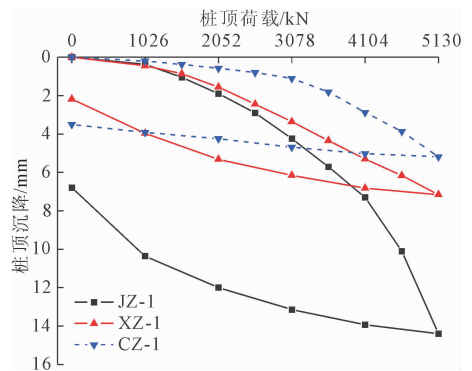


图 2 荷载-位移 ($Q-S$) 曲线

另外, 通过比较搅拌、旋挖植入管桩 $Q-S$ 曲线变化规律可知, 在加载的前期 (0~2 052 kN), 两类桩的 $Q-S$ 曲线几乎重叠, 当竖向荷载超过 2 052 kN 时, 才逐渐发生“分离”。其原因在于: 两类桩的竖向荷载传递模式基本一致。即, 在竖向荷载作用下, 桩顶的绝大部分荷载首先由 PHC 管桩承担, 管桩和加固体 (水泥土或 C30 细石混凝土) 的内界面随即产生足够的抗剪力, 以确保部分竖向荷载以剪应力的形式传递至加固体, 然后再通过加固体传递给桩周土 (产生桩土侧摩阻力), 而另一部分竖向荷载则通过桩端阻力传递至桩端土 (岩) 处。但由于水泥土与管桩的弹性模量比 (0.004) 远小于细石混凝土

与管桩的弹模比(0.855),因此相较于水泥土桩,细石混凝土桩往往能承担更多轴向压力与桩底反力。所以,在加载的中后期(2 052~5 130 kN),旋挖植入管桩的桩顶沉降显著小于搅拌植入管桩。

2.2 桩身轴力分布

为获得各类桩在竖向荷载作用下的荷载分担情况,通过钢筋应力计或桩身应变片读数计算得到了桩身各截面处的轴力,如图3所示。

由图3可知,混凝土灌注桩与管桩的桩身轴力均随桩顶荷载的增加而增大,并沿深度方向逐步减小,其斜率变化与桩顶荷载大小、桩土交界面性质密切相关。整体表现为桩身底部凝灰岩层处轴力变化速率最大、上部杂填土层变化速率最小,中部(含碎石)黏土层处变化速率则介于两者之间。

2.3 桩侧摩阻力

为进一步探究不同成桩工艺对桩身轴力分布的影响,根据文献^[16-17]对桩身相邻断面间的轴力作差,最终得到该段的桩侧摩阻力平均值,各桩侧摩阻力沿深度分布情况如图4所示。

从桩侧摩阻力发挥程度来看,不论成桩工艺如何,桩身上部侧摩阻力均先于下部发挥,具有明显的异步性。随着竖向荷载的增大,桩土间相对位移趋势愈发明显,桩身中下部处的侧摩阻力开始发挥作用。

在其分布形态方面,桩身侧摩阻力沿深度方向呈先增大后减小,再增至峰值的变化规律。该分布特性与土层的性质存在紧密联系,为更清晰地比较不同成桩工艺下桩侧摩阻力的发挥情况,根据土(岩)层的不同,结合桩土相对位移绘制了桩侧摩阻力与桩土位移关系曲线,如图5所示。

(1) 对比图5(a)、图5(b)可知,同种成桩工艺在不同风化程度(岩石强度)凝灰岩地层中,桩侧摩阻力随桩土相对位移变化规律大体一致,但不同成桩工艺的桩侧摩阻力发挥程度存在显著差异。当桩土相对位移较小时(0~1 mm),混凝土灌注桩的侧

摩阻力首先得以发挥,并迅速达到峰值;随着桩土相对位移的继续增大(4 mm~6 mm),搅拌植入管桩除近桩端岩层外,其他土(岩)层处桩侧摩阻力均结束增长,并进入相对稳定阶段;而旋挖植入管桩除浅表杂填土层外,其他土(岩)层处桩侧摩阻力仍呈现出随着桩土相对位移的增大而增加的变化趋势。

(2) 对比图5(c)、图5(d)可知,同种成桩工艺在含碎石粉质黏土层处的桩侧极限摩阻力较不含碎石处的大32.7%~65.3%。这是因为掺杂着碎石颗粒的粉质黏土有着较高的内摩擦角,一定程度上提高了加固体与桩周土界面的抗剪强度。另外,不同成桩工艺的提升幅度(含碎石粉质黏土处桩侧摩阻力/粉质黏土处桩侧摩阻力)也有所差异;搅拌植入法的提升幅度仅为32.7%,而旋挖植入法的提升幅度则达到了65.3%。造成该现象的主要原因可能是由于孔内高流动性的细石混凝土在管桩植入过程中,除了向上流动外,还存在一定的扩径与渗透作用,能与桩周土形成更好的黏结效果;而水泥土桩在高压喷射、搅拌成桩的过程中,易对桩周附近的原状土产生较大的扰动,一定程度上削弱了碎石颗粒成分对粉质黏土以及桩土界面抗剪强度的强化作用。

(3) 由于试验场地原址主要为耕植、鱼塘用地,并散落分布有生活、建材垃圾,所以浅表处杂填土的均匀性较差,自身抗剪强度和有效应力较低,加固体(水泥土桩或混凝土桩)与其相互胶结的效果不佳。在较小的桩土相对位移下(0~1 mm),桩侧摩阻力便已达到峰值,且并未体现出与成桩工艺或桩型的强关联性,如图5(e)所示。

(4) 在桩侧极限摩阻力发挥方面,除杂填土层外,旋挖植入管桩桩侧极限摩阻力在其他土(岩)层处均显著优于混凝土灌注桩和搅拌植入管桩,其增幅约为33.1%~64.9%;在强风化凝灰岩层中,搅拌植入管桩桩侧极限摩阻力略大于混凝土灌注桩,而在(含碎石)粉质黏土层中,则相反。

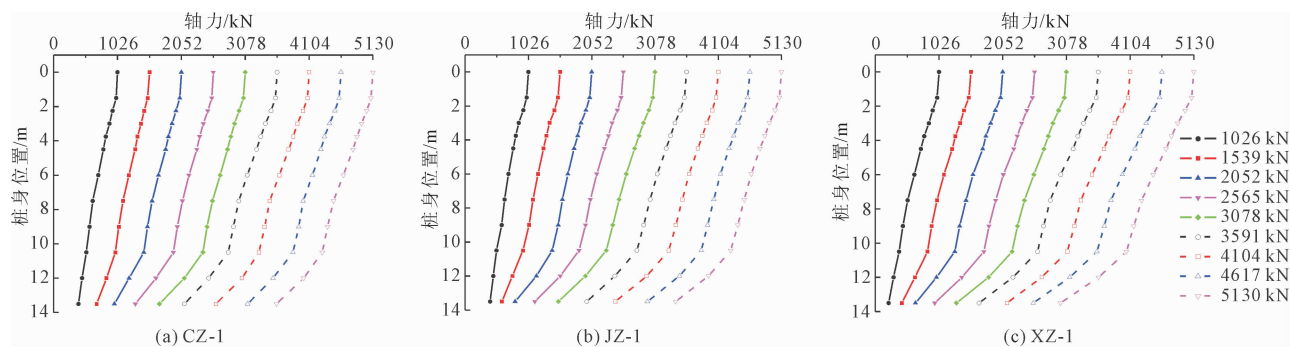


图3 桩身轴力-深度曲线图

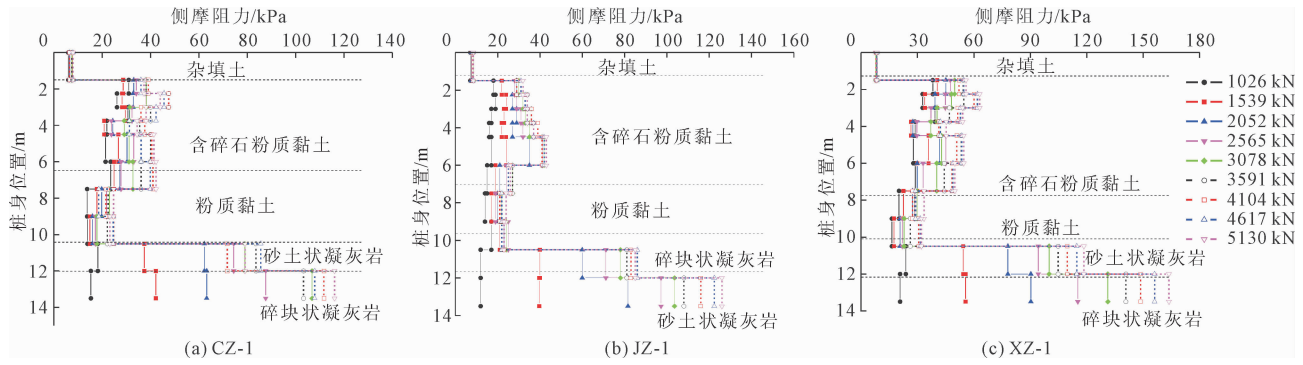


图 4 桩侧摩阻力-深度曲线图

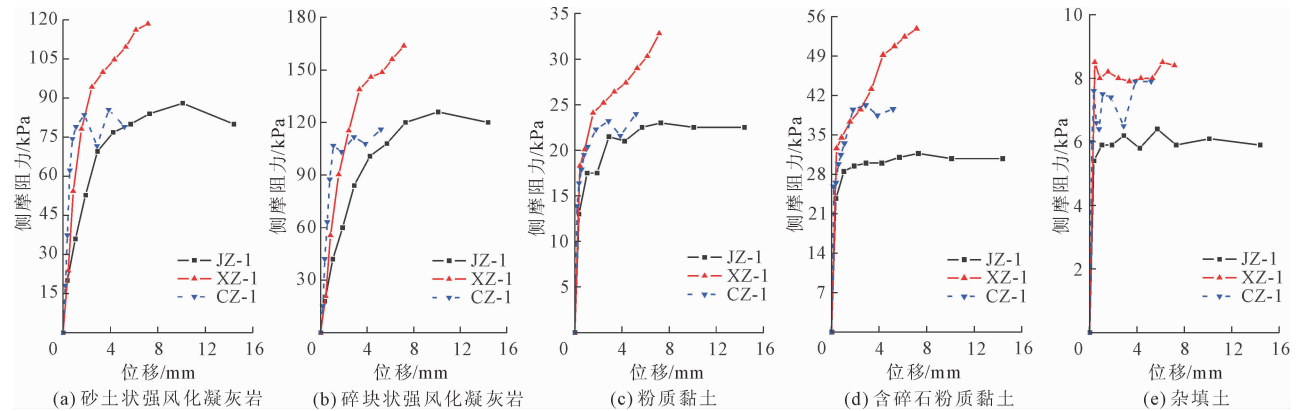


图 5 桩侧摩阻力与桩土相对位移关系曲线

2.4 桩端阻力

图 6(a) 为各桩型桩端阻力随桩顶沉降变化曲线,通过分析可知在试验加载的前中期(桩顶荷载 0~3 591 kN),同一桩端阻力下,旋挖植入管桩与搅拌植入管桩所产生的桩顶沉降大致相同,且均大于混凝土灌注桩。这主要是因为相较于混凝土灌注桩的全截面受压,预成孔植入管桩的竖向加荷区域仅位于管桩截面,且管桩桩端处($D_1 = 600$ mm)的承载面积远小于灌注桩($D_2 = 800$ mm),故而在同一桩端阻力下,管桩桩端处持力层所承受的压强远大于灌注桩,进而产生更大的压缩变形。

从桩端承载占比方面来看,在最大试验荷载下,各类桩型桩端阻力承载比均超过了 50%,说明本文试验桩都属摩擦端承桩。在同一桩顶沉降下,各类桩型桩端承载占比从高到低依次是,混凝土灌注桩、搅拌植入管桩、旋挖植入管桩。各类桩桩端承载比-位移曲线中均存在明显拐点,拐点之前曲线斜率变化较小,拐点之后曲线斜率出现突增;且各类桩型的拐点位置并不相同,当桩端承载比超过 0.28 时,旋挖植入管桩桩顶沉降开始增大,而搅拌植入管桩、混凝土灌注桩的拐点则分别出现在端承比为 0.41、

0.48 时。各类桩型桩端阻力、承载占比与桩顶沉降的关系见表 3 所示。

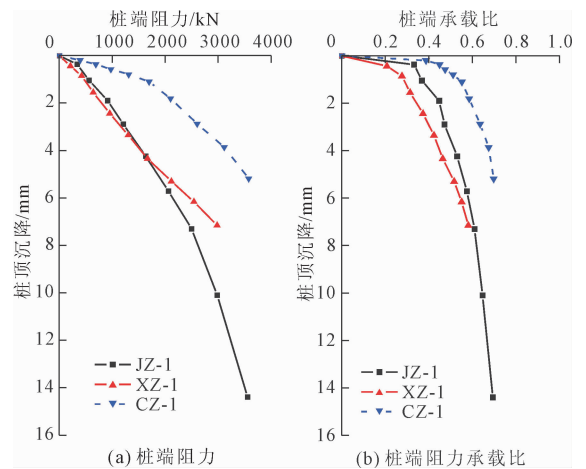


图 6 桩端荷载-位移曲线

表 3 桩端阻力及承载比

编号	最大桩顶沉降/mm	极限桩端阻力/kN	最大承载比	拐点处承载比
CZ-1	5.19	3579.8	0.70	0.48
JZ-1	14.40	3557.7	0.69	0.41
XZ-1	7.16	2980.8	0.58	0.28

综上可知,同一荷载级别下混凝土灌注桩所承受的桩端阻力以及其占比均大于预成孔植入管桩,这也从侧面反映了预成孔植入管桩侧摩阻力的发挥情况优于混凝土灌注桩。

3 与现行规范比较分析

3.1 承载力比较分析

目前,在预成孔植入管桩竖向承载设计上,多是根据《水泥石复合管桩基础技术规程》^[14](JGJ/T 330—2014)(下文简称“水泥石复合桩规程”)或《劲性复合桩技术规程》^[15](JGJ/T 327—2014)(下文简称“劲性复合桩规程”)等规范,基于不同的破坏模式,分别计算得到复合管桩竖向承载力标准值 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 。由于本文试验中仅在管桩截面处施加竖向荷载,且加固体加固深度与管桩入土深度一致,故可将两个技术规程^[14-15]中的加固体-桩周土界面破坏强度 Q_1 、管桩-加固体界面破坏强度 Q_2 、桩体材料破坏强度 Q_3 计算式进一步简化:

$$Q_1 = U_p \sum_{i=1}^n \xi_{si} q_{sia} l_i + \alpha \xi_p q_{pa} A_p \quad (1)$$

$$Q_2 = q_{pa} A_c + \xi_{cz} A_{cf} \quad (2)$$

$$Q_3 = \psi_c A_c f_{ck} \quad (3)$$

式中: U_p 为预成孔植入管桩加固体的外周长, m; ξ_{si} 为侧摩阻力调整系数; q_{sia} 为第 i 层土桩土侧摩阻力特征值, kPa; l_i 为第 i 层土的厚度, m; α 为承载力折减系数; ξ_p 为桩端阻力调整系数; q_{pa} 为桩端地基土未经修正的承载力特征值, 本文依据地勘报告取 650 kPa 进行计算; A_p 为复合桩桩端面积, m^2 ; A_c 为管桩的桩端截面积, m^2 ; ξ_{cz} 为侧阻力换算系数; A_{cf} 为管桩的侧表面积, m^2 ; ψ_c 为管桩工作条件系数; f_{ck} 为管桩混凝土抗压强度标准值, kPa。

表 4 竖向承载力计算参数取值

计算参数	水泥石复合桩规程	劲性复合桩规程
加固体与桩周土界面侧摩阻力调整系数 ξ_{si}	1.5~1.6	1.5~1.9
桩端阻力调整系数 ξ_p	1.0	—
管桩与加固体界面侧阻力换算系数 ξ_{cz}	水泥石: $0.053f_{cu}^{28d}$ 素混凝土体(无)	水泥石: $0.04f_{cu}^{90d}$ 素混凝土体(无)
桩端天然地基土承载力折减系数 α	—	0.7~0.9
管桩工作条件系数 ψ_c	0.85	—

注: f_{cu}^{28d} 、 f_{cu}^{90d} 分别是指 28 d、90 d 龄期的水泥石立方体抗压强度标准值, kPa。

将现场试验实测承载力与各破坏模式下的预成

孔植入管桩竖向承载力标准值 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 进行对比,见表 5 所示。

表 5 承载力标准值与实测值对比

竖向承载力	水泥石复合桩规程	劲性复合桩规程	实测值
Q_1	旋挖:5001 kN 搅拌:5725 kN	旋挖:5146 kN 搅拌:5771 kN	
Q_2	旋挖:无 搅拌:1860 kN	旋挖:无 搅拌:4860 kN	
Q_3	8624 kN	—	5130 kN
Q_m	旋挖:5001 kN 搅拌:1860 kN	旋挖:5146 kN 搅拌:4860 kN	
安全系数 (实测值/ Q_m)	旋挖:1.03 搅拌:2.76	旋挖:1.00 搅拌:1.06	

注:上述实测值为本文试验的最大加载量,但并非各桩的竖向承载力极限值; Q_m 为复合管桩的竖向荷载标准值,取 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 中的最小值。

从表 5 可知,在加固体-桩周土界面破坏强度 Q_1 、管桩-加固体界面破坏强度 Q_2 计算上,劲性复合桩规程所得结果均大于水泥石复合桩规程。特别是在管桩-加固体界面破坏强度上,两者相差甚远。这主要是因为水泥石复合桩规程仅考虑了桩侧摩阻力的贡献,而劲性复合桩规程还同时考虑了管桩桩端阻力的影响。所以,对于本文试验地层条件下(桩端进入到强风化岩层),依据劲性复合桩规程计算所得的 Q_2 会更符合现场的实际情况。另外,对于旋挖植入管桩而言,其在竖向受荷时,桩侧摩阻力的发挥情况要明显优于搅拌植入管桩(详见图 4、图 5 所示),而现行规范中并未对其进行细分讨论,若直接采用水泥石复合桩基竖向承载力计算公式与参数来估算旋挖植入管桩的竖向承载能力,会使计算结果存在较大的不确定性。故而,有必要根据现场试验结果,提出适用于旋挖植入管桩的竖向承载能力的计算式或经验参数。

3.2 桩侧摩阻力比较分析

现有规范中针对预成孔植入复合桩桩侧(端)阻力调整方法有两种,一是基于不同地层条件的差异性桩侧(端)阻力调整系数法(以劲性复合桩规程为代表),二是采用综合调整系数法(以水泥石复合管桩规程为代表)。根据本文试验桩结果,结合图 5、表 6 可知,在不同土(岩)层中,旋挖植入管桩桩侧摩阻力实测值与规范标准值的比值差异较大,故而不宜采用综合调整系数法对其进行修正。对于浅表处的杂填土,由于其厚度小、均匀性较差,难以与加固体形成可靠的粘结,因此建议在计算填土层桩侧

摩阻力时,可取规范推荐值中的较小值;而对粉质黏土、强风化凝灰岩而言,则宜分别取 1.3 和 1.4 ~ 1.7(岩石强度较高时取大值)对水泥土复合桩规程中桩侧摩阻力标准值进行放大调整。需要特别注意的是,由于本次试验桩并未达到极限状态,除杂填土层外,其他土(岩)层处的旋挖植入管桩桩侧摩阻力仍有着较大的发展潜力(见图 5 所示),故本文所提出的调整系数是具有一定安全储备的。

表 6 桩侧阻力实测值与规范推荐值对比

土(岩)层	实测值/kPa	实测/(水泥土复合桩规程推荐值)	实测/(劲性复合桩规程推荐值)
杂填土	8.4	0.83	0.64
粉质黏土	32.8	1.32	1.45
含碎石粉质黏土	53.8	1.37	1.24
砂土状强风化凝灰岩	118.5	1.43	—
碎块状强风化凝灰岩	163.7	1.72	—

3.3 桩端阻力比较分析

通过对比两本规范中桩端阻力计算值与现场实测值发现,在水泥土复合桩规程中,桩端阻力的大小取决于地勘所得的桩端地基土未经修正的承载力特征值;而在劲性复合桩规程中,其值大小则是由《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[18](下文简称“建桩规范”)推荐的泥浆护壁钻孔桩极限端阻力标准值确定,但不论是通过上述哪种方法计算得到的桩端阻力均与现场实测值相差较大,如表 7 所示。

表 7 桩端阻力实测值与规范推荐值对比

计算方法	实测/(水泥土复合桩规程推荐值)	实测/(劲性复合桩规程推荐值)
按地勘报告推荐取值	8.6	19.1
无地区经验,按规范取值	2.5~4.0	—
按规范取值(泥浆护壁钻孔)	—	5.6~8.8
按规范取值(干孔钻孔成桩)	—	4.8~7.7
按规范取值(混凝土预制桩)	—	1.4~2.1

由表 7 可知,在旋挖植入管桩的桩端阻力计算中,采用建桩规范中混凝土预制桩极限桩端阻力标准值作为 q_{pa} 能充分考虑到高强度加固体对桩端承载的强化作用,从而减少设计上对材料的浪费。

4 有限元模拟

4.1 计算模型的建立

为进一步探究不同加固体(细石混凝土、水泥土)参数等对预成孔植入管桩竖向承载特性的影

响,采用 ABAQUS 有限元软件建立了预成孔植入管桩(下文简称“复合桩”)竖向承载数值模型。复合桩桩心位于模型正中央,土(岩)体模型的长、宽均取复合桩桩径的 20 倍,桩端距模型底部距离大于 10 倍复合桩桩径,以消除边界效应对数值计算结果的影响。土体、桩体网格划分单元形式均采用 C3D8R,预应力钢筋采用 T3D2 单元模拟,并植入桩体内。模型及网格划分见图 7 所示。

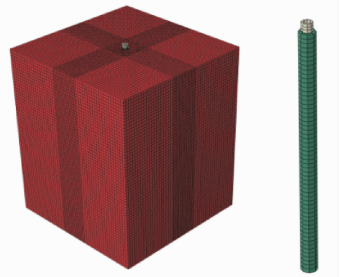


图 7 模型网格划分示意图

由于预成孔植入管桩属微挤土桩,对周围土体影响较小,为便于程序的运算,建模时不考虑其挤土效应。管桩与加固体接触面采用黏结-滑移摩擦模型,接触面黏聚力(界面剪切强度)取水泥土无侧限抗压强度的 0.19 倍^[19],即 253 kPa,切向摩擦系数取 0.65;桩土接触面采用库伦摩擦模型,切向摩擦系数取 0.30,法向接触采用硬接触,并允许接触面滑移和分离。竖向荷载施加方式与现场荷载试验加载情况一致。土(岩)层、桩身材料参数以及本构关系设定见表 8 所示。

表 8 模型土层材料参数

编号	名称	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	本构关系
1	杂填土	10	11.1	10	M-C
2	含碎石粉质黏土	19	19.8	20	M-C
3	粉质黏土	17	23.9	16	M-C
4	强风化砂土状凝灰岩	80	25.0	25	M-C
5	强风化碎块状凝灰岩	100	30.0	30	M-C
6	中风化凝灰岩	200	35.0	35	M-C
7	水泥土	150	250.0	30	M-C
8	C80 混凝土	38000	—	—	线弹性
9	C30 细石混凝土	32500	—	—	线弹性
10	预应力钢筋	210000	—	—	线弹性

4.2 数值模型验证

模拟值与实测值荷载-位移($Q-S$)曲线如图 8

所示。由图 8 可知,ABAQUS 数值模拟结果与现场载荷试验结果 ($Q-S$ 曲线) 较为吻合,模拟值与实测值最大相对误差在 10% 左右,验证了本文模型计算参数、本构关系选取,以及网格划分方法的可靠性与正确性,可在此基础上进行影响因素分析。

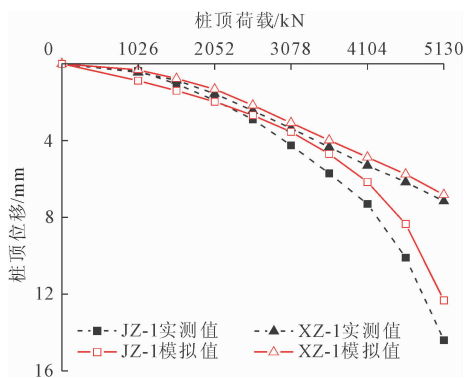


图 8 模拟值与实测值荷载-位移 ($Q-S$) 曲线

4.3 加固体厚度的影响

在竖向受荷过程中,加固体作为管桩与桩周土之间的连接介质,主要起传递荷载的作用,而适当的加固体厚度是确保荷载有效传递的前提。为此,结合劲性复合桩规程对于外芯(水泥土桩)厚度的要求,在本文数值模拟中分别取水泥土桩桩径为 800 mm、900 mm、1 000 mm、1 100 mm、1 200 mm;细石混凝土桩桩径取 700 mm、800 mm、900 mm、1 000 mm、1 100 mm;其他模拟参数均与现场试验一致。提取不同加固体厚度模型桩在不同荷载下的桩顶位移,得到加固体厚度与最大桩顶沉降量关系曲线,如图 9、图 10 所示。

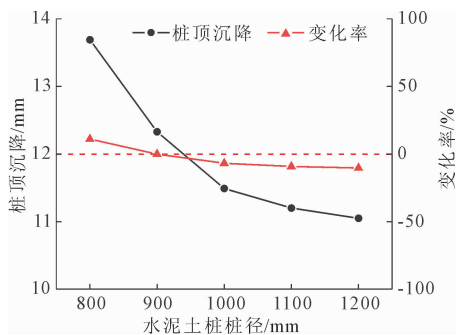


图 9 水泥土桩桩径与最大桩顶沉降关系曲线

由图 9 可得,与现场试验工况相比,当水泥土桩桩径由 900 mm 减小至 800 mm 时,最大试验荷载下 (5 130 kN) 桩顶沉降增大了 11.0 %;而当其桩径从 900 mm 增加至 1 200 mm 时,相对应的桩顶沉降仅减小了 10.4%。因而可知,对于桩端入岩或以端部

承载为主时,增大水泥土桩桩径对搅拌植入管桩桩身沉降控制有一定的帮助,但存在着明显的“边际效应”。

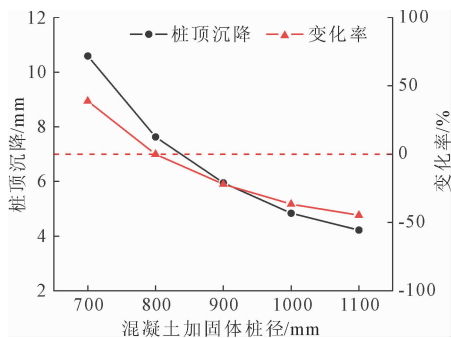


图 10 细石混凝土桩桩径与最大桩顶沉降关系曲线

由图 10 可知,当细石混凝土桩桩径由 800 mm 减小至 700 mm 时,最大试验荷载下桩顶沉降增大了 55.3 %;而当其桩径从 800 mm 增加至 1 100 mm 的过程中,相对应的桩顶沉降分别减小了 22.1 %、35.8 %、41.1%。可以看出,相较于搅拌植入管桩,旋挖植入管桩 $Q-S$ 曲线对于加固体厚度变化的敏感度更高;在以端部承载为主的情况下,细石混凝土桩径对旋挖植入管桩桩身沉降控制有着显著的贡献。

综上所述,建议在实际工程设计或应用时,结合成桩工艺、设备与现场施工条件,对桩端入岩条件下预成孔植入管桩的水泥土桩、细石混凝土桩厚度(加固体半径减去管桩半径)宜分别取 150 mm ~ 200 mm、100 mm ~ 200 mm。

4.4 加固体强度的影响

根据劲性复合桩规程要求,水泥土桩的水泥掺入量宜为 12% ~ 18%,而水泥掺入量的大小又直接影响到水泥土的无侧限抗压强度(加固体强度指标之一)。故本文根据文献^[19-21]给出的水泥掺入量与水泥土 28 d 无侧限抗压强度,弹性模量以及黏聚力关系,分别设计了 5 组计算工况,如表 9 所示。

表 9 水泥土力学参数表

序号	水泥掺入量/%	无侧限抗压强度/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa
1	12	1.00	200	30	150.0
2	14	1.25	250	32	187.5
3	15	1.38	275	33	206.3
4	16	1.50	300	34	225.0
5	18	1.75	350	36	262.5

提取不同水泥掺入量模型桩在不同荷载下的桩

顶位移,得到水泥土掺入量与最大桩顶沉降量关系曲线,如图 11 所示。

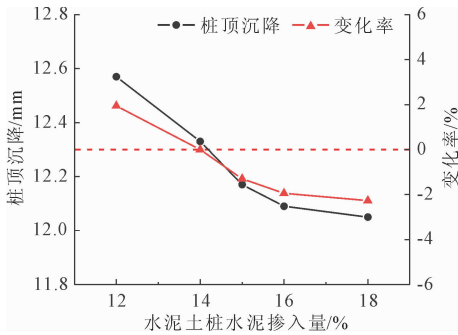


图 11 水泥土掺入量与最大桩顶沉降关系曲线

随着水泥掺入量的增加(水泥土桩强度增加),搅拌植入管桩的桩顶沉降呈减小趋势变化,但变化率较小;与现场试验工况相比,当水泥掺入量由 15% 减小至 12% 时,最大试验荷载下桩顶沉降仅增大了 1.9%;同样地,当水泥掺入量从 15% 增加至 18% 时,相应的桩顶沉降也仅减小了 2.3%。由此可见,在数值计算中,水泥掺入量的改变(12%~18%)对搅拌植入管桩桩身沉降调控并无明显作用。但应予以说明的是,在实际工程中,水泥掺入量一定程度上还影响着水泥土的均匀性、流动性、固化胶结能力等,其比例设定应综合考虑成桩工艺技术、桩周土性质等确定。

5 结论

为探究预成孔植入管桩的竖向承载性能,本文开展了不同加固体(水泥土和细石混凝土)以及成孔方式(搅拌、旋挖)的预成孔植入管桩竖向荷载现场试验,并与等直径混凝土灌注桩进行对比,揭示了预成孔植入管桩的承载机制与荷载传递规律,得到主要结论如下:

(1) 在竖向受荷模式下,预成孔植入管桩 $Q-S$ 曲线呈缓降型变化,且随着桩顶荷载的增大,逐渐呈现出摩擦端承桩的工作特性。在本文最大试验荷载下,预成孔植入管桩并未进入极限承载状态,其承载能力与等外径的混凝土灌注桩相当。

(2) 同一成桩工艺下,不同土层处桩侧摩阻力随桩土相对位移的发挥时机存在异步性。浅表处杂填土层桩侧摩阻力最早达到峰值,(含碎石)粉质黏土层、强风化凝灰岩层处则相对次之。与其他桩型相比,旋挖植入管桩与桩周土(岩)界面的抗剪性能最佳,其桩侧极限摩阻力普遍高于其他桩型 30% 以上。

(3) 在不同土(岩)层中,旋挖植入管桩桩侧摩阻

力实测值与规范标准值的比值差异较大,实际设计中应考虑土层类别的差异,采用不同的桩侧阻力调整系数对其进行修正。建议对粉质黏土、强风化凝灰岩层处的桩侧摩阻力调整系数分别取 1.3 和 1.4~1.7 (岩石强度较高时取大值)。另外,当桩端入岩时,还应充分考虑加固体对桩端土(岩)层的强化嵌固效应,推荐采用建桩规范中混凝土预制桩极限桩端阻力标准值作为计算基数进行桩端阻力计算。

(4) 数值模拟结果表明,相较于加固体强度改变,其桩径的增大对桩身沉降控制贡献更大。在实际工程设计或应用时,应结合成桩工艺、设备与现场施工条件,建议对桩端入岩条件下预成孔植入管桩的水泥土桩、细石混凝土桩厚度(加固体半径减去管桩半径)分别取 150 mm~200 mm、100 mm~200 mm。

参考文献:

- [1] 李伟. 钻孔灌注桩质量控制可拓综合评价法的应用研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- [2] 蒋建平. 灌注桩施工事故实例及综合分析[J]. 施工技术,2006,35(1):51-55.
- [3] 吴春武. 静压桩施工对邻近高速铁路路基及桥梁影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [4] 韦超俊. 基于广西特殊地层的复合管桩植桩工艺及试验研究[D]. 南昌:广西大学,2018.
- [5] 王重,薛万银. 中国预应力混凝土管桩的发展状况及同日本管桩的差距[C]//中国混凝土与水泥制品协会 2012 年会论文集,中国混凝土与水泥制品协会,2012.
- [6] 刘汉龙,赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报,2016,49(1):96-115.
- [7] 陈智鸿,蓝明红,陈景镇,等. 滨海地区复杂地质条件下植入法沉桩施工技术[J]. 施工技术(中英文),2022,51(13):27-30.
- [8] 张永刚,李俊才,邓亚光. 管桩水泥土复合桩荷载传递机制试验研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2013,35(6):79-85.
- [9] 李俊才,张永刚,邓亚光,等. 管桩水泥土复合桩荷载传递规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S1):3068-3076.
- [10] 王俊,干钢,沈金,等. 劲性复合桩在海南省三亚地区砂土地基的应用研究[J]. 建筑结构,2023,53(20):130-134,27.
- [11] 文磊,刘钟,马晓华,等. 粉土地基中劲性复合桩抗压承载特性与荷载传递机制研究[J]. 岩土力学,2024,45(2):511-524.

(下转第 67 页)

不大。但为减小桥梁运营期间主梁的振动幅度,提高行车舒适度,建议中塔-主梁处设置固定支座。

(3) 在主梁与边塔下横梁处设置粘滞阻尼器可进一步减小主塔下横梁下部结构的地震响应。综合分析阻尼系数 C 和速度指数 ξ 对主塔内力和位移的影响规律,建议该三塔四跨悬索桥阻尼器参数选用 $C = 3\ 500, \xi = 0.3$ 。

参考文献:

- [1] 张超,黄群君,余立,等.三塔四跨地锚式悬索桥纵向约束体系研究[J].中国科技论文,2016,11(7):733-738.
- [2] Yoshida Osamu, Okuda Motoi, Moriya Takeo. Structural characteristics and applicability of four span suspension bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004,9(5):453-463.
- [3] 沈锐利,侯康,张新.三塔四跨悬索桥合理结构布置形式研究[J].中外公路,2019,39(3):101-106.
- [4] 李万恒,王元丰,孙永明,等.结构连接对三塔悬索桥性能的影响线分析[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(2):170-174.
- [5] 韦志铝,黄月超,白晓宇,等.三塔地锚式空间缆悬索桥纵向约束体系研究[J].公路,2023,68(11):106-113.
- [6] 闫聚考,李建中,彭天波,等.不同纵向约束体系多塔悬索桥行波效应研究[J].哈尔滨工程大学学报,2017,38(6):874-880.
- [7] Lu Guanya, Wang Kehai. Effects of elastic cable parameters on seismic performance of long-span suspension

bridges[C]//2022 International Symposium on Computing and Artificial Intelligence (ISCAI), Beijing, China, 2022:71-75.

- [8] Tao Tianyou, Wen Xuehua, Wang Hao, et al. Seismic control of a long-span triple-tower suspension bridge using hysteretic steel damper[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2023,20(12):2010-2021.
- [9] 吉林,阮静,王陶.泰州大桥三塔两跨悬索桥关键技术[J].公路交通科技,2015,32(2):94-99.
- [10] 刘鑫,王小松,但莎琦.阿志河悬索桥塔梁纵向连接方式与参数分析[J].铁道建筑,2018,58(3):19-22.
- [11] 郑锋利,陈逸民,李建中,等.塔梁连接方式对多塔悬索桥地震反应的影响[J].公路交通科技,2020,37(8):58-65.
- [12] 王蒂,黄平明.超大跨度斜拉桥纵向减震耗能塔梁连接装置研究[J].郑州大学学报(工学版),2008,29(4):112-115,144.
- [13] 焦驰宇,李建中,彭天波.塔梁连接方式对大跨斜拉桥地震反应的影响[J].振动与冲击,2009,28(10):179-184,233-234.
- [14] 崔杨,杨延凯,丛霄.地震作用下斜拉桥桥塔形式及连接体系选型分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2016,34(3):381-384.
- [15] 周珂,金文刚,李建中.塔梁连接方式对多塔斜拉桥纵向地震反应的影响[J].结构工程师,2018,34(S1):31-36.
- [16] 巫生平,张超,房贞政.斜拉桥粘滞阻尼器设计方案及参数回归分析[J].桥梁建设,2014,44(5):21-26.

(上接第60页)

- [12] 任连伟,吕陈陈,王新宇,等.均质砂土中高喷插芯组合桩多界面剪切特性对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(4):822-835.
- [13] 李进军,丁永君,李辉.劲性搅拌桩的优化设计[J].建筑科学,2007,23(7):101-103,107.
- [14] 水泥石复合管桩基础技术规程:JGJ/T 330—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [15] 劲性复合桩技术规程:JGJ/T 327—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [16] 公路工程基桩检测技术规程:JTGT 3512—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.

- [17] 刘勇健,傅杨攀,黄承泽,等.PHC管桩承载力的动力和静力测试对比分析[J].水利与建筑工程学报,2022,20(5):90-95.
- [18] 建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [19] 李立业.劲性复合桩承载特性研究[D].南京:东南大学,2016.
- [20] 张孟环.劲性复合桩的水平承载特性及其实用计算方法[D].南京:东南大学,2019.
- [21] 陈晓静,王保田,左晋宇,等.水泥石抗压抗剪强度及相关性研究[J].水运工程,2021(8):169-175.