文章编号:1674-2974(2025)09-0038-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025085

喷扩锥台压灌桩抗拔承载特性研究

张乾青[1,2†],刘君伟[1,2],李金良[3],付涛[4],刘思维[5]
[1. 山东大学 岩土与地下工程研究院,山东 济南 250061;
2. 山东大学(齐河)新材料与智能装备研究院,山东 德州 251100;
3. 山东倍特力地基工程技术有限公司,山东 济宁 272100;
4. 山东高速齐鲁建设集团有限公司,山东 济南 250021;
5. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092]

摘 要:喷扩锥台压灌桩为笔者研发的一种新型桩,因具有单桩承载力高、变形小等优点而在实际工程中得到广泛应用.为研究喷扩锥台压灌桩抗拔承载特性,开展了喷扩锥台压灌桩的静载试验,建立了竖向上拔荷载作用下喷扩锥台压灌桩承载性能三维有限元数值计算模型,根据现场静载试验结果验证了数值模拟结果的可靠性.根据有限元数值计算结果分析了双锥台扩径体位置、长细比、直径和锥台角度等因素对喷扩锥台压灌桩抗拔承载特性的影响,揭示了喷扩锥台压灌抗拔桩破坏模式和双锥台扩径体-周围土体的作用机理.相关研究成果可为喷扩锥台压灌桩的变形与承载力计算方法的建立提供参考.

关键词:喷扩锥台压灌桩;抗拔承载力;破坏模式;静载试验;数值模拟
中图分类号:TU473.1 **文献标志码**:A

Study on Uplift Bearing Behavior of Pressure-cast-in-situ Pile with Spray-expanded Frustum

ZHANG Qianqing[1,2†], LIU Junwei[1,2], LI Jinliang[3], FU Tao[4], LIU Siwei[5]
[1. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
2. Research Institute of New Material and Intelligent Equipment, Shandong University (Qihe County), Dezhou 251100, China;
3. Shandong Beiteli Foundation Engineering Technology Co., Ltd., Jining 272100, China;
4. Shandong Hi-speed Qilu construction Group Co., Ltd., Jinan 250021, China;
5. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Pressure-cast-in-situ pile with spray-expanded frustum (PPSF) is a new type of pile developed by the authors, which has been widely used in practice due to its advantages of high bearing capacity and small deformation. To study the uplift bearing behavior of the PPSF, static load tests on the PPSF were carried out, and a three-dimensional finite element numerical calculation model for the uplift behavior of the PPSF was established. The reliability of the numerical calculation results was verified by using the static load test results of the PPSF. Based

* **收稿日期**:2024-06-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278358), National Natural Science Foundation of China (52278358);山东省泰山学者青年专家项目(tsqn202103163), Young Experts of Taishan Scholar Project of Shandong Province (tsqn202103163);山东大学杰出中青年学者人才计划,Program of Outstanding Young and Middle-aged Scholars of Shandong University
作者简介:张乾青(1983—),男,山东济宁人,山东大学教授,博士生导师
† 通信联系人,E-mail: zjuzqq@163.com

on the finite element numerical calculation results, the influence of factors, such as location, length-diameter ratio, diameter and frustum angle of expanded body with double-frustum, on the uplift bearing behavior of the PPSF was analyzed, and the failure mode of the PPSF and the interaction mechanism between expanded body with double-frustum and surrounding soils were clarified. The present research results can provide a reference for the establishment of deformation and bearing capacity calculation methods for the PPSF.

Key words: pressure-cast-in-situ pile with spray-expanded frustum; uplift bearing capacity; failure mode; static load test; numerical simulation

近年来,为提高桩的抗拔承载力,国内外学者和技术人员研发了多种新型抗拔桩,例如挤扩支盘桩[1-2]、静钻根植竹节桩[3-4]、扩底抗拔桩[5-7]和桩侧注浆抗拔桩[8]. 与等截面抗拔桩相比,扩底桩和挤扩支盘桩由于扩底端的存在,能调动更大范围土体的抗剪能力,从而显著提升单桩抗拔承载力. 桩侧注浆抗拔桩通过浆液渗透、扩散和挤密等方式,使桩侧一定范围内的土体得到加固[9],从而改善桩-土接触界面. 然而,在传统桩侧压浆的施工过程中,浆液常沿着桩臂的方向上返、下返或者通过一些较为薄弱的路径进行扩散. 这种扩散方式往往呈现出较大的离散性,导致难以形成形状规则的扩大头[10]. 此外,在扩底抗拔桩和挤扩支盘桩施工过程中,孔壁可能会出现塌孔问题,造成桩底和扩径腔体处存在较厚的沉渣,导致扩径体的施工质量难以保证.

笔者研发了一种具有单桩承载力高、变形小等优点的喷扩锥台压灌桩[11]. 该桩通过螺旋多功能钻机成孔、高压旋喷水泥浆形成扩径腔体、压灌挤振超流态混凝土、定喷水泥浆形成桩身肋板等工序成桩,集成了扩体抗拔桩和桩侧注浆抗拔桩的优势. 此外,上述施工工艺形成的双锥台扩径体形状规则,成桩质量可靠. 喷扩锥台压灌桩独特的施工工艺和桩身几何构造大幅提高了桩身承载力[12-13]. 喷扩锥台压灌桩具有独特的桩身几何结构,已有扩底抗拔桩和挤扩支盘桩的抗拔承载特性难以应用于喷扩锥台压灌桩承载性能分析. 竖向上拔荷载作用下喷扩锥台压灌桩的荷载传递机制和承载特性等方面的研究有待深入.

为研究喷扩锥台压灌桩抗拔承载特性,本文开展了喷扩锥台压灌桩静载试验,建立了竖向上拔荷载作用下喷扩锥台压灌桩承载性能三维有限元数值计算模型. 根据静载试验结果验证了数值计算结果的可靠性,分析了双锥台扩径体位置、长细比、直径和锥台角度等因素对喷扩锥台压灌桩抗拔承载特性的影响,揭示了喷扩锥台压灌桩抗拔破坏模式和双锥台扩径体-周围土体的作用机理.

1　喷扩锥台压灌桩施工工艺

喷扩锥台压灌桩采用集成钻孔、高压喷射、扩径、挤振、压灌和吊放钢筋笼等多种功能于一体的螺旋多功能钻机施工完成. 喷扩锥台压灌桩由双锥台扩径体、肋板和普通段桩身组成,如图 1 所示.



图 1　喷扩锥台压灌桩实物图

Fig.1　Physical photo of the pressure-cast-in-situ pile with spray-expanded frustum

喷扩锥台压灌桩的施工流程(图 2)主要包括:

1)采用螺旋多功能钻机钻孔至设计深度;

2)在预定位置处高压旋喷水泥浆切割桩周土体,形成双锥台扩径体腔体;

3)下放钻杆至桩底后,在桩端处压灌超流态细石混凝土(塌落度宜为 22~25 cm);

4)压灌扩径腔体处的混凝土;

5)下压钻杆振动挤压超流态细石混凝土,形成双锥台扩径体;

6)提升钻杆压灌超流态细石混凝土,同时高压定喷肋板至设计标高;

7)插入钢筋笼和插筋器导杆,振动下沉至设计标高,形成喷扩锥台压灌桩.

喷扩锥台压灌桩扩径体采用高压旋喷水泥浆和压灌超流态混凝土形成,相比其他桩型,扩径体的桩侧摩阻力大.此外在扩径体上部定喷水泥浆形成肋板,高压水泥浆渗透到桩身周围,起到良好的桩侧注浆效果,同时混凝土压灌作用会进一步增强浆液的挤密渗透作用.桩顶荷载施加后,桩体上部结构荷载传递给水泥土,然后水泥土通过与土层之间的黏结力将荷载传给桩周土,芯桩到桩周土形成强→中→弱的强度渐变过程,形成一种中间强度高、外围强度低的合理荷载传递桩体结构.

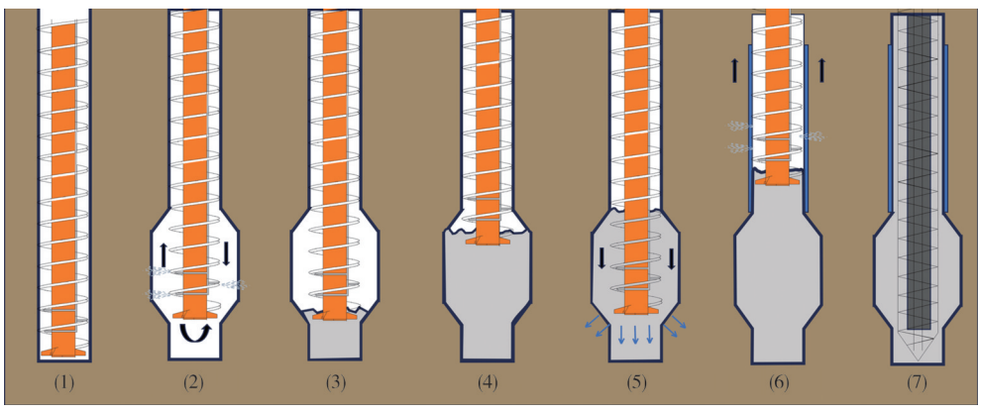


图2 喷扩锥台压灌桩施工流程

Fig.2 Construction processes of the pressure-cast-in-situ pile with spray-expanded frustum

工程实践表明,喷扩挤振压灌法可按设计要求形成与桩身一体的混凝土与水泥土复合的扩径体和桩身肋板.该特殊几何构造使扩径体上部土体受挤压作用呈现压剪应力状态,提高了单桩抗拔承载力.

2 喷扩锥台压灌桩抗拔静载试验

2.1 喷扩锥台压灌桩抗拔静载试验概况

为对喷扩锥台压灌桩的竖向抗拔承载特性进行研究,对山东某工程的喷扩锥台压灌桩进行抗拔静载试验.由于抗浮设计要求不同,针对不同区域抗浮要求设计了3组喷扩锥台压灌桩(UP1、UP2和UP3),每组各3根(分别编号P1~P3、P4~P6、P7~P8).3组试桩的双锥台扩径体底部到桩端的距离l_2为0.5 m,锥台角度为45°,肋板至桩顶的距离l_4为0.5 m,具体设计参数见表1.

该场地土层为全风化花岗岩,属于极破碎的极软岩,岩体基本质量等级为Ⅴ级.根据勘察报告,土体重度γ为22 kN/m^3,内摩擦角φ为38°,黏聚力c为5 kPa,压缩模量E_s为40 MPa.试验采用慢速维持法进行分级加载和卸载,具体加卸载终止条件见《建筑桩基检测技术规范》(JGJ 106—2014)[14].试桩加载和桩顶位移监测装置见图3.

表1 喷扩锥台压灌桩试桩参数

Tab.1 Design parameters of the pressure-cast-in-situ pile with spray-expanded frustum

试桩类型	桩长 l/m	扩径体上部桩身长度 l_1/m	肋板长度 l_3/m	桩径 d/mm	扩径体直径 D/mm	扩径体高度 h/m
UP1	7.5	5.5	5.0	300	500	1.5
UP2	6.5	5.0	4.5	300	500	1.5
UP3	7.5	5.5	5.0	300	500	1.5

2.2 喷扩锥台压灌桩抗拔静载试验结果

对静载试验实测数据进行整理后,绘制的荷载-位移曲线如图4所示.

由图4可知,加载过程中试桩桩顶位移均随着桩顶荷载的增加而增大,且各级桩顶位移增加量较稳定.加载初期,当桩顶荷载小于256 kN时,首先是桩侧摩阻力发挥作用,荷载-位移曲线近似呈线性关系,位移增长速率较为缓慢.随上拔荷载的增大,桩顶荷载大于256 kN后,扩径体挤压周围土体,上锥台周围土体对扩径体产生反作用力,且该反作用力随着桩顶位移的增大而增大,位移增长速率变大.

当试桩UP3桩顶荷载为1 200 kN时,桩顶上拔量为22 mm.由于设计抗拔力特征值为610 kN,而最大试验荷载不小于1 220 kN,因此满足设计要求.此



(a)试桩加载装置图



(b)试桩桩顶位移监测图

图 3　静载试验

Fig.3　Static load test

外,3 根试桩的回弹率分别为 92.84%、87.47% 和 83.28%,试桩回弹率较大,说明其承载潜力较大,桩土体系仍处于弹性工作状态,喷扩锥台压灌桩的承载能力并未完全发挥.

3　喷扩锥台压灌桩抗拔数值模型

3.1　喷扩锥台压灌桩抗拔数值模型建立

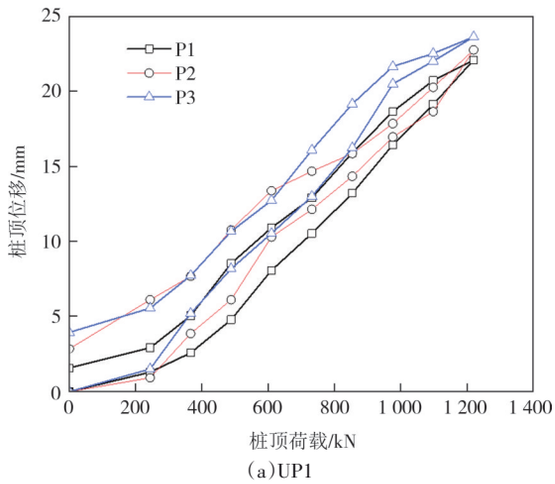
为揭示喷扩锥台压灌桩抗拔机理和多种因素对喷扩锥台压灌桩抗拔承载特性的影响,本文以现场静载试验中的UP3试桩为模拟对象,建立三维数值模型并验证数值模型建立和参数设置的合理性.

在数值模拟过程中,包裹在扩径体混凝土外侧的扩径体水泥土过渡层是扩径体端承受外力结构的一部分,采用式(1)预测水泥土过渡层厚度a[15]:

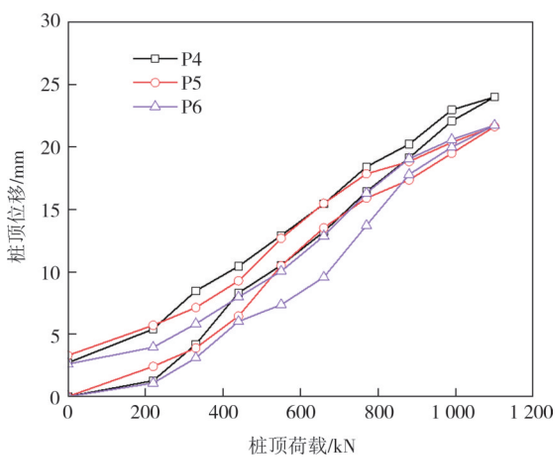
$$a=\frac{d_1}{2}+\frac{\alpha d_0 v_0}{\eta\sqrt{q_u/p_{atm}}}-\frac{D}{2} \tag{1}$$

式中:d_1为长螺旋钻杆直径,m;α为一无量纲参数,与射流性质相关;η是一个特征速度,与土性条件相关;v_0为射流速度,m/s;d_0为喷嘴直径,m;q_u为土的无侧限抗压强度,kPa;p_{atm}是标准大气压值,kPa,具体参数取值见文献[16].经计算,水泥土过渡层厚度为0.05 m.

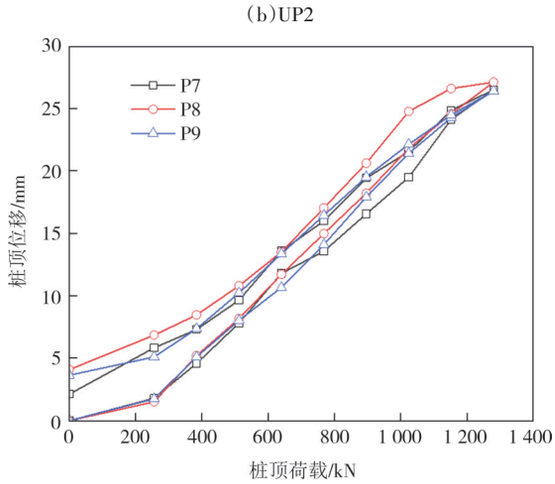
本次有限元数值模拟取计算宽度为 10 m、竖向深度为 15 m 的土体.理论研究和工程实践表明,选



(a)UP1



(b)UP2



(c)UP3

图 4　试桩荷载-位移曲线

Fig.4　Load-displacement curves of test piles

取的土体分析范围不受边界效应的影响,桩土几何模型建立见图5. 利用大型通用有限元软件建立UP3试桩数值模型,混凝土桩身采用线弹性模型,桩周土采用Mohr-Coulomb本构模型. 与文献中的许多研究相似[17-18],在数值模拟中水泥土本构采用线弹性和Mohr-Coulomb塑性模型. 水泥土本构参数采用Li等[19]和叶观宝等[20]的研究成果. 此外,杨森等[21]研究表明当水泥土弹性模量大于100 MPa时,水泥土弹性模量对桩的承载力影响很小. 基于现场场地的勘察报告,桩和桩周土的数值模型参数取值见表2.

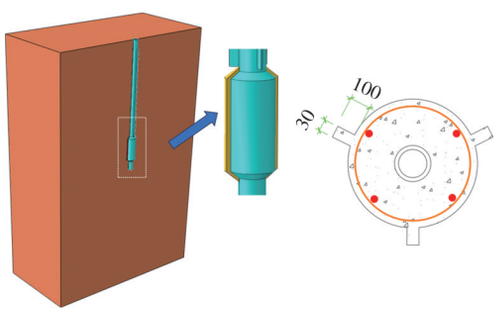


图5 桩土几何模型建立(单位:mm)

Fig.5 Establishment of pile and soil geometric model(unit:mm)

表2 数值模型桩和土层计算参数

Tab.2 Parameters of pile and soils in numerical model

材料	重度γ/(kN·m^{-3})	弹性模量E/MPa	泊松比υ	黏聚力c/kPa	内摩擦角φ/(°)
强风化花岗岩	22	150	0.30	5	38
水泥土	25	3 200	0.19	4 000	40
桩身	25	30 000	0.20	—	—

模型侧面约束水平位移,底面约束水平和竖向位移. 桩土接触界面处的网格进行加密处理,桩底下部土体并非承担荷载的主要区域,网格选择C3D8R,划分后的网格见图6. 创建地应力分析步和加载分析步,桩顶加载方案参考现场静载试验加载方案,分10级加载,每级122 kN.

桩身混凝土-水泥土接触面由于采用喷扩挤振压灌法施工,混凝土和水泥土同时进行水化凝结作用,这与预制桩和水泥土的接触界面不同. 此外从喷扩锥台压灌桩的受力机理考虑,混凝土和水泥土接触面的黏结强度要保证在正常荷载作用下混凝土和水泥土不脱离,这样才能充分利用此处合理荷载传递结构的优势,因此在混凝土和水泥土之间设置绑定约束[3].

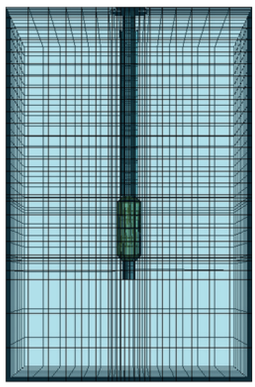


图6 桩土模型的网格划分

Fig.6 Grid division of pile and soil models

桩-土接触面和水泥土-土接触面用库伦摩擦模型来模拟. 桩-土摩擦系数μ可表示为:

$$\mu = \tan\delta \tag{2}$$

式中:δ为桩土界面摩擦角,桩周土为属于软质岩石的强风化花岗岩,取δ=0.75φ[22],即μ取0.543. 此外,在实际施工过程中,即使在均质土中,水泥土的几何形状也并非完美的圆柱形,而是呈现不规则的锯齿形. 这会显著增大水泥土和原状土之间的粗糙度,提高侧摩阻力. 因此,δ取φ,即水泥土-土接触面摩擦系数为0.78.

3.2 喷扩锥台压灌桩抗拔数值模型计算结果

将试桩UP3静载试验和与有限元分析得到的荷载-位移曲线进行对比分析,结果如图7所示.

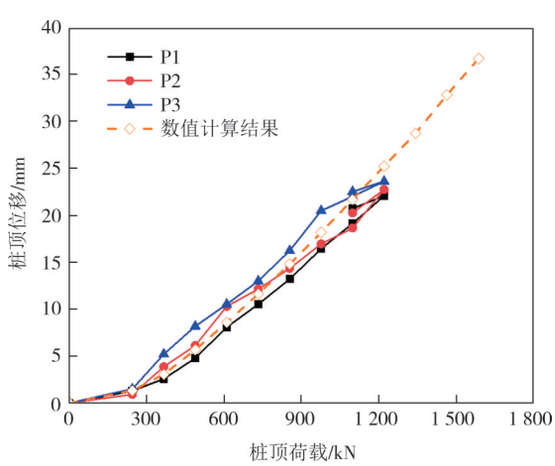


图7 试桩结果和有限元模拟结果比较

Fig.7 Comparison between field test data and FEM results

由图7可知,数值模型计算结果和现场静载试验结果基本一致,因此数值模型可以用来模拟喷扩锥台压灌桩的抗拔承载特性. 加载过程中荷载-位移曲线并未出现拐点,此时桩顶位移明显大于上拔位

移允许值,因此应采用位移控制的方法确定极限抗拔承载力. Xu 等[23]取桩顶位移为 10%d 对应的桩顶荷载作为极限承载力,认为深埋扩体桩需要较大的位移才会出现拐点,达到破坏状态. 因此,若荷载-位移曲线出现拐点时对应的桩顶位移小于位移允许值,取拐点对应的桩顶荷载作为极限抗拔承载力,否则以位移允许值对应的荷载作为极限抗拔承载力. 本文中的计算结果与 Xu 等[23]的数值模拟结果相似,故本文取桩顶位移达 10%d=30 mm 对应的桩顶荷载作为极限承载力,故 UP3 试桩极限抗拔承载力为 1 400 kN.

4　抗拔承载力影响因素分析

4.1　双锥台扩径体位置

为研究双锥台扩径体的竖向位置对极限抗拔承载力及桩周土承载变形特性的影响,建立了 4 个不同双锥台扩径体位置(l_2=0.5、1.5、2.5、3.5 m)的工况. 数值模拟其他参数设置同上述相同,不同工况的桩顶荷载-位移曲线见图 8. 喷扩锥台压灌桩的抗拔承载力随双锥台扩径体位置的变化而显著变化,这表明增加双锥台扩径体的嵌入深度可提升喷扩锥台压灌桩的抗拔承载力,同时减小桩顶位移.

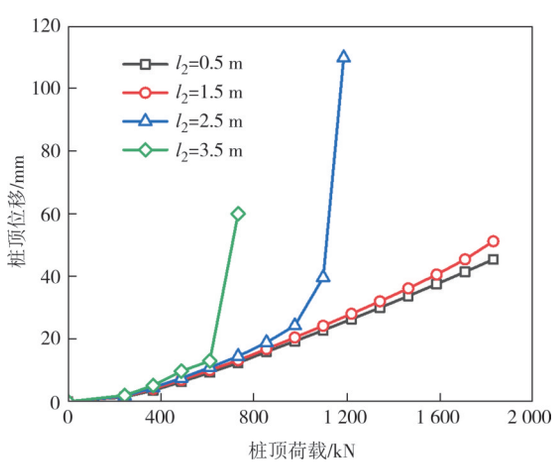


图 8　不同双锥台扩径体位置工况下桩顶荷载-位移曲线

Fig.8　Load-displacement curves at different positions of expanded body with double-frustum

由不同双锥台扩径体位置工况下的喷扩锥台压灌桩桩身轴力(图 9)可知:

1)桩身轴力曲线沿桩身轴向深度呈递减趋势,桩端处轴力为 0. 在桩顶位置处轴力几乎没有变化,这是由于双锥台扩径体的上移会带动相当大范围内土体的移动,造成地表较早出现多条环裂缝和浅部桩-土界面脱开的现象.

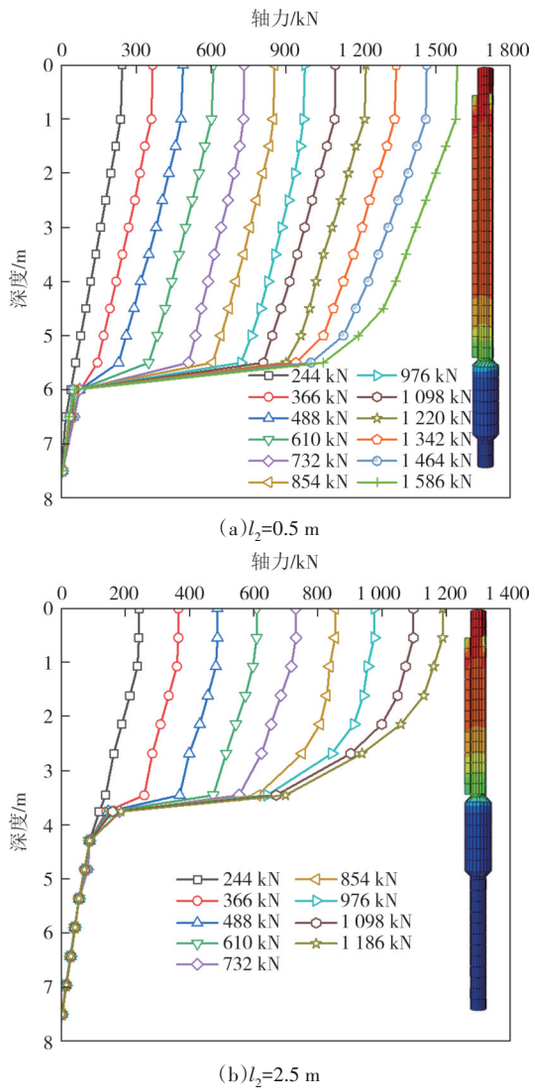


图 9　不同双锥台扩径体位置工况下桩身轴力

Fig.9　Axial force of pile under different positions of expanded body with double-frustum

2)随着桩顶荷载的增加,当桩侧摩阻力达到峰值后,双锥台扩径体逐步上移挤压土体,在双锥台扩径体位置的桩身轴力显著降低,这表明扩径体的抗拔阻力仍可继续增大,即轴力曲线在此处的陡降值持续增大. 然而在双锥台扩径体埋深较浅的情况下,双锥台扩径体上部土层无法提供足够的反作用力,此时桩身轴力曲线在此处的陡降值几乎不发生变化,桩顶荷载-位移曲线因此发生突变,见图 9(b).

3)轴力曲线在双锥台扩径体上部一段范围内的递减值逐步增大,这是因为扩径体对周围土体的挤压作用造成该区域竖向附加应力增大,桩土接触界面更加紧密,出现侧阻强化现象.

为研究双锥台扩径体造成的侧阻强化现象,提取桩-土界面处的竖向附加应力,见图 10.

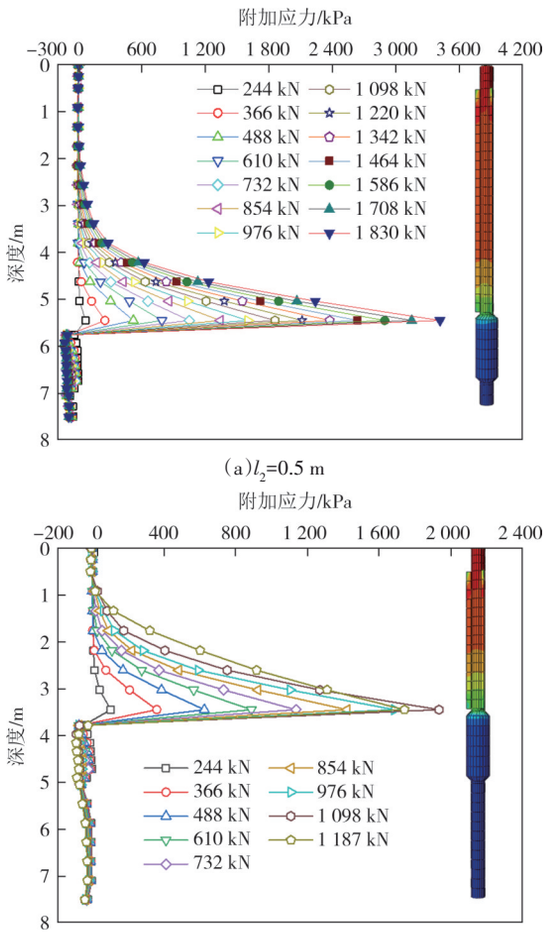


图 10 不同双锥台扩径体位置工况下桩-土界面竖向附加应力

Fig.10 Vertical additional stress at pile-soil interface under different positions of expanded body with double-frustum

由图 10 可知,双锥台扩径体造成扩径体上部范围的桩-土界面竖向应力的增大,且竖向附加应力沿着远离上锥台的方向呈指数形式逐渐减小. 此外,在扩径体埋深位置较浅的情况下,竖向附加应力的增大也会出现停滞现象,这表明上部土层无法提供足够的反作用力,最终导致桩顶荷载-位移曲线出现突变. 综上所述,双锥台扩径体的挤压作用和侧阻强化作用共同提高喷扩锥台压灌桩的抗拔承载力.

4.2 不同长细比对极限抗拔承载力的影响

为研究不同长细比对喷扩锥台压灌桩上拔承载特性的影响,进行不同长细比的单桩抗拔数值模拟试验. 在保持扩径体直径 D=0.5 m 和其他参数不变的情况下,选择长细比 L/D 为 10、11、12、13 和 15 时 5 个工况,利用 3.1 节数值模型建立步骤进行数值模拟,计算得到荷载-位移曲线,如图 11 所示.

若桩顶荷载-位移曲线出现拐点时对应的桩顶位移按极限状态小于 10%d(30 mm),取突变处作为极限承载力,否则以位移允许值对应的荷载作为极限承载力. 由图 11 可知,只有 L/D 为 10 时,荷载-位移曲线拐点对应的桩顶位移小于 30 mm,且随着桩的长细比增加,极限抗拔承载力呈增大的趋势. 当长细比 L/D 大于 12,抗拔承载力的提升幅度变小,说明喷扩锥台压灌桩在全风化花岗岩地基中存在最优长细比,最优长细比为 12.

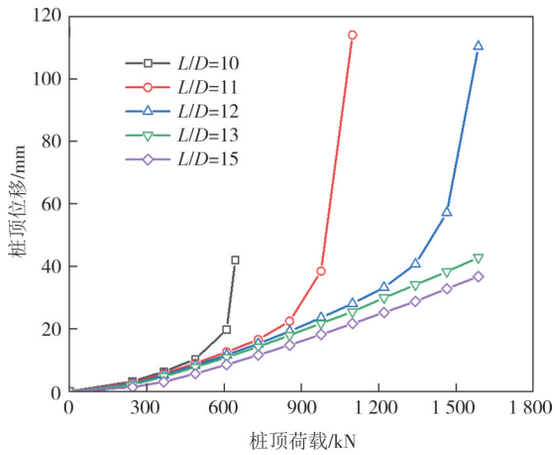


图 11 不同长细比工况下桩顶荷载-位移曲线

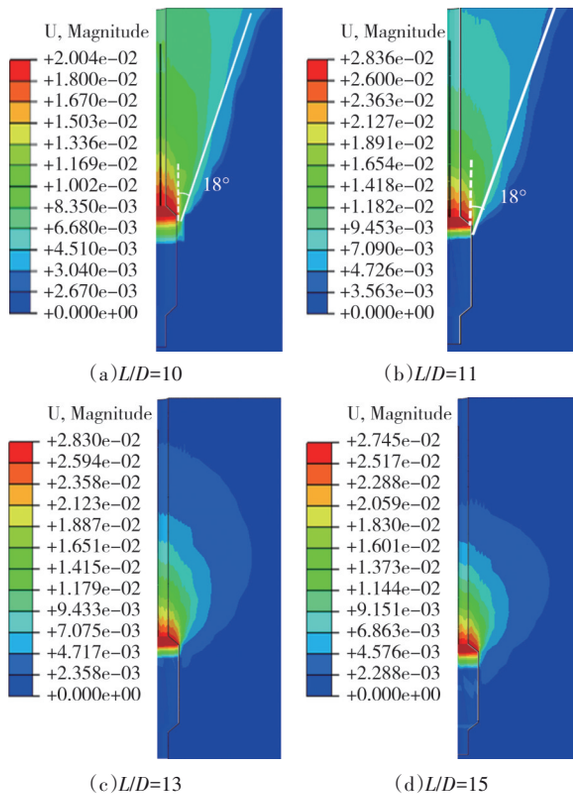
Fig.11 Load-displacement curves at pile head under different conditions of length-diameter ratio

为揭示喷扩锥台压灌桩的抗拔破坏模式,提取极限状态下的桩周土位移云图,如图 12 所示. 由图 12 可知,极限状态下不同长细比的桩周土的位移云图不同,说明破坏机理存在差异. 当长细比 L/D 为 10 和 11 时,位移等值线从上锥台附近开始,呈倒锥形延伸到地表. 而当长细比 L/D 为 13 和 15 时,位移等值线云图呈气球状. 破坏面上方存在一定厚度的土层,限制破坏面达到地表,破坏模式属于局部剪切破坏. 同时,破坏体周围的土体会被逐渐压密,因此当桩顶位移较大时其承载力仍然会继续增大. 桩身轴力曲线和桩-土界面竖向附加应力曲线与图 9、图 10 规律类似,在此不再赘述.

4.3 双锥台扩径体直径 D 对抗拔承载力的影响

为评估双锥台扩径体直径对极限抗拔承载力及桩周土承载变形特性的影响,数值模型建立过程和其他参数不变,建立了 4 个不同双锥台扩径体直径(D=0.4、0.5、0.6、0.7 m)的数值模型,提取了不同工况下的桩顶荷载-位移曲线,如图 13 所示.

由图 13 可知,不同双锥台扩径体直径的喷扩锥台压灌抗拔桩表现出不同的抗拔承载特性. 在相同大小的桩顶荷载作用下,双锥台扩径体直径的增大



(a)L/D=10　(b)L/D=11　(c)L/D=13　(d)L/D=15

图 12　不同长细比工况下土体位移云图

Fig.12　Soil displacement nephograms under different conditions of length−diameter ratio

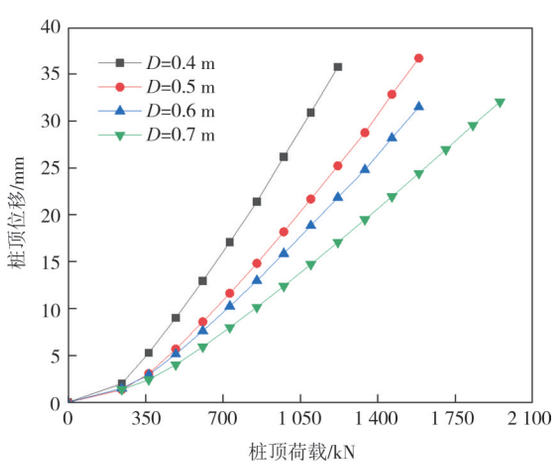
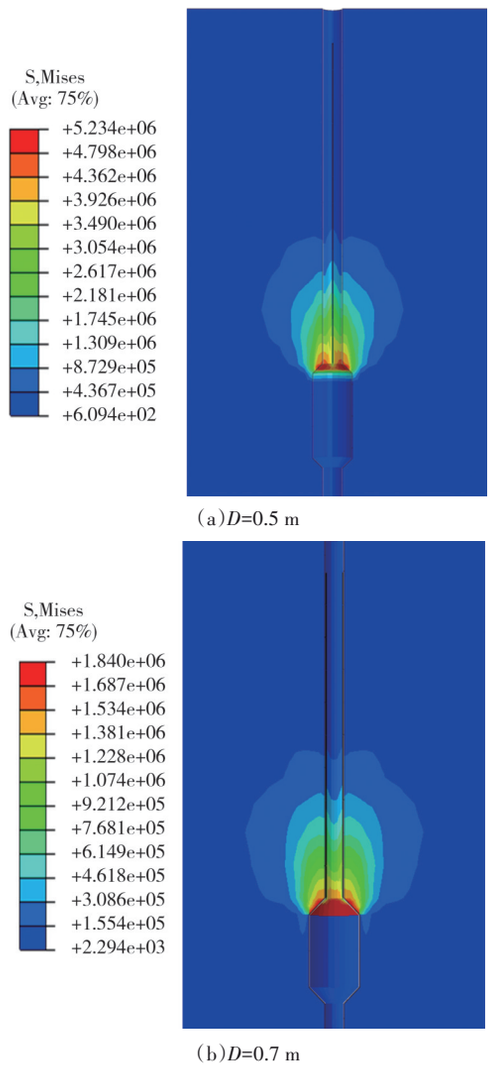


图 13　不同扩径体直径桩顶荷载−位移曲线

Fig.13　Load−displacement curves at pile head under different diameters of expanded body

可以减小桩顶的变形.这是因为喷扩锥台压灌桩的扩径体直径越大,双锥台扩径体的表面积就越大,侧摩阻力就会越大.另外,图 14 所示的不同双锥台扩径体直径工况下土体应力云图表明,扩径体上锥台表面积的增大会促进双锥台扩径体发挥更大范围内土体的抗剪强度,增大双锥台扩径体的抗拔阻力.

扩径体直径为 0.7 m 工况桩−土界面竖向附加应力如图 15 所示.扩径体直径的增大会在一定程度上增大竖向附加应力的影响范围和扩径体的挤压范围.相反,双锥台扩径体直径较小时,不利于发挥桩周土的抗剪强度,抗拔荷载主要靠桩身侧摩阻力承担.然而扩径体直径越大,对扩径体质量要求就越高,因此在实际工程中需合理控制扩径体直径.



(a)D=0.5 m　(b)D=0.7 m

图 14　不同双锥台扩径体直径工况下土体应力云图

Fig.14　Soil stress nephograms under working conditions of double−cone expanded body with different diameters

4.4　锥台角度对抗拔承载力的影响

为研究锥台角度对喷扩锥台压灌桩上拔承载特性的影响,进行不同锥台角度的单桩抗拔数值模拟试验,在保持扩径体直径 D=0.7 m 和其他参数不变的情况下,选择锥台角度 α 为 15°、30°、45°和 90°四个工况,利用上述步骤进行数值模拟,计算得到荷载−位移曲线如图 16 所示.

由图 16 可知,在相同大小桩顶荷载下,锥台角

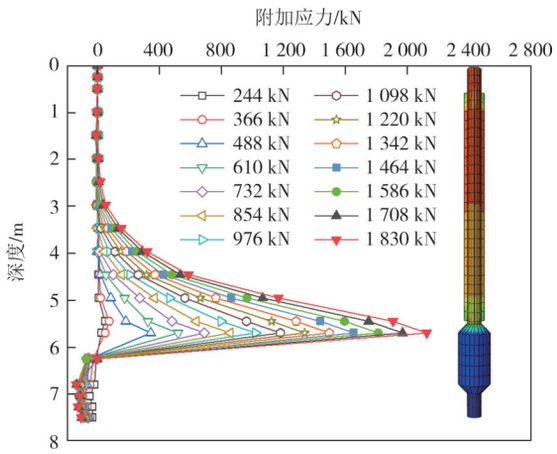


图 15 0.7 m扩径体直径工况桩-土界面竖向附加应力

Fig.15 Vertical additional stress at pile-soil interface under the condition of expanded body with a diameter of 0.7 m

度为15°的喷扩锥台压灌桩桩顶变形量相比其他锥台角度的变形量较大. 当锥台角度大于45°时,桩顶变形量相差不大,这表明锥台角度较小会降低喷扩锥台压灌桩的抗拔承载力.

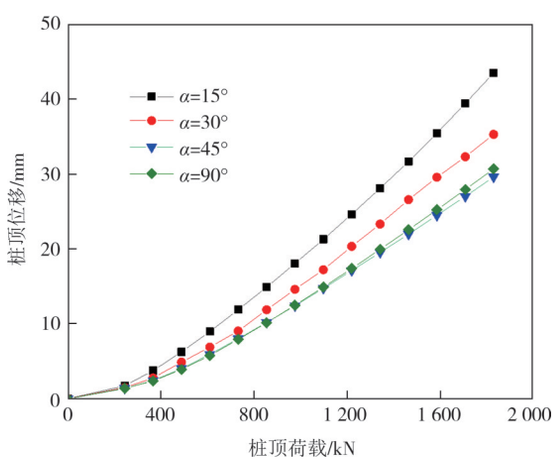


图 16 不同锥台角度工况下桩顶荷载-位移曲线

Fig.16 Load-displacement curves at pile head under different frustum angles

为进一步揭示锥台角度对喷扩锥台压灌桩变形和承载力的影响机理,提取桩-土界面竖向附加应力进行分析,结果如图17所示. 由图17可知,其桩-土界面竖向附加应力变化趋势与图10一致,在锥台上部一段范围内,竖向附加应力沿着远离上锥台的方向逐渐减小. 当锥台角度为15°时,桩-土界面竖向附加应力在深度为3.5 m处接近0;而锥台角度为90°时,桩-土界面竖向附加应力在深度为2 m处接近0. 这表明,在相同扩径体直径下,锥台角度越大,挤压范围越广.

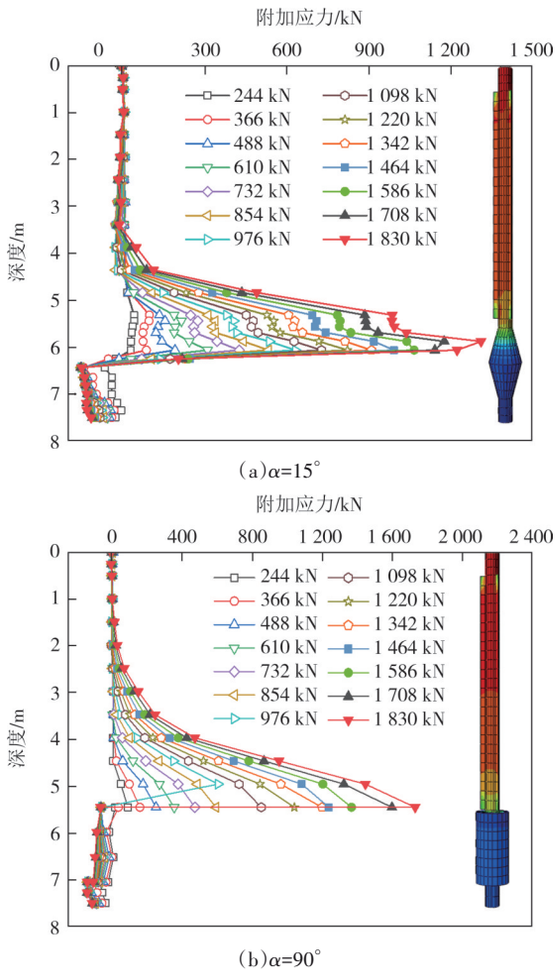


图 17 不同锥台角度工况下桩-土界面竖向附加应力

Fig.17 Vertical additional stress at pile-soil interface under different frustum angles

5 结 论

本文采用现场静载试验和三维有限元数值计算方法研究了喷扩锥台压灌桩的抗拔承载特性,取得了如下主要研究结论:

1)双锥台扩径体位置和桩长细比对喷扩锥台压灌桩抗拔承载力影响较大,且呈现出不同的破坏机理. 随双锥台扩径体的埋深增大,喷扩锥台压灌桩桩顶荷载-位移曲线由陡变型转为缓变型. 扩径体埋深较大的桩破坏模式属于局部剪切破坏,而扩径体埋深较小的桩呈整体破坏,破坏面延伸到地表. 喷扩锥台压灌桩存在最优长细比,在强风化花岗岩地基中最优长细比为12.

2)双锥台扩径体直径对喷扩锥台压灌桩抗拔承载力影响较大,实际工程中在保证扩径体施工质量的前提下,可适当增大双锥台扩径体直径. 锥台角度

增大会提高喷扩锥台压灌桩的承载力,当锥台角度大于45°后,喷扩锥台压灌桩的抗拔承载力几乎不变.

3)双锥台扩径体挤压土体,使扩径体上部一定桩长范围内桩-土界面的竖向附加应力增大,侧摩阻力提高,且桩-土界面竖向附加应力沿着远离扩径体的方向呈指数形式减小.双锥台扩径体直径和锥台角度的增大,会扩大扩径体的挤压范围.

参考文献

[1] 李文峰,李建军,王永新. 挤扩支盘桩在某地铁车站抗浮工程中应用[J]. 岩土力学,2006,27(增刊2):832-835.
LI W F,LI J J,WANG Y X. Application of squeezed branch piles to anti-floating engineering of subway stations[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(Sup.2):832-835.(in Chinese)

[2] 赵明华,李微哲,单远铭. DX桩抗拔承载机理及设计计算方法研究[J]. 岩土力学,2006,27(2):199-203.
ZHAO M H, LI W Z, SHAN Y M. Study on uplift mechanism and calculation of DX pile[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(2):199-203.(in Chinese)

[3] ZHOU J J,GONG X N,WANG K H,et al. Testing and modeling the behavior of pre-bored grouting planted piles under compression and tension[J]. Acta Geotechnica,2017,12(5):1061-1075.

[4] 周佳锦,龚晓南,王奎华,等. 静钻根植竹节桩抗拔承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(3):570-576.
ZHOU J J,GONG X N,WANG K H,et al. Behavior of the static drill rooted nodular piles under tension[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(3):570-576.(in Chinese)

[5] HARRIS D E,MADABHUSHI G S P. Uplift capacity of an under-reamed pile foundation[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering,2015,168(6):526-538.

[6] DICKIN E A,LEUNG C F. Performance of piles with enlarged bases subject to uplift forces[J]. Canadian Geotechnical Journal,1990,27(5):546-556.

[7] MEYERHOF G G,ADAMS J I. The ultimate uplift capacity of foundations[J]. Canadian Geotechnical Journal,1968,5(4):225-244.

[8] 张忠苗,何景愈,邹健. 软土中注浆与未注浆抗拔桩受力性状对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(12):2566-2572.
ZHANG Z M,HE J Y,ZOU J. Experimental study of behavior comparison of grouted and non-grouted uplift piles in soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(12):2566-2572.(in Chinese)

[9] 钱建固,贾鹏,程明进,等. 注浆桩土接触面试验研究及后注浆抗拔桩承载特性数值分析[J]. 岩土力学,2011,32(增刊1):662-668.
QIAN J G, JIA P, CHENG M J, et al. Experimental study of grouting pile-soil interface and numerical simulation of bearing behavior of side-grouting uplift pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup.1): 662-668.(in Chinese)

[10] 朱文波,戴国亮,邓会元,等.后顶扩臂压浆桩竖向承载机理及其桩盘力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(10):82-94.
ZHU W B, DAI G L, DENG H Y, et al. Study on vertical bearing characteristics of post expanded arm grouting pile and mechanical property of pile plate[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(10): 82-94.(in Chinese)

[11] ZHANG Q Q, CHEN Z G, LI J L, et al. Pressure-cast-in-situ pile with spray-expanded frustum: construction equipment and process [J]. Journal of Construction Engineering and Management,2021,147(6): 06021002.

[12] LIU J H, ZHANG Q Q, LI J L, et al. Calculation method for the ultimate bearing capacity of pressure-cast-in-situ pile with spray-expanded frustum [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 166: 106004.

[13] 陈兆庚. 竖向受荷喷扩锥台压灌桩变形机理与承载力计算方法研究[D]. 济南: 山东大学,2022.
CHEN Z G. Study on deformation mechanism and bearing capacity calculation method of pressure grouting on cone-shaped platform under vertical load [D]. Jinan: Shandong University, 2022. (in Chinese)

[14] 建筑桩基检测技术规范:JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.(in Chinese)

[15] 王志丰, 沈水龙, 许烨霜. 基于圆形断面自由紊动射流理论的旋喷桩直径计算方法[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1957-1960.
WANG Z F, SHEN S L, XU Y S. An approach to calculate diameter of jet-grouted columns based on turbulent flow theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(10): 1957-1960.(in Chinese)

[16] SHEN S L,WANG Z F,YANG J,et al. Generalized approach for prediction of jet grout column diameter [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2013,139(12): 2060-2069.

[17] HAN J, OZTOPRAK S, PARSONS R. L, et al. Numerical analysis of foundation columns to support widening of embankments[J]. Computers and Geotechnics, 34(6): 435-448.

[18] ALGIN H M. Optimised design of jet-grouted raft using response surface method[J]. Computers and Geotechnics,2016,74:56-73.

[19] LI P P,HUANG X,LU F,et al. Experimental investigation on the reinforcement of a high-pressure jet grouting pile for an ultra-shallow tunnel in a strongly weathered stratum [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10:1040461.

[20] 叶观宝,高彦斌. 地基处理[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
YE G B,GAO Y B. Ground treatment[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press,2009.(in Chinese)

[21] 杨森, 张忠苗, 刘念武, 等. 新型螺旋成孔根植注浆竹节管桩抗压性状数值模拟研究[J]. 岩土力学,2013,34(7):2119-2126.
YANG M,ZHANG Z M,LIU N W,et al. Numerical simulation of compressive mechanical characters of new bored grouting PHC nodular pile[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(7):2119-2126.(in Chinese)

[22] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Géotechnique,1961,11(4):339-353.

[23] XU H F, YUE Z Q, QIAN Q H. Failure model of soil around enlarged base of deep uplift piles [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2012, 165(5): 275-288.