

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20241127001

文章编号: 1674-599X(2025)02-0020-11

引用格式: 郭盼盼, 汪亦显. 高压旋喷成桩机理及形态预测方法研究进展[J]. 交通科学与工程, 2025, 41(2): 20-30.

Citation: GUO Panpan, WANG Yixian. Advances in formation mechanism and morphology prediction methods of high-pressure jet grouting piles [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(2): 20-30.

高压旋喷成桩机理及形态预测方法研究进展

郭盼盼, 汪亦显

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 高压旋喷技术作为一种有效的地基处理方法, 在公路交通、水利建筑等领域应用广泛。目前, 高压旋喷技术在设备开发、施工工艺等方面发展迅速, 然而该技术涉及的高速射流与土体相互耦合作用机理、高压旋喷成桩形态影响效应、内在机理及其预测评估方法等核心科学问题仍未很好地被科学地认识, 这已成为制约高压旋喷地基处理技术的应用拓展及向智能化、低碳化、绿色化发展的关键技术瓶颈。简要综述了高压旋喷成桩机理及形态预测方法的主要研究进展, 介绍了高压旋喷技术的基本类型及应用领域, 总结了高压旋喷成桩过程中高速射流产生及发展演化特性、高速射流与土体相互作用机理, 梳理了对高压旋喷成桩形态有重要影响的旋喷施工参数及土体物理力学性质参数, 探讨了用于预测高压旋喷成桩形态的经验法、半经验半理论法、人工智能化, 展望了高压旋喷成桩机理及形态预测方法方面值得重视的未来发展及研究方向, 以期高压旋喷地基处理技术领域的工程实践及科学研究提供有益参考。

关键词: 软土; 地基处理; 高压旋喷桩; 成桩机理; 成桩直径; 综述

中图分类号: TU447

文献标志码: A

Advances in formation mechanism and morphology prediction methods of high-pressure jet grouting piles

GUO Panpan, WANG Yixian

(College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: As an effective ground improvement method, high-pressure jet grouting technology finds widespread applications in fields such as highway transportation and hydraulic construction. Currently, this technology witnesses rapid development in terms of equipment development and construction processes. However, the core scientific problems including the coupling mechanism between high-speed jets and soil, the influence of high-pressure jet grouting on pile formation, underlying mechanisms, and prediction and assessment methods are still not well understood scientifically. This has become a key technical bottleneck restricting the expanded application of high-pressure jet grouting ground improvement technology and its development toward intelligence, low carbon, and greenness. This paper briefly reviewed the main research progress in the formation mechanism and morphology prediction methods of high-pressure jet grouting piles and introduced the basic types and application fields of high-pressure jet grouting technology. Meanwhile, it summarized the characteristics of high-

收稿日期: 2024-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52308344); 安徽省自然科学基金资助项目(2308085QE190); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2023HGTA0193、JZ2023HGQA0094)

通信作者: 汪亦显(1980—), 男, 教授, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: wangyixian2012@hfut.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

speed jet generation, development, and evolution during pile formation of high-pressure jet grouting, as well as the interaction mechanism between the high-speed jet and soil. Additionally, the jet grouting construction parameters and physical and mechanical property parameters of soil that have a significant influence on the pile formation morphology of high-pressure jet grouting were reviewed. Furthermore, the empirical methods, semi-empirical and semi-theoretical methods, and artificial intelligence approaches to predicting the morphology of high-pressure jet grouting piles were discussed. Then, this paper concluded with an outlook on noteworthy future developments and research directions in the formation mechanism and morphology prediction methods of high-pressure jet grouting piles, aiming to provide valuable references for engineering practices and scientific research in high-pressure jet grouting ground improvement technology.

Key words: soft soil; ground improvement; high-pressure jet grouting pile; pile formation mechanism; pile diameter; review

我国幅员辽阔,地形地貌复杂,土壤类型丰富,软土分布广泛。软土成因类型多样,主要包括滨海沉积、湖泊沉积、河流沉积、山区河谷平原沉积等。软土具有含水率高、抗剪强度低、压缩性大、触变性强等不良工程特性^[1-3]。因此,在软土地基工程建设过程中常面临承载力不足、差异沉降或累积变形过大的问题,这些问题极易造成基坑坍塌、路堤失稳、建(构)筑物倾斜、路面开裂等工程事故^[4-6]。

近年来,随着“交通强国”“海洋强国”等国家重大发展战略的提出与深入推进,我国软土地区各类工程的建设需求与日俱增,跨海大桥、轨道交通、高速铁路、高速公路、港口码头、航站楼、海景建筑群等基础设施建设如火如荼。为提升软土地基工程建设的安全性及稳定性,工程中常采用高压旋喷法、复合地基法、固化改良法、置换法、排水固结法、密实法等地基处理技术来改善软土的强度与变形特性^[7-9]。

高压旋喷技术具有施工操作简单、适用地层广、施工方式多、成本低、旋喷加固体的耐久性好等优点,在工程中应用广泛。该技术用旋转的喷头喷出高速射流切削土体,被切削下来的部分土体与水泥浆混合形成水泥土混合物,最终经过固化后形成高压旋喷桩。高压旋喷桩的强度可达数兆帕,因此能显著提高软土地基的承载力和抵抗变形的能力。

近年来,高压旋喷技术在施工工艺及设备方面的发展十分迅速,新的施工工艺不断涌现。此外,在加固效果量化、加固体承载特性、施工影响评估、返浆重利用、成桩机理及形态预测方法等方面,国内外学者与工程技术人员也开展了大量研究,取得了丰硕研究成果^[10-11]。然而,高压旋喷成桩机理目

前仍不明晰,高压旋喷成桩形态的合理预测仍是该领域的技术瓶颈,致使高压旋喷成桩形态预测严重依赖工程经验,造成预测结果偏差较大、不确定性高,不仅增大了加固工程失稳破坏、变形过大、环境影响效应高的风险,而且增加了工程造价,因而不符合“双碳”目标及可持续发展战略,亟需开展相关研究。

为促进高压旋喷技术的研究与发展,本文总结了高压旋喷技术的主要应用领域及典型施工工艺,梳理了高压旋喷成桩机理的研究进展,回顾了高压旋喷成桩形态的预测方法,展望了高压旋喷成桩机理及形态预测方法的未来研究方向与发展趋势。

1 高压旋喷技术

1.1 基本类型

目前,高压旋喷技术的基本类型包括单管法、二重管法、三重管法等,如图1所示。单管法在日本被称为CCP工法,它利用水泥浆冲击破坏土体,同时借助注浆管的旋转和提升使浆液与从土体上崩落下来的土搅拌混合,经凝固形成固结体,其成桩过程如图2所示;二重管法使用双通道的二重注浆管,可同时喷射出高压浆液和空气这两种介质的高速射流来冲击破坏土体,其破土能量与单管法相比显著增大,因此能够形成直径更大的固结体;三重管法使用分别输送水、气、浆这三种介质的三重注浆管,先同轴喷射高压水喷射流和气流,冲切土体形成孔隙,再由泥浆泵注入高压浆液充填孔隙,最后凝固形成固结体,其成桩过程如图3所示。随着工程应用中对更大成桩直径、更低环境影响等需求

的增大,双高压旋喷技术、超级旋喷技术、交叉喷射旋喷技术、双液旋喷技术、减压旋喷技术、N-Jet工法

超高压喷射注浆技术等新型高压旋喷技术应运而生。

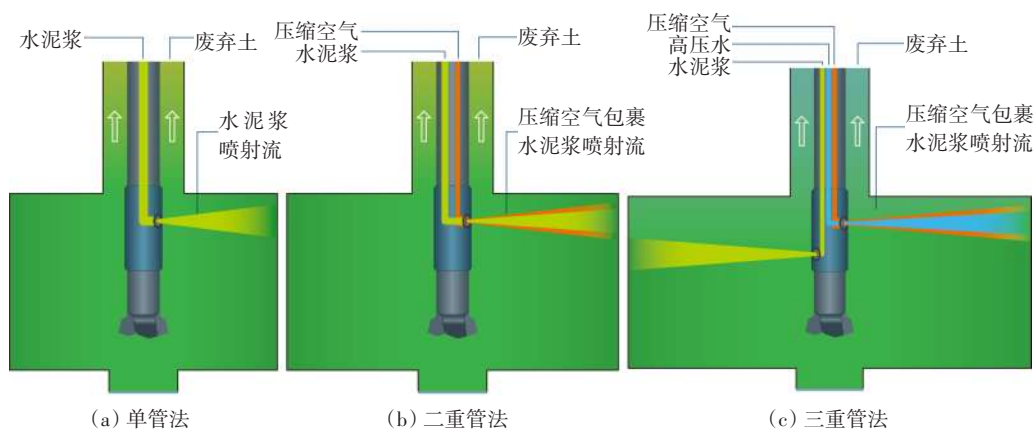


图1 高压旋喷技术的基本类型

Fig. 1 Basic types of high-pressure jet grouting technology

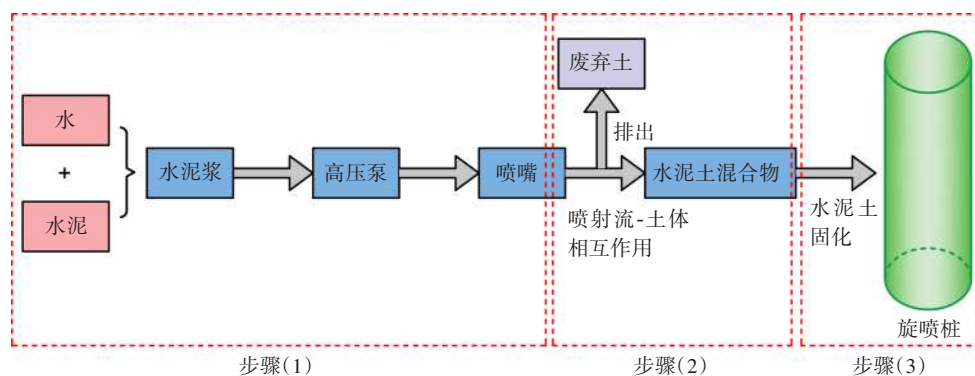


图2 单管法成桩过程示意

Fig. 2 Pile formation process of single-pipe method

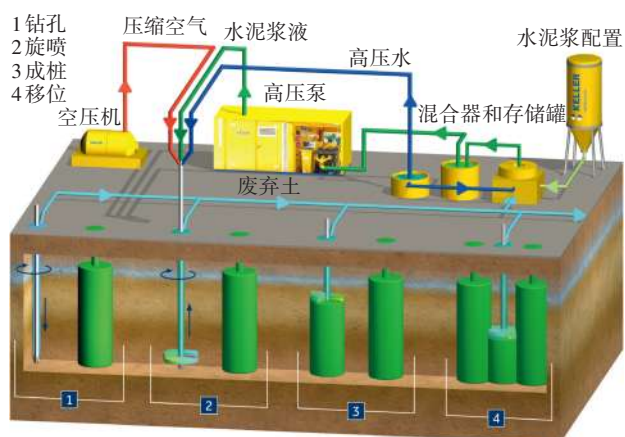


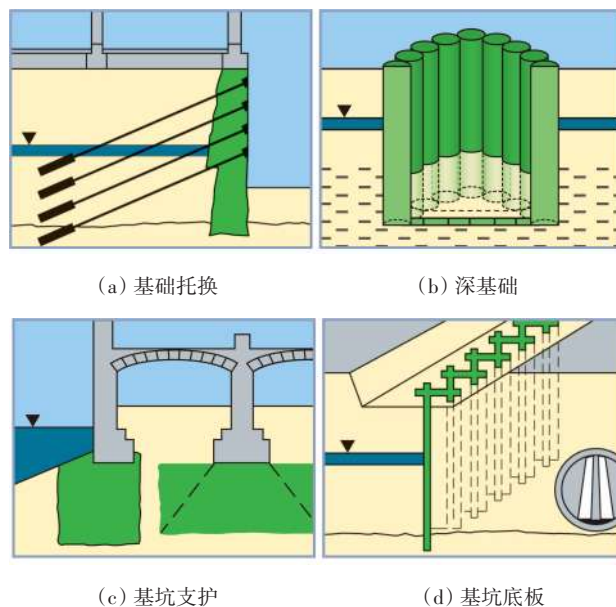
图3 三重管法成桩过程示意

Fig. 3 Pile formation process of triple-pipe method

1.2 应用领域

高压旋喷技术于20世纪70年代初期创始于日本,具有增加地基强度、提高地基承载力、止水防渗、减小支挡结构土压力、防止砂土液化和降低土体含水率等功能,如今已在世界各国的工程建设领域得到广泛应用。自20世纪70年代末期引入我国

以来,高压旋喷技术已成功应用于基础托换、基坑支护、基础加固、止水帷幕、深基础、基坑底板、底水封、排桩墙填充等土木、水利、矿山工程建设的多个方面(图4),并取得了显著的经济和社会效益。



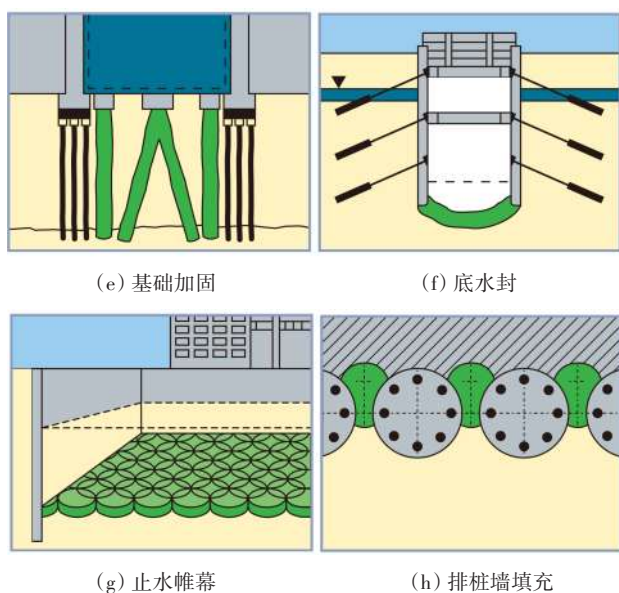


图4 高压旋喷技术的典型工程应用

Fig. 4 Typical engineering applications of high-pressure jet grouting technology

得益于设备结构紧凑、体积小、机动性强的优点,高压旋喷技术可以在很多其他地基处理技术难以施工的条件下施工,特别是在施工场地狭窄、净空低、周围重要设施众多、上部土质坚硬下部土质软弱、施工时不能停止生产运营等条件下,高压旋喷技术具有显著优势。

2 高压旋喷成桩机理

2.1 高速射流特性

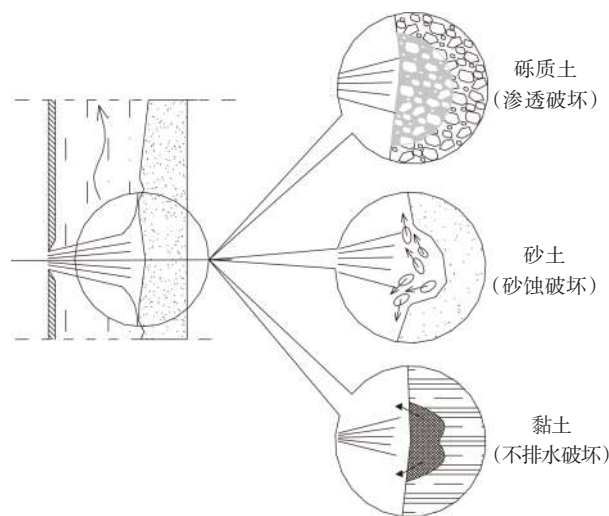
高压旋喷成桩过程极其复杂,导致其成桩机理难以被深刻揭示,这在一定程度上阻碍了该技术的应用与推广。为深刻认识高压旋喷成桩机理,国内外研究者们已开展了大量的实测分析、模型试验等研究工作,并在高速射流特性、高速射流与土体相互作用机理等方面取得了一些研究成果。

高速射流是用高压泵泵送水泥浆并从小直径喷嘴(1~5 mm)中喷出从而形成水泥浆射流的,常用的喷射压力为15~40 MPa,喷射速度在100 m/s以上^[12-14]。当高速射流从喷嘴喷出后,与周围流体发生剧烈的能量交换,因而其流速会随着远离喷口而不断衰减^[15-16]。刘沛清^[17]指出,高压旋喷技术中高速射流的速度衰减模式符合紊动射流理论。考虑到射流空间的有限性及喷射流与周围流体性质的差异性,YUAN等^[16]认为旋喷施工中高速紊动射流在严格意义上属于非淹没非自由射流。然而,为

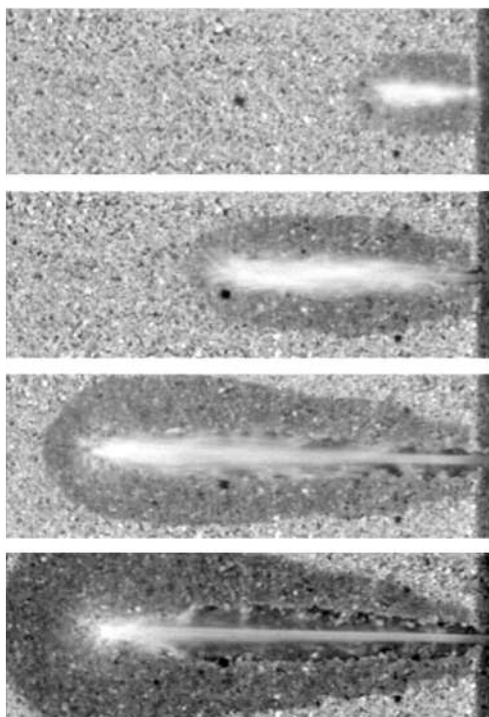
了方便研究问题,多数学者都将高压旋喷技术中的高速紊动射流简化为圆形断面淹没自由紊动射流^[15,18-21]。

2.2 高速射流与土体相互作用机理

高速射流与土体相互作用机理是高压旋喷技术的核心,可从高速射流对土体的冲切破坏作用、土体对高速射流冲切破坏作用的抵抗能力两方面对其进行探究^[16,19]。基于前人研究成果及高压旋喷技术特点,高速射流对土体的冲切破坏作用可视为动压、脉动负荷、气流及冲击力、楔入及空穴效应的组合作用^[22-26]。MODONI等^[18]指出,高速射流对土体的破坏作用形式与土体的类型密切相关(图5)。对于砾质土,由于其孔隙率较大,高速射流基本不会置换出土颗粒^[27-28];对于砂土,由于高速射流的冲刷作用,部分砂土颗粒会被置换而出^[29-30]。BERGSCHNEIDER^[31]基于模型试验研究了高压水射流对非饱和砂土的破坏作用,发现其破坏作用形式主要为拖曳效应和渗透效应(图6)。土体对高速射流冲切破坏作用的抵抗能力可用临界射流速度进行量化,该参数与土体的物理力学性质相关。DABBAGH等^[32]基于模型试验,建立了临界射流速度与土体强度的定量关系,但该研究未考虑土体应力状态的影响。邓开鸿^[33]采用颗粒流离散元分析手段研究了高速射流对黏土、砂土及软土三类均质土层的破坏作用,发现黏土层中浆液的扩散范围明显比软土层及砂土层中的小。

图5 高速射流对不同土体的破坏作用形式示意^[18]Fig. 5 Forms of damage caused by high-speed jets to different soil types^[18]

上述对高压旋喷成桩机理的已有研究主要集中在室内试验、现场测试及理论模型简化等方面,

图6 高速射流对土体破坏情况的演化^[19]Fig. 6 Evolution of soil damage caused by high-speed jets^[19]

对高压旋喷成桩机理的研究还不够深入。尤其是对于高速射流与土体的相互作用机理,目前还缺乏对其宏观物理力学现象的细观结构变化解释(例如从土颗粒运移、应力传递特性等方面);对于高速射流的扩散和压力衰减规律,目前也仅仅基于空气或水介质的经验公式进行近似描述,而没有考虑土颗粒对高速射流的细观力学影响及流固耦合效应,从而导致高压旋喷成桩形态及挤土效应的理论计算公式的可靠性不高。因此,有必要从细观力学角度进一步深入研究高压旋喷成桩机理。

3 高压旋喷成桩形态预测方法

3.1 成桩形态影响因素

在高压旋喷地基处理工程中,设计人员往往将高压旋喷成桩形态理想化为圆柱体,并仅采用旋喷桩直径这一参数来定量描述高压旋喷桩的成桩形态。然而,旋喷施工完成后实际成桩形态的大量直接测量或间接探测结果表明,高压旋喷成桩形态在实际工程中并非预设的理想圆柱体^[34-35],而是呈波动状的复杂空间三维体(图7),也即旋喷桩直径在深度方向及某一深度横截面的不同方位上是不断变化着的。究其原因,高压旋喷桩成桩机理较为复杂,使成桩形态的影响因素十分繁杂,且在工程实

践中也难以调控、预测高压旋喷桩的成桩形态。大量研究及工程实践表明,高压旋喷成桩形态的影响因素可归为两大类:一是旋喷施工参数,二是土体性质参数^[36]。针对这两类参数对旋喷成桩形态的影响效应,前人已基于现场测试、模型试验等手段取得了丰硕研究成果。

注: D 为旋喷桩直径; $R(z)$ 为深度 z 处的桩体半径。

(a) 现场照片

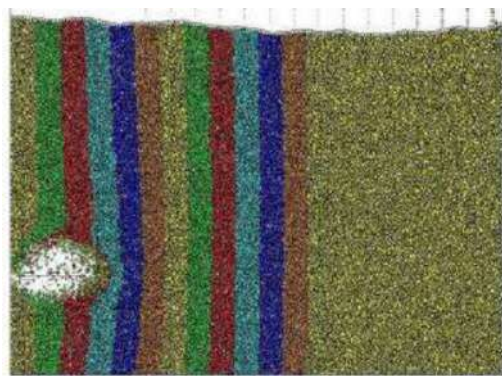
(b) 示意图

图7 高压旋喷成桩实际形态照片及示意图^[26-27]Fig. 7 Actual morphology photos of high-pressure jet grouting piles^[26-27]

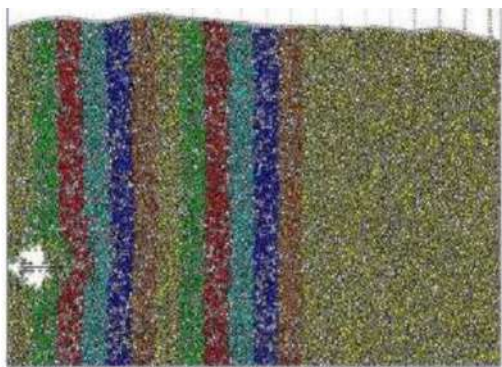
旋喷施工参数主要包括旋喷工法(单管法、二重管法、三重管法)、喷射流体性质、喷射流量、喷射压力、喷嘴个数、喷嘴形状、喷嘴移动速度、压缩空气的压力等^[37]。不同旋喷工法的加固能力不同,因此获得的最大旋喷桩直径也具有差异。研究表明^[38],在软土淤泥及黏土地层中,单管法的成桩直径一般为 $0.4 \sim 0.8 \text{ m}$,而二重管法、三重管法的成桩直径可分别达到 $0.6 \sim 1.3 \text{ m}$ 、 $1.0 \sim 1.8 \text{ m}$ 。MODONI 等^[18]研究了高压水和高压水泥浆这两种不同喷射流体对旋喷桩直径的影响,发现由于水的黏滞性比水泥浆的小,因而可以获得较大的桩径。由于喷射流量与压力直接体现了高压泵所提供的高速射流的破土能量,因此喷射流量与压力对高速射流切割土体的效率有重要影响:喷射压力和流量越大,旋喷成桩直径越大^[39-41]。喷嘴形状是影响高速射流切割土体效率的重要参数,其关键技术指标有喷嘴总长、直径、直线长径比、窄角等。室内试验研究表明,存在最优的喷嘴窄角及直线长径比,它们使得旋喷切割效率最高^[42]。喷嘴移动速度(可由钻喷杆旋转速度和提升速度计算得到)直接决定了喷射时间的长短,因此对成桩直径具有一定的影响^[43]。工程实践表明,若其他条件保持不变,钻喷杆提升速度越大,旋喷桩直径越小^[16]。MALININ 等^[43]基于现场试验指出,对于常用的钻喷杆旋转速度,成桩直径受钻喷杆旋转速度的影响较小。在采用二重管

法进行施工时,压缩空气包裹高压水泥浆射流可以有效降低射流速度在远离喷嘴过程中的衰减速率。韩立志等^[44]基于对已有实测数据的回归分析指出,对于常用的压缩空气压力范围(0.5~1.5 MPa),压缩空气包裹效应对成桩直径的增大比例为27%~81%。

由于高速射流与土体的相互作用是高压旋喷成桩机理的核心内容,因此土体物理力学性质对高压旋喷成桩形态具有重要影响。现有研究主要关注土体颗粒级配(粒径)、相对密实度(一般用标贯击数衡量)、不排水抗剪强度等土体性质参数对高压旋喷成桩形态的影响效应。BELL^[45]的研究表明,旋喷成桩直径随着土颗粒粒径的减小而减小。MIKI等^[46]、TORNAGHI^[47]指出,旋喷成桩直径随着土体标贯击数、不排水抗剪强度的增大而减小。郭豪^[48]基于颗粒流离散元方法研究了砂土地层中的卵石颗粒对高速射流喷射范围的影响效应,发现含有30%卵石颗粒的砂卵石土层中浆液的喷射范围明显比不含卵石颗粒的砂土层中的浆液喷射范围小(图8)。究其原因,砂卵石土的强度和刚度均较大,高速射流的冲切破坏能量在该地层中耗散较快。



(a) 砂土



(b) 砂卵石土

图8 砂土层中卵石颗粒对高速射流喷射范围的影响^[38]

Fig. 8 Influence of pebble particles in sandy soil layers on the spraying range of high-speed jets^[38]

上述关于高压旋喷成桩形态影响因素的已有研究中,旋喷施工参数的影响效应得到了较大程度的重视,各种旋喷施工参数对高压旋喷成桩形态的影响机理已基本被厘清。然而,目前关于土体性质参数影响效应的研究大都停留在定性层面,而且已有研究所建立的用于表征土体性质参数与旋喷桩形态之间关系的数学模型严重依赖多重经验公式的叠加,其相关机理研究还不够深入。此外,目前关于高压旋喷成桩形态影响因素的模型试验及现场试验研究对砾质土、砂土、硬黏土关注较多,而忽略了软土。因此,有必要进一步深入开展软土物理力学参数对高压旋喷成桩形态的影响效应研究,并从细观层面揭示其影响机理,这对于高压旋喷技术的发展及应用推广具有重要意义。

3.2 成桩形态预测方法

高压旋喷成桩形态的合理预测对于高压旋喷地基处理工程的设计优化及施工质量控制具有重要意义。然而,由于高压旋喷成桩形态的影响因素十分繁杂,且其影响机理仍未完全得到深刻认识,目前高压旋喷成桩形态的合理预测仍是工程师必须面临的一大挑战。近三十年来,研究者们基于模型试验、现场试验、紊动射流理论分析等手段提出了多种用于预测高压旋喷成桩形态的方法,这些方法主要可以归为三大类:经验法、半经验半理论法(表1)、人工智能法。

3.2.1 经验法

经验法的预测公式一般是通过对旋喷室内试验或者现场试验获取的数据进行回归分析而建立的。例如,COVIL等^[37]基于现场试验提出了用于计算达到预设成桩直径所需的喷射浆液体积的经验公式,该公式适用于单管法、二重管法旋喷施工工艺。SHIBAZAKI^[42]开展了砂土中高压水射流模型试验,并基于试验结果提出了单管法高压旋喷成桩直径的经验计算公式,该经验公式考虑了喷射压力、喷射流量、喷嘴移动速度等旋喷施工参数的影响效应,但无法考虑土体性质参数的影响。MIHALIS等^[41]针对希腊软岩地层中典型地铁工程现场旋喷试验结果开展回归分析,得到了计算单管法、二重管法、三重管法旋喷成桩直径的经验公式,该公式具有与SHIBAZAKI^[42]所提出的公式类似的缺陷,即无法考虑土体性质参数的影响,且其在非软岩地层中的适用性有待进一步验证。KIMPRITIS等^[49]基于希腊塞萨洛尼基地铁工程中旋喷成桩直

表1 用于预测高压旋喷成桩形态的典型经验法及半经验半理论法

Table 1 Typical empirical methods and semi-empirical and semi-theoretical methods for morphology prediction of high-pressure jet grouting piles

方法	预测公式	适用范围	提出者
经验法	$Q_i = 0.25\pi D^2 H \lambda (1 + \beta)$	单管法、二重管法	COVIL等 ^[37]
	$L_m = KP^\alpha Q^\beta N^\gamma / V_n^\delta$	单管法	SHIBAZAKI ^[42]
	$D_0 = n_1 \left(p_g Q_g / v_s \right)^{n_2}$	单管法、二重管法、三重管法	MIHALIS等 ^[41]
	$D = \alpha_1 \dot{z} + \alpha_2 \rho_{JC} + \alpha_3 q_u + \alpha_4 N_{SPT}$	单管法、三重管法	KIMPRITIS等 ^[49]
半经验半理论法	$D_0 = 2 \int_0^t V_c t^* dt^*$	单管法	MODONI等 ^[18]
	$D_0 = 12.5 d_0 \sqrt{(p_g - p_r) / q_{bu}} + D_r$	单管法	HO ^[19]
	$R_j = \frac{D_0}{2} + \frac{\alpha}{\eta} \frac{4Q}{M\pi d_0 \sqrt{q_u / p_{atm}}}$	单管法	WANG等 ^[50]
	$D_a = D_{ref} \left(\frac{\alpha \Lambda^* E'_n}{7.5 \times 10} \right)^\beta \left(\frac{q_c}{1.5} \right)^\delta$	单管法、二重管法、三重管法	FLORA等 ^[51]
	$D_0 = \left(\frac{v_{m0}}{v_m} \right)^{a_1} \frac{2\alpha d_0 v_0 a_0 N^{a_2}}{\beta (q_u / p_{atm})^k} + D_r$	单管法、二重管法、三重管法	SHEN等 ^[52]

注:限于篇幅,公式中变量的具体含义请参考相应文献

径的现场实测数据,提出了单管法、三重管法旋喷成桩经验预测公式,该公式尽管考虑了土体无侧限抗压强度、标贯击数等土体性质参数的影响,但在其他地区的适用性也有待进一步验证。

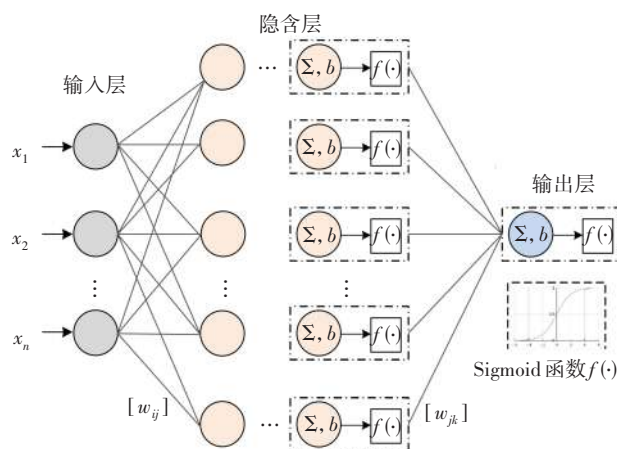
3.2.2 半经验半理论法

半经验半理论法一般是基于紊动射流理论和土体破坏理论而建立的,因此与经验法相比其理论基础较强,但高压旋喷成桩过程极其复杂,致使该方法中的某些参数仍需根据经验确定。MODONI等^[18]基于不同的高速射流-土体相互作用模型建立了砾质土、砂土、黏土地层中单管法旋喷成桩直径预测公式,该公式无法考虑钻喷杆旋转速度、土体颗粒级配、压缩空气压力(仅针对二重管法和三重管法)的影响。HO^[19]建立的半经验半理论法所需参数较少,应用方便,但无法反映喷嘴移动速度、土体颗粒级配、喷射流体性质等参数的影响效应。

WANG等^[50]从高压旋喷桩形成的侵蚀、破土机理出发,通过对圆形断面紊动射流和土体破坏的联合分析,建立了旋喷桩半径预测公式,该公式的预测结果与典型工程的实测数据吻合较好。FLORA等^[51]基于高速射流能量的侵袭作用及土体抵抗冲切破坏的能力,建立了用于预测单管法、二重管法、三重管法成桩直径的半经验半理论公式,该公式的误差基本在20%以内。SHEN等^[52]所建立的半经验半理论公式考虑的成桩直径的影响因素较为全面,其在采用四种不同旋喷工艺的工程中的预测精度均令人满意。

3.2.3 人工智能法

人工智能法在高压旋喷成桩形态预测方面的研究和应用在近年来逐渐兴起。该方法在一定程度上能够规避经验法适用范围有限且不确定性较大、半经验半理论法严重依赖假设与简化的缺陷,但却往往需要大量数据对模型进行训练,以取得较为满意的预测精度。通过采用不同的人工智能法,前人已取得了较为丰硕的高压旋喷成桩形态智能预测研究成果。OCHMAŃSKI等^[53]采用包含超过130个工程案例的数据库对人工神经网络(ANN)进行训练(图9),训练后的模型对单管法、二重管法、三重管法旋喷成桩直径的预测误差分别在12%、13%、15%以内。TINOCO等^[54]开展了基于数据驱动方法(人工神经网络和支持向量机算法)的旋喷成桩直径预测研究,发现钻喷杆提升速度、水泥浆流速、旋喷施工工艺对成桩直径的影响较大。为了克服传统ANN算法训练效率低的缺陷,



注: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为输入神经元; Σ 表示求和; b 为偏置项; $f(\cdot)$ 为激活函数; w_{ij}, w_{jk} 为隐含层和输出层的突出权重。

图9 人工神经网络(ANN)典型结构示意图

Fig. 9 Typical structure of an artificial neural network (ANN)

ATANGANA-NJOCK等^[55]采用差分进化算法对ANN算法进行优化,研究表明,优化后的算法在旋喷成桩直径预测方面的精度和效率比传统算法的好。SHEN等^[56]基于双向长短期记忆(Bi-LSTM)深度学习算法提出了一种用于动态预测软土地基中旋喷成桩直径的智能策略,并指出该智能策略可高效预测桩径随深度的变化。WANG等^[57]提出了一种基于支持向量回归技术(SVR)的旋喷成桩直径预测方法,该方法考虑了旋喷施工工艺、旋喷参数、土体类型、土体抗剪强度的影响,预测精度令人满意。

4 总结与展望

高压旋喷技术作为一种有效的地基处理手段,备受国内外工程界和学术界的广泛关注。近半个世纪以来,国内外工程师和研究者通过开展大量的试验、理论及数值分析研究,已在高压旋喷成桩机理、成桩形态影响因素、成桩形态预测方法等方面取得了丰硕成果。然而,高压旋喷成桩过程极其复杂,高压旋喷成桩形态影响因素众多且其影响效应难以被量化、厘定,导致高压旋喷技术所涉及的关键科学问题至今仍未得到很好的解决,主要体现在:1)在高压旋喷成桩机理方面,目前人们的认识还较为浅显,尤其是高速射流与土体相互作用过程中高速射流的扩散、压力衰减规律以及土体颗粒劈裂剥落、运移演化特征仍未得到深刻揭示;2)在高压旋喷成桩形态预测方面,现有的预测方法大多数是基于粗粒土或硬黏土地基中的模型试验或者现场监测数据而建立的,因而在软土地基中的适用性及精度难以保证,亟需进一步开展研究。

近年来,随着我国软土地区高压旋喷地基处理工程的逐渐增多,高压旋喷技术关键科学问题的现有研究成果已无法满足工程建设的需要,其局限性日益凸显,并在某种程度上降低了工程的稳定性及可靠性,增加了工程造价。因此,亟需进一步深入开展高压旋喷响应机理及形态预测方法研究,为我国滨海软土地区高压旋喷地基处理工程的设计优化、施工感控、影响评估及韧性提升提供科学手段。

综上,笔者认为在高压旋喷成桩机理及形态预测方法的未来发展方向及研究工作中,以下几个方面的内容值得重视:

1)采用离散元与计算流体力学的耦合方法,开展高速射流与土体相互作用的高压旋喷成桩的全

过程模拟,从细观层面揭示高压旋喷成桩机理。

2)进一步开展旋喷施工参数和土体物理力学性质参数对高压旋喷成桩形态影响效应的量化研究,建立表征关键影响参数与旋喷桩形态之间关系的数学模型,为成桩形态预测提供理论支撑。

3)加强软土地基与富水地层中高压旋喷成桩机理及形态预测方法的研究,厘清软土物理力学特性对高压旋喷成桩形态的影响机理。

4)基于大量现场试验及数值模拟数据,结合先进机器学习或深度学习算法,开展考虑超深高压旋喷成桩直径随埋深变化规律的成桩形态预测模型研究,通过工程应用互馈验证,不断提高模型精度。

5)通过利用多场耦合数值方法模拟二重管法、三重管法等涉及多类型高速射流之间耦合效应的高压旋喷成桩过程,探明高压浆液流与高压水喷射流外圈的圆筒状环绕气流对旋喷成桩形态的增强效应,为大直径旋喷加固工程的设计优化提供理论支撑。

参考文献(References):

- [1] 梁志鑫,孙红,牛富俊,等.三轴加载条件下路基软土微观结构演化研究[J].交通科学与工程,2024,40(3): 27-34. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202302142024061970.
LIANG Zhixin, SUN Hong, NIU Fujun, et al. Study on microstructure evolution of subgrade soft soil under triaxial loading [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40 (3) : 27-34. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202302142024061970.
- [2] 贺炜,胡彬,王晓佳,等.塑料排水板处理近海软土地基的沉降量分析[J].交通科学与工程,2023,39(5): 64-73. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021112023101982.
HE Wei, HU Bin, WANG Xiaojia, et al. Settlement analysis of offshore soft soil foundation treated by PVD [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (5) : 64-73. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021112023101982.
- [3] 沈卓恒,阮世强.软土地层路基工后沉降预测及控制研究[J].交通科学与工程,2020,36(4): 17-21. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2020.04.003.
SHEN Zhuoheng, RUAN Shiqiang. Study on prediction and control of post-construction settlement of subgrade in the soft soil layer [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (4) : 17-21. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2020.04.003.
- [4] 任超,王金昌,管红辉,等.软土地基上工后沉降致沥青路面开裂机理分析[J].地基处理,2020,2(5): 397-

403. DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2020.05.008.
REN Chao, WANG Jinchang, GUAN Honghui, et al. Analysis of cracking mechanism of asphalt pavement caused by postconstruction settlement on soft soil foundation[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(5): 397-403. DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2020.05.008.
- [5] 陈云敏, 胡琦, 陈仁朋. 杭州地铁湘湖车站基坑坍塌引起的基底土深层扰动与沉降分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 110-117.
CHEN Yunmin, HU Qi, CHEN Renpeng. Soil disturbance by the collapse of retaining wall for a pit excavation and the induced additional settlement: a case study of Hangzhou Metro Xianghu Station [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(7): 110-117.
- [6] 刘宏扬, 罗强, 薛元, 等. 路堤荷载下CFG桩复合地基失稳破坏特性离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(8): 1502-1511. DOI: 10.11779/CJGE202208015.
LIU Hongyang, LUO Qiang, XUE Yuan, et al. Centrifugal model tests on failure characteristics of CFG pile composite foundation under embankment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(8): 1502-1511. DOI: 10.11779/CJGE202208015.
- [7] 吴创周, 楚剑, 成亮, 等. 微生物注浆地基处理技术研究进展[J]. 地基处理, 2020, 2(3): 181-186. DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2020.03.001.
WU Chuangzhou, CHU Jian, CHENG Liang, et al. Advances of ground improvement with MICP-based biogrouting[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(3): 181-186. DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2020.03.001.
- [8] 郑刚, 赵佳鹏, 周海祚, 等. 国内外高速公路、铁路地基处理技术回顾[J]. 地基处理, 2021(2): 91-99. DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2021.02.001.
ZHENG Gang, ZHAO Jiapeng, ZHOU Haizuo, et al. State-of-the-art review for techniques on ground improvement of highway and railway [J]. Journal of Ground Improvement, 2021(2): 91-99. DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2021.02.001.
- [9] 郑刚, 张军辉, 章定文, 等. 地基处理技术现状与发展[J]. 土木工程学报, 2024, 57(7): 51-70. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.23110916.
ZHENG Gang, ZHANG Junhui, ZHANG Dingwen, et al. State-of-the-art of ground improvement technologies [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(7): 51-70. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.23110916.
- [10] INAZUMI S, SHAKYA S. A comprehensive review of sustainable assessment and innovation in jet grouting technologies [J]. Sustainability, 2024, 16(10): 4113. DOI: 10.3390/su16104113.
- [11] ZHANG F, LI J, DENG Y F, et al. Numerical investigation of mixing process of high-pressure jet-cutting clay by water-air coaxial nozzle considering soil rheological properties [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 165: 105878. DOI: 10.1016/j.compgeo. 2023. 105878.
- [12] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 5-39.
GONG Xiaonan. Handbook of foundation treatment[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 5-39.
- [13] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.
ZHENG Gang, GONG Xiaonan, XIE Yongli, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146.
- [14] 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.
LIU Hanlong, ZHAO Minghua. Review of ground improvement technical and its application in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96-115.
- [15] 王志丰, 沈水龙, 许烽霜. 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 Zhifeng, SHEN Shuilong, XU Yeshuang. 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.
- [16] YUAN Y, SHEN S L, WANG Z F, et al. Automatic pressure-control equipment for horizontal jet-grouting [J]. Automation in Construction, 2016, 69: 11-20.
- [17] 刘沛清. 自由紊动射流理论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008
LIU Peiqing. Free turbulent jet theory [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2008.
- [18] MODONI G, CROCE P, MONGIOVÌ L. Theoretical modelling of jet grouting [J]. Géotechnique, 2006, 56(5): 335-347. DOI: 10.1680/geot.2006.56.5.335.
- [19] HO C E. Fluid-soil interaction model for jet grouting [C]//Grouting for Ground Improvement. Denver: American Society of Civil Engineers, 2007: 1-10. DOI: 10.1061/40912(231)1.
- [20] WANG Z F, SHEN S L, YANG J. Estimation of the diameter of jet-grouted column based on turbulent kinematic flow theory [C]//Grouting and Deep Mixing 2012. New Orleans: American Society of Civil Engineers, 2012. DOI: 10.1061/9780784412350.0179.
- [21] WANG Z F, SHEN S L, HO C E, et al. Jet grouting practice: an overview [J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 2013, 44(4): 88-96.
- [22] NJOCK P G A, CHEN J, MODONI G, et al. A review of jet grouting practice and development [J]. Arabian

- Journal of Geosciences, 2018, 11 (16) : 459. DOI: 10.1007/s12517-018-3809-7.
- [23] WANG Z F, SHEN S L, MODONI G. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: theoretical model and application[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 111: 222-228. DOI:10.1016/j.compgeo.2019.03.012.
- [24] LIU H L, ZHOU H, KONG G Q, et al. High pressure jet-grouting column installation effect in soft soil: theoretical model and field application [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 88: 74-94. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.03.005.
- [25] SHEN S L, WANG Z F, HORPIBULSUK S, et al. Jet grouting with a newly developed technology: the Twin-Jet method [J]. Engineering Geology, 2013, 152 (1) : 87-95. DOI:10.1016/j.enggeo.2012.10.018.
- [26] ATANGANA NJOCK P G, SHEN J S, MODONI G, et al. Recent advances in horizontal jet grouting (HJG): an overview [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43 (4) : 1543-1560. DOI: 10.1007/s13369-017-2752-3.
- [27] MIKI G. Soil improvement by jet grouting [C]// Proceedings of the Third International Geotechnical Seminar on Soil Improvement Methods. Singapore: [s. n.], 1985: 45-52.
- [28] CROCE P, FLORA A. Analysis of single-fluid jet grouting [J]. Géotechnique, 2000, 50 (6) : 739-748. DOI:10.1680/geot.2000.50.6.739.
- [29] BERGSCHNEIDER B B, WALZ B. Jet grouting: range of the grouting jet [C]//Proceedings of the Thirteenth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Prague: [s.n.], 2003: 53-56.
- [30] STEIN J J, GRABE J. Jet grouting tests and simulation [C]// Proceedings of the Thirteenth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Prague: [s.n.], 2003: 899-902.
- [31] BERGSCHNEIDER B. Zur reichweite beim düsenstrahlverfahren im sand[D]. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal, 2002. (in German)
- [32] DABBAGH A A, GONZÁLEZ A S, PEÑA A S. Soil erosion by a continuous water jet [J]. Soils and Foundations, 2002, 42 (5) : 1-13. DOI: 10.3208/sandf.42.5_1.
- [33] 邓开鸿. 高压旋喷桩的成桩机理和挤土效应研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
DENG Kaihong. Research on mechanism and compacting effect of high pressure jet grouting pile[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [34] CHENG S H, LIAO H J, YAMAZAKI J, et al. Evaluation of jet grout column diameters by acoustic monitoring[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54 (12): 1781-1789. DOI:10.1139/cgj-2017-0025.
- [35] WANG K, LI Z P, ZHENG H, et al. A theoretical model for estimating the water-tightness of jet-grouted cut-off walls with geometric imperfections [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 138: 104316. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104316.
- [36] LIU Y, PAN Y T, SUN M M, et al. Lateral compression response of overlapping jet-grout columns with geometric imperfections in radius and position [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55 (9) : 1282-1294. DOI:10.1139/cgj-2017-0280.
- [37] COVIL C S, SKINNER A E. Jet grouting: a review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process[M]//BELL A L. Grouting in the ground. London: Thomas Telford Publishing, 1994: 605-629. DOI:10.1680/gitg.19287.0041.
- [38] GAZZARRINI P. Jet grouting guidelines [S]. [S. l.] : Deep Foundations Institute, 2012.
- [39] HO C E. Turbulent fluid jet excavation in cohesive soil: with particular application to jet grouting [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [40] YOSHIDA H, ASANO R, KUBO H, et al. Effect of nozzle traverse rate and number of passes on cutting soil utilizing water jet for wider application[C]//Proceedings of the Sixth American Water Jet Conference. Houston: [s. n.], 1991: 381-392.
- [41] MIHALIS I K, TSIMBAOS G, ANAGNOSTOPOULOS A. Jet grouting applications in soft rocks: the Athens Metro case[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2004, 157 (4) : 219-228. DOI: 10.1680/geng.2004.157.4.219.
- [42] SHIBAZAKI M. State of practice of jet grouting [C]// Proceedings of International Conference on Grouting and Ground Treatment. New Orleans: American Society of Civil Engineers, 2003: 198-217. DOI: 10.1061/40663 (2003)7.
- [43] MALININ A, GLADKOV I, MALININ D. Experimental research of jet-grouting parameters in different soil conditions [C]// Proceedings of Deep and Underground Excavations. Shanghai: American Society of Civil Engineers, 2010: 49-54. DOI: 10.1061/41107 (380)7.
- [44] 韩立志, 王志丰. 二重管旋喷工法成桩直径实用计算方法[J]. 中国公路学报, 2019, 32 (3) : 128-134. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.03.014.
HAN Lizhi, WANG Zhifeng. Practical method to predict diameter of jet grout column by double fluid system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (3) : 128-134. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.03.014.
- [45] BELL A L. Jet grouting [C]// Proceedings of Ground Improvement. Blackie: [s.n.], 1993: 149-174.

- [46] MIKI G, NAKANISHI W. Technical progress of the jet grouting method and its newest type[C]// Proceedings of the International Conference on In-situ Soil and Rock Reinforcement. Paris: [s.n.], 1984: 195-200.
- [47] TORNAGHI R. Trattamento colonnare dei terreni mediante gettiniezione (jet-grouting) [C]//XVII Convegno Nazionale di Geotecnica. Taormina: [s.n.], 1989: 193-203. (in Italian)
- [48] 郭豪. 高压喷射注浆机理试验与数值模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
GUO Hao. High pressure jet grouting mechanism test and numerical simulation research [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [49] KIMPRITIS T, STANDING J R, THURNER R. Estimating column diameters in jet-grouting processes [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 2018, 171 (3): 148-158. DOI: 10.1680/jgrim.17.00001.
- [50] WANG Z F, SHEN S L, YANG J. Estimation of the diameter of jet-grouted column based on turbulent kinematic flow theory[C]// Proceedings of Grouting and Deep Mixing 2012. New Orleans: American Society of Civil Engineers, 2012: 2044-2051. DOI: 10.1061/9780784412350.0179.
- [51] FLORA A, MODONI G, LIRER S, et al. The diameter of single, double and triple fluid jet grouting columns: prediction method and field trial results [J]. Géotechnique, 2013, 63 (11): 934-945. DOI: 10.1680/geot.12.p.062.
- [52] 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. DOI:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000932.
- [53] OCHMAŃSKI M, MODONI G, BZÓWKA J. Prediction of the diameter of jet grouting columns with artificial neural networks [J]. Soils and Foundations, 2015, 55 (2): 425-436. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.02.016.
- [54] TINOCO J, GOMES-CORREIA A, CORTEZ P. Jet grouting column diameter prediction based on a data-driven approach [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018, 22 (3): 338-358. DOI: 10.1080/19648189.2016.1194329.
- [55] ATANGANA-NJOCK P G, SHEN S L, ZHOU A N, et al. Artificial neural network optimized by differential evolution for predicting diameters of jet grouted columns [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13 (6): 1500-1512. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.05.009.
- [56] SHEN S L, ATANGANA-NJOCK P G, ZHOU A N, et al. Dynamic prediction of jet grouted column diameter in soft soil using Bi-LSTM deep learning [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16 (1): 303-315. DOI: 10.1007/s11440-020-01005-8.
- [57] WANG Z F, CHENG W C. Predicting jet-grout column diameter to mitigate the environmental impact using an artificial intelligence algorithm [J]. Underground Space, 2021, 6(3): 267-280. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.02.004.

(责任编辑:石月珍)