

单管旋喷工法成桩半径实用计算方法

王志丰^{1,2}, 项庆明³, 陈德云⁴, 谢永利^{1,2}

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室,
陕西 西安 710064; 3. 温州市交通工程质量监督局, 浙江 温州 325000;
4. 温州信达交通工程试验检测有限公司, 浙江 温州 325105)

摘 要:为解决在采用单管旋喷工法对软土地基加固时,对成桩半径的合理预测问题,通过对单管旋喷工法施工过程的理论分析,以单位长度高压旋喷桩为研究对象,综合考虑水泥浆射流性质、高压射流喷射能量和土体抵抗力,提出一种预测单管旋喷桩成桩半径的实用计算方法。该方法针对细粒土和粗粒土情况,选取岩土工程勘察报告中常用的静力触探试验获得的锥尖阻力 q_c 和标准贯入试验获得的标贯击数 N_{SPT} 代表土体抵抗力;建立成桩半径与喷嘴处高压射流喷射能量 E_n 和土体抵抗力(锥尖阻力 q_c 和标贯击数 N_{SPT})的定量关系;同时分析成桩半径随高压射流喷射能量 E_n 、锥尖阻力 q_c 和标贯击数 N_{SPT} 的变化情况;最后总结了该方法的计算步骤,并通过与现场实测数据的对比分析,验证了该方法的合理性。研究结果表明:成桩半径随锥尖阻力 q_c (细粒土)和标贯击数 N_{SPT} (粗粒土)的增大迅速减小,即土体抵抗冲刷破坏的能力越强,成桩半径越小;喷嘴处高压射流喷射能量 E_n 越大,代表高压射流对土体的破坏力越强,则成桩半径越大;在喷射参数相同的情况下,单管旋喷工法在粗粒土中的成桩半径一般要高于细粒土中的成桩半径。

关键词:道路工程;软土地基;单管旋喷工法;成桩半径;理论分析

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A

Practical calculation method for column radius by single fluid jet grout system

WANG Zhi-feng^{1,2}, XIANG Qing-ming³, CHEN De-yun⁴, XIE Yong-li^{1,2}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel Engineering of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
3. Wenzhou Traffic Quality Supervision Bureau, Wenzhou 325000, Zhejiang, China; 4. Wenzhou Xinda Traffic Engineering Test and Detection Co., Ltd., Wenzhou 325105, Zhejiang, China)

Abstract: In order to solve the problem that how to reasonably predict jet grout column radius when using single fluid system to reinforce soft ground, by theoretical analysis on the construction of single fluid system, taking the jet grout column with unit length as the research subject, a practical method for predicting jet grout column radius was proposed based on the consideration of the effect of jetting fluid property, jetting energy and resistance of soil to erosion. For the case of fine-grained soils and coarse-grained soils, the results of cone penetration

收稿日期:2017-01-08

基金项目:中国博士后科学基金项目(2015M570803,2016T90877);陕西省博士后科研项目;

中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821161022)

作者简介:王志丰(1986-),男,河南汤阴人,副教授,工学博士,E-mail:zhifeng.wang@chd.edu.cn.

tests q_c and the results of standard penetration tests N_{SPT} that frequently used in geotechnical investigation reports were chosen to represent the resistance of soil to erosion. The quantitative relationship among column radius, energy at the nozzle E_n , and the resistance of soil to erosion (the result of cone penetration test q_c and the result of standard penetration test N_{SPT}) was established in this method. Then the variation of column radius with energy at the nozzle E_n , the result of cone penetration test q_c and the result of standard penetration test N_{SPT} were analyzed. The calculation procedure of this method was summarized, and the analysis results of the calculated and measured data in field verified the applicability of this method. The results show that column radius rapidly decreases with the increase of the result of cone penetration test q_c and the result of standard penetration test N_{SPT} , namely, the higher the resistance of soil to erosion, the smaller the column radius. The higher the energy at the nozzle E_n , the larger the column radius. Column radius formed in coarse-grained soils is larger than that formed in fine-grained soils when the jetting parameters are identical. 2 tabs, 6 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; soft ground; single fluid jet grout system; column radius; theoretical analysis

0 引言

随着中国交通基础设施建设工作的不断发展,高压旋喷技术(high pressure jet grouting technology)在高速公路路基处理与公路隧道超前支护方面得到了广泛应用^[1-4]。它是以旋转的喷头喷出高压射流切削土体,使水泥浆与切削下来的部分土体混合形成水泥土混合物,经过一段时间的固化后,形成旋喷加固体(即高压旋喷桩)^[5-8]。20世纪70年代前后,高压旋喷技术始创于日本,随后由于经济和科学技术的不断发展以及大直径和高强度等设计要求的不断提高,高压旋喷技术得到了迅猛发展,形成了一系列高压旋喷工法^[9-12]。按照成桩过程中喷射流体的不同,高压旋喷工法一般可以分为:单管旋喷工法(单独喷射水泥浆)、二重管法(喷射水泥浆和压缩空气)、三重管法(喷射水、水泥浆、压缩空气)^[13-15]。单管旋喷工法是其中最简单的,也是应用最广泛的。

成桩半径计算的合理预测是单管旋喷工法施工过程中存在的一个问题。根据旋喷施工的具体过程,成桩半径的影响因素为:喷射流体的性质、旋喷参数、土质参数。目前单管旋喷工法成桩半径的计算方法主要分为2类:经验公式法、半理论半经验方法。Shibazaki根据室内试验结果提出了旋喷桩半径计算的经验公式,然而该方法中的计算参数缺乏较为明确的物理意义,并且很难确定,因此无法直接应用于中国的旋喷工程设计^[16]。半经验半理论方法基于紊动射流理论被提出并进行了

开发,目前中国外代表性的成果有:Modoni方法^[17]、Ho方法^[18]、Flora方法^[19]等。这类方法有一定的理论基础,可以较好地解释一些施工中的现象,然而其计算形式复杂,需要考虑的参数非常多,工程应用较为困难,取得的预测结果也不够合理^[20-22]。

本文从单管旋喷工法施工过程出发,同时考虑喷射能量与土体抵抗力,提出成桩半径的实用计算方法。该方法分别针对细粒土和粗粒土,建立成桩半径与喷嘴处喷射能量 E_n 、现场静力触探试验获得的锥尖阻力 q_c 和标准贯入试验获得的标贯击数 N_{SPT} 的定量关系。并通过对不同土质条件下成桩半径实测数据进行对比分析,以验证其合理性。

1 计算原理及步骤

1.1 计算原理

单管旋喷工法的成桩过程极其复杂,因而很难清楚了解其成桩机理。施工过程主要涉及的理论为流体力学理论和土体破坏理论。下页图1为单管旋喷工法的成桩示意^[23],成桩过程分为3个阶段:①高压射流的产生,首先水泥与水按照一定的比例混合形成水泥浆,然后通过高压泵泵送到喷头,并由很小的喷嘴喷出,形成具有较大破坏力的高压射流(泵送过程会损失一些能量);②高压射流与土体的相互作用会冲击破坏土体,同时与周围流体发生剧烈的能量交换,流体的流速也会不断减小,喷入的水泥浆会与土体混合形成水泥土混合物,同样也会有一部分土被置换出并与一部分水泥浆一起被排出

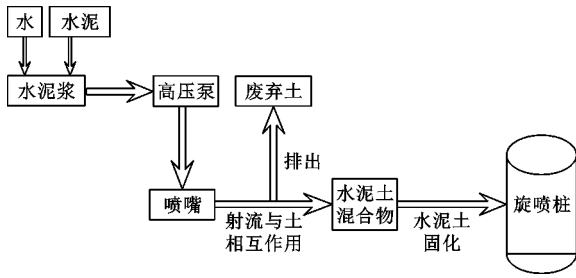


图1 单管旋喷工法成桩示意

Fig. 1 Schematic of column formation by single fluid jet ground system

(这部分排出的混合物一般称为废弃土);③水泥土固化,水泥土混合物发生硬化形成旋喷桩,旋喷桩的强度也会随固化时间的增加而变化。

图2为单管旋喷工法施工中高压射流与土体相互作用的示意。喷嘴出口处的流体速度为 v_0 ,喷嘴处高压射流的喷射能量为 E_n ,可以用来表征高压射流对土体的破坏能力;而土体也存在抵抗高压射流破坏的能力,一般可以用土体抵抗力 K 来表征^[19]。单管旋喷工法成桩半径的主要影响指标可以归纳为射流喷射能量和土体抵抗力。当其他条件相同时,喷嘴处高压射流所具有的能量越大,成桩半径越大;而土体抵抗破坏力越大,则成桩半径越小。此外,水泥浆射流的黏滞性对成桩半径也有一定影响,当其他条件相同时,黏滞性越大,射流从喷嘴喷出后的能量损失越多,对土体的破坏能力越弱,最终的成桩半径越小。

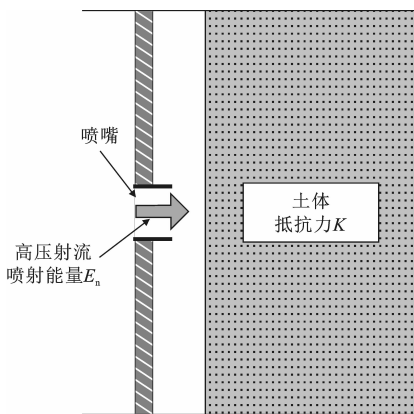


图2 单管旋喷工法施工中射流与土体相互作用

fig. 2 Jet-soil interaction in construction of single fluid system

综合考虑水泥浆射流性质、喷射能量 E_n 和土体抵抗力 K 对成桩半径的影响,提出如下实用经验公式估算单管旋喷工法的成桩半径 R_c ,即

$$R_c = R_{c0} \left(\frac{\alpha_f}{\alpha_{f0}} \right)^k \left(\frac{E_n}{E_{n0}} \right)^n \left(\frac{K}{K_0} \right)^l \quad (1)$$

式中: α_f 为流体性质影响系数,代表喷射流体性质对

成桩半径的影响; R_{c0} 、 α_{f0} 、 E_{n0} 、 K_0 均为常数; k 、 n 、 l 均为回归常数, k 取值0.1, n 取值0.2, l 取值-0.25。

(1) 确定流体性质影响系数 α_f

喷射流体的性质主要受水泥浆水灰比的影响,目前尚无理论计算方法。Modoni等通过对比研究水与水泥浆表观黏度,得到了水泥浆流体性质影响系数的估算方法^[17,21]。为满足工程应用需求,本文采用以下公式计算流体性质影响系数 α_f

$$\alpha_f = \sqrt{\frac{\mu_w / \rho_w}{\mu_g / \rho_g}} \quad (2)$$

式中: ρ_g 、 ρ_w 分别为水泥浆和水的密度(kg/m^3); μ_g 、 μ_w 分别为水泥浆和水的表观黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$), μ_w 一般取 $0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\mu_g = 0.007 W_c^{-2}$, W_c 为水泥浆的水灰比。

从式(2)可以看出,若喷射流体为高压水,则 α_f 的值为1。施工中常用的水灰比取值为1,对应 α_f 的值为0.465,即为本文计算中 α_{f0} 的取值。

(2) 确定喷嘴喷出高压射流的能量 E_n

根据流体连续性假设,首先利用水泥浆喷射流量和喷嘴直径计算高压射流在喷嘴出口处的速度 v_0 ,然后根据动能公式计算单位桩长喷嘴喷出高压射流的能量 E_n ,具体公式为

$$v_0 = \frac{4Q}{M\pi d^2} \quad (3)$$

$$E_n = \frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{8\rho_g Q^3}{\pi^2 M^2 d^4 v_s} \quad (4)$$

式中: Q 为水泥浆喷射流量(m^3/s); M 为喷嘴数; d 为喷嘴直径(m); v_s 为喷嘴提升速度(m/s); m 为流体质量, $m = \rho_g Q / v_s$ 。

(3) 确定土体抵抗力 K

土体抵抗力需采用具体的试验参数进行表征,本文取岩土工程勘察报告中常用的静力触探试验获得的锥尖阻力 q_c 和标准贯入试验获得的标贯击数 N_{SPT} 分别表示细粒土和粗粒土的土体抵抗力。因此,式(1)可以转变为式(5)和式(6)。

对于细粒土

$$R_c = R_{c0} \left(\frac{\alpha_f}{\alpha_{f0}} \right)^k \left(\frac{E_n}{E_{n0}} \right)^n \left(\frac{q_c}{q_{c0}} \right)^l \quad (5)$$

对于粗粒土

$$R_c = R_{c0} \left(\frac{\alpha_f}{\alpha_{f0}} \right)^k \left(\frac{E_n}{E_{n0}} \right)^n \left(\frac{N_{\text{SPT}}}{N_{\text{SPT0}}} \right)^l \quad (6)$$

式中: $q_{c0} = 1.5 \text{ MPa}$, $N_{\text{SPT0}} = 10$,为不同土体的抵抗力; E_{n0} 取为施工常用值 $10 \text{ MJ}/\text{m}$; R_{c0} 为当水灰比 $W_c = 1$, $E_n = E_{n0}$, $q_c = q_{c0}$ (或 $N_{\text{SPT}} = N_{\text{SPT0}}$)时,采用单管旋喷工法施工形成的旋喷桩半径,对于细粒土,

$R_{c0}=0.25\text{ m}$,对于粗粒土, $R_{c0}=0.45\text{ m}$ 。

单管旋喷工法成桩半径的影响因素众多,现有成桩半径计算方法中 Modoni 方法^[17]和 Flora 方法^[19]考虑的因素较全面,但形式复杂,不利于工程应用。其他如 Ho 方法^[18]和王志丰方法^[20]考虑的因素不够全面(如未考虑喷嘴提升速度等),因而造成的误差较大。从之前的分析可以看出,本文方法考虑的影响因素较为全面,同时计算原理及形式简单,工程实际应用价值较高。

1.2 参数分析

喷射能量 E_n 和土体抵抗力 K 共同作用影响单管旋喷工法成桩半径,喷射能量 E_n 代表高压射流对土体破坏的能力,而土体抵抗力 K 则代表土体抵抗高压射流破坏的能力。图 3、图 4 分别为单管旋喷工法在细粒土和粗粒土中成桩半径随喷射能量 E_n 和土体抵抗力 K (锥尖阻力 q_c 或标贯击数 N_{SPT}) 的变化情况。计算时水灰比取 1。

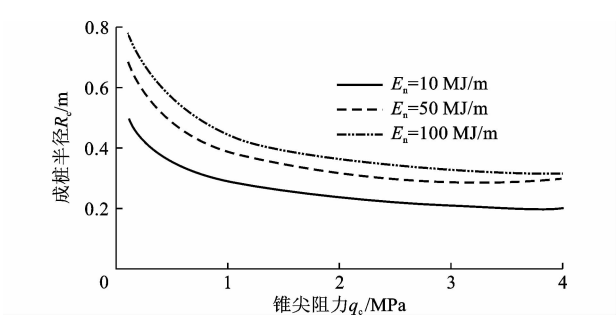


图 3 R_c 随 q_c 的变化
Fig. 3 Variation of R_c with q_c

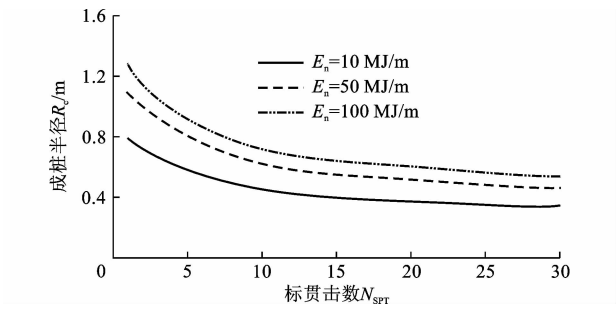


图 4 R_c 随 N_{SPT} 的变化
Fig. 4 Variation of R_c with N_{SPT}

由图 3、图 4 可以看出:成桩半径随土体抵抗力(锥尖阻力 q_c 或标贯击数 N_{SPT}) 的增大而迅速减小;喷嘴处喷射能量 E_n 越大,高压射流破坏力越强,则成桩半径越大。对比图 3 和图 4 还可以看出,相同条件下,单管旋喷工法在粗粒土中的成桩半径一般要高于细粒土中的成桩半径,这与实际情况相吻合。

1.3 计算步骤

- 综上所述,本文方法的具体计算步骤如下:
- (1)根据水泥浆水灰比 W_c 确定水泥浆密度 ρ_g 和水泥浆表观黏度 μ_g ,并利用式(2)确定流体性质影响系数 α_f ;
 - (2)根据旋喷施工参数中的水泥浆喷射流量 Q 、喷嘴直径 d 、喷嘴提升速度 v_s 、水泥浆密度 ρ_g ,利用式(4)确定单位桩长喷嘴喷出高压射流的能量 E_n ;
 - (3)将第 1 步得到的流体性质影响系数 α_f 和第 2 步得到的高压射流能量 E_n 和现场静力触探试验结果 q_c (或标贯击数 N_{SPT})代入式(5)或式(6),得到成桩半径计算值 R_c 。

2 现场实测数据分析

2.1 细粒土中实测数据分析

为了验证本文方法的合理性,搜集了一些现场实测数据进行对比分析。表 1 为文献[19]中黏性土中单管旋喷工法成桩半径的计算参数取值范围。根据本文方法计算步骤,参数 α_f 和 E_n 按照式(2)、式(4)计算得到。然后,将表 1 的计算参数代入式(5),同时取 R_{c0} 为 0.25 m ,最终可以得到成桩半径的计算值。

表 1 细粒土工程实例中的计算参数取值范围^[19]

| Tab. 1 Value ranges of parameters in calculation for the case in fine grained soils ^[19] | |
|---|-----------|
| 参数 | 取值范围 |
| W_c | 0.66~1.25 |
| α_f | 0.33~0.57 |
| $E_n/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-1})$ | 6.7~28.9 |
| q_c/MPa | 1.88~3.08 |

下页图 5 为黏性土中单管旋喷工法实例的成桩半径实测值与本文方法计算值的对比情况。如图 5 所示,实测半径的范围为 $0.19\sim0.32\text{ m}$,计算半径的范围为 $0.20\sim0.26\text{ m}$ 。由此可知,采用本文方法可以得到较为合理的成桩半径预测结果。

2.2 粗粒土中实测数据分析

为了验证本文方法在粗粒土中的适用性,选择文献[24]、[25]中的 2 个工程实例进行分析讨论。

下页表 2 为该工程实例计算参数取值范围,其中标贯击数 N_{SPT} 为 $12\sim15$,水灰比为 $0.9\sim1.1$,利用式(2)计算得到水泥浆影响系数 α_f 为 $0.43\sim0.51$, E_n 按式(4)计算得到。考虑到土质条件为粗粒土情况,取 R_{c0} 为 0.45 m ;同时将表 2 中的计算参数代入式(6),最终可得到成桩半径的计算值。

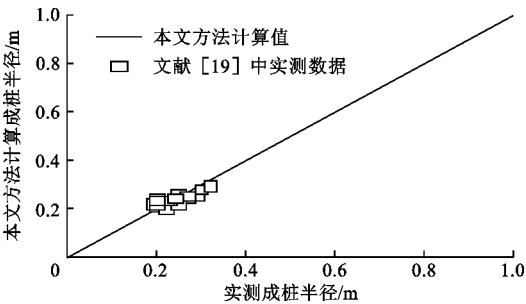


图5 成桩半径实测值与本文方法计算值对比(细粒土)

Fig.5 Comparison of measured and predicted data in this article of column radius (fine grained soil)

表2 粗粒土中工程实例的计算参数取值范围

Tab.2 Value ranges of parameters in calculation for the case in coarse grained soils

| 参数 | 取值范围 |
|-------------------------|-----------|
| W_C | 0.9~1.1 |
| α_f | 0.43~0.51 |
| $E_n/(MJ \cdot m^{-1})$ | 9.0~23.5 |
| N_{SPT} | 12~15 |

图6为粗粒土中单管旋喷工法实例的成桩半径实测值与本文方法计算值的对比情况。如图6所示,实测半径的范围为0.33~0.56 m,计算半径的范围为0.40~0.48 m。由此可知,从满足施工设计等需要出发,采用本文方法可以得到较为合理的成桩半径预测结果。

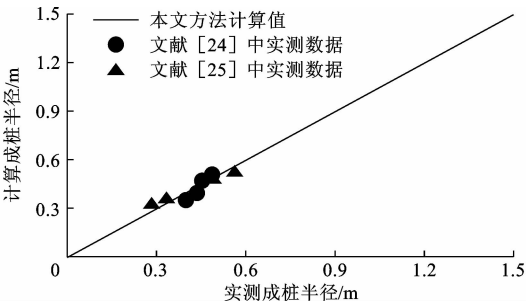


图6 成桩半径实测值与本文方法计算值对比(粗粒土)

Fig.6 Comparison of measured and predicted data in this article of column radius (coarse grained soil)

3 结 语

(1)基于对单管旋喷工法施工过程的理论分析,同时考虑喷射能量与土体抵抗力,提出简单实用的成桩半径计算方法。该方法分别针对细粒土和粗粒土情况,建立成桩半径与喷嘴处喷射能量 E_n 与锥尖阻力 q_c 和标贯击数 N_{SPT} 的定量关系。

(2)参数分析结果表明:成桩半径随土体抵抗力(锥尖阻力 q_c 和标贯击数 N_{SPT})的增大迅速减小;喷

嘴处喷射能量 E_n 越大,高压射流破坏力越强,则成桩半径越大;相同条件下,单管旋喷工法在粗粒土中的成桩半径一般要高于细粒土中的成桩半径。

(3)本文方法适用于单管旋喷工法成桩半径计算,下一步可以考虑在本文方法的基础上,加入压缩空气的影响,提出适用于二重管、三重管旋喷工法的成桩半径实用计算方法。

参考文献:

References:

[1] BURKE G K. Jet grouting systems: Advantages and disadvantages[C]// TURNER J P, MAYNE P W. Proceedings of Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems. Reston: ASCE, 2004: 1-12.

[2] WANG Z F, SHEN S L, HO C E, et al. Investigation of field installation effects of horizontal twin-jet grouting in Shanghai soft soil deposits [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(3): 288-297.

[3] LANARDI P. Ground improvement by means of jet-grouting[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Ground Improvement, 1997, 1(2): 65-85.

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

[5] 王志丰, 王亚琼, 谢永利. 单根水平旋喷桩施工引起地表隆起变形规律研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 117-123.

WANG Zhi-feng, WANG Ya-qiong, XIE Yong-li. Investigation on displacement law of ground upheaval caused by installing a horizontal jet grout column[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 117-123.

[6] OCHMAŃSKI M, MODONI G, BZÓWKA J. Numerical analysis of tunnelling with jet-grouted canopy[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(5): 929-942.

[7] 王志丰, 沈水龙, 谢永利. 水平旋喷桩施工引起周围土体变形分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1083-1088.

WANG Zhi-feng, SHEN Shui-long, XIE Yong-li. Analysis of soil deformation caused by installation of horizontal jet grout column [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1083-1088.

[8] 徐至均, 全科政. 高压喷射注浆法处理地基[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

XU Zhi-jun, QUAN Ke-zheng. Ground treatment with high pressure jet grouting method[M]. Beijing: China

- Machine Press,2004.
- [9] 刘 钟,柳建国,张 义,等.隧道全方位高压喷射注浆拱棚超前支护新技术[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):59-65.
- LIU Zhong, LIU Jian-guo, ZHANG Yi, et al. New technique of rotary horizontal jet grouting for arched tunnel pre-support[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 59-65.
- [10] 张 晓,杨建国,王运周,等.水平旋喷桩预支护在软弱黄土隧道中的试验研究[J].现代隧道技术,2010,47(1):36-40.
- ZHANG Xiao, YANG Jian-guo, WANG Yun-zhou, et al. Application of pre-supporting with horizontal jet grouting piles for a weak loess tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47(1): 36-40.
- [11] 梁 利,李恩璞,王庆国,等. MJS 工法在轻轨车站换乘通道中的工程实践[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):135-139.
- LIANG Li, LI En-pu, WANG Qing-guo, et al. Practice of MJS method in light railway inter change passage construction in Shanghai[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 135-139.
- [12] 安关峰,张洪彬,刘添俊.旋喷群桩复合地基承载特性的数值分析[J].岩土力学,2012,33(3):906-912.
- AN Guan-feng, ZHANG Hong-bin, LIU Tian-jun. Numerical analysis of bearing characteristics of composite subgrade reinforced by chemical churning pile groups[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 906-912.
- [13] WANG Z F, SHEN S L, HO C E, et al. Jet grouting for mitigation of installation disturbance[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Geotechnical Engineering, 2014, 167(6): 526-536.
- [14] 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.
- [15] SHEN S L, WANG Z F, SUN W J, et al. A field trial of horizontal jet grouting using the composite-pipe method in the soft deposits of Shanghai[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 35: 142-151.
- [16] SHIBAZAKI M. State of practice of jet grouting[C]// JOHNSEN L F, BRUCE D A, BYLE M J. Proceedings of the Third International Conference on Grouting and Ground Treatment. Reston: ASCE, 2003: 198-217.
- [17] MODONI G, CROCE P, MONGIOVI L. Theoretical modelling of jet grouting[J]. Géotechnique, 2006, 56(5): 335-347.
- [18] HO C E. Fluid-soil interaction model for jet grouting [C]// HURLEY T M, JOHNSEN L F. Grouting for Ground Improvement: Innovative Concepts and Applications. Reston: ASCE, 2007: 1-10.
- [19] FLORA A, MODONI G, LIPER 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.
- [20] 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 Zhi-feng, SHEN Shui-long, XU Ye-shuang. An approach to calculate diameter of jet-grouted column based on turbulent flow theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1957-1960.
- [21] 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.
- [22] MALININ A, GLADKOV I, MALININ D. Experimental research of jet-grouting parameters in different soil conditions[C]// TONON F, LIU X, WU W. GeoShanghai 2010 International Conference. Reston: ASCE, 2010: 49-54.
- [23] CROCE P, FLORA A. Analysis of single-fluid jet grouting[J]. Géotechnique, 2000, 50(6): 739-748.
- [24] CROCE P, FLORA A. Jet-grouting effects on pyroclastic soils[J]. Rivista Italiana di Geotecnica, 1998, 2: 5-14.
- [25] 龙纲要.影响旋喷桩桩径因素的探讨[J].化工矿产地质,2003,25(4):247-250.
- LONG Gang-yao. Approach to factors determining the diameters of rotating spraying piles[J]. Geology of Chemical Minerals, 2003, 25(4): 247-250.