

# 基于圆形断面自由紊动射流理论的旋喷桩直径计算方法

王志丰<sup>1, 2</sup>, 沈水龙<sup>1, 2</sup>, 许烨霜<sup>1, 2</sup>

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240; 2. 国家海洋工程重点试验室, 上海 200240)

**摘 要:** 基于圆形断面自由紊动射流理论, 提出了一种新的高压旋喷桩直径计算方法。考虑高压旋喷技术的施工过程, 旋喷桩直径主要与施工场地的土性条件以及施工时的旋喷参数有关。从高压旋喷技术机理来看, 高压水或水泥浆对土体的切割作用会产生一个切割距离, 考虑工程实际的需要, 该切割距离可以认为基本等于旋喷桩半径, 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、土性条件以及旋喷施工参数之间的关系。最后通过与现场实测数据的对比验证了该计算方法的实用性。

**关键词:** 旋喷桩; 射流; 直径; 预测方法

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)10-1957-04

**作者简介:** 王志丰(1986-), 男, 河南安阳人, 博士研究生, 主要从事地基处理、地下工程方面的研究。E-mail: whf\_x@163.com。

## An approach to calculate diameter of jet-grouted columns based on turbulent flow theory

WANG Zhi-feng<sup>1, 2</sup>, SHEN Shui-long<sup>1, 2</sup>, XU Ye-shuang<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Based on the theory of turbulent kinematic flows, a simple approach to predict the diameter of jet-grouted column is proposed. Considering the process of jet grouting, the diameter of the jet-grouted columns is related to in-situ properties of soil and the jetting parameters adopted during construction. Since the fluid with high speed is jetted out from a nozzle to erode the soil during jet grouting, and there exists an erosion distance produced in the soil, the diameter can be estimated from this erosion distance. Through the analysis of free jet from a round nozzle and soil erosion, the erosion distance is obtained. Thus, the relationship among column diameter, jet parameters and soil properties can be established. Moreover, comparison between the predicted results and the data from literatures are also presented, and the results are classified according to the different soil types, which suggests that the proposed method is applicable for most soil types.

**Key words:** jet-grouted column; jetting fluid; diameter; prediction method

## 0 引 言

随着中国基础建设的不断发展, 高压旋喷技术已经在地下工程中得到了广泛的应用, 如基坑围护桩、盾构机进出洞的加固等。高压旋喷技术是将水力采煤中的高压水射流技术的原理与化学注浆技术相结合, 以高压水泥浆液或高压水流喷射并冲击土体, 浆液与土粒相互混合, 在地层中经化学反应后形成坚固的圆柱状固结体(该加固体一般称为旋喷桩)<sup>[1-2]</sup>。但是高压旋喷技术施工设计方面长期存在着一个问题, 即旋喷桩直径的预测计算; 现有的一些计算方法大多数基于工程经验, 不确定性较大, 在一种地层中适用, 但在另一种地层中可能不适用。

考虑到旋喷桩的形成过程, 旋喷桩直径的影响因

素可以简单的分为两类: ①土性条件; ②旋喷施工参数。关于土性条件对旋喷桩直径大小的影响, 很多学者<sup>[2-3]</sup>从土的颗粒级配、不排水抗剪强度等方面进行了研究, 得到了旋喷桩直径随着土体不排水抗剪强度或土中细颗粒含量的增大而减小的定性结论。关于旋喷施工参数对旋喷桩直径大小的影响, 很多都是依据经验性的方法来考虑的, 如日本学者 Shibasaki<sup>[3]</sup>曾根据日本地层中的旋喷试验的结果提出过计算旋喷桩直径的经验公式, 然而这些经验方法由于缺乏较为明确的物理意义, 普适性较差, 因此并不能直接应用于旋喷施工设计中。

基于圆形断面自由紊动射流理论<sup>[4]</sup>, 并针对高压

旋喷技术的侵蚀破土机理,提出了一种预测旋喷桩体直径的计算方法。该方法建立了旋喷桩半径、土性条件以及旋喷施工参数之间的关系。然后通过实测数据的对比对该预测方法的实用性进行验证。

## 1 预测方法计算原理

图 1 为旋喷技术基本模式图。考虑高压旋喷技术的施工过程,对于一定条件下的施工参数,高压水泥浆对土体的切割作用会产生一个切割距离( $x_L$ )。由于钻喷杆尺寸是已知的,则旋喷桩半径可以通过该切割距离换算得到。从高压旋喷技术的机理分析来看,高压旋喷施工对土体的破坏主要涉及了两种理论,一种是流体力学的圆形断面自由紊动射流理论,另一种是土体破坏理论。通过对两种理论的联合分析,可以得到切割距离。

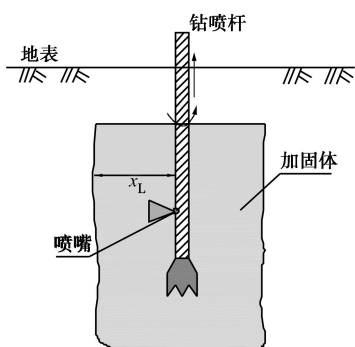


图 1 旋喷技术基本模式图

Fig. 1 Schematic view of jet grouting

### 1.1 圆形断面自由紊动射流

根据圆形断面自由紊动射流理论<sup>[4]</sup>,如图 2 所示,一股射流从出口直径为  $d_0$  的喷嘴喷出,出口速度为  $v_0$ ,则在射流流域中会形成 2 个区域,即初始段和主体段。在初始段,射流速度与出口速度相等,由于旋喷施工中的喷嘴直径很小,只有几个毫米,因而初始段的长度也很小,可以忽略;在主体段,射流轴线上速度满足以下分布模式<sup>[6]</sup>:

$$\frac{v_{x\max}}{v_0} = \alpha \frac{d_0}{x} \quad (1)$$

式中,  $v_{x\max}$  为射流轴线上某位置的速度 (m/s);  $v_0$  为喷嘴速度 (m/s);  $d_0$  为喷嘴直径 (m);  $x$  是射流轴线上该位置到喷嘴的距离 (m);  $\alpha$  为一无量纲常数,与射流性质相关。

### 1.2 计算原理

在高压旋喷施工中,当高速流体从喷嘴喷出后,会与周围流体发生剧烈的能量交换,因而流体的速度会迅速减小。为了使得旋喷施工中高速流体从喷嘴喷出后的速度分布模式满足圆形自由紊动射流理论,需要假设喷嘴喷出的流体与周围流体的性质相同。依据

圆形断面自由紊动射流理论,射流轴线上的速度  $v_{x\max}$  随着距喷嘴的距离  $x$  的增大会不断的衰减,当衰减到土体临界速度  $v_L$  时(土体临界破坏速度即射流能使土体产生破坏的最小速度),土体不再发生破坏,此时对应的  $x_L$  即为切割距离。

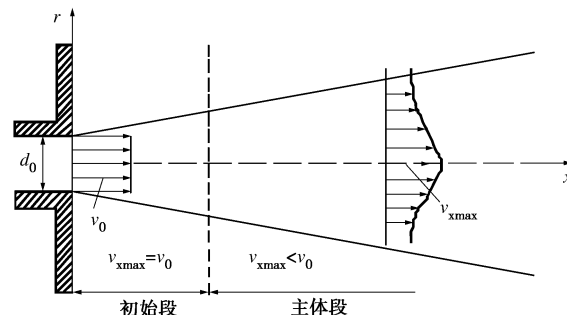


图 2 圆形断面紊动射流原理图

Fig. 2 Free jet from a round nozzle

Dabbagh 等<sup>[6]</sup>通过室内连续水射流破坏土体的试验,对土体的临界破坏速度  $v_L$  进行了研究,并给出以下经验关系:

$$v_L = \eta \sqrt{q_u / p_{\text{atm}}} \quad (2)$$

式中  $p_{\text{atm}}$  是标准大气压值 (kPa);  $q_u$  是土体抵抗力 (kPa), Dabbagh 等<sup>[6]</sup>试验时采用了土样的无侧限抗压强度,所以为了计算方便,可以采取以下方法获取  $q_u$ : 对于黏性土可以采用土体的无侧限抗压强度;对于无黏性土可以采用公式  $q_u = 2\tau_f = 2\sigma' \tan \phi'$ , 其中  $\tau_f$  为抗剪强度 (kPa),  $\sigma'$  为有效应力 (kPa),  $\phi'$  为有效摩擦角;  $\eta$  是一个特征速度,与土性条件相关 (m/s)。

公式 (2) 代入公式 (1) 得到

$$x_L = \frac{\alpha d_0 v_0}{\eta \sqrt{q_u / p_{\text{atm}}}} \quad (3)$$

喷嘴的出口速度可以由以下公式得到

$$v_0 = \frac{4Q}{M\pi d_0^2} \quad (4)$$

式中,  $M$  为喷嘴个数;  $Q$  为水泥浆流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

公式 (4) 代入公式 (3) 可得

$$x_L = \frac{\alpha}{\eta} \frac{4Q}{M\pi d_0 \sqrt{q_u / p_{\text{atm}}}} \quad (5)$$

考虑钻杆直径为  $D_0$  (m), 则预测的旋喷桩半径  $R$  可由下式得到

$$R = \frac{D_0}{2} + x_L = \frac{D_0}{2} + \frac{\alpha}{\eta} \frac{4Q}{M\pi d_0 \sqrt{q_u / p_{\text{atm}}}} \quad (6)$$

上述计算公式可以考虑土体性质,包括强度、流体性状特征、施工参数中的流量、喷嘴数量与直径等。其余的施工参数,如提升速度及旋转速度,根据 Ho<sup>[5]</sup> 的研究结果,认为旋转速度对高压射流切割距离的影响较小,在常用旋喷工法的施工条件下可以忽略。

2 参数分析

根据前面的分析可知, 为了获得最终的旋喷桩直径,  $\alpha$  和  $\eta$  是最重要的两个未知参数, 参数  $\alpha$  代表了射流轴向最大速度随着距离增大的衰减能力, 参数  $\eta$  代表了一般情况下的土体临界破坏速度, 两个参数理论上较难获得, 因而为了分析方便, 引进一个新的参数  $a$  ( $(\text{m/s})^{-1}$ ), 如下式:

$$a = \frac{\alpha}{\eta} \quad (7)$$

参数  $a$  表征了射流性质 (对应于旋喷施工中有无压缩空气包裹) 与土体的物理性质。

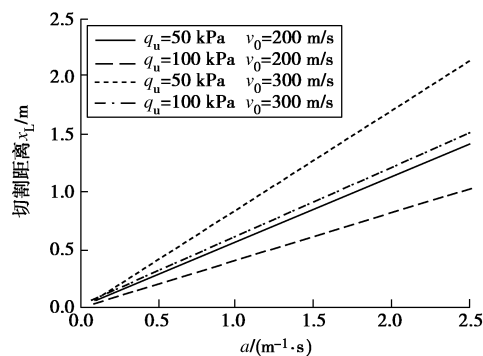


图 3 参数  $a$  对切割距离的影响

Fig. 3 Influence of parameter  $a$  on erosion distance

图 3 给出了当喷嘴直径为 2 mm 时, 计算得到的参数  $a$  对切割距离的影响结果, 从图 3 可以看出, 切割距离随着参数  $a$  的增大呈线性增大, 另外切割距离也随着射流出口速度的增大而不断增大, 这可以解释为出口速度越大, 高速流体的破坏能量也越大, 相应产生的切割距离也会越大。

图 4 给出了当参数  $a$  为 1 时, 计算得到的土体抵抗力对切割距离的影响结果, 从图 4 可以看出, 切割距离随着土体抵抗力的增大而迅速的减小。这也说明了在旋喷施工中, 可以通过同时增大喷嘴直径及流体的喷出速度以达到增大旋喷桩直径的目的。

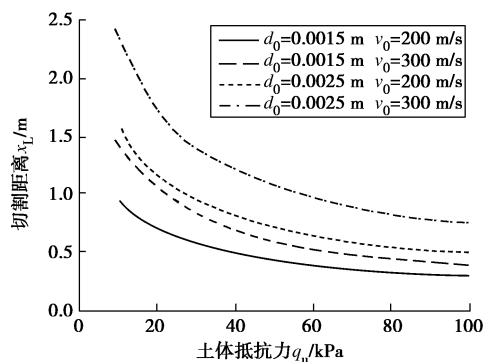


图 4 土体抵抗力对切割距离的影响

Fig. 4 Influence of soil resistance on erosion distance

3 实测数据对比

为了验证该预测方法的可行性, 将不同土性条件和施工参数下的实测数据与采用本文方法所预测的结果进行对比分析。由于所参考的文献中均未给出钻喷杆直径 ( $D_0$ ) 的具体数值, 考虑到旋喷施工时常用的钻杆直径范围大致为 60~120 mm, 因而本文计算时  $D_0$  采用 100 mm, 另外计算时采用的一些其他的基本数据见表 1。

表 1 计算时采用参数的取值范围

Table 1 Parameters used in approach

土性条件	$q_u/\text{kPa}$	$Q/(10^{-3}\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	$d_0/\text{mm}$	$M$
软黏土	65~108	1.33~1.58	2.2~3.0	1
黏质粉土	50~51	1.33~1.58	2.2~3.0	1
粉砂	80~152	1.58~2.5	1.7~3.8	1~2

图 5 给出了实测数据与预测数据的对比情况, 三重管法 (双高压) 施工时, 不同的土质条件对应不同的  $a$  值: 粉质黏土 ( $a=1.27$ ), 软黏土 ( $a=1.79$ )。而单管法施工时, 土质为粉砂时  $a$  的值为 0.21。

参数  $a$  可以采用回归分析的方法获得。本文基于文献[7]中的数据, 给出了三重管法 (双高压) 参数  $a_{3d}$  与黏粒含量之间较为明显的线性关系:

$$a_{3d} = 0.711 + 0.021M_c \quad (8)$$

式中,  $M_c$  为黏粒含量 (粒径小于 5  $\mu\text{m}$ ) (%)。

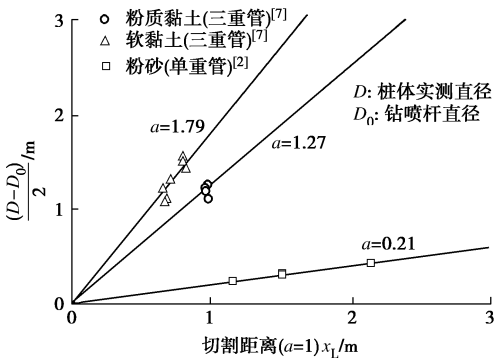


图 5 实测数据与预测数据的对比

Fig. 5 Comparison between predicted and measured data

考虑单重管法、二重管法及三重管法施工技术的原理, 单重管法依靠高压水泥浆切割土体, 二重管法依靠高压空气包裹高压水泥浆切割土体, 三重管法则依靠高压空气包裹高压水切割土体。三重管法 (双高压) 施工时包含了高压空气分别包裹高压水、高压浆的两次切割作用, 因而可以获得更大的桩径。已有文献研究表明, 同等条件下, 相对于水泥浆切割土体而言, 高压水的切割效果提高约 75%<sup>[8]</sup>, 高压空气包裹高压水泥浆的切割效果提高约 60%<sup>[9]</sup>。高压空气及高压水对旋喷桩直径的增大作用均可以反映在参数  $a$

上。为了实际应用方便,本文假设采用三重管法(双高压)可以提升切割效果 30%, 参数  $a_1$  (单重管法)、 $a_2$  (二重管法)  $a_3$  (三重管法) 可以经过简单地换算得到:  $a_3 = a_{3d}/1.3$ ,  $a_2 = a_3/1.75$ ;  $a_1 = a_2/1.6$ , 见图 6。

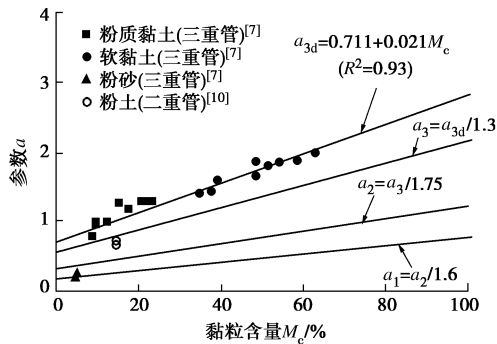


图 6 参数  $a$  随黏粒含量变化图

Fig. 6 Variation of parameter  $a$  with content of clay

## 4 结 语

基于圆形断面自由紊动射流理论,并结合分析高压旋喷技术施工中的土体破坏情况,提出了一种新的高压旋喷桩直径计算方法。该方法建立了旋喷桩半径、土性条件以及旋喷施工参数之间的相互关系。为了便于分析,计算方法中引入一个新的参数  $a$ ,其主要影响因素为喷射流体性质和现场土性条件,并对计算方法中用到的相关参数如喷嘴直径、流体出口速度、土体抵抗力等进行了参数分析。最后将不同土性条件及旋喷施工参数下的实测数据与采用本文方法所预测的结果进行对比分析,结果表明,三重管法中参数  $a$  与土的黏粒含量有着较好的线性关系。通过改变参数  $a$  的值可以将该方法应用于单重管、二重管等更多的旋喷施工方法中。

## 参考文献:

[1] 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 improvement with jet grouting method[M]. Beijing: China Machine Press, 2004. (in Chinese))

[2] CROCE P, FLORA A. Analysis of single fluid jet-grouting[J]. Géotechnique, 2000, **50**(6): 739 - 748.

[3] SHIBAZAKI M. State of practice of jet grouting[C]// Grouting 2003: Grouting and Ground Treatment, ASCE, Florida, 2003: 198 - 217.

[4] 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 Pei-qing. Theory of turbulent kinematic flow[M]. Beijing: Beihang University Press, 2008. (in Chinese))

[5] HO C E. Fluid-soil interaction model for jet grouting[C]// Geo-Denver 2007: New Peaks in Geotechnics, ASCE, Colorado, 2007: 1 - 10.

[6] DABBAGH A A, GONZALEZ A S, PENA A S. Soil erosion by a continuous water jet[J]. Soils and Foundations, 2002, **42**(5): 1 - 13.

[7] SHEN S L, LUO C Y, XIAO X C, et al. Improvement efficacy of RJP method in Shanghai soft deposit[C]// Advances in ground improvement: research to practice in the united states and China, ASCE, Florida, 2009: 170 - 178.

[8] MODONI G, CROCE P, MONGIOVI L. Theoretical modelling of jet grouting[J]. Géotechnique, 2006, **56**(5): 335 - 347.

[9] HO C E. Analysis of deep jet grouting field trial in clay[C]// Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support, ASCE, Florida, 2009: 233 - 240.

[10] DURGUNOGLU H T, KULAC H F, ORUC K, et al. A case history of ground treatment with jet grouting against liquefaction for a cigarette factory in Turkey[C]// Grouting and Ground Treatment, ASCE, Louisiana, 2003: 1 - 12.