

基于 ANSYS 的压密注浆桩半径与 注浆压力关系的研究

胡焕校, 周丁, 李忠诚

(中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南, 长沙 410083)

摘要: 采用 ANSYS 数值模拟软件和 Drucker - Prager 屈服准则, 进行合理的假设并建立压密注浆桩在土体中的压密模型; 在工程中常用的压力范围内, 通过改变注浆压力的大小, 模拟注浆压力对压密注浆桩半径的影响, 研究压密半径随注浆压力的变化规律, 并采用曲线拟合得到压密半径与注浆压力的关系式。结合现场压密注浆桩试验, 得到与数值模拟基本一致的结论, 所得的成果可为现场施工提供理论参考。

关键词: 地基处理; 压密注浆桩; 注浆压力; ANSYS 软件

中图分类号: TU472.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0197-05

Study on relationship between radius of compaction grouting pile and grouting pressure based on ANSYS

HU Huanxiao, ZHOU Ding, LI Zhongcheng

(School of Geosciences and Info - Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The paper used ANSYS numerical simulation software and Drucker - Prager yield criterion and carried out reasonable assumption so as to establish compaction model of compaction grouting pile in the soil; it studied the influence of grouting pressure on compaction grouting pile radius through changing the grouting pressure within the common scope of the pressure used in engineering, and obtained the relation between the compaction radius with grouting pressure by means of curve fitting. Combining the field test of compaction grouting pile, the paper got the conclusion which is basically consistent with the numerical simulation. The results can provide a reference for site construction.

Key words: foundation treatment; compaction grouting pile; grouting pressure; ANSYS software

压密注浆桩法是用特制高压泵将低塌落度注浆材料通过注浆管在高压下压入到指定地层位置, 形成一定直径且具有较高强度的桩体, 同时使压密注浆桩间土体内的孔隙受到挤压变小, 与周围土体共同形成桩土复合地基, 有效提高地基承载力^[1-2]。通常情况下, 桩径随着注浆压力的增大而增大, 加固效果也随之增强。然而, 对于确定压密注浆桩半径的理论还很缺乏, 而桩径是保证加固范围以及工程成本的关键因素之一。由于浆液在裂隙中的扩散实际上是不规则的, 所以从理论上精确计算压密注浆桩的半径很困难。在注浆工程中常常采用经验数据, 并于注浆之前, 先在类似地层进行注浆试验^[3-5]。本文基于 ANSYS 的数值模拟, 在常见的

土层参数中, 研究压密注浆桩半径与注浆压力的关系, 为压密注浆桩法提供理论参考。

1 ANSYS 的数值模拟研究

1.1 模型假设条件

本文主要研究: 土层中压密注浆桩半径与注浆压力的关系。由于土层中的影响因素众多, 对所有的相关因素都进行讨论并不现实, 为了得到普遍性的结果, 简化计算模型, 在岩土工程问题上, 进行合理的假设是可行的^[6-7]。因此, 本计算模型的假设如下:

(1) 土体是在地下的具有各向同性的、均匀的空间半无限体;

收稿日期: 2015-07-10; 修回日期: 2015-08-09

作者简介: 胡焕校(1968-), 男, 浙江慈溪人, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事勘察与基础工程的教学及研究工作。

通讯简介: 周丁(1991-), 男, 江西余干人, 硕士研究生, 研究方向为基础工程。

(2) 土体在不受任何外加荷载的情况下是稳定的,周围的土体看作是连续的弹塑性体;

(3) 土体所受的荷载为静力荷载,周期次数、循环荷载以及它们对材料的影响均忽略不计;

(4) 注浆材料在未成型前具有比较低的力学特性,一般情况,在压密注浆桩的注浆过程中不考虑注浆材料自身产生或承受应力,直接对周围的土体进行计算;

(5) 在模拟计算中,不考虑地下水和初始地应力的影响;

(6) 压密注浆桩的形状按均匀的圆柱体考虑。

1.2 分析模型的确定

根据相关工程经验和理论分析,模型选择为圆柱体^[8],模型水平方向的边界根据最大注浆压力对土体的影响确立为3m,初始钻孔孔径相对于模型忽略不计。根据以上假设条件,建立压密注浆桩计算简图,如图1所示。

其中 P 为注浆压力,考虑到地下土体复杂的特性,分布极其不规则,给软件模拟带来一定的困难。结果收敛可能有一定的误差,所以为了达到求解结果的精确性,本文选取连续介质的大变形理论进行计算,即采用能够处理包括材料非线性和几何非线性问题的计算方法^[9]。压密注浆桩的模型类似厚壁圆筒受内压的模型,出于实际情况的考虑,简化为平面问题,如图2所示。

本文所考察的压密注浆桩桩周土体所承担的荷载假设是一次性施加的,故对土体采用理想弹塑性模型即可满足实际要求。据此选择理想弹塑性本构关系作为土体本构关系,并选用ANSYS自带的Drucker-Prager屈服准则模型来考察土体的弹塑性特征。土体的有限元计算采用表1有限元计算参数。

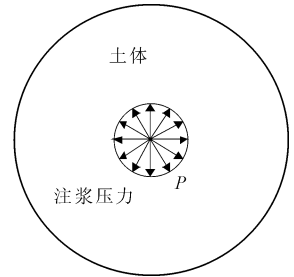
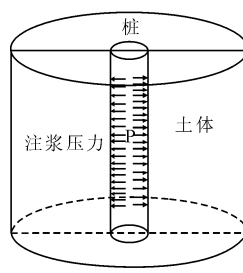


图1 压密注浆桩计算简图 图2 压密注浆桩平面计算简图

表1 理想土体有限元计算参数

弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/($^{\circ}$)
34	0.30	1 680	30	20

1.3 实体模型及材料属性的确定

根据实际的工程情况选择孔径为50 mm,选择3 m范围内周围土体作为考察对象。确定土体的参数(表1)为:弹性模量为34 MPa,泊松比为0.30,密度为1 680 kg/m^3 ,黏聚力为30 kPa,内摩擦角为20 $^{\circ}$ 。考虑到模型的对称性,实际分析过程只需选取1/4对称结构即可。

1.4 对有限元模型施加荷载及求解设置

一般情况下,新的分析(ANTYPE)使用NEW ANSYS;分析类型(ANTYPE)选择STATIC(静态)。大变形或大应变选项(NLGEOM):此模型会产生大应变,故选择ON。

工程中注浆设备的注浆压力,一般维持在0~4 MPa之间。因此,可分别在注浆孔周围施加1、2、3、4 MPa 4个不同的注浆压力,并设置好求解选项,进行分析求解。

1.5 有限元模型求解结果及分析

当注浆压力为1、2、3、4 MPa时,对有限元模型进行加载后,分析结果分别如图3、4、5、6所示。

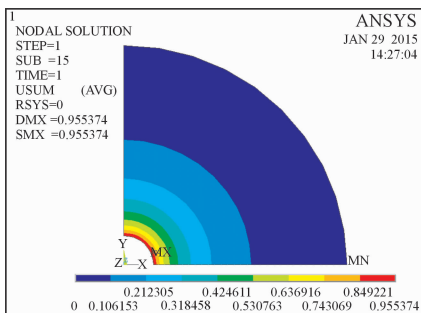


图3 1 MPa 压力时的位移云图

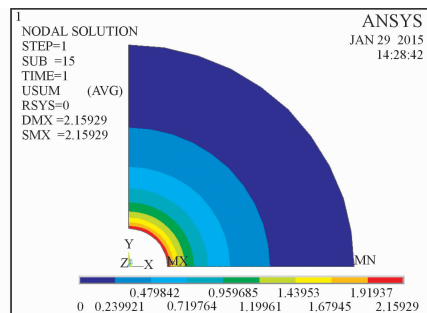


图4 2 MPa 压力时的位移云图

通过以上模拟结果分析可知,当注浆压力分别从1、2、3、4 MPa逐渐增大时,所产生的压密注浆桩

的半径也依次增大,分别为0.096、0.216、0.363、0.394 m。

通过以上这 4 组数据可以看出:注浆桩的半径随注浆压力增大,但并不是线性变化,而是一种非线性的增加。为找到更精确的规律,增加试验组数,减

小注浆压力差值:从 0 ~ 4.6 MPa 注浆压力,每隔 0.2 MPa 进行一次模拟试验,其他参数均保持不变,从而分别得到相对应的 24 个压密半径,见表 2。

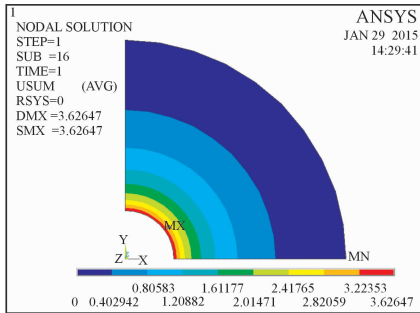


图 5 3 MPa 压力时的位移云图

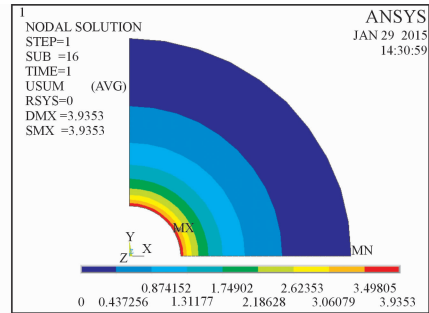


图 6 4 MPa 压力时的位移云图

表 2 数值模拟中压密半径随注浆压力的变化表

注浆压力/MPa	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
压密半径/m	0	0.007	0.025	0.048	0.107	0.095	0.121	0.146	0.170	0.192	0.216	0.251
注浆压力/MPa	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6
压密半径/m	0.286	0.320	0.342	0.363	0.373	0.378	0.383	0.389	0.394	0.398	0.400	0.402

为使数据更加直观,将这 24 组数据绘制成注浆压力 - 压密半径曲线,如图 7 注浆压力 - 压密半径曲线所示。

曲线进行拟合,得到:

$$R = 0.0116P^2 + 0.0905P - 0.0076$$

当注浆压力从 2 ~ 4.6 MPa 时,采用对数函数对曲线进行拟合,得到:

$$R = 0.2302 \ln p + 0.0915$$

从而得到注浆压密桩的桩径与注浆压力的数学关系式。

2 现场试验研究

2.1 工程概况

某水库工程中地下水类型主要为第四系孔隙水,含水层为松散砂层,沿泄洪洞轴线埋深 0.89 ~ 1.52 m。经对地表水(河水)、地下水、泉水分类取样分析,水质类型均为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}^{2+}$ 型水,属低矿化度淡水,环境水对混凝土无侵蚀性。

压密注浆桩试验场地主要地层为第四系砂层,经室内颗分试验,粒径在 0.5 ~ 0.25 mm 之间的占 0 ~ 20%,粒径在 0.25 ~ 0.075 mm 之间的占 60% ~ 85%。砂土的弹性模量为 34.1 MPa,泊松比为 0.30,黏聚力为 0,内摩擦角为 20°。

2.2 以注浆压力为变量进行现场试验

在常规的注浆过程中,注浆压力是一个对注浆效果影响较大的因素。

通过改变注浆压力,一般可以形成不同直径的桩。根据实际工程经验,注浆压力通常控制在 2 ~ 4

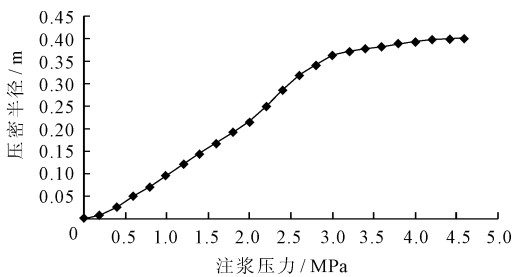


图 7 注浆压力 - 压密半径坐标曲线

通过图 7 注浆压力 - 压密半径曲线可以直观的看出:当注浆压力从 0 开始时,压密半径随压力的增大而增大并且成线性变化;当注浆压力从 2 MPa 开始增加时,此时所对应的压密注浆桩的半径显著增加;当注浆压力达到 3 MPa 时,此时继续增加注浆压力,所对应的压密半径增加有显著的减缓趋势;当到达 3.5 MPa 以后,变化更缓;3.8 ~ 4.6 MPa 之间,压密半径还在增加,但增加的幅度已经极小了。

针对以上所得数据,采用曲线拟合的方法,进一步研究并分析注浆压力与压密半径之间的关系。通过曲线图可以清晰看出两者的变化情况,由此分段对曲线进行拟合分析,所得结果如下:

当注浆压力从 0 ~ 2 MPa 时,采用多项式函数对

MPa 压力条件下。因此,现场试验分别以 2、2.5、3、4 MPa 的注浆压力进行压密注浆试验,待桩体达到凝结时间要求后,对试验桩体分别采取开挖检测的手段,并测量其桩径。得到不同注浆压力下桩径的大小如图 8、9、10 和 11 所示,具体数据如表 3 现场试验的注浆压力与压密桩径所示。



图 8 2.0 MPa 的压密
直径 0.501 mm



图 9 2.5 MPa 的压密
直径 0.603 m



图 10 3.0 MPa 的压密
直径 0.693 m



图 11 4.0 MPa 的压密
直径 0.817 m

表 3 现场试验的注浆压力与压密直径

注浆压力/MPa	2	2.5	3	4
压密直径/m	0.501	0.603	0.693	0.817

从表 3 现场试验的注浆压力与压密桩径可以看出,压密注浆桩的直径是随注浆压力的增大逐渐变大的,但并不是线性关系,从 2~4 MPa 的压力下,压密注浆桩的直径从 0.501 m 变为 0.817 m。

2.3 对数值模拟试验结论和现场试验结果进行对比分析

现场试验的土体的参数中除粘聚力为 0,与数值模拟的参数不一致外,其余包括弹性模量、泊松比、内摩擦角在内的参数均与前文所述数值模拟中采用的理想参数基本一致,并且黏聚力对压密注浆桩的半径的影响很小,可以忽略不计,故可以采用数值模拟对此处工程进行模拟分析。

(1) 采用 2 MPa 注浆压力时:

$$R = 0.2302 \ln p + 0.0915$$

$$= 0.2302 \ln 2 + 0.0915 = 0.2511 (\text{m})$$

(2) 采用 2.5 MPa 注浆压力时:

$$R = 0.2302 \ln p + 0.0915$$

$$= 0.2302 \ln 2.5 + 0.0915 = 0.3024 (\text{m})$$

(3) 采用 3 MPa 注浆压力时:

$$R = 0.2302 \ln p + 0.0915$$

$$= 0.2302 \ln 3 + 0.0915 = 0.3444 (\text{m})$$

(4) 采用 4 MPa 注浆压力时:

$$R = 0.2302 \ln p + 0.0915$$

$$= 0.2302 \ln 4 + 0.0915 = 0.4106 (\text{m})$$

由算得的半径数据转化为直径。

通过表 4 中数据与表 3 现场试验的注浆压力与压密桩径,可以得知:数值模拟结果与现场试验结果基本相符。因此,模拟结果准确可靠。

2.4 压密注浆桩效果检测

按照设计完成所有注浆桩的施工,分别以标准贯入试验、地质雷达扫描测试、原状砂样干密度检

测、桩身成桩情况开挖检测、桩身强度检测等测试方法对压密注浆桩的处理效果进行检测。

表 4 数值模拟试验中注浆压力对应的压密直径

注浆压力/MPa	2	2.5	3	4
压密直径/m	0.502	0.605	0.689	0.821

通过原状砂样对比测试、标准贯入实验、地质雷达测试、钻孔取芯等多种方法,其结果表明,采用施工压密注浆桩能对桩周边一定半径内的砂层,起到挤压密实作用,砂相对密度均能达到 0.75 的设计标准。通过桩身的材料强度测试和室内配比试验,桩身的抗压强度大于 10 MPa。

3 结 语

压密注浆桩是一种新型的地基处理方法,其不同于传统的压密注浆法,在处理砂土或黏土地基时拥有良好的处理效果,可以在民用建筑工程、水库大坝、高速公路、高速铁路等工程中广泛应用。本文分别通过数值模拟分析以及工程试验研究,对压密注浆桩的压密过程中桩的半径和注浆压力的关系进行了研究,得到以下成果:

(1) 利用 ANSYS 数值模拟,保持土体其他参数不变时,根据实际工程一般所使用的注浆压力,分析注浆压力对压密注浆桩半径的影响,得到压密注浆桩半径随注浆压力的变化曲线。

(2) 现场试验证明:通过改变注浆压力大小,在试验平台的地基内注入低塌落度的水泥粘土细石砂

浆,能形成与数值模拟试验基本相符的结果。

(3)采用压密注浆桩处理的实际工程,通过各种检测手段都表明其处理效果良好,完全满足工程要求。

参考文献:

- [1] 王祖平. 可控压密灌浆加固地基材料的研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
- [2] 贺茉莉,彭环云. 地质雷达在可控压密注浆桩地基加固效果检测中的应用[J]. 水利建设与管理, 2014(11): 52 - 55.
- [3] 陈雁,李志文. 压密注浆桩处理地基技术的应用[J]. 工程建设, 2014, 46(3): 26 - 28 + 34.
- [4] 张忠苗,邹健,何景愈,等. 考虑压滤效应下饱和黏土压

密注浆柱扩张理论[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(11): 1980 - 1984.

- [5] Nichols S C, Goodings D J. Physical model testing of compaction grouting in cohesionless soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 126(9): 848 - 852.
- [6] 彭振斌,胡焕校,许宏武. 注浆工程设计计算与施工[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1997.
- [7] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1996.
- [8] 贾红光. 基于 ANSYS 的厚壁圆筒的弹塑性应力分析[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2010, 28(3): 8 - 12.
- [9] 李妍. 基于 ANSYS 软件的接触问题分析及在工程中的运用[D]. 长春:吉林大学, 2004.

(上接第 196 页)

- [5] 常军. 在役桥梁结构损伤位置识别的综合指标方法研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 87 - 90.
- [6] Brownjohn J M W, Moyo P, Omenzetter P et al. Lessons from monitoring the performance of highway bridges [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2005, 12(3 - 4): 227 - 244.
- [7] Hera A., Hou Z.. Application of wavelet approach for ASCE structural health monitoring benchmark studies [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1): 96 - 104.
- [8] 李国强,李杰. 工程结构动力检测理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [9] 周奎,刘义,缪润翰,等. 基于抗弯刚度和柔度曲率的小比例 U 形梁模型损伤识别[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 189 - 192.
- [10] 李胡生,宋子收,周奎,等. 基于模态柔度差曲率的梁结构损伤识别[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2010(9): 75 - 80.

- [11] 付想平,彭斌,黄煜辉,等. 基于环境激励的砖砌体弹性模量识别[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 134 - 137.
- [12] 安永辉,欧进萍. 大跨度钢桁桥模型的精细化损伤定位模拟和试验研究[J]. 计算力学学报, 2011, 28(5): 730 - 736.
- [13] 谈政,张华,傅玉珍. 基于正则化频率变化率的排架渡槽支撑体系损伤定位研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 28 - 32.
- [14] 孙增寿,张耀,王希东. 基于运营环境和提升小波变换的桥梁损伤检测研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(6): 718 - 724.
- [15] 钟儒勉,宗周红,郑沛娟,等. 基于节点曲率和小波分析的梁式桥多尺度损伤识别[J]. 振动与冲击, 2015, 34(12): 108 - 114.
- [16] 姚京川,杨宜谦,王澜. 基于 Hilbert - Huang 变换的桥梁损伤预警[J], 2010, 31(4): 46 - 52.