

基于土体 $\varepsilon - p$ 曲线模型的压密注浆影响半径研究

胡焕校¹, 张剑¹, 杨万松¹, 孙端阳², 陈佳乐¹

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410006; 2. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 根据压密注浆过程中注浆体周围土体的非线性压缩特性建立 $\varepsilon - p$ 曲线模型, 该曲线模型的参数可以通过常规试验确定。基于压密注浆的圆柱形孔扩张模型, 建立考虑土体非线性压缩特性的压密注浆影响半径理论公式, 压密注浆的影响半径与土体本身的压缩特性、注浆压力、注浆量、注浆深度相关。开展压密注浆现场试验, 建立描述该试验场地土体的 $\varepsilon - p$ 曲线模型, 记录压密注浆现场施工参数, 并对该试验场地压密注浆理论影响半径进行计算, 最后通过对在压密注浆孔不同距离处土体所受到的土压力监测结果及加固效果进行分析, 验证压密注浆影响半径理论公式的合理性。该压密注浆影响半径理论公式可以确定压密注浆的加固范围, 在压密注浆的设计施工中具有一定的指导意义。

关键词: 压密注浆; 土体 $\varepsilon - p$ 曲线模型; 非线性压缩; 影响半径; 现场试验

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0195-06

Influence radius of compaction grouting based on soil $\varepsilon - p$ curve model

HU Huanxiao¹, ZHANG Jian¹, YANG Wuansong¹, SUN Duanyang², CHEN Jiale¹

(1. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410006, China;

2. China Design Group Co., Ltd., Nanjin 210000, China)

Abstract: Based on the nonlinear compression characteristics of the soil around the grouting in the process of compaction grouting, the soil $\varepsilon - p$ curve model was established, and the parameters of the curve model were determined by the conventional test parameters. The compaction grouting expansion process was simplified to the cylindrical hole expansion model, derived the theory about influence radius of compaction grouting. The influence radius of compaction grouting is related to the compression characteristics of soil itself, grouting pressure, grouting quantity and grouting depth. From the field test of compaction grouting, we established the $\varepsilon - p$ curve model describing the soil of the compaction grouting test site, recorded the construction parameters of compaction grouting, calculated the theoretical influence radius of the compaction grouting in the test site, analyzed the results of soil pressure monitoring and reinforcement effect at different distances of grouting holes, and verified the reasonableness of the theoretical formula of the influence radius of compaction grouting. The influence radius of compaction grouting can be used to determine the reinforcement range of grouting, and it has certain guiding significance in the design and construction of compaction grouting.

Key words: compaction grouting; soil $\varepsilon - p$ curve model; nonlinear characteristics of compression process; influence radius; field test

1 研究背景

压密注浆技术通过注浆设备将低塌落度浆料压入到指定地层位置, 并随着浆料不断注入, 注浆压力

升高, 注浆孔穴被扩张, 周围的土体不断被挤密压缩, 在注浆过程结束后, 土体的强度伴随孔隙水压力的消散得以提高, 浆料固结成圆柱形或葫芦形的均质桩固结体, 形成桩土复合地基^[1-5]。

收稿日期: 2018-12-17; 修回日期: 2019-04-01

作者简介: 胡焕校(1968-), 男, 浙江慈溪人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地基基础、注浆方面教学研究工作。

通讯作者: 张剑(1995-), 男, 甘肃武威人, 在读硕士研究生, 主要研究方向岩土工程。

了解压密注浆对土体的影响范围是确定压密注浆的加固范围以及保证工程质量的关键因素,目前,人们对于压密注浆过程中浆-土的作用机理还不是很清楚,一些学者对此进行了研究。Yang Xiaoli 等^[6]利用常规三轴压缩试验建立的弹塑性软化模型,提出了土体应变软化阶段的合理屈服函数,并给出了针对软土的压密注浆压力的解析解;Shrivastava 等^[7]认为,压密注浆过程中,侧向土体会对浆体产生限制效应,限制效应在浆-土交界面处很强烈,并随着径向距离和时间的增加而逐渐减弱;张忠苗等^[8]通过室内模拟试验对不同注浆压力下浆体的影响变化规律进行研究,得到了注浆压力增大,则浆体影响范围显著增大,周围土体密实度提高的规律;蒋邵轩等^[9]利用 ABAQUS 有限元软件针对柱形孔扩张模型进行数值模拟研究,分析了土体物理力学参数对孔压力-扩张曲线等的影响;王广国等^[10]提出了压密注浆在不排水条件下饱和黏土扩散半径理论公式;巨建勋^[11]建立了压密注浆的柱形扩散模型,并采用有限元的方法对压密注浆的作用机理进行模拟,得到浆液的影响半径的变化规律;周子龙等^[12]通过离散元法对不同注浆压力作用下浆体对土体压密的动态过程和规律进行研究,得到 0.5 m 内土体最易受影响,变形速率最快的结论。可以看出,目前针对压密注浆对土体的影响范围的结论大多是定性或者半定量的,并且注浆体周围的土体压缩表现出非线性特性。因此,本文建立了描述土体非线性压缩的 $\varepsilon-p$ 曲线模型,该曲线模型的参数可以通过常规试验确定,并基于压密注浆的圆柱形孔扩张模型,建立考虑土体非线性压缩特性压密注浆影响半径理论公式,压密注浆的影响半径与土体本身的压缩特性、注浆压力、注浆量、注浆深度相关。

在湖南某高速压密注浆场地开展现场试验,建立描述该试验场地土体非线性压缩的 $\varepsilon-p$ 曲线模型,并记录压密注浆施工参数,对该试验场地压密注浆理论影响半径进行计算,最后通过对在压密注浆孔不同距离处土体所受到的土压力监测结果以及加固效果进行分析,验证本文提出的压密注浆影响半径理论公式的合理性。该压密注浆影响半径理论公式可以确定压密注浆的加固范围,在压密注浆的设计施工中具有一定的指导意义。

2 土体 $\varepsilon-p$ 曲线模型

2.1 土体的非压缩特性

目前一般通过完全侧限条件下的土体压缩试验

所得到的 $e-p$ 曲线或 $\varepsilon-p$ 曲线来描述土体的压缩特性,不同种类以及不同状态下的土体具有不同的 $\varepsilon-p$ 曲线(ε 为土体压应变, p 为土体所受压应力),该曲线反映了土体的压应变随压应力增大而增大的规律^[13-14]。土体压缩过程的 $\varepsilon-p$ 曲线^[15]如图 1 所示。

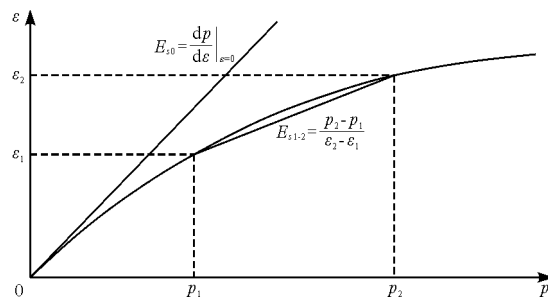


图 1 土体压缩过程的 $\varepsilon-p$ 曲线

由图 1 可知,在土体的 $\varepsilon-p$ 曲线中,当压应力为 0 时,压应变为 0;并且随着压应力增大,土体压应变不断增加;当压应力较小时,土体随着压应力增大产生的应变增量较大,但是当压应力较大时,土体随着压应力增大产生较小的应变增量,土体表现出明显的非线性压缩特性。

2.2 土体 $\varepsilon-p$ 曲线模型

现建立对数函数曲线模型来描述土体的非线性压缩特性,并通过常规侧限压缩试验得到的试验参数来确定模型参数,该土体 $\varepsilon-p$ 曲线模型如下:

$$\varepsilon = A \ln\left(\frac{p}{B} + 1\right) \quad (1)$$

式中: ε 为土体压应变; p 为土体所受压应力, Pa; A 、 B 均为土体 $\varepsilon-p$ 曲线模型特征参数(特征参数 A 无单位,特征参数 B 单位为 Pa)。

该土体 $\varepsilon-p$ 曲线模型需要满足如下两个初始条件:

(1) $\varepsilon = 0 (p = 0)$, 即当压应力为 0 时,压应变为 0;

(2) $E_{s0} = \left. \frac{dp}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0}$, 即压应变为 0 时的切线压缩

模量与 E_{s0} 相等;

式中: E_{s0} 为土体初始压缩模量, Pa。

利用侧限压缩试验得到的试验参数来确定土体 $\varepsilon-p$ 曲线模型的特征参数 A 、 B 的方法如下:

对公式(1)进行恒等变形可以得到:

$$p = B(e^{\frac{\varepsilon}{A}} - 1) \quad (2)$$

公式(2)对 ε 求导,可以得到任意压力下的的压缩模量:

$$E_s = \frac{dp}{d\varepsilon} = \frac{B}{A} e^{\frac{\varepsilon}{A}} = \frac{p+B}{A} \quad (3)$$

式中: E_s 为土体切线压缩模量, Pa。

对于公式(1), 令 $\varepsilon = 0$, 得到土体初始压缩模量:

$$E_{s0} = \frac{B}{A} \quad (4)$$

在一般的工程实践当中, 通常采用压应力由 100 kPa 增加到 200 kPa 时所得的特征压缩模量 E_{s1-2} 来评定土的压缩性, 其表达式为:

$$E_{s1-2} = \frac{p_2 - p_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (5)$$

式中: E_{s1-2} 为土体特征压缩模量, Pa; p_1, p_2 为土体受到 100 kPa 和 200 kPa 的压应力; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为 p_1, p_2 对应的压应变。

取压应力 p 为 150 kPa 时的压缩模量近似等于 E_{s1-2} , 代入公式(3) 即:

$$E_{s1-2} = \frac{p_{1.5} + B}{A} \quad (6)$$

式中: $p_{1.5}$ 为土体受到 150 kPa 的压应力, Pa。

联立公式(4)、(6) 解得特征参数 A, B 如下:

$$A = \frac{p_{1.5}}{E_{s1-2} - E_{s0}} \quad (7)$$

$$B = \frac{p_{1.5} E_{s0}}{E_{s1-2} - E_{s0}} \quad (8)$$

将公式(7)、(8) 分别代入公式(1) 中得到描述土体非线性压缩特性的 $\varepsilon - p$ 关系曲线模型如下:

$$\varepsilon = \frac{p_{1.5}}{E_{s1-2} - E_{s0}} \ln \left[\frac{p(E_{s1-2} - E_{s0})}{p_{1.5} E_{s0}} + 1 \right] \quad (9)$$

3 压密注浆影响半径

在压密注浆施工过程中, 注浆体周围的土体在注浆压力作用下体积缩小, 土中水和气体从孔隙中被挤出, 土颗粒重新排列挤密, 土孔隙体积减少^[16], 并且随着注浆压力的增大, 注浆孔径扩张, 周围土体越来越致密, 越来越难以被压缩, 表现出与侧限压缩试验类似的非线性压缩特性。因此, 注浆体周围的土体的非线性压缩过程用本文建立的 $\varepsilon - p$ 关系曲线模型来描述, 为了计算压密注浆的影响半径, 作出以下假设:

(1) 压密注浆体为圆柱形;

(2) 压密注浆影响范围内的土体为各向同性的均质体;

(3) 在注浆过程中, 土体未发生竖向变形。

注浆孔孔径忽略不计, 随着浆液不断注入, 注浆量逐渐增大, 土体所受的压应力逐渐增加, 注浆孔被

均匀分布的压应力所扩张, 在压密注浆影响边界范围内的土体不断被挤密压缩, 建立圆柱形孔扩张模型如图 2 所示。

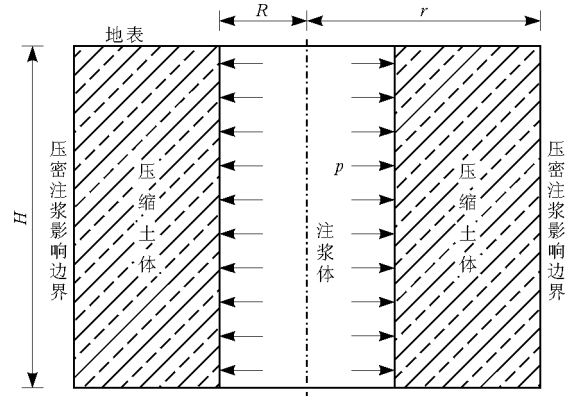


图2 圆柱形孔扩张模型

基于以上假设, 压密注浆注浆量可用以下公式表示:

$$Q = \pi H R^2 \quad (10)$$

式中: Q 为总注浆量, m^3 ; H 为注浆孔的深度, m ; R 为圆柱形浆体的半径, m 。

土体在浆液影响半径范围内的压应变可用以下公式表示:

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\pi H R^2}{\pi H r^2} = \frac{R^2}{r^2} \quad (11)$$

式中: V 为浆液影响半径范围内的体积, m^3 ; ΔV 为体积的变化量, m^3 ; r 为压密注浆的影响半径, m 。

由公式(10)、(11) 联立求解即可得到土体的压应变如下:

$$\varepsilon = \frac{Q}{\pi H r^2} \quad (12)$$

由公式(1)、(12) 联立求解即可得到压密注浆的影响半径如下:

$$r = \left[\frac{Q}{\pi H A \ln \left(\frac{p}{B} + 1 \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

公式(13) 中的 $\varepsilon - p$ 曲线模型的特征参数 A, B 可用上文中所述的方法确定。

分析公式(13) 可以得到: 压密注浆的影响半径与土体本身的压缩特性、注浆压力、注浆量、注浆深度相关; 随着注浆量的增加, 土体被挤密压缩的程度越大, 压密注浆的影响半径越大; 当注浆量一定时, 注浆压力越大, 土体的影响半径越小, 也就是说对于不同的土体注入等量的浆液, 要达到相同的影响范围, 越密实的土体所需的注浆压力越大, 这与现场的实际情况也是相一致的。

4 现场试验

湖南某高速场地内覆盖层为第四系粉质黏土,层厚 2 m 左右,上部回填土为粉质黏土,回填厚度 3 m 左右,下伏基岩为强~中风化炭质页岩,采用压密注浆工艺加固该场地地基,并在该场地开展压密注浆现场试验,对该试验场地压密注浆理论影响半径进行计算,并通过对在压密注浆孔不同距离处土体

所受到的土压力以及加固效果进行分析,验证压密注浆影响半径理论公式的合理性。

4.1 建立描述试验场地土体的 $\varepsilon - p$ 曲线模型

为确定压密注浆影响范围内土体 $\varepsilon - p$ 曲线模型,在压密注浆施工前取原状土样进行侧限抗压强度试验,得到土体的初始压缩模量 E_{s0} 和特征压缩模量 E_{s1-2} ,原状土样侧限抗压强度试验结果如表 1 所示。

表 1 压密注浆施工前原状土样侧限抗压强度试验结果

取样深度/ m	土样 名称	特征压缩模量 E_{s1-2} /MPa	初始压缩模量 E_{s0} /MPa	取样深度/ m	土样 名称	特征压缩模量 E_{s1-2} /MPa	初始压缩模量 E_{s0} /MPa
2.8~3.0	粉质黏土	3.54	1.23	2.5~2.7	粉质黏土	3.35	1.02
3.8~4.1	粉质黏土	3.29	0.98	4.8~5.1	粉质黏土	3.89	0.77
1.9~2.1	粉质黏土	3.59	1.75	2.9~3.1	粉质黏土	3.04	1.22

由表 1 计算得到试验场地内土体特征压缩模量 E_{s1-2} 的均值为 3.45 MPa,初始压缩模量 E_{s0} 的均值为 1.16MPa,并由公式(7)、(8)计算得到土体 $\varepsilon - p$ 曲线模型的特征参数 A 为 0.066, B 为 97.61 MPa。

4.2 试验场地压密注浆影响半径计算

压密注浆的注浆材料为砂浆,为确定材料配合比,在非加固处理区域进行试桩,通过现场塌落度试验(见图 3),要求其塌落度小于 0.05 m;在试验结束 7 d 后进行开挖检测(见图 4),要求材料结石体 28 d 强度实验结果不小于 10.0 MPa,最终确定压密注浆试验材料配合比如表 2 所示。

表 2 试验材料配合比

水泥	砂	细石	膨润土	水
50	150	75	20	35



图 3 塌落度试验



图 4 现场开挖检测

压密注浆设计注浆深度为进入稳定岩层 0.5 m,成桩直径 $\Phi 700$ mm,以注入量 $0.28\text{ m}^3/\text{m}$ 定量从注浆管注入浆材,提升段每段长度为 0.3~0.5 m,反复注入、提升、记录。压密注浆现场记录如表 3。

表 3 压密注浆现场记录

注浆时间	注浆深度/m	泵送次数	泵送压力/MPa	泵送量/ m^3
9:53~9:59	5.6	10	1.8	0.150
10:00~10:05	5.3	8	1.7	0.120
10:16~10:20	5.0	11	1.8	0.195
10:21~10:25	4.5	10	1.7	0.195
10:35~10:40	4.1	7	1.8	0.125
10:41~10:44	3.8	7	1.8	0.155
10:45~10:48	3.5	6	1.2	0.120
11:02~11:06	3.2	7	1.3	0.120
11:07~11:11	2.8	6	1.4	0.105
11:11~11:14	2.5	6	1.2	0.105
11:26~11:28	2.2	7	0.9	0.105
11:29~11:32	1.9	7	0.9	0.090
11:32~11:35	1.5	5	0.9	0.075

通过压密注浆现场记录得到,注浆深度 H 为 5.6 m,压密注浆分段注入提升,共计 13 段,总注浆量 Q 为 1.66 m^3 ,各段注浆压力均值 p 为 1.42 MPa。

将压密注浆注浆深度 H ,总注浆 Q ,注浆压力 p 以及土体 $\varepsilon - p$ 曲线模型的特征参数 A 、 B 代入公式(13)中求得该试验场地压密注浆影响半径理论计算值为 0.72 m。

4.3 压密注浆影响半径现场验证

4.3.1 压密注浆土压力监测分析 在压密注浆施工过程中,随着浆料的注入,不断对土体产生压密作

用,并形成可控位移,土体孔隙中的水和空气逐渐排出,因此,对压密注浆施工过程中不同距离桩周土所受土压力进行监测分析,能够反映出压密注浆时不同距离土体受到的挤压程度,并据此判断压密注浆对土体的影响范围区间。在压密注浆施工过程中的4个不同距离处分别布置4个土压力盒进行径向压力量测,土压力盒布置分别距离注浆孔中心0.5、0.8、1.1、1.4 m,土压力盒布置深度均为3.0 m。为保证土压力埋设过程顺利,制作简易爪形工具用于固定土压力盒,保证土压力盒的受力面与土体侧向接触,垂直面向注浆孔,以此来保证土压力盒径向受力。土压力数据收集频率间隔为2 min,4个不同土压力监测孔得到的土压力监测数据如图6所示。

分析图6可得,在压密注浆过程中,距离注浆孔越远,土体所受的土压力越小,受挤压程度越小;距离注浆孔0.5 m处土体在压密注浆施工过程中受到显著的挤压作用,所受土压力随着注浆施工过程有明显的波动,在施工结束后,土压力逐渐减小,但是相对于初始值提高了约219%,表明该处的土体所受的挤压作用明显;距离注浆孔0.8 m处的土体所受土压力在施工结束后虽然逐渐减小,但是比初始值提高了87%;距离注浆孔1.1 m处的土体在注浆施工过程中受到一定程度的挤压作用,但是在施工过程结束后的一段时间,土压力又恢复到初始水平左右,表明在距离注浆孔1.1 m处土体在压密注浆施工过程中受到一定程度的弹性变形,压密注浆对该距离处土体的加固效果一般;距离注浆孔1.4 m处的土体所受土压力几乎没有明显波动,表明1.4 m处土体所受压密注浆的影响很小。通过以上的分

析可以判断压密注浆影响半径在0.8~1.1 m之间,在一定程度上验证了压密注浆影响半径理论推导的合理性。

4.3.2 压密注浆土体加固效果分析 为进一步验证压密注浆影响半径理论推导的合理性,在压密注浆施工结束28 d后,对距离注浆孔中心0.5、0.7、0.9、1.1、1.3、1.5 m处不同深度土体的加固效果进行检验,检验方法包括标准贯入试验和取原状土样进行直剪试验,不同距离桩周土的物理力学性能分别如图7所示。



图5 土压力盒工具

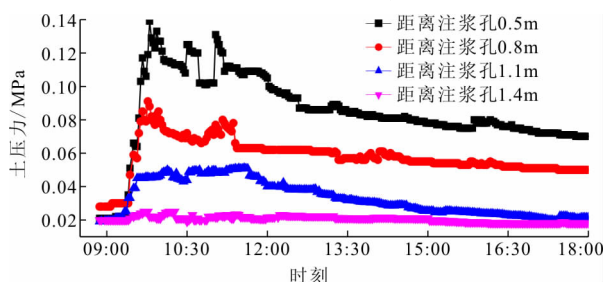


图6 4个不同土压力监测孔的土压力监测数据

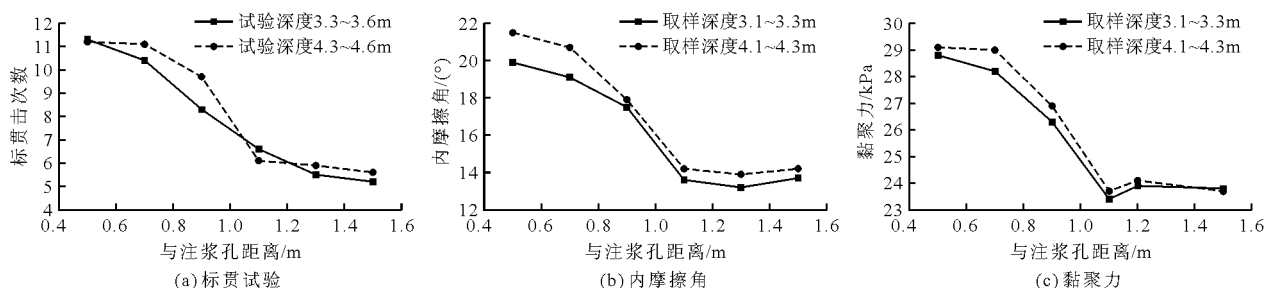


图7 不同距离桩周土的物理力学性能

对图7(a)分析可得,与注浆孔距离大于1.1 m的桩周土的标准贯入击数处于4~7击之间,土体的加固效果较差,与注浆孔距离小于0.9 m的桩周土的标准贯入击数有明显提升,处于9~14击之间,土体的加固效果良好。对图7(b)、7(c)分析可

得,距离注浆孔越近,土体的抗剪强度指标内摩擦角,黏聚力值越大,在小于等于0.9 m范围内土体的抗剪强度都得到一定程度的提升,尤其在小于等于0.7 m的范围内土体的抗剪强度提升明显,通过以上分析可以判断压密注浆影响半径在0.9~1.1 m

之间,说明了压密注浆影响半径理论计算值处于可接受的范围内,并可以为压密注浆的设计施工提供参考。

5 结 论

了解压密注浆影响半径是确定压密注浆的加固范围以及保证工程质量的关键因素,为确定压密注浆影响半径,本文通过理论推导以及现场试验验证,对压密注浆影响半径进行了探究,得到以下成果:

(1)建立了描述土体非线性压缩的 $\varepsilon - p$ 曲线模型,该 $\varepsilon - p$ 曲线模型的特征参数 A 、 B 可以利用常规的侧限压缩试验得到的初始压缩模量 E_{s0} 、特征压缩模量 E_{s1-2} 来确定。

(2)在压密注浆施工过程中,注浆体周围的土体为非线性压缩,基于描述土体非线性压缩的 $\varepsilon - p$ 曲线模型和压密注浆圆柱形孔扩张模型推导出了压密注浆影响半径的理论公式,压密注浆的影响半径与土体本身的压缩特性、注浆压力、注浆量、注浆深度相关。

(3)开展压密注浆现场试验,建立描述该压密注浆试验场地土体的 $\varepsilon - p$ 曲线模型,记录压密注浆施工参数,得到该试验场地压密注浆影响半径的理论计算值为 0.72 m。对在压密注浆孔不同距离处土体所受到的土压力监测结果以及加固效果分析,可以得到压密注浆影响半径的范围在 0.9 ~ 1.2 m 之间,该压密注浆影响半径理论计算值与实际值相差较小,这验证了本文提出的压密注浆影响半径的理论公式的合理性。该压密注浆影响半径理论公式可以用于确定压密注浆的加固范围,为压密注浆的设计施工提供参考。

参考文献:

- [1] 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,2014,34(11):52-55.
- [2] 胡焕校,周丁,李忠诚.基于 ANSYS 的压密注浆桩半径与注浆压力关系的研究[J].水文地质工程地质,2015,26(6):197-201.
- [3] 徐玉峰.路基压密注浆加固效果的研究[J].公路交通科技(应用技术版),2012,8(4):41-43.
- [4] 杨旭朝.压密注浆对土体微观结构的影响研究[J].城市道桥与防洪,2011(8):126-128+11-12.
- [5] 张朝清,刘焯伟.高速公路路基压密注浆加固效果研究[J].天津建设科技,2010,20(4):50-53.
- [6] YANG Xiaoli, ZOU Jinfeng. Estimation of compaction grouting pressure in strain softening soils [J]. Journal of Central South University of Technology, 2009,16(4):653-657.
- [7] SHRIVASTAVA N, ZEN K. An experimental study of compaction grouting on its densification and confining effects [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017,36(5):1-11.
- [8] 张忠苗,邹健,贺静漪,等.黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析[J].岩土工程学报,2009,31(12):1818-1824.
- [9] 蒋邵轩,钱玉林,刘译文,等.压密注浆圆孔扩张的数值分析[J].吉林建筑大学学报,2018,35(1):31-35.
- [10] 王广国,杜明芳,苗兴城.压密注浆机理研究及效果检验[J].岩石力学与工程学报,2000(5):670-673.
- [11] 巨建勋.土体压密注浆机理及其抬升作用的研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [12] 周子龙,赵云龙,陈钊,等.基于颗粒流方法的土体压密注浆微观机理[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(2):465-472.
- [13] 周驰.软土压缩 $e - p$ 曲线模型及其工程应用[D].长沙:湖南大学,2012.
- [14] 王文丽,王兰民,刘洪春,等.土压缩指标的率相关特性试验研究——以兰州黄土为例[J].河南大学学报(自然科学版),2018,48(1):113-118.
- [15] 张连震,李志鹏,张庆松,等.基于土体非线性压密效应的劈裂注浆机制分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(7):1483-1493.
- [16] 龚晓南,谢康和.土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2014:76-92.