

引用本文:周 峰,许 勇,朱 锐,等.砂性地层注浆浆液扩散特性[J].建筑科学与工程学报,2020,37(5):182-192.

ZHOU Feng, XU Yong, ZHU Rui, et al. Diffusion Characteristics of Grouting Slurry in Sandy Stratum[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 182-192.

DOI:10.19815/j.jace.2019.11083

砂性地层注浆浆液扩散特性

周 峰¹, 许 勇¹, 朱 锐², 宋 著¹, 翟德志³, 牟育敏¹

(1. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 210009;

2. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210029;

3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610052)

摘要:对南京地区河砂采用筛孔分别为 5, 2, 0.5, 0.2 mm 的筛网筛分后, 分为不同粒径的砂土, 以渗透系数为控制指标, 根据试验需要对所用河砂进行配比, 模拟出 4 种砂砾土层。通过对自行研制的一种渗透注浆装置进行室内模拟注浆试验, 研究了 4 种不同颗粒级配的砂样在不同注浆量、水灰比、注浆压力等影响因素下浆液的扩散特性, 并在此基础上进行多元线性回归分析。结果表明:浆液扩散半径主要影响因素的主次顺序为注浆压力、渗透系数、水灰比; 注浆量主要影响因素的顺序为注浆压力、渗透系数、水灰比; 结核体强度主要影响因素的顺序为水灰比、渗透系数、注浆压力; 结合试验结果拟合得到了浆液扩散半径、注浆量、结核体强度与渗透系数、浆液水灰比、注浆压力之间的定量关系式; 砂性地层中的浆液扩散半径存在有效半径, 为初始半径的 75%~80%; 对于在砂性地层中的浆液扩散行为, 具有多种浆液扩散模式并存的可能; 所得结论可供类似工程借鉴与参考。

关键词:渗透注浆; 线性回归; 浆液扩散半径; 强度

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)05-0182-11

Diffusion Characteristics of Grouting Slurry in Sandy Stratum

ZHOU Feng¹, XU Yong¹, ZHU Rui², SONG Zhu¹, ZHAI De-zhi³, MOU Yu-min¹

(1. School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, Jiangsu, China;

2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China;

3. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd, Chengdu 610052, Sichuan, China)

Abstract: The river sand in Nanjing area was divided into sand with different particle sizes after sieving through the screens with 5, 2, 0.5 and 0.2 mm mesh holes, respectively. According to the needs of the test and taking the permeability coefficient as the control index, the river sand used was proportioned to simulate four kinds of gravel soil layers. The indoor simulation grouting test was carried out through a self-developed infiltration grouting device, and the diffusion characteristics of slurry under the influence factors of different grouting amounts, water cement ratios and grouting pressures of four kinds of sand samples with different particle grading were studied. On this basis, the multiple linear regression analysis was carried out. The results show that the main influencing factors of the slurry diffusion radius are grouting pressure, permeability

收稿日期: 2019-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778287)

作者简介: 周 峰(1979-), 男, 江苏阜宁人, 教授, 工学博士, E-mail: zhoufeng@njtech.edu.cn.

通信作者: 许 勇(1994-), 男, 江苏南通人, 工学硕士研究生, E-mail: xuyong1301@126.com.

coefficient and water cement ratio; the main influencing factors of grouting volume are grouting pressure, permeability coefficient and water cement ratio; the main influencing factors of the strength of the nodule are water cement ratio, permeability coefficient and grouting pressure; the slurry diffusion radius, grouting volume and grouting pressure are obtained by combining the experimental results. The quantitative relationship between core strength and permeability coefficient, water cement ratio of slurry and grouting pressure is obtained; the effective radius of slurry diffusion radius in sand formation is about 75%-80% of the initial radius; the slurry diffusion behavior in sand formation has the possibility of coexistence of multiple slurry diffusion modes. The test results can be used for reference in similar projects.

Key words: permeation grouting; linear regression; slurry diffusion radius; strength

0 引言

自20世纪60年代以来,岩土体注浆技术在中国得到了广泛的应用,在基础设施大规模建设阶段发挥了积极作用,但仍然存在诸多问题,注浆理论的研究也始终落后于工程实践。砂砾地层在中国分布非常广泛,由于地下水渗流、承压等因素,至今无法进行准确的注浆方案设计^[1-2],工程中也未能得到充分利用。因此,如何改善砂砾地层的工程特性已成为中国基础设施建设中急需解决的关键难题之一。

国内外学者们对于砂砾地层中隧道岩体注浆、渗透注浆理论等方面开展了许多探索性工作,并已取得了一定的进展^[3-6]。Krizek等^[7]通过4种浆液和5种介质共进行了79组注浆模拟试验,对不同浆液的稀释特性进行了初步的探索。Bouchelaghem等^[8]针对可变形饱和多孔介质进行了一系列渗透注浆模拟试验,对浆液在扩散过程中的流体力学性质进行了研究。Axelsson等^[9]采用室内砂柱模拟试验,辅以现场试验,对渗透注浆过程中类水泥浆液止动机制进行了探讨,确定了3种不同的止动机制。Wang等^[10]设计了一系列砂土室内模拟试验,通过改变浆液的水灰比和土体饱和度,对注浆量、结核体的外形等进行了对比分析。李术才等^[11-12]通过模拟试验对不同被注浆介质渗透率及不同注浆速率下注浆压力的变化规律进行了分析。

以上的研究推动了岩土介质渗透注浆理论的发展,但仍存在一定的问题,包括注浆介质模拟的不确定性、注浆材料模拟的艰难性、注浆材料相似模拟的不可捉摸性等诸多复杂因素,使得砂性地层浆液扩散的研究结果与工程实际存在较大误差,尤其是室内注浆模拟试验及其技术的落后一定程度上限制了渗透注浆理论的发展^[13-18]。本文结合已有研究成果,自行设计了室内模拟试验,给出不同砂土介质、

不同水灰比以及不同注浆压力作用下水泥浆液在砂性土层中的扩散特性,并采用多元线性回归分析方法,探究了各因素对浆液扩散半径、注浆量和结核体强度的影响规律,为深部承压砂性地层注浆方案设计提供理论依据,对砂性地层中基础设施建造及其加固具有十分重要的参考价值。

1 试验装置与试验内容

为了研究水泥浆液在不同地层渗透系数、浆液水灰比、注浆压力下的注浆规律,自行研制了一种渗透注浆试验模拟装置,主要由空气压缩机、注浆试验桶、压力容器、试验架和压力表等组成,具体如图1所示。调压阀将空气压缩机输出的气体维持在一定压力值,并输入压力容器,从而挤压水泥浆液,使其通过出浆口压入试验桶土样中。同时通过控制泻流口及试验模具与试验架的连接方式来模拟不同排水条件及承压层注浆。



图1 试验装置
Fig. 1 Test Device

1.1 试验装置

1.1.1 空气压缩机

实际工程中采用的注浆设备体积与质量均较大,室内模型试验不宜采用,故本次试验结合室内工作条件及设备情况,采用小型空气压缩机作为本次

室内模拟试验的供压装置。此外,本文中室内模拟试验所采用的空气压缩机气体出口设有调压阀,可以调节气体出口大小,将供压设备输出的气体压力控制在设定范围内,更易于控制注浆压力。

1.1.2 注浆试验桶

注浆试验桶为内径 10 cm、壁厚 1 cm、高 30 cm 的钢套筒,顶盖与桶身采用螺栓连接,中间为橡胶垫圈;顶盖中心开口外部与压力容器通过橡胶管连接,进行浆液的传送,顶盖中心开口内部为长 8 cm、外径 1 cm、内径 8 mm 的注浆导管,嵌入土体中进行注浆。

1.1.3 压力容器

压力容器为内径 40 cm、壁厚 1 cm、高 40 cm 的钢制圆筒,其顶端采用螺栓连接,并用橡皮圈密封,容器顶盖开 4 个口:进气口、压力表量测口、进浆口和出浆口,其中出浆口一端伸入距压力容器底部约 10 cm 处,一端插入砂砾土体内部 7~10 cm 处,压力的作用是将供气设备的气压转换为注浆压力。

1.1.4 试验架

试验架由钢筋焊制而成,其顶部与注浆试验桶底部焊接,主要作用为保证试验模具的稳定性。

1.1.5 其他仪器

压力表、电子秤、注浆导管等,由于篇幅所限,此处不一一介绍。

1.2 注浆地层模拟

本次试验采用南京地区河砂,按文献[19]中相关要求经过筛孔分别为 5,2,0.5,0.2 mm 的筛网筛分后,分为不同粒径的砂土,根据试验需要,以渗透系数为控制指标,对所用河砂进行配比,模拟 4 种砂砾土层进行注浆试验,根据配比好砂样的含水率、密度等特性计算试验所需用砂量。4 种砂样的粒径分布及组合情况见表 1。各配合砂样基本参数如表 2 所示。

表 1 不同粒径颗粒百分比

Tab. 1 Percentage of Particles with Different Sizes

砂样 编号	不同粒径(mm)颗粒的百分比/%			
	5~10	2~5	0.5~2	≤0.5
S1	10	80	10	
S2		10	80	10
S3	10	10	30	50
S4	5	5	30	60

1.3 注浆材料

试验注浆材料采用中材南京有限公司生产的普

表 2 砂样基本物理性质

Tab. 2 Basic Physical Properties of Sand Samples

砂样 编号	天然密度/ (g·cm ⁻³)	天然含 水率/%	相对 密度	孔隙比	孔隙 率/%	渗透系数/ (cm·s ⁻¹)	不均匀 系数
S1	1.96	20.72	2.79	0.72	41.83	0.930	3.0
S2	1.93	22.81	2.64	0.68	40.63	0.130	6.9
S3	1.69	7.80	2.59	0.65	39.41	0.030	10.2
S4	1.86	7.10	2.67	0.53	34.88	0.008	15.4

通硅酸盐水泥,标号为 42.5,该注浆材料在中砂、粗砂等砂性地层中具有良好的可注性。

1.4 试验设计

本文采用正交试验设计方法来指导试验,选取了渗透系数、水灰比和注浆压力 3 个因素,每个因素 4 个水平,建立了正交试验表,因素水平如表 3 所示,共有 16 个配比,测得每个配比的浆液扩散半径,以进行下一步分析。

表 3 正交试验的因素水平

Tab. 3 Factor Levels of Orthogonal Test

影响因素水平	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	水灰比	注浆压力/MPa
1	0.930	0.5	0.05
2	0.130	0.6	0.10
3	0.030	0.8	0.20
4	0.008	1.0	0.30

1.5 试验步骤

(1)在预留注浆管空位的情况下装入砂土;然后按图 1 所示将各仪器装配成一个整体,并检验其密闭性。

(2)对罐内砂性土样的渗透系数、天然密度、重度、孔隙率等参数进行量测与计算。

(3)将压力容器与空气压缩机连接、注浆试验桶与压力容器连接,连接其余各管线并安装量测仪表。

(4)按试验所设计的参数配置水泥浆液并进行搅拌,试验时室内温度约 28℃;打开电子秤,拧开漏斗进浆阀门,将水泥浆液倒入漏斗从而流入压力容器内,随即拧紧进浆阀门,此时读取并记录压力容器总质量。

(5)检查以上步骤,打开空气压缩机进行气体储备并准备注浆。

(6)开始注浆。打开注浆阀门,根据压力表指数调整供压阀门,至设计的注浆压力值并保持不变,观察电子秤数值,当读数不变时,即浆液无法注入。

(7)关闭注浆阀门,打开漏斗进浆阀门,泄压,此时再一次读取并记录压力容器总质量,并清空压力容器内的剩余水泥浆液。

(8)24 h 后,将砂样脱模,以观察结核体外形,

并测量结核体扩散半径,典型注浆后试样如图 2 所示。



图 2 注浆后典型试样
Fig.2 Typical Samples After Grouting

- (9)清理浆液输送管及漏斗,准备下次试验。
- (10)测试结核体强度。
- (11)对试验结果进行整理并分析。

1.6 注浆效果

由图 2 可以发现,在砂性地层中注浆,水泥浆液在外力作用下渗入到砂性颗粒间的孔隙中,排出并取代其中的水和空气。地层颗粒的不均匀分布使得各方向的渗透性不同,浆液较易沿优势路径形成渗透通道,导致不同区域不同时间时的浆液动能产生差异,因此形成了不同形状的结核体。此外,浆液扩散过程中能够伴随着一定的潜蚀现象,使得注浆土体难以形成均匀的胶结体,一定程度上影响了注浆加固的效果。

2 试验结果分析

2.1 浆液扩散半径

2.1.1 极差分析

本文砂砾地层渗透注浆模拟试验中浆液扩散半径极差计算结果如表 4 所示。不同影响因素对扩散半径的影响见表 5。表 5 中的 K_1, K_2, K_3, K_4 分别为各因素在 4 个水平下的浆液扩散平均半径之和,反映的是各因素不同水平对浆液扩散半径的影响, R' 为某一因素不同水平下浆液扩散半径的极差,用来反映这一因素的水平变化对于浆液扩散半径影响程度的大小,极差大代表该因素为主要因素。经分析可知,砂性地层注浆模拟试验中浆液扩散半径影响因素的主次顺序为注浆压力、渗透系数、水灰比。

2.1.2 效应曲线

效应曲线是对正交试验极差分析表的形象描绘,把表 5 中 3 个因素各水平下的结果均值绘制成效应曲线,如图 3 所示。

表 4 浆液扩散半径极差计算结果
Tab.4 Calculation Results of Range of Slurry

Diffusion Radius				
试验编号	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	水灰比	注浆压力/ MPa	扩散半径/ cm
1	0.930	0.5	0.05	4.1
2	0.930	0.6	0.10	6.5
3	0.930	0.8	0.20	8.6
4	0.930	1.0	0.30	9.7
5	0.130	0.5	0.10	5.5
6	0.130	0.6	0.05	3.0
7	0.130	0.8	0.30	7.3
8	0.130	1.0	0.20	8.3
9	0.030	0.5	0.20	4.4
10	0.030	0.6	0.30	5.5
11	0.030	0.8	0.05	3.5
12	0.030	1.0	0.10	6.4
13	0.008	0.5	0.30	5.1
14	0.008	0.6	0.20	4.2
15	0.008	0.8	0.10	5.4
16	0.008	1.0	0.05	4.0

表 5 不同影响因素对扩散半径的影响
Tab.5 Influences of Different Factors on Diffusion Radius

影响因素	渗透系数	水灰比	注浆压力
K_1	7.225	4.775	3.650
K_2	6.025	4.800	5.950
K_3	4.950	6.200	6.375
K_4	4.725	7.100	6.950
R'	2.500	2.325	3.300

从图 3(a)可以看出,在砂性地层渗透注浆模拟试验中,水泥浆液扩散半径随着渗透系数的增大而变大,主要原因是地层渗透系数的增大代表着土体孔隙率的增大,即土颗粒间内部孔隙的增多,从而使浆液更加容易进行渗透运动。

从图 3(b)可以看出:在水灰比较小(0.5~0.6)时,水泥浆液扩散半径随着水灰比的增大而基本保持不变,主要原因是此时水泥浆液中固体颗粒含量较高,将水泥浆液注入模拟地层中,很快会发生堵塞而止动,这与图 3(a)中渗透系数较小时浆液扩散半径增长缓慢相呼应;当水灰比较大(大于 0.6)时,浆液扩散半径随着水灰比的增大而变大。

从图 3(c)可以看出,水泥浆液的扩散半径随着注浆压力的增加而变大,在压力较小时,其增速较大,在压力较大时(大于 0.1 MPa)时,浆液扩散半径保持匀速上升。在工程实际中,若想获得较大的浆液扩散半径,一般会增大注浆压力。

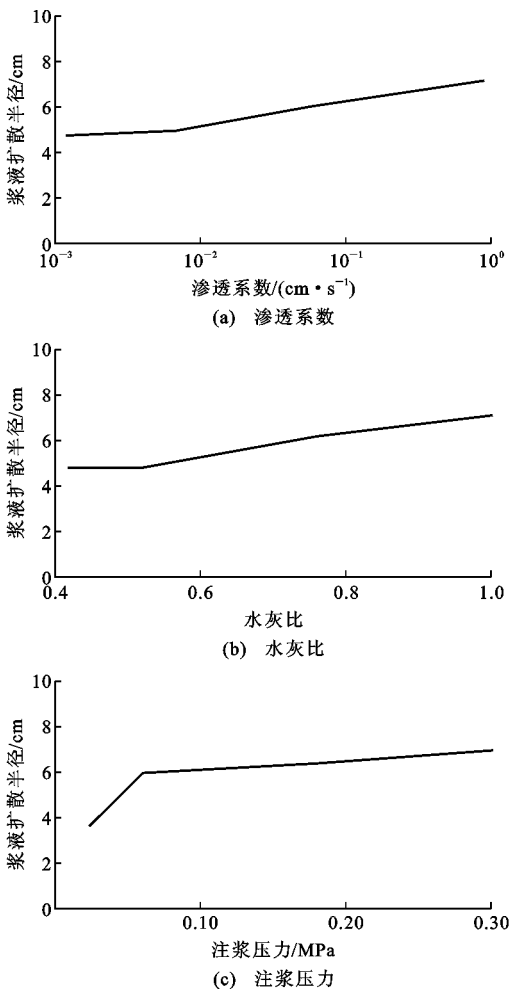


图 3 浆液扩散半径的极差分析效应曲线
Fig. 3 Range Analysis Effect Curves of Slurry Diffusion Radius

2.1.3 有效半径

在开挖结核体的过程中,发现在结核体外部存在一定的注浆体,开挖过程中并不掉落,但由于浆液的含有量较少,砂体经手触碰就会掉落,这个范围内注浆体的承压能力极低。拨开结核体,量测去掉该范围内砂层的结核体半径,即为有效半径,将其与初测值对比,如表 6 所示,发现有效半径仅占初始半径的 75%~80%。可以推测,在砂性地层中的浆液扩散行为,具有多种浆液扩散模式并存的可能,即注浆管口附近为压密注浆或劈裂注浆,并形成了浆液富集区域;其次,此现象与砂性地层的过滤性有关,浆液向外扩散的距离越远,水泥成分的扩散难度越大,浆液中水泥的含量也相应降低,因此实际工程中设计注浆加固方案时应考虑这一因素。

2.2 注浆量

2.2.1 极差分析

注浆量试验结果及极差计算结果如表 7 所示。

表 6 扩散半径 R 与有效半径 r
Tab. 6 Diffusion Radius R and Effective Radius r

试验编号	扩散半径 R /cm	有效半径 r /cm
1	4.1	3.1
2	6.5	4.9
3	8.6	6.5
4	9.7	7.3
5	5.5	4.1
6	3.0	2.3
7	7.3	5.5
8	8.3	6.3
9	4.4	3.3
10	5.5	4.1
11	3.5	2.6
12	6.4	4.8
13	5.1	3.9
14	4.2	3.2
15	5.4	4.1
16	4.0	3.3

表 7 注浆量计算结果

Tab. 7 Calculation Results of Grouting Volume Range

试验编号	渗透系数/ (cm · s ⁻¹)	水灰比	注浆压力/ MPa	注浆量/ cm ³
1	0.930	0.5	0.05	311.4
2	0.930	0.6	0.10	468.2
3	0.930	0.8	0.20	697.3
4	0.930	1.0	0.30	875.4
5	0.130	0.5	0.10	373.1
6	0.130	0.6	0.05	271.7
7	0.130	0.8	0.30	731.1
8	0.130	1.0	0.20	682.5
9	0.030	0.5	0.20	419.7
10	0.030	0.6	0.30	513.6
11	0.030	0.8	0.05	302.8
12	0.030	1.0	0.10	408.5
13	0.008	0.5	0.30	503.6
14	0.008	0.6	0.20	427.3
15	0.008	0.8	0.10	361.4
16	0.008	1.0	0.05	227.4

不同影响因素对注浆量的影响见表 8。

根据表 8 数据可知,砂性地层渗透注浆模拟试验中,注浆量主要影响因素的主次顺序为注浆压力、渗透系数、水灰比。

2.2.2 效应曲线

依据表 6 中的数据绘制而成的效应曲线如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,在砂性地层渗透注浆模拟试验中,注浆量随着渗透系数的增大而增加,主要

表 8 不同影响因素对注浆量的影响

Tab. 8 Influences of Different Factors on Grouting Quantity

影响因素	渗透系数	水灰比	注浆压力
K_1	588.075	401.950	278.325
K_2	514.600	420.200	402.800
K_3	411.150	523.150	556.700
K_4	379.925	548.450	655.925
R'	208.150	146.500	377.600

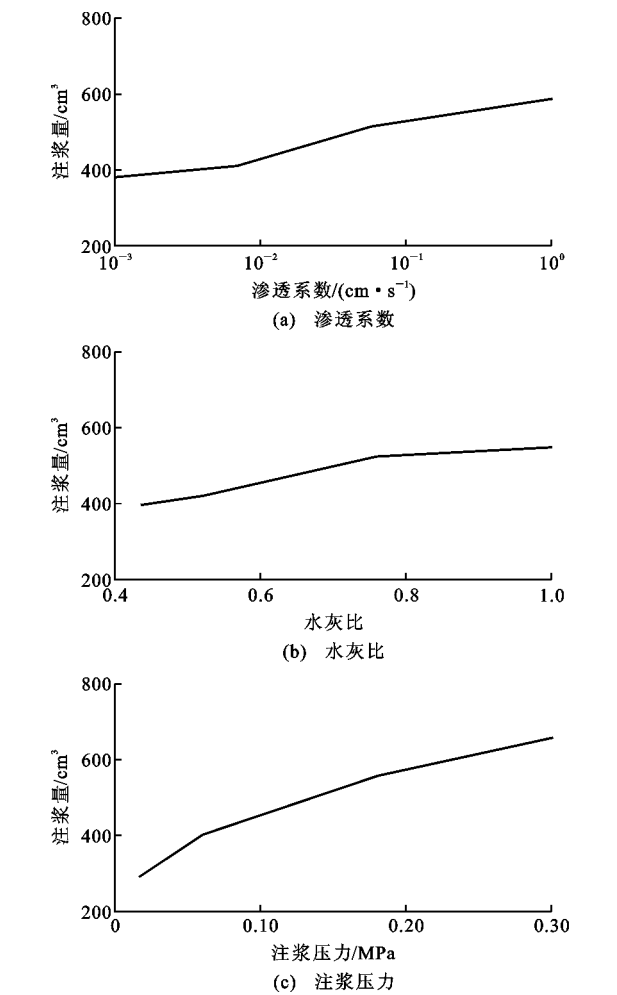


图 4 注浆量的极差分析效应曲线

Fig. 4 Range Analysis Effect Curves of Grouting Volume

是由于其土颗粒间内部孔隙的增多,使得浆液更加容易进行渗透运动,从而可以注入更多的浆液;从图 4(b)可以看出,当水灰比在 0.6~0.8 之间时,注浆量随着水灰比增大而迅速增加,而当水灰比小于 0.6 或大于 0.8 时,其变化为匀速缓慢上升;从图 4(c)可以看出,随着注浆压力的增加,注浆量的增加幅度逐渐减小。可以推测,在实际工程中,增大注浆压力至一定程度,对于注浆量的提升是有限的。

2.3 结核体强度

结核体强度即为注浆加固体的最大承载能力,

注浆前,砂性地层几乎没有黏结能力,无法形成自稳结构,因此抗压强度为 0。注浆结束后,水泥浆液由于发生化学反应,将松散的砂性颗粒胶结在一起,从而形成了具有一定强度的结核体。

2.3.1 极差分析

将试验数据进行处理,可以得到结核体强度的极差计算结果,如表 9 所示。不同因素对结核体强度的影响见表 10。

表 9 结核体强度极差计算结果

Tab. 9 Calculation Results of Extreme Difference of Strength of Nodule

试验编号	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	水灰比	注浆压力/ MPa	结核体强度 (28 d)/MPa
1	0.930	0.5	0.05	12.0
2	0.930	0.6	0.10	10.5
3	0.930	0.8	0.20	9.5
4	0.930	1.0	0.30	7.6
5	0.130	0.5	0.10	11.9
6	0.130	0.6	0.05	10.1
7	0.130	0.8	0.30	9.4
8	0.130	1.0	0.20	7.1
9	0.030	0.5	0.20	11.9
10	0.030	0.6	0.30	10.7
11	0.030	0.8	0.05	8.1
12	0.030	1.0	0.10	6.4
13	0.008	0.5	0.30	11.9
14	0.008	0.6	0.20	9.7
15	0.008	0.8	0.10	7.9
16	0.008	1.0	0.05	5.8

表 10 不同因素对结核体强度的影响

Tab. 10 Influences of Different Factors on Strength of Nodule

影响因素	渗透系数	水灰比	注浆压力
K_1	9.900	11.925	9.000
K_2	9.625	10.250	9.175
K_3	9.275	8.725	9.550
K_4	8.825	6.725	9.900
R'	1.075	5.200	0.900

根据表 10 数据可知,砂性地层渗透注浆模拟试验中结核体强度主要影响因素的主次顺序为水灰比、渗透系数、注浆压力。

2.3.2 效应曲线

把表 9 中 3 个因素各水平下的结果均值绘制成效应曲线,如图 5 所示。

从图 5(a)可以看出,在砂性地层渗透注浆模拟试验中,随着地层渗透系数的增大,结核体强度缓慢

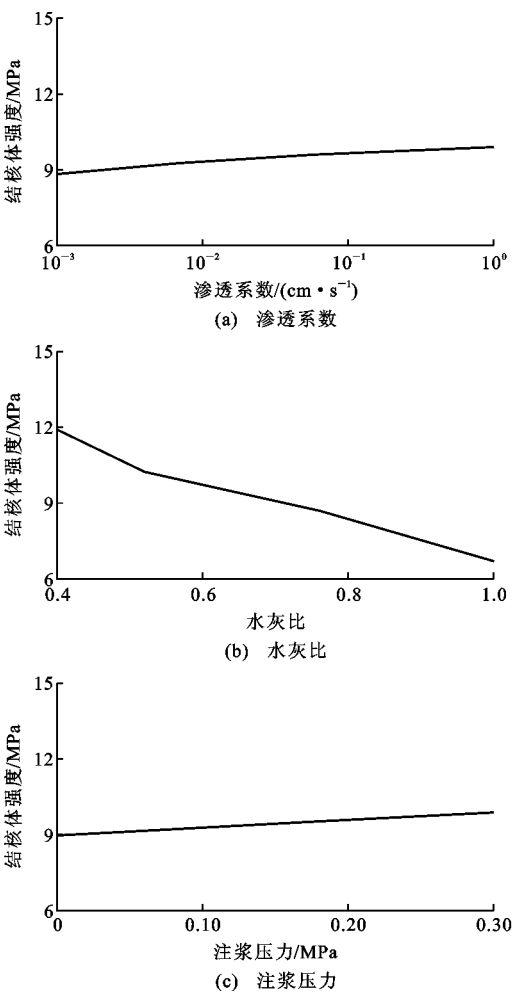


图 5 结核体强度的极差分析效应曲线
Fig. 5 Range Analysis Effect Curves of Strength of Nodule

增加,但增幅并不明显。从图 5(b)可以看出,结核体强度随着水灰比的增大而急剧下降,这是因为在浆液被注入软弱地层后,起加固作用的主要为浆液中的注浆材料,因此水灰比越小,注浆材料比例越大,加固效果越好,结核体强度也越高。从图 5(c)可以看出,随着注浆压力的增加,结核体强度缓慢增加,故注浆压力的增大对其提升并不明显。

3 回归分析

3.1 回归模型简化与建立

根据试验结果及相关文献[7],浆液扩散半径与渗透系数、水灰比、注浆压力之间并非线性关系,而是呈幂函数关系,因此假设其基本模型为

$$Y=AX_1^B X_2^C X_3^D \tag{1}$$

此模型为非线性模型,故对其两边取对数,可以得到

$$\lg(Y)=\lg(A)+B\lg(X_1)+C\lg(X_2)+D\lg(X_3) \tag{2}$$

假定 $y=\lg(Y)$, $a=\lg(A)$, $x_1=\lg(X_1)$, $x_2=\lg(X_2)$, $x_3=\lg(X_3)$,即可将以上模型转变为线性模型

$$y=a+Bx_1+Cx_2+Dx_3 \tag{3}$$

式中: y 为因变量; x_1,x_2,x_3 为自变量。

3.2 回归方程

采用 SPSS 19.0 软件进行计算,所得到的多元线性回归系数如表 11 所示。

表 11 多元线性回归系数

Tab. 11 Multiple Linear Regression Coefficient

回归系数	a	A	B	C	D
数值	1.193	15.596	0.086	0.561	0.312

由表 11 可以得到浆液扩散半径 R 、注浆量 Q 、结核体强度 σ_c 与渗透系数 k 、水灰比 m 、注浆压力 p 之间的回归方程式为

$$R=15.596k^{0.086}m^{0.561}p^{0.312} \tag{4}$$

$$Q=1\,603.25k^{0.087}m^{0.334}p^{0.464} \tag{5}$$

$$\sigma_c=8.492k^{0.028}m^{-0.798}p^{0.065} \tag{6}$$

3.3 浆液扩散半径影响因素

3.3.1 浆液扩散半径与注浆压力的变化关系

图 6 为水灰比为 0.8 的水泥浆液在不同渗透系数地层中,其扩散半径与注浆压力的变化关系曲线。

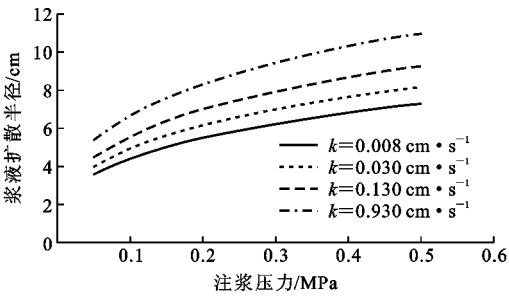


图 6 浆液扩散半径随注浆压力变化曲线
Fig. 6 Variation Curves of Slurry Diffusion Radius with Grouting Pressure

从图 6 可以看出:在给定地层渗透系数和水灰比时,随着注浆压力的增大,水泥浆液扩散半径也增大;当注浆压力小于 0.2 MPa 时,水泥浆液的扩散半径增长速度较快;当注浆压力大于 0.3 MPa 时,水泥浆液的扩散半径增长速度放缓,增幅逐渐减小;渗透系数的增大也给水泥浆液扩散半径带来了一定的提升,与上述分析中地层渗透系数为水泥浆液扩散半径的次要影响因素相对应。

3.3.2 浆液扩散半径与渗透系数的变化关系

图 7 为水灰比为 0.8 的水泥浆液在不同注浆压力下,其扩散半径与地层渗透系数的变化关系曲线。

从图 7 可以看出,在给定水泥浆液水灰比和注

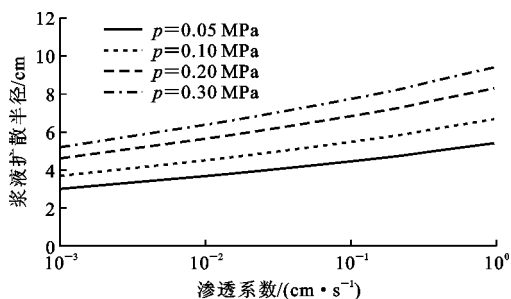


图 7 浆液扩散半径随渗透系数变化曲线

Fig. 7 Variation Curves of Slurry Diffusion Radius with Permeability Coefficient

浆压力时,随着地层渗透系数的增大,水泥注浆量也增大。从微观机理方面来看,当渗透系数较大时,即砂性地层中颗粒粒径较大,颗粒之间的空隙也较大,水泥浆液较易进入颗粒间的空隙,因此,浆液扩散半径随着地层渗透系数的增大而增大。另外,根据文献[20]可知,地层渗透系数极小时,在地层中进行渗透注浆是较为困难的,多为压密注浆和劈裂注浆。

3.3.3 浆液扩散半径与水灰比的变化关系

图 8 为地层渗透系数为 $0.03 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不同注浆压力下的水泥浆液扩散半径与其水灰比的变化关系曲线。

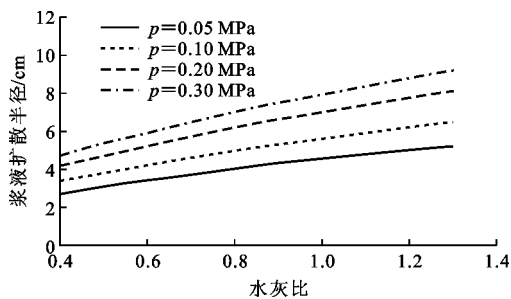


图 8 浆液扩散半径随水灰比变化曲线

Fig. 8 Variation Curves of Slurry Diffusion Radius with Water Cement Ratio

从图 8 可以看出:在给定渗透系数和注浆压力时,随着浆液水灰比的增大,其扩散半径呈线性增加;另外,地层渗透系数及浆液水灰比相同时,注浆压力的增大显著提升了浆液扩散半径,这与上述分析相对应。这是由于水泥浆液水灰比较大时,水泥浆液中含有的水分增加,则单位体积浆液中含有的水泥固体颗粒减少,浆液渗透更为容易地穿过地层颗粒间空隙,从而扩散至更远的距离,因此,浆液扩散半径随着水泥浆液水灰比的增大而增大。

3.4 注浆量影响因素

3.4.1 注浆量与注浆压力的变化关系

图 9 为水灰比为 0.8 的水泥浆液在不同渗透系

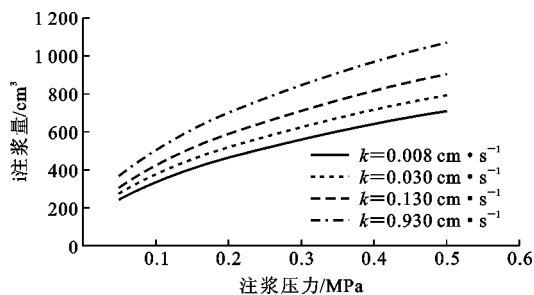


图 9 注浆量随注浆压力变化曲线

Fig. 9 Variation Curves of Grouting Volume with Grouting Pressure

数地层中的注浆量与注浆压力变化关系曲线。

从图 9 可以看出:在给定地层渗透系数和水灰比时,随着注浆压力的增大,水泥浆液扩散半径增大,且增长幅度较大;当注浆压力小于 0.2 MPa 时,水泥浆液的扩散半径增长速率较快;当注浆压力大于 0.3 MPa 时,水泥浆液的扩散半径有增长速率放缓的趋势;另外,地层渗透系数的增大引起注浆量明显的提升。可以推测,影响砂性地层中注浆量的主要因素为注浆压力及渗透系数,主要原因是地层土体的孔隙率反映了浆液渗入的空间,孔隙率越大,地层中浆液含有量越大,注浆量也越大;提升注浆压力则是工程实际中提升注浆量常用的方法之一。

3.4.2 注浆量与渗透系数的变化关系

图 10 为水灰比为 0.8 的水泥浆液在不同注浆压力下的注浆量与地层渗透系数变化关系曲线。

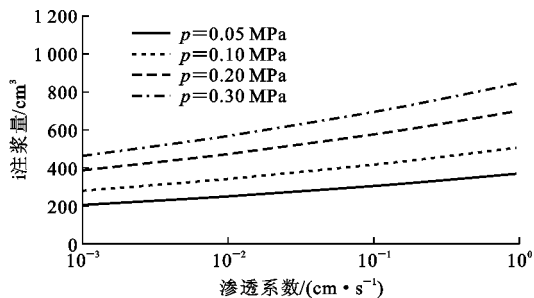


图 10 注浆量随渗透系数变化曲线

Fig. 10 Variation Curves of Grouting Volume with Permeability Coefficient

从图 10 可以看出,在给定水泥浆液水灰比和注浆压力时,随着地层渗透系数的增大,水泥浆液的注浆量也增大,与上文分析相吻合。从微观机理方面来看,当渗透系数较大时,地层中颗粒粒径较大,颗粒间空隙也较大,水泥浆液较易进入颗粒间的空隙,故注浆量随地层渗透系数的增大而增加。

3.4.3 注浆量与水灰比的变化关系

图 11 为地层渗透系数为 $0.03 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不

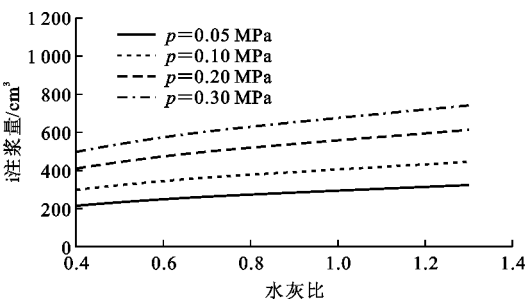


图 11 注浆量随水灰比变化曲线

Fig. 11 Variation Curves of Grouting Volume with Water Cement Ratio

同注浆压力下的水泥浆液注浆量与其水灰比的变化关系曲线。

从图 11 可以看出:在给定地层渗透系数和注浆压力时,注浆量随着水泥浆液水灰比的增大而缓慢增大,且增速逐渐减慢;另外,同一地层渗透系数及浆液水灰比条件下,注浆压力的增大显著提升了水泥浆液注浆量,这和上文所述相吻合。在工程实际中,有时会以增大浆液水灰比来提升渗透注浆中的水泥浆液注浆量,其水灰比可以达到 3.0 以上。

3.5 结核体强度影响因素

3.5.1 结核体强度与注浆压力的变化关系

图 12 为水灰比为 0.8 的水泥浆液在不同渗透系数地层中,结核体强度与注浆压力的变化关系曲线。

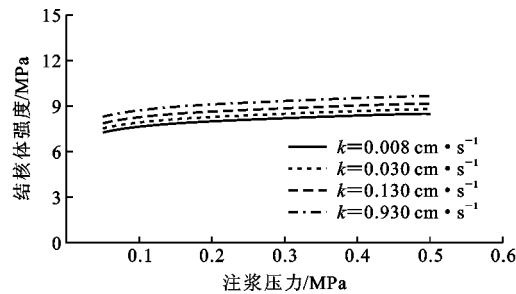


图 12 结核体强度随注浆压力变化曲线

Fig. 12 Variation Curves of Strength of Nodule with Grouting Pressure

从图 12 可以看出:在给定地层渗透系数和水灰比时,随着注浆压力的增大,结核体强度缓慢增加,且增幅较小;地层渗透系数的增加并未显著提升结核体强度。另外,根据文献[21]可知,结核体强度与注浆压力之间的关系较为复杂,结核体强度并非恒定地随着注浆压力增长而增大,因此,在实际工程中,对于渗透注浆,单一地通过注浆压力提升来提高注浆效果是不可取的。

3.5.2 结核体强度与渗透系数的变化关系

图 13 为水灰比为 0.8 的水泥浆液在不同注浆压力下,结核体强度与地层渗透系数的变化关系曲线。

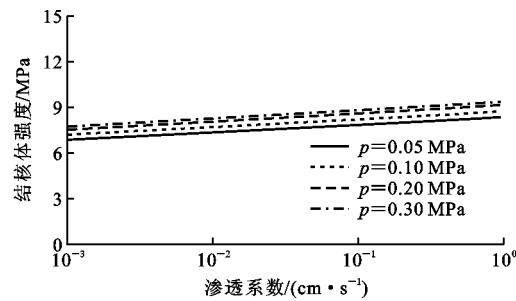


图 13 结核体强度随渗透系数变化曲线

Fig. 13 Variation Curves of Strength of Nodule with Permeability Coefficient

从图 13 可以看出,在给定水泥浆液水灰比和注浆压力时,随着地层渗透系数的增大,结核体强度也增加。这是由于地层渗透系数的增加,水泥浆液更容易进入到颗粒间的空隙。因此,结核体的强度随着颗粒间空隙的增加而增大。

3.5.3 结核体强度与水灰比的变化关系

图 14 为地层渗透系数为 0.03 cm·s⁻¹ 时,不同注浆压力下的注浆工程中结核体强度与水泥浆液水灰比的变化关系曲线。

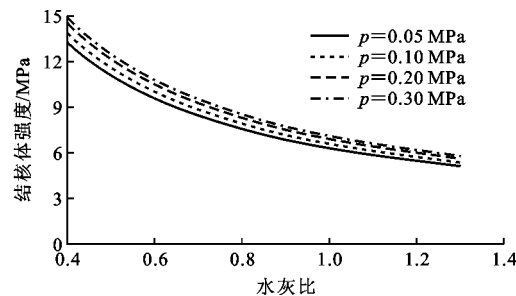


图 14 结核体强度随水灰比变化曲线

Fig. 14 Variation Curves of Strength of Nodule with Water Cement Ratio

从图 14 可以看出:在给定地层渗透系数和注浆压力时,随着水泥浆液水灰比的增大,结核体强度急剧下降;当水灰比大于 1.0 时,结核体强度减小的速率有放缓的趋势。这是由于水泥浆液水灰比较大时,水泥浆液中含有的水分增加,而水泥浆液中发生水化反应所需的水量是恒定的,多余的水分显著地降低了注浆结核体的黏结性能,因此,结核体强度随着水泥浆液水灰比的增加而减小。另外,也可以看出,地层渗透系数的改变对于结核体强度的影响很小,这与上文分析吻合。

4 结 语

(1)采用自行设计的压力渗透注浆模拟试验装置,对水泥浆液在深部砂性地层中的浆液扩散半径、注浆量以及结核体强度进行了研究。浆液扩散半径主要影响因素的主次顺序为注浆压力、渗透系数、水灰比;注浆量主要影响因素的主次顺序为注浆压力、渗透系数、水灰比;结核体强度主要影响因素的主次顺序为水灰比、渗透系数、注浆压力。

(2)通过多元线性回归分析,得到渗透系数、浆液水灰比、注浆压力与浆液扩散半径、注浆量、结核体强度之间的定量关系。

(3)砂性地层中的浆液扩散半径存在有效半径,为初始半径的75%~80%;另外,在砂性地层中的浆液扩散行为,具有多种浆液扩散模式并存的可能。

参考文献:

References:

- [1] 张忠苗. 灌注桩后注浆技术及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
ZHANG Zhong-miao. Post Grouting Technology of Cast-in-place Pile and Its Engineering Application [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [2] YANG M J, YUE Z Q, LEE P K K, et al. Prediction of Grout Penetration in Fractured Rocks by Numerical Simulation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(6): 1384-1394.
- [3] KHAMOV A P. Injection of Clay-cement Grout to Strengthen the Beds of Buildings and Structures[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997, 34(3): 90-93.
- [4] BELL F G. Engineering Treatment of Soils[M]. London: E & FN Spon, 1993.
- [5] CAMBEFORT H. The Principles and Applications of Grouting[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology, 1977, 10(2): 57-95.
- [6] HUANG C L, FAN J C, YANG W J. A Study of Applying Microfine Cement Grout to Sandy Silt Soil[J]. Sino-geotech, 2007, 111(7): 71-82.
- [7] KRIZEK R J, PETER T. Chemical Grouting in Soils Permeated by Water[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(7): 898-915.
- [8] BOUCHELAGHEM F, VULLIET L, LEROY D, et al. Real-scale Miscible Grout Injection Experiment and Performance of Advection-dispersion-filtration Model[J]. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25(12): 1149-1173.
- [9] AXELSSON M, GUSTAFSON G, Fransson A. Stop Mechanism for Cementitious Grouts at Different Water-to-cement Ratios [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 390-397.
- [10] WANG Q, WANG S Y, SCOTT W S, et al. Experimental Investigation of Pressure Grouting in Sand [J]. Soils and Foundations, 2016, 56(2): 161-173.
- [11] 李术才, 张伟杰, 张庆松, 等. 富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 744-752.
LI Shu-cai, ZHANG Wei-jie, ZHANG Qing-song, et al. Research on Advantage-fracture Grouting Mechanism and Controlled Grouting Method in Water-rich Fault Zone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 744-752.
- [12] 张庆松, 王洪波, 刘人太, 等. 考虑浆液扩散路径的多孔介质渗透注浆机理研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 918-924.
ZHANG Qing-song, WANG Hong-bo, LIU Ren-tai, et al. Infiltration Grouting Mechanism of Porous Media Considering Diffusion Path Grout [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 918-924.
- [13] BAKER W H, CORDING E J, MACPHERSON H H. Compaction Grouting to Control Ground Movement During Tunneling [J]. Underground Space, 1982, 7(3): 205-213.
- [14] HARBOUR J R, EDWARDS T B, LORIER T H, et al. Stabilizing Grout Compatibility Study[R]. Aiken: Westinghouse Savannah River Company, 2004.
- [15] 黄明利, 管晓明, 吕奇峰. 基于弹性力学的诱导劈裂注浆机制分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2059-2064.
HUANG Ming-li, GUAN Xiao-ming, LÜ Qi-feng. Mechanism Analysis of Induced Fracture Grouting Based on Elasticity [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2059-2064.
- [16] 张庆松, 张连震, 刘人太, 等. 基于“浆-土”界面应力耦合效应的劈裂注浆理论研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 323-330.
ZHANG Qing-song, ZHANG Lian-zhen, LIU Ren-tai, et al. Split Grouting Theory Based on Slurry-soil Coupling Effects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 323-330.
- [17] OCHMANSKI M, MODONI G, BZOWKA J. Numerical Analysis of Tunneling with Jet-grouted Canopy [J]. Soils and Foundations, 2015, 55(5): 929-942.
- [18] WANG S Y, CHAN D H, LAM K C, et al. Numerical

and Experimental Studies of Pressure-controlled Cavity Expansion in Completely Decomposed Granite Soils of Hong Kong[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(7/8): 977-990.

[19] 谢定义,陈存礼,胡再强. 试验土工学[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
XIE Ding-yi, CHEN Cun-li, HU Zai-qiang. Experimental Soil Engineering[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.

[20] 张连震. 地铁穿越砂层注浆扩散与加固机理及工程应用[D]. 济南:山东大学,2017.

ZHANG Lian-zhen. Study on Penetration and Reinforcement Mechanism of Grouting in Sand Layer Disclosed by Subway Tunnel and Its Application[D]. Jinan: Shandong University, 2017.

[21] 邹超. 砂土层中超细水泥注浆机理的试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2006.
ZOU Chao. Experimental Research on Grouting Mechanics in Clayey Sand Using Super-micro Cement [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2006.