

土石混合体注浆扩散机制及影响因素试验研究

钟祖良^{1,2}, 别聪颖¹, 范一飞¹, 刘新荣^{1,2}, 罗亦琦¹, 涂义亮^{1,3}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045;
3. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 为了研究浆液在土石混合体中的扩散机制及其影响因素, 以重庆地区土石混合体为研究对象, 研制了一套可重复使用的室内注浆模型试验系统, 开展了不同含石量、孔隙比、浆液黏度和注浆压力等条件下土石混合体注浆模型试验研究。研究表明: 浆液在土石混合体中主要以渗透、劈裂的方式扩散。当含石量由低到高变化时, 浆液主要扩散方式由劈裂扩散转化为渗透扩散; 中等含石量时, 劈裂扩散与渗透扩散相当。在试验的基础上, 结合支持向量机制论建立了土石混合体注浆扩散半径预测模型, 并基于该模型的计算结果, 获得了渗透扩散半径和劈裂扩散半径影响因素的影响次序分别为: 含石量>浆液黏度>孔隙比>注浆压力、含石量>注浆压力>浆液黏度>孔隙比。含石量对扩散形式的影响最大, 对扩散半径值的影响占主导地位, 建议实际工程中应根据土体含石量分区段进行注浆技术参数设计。

关键词: 土石混合体; 含石量; 扩散机制; 预测模型; 影响因素

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 11-4194-09

Experimental study on grouting diffusion mechanism and influencing factors of soil-rock mixture

ZHONG Zu-liang^{1,2}, BIE Cong-ying¹, FAN Yi-fei¹, LIU Xin-rong^{1,2}, LUO Yi-qi¹, TU Yi-liang^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. National Joint Engineering Research Center of Geohazard Prevention in Reservoir Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to study the diffusion mechanism of slurry in soil-rock mixture and its influencing factors, a reusable indoor grouting model test system was developed with the Chongqing soil-rock mixture as the research object. Experimental study of grouting model of soil-rock mixture under conditions of different stone contents, porosities, slurry viscosities and grouting pressures was carried out. The results show that slurry diffuses mainly in the soil-rock mixture by means of osmotic and splitting. When the stone content increases, the main diffusion mode of the slurry shifted from splitting to osmotic. When the medium contains stone, the splitting diffusion is equivalent to the osmotic. On the basis of experiments, the grouting diffusion radius prediction model of soil-rock mixture is established based on the theory of support vector machine. Based on the calculation results of the model, the order of influencing factors for the infiltration diffusion radius and the splitting radius are obtained respectively. Which are: stone content>slurry viscosity>porosity> grouting pressure; stone content> grouting pressure>slurry viscosity>porosity. The stone content has the greatest influence on the diffusion form, and it domains the diffusion radius value. It is suggested that the engineering should design the grouting parameters according to the stone content.

Keywords: soil-rock mixture; stone content; slurry diffusion mechanism; prediction model; influencing factors

1 引言

土石混合体回填土是指由具有一定工程尺度、强度较高的块石、细粒土体及孔隙构成且具有一定

含石量的不均匀松散岩土介质系统^[1]。山地城市早期建设中经常开山填谷, 形成了大面积的土石混合体回填区, 其埋深从几米到上百米不等。随着城镇化扩张和城市化进程的加速, 地铁工程建设不可避

收稿日期: 2018-08-13

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2018YFC1504802); 国家自然科学基金项目 (No. 51808083); 重庆市基础研究与前沿探索项目 (No. cstc2018jcyjAX0491)。This work was supported by the National Key R&D Program of China (2018YFC1504802), the National Natural Science Foundation of China (51808083) and the Natural Science Foundation Project of Chongqing (cstc2018jcyjAX0491).

第一作者简介: 钟祖良, 男, 1980年生, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学、隧道与地下工程的试验与理论研究。E-mail: haiou983@126.com

免地要穿越深厚的土石混合体回填土区。为了保证地铁工程顺利施工和后期运营安全,需对土石混合体回填区的隧道围岩进行注浆加固,使洞周土层形成一个环形的承载拱,保证洞室及掌子面的稳定性及提高围岩的抗渗性能。由于山地城市土石混合体回填土中块石粒径大小不一,且在地层中呈随机分布,造成单位体积回填土中含石量差异较大。在回填土地层进行现场注浆加固时,缺乏对土石混合体注浆浆液性能、浆液的扩散规律等的研究,可循的经验数据有限。此外,《注浆技术规程》(YBJ 44—1992)^[2]和《城市轨道交通隧道工程注浆技术规程》(DB11—1444—2017)^[3]所涉及土体皆为单一材料被注介质:碎石、砾石、粗砂、中砂、细砂、粉砂、黄土等,而土石混合体注浆技术参数的选取无规范可依,现场围岩注浆结核体形成效果差。因此,不同含石量下回填土区土石混合体注浆加固机制的研究对隧道安全建设与稳定运营具有重要的工程意义。

国内外学者开展了土石混合体及其注浆性能的相关研究:钟祖良等^[4]在统计大量国内外学者的基础上,研究了含石量、含水率、密实度和其他因素对土石混合体强度的影响。唐建一^[5]、沈辉^[6]等分别研究了土石混合体的剪切特性和渗透侵蚀特性。聂琼^[7]、饶香兰^[8]等分别对水泥浆液的稳定性进行了不同条件下的试验分析,获得了水泥浆液析水性变化规律,提出了水泥浆稳定性判定标准和试验方法。杨坪^[9-10]、申国磊^[11]、夏小亮^[12]、许广坡^[13]等自行设计了注浆模拟试验模型并进行了注浆试验,取得了一定成果,推动了室内注浆试验研究的发展。Stoel^[14]最初以细砂为研究对象,开展了室内注浆试验,研究了注浆技术参数,此后众多学者^[15-19]也通过类似方法拟合各种关系或分析注浆扩散机制或加固机制。张弛^[20]、战玉宝^[21]等从渗透注浆、压密注浆、裂隙岩体注浆及劈裂注浆等方面,简述了国内外岩土体注浆理论的研究成果。姜谏男等^[22]提出了地下工程裂隙岩体注浆量预测的遗传支持向量机方法,建立注浆量及其影响因素之间的非线性映射关系。雷进生^[23]基于支持向量机制论,研究了结

石体抗压强度、弹性模量受被注介质结构、注浆压力、浆液水灰比等因素的影响规律。

由于土石混合体回填土被注介质结构组成不均匀,其注浆机制较为复杂,且相关研究工作甚少,其注浆技术参数的选取依赖于其他工程经验或现场多次试注浆效果。为了揭示不同含石量条件下土石混合体回填土的注浆加固机制,本文依托重庆市轨道交通 10 号线工程,在注浆浆液性能试验研究的基础上,研制了室内注浆模拟系统,开展不同含石量条件下注浆扩散机制及其影响因素的研究。

2 土石混合体室内注浆扩散试验

2.1 正交试验方案

本试验采用 4 因素 3 水平的正交试验方案,4 因素为:含石量、孔隙比、水灰比以及注浆压力。根据工程现场的土石混合体的含石量分布范围(20%~80%)、孔隙比(约 0.35)、注浆压力(0.5~1.0 MPa),设计正交试验方案如表 1 所示,其中第 10、11 组分别为纯石和纯黏土对照试验组。

表 1 注浆试验正交试验表
Table 1 Orthogonal table of grouting test program

编号	含石量 / %	孔隙比	水灰比	注浆压力 / MPa
1	30	0.30	0.6	0.4
2	30	0.35	0.8	0.7
3	30	0.40	1.0	1.0
4	50	0.30	0.6	1.0
5	50	0.35	0.8	0.4
6	50	0.40	1.0	0.7
7	70	0.30	1.0	0.7
8	70	0.35	0.6	1.0
9	70	0.40	0.8	0.4
10	0	0.30	0.6	0.4
11	100	0.40	0.6	0.4

2.2 注浆浆液性能参数

对浆液扩散过程影响较大的浆液性能指标主要包括黏度^[24]、胶凝时间和析水率。经室内试验优化后的水泥浆液性能测试结果如表 2 所示。

表 2 优化后水泥浆液性能表
Table 2 Optimized cement slurry performance

水灰比 W/C	HPMC 掺量 / %	密度 ρ / (g/cm ³)	黏度 μ_c / (mPa · s)	1 min 析水率 / %	5 min 析水率 / %	10 min 析水率 / %	最终析水率 / %	析水时间 / min
0.6	0.000	1.81	138.2	0.42	0.52	0.58	0.83	55
0.8	0.249	1.61	76.9	0.32	0.45	0.85	3.83	63
1.0	0.266	1.46	46.4	0.00	0.05	0.56	5.05	115

2.3 土体基本物理力学参数

本试验土样取自重庆市轨道交通 10 号线工程上弯路一环山公园区间隧道下穿土石回填区域。密度为 2.05 g/cm^3 ，含水率为 9.22%，不均匀系数 $C_u = 56.09$ ，曲率系数 $C_c = 3.79$ ，属于级配不良土。根据钟祖良等^[4]对土石阈值选取的建议，将粒径为

5 mm 作为土石混合体的土、石界限粒径，测得天然含石量为 59.29%。

1#~11#试验组被注介质各项参数见表 3。

1#~11#组各含石量下的土石混合体粒径级配曲线如图 1 所示，不同试验组土石料的区别仅在于土石比不同。

表 3 1#~11#组被注介质参数
Table 3 Injected media parameters of group #1-#11

编号	孔隙比 e	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	等效粒径 d_{20} /mm	渗透系数 /(cm/s)	抗剪强度 /kPa	黏聚力 /kPa	压缩模量 E_s /MPa
1	0.30	37.00	1.32	0.23	7.491×10^{-6}	110	23.0	7.17
2	0.35	37.00	1.32	0.23	1.380×10^{-5}	110	23.0	7.17
3	0.40	37.00	1.32	0.23	2.417×10^{-5}	110	23.0	7.17
4	0.30	56.43	2.93	0.61	8.166×10^{-5}	148	15.3	7.35
5	0.35	56.43	2.93	0.61	1.001×10^{-4}	148	15.3	7.35
6	0.40	56.43	2.93	0.61	1.528×10^{-4}	148	15.3	7.35
7	0.30	29.17	3.72	2.50	1.850×10^{-4}	175	12.1	8.30
8	0.35	29.17	3.72	2.50	2.058×10^{-3}	175	12.1	8.30
9	0.40	29.17	3.72	2.50	3.022×10^{-3}	175	12.1	8.30
10	0.30	22.50	0.43	0.15	1.044×10^{-4}	107	37.4	7.12
11	0.40	29.17	3.72	8.00	2.150	180	—	5.51

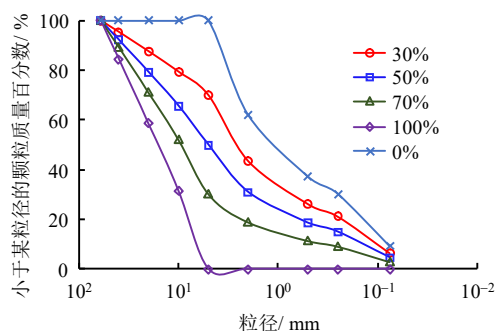


图 1 1#~11#组各含石量下土石混合体级配曲线
Fig.1 Soil grading curves of soil-rock mixture under various contents in #1-#11

2.4 试验仪器及装置的组成

注浆试验采用自行研发的一套可重复使用的注浆系统，满足注浆压力可调可监测、注浆量可监测、注浆时间可判定、注浆结石体可取等试验要求。该注浆系统包括 4 大部分：供压装置、储浆桶、注浆桶以及连通装置，如图 2 所示。

注浆桶直径为 550 mm，高为 630 mm。土石混合体分 4 层进行密实，每层厚度为 150 mm，层与层之间击实后进行凿毛处理，加入 3 层后在注浆桶中心埋入注浆管，如图 3 所示。

2.5 试验流程与操作步骤

注浆试验流程图如图 4 所示。

2.6 试验数据采集与处理

2.6.1 注浆量、注浆压力与注浆时间

(1) 试验采用数显式台秤来采集注浆量数据。

(2) 注浆压力通过供压装置的减压阀和输出压力表进行控制。压力数据用储浆桶上的高精度压力表进行测定。

(3) 出浆阀打开的时间为注浆开始的时间；当台秤示数停止变化，且保持 5 min 未发生变化，在

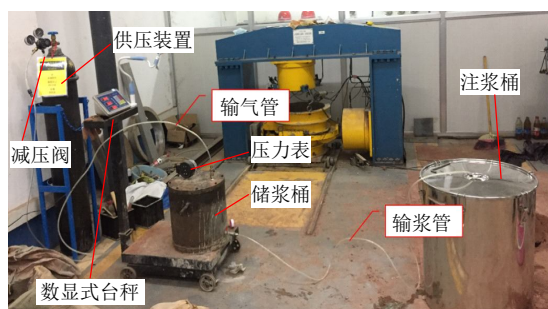


图 2 注浆试验系统
Fig.2 Grouting test system

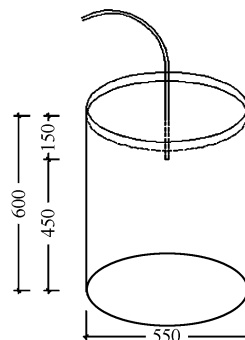


图 3 注浆桶 (单位: mm)
Fig.3 Grouting bucket (unit: mm)

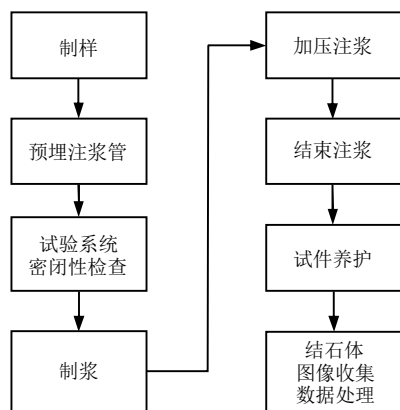


图 4 试验流程图
Fig.4 Test flow chart

管道不发生堵塞的情况下，认为注浆结束，示数停止变化的时间记为注浆结束时间。

2.6.2 扩散半径的确定

扩散半径的确定方法分别为多角度测量法和分层测量法。针对含石量较大的试验组，采用多角度测量法，每 22.5° 拍摄一张图像（见图 5）。通过 GETDATA 软件读取图像上结石体轮廓线特征点的坐标，获得其扩散半径，经统计后取均值，即为该组试验浆液的扩散半径。

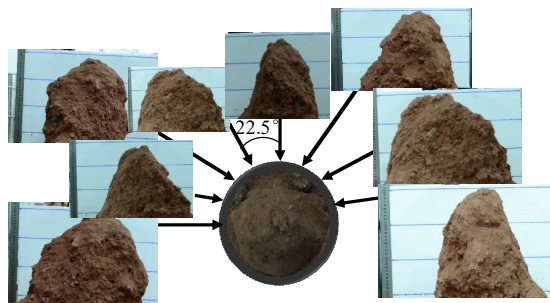


图 5 图像采集方法示意
Fig.5 Image acquisition method

针对含石量较小的试验组，由于结石体极其不规则，采取分层测量法，每间隔 5 cm，对其剖面进行测量和记录数据，并采集剖面照片和进行图像处理与分析。

3 水泥浆液在土石混合体中扩散机制

3.1 水泥浆液在纯石中扩散机制分析

11#组试验即为在纯石（含石量为 100%）中注浆，结石体形貌如图 6 所示。

结石体俯视时接近一个规则的圆形，即注浆桶的内径，结石体上表面凹凸不平。浆液在碎石中呈均匀扩散，且其球形扩散半径大于注浆桶半径。结

石体底部距离注浆管口最远点的距离为 43.2 cm，最近点的距离为 35.5 cm，经统计其平均值为 39.75 cm。

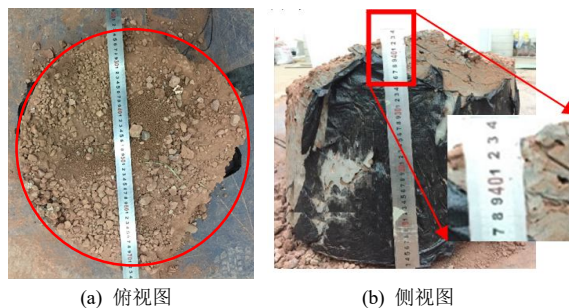


图 6 11#组结石体形貌图
Fig.6 Concretion shape of group #11

结石体剖面图如图 7 所示。浆液较为均匀地分散在石块间缝隙中，将石块包裹在其中。水泥浆液在纯石中的扩散路径主要沿石块之间的缝隙，为渗透扩散。

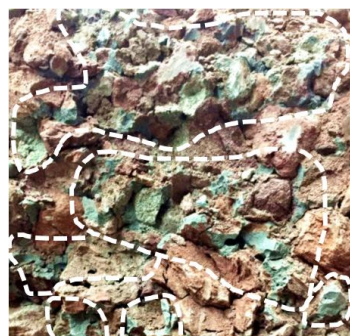


图 7 结石体剖面
Fig.7 Concretion section

3.2 水泥浆液在纯黏土中扩散机制分析

10#试验组被注介质为纯黏土（含石量为 0%），由于孔隙小，可灌性差，注浆时间较长，最终注浆量较小。采用分层测量法测得扩散半径为 21 cm，各层剖面如图 8 所示。

纯黏土中浆液的扩散路径不是沿土体孔隙，而是在压力作用下将土体劈裂，沿径向的新裂缝中扩散，浆液与土粒之间无相互嵌入，而是有清晰明显的分界线，如图 8(a)所示。浆液在纯黏土中的扩散形式是劈裂扩散。

3.3 水泥浆液在土石混合体中扩散机制分析

3.3.1 高含石量组扩散机制分析

7#~9#组含石量为 70%，为高含石量。结石体呈不规则类球体形态，浆液与土石均匀分布，并相互胶结形成一个整体，表现出明显的渗透注浆特征，其渗透注浆半径在 25~40 cm 之间，如图 9 所示。

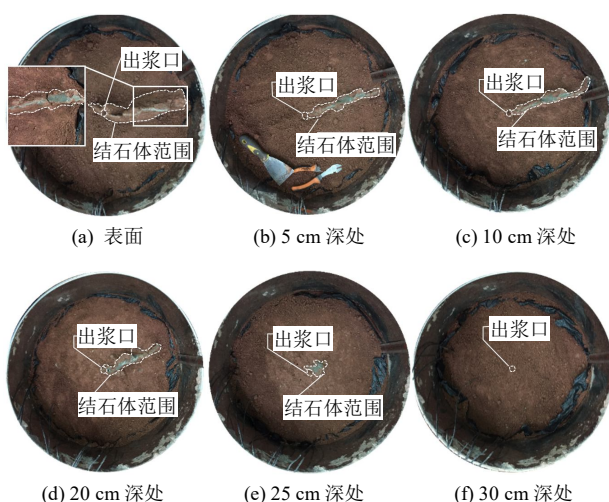


图 8 10#组结石体分层剖面图

Fig.8 Concretion sections of group #10

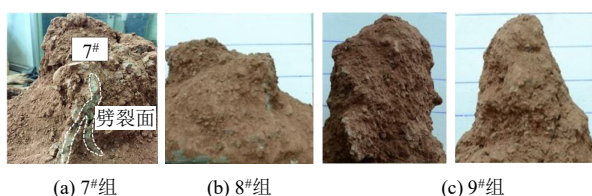


图 9 7#~9#组试验结石体形态

Fig.9 Concretion shapes of tests of group #7-#9 tests

但是结石体上也存在有劈裂扩散的注浆特征,如图 9(a)局部图所示。7#组结石体表面部分含有扁面状浆液凝结体,界线分明,其内部无土石料,为劈裂所致。

3.3.2 中含石量组扩散机制分析

4#~6#组含石量为 50%, 为中含石量。各组结石体均为以注浆管口为中心的渗透注浆结石体,呈不规则类球体(见图 10),测得渗透扩散半径在 10~25 cm 之间;同时,结石体中存在数个劈裂面,测得劈裂扩散半径在 10~20 cm 之间。渗透扩散半径与劈裂扩散半径相当。因此,对中等含石量的土石混合体,其浆液的扩散形式为渗透扩散和劈裂扩散共存。

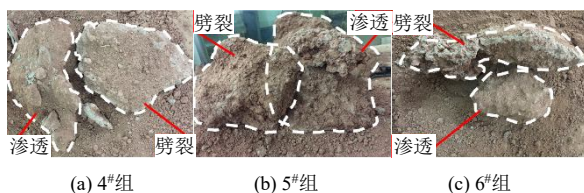


图 10 4#~6#组试验结石体形态

Fig.10 Concretion shapes of tests of group #4-#6

3.3.3 低含石量组扩散机制分析

1#~3#组含石量为 30%, 为低含石量, 各组结

石体形态呈枝桠状、散射状(见图 11)。

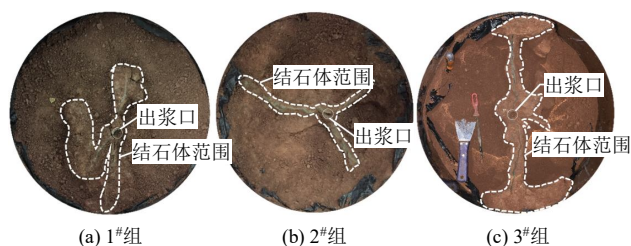
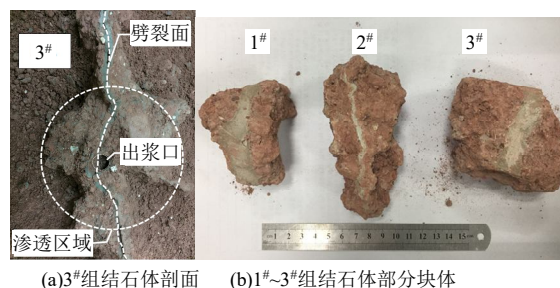


图 11 1#~3#组试验结石体形态

Fig.11 Concretion shapes of tests of group #1-#3 tests

图 11 中存在清晰的劈裂路径,浆液和土体界线分明,表现出典型的劈裂注浆特征。但凿开结石体后发现出浆口周围和劈裂面两侧有浆液与土石相互嵌入、均匀混合的区域,如图 12 所示。



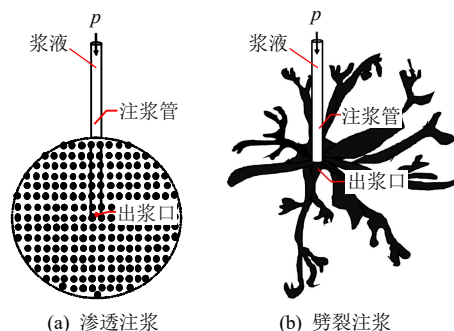
(a) 3#组结石体剖面 (b) 1#~3#组结石体部分块体

图 12 低含石量组结石体

Fig.12 Concretion of low content groups

因此, 1#~3#组试验中浆液扩散形式主要以劈裂扩散为主,并伴随着渗透扩散。采用“分层测量法”测得劈裂注浆扩散半径在 20~40 cm 之间;渗透扩散主要发生在劈裂面两侧,渗透半径约 3~6 cm,对整体扩散半径影响较小。

综上所述,水泥浆液在不同含石量下的土石混合体中的扩散机制主要分为两种:渗透扩散和劈裂扩散,各扩散机制下形成的结石体大致形态如图 13 所示。



(a) 渗透注浆

(b) 劈裂注浆

图 13 不同扩散机制下结石体形态示意

Fig.13 Shapes of concretion under different diffusion mechanisms

含石量较高时以渗透扩散为主，纯石条件下可认为劈裂扩散半径为 0；含石量较低时以劈裂扩散为主，纯黏土条件下可认为渗透扩散半径为 0；当含石量为中等时，渗透扩散与劈裂扩散相当。

4 基于支持向量机的浆液扩散半径预测模型

借助支持向量机 (LibSVM) [25] 的回归预测功能对试验数据进行学习、训练和预测，研究扩散半径与含石量、水灰比、注浆压力、孔隙比之间的影响规律，进而预测扩散半径值，进而指导工程实践。本文使用其中的 ε -SVR 回归功能对试验数据进行预测分析，建立其预测模型。

模型所涉及的因素为 4 个：含石量、土体孔隙比、浆液黏度以及注浆压力。模型样本及其试验结果见表 4、5。

表 4 渗透扩散半径预测结果
Table 4 Penetration grouting diffusion radius prediction results

编号	影响因素				渗透扩散半径/m	
	含石量/%	孔隙比	黏度/(mPa·s)	注浆压力/MPa	试验值	预测值
1	30	0.30	138.2	0.4	0.034 2	0.044 348
2	30	0.35	76.9	0.7	0.048 5	0.075 379
3	30	0.40	46.4	1.0	0.064 2	0.086 223
4	50	0.30	138.2	1.0	0.131 5	0.141 373
5	50	0.35	76.9	0.4	0.183 6	0.193 443
6	50	0.40	46.4	0.7	0.253 6	0.212 546
7	70	0.30	46.4	0.7	0.289 6	0.299 522
8	70	0.35	138.2	1.0	0.286 4	0.242 899
9	70	0.40	76.9	0.4	0.387 9	0.299 754
11	100	0.40	138.2	0.4	0.397 5	0.393 857

表 5 劈裂扩散半径预测结果
Table 5 Split grouting diffusion radius prediction results

编号	影响因素				劈裂扩散半径/cm	
	含石量/%	孔隙比	黏度/(mPa·s)	注浆压力/MPa	试验值	预测值
1	30	0.30	138.2	0.4	0.290 5	0.238 164
2	30	0.35	76.9	0.7	0.381 6	0.369 813
3	30	0.40	46.4	1.0	0.370 9	0.380 295
4	50	0.30	138.2	1.0	0.173 6	0.174 879
5	50	0.35	76.9	0.4	0.100 5	0.141 968
6	50	0.40	46.4	0.7	0.102 5	0.154 297
7	70	0.30	46.4	0.7	0.056 4	0.057 872
8	70	0.35	138.2	1.0	0.044 2	0.040 803
9	70	0.40	76.9	0.4	0.042 1	0.040 803
10	0	0.30	138.2	0.4	0.355 0	0.353 992

预测模型建立如下：①选取 7 个样本构成训练集 $T = (x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_l, y_l)$, $x_i = X_i$ 为第 i 个训

练样本的列向量，即 4 个影响因素值； l 为样本长度，即训练集中样本的个数； y_i 为第 i 个训练样本相应的试验结果，即扩散半径值。其余 4 个样本则构成测试集。②选择 RBF 函数为其核函数，确定参数惩罚因子 c 与方差 g 。③求解最优化问题。④构造决策函数进行计算。

遵循上述预测模型，对渗透扩散半径训练集进行学习训练，然后对测试集进行预测，得到扩散半径预测值，各样本的扩散半径预测结果见表 4。同理，各样本的劈裂扩散半径预测结果见表 5。

渗透扩散半径训练集所求的均方差为 1.733×10^{-3} ，决定系数为 0.974；并求得测试集的均方差为 2.780×10^{-4} ，决定系数为 0.999。劈裂扩散半径训练集所求的均方差为 2.47×10^{-4} ，决定系数为 0.990；并求得测试集的均方差为 1.811×10^{-3} ，决定系数为 0.861。可见，支持向量回归机的预测具有良好的泛化能力。

5 基于支持向量机的浆液扩散半径影响因素分析

5.1 渗透扩散半径影响因素分析

5.1.1 孔隙比对渗透扩散半径影响分析

孔隙比与渗透扩散半径的关系曲线如图 14 所示。由图可知，3 条曲线高低分明，不存在交叉点，表明含石量的影响效果不易受孔隙比的制约。

根据渗透扩散机制分析，孔隙比越大，则土石混合体的渗透系数也越大，浆液渗透能力能，渗透速度快。因此，判断扩散半径与孔隙比呈正相关关系。图 14 中含石量为 70% 的曲线在孔隙比为 0.3 处不符合正相关关系，对应为浆液黏度最小的试验组，由于浆液流动性强，提高了浆液灌注能力，导致其扩散半径异常。说明浆液黏度相对于土石混合体孔隙比来说，对注浆扩散半径的影响更大。

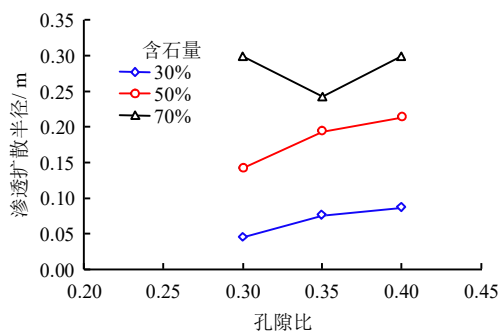


图 14 孔隙比与渗透扩散半径的关系
Fig.14 Relationships between porosity and permeability diffusion radius

5.1.2 浆液黏度对渗透扩散半径影响分析

浆液黏度与渗透扩散半径的关系曲线如图 15 所示。3 条曲线高低分明, 不存在交叉点, 含石量的影响效果不受浆液黏度的制约。

根据渗透扩散机制分析, 浆液黏度越大, 浆液流动性越差, 扩散半径越小, 为负相关。而含石量为 30% 的曲线不符合该规律, 对应为含石量为 30% 曲线中, 浆液黏度增大的同时, 孔隙比和注浆压力也增大, 孔隙比和注浆压力的增大都有利于浆液扩散, 说明此时浆液扩散能力受孔隙比和注浆压力两者共同的促进作用强于浆液黏度较差带来的抑制作用。

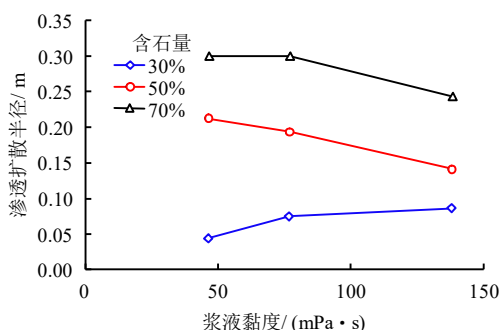


图 15 浆液黏度与渗透扩散半径的关系

Fig.15 Relationships between viscosity and permeation diffusion radius

5.1.3 注浆压力对渗透扩散半径影响分析

注浆压力与渗透扩散半径的关系曲线如图 16 所示。3 条曲线高低分明, 不存在交叉点, 含石量的影响效果不易受注浆压力的制约。

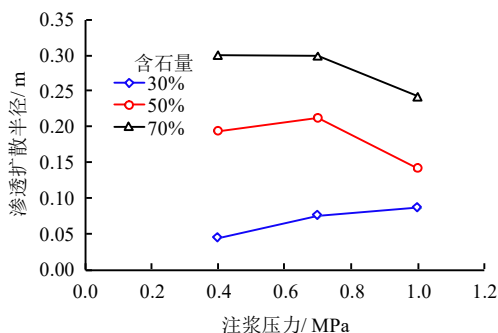


图 16 注浆压力与渗透扩散半径的关系

Fig.16 Relationships between grouting pressure and permeation diffusion radius

根据渗透扩散机制分析, 注浆压力越大浆液在压力作用下越易流动, 扩散半径则越大。而含石量为 50%、70% 的两条曲线不符合该规律, 含石量为 50% 时注浆压力最大值对应的扩散半径反而最小,

此时所对应的浆液黏度为最大值, 说明浆液黏度的影响效果更加显著; 含石量为 70% 时注浆压力最小值对应的扩散半径反而最大, 此时所对应的孔隙比为最大值, 说明孔隙比的影响在起作用, 因此孔隙比的影响效果强于注浆压力的影响效果。

综上所述, 各因素对渗透扩散半径的影响次序为: 含石量 > 浆液黏度 > 孔隙比 > 注浆压力。

5.2 劈裂扩散半径影响因素分析

5.2.1 孔隙比对劈裂扩散半径影响分析

孔隙比与渗透扩散半径的关系曲线如图 17 所示。含石量对劈裂扩散半径的影响效果与对渗透扩散半径的影响效果相反, 含石量越大, 劈裂扩散半径越小。3 条曲线高低分明, 不存在交叉点, 说明对于劈裂扩散半径, 含石量的影响效果也不易受孔隙比的制约。

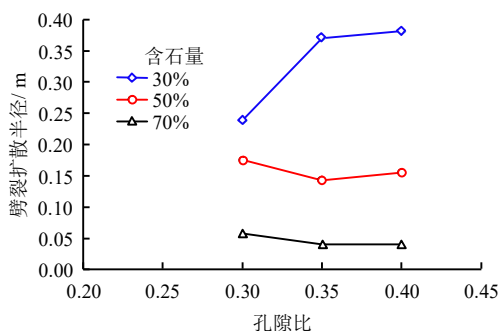


图 17 孔隙比与劈裂扩散半径的关系

Fig.17 Relationships between porosity and splitting diffusion radius

根据浆液注浆扩散理论分析, 在高含石量时, 孔隙比越大, 越利于浆液渗透扩散, 且孔隙比越大意味着石块之间的土体量越少, 少量的土被石骨架隔离, 无法形成连续的整体, 更不易发生劈裂现象; 而在低含石量时, 浆液可灌性差, 不易渗透, 注浆压力足够大时注浆以劈裂扩散形式为主, 此时孔隙比越大, 土体越易压缩, 有利于浆液劈入土体。含石量为 30% 和 70% 时曲线的变化趋势与分析一致。而当含石量为 50% 时, 扩散半径最大值出现在孔隙比最小时, 此时对应的注浆压力值最大; 同时其扩散半径最小值出现在孔隙比的中间值时, 此时对应的注浆压力值最小: 说明此时劈裂扩散效果主要受注浆压力值得影响, 注浆压力越大浆液扩散半径越大。

5.2.2 浆液黏度对劈裂扩散半径影响分析

浆液黏度与劈裂扩散半径的关系曲线如图 18 所示。3 条曲线高低分明, 不存在交叉点, 含石量的影响效果不易受浆液黏度的制约。

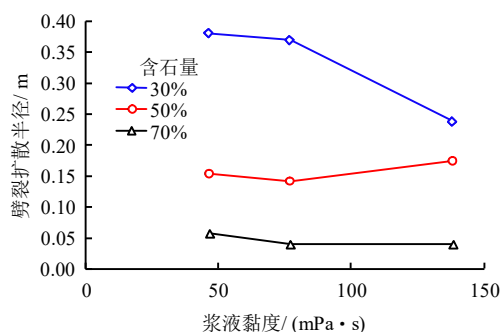


图 18 浆液黏度与劈裂扩散半径的关系

Fig.18 Relationships between viscosity and splitting radius of slurry

浆液黏度越大, 劈裂扩散半径越小。含石量为 30% 和 70% 时, 曲线变化趋势均符合这一规律。含石量为 50% 时, 扩散半径最大值出现在浆液黏度最大时, 此时对应的注浆压力为最大值; 扩散半径最小值出现在注浆压力最小时, 说明注浆压力相对于浆液黏度来说, 其影响效果更加显著。

5.2.3 注浆压力对劈裂扩散半径影响分析

注浆压力与劈裂扩散半径的关系曲线如图 19 所示。曲线随注浆压力的增大基本呈上升趋势, 说明注浆压力越大, 劈裂扩散半径值也越大, 仅含石量为 70% 时扩散半径变化曲线不符合该趋势。扩散最大值对应的注浆压力值为 0.7 MPa, 浆液黏度为最小值, 此处劈裂扩散效果为注浆压力、浆液黏度和孔隙比共同作用的结果。

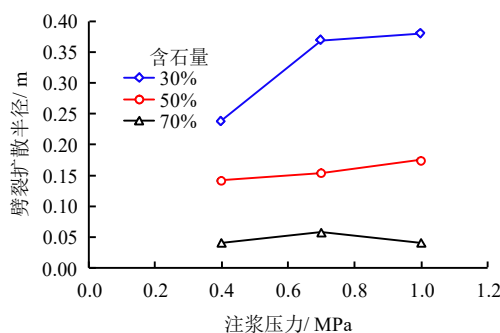


图 19 注浆压力与劈裂扩散半径的关系

Fig.19 Relationships between grouting pressure and splitting radius

综上所述, 各因素对劈裂扩散半径的影响次序为: 含石量>注浆压力>浆液黏度>孔隙比。

6 结 论

(1) 在含石量为 100% (纯石) 时, 水泥浆液以渗透扩散为主; 在含石量为 0% 时 (纯土), 以劈裂扩散为主。含石量由低到高变化时, 浆液主要扩

散方式由劈裂扩散转变为渗透扩散。中等含石量时, 劈裂扩散与渗透扩散相当。

(2) 结合支持向量机制论建立了土石混合体注浆扩散半径预测模型, 并基于该模型的计算结果, 获得了渗透扩散半径和劈裂扩散半径的影响因素的影响次序分别为: 含石量>浆液黏度>孔隙比>注浆压力; 含石量>注浆压力>浆液黏度>孔隙比。

(3) 土石混合体中, 含石量对浆液扩散形式的影响最大, 并主要影响扩散半径值的大小, 建议实际工程中应根据含石量的变化, 分区段进行注浆技术参数的设计。

参 考 文 献

- [1] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念, 分类及意义[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 50—56, 70.
XU Wen-jie, HU Rui-lin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(4): 50—56, 70.
- [2] 中华人民共和国冶金工程部. YSJ211—92 注浆技术规范[S]. 西安: 西安交通出版社, 1993: 3—4.
Ministry of Metallurgical Industry of the People's Republic of China. YSJ211—92 Code of technical regulations[S]. Xi'an: Xi'an Communications Press, 1993: 3—4.
- [3] 北京市住房和城乡建设委员会, 北京市质量技术监督局. DB11/1444—2017 城市轨道交通隧道工程注浆技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Beijing Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development, Beijing Bureau of Quality and Technology Supervision. DB11/1444—2017 Technical specification for grouting of urban rail transit tunnel engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [4] 钟祖良, 涂义亮, 何晓勇, 等. 土石混合体物理指标及强度特性研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 1135—1144.
ZHONG Zu-liang, TU Yi-liang, HE Xiao-yong, et al. Research progress on physical index and strength characteristics of bimsoils[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(4): 1135—1144.
- [5] 唐建一, 徐东升, 刘华北. 含石量对土石混合体剪切特性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 93—102.
TANG Jian-yi, XU Dong-sheng, LIU Hua-bei. Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018 39(1): 93—102.
- [6] 沈辉, 罗先启, 毕金锋. 土石混合体渗透侵蚀特性数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1497—1502, 1509.

- SHEN Hui, LUO Xian-qi, BI Jin-feng. Numerical simulation of internal erosion characteristics of block in matrix soil aggregate[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1497—1502, 1509.
- [7] 聂琼, 姜玉松. 纯水泥浆液稳定性试验研究[C]//地基基础工程与锚固注浆技术研讨会论文集. 长沙: 中国岩石力学与工程学会, 2009.
- NIE Qiong, JIANG Yu-song. Experimental study on stability of pure cement slurry[C]//Proceedings of Symposium on Foundation Engineering and Anchor Grouting Technology. Changsha: Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, 2009.
- [8] 饶香兰. 稳定水泥浆的研究与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- RAO Xiang-lan. The study and application of the steady cement paste[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [9] 杨坪, 陈安. 均匀设计在室内大型注浆试验研究中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006(3): 9—11.
- YANG Ping, CHEN An. Application of uniform design in grouting experiment[J]. **Exploration Engineering: (Rock Soil Drilling and Tunneling)**, 2006(3): 9—11.
- [10] 杨坪, 唐益群, 彭振斌, 等. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2134—2138.
- YANG Ping, TANG Yi-qun, PENG Zhen-bin, et al. Study on grouting simulating experiment in sandy gravels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(12): 2134—2138.
- [11] 申国磊. 不同地质条件下真空注浆模拟试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- SHEN Guo-lei. Research on simulation test of vacuum grouting under different stratum[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.
- [12] 夏小亮. 注浆材料优化配比与注浆试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.
- XIA Xiao-liang. Study on the optimization ratio of grouting materials and grouting experiment[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2011.
- [13] 许广坡. 岩溶注浆扩散半径物理模型试验及数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- XU Guang-po. Grouting diffusion radius of karst physical model and numerical simulation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [14] STOEL A E C V D. Pile foundation improvement by permeation grouting[C]//International Conference on Grouting and Ground Treatment. [S. l.]: [s. n.], 2003: 728—739.
- [15] BREITSPRECHER G, TÓTH P S. Underpinning of a pier by microfine cement grouting and compensation grouting[C]//International Conference on Grouting and Ground Treatment. [S. l.]: [s. n.], 2003: 740—751.
- [16] CHUAQUI M, BRUCE D A. Mix design and quality control procedures for high mobility cement based grouts[J]. **Geotechnical Special Publication**, 2011(120): 1153—1168.
- [17] 岩土注浆理论与工程实例协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- Collaboration of Rock and Soil Grouting Theory and Engineering Examples. Rock and soil grouting theory and engineering examples[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [18] WARNER J, SCHMIDT N, REED J, et al. Recent advances in compaction grouting technology[C]//Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics. [S. l.]: [s. n.], 2010: 252—264.
- [19] BEZUIJEN A, GROTEHUIS R T, TOL A F V, et al. Analytical model for fracture grouting in sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 137(6): 611—620.
- [20] 张弛, 王杰, 杜嘉鸿, 等. 岩土注浆技术的理论探讨[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2001, 17(1): 34—37.
- ZHANG Chi, WANG Jie, DU Jia-hong, et al. Theoretical discussion on geotechnical grouting technology[J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University**, 2001, 17(1): 34—37.
- [21] 战玉宝, 宋晓辉, 陈明辉. 岩土注浆理论研究进展[J]. 路基工程, 2010(2): 20—22.
- ZHAN Yu-bao, SONG Xiao-hui, CHEN Ming-hui. Research progress on grouting theory in rockmass[J]. **Subgrade Engineering**, 2010(2): 20—22.
- [22] 姜谟男, 梁冰. 基于遗传支持向量机的地下工程裂隙岩体注浆量预测[C]//第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集(下册). 北京: [出版者不详], 2006.
- JIANG An-nan, LIANG Bing. Prediction of grouting volume in fractured rock mass of underground engineering based on genetic support vector machine[C]//Proceedings of the 1st Chinese Water Conservancy and Hydropower Geotechnical and Engineering Symposium (Volume 2). Beijing: [s. n.], 2006.
- [23] 雷进生. 碎石土地基注浆加固力学行为研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013.
- LEI Jin-sheng. Research on mechanical behavior of grout in gravelly soil foundations[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2013.
- [24] 金业权. 非牛顿流体漏斗黏度与塑性黏度的试验研究[J]. 西部探矿工程, 2004, 16(2): 37—38.
- JIN Ye-quan. Experimental study on viscosity and plastic viscosity of non-Newtonian fluid funnel[J]. **West-China Exploration Engineering**, 2004, 16(2): 37—38.
- [25] 邓乃扬, 田英杰. 支持向量机: 理论、算法与拓展[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- DENG Nai-yang, TIAN Ying-jie. Support vector machine: theory, algorithm and extension[M]. Beijing: Science Press, 2009.