

影响离析浆液扩散过程的主要因素研究

——基于莽山水库工程注浆工程

朱浩龙^{1,2}, 曹 函^{1,2}, 郑 洪³, 林 飞³, 宾 斌⁴

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083;

2. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083;

3. 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南 长沙 410007;

4. 湖南宏禹工程集团有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘 要: 为研究全风化花岗岩地层中不同注浆工况下扩散距离、注浆量变化规律, 基于莽山主副坝全风化花岗岩帷幕注浆工程现场测试、室内试验数据开展了注浆参数影响因素分析, 在考虑注浆量及浆液扩散时对注浆时间的选取提出设想并得到验证, 采用非稳态达西渗流运动模型推导出注浆过程中浆液扩散方程, 运用数据分析软件对试验数据进行拟合, 得到了具有较高精度的模型, 且拟合效果较好。研究成果可帮助学者对离析浆液在全风化花岗岩地层中的运移过程及扩散规律有更深刻的了解, 从而为实际注浆工程中针对于松散地层钻孔间距的设置提供理论参考和指导。

关键词: 离析浆液注浆; 全风化花岗岩; 浆液扩散; 注浆时间

中图分类号: TV523

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)06—0077—06

Main Affecting Factors of Segregation Slurry Diffusion Process

——Grouting Project Based on Mangshan Reservoir Project

ZHU Haolong^{1,2}, CAO Han^{1,2}, ZHENG Hong³, LIN Fei³, BIN Bin⁴

(1. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring Ministry of Education, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

3. Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha, Hunan 410007, China;

4. Hunan Hongyu Engineering Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410007, China)

Abstract: In order to analyze weathered granite strata in the diffusion distance under different working condition of grouting, grouting quantity change rule, based on Mangshan main auxiliary dam forest fully weathered granite curtain grouting engineering field test and laboratory test data to carry out the grouting parameters influencing factors analysis, when considering grouting quantity and grout diffusion is presented and verified the selection of grouting time, the unsteady darcy seepage flow model is deduced in the process of grouting slurry diffusion equation, using the data analysis software to test data fitting, the model is of high precision, and the fitting effect is good. The research results can improve the understanding of the migration process and diffusion law of the segregation slurry in the completely weathered granite strata, thus provide theoretical reference and guidance for the setting of borehole spacing in the loose strata in the actual grouting engineering.

Keywords: grouting of isolated slurry; fully weathered granite; slurry diffusion; grouting time

收稿日期: 2020-07-16

修稿日期: 2020-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41302124); 国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室基金开放课题基金资助(EDLF2017)

作者简介: 朱浩龙(1997—), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 研究方向为非常规能源开发、岩石力学。E-mail: zhuhaolong@csu.edu.cn

通讯作者: 曹 函(1982—), 女, 湖北随州人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事非常规能源钻采关键技术与储层保护等教学与科研工作。

E-mail: hancao@csu.edu.cn

本研究依托莽山主副坝全风化花岗岩帷幕注浆工程,该工程采用高压脉动注浆技术灌注离析浆液对全风化花岗岩地层进行防渗加固处理,以达到地层透水率小于 5 Lu 的目的。现场研究发现帷幕注浆效果主要受到浆液在地层中的扩散范围的影响。全风化花岗岩一方面岩体强度较高,另一方面具备松散砂土体的特性,在防渗工程处理中十分棘手^[1-5]。注浆作为隐蔽工程,是改善地质条件的常用手段,具有提高土体防渗性能、增强地层承载能力的作用。注浆方案设计时,钻孔间排距影响显著,合理的钻孔间排距可以确保浆液在地层中充分运移,避免浪费注浆材料^[6]。

随着注浆技术的发展,目前已取得发展的注浆理论有渗透注浆,劈裂注浆,压密注浆,电动化学注浆,低渗透介质注浆等^[7]。浆液进入地层往往先从渗透注浆发展成压密注浆,达到地层起劈压力后发展至劈裂注浆。浆液在复杂的地层构造中渗透、渗流于岩土体,同时在浆液运移的过程中岩土体内部发生的物理化学反应十分复杂,且难以准确模拟岩土体内裂隙分布,使得注浆技术人员难以精确的描述岩土体内浆液的运动规律以及扩散范围,因此目前针对注浆理论的研究往往比实践滞后许多^[8]。影响浆液扩散半径的因素有很多,在不同的工程条件下具有极大的差异性,因此只有在某一特定工程环境下所得到的浆液扩散半径数据才具有实际意义。目前国内外研究中,程少振^[9]对劈裂注浆浆液扩散机制和加固机理进行研究,再现了软弱地层中劈裂注浆扩散过程,获得了黏土地层劈裂扩展速度和裂缝宽度随注浆压力的变化规律;周健等^[10]运用 PFC 软件对渗流现象进行了细观模拟研究。张玉等^[11]研制了“一维渗透有机玻璃分段拼接式注浆管系统”,分析了在孔隙介质中渗滤效应对注浆效果的影响机制以及有效扩散距离的计算;沙飞等^[12]设计了一套可视化砂土介质恒压注浆渗透扩散与加固模拟试验装置研究了细砂土体不同浆液、注浆压力工况下扩散距离、注浆量随时间变化规律,以及不同浆液、砂样级配及注浆压力对加固效果的影响。另外,通过研究土体经过注浆改造后细观特性很显然可以反映地层的宏观表现,故而证明了散体介质颗粒流理论应用于注浆工程的数值模拟研究的可行性。Au 等^[13]提出黏土中补偿注浆的概念模型,指出水力劈裂发生后,可能形成劈裂注浆的浆脉,也有可能继续压密注浆;孙峰等^[14]和郑刚等^[15]基于散体介质理论的颗粒流分析方法,针对具有黏聚力的

致密土体,建立能反映颗粒体与流体域耦合作用的土体注浆颗粒流模型。

以上研究大多采用室内试验或数值模拟手段进行了不同类型地层的注浆实验,探索浆液在地层中的运移过程。但由于相同注浆工艺下不同地层的注浆效果往往差异显著,因此常规浆液扩散模型针对于特定地层效果往往不够理想。本文结合前期现场数据和室内注浆模型试验确定了浆液扩散方程并进行优化,通过拟合试验数据分析不同注浆参数对浆液扩散规律的影响,对全风化花岗岩地层中离析浆液的运移过程进行探索,为注浆工程中钻孔间排距的具体设置提供参考。

1 浆液扩散方程的确定

项目地层为典型的孔隙-裂隙二重介质,假设该类地层为拟连续介质或连续介质,注浆浆液假设为不可压缩流体。将完整的注浆过程中浆液的扩散看作以注浆压力为主要推动力的非稳态达西渗流运动,则可得到浆液在地层中扩散基本微分方程为^[16]:

$$\frac{\partial^2 (K_e P)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (K_e P)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (K_e P)}{\partial z^2} = Q \frac{\partial P}{\partial T} \quad (1)$$

式中: K_e 为注浆浆液渗透系数, m/s; P 为注浆压力, MPa; Q 为注浆过程中注浆量, m^3 ; T 为注浆时间, s。

1.1 注浆浆液渗透系数 K_e

钻孔扰动及注浆压力可使地层中应力变化,从而影响浆液在地层中的扩散规律。因此 Louis^[17]提出了材料应力与渗透系数的关系,得到稳压条件下受注地层中浆液扩散的渗透系数表达式:

$$K_e = K_0 e^{-\lambda(\Delta\sigma - P)} \quad (2)$$

式中: K_0 为被注地层初始渗透系数, m/s; λ 为宏观试验参数; $\Delta\sigma$ 为钻孔前后过程中的平均主应力差, Pa。

1.2 注浆压力 P

整体注浆过程中注浆压力假设为稳压状态,注浆压力在注浆管中无衰减,即注浆压力等于设计注浆压力,则有以下关系式:

$$P = P_0, T > 0 \quad (3)$$

式中: P_0 为初设注浆压力, MPa; T 为注浆时间, s。

1.3 注浆时间 T

较大黏度浆液在地层中的扩散主要会对地层的产生劈裂作用,那么当劈裂裂缝注浆压力值与受注土体的起劈压力 P_s 相等时,用公式表达即为:

$$\Delta P = P_0 - P_s \quad (4)$$

式中: ΔP 为注浆压力差,MPa; P_0 为初设注浆压力,MPa; P_s 为受注地层的起劈压力,MPa;也即在此时,浆液则结束了在受注地层的扩散过程,那么从浆液出钻孔的瞬间到结束扩散的时间即为注浆时间 T 。

1.4 注浆量 Q

注浆过程中,注浆量主要受注浆管管径、浆液流速、有效注浆时间等众多因素的影响,为简化计算,假设注浆量只受此三个因素影响。当注浆管半径为 r ;浆液以恒定流速 V_0 从注浆管口流出;有效注浆时间为 T_0 (在富水工况中注浆,部分浆液会被冲散流失没有发挥作用,即可认为是无效注浆时间)^[18],假设浆液的有效注浆时间等于其初凝时间,则公式表达即为:

$$Q = \pi r^2 V_0 T_0 \quad (5)$$

联立式(1)一式(5)即为稳压条件下浆液扩散运动的基本控制方程。

2 注浆参数影响因素分析

基于前期多次室内、现场试验,可明显观察到注浆过程中影响注浆量的因素有注浆管管径 r 、注浆管口流速 V_0 、有效注浆时间 T_0 等,而影响注浆过程中浆液扩散的范围则主要有注浆压力 P ,注浆时间 T 以及注浆流量 q 等因素。采用上一节所建立的数学模型探讨不同注浆管口流速、注浆时间以及注浆管参数对注浆量的影响,并探究在不同注浆压力,注浆流量以及注浆时间下浆液的扩散规律。

通过浆液扩散方程的建立以及注浆参数影响因素分析,基于前期现场原位测试及室内试验收集到的注浆过程中各项参数的数据进行了拟合。

2.1 注浆管口流速对注浆量的影响

图 1 为不同有效注浆时间下,注浆管口浆液流速与注浆量关系曲线。

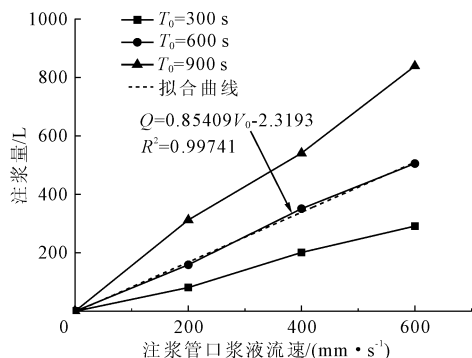


图 1 不同有效注浆时间下,注浆管口浆液流速与注浆量关系

由图 1 可以看出当有效注浆时间较短时,注浆管口浆液流速增大对注浆量增长影响不明显,而随着有效注浆时间的增长,注浆管口浆液流速对注浆量增长速率的影响明显增大,同一注浆管口浆液流速下,注浆量增长速率也有极大提升。当有效注浆时间从 300 s 延长至 900 s 时,在注浆管口浆液流速为 600 mm/s 下注浆量从 291 L 提升至 839 L。对上述现象的产生原因进行分析,注浆过程前期土体先在注浆口处逐渐形成浆泡并挤密周围土体,之后当注浆压力大于起劈压力时进入劈裂注浆过程,即如图 1 所示注浆前期注浆量增长速率较缓慢,当土体中发生初始劈裂后注浆量增长速率明显增大。但也需要注意的是,当注浆管口浆液速率达到某个边界数值时,此时继续增大注浆管口浆液速率将对注浆量的影响不再明显,这是因为注浆速率过快将使浆液在地层中没有充足的时间劈裂土体,从而使注浆量不如预期。

2.2 有效注浆时间对注浆量的影响

图 2 为不同注浆管口浆液流速下,有效注浆时间与注浆量关系曲线。

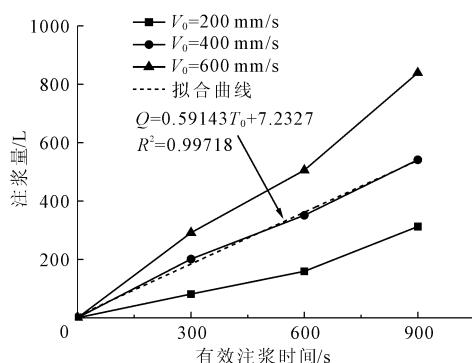


图 2 不同注浆管口浆液流速下,有效注浆时间与注浆量关系

由图 2 可以看出,有效注浆时间对注浆量影响显著,注浆量随有效注浆时间增大而增大,当有效注浆时间持续 900 s 后,注浆管口浆液流速从 200 mm/s 增大到 600 mm/s,注浆量最终从 312 L 增至 839 L。而相同注浆管口浆液流速下,注浆量后期增长速率明显大于前期增长速率,且随着注浆管口浆液流速增大这种现象表现得更加明显。对产生图 2 中现象原因进行分析,很显然延长有效注浆时间可以使浆液在地层中有充足的时间从渗透注浆经过压实注浆最终发展至劈裂注浆,从而使注浆率有极大提升。提高注浆管口浆液流速的同时,延长注浆时间才能取得较好的注浆效果。

2.3 注浆管径对注浆量的影响

图 3 为不同注浆管径下,有效注浆时间与注浆量关系曲线。

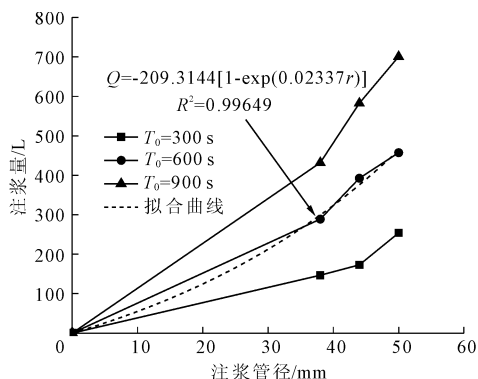


图 3 不同注浆管径下,有效注浆时间与注浆量关系

由图 3 可以看出,注浆管径对注浆量的影响效果显著。在相同有效注浆时间下,注浆量随着注浆管径增大而增大,且随着有效注浆时间的延长,注浆管径增大对注浆量增长的影响明显提升;在同一注浆管径下,随着有效注浆时间的延长,注浆量也会随之增大。当注浆管径从 38 mm 扩大至 50 mm 时,注浆量最终也从 432 L 增长到了 701 L。

2.4 注浆压力对浆液扩散规律的影响

图 4 为不同有效注浆时间下,注浆压力与浆液扩散半径关系曲线。

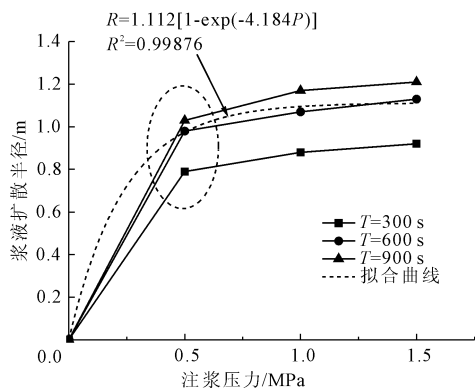


图 4 不同注浆时间下,注浆压力与浆液扩散半径关系

由图 4 可以看出,注浆压力是浆液扩散半径的主要影响因素之一,浆液扩散半径随着注浆压力增大而增大。在注浆时间持续 900 s 时,当注浆压力从 0.5 MPa 增大到 1.5 MPa,浆液最终扩散半径从 1.03 m 增至 1.21 m。从图中可以观察到,在相同注浆时间下当注浆压力达到 0.5 MPa 后,浆液扩散半径增长速率明显降低。对上述现象的产生原因进行分析,地层的注浆浆液渗透系数随注浆压力增加也随之上升,也即通过提高注浆压力可改善地层的注

浆浆液渗透系数,因此浆液扩散半径会随着注浆压力的增长而增大,但根据其他学者的研究,当注浆压力大于某一边界数值后^[16],继续增大注浆压力对于浆液扩散半径影响不再显著,且过大的压力会降低结石体强度,使浆脉变薄,影响注浆效果,从图 4 中也可看出其趋势。

2.5 注浆时间对浆液扩散规律的影响

图 5 为不同注浆压力下,注浆时间与浆液扩散半径关系曲线。

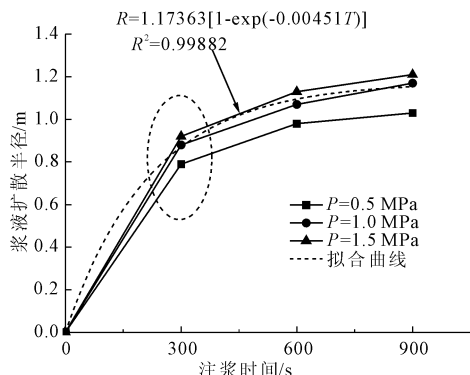


图 5 不同注浆压力下,注浆时间与浆液扩散半径关系

由图 5 可以看出,注浆时间从 300 s 延长至 900 s,浆液最终扩散半径从 0.92 m 增长到了 1.21 m,当注浆时间逐渐延长时,浆液在地层中扩散半径明显增大。对产生图 5 中现象原因进行分析,当注浆时间太短时,地层中的浆液难以充分扩散,只有继续延长注浆时间,使地层中的浆液具备充足的时间发展裂缝,方可产生很好的扩散效果。但通过从图 5 中观察趋势,延长注浆时间虽然能显著增长浆液扩散半径,但当增长到某一临界值时(图中注浆时间 300 s),地层中的浆液扩散速率将急剧降低,此时继续延长注浆时间对浆液扩散半径的影响不再明显。

2.6 注浆流量对浆液扩散规律的影响

图 6 为不同注浆流量下,注浆时间与浆液扩散半径关系曲线。

由图 6 可以看出,注浆流量同样影响着浆液在地层中的扩散效果。提高注浆流量可显著增长浆液扩散半径,在相同注浆流量下,随着注浆时间的延长,浆液扩散半径也随之增大,且很明显的观察出浆液扩散半径的前期增长速率大于后期(浆液扩散半径增长速率在注浆流量达到 0.3 L/s 后明显降低),对产生以上现象原因进行分析,注浆过程中浆液注入地层首先迅速充满土体中缝隙,当缝隙充满后即从渗透阶段进入压密阶段,此时若土体弹性模量较大,浆液很容易受到周围土体挤密压缩而难以扩散,

因此便产生如图中所示在注浆前期浆液扩散速率大于后期的现象。当注浆流量从 0.3 L/s 增长至 0.9 L/s 时,浆液扩散半径从 0.97 m 随之增长至 1.3 m。但根据试验数据以及其他学者^[6]的相关研究结果,能够看到当注浆流量大到一定数值时,浆液扩散半径几乎不会随之变化。对产生图 6 中现象原因进行分析,当注浆流量过大时,浆液很可能在地层中难以及时扩散,当在浅孔注浆时,由于地层中较少有贯通裂隙,因此注浆流量过大将会产生瞬间高压状况,导致施工人员误认为此时土体已被注满从而终止注浆,这种情况下浆液随着时间逐渐渗透不能较好的充填裂隙。

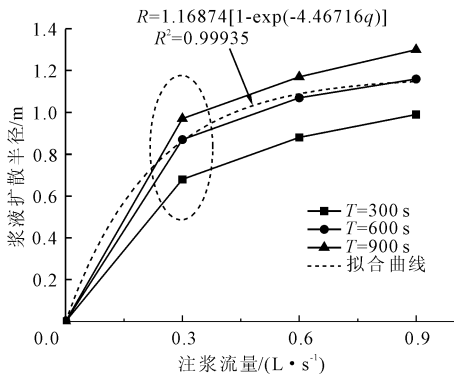


图 6 不同注浆流量下,注浆时间与浆液扩散半径关系

3 不同模型下注浆量及浆液扩散规律

通过数学建模及数据拟合方式建立起模型以得到注浆量和浆液扩散半径。在相同条件下运用模型计算出注浆量与浆液扩散半径的数据并于现场试验结果进行对比,探究模型的适用性。

常规浆液扩散方程^[16]即为公式(1)—公式(5)。

试验数据拟合公式见图 1—图 6。

同时引用了孙峰所假设模型^[14]与试验数据拟合公式进行对比,对模型有效性进行验证。

3.1 预测注浆量

假设地层为全风化花岗岩构造,地层参数以及浆液参数完全一致,取注浆流速 $V_0 = 400$ mm/s,注浆管径 $r = 44$ mm,计算出不同有效注浆时间下的注浆量(见图 7)。

由图 7 可以看到,通过试验数据拟合公式计算出的预测注浆量与现场试验结果、常规浆液扩散方程相比基本吻合,且都具有相同的增长趋势,注浆量随着有效注浆时间的延长随之增长。相同注浆参数下,通过常规浆液扩散方程预测到的注浆量往往大

于拟合公式所预测的注浆量,分析其原因为常规浆液扩散方程将地层看作均匀介质,这与现场情况是完全不同的,从而产生拟合公式预测结果略小于常规浆液扩散方程的现象。

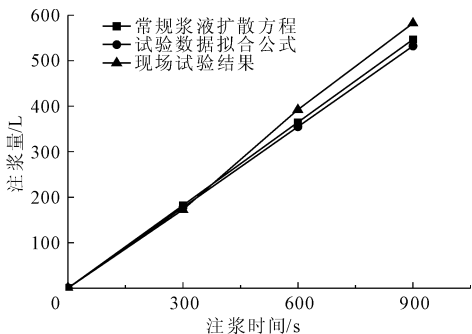


图 7 不同有效注浆时间下预测注浆量对比

此外,在拟合公式和常规浆液扩散方程中,注浆时间,注浆管口浆液流速以及注浆管径都对注浆量影响显著,且都表现为正相关,证实选用以上三种注浆参数评价注浆量是可行的。

3.2 预测浆液扩散半径

假设地层为全风化花岗岩构造,地层参数以及浆液参数完全一致,取注浆时间 $T = 600$ s,注浆流量 $q = 0.6$ L/s,计算出不同注浆压力 P 下的浆液扩散距离,并与孙峰等^[14]的稳压扩散公式计算结果进行对比(见图 8)。

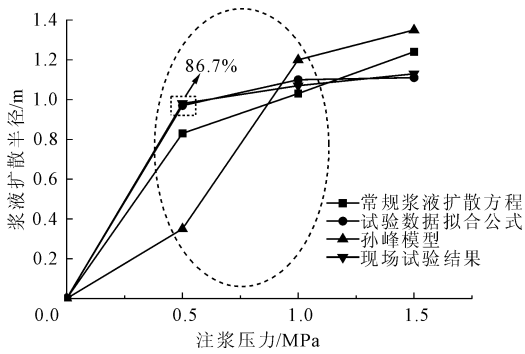


图 8 不同注浆压力下预测浆液扩散半径对比

由图 8 显然可以看出,通过试验数据拟合公式计算出的预测浆液扩散半径与现场试验结果、常规浆液扩散方程相比基本吻合,都具有随注浆压力增大浆液扩散半径随之增大的趋势,证实了采用注浆压力,注浆时间以及注浆流量三种参数建立浆液扩散半径评价体系是可行的,且在注浆压力增加前期,浆液扩散半径增长率较大,超过了 80%。引用孙峰模型^[14]在相同条件下计算,得到在不同压力下三套模型与实际试验现场结果在前期增大注浆压力时对

浆液扩散半径增长的影响,均明显大于后期增大注浆压力对浆液扩散半径增长的影响(浆液扩散半径增长速率在注浆压力达到 0.5 MPa ~ 1.0 MPa 范围内发生转折)。

现场试验数据和三套模型的预测结果对比后可以发现,在 0.5 MPa 时,常规浆液扩散方程预测值大于现场数据,原因是现场地质条件为全风化花岗岩碎石砂土或黏土质砂,这与模型中假设的均匀地层不同,从而造成预测值的明显差异,此外,孙峰模型预测值明显小于现场试验,这也是由于基于颗粒接触黏结模型模拟地质条件与现场地层差异性所导致。

4 结 论

(1) 注浆管径、有效注浆时间以及注浆流速三个参数对注浆量影响显著。当有效注浆时间从 300 s 延长至 900 s 时,在注浆管口浆液流速为 600 mm/s 下注浆量从 291 L 提升至 839 L;当有效注浆时间持续 900 s 时,注浆管口浆液流速从 200 mm/s 增大到 600 mm/s,注浆量最终从 312 L 增至 839 L;在注浆管口浆液流速为 400 mm/s 下,注浆管径从 38 mm 扩大至 50 mm 时,注浆量最终也从 432 L 增长到了 701 L。

(2) 注浆压力、注浆时间以及注浆流量对浆液扩散距离影响巨大。在注浆时间持续 900 s 时,当注浆压力从 0.5 MPa 增大到 1.5 MPa,浆液最终扩散半径从 1.03 m 增至 1.21 m;当注浆压力达到 1.5 MPa 时,注浆时间从 300 s 延长至 900 s,浆液最终扩散半径从 0.92 m 增长到了 1.21 m;在注浆时间达到 900 s 时,注浆流量从 0.3 L/s 增长至 0.9 L/s,浆液扩散半径从 0.97 m 随之增长至 1.30 m。

(3) 建立不同有效注浆时间下注浆量,以及不同注浆压力下的浆液扩散半径两种模型,并将常规扩散方程与现场数据进行对比。结果表明通过所拟合公式预测注浆量与浆液扩散半径,与孙峰模型、常规浆液扩散方程及现场结果相比增长趋势相同,证明具有较好的有效性。注浆压力增加前期,浆液扩散半径增长率较大,超过了 80%。利用建立的模型对注浆工程中浆液扩散情况进行模拟,能很好的反映工程现象,对注浆工程实践具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 李玉龙. 压密注浆在深厚杂填土地基坑止水帷幕的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 163-167.

[2] 袁克阔,李雄伟,徐拴海,等. 巨厚富水松散砂层溃砂灾害现状与注浆固沙技术研究及应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(4): 32-38.

[3] 刘 坪,宾 斌,林 飞,等. 全风化花岗岩地层控制性高压脉动灌浆应用[J]. 湖南水利水电, 2020(2): 1-3.

[4] 王旭斌,郑 洪,林 飞,等. 全风化花岗岩防渗关键技术研究与设计[J]. 水利规划与设计, 2019(4): 149-153.

[5] 陈爱云. 黑云母花岗岩全风化层工程地质特性研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(6): 22-25, 43.

[6] 孙志强,张 露. 不同注浆压力下浆液扩散半径试验研究[J]. 煤矿现代化, 2019(5): 109-111.

[7] 杨 艳,常晓林,周 伟,等. 裂隙岩体水力劈裂的颗粒离散元数值模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(5): 78-85.

[8] 于 方,薛 炜. 注浆理论浅析[J]. 广州化学, 2014, 39(1): 1-8.

[9] 程少振. 土体劈裂注浆扩散与加固机理及工程应用[D]. 北京:北京交通大学, 2019.

[10] 周 健,张 刚,孔 戈. 渗流的颗粒流细观模拟[J]. 水利学报, 2006(1): 28-32.

[11] 张 玉,郭 豪,陈铁林,等. 孔隙介质水泥浆液渗透注浆有效扩散距离试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10): 2536-2551.

[12] 沙 飞,李术才,林春金,等. 砂土介质注浆渗透扩散试验与加固机制研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4259-4269.

[13] Chen Y J. Discussion of "factors affecting long-term efficiency of compensation grouting in clays" by S. K. A. Au, K. Soga, M. R. Jafari, M. D. Bolton, and K. Komiyai[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(8): 883-884.

[14] 孙 锋,张顶立,陈铁林,等. 土体劈裂注浆过程的细观模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 474-480.

[15] 郑 刚,张晓双. 劈裂注浆过程的二维颗粒流的模拟研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2015, 54(6): 905-912.

[16] 张 聪,梁经纬,阳军生,等. 堤坝脉动注浆浆液扩散机制及应用研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1507-1514.

[17] Louis C. Rock hydraulics[C]//Rock Mechanics. New York: Springer Verlag, 1974: 299-387.

[18] 王丽娟,李 凯,张金接,等. 膏浆平面裂隙动水注浆扩散模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3404-3411.