DOI:10.13880/j.cnki.65-1174/n.2026.21.016 文章编号:1007-7383(2026)05-0562-06

考虑渗滤效应的超细水泥注浆机理分析

秦鹏飞
(黄河科技学院工学部,河南 郑州 451000)

摘要:注浆能显著提升粉细砂层的抗渗和承载性能,目前在地铁隧道等工程建设中得到了广泛应用。基于黏性流体运动理论,考虑浆液扩散 Darcy 定律、线性滤过原理、渗流连续性条件及压力降方程,建立渗滤效应下超细水泥浆液扩散的理论模型,探索多孔介质中浆液锋面速度、压力的变化机理,并结合厦门某工程项目建设进行实测验证。研究结果表明:不考虑渗滤作用的恒速注浆时,其锋面速度为考虑渗滤作用的 3.9~5.8 倍,而不考虑渗滤作用的恒压注浆时,其锋面速度则为考虑渗滤作用的 1.6~1.9 倍;某固定时刻浆液压力降和锋面压力沿程减小,随渗滤作用的加剧水泥颗粒逐渐在孔隙通道上滞留沉积,浆液锋面压力逐渐回升。工程实测显示,理论计算值与实际值存在 14%~19%的误差,表明所建立的三维锋面扩散模型具有较高的适用性,可为土木、水利等注浆工程提供借鉴和指导。

关键词:地铁工程;多孔介质;渗滤效应;扩散机理;超细水泥
中图分类号:U231 **文献标志码**:A

Analysis on the mechanism of ultrafine cement grouting considering the percolation effect

QIN Pengfei
(Department of Engineering, Huanghe University of Science and Technology, Zhengzhou, Henan 451000, China)

Abstract: Grouting can significantly improve the impermeability and bearing capacity of silty fine sand layers, and has thus been widely used in engineering construction of subway tunnels and other projects. Based on the theory of viscous fluid motion, and incorporating Darcy's law of slurry diffusion, the linear filtration principle, seepage continuity conditions and the pressure drop equation, a theoretical model for the diffusion of ultra-fine cement slurry under the percolation effect was established. This model investigates the change mechanism of slurry front velocity and pressure in porous media, and is validated through field measurements from a construction project in Xiamen. The results indicate that under constant-rate grouting, the front velocity without considering percolation effect is 3.9 to 5.8 times that when percolation is considered. Under constant pressure grouting, the front velocity without considering percolation effect is 1.6 to 1.9 times that with percolation considered. At a given time, both the slurry pressure drop and the front pressure decrease along the flow path; as the percolation intensifies, cement particles gradually accumulate in the pore channels, and the slurry front pressure gradually rises. Engineering measurements show that the discrepancy between theoretical calculations and actual values ranges from 14% to 19%, demonstrating that the proposed three-dimensional front diffusion model possesses high applicability and can serve as a reference and guide for grouting engineering in civil and hydraulic engineering fields.

Key words: subway engineering; porous media; percolation effect; diffusion mechanism; ultrafine cement

随着我国城市化进程加快,地下空间开发已从“补充性选择”跃升为支撑城市高质量发展的核心战略,成为承载现代文明的“第二空间”。在向深层、超大、复杂地质环境拓展的过程中,面临前所未有的挑战和难题[1]。地下水迁徙、流动常引发流砂、管涌等病害,威胁着城市地下工程安全,无处不在的地下水及其造成的涌突水病害,目前成为工程建设与城市安全的巨大隐患。通过注浆可以有效改善砂层的物理力学性能,起到明显的止水防渗和加固效果,且注浆技术具有投资小见效快的优势,目前在地下工程建设中得到了广泛的应用[2]。

水泥浆液在粉细砂层渗透扩散中,受惯性力或

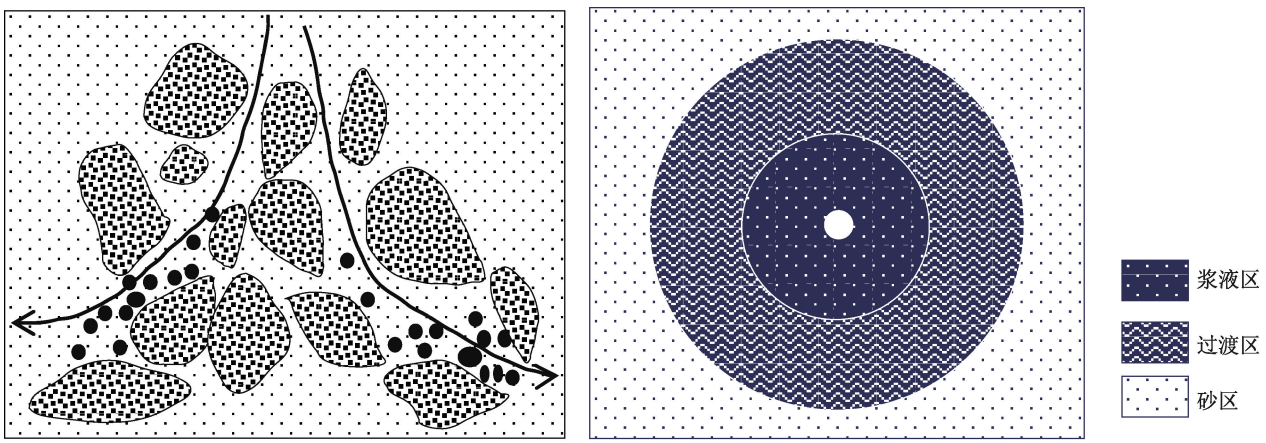
收稿日期:2025-12-05
基金项目:河南省自然科学基金项目(252300420053)
作者简介:秦鹏飞(1984—),男,副教授,主要从事不良地质体加固、高铁路基沉降防治方面的研究,e-mail:929163723@qq.com。

吸附力的影响水泥颗粒会逐渐与流线方向偏离,并在孔隙通道内沉积,此现象为“渗滤效应”。渗滤效应可使浆液的有效扩散距离降低,导致注浆加固效果沿程衰减。Kim[3]将渗滤效应视为水泥与砂土颗粒的质量交换过程,通过分析浆液扩散连续方程和质量守恒方程,探讨了滤滤系数 λ 沿砂层扩散路径的变化规律;李术才[4]基于广义达西定律和渗滤效应动力学,通过引入颗粒沉积概率模型,分析了渗滤过程中水泥颗粒的沉积、迁移特征,揭示了渗滤作用对浆液流量、流速的影响机理;陈铁林[5]指出超细水泥浆液在砂土内部的扩散是复杂的动态耦合过程,浆液水灰比、注浆压力、砂土孔隙比及地下水流量、流速均会对注浆效果产生显著影响;Wu[6]认为砂土等多孔介质对浆液的滤过作用,分为表层渗滤和深层渗滤,水泥浆液在砂层中的渗透扩散主要受深层渗滤作用的制约;王雪松等[7]认为渗滤作用显著降低了颗粒型浆液的有效扩散范围,导致结石体的力学强度减小。

国内外学者对渗滤效应机制、浆液浓度-黏度变化特性,及多孔介质中悬浮颗粒滤失特征等进行了卓有成效的研究,然而关于粉细砂地层中水泥浆液三维运动速度、渗滤作用下浆液压力变化规律等方面却鲜有研究,所以本文基于黏性流体运动理论,考虑浆液扩散 Darcy 定律、线性滤过原理及压力降方程,建立渗滤效应下浆液扩散的理论模型,探索多孔介质中浆液锋面速度、压力的变化机理,并结合厦门工程进行实测验证,旨在为促进渗透注浆技术的高质量发展,并为土木、水利等工程建设提供借鉴和指导。

1　浆液扩散模型分析

超细水泥浆液在砂土介质内的扩散是复杂的物理化学过程,浆液扩散过程中存在水化反应,浆液黏度不断增长。浆液内部粒度分布不均,受流体剪切作用、惯性力及沉积作用影响,表层浆液易发生析水现象,导致浆液密度、浓度呈空间各向异性状态。砂土介质对流动扩散的水泥颗粒产生滤过作用,导致浆液流速、压力沿程衰减。浆液初始流速 $v=v_0$,压力 $p=p_0$,由于存在能量耗散,超细水泥浆液扩散中速度势梯度逐渐变小,至砂土交界面处 $v=v_2$,$p=p_2$(图 1)。



a—水泥颗粒滤积　　b—二维渗透扩散

图 1　浆液扩散模型分析

Figure 1　Slurry diffusion model analysis

1.1　浆液流速特征

超细水泥浆液是具有一定黏滞度的黏性流体,其在砂层内的扩散遵从质量守恒方程和 Navier-Stokes 方程。李术才等[8]和 Xu 等[9]均由黏性流体运动学得出了超细水泥浆液在多孔介质中层流流速计算公式;Israr 等[10]和刘人太[11]通过研究得到了浆液压力梯度;房 凯等[12]和 Zhou[13]分别根据黏性流体质量守恒和 Darcy 定律,得出了流经某断面的水泥颗粒总体积计算公式。

由于水泥颗粒与砂土颗粒密度相差不大,可近似认为相等,郑卓[14]和刘人太[15]均由线性滤过定律得出了水泥滤失系数 λ 与水泥颗粒含量、渗滤系数 χ 的关系式[16-17]。

1.2　浆液压力分布

渗滤效应表现为超细水泥浆液中的固体颗粒与砂土颗粒的物质交换,且满足体系守恒方程,郑卓[18]和韩伟伟[19]分别由高等渗流力学和黏性流体力学得出了浆液沿程扩散过程中压力降的有关公式和浆液扩散中伴随着颗粒滤失和能量耗散的压力衰减方程、水泥颗粒的沉积或然率 e 及单位长度砂层

超细水泥颗粒沉积的或然率 x。

2 浆液动态运移机制

水泥浆扩散区由于水泥颗粒被砂土介质吸附、截留,渗透系数 k_1 较初始渗透系数 k_0 小。取 $k_1 = 0.8k_0$,对渗滤效应下浆液锋面速度、压力的变化关系进行分析,并与恒定流速、恒定压力下 Darcy 渗流扩散特征进行比较。计算所选取的相关参数见表 1。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

p_0/MPa	g/(m·s^{-2})	ρ_w/(g·cm^{-3})	v_0/(cm·s^{-1})	ρ_1(g·cm^{-3})	ρ_h/MPa	k_0/(cm·s^{-1})	χ/s^{-1}	l_0/cm	s/cm	m	y_c
1.1	9.8	1.0	14.7	1.76	0.58	2.13×10^{-2}	2.9×10^{-2}	2.5	360	0.8∶1	0.41

注:设备单位成本取值来源于实际工程项目的计算数据。

2.1 压力衰减特征

取 $\Delta B = 0.58$ kPa/cm,$z\times j = 57.6$,对不同浓度梯度条件下浆液压力的变化特性进行分析。根据超细水泥浆液在砂土介质中的渗透扩散机制,对 l_c = 15 cm、l_c = 30 cm 及 l_c = 45 cm 处,浆液压力降与注浆时长的关系进行了推测,其变化如图 2 所示,可以看出:

(1)l_c = 15 cm、t = 42 s 状态下,压力降 H 对应极大值,其值为 0.39 MPa;l_c = 30 cm、t = 55 s 状态下,压力降 H 对应极大值,其值为 0.27 MPa;l_c = 45 cm、t = 80 s 状态下,压力降 H 对应极大值,其值为 0.17 MPa。分析造成这种现象的原因是,超细水泥浆液前期以渗透扩散为主,后期以淤堵滞积为主,浆液压力降 H 随时间先增后减。

(2)注浆时长为 80 s 时,l_c = 30 cm、l_c = 45 cm 处浆液压力降在数值上基本相等,由此认为该阶段浆液扩散基本终止,浆液流速、压力进入稳步变化状态。

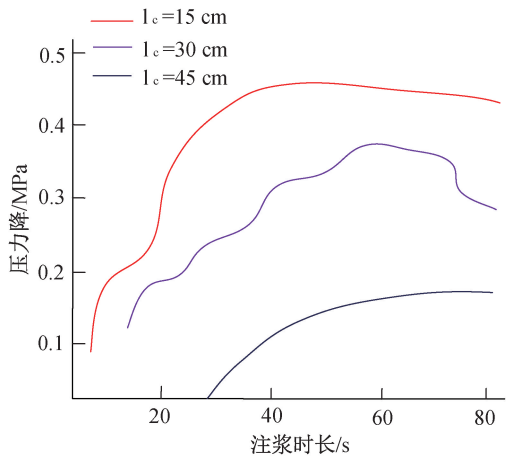


图 2 压力降与注浆时长关系

Figure 2 Relationship between pressure drop and grouting time

2.2 砂层内浆液压力

浆液压力决定着浆液扩散范围、注浆加固效果和渗滤效应下浆液压力在砂层中的分布状态,对研究浆液渗透扩散机制具有重要作用。经过本文理论模型分析,推算出浆液锋面压力随注浆时长的变化关系(图 3)。图 3 显示:浆液压力在注浆时长内呈两阶段变化,第 1 阶段受渗滤效应影响水泥颗粒滤失,浆液浓度、压力逐渐降低,浆-水动界面压力减小;第 2 阶段渗滤效应变弱,浆液锋面压力降较前一阶段变化趋缓,浆液压力逐渐回升,这与叶飞等[20]研究结果一致。这是由于超细水泥浆液扩散过程中存在水化反应,随水化反应进行浆液黏度、颗粒聚集形态发生变化,直接影响了浆液压力在砂层扩散通道内的分布。

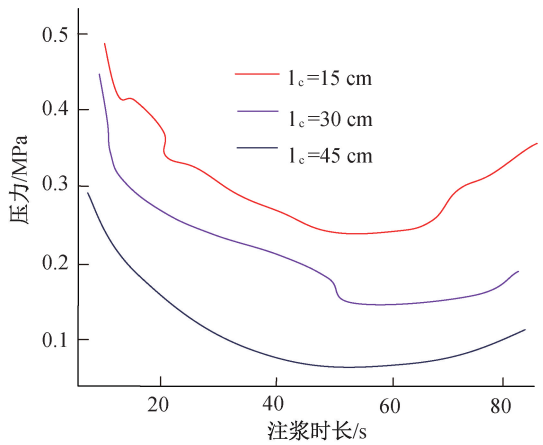


图 3 浆液锋面压力与注浆时长关系

Figure 3 Relationship between grout front pressure and grouting time

2.3 浆液扩散距离分析

根据前文推导分析,由式(2)、式(7)依次求出恒定流速与恒定压力下的 Darcy 渗流速度 v_1、v_2 及渗滤作用时浆液的锋面扩散速度 v_3,可得到浆液锋面速度与扩散距离的变化关系(图 4)。

从图 4 可以看出:

(1)浆液扩散过程中,考虑渗滤作用的浆液扩散特征与恒速、恒压下的 Darcy 扩散特征明显不同。考虑渗滤作用时,浆液流速呈阶梯型急剧下降;不考虑渗滤作用的恒速注浆,其锋面速度保持不变,约为考虑渗滤作用的 3.9~5.8 倍;不考虑渗滤作用的恒

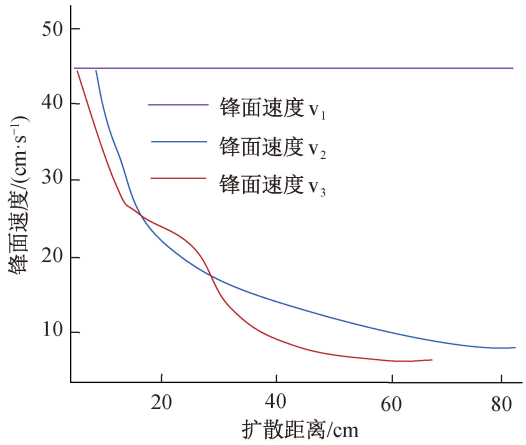


图 4　浆液锋面速度-扩散距离分析

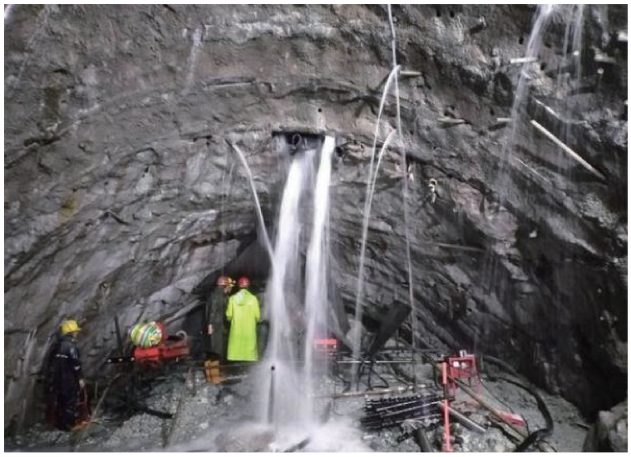
Figure 4　Analysis of slurry front velocity diffusion distance

压注浆,其锋面速度稳步降低,大小为考虑渗滤作用的 1.6~1.9 倍。

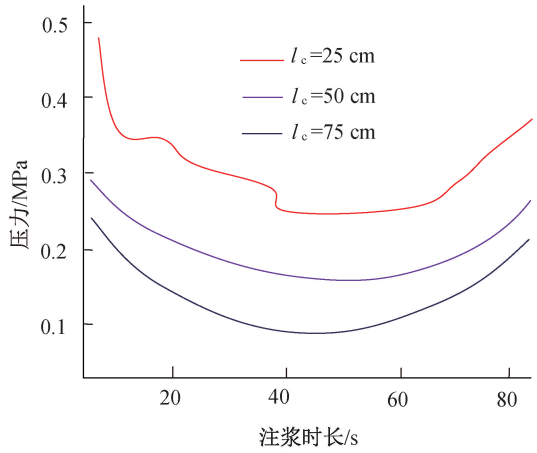
(2)不考虑渗滤作用时,浆液有效扩散距离可达 79 cm,考虑渗滤作用时浆液有效扩散距离仅为 52 cm,工程设计、计算中应充分考虑水泥颗粒滞留、沉积对注浆效果产生的影响。

3　工程应用

厦门某隧道工程地质条件复杂,长距离穿越粉细砂、粘质粉砂等不良土层。隧道开挖断面位于地表线以下 19.1 m,上覆土层依次为人工填土层、第四系黏土层、第四系粉土层。该区段地下水储量丰富,施工过程中多次发生突泥、突水灾害事故(图 5a)。现场采用聚合物超细水泥浆液,对薄弱区位进行注浆加固处理。水泥浆液黏度 η_p = 8.72 mPa·s,初、终凝时间 t_1 = 2.2 h,t_2 = 4.6 h,注浆压力控制在 1.2~1.7 MPa,平均注浆量为 45 L·min^{-1}。



a—开挖、治理中的砂质隧道



b—实测浆液压力-时间关系

图 5　工程应用分析

Figure 5　Engineering application analysis

根据 GB50021—2019《岩土工程勘察规范》,结合对该区段水文地质、工程地质条件的分析,注浆过程中沿浆液扩散通道设置 3 个渗压监测点,采用 VWP-DP 型振弦式渗压计对浆液扩散中压力的变化情形进行记录、采集。将注浆工艺参数、粉细砂地层参数代入式(2)~(4),分析得到浆液压力随注浆时长的变化趋势(图 5b),可以看出:与理论计算相比,现场监测结果偏小 14%~19%,计算误差符合工程设计要求。

浆液压力实测值与理论计算值存在 14%~19%的误差,造成这一现象的原因分析如下:

(1)由于机械设备及注浆工艺等因素影响,水泥浆区在砂层内部的分布形态不规则,本文假定水泥浆区为圆形分布且半径不变,与实际状况存在差异。

(2)渗滤效应下水泥颗粒在砂土通道内不断聚集,导致浆液压力不断升高,渗滤效应转化为压滤效应,文中没有充分考虑这一转变过程。

(3)理论计算中,χ 和 $z\times j$ 的取值均为理想状况下,浆液在均质砂土中扩散的取值,由于应力历史、砂土粒径等因素的影响,使得理论计算值存在误差。

4　讨论

(1) 超细水泥颗粒平均粒径仅 0.2 μm,超细水泥颗粒比表面积较普通水泥颗粒大。超细水泥浆液在砂层内流动扩散时,受迂曲效应、黏度时变效应等因素影响,超细水泥颗粒更易聚集抱团,超细水泥浆液在砂土介质内的扩散受渗滤效应影响更加显著。既有研究往往侧重于从惯性力、水泥粒径及布朗扩散等方面,分析普通硅酸盐水泥浆液在渗滤效应下

压力、流速、密度的变化,本文则考虑了超细水泥浆液粒度特征、流动性及其与普通水泥浆液的差别,研究了其在砂土等多孔介质中的渗滤扩散机制,对提高砂层渗透注浆理论设计水平具有一定推动作用。

(2) 随着轨道交通、矿山开采及水利水电等行业的迅猛发展,工程建设所揭露的不良地质越来越多。第四系砂层成分复杂、赋存广阔,富水条件下极易引发涌水、溃砂、坍塌等灾害事故,目前成为困扰土木、水利工程建设的技术难题。砂层结构性差、自稳能力弱,孔隙通道迂回曲折,砂层加固治理直接关系着工程安全和建设进度。认清渗滤效应下浆液在砂土等多孔介质内的运动、扩散规律及加固机制,对提高岩土工程项目的建设质量和精细化水平具有重要意义。

(3) 地下水在地层中的赋存形态多种多样,地下水处于流动状态时,会影响水泥浆区、浆-水混合区和饱和砂土区的分布形态,进而影响锋面速度、锋面压力与扩散距离、扩散时间等因素间的关系。在水量丰富且水流速度大的砂层中渗透注浆时,需对本文所构建的理论模型进行修正,以综合考虑动水对浆液渗滤机制和注浆加固效果的影响。

(4)渗滤效应广泛存在于多孔介质悬浊液扩散过程中,农田水利、地质勘查、水土污染防治均需厘清颗粒型介质的运移扩散机制。本文开展了理论模型和现场注浆试验研究,揭示了渗滤效应下水泥浆液的运移扩散规律,研究结果有利于推动渗透注浆理论的发展,而且对地下水污染修复、农田水利整治及油气开发,也具有一定的指导意义。

5 结论

渗透注浆不破坏砂层的原状结构,浆液可控性好,是行之有效的加固方法。本文分析了渗滤效应下超细水泥浆液的扩散机理,并结合实际工程进行了检测验证。主要结论如下:

(1)恒速率注浆、恒压力注浆属于理想工况,由于不考虑扩散中的渗滤效应,浆液依 Darcy 定律在多孔介质中黏性流动。恒速率注浆、恒压力注浆与实际误差分别达 3.9~5.8 倍、1.6~1.9 倍。

(2)水泥颗粒在砂层内的滤失经历了由强及弱的变化过程,前半程渗滤效应强烈,超细水泥浆液锋面压力急剧衰减,后半程渗滤效应减弱,浆液压力出现一定回升,这种变化对注浆加固效果有直接影响。

(3)由于机械设备、注浆工艺及砂土结构自然复杂性等因素影响,本文理论计算值与工程实测值存在一定误差,但满足工程设计要求,表明本文构建的超细水泥浆液扩散模型具有一定的工程适用价值。

参考文献(References)

[1] 王复明,李嘉,石明生. 堤坝防渗加固新技术研究与应用[J]. 水力发电学报,2016,35(12):1-11.
Wang Fuming, Li Jia, Shi Mingsheng. New seepage-proof and reinforcing technologies for dikes and dams and their applications[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2016,35(12): 1-11.

[2] Liu B, Zhang D W, Yang C, et al. Long-term performance of metro tunnels induced by adjacent large deep excavation and protective measures in Nanjing silty clay [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2020, 95:103-147.

[3] Y S Kim. Theoretical and experimental research on the grout fronts diffusion considering filtration effect[J]. Sci Sin Tech,2019,47:1198-1206.

[4] 李术才,陈宏斌,张晓,等. 粉质粘土隧道超前支护效果试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(4): 946-956.
Li Shucai, Chen Hongbin, Zhang Xiao, et al. Experimental study on the advance support effect of silty clay tunnels[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2019, 50(4): 946-956.

[5] 陈铁林,张宇,郭浩,等. 多孔介质中水泥浆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),2020,50(10):2536-2551.
Chen Tielin, Zhang Yu, Guo Hao, et al. Experimental study on the effective diffusion distance of cement slurry penetration grouting in porous media [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2020, 50(10): 2536-2551.

[6] 吴祥集,张宇增,韩伟伟,等. 砂层注浆水泥浆液滤过效应分析[J]. 建设科技,2023,17(24):96-99.
Wu Xiangji, Zhang Yuzeng, Han Weiwei, et al. Analysis of filtration effect of cement slurry during sand layer grouting[J]. Construction Science and Technology, 2023, 17(24): 96-99.

[7] 王雪松,程桦,姚志树,等. 富水砂层 Bingham 浆液圆柱渗透扩散模型及试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024,52(8):124-133.
Wang Xuesong, Cheng Hua, Yao Zhishu, et al. Bingham slurry cylinder penetration and diffusion model and experimental study in water-rich sand layers [J]. Coalfield Geology and Exploration, 2024, 52(8):124-133.

[8] 李术才,冯啸,刘人太,等. 砂土介质中颗粒浆液的渗

滤系数及加固机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 36(10): 4220-4228.
Li Shucai, Feng Xiao, Liu Rentai, et al. Study on the infiltration coefficient and reinforcement mechanism of particle slurry in sandy soil media[J]. Geotechnical Mechanics, 2017, 36(10): 4220-4228.

[9] Xu Z H, Wu J, Li S C, et al. Semianalytical solution to determine minimum safety thickness of rock resisting water inrush from filling-type karst caves[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(2): 04017152.

[10] Israr J, Indraratna B. Study of critical hydraulic gradients for seepage-induced failures in granular soils[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2019, 145(7): 04019025.

[11] 刘人太. 水泥基速凝浆液地下工程动水注浆扩散封堵机理及应用研究[D]. 济南:山东大学, 2012.

[12] 房凯, 夏唐代, 包柳青, 等. 考虑滤过效应的卵砾石层浆液扩散研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1443-1448.
Fang Kai, Xia Tangdai, Bao Liuqing, et al. Cement grout dispersion considering filtration in gravel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1443-1448.

[13] Zhou Z L, Du X M, Wang S Y, et al. Analysis and engineering application investigation of multiple-hole grouting injections into porous media considering filtration effects[J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 871-883.

[14] 郑卓. 基于悬浊液流动特性的注浆扩散及加固规律研究[D]. 济南:山东大学, 2020.

[15] 刘人太, 冯啸, 李术才, 等. 多孔介质中浆液动界面扩散规律及工程应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(1): 200-213.
Liu Rentai, Feng Xiao, Li Shucai, et al. Study on spreading law of grout dynamic interface in porous medium and its engineering application[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(1): 200-213.

[16] 孔祥言. 高等渗流力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 153-155.

[17] Yoon J, Mohtar C S. A filtration model for evaluating maximum penetration distance of bentonite grout through granular soils. Comput Geotech, 2015, 65: 291-301.

[18] 郑卓. 单一裂隙注浆扩散与加固机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.

[19] 韩伟伟. 基于渗滤效应的水泥浆液多孔介质注浆机理及其工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2014.

[20] 叶飞, 苟长飞, 陈治, 等. 盾构隧道黏度时变性浆液壁后注浆渗透扩散模型[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 127-134.
Ye Fei, Gou Changfei, Chen Zhi, et al. Back-filled grouts diffusion model of shield tunnel considering its viscosity degeneration[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 127-134.

(责任编辑:张忠)