

# 隧道工程注浆理论与注浆技术研究新进展<sup>\*</sup>

秦鹏飞<sup>1,2</sup> 钟宏伟<sup>2</sup> 陈晓红<sup>2</sup> 刘恺亮<sup>2</sup>

(1. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 730121, 兰州;

2. 郑州铁路职业技术学院铁道工程学院, 451112, 郑州//第一作者, 副教授)

**摘 要** 注浆是保证隧道建设顺利进展的有效方法。从渗滤效应、劈裂注浆机制及脉动注浆压力等方面对隧道注浆理论进行了阐释, 结合高聚物和微生物菌液对注浆新材料进行了分析探讨, 采用 Comsol 有限元及 PFC(颗粒流程序)离散元方法对隧道注浆进行了数值模拟计算。结果表明, 渗滤效应导致水泥颗粒在孔隙通道上沉积淤堵, 严重影响了扩散远端的加固效果, 劈裂和脉动注浆适用于复杂条件下岩土介质的改良处理; 高聚物和微生物菌液作为新材料的代表, 是未来注浆技术的发展方向; 数值模拟成本低、效率高, 必将成为注浆技术研究的重要辅助手段。

**关键词** 隧道工程; 注浆理论; 注浆技术

**中图分类号** U455.49

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.020

## New Development of Tunnel Engineering Grouting Theory and Grouting Technology

QIN Pengfei, ZHONG Hongwei, CHEN Xiaohong, LIU Kailiang

**Abstract** Grouting is an effective method to guarantee the smooth advancement of tunnel construction. Tunnel grouting theory is expounded from the aspects of percolation threshold effect, fracturing grouting mechanism and fluctuating grouting pressure. New grouting materials are analyzed and discussed combined with both polymer and microbial liquid, and a numerical simulation calculation of tunnel grouting is carried out by Comsol finite element method and PFC (particle flow code) discrete element method. Results show that the percolation threshold effect leads to the deposition of cement particles on the pore channel and clogging, severely affecting the reinforcement effect of the diffusion distal end. The fracturing and fluctuating grouting are suitable for improvement treatment of the geomaterials under complex conditions. Representing the new materials, high polymer and microbial liquid will be the development direction of grouting technology in the future, while numerical simulation will become an important support-

ing means for grouting technology research because of the low cost and high efficiency.

**Key words** tunnel engineering; grouting theory; grouting technology

**First-author's address** Lanzhou University State Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, 730121, Lanzhou, China

隧道施工往往面临岩溶、流砂、断层等不良地质条件, 修建过程中涌水突泥、塌方等重大地质灾害时有发生。工程实践表明, 注浆是保证复杂地质环境下, 隧道工程建设顺利进展的有效方法。注浆阻断了地下水的渗流通道, 提高了泥化岩等不良地质体的强度, 目前已在郑万高铁、哈大铁路, 以及青岛、厦门地铁等多项工程中取得显著成效。近些年来, 基于渗滤效应、脉动工艺的注浆新理论及劈裂注浆技术得到了快速发展, 高聚物、微生物菌液等新型注浆材料得到了广泛应用, 而注浆数值计算技术也取得了重大突破。本文尝试对隧道工程中的注浆理论与注浆技术最新成果进行系统阐释。

## 1 注浆理论

注浆理论是指导隧道工程建设顺利进展的重要基础和保证, 是推动隧道注浆技术发展的先决条件。隧道注浆理论研究主要包括水泥浆液的渗滤效应、浆材的黏度时变效应、基于弹塑性理论的劈裂注浆技术及脉动注浆扩散规律等, 目前已初步形成了完善的体系。

### 1.1 渗滤效应

水泥浆液是含有颗粒介质的两相流体。当水泥浆液在裂隙岩体或富水砂层的孔道中流动扩散时, 受惯性力或吸附力等因素的影响, 水泥颗粒会逐渐偏离流线方向并在孔隙通道内沉积。水泥颗

<sup>\*</sup> 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2021-kb03); 河南省水利厅科技攻关项目(2022054)

粒被土体骨架“滤出”将孔隙通道堵塞,致使断面上的浆液流量减少。孔隙通道上的颗粒淤积量随时间迁延增多,最终把通道完全堵塞致使浆液扩散终止,这种现象称为注浆过程中的渗滤效应。渗滤效应模型见图 1 a)。

文献[1]指出,受深层渗滤效应的影响,水泥颗粒在注浆通道上产生了不均匀的淤堵沉积,致使被注介质渗透系数发生了不均匀的变化(见图 1 a))。由于水泥颗粒被滤出导致浆液的质量分数沿扩散路径不断降低,使得扩散末端水泥颗粒沉积不密实而形成无效注浆区段。文献[2]分析了普通水泥和超细水泥在微裂隙岩体中的渗滤机制,发现普通水泥的最小可注入开度和最小无渗滤裂隙开度分别为  $140\ \mu\text{m}$  和  $310\ \mu\text{m}$ ,而超细水泥则分别为  $80\ \mu\text{m}$  和  $280\ \mu\text{m}$ 。减小水泥粒径对最小可注入开度影响明显,而对最小无渗滤裂隙开度影响不明显。文献[3]考虑渗流域内各组分质量守恒(见图 1 b)),采用颗粒沉积概率模型描述水泥颗粒在多孔介质内沉积吸附行为,建立了考虑渗滤效应的柱形扩散理论模型。研究发现,注浆速率和水灰比越小,孔口处的孔隙率衰减越快,水泥浆液在砂土中的滤过效应越显著。

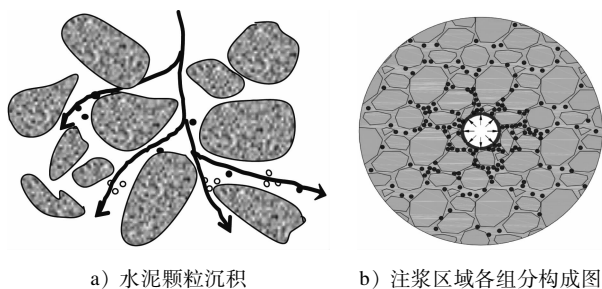


图 1 渗滤效应图示

Fig. 1 Diagram of percolation threshold effect

## 1.2 劈裂注浆

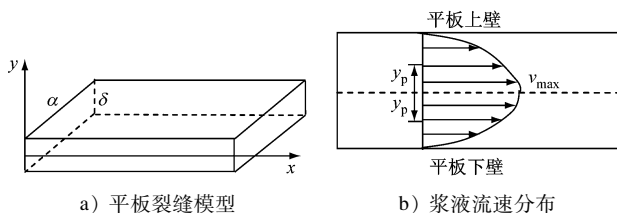
劈裂注浆拓展了岩土介质的孔隙结构,提高了低渗透地层的可注性。劈裂注浆形成的网状浆脉可起到骨架支撑和“加筋”作用,显著地提高了地基强度和刚度,因而劈裂注浆技术研究亦具有重要的理论意义和科学价值。文献[4]基于宾汉体黏度时变性方程和平板裂缝模型(见图 2),推导了宾汉体浆液劈裂注浆的启劈压力  $p_u$  和最大扩散半径  $R$  计算公式:

$$p_u = \frac{12\eta_{p0}\delta\bar{u}^2(e^{\frac{kR}{\delta}} - 1) - 3\varepsilon_s kR(\delta^2 - 4y_p^2)}{k(\delta^3 - 8y_p^3)} + c \quad (1)$$

$$R = \frac{(\delta^3 - 8y_p^3)(p_u - c)}{12\eta(t)\delta\bar{u} - 3\varepsilon_s(\delta^2 - 4y_p^2)} \quad (2)$$

式中:

- $\eta_{p0}$ ——浆液塑性黏度;
- $\delta$ ——裂缝高度;
- $\bar{u}$ ——浆液平均流速;
- $k$ ——黏时变系数;
- $\varepsilon_s, \eta(t)$ ——浆液流变参数;
- $y_p$ ——临界高度;
- $c$ ——锋面压力。



注:  $\alpha$  为平板裂缝宽度;  $v_{\max}$  为浆液最大流速。

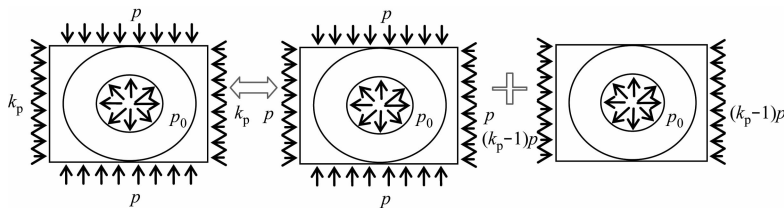
图 2 幂律型浆液劈裂注浆机理

Fig. 2 Mechanism of exponential grout liquid fracturing grouting

文献[5]基于扩孔理论和统一强度准则对非对称荷载下的  $p_u$  进行了计算(见图 3)。分析表明,非对称荷载下的  $p_u$  明显小于对称荷载下的启劈压力,且土的抗剪强度参数  $c$  (黏聚力)、 $\varphi$  (内摩擦角)和侧压力系数  $k_p$  等对  $p_u$  均有较显著的影响。文献[6]基于非线性 Hoek-Brown 强度准则,利用断裂力学对 II 型和复合型裂隙岩体的劈裂注浆机理进行分析(见图 4 a))。研究表明,岩体材料参数  $m_i$ 、裂纹长度  $l$  及地质强度指标  $G_{si}$  对岩体启劈压力影响均十分显著。文献[7]根据试验结果分析认为浆液流场与土体应力场存在耦合效应(见图 4 b))。浆液流场限制劈裂通道宽度随注浆压力衰减,并呈现非线性衰减特征。劈裂通道宽度与浆液的黏度呈正比,与土体的弹性模量呈反比。文献[8]基于基床系数法对劈裂注浆过程进行了分析。研究显示,基床系数标准值和浆液黏度对劈裂扩散半径影响较大,劈裂扩散半径与基床系数标准值正相关而与浆液黏度负相关,任意时刻黏性土中的劈裂扩散半径均小于砂土。

## 1.3 脉动注浆

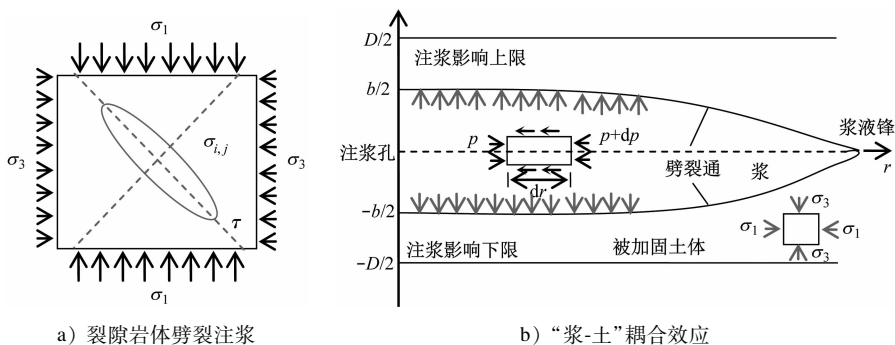
恒压注浆方式下浆液易沿薄弱结构面跑浆,注浆结束后形成夹层的饼状结构,较严重地影响了注浆加固的整体性和均匀性。脉动注浆技术因其具



注:  $p$  为注浆压力;  $p_0$  为孔口注浆压力。

图 3 非对称荷载下劈裂注浆力学机制

Fig. 3 Mechanical mechanism of fracturing grouting under asymmetric load



a) 裂隙岩体劈裂注浆

b) “浆-土”耦合效应

注:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为最大主应力、最小主应力;  $\sigma_{i,j}$ 、 $\tau$  分别为对应的正应力和剪应力;  $D$  为注浆影响厚度;  $b$  为劈裂通道宽度;  $r$  为浆液扩散长度。

图 4 劈裂注浆机理

Fig. 4 Mechanism of fracturing grouting

有良好的浆液可控性和均匀的整体加固效果,近几年逐渐受到研究者的重视。文献[9]采用扁球体劈裂模型推导浆液扩散方程(见式(3)一式(5))。研究发现,脉动注浆条件下浆液的扩散距离明显小于稳压条件下的扩散距离,通过调节脉动频率可以有效实现浆液扩散范围的控制。

$$p_n - p_0 = e^{-\frac{1}{3}M_n r_n^3} \left[ N_n \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{3}M_n\right)^n}{n!} \frac{r_n^{3n+1}}{3n+1} + C \right] -$$

$$e^{-\frac{1}{3}M_1 r_0^3} \left[ N_1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{3}M_1\right)^n}{n!} \frac{r_0^{3n+1}}{3n+1} + C \right] \quad (3)$$

$$M_n = \frac{8192(1-\mu^2)\mu_B}{\pi^4 b_n^3 E T \sqrt{16-\pi^2}} \quad (4)$$

$$N_n = \frac{12\tau_s}{\pi b_n} \quad (5)$$

式中:

$p_n$ 、 $p_0$ ——分别为第  $n$  次脉动后的注浆压力和初始注浆压力, kPa;

$M_n$ 、 $N_n$ ——脉动注浆参数,  $M_n$  单位为  $\text{m}^{-3}$ ,  $N_n$  单位为  $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ ;

$C$ ——积分常数;

$n$ ——脉动次数, 次;

$r_n$ ——第  $n$  次脉动后的浆液扩散距离, m;

$r_0$ ——注浆孔半径, m;

$\mu$ ——土体泊松比;

$\mu_B$ ——浆液的塑性黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;

$E$ ——土体的弹性模量, MPa;

$T$ ——脉动注浆间隔时长, s;

$\tau_s$ ——浆液剪切屈服强度, kPa;

$b_n$ ——第  $n$  次脉动后劈裂通道宽度, m。

文献[10]基于宾汉流体流变模型、黏性流体渗流方程和水泥颗粒沉积理论,推导了脉动压力下宾汉流体有效渗透扩散半径的计算公式(见式(6))。结果显示,浆液扩散距离随脉动注浆时长的增长和地层孔隙率的增大而增大,随脉动注浆间隔时长的增长和地层孔隙率的减小而减小。

$$\Delta p = \frac{[\phi_0 - (n-1)\theta k_0 c_0 t_2]}{3t_1 K \frac{k_0 c_0 t_2}{\pi r_1^2}} r_n^3 - \frac{[\phi_0 - (n-1)\theta k_0 c_0 t_2]\beta}{3t_1 K} r_n^2 + \frac{4}{3}\lambda r_n - \frac{4}{3}\lambda \left[ (n-1) \frac{k_0 c_0 t_2}{\pi r_1^2} \right] \quad (6)$$

式中:

$\Delta p$ —— $n$  次脉动后的压力差, kPa;

$\theta$ ——膨胀系数;

$k_0$ ——沉积系数;

$\phi_0$ ——地层的初始孔隙率;

$c_0$ ——浆液的体积分数;

$t_1$ 、 $t_2$ ——分别为脉动连续时长和脉动间隔时长, s;

$r_1$ 、 $r_n$ ——分别为第 1 次和第  $n$  次浆液脉动扩散距离, m;

$\beta$ ——水的黏度与浆液黏度的比值;

$K$ ——地层渗透系数, cm/s;

$\lambda$ ——启动压力梯度, kPa/m。

2 注浆新材料

注浆技术最活跃和最具有推动力的创新因素

表 1 高聚物注浆材料的主要技术性能指标

Tab.1 Main technical performance indicators of high polymer grouting materials						
表面干燥 时间/s	自由膨胀密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	注浆材料强度达到 90%的时间/min	自由膨胀抗压或 抗拉强度(3 d)/MPa	收缩率/ %	低毒 残留率	技术优势
10 ~ 60	≥40	≤15	≥0. 26 或 ≥0. 15	≤1	满足饮用水要求	微损易控、环保耐久

2.2 微生物菌液

近年来,微生物诱导  $\text{CaCO}_3$  沉淀技术(MICP)受到专家、学者的广泛关注,并取得了许多重要的研究成果。微生物注浆的加固机理与水泥注浆的加固机理相似,微生物矿化作用产生的凝胶体被称为“生物水泥”(见图 5)。

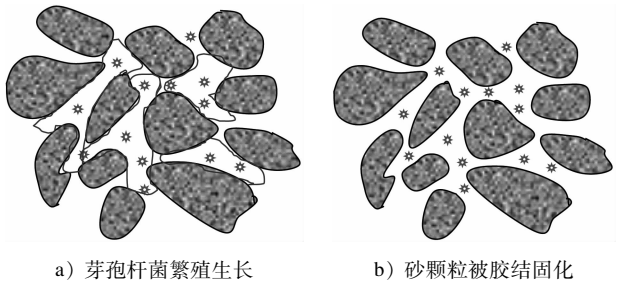


图 5 微生物注浆加固原理

Fig.5 Principle of microorganism grouting reinforcement

文献[11]指出菌液的质量分数、营养液盐分、菌酶活性、环境温度和 PH 值及注射方式等均会对加固效果产生影响。微生物加固土的力学性质则主要取决于  $\text{CaCO}_3$  结晶体的晶型、沉淀量的大小及其在孔隙中的分布形态。文献[12]通过试验发现菌液注射均匀的情形下砂土抗剪强度可提高 50%

是新材料。每次注浆新材料的涌现都会对注浆工艺、设备及注浆计算理论产生重大变革。伴随着化学、生物技术的发展,高聚物等高分子材料和微生物菌液等新型材料相继投入工程应用,并取得了明显的经济和社会效益。

2.1 高聚物注浆材料

高聚物注浆材料的主要成分是非水反应类双组份发泡聚氨酯,目前已广泛应用于堤坝修复、道路脱空塌陷治理及隧道防渗加固等工程领域。高聚物材料注入不良地质体的空穴后,其体积可迅速膨胀 2 ~ 4 倍,反应生成高强度、高韧性和良好耐久性的结石体,从而实现加固土体和抬升基础的目的。高聚物注浆材料具有轻质早强、膨胀力大、绿色环保等诸多优势,其主要技术性能指标见表 1。

以上,防渗性能降低 2 ~ 3 个数量级,同时砂土的抗液化性能也得到显著改善。文献[13]分别以巴氏芽孢八叠球菌、乙酸钙为菌液和营养液加固砂土,发现被加固试样中  $\text{NH}_4^+$  的质量分数呈指数规律衰减,依据试样面积比例设计注浆速率则可以显著提高成矿均匀性。文献[14]研究发现适当降低尿素水解速率或增加营养盐的传输速率对结石体的均匀生成分布有利,而合理控制营养盐的质量分数则可以增加  $\text{CaCO}_3$  沉淀量的生成数量。文献[15]利用尿素水解菌 ATCC11859 对有机质黏土进行了加固试验,通过对比加固前后有机质土的无侧限抗压强度、有机质含量、渗透系数和  $\text{CaCO}_3$  的质量分数等,认为微生物加固有机质土是可行且有效的。微生物注浆技术的鲜明特征在于其实现了岩土工程与生物、化学学科的有机融合,可以预见其重大的工程价值和广阔的前景。

3 注浆数值模拟计算

近年来随着高性能计算机技术的发展,数值仿真模拟在注浆等岩土工程领域中得到了越来越广泛的应用。计算机数值模拟技术具有运行成本低、

功能强大高效等特性,可以实现注浆过程从“不可见”到“可见”的转化,对于深刻揭示浆液扩散规律及浆-土动态耦合过程中应力、位移的变化具有独特的优势。计算机数值模拟技术已逐渐成为工程领域解决问题的主流方法,与理论分析、试验研究一同成为注浆等科学研究的三大支柱。

文献[16]通过 PFC2D 数值试验发现,注浆压力是注浆过程中的决定性因素,注浆压力对浆液的扩散半径、土体的孔隙率及其应力状态均有显著的影响。数值试验表明,浆液的扩散半径随注浆压力的增加先增后减,存在最优注浆压力。测量圈的记录则显示距注浆孔越近,土体的孔隙率、主应力等物理力学参数变化越复杂。文献[17]利用 Diamond-square 方法构建非均质地层分形模型,采取 Delaunay 方法将所构建模型剖分为有限元网格,然后通过 Comsol 有限元中的两相流/动网格分析技术实现了渗流场和应力场耦合作用下浆液的扩散模拟(见图6—图7)。

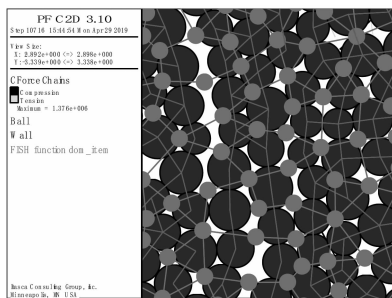
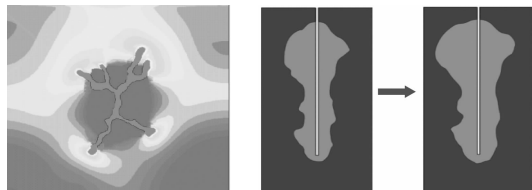


图6 浆液扩散形态

Fig. 6 Grout liquid disperse morphology



a) 浆液渗透扩散

b) 浆液劈裂扩散

图7 浆液扩散方式

Fig. 7 Grout liquid disperse mode

文献[18]推导出流固耦合作用下宾汉姆浆液的扩散方程(见式(7)),并采用离散元程序对单裂隙注浆规律进行数值模拟。研究发现,注浆压力和裂隙宽度是影响浆液扩散形态的主要因素,而裂隙倾角对注浆效果影响不大。

$$q = \frac{1}{\mu_0} \left[ -\frac{\Delta p}{12L} (u_{h0} + f\Delta u_m)^3 + \frac{\tau_0^3}{3(\Delta p/L)^2} - \right]$$

$$\frac{\tau_0}{4} (u_{h0} + f\Delta u_m)^2 \quad (7)$$

式中:

$q$ ——裂隙单宽渗流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\mu_0$ ——浆液动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

$u_{h0}$ ——初始水力隙宽,  $\text{m}$ ;

$f$ ——裂隙粗糙度对浆液流动的影响系数;

$\Delta u_m$ ——隙宽变量,  $\text{m}$ ;

$\tau_0$ ——浆液屈服强度,  $\text{Pa}$ ;

$L$ ——裂隙迹长,  $\text{m}$ 。

文献[19]通过有限元(FEM)和流体体积函数(VOF)方法对劈裂注浆过程进行了可视化研究。结果显示,二次劈裂发生后斜向浆脉迅速扩展,其对土体的结构性改变较大。文献[20]指出注浆孔外围环向拉应力的增加致使土体产生劈裂缝。劈裂注浆改变了土体结构,拓展了土体内部空间,使得其应变率相应增加。

## 4 结语

本文通过查阅大量相关文献,对注浆新理论(渗滤效应、脉动注浆和劈裂注浆)、注浆新材料(高聚物、微生物菌液)及注浆新计算技术等进行了系统阐释。考虑渗滤效应的注浆新理论为工程设计提供了更加准确的参考依据。新材料和新技术的涌现为注浆技术的发展提供了巨大动力。隧道注浆技术领域所取得的宝贵研究成果,必将推动相关产业向精细化质量方向全面提升。

## 参考文献

- [1] 李术才,冯啸,刘人太. 砂土介质中颗粒浆液的渗滤系数及加固机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017(增刊2): 4220. LI Shucan, FENG Xiao, LIU Rentai. Study on infiltration coefficient and reinforcement mechanism of grout suspension in sandy soil medium[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017(S2): 4220.
- [2] 朱光轩,张庆松,冯啸. 基于颗粒吸附概率模型的渗透注浆滤过机制研究[J]. 工程科学与技术, 2020(5): 125. ZHU Guangxuan, ZHANG Qingsong, FENG Xiao. Study on filtration mechanism in permeation grouting using the particle deposition probability model[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020(5): 125.
- [3] 王凯,王连国,陆银龙,等. 微裂隙中水泥浆液渗滤效应的可视化试验研究[J]. 煤炭学报, 2020(3): 990. WANG Kai, WANG Lianguo, LU Yinlong, et al. Visual experimental study on the infiltration effect of cement slurry in micro-

- fractures[J]. Journal of China Coal Society, 2020(3): 990.
- [4] 孙锋,张顶立,陈铁林. 基于流体时变性的隧道劈裂注浆机制研究[J]. 岩土工程学报,2011(1):88.
- SUN Feng, ZHANG Dingli, CHEN Tielin. Fracture grouting mechanism in tunnels based on time-dependent behaviors of grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011(1):88.
- [5] 张森,邹金锋,陈嘉祺. 非对称荷载作用下土体劈裂注浆压力分析[J]. 岩土力学, 2013(8):2255.
- ZHANG Miao, ZHOU Jinfeng, CHEN Jiaqi. Analysis of soil fracturing grouting pressure under asymmetric loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(8): 2255.
- [6] 邹金锋,童无欺,罗恒,等. 基于 Hoek-Brown 强度准则的裂隙岩体劈裂注浆力学机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013(7):2889.
- ZOU Jinfeng, TONG Wuqi, LUO Heng, et al. Mechanism of fracture grouting for fractured rock based on Hoek-Brown failure criterion[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013(7): 2889.
- [7] 张庆松,张连震,刘人太. 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(2): 323.
- ZHANG Qingsong, ZHANG Lianzhen, LIU Rentai. Split grouting theory based on slurry-soil coupling effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016(2): 323.
- [8] 张乐文,辛冬冬,丁万涛,等. 基于基床系数法的劈裂注浆过程分析[J]. 岩土工程学报,2018(3): 399.
- ZHANG Lewen, XIN Dongdong, DING Wantao, et al. Process analysis of split grouting based on foundation bed coefficient method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018(3):399.
- [9] 欧阳进武,张贵金,刘杰. 劈裂灌浆扩散机理研究[J]. 岩土工程学报,2018(7): 1328.
- OUYANG Jinwu, ZHANG Guijin, LIU Jie. Diffusion mechanism of split grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018(7): 1328.
- [10] 张聪,梁经纬,张箭,等. 基于脉动注浆的宾汉流体渗透扩散机制研究[J]. 岩土力学,2018(8):2470.
- ZHANG Cong, LIANG Jingwei, ZHANG Jian, et al. Study on Bingham fluid permeation and diffusion based on pulse injection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018(8): 2470.
- [11] 程晓辉,麻强,杨钻,等. 微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J]. 岩土工程学报,2013(8):1486.
- CHENG Xiaohui, MA Qiang, YANG Zuan, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(8):1486.
- [12] 刘汉龙,肖鹏,肖杨,等. MICP 胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2016(1):38.
- LIU Hanlong, XIAO Peng, XIAO Yang, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016(1):38.
- [13] 韩智光,程晓辉. 可液化砂土微生物处置试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016(12):103.
- HAN Zhiguang, CHENG Xiaohui. An experimental study of microorganism's treatment on liquefiable sands[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016(12): 103.
- [14] 陈婷婷,程晓辉,郭红仙. 基于数值模拟的砂柱微生物注浆影响因素分析[J]. 土木工程学报,2018(6):111.
- CHEN Tingting, CHENG Xiaohui, GUO Hongxian. Influencing factors of bio-grouting precipitation in sand column based on numerical simulation analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2018(6): 111.
- [15] 彭劼,温智力,刘志明. 微生物诱导碳酸钙沉积加固有机质黏土的试验研究[J]. 岩土工程学报,2019(4):733.
- PENG Jie, WEN Zhili, LIU Zhiming. Experimental research on MICP-treated organic clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019(4):733.
- [16] 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(6): 905.
- ZHENG Gang, ZHANG Xiaoshuang. Meso-mechanical simulation of fracture grouting using particle flow code in two dimensions[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2015(6):905.
- [17] 雷进生,刘非,王乾峰. 非均质土层的注浆扩散特性与加固力学行为研究[J]. 岩土工程学报,2015(12):2245.
- LEI Jinsheng, LIU Fei, WANG Qianfeng. Diffusion characteristics and reinforcement mechanics of grouting in non-homogeneous soil strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015(12): 2245.
- [18] 王晓玲,李瑞金,敖雪菲. 水电工程大坝基岩三维随机裂隙岩体灌浆数值模拟[J]. 工程力学,2018(1):148.
- WANG Xiaoling, LI Ruijin, AO Xuefei. Three-dimensional numerical simulation of grouting in stochastic fracture network of dam bedrock in hydropower engineering[J]. Engineering Mechanics, 2018(1):148.
- [19] 程少振,陈铁林,郭玮卿. 土体劈裂注浆过程的数值模拟及浆脉形态影响因素分析[J]. 岩土工程学报,2019(3): 1667.
- CHENG Shaozhen, CHEN Tielin, GUO Weiqing. Numerical simulation of fracture grouting and analysis of influencing factors of grout vein morphology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019(3): 1667.
- [20] 秦鹏飞. 不良地质体注浆细观力学模拟研究[J]. 煤炭学报, 2020(7): 2646.
- QIN Pengfei. Study on meso-mechanical simulation of grouting in bad geo-body[J]. Journal of China Coal Society, 2020(7): 2646.

(收稿日期:2021-01-23)