

地铁隧道砂土劈裂注浆加固机理分析*

秦鹏飞^{1,2} 钟宏伟³

(1. 黄河科技学院工学部, 451001, 郑州; 2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 400074, 重庆;
3. 郑州铁路职业技术学院铁道工程学院, 451010, 郑州)

摘要 [目的] 地铁隧道砂土在注浆过程中, 其砂土应力场与浆液流场存在动态耦合作用。为了提高地铁隧道砂土注浆设计水平, 需对浆土耦合效应下的砂土劈裂注浆机理进行研究。[方法] 将劈裂注浆扩散过程简化为对称扩张过程, 以宾汉流体为代表对浆液流场的基本特征进行分析; 将砂层视作线弹性变形的理想材料, 采用均质各向同性的弹性假定, 推导了劈裂通道宽度、浆液压力的时空变化方程; 通过调节浆液黏度、砂土刚度等参数, 对砂土劈裂注浆的基本规律进行了探讨。根据浆土耦合效应下砂土劈裂注浆的基本规律, 对重庆地铁 10 号线二期兰花路站—后堡站区间中粗砂-粉土地层下的砂土劈裂注浆进行了现场验证, 得到了主浆脉长度和次浆脉长度。[结果及结论] 浆液压力在注浆起始和末尾阶段变化较为剧烈, 而在中间阶段较为稳定。浆液黏度和砂土压缩模量是影响劈裂扩散规律的重要因素: 浆液黏度和砂土压缩模量越小, 浆液扩散半径越大; 砂土压缩模量越大, 劈裂通道宽度越小。工程验证发现, 浆脉长度开挖检测值与理论计算值存在 17% ~ 22% 的误差, 表明该理论模型具有一定的工程应用价值。

关键词 地铁隧道; 砂层; 劈裂注浆加固机理

中图分类号 TU472.6; U459.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.03.006

Mechanism Analysis of Sand Splitting Grouting in Metro Tunnel

QIN Pengfei^{1,2}, ZHONG Hongwei³

(1. Department of Engineering, Huanghe University of Science and Technology, 451001, Zhengzhou, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, 400074, Chongqing, China; 3. School of Railway Engineering, Zhengzhou University of Railway Vocational Technology, 451010, Zhengzhou, China)

Abstract [Objective] In the process of grouting in metro tunnel, there exists dynamic coupling effect between sand stress field and slurry flow field. In order to improve the design

level of metro tunnel sand grouting, it is necessary to study the mechanism of sand splitting grouting under the coupling effect of slurry and sand. [Method] The splitting grouting diffusion process is simplified as a symmetric expansion process, and the basic characteristics of the slurry flow field are analyzed with Bingham fluid as the representative. The temporal and spatial variation equation of the splitting channel width and the slurry pressure is derived when the sand layer is treated as ideal linear elastic material and the elasticity is assumed to be homogeneous and isotropic. The basic law of sand splitting grouting is discussed by adjusting parameters such as slurry viscosity and sand stiffness. According to the basic law of sand splitting grouting under the coupling effect of slurry and sand, the sand splitting grouting under the coarse sand and silt soil layer in the section between Lanhua Rd. Station and Houbao Station of Chongqing Metro Line 10 phase II is verified on the spot, and the length of main and secondary slurry veins is obtained. [Result & Conclusion] The slurry pressure changes more sharply at the starting and ending stages of grouting, but is stable in the middle. Slurry viscosity and compression modulus of sand are important factors affecting the splitting diffusion law. The smaller the slurry viscosity and the compression modulus of sand, the larger the diffusion radius of the slurry becomes. While the larger the compression modulus of sand, the smaller the width of the splitting channel. Engineering verification shows that there is a 17%-22% deviation between the measured value and the calculated value, which indicates that the theoretical model has certain value for engineering application.

Key words metro tunnel; sand layer; splitting grouting

在劈裂注浆过程中, 砂层结构在注浆压力的作用下遭到破坏, 劈裂通道在砂土内部交错、扩展^[1-5]。劈裂注浆产生的浆脉改善了砂砾石层的结构形态, 显著提升了砂层的防渗与承载性能^[6-7]。文献[8]发现砾石土和砂土多序次注浆加固中, 土

* 河南省高等学校重点科研项目(24A560011); 河南省水利厅科技攻关项目(2023GG45); 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2023B07); 黄河科技学院博士科研启动基金项目(02032695)

体压缩应变-应力曲线和浆液劈裂扩散轨迹呈规律性的动态变化;文献[9]指出砂层中黏性土含量是影响劈裂注浆效果的重要因素,砂层自身压密特性、浆液扩散形态均随黏性土含量发生明显改变;文献[10]分析了脉动注浆与稳压注浆的加固机制和加固效果,认为脉动劈裂注浆应力传递更均匀,其对局部地层抬升具有更强的可控性;文献[11]基于流体体积法和弥散裂缝模型编制有限元程序,分析了土性参数、注浆压力、注浆速率及注浆孔埋深等因素对劈裂注浆加固效果的影响;文献[12]认为浆液压力在孔口及远端处急速衰减,而在中间区段呈稳定变化趋势,浆液压力的时空分布决定着劈裂通道宽度的分布。

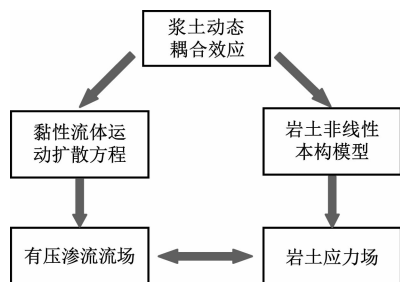
上述研究大多基于弹塑性力学的基本理论,假定劈裂注浆中劈裂裂缝一次成型且宽度不变。实际上劈裂注浆是浆液流场与砂土应力场的耦合过程,浆土界面存在复杂的流固耦合效应,因此分析计算中需考虑这种动态作用。本文以宾汉流体为代表对浆液流场的基本特征进行了分析;采用均质

各向同性的弹性假定,推导了劈裂通道宽度、浆液压力的时空变化方程;通过调节浆液黏度、砂土刚度等参数,对砂土劈裂注浆基本规律进行了探讨。结合重庆地铁10号线(以下简称“10号线”)某暗挖区间进行检验验证,对指导实际注浆设计、施工具有一定参考。

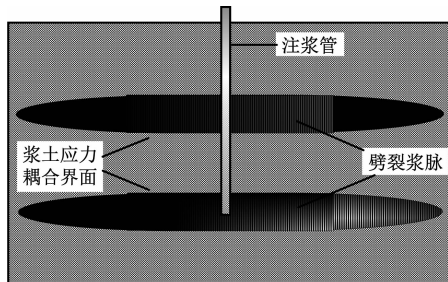
1 劈裂注浆理论

1.1 基本假定

为便于分析计算,本文对砂土劈裂注浆模型做如下假定:①砂土为均质、各向同性的弹性体,压密变形表现为线性变形,注浆浆液为宾汉水泥浆液,水灰比在扩散路径上不变;②劈裂通道上下侧壁与中轴线平行,浆土界面上的浆液压力近似沿铅垂向;③注浆压力为脉冲式压力,压力大小、间歇时间保持恒定;④浆液在扩散过程中不发生流失,严格满足质量守恒方程,考虑重力对浆液扩散形态的影响^[13-14]。砂土劈裂注浆机理见图1。



a) 浆土动态耦合机理



b) 劈裂扩散模型

图1 砂土劈裂注浆机理

Fig.1 Mechanism of sand splitting grouting

1.2 起劈压力与劈裂通道扩展压力

砂土劈裂注浆力学机制非常复杂^[15-17]。为简化分析,将钻孔应力状态进行对称分解。砂土劈裂注浆力学机理分析见图2。设注浆孔内连续施加稳定的注浆压力为 p ,注浆孔半径为 c_0 ,孔外承受水平向最大主应力为 σ_1 ,竖向最小主应力为 σ_3 ,砂土单元环向拉应力 σ_β 为:

$$\sigma_\beta = \frac{1}{2c^2}[(2\cos^2\beta\sigma_1 - \sigma_1 - 2\cos^2\beta\sigma_3 + \sigma_3) \cdot (c^2 + 3c_0^2) - (\sigma_1 + \sigma_3)(c^2 + c_0^2)] + \frac{c_0^2}{c^2}p \quad (1)$$

式中:

β ——任一点在钻孔极坐标系下的极角;

c ——任一点在极坐标下的半径。

钻孔周围应力状态随注浆压力增大呈复杂变化。当注浆压力达到临界值时,砂土结构产生贯通破坏,起劈压力 p_k 为:

$$p_k = 4\sigma_3 + \sigma_c - \sigma_1 \quad (2)$$

式中:

σ_c ——砂土极限抗拉强度。

劈裂发生后砂土应力持续调整,伴随着一系列受剪、受拉破坏,劈裂裂缝在砂土内四处扩展。劈裂扩展压力 p_u 为:

$$p_u = \frac{V(s/c_0) - W(s/c_0)}{V(s/c_0)}\sigma_1 + \frac{\gamma_0 + \pi W(s/c_0)s\sigma_3}{\pi V(s/c_0)s} \quad (3)$$

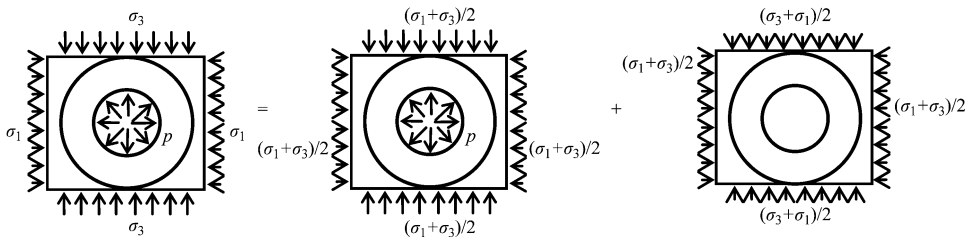


图2 砂土劈裂注浆力学机理分析

Fig. 2 Mechanism analysis of sand splitting grouting mechanics

式中:

p_u ——断裂效应下劈裂扩展压力;

$V(s/c_0)$ 、 $W(s/c_0)$ ——断裂力学计算函数, s 为劈裂扩展有效长度;

γ_0 ——劈裂扩展影响系数。

在中密-松散结构的富水砂层中,劈裂注浆下浆液扩散半径可达 22 ~ 40 m。浆液劈开砂层后注浆压力有所衰减,随着后续能量的注入,浆液压力在扩散通道上呈现起伏跌宕的状况。注浆压力-浆液扩散距离关系曲线见图 3。

1.3 劈裂通道内部浆液扩展特征

劈裂注浆过程中浆土界面存在动态耦合作用,

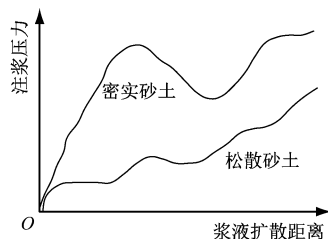
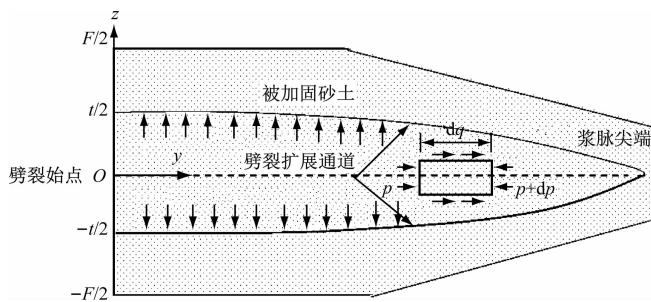


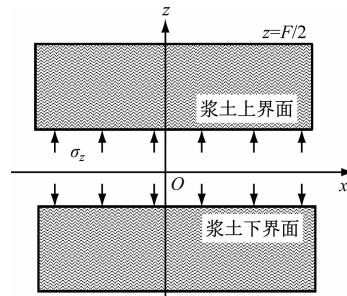
图3 注浆压力-浆液扩散距离关系曲线

Fig. 3 Relation curves of grouting pressure and slurry diffusion distance

浆液在辐射扩散时对砂层产生压应力,砂层对辐射扩散的浆液产生一定阻抗。劈裂注浆中浆土耦合作用分析模型见图 4。



a) 劈裂扩展机制模型



b) 弹性变形计算模型

注: F 为砂土劈裂注浆有效分析厚度; t 为劈裂通道总宽度; σ_z 为浆土界面上的耦合应力。

图4 劈裂注浆中浆土耦合作用分析模型

Fig. 4 Analysis model of slurry and sand coupling in splitting grouting

根据黏性流体流动机理,劈裂通道上浆液微元体受力平衡方程为^[18-19]:

$$\tau dq + h dp = 0 \quad (4)$$

式中:

τ ——黏性流体内部剪切应力;

dq ——微元体分析计算长度;

h ——劈裂通道中心线下半部分微元体高度。

式(4)经恒等变形可得:

$$\tau = -h dp / dq \quad (5)$$

宾汉型流体的本构方程:

式中:

τ_f ——静切力;

η_g ——塑性黏度;

v ——浆液流速。

联立式(5)一式(6),同时考虑劈裂通道上下侧壁浆液流速为 0,可得扩展通道内浆液平均流速 \bar{v} 为:

$$\bar{v} = \frac{t^2}{9\eta_g} \left(-\frac{dp}{dq} \right) \quad (7)$$

由浆液质量守恒和密度守恒假定,得到劈裂通道内的注浆压力变化为:

$$\frac{dp}{dq} = -\frac{6\eta_g\lambda}{\pi ct^3} \tag{8}$$

式中:
 λ ——注浆速率。

1.4 劈裂通道宽度计算

以通过劈裂通道中心线的水平面为 Oxy 平面,以竖直平面为 Oxz 平面建立坐标系,进行劈裂机理分析。考虑对称性,砂土在 x 、 y 方向均不产生位移,仅在 z 方向存在位移^[20-25]:

$$a_x = a_y = 0, a_z = a(z) \tag{9}$$

式中:
 a_x 、 a_y 、 a_z ——砂土分别在 x 、 y 、 z 方向上的位移。
砂土产生压密变形的应力 σ_h 与注浆压力有关,其大小为 $\sigma_h = p - p_u$ 。根据弹性力学的基本原理,砂层压密变形后其铅垂向应变 ε_z 为:

$$\varepsilon_z = \frac{da_z}{dz} = \frac{(1 - \mu - 2\mu^2)\sigma_z}{(E - 1.25E\mu)} \tag{10}$$

式中:
 E ——弹性模量;
 μ ——泊松比。

考虑浆土耦合效应,砂土铅垂向的应力 $\sigma_z = p_u - p$ 。对式(10)两侧进行积分、变换,可得 a_z :

$$a_z = \frac{(2\mu^2 + \mu - 1)(p - p_u)}{(1 - 1.25\mu)E}z + B_0 \tag{11}$$

式中:
 B_0 ——积分常数,可由初始应力、位移条件求得。

砂土劈裂注浆存在有效影响范围,砂土竖向位移在浆土应力接触界面上最大,并沿该界面上下两侧逐渐衰减。砂土最大竖向位移 a_{\max} 为:

$$a_{\max} = \frac{(1 - \mu - 2\mu^2)(p - p_u)F}{2(E - 1.25E\mu)} \tag{12}$$

劈裂通道总宽度在浆液扩散半径上动态变化,为上下通道宽度之和。劈裂通道总宽度与注浆压力的关系为:

$$t = \frac{(1 - \mu - 2\mu^2)(p - \sigma_3)F}{(1 - 1.25\mu)E} = J_0(p - \sigma_3) \tag{13}$$

式中:

表1 砂土物理力学性能参数

Tab.1 Physical and mechanical property parameters of sand						
天然密度/(g/cm ³)	不均匀系数	压缩模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	含泥量/%	注浆影响范围/m
2.13	5.48	5.47	0.37	32.5	12.8	3~6

J_0 ——砂土刚度参数。

1.5 劈裂通道宽度及浆液压力空间分布方程

考虑劈裂通道宽度与注浆压力的关系,以及注浆压力衰减的变化规律,可得劈裂通道宽度的分布方程:

$$\frac{dt}{dq} = -\frac{6\eta_g\lambda J_0}{\pi At^3} \tag{14}$$

式中:
 A ——脉冲扩散半径。
对式(14)分离变量并积分,得到劈裂通道总宽度 t 在均质砂层内的衰减函数:

$$t = \sqrt[4]{K_0 - \frac{18\eta_g\lambda J_0}{\pi^2}\ln c} \tag{15}$$

式中:
 K_0 ——待定常数。
由边界条件 $c = c_{\max}$ (c_{\max} 为浆脉尖端与注浆孔心的距离), $t = 0$ 可得:

$$K_0 = \frac{18\eta_g\lambda J_0}{\pi}\ln c_{\max} \tag{16}$$

将 K_0 代入式(15),整理可得砂层劈裂通道宽度分布方程:

$$t = \sqrt[4]{\frac{18\eta_g\lambda J_0}{\pi^2}\ln\left(\frac{c_{\max}}{c}\right)} \tag{17}$$

联立式(13)、式(17),考虑劈裂扩展的时空效应,浆液压力分布方程为:

$$p = \sqrt[4]{\frac{18\eta_g\lambda}{\pi J_0^3}\ln\left(\frac{c_{\max}}{c}\right)} + \sigma_3 \tag{18}$$

2 砂土劈裂扩散规律分析

重庆地铁10号线(以下简称“10号线”)某暗挖区间地质状况复杂,开挖揭露地层为典型的中粗砂-粉土夹层,现场采用普通硅酸盐水泥浆液对局部薄弱区域进行加固治理。以实际工程项目为依托,对砂土劈裂注浆机理进行分析。浆液的基本性能参数为:水灰质量比为0.7:1.0, η_g 为 12.4×10^{-3} Pas。注浆工艺参数如下: λ 为 55.8 L/min,注浆压力为 2.4~2.6 MPa,注浆管半径为 0.05 m。砂土的物理力学性能参数见表1。

2.1 不同注浆压力下浆液扩散半径分析

图 5 为浆液扩散半径-注浆压力差关系曲线。由图 5 可知:

- 1) 注浆压力在较低水平时,浆液劈裂扩散范围十分有限,砂土地基改良加固的效果不明显。当注浆压力超过临界值后,浆液扩散半径剧烈增长,与注浆压力差呈高幂次函数关系。
- 2) 浆液黏度、砂土弹性模量等参数,对劈裂注浆效果影响非常显著。浆液黏度越小,浆液劈裂扩散过程中遭遇的黏滞阻力越小,浆液扩散半径越大;砂土弹性模量越小,浆液劈裂过程中经受的土体阻抗越小,扩散半径同样越大。
- 3) 在实际工程中,受砂土结构的自然性、施工

工艺的多样性,以及浆液扩散规律的复杂性影响,注浆扩散范围比理论计算值要小很多。

2.2 劈裂通道宽度衰减规律

图 6 为劈裂通道宽度-浆液扩散距离关系曲线。由图 6 可知:

- 1) 孔口附近浆脉宽度最大,约为 10 mm,且浆液扩散距离沿扩散路径浆脉宽度逐渐衰减,至浆液锋面为 0。中间浆液扩散区段浆脉宽度衰减趋势较为平缓,而初始和终端浆脉宽度衰减较为剧烈,此变化规律与注浆压力的变化规律基本一致。
- 2) 浆液性能、地质参数对劈裂扩散过程存在显著影响,劈裂通道宽度随浆液黏度增加而增加,随砂土弹性模量增加而减小。

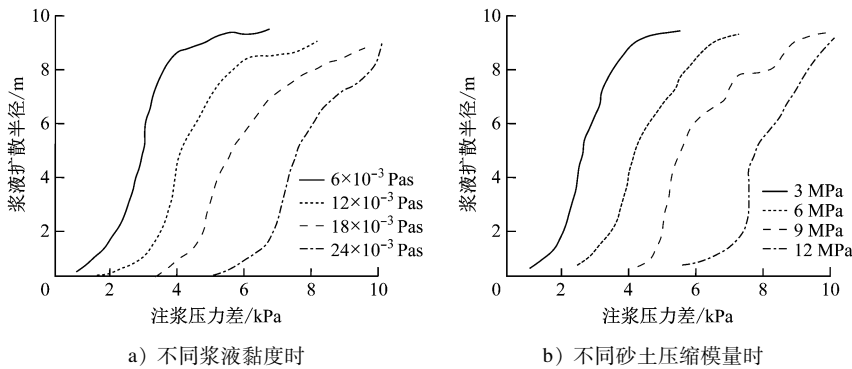


图 5 浆液扩散半径-注浆压力差关系曲线

Fig. 5 Relation curves of slurry diffusion radius and grouting pressure

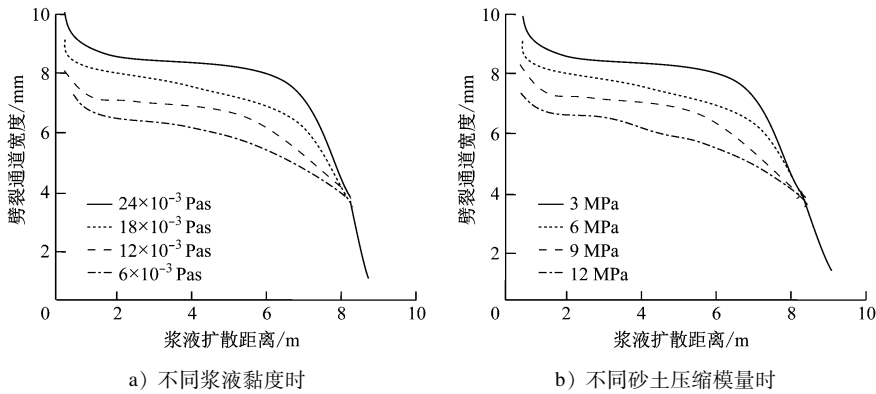


图 6 劈裂通道宽度-浆液扩散距离关系曲线

Fig. 6 Relation curves of splitting passage width and slurry diffusion distance

3 工程实测

10 号线二期兰花路站一后堡站区间为中粗砂-粉土地层,盾构掘进中经受了涌水、拱壁坍塌等多种事故。现场采用普通硅酸盐水泥浆液,对长度为 2 km 的区间进行了加固治理。依据稀浆开灌、逐级变浓的原则,现场共灌注水泥材料 12.1 t。注浆压

力控制在 2.4 ~ 2.6 MPa,注浆孔间距为 2.8 ~ 3.2 m。注浆结束后发现砂层中存在丰富的结石浆脉,主浆脉长度为 63 ~ 74 cm,次浆脉长度为 16 ~ 22 cm。

根据本文分析推导的浆土耦合效应下砂土劈裂注浆的基本规律,结合郑州地区的施工经验,通过式(14)、式(17),得到主浆脉长度为 73 ~ 80 cm,

次浆脉长度为14~18 cm。经与现场开挖所检测的浆脉长度相比,其理论计算值偏大17%~22%左右,计算误差处于工程设计允许范围内。

浆脉长度开挖检测值与理论计算值存在17%~22%误差,究其原因:

1) 砂土存在原生结构性,局部不良地质区域经过注浆后,其结构形态、力学强度及刚度显著改变和提升,浆液劈裂扩展需要更高的压力,而理论计算中仍采用均质各向同性假定。

2) 浆液压力衰减是由砂土侧壁的摩阻、黏性流体的黏滞性等多因素造成的,理论计算中忽略了砂土压缩变形对浆液扩散的影响。

4 结论

1) 浆液压力在注浆起始和末尾阶段变化较为剧烈,而在中间阶段变化稳定。劈裂通道宽度基本由注浆压力决定。

2) 工程验证发现,浆脉长度开挖检测值与理论计算值存在17%~22%的误差,表明该理论模型具有一定的工程应用价值,对指导实际注浆设计、施工具有参考意义。

3) 水灰比是影响砂土加固强度的重要因素。为了提高注浆加固效果,工程中有时会使用较高浓度的水泥浆液。水灰质量比为0.5:1.0~0.6:1.0的水泥浆液属于幂律流体,其流动扩散规律与宾汉型浆液不同,下一步可针对幂律流体扩散特性,对劈裂注浆机理展开分析。

4) 由于地质条件的天然复杂性和自然结构性,砂层内分布有不规则的孔隙和空洞。均匀各向同性弹性介质的假设在理论计算中节省了一定工作量,但与实际工程情况差别仍然较大。

5) 注浆施工作业不可避免地受天然重力场和超固结应力场的影响,本文研究工作忽略了这种影响,有待进一步深入研究。

参考文献

[1] PARK D, OH J. Permeation grouting for remediation of dam cores[J]. *Engineering Geology*, 2018, 233: 63.

[2] 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.

ZHANG Qingsong, WANG Hongbo, LIU Rentai, et al. Infiltration grouting mechanism of porous media considering diffusion paths of grout[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,

2018, 40(5): 918.

[3] RASOULI R, HAYASHI K, ZEN K. Controlled permeation grouting method for mitigation of liquefaction[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(11): 1.

[4] 王复明, 范永丰, 郭成超. 非水反应类高聚物注浆渗漏水处理工程实践[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(10): 1.

WANG Fuming, FAN Yongfeng, GUO Chengchao. Practice of non-water-reacting polymer grouting treatment to seepage[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(10): 1.

[5] 李培楠, 石来, 李晓军, 等. 盾构隧道同步注浆纵环向整体扩散理论模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(5): 629.

LI Peinan, SHI Lai, LI Xiaojun, et al. Theoretical model of synchronous grouting longitudinal-circumferential integrated diffusion of shield tunnels[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(5): 629.

[6] 张庆松, 张连震, 张霄, 等. 基于浆液黏度时空变化的水平裂隙岩体注浆扩散机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(6): 1198.

ZHANG Qingsong, ZHANG Lianzhen, ZHANG Xiao, et al. Grouting diffusion in a horizontal crack considering temporal and spatial variation of viscosity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(6): 1198.

[7] 李召峰, 李术才, 刘人太, 等. 富水破碎岩体注浆加固实验与机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(1): 198.

LI Zhao Feng, LI Shucai, LIU Rentai, et al. Grouting reinforcement experiment for water-rich broken rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(1): 198.

[8] 张连震, 李志鹏, 张庆松, 等. 基于土体非线性压密效应的劈裂注浆机制分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1483.

ZHANG Lianzhen, LI Zhipeng, ZHANG Qingsong, et al. Split grouting mechanism based on nonlinear characteristics of compression process of soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(7): 1483.

[9] 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.

ZHANG Qingsong, ZHANG Lianzhen, LIU Rentai, et al. Split grouting theory based on slurry-soil coupling effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(2): 323.

[10] 李鹏, 张庆松, 王倩, 等. 隧道泥质断层多序注浆动态劈裂扩散规律[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(10): 328.

LI Peng, ZHANG Qingsong, WANG Qian, et al. Dynamic fracturing diffusion law considering the influence of multiple sequence grouting in argillaceous fault[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(10): 328.

[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.

LI Shucai, ZHANG Weijie, ZHANG Qingsong, 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.
- [12] GHAFAR A N, MENTESIDIS A, DRAGANOVIC A, et al. An experimental approach to the development of dynamic pressure to improve grout spread[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9): 3709.
- [13] 樊赞超, 钟登华, 任炳显, 等. 基于分形理论的坝基裂隙岩体注浆量与导水率关系研究[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 576.
- FAN Guichao, ZHONG Denghua, REN Bingyu, et al. Research on the relationship between cement take and transmissivity of fractured rocks under dam foundation based on fractal theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(5): 576.
- [14] 蔡德国, 叶飞, 曹凯, 等. 砂性地层盾构隧道壁后注浆浆液扩散室内试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 274.
- CAI Deguo, YE Fei, CAO Kai, et al. Test of grout diffusion of shield tunnel backfill grouting in sandy strata[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 274.
- [15] 崔激, 王利新, 江志安, 等. 基于修正立方定律的岩体粗糙裂隙网络注浆过程模拟研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2250.
- CUI Wei, WANG Lixin, JIANG Zhian, et al. Numerical simulation of grouting process in rock mass with rough fracture network based on corrected cubic law[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2250.
- [16] 付艳斌, 陈湘生, 吕桂阳, 等. 基于小孔扩张弹塑性理论的注浆起始劈裂压力研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 154.
- FU Yanbin, CHEN Xiangsheng, LYU Guiyang, et al. Study on initial fracture pressure of grouting based on the elastic-plastic theory of cavity expansion[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 154.
- [17] 刘向阳, 程桦, 黎明镜, 等. 基于浆液流变性的深埋岩层纵向劈裂注浆理论研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1373.
- LIU Xiangyang, CHENG Hua, LI Mingjing, et al. Theoretical research on longitudinal fracture grouting of deep buried strata based on slurry rheology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1373.
- [18] 姚茂宏, 谢长岭, 程少振, 等. 双孔劈裂条件下地应力及孔间应力的耦合分析[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(3): 61.
- YAO Maohong, XIE Changling, CHENG Shaozhen, et al. Coupling analysis of in situ stress and inter hole stress under double-hole splitting[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(3): 61.
- [19] PANTAZOPOULOS I A, MARKOU I N, CHRISTODOULOU D N, et al. Development of microfine cement grouts by pulverizing ordinary cements[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(5): 593.
- [20] KANG S P, KWON S J. Effects of red mud and Alkali-Activated Slag Cement on efflorescence in cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2017, 133: 459.
- [21] PEPPER R A, COUPERTHWAITTE S J, MILLAR G J. Comprehensive examination of acid leaching behaviour of mineral phases from red mud: recovery of Fe, Al, Ti, and Si[J]. Minerals Engineering, 2016, 99: 8.
- [22] 张森, 邹金锋, 陈嘉祺, 等. 非对称荷载作用下土体劈裂注浆压力分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2255.
- ZHANG Miao, ZOU Jinfeng, CHEN Jiaqi, et al. Analysis of soil fracturing grouting pressure under asymmetric loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2255.
- [23] 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, 44(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, 44(7): 2889.
- [24] 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.
- HUANG Mingli, GUAN Xiaoming, LYU Qifeng. Mechanism analysis of induced fracture grouting based on elasticity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2059.
- [25] 张连震, 张庆松, 刘人太, 等. 基于浆液-岩体耦合效应的微裂隙岩体注浆理论研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2003.
- ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, LIU Rentai, et al. Grouting mechanism in fractured rock considering slurry-rock stress coupling effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2003.
- [26] 张连震, 李志鹏, 张庆松, 等. 基于土体非线性压密效应的劈裂注浆机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1483.
- ZHANG Lianzhen, LI Zhipeng, ZHANG Qingsong, et al. Split grouting mechanism based on nonlinear characteristics of compression process of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1483.
- [27] 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, 40(7): 1328.
- OUYANG Jinwu, ZHANG Guijin, LIU Jie. Diffusion mechanism of split grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1328.
- [28] 王晓玲, 刘长欣, 李瑞金, 等. 大坝基岩单裂隙灌浆流固耦合模拟研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(10): 1037.
- WANG Xiaoling, LIU Changxin, LI Ruijin, et al. Fluid-solid coupling simulation of single fracture grouting in dam bedrock[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50(10): 1037.

为 1:8 时,泡沫的半衰期为 12.4 min,发泡倍率为 14.7 倍,膨润土泥浆黏度为 50 s,可见改良剂性能均满足需求。

2) 采用泡沫单独改良渣土,能有效改善渣土的流塑性,但其受含水率的影响较大。当渣土含水率较高时,砂层易出现析水、析泡现象,导致渣土的渗透系数不降反增。

3) 本文缺乏不同渣土含水率对泡沫、膨润土泥浆混合改良效果的影响分析,后续可对此展开深入研究。对渣土的变级配问题研究不深,渣土级配不同对其改良的影响亦是后续研究的重点。

参考文献

- [1] 晏启祥,郑代靖,何川,等. 富水砂卵石地层地铁盾构施工若干问题及对策[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(3):713.
YAN Qixiang, ZHENG Daijing, HE Chuan, et al. Problems and countermeasures of metro shield construction in water-soaked sand and cobble stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3):713.
- [2] HUANG S, WANG S Y, XU C J, et al. Effect of grain gradation on the permeability characteristics of coarse-grained soil conditioned with foam for EPB shield tunneling[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019,23(11):4662.
- [3] VINAI R, OGGERI C, PEILA D. Soil conditioning of sand for EPB applications: Alaboratory research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(3):308.

- [4] PSOMAS S. Properties of foam/sand mixtures for tunneling applications[D]. Oxford: St Hugh's College, 2001:84.
- [5] 齐跃军. 泡沫和膨润土泥浆对改良砂土渗透性的研究[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(3):26.
QI Yuejun. Influence of foam and benatonite slurry on conditioning sand soil permeability[J]. Urban Mass Transit, 2022,25(3):26.
- [6] 陈先智,成勇,杨小龙,等. 富水圆砾地层盾构渣土改良技术研究[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(5):636.
CHEN Xianzhi, CHENG Yong, YANG Xiaolong, et al. Experimental study on ground conditioning technology for EPB shield boring in water-rich gravel stratum[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(5):636.
- [7] 张润来,宫全美,周顺华,等. 砂卵石地层土压平衡盾构施工渣土改良试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(5):673.
ZHANG Runlai, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, et al. Soil conditioning tests for earth pressure balance shield applications in sandy cobble strata[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019,47(5):673.

· 收稿日期:2022-04-17 修回日期:2022-05-26 出版日期:2024-03-10
Received:2022-04-17 Revised:2022-05-26 Published:2024-03-10
· 第一作者:郑选荣,副教授,506396899@qq.com
通信作者:刘莹,研究生,3479689397@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 36 页)

- [29] 杨志全,卢杰,王渊,等. 考虑多孔介质迂回曲折效应的幂律流体柱形渗透注浆机制[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(2):410.
YANG Zhiqian, LU Jie, WANG Yuan, et al. Column penetration grouting mechanism for power-law fluids considering tortuosity effect of porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2):410.
- [30] 秦鹏飞. 砂砾石土渗透注浆浆液扩散规律及扩散半径影响因素试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2015,13(5):368.

QIN Pengfei. Test research on cement slurry diffusion feature of penetration grouting and its influence factors in sand and gravel layer[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(5):368.

· 收稿日期:2022-05-04 修回日期:2023-07-08 出版日期:2024-03-10
Received:2022-05-04 Revised:2023-07-08 Published:2024-03-10
· 通信作者:秦鹏飞,副教授,929163723@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com