

粉细砂地层注浆加固技术的研究进展

庞浩然¹, 高艳华^{2*}, 徐兴芃¹, 熊楚明³

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100160; 2. 北京城市学院 城市建设学部, 北京 100083;
3. 浙江万凝科技有限公司, 浙江 杭州 310052)

摘要: 粉细砂地层在我国大部分地区广泛分布, 具有动力荷载作用下易液化、地下空间工程施工扰动下稳定性差的特点, 易形成喷涌、滑塌、地面沉降、地基失稳等灾害, 注浆加固技术是一种行之有效的防治粉细砂地层灾害的技术方法。本文从粉细砂地层的工程性质、注浆材料选择、注浆方法及理论、实际工程的注浆参数及注浆效果等方面, 详细综述了粉细砂地层注浆加固技术的研究进展, 并提出了有待研究的问题, 其中重点阐述超细水泥、水玻璃注浆材料性质及其工程应用, 粉细砂地层注浆方法, 劈裂渗透理论, 渗透扩散半径计算公式以及注浆技术参数等, 为进一步研究粉细砂地层注浆加固技术提供参考。

关键词: 粉细砂; 超细水泥; 水玻璃; 注浆加固技术; 注浆加固机理

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)05-0421-13

Research progress of grouting reinforcement technology in silty fine sand stratum

PANG Hao-ran¹, GAO Yan-hua^{2*}, XU Xing-peng¹, XIONG Chu-ming³

(1. PowerChina Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing 100160, China;

2. Urban Construction School, Beijing City University, Beijing 100083, China;

3. Zhejiang Wanning Technology Co., Ltd., Hangzhou 310052, Zhejiang, China)

Abstract: Silty fine sand stratum is widely distributed in most urban areas of China. This type of stratum is prone to liquefaction under dynamic load and exhibits poor stability during underground engineering construction, leading to potential disasters such as gushing, collapse, ground settlement, and foundation instability. To address these challenges, grouting reinforcement technology has proven to be an effective method for preventing and controlling disasters associated with silty fine sand stratum. In this work, we provided a comprehensive review of the research progress on grouting reinforcement technology in silty fine sand stratum. The review covered various aspects, including the engineering properties of silty fine sand stratum, selection of grouting materials, grouting method and theory, grouting parameters, and grouting diffusion laws. Additionally, we identified key areas for future study. The work mainly focused on describing the properties and engineering applications of ultra-fine cement and water glass grouting materials, the grouting method for silty fine sand stratum, the theory of splitting permeability, the calculation formula of diffusion radius, and grouting technical parameters. This research progress summary establishes a foundation for further investigation into grouting reinforcement technology for silty fine sand stratum, providing support for the disaster prevention and control measures in areas affected by this type of geological formation.

Key words: silty fine sand; ultra-fine cement; water glass; grouting reinforcement technology; grouting reinforcement mechanism

收稿日期: 2022-08-16

基金项目: 中电建路桥集团有限公司科技项目 (No. LQKY2018-10); 北京城市学院科研发展基金 (No. KYF201902)。

作者简介: 庞浩然 (1992—), 男, 河南南阳人, 硕士, 工程师, 主要从事公路、市政理论和施工技术研究。E-mail: 1549822861@qq.com。

*通信作者: 高艳华 (1975—), 女, 河北衡水人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程灾害控制研究。E-mail: gaoyanhua@bcu.edu.cn。

0 引言

粉细砂地层在我国分布广泛,以杭州、苏州、武汉、长沙、广州、天津等地为典型代表^[1],其他城市也分布广泛,例如:北京位于山前冲积扇地区,土体自上而下大致分为黏性土、粉砂层及卵石层^[2]。粉细砂地层作为一种特殊地质,具有动力荷载下易液化、施工扰动下稳定性差的特点,易形成喷涌、滑塌、地面沉降、地基失稳等灾害,且加固、止水较为困难^[3-4]。随着城市发展及人口增长,城市土地资源日益紧张,从21世纪起我国城市地下空间开发利用进入快速发展阶段^[5-6],地下空间工程建设发展迅速,地下空间工程在复杂的岩土体地层中建设及运营^[7-8],岩土体的稳定直接关系到工程建设和运营的稳定。因此,城市地下工程在粉细砂地层中施工时,遇到粉细砂地层加固止水问题也日益突出。

注浆加固技术是一种行之有效的解决粉细砂地层加固止水问题的技术方法。实际注浆加固工程中,由于普通水泥浆液颗粒粒径大,难以进入裂隙小于25 μm的细粒土以及渗透系数小于0.5 cm/s的砂层中,对粉细砂土层难以进行注浆加固,多数化学注浆虽可注性好,但因其有污染、价格高、易老化、耐久性差等特点,发展受到限制^[9-10]。超细水泥因其颗粒粒径微小,可注入土层微小的裂隙,水玻璃有较好的可注性且能提高注浆早期强度,因此超细水泥、水玻璃注浆材料逐渐被应用在粉细砂地层加固中。

本文首先介绍粉细砂地层工程性质,然后详细介绍适用于粉细砂地层注浆的超细水泥、水玻璃注浆材料,注浆方法,加固机理,注浆参数,注浆扩散规律等方面的研究进展,其中重点综述了超细水泥、水玻璃注浆材料的粉细砂地层加固机理、工程应用及其注浆参数、注浆扩散半径计算公式等,并对粉细砂地层注浆技术的前景进行展望,为进一步研究粉细砂地层注浆加固技术提供参考,也为城市地下空间开挖工程、道路粉细砂路基加固等工程提供借鉴意义。

1 粉细砂地层的工程性质

《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[11]中分别给出了粉砂、细砂的定义。因二者工程性质较接近,实际工程中往往将二者统称为粉细砂^[12]。例如:郭佳齐等^[13]指出粉细砂主要是粒径小于

0.25 mm颗粒和粒径大于0.075 mm颗粒分别占总质量50%以上的砂土,该定义包含了粉砂和细砂。粉细砂的基本物理性质以及常见的物理量的数值范围见表1^[12-17]。

此外,一般粉细砂颗粒粒径集中于0.25~0.075 mm之间,颗粒组成较单一,级配不良,例如:取自钱塘江南岸萧绍冲击平原的粉细砂土样,0.25~0.075 mm颗粒含量占总质量高达95%^[18]。这些物理性质反映到工程施工中,则是粉细砂地层在动力荷载作用下易液化,且渗透稳定性差,在地下水作用下易流砂、涌砂,可能引发地面沉降、地基失稳、工程坍塌等事故^[12-13,19]。因此,在粉细砂地层中施工往往需要采取加固止水措施。

表1 粉细砂物理性质表

Table 1 Physical properties of silty fine sand	
物理量	物理性质
含水率	干燥地区尤其是地表的粉细砂含水率较低,埋深大的粉细砂一般含水率较高,饱和度在90%以上,一般含水率15%~28%
重度	重度一般较小,干重度平均值14.90 kN/m ³ ,湿重度平均值15.65 kN/m ³ ,也有一些粉砂重度值会较大
孔隙比	一般在0.6~0.85
黏聚力	粉黏粒含量少,黏聚力很小或几乎没有
摩擦角	一般内摩擦角在26°~36°
渗透系数	粉细砂的渗透系数一般为10 ⁻³ cm/s(一些密实的粉砂可到10 ⁻⁴ cm/s),属于中度透水性

2 粉细砂地层注浆材料

2.1 粉细砂地层注浆材料选择

注浆材料一般分为有机和无机两类。有机注浆材料包括质素类、丙稀酰胺类、聚氨酯类、脲醛树脂类以及其他有机注浆材料,因其价格高、耐久性差、有污染等特点,应用受到限制^[20-21]。无机注浆材料包括单液水泥类、水玻璃、水泥-水玻璃类、水泥黏土类及其他无机浆液,因无机系列以水泥材料为主,价格低、环保、渗透性小、结石体强度高、耐久性好,同时可通过添加外加剂或矿物掺合料等方式改善其工艺以及加固止水性能,因此,在国内外被广泛采用^[12,21-23]。

针对粉细砂地层,因普通水泥颗粒较大,难以注入且浆液扩散半径小,超细水泥是更好的注浆材料选择。因水玻璃胶凝时间短可提高注浆早期强

度,可注性好,适合于粉细砂地层注浆加固。综合二者优点,超细水泥和水玻璃双液注浆材料是粉细砂地层良好的注浆材料。

2.2 超细水泥注浆材料

(1) 超细水泥发展现状及粒径特征

自从20世纪80年代初超细水泥诞生于日本,超细水泥得到广泛使用。我国超细水泥材料经过20多年发展,水泥颗粒粒径逐渐减小。韩忠存等^[21]早在1997年对MC型超细水泥进行详细研究,当时研制的MC型超细水泥,最大粒径 $D_{95} \leq 8 \mu\text{m}$, $D_{50} \leq 2 \mu\text{m}$,比表面积在 $1\ 600 \text{ m}^2/\text{kg}$ 左右。2017年我国推出《超细硅酸盐水泥》(GB/T 35161—2017)^[24]规范,给出超细硅酸盐水泥等级要求:I级, $D_{90} \leq 10 \mu\text{m}$, $D_{50} \leq 5 \mu\text{m}$;II级, $D_{90} \leq 20 \mu\text{m}$, $D_{50} \leq 8 \mu\text{m}$ 。浙江万凝科技有限公司研制的新一代超细水泥材料(MC活性粒子材料),其平均粒径小于 $2 \mu\text{m}$ 甚至可以达到 $1 \mu\text{m}$ 以下,最大比表面积可达 $4\ 500 \text{ m}^2/\text{kg}$ 以上,可注入 $25 \mu\text{m}$ 以内的细微裂缝之中,针对粉细砂地层注浆较为适用。此外,管学茂等^[25]研制以粉煤灰为主的复合改性材料超细高性能灌浆水泥。

(2) 超细水泥浆液注浆参数

超细水泥浆液注浆参数包括水灰比、稠度、流动度、泌水率或结石率、初凝和终凝时间、抗分散率、抗折和抗压强度^[12,22]。其中水灰比是决定浆液其他物理力学性质以及注浆加固体的强度和耐久性的主要参数^[26],水灰比不同,其他参数相应变化。随着水灰比的增加,浆液的泌水率、流动度增大,结石率、稠度降低,当水灰比大于1.5时,其黏度减小幅度减弱^[27]。不同水灰比超细水泥浆液性质见表2^[22,26-28]。总之,浆液应采用合理的水灰比。工程实践中,粉细砂地层常采用水灰比为1的超细水泥浆液注浆加固。

表2 不同水灰比超细水泥浆液性质

Table 2 Properties of superfine cement slurry with different water cement ratios

水灰比	浆液性质
<0.8	浆液流动度较小、泌水率小、结石率高,此时注浆操作性能有待改善,可通过添加外加剂提高浆液的流动度,增加浆液可注性
0.8~1.5	各个物理量相对较均衡,是注浆常用水灰比
>1.5	浆液流动度较大、泌水率大、结石率低,因水灰比较高,尤其是水灰比达到2或大于2时,易给地层注入大量水,不利于注浆体加固强度、止水效果以及耐久性

除水灰比之外的其他参数也对注浆加固有重要影响,超细水泥浆液的流动度和稠度关系到浆液注浆的可操作性、可注性;泌水率和结石率、抗分散率关系到注浆的稳定性、可控性;浆液初凝和终凝时间关系到注浆施工的操作时间及加固效果;抗折抗压强度关系到加固体的强度。规范对浆液参数值范围有明确要求^[24]。

注浆浆液应满足稠度小、流动性大、可注性好、分散性高、结石率高、泌水率低、结石体强度高等基本要素。为了获得更好的注浆效果,超细水泥中可通过掺加外加剂来改善其性能,根据注浆需要,可掺入水玻璃和氯化钙等速凝剂,膨润土及其他高塑性黏土等稳定剂,木质素磺酸盐类、萘系、聚羧酸类减水剂以及其他外加剂。管学茂等^[27]研究6种高效减水剂与超细水泥的相容性,研究表明减水剂效果较好的是花王和UNF-5S7高效减水剂,当水灰比为0.6时,掺量在1.5%时浆液的黏度小于30s;郭东明等^[28]在超细水泥浆液中加入占水泥质量约4%的膨润土,提高水泥浆液的保水性和稳定性;郑青^[29]在富水粉细砂地层暗挖隧道工程中采用超细水泥-水玻璃双浆液注浆加固围岩,超细水泥浆液中采用缓凝剂磷酸二氢钠,掺量为水泥质量的2.5%。

2.3 水玻璃注浆材料

硅酸钠水溶液称为水玻璃,水玻璃无色无臭、绿色环保、价格低、浆液黏度低、可注性好,但耐水性差、固结体强度低。通过调节水玻璃波美度可用于粉细砂地层注浆加固,近年来水玻璃浆液的性能改善研究得到关注。在水玻璃中加入酸性反应剂可制备酸性水玻璃,可调节浆液胶凝时间、提高稳定性。李夏等^[30]设计磷酸-水玻璃注浆材料配比,在青岛地铁砂层采用磷酸与水玻璃体积比2:1、PH值4.3、凝胶时间40~60min的酸性水玻璃注浆,开挖过程中围岩稳定;关振伟^[31]针对粉细砂地层注浆施工要求,研究加入硫酸的酸性水玻璃浆液以及在酸性水玻璃中再加入碳酸钙的浆液配比和胶凝时间;赵建伟^[32]配置水玻璃-硫酸-碳酸钙(0.946:1:0.062)的酸性水玻璃并用于太原隧道粉细砂地层注浆加固。水玻璃浆液的性能改善研究逐渐深入。臧鹏等^[33]为满足粉细砂地层注浆加固要求,通过有机物(多元醇及有机醋酸酯)与无机物(磷酸盐)复合改性方式,提高水玻璃注浆材料的强度和耐水性。

此外,也有学者对水玻璃与其他化学浆液的双浆液材料在粉细砂地层中的应用开展了研究。贺

博^[34] 研究水玻璃-氯化钙双浆液在粉细砂地层注浆的加固机理及工程应用。

2.4 水泥/超细水泥-水玻璃双浆液注浆材料

鉴于水玻璃可注性好, 凝结时间可调, 但强度和稳定性差, 而水泥类注浆材料抗渗性、耐久性好, 强度高, 但凝结时间长, 在实际工程中常将两种材料进行双液注浆, 发挥各自优点^[35], 工程应用广泛。熊楚明^[36] 在杭州粉细砂地层暗挖隧道工程中采用 MC 超细水泥-水玻璃双浆液进行超前预加固地层。

最新的文献中, 一些学者通过添加掺合料来优化水泥-水玻璃双浆液的注浆性能, 有待于开展粉细砂地层应用研究。迟凤霞等^[37] 研究粉煤灰和矿渣微粉矿物掺合料对水泥-水玻璃双浆液材料性能的影响规律, 研究表明相对于粉煤灰, 矿渣微粉对双浆液结石体的孔结构改善效果更好。李三^[38] 研究粉煤灰、钢渣粉、矿渣粉等矿物掺合料对水泥-水玻璃浆液结石体性能的影响, 研究表明钢渣粉和矿渣粉掺量适宜(不宜超过 20%) 时能提高浆液结石体强度, 但粉煤灰可降低结石体强度, 应严格限制粉煤灰的掺量。

3 粉细砂地层注浆方法及理论

3.1 粉细砂地层注浆方法

渗透注浆、劈裂注浆以及压密注浆为常见的注浆方法。渗透注浆主要是指浆液在压力作用下充填到土层孔隙和岩石裂隙中; 劈裂注浆为注浆压力达到启裂压力时地层产生裂隙, 浆液流入并凝固形成条带状的胶结体^[39]; 压密注浆则是将配合好的较稠的浆液注入土体, 形成一定形状的浆泡, 达到压密周围土体的目的。其中压密注浆在软土地基加固处理及路基加固工程应用较多^[40-44], 主要针对于淤泥质粉质黏土^[41] 或者低液限粉土及黏土^[43] 等, 粉细砂土层与这类土层力学性质存在差异, 虽注浆加固中存在挤密加固作用, 但一般情况下不宜单独采用压密注浆。

粉细砂地层颗粒粒径往往集中于 0.075~0.25 mm, 且含有一定量的粉粒, 因此相比其他砂, 粉细砂较为密实, 注浆难度大, 同时粉细砂地层注浆过程中注浆材料易在压力下泌水, 导致注浆材料的使用性能的变化, 可控注浆较难。此外, 粉细砂地层较易变形, 挤密加固作用相对较小, 而渗透注浆、劈裂注浆相对来说加固作用更大^[12]。

针对粉细砂地层注浆加固以上特点, 水玻璃类浆液注浆主要采用渗透方法注浆, 劈裂压密为辅;

而水泥类尤其是超细水泥浆液注浆较难单独使用渗透注浆或劈裂注浆方法, 二者融合更适合。即注浆开始是渗透注浆, 当注浆压力达到启裂压力后出现劈裂注浆, 不可避免地在劈裂注浆时也对地层有挤密作用, 同时劈裂后又伴随渗透注浆。实际工程中, 普通水泥因其粒径较大, 在粉细砂地层难渗透, 以劈裂注浆为主, 渗透注浆为辅(甚至可忽略); 超细水泥浆液渗透性能提高, 在粉细砂地层中通过渗透注浆和劈裂注浆达到较好的加固止水效果。

3.2 粉细砂地层劈裂渗透加固力学机理

(1) 粉细砂地层劈裂渗透力学分析

注浆加固的劈裂渗透理论较适合粉细砂地层加固。文献[12]根据劈裂渗透理论, 将粉细砂地层注浆过程概括为 5 个阶段: 充填渗透阶段 (oa)、挤密阶段 (ab)、劈裂阶段 (bc)、被动土压力阶段 (bc)、再渗透阶段 (cd), 如图 1 所示。

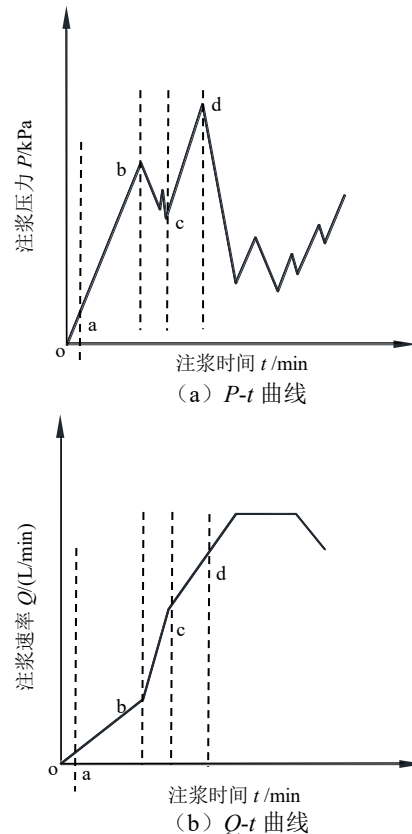


图 1 注浆压力与时间曲线及注浆速率与时间曲线^[12]

Fig. 1 Relationship curve between grouting pressure, grouting speed and time^[12]

在 bc 段, 首先在粉细砂地层薄弱部位发生劈裂, 浆液充填劈裂裂隙, 即劈裂阶段, 劈裂方向首先沿土层最小主应力方向(一般为水平方向); 随着注浆压力增加, 粉细砂地层注浆由劈裂阶段转入被动土压力阶段, 水平应力转化为被动土压力状态, 劈裂开始向垂直方向发展, 即在主劈裂面上产生垂直

于主劈裂面的次劈裂面。被动土压力阶段是劈裂注浆的关键阶段, 劈裂后的注浆可使土层大小主应力差缩小, 水平与垂直劈裂形成的浆脉起到土体的骨架作用, 提高加固土体的稳定性, 达到注浆目的^[12]。此外, 从图 1 中也可看出, 渗透注浆时注浆压力逐渐增加, 注浆速率增加缓慢; 劈裂注浆时注浆压力从启裂压力逐渐下降, 注浆速率增加迅速。

(2) 粉细砂地层模型试验实测注浆过程曲线

郭佳奇等^[13] 分别采用体积比 1:1.4 的水玻璃-草酸浆液和水灰比 1.5:1 的超细水泥进行粉细砂地层注浆室内模型试验研究, 两种注浆材料的注浆压力-流量-注浆时间 ($P-Q-t$) 曲线如图 2~3 所示。

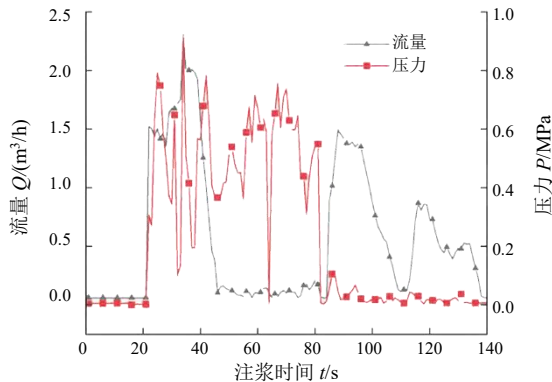


图 2 水玻璃浆液注浆 $P-Q-t$ 曲线^[13]

Fig. 2 $P-Q-t$ curve of water glass slurry grouting^[13]

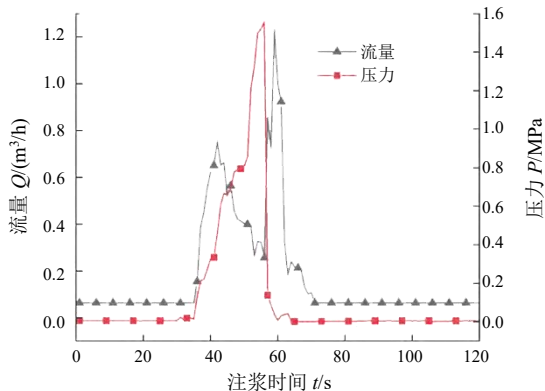


图 3 超细水泥浆液注浆 $P-Q-t$ 曲线^[13]

Fig. 3 $P-Q-t$ curve of ultra-fine cement slurry grouting^[13]

3.3 粉细砂地层注浆渗透扩散规律计算公式

最早在 1938 年 Maag 提出了球形扩散计算模型, 给出砂层中牛顿流体渗透扩散半径计算公式^[45]。近些年我国学者在渗透注浆扩散半径理论计算方面进行广泛研究, 浆液渗透扩散理论研究逐渐深入。扩散半径理论计算公式从牛顿流体扩展到宾汉姆流体^[46-48]; 从单浆液扩展到双浆液^[49]; 从较为简化的注浆过程到逐渐考虑注浆过程中的扩散路径^[50-51]、动水条件^[52]、渗滤效应^[53]、浆液黏度时空效应^[54-55]、迂回曲折效应^[49]。此外, 由实验数据回归分析得到

的计算公式也逐渐发展。应用于粉细砂地层注浆相关的渗透扩散半径研究如下:

(1) 水泥浆液扩散半径

一般情况下, 水灰比在 0.7~1.0 之间的水泥浆液为宾汉姆流体^[39]。王庆磊等^[55] 推导了考虑黏度空间衰减的宾汉姆流体浆液柱形扩散模型理论计算公式 (1), 并以石家庄地铁暗挖隧道超前注浆加固工程为背景, 采用水泥在无水细砂地层进行模型试验, 理论计算值与实测值较为接近。

$$\Delta p = p_1 - p_0 = \frac{\varphi n_{p0} l_1^2}{2kt} \left[b(l_0 - l_1) - \ln \frac{l_0}{l_1} - \frac{al_1^2}{2} \right] - \frac{4}{3} \lambda (l_0 - l_1) \quad (1)$$

式中: p_1 、 p_0 分别为注浆压力和注浆点地下水压力; k 、 φ 分别为注浆土层渗透系数和孔隙率; n_{p0} 为初始黏度; l_0 、 l_1 分别为注浆管半径和注浆时间 t 时浆液的扩散距离; a 、 b 分别为浆液与水灰比相关的系数; λ 为浆液的启动压力梯度。

吴星^[56] 通过自主研发的渗透注浆模拟系统, 模拟了不同水灰比的水泥浆液在各种砂层中渗透扩散的过程, 建立注浆扩散半径 L 与注浆参数之间的函数关系式 (2):

$$L = 101.39P^{0.35} K^{0.246} M^{0.392} \quad (2)$$

式中: P 为注浆压力; K 为渗透系数; M 为水灰比。

李术才等^[53] 在不同颗粒级配砂样中, 采用不同注浆参数进行普通硅酸盐水泥注浆, 研究注浆量变化规律, 得到考虑渗滤效应的水泥浆液扩散半径 L 计算公式 (3):

$$L = \frac{2.21 \times 10^{-1}}{\alpha^{-0.5}} X_1^{1.18} X_2^{-2.1} X_3^{0.66} \quad (3)$$

式中: α 为渗滤系数; X_1 、 X_2 、 X_3 分别为孔隙直径、水泥颗粒质量分数以及注浆压力。

(2) 水玻璃浆液扩散半径

韩晓雷等^[57] 针对取自韩城下峪口的含泥粉细砂开展先注入波美度 39°Be 的水玻璃, 再注入浓度为 25% 的氯化钙溶液的注浆试验, 通过回归分析得到其扩散半径 L 、注浆量 Q 分别与注浆压力 p 、渗透系数 k 、浆液黏度 μ 的关系式 (4) 和式 (5)。

$$L = 154.17 p^{0.629} k^{0.179} \mu^{-0.167} \quad (4)$$

$$Q = 17.54 p^{0.32} k^{0.18} \mu^{-0.115} \quad (5)$$

(3) 水泥-水玻璃双浆液扩散半径

朱定桂等^[49] 假定水泥-水玻璃双浆液为考虑黏度时空效应的宾汉姆流体, 考虑迂曲度建立了水

泥-水玻璃双浆液柱形渗透浆液扩散半径 L_1 计算式(6), 并在粉细砂及卵石类地层注浆应用。

$$L_1 = 2B \sqrt{\left[\Delta P - \frac{4}{3} \Gamma \beta (L_1 - L_0) \right] \frac{4K\mu_w B}{A\phi^B \Gamma} \left(\frac{L_0^2 v_0}{m} \right)^{B-1} + L_0^{2B}} \quad (6)$$

式中: A 、 B 为与双浆液配比有关的常数; ΔP 为注浆压力和地下水压力差值; Γ 为迂曲度; β 为浆液的启动压力梯度; L_0 、 v_0 为注浆管半径和注浆管内浆液的流速; K 、 ϕ 分别为注浆土层渗透系数和孔隙度; μ_w 为水的黏度; m 为柱形加固区高度。

3.4 粉细砂地层劈裂注浆理论及试验研究

实际粉细砂地层注浆加固中劈裂注浆较为普遍, 但劈裂注浆理论研究落后于工程实践^[58]。目前粉细砂地层劈裂注浆常采用理论计算公式, 主要包括注浆挤密阶段土体沿注浆孔的径向位移、垂直劈裂注浆压力、水平劈裂注浆压力、劈裂注浆极限压力值等公式^[12, 33]。近年来, 刘向阳等^[59]建立了考虑浆液流变性的深埋岩层纵向劈裂扩散模型, 然而粉细砂地层劈裂扩散模型有待深入发展。

在室内或模型试验研究方面, 近几年在黏土^[60-61]、断层破裂带土体(全风化页岩夹强风化砂岩孤石)^[58]、风化花岗岩土体^[62]等岩土体中劈裂注浆试验逐渐开展, 砂层的劈裂注浆试验研究有开展, 但针对粉细砂地层劈裂注浆实验研究较少。张连震等^[63-64]针对地层劈裂-压密注浆情况提出注浆加固效果定量计算方法, 在青岛地铁2号线砂层注浆加固工程中验证, 并采用水泥-水玻璃浆液, 针对青岛地区含黏性土砂, 在自主研发的可视化注浆模拟系统中进行注浆模型试验, 深入研究砂层劈裂-压密注浆扩散模式, 提出砂层劈裂-压密注浆设计方法的改进建议。

在数值试验研究方面, 有限元及离散元等方法被用于土体劈裂注浆数值模拟。程少振等^[65]采用流体体积函数与有限元的结合, 从细观层面模拟土体(邓肯-张模型作为土体本构关系模型)劈裂浆脉扩展过程, 注浆深度、土体模量、大小主应力差值以及大小主应力转化次数等都影响了浆脉的形态; 崔韬^[66]采用颗粒流软件模拟超细水泥注浆过程; 朱昱等^[67]结合弥散裂缝模型和流体体积法, 采用 ABAQUS 二次开发有限元程序进行劈裂注浆模拟, 随着注浆深度的增加, 大小主应力差成为劈裂浆脉形态的主要控制因素。针对粉细砂地层注浆数值试验有待研究。

4 粉细砂地层注浆参数及注浆效果

4.1 注浆加固实际工程的注浆参数及注浆效果

早在 1998 年, 邹正盛等^[68]通过双排管法, 采用超细水泥对北京复八线地铁工程隧道顶板 2~3 m 厚的富水粉细砂层进行注浆止水加固, 该方法可使饱水粉细砂地层顶板稳定性得到有效控制。随着国家基础设施建设发展, 粉细砂地层注浆加固技术逐渐发展, 超细水泥、水玻璃、普通硅酸盐水泥等注浆材料被广泛应用。近几年粉细砂注浆加固工程的注浆参数及注浆效果统计见表 3。其中文献^[69]隧道径向隔孔复合注浆工艺中隧道横断面注浆孔设计如图 4 所示。文献^[70]地表深孔注浆实验段横断面如图 5 所示。

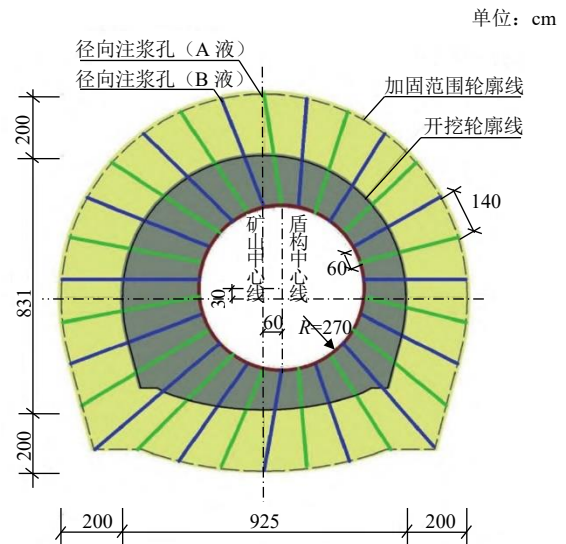


图 4 隧道径向加固注浆横断面设计图^[69]

Fig. 4 Design drawing of radial reinforcement grouting of tunnel^[69]

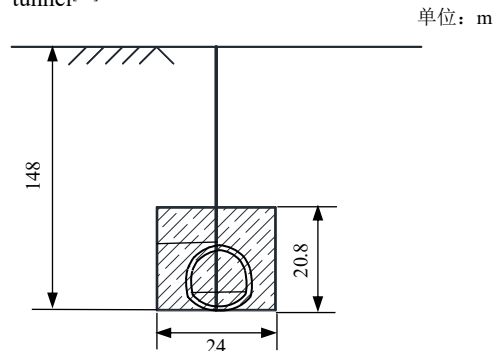


图 5 地表深孔注浆试验段横断面示意图^[70]

Fig. 5 Cross section diagram of test section of deep hole grouting from surface^[70]

4.2 粉细砂地层注浆参数对注浆效果的影响

注浆效果一般可由注浆扩散半径、加固体抗渗性、加固体抗压强度等方面来衡量。影响注浆效果

的因素包括注浆材料水灰比、注浆压力、注浆粉细砂土层密实度或孔隙率等。

周小杰^[71] 采用水灰比 0.8、1、1.2 的超细硅酸盐水泥, 注浆压力分别为 0.5 MPa、1 MPa、1.5 MPa, 在孔隙率 0.34、0.36、0.38 的富水粉细砂地层进行 3 因素 3 水平正交注浆试验。研究表明: 影响注浆浆液扩散半径的主控因素为注浆压力, 注浆压力增大扩散半径显著增大, 影响程度为注浆压力 > 孔隙

率 > 水灰比; 影响加固体渗透系数和抗压强度的主控因素为水灰比, 影响程度均为水灰比 > 孔隙率 > 注浆压力, 注浆材料水灰比及注浆土层孔隙率增大, 注浆加固体渗透系数增大, 抗渗性减弱, 抗压强度降低, 而注浆压力对抗渗性和强度影响不明显。李志鹏等^[72] 开展砂层渗透注浆试验, 研究多因素对注浆加固效果的影响, 也得到渗透注浆效果的主控因素是水灰比。

表 3 注浆加固工程注浆参数及注浆效果统计表

Table 3 Statistics of grouting parameters and grouting effects of grouting reinforcement engineering

工程案例	注浆参数				注浆效果
	注浆材料及配合比	注浆工法	注浆孔布置	注浆压力	
北京地铁 14 号线 15 标高家园站 S1 联络通道工程, 为富水致密粉细砂地层暗挖隧道 ^[29]	A 液: 水灰比 1 : 1 超细水泥, 缓凝剂磷酸二氢钠, 掺量为水泥质量的 2.5%; B 液: 水与水玻璃质量比为 1 : 1 (波美度为 20°Bé); A 与 B 液体积比 4 : 1	二重管无收缩双液注浆法	注浆孔径 5 cm, 孔距 35 cm, 随着开挖 3 次循环注浆孔深分别为 6.2 m、7 m、7 m。	0.2~0.5 MPa	7 d 龄期抗渗性能达到 0.6 MPa; 开挖过程未发生涌水、涌砂现象; 对比原水泥双浆液, 超细水泥双浆液在控制注浆隆起同时起到加固止水效果
郑州地铁 2 号线紫荆山站—东大街站区间联络线粉细砂地层中暗挖隧道 ^[69]	A 液: 改性水玻璃浆液 (偏铝酸钠水玻璃); B 液: 水灰比 1 : 1.5 超细水泥	采取隧道径向隔孔复合注浆工艺。先在 1 个孔注 A 液渗透, 后在相邻孔注 B 液劈裂, 下一个孔再注 A 液, 依次循环	纵向布置间距 1 m, 环向布置间距孔口 0.6 m, 孔底 1.4 m, 梅花形布置, 扩散半径 0.8 m, 注浆孔径 5 cm	A 液注浆压力 1.2~1.5 MPa; B 液注浆压力为 0.8~1.0 MPa	浆液注入总量为设计方案注入总量的 92%; 地层含水率降低, 开挖面无渗水和湿渍, 围岩稳定性良好; 注浆阶段地表建筑物累计变形小于 2 mm
玉磨铁路的太达村隧道, 富水弱胶结粉细砂地层 ^[70]	地表深孔注浆: 水泥—水玻璃双浆液 (水灰比 0.8 : 1~1 : 1, 水泥和水玻璃 1 : 1); 超前帷幕注浆: 42.5 号普通硅酸盐水泥, 水灰比 (0.5~0.8) : 1	地表深孔注浆与掌子面超前帷幕注浆相结合	地表深孔注浆: 采用刚性袖阀管注浆, 孔距 3 m 梅花形布置, 钻孔直径 Φ160 mm, 深度 165~180 m; 超前帷幕注浆: 孔径 Φ108 mm, 间距不大于 3 m	地表深孔注浆终压 5 MPa; 超前帷幕注浆终压 1.5~2 MPa	浆液通过劈裂和挤密作用提高了粉细砂地层的承载力, 掌子面在渗水量较小的情况下开挖, 开挖中进行局部补强注浆, 可满足开挖要求
石家庄地铁 2 号线配套工程粉细砂地层中暗挖隧道 ^[73]	水玻璃: 乳液, 质量比为 1 : 0.5, 其中乳液为乙酸乙酯; 吐温: 水, 质量比 10 : 0.1 : 10 (凝胶时间 35 min)	采用小型单缸注浆泵, 连接注浆小导管注浆	—	0.2 MPa 0.3 MPa	注浆压力 0.2 MPa 时结石体半径 26 cm; 注浆压力 0.3 MPa 时结石体半径 33.7 cm

5 结论

本文针对粉细砂地层注浆加固技术,综述粉细砂地层工程性质、注浆材料选择、注浆方法及理论、实际工程的注浆参数及注浆效果等内容,得出以下结论:

(1)粉细砂地层注浆材料的选择及发展。注浆加固技术解决粉细砂地层加固止水问题行之有效,注浆材料宜选择超细水泥或者超细水泥-水玻璃双浆液,为获得更好注浆效果,超细水泥可通过更小的颗粒粒径及掺加外加剂或复合改性材料来改善注浆性能,水玻璃可通过调整PH值来满足注浆要求。注浆材料不断改进为注浆技术发展奠定基础,新材料工程应用将促进注浆技术发展。

(2)劈裂渗透理论较适合粉细砂地层注浆。工程实践中粉细砂地层超细水泥注浆较常见,注浆施工经验丰富,但模型或原位以及数值试验研究开展较少,相应的理论研究尤其是粉细砂地层劈裂扩散模型理论有待深入研究。此外不同注浆材料在不同粉细砂地层工程中的注浆方法及加固机理有待深入研究。

(3)粉细砂地层注浆参数确定积累了较为丰富的工程经验,但粉细砂地层注浆地质环境复杂,且地层密实、易泌水,针对具体工程注浆参数精准确定、可控注浆加固等方面的研究仍显不足。粉细砂地层注浆效果受多种因素(注浆土层的含水率、孔隙率、密实度、地应力、不均匀性;浆液的性质;注浆工艺等因素)影响,多因素影响下注浆参数与注浆效果的关系、注浆加固机理以及劈裂渗透形成的注浆加固体加固效果评价等也有待深入研究。

致谢:感谢中电建路桥集团有限公司科技项目经费资助(No. LQKY2018-10);北京城市学院科研发展基金支持(No. KYF201902)。

参考文献

[1] 杨振伟,赵勇,王敏.盾构在富水粉细砂地层施工洞内涌砂风险分析[J].公路交通科技:应用技术版,2018,14(4):280-282.
YANG Zhen-wei, ZHAO Yong, WANG Min. Risk analysis of sand gushing in shield tunnel construction in water rich silty fine sand stratum[J]. Journal of Highway and

Transportation Traffic Technology: Application Technology Edition, 2018, 14(4): 280-282.

- [2] 彭建兵,黄伟亮,王飞永,等.中国城市地下空间地质结构分类与地质调查方法[J].地学前缘,2019,26(3):9-21.
PENG Jian-bing, HUANG Wei-liang, WANG Fei-yong, et al. Geological structural classification of and geological survey method for urban underground space in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 9-21.
- [3] 张帅.富水粉细砂地层中盾构掘进的研究[J].山东工业技术,2017(8):115.
ZHANG Shuai. Study on shield tunneling in water rich silty fine sand stratum[J]. Shandong Industrial Technology, 2017(8): 115.
- [4] 唐国志.富水粉细砂地层铁路隧道降水施工技术[J].科技创新与应用,2015(16):216.
TANG Guo-zhi. Dewatering construction technology of railway tunnel in water rich silty fine sand stratum[J]. Technology Innovation and Application, 2015(16): 216.
- [5] 孙钧.国内外城市地下空间资源开发利用的发展和存在问题[J].隧道建设(中英文),2019,39(5):699-709.
SUN Jun. Development and some issues on exploitation and utilization of urban underground space in China and abroad[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(5): 699-709.
- [6] 程光华,王睿,赵牧华,等.国内城市地下空间开发利用现状与发展趋势[J].地学前缘,2019,26(3):39-47.
CHENG Guang-hua, WANG Rui, ZHAO Mu-hua, et al. Present situation and developmental trend of urban underground space development and utilization in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 39-47.
- [7] 油新华,何光尧,王强勋,等.我国城市地下空间利用现状及发展趋势[J].隧道建设(中英文),2019,39(2):173-188.
YOU Xin-hua, HE Guang-yao, WANG Qiang-xun, et al. Current status and development trend of urban underground space in China[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 173-188.
- [8] 胡志平,彭建兵,张飞,等.浅谈城市地下空间开发中的关键科学问题与创新思路[J].地学前缘,2019,26(3):76-84.
HU Zhi-ping, PEGN Jian-bing, ZHANG Fei, et al. The critical issues and creative concepts in the development of urban underground space[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 76-84.
- [9] GOUVENOT D. State of the art in European grouting[J].

- Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 1998, 2(2): 51-67.
- [10] 刘红彬, 唐伟奇, 肖凯璐, 等. 水泥基注浆材料的研究进展[J]. 混凝土, 2016(3): 71-75.
LIU Hong-bin, TANG Wei-qi, XIAO Kai-lu, et al. Research progress of cement-based grouting materials[J]. Concrete, 2016(3): 71-75.
- [11] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Investigation of Geotechnical Engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [12] 叶英. 粉细砂地层浅埋暗挖法注浆加固技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
YE Ying. Silty-Fine Sand Stratum Shallow Mining Method Grouting Reinforcement Technique Guide[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [13] 郭佳奇, 王生, 孟长江, 等. 粉细砂地层注浆模型试验研究及工程应用[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(24): 331-337.
GUO Jia-qi, WANG Sheng, MENG Chang-jiang, et al. Experimental study and engineering application of grouting model in silty sand stratum[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(24): 331-337.
- [14] 齐俊修, 赵晓菊, 张广禹, 等. 粉细砂渗透、渗透变形参数统计分析研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊2): 419-424.
QI Jun-xiu, ZHAO Xiao-ju, ZHANG Guang-yu, et al. Statistical analysis and study on silty-fine sand permeability and permeability deformation parameter[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S2): 419-424.
- [15] 张全志, 杨敏, 张成武, 等. 杭州某新建地面道路工程地质勘察与评价[J]. 土木工程, 2021, 10(10): 1091-1097.
ZHANG Quan-zhi, YANG Min, ZHANG Cheng-wu, et al. Geological survey and evaluation of a new ground road engineering in Hangzhou[J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2021, 10(10): 1091-1097.
- [16] WANG H F, ZHANG Y Y, GAO Y H, et al. Study on physical and mechanical properties of the water-rich silt fine sand stratum in an area of Hangzhou[C]//2021 4th International Symposium on Traffic Transportation and Civil Architecture (ISTTCA). IEEE Conference Proceedings. Suzhou, Jiangsu, 2022.
- [17] 谭海晖, 杨涟, 米德才, 等. 南宁市粉细砂层抗剪强度参数取值研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5): 140-143, 234.
TAN Hai-hui, YANG Lian, MI De-cai, et al. Parameters determination for shear strength of fine sand from Nanning[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(5): 140-143, 234.
- [18] 孔令伟, 李新明, 田湖南. 砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 21-26, 41.
KONG Ling-wei, LI Xin-ming, TIAN Hu-nan. Effect of fines content on permeability coefficient of sand and its correlation with state parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 21-26, 41.
- [19] 刘坤鹏, 管泽英. 饱和粉细砂土基坑开挖支护技术[J]. 隧道建设, 2006, 26(4): 61-63, 67.
LIU Kun-peng, GUAN Ze-ying. Excavation and reinforcement technology for foundation pits in saturated fine silt sands[J]. Tunnel Construction, 2006, 26(4): 61-63, 67.
- [20] 李晓强. 丙烯酸酯注浆材料优化及对粉细砂地层加固机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
LI Xiao-qiang. Optimization of acrylate grouting material and study on reinforcement mechanism of fine sand stratum[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [21] 韩忠存, 张民庆, 吴爱凤, 等. MC 型超细水泥特性初探[C]//中国岩石力学与工程学会地面岩石工程专业委员会, 中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会. 地面岩石工程与注浆技术学术研讨会论文集. 北京, 1997.
HAN Zhong-cun, ZHANG Min-qing, WU Ai-feng, et al. MC type microcement property first probe[C]//Ground Rock Engineering Committee of China Society of Rock Mechanics and Engineering, Professional Committee of Rock Anchoring and Grouting Technology of China Society of Rock Mechanics and Engineering. Proceedings of the Symposium on Ground Rock Engineering and Grouting Technology. Beijing, 1997.

- [22] 周茗如, 彭新新, 苏波涛, 等. 普通水泥与超细水泥注浆性能分析及其黄土注浆效果对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1673-1678.
ZHOU Ming-ru, PENG Xin-xin, SU Bo-tao, et al. Grouting performance of ordinary cement and superfine cement and comparison of grouting effect in loess[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(5): 1673-1678.
- [23] 王呼佳. 粉细砂地层中盾构隧道洞内注浆加固技术研究[J]. 四川建筑, 2019, 39(2): 173-175, 178.
WANG Hu-jia. Study on grouting reinforcement technology in shield tunnel in silty sand stratum[J]. Sichuan Architecture, 2019, 39(2): 173-175, 178.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 超细硅酸盐水泥: GB/T 35161—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Ultra-fine Portland Cement: GB/T 35161—2017[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2017.
- [25] 管学茂, 胡曙光, 丁庆军. 超细高性能灌浆水泥的性能及其微观结构研究[J]. 水泥, 2003(6): 10-13.
GUAN Xue-mao, HU Shu-guang, DING Qing-jun. Study on properties and microstructure of ultra fine high performance grouting cement[J]. Cement, 2003(6): 10-13.
- [26] 吴爱祥, 于少峰, 韩斌, 等. 超细水泥注浆溶液配比优化及扩散规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 304-309.
WU Ai-xiang, YU Shao-feng, HAN Bin, et al. Optimization of mix-proportion and diffusing rule of super-fine cement grouting slurry[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(2): 304-309.
- [27] 管学茂, 胡曙光, 丁庆军, 等. 超细水泥基注浆材料性能研究[J]. 煤矿设计, 2001(3): 28-31.
GUAN Xue-mao, HU Shu-guang, DING Qing-jun, et al. Study on properties of superfine cement-based grouting materials[J]. Coal Mine Design, 2001(3): 28-31.
- [28] 郭东明, 谭霁爽, 肖正星, 等. 超细水泥浆液最优配比及注浆效果研究[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2017, 36(5): 1-8, 34.
GUO Dong-ming, TAN Ji-shuang, XIAO Zheng-xing, et al. Study on the optimum proportion and grouting effect of superfine cement slurry[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2017, 36(5): 1-8, 34.
- [29] 郑青. 超细水泥-水玻璃浆液在富水粉细砂地层暗挖隧道中的注浆止水效果研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(3): 51-54, 64.
ZHENG Qing. Study on water-stop effects of ultrafine cement-water glass slurry used in underground excavation tunnel with water-rich silty fine sand stratum[J]. Railway Engineering, 2021, 61(3): 51-54, 64.
- [30] 李夏, 徐军哲, 刘人太, 等. 新型酸性水玻璃注浆材料的研究与应用[J]. 隧道建设, 2017, 37(10): 1296-1302.
LI Xia, XU Jun-zhe, LIU Ren-tai, et al. Study and application of a new acid water glass grouting material[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(10): 1296-1302.
- [31] 关振伟. 粉细砂地层注浆施工酸性水玻璃胶凝时间研究[J]. 中国水能及电气化, 2019(11): 13-16.
GUAN Zhen-wei. Study on gelation time of acidic sodium silicate in silty-fine sand stratum grouting construction[J]. China Water Power & Electrification, 2019(11): 13-16.
- [32] 赵建伟. 粉细砂地层中酸性水玻璃浆液及注浆加固的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
ZHAO Jian-wei. Study on acidic water glass and grouting reinforcement in silty and fine sand[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [33] 臧鹏, 冯杨文, 钟久安, 等. 水玻璃注浆材料性能改善的探索[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(1): 20-22, 27.
ZANG Peng, FENG Yang-wen, ZHONG Jiu-an, et al. Exploration on improving the performance of water glass grouting material[J]. West-China Exploration Engineering, 2022, 34(1): 20-22, 27.
- [34] 贺博. 粉细砂层硅化双液注浆加固机理及工程应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
HE Bo. Study on mechanism of silicified double solution grouting reinforcement in silty sand layer and engineering application[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [35] SHA F, LI S C, LIU R T, et al. Experimental study on performance of cement-based grouts admixed with fly ash, bentonite, superplasticizer and water glass[J]. Construction and Building Materials, 2018, 161: 282-291.
- [36] 熊楚明. 杭州市横河地下过街通道施工方案设计浅析[J]. 城市道桥与防洪, 2012(6): 231-232, 235.
XIONG Chu-ming. Elementary analysis on construction scheme of Henghe underpass in Hangzhou[J]. Urban

- Roads Bridges & Flood Control, 2012(6): 231-232, 235.
- [37] 迟凤霞, 韩博, 孙艺涵, 等. 矿物掺合料对水泥-水玻璃注浆材料性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 773-780.
- CHI Feng-xia, HAN Bo, SUN Yi-han, et al. Effect of mineral admixtures on performance of cement-water glass grouting material[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 773-780.
- [38] 李三. 矿物掺合料对水泥-水玻璃双液注浆材料的影响[J]. 建材世界, 2021, 42(6): 6-9.
- LI San. Effect of mineral admixtures on cement-sodium silicate double-liquid grouting material[J]. The World of Building Materials, 2021, 42(6): 6-9.
- [39] 韩焯. 考虑黏度时变性的宾汉姆浆液注浆扩散机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- HAN Ye. Study on the mechanism of grouting diffusion of Bingham grouts with viscosity variation[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [40] 屈艳妮, 刘斌, 邢丁家. 挤密注浆加固建筑物砂土地基研究与应用[J]. 中国水利, 2019(6): 49-52.
- QU Yan-ni, LIU Bin, XING Ding-jia. Studies and application of squeeze grouting for consolidation of sandy foundation[J]. China Water Resources, 2019(6): 49-52.
- [41] 孙国忠. 压密注浆在公路软基加固中的应用探讨[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2014, 10(7): 63-65.
- SUN Guo-zhong. Application of compaction grouting in highway soft foundation reinforcement[J]. Journal of Highway and Transportation Traffic Technology: Application Technology Edition, 2014, 10(7): 63-65.
- [42] 朱连利, 张灵, 瞿军, 等. 压密注浆在市政道路高填方路基处理设计中的应用探析[J]. 北方交通, 2015(4): 101-104.
- ZHU Lian-li, ZHANG Ling, ZI Jun, et al. Exploration and analysis on application of compaction grouting in municipal roads high fill subgrade treatment design[J]. Northern Communications, 2015(4): 101-104.
- [43] 周万东. 压密注浆在新郑高速路软弱地基加固中的应用[J]. 岩土工程界, 2003(11): 57-58.
- ZHOU Wan-dong. Application of compaction grouting in soft foundation reinforcement of Xinzheng expressway[J]. Geotechnical Engineering World, 2003(11): 57-58.
- [44] 张宝文. 高速铁路软粘土地基压密注浆及劈裂注浆试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- ZHANG Bao-wen. Experimental study on compaction grouting and fracture grouting for soft clay in the high-speed railway foundation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [45] 王国际. 注浆技术理论与实践[M]. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- WANG Guo-ji. Theory and Practice of Grouting Technology[M]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology Press, 2000.
- [46] 杨秀竹, 王星华, 雷金山. 宾汉体浆液扩散半径的研究及应用[J]. 水利学报, 2004(6): 75-79.
- YANG Xiu-zhu, WANG Xing-hua, LEI Jin-shan. Study on grouting diffusion radius of Bingham fluids[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(6): 75-79.
- [47] 杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 等. 幂律型流体柱形渗透注浆机制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 178-183.
- YANG Zhi-quan, NIU Xiang-dong, HOU Ke-peng, et al. Column penetration grouting mechanism research based on power-law fluid[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 178-183.
- [48] 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, 39(8): 2740-2746, 2754.
- ZHANG Cong, LIANG Jing-wei, ZHANG Jian, et al. Mechanism of Bingham fluid permeation and diffusion based on pulse injection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2740-2746, 2754.
- [49] 朱定桂, 施成华, 孙晓贺, 等. 考虑迂曲度的水泥-水玻璃双液浆柱形渗透机制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(5): 1800-1809.
- ZHU Ding-gui, SHI Cheng-hua, SUN Xiao-he, et al. Cylindrical penetration mechanism of cement and sodium silicate mixed grout considering tortuosity[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(5): 1800-1809.
- [50] 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): 918-924.
- ZHANG Qing-song, WANG Hong-bo, LIU Ren-tai, et al. Infiltration grouting mechanism of porous media considering diffusion paths of grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 918-924.
- [51] 路乔, 杨智超, 杨志全, 等. 考虑扩散路径的宾汉姆流体渗透注浆机制[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 385-394.

- LU Qiao, YANG Zhi-chao, YANG Zhi-quan, et al. Penetration grouting mechanism of Bingham fluid considering diffusion paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(2): 385-394.
- [52] 张连震, 张庆松, 张霄, 等. 动水条件下渗透注浆扩散机理研究[J]. *现代隧道技术*, 2017, 54(1): 74-82.
ZHANG Lian-zhen, ZHANG Qing-song, ZHANG Xiao, et al. On the diffusion mechanism of permeation grouting under hydrodynamic conditions[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2017, 54(1): 74-82.
- [53] 李术才, 冯啸, 刘人太, 等. 考虑渗滤效应的砂土介质注浆扩散规律研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(4): 925-933.
LI Shu-cai, FENG Xiao, LIU Ren-tai, et al. Diffusion of grouting cement in sandy soil considering filtration effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 925-933.
- [54] 杨志全, 侯克鹏, 郭婷婷, 等. 黏度时变性宾汉体浆液的柱-半球形渗透注浆机制研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(9): 2697-2703.
YANG Zhi-quan, HOU Ke-peng, GUO Ting-ting, et al. Study of column-hemispherical penetration grouting mechanism based on Bingham fluid of time-dependent behavior of viscosity[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(9): 2697-2703.
- [55] 王庆磊, 朱永全, 李文江, 等. 考虑黏度空间衰减的宾汉姆流体柱形渗透注浆机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(8): 1647-1658.
WANG Qing-lei, ZHU Yong-quan, LI Wen-jiang, et al. Study on the mechanism of column permeation grouting of Bingham fluid considering the spatial attenuation of viscosity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(8): 1647-1658.
- [56] 吴星. 水泥浆液渗透注浆扩散机理试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
WU Xing. Experimental study on diffusion mechanism of cement slurry permeation grouting[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [57] 韩晓雷, 贺博, 张涛. 含泥粉细砂层模拟注浆试验研究[J]. *路基工程*, 2014(2): 95-97, 101.
HAN Xiao-lei, HE Bo, ZHANG Tao. Study on simulated grouting test on mud-bearing fine sand layer[J]. *Subgrade Engineering*, 2014(2): 95-97, 101.
- [58] 李鹏, 张庆松, 张霄, 等. 基于模型试验的劈裂注浆机制分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(11): 3221-3230.
LI Peng, ZHANG Qing-song, ZHANG Xiao, et al. Analysis of fracture grouting mechanism based on model test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(11): 3221-3230.
- [59] 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): 1373-1380, 1394.
LIU Xiang-yang, CHENG Hua, LI Ming-jing, et al. Theoretical research on longitudinal fracture grouting of deep buried strata based on slurry rheology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(5): 1373-1380, 1394.
- [60] 朱明听, 张庆松, 李术才, 等. 劈裂注浆加固土体的数值模拟和试验研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2018, 49(5): 1213-1220.
ZHU Ming-ting, ZHANG Qing-song, LI Shu-cai, et al. Numerical simulation and experimental study on soil split grouting reinforcement mechanism[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2018, 49(5): 1213-1220.
- [61] 朱明听. 劈裂注浆加固土体剪切破坏规律研究[J]. *建筑技术开发*, 2018, 45(1): 17-18.
ZHU Ming-ting. Study on shear failure law of soil reinforced by split grouting[J]. *Building Technology Development*, 2018, 45(1): 17-18.
- [62] YUN J W, PARK J J, KWON Y S, et al. Cement-based fracture grouting phenomenon of weathered granite soil[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(1): 232-242.
- [63] 张连震, 刘人太, 张庆松, 等. 软弱地层劈裂-压密注浆加固效果定量计算方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(5): 1169-1184.
ZHANG Lian-zhen, LIU Ren-tai, ZHANG Qing-song, et al. Calculation of reinforcement effect of fracturing-compaction grouting in soft strata[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1169-1184.
- [64] 张连震, 李志鹏, 刘人太, 等. 砂层劈裂-压密注浆模拟试验系统研发及试验[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(4): 665-674.
ZHANG Lian-zhen, LI Zhi-peng, LIU Ren-tai, et al. Simulation tests on fracture-compaction grouting process in sand layer[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(4): 665-674.
- [65] 程少振, 陈铁林, 郭玮卿, 等. 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, 41(3): 484-491.
- CHENG Shao-zhen, CHEN Tie-lin, GUO Wei-qing, et al. Numerical simulation of fracture grouting and influencing factors for morphology of grout veins[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 484-491.
- [66] 崔韬. 基于离散元的注浆过程模拟研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(31): 51-52.
- CUI Tao. Discrete element-based simulation of grouting process[J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(31): 51-52.
- [67] 朱旻, 龚晓南, 高翔, 等. 基于流体体积法的劈裂注浆有限元分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4523-4532.
- ZHU Min, GONG Xiao-nan, GAO Xiang, et al. Volume of fluid method based finite element analysis of fracture grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4523-4532.
- [68] 邹正盛, 章银祥, 关继发, 等. 北京大北窑地铁隧道粉细砂层顶板注浆加固研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(4): 65-69.
- ZOU Zheng-sheng, ZHANG Yin-xiang, GUAN Ji-fa, et al. Research on stabilization of silt and fine sand roof at Beijing Dabeiyao metro by grouting[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(4): 65-69.
- [69] 王玥, 徐启鹏, 马召林. 郑州地铁粉细砂地层区间隧道扩挖注浆方案优化研究与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(12): 2140-2149.
- WANG Yue, XU Qi-peng, MA Zhao-lin. Practice and optimization of grouting scheme for expansion excavation of tunnel in silty fine sand stratum of Zhengzhou metro[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(12): 2140-2149.
- [70] 陆兴. 富水粉细砂隧道围岩加固技术研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2021, 39(2): 60-64.
- LU Xing. Study on reinforcement technology of tunnel surrounded by water-rich fine siltstone rock[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2021, 39(2): 60-64.
- [71] 周小杰. 富水粉细砂地层大断面隧道围岩稳定性及注浆加固效果研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- ZHOU Xiao-jie. Study on stability of surrounding rock and effect of grouting reinforcement for large section tunnels in water rich silty-fine sand strata[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [72] 李志鹏, 张连震, 张庆松, 等. 砂层渗透注浆加固效果模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3488-3497.
- LI Zhi-peng, ZHANG Lian-zhen, ZHANG Qing-song, et al. Simulation test for permeation grouting reinforcement effect of sand layer[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3488-3497.
- [73] 连苏宁, 李文江, 王庆磊. 粉细砂地层水玻璃渗透注浆研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2020, 33(3): 103-108.
- LIAN Su-ning, LI Wen-jiang, WANG Qing-lei. Numerical simulation and field test of water glass grouting in silty sand formation[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science Edition, 2020, 33(3): 103-108.