

纳米层状硅酸盐复合砂土渗透及 微观特性试验研究

王琳^{1,2,3,4}

- (1. 上海勘察设计院(集团)有限公司, 上海 200093;
2. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 上海岩土与地下空间综合测试工程技术研究中心, 上海 200093;
4. 上海市岩土工程专业技术服务平台, 上海 200093)

摘要: 注浆封堵是地下工程渗漏治理工作中常用的方法之一, 基于纳米级层状硅酸盐材料的新型渗透注浆技术, 相较于传统水泥和化学注浆, 具有自渗性好、微扰动及无污染等特性。在充分调研国内外相关研究成果的基础上, 选用具有代表性但研究较少的纳米材料——合成锂藻土(Laponite), 分别开展其复合土体的变水头渗透试验和冷冻扫描电镜测试。Laponite 注浆前后的渗透试验结果对比表明, 添加 1.5% ~ 3.5% 的 Laponite, 砂土渗透系数可从 6.12×10^{-3} cm/s 降低至 8.99×10^{-5} ~ 6.09×10^{-6} cm/s, 抗渗性能得到显著提高。冷冻扫描电镜图像则直观地说明了 Laponite 浆液提高土体抗渗特性的微观机理, 即孔隙流体改性同时包裹胶结土颗粒。以上研究结果可为同类型注浆材料的研究提供参考和数据。

关键词: 渗透注浆; 合成锂藻土; 纳米复合砂土; 渗透特性; 微观结构

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)02—0054—05

Experimental Study on Permeability and Microscopic Characteristics of Nano-layered Silicate Composite Sand

WANG Lin^{1,2,3,4}

- (1. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Shanghai Engineering Research Center of Geotechnical Test for Underground Space, Shanghai 200093, China;
4. Shanghai Professional Technology Service Platform of Geotechnical Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: Grouting is one of the commonly used methods to control leakage in underground engineering. A novel permeation grouting technology based on nano-layered silicate material is proposed. Compared with traditional cement and chemical grouting, this technology has good self-permeability, micro disturbance, and no pollution. Based on literature review of relevant research, representative but less studied nanomaterial were selected, Laponite was selected as the experimental material. The falling head permeability tests and Cryo-scanning electron microscopy tests were conducted. The comparison of permeability test results before and after Laponite grouting shows that anti-penetrability performance nano composite sand has been significantly improved. Adding 1.5% ~ 3.5% Laponite, the permeability coefficients of sand were reduced from 6.12×10^{-3} cm/s to 8.99×10^{-5} cm/s ~ 6.09×10^{-6} cm/s. Cryo-scanning electron images directly illustrate the microscopic mechanism of Laponite grouting. The pore fluid is modified, and the cemented soil particles are simultaneously wrapped, thus improving the permeability of sand. The above research results can provide reference and data for the same type of grouting materials.

Keywords: penetration grouting; Laponite; nanocomposite soil; permeability; microstructure

收稿日期: 2021-11-20

修稿日期: 2021-12-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42002272); 上海市“超级博士后”激励计划(2019223); 上海市科学技术委员会科研计划项目(21DZ1204303)

作者简介: 王琳(1990—), 女, 博士, 工程师, 主要从事岩土工程设计与研究工作。E-mail: wanglin@sgidi.com

随着经济建设高速发展,快速工业化及城市人口的高度集中化,城市地下空间开发建设进入蓬勃发展阶段^[1]。据统计,“十三五”期间,全国累计新增地下空间建筑面积达到10.7亿m²。2019年,全国地下空间新增建筑面积约2.57亿m²^[2]。但渗漏水问题则是一直是困扰地下工程建设使用的“建筑癌症”。中国建筑防水协会和北京零点市场调查与分析公司联合发布了《2013年全国建筑渗漏状况调查项目报告》抽样调查显示,涉及28个城市的地下建筑样本1777个,其中有1022个出现不同程度的渗漏,渗漏率达到了57.51%,个别城市如重庆、无锡等地,地下建筑渗漏率高达100%^[3]。北京市建筑工程研究院责任有限公司建设工程质量司法鉴定中心统计,自成立14年间承接有关工程渗漏的案件多达1000多件,占工程质量总案件的25%^[4]。

注浆封堵是地下工程渗漏治理工作中常用的方法之一,即将各类工程浆材(悬浮分散颗粒浆或化学真溶液)通过压力传输系统(泵和传输装置)输送到土层中,使之固化或凝胶,从而达到防渗堵漏作用^[5]。注浆技术始于1802年黏土浆液被用于修复挡潮闸的砂砾土地基,至今已被国内外众多学者和工程师广泛研究并应用。本文首先对用于堵漏的注浆材料进行了梳理,包括传统的水泥基、化学注浆材料,以及新型的微生物、纳米注浆封堵材料。选取代表性纳米层状硅酸盐,开展其加固土体的渗透及微观特性研究,为注浆堵漏研究提供新的思路。

1 注浆堵漏材料研究进展

1.1 传统注浆堵漏材料

注浆材料是注浆技术的最重要组成部分之一,经过历年来的不断发展,注浆材料的种类愈加丰富。传统的注浆材料主要包括:

(1) 水泥基浆液,具有来源丰富、价格低廉、结石体强度高和抗渗性能好等巨大优势,使得水泥注浆也是长期以来地基处理的主要手段。但是水泥属于悬浮分散颗粒状浆材,普通水泥颗粒尺寸大(平均粒径约为20 μm)、黏度高,不易渗透进颗粒粒径较细的土体中^[6]。

(2) 丙烯酰胺、水玻璃、环氧树脂等化学注浆材料,黏度低、渗透性良好,但是成本较高,且大多数化学浆液在会一定程度上对环境造成污染^[7];并且其强度和耐久性较差,难以达到长久的密闭堵漏效果^[8]。

(3) 非水反应高聚物注浆材料,具有轻质、早强、防水、耐久、安全、快速、微损、可控等优点,在治

理道路孔洞、防渗墙、以及注浆锚杆等方面已有工程应用^[9-10],但其成本与人工费用较高一直是制约其发展的主要因素。此外,基于水泥、石灰及有机胶类注浆材料的制造属高耗能和高排放产业,与“绿色岩土”的环保理念不符,因此需探究更多易渗透、无污染且经济的新型注浆材料。随着微生物科技、纳米科技和多学科交叉应用的迅速发展,一系列创新性的注浆堵漏方法及材料被相继提出。

1.2 微生物注浆材料

微生物矿物学相关研究表明,岩土体存在一些无害的天然微生物,能够通过新陈代谢作用析出多种矿物结晶,使土体的原位微生物改性与固化成为可能。2006年,DeJong等^[11]提出了微生物诱导碳酸钙结晶技术(Microbial Induced Carbonate Precipitation, MICP)。该技术利用产脲酶的微生物 *Sporosarcina Pasteurii*,通过为之提供富含钙离子和氮源的营养盐,快速析出具有胶凝作用的碳酸钙结晶,有效提高土体强度、降低水力传导率。并且能够通过人为干预营养环境,如初始细菌浓度、原位微生物酶活性、营养液浓度、pH、温度等,调节碳酸钙产率^[12]。由于巴斯德氏杆菌等微生物广泛存在,且价格低廉,相关工程应用也在逐步开展,例如某人工湖的防渗设计实例,提出以微生物灌浆为主的新型生态防渗体系,以达到防渗与生态之间的平衡^[13]。

1.3 纳米注浆材料

最初在污染场地修复领域, Persoff等研究发现了一种比黏土尺寸更小的纳米材料——硅溶胶(Colloidal Silica)可有效降低土体渗透性从而形成帷幕(Viscous Liquid Barrier, VLB),以阻止污染物的运移^[14]。随后, Gallagher提出了一种基于硅溶胶的新型渗透注浆方法——被动场地稳定法(Passive Site Stabilization)^[15]。由于硅溶胶颗粒尺寸极小(7 nm~22 nm),浆液可在保持土体骨架不变的前提下渗透进土中,通过孔隙流体改性(Pore Fluid Engineering),胶结土颗粒以增强土体强度、减小渗透性,因此相较其他注浆技术,环境影响更小。此外,纳米材料具有颗粒小、比表面积大、表面带电荷、易形成特殊微观结构等特性,少量的纳米材料即可极大地影响孔隙流体的工程性质^[16]。被动式稳定技术为纳米材料在岩土工程领域的应用和微扰动注浆技术提供了新思路,已逐步成为了该领域的研究热点和前沿问题。

除硅溶胶外,其他纳米层状硅酸盐材料,如纳米膨润土(nano-Bentonite)、合成锂藻土(Laponite)也

同样被引入土体改良研究中。其中,合成锂藻土相较其他两种材料具有更低的初始黏度,无需添加调节剂或增大注浆压力即可快速注入土体中,且黏度增长表现出显著的时变性,更具典型性和代表性^[17]。但目前关于合成锂藻土对土体渗透特性影响的定量研究和数据仍较少,因此本文以合成锂藻土注浆加固后的复合砂土为研究对象,分别开展变水头渗透试验和冷冻扫描电镜测试,获得了其渗透特性的变化规律,并结合电镜图像信息进一步分析了复合土体的微观结构特性。

2 试验材料与试验方法

2.1 试验材料

本文试验选用的纳米级层状硅酸盐材料为 BYK Additives and Instruments (原洛克伍德公司, Rockwood Additives) 生产的 Laponite RD 型号人工合成锂藻土(后文统一简称“Laponite”)。Laponite 颗粒呈片层状,厚度约为 1 nm,直径约为 25 nm,其晶格结构为“三八面体”,由两层 Si-O 四面体和一层 Mg-OH-O 八面体构成(见图 1),与天然的蒙脱石结构相似。其化学组成为 65.82% SiO₂, 30.15% MgO, 3.20% Na₂O 和 0.83% Li₂O, 经验化学式为 Na^{+0.7} [Si₈ Mg_{5.5} Li_{0.3} H₄ O₂₄]^{-0.7}^[18]。与其性质相近的纳米颗粒有硅酸镁锂、锂皂石等,已广泛应用于涂料、日用护理品、制药、造纸、陶瓷等领域。

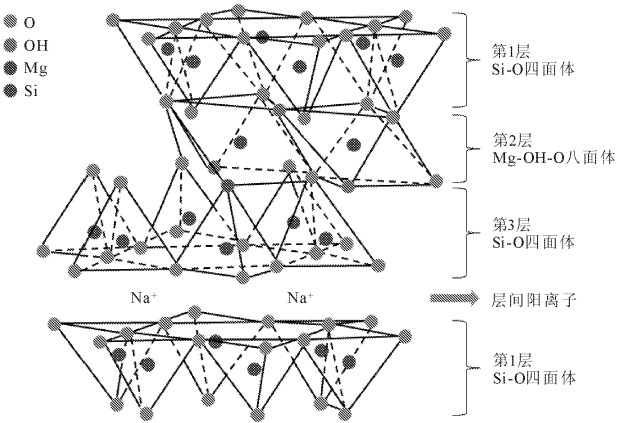


图 1 合成锂藻土(Laponite)理想结构(修改自产品手册)

Laponite 无毒、无刺激性,具有生物化学惰性,环境友好。其外观为白色粉末(见图 2(a)),比表面积为 370 m²/g,堆积密度为 1 000 kg/m³,比重为 2.57,在磁力搅拌下可均匀分散于水中并形成透明的悬浮液,静置一段时间后会失去流动性,形成类似软固体的凝胶(见图 2(b)),将 Laponite 悬浮液注入

土体中,养护一定时间后将形成纳米复合砂土(见图 2(c))。试验采用的砂土为普通黄砂,其颗粒级配曲线如图 3 所示。

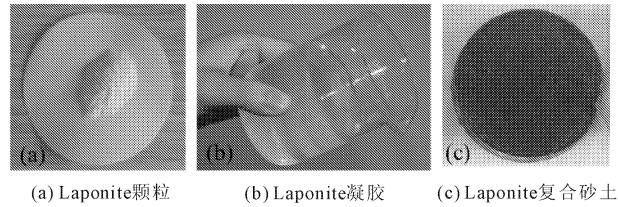


图 2 复合砂土形成过程

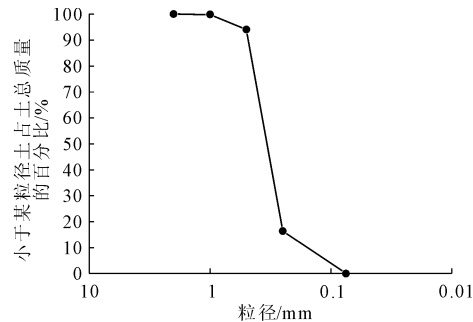


图 3 试验砂土颗粒级配曲线

2.2 试验方法

注浆前后土体的渗透系数变化可作为评价注浆堵漏效果的直接指标之一。通过纳米复合砂土在不同 Laponite 浓度(1.5%、2.5%、3%、3.5%)和养护时间(2 d、4 d、7 d、28 d)条件下的变水头渗透试验,定量分析 Laponite 对砂土渗透系数的影响变化规律。试验装置采用 TST-55 型渗透仪(见图 4),为了尽可能减小制样扰动,复合砂土的制备和养护均在渗透仪上进行。首先制备浆液,采用磁力搅拌机对 Laponite 悬浮液充分搅拌,直至分散液均匀透明且无团块;将浆液与定量砂土混合,控制砂土干密度为 1.5 g/cm³;搅拌均匀后倒入渗透仪器中,密封养护一定时间,注意试验前渗透仪环刀内壁需涂抹凡士林。

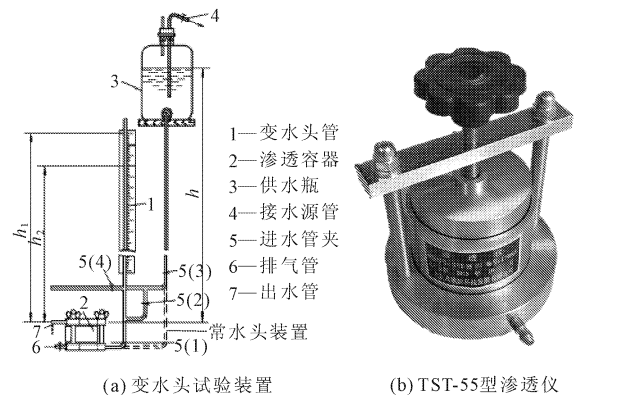


图 4 变水头试验装置及 TST-55 型渗透仪

纳米复合土体的宏观渗透特性往往与其微观结构密切相关,进一步开展了纳米复合砂土的微观结构观测试验。本次试验采用同济大学 Hitachi N-3400S 型冷冻扫描电镜 (Cryo-SEM) 系统 (见图 5), 对样品进行快速超低温冷冻,使样品中的水在低温状态下呈玻璃态,减少冰晶的产生,避免样品的结构损伤。同时,其冷冻传输系统可实现在低温状态下直接对样品进行电镜观察。因此,冷冻扫描电镜可获取样品原有结构的真实图像。本次所用试样为 3% 浓度、养护 7 d 的 Laponite 复合砂土,试验分为冷冻包埋、转移至液氮中、观测并采集图像、三维重构和分析等步骤。

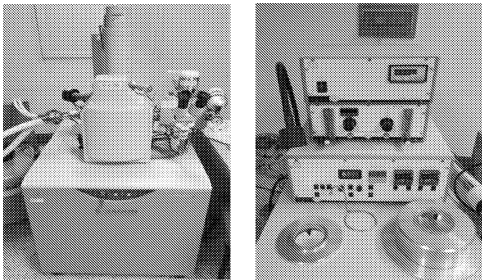


图 5 冷冻扫描电镜

3 试验结果分析

3.1 渗透特性

作为对照组,首先测定了纯砂土在 20℃ 的平均渗透系数,为 $6.12 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。不同 Laponite 浓度和养护时间条件下复合土体的渗透系数如表 1 所示,为 $8.99 \times 10^{-5} \text{ cm/s} \sim 6.09 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,相较于纯砂土渗透系数降低两至三个数量级,说明仅添加 1.5% 的合成锂藻土,砂土的防渗性能有显著改善。

表 1 纳米复合砂土渗透系数 (20℃)

养护时间 /d	不同浓度渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)			
	1.5%	2.5%	3.0%	3.5%
2	8.99×10^5	5.96×10^5	4.48×10^5	4.87×10^5
4	7.34×10^5	5.37×10^5	2.09×10^5	2.68×10^5
7	4.79×10^5	1.01×10^5	6.09×10^6	7.97×10^6
28	3.35×10^5	1.17×10^5	6.37×10^6	9.07×10^6

Laponite 复合砂土的渗透系数随 Laponite 浓度变化的规律见图 6。由试验结果可知,养护时间相同,Laponite 浓度从 1.5% 增加至 3.0% 时,渗透系数有明显的下降趋势,由于 Laponite 颗粒水化后形成特殊的结构,在宏观上表现为形成凝胶。但浓度继续增加至 3.5% 时,渗透系数反而出现轻微增加,说明浓度为

3% Laponite 能最有效地改善砂土的抗渗性能。

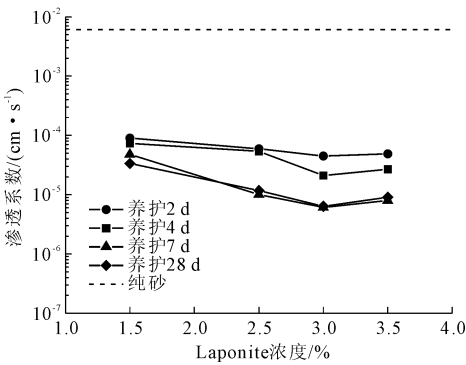


图 6 Laponite 浓度对复合砂土渗透系数的影响

Laponite 复合砂土的渗透系数随养护时间变化的规律见图 7。由试验结果可知,Laponite 浓度相同,7 d 内复合砂土的渗透系数对养护时间的增加而逐渐降低,但 7 d 至 28 d 曲线逐渐平缓,说明 Laponite 水化在 7 d 内已基本完成。在工程实践中,考虑抗渗要求、时间及成本等因素,建议 Laponite 浓度以 3% 为宜。

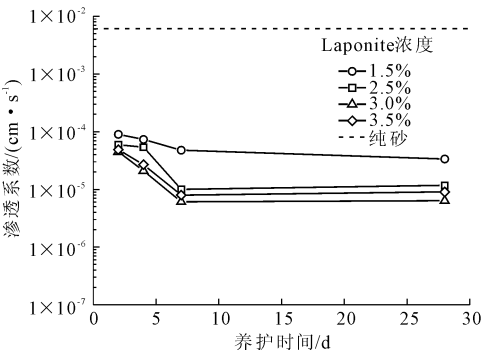


图 7 养护时间对复合砂土渗透系数的影响

3.2 微观结构

图 8 为纳米复合砂土的冷冻扫描电镜图像,网状结构的物质即为 Laponite 凝胶,呈现出有序的定向排列,并且在最长方向上的尺寸远大于纳米颗粒的间距和颗粒本身。该特殊网络交联结构的形成从微观层面上有效地揭示了凝胶体系的形成机制,即纳米颗粒分散于水中形成凝胶,在宏观上表现为 Laponite 悬浮液的流动性减弱,而在微观上表现为特殊网状结构的逐渐形成。当 Laponite 悬浮液与砂土充分混合后,固化形成纳米复合砂土,Laponite 凝胶对砂土渗透特性的影响主要有两方面,一方面填充在土颗粒间的孔隙中,改变了孔隙流体的特性;Laponite 凝胶大量吸附在土颗粒表面,对砂土产生了包裹胶结的作用。

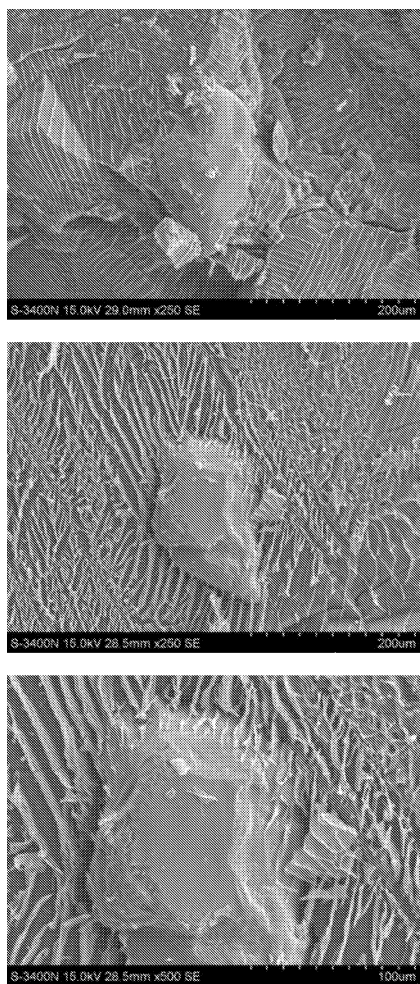


图 8 纳米复合砂土的微观结构(3% Laponite, 7 d)

从材料学的角度分析 Laponite 悬浮液形成凝胶是纳米颗粒的表面结构和粒子间的相互作用所导致的,即表面、边缘之间的相反电荷的静电吸引导致形成“边缘面”的三维结构,形成物理交联凝胶的“卡片屋”结构,见图 9。Nature Material 曾报道 Ruzicka 等首次通过试验观察到了 Laponite 颗粒相互联结所形成的不流动的网络结构,即“平衡胶体”,且该平衡结构不会发生潜在的可能分离^[19]。因此,该材料在注浆使用过程中能够维持材料性能的稳定。

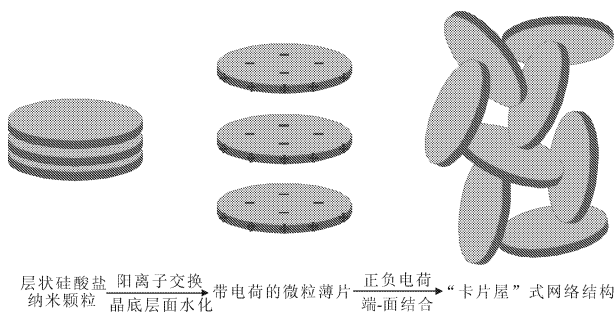


图 9 Laponite 凝胶形成过程及“卡片屋”结构模型示意图

4 结 论

地下工程的渗漏水问题严重影响其使用性和安全性,注浆堵漏技术作为有效的渗漏治理手段之一而备受关注。鉴于纳米层状硅酸盐材料具有相近的特性,本文对合成锂蒙土(Laponite)抗渗性能和微观结构的研究可为同类型注浆材料的研究提供参考。

(1) Laponite 注浆前后的渗透试验结果对比表明,添加 1.5% ~ 3.5% 的 Laponite,砂土渗透系数可从 $6.12 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 降低至 $8.99 \times 10^{-5} \text{ cm/s} \sim 6.09 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,抗渗性能得到显著提高。在工程实践中,考虑抗渗要求、时间及成本等因素,建议 Laponite 浓度以 3% 为宜。

(2) 通过冷冻扫描电镜(Cryo-SEM)开展纳米复合砂土的微观试验,获取了其在纳米尺度下的高分辨率微观结构立体图像信息,从微观层面上解释了 Laponite 浆液提高土体抗渗性能的原因:纳米凝胶填充了砂土间的孔隙,特殊网络结构,改变了孔隙流体的特性;纳米凝胶大量吸附在土颗粒表面,对砂土产生了包裹作用。

参考文献:

- [1] 陈丽蓉,顾国荣. 城市地下空间开发建设风险防控[M]. 上海:同济大学出版社,2018.
- [2] 中国工程院战略咨询中心. 中国岩石力学与工程学会地下空间分会,中国城市规划学会. 2020 中国城市地下空间发展蓝皮书[EB/OL]. 2020. https://www.cgs.gov.cn/gzdt/dzhy/202101/t20210105_661598.html.
- [3] 潘文亮,庞正其. 治理建筑渗漏顽疾,惟其艰难方显勇毅——从《2013 年全国建筑渗漏状况调查项目报告》发布谈起[J]. 中国建筑防水,2014(18):9-13.
- [4] 叶林标,曹征富. 建筑防水工程施工新技术手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [5] 刘汉龙,赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报,2016,49(1):96-115.
- [6] Oss HGV, Padovani AC. Cement manufacture and the environment Part II: environmental challenges and opportunities[J]. Journal of Industrial Ecology, 2003,7(1): 93-126.
- [7] Vik EA, Sverdrup L, Kelley A, et al. Experiences from environmental risk management of chemical grouting agents used during construction of the Romeriksporten tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000,15(4):369-378.

(下转第 65 页)

拱顶上方沉降量最大,易形成塌方区域。黄土隧道地表沉降呈现正态分布形状,地表最大沉降与地层最大沉降均随支护强度增强而减小。

(3) 由支护强度与拱顶沉降关系曲线得到可用拱顶沉降极限值来控制拱顶沉降。由位移释放率曲线可求出不同工况下的位移释放率,由极限值与隧道埋深关系曲线可求出相应的拱顶沉降极限值 $S_{\max}$,再由 $S_{2\max} = S_{\max}(1 - \eta)$ 可求出拱顶沉降监测极限值 $S_{2\max}$ 。实际工程中,若监测到拱顶沉降略小于拱顶沉降极限值,则隧道围岩稳定,可继续施工;若监测拱顶沉降远小于 $S_{2\max}$,则可适当降低支护强度以减小施工量和降低工程造价;若监测到拱顶沉降大于 $S_{2\max}$,则需加强支护以保证施工安全。

参考文献:

- [1] 马 林,关 伟,张 军.考虑结构性影响的黄土隧道围岩力学响应分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(5):114-118.
- [2] 王秉勇,王建奇,王伟星,等.黄土塬区浅埋大断面隧道掌子面失稳机理研究[J].铁道工程学报,2020,37(1):67-72.
- [3] 邵生俊,杨春鸣,焦阳阳,等.湿陷性黄土隧道的工程

- 性质分析[J].岩土工程学报,2013,35(9):1580-1590.
- [4] 陈锦涛,韩爱果,任光明.基于应力监测的软岩隧道支护结构稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(1):178-182.
- [5] 卫建军.黄土地铁隧道施工围岩及地表变形规律[J].科学技术与工程,2018,18(11):287-292.
- [6] 扈世民,张顶立,王梦恕.铁路大断面黄土隧道初期支护作用效果[J].北京交通大学学报,2012,36(1):19-23.
- [7] 扈世民,张顶立,郭 婷,等.大断面黄土隧道变形特征分析[J].铁道学报,2012,34(8):117-122.
- [8] 李志清,丁春林,王科元,等.浅埋大断面黄土隧道初期支护安全性分析[J].地下空间与工程学报,2014,10(5):1151-1157.
- [9] 李志清,丁春林,李双美,等.浅埋大断面黄土隧道围岩变形时空效应分析[J].华东交通大学学报,2014,31(4):6-10.
- [10] 李志清,丁春林,窦世学,等.大断面浅埋黄土隧道围岩变形特性分析[J].地下空间与工程学报,2014,10(S1):1623-1628.
- [11] 郑选荣.地铁隧道穿越地裂缝的变形控制措施及其效果分析[J].城市轨道交通研究,2014,17(4):58-62.

(上接第58页)

- [8] Avci E. Performance of novel chemical grout in treating sands[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017,29(10):04017164.
- [9] 王复明,范永丰,郭成超.非水反应类高聚物注浆渗漏水处治工程实践[J].水力发电学报,2018,37(10):1-11.
- [10] 徐建国,胡会明,李松涛,等.地下管道脱空渗漏高聚物注浆抬升修复与数值分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):35-40.
- [11] Dejong J T, Fritzges M B, Nüsslein K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006,132(11):1381-1392.
- [12] Qabany A A, Soga K, Santamarina C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012,138(8):992-1001.
- [13] 李 娜,赵 宇,李 凯,等.人工湖泊微生物灌浆的新型生态防渗技术研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(2):226-231.
- [14] Persoff P, Apps J, Mordis G, et al. Effect of dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999,125(6):461-469.
- [15] Gallagher P M. Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk [D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Tech, 2000.
- [16] Zhang G. Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils[C]//Proc., GeoDenver Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior, 2007:1-13.
- [17] Huang Y, Wang L. Experimental studies on nanomaterials for soil improvement: a review[J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(6):1-10.
- [18] Paula FLO, Silva GJD, Aquino R, et al. Gravitational and magnetic separation in self-assembled clay-ferrofluid nanocomposites[J]. Brazilian Journal of Physics, 2009, 39(1):163-170.
- [19] Ruzicka B, Zaccarelli E, Zulian L, et al. Observation of empty liquids and equilibrium gels in a Colloidal clay [J]. Nature Materials, 2011,10(1):56-60.