

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

全风化花岗岩地层中高固相离析浆液灌浆机理研究

赵 钰,郑 洪,曹 函,林 飞,王旭斌,贺茉莉 A study of grouting mechanism of high solid phase segregation grout in fully weathered granite ZHAO Yu, ZHENG Hong, CAO Han, LIN Fei, WANG Xubin, and HE Moli

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006023

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

花岗岩循环爆破振动衰减规律与损伤演化机理试验

An experiment of attenuation law of vibration and evolution mechanism of damage of granite under cyclic blasting 钟靖涛, 王志亮, 田诺成 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 101-101

含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting 张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79–79

富水隧道幕墙堵水技术研究

Research on water blocking technology of curtain walls in water-rich tunnels 吴祖松, 侯秋萍, 马君伟, 刘琦, 肖缔, 李松 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 65-71

巫溪县西溪河北岸高位高危碎屑流滑坡特征与机理研究

A study of the characteristics and mechanism of high-risk debris flow landslide on the northern bank of the Xixi River in Wuxi county 李浩, 乐琪浪, 孙向东, 杨秀元, 李刚, 李兴虎 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 13-13

封隔注浆分层成井技术在水文地质勘查中的应用研究

Application of the technology of injecting cement for the stratified well completion to hydrogeological exploration 王明明, 解伟, 安永会, 龚磊, 王文祥, 崔虎群 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 50-50

井内嵌入同轴多孔与固体圆柱地下水渗流流型分析

Flow pattern analysis around a solid cylinder with both porous and water rings in porous media 朱琳, 雷海燕, 马非, 戴传山 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 25-31



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006023

全风化花岗岩地层中高固相离析浆液灌浆机理研究

赵 钰1,郑 洪2,曹 函1,林 飞2,王旭斌2,贺茉莉3

 (1. 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南长沙 410083;2. 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南长沙 410000;3. 湖南宏禹工程集团有限公司,湖南长沙 410000)

摘要: 全风化花岗岩地层稳定性差、遇水易发生崩解,工程上使用常规材料防渗加固注浆时效果较差。针对这一情况,依 托湖南省郴州市莽山水库防渗加固灌浆项目,通过自主设计的全风化花岗岩地层注浆室内模拟试验装置,进行模拟注浆试 验,实现了浆液在整个注浆过程中的扩散情况模拟,对不同注浆压力、不同位置点所取试样开展单轴抗压、抗剪强度及渗 透率测试试验,对不同注浆压力下完整结石体取样观察,研究以全风化花岗岩颗粒为配方主体材料的高固相离析浆液在全 风化花岗岩地层的防渗加固效果及浆液扩散模式。结果表明:该浆液在全风化花岗岩地层扩散过程中经历了渗透扩散、挤 密压缩、劈裂扩展三个阶段,是一种复合注浆形式;以全风化花岗岩颗粒为主体的高固相离析浆液在全风化花岗岩地层注 浆中效果显著,随着注浆压力提升,单轴抗压强度显著提升为原土体的 3.25~13.67 倍,抗剪强度在不同法向压力情况下提 升为原土体的 1.63~2.69 倍,渗透系数从 10⁻⁴ cm/s 下降至 10⁻⁵ cm/s 甚至 10⁻⁶ cm/s。

关键词: 全风化花岗岩;高固相离析浆液;注浆压力;注浆效果;浆液扩散模式

中图分类号: TU 432 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2021)02-0078-11

A study of grouting mechanism of high solid phase segregation grout in fully weathered granite

ZHAO Yu¹, ZHENG Hong², CAO Han¹, LIN Fei², WANG Xubin², HE Moli³

 (1. School of Geosciences and Information Physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China; 2. Hunan Hydro&Power Design Institute, Changsha, Hunan 410000, China; 3. Hunan Hongyu Engineering Group Co. Ltd., Changsha, Hunan 410000, China)

Abstract: The stability of completely weathered granite is poor and it is easy to disintegrate when exposed to water. In engineering, the grouting effect of using conventional materials for seepage prevention and reinforcement in this rock is poor. In view of this situation, based on the grouting project of the Mangshan reservoir in Chenzhou of Hunan Province, the simulated grouting experiment is carried out by the independent design of the laboratory simulation test device. The diffusion of slurry in the whole grouting process is simulated. Uniaxial compression, shear strength and permeability tests are conducted on the samples taken at different grouting pressures and at different locations, and the whole stone body under different grouting pressures is sampled and observed to examine the anti-seepage reinforcement effect and the slurry diffusion mode of the high-solid phase segregation slurry, which is composed of fully weathered granite particles, in the fully weathered granite. The results show that the slurry has undergone three stages of permeation and diffusion, compaction and

收稿日期: 2020-06-11; 修订日期: 2020-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41302124);国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室基金开放课题基金(EDLF2017)

第一作者:赵钰(1996-),男,硕士研究生,主要从事非常规能源开发、岩石力学等研究。E-mail: zhaoyu@csu.edu.cn

通讯作者: 曹函(1982-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事非常规能源钻采关键技术与储层保护等教学与科研工作。

compression, and cleavage and expansion in the process of fully weathered granite formation diffusion, and the high solid phase segregation grout with fully weathered granites as the main body has a remarkable effect on the grouting of fully weathered granites. With the increasing grouting pressure, the uniaxial compressive strength is significantly increased to 3.25-13.67 times the original soil mass, and the shear strength is increased to 1.63-2.69 times the original soil mass under different normal pressures. The permeability decreases from 10^{-4} cm/s to 10^{-5} cm/s or 10^{-6} cm/s. Therefore, the high solid phase segregation slurry has a significant anti-seepage effect on the fully weathered granite.

Keywords: fully weathered granite; high solid phase segregation slurry; grouting pressure; grouting effect; slurry diffusion pattern

花岗岩广泛分布于我国南方地区,受气候、矿物、 结构构造、裂隙和生物等因素的影响,易发生不均匀 风化^[1]。对于全风化花岗岩的物理力学性质,国内外 学者进行了相关研究。陈爱云等^[2] 对黑云母花岗岩 全风化层的工程地质特性进行了研究,发现其具有裂 隙发育、自稳能力差的特点,在地下工程建设中易失 稳垮塌;陈洪江等^[3]通过对全风化花岗岩多项物理力 学指标进行系统分析,认为各指标之间相互关联,且 全风化花岗岩残积土存在变异性特征;苗胜军等^[4]通 过对全风化花岗岩加载时细观力学特性的研究,提出 其破裂演化的规律;李建新等^[5]通过对南岳地区的全 风化花岗岩进行试验研究,得出了其遇水崩解性强的 特点:张素敏等⁶⁰发现具有其明显的软岩流变特征。 因此,工程上常用注浆方式对全风化花岗岩地层进行 防渗加固。目前常用的灌浆方式主要有混凝土连续 墙、高压喷射灌浆、常规帷幕灌浆^[7]等,但这些方式都 存在一定问题:混凝土连续墙对施工技术、施工场地 及施工设备要求高,且造价高昂;高喷灌浆水力切割 全风化花岗岩时较困难,最终形成的防渗帷幕整体性 较差;常规水泥灌浆则存在易塌孔、易冒浆、难封闭、 吸水不吸浆等技术难题。

为探究适宜全风化花岗岩地层防渗加固的灌浆 体系,国内外学者开展了相关研究。罗平平等⁸¹对全 风化花岗岩等类似裂隙岩体灌浆中的渗透性、可灌 性、灌浆准则的选取在理论及数值模拟层面进行了探 讨;李术才等⁹¹对富水断裂带优势劈裂注浆机制进行 研究,建立了单一平板优势劈裂注浆扩散模型,推导 了考虑浆液流变特征的优势劈裂注浆扩散模型,推导 了考虑浆液流变特征的优势劈裂注浆扩散模型,推导 了考虑浆液流变特征的优势劈裂注浆扩散控制方程; 齐延海等^[10]探讨了不同水压条件下疏水降压对全风 化花岗岩富水地层注浆模拟加固效果的影响;王旭斌 等^[11]探讨了采用高压脉动灌浆技术自下而上封闭灌 浆的可行性。针对浆液选型问题,王凯等^[12]使用普通 水泥浆液进行了全风化花岗岩注浆的模拟试验;袁敬 强等^[13]采用搅拌混合法制备不同普通水泥浆液充填 率的注浆试样,开展物理力学及水理性试验;涂鹏等^[14] 对于海底隧道中注浆材料强度劣化规律及使用寿命 进行了研究;张健等^[15]对普通水泥浆液和水泥-水玻 璃浆液 2 种浆液的加固效果进行了对比分析研究;张 贵金等^[16]则对黏土水泥膏浆流变性能及其对灌浆的 影响进行了试验研究。上述研究在注浆理论、试验及 工程实践等方面对改进全风化花岗岩地层灌浆体系 进行了探索,具有一定参考价值,但是鲜有人考虑到 由于常规水泥浆液本身为悬浊液,其难以完全注入岩 体微裂隙和空隙,防渗加固效果较差,而且注浆过程 中易冒浆,产生浪费的同时也增加了施工成本。因此 选取注浆效果及经济效益优良的浆液体系显得尤为 重要。

鉴于此,本文以湖南省郴州市莽山水库防渗加固 注浆项目工程主副坝段深厚层全风化花岗岩地层为 研究对象,选取以当地花岗岩颗粒为主要原材料的高 固相离析浆液开展系统的注浆模拟试验研究,通过对 不同注浆压力、不同取样位置试样的物理力学试验, 分析该浆液体系的防渗加固效果及实用意义,揭示该 浆液在全风化花岗岩地层注浆中的扩散机理,以期对 今后类似工程项目提供指导。

1 试验材料

1.1 注浆材料

由于普通硅酸盐水泥作为灌浆材料普遍存在凝 结时间过长、早期强度不高的缺陷,不能完全满足灌 浆要求。若想满足灌浆需要且能应用于实际工程中, 注浆材料必须具备凝结速度快、早期强度高及流动性 较好等特点。根据这一情况,本次注浆试验中采用了 配方(水泥:膨润土:全风化花岗岩砂土:水:HY-1)的高固相离析浆液。具体要求如下:

水泥:选用湖南娄底涟源水泥厂生产的海螺牌普 通硅酸盐水泥(PO42.5),其细度通过 80 μm 方孔筛的 筛余量小于5%。

膨润土:选用四川仁寿兴大工贸有限公司生产的 钠质基膨润土,有机物含量不宜大于3%。

全风化花岗岩砂土:为全风化花岗岩经过 10 mm 方孔筛网过筛所得。

宏禹1号(HY-1):为湖南省宏禹工程集团有限公司生产的添加剂,具有使浆液增稠、速凝、早强等效果。

该浆液配方的基本参数如下:塌落度 160 mm,扩展值 36 mm,稠度 90 mm,析水率/结实率 1%/99%,初凝时间和终凝时间分别为 3 h 和 5.5 h。

1.2 全风化花岗岩地层特

试验土样取自湖南省郴州市莽山水库主副坝交 界处的全风化花岗岩地层,土样基本物理性质如下: 天然密度 2.08 g/cm³,干密度 1.84 g/cm³,含水率 12.83%, 孔 隙率 37%。使用德国 BRUKER 公司生产的 New D8 型衍射仪对全风化花岗岩试样粉末进行了 X-RD 矿物成分定量分析,土体矿物组成及各部分质量参数 见图 1,其中,石英、高岭石、长石、云母、方解石、赤 铁矿含量分别为 13.83%、42.57%、31.27%、8.84%、 1.26%、2.23%。粒径级配曲线见图 2。



Fig. 1 X-rd test results of the fully weathered granite

由图1可知,该地全风化花岗岩矿物成分主要由 石英、高岭石、长石组成,黏土矿物含量高,对水的敏 感性强,易水化膨胀,坝体长久浸泡在水中,自身的结 构强度会受到影响。

由图 2 可知,该土样总体颗粒级配良好,粒径分布 范围广,其中 2~10 mm 的砾粒组占总质量的 40% 左 右,小于 0.1 mm 的细粒组平均占总质量 4%,0.1~2 mm 粒径范围内的砂粒组平均占总质量的 60%,由土的工 程分类标准^[17]可知该地层组成以砂粒组为主。



2 试验方案设计

2.1 注浆模拟试验

基于张贵金等^[18]室内模拟试验装置基础上研发的大型室内试验系统如图 3 所示,主要由千斤顶反作用力平台、注浆腔体、砂浆注浆泵、浆液搅拌桶 4 部分组成。





砂浆注浆泵型号为衡阳中地装备钻探工程机械 有限公司生产的 BWS100/7 无极变速高压脉动注浆 泵,泵速 33~108 r/min,流量 30~100 L/min,最高工作 压力 7 MPa。试验所用注浆腔体形状为圆筒状,直 径×高度为 56 cm×80 cm,纵向分为相等的两半并由螺 栓连接,以方便取样,桶壁厚 2 cm,壁上均匀分布泄流 孔,用于装载全风化花岗岩土样。千斤顶反作用力平 台主要作用为固定注浆腔体及提供上覆荷载以防止 注浆时发生地层抬动。试验步骤如下:

(1)对全风化花岗岩原状土烘干并筛除粒径超过
10 mm的块石(含量极低,为避免尺寸效应故筛除);
(2)每层填筑高度为5 cm,根据测得含水率(12.8%)及
天然密度(2.08 g/cm³)计算得到每层土体中需加入的

第2期

水及土的质量分别为 2.91, 22.71 kg, 加入后将土体夯 实到指定高度; (3)待注浆腔体填筑完毕后静置 6 h; (4)连接好注浆管路, 开启搅拌桶, 将水、水泥、膨 润土、全风化砂、宏禹 1 号按配方依次加入进行搅拌; (5)搅拌均匀后开启注浆泵, 调整泵速, 观察压力表示 数, 待达到试验预设终压后, 停止注浆。(6)注浆结束 12 h 后, 打开注浆腔体, 在指定位置进行取样(图4)。





2.2 物理力学试验

对注浆前试样与在不同注浆压力条件下取样点 A、B处试样分别进行无侧限单轴抗压强度、直接剪 切、气测渗透率试验,研究该浆液在不同的注浆压力 下对于全风化花岗岩强度特性、渗透性的影响情况及 浆液扩散模式机理。注浆前全风化花岗岩原位取样 和注浆后结石体试样如图 5 所示。



图 5 注浆前全风化花岗岩原样(a)和注浆后结石体试样(b) Fig. 5 Completely weathered granite samples before grouting (a) and stone sample after grouting (b)

2.2.1 单轴抗压强度试验

无侧限单轴抗压强度试验采用济南一诺世纪实 验仪器有限公司的 YDW-100 型微机控制岩石拉伸劈 裂实验机。试验时采用位移加载方式,加载速度为 2 mm/min,根据土工试验规程^[19],试样为直径 50 mm、 高度 100 mm 的圆柱体。注浆结束 12 h后取样,试验 前需在标准条件下养护 28 d。

2.2.2 直接剪切试验

直接剪切试验所用试验仪器为济南矿岩实验仪器有限公司生产的YZ-6型数显式岩石直剪仪。法向压力分别选取300,400,500 kPa,采用手动加载方式,控制剪切速率约为2 mm/min,测得在不同注浆压力、不同法向压力情况下的注浆前后试样抗剪强度。试验试样为直径50 mm、高度50 mm的圆柱体,注浆结束12 h 后取样,试验前需在标准条件下养护28 d。 2.2.3 渗透试验

注浆前试样采取常水头试验方式测试渗透率,试验仪器选用南京土壤仪器厂有限公司生产的TST-70型土壤渗透仪。灌浆后试样采取气测方式测试渗 透率,试验仪器为江苏联友科研仪器有限公司生产的 KXD-II型孔隙度渗透率联测仪,注浆后试样尺寸要 求为直径25 mm、高度50 mm的标准圆柱体,在注浆 完成12h后取样,养护28d后进行试验。

3 试验结果及分析

3.1 单轴抗压试验

单轴抗压强度试验结果如图 6、表1所示,通过对 取样点A和取样点B处所取试样进行的单轴抗压强 度试验结果对比发现,随着注浆压力的提高,A、B处 所取试样的单轴抗压强度均显著提高(图中注浆压力 为0的点代表原状土样的单轴抗压强度),其中,取样 点A处所取试样在不同压力下的单轴抗压强度均大 于B处所取试样,当注浆压力在0.0~0.5 MPa时,A处 所取试样强度增幅最大, 0.5 MPa时试样单轴抗压强 度为未注浆时的 7.33 倍, 注浆压力在 0.5~1.5 MPa 之间时增幅较为稳定,1.5 MPa时试样强度为未注浆 时的13.67倍; B处所取试样在注浆压力达到0.5 MPa 之前增幅较缓, 0.5 MPa 时强度为注浆前的3.25 倍, 超过 0.5 MPa 后增幅呈现增大趋势, 而当注浆 压力增大到1.0 MPa后,单轴抗压强度增幅再次变缓, 注浆压力在 1.0~1.5 MPa 时单轴抗压强度分别为注浆 前的 7.58 倍、10.08 倍。

3.2 直接剪切试验

不同注浆压力条件下取样点 A、B 所取试样在法 向压力分别为 300, 400, 500 kPa 时的抗剪强度值如表 2 所示。分别选取 σ_n=400, 500 kPa 时不同注浆压力、 不同取样点试样的抗剪强度进行分析, 注浆压力与抗



Fig. 6 Relationship between uniaxial compressive strength and grouting pressure

表 1	取样点 A,	B不同注浆压力下单轴抗压强度实验结果
-----	--------	--------------------

 Table 1
 Experimental results of uniaxial compressive strength at sampling point A and B under different grouting pressures

	计投始日	注浆压力/	单轴抗压强度/	单轴抗压强度	
	试件编号	MPa	MPa	平均值/MPa	
	I -1		0.15		
	I -2	0.0	0.09	0.12	
	I -3		0.12		
	∏ -1		0.69		
	II -2	0.5	0.93	0.88	
ҧ坮占∧	∏-3		1.02		
城件点A	Ⅲ-1		1.58		
	Ⅲ -2	1.0	1.14	1.31	
	Ⅲ-3		1.32		
	IV-1		1.68		
	IV-2	1.5	1.75	1.64	
	IV-3		1.49		
	I -1		0.15		
	I -2	0.0	0.09	0.12	
	I -3		0.12		
	∏ -1		0.32		
	∏ -2	0.5	0.42	0.39	
取样占 D	∏ -3		0.43		
取件点D	Ⅲ-1		0.88		
	Ⅲ-2	1.0	0.75	0.91	
	Ⅲ-3		1.10		
	IV-1		1.23		
	IV-2	1.5	1.11	1.21	
	IV-3		1.29		

剪强度关系见图 7。由图 7、表 2可知,取样点 A、 B所取试样在不同法向压力下的抗剪强度都随着注浆 压力的增大而提高,取样点 A 处所取试样在不同法向 压力、不同注浆压力情况下的抗剪强度总是大于取样 点 B 处试样。法向压力 σ_n=400 kPa 时,取样点 A 试样

	sumpling of point if and 2				
	试样编号	注浆压力/MPa	法向压力/kPa	抗剪强度/kPa	
	I -1		300	209	
	I -2	0.0	400	253	
	I -3		500	304	
	∏ -1		300	453	
	∏ -2	0.5	400	523	
取样占∧	∏-3		500	643	
城什点A	Ⅲ-1		300	542	
	Ⅲ-2	1.0	400	625	
	Ⅲ-3		500	705	
	IV-1	1.5	300	658	
	IV-2		400	728	
	IV-3		500	819	
	I -1		300	209	
	I -2	0.0	400	253	
	I -3		500	304	
	∏ -1		300	331	
	∏ -2	0.5	400	343	
取样占B	∏ -3		500	497	
MIT WD	Ⅲ-1		300	364	
	Ⅲ -2	1.0	400	518	
	Ⅲ-3		500	655	
	IV - 1		300	385	
	IV-2	1.5	400	569	
	IV-3		500	703	

抗剪强度在注浆压力 0.0~0.5 MPa 段上升幅度较大, 0.5 MPa 时强度为未注浆土体试样的 2.07 倍, 0.5~1.5 MPa 段上升幅度较小, 1.0, 1.5 MPa时强度分别为未注 浆土体试样的 2.47 倍、2.88 倍。取样点 B 试样抗剪强 度在 0~0.5 MPa 段上升较缓, 0.5~1.0 MPa 段幅度增 大, 1.0~1.5 MPa 又再次变缓, 注浆压力为 0.5, 1.0, 1.5 MPa 时的抗剪强度分别是未注浆土样强度的 1.36 倍、 2.05 倍、2.25 倍。法向压力 σ_n =500 kPa 时,取样点 A、 B 所取试样抗剪强度随注浆压力增长规律与 σ_n =400 kPa 时基本相同,取样点 A 所取试样在注浆压力为 0.5, 1.0, 1.5 MPa时的抗剪强度分别是未注浆土样强度 的 2.12 倍、2.32 倍、2.69 倍,取样点 B 则为 1.63 倍、 2.15 倍、2.31 倍。

3.3 渗透试验

采用气测方式进行渗透率测试,所用气体为氮 气,试验原理为当气体以一定流速通过岩样时,在岩 样两端建立压差,根据岩样两端的压差和气体的流 速,利用达西定律即可求出岩样的渗透率,换算得到 岩样渗透系数:

表 2 取样点 A, B 试样抗剪强度实验结果

 Table 2
 Experimental results of shear strength of sample at sampling of point A and B





Fig. 7 Relationship between shear strength and grouting pressure of different normal stress

$$k = \frac{Q_2 \times u_g \times L \times 2P}{F[\Delta P^2]} \tag{1}$$

$$K = \frac{k\gamma}{\mu} \tag{2}$$

式中: Q_2 —通过岩芯出口处的气体流量/($cm^3 \cdot s^{-1}$);

 ΔP ——岩芯入口处与出口处的气体压差; P——岩芯出口处的气体压力;

$$\mu_{g}$$
——气体的黏度/(MPa·s);

L——岩芯长度/cm;

 μ ——流体的动力黏滞系数/(MPa·s)。

出口处气体压力为标准大气压,其值为101.325 kPa, 试验时室温为18℃,空气黏度为0.017 99 MPa·s,流体 重度取9.8×10⁻³ N/cm³,动力黏滞系数为1.061×10⁻⁶ kPa·s。 计算得到不同注浆压力条件下不同取样位置试样渗 透系数结果如表3所示。

Table 3 Relationship between grouting pressure and							
permeability at different sampling locations							
取样位置	试样编号	注浆压力/ MPa	渗透系数/ (cm·s ⁻¹)	平均渗透系数/ (cm·s ⁻¹)	透水等级		
	I -1		2.3×10 ⁻⁴				
	I -2	0.0	5.7×10^{-4}	4.7×10 ⁻⁴	中等透水		
	I -3		6.1×10^{-4}				
	∏ -1		6.8×10 ⁻⁵	4.5×10 ⁻⁵	弱透水		
	II -2	0.5	3.5×10^{-5}				
	II -3		3.2×10 ⁻⁵				
取杆点A	Ⅲ-1		2.0×10 ⁻⁵				
	Ⅲ-2	1.0	1.8×10^{-5}	1.6×10 ⁻⁵	弱透水		
	Ⅲ-3		9.8×10 ⁻⁶				
	IV-1		7.0×10 ⁻⁶				
	IV-2	1.5	1.0×10^{-5}	8.9×10^{-6}	微透水		
	IV-3		9.6×10 ⁻⁶				
	I -1	0.0	2.3×10^{-4}	4.7×10 ⁻⁴	中等透水		
	I -2		5.7×10^{-4}				
	I -3		6.1×10^{-4}				
	∏ -1	0.5	5.4×10 ⁻⁵	6.7×10 ⁻⁵	弱透水		
	П-2		7.3×10^{-5}				
市共とり	II -3		7.7×10^{-5}				
取件点B	Ⅲ-1		3.2×10 ⁻⁵				
	Ⅲ-2	1.0	4.8×10^{-5}	3.9×10 ⁻⁵	弱透水		
	Ⅲ-3		3.7×10 ⁻⁵				
	IV-1		9.8×10 ⁻⁶				
	IV-2	1.5	1.3×10^{-5}	1.2×10^{-5}	弱透水		
	IV-3		1.3×10 ⁻⁵				

表 3 不同取样位置注浆压力与渗透系数

由表 3 可知, 不同位置所取试样的渗透系数均随 注浆压力的增大降低。试验测得未注浆土样的渗透 系数为 4.7×10⁻⁴ cm/s, 根据水利水电工程地质勘察规 范^[20], 其渗透性等级为中等透水。注浆压力提升至 0.5 MPa 与 1.0 MPa 时, 渗透系数数量级由 10⁻⁴ 降为 10⁻⁵, 渗透性等级为弱透水。当压力提升至 1.5 MPa 时, 取样点 A 处试样渗透系数数量级达到了 10⁻⁶, 渗 透性等级为微透水。

将取样点A、B注浆压力与渗透系数对应点拟合 为二次曲线,如图8所示,方程分别为:

取样点 A: y=0.75x²-2.131x+2.434 5, R²=0.982 4

取样点B: y=0.53x²-1.661x+2.444 5, R²=0.987 3

在注浆压力 0~1.5 MPa 之间,取样点 A 拟合曲线 方程斜率的绝对值总是大于取样点 B, 对应取样点 A 处试样渗透系数随注浆压力增大降低幅度始终大 于取样点 B 处试样, A、B 拟合方程斜率逐渐趋向于 0, 对应曲线趋于平缓,说明注浆压力在 0~1.5 MPa 之 间渗透系数变化幅度逐渐减小。





4 浆液作用机理分析

4.1 强度特性分析

根据尚彦军等^[21]、赵柳等^[22]、李晓鄂^[23]等关于全 风化花岗岩微观特性的研究,全风化花岗岩中孔隙以 大孔隙和中小孔隙为主,范围为30%~50%,矿物成分 以石英居多,长石含量小于50%,而正常花岗岩矿物 长石含量占 2/3 以上,长期的不均匀风化导致花岗岩 结构遭到破坏,胶结物和长石等易风化矿物破碎流 失,在自重和外力作用下形成裂缝和孔隙,直接影响 了全风化花岗岩的密实程度、力学特征与渗透能力。 该高固相离析浆液注浆可以有效改善这一情况。当 注浆压力在0~0.5 MPa时,由于压滤效应影响,浆液 中的水分在压力作用下滤过土体,浆液浓度升高,高 浓度的浆液首先向注浆管口周边的土体裂缝孔隙中 渗透。如前文所述,高固相离析浆液以全风化花岗岩 颗粒为主体材料,而该地全风化花岗岩颗粒中含有大 量的高岭石等黏土矿物,这些黏土矿物与膨润土一同 发生水化膨胀,充填裂隙孔隙。随着注入浆液的增 多,空间填充完毕,开始形成憋压,在注浆管口附近聚 集形成柱状浆泡,高浓度的水泥浆液置换掉周围松散 土体。由于浆泡的强度远远大于全风化花岗岩的强 度,因此在取样点A处试样单轴抗压强度与直剪强度 增幅明显。对于取样点B处,由于浆液在此压力范围 内无法对地层形成劈裂,形成的浆泡也比较小,因此 取样点 B 处地层除了渗入的少量浆液外, 最主要是由 于土体挤密压缩,裂缝闭合,孔隙变小而引起的土体 力学强度升高。当注浆压力在 0.5~1.0 MPa 范围时, 管口处浆泡扩张,继续挤密地层。当注浆压力上升至

大于地层启劈压力后,土体沿着最薄弱面产生裂隙, 浆液进入裂隙沿径向扩展,产生劈裂面。随着压力继 续增大,劈裂面的数目增多,部分劈裂面互相贯通,浆 脉扩展,提高了浆脉周围土体密实度。这表现为取样 点 A 处强度上升幅度减小,而取样点 B 处由于浆脉的 形成增幅变大。

注浆压力在 1.0~1.5 MPa 范围时,浆泡继续扩张, 浆脉沿径向继续延伸、加粗,形成的劈裂面数量增多, 劈裂面之间相互贯通,表现为 A、B 两点处土体强度 上升幅度减小。

4.2 渗透性分析

数据结果显示,原状全风化花岗岩的渗透率较大,平均渗透系数为 4.7×10⁻⁴ cm/s,属于中等透水等级,注浆对于改善全风化花岗岩的渗透率效果显著。 在不同注浆压力下,A、B取样点所取试样的渗透率均显著下降,达到 10⁻⁵甚至 10⁻⁶数量级,透水等级也降低为弱透水、微透水。取样点A处试样渗透系数在不同注浆压力下均小于B处试样。运用 SEM 扫描电镜 手段进行原因分析,扫描电镜结果见图 9。

原状全风化花岗岩样品在1000倍、3000倍镜下 可以看出,全风化花岗岩存在团粒状、片状、块状、细 粒状微观结构,颗粒表面不平整,侵蚀严重,矿物连接 松散、矿物之间存在空隙、带状裂隙及亚微米级孔 隙。矿物间隙为风化长石被冲刷带走形成,留下黑云 母、石英等矿物;岩体有强烈的风化作用,空隙发育, 影响岩体整体的结构性,导致其渗透率较高,力学强 度较低。。

注浆后样品孔隙率远远低于注浆前。在注浆过 程中,岩体颗粒之间由浆液充当胶结物进行连接,浆 液中的膨润土与全风化花岗岩颗粒所含的大量黏土 矿物吸水膨胀,堵漏效果显著。同时水泥发生水化反 应产生的水化产物(纤维状或花瓣状的水化硅酸钙晶 体(C-S-H)、针状的钙矾石晶体(AF_t)等)充填于孔隙 中,不但对土颗粒有胶结作用,甚至相互胶结形成连 续的空间网状结构,使加固体强度得到提升,密实程 度提高,孔隙率的降低使其渗透率也明显下降。

取样点 A 所处位置比取样点 B 更靠近注浆管口, 在一定注浆压力下注入浆液量更多,由图 9(b)、(c)中 明显看出,取样点 A 处试样孔隙较取样点 B 处试样更 少,裂隙填充及颗粒之间的胶结也更明显,取样点 B 试样浆液水化生成的纤维状、针状晶体只是部分胶 结,并没有完全填充裂隙,导致其强度和渗透率变化 小于取样点 A 试样。这说明在注浆过程中,水化产物



20kV x1.000 10 μm 22/JUL/19 20kV x3.000 5 μm 22/JUL/19

(a) 原状全风化花岗岩



(b) 注浆后取样点 B 处试样



图 9 全风化花岗岩原样和注浆后试样 SEM 扫描电镜图 Fig. 9 Scanning electron microscope (SEM) images of the original samples of the ompletely weathered granite and the samples after grouting

生成及浆液胶结岩体颗粒的过程随着注入土体的浆 液量增多而逐渐发生,这也是距离注浆管越近的土层 防渗加固效果越好的影响因素。

4.3 浆液扩散模式及机理分析

对不同注浆压力下注浆试验结束后的结石体取 样,试样形态特征如图 10 所示。

当注浆压力为 0.5 MPa 时,浆液首先沿着孔隙与裂缝渗透,在注浆管管口处形成直径 12.5 cm、厚度

5.5 cm 的球状浆泡,浆泡周围土体被挤密。当注浆压 力达到 1.0 MPa 时,注浆口管口处形成厚度为 7.4 cm 浆泡的同时,土体挤密现象更明显,又产生了主劈裂 面及次生劈裂面 1 和 2。沿径向首先在浆泡周围较薄 弱面形成主劈裂面,随着压力逐渐增大,又在主劈裂 面的基础上形成次生劈裂面 1,并在另一薄弱面方向 形成次生劈裂面面 2。当压力损耗之后的残余压力刚 好下降至与地层启劈压力相等时,浆液无法继续往前



Fig. 10 Stone body shape under different grouting pressures

劈裂扩展。当注浆压力达到 1.5 MPa 时,注浆口管口 处形成 11.3 cm 的浆泡,沿径向形成 4 个较为明显的 劈裂面,形成的所有劈裂面之间彼此贯通,形成了 1 个中间凸、四周凹的圆饼状结石体,此现象与邹建 等研究结果相吻合^[24]。

综合上述分析可知,该高固相离析浆液在全风化 花岗岩注浆的过程中存在3个阶段:渗透扩散、挤密 压缩、劈裂扩展。

注浆刚开始时浆液首先渗透充填至土体的孔隙 和空隙中,表现为渗透注浆机理;待空间被浆液填充 完毕后开始起压,周围土体被挤密,裂缝闭合,孔隙减 少,表现为压密注浆机理;实际上压密灌浆和劈裂灌 浆两个阶段之间并没有严格的区分。随着压力上升, 浆泡逐渐增大,导致浆泡周围的土体强度、黏聚力、 内摩擦角等增大。当压力超过土体的启劈压力时,浆 液沿着土体的薄弱面扩散,产生一个或多个劈裂面。 压力增长至一定程度后,劈裂面之间相互贯通,表现 为劈裂注浆机理。综合上述分析,该离析浆液对于全 风化花岗岩地层防渗加固注浆效果显著,注浆时上部 的黏土水泥颗粒可以深入到全风化花岗岩的裂缝中, 下部的大颗粒水泥砂浆可以对全风化花岗岩地层进 行挤密,有效提高地层强度,降低渗透率。

5 结论

· 86 ·

(1)设计了一种适用于全风化花岗岩地层注浆的 室内模拟试验装置,实现了浆液在整个注浆过程中的 扩散情况模拟,且方便注浆后完整结石体取样。

(2)以全风化花岗岩颗粒为主体的高固相离析浆 液在全风化花岗岩地层注浆中效果显著。该离析浆 液上部的黏土水泥颗粒可以深入到全风化花岗岩的 裂缝中,下部的大颗粒水泥砂浆可以对全风化花岗岩 地层进行挤密。随着注浆压力提高,灌后土体单轴抗 压强度提高 $3.25 \sim 13.67$ 倍, 抗剪强度提高 $1.63 \sim 2.69$ 倍, 渗透率下降至 10^{-5} cm/s 甚至 10^{-6} cm/s。

(3)土体强度与渗透率增幅最大总是发生于浆液 最先接触地层阶段,挤密地层使强度与渗透率上升较 小,浆液中固体成分充填孔隙裂缝是改变土体强度与 渗透率的最重要因素。

(4)以全风化花岗岩颗粒为主体的高固相离析浆 液在全风化花岗岩地层注浆时存在渗透扩散、挤密压 缩、劈裂扩展3个阶段,是一种复合注浆形式。

参考文献(References):

- [1] 吴能森.花岗岩残积土的分类研究[J].岩土力学, 2006, 27(12): 2299 - 2304. [WU Nengsen. Study on classification of granite residual soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2299 - 2304. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陈爱云.黑云母花岗岩全风化层工程地质特性研究
 [J].铁道工程学报, 2016, 33(6): 22 25. [CHEN Aiyun. Research on the engineering geology characteristics of completely weathering layer of biotite granite[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(6): 22 25. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 陈洪江, 崔冠英. 花岗岩残积土物理力学指标的概型 分布检验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 92 - 94. [CHEN Hongjiang, CUI Guanying. Probability type testing of the distribution on the granite eluvial soil mechanical parameters[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology. Nature Science, 2001, 29(5): 92 - 94. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 苗胜军,杨志军,龙超,等.混合花岗岩加载细观力学 特性及破裂演化规律[J].江苏大学学报(自然科学 版), 2012, 33(4): 469 - 473. [MIAO Shengjun, YANG Zhijun, LONG Chao, et al. Micro-mechanical

characteristics and cracks revolution laws of migmatitic granite under different loading conditions[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2012, 33(4): 469 – 473. (in Chinese with English abstract)

赵

- [5] 李建新,陈秋南,赵柳,等.南岳地区全风化花岗岩崩 解特性试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学 版), 2015, 30(4): 59-63. [LI Jianxin, CHEN Qiunan, ZHAO Liu, et al. Experimental research on disintegration characteristics of weathered granite in Nanyue[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Editon), 2015, 30(4): 59 – 63. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张素敏,朱永全,高炎,等.全风化花岗岩流变特性试 验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 904-911. [ZHANG Sumin, ZHU Yongquan, GAO Yan, et al. Experimental investigation on rheological properties of completely weathered granite[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 904 -911. (in Chinese with English abstract)
- [7] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组.岩土注浆理论 与工程实例[M].北京:科学出版社, 2001. [The groups of the "Geotechnical grouting theory and engineering examples". Geotechnical grouting theory and engineering examples[M]. Beijing: Science Press, 2001.(in Chinese)
- [8] 罗平平. 裂隙岩体可灌性及灌浆数值模拟研究[D]. 南 京:河海大学, 2006. [LUO Pingping. Numerical simulation study on the irrigability and grouting in fractured rock mass[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.(in Chinese with English abstract)]
- [9] 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 – 752. [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 – 752. (in Chinese with English abstract)
- [10] 齐延海,李术才,李召峰,等.全风化花岗岩富水地层 注浆治理研究与应用[J]. 中南大学学报(自然科学 版), 2019, 50(3): 694 - 703. [QI Yanhai, LI Shucai, LI Zhaofeng, et al. Study and application of grouting governing of completely weathered granite in water-rich stratum[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(3): 694 – 703. (in Chinese)
- 王旭斌,郑洪,林飞,等.全风化花岗岩防渗关键技术 [11] 研究与应用[J].水利规划与设计,2019(4):149-153.

[WANG Xubin, ZHENG Hong, LIN Fei, et al. Research and application of the key technology of seepage control of fully weathered granite[J]. Water Resources Planning and Design, 2019(4): 149 – 153. (in Chinese)]

- [12] 王凯,李术才,杨磊,等.全风化花岗岩加固特性注浆 模拟试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术 版), 2017, 50(11): 1199 - 1209. [WANG Kai, LI Shucai, YANG Lei, et al. Grouting simulation experiment of reinforcement characteristics completely on decomposed granite[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50(11): 1199 - 1209. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 袁敬强,陈卫忠,黄世武,等.全风化花岗岩注浆加固 特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增 刊1): 2876 - 2882. [YUAN Jingqiang, CHEN Weizhong, HUANG Shiwu, et al. Experimental study on physico-mechanical properties of grouted completely weathered granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup1): 2876 - 2882. (in Chinese with English abstract)
- [14] 涂鹏,王星华.海底隧道注浆材料强度劣化规律及使 用寿命研究[J].水文地质工程地质,2011,38(1):65-68. [TU Peng, WANG Xinghua. Research on strength degradation law and Service Life of grouting materials in undersea tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(1): 65 – 68. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张健,李术才,李召峰,等.全风化花岗岩地层单-双液 浆加固试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(12): 3051 - 3059. [ZHANG Jian, LI Shucai, LI Zhaofeng, et al. Comparative study of reinforcement patterns between single-and double-fluid grouting in fullyweathered granite[J]. Journal of Central South University (Natural Science edition), 2018, 49(12): 3051 - 3059. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张贵金,刘杰,胡大可,等.黏土水泥膏浆流变性能及 其对灌浆的影响[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 119 - 125. [ZHANG Gguijin, LIU Jie, HU Dake, et al. Rheological Properties of plaster slurry of clay-cement and its influence on grouting engineering[J]. Journal of Changjiang Academy of Sciences, 2017, 34(3): 119 -125. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 中华人民共和国水利部.土的工程分类标准:GB/T 50145-2007[S]. 北京:中国计划出版社, 2008. [Ministry of Water Resources, PRC. Engineering classification standard for soils: GB/T 50145-2007[S].

Beijing: China Planning Press, 2008.(in Chinese)]

- [18] 张贵金,肖通,张聪,等.松散地层脉动与稳压灌浆室 内试验研究[J].水文地质工程地质,2016,43(5):87-93.
 [ZHANG Guijin, XIAO Tong, ZHANG Cong, et al. An indoor experimental study of loose soil strata pulsating and regulated filling[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5):87-93. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 南京水利科学研究院. 土工试验规程: SL 237—1999[S].北京:中国水利水电出版社, 1999.
 [Nanjing Water Conservancy Research Institute. Code of geotechnical test: SL 237—1999[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1999. (in Chinese)]
- [20] 中华人民共和国水利部.水利水电工程地质勘察规范:GB 50487-2008[S].北京:中国计划出版社,2009.
 [Ministry of Water Resources, PRC. Code for geological survey of water conservancy and hydropower projects: GB 50487-2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese)]
- [21] 尚彦军,王思敬,岳中琦,等.全风化花岗岩孔径分布-颗粒组成-矿物成分变化特征及指标相关性分析[J]. 岩土力学,2004,25(10):1545 - 1550. [SHANG Yanjun, WANG Sijing, YUE Zhongqi, et al. Variation features of pore radius and particle diameter distributions and mineral content of completely decomposed granite and

correlation of parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1545 – 1550. (in Chinese with English abstract)]

- [22] 赵柳,陈秋南,李建新,等.南岳地区全风化花岗岩的 微观特性[J].湖南工程学院学报(自然科学版), 2013, 23(4):68-72. [ZHAO Liu, CHEN Qiunan, LI Jianxin, et al. Research on micro properties of Nanyue completely decomposed granite[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2013, 23(4):68-72. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李晓鄂,蔡胜华. 三峡工程坝基花岗岩力学性能的微观分析[J]. 电子显微学报, 1995, 14(5): 379 384.
 [LI Xiaoe, CAI Shenghua. Microscopic analysis of mechanical properties on granite of dam foundation of Three Gorges project[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 1995, 14(5): 379 384. (in Chinese)]
- [24] 邹健,张忠苗.考虑压滤效应饱和黏土压密注浆球孔 扩张理论[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(12): 119-123. [ZOU Jian, ZHANG Zhongmiao. Spherical cavity expansion theory of compaction grouting in saturated clay considering pressure filtration[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011,43(12):119-123. (in Chinese with English abstract)]

编辑:张明霞