

全风化花岗岩地层单-双液浆加固试验研究

张健, 李术才, 李召峰, 杨磊, 张庆松, 王凯, 齐延海, 林荣峰

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南, 250061)

摘要: 针对全风化花岗岩注浆治理工程中的浆液选型及注浆参数调控问题, 通过注浆模拟试验, 对水泥浆液和水泥-水玻璃浆液(C-S浆液)2种浆液的加固效果进行对比分析研究。研究表明, 单-双液浆在地层中均以劈裂扩散为主, 但扩散模式具有显著差异: 水泥浆液呈直线式和放射式2种, 其主控因素为水灰比; 而C-S浆液的扩散模式主要为放射式和网络式, 扩散模式受水灰比和注浆压力双因素影响。2种浆液注入地层后, 加固体试样抗压强度、抗崩解性均显著增高, 根据对加固效果的作用关系可将水灰比分为注浆压力作用区(水灰比为0.80~1.13)和C-S浆液优势区(水灰比为1.13~1.50), 水泥浆液多适用于深部高压加固区, C-S浆液多适用于浅部低压加固区。在满足注浆工程要求前提下, C-S浆液加固体压缩可变形性和残余强度比水泥浆液加固体的高, 加固地层更为稳定。通过工程现场验证, 研究成果对类似地层的注浆加固治理具有一定的参考和借鉴意义。

关键词: 全风化花岗岩; 水泥浆液; 水泥-水玻璃浆液; 加固模式; 抗压强度; 抗崩解性

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)12-3051-09

Comparative study of reinforcement patterns between single- and double-fluid grouting in fully-weathered granite

ZHANG Jian, LI Shucui, LI Zhaofeng, YANG Lei, ZHANG Qingsong, WANG Kai, QI Yanhai, LIN Rongfeng

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The selection of slurry types and the grouting parameter in the grouting engineering were discussed. The difference between two slurries in reinforcement pattern was analyzed based on grouting simulation experiment. The results show that diffusion patterns of the two slurries are different from each other due to the grouting characteristics. The cement paste has line model and emanant model, which is determined by the water/cement ratio, the cement/sodium silicate slurry has emanant model and network model, which is determined by the effect of water/cement ratio and grouting pressure. The compressive strength of the grouted weathered granite and anti-disintegration characteristics of both slurries are increased significantly. There are grouting pressure zone(water/cement ratio 0.80-1.13) and cement/sodium silicate slurry zone(water/cement ratio 1.13-1.50) of water/cement ratio according to the compressive strength and anti-disintegration characteristics. It is concluded that cement paste is suitable for high pressure reinforcement area and cement/sodium silicate slurry is suitable for low pressure reinforcement area. Under the condition that the requirements of grouting engineering are met, the deformability and residual strength of cement/sodium silicate slurry is higher than cement paste. The experimental results can provide some guidance for the grouting engineering in the similar stratum through test in-site.

Key words: fully-weathered granite; cement paste slurry; cement/sodium silicate slurry; reinforcement pattern; compressive strength; anti-disintegration

收稿日期: 2017-12-29; 修回日期: 2018-05-09

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51709158, 51509146); 山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2017ZC0734) (Projects 51709158, 51509146) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(ZR2017ZC0734) supported by the Major Basic Project of Shandong Provincial Natural Science Foundation of China)

通信作者: 李召峰, 博士, 硕士生导师, 从事地下工程灾害防控及注浆材料研究; E-mail: lizf@sdu.edu.cn

花岗岩约占我国国土面积的 9%，受气候、结构、裂隙和生物等因素影响，易发生物理风化、化学风化和生物风化^[1-2]。全风化花岗岩岩质极软，已风化成硬塑砂质黏性土状，具有承载力低、在地下水作用下泥化严重、易崩解的特点。全风化花岗岩在地下工程建设中极易诱发突水突泥、围岩塌方变形等灾害^[3-6]。地下工程建设中多采用注浆手段对全风化花岗岩地层进行加固。崔红琴等^[7-11]针对风化花岗岩地层突涌水灾害分别提出了不同的注浆治理方案；李蓉等^[12]研究了水泥浆液、超细水泥浆液、水泥-水玻璃浆液对全风化花岗岩地层注浆加固效果的影响，并针对地层特点提出注浆方案；孙峰等^[13]研究了水泥复合浆液流体时变性及对浆液扩散范围的影响，推导了考虑流体时变性的全风化花岗岩地层劈裂注浆扩散半径计算公式；袁敬强等^[14-15]针对全风化花岗岩地层注浆加固效果开展了深入研究。对全风化花岗岩地层的注浆治理，国内外学者集中于注浆加固机制研究以及注浆参数对加固效果的影响等方面^[13-15]。而实际注浆工程中往往需要多种浆液相互配合使用，但注浆过程中浆液类型的选取、浆液转换时注浆参数调控等方面，仍缺乏科学系统的理论与方法。本文作者以广西均昌隧道突水突泥治理工程 DK7+857 段全风化花岗岩地层为对象，选取注浆工程中常用的水泥浆液、水泥-水玻璃浆液开展系统的注浆加固模拟试验研究，揭示了 2 种典型浆液注浆效果的差异性及其影响因素的作用规律，并明确了 2 种浆液注浆操作过程中的调控方法，为全风化花岗岩地层的注浆加固治理提供一定理论指导。

1 试验材料及注浆模拟试验方法

1.1 试验材料

1.1.1 注浆材料

水泥选用广西润丰水泥厂生产的普通硅酸盐水泥 (PO.42.5)；水玻璃型号为波美度 $Be^{\circ}=35$ ，模数 M 为 3.3。根据现场施工经验水灰比选取 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5。水泥浆液和体积比为 1:1 的水泥-水玻璃浆液 (C-S 浆液) 的基本物理力学性能见表 1。

1.1.2 被注介质

广西均昌隧道工程穿越全风化花岗岩地层，试验所用土样取自里程 DK7+857 处，土样基本物理性质见表 2。

1.2 注浆模拟试验方法

基于山东大学自主研发的三维注浆模拟试验系统^[16]，开展注浆试验。试验装置如图 1 所示，双液注

浆泵型号为 ZBSS0.13，泵速 0~15 L/min，压力 0~10 MPa；被注腔体直径×高度为 28 cm×45 cm，用于装载全风化花岗岩土样。

表 1 单双浆液物理力学性能

水灰比	初凝时间/h		终凝时间/h		抗压强度/MPa			
	水泥	C-S	水泥	C-S	3 d		7 d	
					水泥	C-S	水泥	C-S
0.8	10	60*	19	69*	4.0	5.5	6.1	11.3
0.9	11	64*	21	80*	3.7	4.8	5.8	10.6
1.0	13	72*	24	92*	3.5	3.7	5.0	7.6
1.2	14	75*	25	95*	3.0	3.1	4.3	4.8
1.5	17	83*	48	102*	2.3	2.4	2.9	3.6

注：*表示 C-S 浆液凝固时间单位为 s。

表 2 全风化花岗岩的基本物理性质

天然密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/ %	孔隙率/ %	颗粒质量分数/%	
			1~0.075 mm	<0.075 mm
2.06	10.5	22.3	72	15

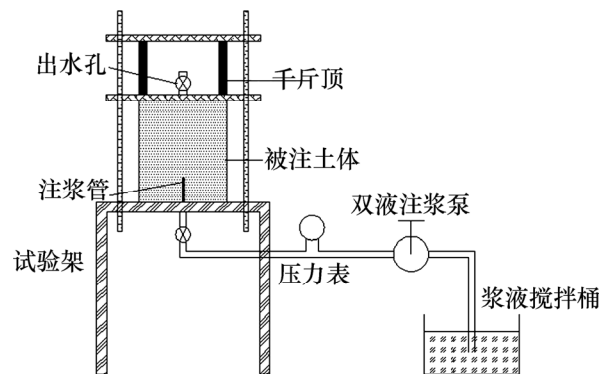


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grouting test system

试验方法：将所选土样按表 2 参数制备成重塑土后，分层夯实到被注腔体中 (每层 5 cm，称土质量 6.34 kg)，用千斤顶密封系统。使用双液注浆泵将浆液由注浆管注入被注土体中，控制注浆泵速为 4 L/min；达到设计终压稳压 30 s 后停止注浆。注浆后 24 h 取样测试。

1.3 试验方案设计

1.3.1 注浆压力

注浆压力是注浆加固的重要控制参数，适当的压力可以充分利用“浆土互压”作用提高加固效果，压力过低达不到注浆效果，压力过高会破坏围岩完整性。根据现场施工经验，考虑全风化花岗岩地层注浆加固

特点及注浆模拟试验系统的限制, 设定注浆压力为 1.0, 1.5 和 2.0 MPa; 因在本试验注浆压力范围内, 水泥浆液、C-S 浆液扩散半径均大于模型试验装置半径^[17], 二者均存在边界效应, 因此, 本文实验结果分析过程中不考虑边界效应的影响。试验共开展 30 组。

1.3.2 土体试样取样标准

注浆后 24 h 取出试样。取样标准抗压强度试验及抗崩解性试验如图 2~4 所示。考虑边界效应的影响, 所测试样均取自垂直高度 25 cm、距离横截面圆心 7 cm 处的浆脉压密土体区域(以下简称压密区), 浆脉宽度测量选自主浆脉中间部位。

单轴抗压强度试样在标准条件下养护 7 d 进行测试; 加固体(直径×高度为 28 cm×45 cm)单轴压缩试验于标准条件下养护 28 d 进行测试; 湿化试验取样后立即测试^[14]。

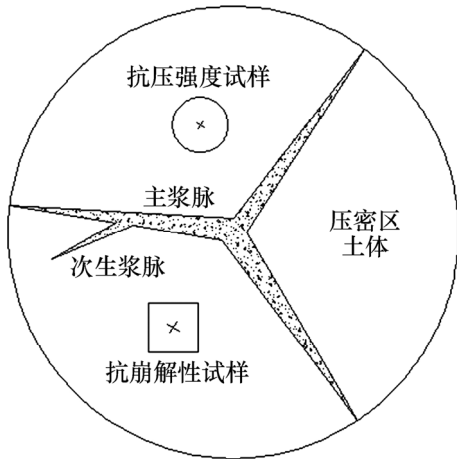
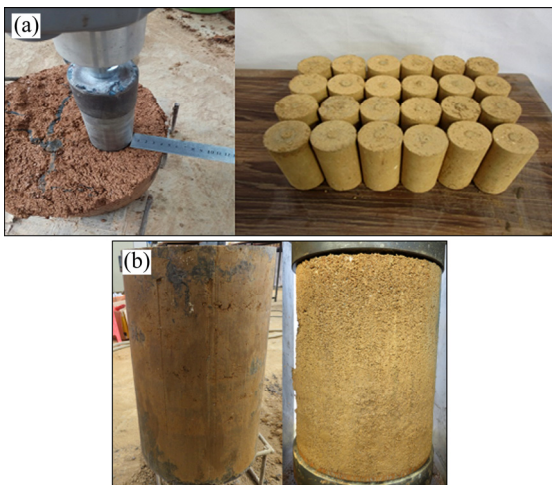


图 2 试样取样标准
Fig. 2 Sampling standard



(a) 单轴抗压强度试验; (b) 加固体抗压强度试验
图 3 抗压强度试验

Fig. 3 Test of compressive strength



图 4 抗崩解性试验
Fig. 4 Test of anti-disintegration

2 注浆加固模式对比分析

2.1 浆液扩散模式差异性研究

图 5 所示为不同水灰比条件下 2 种浆液的扩散模式(注浆压力为 1.5 MPa), 图 6 所示为不同注浆压力条件下 2 种浆液在土体中的扩散模式(水灰比为 1)。

由图 5 和图 6 可知: 水泥浆液和 C-S 浆液在土体中均以劈裂扩散方式为主。全风化花岗岩土体致密, 可注性差, 浆液很难通过渗透的方式进入地层, 在选取的全风化花岗岩地层中, 2 种浆液均为劈裂扩散模式。

由图 5 可以看出: 全风化花岗岩地层中水泥浆液劈裂扩散模式可分为直线式和放射式 2 种。当水灰比为 0.8~0.9 时, 水泥浆液的浆脉呈直线式扩散, 当水灰比大于 0.9 时, 水泥浆液扩散模式变成放射式。随着水灰比增大, 浆液黏度降低, 流动中压力损耗减小, 劈裂土体所需要的注浆压力减小^[18], 在相同压力下可形成多个劈裂面。因此水泥浆液在水灰比较小时, 在土体中呈直线式扩散, 当水灰比增大, 在土体中呈放射式扩散。

C-S 浆液劈裂扩散模式为放射式和网络式 2 种。当水灰比为 0.8 时, C-S 浆液的浆脉呈放射式, 当水灰比为 0.9 时, 在主浆脉上开始出现次生浆脉, 随着水灰比的升高, C-S 浆液的浆脉数量增多, 浆脉扩展形态由放射式向网络式转变。C-S 浆液前期黏度低, 自身剪切力小, 浆液劈裂土体需要的注浆压力小, 注浆前期浆液在土体中形成 3 个主劈裂面。当 C-S 浆液在劈裂通道内运移一段时间后部分固结, 浆液在注浆压力作用下于原有劈裂通道周围土体的薄弱区劈裂新通道, 形成次生浆脉。水灰比增大时, C-S 浆液凝结时间增长, 浆液黏度降低, 浆液在主劈裂通道周围会形成更多次生浆脉。因此在相同注浆压力下, 随着水灰比的增大, C-S 浆液形成与水泥浆液不同的网络式扩散模式。

由图 6 可知:随着注浆压力的变化,水泥浆液扩散模式均为放射式。当浆液达到启裂压力在土体中形成劈裂通道后,水泥浆液凝结时间长,随着注浆压力的升高,浆液倾向于沿劈裂通道运移。因此,注浆压力对水泥浆液扩散模式影响较小。

C-S 浆液的扩散模式随着注浆压力的升高逐渐由放射式向网络式转变。C-S 浆液凝结时间短,浆液在劈裂通道中固结,难以进一步在通道中运移,在注浆压力的作用下浆液在土体中形成多条劈裂通道。随着注浆压力的升高,浆脉数量呈增多的趋势。

由图 7 可知:2 种浆液的浆脉宽度均与注浆压力

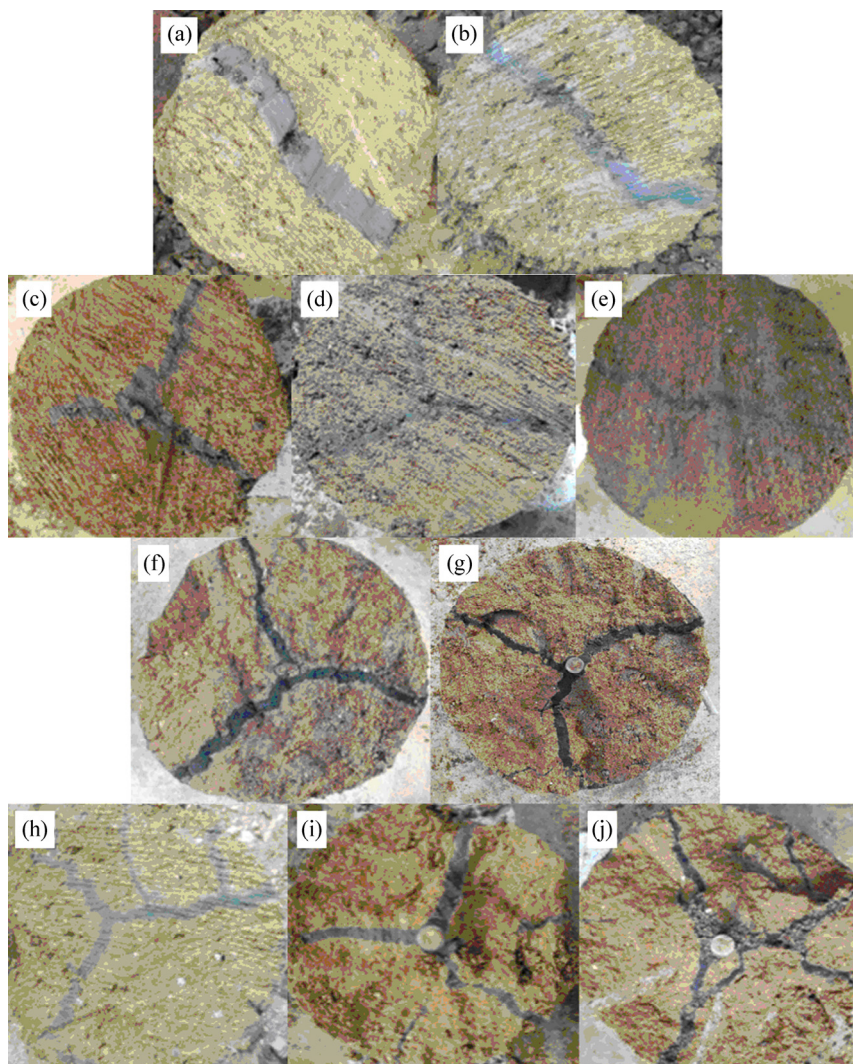
呈正比,与水灰比呈反比,且 C-S 浆液浆脉宽度的变化幅度比水泥浆液的小。

在试验设计参数范围内,不同水灰比和注浆压力条件下,水泥浆液的扩散模式为直线式和放射式 2 种,扩散模式由浆液水灰比控制,而注浆压力对浆液扩展模式影响较小。C-S 浆液的扩散模式为放射式和网络式 2 种,且扩散模式是水灰比和注浆压力共同作用的结果。

2.2 注浆加固效果分析

2.2.1 压密区土体强度对比分析

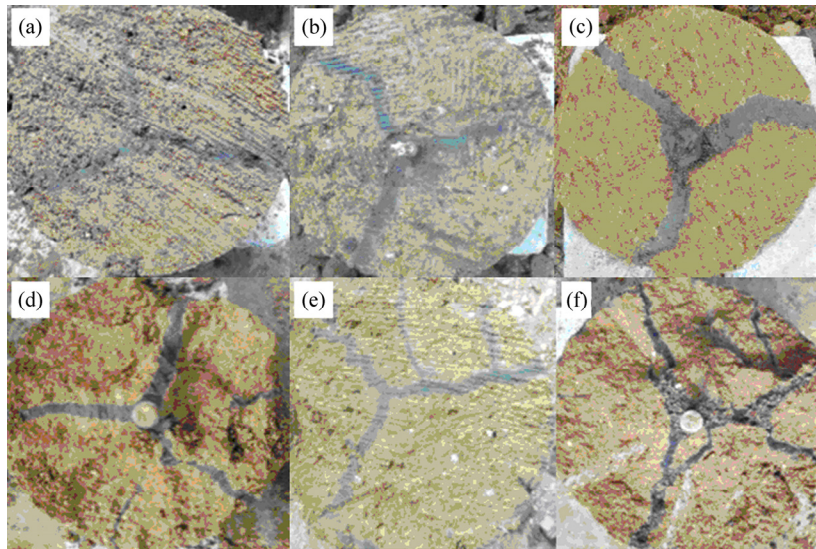
土体强度是衡量全风化花岗岩地层注浆加固效果的一个重要指标,注浆前后土体压密区试样抗压强度



(a) 水泥浆液, 水灰比为 0.8; (b) 水泥浆液, 水灰比为 0.9;
 (c) 水泥浆液, 水灰比为 1.0; (d) 水泥浆液, 水灰比为 1.2;
 (e) 水泥浆液, 水灰比为 1.5; (f) C-S 浆液, 水灰比为 0.8;
 (g) C-S 浆液, 水灰比为 0.9; (h) C-S 浆液, 水灰比为 1.0;
 (i) C-S 浆液, 水灰比为 1.2; (j) C-S 浆液, 水灰比为 1.5;

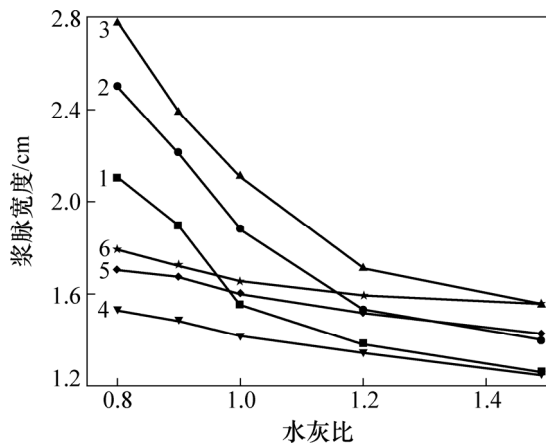
图 5 不同水灰比浆脉形态

Fig. 5 Slurry vein under different water-cement ratios



(a) 水泥浆液, $p=1.0$ MPa; (b) 水泥浆液, $p=1.5$ MPa; (c) 水泥浆液, $p=2.0$ MPa;
 (d) C-S 浆液, $p=1.0$ MPa; (e) C-S 浆液, $p=1.5$ MPa; (f) C-S 浆液, $p=2.0$ MPa

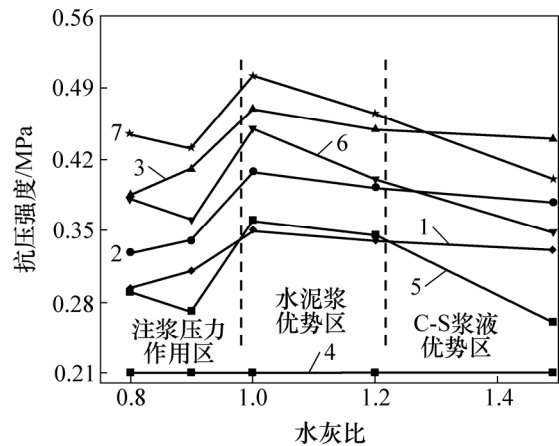
图 6 不同注浆压力注浆后试样浆脉形态
 Fig. 6 Slurry vein under different pressures



1—水泥浆液, $p=1.0$ MPa; 2—水泥浆液, $p=1.5$ MPa;
 3—水泥浆液, $p=2.0$ MPa; 4—C-S 浆液, $p=1.0$ MPa;
 5—C-S 浆液, $p=1.5$ MPa; 6—C-S 浆液, $p=2.0$ MPa。

图 7 不同注浆参数下浆脉宽度变化图

Fig. 7 Width of grouting vein with different grouting parameters



1—C-S 浆液, 1.0 MPa; 2—C-S 浆液, 1.5 MPa;
 3—C-S 浆液, 2.0 MPa; 4—原状土;
 5—水泥浆液, 1.0 MPa; 6—水泥浆液, 1.5 MPa;
 7—水泥浆液, 2.0 MPa。

图 8 不同注浆参数下土体单轴抗压强度
 Fig. 8 Axial compressive strength under different grouting parameters

如图 8 所示。

由图 8 可知: 2 种浆液加固后压密区土体抗压强度均与注浆压力呈正比。不同水灰比条件下, 水泥浆液注浆后土体压密区试样抗压强度从大到小的顺序为 1.0, 1.2, 0.8, 0.9, 1.5, C-S 浆液的抗压强度从大到小的顺序为 1.0, 1.2, 1.5, 0.9, 0.8。

对于水泥浆液, 当扩散模式为放射式时, 浆液对周围土体的压密作用范围大于直线式, 但当水灰比为

1.5 时, 受浆脉宽度的制约, 对周围土体的挤密作用较水灰比 0.8~0.9 时的弱。C-S 浆液在土体中形成主浆脉与次生浆脉相互交错的网络结构, 网络式对周围土体的挤密作用强于放射式。

由图 8 还可以看出, 根据土体强度可将水灰比分为 3 个区域: 注浆压力作用区(水灰比 0.80~0.98)、水泥浆液优势区(水灰比 0.98~1.22)和 C-S 浆液优势区(水

灰比 1.22~1.50)。

在注浆压力作用区, 2 种浆液的土体强度由注浆压力控制。因该区域水灰比大, 当注浆压力为 1 MPa 时, 水泥浆液的扩散模式为直线式, C-S 浆液的扩散模式为放射式, 水泥浆液浆脉宽, 但对土体的压密作用范围较 C-S 浆液的小, 当注浆压力升至 1.5~2.0 MPa 时, 水泥浆液形成浆脉的宽度增加显著, C-S 浆液形成浆脉的宽度变化微弱, 网络式对土体的挤密作用弱于水泥浆液的直线式, 水泥浆液的加固效果优于 C-S 浆液加固效果。

在水泥浆液优势区和 C-S 浆液优势区, 水泥浆液的扩散模式为放射式, C-S 浆液的扩散模式为网络式。但在水泥浆液优势区, 因水泥浆液浆脉宽度大, 其加固效果优于 C-S 浆液加固效果; 随着水灰比的增大, 浆脉宽度逐渐减小, 在 C-S 浆液优势区, C-S 浆液网络式的扩散模式对土体的压密作用大于水泥浆液的压密作用, 其加固效果优于水泥浆液。

2.2.2 加固体稳定性对比分析

注浆加固体稳定性是加固效果的一个重要评价指标, 注浆 28 d 后进行加固体的单轴压缩试验(注浆压力为 2 MPa, 水灰比为 0.8, 0.9, 1.0 和 1.2), 试验结果如表 3 和图 9 所示。

由表 3 和图 9 可以看出: 相同条件下水泥浆液加固体的峰值强度均比 C-S 浆液加固体的高, 因为加固体强度受内部浆脉控制, 且水泥浆液浆脉的强度和宽度均比 C-S 浆液的高。

在满足注浆工程要求前提下, 从负荷-位移曲线

峰值强度之前的阶段可以看出, C-S 浆液加固体变形模量比水泥浆液的小, 其压缩可变形性比水泥浆液的高。与水泥浆液相比, 在地下工程开挖及运营过程中 C-S 浆液加固体塑性变形更大, 更有助于地应力能量释放, 能够保证围岩的稳定性和完整性, 实现工程安全建设。

从负荷-位移曲线的应变软化阶段可以看出, 到达峰值强度后, 水泥浆液加固体迅速脱落, 近似成脆性破坏, C-S 浆液加固体近似成延性破坏。在该阶段, C-S 浆液加固体的强度比水泥浆液的高。

在应力-应变曲线的残余强度阶段, C-S 浆液加固体残余强度显著高于水泥浆液加固体残余强度, 说明水泥浆液浆脉对土体的骨架支撑作用范围有限, C-S 浆液网络式的扩散模式对压缩破坏过程起控制作用, 加固体仍可承受一定荷载。

2.2.3 抗崩解性对比

全风化花岗岩遇水失稳破坏是诱发突水突泥地质灾害的主要原因。土体抗崩解性的提升是注浆加固效果的一个重要评价标准。图 10 所示为抗崩解试验测得 2 种浆液注浆后压密区土体的抗崩解性情况。

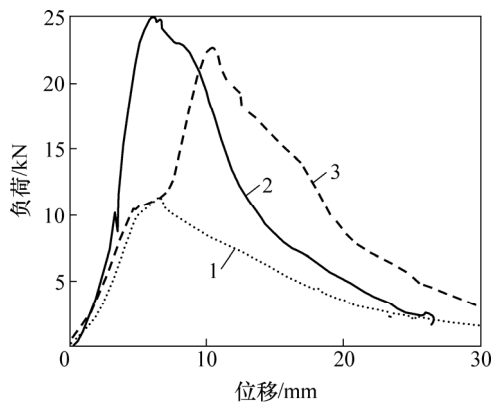
注浆前原状土完全崩解时间为 700 s, 注浆加固后土体抗崩解性显著提升。由图 10 可知: 土体抗崩解性与注浆压力成正比, 随水灰比的增加呈先增加后减小的趋势。

抗崩解性由土体的密实度和土颗粒之间的黏结力控制。劈裂注浆过程中, 浆液对劈裂通道周围土体产生挤密作用。挤密作用可减小土体的孔隙率和含水率,

表 3 加固体单轴压缩试验结果

Table 3 Uniaxial compression test results of reinforced body

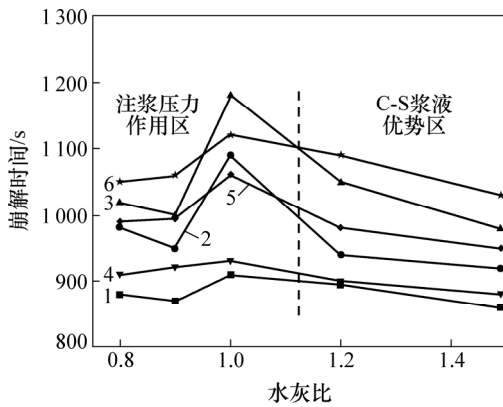
水灰比	峰值强度/MPa		残余强度/MPa		峰值变形量/mm	
	水泥	C-S	水泥	C-S	水泥	C-S
0.8	0.341	0.242	0.064	0.095	3.97	6.18
	0.328	0.240	0.057	0.106	3.52	6.21
	0.306	0.225	0.044	0.093	3.34	6.05
0.9	0.311	0.248	0.110	0.116	3.13	6.10
	0.331	0.264	0.117	0.123	3.54	6.50
	0.330	0.270	0.120	0.121	3.62	7.00
1.0	0.414	0.377	0.068	0.124	3.35	7.56
	0.346	0.372	0.075	0.108	3.45	8.62
	0.473	0.327	0.076	0.119	3.25	9.18
1.2	0.399	0.361	0.075	0.114	3.56	8.54
	0.369	0.337	0.065	0.100	3.52	8.01
	0.342	0.311	0.052	0.110	3.21	7.31



1—原状土; 2—水泥浆液; 3—C-S 浆液。

图 9 加固体负荷-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curve of reinforced body



1—水泥浆液, $p=1.0$ MPa; 2—水泥浆液, $p=1.5$ MPa;
3—水泥浆液, $p=2.0$ MPa; 4—C-S 浆液, $p=1.0$ MPa;
5—C-S 浆液, $p=1.5$ MPa; 6—C-S 浆液, $p=2.0$ MPa。

图 10 不同注浆参数下试样抗崩解性能

Fig. 10 Slake durability under different grouting

提高土体的密实度和土颗粒之间的黏结性, 因此, 注浆后土体的抗崩解性得到显著提升。

由图 10 可以看出: 注浆后土体抗崩解性的提升效果可分为注浆压力作用区(0.8~1.13)、C-S 浆液优势区(1.13~1.5), 与图 8 不同的是, 水泥浆液优势区范围减小, 成为注浆压力作用区。

全风化花岗岩崩解是土体浸水发生结构分散的现象, 土体含水量越大时, 崩解速度越快。注浆过程中, 浆液在土体中存在“压滤效应”, 水泥浆液凝结时间长, “压滤效应”作用下进入土体的水分较 C-S 浆液的多, 土体含水量增大的幅度比 C-S 浆液的大, 在低压注浆时, C-S 浆液试样抗崩解性较高; 当注浆压力升高时, 水泥浆液浆脉宽度增长幅度高, 对土体的挤密作用大于“压滤效应”引起的负面作用, 其抗崩解性优于 C-S 浆液的抗崩解性。当水灰比由 1.13 升至 1.5 时, 水泥

浆液加固后土体强度与抗崩解性均比 C-S 浆液的弱。

3 现场试验

3.1 方案设计

广西均昌隧道遭遇全风化花岗岩地层, 采用帷幕注浆法对其实施系统加固, 以进口左洞第五循环(CK7+867-885 里程段)为例, 采用前进式分段注浆方式, 浆液选型方案如图 11 所示, 实线代表 C-S 浆液, 注浆压力为 2~3 MPa, 水灰比为 0.9~1.1; 虚线代表水泥浆液, 注浆压力为 3~5 MPa, 水灰比为 1.0~1.2。

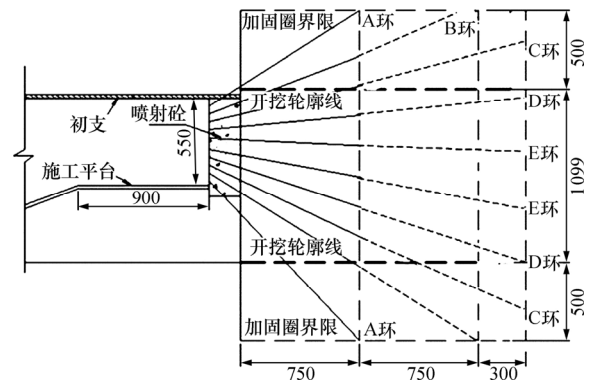
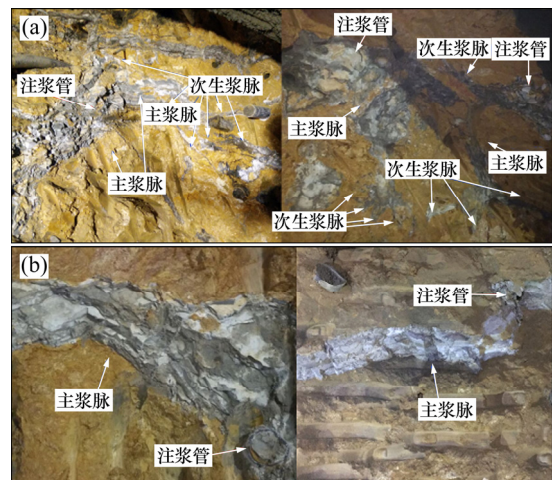


图 11 左洞第五循环帷幕注浆浆液选型设计图

Fig. 11 Slurry selection design of fifth cycle in left tunnel

3.2 浆液扩散模式分析

帷幕注浆完成后实施开挖工作, 分别对 C-S 浆液加固区和水泥浆液加固区浆脉进行观测, 浆脉分布形态见图 12。由图 12 可知: C-S 浆液加固区浆脉呈网



(a) C-S 浆液加固区; (b) 水泥浆液加固区

图 12 不同加固区劈裂浆脉

Fig. 12 Grouting veins of different grouted zones

络式分布, 水泥浆液加固区浆脉则为粗大浆脉, 没有次生浆脉产生, 与室内试验结果一致。

3.3 注浆加固效果分析

帷幕注浆完成后, 采用检查孔法、钻孔 $P-Q-t$ 曲线法对本循环帷幕注浆效果进行检查评定。检查孔设置如图 13 所示, 其中 J-1, J-4, J-5 检查水泥浆液加固区, J-2, J-3, J-6 检查 C-S 浆液加固区。

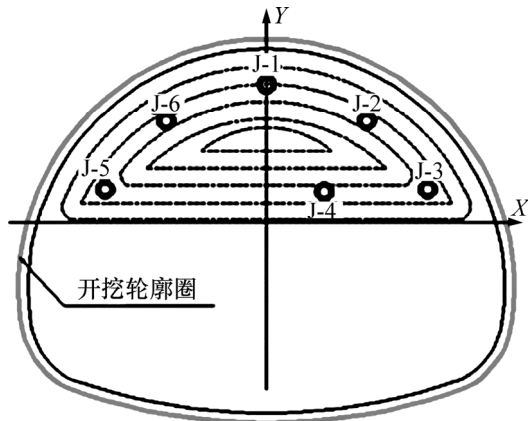


图 13 检查孔开孔图

Fig. 13 Design of test hole

退出钻杆后, 采用细钢管探测成孔情况, 检查孔成孔情况如表 4 所示, 检查孔成孔率达到 90% 以上。通过本方法进行注浆加固, 围岩完整性显著提高, 围岩强度也相应提高。由表 4 可知: C-S 浆液加固的浅部区域的成孔率比水泥浆液加固的深部区域的高。

表 4 检查孔成孔情况

Table 4 Statistical of test holes

孔号	钻孔深度/m	初始成孔率/%
J-1	19.0	97.1
J-2	7.5	100.0
J-3	7.5	97.2
J-4	19.0	97.8
J-5	19.0	94.4
J-6	7.5	98.2

通过对检查孔进行注浆试验发现, 注浆开始后, 注水压力在 5 min 内升高至 5.0 MPa。随着劈裂通道的形成, 注浆压力出现降低-升高波动变化, 基本稳定在 4 MPa 左右, $P-Q-t$ 曲线符合检测标准, 随后停止本孔段注浆。J-1 检查孔在注浆过程中的 $P-Q-t$ 曲线如图 14 所示。

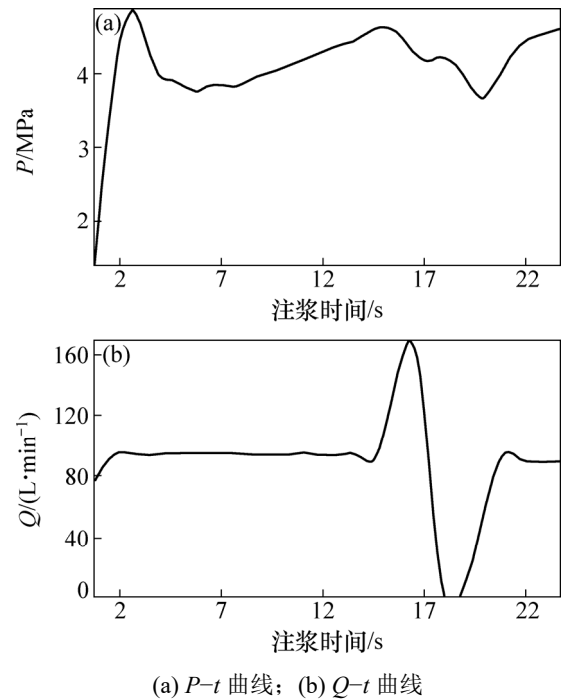


图 14 J-1 检查孔注浆 $P-Q-t$ 曲线

Fig. 14 $P-Q-t$ curve of test hole J-1

4 结论

1) 水泥浆液和 C-S 浆液在全风化花岗岩地层中均为劈裂扩散, 由于浆液凝结时间的差异性, 水泥浆液扩散模式由水灰比控制, 呈现直线式和放射式, C-S 浆液扩散模式则受水灰比和注浆压力双因素影响, 呈现放射式和网络式。

2) 对于全风化花岗岩地层, 注浆后土体强度和抗崩解性得到显著提高。注浆加固体的压密区土体可根据加固效果将水灰比分为注浆压力作用区(0.80~1.13)和 C-S 浆液优势区(1.13~1.50)。针对全风化花岗岩地层注浆加固治理工程, 水泥浆液多用于高压加固区, C-S 浆液多用于低压加固区。为提高注浆治理效果, 实际工程实践时建议 2 种浆液水灰比控制在 0.9~1.2 为宜。

3) 在满足注浆工程要求前提下, C-S 浆液加固体的压缩可变形性和残余强度均比水泥浆液的高, 说明在相同初始地应力环境下, 采用 C-S 浆液加固的地层在开挖扰动作用下更稳定, 有利于保证工程安全。

在广西均昌隧道帷幕注浆工程进行现场应用试验, 进一步验证了试验结论的正确性, 研究结论对指导注浆工程浆液选型、压力控制等方面有积极作用。

参考文献:

- [1] 赵建军,王思敬,尚彦军,等.全风化花岗岩抗剪强度影响因素分析[J].岩石力学,2005,26(4):624-628.
ZHAO Jianjun, WANG Sijing, SHANG Yanjun, et al. Control factors on shear strength of completely decomposed granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 624-628.
- [2] 于洪丹,陈卫忠,郭小红,等.厦门海底隧道强风化花岗岩力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):381-387.
YU Hongdan, CHEN Weizhong, GUO Xiaohong, et al. Research on mechanical characteristics of strongly weathered granite for Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 26(4): 624-628.
- [3] 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.
- [4] 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 Edition), 2015, 30(4): 59-63.
- [5] 颜波,汤连生,胡辉,等.花岗岩风化土崩岗破坏机理分析[J].水文地质工程地质,2009,36(6):68-71.
YAN Bo, TANG Liansheng, HU Hui, et al. The mechanism of disintegration damage of granite weathered soil[J]. Hydrogeology and engineering geology, 2009, 36(6): 68-71.
- [6] 张先伟,孔令伟,臧濛.雷州半岛玄武岩残积土的工程地质特性研究[J].岩土工程学报,2014,36(5):855-863.
ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, ZANG Meng. Engineering geological characteristics of basalt residual soils in Leizhou Peninsula[J]. Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 855-863.
- [7] 崔红琴.超浅埋富水全风化花岗岩大断面隧道施工技术[J].铁道建筑技术,2014(3):1-5.
CUI Hongqin. Construction technology of ultra shallow water rich fully weathered granite and large section tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2014(3): 1-5.
- [8] 郭小红,王梦恕.厦门翔安海底隧道F1风化深槽注浆加固技术[J].中国工程科学,2011,13(9):38-41.
GUO Xiaohong, WANG Mengshu. Study on the grouting technology adopted in F1 weathered trough for Xiamen Xiang'an Subsea Tunnel[J]. Chinese Engineering Science, 2011, 13(9): 38-41.
- [9] 袁敬强,陈卫忠,黄世武,等.全强风化花岗岩隧道突水灾害机制与协同治理技术研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增2):4164-4171.
YUAN Jingqiang, CHEN Weizhong, HUANG Shiwu, et al. Mechanism and synergetic treatment technology of water inrush disaster in completely and strongly weathered granite tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(suppl 2): 4164-4171.
- [10] 张顶立,孙锋,李鹏飞.海底隧道复合注浆机制研究及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):445-452.
ZHANG Dingli, SUN Feng, LI Pengfei. Mechanism of composite grouting subsea tunnel and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 445-452.
- [11] 程盼,邹金锋,罗恒,等.松散填土层中注浆效果检测方法试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(9):3800-3806.
CHENG Pan, ZOU Jinfeng, LUO Heng, et al. Experimental research on detection method of grouting effect in loose filled soil[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(9): 3800-3806.
- [12] 李蓉,李治国.海底隧道全强风化花岗岩地层注浆技术研究[J].现代隧道技术,2008,45(1):21-29.
LI Rong, LI Zhiguo. Study on the grouting technology adopted in strong- weathered granite for an under-sea tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(1): 21-29.
- [13] 孙峰,张顶立,陈铁林.基于流体时变性的隧道劈裂注浆机理研究[J].岩土工程学报,2011,33(1):88-93.
SUN Feng, ZHANG Dingli, CHEN Tielin. Fracture grouting mechanism in tunnels based on time-dependent behaviors of grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 88-93.
- [14] 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(suppl 1): 2876-2882.
- [15] 刘金泉,陈卫忠,袁敬强.全风化花岗岩注浆加固体抗冲刷特性试验研究[J].岩土力学与工程学报,2016,35(9):1767-1775.
LIU Jinquan, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang. Test on anti-scouring property of grouting reinforced body in completely weathered granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1767-1775.
- [16] 李召峰,李术才,张庆松,等.富水破碎岩体注浆加固模拟试验及应用研究[J].岩土工程学报,2016,38(12):2246-2253.
LI Zhaofeng, LI Shucai, ZHANG Qingsong, et al. Model tests on grouting reinforcement of water-rich broken rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2246-2253.
- [17] 杨晓华,俞永华.水泥-水玻璃双液注浆在黄土隧道施工中的应用[J].中国公路学报,2004,17(2):68-72.
YANG Xiaohua, YU Yonghua. Application of cement-silicate double solution grouting in loess tunnel construction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 68-72.
- [18] 张永成.注浆技术[M].北京:煤炭工业出版社,2012:10-30.
ZHANG Yongcheng. Cementation technology[M]. Beijing: China Coal Industrial Publishing House, 2012: 10-30.

(编辑 赵俊)