

DOI:10.11784/tdxbz201702057

全风化花岗岩加固特性注浆模拟试验

王 凯¹, 李术才¹, 杨 磊¹, 张庆松¹, 李召峰¹, 袁敬强²

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 济南 250061;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 针对全风化花岗岩自稳能力差、遇水极易软化崩解等特点, 依托广西均昌隧道帷幕注浆灾害治理工程, 设计全风化花岗岩注浆模拟试验, 通过改变注浆压力, 对被注介质单轴抗压强度、抗剪强度、渗透系数、崩解率等参数进行测定, 研究注浆对全风化花岗岩地层强度特性和水理特性的影响机制。试验结果表明: 全风化花岗岩地层中, 注浆以劈裂模式为主; 随着注浆压力的提高, 主浆脉扩展厚度不断提高, 被注介质的劈裂区(含浆脉)及压密区(不含浆脉)的单轴抗压强度和抗剪强度均显著增长; 在注浆压力为 2.0 MPa 时, 劈裂区抗压强度提高了 152.4%, 抗剪强度($\sigma_n = 200$ kPa)提高了 348.6%, 压密区抗压强度提升 71.4%, 抗剪强度($\sigma_n = 400$ kPa)提升了 149.6%; 注浆加固后被注介质渗透系数大幅降低, 水稳定性显著提高。

关键词: 全风化花岗岩; 注浆模拟试验; 注浆压力; 水稳定性; 注浆效果

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2017)11-1199-11

Grouting Simulation Experiment on Reinforcement Characteristics of Completely Decomposed Granite

Wang Kai¹, Li Shucui¹, Yang Lei¹, Zhang Qingsong¹, Li Zhaofeng¹, Yuan Jingqiang²

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: Completely decomposed granite has the characteristics of poor self-stability and strong disintegration with the influence of water. To study the physico-mechanical properties of completely decomposed granite, a grouting simulation experiment was designed based on the curtain grouting engineering of Junchang tunnel in Guangxi province. In this experiment, the uniaxial compressive strength, shear strength, permeability coefficient and rate of disintegration of the medium under different grouting pressures were obtained to investigate the influence mechanism of grouting on the strength and hydraulic characteristics of completely decomposed granite. The results showed that fracturing grouting was the dominating mode of completely decomposed granite stratum; with the increase of grouting pressure, the thickness of main slurry vein increased constantly, and the uniaxial compressive strength and shear strength in fracturing grouting area(with slurry vein)and compaction grouting area(without slurry vein)rose remarkably. Additionally, as the grouting pressure reached 2.0 MPa, the uniaxial compressive strength of fracturing grouting area increased by 152.4%, and the shear strength($\sigma_n = 200$ kPa)increased by 348.6%; the compressive strength of compaction grouting area increased by 71.4%, and the shear strength($\sigma_n = 400$ kPa)increased by 149.6%. The osmotic coefficient of grouted medium declined sharply, while the water stability increased remarkably.

Keywords: completely decomposed granite; grouting simulation experiment; grouting pressure; water stability;

收稿日期: 2017-02-25; 修回日期: 2017-04-13.

作者简介: 王 凯(1986—), 男, 博士研究生, wakai9958@163.com.

通讯作者: 杨 磊, yanglei@sdu.edu.cn.

网络出版时间: 2017-08-30. 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1127.N.20170830.1047.002.html>.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801604); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51509146).

Supported by the National Key Research and Development Program of China(No. 2016YFC0801604)and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(No. 51509146).

grouting effect

在我国,花岗岩广泛分布于闽、粤、桂东南与湘南、赣南等地区^[1-4]。受这些地区湿热气候的影响,花岗岩风化程度高,裂隙发育、自稳能力差、遇水崩解性强,隧道与地下工程施工过程中极易发生塌方、突水、突泥等地质灾害。针对这些地质灾害,在隧道建设中常采用注浆作为主要治理手段进行堵水、加固治理^[5-10]。

目前,针对风化花岗岩的物理力学特性及水理特性,国内外专家开展了相关研究:于洪丹等^[11]通过对厦门海底隧道风化槽内天然及重塑强风化花岗岩岩样进行一系列室内试验,对流固耦合作用下的力学特性进行研究,建立了强风化花岗岩的力学模型。陈洪江等^[12-13]通过对全风化花岗岩残积土内摩擦角、黏聚力等 8 项物理力学指标进行概型分布检验及概率统计分析,认为各指标都可用对数正态或正态分布函数拟合,指标间存在相互关系,且花岗岩残积土存在变异性特征。马海毅等^[14]在系统研究广东阳江和台山地区风化花岗岩物理力学特性的基础上,认为强风化花岗岩地层不均匀性突出,水对风化花岗岩抗剪强度参数中的凝聚力影响效应更大,弱化作用更明显。赵建军等^[15]分析了香港全风化花岗岩三轴抗剪强度指标同微结构及成分的关系,认为微结构特点决定强度特点,摩擦力在抗剪强度中占较大比重。李建新等^[16]采用自制崩解仪对不同状态的花岗岩试样进行崩解试验,从定性及定量角度划分了崩解阶段,分析了崩解时间及崩解速率,对南岳地区全风化花岗岩崩解特性进行了探讨。

针对风化花岗岩上述特点,工程中采用注浆作为改善其自稳能力、提高水稳定性的重要手段。张顶立等^[17]针对厦门翔安海底隧道全强风化花岗岩地层,提出海底隧道的复合注浆技术,通过注浆方式与材料的复合,分步改善工程载荷作用的边界条件,解决围岩的渗透、强度及稳定性问题。针对全风化花岗岩的注浆加固效果,刘金泉等^[18]采用自主研发的抗冲刷试验装置研究注浆加固体颗粒流失与抗冲刷特性,认为注浆量、养护龄期、动水流速都对加固体抗冲刷特性具有显著影响。袁敬强等^[19]采用搅拌混合法制备不同浆液充填率的注浆试样,并以此开展物理力学及水理性试验,分析了全风化花岗岩注浆加固特性及加固机制,为该类地层注浆加固性能评价提供了理论依据。然而,由于全风化花岗岩原状地层通常较为致密,注浆扩散模式以劈裂为主,加固后的地层呈现显著的不均质性,而采用搅拌混合法制备的注浆试样进

行试验所获取的数据与实际工程存在一定差距。

因此,本文在总结前期研究成果的基础上^[18-23],通过开展不同注浆压力控制下的注浆模拟试验,分别选取劈裂区及压密区注浆试样,进行单轴抗压试验、直剪试验、渗透及湿化试验,分析不同注浆压力下全风化花岗岩注浆加固体各物理力学参数的变化规律,为全风化花岗岩地层注浆效果评价及注浆施工中注浆压力控制提供理论指导。

1 注浆模拟试验

依托广西岑溪—水汶高速公路均昌隧道突水突泥灾害帷幕注浆治理工程,设计了一套单液注浆模拟试验系统。

均昌隧道地处构造集中发育区,围岩风化程度高,表现为全-强风化花岗岩,扰动区岩体结构松散破碎,节理、裂隙高度发育,围岩基本无自稳能力,施工难度极大。2013 年 9 月—2015 年 10 月,均昌隧道左、右洞共发生 4 次大规模突水、突泥灾害,最大涌水量为 1 200 m³/h,最大突泥量约 2 900 m³/h,导致施工进度缓慢,工期延误。

1.1 注浆模拟试验系统

注浆模拟试验系统由试验发生单元、注浆单元及水压、水量供给单元构成,可实现不同注浆压力下全风化花岗岩介质单液注浆模拟试验,并对被注介质劈裂区、压密区进行完整取样。注浆模拟试验系统如图 1 所示。

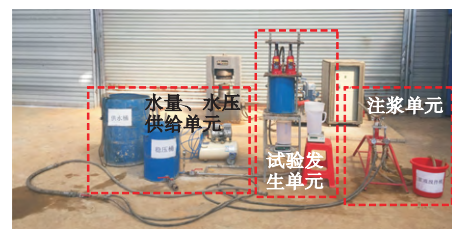


图 1 注浆模拟试验系统

Fig.1 Grouting simulation experiment system

1.2 被注介质

被注介质所选用的全风化花岗岩取自广西均昌隧道 CK7 + 862 里程掌子面核心土右侧,埋深约 100 m,受前期突水突泥的强扰动影响,该全风化花岗岩地层围岩松散薄弱,自稳能力差,遇水易软化崩解。被注介质试样选取该位置全风化花岗岩,通过烘干箱、电子秤、试验筛、振筛仪和液塑限联合测定仪

进行天然密度、干密度、含水率、颗粒级配及液、塑限等物理参数的获取,并通过计算得到土体孔隙率,原状土基本物理参数见表 1,全风化花岗岩基本物理试验见图 2,颗粒级配曲线见图 3。

由图 3 所示,该土样颗粒级配良好,粒径分布范围广,其中小于 0.075 mm 的细粒组占总质量 11.33%, 0.075 mm ~ 2 mm 粒径范围内的砂粒组占总质量的 73.67%,可见该地层组成以砂粒组为主^[24],帷幕注浆施工难度大。

表 1 全风化花岗岩基本物理参数

Tab.1 Basic physical parameters of completely decomposed granite

天然密度/ (g · cm ⁻³)	干密度/ (g · cm ⁻³)	含水率/%	液限/%	塑限/%	孔隙率/%
1.92	1.75	8.3	39.2	18.4	34



图 2 全风化花岗岩物理试验

Fig.2 Physical experiment on completely decomposed granite

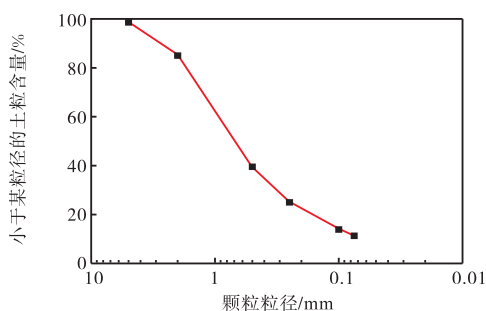


图 3 全风化花岗岩土样颗粒级配曲线

Fig.3 Gradation curve of completely decomposed granite

1.3 注浆材料及仪器

广西均昌隧道突水突泥灾害治理工程中所采用的水泥单液浆主体材料为普通硅酸盐水泥,标号为 PO.42.5;在水灰比为 1 : 1 时,该水泥浆液的基本参数如表 2 所示。

表 2 水泥浆液基本参数

Tab.2 Basic parameters of cement grouting

水灰比	初凝 时间/h	终凝 时间/h	抗压强度/MPa			黏度/(Pa · s)
			1 d	3 d	7 d	
1 : 1	13	24	2.5	3.5	5.0	0.018

试验中采用的注浆动力设备为 ZBSS0.13 手动双液注浆泵(参数见表 3),注浆压力满足单液水泥浆高压泵注需求,注浆速率可通过控制活塞行程大小及压缩速率灵活调整。

表 3 手动双液注浆泵参数

Tab.3 Parameter of double-liquid grouting pump

浆液配比	最大注浆压力/MPa	排量/(L · min ⁻¹)	活塞行程/mm
1 : 1	10	4 ~ 8	50

1.4 注浆模拟试验过程

基于李蓉等^[25]、张顶立等^[17]、袁敬强等^[19]的注浆实施情况及室内试验研究,全风化花岗岩地层中水泥单液浆扩散以劈裂形式为主,压密与渗透为辅,且浆液扩散范围及加固效果与注浆压力密切相关。对于劈裂注浆,浆脉劈裂区对松散土体的加固效果及机制与无浆脉压密区显著不同。在此基础上,设计不同注浆压力控制下全风化花岗岩单液注浆模拟试验并实施。

试验步骤简述: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;②根据测得含水率(8.3%)配置填筑土样;③采用密度(1.75 g/cm³)控制夯实度,分层填筑土样至模型桶内,每层填筑高度 5 cm,每层填筑质量为 5 388 g;④通过水量、水压控制单元中的空压机及稳压桶向试验体内稳定注入有压水,水压控制为 1.0 MPa;⑤待土体浸泡饱和后,使用注浆单元中的手动注浆泵通过注浆管路向试验体内注入水泥单液浆(水灰比为 1 : 1),控制注浆速率,在试验预设终压下停止注浆;⑥取出试验体,在距离中心注浆管 7 cm 处的劈裂区及压密区分别进行各物理试验试块取样。注浆模拟试验主要参数见表 4。试块取样位置示意图图 4。

表 4 注浆加固模拟试验主要参数

Tab.4 Main parameters of grouting reinforcement simulation test

试验序次	注浆时间 t/s	注浆量 Q/L	注浆速率 q _g / (L · min ⁻¹)	注浆终压 p/MPa
1	74	3.1	3.70	0.5
2	83	4.0	3.85	1.0
3	89	4.4	3.95	1.5
4	118	5.1	3.85	2.0

根据原位试样颗粒级配分析结果,粒径超过 10 mm 的砾粒在全风化花岗岩中的比例极低,仅占 0.7%,其对岩土体结构的影响微弱。在试验研究中,相对于内径 280 mm 的试验架而言,砾粒由于自身粒径较大,其尺寸效应显著,可导致试验结果出现较大离散性,对试验数据分析产生干扰。因此,在模型填筑时剔除了粒径超过 10 mm 的砾粒。

注浆模拟试验结束后,采用打开双开式注浆试验

桶,取出注浆试验体,通过取样工具分别制取劈裂区及压密区的试样(见图 5),进行物理力学试验。

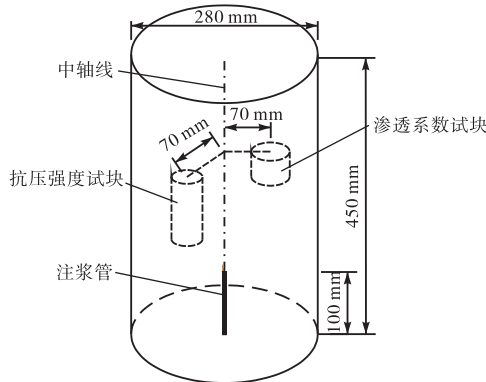


图 4 试块取样空间位置示意

Fig.4 Schematic diagram of spatial position of samples



(a) 取样



(b) 物理力学试验试样

图 5 物理力学试验试样制备

Fig.4 Preparation of samples of physical mechanics experiment

2 物理力学试验

注浆模拟试验结束后,对劈裂区及压密区分别进行取样,进行单轴抗压试验、直剪试验、渗透试验及湿化试验,研究不同注浆压力对于全风化花岗岩强度变形特性、渗透性及耐水崩解性的改善效果及加固机制。

2.1 单轴抗压强度试验

对不同注浆压力下的劈裂区(含浆脉)及压密区

(不含浆脉)土体试样与填筑的未注浆原状土试样进行无侧限抗压强度试验,试验仪器为长春市朝阳试验仪器有限公司制造的 GAW-1000 的微机控制电液伺服岩石刚性试验机。在无侧向压力条件下,采用位移作为加载控制方式,加载速度为 1 mm/min,对全风化花岗岩注浆前后的试样进行单轴抗压强度的测定。

试样制备根据土工试验规程^[26]采用直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱体标准试样。试验完成后 12 h 内完成试样的取出,以避免浆液凝固后取样过程对浆土界面造成较大扰动。对压密区采用自主研发的薄壁取土器取样,对劈裂区采用改造后的手提钻取样。试样取出后,在标准养护条件下养护 7 d,进行单轴抗压强度试验。

2.2 直剪试验

直剪试验是测定土的抗剪强度的一种常用方法。试验仪器为北京中路兴业试验仪器科技有限公司制造的型号为 ZJ-1A 的应变控制直剪仪。每组试验选取距中心注浆管 7 cm 处截取试样 4 个,分别在垂直压力为 100、200、300、400 kPa 下,采用剪切速率(1.0 mm/min)控制施加水平剪切力进行直剪试验,测得不同垂直压力下的抗剪强度。

试样为直径 61.8 mm、高度 20 mm 的圆柱体。试验完成后 12 h 内完成试样的取出,取出后在标准养护条件下养护 7 d 进行直剪试验。

2.3 渗透试验

针对全风化花岗岩注浆试样,采用变水头试验方法进行渗透系数测定。试验仪器选用河北大宏实验仪器有限公司制造的 TST-55 型号土壤渗透仪,对同组试验试样距中心注浆管路相同距离位置截取注浆体试样,利用渗透仪取土环刀作为养护环境,测定养护 7 d 后试件的渗透系数。

试样尺寸采用直径 61.8 mm、高度 40 mm 的圆柱体标准试样。试验完成后 12 h 内完成试样的取出,以减小浆脉凝固后截取试样对浆土交界面渗透性的影响。

2.4 湿化试验

土的湿化是指土体在水中发生崩解的现象,湿化试验是测定土体的水稳定性的试验。参照土工试验规程^[26]中湿化试验测定方法,采用南京精科宇盛仪器有限公司制造的型号为 SHY-1 的土壤湿化仪,对全风化花岗岩注浆加固前后土体试样的水稳定性进行测定。

在注浆模拟试验结束后,采用切土刀切割制成边长为 5 cm 的立方体试样。试样需在注浆结束后 6 h 内完成制取并完成试验。

3 试验结果及分析

对全风化花岗岩充填介质进行不同终压下的注浆模拟实验,试验结束后,对土体进行分层切割,分析注浆扩散模式;对注浆加固体劈裂区及挤密区试样进行各项物理力学试验,分析不同注浆压力下各试验结果变化规律,并对全风化花岗岩加固特性进行研究.

由于该重点研究全风化花岗岩区域曾多次发生突水突泥灾害,地层扰动严重,围岩具有极强的空间分布不均匀性,在不同位置处取样测得的抗压强度和渗透系数相差极大,对于分析试验结果干扰较大,因此本文未对原位试样进行对比研究.此外,在注浆过程中,浆液扩散受多种因素制约,使得浆液扩散形态具有一定的随机性,直接影响劈裂区及挤密区试块的各项物理力学试验结果,对试验规律的分析造成影响.为削弱这种影响,本试验通过填充介质的密度控制,保证土体具有相同的密实度;同时增加各组试验数量,降低误差的影响.

3.1 注浆扩散模式分析

对注浆试验体分层切割,每层厚度 2 cm,采用高清相机记录加固体浆脉扩展形态,分析注浆扩散模式,研究不同注浆压力下浆脉扩展形态演化规律.

1) 浆液扩散形态分析

图 6 为距离注浆管口顶端 15 cm 处横剖面典型浆脉扩展情况,分析图 6 可知,注浆压力对于浆脉扩展形态影响显著.当注浆压力 $p = 0.5 \text{ MPa}$ 时,浆液在较低注浆压力下,仅形成主浆脉,浆脉宽度为 0.6 cm,浆脉扩展半径为 7.4 cm;当注浆压力 $p = 1.0 \text{ MPa}$ 时,浆液扩展形态表现为主浆脉与两根次生浆脉共生,主浆脉与次浆脉 1 之间夹角为接近 180° ,与次浆脉 2 夹角为 115° ;当注浆压力 $p = 1.5 \text{ MPa}$ 时,浆液扩展形态表现为主、次浆脉共生,主、次浆脉扩展角度为 175° ;当注浆压力 $p = 2.0 \text{ MPa}$ 时,浆液扩展形态呈现三叉型,且主浆脉与次生浆脉基本呈 120° 夹角.表 5 为不同注浆压力下浆脉空间扩展基本数据,图 7 为不同注浆压力下主浆脉厚度变化曲线.

2) 基于浆液扩散形态的加固特性分析

通过分析注浆模拟试验浆脉扩展情况,可以得出:在全风化花岗岩地层中,注浆扩散模式主要以劈裂注浆为主,压密注浆为辅,渗透注浆较少,这与张顶立等^[17]的研究结果相符.主浆脉扩展厚度与注浆压力呈正相关关系,浆脉厚度随注浆压力的提高逐渐增大,注浆加固效果得到加强.这是由于随着注浆压力的不断提高,主、次浆脉沿主要弱势面劈裂宽度逐

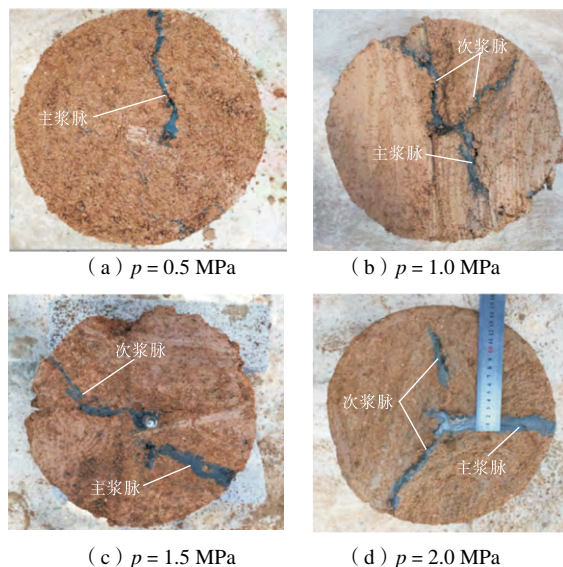


图 6 不同注浆压力下浆液扩展形态

Fig.6 Extension form of slurry under different grouting pressures

表 5 不同注浆压力下浆脉空间形态基本参数

Tab.5 Basic parameters of grouting vein spatial form under different grouting pressures

试验序次	注浆压力 p/MPa	主浆脉厚度 d/cm	次浆脉 1 厚度 d_1/cm	次浆脉 2 厚度 d_2/cm
1	0.5	0.6	0.5	无
2	1.0	1.1	0.5	0.3
3	1.5	1.8	0.9	无
4	2.0	2.0	1.2	0.7

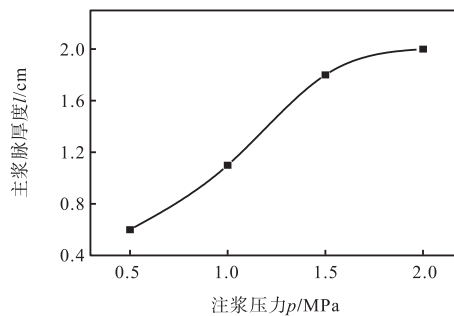


图 7 主浆脉厚度与注浆压力关系曲线

Fig.7 Relationship between thickness of main grouting vein and grouting pressure

渐扩展,形成主干浆脉,作为骨架支撑结构,提高了受注介质的完整性及强度;随着浆脉不断生长、扩展,在压密作用下浆脉周边土体被压缩,土颗粒之间咬合、嵌入性提高,结构性得到增强,提高了压密区介质强度.通过全风化花岗岩地层主、次浆脉不断生长、扩展,使被注介质注浆加固效果得到了增强.

3.2 介质强度特性分析

1) 单轴抗压试验

通过对压密区(不含浆脉)及劈裂区(含浆脉)试样进行单轴抗压试验,比较试验结果发现,压密区及

劈裂区土体试样强度显著高于未注浆土体试样,且劈裂区土体试样单轴抗压强度高于压密区土体试样.由图 8 可知,随注浆终压的提高,单轴抗压强度呈现增大趋势,在注浆终压为 2.0 MPa 下,劈裂区试样单轴抗压强度相较于未注浆土体提高 152.4%,压密区试样单轴抗压强度提高 95.2%.不同注浆压力下劈裂区及压密区试样的单轴抗压强度变化曲线见图 8 (其中,注浆压力 $p=0$ 数据点表示未注浆土体试样抗压强度).不同注浆压力下压密区试样单轴抗压强度试验结果见表 6,不同注浆压力下劈裂区试样单轴抗压强度试验结果见表 7,其中单轴抗压强度提升幅度为相对于未注浆土体试样单轴抗压强度平均值的增长幅度.

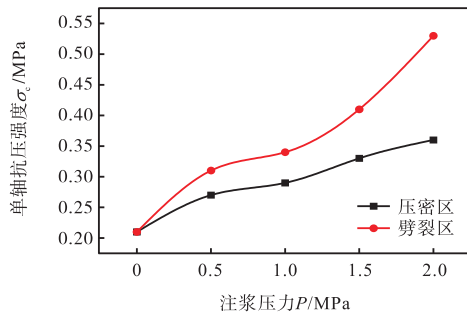


图 8 单轴抗压强度与注浆压力关系曲线

Fig.8 Relationship between uniaxial compressive strength and grouting pressure

结合表 6、表 7 和图 8 进行分析:劈裂区土体试样及压密区土体试样抗压强度都随注浆压力的增大显著提高,但压密区试块抗压强度当注浆压力超过 1.5 MPa 后增长幅度逐渐平缓,而劈裂区试块单轴抗压强度当注浆压力大于 1.5 MPa 后,增幅呈现增大趋势.原因在于:在注浆压力较高条件下,更有利于浆脉的扩展,浆脉厚度不断增大,对周边土体的压密作用增强,造成了劈裂区及压密区试块抗压强度的显著提高;劈裂区及压密区试块单轴抗压强度在注浆压力 $p = 1.5$ MPa 处发展规律出现差异性,结合浆脉扩展形态进行分析,当注浆压力较小(低于 1.5 MPa)时,结合表 5 及图 6,此时主浆脉厚度随注浆压力提高迅速增长,压密区土体也随之被迅速压密,此时劈裂区试块抗压强度主要受浆脉厚度影响,压密区压密作用显著,二者抗压强度都增长较快;当注浆压力达到 1.5 MPa 时,浆液滤作用明显,主浆脉通道浆液浓度大幅提升,浆脉厚度扩展缓慢(见表 5 及图 6),对周边土体的压密作用削弱,此时,劈裂区试块抗压强度提升主要受主浆脉通道中浆液凝固密实度的影响.因此,虽然浆脉宽度增长缓慢,但劈裂区试块强度依旧增长迅速,而压密区由于挤密作用减弱强度增长缓

慢.本节中试验数据与第 3.1 节中基于不同浆脉扩展形态的加固特性分析相吻合.

表 6 不同注浆压力下压密区试样单轴抗压强度试验结果
Tab.6 Uniaxial compressive test results of compaction grouting regions under different grouting pressures

试样编号	注浆压力 p /MPa	单轴抗压强度 σ_c /MPa	单轴抗压强度平均值/MPa	单轴抗压强度提升幅度/%
I-1	0	0.23	0.21	—
I-2	0	0.20		—
I-3	0	0.22		—
I-4	0	0.17		—
II-1	0.5	0.31	0.27	28.6
II-2	0.5	0.25		
II-3	0.5	0.24		
II-4	0.5	0.27		
III-1	1.0	0.24	0.29	38.1
III-2	1.0	0.28		
III-3	1.0	0.31		
III-4	1.0	0.32		
IV-1	1.5	0.41	0.33	57.1
IV-2	1.5	0.32		
IV-3	1.5	0.29		
IV-4	1.5	0.31		
V-1	2.0	0.39	0.36	71.4
V-2	2.0	0.35		
V-3	2.0	0.39		
V-4	2.0	0.32		

表 7 不同注浆压力下劈裂区试样单轴抗压强度试验结果
Tab.7 Uniaxial compressive test results of fracturing grouting regions under different grouting pressures

试样编号	注浆压力 p /MPa	单轴抗压强度 σ_c /MPa	单轴抗压强度平均值/MPa	单轴抗压强度提升幅度/%
I-1	0	0.23	0.21	—
I-2	0	0.20		—
I-3	0	0.22		—
I-4	0	0.17		—
II-1	0.5	0.29	0.31	47.6
II-2	0.5	0.32		
II-3	0.5	0.31		
II-4	0.5	0.11*		
III-1	1.0	0.39	0.34	61.9
III-2	1.0	0.35		
III-3	1.0	0.29		
III-4	1.0	0.33		
IV-1	1.5	0.47	0.41	95.2
IV-2	1.5	0.35		
IV-3	1.5	0.13*		
IV-4	1.5	0.42		
V-1	2.0	0.56	0.53	152.4
V-2	2.0	0.55		
V-3	2.0	0.49		
V-4	2.0	0.51		

注: *代表由于试验误差导致的无效数据.

2) 直接剪切试验

通过直接剪切试验,测得不同垂直压力下压密区

及劈裂区土体试块发生水平剪切破碎时的剪应力,并确定介质抗剪强度,如表8所示。

劈裂区所截取土体试块放置入剪力盒内时保持浆脉延展面与剪切方向垂直。对未注浆土体进行直剪试验,测得未加固前土体试样在不同垂直压力下的抗剪强度:当垂直压力 $\sigma_n = 100$ kPa时,抗剪强度 $\tau_f = 98.27$ kPa; $\sigma_n = 200$ kPa时, $\tau_f = 153.77$ kPa; $\sigma_n = 300$ kPa时, $\tau_f = 183.80$ kPa; $\sigma_n = 400$ kPa时, $\tau_f = 225.30$ kPa。

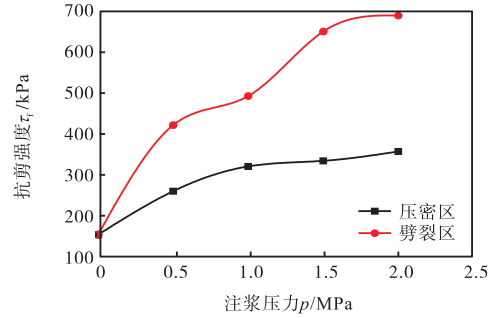
取 $\sigma_n = 200$ kPa及 $\sigma_n = 400$ kPa时,不同取样区域、不同注浆压力下试验数据进行分析,抗剪强度变化规律曲线见图9(其中,注浆压力 $p = 0$ 对应的数据点表示未注浆土体试样的抗剪强度)。

通过表8分析可得,相同垂直压力下,试块抗剪强度随注浆压力提高而增大,而相同注浆压力下,劈裂区土体试块(带浆脉)的抗剪强度比压密区土体(不

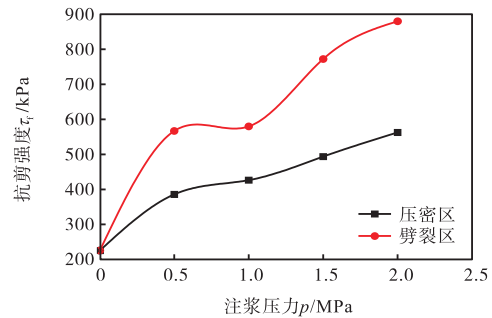
表8 不同注浆压力下土体介质剪切强度参数

Tab.8 Shear strength properties of soil medium samples under different grouting pressures

试样编号	取样区域	注浆压力 p/MPa	垂直压力 σ_n/kPa	抗剪强度 τ_f/kPa
1	压密区	0.5	100	203.33
			200	260.12
			300	326.67
			400	385.67
2	压密区	1.0	100	200.32
			200	320.67
			300	381.86
			400	426.41
3	压密区	1.5	100	234.34
			200	334.23
			300	427.33
			400	493.67
4	压密区	2.0	100	244.84
			200	357.22
			300	422.93
			400	562.47
5	劈裂区	0.5	100	288.33
			200	421.67
			300	544.35
			400	566.67
6	劈裂区	1.0	100	385.38
			200	492.67
			300	517.00
			400	579.67
7	劈裂区	1.5	100	579.67
			200	650.67
			300	638.42
			400	772.15
8	劈裂区	2.0	100	645.31
			200	689.76
			300	740.82
			400	880.12



(a) $\sigma_n = 200$ kPa



(b) $\sigma_n = 400$ kPa

图9 抗剪强度与注浆压力关系曲线

Fig.9 Relationship between shear strength and grouting pressure

含浆脉)试块高。这是因为劈裂注浆过程中,随着注浆压力的提高,浆脉厚度不断增大,造成在直剪试验中剪裂含浆脉试块的最大剪应力也相应增大,抗剪强度提高;同时由于浆脉的不断扩展,对浆脉周边土体压密作用增强,土体密实度增高,增强了土颗粒间的摩擦、嵌入及咬合作用,造成压密区的抗剪强度提高;但由于剪裂水泥浆脉的剪力远大于克服土颗粒之间相互作用的力,因此劈裂区土体试样抗剪强度要高于压密区。比较图9(a)及图9(b),二者曲线形态基本一致,反映的规律基本相同,证明了试验测试的准确性。

3.3 介质渗透性分析

对全风化花岗岩注浆未注浆试样及注浆后压密区试样,采用变水头试验方法进行渗透系数测定。

通过试验测得,密度为 1.75 g/cm^3 、含水率为 8.3% 的全风化花岗岩试块注浆加固前渗透系数平均值为 $4.1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,随着注浆压力的提高,土体介质的渗透系数不断降低。特别是当注浆压力提升到 1.5 MPa 及 2.0 MPa 时,渗透系数分别降低到未加固土样的 3.6% 及 1.9% ,渗透系数数量级从 10^{-5} 降低到了 10^{-7} 。不同注浆压力下的渗透系数见图10。

通过提高注浆压力可以有效降低全风化花岗岩的渗透系数,且注浆压力高于 1.5 MPa 时,渗透系数

变化趋于平缓. 原因在于随着注浆压力的不断提高, 浆脉不断扩展, 浆脉厚度持续增大, 对周边土体的挤密作用更加显著, 造成土体孔隙率也相应降低, 导致渗透系数降低; 同时, 水泥浆液的水化反应产物与土体颗粒通过复杂的物理化学反应凝聚、结晶, 并通过离子吸附交换形成团粒结构, 共同增大了土颗粒间的胶结作用, 降低了土体介质孔隙率导致渗透系数降低. 在注浆压力低于 1.5 MPa 时, 浆脉扩展以厚度增长为主, 压密区土体压缩明显, 孔隙率降低显著, 造成渗透系数下降较快, 当注浆压力高于 1.5 MPa 时, 浆液滤作用增强, 此时提高注浆压力浆脉扩展缓慢, 孔隙率降低缓慢, 造成压密区土体渗透系数下降平缓, 这与第 3.1 节中基于扩展形态的加固特性分析相吻合.

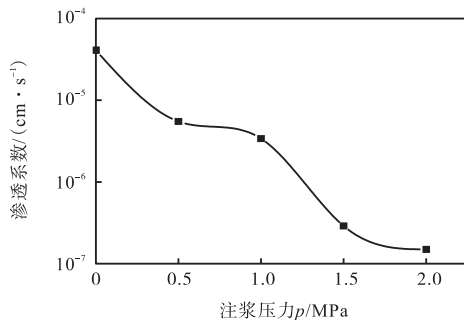


图 10 不同注浆压力下渗透试验结果

Fig.10 Results of permeability test under different grouting pressures

由于劈裂区试块取样过程中, 易造成浆-土交界面的扰动变形, 对渗透系数及崩解率有较大影响, 因此, 本文对劈裂区试块的水理性不作分析.

3.4 介质水稳定性分析

劈裂区内部由于浆脉骨架的存在, 水稳定性强, 因此试样加工的过程中, 选择注浆加固中最为薄弱压密区进行水稳定性分析.

图 11 为不同注浆压力下压密区土体试样崩解率试验曲线. 对比分析试验结果可知, 未注浆全风化花岗岩试样崩解率增长最快, 在浸入水中 450 s 后, 崩解率达到 98.8%, 并稳定在该数值; 对于压密区试样, 注浆压力 $p = 0.5$ MPa 时, 在浸入水中 780 s 后, 崩解率稳定在 96.66%; 当 $p = 1.0$ MPa 时, 在浸入水中 870 s 后, 崩解率稳定在 96.45%; 当 $p = 1.5$ MPa 时, 在浸入水中 930 s 后, 崩解率稳定在 96.85%; 当 $p = 2.0$ MPa 时, 在浸入水中 1 260 s 后, 崩解率稳定在 96.67%. 分析图 11 可得, 随着注浆压力的不断提高, 土体在水中完全崩解的时间逐渐增长, 在注浆压力为 2.0 MPa 时, 土体试块完全崩解的时间为未注浆

试块的 2.8 倍.

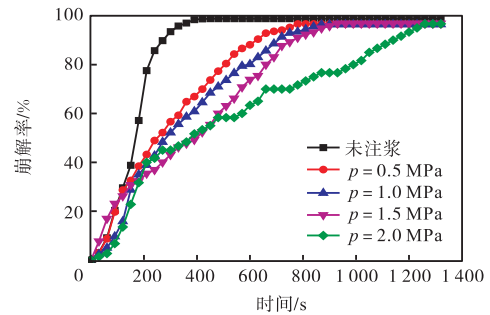


图 11 不同注浆压力下崩解率试验曲线

Fig.11 Curves of slake durability test under different grouting pressures

通过提高注浆压力可以有效提高全风化花岗岩压密区水稳定性, 原因在于水泥浆液的挤密及劈裂作用. 水泥浆液进入土体介质后, 通过注浆压力的提高, 浆脉对于周边影响区土体的挤密作用增强, 土体内部孔隙率大幅降低, 部分贯通性裂隙闭合, 浸泡水难以进入土体内部加快土体软化崩解. 同时部分主浆脉上的次生浆脉对土体内部微小裂隙进行劈裂、贯穿及充填, 也在一定程度上降低了土体的孔隙率, 提高了土体介质的水稳定性. 但由于压密区土体内部无浆脉或仅存在微小次生浆脉, 土体在水中浸泡时间足够长, 依旧会造成崩解率达到 90% 以上.

劈裂区土体试样, 由于水泥浆脉的存在, 对试件的水稳定性提高较大; 压密区试样在完全水环境中的水稳定性虽有显著提升, 但崩解率依然较高, 是注浆加固的薄弱环节.

3.5 试验数据对比分析

采用注浆模拟试验制取的试块所测得各物理力学参数(测得值)与采用均匀搅拌混合法制备的试块测得的物理力学参数(比较值)存在差异性. 考虑到介质孔隙率等因素, 本文选取浆液充填率为 32% 的搅拌混合法制备的试块数据进行分析.

(1)强度特性方面: 取搅拌混合法制备的养护时间为 7 d 的强度参数计算试件单轴抗压强度数据, 与本文注浆模拟试验测得值对比发现, 在 0.5 ~ 2.0 MPa 注浆压力下劈裂区及压密区试块单轴抗压强度均低于搅拌混合法比较值. 原因在于劈裂区土体试件抗压强度主要由主浆脉骨架承担, 接触面受力不均, 易造成试块破坏, 而由均匀搅拌法得到的试块, 水泥浆液与土体颗粒充分搅拌混合, 增强了土体颗粒间的黏结强度, 所得到的均匀水泥加固体更能发挥整体抗压性, 相较于依靠浆脉与压密土体支撑的注浆模拟试验试块单轴抗压强度更高.

(2) 渗透性及水稳定性方面: 采用注浆模拟试验制取试块的渗透性测得值高于比较值, 水稳定性弱于比较值. 原因在于采用注浆模拟试验制取的土体试样, 通过浆脉的扩展对周边土体介质进行压密, 降低介质孔隙率, 使土体介质渗透性降低, 水稳定性提高; 采用搅拌混合法制备的试块在水泥浆液注入后, 水化产物将土体颗粒胶结得更为紧密, 增强了介质的整体性, 且水泥浆液渗入充填土体颗粒之间的孔隙, 降低了土体孔隙率, 相较于通过注浆模拟试验制取的压密区试块, 水稳定性更强, 渗透系数更低.

采用注浆模拟试验制取的试块所反映的加固效果整体弱于通过搅拌混合法制备的试块, 但由于注浆模拟试验方法更接近于帷幕注浆工程实际施工, 在全风化花岗岩注浆加固效果评价方面具有较强的指导意义.

4 结 论

(1) 在全风化花岗岩中注浆扩散模式以劈裂注浆为主, 压密注浆为辅; 随着注浆压力的持续增大, 土体试块的强度特性得到显著提高, 当注浆压力达到 2.0 MPa, 劈裂区土体试件抗压强度较未注浆试块提高 152.4%, 抗剪强度提高 348.6%.

(2) 针对帷幕注浆治理中的薄弱压密区进行分析认为, 在注浆加固过程中提高注浆压力, 可有效改善加密区介质水理特性, 当注浆压力达到 2.0 MPa 时, 渗透系数降低为未注浆试样的 0.36%, 试块完全崩解浸水时间为未注浆试样的 2.8 倍, 通过注浆加固显著降低了介质的渗透性, 提高了水稳定性. 压密区的水稳定性注浆后虽有显著提升, 但在受扰动的富水环境中, 崩解率依然较高, 是注浆加固的薄弱环节, 施工中应避免扰动, 改善渗透率, 避免其崩解失稳.

(3) 根据试验结果分析, 增大注浆压力是提高加固效果的重要手段. 因此在注浆施工过程中, 在综合考虑围岩及衬砌结构承载力的基础上, 适当加大注浆压力, 对于提高围岩整体强度、保证加固效果具有重要意义.

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 袁敬强. 富水风化花岗岩隧道注浆机制与突水治理技术研究[D]. 北京: 北京科学院大学, 2014.
Yuan Jingqiang. Mechanism of Grouting and Treatment Technology of Water Inrush Disaster in Water-Rich Weathered Granite Tunnels[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014(in Chinese).
- [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).
- [5] 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 Shucui, 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).
- [6] 刘润, 闫玥, 闫澍旺, 等. 浅层压力注浆法加固风化岩质边坡及加固效果分析[J]. 天津大学学报, 2006, 39(5): 532-536.
Liu Run, Yan Yue, Yan Shuwang, et al. Effective analysis on applying grouting method to stabilize weathered rock slope[J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39(5): 532-536(in Chinese).
- [7] 高健, 张义同. 实施超前注浆管棚支护的隧道开挖面稳定分析[J]. 天津大学学报, 2009, 42(8): 666-672.
Gao Jian, Zhang Yitong. Stability analysis of tunnel face reinforced with advanced pipe grouting[J]. *Journal of Tianjin University*, 2009, 42(8): 666-672(in Chinese).
- [8] 张庆松, 韩伟伟, 李术才, 等. 灰岩角砾岩破碎带涌水综合注浆治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,

- 31(12): 2412-2419.
Zhang Qingsong, Han Weiwei, Li Shucai, et al. Comprehensive grouting treatment for water gushing analysis in limestone breccias fracture zone [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2412-2419(in Chinese).
- [9] 李术才, 张 霄, 张庆松, 等. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制与封堵方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2377-2396.
Li Shucai, Zhang Xiao, Zhang Qingsong, et al. Research on mechanism of grout diffusion of dynamic grouting and plugging method in water inrush of underground engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(12): 2377-2396(in Chinese).
- [10] 胡文涛. 厦门海底隧道风化深槽全断面帷幕注浆方案设计[J]. 石家庄铁道学院学报, 2007, 20(2): 130-134.
Hu Wentao. Full-face curtain grouting for the weathered ditch in the construction of sea tunnel in Xiamen[J]. *Journal of Shijiazhuang Railway Institute*, 2007, 20(2): 130-134(in Chinese).
- [11] 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*, 2010, 29(2): 381-387(in Chinese).
- [12] 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: Natural Science Edition*, 2001, 29(5): 92-94(in Chinese).
- [13] 陈洪江, 崔冠英. 花岗岩残积土物理力学指标的概率统计分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(5): 95-97.
Chen Hongjiang, Cui Guanying. Probability statistic analysis of physical mechanical parameters of granite eluvial soil [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2001, 29(5): 95-97(in Chinese).
- [14] 马海毅, 鲁祖德. 粤西滨海核电厂址强风化花岗岩物理力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 361-366.
Ma Haiyi, Lu Zude. Investigation of physico-mechanical properties for highly weathered granite of nuclear power station in coastal site of western Guangdong province[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(2): 361-366(in Chinese).
- [15] 赵建军, 王思敬, 尚彦军, 等. 香港全风化花岗岩的固结特性[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 85-88.
Zhao Jianjun, Wang Sijing, Shang Yanjun, et al. Consolidation characteristics of completely decomposed granite in Hong Kong [J]. *Journal of Hehai University: Natural Sciences*, 2005, 33(1): 85-88(in Chinese).
- [16] 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 and Technology: Natural Science Edition*, 2015, 30(4): 59-63(in Chinese).
- [17] 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, 2005, 31(3): 445-452.
Zhang Dingli, Sun Feng, Li Pengfei, et al. Mechanism of composite grouting in subsea tunnel and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 31(3): 445-452(in Chinese).
- [18] 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]. 岩石力学与工程学报, 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(in Chinese).
- [19] 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(in Chinese).

- [20] 李 鹏, 张庆松, 张 霄, 等. 非均质断层介质单双液加固特性对比[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(4): 840-851.
Li Peng, Zhang Qingsong, Zhang Xiao, et al. Comparison research on reinforcement characteristics of cement slurry and C-S slurry for inhomogeneous fault medium[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, 24(4): 840-851(in Chinese).
- [21] 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 Qingsong, Zhang Xiao, et al. Analysis of fracture grouting mechanism based on model test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(11): 3221-3230(in Chinese).
- [22] 张忠苗, 邹 健, 贺静漪, 等. 黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1818-1824.
Zhang Zhongmiao, Zou Jian, He Jingyi, et al. Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(12): 1818-1824(in Chinese).
- [23] 张庆松, 李 鹏, 张 霄, 等. 隧道断层泥注浆加固机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 924-934.
Zhang Qingsong, Li Peng, Zhang Xiao, et al. Model test of grouting strengthening mechanism for fault gouge of tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(5): 924-934(in Chinese).
- [24] 中华人民共和国水利部. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50145—2007 Standard for Engineering Classification of Soil[S]. Beijing: China Planning Press, 2008(in Chinese).
- [25] 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 Tunneling Technology*, 2008, 45(1): 21-29(in Chinese).
- [26] 南京水利科学研究所. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Nanjing Institute of Water Resources and Hydropower Research. SL237—1999 Specification of Soil Test[S]. Beijing: China Water and Power Press, 1999(in Chinese).

(责任编辑: 樊素英)