

# 全风化花岗岩注浆加固体抗冲刷特性试验研究

刘金泉<sup>1,2</sup>, 陈卫忠<sup>3</sup>, 袁敬强<sup>1</sup>

(1. 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, 湖北 武汉 430071;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 突水突泥是全风化花岗岩隧道施工中常见的地质灾害, 土体颗粒的流失和抗冲刷特性是决定全风化土体发生突水的关键因素。为了研究注浆加固体颗粒流失与抗冲刷特性, 自行设计注浆试样制备及抗冲刷试验装置, 能够实现全风化花岗岩劈裂、挤密注浆试样制作, 以及模拟注浆加固体受水流冲刷的关键过程。利用该试验装置开展注浆量、动水流速、养护龄期、土体初始含水量等因素对注浆加固体的颗粒流失与抗冲刷特性试验研究, 并定义颗粒流失率指标来定量评价土体颗粒流失与抗冲刷特性。试验表明: 注浆加固体抗冲刷特性随注浆量及其养护龄期的提高均明显改善, 动水流速的增加显著加大颗粒流失, 含水量过低或过高时, 加固体的抗冲刷特性均较差, 存在一个最佳含水量值使得抗冲刷特性最优。同时, 单位浆液量胶结土体范围(浆液胶结率)随注浆量呈二次抛物线变化, 且浆液胶结率峰值随动水流速的提高向高注浆量方向移动。最后, 根据试验结果提出地层注浆量的计算方法及含水量分区治理的原则。

**关键词:** 岩石力学; 抗冲刷特性; 颗粒流失率; 浆液胶结率; 注浆量

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2016)09-1767-09

## Test on anti-scouring property of grouting reinforced body in completely weathered granite

LIU Jinquan<sup>1,2</sup>, CHEN Weizhong<sup>3</sup>, YUAN Jingqiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

**Abstract:** Water inrush is a common geological disaster in tunnel construction in completely weathered granite soil, and the loss of soil particles and the anti-scouring property are the keys to determine the water inrush. Therefore, a simple device for grouted sample manufacturing and an anti-erosion device were made to manufacture the samples of compaction grouting and fracturing grouting and to simulate the vital process of grouting reinforced solid being flushed by the flowing water. With these devices, a series of tests were carried out by controlling a number of factors such as the grouting capacity, the velocity of dynamic water, the curing time and the initial water content of the soil. The index of the particle erosion rate (PER) was proposed to evaluate the loss of soil particles and the anti-scouring property. The test results showed that the anti-scouring property was improved with the increasing of grouting capacity and curing time. However, the particle erosion rate was increased

**收稿日期:** 2015-11-09; **修回日期:** 2016-01-16

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036006); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(51225902); 国家自然科学基金青年基金项目(51509246)

Supported by the National Basic Research and Development Program of China(973 Program)(Grant No. 2013CB036006) and Nation Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51225902 and 51509246)

**作者简介:** 刘金泉(1989-), 男, 2011年毕业于广西大学安全工程专业, 现为博士研究生, 主要从事地下工程突水突泥机制与灾害控制理论方面的研究工作。E-mail: jinquanliu99@163.com. 通讯作者: 陈卫忠(1968-), 男, 现任研究员、博士生导师。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1537

significantly with the increasing of dynamic water velocity , and the anti-scouring property was poor when the initial soil water content was very low or very high. There existed an optimum initial water content to make the anti-scouring property the best. The range of grout cementation over grouting capacity(ratio of grouting cementation) changed parabolically with the grouting capacity. The peak of grouting cementation ratio moved to the direction of high grouting capacity with the increasing of water velocity. A new method to calculate the grouting capacity and the principal of partition treatment of water inrush was proposed according to the test results.

**Key words** : rock mechanics ; anti-scouring property ; particle erosion rate ; grouting cementation ratio ; grouting capacity

# 1 引言

富水全风化花岗岩地层区域隧道及地下工程建设过程中,经常面临发生突水突泥灾害的风险<sup>[1-2]</sup>。全风化土体突水通道的形成是水压及工程扰动作用下,土体细颗粒冲刷流失、粗颗粒乃至通道断面失稳造成的通道扩展过程。注浆是工程实践中常用的堵水加固措施。注浆后加固体颗粒流失特性及抗冲刷特性对全风化地层突水治理成功与否至关重要。

目前,在颗粒流失理论方面已有不少研究成果。D. Sterpi<sup>[3]</sup>根据可动细颗粒的连续方程和渗流方程,引入可动细颗粒流失量与渗透坡降的经验公式,建立了细颗粒运移模型。A. Cividini 和 G. Gioda<sup>[4]</sup>在 D. Sterpi<sup>[3]</sup>的基础上建立了描述可动细颗粒流失的有限元模型。罗玉龙等<sup>[5-6]</sup>将出砂预测模型引进到管涌和破碎岩土体通道形成数学模型,建立的模型体系可用于描述通道形成过程中的颗粒运移特征。另外,不少河流泥沙研究学者从力学角度及推移质运动方面,开展了泥沙颗粒的运动规律,建立了颗粒临界起动条件<sup>[7-8]</sup>。这些研究极大丰富了颗粒的运移机制,但由于全风化土体突水模型涉及到高压、大埋深、强扰动等与管涌、河流泥沙颗粒不同的特征因素,仍需深入研究。

在注浆加固体抗冲刷特性研究方面,相关成果较少。过去国内外学者多从注浆加固体强度、渗透特性等方面开展研究,且已有一些研究成果<sup>[9-12]</sup>。由于室内劈裂及挤密注浆仪器设备的限制,大多采用均匀搅拌形成的水泥土试样开展研究,这种方式与实际工程的注浆有显著的差别。另外,虽然加固体强度、渗透性特性与颗粒流失和抗冲刷特性有一定的关系,但水流冲刷引起的土颗粒流失与土体在外力作用下作为一个整体受剪破坏的机制完全不同<sup>[7]</sup>。因此,劈裂及挤密注浆条件下,注浆加固体颗粒流失与抗冲刷特性对于注浆堵水加固效果及突水机制研究还亟待完善。

为此,笔者自行设计一套抗冲刷装置,并采用一种注浆装置实现劈裂及挤密注浆试样的制作,开展了包括注浆量、土样初始含水量、养护龄期、动水流速等多因素条件下的注浆加固体抗冲刷及颗粒流失特性试验研究。

# 2 注浆加固体抗冲刷试验

## 2.1 试验设计

为了进行抗冲刷试验,设计了图 1 所示试验装置,该试验装置由水箱、水槽及收集系统组成。试验水箱内径 10 cm,高 150 cm,距离水槽高差 50 cm,可提供最大水流平均流速超过 1 m/s。试验水槽为上端开口的长方体沟槽,长 200 cm,宽 10 cm,高 10 cm。与水箱连接处设一缓冲池,用以调节水流均匀流入试验水槽。缓冲池与水槽连接一侧采用开有部分滤孔的挡板构造,另一侧设有流速调节阀门,控制水槽内流速达到试验要求。水槽出水口设有颗粒收集系统,收集系统采用两层滤网构造。试样放置在距离出水口 20 cm 处。

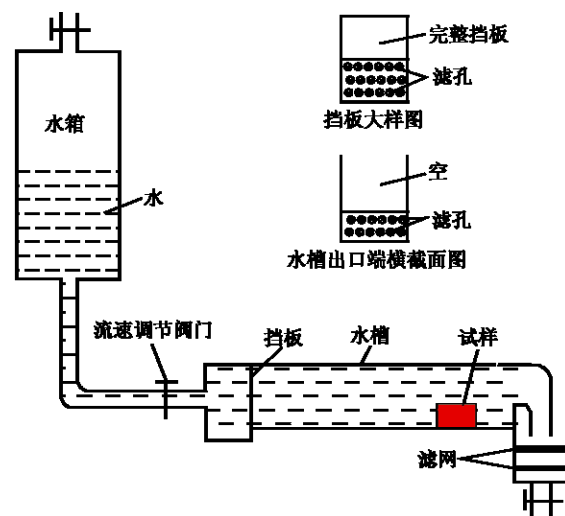


图 1 注浆加固体抗冲刷装置  
Fig.1 Anti-scouring device

试验过程中分别设定不同的动水流速条件,将制好的注浆试样放入水槽中,按一定时间间隔记录

试样颗粒流失量，待试样保持稳定，不再发生流失时关闭进水口阀门。定义试样颗粒流失率  $PER$ (particle erosion ratio)为动水条件下，滤网收集到的颗粒流失量  $m_s$  与试样原质量  $m_0$  之比，用于定量评价注浆加固体抗冲刷性能。

### 2.2 试验材料

本试验以一多次发生突水的隧道现场全风化花岗岩土体为研究对象，其基本物理性质指标见表 1。

表 1 全风化花岗岩基本物理性质

Table 1 Physical properties of completely weathered granite

干密度 $\rho_d /$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	土样含水率 $w / \%$	孔隙率 $n$	不同粒径颗粒所占比例 / %			
			< 0.005 mm	0.005 ~ 0.075 mm	0.075 ~ 2 mm	> 2 mm
1.7	8	0.37	13.3	17.5	57.0	12.2

突水突泥隧道地层加固材料主要为水泥浆液和各类化学浆液。快硬硫铝酸盐水泥因具有早强、凝胶时间短、安全环保的优点，在隧道、市政等地下工程中有着较为广泛的应用。因此，本文采用 42.5 快硬硫铝酸盐水泥作为注浆材料，水泥品质符合《硫铝酸盐水泥》(GB20472—2006)标准，试验中水灰比  $W/C$  为 0.8 : 1，其初凝时间约 21 min。

### 2.3 试验装置

为较真实反映工程现场注浆情况，模拟浆液在土体中挤密、劈裂机制。自行开发一套室内压力注浆试样制备装置，能够模拟各种土体的挤密注浆和劈裂注浆，且能形成完整的注浆试样。该装置主要由千斤顶、反力架、浆液注射器、试样架及试样模具 5 个部分组成。如图 2 所示。

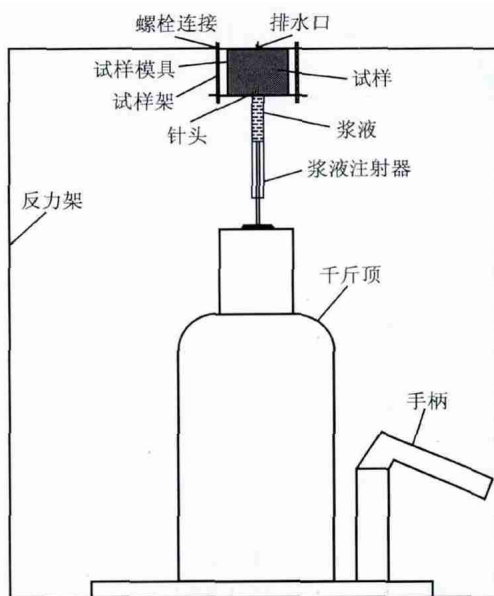


图 2 注浆装置

Fig.2 Grouting device

#### (1) 千斤顶

千斤顶为注浆的供压设备，试验选用的千斤顶为 QYL10 手动油压千斤顶，可提供最大压力 61.68 MPa。

#### (2) 反力架

反力架的作用是为千斤顶提供反力，顶端采用螺栓与试验架连接，并在顶部中间设一排水口，装置高 60 cm，长 25 cm，宽 25 cm，厚 10 cm，采用钢材构造。

#### (3) 试样架

试样架主要提供固定作用，通过上部与反力装置螺栓连接以保证试样模具的稳定。

#### (4) 试样模具

试样模具为内尺寸为边长 4 cm、壁厚 2 cm 的可拆卸钢构件。模具四边采用螺纹紧固件连接。

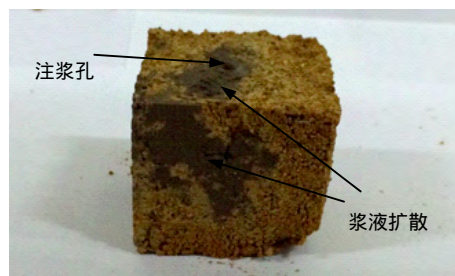
#### (5) 浆液注射器

浆液注射器作用为将需要的浆液注入到土体中，注射器一端与千斤顶接触，另一端采用内径为 1.6 mm、长 1 cm 的钢制针头插入土体内部。

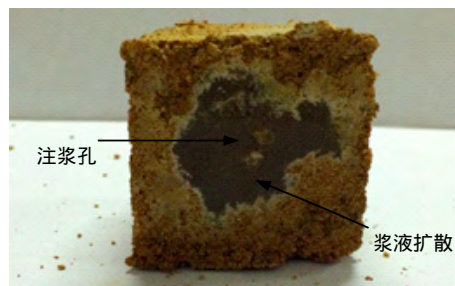
### 2.4 试样制备

首先采用 3 mm 筛将土样筛分，去除土样中粗颗粒，将土样倒入已连接好的模具中，分层捣实至 4 cm 并将模具顶盖密封好，用注射器吸取试验需要的浆液量，然后按图 2 所示将仪器装配成一个整体。打开排水口，压缩千斤顶手柄，施加注浆压力进行注浆，同时通过手柄压缩速率来控制注浆速率。

浆液全部注入后，将试样模具拆开，取出试样按标准进行养护，以待下一步试验。典型的注浆后试样如图 3 所示。



(a)



(b)

图 3 典型注浆后试样

Fig.3 Typical samples after grouting

### 2.5 试验方案

开展了注浆量、养护龄期、动水流速对注浆加固体抗冲刷特性影响的试验研究。注浆量以浆液充填率  $GFR$ (grouting filling rate)来定量描述,  $GFR$  为浆液体积与原土体孔隙体积之比, 分别设有 0%, 16%, 32%, 48%, 64%, 80% 六种。为研究水泥初凝前、初凝时及初凝后的抗冲刷特性规律, 养护龄期分别设为 10 min, 21 min, 1 d, 3 d 和 7 d。动水流速设 0.2, 0.4, 0.6 m/s 三种。同时, 为了研究全风化花岗岩初始含水量的影响, 增加 12%, 17%, 21.7%(饱和含水量)3 种含水量且流速为 0.4 m/s 的对比试验。试验共开展了 93 组, 具体试验方案见表 2。试验流程如下:

表 2 试验方案及试验结果  
Table 2 Test schemes and results

序号	$v/(m \cdot s^{-1})$	龄期	含水量/%	浆液结石体流失率/%					
				G-0	G-16	G-32	G-48	G-64	G-80
1	0.2	10 min	8.0	-	100	100.0	95.2	93.6	90.1
2	0.2	21 min	8.0	-	100	78.1	65.4	56.7	50.2
3	0.2	1 d	8.0	100	100	67.2	54.9	42.3	34.8
4	0.2	3 d	8.0	-	100	52.4	42.7	39.7	32.8
5	0.2	7 d	8.0	-	100	51.4	45.2	32.9	31.0
6	0.4	10 min	8.0	-	100	100.0	100.0	100.0	94.3
7	0.4	21 min	8.0	-	100	95.7	86.5	79.3	67.6
8	0.4	1 d	8.0	100	100	78.3	61.4	54.8	46.7
9	0.4	1 d	12.0	-	100	65.5	57.1	44.7	35.3
10	0.4	1 d	17.0	-	100	78.0	66.1	49.3	36.8
11	0.4	1 d	21.7	-	100	77.3	66.5	52.2	37.2
12	0.4	3 d	8.0	-	100	68.8	53.1	51.0	45.6
13	0.4	7 d	8.0	-	100	63.0	51.8	40.3	39.7
14	0.6	10 min	8.0	-	100	100.0	100.0	100.0	99.3
15	0.6	21 min	8.0	-	100	96.2	88.4	83.6	72.3
16	0.6	1 d	8.0	100	100	91.4	73.9	60.3	54.0
17	0.6	3 d	8.0	-	100	72.2	59.5	55.0	48.8
18	0.6	7 d	8.0	-	100	75.7	58.7	53.4	42.0

注:  $v$  为动水流速; G-0, G-16 分别为浆液充填率  $GFR$  为 0%, 16% 的试验, 其余类似。

- (1) 按照试验方案制好试样, 采用标准养护条件养护至不同龄期。
- (2) 采用浮标法测定水流流速, 并通过调节进水口阀门控制流速, 使水槽内流速分别为 0.2, 0.4, 0.6 m/s。
- (3) 将制好的试样称量( $m_0$ ), 放入水槽内试验。
- (4) 按照 10 s 30 s 60 s 90 s 120 s 180 s, 其后间隔 60 s 记录一次试样颗粒流失量, 直至 2 次记录时间下的颗粒流失量不超过 0.1 g 为止。
- (5) 将测得的试样颗粒流失量烘干并换算成原试样含水量条件下的质量  $m_s$ , 计算颗粒流失率  $PER$ , 并整理试验结果。

### 3 试验结果及试验分析

采用全面试验法对注浆加固体抗冲刷特性进行试验分析, 试验考察了不同的浆液充填率、动水流速、养护龄期及土体初始含水量影响, 共进行 93 组试验, 分别测定试验前加固体质量和试验后冲刷流失的颗粒质量, 计算得到颗粒流失率  $PER$ , 试验结果见表 2。

#### 3.1 浆液充填率对注浆加固体抗冲刷特性影响

图 4 为 1 d 龄期、不同浆液充填率下的注浆加固体颗粒流失率变化曲线。同一流速条件下, 浆液充填率较低时, 其对加固体抗冲刷特性没有明显改善, 随着浆液充填率提高, 颗粒流失率明显下降。以图 4(a) 为例, 浆液充填率为 0% 和 16% 的加固体颗粒流失

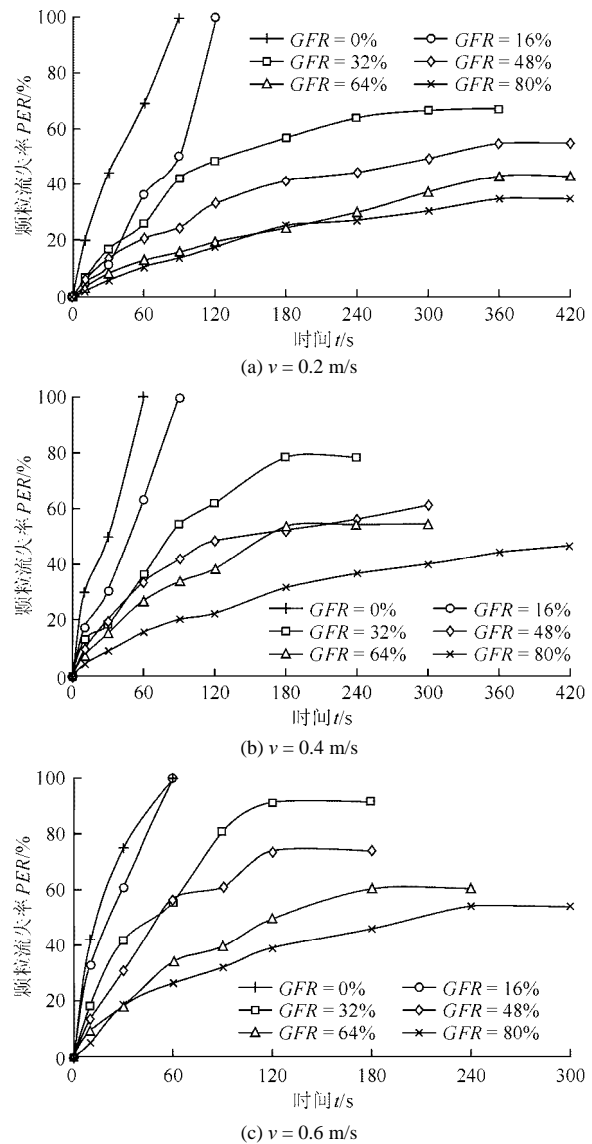


图 4 1 d 龄期不同流速下的加固体颗粒流失率变化曲线  
Fig.4 Relationship between  $PER$  and  $GFR$  under different water flow velocities at curing time of 1 d

率达到 100%，随着浆液充填率从 32% 提高至 80%，颗粒流失率从 67.2% 降至 34.8%。结合图 4, 5 可知，浆液充填率越低，加固体颗粒流失稳定时间越短，颗粒流失速率越大。以 0.2 m/s 为例，未注浆试样 90 s 即完全冲刷流失，而浆液充填率为 80% 的试样耗时 420 s 才达到稳定，颗粒流失率仅 34.8%，两者的流失速率分别为 1.11%/s 和 0.08%/s，相差近 14 倍。因此，注入适当的浆液能显著提高全风化花岗岩抗冲刷能力。

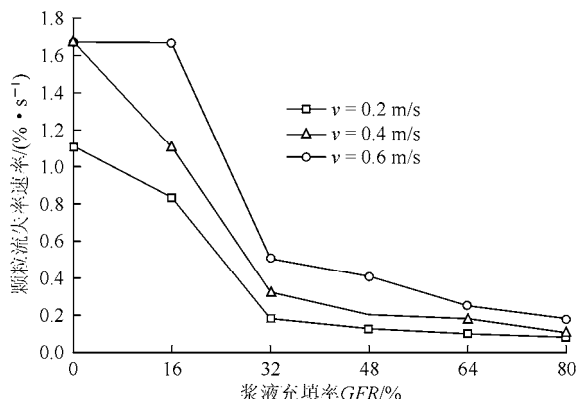


图 5 1 d 龄期下平均流失速率曲线

Fig.5 Curve of average PER rate at curing time of 1 d

此外，为了分析浆液充填率对全风化花岗岩微观结构的影响，开展了相应的扫描电镜分析(见图 6)。可见，提高注浆量一方面可显著减小全风化花岗岩的孔隙率(见图 6(a))；另一方面，浆液水化反应产生的水化产物(如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(AFt)等)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(见图 6(b))，使加固体的抗冲刷特性得到明显增强。

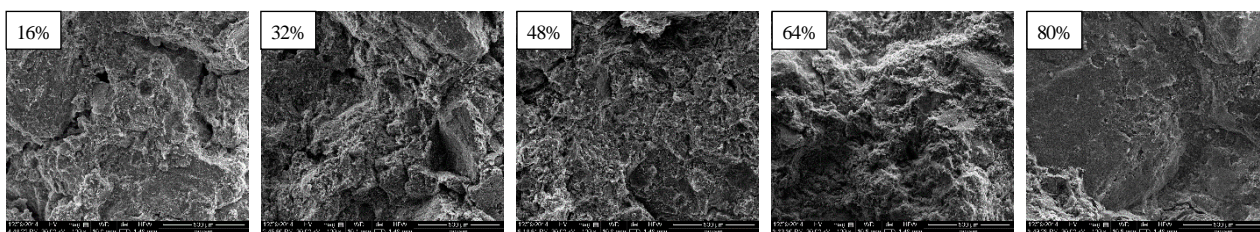
### 3.2 动水流速对注浆加固体抗冲刷特性影响

动水流速对加固体抗冲刷特性影响如图 7 所示，颗粒流失率随动水流速呈线性增大，但随着浆液充填率提高，其增长趋势放缓。当  $v = 0.2$  m/s 时，除浆液充填率为 16% 的试样外，其余试样颗粒流失率都低于 70%，最小仅为 34.8%。随着  $v$  提高至 0.4 m/s 时，除浆液充填率为 80% 的试样外，其余试样颗粒流失率均超过 50%；当  $v = 0.6$  m/s 时，所有试样颗粒流失率都超过 50%。说明  $v < 0.4$  m/s 时，通过改变注浆量可使颗粒流失率降低至 35% 以内，而  $v > 0.4$  m/s 时，所有试样颗粒流失率均超过 50%，仅靠提高注浆量无法显著降低颗粒流失率。

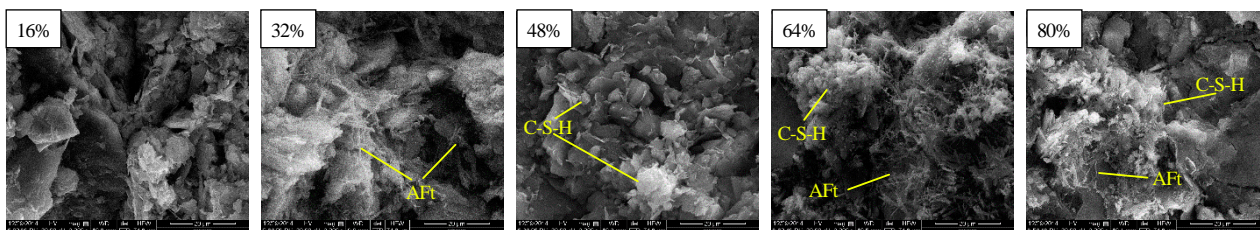
随着流速提高，加固体颗粒流失率增大，这源于流速的增大导致作用在加固体上的水流拖曳力增大<sup>[7]</sup>。低流速条件下，通过提高注浆量即可降低颗粒流失率，而在流速较大环境下，颗粒流失率较大，需结合通道封堵措施，切断渗流通道，降低渗流速度，再通过注浆提高注浆加固体抗冲刷特性。

### 3.3 养护龄期对注浆加固体抗冲刷特性影响

养护龄期对加固体抗冲刷特性影响见图 8，可以看出，浆液未达到初凝(10 min)前，加固体颗粒流失率非常高，达到 90% 以上；浆液初凝(21 min)后，浆液的加固效果显著提高，加固体颗粒流失率下降了近一半；随着龄期的继续增长(1 d)，浆液的加固作用继续加强，颗粒流失率仅为 31%，之后，随着龄期进一步增长，颗粒流失率不再继续增大。



(a) 放大 100 倍



(b) 放大 2000 倍

图 6 不同浆液充填率下注浆加固体 SEM 分析

Fig.6 SEM analysis of grout-stabilized soil under different grouting filling rates

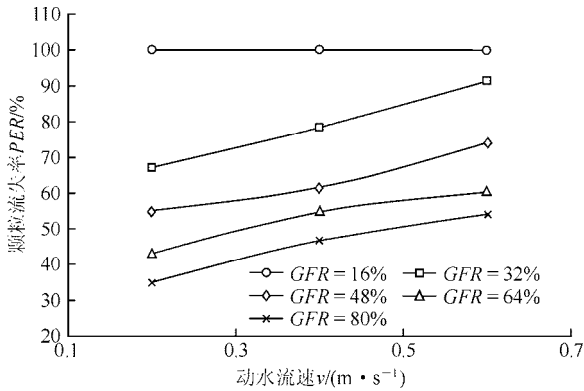


图7 1 d 龄期不同流速下的抗冲刷试验曲线

Fig.7 Curves of PER under different water flow velocities at curing time 1 d

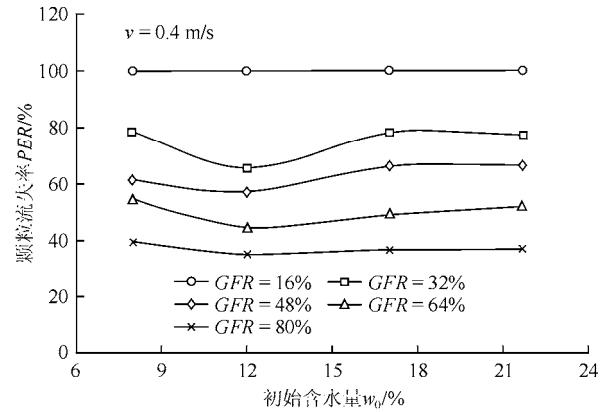


图9 不同含水量下加固体颗粒流失曲线

Fig.9 Curves of PER under different initial water contents

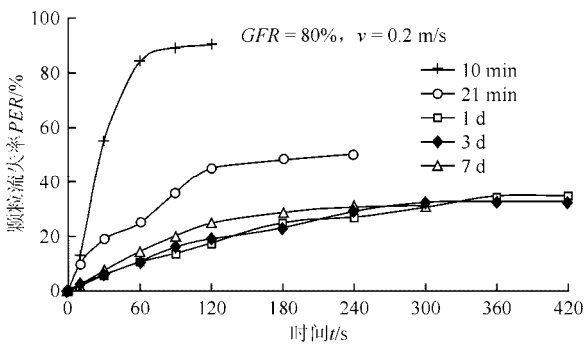


图8 不同龄期下加固体颗粒流失率变化曲线

Fig.8 Curves of PER under different curing times

龄期的提高促进水泥更加充分的水化，形成的水化硅酸钙、钙矾石等产物对土体的胶结作用更强，这也是加固体颗粒流失率随着龄期提高而不断下降的原因。而快硬硫铝酸盐水泥具有早强快硬特性，初期水化反应很快，3 d 龄期下即达到较大强度，而后期水化会有所下降，也就导致 3 和 7 d 龄期颗粒流失率相差不大的缘故。因此，对于实际工程中，尤其是快速转换的注浆工序，保证浆液的适当养护龄期是必要的，至少要超过浆液的初凝时间。否则，将无法保证浆液的凝胶而被水流冲刷流失。另外，对于突水防治工程，浆液类型、龄期等技术指标对于工程治理成功与否至关重要，较短的凝胶时间是保证浆液及注浆加固体在动水条件下不发生流失的关键技术要点。

### 3.4 初始含水量对注浆加固体抗冲刷特性影响

初始含水量对注浆加固体抗冲刷特性影响见图 9。可以看出，加固体颗粒流失率随含水量增大呈先减小后增大趋势，各浆液充填率下曲线均有相应的最大值和最小值，总体上表现为 17% 与 8% 的含水量对应最大颗粒流失率，12% 的含水量对应最小颗粒流失率，说明加固体抗冲刷能力存在一个最

佳含水量。但随着充填率提高，曲线趋于平缓，含水量对颗粒流失率的影响逐步降低。

含水量对加固体抗冲刷性能影响主要源于水泥水化特性，含水量偏低时，水泥水化不完全，生成的水化产物偏低，对土体加固能力有限；而含水量较高时，水泥水化完成后尚有多余水分，会导致水化产物(钙矾石)由于浓度偏低而结晶量太少，难以形成空间连锁加固网络，导致加固体的胶结强度也无法提高。

至于初始含水量对加固体颗粒流失率影响随浆液充填率提高而逐渐减小，可以理解为初始含水量对改变浆液水灰比的影响减小，G. M. Filz 等<sup>[13]</sup>提出用总水灰比概念来考虑含水量对固化土强度特性的影响。总水灰比公式为

$$(w/c)_t = [w_c(w/c)_i + w_0] / w_c \quad (1)$$

式中： $(w/c)_t$  为总水灰比， $(w/c)_i$  为配制的水灰比， $w_c$  为水泥掺量， $w_0$  为土样初始含水量。

由此可见，总水灰比水分由土体初始含水量和配置浆液所含水分两部分组成。显然，对于固定的土样含水量及给定配制的水灰比水泥浆，随着水泥充填量  $w_c$  增加，土样初始含水量对总水灰比的影响逐渐减小。以本文试验参数为例，图 10 为初始含水量为 17% 的土样总水灰比与初始含水量对水灰比的贡献值随浆液充填率变化规律。当浆液充填率 GFR 为 16% 时，总水灰比为 2.06，而初始含水量与水泥比值达 1.06，占总水灰比 50% 以上。此后随浆液充填率增加，初始含水量对水灰比的贡献明显下降，最小仅占总水灰比 17% (GFR = 80%)。这也就解释了随浆液充填率提高，含水量对加固体颗粒流失率影响逐渐减小的原因。

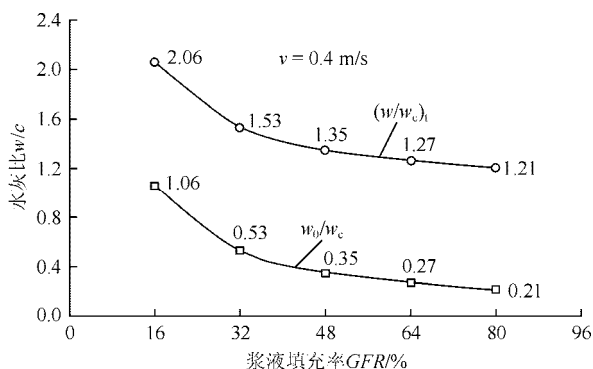


图 10 试验水灰比随浆液充填率变化曲线

Fig.10 Ratios of water to cement under different grouting filling rates

### 3.5 浆液胶结土体特性分析

浆液的扩散半径及浆液对被注地层有效胶结范围是工程实践中注浆量、注浆孔布置等注浆方案确定的重要因素，为了定量分析浆液对周围土体的胶结固化特性，定义浆液胶结率  $GCR$ (grout cementation ratio)为动水条件下加固体受水流冲刷残留的结石体质量与所注注浆量之比。

不同流速下的浆液胶结率与浆液充填率关系如图 11 所示。浆液胶结率与浆液充填率呈二次抛物线规律变化，且抛物线峰值随着流速的提高而向高注浆量方向移动(见图中带箭头虚线)。图 11 表明，注浆量过高或过低，浆液胶结率都偏低，只有在最佳注浆量时，浆液胶结率才能达到最大值。针对浆液胶结率峰值随流速的提高向高注浆量方向偏移的现象，可做如下解释：低流速条件下，注浆加固体颗粒受到水流冲刷力较小，少量的浆量能充分发挥其胶结作用；而在高流速下，颗粒受到的冲刷力明显加大，较小的注浆量对土体的胶结作用有限，相应的注浆量也要求更高，但过高的注浆量由于土体孔隙及劈裂通道有限，无法充分发挥浆液的胶结作用而导致其浆液胶结率降低。

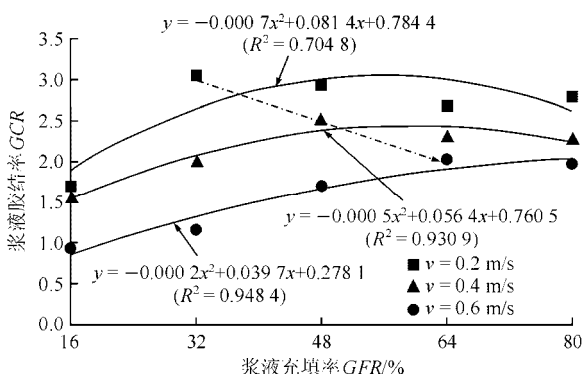


图 11 不同流速下浆液胶结率与浆液充填率曲线

Fig.11 Relationship between  $GCR$  and  $GFR$  under different water flow velocities

从图 11 可知，流速的提高显著降低浆液胶结率， $v = 0.2 \text{ m/s}$  时，各浆液充填率下的浆液胶结率全在 1.7 以上，最大达到 3.0 以上。当  $v$  增至  $0.4 \text{ m/s}$  时，浆液胶结率为  $1.5 \sim 2.5$ ，较  $0.2 \text{ m/s}$  流速条件下的浆液胶结率下降了  $10\% \sim 35\%$ 。当  $v$  继续增大至  $0.6 \text{ m/s}$  时，其浆液胶结率进一步下降，最低仅为  $0.7$ ，最大不超过  $2.0$ 。较  $0.2 \text{ m/s}$  流速条件下的胶结率下降了  $24\% \sim 74\%$ 。

从图 12 更直观看出，注浆量较小时，浆液仅在注浆管口附近挤密形成较小的浆泡<sup>[14]</sup>，残余的结石体集中在注浆管口。随注浆量增大，浆泡明显增大，周边土体加固得到加强。结石体形态由初始的锥形体向四周较为均匀的长方体或椭球体演变。但流速提高后，浆液加固范围明显减小，以浆液充填率为  $80\%$  为例，流速为  $0.2, 0.4, 0.6 \text{ m/s}$  的结核体尺寸(球体近似直径)分别为  $3.5 \sim 4.0, 3.0 \sim 3.5, 1.5 \sim 3.0 \text{ cm}$ ，逐渐减小。

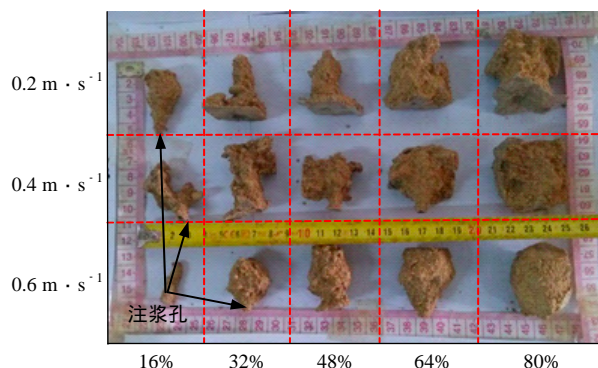


图 12 抗冲刷试验后结石体形态

Fig.12 Morphology of aggregated masses after experiment

随着流速提高，浆液胶结率大幅度下降。一方面需要提高总的注浆量来加大对周围土体加固，另一方面，需根据不同流速条件下浆液胶结率与注浆量变化关系来确定合适的浆液胶结率，从而对浆液最为有效的利用。实际工程中对浆液有效加固范围的提高可通过加密注浆孔的布置，同时减少单孔的注浆量，使浆液胶结率达到最大，但注浆孔施工工程量较大其布置也不宜过密，需要根据实际工程地质与水文地质条件确定最佳范围。

## 4 隧道突水突泥注浆工艺讨论

### 4.1 注浆量的探讨

目前，注浆量的理论计算还存在很多问题，过去推导的渗透注浆公式<sup>[15-16]</sup>大多从牛顿流体导出，不考虑浆液的时变特性，由此导出的渗透注浆公式

在工程中更经常直接被用于劈裂及挤密注浆。首先两者在理论上的明显差异导致的注浆量无法正确确定；其次，决定注浆量及注浆孔布置的浆液扩散半径与实际地层浆液有效加固范围仍有不同，即使在浆液扩散半径内，由于注浆压力沿扩散路径衰减及区域含水量不同等常常导致地层内加固效果不同，仍有可能在动水条件下局部薄弱区域发生颗粒流失而形成突水通道。

为此，本文在试验的基础上，从浆液的有效加固范围和抗冲刷特性提出一种新的注浆量计算方法，该方法能够考虑注浆加固体在动水条件下的颗粒流失率和浆液胶结率，避免过去理论计算公式及浆液扩散半径带来的不足，更为实际、安全、可靠地对注浆量  $Q_c$  进行计算。计算公式如下：

$$Q_c = Q_1 / GCR = (Q_s + Q_c - Q_e) / GCR \quad (2)$$

将  $Q_e = (Q_s + Q_c)PER$  代入式(2)可得

$$Q_c = Q_s(1 - PER) / (GCR + PER - 1) \quad (3)$$

式中： $Q_c$  为考虑浆液胶结率且满足抗冲刷特性的注浆量； $Q_1$  为地层注浆后胶结的加固体质量； $Q_s$  为需注浆地层土体质量； $Q_e$  为满足工程安全的颗粒流失量； $GCR$  为浆液胶结率，由试验确定。

需要说明的是：第一，该注浆量计算公式仅考虑浆液有效注入土体加固所需的浆液，对于配浆及浆液遇动水分散等造成的损失暂不考虑；第二，本文试验加固体颗粒流失率均较高，最低的也达到30%，这主要是由于试验条件为试样完全淹没且四周遇水冲刷的最不利工况导致，实际工程一般是孔隙、裂隙通道边壁颗粒遇一定的流速冲刷，对此还需进一步试验研究。

#### 4.2 全风化花岗岩初始含水量的影响及分区治理

初始含水量对颗粒的流失影响主要体现在水泥水化完成程度和水泥水灰比变化上，对于全风化花岗岩抗冲刷特性，存在一个最佳含水量，隧道地层岩土体由于裂隙、孔隙发育程度不同、区域赋水特性不同等原因，常导致隧道不同区域土体含水量存在差异。对此，可采取分区治理原则，一方面，通过调节浆液的水灰比来降低初始含水量的影响，在含水量较高区域，采用水灰比较低的浆液配比，反之则采用浆液配比较高的稀浆；另一方面，可通过对地层采用排水或增湿措施使地层含水量达到最佳值，在含水量较高的富水区域，通过封堵水流补给通道，加大排水措施，降低土体含水量。在低含水量区域，可采用式(4)对地层增湿量  $Q_w$  进行计算：

$$Q_w = r_d(w_m - w_0)V \quad (4)$$

式中： $Q_w$  为增湿量， $r_d$  为土层的干容重， $w_m$  为最佳含水量， $w_0$  为土体初始含水量， $V$  为加湿土层的体积。综合各项措施最大限度提高全风化花岗岩加固体抗冲刷特性。

## 5 结 论

为了研究劈裂及挤密注浆后的全风化花岗岩加固体颗粒流失及抗冲刷特性，自行设计注浆试样制备和抗冲刷试验装置，利用该试验装置开展了注浆量、动水流速、养护龄期、初始含水量对注浆加固体的颗粒流失和抗冲刷特性试验研究，并定义颗粒流失率作为注浆加固体抗冲刷评价指标，通过系统开展硫酸盐水泥在不同因素下的抗冲刷试验，得到以下结论：

(1) 注浆量较低时加固体抗冲刷特性较差，随着注浆量提高，颗粒流失率明显降低，抗冲刷特性明显增强。动水流速的提高显著加大颗粒流失，且低流速( $v < 0.4$  m/s)条件下，通过改变注浆量可降低流失率至35%以内，而流速较大( $v > 0.4$  m/s)条件下，颗粒流失率均超过50%，仅靠提高注浆量无法显著降低流失率。

(2) 注浆加固体抗冲刷特性还与其浆液的养护龄期、试样初始含水量有关，浆液的养护龄期低于其初凝时间时颗粒流失率非常大，适当延长加固体的养护时间有助于抗冲刷特性的提高。另外，加固体抗冲刷特性存在一个最佳含水量，含水量过低及过高时，加固体抗冲刷特性均较差。

(3) 浆液胶结率与注浆量呈二次抛物线规律变化，随流速提高，浆液胶结率不断下降，浆液胶结率峰值向高注浆量方向移动。

(4) 根据试验结果，提出突水治理时注浆量的计算方法，并根据全风化花岗岩初始含水量对抗冲刷特性影响提出分区治理的原则，采取不同浆液配比，地层加湿及降水等技术措施分别对不同含水量地层进行分区治理。

#### 参考文献(References)：

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1 945 - 1 956. (QIAN Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. 2012, 31(10): 1 945 - 1 956. (in Chinese))
- [2] 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[博士



- 学位论文[D]. 北京：中国科学院大学，2014.(YUAN Jingqiang. Mechanism of grouting and treatment technology of water inrush disaster in water-rich weathered granite tunnels[Ph. D. Thesis]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2014.(in Chinese))
- [3] STERPI D. Effect of the erosion and transport of fine particles due to seepage flow[J]. International Journal of Geomechanics，2003，3(1)：111-122.
- [4] CIVIDINI A，GIODA G. Finite-element approach to the erosion and transport of fine particles in granular soils[J]. International Journal of Geomechanics，2004，4(3)：191-198.
- [5] 罗玉龙. 堤防渗流控制技术及管理机制研究[博士学位论文][D]. 武汉：武汉大学，2009.(LUO Yulong. Studies on seepage control of levee and piping mechanism[Ph. D. Thesis]. Wuhan：Wuhan University，2009.(in Chinese))
- [6] 姚邦华. 破碎岩体变质量流固耦合动力学理论及应用研究[博士学位论文][D]. 徐州：中国矿业大学，2012.(YAO Banghua. Research on variable mass fluid-solid coupling dynamic theory of broken rock mass and application[Ph. D. Thesis]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2012.(in Chinese))
- [7] 钱宁，万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京：科学出版社，1983：256-258.(QIAN Ning，WAN Zhaohui. Sediment transport mechanics[M]. Beijing：Science Press，1983：256-258.(in Chinese))
- [8] 韩其为，何明民. 泥沙起动规律及起动流速[M]. 北京：科学出版社，1999：59-69.(HAN Qiwei，HE Mingmin. Sediment starting law and starting speed[M]. Beijing：Science Press，1999：59-69.(in Chinese))
- [9] 王银梅，韩文峰，谔文武. 新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究[J]. 岩土力学，2004，25(11)：1761-1765.(WANG Yinmei，HAN Wenfen，CHEN Wenwu. Research on comparison between mechanical behaviors of loess solidified with new polymer material and cement[J]. Rock and Soil Mechanics，2004，25(11)：1761-1765.(in Chinese))
- [10] 范晓秋，洪宝宁，胡昕，等. 水泥砂浆固化土物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报，2008，30(4)：605-610.(FAN Xiaochu，HONG Baoning，HU Xin，et al. Physico-mechanical properties of soils stabilized by cement mortar[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2008，30(4)：605-610.(in Chinese))
- [11] 薛慧君，申向东，邹春霞，等. 水泥土早期力学性能影响因素分析[J]. 硅酸盐通报，2014，33(8)：2056-2062.(XUE Huijun，SHEN Xiangdong，ZOU Chunxia，et al. Analysis of the factors affecting the early mechanical properties of cement soil[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2014，33(8)：2056-2062.(in Chinese))
- [12] 王增红，朱崇辉，刘俊民，等. 黏质水泥土渗透变形模型初探[J]. 人民黄河，2014，36(7)：131-133.(WANG Zenghong，ZHU Chonghui，LIU Junmin，et al. Exploration of penetration deformation model of cement soil[J]. Yellow River，2014，36(7)：131-133.(in Chinese))
- [13] FILZ G M，HODGES D K，WEATHERBY D E，et al. Standardized definitions and laboratory procedures for soil-cement specimens applicable to the wet method of deep mixing[J]. Innovations in Grouting and Soil Improvement，2005：1-13.
- [14] 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))
- [15] 杨志全，侯克鹏，梁维，等. 牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式扩散参数的研究[J]. 岩土力学，2014，35(增2)：17-24.(YANG Zhiquan，HOU Kepeng，LIANG Wei，et al. Study of diffusion parameters of Newtonian fluid based on column-hemispherical penetration grouting[J]. Rock and Soil Mechanics，2014，35(Supp.2)：17-24.(in Chinese))
- [16] 邝健政. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京：北京出版社，2001：53-60.(KUANG Jianzheng. Geotechnical grouting theories and case histories[M]. Beijing：Beijing Press，2001：53-60.(in Chinese))