

DOI: 10.11779/CJGE201612013

富水破碎岩体注浆加固模拟试验及应用研究

李召峰^{1,2}, 李术才¹, 张庆松¹, 蒋宇静^{2,3}, 刘人太¹, 杨磊^{*1}, 白继文¹, 沙飞¹, 陈泊涵¹, 吴学震^{2,3}

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 长崎大学工学部地盘环境研究室, 日本 长崎 8528521;

3. 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点试验室培育基地, 山东 青岛 266510)

摘要: 设计了一套适用于富水破碎岩体的注浆加固模拟试验装置。选用 PO42.5 水泥、SAC42.5 水泥和自主研发材料对富水破碎灰岩体进行了注浆加固试验。在分析加固结石体的单轴压缩试验结果的基础上, 研究了注浆压力、注浆材料和破碎岩体间泥质充填物对注浆加固效果的影响和作用规律。采用极差分析法确定了影响注浆加固效果的主控因素及各因素间相互作用关系。验证了自主研发材料用于富水破碎岩体注浆加固治理的效果显著优于传统水泥材料。将上述试验结论成功用于指导工程实践, 取得了良好的注浆治理效果。

关键词: 富水破碎岩体; 注浆加固; 模拟试验; 抗压强度

中图分类号: TU472.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)12-2246-08

作者简介: 李召峰(1986-), 男, 博士, 讲师, 主要从事地下工程水害治理及注浆材料研发方面研究。E-mail: lizf68@126.com。

Model tests on grouting reinforcement of water-rich broken rock mass

LI Zhao-feng^{1,2}, LI Shu-cai¹, ZHANG Qing-song¹, JIANG Yu-jing^{2,3}, LIU Ren-tai¹, YANG Lei¹, BAI Ji-wen¹, SHA Fei¹, CHEN Bo-han¹, WU Xue-zhen^{2,3}

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Geoenvironmental Laboratory, Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 8528521, Japan; 3. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: An experimental device for testing the grouting reinforcement of water-rich broken rock mass is designed. Grouting reinforcement tests are conducted on the water-rich broken lime rock mass by using cement PO42.5, cement SAC42.5 and self-developed materials. By analyzing on the results of the uniaxial compression tests on reinforced rock samples, the influences of the grouting pressure, grouting materials and argillaceous filler inside the broken rock mass on the grouting effectiveness are studied. ANOVA is adopted to determine the dominant factors which influence the grouting effectiveness and their interior interactions. The self-developed materials are proved to have better performance than Portland and Sulfur-aluminate cement materials. The test results are successfully applied to engineering practice with a good grouting effect.

Keywords: water-rich broken rock mass; grouting reinforcement; model test; compressive strength

0 引言

富水破碎岩层是岩土工程领域时常遭遇的一种不良地质体, 由于岩体破碎含水, 并伴有泥质胶结物和风化碎屑, 导致围岩承载力差, 给地下工程开挖建设造成极大的安全隐患。

针对不良地质体, 注浆作为最为有效的一种治理方式, 在岩土工程领域得到了广泛应用。特别是针对富水破碎地层, 为提高围岩自承能力, 改善围岩隔水性能, 常用预注浆方法进行加固处置, 以保证地下工程安全顺利通过和运营稳定。由于地下工程条件的隐蔽和复杂性, 影响富水破碎岩体注浆加固封堵效果的

因素十分复杂。如注浆时压力设定、钻孔布设、注浆材料选型、水灰比选取, 岩体破碎程度、充填介质等。国内外学者也开展了大量相关研究工作, 葛家良等^[1]、杨坪等^[2]通过注浆模拟试验, 分析了注浆加固强度与各影响因素对关系, 并在工程中加以应用。宗义江等^[3]、李术才等^[4]通过注浆模拟试验研究了破裂岩体注浆前后结石体的力学变化的差异性能。雷进生等^[5]、

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB036001); 国家自然科学基金青年项目(51309146); 国家自然科学基金青年项目(51509146)

收稿日期: 2016-01-21

***通讯作者:** (E-mail: yanglei@sdu.edu.cn)

Bezuijen 等^[6]研究了非均质地层注浆扩散特性与加固结石体的力学关系。Bolton 等^[7]、刘彦伟等^[8]研究了水泥类注浆材料与加固体强度的关系。许宏发等^[9]通过总结大量学者的研究结论,开展了破碎岩体注浆加固强度估计方面的研究。相关学者通过研究还发现虽然环氧树脂、聚氨酯类化学溶液类材料可以有效进入岩体微裂隙和空隙,不易被水冲刷流失,能够起到良好的注浆治理效果,但其成本高、结石体强度较低且易老化^[10-11]。水泥类材料浆液为悬浊液,有时难以完全注入岩体微裂隙和空隙中,但其结石体强度高,无污染,成本低,在实际大型注浆工程中仍作为首选材料^[12-14]。

通过自主设计的富水破碎岩体注浆模拟试验装置,研究了水泥基注浆材料、注浆压力和泥质充填物对注浆加固效果的影响,并将试验结论用于现场工程实践,取得了良好的治理效果,以期为富水破碎岩体的注浆加固治理提供指导。

1 试验装置与试验方法

1.1 试验装置说明

富水破碎岩体注浆模拟试验系统主要包括地层模拟模块、地下水供给模拟模块、注浆系统模块。富水破碎地层模拟模块采用三维钢结构加工制成,充填尺寸为 850 mm×650 mm×650 mm,由 6 块 10 mm 厚带肋钢板通过精钢螺丝拼装成,方便拆卸和重复利用,采用橡胶垫完成密封,最高可以承载 10 MPa 注浆压力。装置上顶部设注浆孔一个,侧面设进出水孔各一个。

注浆系统模块主要包括注浆泵送装置、动力装置、搅拌装置和浆液输送装置,以及注浆花管,压力表,高压管路等。具体装备型号与性能见表 1。

表 1 注浆设备型号与性能

Table 1 Types and performances of grouting equipments		
装备类别	组成设备	性能
注浆泵送装置	注浆泵	注浆量 0~30 L/min 范围内无极变速,最大注浆压力 3 MPa
搅拌装置	气动搅拌机	50~400 转/min 内转速可调,水泥浆与化学液分别采用不同的搅拌机
	搅拌桶	浆液容积 200 L
动力装置	空气压缩机	供风量 09 m³/min, 风压 0.5±0.02 MPa
浆液输送装置	高压输浆管	内径 12.5 mm, 最大耐受压力 20 MPa
	混合器	被动静态螺旋混合器,螺旋段长 20 cm

在试验中采用静态水对模拟试验平台进行水源供给,确保被注介质处于富水状态,设计供水装置尺寸为设计尺寸为 400 mm×400 mm×400 mm,放置高度为 3 m。富水破碎岩体注浆模拟系统如图 1 所示。



图 1 注浆模拟试验装置整体布置

Fig. 1 Layout of model tests

1.2 试验方法

(1) 材料选型: 普通硅酸盐水泥 (PO), 标号 #42.5; 硫铝酸盐水泥 (SAC), 标号 #42.5; 自主研发的水泥基复合材料 (CGM)。在水灰比为 1:1 时, 3 种材料的基本物理力学性能如表 2 所示。

表 2 试验用注浆材料基本物理力学性能

Table 2 Basic physical properties of grouting materials						
名称	比表面积 (m²·kg⁻¹)	凝结时间		抗压强度/MPa		结实率 /%
		初凝	终凝	3 d	28 d	
PO.42.5	385	15.1 h	21.5 h	4	13	67.8
SAC.42.5	385	3.7 h	8.7 h	8	15	70.1
CGM	436	52 min	92 min	13	35	89.5

(2) 地层模拟: 试验选用粒径区间为 3~24 cm 的灰岩试块,并将其划分为 8 个粒径区间。采用充填体空隙率误差小于±1%为评价依据,采用随机筛检方式和上表面充填密实为原则进行充填,如图 2,3 所示。通过注水方式进行空隙率测试,分别对应空隙率为 PO-48.65%, SAC-49.59%, CGM-48.77%, 误差均小于 1%,能够到达试验要求。



图 2 地层模拟平台充填照片

Fig. 2 Filling of platform

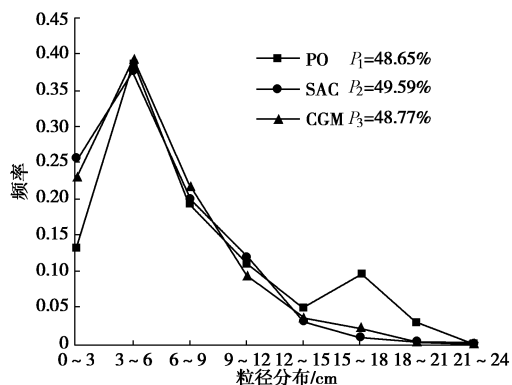


图3 充填破碎岩块的粒径分布曲线与孔隙率
Fig. 3 Relationship between porosity and rock size

(3) 注浆控制：为便于对比分析，试验中浆液的水灰比均为 1：1，注浆速率为 5 L/min。注浆开始时，先关闭模型下部进水阀门，当模型上部阀门出现浆液时，关闭上部出水阀门，继续注浆，达到设计终压后，稳压 10 min。达到浆液初凝时，开启进水和出水阀门，使注浆系统保持与供水系统连接，确保注浆结束后模拟地层处于富水状态。试验中每隔 1 min 记录一次注浆压力，并记录达到注浆终压的时间。

2 试验结果分析与讨论

2.1 注浆材料选型对加固效果的影响

为对比不同注浆材料的加固效果，试验对灰岩原岩进行了单轴压缩试验测试，测试结果如表 3 所示。

表 3 灰岩单轴压缩试验结果

Table 3 Uniaxial compression test results of limestone					
试样名称	平均抗压强度/MPa	平均残余强度/MPa	试样编号	单轴抗压强度/MPa	残余强度/MPa
灰岩	53.6	11.3	L-1	52.8	13.1
			L-2	57.7	9.8
			L-3	49.8	11.1
			L-4	54.9	10.4
			L-5	51.8	12.1

表 4 为 3 种注浆材料在设计终压为 2 MPa 时加固结石体 28 d 试样的单轴压缩强度测试结果。由表 4 中数据可知，破碎岩体注浆后，加固结石体强度较注浆前强度有显著提高通，PO 和 SAC 材料加固系数分别为 2.01 和 2.05，CGM 材料加固系数则为 3.28。说明 CGM 材料对富水破碎岩体的注浆加固效果显著优于 PO 和 SAC 两种材料。

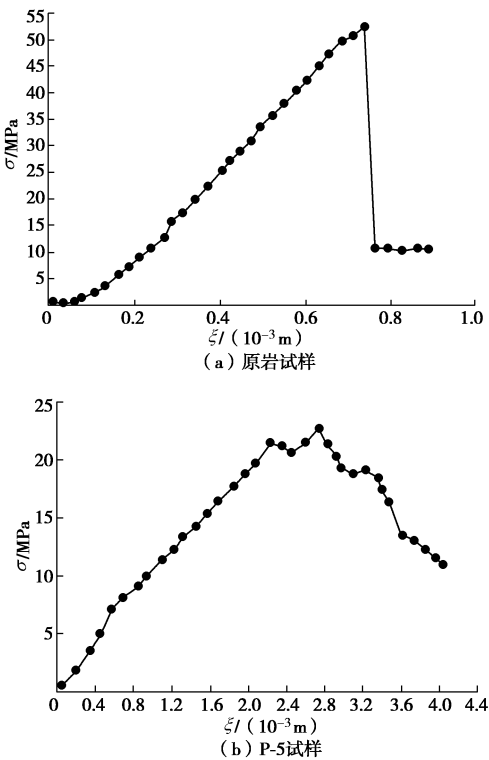
图 4 为原岩及 3 种材料加固结石体试样的应力应变曲线。图 4 (a) 为原岩的应力 - 应变曲线，该曲线平滑，没有明显的波动，说明原岩致密度高，内部孔隙不发育，具有较好的刚性；由图 4 (b)、(c) 可以看出，注浆后，应力 - 应变曲线出现较大的波动，

表明 PO 和 SAC 两种材料对应加固结石体内部仍有缺陷或未充填空隙。在试验过程中，随着压力的增大，内部裂隙和未完全充填区域弱化严重，导致岩体承载力降低，造成岩体达到屈服极限前应力增大，此时岩体变形为弹性变形，但变形量在增大；同时 PO 和 SAC 材料其浆液析水率较高，体积干缩大，也极易导致结石体内部出现干缩裂隙或析水引起的空隙。由图 4 (d) 可以看出，CGM 注浆材料加固结石体应力与应变曲线屈服前与原岩最为相近，说明结石体内部充填致密，空隙率低，CGM 材料加固和充填效果显著优于 PO 和 SAC 材料。

表 4 注浆加固结石体单轴压缩强度测试结果

Table 4 Uniaxial compression test results of grouting-reinforced samples				
材料类别	平均单轴强度 /MPa	加固系数	试样编号	单轴抗压强度 /MPa
PO	22.7	2.01	P-1	21.6
			P-2	24.4
			P-3	23.4
			P-4	20.8
			P-5	23.3
SAC	23.2	2.05	S-1	26.1
			S-2	21.5
			S-3	22.8
			S-4	20.7
			S-5	24.9
CGM	37.1	3.28	C-1	40.2
			C-2	38.6
			C-3	34.5
			C-4	36.5
			C-5	35.7

注：加固系数为注浆加固结石体单轴压缩强度与原岩峰后残余强度的比值。



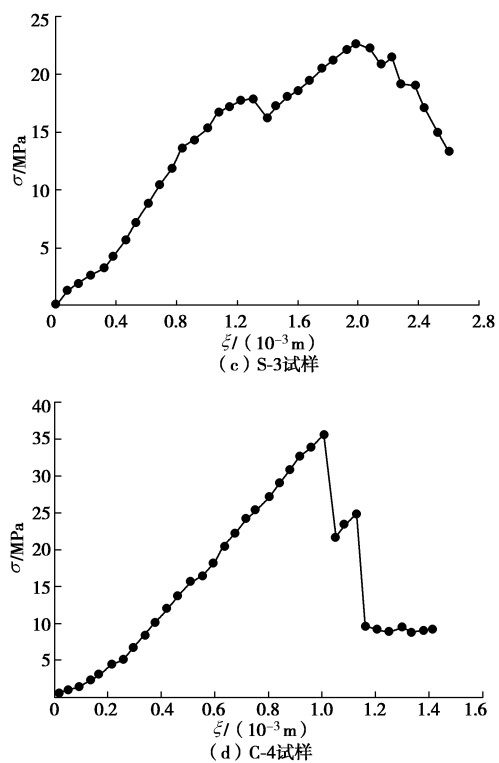


图 4 灰岩注浆前后应力 - 应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of stone before and after grouting

由图 4 中各试样应力 - 应变曲线可发现, 原岩试样达到屈服极限后立即破坏, 轴向应力迅速下降, 在短时间内即到达峰后的残余强度。结合试验过程中试样破坏现象, 如图 5 所示, 分析可知注浆结石体在所受应力达到峰值后下降幅度较小, 进入残余强度阶段, 加固结石体内部存在剪切滑移面, 导致结石体发生轴向的拉张劈裂, 并造成结石体中材料与破碎岩体表面脱离, 显示沿岩浆界面的脆性破坏。而 CGM 材料试样沿岩浆界面破坏的机率要远小于 PO 和 SAC 材料试样, 在峰后迅速出现轴向应力降低, 在峰后阶段进入应变软化或塑性流动阶段才会出现岩浆胶结面的破坏。

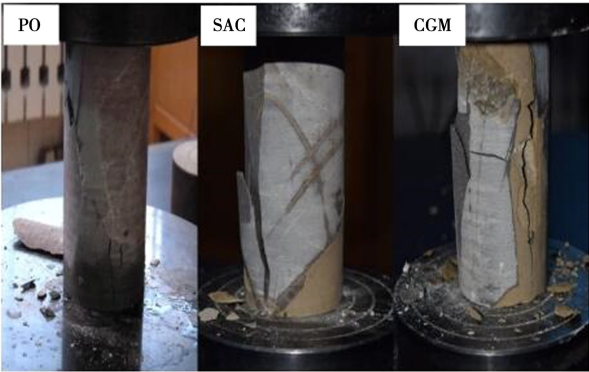


图 5 不同浆液结石单轴压缩试验

Fig. 5 Uniaxial test photos of different grouting reinforced samples

通过对比各试样应力 - 应变曲线和观测试验过程中现象, 注浆前岩体表现为显著脆性, 弹性模量大, 变形很小即发生瞬间崩裂。注浆后轴向应变开始增大,

其中以 PO 试样的变形最大 2.9%, SAC 试样变形最大为 2%, CGM 试样变形较小, 为 1.1%, 说明注浆加固后破碎岩体与原岩相比塑性增大。3 种材料结石体相比, CGM 试样刚性更强, 加固系数更高。在实际工程应用过程中, 既可以起到围岩二次受力时释放应力的作用, 又能保证围岩具有较高的强度和稳定性^[3, 15]。

2.2 注浆压力对加固效果作用规律

富水破碎岩体的注浆加固, 注浆压力对浆液在地层中的扩散、空裂隙充填和岩浆胶结能力具有显著影响^[9]。因此, 确定注浆压力与加固效果的关系对指导工程实践具有重要意义。

表 5 为注浆终压分别为 1, 3 MPa 时 3 种注浆材料加固结石体试样单轴强度测试结果。图 6 为综合表 4, 5 试验结果获得的不同试验条件下注浆加固系数曲线。由图 6 可知, 富水破碎岩体注浆加固系数与注浆压力密切相关, 随着注浆压力的升高, 加固系数显著增大。说明浆液在高压作用下对破碎岩体内空裂隙形成劈裂作用, 浆液进入微裂隙或微小空隙中的数量增大, 破碎岩体充填密实度升高, 同时浆液压滤效果更显著, 浆液中作为运移材料颗粒的溶剂水能够快速析出, 提高了浆液的结石率和致密度^[12]。

表 5 不同注浆压力条件下注浆加固结石体的单轴抗压强度
Table 5 Uniaxial compression test results of grouting-reinforced samples under different pressures

材料类型	注浆压力 /MPa	平均抗压强度/MPa	加固系数	试样编号	单轴抗压强度/MPa
PO	1.0	20.3	1.80	P-6	19.2
				P-7	21.9
				P-8	19.7
	3.0	24.1	2.12	P-9	25.6
				P-10	22.9
				P-11	23.8
SAC	1.0	20.5	1.81	S-6	20.6
				S-7	22.3
				S-8	18.7
	3.0	24.7	2.19	S-9	25.7
				S-10	22.6
				S-11	25.8
CGM	1.0	35.6	3.15	C-6	36.1
				C-7	37.2
				C-8	33.8
				C-9	32.7
				C-10	38.3
				C-11	36.1
	3.0	37.5	3.32	C-12	37.4
				C-13	37.5
				C-14	39.7
				C-15	36.9

PO 和 SAC 材料相比,CGM 材料试样加固系数虽也随着注浆压力升高而增大, 但受影响较弱, 加固效果仍显著优于前两种材料。说明 CGM 材料更适合用于富水破碎地层的注浆加固治理, 特别是在对注浆压力敏感或围岩支护条件较差的工况下, 更易于注浆工

程的实施。

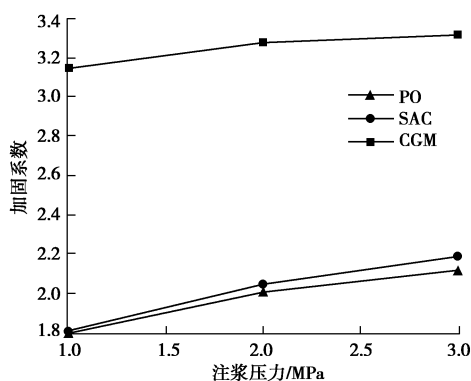


图 6 注浆压力与加固系数的关系曲线

Fig. 6 Relationship between grouting pressure and reinforce coefficient

2.3 泥质充填物对加固效果的影响

在富水破碎地层中，由于地下水的运移冲刷或风化作用，破碎岩体裂隙内部往往充填有泥质类胶结物存在，这些胶结物附着于岩体表面，在一定程度上充填了岩体裂隙，但黏接强度低，在地下水流动状态发生大的变化时，易被冲出裂隙，注浆过程中，可与浆液相互作用，影响富水破碎岩体的注浆治理效果。试验中，采用黏土浆液对破碎岩体浸泡后再充填地层模拟平台，黏土浆液水灰比为 1：1，注浆结石体的单轴压缩试验结果如表 6 示。

表 6 泥质胶结物存在时注浆结石体单轴抗压强度

Table 6 Uniaxial compression test results of grouting-reinforced clay samples

材料类型	注浆压力 /MPa	平均抗压强度/MPa	加固系数	试样编号	单轴抗压强度/MPa
PO	1	15.8	1.40	P-12	16.5
				P-13	15.7
				P-14	15.2
	2	18.3	1.62	P-15	18.2
				P-16	19.1
				P-17	17.7
	3	20.6	1.82	P-18	20.5
				P-19	21.6
				P-20	19.7
SAC	1	16.6	1.47	S-12	16.2
				S-13	15.9
				S-14	17.6
	2	19.6	1.73	S-15	18.9
				S-16	19.7
				S-17	20.2
	3	21.6	1.91	S-18	22.5
				S-19	21.8
				S-20	20.6
CGM	1	32.2	2.85	C-16	32.1
				C-17	30.7
				C-18	33.9
	2	34.6	3.06	C-19	32.9
				C-20	34.4
				C-21	36.5
	3	35.0	3.10	C-22	33.6
				C-23	36.2
				C-24	35.2

图 7 为黏土对不同试验条件下注浆加固试样的影响曲线。由表 5 和图 7 可知，PO 材料试样加固系数衰减最为明显，在注浆压力为 1 MPa 时由 1.8 减小到 1.40，衰减率为 22.2%，SAC 试样衰减率为 18.9%，CGM 试样衰减率为 9.5%。随着注浆压力的升高，加固系数衰减程度减弱，在注浆压力为 3 MPa 时，PO 试样加固系数衰减率为 14.2%，SAC 试样衰减率为 12.8%，CGM 试样衰减率为 6.6%。说明泥质介质能够降低注浆结石体的强度，与未加入泥质介质试样相比，PO 和 SAC 试样受影响更大，而 CGM 受影响相对较弱，注浆压力升高，泥质介质对注浆效果的影响作用变弱。

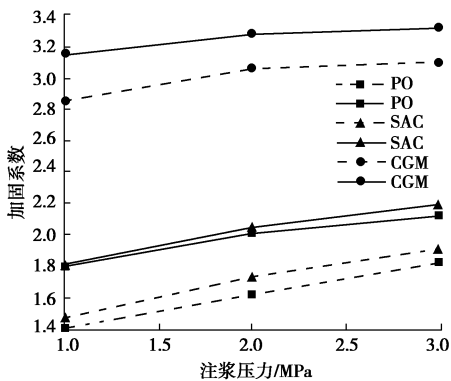


图 7 黏土介质与加固系数的关系曲线

Fig. 7 Relationship between clay and reinforce coefficient

黏土主要化学组分为硅氧化物和铝氧化物，物化学性质较为稳定，在岩浆胶结界面起到了润滑作用，降低了岩浆界面胶结强度，在单轴压缩试验过程试样沿岩浆界面滑移破坏的概率显著增大，如图 8 所示。

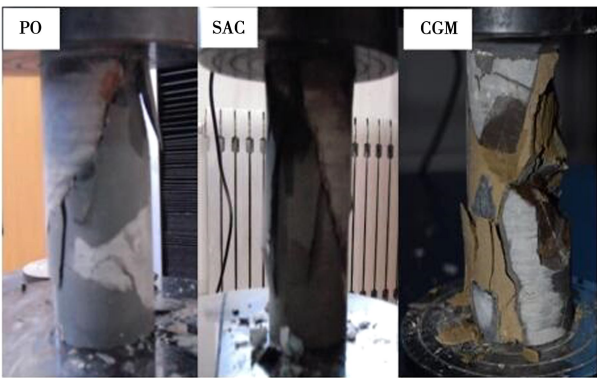


图 8 结石体单轴压缩试验照片

Fig. 8 Uniaxial test photos of grouting-reinforced samples

2.4 注浆加固效果主控因素分析

通过系统的注浆模拟试验，获得了不同因素对富水破碎岩体注浆加固效果的作用规律。为能更为有效地指导富水破碎岩体注浆治理工程设计，采用方差分析法对各影响因素进行权重分析，分析结果如表 7 所示。

表 7 注浆治理效果影响因素方差分析表

Table 7 ANOVA of grouting factors				
试验编号	注浆材料	注浆压力	充填介质	试验结果/MPa
1	PO	1	无	15.8
2	PO	2	有	18.3
3	PO	3	无	24.7
4	SAC	1	有	16.6
5	SAC	2	无	22.7
6	SAC	3	无	24.1
7	CGM	1	无	35.6
8	CGM	2	无	37.1
9	CGM	3	有	35.0
K_1	19.400	22.667	25.867	—
K_2	21.333	26.033	23.300	—
K_3	35.900	27.933	—	—
R	16.5	5.266	2.567	—

由表 7 中可以看出, 注浆材料极差值远大于注浆压力和充填介质, 对注浆加固效果影响最大, 为主控因素, 注浆压力的影响次之, 充填介质影响最弱。对于裂隙和空隙发育且连通性强的富水破碎地层进行注浆加固治理时, 注浆材料选型最为关键, 应选择浆液扩散性能好、析水率低、结石体体积干缩率小且黏接能力强的材料。在确保被注围岩支护条件良好或自承力较高的前提下, 注浆压力越高, 越有利于提高结石体致密度和裂隙孔隙充填率, 提高结石体刚度和强度。可以通过材料选型和调整注浆压力的方式降低充填介质对注浆效果的影响。

3 工程应用

3.1 工程概况

山东新能源有限公司为山东能源集团下辖矿井, 位于黄河北煤田济阳预测区浅部。其-550 m 水平西翼胶带运输巷道穿越姚店断层, 揭露第四系砂岩含水层, 导致巷道上山段 60 m 范围内出现大面积涌水, 总涌水量 60 m³/h, 水压 1.5 MPa, 为典型富水破碎地层涌水。

图 9 为巷道涌水区段高密度电法探测解译结果。测线布设以 G4 点为起点沿上山方向对巷道顶板进行探测 90 m。结合钻探结论可知, 巷道涌水区域围岩垂直向节理裂隙发育, 在地应力和涌水冲刷双重作用下软化严重, 自承能力差。特别是 3~9 m 范围内围岩极为破碎。15~20 m 深度范围富水性强, 含导水裂隙发育。

根据室内模拟试验结论, 将巷道涌水区段划分为 PO 和 CGM 两种材料治理区域, 采用水泥比为 1:1 的浆液对 3~9 m 范围内破碎围岩进行浅部径向注浆加固, 采用深部帷幕钻孔(图 10 中 Z1 和 Z2 所示)对 15~20 m 富水区域进行深部注浆封堵, 控制注浆压力为 2.5~3.5 MPa, 在不用断面埋设在线监测原件

记录注浆治理过程中水压计围岩应力变化。治理示意图如图 10 所示。

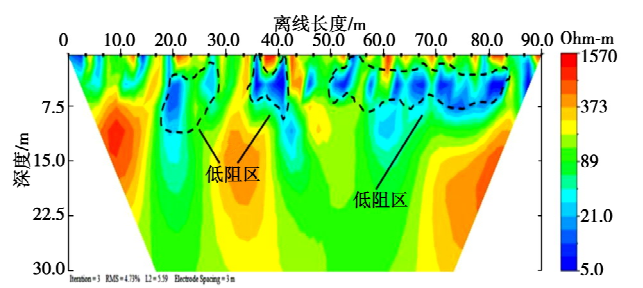


图 9 高密度电法探测结果解译图

Fig. 9 Interpretation results of high-density electrical technique

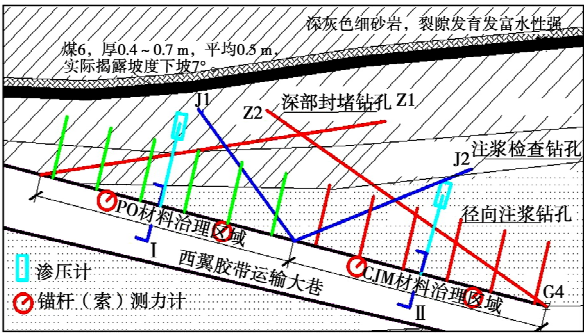


图 10 西翼胶带巷道涌水区段钻孔和监测设备布设示意图

Fig. 10 Sketch of grouting holes and monitoring equipments

3.2 注浆监测分析

注浆过程中 PO 材料治理区域和 CGM 材料治理区域同时进行施工, 图 11 为注浆加固过程中 I 和 II 断面渗压计监测数据结果。

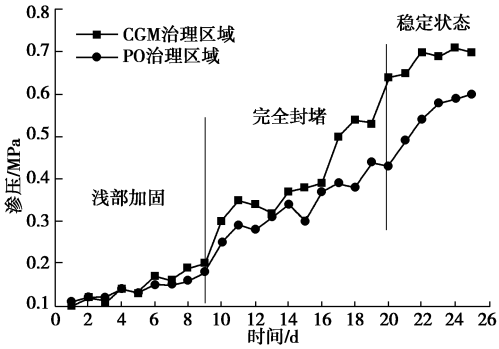


图 11 不同治理区段渗压计监测数据

Fig. 11 Monitoring data of osmometer in different treatment areas

观测渗压计监测数值, 在对浅部围岩进行径向注浆加固时, 两个区域内水压均呈缓慢上升趋势, CGM 材料治理区域略高于 PO 材料治理区域, 但相差不大, 此时巷道淋散水逐渐减少, 涌水均集于 Z1 和 Z2 深部封堵钻孔。待将引排钻孔完全封堵后, 渗水压力显著上升, 但 PO 材料治理区域又出现较多的淋水现象, 导致该区域内水压变化要小于 CGM 材料治理区域, 与室内注浆模拟试验结论相吻合。在浆液达到终凝状

态，后续观测各区域水压趋于稳定，PO 材料治理区域渗水水压仍低于 CGM 材料治理区域。

图 12 为锚杆应力传感器监测数据曲线。PO 材料区域传感器初始安装预紧力为 12.6 MPa，在进行浅部注浆加固过程中，传感器显示拉应力变化不大，此时注浆压力和水压对围岩的作用还未显现。当完成涌水封堵时，传感器压力迅速增大到 14.5 MPa，后续缓慢增长维持在 14.7 MPa。PO 材料在浅部注浆加固和深部封堵过程中，浆液凝结时间较长，结石体强度增进速度慢，对破碎围岩承载力的提高不显著，当水压升高时，在与注浆压力的双重作用下，围岩受力增大，锚杆所受拉应力出现升高。

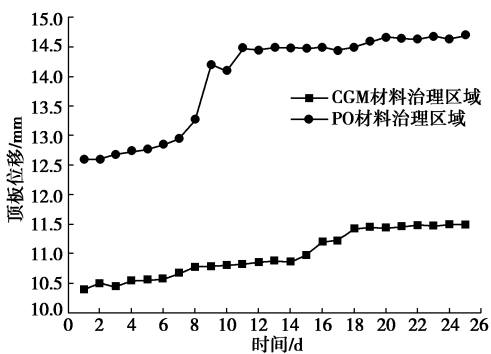


图 12 不同治理区段锚杆应力监测曲线

Fig. 12 Monitoring curves of stress of rock bolt in different treatment areas

CGM 材料治理区域，进行浅部注浆加固时，变化趋势与 PO 材料相同，后期涌水完全封堵后，该区域锚杆所受拉应力仅增加 1 MPa，且升高速率缓慢，未出现急剧升高现象，后期显示锚杆所受拉应力稳定在 11.5 MPa。这与 CGM 材料具有凝结时间短、强度发挥快、体积微膨胀的特点有关，能够在较短时间显著提高破碎岩体承载力，为后续深部注浆和涌水封堵提供良好的围岩条件，降低了锚杆等支护结构的受力。

3.3 注浆治理效果分析

为检查和评定注浆治理效果，分别施工检查钻孔 J1 和 J2，如图 10 所示。通过对钻探结果进行分析，CGM 材料治理区段取芯率为 72%，显著高于 PO 材料治理区域的 46%。CGM 材料结石体平均单轴压缩强度为 24.5 MPa，PO 材料结石体平均压缩强度为 18.1 MPa。测试过程中发现，PO 材料试样沿岩浆胶结界面的滑移破坏概率远高于 CGM 试样，与室内模拟试验结论相符，如图 13 所示。

通过测量西翼运输巷道集水硐室内水量可知，巷道涌水由 60 m³/h 减少至 2.5 m³/h，堵水率达到了 96%，剩余主要为 PO 材料治理区域出现的淋散水，如图 14 所示。观测渗压计及锚杆应力计数值未发生显著变化，

说明围岩受力稳定。

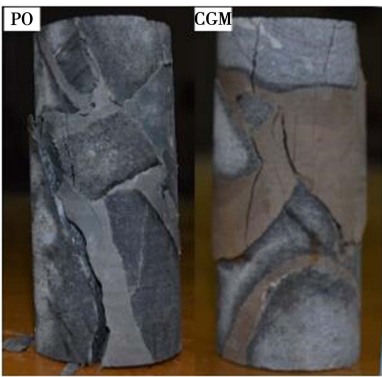


图 13 钻探取芯岩样的单轴压缩试验照片

Fig.13 Uniaxial test photos of rock core

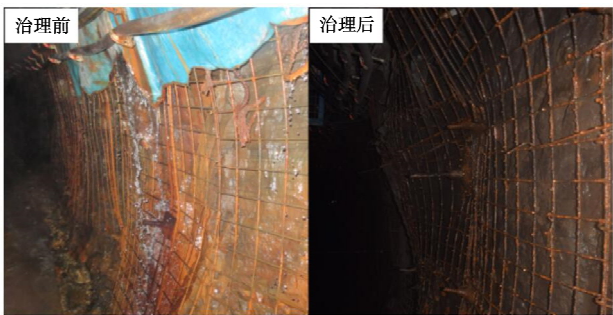


图 14 涌水区域治理前后对比

Fig. 14 Comparison of pouring water points before and after treatments

4 结 论

(1)PO 和 SAC 两种传统水泥类材料对富水破碎岩体的注浆加固效果相差不大，实际应用时可根据工程经济性和其他技术要求进行选择。自主研发的 CGM 材料应用于富水破碎地层注浆治理时，充填和加固效果好，对破碎岩体力学性能的改善程度显著优于传统水泥类材料，并在工程实践中得到验证，取得了良好的治理效果。

(2)富水破碎岩体注浆加固治理的主控因素为材料选型，其次为注浆压力控制，泥质胶结物的影响最弱。材料浆液析水率低，结石体强度高且体积稳定性好，与岩石胶结能力强，注浆加固效果越好。在确保外部支护结构稳定的前提下，注浆压力与加固效果为正相关。破碎岩体间泥质胶结物可以降低注浆加固效果，但可通过材料选型和注浆压力控制来降低其影响程度。

(3)采用室内注浆模拟试验的研究方法可以有效的指导注浆工程实践。本文只是基于工程案例进行了部分因素对富水破碎岩体注浆加固效果的作用规律研究，但由于地下工程条件复杂多样，寻找一种可以实现全因素作用下的注浆模拟试验方法成为亟待解决的

难题,以便推动注浆理论、技术和工艺的进步。

参考文献:

- [1] 葛家良, 陆士良. 注浆模拟试验及其应用的研究[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(3): 31 - 36. (GE Jia-liang, LU Shi-liang. Study on grouting simulation experiment and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(3): 31 - 36. (in Chinese))
- [2] 杨 坪, 唐益群, 彭振斌, 等. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(12): 2134 - 2138. (YANG Ping, TANG Yi-qun, PENG Zhen-bin, et al. Study on grouting simulation experiment in sandy gravels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2134 - 2138. (in Chinese))
- [3] 宗义江, 韩立军, 韩贵雷. 破裂岩体承压注浆加固力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, **30**(4): 483 - 488. (ZONG Yi-jiang, HAN Li-jun, HAN Gui-lei. Mechanical characteristics of confined grouting reinforcement for cracked rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, **30**(4): 483 - 488. (in Chinese))
- [4] 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): 745 - 751. (LI Shu-cai, ZHANG Wei-jie, ZHANG Qing-song, 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): 745 - 751. (in Chinese))
- [5] 雷进生, 刘 非, 王乾峰, 等. 非均质土层的注浆扩散特性与加固力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **32**(12): 2245 - 2253. (LEI Jin-sheng, LIU Fei, WANG Qian-feng, et al. Diffusion characteristics and reinforcement mechanics of grouting in non-homogeneous soil strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **32**(12): 2245 - 2253. (in Chinese))
- [6] BEZUIJEN A, BRASSINGA H E. Blow-out pressures measured in a centrifuge and in the field Proc VIII [C]// ECSMGE. Istanbul, 2001.
- [7] BOLTON M D, MCKINLEY J D. Geotechnical properties of fresh cement grout-pressure filtration and consolidation tests[J]. Géotechnique, 1997, **47**(2): 347 - 352.
- [8] 刘彦伟, 程远平, 李国富. 高性能注浆材料研究与围岩改性试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, **29**(6): 821 - 826. (LIU Yan-wei, CHEN Yuan-ping, LI Guo-fu. Research on high performance grouting material and improving surrounding rock mass strength[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, **29**(6): 821 - 826. (in Chinese))
- [9] 许宏发, 耿汉生, 李朝甫, 等. 破碎岩体注浆加固体强度估计[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(11): 2018 - 2022. (XU Hong-fa, GENG Han-sheng, LI Cao-fu, et al. Estimating strength of grouting reinforced bodies in broken rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(11): 2018 - 2022. (in Chinese))
- [10] LOMBARDI G. Grouting of rock masses[C]// Proceedings of the Third International Conference, Grouting and Ground Treatment. New Orleans, 2003: 164 - 197.
- [11] LI S C, LI Z F, SHA F, et al. The development of new composite material for the grouting treatment of Ordovician limestone aquifer and performance tests[J]. Materials Research Innovations, 2015, **19**(S1): 252 - 255.
- [12] 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和封堵方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(12): 2377 - 2396. (LI Shu-cai, ZHANG Xiao, ZHANG Qing-song, et al. Research on mechanism of grout diffusion of dynamic grouting and plugging method in the water inrush of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(12): 2377 - 2396. (in Chinese))
- [13] 刘人太, 李术才, 张庆松, 等. 一种新型动水注浆材料的试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(7): 1454 - 1459. (LIU Ren-tai, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Experiment and application research on a new type of dynamic water grouting material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(7): 1454 - 1459. (in Chinese))
- [14] 刘泉声, 卢超波, 卢海峰, 等. 断层破碎带深部区域地表预注浆加固应用与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 3688 - 3695. (LIU Quan-sheng, LU Chao-bo, LU Hai-feng, et al. Application and analysis of ground surface pre-grouting strengthening deep fault fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3688 - 3695. (in Chinese))
- [15] 王汉鹏, 高延法, 李术才. 岩石峰后注浆加固前后力学特性单轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, **3**(1): 27 - 39. (WANG Han-peng, GAO Yan-fa, LI Shu-cai. Uniaxial experiment study on mechanical properties of reinforced broken rocks pre-and-post grouting[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, **3**(1): 27 - 39. (in Chinese))