

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0133

砂土介质注浆渗透扩散试验与加固机制研究

沙 飞, 李术才, 林春金, 刘人太, 张庆松, 杨 磊, 李召峰

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 设计了一套可视化砂土介质恒压注浆渗透扩散与加固模拟试验装置。选用普通硅酸盐 42.5 水泥 (OPC)、超细硅酸盐水泥 (MC)、超细硫铝水泥 (MSAC) 及自主研发材料 (EMCG), 对砂土多孔介质进行了注浆渗透扩散与加固试验。研究了细砂土体不同浆液、注浆压力工况下扩散距离、注浆量随时间变化规律, 以及不同浆液、砂样级配及注浆压力对加固效果影响。采用极差分析法确定了加固效果主控因素, 获得了加固体宏观破坏模式, 通过 SEM 分析了岩-浆界面微观加固模型, 揭示了不同材料加固效果差异的本质原因。研究结果表明: 注浆材料与颗粒质量分数主导着细砂土体可注性, 注浆压力对可注性提高程度不大, EMCG 可注性最强, MC、MSAC 次之, OPC 最差; 在完全可注情况下, 砂样级配越细, 加固体强度改善效果越明显; EMCG 材料加固体 7、28 d 强度明显高于 MSAC、MC、OPC 加固体; EMCG 的 7 d 加固体强度达到 28 d 参数 70% 以上; 注浆材料主导着注浆加固效果, EMCG 对不同级配砂土体注浆加固效果显著优于其他水泥类材料, OPC 最差; 注浆后 EMCG 浆-岩界面生成的致密 C-S-H 凝胶体能够有效提高胶结强度。最后从注浆材料选型、注浆过程控制、钻孔布置方面对砂土层渗透注浆设计方法提出了工程治理改进建议。

关 键 词: 砂土多孔介质; 注浆模拟试验; 渗透扩散; 注浆材料; 加固效果; 岩-浆加固机制

中图分类号: TU 502

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 11-4259-11

Research on penetration grouting diffusion experiment and reinforcement mechanism for sandy soil porous media

SHA Fei, LI Shu-cai, LIN Chun-jin, LIU Ren-tai, ZHANG Qing-song, YANG Lei, LI Zhao-feng

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

Abstract: A novel visualizing constant pressure penetration grouting diffusion and reinforcement simulation test device was designed. The ordinary Portland cement 42.5 (OPC), microfine Portland cement (MC), microfine sulphoaluminate cement (MSAC), and self-developed effective microfine cement-based grout (EMCG) were selected, and the penetration grouting diffusion and reinforcement test has been performed. The variation rules of diffusion distance and volume under different suspension and grouting pressures were studied, as well as the effects of grouting material, pressure and sand gradation on the reinforcement. The ANOVA method was adopted to determine the dominant factor for grouting effectiveness, and the macroscopic failure modes of reinforcement specimens were obtained. The microscopic reinforcement model of rock-slurry interface and mineral characteristic were analyzed through SEM method, and the core reasons of reinforcement differences caused by different grouts were revealed. The results show that the grouting material and particle percent in slurry were the dominant factors for the groutability of fine sandy stratum, the increase of groutability was not evident with the increase of grouting pressure. The groutability of EMCG slurry was the best, followed by MC and MSAC, and the groutability of OPC slurry was the worst. The strength improvement of reinforcement specimen was better when the sand gradation was finer when suspensions penetrated fully. The 7 d and 28 d strengths of EMCG reinforcement specimen are higher than those of MSAC, MC and OPC, the 7 d of strength of EMCG reinforcement specimen is greater than 70% value of its 28 d strength. The grout is the dominant factor for reinforcement effectiveness, and EMCG is the best while OPC is the worst. After grouting, the dense C-S-H gels produced in EMCG rock-slurry interface can enhance its bonding strength effectively. Finally, improvement suggestions for practical penetration grouting design have been put forward based on three aspects, which are grouts selection, grouting dynamic control and drilling holes layout.

Keywords: porous media of sandy soil; grouting simulation test; penetration diffusion; grouts; reinforcement effectiveness; rock - slurry reinforcement mechanism

收稿日期: 2019-01-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2016YFC0801604); 国家自然科学基金青年项目 (No. 51909140); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2018M642658)。This work was Supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0801604), the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (51909140) and China Postdoctoral Science Foundation (2018M642658).

第一作者简介: 沙飞, 男, 1987 年生, 博士, 博士后, 主要从事地下工程灾害控制材料、理论及工程治理方面的研究工作。E-mail: shafei@sdu.edu.cn
通讯作者: 林春金, 男, 1980 年生, 博士, 副教授, 主要从事裂隙岩体力学特性及水害治理方面的教学与科研工作。E-mail: linchunjin@sdu.edu.cn

1 引言

地下工程建设中,对于富水软弱地层,常采用注浆方法进行加固治理,以实现水力封堵、地层加固隔水及围岩承载能力大幅提高等目的^[1-3]。砂土层是一种常见、难以治理且危害巨大的不良地质,该地层硐室稳定性极差^[4-6],且由于地下水补给、渗流、地应力及工程开挖等影响,极易引发塌方、地表塌陷、地下水枯竭及人员伤亡等严重问题^[7-8]。

国内外学者在该领域开展了较多研究工作,推动了富水砂土层注浆加固理论与技术的发展。Herzig 等^[9]针对砂土体孔隙注浆渗滤现象,推导并讨论了多个不同堵塞机制计算式,分析了多孔介质注浆扩散性。杨坪等^[10]针对砂卵石地层,研究了注浆孔隙度等参数对注浆量、扩散半径及强度的影响。黄红元等^[11]推导了毛细力作用下饱和砂层的平面径向流、球形向心流两种渗透注浆扩散模型。Saada 等^[12-13]以密实度、注浆压力、水灰比、浆液凝固程度及注浆速率等为变化参数,分析了砂土层中超细水泥浆液扩散与加固机制。Reddi 等^[14]采用数学计算方法,得到浆液在颗粒间的积聚与注浆材料粒径分布、砂土体孔隙尺寸、孔隙流体组成及沉积系数等有关。Bouchelaghem 等^[15]针对水泥类颗粒型浆液,建立了圆柱体注浆模拟的数值模型,进行了多孔介质的渗透注浆数值模拟,分析了饱和砂土体浆液流体力学性质及注浆效果。Gothall 等^[16]针对普通水泥浆液,采用断裂力学等基础,研究了较高注浆压力下浆液劈裂及裂纹发展特征。针对富水砂土体注浆治理,已有成果多侧重于注浆工艺与技术^[17-18]、理论推导^[19]、数值模拟^[20]等方面,现有研究在注浆治理效果与注浆材料选型关系、细砂土体注浆扩散与加固效果与原因、不同水泥类材料微观加固作用机制等方面缺乏系统分析^[21-23]。

本文采用自主设计的注浆模拟装置,开展水泥类材料在细砂土层中注浆扩散加固试验,分析了不同水泥类浆液扩散与加固效果,获得了砂土体注浆加固破坏模式,从微观角度揭示了浆液与砂土体间的相互作用机制,总结了不同水泥类材料注浆加固的本质差别,以期类似砂层注浆工程现场提供相应理论参考与设计参数。

2 试验系统与试验方法

2.1 注浆试验系统

本文可视化砂层一维注浆扩散试验系统主要包括可视化砂层模拟装置、监测装置、注浆装置、恒

压装置,试验系统原理图如图 1 所示,试验装置见图 2。

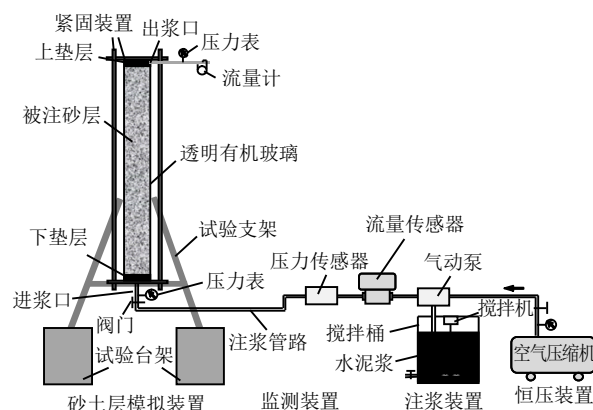


图1 可视化砂土层注浆扩散试验系统原理图
Fig.1 Visualized grouting diffusion system for sandy stratum



图2 注浆系统试验装置图
Fig.2 Photos of grouting experiment system

砂土层模拟装置由可视化有机玻璃管(内径为100 mm,高度为2 m,管壁厚度为5 mm)、PPR管头、变径管、上下垫层、紧固法兰、支架及台架等组成,砂层模拟装置为竖直方向,注浆孔位于装置底端,浆液由装置底端注入,从顶端渗出。监测装置主要为压力表、压力传感器、流量传感器等,恒压装置主要为空气压缩机、稳压装置。注浆装置主要包括气动注浆泵、耐压泵送管路、动力装置、搅拌机等。具体装备型号与性能如表1所示。

表 1 主要设备与性能

Table 1 Main devices and performance

主要设备	性能
气动注浆泵	注浆量为 0~30 L/min，最大注浆压力为 3 MPa
气动搅拌机	搅拌速率为 50~2 000 r/min
搅拌桶	浆液容积为 200 L
空气压缩机	供风量为 0.9 m ³ /min，风压为 0.5 MPa±0.02 MPa
耐压泵送管路	内径为 12.5 mm，最大耐压为 20 MPa

2.2 试验方法

(1) 注浆材料选型：普通硅酸盐 PO.42.5 水泥（OPC）；超细硅酸盐 42.5[#]水泥（MC）；超细硫铝酸盐水泥（MSAC）；自主研发高效超细水泥基复合材料（EMCG）；不同水泥基材料颗粒粒径分布采用激光粒度仪测试。

文中 4 种注浆材料化学组成、颗粒粒径分布分别如表 2、图 3 所示。水灰比为 1:1 时，4 种注浆材料的基本物理力学性能如表 3 所示。

表 2 试验用注浆材料化学组成（单位：%）
Table 2 Chemical composition of different grouts
(unit: %)

材料名称	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	烧失量
OPC	21.65	54.06	9.15	2.85	3.90	3.62	2.87
MC	20.64	56.51	6.45	2.38	3.60	3.70	4.90
MSAC	8.03	46.16	27.87	2.36	1.11	11.57	1.87
EMCG	26.12	48.32	11.13	3.27	4.21	3.10	2.21

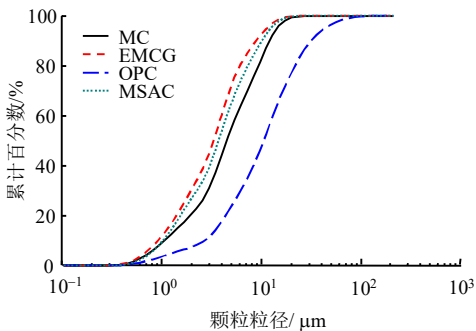


图 3 试验用注浆材料颗粒粒径分布
Fig.3 Particle size distribution of different grouts

表 3 试验用注浆材料基本物理力学性能
Table 3 Basic properties of grouting materials

材料名称	凝结时间/h		抗压强度/MPa			结石率/%
	初凝	终凝	3 d	7 d	28 d	
OPC	7.3	8.9	5.4	9.40	14.2	76.5
MC	5.5	6.7	9.7	11.50	17.1	98.9
MSAC	0.8	1.2	10.6	13.40	16.4	99.3
EMCG	2.1	2.8	13.3	24.32	32.8	99.7

(2) 被注试样：选取 0.15~0.30、0.30~0.60、0.60~1.00、1.00~1.40、1.40~2.00 mm 共 5 种(S1~S5) 单粒径中-细砂，基于 S1~S5 砂样组成一种混合粒径砂样（S6），各试样颗粒级配及物理参数如表 4 所示，混合组 S6 的不同分级粒径颗粒含量如表 5 所示。

表 4 砂试样颗粒级配及主要物理参数

Table 4 Particle size distribution and main parameters

编号	分级粒径/mm	D_{10} /mm	D_{15} /mm	相对密度	e_{max}	e_{min}
S1	0.15~0.30	0.16	0.17	2.63	1.142	0.713
S2	0.30~0.60	0.32	0.34	2.62	1.138	0.687
S3	0.60~1.00	0.63	0.65	2.64	1.084	0.632
S4	1.00~1.40	1.09	1.10	2.64	1.040	0.608
S5	1.40~2.00	1.48	1.49	2.64	1.028	0.597
S6	混合级配	0.66	0.69	2.64	1.095	0.739

表 5 混合砂样不同分级粒径颗粒含量

Table 5 Particle classification contents of S6 sample

砂试样	不同分级粒径颗粒含量/%					
	0.15~0.30 mm	0.30~0.60 mm	0.60~1.00 mm	1.00~1.40 mm	1.40~2.00 mm	2.00~3.35 mm
S6	9.7	10.5	32.0	19.1	18.1	10.6

(3) 注浆控制：试验过程采用注浆压力与注浆量双控形式；考虑到城市浅埋地铁砂层注浆过程地表隆起被严格控制，因此注浆压力不宜过大；本文注浆试验恒压 P 选取 40、80、120 kPa；相同水灰比情况下，材料细度增加将导致浆液黏度增大，浆液达到相同流动性能所需水量相应增多；为更形象表示浆液可注性，本文采用浆液初始颗粒质量分数 ω （水泥颗粒质量占初始浆液质量的百分数）进行论述，水灰比为 1:1、1.5:1.0、2:1、2.5:1.0 的 ω 分别为 50%、40%、33%、29%。

(4) 浆液扩散与加固效果测试：研究不同工况（不同浆液类型、不同级配砂样及不同注浆压力）条件下注浆量的时间变化规律；记录不同工况下浆液渗透扩散距离；注浆试验结束后，将加固体湿养至 7、28 d，分别将试块外侧有机玻璃从中间位置切开；加固体直径为 100 mm、高度为 200 mm，测试不同龄期注浆加固体单轴抗压强度。

(5) 加固体浆-岩微观胶结加固测试：采用 SEM 微观方法，测试分析岩-浆界面过渡区微观加固特性、矿物种类与分布特征，分析超细水泥、超细硫铝酸盐水泥、EMCG 浆-岩界面加固机制，获得不同材料加固本质差别；总结浆-岩微观加固机制。

3 扩散试验结果分析

3.1 多孔介质注浆渗滤效应分析

砂土介质注浆过程中,砂土颗粒起到骨架作用,微孔隙对水泥颗粒产生滤过作用,形成不均匀扩散与渗滤效应。砂土介质水泥基浆液渗滤如图4所示。

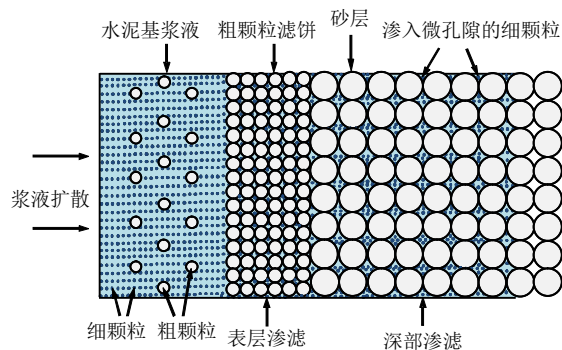


图4 水泥基浆液砂土介质扩散过程渗滤示意图

Fig.4 Filtration illustration of cementitious suspensions in sandy soil porous media

普硅42.5#水泥浆液在不同级配砂样中的可注性结果如图5所示,共包括S1~S5及2.00~3.35共6种试样。

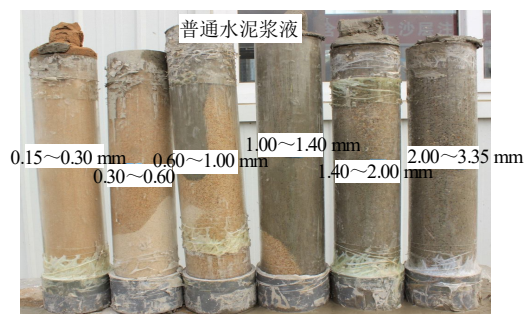


图5 普硅酸盐 42.5#水泥不同级配砂样中渗透注浆扩散结果
Fig.5 Measured permeation diffusion states of OPC slurry in sands with different gradations

如图5所示,普通水泥浆液只能在1.40~2.00 mm中砂层、2.00~3.35 mm粗砂层完全渗透扩散;在1.00~1.40 mm中砂层部分渗透扩散;在0.60~1.00 mm中砂层有效渗透扩散距离很小;在0.30~0.60 mm中-细砂层、0.15~0.30 mm细砂层均不能扩散、不能有效注入,渗滤效应较明显,渗透扩散效果差。MSAC浆液、MC浆液、EMCG浆液在S2级配细砂样中渗透扩散(≤ 0.3 MPa)结果如图6所示。

由图6可知,EMCG浆液在S2细砂层中能够

很好地渗透扩散(> 2 m),MSAC、MC浆液均不能超过2 m,二者浆液均不能在S2细砂层有效扩散。超细硫铝酸盐水泥、超细硅酸盐水泥虽颗粒细度与EMCG相近,但二者形成的浆液黏度值或宏观流动性能相差较大,二者水泥熟料含量较多;硫铝酸盐水泥具有快凝特性,且在超细状态下凝结尤其迅速,导致浆液黏度增长较快,扩散时间短。EMCG中粉煤灰等辅助胶凝材料“降黏”作用较明显,可通过提高水灰比、选择浆液适应性更好的外加剂、注浆参数优化等措施,进一步提高浆液在细砂土介质中的扩散距离^[24]。



图6 MSAC、MC与EMCG浆液细砂层渗透扩散结果
Fig.6 Penetration grouting diffusion results for MSAC, MC and EMCG suspensions in fine sands

3.2 不同工况注浆量 Q 试验结果分析

在注浆治理工程中,注浆量是确定注浆结束与评估治理效果的关键参数之一。在渗透装置出浆口处测量水泥浆的流量值,分别得到了不同浆液(材料类型与颗粒质量分数 ω)、不同级配砂样及不同注浆压力条件下注浆量的时间变化规律,如图7、8所示。

如图7(a)所示,针对 $D_{10}=0.16$ mm试样,采用注浆压力为40 kPa、水泥颗粒质量分数为29%浆液进行注浆,普通水泥浆液注入量极少,超细浆液注入量由大到小排序为EMCG>MC>MSAC,EMCG总注浆量约为MSAC、MC注浆量1.67倍、1.28倍。如图7(b)所示,针对 $D_{10}=0.32$ mm试样,采用注浆压力为40 kPa、水泥颗粒质量分数为33%浆液进行注浆,此时普通水泥浆液注入量依然很少,超细浆液注入量由大到小排序为EMCG>MC>MSAC,MC与MSAC注入量相差较小,EMCG总注浆量约为MSAC、MC注浆量的1.21倍、1.23倍。MSAC本身凝结时间较短、黏度上升较快,这也是导致其浆液注入量较小的主要原因。

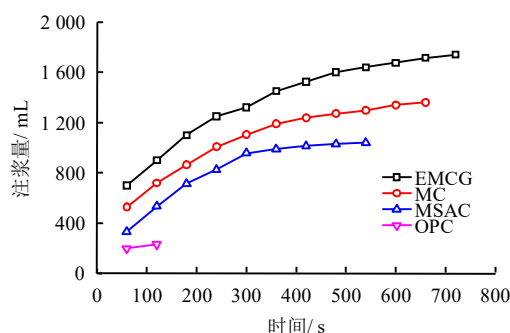
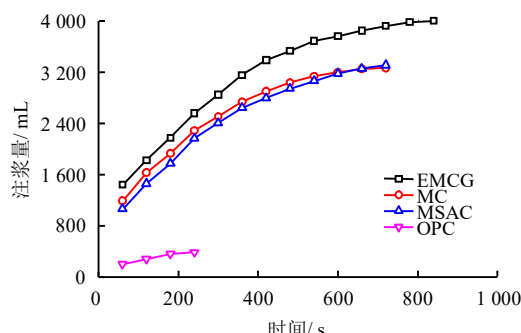
(a) $D_{10} = 0.16 \text{ mm}$, $P = 40 \text{ kPa}$, $\omega = 29\%$ (b) $D_{10} = 0.32 \text{ mm}$, $P = 40 \text{ kPa}$, $\omega = 33\%$

图 7 不同浆液选型工况注浆量随时间变化曲线

Fig.7 Grouting volume variation with time for different grouting materials

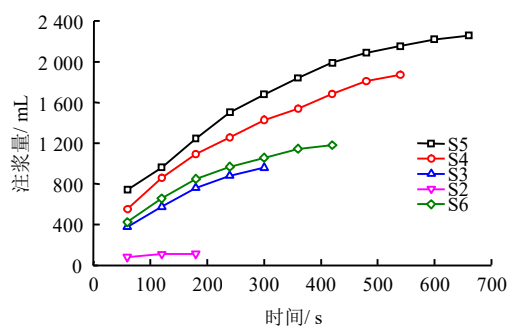
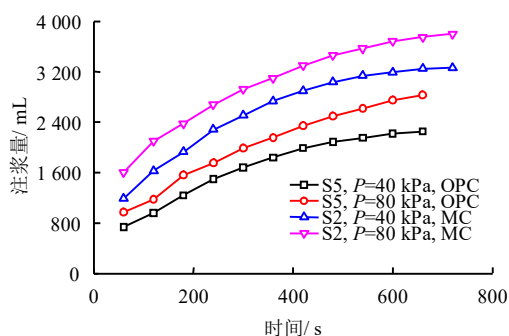
(a) $P = 40 \text{ kPa}$, $\omega = 33\%$, OPC(b) $P = 40, 80 \text{ kPa}$, $\omega = 33\%$, OPC, MC

图 8 不同级配砂样、注浆压力工况注浆量随时间变化曲线

Fig.8 Grouting volume variation with time for different sand gradations and grouting pressures

图 8(a)中,普通水泥浆液在 S2~S6 不同级配砂样中注浆量差别非常显著,以 $D_{10} = 0.32 \text{ mm}$ (S2) 为基数,当 D_{10} 增至 4.63 倍 (S5)、3.41 倍 (S4)、2.06 (S6) 倍及 1.97 倍 (S3) 时,OPC 浆液试样中总注浆量约为 $D_{10} = 0.32 \text{ mm}$ 注浆量的 20.15 倍、16.71 倍、10.54 倍及 8.57 倍,可知注浆量与 D_{10} 及孔隙直径呈正相关关系。图 8(b)中,以注浆压力 $P = 40 \text{ kPa}$ 为基数,当 P 增至 2 倍时,OPC 浆液在 $D_{10} = 1.48 \text{ mm}$ 试样中总注浆量增至 1.25 倍,MC 浆液在 $D_{10} = 0.32 \text{ mm}$ 试样中总注浆量增至 1.16 倍,可知注浆量随着注浆压力增大而增大,但增大程度不明显。

综合图 7 与图 8,注浆材料选型、浆液颗粒质量分数、砂土颗粒级配及注浆压力对注浆量及浆液渗透扩散有效性产生不同程度的影响。因此,实际砂土介质注浆工程中,为确保有效注浆治理效果,应在充分研究实际砂土地层结构特征基础上,优选合理的注浆材料、浆液配合比及注浆压力。

3.3 浆液渗透扩散距离结果分析

注浆扩散距离能够为实际注浆工程提供钻孔设计依据,注浆扩散距离越大,则钻孔间距也应越大。本节重点研究了不同水泥基浆液砂土介质中的扩散距离,不同浆液试验组渗透扩散距离结果分析如图 9 所示。

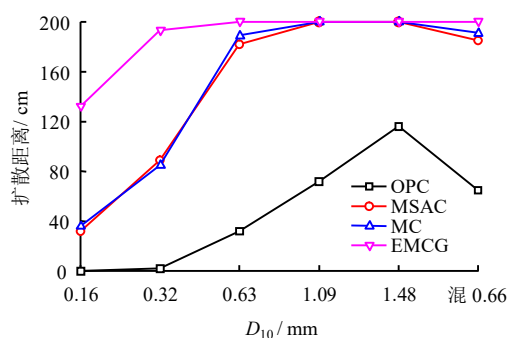
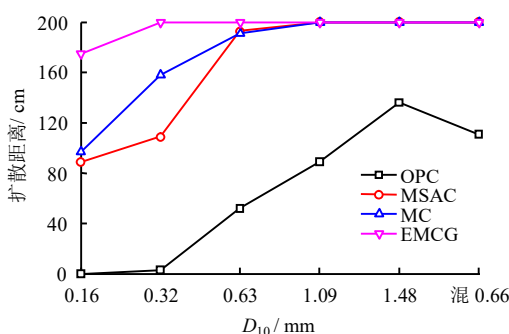
(a) $P = 40 \text{ kPa}$, $\omega = 40\%$ (b) $P = 40 \text{ kPa}$, $\omega = 33\%$

图 9 不同浆液渗透扩散距离结果分析

Fig.9 Penetration diffusion distances for different slurries

如图 9(a)及 9(b)所示, OPC 浆液各级配砂土试样中扩散距离很小, 水泥颗粒质量分数降低时有一定改善, 改善程度有限, 说明此时黏度不是扩散距离主导因素, 主要因为 OPC 浆液大颗粒含量较多, 导致了其深层渗滤效应明显、扩散距离有限。 $D_{10} \leq 0.66$ mm 级配细砂土试样中, 超细浆液扩散距离由大到小排序为 EMCG>MC>MSAC, MC 与 MSAC 不同级配细砂土试样中扩散距离均小于 2 m。 $D_{10} = 0.16$ mm 细砂土试样中, 随着 ω 的降低, EMCG、MC 及 MSAC 浆液扩散距离明显增大, 说明此级配砂土扩散距离主导因素是 ω 。 $D_{10} \geq 1.09$ mm 砂土试样中, EMCG、MC 及 MSAC 扩散距离均能够达到 2 m, 说明此时注浆材料的细度及粒径分布是浆液扩散距离的主导因素。

4 砂土介质注浆加固机制分析

4.1 不同注浆材料对加固效果的影响

本节重点研究了不同注浆材料对加固效果的影响, 对不同材料渗透注浆加固体进行了单轴压缩强度试验, 加固体 7 d、28 d 强度结果如表 6 所示。

表 6 不同注浆材料加固体试样强度试验结果
Table 6 Compressive strength of reinforcement specimen with different grouts

材料类别	砂样 D_{10} /mm	加固龄期 /d	编号	平均加固强度 /MPa
OPC	1.09	7	OP-1	1.0
	1.48	7	OP-2	0.9
	1.09	28	OP-3	2.1
	1.48	28	OP-4	1.8
MSAC	0.32	7	MS-1	3.9
	0.63	7	MS-2	3.6
	混 0.66	7	MS-3	3.0
	0.32	28	MS-4	4.9
	0.63	28	MS-5	4.2
	混 0.66	28	MS-6	3.6
MC	0.32	7	MC-1	2.4
	0.63	7	MC-2	1.9
	混 0.66	7	MC-3	1.8
	0.32	28	MC-4	4.6
	0.63	28	MC-5	3.9
	混 0.66	28	MC-6	3.1
EMCG	0.32	7	EM-1	10.2
	0.63	7	EM-2	8.9
	混 0.66	7	EM-3	8.1
	0.32	28	EM-4	13.6
	0.63	28	EM-5	12.1
	混 0.66	28	EM-6	10.5

表 6 中, OPC 对 $D_{10} = 1.09$ 、1.48 mm 试样的加固强度较低, 这与 OPC 浆液析水率较大有关^[23-24], 较大的析水率导致了砂土体局部孔隙较多, 同时

OPC 颗粒较大导致水化不够充分, 均不能有效加固。针对 $D_{10} = 0.32$ 、0.63、0.66 mm 细砂土试样, EMCG 加固体 7、28 d 强度均显著高于 MSAC 与 MC 材料, 加固效果最好, EMCG 的 7 d 加固体强度超过其 28 d 强度参数, EMCG 细砂土体 ($D_{10} = 0.32$) 加固体 28 d 强度达到 13.6 MPa。在完全渗透情况下, 砂样级配越细, 浆液加固体强度呈现增大趋势, 说明加固改善效果越明显。MSAC 加固体早期 (7 d) 强度较高, 28 d 强度增进率较低, MSAC 加固体 7 d、28 d 强度均高于 MC 加固体, 但 MC 与 MSAC 加固体 28 d 强度相差不大。因此, 基于注浆加固效果, 细砂土地层注浆工程注浆材料优选顺序为 EMCG>MSAC>MC>OPC。

4.2 注浆加固效果主控因素分析

为更有效地指导砂土地层注浆治理工程设计, 综合考虑注浆材料、砂土级配 (D_{10})、注浆压力, 采用方差分析法对各影响因素进行权重分析, 结果如表 7 所示。表中选取了细砂土体, 并选取了 MSAC、MC 与 EMCG 3 种超细水泥基注浆材料。

表 7 注浆治理效果影响因素方差分析表
Table 7 ANOVA of influence factors for grouting reinforcement effectiveness

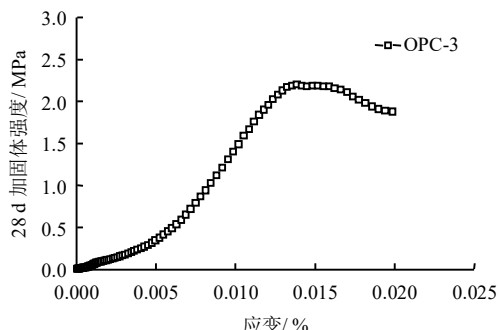
编号	注浆材料	砂土级配 D_{10} /mm	注浆压力 /kPa	28 d 强度 /MPa
1	MSAC	0.32	40.00	4.0
2	MSAC	0.63	80.00	4.2
3	MSAC	混 0.66	120.00	3.9
4	MC	0.32	80.00	4.6
5	MC	0.63	120.00	4.1
6	MC	混 0.66	40.00	2.8
7	EMCG	0.32	120.00	14.0
8	EMCG	0.63	40.00	11.8
9	EMCG	混 0.66	80.00	10.5
$\overline{K_1}$	4.03	7.53	6.20	
$\overline{K_2}$	3.83	6.70	6.43	
$\overline{K_3}$	12.10	5.73	7.33	
R_j	8.27	1.80	1.13	

注: $\overline{K_1}$ 、 $\overline{K_2}$ 、 $\overline{K_3}$ 分别为 j 列因素 1、2、3 水平所对应的 28 d 强度指标平均值; R_j 为 j 列因素的极差。

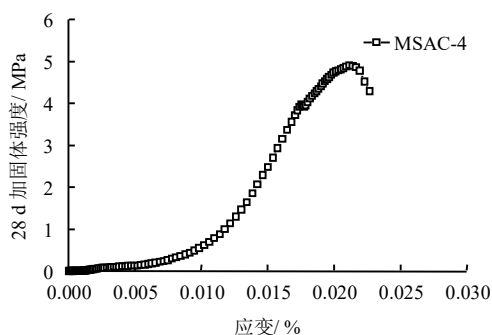
表 7 中, 注浆材料极差值远大于砂土级配与注浆压力, 对 28 d 强度及加固效果影响最大, 为主控因素。砂土级配影响次之, 注浆压力影响最弱。对于微孔隙细砂土地层注浆治理时, 注浆材料选型为最关键因素, 应选择可注性强、渗透加固效果好、析水率低、结石体干缩小且浆-岩胶结能力强的注浆材料; 同时应充分掌握所注地层砂土级配及结构参数, 并在注浆过程动态调节注浆压力, 以提高孔隙介质充填率, 并确保加固体致密度、强度及稳定性。

4.3 加固体宏观破坏模式

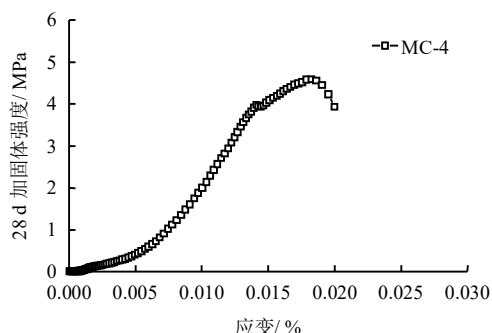
图 10 为 4 种注浆材料加固体的应力-应变曲线。如图 10(a)所示, OPC 加固体破坏应力 σ 较低, 当 σ 超过 $\sigma_{\max}$ 后, 试样发生明显的塑性变形, 且出现颈



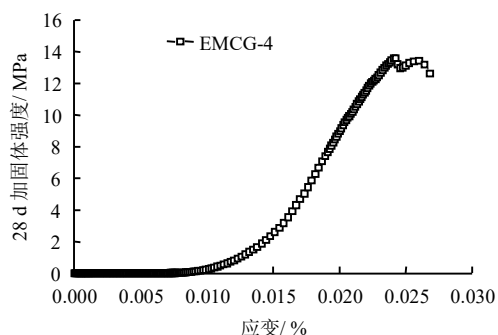
(a) OPC-3 试样



(b) MSAC-4 试样



(c) MC-4 试样



(d) EMCG-4 试样

图 10 不同注浆材料加固体破坏后应力-应变曲线
Fig.10 Stress-strain curves of grouted specimen with different grouting materials

缩后真实应力一直处于下降状态, 说明 OPC 浆液加固体仍有未充填孔隙, 且充填区域因析水而严重弱化, 导致了加固体刚度低、塑性强, 整体承载力低。如图 10(b)与 10(c)所示, 相比 OPC 渗透加固体, MSAC 与 MC 加固体破坏应力 σ 分别提高至 2.23 倍、2.09 倍, MSAC 与 MC 加固体 σ - ε 曲线相似, 不均匀塑性变形阶段变小, 加固体出现颈缩后应力仍在升高, 超细化后 MSAC 与 MC 浆液几乎不析水, MSAC 与 MC 砂土体注浆后孔隙填充相对充分, 相对于 OPC 加固体, 二者加固体整体性、刚度与强度改善较明显。图 10(d)中, 相比 OPC、MSAC、MC 加固体, EMCG 加固体破坏应力 σ 分别提高至 6.18、2.78、2.96 倍, EMCG 加固体 σ - ε 曲线中不均匀塑性变形阶段进一步变小, 颈缩后应力持续升高, $\sigma_{\max}$ 破坏后仍能承受较大荷载, 说明 EMCG 加固体刚度更高、压缩模量更大、整体性更强, 具有高强破坏特征。EMCG 细砂土体中渗透扩散后几乎不析水, 干缩很小且浆岩胶结能力较强, 这决定了砂土介质孔隙被充分填充, 且浆与砂颗粒有效胶结。综上, EMCG 加固体强度、刚度与整体性改善最明显, 致密程度高, 力学性能最优异, 远超砂土地层注浆工程对固砂体力学性能的要求。

不同浆液细砂土加固体破坏照片如图 11 所示。图 11 中, MC 加固体破坏残余强度阶段, 加固体内部沿内部剪切滑移面破坏, 导致结石体易沿斜截面破坏, 并轻易掉块、破碎, 且注浆材料结石体易与砂土体脱离, 脆性较大, 整体性较差。与 MC 相比, MSAC 加固体未沿斜截面破坏, 浆砂胶结状态有所改善, 但其整体性仍不足, 仍存在薄弱区先破裂、先脱离现象, 大裂缝易先贯穿侧端, 导致局部先破碎。而 EMCG 加固体剪切滑移破坏概率远小于 MC 和 MSAC 试样, EMCG 试样破坏整体性大幅提高, 浆砂高度胶结、加固体致密程度高, 裂纹均匀贯穿

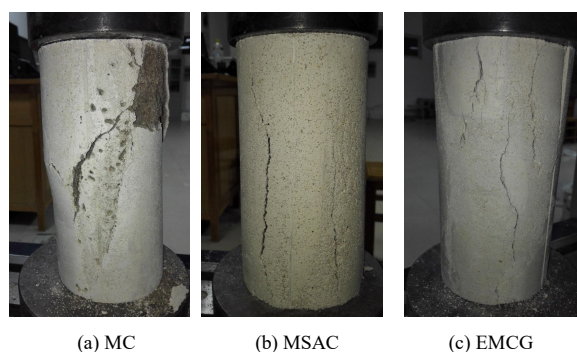


图 11 不同注浆材料加固体试样破坏特征

Fig.11 Failure characteristics of grouted specimen with different grouts

整个加固体, $\sigma_{\max}$ 后仍能承受较大荷载。在实际砂土体注浆加固工程中, EMCG 在确保围岩强度与整体稳定性方面具有较大优势。

4.4 加固体微观岩-浆加固机制分析

如图 12 所示, Zaitsev 等^[25]将硬化后水泥浆体、砂石骨料定义为多种介质组成的复合材料, 考虑其非均质性, 假设裂纹起始于浆-岩界面薄弱区域, 提出了一种基于浆-岩裂纹扩展的加载破坏模型。

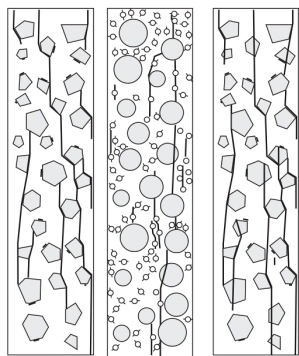


图 12 基于浆-岩裂纹扩展的加固体破坏模型^[25]

Fig.12 Crack propagation model for slurry-rock interface of reinforcement specimen after failure^[25]

砂土介质注浆加固有效性本质取决于浆液结石体与砂土间的胶结紧密程度与有效性。这是因为, 注浆本身即通过不断改善浆-岩胶结而使岩土体具有高度稳定性与整体性; 另一方面, 注浆加固体破碎时首先在浆-岩胶结界面处破裂, 因其是加固体中最薄弱环节。因此, 浆-岩微观加固状态及加固机制对实际砂层注浆治理具有重要现实意义。本节针对不同浆-岩界面胶结模型^[26-28], 结合本文 MC、MSAC、EMCG 3 种不同超细水泥基注浆材料, 总结出相应浆液加固体浆-岩微观界面胶结模型, 如图 13~15 所示。

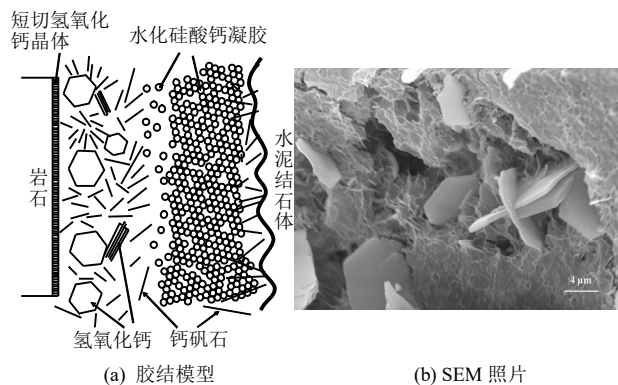


图 13 MC 注浆材料加固体浆-岩胶结模型

Fig.13 Slurry-rock reinforcement model for MC grout

图 13(a)为本文超细硅酸盐水泥注浆加固体浆-岩微观胶结模型, 结合图 13(a)与 13(b), 超细硅酸盐水泥浆-岩界面六方板状氢氧化钙晶体尺寸很大, 发育极好, 且易定向生长、取向明显。MC 浆岩界面相当数量凝胶体裂缝明显, 结构疏松、无序、胶结程度低, 严重影响加固体宏观强度。若 MC 浆岩界面一直处于地下水渗流或离子侵蚀环境中, CH 矿物极易溶出, 此时界面微观结构更疏松, 这也是超细水泥加固体地下富水及侵蚀环境中力学性能、稳定性严重退化的本质, 地下工程砂土地层富水及侵蚀环境不推荐超细硅酸盐水泥 (MC)。

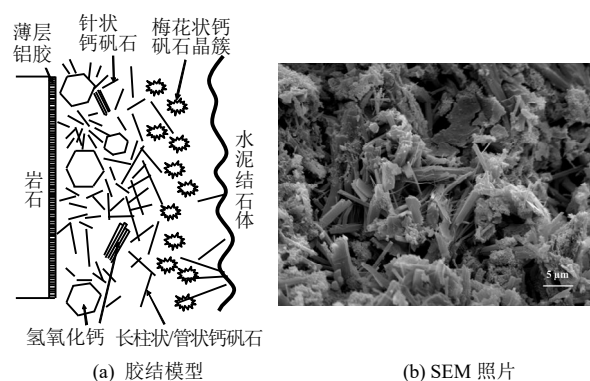


图 14 MSAC 注浆材料加固体浆-岩胶结模型

Fig.14 Slurry-rock reinforcement model for MSAC grout

图 14(a)为本文超细硫铝酸盐水泥加固体浆-岩微观胶结模型, 结合图 14(a)与 14(b), 超细硫铝酸盐水泥浆-岩界面区存在一定数量氢氧化钙矿物, 其尺寸不大, 存在针状及管状钙矾石晶体, 也存在梅花状钙矾石晶簇。MSAC 界面结构致密度比 MC 有所改善, 其存在的大量不同形状钙矾石决定了其加固体较高的早期强度, 考虑其仍有一定数量氢氧化钙, 水化后期仍存在大量钙矾石, 且凝胶体数量较少, 其适合地下工程早期封堵及加固, 不优先推荐用于地下工程砂土地层长期富水及侵蚀环境。

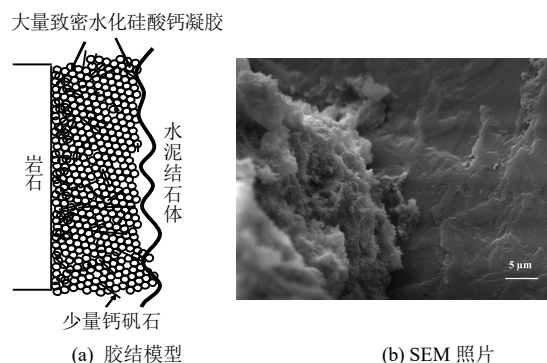


图 15 EMCG 注浆材料加固体浆-岩胶结模型

Fig.15 Slurry-rock reinforcement model for EMCG grout

图 15(a)为本文 EMCG 注浆加固体浆-岩微观胶结模型, 结合图 15(a)与 15(b), EMCG 浆-岩界面不存在氢氧化钙矿物, CH 矿物已与硅质或铝质矿物反应, 全部生成大量 C-S-H 等无定形凝胶体; 浆岩表面胶结致密程度高; 且结石体本身凝胶体无裂缝、结构致密; 以上均非常有利于大幅提高浆-岩界面胶结强度。相比 MC、MSAC 加固体, EMCG 具有矿物合理、结构致密、胶结面强度高等优势, 这确保了 EMCG 砂土加固体在地下富水及侵蚀环境中具有优越的力学性能与长期稳定性, 优先推荐用于地下工程砂土地层长期富水及侵蚀环境。

5 工程实践意义

砂土介质渗透注浆模式与劈裂-压密模式存在明显差别, 劈裂-压密注浆模式下注浆压力高, 通常形成多条劈裂浆脉。而对砂土地层注浆, 渗透注浆模式下浆液通常形成较均匀的注浆加固体, 因此渗透注浆加固效果较好。砂土地层渗透注浆难度大, 尤其针对微孔隙细砂土介质, 对注浆材料、注浆工艺参数及钻孔布置设计等要求较高, 一般需综合考虑注浆材料颗粒级配、材料组分水化活性、浆液渗透扩散距离、加固有效性、浆液环保性等因素。

(1) 注浆材料选型

砂土介质 OPC 浆液扩散过程渗滤效应明显。MC 虽渗透扩散距离改善较好, 其强度有待进一步提高。MSAC 加固强度虽有所提高, 但其凝结时间较短, 扩散距离有待进一步提高。EMCG 浆液在渗透扩散距离及加固有效性方面均提升显著, 能够确保砂土加固体具有优越的力学长期稳定性。因此, 注浆材料优选排序为 EMCG > MSAC > MC > OPC。

(2) 注浆过程控制

注浆压力与注浆速率是两个关键注浆工艺参数, 二者需动态结合调控。注浆实施过程中需综合注浆压力差异控制、注浆速率梯度控制与浆液动态调节控制。根据砂土地层围岩条件, 分区段选择注浆终压; 随着地层由浅而深加固, 逐渐提高注浆终压。注浆前期选择较大初始注浆速率; 随后转变为低速率慢渗注浆, 以利于砂土体的充分强化。

(3) 钻孔布置

实际砂土介质渗透扩散模式中, 应充分掌握被注地层砂土体结构参数, 依据砂土体特征结构参数及孔隙直径, 调整注浆材料颗粒级配, 并动态调整浆液配合比, 以提高优化后水泥基浆液的渗透扩散距离。依据本文研究成果, EMCG 浆液细砂土介质中能够确保 2 m 以上的扩散距离, 实际砂土地层渗

透注浆工程中钻孔间距设计可大于 2 m。

6 结 论

(1) 设计了一套可视化砂土介质恒压注浆渗透扩散与加固模拟试验装置。注浆材料(级配、组分)与水泥颗粒质量分数主导着细砂土体可注性; 增加注浆压力能够一定程度提高浆液注浆量及扩散距离, 但提高程度不大。EMCG 渗透扩散距离及可注性效果最好, MC、MSAC 次之, OPC 最差。

(2) 注浆材料类型是砂土介质注浆加固效果的主导因素, 砂土级配与注浆压力对加固效果影响相对较弱。注浆材料 7 d、28 d 加固效果优先排序为 EMCG > MSAC > MC > OPC。EMCG 加固体 28 d 强度为 OPC、MSAC、MC 加固体的 6.18、2.78、2.96 倍以上。EMCG 的 7 d 加固体强度达到 28 d 参数的 70% 以上。在完全可注情况下, 砂样级配越细, 加固体强度改善效果越明显。

(3) EMCG 加固体 $\sigma - \varepsilon$ 曲线塑性变形阶段最小, $\sigma_{\max}$ 破坏后仍能承受较大荷载, EMCG 加固体强度、刚度与整体性改善最明显, 力学性能最优异, 砂土介质孔隙被充分填充胶结, 破坏裂纹均匀贯穿整个加固体, 具有高强破坏特征。

(4) 通过 SEM 分析了岩-浆界面微观加固模型, 分析了界面过渡区矿物分布特征。MC 浆-岩过渡区板状 CH 发育极好, 结构疏松, 裂缝明显, CH 地下富水环境极易被溶出或侵蚀, 导致了其性能严重退化。MSAC 浆-岩界面存在一定数量 CH, 大量钙矾石利于早期强度, 后期强度及侵蚀环境性能有待提高。EMCG 浆-岩界面已无 CH, 形成大量致密 C-S-H 凝胶体, 矿物合理、结构致密、浆-岩胶结程度高, 确保了其优异力学性能与耐久性。

(5) 实际砂土地层注浆治理时, 注浆材料优选排序为 EMCG > MSAC > MC > OPC, 并从注浆过程控制、钻孔布置方面对砂土地层注浆设计方法提出了改进建议。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 李术才, 冯啸, 刘人太, 等. 考虑渗滤效应的砂土介质注浆扩散规律研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 925—933.
- LI Shu-cai, FENG Xiao, LIU Ren-tai, et al. Diffusion of grouting cement in sandy soil considering filtration effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(4): 925—933.
- [4] 邱龑, 杨新安, 徐前卫, 等. 富水砂层盾构隧道开挖面稳定性及其失稳风险的分析[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(6): 55—62.
- QIU Yan, YANG Xin-an, XU Qian-wei, et al. Analysis on stability and instability risk of excavation face of shield tunnel in water-rich sand layer[J]. **China Railway Science**, 2015, 36(6): 55—62.
- [5] 袁克阔, 李雄伟, 徐拴海, 等. 巨厚富水松散砂层溃砂灾害现状与注浆固沙技术研究及应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(4): 32—38.
- YUAN Ke-kuo, LI Xiong-wei, XU Shuan-hai, et al. Underground grouting-reconstruction technology for thick water-rich sand layer and its engineering practice[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2017, 15(4): 32—38.
- [6] 孟庆彬, 韩立军, 石荣剑, 等. 煤矿斜井井筒过流砂层施工技术研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 900—910.
- MENG Qing-bin, HAN Li-jun, SHI Rong-jian, et al. Study and application of construction technology for inclined shafts penetrating drift sand strata in coal mine[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(5): 900—910.
- [7] 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): 1945—1956.
- QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(10): 1945—1956.
- [8] 吴生金, 唐和青, 孟维孝, 等. 厦门翔安海底隧道穿越富水砂层施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3816—3822.
- WU Sheng-jin, TANG He-qing, MENG Wei-xiao, et al. Construction techniques of Xiamen Xiang'an subsea tunnel across water-enriched sandy stratum[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Suppl.2): 3816—3822.
- [9] HERZIG J P, LECLERC D M, GOFF P L. Flow of suspensions through porous media-application to deep filtration[J]. **Industrial and Engineering Chemistry**, 1970, 62(5): 8—35.
- [10] 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 simulating experiment in sandy gravels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(12): 2134—2138.
- [11] 黄红元, 荣耀. 饱和砂层驱水渗透注浆分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2016—2020.
- HUANG Hong-yuan, RONG Yao. Analysis of driving-water permeation grouting of saturated sand seam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2016—2020.
- [12] SAADA Z, CANOU J, DORMIEUX L, et al. Evaluation of elementary filtration properties of a cement grout injected in a sand[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2006, 43(12): 1273—1289.
- [13] SAADA Z, CANOU J, DORMIEUX L, et al. Modelling of cement suspension flow in granular porous media[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2005, 29(7): 691—711.
- [14] REDDI L N, BONALA M V S. Analytical solution for fine particle accumulation in soil filters[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(12): 1143—1152.
- [15] BOUCHELAGHEM F, VULLIET L, LEROY D, et al. Real-scale miscible grout injection experiment and performance of advection-dispersion-filtration model[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2001, 25(12): 1149—1173.
- [16] GOTHALL R, STILLE H. Fracture-fracture interaction during grouting[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2010, 25(3): 199—204.
- [17] 张旭东. 土压平衡盾构穿越富水砂层施工技术探讨[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1445—1449.
- ZHANG Xu-dong. Construction technology of earth pressure balance shield in watery sandy stratum[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(9): 1445—1449.
- [18] 陈铁林, 滕红军, 张顶立. 厦门翔安海底隧道富水砂层注浆试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3711—3717.
- CHEN Tie-lin, TENG Hong-jun, ZHANG Ding-li, et al. Grouting test on water-enriched sand layer of Xiamen Xiang'an subsea tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Suppl.2): 3711—3717.
- [19] KIM J S, LEE I M, JANG J H, et al. Groutability of cement-based grout with consideration of viscosity and filtration phenomenon[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2009, 33(16): 1771—1797
- [20] 张瑾. 青岛富水砂层隧道变形机制及其控制对策研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- ZHANG Jin. Deformation mechanism and its control strategy for water-rich sand stratum in tunnels of Qingdao[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2013.
- [21] 李召峰, 李术才, 刘人太, 等. 富水破碎岩体注浆加固实验与机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 198—207.
- LI Zhao-feng, LI Shu-cai, LIU Ren-tai, et al. Grouting reinforcement experiment for water-rich broken rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(1): 198—207.
- [22] LI Shu-cai, SHA Fei, LIU Ren-tai, et al. Investigation on viscous behavior and strength of microfine cement-based grout mixed with microfine fly ash (MFA) and superplasticizer (SP)[J]. **Advances in Cement Research**, 2017, 29(5): 206—215.
- [23] LI Shu-cai, SHA Fei, LIU Ren-tai, et al. Investigation on fundamental properties of microfine cement and cement-slag grouts[J]. **Construction and Building Materials**, 2017, 153: 965—974.
- [24] 沙飞. 富水砂层高效注浆材料及其加固机制研究和应用[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- SHA Fei. Study on effective micro-fine cement-based grout and reinforcement mechanism and the application for water-rich sand stratum[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [25] ZAITSEV Y B, WITTMANN F H. Simulation of crack propagation and failure of concrete[J]. **Materials and Structures**, 1981, 14(2): 357—365.
- [26] BANRES B D, DIAMOND S, DOLCH W L. The contact zone between Portland cement paste and glass aggregate surfaces[J]. **Cement and Concrete Research**, 1978, 10(8): 233—244.
- [27] OLLIVIER J P, GRANDET J. Etude de l'effet retardateur du zinc sur l'hydratation de la pate de ciment Portland[J]. **Cement and Concrete Research**, 1982, 12(1): 79—86.
- [28] ZIMBELMAN R. A contribution to the problem of cement aggregate bond[J]. **Cement and Concrete Research**, 1985, 15(5): 801—808.
- [14] ZHENG Y, FOX P J, SHING P B. Verification of numerical model for static analysis of geosynthetic-reinforced soil bridge abutments[J]. **Geosynthetics**, 2015, 2015: 152—160.
- [15] ZHENG Y, FOX P J. Numerical investigation of geosynthetic-reinforced soil bridge abutments under static loading[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2016, 142(5): 04016004.
- [16] 王家全, 张亮亮, 刘政权, 等. 土工格栅加筋砂土地基大模型动载试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3539—3547.
- WANG Jia-quan, ZHANG Liang-liang, LIU Zheng-quan, et al. Large model test research on geogrid reinforced soil foundation under dynamic Loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(10): 3539—3547.
- [17] CERATO A B, LUTENEGGER A J. Scale effects of shallow foundation bearing capacity on granular material[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(10): 1192—1202.
- [18] WANG J Q, ZHANG L L, XUE J F, et al. Load settlement response of shallow square footings on geogrid-reinforced sand under cyclic loading[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2018, 46(5): 586—596.

上接第 4228 页