

DOI: 10.11779/CJGE20240251

密实细砂层地铁暗挖隧道新型超前加固材料性能及注浆参数研究

陈 钺¹, 来弘鹏^{*1}, 刘禹阳², 朱新健¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为降低超前注浆加固对地铁暗挖隧道地层环境影响, 注浆要求低压缓注。密实细砂层结构紧密、黏粒含量高, 导致现有注浆材料在低注浆压力下扩散半径小, 无法有效加固隧道掌子面。基于组分活性激发及颗粒尺寸优化理念, 以矿渣微粉、超细粉煤灰为主体, 掺入适量超细水泥及复合激活凝聚剂, 制备了新型注浆材料。通过室内试验, 探究了不同配合比、复合激活凝聚剂掺量影响下新型注浆材料浆液流动度、凝结时间及结石体强度变化特性。采用自主研制的小导管注浆足尺试验装置, 对比分析了普通水泥、超细水泥及新型注浆材料加固效果, 揭示了上覆荷载与含水率影响下新型材料浆液扩散特性及注浆终压变化规律。研究结果表明: 水固比为1:1、矿渣微粉、超细粉煤灰及超细水泥质量比为4:2:4, 复合激活凝聚剂掺量4%时, 新型注浆材料浆液流动性最优、凝结时间可控、结石体强度较高; 采用小导管注浆加固时, 普通水泥浆液在密实细砂层以压密扩散为主、超细水泥浆液以压密-劈裂为主, 新型材料则以渗透-劈裂方式进行扩散。新型注浆材料扩散性能及加固效果最优, 超细水泥次之, 普通水泥最差; 注浆前期, 新型材料应保持低压注浆, 防止注浆量过大, 引起砂土局部劈裂, 造成加固失效的问题; 新型材料注浆终压随上覆荷载及含水率的增加呈线性增长, 上覆荷载增加50 kPa, 注浆压力增大50 kPa左右。含水率增加2%, 注浆压力增加量约为40 kPa。研究结果对注浆加固工程理论研究及工程应用有一定指导意义。

关键词: 地铁隧道; 浅埋暗挖法; 密实细砂层; 小导管注浆加固; 浆液扩散特性; 注浆参数

中图分类号: TU425 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2025)07-1432-11

作者简介: 陈 钺(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程等领域的科研工作。E-mail: 1325099107@qq.com。

Performance and grouting parameters of new advanced reinforcement materials for underground tunnels with dense fine sand layers

CHEN Cheng¹, LAI Hongpeng¹, LIU Yuyang², ZHU Xinjian¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to mitigate the impact of advanced grouting reinforcement on the underground environment, it's necessary to employ low-pressure slow injection for grouting. The dense fine sand layer exhibits a tight structure and high clay content. Consequently, under low grouting pressure, the diffusion radius of the existing grouting materials is limited, leading to ineffective reinforcement of the tunnel face. Based on the principles of component activation and particle size optimization, the novel grouting material is developed using the ground granulated blast-furnace slag (GGBS), ultrafine fly ash (UFFA) and ultrafine Portland cement (UFPC) as the primary components, with the addition of an appropriate quantity of composite activating. Through the laboratory experiments, the characteristics of slurry fluidity, setting time and unconfined compressive strength of the novel grouting materials under the influences of varying mix ratios and contents of composite activator are investigated. The reinforcement effects of the Portland cement (OPC), UFPC and new grouting materials are compared and analyzed using a self-developed small pipe grouting full-scale test device. The diffusion characteristics and the change in the final grouting pressure under the influences of overburden load and water content are elucidated. The experimental results show that at a water-solid ratio of 1:1, a mass ratio of 4:2:4 for the GGBS, UFFA and UFPC, and a composite activator content of 4%,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278391, 51978064); 国家自然科学基金青年基金项目(51908051); 中国博士后科学基金项目(2021M700534)
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52278391, 51978064), the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (Grant No. 51908051), China Postdoctoral Science Foundation Project (Grant No. 2021M700534).

收稿日期(Received): 2024-03-20 修回日期(Revised): 2024-09-28 接受日期(Accepted): 2024-10-12 网络出版日期(Online): 2024-10-13

*通信作者 (E-mail: laihp168@chd.edu.cn)

the new grouting material exhibits optimal slurry fluidity, controllable setting time and high stone body strength. When using the advanced small pipe grouting method for reinforcement, the OPC slurry diffuses in dense fine sand layer through compaction process, the UFPC slurry through compaction-splitting process and the new grouting material through permeation-splitting processes. The new grouting material exhibits superior diffusion and reinforcement properties, surpassing the UFPC, while the OPC demonstrates the least favorable characteristics in comparison. Furthermore, the new materials should maintain low-pressure grouting during the initial stage of the process to mitigate the risk of excessive grout-causing localized sand splitting and subsequent reinforcement failure. The final grouting pressure linearly increases with the increase of the overlying load and water content, with an increase of 50 kPa in the overlying load resulting in an approximate 50 kPa increase in the grouting pressure. A 2% increase in the water content leads to an increase of around 40 kPa in the grouting pressure. The research findings have certain guiding significance for the theoretical researches and engineering applications of grouting.

Key words: metro tunnel; shallow buried subterranean excavation method; dense fine sand layer; small pipe grouting reinforcement; slurry diffusion pattern; grouting parameter

0 引言

细砂层胶结强度低、围岩自稳能力差^[1-2], 暗挖地铁隧道施工过程中, 拱顶掉块、掌子面坍塌等事故频发, 严重影响了施工进度及施工人员安全。采用超前小导管进行注浆加固时, 为降低施工对周围环境及交通设施影响, 要求将注浆压力控制在1 MPa以内, 加之细砂层结构密实, 使得现有注浆材料扩散半径小, 无法对密实细砂层进行有效加固^[3-5]且水泥材料生产过程具有高耗能、高污染及高二氧化碳排放^[6]等缺点, 与现阶段绿色施工理念相违背。因此, 研发新型注浆材料, 给出新型材料注浆参数, 探究新型材料扩散特性为注浆加固工程提供科学依据, 已成为亟待解决的问题。

注浆材料是注浆加固工程中至关重要的一部分, 对注浆加固效果有着直接影响。近年来, 随着人们环保意识增强及矿产资源稀缺, 利用固体废弃物制备新型注浆材料的理念引起了学者们的广泛关注。Song等^[7]通过室内宏-微观试验, 探究了矿渣、钢渣及粉煤灰协同作用机理, 发现矿渣不仅可以促进钢渣发生水化反应, 而且能够提高注浆材料结构密实性; 肖杰等^[8]通过室内试验发现水灰比相同, 随着粉煤灰掺量增加, 浆液流动度、结石率均呈现出增大趋势; 张健等^[9]发现赤泥可提高浆液泵送性能, 但会影响浆液结石体强度, 建议赤泥最优掺量为40%~60%; 王强等^[10]发现钢渣对结石体早期强度有一定抑制作用, 但可以增加结石体后期强度; 曾铭乐等^[11]发现煤矸石粉在常温下活性较低, 需要高温煅造后其活性才能被激发。上述学者对固体废弃物基注浆材料水化作用机理进行了详细论述, 但固体废弃物基注浆材料普遍存在早期强度低的问题, 导致其工程应用受限。

注浆加固工程具有一定隐蔽性, 且施工环境复杂多变。试验法能够直观、全面、真实地反映材料扩散

特性, 成为注浆理论研究的重要手段。刘奇等^[12]通过自主研制的小导管注浆装置探究了水泥浆液在充填黏性土中的加固效果; 沙飞等^[13]、Min等^[14]研制了室内一维可视化砂土渗透注浆装置, 揭示了砂土介质渗透扩散机理; 张连震等^[15]研制了三维可视化注浆装置, 发现水泥-水玻璃浆液在砂层中的扩散方向与大主应力方向一致。上述试验装置, 能够直观地观测到浆液扩散过程, 但装置尺寸较小, 无法避免壁面效应对试验结果的影响。张伟杰等^[16]、张忠苗等^[17]研制了大型三维注浆试验装置, 发现随着水灰比增大, 浆液在黏土层中的扩散模式由压密注浆逐渐转变为劈裂注浆。上述试验装置空间较大, 避免了尺寸效应对注浆结果产生的影响, 但存在试验成本高、试验周期长等缺点。

本文以矿渣微粉、超细粉煤灰等固体废弃物为主, 掺入适量超细水泥及复合激活凝聚剂, 制备了新型注浆材料, 探究了新型材料工作性能。采用自主研制的小导管注浆装置, 对比分析了普通水泥、超细水泥及新型注浆材料加固效果, 揭示了不同影响因素下新型材料浆液扩散特性及注浆终压变化规律, 研究成果可为细砂层暗挖地铁隧道注浆加固工程提供一定借鉴。

1 试验概况

1.1 新型注浆材料设计理念

注浆材料主要包括化学浆液与非化学浆液, 化学浆液具有可注性好、抗渗性高等优点, 但部分聚氨酯类化学浆液具有一定毒性, 易造成环境污染且价格昂贵, 导致其在地铁加固工程中应用受限。非化学浆液是指以水泥、黏土、粉煤灰等颗粒与水混合而成的悬浊液, 这类浆液材料来源广泛、价格低廉且不污染环境, 在注浆加固工程中得到了广泛应用, 但其粒径较大, 很难进入渗透系数小于 5×10^{-2} cm/s 及粒径小于0.2 mm 的土体中。在上述背景下, 超细水泥、矿渣微

粉、超细粉煤灰等超细粒径材料应运而生，其平均粒径在 $2\sim10\text{ }\mu\text{m}$ ，有效改善了非化学浆液的可注性。此外，矿渣微粉、超细粉煤灰等固体废弃物中含有大量CaO、Al₂O₃及SiO₂等物质，在激活凝聚剂激发作用下能够生成大量胶凝物质替代水泥制品用量，具有低能耗、低碳排放等优点，与超细水泥协同作用后，可以调节超细水泥浆液工作性能。

1.2 试验材料

新型注浆材料由矿渣微粉、超细粉煤灰及超细硅酸盐水泥组成，优化剂为复合激活凝聚剂。注浆原材料及其主要化学成分，见图1，表1。材料粒径分布见图2。由图2可知：超细粉煤灰、矿渣微粉及超细水泥粒径主要集中在 $1.4\sim7.2, 2.1\sim8.3, 3.1\sim14.7\text{ }\mu\text{m}$ 。

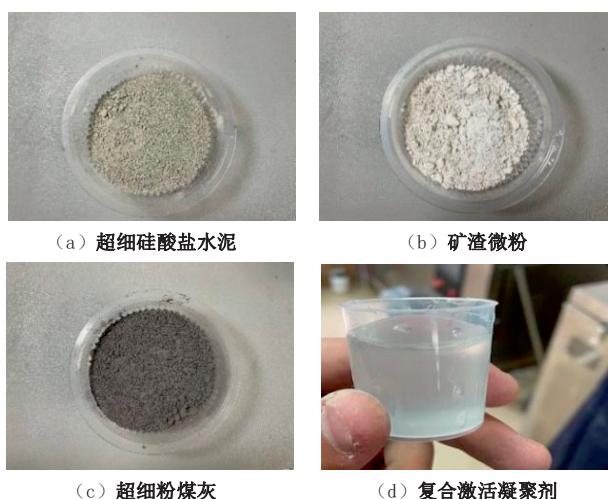


图1 原材料

Fig. 1 Raw materials

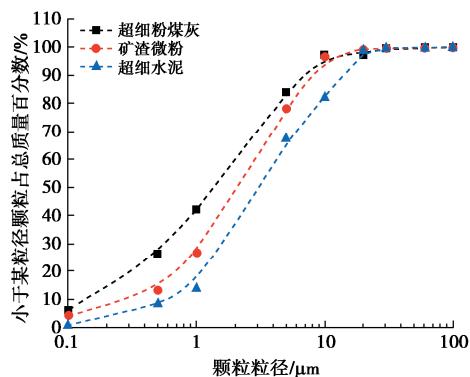


图2 材料粒径分布

Fig. 2 Grain-size distribution curves of raw materials

表1 注浆原材料主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of grouting raw materials

原材料	各化学成分质量分数/%						烧失量/%
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	
超细水泥	59.94	11.15	21.79	2.46	1.78	2.88	2.90
矿渣微粉	40.34	12.32	28.15	16.06	0.35	2.78	2.12
超细粉煤灰	9.23	22.26	60.32	0.39	7.24	0.56	2.98

1.3 试验方法

浆液流动度：根据《混凝土外加剂匀质性试验方法：GB/T 8077—2012》^[18]中的规定，采用内壁光滑的金属截锥圆模对浆液流动度进行测试。

浆液凝结时间：根据《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法：GB/T 1346—2011》^[19]中的规定，采用维卡仪对浆液初凝及终凝时间进行测试。

浆液结石体无侧限抗压强度：根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程：JTG 3420—2020》^[20]中的规定，将搅拌均匀的浆液倒入试模中，脱模后进行标准养护，对养护龄期为1, 2, 3, 7, 28 d浆液结石体强度进行测试，试验测试装置见图3。



图3 测试装置

Fig. 3 Testing devices

1.4 试验方案

固体废弃物基注浆材料早期强度低而注浆加固工程对时效性要求较高，为保证注浆初期浆液结石体就具有一定强度，根据前期试验结果，水固比（水与固体原材料的总质量比）为1:1，超细水泥掺量固定为40%，剩余部分按矿渣微粉与超细粉煤灰总量占比60%进行掺配，共7种工况。复合激活凝聚剂复掺量分别占新型浆液总质量0%, 2%, 4%, 6%, 8%，制备新型浆液，试验共35组。根据上述试验方法，对不同配比下新型注浆材料浆液流动度、凝结时间及无侧限抗压强度进行测试，具体材料配比见表2。

表2 新型注浆材料配合比

Table 2 Mix proportion of new grouting materials

水固比	材料配比/%			复合激活凝聚剂/%
	超细水泥	矿渣微粉	超细粉煤灰	
1:1	40	60	0	
		50	10	
		40	20	0, 2, 4,
		30	30	6, 8
		20	40	
		10	50	
		0	60	

1.5 试验结果分析

(1) 浆液流动度

浆液流动度是表征施工和易性的重要指标，杜野等^[4]建立了浆液流动度与可泵时间的关系，发现浆液

流动度介于 140~200 mm, 就能满足现场施工要求。复合激活凝聚剂掺量及材料配比影响下浆液流动度变化见图 4。由图 4 可知: ①随着超细粉煤灰掺量增加, 浆液流动度呈现出逐渐增大趋势, 表明超细粉煤灰具有显著“降黏”作用。以复合激活凝聚剂掺量 4%为例, 不同配比下新型注浆材料浆液流动度分别为 221, 252, 267, 271, 277, 282, 285 mm。当粉煤灰掺量超过 20%时, 浆液流动度增加量已不明显。因此, 建议粉煤灰最优掺量为 20%。②随着复合激活凝聚剂掺量增加, 浆液流动度呈现出减小的趋势。这主要是由于复合激活凝聚剂与超细水泥颗粒发生了水化反应, 短时间内生成了大量胶凝物质, 从而降低了浆液流动性能。

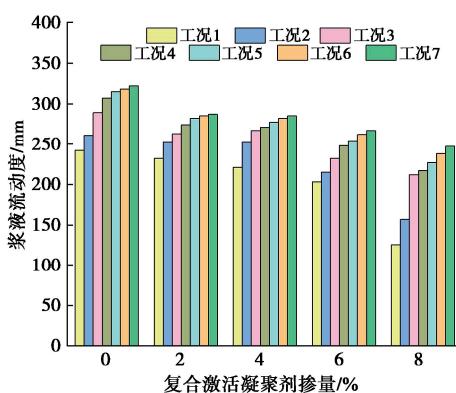


图 4 新型材料浆液流动度变化

Fig. 4 Slurry fluidity of new materials

(2) 浆液凝结时间

浆液凝结时间对浆液可泵送性及施工工艺影响较大, 浆液凝结时间过快, 不仅造成浆液在地层中扩散半径小, 而且影响浆液长距离输送。浆液凝结时间慢, 则短期内注浆结石体强度低, 对施工进度及施工安全产生较大威胁。复合激活凝聚剂掺量及材料配比影响下浆液凝结时间变化见图 5。由图 5 可知: ①随着超细粉煤灰掺量增加, 浆液凝结时间呈现出先增大后稳定的趋势, 这主要是由于粉煤灰中含有大量 SiO_2 , 在复合激活凝聚剂作用下生成了大量 SiO_3^{2-} 离子, 缺少浆液水化反应中的 Ca^{2+} , 减缓了浆液水化反应速率; ②随着复合激活凝聚剂掺量的增加, 浆液凝结时间呈现出减小的趋势。以粉煤灰掺量 20%为例, 当复合激活凝聚剂掺量分别为 0%, 2%, 4%, 6%, 8%时, 浆液初凝时间为 428, 238, 124, 46, 31 min, 终凝时间为 723, 626, 376, 327, 387 min, 表明复合激活凝聚剂对浆液初凝时间影响显著。当复合激活凝聚剂掺量在 4%~6%时, 浆液初凝、终凝时间均在施工要求范围内。因此, 建议复合激活凝聚剂掺量控制在 4%~6%。

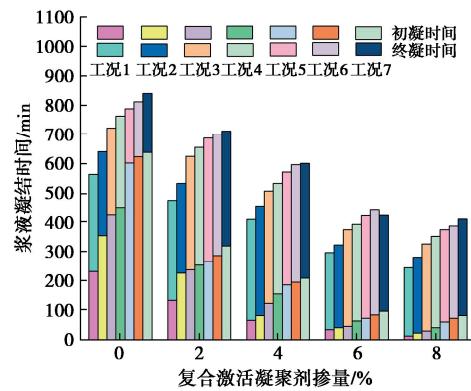


图 5 新型材料浆液凝结时间变化

Fig. 5 Setting time of slurry of new materials

(3) 浆液结石体无侧限抗压强度

浆液结石体强度越高, 意味着加固后围岩承载能力更强, 施工安全性更高, 注浆加固效果更好。粉煤灰掺量为 20%时, 不同复合激活凝聚剂掺量下, 结石体 1, 2, 3, 7, 28 d 无侧限抗压强度见图 6。由图 6 可知: 随着复合激活凝聚剂掺量增加, 结石体 1 d 及 28 d 无侧限抗压强度分别为 0.98, 1.86, 3.21, 5.67, 6.53 及 10.35, 20.21, 23.17, 21.74, 18.59 MPa, 表明复合激活凝聚剂对结石体早期强度有一定促进作用。当复合激活凝聚剂掺量超过 4%后, 结石体 28 d 强度开始下降, 这主要是由于浆液前期水化反应过快, 产生了较高热量, 导致结石体内部产生了一定数量的微小裂缝^[21]。

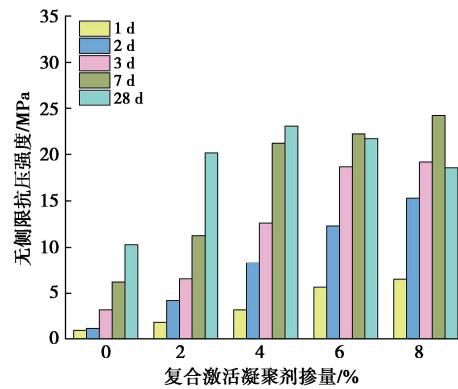


图 6 新型注浆材料浆液结石体强度

Fig. 6 Strengths of grout stone body of new grouting materials

2 注浆试验装置及试验方法

2.1 注浆试验装置

注浆试验采用自主研制的超前小导管注浆足尺试验装置, 该装置主要由砂层模拟装置、供压装置及注浆装置 3 部分组成, 试验装置细节见图 7。

(1) 砂层模拟装置

砂层模拟装置主要由试验架、试样加载仓、千斤

顶及压力测量装置组成。试验架由6根 $\varnothing 25$ 螺纹丝杆及上、中、下3个承载板构成,上、下承载板厚25 mm,直径800 mm,螺纹丝杆在上承载板与下承载板四周均匀分布。中承载板位于试样加载仓的顶部,厚20 mm,直径600 mm,上部焊接8根斜三角刚肋板,使上覆荷载能够均匀传递到砂土介质中,避免了加载过程中应力集中现象的产生。试样加载仓,厚度为10 mm,高800 mm,内径600 mm。千斤顶位于中承载板与上承载板之间,能够提供0~1 MPa上覆荷载,可真实模拟砂土赋存环境。压力测量仪埋设在中承载板表面下10 cm处,对加载过程中土体压力进行测量,量程0~1 MPa,综合误差±3 kPa,有效保证了加载精度。



图7 注浆试验装置

Fig. 7 Grouting test equipment

(2) 注浆装置

注浆装置由气动注浆机、储浆桶、高速搅拌机、注浆管及超前小导管组成。气动注浆机工作压力0~5 MPa,注浆速率0~30 L/min,满足试验要求。高速搅拌机转速2800 r/min,可对浆液进行高速均匀搅拌。注浆管采用高压注浆管,内径25 mm,可承受最大注浆压力20 MPa,保证了试验过程的安全。超前小导管采用地铁施工中常用的 $\varnothing 25$ 钢焊管,长750 mm,管头长300 mm,尾部250 mm内不开孔,剩余部分间隔100 mm梅花形环向布设 $\varnothing 8$ 溢浆孔,具体细节见图8。

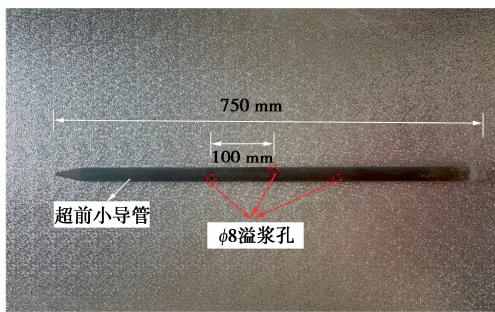


图8 超前小导管

Fig. 8 Advanced small pipe

(3) 供压装置

供压装置主要由空气压缩机、压力表及压力调节阀组成。空气压缩机工作压力0~5 MPa,容积80 L,供风量0.6 m³/min,通过 $\varnothing 32$ 高压软管与气动注浆机相连,软管顶部设有压力调节阀,可对注浆压力进行调节,真实模拟现场注浆工况。

2.2 试验方法

(1) 注浆材料

注浆材料主要包括:普通42.5硅酸盐水泥、超细硅酸盐水泥及自主研制的水固比为1:1,矿渣微粉、超细粉煤灰及超细水泥质量比为4:2:4,复合激活凝聚剂掺量为4%的新型注浆材料。

(2) 被注介质

被注介质为密实细砂,砂土试样取自西安地铁一号线三期秦皇南路站—白马河站区间富水砂层,砂层物理力学性质见表3。试样烘干后,进行室内筛分试验,砂土粒径分布及组成见图9。

表3 砂土试样物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of sand samples

含水率/%	不均匀系数 C _u	天然孔隙率	相对密度 D _r	压缩模量/MPa	G _s
15	10.14	0.58	0.82	8.8	2.67



图9 砂土粒径分布

Fig. 9 Grain-size distribution of sands

(3) 试验步骤

a) 砂土孔隙率测试:试验采用重塑砂土,为了保证重塑砂土与现场砂土物理力学特性相同,重塑砂土粒径分布及含量与原状砂土一致,采用相对密度指标对其孔隙率进行控制。根据《公路土工试验规程:JTG 3430—2020》^[22]及李珊珊等^[23]研究成果,采用振动锤击法,对砂土最小孔隙比进行测试。砂土最大孔隙率,采用量筒慢转法进行测试。

b) 试样拌合、装填:根据上述测定的砂土最大孔隙率及最小孔隙率,基于相对密度及土体孔隙率计算公式,如式(1),(2)所示,确定填土质量。砂土分5层装填,采用击实仪逐层击实,具体试验步骤见

图 10。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad . \quad (1)$$

式中: D_r 为相对密度; e_{\max} 为砂土最大孔隙率; e_{\min} 为砂土最小孔隙率; e 为砂土天然孔隙率,

$$e = \frac{G_s(1+w)\gamma_w}{\gamma} - 1 \quad . \quad (2)$$

式中: G_s 为砂土颗粒相对质量密度; w 为砂土含水率 (%); γ_w 为水的重度 (kN/m^3); γ 为砂土重度 (kN/m^3)。

c) 注浆试验: 制备注浆浆液, 采用高速搅拌机对浆液进行充分搅拌, 连接注浆管路, 打开电子台秤及高速摄像机, 对注浆过程中注浆量及注浆压力进行实时监测。

d) 注浆结束: 注浆结束的标志可用注浆量、注浆压力、注浆时间及注浆速率等参数进行衡量。崔玖江等^[24]研究发现在均质砂层中进行注浆时, 可将注浆量作为注浆结束的标志。单孔注浆量计算公式为

$$Q = \pi R^2 L n \alpha \quad . \quad (3)$$

式中: Q 为单孔浆液注入量 (m^3); R 为浆液扩散半径, 本文取 $R=0.3 \text{ m}$; L 为注浆段长度, 本文取 $L=0.3 \text{ m}$; n 为砂土天然孔隙率, 本文 $n=0.58$; α 为地层填充率, 对于密实细砂, 取 $\alpha=0.5$ 。

注浆结束 1 h 后, 对试验装置进行拆除, 查看砂土内部浆脉分布, 测量浆脉厚度。



图 10 试验步骤

Fig. 10 Test procedure

3 浆液扩散特性及注浆参数

3.1 浆液扩散特性

浆液扩散特性对注浆效果有重要影响, 一般来说, 浆液扩散距离越大, 覆盖的区域越广, 填充效果越好, 地层稳定性和承载能力越高。含水率为 15%, 地应力为 300 kPa 时, 普通硅酸盐水泥、超细硅酸盐水泥及新型注浆材料在密实细砂层中的扩散特性见图 11。由

图 11 可知: 普通水泥浆液在密实细砂层中扩散半径为 7 cm 左右, 扩散半径最小, 在细砂层中表现为不可注。超细水泥浆液扩散半径最大达 30 cm, 但存在局部扩散半径小的问题, 实际施工过程中可能会造成局部加固失效。新型注浆材料浆脉扩散半径均达到 30 cm 左右, 表明在扩散特性方面新型注浆材料 > 超细硅酸盐水泥 > 普通硅酸盐水泥。

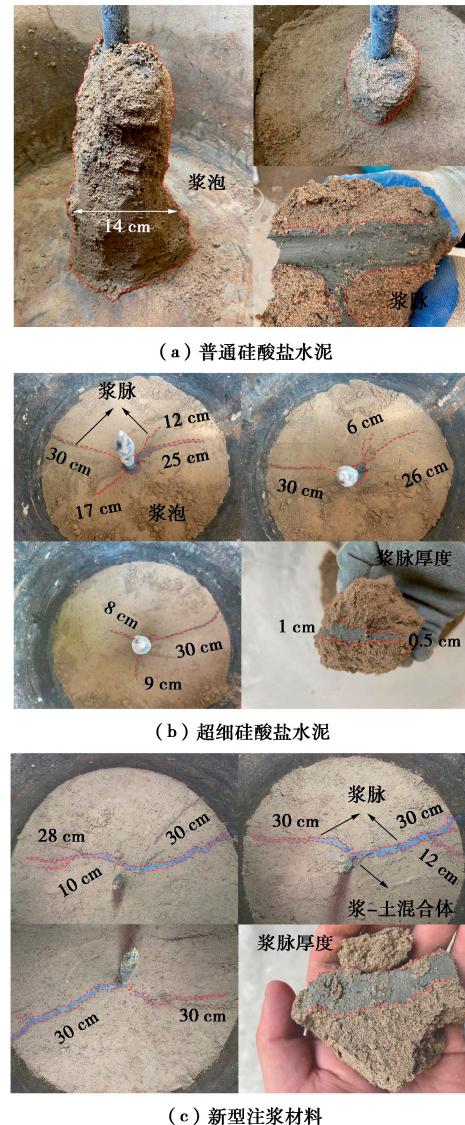


图 11 浆液扩散特性

Fig. 11 Characteristics of slurry diffusion

浆脉厚度越大, 表明砂层被挤密程度越大, 注浆效果越好。超细硅酸盐水泥及新型注浆材料浆脉厚度均表现为沿着浆液扩散锋面逐渐较小的趋势, 超细水泥浆脉厚度介于 0.5~1 cm, 而新型注浆材料浆脉厚度在 3~4 cm 左右, 表明新型材料加固性能最优。

普通硅酸盐水泥浆液在密实细砂层中以浆泡形式存在, 对周边砂土产生挤密作用, 浆泡沿着注浆管壁以“圆台”状发育, 局部区域可见微小裂缝, 表明普

通硅酸盐水泥主要以压密注浆扩散为主,这主要是由于普通水泥浆液颗粒较大,难以穿透砂土颗粒之间的微小孔隙。超细硅酸盐水泥浆液及新型注浆材料主要以浆脉形式存在,浆脉垂直于注浆管,以薄层板状发育。超细水泥浆液注浆完成后,注浆管壁局部范围内存在半径2~3 cm浆泡,表明超细硅酸盐水泥浆液主要以压密-劈裂注浆为主。而新型注浆材料注浆完成后,注浆管周边存在1~2 cm浆-土混合体,说明新型注浆材料主要以渗透-劈裂注浆为主。这主要是由于新型注浆材料粒径较小,在注浆压力作用下进入土体中,在砂土孔隙中进行渗透填充。随着注浆压力增大,浆液内能量积聚加之材料渗透能力较高,从而使得砂土产生劈裂现象。

3.2 注浆压力-注浆量-注浆时间变化规律

试验过程中注浆压力-注浆量-注浆时间($P-Q-T$)实时变化规律,对于分析注浆过程尤为重要。含水率为15%,地应力为300 kPa时,普通硅酸盐水泥、超细硅酸盐水泥及新型注浆材料 $P-Q-T$ 曲线见图12。由图12可知:注浆量与注浆压力随注浆时间增加表现为一定波动性,这主要是由于活塞式注浆泵工作过程中,活塞在缸套中往复运动,造成注浆量与注浆压力产生波动。注浆量在0~10 s内快速增长,而注浆压力近似为零,主要是由于试验开始后,浆液首先要填充注浆管及超前小导管,浆液在此阶段处于无外界条件约束状态,注浆量快速增加而注浆压力则保持为零。

由图12(a)可知,普通水泥浆液在10~124 s内,注浆压力与注浆量分别为1.1 MPa及2.2 L/min。该阶段内,浆液内部积聚的能力较小,无法直接将砂土试样进行劈裂,主要以浆泡形式存在对周边砂土进行挤密。当注浆时间超过124 s后,注浆压力持续增加,最大达1.46 MPa,注浆量则急剧减小,在0.12 L/min左右波动,该阶段内浆液扩散过程中,水泥颗粒受到砂土介质骨架的吸附拦截而逐渐滤出滞留,导致水泥颗粒在砂土孔隙中沉积,产生了渗透效应,造成浆液无法注入,使得注浆压力快速上升,而注浆量急剧下降。

由图12(b)可知,注浆初期,超细硅酸盐水泥浆液注浆压力与注浆量分别在0.51 MPa及2.1 L/min左右波动,该阶段内超细硅酸盐水泥浆液主要以压密状态进行扩散。注浆时间超过54 s后,注浆压力与注浆量激增,浆液内部积聚的能力使得砂土发生破坏,表明该阶段为劈裂阶段。

由图12(c)可知,新型注浆材料注浆初期,注浆压力在0.28 MPa左右波动,表明该阶段浆液主要通

过渗透方式在砂土中扩散,注浆量约为超细水泥的1.7倍左右,注浆量较大。试验过程中发现,新型材料注浆前期注浆量超过6 L/min后,浆液将会从砂土中涌出。因此,新型材料注浆前期,应严格控制注浆量,避免注浆量过大引起砂土局部劈裂,导致加固失效的问题。当注浆时间达80 s时,土体发生破坏,浆液起劈压力在0.52 MPa左右,表明新型注浆材料具有低压可注性。

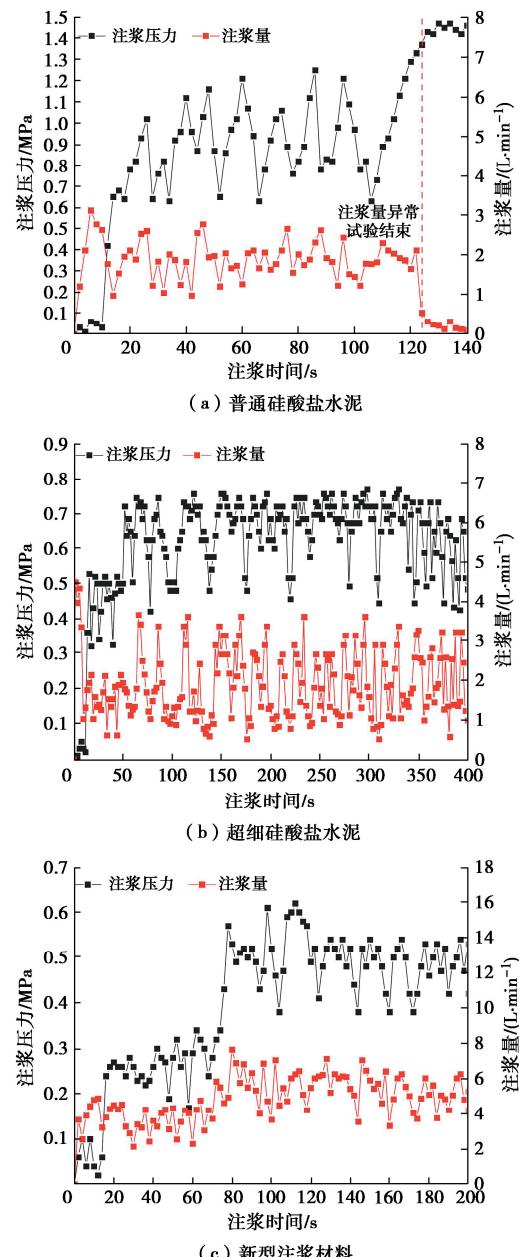


图12 不同注浆材料 $P-Q-T$ 曲线

Fig. 12 P-Q-T curves of different grouting materials

4 不同影响因素下新型材料扩散特性及注浆终压

浆液扩散特性及注浆终压是现场施工过程中重要

的施工参数, 因此, 探究新型材料在不同影响因素下浆液扩散特性及注浆终压变化特性显得尤为重要, 研究发现含水率及上覆荷载是影响浆液扩散特性及注浆终压的重要原因^[25]。地铁隧道埋深通常在7~20 m, 本文试验参考上述埋深对土体施加50~300 kPa上覆荷载。试验过程中, 对细砂含水率进行测试, 发现其最大含水率为15.7%, 取含水率分别为7%, 9%, 11%, 13%, 15%, 共30种试验工况, 如表4所示。

表4 试验工况

Table 4 Test conditions

上覆荷载/kPa	含水率/%
50, 100, 150, 200, 250, 300	7, 9, 11, 13, 15

4.1 不同影响因素下新型材料浆液扩散特性

上覆荷载为300 kPa, 不同含水率影响下新型注浆材料浆液扩散特性见图13。由图13可知: 随着砂土含水率增大, 超前小导管周边浆-土混合体半径由5 cm逐渐减小至1~2 cm左右, 说明新型材料注浆过程中, 浆液渗透阶段逐渐降低, 主要以劈裂扩散的方式在砂土中进行扩散。此外, 浆脉厚度也从6.5 cm左右, 减小至3~4 cm, 这主要是砂土内部土颗粒之间孔隙水压力逐渐增大造成的。

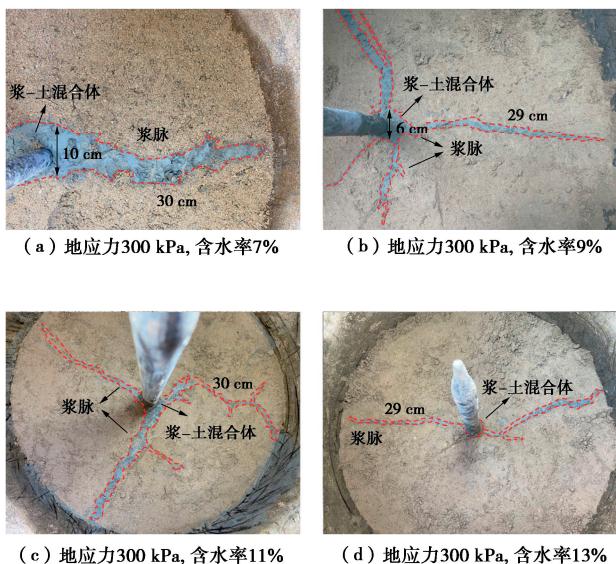


图13 含水率影响下新型注浆材料浆液扩散特性

Fig. 13 Diffusion characteristics of slurry of new grouting materials under influences of water content

含水率15%, 不同上覆荷载影响下新型注浆材料浆液扩散特性见图14。由图14可知: 随着上覆荷载增加, 新型注浆材料浆脉形状逐渐由“树枝状”转变为“一”字形, 主浆脉及其周边次生浆脉数量逐渐减小, 出现这种现象的主要原因是随着上覆荷载增加, 砂土颗粒之间接触压力增大, 使得浆液扩散较为困难。

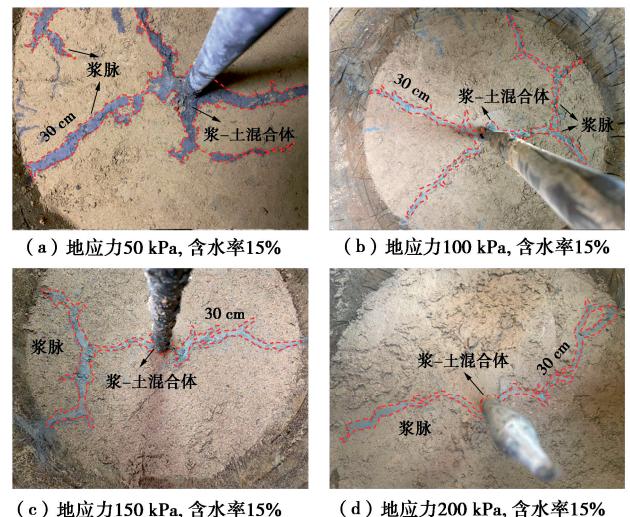


图14 上覆荷载影响下新型注浆材料浆液扩散特性

Fig. 14 Diffusion characteristics of slurry of new grouting materials under influences of overburden

4.2 不同影响因素下新型材料注浆终压

(1) 上覆荷载影响

不同上覆荷载影响下新型注浆材料注浆终压变化规律见图15。由图15可知: 含水率一定时, 随着上覆荷载增加, 注浆终压也表现为逐渐增大趋势。这主要是由于上覆荷载增大, 土颗粒骨架承担的荷载也相应变大, 造成土颗粒之间接触压力增大, 砂土结构也相对密实, 浆液需要克服的阻力也就越大, 相应的注浆压力也就越高。不同上覆荷载下, 注浆终压增长形式类似于线性, 以含水率15%为例, 当上覆荷载分别为50, 100, 150, 200, 250及300 kPa时, 新型材料注浆终压分别为0.28, 0.32, 0.37, 0.42, 0.48及0.52 MPa, 表明上覆荷载每增加50 kPa, 注浆终压增加50 kPa左右。

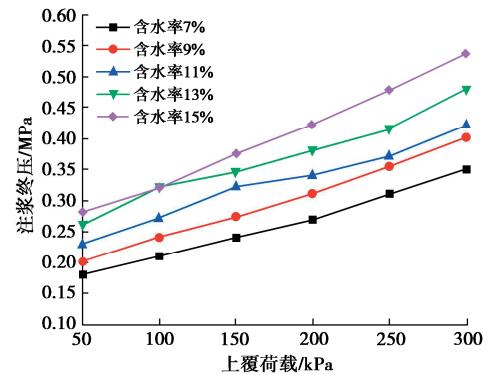


图15 上覆荷载影响下新型注浆材料注浆终压变化

Fig. 15 Final grouting pressures of new grouting materials under influences of overburden load

(2) 含水率影响

不同含水率影响下新型注浆材料注浆终压变化规

律见图 16。由图 16 可知：上覆荷载一定，随着含水率增加，新型材料注浆终压也呈现出逐渐增大的趋势，这主要是由于当含水率增加时，砂土颗粒之间的孔隙逐渐由水分子填充，引起砂土颗粒之间孔隙水压力增大，注浆过程中浆液需要更大的能量将土体劈开。以上覆荷载 300 kPa 为例，当含水率分别为 7%，9%，11%，13%，15% 时，新型材料注浆终压分别为 0.35，0.40，0.43，0.48，0.52 MPa，表明土体含水率每增加 2%，注浆终压增加 40 kPa 左右。

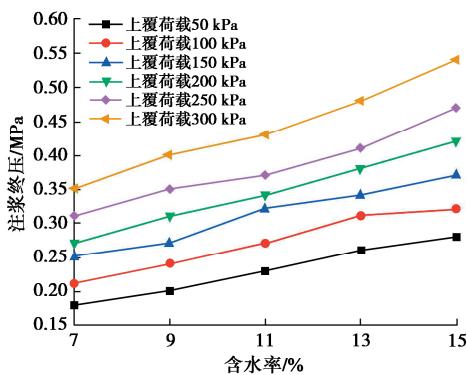


图 16 含水率影响下新型注浆材料注浆终压变化

Fig. 16 Final grouting pressures of new grouting materials under influences of water content

5 结 论

本文以矿渣微粉、超细粉煤灰等固体废弃物为主，制备了新型注浆材料，探究了不同配合比、复合激活凝聚剂掺量影响下新型材料工作性能。对比分析了普通水泥、超细水泥及新型注浆材料浆液加固效果，揭示了上覆荷载与含水率影响下新型材料扩散特性及注浆终压变化规律，主要得到以下 5 点结论。

(1) 研制了新型超前加固材料，试验结果表明，水固比为 1:1，矿渣微粉、粉煤灰及超细水泥质量比为 4:2:4，复合激活凝聚剂掺量 4% 时，新型注浆材料浆液流动度达 277 mm，浆液初凝及终凝时间分别为 124 min 及 508 min，结石体 24 h 强度达 3.21 MPa，浆液工作性能满足施工要求。

(2) 研发了砂层小导管注浆足尺试验装置，试验结果表明，新型注浆材料在密实细砂层中扩散模式以渗透-劈裂为主，超细水泥浆液则以压密-劈裂为主，普通水泥浆液以压密为主。在扩散特性方面新型注浆材料优于超细硅酸盐水泥，普通硅酸盐水泥则表现为不可注。

(3) 注浆初期，新型注浆材料应保持低压注入，保障浆液充分渗透，同时控制注浆量不超过 6 L/min，

防止注浆量过大，引起砂土局部劈裂，造成注浆加固失效的问题。

(4) 随着含水率增加，新型注浆材料渗透阶段逐渐降低，浆液主要以劈裂扩散方式在砂土中进行扩散；随着上覆荷载增加，新型注浆材料浆脉形状逐渐由“树枝状”转变为“一”字形。

(5) 注浆终压随着注浆压力与土体含水率的增大近似呈线性增长，上覆荷载增加 50 kPa，注浆压力增大 50 kPa 左右，含水率增加 2%，注浆压力增加量约为 40 kPa。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性财务利益或个人关系。
The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

作者贡献/Authors' Contributions: 来弘鹏和刘禹阳参与了试验方案设计；陈铖和朱新健完成了模型试验操作；陈铖、来弘鹏和刘禹阳参与了论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by LAI Hongpeng and Liu Yuyang. The physical model experimental was completed by CHEN Cheng and ZHU Xinjian. The manuscript was drafted and revised by CHEN Cheng, LAI Hongpeng and Liu Yuyang. All authors have read the final version of this paper and consented for submission.

参 考 文 献：

- [1] 潘泓, 蔡磊, 罗俊兴, 等. 上细下粗富水复合砂层渗透破坏机制试验及初步工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1778-1788. (PAN Hong, CAI Lei, LUO Junxing, et al. Experimental study on seepage failure mechanism in an upper-fine-lower-coarse composite sandy strata and its preliminary engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(7): 1778-1788. (in Chinese))
- [2] 张民庆, 何志军, 肖广智, 等. 第三系富水砂层隧道工程特性与施工技术研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(9): 76-81. (ZHANG Minqing, HE Zhijun, XIAO Guangzhi, et al. Research on the tunnel engineering characteristics and construction technology of the tertiary water rich sand[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(9): 76-81. (in Chinese))
- [3] LI S C, SHA F, LIU R T, et al. Investigation on fundamental properties of microfine cement and cement-slag grouts[J].

- Construction and Building Materials, 2017, **153**: 965-974.
- [4] 杜野, 裴向军, 黄润秋, 等. 黏度时变性注浆材料流动特性与应用研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(12): 3498-3504. (DU Ye, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Study on flow characteristics and application of viscosity time-varying grouting material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(12): 3498-3504. (in Chinese))
- [5] ZHANG B, ZHANG S J. Study on grouting reinforcement method under soft water-rich sand layer in metro station[J]. Journal of Engineering Mechanics and Machinery, 2020, **5**(1): 5-11.
- [6] CHEN R, LAI H P, CUI D, et al. Alkali-activated mortar for tunnel-lining structure repair[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, **31**(10): 04019217.
- [7] SONG W L, ZHU Z D, PU S Y, et al. Multi-technical characterization and correlations between properties of standard cured alkali-activated high-calcium FA binders with GGBS as additive[J]. Construction and Building Materials, 2020, **241**: 117996.
- [8] 肖杰, 刘财壮, 刘志勇, 等. CFB灰-钢渣粉-矿渣-脱硫石膏全固废公路下伏采空区注浆材料特性研究[J]. 中国公路学报, 2024, **37**(6): 193-206. (XIAO Jie, LIU Caizhuang, LIU Zhiyong, et al. Research on characteristics of solid waste grouting material of CFB ash-steel slag powder-blast furnace slag for goaf underlying highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, **37**(6): 193-206. (in Chinese))
- [9] 张健, 王川, 李召峰, 等. 赤泥基绿色高性能注浆材料工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(增刊2): 3339-3352. (ZHANG Jian, WANG Chuan, LI Zhao-feng, et al. Experimental study on the engineering characteristics of red mud-based green high-performance grouting material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(S2): 3339-3352. (in Chinese))
- [10] 王强, 黎梦圆, 石梦晓. 水泥—钢渣—矿渣复合胶凝材料的水化特性[J]. 硅酸盐学报, 2014, **42**(5): 629-634. (WANG Qiang, LI Mengyuan, SHI Mengxiao. Hydration properties of cement-steel slag-ground granulated blast furnace slag complex binder[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, **42**(5): 629-634. (in Chinese))
- [11] 曾铭乐, 王志祥. 固废基道路地聚物注浆材料的组分优化及机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, **42**(8): 3033-3044. (ZENG (Ming)(Le|Yue), WANG Zhixiang. Composition optimization and mechanism study of solid waste based road geopolymer grouting materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, **42**(8): 3033-3044. (in Chinese))
- [12] 刘奇, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 岩溶充填黏土注浆加固试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊1): 3179-3188. (LIU Qi, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang, et al. Experimental study on grouting reinforcement of Karst filled clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S1): 3179-3188. (in Chinese))
- [13] 沙飞, 李术才, 林春金, 等. 砂土介质注浆渗透扩散试验与加固机制研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(11): 4259-4269. (SHA Fei, LI Shucui, LIN Chunjin, et al. Research on penetration grouting diffusion experiment and reinforcement mechanism for sandy soil porous media[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(11): 4259-4269. (in Chinese))
- [14] MIN F L, SONG H B, ZHANG N. Experimental study on fluid properties of slurry and its influence on slurry infiltration in sand stratum[J]. Applied Clay Science, 2018, **161**: 64-69.
- [15] 张连震, 李志鹏, 刘人太, 等. 砂层劈裂-压密注浆模拟试验系统研发及试验[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 665-674. (ZHANG Lianzhen, LI Zhipeng, LIU Rentai, et al. Simulation tests on fracture-compaction grouting process in sand layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 665-674. (in Chinese))
- [16] 张伟杰, 李术才, 魏久传, 等. 三维注浆模型试验系统研制及应用[J]. 岩土力学, 2016, **37**(3): 902-911. (ZHANG Weijie, LI Shucui, WEI Jiuchuan, et al. Development of a 3D grouting model test system and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(3): 902-911. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 混凝土外加剂匀质性试验方法: GB/T 8077—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. (Methods for Testing Uniformity of Concrete Admixture: GB/T 8077—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese))
- [19] 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法: GB/T 1346—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. (Test Methods for Water Requirement of Normal Consistency, Setting Time and Soundness of the Portland Cement: GB/T 1346—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese))

- [1346—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese))
- [20] 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程: JTG 3420—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. (Testing Methods of Cement and Concrete for Highway Engineering: JTG 3420—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese))
- [21] 罗彪, 罗正东, 任辉启, 等. 速凝剂对低水胶比浆体早期水化与微观结构的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(9): 87-93. (LUO Biao, LUO Zhengdong, REN Huiqi, et al. Effects of accelerators on the early hydration and microstructure of paste with low water-binder ratio[J]. Materials Reports, 2023, 37(9): 87-93. (in Chinese))
- [22] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. (Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese))
- [23] 李珊珊, 李大勇, 高玉峰. 砂土最大最小孔隙比测定及其影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 554-561. (LI Shanshan, LI Dayong, GAO Yufeng. Determination of maximum and minimum void ratios of sands and their influence factors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 554-561. (in Chinese))
- [24] 崔玖江, 崔晓青. 隧道与地下工程注浆技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (CUI Jiujiang, CUI Xiaoqing. Grouting Technology for Tunnel and Underground Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [25] 姜鹏, 张庆松, 刘人太, 等. 富水砂层合理注浆终压室内试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 302-310. (JIANG Peng, ZHANG Qingsong, LIU Rentai, et al. Laboratory tests on reasonable grouting final pressure of water-rich sand layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 302-310. (in Chinese))