

郭天宇,李慎刚,刘晋宁,等.膨胀岩地层盾构壁后混杂纤维注浆浆液性能研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(1):71-82.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20240079

GUO Tianyu,LI Shengang,LIU Jinning,et al.Research on the performance of hybrid fiber grouting slurry behind the shield tunnel segment in expansive rock stratum[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(1):71-82.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20240079

膨胀岩地层盾构壁后混杂纤维注浆浆液性能研究

郭天宇¹,李慎刚^{1*},刘晋宁¹,蒋琛¹,籍湛²

(1. 东北大学资源与土木工程学院,辽宁沈阳110819;

2. 沈阳地铁集团有限公司沈阳盾构设备工程有限公司,辽宁沈阳110000)

摘要:为解决穿越膨胀岩地层的盾构隧道管片受到特殊围岩吸水膨胀变形不利影响的问题,以钠基膨润土、水泥、粉煤灰、河砂、水为原材料配制的盾构壁后注浆浆液作为基体,混掺加入聚丙烯纤维(PPF)和玄武岩纤维(BF),提高注浆结石体的缓冲能力、变形能力和韧性。通过设定不同水平的纤维体积掺量和纤维体积混掺比,探究混杂纤维对注浆浆液性能的影响规律,分析了作用机理,最后建立力学性能预测模型。研究结果表明:混杂纤维的加入对注浆浆液的性能影响显著,特别是对注浆结石体的力学性能有明显的改良增韧效果。研究结论可为混杂纤维在盾构壁后注浆工程的应用提供参考依据。

关键词:膨胀岩地层;盾构壁后注浆浆液;混杂纤维;体积掺量;体积混掺比;力学性能预测模型

中图分类号:U231

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)01-0071-12

Research on the performance of hybrid fiber grouting slurry behind the shield tunnel segment in expansive rock stratum

GUO Tianyu¹, LI Shengang^{1*}, LIU Jinning¹, JIANG Chen¹, JI Zhan²

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Shenyang Shield Tunnel Equipment Engineering Company Limited, Shenyang Metro Group Company Limited, Shenyang 110000, China)

Abstract:To address the issue of shield tunnel segment being adversely affected by the expansion deformation resulting from water absorption in special surrounding rock when tunneling through expansive rock stratum, a grouting slurry formulated with sodium bentonite, cement, fly ash, river sand, and water is used as the matrix for the backfill behind the shield tunnel segment. Polypropylene fiber (PPF) and basalt fiber (BF) are blended into this slurry to enhance the cushioning capacity, deformation resistance, and toughness of the grouting stone body. By setting different levels of fiber volume contents and fiber volume hybrid ratios, the influence pattern of hybrid fiber on the properties of grouting slurry was explored, and the mechanism of action was analyzed. Finally, a mechanical property prediction model was established. The research results indicate that the addition of hybrid fiber has a significant impact on the properties of the grouting slurry, particularly exhibiting notable improvement and toughening effects on the mechanical properties of the grouting stone body. The research conclusions can provide a reference for the application of hybrid fiber in the grouting project behind the shield tunnel segment.

Key words:expansive rock stratum;grouting slurry behind the shield tunnel segment;hybrid fiber;volume content; volume hybrid ratio;mechanical property prediction model

0 引言

盾构法施工具备自动化程度高、掘进施工效率高、对周围地层扰动小、安全性高等优点,已

被广泛应用于地铁建设^[1-4]。盾构施工过程中,由于刀盘直径大于管片外径,会在盾尾管片与周围土体之间形成空隙^[5],为防止地表沉降等问题发生,需要通过壁后注浆填充空隙。其中,壁后注

收稿日期:2024-04-05 修回日期:2024-05-15 接受日期:2024-05-22 责任编辑:焦丽

基金项目:国家自然科学基金项目(51878127);中央高校基本科研业务费项目(N180104013)

作者简介:郭天宇(1998-),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事盾构隧道壁后注浆材料方面的研究。E-mail:13931701934@163.com

通信作者:李慎刚(1978-),男,辽宁葫芦岛人,博士,讲师,主要从事盾构隧道壁后注浆材料方面的研究。E-mail:lsglili@163.com

浆浆液性能对降低管片上浮量、控制盾尾地表沉降、提高管片抗渗能力、改善管片均匀受力状态起着关键作用^[5-7]。目前,学者们对于盾构壁后注浆浆液的研究可以简要概括为以下几类:一是注浆浆液原材料配合比优化研究^[8-12],二是注浆浆液新型制备材料开发研究^[13-19],三是壁后注浆浆液扩散机理研究^[20-24],四是注浆效果评估研究^[25-28],五是注浆浆液、管片、围岩之间的相互作用机理研究^[29-31]。此外,许多学者针对特定地层的盾构壁后同步注浆问题进行了深入研究,如岩溶地区水下盾构隧道^[15]、海底盾构隧道^[17]等,所采用的注浆材料都能达到良好的施工性能,满足特定地层的要求。穿越膨胀岩地层的盾构隧道管片会受到膨胀岩吸水膨胀、失水收缩变形的影响,但针对膨胀岩地层盾构壁后注浆浆液的研究鲜见报道。

膨胀岩吸水会产生膨胀变形,当岩土体变形受到约束时,就会产生膨胀力。考虑到注浆结石体在服役过程中会受到膨胀力,可向注浆材料中加入纤维阻止注浆结石体内部裂纹的发展,提高抗拉强度、断裂能,并延缓承载时裂缝的出现,同时使抗渗性能得到较大程度的改善。游永锋等^[32]从同步注浆浆液配合比入手,采用配合比设计、试验改进配合比的方法,研究减水剂、聚丙烯纤维及絮凝剂对同步注浆浆液性能的影响。通过调整胶凝材料组分、水胶比,添加絮凝剂、有机纤维和减水剂,制备出可减少管片上浮、抗水分散性好、抗渗性好于一体的高性能同步注浆材料。杨丽冰^[33]以南宁轨道交通一号线穿越膨胀岩地层为工程背景,采用室内力学试验及模型试验,结合数值模拟的方法对膨胀岩地层盾构壁后注浆浆液进行研究。张世荣等^[34]以南宁轨道交通一号线穿越膨胀岩地层为工程背景,开展纤维壁后注浆浆液力学性能研究。选取3组工程常用配比,分别掺入 0.9 kg/m^3 、 1.5 kg/m^3 、 2.0 kg/m^3 聚丙烯纤维,进行抗压、劈裂抗拉、抗折试验,并设计了模型试验装置,对掺入 1.5 kg/m^3 纤维时注浆材料与膨胀岩

相互作用开展模型试验及数值分析。

大量试验研究和工程应用表明,将2种或2种以上不同类型的纤维掺入砂浆中,可同时发挥不同类型纤维的优势性能和纤维之间的协同工作作用,进而优化砂浆的力学性能。已有研究均通过掺入单一聚丙烯纤维改善注浆浆液性能,但聚丙烯和玄武岩混杂纤维同时掺入对注浆浆液性能的影响规律研究还较鲜见,两者最优体积掺量和最优体积混掺比的选择仍是工程难题;混杂纤维对壁后注浆结石体的微观作用机理尚不清晰;此外,缺少混杂纤维注浆结石体力学性能预测模型。

基于此,以膨胀岩地层为依托背景,将聚丙烯纤维(PPF)和玄武岩纤维(BF)混杂掺入盾构壁后注浆浆液,提高注浆结石体的缓冲能力、变形能力以及韧性,并引入拉压比、折压比作为评价指标,同时分析纤维体积掺量和两种纤维体积混掺比例(P-B比、P:B)对盾构壁后注浆浆液的拌合物性能、力学性能的影响规律。采用扫描电镜和EDS分别对混杂纤维注浆结石体的微观结构和化学成分进行观测和分析,揭示PPF-BF混杂纤维对盾构壁后注浆结石体的力学性能的作用机理。最后,基于灰色系统理论建立混杂纤维注浆结石体力学性能预测模型。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验盾构壁后注浆基体是由水泥、粉煤灰、膨润土、河砂、水配制而成的水泥基单液活性砂浆(硬性浆),水泥和粉煤灰为其胶凝材料。试验用水泥为沈阳冀东水泥有限公司生产的P·O 42.5级普通硅酸盐水泥,烧失量为3.5%;粉煤灰为山西省河津市生产的工业II级粉煤灰,45 μm 方孔筛筛余为27.5%,需水量比为100%,烧失量为2.0%;膨润土为山东潍坊生产的钠基膨润土;试验用砂取自沈阳地铁六号线施工现场,细度模数为2.2~3.0,含泥量小于等于3%。聚丙烯纤维(PPF)和玄武岩纤维(BF)的性能见表1。

表1 纤维性能指标

Tab.1 performance indexes of fibers

纤维名称	纤维类型	抗拉强度	弹性模量/GPa	容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	纤维长度/mm	纤维直径/ μm	抗酸碱性
聚丙烯	束状单丝	大于486 MPa	大于4.8	0.91	6	18~48	高
玄武岩	束状单丝	0.41 N/tex	100	2.8~3.3	6	17	极高

1.2 试验方法

按照有关规范标准^[35-39],测定注浆浆液的评价

指标(凝结时间、稠度、泌水率、初始流动度、抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度),测定过程

见图 1。主要仪器设备有: NLD-3 型水泥胶砂流动度测定仪、SC-145 型砂浆稠度仪、ZKS-100 砂浆凝结时间测定仪、YAW-500 无侧限压力试验机、

70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 规格的抗压夹具、劈裂抗拉夹具、40 mm×40 mm×160 mm 规格的抗折夹具、量杯、量筒、胶头滴管。

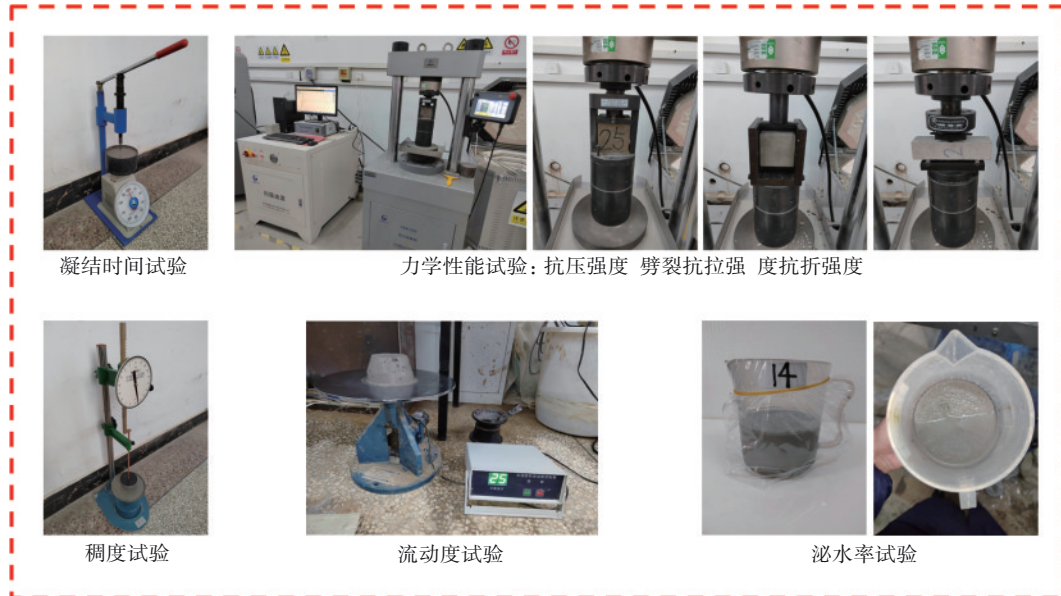


图 1 浆液性能测试

Fig.1 performance tests of grout

1.3 试验配合比

通过对国内地铁隧道项目壁后注浆浆液配合比展开调研, 同时结合咨询、设计和施工单位, 确定本研究注浆浆液基体质量配合比如下: 水胶比为 0.65、胶砂比为 0.7、膨水比为 0.2、灰粉比为 1.0。纤维体积掺量设置为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%、1.4% 共 7 个水平。聚丙烯纤维与玄武岩纤维体积混掺比 (P-B 比、P : B) 设置为 10 : 0、9 : 1、7 : 3、1 : 1、3 : 7、1 : 9、0 : 10 共 7 个水平。试验配合比见表 2。

表 2 壁后注浆浆液配合比

Tab.2 mixture ratios of backfill grouting slurry

试验序号	水胶比	胶砂比	膨水比	灰粉比	纤维体积掺量/%	P-B 比 (P:B)
1	0.65	0.7	0.2	1.0	0.0	
2	0.65	0.7	0.2	1.0	0.2	1:1
3	0.65	0.7	0.2	1.0	0.4	1:1
4	0.65	0.7	0.2	1.0	0.6	1:1
5	0.65	0.7	0.2	1.0	0.8	1:1
6	0.65	0.7	0.2	1.0	1.0	1:1
7	0.65	0.7	0.2	1.0	1.2	1:1
8	0.65	0.7	0.2	1.0	1.4	1:1
9	0.65	0.7	0.2	1.0	0.8	10:0
10	0.65	0.7	0.2	1.0	0.8	9:1
11	0.65	0.7	0.2	1.0	0.8	7:3
12	0.65	0.7	0.2	1.0	0.8	3:7
13	0.65	0.7	0.2	1.0	0.8	1:9
14	0.65	0.7	0.2	1.0	0.8	0:10

1.4 注浆浆液性能基本要求

根据《盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程》(T/CECS 563—2018)^[36]与《盾构法隧道同步注浆材料》(DB42/T 1218—2016)^[40]以及工程实际经验确定注浆浆液性能如下: 泌水率小于 5%, 凝结时间小于 5 h, 28 d 抗压强度大于 2.5 MPa, 初始流动度为 180~240 mm, 稠度为 80~100 mm。

2 试验结果及分析

2.1 注浆浆液拌合物性能变化规律

(1) 泌水率变化规律

注浆浆液泌水率变化见图 2。注浆浆液的泌水率随 PPF-BF 混杂纤维掺量的增加先增大后减小, 当纤维掺量为 0.2% 时, 注浆浆液泌水率最大, 为 2.4%; 当纤维含量为 1.4% 时, 泌水率最小, 为 0.5%。分析原因是当纤维掺量较小时, 还不足以形成密实纤维网络结构, 且聚丙烯纤维和玄武岩纤维都具有一定的疏水性, 从而导致浆液内部自由水增多, 最终在宏观上表现为泌水率增大; 当纤维掺量较大时, 纤维会在浆液内部形成密实的纤维网络结构, 呈三维乱向分布, 对毛细管形成挤压或阻塞毛细管, 减少基体的失水面积使得泌水率减小。

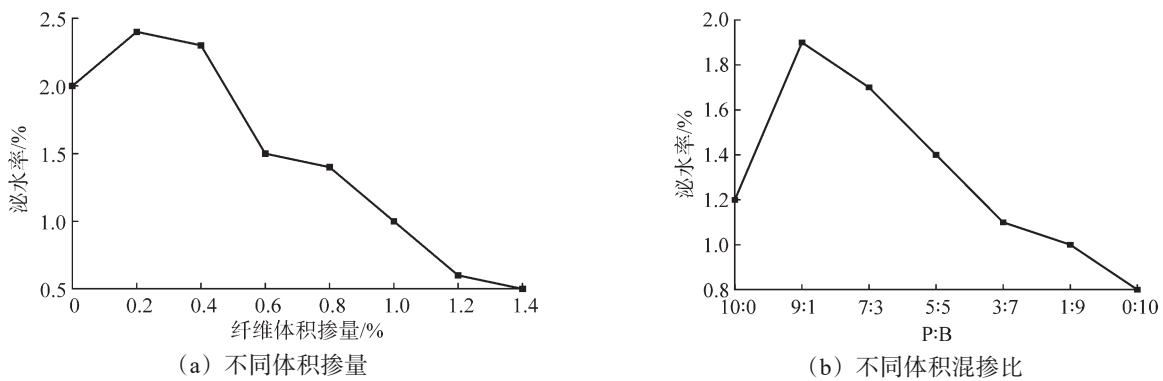


图2 泌水率变化规律

Fig.2 variation pattern of bleeding rate

注浆浆液的泌水率随聚丙烯纤维比例的降低、玄武岩纤维比例的升高先增大后减小,当 $P:B=9:1$ 时,注浆浆液泌水率最大,为1.9%;当 $P:B=0:10$ 时,泌水率最小,为0.8%。其原因与两种纤维的疏水性强弱和纤维直径不同有关,玄武岩纤维直径为 $17\ \mu\text{m}$,聚丙烯纤维直径为 $18\sim 48\ \mu\text{m}$,两种纤维长度均为 $6\ \text{mm}$,当纤维进行同体积置换时,玄武岩纤维的总根数要多于聚丙烯纤维,可以更加均匀分散在浆液内部,减少基体的失水面积,且玄武岩纤维的直径更小,所以对毛细管的挤压和阻塞作用优于直径更大的聚丙烯纤维。

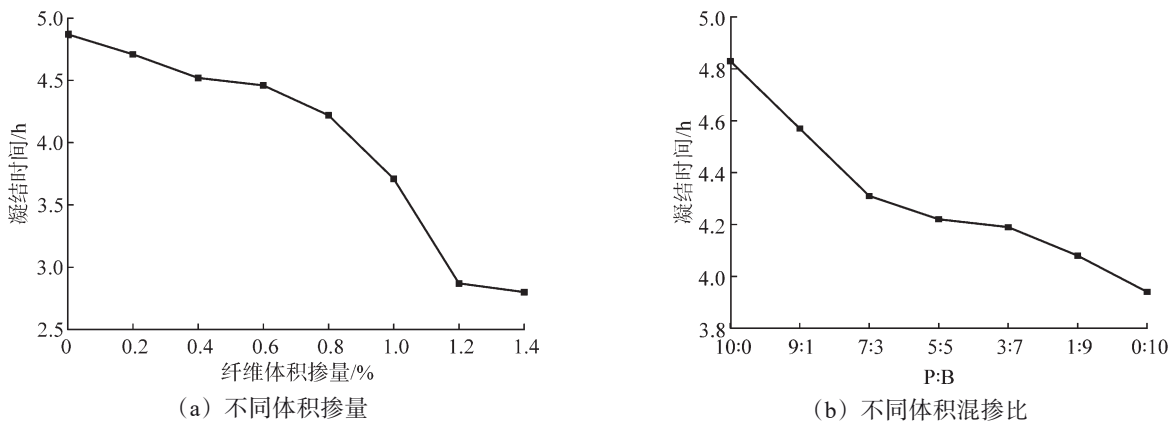


图3 凝结时间变化规律

Fig.3 variation pattern of setting time

注浆浆液的凝结时间随聚丙烯纤维比例的降低、玄武岩纤维比例的升高逐渐缩短,当 $P:B=10:0$ 时,注浆浆液凝结时间最长,为 $4.83\ \text{h}$;当 $P:B=0:10$ 时,凝结时间最短,为 $3.94\ \text{h}$ 。这是由于玄武岩纤维相对于聚丙烯纤维具有更大的相对表面积,使其与浆液基体接触总面积增大,导致纤维与基体之间的桥连作用得到增强,试针贯入时受到更大的阻力,最终反映在性能指标上为凝结时间的减少。

(2) 凝结时间变化规律

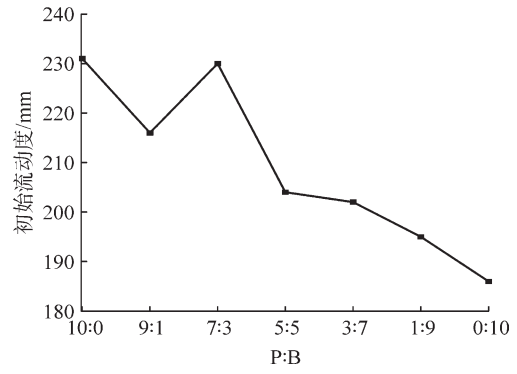
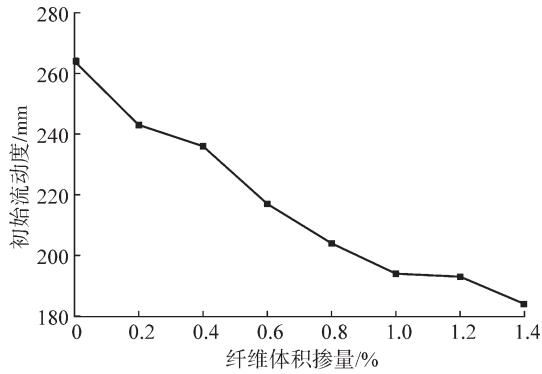
注浆浆液凝结时间变化见图3。注浆浆液的凝结时间随PPF-BF混杂纤维掺量的增加逐渐减少,当纤维掺量为0时,注浆浆液凝结时间最长,为 $4.87\ \text{h}$;当纤维掺量为1.4%时,凝结时间最短,为 $2.80\ \text{h}$ 。这是由于掺入注浆浆液的纤维与基体黏结,当砂浆凝结时间测定仪的试针贯入浆液内部时,纤维发挥桥连作用,使试针受到的贯入阻力增大,从而在宏观上表现为凝结时间的缩短。由于试针贯入阻力并非完全来自水泥水化反应,其中部分来自纤维桥连作用,可以称之为“假性凝结状态”。

(3) 初始流动度变化规律

注浆浆液初始流动度变化见图4。注浆浆液的初始流动度随PPF-BF混杂纤维掺量的增加逐渐降低,当纤维掺量为0时,注浆浆液初始流动度最大,为 $264\ \text{mm}$;当纤维掺量为1.4%时,初始流动度最小,为 $184\ \text{mm}$ 。其原因是PPF-BF混掺纤维在浆液内部呈三维乱向分布,同时会使更多浆液用于包裹纤维,消耗了原用于包裹细骨料颗粒的浆液,减弱

了细骨料颗粒的滑移流动作用, 增大了细骨料颗粒

之间的摩阻力, 使颗粒的流动变得更加困难。



(a) 不同体积掺量

(b) 不同体积混掺比

图4 初始流动度变化规律

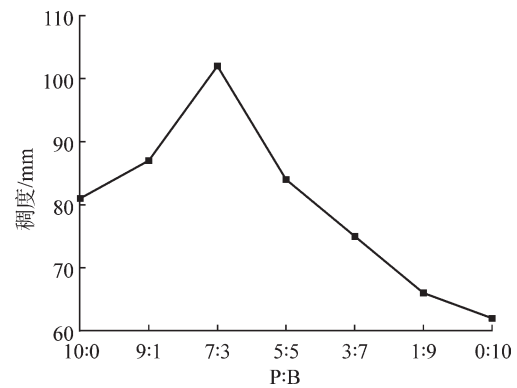
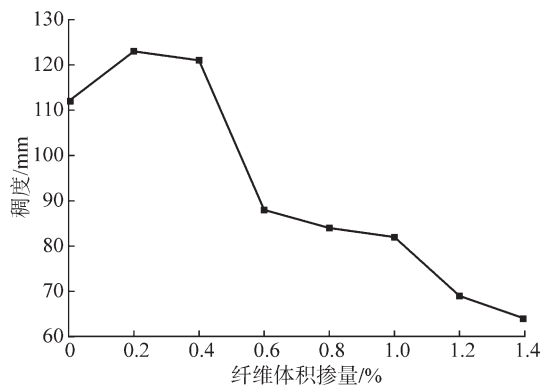
Fig.4 variation pattern of initial fluidity

注浆浆液的初始流动度随聚丙烯纤维比例的降低、玄武岩纤维比例的升高先降低再升高, 又降低。原因是聚丙烯纤维和玄武岩纤维之间存在复杂的协同交互作用, 从而导致变化曲线非单调递减。当 P : B=10 : 0 时, 注浆浆液初始流动度为最大值 231 mm; 当 P : B=0 : 10 时, 初始流动度为最小值 186 mm; 当 P : B=7 : 3 时, 流动度为 230 mm, 与 P : B=10 : 0 时的流动度几近相同。

量为 0.2% 时, 注浆浆液稠度最大, 为 123 mm; 当纤维掺量为 1.4% 时, 稠度最小, 为 64 mm。原因是当纤维掺量较小时, 浆液内部的纤维网络还不够密实, 且聚丙烯纤维和玄武岩纤维表面光滑, 在砂浆稠度仪圆锥体沉入浆液时, 浆液内部易产生滑移难以抵抗外力变形, 表现为砂浆稠度增大; 随着纤维掺量的逐渐增大, 注浆浆液内部网状结构逐渐密实, 抵抗外力变形能力得到增强, 且会使更多浆液用于包裹纤维, 消耗原用于包裹细骨料颗粒的浆液, 减弱细骨料颗粒的滑移流动作用, 纤维表面光滑作用不再占据主导地位, 使砂浆稠度减小。

(4) 稠度变化规律

注浆浆液稠度变化见图 5。注浆浆液的稠度随 PPF-BF 混杂纤维掺量的增加先增大后减小, 当纤维掺



(a) 不同体积掺量

(b) 不同体积混掺比

图5 稠度变化规律

Fig.5 variation pattern of consistency

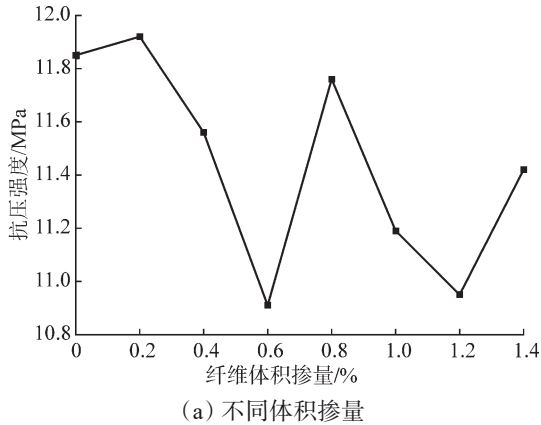
注浆浆液的稠度随聚丙烯纤维比例的降低、玄武岩纤维比例的升高先增大后减小。当 P : B=7 : 3 时, 注浆浆液稠度最大, 为 102 mm; 当 P : B=0 : 10 时, 稠度最小, 为 62 mm。其原因是当 P-B 比在 10 : 0 至 7 : 3 之间时, 由于玄武岩纤维相较于聚丙烯纤维具有更加光滑的表面, 随着玄武岩纤维比例的提高, 浆液内部产生滑移变得更加容易从而使稠度变大; 当 P-B 比在 7 : 3 至 0 : 10 之间

时, 由于玄武岩纤维相较于聚丙烯纤维具有更大的相对表面积, 玄武岩纤维比例的提高会使更多浆液用于包裹纤维, 消耗了原用于包裹细骨料颗粒的浆液, 减弱了细骨料颗粒的滑移流动作用, 这种减弱作用超过了玄武岩纤维表面光滑作用, 且玄武岩纤维相比于聚丙烯纤维具有更大抗弯刚度, 也在一定程度上弱化了滑移作用, 最终使稠度下降。

2.2 注浆结石体力学性能变化规律

(1) 无侧限抗压强度变化规律

注浆结石体抗压强度变化见图6。结石体的抗压强度随PPF-BF混杂纤维掺量的增加呈现出无明显变化规律的过程。当纤维掺量为0.2%时, 结石体抗压强度最大, 为11.92 MPa, 相较于素结石体(无纤维体积掺量)增长0.6%, 增长效果并不明显; 当纤维掺量为0.6%时, 抗压强度最小, 为



10.91 MPa, 相比于素结石体下降7.9%, 下降幅度较为明显。从总体上看, 抗压强度的变化趋势是微弱降低的, 这是因为纤维表面光滑与基体之间形成弱结合面, 随着纤维掺量的增加, 结石体内部的弱结合面越来越多, 并且过高掺量的纤维不利于纤维在基体中充分分散, 导致注浆浆液不易振捣密实, 内部出现空隙, 致使抗压强度降低。

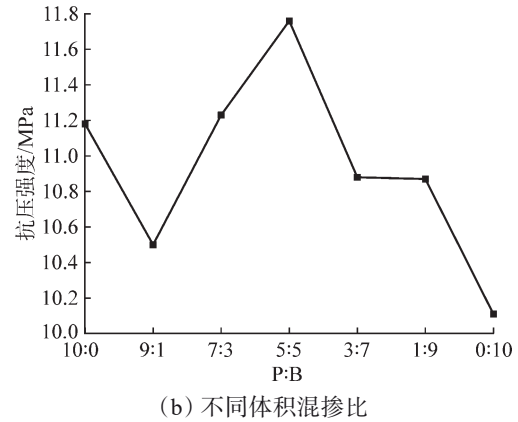


图6 无侧限抗压强度变化规律

Fig.6 variation pattern of unconfined compression strength

结石体抗压强度随P-B比的变化无明显变化规律。当P:B=5:5时, 结石体抗压强度最大, 为11.76 MPa; 当P:B=0:10时, 抗压强度最小, 为10.11 MPa。

(2) 劈裂抗拉强度与抗折强度变化规律

注浆结石体劈裂抗拉强度变化见图7。结石体劈裂抗拉强度随PPF-BF混杂纤维掺量的增加呈“W”形变化趋势。当纤维掺量为0.8%时, 结石体

劈裂抗拉强度最大, 为4.32 MPa, 相较于素结石体提高10.5%, 增长效果较为明显; 当纤维掺量为1.2%时, 劈裂抗拉强度最小, 为3.62 MPa, 相较于素结石体下降7.4%。结石体劈裂抗拉强度随P-B比的变化也出现“W”形变化过程。当P:B=0:10时, 结石体劈裂抗拉强度最大, 为4.48 MPa, 相较于素结石体提升14.6%; 当P:B=9:1时, 劈裂抗拉强度最小, 为3.31 MPa, 较素结石体降低15.3%。

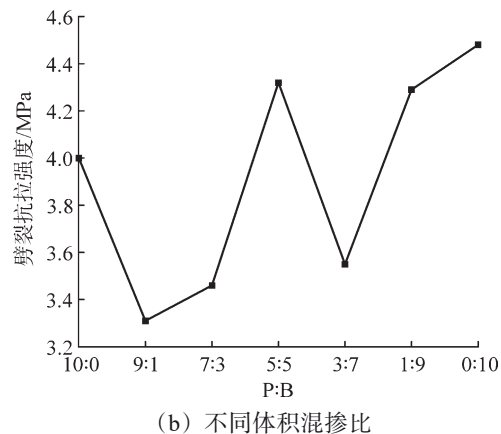
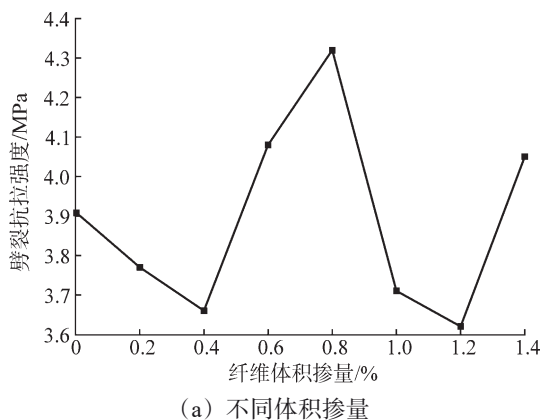
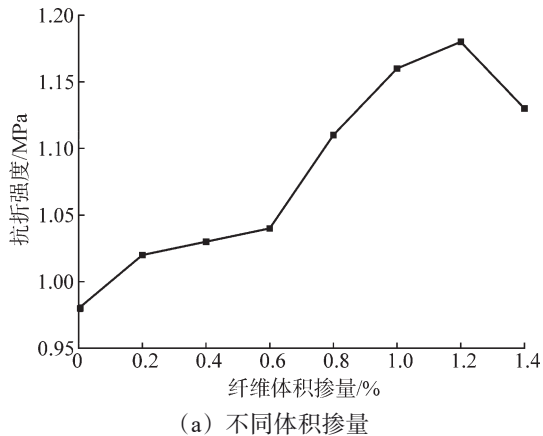


图7 劈裂抗拉强度变化规律

Fig.7 variation pattern of splitting tensile strength

注浆结石体抗折强度变化见图 8。结石体的抗折强度随 PPF-BF 混杂纤维掺量的增加先增大后减小。当纤维掺量为 1.2% 时, 结石体抗折强度最大, 为 1.18 MPa, 相较于素结石体增长 20.4%。当纤维掺量超过 1.2% 时, 抗折强度出现下降的趋势, 这是因为当纤维的掺量超过一定水平后, 纤维易相互重叠而相互干扰, 在结石体内部出现结团现象, 使纤维与基体的接触表面积减少, 降低纤维的有效利用



率, 在宏观上表现为增强作用减小。结石体抗折强度随聚丙烯纤维比例的降低、玄武岩纤维比例的升高先减小后增大, 又减小。分析原因是聚丙烯纤维和玄武岩纤维之间存在复杂的协同交互作用, 从而导致变化曲线非单调递增。当 P : B = 1 : 9 时, 结石体抗折强度最大, 为 1.13 MPa, 相比于素结石体提高 15.3%; 当 P : B = 9 : 1 时, 抗折强度最小, 为 0.92 MPa, 较之素结石体下降 6.1%。

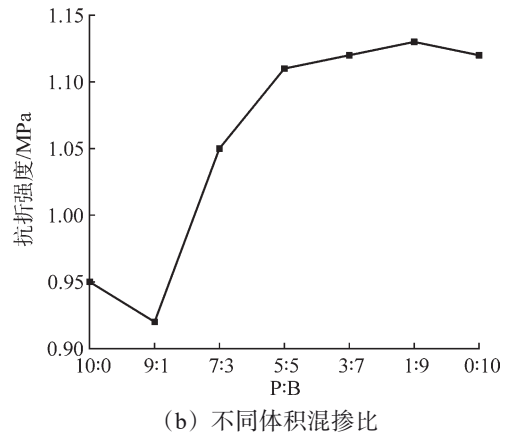
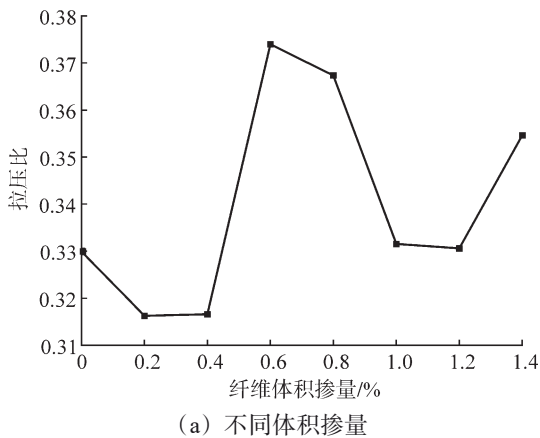


图 8 抗折强度变化规律

Fig.8 variation pattern of rupture strength

(3) 拉压比与折压比变化规律

注浆结石体拉压比变化见图 9。结石体的拉压比随 PPF-BF 混杂纤维掺量的增加呈现 “W” 形的变化趋势。当纤维掺量为 0.6% 时, 结石体拉压比最大, 为 0.374, 相比于素结石体增加 12.1%, 可



以看出注浆结石体的 “脆性” 改善, “柔性” 增加, 增韧效果明显。结石体拉压比随 P-B 比的变化也出现 “W” 形变化过程。当 P : B = 0 : 10 时, 结石体拉压比最大, 为 0.44, 相较于素结石体提升 33.3%。

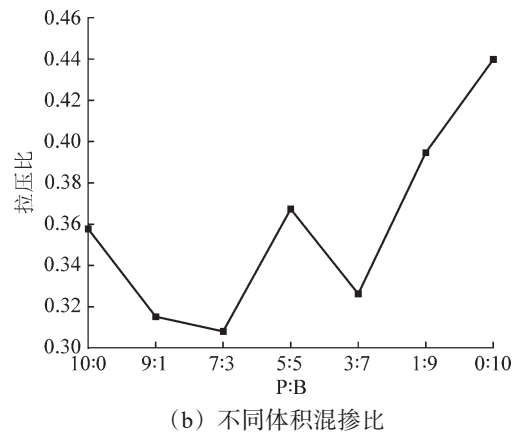


图 9 拉压比变化规律

Fig.9 variation pattern of tension-compression ratio

注浆结石体折压比变化见图 10。结石体的折压比随 PPF-BF 混杂纤维掺量的增加总体上呈现先增大后减小的变化过程。当纤维掺量为 1.2% 时, 结石体折压比最大, 为 0.11, 相比于素结石体增加 37.5%, 可以看出注浆结石体的 “脆性” 得到改善, “柔性” 增加, 增韧效果明显。结石体折

压比随聚丙烯纤维比例的降低、玄武岩纤维比例的升高出现逐渐增大的变化趋势。当 P : B = 0 : 10 时, 结石体折压比为最大值 0.11, 相较于素结石体提升 37.5%。

综上, 当纤维体积掺量为 0.8%、纤维体积混掺比为 1 : 1 时, 对注浆结石体的抗压强度影响很

小,对劈裂抗拉强度、抗折强度、拉压比、折压比均有不同程度的提高,结石体的“脆性”得到改善,“柔性”增加,增韧效果明显。同时,浆液的泌水

率、凝结时间、初始流动度、稠度均符合规范要求。因此,本次试验中纤维体积掺量0.8%为最优掺量,纤维体积混掺比1:1为最优混掺比。

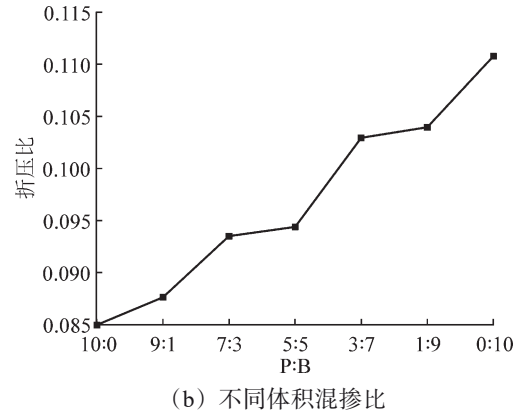
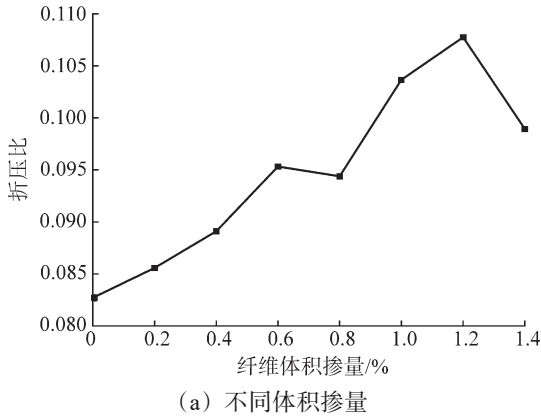


图10 折压比变化规律

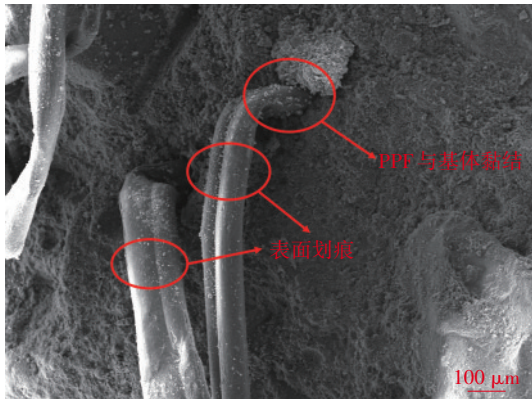
Fig.10 variation pattern of rupture-compression ratio

3 纤维作用机理分析

3.1 纤维结石体 SEM 分析

图11为纤维结石体破坏后扫描电子显微镜测试图。图11(a)中聚丙烯纤维表面出现划痕,表明聚丙烯纤维在被拔出注浆结石体基体的破坏过程中发

挥了桥连作用,同时发现聚丙烯纤维可与注浆结石体基体有效黏结。图11(b)中玄武岩纤维表面存在附着物,说明玄武岩纤维在被拔出注浆结石体基体的破坏过程中有效地发挥了桥连作用,同时发现玄武岩纤维可与注浆结石体基体有效黏结。



(a) PPF与基体黏结



(b) BF与基体黏结

图11 纤维扫描电子显微镜图像

Fig.11 SEM images of fibers

3.2 纤维-基体黏结界面的元素分析

利用EDS对聚丙烯纤维-基体黏结界面的、玄武岩纤维-基体黏结界面以及远离纤维基体处的元素进行分析,测试结果如图12所示。从图12(a)、图12(b)可看出,聚丙烯、玄武岩纤维与基体的黏结界面以及远离纤维基体处的元素均为O、Al、Si、Ca,但是聚丙烯、玄武岩纤维与基体的黏结界面以及远离纤维基体处的元素比有明显差别。

表3为聚丙烯纤维-基体黏结界面处、玄武岩纤维-基体黏结界面处以及远离纤维基体处的EDS元

素分析结果。由表3可知,聚丙烯、玄武岩纤维与基体黏结界面处Ca/Si比相差明显,聚丙烯纤维-基体黏结界面处的Ca/Si比为2.09,玄武岩纤维-基体黏结界面处Ca/Si比为1.69。注浆结石体非常重要的强度来源为胶凝材料中水泥水化后产生的水化硅酸钙,而水化硅酸钙的Ca/Si比在1.5~2.0之间,本次试验远离纤维基体处Ca/Si比为1.78。通过对比两种不同纤维-基体黏结界面处以及远离纤维基体处的Ca/Si比数值大小,可以看出玄武岩纤维-基体黏结界面相较于聚丙烯纤维-基体黏结界面水化反应进

行得更加充分, 黏结界面的强度更高, 即玄武岩纤维与基体材料在力学性能方面有更好的相容性。

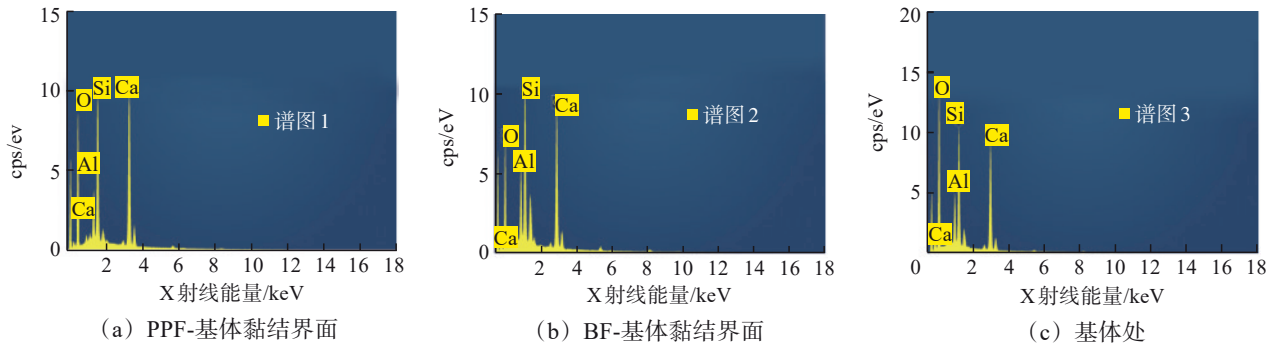


图 12 纤维-基体黏结界面及基体处元素

Fig.12 elements at the fiber-matrix bonding interface and matrix

表 3 纤维-基体黏结界面处及基体处 EDS 测试结果

Tab.3 EDS test results at the fiber-matrix bonding interface and matrix

元素	纤维-基体黏结界面处原子比		基体处原子比
	聚丙烯纤维	玄武岩纤维	
O	50.52	46.79	59.08
Al	4.31	7.13	5.22
Si	14.60	17.13	12.83
Ca	30.56	28.94	22.86
Ca/Si 比	2.09	1.69	1.78

4 PPF-BF 注浆结石体力学性能预测模型

本节基于灰色系统理论分别建立 GM(1,4) 和 GM(1,3) 力学性能预测模型, 并比较 2 个预测模型的预测精度, 同时对产生误差的原因进行分析, 最终选择最优预测模型供施工人员参考。

灰色模型是将若干无明显规律的数据经过一系列的数学运算生成新的有规律的数据组, 通过新数据组建立微分方程, 用最小二乘法求出系数。灰色预测模型可以揭示事物发展的本质规律。常用的灰色模型为 GM(1,N), 它反映 N-1 个变量对某一个变量一阶导数的影响程度^[41]。

GM(1,4) 灰色模型把注浆结石体力学性能与混杂纤维掺量、聚丙烯纤维占纤维总量比及玄武岩纤维占纤维总量比作为因素; GM(1,3) 灰色模型把注浆结石体力学性能与混杂纤维掺量、聚丙烯纤维

与玄武岩纤维混掺比作为因素。为消除各因素量纲对计算结果产生的影响, 所选因素均做量纲均值化处理^[42]。

灰色系统模型的建立需要对各种运算形式进行定义, 令 $x_1^{(0)}$ 为系统主行为, $x_i^{(0)}(i=2,3,\dots,N)$ 为行为因子, 则

$$x_1^{(0)} = (x_1^{(0)}(1) \ x_1^{(0)}(2) \ \dots \ x_1^{(0)}(n)), \quad (1)$$

$$x_i^{(0)} = (x_i^{(0)}(1) \ x_i^{(0)}(2) \ \dots \ x_i^{(0)}(n)), \quad (2)$$

记 $x_i^{(0)}$ 为 $x_i^{(0)}$ 的一阶累加序列, a 为发展系数, $b_i(i=2,3,\dots,N)$ 为灰色作用量, 则

$$x_1^{(0)}(k) + aZ_1^{(0)}(k) = \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k), \quad (3)$$

$$Z_1^{(0)}(k) = 0.5x_1^{(0)}(k) + 0.5x_1^{(0)}(k-1), \quad (4)$$

式(3)、式(4)中, $k=2, 3, \dots, n$ 。

4.1 GM(1,4) 灰色预测模型

根据上述定义, 设 $x_{11}^{(0)}$ 、 $x_{12}^{(0)}$ 、 $x_{13}^{(0)}$ 分别为抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度, $x_i^{(0)}(i=2,3,4)$ 为混杂纤维掺量、聚丙烯纤维占纤维总量比及玄武岩纤维占纤维总量比, 根据式(3)、式(4)建立 GM(1,4) 模型。式(3)中, N 取 4。

根据最小二乘法可求得各项系数。将试验所得力学参数与试验方案中自变量作为建模因素, 并将试验数据代入 GM(1,4) 模型, 得到注浆结石体力学性能预测模型, 见表 4。

表 4 GM(1,4) 力学性能预测模型

Tab.4 GM(1,4) mechanical property prediction model

力学性能	预测模型
抗压强度	$x_{11}^{(0)}(k) = -2.498Z_1^{(0)}(k) - 0.036x_2^{(0)}(k) + 1.256x_3^{(0)}(k) + 1.267x_4^{(0)}(k)$
劈裂抗拉强度	$x_{12}^{(0)}(k) = -0.781Z_1^{(0)}(k) - 0.314x_2^{(0)}(k) + 0.507x_3^{(0)}(k) + 0.661x_4^{(0)}(k)$
抗折强度	$x_{13}^{(0)}(k) = -2.048Z_1^{(0)}(k) + 0.179x_2^{(0)}(k) + 0.816x_3^{(0)}(k) + 1.063x_4^{(0)}(k)$

4.2 GM(1,3)灰色预测模型

根据定义, 设 $x_1^{(0)}$ 为注浆结石体力学性能 (抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度), $x_i^{(0)}(i=2,3)$ 为混杂纤维掺量、聚丙烯纤维与玄武岩纤维混掺比, 建立 GM(1,3) 模型, 式 (3) 中, N 取 3。

根据最小二乘法求得各项系数。将试验所得力学参数与试验方案中自变量作为建模因素, 并将试验数据代入 GM(1,3) 模型, 得到注浆结石体力学性能预测模型见表 5。

2 种灰色系统理论模型预测结果与试验结果对比见图 13。由图 13 可见, GM(1,4) 模型预测抗压强度、劈裂抗拉强度及抗折强度与试验结果的平均相对误差分别为 5.55%、7.90%、6.07%, 而 GM(1,3) 模型预测抗压强度、劈裂抗拉强度及抗折强度与

试验结果的平均相对误差分别为 14.49%、13.19%、11.42%。由此可见, GM(1,4) 强度预测模型相比于 GM(1,3) 强度预测模型具有更好的预测精度, 但仍有个别预测数据存在较大误差。原因是注浆结石体力学性能与预测模型中自变量灰色关联度有限, 后续研究中可考虑引入灰色关联度更大的自变量, 例如束缚流体饱和度、孔隙度以及敏感孔径孔隙占比, 进而提高模型预测精度。

表 5 GM(1,3) 力学性能预测模型

Tab.5 GM(1,3) mechanical property prediction model

力学性能	预测模型
抗压强度	$x_{11}^{(0)}(k) = 0.704Z_1^{(0)}(k) - 0.537x_2^{(0)}(k) - 0.027x_3^{(0)}(k)$
劈裂抗拉强度	$x_{12}^{(0)}(k) = 0.732Z_1^{(0)}(k) - 0.557x_2^{(0)}(k) - 0.030x_3^{(0)}(k)$
抗折强度	$x_{13}^{(0)}(k) = 0.829Z_1^{(0)}(k) - 0.630x_2^{(0)}(k) - 0.045x_3^{(0)}(k)$

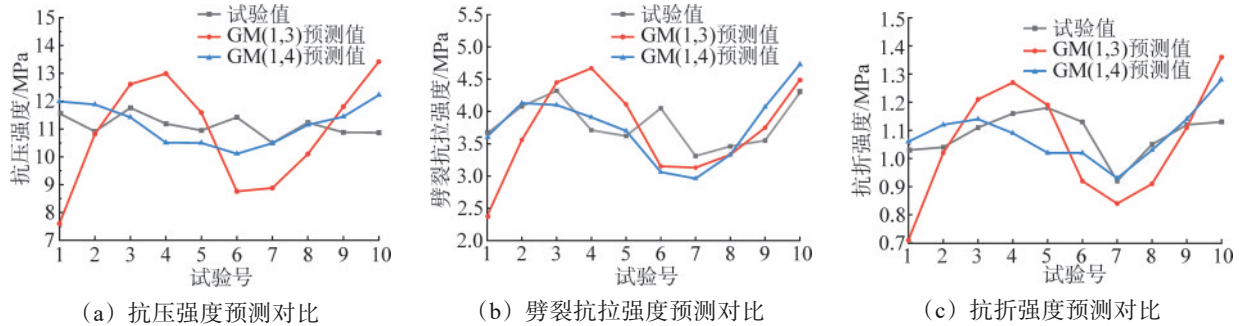


图 13 灰色系统理论预测模型对比

Fig.13 comparison of grey system theory prediction models

5 结论

通过室内试验及理论分析相结合的方式, 对不同纤维体积掺量和混掺比的注浆浆液基本性能及力学性能进行了研究, 并提出注浆结石体力学性能预测模型, 得出以下结论。

(1) 注浆浆液的不同拌合物性能受纤维体积掺量和混掺比的影响程度不同。随着纤维体积掺量的增加, 注浆浆液的泌水率、凝结时间、初始流动度、稠度总体呈现逐渐下降的趋势; 随着聚丙烯纤维比例的降低、玄武岩纤维比例的升高, 注浆浆液的泌水率和稠度总体呈现先上升后下降的变化趋势, 凝结时间和初始流动度总体呈现逐渐下降的趋势。

(2) 注浆结石体的不同力学性能受纤维体积掺量和混掺比的影响程度不同。随着纤维体积掺量的增加, 注浆结石体的抗压强度呈现微弱降低的变化趋势, 劈裂抗拉强度、抗压比总体呈现“W”形的变化趋势, 抗折强度和抗压比总体呈现

先上升后下降的变化趋势; 随着聚丙烯纤维比例的降低、玄武岩纤维比例的升高, 注浆结石体的抗压强度呈现无明显规律的变化趋势, 劈裂抗拉强度和抗压比总体呈现“W”形的变化趋势, 抗折强度和抗压比总体呈现逐渐上升的趋势。

(3) 根据浆液性能随纤维体积掺量、纤维体积混掺比的变化规律, 综合评判确定本次试验纤维最优体积掺量为 0.8%, 纤维最优体积混掺比为 1:1, 增韧效果明显。

(4) 通过 SEM 测试分析可知, 聚丙烯纤维和玄武岩纤维均可与注浆浆液基体材料有效黏结, 发挥桥连作用。同时, EDS 测试分析显示玄武岩纤维-基体黏结界面的强度要高于聚丙烯纤维-基体黏结界面的强度, 说明玄武岩纤维表面的水泥水化反应更好, 玄武岩纤维与基体材料在力学性能方面有更好的相容性。

(5) 基于灰色系统理论建立的 2 个力学性能预测模型中, GM(1,4) 模型预测误差更小, 效果更优。

参考文献(References):

- [1] 何川,封坤,方勇.盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J].西南交通大学学报,2015,50(1):97-109.
HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97-109.
- [2] LIU J L, HAMZA O, SIAN DAVIES-VOLLUM K, et al. Repairing a shield tunnel damaged by secondary grouting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 313-321.
- [3] YANG C, SHEN S L, HOU D W, et al. Material properties of the seal gasket for shield tunnels: a review[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 877-890.
- [4] TAN J S, SHEN S L, ZHOU A N, et al. Laboratory evaluation of long-term sealing behaviors of two water-swelling materials for shield tunnel gasket[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118711.
- [5] YANG Q, GENG P, WANG J X, et al. Research of asphalt-cement materials used for shield tunnel backfill grouting and effect on anti-seismic performance of tunnels[J]. Construction and Building Materials, 2022, 318: 125866.
- [6] 叶飞,王斌,韩鑫,等.盾构隧道壁后注浆试验与浆液扩散机理研究进展[J].中国公路学报,2020,33(12):92-104.
YE Fei, WANG Bin, HAN Xin, et al. Review of shield tunnel backfill grouting tests and its diffusion mechanism[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 92-104.
- [7] SONG W L, ZHU Z D, PU S Y, et al. Synthesis and characterization of eco-friendly alkali-activated industrial solid waste-based two-component backfilling grouts for shield tunnelling[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 266: 121974.
- [8] 梁精华.盾构隧道壁后注浆材料配比优化及浆体变形特性研究[D].南京:河海大学,2006:1-70.
- [9] 张海涛.盾构同步注浆材料试验及隧道上浮控制技术[D].上海:同济大学,2007:1-74.
- [10] 陈艺元.盾构同步注浆复合水泥基—水玻璃双液浆材料特性研究及强度模拟试验[D].北京:北京交通大学,2017:1-84.
- [11] 贾毅,李福海,吴德宝,等.盾构隧道壁后同步注双液浆配合比试验研究[J].现代隧道技术,2019,56(2):143-151,157.
JIA Yi, LI Fuhai, WU Debao, et al. Experimental study on mix proportions of synchronous two-component grouting for shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(2): 143-151, 157.
- [12] 叶飞,夏天哈,应凯臣,等.盾构隧道壁后注浆浆液与地层适配性优选方法[J].岩土工程学报,2022,44(12):2225-2233.
YE Fei, XIA Tianhan, YING Kaichen, et al. Optimization method for backfill grouting of shield tunnel based on stratum suitability characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2225-2233.
- [13] HUANG W H. Improving the properties of cement-fly ash grout using fiber and superplasticizer[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(7): 1033-1041.
- [14] SARIC-CORIC M, KHAYATKH, TAGNIT-HAMOUA. Performance characteristics of cement grouts made with various combinations of high-range water reducer and cellulose-based viscosity modifier [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(12): 1999-2008.
- [15] ZHANG C, FU J Y, YANG J S, et al. Formulation and performance of grouting materials for underwater shield tunnel construction in Karst ground[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 327-338.
- [16] ZHANG C, YANG J S, FU J Y, et al. Recycling of discharged soil from EPB shield tunnels as a sustainable raw material for synchronous grouting[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268: 121947.
- [17] MAO J H, YUAN D J, JIN D L, et al. Optimization and application of backfill grouting material for submarine tunnel[J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120281.
- [18] 宋维龙.碱激发工业废渣基盾构隧道壁后注浆浆液特性与扩散机理研究[D].南京:东南大学,2021:1-163.
- [19] LIU C H, LI Z Y, BEZUIJEN A, et al. Optimizing the shield tunnel backfilling grouts with supplementary cementitious materials by response surface methodology[J]. Construction and Building Materials, 2024, 421: 135575.
- [20] 叶飞,陈治,贾涛,等.盾构隧道管片注浆幂律流型浆液渗透扩散模型[J].岩土工程学报,2016,38(5):890-897.
YE Fei, CHEN Zhi, JIA Tao, et al. Penetration diffusion model of exponential fluid for backfill grouting through segments of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 890-897.
- [21] YE F, YANG T, MAO J H, et al. Half-spherical surface diffusion model of shield tunnel back-fill grouting based on infiltration effect[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 274-281.
- [22] 梁禹,阳军生,王树英,等.考虑时变性影响的盾构壁后注浆浆液固结及消散机制研究[J].岩土力学,2015,36(12):3373-3380.
LIANG Yu, YANG Junsheng, WANG Shuying, et al. A study on grout consolidation and dissipation mechanism during shield backfilled grouting with considering time effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3373-3380.
- [23] 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.
- [24] 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 Shucai, FENG Xiao, LIU Rentai, et al. Diffusion of grouting cement in sandy soil considering filtration effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 925-933.
- [25] 张连震,张庆松,刘人太,等.考虑浆液黏度时空变化的速凝浆液渗透注浆扩散机制研究[J].岩土力学,2017,38(2):443-452.
ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, LIU Rentai, et al. Penetration grouting mechanism of quick setting slurry considering spatiotemporal variation of viscosity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 443-452.

- [26] 张玉,郭豪,陈铁林,等.孔隙介质水泥浆液渗透注浆有效扩散距离试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(10):2536-2551.
ZHANG Yu, GUO Hao, CHEN Tielin, et al. Experimental study on effective diffusion distance of cement slurry in porous media under permeation grouting[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(10): 2536-2551.
- [27] DING W Q, DUAN C, ZHU Y H, et al. The behavior of synchronous grouting in a quasi-rectangular shield tunnel based on a large visualized model test[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 409-424.
- [28] 黄宏伟,杜军,谢雄耀.盾构隧道壁后注浆的探地雷达探测模拟试验[J].岩土工程学报,2007,29(2):243-248.
HUANG Hongwei, DU Jun, XIE Xiongyao. Simulation of GPR detecting of grouting materials behind shield tunnel segments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 243-248.
- [29] BEZUIJEN A, TALMON A M, KAALBERG F J, et al. Field measurements of grout pressures during tunnelling of the sophia rail tunnel[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1): 39-48.
- [30] HASHIMOTO T, BRINKMAN J, KONDA T, et al. Simultaneous backfill grouting, pressure development in construction phase and in the long-term[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(4/5): 447.
- [31] 申志军,艾旭峰,郑余朝,等.马蹄形盾构隧道结构内力现场测试[J].土木工程学报,2017,50(增刊2):267-273.
SHEN Zhijun, AI Xufeng, ZHENG Yuchao, et al. Insitu test of internal force for structure hippocrepiform shield tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(Suppl.2): 267-273.
- [32] 游永锋,梁奎生,谭华灵.盾构快速掘进下同步注浆材料优化配合比设计[J].隧道建设,2012,32(6):816-820.
YOU Yongfeng, LIANG Kuisheng, TAN Hualing. Optimization of mixing proportion of grout for simultaneous grouting in shield tunneling[J]. Tunnel Construction, 2012, 32(6): 816-820.
- [33] 杨丽冰.南宁膨胀岩地区盾构壁后注浆材料试验研究[D].南宁:广西大学,2013:1-51.
- [34] 张世荣,侯凯文,潘鑫,等.膨胀岩地区盾构壁后纤维注浆材料试验研究[J].广西大学学报(自然科学版),2016,41(1):187-195.
ZHANG Shirong, HOU Kaiwen, PAN Xin, et al. Research on mechanical effect of backfill fiber grouting material on expansive rock[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(1): 187-195.
- [35] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T70-2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009:6-7, 14-16.
- [36] 中国工程建设标准化协会.盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程:T/CECS 563-2018[S].北京:中国建筑工业出版社, 2018:7,17.
- [37] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.水泥胶砂流动度测定方法:GB/T 2419-2005[S].北京:中国标准出版社,2005:1-5.
- [38] 中华人民共和国交通运输部.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,2020:271-275.
- [39] 国家市场监督管理总局.水泥胶砂强度检验方法(ISO法):GB/T 17671-2021[S].北京:中国标准出版社,2021:12-13.
- [40] 湖北省质量技术监督局.盾构法隧道同步注浆材料:DB42/T 1218-2016[S].2016:4.
- [41] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社, 1990:15-20.
- [42] 乔立冬,姚占全,王宗熙,等.煤矸石对混凝土宏观性能的灰熵分析[J].排灌机械工程学报,2022,40(1):30-34,54.
QIAO Lidong, YAO Zhanquan, WANG Zongxi, et al. Grey entropy analysis of coal gangue on macro and micro properties of concrete [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(1): 30-34, 54.