

泡沫掺量对再生细骨料泡沫混凝土性能影响分析

Analysis of the Effect of Foam Dosage on the Performance of Recycled Fine Aggregate Foamed Concrete

蔡燕霞^{1,2,3}, 罗 帅¹, 邱 伟⁴, 郜佳琦^{2,3}, 薛晓杰⁴, 李立辉³

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 中路高科(北京)公路技术有限公司, 北京 100088;
3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 4. 广州市高速公路有限公司, 广州 510000)

摘要: 为实现废旧混凝土再生细骨料的高值化利用, 研究了不同泡沫掺量、聚丙烯纤维掺量对再生细骨料泡沫混凝土的湿密度、流动度、抗压强度等工作性能影响, 结合多种拟合形式分析了泡沫掺量与抗压强度之间的拟合关系。结果表明: 随泡沫掺量的增加, 再生细骨料泡沫混凝土的湿密度明显下降、流动度减小、抗压强度降低; 对不同泡沫掺量的再生细骨料泡沫混凝土, 聚丙烯纤维的掺入会对湿密度与流动度产生不同影响, 对抗压强度无明显改善效果; 根据有无聚丙烯纤维掺入, 再生细骨料泡沫混凝土的泡沫掺量与强度最佳拟合形式分别为指数拟合和多项式拟合。

关键词: 再生细骨料; 泡沫混凝土; 抗压强度; 泡沫掺量; 聚丙烯纤维

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 01-0001-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.001

CAI Yanxia^{1,2,3}, LUO Shuai¹, QIU Wei⁴, GAO Jiaqi^{2,3}, XUE Xiaojie⁴, LI Lihui³

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Beijing Zhonglu Gaoke Highway Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China;

3. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

4. Guangzhou Expressway Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to achieve the high-value utilization of recycled fine aggregate from waste concrete, the study investigated the influence of different foam dosages and the presence of polypropylene fibers on the workability properties, such as wet density, flowability, and compressive strength of recycled fine aggregate foamed concrete. By combining various fitting forms, the relationship between foam dosage and compressive strength was analyzed. The research showed that with an increase in foam dosage, the wet density of recycled fine aggregate foamed concrete decreased significantly, while the flowability and compressive strength decreased. The addition of polypropylene fibers had different effects on the wet density and flowability of recycled fine aggregate foamed concrete with different foam dosages, but it did not have a significant improvement effect on compressive strength. According to the presence or absence of polypropylene fibers, the optimal fitting forms for the relationship between foam dosage and strength of recycled fine aggregate foamed concrete were exponential fitting and polynomial fitting, respectively.

Key words: recycled fine aggregates; foamed concrete; compressive strength; foam content; polypropylene fiber

基金项目: 国家自然科学基金 (52178428)。

作者简介: 蔡燕霞 (1984—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向: 道路结构与材料。

通信作者: 罗 帅 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 路面结构与材料。

收稿日期: 2023-08-31

材料科学

0 引言

随着国家经济的不断发展,在改扩建中旧建(构)筑物被拆除,产生了大量废旧混凝土。若将废旧混凝土处理成再生骨料应用于混凝土构件的生产,不仅能够节省处理废旧混凝土所占用的大片土地资源,还能节约生产中对天然骨料资源的消耗^[1]。泡沫混凝土是具有轻质、多孔、保温、隔热、吸声降噪等特点的新型建筑材料,广泛应用于隧道、公路等领域。若在泡沫混凝土中掺入一定量的再生细骨料,不仅可以节约水泥用量、降低制备成本,还可以拓宽废旧混凝土的应用领域,具有一定推广意义。

已有研究发现,废旧混凝土经过破碎处理后,产出的再生骨料、再生砂粉等再生资源可以替代细骨料或水泥,用于制备泡沫混凝土^[2]。肖建庄等^[3]利用废旧混凝土生产的再生原料制备泡沫再生混凝土,阐述了再生骨料和再生微粉的加工工艺和复杂性,分析了影响泡沫混凝土性能的主要因素,提出了一种低强功能化泡沫再生混凝土的制备方法,确定了配合比;杨帆等^[4]以废旧混凝土研磨砂粉为原料制备再生泡沫混凝土(RFC),研究了RFC的密度等级、砂灰比等因素对其性能的影响,结果表明在水料比为0.25、砂灰比为1时,RFC工作性能相对较好,强度为标准砂泡沫混凝土强度的50%~65%;罗建林^[5]在已获得的基准配合比的基础上,掺入再生细骨料,通过改变再生细骨料掺量、来源及粒径等来研究再生细骨料对泡沫混凝土抗压强度的影响,结果表明在泡沫混凝土中掺入再生细骨料后,其抗压强度有所降低,而干密度先降低后增加,再生细骨料来源对泡沫混凝土抗压强度的影响较小;蒋培义^[6]将废旧混凝土再生骨料应用在桥梁桥面中,当水泥含量一定时,随着再生骨料取代率的增加,水泥稳定混合料的无侧限抗压强度和回弹模量均表现出先减小后增大的趋势;Aamir等^[7]研究了废旧混凝土骨料代替新的骨料,其重量从0到100%不等,废弃混凝土骨料代替新骨料时,吸水率从1.58%上升到4.65%,破碎值由26.54%提高到55.29%,冲击值由27.86%提高到58.05%,磨耗值由26.96%提高到35.58%;陈宗平等^[8]分析了不同再生骨料替代再生混凝土的抗压强度、抗折强度、弹性模量和

泊松比,并提出了应力-应变本构关系;朱祥等^[9]也由建筑垃圾制备再生骨料并用于再生混凝土砖,分析了再生骨料含量对吸水率和抗压强度的影响。

目前,利用再生资源制备泡沫混凝土的研究仍主要集中在较细粒径的混凝土再生砂粉,对利用再生细骨料制备泡沫混凝土仍有待进一步的研究。综上,在诸多学者的基础上,通过调研确定了发泡剂种类^[10-12],研究了不同泡沫掺量、有无纤维掺量等因素对再生细骨料泡沫混凝土的湿密度、流动度以及抗压强度的影响规律,为以后制备性能优良的再生细骨料泡沫混凝土提供一定依据。

1 原材料

原材料主要包括水泥、再生细骨料、发泡剂、水、聚丙烯纤维、粉煤灰。水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥,水泥性能指标和化学成分组成见表1~2;粉煤灰为浮选法筛选出来的优质粉煤灰,其性能指标见表3;再生细骨料取自废旧混凝土利用化企业加工生产的再生细骨料,通过筛分试验,颗粒级配见表4,其细度模数为3.0,中砂,表观密度为2 631 kg/m³,饱和面干吸水率为1.38%,远大于机制砂饱和面干吸水率,这是由于再生细骨料相对机制砂比表面积大,孔隙多所造成;聚丙烯纤维性能指标见表5,试验采用LG2258水泥发泡剂,为植物源复合发泡剂,稀释倍数60,发泡倍数40,1 h时的沉降为9 mm,1 h泌水量为30 mL,符合JC/T 2199—2013《泡沫混凝土用泡沫剂》规范对泡沫剂发泡性、均质性要求;试验用水为自来水。

表1 水泥基本性能

Table 1 Basic properties of cement

密度/ (g/cm ³)	比表面积/ (m ² /kg)	凝结时间 /min		抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa		安定性
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d	
3.1	350	81	325	3.9	7.5	28	48	合格

表2 水泥化学成分组成

Table 2 Chemical composition of cement

SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ Oeq	f-CaO	Cl ⁻	烧失量
20.58	63.57	2.29	4.97	3.76	2.00	0.53	0.75	0.026	1.524

表3 粉煤灰性能指标

Table 3 The performance indicators of fly ash

平均粒径/ μm	球体密度/ (g/cm ³)	真密度/ (g/cm ³)	堆积密度/ (g/cm ³)	含水量/ %	标准稠度 需水比/%	胶砂需水 量比/%
1.2	2.52	0.72	0.67	≤0.1	92	82

表 4 再生细骨料级配分析

Table 4 The gradation analysis of recycled fine aggregates /%

4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm
0	23.8	50.1	61.4	81	87.8

表 5 聚丙烯纤维性能指标

表 5 Performance indicators of polypropylene fibers

纤维类型	抗拉强度 /MPa	比重	纤维直径 / μm	弹性模量 /MPa	拉伸极限 /%	吸水性
束状单丝	>486	0.91	25	>3.5	>15	无

2 配合比设计与试验方法

2.1 配合比设计

为研究泡沫掺量对再生细骨料泡沫混凝土 (RFC) 性能影响, 设计并制备泡沫掺量为浆体体积 40%、60%、80% 和 100% 的 RFC, 掺加浆体体积 0.1% 的 12 mm 聚丙烯纤维, 根据 JGJ/T 341—2014 《泡沫混凝土应用技术规程》通过体积法对配合比进行设计, 推算出所需泡沫体积与浆体体积, 得出试验所需各原材料用量。为了保持水胶比 0.5 不变, 总水量分为拌合用水和随泡沫掺入带来的泡沫剂稀释用水。不同泡沫掺量混凝土配合比见表 6, 泡沫富裕系数均为 1.1。

表 6 再生泡沫混凝土配合比设计

Table 6 The design of the mix proportion for recycled foamed concrete

编号	水泥/ (kg/m^3)	粉煤灰/ (kg/m^3)	再生骨料/ (kg/m^3)	纤维/ (g/m^3)	泡沫掺 量/%	水/ (kg/m^3)	发泡剂 稀释水/ (kg/m^3)
F-40	630	70	350	0	40	341	9
F-60	551	61	306	0	60	294	12
F-80	490	54	272	0	80	258	14
F-100	441	49	245	0	100	229	16
F-PP-40	621	69	345	0.64	40	336	9
F-PP-60	543	60	301	0.56	60	289	12
F-PP-80	481	53	267	0.50	80	253	14
F-PP-100	432	48	240	0.45	100	224	16

2.2 试件制备

试件的制备步骤分为 6 个部分, 具体操作步骤: 对试验所需材料按照设计配合比进行称量, 按比例稀释发泡剂备用, 将称好的纤维预先加入拌合水中分散均匀; 依次将再生细骨料、水泥、粉煤灰加入搅拌机内干拌 30 s; 将拌合水加入搅拌机内搅拌 180 s, 直至浆体混合均匀; 通过发泡机将稀释好的发泡剂发泡, 按泡沫掺量量取泡沫并迅速加入浆料中继续搅拌 180 s, 至泡沫与浆体相融合, 即浆体中骨料无明显沉降且无泡沫浮于表面; 把浆体倒入尺

寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的标准立方体试模, 用刮刀将试模表面多余浆体刮去使表面平整, 在温度 (20 ± 2) °C 环境内静置 48 h 后脱模; 脱模后的试件放入温度为 (20 ± 2) °C、相对湿度 95% 以上的标准养护箱中养护, 试件之间相隔不得小于 1 cm, 试件表面不得积水, 待达到试件养护龄期后进行相关试验测试。

2.3 试验方法

湿密度和流动度参照 JGJ/T 341—2014 《泡沫混凝土应用技术规程》附录 B 和附录 C 进行测试。

抗压强度参照 JGJ/T 341—2014 《泡沫混凝土应用技术规程》试验方法, 对泡沫混凝土 7、28 d 两个龄期进行测试。

3 试验结果分析

3.1 湿密度

泡沫混凝土的湿密度是指泡沫混凝土制备过程中所达到的密度, 包括水分在内的总质量与总体积之比, 由于泡沫混凝土中含有大量的气泡, 所以其湿密度通常比同等体积的普通混凝土要低很多, 试验对不同配比的 RFC 湿密度进行了测试, 其结果如图 1 所示。

随着泡沫掺量的增加, 无论有无纤维掺量的 RFC, 其湿密度都呈现不断下降趋势, 在相同泡沫掺量下, 掺纤维再生细骨料泡沫混凝土 (RFC-PP) 的湿密度普遍比无纤维泡沫混凝土湿密度低。其中, 泡沫掺量为 40% 和 60% 时, 无纤维比掺纤维的 RFC 湿密度分别增长了 5% 和 7%, 但随着泡沫掺量增加, 泡沫掺量达到 80% 和 100% 时湿密度已经相差不大。原因是在低泡沫掺量下加入纤维后, 纤维在水泥浆体中呈散乱分布, 毛细孔隙增加导致浆体孔隙率提高, RFC 湿密度降低。另外, 聚丙烯纤维良好的分散性使得纤维掺入后在浆体中呈现三维乱向分布, 能在浆体中分担泡沫所受压力起到支撑作用, 使浆体中气泡不易发生失稳破裂现象, 从而增加了孔隙率。而随着泡沫掺量的增加, 浆体不再能均匀的包裹泡沫, 泡沫稳定性变差, 纤维改善性能变低, 呈现出高泡沫掺量下 RFC 有无纤维湿密度相差不大。

材料科学

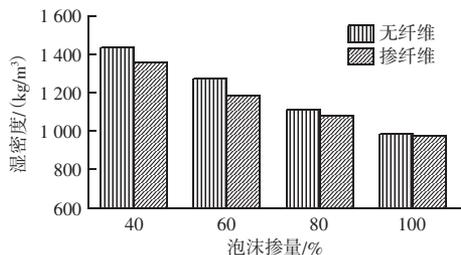


图1 不同配比有无纤维泡沫混凝土湿密度变化
Fig. 1 The wet density variation of fiber foam concrete with different ratios with or without fibers

在相同配合比下,良好的搅拌工艺可以提高泡沫混凝土的强度。通过物理发泡制备泡沫混凝土时,规范中对于搅拌机的转速要求不小于90 r/min。但对于单次搅拌量较小的实验室试验,高转速是否合适以及常规转速下是否能制备出良好质量的泡沫混凝土的讨论相对较少。因此,分别用常规转速45 r/min和高转速125 r/min制备相同配合比的RFC,测量实际湿密度并与理论湿密度进行对比,研究两种转速对再生骨料泡沫混凝土密度的影响,其结果如图2所示。

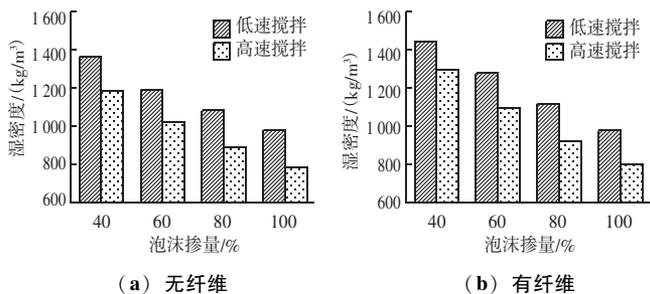


图2 不同搅拌速度下有无纤维泡沫混凝土湿密度变化
Fig. 2 The wet density variation of fiber foam concrete with or without fibers under different mixing speeds

引入了不同配比泡沫混凝土理论湿密度作为依据进行分析,见表7。低速搅拌下的湿密度更接近理论值,高速搅拌下的湿密度在掺纤维情况下相对理论湿密度分别偏离了14.4%、15.5%、16.8%、18.8%,无纤维湿密度分别偏离了8%、10.8%、15.3%、18.5%。随着泡沫掺量增加偏离趋势加剧,在泡沫掺量100%时达到峰值。分析原因:一方面是,RFC高速搅拌时,浆体被引入了更多气体,气体与泡沫融合使泡径增大,泡沫混凝土内部孔隙体积增大,湿密度降低;另一方面,随着泡沫掺量的增多,当大量泡沫聚集,高速搅拌下气体不断融入浆体中形成分布不均的泡径。泡径的不均匀分布使得相邻泡沫之间附加压力不相等,在高速搅拌下更

容易发生泡沫移动和气体扩散,小气泡在附加压力作用下向大气泡排气,最终小气泡消失,中等气泡变大,大气泡破裂,RFC总体孔隙率上升,导致湿密度下降。

表7 不同配比下泡沫混凝土理论湿密度
Table 7 Theoretical wet density of foam concrete under different mix proportions

泡沫掺量/%	掺纤维理论湿密度/(kg/m³)	无纤维理论湿密度/(kg/m³)
40	1 382	1 400
60	1 207	1 226
80	1 070	1 086
100	961	981

3.2 流动度

泡沫混凝土的流动度决定了其在施工过程中的流动性能,即其能否顺利地流入模板中,填满模板的空隙并达到设计要求。相比于普通混凝土,RFC对流动度的要求更高。试验对不同配比的RFC流动度进行了测试,具体结果如图3所示。

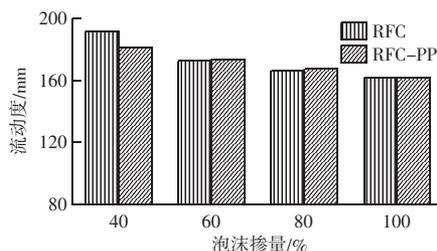


图3 不同配比泡沫混凝土流动度
Fig. 3 Flowability of foam concrete under different mix proportions

有无纤维掺量的RFC流动度都伴随着泡沫掺量增加呈现下降的趋势,在40%泡沫掺量下无纤维和有纤维RFC流动度都达到了最大值,分别为192和182 mm。在泡沫掺量为100%时,均降低到最小值162 mm。主要是泡沫掺量较小时,少量的泡沫会填充在水泥浆体中对浆体起到分散作用。另一方面,泡沫掺量较小时,泡沫中含有的水分会降低混凝土内部黏附力,使得泡沫混凝土流动度增大。伴随着泡沫不断增加,浆体中泡沫稠度增加,使得浆体无法均匀包裹泡沫,浆体之间的连接被泡沫隔开导致RFC整体流动度降低。

有无纤维的泡沫混凝土在泡沫掺量为40%时相差较大,在其他泡沫掺量时几乎持平。这是因为聚丙烯纤维具有良好的分散性,在泡沫掺量较小时,纤维在RFC内部散乱分布,增加了浆体内部的摩擦

力,从而阻碍了浆体的流动,降低了 RFC 流动性。当泡沫掺量增加聚丙烯纤维比例不变时,纤维相比泡沫对流动度的阻碍影响较小,所以形成了在泡沫掺量为 60%、80%、100% 时流动度基本持平现象。

3.3 抗压强度

试验对不同泡沫掺量下不同龄期的 RFC 进行了抗压强度测试,结果如图 4 所示,随着泡沫掺量的增加,无论有无纤维 RFC 其 7、28 d 抗压强度都呈现下降趋势,无纤维 RFC 在不同泡沫掺量情况下 7 d 抗压强度分别为 7、6.9、4.4、2.4 MPa, 28 d 抗压强度分别为 11.8、7.5、5.9、3.8 MPa; 带纤维 RFC 的 7 d 抗压强度分别为 7.6、7、4、2.6 MPa, 28 d 抗压强度分别 9.5、8.5、6、3.6 MPa。

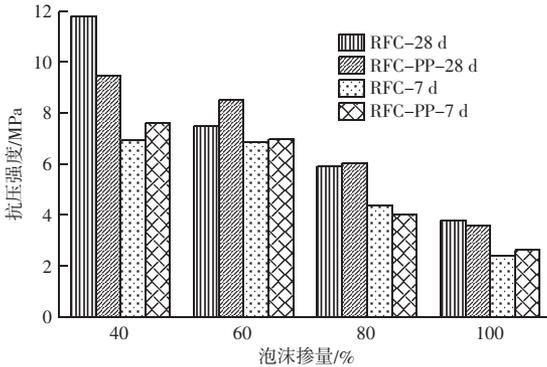


图 4 不同龄期有无纤维泡沫混凝土强度变化

Fig. 4 Strength variation of fiber-free foam concrete at different ages

无论是否掺纤维,随着龄期增长,RFC 都在泡沫低掺量下抗压强度较大,并且,在相同龄期纤维掺量比例不变情况下,相同泡沫掺量的 RFC 抗压强度变化不定,泡沫掺量为 40% 时 7 d 掺纤维 RFC 强度更大,而在 28 d 时无纤维 RFC 抗压强度更大,泡沫掺量为 60% 时,7 和 28 d 掺纤维 RFC 抗压强度更

高,但有无纤维掺量都没有改变 RFC 抗压强度变化趋势,表明在小掺量下的聚丙烯纤维对 RFC 抗压强度影响不大。当泡沫掺量增加到 100% 时,有无纤维 RFC 的 7 d 抗压强度分别为 2.4、2.6 MPa, 28 d 抗压强度分别为 3.8、3.6 MPa, 相同龄期两者相差不大,但相比泡沫掺量为 80% 的 7 d 抗压强度分别下降了 45% 和 35%, 28 d 的分别下降了 36% 和 40%, 由此可见,泡沫掺量对抗压强度的影响更加明显。分析其原因是随着泡沫掺量的增加,RFC 内部孔隙率逐渐增长的同时胶凝材料总量逐渐减小,而提供抗压强度的主要是胶凝材料水化产物,因此导致抗压强度降低;对于掺入纤维的 RFC,纤维分布在浆体中并对骨料起到一定支撑,降低了泡沫的破裂和融合,从而提高 RFC 的内部泡沫的稳定性,对抗压强度有一定提升,但当纤维掺量较少时,不能充分发挥其增强作用,是造成掺加的纤维对抗压性能提升不显著的原因。

考虑到纤维对强度的影响,为了进一步确定泡沫掺量与其抗压强度的关系,对有无纤维 RFC 的 28 d 强度进行了线性拟合、多项式拟合及指数拟合,多项式拟合最高次为 2 次,其拟合结果如图 5~6 所示。无纤维泡沫混凝土线性拟合、多项式、指数拟合时拟合优度分别为 0.950 1、0.985 2、0.987 2。有纤维泡沫混凝土的线性、多项式、指数拟合时,拟合优度分别为 0.970 6、0.993 9、0.992 1。

无纤维 RFC 指数拟合比线性拟合和多项式拟合结果更接近于 1; 而掺纤维 RFC 的多项式拟合相较线性拟合和指数拟合更接近于 1。由此可得,RFC 无纤维时采用指数拟合结果,掺纤维时取多项式进行拟合时更接近实际,效果更好。综上,取多项式拟

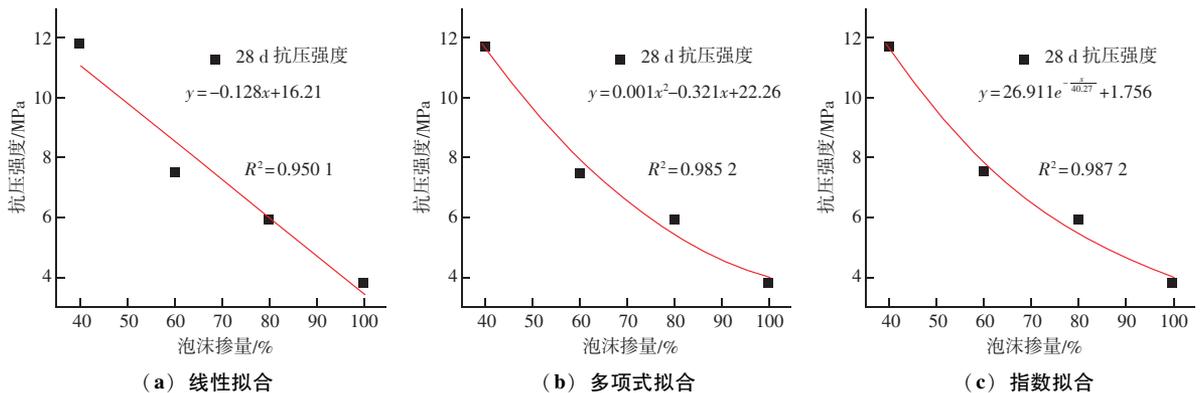


图 5 无纤维泡沫混凝土 28 d 抗压强度与泡沫掺量拟合

Fig. 5 Fitting of compressive strength of fiber-free foam concrete at 28-day with respect to the foam content

材料科学

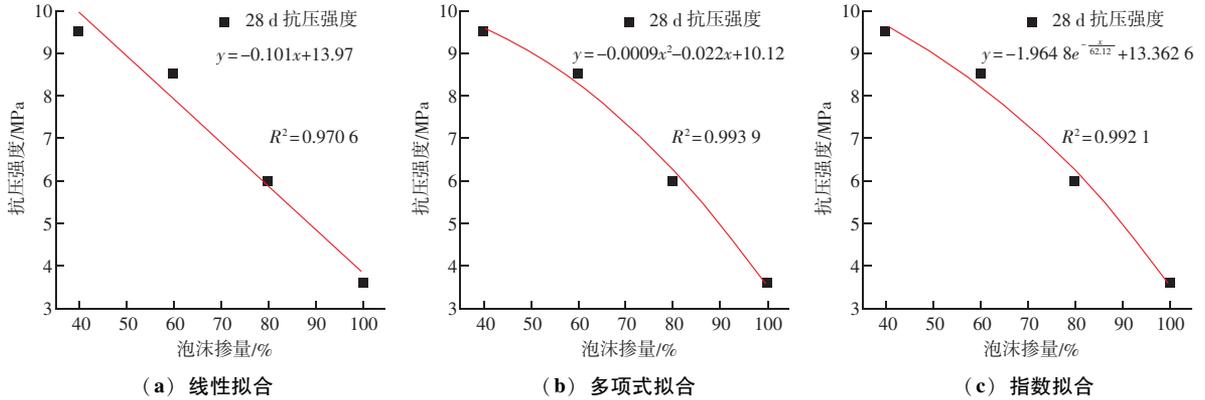


图6 掺纤维泡沫混凝土 28 d 抗压强度与泡沫掺量拟合

Fig. 6 Fitting of compressive strength of fiber-reinforced foam concrete at 28-day with respect to the foam content

合关系式作为无纤维 RFC 抗压强度与泡沫掺量的关系式, 多项式拟合关系式为掺纤维 RFC 抗压强度和泡沫掺量关系式。

4 结论

(1) RFC 的湿密度会随着泡沫掺量的增加而逐渐减小, 掺有纤维的 RFC 在泡沫掺量较小时, 纤维的分散性和支撑性使泡沫混凝土湿密度略微下降, 而当泡沫掺量较高, 纤维量不变时, 因纤维改善性能下降, 湿密度会与无纤维泡沫混凝土相差不大。无论有无纤维掺量 RFC 都在低速搅拌下更加接近理论湿密度。

(2) RFC 的流动度会随泡沫掺量增加逐渐减小, 相同泡沫掺量下有无纤维 RFC 流动度可能不同, 0.1% 体积掺量的纤维在泡沫掺量 40% 时会降低 RFC 流动性, 等比例纤维随着泡沫掺量的增加对流动度的降低不显著, 泡沫掺量为 60% 以上, 有无纤维 RFC 流动度无明显变化。

(3) RFC 的抗压强度随着泡沫掺量增加, 强度降低, 并且在相同龄期 0.1% 体积的纤维掺量不变情况下, 相同泡沫掺量的 RFC 抗压强度变化不定, 低掺量纤维对 RFC 的抗压强度无明显提升, 泡沫掺量为影响抗压强度的主要因素, 有无纤维 28 d 养护龄期的 RFC, 在泡沫掺量由 80% 到 100% 时, 抗压强度分别降低了 36% 和 40%。

(4) 通过对有无纤维 RFC 的 28 d 抗压强度和泡沫掺量进行线性拟合、多项式拟合、指数拟合发现: 无纤维 RFC 指数拟合更接近实际, 而掺纤维 RFC 进

行多项式拟合效果最佳。

参 考 文 献

- [1] 何立峰. 关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见 [R]. 北京: 中华人民共和国国家发展与改革委员会, 2021.
- [2] 张凯. 废弃和再生骨料建材开发的理论和试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [3] 肖建庄, 张航华, 唐晨隽, 等. 低强再生混凝土及其应用 [J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37 (2): 20-26.
- [4] 杨帆, 张喆, 姜维, 等. 建筑垃圾再生泡沫混凝土性能及其成孔机理研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (8): 112-115, 171.
- [5] 罗建林. 再生细骨料加气混凝土的试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [6] 蒋培义. 废弃混凝土再生骨料在桥梁桥面中的应用研究 [J]. 交通世界, 2021 (24): 15-17.
- [7] AAMIR M M, PERVEZ A, SIRAJUDDIN A, et al. Sustainable usage of demolished concrete waste as a sub-base material in road pavement [J]. Frontiers in Sustainability, 2023, 4: 1060878.
- [8] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16 (1): 24-32.
- [9] 朱祥, 薛凯旋, 杨国良, 等. 建筑垃圾对再生混凝土砖性能的影响 [J]. 粉煤灰, 2014, 26 (4): 27-30.
- [10] 苏海霆, 吴奇泽, 马倩, 等. 四种水泥发泡剂发泡效果评价 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2020, 51 (3): 559-561.
- [11] 胡敏, 项腾飞, 陈德鹏, 等. 泡沫混凝土的抗氯离子渗透性能研究 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2020, 37 (1): 80-86.
- [12] 郭毅松, 刘乐冕, 陈剑锋. 油茶粕绿色发泡剂制备泡沫混凝土的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (4): 1226-1232, 1241.