

地铁车站抗裂防渗混杂纤维混凝土试验研究

杨国栋¹, 霍曼琳¹, 曹玉新², 靳利安²

(1.兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2.中电建铁路建设投资集团有限公司, 北京市 100070)

摘 要:以玄武岩纤维掺量(体积分数分别为 0.05%、0.10%、0.15%)、聚丙烯纤维(体积分数分别为 0.05%、0.10%、0.15%)、粉煤灰掺量(质量分数分别为 15%、20%、25%)为主要影响因素进行混杂纤维混凝土正交试验;然后通过平板约束试验和渗水高度法试验,测定混杂纤维混凝土平均开裂面积和平均渗水高度,分析以上 3 种材料对混凝土早期抗裂和抗渗性能的影响。测试结果表明:与基准混凝土比较,聚丙烯纤维对混杂纤维混凝土抗裂性能影响最大,其体积分数为 0.15%时混凝土的总开裂面积最小,其次是玄武岩纤维;对抗渗性能而言,玄武岩纤维的影响最为显著,其体积分数为 0.10%时混凝土的平均渗水高度最小,其次是聚丙烯纤维;粉煤灰的影响均最小。当玄武岩纤维、聚丙烯纤维的体积分数均为 0.10%、粉煤灰质量分数为 20%时,混杂纤维对混凝土抗裂、防渗性能最为有利。

关键词:混杂纤维混凝土;平均渗水高度;总开裂面积

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)12-0243-06

0 引言

混凝土是由水泥、砂、石料和水等原材料混合而成的一种建筑材料,具有优异的强度和耐久性,能够满足各类建筑工程需要。但传统混凝土也有抗拉强度小、脆性大、韧性差、自重大的缺点,已经无法适应现代建筑的需要。数据显示,大量混凝土建筑在服役期间均有不同程度的裂缝、破坏和崩塌产生,其耐久性问题给世界各国带来了很大的经济损失。在国内,该损失占了全国生产总值(GDP)的 2%~4%,因而限制了它的进一步应用开发^[1-2]。

近年来国内外不少研究人员提出各种改善混凝土性能的措施,其中,纤维混凝土这一概念应运而生^[3]。纤维混凝土是在混凝土中掺入连续长纤维或不连续短纤维复合而成,属于复合材料的范畴。

本试验研究以玄武岩纤维掺量(体积分数 φ_b)、聚丙烯纤维掺量(体积分数 φ_p)、粉煤灰掺量(质量分数 w_f)为主要影响因素进行混杂纤维混凝土正交试验,分析各因子对混凝土抗裂、抗渗性能的影响程度,为实际工程提供参考。

1 试验

1.1 工程概况及配合比设计

采用三因素三水平正交试验方案 L₉(3³)来研究

收稿日期: 2023-03-09

作者简介: 杨国栋(1994—), 男, 硕士在读, 从事土木工程材料研究工作。

混杂纤维混凝土的抗裂和抗渗性能。其中 3 个试验因素分别为玄武岩纤维掺量 φ_b 、聚丙烯纤维掺量 φ_p 和粉煤灰掺量 w_f ;每个因素又有 3 种水平(见表 1)。通过正交试验的设计,可在有限的试验次数内,全面考察各个因素对混凝土抗裂和抗渗性能的影响,从而得到最优的配合比。

表 1 试验因素与水平

因素和水平	φ_b /%	φ_p /%	w_f /%
1	0.05	0.15	15
2	0.10	0.10	20
3	0.15	0.05	25

试验共设计了 10 组配合比,基准混凝土配合比见表 2。正交试验方案见表 3。

1.2 原材料

P·O 42.5 水泥;自来水;经过严格检验的河砂,细度模数达 3.2;粒度介于 5~20 mm 的粗骨料,由于其逊径为 2%,因此需要对其进行适当调整以符合规范《建设用砂》(GB/T 14684—2022)要求;I 级粉煤灰,国家电投集团东北电力有限公司抚顺热电分公司出产;玄武岩纤维、聚丙烯纤维均由长沙柠祥建材有限公司生产,其基本物理性能指标见表 4;引气型高性能聚羧酸系减水剂(WJF 引气型)。

1.3 试验方法

1.3.1 抗裂试验

按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009),对 800 mm × 600 mm ×

表 2 基准混凝土配合比及材料用量

强度等级	砂率 /%	水胶比	材料用量 /(kg·m ⁻³)					
			碎石	河砂	自来水	水泥	粉煤灰	减水剂
C50	42	0.32	932	675	180	450	113	5.625
逊径调整	42	0.32	1 037	571	180	450	113	5.625

表 3 正交试验方案

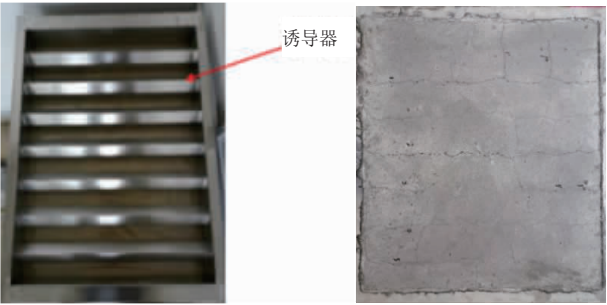
组别	因素和水平	φ_b /%	φ_p /%	w_f /%	材料用量 /(kg·m ⁻³)			
					水泥	自来水	河砂	减水剂
1	基准	0	0	20	450	180	571	5.625
2	A ₁ B ₁ C ₁	0.05	0.15	15	478	180	571	5.625
3	A ₁ B ₂ C ₂	0.05	0.10	20	450	180	571	5.625
4	A ₁ B ₃ C ₃	0.05	0.05	25	422	180	571	5.625
5	A ₂ B ₁ C ₂	0.10	0.15	20	450	180	571	5.625
6	A ₂ B ₂ C ₃	0.10	0.10	25	422	180	571	5.625
7	A ₂ B ₃ C ₁	0.10	0.05	15	478	180	571	5.625
8	A ₃ B ₁ C ₃	0.15	0.15	25	422	180	571	5.625
9	A ₃ B ₂ C ₁	0.15	0.10	15	478	180	571	5.625
10	A ₃ B ₃ C ₂	0.15	0.05	20	450	180	571	5.625

表 4 纤维性能指标

纤维品种	直径 / μm	长度 /mm	密度 /(g·cm ⁻³)	弹性模量 /GPa	拉伸强度 /MPa	极限伸长率 /%
玄武岩纤维	17	12	2.65	7.6	1 050	3
聚丙烯纤维	31	12	0.91	3.5	410	30

100 mm 平面薄板型试件进行早期抗裂试验,以确保其质量符合要求^[4]。试验基本原理是:采用 7 道并行平铺的刀口作为诱导器,以有效控制混杂纤维混凝土材料的开裂,从而可在保持其他试验条件不变的前提下,达到试件快速开裂的效果。

本次试验中,每组配合比均制作 2×3,共 6 个试件;成型 24 h 后,根据文献[5],分别测量每个试件的裂缝数量和平均开裂面积,将各组 6 个试件的裂缝总数与平均开裂面积相乘后,即可得出这组试件的总开裂面积,作为其抗裂性能的最终评价标准。平板抗裂试验示意图见图 1。



(a)试件模具 (b)试件成型

图 1 平板抗裂试验示意图

1.3.2 抗渗试验

本次试验采用抗水渗透法。先用橡胶圈将试件紧密封闭,然后将其放入抗渗仪中(见图 2(a)),施加 1.2 MPa 水压,以确保试件的渗透效果。当试件表面出现渗漏水或试验时间满 24 h 时停止试验,然后将试件沿纵断面劈开,沿着纵向切割 10 个测点,并测量每个测点的高度,数值精确到 1 mm。用 10 个测点的渗水高度值作为该试件的渗水高度,并计算出每组 6 个试件渗水高度的平均值,作为该组试件的平均渗水高度。混凝土抗渗试验示意图见图 2。



(a)抗渗仪 (b)试件抗渗变化情况

图 2 混凝土抗渗试验示意图

2 试验结果及分析

正交试验结果汇总见表 5。

表 5 正交试验结果汇总

组别	因素和水平	抗裂试验			抗渗试验	
		裂缝数目 / (条·m ⁻²)	平均开裂面积 / (mm ² ·条 ⁻¹)	总开裂面积 / (mm ² ·m ⁻²)	6 个试件的平均渗透 系数 / (10 ⁻⁸ mm·h ⁻¹)	6 个试件的平均 渗水高度 /mm
1	基准	14.6	120	1 752	13.69	13.37
2	A ₁ B ₁ C ₁	10.4	43.5	452	7.15	9.66
3	A ₁ B ₂ C ₂	9.7	41	397.7	7.66	10
4	A ₁ B ₃ C ₃	9.4	58	545.2	11.72	12.37
5	A ₂ B ₁ C ₂	7.3	38.5	281.1	4.84	7.95
6	A ₂ B ₂ C ₃	6	51.3	308	0.57	2.73
7	A ₂ B ₃ C ₁	6	75.5	453	9.83	11.33
8	A ₃ B ₁ C ₃	3.5	55	192.5	6.21	9
9	A ₃ B ₂ C ₁	10.3	39.6	408	5.15	8.2
10	A ₃ B ₃ C ₂	5	83	415	4.78	7.87

2.1 工作性能

混杂纤维混凝土工作性能测试结果见图 3。

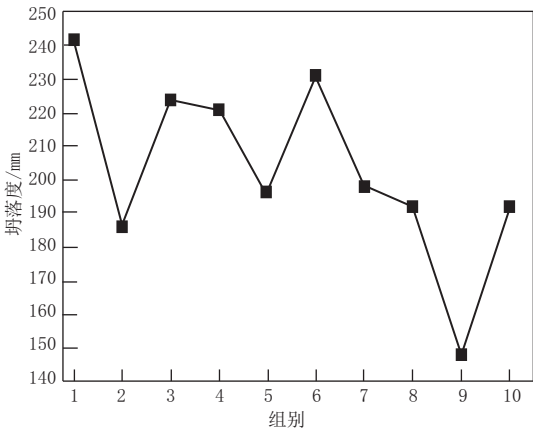


图 3 混杂纤维混凝土工作性能测试结果

由图 3 可知,不管纤维的类型和比例如何变化,混杂纤维混凝土拌和物的流动性均低于基准混凝土。这是由于分散在水泥浆体中的纤维(玄武岩纤维或聚丙烯纤维)阻碍了拌和物流动的缘故,且纤维的体积分数越大,拌和物工作性能变差的趋势越明显^[6]。其中第 3 组(A₁B₂C₂)、第 4 组(A₁B₃C₃)、第 6 组(A₂B₂C₃)均能符合本试验工作性能要求,因此得出结论:混杂纤维总体积分数保持在 0.10%~0.20%,粉煤灰质量分数为 20%~25%时,混杂纤维混凝土拌和物工作性能均能符合本试验要求。

2.2 抗裂性能试验

2.2.1 试验结果对比与分析

抗裂性能试验中的 3 个因素与混凝土抗裂性能的关系见图 4。

由图 4 和表 5 的数据可知,当掺入 2 种纤维和

粉煤灰后,混凝土整体开裂面积逐渐减小,同时早期的抗裂性能也得到了显著提高。由图 4(a)可知,当玄武岩纤维体积分数在 0.05%~0.15%内发生变化时,混凝土总开裂面积为 1 394.9~1 015.5 mm²/m²,相较于未掺入纤维的基准混凝土开裂面积减小了 20.38%~42%,其中又以体积分数为 0.15%时性能提升最好。

由图 4(b)可知,随着聚丙烯纤维体积分数的不断增加,混凝土试件的总开裂面积呈递减趋势。当聚丙烯纤维体积分数为 0.05%~0.15%时,混凝土总开裂面积为 1 413.3~925.6 mm²/m²,相较于未掺入纤维的基准混凝土开裂面积减小了 19.35%~47.17%,其中又以体积分数为 0.15%时性能最佳。

综上所述,掺入聚丙烯-玄武岩混杂纤维可以有效地控制混凝土的裂缝扩展。当混凝土受到外力作用时,混杂纤维可以在混凝土内部形成一个网状结构,从而防止裂缝的扩展。

由图 4(c)可知,在混凝土中掺加粉煤灰后,混杂纤维混凝土的抗裂性能会随其掺量的增加而逐渐提升,当粉煤灰掺量达到 25%时,与基准混凝土相比,其抗裂性能提升了 25.57%。这是因为粉煤灰的颗粒细小,具有良好的吸附和填充作用,使得混凝土中的毛细孔得到堵塞,水分蒸发速度变慢,干燥收缩率也会相应降低^[7]。由此可见在大掺量粉煤灰情况下,仍可极大程度地降低混凝土的干缩变形,减小混凝土产生干缩裂缝的概率,提高混凝土的抗裂性能。

2.2.2 破坏形态及分析

混凝土破坏形态对比分析图见图 5。

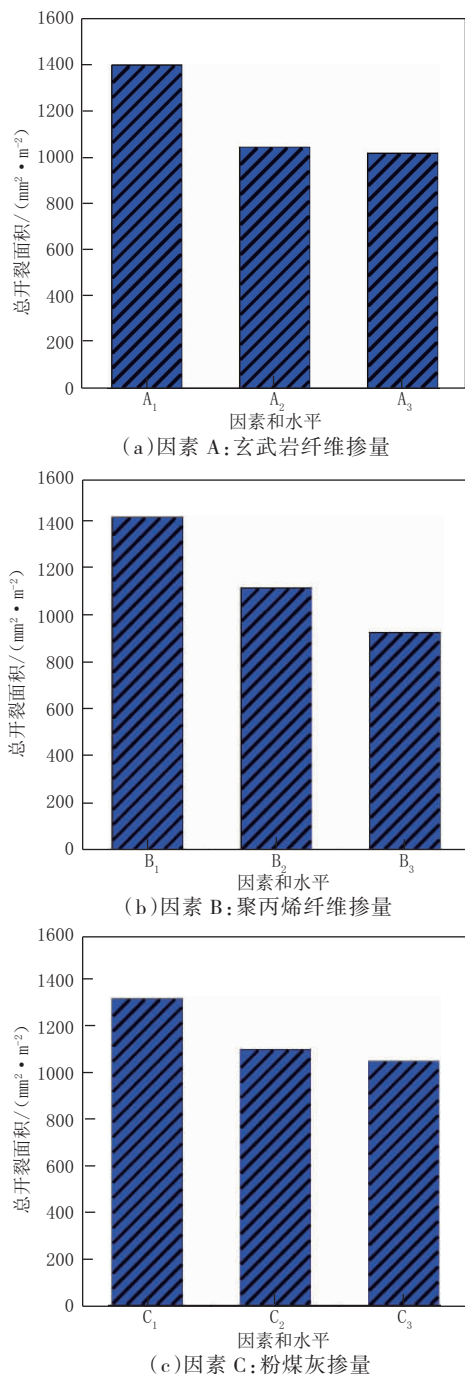


图4 3个因素与混凝土抗裂性能的关系

由图5可以看出,与基准混凝土试件比较,掺入玄武岩纤维和聚丙烯纤维的混杂纤维混凝土试件裂缝宽度明显较小。由此可见,纤维能有效提高混凝土早期抗裂性能,原因是玄武岩纤维和聚丙烯纤维对混凝土拌和物的分层离析有改善作用,能减弱试件浇筑成型后的自收缩能力;同时,由于纤维分散性良好,容易与水泥基体形成良好的黏结性,当裂缝扩展至混凝土内部界面薄弱之处时,由于纤维与混凝土的握力较强,因此可阻挡试件表面或内部裂缝的扩展路径,使纤维的抗拉性能得到更好的发挥,延缓裂纹的进一步发展。这两方面原因使得混杂纤维混凝土

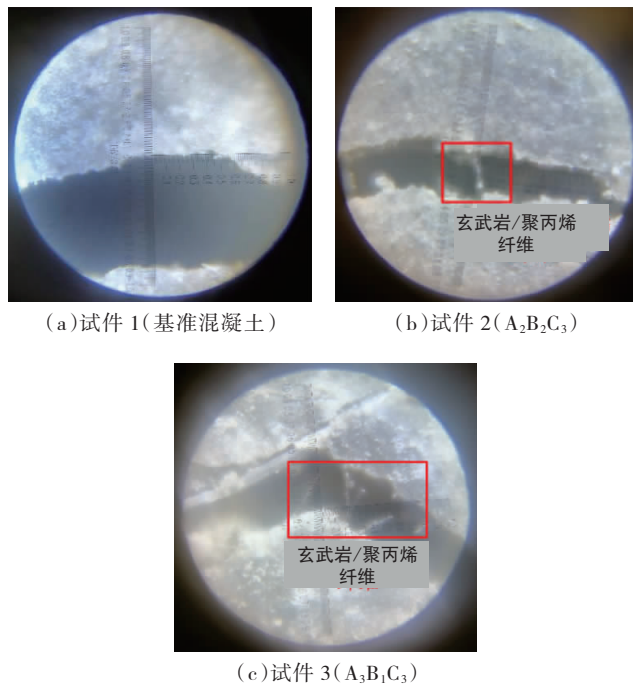


图5 混凝土破坏形态对比分析图

土的抗裂效果优于基准混凝土^[8]。

2.3 抗渗性能试验

2.3.1 试验结果对比与分析

由表5求出每一个因素在不同水平下的试件平均渗水高度,可得3个因素与混凝土抗渗性能的关系图,见图6。

由图6(a)和表5可知,与基准混凝土相比,玄武岩纤维的掺入对混凝土的抗渗效果为先提升后降低,当其体积分数在0.05%~0.15%内变化时,混凝土平均渗水高度为6.67~11.01 mm,较基准混凝土分别降低17.65%、50.12%、37.47%。由图6(b)可知,聚丙烯纤维的掺入对混凝土抗渗性能的提升效果与玄武岩纤维等同,当其体积分数从0.15%降低到0.05%时,混凝土平均渗水高度为10.78~6.98 mm,较基准混凝土分别降低19.37%、47.79%、38.07%。

综合以上试验结果,得出玄武岩纤维体积分数(因素A)和聚丙烯纤维体积分数(因素B)均为0.10%时,能有效提升混凝土的抗渗性能。

由图6(c)可知,混凝土抗渗性能随着粉煤灰掺量的增加而先升高后降低。当粉煤灰掺量在15%~25%内变化时,混凝土平均渗水高度为7.94~9.7 mm,较基准混凝土分别降低37.17%、40.61%、27.45%。由此得出粉煤灰掺量为20%时,可有效改善纤维混凝土的渗透性。

2.3.2 破坏形态及分析

混凝土抗渗形态对比分析图见图7。

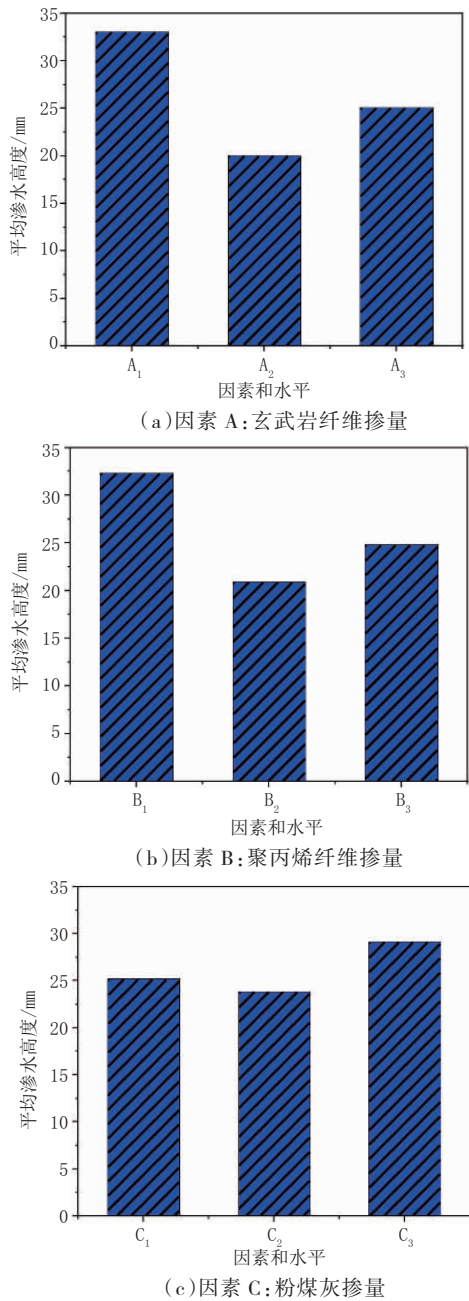


图 6 3 个因素与混凝土抗渗性能的关系图

由图 7 可知,与基准混凝土试件 1 对比,混杂纤维混凝土试件 2、试件 3 的平均渗水高度较低。这是因为:玄武岩纤维具有较高的弹性模量和伸长率,可以提升混凝土基体的抗拉性能,而聚丙烯纤维具有良好的耐久性和抗腐蚀性,且容易在混凝土内均匀分散,可防止混凝土内氯离子和二氧化碳等有害物质的渗透;在搅拌和成型过程中,2 种纤维混合在一起形成了混杂纤维,构成了三维网络空间结构,增加了内部的内聚力和黏结力,从而可填充混凝土中的微裂纹和孔隙,改善混凝土界面处的孔隙率和抗渗性。

但若纤维掺量过高,会导致混凝土拌和物黏稠度增加,并有轻微的泌水和分层现象,在实际搅拌过

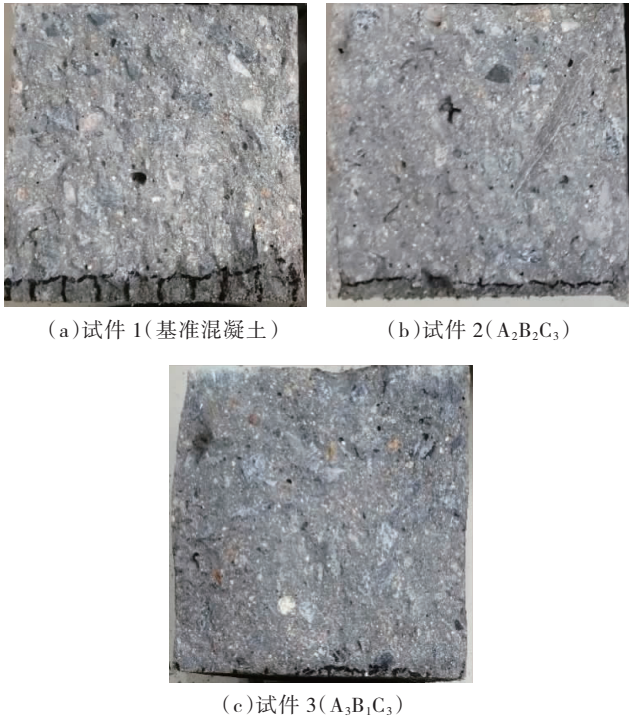


图 7 混凝土抗渗形态对比分析图

程中难以成型,从而对混凝土的密实性产生影响。因此,在掺入混杂纤维时,需要控制合理掺量,以保证混杂纤维能够均匀分布在混凝土内,发挥最佳的增韧抗裂效果。

而粉煤灰能改善混杂纤维混凝土抗渗性能的作用机理为:粉煤灰颗粒尺寸小,含有较多的硅酸、铝酸和氧化铁等物质,这些物质极易与水中的氢氧根离子发生反应,生成大量的胶凝材料,同时也能减少混凝土内的水分含量,从而填充混凝土的微小孔隙和裂纹。因此,粉煤灰对混凝土抗渗性能的改善主要包括细粒度、化学反应、微观结构和填充作用,这些机理相互作用于混凝土中,共同提高了混凝土的抗渗性能。

2.4 极差分析

对表 5 结果进行处理,得出极差分析结果,见表 6。由表 6 可见,当玄武岩纤维、聚丙烯纤维体积分数均为 0.15%、粉煤灰质量分数为 25%时,所配制的混杂纤维混凝土试件的总开裂面积最小,即 A₃B₁C₃ 为目标抗裂试验最佳配合比。

在抗渗试验中,当玄武岩纤维、聚丙烯纤维体积分数均为 0.10%、粉煤灰质量分数为 20%时,所配制的混杂纤维混凝土试件渗透高度最低。得出结论: A₂B₂C₂ 为目标抗渗试验最佳配合比。

3 结 语

(1)聚丙烯纤维对混杂纤维混凝土抗裂性能有最为显著的影响;玄武岩纤维对混杂纤维混凝土抗

表 6 正交试验极差分析

目标	比较内容	A:玄武岩 纤维掺量	B:聚丙烯 纤维掺量	C:粉煤灰 掺量
抗裂 试验	同水平和	K1	1 394.9	925.6
		K2	1 042.1	1 113.7
		K3	1 015.5	1 413.3
	取平均值	R1	464.97	308.53
		R2	347.36	371.23
		R3	338.4	471.1
	极差	ΔR	126.57	162.47
	影响程度	聚丙烯纤维>玄武岩纤维>粉煤灰		
	同水平和	K1	33.03	32.33
		K2	20.01	20.93
		K3	25.07	24.85
抗渗 试验	取平均值	R1	11.01	10.78
		R2	6.67	6.98
		R3	8.36	8.28
	极差	ΔR	4.34	3.8
	影响程度	玄武岩纤维>聚丙烯纤维>粉煤灰		

渗性能有最为显著的影响。

(2)玄武岩-聚丙烯混杂纤维总体积分数以 0.10%~

0.20%、粉煤灰质量分数以 20%~25%为宜。

(3)利于抗裂性能的最优搭配为:聚丙烯纤维和聚丙烯纤维体积分数均为 0.15%、粉煤灰质量分数为 25%。

(4)利于抗渗性能的最优搭配为:聚丙烯纤维和聚丙烯纤维体积分数均为 0.10%、粉煤灰质量分数为 20%。

参考文献:

[1] 乔伊夫.严酷环境下混凝土结构的耐久性设计[M].赵铁军译.北京:中国建材工业出版社,2010.
[2] 朱明娇.纤维增强水泥基材料的未来[J].混凝土与水泥制品,1999(1):5-6.
[3] 刘君杰,王建坤.纤维增强混凝土的应用现状和水泥基材料的未来[J].天津纺织科技,2003,4(3):9-14.
[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
[5] 张林,钱国林.粉煤灰掺量对混凝土抗裂性能的影响[J].建材世界,2018(4):30-33.
[6] 邓宗才,张永方,徐海滨,等.纤维素纤维混凝土早期抗裂与抗渗性能试验[J].南水北调与水利科技,2012(6):10-13.
[7] 王鹏,杜应吉.大掺量粉煤灰混凝土抗渗抗冻耐久性研究[J].混凝土,2011(12):76-78.
[8] 方圣恩,张培辉,洪华山.纤维混凝土梁受弯试验及开裂弯矩计算公式[J].建筑材料学报,2019,22(4):567-574.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com