

竹纤维再生骨料生态混凝土力学与植生性能研究

李涛^{1,2}, 邓博凡³, 何茂林², 刘婷^{1*}, 陈厚德⁴

(1.上海城建职业学院 市政与生态工程学院, 上海市 201415; 2.浙江海洋大学 船舶与海运工程学院, 浙江 舟山 316022;
3.东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189; 4.浙江润达检测科技有限公司, 浙江 舟山 316041)

摘要:针对当前大量存在的城市建筑垃圾处理问题, 该文利用经过加工处理的再生建筑垃圾骨料以及竹制品垃圾等材料, 成功制备了竹纤维再生骨料生态混凝土。通过调整竹纤维的添加量, 并采用正交试验及验证的方法系统分析竹纤维掺入量对混凝土力学性能和植被覆盖性能的影响。试验结果显示: 竹纤维的掺入能够显著增强生态混凝土的韧性。尤其当竹纤维掺入量达到 3.0 kg/m^3 以上时, 对再生骨料生态混凝土的抗拉性能具有明显的增强效果。由于竹纤维能够在混凝土中形成空间网状结构, 试验中混凝土的抗拉强度最高可达 4.71 MPa 。此外, 采用优化后的配合比进行的混凝土植被覆盖性能试验结果表明: 竹纤维再生骨料生态混凝土具有良好的植被覆盖性能。该研究成果为竹纤维再生骨料生态混凝土在工程应用中提供了可靠的试验和理论依据, 为解决城市建筑垃圾处理问题, 促进建筑材料的可持续和循环利用提供了一种有效的方案。

关键词:生态混凝土; 再生骨料; 竹纤维; 植生性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

Mechanical and Vegetative Performance of Bamboo Fiber-Reinforced Eco-Concrete with Recycled Aggregate

LI Tao^{1,2}, DENG Bofan³, HE Maolin², LIU Ting^{1*}, CHEN Houde⁴

(1.School of Municipal and Ecological Engineering, Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai 201415, China; 2.School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China; 3.School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China; 4.Zhejiang Runda Detection Technology Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang 316041, China)

Abstract: In response to the current common urban construction waste disposal issue, this study utilized processed recycled construction waste aggregate and bamboo waste materials to produce bamboo fiber-reinforced eco-concrete with recycled aggregate. By adjusting the dosage of bamboo fiber, the effects of the dosage of bamboo fiber on the mechanical and vegetative performance of the concrete were systematically analyzed by means of orthogonal tests and verification methods. The test results indicate that bamboo fiber enhances the toughness of eco-concrete significantly. Particularly, when the dosage of bamboo fiber exceeds 3.0 kg/m^3 , there is a significant enhancement in the tensile performance of the eco-concrete with recycled aggregate. Due to the spatial network structure formed by bamboo fiber within the concrete, the highest tensile strength of the concrete reaches 4.71 MPa in the experiment. Furthermore, the vegetative performance test of concrete is carried out with an optimized mix ratio, and the test results show that bamboo fiber-reinforced eco-concrete with recycled aggregate exhibits excellent vegetative performance. The study provides reliable experimental and theoretical evidence for the application of bamboo fiber-reinforced eco-concrete with recycled aggregate in engineering. It also offers a viable solution to the urban construction waste disposal issue and promotes the sustainable utilization and recycling of construction materials.

Keywords: eco-concrete; recycled aggregate; bamboo fiber; vegetative performance

收稿日期: 2024-09-12(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51879236)

作者简介: 李涛, 男, 博士, 教授. E-mail: litao@succ.edu.cn

*通信作者: 刘婷, 女, 博士, 副教授. E-mail: 61264425@qq.com

0 引言

中国建筑垃圾在2022年的总量约为18.03亿t,预计到2026年将超过20亿t,因此对其的资源和资源化利用已成为当前研究的热点问题。研究表明:采用特定的施工工艺可以将建筑垃圾加工成结构强度较低的再生骨料混凝土,具有良好的透水性和低碱度值,已应用于一些对强度要求不高或非结构混凝土的工程中,如河流两岸护岸、道路两旁护坡、屋顶绿化以及韧性城市建设等^[1-2]。此外,在工程中还可以通过添加橡胶颗粒、钢纤维、矿渣、钢渣、棉纤维以及植物纤维等^[3-8]外掺料来改善混凝土的强度和韧度。竹纤维的原料是竹子,一年即可生长成型,2~5年成熟后可砍伐使用。尽管竹纤维的抗拉强度不及钢、碳、芳纶等纤维,但其断裂延伸率明显优于其他纤维,可以显著提高混凝土构件的韧性。另外,与其他植物纤维不同,与椰壳纤维、剑麻纤维、黄麻纤维和木槿大麻素纤维相比,竹纤维在混凝土中具有较好的抗碱性,一般不容易受到混凝土的碱环境腐蚀,可以在混凝土的碱性环境下相对稳定存在^[9]。这是由于其硅酸盐含量高、纤维表面光滑、结构稳定以及化学成分等特性相互作用导致的,这些特性使竹纤维能够有效抵御混凝土碱性环境的腐蚀,能与植物相互共存,缓解生物隔离,保持其稳定性和耐久性。

自20世纪90年代起,关于竹纤维混凝土的研究已经取得了一系列成果。陈瑞麟等^[10]、叶颖薇等^[11]学者的试验结果表明:竹纤维能够显著提高混凝土的韧性、延性、抗弯性能、抗冲击性能和抗裂性能。这方面的研究也在其他文献中有所提及^[12-13];张昌等^[14]则通过建立有限元分析模型,研究了竹纤维混凝土在不同参数影响下的力学性能,并提出了竹纤维混凝土力学性能的建议计算公式;Tosho Moruma公司在20世纪90年代末进行了对比试验,结果显示:使用竹条增强的混凝土抗弯强度增加了150%^[15];2005年,Ghavami^[16]进行了深入研究,发现竹筋可以完全取代钢筋,并且竹筋与混凝土的黏结强度达到了0.52 MPa;Lima等^[17]研究了巴西当地的竹材力学性能,结果显示竹材的抗拉强度可达280 MPa,具有良好的延性。然而,由于再生骨料来源、制作工艺的不同,以及试验环境、设计和操作的差异,导致各种再生混凝土力学性能试验结果的差异。

国内外学者通过对比试验发现,再生混凝土的基本力学性能低于普通骨料混凝土^[18-22]。然而,通过缜密变量控制试验,Ahmad^[23]、Mukai等^[24]发现再生骨料混凝土的力学性能与普通骨料混凝土几乎相同。当再生细骨料所占比例低于30%时,Lotfy等^[25]、Evan-gelista等^[26]提出了相似的结论;Grdic等^[27]则在研究再生粗骨料制备的自密实混凝土时,也发现其力学性能与普通混凝土相差无几;李涛等^[28]研究了滨海生态混凝土的植生性能及工程应用;袁玉龙^[29]从宏观和微观性能方面研究再生植生混凝土基本性能,得到再生植生混凝土性能的影响因素。综上所述,掺混竹纤维的普通混凝土在韧性、延性、抗弯性能、抗冲击性能和抗裂性能方面有所提高,利用竹纤维可以改善再生混凝土的力学性能。而生态混凝土的植生性能不仅需要良好的孔隙率,还需要适宜的根系生长环境和营养。因此,在边坡生态防护及建筑物绿化中,掺混竹纤维的生态混凝土具有独特的优势。然而,目前针对竹纤维再生骨料生态混凝土的力学性能和植生性能的研究,尚未有较多深入探讨。

本文选取建筑垃圾再生骨料及竹制品加工厂的废料,配制竹纤维再生骨料生态混凝土作为研究对象,采用正交试验方法得到最佳配比,通过改变竹纤维的掺入量分析其力学性能的变化规律,并确定最佳的植生性能孔隙率,为建筑垃圾资源化利用和各类生态防护工程建设提供参考。

1 正交试验

1.1 原材料

(1) 再生粗骨料:再生骨料采用连续级配,公称粒径为9.5~19 mm。依据《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52—2006)测试其物理性能指标(表1)。

再生骨料的成分较为复杂,有混凝土碎块、烧结砖碎块、瓷砖碎块、钢筋头、钢钉、塑料碎片、木材屑、玻璃碎块、渣土等,骨料表面有大量的泥土与粉尘(图1),因此不能直接用于竹纤维生态再生骨料生态混凝土的试配;且再生骨料的吸水率比普通骨料大,影响骨料与浆体材料的黏聚性,故需要进行去杂质处理,该文采用高压水枪反复冲洗的方式进行处理,并保证再生骨料的粒径为9.5~19 mm,如图2所示。

表 1 再生骨料的各项物理性能指标

Table 1 Various physical performance indicators of recycled aggregate

骨料公称 粒径/mm	压碎指标/ %	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	紧密堆积密度/ (kg·m ⁻³)	表观密度/ (kg·m ⁻³)	吸水率/ %	含泥量/ %	针片状含量/ %
10~20	19.85	1 123.90	1 286.95	2 259.63	6.60	1.44	4.7



图 1 原始再生骨料

Figure 1 Initial recycled aggregate



图 2 清洗并筛分后的再生骨料

Figure 2 Recycled aggregate after cleaning and screening

(2) 水泥:选用宁海强蛟海螺 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,技术指标见表 2。

(3) 矿物掺合料:选用 I 级粉煤灰作为矿物掺合料,密度为 2 420 kg/m³,比表面积为 420 m²/kg,化学成分见表 3。

(4) 减水剂:选用聚羧酸高性能减水剂,外观呈淡黄色液体,pH 值 6.7,减水率 23%。

(5) 水:选用实验室的自来水。

(6) 竹纤维:竹子是世界上生长速度最快的植物之一,在中国南方随处可见。竹子作为一种绿色低碳建筑材料,具有优异的力学性能:抗拉强度 1 100~2 300 MPa,弹性模量 17~40 GPa,断裂延伸率 4.3%~9.7%,在混凝土中掺入竹纤维能够有效增强其抗拉性能和韧性。但竹材作为一种生物材料,不仅容易受到真菌和昆虫的攻击,而且容易受到温度、湿度、紫外线辐射等环境变化的影响。研究表明:未经处理的竹材在暴露环境中只能使用 13 年^[30]。为了提高竹材的耐久性,前人提出了大量预处理方案^[31-32]。

表 2 水泥物理力学性能指标

Table 2 Physical and mechanical properties of cement

密度/ (kg·m ⁻³)	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	初凝时 间/min	终凝时 间/min	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		安定性
				3 d	28 d	3 d	28 d	
3 130	366	166	248	27.9	49.5	5.2	8.5	合格

表 3 粉煤灰的化学成分

Table 3 Chemical composition of fly ash

$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{K}_2\text{O})$	烧失量
2.52	2.63	0.81	34.86	53.95	0.47	0.35	1.76	2.65

实践证明:经过适当的物理或化学处理,竹材可使用 50 年以上而不出现性能下降^[33],不断改进的预处理工艺为竹纤维材料在生态混凝土中的应用提供了基础。本研究选择衢州市柯城区九华乡竹制品加工厂的废料作为竹纤维的来源。试验前,先将较长的竹纤维剪短,长度控制为 30~50 mm,直径控制为 0.2~0.6 mm,如图 3 所示。随后将其进行碱处理:将竹纤

维浸泡在体积浓度为 5% 的 NaOH 溶液中 6 h,然后用清水冲洗至冲洗液呈中性,沥干备用,如图 4 所示。碱处理能够有效去除竹纤维结构中的非纤维素部分以及可能影响混凝土硬化的残留物。处理后的竹纤维,不仅显著提升了韧性,有效防止在混凝土搅拌过程中发生断裂,而且降低了其吸水率,减少水灰比对其性能的影响。



图3 竹纤维废料
Figure 3 Bamboo fiber waste



图4 经碱处理后的竹纤维
Figure 4 Bamboo fiber treated with alkali

1.2 配合比设计与试件制备

在配合比设计中,根据再生骨料的黏聚性要求,确定单位体积竹纤维和再生骨料的合理用量。该文采用绝对体积法进行设计,设定再生骨料体积、胶结浆体体积、目标孔隙率体积及竹纤维体积的总体积为1 m³,考虑了粉煤灰取代率与处理后的竹纤维吸水率对水灰比的影响,试配时适当调整配合比,考虑骨

料周围包裹一层1.0 mm的水泥浆时效果最佳,其理论计算公式如式(1)所示^[18]:

$$M=k\frac{6h\rho_{cp}}{d\rho_g}\tag{1}$$

式中: M 为单位体积水泥浆体用量; k 为修正系数,主要与骨料表面粗糙度有关,取0.65~0.75; h 为包裹骨料的水泥浆厚度,取1.0 mm; ρ_{cp} 为水泥浆密度; ρ_g 为骨料的紧密堆积密度; d 为骨料平均粒径。

因生态混凝土内部孔隙率达15%~30%,为实现良好的孔隙率和抗压强度,该文采用正交试验加后续验证方法进行配比优化设计。试验采用孔隙率、水灰比、粉煤灰取代率、竹纤维掺入量4个变量(分别用A、B、C、D表示)作为控制因素,每个因素3个水平(用序数表示),采用四因素三水平进行正交试验,试验设计见表4。

表4 正交试验因素及水平
Table 4 Orthogonal test factors and levels

水平	因素			
	孔隙率 (A)/%	水灰比 (B)	粉煤灰取代 率(C)/%	竹纤维掺入量 (D)/(kg·m ⁻³)
1	15	0.26	15	0.0
2	20	0.31	20	1.5
3	25	0.36	25	3.0

具体每组各3块平行试件,试件的正交设计与配合比设计材料用量见表5。

表5 正交试验设计与试验配合比
Table 5 Orthogonal test design and mix ratio

组号	因素水平				配合比/(kg·m ⁻³)					
	A	B	C	D	粗骨料	水泥	粉煤灰	水	减水剂	竹纤维
1	1	1	1	1	1 261.21	612.31	108.05	187.29	7.20	0.0
2	1	2	2	2	1 261.21	554.29	138.57	214.79	6.93	1.5
3	1	3	3	3	1 261.21	500.55	166.85	240.26	6.67	3.0
4	2	1	2	3	1 261.21	477.56	119.39	155.21	5.97	3.0
5	2	2	3	1	1 261.21	430.62	143.54	177.99	5.74	0.0
6	2	3	1	2	1 261.21	470.10	82.96	199.10	5.53	1.5
7	3	1	3	2	1 261.21	355.15	118.38	123.12	4.74	1.5
8	3	2	1	3	1 261.21	387.14	68.32	141.19	4.55	3.0
9	3	3	2	1	1 261.21	350.97	87.74	157.94	4.39	0.0

根据《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)和《再生骨料透水混凝土应用技术规程》(CJJ/T 253—2016)的规定,由于竹纤维的体积较小

(图5),在采用绝对体积法进行计算时可忽略其引起的体积变化,并根据表5中的单位体积掺入量进行取值。

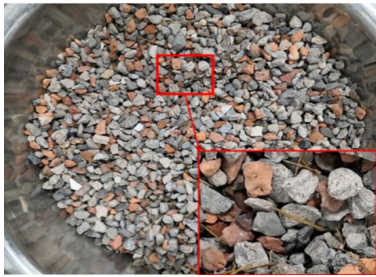


图5 拌匀后的再生骨料与竹纤维

Figure 5 Mixed recycled aggregate and bamboo fiber

1.3 配合比优化

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019),测试混凝土在 14 d 和 56 d 时的抗

压强度及 14 d 的抗折强度。另外,根据《再生骨料透水混凝土应用技术规程》(CJJ/T 253—2016)实测孔隙率,并采用定水位法^[21]测定透水系数。

在透水系数试验中,每个试件进行 3 次测量,取其平均值。另外,为测试再生骨料生态混凝土的 pH 值,使用 8 L 的水对试件进行浸泡,待 pH 值稳定后测量浸泡液的 pH 值。详细试验结果见表 6。

在分析正交试验数据中,研究采用孔隙率、水灰比、粉煤灰和竹纤维掺入量在不同水平组下的平均值。具体来说,当对某一因素进行分析时,忽略其他因素对测试结果的影响。最后,通过极差分析,得出各因素对测试指标的影响程度。详细数据见表 7~10。

表 6 生态混凝土正交试验结果

Table 6 Orthogonal test results of eco-concrete

组号	因素水平				14 d 抗压	56 d 抗压	14 d 抗折强	实测	pH 值	透水系数/ (cm·s ⁻¹)
	A	B	C	D	强度/MPa	强度/MPa	度/MPa	孔隙率/%		
1	1	1	1	1	3.35	5.09	1.88	20.03	10.92	5.46
2	1	2	2	2	14.73	18.69	3.38	19.38	10.90	5.27
3	1	3	3	3	9.69	14.89	4.71	16.90	10.83	5.07
4	2	1	2	3	4.28	8.67	3.29	24.44	10.71	8.47
5	2	2	3	1	9.36	11.05	2.15	19.48	10.26	11.40
6	2	3	1	2	11.04	15.71	2.49	21.52	10.71	7.25
7	3	1	3	2	1.63	2.33	0.76	29.87	10.42	15.92
8	3	2	1	3	3.36	6.23	1.37	36.89	11.02	19.28
9	3	3	2	1	4.20	7.34	2.01	28.61	11.12	13.81

表 7 不同设计孔隙率水平下各性能指标平均值

Table 7 Average value of performance indicators under different design porosities

设计 孔隙率/%	实测孔 隙率/%	14 d 抗压 强度/MPa	14 d 抗折 强度/MPa	pH 值	透水系数/ (cm·s ⁻¹)
15(A ₁)	18.77	9.26	3.32	10.88	5.27
20(A ₂)	21.81	8.23	2.64	10.56	9.04
25(A ₃)	31.79	3.06	1.38	10.85	16.34

表 8 不同水灰比水平下各性能指标平均值

Table 8 Average value of performance indicators under different water-cement ratios

水灰比	实测孔隙 率/%	14 d 抗压 强度/MPa	14 d 抗折 强度/MPa	pH 值	透水系数/ (cm·s ⁻¹)
0.26(B ₁)	24.78	3.09	1.98	10.68	9.95
0.31(B ₂)	25.25	9.15	2.30	10.73	11.98
0.36(B ₃)	22.34	8.31	3.07	10.89	10.89

表 9 不同粉煤灰取代率水平下各性能指标平均值

Table 9 Average value of performance indicators under different fly ash substitution rates

粉煤灰取 代率/%	实测孔 隙率/%	14 d 抗压 强度/MPa	14 d 抗折 强度/MPa	pH 值	透水系数/ (cm·s ⁻¹)
15(C ₁)	26.14	5.92	1.91	10.88	10.66
20(C ₂)	24.14	7.74	2.89	10.91	9.18
25(C ₃)	22.08	6.90	2.54	10.50	10.80

表 10 不同竹纤维掺量水平下各性能指标平均值

Table 10 Average value of performance indicators under different bamboo fiber dosages

竹纤维掺入量/ (kg·m ⁻³)	实测孔 隙率/%	14 d 抗压 强度/MPa	14 d 抗折 强度/MPa	pH 值	透水系数/ (cm·s ⁻¹)
0.0(D ₁)	22.71	5.64	2.01	10.77	10.22
1.5(D ₂)	23.59	9.13	2.21	10.68	9.48
3.0(D ₃)	26.07	5.78	3.12	10.85	10.94

在9组配合比中,优选出了两组作为后续试验的配合比,如表11所示。最终确定正交试验表5中的第2组的配合比为最优配合比。

表 11 各性能指标的极差值及因子的主次顺序
Table 11 Range value of performance indicators and primary and secondary order of factors

因素	各性能指标极差				
	实测孔隙率/%	14 d 抗压强度/MPa	14 d 抗折强度/MPa	pH 值	透水系数/(cm·s ⁻¹)
设计孔隙率 A	13.02	6.19	1.94	0.33	11.07
水灰比 B	2.91	6.06	1.09	0.20	2.03
粉煤灰取代率 C	4.06	1.82	0.98	0.41	1.62
竹纤维掺入量 D	3.37	3.50	1.11	0.18	1.46
因子主次顺序	A→C→	A→B→	A→D→	C→A→	A→B→
	D→B	D→C	B→C	B→D	C→D

2 植生性能试验

根据正交试验结果及后续试验验证,研究选取正交试验中表5中的第2组配合比(再生骨料:水泥:粉煤灰:水:减水剂:竹纤维=2.275 4: 1: 0.250 0: 0.387 5:0.012 5:0.002 7)和第6组配合比(再生骨料:水泥:粉煤灰:水:减水剂:竹纤维=2.682 9:1:0.176 5: 0.423 5:0.011 8:0.003 2)进行植生性能试验。

植生性能试验中,植物种子的播种量为30~40 g/m³。试验分为两种工艺:覆土和喷播。首先,在竹纤维生态再生骨料混凝土上覆盖一层厚约10 mm的营养土层,然后将营养土和草种按照植物播种量的比例混合均匀后,涂抹在已覆土的生态混凝土表面,形成厚约10 mm的覆盖层。用于植生性能试验的试件在室外自然条件下养护3个月,并观察其生长状态。植物生长状态见图6,播种后植物高度随时间变化情况见图7。



图 6 植生试验图
Figure 6 Vegetative performance test

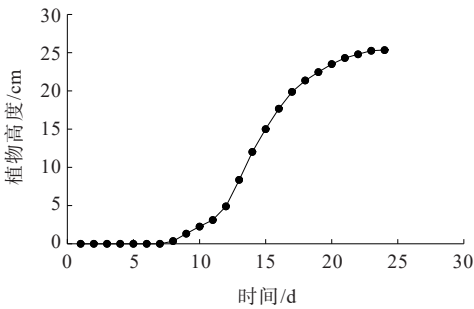


图 7 植生长高度随时间变化曲线
Figure 7 Variation of plant growth height with time

3 试验结果分析

3.1 影响竹纤维生态再生骨料混凝土强度的主要因素
图8~11为不同影响因素下竹纤维生态再生骨料混凝土强度的试验结果。

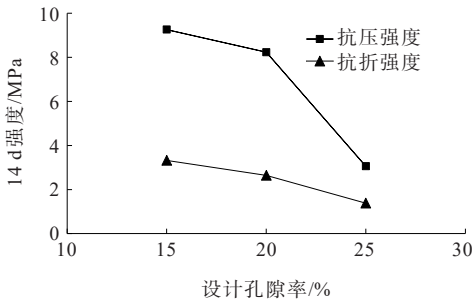


图 8 设计孔隙率影响
Figure 8 Influence of design porosity

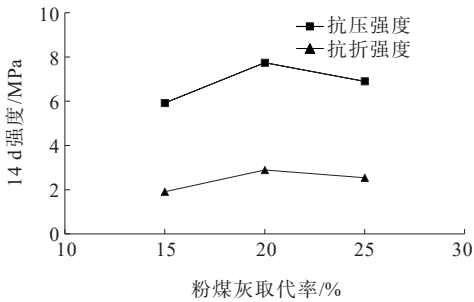


图 9 水灰比影响
Figure 9 Influence of water-cement ratio

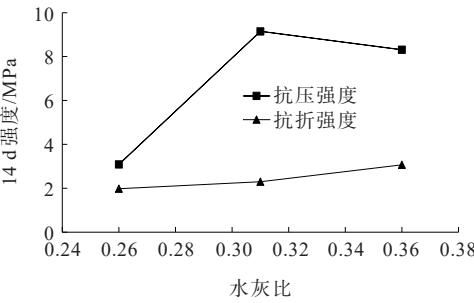


图 10 粉煤灰取代率影响
Figure 10 Influence of fly ash substitution rate

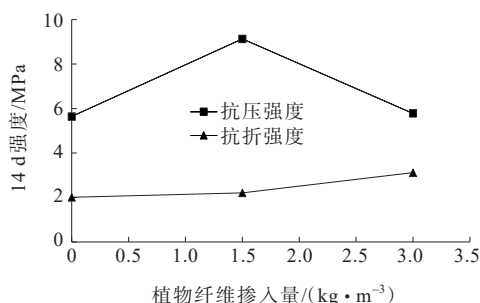


图 11 竹纤维掺量影响

Figure 11 Influence of bamboo fiber dosage

图8~11的试验结果显示:竹纤维再生骨料生态混凝土的强度受到多种因素的影响。除孔隙率和水灰比外,竹纤维的掺量也对混凝土的力学性能产生显著影响。通过分析混凝土14 d抗折强度平均值发现,随着竹纤维掺量的增加,试块的抗折强度随之提高;竹纤维的掺量与混凝土抗折强度呈正比关系。主要是由于竹纤维能够增加混凝土的内聚力、抗裂性能和韧性,同时促进水化反应,从而提高了混凝土的整体强度。

3.2 竹纤维空间形态对力学性能的影响

在再生骨料生态混凝土中,竹纤维具有类似于钢筋的作用,能够增强混凝土的抗拉性能。试验结果表明:随着竹纤维掺量的增加,混凝土的抗拉性能也随之提高。当竹纤维的掺入量从0增加到3 kg/m³时,混凝土14 d抗折强度平均值也相应增加。然而,竹纤维在混凝土中的分布呈现出均匀性、随机性和分散性,同时在力学性能上也表现出各向异性特征。当竹纤维的分布方向与受拉应力状态一致时(图12),混凝土的抗拉性能表现良好。

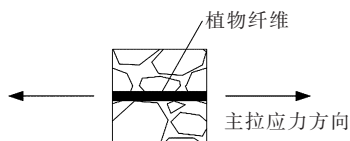


图 12 竹纤维的分布方向与主拉应力方向一致

Figure 12 Distribution direction of bamboo fiber is consistent with direction of principal tensile stress

当受拉应力状态恰好与竹纤维的分布方向垂直时(图13),竹纤维几乎不对再生骨料生态混凝土的力学性能产生任何影响。

由于竹纤维的抗压性能低于混凝土自身,过多的添加会对混凝土的抗压性能造成不利影响。在试件发生破坏后,在抗折的断裂面上会出现竹纤维的

断裂情况。同时,也会观察到部分竹纤维没有脱落的现象,偶尔会出现试件断裂时,中性层附近的竹纤维仍然黏结的情况。

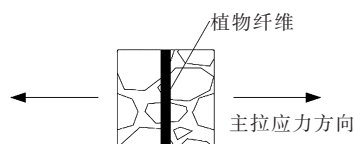


图 13 竹纤维的分布方向与主拉应力方向垂直

Figure 13 Distribution direction of bamboo fiber is perpendicular to direction of principal tensile stress

3.3 再生骨料生态混凝土的破坏形态

通过对比普通骨料和再生骨料生态混凝土的破坏形态试验,发现在破坏过程中均会产生裂缝,并有部分骨料从试块上脱落。相比之下,竹纤维再生骨料生态混凝土的裂缝明显少于普通骨料生态混凝土。在试件破坏时,偶尔会发现部分已脱落的骨料通过竹纤维的联结继续与试件主体部分“藕断丝连”。试验完成后,压力试验机停止加载时,试件的破坏形态如图14、15所示。



图 14 普通骨料混凝土

Figure 14 Concrete with ordinary aggregate



图 15 竹纤维再生骨料生态混凝土

Figure 15 Bamboo fiber-reinforced eco-concrete with recycled aggregate

若试件在破坏后继续加载,少部分受力的竹纤维断裂后,试件会迅速从主体上脱落,试件分解成散乱碎石。在抗折试验中,试件的断裂面基本呈平面

状,断裂面上的竹纤维明显被拉断。在平面上可见残余的拉断竹纤维,其中与主拉应力方向平行的竹纤维拉断时形成一个小点,而与主拉应力方向不平行或垂直的竹纤维在断裂后有部分裸露在断裂面上。如图16所示,竹纤维在再生骨料生态混凝土中形成了空间网状结构。

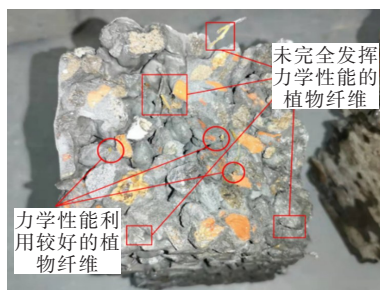


图16 竹纤维生态再生骨料混凝土断裂面

Figure 16 Fracture surface of bamboo fiber-reinforced eco-concrete with recycled aggregate

3.4 植生性能分析

再生骨料生态混凝土具有良好的孔隙率,而环境因素对其植被生长性能产生重要影响。观察高羊茅的生长过程发现,大多数草种的发芽时间为播种后第8天,根系能够穿透混凝土,而关键的生长阶段出现在喷播后的前12天。在此期间,高羊茅的叶绿素逐渐形成,进行光合作用已实现自给自足。随后的12~21 d是高羊茅生长速度较快的阶段,之后生长速度显著减缓。持续观察发现,在第30天,高羊茅的根系已完全穿过表面喷播的土壤,到达生态混凝土区域,如图17所示;到了第50天,植物的根系已能穿透混凝土,并与底部土层良好融合,如图18所示。高羊茅在竹纤维生态再生骨料混凝土环境中生长良好,其根系通过混凝土的孔隙向下方延伸,可达穿透底部,一般植物在中性或者偏酸性环境下生长更佳,加入经碱化处理后的竹纤维以后,内部呈弱碱性,植物部分根茎长达20 cm(图18),表现出对弱碱性环境良好的适应性。制约生态混凝土发展的原因主要是强度与透水性的协调性,混凝土内部碱性环境亦是植物生长的不利因素,通过加入竹纤维的再生骨料生态混凝土既提高了强度与韧性,又能让植物向下和向上生长,穿透混凝土向下长入自然土壤中,提高了植物成活率,故加入竹纤维的再生骨料生态混凝土具备良好的植生性能。



图17 植物根系的生长(30 d)

Figure 17 Growth of plant roots (30 d)



图18 植物根系穿过生态混凝土(50 d)

Figure 18 Plant roots through eco-concrete (50 d)

4 结论

(1) 竹纤维在生态再生骨料混凝土中发挥了增强韧性的作用,提升了其抗拉强度,试验中最大的抗折强度达4.71 MPa。然而,过量添加竹纤维会导致生态混凝土的抗压性能下降。试验结果表明,当竹纤维掺入量为 3.0 kg/m^3 时,混凝土的抗拉性能达到最佳。

(2) 通过正交试验得出的最优配合比为:再生骨料:水泥:粉煤灰:水:减水剂:竹纤维=2.682 9:1:0.176 5:0.423 5:0.011 8:0.003 2。该配合比下再生骨料生态混凝土具有最佳植生性能,其孔隙率为20%,较好地解决了强度和透水性的协调性,适合高羊茅等植物的生长;植物根系能够穿透生态混凝土并深入土层20 cm,在弱碱性环境下生长良好;根系在生态混凝土中呈现网状分布,错综复杂,起到了固锚作用,提高了混凝土的力学性能,形成了一种新的复合体。

(3) 竹纤维再生骨料生态混凝土充分利用了建筑垃圾与竹制品废料,符合可持续发展的生态理念,促进了再生资源的利用,为城市建筑垃圾的处理提供了新途径,在城市更新中可广泛应用于边坡防护及建筑物绿化,具有广阔的应用前景。

参考文献:

References:

- [1] 孟海星,贾倩,沈清基,等.韧性城市研究新进展:韧性城市大会的视角[J].现代城市研究,2021,36(4):80-86.
MENG Haixing, JIA Qian, SHEN Qingji, et al. New progress in study on resilient cities: Perspective from resilient cities congress[J]. Modern Urban Research, 2021, 36(4):80-86.
- [2] 梁远博,王成启.生态植草混凝土制备及其在生态城护岸中的应用[J].水运工程,2021(6):1-5.
LIANG Yuanbo, WANG Chengqi. Ecological grass-planting concrete preparation and application in eco-city revetment[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(6):1-5.
- [3] 梁波,张海涛,刘政,等.纤维改性沥青混合料性能研究进展[J].中外公路,2023,43(3):1-16.
LIANG Bo, ZHANG Haitao, LIU Zheng, et al. Research progress on the performance of fiber-modified asphalt concrete mixtures[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3):1-16.
- [4] 邱建冬.钢-聚丙烯复掺纤维橡胶混凝土力学性能试验研究[J].中外公路,2023,43(4):274-279.
QIU Jiandong. Experimental study on the mechanical properties of steel-polypropylene blended fiber rubber concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4):274-279.
- [5] 刘本立,张朋,单景松,等.纳米硅+聚丙烯纤维复合改性透水混凝土性能研究[J].中外公路,2024,44(4):97-103.
LIU Benli, ZHANG Peng, SHAN Jingsong, et al. Study on the performance of nanosilica+polypropylene fiber composite modified porous concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4):97-103.
- [6] 熊辉,刘洪辉.掺钢纤维和矿渣的高性能再生混凝土性能研究[J].中外公路,2020,40(1):206-211.
XIONG Hui, LIU Honghui. Influence of high performance recycled concrete mixed with steel fibers and slags[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1):206-211.
- [7] 沈凡,庞若楠,韦国苏,等.掺钢渣再生沥青混凝土的制备及路用性能研究[J].中外公路,2020,40(3):231-237.
SHEN Fan, PANG Ruonan, WEI Guosu, et al. Production and road performance of recycled asphalt concrete with steel slag[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3):231-237.
- [8] 王红梅,高涛涛,王丽英.棉纤维沥青混凝土的力学性能试验研究[J].中外公路,2022,42(4):199-202.
WANG Hongmei, GAO Taotao, WANG Liying. Experimental study on mechanical properties of cotton fiber asphalt concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(4):199-202.
- [9] 白诗淇.植物纤维混凝土性能研究[J].中国新技术新产品,2020(24):73-75.
BAI Shiqi. Study on properties of plant fiber concrete[J]. New Technology & New Products of China, 2020(24):73-75.
- [10] 陈瑞麟,曾家民.竹纤维混凝土主要力学性能的试验研究[J].华侨大学学报(自然科学版),1990,11(4):377-381, 431.
CHEN Ruilin, ZENG Jiamin. Pilot study on the principal mechanical properties of bamboo concrete[J]. Journal of Huqiao University (Natural Science), 1990, 11(4):377-381, 431.
- [11] 叶颖薇,冼定国,冼杏娟.竹纤维和椰纤维增强水泥复合材料[J].复合材料学报,1998,15(3):92-98.
YE Yingwei, XIAN Dingguo, XIAN Xingjuan. Bamboo fiber and coconut husk fiber reinforced cement composite materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1998, 15(3):92-98.
- [12] 罗皓鹏,仰涛,巫绪涛.竹纤维混凝土的动态力学性能研究[J].安徽水利水电职业技术学院学报,2019,19(3):6-10.
LUO Haopeng, YANG Tao, WU Xutao. Study on dynamic mechanical properties of bamboo fiber reinforced concrete [J]. Journal of Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power, 2019, 19(3):6-10.
- [13] 王怡静.论竹纤维在混凝土中的应用前景[J].中国科技投资,2017(14):44.
WANG Yijing. On the application prospect of bamboo fiber in concrete[J]. China Venture Capital, 2017(14):44.
- [14] 张昌,黄真,王贤栋,等.竹纤维增强混凝土的力学性能与计算方法研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(1):220-225.
ZHANG Chang, HUANG Zhen, WANG Xiandong, et al. Experimental study and analysis on mechanical properties of bamboo fiber reinforced concrete[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(1):220-225.
- [15] 贺子岳,余红,蔡剑英.国外新型纤维增强混凝土及其应用[J].国外建材科技,1998,19(3):7-11.
HE Ziyue, YU Hong, CAI Jianying. New fiber reinforced concrete abroad and its application[J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 1998, 19(3):7-11.
- [16] GHAVAMI K. Bamboo as reinforcement in structural

- concrete elements[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005,27(6):637-649.
- [17] LIMA H C, WILLRICH F L, BARBOSA N P, et al. Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement [J]. *Materials and Structures*, 2008,41(5):981-989.
- [18] CASUCCIO M, TORRIJOS M C, GIACCIO G, et al. Failure mechanism of recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(7): 1500-1506.
- [19] 张玉栋,张立群,郭强,等.基于骨料掺配的再生混凝土界面和力学性能研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2018(4):99-101.
- ZHANG Yudong, ZHANG Liquan, GUO Qiang, et al. Study on interface and mechanical performance of recycled concrete based adding aggregate[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2018(4):99-101.
- [20] 肖建庄,雷斌,袁飏.不同来源再生混凝土抗压强度分布特征研究[J]. *建筑结构学报*, 2008,29(5):94-100.
- XIAO Jianzhuang, LEI Bin, YUAN Biao. Compressive strength distribution of recycled aggregate concrete derived from different origins[J]. *Journal of Building Structures*, 2008,29(5):94-100.
- [21] 郭远新,李秋义,岳公冰,等.考虑粗骨料品质和取代率的再生混凝土抗压强度计算[J]. *建筑结构学报*, 2018,39(4): 153-159.
- GUO Yuanxin, LI Qiuyi, YUE Gongbing, et al. Calculation of compressive strength of recycled concrete based on coarse aggregate quality and replacement rate[J]. *Journal of Building Structures*, 2018,39(4):153-159.
- [22] 贾飞.骨料侵蚀程序及加载参数对再生混凝土力学性能的影响研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- JIA Fei. Study on the influence of aggregate erosion program and loading parameters on the mechanical properties of recycled concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [23] AHMAD S H. Properties of concrete made with North Carolina recycled coarse and fine aggregates[R]. United States:North Carolina State University, 2004.
- [24] MUKAI T, KIKUCHI M. Study on the properties of cement containing recycled concrete aggregates[R]. Japan: Cement Association of Japan, 1978.
- [25] LOTFY A, AL-FAYEZ M. Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015,61:36-43.
- [26] EVANGELISTA L, DE BRITO J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007,29(5):397-401.
- [27] GRDIC Z J, TOPLICIC-CURCIC G A, DESPOTOVIC I M, et al. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2010,24(7):1129-1133.
- [28] 李涛,孙浩铭,赖小颖,等.浙东海岛植生型生态混凝土植生性能研究[J]. *混凝土*, 2022(2):131-135.
- LI Tao, SUN Haoming, LAI Xiaoying, et al. Study on planting performance of vegetation-type ecological concrete on East Zhejiang Islands[J]. *Concrete*, 2022(2): 131-135.
- [29] 袁玉龙.再生植生混凝土基本性能及配合比试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.
- YUAN Yulong. Experimental study on basic properties and mix proportion of recycled plant-growing concrete[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [30] 孙芳利, PROSPER N K, 吴华平,等.木竹材防腐技术研究概述[J]. *林业工程学报*, 2017,2(5):1-8.
- SUN Fangli, PROSPER N K, WU Huaping, et al. A review on the development of wood and bamboo preservation[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2017,2(5):1-8.
- [31] GAUSS C, KADIVAR M, HARRIES K A, et al. Chemical modification of dendrocalamus asper bamboo with citric acid and boron compounds: Effects on the physical-chemical, mechanical and thermal properties[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,279:123871.
- [32] SU N, FANG C H, YU Z X, et al. Effects of rosin treatment on hygroscopicity, dimensional stability, and pore structure of round bamboo culm[J]. *Construction and Building Materials*, 2021,287:123037.
- [33] 王军.竹纤维对混凝土性能影响研究[J]. *化学工程与装备*, 2023(4):22-24.
- WANG Jun. Study on the influence of bamboo fiber on concrete performance[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2023(4):22-24.