

稻壳灰生态混凝土的力学及植生性能

龚芳媛, 王书岳, 杜政阳, 程雪佼

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

摘要:【目的】利用工业发电过程中产生的废弃稻壳灰替代硅灰制备稻壳灰生态混凝土,改善生态混凝土的强度和植生性能,降低生态混凝土制造成本的同时保护生态环境。【方法】采用稻壳灰部分代替硅灰作为胶凝材料,保持硅灰和稻壳灰质量之和不变,对稻壳灰代替硅灰进行第1次配比设计,研究水和胶凝材料的质量比(水胶比)、稻壳灰替代率对稻壳灰生态混凝土强度的影响,确定最佳水胶比和稻壳灰替代率的取值范围;进行第2次配比设计,采用 Design Expert 软件进行响应面分析,研究水胶比、稻壳灰替代率和孔隙率对稻壳灰生态混凝土抗压强度和抗折强度等力学性能的影响,确定最佳水胶比和稻壳灰替代率,并采用狗牙根、黑麦草、高羊茅3种草本植物验证稻壳灰生态混凝土的植生性能。【结果】随着稻壳灰替代率的增大,稻壳灰生态混凝土的强度呈现先增大后减小的趋势,最佳稻壳灰替代率为55%;3种草本植物均能够在稻壳灰生态混凝土中正常生长,高羊茅植生性能最佳。【结论】稻壳灰可以替代硅灰用作胶凝材料,制备的稻壳灰生态混凝土具有良好的力学性能和植生性能。

关键词:生态混凝土;稻壳灰;强度;植生性能;响应面法

中图分类号: TB4; TQ324.8

文献标志码: A

引用格式:

龚芳媛, 王书岳, 杜政阳, 等. 稻壳灰生态混凝土的力学及植生性能[J]. 中国粉体技术, 2024, 30(2): 173-186.

GONG F Y, WANG S Y, DU Z Y, et al. Mechanical and vegetation properties of rice husk ash ecological concrete [J]. China Powder Science and Technology, 2024, 30(2): 173-186.

随着经济的快速发展,混凝土的需求不断增加,导致碳排放和环境污染问题日益严重。在混凝土制备过程中,对生态环境影响最大的是水泥生产和细集料河砂开采过程,制备1 t水泥产生的二氧化碳排放量约为0.8~1.3 t,细集料河砂开采中对森林的砍伐会影响沿岸植被的生态稳定性^[1-2]。为缓解制造混凝土引发的碳排放和生态环境破坏问题,越来越多的工业副产品如矿渣、粉煤灰、硅灰、偏高岭土等被用来代替水泥作为辅助胶凝材料,其中采用具有火山灰性能的硅灰、粉煤灰等制备的胶凝材料性能较为优良^[3]。火山灰特性材料在混凝土中的应用不仅有助于提升固废利用率,还能提高混凝土的耐久性^[4-5]。

各类环境友好型的混凝土因使用回收材料、减少对自然资源的消耗以及降低对自然环境的破坏而备受关注^[6]。生态混凝土是一种使用广泛的环境友好型混凝土,通过特定粒径的粗骨料之间的嵌挤作用而形成基本结构。生态混凝土具有较大的孔隙,可以连通水分、土壤、空气和植物根系,可为植物及微生物的生长提供空间,进而改善生态环境^[7]。

稻米在我国年生产量超过0.4亿t,其中每吨稻米产生大约0.2 t稻壳,根据气候、稻米种类和处理方式的不同,这些稻壳会产生0.18~0.2 t的灰烬,处理不当会影响生态环境^[8]。稻壳中纤维素、木质素及矿质元素的质量分数分别约为40%、30%、17%,因此常被用作电站燃料,稻壳在一定的加热条件下形成的灰烬成为具有一定使用价值的稻壳灰^[9]。研究发现,稻壳灰的无定形二氧化硅质量分数大于80%,具有良好的火山灰性能,有助于水泥混凝土性能的提高^[4, 10]。Kang等^[11]采用稻壳灰进行超高性能混凝土的制备,发现稻壳灰的使用有效地提高了超高性能混凝土的抗压强度。Kumar等^[12]将棕榈燃料灰和稻壳灰加入混凝土中,发现掺入稻壳灰的混凝土具有更好的耐久性能。Liu等^[13]用稻壳灰部分取代水

收稿日期: 2023-10-28, 修回日期: 2024-12-28, 上线日期: 2024-02-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目,编号:52008154。

第一作者简介: 龚芳媛(1990—),女,博士,副教授,博士生导师,研究方向为道路工程材料及结构。E-mail:fgong1@hebut.edu.cn。

泥,并对稻壳灰混凝土的工作性能和抗压强度进行研究,建立了稻壳灰替代率的最佳模型。

将部分工业副产品作为辅助胶凝材料应用到混凝土中,虽然可以减少水泥用量并改善混凝土的性能,但混凝土的产量和质量稳定性往往难以保证,特别是常用来制备高性能混凝土的胶凝材料硅灰的价格较高,大用量推广应用受到限制。稻壳灰在组成成分上与硅灰相似,二者均可以通过水化反应产生硅酸钙凝胶来提高混凝土的强度,因此可考虑将稻壳灰用来代替其他火山灰活性材料组成胶凝材料^[14]。Lo等^[9]将粉煤灰和稻壳灰部分取代普通硅酸盐水泥制备透水混凝土,受稻壳灰、粉煤灰性能的影响,混凝土的浆体体积增大,致密性和抗压强度提高。Tayeh等^[15]认为合理使用稻壳灰代替硅灰可以提高混凝土的强度和耐久性。Qureshi等^[16]研究了4种辅助胶凝材料对再生混凝土强度和性能的影响,发现质量分数分别为15%、10%的稻壳灰和硅灰制备的样品均具有较好的强度和耐久性。Syed等^[17]将稻壳灰和微硅粉2种材料应用到改善钢纤维水泥基材料的研究中,认为稻壳灰和微硅粉的质量均占胶凝材料总质量的7.5%时钢纤维水泥基材料具有最佳性能。

现有研究大多集中于稻壳灰作为火山灰材料对常规混凝土性能的影响,缺少将稻壳灰应用于具有生态效益的混凝土结构中,从而改善混凝土的土力学性能及环境污染问题。国内对生态混凝土的研究起步较晚,使用新型环保材料来代替已有掺合料的研究相对较少,因此,将稻壳灰代替硅灰应用到生态混凝土中,可为优质掺合料在生态混凝土中的应用提供理论依据。

稻壳灰生态混凝土由水、水泥、硅灰、稻壳灰、碎石和减水剂组成,本文中将造价较低的稻壳灰^[5, 18]部分代替硅灰作为胶凝材料来使用。对稻壳灰代替硅灰进行第1次配比设计时,保持硅灰和稻壳灰总质量不变,研究水胶比、稻壳灰替代率对稻壳灰生态混凝土强度的影响,初步确定最佳水胶比和稻壳灰替代率的取值范围;进行第2次配比设计时,采用Design Expert软件中的BoxBehnken Design模块进行第2次配合比方案设计,构建响应面模型,研究水胶比、稻壳灰替代率和孔隙率对稻壳灰生态混凝土抗压强度和抗折强度等力学性能的影响,并采用狗牙根、黑麦草、高羊茅3种草本植物研究稻壳灰生态混凝土的植生性能。

1 材料与方法

1.1 原材料与仪器设备

原材料:普通硅酸盐水泥(强度等级为42.5,潍坊山水水泥有限公司);根据CECS 361—2013《生态混凝土应用技术规程》^[19],采用粒径为19~26.5 mm的粗集料(安丘山水水泥有限公司),不采用细集料。硅灰(SiO_2 质量分数为94.5%,比表面积大于 $15 \text{ m}^2/\text{g}$,河南鼎诺净水材料有限公司);稻壳灰(SiO_2 质量分数 $\geq 85\%$,平均粒径为 $10 \mu\text{m}$,表观密度为 $1\,320 \text{ kg}/\text{m}^3$,鱼台创建保温材料有限公司)。放大倍数分别为500、1 000、2 000时的稻壳灰扫描电子显微镜(SEM)图像如图1所示。由图可见,稻壳灰表面具有呈规则排列的类细胞结构,结构单元之间有一定的空隙,使得稻壳灰具有较大的比表面积,可以吸附更多水分^[13]。

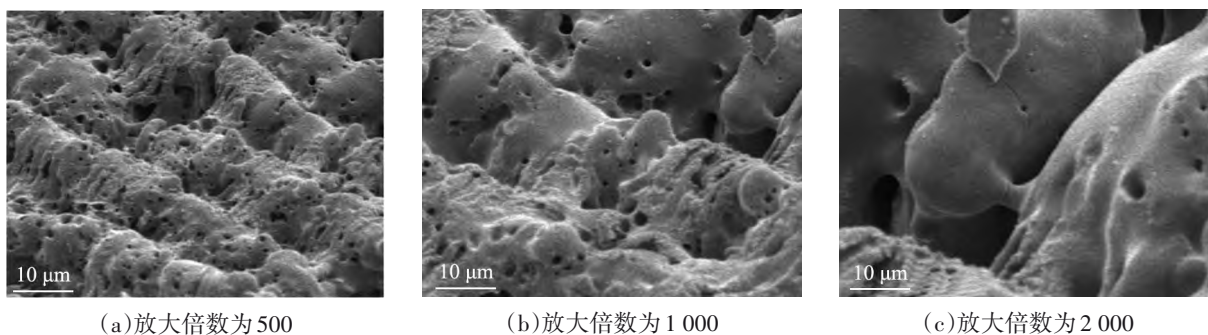


图1 不同放大倍数时的稻壳灰的SEM图像

Fig. 1 SEM images of rice husk ash at different magnifications

仪器与设备:JYW-2000型数显式压力试验机(北京科达济威实验仪器制造厂);YA-2000D型电液式压力试验机(威海市试验机制造有限公司);JSM-7800F型场发射扫描电子显微镜(上海百贺仪器科技有限公司)。

1.2 试件的制备

第1次配合比设计确定最优水胶比和稻壳灰替代率的取值范围。生态混凝土具有独特的孔隙结构,通常要求胶凝材料必须完全包裹骨料,水胶比过小或过大均会造成生态混凝土成型困难,根据文献^[2, 20],采用体积法进行配合比设计,选择水胶比分别为0.20、0.25、0.30、0.35。稻壳灰因为粒径较小无法充分填充水泥和硅灰之间的孔隙,这些孔隙可以保证生态混凝土具有良好的植生性能,但稻壳灰掺量过大会导致混凝土强度的降低^[16],因此,稻壳灰替代率分别设为0、20%、40%、60%、80%、100%。根据文献[21],设定碎石质量为1 420 kg,孔隙率为20%,胶凝材料质量分数为7.5%。每立方米稻壳灰生态混凝土第1次配合比设计材料质量如表1所示。由表可知,共24组配方,每组配方按照养护龄期不同分别制备3个试件,养护龄期分别设为7、28 d。

表 1 每立方米稻壳灰生态混凝土第1次配合比设计材料质量
Tab. 1 First mix design and material mass of rice husk ash ecological concrete per cubic meter

水胶比	质量/kg					稻壳灰替代率/%
	水	水泥	减水剂	硅灰	稻壳灰	
0.20	71.67	331.46	7.17	26.88	0	0
				21.50	5.38	20
				16.13	10.75	40
				10.75	16.13	60
				5.38	21.50	80
				0	26.88	100
				25.80	0	0
0.25	86.00	318.20	6.88	20.64	5.16	20
				15.48	10.32	40
				10.32	15.48	60
				5.16	20.64	80
				0	25.80	100
				24.81	0	0
				19.85	4.96	20
0.30	99.23	305.96	6.61	14.88	9.92	40
				9.92	14.88	60
				4.96	19.85	80
				0	24.81	100
				23.89	0	0
				19.11	4.78	20
				14.33	9.56	40
0.35	111.48	294.63	6.37	9.56	14.33	60
				4.78	19.11	80
				0	23.89	100

1.3 性能测试

1.3.1 力学性能

根据 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[22], 正方体抗压强度试件的边长为 150 mm; 棱柱体抗折强度试件的尺寸为 600 mm×150 mm×150 mm(长度×宽度×高度)。稻壳灰生态混凝土的强度试验现场如图 2 所示。

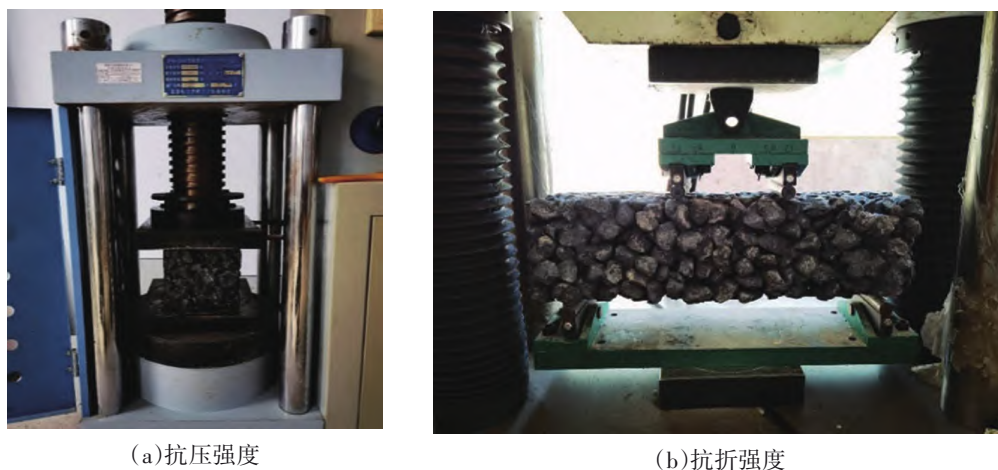


图2 稻壳灰生态混凝土的强度试验现场

Fig. 2 Strength test site of rice husk ash ecological concrete

1.3.2 孔隙率

孔隙率对生态混凝土的强度和植生性能均有较大影响。随着孔隙率的增大, 结构的胶结能力下降, 植物生长的空间增大^[11]。可采用排水法测试生态混凝土的孔隙率, 孔隙率计算公式为

$$C = \frac{m_1 - m_2}{\rho V} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: C 为孔隙率; m_1 为容器与水的质量; m_2 为试件取出后容器与水的质量; ρ 为水的密度; V 为生态混凝土试件的体积。

1.3.3 植生性能

生态混凝土作为护坡材料使用时, 要求所选草本植物应适应弱碱性、根系较细且发达、抗旱性能强, 能穿透一定厚度的生态混凝土到达天然土壤汲取养分, 因此, 选择狗牙根、黑麦草、高羊茅进行植生性能试验。植物的正常生长离不开土壤内的水分和养分, 在植物根系穿透生态混凝土扎到天然土壤之前, 需要在生态混凝土孔隙中填充植生基材。由于生态混凝土内孔隙空间 pH 显弱碱性, 植生基材由土壤、水、硫酸亚铁、复合肥按照质量比为 74:24:1:1 进行配制。种植土壤 pH 为 6.5~7, 环境温度为 25~30 °C, 光照充足, 种植过程中保持早晚浇等量的水。

在实际操作过程中, 将植生基材搅拌成糊状浆体后, 把浆体充分填充到稻壳灰生态混凝土孔隙中, 得到植生混凝土浆块, 然后将浆块用天然土壤包裹放入亚克力模型盒中; 采用表面播种法播种草籽, 将面密度为 30 g/m² 的草种均匀播撒在植生混凝土浆块的上部覆土中, 用厚度约为 1 cm 的细土将草种覆盖, 形成的植生混凝土的植生容器如图 3 所示。

2 结果与分析

2.1 力学性能

不同养护龄期时, 稻壳灰替代率对不同水胶比的稻壳灰生态混凝土的抗压强度的影响如图 4 所示。水胶比为 0.20 时, 水泥未能形成浆体裹附在碎石表面, 未达到成型要求。由图 4(a) 可知, 养护龄期为 7 d 时, 随着稻壳灰替代率的增大, 3 种水胶比下稻壳灰生态混凝土抗压强度均呈现逐渐减小的趋势, 这

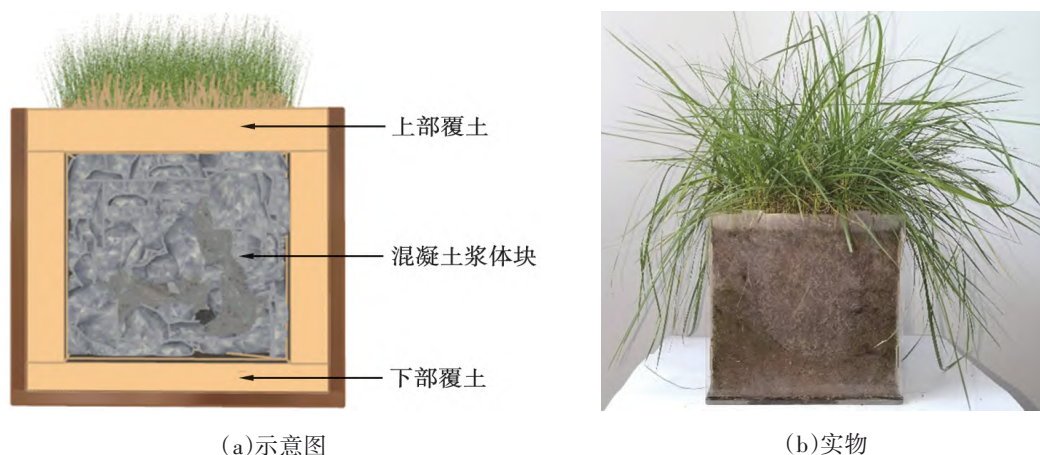


图3 植生混凝土的植生容器

Fig. 3 Planting container of vegetation concrete

是由于稻壳灰比硅灰拥有更大的比表面积,需水量更大,影响前期水泥水化反应的进程,但稻壳灰作为混凝土内部进行第2次水化反应的反应物,在早期发挥作用较小。由图4(b)可知,养护龄期为28 d时,随着稻壳灰替代率的增大,抗压强度先增大后减小,在水胶比为0.25、0.35时,稻壳灰替代率为60%时稻壳灰混凝土抗压强度最大,分别为9.32、9.6 MPa;在水胶比为0.30时,稻壳灰替代率为40%时稻壳灰混凝土抗压强度最大,为9.9 MPa,这是因为,随着胶凝材料水化反应充分,混凝土内部生成了可以改善强度的硅酸钙凝胶,但稻壳灰替代率继续增大后,因稻壳灰的需水量较多,胶凝材料的流动性逐渐降低,成型后的稻壳灰生态混凝土密实度降低,此外,稻壳灰的密度比硅灰的小,代替硅灰之后填充孔隙的能力相对较差,这些因素共同导致稻壳灰生态混凝土抗压强度减小。

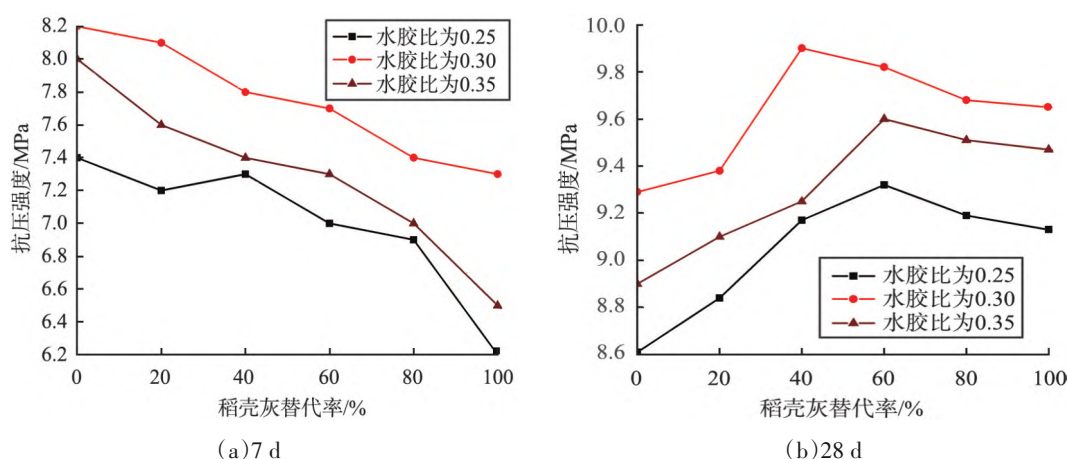


图4 不同养护龄期时稻壳灰替代率对不同水胶比的的稻壳灰生态混凝土的抗压强度的影响

Fig. 4 Effects of rice husk ash substitution rate on compressive strength of rice husk ash ecological concrete with different water-binder ratio at different curing ages

不同养护龄期时,稻壳灰替代率对不同水胶比的稻壳灰生态混凝土的抗折强度的影响如图5所示。7、28 d抗折强度表现出不同的变化趋势,而最大抗折强度均出现在水胶比为0.30时。与抗压强度不同,水胶比为0.30时的抗折强度与水胶比为0.25和0.35时具有相同的变化趋势。由图5(a)可知,养护龄期为7 d时随着稻壳灰替代率的升高,3种水胶比下的生态混凝土抗折强度均逐渐减小,而在水胶比为0.35时,不含稻壳灰的生态混凝土的抗折强度低于水胶比为0.25时的抗折强度,且随着稻壳灰替代

率的增加,水胶比为0.25时抗折强度的变化趋势较为明显。这是因为在水胶比较小时,稻壳灰本身的填充能力产生的强度要高于水化反应带来的强度变化,相对较高的强度在抗折试块中可以产生较高的弯矩,从而影响7 d强度。由图5(b)可知,养护龄期为28 d时随着稻壳灰替代率的升高,3种水胶比下的抗折强度先增加后减小,稻壳灰替代率为60%时具有最大强度。

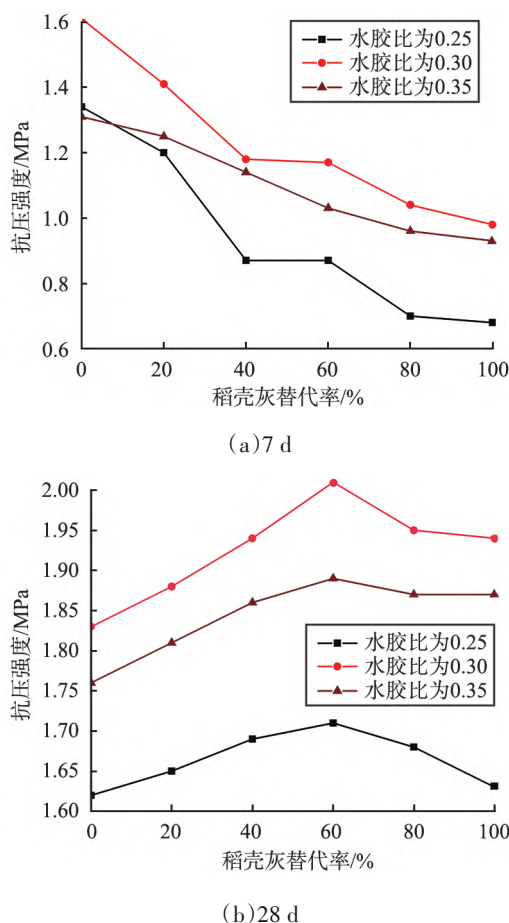


图5 不同养护龄期时稻壳灰替代率对不同水胶比的稻壳灰生态混凝土的抗折强度的影响

Fig. 5 Effects of rice husk ash substitution rate on flexural strength of rice husk ash ecological concrete with different water-binder ratio at different curing ages

综上,稻壳灰生态混凝土的7、28 d强度有不同的变化趋势,养护龄期为7 d时,3种水胶比下的稻壳灰生态混凝土抗压强度和抗折强度均随着稻壳灰替代率的增大呈减小趋势;养护龄期为28 d时,稻壳灰生态混凝土的抗压强度和抗折强度均随着稻壳灰替代率先增大后减小,在水胶比为0.30,稻壳灰替代率为40%时抗压强度最大为9.9 MPa;在水胶比为0.30,稻壳灰替代率为60%时抗折强度最大为2.01 MPa。

2.2 配合比的二次优化

2.2.1 响应面法

采用Design Expert软件中的BoxBehnken Design模块进行第2次配合比方案设计。根据第1次配合比设计的结果进一步研究孔隙率、水胶比、稻壳灰替代率3种因素对稻壳灰生态混凝土强度和植生性能的交互影响,建立回归方程确定最佳水胶比和稻壳灰替代率。

生态混凝土的特殊骨架决定了其自身孔隙结构大部分由粗骨料堆积胶结而成。根据CECS 361—2013《生态混凝土应用技术规程》,本文中选择粒径为19~26.5 mm骨料且采用单级配,在目标孔隙率为20%的条件下抗压强度大于5 MPa,因此,孔隙率初步选取为20%、25%、30%。

水胶比主要影响稻壳灰生态混凝土的强度,也会间接影响孔隙率。在第 1 次配合比试验中,水胶比为 0.20 时,水泥未能形成浆体裹附在碎石表面,未达到成型要求,这是因为,当水胶比较小时,水化反应不充分,降低了胶凝材料的黏结力;当水胶比较大时,易产生离析和流浆现象,较稀的胶凝材料浆体容易聚集到稻壳灰生态混凝土底部,影响稻壳灰生态混凝土的成型和强度,因此,随着水胶比的增大,稻壳灰生态混凝土的强度呈现先增大后减小的趋势。当水胶比为 0.30、养护龄期为 28 d 时,稻壳灰生态混凝土的抗压强度均大于 9 MPa,而在水胶比为 0.35 时并未产生离析现象,故水胶比初步选取为 0.25、0.30、0.35。

稻壳灰生态混凝土的抗压、抗折试验结果表明,养护龄期为 28 d 时,随着稻壳灰替代率的增大,抗压和抗折强度均呈现先增大后减小的趋势,根据第 1 次配合比设计结果可知,在水胶比为 0.25 和 0.35,稻壳灰替代率 60% 时,抗压强度最大,在水胶比为 0.30,稻壳灰替代率 40% 时,抗压强度最大。而 3 种水胶比下的抗折强度曲线呈现相同的变化趋势,抗折强度均在稻壳灰替代率 60% 时为最大值,因此,可能在稻壳灰替代率 60% 左右出现同时满足最大抗压强度和最大抗折强度的情况,故初步选取稻壳灰替代率为 55%、60%、65%。

综上,二次配合比的响应面试验因素和水平如表 2 所示。响应面试验结果如表 3 所示。

表 2 响应面试验因素和水平
Tab. 2 Factors and levels of response surface method

水平	因素		
	A 孔隙率/%	B 水胶比	C 稻壳灰替代率/%
1	20	0.25	55
2	25	0.30	60
3	30	0.35	65

表 3 响应面试验结果
Tab. 3 Results of response surface method

孔隙率/%	水胶比	稻壳灰替代率/%	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	实测孔隙率/%
20	0.25	60	9.32	1.71	20.1
	0.30	55	10.06	2.01	20.3
	0.30	65	9.79	1.96	19.7
	0.35	60	9.61	1.89	20.2
25	0.30	60	8.33	1.10	25.1
	0.30	60	8.39	1.16	24.8
	0.30	60	8.32	1.17	24.7
	0.35	65	8.04	1.10	25.2
	0.25	55	7.80	1.11	25.6
	0.30	60	8.30	1.11	25.0
	0.30	60	8.31	1.10	25.1
	0.25	65	7.71	1.12	25.3
30	0.35	55	8.13	1.03	25.0
	0.25	60	6.08	0.57	31.8
	0.35	60	6.21	0.48	30.6
	0.30	55	6.64	0.32	30.5
	0.30	65	6.43	0.55	30.3

2.2.2 回归方程的建立

根据响应面法采用二次模型对结果进行多元回归拟合,得到二次多项式回归方程

$$\begin{cases} y_1 = 8.33 - 1.68x_1 + 0.14x_2 - 0.083x_3 - 0.11x_1^2 - 0.42x_2^2 \\ y_2 = 1.13 - 0.71x_1 + 0.053x_2 - 0.016x_3 - 5e^{-0.03}x_1x_2 + \\ \quad 7.5e^{-0.03}x_1x_3 + 0.015x_2x_3 + 0.079x_1^2 - 0.11x_2^2 + 0.059x_3^2 \\ y_3 = 24.94 + 5.36x_1 - 0.23x_2 - 0.11x_3 - 0.33x_1x_2 + \\ \quad 0.1x_1x_3 + 0.13x_2x_3 + 0.33x_1^2 + 0.41x_2^2 - 0.07x_3^2, \end{cases} \quad (2)$$

式中: y_1 为抗压强度; y_2 为抗折强度; y_3 为孔隙率; x_1 为孔隙率; x_2 为水胶比; x_3 为稻壳灰替代率。

利用 Design Expert 软件中的方差分析对回归方程进行显著性检验,一般认为, $P < 0.01$ 时为非常显著, $0.01 \leq P \leq 0.05$ 为显著, $P > 0.05$ 为不显著^[23]。回归方程的显著性检验结果如表4所示。

表4 回归方程的显著性检验结果

Tab. 4 Significance test results of regression equation

水平	<i>P</i>		
	抗压强度	抗折强度	孔隙率
模型	< 0.000 1	< 0.000 1	< 0.000 1
x_1	< 0.000 1	< 0.000 1	< 0.000 1
x_2	< 0.000 1	0.009 1	0.036 2
x_3	0.001 4	0.305 4	0.237 3
x_1^2	0.002 1	0.005 8	0.028 5
x_2^2	< 0.000 1	0.000 8	0.011 8
x_3^2		0.022 2	0.578 0
x_1x_2		0.816 8	0.033 4
x_1x_3		0.728 8	0.443 4
x_2x_3		0.493 9	0.343 8
失拟项	0.135 8	0.127 6	0.161 2

注: x_1 为孔隙率, x_2 为水胶比, x_3 为稻壳灰替代率。

由表4可知,养护龄期为28 d时,稻壳灰生态混凝土的抗压强度、抗折强度和孔隙率的二次多项式回归方程的 P 值全部小于0.000 1,表明二次模型显著性良好;在水胶比、孔隙率和稻壳灰替代率这3个单因素中,3个因素均对抗压强度的影响非常显著,孔隙率和水胶比的影响程度基本一致,稻壳灰替代率的影响最小;孔隙率对抗折强度的影响非常显著,水胶比和稻壳灰替代率的影响不显著,3个因素的影响程度从大到小依次为孔隙率、水胶比、稻壳灰替代率。

2.2.3 响应面分析

水胶比、孔隙率和稻壳灰生态混凝土强度的响应面分析如图6所示。由图可知,当水胶比为0.30时,随着孔隙率的减小,稻壳灰生态混凝土的抗压强度和抗折强度均达到最大值,水胶比对胶凝材料间水化反应的影响较小,孔隙率对稻壳灰生态混凝土的强度影响较大。

水胶比、稻壳灰替代率和稻壳灰生态混凝土强度的响应面分析如图7所示。由图可知,稻壳灰替代率的改变对强度的影响较小,虽然稻壳灰具有较好的吸水能力,但在强度产生过程中起到主要作用的仍为胶凝材料间的水化反应,稻壳灰替代率对强度影响较小,结合图4、6中所示的稻壳灰生态混凝土强度变化可以看出,稻壳灰具有与掺加硅灰水泥混凝土相似的强度。

孔隙率和稻壳灰替代率对强度的响应面如图8所示。由图可知,稻壳灰生态混凝土的强度随着孔隙率增大和稻壳灰替代率降低而增大,表明虽然稻壳灰和硅灰相比有较大的比表面积,可以进行更充分的水化反应产生数量更多的硅酸钙凝胶,但是不足以改善因孔隙率变化引起的混凝土结构变化。

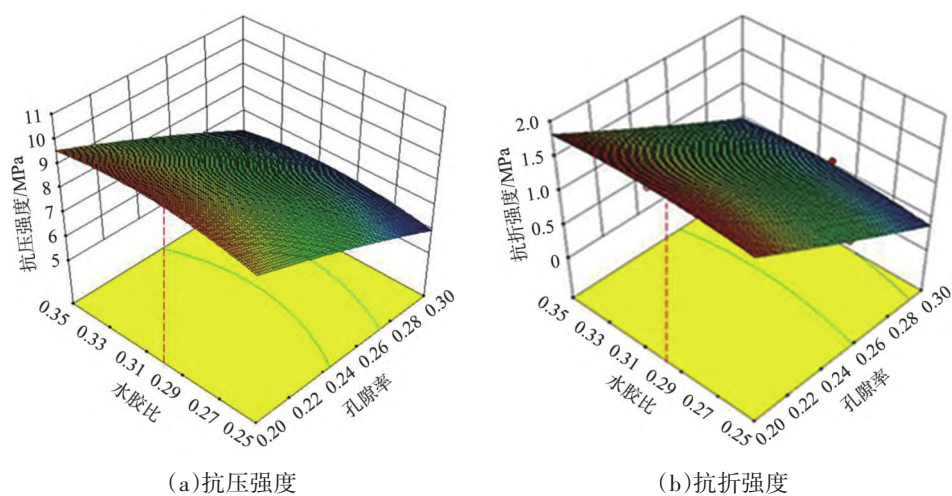


图6 水胶比、孔隙率和稻壳灰生态混凝土强度的响应面分析

Fig. 6 Response surface analysis performed on water-binder ratio and porosity in rice husk ash ecological concrete to evaluate their respective effects on concrete strength

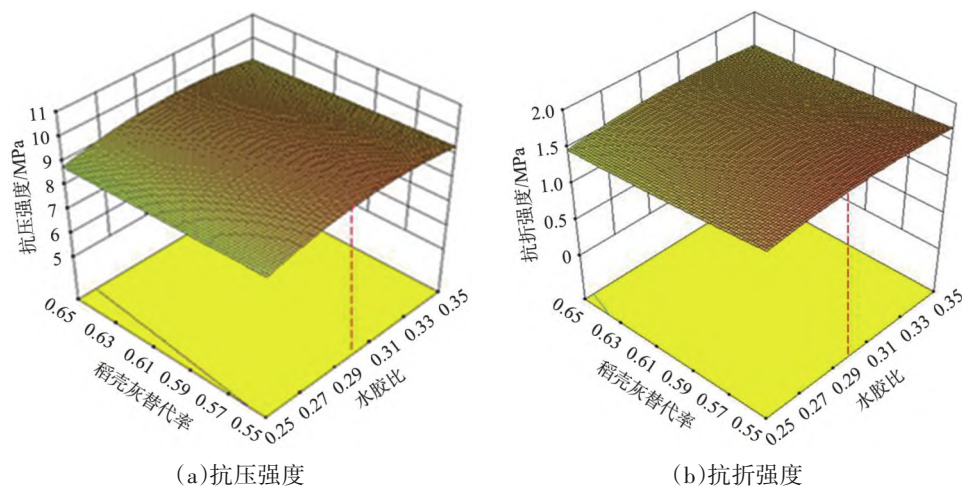


图7 水胶比、稻壳灰替代率和稻壳灰生态混凝土强度的响应面分析

Fig. 7 Response surface analysis performed on water-binder ratio and substitution rate of rice husk ash in rice husk ash ecological concrete to evaluate their respective effects on concrete strength

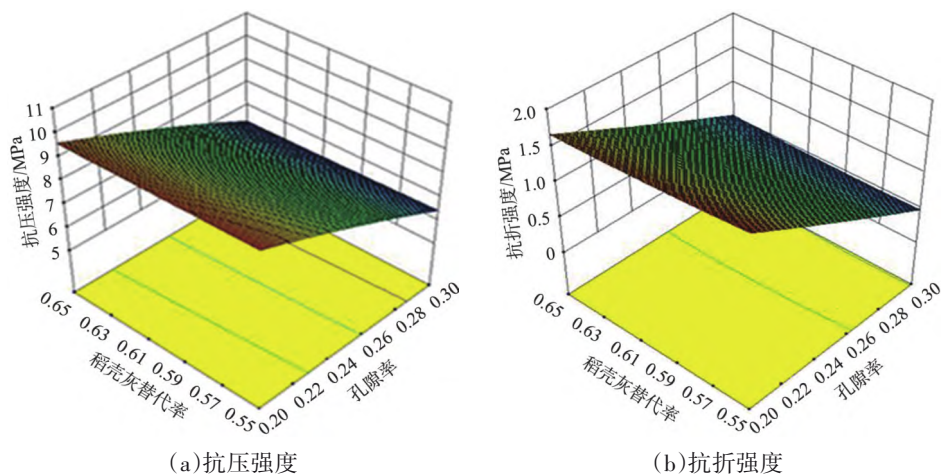


图8 孔隙率、稻壳灰替代率和稻壳灰生态混凝土强度的响应面分析

Fig. 8 Response surface analysis performed on porosity and substitution rate of rice husk ash in rice husk ash ecological concrete to evaluate their respective effects on concrete strength

2.2.4 最优配比及验证

为了检验响应面分析结果的准确性和有效性,当孔隙率为 20%、水胶比为 0.31、稻壳灰替代率为 55%时,最优配比的预测值和实测值如表 5 所示。由表可见,抗压强度和抗折强度的实测值与预测值之间的误差均小于 5%,表明模型精度较高且优化方案可信。采用最优配比时,较未使用稻壳灰部分代替硅灰时的生态混凝土的强度^[21, 24]提高了 25%~43%。

表 5 最优配比的预测值与实测值
Tab. 5 Predicted value and measured value of optimal mix ratio

孔隙率/%	水胶比	稻壳灰替代率/%	抗压强度			抗折强度		
			预测值/MPa	实测值/MPa	误差/%	预测值/MPa	实测值/MPa	误差/%
20	0.31	55	10.023 3	10.024 2	0.001	2.006 5	2.011 1	0.200

综上,以稻壳灰生态混凝土抗压强度和抗折强度的最大值作为优化目标,采用 Design Expert 软件得到的最优配合比为:孔隙率为 20%,水胶比为 0.31,稻壳灰替代率为 55%。

2.3 植生性能

3 种植物在不同植生时间的生长状况如图 9 所示。由图可见,植生时间为 7 d 时,黑麦草和高羊茅生长正常,黑麦草、高羊茅的平均高度分别为 3.4、1.3 cm,狗牙根开始部分发芽;植生时间为 14 d 时,黑麦草、高羊茅的平均高度分别为 7.8、5.8 cm,狗牙根部分发芽;植生时间为 21 d 时,狗牙根有明显的生长,此时黑麦草、高羊茅和狗牙根的平均高度分别为 20.4、19.4、7.1 cm。

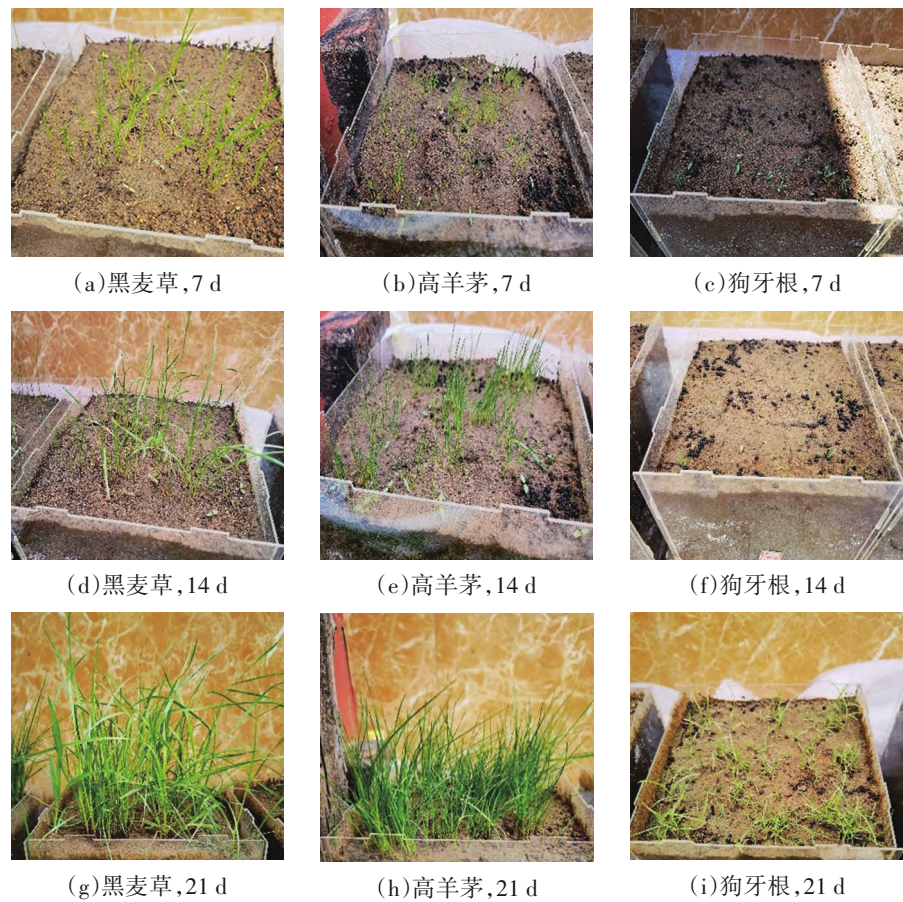


图 9 3 种植物在不同植生时间时的生长状况

Fig. 9 Growth status of three plants in different planting days

植物生长高度与覆盖率随植生时间的变化如图10所示。由图可得,在温度适宜、湿度半饱和和光照充足的条件下,随着种植时间增加,高羊茅和黑麦草的生长状况良好,符合其出苗快、生长迅速的特点,其中高羊茅虽然出芽时间较黑麦草晚,但在植生时间为21 d时具有和黑麦草相当的长度。狗牙根的生长较为缓慢,可能是因为狗牙根对弱酸环境较为敏感,但根据其生长匍匐前进的特点,在植生时间为21 d时也可覆盖土壤表面。狗牙根的发芽率虽有波动,但整体差异不明显。

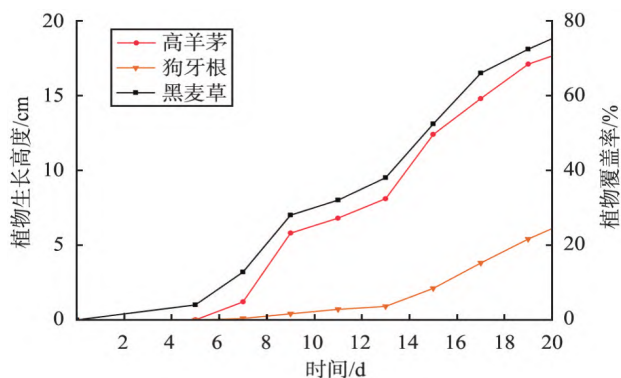


图10 植物生长高度与覆盖率随植生时间的变化

Fig. 10 Changes of plant growth height and coverage with planting time

综上,3种草本植物均能正常生长,在种植时间为21 d时,植株高度最高可达20.4 cm,植物覆盖率接近80%,稻壳灰生态混凝土的植生性能良好。

3 结论

保持硅灰和稻壳灰总质量不变,对稻壳灰代替硅灰进行第1次配比设计,研究水胶比、稻壳灰替代率对稻壳灰生态混凝土强度的影响,初步确定最佳水胶比和稻壳灰替代率的取值范围;采用Design Expert软件进行第2次配合比方案设计,构建响应面模型,研究水胶比、稻壳灰替代率和孔隙率对稻壳灰生态混凝土抗压强度和抗折强度等力学性能的影响;采用狗牙根、黑麦草、高羊茅3种草本植物研究稻壳灰生态混凝土的植生性能。

1)在生态混凝土中用稻壳灰代替硅灰,可以有效提高其强度。护龄期为7 d时,3种水胶比时的稻壳灰生态混凝土抗压强度和抗折强度均随着稻壳灰替代率的增大逐渐减小;养护龄期为28 d时,稻壳灰生态混凝土的抗压强度和抗折强度均随着稻壳灰替代率先增大后减小。在水胶比为0.30,稻壳灰替代率为40%时抗压强度最大为9.9 MPa,在水胶比为0.30,稻壳灰替代率为60%时抗折强度最大为2.01。

2)根据响应面分析,水胶比、稻壳灰替代率、孔隙率3个因素对稻壳灰生态混凝土的强度影响比较明显,其中孔隙率的变化对强度影响最为明显,因此,稻壳灰可以替代硅灰用于生态混凝土的制备,且稻壳灰生态混凝土具有良好的力学性能和植生性能。以稻壳灰生态混凝土抗压强度和抗折强度的最大值作为优化目标,采用Design Expert软件得到的最优配合比为:孔隙率为20%,水胶比为0.31,稻壳灰替代率为55%。

3)在稻壳灰生态混凝土植生试验中,3种草本植物均能正常生长,在种植21 d时,植株高度最高可达20.4 cm,植物覆盖率达80%,稻壳灰生态混凝土的植生性能良好。

利益冲突声明(Conflict of Interests)

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献 (Author's Contributions)

龚芳媛和王书岳进行了方案设计,龚芳媛、王书岳、程雪佼、杜政阳参与了论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The study was designed by GONG Fangyuan and WANG Shuyue. The manuscript was written and revised by GONG Fangyuan, WANG Shuyue, DU Zhengyang and CHENG Xuejiao. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献 (References)

- [1]SELVARANJAN K, GAMAGE J C P H, DE SILVA G I P, et al. Development of sustainable mortar using waste rice husk ash from rice mill plant: physical and thermal properties [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 102614.
- [2]SUN R, WANG D, CAO H, et al. Ecological pervious concrete in revetment and restoration of coastal wetlands: a review [J]. Construction and Building Materials, 2021, 303: 124590.
- [3]MEHRAN D, DANISH P, PATEL M. Experimental study on eco-friendly concrete in construction industries[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 6734-6739.
- [4]ASADI H, GHORBANI M, REZAEI-RASHTI M, et al. Application of rice husk biochar for achieving sustainable agriculture and environment[J]. Rice Science, 2021, 28(4): 325-343.
- [5]FERNANDO S, GUNASEKARA C, LAW D W, et al. Life cycle assessment and cost analysis of fly ash-rice husk ash blended alkali-activated concrete[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 295: 113140.
- [6]GHOULEH Z, SHAO Y X, ZHANG S P. Performance of eco-concrete made from waste-derived eco-cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 289:125758.
- [7]LI L B, ZHANG H M, ZHOU X M, et al. Effects of super absorbent polymer on scouring resistance and water retention performance of soil for growing plants in ecological concrete [J]. Ecological Engineering, 2019, 138: 237-247.
- [8]何凌侠, 尹健, 田冬梅, 等. 稻壳灰对活性粉末混凝土强度的影响[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 23-28.
- HE L X, YIN J, TIAN D M, et al. Effect of rice husk ash on strength of reactive powder concrete [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2016, 38(2): 23-28.
- [9]LO F C, LEE M G, LO S L. Effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary portland cement on pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 286: 122947.
- [10]LE H T, LUDWIG H-M. Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete[J]. Materials & Design, 2016, 89: 156-166.
- [11]KANG S H, HONG S G, MOON J, et al. The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2019 115: 389-400.
- [12]KUMAR G S, SK M S, BAHURUDEEN A. Recycling of palm oil fuel ash and rice husk ash in the cleaner production of concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 354: 131736.
- [13]LIU C, ZHANG W, LIU H W, et al. Recycled aggregate concrete with the incorporation of rice husk ash: mechanical properties and microstructure[J]. Construction and Building Materials, 2022, 351: 128934.
- [14]LIANG G W, ZHU H J, LI H X, et al. Comparative study on the effects of rice husk ash and silica fume on the freezing resistance of metakaolin-based geopolymer[J]. Construction and Building Materials, 2021, 293: 123486.
- [15]TAYEH B A, ALYOUSEF R, ALABDULJABBAR H, et al. Recycling of rice husk waste for a sustainable concrete: a critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 312: 127734.
- [16]QURESHI L A, ALI B, ALI A. Combined effects of supplementary cementitious materials (silica fume, GGBS, fly ash and rice husk ash) and steel fiber on the hardened properties of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: 120636.
- [17]SYED S. R, BABAR AMUHAMMAD N, et al. Mechanical properties, flexural behavior, and chloride permeability of high-performance steel fiber-reinforced concrete (SFRC) modified with rice husk ash and micro-silica[J]. Construction and Building Materials, 2022, 359: 129520.
- [18]ZHANG Z G, LIU S Y, YANG F, et al. Sustainable high strength, high ductility engineered cementitious composites

- (ECC) with substitution of cement by rice husk ash[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 317: 128379.
- [19]中国工程建设标准化协会. 生态混凝土应用技术规程: CECS 361—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for eco-concrete application: CECS 361-2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [20]LI S, YIN J, ZHANG G. Experimental investigation on optimization of vegetation performance of porous sea sand concrete mixtures by pH adjustment[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: 118775.
- [21]陈龙修. 生态混凝土组成设计及性能试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- CHEN L X. Composition design and performance test of ecological concrete [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [22]中国建筑科学研究院, 清华大学, 同济大学材料科学与工程学院, 等. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 国家质检总局, 2003.
- China Academy of Building Research, Tsinghua University, College of Materials Science and Engineering, Tongji University, et al. Standard for test methods of mechanical properties of ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. AQSIQ, 2003.
- [23]ALENYOREGE E A, MA H, AHETO J H, et al. Response surface methodology centred optimization of mono-frequency ultrasound reduction of bacteria in fresh-cut Chinese cabbage and its effect on quality[J]. *LWT*, 2020, 122: 108991.
- [24]何若楠, 商建行, 王元纲, 等. 新型大孔隙生态混凝土力学性能多因素影响分析[J]. *混凝土*, 2020(7): 145-148, 152.
- HE R N, SHANG J X, WANG Y G, et al. Multi-factor analysis of mechanical properties of new macro-porous ecological concrete[J]. *Concrete*, 2020(7): 145-148, 152.

Mechanical and vegetation properties of rice husk ash ecological concrete

GONG Fangyuan, WANG Shuyue, DU Zhengyang, CHENG Xuejiao

(School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract

Objective In order to enhance the strength and planting performance of ecological concrete, while effectively utilizing the waste rice husk ash generated from industrial power generation.

Methods In this study, the mix design was conducted in two stages using the volume method. Initially, the first mix design focused on investigating the water-binder ratio and the proportion of rice husk ash replacing silica fume as influencing factors. Different water-binder ratios (0.20, 0.25, 0.30, 0.35) were chosen, and the substitution rates of rice husk ash for silica fume varied from 0% to 100% (0, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%), with a porosity of 20% and 7.5% silica fume content. Subsequently, the second mix design was carried out using response surface methodology, considering influencing factors such as porosity, water-binder ratio, and rice husk ash substitution rate. The objective was to optimize the mix design based on mechanical properties through multifactor analysis. Additionally, the planting performance was validated using three herbaceous plants: bermuda grass, ryegrass and tall fescue.

Results and Discussion At 7 days, as the substitution rate of rice husk ash increases, the strength of ecological concrete decreases gradually under the three different water-binder ratios. This is due to the larger specific surface area of rice husk ash compared to silica fume, resulting in higher water demand that affects the early hydration process of cement. Rice husk ash, acting as a reactant for the secondary hydration reaction within the concrete, has a limited impact in the early stages. At 28 days, with the increase in rice husk ash substitution rate, both compressive and flexural strengths first increase and then decrease. In the compressive strength test, under water-binder ratios of 0.25 and 0.35, the compressive strength of ecological concrete gradually increases from 0 to 60% substitution rate. At a water-binder ratio of 0.3, lower rice husk ash substitution rates (0 to 40%) lead to gradual strength enhancement of ecological concrete due to sufficient curing age allowing full hydration of the cementitious materials, resulting in additional formation of calcium silicate hydrate gel. However, under the water-binder ratio of 0.25 and 0.35 during the increase in rice husk ash substitution rate from 60% to 100%, and at a water-binder ratio of 0.3 during the increase in rice husk ash substitution rate from 40% to 100%, the compressive strength of ecological concrete

decreases with higher rice husk ash substitution rates. In contrast, the flexural strength at 28 days exhibits similar patterns among the three water-binder ratios: an increase in ecological concrete's flexural strength from 0 to 60% substitution rate, followed by a decrease in strength from 60% to 100% substitution rate of rice husk ash.

Conclusion In this study, rice husk ash is investigated as a potential replacement for silica fume in the preparation of ecological concrete, which exhibits good mechanical properties and planting performance. Using the response surface analysis, the factors such as water-binder ratio, rice husk ash substitution rate and porosity significantly affect on the concrete's strength, with the porosity exhibiting the most significant effect on the strength change.

Keywords: ecological concrete; rice husk ash; strength; plant growth performance; response surface method

(责任编辑:吴敬涛)