

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.191



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



生态混凝土绿色护坡的植生性与耐久性

王家庆¹, 吴健生², 黄凯健¹, 王佳梁¹

(1. 南京林业大学土木工程学院, 南京 210037; 2. 中煤科工集团南京设计研究院有限公司, 南京 210018)

摘要: 作为传统边坡防护混凝土的替代品, 在实际工程中, 大孔隙护坡生态混凝土可有效保护服役地区的边坡生态环境, 具有较好的生态和社会效益。通过植生性能、耐久性试验及微观机理分析, 研究大孔隙护坡生态混凝土内部碱环境的关键调控方法。结果表明: 复合降碱方法可以实现较好的降碱效果; 降碱处理后的大孔隙护坡生态混凝土与黑麦草和高羊茅具有很好的匹配性, 满足植被的生长需求; 植物生长前后, 生态混凝土的抗压强度及孔隙率未产生显著变化。生态混凝土碱环境调控方法与草种协同技术的提出有利于大孔隙护坡生态混凝土的性能提升, 进一步推动“绿色可持续型”生态混凝土材料在护坡工程中的实际应用。

关键词: 基础设施; 复合降碱方法; 植生试验; 生态混凝土; 力学性能; 耐久性

中图分类号: TU528.59 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)04-0029-12

Planting performance and durability of eco-concrete for slope protection

WANG Jiaqing¹, WU Jiansheng², HUANG Kaijian¹, WANG Jialiang¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P. R. China; 2. China Coal Science and Engineering Group Nanjing Design & Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210018, P. R. China)

Abstract: Porous eco-concrete is an alternative for the conventional concrete materials for slope protection, which could effectively protect the ecological environment of the slope in the service area during the field applications, with significant ecological and social benefits. In this paper, the key control methods of alkaline environment in porous eco-concrete for slope protection were studied by means of biogenic energy, durability test and microscopic mechanism analysis. The results demonstrate that the composite alkali-reduction method can achieve a good alkali reduction effect; the porous eco-concrete for slope protection after alkali reduction treatment has a good match with ryegrass and tall fescue and meets the growth requirements of vegetation; after plants' growth, the compressive strength and porosity of specimens are not significantly changed. In summary,

收稿日期: 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(52108408); 江苏省自然科学基金(BK20210617)

作者简介: 王家庆(1994-), 男, 博士, 副教授, 主要从事道路材料、固废资源化利用研究, E-mail: jiaqingw@njfu.edu.cn。

黄凯健(通信作者), 男, 博士, 教授, E-mail: huangkaijian@njfu.edu.cn。

Received: 2021-05-24

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52108408); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20210617)

Author brief: WANG Jiaqing (1994-), PhD, associate professor, main research interests: pavement materials, solid waste utilization, E-mail: jiaqingw@njfu.edu.cn.

HUANG Kaijian (corresponding author), PhD, professor, E-mail: huangkaijian@njfu.edu.cn.

the proposed alkaline environment-modification method and vegetation matching technique could contribute to the performance improvement of porous eco-concrete, which will promote the engineering applications of "green-sustainable" eco-concrete in projects for slope protection.

Keywords: infrastructure construction; coupling alkaline reduction method; planting test; eco-concrete; mechanical property; durability

与传统护坡混凝土不同,在强度达到一定要求的同时,生态混凝土护坡材料也能满足植物生长需求,对于工程中生态环境的改善具有重要意义。大孔隙护坡生态混凝土多为骨架-孔隙结构,是选择特定粒径的粗骨料,通过浆体胶结及骨料嵌挤而形成的^[1]。大孔隙混凝土材料为水分、土壤、空气及植物根系提供了连通区域^[2-3]。综合结构性能和生态效益,其具有如下特点:生态混凝土存在较多单独或连通的孔隙,促进了地表水与地下水的转换与循环,能有效缓解城市地下水水位下降的问题^[4-5];生态混凝土具有植生性,其大孔隙结构为植被生长提供了必要条件,既可作为垂直绿化墙体及人工浮岛的载体,也可用于道路中的边坡治理,且植物根系具有加筋固坡的作用^[6-7];铺设生态混凝土为动植物提供了栖息地,特别是以微生物为主体的动植物群,保护了工程用地的生物多样性。

然而,混凝土材料内部较高的碱度会影响植物生长,近年来,针对生态混凝土植生性影响因素的研究受到广泛关注。蒋昌波等^[8]通过植生试验发现,当花草种植在骨料粒径为150~300 mm的生态混凝土中时,其抗冲刷性及耐旱性良好,耐淹性与自然土壤中生长的植被基本持平。李化建等^[9]、冯乃谦等^[10]指出,水灰比与粗集料粒径级配是影响生态混凝土内部孔结构的主要因素,粗集料粒径越大,孔隙平均孔径越大,越适宜植物生长。Xu等^[3]研究指出,水泥含量对生态混凝土中植物种子的萌发及生长有较大影响,幼苗的存活率随水泥含量的增加而显著降低。为提高生态混凝土的植生性,学者们提出了多种降碱手段及方法,包括添加外加剂、运用酸碱中和原理、碳化处理及物理降碱等。廖文宇等^[11]发现,外加剂能降低碱度,且较为方便、简单,同时指出,碳化对植生混凝土具有降碱和提升强度的作用。XRD分析结果表明:外加剂具有降低植生混凝土内部碱性的作用,且外加剂含量为5%~6%时亦能提高植生混凝土的强度。杨永民等^[12]指出,降低多孔混凝土中孔隙的平均孔径有利于降低混凝土孔隙水环境的碱性;适当增大高效减水剂的掺量或在水泥中掺入一定量的矿物掺合料可降低多

孔混凝土孔隙水环境的pH值;同时,采用蜡封法可起到固封孔隙液的作用。Gong等^[13]指出,改变胶凝材料的种类可以提高生态混凝土的植生性,比如硫铝酸盐水泥;利用硫铝酸盐水泥制备出强度12 MPa以上、孔隙溶液pH值为8左右的多孔混凝土。唐瑞等^[14]选用粒径为16~20、20~25、25~30 mm的粗骨料,分别以普通硅酸盐水泥、低碱硫铝酸盐水泥、普通硅酸盐水泥-秸秆粉3种胶凝材料制备了生态混凝土,并研究了这3种胶凝材料的植生性。结果表明,低碱硫铝酸盐水泥制备的生态混凝土植生性优异;在普通硅酸盐水泥中掺加秸秆粉对碱性物质有一定的吸附、中和作用,使内部孔隙环境基本满足植物生长要求。陈景等^[15]研究表明,在28℃时,28 d龄期硅酸盐水泥中86%~97%的碱已经释放出来,经长时间暴露后,硅酸盐水泥硬化浆体中仅保留15%左右的碱,采用FeSO₄溶液与Ca(OH)₂发生中和反应可降低生态混凝土的pH值。高婷^[16]研究了草酸浸泡、草酸喷涂、永凝液喷涂和快速碳化等单一降碱方法对生态混凝土强度及碱度的影响,结果表明,上述方法可将pH值降低1~2左右。

在研究降碱手段的同时,不同草种对生态混凝土的适应性也有待进一步探索。商建行^[17]研究发现,草种的生长性能受到孔隙率及水胶比的影响,百喜草在孔隙率为39.45%、平均孔径达6.4 mm的生态混凝土中生长发育情况最好;在孔隙率为20%和25%的试件中,狗牙根的覆盖率随着水胶比的增大而提升;而在孔隙率为30%时,其覆盖率随水胶比的增大表现为先提升后下降的趋势。聂丽华^[18]指出,冷季型和暖季型草种为目前主要应用的草种;冷季型草大多原产于欧洲或亚洲的冷凉气候区,其生长性状表现为发育迅速、成坪快、可播种繁殖,但不耐高温、需水量大;暖季型草大多产自中国、日本及欧洲,省工,具有较强的适应性、耐践踏性。沈晓丹^[19]从轻质高强及低碱度的角度出发,选用页岩陶粒代替传统粗集料,配制出了透水性良好、强度较高的生态混凝土,并实现了在屋顶绿化中的工程应用。

生态混凝土的结构不同于普通混凝土,其耐久

性破坏通常于结构内外同时发生,且破坏程度远大于普通混凝土结构。吴智仁等^[20]研究了护堤植生型生态混凝土的耐久性能,发现耐久性指标的影响因素既包括内因,也包括外因,并指出了多种尺度下耐久性损伤研究的必要性。冷发光等^[21]参照 ASTM C1012 标准,进行了混凝土抗硫酸盐腐蚀干湿循环试验。汲博生^[22]通过对大孔生态混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的研究发现,胶凝材料的用量、孔隙率及水灰比均会对大孔生态混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能产生影响,抗硫酸盐侵蚀能力随胶凝材料的增加而增强;当孔隙率相同时,抗硫酸盐侵蚀能力随水灰比的增大而减弱;当胶凝材料用量相同时,抗硫酸盐侵蚀能力随孔隙率的增大而减弱。在大孔隙护坡生态混凝土的耐久性能研究中,现阶段所开展的大多为常规的耐久性能检测,未来还应与植生试验相结合,研究植生性能对其耐久性能的影响。

综上所述,目前生态混凝土的研究存在有待进一步解决的问题:普通硅酸盐水泥制备的生态混凝土中孔隙液碱性过高,不适合植物生长,既能保证生态混凝土强度形成、又能提供适宜植生性的有效降碱方法有待被提出;不同草种对不同环境的适应性及耐践踏性不同,其与混凝土的匹配性还缺乏研究;大孔隙护坡生态混凝土植生性与耐久性能之间的关系有待进一步研究。

笔者主要研究大孔隙护坡用生态混凝土的植生性能与耐久性能;探究降碱方法对生态混凝土内部碱环境的影响,提出复合降碱方法,合理改善混凝土内部碱环境;记录并分析植物生长状况,评价生态混凝土的植生性能,确定与大孔隙护坡生态混凝土更加匹配的草种;研究大孔隙护坡生态混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力,分析快速碳化对其性能的影响,并探究植物生长前后生态混凝土性能的变化规律。生态混凝土复合降碱方法与草种匹配调控技术的提出有利于大孔隙护坡生态混凝土植生性能的提升,可推动“绿色可持续型”生态混凝土材料在护坡工程中的实际应用。

1 试验

1.1 试验材料

水泥:大孔隙护坡生态混凝土的强度远低于普通混凝土,其强度主要来自集料间的嵌挤作用及胶凝材料产生的黏结作用。水泥强度高有利于提高生态混凝土的强度。采用强度等级为 42.5 的 P·II

硅酸盐水泥,其化学成分及含量、物理力学性能见表 1、表 2。

表 1 水泥的化学成分及含量

烧失量	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃
2.98	5.85	70.45	1.24	2.97	19.00	2.83

表 2 水泥的物理力学性能

标准稠度用 水量/%	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
28	195	320	27.8	54.2	5.4	8.6

粉煤灰:粉煤灰是一种固体废料,主要来源于燃煤火电厂的排放。从排放的烟气中回收的细灰属于工业废渣,具有低火山灰活性。粉煤灰部分代替水泥,以减少水泥用量,可以降低胶凝材料的水化热及混凝土自身的碱度。试验所用粉煤灰为 I 级粉煤灰,其物理、化学成分如表 3、表 4 所示。

表 3 粉煤灰的物理性质

密度/ (kg·m ⁻³)	细度/ %	需水量质 量比/%	烧失 量/%	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	含水 量/%
2 100	18	106	1.95	340	0.6

表 4 粉煤灰的化学成分

烧失量	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃
1.95	57.93	1.50	2.80	4.3	30.00	3.2	0.3

硅灰:硅灰主要来源于冶金厂对金属硅及硅铁合金的冶炼,是对冶炼产生的烟尘进行回收而得到的废灰,属于矿物掺合料的一种。采用南京某公司生产的硅灰,通过比表面积仪测定其比表面积为 21 500 m²/kg,表观密度为 2 150 kg/m³,其物理性质和化学成分分别如表 5、表 6 所示。

表 5 硅灰的物理性质

密度/ (kg·m ⁻³)	活性指 数/%	需水量质 量比/%	烧失 量/%	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	含水 量/%
2 150	114	125	3.9	21 500	0.08

表 6 硅灰的化学成分

MnO	SiO ₂	SO ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O
0.23	92.13	0.43	0.22	0.02	0.05	0.30	0.01

化学试剂及减水剂:生态混凝土孔隙内部水环境呈碱性,主要是由于水泥水化产生了可溶性碱。FeSO₄可以与Ca(OH)₂发生反应,形成难溶于水的沉淀。试验采用喷洒FeSO₄溶液的处理方法进行降碱,FeSO₄是化学分析纯试剂,其性能参数如表7所示。试验采用高性能聚羧酸减水剂改善拌合物的工作性能,减水剂品名为Sika ViscoCrete 325C。

表 7 硫酸亚铁相关信息

名称	纯度	分子式	分子量	生产地
硫酸亚铁	99%	FeSO ₄ ·7H ₂ O	278.10	南京

粗集料:在大孔隙护坡生态混凝土制备试验中,粗骨料的粒径大小、形状及级配都会对成型试件的性能产生直接影响,包括孔隙率、透水系数、孔径形态等。依据《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52—2006)^[23]、《公路工程集料试验规程》(JTGE 42—2005)^[24]等相关规范,综合考虑大孔隙护坡生态混凝土与骨料级配粒径的关系,试验全部采用粒径为19~26.5 mm的玄武岩碎石集料。由表8可知,该粗集料的压碎值为6.2%,含泥量与针片状含量仅为0.3%、0.6%,符合规范要求。

1.2 试验方案及测试方法

1.2.1 试验方案 复合降碱方法及试件配合比设计:前期试验发现,内掺粉煤灰与硅灰均可以实现

表 8 粗集料的技术指标

级配/ mm	压碎 值/%	含泥 量/%	表观密度/ (kg·m ⁻³)	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	孔隙 率/%	针片状 含量/%
19~ 26.5	6.2	0.3	2 624	1 606	40.6	0.6

大孔隙生态混凝土碱度的降低;采用硫酸亚铁溶液进行降碱具有可行性,因此,采用复合降碱(掺合料+FeSO₄溶液喷洒)处理措施,对比分析不同情况下pH值及强度的变化规律。在配合比设计过程中,主要考虑两点因素:1)在满足强度的前提下,有效孔隙率应控制在20%~30%,孔隙率过大会直接影响试件强度,过小则不利于透水性能及植物生长空间,故选用该范围的上、下限作为两种目标孔隙率。2)水泥用量要少,掺合料掺加量尽可能大,将生态混凝土试件内部pH值控制在8~10之间,既保证植物具有可以生长的碱度较低环境,又保证水化产物的形成和强度发展。故基于以往的研究基础,选择较大掺量的掺合料替代水泥,即硅灰掺量为5%、10%,粉煤灰掺量为30%、40%。

试件配合比设计如表9所示。表中组号A代表目标孔隙率为20%的试件,组号B代表目标孔隙率为30%的试件,数字1代表对照组(无掺合料),数字2、3分别代表掺入5%、10%的硅灰,数字4、5分别代表掺入30%、40%的粉煤灰,共10种不同的配合比。有效孔隙率均接近目标孔隙率,满足试验要求。除对照组外,其余所有试件均在拆模1d后持续喷洒0.5 mol/L的FeSO₄溶液,该浓度是前期研究发现的硫酸亚铁最佳降碱浓度。

表 9 试件配合比设计

组号	骨料粒径/ mm	粗骨料用量/ (kg·m ⁻³)	水泥用量/ (kg·m ⁻³)	硅灰/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	水灰比	目标孔隙 率/%	有效孔隙 率/%
A1	19~26.5	4.72	1 132			0.24	20	20.8
A2	19~26.5	4.72	1 075.4	56.6		0.24	20	19.8
A3	19~26.5	4.72	1 018.8	113.2		0.24	20	20.2
A4	19~26.5	4.72	792.4		339.6	0.24	20	19.9
A5	19~26.5	4.72	679.2		452.8	0.24	20	20.3
B1	19~26.5	4.72	566			0.24	30	31.0
B2	19~26.5	4.72	537.7	28.3		0.24	30	30.5
B3	19~26.5	4.72	509.4	56.6		0.24	30	29.8
B4	19~26.5	4.72	396.2		169.8	0.24	30	30.3
B5	19~26.5	4.72	339.6		226.4	0.24	30	30.6

生态混凝土的成型及养护:生态混凝土采用“裹浆法”搅拌成型,具体步骤为:1)加入全部粗集料和70%的水,搅拌60 s;2)加入50%的胶凝材料,继续搅拌60 s;3)最后加入剩余的胶凝材料和水,再搅拌120 s,搅拌成型后,分3次加入试模,每一次均需插捣,以防止集料嵌挤不均匀,影响试件的强度及孔隙率。24 h后拆模,并在标准养护室中养护至28 d龄期。将制备成型的大孔隙护坡生态混凝土置于标准养护室(温度 (20 ± 3) °C,相对湿度90%以上)直至测试规定的养护龄期。每类试验均制备3个平行试件。

1.2.2 测试方案 抗压强度:参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)^[25]进行抗压强度测试,试验采用TYE-2000C型压力试验机,加载速率为0.5~0.8 MPa/s。当试件接近破坏而开始迅速变形时,停止调整试验机油门,直至试件破坏,然后回油。记录破坏荷载 P , kN,试件抗压强度为 P/A , MPa,其中 A 为受压面积, mm²。试验采用100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件(非标准试块),根据规范,乘以系数0.95所得数值即为标准试块7、28 d的抗压强度。

孔隙率:大孔隙护坡生态混凝土孔隙包括连通孔隙、闭口孔隙及半开半闭孔隙。为了满足植被根茎的生长,需确保孔隙的形成。试验采用排水法,参照日本《透水性混凝土河川护堤施工手册》^[26]测定多孔生态混凝土的总孔隙率和连通孔隙率,具体步骤:1)将成型好的试件放入烘箱中烘至恒重,然后称取其在室内一般环境中的质量 W_1 ;2)将该试件放入静水天平中浸泡24 h,使其材料处于饱水状态,然后称取其在水中的质量 W_2 ;3)在水中称取完成并放入标准养护室24 h后,再称取其在标准养护下的质量 W_3 ;4)最后,用排水法测量试件的体积 V 。则大孔隙护坡生态混凝土的总孔隙率和连通孔隙率分别为式(1)、式(2)中的 P_1 、 P_2 。

$$P_1 = \left(1 - \frac{W_1 - W_2}{V} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$P_2 = \left(1 - \frac{W_3 - W_2}{V} \right) \times 100\% \quad (2)$$

溶出液pH值:利用碱度释放原理^[27],采用“溶出法”进行pH值测试,步骤为:选择化学性质稳定的聚丙烯容器,放入需要测量的试件,定量加入2 L水,保证水面高度高于生态混凝土试件的上表面,并以塑料膜进行密封,防止碳化。24 h后,采用笔式酸碱计(8685A)测量水溶液的pH值。

抗硫酸盐侵蚀性能:参照美国ASTM C1012标

准^[28],进行生态混凝土抗硫酸盐腐蚀干湿循环试验。具体试验方法:将尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件移至标准养护室28 d后进行干湿循环试验。循环制度:室温条件下,采用0.3、0.5 mol/L的FeSO₄溶液将试件浸泡16 h,取出晾干1 h,采用这两个浓度对硫酸亚铁溶液喷洒降碱方法进行模拟并对生态混凝土抗硫酸盐侵蚀性能受溶液浓度变化的影响进行评价;之后,将试件放入80 °C烘箱中烘干6 h,冷却1 h后称重,测定抗压强度。一个循环周期为24 h,强度损失达到25%为试验终止判断依据,记录循环次数,同时,观察混凝土表面的破损情况。最后,采用扫描电子显微镜(SEM)对不同侵蚀龄期试件表面及内部的微观结构进行观察。

表10 草种类型及其植物特性

Table 10 Types and plant characteristics of grass seeds

草种名称	根系情况	适宜pH值范围	适宜温度范围/°C	抗逆性
高羊茅	良好	4.7~8.6	18~25	优
黑麦草	良好	6.0~8.0	10~27	良
披碱草	发达	7.6~8.7	15~25	优
狗牙根	发达	5.5~7.5	25~35	优
早熟禾	良好	6.5~7.6	15~30	优

2 试验结果与讨论

2.1 复合降碱工艺对碱度和强度的影响

由表11可以看出,复合降碱措施在实现降碱的同时也会对大孔隙生态混凝土的强度产生不利影响,存在强度低于5 MPa的情况。在孔隙率不同的情况下,孔隙率20%的试件强度高于孔隙率30%的试件。通过A4、A5、B4、B5组对比分析可得,在“粉煤灰+喷洒FeSO₄溶液”的组合条件下,试件强度损失较大。当孔隙率为20%时,A4组的28、56 d强度分别为5.3、5.5 MPa,A5组分别为5.4、5.7 MPa,两组强度均略高于5 MPa。而当孔隙率提高到30%时,不论是B4组还是B5组,28 d强度均低于5 MPa,尽管后期强度稍有提升,但依然在5 MPa左右。相较于以上结果,“硅灰+喷洒FeSO₄溶液”的组合条件则更加有利一些。根据A2、A3、B2、B3组的数据可知,两种孔隙率的试件在28、56 d的强度均在6 MPa上下,强度提高值为1 MPa左右。

由图1、图2可以发现,该复合降碱措施可以对

表 11 复合降碱措施对试件强度和 pH 值的影响

Table 11 Effect of combined alkali reducing methods on strength and pH value of specimens

试件类型	组号	处理方式	抗压强度/MPa		pH 值		
			28 d	56 d	7 d	14 d	28 d
孔隙率为 20% 的试件	A1	对照组	9.2	9.9	12.5	12.1	11.8
	A2	5% 硅灰+喷洒 0.5 mol/L FeSO ₄ 溶液	5.8	6.3	11.9	11.5	10.5
	A3	10% 硅灰+喷洒 0.5 mol/L FeSO ₄ 溶液	6.1	6.4	11.8	11.1	10.9
	A4	30% 粉煤灰+喷洒 0.5 mol/L FeSO ₄ 溶液	5.2	5.5	11.6	11.0	10.6
	A5	40% 粉煤灰+喷洒 0.5 mol/L FeSO ₄ 溶液	5.1	5.3	11.5	10.9	10.2
孔隙率为 30% 的试件	B1	对照组	8.3	8.9	12.1	11.9	11.5
	B2	5% 硅灰+喷洒 0.5 mol/L FeSO ₄ 溶液	5.4	5.9	11.7	11.2	10.3
	B3	10% 硅灰+喷洒 0.5 mol/L FeSO ₄ 溶液	5.8	6.2	11.6	11.0	10.2
	B4	30% 粉煤灰+喷洒 0.5 mol/L FeSO ₄ 溶液	4.6	4.9	11.4	10.9	10.2
	B5	40% 粉煤灰+喷洒 0.5 mol/L FeSO ₄ 溶液	4.7	5.1	11.2	10.6	9.9

大孔隙生态混凝土试件进行有效降碱。在不同孔隙率的情况下,与对照组相比,试件 pH 值均能够降低 1~2 左右。当孔隙率为 20% 时,pH 值整体呈下降趋势,其中“粉煤灰”组试件的碱度总体来说更低,28 d 时 A4、A5 组的 pH 值分别为 10.6、10.2,相较于对照组,分别下降了 1.2、1.6;而“硅灰”组虽然下降速率更高,但其试件内部碱度起点高,所以在到达 28 d 时 A2、A3 组的 pH 值分别为 10.5、10.9,与对照组相比,也分别下降了 1.3、0.9。当孔隙率达到 30% 时,pH 值变化规律无明显变动,“硅灰”组总体碱度更高,B2、B3 组 28 d 的 pH 值分别为 10.3、10.2,比对照组降低了 1.2、1.3;“粉煤灰”组依旧保持着碱度上的优势,B4、B5 组 28 d 的 pH 值分别降至 10.2、9.9,与对照组相比,分别降低了 1.3、1.6。

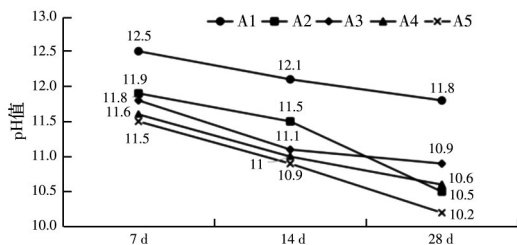


图 1 20% 孔隙率试件的 pH 值变化

Fig. 1 pH value change of specimen with 20% porosity

综上所述,所提出的复合降碱措施具有可行性,既能实现降碱效果,也能满足试件最低强度要求。通过与对照组数据对比可知,增大试件的孔隙率、减少水泥的用量可以实现一定的降碱效果。其中,“硅灰”组具有更好的效果,强度可大于 6 MPa, pH 值可达到 10.5 左右;而“粉煤灰”组虽然碱度可

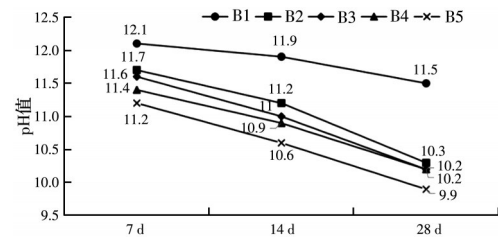


图 2 30% 孔隙率试件的 pH 值变化

Fig. 2 pH value change of specimen with 30% porosity

以达到更低的状态,但强度损失更大,甚至不满足最低强度要求。

2.2 抗硫酸盐侵蚀能力

2.2.1 硫酸亚铁浓度对强度的影响 探究不同孔隙率下溶液浓度对试件强度的影响。对孔隙率分别为 20%、30% 的对照组试件在不同浓度的硫酸亚铁溶液喷洒下的抗压强度进行测试。试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,不同孔隙率下,强度变化趋势均为由低到高逐渐递增,但孔隙率 30% 的试件总体强度更低。当孔隙率为 20% 时,未降碱处理的试件表现出较高的强度,28 d 可达 10.2 MPa;另外,喷洒两种不同浓度的溶液进行降碱处理的试件表现出相似的变化规律,浓度高时强度更低;当硫酸亚铁溶液浓度为 0.3 mol/L 时,试件强度由 7 d 的 7.5 MPa 增至 28 d 的 8.3 MPa;当浓度提高到 0.5 mol/L 时,试件强度由 7.1 MPa 增至 7.6 MPa;两种浓度下,与对照组相比,28 d 强度分别减少了 1.9、2.6 MPa。当孔隙率提高至 30% 时,对照组的 7、28 d 强度分别为 7.8、8.5 MPa;当喷洒浓度为 0.3 mol/L 的溶液时,强度继续下降,7、28 d 强度分别达到 6.8、7.5 MPa,

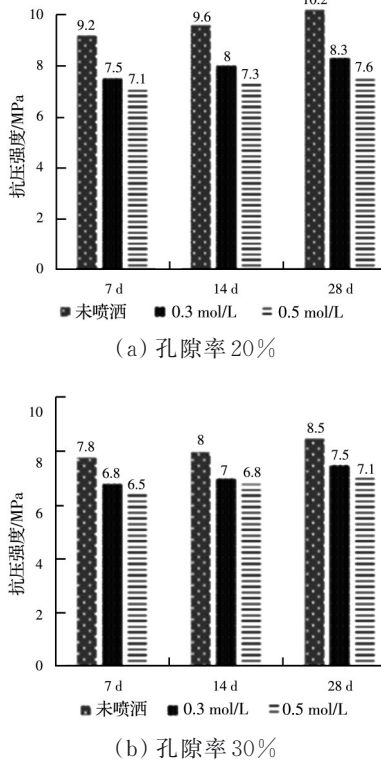


图 3 不同浓度硫酸亚铁溶液喷洒下的强度变化测试结果
Fig. 3 Test results of strength change under different concentrations of ferrous sulfate solution spraying

与对照组相比,下降了 1 MPa;当选择 0.5 mol/L 的溶液时,试件强度最低,7 d 强度为 6.5 MPa,28 d 强度仅有 7.1 MPa,相较于对照组,28 d 强度减小了 1.4 MPa。采用喷洒硫酸亚铁溶液进行降碱的处理方式会导致混凝土试件强度损失,溶液浓度越大,强度损失越多,28 d 强度损失量在 2 MPa 左右。这是由于 Fe^{2+} 不仅会不断消耗 $Ca(OH)_2$,降低强度的同时,也会造成混凝土内部碱度下降,而在低于最低碱度值时水泥水化产物会发生分解,进一步导致强度的丧失。因为长期喷洒硫酸亚铁溶液, Fe^{2+} 被氧化成 Fe^{3+} 附着在试件表面,导致表面存在不同程度的铁锈。

2.2.2 干湿循环对强度及质量的影响 由图 4 可知,选用硫酸亚铁溶液对大孔隙生态混凝土试件进行干湿循环处理对不同孔隙率试件的抗压强度均有较大影响。当孔隙率为 20% 时,15 次循环后,试件的抗压强度产生一定的下降,由 10.5 MPa 降至 9.1 MPa;继续循环至 30 次以后,试件强度受到更大的损失,跌至 6.8 MPa,共下降了 3.7 MPa。当孔隙率为 30% 时,强度变化更明显,循环 30 次后,由 8.3 MPa 降至 4.1 MPa,总共下降了 4.2 MPa,且不

满足最低强度为 5 MPa 的标准。在两种孔隙率下,强度损失率分别达到了 35% 和 51%。

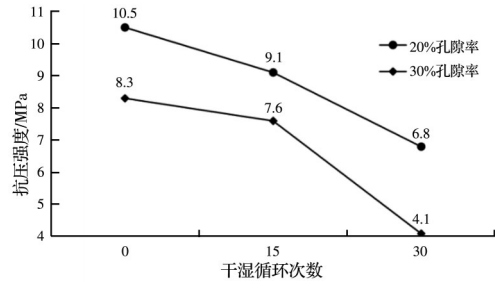


图 4 干湿循环对试件强度的影响
Fig. 4 Influence of drying-wetting cycles on strength of specimens

由图 5 可知,当采用硫酸亚铁溶液进行干湿循环时,由于 Fe^{2+} 的存在,导致试件质量随着时间不断增加。进行烘干时, Fe^{2+} 被氧化成 Fe^{3+} ,并以铁锈的形式附着在试件表面,导致质量增加,试件表面呈红褐色(图 6)。孔隙率 20% 的试件质量由 1 935.8 g 增至 1 963.2 g,孔隙率 30% 的试件质量由 1 666.2 g 增至 1 694.3 g,分别增加了 27.4、28.1 g。

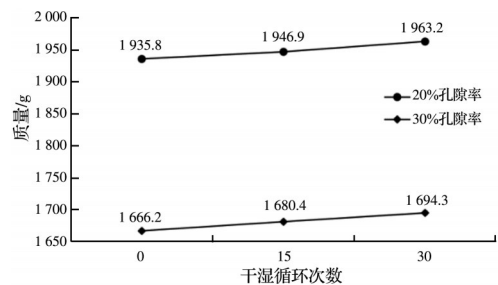


图 5 干湿循环对试件质量的影响
Fig. 5 Influence of drying-wetting cycles on mass of specimens

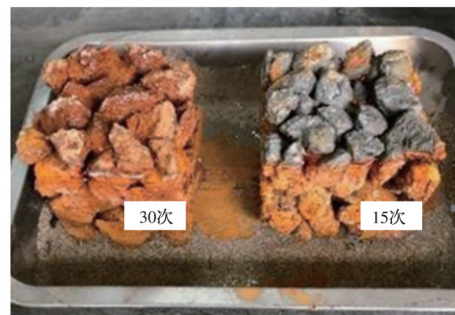


图 6 不同侵蚀龄期下试件的外观变化
Fig. 6 Appearance changes of specimens with different erosion ages

2.2.3 微观侵蚀机理分析 观察不同侵蚀龄期的试件表面微观结构可知,采用硫酸亚铁溶液进行干湿循环后,试件表面覆盖着一层疏松层(主要为铁锈),紧紧地依附在层片状氢氧化钙的四周。对比图7(a)、(b)可发现,随着侵蚀龄期的增长,侵蚀作用加深,因侵蚀产物的结晶膨胀而导致混凝土表层疏松层面积增大,宏观上表现为混凝土试件表面不光洁、掉角,且质量呈递增趋势。疏松层的出现表明硫酸盐侵蚀现象不仅发生在内部孔隙中,也直接对生态混凝土的表面产生了侵蚀作用。由图7(c)、(d)可见,试件中存在致密区域,也存在结构相对疏松的区域。大孔隙护坡生态混凝土内部大量连通孔隙的存在为 SO_4^{2-} 的进入提供了通道,也为钙矾石等侵蚀产物提供了生长空间,这也是大孔隙生态混凝土抗硫酸盐侵蚀能力较弱的重要原因。当侵蚀龄期达15 d时,可见少量针片状钙矾石晶体生长于试件内部水化C-S-H凝胶体系中。

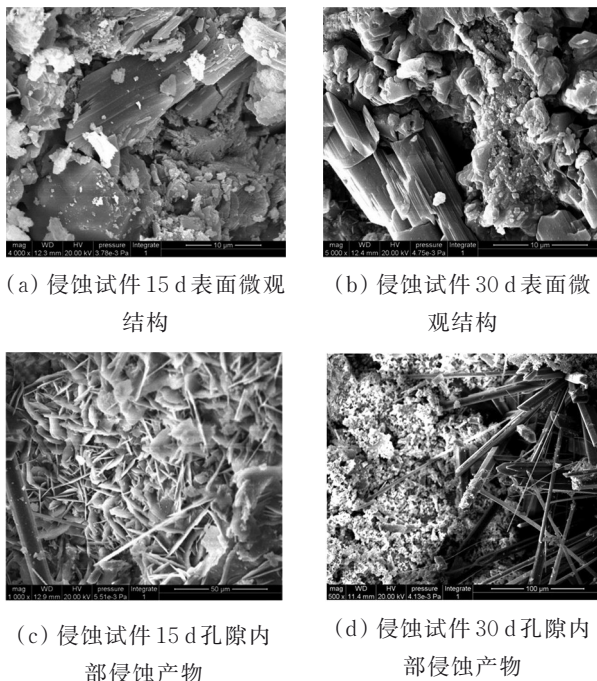


图7 不同侵蚀龄期下表面微观结构及孔隙内微观结构
Fig. 7 Surface microstructure and pore microstructure at different erosion ages

钙矾石晶体具有膨胀性和高度的方向性,沿着孔隙边缘呈放射状增长。侵蚀前期,少量钙矾石晶体的产生起到了填充内部孔隙的作用,增大了界面的密实度。但随着侵蚀龄期的增长,钙矾石晶体不断地聚集生长,其聚集性和膨胀性愈发明显。从图7(d)可以看出,在30 d侵蚀龄期时可见大量钙矾石

晶体,且部分晶体由针片状转变为长柱状,孔隙内的有效生长空间急剧减少。由于钙矾石晶体的膨胀性,随着孔隙内生长空间的不断缩小,晶体之间、晶体与周围水化产物之间互相挤压,产生较大的内应力,致使内部孔隙周围产生大量微裂缝,最终降低了大孔隙护坡生态混凝土的整体结构强度。

2.3 植物生长性能

2.3.1 生长高度及生长速度 植物发芽以后能否顺利生长发育至关重要,在相应的时间段达到相应的生长高度体现了植物对生长环境的适应性,生长速度快、密度大的草种与试件的匹配度更高。在不同条件下,5种草种的叶片高度及生长速度如表12所示。其中,A组以大孔隙生态混凝土试件为生长载体,记为试验组;B组以土壤为生长载体,记为对照组。由表12可知,当5种草种在不同温度下生长时,总体表现为温度越高,植物生长速度越快,生长高度越高。当生长温度为5~10℃时,A、B两组的狗牙根与早熟禾出芽率极低,且生长缓慢,28 d生长高度仍低于5 cm。A、B两组的高羊茅、黑麦草、披碱草发芽后均可顺利生长发育,A组高羊茅、黑麦草、披碱草28 d平均生长高度分别为14、16.5、13 cm,B组分别为16.5、19、16 cm。由于B组为自然土壤培育的草种,故整体生长速度快于A组,A、B组28 d平均生长高度分别相差2.5、2.5、3 cm。比较20~25℃下的植物发育情况可以发现,温度过低会抑制植物的正常生长。

由图8、图9可知,在不同的生长温度下,黑麦草和高羊茅的生长速度均表现为先增大后降低。播种后的7~14 d属于植物的快速生长阶段,生长速度在此阶段达到顶峰。随后的14~28 d内,生长速度有所下降,但依旧保持着良好势头。在5~10℃的生长温度下,B组作为对照组,由于具有天然土壤培育的优势,高羊茅与黑麦草的生长速度均快于A组,其中,在初始阶段,二者发芽时间相同,均为6 d,生长高度仅为1 d的生长量,生长速度相差无几;黑麦草在7~14 d内的生长速度达到1.93 cm/d,高羊茅的生长速度也达到1.78 cm/d,远远大于其他阶段的生长速度;之后的14~28 d内,生长速度都开始下降,高羊茅的生长速度为1.0 cm/d,比黑麦草高0.43 cm/d。重点关注A组发现,当高羊茅与黑麦草以混凝土试件为生长载体时,生长速度在各个阶

段都有所下降;在0~7 d内,黑麦草的生长速度基本与B组草种持平,为0.21 cm/d;高羊茅的生长速度最低,为0.14 cm/d,两者的值相差0.07 cm/d;在7~14 d内,两草种处于快速生长阶段,生长速度均超过1.0 cm/d,相差0.14 cm/d;在最后的14~28 d内,黑麦草与高羊茅分别为0.85、0.71 cm/d,仅相差0.14 cm/d。可以看出,黑麦草与高羊茅生长速度相差不大,黑麦草略占优势。当生长温度升高到20~25 °C时,从图9中可以看出,各组生长速度的趋势基本相同,但组内差距更加均衡。对于对照组(B组),初始阶段高羊茅与黑麦草的生长速度相较于低温时略有提升,均为0.28 cm/d,提升了0.07 cm/d。在7~14 d阶段内,黑麦草生长速度创新高,达到2.07 cm/d;高羊茅也升高为1.78 cm/d。到最后一个阶段,黑麦草生长速度依然下降最多,跌至1.14 cm/d;高羊茅缓慢下降至1.35 cm/d。在这3个阶段,二者生长速度分别相差0、0.29、0.21 cm/d。再分析A组,总体来看,黑麦草依旧保持着速度上的优势。二者起步相同,在第2阶段,黑麦草的生长速度比高羊茅快0.14 cm/d;到第3阶段时,两草种生长速度都有所下降,黑麦草降至1.14 cm/d,高羊茅降至0.92 cm/d,黑麦草依然保持0.22 cm/d的领先。对比可知,以混凝土试件作为生长载体时,植物生长环境碱度过高,抑制了植物的生长。高羊茅与黑麦草能够较好地适应该环境,顺利完成生长发育。

对比图9和图10的试验结果可知,当选用降碱后的试件作为植物生长载体时发现,同为30%孔隙率的试件降碱后植物生长速度得到全面提升,说明

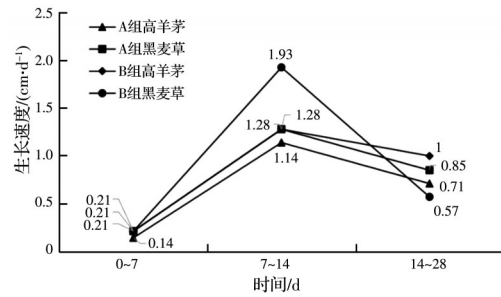


图8 植物在5~10 °C下的生长速度
Fig. 8 Growth rate of plants at 5~10 °C

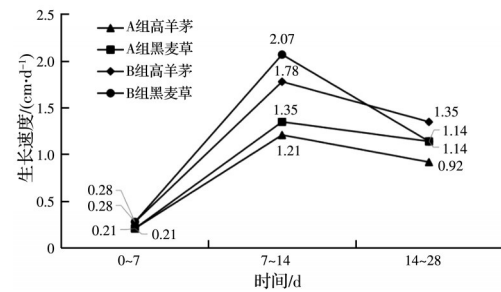


图9 植物在20~25 °C下的生长速度
Fig. 9 Growth rate of plants at 20~25 °C

碱度的降低有利于草种植生性能的提高。从图10中可以看出,在采取相同的降碱措施后,孔隙率不同也会对植物的生长速度产生影响,孔隙率较大的试件植物生长速度更快。但是,即便在不同的孔隙率下,黑麦草也一直保持着生长优势。当孔隙率为20%时,在初始阶段,黑麦草的生长速度为0.35 cm/d,高羊茅为0.28 cm/d;在7~14 d,黑麦草与高羊茅生长速度均为1.57 cm/d;在14~28 d,生长速

表12 草种生长高度测试结果

Table 12 Test results of growth height of grass seed

生长温度/°C	植物	叶片高度/cm											
		7 d				14 d				28 d			
		A组	B组	C组	D组	A组	B组	C组	D组	A组	B组	C组	D组
5~10	高羊茅	1	1~2			8~10	10~11			13~15	15~20		
	黑麦草	1~2	1~2			10~11	14~16			15~18	18~20		
	披碱草					7~9	12~15			12~14	15~17		
	早熟禾												
	狗牙根												
20~25	高羊茅	1~2	2	2	2~3	9~11	13~16	11~15	12~15	15~18	22~26	18~20	20~24
	黑麦草	1~2	2	2~3	3	10~12	15~18	13~16	13~17	18~20	23~26	20~25	21~25
	披碱草					8~10	12~15			12~15	17~19		
	早熟禾					1~2	3~4			5~7	8~9		
	狗牙根					1~2	3~5			6~7	8~10		

注:A组以大孔隙生态混凝土试件作为生长载体,记为试验组;B组以土壤作为生长载体,记为对照组;C组、D组分别对应孔隙率为20%、30%的试件。

度也会同之前一样开始降低,黑麦草降至 1.14 cm/d,高羊茅降至 0.85 cm/d。当孔隙率为 30% 时,二者生长速度均有提升,黑麦草在 3 个时间段内分别提升了 0.07、0.14、0 cm/d,狗牙根分别提升了 0.09、0.09、0.36 cm/d。与不同温度下的 A 组相比,B 组黑麦草与高羊茅均展现出良好的生长态势(图 11)。综上,对试件采取降碱措施处理可以提前草种发芽的时间、提高植被地上高度;增大试件孔隙率也会使植被的发育环境有所改善。

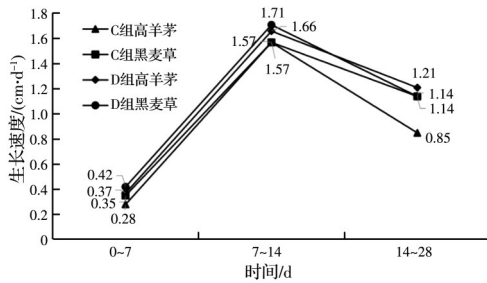


图 10 孔隙率及降碱方式对生长速度的影响(20~25 °C)

Fig. 10 Effect of porosity and alkali reducing methods on growth rate (at 20~25 °C)

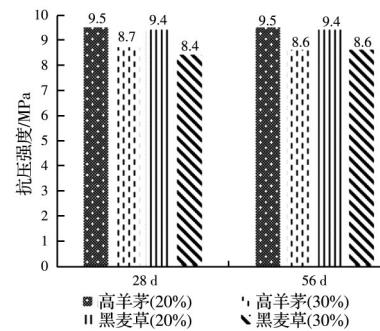


图 11 黑麦草与高羊茅在降碱处理后的大孔隙生态混凝土试件中 28 d 的生长状况

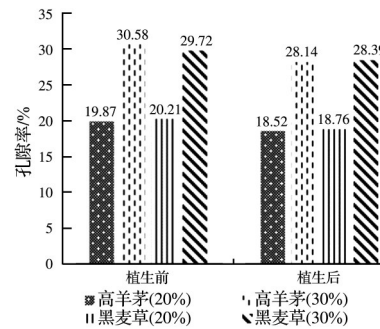
Fig. 11 Growth status of *Lolium perenne* and *Festuca arundinacea* in macroporous eco-concrete after alkali reducing treatment at 28 days

2.3.2 植生后混凝土性能变化 大孔隙生态混凝土实现植生的同时,植物根系在混凝土内部的生长发育也会对试件本身的性能造成一定影响。选择植物生长良好的组,测量其植生 28 d(即试件成型 56 d)后强度和孔隙率的变化。试验结果如图 12 所示。

由图 12 可知,在种植黑麦草与高羊茅前后,大孔隙生态混凝土试件强度变化不大,约 0~0.2 MPa 的差距。当孔隙率为 20% 时,“高羊茅”试件在种植前后强度均为 9.5 MPa,“黑麦草”试件强度均为 9.4 MPa。当孔隙率为 30% 时,“高羊茅”与“黑麦



(a) 抗压强度



(b) 孔隙率

图 12 植生前后抗压强度及孔隙率的变化规律

Fig. 12 The changes of compressive strength and porosity before and after planting

草”试件在种植前后强度均保持不变,“高羊茅”试件的强度分别为 8.7、8.6 MPa,“黑麦草”强度则为 8.4、8.6 MPa,在植生前后两组试件的强度差距很小。根据以上数据可知,两种植物的生长发育对试件强度的影响很弱。究其原因,黑麦草与高羊茅在生态混凝土内部的生长环境受限,后期营养不足,根系发育受到一定限制,根系的强度无法对混凝土内部结构造成破坏。大孔隙生态混凝土的孔隙率在植生前后存在一定变化。试件制备成型后,实际孔隙率与目标孔隙率存在一定差距。经实测,“20%”组的实际孔隙率分别为 19.8%、20.2%,”30%”组分别为 30.5%、29.7%。种植高羊茅以后,“20%”和“30%”组的孔隙率分别降至 18.5%、28.1%;种植黑麦草以后则分别降至 18.7%、28.3%。植生试验对试件的孔隙率存在影响,植生后孔隙率降低,主要是因为外界因素的影响,而非混凝土本身结构的变化。对植生后的试件进行测量时,孔隙内有营养土、根系残余,无法将其全部清理干净,且高羊茅与黑麦草的根系还不足以改变试件内部的孔结构,所以这两种植物生长对试件孔隙率的影响可忽略。

3 结论

在满足强度要求的基础上,大孔隙护坡生态混凝土较适宜植物的生长发育,能实现生态环境的改善。提出了复合降碱方法并选取合适草种进行植生试验,测试植生性能;结合硫酸亚铁溶液降碱工艺,探求其抗硫酸盐侵蚀的性能,并通过植生前试件性能的变化对混凝土的耐久性能进行评价。主要结论如下:

1)掺合料的掺入能够改善混凝土性能,其中40%粉煤灰和10%硅灰为最佳掺量,28 d的pH值可降至10.5左右。复合降碱方法最优组合为“内掺10%硅灰+喷洒0.5 mol/L的硫酸亚铁溶液”,最低pH值达到10.2,且试件抗压强度可保持在6.2 MPa。

2)在干湿循环条件下,大孔隙护坡生态混凝土会发生硫酸盐侵蚀现象,抗压强度损失较多,是耐久性能中的薄弱点。综合分析认为,大孔隙护坡生态混凝土不适宜在硫酸盐侵蚀严重的地区推广使用;由于高羊茅与黑麦草的生长发育对大孔隙护坡生态混凝土性能的影响很小,建议在实际工程中主要考虑其植生效果的优劣来选用。

3)试件的孔隙率越大,碱度越低,植被的生长状况越好;当试件孔隙率选择为30%,并采取合理的降碱工艺时,植被的生长效果最优。经过植生试验,生长状况好坏排序为:黑麦草>高羊茅>披碱草>狗牙根>早熟禾。高羊茅、黑麦草与大孔隙生态混凝土更匹配,且适用于粗放管理。

参考文献

- [1] 吴燕平. 大孔隙护坡生态混凝土力学性能研究[D]. 南京林业大学, 2017.
WU Y P. Research on the mechanical properties of ecological concrete for large porosity slope protection [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [2] MA H Y, WU Z Y, ZHANG J H, et al. Uniaxial compressive properties of ecological concrete: Experimental and three-dimensional (3D) mesoscopic investigation [J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 121034.
- [3] XU Y, CHENA F Q. Effects of concrete content in vegetation concrete matrix on seed germination and seeding establishment of cynodon dactylon [J]. Procedia Engineering, 2012, 28: 105-109.
- [4] 吴元梅, 郭凯先, 贾海峰. 生态混凝土在海绵城市中的应用及其特性试验设计[J]. 混凝土, 2018(7): 122-125.
WU Y M, GUO K X, JIA H F. Application of ecological concrete in sponge city construction and its characteristic experiment design [J]. Concrete, 2018(7): 122-125. (in Chinese)
- [5] 齐梦, 蔡焕琴, 陈硕. 植生型生态混凝土研究与发展[J]. 建设科技, 2017(22): 122-123.
QI M, CAI H Q, CHEN S. Research and development of vegetative ecological concrete [J]. Construction Science and Technology, 2017(22): 122-123. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] 孙嘉卿, 丛干文, 刘君实, 等. 再生骨料生态混凝土预测模型抗压强度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(Sup1): 381-389.
SUN J Q, CONG G W, LIU J S, et al. Experimental study on compressive strength of prediction model of eco-concrete with recycled aggregate [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Sup1): 381-389. (in Chinese)
- [8] 蒋昌波, 刘易庄, 向泰尚, 等. 多孔混凝土植生性能试验研究[J]. 混凝土, 2014(5): 152-156.
JIANG C B, LIU Y Z, XIANG T S, et al. Studies on the suitable of porous concrete for planting [J]. Concrete, 2014(5): 152-156. (in Chinese)
- [9] 李化建, 孙恒虎, 肖雪军. 生态混凝土研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(3): 17-20, 24.
LI H J, SUN H H, XIAO X J. Advance in research on eco-concrete [J]. Materials Review, 2005, 19(3): 17-20, 24. (in Chinese)
- [10] 冯乃谦, 张智峰, 马骁. 生态环境与混凝土技术[J]. 混凝土, 2005(3): 3-8.
FENG N Q, ZHANG Z F, MA X. Ecological environment and concrete technology [J]. Concrete, 2005 (3): 3-8. (in Chinese)
- [11] 廖文宇, 石宪, 黄泽峰, 等. 植生混凝土的降碱技术及种植效果研究[J]. 混凝土, 2013(7): 155-158.
LIAO W Y, SHI X, HUANG Z F, et al. Study on decreasing alkalinity of planting concrete and the resulting planting effect [J]. Concrete, 2013(7): 155-158. (in Chinese)
- [12] 杨永民, 何永刚, 刘晓飞, 等. 多孔生态混凝土孔隙水环境碱性降低措施研究[J]. 广东水利水电, 2018(11): 106-109.
YANG Y M, HE Y G, LIU X F, et al. Study on alkaline reduction measures of pore water environment in

- porous ecological concrete [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2018(11): 106-109. (in Chinese)
- [13] GONG C C, ZHOU X M, DAI W Y, et al. Effects of carbamide on fluidity and setting time of sulphoaluminate cement and properties of planting concrete from sulphoaluminate cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 182: 290-297.
- [14] 唐瑞, 刘筱玲, 陈代果, 等. 生态混凝土制备及其植生性能试验研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2017(10): 18-23. TANG R, LIU X L, CHEN D G, et al. Experimental research on preparation and planting performance of eco-concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2017 (10): 18-23. (in Chinese)
- [15] 陈景, 卢佳林, 徐芬莲, 等. 植生多孔混凝土的制备及其植生性能研究[J]. *商品混凝土*, 2015(5): 56-59. CHEN J, LU J L, XU F L, et al. Preparation of porous concrete and study on planting experiment for plants-growing [J]. *Ready-Mixed Concrete*, 2015(5): 56-59. (in Chinese)
- [16] 高婷. 生态多孔混凝土降碱技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017. GAO T. Research on decreasing alkalintiy of eco-porous concrete [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 商建行. 新型大孔隙护坡生态混凝土力学性能与植生性能研究[D]. 南京林业大学, 2018. SHANG J X. Research on mechanical properties and vegetation performance of new ecological concrete for large-porosity slope protection [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018. (in Chinese)
- [18] 聂丽华. 绿化混凝土的植物相容性与生物学特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008. NIE L H. Study of the plant compatibility and biological properties of green concrete [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2008. (in Chinese)
- [19] 沈晓丹. 页岩陶粒生态混凝土试验研究[D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2014. SHEN X D. Experimental study on shale ceramsite ecological concrete [D]. Jiaozuo, Henan: Henan Polytechnic University, 2014. (in Chinese)
- [20] 吴智仁, 陆春华, 刘荣桂, 等. 现浇护堤植生型生态混凝土性能指标及耐久性能[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(5): 380-383. WU Z R, LU C H, LIU R G, et al. Performance index and durability of eco-concrete cast on site for rivage-protecting and plant-growing [J]. *Journal of Jiangsu University (National Science Edition)*, 2005, 26(5): 380-383. (in Chinese)
- [21] 冷发光, 马孝轩, 田冠飞. 混凝土抗硫酸盐侵蚀试验方法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(Sup2): 45-48. LENG F G, MA X X, TIAN G F. Investigation of test methods of concrete under sulfate corrosion [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2006, 36(Sup2): 45-48. (in Chinese)
- [22] 汲博生. 大孔生态混凝土实验研究[D]. 山东青岛: 青岛理工大学, 2013. JI B S. Experimental study on macroporous ecological concrete [D]. Qingdao, Shandong: Qingdao Tehcnology University, 2013. (in Chinese)
- [23] 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52—2006 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. Standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete: JGJ 52—2006 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese)
- [24] 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of aggregate for highway engineering: JTG E42—2005 [S]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese)
- [25] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese)
- [26] 先端建設技術センター. ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き[S]. 日本: 山海堂出版, 2001: 92-93.
- [27] 黄庆亮. 肥效缓释型多孔生态混凝土的制备与性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2016. HUANG Q L. Preparation and performance of porous ecological concrete with slow release fertilizer [D]. Jinan: Jinan University, 2016. (in Chinese)
- [28] Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution: ASTM C1012—04 [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2004.

(编辑 黄廷)