DOI:10. 3969/j. issn. 2095-7300. 2020. 04. 005 http://www.hnstkxxb.com

景观道路中透水混凝土应用效益分析

——以衡阳船山文化园透水景观路为例

邓显石， 李三华， 阳芳， 陈盛彬

（湖南环境生物职业技术学院 园林学院,湖南 衡阳 421005）

摘　要:通过分析透水混凝土透水性能、景观效应、主要参数及应用特点,说明其在路面建设中的良好生态效益.并以透水混凝土在景观道路中的应用为调查分析对象,基于模糊综合评价理论,构建其应用效益综合评价体系.通过分析综合评价结果得出:透水混凝土在景观道路中应用的主要考察性能为透水性能和游览舒适性,目前其游览装饰性和景观装饰性认可度最高,综合来说透水混凝土在景观道路中应用具有良好的综合效益,同时在吸声降噪性能、易维护性能及承重普通道路推广应用上还需继续开展相关研究.

关键词:景观道路;生态;透水混凝土;模糊综合评价;应用效益分析

中图分类号:TU986.3　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2095-7300(2020)04-0027-09

Application Benefit Analysis of Permeable Concrete in Landscape Road

——Taking the permeable landscape Road of Chuanshan Cultural Park in Hengyang as an example

DENG Xianshi， LI Sanhua， YANG Fang， CHEN Shengbing

（Landscape Department,Hunan Polytechnic of Environment and Biology,Hengyang 421005,China）

Abstract: Analysis on the permeability performance, landscape effect, main parameters and application characteristics in permeable concrete,shows good ecological benefits in pavement construction. Based on the fuzzy comprehensive theories,the application of permeable concrete in landscape roads was taken as the investigation objects and a comprehensive evaluation system on application benefits was proposed.The results showed that the main characteristics of the application of permeable concrete in landscape roads are the permeability performance and touring comfort.At present,the touring decoration and landscape decoration have the highest recognition.The application of permeable concrete in landscape

收稿日期:2020-07-02

基金项目:湖南环境生物职业技术学院青年基金(KZ2019-03)

作者简介:邓显石,硕士,工程师,研究方向:景观工程构造与生态修复,E-mail:dengxianshivip@163.com

引文格式:邓显石,李三华,阳芳,等.景观道路中透水混凝土应用效益分析——以衡阳船山文化园透水景观路为例[J].湖南生态科学学报,2020,7(4):27-35.DENG X S,LI S H,YANG F,et al.Application benefit analysis of permeable concrete in landscape road——Taking the permeable landscape Road of Chuanshan Cultural Park in Hengyang as an example[J].Journal of Hunan Ecological Science,2020,7(4):27-35.

roads has good comprehensive benefits generally. Meanwhile, some generalized researches on sound absorption and noise reduction performance, easy maintenance performance and load-bearing ordinary roads need to further study.

Keywords: Landscape road; ecology; permeable concrete; fuzzy comprehensive analysis; application benefit analysis

园林景观工程作为人类文明传承发展的重要载体,是人类社会发展各历史阶段特征的重要展示.为了更好地传承与发展传统文化,结合生态文明建设理念,将增强生态产品研发应用融入美丽中国建设战略的发展路径很有必要[1].依托地方独特风貌的自然资源与文化特色的旅游景观资源开发建设正在兴起[2-3],地方景观基因作为地方文化的内核,其开发建设成为地方景观旅游发展的重要途径[4].景观道路是园林观光旅游的交通枢纽及空间分界带,起着划分空间、组织交通等方面的作用,是景观建设工程的重要组成部分.景观道路可以引导人们游览景区、串联各个景点,让人们融入自然,其性能优劣直接影响人们的游览舒适度[5].

透水混凝土是一种新型生态环保路面材料,能改善普通硬化路面积水现状、及时补充地下水、缓解城市热岛效用,在园林道路等工程中应用广泛[6].透水混凝土一般由水泥、粗骨料及添加剂等原材料加水按一定的比例拌制而成[7].透水混凝土是一种轻质多孔材料,孔隙呈蜂窝状构造,孔隙率在 15%~25%之间,透水效率高[8].透水混凝土具有良好的承载力和耐磨性,能形成各种色彩丰富的彩色地坪,且相对普通混凝土路面装饰性、散热性、舒适性均更好[9-10].透水混凝土内部孔隙曲折度较大,在具体工程建设使用过程中,由于外界环境中含有较多灰尘等固体杂质,易引起孔隙堵塞,影响透水性能[11].透水性能作为透水混凝土应用性能优劣的评价依据之一,主要以其透水系数的大小来表征透水性能的优劣,透水混凝土内部孔隙构造作为透水系数的主要影响因素,其孔隙率与透水系数呈正相关性[12-14].研究表明以透水混凝土总孔隙率为首要设计参数,再结合抗压强度设计参数的配合比设计方法,能制备达到设计要求且良好透水性及强度的透水混凝土[15].在透水混凝土制备中掺入一定量的粉煤灰能显著提高透水混凝土的透水系数,运用这种方法可制备高透水性混凝土[16].透水混凝土配合比设计时主要考虑目标孔隙率、水胶比等性能影响较大的参数[17].许多学者运用球模型包裹法、体积法、浆体包裹理论进行透水混凝土的配合比设计[18-20].

近年来我国生态文明建设的持续推进,透水混凝土在公园、人行道等景观轻量化道路路面应用较为广泛,在机动车道等承载力要求较高的路面研究应用较少[21].随着美丽中国建设战略的稳步推进,传承传统文化视角下的旅游景观建设在全国各地兴起,基于透水混凝土良好的透水、装饰等性能,在各类景观道路建设中应用效果良好.起初透水混凝土地面主要应用于公园、停车场等城市路面,在旅游景观路面建设应用过程中的效益及工艺方面研究较少[22].本文通过调查分析衡阳船山文化园景观道路中透水混凝土路面在施工工艺、生态效益、景观等方面的应用效益,构建一套科学规范、简洁实用的评价体系,为透水混凝土在景观道路中的进一步推广应用提供依据.

1 透水混凝土在景观道路中透水原理和景观效应

1.1 透水混凝土路面透水原理

1.1.1 透水混凝土路面透水机理

透水混凝土的应用起源于美国、日本等发达国家,旨在缓解沿海地区等城市路面积水、有效补充地下水资源,我国传统园林道路中一般采用鹅卵石铺装等方法形成多孔结构路面以达到透水效果.随着透水混凝土不断推广,由于其良好的透水性等功能,且制作、施工便利,目前在园林道路等景观工程中有广泛应用.基于特定级配配置的透水混凝土含有相互联通蜂窝状孔隙结构,用于疏排路面雨水和道路内部水分蒸发的通道,其具体透水构造机理如图 1.

1.1.2 透水混凝土的透水性能分析

基于上述透水混凝土透水机理分析可知其内部孔隙结构分布是透水性能优劣的关键因素之一,

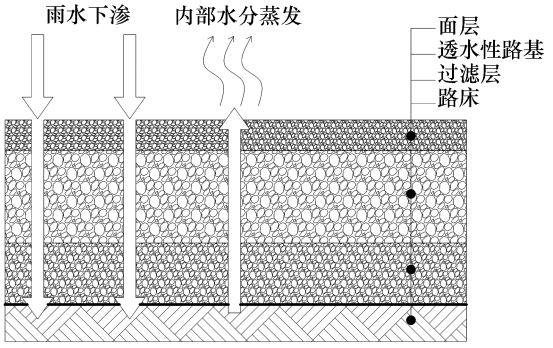

图 1　透水混凝土路面透水机理

Fig.1　Pervious mechanism of pervious concrete pavement

透水性能作为透水混凝土工程应用的核心性能,实际应用中主要以透水系数作为其透水性能优劣的定量指标,透水系数的测定按场所分为实验室测定和现场测定两类方法.现场测定透水系数主要采用单环法、双环法等.目前采用实验室法测定渗透系数的仪器种类和试验方法很多,但基于试验原理上大致分为“常水头法”和“变水头法”两种.

(1)常水头法即在整个试验过程中保持水头为一定量,故水头差为一常数,试验测试装置设计原理如图 2.

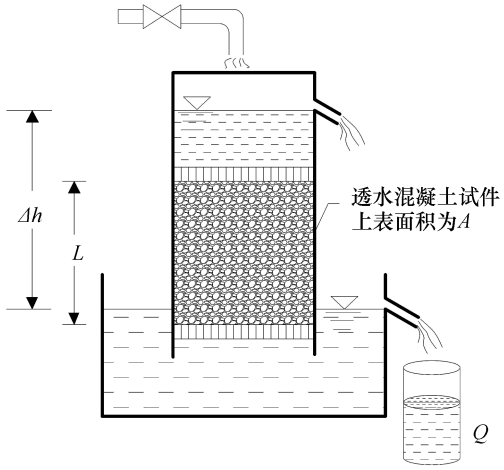

图 2　常水头法测试透水系数测试装置设计原理

Fig.2　Design principle of test device for measuring permeability coefficient by constant head method

试验时,将试件四周密封,仅上下表面透水,将吸水饱和的透水混凝土试件装入透明塑料筒中,接入水源,调整合适进水量,使透水装置保持一定的水位,让水流从试件上表面往下渗透至下部溢流水槽,并经出水口排至预先放置好的量筒.待水头差 $\triangle h$ 和下部溢流水槽渗出水量趋于稳定后,通过出水口处量筒测定在 t 时间内自上而下透过试件的水量 Q,根据达西定律可得透水混凝土试件透水系数.常水头法适应于高透水性混凝土的透水系数测定.

(2)变水头法即在试验测试过程中水头差不是定值,随时间改变,水头差为不定值,其测试装置原理如图 3.

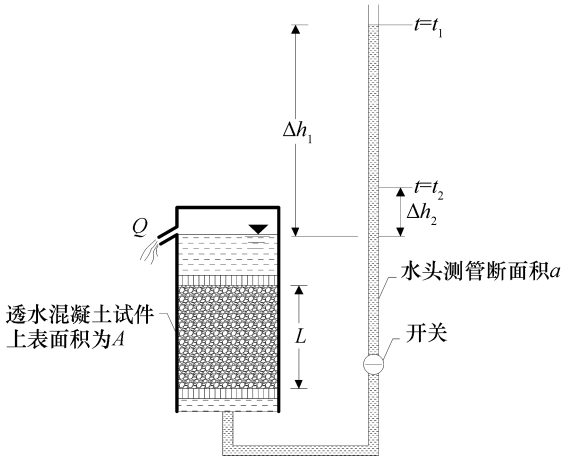

图 3　变水头法测试透水系数测试装置设计原理

Fig.3　Design principle of testing device for permeability coefficient by variable head method

水从右侧带有刻度的直立水头玻璃测管和 U 形管从透水混凝土试件下表面向上表面渗透.试验测试过程中,注水至直立水头玻璃测管设计高度,开始计时,测定好初始水头差 $\triangle h_1$,再测定 t 时间后最终水头差 $\triangle h_2$,基于达西定律,建立瞬时水力坡度与水渗透速度之间的线性关系,可推导出透水系数.

1.2　透水混凝土路面的景观效应

随着人民物质生活水平不断提高,人们对生活环境的要求越来越高,各类生态效益良好的休闲游览基础设施建设逐步完善.透水混凝土作为一种环境友好型的新型路面材料在城市及乡村景观道路中广泛应用,可通过路面喷涂和内掺颜料等方式形成不同颜色的彩色透水混凝土路面,基于道路应用需要,依据设计人员个人独特创意,搭配不同颜色设计组合成具有特殊图案等风格各异的路面装饰效果如图 4,在乡村旅游景观道路、城市园林及海绵城市等建设过程中具有点缀景观、勾勒园林效果、空间分隔等景观效应.

图 4 透水混凝土装饰图案

Fig.4 Decorative pattern of pervious concrete

2 透水混凝土主要参数及应用特点

透水混凝土主要由胶结料、骨料、添加剂等加水拌制而成,在工程应用中主要考虑的功能参数是透水系数 k、强度,综合考虑各功能参数合理选择设计参数.

2.1 透水系数

在透水混凝土制备配合比设计过程中透水系数 k 并不能直接作为设计参数,研究表明透水混凝土的孔隙分布结构是其透水系数主要影响因素,可在透水混凝土制备配合比设计时确定合理目标孔隙率,基于透水系数与目标孔隙率的相关性关系以确保透水性能[23].孔隙率的测定一般是采用体积质量法[24],即将试件在水中浸泡一定时间后,测定试件在水中的质量 m_1,再测试试件风干一定时间后的重量 m_2,设 V 为试件体积,ρ 为水的密度,则孔隙率 P 如式(1).

$$P = \left(1 - \frac{m_2 - m_1}{V \cdot \rho}\right) \times 100\% \tag{1}$$

2.2 强度

透水混凝土目前主要应用于公园景观道路、人行道、自行车道及乡村旅游道路等生态铺装路面.目前透水混凝土路面铺装一般应用于轻量化道路的生态铺装,透水混凝土的强度方面主要考虑其抗压强度,根据需要也可在试验室做抗折强度测试.透水混凝土的抗压强度和抗折强度测试可参照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》.

2.2.1 抗压强度

透水混凝土抗压强度试验是制作边长为 150 mm的立方体标准试件及边长为 100 mm 和 200 mm的立方体非标准试件,在标准条件下养护 28 d,按式(2)测定其抗压强度,非标准试件抗压强度计算换算系数分别取 0.95 和 1.05.

$$f_c = \frac{F}{A} \tag{2}$$

式中 f_c 为试件抗压强度,MPa;F 为试件破坏荷载,N;A 为试件承压面面积,mm^2.

2.2.2 抗折强度

透水混凝土抗折强度试验是制作尺寸为 150 mm×150 mm×600 mm(或 550 mm)的棱柱体标准试件及尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体非标准试件,在标准条件下养护 28 d,按式(3)测定其抗折强度,非标准试件抗折强度计算换算系数为 0.85,测试装置如图 5.

$$f_f = \frac{Fl}{bh^2} \tag{3}$$

式中 f_f 为试件抗折强度,MPa;F 为试件破坏荷载,N;l 为两支座跨度,mm;b 为试件截面宽,mm;h 为试件截面高,mm.

2.3 透水混凝土的多孔特性应用

2.3.1 透水性应用

透水混凝土路面孔隙率一般可达 15%以上,透水速度可达 31 L/(m·h)以上,比路面一般排水系

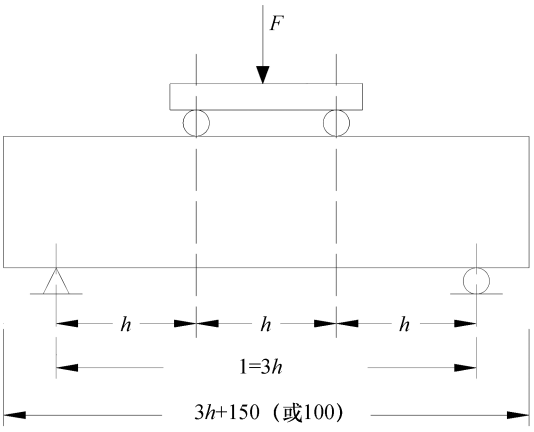

图 5　抗折试验装置原理图

Fig.5　Schematic diagram of bending test device

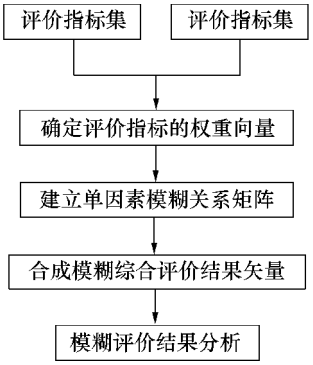

图 6　模糊综合评价法步骤

Fig.6 Steps of fuzzy comprehensive evaluation method

统更高效.能够有效缓解路面积水带来的危害,还能补充地下水资源.同时透水混凝土内部孔隙还能吸附外部环境中的粉尘等杂质,与路面细粒物质透过内部孔隙一起排至地下,起到净化路面与空气环境的作用.

2.3.2　其他综合应用

由于多孔结构特征,透水混凝土相比普通混凝土能够让基层地表与空气中的水分与热量互相流通,降低地面温度,优化周边环境,有利于生态平衡.同时还能吸收环境中的噪音,拥有良好散热性和抗冻融性等性能.

3　基于模糊综合评价法的透水混凝土景观道路应用效益评价体系构建

透水混凝土路面拥有良好的透水、吸声、防污染等性能,还能起到景观装饰作用.为了在景观道路建设中合理应用透水混凝土路面的各项优秀性能,可基于模糊数学理论的模糊综合评价法对透水混凝土在景观道路中应用的经济、质量、景观、生态等效益进行综合评价分析.模糊综合评价法可根据隶属度理论将定性因素转化为定量因素,其评价结果明了,逻辑性强,对定量困难、非确定性等问题研究颇具效果.本文基于模糊数学的综合评价步骤如图 6.

3.1　建立评价指标集

通过模糊综合评价法对透水混凝土在景观道路中的应用进行评价.路面功能及舒适度直接影响到景点的游览质感.在选择评价因素时要综合考虑,科学规范的选择评价指标集.选用 6 个方面的指标如表 1,指标集为

$$U=\{U_1,U_2,U_3,U_4,U_5,U_6\}$$

表 1　评价指标

Table 1　Evaluating indicator

评价指标代号	评价指标说明
U_1	路面透水性能
U_2	吸声降噪性能
U_3	景观装饰性
U_4	经济成本
U_5	游览舒适性
U_6	易维护性

3.2　建立评价标准集

确定评价标准集为 $V=\{V_1,V_2,V_3,V_4\}$ 如表 2,对各评价标准进行赋分 $C=\{C_1,C_2,C_3,C_4\}$.

表 2　评价标准

Table 2　Evaluation criterion

评价指标	评价标准分级
U_1	V_1、V_2、V_3、V_4
U_2	V_1、V_2、V_3、V_4
U_3	V_1、V_2、V_3、V_4
U_4	V_1、V_2、V_3、V_4
U_5	V_1、V_2、V_3、V_4
U_6	V_1、V_2、V_3、V_4

注:V_1 为优,V_2 为良,V_3 为中,V_4 为差.

3.3 确定评价指标的权重向量

模糊综合评价过程中,评价指标权重作为主观评价的确定对最终评价结果影响很大.邀请有相关经验专家对各指标进行权重评分,再采用统计分析方法得出各评价指标权重.指标权重向量为 $A=\{a_1,a_2,a_3,a_4,a_5,a_6\}$.

3.4 基于单指标模糊关系建立隶属度矩阵

单独考虑一个评价指标,建立评价对象对评价标准集 V 的隶属度,构造等级模糊子集,再对各评价对象基于每个指标 U_i 上进行量化,确定单指标评价过程中被评价对象对各等级模糊子集的隶属度,最终得出基于单指标模糊关系的隶属度矩阵如式(4).

$$R=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中,$r_i=(r_{i1},r_{i2},r_{i3},r_{i4})$,$\sum r_{ij}=1$,r_{ij} 为从评价指标 U_i 来看对等级模糊子集 V_j 的隶属度.

在确定隶属关系时,按评价指标重要程度分别邀请有关专业人员与普通游览民众按评价标准等级赋值对评价对象进行打分,在统计得出隶属度.

3.5 构建多指标模糊综合评价模型

运用合理的合成模糊算子将模糊权重向量 A 与模糊关系矩阵 R 通过矩阵运算得到基于各评价指标的模糊综合评价向量 B 如式(5).

$$\begin{aligned} B &= A\times R \\ &= (a_1,a_2,a_3,a_4,a_5,a_6)\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} \end{bmatrix} \\ &= (b_1,b_2,b_3,b_4) \end{aligned} \tag{5}$$

式中 b_j 表示评价对象综合上来说对评价等级模糊子集 V_j 的隶属度.

3.6 模糊综合评价结果分析

模糊综合评价法的结果一般是一模糊向量,不是一点值,将综合评价向量 B 各元素等级隶属度进行归一化得到 B' 如式(6).

$$B'=\left[\frac{b_1}{\sum b_i},\frac{b_2}{\sum b_i},\frac{b_3}{\sum b_i},\frac{b_4}{\sum b_i}\right] \tag{6}$$

再将其转化为指标综合评价分值 W,按其大小排序进行综合分析评价,表达式如式(7):

$$\begin{aligned} W &= B'\times C \\ &= \left[\frac{b_1}{\sum b_i},\frac{b_2}{\sum b_i},\frac{b_3}{\sum b_i},\frac{b_4}{\sum b_i}\right]\times\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{7}$$

4 应用效益综合评价分析

本文调查的的透水混凝土景观路面为衡阳王船山故居船山文化园游览道路如图 7,依据上述构建的透水混凝土景观道路应用效益模糊评价体系,对该透水混凝土路面的应用效益进行综合评判.

图 7 船山文化园透水混凝土游览道路

Fig.7 Water permeable concrete tour road of Chuanshan Cultural Park

4.1 建立评价指标集

评价指标集 $U=\{U_1,U_2,U_3,U_4,U_5,U_6\}$.

4.2 建立评价标准集

评价标准集 $V=\{V_1,V_2,V_3,V_4\}$,对各评价标准进行赋分 $C=\{90,80,70,60\}$.

4.3　确定各评价指标的权重向量

U_1 与 U_3 邀请湖南环境生物职业技术学院园林学院园林专业教师评分,U_2 与 U_5 到船山文化园邀请游览民众评分,U_4 与 U_6 由园区运营维护工作人员评分,为了方便数据统计,各指标均邀请 5 位相关评分人员评分,指标评分采取 100 制,各指标评分情况如表 3,再通过加权平均法得出各指标权重向量 $A=\{0.30,0.10,0.15,0.10,0.25,0.10\}$.

表 3　评价指标权重赋值评分

Table 3　Evaluation index weight assignment score

评分老师	评价指标					
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
老师 A	30	15	15	10	20	10
老师 B	25	10	10	15	30	10
老师 C	30	10	15	5	25	15
老师 D	35	5	20	10	20	10
老师 E	30	10	15	10	30	5
加权评分	30	10	15	10	25	10
指标权重	$a_1=0.3$	$a_2=0.10$	$a_3=0.15$	$a_4=0.10$	$a_5=0.25$	$a_6=0.10$

4.4　基于各单指标模糊关系建立隶属度矩阵

为了体现评价结果的综合性,使评价结果更科学合理,根据各评价指标特征邀请相关专业人员与游览民众按评价标准等级进行评分,综合评分标准如表 4.

表 4　综合评分标准

Table 4　Comprehensive scoring standard

评分标准	90~100	80~90	70~80	60
等级	优	良	中	差

将各评分进行统计分析得出基于各单指标模糊关系建立隶属度矩阵 R 如式(8).

$$R=\begin{bmatrix}0.35 & 0.40 & 0.15 & 0.10\\ 0.30 & 0.35 & 0.25 & 0.10\\ 0.45 & 0.30 & 0.15 & 0.10\\ 0.30 & 0.35 & 0.20 & 0.15\\ 0.50 & 0.30 & 0.10 & 0.10\\ 0.35 & 0.30 & 0.15 & 0.20\end{bmatrix} \tag{8}$$

分析隶属度矩阵可知,透水混凝土在景观道路中应用在游览舒适性和景观装饰性方面认可度最高.

4.5　构建多指标模糊综合评价模型

合成评价指标权重向量 A 与隶属度矩阵 R 得到基于各评价指标的模糊综合评价向量 B 如式(9).

$$\begin{aligned}B&=A\times R\\&=\{0.3925,0.3400,0.1525,0.1150\}\end{aligned} \tag{9}$$

4.6　模糊综合评价结果分析

将综合评价向量 B 各元素等级隶属度进行归一化得到 B' 如式(10).

$$\begin{aligned}B'&=\left[\frac{b_1}{\sum b_i},\frac{b_2}{\sum b_i},\frac{b_3}{\sum b_i},\frac{b_4}{\sum b_i}\right]\\&=\{0.3925,0.3400,0.1525,0.1150\}\end{aligned} \tag{10}$$

从综合评价归一化向量 B' 的结果可知,认为透水混凝土在景观道路应用效益优的占比最大为 36.75%,良的占 32%,中的占 19.75%,差的占 11.5%.总体来说认为良以上达 73.25%,透水混凝土在景观道路中应用能够取得较好地综合效益.

最后将综合评价归一化向量 B' 转化成指标综合评价分值 W 如式(11).

$$W = B' \times C$$

$$= [0.3925, 0.3400, 0.1525, 0.1150] \times \begin{bmatrix} 90 \\ 80 \\ 70 \\ 60 \end{bmatrix}$$

$$= 80.1 \quad (11)$$

基于综合评分标准,从指标综合评价分值计算结果可看出透水混凝土在景观中的应用效益良好.

5 结论

(1)透水混凝土是一种多功能的路面生态环保材料,通过相关专业人员打分得到的各评价指标权重可以看出透水混凝土在景观道路中的应用最重要的是其透水性能和游览舒适性.

(2)分析基于模糊数学理论建立的隶属度矩阵可知,透水混凝土在景观道路中应用在游览舒适性和景观装饰性方面认可度最高.

(3)通过模糊综合评价结果可得,透水混凝土在景观道路中应用具有良好的综合效益,应在美丽中国建设及旅游景观开发中进一步推广.透水混凝土的吸声降噪性能、易维护性能还有待进一步提升技术指标,在实际工程应用中发挥效益.同时在确保其他重要性能同时提高透水混凝土承载能力,将其从轻量化道路应用为主推向普通承重公路应用中.

参考文献:

[1] 李周.建设美丽中国实现永续发展[J].经济研究,2013(2):17-19.
LI Z.Building a beautiful China and realizing sustainable development[J].Economic Research Journal,2013(2):17-19.

[2] 王萃.新材料在当代景观中的应用[D].南京:南京林业大学,2011.
WANG C.The use of new material in the temporary landscape[D].Nanjing:Nanjing Forestry University,2011.

[3] 任国平,刘黎明,付永虎,等.都市郊区乡村聚落景观格局特征及影响因素分析[J].农业工程学报,2016,32(2):220-229.
REN G P, LIU L M, FU Y H, et al. Analysis of characteristic and influencing factors of rural settlement landscape pattern in metropolitan suburbs[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(2):220-229.

[4] 罗琪.旅游景区民俗文化街乡土建筑及景观设计[J].建筑经济,2020,41(7):133-134.
LUO Q.Local architecture and landscape design of folk culture street in tourist attractions[J].Construction Economy,2020,41(7):133-134.

[5] 郭庭鸿,董靓,刘畅.健康视角下影响城市游园使用的环境特征识别研究[J].中国园林,2020,36(4):78-82.
GUO T H,DONG L,LIU C.Identifying features influencing the use of small-scale urban park under the health perspective[J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(4):78-82.

[6] 曾伟.透水混凝土配合比设计及性能研究[D].重庆:重庆大学,2007.
ZENG W.Study on proportion of porous concrete mixture and its properties[D].Chongqing:Chongqing University,2007.

[7] 王玥,闫滨,李成林.透水混凝土制备及性能研究综述[J].硅酸盐通报,2017,36(3):864-869.
WANG Y,YAN B,LI C L.Review on preparation and properties of permeable concrete[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2017,36(3):864-869.

[8] 尹健,张贤超,宋卫民,等.基于混料设计理论的透水混凝土骨料特征响应分析[J].建筑材料学报,2013,16(5):846-852.
YIN J,ZHANG X C,SONG W M,et al.Response analysis of pervious concrete aggregate gradation characteristics based on theory of mixture design[J].Journal of Building Materials,2013,16(5):846-852.

[9] LIU Y, LI T, PENG H Y. A new structure of permeable pavement for mitigating urban heat island[J]. Science of the Total Environment,2018(634):1119-1125.

[10] 刘雪敏.透水混凝土技术在城市道路中的应用——评《海绵城市透水混凝土应用技术》[J].混凝土与水泥制品,2020(5):104-105.
LIU X M.Application of pervious concrete technology in urban roads——Comment on "application technology of permeable concrete in sponge City"[J].China Concrete and Cement Products,2020(5):104-105.

[11] KIA A,WONG H S,CHEESEMAN C R.Clogging in permeable concrete:a review[J].Journal of Environmental Management,2017(193):221-233.

[12] 余海燕,李永强,石译文,等.透水混凝土的试验研究[J].混凝土,2018(12):137-139.
YU H Y,LI Y Q,SHI Y W,et al.Experimental study on permeable concrete[J].Concrete,2018(12):137-139.

[13] 杨静,蒋国梁.透水性混凝土路面材料强度的研究[J].混凝土,2000(10):27-30.
YANG J,JIANG G L.A Study on strength of pervious concrete as pavement material[J].Concrete,2000(10):27

-30.

[14] 刘志峰,石丹丹,周斌斌,等.透水混凝土研究进展及废弃物骨料对其力学性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2018(12):6-12.
LIU Z F,SHI D D,ZHOU B B,et al.Research progress of previous concrete and the effects of waste aggregate on its mechanical performance[J].China Concrete and Cement Products,2018(12):6-12.

[15] 张朝辉,王沁芳,杨江金,等.透水混凝土配合比研究与设计[J].混凝土,2008(6):120-122.
ZHANG Z H,WANG Q F,YANG J H,et al.Study and design on pervious concrete mix proportion[J].Concrete,2008(6):120-122.

[16] 梁鹿鸣.高透水粉煤灰混凝土制备及性能研究[J].粉煤灰综合利用,2018(5):58-62.
LIANG L M.Preparation and performance study of high-permeable fly ash concrete[J].Fly Ash Comprehensive Utilization,2018(5):58-62.

[17] 徐行军,林开钊,李冰.透水混凝土路面的配合比设计与性能试验研究[J].混凝土,2018(6):136-140.
XU X J,LIN K Z,LI B.Study on mix proportion design and performance test of pervious concrete pavement[J].Concrete,2018(6):136-140.

[18] 陶卓辉.多孔水泥混凝土路面材料设计及性能研究[D].南京:东南大学,2006.
TAO Z H.Research on material design and performance of porous cement concrete pavement[D].Nanjing:Southeast University,2006.

[19] 李彦坤,胡晓波,陈清己,等.球模型包裹法设计透水混凝土配合比[J].混凝土,2008(9):29-32.
LI Y K,HU X B,CHEN Q J,et al.Designing of pervious concrete mixture proportion by surrounding spherical model[J].Concrete,2008(9):29-32.

[20] 盛燕萍,陈拴发,郑木莲,等.免振捣多孔混凝土配合比设计方法[J].交通运输工程学报,2009,9(1):44-49.
SHENG Y P,CHEN S F,ZHENG M L,et al.Mix design method of porous concrete with non-vibration molding[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering,2009,9(1):44-49.

[21] 何向玲.透水混凝土地面在城市园林道路综合效益的分析[J].北方园艺,2011(15):146-149.
HE X L.Synthetically benefit analyses of porous concrete ground at city garden[J].Northern Horticulture,2011(15):146-149.

[22] 朱文丽.透水铺装材料在现代城市景观中的应用[J].新型建筑材料,2017,44(9):100-102+117.
ZHU W L.Application of permeable pavement material in landscape pavement of the modern city[J].New Building Materials,2017,44(9):100-102,117.

[23] 薛文韬,方从启,雷超,等.骨料级配对于透水混凝土抗压强度的作用机理[J].混凝土,2018(6):61-63.
XUE W T,FANG C Q,LEI C,et al.Effect mechanism of aggregate gradation on compressive strength of pervious concrete[J].Concrete,2018(6):61-63.

[24] 刘颀,胡亚非,熊建军.石墨多孔材料孔隙率测定方法研究[J].润滑与密封,2010,35(10):99-101.
LIU Q,HU Y F,XIONG J J.Experimental study on porosity measurement of graphite porous materials[J].Lubrication Engineering,2010,35(10):99-101.

责任编辑:周安刚
英文校对:王芬