

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.04.008

基于 AHP-FCE 方法的气泡混合轻质土耐久性评估

刘鑫^{1,2,3}, 李之隆^{1,2,4}, 甘亮琴^{1,2,4}, 盛柯^{1,2,4}, 洪宝宁^{1,2,4}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 河海大学, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学隧道与地下工程研究所, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为提高气泡混合轻质土的耐久性能, 将层次分析法(AHP)和模糊综合评价法(FCE)相结合, 对气泡混合轻质土耐久性进行综合全面评估。基于气泡混合轻质土的物理力学性质, 从初步设计、施工工艺和运行管理角度出发, 选择相应的影响因子, 建立了影响因子等级标准; 建立了基于目标层、准则层和指标层的气泡混合轻质土耐久性综合评估模型, 通过 AHP 法确定下一层次相对于上一层的影响权重, 并对判断矩阵进行一致性检验, 证明了影响因子权值分配的合理性; 构建了适用于各影响因子的隶属函数, 计算相应的隶属度, 并给出模糊综合评价的具体方法; 以广东某高速公路 S03 标段收费岛范围的轻质土路基为实例, 对该项目进行耐久性综合评估, 证明了 AHP-FCE 方法的实用性与可靠性。

关键词: 气泡混合轻质土; 轻质土耐久性; 层次分析法(AHP); 模糊综合评价法(FCE); 轻质土路基; 高速公路收费岛范围路基

中图分类号: TU47 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)04-0332-08

Durability assessment of foamed mixture lightweight soil based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation (AHP-FCE)

LIU Xin^{1,2,3}, LI Zhilong^{1,2,4}, GAN Liangqin^{1,2,4}, SHENG Ke^{1,2,4}, HONG Baoning^{1,2,4}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Research Institute of Tunnel and Underground Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to improve the durability of foamed mixture lightweight soil (FMLS), the analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation (FCE) were combined to comprehensively evaluate the durability of FMLS. Based on the physical and mechanical properties of FMLS, the influencing factors were selected from the point of view of preliminary design, construction technology, and operation management, and the grade classification of influencing factors was established. The comprehensive evaluation model of FMLS' durability was established based on the target layer, criterion layer, and index layer. The weight of the lower layer relative to the upper layer was determined by the AHP, and the consistency check of the judgment matrix was conducted to prove the rationality of the distribution of influencing factors' weight. The membership function suitable for each influencing factor was built to calculate the membership degree, and the specific method of fuzzy comprehensive evaluation is presented. Using the lightweight soil subgrade in the charging island along the S03 section of a highway in Guangdong Province as an example, its durability was evaluated, demonstrating the practicality and

reliability of AHP-FCE.

Key words: foamed mixture lightweight soil; durability of lightweight soil; analytic hierarchy process (AHP); fuzzy comprehensive evaluation (FCE); lightweight soil subgrade; subgrade in charging island of highway

气泡混合轻质土因具有轻质性、强度可调节性、固化后自立性等优点^[1]而在工程上的应用越来越多,但其力学性能有很多不可预知性,尤其是耐久性问题。气泡混合轻质土耐久性是指其抵抗气候作用、化学侵蚀、物理作用及其他破坏的能力。由于耐久性不足而造成的工程结构破坏在国内外屡见不鲜,不仅影响到结构的正常使用,还造成了巨大的经济损失。目前关于气泡混合轻质土的耐久性问题已有了一些研究,如 Neramitkomburi 等^[2]研究添加黏土和粉煤灰废料的气泡轻质土的干湿循环强度,建立了干湿循环级数与强度的方程,并验证了方程的适用性。Kang 等^[3]考察了不同水泥含量的气泡混合轻质土在室外低温、地面以下以及浸水环境下养护的抗压强度变化,并比较了全部长期浸水、干湿循环和部分浸水试样的密度和抗压强度;Park 等^[4]运用人工神经网络,基于试验数据建模以预测气泡混合轻质土无侧限抗压强度;Kobayashi 等^[5]和 Furukawa 等^[6]将短切纤维添加到气泡混合轻质土中以达到增加耐久性的目的;Kikuchi 等^[7]开展了一系列气泡混合轻质土干湿循环耐久性试验,并将试验结果与在工程中应用了 10a 的轻质土进行对比;顾欢达等^[8-9]利用试验手段探讨了干湿循环环境和酸雨环境下气泡混合轻质土的稳定性状;刘楷等^[10]开展了气泡混合轻质土干湿循环和硫酸钠耐久性试验;章灿林等^[11]通过冻融循环和酸碱腐蚀试验说明冻融破坏和酸碱腐蚀明显降低了气泡轻质土的抗压强度,增大了其质量损失和吸水率。这些研究都仅考虑到 1 个或 2 个影响因子,但在实际工程中,气泡混合轻质土的耐久性问题不是简单地由单一因子引起的,而是由多种因子相互影响、共同作用导致的,难以用精确的数学和力学函数来表达它们之间的关系,因此笔者采用模糊综合评价理论对气泡混合轻质土的耐久性开展研究。

模糊综合评价(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)是对具有相互联系、相互影响的多个因素的事物做出评价的一种多因素决策方法,其理论基础是模糊数学,对某些具有模糊性、难以定量的因素利用模糊合成进行量化。由于在进行气泡混合轻质土耐久性评价时影响因子众多,使用的评语也常带有模糊性,所以宜采用模糊综合评价方法。但在应用模糊评价方法时,影响因子的权重是专家根据经验给出的,带有很强的主观性;而层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)能把定性因子量化,并能在一定程度上减少主观臆测的影响,使评价更科学化。基于 AHP 的模糊综合评价方法(AHP-FCE)已逐渐发展成熟,文献[12-14]将 AHP-FCE 方法应用到工程结构的耐久性评价中,取得了一些重要的成果。这些工程实践和成果证实了该方法在耐久性评价中应用的可行性。气泡混合轻质土作为一种新型材料,目前对其耐久性方面的研究较少,而且没有确切的评价方法,因此开展基于 AHP-FCE 方法的气泡混合轻质土耐久性评价研究具有重大的工程意义。

综上,在气泡混合轻质土的耐久性评价过程中,不能简单地进行单一评价,同时也不能不分主次地将各影响因子同等对待。因此,笔者基于 AHP-FCE 方法,选择相应的影响因子,赋予它们合理的权重,同时,结合影响因子的等级标准,确立合理的隶属函数,给出模糊综合评价的具体方法。在此基础上,对实际项目的气泡混合轻质土耐久性作出综合全面的评估。

1 影响因子及其等级标准

1.1 气泡混合轻质土耐久性影响因子选择

考虑到影响气泡混合轻质土耐久性的因素很多,而且影响气泡混合轻质土耐久性等级评价结果的检测项目也很多,根据 CJJ/T 177—2012《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》^[15]中的相关要求并结合气泡混合轻质土的基本物理力学性质,影响气泡混合轻质土耐久性的因素从初步设计、施工工艺、运行管理 3 个方面进行考虑。

a. 初步设计。工程建设需要科学合理的设计方案,在进行设计时应考虑材料配比和结构安全稳定性问题。当设计方面出现问题时工程建设就会存在安全风险。气泡混合轻质土的耐久性受到初步设计的影响,从设计角度选择 6 个影响因子:湿密度、抗压强度、填筑高宽比、安全系数、衔接面坡率和钢丝网设置情况。

b. 施工工艺。气泡混合轻质土对施工工艺有严格的要求,不同的施工工艺对气泡混合轻质土的耐久性

有不同程度的影响,从施工工艺角度选择7个影响因子:制备设备、搅拌充分程度、流值、单层浇筑厚度、单层浇筑时间、层间浇筑间隔时间和施工环境。

c. 运行管理。气泡混合轻质土的后期管理对耐久性的影响是至关重要的。若严重超载必然导致气泡混合轻质土开裂,缩短寿命;长期泡在水里也会导致强度降低。除此之外,还有温度变化、化学腐蚀等因素。因此,从运行管理角度选择5个影响因子:养护时间、车辆荷载、排水情况、化学腐蚀和温度变化。

1.2 气泡混合轻质土耐久性影响因子等级标准

各影响因子取值的确定随工程分类、特点和评估目的不同而不同。根据现有气泡混合轻质土相关文献资料以及本课题组的研究进展,将影响因子的等级划分如下:

a. 湿密度。气泡混合轻质土的湿密度范围在500~1 200 kg/m³之间,填土路基密度范围在1 900~2 000 kg/m³之间,比较两者可以划分为4个等级(表1)。

b. 抗压强度。与密度的可调节性原理一样,通过改变轻质土中各种成分的比例,其强度可在0.3~5 MPa范围内调整。本文将抗压强度分为4个等级(表1)。

c. 填筑高宽比。从稳定性的角度考虑,高宽比不能过大,规范CJJ/T 177—2012《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》中规定高宽比大于2时需要采取锚固措施。本文选择当没有锚固措施处理时将高宽比分为(0,1)、[1,1.5)、[1.5,2)、[2,∞)4个等级。

d. 安全系数。气泡混合轻质土路堤作为整体需要验算其稳定性,本文选取包括地基在内的抗倾覆验算的安全系数作为评价指标,将安全系数分为4个等级(表1)。

e. 衔接面坡率。气泡混合轻质土的直立性较好,但如果坡率过大,会引起开裂甚至不稳定的情况,规范也限定气泡混合轻质土的衔接面坡率不得超过1:1。本文采用衔接面与水平面的夹角划分等级,当夹角小于90°时轻质土在路基土之上;反之,当夹角大于90°时轻质土在路基土之下。根据工程应用情况分为4个等级(表1)。

f. 钢丝网设置。钢丝网设置应符合一般规定,当填筑高度小于5 m时应分别在填筑体底部50 cm以内、顶部50 cm以内位置设置1层钢丝网;当填筑高度为5~12 m时,应分别在填筑底部100 cm以内、顶部100 cm以内位置设置2层钢丝网等。对钢丝网设置的等级划分主要取决于是否按以上规定设置。

g. 制备设备。对制备设备的评价主要取决于发泡设备,发泡设备宜采用压缩空气发泡剂水溶液混合的方式形成泡沫,不宜通过搅拌产生气泡,应具备稳定的发泡倍率,产气量大,气压大。

h. 搅拌充分程度。制作不同数量的轻质土需要不同的搅拌时间,一般宜为5~10 min,搅拌时间不宜过长或过短,水泥浆液和轻质土的搅拌需要控制不同的搅拌速度。

i. 流值。根据规范要求,流值宜控制在180 mm左右,本文将流值分为4个等级(表2)。

j. 单层浇筑厚度。为减小水化热,气泡混合轻质土要采取分层分块式浇筑,除空洞充填、管线回填工程外,单层浇筑厚度宜按0.3~0.8 m控制。

k. 单层浇筑时间。若水泥材料一样,单层浇筑时间应控制在水泥初凝时间内。

l. 层间浇筑间隔时间。上一层的浇筑应在下一层终凝后浇筑,一般轻质土浇筑至终凝需要6~7 h,所以间隔时间至少7 h。

m. 施工环境。降雨、夏季高温、冬季低温等因素,根据施工期间记录的天气情况评判施工环境的好坏。

n. 养护时间。当填筑体完成施工后,应立即对填筑体表面覆盖塑料薄膜或土工布保湿养护,养护时间不宜少于7 d。

o. 车辆荷载。荷载越大对气泡混合轻质土的寿命影响越大,超载频率直接影响轻质土的耐久性。

p. 排水情况。根据排水是否通畅、有无经常积水决定排水情况的好坏。

q. 化学腐蚀。由于发泡剂呈碱性,因此气泡混合轻质土是一种碱性材料,对酸的抵抗能力较弱,酸性越强腐蚀越厉害。腐蚀程度应低于10%。

r. 温度变化。何国杰等^[16]对气泡混合轻质土做了冻融循环试验,结果表明,经过冻融循环后气泡混合轻质土的强度和弹性模量有所下降,且下降速度由快转慢,最后趋于平稳。

将气泡混合轻质土耐久性分为4个评价等级:优秀、良好、一般、较差,以上述各影响因子等级划分为依据,建立影响因子的等级标准,如表1、表2、表3所示。

表 1 初步设计过程的影响因子等级标准

Table 1 Grade classification of influencing factors in initial design process

评价等级	湿密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度/MPa	填筑高宽比	安全系数	衔接面坡率/($^{\circ}$)	钢筋网设置
优秀	[500,1000)	[3.5, ∞)	(0,1)	[1.5, ∞)	(0,45]	优秀
良好	[1000,1500)	[2,3.5)	[1,1.5)	[1.3,1.5)	(45,90]	良好
一般	[1500,2000)	[0.5,2)	[1.5,2)	[1.2,1.3)	(90,135]	一般
较差	[2000, ∞)	[0,0.5)	[2, ∞)	(0,1.2)	(135,180]	较差

表 2 施工工艺过程的影响因子等级标准

Table 2 Grade classification of influencing factors in construction technology process

评价等级	制备设备	搅拌充分程度	流值/mm	单层浇筑厚度/m	单层浇筑时间	浇筑间隔时间/h	施工环境
优秀	优秀	优秀	[170,180]	[0.3,0.5]	初凝前 10min	[8, ∞)	优秀
良好	良好	良好	(180,200]	(0.5,0.7]	初凝前 5min	[7,8)	良好
一般	一般	一般	[160,170)	(0.7,0.8]	初凝时间	[6,7)	一般
较差	较差	较差	(0,160)	(0.8, ∞)	大于初凝时间	[0,6)	较差

表 3 运行管理过程的影响因子等级标准

Table 3 Grade classification of influencing factors in operation management process

评价等级	养护时间/d	车辆荷载	排水情况	化学腐蚀率/%	温度变化
优秀	[10, ∞)	无超载	优秀	[0,1)	极小
良好	[8,10)	极少超载	良好	[1,3)	相当小
一般	[7,8)	少量超载	一般	[3,10)	较大
较差	(0,7)	较多超载	较差	[10, ∞)	相当大

2 气泡混合轻质土耐久性综合评估模型

2.1 建立因素集与评语集

结合气泡混合轻质土耐久性的主要影响因子,构建了表 4 所示的气泡混合轻质土耐久性综合评估模型。基于 AHP 法将气泡混合轻质土耐久性评估模型分为 3 个层次,目标层是气泡混合轻质土的耐久性,准则层是初步设计、施工工艺和运行管理 3 个方面,第 3 个层次为影响轻质土耐久性的各个具体因子。该评估模型综合考虑了气泡混合轻质土的特点、施工工艺及运行维护,涉及建设工程项目的实施阶段和使用阶段,较全面地反映气泡混合轻质土耐久性的影响因子,符合全面性、科学性及可行性的评价原则。

设 $U_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为第 i 个影响因素, n 为影响因素的个数; $u_{ik}(k=1,2,\cdots,l)$ 为第 i 个影响因素所对应的第 k 个影响因子, l 为第 i 个影响因素的影响因子个数,当 $i=1$ 时 $l=6$,当 $i=2$ 时 $l=7$,当 $i=3$ 时 $l=5$ 。 $\{U\}$ 为因素集, $\{U_i\}$ 为第 i 个子因素集。根据气泡混合轻质土耐久性评估模型建立因素集:

$$\{U\} = \{U_1, U_2, U_3\} = \{\text{初步设计, 施工工艺, 运行管理}\} \tag{1}$$

子因素集:

$$\begin{aligned} \{U_1\} &= \{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}, u_{16}\} = \\ &\quad \{\text{湿密度, 抗压强度, 填筑高宽比, 安全系数, 衔接面坡率, 钢筋网设置}\} \end{aligned} \tag{2}$$

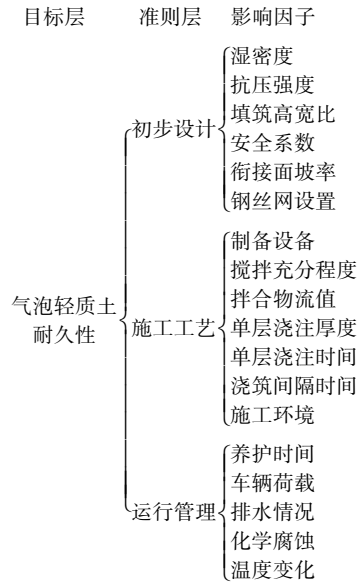
$$\begin{aligned} \{U_2\} &= \{u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}, u_{25}, u_{26}, u_{27}\} = \\ &\quad \{\text{制备设备, 搅拌充分程度, 流值, 单层浇筑厚度, 单层浇筑时间, 层间浇筑时间间隔, 施工环境}\} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\{U_3\} = \{u_{31}, u_{32}, u_{33}, u_{34}, u_{35}\} = \{\text{养护时间, 车辆荷载, 排水情况, 化学腐蚀, 温度变化}\} \tag{4}$$

设 $v_j(j=1,2,\cdots,m)$ 为评语集中第 j 个评价等级, m 为评价等级的个数,综合评语集为 $\{V\}$,则有

表 4 气泡混合轻质土耐久性评估模型

Table 4 Evaluation model of durability of FMLS



$$\{V\} = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{优秀, 良好, 一般, 较差}\}$$

(5)

2.2 利用层次分析法确定权重

由于涉及数据较多,权重确定较烦琐,以准则层为例,确定初步设计、施工工艺、运行管理三者的权重。通过两两因素比较,对它们的重要性引用数字1~9及其倒数作为标度赋值。具体为:标度1,表示两因素相比,具有同样的重要性;标度3,表示两因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要;标度5,表示两因素相比,一个因素比另一个因素明显重要;标度7,表示两因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要;标度9,表示两因素相比,一个因素比另一个因素极端重要;标度2、4、6、8,表示上述相邻两判断的中值;若一个因素与另一个因素比较得到一个值,则后者与前者比较的判断为该值的倒数。

通过大量资料分析和咨询专家,对初步设计、施工工艺和运行管理三者之间的相对重要性进行综合客观比较,得到它们的判断矩阵A,计算判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 \\ 2 & 1 & 2 \\ 2 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{列向量归一化}} \begin{bmatrix} 0.2 & 0.25 & 0.143 \\ 0.4 & 0.5 & 0.571 \\ 0.4 & 0.25 & 0.286 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{按行求和}} [0.593 \quad 1.471 \quad 0.936]^T \xrightarrow{\text{归一化得}\alpha} [0.198 \quad 0.490 \quad 0.312]^T$$

(6)

据此判断矩阵的最大特征值λ_{max}和权重W:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\alpha)_i}{\alpha_i} = 3.05 \qquad W = (0.198 \quad 0.490 \quad 0.312)$$

(7)

式中:α——最大特征值对应的特征向量;α——特征向量的元素。

为了验证权值的分配是否合理,需要对判断矩阵作一致性检验,公式为

$$C_R = \frac{C_I}{R_I}$$

(8)

式中:C_R——一致性比例;C_I——一致性指标,C_I=(λ_{max}-n)/(n-1);R_I——平均一致性指标,n=1~9对应的R_I分别为0.00、0.00、0.58、0.90、1.12、1.24、1.32、1.41、1.45。

将相关数据代入式(1)得C_R=0.043<0.10,因此判断矩阵具有满意的一致性,证明权值分配是合理的。

指标层相对于准则层的权重的确定方法和步骤同上,判断矩阵A_i(i=1,2,3)分别为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1/3 & 1/5 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 4 & 1/2 & 8 & 7 \\ 3 & 1/4 & 1 & 1/4 & 3 & 4 \\ 5 & 2 & 4 & 1 & 8 & 8 \\ 1/3 & 1/8 & 1/3 & 1/8 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/7 & 1/4 & 1/8 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 6 & 4 & 5 & 5 & 4 \\ 1/3 & 1 & 5 & 3 & 5 & 5 & 4 \\ 1/6 & 1/5 & 1 & 1/5 & 1/3 & 2 & 1/4 \\ 1/4 & 1/3 & 5 & 1 & 4 & 5 & 2 \\ 1/5 & 1/5 & 3 & 1/4 & 1 & 3 & 1/5 \\ 1/5 & 1/5 & 1/2 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1/5 \\ 1/4 & 1/4 & 4 & 1/2 & 5 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 3 & 4 \\ 1/2 & 1 & 4 & 2 & 4 \\ 1/4 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1 \\ 1/3 & 1/2 & 2 & 1 & 4 \\ 1/4 & 1/4 & 1 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

(9)

通过计算得指标层的权重值W_i(i=1,2,⋯,n)如下:W₁=(0.091 0.3 0.131 0.401 0.045 0.033),W₂=(0.351 0.34 0.041 0.148 0.065 0.034 0.127),W₃=(0.398 0.276 0.08 0.174 0.072)。一致性比例C_R分别为0.054、0.08、0.031,均小于0.1,说明权值分配合理。

2.3 隶属函数的确定

对于气泡混合轻质土耐久性子因素集中的定量因子(如湿密度、安全系数等)采用隶属函数法来描述。隶属函数的形式并不是唯一的,笔者在阅读相关文献^[17-19]的基础上,根据研究对象的实际情况确定隶属函数。从表1~3可看出定量因子的变化规律不是全部一致的,为了合理地将不一致的变化规律用统一的计算式表示出来,将各影响因子的取值由小到大排列,并把它们的取值范围分为4个区间,用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ表示,各个区间不是等分的,与评价等级也不是一一对应的关系,而是根据等级标准对应。令相邻2个区间的临界值d₂、d₃、d₄的隶属度为0.5,区间中点值d₁'、d₂'、d₃'的隶属度为1,Ⅰ和Ⅳ是2个比较极端的区间,因此赋予其较高的隶属度,如湿密度的范围为500~2000kg/m³,一般认为湿密度越小越好,则当湿密度非常接近取

值范围的下限时,可认为隶属于优秀等级的程度为 1,当湿密度在取值范围上限以外时是相当不利的,完全属于较差的等级。隶属函数能完全覆盖各影响因子的取值范围,利用相关的影响因子取值进行验算,得到的隶属度较为合理,因此认为该隶属函数符合各影响因子的客观事实。

对于定性因子(如制备设备、搅拌充分程度等)建立语言变量,对各评价等级予以赋分(1 分、2 分、3 分、4 分),4 个评价等级各得分的隶属度如表 5 所示。

2.4 模糊综合评估

设 r_{ikj} 为第 i 个影响因素所对应的第 k 个影响因子对评语集中第 j 个评价等级的隶属度,则单个影响因子的模糊评价向量可表示为 $\mathbf{R}_{ik}=(r_{ik1} \ r_{ik2} \ \cdots \ r_{ikm})$,组合所有单个影响因子的模糊评价向量,即可得到子因素集的模糊评价矩阵:

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{i1} \\ \vdots \\ \mathbf{R}_{il} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i11} & \cdots & r_{i1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{il1} & \cdots & r_{ilm} \end{bmatrix}$$

(10)

根据子因素集 $\{U_i\}$ 所对应的权重 $\mathbf{W}_i$,可得第 i 个影响因素的影响因子的一级综合评价:

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{W}_i * \mathbf{R}_i = (b_{i1} \ b_{i2} \ \cdots \ b_{im})$$

(11)

式中: $*$ ——广义模糊合成运算; b_{ij} ——第 i 个影响因素对第 j 个评价等级的隶属程度。

采用加权平均型算子 $M(\cdot, \oplus)$ 进行运算,则有 $b_{ij} = \sum_{k=1}^l w_{ik} r_{ikj} (i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m)$ 。重复上述步骤进行二级综合评估,令因素集的模糊评价矩阵为 $\mathbf{R}=(\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \cdots, \mathbf{B}_n)^T$,并由计算所得因素集 $\{U\}$ 的权重 $\mathbf{W}$,用加权平均法确定气泡混合轻质土耐久性的二级模糊综合评价的最终结果:

$$\mathbf{B} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{R} = (b_1, b_2, \cdots, b_m)$$

(12)

最后,根据最大隶属度原则,选择综合评价结果 $\mathbf{B}$ 中最大的评价指标 b_j 作为气泡混合轻质土耐久性的最终评价结果,即气泡混合轻质土耐久性总体来讲隶属于第 j 等级。

3 工程实例

广东某高速公路 S03 标段收费岛范围的轻质土路基,里程桩号:K30+893.745 ~ K31+303.926。长度 410.181 m,起端最窄处 95.07 m,末端最窄处 47.01 m,中间最大宽度 114.4 m。气泡混合轻质土路基厚度 5.2 m。立面设计考虑到分块浇筑和横向坡度的因素,设计有台阶,台阶高度一般为 20 cm。各影响因子原始数据如下:(a)设计因素。湿密度为 7200 kg/m^3 ,强度为 0.8 MPa,高宽比为 0.06,安全系数为 1.93,衔接面坡率为 90° ,钢丝网情况优秀。(b)施工因素。制备设备优秀,搅拌充分程度良好,流值为 180 mm,单层浇注厚度为 50 cm,单层浇筑时间即初凝时间,浇筑间隔时间为 8 h,施工环境良好。(c)管理因素。养护时间为 15 d,车辆荷载情况为少量荷载,排水情况一般,无化学腐蚀,温度变化极小。

根据气泡混合轻质土耐久性模糊评估模型得到各子因素集模糊评价矩阵如下:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} 0.67 & 0.33 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(13)

则一级综合模糊评价结果如下:

表 5 定性因子的语言变量得分隶属度
Table 5 Memberships of scores of linguistic variables of qualitative factors

评价	隶属度			
	1 分	2 分	3 分	4 分
优秀	0	0	0.33	0.67
良好	0	0.25	0.50	0.25
一般	0.25	0.50	0.25	0
较差	0.67	0.33	0	0

$$\begin{cases} \boldsymbol{B}_1 = \boldsymbol{W}_1 \cdot \boldsymbol{R}_1 = (0.645 & 0.033 & 0.233 & 0.09) \\ \boldsymbol{B}_2 = \boldsymbol{W}_2 \cdot \boldsymbol{R}_2 = (0.436 & 0.424 & 0.123 & 0.016) \\ \boldsymbol{B}_3 = \boldsymbol{W}_3 \cdot \boldsymbol{R}_3 = (0.620 & 0.113 & 0.178 & 0.089) \end{cases} \quad (14)$$

令因素集模糊评价矩阵 $\boldsymbol{R}=(\boldsymbol{B}_1 \quad \boldsymbol{B}_2 \quad \boldsymbol{B}_3)^T$,则二级模糊综合评价结果如下:

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{W} \cdot \boldsymbol{R} = (0.535 \quad 0.250 \quad 0.162 \quad 0.053) \quad (15)$$

根据最大隶属度原则,选择综合评价结果 $\boldsymbol{B}$ 中最大的评价指标 $b_1=0.535$ 作为气泡混合轻质土耐久性的最终评价结果,即本工程气泡混合轻质土耐久性评价结果为优秀。

结合该工程目前的具体运营情况,本文做出的耐久性模糊综合评估结果接近于实际运营情况,说明本文所建立的气泡混合轻质土耐久性模糊综合评估模型是合理和准确的,证明了 AHP-FCE 方法的实用性与可靠性。

4 结 论

- a. 将 AHP-FCE 方法引入气泡混合轻质土耐久性评估中,基于气泡混合轻质土的物理力学性质,从初步设计、施工工艺和运行管理角度出发,选择相应影响因子,建立了影响因子等级标准。
- b. 建立了基于目标层、准则层和指标层的气泡混合轻质土耐久性综合评估模型,通过 AHP 法确定下一层次相对于上一层次的影响权重,并对判断矩阵进行一致性检验,证明了影响因子权值分配的合理性。
- c. 构建了适用于各影响因子的隶属函数,计算了相应的隶属度,并给出模糊综合评价的具体方法。
- d. 以广东某高速公路 S03 标段收费岛范围的轻质土路基为实例,对该项目进行耐久性综合评估,证明了 AHP-FCE 方法的实用性与可靠性。

参考文献:

[1] 何国杰,丁振洲,郑颖人. 气泡混合轻质土的研制及其性能[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1):18-22. (HE Guojie, DING Zhenzhou, ZHENG Yingren. Preparation of bubble mixed light soil and its properties[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1):18-22. (in Chinese))

[2] NERAMITKOMBURI A, HORPIBULSUK S, SHEN S L, et al. Durability against wetting-drying cycles of sustainable lightweight cellular cemented construction material comprising clay and fly ash wastes[J]. Construction & Building Materials, 2015, 77 (6):41-49.

[3] KANG D, SHIN E. Experimental study on behavior of the lightweight air-foamed soil considering freezing-thawing and Soaking Conditions[J]. Journal of the Korean Geoenvironmental Society, 2016, 17(5): 37-46.

[4] PARK H I, KIM Y T. Prediction of strength of reinforced lightweight soil using an artificial neural network[J]. Engineering Computations(Int J for Computer-Aided Engineering), 2011, 28(5):600-615.

[5] KOBAYASHI H, YOSHIDA M, MINAMI K, et al. Laboratory and field tests on characteristics of deformation and strength of air foamed lightweight soil mixed with short fiber[C]//Jioshinsetikkusu Rombunshu. Proceedings of Geosynthetics Symposium. Jioshinsetikkusu:Japan Chapter of International Geosynthetics Society, 2007:49-54.

[6] FURUKAWA Y, FUJIMURA K. Reinforcement effects of foamed mixture lightweight soilmixed with shortfibers reutilized waste petbottles [J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu C, 2015, 71:136-146.

[7] KIKUCHI Y, NAGATOME T, NOGUCHI T. Durability of lightweight soil with air foam[C]//YIN Jianhua. 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2011. Hong Kong: Hong Kong Geotechnical Society (HKGES), 2011:805-810.

[8] 顾欢达,顾熙. 干湿循环作用下发泡颗粒轻质土的稳定性[J]. 公路, 2005 (5): 125-128. (GU Huanda, GU Xi. Stability of light soil mixed with foamed beads under dry-wet-cycle condition[J]. Highway, 2005(5): 125-128. (in Chinese))

[9] 顾欢达,顾熙. 酸雨环境对轻质土的工程性质的影响[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(3): 17-18. (GU Huanda, GU Xi. Influence of Acid Rain on engineering properties of light soil[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(3): 17-18. (in Chinese))

[10] 刘楷,李仁民,杜延军,等. 气泡混合轻质土干湿循环和硫酸钠耐久性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 362-366. (LIU Kai, LI Renmin, DU Yanjun, et al. A durability experimental study of lightweight soil subjected to wetting-drying cycles and sodium sulfate soaking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup1):362-366. (in Chinese))

[11] 章灿林,黄俭才,熊永松,等. 不同原料土掺量的气泡轻质土耐久性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(8): 32-36.

(ZHANG Canlin, HUANG Jiancai, XIONG Yongsong,et al. Durability of foamed cement banking with raw soil[J]. Journal of Wuhan University of technology, 2014, 36(8): 32-36. (in Chinese))

[12] 元成方,牛获涛. 基于 AHP 法和模糊综合评价的钢筋混凝土桥梁耐久性评估[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(6):829-834. (YUAN Chengfang, NIU Ditaο. Durability assessment of RFC bridges based on the analytic hierarchy process and fuzzy synthetic evaluation[J]. Journal of Xi'an University of Arch&Tech(Natural Science Edition), 2010, 42(6):829-834. (in Chinese))

[13] 张贵文,张海梅. 基于模糊理论的钢筋混凝土结构耐久性评价[J]. 甘肃科学报,2013,25(3):76-79. (ZHANG Guiwen, ZHANG Haimei. On the durability of reinforce structures based on the fuzzy theory[J]. Journal of Gansu Sciences, 2013,25(3): 76-79. (in Chinese))

[14] 郭梦圆,高聪聪,杨小乐,等. 船闸闸墙的模糊层次评价模型[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2014, 13(6):720-725. (GUO Mengyuan, GAO Congcong, YANG Xiaole, et al. Evaluation technology research for lock camber wlls bsd on the fuzzy comprehensive evaluation Model[J]. Journal of Jiangnan University(Natural Science Edition), 2014, 13(6):720-725. (in Chinese))

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 气泡混合轻质土填筑工程技术规程:CJJ/T 177—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[16] 何国杰,郑颖人,杨晨曦. 气泡混合轻质土的吸水特性和抗冻融循环性能[J]. 后勤工程学院学报, 2008, 24(4):6-8. (HE Guojie, ZHENG Yingren, YANG Chenxi. Characteristics of water asorption and fost thawing resistance to foamed cement banking [J]. Journal ofLogistical Engineering University, 2008, 24(4):6-8. (in Chinese))

[17] 张永杰,李侑军,李邵军,等. 边坡模糊可靠性分析隶属函数取值界限研究[J]. 岩土力学, 2014,35(4):1157-1163. (ZHANG Yongjie, LI Youjun,LI Shaojun, et al. Study of boundaries of membership function values for slope fuzzy reliability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(4):1157-1163. (in Chinese))

[18] 黄丽,胡世凯,李中夫. 基于标准论域确定隶属函数的方法[J]. 四川大学学报(自然科学版),2010,47(2):207-212. (HUANG Li, HU Shikai, LI Zhongfu. Determine membership function by normalized universe of discourse[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition),2010,47(2):207-212. (in Chinese))

[19] 于少伟. 基于区间数的模糊隶属函数构建[J]. 山东大学学报(工学版), 2010,40(6):32-35. (YU Shaowei. Construction of a fuzzy membership function based on interval number[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2010, 40(6):32-35. (in Chinese))

• 简讯 •

第一届水生态文明建设学术研讨会将在苏州市举办

由中国水利学会主办的第一届水生态文明建设学术研讨会将于2017年12月上旬在苏州市举办。研讨会将围绕水生态文明建设理念、制度、热点焦点问题及前沿科技研究和成果等,开展学术研讨交流,有效地推进水生态文明建设。会议协办单位如下:水利部太湖流域管理局、江苏省水利厅、江苏省水利学会、中国水利学会水生态专业委员会、中国水利学会环境水利专业委员会、中国水利学会水资源专业委员会。

本次会议主题为:创新驱动,助力水生态文明建设。会议议题如下:(a)水生生态系统保护和修复理论与实践;(b)河湖水系连通理论与实践;(c)水生态文明试点实践探索;(d)河湖健康评估技术与评估机制;(e)水生态补偿机制。

会议详情请关注:<http://www.ches.org.cn/ches/>

(本刊编辑部供稿)