

基于南非标准的材料分类系统方法研究

赵宾¹, 古洋², 臧芝树¹, 袁仁峰¹, 边晓龙¹ 编译

(1. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京市 100097; 2. 中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆市 400013)

摘要:在旧路修复项目中,合理有效地确定材料等级,是旧路路面结构设计的重要环节。基于模糊逻辑和确定性理论,采用设计当量材料等级指标(Design Equivalent Material Class,简称 DEMAC),提供一种新颖的南非路面材料分类系统方法。从判别原理出发,详细论述了确定性因子、样本大小修正系数、相对确定度 $C(E)$ 以及相对置信度等参数,总结提炼出了基于南非标准的材料分类系统方法的设计流程。案例分析表明:试验条件允许时,建议适当增加测试指标,以提高判别 DEMAC 等级的确定性程度。

关键词:沥青路面; 南非标准; 材料分类系统; DEMAC; 确定性理论

中图分类号: U414 **文献标志码:** A

材料分类在旧路修复设计项目中具有十分重要的作用,现行的判别方法往往依赖于设计施工规范及试验检测规范,一旦某个指标如加州承载比(R_{CBR})、塑性指数 I_p 等不符合等级要求,则无法将试验材料归于该类别。考虑到试验方法、试验指标、试验数量众多,如何有效合理地判别材料分类是旧路结构设计的关键所在。

基于此,南非开发了适应于南部非洲地区的材料分类系统,该系统在混合料结构设计和施工质量控制之间建立了联系,其主要目的就是提供一个可靠合理的一致性指标,去判别现有材料的等级。从判别原理出发,该文首先介绍南非材料分类系统法的设计内容、设计参数及设计流程,同时结合案例进行分析,可为深入了解南非标准的材料体系提供一定的参考。

1 材料分类系统法

材料分类系统法是一种基于数学理论建立起来的方法,以判别试验材料的等级,适用于南部非洲地区的所有常见材料,尤其适合再生修复项目。当采用该方法进行设计时,引入设计当量材料等级指标,一旦某材料指定相应的 DEMAC,则表明该材料的性能如剪切强度、刚度等与新建道路的同类材料相似。

例如,在修复项目中,现有路面结构某材料被指定为设计等效的 G2 等级,以 DE-G2 表示,则表明该等级的性能与新建项目中的 G2 材料相似,其他材料同理。

2 判别原理

基于模糊逻辑和确定性理论,采用确定度指标,对试验材料进行等级判别,相关的数学判别原理如下:

(1) 首先拟定假设为 H ,则 $C(H)$ 代表假设 H 为真的确定度,范围为 $-1 \sim 1$,其中,当假设 H 为真时, $C(H)=1$,当假设 H 为假时, $C(H)=-1$,当假设 H 不确定真假时, $C(H)=0$,同时进行第一条规则判别时,假定 $C(H)=0$ 。

(2) 其次 $C(H)$ 是由各种规则决定的,而每个规则均有自己的确定性因子 F_{CF} (Certainty Factor),该因子反映每条证据(如试验方法)的确定性水平。例如,若 $I_p < 4$,则材料属于 DE-G1 等级,就是一条规则,其确定性因子 $F_{CF}=0.4$ 可查表获得。

(3) 然后计算每条证据的改进确定性因子 F'_{CF} (Modified Certainty Factor),如式(1)所示,其中 $C(E)$ 代表支持假设 H 时该证据的相对确定度,范围为 $0 \sim 1$,当 $F'_{CF}=0$ 时,代表缺乏证据,相反 $F'_{CF}=1$ 时,代表有绝对的确定度。

$$F'_{CF} = F_{CF} \times C(E) \quad (1)$$

(4) 最后计算证据 E 条件下,假设 H 是真的确定度,记为 $C(H|E)$,如式(2)~(4)所示:

$$\text{当 } C(H) \geq 0, \text{ 且 } F'_{CF} \geq 0, \text{ 则 } C(H|E) = C(H) + \{F'_{CF} \times [1 - C(H)]\} \quad (2)$$

$$\text{当 } C(H) \leq 0, \text{ 且 } F'_{CF} \leq 0, \text{ 则 } C(H|E) = C(H) +$$

$$\{F'_{CF} \times [1 + C(H)]\} \quad (3)$$

当 $C(H) \times F'_{CF} < 0$, 则 $C(H|E) =$

$$\frac{C(H) + F'_{CF}}{1 - \min(|C(H)|, |F'_{CF}|)} \quad (4)$$

(5) 一旦确定第一条规则的更新确定度 $C(H|E)$ (Updated Certainty)后,将该规则下的 $C(H|E)$ 作为第二条规则的初始确定度 $C(H)$ 。

(6) 然后重复(2)~(5),遍历所有的规则。

(7) 最终,假设 H 的整体确定度就是最后一条规则的累计确定度 $C(H|E)$ 。

在判别材料分类时,根据不同的试验材料选定 DEMAC 指标,假设 H 就是试验材料是否是拟定的设计当量等级,如 DE-G2,每条证据则是各种试验及检测指标,其中确定性因子是试验指标真实反映材料实

际性能的确定性程度,而证据的相对确定度 $C(E)$ 就是反映试验结果数据的变化程度。

3 设计参数

3.1 确定性因子 F_{CF}

确定性因子 F_{CF} 反映每条证据的确定性水平,对于每条证据,南非规范根据各种材料(粒料类材料、沥青稳定类及水泥稳定类材料)提供了不同 DEMAC 下的试验限值及 F_{CF} 值,该文仅以粒料类材料中的天然砂砾(Natural Gravel,简称 NG)某些试验指标 [R_{CBR} 、相对密度、动力锥贯入仪 DCP(Dynamic Cone Penetrometer)贯入值、FWD(Falling Weight Deflectometer)刚度、 I_p]为例进行说明,详见表 1。

表 1 不同 DEMAC 下粒料类材料(NG)的试验限值及 F_{CF} 值

项目	$R_{CBR}/\%$	相对密度	DCP 贯入值/ (mm·次 ⁻¹)	FWD 刚度/ MPa	塑性指数 I_p
DE-G1	—	>1.02	<1.4	>600	—
DE-G2	—	1.00~1.02	1.4~1.79	500~600	—
DE-G3	—	0.98~1.00	1.8~1.99	400~499	<5
DE-G4	—	0.98~1.00	2.00~3.69	300~399	5~6
DE-G5	>45	0.95~0.98	3.7~5.69	200~299	6~10
DE-G6	25~44	0.93~0.95	5.7~9.09	150~199	10~12
DE-G7	15~24	0.93~0.95	9.1~13.99	100~149	>12
DE-G8	10~14	<0.93	14~18.99	70~99	—
DE-G9	7~9	<0.93	19~25	50~69	—
DE-G10	<7	<0.93	>25	0~49	—
确定性因子 F_{CF}	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4

3.2 样本大小修正系数

在进行旧路路况评价时,小样本数量经常存在且影响着材料 DEMAC 指标的判定,为考虑样本大小对整体确定度 $C(H|E)$ 的影响,引入样本大小修正系数,对确定性因子 F_{CF} 进行修正,二者直接相乘就是修正后的 F_{CF} ,以此得到各项试验指标的改进确定性因子 F'_{CF} ,修正系数 A_s 如表 2 所示。

表 2 样本大小修正系数 A_s

样本大小	修正系数 A_s	样本大小	修正系数 A_s
1	0.2	4~6	0.7
2	0.3	>6	1.0
3	0.6		

3.3 相对确定度 $C(E)$

考虑到众多试验方法测试指标的不完整性,加之抽样统计方法在检测材料中的应用,材料的分类评估是模糊和不确定的,前一个因素已在确定性因子 F_{CF} 中考虑,至于后一个因素,采用证据的相对确定度 $C(E)$ (Relative Certainty)来表征,它表示试验结果的变异程度,通过第 10 百分位数(10th Percentile)、第 50 百分位数(50th Percentile)和第 90 百分位数(90th Percentile)进行计算,如图 1 所示。

图 1 为某一证据(CBR 试验)下相对确定度 $C(E)$ 的确定方法,其中三角形面积记为 S ,高度为 1.0。一旦 10th、50th 和 90th 确定后,可计算出落在每个 DEMAC 区域的面积,如三角形落在 DE-G7 和 DE-

G6 的面积记为 S_1 和 S_2 , 则属于 DE-G7 和 DE-G6 的相对确定度 $C(E)$ 分别为 S_1/S 和 S_2/S 。采用此方法可类推确定所有证据下的相对确定度 $C(E)$ 。

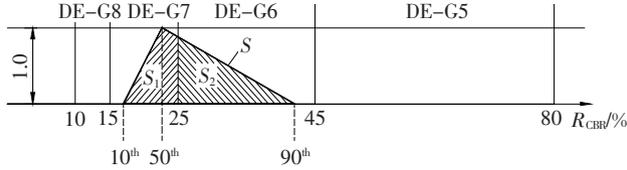


图 1 相对确定度 $C(E)$ 的确定

3.4 相对置信度

在确定性理论中, 相对置信度 (Relative Confidence) 是设计可靠度的相对指标, 南非基于材料分类方法, 建立了与整体确定度 $C(H|E)$ 的相关关系, 其值取决于测试指标的数量及其确定性因子大小, 具体见表 3。

表 3 相对置信度与整体确定度 $C(H|E)$ 的关系

整体确定度 $C(H E)$	相对置信度	整体确定度 $C(H E)$	相对置信度
<0.3	很低	$0.5 \sim 0.7$	中等
$0.3 \sim 0.5$	低	>0.7	高

4 材料分类设计流程

南非材料分类系统法在判别理论的基础上, 结合相关设计参数, 通过确定材料的整体确定度 $C(H|E)$, 最终判别材料的 DEMAC, 其具体设计流程为:

(1) 建立假设 H : 材料属于某 DEMAC, $C(H)$ 初始值为 0。

(2) 查询不同测试指标提供的确定性因子 F_{CF} , 基于统计样本的修正系数 A_s , 确定每个试验指标下修正后的确定因子 F_{CF} 。

(3) 根据图 1 提供的方法, 计算每个试验的相对确定度 $C(E)$ 。

(4) 根据式(2)~(4)计算该试验下的更新确定度 $C(H|E)$ 。

(5) 上一个试验下的更新确定度 $C(H|E)$ 作为下一个试验的初始 $C(H)$ 。

(6) 重复(2)~(5), 直至遍历所有试验。

(7) 最终, 所有试验的累计确定度即为测试材料的整体确定度。

5 案例分析

某道路修复改造项目, 总长 28 km, 对现有路面进行了各种试验测试, 以底基层材料为研究对象, 采用材料分类方法进行 DEMAC 划分, 其中底基层材料属于辉绿岩天然砂砾。

5.1 测试结果

对底基层材料进行了 CBR 试验、相对密度试验、 I_P 试验以及 DCP 试验, 试验结果见表 4。

表 4 各种试验的测试值

桩号/ km	相对密度	$R_{CBR}/$ %	I_P	DCP 贯入值/ (mm·次 ⁻¹)
1.5	1.03	70	9	1.8
2.7	0.87	24	10	4.8
4.3	0.94	64	9	-1.0
4.9	1.00	66	7	-1.0
7.9	1.00	70	8	-1.0
9.2	1.00	100	8	-1.0
12.5	1.00	90	5	2.4
14.3	0.98	80	8	1.4
17.5	0.94	—	6	-1.0
10 th	0.93	52	6	-1.0
50 th	1.00	70	8	-1.0
90 th	1.01	93	9	2.9
样本大小	9	8	9	9

注: DCP 贯入值为 -1.0 代表数据无效。

5.2 相对确定度 $C(E)$ 的计算

结合表 1 提供的各种 DEMAC 试验限值, 从表 4 测试值的分布来看, 选定 3 个 DEMAC (DE-G4、DE-G5 和 DE-G6) 进行判定, 按照材料分类设计流程以及 3.3 节相对确定度 $C(E)$ 方法进行计算, 其结果如表 5 所示。

5.3 整体确定度 $C(H|E)$ 的计算

当相对确定度 $C(E)$ 及修正后的确定性因子 F_{CF} 确定后, 从试验指标相对密度开始, 假设 $C(H)=0$, 开始计算相对密度指标下不同 DEMAC 的 $C(H|E)$, 然后, 将相对密度指标下的 $C(H|E)$ 作为 R_{CBR} 指标下的初始 $C(H)$, 再计算 R_{CBR} 指标下不同 DEMAC 的 $C(H|E)$, 依次往下递推, 将所有试验指标的 $C(H|E)$ 计算完成后, 则该材料的整体确定度为最后一个试验指标的累计 $C(H|E)$, 计算结果如表 6 所示。

表5 相对确定度 $C(E)$ 的计算

试验指标	F_{CF}	A_s	$F_{CF} \times A_s$	10 th 百分位数	50 th 百分位数	90 th 百分位数	$C(E)$		
							DE-G4	DE-G5	DE-G6
相对密度	0.3	1	0.3	0.93	1.00	1.01	0.21	0.38	0.04
R_{CBR}	0.4	1	0.4	52.00	70.00	93.00	0.18	0.81	0
I_P	0.4	1	0.4	6.00	8.00	9.00	0	1.00	0
DCP 贯入值	0.4	1	0.4	-1.0	-1.00	2.90	0.05	0	0

表6 迭代法计算整体确定度 $C(H|E)$

试验指标	F'_{CF}			$C(H E)$		
	DE-G4	DE-G5	DE-G6	DE-G4	DE-G5	DE-G6
相对密度	0.06	0.11	0.01	0.06	0.11	0.01
R_{CBR}	0.07	0.32	0.00	0.13	0.40	0.01
I_P	0.00	0.40	0.00	0.13	0.64	0.01
DCP 贯入值	0.02	0.00	0.00	0.15	0.64	0.01

从表6可以看出:对于天然砂砾底基层而言,当取DE-G4等级时, $C(H|E)$ 为0.15,当取DE-G5等级时, $C(H|E)$ 为0.64,当取DE-G6等级时, $C(H|E)$ 为0.01,取三者最大值,则天然砂砾材料等级最终拟为DE-G5,整体确定度 $C(H|E)=0.64$,查表3可知,相对置信度为“中等”。

同时,随着试验指标的增多,整体确定度亦在逐渐累加,表明增加测试指标可有效地提高判别试验材料DEMAG等级的整体确定度,因此,试验条件允许时,建议适当增加测试指标。

6 结论

(1) 基于设计当量材料等级,介绍一种新颖的基于模糊逻辑和确定性理论的南非路面材料分类系统方

法,在旧路修复项目中采用模糊的方式处理众多试验数据,确定材料的当量等级,为旧路路面结构设计提供合理的材料等级和技术参数。

(2) 从判别原理出发,详细论述了确定性因子、样本大小修正系数 A_s 、相对确定度 $C(E)$ 及相对置信度等内容,总结提炼出了基于南非标准的材料分类系统方法的设计流程。

(3) 在试验条件允许的情况下,建议适当增加测试指标,从而保证判定试验材料设计当量材料等级的确定度。

——编译自:Academy Asphalt. Bituminous Stabilised Materials: A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials[J]. Emulsions, 2009.