

基于层次分析法的沥青路面施工质量评价模型

章 毅, 李立寒

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 通过调整评价指标组成, 引进限值内百分率法量化各指标的质量, 建立了针对沥青路面不同层位的施工质量评价模型, 应用层次分析法以高温性能、水稳定性和疲劳性能等为分析要素, 求得模型内各评价指标的权重系数, 最后通过实际案例分析了模型的实用性。

关键词: 沥青路面; 施工质量; 层次分析法; 限值内百分率; 权重

中图分类号: U 416.217

文献标识码: A

Asphalt Pavement Construction Quality Evaluation Model and Weight Calculation Based on Analytic Hierarchy Process

ZHANG Yi, LI Lihan

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Upon adjusting the composition of evaluating indicators and adopting percent within limits (PWL) method to measure the quality indicator, the quality evaluation model for different layers is constructed. The weight of each quality indicators in the model is calculated with analytic hierarchy process (AHP) considering pavement performance and other factors. Model practicability is verified in one experience project.

Key words: asphalt pavement; construction quality; analytic hierarchy process; percent within limits; weight

沥青路面施工质量评价的主要内容是根据质量评价模型, 通过对工程各项指标进行试验测试和数据分析整理, 按照一定的标准和计算方法, 对施工质量进行确认和评价。沥青路面施工质量评价模型和评价方法的准确性和合理性直接关系到施工企业对

质量目标的选择, 也是提高沥青路面施工质量的可靠保证和有效手段。笔者针对安徽省气候环境特征, 调整质量评价指标组成及质量度量方法建立了新的质量评价模型, 并结合多因素决策的层次分析法计算了模型中各评价指标的权重。

1 现有评价模型及其存在的问题

1.1 现有沥青路面施工质量评价模型及构成要素

我国关于沥青路面施工质量验收评定的规范主要是 JTG F80/1—2004《公路工程质量检验评定标准》, 以下简称《规范》, 其中关于沥青路面部分的内容主要成型于 20 世纪 90 年代。《规范》中规定, 沥青路面施工质量验收评定应先将工程项目由大到小分别划分为单位工程、分部工程和分项工程, 再由分项工程按规定权重逐层回评至单位工程。其中分项工程评分是最为重要和基本的评定过程, 其评价模型见式(1)和式(2), 各检查项目及权值见表 1。

$$S_{Sw} = \sum (S_{Ew} w_{Ew}) / \sum w_{Ew} \quad (1)$$

式中: S_{Sw} 为分项工程得分; S_{Ew} 为检查项目得分; w_{Ew} 为检查项目权重。

$$P_{Ew} = G_{acp} / G_{all} \quad (2)$$

式中: P_{Ew} 为检查项目合格率, %; G_{acp} 为检查合格的点(组)数; G_{all} 为检查项目的全部点(组)数, 其中检查项目得分为检查项目合格率乘以 100, 由式(2)计算。

1.2 存在的问题

评价模型一般由 3 项要素构成, 即质量评价指标(检测项目)、质量度量方法(如检查项目合格率)和权重系数(权值)。此 3 项要素的选择和确定直接影响评定方法的准确、合理性。其中, 评价指标是对质量目标的定性说明, 质量度量方法和权重是对质

收稿日期: 2009-10-20

第一作者: 章 毅(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路工程结构与材料. E-mail: zynge@163.com

通讯作者: 李立寒(1957—), 女, 教授, 博士生导师, 工学硕士, 主要研究方向为道路工程结构与材料. E-mail: lhli@tongji.edu.cn

量目标的定量计算. 经过多年的实践应用, 发现《规范》方法的三要素存在较多问题, 主要包括:

(1) 评价指标. 现有验收检测项目主要有表1中的6项, 这些指标虽在一定程度上把握了路面舒适性、安全性和可靠性要求, 但忽略了路面材料组成的要求, 无法确认沥青混合料设计目标在路面修筑过程中是否实现, 混合料设计的重要性也就无法体现.

表1 沥青路面质量验收检查项目和权重

Tab.1 Quality characteristic and weight of asphalt pavement construction evaluation

压实度	平整度	弯沉值	渗水系数	抗滑	厚度
3	2	2	2	2	3

(2) 质量度量方法. 《规范》中的检查项目合格率法严重低估了测试数据变异性对质量判别的影响. 以压实度为例, 假设沥青混合料的设计压实度为95%, 容许范围为93%~97%, 现有表2中两标段的检测结果, 显然标段A变异性远小于标段B, 标段A的压实度质量要优于标段B, 但两标段的合格率却均为100%.

表2 压实度检测数据

Tab.2 Results of compactness

标段	样本1	样本2	样本3	样本4	均值	标准差
A	95.0	95.5	94.5	95.1	95.0	0.36
B	93.0	97.0	93.1	96.7	95.0	1.90

(3) 权重系数. 评价指标本身存在的不足使权重系数的合理性也无从谈起.

因此, 在当前的工程技术背景下, 为实现沥青路面施工质量评价方法、准确地把握施工质量和有效提高施工质量的功能, 有必要对沥青路面施工质量评价模型进行更进一步研究.

2 评价模型的建立及权重计算

2.1 评价指标的选择

如前所述, 目前《规范》选用的评价指标缺乏评价沥青混合料组成特征的能力, 为增加评价模型的准确性与合理性, 应增补这部分指标.

沥青混合料主要由沥青结合料和具有一定级配的集料组成, 为判定混合料是否满足其设计目标要求需对沥青质量分数和级配组成进行确认. 沥青质量分数指标的重要性不言自明, 即使在级配完全符合要求的前提下, 沥青质量分数的小幅波动都将显著影响混合料的路用性能.

级配指标虽然重要, 却不易进行全面评价: 一是检测困难, 如0.075 mm以下集料的准确检测几乎不可能; 二是筛孔通过率对混合料体积参数和路用性能的影响程度难以量化. 因此, 级配评价的一般做法是选择部分关键筛孔的通过率进行评价, 关键筛孔包括0.075 mm、2.36 mm和4.75 mm, 这些筛孔主要用于评价混合料细集料含量, 其中尤为重要的是2.36 mm筛孔, 其通过率对混合料VMA(矿料间隙率)有显著影响^[1], 以其作为级配评价的首选指标是较为合适的选择.

但仅采用沥青质量分数和2.36 mm通过率2项指标并不足以评定混合料的整体质量. 在实践工程中, 摊铺型混合料(摊铺后碾压前的沥青混合料)离析可能导致沥青用量和级配出现2种变化趋势, 一是沥青质量分数变幅小而关键筛孔通过率变幅大, 二是两者呈一定正比关系变化, 如图1所示. 图1中, 混合料A和B均来自同一设计, 沥青质量分数设计值为5.4%, 2.36 mm通过率设计值为45%. 采用上述2项指标评价时, 混合料A明显强于混合料B, 这是因为在2.36 mm筛孔通过率波动情况相同的条件下, 混合料A中沥青质量分数在设计范围内较混合料B波动小. 从所形成的沥青膜厚来说, 混合料B一直保有接近设计要求的沥青膜厚, 而混合料A在整个曲线范围内膜厚要么过厚, 要么过薄. 过厚易引起混合料抗车辙能力下降^[2], 过薄则不利于混合料水稳定性. 为弥补指标离析判定能力的不足, 增加摊铺型沥青混合料的空隙率指标.

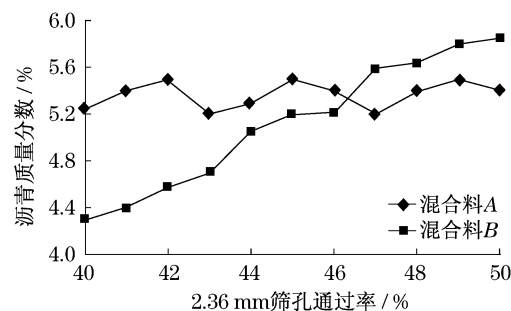


图1 2.36 mm筛孔通过率与沥青质量分数的关系

Fig.1 Relationship between percentage passed 2.360 mm sieve and asphalt content

此外, 增加上面层构造深度比(检测混合料与设计混合料比值)以评价路面的抗滑性能和混合料离析^[3]. 其他指标将沿用规范中的部分指标, 将所有指标汇总, 见表3. 前3项指标均为摊铺型沥青混合料的检测项目, 后4项指标为成型路面检测指标, 除表面层混合料需检测平整度和构造深度比(构造深度

比为检测路面构造深度与设计混合料的比值),其他 面层仅以前 5 项为评价指标.

表 3 沥青路面施工质量评价指标

Tab.3 Quality characteristic of asphalt pavement construction

表面层	沥青质量分数	级配	空隙率	压实度	面层厚度	平整度	构造深度比
其他层位	沥青质量分数	级配	空隙率	压实度	面层厚度		

2.2 质量度量方法的选择

2.2.1 允许限值内百分率(PWL)方法

质量度量方法是指与评价指标无关的用于量化产品质量的方法.我国沥青路面施工质量评价普遍采用的质量度量方法是合格率法,见式(2).该方法的主要特点是简单易行,但缺乏对数据整体特征的解读能力,无法反映检测数据的波动情况.目前国外应用的质量度量方法主要有^[4]:允许限值内百分率(PWL)、绝对偏差平均值(AAD)、正形指数(CI)和移动平均值(MA)等.其中,PWL 方法在国外应用最为广泛^[5],该法在计算中同时考虑了样本数据的均值和标准差,能够准确和稳定地反映数据的波动情况^[6],且其数学意义易于被接受,PWL 的计算结果表征的是样本所属母体符合限值要求的比例^[7].因此推荐以 PWL 替代现有的合格率法进行质量评定,以增进评定结果的科学性.PWL 质量度量方法的详细计算原理及步骤见文献[8-9].

2.2.2 限值范围

施工质量评定是对沥青混合料质量是否达到预期质量目标与设计要求的判定.根据 PWL 计算原理可知,采用 PWL 方法实现这一判定的根本前提是设定的限值范围不超过容许的质量波动范围,质量波动范围则体现为施工的均匀性.文献[9]通过路面检测分析,结合室内试验方法,借鉴国内外沥青混合料级配离析判别标准,提出了评价沥青路面施工质量均匀性判别标准.笔者推荐文献[9]中的无离析判别标准结合我国 JTGF40—2004《公路沥青路面施工技术规范》中的标准作为 PWL 法计算的限值范围^[10],见表 4.

2.3 指标权重的计算

采用层次分析法确定各评价指标的权重.层次

分析法 AHP(the analytic hierarchy process)是一种将主观判断的定性结果用定量的形式表达和处理的、系统化、层次化的分析方法,特别适用于由相互关联、相互制约的众多因素构成的复杂而又缺少定量数据的系统.先前所选择的评价指标与路面性能质量就构成了这样的模糊系统.

表 4 指标限值范围

Tab.4 Limits of quality characteristic

质量特性指标	取样频度/(次·t ⁻¹)		质量要求或允许偏差
	上面层	其他面层	
空隙率 级配(2.360 mm) 沥青质量分数	≤1/600	≤1/1 000	- 1.2%~1.6% ± 5%(AC 混合料) ± 0.2%
压实度 路面厚度	≤1/60	≤1/100	93%至设计值 ¹⁾ - 10%~0
平整度 构造深度比 ²⁾	≤1/60		1.2 mm 0.83~1.53

注:1)压实度设计值为设计沥青混合料相对毛体积密度与最大理论相对密度的比值;

2)构造深度比为测试值与设计值的比值.

应用层次分析法建模确定各个评价指标权值的基本步骤如下:

(1) 建立多级递阶层次结构.分析各评价指标与路面质量之间的关系,建立 3 级递阶层次结构,见图 2.其中:①目标层反映路面的综合质量,由综合评价指标的计算结果进行评定;②准则层给出了与各项质量特性指标相关的沥青路面的路用性能要素,如高温性能、疲劳性能等;③方案层以所选的各项评价指标为要素.

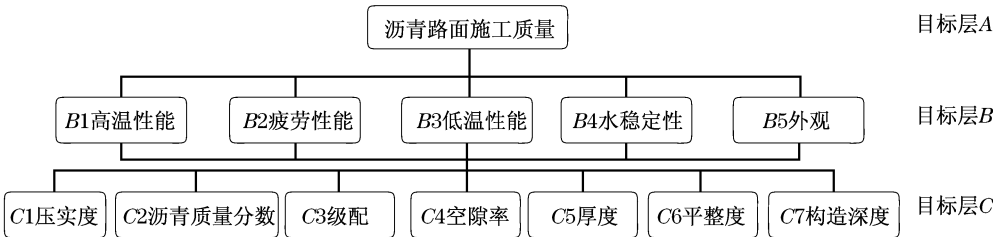


图 2 路面质量层次结构

Fig.2 Hierarchical structure of asphalt pavement quality

(2) 建立判断矩阵. 判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 以上一层的某一要素作为评价准则对本层的要素进行两两比较来确定的, a_{ij} 值采用 Saaty 建立的 9 标度法^[11] 予以确定. 矩阵 A 满足 $a_{ij} > 0$ 且 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 的正互反矩阵(易知 $a_{ji} = 1, i = 1, \dots, n$). 在本文中采用谢菲尔德法, 要求专家团成员根据安徽省条件独立给出 B 层相对于 A 层($B \sim A$)和 C 层相对于 B 层($C \sim B$)的判断矩阵. 其中一专家给出 $B \sim A$ 的判断矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 5 & 4 & 5 \\ 1/5 & 1 & 3 & 1 & 4 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/2 & 2 \\ 1/4 & 1 & 2 & 1 & 4 \\ 1/5 & 1/4 & 1/2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

(3) 相对重要度计算和一致性检验. 相对重要度的计算是在判断矩阵的基础上计算整层要素的相对重要度. 应用和积法求取特征向量. 计算步骤为:

①将判断矩阵每一列归一化: $\bar{a}_{ij} = a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj} (i = 1, 2, \dots, n)$, 得关于 \bar{a}_{ij} 的矩阵 $\bar{A} = (\bar{a}_{ij})_{n \times n}$, $\bar{A} =$

0.54	0.66	0.43	0.59	0.31
0.11	0.13	0.26	0.15	0.25
0.11	0.04	0.09	0.07	0.13
0.14	0.13	0.17	0.15	0.25
0.11	0.03	0.04	0.04	0.06

②对按

列归一化的判断矩阵按行求和得 $\bar{W}_i, \bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, \bar{W}_1 = 2.54, \bar{W}_2 = 0.99, \bar{W}_3 = 0.44, \bar{W}_4 = 0.84, \bar{W}_5 = 0.28$. ③将向量 $\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_5]^T$ 归一化, 得特征向量, 即权重系数, $W_1 = \bar{W}_i / \sum_{i=1}^5 \bar{W}_i = [0.51 \ 0.18 \ 0.09 \ 0.17 \ 0.06]^T$. ④计算最大特征根 $\lambda_{\max}, \lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n (AW)_i / (nW_i)$, 得 $\lambda_{\max} = 5.23, (AW)_i$ 表示向量 AW 的第 i 个分量. ⑤一致性检验. 一致性检验的目的是避免所建立的判断矩阵出现逻辑错误. 计算一致性检验指标 $C_1, C_1 = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (5.23 - 5) / (5 - 1) = 0.058$, 再根据该层要素数量查平均随机一致性指标 R_1 值, R_1 值是 500 个随机样本矩阵的 C_1 平均值, 由 Saaty 计算给出. 最后计算一致性比例 $C_R, C_R = C_1 / R_1 = 0.058 / 1.12 = 0.051$. 一般规定, 当 $C_1 < 0.10$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的, 说明各矩阵中两要素间相对于上一层的重要性比值的选择符合逻辑性要求, 否则应对判断矩阵作适当修正.

因此, 上述判断矩阵具有满意的一致性, 是可接受的. 按照以上 5 个步骤可依次计算 C 层对于 B 层要素的判断矩阵 $C \sim B_j, j = 1, \dots, 5$ 的权重, 由于篇幅限制, 略去各专家给出的判断矩阵及计算.

(4) 综合重要度的计算和检验. 层次分析法的最终目的是要得到最低层中各方案对于目标层的排序权重即综合重要度, 在得到一层元素对其上一层中某元素的权重后要将单准则下的权重进行合成. 综合重要度的计算要自上而下地将单准则下的权重进行合成.

在本案中: 上一层次(B 层)包含 B_1, \dots, B_5 共 5 个因素, 它们的层次总排序权重分别为 b_1, \dots, b_5 ; 下一层次(C 层)包含 7 个因素 C_1, \dots, C_7 , 它们关于 B_j 的层次单排序权重分别为 c_{1j}, \dots, c_{7j} . 那么 C 层中各因素关于总目标 A 层的权重为 c_1, \dots, c_7 , 即 $c_i = \sum_{j=1}^5 C_1(j) b_j, i = 1, \dots, 7$. 当 C 层中与 B_j 对应的判断矩阵通过一致性检验, 求得单排序一致性指标 $C_1(j), j = 1, \dots, 5$ 及相应的平均随机一致性指标 $R_1(j)$, 则 C 层总排序随机一致性比例为

$$C_R = \sum_{j=1}^5 C_1(j) b_j / \sum_{j=1}^5 R_1(j) b_j$$

当 $C_R < 0.10$ 时, 认为层次总排序结果具有较满意的一致性并接受该分析结果. 易知, 在本案中若通过单排序一致性检验, 总排序一致性检验必能合格.

(5) 确定权重. 按照上述 4 个步骤可以得到专家团各成员对评价指标的权重判断结果. 但由于专家的认识和经验上的差异, 判断结果或多或少存在一点偏颇. 为了消除主观影响, 采用平均法对按式(3)各专家得出的判断结果进行无差别平均化. 得到各项指标最终权重, 见表 5.

表 5 各指标权重
Tab.5 Weight of each quality characteristic

方案层	高温性能	疲劳性能	低温性能	水稳定性能	外观	综合权值
沥青质量分数	0.21	0.22	0.25	0.19	0.14	0.20
级配	0.21	0.22	0.19	0.19	0.12	0.20
空隙率	0.17	0.15	0.17	0.22	0.09	0.17
压实度	0.21	0.20	0.21	0.23	0.15	0.21
路面厚度	0.09	0.09	0.08	0.08	0.10	0.10
平整度	0.06	0.09	0.05	0.05	0.29	0.07
构造深度	0.04	0.04	0.05	0.04	0.12	0.05

$$\bar{f}_i = (f_{i1} + f_{i2} + f_{i3} + \cdots + f_{im})/m \quad (3)$$

式中: \bar{f}_i 为某一评价指标权重的均值; $f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}, \cdots, f_{im}$ 为由各位专家给出的判断矩阵得出的权值; m 为专家数量. 准则层中的权重分别为: 高温性能 0.51, 疲劳性能 0.17, 低温性能 0.09, 水稳定性 0.17, 外观 0.06.

(6) 沥青路面施工质量综合评分公式. 依据表 5 中各评价指标权重及相应质量度量方法, 建立表面层沥青路面施工质量综合评价式(4), 根据相同质量指标权重相等的原则, 在式(4)中减去平整度和构造深度指标, 得沥青路面其他层位综合评价式(5).

$$P_c = 0.20P_{WL1} + 0.20P_{WL2} + 0.17P_{WL3} + 0.21P_{WL4} + 0.10P_{WL5} + 0.07P + 0.05P_{WL6} \quad (4)$$

$$P_{ci} = 0.23P_{WL1} + 0.23P_{WL2} + 0.24P_{WL4} + 0.19P_{WL3} + 0.11P_{WL5} \quad (5)$$

表 6 沥青路面施工质量评定结果
Tab.6 Evaluation results of asphalt pavement construction quality

评价指标	沥青质量分数	级配	空隙率	压实度	面层厚度	平整度	构造深度比	各层评分	均值
前标	上面层	95.3	88.6	94.2	81.2	71.1	93.3	100.0	88.5
	中面层	98.5	75.9	79.6	80.1	74.2			82.6
	下面层	88.4	84.4	84.3	79.4	81.4			83.8
后标	上面层	75.0	83.3	84.2	66.3	58.3	85.0	91.3	76.2
	中面层	81.4	92.3	84.5	56.5	66.1			76.8
	下面层	75.3	80.5	86.7	66.2	63.5			75.2

从评分结果来看, 该高速前标路面施工质量略优于后标, 对两标段行车道进行车辙调查, 发现前标平均车辙深度为 1.5 cm, 明显小于后标车辙的 3.5 cm, 而且后标的其他损坏如坑槽、裂缝等也多于前标. 说明笔者提出的评价模型在一定程度上能够区分路面使用性能的优劣.

4 结语

沥青路面施工质量评价模型的准确性与合理性直接关系到沥青路面质量目标的形成. 笔者根据安徽省的自然气候环境特征, 在原有沥青路面施工质量评价模型的基础上, 通过调整评价指标组成, 引进 PWL 法代替原有的合格率法量化各指标的质量, 建立了针对沥青路面不同层位的施工质量评价模型, 采用层次分析法计算了模型中各指标的权重, 最后通过工程实例说明该模型对路面质量具有一定的鉴别力. 但鉴于参考案例有限, 提出的质量评价模型还

式中: P_c 为表面层沥青混合料施工质量综合得分; P_{WL}, P_{WLi} 分别为表面层和其他层位某项质量特性指标的 PWL 计算值, 下标 1 代表沥青质量分数, 2 代表级配, 3 代表空隙率, 4 代表压实度, 5 代表厚度, 6 代表构造深度; P 为表面层平整度指标的合格率评分值; P_{ci} 为其他层位沥青混合料施工质量综合得分.

3 评价模型的工程应用

选取安徽省已建某高速公路 2 个标段(简称前标和后标)采用上述模型进行评价. 两标段路面结构设计相同, 同为半刚性基层路面、3 层沥青面层. 完工路面检测数据通过两标段停车带路面全厚检测获取, 其他检测数据取自施工过程中的抽检资料. 将各类数据进行汇总计算, 计算得各标段路面质量评定结果见表 6.

需通过更多的实践应用来加以验证和完善.

参考文献:

[1] 李立寒, 郭亚兵, 郑航, 等. 级配组成与沥青混合料体积参数的关系[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(6): 631.
LI Lihan, GUO Yabing, ZHENG Hang, et al. Study on relationship between gradation and volume parameters of asphalt mixes [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8 (6): 631.

[2] 李立寒, 曹林涛, 郭亚兵, 等. 初始空隙率对沥青混合料性能影响的实验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34 (6): 760.
LI Lihan, CAO Lintao, GUO Yabing, et al. Influence of initial air void on performance of asphalt mixtures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(6): 760.

[3] 李立寒, 麻旭荣. 级配离析沥青混合料性能的试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(12): 1625.
LI Lihan, MA Xurong. Influence research of gradation segregation on performance of asphalt mixture [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(12): 1625.

- [4] Burati J L, Weed R M, Hughes C S. Optimal procedures for quality assurance specifications [R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2003.
- [5] Hughes C S. NCHRP Synthesis 346: State construction quality assurance programs [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2005.
- [6] Burati J L, Weed R M, Hughes C S, et al. Evaluation of procedures for quality assurance specifications [R]. [S. l.]: Clemson University; Federal Highway Administration, 2004.
- [7] Hughes C S. What in world is PWL [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2006, 75: 853.
- [8] 章毅. 基于 PWL 的沥青混合料质量评定方法 [J]. 公路与汽运, 2009(2): 93.
- ZHANG Yi. Asphalt pavement construction quality measure based on PWL [J]. Highways & Automotive Applications, 2009 (2): 93.
- [9] U. S. Department of Defense. Military Standard 414, Sampling procedures for inspection by variables for percent defective [S]. Washington D C: Department of Defense of U. S. , 1957.
- [10] 安徽省交通基本建设工程质量监督站, 同济大学. 沥青路面施工质量变异水平及控制标准的探讨 [R]. 合肥: 安徽省交通基本建设工程质量监督站, 2005.
- Quality Monitoring Station of Transportation Capital Construction of Anhui Province, Tongji University. Research on the variation of construction and control standards of asphalt pavement [R]. Hefei: Quality Monitoring Station of Transportation Capital Construction of Anhui Province, 2005.
- [11] 安徽省交通基本建设工程质量监督站, 同济大学. 沥青路面施工质量管理方法研究 [R]. 合肥: 安徽省交通基本建设工程质量监督站, 2009.
- Quality Monitoring Station of Transportation Capital Construction of Anhui Province, Tongji University. Investigation of asphalt pavement construction quality management [R]. Hefei: Quality Monitoring Station of Transportation Capital Construction of Anhui Province, 2005.
-
- (上接第 246 页)
- FENG Jiliang, XU Aihua, XI Xiaobo. Visco-elastic method for prediction of asphalt pavement rutting [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(5): 12.
- [8] 延西利, 扈惠敏, 张登良. 沥青混合料线性流变模型的数值模拟 [J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(1): 7.
- YAN Xili, HU Huimin, ZHANG Dengliang. Numerical simulation for linear rheological model of bituminous mix [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(1): 7.
- [9] 李辉, 黄晓明, 张久鹏, 等. 基于连续变温的沥青车辙分析 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(5): 916.
- LI Hui, HUANG Xiaoming, ZHANG Jiupeng, et al. Simulation analysis on rutting of asphalt pavements considering consecutive temperature variation [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(5): 916.
- [10] HKS. ABAQUS theory manual [M]. Pawtucket: Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc, 2002.
- [11] 黄仰贤. 路面分析与设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- HUANG Yangxian. Pavement analysis and design [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [12] 李海军, 黄晓明. 重载条件下沥青路面按弯沉等效的轴载换算 [J]. 公路交通科技, 2004(7): 5.
- LI Haijun, HUANG Xiaoming. Axle load conversion formula based on deflection equivalent for semi-rigid base asphalt pavement under heavy-load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004(7): 5.