

文章编号:1671-8879(2008)03-0006-05

基于分形理论的沥青混合料抗滑级配评价

赵战利^{1,2}, 张争奇¹, 薛建设³, 王秉纲¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 西北民航管理局 机场建设监理咨询有限责任公司, 陕西 西安 710082;

3. 西安市公路勘察设计院, 陕西 西安 710075)

摘 要:为了研究沥青混合料抗滑级配的评价方法, 分析了分形理论在级配评价中的作用和原理; 在对常用抗滑级配分形特征参数求取和分析的基础上, 探讨了分维数和相关系数在级配评价中的识别作用, 在此基础上提出了抗滑级配的双参数定量评价模式。采用此模型估算出的抗滑级配分维数及矿粉质量分数的合理范围分别为 2.50~2.60 和 6%~10%。

关键词:道路工程; 沥青混合料; 抗滑; 级配; 分形理论

中图分类号:U414.75

文献标志码:A

Evaluation of skid resistance gradations of asphalt mixture based on fractal theory

ZHAO Zhan-li^{1,2}, ZHANG Zheng-qi¹, XUE Jian-she³, WANG Bing-gang¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an

University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Supervision and Consult Co Ltd of Airport

Construction, Northwest Administration of Civil Aviation, Xi'an 710082, Shaanxi, China; 3. Xi'an

Institute of Highway Survey and Design, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the evaluation method of skid resistance gradations of asphalt mixture, the fractal theory was applied to the evaluation, and the principle of evaluation with fractal theory was researched. The fractal characteristic parameters of common skid resistance gradations were presented, the fractal dimensions and relative factors were put forward in the evaluation of skid resistance gradations. The quantitative evaluation model with two parameters of skid resistance gradations was developed. With this model, the variable range of fractal dimension of skid resistance gradations is from 2.50 to 2.60, the variable range of mineral filler mass ratio is from 6% to 10%. 3 tabs, 5 figs, 8 refs.

Key words: road engineering; asphalt mixture; skid resistance; gradations; fraction theory

0 引 言

抗滑性能是沥青路面的重要使用性能之一, 它

同路表面的构造特征有密切的关系, 一般而言, 粗糙的路面更易获得良好的抗滑性能。传统密级配难以满足安全行车对路面构造的要求, 因此出现了各具

收稿日期: 2007-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(50478095); 国家西部交通建设科技项目(200631881221)

作者简介: 赵战利(1972-), 男, 陕西西安人, 西北民航管理局高级工程师, 长安大学博士研究生, E-mail: zhaochenzichen@sohu.com

特色的抗滑级配,如 SMA、OGFC 和 AK 等。理想的抗滑级配能在路面抗滑性能与温度稳定性、耐久性之间实现“平衡”^[1]。由于集料加工破碎的随机性,同一筛孔规格矿料颗粒的几何形状、特征尺寸并不完全相同,粒径分布呈现一定的随机性和不规则性,很难用常规数学语言准确描述。即使按同一抗滑级配配制,所得混合矿料尽管相似却不尽相同,故评价不同抗滑级配时,某筛孔的通过率并不是最好的标准,而必须寻找能够反映这种不规则性的指标和分析方法。分形是研究自然界中大量存在的不规则现象的新的理论工具,已在计算机图形学、物理化学和地质地貌学等很多领域广泛应用,为具有统计自相似性不规则体的描述和评价提供了新的手段^[2],目前已被引入路面材料形态描述、分布特征和性能评价等方面的研究^[3-5]。本文运用分形级配理论,在常用抗滑级配分形特征参数分布规律及影响因素分析的基础上^[6-8],提出采用分维数和相关系数相结合的方式对抗滑级配进行定量评价,并根据路面抗滑性能与其他路用性能协调一致的原则,估算出抗滑级配分维数和矿粉质量分数的合理范围。

1 分形和分形级配理论

1.1 分形体的识别

一般地,一个系统满足如下的幂律定义,则可以认为它是一个分形,其表达式为

$$F(\epsilon) = F_0 \left(\frac{\delta}{\delta_{\max}} \right)^{-(D-d)} \quad (1)$$

式中: $F(\epsilon)$ 为几何图形的长度、面积或体积; F_0 为对应整形($D=1$)时的情况; δ 为长度尺码; ϵ 为无量纲尺码长度; D 为分形维数; d 为拓扑维数,对分形曲线, $d=1$,对分形曲面, $d=2$,对三维分形体, $d=3$ 。分维数 D 和拓扑维数 d 之差在一定程度上反映了系统的无序程度。

1.2 分形级配理论公式

集料级配一般以不同筛孔通过率的方法给出,为了理论推导的需要,假设各级筛孔上集料颗粒为大小相等的刚性球体。事实上集料的大小分布并不像假设的那样有规则,即便是同一筛孔上的集料其尺寸分布也不完全一样,而是呈现出一定的分形特征。

定义沥青混合料质量分布函数为

$$P(x) = \frac{M(x)}{M_0} \quad (2)$$

式中: $P(x)$ 为集料质量分数; $M(x)$ 为粒径不大于 x 的集料质量; M_0 为集料总质量。

已知集料粒径分布为分形^[4],假设其对应体积分布也是分形,则其拓扑维数 $d=3$,由式(1)有

$$V(x) = V_0 \left(\frac{x}{x_{\max}} \right)^{-(D-3)}$$

$$dV(x) = -V_0(D-3) \left(\frac{1}{x_{\max}} \right)^{-(D-3)} x^{-(D-2)} dx$$

式中: $V(x)$ 为粒径不大于 x 的集料颗粒体积; V_0 为整形($D=1$)时的体积; x_{\max} 为最大筛孔尺寸; $dV(x)$ 为区间 $(x, x+dx)$ 内集料颗粒的体积。

根据定义有

$$M(x) = \int_{x_{\min}}^x \rho dV(x) =$$

$$-V_0 \rho (D-3) \left(\frac{1}{x_{\max}} \right)^{-(D-3)} \int_{x_{\min}}^x x^{-(D-2)} dx =$$

$$-V_0 \rho \left(\frac{1}{x_{\max}} \right)^{-(D-3)} (x^{-(D-3)} - x_{\min}^{-(D-3)})$$

式中: ρ 为集料密度; x_{\min} 为最小筛孔尺寸。

于是当 $x = x_{\max}$ 时,有

$$M_0 = -V_0 \rho \left(\frac{1}{x_{\max}} \right)^{-(D-3)} (x_{\max}^{-(D-3)} - x_{\min}^{-(D-3)})$$

故有

$$P(x) = \frac{x^{-(D-3)} - x_{\min}^{-(D-3)}}{x_{\max}^{-(D-3)} - x_{\min}^{-(D-3)}} \quad (3)$$

式(3)即为用集料质量分数表示的集料级配分形表达式,不同值对应不同的级配组成,如图1所示。随着 D 值的增大,级配逐渐由开级配向密级配过渡,图中同时标出了 DAC-16 上、下限级配曲线,经试算符合 DAC-16 范围的分形级配维数为 2.40~2.55。

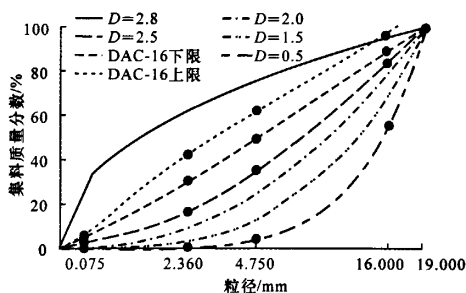


图1 分形理论确定的级配曲线

1.3 不同级配参数的统一

目前常用的级配设计方法有 N 法、 K 法和 I 法,这些方法尽管表现形式不同,但本质上都是反映具有分形特征的集料分布状态,将式(3)经过简单变换后与其他级配表达式比较,得到各级配特征参数与级配分维数 D 的关系,如表1所示,相应地也给出了 DAC-16 的参数范围。可见,级配分维数反映了混合集料的分布规律,可以作为级配的评价参数。

表 1 不同级配设计与级配分维数的关系

项 目	N 法	K 法	I 法	D 法
计算公式	$P(x) = \left(\frac{x}{x_{\max}}\right)^n$	$P(x) = \left(\frac{k^{3.32\lg(x_{\max}/x_{\min})} - k^{3.32\lg(x_{\max}/x)}{k^{3.32\lg(x_{\max}/x_{\min})} - 1}\right)^n$	$P(x) = i^{3.32\lg(x_{\max}/x)}$	$P(x) = \frac{x^{-(D-3)} - x_{\min}^{-(D-3)}}{x_{\max}^{-(D-3)} - x_{\min}^{-(D-3)}}$
参数换算	$n = 3 - D$	$k = 10^{(D-3)/3.321}$	$i = \left(\frac{1}{2}\right)^{-(D-3)}$	D
DAC-16 值范围	0.45 ~ 0.60	0.659 6 ~ 0.731 9	0.659 8 ~ 0.732 0	2.40 ~ 2.55

注: n, k, i 分别为 N 法、K 法、I 法中的参数。

2 抗滑级配的分形分析

抗滑级配是以提高路面抗滑能力为目的的“功能性”级配,也具有上述级配的分形特征,因此通过分维数及相关系数的分析,可以揭示抗滑级配颗粒分布的规律性,对于差别细微的抗滑级配的比较、描述和设计都具有重要意义。

2.1 分维数

在式(3)中,当最小粒径为 x_{\min} 时,有

$$\lg P(x) \propto -(D-3)\lg x \quad (4)$$

在双对数坐标上,矿料级配曲线的斜率 k_x 与 D 有如下关系

$$k_x = -(D-3) = 3-D$$

常见的抗滑级配分维数见表 2。为便于比较,表 2 给出了 AC-I、AC-II 和 DAC-16 等几种级配。DAC-16 的分维数区间为 2.395 1 ~ 2.560 2,与式(3)试算得到的 2.40 ~ 2.55 十分接近,说明利用式(4)求 D 值是有理论依据的。

2.2 分维数与级配范围

级配范围可通过分维数区间来表示,级配上限较级配下限具有更高的分维数。不同类型级配的微小差异可以通过其上下限分维数及平均值之间的差异来反映,AC-16I 比 AC-16II 的 4.75 mm 通过率大,级配整体偏细,因此对应的分维数都较大,这与图 1 所示的规律是一致的。AK-16A 和 AK-16B 的情况与此类似;DAC-16 在范围上涵盖了 AC-16I 和 AC-16II 的大部分,因此表现为其平均分维数和二者分维数平均值相当。

2.3 分维数与沥青混合料结构

沥青混合料不同的结构特征也可通过分维数的差异来估计。最大公称粒径 16 mm 的矿料级配分维数分布范围为 2.28 ~ 2.61,骨架密实型混合料分维数最大(如 SMA),悬浮密实型次之(如 DAC 和 AC、AK 型),骨架空隙型最小(如 OGFC);SAC 混合料结构介于骨架密实和悬浮密实之间,因此也具有较大的分维数。

表 2 不同级配的分形回归计算

级配名称		斜率 k_x	相关系数 R^2		级配分维数 D	
			数值	平均值	数值	平均值
DAC-16	上限	0.439 8	0.990 1	0.986	2.560 2	2.478
	下限	0.604 9	0.982 1		2.395 1	
AC-16I	上限	0.424 0	0.981 6	0.987	2.576 0	2.514
	下限	0.547 3	0.993 3		2.452 7	
AC-16II	上限	0.515 7	0.993 5	0.994	2.484 3	2.387
	下限	0.711 0	0.994 1		2.289 0	
SAC-16	上限	0.409 7	0.961 8	0.962	2.590 3	2.540
	下限	0.509 4	0.962 5		2.490 6	
AK-16A	上限	0.428 0	0.994 0	0.990	2.572 0	2.505
	下限	0.561 7	0.985 2		2.438 3	
AK-16B	上限	0.482 3	0.996 8	0.983	2.517 7	2.447
	下限	0.624 1	0.969 6		2.375 9	
SMA-16	上限	0.399 0	0.908 3	0.885	2.601 0	2.576
	下限	0.449 1	0.861 7		2.550 9	
OGFC-16	上限	0.514 8	0.960 2	0.940	2.485 2	2.381
	下限	0.723 2	0.919 6		2.276 8	

空隙率是反映混合料结构的特征参数之一,级配分维数 D 与对应的空隙率 V_a 存在一定的统计相关性(图 2),其回归方程为

$$V_a = 582\ 324e^{-4.636\ 2D}, R^2 = 0.634\ 7 \quad (5)$$

图 2 中数据点分布总的趋势是:随着分维数的增加,沥青混合料空隙率有减小的趋势;二者相关系数 R^2 相对较低,只有 0.634 7,大多数密实级配上限分维数值较大,相关性也较好;而开级配或半开级配下限相对较粗,分维数值较小,数据点离散性较大,矿粉质量分数较低且差异很大是这种无序性的主要原因。良好的抗滑级配混合料不但要有满意的构造特征,而且能够在路面稳定性、抗滑性和耐久性之间维持“平衡”。理想的模式是粗集料形成骨架,细集料和沥青胶浆填充其间形成骨架密实结构。据统计,沥青混合料保持各种性能均衡时,空隙率为 3% ~ 6%,根据图 2 的分析结果,对应的分维数值范围应该控制为 2.50 ~ 2.60。

不同混合料具有不同强度特性,骨架密实型兼

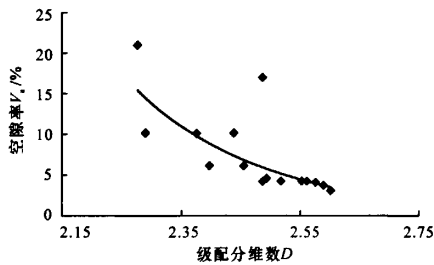


图 2 空隙率与级配分维数的关系

具强度和稳定性两方面的优点,悬浮密实型次之,骨架空隙型最差,从这一点推理,级配分维数似乎又可能与结构强度相关联。

2.4 分维数与矿粉质量分数

分维数与矿料级配的分布有关,在一定程度上反映矿料体系内部的不规则程度,级配矿料中比表面积越大,体系的不规则性也就越显著,对应分维数值也就越大。因此在矿料级配中,尽管矿粉质量分数很小,但对分维数值影响要较细集料质量分数显著得多;矿粉质量分数增加,分维数变大,这种趋势在矿粉质量分数较小时更加明显,如图 3、图 4 所示。分维数和矿粉、细集料质量分数的回归方程为矿粉

$$D = 0.185 \ln[P(0.075)] + 2.1663$$
$$R^2 = 0.9723 \tag{6}$$

细集料

$$D = 2.0041[P(0.075)]^{0.0598}$$
$$R^2 = 0.3710 \tag{7}$$

所以,要获得各项性能比较均衡的抗滑级配,矿粉质量分数不宜过小。根据式(6),矿粉质量分数应为 6%~10%。

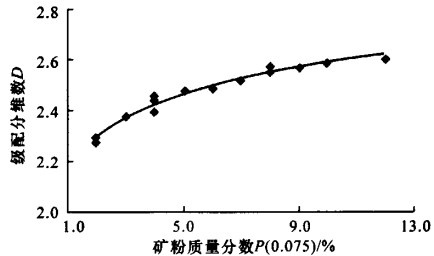


图 3 矿粉质量分数与级配分维数的关系

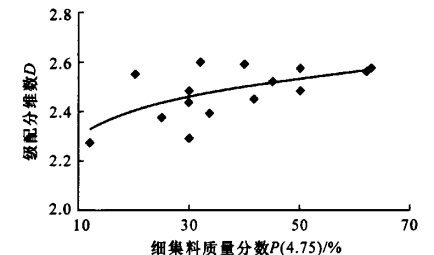


图 4 细集料质量分数与级配分维数的关系

2.5 相关系数与级配连续性

比较表 2 各级配分维数回归相关系数 R^2 可知: R^2 越大,说明级配的连续性越好。AC、AK、DAC 等级配属于连续级配的范畴,相关性最好,SAC 在连续密级配的基础上吸收了部分骨架密实级配(SMA)的优点,相关性略低一些;OGFC 和 SMA 都属于间断级配,粗集料都具有相似骨架结构,而细集料之间的差别使 SMA 的间断程度更为显著,因此 SMA 的相关性最差。

其更深层的原因是: R^2 反映矿料级配分形度的大小,其值越大,说明级配的实际组成与级配分形理想模型式(3)拟合的程度越高,连续级配与级配分形的前提相近,一般都具有较高的相关系数;间断级配由于在某一档或几档断开或接近断开,使原本一个具有分形特征的散料体系裂断成两个或多个更小的分形体系,也即分形体存在的统计意义上的无标度区上下限发生变化,因此在同一尺度范围内间断级配的相关系数明显较连续级配低。

3 抗滑级配评价

由式(3)可知,给定一个 D 值,可求得唯一的矿料级配, D 是反映级配的唯一特征参数,其大小可作为区分不同矿料级配的标准。当对两条已知级配进行分维分析时,由于 D 在双对数坐标上表示为级配曲线的回归斜率,而双对数在一定程度上可能会掩盖两种不同级配之间的微小差异而得到相同的 D 值,表面上看起来似乎破坏了分维数与矿料级配之间的唯一性,其实不然。因为被双对数坐标掩盖的那部分信息可以通过另一个增加的参量 R^2 来体现。 R^2 反应了实际级配与式(3)分形级配之间的拟合程度,其值越大,拟合程度越高,级配筛孔的的连续性也就越好。

级配分维数取决于集料级配的组成特征,并同混合料的密实度和结构特征有一定的关系。因此,可利用分形理论,通过 D 与 R^2 组合的方式来实现对抗滑级配的定量评价,即 $\{D, R^2\}$ 。其中, D 主要反映级配的组成及潜在的混合料性能方面的暗示,与级配的连续性有关, D 与 R^2 结合才能比较完整地描述一个级配,该评价方式也适合于其他级配形式的评价。

事实上,间断级配应该理解为一个多度域分形更合理,即在不同的尺度区间存在不同特征的分形,当间断级配比较接近或相关系数过低时,分维数和相关系数的组合已不能合理评价该级配,必须按不同区间来分段评价,分段越多则相关系数越大。以

SMA16 为例,根据双对数坐标上数据点的分布,在 4.75 mm 筛孔处将级配划分为粗、细两部分,并进行回归求取其维数,结果分别见图 5 和表 3。可见,经过分段回归后,SMA-16 上下限的级配分维数都比分段前有所下降,而相关系数则更大。

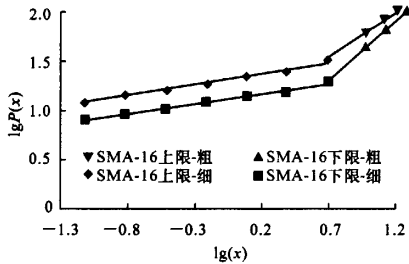


图 5 SMA-16 分段回归

表 3 SMA-16 级配的分形回归计算

级配名称	分段	相关系数 R^2		级配分维数 D	
		数值	平均值	数值	平均值
SMA-16 上限	粗集料	0.976 6	0.977 6	2.138 2	2.455
	细集料	0.978 6		2.772 1	
SMA-16 下限	粗集料	0.996 2	0.988 1	1.813 3	2.300
	细集料	0.980 0		2.787 5	

因此,在抗滑级配分形分析时,如果级配间断情况比较近似或相关系数过小时,可进一步做分段回归处理,并可采用如下的扩充方式进行级配的定量描述和比较

$\{D_1, R_1^2; D_2, R_2^2; \cdots; D_i, R_i^2; \cdots; D_n, R_n^2; i = 1, 2, \cdots, n\}$
式中: D_i, R_i^2 分别为相应 i 的分维数和相关系数。

4 结 语

(1) 由于加工过程的偶然性和随机性,连续矿料级配并不是理想模型中一系列大小不同的刚性球体的堆积,而是呈现出一定层次上的不规则分布,并且具有统计意义上的自相似特征,因此可以采用分形理论进行分析。

(2) 抗滑级配是一种分形,通过对常用抗滑级配(含比较级配)特征参数的求取和分析,明确了不同级配分维数的分布规律和主要影响因素,并根据路面抗滑性能、温度稳定性和耐久性协调均衡的理想目标,估算抗滑级配分维数及矿粉质量分数的合理取值范围,对于抗滑级配的设计和比较具有重要意义;根据抗滑级配分维数和回归相关系数的含义,提出抗滑级配的定量评价模式,并将其扩展到间断级配的评价。

(3) 给出的抗滑级配分形分析和评价方法可进一步推广到对其他级配形式的分析、比较和评价。

参考文献:

References:

- [1] 赵战利,张争奇,胡长顺.集料级配对抗滑路面抗滑性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(1):6-9.
ZHAO Zhan-li, ZHANG Zheng-qi, HU Chang-shun. Influence of gradation on anti-skidding performance of asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1): 6-9.
- [2] 张济忠.分形[M].北京:清华大学出版社,1995.
- [3] Li L, Chan P, Zollinger D G, et al. Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals[J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(4): 357-365.
- [4] 李国强,邓学钧.集料的分形级配研究[J].重庆交通学院学报,1995,14(2):38-43.
LI Guo-qiang, DENG Xue-jun. On fractal gradation of aggregate [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1995, 14(2): 38-43.
- [5] Yeggoni M, Button J W, Zollinger D G. Fractals of aggregates correlated with creep in asphalt concrete [J]. ASCE Journal of Transportation Engineering, 1996, 122(1): 22-28.
- [6] 朱梦良,赵平,高心亮,等. AK16 抗滑表层的矿料级配优化[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 10-14.
ZHU Meng-liang, ZHAO Ping, GAO Xin-liang, et al. Optimizations of aggregate gradation for AK16 anti-slide surface [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 10-14.
- [7] 陈忠达,袁万杰,高春海.多级嵌挤密实级配设计方法研究[J].中国公路学报,2006,19(1):32-37.
CHEN Zhong-da, YUAN Wan-jie, GAO Chun-hai. Research on design method of multilevel dense built-in gradation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 32-37.
- [8] 陆阳,周永江,张蓉. SMA 粗集料结构的数值模拟[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 38-41.
LU Yang, ZHOU Yong-jiang, ZHANG Rong. Numerical simulation of coarse aggregate skeleton of stone matrix asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 38-41.