

文章编号: 1002-0268 (2005) 01-0001-04

沥青混合料级配曲线走向的分形研究

陈国明¹, 谭忆秋¹, 王哲人¹, 张跃文²

(1. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2 黑龙江省伊春市五营林业局, 黑龙江 伊春 153000)

摘要: 不同级配曲线走向决定沥青混合料的结构类型, 从而影响其各项力学性能。本文以 SMA-13 为例, 在规范级配曲线范围附近选取 5 种代表性走向和 5 种随机走向, 根据分形理论定量计算这 10 种级配的分形维数。通过沥青混合料的 65℃ 车辙试验, 指出代表性级配走向的分形维数与其动稳定度是线性相关的, 提出回归公式, 根据此回归公式预测 5 种随机走向沥青混合料的动稳定度值。

关键词: 沥青混合料; 级配曲线走向; 分形维数; 动稳定度

中图分类号: U414

文献标识码: A

Fractal Study of Grading Curve Trend of the Asphalt Mixtures

CHEN Guo-ming¹, TAN Yi-qiu¹, WANG Zhe-ren¹, ZHANG Yue-wen²

(1. School of Communications Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang Harbin 150090, China;

2 Wuying Forest Bureau of Yichun City, Heilongjiang Province, Heilongjiang Yichun 153000, China)

Abstract: Different grading curve trend has determined structure type of asphalt mixtures and influenced its various mechanics properties remarkably. Taking SMA-13 as example 5 representative and 5 random grading curves were selected round the grading envelope proposed by the present specification. Then fractal dimensions of these 10 grading were calculated. Through rut formation test of 65 centigrade of asphalt mixtures, this paper indicated that fractal dimensions were highly linear correlation to its dynamic stabilities of 5 representative curve trend. Then the regression formula was put forward. Finally dynamic stabilities of 5 random trends of asphalt mixtures were forecasted by using this formula.

Key words: Asphalt mixtures; Grading curve trend; Fractal dimension; Dynamic stability

0 引言

近年来, 我国高速公路建设迅猛发展, 90% 以上路面结构采用沥青面层。沥青路面的性能是影响道路性能的关键因素, 而沥青混合料中矿料部分占到混合料总重的 95% 左右, 矿料分布情况直接决定沥青混合料的结构类型, 进而影响沥青混合料的一系列物理力学性能。在沥青混合料配合比设计过程中, 其它条件不变的情况下, 确定矿料级配时, 要根据矿料供应情况, 根据经验和设计要求首先在规范推荐的范围内

选定某个级配走向, 然后进行一系列物理力学性能试验, 如果满足相应的指标要求即可, 否则调整矿料级配直至其沥青混合料的物理力学性能满足相应的要求为止。

由于规范推荐的矿料级配范围比较宽, 在此范围内由于各粒径含量的变异会呈现不同的级配走向如图 1, 不同级配走向形成不同结构类型的沥青混合料, 如悬浮-密实型、骨架-空隙型和骨架-密实型, 这 3 种典型结构类型的沥青混合料的力学性能相差非常大。按照通常的配合比设计方法来确定矿料级配时, 不仅

试验具有较大的盲目性、试验量大,而且不能充分预测不同矿料级配走向的沥青混合料性能,无法定量描述矿料的不同级配走向。因此,有必要定量研究沥青混合料矿料级配的不同走向,初步预测不同级配走向与沥青混合料性能之间的关系,以减少沥青混合料配合比设计过程的盲目性和繁重的工作量,指导沥青混合料配合比设计^[1,2]。

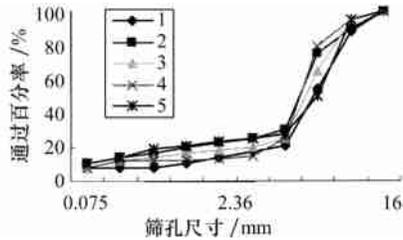


图1 SMA-13 五种代表性级配走向

本文以 SMA-13 沥青混合料为例,在规范级配曲线范围附近选取了 5 种代表性走向和 5 种随机走向,根据分形理论定量计算这 10 种级配曲线走向的分形维数。通过 65℃ 车辙试验,指出代表性级配走向的分形维数与其动稳定度是线性相关的,提出了回归公式,并根据此回归公式预测了 5 种随机走向沥青混合料的动稳定度值,通过与实测动稳定度进行比较,验证了此回归公式的正确性。

1 分形理论简介

法国数学家 Mandelbrot 通过对许多形状复杂的不规则物体进行仔细观察和综合分析后提出了分形的概念,并首创了分形理论。它的两个基本特性是自相似性和分形维数。自相似性是局部和整体具有相似的性质,体现了分形具有跨越不同尺度的对称性。分形维数简称为分维,其变化是连续的,它定量描述了分形结构自相似程度、不规则程度或破碎程度^[3,4]。

1.1 集料分布的分形理论

由分形理论的研究可知,虽然岩石破碎的物理过程十分复杂,表现出一定的随机性和不规则性,但其尺度具有不变性。不论是大的岩石破碎成小的岩石,还是小的岩石破碎成更小的岩石,其动力学机制是一样的,颗粒粒径的分布是分形的,可用分形维数度量。

1.2 分形维数的计算

假定颗粒分布满足:

(1) 幂次律

$$N(r) = kr^{-D} \quad (1)$$

式中, $N(r)$ 是特征尺寸大于 r 的颗粒的数目; k 、 D 均为待定常数。

(2) Weibull 分布模型

$$\frac{M(r)}{M_T} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{r}{\sigma}\right)^\alpha\right] \quad (2)$$

式中, $M(r)$ 是半径小于 r 的颗粒总质量; M_T 是所有颗粒的质量; σ 是与平均半径有关的量,通常取颗粒最大粒径; α 是待定常数,称为 Weibull 模量。

如果 $\frac{r}{\sigma} \ll 1$, 则 (2) 式可以化简为常用的幂次律

$$\frac{M(r)}{M_T} = \left(\frac{r}{\sigma}\right)^\alpha \quad (3)$$

对 (3) 式微分, 得

$$dM \sim r^{\alpha-1} dr \quad (4)$$

对 (1) 式微分, 得

$$dN \sim r^{-D-1} dr \quad (5)$$

因为 $M(r) \sim V(r) \sim N(r)r^3$, 所以就 $M(r)$, $N(r)$ 的增量而言有

$$dM(r) \sim r^3 dN(r) \quad (6)$$

将 (4)、(5) 式代入 (6) 式, 得

$$r^{\alpha-1} \sim r^{-D-1} \cdot r^3 \quad (7)$$

即

$$D = 3 - \alpha \quad (8)$$

因此, 由 (3) 式得

$$\sigma = r \left[\frac{M(r)}{M_T} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (9)$$

取对数

$$\alpha = \ln \frac{M(r)}{M_T} / \ln \frac{r}{\sigma} \quad (10)$$

利用最小二乘法, 作最佳曲线拟合, 求待定常数 α 、 σ , 再利用式 (8) 可以求出分形维数 D 。

2 试验设计及分析

2.1 原材料

沥青: 壳牌 70 号沥青; 集料: 粗集料为花岗岩, 细集料为天然砂; 改性剂: 抗剥落剂、木质素纤维 (掺量均为 0.4%); 填料: 石灰石矿粉。

2.2 级配选择及分析

2.2.1 级配选择

采用 SMA-13, 在规范推荐的矿料级配曲线范围附近选定了 10 种级配。其中 1~5 号为代表性级配走向如表 1 和图 1, 这 5 个级配走向涵盖了规范范围附近所有可能的级配走向, 其含义为: 1 为接近规范建议的级配曲线范围下限, 2 为接近上限, 3 为接近中值, 4 为从 0.075~16mm 筛孔, 级配曲线由下限向上限, 5 为从 0.075~16mm 筛孔, 级配曲线由上限向下限; 6~10 号级配走向在规范范围附近随机选取, 如

表 1 和图 2 所示。

2.2.2 级配分析

由于 1~5 号为代表性级配走向, 因此本文只对这 5 种级配进行分析。1 号级配与规范级配的下限基

表 1 SMA-13 级配曲线走向及分形维数

筛孔/mm	级配代码										规范级配		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	下限	上限	中值
0.075	8	10	8	8	10	11	10	10	12	10	8	12	10
0.15	8	14	12	12	14	12	15	12	12	15	8	15	11.5
0.3	8	16	14	12	19	14	17	14	14	15	10	16	13
0.6	10	20	16	12	21	16	19	16	16	18	12	20	16
1.18	14	22	18	13	23	18	22	18	18	21	14	24	19
2.36	17	25	20	15	25	23	25	20	20	25	15	26	20.5
4.75	21	30	25	25	28	27	30	35	30	32	20	32	26
9.5	54	75	65	79	50	78	70	88	80	70	50	75	62.5
13.2	88	90	95	95	95	85	85	95	95	95	90	100	95
16	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
油石比/%	5.7	6.0	6.4	6.0	5.6	5.7	5.7	6.0	5.6	6.0			
动稳定度/次·mm ⁻¹	166	1130	566	663	1277	810	1128	592	710	854			
分形维数 <i>D</i>	2.526	2.596	2.540	2.559	2.628	2.586	2.610	2.556	2.584	2.592	2.530	2.608	2.576

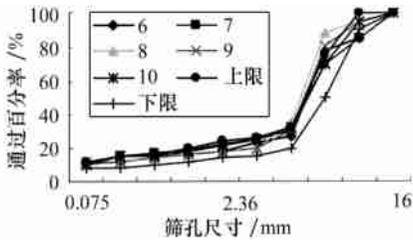


图 2 SMA-13 五种随机选取的级配走向

本相同, 但在 0.075~0.3mm 间断档, 填充骨架的细集料数量最少, 而用于形成骨架的 9.5~16mm 粗集料含量较多; 2 号级配在 13.2mm 筛孔的通过百分率与规范级配上限相差较大, 其余筛孔基本一致, 虽然其细集料数量较多, 但主要用于形成骨架的 9.5~16mm 间颗粒含量较少; 3 号级配与规范级配中值基本一致, 各颗粒含量适中; 4 号级配在 0.15~0.6mm 之间断档, 其中间粒径 1.18~4.75mm 颗粒含量最多, 在 9.5mm 筛孔通过百分率超出规范推荐范围上限 4%, 用于形成骨架的 9.5~16mm 间颗粒含量最少; 5 号级配在 0.3mm 处超出规范级配上限 3%, 1.18mm 以下细集料最多, 中间尺寸 1.18~4.75mm 含量最少, 用于形成骨架的 9.5~16mm 间颗粒含量最多, 级配呈 S 型走向。

通过上述分析, 由沥青混合料填充理论可知, 由于 1~5 号级配曲线走向各不相同, 因此容易形成各不相同的结构类型, 其中 5 号级配最容易形成紧密嵌挤骨架-密实型结构骨架; 1 号级配最容易形成松排骨架-空隙型结构, 空隙率过大; 2 和 3 号级配容易形成悬浮-密实型结构; 4 号级配的混合料容易形成紧排骨架-空隙型结构。

2.3 粒径分布的分形维数

按照上述分形理论分别计算规范级配的上、中、下限和 10 种自选级配粒径分布的分形维数 *D* 见表 1。

可见, SMA-13 级配范围附近不同粒径分布的分形维数 *D* 值在 2.526~2.628 间。其中 5 种代表性级配走向的 *D* 值差别较大, 以 5 号级配走向的 *D* 值最大。将表 1 中计算的 13 个级配的分形维数与其 2.36mm 的通过百分率分别绘制在图 3 中, 可见二者有较好的线性相关性, 其相关系数 *R* 高达 0.926 0, 即在不同的级配走向中, 2.36mm 筛孔的通过百分率对其粒径分布的分形维数影响程度最大。

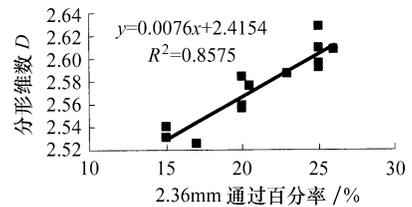


图 3 分形维数与 2.36mm 通过百分率

2.4 车辙试验分析

车辙试验是用来评定沥青混合料高温稳定性能的, 在高温条件及其它条件不变的情况下, 沥青混合料的抗车辙能力主要依赖于粗集料之间的嵌挤作用和细集料的填充是否密实, 而不同级配曲线走向沥青混合料的结构类型有所不同, 所以本文选取车辙试验分析不同级配走向的沥青混合料性能。

为此, 本文对 1~10 号级配曲线走向的 SMA-13 沥青混合料进行了 65℃ 的车辙试验, 测得相应的动稳定度值见表 1, 其中每个动稳定度为 3 个试件的平均值。

图 4 为 5 种代表性级配走向的动稳定度 *DS* 与分

形维数 D 的关系, 可见, 二者具有非常好的线性相关性, 其相关系数 $R=0.9694$, 计算得到最小二乘回归公式如图 4。根据此回归公式对 6~10 号级配的动稳度进行预测如表 2 所示, 并与实测动稳度进行对比, 其绝对差值在 28~196 之间。其中 7、8 号级配的预测值与实测值的相对差仅为 4.7% 和 4.8%, 非常准确; 6、10 号级配的相对差均小于 20%, 只有 9 号级配的相对差值为 27.6%, 误差较大。可见, 按照此回归公式预测规范范围附近不同级配走向沥青混合料的动稳度比较准确。

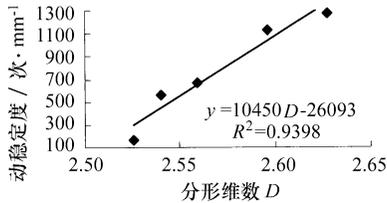


图 4 分形维数与动稳度关系

表 2 6~10 号级配计算和实测动稳度对比

级配	6	7	8	9	10
计算动稳度 DS_j /次 \cdot mm $^{-1}$	933	1180	620	906	998
实测动稳度 DS_c /次 \cdot mm $^{-1}$	810	1128	592	710	854
$\frac{DS_j - DS_c}{DS_c} \times 100\%$	15.2	4.7	4.8	27.6	16.8

3 结论

(1) 沥青混合料矿料级配曲线的粒径分布是分形的, 采用分形维数 D 可以定量研究不同级配曲线走向的粒径分布。

(2) 以 SMA-13 为例, 在规范附近选取了 5 种代表性级配走向, 其混合料的动稳度 DS 与粒径分布的分形维数 D 之间具有较好的线性相关性, 回归公式为 $DS = 10450 \times D - 26093$, 相关系数 R 高达 0.969。

(3) 在规范范围附近, 根据本文提出的回归公式, 可以比较准确地预测 SMA-13 不同级配曲线走向的动稳度, 为配合比设计过程中级配走向的选择提供指导, 而且可以定量预测沥青混合料的路用性能。

参考文献:

- [1] 严家. 道路建筑材料 (第三版) [M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [2] 辛德刚, 王哲人, 周晓龙. 高速公路沥青路面材料与结构 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [3] 谢和平. 分形-岩石力学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [4] 武生智. 沙粒粗糙度和粒径分布的分形特性 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 1999 (1).