

文章编号:1671-6833(2010)01-0026-04

## 基于级配分形的 SUPERPAVE 混合料设计参数预估

刘建勋<sup>1,2</sup>, 李波<sup>3</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 甘肃路桥建设集团有限公司, 甘肃 兰州 730030; 3. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** 基于分形几何理论, 推导出矿料的分形分布模型; 以 SUPERPAVE-19 为例, 计算了矿料级配分维值, 并通过沥青混合料设计参数的测试, 研究了分形维数与混合料设计参数的关系, 在此基础上对 SUPERPAVE 混合料设计参数进行了预估。结果表明: SUPERPAVE 混合料矿料级配亦具有明显的分形特征; 分维值  $D$  与矿料间隙率、沥青饱和度、初始压实度和沥青用量等设计参数有很好的线性相关性。利用矿料级配分形规律, 可对具有不同分维值  $D$  的 SUPERPAVE 混合料的体积参数进行预估, 使混合料的配合比设计更具针对性。

**关键词:** 路面工程; 分形维数; SUPERPAVE 混合料; 设计参数; 预估

**中图分类号:** U416.2 **文献标识码:** A

### 0 引言

沥青混合料是由矿料、矿粉和沥青组成的非均值、多相、多层次的复合体系。矿料占混合料中的质量分数约 95%, 因此, 矿料特征决定了沥青混合料的体积组成, 进而影响着混合料各种路用性能。矿料往往使用机制碎石。研究表明, 碎石的表面具有明显的分形特征—自相似和自仿射<sup>[1]</sup>, 不同尺度的碎石混合后, 表征矿料特征尺寸的粒径形成一种分布, 这种分布是一种数学分形。由此导致其质量分布函数(通过率)、体积结构具有分形特征<sup>[2]</sup>, 从而使沥青混合料宏观力学性能呈现出不确定性、不规则性、模糊性和非线性的分形特点。近年来, 道路研究人员利用分形几何理论对矿料颗粒分形特征、混合料级配走向及其与设计参数的关系进行了研究, 取得了一些重要结论<sup>[3-10]</sup>。但是, SUPERPAVE 混合料矿料级配的分形规律及其应用, 未见报道。笔者探讨 SUPERPAVE 混合料矿料的分形规律, 研究矿料级配分形维数与 SUPERPAVE 混合料体积指标的关系, 以期对 SUPERPAVE 混合料级配设计和性能检测更具针对性。

### 1 原材料

#### 1.1 沥青

选用韩国 SK-70 号 A 级道路石油, 按沥青试验规程进行试验, 技术性质如表 1。

表 1 沥青技术性质  
Tab. 1 Properties of Asphalt

试验项目	试验值
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	70.1
延度(15℃, 5 cm/min)/cm	> 100
延度(10℃, 5 cm/min)/cm	24.7
软化点(环球法)/℃	47
针入度指数 PI	-0.82
溶解度/%	99.59
含蜡量(蒸馏法)/%	1
质量损失	-0.16
TPOT 后(163℃, 5 h)25℃残留针入度比/%	64.5
10℃残留延度/cm	8.7

#### 1.2 矿料

采用河南省禹州市浅井乡石灰岩, 粗细矿料的技术性质分别见表 2 和表 3。

收稿日期: 2009-09-01; 修订日期: 2009-11-10

基金项目: 哈尔滨理工大学青年科学研究基金项目(2008XQJZ020)

**作者简介:** 刘建勋(1970-), 男, 甘肃武威人, 长安大学博士研究生, 甘肃路桥建设集团有限公司高级工程师, 主要从事公路施工与管理工作; 通信作者: 李波(1981-), 男, 宁夏中卫人, 兰州交通大学讲师, 博士, 主要从事路面材料与结构教学与研究工作, E-mail: nxlibolibo@163.com.

表2 粗矿料技术性质

Tab.2 Properties of coarse aggregate

试验项目	试验值	规范要求
石料压碎值/%	16.4	≤26
洛杉矶磨耗损失/%	21.5	≤28
视密度/(t·m <sup>-3</sup> )	2.724	≥2.60
吸水率/%	0.32	≤2.0
对沥青的粘附级/级	5	≥4
坚固性/%	4.3	≤12
针片状颗粒含量/%	9.4	≤15
水洗法(<0.075 mm 颗粒含量)/%	0.7	≤1
软石含量/%	2.1	≤3

表3 细矿料技术性质

Tab.3 Properties of fine aggregate

试验项目	试验值	规范要求
视密度/(t·m <sup>-3</sup> )	2.718	≥2.50
坚固性(>0.3 mm 部分)/%	12.5	≥12
砂当量/%	67.5	≥60
含泥量(<0.075 mm 的含量)/%	2.5	≤3

## 2 矿料级配的分形模型

设矿料的颗粒粒径为  $r$ , 粒径不大于  $r$  的颗粒数目为  $N(r)$ , 根据分形理论有:

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

式中:  $C$  为常数;  $D$  为颗粒粒径分形维数. 从而可以定义颗粒粒径分布函数为:

$$F(r) = B(r)/N_0 \quad (2)$$

式中:  $F(r)$  为颗粒粒径分布函数;  $N_0$  为颗粒总数.

级配碎石的粒径分布可以采用各粒径矿料的质量分布函数表示, 即

$$P(r) = M(r)/M_0 \quad (3)$$

式中:  $P(r)$  为各颗粒粒径的质量通过率;  $M(r)$  为粒径不大于  $r$  的矿料质量;  $M_0$  为矿料总质量.

则矿料级配的分形公式为:

$$P(r) = (r_{\min}^{3-D} - r_{\max}^{3-D}) / (r_{\min}^{3-D} - r_{\max}^{3-D}) \quad (4)$$

式中:  $r_{\min}$  为最小颗粒粒径;  $r_{\max}$  为最大颗粒粒径.

一般情况下, 当颗粒粒径  $r$  相对于  $r_{\min}$  较大时,  $r_{\min}$  可以忽略, 式(4)变为:

$$P(r) = [r/r_{\max}]^{3-D} \quad (5)$$

## 3 矿料级配分形规律及其与体积指标间的关系

### 3.1 矿料级配及分维值

为了系统地研究不同矿料级配对 SUPERPAVE 沥青混合料体积性能和路用性能的影响, 以 SUPERPAVE-19 混合料为例, 选择 4 种级配, 见表 4. 其中通过禁区上方的级配 1 和级配 2, 穿过级配禁区的级配 3 和级配 4, 通过禁区下方的级配 5 和级配 6 用于研究沥青稳定碎石混合料矿料级配分形规律及其与体积指标的关系, 级配 7 和级配 8 用于检验预估结果.

根据表 4 的矿料级配组成数值, 在矿料级配的双对数坐标图上, 利用最小二乘法对级配曲线进行最佳直线拟合, 求出通过率与筛孔之间的最佳拟合直线的斜率  $b$ , 再利用  $3-D=b$ , 即可求得沥青混合料矿料粒径分维值  $D$ . 各级级配对应的分维值见表 4.

### 3.2 各级配分维值与体积指标之间的关系

以表 4 中的各级级配为初始级配, 在成型温度 150 ℃、压力为 600 kN、旋转次数为 125 次的条件下成型试件, 测得混合料目标孔隙率  $VV$  为 4% 时各级配的矿料间隙率  $VMA$ 、沥青饱和度  $VFA$ 、初始压实度和沥青用量  $Pa$  等体积指标, 见表 5. 分维值  $D$  与矿料间隙率  $VMA$ 、沥青饱和度  $VFA$ 、初始压实度和沥青用量  $Pa$  的关系曲线, 见图 1~图 4.

表4 矿料级配及其分维值

Tab.4 The gradation of aggregate and its fractal dimension

级配	通过以下筛孔的质量百分率/%											分维值 $D$
	φ26.5	φ19.0	φ12.5	φ9.5	φ4.75	φ2.36	φ1.18	φ0.6	φ0.3	φ0.15	φ0.075	
No. 1	100	98.0	72.9	65.0	48.6	36.2	28.4	20.8	15.2	11.3	8.0	2.569 2
No. 2	100	98.0	85.0	78.0	62.0	47.0	36.0	24.0	15.0	10.0	6.9	2.535 9
No. 3	100	96.2	72.1	64.0	47.3	34.9	25.8	19.2	13.7	10.5	7.8	2.557 2
No. 4	100	96.2	79.7	74.8	55.2	37.9	27.5	15.5	10.3	8.7	6.2	2.494 7
No. 5	100	96.3	69.7	61.1	43.8	31.3	22.2	16.2	11.6	8.3	6.0	2.512 9
No. 6	100	96.3	65.7	59.1	39.6	25.6	17.3	10.5	7.9	5.9	4.6	2.444 5
No. 7	100	96.2	65.0	58.6	40.6	29.8	17.9	11.1	8.6	6.3	4.9	2.459 1
No. 8	100	96.3	68.7	59.9	42.3	29.8	21.1	15	10.6	7.5	5.3	2.492 1

表5 各组混合料设计指标试验值

Tab.5 The experiment results of design index for 8 mixtures %

级配	VV	VMA	VFA	初始压实度	沥青含量
No.1	4.0	14.8	73.0	88.5	5.3
No.2	4.0	14.5	72.4	87.2	5.1
No.3	4.0	14.7	72.8	87.7	5.2
No.4	4.0	13.4	70.1	85.9	4.6
No.5	4.0	13.9	71.2	86.1	4.7
No.6	4.0	12.9	69.0	84.4	4.2
No.7	4.0	13.1	69.5	85.2	4.3
No.8	4.0	13.3	69.9	85.5	4.6

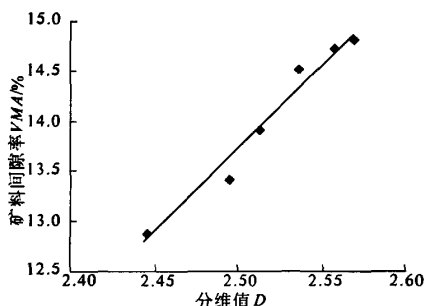
图1 分维值  $D$  与矿料间隙率的关系

Fig.1 The relation between fractal dimension and voids in mineral aggregate

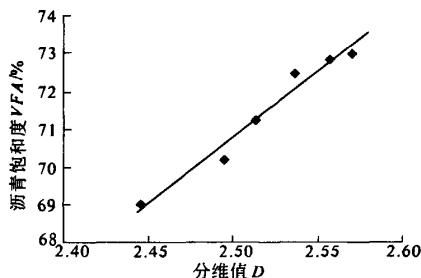
图2 分维值  $D$  与沥青饱和度的关系

Fig.2 The relation between fractal dimension and voids filled with asphalt

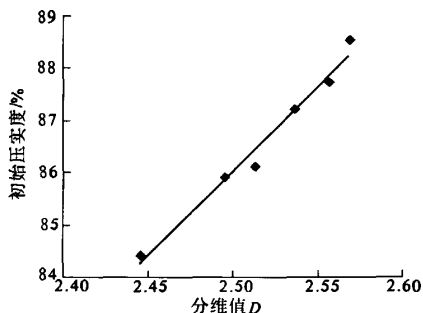
图3 分维值  $D$  与初始压实度的关系

Fig.3 The relation between fractal dimension and initial compaction degree

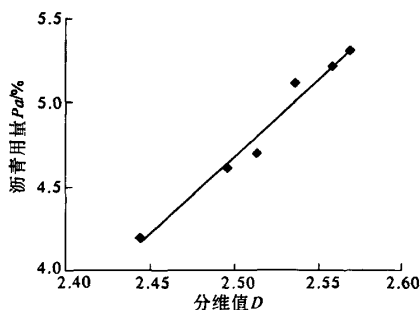
图4 分维值  $D$  与沥青用量的关系

Fig.4 The relation between fractal dimension and asphalt content

由图1~4可以看出,矿料间隙率、沥青饱和度、初始压实度和沥青用量设计指标随分维值变化的趋势都大致相同,即随着矿料粒径分维值  $D$  的增加而增大。这主要是因为矿料分维值越大,混合料级配越细<sup>[4]</sup>。较多的细料填充了粗矿料间隙从而造成了矿料间隙率和沥青饱和度的增大。此外,细料的增多,形成沥青胶浆所需的沥青就随之增加,初始压实度也就随之增大。对分维值  $D$  与混合料设计指标进行线性回归分析:

分维值  $D$  与矿料间隙率的回归模型

$$VMA = 16.516D - 27.5724, R^2 = 0.9646 \quad (6)$$

分维值  $D$  与沥青饱和度的回归模型

$$VFA = 34.474D - 15.418, R^2 = 0.968 \quad (7)$$

分维值  $D$  与初始压实度的回归模型

$$y = 31.743D + 6.6705, R^2 = 0.9785 \quad (8)$$

分维值  $D$  与沥青用量的回归模型

$$Pa = 9.1546D - 18.211, R^2 = 0.9779 \quad (9)$$

可以看出,沥青稳定碎石混合料矿料级配分维值与矿料间隙率、沥青饱和度、初始压实度、沥青用量等混合料配合比设计的体积指标存在很好的线性关系。

#### 4 混合料设计参数预估

将级配7的分维值  $D = 2.4591$  和级配8的分维值  $D = 2.4921$  代入公式(6)~(9),计算级配7、8的矿料间隙率、沥青饱和度、初始压实度和沥青含量,结果见表6。

由级配7、8实测结果与通过回归公式的计算结果对比可以看出,两者相差很小。亦即利用 SUPERPAVE 混合料的分形规律,任意拟定两组级配测定其设计参数并回归矿料级配分维值与设计参数的关系,可对所配制的混合料的体积指标进行预估,从而使混合料设计更具针对性。

表6 混合料设计参数预估  
Tab.6 Prediction results of design index  
for verification mixtures %

级配	VMA	VFA	初始压 实度	沥青 含量
No.7	13.0	69.4	84.7	4.3
No.8	13.6	70.5	85.8	4.6

## 5 结论

(1) SUPERPAVE 混合料矿料级配分形维数和常用的  $k$  法等确定级配的方法具有统一的内涵,可从微观层面上解释级配的分布特征。

(2) SUPERPAVE 混合料矿料级配分维值与混合料矿料间隙率、沥青饱和度、初始压实度和沥青用量等设计指标有明显的线性关系。

(3) 利用 SUPERPAVE 混合料矿料级配分形规律,可以在混合料设计时只需在规范范围内任意选定两个级配,即可对所配制的混合料的体积指标进行预估,从而使混合料设计更具针对性。

## 参考文献:

- [1] CARR J R, NORRIS G M, NEWCOMB D E. Characterization of aggregate shape using fractal dimension[J]. Transportation Research Record, 1990; 43-50.
- [2] 黄继成, 黄彭. 沥青混合料矿料分形和性状相关性研究[J]. 同济大学学报, 2006, 34(12): 1632-1636.
- [3] 李波, 李涛, 滕旭秋, 等. 基于矿料分形特征的沥青混合料配合比设计[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(12): 50-53.
- [4] 李波, 韩森, 刘亚敏, 等. 骨架密实型沥青混合料矿料的分形特征[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(1): 67-70.
- [5] 黄继成, 黄彭. 沥青混合料矿料分形和性状相关性研究[J]. 同济大学学报, 2006, 34(12): 1632-1636.
- [6] 颜强, 黄彭. 沥青混合料空隙的分形特性[J]. 同济大学学报, 2004, 32(1): 43-48.
- [7] 杨瑞华, 许志鸿. 密级配沥青混合料矿料分形分维与路用性能的关系[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 98-103.
- [8] 陈国明, 谭忆秋, 王哲人, 等. 沥青混合料级配曲线走向的分形研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(1): 1-4.
- [9] 黄继成, 黄彭. 沥青混合料矿料分维数值和矿料间隙率的关系[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(11): 1481-1485.
- [10] 彭勇, 孙立军, 王元清, 等. 沥青混合料级配矿料的分形特性[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(12): 80-82.

## Prediction of Design Parameters for SUPERPAVE Mixtures Based on the Fractal Law of Aggregate Gradation

LIU Jian-xun<sup>1,2</sup>, LI Bo<sup>3</sup>

(1. School of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Gansu Road and Bridge Construction Group Co. Ltd., Lanzhou 730030, China; 3. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The fractal model of aggregates in Suppave mixture was deduced based on the theory of fractal geometry. By taking SUPERPAVE-19 as an example, the relationship between the fractal dimension(D) and design parameter was studied by testing volume parameter of mixtures. Base on this, the design parameters of mixtures were predicted. The results show that aggregate gradation of SUPERPAVE mixture has fractal characteristic too. The fractal dimension has good linear correlation with voids in mineral aggregate, voids filled with asphalt, initial compaction degree and asphalt content. The design parameters of SUPERPAVE mixtures with different D can be estimated accordingly. The fractal characteristics of SUPERPAVE mixtures will make design method of asphalt mixtures more objective.

**Key words:** pavement engineering; fractal dimension; SUPERPAVE mixture; design parameter; prediction