

沥青混合料级配分形分析与路用性能研究

李胜

(湖南省交建工程集团有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: 在集料逐级填充试验的基础上, 结合分形理论, 对粗、细集料内部构成情况进行分析; 通过承载比和密度试验, 确定粗集料分维数 D_c 、细集料分维数 D_f 的合理取值范围; 以 30% 关键筛孔 4.75 mm 通过率进行级配设计, 并在最佳油石比情况下进行沥青混合料路用性能试验, 依据试验结果分析沥青混合料分形维数与路用性能之间的相关性。

关键词: 公路; 沥青混合料; 分形理论; 路用性能

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)01-0059-04

分形理论旨在对自然界中不稳定、无序、非平衡状态目标的自相似程度、不规则程度进行定量分析, 在不规则材料描述方面, 分形理论比传统几何语言具有更大的优越性。沥青混合料组成成分相似, 具有一定的自相似性, 满足分形理论对研究目标的基本原则, 可利用分形理论对沥青混合料进行分析。

1 分形理论简介

在几何数学中, n 段长为 r 的线段可组成长为 1 的直线段, 即 $n \times r = 1$; n 个边长为 r 的小正方形可组成面积为 1 的正方形, 即 $n \times r^2 = 1$; n 个体积为 r 的小正方体可组成体积为 1 的正方体, 即 $n \times r^3 = 1$ 。可见, 传统几何数学中, r 的幂次 D 即为几何体的空间维数, 可表示为:

$$D = \frac{\lg n}{\lg(1/r)} = -\frac{\lg n}{\lg r} \quad (1)$$

在海岸线长度测量过程中, 若尺子长度为 r_1 , 度量次数为 N_1 , 则海岸线长度 $L_1 \approx N_1 \times r_1$; 若尺子长度为 r_2 ($r_2 < r_1$), 度量次数为 N_2 ($N_2 > N_1$), 则海岸线长度 $L_2 \approx N_2 \times r_2$; 若尺子长度为 r_n , 度量次数为 N_n , 则海岸线长度 $L_n \approx N_n \times r_n$ 。由于度量过程中忽略了度量尺中间的曲线长度, 最终海岸线度量值 $L_1 < L_2 < \dots < L_n$, 即海岸线长度随度量精度变化而变化, 二者之间存在幂指数函数关系:

$$\lg L \propto b \lg(1/r) \quad (2)$$

设尺子长为 r , 度量次数为 n , 则海岸线长 $L = n \times r$, 得:

$$D = \frac{\lg n}{\lg(1/r)} \quad (3)$$

$$\lg L = \lg n + \lg r \quad (4)$$

由上述公式可推出 $D = 1 - b$ (b 为海岸线长度与测量精度之间的比例关系, 从某种意义上说是两者在坐标图上对应关系的斜率), 得:

$$L = L(r) = n \times r = L_0 \left(\frac{r}{L_0} \right)^{1-D} \quad (5)$$

若 $D = 1$, 则海岸线在传统几何学意义中表现为光滑曲线, $L = L_0$; 若 $r = L_0$, 则 $L = L_0$; 度量尺长 r 趋向于零时, 海岸线长 L 趋向于无穷大, 此时采用传统几何学将无法对其进行准确描述, 亟待寻求其他参数进行表征。

分形理论突破传统几何学中空间维数为整数的界限, 提出分维空间的概念, 分析自然界中无规则又自相似的物体。将式(5)推广, 可得:

$$A(r) = A_0 (r/r_{\max})^{E-D} \quad (6)$$

式中: E 表征研究目标的空间维数, $E = 0$ 时, 研究目标为点, $A(r)$ 和 r 表征研究目标点的个数; $E = 1$ 时, 研究目标为线, $A(r)$ 和 r 表征研究目标的长度值; $E = 2$ 时, 研究目标为面, $A(r)$ 表征研究目标的面积, r 表征研究目标的长度; $E = 3$ 时, 研究目标为立体, $A(r)$ 表征研究目标的体积, r 表征研究目标的长度; A_0 为 $E = D$ 时 $A(r)$ 的值; r_{\max} 为码尺最大长度; D 为分维数。

具有无规则又自相似性的形态广泛存在于自然界中, 如山川、云朵等。分形理论认为, 若所研究目标满足式(6), 则研究目标可采用分形维数 D 来度量其空间结构的无序程度, 即式(6)可看作分形理论的数学表达式。

根据相关研究成果, 集料粒径、沥青混合料传统设计理论均具有一定分形特征, 可采用分形理论表达式表征。集料粒径分布的分形表达式如下:

$$F(x) = \left(\frac{x}{x_{\max}}\right)^{-D_n} \quad (7)$$

级配分形函数的分形表达式如下:

$$\lg P(x) \propto (3-D) \lg x \quad (8)$$

N法的分形表达式如下:

$$\lg P(x) \propto n \lg x \quad (9)$$

I法的分形表达式如下:

$$\lg P(x) \propto -3.32 \lg i \lg x \quad (10)$$

K法的分形表达式如下:

$$\lg P(x) \propto -3.32 \lg K \lg x \quad (11)$$

粒子干涉理论的分形表达式如下:

$$\lg P(x) = 3.32 \lg \left(\frac{x_{\max}}{x}\right) \lg(1-\varphi_0) + 2 \quad (12)$$

贝雷法(PCS为第一控制筛孔、SCS为第二控制筛孔、TCS为第三控制筛孔)的分形表达式如下:

$$P_{\text{PCS}} = \left(\frac{R_{\text{PCS}}}{R_{\text{NMPS}}}\right)^{3-D} P_0 = 0.22^{3-D} P_0 \quad (13)$$

$$P_{\text{NMPS}/2} = \left(\frac{R_{\text{NMPS}/2}}{R_{\text{NMPS}}}\right)^{3-D} P_0 \quad (14)$$

$$R_{\text{CA}} = \left(\frac{0.5^{3-D} - 0.22^{3-D}}{100 - 0.5^{3-D}}\right) \times P_0 \quad (15)$$

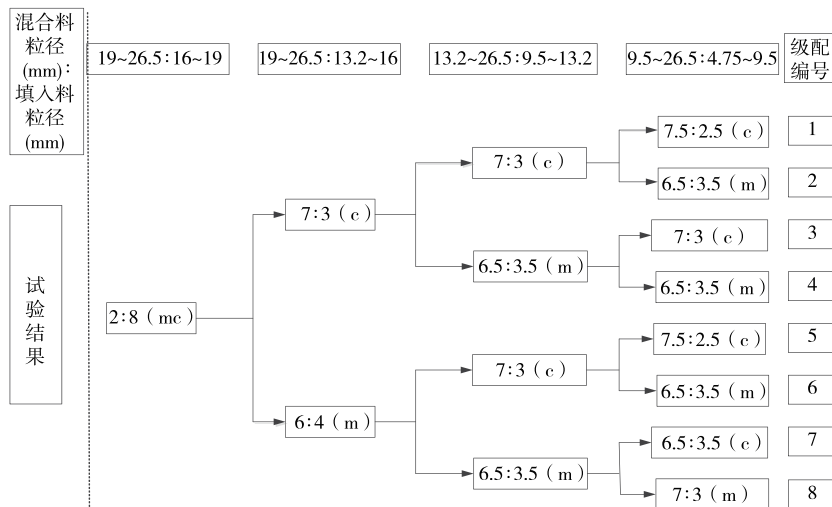
由式(9)~(15)可知:各级配理论均具有一定相通性。这是因为无论何种理论,其最终目的都是使沥青混合料内部组成结构更合理,表现出更优良的路用性能。

2 矿料级配设计

2.1 粗集料逐级填充试验

对单一粒径粗集料进行逐级填充分析,可得到各档粒径材料对混合料整体的影响效果。采取逐级填充的方式对所组成的混合集料进行密度试验,同时参照土工CBR试验进行承载比试验。以密度与承载比试验结果作为评价依据,得出粗集料内部各粒径集料最优比例构成。试验流程见图1。

由图1可知:混合料最大密度与最大承载比并未同时出现,若仅以最大密度作为级配设计最终目标,级配各项性能难以达到最佳状态,仍存在较大优化空间。



16~26.5 mm中粒径16~19与19~26.5 mm两档集料质量比由两档集料混合试验确定,其余类同;c表示同一档混合料试验承载比值最大;m表示同一档混合料试验密度最大

图1 逐级填充试验的流程

对试验确定的8个不同内部组成比例的粗集料进行编号,通过式(5)分别计算其对应的分形维数,计算结果见图2、图3。

由图2~3可知:随着粗集料分形维数 D_c 的增加,密度与承载比均呈现先增大后减小的趋势。推荐粗集料分形维数取值范围为1.09~1.3885。

2.2 细集料逐级填充试验

胶浆理论认为,细集料在沥青混合料中主要起填充作用,为使细集料对粗集料骨架间隙填充效果

达到最佳,细集料内部空隙率应足够小。对细集料

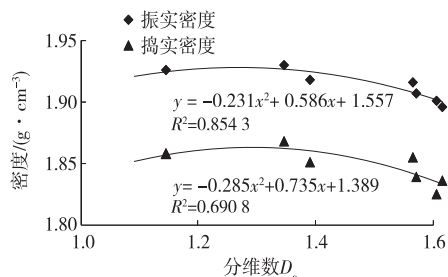


图2 密度与 D_c 的关系

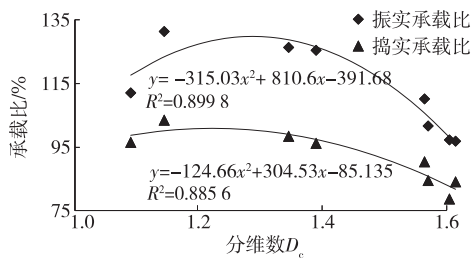


图 3 承载比与 D_c 的关系

进行逐级填充试验,使细集料达到最大密实状态,并

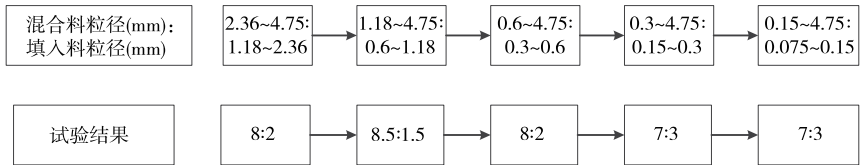


图 4 细集料逐级填充试验的流程

2.3 粗、细集料混合比例的确定

控制关键筛孔 4.75 mm 通过率为 30%,将前文所得各粗、细集料进行混合料,得到 8 组内部组成不同的矿质混合料。分别对 8 组混合料进行密度与承载比试验,试验结果与其分形维数计算值 D' 的关系见图 5、图 6。

由图 5、图 6 可知:随着分维数的增大,密度整

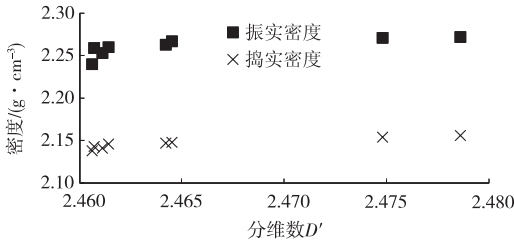


图 5 密度与分维数 D' 的关系

对该状态下细集料内部各粒径分布进行分析。试验流程见图 4。

通过细集料逐级填充试验,可得到细集料达到最大密实状态时细集料各档的通过率。对各筛孔尺寸与对应的通过率取对数后建立坐标系,并进行线性拟合,求得其回归方程为 $\lg P(x) = 0.4741 \lg x + 1.73096$,相关系数 $R^2 = 0.973$,二者之间拟合度较高。根据式(5),此时细集料分形维数 $D_f = 3 - k_f = 2.5262$ (k_f 为细集料回归曲线的斜率)。

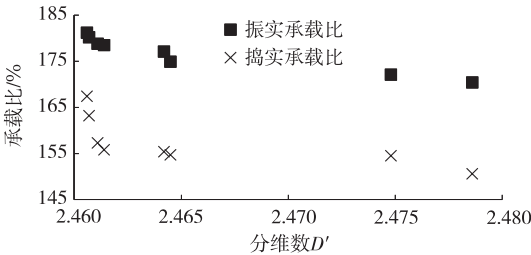


图 6 承载比与分维数 D' 的关系

体呈现增大趋势,矿质混合料逐渐趋向于密实;承载比整体呈现减小趋势,混合料骨架作用越来越强。

2.4 最佳沥青用量的确定

通过马歇尔试验确定各组矿质混合料的最佳油石比,计算最佳油石比下各档粒径集料的通过率及对应的分形维数 D ,结果见表 1。

表 1 最佳油石比下各档集料通过率及分维数

级配 编号	斜率	分形 维数 D	相关 系数	各档集料(mm)通过率/%												
				26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
1	0.445 7	2.554 3	0.959 2	100	94.9	74.3	63.3	47.5	30.0	23.1	20.1	15.9	12.4	9.3	4.1	
2	0.462 0	2.538 0	0.961 6	100	95.5	77.7	68.1	54.4	29.9	23.0	20.0	15.8	12.3	9.2	4.0	
3	0.458 9	2.541 1	0.960 4	100	95.5	77.7	68.1	50.9	29.9	23.0	20.0	15.8	12.3	9.2	4.0	
4	0.463 6	2.536 4	0.960 5	100	95.9	79.3	70.4	54.5	30.0	23.1	20.1	15.9	12.4	9.3	4.1	
5	0.449 5	2.550 5	0.957 3	100	95.6	78.0	63.3	47.5	30.0	23.1	20.1	15.9	12.4	9.3	4.1	
6	0.463 2	2.536 8	0.960 1	100	96.2	80.9	68.2	54.5	30.0	23.1	20.1	15.9	12.4	9.3	4.1	
7	0.464 5	2.535 5	0.959 0	100	96.5	82.3	70.5	54.6	30.1	23.2	20.2	16.0	12.5	9.4	4.2	
8	0.460 1	2.539 9	0.958 5	100	96.2	80.9	68.2	51.0	30.0	23.1	20.1	15.9	12.4	9.3	4.1	

3 沥青混合料的路用性能

3.1 高温稳定性

采用车辙试验与单轴贯入试验对比研究上述沥

青混合料的高温性能,试验结果见表 2。动稳定度、无侧限破坏荷载与分维数 D 的关系见图 7。

由图 7 可知:沥青混合料动稳定度与无侧限破坏荷载的相关性较好,同一级配动稳定度大,则其破

表2 沥青混合料车辙试验与贯入试验结果

级配 编号	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	无侧限 破坏荷 载/kN	级配 编号	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	无侧限 破坏荷 载/kN
1	8 370	8.3	5	8 399	8.8
2	8 461	9.7	6	8 436	9.4
3	8 408	8.9	7	8 413	9.4
4	8 439	9.4	8	8 473	9.0

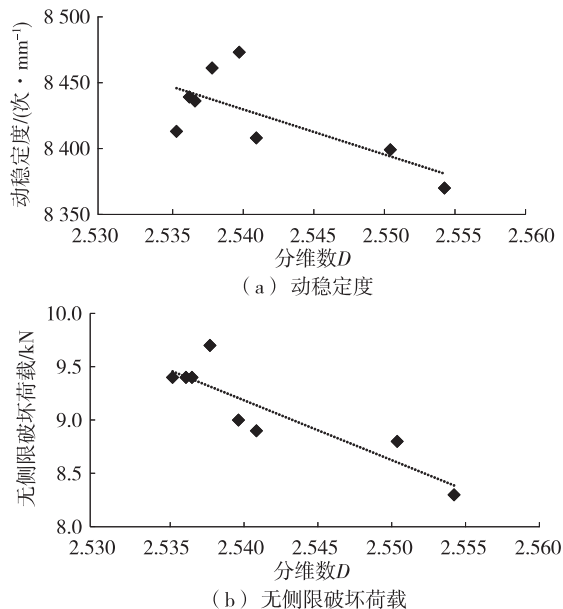


图7 沥青混合料级配与高温稳定性指标的关系

坏荷载较高。随着分维数 D 的增大,动稳定度及无侧限破坏荷载均小幅下降。究其原因,分维数 D 越大,混合料越密实,混合料中粗集料的骨架效应降低,表现为沥青混合料高温性能小幅下降。

3.2 低温抗裂性

采用小梁弯曲试验进行沥青混合料低温稳定性研究,试验结果见表3。

由表3可知:通过逐级填充试验所确定的沥青混合料均具有良好的低温稳定性能,且随着分维数

表3 沥青混合料低温弯曲试验结果

级配 编号	抗弯拉 强度/MPa	最大弯曲 应变/ $\mu\epsilon$	弯曲刚度 模量/MPa
1	10.5	3 142.8	3 341.0
2	10.6	3 148.0	3 367.2
3	11.0	3 145.1	3 497.5
4	11.1	3 133.9	3 541.9
5	10.6	3 187.8	3 325.2
6	11.3	3 177.0	3 556.8
7	10.5	3 180.7	3 301.2
8	11.4	3 167.4	3 599.2

D 的变化,混合料的低温性能变化较小。 D 值较小时,混合料骨架结构较理想; D 值较大时,混合料中沥青胶浆含量较多。因此,不同分维数的沥青混合料均表现出良好的抗低温性能。

3.3 水稳定性

水稳定性是指沥青混合料抵抗水损害的能力,常用试验方法有浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验。以浸水马歇尔试验评价所设计沥青混合料的水稳定性,结果见表4。

表4 沥青混合料水稳定性试验结果

级配 编号	稳定度/ kN	浸水 48 h 后的 稳定度/kN	浸水残留 稳定度/%
1	17.6	16.7	94.9
2	16.1	14.9	92.5
3	16.8	15.7	93.5
4	17.4	15.7	90.2
5	15.2	14.3	94.1
6	16.6	15.0	90.4
7	17.0	15.2	89.4
8	16.4	15.2	92.7

由表4可知:各级配沥青混合料均具有良好的水稳定性能,且与分维数 D 具有较好的相关性。随着 D 的增加,沥青混合料的残留稳定度呈上升趋势。表明混合料中各粒径集料越密实,其抵抗水损害的能力越强。

4 结论

(1) 传统级配设计方法可采用分形表达式表征,传统级配设计方法均具有分形特征,采用分形理论进行沥青混合料级配设计具有一定的可行性。

(2) 混合后的粗集料密度最大与承载比最大时对应的各粒径组成比例不尽相同,在级配设计中仅以最大密度作为设计目标难以使矿质级配达到最优,有必要进行优化。

(3) 粗集料分维数 D_c 与密度之间存在良好的相关性,随着 D_c 的增大,集料密度与承载比先增大后减小,推荐粗集料分维数的取值范围为 1.09 ~ 1.388 5;细集料分维数 D_f 为 2.526 2 时,可得到最大密实度的细集料混合料。

(4) 沥青混合料的分维数 D 与其路用性能之间存在良好的相关性,进一步证明分形理论在级配设计中的可行性与优越性;综合考虑沥青混合料各项路用性能,混合料分维数的取值范围为 2.538 ~ 2.550 5。

(下转第 86 页)

表4 压路机的组合配置

压路机类型	数量/台	碾压速度/(km·h ⁻¹)		
		初压	复压	终压
双钢轮压路机	3	2~3(静压、 振动)		3~5(静压)
单钢轮压路机	2		3~4(振动)	
轮胎式压路机	2		2~3(静压)	



图7 现场芯样照片

4 结语

通过调查佛山一环高速公路旧路路面使用现状并进行病害成因分析,根据不同车道的病害情况提出试验路路面结构设计方案。为确保乳化沥青冷再生混合料具备良好的路用性能,开展不同 RAP、水泥掺

量对乳化沥青冷再生混合料性能影响研究,确定 RAP 掺量为 80%、水泥掺量为 1.5% 时混合料的综合性能较佳。根据现场取芯情况,芯样完整密实、骨架较好,试验路总体铺筑效果良好。

参考文献:

- [1] 秦永,徐振彭,李磊.乳化沥青厂拌冷再生混合料配合比设计及性能研究[J].黑龙江交通科技,2018(10):57-59.
- [2] 梅朝阳,吴超凡,梁勇.厂拌冷再生沥青混合料生产工艺与质量控制[J].公路工程,2017,42(5):256-261.
- [3] 吕振北.RAP 掺量对乳化沥青冷再生混合料的性能影响研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(2):414-418.
- [4] 孙岩松.水泥掺量对乳化沥青冷再生混合料性能的影响[J].武汉理工大学学报,2013,30(4):45-48.
- [5] 丁武洋,刘强,吴旻.乳化沥青厂拌冷再生混合料关键技术研究及应用[J].中外公路,2012,32(5):216-219.
- [6] 徐东,陈祥峰,郑南翔.乳化沥青冷再生混合料配合比设计及性能分析[J].广西大学学报(自然科学版),2012,37(1):103-109.
- [7] 张帅,高鸣,吕军军.不同水泥用量冷再生混合料性能试验研究[J].商品混凝土,2020(1):37-40.

收稿日期:2020-08-24

(上接第 62 页)

参考文献:

- [1] 李松.基于分形理论的沥青混合料空隙特征研究[D].天津:河北工业大学,2015.
- [2] 李丽民,陈云勇,蒋建清.基于体积指标与分形理论的骨架密实型沥青混合料抗车辙性能预控[J].材料科学与工程学报,2018,36(5):804-809+840.
- [3] 张金辉,于江,李林萍,等.分形级配理论在连续级配设计中的应用[J].中外公路,2013,33(6):243-247.
- [4] 张飞.基于分形理论的温拌沥青混合料宏观空隙研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2015.
- [5] 崔通.基于分形理论的沥青混合料级配组成分析研究[J].公路交通技术,2017,33(5):23-28+36.
- [6] 熊依筱,黄维蓉,杨东来.基于分形理论的沥青混合料比表面积与相关性能研究[J].中外公路,2018,38(4):290-294.
- [7] 曾冠博.基于分形的沥青混合料级配评价与路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
- [8] SANCHEZ-LEAL F J, ANGUAS P G, LARREAL M, et al. Polyvoids: Analytical tool for superpave HMA design [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(8): 1129-1137.
- [9] OZTURK H I, KUTAY M E. An artificial neural network model for virtual superpave asphalt mixture design [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 15(2): 151-162.
- [10] KARIMI S S, GOULIAS D G, SCHWARTZ C W. Risk and expected pay factor analysis for assessing gap and dense-graded superpave mixture specifications [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2015, 16(1): 69-79.
- [11] MARCELO S Medeiros Jr, JO Sias Daniel, HEATHER L Bolton, et al. Evaluation of moisture and low-temperature cracking susceptibility of warm-mixture asphalt [J]. The International Journal of Pavement Engineering, 2012, 13(5): 395-400.
- [12] RAFIQU L A Tarefder, YOUSEFI S. Laboratory evaluation of moisture damage in asphalt [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2012, 39(1): 104-115.

收稿日期:2019-12-10