

再生沥青混合料级配优化设计*

樊旭英¹, 李印冬¹, 李章珍¹, 李婷²

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000; 2. 张家口市职业技术教育中心, 河北 张家口 075000)

摘要: 为改善再生沥青混合料的使用性能, 运用最大密度曲线和贝雷法比较 AC-20 的 4 种设计级配 AC20-1、AC20-2、AC20-3、AC20-4 的级配设置范围、密度、间隙率和贝雷法检验指标 CA 、 FA_C 、 FA_F , 结果表明, 4 种级配与 $n=0.45$ 时各孔径通过率的方差大小依次为 $AC20-3 > AC20-4 > AC20-2 > AC20-1$, $AC20-3$ 和 $AC20-4$ 的方差过大, 且只有 $AC20-2$ 和 $AC20-3$ 满足贝雷法的 3 个检验指标要求; 对 $AC20-1$ 和 $AC20-2$ 进行马歇尔和浸水马歇尔试验, 结果显示, $AC20-1$ 的毛体积密度大于 $AC20-2$, $AC20-2$ 的骨架结构和水稳定性优于 $AC20-1$ 。综合考虑, 推荐 $AC20-2$ 为再生沥青混合料设计及配。

关键词: 公路; 再生沥青混合料; 级配设计; 贝雷法; 最大密度曲线

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)04-0062-04

再生沥青混合料由沥青和集料混合而成, 其物理力学性能主要取决于集料级配。集料级配中粗、细集料和填料的不同组成决定再生沥青混合料的骨架结构, 直接关系到再生沥青混合料的使用性能。目前最常用的级配设计方法有 Superpave、马歇尔设计法、维姆设计法和贝雷法等。陈忠达等提出的多级嵌挤密实级配设计方法和变 i 法及相应算法进一步完善了级配设计方法, 王立久等以逐级堆积理论和分形理论为基础提出了粗、细集料级配数学公式及集料级配调整公式。该文综合运用最大密度曲线和贝雷法在 AC-20 的 4 种设计级配中优选使用性能较好的级配用于合成 30% 旧沥青混合料掺量的再生沥青混合料。

1 旧沥青混合料级配设计

根据集料筛分结果, 按照式(1)~(4)计算各孔径的通过率, 结果见表 1。

$$m_{0.075} = m_3 - m_4 \quad (1)$$

$$P_{0.075} = (m_3 - m_4) / m_3 \times 100\% \quad (2)$$

$$m_5 = m_3 - (\sum m_i + m_{0.075}) \quad (3)$$

$$P_{\text{通过率}} = (m_{\text{总}} - m_{\text{余}}) / m_{\text{总}} = \sum m_{i-1} / m_{\text{总}} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{通过率}}$ 为各筛孔的集料通过率; $m_{\text{总}}$ 为除去损耗后的总质量; $m_{\text{余}}$ 为筛上剩余质量; $\sum m_{i-1}$ 为孔径小于该孔径的筛余质量之和。

表 1 旧集料级配与 AC-20 设计级配

孔径/ mm	旧料级配/%		AC-20 设计级配/%			
	旧料	30% 旧料	AC 20-1	AC 20-2	AC 20-3	AC 20-4
0.075	4.0	1.2	4.2	5.0	3	7
0.150	7.2	2.2	8.2	8.5	4	13
0.300	9.3	2.8	11.8	11.0	5	17
0.600	14.3	4.3	16.3	16.0	8	24
1.180	20.3	6.1	22.1	22.5	12	33
2.360	29.8	8.9	30.9	30.0	16	44
4.750	49.6	14.9	43.7	41.0	26	56
9.500	67.2	20.2	58.2	61.0	50	72
13.200	87.2	26.2	73.2	71.0	62	80
16.000	96.5	29.0	85.0	85.0	78	92
19.000	99.5	29.9	94.9	95.0	90	100
26.500	100.0	30.0	100.0	100.0	100	100

2 级配理论

目前的级配理论主要有最大密度曲线理论和粒子干涉理论, 其中最大密度曲线理论主要用于连续级配的粒径分布, 粒子干涉理论既可用于连续级配计算, 也可用于间断级配计算。

2.1 最大密度曲线理论

最大密度曲线是一种理想曲线, 经大量实验研究得出。W. B. Fuller 等认为将固体颗粒粒度大小进行有规则的排列组合, 粗细配合, 即可得到密度最

* 基金项目: 河北建筑工程学院校级科研项目(Z-201310); 河北建筑工程学院研究生创新基金项目(XB201821)

大、空隙最小的混合料。根据最大密度曲线理论,矿质混合料的颗粒级配曲线越接近抛物线,混合料的密度越大。

根据上述理论,当矿质混合料级配曲线为抛物线时,最大密度曲线集料各孔径集料 d_i 与通过率 P_i 的关系为:

$$P_i = 100 \times (d_i/D)^{0.5} \quad (5)$$

式中: D 为矿质混合料中的最大粒径。

Talbot 认为最大密度曲线公式中的幂指数应是一个变量,而不是一个常数,将 W. B. Fuller 提出的最大密度曲线中的幂指数 0.5 改为 n ,称为 n 法[见式(6)]。研究表明, $n=0.45$ 时沥青混合料密度最大、空隙率最小。实际应用中矿质混合料级配允许在一定范围内波动,可假定 $n=0.3$ 计算混合料级配上限、 $n=0.7$ 计算混合料级配下限。

$$P_i = 100 \times (d_i/D)^n \quad (6)$$

2.2 基于最大密度曲线对级配的评价

根据 n 法计算实际应用中 $n=0.3$ 、 $n=0.7$ 时的级配上、下限及其与 $n=0.45$ 时级配的方差,评价 AC20-1、AC20-2、AC20-3、AC20-4 级配的优劣,结果见图 1~4。

由图 1~4 可知:以 $n=0.3$ 对应级配为上限、 n

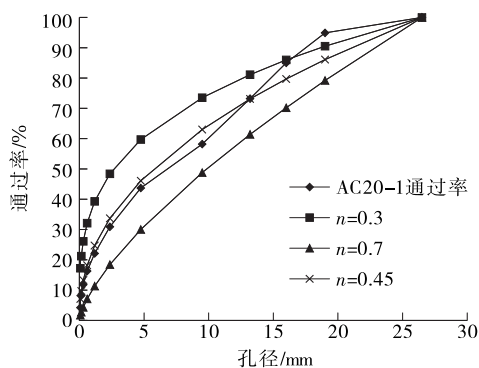


图 1 最大密度曲线及 AC20-1 各粒径通过率

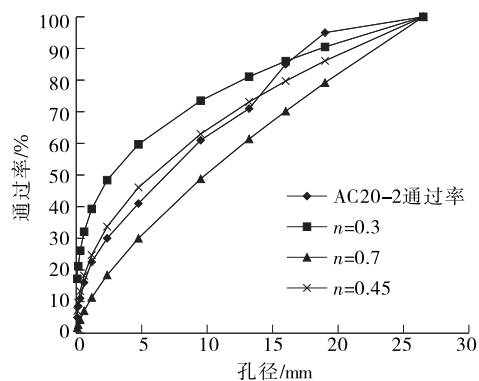


图 2 最大密度曲线及 AC20-2 各粒径通过率

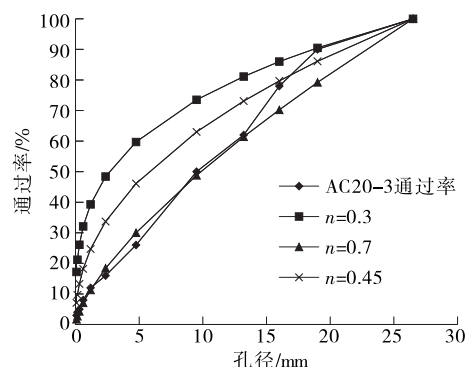


图 3 最大密度曲线及 AC20-3 各粒径通过率

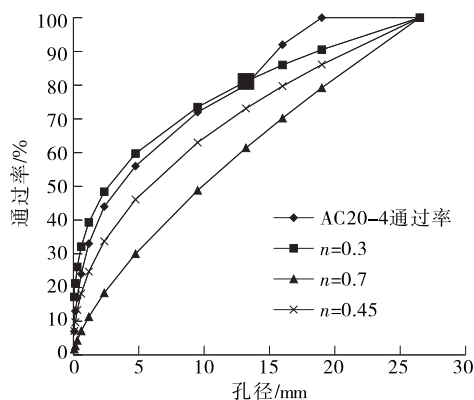


图 4 最大密度曲线及 AC20-4 各粒径通过率

$=0.7$ 对应级配为下限时,AC20-1 和 AC20-2 在孔径为 19 mm 时的通过率高于 n 法的级配上限,AC20-3 在孔径为 2.36 和 4.75 mm 时的通过率低于 n 法的级配下限,AC20-4 在孔径为 16 和 19 mm 时的通过率高于 n 法的级配上限。

按 4 种级配与 $n=0.45$ 时各孔径通过率的方差计算结果,AC20-3 的方差 = 1 411.13 > AC20-4 的方差 = 804.33 > AC20-2 的方差 = 176.23 > AC20-1 的方差 = 165.46。根据最大密度曲线理论,沥青混合料级配越接近 $n=0.45$ 时的级配,其密度越大、间隙率越小,4 种级配沥青混合料的密度大小为 AC20-1 > AC20-2 > AC20-4 > AC20-3,间隙率大小为 AC20-3 > AC20-4 > AC20-2 > AC20-1。

3 贝雷法

贝雷法沥青混合料级配设计理论由 Robert D. Bailey 提出,被美国道路咨询公司(IRES)用作沥青混合料级配设计最重要的选择方法。它还是一种级配检验方法,不仅适用于所有密级配沥青混合料级配检验,还适用于其他混合料级配检验。由于贝雷

法充分考虑了各组成矿料的填充特性,根据贝雷法设计的级配具有稳定的骨架结构及适宜的矿料间隙率,能提高沥青路面抗车辙能力、耐久性能和低温抗裂能力。

3.1 粗、细集料的划分

国内通常将粒径大于 2.36 或 4.75 mm 的集料划分为粗集料,小于 2.36 或 4.75 mm 的集料划分为细集料。而贝雷法是以公称最大粒径($NMPS$,为 19 mm)的 0.22 倍(第一控制筛孔 PCS ,为 4.75 mm)所对应的筛孔来划分粗、细集料,并对 PCS 以下的细集料作进一步划分,较粗的细料(第二控制筛孔 SCS ,为 1.18 mm)为 PCS 的 0.22 倍、较细的细料(第三控制筛孔 TCS ,为 0.3 mm)为 SCS 的 0.22 倍。4 种级配各筛孔通过率见表 2。

表 2 不同级配的各筛孔通过率

筛孔尺 寸/mm	各级配通过率/%			
	AC20-1	AC20-2	AC20-3	AC20-4
26.50	100.0	100.0	100	100
19.00	94.9	95.0	90	100
9.50	58.2	61.0	50	72
4.75	43.7	41.0	26	56
1.18	22.1	22.5	12	33
0.30	11.8	11.0	5	17

注:26.5 mm 为最大粒径。

3.2 贝雷法的检验指标

贝雷法的检验指标包括 CA 、 FA_C 、 FA_F ,分别按式(7)~(9)计算。4 种级配的贝雷法检验指标值见表 3。

$$CA = (P_{NMPS/2} - P_{PCS}) / (P_{100\%} - P_{NMPS/2}) \quad (7)$$

$$FA_C = P_{SCS} / P_{PCS} \quad (8)$$

$$FA_F = P_{TCS} / P_{SCS} \quad (9)$$

式中: $P_{NMPS/2}$ 为 $NMPS/2$ 筛孔通过率; P_{PCS} 为第一控制筛孔通过率; $P_{100\%} = 100$; P_{SCS} 为第二控制筛孔通过率; P_{TCS} 为第三控制筛孔通过率。

由表 3 可知:AC20-1 的 CA 小于贝雷法的最小参数;AC20-4 的 FA_C 大于贝雷法的最大参数,只有 AC20-2 和 AC20-3 满足贝雷法的 3 个检验

指标要求。

表 3 不同级配的贝雷法检验指标值

级配类型	CA	FA_C	FA_F
AC20-1	0.3	0.5	0.5
AC20-2	0.5	0.5	0.5
AC20-3	0.5	0.5	0.4
AC20-4	0.6	0.6	0.5
贝雷法参数范围	0.4~0.8	0.2~0.5	0.2~0.5

4 试验

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对 AC20-1 和 AC20-2 再生沥青混合料进行马歇尔及浸水马歇尔试验,其中:旧料掺量为 30%,新料掺量为 70%;沥青为 70# 道路石油沥青,集料为拌和站提供的集料。再生沥青混合料合成级配见表 4,马歇尔及浸水马歇尔试验结果见表 5。

由表 5 可知:AC20-1 的毛体积密度大于 AC20-2,说明 AC20-1 的间隙率小于 AC20-2;AC20-2 的浸水稳定度和残留稳定度均大于 AC20-1,说明 AC20-2 的骨架结构和水稳定性优于 AC20-1。因此,选择 AC20-2 作为再生沥青混合料设计级配。

表 4 再生沥青混合料的合成级配

孔径/ mm	旧料级配/%		AC20-1 级配/%		AC20-2 级配/%	
	旧料	30% 旧料	70% 新料	合成 级配	70% 新料	合成 级配
0.075	4.0	12.0	3.0	4.2	3.8	5.0
0.150	7.2	2.2	3.0	8.2	2.5	8.5
0.300	9.3	2.8	3.0	11.8	1.9	11.0
0.600	14.3	4.3	3.0	16.3	3.5	16.0
1.180	20.3	6.1	4.0	22.1	4.7	22.5
2.360	29.8	8.9	6.0	30.9	4.7	30.0
4.750	49.6	14.9	6.8	43.7	5.0	41.0
9.500	67.2	20.2	9.2	58.2	14.7	61.0
13.200	87.2	26.2	9.0	73.2	4.0	71.0
16.000	96.5	29.0	9.0	85.0	11.2	85.0
19.000	99.5	29.9	9.0	94.9	9.1	95.0
26.500	100.0	30.0	5.0	100.0	4.9	100.0

表 5 再生沥青混合料的马歇尔及浸水马歇尔试验结果

级配类型	沥青含量/%	毛体积密度/(g·cm ⁻³)	流值/mm	稳定度/kN	浸水稳定度/kN	残留稳定度/%
AC20-1	5	2.35	2.48	10.40	9.18	88.3
AC20-2	5	2.32	3.07	11.62	10.59	91.1

5 结论

(1) 沥青混合料级配曲线越接近最大理论密度曲线,其毛体积密度越大、间隙率越小;满足贝雷法的3个检验指标即 CA 、 FA_C 和 FA_F 的级配具有更好的骨架结构,其水稳定性也越好。

(2) 级配理论检验结果表明AC20-3和AC20-4与 $n=0.45$ 时各筛孔通过率的方差过大,贝雷法检验结果表明只有AC20-2和AC20-3满足贝雷法三大指标要求,试验结果表明AC20-2的水稳定性优于AC20-1。综合考虑,推荐AC20-2为再生沥青混合料设计级配。

(3) 以最大密度曲线和贝雷法为基础对再生沥青混合料级配进行优化设计,有利于提高再生沥青混合料的路用性能。

参考文献:

- [1] 陈跃峰.五纵七横国道主干线贯通 高速路网雏形初现[J].公路交通科技:应用技术版,2008(1).
- [2] 季节,徐世法,罗晓辉.重复再生沥青混合料及温拌沥青混合料性能评价[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [3] 郝培文,徐金枝,周怀治.应用贝雷法进行级配组成设计的关键技术[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(6).
- [4] 陈忠达,袁万杰,郑东启,等.级配理论应用研究[J].重庆交通学院学报,2005,24(4).
- [5] 陈忠达,袁万杰,高春海,等.多级嵌挤密实级配设计方法研究[J].中国公路学报,2006,19(1).
- [6] 吴爱祥,王建栋,彭乃兵,等.颗粒级配对粗骨料充填料浆离析的影响[J].中南大学学报:自然科学版,2016,47(9).
- [7] 王立久,刘慧.骨架密实型沥青混合料集料级配设计方

法[J].中国公路学报,2008,21(5).

- [8] 廖克俭,丛玉凤.道路沥青生产与应用技术[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [9] 张金喜,李娟.我国废旧沥青混合料再生利用的现状和课题[J].市政技术,2005(6).
- [10] 王立久,刘慧.矿料级配设计理论的研究现状与发展趋势[J].公路,2008(1).
- [11] 彭波.基于变 i 法理论的级配组成设计方法[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2005,29(5).
- [12] 陈爱文,郝培文.应用贝雷法设计和检验级配[J].中外公路,2004,24(5).
- [13] 张争奇,赵战利,张卫平.矿料级配对沥青混合料低温性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(2).
- [14] 吕文江,陈爱文,郝培文,等.贝雷法参数 CA 比对沥青混合料性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(4).
- [15] 张铭铭,李会娟,郝培文.基于贝雷法排水性沥青混合料级配设计方法研究[J].公路,2009(6).
- [16] 申康,陈爱文,吕文江,等.贝雷法设计密度对沥青混合料性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(3).
- [17] 谭忆秋.沥青与沥青混合料[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [18] 杨瑞华.基于分形理论的沥青混合料设计理论与方法研究[D].上海:同济大学,2008.
- [19] 杨瑞华,许志鸿,张超,等.沥青混合料分形级配理论[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(12).
- [20] 刘刚,郝培文,曹晓娟.基于级配理论的沥青混合料骨架结构研究[J].中外公路,2013,33(3).
- [21] 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).

收稿日期:2018-01-10

(上接第61页)

aged asphalt influence on the performance of asphalt emulsion cold recycled mixes[J].Construction & Building Materials,2014,71.

- [8] 吴旷怀,李燕枫,杨国梁,等.乳化沥青冷再生沥青混合料的研究[J].暨南大学学报:自然科学版,2008,29(3).
- [9] 王宏,郝培文,南兵章,等.乳化沥青冷再生混合料高温稳定性研究[J].公路工程,2013,38(4).
- [10] 蒋应军,蔡永涛,胡永林,等.级配对乳化沥青冷再生混合料强度的影响[J].建筑材料学报,2017,20(5).
- [11] 王志刚.掺加纤维的乳化沥青冷再生混合料路用性能及机理分析[J].公路工程,2016,41(6).

- [12] 吕政桦,申爱琴,覃潇,等.乳化沥青冷再生混合料性能优化及机理研究[J].建筑材料学报,2018,21(1).
- [13] JTG E51-2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [14] 蒋应军,乔怀玉.垂直振动法水泥稳定碎石设计与施工技术[M].北京:人民交通出版社,2012.
- [15] 王天林,蒋应军.沥青混合料试件振动成型方法[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2014,38(3).
- [16] 苏勇文.AC-20 沥青混合料试件垂直振动方法[D].西安:长安大学,2013.

收稿日期:2018-03-06