

文章编号:1671-8879(2008)03-0016-05

贝雷法设计密度对沥青混合料性能的影响

申 康,陈爱文,吕文江,郝培文

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:根据级配反算方法给出了贝雷法设计密度的公式,按照贝雷法设计级配的原则,选择设计密度为松装密度90%、95%、100%、105%、110%的5个不同等级的设计密度值设计级配,并在固定沥青用量条件下对沥青混合料进行了试验检测。结果表明:沥青混合料在设计密度为松装密度95%时最密实,高温性能和低温性能在设计密度为松装密度100%时最优;综合考虑设计密度、沥青混合料体积指标与路用性能之间的关系,在用贝雷法设计级配时,建议设计密度值约取松装密度的100%。

关键词:道路工程;沥青混合料;贝雷法;设计密度;级配

中图分类号:U414.75

文献标志码:A

Influence of Bailey's chosen unit weight on performance of asphalt mixture

SHEN Kang, CHEN Ai-wen, LÜ Wen-jiang, HAO Pei-wen

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: A formula is proposed to work out the chosen unit weight according to gradation, five different gradations of chosen unit weight including 90%, 95%, 100%, 105%, 110% of apparent density are designed using Bailey method. When the amount of asphalt is fixed, Marshall test, rut test and low temperature bend test are carried out. The results indicate that as chosen unit weight is 95% of apparent density, the most dense condition is an essence to asphalt mixture void volume; as chosen unit weight is 100% of apparent density, the best high and low temperature performance is an essence to asphalt mixture. According to the relation between the chosen unit weight and mixture volumetric, mixture performance, chosen unit weight is advised around 100% of apparent density while designing gradation using Bailey method. 8 tabs, 1 fig, 8 refs.

Key words: road engineering; asphalt mixture; Bailey method; chosen unit weight; gradation

0 引 言

贝雷法是由美国伊利诺伊州运输部的罗伯特·贝雷(Robert Bailey)^[1-2]首先提出的,它不仅可以用于级配的检验,还可以用于级配的设计。贝雷法设计级配的方法是确定粗集料和细集料混合组成以

后,选择粗集料的设计密度,在此基础上计算粗集料的空隙,然后根据细集料以捣实密度填充粗集料空隙的原则计算细集料用量。所谓设计密度,就是设计者想要设计的沥青混合料中粗集料达到的嵌挤程度,常用其与粗集料松装密度的百分率比值衡量。目前应用贝雷法仅是通过验证粗细集料的比例来保

收稿日期:2007-05-20

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200131800055)

作者简介:申 康(1978-),男,陕西合阳人,博士研究生,E-mail:shenkang_19790905@126.com

证粗集料的骨架,因此存在一定的局限性^[3-6]。为此,本文分析了设计密度在评价级配时所起的作用,并通过试验研究了设计密度对沥青混合料性能的影响,为更好应用贝雷法的设计密度指标进行设计和评价级配提供参考。

1 贝雷法设计密度参数分析

贝雷法给出 3 个参数,可对沥青混合料合成级配进行分析。

(1)CA 比(I_{CA}),其表达式为

$$I_{CA} = \frac{P_{D/2} - P_{PCS}}{100 - P_{D/2}} \tag{1}$$

式中: $P_{D/2}$ 为粒径 $D/2$ (D 为公称最大粒径)的通过率(%); P_{PCS} 为第一控制筛孔的通过率(%),第一控制筛孔(PCS)为贝雷法提出的粗细集料的分界线,按照贝雷法的观点,第一控制筛孔为与公称最大粒径 D 的 0.22 倍最接近的筛孔。

(2) FA_c 比(I_{FA_c}),其表达式为

$$I_{FA_c} = \frac{P_{SCS}}{P_{PCS}} \tag{2}$$

式中: P_{SCS} 为第二控制筛孔的通过率(%),第二控制

筛孔(SCS) 为 0.22 倍第一控制筛孔。

(3) FA_f 比(I_{FA_f}),其表达式为

$$I_{FA_f} = \frac{P_{TCS}}{P_{SCS}} \tag{3}$$

式中: P_{TCS} 为第三控制筛孔的通过率(%),第三控制筛孔(TCS) 为 0.22 倍第二控制筛孔。

从式(1)、式(2)、式(3) 可以看出,CA 比表征的是粗集料内部质量比, FA_c 比、 FA_f 比表征的是细集料(PCS 以下) 内部质量比。这对于合成级配,还缺少粗细集料之间的质量比,贝雷法是用设计密度来控制粗细集料之间的质量比。

贝雷法给出的 3 个参数,本来是用于检验贝雷法设计的级配,控制好设计密度和 3 个参数(CA 比、 FA_c 比、 FA_f 比) 在合适的范围,就能很好地控制整个级配粗细集料之间的质量比和粗细集料各自内部的质量比。所以,对于任意一个级配,如果事先没有设计密度来控制粗细集料之间的质量比,就用贝雷法给出的 3 个参数来检验级配。如 3 个参数都处在合适的范围内,也不能说明这是一个理想的级配。以级配 A、B 为例,对贝雷法 3 个参数进行验证,结果见表 1。

表 1 不同级配的 3 个参数对照结果

级 配	筛 孔					
	最大粒径 (25 mm)	公称最大粒径 (19 mm)	公称最大粒径的一 半(9.50 mm)	第一控制筛孔 (4.75 mm)	第二控制筛孔 (1.18 mm)	第三控制筛孔 (0.30 mm)
级配 A 通过率/%	100		87.5	80	36	16.20
级配 B 通过率/%	100		50.0	20	9	4.05

表 1 中,粗集料(PCS 以上) 与细集料(PCS 以下) 的质量比,级配 A 为 2 : 8,级配 B 为 8 : 2,显然都是不良级配。但是,这两个级配具有一样的 CA 比值(0.6)、 FA_c 比值(0.45) 和 FA_f 比值(0.45),且都为当前合适范围的中值。分析表明,仅用 3 个参数来检验非贝雷法设计的级配是不够全面的。

对非贝雷法设计的级配,可根据已定级配反算设计密度值,其反算公式为

$$\frac{P_{PCS} - P_{0.075}}{\rho_1} + \frac{100 - P_{PCS}}{\rho_2} = \frac{100 - P_{PCS}}{\rho_3} \tag{4}$$

式中: $P_{0.075}$ 为筛孔为 0.075 mm 的通过率; ρ_1 为细集料干捣密度; ρ_2 为粗集料毛体积密度; ρ_3 为粗集料设计密度。

粗集料指 PCS 以上的集料,细集料指 PCS 至 0.075 mm 之间的集料。

将一堆混合粗集料的体积分成两部分,即粗集料本身的体积和粗集料的空隙,按照贝雷法设计级配的方法,可知粗集料的空隙也就是细集料以捣实

状态存在的体积。式(4) 中, $\frac{P_{PCS} - P_{0.075}}{\rho_1}$ 是细集料以捣实状态存在的体积,等于粗集料的空隙; $\frac{100 - P_{PCS}}{\rho_2}$ 是粗集料本身的体积;两者相加即为混合粗集料的体积 $\frac{100 - P_{PCS}}{\rho_3}$ 。

这样,对于任意一个级配,只要反算出它的设计密度,再结合 CA 比、 FA_c 比和 FA_f 比 3 个参数,就能全面判断该级配的优劣。

2 粗细集料组成及设计密度

2.1 确定粗集料组成

一般认为,在沥青混合料中,粗集料形成良好的骨架,较细的集料充分填充空隙,以使混合料达到设计空隙率,从而充分发挥粗集料在嵌挤力方面的优势,同时充分发挥细集料在粘聚力方面的优势。因此,粗集料的骨架是否为最优骨架,对沥青混合料的

性能具有重要的影响。

选择最优骨架,首先要确定骨架优劣的评价标准。由于成型的骨架是一个松散的材料,所以不能采用常规的方法进行评价。加州承载比(CBR)方法在一定程度上反映了某一变形级位时荷载与变形的关系,也在一定程度上反映了骨架抵抗外荷载的能力。本文采用 CBR 方法评价骨架,并且认为 CBR 值越大骨架越强。

文献[7-8]认为,骨架结构具有继承性。试验表明,以某一档集料的最佳质量分数和母体形成的新母体为底,寻找次级集料的最佳质量分数而得到的骨架性能最优。这就是说,最优骨架具有良好的继承性,下一级骨架的最优组合依赖于上一级骨架的最优组合,上一级骨架的最优组合遗传给了下一级骨架的最优组合。利用这一性质寻求骨架结构有着重要意义,特别是用贝雷法设计级配时,首先要确定粗集料的内部组成关系,然后利用骨架继承性寻找最佳的骨架组合,由此可以减少寻求良好骨架的盲目性,使骨架寻优工作系统化。

本研究就是按照上述方法确定粗集料内部的质量比,即先在 16 mm 集料和 13.2 mm 集料不同比例中找到最优骨架,并以此骨架为母体添加 9.5 mm 集料,找到 16、13.2、9.5 mm 这 3 档集料组成的最优骨架,然后再以此骨架为母体加入 4.75 mm 集料,得到整个粗集料为最优骨架的质量比。

本研究中,先将混合料按比例逐级配合好,装入内径 152 mm、高 170 mm 的试筒中,先装一半,置于振动台振动 2 min,再将剩余集料装入,再振动 2 min,然后进行 CBR 试验。试验时,压头变形速率为 5 mm/min, CBR 试验结果如表 2 所示。

表 2 CBR 试验结果

项 目	最优骨架质量比	CBR 值/%
16 mm 集料与 13.2 mm 集料的质量比	4 : 1	37.0
	3 : 2	53.8
	2 : 3	59.3△
	1 : 4	15.0
(16 mm+13.2 mm)集料与 9.5 mm 集料的质量比	4 : 1	20.3
	3 : 2	56.0
	2 : 3	96.7△
	1 : 4	56.8
(16 mm+13.2 mm+9.5 mm)集料与 4.75 mm 集料的质量比	4 : 1	86.7△
	3 : 2	67.5
	2 : 3	49.0
	1 : 4	58.1

注:带“△”标记的为 CBR 值最大集料,是下轮 CBR 试验的粗集料母

体;每一筛孔尺寸表示粒径在该级筛孔与上一级筛孔之间的集料,如 16 mm 表示粒径为 19~16 mm 的集料,13.2 mm 表示粒径为 16~13.2 mm 的集料。

由表 2 可看出,粗集料最优骨架的质量比为:16 mm 集料和 13.2 mm 集料的质量比为 2 : 3,加入 9.5 mm 集料的最优质量比还是 2 : 3,则 16 mm 集料 : 13.2 mm 集料 : 9.5 mm 集料为 4 : 6 : 15;再加入 4.75 mm 集料最优质量比为 4 : 1;则 16 mm 集料 : 13.2 mm 集料 : 9.5 mm 集料 : 4.75 mm 集料为 16 : 24 : 60 : 25。粗集料的质量分数见表 3。

表 3 粗集料质量分数

不同粒径集料/mm	16.00	13.20	9.50	4.75
质量分数/%	12.8	19.2	48.0	20.0

注:16.00 mm 表示粒径大于 16.00 mm 的集料;13.20 mm 表示粒径 13.20~16.00 mm 的集料;其他类同。

2.2 确定细集料组成

贝雷法中粗细集料的定义不同于传统的以 4.75 mm 筛孔为界的划分方法,其对细集料的定义为能填充由粗集料产生的空隙的集料颗粒。细集料的质量比根据 0.45 次方算得,其质量分数见表 4。

表 4 细集料质量分数

不同粒径集料/mm	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075
质量分数/%	31.9	23.1	16.6	12.5	9.2	6.7

注:2.36 mm 表示粒径 2.36~4.75 mm 的集料,其他类同。

2.3 确定不同设计密度级配

本研究选择了 5 个不同等级的设计密度,分别为松装密度的 90%、95%、100%、105%、110%。0.075 mm 通过率统一确定为 5%,取 $\rho_1 = 1.652 \text{ g/cm}^3$, $\rho_2 = 2.667 \text{ g/cm}^3$, $\rho_3 = \rho_s \rho_1 \text{ g/cm}^3$,其中 ρ_s 、 ρ_1 分别为粗集料的松装密度和设计密度。代入式(4)得到第一控制筛孔通过率,本文定为 4.75 mm 通过率。不同设计密度级配的确定见表 5。

3 试验研究

3.1 马歇尔试验

对表 5 中的 5 个级配,固定沥青用量,即沥青质量分数为 4.5%,进行马歇尔试验,试验结果见表 6。

从表 6 可看出,随着设计密度的增大,沥青混合料的空隙率和矿料间隙率都是先减小再增大。设计密度增大,表明混合料中粗集料接触越来越紧密,骨架作用越来越强;其设计结果是粗集料用量越来越多,细集料用量越来越少。

假设粗集料的空隙率为 V_c ,细集料捣实状态空隙率为 V_x ,细集料以捣实状态填充粗集料空隙,且假定不对粗集料构成影响,则混合集料(不包括矿

表 5 不同设计密度级配的确定

设计密度为松装密度的百分率/%	不同筛孔尺寸(mm)的通过率/%										
	19	16	13.20	9.50	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075
90	100	92.7	81.7	54.2	42.8	30.7	22.0	15.7	11.0	7.5	5.0
95	100	92.4	80.9	52.3	40.4	29.1	20.9	15.1	10.6	7.4	5.0
100	100	92.1	80.2	50.4	38.0	27.5	19.9	14.4	10.2	7.2	5.0
105	100	91.8	79.4	48.6	35.7	25.9	18.8	13.7	9.9	7.1	5.0
110	100	91.5	78.7	46.8	33.5	24.4	17.8	13.1	9.5	6.9	5.0

表 6 马歇尔试验结果

设计密度为松装密度的百分率/%	沥青质量分数/%	毛体积密度/(g·cm ⁻³)	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%
90	4.5	2.397	4.39	15.41	71.52
95	4.5	2.407	3.91	14.98	73.88
100	4.5	2.390	4.51	15.50	70.87
105	4.5	2.394	4.28	15.28	72.01
110	4.5	2.393	4.21	15.24	72.17

粉)空隙率 V 的计算公式为

$$V = \begin{cases} V_c - V_t + V_t V_x & V_t < V_c \\ V_t V_x & V_t \geq V_c \end{cases} \quad (5)$$

式中: V_t 为细集料填充粗集料的质量比, V_t 越大,表示细集料用量越多,设计密度越大。

对上述模型分析,当细集料用量较少时,不能完全填满粗集料空隙,此时混合集料的空隙率还是比较大;随着细集料用量的增加,粗集料的空隙越来越得到填充,混合料的空隙率逐渐减小;当细集料用量增加到刚好能填满粗集料空隙,此时混合集料的空隙率达到最小;此后细集料数量再增加,将把粗集料撑开。由于细集料本身也存在很大的空隙,因而随着细集料数量的增加,整个混合集料的空隙率又会增大(图 1)。

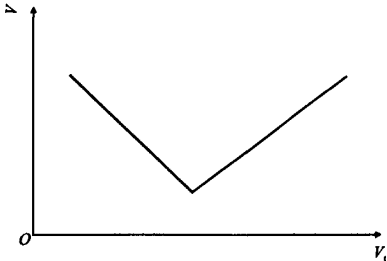


图 1 细集料填充粗集料空隙

[例] 假设粗集料空隙率为 40%，细集料空隙率为 45%，则细集料填充粗集料空隙的情况可以分为以下 3 种。

(1)未填满。如果填充了 10%，则混合集料空隙率 $V=(40\%-10\%)+10\%\times 45\%=34.5\%$ 。

(2)刚好填满。则 $V=40\%\times 45\%=18\%$ 。
(3)已撑开粗集料。如果填充了 60%，则 $V=60\%\times 45\%=27\%$ 。

以上表明,在细集料刚好填满粗集料空隙时候,混合集料空隙率最小为 18%。

上述模型虽然只是一种理想的理论分析,但是细集料填充数量增大的过程就是设计密度变小的过程,细集料在填充中存在一个最密实的点,这可以解释设计密度变化过程中存在最密实点的现象。

3.2 车辙试验

对表 5 中的 5 个级配的沥青混合料进行车辙试验,试验结果见表 7。

表 7 不同设计密度的沥青混合料车辙试验

设计密度为松装密度的百分率/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	车辙深度/mm	沥青膜厚度/ μm
90	4 441	1.988	9.85
95	4 499	2.014	10.05
100	5 169	1.806	10.28
105	4 797	2.132	10.49
110	4 057	2.311	10.73

从表 7 可看出,随着设计密度的增大,沥青混合料的高温抗车辙性能先提高后降低,在设计密度为松装密度的 100%时达到高峰。其原因是:随着设计密度的增加,沥青混合料中粗集料不断增多,因而高温性能越来越好;但随着设计密度的进一步增大,沥青混合料的空隙率和矿料间隙率逐渐变大,沥青混合料越来越不密实,因而高温性能又有所下降。

3.3 低温弯曲试验

对表 5 中的 5 个级配进行低温弯曲试验,试验结果见表 8。

表 8 不同设计密度的低温弯曲试验

设计密度为松装密度的百分率/%	90	95	100	105	110
应变能密度/(kJ·m ⁻³)	7.14	8.07	8.80	6.20	5.02

从表 8 可看出,随着设计密度的增加,沥青混合料低温性能先提高后降低,当设计密度为松装密度

100%时存在一个最优点。由前面的分析可知,随着设计密度的增加,沥青混合料存在一个最密实点,从而可以推断沥青混合料的低温性能存在一个最优点。试验结果表明,沥青混合料低温性能最好是设计密度为松装密度的100%时,而沥青混合料是设计密度为松装密度的95%时最密实。由于本研究中沥青质量分数固定为4.5%,这样随着设计密度的增加,级配越来越粗,沥青混合料中沥青膜厚度不断增加。当设计密度增加5%时,沥青膜厚度就增大0.23 μm ,这导致了沥青混合料低温性能的提高。因此,沥青混合料低温性能的最优点并不是最密实点,而是出现往后推移的现象。

4 结 语

(1)仅用3个参数来检验非贝雷法设计的级配是不够的。对非贝雷法设计的级配,可根据本文提出的公式反算已知级配的设计密度值。综合运用反算出的设计密度和贝雷法3个参数,可以评价任意一个级配的优劣。

(2)设计密度的增加,实质上就是混合集料中粗集料质量分数的增加,细集料质量分数的减小。随着设计密度为松装密度90%增加到110%时,沥青混合料在设计密度为松装密度95%时最密实。

(3)不论是高温性能还是低温性能,随着设计密度为松装密度90%增加到110%时,沥青混合料都是在设计密度为松装密度100%时达到最优。

(4)综合各体积指标和路用性能,在用贝雷法设计级配时,建议设计密度约取松装密度的100%。

参考文献:

References:

- [1] William R V, William J P, Samuel H C. Aggregate blending for asphalt mix design Bailey method[C]// TRB. Transportation Research Record 1789. Washington D C: TRB, 2002: 146-153.
- [2] 张登良. 沥青与沥青混合料[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.
- [3] 谭忆秋, 邵显智, 张肖宁. 基于低温流变特性的沥青低温性能评价方法[J]. 中国公路学报, 2002, 15(3): 1-5.
TAN Yi-qiu, SHAO Xian-zhi, ZHANG Xiao-ning. Research on evaluations approach to low-temperature performance of asphalt based on rheology characteristic of low temperature[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(3): 1-5.
- [4] 袁 峻, 黄晓明. 级配碎石回弹变形特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(6): 29-33.
YUAN Jun, HUANG Xiao-ming. Resilient deformation behavior of unbound stone aggregates[J]. Journal of Chann'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(6): 29-33.
- [5] 张争奇, 李宁利, 陈华鑫. 改性沥青混合料拌和与压实温度确定方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 36-40.
ZHANG Zheng-qi, LI Ning-li, CHEN Hua-xin. Determining method of mixing and compaction temperatures for modified asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 36-40.
- [6] 王 龙, 冯德成. 提高级配碎石基层使用性能的方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 40-45.
WANG Long, FENG De-cheng. Methods for improving using performance of graded broken stone base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 40-45.
- [7] 田 波, 侯 芸, 杜二鹏, 等. 沥青混合料中骨架结构特征的评价[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2001, 29(5): 541-545.
TIAN Bo, HOU Yun, Du Er-peng, et al. Characteristic evaluation of coarse aggregate in hot mix of asphalt[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2001, 29(5): 541-545.
- [8] 许志鸿, 陈兴伟, 刘 红, 等. Superpave 级配范围[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(3): 1-6.
XU Zhi-hong, CHEN Xing-wei, LIU Hong, et al. Gradation scope of Superpave[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(3): 1-6.