

文章编号: 1002-0268 (2008) 02-0001-05

粗级配沥青混合料骨架结构的细观分析

陆阳¹, 周永江², 廖敬梅¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 四川省交通厅公路规划勘测设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 将数值模拟方法与室内试验相结合, 从细观角度探讨了粗级配沥青混合料的骨架特征。从混合料的矿料组成看, 根据不同粒径粗集料的组成百分比的变化, 粗集料既可能是构成混合料的骨架单元, 也可能起充填骨架间空隙的作用。以 $1/2$ 最大公称尺寸作为粗集料偏粗及偏细骨料的分界尺寸, 则当粒径小于分界尺寸的集料含量增加时, 偏细的粗集料起充填作用的可能性随之增大, 即细集料含量会影响混合料细观结构的传力特征; 当细集料充填量足够大时, 相当数量的细集料将具有与粗集料类似的结构特征, 从而导致混合料由密实骨架结构向悬浮密实结构的转化。

关键词: 道路工程; 粗级配沥青混合料; 数值模拟; 骨架结构; 配位数; 贝雷法

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

On the Microscopic Aspect of Skeleton Structure of Asphalt Mixture with Coarse Gradation

LU Yang¹, ZHOU Yong-jiang², LIAO Jing-mei¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. Institute of Highway Design and Research, Department of Sichuan Transportation, Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: Micro structure of skeleton of coarse aggregates of mixture was studied numerically in terms of particle coordination numbers and mixture porosity. Results show that coarse aggregates play a double role in the mixture. They are elements of the mixture skeleton and also void filling materials of the skeleton structure. Upon the assumption that the coarse aggregates can be further categorized into two classes as larger coarse aggregates and fine-coarse aggregates divided by the sieve size of $1/2$ of the nominal maximum size, some fine-coarse particles will actually act as void fillers rather than the elements of the skeleton structure. With the increase of the number of the fine-coarse aggregates, more fine-coarse aggregates will have a similar spatial location as that of the larger-coarse aggregates in the mixture. It is therefore justifiable to reason that if fine aggregates in the mixture exceed certain amount, the skeleton of coarse aggregate to coarse aggregate contact will no longer predominate. Reasonably good agreement was obtained between the numerical studies and the laboratory work.

Key words: road engineering; asphalt mixture with coarse gradation; numerical simulation; skeleton structure; coordination number; Bailey method

0 引言

按集料的嵌挤与填充情况, 可以将沥青混合料分为由粗集料形成骨架结构的粗级配混合料以及未形成粗集料骨架的细级配混合料。粗级配混合料要求细集

料不对粗集料产生明显干涉, 因此进行配合比设计时, 首先应当对粗细集料的划分有一个明确的定义。传统上, 沥青混合料以 4.75 mm 为粗细集料的分界粒径, 并常以此作为配合比设计的控制指标之一。近年来, 为考虑各组成集料的填充特性, 并提供一种可用

收稿日期: 2007-01-09

基金项目: 教育部博士点基金资助项目 (20040613018)

作者简介: 陆阳 (1957-), 男, 成都人, 教授, 博士生导师, 研究方向为道路工程. (luyjlm@sina.com)

来调整集成集料填充特性的数量法则,由文献[1]提出的贝雷法受到了学术界的广泛关注。贝雷法将分界粒径与集料的最大粒径及粗集料的级配相联系,并提出对粗细集料加以进一步分组的准则。这种集料多层次分级方法,可操作性强,得到了越来越多的工程应用^[2~5]。

为深入理解密级配沥青混合料粗集料骨架特性,论文利用在 VC++ 平台上开发的球形体堆积程序,将贝雷法基本思想与数值模拟方法相结合,从细观角度探讨了粗集料组成对沥青混合料粗级配骨架结构的影响,加深了对混合料骨架结构的认识。

1 粗级配沥青混合料的骨架结构特性分析

1.1 粗集料骨架结构的组成分析

理想状态下,粗级配沥青混合料的结构应当是:由粗集料形成空间均匀分布的骨架,并按混合料要求达到的空隙率,再由较细集料充填骨架间的空隙。可见,粗集料骨架的结构特性至少涉及两个参数,即粗细集料的分界粒径及不同粒径粗矿料所占的比例。沥青混合料的传统设计方法以 4.75 mm 筛孔为粗细集料的划分界限,不同粒径矿料的组成则根据经验确定。传统方法没有明确混合料骨架结构与粗细集料分界粒径及粗集料组成之间的联系,无法反映粗集料分组粒径组成的改变引起的粗细集料分界粒径的变化。例如较粗粒径矿料所占比例减小时,相当数量的原本起充填作用的集料,可能转换为构成骨架的组成单元。相比之下,贝雷法能更好地解释不同粒径集料间的嵌挤与填充关系。贝雷法考虑了密级配沥青混合料中,粗细集料分界粒径与集料公称最大粒径的近似关系,建议将构成骨架结构的粗集料进一步分为粗、细二部分,并由二者的比值作为粗集料组成的评价参数,则粗集料比 CA 为:

$$CA = \frac{P_{D/2} - P_{PCS}}{100 - P_{D/2}}, \quad (1)$$

式中, $P_{D/2}$ 为筛孔为 $D/2$ (D 为集料的公称最大粒径)的集料通过率; P_{PCS} 为粗细集料分界粒径筛孔的通过率。

式(1)中 $1/2$ 公称最大粒径是进一步划分粗集料中粗、细级配的分界点,并由 $P_{D/2}$ 反映混合料中粗集料部分的填充特性。显然, CA 值的增大意味着粗集料中细料部分含量增多。根据工程经验,粗集料中细料部分过多会增加施工碾压难度;反之,若 CA 值过小,粗集料中细料部分含量较少,容易产生离析。因此,贝雷法建议的密级配沥青混合料 CA 取值范围为 0.4 ~

0.8。

1.2 混合料粗级配细观评价方法

对沥青混合料骨架结构的传统评价方法是基于体积指标的宏观评价,评价精度对试验条件非常敏感,变异性大。近年来随着计算机仿真技术的发展,基于数字模拟的虚拟试验在混合料细观结构分析中受到学术界的重视^[6~9]。鉴于本文主要探讨集料组成对骨架结构的影响,故将集料简化为按一定级配分布且随机地存在于混合料空间中的某一位置的球形体。作为混合料骨架组成部分的单个矿料,它既是受力体又是施力体,因此在稳定状态下,骨架组成单元的集料,其重心的投影须位于支承该集料的其他球体组成的平面内,从而在混合料内部集料之间互成点与点的接触形式。另一方面,粗级配沥青混合料以粗集料的干捣密度及松装密度为形成骨架结构的上、下限^[10],故处于空间稳定位置的集料应满足局域势能最小原理。所以对混合料骨架构成过程的模拟可分两步进行:首先是集料的随机生成,包括矿料的粒径、在空间的初始位置;然后通过矿料的下落、滚动,确定约束条件下生成矿料的最终稳定位置。模拟中,集料的构造是一个顺序过程,而且一旦生成,则认为已处于稳定状态,与边界条件共同形成待生成集料的约束。

根据上述原理,作者开发出沥青混合料骨架结构组成程序^[6,8,9]。程序采用面向对象的设计思想,以便于考虑不同几何形态或边界条件下的混合料的骨架构造。考虑到混合料内部结构的模拟需大量集料单元的集成,难以逐个考察各单元与其他集料之间的相互接触关系,因此有必要利用可视化技术以了解混合料内部结构。鉴于此,决定在 VC++ 开发平台上进行程序的研制,并以单一粒径球体以及两种粒径球体组成结构框架的情况,对程序的可靠性进行了验证。

在模拟形成的骨架基础上,以配位数(所考察矿料与其他集料接触的数目)作为描述矿料个性的细观指标。例如作为骨架组成单元,由于传力要求,其矿料配位数至少应大于等于 4;处于无接触的悬浮状态下,矿料的配位数等于 0。由此可对混合料中集料的状态进行统计分析并加以判断。

2 粗集料骨架的级配敏感性分析

粗集料构成了粗级配沥青混合料的骨架,而粗集料不同粒径组的相对数量直接影响骨架的结构形式。为简化问题,假定滞留于任意一标准筛上的集料均连续且呈均匀分布,则由矿料级配曲线经变换可得关于粗集料各分组占粗集料总体积的百分率。由于密度函

数以集料样本容量为变量，而级配曲线以集料体积（设集料颗粒表观密度为恒定值）为度量单位，故以变换后的百分占有率除以各分组粒径集料各自的平均体积，然后进行归一化处理，得各组粗集料以样本容量为度量单位。参考文献 [11] 推荐的密级配沥青混合料 DAC16 级配组成，经变换后的粗集料样本分组频率如图 1。

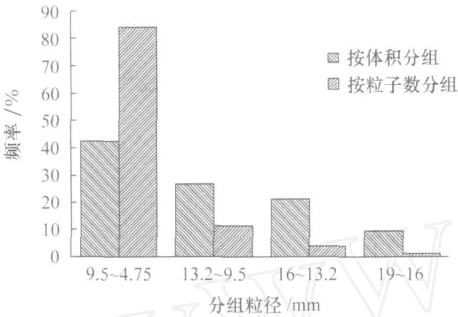


图 1 DAC16 粗集料（中值配比）分组百分率

Fig. 1 Percentage of each group of coarse aggregate group of DAC16

依据粗集料样本分组频率，由蒙特卡罗法随机确定矿料所属集料分组，再由式（2）确定矿料粒径：

$$d = d_1 \sqrt{\frac{1}{N[1 - G[1 - (d_1/d_2)^2]]}}, \quad (2)$$

式中， G 为由乘同余数法产生的伪随机变量； d_1 、 d_2 为粗集料各组粒径的上下限，模拟中， d_1 、 d_2 分别等于 4.75、9.5、13.2、16、19 mm。

试验及数值模拟均证实，混合料体积指标受试验容器或边界条件的影响^[5,8]。但散离体定位是基于二向搜索的接触判断，过大的边界使模拟迭代次数成指数函数增长。综合上述因素，混合料试件取直径 190 mm，高 171 mm 的圆柱体。

为考察粗细级配混合料骨架结构的影响，以粗集料比 CA 为参数，生成表 1 所示粗集料组成方案下的混合料骨架结构。表 1 中，方案 1 参照文献 [11] 选取密级配沥青混合料 DAC16 中值配比， CA 由式（1）计算；其中因集料分段连续均布， $P_{D/2}$ 由 $P_{4.75}$ 及 $P_{9.5}$ （ $P_{4.75}$ 、 $P_{9.5}$ 分别为粒径 4.75、9.5 mm 的百分通过率，下同）两点线性插值确定。方案 2、方案 3 则先据 CA 值反算 $P_{D/2}$ ，再定 $P_{9.5}$ 、 $P_{13.2}$ 。由此得方案 1 ~ 方案 3 的试件骨架结构，进而计算空隙率、集料平均配位数等参数（以频率为权函数的配位数之和，表 2），其中分析配位数频率时，只就试件内部的 $\phi 150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 圆柱体（与试件同轴但距试件底部 38.0 mm）范围内的集料进行了统计，以减小试件边界对

结果的影响。

表 1 计算方案及集料级配组成

Tab. 1 Scheme and gradation of aggregates

方案	矿料通过下列筛孔 (mm) 的质量百分率 / %						粗集料比 CA
	19	16	13.2	9.5	8	4.75	
级配范围	100	90 ~ 100	76 ~ 92	60 ~ 80	—	34 ~ 62	
方案 1	100	95	84	70	63.1	48	0.407
方案 2	100	95	80.2	60.7	56.7	48	0.20
方案 3	100	95	87.0	76.5	67.5	48	0.60

表 2 骨架空隙率及平均配位数随粗集料比的变化

Tab. 2 Variation of skeleton voids and average coordination number with different CA ratios

粗集料比 CA	模拟方案	空隙率	平均配位数	
			全体粗集料	$\phi \geq 8 \text{ mm}$ 粗集料
0.20	2	0.462	6.32	5.05
0.41	1	0.458	6.29	4.07
0.60	3	0.450	6.31	3.48

模拟结果表明，当骨架由粒径大于 4.75 mm 的矿料构成时， CA 值的变化对配位数频率分布影响不大（图 2），相应地，平均配位数的改变也不十分显著。但是，仅考察粒径大于 8.0 mm 的矿料时，配位数频率分布曲线出现左移（图 3），而且随 CA 值的增大，曲线的左移更为明显，并出现配位数等于零的矿料，表明有孤立的大粒径矿料悬浮存在于小于 $\phi 8.0 \text{ mm}$ 的矿料中。

值得注意的是，粗集料比 CA 值由 0.2 增大至 0.6 时，混合料骨架空隙率变化并不显著，但结合反映混合料细观结构的指标——配位数进行分析，发现 $CA = 0.20$ 时，混合料中约 8 % 的粗集料（按数量计）的配位数等于 3，而当该矿料为骨架结构组成单元具有传力功能时，所要求的配位数不应小于 4，因此认为有相当一部分粗集料仅起填充作用，而正是由于填充矿料的增多减小了空隙率。对 $CA = 0.20$ 的骨架组成的进一步分析发现，粒径小于 8 mm 的粗集料中，配位数等于 3 的矿料的体积比为 7.1 %。 CA 增至 0.41、0.60 时，配位数等于 3 的矿料在 8 mm 以下粗集料中所占比例分别降至 3.7 % 和 2.7 %。可见，粗集料中较细部分偏少时，更多的粗细级配矿料仅起填充空隙作用而不是作为组成骨架的单元存在于混合料中。由此推论，粗细集料的分界不仅与集料的最大粒径相联系，而且受粗集料组成的影响。

3 细集料的充填作用分析

贝雷法引入了集料分级嵌挤、充填的思想，将细集料进一步划分为粗、细两个部分，其中细集料中的

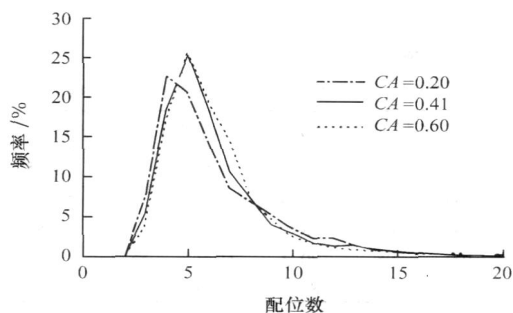


图2 以粗集料比为参数的矿料配位数分布频率

Fig. 2 Frequency distribution of coordination number with CA ratio

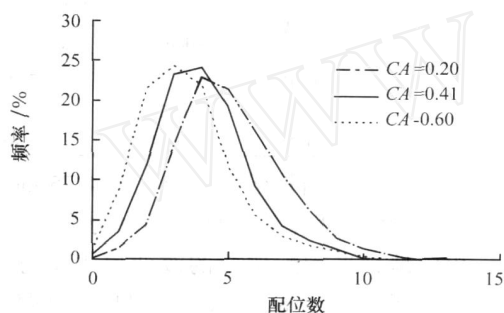


图3 以粗集料比为参数的粒径大于8.0 mm的矿料配位数分布频率

Fig. 3 Frequency distribution of coordination number of particles larger than 8.0 mm with CA ratio

粗料部分起充填粗集料骨架空隙的作用。为加以说明,现考察4.75~2.36 mm组集料在上述方案1所形成骨架结构内的充填情况,即首先随机生成4.75~2.36 mm的矿料,并初步确定该矿料在空间的随机分布,然后以方案1所形成的骨架及边界条件为约束,进行新生成矿料的定位。

相同收敛条件下的模拟结果表明,在方案1形成的骨架内部,4.75~2.36 mm粒径组矿料的最大充填量占19~2.36 mm集料总体积量的13.1%,使粗集料间空隙率减小0.061。作为对比,课题组进行了集料的充填试验。试验选用粒径19~4.75 mm的近似浑圆状的卵石作为粗集料,其组成见表3(总重量13.0 kg,毛体积密度等于2.727)。由于难以获取相应粒径的卵石作为细集料,4.75~2.36 mm的细集料由碎石替代(毛体积密度等于2.797)。参照文献[12],试验采用 $\phi 233$ mm圆柱形桶。试验首先测试混合均匀的粗集料在桶内的堆积高度。然后在混合料中加入130 g碎石细集料,并在桶外与粗集料混合均匀,按同样方法分3层装入试桶,分层捣实后量测堆积高度(分3次平行试验并取其平均值)。重复上述步骤,且

每次测试均在前一次形成的混合料基础上再新加入130 g碎石,得混合料堆积高度随碎石加入量变化情况如图4。

表3 试验集料组成

Tab. 3 Composition of aggregates in filling test

分组粒径/mm	19~16	16~13.2	13.2~9.5	9.5~4.75	4.75~2.36
分组重量/kg	1.25	2.76	3.50	5.50	0.13 n [*]

注: n^{*} = 0, 1, 2, ...

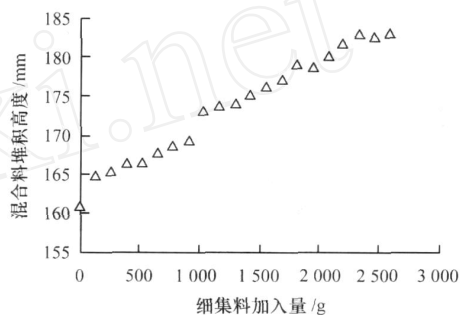


图4 混合料堆积高度随细集料加入量的变化曲线

Fig. 4 Height of packing mixture vs amount of mixed fine aggregates

不含4.75~2.36 mm细集料时,测得粗集料松装堆积高度为173.09 mm。细集料加入量小于0.91 kg时,经干捣的混合料堆积体积没有明显增大;但细集料加入量大于1.04 kg后,经捣实的混合料体积大于粗集料松装堆积体积,表明4.75~2.36 mm的细集料等于集料总量的6.5%~7.4%时,细集料开始对粗集料产生明显干涉。再对19~16、16~13.2、13.2~9.5、9.5~4.75 mm粒径组碎石及卵石分别进行干捣堆积对比试验,测得碎石堆积密度较卵石小5.3%~6.2%。由此修正细集料充填量,可得与模拟结果足够接近的试验结果。

最后需指出,以4.75~2.36 mm矿料充填方案1骨架空隙时,该粒径组中有21.4%的集料的配位数大于或等于6,其平均配位数也达到4.51,也就是说有相当部分粒径为4.75~2.36 mm的细集料具有与粗集料类似的细观结构,导致混合料内部荷载传递方式的改变。因此,混合料中起骨架或充填作用的集料应视为统计意义上的相对划分。

4 结论

论文在贝雷法提出的集料多层次分级理论的基础上,应用数值模拟方法,从细观角度探讨了粗级配沥青混合料的骨架特征。对算例的分析表明:就个体粗集料而言,它既可能是混合料骨架的组成单元,也可能起充填骨架间空隙的作用,特别是在粗集料中细级

配集料所占比例增加时,较细的粗集料所起充填作用的可能性随之增大,导致更多的粗颗粒矿料悬浮于细级配粗集料中。另一方面,混合料结构特征还受到细集料含量的影响,细集料含量小则以充填作用为主;但当充填量足够大时,即使不改变由粗集料组成的混合料骨架,相当数量的细集料也会具有与粗集料类似的细观结构。

参考文献:

References:

- [1] VAVRIK W R, PINE W J, HUBER G, *et al.* The Bailey Method of Gradation Evaluation: The Influence of Aggregate Gradation and Packing Characteristics on Voids in the Mineral Aggregate [J]. *Asphalt Paving Technology*, 2002, 70: 132 - 175.
- [2] 于新, 吴建浩. 贝雷方法应用探讨 [J]. *公路*, 2003 (8上): 83 - 87.
YU Xin, WU Jian-hao. Discussion about Application of Bailey Method [J]. *Highway*, 2003 (8.1): 83 - 87.
- [3] 陈旭庆, 黄晓明, 杨军. 沥青混合料骨架形成问题的研究 [J]. *城市道桥与防洪*, 2003 (5): 23 - 27.
CHEN Xu-qing, HUANG Xiao-ming, YANG Jun. Study on Problem of Skeleton Formation of Bituminous Mixture [J]. *Municipal Road, Bridge and Flood Control*, 2003 (5): 23 - 27.
- [4] 彭波, 袁万杰, 李晓华, 等. 贝雷法在 SMA-16 型集料级配设计中的应用 [J]. *公路交通科技*, 2005, 22 (10): 23 - 26.
PENG Bo, YUAN Wan-jie, LI Xiao-hua, *et al.* Bailey Method for Aggregate Grading Design of SMA-16 [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22 (10): 23 - 26.
- [5] 何昌轩, 陆阳, 黄晚清. 集料颗粒形状对骨架结构体积指标及 SGC 压实特性影响的研究 [J]. *公路*, 2007 (3): 112 - 118.
HE Chang-xuan, LU Yang, HUANG Wan-qing. Research on Influence of Particle Shape of Coarse Aggregate on Volume Index of Skeleton Structure and SGC Compacting Characteristics [J]. *Highway*, 2007 (3): 112 - 118.
- [6] 黄晚清, 陆阳, 何昌轩, 等. 刚性散粒体随机堆积的三维数值模拟 [J]. *公路交通科技*, 2006, 23 (12): 21 - 24.
HUANG Wan-qing, LU Yang, HE Chang-xuan, *et al.* 3-D Numerical Simulation of Random Packing of Rigid Particles [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23 (12): 21 - 24.
- [7] 王端宜, 张肖宁, 王绍怀. 用虚拟试验方法评价沥青混合料的级配类型 [J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2003, 31 (2): 48 - 51.
WANG Duan-yi, ZHANG Xiao-ning, WANG Shao-huai. Evaluation on Grading Type of Asphalt Mixture with Virtual Test Method [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2003, 31 (2): 48 - 51.
- [8] 陆阳, 周永江, 张蓉. SMA 粗集料结构的数值模拟 [J]. *中国公路学报*, 2006, 19 (1): 38 - 41.
LU Yang, ZHOU Yong-jiang, ZHANG Rong. Numerical Modelling of Coarse Aggregate Skeleton of Stone Matrix Asphalt [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19 (1): 38 - 41.
- [9] 陆阳, 张蓉, 廖敬梅. 开级配沥青稳定碎石 (ATPB) 骨架结构的细观分析 [J]. *公路*, 2007 (2): 107 - 110.
LU Yang, ZHANG Rong, LIAO Jing-mei. Microscopic Analysis for the Structure of Open Graded ATPB [J]. *Highway*, 2007 (2): 107 - 110.
- [10] 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): 1 - 6.
HAO Pei-wen, XU Jin-zhi, ZHOU Huai-zhi. Key Technologies of Aggregate Blending by Bailey Method [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2004, 24 (6): 1 - 6.
- [11] JTG F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S].
JTG F40-2004, Technical Specification for Construction of Highway Asphalt Pavements [S].
- [12] JTG E42-2005, 公路工程集料试验规程 [S].
JTG E42-2005, Test Method of Aggregate for Highway Engineering [S].