

DOI:10.11918/202101076

多孔沥青混合料矿料间隙率物理模型的构建

李金凤,何兆益,官志桃

(重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074)

摘要: 为了解多孔沥青混合料(PAC)的主骨架结构和矿料间隙率,针对多孔沥青混合料的多空隙特点,将所有矿料划分为较大粒径集料(LSA)、主集料(DASR)、干涉集料(PDA)和间隙集料(ICA)四部分,分析主集料形成的主骨架空隙结构,确定各部分集料的粒径范围,并提出了主骨架空隙率的计算方法。基于体积法,考虑ICA的填充作用、PDA的干涉作用和LSA的取代效应,构建PAC混合料矿料间隙率的物理模型,并通过PAC-13和PAC-10击实试验验证该模型预测效果。结果表明:对于DASR形成的主骨架空隙,ICA主要起填充作用;PDA的干涉作用虽然会占据DASR形成的部分骨架空隙,但一定程度上也会增大主骨架的空隙;粒径较大的LSA取代部分DASR后也会使得主骨架的空隙率有所增大;对于DASR形成的主骨架空隙率,LSA、PDA和ICA对矿料间隙率的影响具有不同的方向性;在PAC级配设计初始阶段,无需制作混合料试件,仅依据级配曲线确定四组分集料的分界粒径即可预估相应的矿料间隙率,方便确定最佳级配,在很大程度上减少了PAC混合料配合比设计的试验量。综上,所建模型具有合理性和有效性,有较好预测效果。

关键词: 道路工程;多孔沥青混合料;主骨架结构;矿料间隙率;物理模型

中图分类号: TU449

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)03-0139-09

Physical model for void ratio in mineral aggregates of porous asphalt concrete

LI Jinfeng, HE Zhaoyi, GUAN Zhitao

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To investigate the main skeleton structure and void ratio in mineral aggregate (VMA) of porous asphalt concrete (PAC), according to the porosity of PAC, all mineral aggregates were divided into four parts: larger size aggregate (LSA), dominant aggregate size range (DASR), potentially disruption aggregate (PDA), and interstitial component aggregate (ICA). The main skeleton void structure formed by DASR was analyzed, the particle size range of each aggregate part was determined, and the calculation method of the void ratio in main skeleton was proposed. Based on the volume method, the physical model for VMA of PAC was developed by introducing the filling mechanism of ICA, interference of PDA, and substitution effect of LSA, which had a good prediction effect compared with compaction test results of PAC-13 and PAC-10. Results show that for the main skeleton void structure formed by DASR, ICA mainly played the role of filling the skeleton voids. The interference of PDA though occupied part of the skeleton voids formed by DASR, increased the main skeleton voids to a certain extent. LSA with larger particle size also increased the void ratio of the main skeleton structure after replacing part of DASR. LSA, PDA, and ICA had different directionality effects on the void ratio of main skeleton formed by DASR. In the initial aggregate grading design of PAC, there is no need to prepare test specimens, and the corresponding VMA can be predicted by determining the critical particle size of the four aggregate parts according to the grading curves. It is convenient to determine the best gradation by using this model, which greatly reduces the experimental workload for PAC mixture design. In conclusion, the proposed model is reasonable and effective, and has a good prediction effect.

Keywords: road engineering; porous asphalt concrete (PAC); main skeleton structure; void ratio in mineral aggregate (VMA); physical model

沥青混合料是一种典型的多相复合材料,由集料、沥青和填料等不同性质的材料组成。其中,粗集

料形成骨架结构,承担车辆荷载;细集料、填料和沥青填充粗集料形成的空隙,提高路面结构的整体稳定性。矿料间隙率是沥青混合料级配设计的重要体积参数,对沥青混合料性能有显著影响^[1]。相比密级配或骨架密实型沥青混合料,多孔沥青混合料(PAC)作为环境友好型路面材料,为了实现在大雨期间加快路面排水、减少路面水膜、提高路面抗滑以

收稿日期: 2021-01-20

基金项目: 交通运输部行业重点科技项目(2018-TG-003);
国家自然科学基金面上项目(51978116)

作者简介: 李金凤(1986—),女,博士研究生;
何兆益(1965—),男,教授,博士生导师

通信作者: 李金凤,511417058@qq.com

及有效降低交通噪音等功能^[2-4],需要较大空隙率,通常控制在 20%左右^[4-5]。空隙率通常是由矿料间隙率推求而来,因此开展 PAC 混合料主骨架结构和矿料间隙率物理模型的研究具有重要的工程意义。

沥青混合料的强度来源于集料的嵌挤和沥青砂浆的黏结,对抗车辙、抗裂和抗水损害等有重大意义^[6]。根据尺寸大小,集料可分为粗集料和细集料^[7],合理的粗细集料比例可以确保沥青混合料形成稳定的主骨架结构。沥青混合料的力学性能和体积指标高度依赖于集料的级配曲线类型^[8]。文献^[9]提出了接近于抛物线形状的密实级配设计方法,但密实结构并不意味着混合料中存在主骨架结构。文献^[10]引入粗细集料比作为评价指标,可粗略表征沥青混合料的骨架性能,但该比值具有经验性质,并不能反映细集料对粗集料的影响。文献^[11-12]基于颗粒堆积和粒径分布理论提出了评估沥青混合料粗集料骨架结构的的分析模型,确定了形成骨架结构的主集料粒径范围(DASR),并分析了 DASR 与沥青混合料抗车辙^[13-15]和抗裂^[12]的相关性。文献^[16]利用 DASR 的概念,将粒径小于 DASR 的集料称为间隙组分,将沥青与空隙的体积之和作为间隙体积,并引入干涉系数(DF)来评估间隙组分对主骨架结构的影响,最后研究了沥青砂浆、粒径小于 DASR 的集料含量以及空隙率对沥青混合料抗车辙和抗裂性能的影响。综上可知,DASR 与沥青混合料路用性能有很好的相关性,形成的主骨架结构决定了混合料的矿料间隙率,进而影响混合料的空隙率,但并没有提出矿料间隙率的计算方法。

现有级配设计方法主要有泰勒曲线法、体积填充法和贝雷法等^[17],这些方法主要针对是密级配沥青混合料。目前,常采用试错法或基于经验模型选择满足空隙率目标要求的最佳级配,其弊端就是需要开展大量的试验测试。本文将在 DASR 的基础上进行拓展,构建适于计算 PAC 混合料矿料间隙率的物理模型,方便选定满足目标空隙率要求的混合料最佳级配,可节约大量的时间和精力,能够有效控制混合料性能差的风险。

1 DASR 法及其改进

1.1 原始 DASR 法

文献^[12]基于颗粒堆积理论和粒径分布构建了一种评估粗集料骨架结构的理论方法,提出了描述沥青混合料组成的物理模型。该模型认为沥青混合料由主集料(DASR)形成空间骨架结构,其间隙部分是由粒径小于 DASR 的集料(称为间隙集料 ICA,可完全融入到 DASR 的内部空隙中)、沥青和

空隙组成,如图 1 所示。

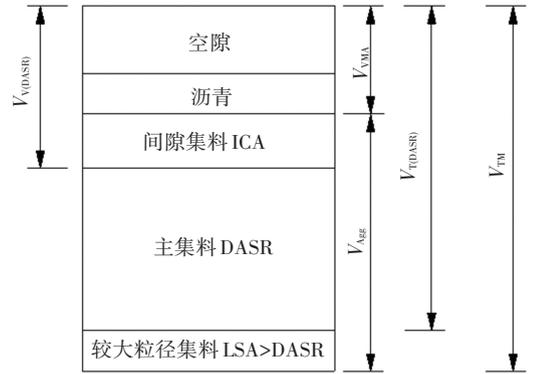


图 1 计算主骨架空隙率的沥青混合料组成^[11]

Fig.1 Mixture components for calculation of main skeleton void ratio^[11]

沥青混合料经压实后矿物集料之间的有效空间体积(矿料间隙体积)所占总体积的百分比,即为矿料间隙率,类似于土体中的孔隙率。则有

$$V_{VMA} = V_{TM} - V_{Agg} \quad (1)$$

式中: V_{VMA} 为矿料间隙体积, V_{TM} 为压实后混合料的总体积, V_{Agg} 为混合料中集料所占的体积。

如果沥青混合料在给定的集料级配下具有一定的有效沥青含量和空隙率,则可计算 DASR 形成主骨架的空隙率。将粒径大于 DASR 的集料称为较大粒径集料(LSA),其占比较少;利用混合料的总体积减去 LSA 的颗粒体积来计算 DASR 的总体积,即

$$V_{T(DASR)} = V_{TM} - V_{LSA} \quad (2)$$

式中: $V_{T(DASR)}$ 表示 DASR 形成的主骨架总体积,包括 DASR 本身及其形成的主骨架空隙部分; V_{LSA} 表示 LAS 的颗粒体积。

DASR 形成的主骨架空隙体积包括间隙集料(ICA)体积、有效沥青体积和空隙体积(后两者之和即为矿料间隙体积 V_{VMA}),则有

$$V_{V(DASR)} = V_{ICA} + V_{VMA} \quad (3)$$

式中: $V_{V(DASR)}$ 为 DASR 形成的骨架空隙体积, V_{ICA} 为 ICA 的颗粒体积。

DASR 骨架空隙率的计算表达式为

$$\eta_{DASR} = \frac{V_{V(DASR)}}{V_{T(DASR)}} = \frac{V_{ICA} + V_{VMA}}{V_{TM} - V_{LSA}} \quad (4)$$

由式(4)可知,ICA 的体积是影响主骨架空隙率的主要因素,LSA 在混合料中只是取代少部分 DASR,并不会影响混合料的矿料间隙率。而实际情况是,混合料中 LSA 比同等含量的 DASR 形成空隙体积要大,因而 LSA 不仅取代了少部分 DASR,还会影响混合料的矿料间隙。另外,混合料中还包括颗粒粒径介于 DASR 与 ICA 之间的集料,这部分集料并不能完全融入到 DASR 形成的骨架空隙中,在占

据 DASR 内部空隙的同时还会干涉 DASR 的骨架结构,进而影响混合料的矿料间隙率,将这部集料称为干涉集料 PDA。针对上述不足,本文将通过考虑 LSA 和 PDA 的影响,对原始的 DASR 法进行改进和完善。

1.2 改进的 DASR 法

1.2.1 骨架空隙结构

PAC 混合料属于典型的骨架大空隙结构, DASR 主骨架结构的稳定性取决于较小粒径集料如何融入到 DASR 内部的骨架空隙。通常将集料颗粒假定为球体形状在混合料中呈随机堆积排列,利用颗粒堆积理论可近似确定主骨架空隙结构(空隙类型、数量和大小)。对于规则的球体系统,可利用基于填充的数学方程对其空隙结构进行评估。若采用试验测定(如 CT 扫描)可获得准确的混合料空隙结构,但费用昂贵,应用受到极大限制。较小粒径集料与单个 DASR 骨架空隙之间的关系如图 2 所示。

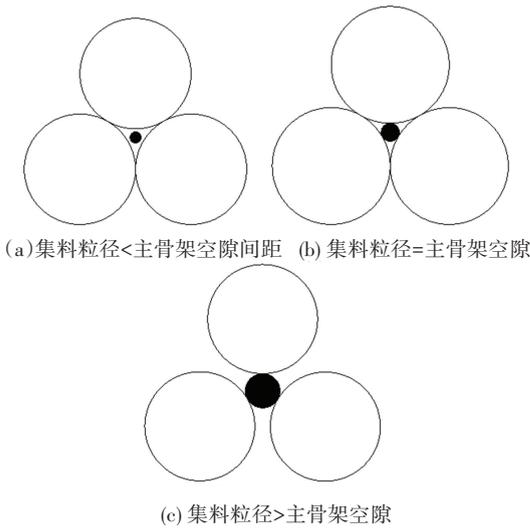


图 2 DASR 形成的主骨架结构的局部稳定性

Fig. 2 Local stability of main skeleton structure formed by DASR

由图 2 可以看出,若集料的粒径小于主骨架空隙,主骨架结构是稳定的;若集料粒径等于主骨架空隙,主骨架结构的稳定性处于临界状态;若集料粒径大于主骨架空隙,主骨架结构会遭到破坏,也就是对主骨架形成了干涉,将其称为干涉集料 PDA。如图 3 所示,当所有集料粒径均小于主骨架空隙尺寸时,则主骨架结构处于稳定状态,见图 3(a); PDA 数量越多,主骨架结构受到的干涉影响越明显;随着 PAD 数量的增多,主骨架结构的接触点会显著减少,使得骨架结构的空隙率也会有所增大。

假定集料为球体形状, DASR 和 PDA 的半径分别为 R_D 和 R_P 。根据堆积理论,二维平面内 R_D 和 R_P

之间的关系,如图 4 所示。考虑集料颗粒形状的影响,取图 4 中 4 种情况的平均值 $R_P = 0.22R_D$ 作为 PDA 粒径的最小值。若 DASR 颗粒的平均半径为 R_D , 则 PDA 颗粒平均半径 R_P 介于 $0.22R_D \sim R_D$ 之间。对于粒径小于 PDA 的集料即为间隙集料 (ICA), 能够完全融入主骨架空隙中,且由于多孔沥青混合料中的细集料占比较少,不会出现主骨架空隙完全被填满的情况,也就是说所有的 ICA 均可完全融入到主骨架空隙中。

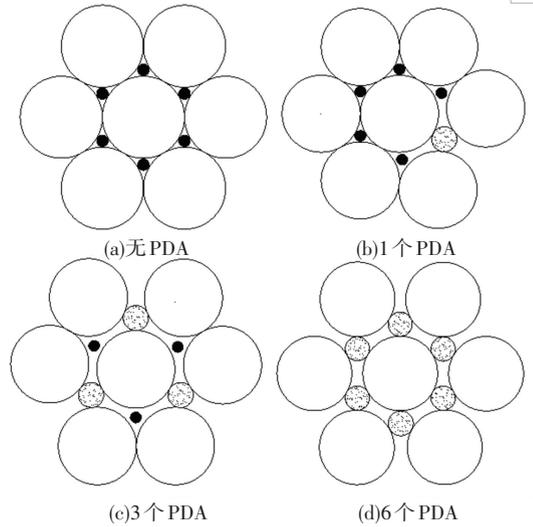


图 3 PDA 的干涉对 DASR 主骨架结构稳定性的影响

Fig. 3 Influence of PDA interference on the global stability of main skeleton structure formed by DASR

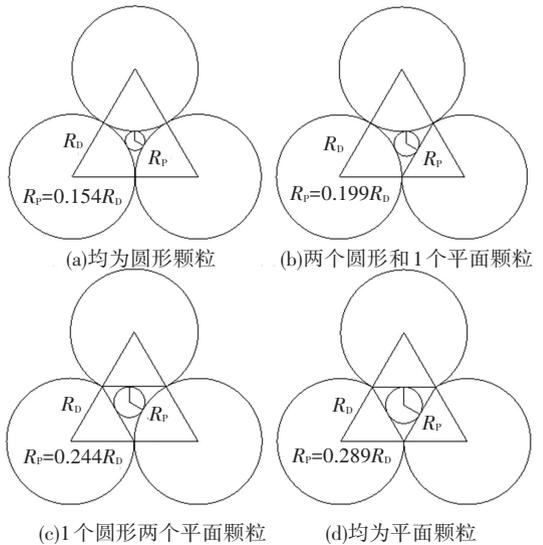


图 4 不同面主集料颗粒组合的二维分析

Fig. 4 Two-dimensional analysis of DASR particle combinations with different particle surfaces

由于 LSA 的粒径大于 DASR,且在混合料中所占比例较少,不会对主骨架结构稳定性产生较大影响^[11],但会形成较大空隙,一定程度上会增大混合

料的矿料间隙率。图 5 给出了 LSA 和 DASR 不同组合形成的局部结构,阴影部分即为空隙,LSA 和 DASR 的颗粒半径分别为 R_L 和 R_D ,其中 $R_L > R_D$ 。3 个 DASR、两个 DASR 和 1 个 LSA、1 个 DASR 和两个 LSA 以及 3 个 LSA 颗粒等组合的中间空隙面积依次增大。3 个 DASR 颗粒的内部空隙为

$$A_0 = (\sqrt{3} - 0.5\pi) R_D^2 \quad (5)$$

两个 DASR 和 1 个 LSA 颗粒的内部空隙为

$$A_1 = R_D \sqrt{R_L^2 + 2R_L R_D} - 0.5\pi R_D^2 - \frac{1}{2} \arccos \sqrt{1 - \left(\frac{R_D}{R_L + R_D}\right)^2} \quad (6)$$

1 个 DASR 和两个 LSA 颗粒的内部空隙为

$$A_2 = R_L \sqrt{R_D^2 + 2R_L R_D} - 0.5\pi R_L^2 - \frac{1}{2} \arccos \sqrt{1 - \left(\frac{R_L}{R_L + R_D}\right)^2} \quad (7)$$

3 个 LSA 颗粒的内部空隙为

$$A_0 = (\sqrt{3} - 0.5\pi) R_L^2 \quad (8)$$

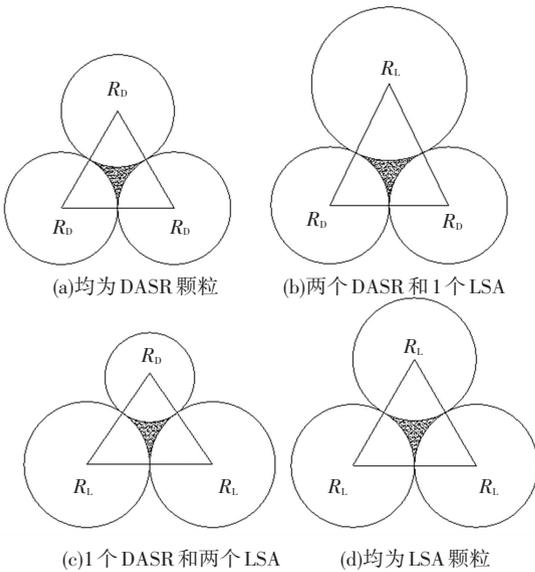


图 5 不同 LSA 和 DASR 组合的二维分析

Fig.5 Two-dimensional analysis of different combinations of LSA and DASR

文献[11-14]基于大量测试结果,提出了一种用于计算压实后混合料中特定粒径颗粒之间中心距的理论分析程序。该程序计算表明,两个相邻粒径颗粒含量(质量)的相对比例接近 70/30,如(68~70)/(32~30)时,颗粒间距开始迅速增大;如果这一相对比例超过 70/30 的阈值,一种粒径颗粒将会严重破坏其他粒径颗粒的相互作用能力。举例说明如下:4.75~9.5 mm 和 2.36~4.75 mm 即为两相邻粒径,4.75~9.5 mm 和 9.5~13.2 mm 也是两相邻粒径,根据筛孔尺寸类推;混合料中两相邻粒径颗粒含量

的比值即为相对比例。

为了确保颗粒间良好的相互作用,两个相邻粒径 A 和 B,若粒径 A 颗粒含量的比例不大于 70%,则粒径 B 颗粒含量的比例不应小于 30%。因此,70/30 的相对比例可以作为标准用于判定相邻筛孔上的集料颗粒能否形成连续接触相互作用的颗粒骨架结构,DASR 也可基于 70/30 的相对比例限定其粒径范围。DASR 可以由 1 个或多个尺寸粒径的集料组成。

综上所述,由两个相邻粒径颗粒含量(质量)的相对比例为 70/30,可以方便确定 LSA 和 DASR、DASR 和 PDA 的分界尺寸;由 PDA 最小粒径等于 DASR 粒径的 0.22 倍,可以确定 PDA 和 ICA 的分界尺寸。

1.2.2 主骨架空隙率

根据前述分析,较大粒径集料 LSA、干涉集料 PDA 和间隙集料 ICA 均会对沥青混合料的矿料间隙率产生影响。图 6 为 PAC 混合料组成的示意图,DASR 形成的主骨架结构总体积可由式(2)改写为

$$V_{T(DASR)} = V_{TM} - (V_{LSA} + V_{PDA}) \quad (9)$$

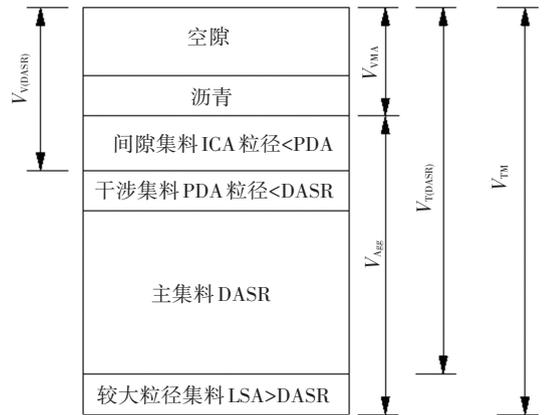


图 6 多孔沥青混合料组成的示意图

Fig.6 Schematic diagram of PAC compositions

DASR 形成的骨架空隙体积包括 ICA 颗粒体积、LSA 取代作用增大的空隙体积 ΔV_{LSA} 、PDA 干涉作用增加的空隙体积 ΔV_{PDA} 、有效沥青体积以及矿料间隙体积等。DASR 的骨架空隙体积由式(3)可改写为

$$V_{V(DASR)} = V_{ICA} + V_{VMA} + \Delta V_{LSA} + \Delta V_{PDA} \quad (10)$$

DASR 骨架结构的空隙率 η_{DASR} 可由式(4)可改写为

$$\eta_{DASR} = \frac{V_{V(DASR)}}{V_{T(DASR)}} = \frac{V_{ICA} + V_{VMA} + \Delta V_{LSA} + \Delta V_{PDA}}{V_{TM} - V_{LSA} - V_{PDA}} \quad (11)$$

根据图 5 种的 4 种情况,LSA 作用增加的空隙率 $\Delta \eta_{LSA}$ 为

$$\Delta\eta_{LSA} = \frac{\Delta V_{LSA}}{V_{TM} - V_{LSA} - V_{PDA}} = \left(\frac{A_1 + A_2 + A_3 - 3A_0}{3A_0 + 3\pi R_D^2} \right) P_{LSA} = (\eta_{LSA} - \eta_{DASR}) P_{LSA} \quad (12)$$

虽然 PDA 颗粒粒径较小, 但无法完全融入到混合料的主骨架空隙中, 因而 PDA 会对主骨架起到干涉作用使空隙含量增加, 同时也会占据主骨架中的部分空隙使空隙含量减小。这样, PDA 在混合料中就起到两种作用效果。若混合料中只含有 PDA, 也会形成内部空隙。假定 PDA 使空隙增加的部分等于 PDA 经捣实后的空隙率 η_{PDA} 与其在混合料中所占比例的乘积, 还需要减去 PDA 自身的颗粒体积, 由此构建考虑 PDA 作用的矿料间隙率的数学表达式为

$$\Delta\eta_{PDA} = \frac{\Delta V_{PDA}}{V_{TM} - V_{LSA} - V_{PDA}} = \frac{\frac{P_{PDA}(V_{T(PDA)} - V_{PDA})}{V_{T(PDA)}} - V_{PDA}}{V_{TM} - V_{LSA} - V_{PDA}} = \frac{\frac{\rho_{DASR}}{\rho_{DASR}} \left(\eta_{PDA} - \frac{1}{\gamma_{PDA}} \right) P_{PDA}}{V_{TM} - V_{LSA} - V_{PDA}} \quad (13)$$

式中: P_{LSA} 、 P_{PDA} 分别表示混合料中 LSA 和 PDA 所占的比例; $V_{T(PDA)}$ 表示 PDA 经捣实后的总体积; V_{PDA} 表示 PDA 颗粒的体积; η_{LSA} 、 η_{DASR} 、 η_{PDA} 分别表示 LSA、DASR 和 PDA 经捣实后的空隙率。

为了验证式(13)的合理性, 根据《排水沥青路面设计与施工技术规范》(JTG/T 3350-03-2020)^[18]和后续表 3, 并由 1.2.1 节可知, PAC-13 的主集料粒径 DASR 为 4.75~13.2 mm, 干涉集料粒径 PDA 为 1.18~4.75 mm, PDA 含量大致相当于 DASR 含量的 5%~25%。设定集料的颗粒粒径为 1.18~13.2 mm (不含有 LSA 和 ICA), 1.18~2.36 mm 和 2.36~4.75 mm 两相邻粒径集料的相对比例为 50/50, 4.75~9.5 mm 和 9.5~13.2 mm 两相邻粒径颗粒的相对比例也为 50/50。根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42-2005)^[19], 测得了集料捣实后空隙率随 P_{PDA}/P_{DASR} 的增加近似线性增大的变化关系, 如图 7 所示。将后续表 1 和表 2 的相关参数代入式(13)中, 计算结果与实测值具有较高的吻合程度, 如图 7 所示, 说明构建的式(13)是合理的。

由式(10)~(13)可以看出, 改进后的 DASR 法根据沥青混合料实际情况, 同时考虑了 ICA、LSA 和 PDA 对主骨架空隙率的影响。因此, 在构建 PAC 混合料矿料间隙率的物理模型时, 不仅要考虑 ICA 的填充作用, 同时还需要进一步考虑 LSA 的取代作用和 PDA 的干涉作用对矿料间隙率的影响。

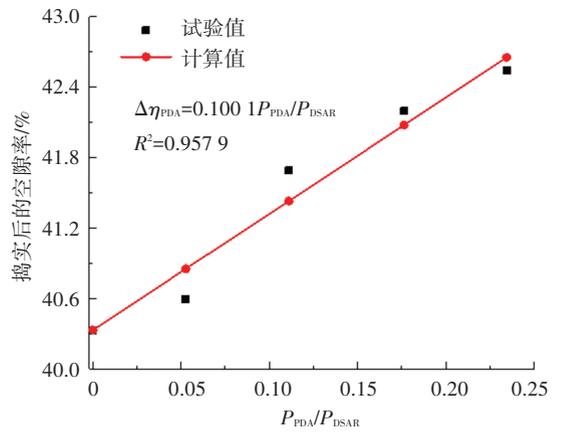


图 7 集料捣实空隙率随 P_{PDA}/P_{DASR} 的变化关系

Fig.7 Voids of compacted aggregate changing with the value of P_{PDA}/P_{DASR}

2 矿料间隙率物理模型的构建

2.1 颗粒堆积原理

目前, 有关固体颗粒堆积理论的研究可分为两类: 一是研究评估颗粒特性、容器和堆积方法等变量如何控制颗粒的堆积; 二是研究堆积体的颗粒排列和孔隙结构以解释颗粒的堆积行为^[20-21]。大量研究表明, 堆积体的空隙结构与颗粒形状、尺寸、粒径分布等特性存在高度相关性。

文献[22]提出了一种基于二元混合物的多组分球形颗粒堆积体空隙率的数学方法。其他学者^[16-17]均将集料简化为球体形状, 在此基础上开展了较为深入的研究, 表明固体颗粒的堆积主要包括填充和占据两种机制。对于填充机制, 新颗粒只是简单填充到已有大颗粒形成的骨架空隙中, 而对骨架结构不会产生影响; 若新的细小颗粒占比不多, 该机制则是有效的, 占据机制则不同, 由于新加入的颗粒尺寸较大以至于不能完全填充到现有系统的骨架空隙中, 因而新颗粒的加入会改变原有系统的骨架结构, 如图 3 所示。基于该机制, 线性堆积模型得到了较快的发展^[23], 但该类模型涉及的未知变量较多 (如颗粒间相互作用系数和协调数), 且很难通过试验进行确定, 应用受到很大限制。本文将在上述机制的基础上进行扩展, 提出方便使用的矿料间隙率物理模型。

2.2 物理模型构建

基于填充机制, 如图 6 所示, 若混合料中只包含主集料 DASR 和间隙集料 ICA, 由体积设计法^[24], 可得

$$\frac{P_{DASR}}{\rho_{DASR}} \left(\frac{V_{V(DASR)} - V_{VMA}}{V_{T(DASR)}} \right) = \frac{P_{ICA}}{\gamma_{ICA}} \quad (14)$$

式中: P_{DASR} 和 P_{ICA} 分别表示 DASR 和 ICA 所占的百

分比,有 $P_{\text{DASR}} + P_{\text{ICA}} = 100\%$; ρ_{DASR} 表示 DASR 捣实后的密度; γ_{ICA} 表示 ICA 的合成毛体积相对密度; $V_{\text{T(DASR)}}$ 和 $V_{\text{V(DASR)}}$ 分别表示 DASR 捣实后的总体积和空隙体积; V_{VMA} 表示矿料间隙体积。

当取 $V_{\text{T(DASR)}} = 1.0$, 则式 (14) 可改写为

$$\frac{P_{\text{DASR}}}{\rho_{\text{DASR}}}(\eta_{\text{DASR}} - \eta_{1(\text{VMA})}) = \frac{P_{\text{ICA}}}{\gamma_{\text{ICA}}} \quad (15)$$

式中: η_{DASR} 表示 DASR 形成的主骨架结构的空隙率, $\eta_{1(\text{VMA})}$ 表示混合料中只包含 DASR 和 ICA 时的矿料间隙率。

由式 (15), 可得

$$\eta_{1(\text{VMA})} = \eta_{\text{DASR}} - \frac{\rho_{\text{DASR}}}{P_{\text{DASR}}} \frac{P_{\text{ICA}}}{\gamma_{\text{ICA}}} \quad (16)$$

当混合料中含有 PDA 时, DASR 就会受到干涉发生移位, 不仅会影响主骨架结构, 也会影响主骨架结构的空隙率, 如图 3 所示。也就是说, 主骨架空隙的变化与 PDA 所占的比例有关。对于混合料中只包括 DASR、PDA 和 ICA 的情况, 考虑到 PDA 干涉后不仅会占据部分主骨架空隙, 同时还会使得主骨架的空隙率有所增大, 依据式 (13) 和式 (15) 构建相应干涉模型的表达式为

$$\frac{P_{\text{DASR}}}{\rho_{\text{DASR}}}(\eta_{\text{DASR}} - \eta_{2(\text{VMA})}) = \frac{P_{\text{ICA}}}{\gamma_{\text{ICA}}} + \frac{P_{\text{PDA}}}{\gamma_{\text{PDA}}} - \eta_{\text{PDA}} P_{\text{PDA}} \quad (17)$$

式中: ρ_{PDA} 、 η_{PDA} 分别为 PDA 捣实后的密度和空隙率; $\eta_{2(\text{VMA})}$ 表示混合料中只包含 DASR、PDA 和 ICA 的矿料间隙率, $P_{\text{DASR}} + P_{\text{PDA}} + P_{\text{ICA}} = 100\%$ 。

由式 (17), 可得

$$\eta_{2(\text{VMA})} = \eta_{\text{DASR}} - \frac{\rho_{\text{DASR}}}{P_{\text{DASR}}} \left(\frac{P_{\text{ICA}}}{\gamma_{\text{ICA}}} + \frac{P_{\text{PDA}}}{\gamma_{\text{PDA}}} - \eta_{\text{PDA}} P_{\text{PDA}} \right) \quad (18)$$

联立式 (16) 和式 (18), 可得由于 PDA 作用造成骨架空隙率增加部分 $\Delta\eta_2$ 的表达式为

$$\Delta\eta_2 = (\eta_{2(\text{VMA})} - \eta_{1(\text{VMA})}) = \frac{\rho_{\text{DASR}}}{P_{\text{DASR}}} \left(\eta_{\text{PDA}} P_{\text{PDA}} - \frac{P_{\text{PDA}}}{\gamma_{\text{PDA}}} \right) \quad (19)$$

如果混合料中只有 DASR, 则矿料间隙率即为 DASR 经捣实后的空隙率 η_{DASR} 。当混合料中只包含 DASR 和 LSA 时, LSA 的存在将一定程度上占据部分 DASR 的位置并形成的空隙。由于 LSA 颗粒较大, 可形成较大的空隙结构, 也就是说 LSA 取代部分 DASR 后一定程度上也会增加主骨架结构的空隙率, 依据式 (12), 构建相应取代模型的表达式为

$$\frac{P_{\text{DASR}}}{\rho_{\text{DASR}}} \eta_{3(\text{VMA})} = \frac{P_{\text{DASR}} + P_{\text{LSA}}}{\rho_{\text{DASR}}} \eta_{\text{DASR}} + (\eta_{\text{LSA}} - \eta_{\text{DASR}}) P_{\text{LSA}} \quad (20)$$

式中: $\eta_{3(\text{VMA})}$ 表示混合料中只包含 LSA 和 DASR 时的矿料间隙率, $P_{\text{LSA}} + P_{\text{DASR}} = 100\%$; η_{LSA} 表示 LSA 捣实后的空隙率。

由式 (20), 可得

$$\eta_{3(\text{VMA})} = \eta_{\text{DASR}} + \frac{P_{\text{LSA}}}{P_{\text{DASR}}} [\eta_{\text{DASR}} + \rho_{\text{DASR}} (\eta_{\text{LSA}} - \eta_{\text{DASR}})] \quad (21)$$

由 LSA 所致主骨架空隙率增加部分 $\Delta\eta_3$ 的表达式为

$$\Delta\eta_3 = \eta_{3(\text{VMA})} - \eta_{\text{DASR}} = \frac{P_{\text{LSA}}}{P_{\text{DASR}}} [\eta_{\text{DASR}} + \rho_{\text{DASR}} (\eta_{\text{LSA}} - \eta_{\text{DASR}})] \quad (22)$$

对于 PAC 混合料整体而言, 结合式 (16)、(19)、(22), 可得到新的矿料间隙率 η_{VMA} 的表达式为

$$\begin{aligned} \eta_{\text{VMA}} = & (P_{\text{DASR}} + P_{\text{ICA}}) \eta_{1(\text{VMA})} + P_{\text{PDA}} \Delta\eta_2 + P_{\text{LSA}} \Delta\eta_3 = \\ & (P_{\text{DASR}} + P_{\text{ICA}}) \left(\eta_{\text{DASR}} - \frac{\rho_{\text{DASR}}}{P_{\text{DASR}}} \frac{P_{\text{ICA}}}{\gamma_{\text{ICA}}} \right) + \\ & P_{\text{PDA}} \frac{\rho_{\text{PDA}}}{P_{\text{DASR}}} \left(P_{\text{DASR}} \eta_{\text{PDA}} - \frac{P_{\text{PDA}}}{\gamma_{\text{PDA}}} \right) + \\ & \frac{P_{\text{LSA}}}{P_{\text{DASR}}} [\eta_{\text{DASR}} + \rho_{\text{DASR}} (\eta_{\text{LSA}} - \eta_{\text{DASR}})] P_{\text{LSA}} \end{aligned} \quad (23)$$

式中: 右边第 1 项表示基于 ICA 的填充作用确定的矿料间隙率, 第 2 项和第 3 项分别表示 PDA 的的干涉作用和 LSA 的取代作用造成主骨架空隙率增加的部分, $P_{\text{LSA}} + P_{\text{DASR}} + P_{\text{PDA}} + P_{\text{ICA}} = 100\%$ 。

当沥青混合料中 DASR 包括多个尺寸粒径的集料时, 其捣实后的毛体积密度 ρ_{DASR} 和空隙率 η_{DASR} 可采用加权平均的方法进行计算:

$$\rho_{\text{DASR}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{Di}} \rho_{\text{Di}}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{Di}}} \quad (24)$$

$$\eta_{\text{DASR}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{Di}} \eta_{\text{Di}}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{Di}}} \quad (25)$$

式中: P_{Di} 表示 DASR 中某一尺寸粒径集料所占百分比; ρ_{Di} 、 η_{Di} 分别表示 DASR 中某一尺寸粒径集料捣实后的毛体积密度和空隙率。

3 模型验证及讨论

3.1 室内测试与验证

本文试验中粗、细集料均采用玄武岩, 填料为普通石灰岩矿粉, 矿粉的表现相对密度为 2.753。根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)^[19], 测得集料的主要技术指标, 见表 1。将目标集料烘干后放入的钢壁筒内, 经捣实后测的目标集料的密度和空隙率, 见表 2。为避免 PAC 混合料黏结性不足,

采用高黏度改性沥青来提高混合料的抗变形和抗裂性能,即由 SBS 改性沥青中加入 8.7% 的高黏剂制备而成(60 °C 动力黏度为 725 kPa · s),拌和时并掺入混合料总质量 0.1% 的聚酯纤维。

表 1 集料主要技术指标

Tab.1 Main technical indexes of aggregate

集料粒径/ mm	表观相对 密度	表干相对 密度	毛体积 相对密度	吸水率/ %
13.2~16.0	2.959	2.912	2.896	0.604
9.5~13.2	2.952	2.904	2.883	0.629
4.75~9.5	2.943	2.887	2.861	0.735
2.36~4.75	2.925	2.859	2.827	0.906
1.18~2.36	2.907	—	—	—
0.6~1.18	2.892	—	—	—
0.3~0.6	2.881	—	—	—
0.15~0.3	2.869	—	—	—
0.075~0.15	2.865	—	—	—

集料的密度 ρ_{TA} 和空隙率 η_{TA} 表达式分别为

$$\rho_{TA} = m_{TA} / V_{TA} \quad (26)$$

$$\eta_{TA} = (1 - \rho_{TA} / \gamma_{TA}) \times 100 \quad (27)$$

式中: γ_{TA} 为粗集料的毛体积相对密度或细集料的表观密度, m_{TA} 为粗集料或细集料的质量。

按表 3 中的矿料级配和沥青用量,采用标准马歇尔击实试验制备 PAC 混合料试件,采用体积法测得了混合料空隙率和毛体积相对密度。由 1.2.1 节可知,PAC-13 和 PAC-10 的主集料粒径 DASR 分

表 3 多孔沥青混合料的级配组成

Tab.3 Gradation of PAC for test

试件编号	筛孔通过率/%										油石比/ %	空隙率/ %	毛体积 相对密度	矿料空隙率/%	
	16.0 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm				实测值	计算值
1	100	90.5	63.0	28.5	22.3	11.5	9.2	6.8	5.6	4.5	4.8	16.9	2.233	25.3	24.4
2	100	90.5	63.0	21.2	17.6	14.5	9.2	6.8	5.6	4.5	4.8	18.7	2.184	26.4	25.8
3	100	90.5	63.0	15.6	13.4	11.5	9.2	6.8	5.6	4.5	4.8	21.0	2.121	29.3	29.2
4	100	90.5	63.0	21.2	17.6	8.5	7.0	6.0	5.0	4.0	4.7	20.1	2.149	28.5	28.1
5	100	96.8	74.3	26.5	20.5	15.5	11.0	7.5	5.2	4.0	4.9	15.4	2.264	24.8	25.2
6	100	87.5	54.5	19.5	13.0	10.5	8.0	6.0	5.0	4.0	4.6	22.1	2.103	28.2	27.6
7	100	88.0	63.0	21.5	18.5	11.5	9.0	7.0	5.5	4.0	4.7	18.8	2.186	27.2	26.3
8	100	95.0	69.0	21.0	16.0	12.0	8.0	6.0	4.0	3.0	4.8	19.2	2.171	27.7	28.3
9	100	90.0	60.0	18.0	14.0	10.0	8.0	6.0	5.0	4.0	4.8	20.6	2.135	28.7	28.7
10	100	100	98.0	57.0	21.0	15.0	12.0	9.0	7.0	5.5	5.1	18.6	2.169	27.5	28.2
11	100	100	94.5	48.5	17.5	12.0	9.5	7.0	5.5	4.5	5.0	19.8	2.148	29.2	29.3
12	100	100	90.0	40.0	13.0	9.0	7.0	6.0	5.0	4.0	4.9	20.5	2.127	30.1	30.5
13	100	100	86.0	31.5	9.5	7.5	6.5	5.5	4.5	3.5	4.8	22.3	2.078	30.6	31.0

3.2 模型讨论

在沥青的种类及压实工艺等因素相同的情况下,PAC 混合料矿料间隙率主要取决于集料的级配、棱角特征和矿料密度等因素,以下主要从集料级配组成的角度分析矿料间隙率的变化规律。

以 PAC-13 为研究对象,保持 PDA 与 ICA 含量不变的情况下(即 $P_{PDA} + P_{ICA}$ 为定值),图 9 给出了

别为 4.75~13.2 mm 和 2.36~9.5 mm,PDA 的粒径分别为 1.18~4.75 mm 和 0.6~2.36 mm。由于 PAC-13 和 PAC-10 的 DASR 和 PDA 均含有两种粒径的集料,可根据所占比例采用加权平均的方法分别求得相应的密度和空隙率,见式(24)、(25)。

表 2 经捣实后集料空隙率和密度

Tab.2 Aggregate void ratio and density after compaction

集料粒径/mm	空隙率/%	密度/(g · cm ⁻³)
13.2~16.0	44.37	1.611
9.5~13.2	43.18	1.638
4.75~9.5	41.56	1.672
2.36~4.75	40.18	1.691
1.18~2.36	40.49	1.73
0.6~1.18	39.28	1.756
0.3~0.6	38.60	1.769
0.15~0.3	38.06	1.777
0.075~0.15	37.77	1.783

将集料物理参数(如:各档集料的所占比例、毛体积密度、捣实密度和捣实后空隙率等)代入到模型(23)中,即可计算得到不同级配沥青混合料的矿料间隙率,见表 3。将所建 PAC 混合料矿料间隙率模型的计算值与试验结果进行对比,如图 8 所示。可以看出,图中所有的数据点都以 1:1 的梯度紧密分布,相关性系数 R^2 为 0.904 6,平均绝对误差只有 2.20%,说明本文所建的矿料间隙率物理模型能够较准确地反映多孔沥青混合料的空隙率大小。

LSA 与 DASR 所占比例的比值变化对矿料间隙率 η_{VMA} 影响的关系曲线。由图 9 可以看出, η_{VMA} 随着 P_{LSA} / P_{DASR} 的增加逐渐衰减,且衰减的幅度逐渐减小。虽然 LSA 含量的增加一定程度上会使得混合料的骨架空隙增加,但空隙尺寸的增加会导致部分 PDA 可完全融入到骨架空隙中无法起到干涉作用,从而导致了矿料间隙率的减小。当 ICA 含量一定

且 P_{LAS}/P_{DASR} 相等时,矿料间隙率随着 PDA 含量的增加而减小;当 $P_{LSA}/P_{DASR} = 0.2$ 时,PDA 含量增加 7.0%,意味着 LSA 和 PAD 的含量分别减小了 1.17% 和 5.83%,由于 LSA 含量减小和 PDA 含量减小导致矿料间隙率分别减小了 0.52% 和 2.49%,PDA 含量增加导致矿料间隙率增加了 0.64%,造成矿料间隙率减小了 2.38%。由此可知,LSA 与 DASR 含量增加使得骨架空隙增加的部分远大于 PDA 减少导致空隙减少的部分。

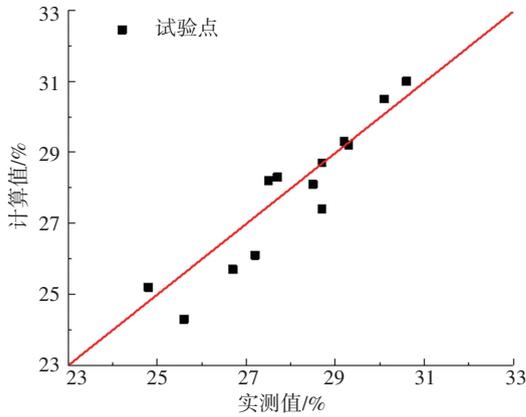


图 8 矿料间隙率计算值与实测结果的对比

Fig.8 Comparison between predicted and test results for VMA

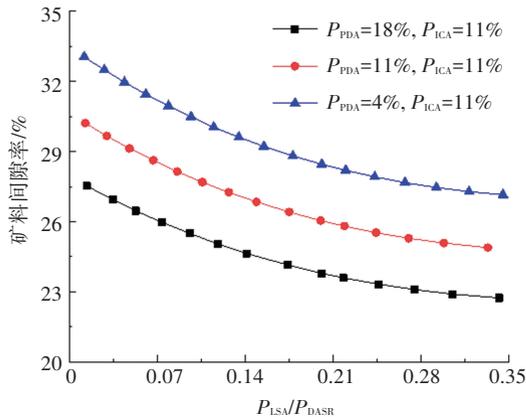


图 9 LSA 含量对矿料间隙率的影响

Fig.9 Effects of LSA content for VMA

保持 LSA 和 ICA 含量不变的情况下, η_{VMA} 随着 P_{PDA}/P_{DASR} 变化的关系曲线,如图 10 所示。可以看出, η_{VMA} 随着 P_{PDA}/P_{DASR} 的增加逐渐减小,主要是因为 DASR 含量减小使骨架空隙减小的部分远大于 PDA 含量增加导致空隙增加的部分。当 LSA 含量一定且 P_{PDA}/P_{DASR} 相等的情况下, η_{VMA} 随着 ICA 含量的减小而增加,原因在于 ICA 主要是填充主骨架空隙,所以 ICA 含量越高,矿料间隙率越小。

保持 LSA 和 DASR 含量不变的情况下, η_{VMA} 随着 P_{PDA}/P_{ICA} 变化的关系曲线,如图 11 所示。由图 11 可知, η_{VMA} 随着 P_{PDA}/P_{ICA} 的增加而增大且增加的幅度逐渐减缓,主要是因为 P_{PDA}/P_{ICA} 的增加意味

着 PDA 含量的增加和 ICA 含量的减小,由于 PDA 的干涉作用和 ICA 的充填作用,从而造成了矿料间隙率的增加。LSA 含量一定且 P_{PDA}/P_{ICA} 相等的情况下,矿料间隙率随着 DASR 含量的增加而增大;当 $P_{PDA}/P_{ICA} = 0.5$ 时,DASR 含量增加 4.0%,意味着 PDA 和 ICA 含量的分别减小了 1.33% 和 2.67%,由于 DASR 含量增加、PDA 含量减小和 ICA 含量减小导致矿料间隙率分别增加了 1.67%、0.12% 和 1.32%,使得矿料间隙率共增加了 3.1%。由此可以看出,主集料 DASR 形成的骨架空隙和间隙集料 ICA 的填充作用是影响矿料间隙率的主要因素。

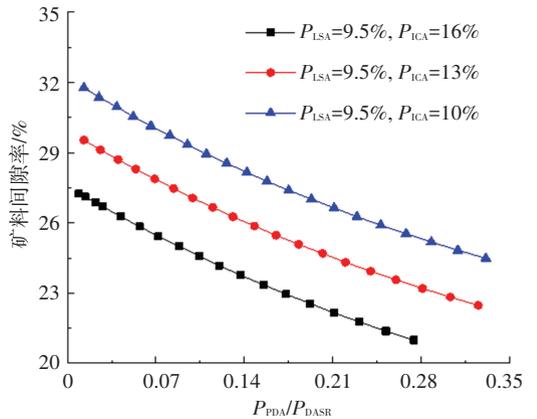


图 10 PDA 含量对矿料间隙率的影响

Fig.10 Effects of PDA content for VMA

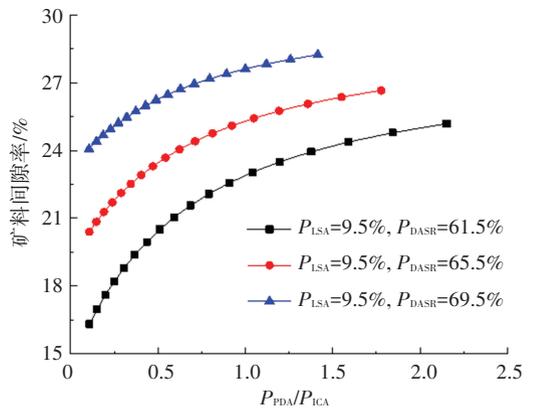


图 11 ICA 含量对矿料间隙率的影响

Fig.11 Effects of ICA content for VMA

4 结 论

1) 针对多孔沥青混合料的多孔性特点,将矿料划分为较大粒径集料 LSA、主集料 DASR、干涉集料 PDA 和间隙集料 ICA 四部分,分析了 DASR 形成的主骨架空隙结构,确定了 LSA、DASR、PDA 和 ICA 的界限尺寸,提出了确定主骨架空隙率的方法。

2) ICA 主要是填充 DASR 形成的主骨架空隙,PDA 的干涉作用会导致主骨架结构空隙率有所增加;由于 LSA 可以形成较大空隙,一定程度上也会增加骨架结构的空隙体积。通过考虑 ICA、PDA 和

LSA对DASR主骨架结构不同的作用机制,构建了沥青混合料矿料间隙率的物理模型,并通过多种级配多孔沥青混合料的试验结果验证了所建模型的合理性和有效性。

3)在PDA和ICA含量不变的情况下,矿料间隙率随着 P_{LSA}/P_{DASR} 的增加而减小,且幅度逐渐减缓;LSA和ICA含量不变的情况下,矿料间隙率随着 P_{PDA}/P_{DASR} 含量增加而减小;在LSA和DASR含量不变的情况下,矿料间隙率随着 P_{PDA}/P_{ICA} 含量的增加而增大。

4)对于DASR形成的主骨架结构,LSA、PDA和ICA对PAC混合料矿料间隙率的影响具有不同的方向性。根据级配曲线可确定上述4种集料的分界尺寸,将集料的相关物理参数代入所提出的矿料间隙率物理模型,便可判断所选型配是否满足混合料目标空隙率的要求,很大程度上减少了PAC混合料目标配合比设计的试验量。

参考文献

[1] 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京:人民交通出版社, 2004
Technical specifications for construction of highway asphalt pavement: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2004

[2] 陈俊,姚成,周若愚,等. 多孔沥青混合料渗水性能的方向差异性及其受空隙结构的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(5):920
CHEN Jun, YAO Cheng, ZHOU Ruoyu, et al. Directional difference of water permeability of porous asphalt mixture and influence of pore structure[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(5):920

[3] CHU L, FWA T F, TAN K H. Evaluation of wearing course mix designs on sound absorption improvement of porous asphalt pavement [J]. Construction and Building Materials, 2017, 141:402

[4] 王宏畅,周明刚. 多孔沥青混合料排水及抗堵塞性能研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2):413
WANG Hongchang, ZHOU Minggang. Drain ability and anti-clogging of porous asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2):413

[5] PARTL M N, PASQUINI E, CANESTRARI F, et al. Water and thermal sensitivity of open graded asphalt rubber mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(3):283

[6] ZAUMANIS M, POULIKAKOS L D, PARTL M N. Performance-based design of asphalt mixtures and review of key parameters[J]. Materials and Design, 2018, 141:185

[7] KANDHAL P S, COOLEY L A. Coarse-versus fine-graded superpave mixtures: comparative evaluation of resistance to rutting [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1789:216

[8] ELLIOTT R P, FORDJR M C, GHANIM M, et al. Effect of aggregate gradation variation on asphalt concrete mix properties [J]. Transportation Research Record, 1991, 1317:52

[9] FULLER W B, THOMPSON S E. The laws of proportioning concrete

[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1907, 2:67

[10] VAVRIK W R, PINE W J, CARPENTER S H. Aggregate blending for asphalt mix design: Bailey method [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1789:146

[11] KIM S, GRARIN A, ROQUE R, et al. Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixture [J]. Journal of Asphalt Paving Technologies, 2006, 75:789

[12] ROQUE R, BIRGISSON B, KIM S, et al. Development of mix design guidelines for improved performance of asphalt mixtures [R]. Tallahassee: Florida Department of Transportation, 2006.

[13] KIM S, ROQUE R, GRARIN A, et al. Laboratory evaluation for rutting performance based on the DASR proosity of asphalt mixture [J]. Road Materials and Pavement Design, 2008, 9(3):421

[14] KIM S, ROQUE R, BIRGISSON B, et al. Porosity of the dominant aggregate size range to evaluate coarse aggregate structure of asphalt mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(1):32

[15] CHUN S, KIM K, PARK B, et al. Evaluation of the effect of segregation on coarse aggregate structure and rutting potential of asphalt mixtures using dominant aggregate size range (DASR) approach [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(1):125

[16] GRARIN A, ROQUE R, KIM S, et al. Disruption factor of asphalt mixtures [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2013, 14(5):472

[17] CAI X, WU K H, HUANG W K, et al. Study on the correlation between aggregate skeleton characteristics and rutting performance of asphalt mixture[J]. Materials and Structures, 2018, 46(8):294

[18] 排水沥青路面设计与施工技术规范: JTG/T 3350-03—2020 [S]. 北京:人民交通出版社, 2020
Technical specifications for design and construction of porous asphalt pavement: JTG/T 3350-03—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020

[19] 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005 [S]. 北京:人民交通出版社, 2005
Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG E42—2005 [S]. Beijing: China Communications Press, 2005

[20] FURNAS C C. Grading aggregates I—mathematical relations for beds of broken solids of maximum density[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1931, 23(9):1052

[21] ZHAO Y, XU T, HUANG X, et al. Gradation design of the aggregate skeleton in asphalt mixture[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(7):1

[22] WESTMAN A E R. The packing of particles: empirical equations for intermediate diameter ratios [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1936, 19:127

[23] POURANIAN M R, HADDOCK J E. Determination of voids in the mineral aggregate and aggregate skeleton characteristics of asphalt mixtures using a linear-mixture packing model [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188:292

[24] 张肖宁,郭祖辛,吴旷怀. 按体积法设计沥青混合料[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1995, 28(2):28
ZHANG Xiaoning, GUO Zuxin, WU Kuanghuai. Volume method of bituminous mixture design [J]. Journal of Harbin University of Architecture and Engineering, 1995, 28(2):28