

文章编号:1671-8879(2017)06-0009-08

排水性沥青混合料体积参数变化规律及 矿料间隙率预估方法

关 泊,陈治君,郝培文

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了对没有压实的混合料试件的矿料间隙率(VMA)进行合理估算,构建了基于体积参数的排水性沥青混合料的沥青用量确定新方法。通过理论分析和室内试验对排水性沥青混合料体积参数的内部关系和变化规律进行研究,揭示排水性沥青混合料矿料间隙率、空隙率和有效沥青用量之间的定量关系;基于矿料间隙率计算模型,考虑矿料级配、矿料堆积特性和棱角特征对 VMA 的影响,提出基于矿料级配的矿料间隙率经验计算方法。研究结果表明:矿料级配对 VMA 具有显著性影响,VMA 值的大小主要取决于矿料级配,当油石比为 4.0%~5.5%时,其变化对 VMA 没有显著性影响;实测 VMA 值与经验法计算的 VMA 值相近,存在良好的线性相关关系;在进行排水性沥青混合料设计时,可根据矿料间隙率、空隙率和有效沥青用量之间的体积关系,应用提出的排水性沥青混合料有效沥青用量确定新方法来确定有效沥青用量。

关键词:道路工程;矿料间隙率;预估方法;排水性沥青混合料;体积参数;有效沥青用量

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Change law of volume parameters and predictive method of VMA of porous asphalt mixture

GUAN Bo, CHEN Zhi-jun, HAO Pei-wen

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

Abstract: In order to reasonably estimate the VMA of non-compacted mixture specimen, a new method of determining asphalt content of drainage asphalt mixture was built based on volume parameters. The relationships among volume parameters and change law of volume parameters for porous asphalt mixture by means of theoretical analysis and indoor tests were studied in this paper, which revealed the quantitative relationship among VMA, VV and effective asphalt content of drainage asphalt mixture. Based on the calculation model of VMA, considering the effect of aggregate gradation, aggregate accumulation characteristics and aggregate angular features on VMA, this paper proposed an empirical calculation method for VMA upon aggregate gradation. The results show that the aggregate gradation has a significant influence on VMA, and the value of VMA mainly depends on aggregate gradation. While the asphalt aggregate ratio

收稿日期:2017-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51478046)

作者简介:关 泊(1988-),男,陕西西安人,工学博士研究生,E-mail:guan_bo_2006@163.com。

通讯作者:郝培文(1967-),男,内蒙古和林人,教授,博士研究生导师,E-mail:haopw211@163.com。

is within 4.0% to 5.0%, the change has no significant effect on VMA. Comparing the results of VMA from calculated and measured, which show that they are similar and have a good linear correlation. According to the relationship among VMA, VV and effective asphalt content, the effective asphalt content can be determined by applying the new method in the design process of porous asphalt mixture. 7 tabs, 4 figs, 24 refs.

Key words: road engineering; void in mineral aggregate (VMA); predictive method; porous asphalt mixture; volume parameter; effective asphalt content

0 引言

大空隙特征的排水沥青路面铺装具有抗滑性能高、噪声低、抑制水雾、防止水漂、减轻眩光等突出优点,已成为一种高性能、高品质的公路路面结构类型^[1-2]。沥青混合料的体积参数在沥青混合料的设计过程中起着至关重要的控制作用。无论是传统的马歇尔(Marshall)设计法还是现代的高性能沥青路面(Superpave)混合料设计法,都严格规定了混合料体积指标设计要求。20世纪90年代,美国公路战略研究项目(SHRP)的Superpave设计方法中,将体积参数设计作为沥青混合料设计的重要过程,其目的是将体积参数控制在合理的范围内,以保证沥青混合料具有较高的路用性能^[3-5]。排水性沥青混合料优良的路用性能依赖于石-石接触形成的粗集料骨架和适量沥青玛蹄脂(SMA)对骨架空隙的填充而形成的残余空隙率,因此,体积参数对排水性沥青混合料至关重要^[6]。

1956年,美国McLeod等首次提出在沥青混合料配合比设计中应该使用体积指标而不是质量指标,同时提出矿料空隙率和空隙率2个重要的体积指标^[7-8];1985年,Kandhal等指出矿料空隙率是混合料设计中最重要参数之一,直接影响混合料的耐久性^[9]。各国在SMA混合料设计标准中,引入了矿料空隙率VMA,并且规定最小VMA的要求,目的是保证混合料具有良好的耐久性^[10-11]。1994年发布的SHRP-A-408中^[12],对混合料组成集料与体积指标进行打分评估,发现VMA是混合料设计中仅次于空隙率的重要指标。在常规混合料设计和级配优化过程中,矿料空隙率通常是根据压实混合料试件的体积参数测试结果计算而得到,这不仅需要耗费大量的时间进行马歇尔试验,且其没有考虑油石比与矿料级配之间的联系^[13]。Hudson等研究了集料组成对VMA的影响,结果表明集料中相邻不同粒径的通过率比值R与VMA的变化呈一定的关系,即可根据相邻粒径的R值计算

VMA值^[14-15]。

目前,中国排水性沥青混合料的设计方法大多吸收和借鉴美国、日本的设计方法。由于各国的实际情况不同,在使用过程中存在以下问题:沥青用量确定方法不统一,且多以经验为主,具有一定主观性,目前尚未有一种定量的设计方法来确定沥青用量;配合比设计如何能达到耐久性和功能性的协调统一;配合比设计耗时长,可重复性差等。因此,研究排水性沥青混合料矿料空隙率影响因素,提出基于矿料级配的适用于排水性沥青混合料的矿料空隙率的经验算法,是发展和完善排水性沥青混合料配合比设计方法的理论基础。

为此,本文在已有研究的基础上,以排水性沥青混合料为研究对象。首先,基于排水性沥青混合料的体积结构组成,对其体积参数进行理论推导和分析,提出排水性沥青混合料有效沥青用量的定量确定方法;然后通过室内试验对其体积参数的变化规律和机制展开分析研究;并基于其空隙率的变化规律与机制,提出基于矿料级配的排水性沥青混合料沥青矿料空隙率的预估方法。

1 排水性沥青混合料体积参数分析

1.1 体积参数基本关系

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中规定的计算方法,计算集料相关体积参数,即

$$\gamma_t = \frac{100 + P_b}{100/\gamma_{se} + P_b/\gamma_b} \quad (1)$$

$$I_{VV} = 100 \left(1 - \frac{\gamma_t}{\gamma_i} \right) \quad (2)$$

$$I_{VA} = \frac{100P_b\gamma_t}{(100 + P_b)\gamma_b} \quad (3)$$

$$I_{VMA} = 100 \left(1 - \frac{\gamma_t}{\gamma_i} \right) + \frac{100P_b\gamma_t}{(100 + P_b)\gamma_b} \quad (4)$$

$$I_{VCA_{mix}} = 100 \left(1 - \frac{\gamma_t}{\gamma_{ca}} P_{ca} \right) \quad (5)$$

令 $\gamma_f \frac{100}{100+P_b} = \gamma$, 有 $I_{VMA} = 100 \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_{sb}} \right)$, 其中

$$\gamma = (1 - 0.01 I_{VMA}) \gamma_{sb} \quad (6)$$

式中: γ_f 为最大理论相对密度; γ_f 为马歇尔试件的毛体积相对密度; γ_b 为沥青的相对密度; γ_{se} 为矿料有效相对密度; γ_{sb} 为矿料合成毛体积相对密度; γ_{ca} 为粗集料部分合成毛体积相对密度; P_b 为油石比(%); P_{ca} 为排水性沥青混合料中粗集料的比例(%); I_{VV} 为空隙率的计算参数(%); I_{VA} 为沥青体积百分率的计算参数(%); I_{VMA} 为沥青混合料试件的矿料间隙率计算参数(%); $I_{VCA_{mix}}$ 为粗集料骨架间隙率的计算参数(%)。

1.2 排水性沥青混合料组成部分体积率

1.2.1 有效沥青体积率计算

压实成型的排水性沥青混合料中, 矿料间隙率、空隙率、有效沥青体积率之间相互依赖、相互约束, 存在一定数量关系。VMA 表示压实沥青混合料矿料颗粒间的空隙体积占混合料总体积的百分率, 包括剩余空隙体积和有效沥青体积, 即

$$V_{be} = I_{VMA} - I_{VV} \quad (7)$$

式中: V_{be} 为有效沥青体积率(%)。

1.2.2 细集料部分体积率计算

根据贝雷法确定的粗细集料划分界限, 定义划分界限大于等于 0.075 mm 筛孔的矿料为细集料部分。细集料在沥青混合料中所占体积率计算式为

$$V_{fa} = \gamma_f \frac{100 P_{fa}}{100 + P_b \gamma_{fa}} \quad (8)$$

将式(6)代入式(8)可得

$$V_{fa} = (1 - 0.01 I_{VMA}) \gamma_{sb} \frac{P_{fa}}{\gamma_{fa}} \quad (9)$$

式中: V_{fa} 为压实混合料中细集料所占体积率(%); P_{fa} 为细集料体积含量, 以占矿料总量的百分率计; γ_{fa} 为细集料部分的合成毛体积相对密度。

1.2.3 填料部分体积率计算

由沥青和填料混合而成的胶浆是沥青混合料形成强度的重要因素。通常定义 0.075 mm 筛孔以下部分矿粉为填料部分, 其在沥青混合料中所占的体积率计算式为

$$V_{fi} = \gamma_f \frac{100 P_{fi}}{100 + P_b \gamma_{fi}} \quad (10)$$

将式(6)代入式(10)可得

$$V_{fi} = (1 - 0.01 I_{VMA}) \gamma_{sb} \frac{P_{fi}}{\gamma_{fi}} \quad (11)$$

式中: V_{fi} 为压实混合料中填料所占体积率(%); P_{fi} 为填料体积含量, 以占矿料总量的百分率计; γ_{fi} 为填

料部分的合成表观相对密度。

1.3 排水性沥青混合料体积参数关系

压实的大孔隙开级配排水式沥青磨耗层的沥青混合料体积可以分为两部分, 一部分为粗集料骨架, 另一部分为沥青玛蹄脂。粗集料骨架间隙 VCA_{mix} 的一部分由沥青玛蹄脂填充, 另一部分为剩余的空隙。沥青、填料、纤维(由于掺量较小, 不计体积)和细集料构成沥青玛蹄脂部分, 根据压实的排水性沥青混合料的体积组成可得

$$I_{VCA_{mix}} = I_{VMA} + V_{fa} + V_{fi} \quad (12)$$

将式(9)、式(11)代入式(12)可得

$$I_{VCA_{mix}} = \gamma_{sb} \left(\frac{P_{fi}}{\gamma_{fi}} + \frac{P_{fa}}{\gamma_{fa}} \right) + \left[1 - 0.01 \gamma_{sb} \left(\frac{P_{fi}}{\gamma_{fi}} + \frac{P_{fa}}{\gamma_{fa}} \right) \right] I_{VMA} \quad (13)$$

从式(13)可看出, VCA_{mix} 值由两部分组成, 一部分是与矿料级配有关的量 $\gamma_{sb} \left(\frac{P_{fi}}{\gamma_{fi}} + \frac{P_{fa}}{\gamma_{fa}} \right)$, 可由细集料和填料在混合料中所占的比例和各部分的密度计算而得, 另一部分是 VMA 的常数倍。可见, 在混合料级配和原材料一定的条件下, VCA_{mix} 值与 VMA 密切相关。

1.4 排水性沥青混合料有效沥青用量确定

相比于密级配沥青混合料, 排水性沥青混合料的结合料用量不存在最佳值。在密级配混合料设计过程中, 马歇尔稳定度在合理的沥青用量范围内存在一个极值, 这时对应的沥青用量可以称为最佳沥青用量, 具有明确的物理指标意义。而排水性沥青混合料沥青用量没有与物理指标相对应的最佳值, 因此不存在最佳沥青用量^[16-18]。排水性沥青混合料配合比设计过程中, 重要的是体积参数指标的实现。因此, 可根据体积参数之间的理论关系, 结合设计空隙率和对应的矿料间隙率确定有效沥青结合料用量。

有效沥青所占体积率 V_{be} 为

$$V_{be} = \gamma_f \frac{100 P_{be}}{100 + P_b \gamma_b} \quad (14)$$

将式(6)代入式(14)得

$$V_{be} = (1 - 0.01 I_{VMA}) \gamma_{sb} \frac{P_{be}}{\gamma_b} \quad (15)$$

求解得有效沥青用量 P_{be} 为

$$P_{be} = \frac{(I_{VMA} - I_{VV}) \gamma_b}{(1 - 0.01 I_{VMA}) \gamma_{sb}} \quad (16)$$

目前, 国内外排水性沥青混合料沥青用量的确定方法不统一, 多以经验为主, 具有一定主观性, 没

有一种量的设计方法来确定沥青用量。式(16)从本质上揭示了排水性沥青混合料矿料间隙率、空隙率与有效沥青用量之间的定量关系,也提出了排水性沥青混合料设计过程中有效沥青用量确定的新方法。

2 排水性沥青混合料体积参数试验

2.1 级配设计

随着现代交通的发展,现行规范中规定的级配在实际使用中逐渐暴露出缺陷与不足。经验证明:并不是所有符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中建议级配范围内的沥青混合料都符合技术标准,超出规范级配范围的也并不是都不合格。鉴于以上原因,参考国内外级配设计经验,结合中国排水性沥青混合料级配范围,选取集料最大粒径 13 mm 大孔隙开级配排水性沥青磨耗层沥青混合料(OGFC-13)为研究对象,确定如表 1 中 5 个粗细不同的矿料级配 G₁、G₂、G₃、G₄、G₅。

表 1 矿料级配

Tab. 1 Aggregate gradation

级配	不同筛孔尺寸(mm)下的通过率/%						
	16.0	13.2	9.5	4.8	2.4	1.2	0.6
G1	100.0	100.0	75.0	30.0	20.0	18.0	15.0
G2	100.0	97.5	68.8	25.5	17.0	15.0	12.7
G3	100.0	95.0	62.5	21.0	14.0	12.0	10.4
G4	100.0	92.5	56.3	16.5	11.0	9.0	8.1
G5	100.0	90.0	50.0	12.0	8.0	6.0	5.8

2.2 体积参数测定

5 个矿料级配分别在油石比 4.0%、4.5%、5.0%、5.5%下,纤维用量为沥青混合料的 0.1% (质量分数),击实次数为双面各 50 次,一组 5 个试件,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中 T0702—2011 的方法制作马歇尔试件。通过室内试验测定马歇尔试件的物理指标,然后分别计算体积参数的空隙率、矿料间隙率、粗集料骨架空隙率,实测计算结果见表 2。

2.3 体积参数变化规律分析

空隙率由混合料的理论最大相对密度和压实试件的毛体积相对密度确定,既与矿料级配有关又与沥青用量有关。图 1 为空隙率随矿料级配和油石比的变化。图 1 中级配越粗,空隙率越大;沥青用量越大,空隙率越小。相同级配下,沥青用量多的混合料

表 2 试件的体积参数计算结果

Tab. 2 Computed results of volume parameters %

矿料级配	油石比	γ_t	空隙率	I_{VMA}	$I_{VCA_{mix}}$
G ₁	4.0	2.304	13.0	22.0	35.513
	4.5	2.314	11.9	21.9	35.236
	5.0	2.323	10.9	21.8	34.980
	5.5	2.338	9.7	21.6	34.563
G ₂	4.0	2.213	16.5	24.8	35.695
	4.5	2.229	15.2	24.7	35.218
	5.0	2.279	12.7	23.7	33.895
	5.5	2.285	11.8	23.5	33.598
G ₃	4.0	2.167	18.3	27.2	34.699
	4.5	2.169	17.8	26.8	33.843
	5.0	2.195	16.0	26.4	33.828
	5.5	2.198	15.3	26.2	33.781
G ₄	4.0	2.110	20.5	28.5	34.139
	4.5	2.119	19.6	28.3	33.864
	5.0	2.144	18.0	28.0	33.353
	5.5	2.149	17.7	27.9	33.078
G ₅	4.0	2.002	24.3	32.2	35.533
	4.5	2.009	24.1	31.9	35.398
	5.0	2.015	23.7	31.4	35.365
	5.5	2.026	23.0	31.1	35.009

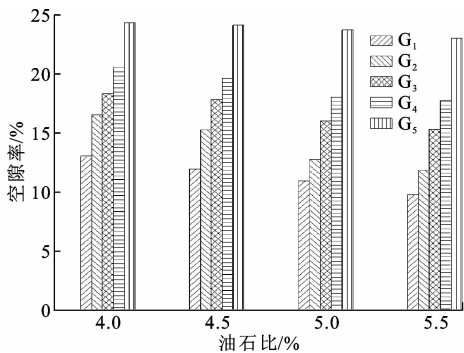


图 1 空隙率随矿料级配和油石比的变化

Fig. 1 Changes of voidage with grading and asphalt-aggregate ratio

经压实后较密实,剩余空隙率小;级配粗,粗集料多,形成的粗集料间隙率就大。级配和油石比的变化都会引起空隙率的变化,因此在进行配合比设计时,既要适当调整级配,又要正确选用沥青用量来达到目标空隙率。

下页图 2 为各级配矿料间隙率随油石比的变化。由图 2 可得出,在沥青用量相同时,VMA 值随级配变粗而增大,且排水性沥青混合料的矿料间隙率比普通沥青混合料的矿料间隙率大很多(20%以上)。这是因为排水性沥青混合料的级配较普通沥青混合料的级配粗,粗集料含量多,所以压实以后形

成了更大的矿料间隙率。不同级配混合料的矿料间隙率随油石比的增大呈现相似的趋势,随着油石比增加,VMA 值减小;但矿料间隙率随油石比的变化幅度很小。在级配相同的条件下,油石比每增加 0.5%,VMA 值减小 0.1%~0.2%,表明在一定的油石比范围内,矿料级配对混合料的矿料间隙率影响比较明显,而对油石比的影响则很小^[19]。

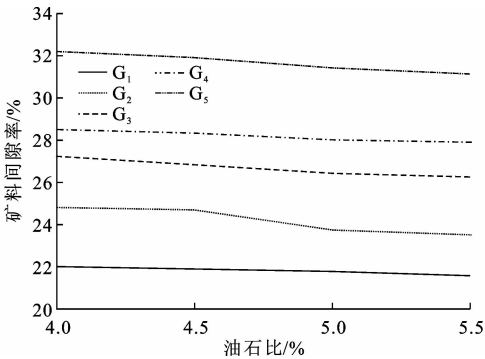


图 2 各级配矿料间隙率随油石比的变化

Fig. 2 Changes of VMA with asphalt-aggregate ratio

图 3 给出了 5 个级配的粗集料骨架间隙率 VCA_{mix} 随油石比的变化,可以看出,在级配相同的情况下,随着油石比的增加, VCA_{mix} 值呈现降低的趋势,这与 VMA 值的变化一致。级配越粗, VCA_{mix} 值越小。级配的变化对 VCA_{mix} 的影响要显著大于油石比变化对 VCA_{mix} 的影响。这也与前文体积参数理论分析得出的结论一致。

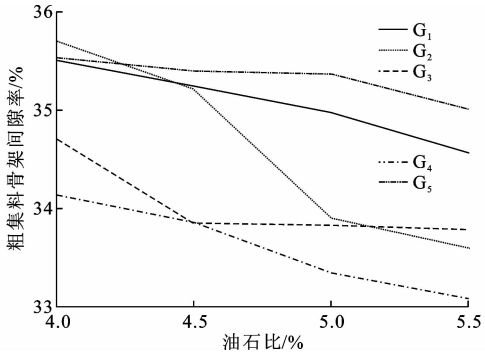


图 3 VCA_{mix} 随油石比的变化

Fig. 3 Changes of VCA_{mix} with asphalt-aggregate ratio

为了从本质上揭示体积参数的变化机制,采用统计分析的方法对其进行研究。利用 SPSS18.0 进行两因素方差分析,自变量矿料级配有 5 个水平,自变量油石比有 4 个水平。统计分析结果见表 3 和表 4。

表 3 表明:在显著性水平 5.0% 下,矿料级配变化对矿料间隙率有显著性影响;油石比变化对矿料间隙率没有显著性影响,验证了矿料间隙率随油石

表 3 矿料间隙率分析结果

Tab. 3 Analysis results of voids in mineral aggregate

源	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F 值	Sig. 值
校正模型	1 125.913	19	59.259	197.188	0.000
截距	57 888.548	1	57 888.548	192 629.072	0.000
矿料级配	1 087.740	4	271.935	904.887	0.000
油石比	2.426	3	0.809	2.691	0.054
误差	19.233	64	0.301		
总计	61 284.500	84			
校正总计	1 145.146	83			

表 4 粗集料骨架间隙率分析结果

Tab. 4 Analysis results of gap rate of coarse aggregate

源	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F 值	Sig. 值
校正模型	46.439	8	5.805	19.616	0.000
截距	32 023.783	1	32 023.783	108 216.648	0.000
矿料级配	31.542	5	6.308	21.318	0.000
油石比	13.393	3	4.464	15.086	0.000
误差	22.194	75	0.296		
总计	100 252.596	84			
校正总计	68.633	83			

比变化微小的规律。由表 4 可知:在 5.0% 的显著性水平下,矿料级配和油石比的变化对 VCA_{mix} 的影响显著,这与体积参数理论分析时得到的结论一致。因此,在排水性沥青混合料配合比设计时,通过调整矿料级配来获得需要的矿料间隙率是合理可行的;在获得合理的矿料间隙率的情况下,才可以改变沥青用量来获得性能优良的混合料。

3 排水性沥青混合料 VMA 预估方法

3.1 基于级配的矿料间隙率计算模型

矿料间隙率的大小与矿料级配、矿料颗粒的表面特性及沥青用量等参数有直接关系^[20-21],尤其是对于较大矿料间隙率的排水性沥青混合料,在集料性质满足规范要求的前提下,矿料间隙率大小主要取决于矿料级配。

Takemi 等遵循“堆积法”原理^[22],从 2 种粒径集料混合形成的间隙率入手,计算不同粒径的集料按照不同的比例混合形成的空隙比,充分考虑矿料级配的特点,引入当量粒径参数,利用数学归纳法,将方程推广到由多种粒径集料组成的矿料级配的空隙比计算中,得到基于级配的矿料间隙率的经验计算公式

$$e = me_s + ne_p - \frac{1}{4k} m \lg(r) - \frac{1}{2k} n \lg(r) - \frac{1}{2k} n \lg(n) \lg(r) \frac{n}{m} - \frac{1}{k} n \lg(n) \lg(S_d) \quad (17)$$

$$I_{VMA_a}=\frac{e}{1+e}\tag{18}$$

式中: n 为较小一级粒径集料体积占有所有矿料体积的百分率; m 为较粗一级粒径集料体积占有所有矿料体积的百分率; e 为空隙比; e_s 为较粗一级集料的空隙比; e_p 为较细一级集料的空隙比;初始计算时 $e_r=e_s$, $e_0=e_p$, e_r 为集料空隙比, e_0 为矿粉空隙比; I_{VMA_a} 为无沥青矿料间隙率 VMA_a 的计算参数; k 为集料形态特征系数, 主要表示集料的棱角性; $S_d=d_r^m d_o^n$, d_r 为粗集料粒径, d_o 为细集料粒径; r 为相邻粒径尺寸比, $r=\frac{d_r}{d_{r-1}}$ 。

3.2 基本参数

VMA 值与集料粒径大小、级配组成、几何形状、表面微观纹理和颗粒间排列组合方式有关, 计算 VMA 值时需要考虑以上影响因素, 本文采用以下 3 个基本参数表征这些影响因素。

3.2.1 集料体积通过百分率

VMA 是表征混合料内部体积关系的指标, 计算时需要将矿料级配的集料质量通过百分率换算为体积通过百分率, 其换算公式为

$$A_i=M_i\gamma_s/\gamma_i\tag{19}$$

式中: A_i 为某一级粒径 i 集料筛余体积百分率; M_i 为某一级粒径 i 集料筛余质量百分率; γ_i 为某一级粒径 i 集料的相对密度, 粗集料取毛体积相对密度, 细集料、矿粉取表观相对密度; γ_s 为集料合成相对密度, 粗集料取毛体积相对密度, 细集料、矿粉取表观相对密度。

3.2.2 集料空隙比 e_r

矿料间隙率的大小不仅受集料级配影响, 还与单一级粒径集料的堆积特性有密切关系, 单位体积下堆积的单一级粒径集料形成一定的矿料间隙率, 矿料间隙率的大小与集料的粒径、棱角性特征、压实特性有关。计算时粗集料的矿料间隙率采用捣实下的矿料间隙率, 细集料采用紧装状态下的紧堆空隙率。根据《公路工程集料试验规程》(JTGE42—2005) 中 T0309—2005、T0331—1994 的测试方法, 测试粗集料的捣实矿料间隙率和细集料的紧堆空隙率, 并通过空隙比与矿料间隙率之间的关系换算为集料空隙比

$$e_r=I_{VCA_{DRC}}/(1-I_{VCA_{DRC}})$$
$$\text{或 } e_r=N/(1-N)\tag{20}$$

式中: $I_{VCA_{DRC}}$ 为粗集料捣实矿料间隙率 VCA_{DRC} 的计算参数(%); N 为细集料紧堆空隙率(%)。

3.2.3 集料形态特征系数 k

不同粒径集料的排列、组合方式受集料形态特征的影响, 即矿料间隙率对粗细集料的形态特征变化有一定的敏感性。

文献[23]中借助图像分析技术对不同岩石种类的粗集料棱角性进行了研究, 提出 2 个可定量表征集料棱角性的指标: 粗糙度和分形维数。研究发现: 粗糙度、分形维数与国外的表面参数这 3 个指标具有较好的一致性, 均可定量表征集料的棱角性特征。因此本文采用粗糙度来定量表征粗集料的棱角性特征, 采用文献[24]中提出以等效椭圆长短轴比作为细集料形状特性的表征, 并借鉴文献[22]中对矿粉棱角性特征的表征, 近似认为小于 0.075 mm 颗粒的形态特征系数为 1.60。

3.3 基于级配的无沥青矿料间隙率预估方法验证

在进行 VMA 预估计算时, 根据级配范围确定级配的最大计算粒径; 由于矿粉中小于 0.005 mm 的颗粒极少, 故一般取 0.005 mm 作为计算的下限。

测试粗集料的捣实矿料间隙率和细集料的紧堆空隙率, 并通过式(20)换算为空隙比, 结果见表 5。

根据图像分析技术确定粗细集料及矿粉形态特征系数, 结果见表 6。

表 5 粗细集料及矿粉空隙比

Tab. 5 Void ratios of coarse/fine aggregate and mineral powder

粒径/mm	[16,13.2)	[13.2,9.5)	[9.5,4.75)	[4.75,2.36)	[2.36,1.18)
空隙比	0.64	0.71	0.75	0.76	0.77
粒径/mm	[1.18,0.6)	[0.6,0.3)	[0.3,0.15)	[0.15,0.075)	矿粉
空隙比	0.77	0.80	0.82	0.84	1.60

表 6 粗细集料和矿粉的形态特征系数

Tab. 6 Morphological characteristics factor of coarse/fine aggregate and mineral powder

参数	不同粒径(mm)集料的形态特征系数		矿粉形态特征系数
	[16,2.36)	[2.36,0.075)	
参数值	1.01	1.30	1.60

针对 5 个计算级配在不同油石比下进行体积参数室内试验测定, 并将实测值与经验法计算值进行对比, 结果见表 7。

表 7 VMA 计算结果

Tab. 7 Computed result of VMA

矿料级配	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅
计算 VMA 值/%	21.6	24.2	26.5	28.1	31.4
实测 VMA 最大值/%	22.0	23.5	27.2	28.5	32.2
相对误差/%	1.8	3.0	2.6	1.4	2.5

从表 6 可见, 利用经验法计算的 VMA 值与实测值之间的最大相对误差在允许范围内, 实测时沥青用

量对其只有微小的影响;对实测结果和经验法计算结果进行相关性分析(图4),发现两者之间存在很好的线性关系,判定系数 R^2 为0.9862,因此采用该经验法进行排水性沥青混合料VMA值预估可行。

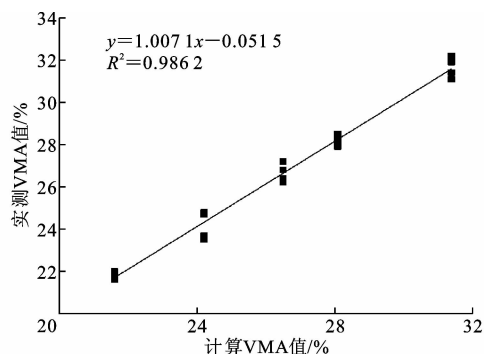


图4 VMA实测值与计算值的关系

Fig.4 Relationship between measured and calculated values of VMA

4 结 语

(1)排水性沥青混合料体积参数室内试验研究表明,级配变化对矿料间隙率有显著性影响,而在一定的油石比范围内,油石比变化对矿料间隙率没有显著性影响。

(2)在5.0%的显著性水平下,级配和油石比的变化对粗集料骨架间隙率的影响显著,这与体积参数理论分析得到的结论一致。

(3)在排水性沥青混合料配合比设计时,通过调整矿料级配来获得需要的矿料间隙率是合理可行的;在获得合理矿料间隙率的情况下,才可以改变沥青用量以获得性能优良的混合料。

(4)在进行排水性沥青混合料设计中,可在不进行大量马歇尔试验的前提下,预估出设计级配的无沥青矿料间隙率。

(5)根据矿料间隙率、空隙率和有效沥青用量之间的关系,可以应用排水性沥青混合料有效沥青用量确定新方法,确定有效沥青用量,该方法能显著节省试验工作量,缩短配合比设计周期,提高工程效率等,具有重要的工程意义。

(6)本文在分析排水性沥青混合料体积参数时,只采用了5个粗细不同的矿料级配,级配样本数量较少。下一步应增大试验样本数量,进一步补充和检验研究结果。

参考文献:

References:

[1] HANIM F, KAMAR A, JAZLINA N, et al. Design of

porous asphalt mixture to performance related criteria [C]//REAAA. Proceedings of 13th Conference of the Road Engineering Association of Asia and Australasia (REAAA). Wellington: REAAA, 2009: 9-16.

[2] LI M. Tyre-road noise, surface characteristics and material properties[D]. Delft: Delft University of Technology, 2013.

[3] KANDHAL P, FOO K, MALLICK R. Critical review of voids in mineral aggregate requirements in superpave [J]. Transportation Research Board, 1998 (1609): 21-27.

[4] 林绣贤. 论 Superpave 组成配比的特色[J]. 华东公路, 2002(1): 3-7.
LIN Xiu-xian, Discussing the characteristics of the ratio of composition for superpave[J]. East China Highway, 2002(1): 3-7.

[5] 林绣贤. 论 HMA 的设计空隙率和矿料最小间隙率[J]. 上海公路, 2004(4): 1-5.
LIN Xiu-xian, Discussion on design air voids and minimum voids of mineral aggregate requirements for HMA[J]. Shanghai Highways, 2004(4): 1-5.

[6] XU B, CHEN J, ZHOU C, et al. Study on Marshall Design parameters of porous asphalt mixture using limestone as coarse aggregate [J]. Construction & Building Materials, 2016, 124: 846-854.

[7] MCLEOD N W. Relationships between density, bitumen content, and voids properties of compacted bituminous paving mixtures [C]//Highway Research Board. Proceedings of the 35th Annual Meeting of the Highway Research Board, Washington DC: Highway Research Board, 1956: 327-404.

[8] MCLEOD N. Void requirements for dense-graded bituminous paving mixtures[M]//ASTM International. Bituminous Paving Materials. Philadelphia: ASTM International, 1959: 1-20.

[9] KANDHAL P S, KOEHLER W S. Marshall mix design method: Current practices [C]//Association of Asphalt Paving Technologists. Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings. Philadelphia: Association of Asphalt Paving Technologists, 1985: 284-303.

[10] MALLICK R B, BUCHANAN M S, KANDHAL P S, et al. A rational approach of specifying the voids in the mineral aggregate for dense-graded hot-mix asphalt [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2000.

[11] ANDERSON R M, BENTSEN R A. Influence of voids in the mineral aggregate (VMA) on the mechanical proper-

- ties of coarse and fine asphalt mixtures (with discussion) [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2001, 70: 1-37.
- [12] COMINSKY R, LEAHY R B, HARRIGAN E T. Level one mix design: Materials selection, compaction, and conditioning [M]. Washington DC: Transportation Research Board, 1994.
- [13] HUANG Xiao-qi, LI Bing, LI Chuang-min. Different gradations' influence on the voids in the mineral aggregate (VMA) of the bituminous mixture [J]. Railway Construction Technology, 2008(3): 74-77.
- [14] HUDSON S B, DAVIS R L. Relationship of aggregate voidage to gradation [J]. Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1965(34): 574-593.
- [15] 刘树堂, 曹卫东, 任晓刚, 等. Superpave 体系级配设计关键技术分析与 VMA 曲线预测 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(2): 8-13, 25.
LIU Shu-tang, CAO Wei-dong, REN Xiao-gang, et al. Analysis of key issues about gradation design in superpave system and VMA-curve prediction [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(2): 8-13, 25.
- [16] 党延兵, 李爱国, 李会娟, 等. 排水性沥青混合料配合比设计优化研究 [J]. 公路, 2009(6): 147-151.
DANG Yan-bin, LI Ai-guo, LI Hui-juan, et al. Study on mix design of porous asphalt mixture [J]. Highway, 2009(6): 147-151.
- [17] 魏如喜. 排水性沥青混合料的配合比设计方法 [J]. 国外公路, 2000, 20(5): 36-39.
WEI Ru-xi. Design method of porous asphalt mixture [J]. Journal of Foreign Highway, 2000, 20(5): 36-39.
- [18] 王敏敏. 开级配排水性沥青混合料配合比设计方法研究 [J]. 公路工程, 2016, 41(5): 133-138.
WANG Min-min. Research open graded drainage asphalt mixture design method [J]. Highway Engineering, 2016, 41(5): 133-138.
- [19] 刘洪海, 范鹏云, 岳鹏程, 等. 影响沥青混合料体积参数的因素与质量控制 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(9): 55-58.
- LIU Hong-hai, FAN Peng-yun, YUE Peng-cheng, et al. The factors of influencing mixture volume parameter of asphalt and construction quality control [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(9): 55-58.
- [20] 郝培文, 徐金枝, 肖 曼, 等. 矿料间隙率标准研究进展 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(1): 21-25.
HAO Pei-wen, XU Jin-zhi, XIAO Man, et al. Review on requirement of voids in mineral aggregates [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(1): 21-25.
- [21] 李 兵. 沥青混合料临界矿料间隙率试验研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.
LI Bing. Research on voids in the mineral aggregate (VMA) of the asphalt mixture [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2006.
- [22] INOUE T, GUNJI Y, AKAGI H. Rational design method of hot mix asphalt based on calculated VMA [C] // Foundation Eurasphalt. Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress. Breukelen: Foundation Eurasphalt, 2004: 1956-1966.
- [23] 汪海年, 郝培文, 肖庆一, 等. 粗集料棱角性的图像评价方法 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(4): 637-641.
WANG Hai-nian, HAO Pei-wen, XIAO Qing-yi, et al. Digital image evaluation method for angularity of coarse aggregates [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(4): 637-641.
- [24] 王大庆. 细集料几何特征参数的表征及对沥青混料影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
WANG Da-qing. Research on representation of fine aggregate geometric characteristics parameters and its influence on asphalt mixture performance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.