

文章编号:1671-8879(2009)02-0028-05

基于路用性能的沥青混合料的最佳沥青用量

黄宝涛¹, 李家春², 崔 娥², 俞竞伟¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:为了研究按路用性能确定沥青混合料的最佳沥青用量,采用旋转压实仪(GTM)模拟施工工况,分别对 Sup-13、Sup-16 两种级配进行了 GTM 成型试验,通过拟合测定的旋转稳定系数(GSI)随油石比变化曲线的曲率半径突变点,确定了 Sup-13 的最佳油石比为 4.8%, Sup-16 的最佳油石比为 4.9%。室内模型足尺加速加载试验和试验路用性能长期观测表明:GTM 法确定最佳沥青用量的沥青混合料路用性能优于马歇尔法;旋转稳定系数突变点确定的最佳沥青用量是合理的;突变点处的油石比与路用性能具有很好的相关性。

关键词:道路工程;沥青混合料;路用性能;最佳用量

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Optimum asphalt mixture content based on pavement performance

HUANG BAO-Tao¹, LI Jia-chun², CUI E², YU Jing-wei¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to ascertain optimum asphalt mixture content according to pavement performance, this paper established a gyrators-test-model(GTM) to simulate construction condition and respectively conducted GTM forming experiment of the two kinds gradation of Sup-13, Sup-16. The optimum asphalt mixture content could be confirmed through fitting curvature radius catastrophe point of the gyrators-stability-index changing tendency followed the asphalt content variation curves. The optimal asphalt content of Sup-13 is 4.8%, and the one of Sup-16 is 4.9%. Accelerated-loading-facility laboratory test and long-term-pavement-performance observation prove that the pavement performance through GTM method to ascertain optimum asphalt binder content is superior to Marshall method. It is reasonable to ascertain optimum asphalt mixture content based on catastrophe point. There is a good correlation between the asphalt mixture content in catastrophe point and pavement performance. 7 tabs, 6 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; asphalt mixture; road performance; optimum content

收稿日期:2008-04-18

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2006 318 000 07)

作者简介:黄宝涛(1975-),男,山东邹城人,工学博士研究生,E-mail:hbt1f2002@yahoo.com.cn.

0 引言

按路用性能确定沥青混合料的最佳用量一直是路面科学研究的热点,潭忆秋等^[1]提出了用体积设计法确定沥青用量;游宏^[2]和周卫峰^[3]分别采用SGC(美国旋转压实仪)和GTM(旋转压实仪)方法对不同级配进行了最佳沥青用量的确定。本文采用旋转压实仪对试件成型方式最大限度地模拟其施工工况,室内试验通过旋转稳定系数(GSI)随油石比变化拟合曲线的曲率半径突变点来确定最佳沥青用量;通过试验段长期路用性能观测证明,旋转稳定系数突变点处的油石比与路用性能具有很好的相关性,从而提出了一种与路用性能相联系的沥青混合料最佳沥青用量的确定方法。

1 马歇尔沥青用量设计法的弊端

《公路沥青路面施工技术规范》规定最佳沥青含量由马歇尔稳定度试验来确定。然而,在试件成型方面,马歇尔锤击次数与路面成型时的压实功能没有内在联系,马歇尔击锤的冲击力与车辆车轮接地压强存在巨大差异。马歇尔试模对沥青混合料的约束条件也与实际路面材料的受力条件不同,冲击压实不利于集料的定向重排,造成混合料的密度较低,用它控制施工往往造成路面的密度偏小,空隙率过高,由此导致混合料未被充分压实,在交通荷载作用下很快产生了由于抗剪强度小和再压实而出现车辙。因此,用马歇尔击实方法成型的试件,各种指标在控制现场施工质量中存在隐患。

2 最佳沥青用量的思路

室内试验要准确、有效地预测与控制现场施工质量,就要求室内成型方式与路面压实效果相吻合,能够最大限度地模拟施工工况,使室内成果与面层实际应用效果有可比性;施工现场混合料是在振动和揉搓共同作用下,集料在三维空间移动并充分就位,形成密实的混合料。在采用室内压实试验方法时,要能将混合料试件逼真地压实成实际路面气候和荷载条件下所达到的密实状态,同时压实设备能适应大小尺寸的集料,并能通过一定的手段测试混合料的可压实性能等。为此,利用旋转压实设备效果较好。本文采用旋转压实仪对试件成型方式最大限度地模拟,从而确定最佳沥青用量。

3 最佳沥青用量的方法

GTM成型试验的目的在于模拟路面行车荷载

作用下沥青混合料的最终压实状态即平衡状态,并测试分析试样被压实到平衡状态过程中剪切强度和最终塑性形变的大小,以判断混合料组成是否合理。在混合料被压实到平衡状态过程中,若机器角上升,滚轮压力下降,说明混合料的抗剪强度降低,变形增加,呈现出了塑性状态,即表明沥青混合料的沥青用量过大。试件的最终塑性形变大小是用旋转稳定系数来表示的。旋转稳定系数是试验结束时的机器角与压实过程中的最小机器角的比值,是表征试件受剪应力作用的变形稳定程度的参数。试验中需变化沥青用量,分别进行GTM压实试验,然后绘制旋转稳定系数与沥青用量的关系曲线,以确定混合料的最大沥青用量。另外,GTM还可提供试件的最大密度——试件处于平衡状态时的密度、安全系数(GSF)——抗剪强度与最大剪应力之比值、静态剪切模量和抗压模量等。

3.1 GTM试验与路用性能的相关性

(1)GTM试验应用推理的方法,采用应力-应变原理进行设计,以试验结束时的机器角与压实过程中的最小机器角的比值作为确定最佳沥青用量的参数,使得最佳油石比的确定与混合料力学性能相联系,相比马歇尔方法,设计思想更为先进。

(2)GTM试验采用旋转成型方式,精确模拟现场碾压工况,能够得到与现场混合料结构基本相同的室内试件,从而准确预测与控制现场工程质量。

(3)利用GTM设计沥青混凝土时,充分考虑行车荷载的实际状况,选择不同的设计压强,从而使设计方法更为合理。

(4)与Superpave(高性能沥青路面)成型方式不同,GTM不固定压实功,而是以极限平衡状态作为旋转结束条件,以避免路面出现因交通荷载作用产生的二次追密。

总之,GTM不仅是一种试件成型设备,其成型试件的优点也不仅是最大限度地模拟了路面施工时的碾压工况,并且更有价值的是,它是以汽车轮胎的接地压强作为成型试件的一个主要控制条件,不固定试件成型功能,而且是以被试验对象达到极限平衡状态作为结束条件,恰恰能反映不同沥青混合料的物理力学特性。GTM成型时试件被压实到了最终使用状态,试件密度高、空隙率和矿料间隙率小,设计沥青用量少,使沥青混合料兼顾各种路用性能。

3.2 最佳油石比的确定

试验材料的技术指标为:粗集料为辉绿岩,细集料为辉绿岩石屑;矿粉采用普通辉绿岩矿粉,过

0.075 mm 方孔筛后使用。经试验检验,集料及矿粉各项指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》要求。选用的结合料为重交通 70# 沥青,具体技术指标如表 1 所示。

为了模拟路面行车荷载作用下沥青混合料的最佳沥青用量,选取的集料级配如表 2 所示。

分别对表 2 中 Sup-13、Sup-16 两种级配,选择 4.4%、4.7%、5.0%、5.3%、5.6% 的 5 组油石比进行拌和,每种油石比进行 7 次试验,GTM 试验的温度为 140 ℃~145 ℃,工作参数模拟重载交通,取垂直压力为 1.0 MPa;将旋转压实成型试件(达到极限平衡状态)制成 7 组,旋转稳定系数的测试结果如表 3、表 4 所示;旋转稳定系数随油石比的变化如图 1、图 2 所示。

表 2 试验集料的各筛孔通过率

筛孔尺寸/mm	26.5	19	16	13	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Sup-13 级配/%	100	100.0	95.0	75.0	55.0	26.0	19.5	18.0	15.0	12.5	11.5	10.0
Sup-16 级配/%	100	98.0	88.0	77.0	62.7	38.4	29.5	22.8	16.1	11.3	7.9	5.5

表 3 Sup-13 沥青混合料的旋转稳定系数随油石比变化的试验结果

油石比/%	旋转稳定系数							
	Sup-13-1	Sup-13-2	Sup-13-3	Sup-13-4	Sup-13-5	Sup-13-6	Sup-13-7	均值
4.4	1.00	1.00	1.01	0.97	0.97	0.95	0.99	0.98
4.7	1.01	1.01	1.02	1.02	0.98	1.01	1.03	1.01
5.0	1.12	1.14	1.13	1.15	1.14	0.98	1.12	1.11
5.3	1.45	1.34	1.35	1.38	1.36	1.41	1.45	1.39
5.6	1.43	1.48	1.49	1.48	1.45	1.49		1.47

注:Sup-13-1 为 Sup-13 的第 1 组试验编号;其余以此类推。

表 4 Sup-16 沥青混合料的旋转稳定系数随油石比变化的试验结果

油石比/%	旋转稳定系数							
	Sup-16-1	Sup-16-2	Sup-16-3	Sup-16-4	Sup-16-5	Sup-16-6	Sup-16-7	均值
4.4	0.98	1.05	1.03	0.97	0.97	0.98	1.03	1.00
4.7	1.06	1.06	1.04	0.99	1.03	0.98	1.04	1.03
5.0	1.06	1.06	1.11	1.04	1.04	1.00	1.06	1.05
5.3	1.18	1.07	1.35	1.15	1.18	1.04	1.06	1.15
5.6		1.20				1.16	1.15	1.17

注:Sup-16-1 为 Sup-16 的第 1 组试验编号;其余以此类推。

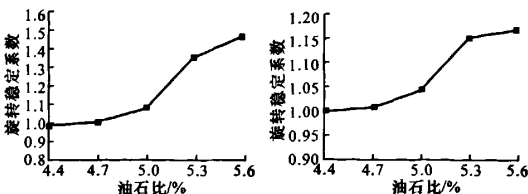


图 1 Sup-13 的旋转稳定系数随油石比的变化曲线

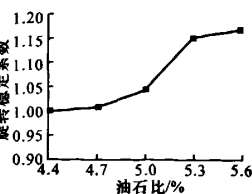


图 2 Sup-16 的旋转稳定系数随油石比的变化曲线

由 Sup-13、Sup-16 两种级配的旋转稳定系数试

表 1 AH-70# 重交通道路沥青技术指标

技术指标		试验结果
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.1 mm		65
软化点(环球法)/℃		46
延度(15 ℃,5 cm/min)/cm		>150
延度(10 ℃,5 cm/min)/cm		35
含蜡量(质量分数)/%		1.9
闪点/℃		290
溶解度(三氯乙烯)/%		99.9
密度(15 ℃)/(g·cm ⁻³)		1.01
旋转薄膜烘箱试验	延度(10 ℃)/cm	9
	延度(15 ℃)/cm	>100
	质量损失/%	0.03
	针入度比(25 ℃)/%	71

验结果显示,所有试验的旋转稳定系数随油石比的变化均表现出相同的特点,即当油石比较小时,旋转稳定系数变化不大,所拟合曲线比较平坦,曲率半径较大;当油石比达到某个值(即沥青混合料开始出现塑性变形)时,由于旋转稳定系数急剧增加,曲线曲率在此点处变大,即曲率半径最小;当油石比继续增加,曲线的曲率半径又开始变大,即油石比增大,沥青混合料抗变形能力降低(旋转稳定系数逐渐增大)。但它们均有一个值得关注的现象,即对于不同试验的沥青混合料,随着油石比的增大,旋转稳定系数普遍存在一个拟合曲线的曲率半径最小的突变点。这个突变点的存在,标志着油石比一旦大于此值,沥青混合料抗变形能力迅速下降,故而可以将该突变点作为沥青混合料最佳油石比的判据^[4 5]。由图 1 可知,级配 Sup-13 的最佳油石比为 4.8%;由图 2 可知,级配 Sup-16 的最佳油石比为 4.9%。GTM 试验以轮胎接地压强作为垂直压力,以综合考虑路用性能的旋转角度作为基准角,不固定压实功,以极限平衡状态作为试验结束条件,以旋转稳定系数即抗变形能力变化的突变点作为最佳沥青用量的确定点,恰恰反映了原材料特性、级配和压实功等因素对沥青混合料力学性能的综合影响。由多项饱和体的理论可知,当特定多相体达到相对饱和状态时,所对应的液相材料的含量是唯一的^[6-10]。所以,无论混合料级配形式如何变化,用以上判据确定沥青用量是合理的,但它决不意味着对于所有原材料

组成的沥青混合料,达到过饱和状态的沥青含量是相同的。

4 典型级配的室内环道试验

采用上述试验的级配,将试验路面铺筑于东南大学道路桥梁实验室的环道试验槽内,路面结构与试验路相同,如表5所示。

表5 典型级配的室内环道试验段结构

路段	上面层/cm	中面层(6 cm)	下面层(8 cm)	基层(36 cm)
GTM 试验段	4	Sup-20	Sup-25	水泥稳定碎石
马歇尔试验段	4	Sup-20	Sup-25	水泥稳定碎石

环道试验槽深 200 cm,外径 950 cm,内径 550 cm,环道试验路面宽 200 cm。环道加载装置的运行系统为双臂加载,臂的外端安装一组足尺双轮组轴载,加载臂上装有砝码槽,由此调节轴载值;运行速度可自动调节,最高轮行线速度为 60 km/h。试验模拟双轮单轴荷载 110 kN,单侧轴载为 55 kN,轮胎接地压力 0.70 MPa,运行速度为(25±5) km/h。依据设置在路基外侧的交通量自动记录装置的累计数字,在累计当量轴载作用次数为 1.5×10^6 、 2.8×10^6 、 3.4×10^6 、 4.1×10^6 的情况下,进行了检测,其检测结果如表6所示。

表6 试验路段车辙检测结果

试验编号 及类型	GTM 试验段车辙 深度/mm				马歇尔试验段车辙 深度/mm			
Sup-13-1	5.0	9.0	10	19	18	36	修补	停止 试验
Sup-13-2	4.0	6.0	11	18	22	33	修补	
Sup-13-3	7.0	10.0	25	修补	30	修补		
Sup-13-4	3.0	5.5	13	22	23	29		
Sup-13-5	4.0	7.0	15	26	36	修补		
Sup-13-6	2.0	6.5	13	29	30	修补		
Sup-13-7	3.5	7.5	21	修补	22	28	修补	
Sup-16-1	6.0	10.0	15	26	27	修补		
Sup-16-2	6.5	10.0	13	22	12	26	修补	
Sup-16-3	5.0	9.0	14	25	15	28	修补	
Sup-16-4	5.5	10.0	15	24	13	26	修补	
Sup-16-5	4.0	7.0	11	19	29	修补		
Sup-16-6	4.0	8.0	10	17	15	27	修补	
Sup-16-7	5.0	8.5	13	22	30	修补		
累计当 量轴次	1.5×10^6	2.8×10^6	3.4×10^6	4.1×10^6	1.5×10^6	2.8×10^6	3.4×10^6	4.1×10^6

由环道试验路检测结果可知,GTM 方法确定的最佳沥青含量(质量分数)的沥青混合料高温抗车辙能力远大于马歇尔方法确定的最佳沥青含量的沥青混合料。检测结果表明,在最佳沥青含量下,

GTM 试验段沥青混合料的抗车辙能力为马歇尔路段的 1.5~2.9 倍。在路面设计使用年限内,GTM 试验段除个别段进行了修补外,绝大多数路段可以满足行车路用性能的要求。而由马歇尔方法确定的最佳沥青含量试验段,在经历了 1.5×10^6 累计当量轴载作用次数后,其车辙深度严重超出车辆正常行驶的路用要求,不得已进行了部分试验段的罩面修补,从而失去了数据的可比性。

5 典型级配的路用性能观测

为了更好地验证通过 GTM 确定的最佳沥青含量的实际使用效果,在江苏省沿江高速公路的苏州段分别按 GTM 成型和马歇尔成型确定的最佳沥青用量,共铺筑了 4.3 km 左右的对比试验段,进行了路面长期路用性能的观测。其路用性能指标的观测结果如表7所示。

表7 试验路段动弯沉、平整度、车辙和开裂的检测结果

路段	性能指标	年份							
		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
GTM 试验段	动弯沉/0.01 mm	14.9	15.2	16.9	17.4	18.1	18.6	19.1	19.8
	平整度/mm	1.1	1.5	2.0	2.7	3.5	4.3	4.4	4.6
	车辙/mm	0	0.7	1.1	1.6	2.1	3.2	3.9	5.2
	开裂/ ($\text{m}^2\cdot1000\text{m}^{-2}$)	4.1	4.4	4.4	5.5	5.9	6.8	7.1	7.3
马歇尔 试验段	动弯沉/0.01 mm	15.9	21.2	23.6	25.7	26.8	29.2	30.9	33.2
	平整度/mm	1.8	2.5	3.2	4.7	5.8	7.3	8.1	8.8
	车辙/mm	0	2.1	3.8	5.2	8.1	10.9	13.5	17.9
	开裂/ ($\text{m}^2\cdot1000\text{m}^{-2}$)	8.1	10.4	11.4	13.5	15.9	16.4	17.5	18.4

试验路段的观测数据表明,GTM 法确定的最佳沥青用量的沥青混合料路用性能优于马歇尔法确定的沥青混合料的路用性能。对试验路段观测的数据进行回归分析,得到了如图3~图6(见下页)所示的变化趋势。

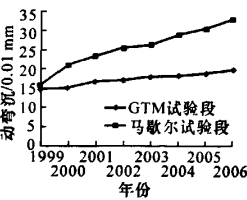


图3 试验段动弯沉
观测值变化曲线

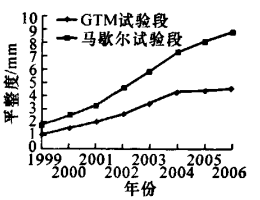


图4 试验段平整度
观测值变化曲线

由路用性能指标变化的趋势可以看出,通过 GTM 试验的旋转稳定系数突变点确定的最佳沥青含量是合理的,GTM 成型试件参数与沥青混合料

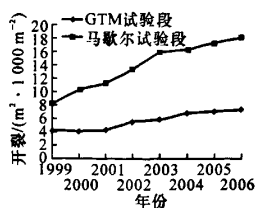


图5 试验段开裂
观测值变化曲线

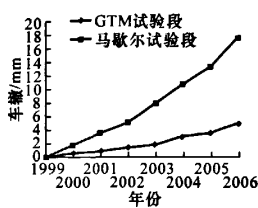


图6 试验段车辙
观测值变化曲线

的路用性能有很好的相关性,提出了一种与路用性能相联系的沥青混合料最佳沥青用量的确定方法。

6 结 语

(1)由于马歇尔试验确定的标准参数与沥青混合料路用性能没有内在联系,在沥青混合料路用成型原理的基础上,分析了 GTM 试件旋转压实成型可以模拟混合料路用成型的合理性。

(2)通过对典型级配不同油石比下的 GTM 试件成型时的旋转稳定系数数据分析,旋转稳定系数值普遍存在一个拟合曲线的曲率半径最小的突变点,它的存在标志着油石比一旦大于此值,沥青混合料抗变形能力便迅速下降,故而可以将该突变点作为沥青混合料最佳油石比的判断依据。

(3)通过室内直线式足尺路面加速加载破坏试验和室外江苏省沿江高速公路的苏州段试验,分别对 GTM 成型和马歇尔成型确定的最佳沥青用量对比试验路段的路面长期路用性能的观测数据的分析,证实了通过旋转稳定系数突变点确定的最佳沥青含量是合理的,从而找到了一种与路用性能相联系的沥青混合料最佳沥青用量的确定方法。

参考文献:

References:

- [1] 谭忆秋,张肖宁,郭祖辛.用体积法设计 SMA 混合料的配合比[J].哈尔滨建筑大学学报,1999,32(3):105-110.
TAN Yi-qiu,ZHANG Xiao-ning,GUO Zu-xin. Designing the gradation of stone matrix asphalt mixture by void design procedure[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture,1999,32(3):105-110.
- [2] 游宏,黄卫东,陈乐生,等. SGC 设计方法与马歇尔设计方法设计 SMA 最佳沥青用量的比较研究[J].公路交通科技,2006,23(8):67-71.
YOU Hong,HUANG Wei-dong,CHEN Le-sheng,et al. Comparison research on SGC and Marshall mixture

design procedure for SMA[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2006,23(8):67-71.

- [3] 周卫峰.基于 GTM 的沥青混合料配合比设计方法研究[D].西安:长安大学,2006.
- [4] 黄宝涛,廖公云,张静芳.半刚性基层沥青路面层间接触临界状态值的计算方法[J].东南大学学报:自然科学版,2007,37(4):666-670.
HUANG Bao-tao,LIAO Gong-yun,ZHANG Jing-fang. Analytical method of interlayer contact fettle in semi-rigid-base bituminous pavement[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition,2007,37(4):666-670.
- [5] 黄宝涛,梁轶,崔娥,等.沥青混合料抗车辙性能的分形描述方法[J].交通运输工程学报,2007,7(6):59-63.
HUANG Bao-tao,LIANG Yi,CUI E,et al. Fractal description method of asphalt mixture rut resistance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2007,7(6):59-63.
- [6] Warren T L,Krajcinovic D. Fractal models of elastic-perfectly plastic contact of rough surfaces based on the cantor set[J]. International Journal of Solids and Structures,1995,32(19):2907-2922.
- [7] 陈忠达,袁万杰,薛航,等.沥青混合料高温性能评价指标[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(5):1-4.
CHEN Zhong-da,YUAN Wan-jie,XUE Hang,et al. High temperature stability index of hot mixed asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2006,26(5):1-4.
- [8] 李平,芦军,张争奇,等.沥青混合料用矿粉性能指标研究[J].中国公路学报,2008,21(4):6-11.
LI Ping,LU Jun,ZHANG Zheng-qi,et al. Research on performance index of mineral filler used in asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(4):6-11.
- [9] Turcotte D L. Implications of chaos, scale-invariance, and fractal statistics in geology[J]. Palaeogeography,1990,89(3):301-308.
- [10] 黄宝涛,田伟平,李家春,等.沥青路面抗滑性能定量评价的分形方法[J].中国公路学报,2008,21(4):12-17.
HUANG Bao-tao,TIAN Wei-ping,LI Jia-chun,et al. Fractal method based on quantitative evaluation of asphalt pavement anti-slide performance[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(4):12-17.