

沥青贯入式碎石路面材料用量及施工工艺研究

靳文硕¹, 王亮¹, 刘强¹, 司青山², 孙兆云², 张磊²

¹山东高速尼罗投资发展有限公司, 山东 济南

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

收稿日期: 2021年11月24日; 录用日期: 2021年12月24日; 发布日期: 2021年12月31日

摘要

为进一步对沥青贯入式路面原材料用量进行研究, 参考分级掺配的方法设计了沥青混合料的级配, 利用体积填充的方法确定了沥青用量并通过试验说明了石料除尘及加热的必要性。通过足尺模型试验对原材料级配进行了验证, 结果表明: 通过分级掺配法使混合料骨料密实度增加, 从而降低了石料和沥青用量。

关键词

沥青贯入式, 足尺模型, 石料用量, 沥青用量

Research on Material Consumption and Construction Technology of Asphalt Penetration Macadam Pavement

Wenshuo Jin¹, Liang Wang¹, Qiang Liu¹, Qingshan Si², Zhaoyun Sun², Lei Zhang²

¹Shandong High Speed Nile Investment Development Co. LTD., Jinan Shandong

²Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong

Received: Nov. 24th, 2021; accepted: Dec. 24th, 2021; published: Dec. 31st, 2021

Abstract

In order to further study the raw material consumption of asphalt penetration pavement, the gradation of asphalt mixture was designed by referring to the method of gradation blending, the asphalt consumption was determined by volume filling method, and the necessity of dust removal and heating of stone material was explained through experiments. The gradation of raw materials is verified by full-scale model test. The results show that the gradation method can increase the density of aggregate and reduce the amount of stone and asphalt.

Keywords

Asphalt Penetration Type, Full Scale Model, Dosage of Stone, Asphalt Content

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

沥青路面修筑的历史大约已有 150 多年, 1854 年法国巴黎修筑了薄层沥青路面[1], 随着该类型路面的出现与使用, 沥青路面的设计方法也应运而生。第一个沥青路面设计的公式是由美国麻省道路委员会在 1901 年提出的[2], 而后随着道路工作者对沥青混合料研究的深入, 沥青路面设计方法不断改进, 由早期基于经验的设计方法, 改进为基于力学的设计方法, 发展到现在基于使用性能的设计方法。

集料的级配设计在沥青混合料设计中具有举足轻重的作用, 直接影响沥青路面后期的路用性能。现有的相关研究认为混合料的级配对路面的抗车辙能力贡献率约占 60% [3], 因此, 如何对沥青混合料进行较好的级配设计, 直接影响混合料的使用性能。从级配设计方法的发展历程可以看出, 级配的设计已经从早期的纯经验设计方法逐步向纯理论设计方法进行转变过程, 并且开始逐步结合实际工程的需求开展设计[4]。

贯入式路面充分利用了粗集料之间的嵌挤, 一定条件下可达到抗车辙的目的[5], 且具有施工工艺简单、成本造价低廉、对施工机械要求较低等特点, 适合于低等级道路或小交通量道路使用。为进一步探究贯入式路面的材料用量, 本研究从分级掺配的角度, 对贯入式路面沥青混合料的级配进行了设计, 通过足尺模型试验对其用量进行了验证, 并与现行规范进行了对比。

2. 原材料性能

2.1. 集料性能

粗集料和细集料采用花岗岩碎石, 矿粉采用普通石灰石矿粉, 集料技术指标性能试验根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42-2005)进行, 其性能指标如表 1 所示。

Table 1. Physical and technical index of aggregate

表 1. 粗集料性能指标

规格及指标 (mm)	洛杉矶磨耗 /%	表观相对密 度(g/cm ³)	吸水率/%	针片状含 量/%	棱角性	坚固性/%	塑性指数/%
30~50	14.7	2.816	0.53	-	100/100	0.7	
20~40		2.733	0.57	11.7	100/100	0.7	
20~30		2.751	0.49		100/100	0.5	
10~20		2.736	0.53	10.3	100/100	0.2	
10~15		2.594	0.61		100/100	0.4	
5~10		2.615	0.77	11.2	100/100	0.7	
3~6		2.377	1.68		-	0.6	
0~3		2.514	-		-	0.9	2.34

Continued

矿粉		2.867	-	-	-	3.06	
质量要求	≤28	≥2.6	≤2	≤15	100/90	≤12	≤4

筛分试验结果

各组成矿料的筛分结果如表 2 所示。

Table 2. Aggregate screening test results

表 2. 集料筛分试验结果

集料规格 (mm)	通过筛孔(方孔筛, mm)百分率(%)														
	53.0	37.5	31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
30~50	100	85.3	41.1	5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20~40	100	100	91.7	52.3	3.3	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
20~30	100	100	100	91.5	10.2	3.3	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
10~20	100	100	100	100	91.8	69.4	45.3	9.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
10~15	100	100	100	100	100	98.9	91.4	25.8	2.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
5~10	100	100	100	100	100	100	100	97.4	5.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
3~6	100	100	100	100	100	100	100	100	76.1	11.2	2.7	0.6	0.6	0.6	0.6
0~3	100	100	100	100	100	100	100	100	99.2	77.9	51.9	42.3	23.8	13.1	9.3
矿粉	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97.8	87.4

2.2. 沥青技术指标

沥青选用 A 级 70# 基质沥青。沥青的性能检测按照《公路沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011) 进行, 其性能要求参照《沥青路面施工技术规范》的相关规定。检测结果见表 3, 检测结果满足现行相关规范标准。

Table 3. Technical specifications and test results of grade A 70 base asphalt

表 3. A 级 70 号基质沥青技术指标及检验结果

性能指标	单位	技术要求	实测
针入度指数 PI	-	1.5~+1.0	0.47
针入度	0.1 mm	60~80	69
软化点	°C	≥47	50.2
密度	g/cm ³	-	1.019
延度	(5°C, 5 cm/min)	≥15	60.1
	(25°C, 5 cm/min)	≥100	122.2

3. 沥青贯入式碎石路面配合比设计

3.1. 分级掺配法简介

集料的分级掺配法[6]是由 Lees 在 1970 年提出的, 该方法以混合料达到最大密实度为设计目标, 通

通过对由粗到细的一系列粒料的掺配,得出集料密实度最大(孔隙率最小)时各档集料的最佳比例,从而确定集料的最佳级配。可用以下例子说明,将4种粒径不同的集料(用A、B、C、D分别代表四种不同粒径的集料)配制成最密实的混合料,集料粒径大小关系 $A > B > C > D$,假设在最密实状态时掺配比例为 a, b, c, d ,则掺配步骤为:

- 1) 将A和B按比例 a, b 掺配;
- 2) 将上一步掺配的AB混合料视为一种集料与C按比例 $a + b$ 和 c 掺配;
- 3) 将混合料ABC视为一种集料与D按比例 $a + b + c$ 和 d 掺配。

3.2. 配合比设计

本研究中对粗集料最大粒径为31.5 mm、最小粒径4.75 mm的沥青贯入式路面进行研究。

首先确定粗细集料的分界点,对于公称最大沥青31.5 mm的混合料,共需进行三级掺配,分别是:一级掺配27.5~19.0 mm;二级掺配9.5~19.0 mm;三级掺配4.75~9.5 mm。掺配的设计步骤为:

1) 在第一级的掺配中,将粒径在19.0~31.5 mm范围内的集料视为“粗集料”,将粒径在9.5~19.0 mm范围内的集料视为“细集料”,二者按照不同的比例进行掺配(例如:100:0、75:25、50:50、25:75、0:100),分别测出“粗集料”的干捣实密度和“细集料”的毛体积密度以及各掺配比例下集料的毛体积密度 ρ_b 和捣实状态下集料的堆积密度 ρ_t 。

2) 按公式(1)得出不同比例的集料骨架间隙率 VCR_{DRC} ,并选择 VCR_{DRC} 最小的掺配比例。但是在掺配的过程中, VCR_{DRC} 计算结果较低只能认为该掺配比例下的骨料嵌挤比较密实,并不能保证掺配后的粗集料形成骨架,因此,可以利用公式(2)来验证本次掺配下的二级掺配骨料有没有对以及掺配所形成的骨架产生干涉。如果通过验证,所得结果满足公式(2),则说明二级掺配骨料的体积小于以及掺配所产生的空隙,证明粗集料空隙未被干涉,不用调整一级掺配与二级掺配的比例;若所得的结果不满足公式(2)要求,则表明一级掺配骨料产生的空隙受到了二级掺配骨料的影响,需调整二者之间用量之比,增加一级掺配骨料的用量,使得二级掺配骨料的体积小于一级掺配骨料所形成的孔隙,从而完成一级掺配。

3) 在完成第(2)步后,可在其基础上进行下一级掺配。在二级掺配中,将上一级的骨料(粒径在19.0~27.5 mm范围内)看作一整体,视为“粗骨料”,将粒径在9.5~19.0 mm范围内的集料视为“细集料”。参考第(2)步进行比例调整,然后采用公式(2)进行验证,完成本掺配。

4) 与上一步相似,将二级掺配比例下的集料(粒径在9.0~31.5 mm范围内)看作一整体,将粒径在4.75~9.0 mm范围内的作为“细集料”进行掺配。按上述的方法进行三级掺配,最终得到各档集料比例。

$$VCA_{DRC} = \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho_b} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: VCA_{DRC} ——捣实状态下集料骨架间隙率(%);

ρ_b ——按《公路工程集料试验规程》中T0304确定的集料毛体积密度(t/m^3);

ρ_t ——按《公路工程集料试验规程》中T0309捣实法测定的集料自然堆积密度(t/m^3)。

$$\left\{ \begin{array}{l} q_c + q_f = 100 \\ \frac{q_c}{100\rho_{sc}} VCA > \frac{q_f}{\rho_f} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: q_c, q_f ——“粗集料”及“细集料”的含量(%);

VCA ——“粗集料”形成的空隙(%);

ρ_{sc}, ρ_f ——对应“粗集料”的干捣实密度及“细集料”毛体积密度(t/m^3)。

通过上述方法进行掺配试验,从而确定了各骨料掺配比例,分别为 19.0~31.5:9.5~19.0 = 72:28; 27.5~9.0:4.75~9.5 mm = 60:40。通过式(2)验算,若满足公示要求,即可证明粗集料骨架不受影响,不需要调整粗集料的比例。粗集料各档粒径比例为 27.5:19.0:9.5:4.75:2.36 = 100:70.6:51:30:0。最终形成的沥青贯入式路面的级配表 4 所示,级配曲线如图 1 所示。

Table 4. Technical specifications and test results of grade A 70 base asphalt
表 4. 沥青贯入式碎石路面级配表

级配	通过下列筛孔(方孔筛 mm)的质量百分率(%)				
	31.5	19.0	9.5	4.75	2.36
三级掺配	100	70.6	51	30	0

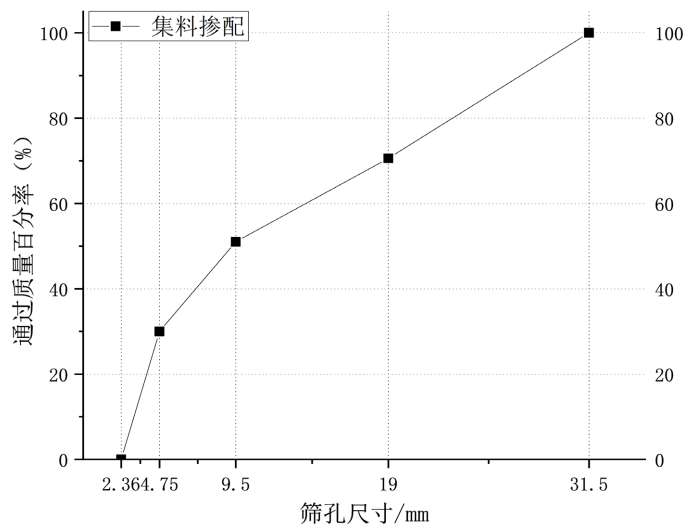


Figure 1. Aggregate gradation curve
图 1. 集料级配曲线

本研究采用 70 号基质沥青作为胶结料,对贯入式路面原材料用量进行研究。

3.3. 沥青用量研究

本研究采用 70 号基质沥青作为胶结料,对贯入式路面的性能进行研究。根据体积填充原则,设计思路为粗集料形成骨架,沥青完全填充骨架空隙,起粘结、填充、稳定骨架的作用。混合料中的沥青用量采用式(3-3)确定。使沥青于填料的体积等于骨架空隙体积。

$$Q = VCA_{DRC} \times \frac{\rho_a}{\rho_{sc}(1 + \rho_a)} \quad (3)$$

ρ_{sc} 、 ρ_a 、 ρ_p ——粗集料的干捣实密度、沥青密度;

VCA_{DRC} ——粗集料形成的空隙(%);

按照式(3)计算出贯入式路面所需沥青用量为 6.1%。

3.4. 集料预热及除尘的必要性

当沥青贯入常温碎石时,由于碎石温度较低,沥青温度也会在段时间内有较为明显的下降,在沥青未到达碎石底部前,沥青粘度会迅速增加,无法渗透碎石底;对于未经除尘的碎石,沥青在灌入碎石过

程中,会导致沥青对粉尘的吸附,从而影响其流动性。因此,在沥青贯入式路面施工的过程中,应该提前对碎石进行加热和除尘[5]。

4. 足尺模型试验

上述配合比设计主要包括以下两个方面:一是对粗集料的用量进行计算,确保细集料不会对粗集料的空隙产生干涉;二是通过对由粗到细的一系列粒料的掺配,使得粗集料密实度最大(孔隙率最小)时各档集料的佳比例,从而确定集料的佳级配。沥青贯入式路面的施工工艺与沥青混合料的存在较大差别,沥青贯入式路面一般为将石料运输至现场,然后按照粗集料-洒布第一遍沥青-撒布第一遍嵌缝料-洒布第二遍沥青-撒布第二层嵌缝料的施工顺序进行施工。因此,需在计算沥青混合料配合比的基础上,进行足尺模型试验,对其原材料用量进行验证。

为验证配合比材料用量与工程实际材料用量之间的关系,布置 2 m^2 的足尺模型进行试验。

足尺模型所用原材料与 2.1 和 2.2 章节所用原材料一致。矿料及沥青的施工温度见表 5。

Table 5. Mineral and asphalt construction temperature

表 5. 矿料及沥青施工温度

沥青种类及标号	70#基质沥青	
沥青加热温度(°C)	150~160	
矿料加热温度(°C)	160~180	
沥青运输到现场温度(°C)	不低于 150	
矿料运输到现场温度(°C)	不低于 150	
摊铺温度(°C)	不低于 145	
碾压温度(°C)	初压	不低于 140
	复压	不低于 110
	终压	不低于 80

由于沥青面层较薄,因此在足尺模型施工时,温度均取上限。本次足尺模型试验仅对沥青贯入式路面的原材料用量进行验证,故不再进行路面结构等设计,直接在已有沥青混凝土路面上,直接进行铺筑,施工采用人工铺设碎石及洒布沥青的方式进行。

施工前,将三档不同粒径的石料进行除尘并称重,以便完成施工后计算各档石料的用量,然后将石料放置在 160°C 的烘箱内进行预热 12 h,预热温度为 160°C 。

施工步骤:

- 1) 在原道路路面上,测量出 $1 \times 2\text{ m}$ 的足尺模型尺寸,用砖块将试验区域进行围挡;
- 2) 清扫足尺模型范围内的路段,确保试验区域无浮尘;
- 3) 在试验区域内,首先将已预热好的 $19.5\sim 31.5\text{ mm}$ 碎石进行人工手摆铺设。主层集料须摆放紧密,所有碎石单独坐稳,碎石大面朝下,尖端向上,相邻块石的表面高差不宜太大。铺设过程要确保各碎石之间接触紧密;
- 4) 主层石料铺设完成后,立即用 6 t 小型压路机对铺筑石料进行碾压,碾压速度为 2 km/h ,直至主层集料嵌锁紧密,无显著轮迹;
- 5) 将加热好的 70 号基质沥青浇洒在主层集料上。

6) 撒布主层沥青后立即人工撒布第一层主集料嵌缝料。撒布嵌缝料后应及时扫匀, 达到全面覆盖、厚度一致、集料不重叠, 也不露出沥青的要求。局部有缺料时适当找补, 积料过多的将多余集料扫出。

7) 第二层嵌缝料及沥青的施工方法与第一层相同。

足尺模型试验如图 2 所示, 各档不同粒径石料的用量如表 6 所示。



Figure 2. Curve: system result of standard experiment

图 2. 沥青贯入式碎石路面足尺模型试验

Table 6. Scale for stone for full-scale model test

表 6. 足尺模型试验石料用量表

粒径(mm)	用量/(kg/1000 m ²)	用量/(m ³ /1000 m ²)
19.0~31	40100	30.7
9.5~19.0	15150	11
4.75~9.5	10050	7.3
沥青用量/(kg/m ²)	4.1	

通过表 6 可知, 在足尺模型试验中, 各档石料的原材料用量之比为 19.0~31.5:9.5~19.0:4.75~9.5 = 62.8:12.5:14.7。与配合比设计用量基本一致。

《公路沥青路面施工技术规范》(J TGF40-2004)中各档石料的推荐用量范围之比为 19.0~31.5:9.5~19.0:4.75~9.5 = 71.4~72.5:20~16.7:8.6~8.5:8.1。因此, 从各档石料的用量来看, 通过配合比的调整, 降低了主层石料所用比例, 增加了第二层嵌缝料的比例, 且各层石料用量均低于规范推荐用量, 主层石料每平方米用量较标准要求减少了 18.7~19.3 kg, 降低率为 32%~38.6%, 第一层嵌缝料每平方米用量较标准要求减少了 1~3 kg, 降低率为 8.3%~21.4%, 第二层嵌缝料每平方米用量较标准要求增加了 1.2~2.2 kg, 增加率为 24%~37%。分析其原因, 认为主要原因是采用摊铺机或平地机进行铺设的过程中, 不能保证主层集料始终单层铺筑, 从而会导致主层集料的用量增加, 而主层石料的重叠会降低空隙率, 从而导致嵌缝料用量降低。在足尺模型试验中, 主层石料采用人工进行摆设, 尽可能确保了石料间的接触紧密, 且始终为单层摆设, 避免了以上问题的发生。

5. 结论

1) 通过分级掺配法对沥青贯入式碎石路面的原材料用量进行了计算, 并用体积填充的方法确定了沥青的用量。

2) 采用组成模型试验的方法,对分级掺配法所得出材料用量进行了验证,结果表明实际工程用量与计算用量相似,且主层石料用量较标准降低了 32%~38.6%,第一层嵌缝料用量较标准要求降低了 8.3%~21.4%增加了第二层嵌缝料的比例,增加率为 24%~37%,总体来说,石料用量低于规范推荐用量,降低了施工成本。

3) 沥青贯入式路面在施工前,为保证沥青能够有效灌入主层石料下部,需提前对其进行加热和除尘。

参考文献

- [1] 李兵. 聚合物改性沥青在德国与法国的应用[J]. 交通世界, 2001(9): 36-37.
- [2] 杨明艳. 乳化沥青稀浆混合料贯入式沥青路面强度形成机理的研究[J]. 中华建设科技, 2015(8): 7.
- [3] 白楷. 大粒径沥青稳定碎石柔性基层沥青路面力学性能研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [4] 董泽蛟, 肖桂清, 龚湘兵. 级配及抗车辙剂对沥青混合料抗车辙性能的影响分析[J]. 公路交通科技, 2014, 3146(8): 1401-1414.
- [5] 邓青子. 预拌热碎石贯入式沥青混合料研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2020.
- [6] 梅廷义. 沥青混合料间架结构设计方法与车辙控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2009.