

高原冻土地区 AC-13C 沥青混合料 配合比设计与试验研究

王伟^{1,2}, 刘家奇², 张景禄³, 梁斌^{2*}

(1. 中交二公局第四工程有限公司, 河南 洛阳 471013; 2. 河南科技大学 土木工程学院; 3. 中交第二公路工程局有限公司)

摘要:该文针对高原冻土地区公路路面的主要病害问题,通过马歇尔试验确定 AC-13C 沥青混合料配合比并对其路用性能进行试验研究。依托国道 109 线那曲至拉萨公路改建工程,结合 AC-13C 改性沥青混合料在不同油石比和矿料级配条件下进行了最佳配合比设计;采用浸水马歇尔试验、低温弯曲试验、车辙试验、冻融循环试验等研究了沥青混合料的水稳定性、高温稳定性、低温抗裂性、耐久性及抗渗水性能等路用性能;并铺筑试验路段进行路面厚度、平整度和弯沉检测,验证了使用该配合比厂拌沥青混合料的实际路用性能。结果表明:110-A 级沥青配合当地集料进行混合料配合比优选设计,得到最佳油石比为 5.0%,沥青用量为 4.76%,空隙率为 4.6%。该配合比下沥青混合料各项技术指标满足规范要求,并在试铺阶段效果良好,满足高原冻土地区公路路面性能要求。

关键词:高原冻土地区; AC-13C 沥青混合料; 配合比设计; 路用性能; 试验研究

1 前言

近年来,中国加强基础交通建设,其中针对西藏高海拔、高寒地区老旧公路新建和改建工程不断推进。西藏地区在公路建设中常遇到路基冻融导致路基开裂,沥青路面老化等问题。

国内外关于多年冻土区公路工程研究受纬度控制,主要集中在欧亚大陆、北美大陆,所涉及冻土均为低温冻土,冻土环境稳定。中国为实现在青藏高原多年冻土区铺筑沥青路面,进行了近 30 年的不断研究最终取得成功。为使沥青混合料拥有较好的路用性能、更长的使用寿命并且更加环保,科研人员研究出多种适用于不同环境和条件的外加剂。裴磊等依据沥青混合料对空隙率的要求,设计出以填充粒径为上一级粒径 0.22 倍的填充方案并得出更加合理的室内试验压实方案;赵永利等通过改进沥青混合料水稳定性试验的浸水条件,采用煮沸劈裂试验测定残留稳定度评估混合料水稳定性。由于冻融问题对热拌沥青混合料影

响较大,故需进行试验研究其水稳定性和耐久性,研究过程中发现以往试验方法存在不足,因此对试验进行了优化设计,使用优化后的试验方法检测混合料耐久性能。罗蓉等通过分析冻融循环水损害过程后沥青混合料内部空隙结构改变,提出提高沥青与集料的黏附性能,可降低冻融循环对沥青路面的影响;马宏岩等通过现场调查和室内试验证明,得到沥青路面开裂程度与冻融前后级配偏差的绝对值成正比;欧阳心和等根据各档粒径集料质量比不变,且含不同粒径集料总表面积与沥青用量之比不变的原则,设计并测定含有不同粒径集料沥青混合料的劈裂抗拉强度,得到含不同粒径集料沥青混合料劈裂强度与集料粒径的相关性,其中 4.75~9.5 mm 集料对沥青混合料劈裂强度有较为明显的提升。

该文依托国道 109 线那曲至羊八井段公路改建工程项目,公路路面上面层采用 AC-13C 型改性沥青混合料,通过马歇尔试验设计改性沥青混合料最佳配合比,采用浸水马歇尔试验、冻融循环试验、低温弯曲试验、车辙试验等研究改性沥青混合料路用性能,分析

收稿日期:2021-05-10(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:U1604135);中交第二公路局有限公司重点科研项目(编号:2017-1-1);河南省科技厅产学研合作项目(编号:2015HNCXY011)

作者简介:王伟,男,大学本科,高级工程师。

* 通信作者:梁斌,男,教授,博士生导师, E-mail:liangbin4231@163.com

AC-13C 改性沥青混合料各项性能指标,并以此为基础在高原冻土环境下进行实际路用性能检测。

2 工程概况

国道 109 线那曲至拉萨公路(那曲至羊八井段)改建工程起于古露镇,路线向南沿 G109 和青藏铁路布设,经马乡、当雄县南、羊八井镇等地,后经珠峰隧道、拉萨河特大桥设拉萨枢纽互通与拉贡高速公路相接。全长 85.109 km,改性细粒式沥青混合料 AC-13C 使用量为 37.3 万 m²。该项目是中国首条高寒高海拔地区修建的公路,海拔均为 4 200 m 以上,气候条件恶劣,紫外线强。

项目地处阿热湿地南缘,受地形条件与既有交通工程如青藏铁路、G109 等影响,路线需穿越阿热湿地,湿地中一般地表植被较发育,表层分布腐殖土,厚度为 0.5~4.3 m,承载力低,路基易产生不均匀沉降。由于土体呈饱和状态,冬季冻胀严重,春季消融易形成翻浆现象,对公路耐久性产生较大影响。因此公路路面抗渗水、防冻胀工程措施尤为重要。

3 原料

3.1 沥青

试验所用沥青为 110-A 级沥青,依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中沥青技术指标检测方法,对 110-A 级沥青进行检测,结果见表 1。

表 1 沥青技术指标检测结果

检测项目	单位	检测结果	技术要求
针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	89	80~100
延度(5℃,5 cm/min)	cm	70.20	≥40
软化点	℃	69	≥60
闪点	℃	256	≥230
运动黏度(135℃)	Pa·s	1.55	≤3
溶解度(Sb)	%	99.37	≥99
密度(15℃)	g/cm ³	1.02	

经现场改性为 SBS 改性沥青 I-B 类,其技术指标满足要求。

3.2 集料

试验配合比设计所用矿料为不同粒径的碎石、机

制砂和矿粉,其中碎石及机制砂分别为 10~15、5~10 mm 碎石、3~5、0~3 mm 机制砂。按照 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》对目标配合比设计过程中矿料的基本性能进行检测,结果满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》相关要求,集料指标测定值见表 2、3。

表 2 粗骨料指标测定值

集料/mm	集料压碎值/%	针片状颗粒质量分数/%	表观相对密度	毛体积相对密度
10~15	15.2	4.8	2.625	2.609
5~10	15.2	5.3	2.624	2.608
3~5			2.622	2.605
技术要求	≤28		≥2.50	

表 3 细骨料指标测定值

材料	表观相对密度	砂当量/%	亚甲蓝/(g·kg ⁻¹)	亲水系数	塑性指数
0~3 mm	2.604	79	9.8		
矿粉	2.712			0.84	3
技术要求	≥2.50	≥60	≤25	<1	<4

混合料中粗、细骨料和矿粉对于提高沥青混合料强度有较大的影响。由表 2 可以看出:5~10 mm 与 10~15 mm 粗骨料压碎值为 15.2%,均小于 28%;各粒径粗骨料针片状颗粒质量分数均小于 15%;表观相对密度均大于 2.50 g/cm³。

4 配合比设计

4.1 最佳油石比确定

试验设计采用 5 种油石比制备沥青混合料试块并进行马歇尔试验,确定最佳油石比。每组制备 4 个马歇尔试件,试验测得不同油石比的标准试块各项指标,马歇尔试验结果如表 4 所示。

结合最大密度、稳定度、目标空隙率、沥青饱和度得出 AC-13C 最佳油石比为 5.0%,沥青用量为 4.76%,抗剥落剂为沥青用量的 3%。

4.2 矿料级配设计

不同粒径矿料配合比直接影响混合料空隙率大小,沥青混合料中的空隙是在大粒径粗集料之间形成的,需要小粒径细集料和矿粉填充空隙。

表 4 马歇尔试验结果

油石 比/ %	毛体积 相对 密度	空隙 率/ %	矿料 间隙 率/%	沥青 饱和 度/%	稳定 度/ kN	流值/ (0.1 mm)
4.0	2.285	7.20	15.60	53.80	14.10	23.10
4.5	2.300	6.00	15.50	61.30	14.82	26.90
5.0	2.315	4.60	15.30	69.30	14.07	28.80
5.5	2.321	3.80	15.50	75.50	13.61	34.20
6.0	2.317	3.30	16.00	79.40	13.21	36.80

根据矿料水洗筛分结果得到矿料级配设计曲线如图 1 所示。根据逐级填充理论确定矿料级配的大致比例,并通过计算机模拟计算进行生产矿料级配优化。最终确定矿料级配为:(10~15 mm):(5~10 mm):(3~5 mm):(0~3 mm):矿粉=34.0:21.0:11.0:30.0:4.0。

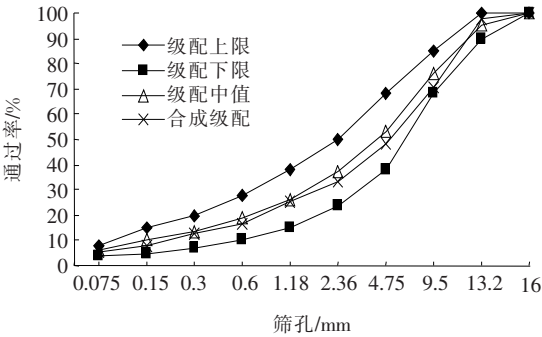


图 1 矿料级配

5 配合比验证

5.1 水稳定性验证

按照设计配合比拌和 AC-13C 改性沥青混合料制作直径为 101.6 mm、高为 63.5 mm 标准马歇尔试

块,且每组试件不少于 4 个,通过浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验验证该文设计配合比下生产的沥青混合料的水稳定性。

5.1.1 浸水马歇尔试验

引起沥青路面水损害主要有两方面原因:① 沥青在水侵蚀作用下沥青膜老化剥落,沥青混合料黏结力丧失引起的混合料水损害;② 空隙水膨胀是引起沥青混合料内部结构破坏的原因之一。

试验将试件和马歇尔试验仪的上下压头置于 60℃ 的恒温水槽中保温,试件在恒温水槽中保温时间为 48 h,水槽底部与试件间隔需大于 5 cm,其余步骤与标准马歇尔试验相同。

式(1)为试件浸水残留稳定度计算公式:

$$MS_0 = \frac{MS_1}{MS} \times 100 \tag{1}$$

式中:MS₀ 为试件浸水残留稳定度(%);MS₁ 为试件浸水 48 h 后的稳定度(kN);MS 为试件的稳定度(kN)。

通过马歇尔试验测得稳定度为 14.07 kN,试件浸水 48 h 后稳定度为 11.90 kN,由式(1)计算可知沥青混合料试件残留稳定度为 84.6%,可得 AC-13C 沥青混合料在高原冻土环境中受冻融水损害时有较好的抗剥落能力。

5.1.2 冻融劈裂试验

根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中冻融劈裂试验方法进行试验,冻融过程结束后,将试件放入恒温水箱中保温,温度为(25+0.5)℃,保温过程中试件保持不少于 10 mm 的间距;保温 2 h 后将试件取出并按照试验规程进行劈裂试验,试验结果见表 5。

经过冻融劈裂试验后试件的冻融劈裂强度比为 90.1%,大于规范技术要求的 75%。试验结果表明:在高原冻土地区特殊的气候条件下,油石比为 5.0%

表 5 冻融劈裂试验结果

试件 编号	试件冻 融状态	试件高度/mm				直径/ mm	换算压 力/kN	劈裂强 度/MPa
		1	2	3	4			
1	冻前	63.0	63.2	63.4	63.4	101.6	7.43	0.74
	冻后	62.8	63.0	62.6	62.8	101.6	6.22	0.62
2	冻前	63.4	63.2	63.0	63.6	101.6	7.01	0.70
	冻后	63.8	63.6	63.6	63.4	101.6	6.54	0.65
3	冻前	62.8	63.0	62.6	62.8	101.6	6.88	0.69
	冻后	63.4	63.2	63.0	63.0	101.6	6.41	0.64
4	冻前	63.4	63.0	63.2	63.2	101.6	7.14	0.71
	冻后	63.2	63.6	63.4	63.2	101.6	6.46	0.64

的 AC—13C 改性沥青混合料抗劈裂性能良好且各项技术指标符合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》标准要求。

5.2 高温性能检验

为了验证沥青混合料高温抗车辙性能,在规定温度与荷载条件下,进行高温车辙试验。通过试验测定试验轮在试件上往返碾压造成的车辙变形速率,用动稳定度表示。

按选定配合比及 5.0%油石比并按照试验规程制作 300 mm×300 mm×50 mm 标准试件,因工程处于高原冻土地区全年平均最低气温为-22℃,平均最高气温为 16℃,选取试验温度为 45℃,轮压为 0.7 MPa。试件成型后,连同改性沥青混合料试模一起在常温条件下放置 48 h,使试块中的改性沥青充分固化后,将试块连同试模一起置于已达到试验温度(45±1)℃的恒温室中,保温不少于 5 h 且不大于 12 h。在试件的边缘处粘贴一个温度计,用以控制试件在试验过程中的温度稳定在(45±0.5)℃。将试件连同试模放入自动车辙试验仪的试验台,试验轮在试件中央行走,方向须与行车方向一致,试验轮在试件上往返行走 1 h,试验过程中使用记录仪自动记录试验数据,计算动稳定度的车辙变形量取值时间分别为 45 min 和 60 min,3 组试验中第 1 次记录车辙变形量平均值为 2.34 mm,第 2 次记录平均值为 2.49 mm。计算试件动稳定度:

$$DS=\frac{(t_2-t_1)\times N}{d_2-d_1}\times C_1\times C_2$$

(2)

式中: C_1 为试验机类型系数; C_2 为试件系数,试验室制备宽 300 mm 的试件为 1.0; N 为试验轮往返碾压速度,通常为 42 次/min。

计算得 AC—13C 改性沥青混合料动稳定度为 4 112.5 次/mm,满足规范小于 3 000 次/mm 的要求。

5.3 低温性能检验

沥青混合料弯曲性能、破坏时最大弯拉应变通过沥青混合料弯曲试验进行检验,低温时混合料低温抗裂性能代表其破坏时最大弯拉应变。当混合料能承受较大弯拉应力时,在低温环境中路面抵抗开裂能力越强,抗收缩应力越大。按照沥青混合料弯曲试验规程,将试件加工成棱柱体小梁,其尺寸为 250 mm×30 mm×35 mm(±2 mm),跨径为 200 mm。使用全自动压力试验仪,以 50 mm/min 速率加载。将恒温箱中达到(-10±0.5)℃的试件,按照试验要求安放在试验仪上,试件成型时方向即为试件安放在试验仪上的方向,将电阻应变片粘贴在合适的位置并调试动态电阻应变仪,启动压力仪在中点加载荷载,同时记录试验数据。

由试验所得数据,根据式(3)、(4)计算出试件破坏时的抗弯拉强度 R_B 、破坏时的梁底最大弯拉应变 ϵ_B 。结果见表 6。

$$R_B=\frac{3\times L\times P_B}{2\times b\times h^2}$$

(3)

$$\epsilon_B=\frac{6\times h\times d}{L^2}$$

(4)

由表 6 可知,该配合比下 AC—13C 改性沥青混合料平均抗弯拉强度为 3.7 MPa,破坏时的平均弯拉应变为 2.81×10^{-3} ,高原冻土低温环境下,有较好的低温抗弯性能,能够有效抵抗冻胀、路面低温开裂。

5.4 耐久性能检验

高原冻土地区存在大量沥青路面冻融病害问题,冻融循环导致沥青混合料破坏的原因是当水分进入沥

表 6 低温弯曲试验结果

试件 编号	试件跨径 L / mm	跨中试 件宽度 b /mm	跨中试 件高度 h /mm	试件破坏 时跨中挠 度 d /mm	试件破坏时 最大荷载 P_B /N	试件破坏 时抗弯拉 强度/MPa	试件破坏时 最大弯拉应 变/($\times 10^{-3}$)
1	200	30	37	0.51	14.60	3.20	2.85
2	200	30	36	0.52	16.42	3.80	2.82
3	200	32	37	0.50	19.17	4.20	2.80
4	200	28	36	0.52	12.96	3.00	2.97
5	200	28	36	0.52	17.28	4.00	2.79
6	200	31	36	0.52	18.14	4.20	2.78

青路面内部空隙后,在低温条件下结冰冻胀导致粗集料之间空隙增大,混合料内部出现细微损伤,降低了集料间黏结力。随着冻融循环次数增加,内部微损伤逐渐积累导致内部产生微小裂痕,沥青混合料劈裂强度随冻融循环次数增加而逐渐减小。

该工程所在地高寒缺氧,气候干燥,全年最低气温为-22℃,最高气温为16℃,年相对湿度为48%~51%。根据已有试验方案并结合当地气候条件,制定冻融循环试验方案为:在97~98 kPa的真空浸水条件下存放30 min后把试件放置于环境气压下浸水30 min,将试件放入存有约10 mL水的袋子中,将其放入温度为-18℃冷冻箱中保持16 h,在45℃恒温水槽中水浴融化撤去塑料袋,保持恒温25℃持续24 h,以此作为一个冻融循环。

为更好控制AC-13C改性沥青混合料抗冻融循环性能,该试验冻融循环次数为5次,为保证试验准确性每组试验准备4个试件,试验结果见表7。

表 7 冻融循环试验结果

冻融循环次数/次	空隙率/%	劈裂抗拉强度/MPa
0	4.6	0.736
1	5.1	0.628
2	5.5	0.603
3	5.9	0.587
4	6.1	0.546
5	6.3	0.500

由表7可得:冻融后空隙率增大,沥青混合料经第1次冻融后强度有较大下降,沥青混合料经2~3次循环空隙率明显上升,至第4~5次循环空隙率、劈裂强度趋于稳定。经过反复冻融后该混合料空隙率稳定,保证了混合料强度及抗渗能力,有利于抵抗结冰冻胀对沥青路面结构耐久性的影响,其中在沥青混合料中添加抗剥落剂有助于提升其抗渗透能力,并且控制空隙率增长。

5.5 渗水性能检验

沥青混合料渗水是沥青路面水损害的早期表现,水损害是造成路面质量下降以及使用寿命减少的重要原因之一。混合料内部渗水能力与连通空隙率密切相关,侧面印证沥青混合料水稳定性。对沥青混合料进行渗水试验得到渗水系数用于评价混合料渗水性能,渗水系数与混合料受水侵蚀程度成正相关,试验结果

见表8。

表 8 渗水试验结果

试验 编号	渗水情况读数				渗水 系数/ (mL· min ⁻¹)	平均值/ (mL· min ⁻¹)
	第1次 读数/ mL	第1次 计时/ s	第2次 读数/ mL	第2次 计时/ s		
1	100	0	319	180	73	
2	100	0	322	180	74	75
3	100	0	334	180	78	

由表8可知:试验得沥青混合料的渗水系数为75 mL/min,渗水系数过大极易引起沥青路面的水损坏。该工程为高原冻土地区公路项目路面受冻胀病害影响较大,控制路面渗水量尤为重要,该混合料的渗水系数小于120 mL/min满足规范要求。

6 工程应用

6.1 路面压实度检测

国道109那曲至羊八井段第二标段采用集料配比为(10~15 mm粗骨料):(5~10 mm粗骨料):(3~5 mm粗骨料):(0~3 mm细骨料):矿粉=34:21:11:30:4,空隙率为4.6%的热拌AC-13C改性沥青混合料,铺筑200 m试验路段,对面层施工压实度进行观察与检测。

为检测AC-13C改性沥青混合料在实际工程中的铺筑效果,在该路段随机选取检测点对沥青面层采用钻芯法检测压实度。测定钻芯试件的密实度,测得路面理论密度压实度最小值为98.2%,平均压实度为98.82%,均大于规范要求的97%。试验结果完全满足规范要求。

6.2 弯沉检测

在试验路段进行弯沉检测,利用弯沉值表征路面材料刚度和抗拉强度,路面抵抗垂直荷载作用下产生变形的能力。路面弯沉试验采用贝克曼梁法,该公路设计弯沉值为18.5(0.01 mm),经检测66个测点平均值为6.4(0.01 mm),弯沉结果符合JTG E80/1—2017《公路工程质量检验评定标准》及设计要求。

6.3 其他检测

路面设计厚度值为40 mm,施工中允许偏差≤4 mm;路面摩擦系数检测过程中路面温度T为10℃,

修正值 ΔF 为-3,修正后最低抗滑值为 75 BPN。经检测各项路用性指标均符合 JTGE80/1—2017《公路工程质量检验评定标准》及设计要求,检测结果见表 9。

表 9 公路工程质量检测结果

沥青用量平均 值/(kg·m ⁻²)	路面厚度 平均值/mm	路面平整度 标准差/mm	路面平均 抗滑值/BPN
0.508	41.2	0.465	77

7 结论

通过试验研究 AC-13C 改性沥青混合料在高原冻土地区气候条件下的路用性能,得到以下结论:

(1) 高原冻土地区在沥青混合料中添加抗剥落剂,用量为沥青的 3‰,可以有效降低空隙率增长,降低融水渗透率,缓解沥青路面老化问题,增加沥青路面稳定性。

(2) 油石比为 5.0% 的 AC-13C 改性沥青混合料试件经过耐久性试验后沥青混合料在第 1、2 次冻融循环后空隙率明显上升,劈裂抗拉强度明显下降,之后趋势均明显减缓并稳定。结合高原寒冷地区冻融循环频繁的特征,良好的抗冻融性能可有效提升沥青路面耐久性。

(3) AC-13C 改性沥青混合料在高原冻土地区缺氧低气压的环境下路面高温抗车辙性能、渗水、压实度、厚度、平整度、弯沉值等方面表现良好。

(4) 试验所选 5.0% 油石比的 AC-13C 沥青混合料有良好的低温抗弯性与耐久性,适于在常年平均气温低于 5℃ 的高原冻土地区沥青路面上面层使用。

参考文献:

[1] 杨树萍,鹿中山,程新春.半刚性基层沥青路面病害的原因与防治[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2002

(5).

[2] 巴桑顿珠,黄晓明,张道德,等.西藏东南部沥青路面常见病害及成因分析[J].公路交通科技,2006(11).

[3] 汪双杰,李祝龙.中国多年冻土地区公路修筑技术研究[J].公路交通科技,2008(1).

[4] 章金钊,李祝龙,武懋民.高原多年冻土地区公路修筑技术研究简介[J].公路,1999(11).

[5] 宋云连,吕鹏,张杨,等.温拌沥青混合料高温性能试验研究[J].公路工程,2018(5).

[6] 程永春,余地,谭国金,等.玄武岩纤维沥青混合料的冻融损伤演化规律[J].哈尔滨工程大学学报,2019(3).

[7] 孔志峰.增塑剂对路用沥青性能影响研究[D].长安大学硕士学位论文,2015.

[8] 裴磊,任瑞波,范正金.基于逐级填充理论骨密结构水稳碎石级配设计[J].山东建筑大学学报,2010(2).

[9] 赵永利,吴震,黄晓明.沥青混合料水稳定性的试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2001(3).

[10] 张宏超,孙立军.沥青混合料水稳定性能全程评价方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2002(4).

[11] 郑健龙,张洪刚,钱国平,等.水温冻融循环条件下沥青混合料性能衰变的规律[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2010(1).

[12] 周瑞霞.冻融循环条件下沥青混合料力学性能衰变规律研究[J].北方交通,2016(5).

[13] 许西森,刘忠根.冻融循环对再生沥青混合料低温抗裂性能的影响研究[J].北方交通,2019(1).

[14] 罗蓉,柳子尧,黄婷婷,等.冻融循环对沥青混合料内水气扩散的影响[J].中国公路学报,2018(9).

[15] 马宏岩,林铭彬,侯亚丽.冻融作用下沥青混合料中骨料级配的差异分析[J].中外公路,2019(2).

[16] 欧阳心和,李友云,李沛洪,等.含不同粒径集料沥青混合料劈裂抗拉强度研究[J].公路工程,2018(5).

[17] JTGE20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[18] JTGE42—2005 公路工程集料试验规程[S].

[19] JTGF40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].

[20] JTGE80/1—2017 公路工程质量检验评定标准[S].