

高强冷铺沥青路面材料与结构设计研究

彭彬

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 高强度冷铺混合料对环境友好且不受气温限制,同时也可避免因温度散失而导致的压实度不足等热拌混合料无法避免的缺陷问题,但为了达到热拌沥青路面的效果,路面的结构设计需要专门基于高强度冷拌沥青混合料的力学性能进行分析和研究。研究首先进行高强冷拌沥青混合料的结构设计,以常规改性AC-13作为对比,选取了两种路面结构设计,并分别进行路面力学分析。研究结果显示:高强度冷铺沥青混合料适用级配为DE-10,其中不含水的最佳沥青用量为5.7%,乳化沥青用量为9.5%;高强度冷铺沥青混合料不仅具有一定的柔性,还具有很高的刚度和强度;当选用高强度冷铺沥青作为上面层后,在标准荷载作用下各指标相对常规路面都得到了优化,路面总体厚度相比常规方案降低了的同时,性能获得了提升;高强度冷铺沥青结构能够抵抗更高的荷载。

关键词: 高强冷铺沥青;沥青混合料;路面结构设计

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)09-0232-03

0 引言

随着国家对环保生态的要求提高和“双碳”战略的深入推进,在土建工程施工过程如何实现低能耗、低排放的问题受到日益重视,大量研究和示范工程表明选用高强度冷铺混合料铺筑路面面层可在道路路面施工过程中实现无烟雾和少污染,且冷铺技术不受气温限制,可同时避免因温度散失而导致的压实度不足等热拌混合料无法避免的缺陷问题^[1]。在路面选用冷拌混合料后,为达到等同热拌沥青路面的效果,对路面的结构设计需要基于高强度冷拌沥青混合料的力学性能进行分析和研究^[2],因此将对高强冷拌沥青路面的上面层模量进行研究,并选择BISAR 3.0软件作为路面力学分析软件,在以改善上面层结构设计为目标与满足标准性能要求下,对路面结构设计进行研究与分析。

1 试验与材料

1.1 沥青胶结料

对比方案中的改性沥青选用成品SBS(Styrene-Butadiene-Styrene)改性沥青,其各项技术指标如表1所示。

收稿日期: 2023-09-28

作者简介: 彭彬(1983—),男,工学硕士,高级工程师,从事道路交通的规划、设计与研发工作。

表1 试验采用的SBS改性沥青的各项指标检测

项目	技术指标	SBS改性沥青
针入度(25℃、100 g、5 s)/0.1 mm	30~60	55
针入度指数PI	0~+1.0	0.321
延度5℃/cm	≥20	41
软化点/℃	≥60	87.7
离析,48 h软化点之差/℃	≤2.5	1.6
130℃运动黏度/(Pa·s)	≤3	2.33
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)	实测	1.035
质量损失/%	±1.0	0.14
163℃薄膜加热试验(5 h)	残留针入度比/%	≥65
	残留延度(5℃)/cm	≥15

本次对比试验中DE-10沥青混合料所用的高强度冷铺沥青亦采用双组份拌制,研制完成的胶结料沿用了本科研课题的前序研究成果^[3]。

1.2 集料与级配设计

为达到结构设计对比分析的效果,研究选取常规路面上面层所通常选用的改性沥青铺筑的结构形式,即细粒式连续密集配沥青混合料AC-13作为对比组,而用于上面层的高强度冷铺沥青混合料则选取了间断级配细粒式沥青混合料DE-10^[3]。

本试验所选用级配由四档集料组合而成,其规格分别为13.2~9.5 mm、9.5~4.75 mm、4.75~2.36 mm、2.36~0.075 mm。其中4.75 mm以上的粗集料使用江

苏产玄武岩, 2.36 mm 及以下的集料为同产地的石灰岩, 0.075 mm 的粉料将通过水洗全部筛除后使用矿粉代替, 矿粉均由石灰岩研磨而成。集料的物理性能测试结果如表 2 所示。

表 2 试验用集料的物理性能指标测试结果

种类	粒径 /mm	表观密度 / (g·cm ⁻³)	毛体积密度 / (g·cm ⁻³)	吸水率 /%
玄武岩	9.5~13.2	2.932	2.909	0.79
	4.75~9.5	2.926	2.892	1.211
	2.36~4.75	2.882	2.882	—
石灰岩	0~2.36	2.582	2.582	—

为了便于将高强度冷铺沥青混合料中的水分顺利排出, 研究选用了具有较大矿料间隙率的间断级配 DE-10 级配, 该级配适用于上面层, 且无需如 SMA(Stone Mastic Asphalt) 沥青要加入大量矿粉和纤维, 是结合我国筛孔尺寸规格在德国 DE-0/8 级配基础上调整而来的^[4], 其级配构成如表 3 所示。对比方案中的 AC-13 级配则选用了级配中值, 其级配构成属于规范规定范畴, 不在此赘述。

表 3 DE-10 高强度冷铺沥青混合料级配构成

筛孔 /mm	13.2	9.5	4.75	2.36	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率 /%	100	90	71	20	13	11	10	8

1.3 最佳沥青用量的确定

前期混合料的用量设计可通过马歇尔试验进行, 以 4.0% 为目标空隙率, 确定改性 AC-13 的最佳沥青用量为 4.8%, 高强度冷铺沥青混合料 DE-10 则采用 3.5% 作为目标空隙率, 水性乳化环氧沥青用量为 9.5%; 由于乳化沥青中固含量为 60%, 则结合料中不含水的结合料用量应为 5.7%。

1.4 模量试件制备

按城镇道路路面设计规范(CJJ169—2012)^[5], 路面设计需要测试所使用的沥青混合料在两个温度下的抗压回弹模量(15℃和 20℃)。考虑到 DE-10 混合料制备的标准马歇尔试件会有破乳困难的问题出现, 而相对于击实成型, 旋转压实的压实功较大, 因此两种混合料均采用旋转压实的方法制作成型, 如图 1 所示。

2 试验结果

路面结构设计中面层材料最核心的试验指标为回弹模量, 它反映着材料抗形变的能力和承载交通



图 1 出水后的旋转压实试件(高强度冷铺沥青混合料)

荷载的能力, 试验过程测试路面材料在恒定应力或应变的条件下回馈至力学装置的性能。根据受力方式的不同, 路面材料的力学指标有拉伸模量、剪切模量和压缩模量等。用于路面设计的其中一个必要指标即压缩模量, 也称抗压模量, 它是反映路面材料适用结构层位的关键指标^[5]。

为了试验研究具有更好的延续性与更广泛的可比性, 试件选为圆柱体, 分别在 15℃ 和 20℃ 温度下进行抗压回弹模量试验^[6]。路面结构设计中的拉应力指标和弯沉预测指标将以此条件下测出的抗压模量进行计算。测试抗压模量的试验按公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTG E20—2011)^[6]中的标准沥青混合料单轴压缩实验试验方法(T0 713—2000)进行, 试验结果如表 4 所列。

表 4 高强度冷铺沥青混合料抗压回弹模量

混合料类型	试验温度	试验次数	抗压强度 / MPa	均值 / MPa	弹性模量 / MPa	均值 / MPa
改性 AC-13	15℃	1	19.02		2 587.0	
		2	19.54	19.5	2 505.2	2 596
		3	20.01		2 696.5	
	20℃	1	16.46		2 191.4	
		2	17.43	17.0	2 321.2	2 275
		3	17.15		2 312.9	
高强度冷铺 DE-10	15℃	1	36.91		3 695.0	
		2	32.14	35.4	3 322.1	3 369
		3	37.23		3 099.6	
	20℃	1	31.38		3 012.7	
		2	32.3	31.7	2 968.6	2 983
		3	31.45		2 895.8	

从试验结果可以看出, 高强度冷铺沥青混合料的抗压回弹模量相较于改性沥青 AC-13 要高出许多, 但又不至于如环氧沥青混凝土那般达到接近于混凝土的数量级, 而导致会出现脆性, 因此在具备了很好的刚度和强度的同时又保持了一定的柔韧性^[7]。相比改性 SMA 和基质沥青混合料, 高强度冷铺沥青

混合料的回弹模量已高于两者，说明其能够被设计应用到任意路面面层中。

3 力学分析与路面结构设计

将高强度冷铺沥青路面设计结构与当前国内最常见的道路路面设计结构进行对比分析，其结构层次与总厚度如表 5 所列。

表 5 路面结构设计		
项目	常规设计	高强度冷铺沥青路面结构设计
路面结构	4 cm 改性沥青 AC-13	3 cm 高强度冷铺沥青抗滑面层
	6 cm 中粒式沥青混凝土 AC-20	DE-10
	8 cm 粗粒式沥青混凝土 AC-25	5 cm 中粒式沥青混凝土 AC-20
		8 cm 粗粒式沥青混凝土 AC-25
	40 cm 水泥稳定碎石基层	40 cm 水泥稳定碎石基层
	20 cm 石灰土垫层	20 cm 石灰土垫层
总厚度	78 cm	76 cm

可见，使用高强度冷铺沥青的路面总厚度更低。
接着，采用力学分析软件对车行道的路面结构性能进行计算。

本研究中选用 BISAR 3.0 软件对路面结构进行力学分析计算。该软件可以模拟出多层状的拟设计路面结构模型，其中非本研究试验用的其他路面结构层的性能参数选自《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)^[5]的附录。计算路表弯沉程度时，高强度冷铺沥青结构的参数测试结果见表 4，分别对两种路面设计方案的沥青混合料在 20℃ 和 15℃ 下进行抗压回弹模量试验，在计算层底拉应力时选用 15℃ 时的抗压回弹模量，在计算高温下的层间剪应力时下面层选用 20℃ 时的抗压回弹模量，在基层选用两类抗压回弹模量。具体的计算参数见表 6。

表 6 高强度冷铺路面结构设计及其性能参数				
结构层	路表弯沉 计算回弹 模量 /MPa	层底拉应力 计算回弹 模量 /MPa	剪应力 计算回弹 模量 /MPa	泊松比
3 cm 高强度冷铺沥青 DE-10	3 369	2 983	320	0.25
5 cm AC-20	1 200	1 800	1 800	0.25
8 cm AC-25	1 000	1 200	1 200	0.25
40 cm 水泥稳定碎石基层	1 500	3 600	3 600	0.25
20 cm 石灰土	500	1 300	1 300	0.25
路基	30	30	30	0.35

计算结果如表 7 所列。
根据表 7 的力学计算结果可得：采用常规设计方案的路面在标准荷载作用下的最大值分别为路表

表 7 城市道路典型结构路面力学计算结果						
计算点位	0.7 MPa		0.8 MPa		0.9 MPa	
	高强冷铺	常规	高强冷铺	常规	高强冷铺	常规
A(路表弯沉 / 0.01 mm)	22.3	24.6	27.6	32.2	33.9	39.2
B(层底拉应力 / MPa)	0.16	0.23	0.17	0.24	0.19	0.27
C(层底拉应力 / MPa)	0.16	0.22	0.17	0.25	0.20	0.28
D(层间剪应力 / MPa)	0.17	0.26	0.21	0.33	0.22	0.41
E(层间剪应力 / MPa)	0.16	0.31	0.20	0.35	0.21	0.39

弯沉 24.6 × 0.01 mm、层底拉应力 0.23 MPa、层间剪应力 0.26 MPa，而采用高强冷铺结构设计的三个数据分别只有 22.3 × 0.01 mm、0.16 MPa 和 0.16 MPa，力学性能优势明显。同时随着荷载的增大，上述三项数值差也随之增大，两种结构的弯沉差变大，表现出高强度冷铺沥青结构能够更好地抵抗更高荷载。总体上，各个指标值相对于常规路面都得到了改善，说明采用高强度冷铺沥青结构使得总体路面厚度降低了 2 cm 的同时，路面结构性能也获得了提升。

4 结 论

- (1)高强度冷铺沥青混合料的适用级配为 DE-10，其中不含水的最佳沥青用量为 5.7%，实际含水的乳化沥青用量为 9.5%；
- (2)高强度冷铺沥青混合料在 15℃ 和 20℃ 时的回弹模量分别达到 3 369、2 983 MPa，不仅表现出了一定的柔性，还同时表现出了较高的强度及较高的刚度，回弹模量值已超过上面层模量的需求，适用于任何路面层，在任何层面都可以进行铺装；
- (3)当选用高强度冷铺沥青作为上面层后，在标准荷载作用下的应力最大值分别为路表弯沉 22.3 × 0.01 mm、层底拉应力 0.16 MPa、层间剪应力 0.16 MPa。各个指标相对于常规路面都得到了优化，即在降低了路面厚度的同时，性能获得了提升，且高强度冷铺沥青结构还能够抵抗更高的荷载。

参考文献：
[1]《中国公路学报》编辑部.中国路面工程学术研究综述·2020[J].中国公路学报,2020,33(10):1-66.
[2] 罗要飞,张苛,张争奇.基于层间模量比变化的沥青路面结构受力特性研究[J].公路,2023,68(8):22-28.
[3] Ming H. Investigation on production process of epoxy emulsified asphalt[J]. Procedia Manufacturing,2019(30):380-387.

(2)当边柱间距距离较小时,混凝土受拉区域主要集中于盖梁部位,但随着边柱间距的逐步增大,受拉区域逐步由盖梁传递至边柱区域。边柱间距大于18.4 m时,边柱结构承担拉应力效果显著,易导致结构开裂失效。

(3)随着边柱间距的增加,结构受力状态劣化,盖梁结构损伤程度也由轻微损伤 $B(L=16.4\text{ m})$ 劣化为中度损伤 $C(L=18.4\text{ m})$ 、重度破坏 $D(L=21.9\text{ m}, 23.9\text{ m})$ 。此外,边柱间距 $L>18.4\text{ m}$ 时,边柱结构损伤破坏严重,承载能力大幅下降。

(4)当边柱间距大于18.4 m时,提出在盖梁和边柱之间由刚性支座替换成柔性铰支座,并成功应用于现场实际项目工程中,应用效果良好,对后续的四柱预应力盖梁桥体安全可靠施工具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 朱劲松,陈旭晟.基于应变冲击系数指标的悬索桥损伤识别方法[J]. 振动、测试与诊断,2023,43(3):450-458,617.
- [2] YIFENG Z, JINSONG Z. Damage Detection of Bridge Structures Under Vehicle Loads Using Moving-Window Correlation Coefficient of Signals with Limited Sensors [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2022, 22(9):105-134.
- [3] LU Z, DONGMING F, GANG W. Simultaneous Identification of Bridge Damage and Vehicle Parameters Based on Bridge Strain Responses [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(6): e2945.1-e2945.20.
- [4] 秦峰.考虑结构损伤的中小跨桥梁有限元模型修正方法的研究[J]. 公路,2023,68(3):176-181.
- [5] 李文,杜伟强,武先梅.移动荷载下横向损伤对T梁桥边梁荷载横向分布的影响[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2020,35(3):54-58,77.
- [6] 姚晓飞,徐岳,付迎春.混凝土铰接T梁桥结构体系损伤评价试验[J].长安大学学报:自然科学版,2009(2):65-69.
- [7] 黄成,郭晓光,李院军,等.考虑旧桥损伤的拼宽T梁桥荷载横向分布计算[J].铁道科学与工程学报,2019,16(9):2233-2239.
- [8] J Y K. Structural Strengthening of a Constructed Timber Bridge: Field application and numerical modeling [J]. Engineering Structures, 2023, 288(3):165-180.
- [9] NAN Z, RUIWEN L, HAO W. Assessment on Concrete Constitutive Models for Numerical Simulations of Vehicular Collisions with RC Bridge Piers[J]. Structures, 2023, 53(2):1582-1599.
- [10] B Min, C Zhang, W Zhu, et al. Influence of Cracks at the Invert on the Mechanical Behavior of the Tunnel Structures [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 161(4):1-13.
- [11] 乐运国,李遇春,晏思聪,等.高强度混凝土I型裂纹损伤断裂判据研究[J].水电站设计,1999(1):35-39.
- [4] Navid N, Alireza A, Rezvan B. Investigation of fatigue behaviour of warm modified binders and warm-stone matrix asphalt (WSMA) mixtures through binder and mixture tests [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 22(8):1042-1051.
- [5] CJJ 169—2012,城镇道路路面设计规范[S].
- [6] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [7] 黎荣刚,郑木莲,陈曦.桥面铺装用环氧沥青增韧技术研究综述[C]//中国科学技术协会,交通运输部,中国工程院,湖北省人民政府.2022世界交通运输大会(WTC2022)论文集(公路工程篇).人民交通出版社股份有限公司,2022:5.

~~~~~  
(上接第234页)