

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.012

不同基层类型对沥青面层低温收缩性能影响的研究

徐永丽¹,郭阳¹,孙志棋²

(1.东北林业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040;2.石家庄铁道大学 省部级共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室,河北 石家庄 050043)

摘要:为了研究不同基层类型对沥青面层低温收缩性能的影响,针对半刚性基层和柔性基层两种类型,设计两种沥青路面组合结构:AC-16+水泥稳定碎石和AC-16+沥青稳定碎石。在两种材料侧面的中心和层间界面特征位置粘贴应变片,采用电阻应变片测量法,进行组合结构的温缩试验,获得在降温过程中各个位置的应变变化,分析基层类型对面层低温收缩性能的影响,试验温度为-30~20℃,每10℃为一个温度范围。研究表明:在同一温度下,柔性基层各特征位置处的应变值与沥青面层十分接近,两者绝对差值为3.1%;柔性基层对应的沥青面层温缩应变更接近自由态的单体变形;在各温度范围内,柔性基层对沥青面层的约束应变与半刚性基层结构相比平均降低了76.7%;随着温度的降低,层间应变差量平均值增大,柔性基层结构的层间应变差量远小于半刚性基层结构。研究结果较好地解释了不同基层类型下沥青面层低温收缩能力的差别,可为寒冷地区沥青路面结构提供较好的理论支撑。

关键词:道路工程;温度收缩应变;温缩试验;沥青路面;基层类型;层间应变差量;温缩系数

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

0 引言

中国高速公路绝大部分采用的是半刚性基层沥青路面,北方地区冬季寒冷半刚性基层沥青路面低温开裂现象十分普遍,开裂原因可归结为路面基层开裂形成的反射裂缝和面层与基层温度收缩性能不同所产生的温缩裂缝,因此基层的选择对减少沥青面层低温开裂,延长路面使用寿命具有十分重要的意义^[1-4]。

本文将从沥青面层与半刚性基层材料不同、收缩速率不同,互相抑制导致沥青面层缩裂形成温缩裂缝的角度进行分析。对于温缩裂缝的研究,一部分学者从材料的角度进行研究,试图从中找到能够抑制裂缝产生的因素。张怀志等^[5]以级配类型为切入点分析水泥稳定碎石的温缩系数,得出骨架嵌挤密实型级配的抗收缩性能优于骨架密实型级配结论;Pan等^[6]使用橡胶改性沥青混合料作为应力吸收层,证明橡胶改性沥青混合料相较于其他热拌沥青混合料可以显著改善沥青面层底部的受力情况;Hong

等^[7]研究表明将煤粉和聚酯纤维混合加入沥青混合料中可提高沥青面层的开裂温度;冉武平等^[8]通过室内试验研究了环氧树脂沥青混凝土的低温性能,表明在同类型改性沥青混合料中其低温抗裂性能表现突出。一部分学者为了明确开裂机理,采用力学、数值模拟仿真的方法进行温缩裂缝研究。宋健民等^[9]通过构建路面温缩裂缝的有限元模型得出,面层模量与裂缝的产生具有一定联系,随着模量的增大,沥青路面更容易产生裂缝;李明等^[10]以粗集料及其界面特性为切入点,分析了温缩抗裂性能各影响因素的显著性;刘鹏飞等^[11]使用有限元软件,在相同路面荷载下,对柔性基层沥青路面结构与半刚性沥青路面结构的剪应力与剪应变进行研究;尹传军等^[12]测得随深度的增加,柔性基层沥青路面层底拉应力与容许拉应力始终保持一致;刘凯等^[13]研究了采用半正弦荷载模式与移动恒载同时作用下半刚性基层沥青路面结构各层的动力响应。

目前对于沥青路面基层对面层的温缩性能影响研究,主要是针对单一的面层材料或是基层材料展开的^[14],甚少以面层+基层的复合结构为切入点

收稿日期:2022-04-28

作者简介:徐永丽,女,博士,教授.E-mail:xuyongli77@163.com

温缩性能进行分析。而沥青路面作为一个由面层和基层构成的复合结构,只单独分析面层或基层材料并不具有代表性。为了更好地模拟实际路面结构,在复合结构中设置多个特征位置分析基层对面层温缩性能的影响。采用电阻应变片测量法分别对现行路面结构中的半刚性基层和柔性基层两种常用路面结构进行温缩试验,测得 $-30\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 各温度段各特征位置的应变值,分别从两种复合结构对沥青稳定碎石、水泥稳定碎石以及沥青混凝土材料在温缩应变、温缩系数方面的影响以及复合结构层间应变进行分析。

1 试验材料和混合料配合比

面层材料选用沥青混凝土(AC-16),柔性基层为沥青稳定碎石(ATB-25),半刚性基层为水泥稳定碎石(CTB-25)。

1.1 沥青材料

面层选用SBS改性沥青,ATB-25选用AH-90[#]基质沥青。SBS改性沥青与AH-90[#]基质沥青的性能指标如表1所示。

表1 SBS改性沥青与AH-90[#]基质沥青的性能指标

材料名称	试验项目	单位	检测结果	规范要求
SBS改性沥青	针入度(25 $^{\circ}\text{C}$,5 s,100 g)	0.1 mm	70	60~80
	软化点	$^{\circ}\text{C}$	77	>55
	延度(5 $^{\circ}\text{C}$)	cm	42	>30
AH-90 [#] 基质沥青	针入度(25 $^{\circ}\text{C}$,5 s,100 g)	0.1 mm	93	80~100
	软化点	$^{\circ}\text{C}$	57	>55
	延度(10 $^{\circ}\text{C}$)	cm	54	>30

1.2 水泥

水泥稳定碎石选用P.O42.5普通硅酸盐水泥,具体性能指标如表2所示。

表2 水泥性能指标

标号	细度筛余量 (80 μm 方孔筛)/%	初凝 时间/ min	终凝 时间/ min	3 d强度/ MPa		28 d强度/ MPa	
				抗压	抗折	抗压	抗折
P.O42.5	7.1	171	208	27.1	5.8	58.4	9.2

1.3 水泥稳定碎石配合比

基层选用水泥剂量为4%的水泥稳定碎石,具体

混合料级配如表3所示。

表3 水泥稳定碎石配合比 %

20~30 mm	10~20 mm	5~10 mm	机制砂	水泥	水
28	26	18	28	4	64

1.4 沥青混凝土配合比(AC-16)

本试验面层沥青混合料级配选用65.0%的粗集料、30.0%的细集料、4.6%油石比和5%的矿粉。具体级配如表4所示。

表4 AC-16沥青混凝土配合比 %

11~19 mm	6~11 mm	3~6 mm	0~3 mm	矿粉	油石比
30.0	15.0	20.0	30.0	5.0	4.6

1.5 沥青稳定碎石配合比(ATB-25)

基层沥青混合料级配选用76%的粗集料、21%的细集料、3.4%油石比和3%的矿粉。具体级配如表5所示。

表5 ATB-25沥青稳定碎石配合比 %

19~ 26.5 mm	10~ 20 mm	5~ 10 mm	3~ 5 mm	0~ 3 mm	矿粉	油石比
32	29	11	4	21	3	3.4

2 试验方案及参数

2.1 试验方案

制作3种单体试件,其尺寸分别为:AC-16试件尺寸为300 mm \times 100 mm \times 50 mm,ATB-25试件尺寸为300 mm \times 100 mm \times 70 mm,CTB-25试件尺寸为100 mm \times 100 mm \times 400 mm。再分别组合成两种组合式路面结构:AC-16+CTB-25(I型),AC-16+ATB-25(II型);各层间用改性乳化沥青黏结。试验温度范围为 $-30\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

试件放入DR-64型冻融试验箱中,底部放在可滚动玻璃棒上,保证试件沿水平方向无约束,将试件上的应变片与电路采用屏蔽双绞线连接。环境箱的温度先升到最高温度20 $^{\circ}\text{C}$,之后以10 $^{\circ}\text{C}$ 为一个温度梯度进行降温,降温速率为10 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$,每个温度恒温2 h。在温度梯度内应变片数据稳定时读取应变值,直到最终温度 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 结束。试验数据的采集方式为应变片静态采集。

分别测得各种温度范围时3种单体材料的温度

收缩系数以及组合结构各位置的应变值、累计应变值和层间差量平均值,计算出材料在不同温度下的温缩系数。

2.2 应变片粘贴方案及方法

用砂轮对面层与基层材料需要粘贴应变片的部位磨平,在单体材料中心(面层部分DU1、基层部分DL1)、组合结构跨中界面(面层部分DU2、基层部分DL2)、组合结构距跨中 $L/4$ 界面(面层部分DU3、基层部分DL3)和组合结构端处(面层部分DU4、基层部分DL4)粘贴应变片,示意图见图1。U1处选用 $100\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的应变片,U2、U3、U4处选用 $20\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的应变片,粘贴后的组合试件见图1。

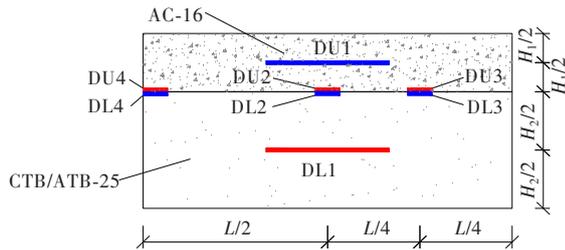


图1 AC-16+CTB/ATB-25组合结构应变片粘贴示意图

3 单体材料低温收缩系数

通过式(1)计算得出3种单体材料应变值在该温度范围的收缩系数,结果如表6所示。

$$\beta_1 = \frac{\epsilon}{\Delta T} + \beta_2 \quad (1)$$

式中: β_1 为所测试件的温缩系数($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$); ϵ 为对应 ΔT 内的应变(10^{-6}); ΔT 为温度变化差($^{\circ}\text{C}$); β_2 为标准试件的线膨胀系数(本试验为 $4.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)。

表6 3种材料不同温度范围的温缩系数

温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	不同材料的温缩系数/ $(10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{-1})$		
	AC-16	ATB-25	CTB-25
20~10	-23.70	-19.75	-9.40
10~0	-22.35	-17.95	-7.60
0~-10	-20.70	-17.00	-7.50
-10~-20	-20.60	-16.30	-7.30
-20~-30	-17.00	-12.50	-6.10
平均值	-20.87	-16.70	-7.58
总体方差	5.05	5.75	1.11

由表6可知:随温度的降低,3种混合料温缩系数绝对值递减,温缩系数的比例关系为 $C_{AC-16}:C_{ATB-25}$:

$C_{CTB-25}=100:82:36$,两种沥青混合料更为接近。其中AC-16最敏感,其温缩系数比其他两种大;CTB-25最稳定,全程差别较小,温缩系数的总体方差为1.11。

4 试验数据分析

4.1 双层复合结构的温缩应变分析

4.1.1 AC-16+CTB-25(I型)组合试件

对于I型组合结构,考虑到CTB-25层与面层相比较时厚度大且温度收缩系数小,可以将此双层叠合梁的力学模型考虑为不计弯曲变形条件而且沿高度和宽度的温度梯度为0;由层间约束引起拉压效应时,在降温过程中,面层材料的线膨胀系数比CTB-25材料的大,两种材料的收缩速度不同,且层间存在一定黏结和摩阻力,使得这两种材料在层间界面处产生了一组剪切力 F_1 ,促使沥青面层和水泥稳定碎石基层分别产生了拉应力和压应力。CTB-25基层一旦出现裂缝就会加速裂缝的发展,也是面层容易开裂产生反射裂缝的原因之一。I型试件上、下层不同温度下各试验点的累计应变值如图2、3所示。

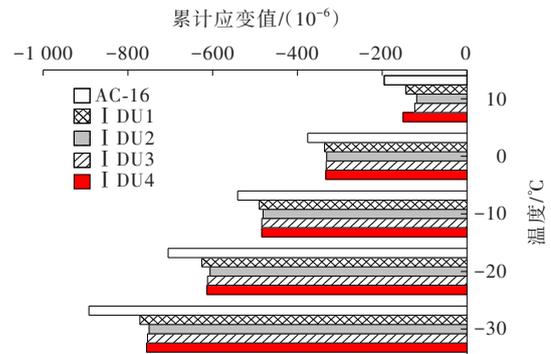


图2 I型试件上层不同温度下各试验点的累计应变值

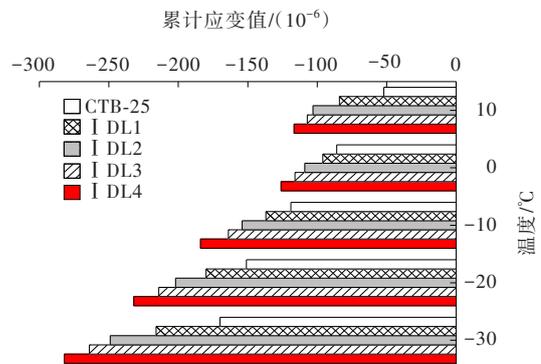


图3 I型试件下层不同温度下各测点的累计应变值

随温度降低,各个位置处积累的应变值越大,且

每个位置处差量有递增趋势。从图2可以看出：I型组合中，沥青面层中心I DU1小于AC-16单体材料的对应应变值，这是由于层间约束限制收缩造成的；相同温度下，层间界面位置I DU2、I DU3和I DU4，表现出同一材料的收缩应变差异甚小。由图3可知：水泥稳定碎石各特征位置处的应变值小于沥青混凝土，水泥稳定碎石层中心处IDL1大于CTB-25单体材料的应变值。AC-16层变形通过层间黏结力对其牵拉作用而产生；在同一温度下，沥青混凝土材料与水泥稳定碎石相应位置处的绝对差值为22.2%~25.7%，层间界面位置的IDL2、IDL3和IDL4在相同温度水平下收缩应变依次递增。

4.1.2 AC-16+ATB-25(II型)组合试件

II型组合结构，考虑到ATB-25层与AC-16层的材料和温度力学特性十分相近，可以将此双层叠合梁的力学模型考虑为不计弯曲变形条件而且沿高度和宽度的温度梯度为0；由层间约束引起的拉压效应时，在降温过程中，面层材料的线膨胀系数要比ATB-25材料略大，但是这两种材料的单位温度的收缩应变很接近，在很大程度上会因同步变形减小层间的剪应力。II型试件上、下层不同温度下各测点的累计应变值如图4、5所示。

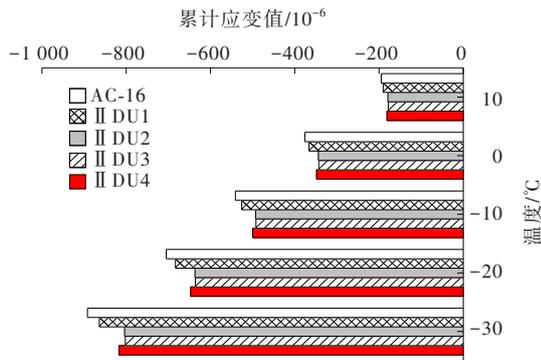


图4 II型试件上层不同温度下各测点的累计应变值

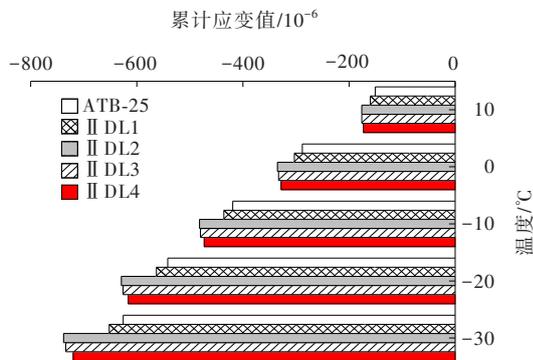


图5 II型试件下层不同温度下各测点的累计应变值

随温度降低，每个位置处的累计应变值增大，ATB-25每阶段的应变差量有降低的趋势。从图4可以看出：沥青面层中心的II DU1略小于AC-16单体材料对应的应变值；在相同温度水平下，层间位置的II DU2、II DU3和II DU4收缩应变差异量很小。从图5可看出：ATB-25沥青稳定碎石层的各特征位置处的应变值与AC-16沥青混合料的值十分接近，且在同一温度下相应的位置处各个绝对差值最大为3.1%，最小为0.3%，这是由于材料材质、弹性模量、温度的力学响应十分相近，能够很大程度上减小由拉压效应产生的层间剪力；层间界面位置处IDL2、IDL3和IDL4在同一温度水平的收缩应变大小相差很小，且3个值十分接近但均大于ATB单体试件的应变值。

4.2 两种结构对比分析

4.2.1 AC-16层中心温缩应变的对比

I型和II型试件不同温度下各测点的累计应变值如图6所示。

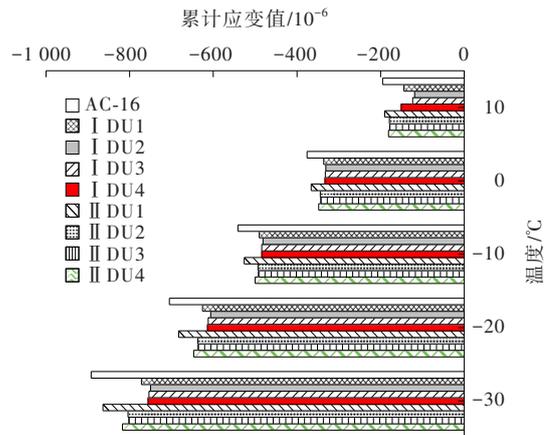


图6 I型和II型试件不同温度下各测点的累计应变值

由图6可知：各控制点在不同温度下的收缩应变规律较为一致，且单体AC-16>II型AC-16>I型AC-16，即AC-16单体材料的温缩应变最大。当试件在0℃时，单体AC-16、I型AC-16、II型AC-16的收缩应变分别为 -376×10^{-6} 、 -336×10^{-6} 、 -366×10^{-6} ，可以得出柔性基层ATB-25的II型结构中，AC-16层的温缩应变更接近单体材料的变形；以单体为基准变形时，I型AC-16、II型AC-16的受限约束应变分别为 40×10^{-6} 、 10×10^{-6} ，即II型结构比I型结构所受到的约束应变降低了75.0%。统计各个温度范围的数值得出，II型结构比I型结构所受到的

约束应变降低的平均值为76.7%。

4.2.2 两种复合结构层间各位置应变对比

I型和II型组合结构不同温度时的层间应变差量平均值如图7所示。

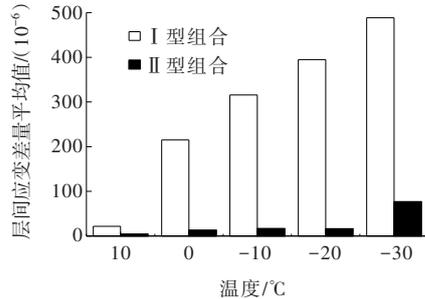


图7 I型和II型组合结构不同温度下的层间应变差量平均值

由图7可知:在I型组合试件中,层间3个位置处,在同一温度下,0℃时差量平均值为 215×10^{-6} ;10℃时平均值为 21.9×10^{-6} , -20℃为 394.7×10^{-6} , -30℃为 488.3×10^{-6} 。而在II型组合试件中,3对控制点在10℃、0℃、-10℃、-20℃、-30℃,对应的平均差量为 4×10^{-6} 、 13×10^{-6} 、 16×10^{-6} 、 17×10^{-6} 、 77×10^{-6} 。两种组合类型随温度降低,层间差量平均值越大。II型组合结构的层间应变差量远小于I型组合结构。层间的应变差量是产生剪应力的主要原因,剪应力越大,越容易发生层间的黏结失效。

5 结论

(1)从单体材料的角度进行分析,当不同温度收缩系数的两种材料黏结在一起时,彼此间的约束作用导致层间约束应变的产生,ATB-25的材料收缩系数与AC-16更为接近,柔性基层结构AC-16+ATB-25(II型)中ATB-25对AC-16的约束应变相较半刚性基层结构AC-16+CTB-25(I型)中CTB-25对AC-16的约束应变平均降低了76.7%。

(2)从层间各特征位置进行分析,柔性基层结构

的跨中界面、L/4界面和端部处所对应的层间应变差量平均值远小于半刚性基层。

参考文献:

- [1] 叶向前,邹晓翎,何虹霖,等.半刚性基层沥青路面低温开裂成因研究综述[J].中外公路,2020,40(4):62-67.
- [2] ZHANG W G, KHAN A R, SHEN S H, et al. Laboratory validation of surface-initiated transverse cracking of asphalt pavement[J]. Applied Sciences, 2020, 10(3): 1002.
- [3] 马士宾,徐文斌,刘昊杨,等.半刚性基层沥青路面结构可靠性分析[J].中外公路,2017,37(6):77-80.
- [4] 朱磊,李强.基于不同基层沥青路面长期性能观测与分析[J].中外公路,2016,36(6):60-63.
- [5] 张怀志,杨帆,杨野.不同类型水泥稳定碎石温缩系数对比试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(2):323-329.
- [6] PAN R, LI Y M. Effect of warm mix rubber modified asphalt mixture as stress absorbing layer on anti-crack performance in cold region[J]. Construction and Building Materials, 2020, 251: 118985.
- [7] HONG R B, WU J R, CAI H B. Low-temperature crack resistance of coal gangue powder and polyester fibre asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117678.
- [8] 冉武平,凌建明,谷志峰.环氧沥青混合料低温性能及评价指标[J].西南交通大学学报,2017,52(5):935-942.
- [9] 宋健民,曾力,白鹏飞.基于数值分析法对沥青路面低温缩裂纹的研究[J].公路工程,2016,41(2):37-43,52.
- [10] 李明,李昶,刘继华,等.粗集料及界面特性对水泥稳定碎石温缩抗裂性能影响性分析[J].公路,2019,64(10):1-7.
- [11] 刘鹏飞,杨刚,梁乃兴.柔性基层和半刚性基层沥青路面有限元对比分析[J].公路交通技术,2013,29(4):28-31.
- [12] 尹传军,程培峰,周西棚.柔性基层结构在寒区公路的适用性分析[J].低温建筑技术,2013,35(9):124-126.
- [13] 刘凯,徐晓美,张磊,等.动态荷载作用下半刚性沥青路面动力响应研究[J].森林工程,2019,35(2):82-86,92.
- [14] 白琦峰,钱振东,吴春颖.基于实测验证的沥青路面力学模型研究[J].公路交通科技,2011,28(5):39-43.