

就地复合冷再生路面设计参数及工艺参数

樊统江¹, 赵磊²

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000)

摘要:就地复合冷再生层技术是在现场将部分旧沥青层与基层一同再生后,形成既具有一定柔性又具较大刚性的新型路面结构的一种技术。结合渝涪高速公路沥青路面病害处治工程,研究了就地复合冷再生层的结构厚度和组合、材料参数和工艺参数以及受力分析,并取得了成功的应用经验。研究结果认为:1)在复合铣刨和再生沥青面层和水泥稳定上基层条件下,为了确保就地复合冷再生层的压实质量,其厚度应控制在26 cm以内比较适宜;2)复合冷再生层的空隙率应控制小于12%;3)复合冷再生层上应设置一层防水层,而且新铺沥青混凝土厚度应不小于9 cm;4)复合冷再生层混合料的主要技术性能宜采用马歇尔流值(3~5 mm)、浸水劈裂强度(大于0.45 MPa)、冻融劈裂强度比(大于50%)和-10℃弯曲应变(大于1 800 $\mu\epsilon$)来控制,而动稳定度(大于2 000次/mm)仅作为次要技术指标。

关键词:就地复合冷再生基层技术;结构参数;材料参数;施工工艺参数;受力分析

中图分类号:U418 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)03-0049-09

Design Parameters for Cold In-Place Reclaimed Composite Pavement

FAN Tong-jiang¹, ZHAO Lei²

(1. School of Civil Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China;

2. Sichuan College of Architectural Technology, Degang Sichuan 618000, P. R. China)

Abstract: The cold in-place reclaimed composite base technique is a technique that the partially old asphalt pavement and the partially old base was milled together then reclaimed in-place as a new base with flexible and rigid property. Taking the treatment project for failed asphalt pavement of Yuhu Expressway in Chongqing as a case study, the structure thickness and the structure composition, the material parameters, the technological parameters were studied and mechanic behavior was discussed for the cold in-place reclaimed composite base. It is found that (1)based on milling and reclaiming asphalt concrete with up-base stabilized by cement together, a suitable compacted thickness should be controlled within the 26cm to ensure the compaction quality for the cold in-place reclaimed composite base,;(2)the void contents for the cold reclaimed composite base would be restricted at low than 12%;(3)a waterproof layer should be set and the thickness of new asphalt concrete should be paved to be more than 9cm on the cold in-place reclaimed composite base;(4)the principal technical performances are recommended using the Marshall Flow(to be controlled in the range of the 3~5 mm)、soaked split strength(to be large than 0.45 MPa)、the freeze-thaw split strength ratio(to be large than50%) and the bend strain(to be large than 1 800 $\mu\epsilon$) as the controlled index of the cold reclaimed composite base. And the dynamic stability(to be large than 2000 times/mm) only is used as a secondary technical performance.

收稿日期:2009-12-23

作者简介:樊统江(1954-),男,教授,主要从事道、桥、隧等特殊铺装工程和高性能材料研究,(E-mail)ftj.163@163.com。

Key words: Cold in-place reclaimed composite base technology; Structure design parameter; Material parameter; Construction technological parameter; Mechanical discuss.

再生利用旧沥青路面,既可降低工程造价、节约新矿料和沥青材料等不可再生资源,还可节省废料占地空间和减少对环境的污染以及减轻开山取石对环境的破坏,具有非常显著的经济效益和环境效益这一认识已得到行业的普遍认同。

中国已建成 6 万多 km 高速公路^[1],主要以沥青混凝土路面为主。许多沥青路面经过多年使用,路面已逐渐进入大修阶段。据估计每年约有 12% 的沥青路面需要翻修,每年可再生的沥青混合料估计达到 1 900 万 t,并还将以每年 15% 的速度增长^[2-3]。10 a 以后,估计每年将增加到 8 000 万 t 左右。因此,合理有效地再生利用旧沥青混合料,是摆在我们面前的一个刻不容缓的课题。

世界各国都很重视旧沥青路面的再生利用。据资料报道^[4]:美国 1985 年再生沥青混合料用量就达近 2 亿 t;日本的旧路面废料再生利用量已超过 50%;联邦德国到 1978 年已经将全部废弃的路面材料加以再生利用;前苏联 1984 年就出版了《再生路用沥青混凝土》一书,介绍了仅列宁格勒市每年推广沥青路面再生技术就可节约沥青材料达 1 400 t 之多。

旧沥青路面再生利用技术有就地冷再生、就地热再生、工厂冷再生和热再生等多种方法。就降低工程造价、材料的充分利用、降低能耗和减少环境污染等方面的优势而言,就地冷再生受到业界的推崇。

由于中国沥青路面多数是半刚性基层沥青路面结构。许多破坏的路面不仅仅是沥青层被破坏,其半刚性基层的使用性能也大大降低,已不适用再做新路面的基层结构。为了充分利用旧路面材料,降低工程造价和减少环境污染,开展了就地复合冷再生技术在渝涪高速公路沥青路面病害处治工程中的应用研究。

所谓就地复合冷再生技术就是在现场将部分旧沥青层与部分(功能退化的)基层通过再生设备就地一同铣刨并再生后形成既具有一定柔性又具较大刚性的新型路面结构的一种技术。目前对这类复合再生路面的设计参数研究有一些报道:美国 Ramzi Taha^[5]等人仅研究了在室内条件下不同旧沥青混合料掺量、不同水泥掺量下,不同零期的基层和底基层再生混合料的强度,给出的结论是不能全部使用旧沥青混合料;Yongjoo Kim^[6-7]等人就取至 7 个地方的旧沥青混合料采用直接拉伸试验研究掺泡沫沥青

的新拌再生沥青混合料的设计步骤,认为在 60℃ 养生 2 d 比在 40℃ 养生 3 d 的强度高,得出泡沫沥青最佳掺量为 1.5% ~ 2.5%;Raficqul Alam Tarefder^[8]等人研究了石灰处理的再生沥青混合料的室内性能和路用性能,但未提出控制性指标;Wang Hai-yan^[9]等人介绍了全厚式现场冷再生沥青路面的方法,重点在施工工艺方面;Huang Y^[10]等人的研究重点在废玻璃、废钢渣等固体废料在沥青路面中的再生利用;Hosin "David" Lee^[11]等人研究了结合料、再生混合料温度和发泡用水量对现场冷再生混合料设计处理的影响;Y. Niazi^[12]等人研究了水泥和石灰对用乳化沥青的再生混合料的性能影响;姚卓等人^[13]对冷再生基层施工及其控制指标做了初步探讨;赵蕾^[14]也开展过类似研究;武建民^[15]等人专门研究了沥青路面冷再生深度。然而,尽管国内外学者的研究积累了一些经验,但对于再生混合材料的技术参数、再生路面结构组合形式和结构厚度、施工工艺参数等关键技术问题还未解决。因此,结合就地复合冷再生层技术在渝涪高速公路沥青路面病害处治工程中的应用研究课题,对上述问题进行了探讨。

1 复合冷再生路面结构组合和厚度

重庆渝涪高速公路原路面结构组合和厚度为上面层 15 cm 沥青混凝土+下层 48 cm 粉煤灰石灰稳定基层组成。该路已通车使用达 7 a 多,虽然不到设计寿命的 1/2,但根据实际的交通量资料换算的标准轴载结果,不计 2 t 级以下的交通量,目前一个车道上的累积作用次数已接近设计值,相当于沥青路面已接近设计使用寿命。全路段出现了坑槽、纵横向裂缝、网裂和翻浆、泛油等严重病害,严重影响了车辆的正常和安全行驶。通过开挖检查和弯沉检测表明,代表弯沉值大于原设计弯沉值的比例占 23%,沿断面竖向的裂纹从面层延伸到基层,属于交通荷载引起的典型的疲劳破坏。而且上基层由于受水损害,其结构强度也受到严重影响。从钻取的芯样厚度检测结果表明,厚度的单点合格率只达到设计厚度的 76.6%,最薄处只有 10 cm。显然路面厚度也先天性严重不足。

考虑到该路交通量较大,为了不影响通行,试验工程分别于 2006 年选择了 6 km、2007 年选择 5.4 km 进行实验研究。

由于受工程的制约,试验段只分别考虑了 2 种结构组合:结构 1 为面层 4 cm AC13 改性沥青混凝土+5 cm AC16 改性沥青混凝土+1 cm 稀浆封层防水层+26 cm 复合冷再生层+28 cm 原石灰粉煤灰半刚性基层组成,总厚 64 cm;结构 2 为面层 4 cm AC13 改性沥青混凝土+5 cm AC16 改性沥青混凝土+8 cm AC25 普通沥青混凝土+乳化沥青透层+24 cm 复合冷再生层+30 cm 原石灰粉煤灰半刚性基层组成,总厚 71 cm。前一结构主要考察在对复合冷再生层防水处理后减薄新铺沥青层厚度的路面结构的使用效果;后一结构则是考察对复合冷再生层无防水处理但通过增厚新铺沥青层路面结构的使用效果。

结构厚度的取值仍然依据于现有规范的设计弯沉和路面设计理论,但复合冷再生层的材料参数采用实测值。

2 复合冷再生层材料参数

目前中国只发布了《热拌再生沥青混合料路面施工及验收规程》(CJJ 43-91)和《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41-2008)。但没有复合冷再生层材料参数的有关规定和参考资料。作为再生路面结构设计,复合冷再生层的材料参数是必不可少的。

2.1 复合冷再生层混合料的配合比设计

研究中旧路面铣刨是将 4 cm 表层沥青混凝土铣刨除去后,连同中、下旧沥青层和半刚性基层一起进行铣刨再生的。因此铣刨出的混合料是沥青混合料和半刚性基层混合物的复合物,其级配发生了很

大变化。取样筛分结果表明,粗集料含量偏少,0.6 mm 以下细集料含量也偏少(如图 1)。考虑到复合冷再生后作为基层使用及现场施工的方便性、经济性,级配主要以满足密实度要求并得到适当的强度作为主要控制目标,对复合冷再生层混合料的级配立足于就地铣刨的原料级配,只考虑到压实性,增加了部分细集料对级配进行适当的调整。选择了 3 种级配进行试验,如图 1 所示。

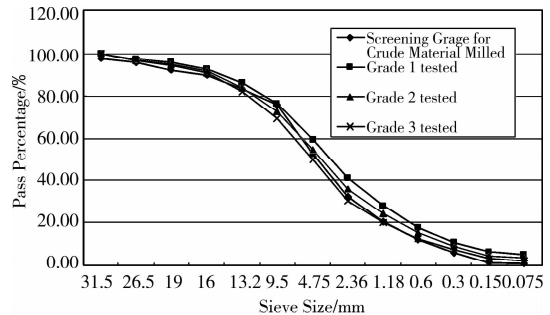


图 1 旧路面沥青混合料抽提筛分曲线和试验级配曲线

复合冷再生层混合料(该次为半刚性基层混合料约占 45%~40%;旧沥青混合料约占 60%~55%)的配合比设计主要确定水泥、泡沫(乳化)沥青的添加量和最佳总用水量。其设计方法目前国内外都采用的马歇尔试验方法。由于复合冷再生层混合料中有水泥,马歇尔稳定度往往很高,仅以马歇尔稳定度指标控制难以确定合适的配合比。因此,研究以水泥(425#)用量、泡沫(乳化)沥青(中海 70#)用量、总用水量和级配为考察因素,以马歇尔稳定度、流值、劈裂强度为考察指标,采用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验,试验结果见表 1。分析试验结果表明,对劈

表 1 复合冷再生基层混合料配合比正交试验结果

Test No.	Test Results				Test Results		
	Cement/%	Total Water/%	Grade No.	Foem asphalt/%	Spilt Strengths/MPa	Marshall Stability/KN	Flows/mm
1	0	4.5	1	2	0.59	7.1	4.1
2	0	5.5	2	2.5	0.56	9	5.1
3	0	6.5	3	3	0.49	7.9	7.3
4	1.5	4.5	2	3	0.62	10.3	5.2
5	1.5	5.5	3	2	0.5	14.1	4.4
6	1.5	6.5	1	2.5	0.59	10.2	3
7	3	4.5	3	2.5	0.67	17.9	3.5
8	3	5.5	1	3	0.66	12.4	3.5
9	3	6.5	2	2	0.57	15.9	4

裂强度指标影响显著的排列顺序为水泥>总用水>级配>泡沫沥青;对马歇尔稳定度指标影响显著的排列顺序为水泥>级配>泡沫沥青>总用水;对流动值指标影响显著的排列顺序为水泥>级配>泡沫沥青>总用水。尽管排列顺序不完全一致,但水泥的用量是影响复合冷再生层力学性能的最主要因素。由于复合冷再生层为半柔性层,既要求有较高的强度,又需要满足一定柔性,同时要考虑施工的可压实性和工程经济性。因此最后确定以劈裂强度指标和流动值作为主要技术控制指标,初步确定复合冷再生层的劈裂强度指标为 0.5~0.6 MPa,流动值为 3.5~5 mm。得到的最优组合为:水泥用量 2%;总用水 5%;泡沫沥青 2.5%;级配 2。

2.2 复合冷再生基层混合料的性能

以初步确定出的最优组合为基准,保持级配(2)和总用水量不变,变化水泥用量和泡沫沥青用量,进一步考察了对高温稳定性、低温抗裂和抗水损害性的影响,为复合冷再生层混合料的材料参数取值提供依据。

2.2.1 复合冷再生层混合料的高温稳定性 图 2 和图 3 分别给出了不同泡沫沥青用量下,车辙动稳定度和劈裂强度分别随水泥用量的变化。可以看出,当泡沫沥青用量一定时,无论车辙动稳定度还是劈裂强度都在所研究的水泥用量范围内随水泥用量的增加而增加。其中车辙动稳定度在水泥用量掺到 1.5%时就已经达到了满足改性沥青混合料的规范要求。

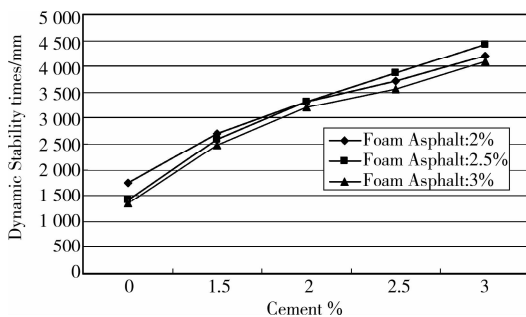


图 2 动稳定度随水泥和泡沫沥青用量的变化

从高温稳定性角度,水泥用量不需要太高,控制在 1.5%~2.5%之间已足够满足要求。但是泡沫沥青用量增加到一定量(3%)后,动稳定度增长不显著或有所降低,表明泡沫沥青有一个合理的用量范围。同时,泡沫沥青用量也影响劈裂强度。泡沫沥青用量过多或过少都将降低劈裂强度,如图 3 所示。

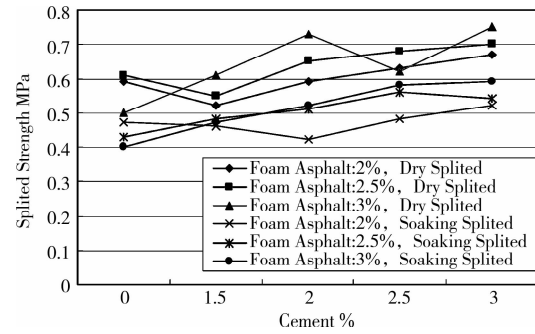


图 3 干湿劈裂强度随水泥和泡沫沥青用量的变化

2.2.2 复合冷再生层混合料的低温性能 -10°C 的弯曲试验结果表明(如图 4),水泥用量的增加将增加复合冷再生层混合料的弯曲强度但降低弯曲变形,这意味着低温弯曲模量的增加。在低温状态下,复合冷再生层混合料的高模量将导致复合冷再生层的温度应力增加,容易出现开裂。根据应力松弛理论,只有提高低温变形能力,才能有效降低温度应力。所以,水泥用量过多,会显著提高复合冷再生层的刚度,不利于复合冷再生层的低温变形;而泡沫沥青用量在 3%以内,弯曲强度是随泡沫沥青用量的增加而减小,弯曲变形则是随用量的增加而增加。这主要是泡沫沥青用量的增加使复合冷再生层的柔性增加,从而提高了低温变形能力。

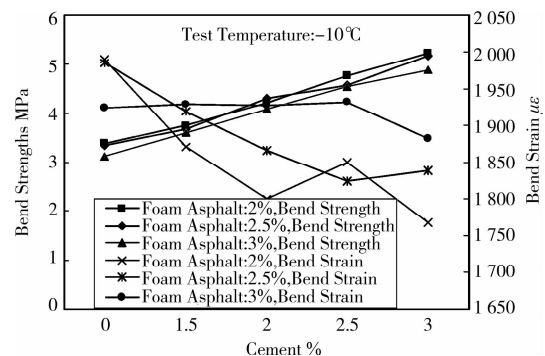


图 4 复合冷再生基层混合料的弯曲强度和弯曲应变

2.2.3 复合冷再生层混合料的抗水损害性能 从图 3 中的浸水劈裂强度结果(15°C 下浸泡 48 h 后试验,其余同规范)可看出,随着水泥用量的增加,抗水损害能力得到提高。这是因为水泥是水硬性材料,经过水化反应形成强度后对水的敏感性降低;另一方面,水泥与乳化沥青中的水反应,沥青一同进入水化硅酸凝胶孔,提高了水泥石的密实性,而沥青则被硅酸凝胶包裹,阻隔了沥青与水的接触,降低了沥青的水敏感性,因而泡沫沥青和水泥用量在合理的配合比下,将获得最好的抗水损害性能。也因此过多增加泡沫沥青用量对混合料的抗水损害能力的提高并非很有用,也不经济。图 5 给出 3 种泡沫沥青用

量下复合冷再生层混合料的冻融劈裂强度比随水泥用量的变化趋势。得到的结论与图4反映的结果基本一致,但冻融劈裂强度普遍较低(小于0.45 MPa),所以冻融劈裂强度比也普遍较低。不过目前没有规范对此有相应规定。

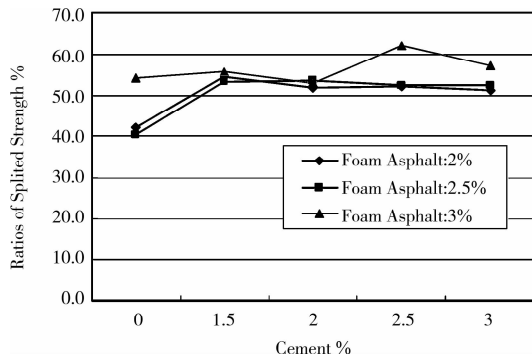


图5 复合冷再生基层混合料的冻融劈裂强度比

2.3 复合冷再生层混合料的参数

2.3.1 关于复合冷再生层混合料的级配 由于实际工程中铣刨出的基层混合料和沥青层混合料的级配受到原级配的影响和铣刨过程的影响,其中沥青

层混合料又是由不同级配的中面层和下面层混合组成,十分复杂,而且原基层铣刨厚度和沥青层铣刨厚度的比例也影响复合层混合料的级配。因此,用外加集料方式来调整,在实际工程中很难实施。根据前面选取的3组级配实验结果来看,级配对复合层混合料的劈裂强度有影响但影响不大。研究认为,考虑到工程可行性,冷再生复合层混合料的级配主要以基层再生厚度和沥青层再生厚度控制,调节的外加集料的粒径、用量主要以满足密实度来控制。

2.3.2 关于复合冷再生层混合料的材料参数 根据上述研究结果,由于复合冷再生层混合料的动稳定指标一般都能达到大于2500次/mm,已足够满足高温性能使用要求。而水损害性能、变形性能和低温抗裂性能才是更敏感性指标。因此建议主要以浸水劈裂强度和冻融劈裂强度比、弯曲变形和(或)弯曲模量以及马氏流值几个指标来控制。因此,根据实验结果和力学分析结果,并考虑实际工程存在许多不定因素与实验结果存在的差异,对复合冷再生层混合料的材料参数提出了表2所示建议值。

表2 复合冷再生层混合料的材料参数

Items	Test temperature/°C	Index mark	Suitable ultimate air temperature /°C
Allowably maximum milling thickness/cm	/	23	/
Dynamic stability/(times/mm)	60	≥2000	≥20(high temperature)
Marshall flow/mm	60	3~5	≥20(high temperature)
Split strength by soaking test/MPa	15,48h	≥0.45	≥20(high temperature)
Damaged bend modulus/MPa	-10	≤2000	≥-21.5(low temperature)
Damaged bend strain/(με)	-10	≥1800	≥-21.5(low temperature)
Ratio of residually split strength by freeze-thaw test/%	Circulating from -18°C to 60°C, then test at 25°C	≥50	≥-21.5(low temperature)
Void content/%	25°C	10~12	/

3 复合冷再生路面的受力分析

基于弹性层状体系理论建立有限元模型,利用ANSYS软件对双圆均布荷载下轮下中心、轮下1/4、轮缘边和两轮隙中心4位置处的行车方向(x 向)、横车道方向(y 向)和断面竖向(z 向)的受力进行了分析。有限元模型采用的尺寸为宽3.75 m,长3.75 m,厚度2 m,网格划分为0.7 mm。荷载采用标准轮压0.7 MPa。考虑到再生层与沥青混凝土层间有透层油和稀浆封层,沥青混凝土层间也洒了粘接油,因此假定各层间接触为完全连续。从钻心取样也证明各层间接触良好。各层材料参数参考规范取值,但复合再生层采用实测值。表3和表4分别给出了

结构1和结构2在4个计算位置处各层位的三向正应力、剪应力和弯沉计算结果。

分析结果表明,两种结构的沥青层表面在轮下中心、轮下1/4、轮缘边3个位置均产生的三向压应力,其中最大的压应力均发生在轮下中心的断面竖向(z 向),主压应力合力分别达到结构1为1.508 MPa,结构2为1.326 MPa;而在两轮隙中心处的横车道方向(y 向)和断面竖向(z 向),产生的是拉应力,其中 z 向分别达到结构1为0.066 MPa,结构2为0.129 MPa。平面和垂直面各个计算点的剪应力均很小,最大值才0.07 MPa。在深度方向,复合冷再生层的表面和底面在行车方向(x 向)均产生的拉应力,但最大值结构1才0.01 MPa,结构2才

0.0137 MPa,均很小;其余各个计算点在 y, z 向均产生的压应力,也均很小,最大值结构 1 才 0.043 MPa,结构 2 才 0.041 MPa,2 结构的非常接近。表明复合冷再生层处于安全使用状态。比较表 2 给出的浸水劈裂强度技术指标可知,复合冷再生层有较大的安全系数。

比较 2 种结构的力学分析结果可看出,结构 1 由于少了 1 层 8 cm 的沥青混凝土层,路表的 3 项主应力要比结构 2 的大,而且复合冷再生层受到的剪应力也比结构 2 大 1 个数量级,但绝对值均很小;另

一方面,由于结构 1 增设了 1 层稀浆封层防水层,有效降低了复合冷再生层层底的拉应力,对复合冷再生层的受力特别有利。因此,从受力状态来看,结构 1 并不差于结构 2。从防水状态来看,由于复合冷再生层现场的实际空隙率达 10%~12%,从沥青层进入的水很容易残留在复合冷再生层的空隙中,易于导致该层产生水损害。所以加稀浆封层防水层的结构 1 在耐久性上优于结构 2。但目前上述两种结构都处于良好的使用状态,长期效果有待进一步观测。

表 3 结构 1 不同层位的正应力、剪应力和弯沉

Calculated sites	Layer sites	Depths from surface/cm	Direct stresses/MPa			Shears/MPa		Deflection/mm
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xz}	τ_{yz}	
Under the centre of wheel	Surface	0	-0.820	-0.770	-1.002	-7.09E-08	-6.06E-04	-0.231
	Bottom of AC13	4	-0.230	-0.205	-0.724	-7.27E-07	5.27E-04	-0.218
	Bottom of AC16	9	-0.026	-0.028	-0.339	2.23E-06	-1.99E-02	-0.201
	Bottom of slurry seal coat	10	-0.059	-0.060	-0.285	3.96E-06	-1.97E-02	-0.197
	Bottom of cold reclaimed layer	36	9.59E-03	8.22E-04	-4.25E-02	-2.67E-06	-1.17E-02	-0.165
	Bottom of subbase	64	2.69E-02	1.41E-02	-6.50E-03	-6.20E-08	-6.77E-04	-0.157
Under the 1/4 of wheel	Surface	0	-0.521	-0.460	-0.501	-3.14E-08	1.11E-02	-0.214
	Bottom of AC13	4	-0.157	-0.173	-0.426	-2.85E-07	0.103	-0.208
	Bottom of AC16	9	-0.022	-0.056	-0.247	2.51E-06	4.69E-02	-0.198
	Bottom of slurry seal coat	10	-4.72E-02	-0.064	-0.217	3.65E-06	1.97E-02	-0.196
	Bottom of cold reclaimed layer	36	1.0E-02	6.59E-04	-4.35E-02	-2.86E-06	-7.45E-03	-0.166
	Bottom of subbase	64	2.8 E-02	1.5 E-02	-6.59E-03	-6.91E-08	-4.8E-04	-0.158
Under the wheel flange	Surface	0	-0.257	-0.136	-0.125	1.39E-08	1.54E-02	-0.195
	Bottom of AC13	4	-0.099	-0.145	-0.141	3.82E-07	9.8E-02	-0.194
	Bottom of AC16	9	-0.021	-0.111	-0.065	2.65E-06	3.4E-02	-0.187
	Bottom of slurry seal coat	10	-0.024	-0.067	-0.077	1.93E-06	0.030	-0.186
	Bottom of cold reclaimed layer	36	1.03E-02	3.09E-04	-4.34E-02	2.97E-06	-3.82E-03	-0.167
	Bottom of subbase	64	2.81E-02	-1.62E-02	-6.66E-03	7.51E-08	-2.69E-04	-0.158
Under the centre between two wheel	Surface	0	-0.111	0.055	0.066	4.54E-8	5.81E-03	-0.183
	Bottom of AC13	4	-0.069	-0.131	0.021	-8.81E-07	2.56E-02	-0.185
	Bottom of AC16	9	-0.021	-0.111	-0.065	2.74E-06	-3.39E-02	-0.187
	Bottom of slurry seal coat	10	-2.35E-02	-6.69 E-02	-7.67E-02	1.76 E-06	-3.02E-02	-0.186
	Bottom of cold reclaimed layer	36	1.0E-02	6.26E-05	-4.30E-02	3.08E-06	-8.60E-04	-0.167
	Bottom of subbase	64	2.84E-02	1.66E-02	-6.68E-03	7.99E-08	-5.17E-05	-0.159

表 4 结构 2 不同层位的正应力、剪应力和弯沉

Calculated sites	Layer sites	Thicknesses/cm	Direct stresses/MPa			Shears/MPa		Deflection/mm
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xz}	τ_{yz}	
Under the centre of Wheel	Surface	0	-0.727	-0.648	-0.898	-1.68E-09	1.72E-03	-0.242
	Bottom of AC13	4	-0.239	-0.234	-0.714	-1.63E-08	1.71E-02	-0.229
	Bottom of AC16	9	-0.078	-0.092	-0.421	-4.93E-08	6.28E-03	-0.21
	Bottom of AC25	17	-3.03E-03	-0.018	-0.181	-5.73E-07	-1.18E-02	-0.195
	Bottom of cold reclaimed layer	41	1.26E-02	2.52E-04	-3.90E-02	-6.08E-07	-9.20E-03	-0.178
	Bottom of subbase	71	3.03E-04	-1.56E-03	-7.09E-03	-3.08E-09	-2.54E-04	-0.152

续表 4

Calculated sites	Layer sites	Thicknesses/cm	Direct stresses/MPa			Shears/MPa		Deflection/mm
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xz}	τ_{yz}	
Under the 1/4 of wheel	Surface	0	-0.492	-0.403	-0.511	-3.41E-09	2.97E-03	-0.227
	Bottom of AC13	4	-0.173	-0.206	-0.432	-3.46E-08	8.89E-02	-0.221
	Bottom of AC16	9	-0.067	-0.099	-0.284	-5.63E-08	4.73E-03	-0.211
	Bottom of AC25	17	3.43E-03	-0.0268	-0.149	-2.69E-07	7.05E-02	-0.199
	Bottom of cold reclaimed layer	41	1.37E-02	3.66E-03	-3.96E-02	-5.98E-07	-6.55E-03	-0.179
	Bottom of subbase	71	1.77E-04	-8.13E-04	-7.23E-03	-3.78E-09	-2.76E-04	-0.168
Under the wheel flange	Surface	0	-0.257	-0.154	-0.13	-2.09E-09	1.79E-03	-0.211
	Bottom of AC13	4	-0.105	-0.178	-0.146	-2.46E-08	5.89E-02	-0.211
	Bottom of AC16	9	-4.01E-02	-0.107	-0.15	-5.11E-08	-3.62E-02	-0.2
	Bottom of AC25	17	5.10E-03	-0.039	-0.124	-1.77E-07	-6.78E-03	-0.199
	Bottom of cold reclaimed layer	41	1.36E-02	3.22E-03	4.08E-02	-5.97E-07	-2.89E-03	-0.18
	Bottom of subbase	71	1.67E-03	-5.76E-04	-7.24E-03	-3.58E-09	-6.79E-05	-0.169
Under the centre between two wheel	Surface	0	-0.097	0.017	0.129	1.95E-10	-3.22E-03	-0.199
	Bottom of AC13	4	-0.058	-0.158	0.051	-1.63E-08	-1.71E-02	-0.203
	Bottom of AC16	9	-0.025	-0.103	-0.068	-3.67E-08	-6.43E-03	-0.204
	Bottom of AC25	17	6.95E-03	-0.039	-0.105	-2.47E-07	-1.24E-02	-0.199
	Bottom of cold reclaimed layer	41	1.36E-02	-2.99E-03	-4.10E-02	-6.11E-07	-8.11E-04	-0.18
	Bottom of subbase	71	2.63E-03	-3.14E-04	-7.44E-03	-3.65E-09	-3.14E-04	-0.169

4 现场复合冷再生层施工工艺参数

现场复合冷再生层施工工艺参数主要包括沥青发泡温度、泡沫沥青的膨胀比和半衰期(s)、铣刨深度、再生厚度、压实度或空隙率等。

4.1 沥青发泡温度、泡沫沥青的膨胀比和半衰期

现场复合冷再生层通常使用泡沫沥青但也可使用乳化沥青。该研究主要使用的泡沫沥青。对用于发泡的基质沥青的标号应根据公路等级和所在地区的气候条件选择。气温较高的南方地区通常采用较稠的 70[#] 或 90[#] 重交沥青。

对沥青的发泡,目的是通过发泡降低沥青的粘度和增加沥青在再生混合料中的分布面积和均匀性。因此通常用膨胀比(沥青体积增大的比例)来表现沥青的发泡效果。但泡沫沥青的膨胀比除与沥青的稠度有关外,还与发泡温度、压力和加水量有关。图 6 给出了中海 70[#] 沥青在规定压力下,膨胀比和半衰期与加水量和温度的关系。可以看出,用水量越高,膨胀比越大;同时在同一用水量下,温度越高膨胀比越大。实际工程中,膨胀比不是越高越好,还要结合半衰期(泡沫沥青从最大体积衰减到最大体积的一半所需的时间(以秒 s 计))考虑。比较图中结果可知,半衰期与膨胀比有关,膨胀比越大,半衰期越小。半衰期小意味着泡沫消失越快,不利于泡沫沥青在混合料中的分散,从而影响再生混合料的

物理力学性能。实验结果表明,对应温度 155~185℃的膨胀比线和半衰期线交叉点的膨胀比和半衰期分别为 22~25 倍和 11~13 s。考虑到实验室能严格控制实验条件,而实际工程存在许多不定因素,根据本研究的工程经验,建议泡沫沥青的膨胀比控制不小于 22 倍,半衰期控制 11 s,发泡温度应控制在 160~170℃之间,用水量一般为 3%。

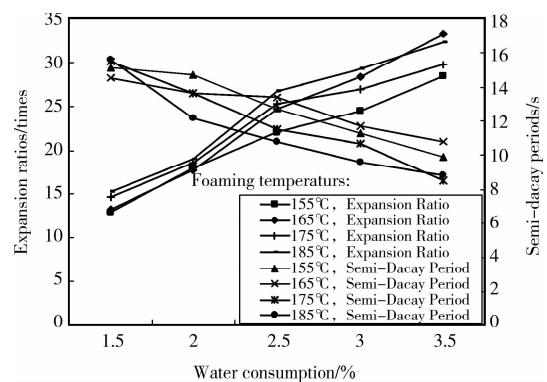


图 6 沥青的发泡特性

4.2 铣刨深度、再生厚度、再生速度

铣刨深度是需再生的沥青层厚度和基层厚度的总和,取决于设计要求和再生机的能力。从工程实践来看,维特根再生机实际铣刨的深度超过 30 cm 后其效果较差。由于被压实的再生厚度存在较大的空隙率,铣刨出的松散厚度(通常松散系数在 1.3~1.35)经重新压实的厚度(通常压实系数在 1.15

~1.2)将远大于铣刨深度,加之还要添加水泥、泡沫沥青或骨料。因此实际的铣刨深度是再生厚度除以 $1+\text{松散系数}-\text{压实系数}$,比如设计的再生厚度为26 cm,实际需要铣刨的总深度只为23 cm。

对于再生厚度,必须考虑压实机械的压实功。目前市面上的压路机最大吨位加振后才达到30多吨,而且冷再生混合料的和易性完全不同于热拌沥青混合料,压实较困难。根据实践经验,再生压实厚度26 cm时,在合理的压实机械组合下,能达到的实际压实度只有理论密度的88%~90%,即便增加压实遍数也无济于事。因此在同时铣刨和再生沥青面层和水泥稳定上基层条件下,为了确保就地复合冷再生层的压实质量,其应控制在26 cm以内比较适宜。即将铣刨深度拟定为23 cm(见表2)。

再生速度与铣刨深度和再生厚度有关,也与再生机的能力有关。对于再生厚度26 cm的复合冷再生层,一般前进速度应控制在6~8 m/min,使原有路面铣削充分,防止产生大量的大块状料。

4.3 压实度或空隙率

压实度或空隙率既取决于冷再生混合料的配合比(级配、水泥用量、泡沫沥青用量和总用水量),也取决于再生厚度和压实机械。正如3.2节所述,在合理的压实机械组合下,压实厚度为26cm的复合冷再生层能达到的实际压实度只有理论密度的88%~90%。即空隙率达到10%~12%,这样的空隙率很容易进水,造成复合冷再生层水损害。因此,应采取有效措施确保复合冷再生层的压实度,并设置防水层。

此外,还要正确确定再生幅数。再生幅数的划分与再生机的工作宽度、需要再生的原路面宽度、相邻两幅的搭接宽度等有关。合理的再生幅数可以保证再生机的工作效率,同时,能最大限度地使混合料为一次性再生,确保搭接部位的实际配合比能满足设计配合比的要求。

5 结论

1)将旧沥青层与旧基层一同就地冷再生作为新基层或沥青面层的下层的路面结构组合体系是可行的。但考虑到复合冷再生层的压实性差、空隙率大的特点,在复合冷再生层上必须设置一层防水层;如果作为沥青面层的下层,根据两种结构对比使用的结果,其上的新铺沥青混凝土层不应小于9 cm。但路面结构的总厚度应根据具体的交通荷载设计。

2)作为复合冷再生路面结构设计参数和性能的

评价,建议宜采用马歇尔流值(3~5 mm)、浸水劈裂强度(大于0.45 MPa)、冻融劈裂强度比(大于50%)和-10℃弯曲应变(大于1800 $\mu\epsilon$)作为主要控制指标,而动稳定度(大于2000次/mm)仅作为次要技术指标。

3)除了在复合冷再生层上设置防水层外,其空隙率应严格控制小于12%。

4)要根据所采用的再生剂类型(泡沫沥青还是乳化沥青或其他再生剂)、再生设备能力和当地气候条件等,合理确定水泥用量、沥青用量、用水量、再生厚度、再生速度等施工技术参数。采用泡沫沥青,推荐的水泥用量2%、泡沫沥青用量2.5%、总用水量5%、再生厚度26 cm、再生速度6~8 m/min、泡沫沥青的膨胀比22倍、半衰期11 s等施工技术参数可供类似工程借鉴。

5)不要刻意追求复合冷再生层混合料的级配,应充分考虑工程的可行性,以保证压实度为基础,根据需要添加适量的粗集料和细集料进行调整。

参考文献:

- [1]董学博.中国高速公路总里程全球第二[EB/OL].
<http://www.chinahighway.com/news/2009/361571.php>. 2009-09-25.
- [2]陈启宗.“工厂热法”沥青混凝土路面再生技术[J].
工程机械,2001,32(5):27-29.
CHEN QING-ZHONG. “In plant heating” reclamation technology of asphalt concrete road[J].
Construction Machinery and Equipment,2001,32(5):27-29.
- [3]孙志鸿,徐涛,于文学.谈沥青路面再生技术的应用前景[J].
黑龙江交通科技,2001(2):74-77.
SUN ZHI-HONG, XU TAO, YU WEN-XUE.
Discussion on the foreground of application of bituminous pavement recycling technology [J].
Communications Science and Technology Heilongjiang,2001(2):74-77.
- [4]李光颖.沥青路面就地冷再生技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [5]RAMZI TAHA, AIL AI-HARTHY, KHALID AL-SHAMSI. Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases[J].
Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14:2-3.
- [6]YONGJOO KIM, HOSIN DAVID LEE. Development of mix design procedure for cold In-place recycling with foamed asphalt [J].
Journal of Materials in Civil Engineering,2006,18(1):116-124.

- [7] YONGJOO KIM, HOSIN DAVID LEE. Michael heitzman, validation of new mix design procedure for cold In-place recycling with foamed asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(11): 1000-1010.
- [8] RAFIQUL ALAM TAREFDER, MUSHARRAF ZAMAN, ROLAND SISSON. Field and laboratory properties of lime-treated cold In-place recycled asphalt pavements [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2006, 34(1): 31-41.
- [9] WANG HAI-YAN, DU ER-PENG, WANG XIAO-HUA, et al. Approach to full depth cold In-place recycling of asphalt pavement [C]//4th International Conference on Road & Airfield Pavement Technology. Kunming, China, 2002.
- [10] HUANG Y, BIRD R N, HEIDRICH O. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 52(1): 58-73.
- [11] HOSIN DAVID LEE, YONGJOO KIM. Influences of binder and RAP temperatures and foaming water content on cold In-place recycling mix design process using foamed asphalt[C]//2006 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference, Atlanta, Georgia, USA.
- [12] Y NIAZI, M JALILI. Effect of portland cement and lime additives on properties of cold In-place recycled mixtures with asphalt emulsion [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1338-1343.
- [13] 姚卓, 姜洋, 徐春雨. 关于鞍千公路冷再生基层施工及其控制指标的探讨[J]. 辽宁: 北方交通, 2006(3): 8-10.
YAO ZHUO, JIANG YANG, XU CHUN-YU, Construction of cold-recycled base of anqian highway and its controlled indexes[J]. Northern Communication, 2006(3): 8-10.
- [14] 赵蕾. 半柔性高强基层冷再生技术试验及工程应用[J]. 交通科技, 2006(1): 68-70.
ZHAO LEI. Test of cold recycling technique for Semi-flexible base with high strength and its application in engineering[J]. Transportation Science & Technology, 2006(1): 68-70.
- [15] 武建民, 郝合瑞, 马俊毅, 等. 沥青路面冷再生深度的确定[J]. 交通标准化, 2007(10): 112-115.
WU JIAN-MIN, HAO HE-RUI, MA JUN-YI, et al. The depth determining of asphalt pavement cold regeneration[J]. Communications Standardization, 2007(10): 112-115.

(编辑 胡 玲)