

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2015.06.005

# 长寿命柔性路面技术的探讨与应用

易向阳

(河南省公路工程集团有限公司, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 分析了长寿命柔性沥青路面的结构行为理论。路面结构组合设计采用沥青层底拉应变和路基顶面压应变指标来控制沥青路面的疲劳寿命; 材料组成设计主要是针对路面结构抗车辙性能和耐疲劳性能等方面, 以提高沥青混凝土路面的长期使用性能为目的; 增强层间结合力有助于改善沥青路面结构层间界面力学特性, 从而保证路面结构层间连续。通过工程实体验证、寿命周期费用分析表明长寿命柔性基层路面的技术和经济效益显著, 值得推广应用。

**关键词:** 道路工程; 长寿命柔性基层路面; 试验研究; 结构组合; 材料组成; 层间处治

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2015)06-0025-07

## Discussion and Application of Long-life Flexible Pavement Technology

YI Xiang-yang

(Henan Highway Engineering Group Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450052, China)

**Abstract:** The structural behavior theory of long-life flexible asphalt pavement is analysed. In the aspect of designing pavement structural combination, the asphalt layer bottom flexural tensile strain and subgrade top compressive strain are used to control its fatigue life. Material composition is mainly aiming at rut resistance and fatigue resistance performance of pavement to improve the long-term performance of asphalt concrete pavement. In addition, improving the interlayer binding force is helpful in enhancing the interlayer mechanical characteristic of pavement structure so as to ensure interlayer continuation. The project authentication and the analysis of life cycle cost show that long-life flexible base pavement has significant technical and economic benefits which is worthy of promotion.

**Key words:** road engineering; long-life flexible base pavement; experimental research; structural combination; material composition; interlayer disposal

## 0 引言

长寿命柔性基层(沥青)路面是国际沥青路面界近年提出的路面发展趋势, 深受国外学者的推崇, 其特点是路面刚度低、弯拉应变小、路面弹性好而且维修方便。国内研究认为, 柔性基层由于对重载交通的轴载敏感性低且不存在反射裂缝, 能提高沥青路面抗车辙能力, 是适应我国当前重轴比例大、超重载交通的一种路面结构形式。2007年1月实施

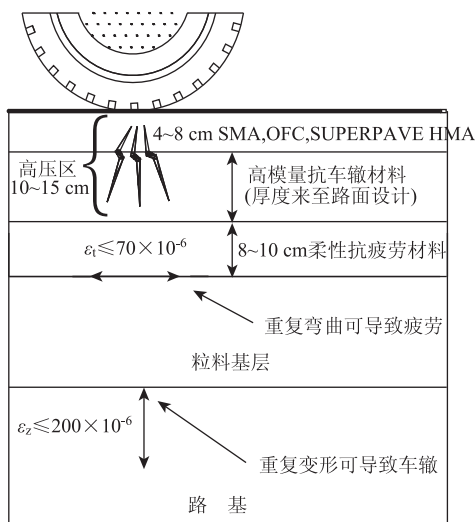
的《公路沥青路面设计规范》明确提出了“柔性基层”概念, 指出级配碎石可用于各级公路的基层和底基层<sup>[1]</sup>。2008年, 二连浩特—广州高速公路洛阳段进行了大量的试验性研究, 修建了国内首条长寿命柔性基层路面。本文旨在已有研究成果的基础上, 论述长寿命柔性基层路面结构疲劳寿命取决于沥青层底拉应变和路基顶面压应变, 提高路面结构抗车辙性能和耐疲劳性能, 加强层间处治技术, 是保证沥青混凝土路面长期使用性能的根本。

收稿日期: 2014-03-12

作者简介: 易向阳(1974-), 男, 河南商城人, 高级工程师。(xyxyxp@sina.com)

## 1 路面结构组合设计

长寿命沥青路面设计的根本理念是实现路面损坏模式的转变,即从“自下而上”转变为“自上而下”。当沥青混凝土层厚度超过一定值时,施工良好的路面结构不会产生源于沥青层底的疲劳开裂和车辙,在标准轴次超过一定次数后,沥青混凝土层厚度也无须增加。这是因为沥青混凝土层底存在一个极限弯拉应变水平,即疲劳极限,当沥青层厚度使沥青层底的弯拉应变低于材料疲劳极限时,沥青混凝土层内部将不发生疲劳损坏的累积,其疲劳寿命可以认为是无限的(即疲劳作用次数是无限大)。英国 TRRL 对 AC 养生研究表明,道路在使用期间沥青碎石基层弹性劲度随沥青的老化会逐渐增长至原来的 4 倍或者更高,扩散荷载的能力也逐渐提高,从而减小了车辆荷载引起的、导致路面疲劳的基层拉应变,这种变化对长寿命沥青路面的设计有重大意义。长寿命柔性沥青路面的最大特点是路面损坏主要位于面层顶部(25~100 mm),表面裂缝不一定会削弱结构强度,对道路也不造成结构性损坏,这种功能性破坏还可以通过预防性养护得以修复。一旦道路表面损坏达到临界水平,其经济性处理方法就是沥青混凝土罩面或者铣刨加铺,长寿命柔性沥青路面概念见图 1<sup>[2]</sup>。



注:  $\epsilon_1$  为沥青层底拉应变;  $\epsilon_2$  为土基顶面压应变

图 1 长寿命柔性沥青路面概念

Fig. 1 Concept of long-life flexible asphalt pavement

英国 Nunn 等人调查发现,薄沥青层路面更易发生车辙,当沥青混凝土层厚小于 180 mm 时,车辙率较高;当沥青混凝土层厚大于 180 mm 时,车辙发生率出现了突变,比前者小 2 个数量级;当沥青混凝土

土层厚超过 200 mm 时,车辙发生率较小。我国公路超载情况严重,影响深度会大一些。一般来讲,增大沥青混凝土层厚度虽然不能显著减小整个沥青混凝土层的车辙,但会显著减小基层或底基层及土基的永久变形,所以并不是沥青混凝土层越厚路面车辙就越严重。从国内外研究情况来看,能够在路面力学行为和路面使用性能间建立关系的指标是疲劳和车辙,路面疲劳开裂和车辙这两项指标能够反映较长时间内行车荷载及自然因素对路面的影响,并且能有效地反映路面使用性能变化情况<sup>[3]</sup>。通过路面结构组合设计,譬如沥青路面的合理厚度和厚度匹配、沥青路面结构的整体性以及各结构层模量匹配等,来控制沥青路面的疲劳开裂、车辙,防止或延缓沥青路面结构整体性破坏。基于中国沥青路面现行规范标准及近些年道路状况的调查报告,采用力学-经验设计方法完成了高质量沥青路面结构设计,30 cm 厚的长寿命柔性基层路面结构的表现将满足 30 a 的路面结构设计寿命。本工程路面结构及技术参数见表 1<sup>[4]</sup>。

表 1 路面结构及技术参数

Tab. 1 Pavement structure and technical parameters

| 结构层                    | 20 ℃ 抗压<br>模量/MPa | 15 ℃ 抗压<br>模量/MPa | 容许拉<br>应力/MPa |
|------------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| 4 cm 改性 AC-13C/SUP12.5 | 1 400             | 2 000             | 0.32          |
| 6 cm 改性 AC-20C/SUP19   | 1 200             | 1 800             | 0.23          |
| 20 cm 重交 AC-25C/SUP25  | 1 000             | 1 200             | 0.19          |
| 20 cm 级配碎石基层           | 400               | 400               |               |
| 40 cm 级配碎石底基层          | 300               | 300               |               |

注: (1) 本表仅适用于路床细粒土。对于路床粗粒土,级配碎石底基层厚度为 20 cm,其余技术参数不变; (2) 路床强度是 80 MPa

级配碎石基层的力学特性与沥青面层一样均属于柔性结构,模量变异性不大,因此在应力传递的协调过渡方面比较顺利。另外,级配碎石由于空隙大还能起到排水层的作用,减少路面水毁现象。但是,级配碎石显著的非线性特性对整个沥青路面结构受力有明显的影 响,较大的塑性变形是沥青路面产生车辙的因素之一,较低的弹性模量是沥青路面疲劳开裂的关键因素<sup>[5]</sup>。施工中,级配碎石能否成功应用于柔性基层取决于成型后的强度,强度指标最终以弹性模量值和抗永久变形能力来表征。

从路面结构的应力分析可知,级配碎石层的模量和沥青面层的厚度对沥青层底的拉应力有着巨大的影响,减小沥青层底的拉应力可以采取两种途径:

一是增加沥青面层的厚度,二是提高级配碎石的弹性模量。当级配碎石的模量较低( $<400\text{ MPa}$ )时,增加其模量与沥青层厚度同时有效;当级配碎石模量较高时,提高其模量比增加沥青层厚更有效,级配碎石弹性模量与所处的层位有关,变化范围处于 $200\sim550\text{ MPa}$ <sup>[6]</sup>。本工程级配碎石采用了骨架-密实型级配,级配碎石基层设计弯沉值(30 a 交通量数据) $L_s=72(0.01\text{ mm})$ 。完工后的级配碎石基层形貌见图2。



图2 级配碎石基层形貌

Fig. 2 Feature of graded gravel base

## 2 路面材料组成设计

沥青混合料的力学强度是由矿质集料之间的内摩阻力(嵌挤力)和沥青之间的黏结力所构成的,它的特性取决于沥青和集料各自的特性及其组合在一起的特性。根据三层式沥青路面结构的不同功能和要求,有针对性地进行路面材料组成设计,才能保证沥青路面结构层的强度和耐久性<sup>[7]</sup>。本工程路面结构层的使用性能要求如下:表面层,高强度抗车辙、良好的水稳性和抗滑性;中面层,高模量抗车辙,耐久性好;下面层,高柔性抗疲劳,耐久性好;粒料(底)基层,高强度和刚度,良好的承载力。

为了建立沥青混合料力学性质与沥青路面使用性能的直接关系,至少需要按 Superpave 混合料体积设计法设计混合料。该方法从材料体系入手,系统地分析沥青混合料性质,通过沥青混合料配合比设计,从材料组成方面控制和减少了路面高温车辙、低温开裂及疲劳开裂。Superpave 混合料级配曲线通过控制点,避开限制区,级配较传统 AC 型结构相比偏粗,更加侧重于中间集料的用量,混合料组成也更为合理,施工离析现象大大减少,有助于形成良好的骨架结构。另外,Superpave 沥青胶结料性能等级(PGAC)测试更加科学、实用<sup>[8]</sup>。本工程沥青材

料在针入度、延度、软化点3大指标基础上增加了黏度指标,以提供更好的科学、实用性能。

### 2.1 基于抗车辙性能的材料组成

抗车辙性能正成为当前沥青路面设计和评价的关键指标。从长寿命柔性沥青路面结构应力分析可知,剪切应力峰值主要集中在中间层,中间层最有可能出现剪切破坏。同时,表面层受到自然条件和行车荷载的作用最频繁,也是压应力、剪切应力集中的区域。因此,沥青面层上部 $150\text{ mm}$ 区域是承受车轮荷载作用的高应力区,极易产生剪切损坏,实际工程中必须给予足够的重视。

(1) 沥青混合料的高温稳定性不足是沥青混凝土路面产生车辙的最直接内因。在沥青混合料材料组成设计中,通过提高集料质量,改善集料级配、沥青改性及合理的施工工艺等途径从多角度、全方位来保障沥青混合料的技术性质。其中,集料级配和公称最大集料粒径对沥青混合料抗剪强度有显著的影响。Superpave 混合料在生产过程中,要求生产配合比的级配完全切近目标配合比,同时要求拌和厂生产的沥青混合料级配同生产配合比级配的偏差在规定范围内。只有在最佳级配和沥青用量下,Superpave 混合料的剪切强度才能达到最大;

(2) 沥青路面表、中面层须同时具备高温稳定性、低温抗裂性和抗老化性等能力,较高的中间层材料模量有利于路基顶面最大压应变、面层最大剪应力的减小。本工程区属大型季风性气候,夏天炎热,重载交通下沥青路面易产生车辙;冬季干冷,沥青路面温缩裂缝较为普遍。基于此,沥青路面表、中面层使用双层改性沥青,且中面层沥青混合料的高温等级与表面层一致。

根据本工程的材料样本就沥青混合料 AC-13/Sup12.5, AC-20/Sup19 和 AC-25/Sup25(使用 Superpave 旋转压实仪在4%和7%的空隙率下成型圆柱形试件)的抗车辙性能和回弹模量,分别使用了沥青路面分析仪(APA)和诺丁汉沥青试验仪(NAT)进行了试验。沥青路面分析仪车辙试验能模拟实际行车作用下的路面受力状态,通过测定沥青混合料试件在一定高温和浸水条件下的永久变形来评定沥青混合料的高温稳定性,是一种较好的动态模拟试验测试方法<sup>[9]</sup>。就本工程沥青路面的表面层而言,在 Superpave 沥青级配、高温为 $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ (用于汝阳县)的条件下,APA 8 000次车辙变形应小于 $5\text{ mm}$ 。若在极重型卡车荷载和陡坡状况下,APA 车辙变形应减少到小于 $3\text{ mm}$ ;对于中面层和下面层,

其 APA 8 000 次车辙变形（应力和温度较表面层低）应小于 5 mm 和 7 mm。另外，在浸水条件下进行 APA 试验以测试试件的抗剥离性能（水稳定性）。

表 2 为 APA 车辙试验数据一览表，图 3 为不同空隙率下 APA 车辙试验曲线。沥青路面分析仪的试验结果显示，在 58 ℃ 环境下，本工程沥青混合料的抗车辙性能全部满足设计要求，其中以含玄武岩集料 SBSI-D、高摩擦系数的 AC-13/Sup12.5 表面层具有最佳的抗车辙性能；在试件浸水条件下，全部试件都具有良好的抗剥离性能，其中又以加了 1% 消解熟石灰、玄武岩集料 SBSI-D 的 AC-13/Sup12.5 表现最佳。

## 2.2 基于耐疲劳性能的材料组成

道路状况调查报告表明，疲劳破坏是柔性基层（沥青）路面主要的破坏模式之一。长寿命沥青路面结构中，较高的沥青稳定基层模量有利于沥青层底最大拉应变的减小，同时，调整沥青稳定基层厚度

表 2 APA 车辙试验数据一览表

Tab. 2 APA rutting test data list

| 沥青混合料类型<br>(描述包括沥青胶<br>结料和集料来源)               | 空隙<br>率/% | 沥青胶<br>结料/% | 车辙变形/mm |              |       |
|-----------------------------------------------|-----------|-------------|---------|--------------|-------|
|                                               |           |             | 58 ℃    | 58 ℃<br>(水中) | 64 ℃  |
| AC-13/SUP12.5 玄武岩<br>集料/SBSI-D/消解熟石<br>灰(西鑫山) | 4.0       | 5.5         | 0.830   | 1.670        | 1.150 |
| AC-20/SUP19 石灰岩集<br>料/SBSI-D(云梦山)             | 4.0       | 4.0         | 1.470   | 2.349        | 2.450 |
| AC-25/SUP25 石灰岩集<br>料/70A(云梦山)                | 4.0       | 4.0         | 3.239   | 4.134        | 4.834 |
| AC-13/SUP12.5 玄武岩<br>集料/SBSI-D/消解熟石<br>灰(西鑫山) | 7.0       | 5.5         | 1.728   | 2.661        | 2.660 |
| AC-20/SUP19 石灰岩集<br>料/SBSI-D(云梦山)             | 7.0       | 4.0         | 2.734   | 3.559        | 4.161 |
| AC-25/SUP25 石灰岩集<br>料/70A(云梦山)                | 7.0       | 4.0         | 5.643   | 6.846        | 7.429 |

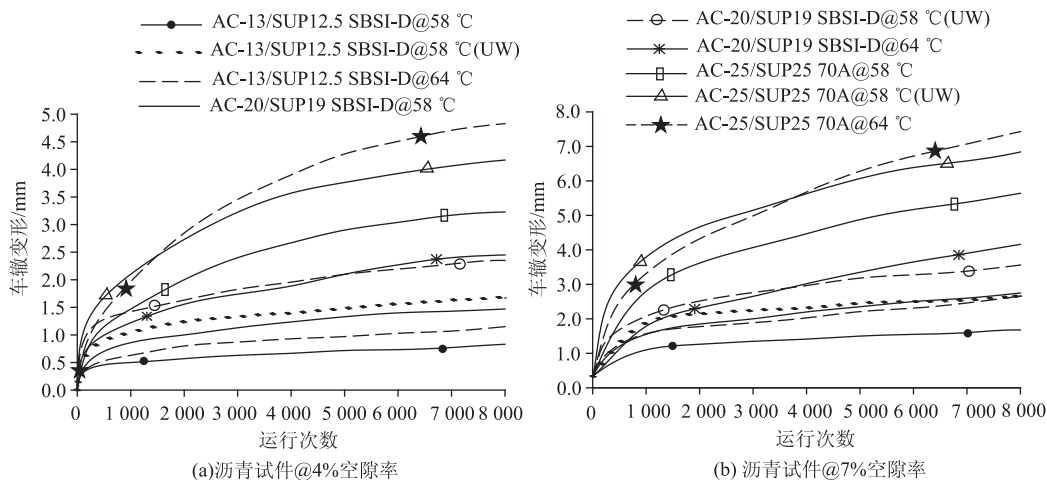


图 3 不同空隙率下 APA 车辙试验曲线

Fig. 3 Curves of APA rutting test in different porosities

对满足路基顶面压应变也是最为经济有效的。国外工程中，增强沥青层特别是沥青稳定基层的模量和沥青稳定基层的厚度是提高沥青路面使用寿命常用的两种方法<sup>[10]</sup>。由于耐疲劳性能直接影响沥青路面的使用年限，所以耐久性为沥青混合料材料组成设计中的关键性能指标。我国现行规范采用空隙率、饱和度及残留稳定度等指标来表征沥青混合料的耐久性。

(1) 沥青混合料的疲劳性能主要受空隙率大小的影响，大的空隙率会促使沥青老化，加速路面的疲劳破坏。沥青稳定基层应尽可能地减小空隙率，

降低沥青层底拉应变所产生的疲劳破坏，抗阻裂缝“自下而上”产生。为此，选用 Superpave 混合料体积设计法进行配合比设计呼应了长寿命柔性沥青路面概念。

AC-25 沥青混合料属于悬浮密实结构，虽然其疲劳性能较嵌挤型结构好得多，但是实际施工中较易产生离析，部分沥青混合料的空隙率难免会大于 7%。因此，本工程沥青路面下面层的空隙率控制在 3%~5% 是至关重要的；

(2) 沥青含量的多少是影响沥青混合料疲劳性能的一个重要因素。对于沥青稳定基层，沥青含量



的增加有利于改善沥青混合料的柔性、抵抗更高的弯拉应变,若再加之适宜的厚度,就能有效地增强路面结构耐疲劳开裂的能力。相反,较低的沥青含量导致沥青混合料疲劳寿命对荷载大小更为敏感,也增大了沥青混合料的空隙率,造成水损害等。另外,沥青稳定基层极易受水影响,高含量的沥青混合料可以抵抗湿度影响;

(3) 对于长寿命沥青路面,压实情况好的沥青混合料层能显著提高劲度模量,减少沥青混合料的脆性,从而在给定拉应变水平下可以增加沥青混合料的疲劳寿命。为了获得高劲度的沥青混合料,本工程采用密实级配和高黏沥青。

图4为诺丁汉沥青试验仪就沥青混合料回弹模量( $M_r$ )进行的试验结果,本试验结果落在典型 $M_r$ 值的高标范围内,回弹模量测试结果良好。图5为诺丁汉沥青试验仪就下面层沥青混合料AC-25/Sup25的抗疲劳特性进行的试验结果。同时,图5还涵盖其他典型沥青混合料的抗疲劳特性曲线,其中

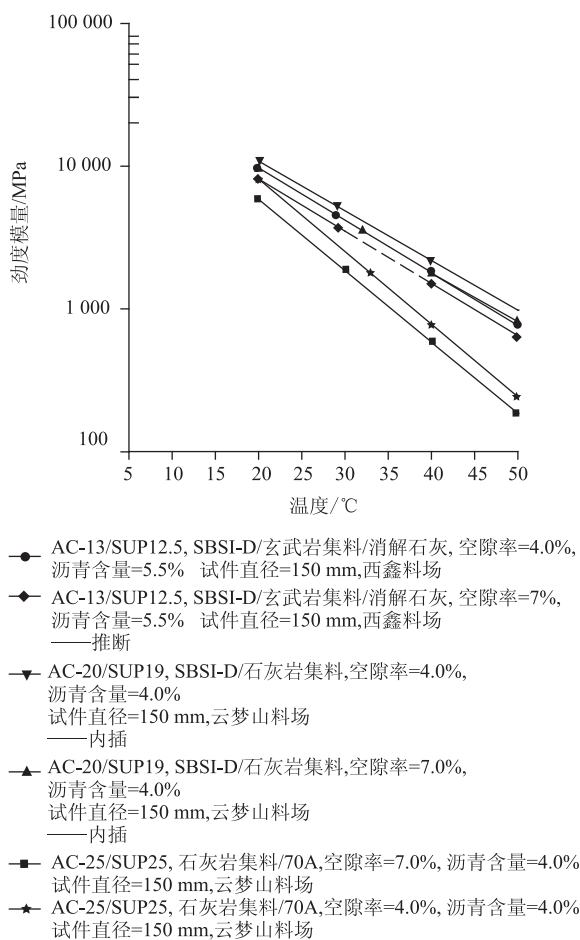


图4 NAT回弹模量试验

Fig. 4 NAT resilient modulus test

4.3% 沥青胶结料和5.0% 空隙率的沥青混合料AC-25/Sup25(粗实线)代表出现临界横向应力的下面层沥青混合料。本试验的耐疲劳性能与所用长寿命柔性沥青路面结构设计和分析软件得到的模拟结果相类似<sup>[3]</sup>。另外,工程实践经验显示高质量沥青混合料的现场耐疲劳性能大约高于实验室测验结果的100倍。

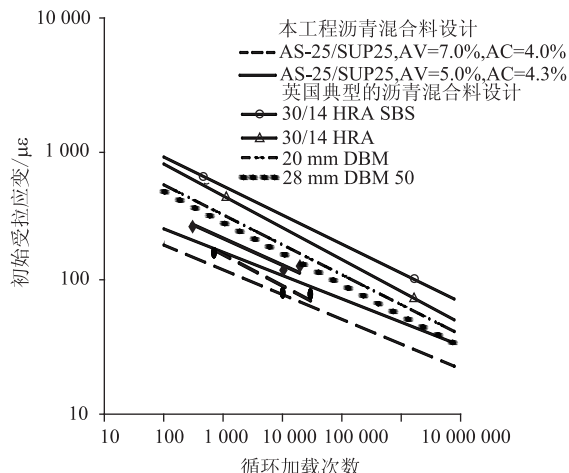


图5 NAT疲劳寿命试验

Fig. 5 NAT fatigue life test

### 3 路面层间处治技术

沥青路面结构层界面力学特性关系到道路路面整体结构的耐久性。柔性基层路面结构的破坏,主要是由于沥青面层的抗剪强度不足及层间存在的大量剪切应力所致。为了保证沥青路面多层组合体系的整体性和应力传递的连续性,施工中应该加强路面层间处治技术的控制。

层间界面状态对沥青混凝土抗疲劳层层底的拉应变影响最大,当路面层间界面状态由完全连续的接触状态转变为光滑半连续状态后,沥青稳定基层层底的拉应变会有较大幅度的增加。《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中,透层油要求“喷洒后通过钻孔或挖掘确认透层油渗透入基层的深度宜不小于5(无机结合料稳定集料基层)~10 mm(无结合料基层),并能与基层黏结成为一体”<sup>[11]</sup>。本工程基、面层间透层使用煤油稀释液体沥青,分两次喷洒,每次洒布量为 $1.0 \text{ L/m}^2$ ,第2次喷洒时间为第1次喷洒后煤油含量蒸发完毕。煤油用量越大,渗透效果越好;

道路沥青路面层间喷洒黏层油已作为强制性条款被列入《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)。科学、合理地喷洒黏层油有利于提高

层间抗剪切性能、沥青路面的高温稳定性和耐久性能,以及减轻污染、浸水、冻融等环境因素对层间界面产生的不利影响。有关试验研究表明,对于沥青层间常温下若不洒布黏层油,路面层间仅相当具有60%左右的黏性,而洒布黏层油后将使层间黏结提高约为12%~21%<sup>[12]</sup>。为了增大界面黏结强度,力求使沥青层之间达到或接近完全连续状态,本工程黏层沥青选用PC-3阳离子乳化沥青;

对于沥青层与水泥混凝土板间常温下层间洒布黏层油后相当于具有68%~78%的黏性,但是此种结构基、面层的模量比较大,沥青层底应力水平绝大多数处于受压状态,即使当层间处于滑动时,沥青层底出现的拉应力水平也较小,远远没有达到材料的容许拉应力值(即疲劳强度),因此这不具备疲劳破坏的条件,此结构的主要矛盾是高温下的层间剪切滑移<sup>[12]</sup>。实际工程中,基层的表面粗糙程度对

路面基、面层间的抗剪强度影响很大,粗糙表面层的结合力甚至比黏层油效果还好。对此,本工程桥面铺装水泥混凝土表面进行了裸化处治,严格控制对凿毛的分布密度、深度,以增加路面层间的嵌锁作用。

#### 4 全寿命周期成本分析

二连浩特—广州高速公路洛阳段位于河南省汝阳县境内,全长27.202 km,于2008年11月26日建成通车。2008年4月,该路面工程开始施工。

全寿命周期成本(LCCA)包括建造成本、维护成本、重建成本、残值成本和使用成本(譬如沥青面层换新时交通延误费用)。就具有30 a设计寿命的柔性(沥青)路面、刚性(混凝土)路面和复合式(沥青/混凝土)路面进行了全寿命周期成本分析,其建造成本组成部分见图6。

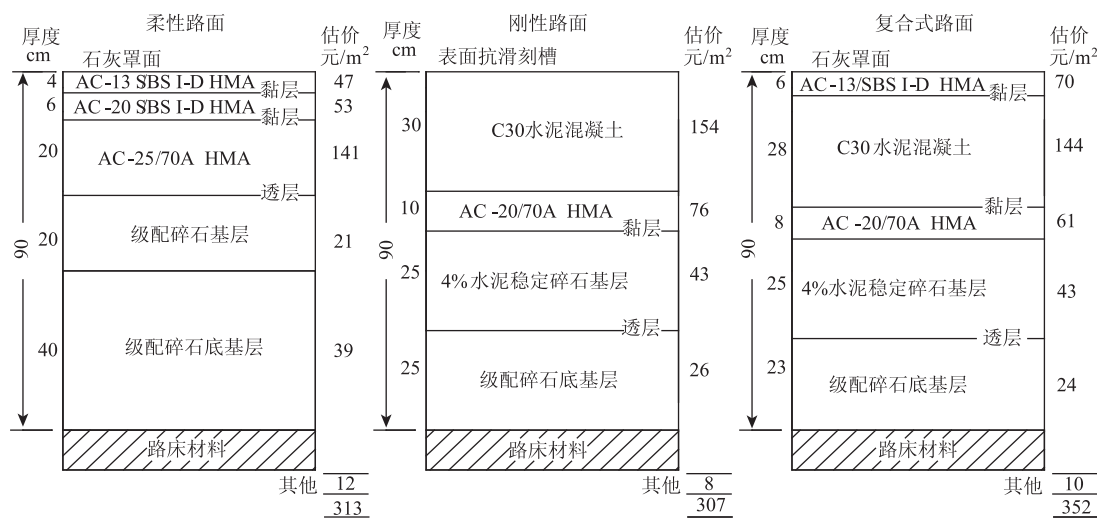


图6 三种长寿命路面的建造成本

Fig. 6 Construction costs of 3 kinds of long-life pavement

服务寿命周期(一般为10 a)内,柔性路面和复合式路面需要将面层沥青混凝土“换新”(假定为4 cm HMA,当时估价¥31元/m²),刚性路面需要水泥混凝土面板的局部修缮、硬刻槽恢复抗滑构造,更换填缝材料等(当时估价¥29元/m²)。以上费用按10 a贴现后,在全寿命周期成本中折算为约20元/m²。按以上基础,全寿命周期成本是:柔性路面为333元/m²;刚性路面为¥327元/m²;复合式路面为¥372元/m²。

全寿命周期成本分析比较表明:柔性路面的成本比复合式路面低约10.5%,与刚性路面相当(前者大约高1.8%)。可是,刚性路面还需要额外的大量费用(与柔性路面相比)进行桥涵引道/搭板处等

端部处理。如果实施了系统的预防性维护和面层换新后,现实中有结构服务寿命大于50 a的沥青混凝土路面,也称为永久路面。囿于我国当前大交通量和重载交通的需求,长寿命柔性沥青路面结构更加合理、经济,可行。多年来的跟踪性能观测结果表明:该工程沥青混凝土路面表面粗糙、密实,没有明显的裂缝、车辙等病害,具有良好的路面均匀性及路面服务功能。其综合效果有待于实体工程的进一步深入跟踪完善。

#### 5 结论

(1) 基于路面长期使用性能的需求,本文系统的论述、分析了长寿命柔性基层路面抗车辙性能和

耐疲劳性能的结构、材料设计,以沥青层底拉应变及路基顶面压应变来控制沥青混凝土路面的疲劳寿命,增强路面结构的稳定性和耐久性。

(2) 层间界面力学特性对沥青路面结构层应力、应变有着很大的影响。加强层间处治技术、改善层间界面状态,对提高沥青混凝土路面的使用性能十分重要。

(3) 当前,我国在长寿命柔性沥青路面领域还处于相对落后的状态,在分析、探讨适合我国交通特性的长寿命柔性沥青路面结构的力学模型、设计指标及材料参数等方面还几乎空白,在考虑层间界面的动态性能与路面疲劳寿命的影响方面还需要进一步的试验和理论研究。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范 [S].  
JTG D50—2006, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [2] MARTIN J S, HARVEY J T, LONG F, et al. Long-life Rehabilitation Design and Construction: I-710 Freeway, Long Beach, California [R]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2001: 50—65.
- [3] 武建民, 伍石生. 沥青路面长期使用性能指标 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24 (3): 17—20.  
WU Jian-min, WU Shi-sheng. Criteria of Long Term Performance of Asphalt Pavement. [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24 (3): 17—20.
- [4] 约翰 埃默里. 二连浩特—广州高速公路洛阳段 (中国境内) 长寿命柔性沥青路面结构设计报告, JEGEL2008—48A [R]. 多伦多: 加拿大杰格工程咨询公司, 2008.  
JOHN E. Report on Design of Perpetual Flexible Asphalt Pavement Structure of Luoyang Section of Erenhot - Guangzhou Expressway (China), JEGEL2008 - 48A [R]. Toronto: Canada Jaeger Engineering Consulting Firm, 2008.
- [5] 崔鹏, 邵敏华, 王国英, 等. 长寿命沥青路面结构组合探讨 [J]. 中南公路工程, 2007, 32 (3): 6—10.  
CUI Peng, SHAO Min-hua, WANG Guo-ying, et al. Research on Perpetual Pavements Structural Combination [J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2007, 32 (3): 6—10.
- [6] 王龙, 解晓光, 冯德成. 级配碎石材料强度及塑性变形特性 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39 (6): 944—947.  
WANG Long, XIE Xiao-guang, FENG De-cheng. Characteristics of the Modulus and Distortion of the Graded Aggregate Material [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39 (6): 944—947.
- [7] 彭勇, 孙立军, 石永久, 等. 沥青混合料抗剪强度的影响因素 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37 (2): 330—333.  
PENG Yong, SUN Li-jun, SHI Yong-jiu, et al. Influence Factors of Shear Resistance of Asphalt Mixture [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37 (2): 330—333.
- [8] JTJ 052—2000, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S].  
JTJ052—2000, Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S].
- [9] AASHTO TP63-03, Standard Method of Test for Determining Rutting Susceptibility of Asphalt Paving Mixtures Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA) [S].
- [10] 朱洪洲, 何兆益, 黄晓明, 等. 沥青稳定基层混合料疲劳性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (4): 7—11.  
ZHU Hong-zhou, HE Zhao-yi, HUANG Xiao-ming, et al. Experimental Research on Fatigue Performance of Asphalt-treated Base Mixtures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (4): 7—11.
- [11] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S].  
JTGF40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements [S].
- [12] 冯德成, 宋宇. 沥青路面层间结合状态试验与评价方法研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39 (4): 627—631.  
FENG De-cheng, SONG Yu. Study of Test and Evaluation Method on Interfacial Combining State of Asphalt Pavement [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39 (4): 627—631.