

基于法国路面设计方法的全厚式沥青路面 结构性能分析

郭立成¹, 徐希忠², 曾国东³, 韦金城², 李浩³, 闫翔鹏²

(1. 佛山市路桥建设有限公司, 广东 佛山 528300; 2. 山东省交通科学研究院; 3. 佛山市交通科技有限公司)

摘要: 为了进一步分析全厚式沥青路面结构性能, 基于法国路面设计方法, 以力学响应指标表征结构力学性能, 以相同条件下服役寿命、开裂风险描述疲劳性能, 对比全厚式普通、全厚式高模量沥青路面结构性能。结果表明: 荷载作用下, 两种路面结构弯沉、剪应力及拉应变响应主要集中在荷载作用区域, 具有较强的荷载集中效应; 随着基层厚度的增加, 两种路面结构服役寿命均增加, 开裂风险均减小, 但全厚式高模量路面在服役寿命方面相对于开裂风险方面的改善具有较强的优势。

关键词: 全厚式沥青路面; 法国标准; 结构性能; 服役寿命; 开裂风险

在近 40 年公路建设中, 中国在半刚性基层沥青路面设计与应用中积累了丰富的实践经验, 半刚性基层路面技术处于世界领先水平, “强基、薄面、稳土基”的设计思想至今仍对中国沥青路面设计有着深远影响。但半刚性基层材料具有温缩、干缩等固有特性, 在交通荷载、区域环境等因素耦合作用下, 极易发生基层疲劳开裂、唧浆、冲刷等病害, 使得道路服役性能急剧下降, 使用寿命急剧降低, 路面维修、改建频繁, 造成资金浪费, 交通拥堵等经济损失和社会不良影响。考虑到半刚性基层沥青路面的诸多问题, 中国道路工作者逐渐探索寻求不同类型的路面基层材料, 使得路面结构形式朝多元化方向发展。陈尚江对倒装式基层沥青路面进行了力学行为特性的研究; 曹明明依托陇遂广高速试验路分析了刚柔复合式基层沥青路面的结构特征; 王选仓进行了 PCC+AC 路面结构的设计研究; 并在蔚许高速进行了现场实施; 赵丽华对全透水沥青路面进行了设计研究, 并铺筑了试验路。全厚式沥青路面在欧美得到了实践检验, 表现出较强的结构优越性, 中国也对全厚式沥青路面有了一定的研究, 铺筑了一些试验路, 但由于缺乏实用的工具, 使得全厚式沥青路面结构性能分析缺乏系统性。

目前国际上沥青路面设计方法以美国 ASSHTO 设计方法、澳大利亚设计方法、法国典型结构法及中国多指标设计方法为代表, 其中, 法国沥青路面设计方法在整个欧洲处于领先地位, 其设计参数获取、路面结构

组合、路基等级划分等具有独到之处, 其材料模型参数可直接应用于路面结构设计, 实现了结构与材料一体化设计, 中国对于其设计方法有了较为深入的探讨, 但较少用于沥青路面结构性能分析, 对于全厚式沥青路面性能分析更是少之又少。

该文采用法国沥青路面设计方法, 对全厚式沥青路面结构性能进行分析。在介绍法国沥青路面设计方法基础上, 在法国沥青路面设计软件中, 输入山东省高速公路全厚式沥青路面交通、气候及结构参数, 对其力学响应进行分析, 选定若干影响因素, 以疲劳寿命、开裂风险为评价指标, 探讨各因素对评价指标的影响, 提出提升全厚式沥青路面结构性能的建议, 可为进一步促进全厚式沥青路面在中国应用提供参考。

1 法国沥青路面设计方法简介

1.1 基本理论

法国沥青路面设计以典型结构法为主要特征, 其结构验算的基本理论依据仍是弹性层状体系, 在允许值计算时考虑了现场调整系数、可靠度及结构开裂风险等, 是一种较为合理的设计方法, 其材料模型参数可直接应用于路面结构设计, 实现了材料设计与结构设计的有机统一, 并可以在施工质量控制中得到验证, 从材料设计到施工控制形成了一个完整的体系。与其他路面设计方法相比, 应用法国方法进行全厚式沥青

路面结构性能分析,可提升路面结构性能分析的准确性及合理性。

1.2 设计参数

1.2.1 标准轴载

法国路面结构设计采用双圆荷载模式,以 130 kN 为标准轴载,具体见表 1。

表 1 法国沥青路面设计轴载

标准轴载/ kN	轮胎接地 压强/MPa	当量圆半径/ cm	两轮中心 间距/cm
130	0.662	25	37.5

1.2.2 材料参数

(1) 土基

根据法国沥青路面设计指南,法国土基模量主要通过承载板测试,按照模量的不同分为如表 2 所示的 4 个等级。

表 2 法国路基等级划分

路基等级	模量/MPa	路基等级	模量/MPa
PF1	20	PF3	120
PF2	50	PF4	200

(2) 沥青类材料

① 沥青混合料模量

在法国标准中,沥青混合料模量为采用两点弯曲梯形梁试验获取的复数模量,取值条件为 15 °C, 10 Hz,根据中国沥青混合料动态模量取值条件,用于中国路面结构分析时取 20 °C, 10 Hz 条件下的复数模量值,具体试验原理见图 1。

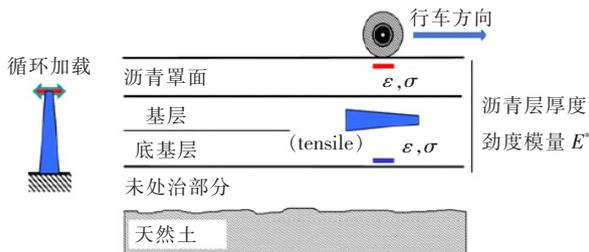


图 1 梯形两点弯曲试验原理

② 沥青混合料疲劳

沥青混合料疲劳主要获取 100 万次疲劳破坏应变 ϵ_6 ,具体方法为每种混合料切制 18 根梁,一般一个应变水平做 6 根,将 3 个应变水平下的疲劳寿命在双对数曲线上回归拟合,得出疲劳曲线的斜率、100 万次疲劳破坏应变 ϵ_6 、回归方程的残差 S_N ,回归方程示例见图 2。

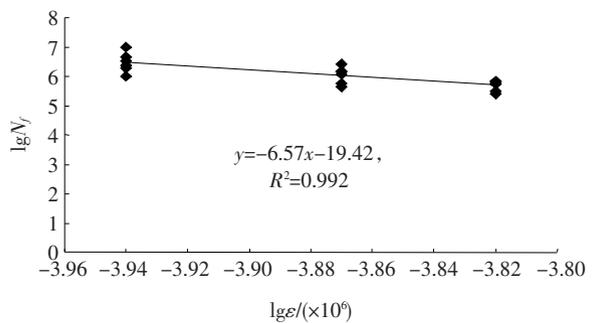


图 2 疲劳曲线构建示意

1.3 设计指标

法国沥青路面设计按照不同的基层类型具有不同的设计指标体系,对于全厚式沥青路面,其设计指标为沥青混合料层底的计算弯拉应变 ϵ_t ,应小于容许弯拉应变 ϵ_{tadm} ;路基顶部计算压应变 ϵ_c ,应小于等于容许压应变 ϵ_{zadm} 。

1.4 设计软件

法国当前应用最为广泛的路面结构设计程序是 LCPC Alize,采用 Fortran 语言编制完成,当前最新版本为 Alize1.5,最大层数可以计算 15 层。运用 LCPC Alize 执行路面结构设计主要分为 4 步:① 结构确定及材料参数录入;② 交通参数录入及允许值计算;③ 采用弹性层状体系执行计算值运算;④ 计算值、允许值比较及结构调整。

LCPC Alize 要求输入参数有交通参数,路面结构层材料、厚度、模量、泊松比及层间结合状态等,其输入结果包括应力、应变和弯沉等。

2 路面结构及材料参数

2.1 路面结构

该文在参考山东省现有全厚式沥青路面结构基础上,选择如图 3 所示典型全厚式沥青路面进行结构性能分析。

2.2 材料参数

根据上述材料参数测定方法,对上述材料进行参数确定,具体结果如表 3 所示。

3 全厚式沥青路面力学响应分析

如前所述,法国路面设计体系具有其独到之处,因此可应用其对全厚式沥青路面进行力学响应分析,以充分发挥其独到优势,同时丰富中国路面结构分析手段。

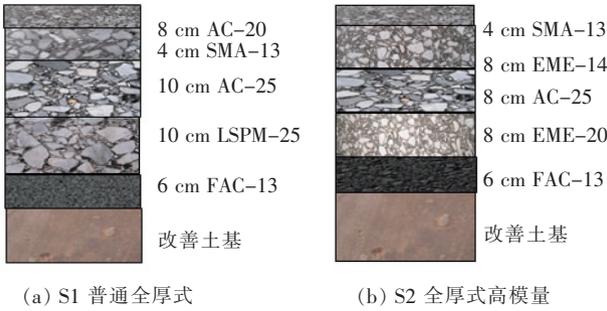


图 3 典型全厚式结构

表 3 结构层材料参数

材料类型	$E(20\text{ }^\circ\text{C};$	$\epsilon_6(10\text{ }^\circ\text{C};$	$-1/b$	s_h	k_c
	$10\text{ Hz})/\text{MPa}$	$25\text{ Hz})$			
SMA-13	7 400	100	5	可变的	1.1
AC-20	7 700	90	5	可变的	1.3
AC-25	7 300	80	5	可变的	1.3
EME-14	13 000	142	5	可变的	1.0
LSPM-25	8 000	80	5	可变的	1.3
EME-20	13 500	140	5	可变的	1.0
FAC-13	6 800	110	5	可变的	1.1
土基	120	—	—	—	—

注： $E(20\text{ }^\circ\text{C};10\text{ Hz})\text{MPa}$ 为沥青混合料在 $(20\text{ }^\circ\text{C};10\text{ Hz})$ 条件下两点弯曲复数模量； $\epsilon_6(10\text{ }^\circ\text{C};25\text{ Hz})$ 为沥青混合料百万次疲劳破坏应变 $(\mu\epsilon)$ ； b 为沥青混合料疲劳曲线的斜率， $(-1 < b < 0)$ ； s_h (m)为沥青路面结构层厚度的离散状态； s_h 与结构层厚度的关系如下： $h < 10\text{ cm}$ 时， $s_h = 1.0\text{ cm}$ ， $10\text{ cm} < h < 15\text{ cm}$ 时， $s_h = 1 + 0.3 \times (h - 10)$ ， $h > 0.1515\text{ cm}$ 时， $s_h = 2.5\text{ cm}$ 。

3.1 路表弯沉

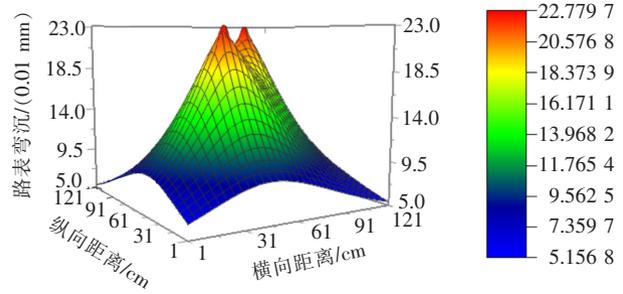
中国现行 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》虽然取消了弯沉设计指标，但弯沉作为路面结构整体强度评定具有较强的合理性，因而对全厚式沥青路面弯沉响应对比十分必要。以路表弯沉为基本指标，分析不同全厚式沥青路面的力学特性的差异，计算结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出：单轴双轮组荷载作用引起的路表弯沉响应，集中于荷载作用处，且弯沉三维分布呈现出类似马鞍形状，距离荷载位置越近，路表弯沉响应值越大，总体来说，两种全厚式沥青路面弯沉盆形态差别不大，但全厚式普通沥青路面弯沉响应水平高于全厚式高模量沥青路面。

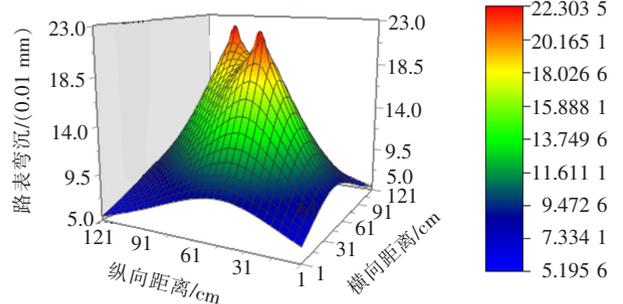
3.2 结构内部剪应力

大量研究表明：沥青路面剪切应力分布与路面流动性车辙、压密性车辙、推移及拥包等病害有关，为进

一步分析全厚式沥青路面内部抗剪强度，该文计算了荷载作用下两种全厚式路面结构的剪应力，将沿深度方向最大剪应力所处位置剪应力三维分布绘于图 5。

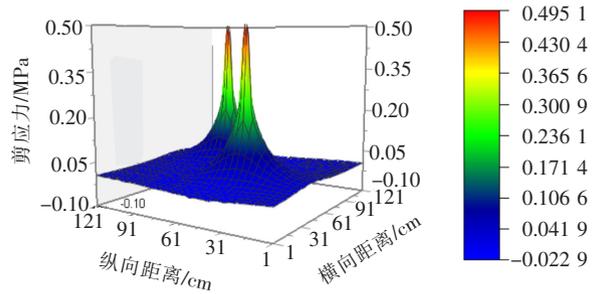


(a) S1 普通全厚式

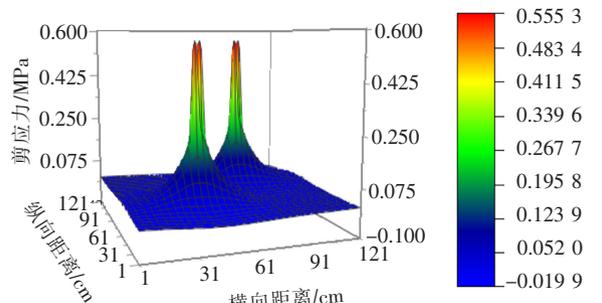


(b) S2 全厚式高模量

图 4 不同结构路表弯沉响应三维分布图



(a) S1 普通全厚式



(b) S2 全厚式高模量

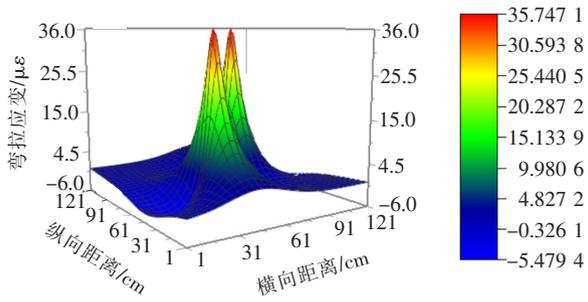
图 5 剪应力三维分布图

由图 5 可知：结构层剪应力主要集中分布于荷载作用区域，且随着横向、纵向距离的增加急剧减小，具有较强的荷载集中效应，且剪应力峰值并不出现于荷

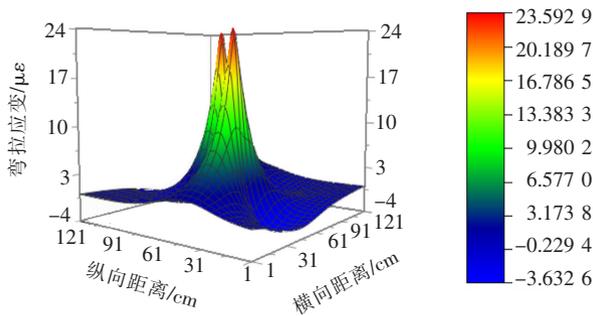
载中心位置,而是位于荷载边缘位置处,从剪应力峰值看,全厚式高模量要大于全厚式普通,这是由于全厚式高模量下面层设置了高模量沥青混凝土的原因。

3.3 沥青层层底弯拉应变

沥青层层底弯拉应变响应是控制路面结构疲劳破坏的重要力学指标,因此,对于沥青层层底弯拉应变分析非常必要,两种全厚式路面结构的沥青层层底弯拉应变响应空间分布见图6。



(a) S1 普通全厚式



(b) S2 全厚式高模量

图6 沥青层层底弯拉应变三维分布图

由图6可以看出:两种结构的弯拉应变响应主要位于荷载作用区,具有典型的双峰分布形式,对于纵、横向远离荷载中心位置的区域,其应变响应幅度明显降低,总体来说,全厚式高模量路面较全厚式普通路面应变响应减小了 $51.5 \mu\epsilon$,说明高模量沥青混凝土层的添加,有助于改善沥青层层底弯拉应变状态。

4 路面结构性能预测

在法国路面设计程序中,可以依据应变响应反演路面结构疲劳寿命及在固定服役期内路面开裂风险(以百分率表征),该文选定两种路面结构,选择相同的面层厚度 12 cm ,不同的基层厚度($22, 24, 26, 28 \text{ cm}$),分析在相同条件下的服役寿命和开裂风险。

4.1 不同结构服役寿命

拟定日平均交通量为 $10\,000 \text{ pcu/d}$,交通量增长率为 4% ,两种全厚式路面结构在不同基层厚度下服役寿命反演结果见图7。

由图7可以看出:随着基层厚度的增加,两种全厚式路面结构寿命均呈现出递增的趋势,全厚式高模量沥青路面服役寿命总是高于全厚式普通沥青路面,基层厚度的增加,使得全厚式高模量路面的服役寿命优势更加明显。

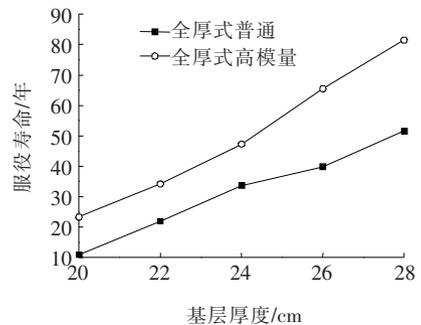


图7 不同基层厚度下两种路面结构疲劳寿命反演结果

4.2 不同结构开裂风险

拟定日平均交通量为 $15\,000 \text{ pcu/d}$,交通量增长率为 6% ,设计年限为 20 年不同基层厚度下两种全厚式沥青路面在服役期内开裂风险见图8。

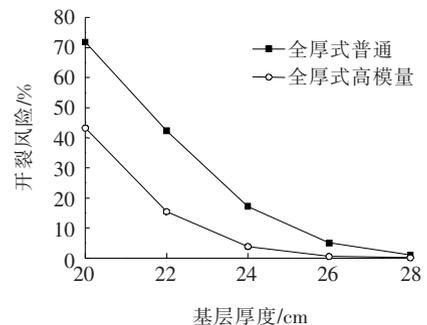


图8 两种结构不同基层厚度开裂风险

由图8可以看出:在相同设计条件下,随着基层厚度的增大,两种路面结构开裂风险均降低,全厚式高模量沥青路面开裂风险总是低于全厚式普通路面,但随着基层厚度的增加,全厚式高模量路面抗开裂优势逐渐减小,因此,考虑降低开裂风险,增加基层厚度是不科学的。

5 结论

(1) 荷载作用下,路面结构弯沉、剪应力及拉应变

响应主要集中在荷载作用区域,具有较强的荷载集中效应。

(2) 除剪应力以外,全厚式高模量路面力学响应指标均小于全厚式普通路面,说明结构采用高模量层,显著改善了结构性能。

(3) 随着基层厚度的增加,两种路面结构服役寿命均增加,开裂风险均减小,但全厚式高模量路面在服役寿命改善方面相对于开裂风险的改善方面具有较强的优势。

参考文献:

- [1] 沙庆林. 长寿命半刚性基层沥青路面设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 姚祖康. 沥青路面结构设计[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
- [3] 吕松涛,郑健龙,黄拓,等. 耐久性沥青路面设计方法——基于结构层寿命递增的设计理念[M]. 北京:科学出版社,2019.
- [4] 陈尚江,张肖宁. 倒装式基层沥青路面结构力学行为分析[J]. 建筑材料学报,2014(4).
- [5] 曹明明. 刚柔复合式基层沥青路面结构特征与荷载响应分析[J]. 西南交通大学博士学位论文,2018.
- [6] 王选仓,侯荣国. 长寿命路面结构设计[J]. 交通运输工程学报,2007(6).
- [7] 赵丽华,杨志浩,许斌,等. 基于透水性能的全透水沥青路面结构设计[J]. 中外公路,2019(4).
- [8] JTG D50—2017 公路沥青路面结构设计规范[S].
- [9] 余四新,徐飞萍,刘甲荣. 基于新版沥青路面设计规范的路面结构设计分析[J]. 中外公路,2019(5).
- [10] 蒋鑫,冯文青,吴朝阳,等. 沥青路面结构力学分析四款典型专业软件评析[J]. 中外公路,2019(4).
- [11] 刘军勇,李刚,张留俊,等. 基于法国标准的沥青路面材料的应用[J]. 公路工程,2010(5).
- [12] 马玉洲,田庆辉,刘剑,等. 基于法国车辙试验的沥青混凝土配合比设计探讨[J]. 交通世界,2011(7).
- [13] 秦禄生. 法国半刚性基层沥青路面结构设计方法[C]. 第三届全国公路科技创新高层论坛论文集,2006.
- [14] 蔡燕霞,金生斌,侯芸. 基于正交试验的沥青路面倒装结构力学响应研究[J]. 中外公路,2020(1).
- [15] 刘锋,李刚,丁小军. 法国规范体系下全厚式沥青混凝土路面结构设计方法[J]. 公路,2008(9).
- [16] 雷宇,李刚. 柔性基层沥青路面各层模量变化对沥青路面设计指标的影响[J]. 中外公路,2008(3).
- [17] 蒋松利,丁淑巍. 基于法国标准的复合式基层沥青路面结构设计案例分析[J]. 中外公路,2018(5).
- [18] 李刚,王崇涛,丁小军,等. 基于法国规范的土方、垫层和路面综合设计方法[J]. 中外公路,2009(4).
- [19] 边昶辉. 基于法国规范的沥青混凝土路面设计方法[J]. 中外公路,2010(1).
- [20] LCPC. French Design Manual for Pavement Structure, English Edition Draft[S],2020.
- [21] User's Manual. Alize—LCPC Routes[Z]. Version 1. 5 LCPC,2016.
- [22] 薛爱新,王洁光,王海军,等. 高速公路沥青路面裂缝发展对路面结构性能的影响研究[J]. 中外公路,2019(3).

投稿须知

1. 征稿范围:国内外公路概况;国外公路考察见闻;公路路线设计;路基路面工程;桥梁与隧道工程;材料试验与应用;交通工程与管理;公路景观与环保等。

2. 稿件要求:① 请提供 word 文档。文稿以 6 000 字左右为佳;② 投稿网址:<http://zwgl.csust.edu.cn/zwgl/home>,本刊审稿周期 1~2 个月。3 个月未收到通知,作者可另行处理。请勿一稿多投,否则后果自负;③ 题目应简洁明晰,字数不能多于 20 个中文字;④ 作者单位必须注明邮政编码。第一作者须注明出生年、性别、学历、职称、研究方向、电子信箱和联系电话;⑤ 摘要、关键词。摘要请务必按“研究目的、方法、结果、结论”四要素撰写。关键词:3~8 个;⑥ 基金项目必须写明基金项目名称和编号;⑦ 图表。图表要与文中相对应,(示例:***如表 1 所示)。图表要有图名和表名。除照片外,其余图均需提供 excel 或 origin 或 cad 源文件。表格采用三线表。所有图、表中的字体为小 5 号或 6 号;⑧ 文后必须要有参考文献。参考文献参考格式如下:[1]期刊:作者姓名(列三位,等(姓在前,名在后)). 文章题目[J]. 刊名,出版年份,卷(期):页码;[2]专著:作者姓名(列三位,等). 专著名称[M]. 版本(第一版不标注). 出版地:出版单位,出版年:页码;[3]论文集:作者姓名(列三位,等). 题名[C]. 论文集名,出版年:页码;[4]学位论文:作者姓名. 题名[D]. 单位[硕士(博士)学位论文],年份:页码;[5]专利:专利申请者姓名(列三位,等). 题名:国别,专利号[P]. 公告日期或公开日期[引用日期];[6]技术标准:标准代号 标准名称[S].