

# 基于高模量沥青混合料的全厚式沥青路面结构优化设计研究

张新<sup>1</sup>, 张晓萌<sup>2</sup>, 姚望<sup>1</sup>, 章清涛<sup>1</sup>, 韦金城<sup>2</sup>, 孙兆云<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东高速股份有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东省交通科学研究院, 山东 济南

Email: 791433632@qq.com

收稿日期: 2021年1月19日; 录用日期: 2021年2月17日; 发布日期: 2021年2月25日

## 摘要

通过采用高模量沥青混合料, 对全厚式沥青路面结构进行了优化设计, 根据不同路面材料参数, 分别计算分析了3种全厚式沥青路面结构沥青层底拉应变与路基顶面压应变, 得到了不同全厚式沥青路面结构层的厚度。结果显示, 方案1中高模量沥青混合料层底的允许拉应变为 $72.0 \times 10^{-6}$ , 路基顶面允许的压应变为 $230.5 \times 10^{-6}$ , 可以满足结构所需的最小结构层厚度为9 cm; 方案2中高模量沥青混合料层底的允许拉应变为 $70.5 \times 10^{-6}$ , 路基顶面允许的压应变为 $230.5 \times 10^{-6}$ , 可以满足结构所需的最小厚度为26 cm, 为了便于施工可以将其分成8 cm、9 cm和9 cm。优化设计的全厚式沥青路面相比原方案有效降低了沥青层厚度, 在满足相同荷载作用条件下, 对全厚式沥青路面结构进行了降低成本优化, 减小了路面结构因过度冗余设计所导致的资源浪费。

## 关键词

全厚式沥青路面, 高模量, 路面结构, 厚度

## Structural Optimization Design of Full Thickness Asphalt Pavement Based on High Modulus Asphalt Mixture

Xin Zhang<sup>1</sup>, Xiaomeng Zhang<sup>2</sup>, Wang Yao<sup>1</sup>, Qingtao Zhang<sup>1</sup>, Jincheng Wei<sup>2</sup>, Zhaoyun Sun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shandong Hi-Speed Company Limited, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong

Email: 791433632@qq.com

Received: Jan. 19<sup>th</sup>, 2021; accepted: Feb. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Feb. 25<sup>th</sup>, 2021

文章引用: 张新, 张晓萌, 姚望, 章清涛, 韦金城, 孙兆云. 基于高模量沥青混合料的全厚式沥青路面结构优化设计研究[J]. 材料科学, 2021, 11(2): 105-110. DOI: 10.12677/ms.2021.112014

## Abstract

Using high modulus asphalt mixture, the structure of full thickness asphalt pavement is optimized. According to different pavement material parameters, the tensile strain at the bottom of asphalt layer and the compressive strain at the top of subgrade of three kinds of full thickness asphalt pavement structures are calculated and analyzed respectively, and the thickness of different full thickness asphalt pavement structure layer is obtained. The results show that in Scheme 1, the allowable tensile strain at the bottom of the high-modulus asphalt mixture layer is  $72.0 \times 10^{-6}$ , and the allowable compressive strain at the top of the subgrade is  $230.5 \times 10^{-6}$ , which can meet the requirements of the minimum structural layer thickness of 9 cm. In Scheme 2, the allowable tensile strain at the bottom of the medium-high modulus asphalt mixture layer is  $70.5 \times 10^{-6}$ , and the allowable compressive strain at the top of the subgrade is  $230.5 \times 10^{-6}$ . The minimum thickness required by the structure is 26 cm, which can be divided into 8 cm, 9 cm and 9 cm for the convenience of construction. Compared with the original scheme, the optimized full-thickness asphalt pavement can effectively reduce the thickness of the asphalt layer. Under the same load conditions, the full-thickness asphalt pavement structure is optimized to reduce the cost and reduce the resource waste caused by excessive redundancy design.

## Keywords

Full Depth Asphalt Pavement, High Modulus, Pavement Structure, Thickness

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国高速公路沥青路面结构总厚度通常在 70 cm 以上, 随着我国对环保工作的重视, 高能耗、高污染及破坏环境的砂石料开采加工被大量限制, 导致公路建设用砂石料资源严重缺乏, 不仅严重影响公路建设进度, 同时也极大增加了路面工程造价。全厚式沥青路面是指沥青混合料直接铺筑在土基上的一种特殊路面结构, 与传统沥青路面结构相比, 路面总体厚度可较传统减薄 30 cm 以上, 节约资源的潜力巨大。

全厚式沥青路面, 在美国、德国、法国、澳大利亚以及加拿大一些州等国成为高速公路的主要结构类型之一, 在重、中交通上得到大量应用。尤其是美国的永久性路面设计方法及 MEPDG 设计方法、欧洲的“绿色公路”技术体系《长寿命柔性路面设计指南》和法国的沥青路面设计规范等都对全厚式沥青路面结构设计提出了相应的要求[1] [2] [3]。而在我国, 全厚式沥青路面结构仍然处于探索阶段。王林等在滨州至大高永久性路面试验路中采用了总长 3 公里的 3 种全厚式沥青路面结构, 试验段经过运营 15 年, 3 种全厚式沥青路面结构均表现出良好的服役性能, 验证了该路面结构的可靠性与可行性[4] [5] [6]。

本文针对我国传统沥青路面结构厚度大, 资源消耗大的问题, 结合全厚式沥青路面的结构特点, 基于高模量沥青混合料, 提出两种重载交通条件下高速公路全厚式沥青路面结构, 对该结构进行了力学计算分析与优化, 确定了路面结构层层厚。研究成果对降低公路建设资源消耗、提高道路使用性能、降低工程造价等具有显著的经济和社会效益。

## 2. 路面结构设计方案

原设计的全厚式沥青路面结构与优化计算的设计方案见图 1。其中,原设计方案上面层为最大粒径 13.2 mm 的沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA-13),中下面层分别为最大粒径 20 mm 的高模量沥青混合料(EME-20),柔性基层为最大粒径 25 mm 的大粒径透水性沥青混合料(LSPM-25),路基上部设置最大粒径 13.2 mm 的密级配沥青混合料(AC-13F)作为抗疲劳层。而优化设计的路面结构方案 1 和方案 2 与原设计方案有较大的不同,方案 1 采用了高模量沥青混合料(EME-20)置于柔性基层下部,使 EME-20 主要起到抗疲劳的作用;方案 2 则进一步简化了材料类型除表面层外全部采用了 EME-20。方案 1 和方案 2 都需要计算确定 EME-20 沥青层的厚度。

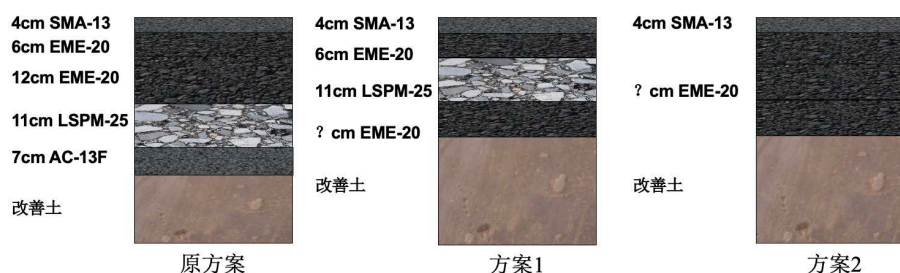


Figure 1. Design of full depth asphalt pavement

图 1. 全厚式沥青路面结构初步设计

## 3. 分析方法与参数

对于全厚式沥青路面结构的设计计算与分析,采用国际上较为成熟的法国路面结构设计软件 ALIZE 以及法国路面结构设计规范(NF P98-086)。在 ALIZE 中变换轴载为我国 100 kN 标准轴载(表 1),设计年限为 20 年,路网类型为高速公路,等效温度 21.8℃,路基强度采用法国标准 PF3 等级(80 MPa)。分析计算时,采用的路面材料参数见表 2。

全厚式路面结构厚度设计分析的主要控制指标为:沥青层底的水平拉应变和路基顶面的竖向压应变,同时还要满足沥青层疲劳次数的要求。

Table 1. Standard axle load

表 1. 标准轴载

参数	位置示意图
当量圆半径 R (m)	0.1065
轮胎接地压强(MPa)	0.7016
车轮重量(kN)	25
两轮中心距 d (m)	0.3195

Table 2. Pavement materials parameters

表 2. 路面材料参数

参数	SMA-13	EME-20	LSPM-25	AC-13F
复合模量 E (15℃, 10 Hz)	7500 MPa	11,000 MPa	8000 MPa	7500 MPa
复合模量 E (22℃, 10 Hz)	4470 MPa	6656 MPa	4768 MPa	4470 MPa
破坏应变( $\times 10^{-6}$ )		130	75	105

### 4. 计算与分析

首先，采用我国的标准轴载计算全厚式沥青路面结构原方案的力学状态，其中沥青层底拉应变(即 AC-13F 层底)为  $52.1 \times 10^{-6}$ 、路基顶面压应变为  $151.8 \times 10^{-6}$ 。此时，原方案计算出的沥青层底拉应变小鱼 AC-13F 材料允许拉应变  $105 \times 10^{-6}$ ，满足要求。然后，为了准确获取原方案路面结构所能承受的交通量，需要根据 AC-13F 的抗疲劳次数与计算得出的沥青层底拉应变反算交通量。计算可以得到，设计年限内累计当量轴次 NE 为 68,527,000 轴次，日交通量为 4708 辆重车/每天/车道。根据法国规范分类，其交通等级为 TS+。最终，后续优化设计的全厚式沥青路面结构均采用该交通量进行计算分析。

进一步优化设计全厚式沥青路面方案 1 和方案 2 中 EME-20 沥青层的厚度。按照反算得到的交通量参数和方案 1、方案 2 中设计的 SMA-13、LSPM-25 等结构层厚分别计算各方案中 EME-20 层厚度。

对于方案 1，预设 EME-20 层的厚度，通过结构层厚度敏感性分析，计算得到沥青层底弯拉应变与 EME 层厚度的对应关系见图 2。此时，计算得出沥青层底层 EME-20 的允许拉应变为  $72.0 \times 10^{-6}$ ，路基顶面允许的压应变为  $230.5 \times 10^{-6}$ 。根据图中可以得到，由于沥青层底弯拉应变要小于允许值  $72.0 \times 10^{-6}$ 。因此绿色部分为沥青层最底层 EME-20 层可以满足结构所需的厚度，其中最小结构层厚度为 9 cm。对沥青层底 EME-20 厚度为 9 cm 的方案 1 进行力学验算，验算结果见表 3，可以得到所有计算值均小于允许值。全厚式沥青路面方案 1 中位于沥青层底的 EME-20 最小厚度可以采用 9 cm。

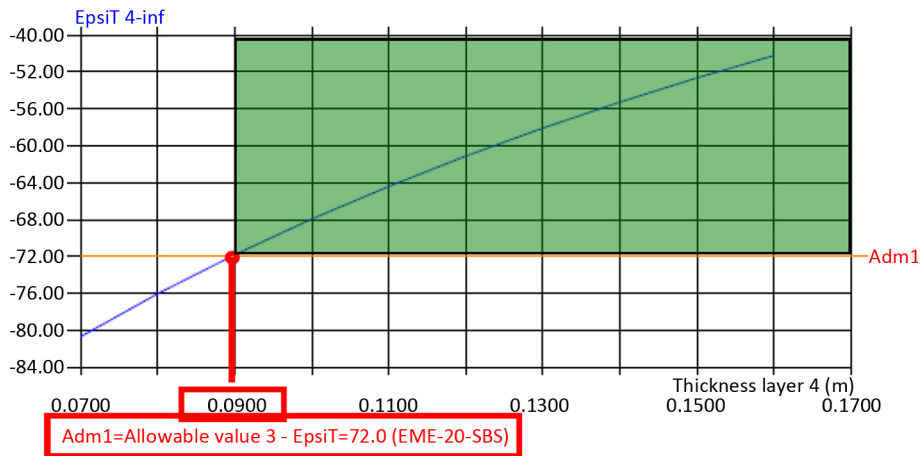


Figure 2. Relationship of tensile strain at the bottom of asphalt layer between EME depth in scheme 1

图 2. 方案 1 沥青层底弯拉应变与 EME 层厚度的对应关系

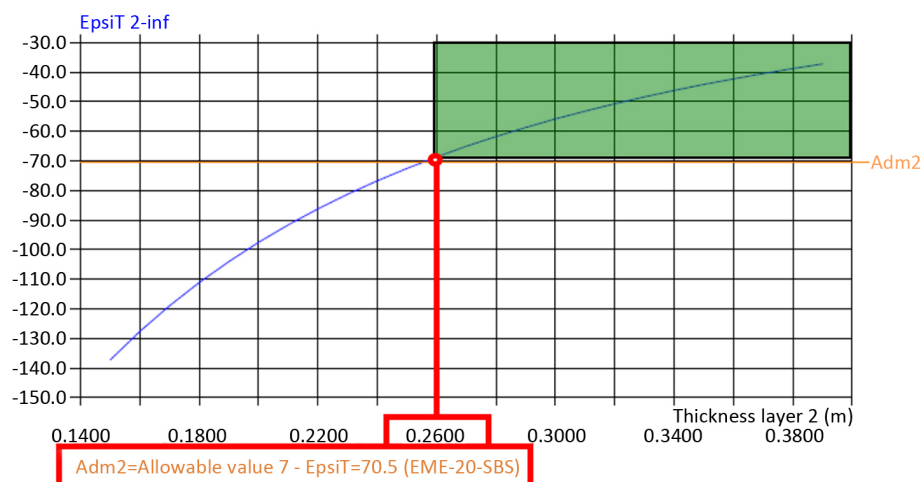
Table 3. Comparison of allowable value and calculated value of pavement structure

表 3. 路面结构允许值与计算值对比

验算指标	计算值	允许值
沥青层底弯拉应变	$71.8 \times 10^{-6}$	$72.0 \times 10^{-6}$
路基的层顶压应变	$222.0 \times 10^{-6}$	$230.5 \times 10^{-6}$

对于方案 2，通过结构层厚度敏感性分析，计算满足应变要求下的结构层厚度，得到的沥青层底弯拉应变与 EME 层厚度的对应关系见图 3。计算得出 EME-20 层底的允许拉应变为  $70.5 \times 10^{-6}$ ，路基顶面允许的压应变为  $230.5 \times 10^{-6}$ 。根据图中结果可以得到，由于沥青层底弯拉应变要小于允许值  $70.5 \times 10^{-6}$ 。因此绿色部分为 EME-20 层可以满足结构所需的厚度，其中最小厚度为 26 cm。以该最小厚度对方案 2

设计出的全厚式沥青路面结构进行力学验算，验算结果见表 4，所有计算值均小于允许值。全厚式沥青路面方案 2 中位于沥青上面层以下的 EME-20 层总体最小厚度可以采用 26 cm，为了便于施工可以将其分成 8cm、9 cm 和 9 cm。



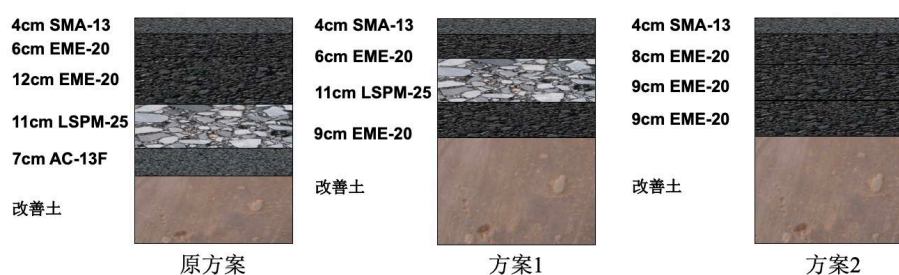
**Figure 3.** Relationship of tensile strain at the bottom of asphalt layer between EME depth in scheme 2

**图 3.** 方案 2 沥青层底弯拉应变与 EME 层厚度的对应关系

**Table 4.** Comparison of allowable value and calculated value of pavement structure

**表 4.** 路面结构允许值与计算值对比

验算指标	计算值	允许值
沥青层底弯拉应变	$68.7 \times 10^{-6}$	$70.5 \times 10^{-6}$
路基的层顶压应变	$212.7 \times 10^{-6}$	$230.5 \times 10^{-6}$



**Figure 4.** Final design of full depth asphalt pavement

**图 4.** 全厚式沥青路面结构最终设计

由图 4 可知，通过对全厚式沥青路面结构材料、层位以及厚度等因素的优化，新的方案相比原设计方案可以有效降低沥青层厚度，由原 40 cm 减小至 30 cm。其中，方案 2 只采用了两种混合料类型就满足了交通荷载的要求，再减薄沥青层厚度的同时还简化了施工工艺。而方案 1 则将 EME-20 用于抵抗层底拉应变和疲劳荷载的作用，其效果与原 AC-13F 的性能相当。方案 1 和方案 2 均在满足相同荷载作用条件下，对全厚式沥青路面结构进行了降低成本优化，减小了路面结构因过度冗余设计所导致的资源浪费。

## 5. 结论

- 1) 方案 1 中沥青层底层 EME-20 的允许拉应变为  $72.0 \times 10^{-6}$ ，路基顶面允许的压应变为  $230.5 \times 10^{-6}$ 。

沥青层最底层 EME-20 层可以满足结构所需的最小结构层厚度为 9 cm。

2) 方案 2 中 EME-20 层底的允许拉应变为  $70.5 \times 10^{-6}$ , 路基顶面允许的压应变为  $230.5 \times 10^{-6}$ 。EME-20 层可以满足结构所需的最小厚度为 26 cm。全厚式沥青路面方案 2 中位于沥青上面层以下的 EME-20 层总体最小厚度可以采用 26 cm, 为了便于施工可以将其分成 8 cm、9 cm 和 9 cm。

3) 新的全厚式沥青路面设计方案相比原方案有效降低了沥青层厚度, 在满足相同荷载作用条件下, 对全厚式沥青路面结构进行了降低成本优化, 减小了路面结构因过度冗余设计所导致的资源浪费。

## 参考文献

- [1] 王林, 韦金城, 张晓萌, 等. “四个一体化”破解长寿命沥青路面技术瓶颈[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3238-3245.
- [2] 李伊, 刘黎萍, 孙立军. 全厚式沥青路面温度场预估模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 377-382.
- [3] 王林, 王晓燕. 山东在长寿命路面技术方面的探索[J]. 中国公路, 2020(14): 33-35.
- [4] 王旭东. 足尺路面试验环道路面结构与材料设计[J]. 公路交通科技, 2017, 34(6): 30-37.
- [5] 李涛, 刘宁, 张涛. 全厚式高模量沥青混凝土路面结构设计及力学分析[J]. 公路, 2013(4): 90-94.
- [6] 沈孔健. 全厚式长寿命沥青路面轴载换算方法研究[J]. 石油沥青, 2012, 26(1): 29-31.