

# 冷再生沥青路面车辙变形与疲劳寿命分析

李 凯<sup>1</sup>, 肖护兵<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>安徽亳阜高速公路有限公司, 安徽 亳州

<sup>2</sup>江苏聚登建设工程有限公司, 江苏 镇江

收稿日期: 2023年6月3日; 录用日期: 2023年6月23日; 发布日期: 2023年6月30日

## 摘 要

基于冷再生沥青路面结构当前研究存在的不足, 本文拟开展冷再生沥青路面车辙变形和疲劳寿命研究。本文采用ABAQUS有限元数值仿真建立了三种路面结构模型, 获取了沥青面层及其他结构层的材料参数, 并基于现场试验数据验证了模型的正确性, 确定了沥青路面永久变形等效温度场, 以更好地计算冷再生沥青路面车辙变形量。此外, 对比分析了乳化沥青和泡沫沥青冷再生路面结构的力学响应和疲劳寿命预估, 并基于分析结果给出了相应的工程建议。

## 关键词

冷再生, 有限元分析, 车辙变形, 疲劳寿命

# Rutting Deformation and Fatigue Life Analysis of Cold Recycled Asphalt Pavement

Kai Li<sup>1</sup>, Hubing Xiao<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Anhui Bofu Expressway Co., Ltd., Bozhou Anhui

<sup>2</sup>Jiangsu Judeng Construction Engineering Co., Ltd., Zhenjiang Jiangsu

Received: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2023; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Based on the shortcomings of current research on cold recycled asphalt pavement structure, this paper intends to carry out research on rut deformation and fatigue life of cold recycled asphalt pavement. In this paper, three kinds of pavement structure models are established by ABAQUS finite element numerical simulation, and the material parameters of asphalt surface layer and other structural layers are obtained. Based on the field test data, the correctness of the model is verified,

\*通讯作者。

and the equivalent temperature field of permanent deformation of asphalt pavement is determined to better calculate the rutting deformation of cold recycled asphalt pavement. In addition, the mechanical response and fatigue life prediction of emulsified asphalt and foamed asphalt cold recycled pavement structure are compared and analyzed, and corresponding engineering suggestions are given based on the analysis results.

## Keywords

Cold Recycling, Finite Element Analysis, Rut Deformation, Fatigue Life

Copyright © 2023 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

沥青路面再生是指将沥青混合料回收料铣刨筛分后添加一定量的新集料、矿粉、水泥以及沥青等材料经一系列施工工艺得到的路面结构层, 其中冷再生技术由于施工简便、节约能源而被广泛的应用[1]。沥青路面冷再生主要有乳化沥青冷再生与泡沫沥青冷再生两种方式, 这两种技术中无论是结合料还是集料均是常温拌和, 节约了大量的能源[2]。乳化冷再生沥青混凝土是将旧沥青路面铣刨后运至拌和厂, 通过破碎、筛分, 根据旧料中沥青含量、沥青老化程度、集料级配等指标, 掺入一定数量的新集料、乳化沥青、水泥、水等, 经特种拌和设备进行常温拌和, 由摊铺机按一定工艺常温铺筑, 形成路面面层结构层的一种再生技术[3] [4]。泡沫沥青冷再生是在利用沥青发泡技术把旧沥青路面回收料、部分新集料、水泥矿粉等集料粘结成整体, 并压实成型[5]。冷再生技术适应我国半刚性、刚性基层沥青路面大中修、改扩建路面重修。我国越来越注重生态文明建设和持续发展, 道路工程的建设必将更加注重旧料的循环利用[6] [7]。

我国沥青冷再生技术起步较晚, 尚缺乏系统研究成果, 不论从施工设备研发、配合比设计方法还是性能评价、关键技术、质量控制标准、跟踪研究等方面都存在不足[8]。对再生技术的研究还需要全面和系统性的提高完善, 现有冷再生混合料设计方法和再生路面结构设计方法不能准确地揭示冷再生路面工作环境, 故有必要对冷再生沥青路面的路面性能进行研究[9] [10]。

本文基于 ABAQUS 有限元软件建立沥青路面冷再生结构力学响应模型, 对不同再生路面结构的服务性能、力学性能、结构强度性能及材料性能进行分析评价, 结合试验路沥青路面冷再生结构层厚度、设计模量、泊松比、路面弯沉值、结构层应力应变等对模型的参数进行修正, 并通过数值模拟的方法提出试验路路面结构的结构性能衰减规律和衰减模型。

## 2. 有限元数值仿真建模及参数标定

**Table 1.** Structural forms of cold recycled asphalt pavement

**表 1.** 冷再生沥青路面结构形式

结构方案	具体结构
结构一	4 cm SMA-13 + 6 cm AC-20 + 8 cm ATB-25 + 16 cm 泡沫沥青冷再生 + 未铣刨旧路
结构二	4 cm SMA-13 + 8 cm AC-25 + 16 cm LSPM-20 + 6 cm AC-20 + 未铣刨旧路
结构三	4 cm SMA-13 + 6 cm AC-20 + 8 cm ATB-25 + 16 cm 乳化沥青冷再生 + 未铣刨旧路

为了后续分析沥青路面冷再生结构的长期性能演化规律, 本文采用了如表 1 所示的三种路面结构形式和相应的材料组成, 建立 ABAQUS 中建立有限元仿真模型(如图 1 所示)。

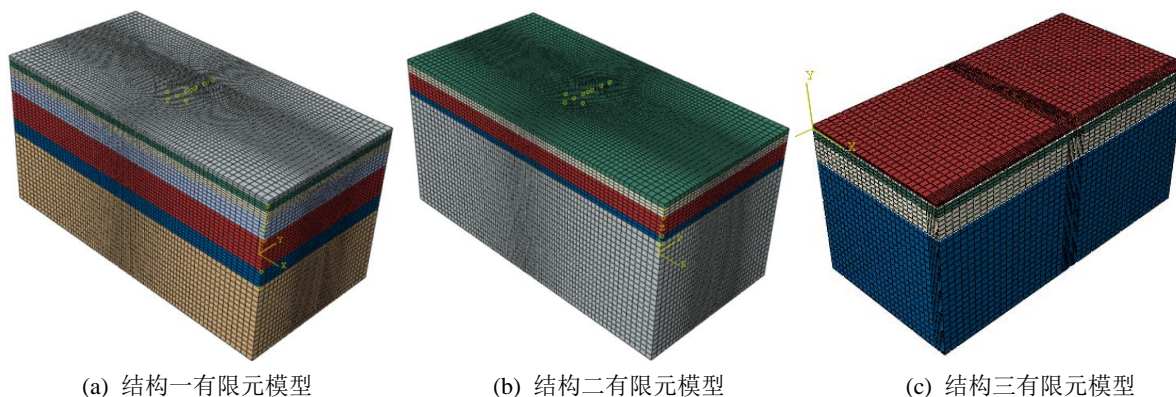


Figure 1. Finite element numerical simulation model

图 1. 有限元数值仿真模型

## 2.1. 沥青混合料设计参数研究

沥青混合料作为一种温度敏感性材料, 其主要结构设计参数 - 动态回弹模量与泊松比受到温度的影响极大。本文对当前路面结构中较常使用的不同沥青胶结料上面层材料 AC-13、中面层材料 AC-20、沥青碎石基层材料 ATB-25 的动态模量进行测试。动态模量试验参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011)试验规程, 试验温度采用 0℃, 20℃和 40℃三个温度。在试验开展前放置保温箱内至少 4 h, 以使试件达到试验温度。试验结果取 10 Hz 下的动态模量值, 结果如图 2~4 所示。

由以上对比可知, 三种沥青混合料的动态模量测试结果更为接近规范动态模量推荐范围的下限。对于相同胶结料类型, AC-20 动态模量略高于 AC-13 的动态模量, ATB-25 由于设计参数为 5 Hz, 其动态模量最低。对于相同的级配, 低标号沥青能够提供最高的动态模量, 高标号沥青 + 高模量剂/抗车辙剂的配方同样能够显著提高动态模量。SBS 改性沥青动态模量相对较低, 但高于 70#基质沥青。

AC-13 10Hz动态模量试验结果

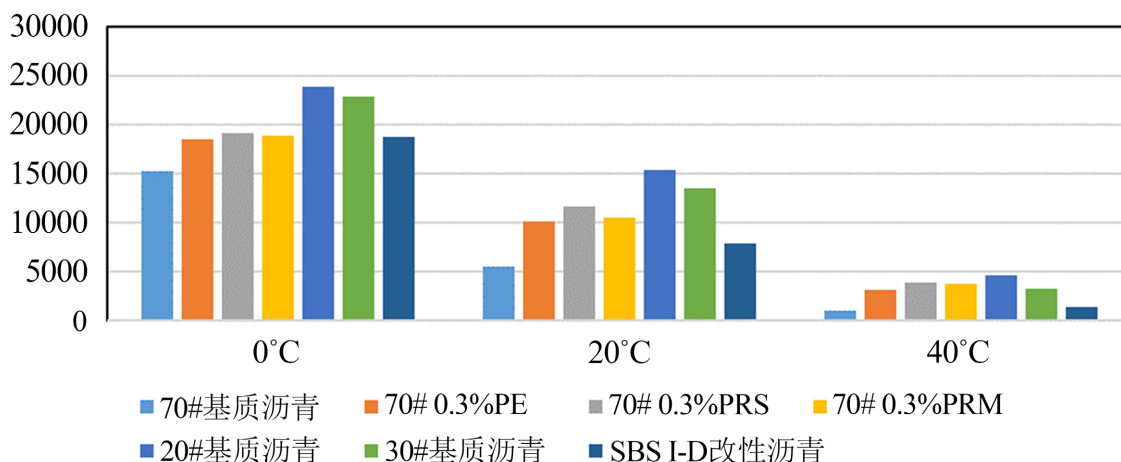


Figure 2. Dynamic modulus of AC-13 at different temperatures and 10 Hz

图 2. 不同温度 AC-13 10 Hz 动态模量

AC-20 10Hz动态模量试验结果

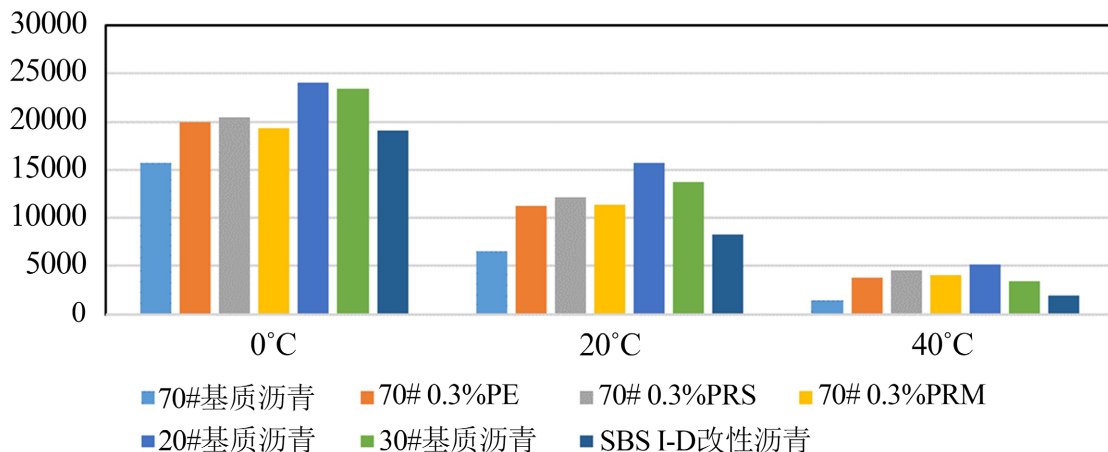


Figure 3. Dynamic modulus of AC-20 at different temperatures and 10 Hz

图 3. 不同温度 AC-20 10 Hz 动态模量

ATB-25 5Hz动态模量试验结果

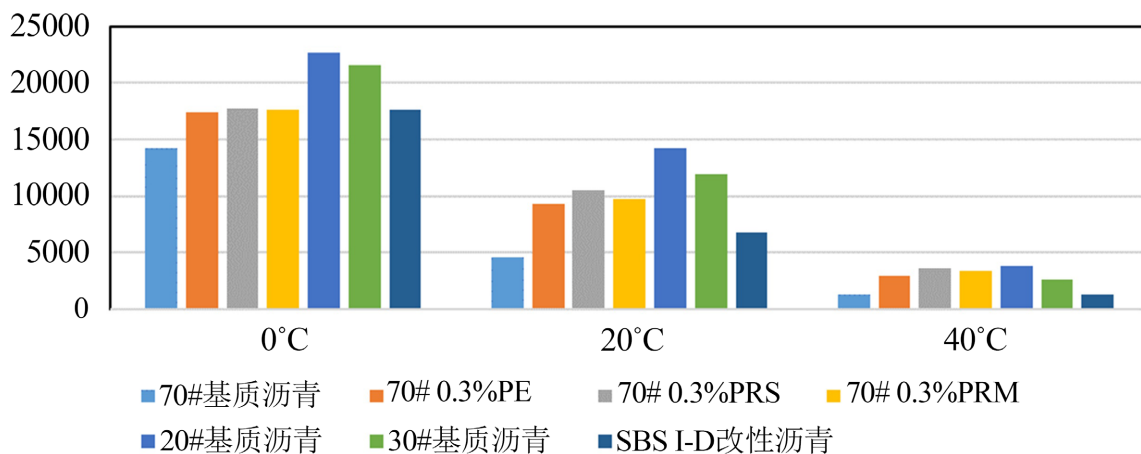


Figure 4. Dynamic modulus of AC-25 at different temperatures and 5 Hz

图 4. 不同温度 ATB-25 5 Hz 动态模量

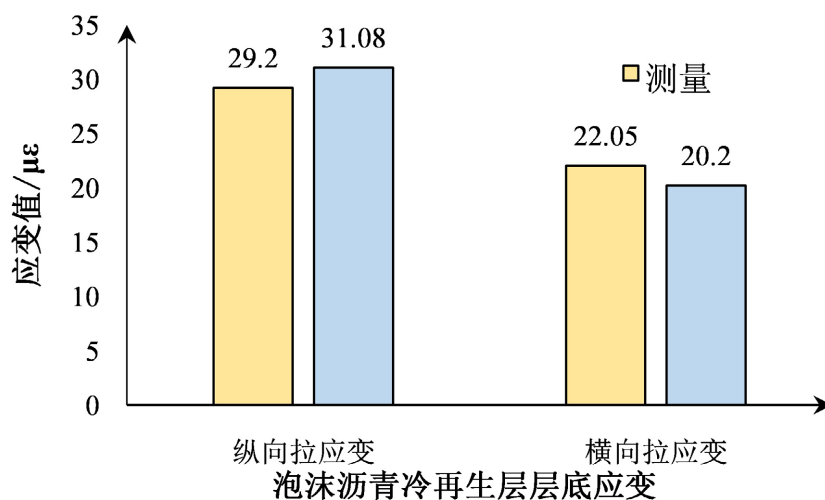
## 2.2. 冷再生层及旧路结构参数拟合

旧路的路基模量的取值依照现场反算的模量数据, 本文取 45 MPa 作为路基模量的代表值。考虑到温度对于路面材料(沥青混合料、冷再生混合料)等的影响, 参照应变采集当日结构温度场数据, 对面层材料的温度进行修正, 而后进行仿真计算, 得到冷再生层、旧路基层的模量数据如表 2 所示。在该模量下, 有限元仿真计算的应变响应与试验段获得的应变响应对比如图 5 和图 6 所示。

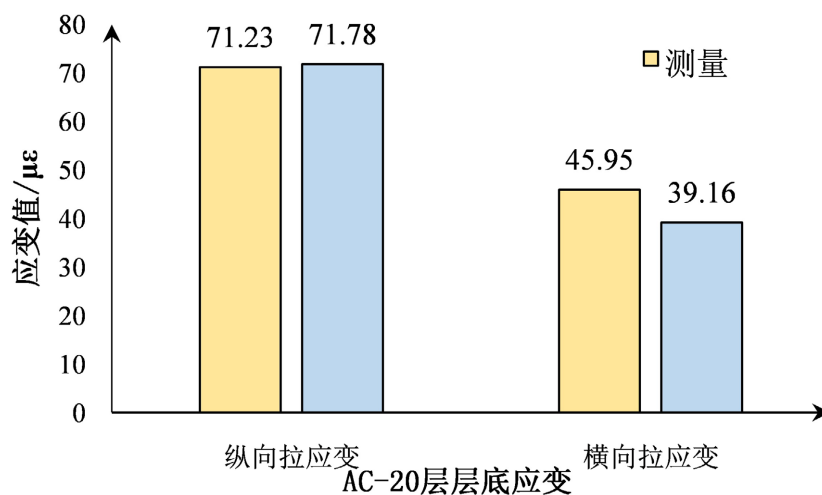
从表 2 及图 5, 图 6 的结果中可以看出, 由于测量时沥青层的温度高于规范设计状态下的温度, 因此沥青混合料的模量普遍偏低。即使对同一种材料(如 AC-20 混合料), 在不同结构的不同层位下, 由于荷载作用频率不同, 导致其模量也有所区别。从计算结果来看, 旧路基层的模量普遍偏低, 承载能力较差, 与现场反算得到的模量水平较为接近。而结构一的泡沫沥青混合料的模量取值与室内动态模量试验的数据较为一致。因此, 可以认为对于沥青路面冷再生结构, 冷再生层的结构设计参数(动态模量、泊松比)可以选取为试验测量值。

**Table 2.** Fitting results of experimental section parameters  
**表 2.** 试验段参数拟合结果

结构一		结构二	
层位	模量/MPa	层位	模量/MPa
SMA-13	7500	SMA-13	7500
AC-20	9000	AC-25	7800
ATB-25	6500	LSPM-30	4500
泡沫沥青混合料	2700	AC-20	8000
旧路基层	1600	路基	45
旧路底基层	1000		
路基	45		



**Figure 5.** Comparison of finite element simulation and measurement results of section one  
**图 5.** 结构一有限元仿真结果与试验段测量结果对比



**Figure 6.** Comparison of finite element simulation and measurement results of section two  
**图 6.** 结构二有限元仿真结果与试验段测量结果对比

### 2.3. 沥青路面永久变形等效温度场确定

考虑到实际路面情况下交通作用具有明显的时间区间分布, 即白昼时段的车辆作用较为集中, 夜晚时段的行车数量较少。并且, 不同温度场下的行车荷载对于车辙水平的影响程度有明显的区别。因此, 需要基于现场的温度场数据, 对数值仿真模型中的参数进行修正。在试验段记录的温度传感器数据的基础上, 使用 ABAQUS 有限元程序先对每个月中逐日温度场下的结构层参数进行修正; 在此基础上, 选择在相同交通荷载水平下产生相近车辙量的温度场作为当月的代表温度场, 进而得到 12 种代表温度场; 最后, 根据换算的当量轴载累积作用次数以及假定的交通运行速度, 将多次轴载作用等效为具有标准轴载的作用时间, 从而可以进行逐月的车辙量预估。

对比结构一、结构二的温度场数据, 并按照以上方法进行计算, 得到等效温度场如表 3 所示。

Table 3. Monthly representative temperature field of asphalt layer

表 3. 沥青层逐月代表温度场

深度/m	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
0	8.8	10.9	24.5	27.3	32.5	38.0	42.5	45.4	38.0	28.5	17.0	9.9
-0.02	5.6	8.7	20.4	21.0	27.6	32.2	38.8	41.4	32.2	26.3	14.0	7.2
-0.08	1.9	5.2	14.3	15.3	25.0	28.0	34.1	36.1	28.0	25.0	13.0	4.5
-0.12	1.1	2.9	10.5	13.2	24.8	26.8	31.6	33.3	26.8	24.0	12.0	3.8
-0.20	2.3	2.8	9.4	12.6	24.7	26.5	30.6	32.5	26.5	23.4	12.3	4.6
-0.31	3.2	3.3	9.5	12.3	22.8	26.4	30.4	32.5	26.4	22.8	12.8	6.7

为了方便在 ABAQUS 中进行温度 - 荷载的耦合计算, 将表 3 中各月份的温度变化场通过非线性函数拟合, 以建立预设的温度场, 并完成永久变形预估计算。不同月份下代表温度场的表达式如表 4 所示, 其中,  $Z$  代表深度(m)。

Table 4. Mathematical expression of temperature field

表 4. 温度场的数学表达

月份	温度场
1	$T = 4450.3*Z^4 + 4073.1*Z^3 + 1326.8*Z^2 + 170.19*Z + 8.6983$
2	$T = 621.92*Z^3 + 468.65*Z^2 + 109.85*Z + 10.862$
3	$T = 1013.7*Z^3 + 766.38*Z^2 + 187.83*Z + 24.292$
4	$T = 17244*Z^4 + 12160*Z^3 + 3015.8*Z^2 + 327.32*Z + 27.015$
5	$T = 1692.3*Z^3 + 899.84*Z^2 + 144.77*Z + 31.554$
6	$T = 1759.3*Z^3 + 1044.7*Z^2 + 189.49*Z + 37.064$
7	$T = 960.43*Z^3 + 669.43*Z^2 + 153.2*Z + 42.165$
8	$T = 1110.5*Z^3 + 769.99*Z^2 + 172.61*Z + 45.091$
9	$T = 1759.3*Z^3 + 1044.7*Z^2 + 189.49*Z + 37.064$
10	$T = 464.55*Z^3 + 290.04*Z^2 + 62.381*Z + 28.086$
11	$T = 706.83*Z^3 + 434.45*Z^2 + 78.392*Z + 16.381$
12	$T = 889.57*Z^3 + 590.96*Z^2 + 107.08*Z + 9.5885$



### 3. 有限元数值仿真结果分析

#### 3.1. 沥青路面冷再生结构永久变形计算

##### 1) 交通分析

试验段交通数据统计可知: 全年货车通行量 3,301,532 辆, 日均交通量 AADTT 为 9045 辆(货车), 日均设计车道当量标准轴次(100 KN)为 8936 次。根据交通量和交通组成, 设计车道 15 年设计期累计标准轴载作用次数 48,926,514 次。

对于标准轴载(BZZ), 其等效为矩形荷载时, 矩形尺寸为: 19.2 cm\*18.6 cm, 双轮轮心间距为 31.4 cm, 如图 7 所示。因此, 对于 60 km/h 的行车速度, 单次荷载的作用时间为 0.01152 s。因此, 经过换算可得, 每个月当量轴载作用时间为 3131.3 s。再基于前述的等效温度场, 以一个月为周期设立单独的时间步, 便可进行设计周期内的逐月车辙量计算。

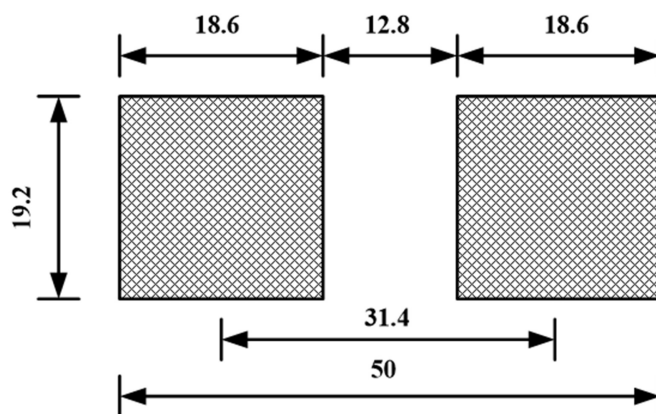


Figure 7. Equivalent rectangular load of standard axis  
图 7. 标准轴等效矩形荷载

##### 2) 车辙结果对比分析

通过以上方面计算结构二的车辙水平, 并同时根据规范方法进行对比分析, 结果如图 8 所示:

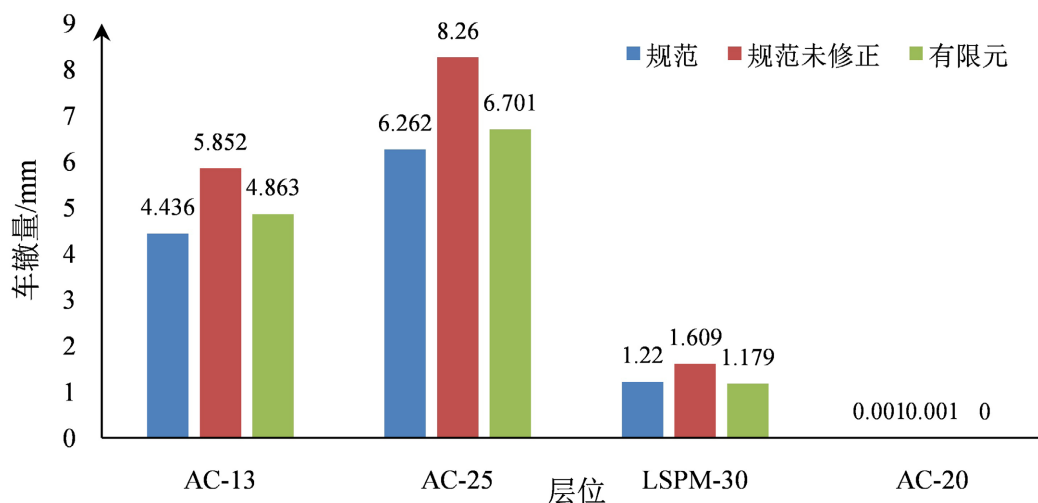


Figure 8. Comparative analysis of rutting results between standard and finite element simulation  
图 8. 规范与有限元仿真车辙结果对比分析

从计算结果上来看, 有限元预估的全寿命周期内的车辆量为 12.7 mm, 略高于规范预估的 11.9 mm。考虑到地域气候偏差以及计算仿真结果的误差, 基本可以认为采用规范的方法进行结构车辙的预估是合理的。然而, 需要注意的是, 规范车辙预估公式中的等效温度项:

$$T_{pef} = T_{\xi} + 0.016h_a \quad (1)$$

式中:  $T_{pef}$ , 沥青混合料层等效温度/ $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\xi}$ , 基准等效温度, 这里取为日照地区的  $19.4^{\circ}\text{C}$ ;  $h_a$ , 沥青混合料层厚度/mm。

在规范附录 B 计算沥青层永久变形时[11], 同样出现了沥青混合料层厚度的参数, 也同样用  $h_a$  表达, 但却限制了厚度的取值, 即沥青层厚度大于 200 mm 时, 取为 200 mm。因此, 图 8 展示了若等效温度没有进行厚度修正后的结果, 可以看出, 整体的车辙水平由于等效温度的提高而明显增大。而对于大厚度的柔性结构, 国外经验已经充分证明了, 沥青层的主要车辙水平发生在上部 200 mm, 其余部分对于车辆的贡献可以忽略不计。所以, 由于等效温度的提高而造成柔性结构(或大厚度沥青层结构)的车辙水平偏高是不合理的。因此, 本研究推荐对于沥青混合料层等效温度同样做厚度限制。

根据以上结论, 将不同结构的力学响应分析结果代入规范的车辙计算方法中验算, 得到如图 9 所示的计算结果。三种结构的车辙量分别为 12.36 mm、11.84 mm、11.92 mm, 均满足规范里对于车辙的要求。值得注意的是, 结构一、结构三的结构形式与厚度相同, 但冷再生混合料类型不同: 结构一为乳化沥青冷再生混合料, 结构三为泡沫沥青冷再生混合料。从室内试验结果来看, 乳化沥青冷再生混合料的模量高于泡沫沥青冷再生混合料。因此, 结构三具有较小的剪切应力, 这是其车辙水平总体更小的主要原因。

结构二的方案虽然有着与结构一、结构三相同的沥青层厚度, 但是由于 LSPM 材料本身较为松散, 抗车辙性能稍弱于结构一与结构三, AC-25 混合料的车辙量也略高于其他沥青混合料, 因此计算所得的车辙水平会略高于前两者。

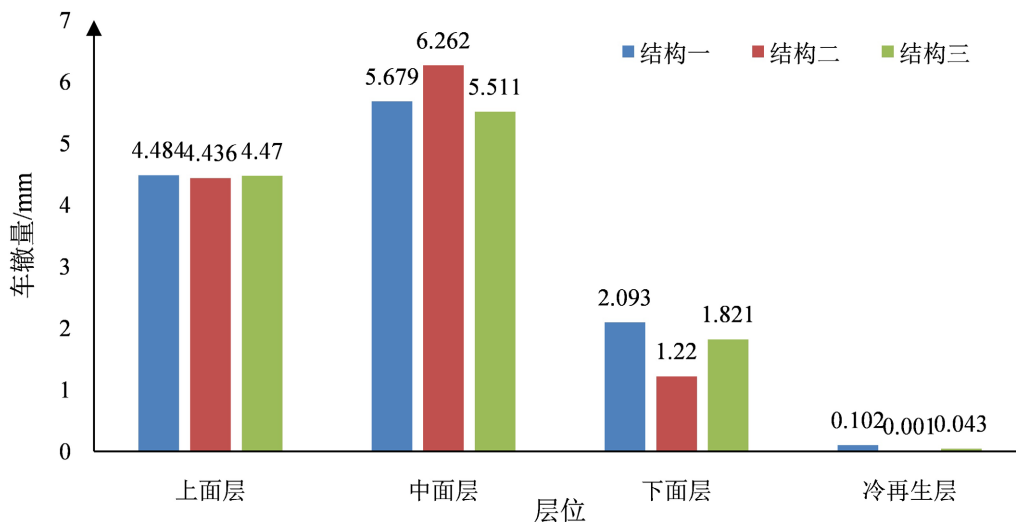
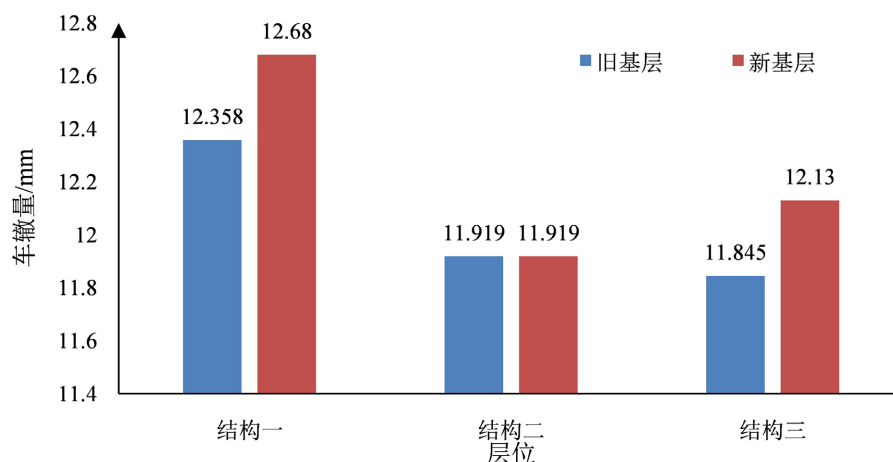


Figure 9. Comparison of ruts with different cold recycled structures

图 9. 不同冷再生结构车辙对比

图 10 所示的是基层强度变化下不同结构的车辙水平。由于结构二基层在铺筑前被挖出, 因此车辙量并没有改变。但从结构一、三的结果中可以看出, 基层强度的增加将加剧车辙的发展。当然, 由于本研究试验段内的沥青层厚度普遍较大, 因此基层刚度变化对于车辙的影响较小。





**Figure 10.** Effect of base strength on rutting  
**图 10.** 基层强度对车辙水平的影响

### 3.2. 冷再生沥青路面疲劳损伤演化研究

#### 1) 力学响应计算

考虑到当前规范中对于沥青路面冷再生结构的设计并没有专门的说明, 因此也缺少专门的公式去预估冷再生结构的疲劳性能。对于本研究所依靠的高速试验路, 其基层的承载能力状态十分有限, 因此可以认为基层在行车荷载作用下不会发生进一步的损坏, 本身可以被视作为粒料基层。据此, 根据前述现场拟合结构参数的结论, 按照 20℃, 10 Hz 加载频率下的沥青面层动态模量数据, 以及冷再生层及沥青稳定碎石基层的动态模量数据、旧路反算的基层模量和土基模量, 计算两种冷再生试验段结构的力学响应, 以评估其长期性能。对于不同结构的参数取值如表 5 所示:

**Table 5.** Calculation values of cold recycled structure response  
**表 5.** 冷再生结构响应计算取值

	层位	厚度/m	模量/MPa	泊松比
结构一	SMA-13	0.04	11000	0.25
	AC-20	0.06	12000	0.25
	ATB-25	0.08	9000	0.25
	泡沫沥青冷再生	0.16	3000	0.25
	旧路基层	0.28	1600	0.35
	旧路底基层	0.15	1000	0.35
	土基		50	0.40
结构三	层位	厚度/m	模量/MPa	泊松比
	SMA-13	0.04	11000	0.25
	AC-20	0.06	12000	0.25
	ATB-25	0.08	9000	0.25
	乳化沥青冷再生	0.16	7000	0.25
	旧路基层	0.28	1600	0.35
	旧路底基层	0.15	1000	0.35
土基		50	0.40	

由此, 在标准轴 BZZ-100 作用下, 冷再生层层底的拉应力、结构四沥青层层底的拉应变表 6 所示:

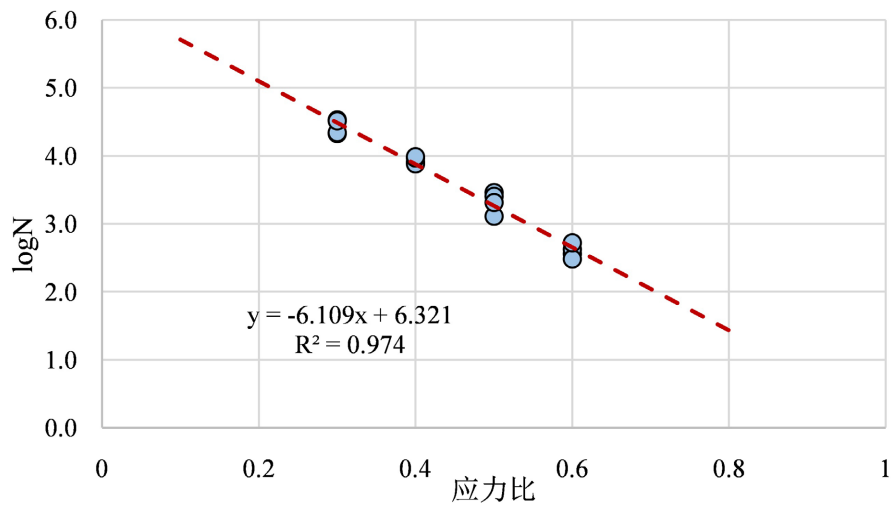
**Table 6.** Structural mechanics response of cold recycling asphalt pavement  
**表 6.** 冷再生沥青路面结构力学响应

	层位	水平拉应力/MPa
结构一	泡沫沥青冷再生层层底	0.079
结构三	乳化沥青冷再生层层底	0.192

可以看出, 由于乳化沥青冷再生混合料具有更高的模量, 其层底的拉应力值将远高于泡沫沥青冷再生混合料。

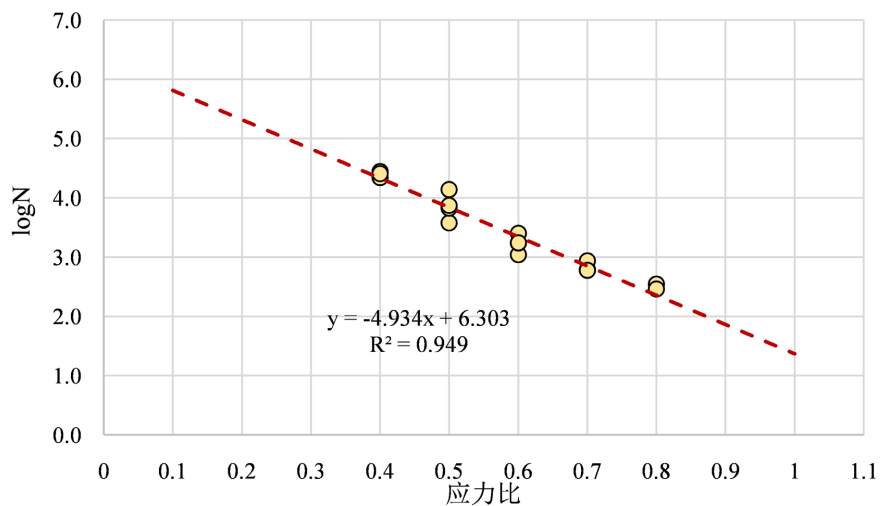
2) 疲劳寿命预估

根据乳化沥青和泡沫沥青冷再生混合料疲劳试验的结果, 拟合出如下的疲劳公式:



**Figure 11.** Fatigue test data of foam asphalt

**图 11.** 泡沫沥青疲劳试验数据



**Figure 12.** Fatigue test data of emulsified asphalt

**图 12.** 乳化沥青疲劳试验数据

根据图 11 和图 12 的试验结果, 可以拟合出如下的疲劳公式:

对于泡沫沥青冷再生混合料, 有:

$$\log N = 6.321 - 6.110 \frac{\sigma_t}{R_s}$$

对于乳化沥青冷再生混合料, 有:

$$\log N = 6.3035 - 4.934 \frac{\sigma_t}{R_s}$$

式中:  $N$ , 疲劳寿命;  $\sigma_t$ , 力学响应计算得到的拉应力, MPa;  $R_s$ , 冷再生混合料弯拉强度, MPa。

对于乳化沥青混合料, 其弯拉强度一般略高, 一般为 0.60~0.85 MPa 左右; 而对于泡沫沥青冷再生混合料, 其取值一般为 0.55~0.75 MPa。据此, 得到两种结构冷再生层位的容许疲劳寿命如表 7 所示:

**Table 7.** Fatigue life calculation

**表 7.** 疲劳寿命计算

	荷载应力/MPa	弯拉强度/MPa	容许轴载作用次数
结构一	0.079	0.65	378791
结构三	0.192	0.75	109747

从图 11 以及图 12 中可以看出, 相较于乳化沥青, 泡沫沥青有着更大的应力敏感性, 因此在高应力比下, 其疲劳寿命更小。但是由于在结构层位中, 乳化沥青冷再生混合料层具有更高的模量, 使得其层底的拉应力水平更高, 带来了更大的应力比, 因此结构三的疲劳寿命远小于结构一。

结构一、三的抗疲劳性能不佳的主要原因是由于冷再生沥青混合料较差的抗疲劳性能。在相同应力比小, 冷再生沥青混合料的疲劳寿命远小于无机结合料稳定类材料以及热拌沥青混合料; 而考虑到无机结合料稳定类材料以及沥青混合料本身的弯拉强度远高于冷再生沥青混合料, 在实际轴载作用下, 即使由于材料本身刚度更大具有更高的拉应力, 但其应力比水平更低, 抗疲劳性能更优。

研究表明当基层强度(刚度)提高后, 冷再生层层底的拉应力将会显著下降。因此, 对于旧路基层具有较好承载力的路段, 可以在旧基层上直接加铺冷再生混合料层; 但对于旧路基层病害繁多, 基本丧失承载能力的路段, 不建议在其上直接加铺冷再生混合料层。对于后者, 基层可以看作是粒料类基层, 整体旧路结构也可以视其为加强路基, 因此在其上需要有抗疲劳性能较好的结构层以保证路面的长期服役性能。

#### 4. 结论

本文采用 ABAQUS 有限元数值仿真建立了三种路面结构模型, 确定了沥青路面永久变形等效温度场, 计算了冷再生沥青路面车辙变形量, 对比分析了乳化沥青和泡沫沥青冷再生路面结构的力学响应和疲劳寿命预估。具体结论如下:

1) 基于现场的温度传感器记录的数据, 采用 ABAQUS 对逐日温度场下的结构层参数进行修正, 选择在相同交通荷载水平下产生相近车辙量的温度场作为当月的代表温度场, 进而得到 12 种代表温度场。此后, 根据换算的当量轴载累积作用次数以及假定的交通运行速度, 将多次轴载作用等效为具有标准轴载的作用时间, 从而可以进行逐月的车辙量预估。

2) 泡沫沥青冷再生混合料的车辙试验结果较乳化沥青冷再生混合料更低, 但由于冷再生混合料所处的层位靠下, 该层抗车辙性能的强弱不会对整体车辙水平造成显著的影响。

3) 冷再生沥青结构层层底拉应力会随着基层强度的提高呈下降的趋势, 冷再生结构层施工前应保证基层具有较好的承载力。

### 参考文献

- [1] 陈改霞, 贾秦龙, 薛邵龙. 乳化沥青厂拌冷再生在高速公路下面层的应用[J]. 安阳工学院学报, 2022, 21(2): 67-72.
- [2] 陈谦, 宋亮, 王帅, 等. 泡沫沥青冷再生混合料路用性能综合评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 83-88.
- [3] 栾英成, 陈田, 马涛, 等. 基于精细化 DEM 建模的冷再生混合料断裂性能分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 125-134.
- [4] 杜少文. 外加材料对乳化沥青冷再生混合料路用性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(3): 534-538.
- [5] 马川义. 乳化沥青冷再生混合料设计方法优化研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2014.
- [6] 吴聪. 厂拌乳化沥青冷再生在公路建设中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [7] 李昊隆. 乳化沥青冷再生混合料早期强度发展规律研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- [8] 郑俊秋. 乳化沥青冷再生混合料性能提升研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [9] 中国路面工程学术研究综述·2020 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
- [10] 马登成. 沥青路面再生设备研究现状与发展[C]//中国公路学会养护与管理分会, 中交公路规划设计院有限公司, 中交第三公路工程局有限公司. 中国公路学会养护与管理分会第十届学术年会论文集. 2020: 10.
- [11] JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.