

钢桥面复合铺装结构永久变形预估

罗 桑¹, 钟 科², 钱振东¹

(1. 东南大学 智能运输系统研究中心, 江苏 南京 210096; 2. 交通部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 针对浇注式与环氧沥青混凝土两种铺装材料组成的 5 类铺装结构, 采用恒高度剪切疲劳试验对铺装材料的流变特性进行试验研究, 根据试验结果, 利用多元非线性回归方法获得基于 Bailey-Norton 模型的铺装材料高温蠕变参数; 而后, 建立正交异性钢桥面铺装复合结构有限元模型, 仿真模拟 60 ℃ 下铺装的永久变形; 最后, 利用等厚度修正的车辙试验对 5 类铺装结构的永久变形仿真结果进行了试验验证。研究表明: 浇注与环氧组成的异性铺装结构中, 铺装永久变形贡献率大部分是浇注式沥青混凝土, 而环氧沥青混凝土的贡献率很小; 浇注或环氧组成的双层同质铺装结构中, 铺装车辙变形主要发生在上层。研究内容为钢桥面铺装结构与材料的高温变形设计提供理论支撑。

关键词: 钢桥面铺装; 贡献率; 恒高度剪切疲劳试验; 蠕变; 流变

中图分类号: U414.1

文献标志码: A

Permanent Deformation Prediction of Steel Deck Pavements with Different Combinations

LUO Sang¹, ZHONG Ke², QIAN Zhendong¹

(1. Intelligent Transportation System Research Center, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Research Institute of Highway of the Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: For five types of pavement structures combined with gussasphalt and epoxy asphalt concrete, the repeated shear tests with constant height were conducted first to obtain the rheological characteristics of the two pavement materials. And then, the creep parameters of pavement materials were fitted with multiple nonlinear regression based on Bailey-Norton model. With the parameters of materials, a finite element model of orthotropic steel deck pavement was established to simulate the permanent deformation of pavement at 60 ℃. Finally, the simulation results were verified with the modified wheel track test. Research results show that of the two-layers pavement structures combined

with different asphalt concretes, gussasphalt concrete has the highest deformation contribution rate, while epoxy asphalt concrete has the lowest. However, of the two-layers pavement structures combined with the same asphalt concrete, the rutting damage happens on the surface course. The research findings provide technique support for high-temperature performance design of structures and materials of steel deck pavement.

Key words: steel deck pavement; contribution rate; repeated shear test with constant height; creep; rheology

近十年来, 浇注式沥青混凝土和环氧沥青混凝土已成为我国大跨径钢桥面铺装采用的两类主要材料, 主要原因是浇注式沥青混凝土具有优异的变形能力、低空隙密水性以及良好的协同钢板变形能力, 环氧沥青混凝土具有强度高、高温无车辙、疲劳寿命长等特性。然而上述两类铺装材料也具有各自的缺陷: 浇注式沥青混凝土的高温抗变形能力差, 60 ℃ 动稳定度为 400 次·mm⁻¹[1-3]; 环氧沥青混凝土的协同变形能力较浇注稍逊一筹。因此, 基于浇注与环氧两类铺装材料各自的性能特点, 采用异性结构设计的方式, 设计出的“浇注+环氧”铺装结构型式逐渐引起道路工程界的广泛重视, 并已应用于润扬长江大桥试验桥冻青桥, 江阴大桥修复工程, 以及泰州长江大桥铺装设计方案中。但是, 针对浇注式沥青混凝土高温稳定性差的缺点, 如何与高强的环氧沥青混凝土进行铺装组合设计, 达到“浇注+环氧”异性铺装结构的高温稳定性最优, 是目前钢桥面铺装高温性能设计所面临的关键所在。

本文以“下层 3 cm 浇注式+上层 3 cm 环氧”、“下层 3.5 cm 浇注式+上层 2.5 cm 环氧”、“下层 3 cm 环氧+上层 3 cm 浇注式”三类异性铺装结构为研究对象, 为对比分析, 还选取了双层 6 cm 浇注式

收稿日期: 2012-02-25

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2009BAG15B03); 国家自然科学基金(50878053); 教育部博士点基金(20110092120062)

第一作者: 罗 桑(1983—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为道路基础设施、桥面铺装技术、新型路面材料等。

E-mail: luosangseu@gmail.com

沥青混凝土和双层 6 cm 环氧沥青混凝土两类铺装结构。首先,采用恒高度剪切疲劳试验对环氧沥青混凝土和浇注式沥青混凝土的重复剪切特性进行研究,基于时间硬化模型获取材料的蠕变参数;而后,建立正交异性钢桥面铺装复合结构有限元模型,对上述 5 类铺装结构进行了标准荷载与超载条件下铺装的高温永久变形仿真预估;最后,通过复合结构的车辙试验对仿真预估进行了验证。研究结果对“浇注+环氧”的异性铺装结构高温性能设计提供理论依据。

1 铺装材料高温蠕变参数研究

1.1 铺装材料

浇注式沥青混合料由 30 # 沥青与特立尼达湖沥青按质量比 30 : 70 进行掺配而成,集料采用玄武岩矿料,混合料最佳油石比为 8.8%,流动度为 25 s,40 °C 贯入度为 1.21 mm,空隙率小于 1%。

环氧沥青混合料是由环氧沥青结合料和密级配的玄武岩集料拌和而成的热固性混合料,混合料最佳油石比为 6.5%,固化试件的马歇尔稳定度为 56.7 kN,空隙率小于 3%。

1.2 恒高度剪切疲劳试验

根据 AASHTO320 试验规程,采用 COX&SONS 生产的 Superpave 剪切试验机对浇注式和环

氧沥青混合料进行恒高度剪切疲劳试验。试件选用高 38 mm、直径 150 mm 的圆柱形试件($\Phi 150 \text{ mm} \times H 38 \text{ mm}$),试验温度为 55 °C 和 60 °C,加载力采用 70、100、130 kPa 的水平剪切力,加载波形为加载 0.1 s、卸载 0.6 s 的方波。整个试验过程中,试件的高度通过固定的刚性构件保持恒定的高度尺寸。

1.3 试验结果分析

通过上述恒高度剪切疲劳试验,可以得出铺装材料在不同温度和加载力条件下的剪切永久变形与作用次数间的关系曲线,具体试验结果和分析如下。

1.3.1 环氧沥青混合料

60 °C 时,不同水平剪切应力下,环氧沥青混合料剪切永久变形与作用次数间的关系如图 1 所示。试验结果显示,环氧沥青混合料的永久变形应变随加载次数的增加呈现幂函数曲线增长关系。随着剪切力的增大,永久应变量相应的也发生增大。

1.3.2 浇注式沥青混合料

60 °C 时,不同水平剪切应力下,浇注式沥青混合料剪切永久变形与作用次数间的关系如图 2 所示。试验结果显示,浇注式沥青混合料的永久变形应变随加载次数的增加呈现增长关系。随着剪切力的增大,永久应变量相应的也发生增大,并且永久变形量比环氧沥青混合料永久变形量大 100 倍以上,说明浇注式沥青混合料高温抗变形能力较弱。

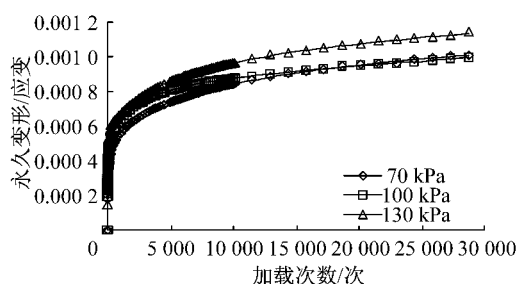


图 1 60 °C 时不同剪切力作用下环氧沥青混合料重复剪切疲劳试验结果

Fig.1 Results of repeated shear tests for epoxy asphalt mixes under different loads at 60 °C

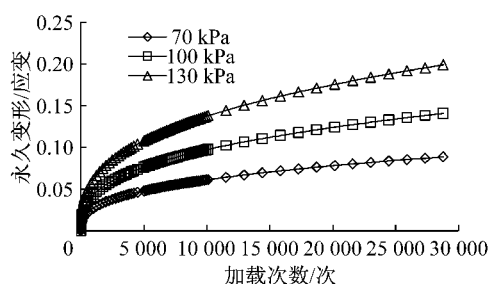


图 2 60 °C 时不同剪切力作用下浇注式沥青混合料重复剪切疲劳试验结果

Fig.2 Results of repeated shear tests for gussasphalt mixes under different loads at 60 °C

1.4 材料高温蠕变参数分析

铺装材料的流变特性可用蠕变模型进行描述^[4-5],即材料的变形 ϵ_c 是与温度 T 、应力 σ 和时间 t 相关函数。在 Abaqus 软件中,材料高温蠕变模型采用 Bailey-Norton 公式进行表征,其表达式为^[4]

$$\dot{\epsilon}_c = A \sigma^m t^n \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}_c$ 为应变速率,即单位时间产生的应变量; σ

为轴向偏应力,即轴向压力与围压的差; t 为荷载累计作用时间; A, m, n 为材料蠕变参数,依赖于温度及应力水平。

根据恒高度剪切疲劳试验数据,采用 Datafit 软件包进行多元非线性回归,获得 60 °C 浇注式沥青混凝土和环氧沥青混凝土的高温蠕变参数,见表 1。

表 1 铺装材料的非线性蠕变参数

Tab.1 Nonlinear creep parameters for pavement materials

混合料类型	试验条件		材料非线性蠕变参数		
	水平剪应力/kPa	温度/℃	A	m	n
浇注式沥青混凝土	70, 100, 130	60	1.22×10^{-11}	1.376	-0.649
环氧沥青混凝土			3.00×10^{-5}	0.026	-0.815

2 正交异性钢桥面铺装永久变形仿真模型

2.1 几何模型及边界条件

采用大型通用有限元软件 Abaqus 建立正交异性钢桥面铺装层永久变形仿真模型,模型两端横隔板底部采用固结约束,模型沿纵桥向的板边缘采用水平向约束、竖向自由的边界方式,如图 3 所示。其中正交异性钢桥面模型几何尺寸:沿桥面横向取 8 个 U 型加劲肋,共 4.8 m,沿桥面纵向取 3 跨,包括 4 块高度 1.2 m 的横隔板,共 9 m;U 型加劲肋高度为 280 mm,肋开口宽度为 300 mm,肋闭口宽度为 170 mm,厚度为 8 mm,两相邻加劲肋中心间距为 600 mm;横隔板间距为 3 000 mm,厚度为 10 mm;钢桥面板厚度为 14 mm。

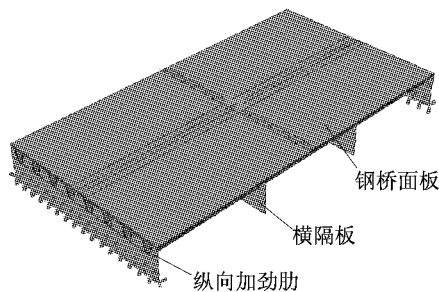


图 3 正交异性钢桥面铺装层永久变形仿真模型

Fig.3 Simulation model of permanent deformation for orthotropic steel deck pavements

5 种铺装结构:①双层 6 cm 浇注;②下层 3 cm 环氧+上层 3 cm 浇注;③下层 3.5 cm 浇注+上层 2.5 cm 环氧;④下层 3 cm 浇注+上层 3 cm 环氧;⑤双层 6 cm 环氧。

本模型中线性缩减积分单元 C3D8R。模型由两个部件组成,桥面板、加劲肋和横隔板生成的桥面部件以及路面部件。

2.2 材料参数及荷载条件

仿真模型中铺装材料的蠕变参数见表 1。浇注式沥青混凝土、环氧沥青混凝土和钢板的模量、泊松比参数见表 2,其中铺装材料的模量为 60 ℃、10 Hz 下的动态模量^[6]。

表 2 仿真模型所采用的材料参数值

Tab.2 Parameters of the simulation model materials

材料类型	浇注式沥青混凝土	环氧沥青混凝土	钢板
模量/MPa	1 351	2 410	210 000
泊松比	0.25	0.25	0.3

模型中,荷载采用双轮方形荷载形式,正方形尺寸为 189 mm×189 mm,两轮间距为 320 mm,轮胎接地压强为 0.7 MPa。根据已有研究成果,仿真模型的车辙最不利荷位确定为荷载中心横向位于两个 U 型加劲肋之间的中点,纵向位于两横隔板跨中的荷载位置。

模型中分析步的时长,即在荷载累积作用时间的计算公式如下:

$$t = \frac{0.36NP}{n_w p B v} \quad (2)$$

式中: t 为轮载累积作用时间,s; N 为轮载作用次数,次; P 为车辆轴重,kN; n_w 为单个轴的轮数,个; p 为胎压,MPa; B 为轮胎接地宽度,cm; v 为行车速度,km·h⁻¹。

仿真分析中,车辆轴重为 100 kN,胎压为 0.7 MPa,轮胎接地宽度为 18.9 cm,行车速度为 80 km·h⁻¹,依据式(1)可计算出单次轴载作用时间为 0.008 641 s,50 万次轴载作用对应于仿真模型中的分析步时长为 4 320 s。

3 仿真结果及分析

3.1 铺装结构永久变形分析

依据上述模型及计算参数,5 种铺装结构沿桥面板横断面的永久变形分布如图 4 所示,图 4 即为仿真结果图。由图 4 可以看出,永久变形量从大到小的铺装结构依次为:双层 6 cm 浇注>下层 3 cm 环氧+上层 3 cm 浇注>下层 3.5 cm 浇注+上层 2.5 cm 环氧>下层 3 cm 浇注+上层 3 cm 环氧>双层 6 cm 环氧,即铺装结构高温抵抗永久变形的能力也为上述排列次序。铺装层发生永久变形的发生区域:车辙凹陷处于轮载接触位置即 U 型肋顶附近区域,凸起发生于两 U 型肋中间。

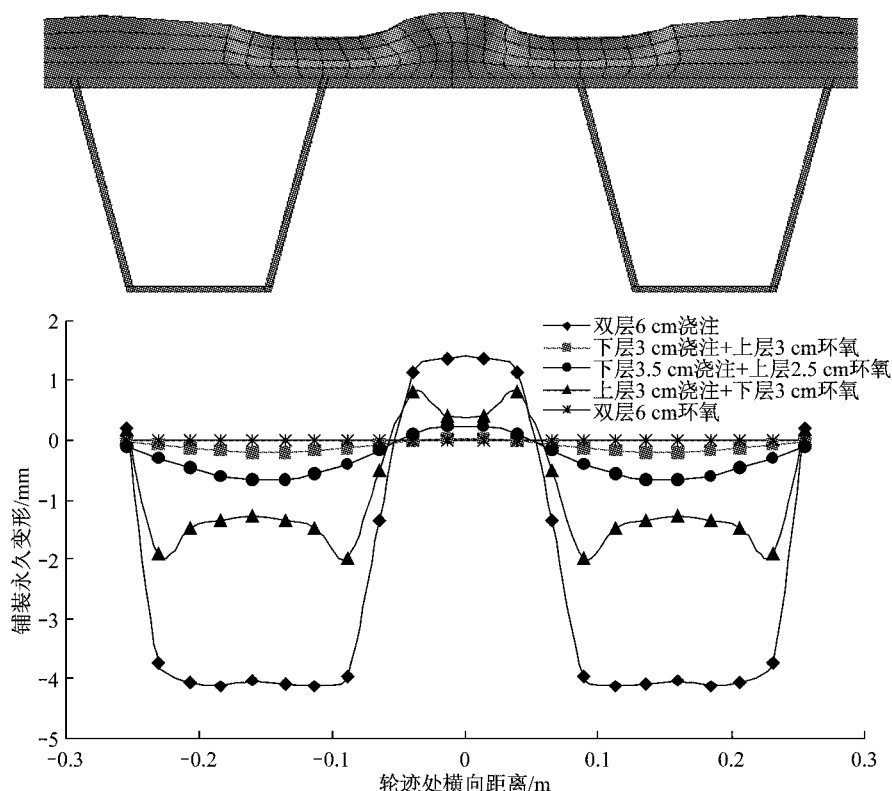


图 4 正交异性钢桥面铺装层永久变形仿真结果图

Fig. 4 Simulation results of permanent deformation for orthotropic steel deck pavements

3.2 铺装材料对总永久变形量贡献率分析

研究中的 5 类铺装结构为浇注式沥青混合料和环氧沥青混合料两种铺装材料在不同层位的组合. 为获得铺装材料对于铺装结构总体永久变形量的贡献, 将 5 种铺装结构中不同层位的永久变形量列于图 5 所示. 从图 5 可知, 环氧沥青混凝土使用在铺装上层, 能有效降低铺装结构的总体永久变形量, 提高复合结构的永久变形能力. 而浇注式沥青混凝土建议不使用在铺装上层, 防止铺装层出现高温流变变形现象. 由图中铺装结构类型 2 和 3 的车辙深度对比图可以看出, 相同铺装结构形式“下层浇注+上层环氧”, 相同铺装总厚度 60 mm 的情况下, 上层环氧铺装层厚度的增加会引起铺装结构整体抗变形能力

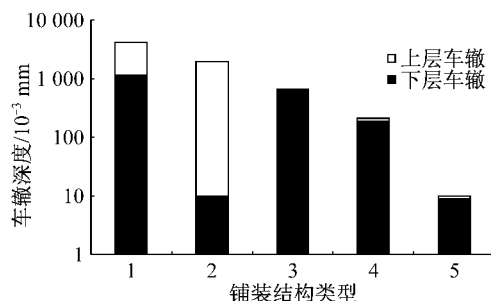


图 5 铺装结构不同层位车辙深度对比图

Fig. 5 Rut depth for different layers of pavement

的较大幅度的提高.

不同铺装材料在不同铺装结构中对于铺装总体永久变形的贡献率见表 3.

表 3 各结构组合车辙深度及所占百分比

Tab. 3 Rut depth and its contribution rate of different pavement layers

铺装结构类型	总车辙深度/mm	上层		下层	
		车辙深度/mm	贡献率/%	车辙深度/mm	贡献率/%
①双层 6 cm 浇注	4.12	2.94	71.49	1.17	28.51
②下层 3 cm 环氧+上层 3 cm 浇注	1.97	1.96	99.53	0.01	0.47
③下层 3.5 cm 浇注+上层 2.5 cm 环氧	0.68	0.03	4.79	0.64	95.21
④下层 3 cm 浇注+上层 3 cm 环氧	0.21	0.02	8.20	0.19	91.80
⑤双层 6 cm 环氧	0.01	0.009	87.89	0.001	12.11

表 3 结果显示, 在三类浇注与环氧组成的异性铺装结构中, 浇注式沥青混凝土对于铺装永久变形

的贡献率均大于 90%, 而环氧沥青的永久变形贡献率都低于 10%, 说明浇注式沥青混凝土对于铺装结

构的高温抗变形能力有不利影响。在双层浇注和双层环氧两类双层同质铺装结构中,铺装上层的永久变形量要远大于铺装下层,说明在同一铺装材料组成的钢桥面铺装层中,车辙变形主要发生在铺装结构上层,与传统道路路面中铺装车辙发生在铺装表面以下 50 mm 处的结论不同。主要原因是正交异性钢桥面板复合结构的受力模式不同于普通道路路面。

4 仿真模型的复合结构车辙试验验证

采用复合结构车辙试验进行对上述建立的正交异性钢桥面铺装永久变形仿真模型进行模型复核及验证。复合结构车辙试验方案在参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)车辙试验规程的基础上,结合正交异性钢桥面铺装层受力特性,进行了适当调整。试件为 300 mm×300 mm×60 mm 板状试件,其中试件厚度未按规范要求取 50 mm,而是与本文讨论的铺装结构厚度取相同值。试件分两层成型,每层的材料和厚度与本文选取的 5 类铺装结构型式规定的相一致。轮压采用标准荷载(0.7±0.05) MPa,加载速率为(42±1) 次·min⁻¹,试验温度为 60 ℃,试验开始前,试件保温时间不少于 4 h。复合结构车辙试验结果及模型计算值见图 6。

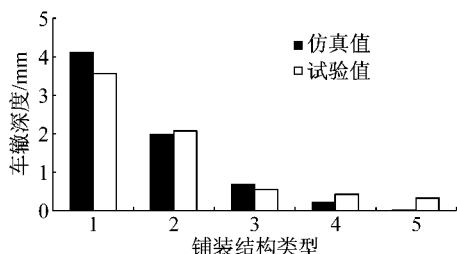


图6 不同铺装结构车辙深度仿真与试验值对比图

Fig.6 Comparison between the simulated and tested rut depths

由图 6 对比结果可以看出,车辙试验及有限元模型预估所得结果随不同结构变化的趋势基本相同,表明有限元数值方法模拟和预测沥青路面车辙的发展规律是合理有效的,而且以数值模拟方法部分取代车辙试验将更为便利直观快捷。产生仿真值与试验值之间的差别,主要原因有两个方面:(1) 材料参数的影响。材料参数是通过试验获得的,而该试验中试件的压实状态与车辙试验中的之间不可能完全相同,因此用该材料参数预估铺装车辙不可避免地存在误差,为了减小该因素造成的影响,在试件成型及铺筑铺装层时必须严格控制温度及压实度等。

(2) 车辆荷载的影响。模型预估时,采用的轮载为简化的均布荷载,但实际上轮载作用力的分布并不均匀并且轮胎作用形状并不完全是矩形。

5 结论

(1) 恒高度剪切疲劳试验结果表明,浇注式与环氧沥青混凝土铺装材料的剪切永久变形与荷载作用次数呈反 S 曲线增长关系,且永久变形量随着荷载的增加而增加。

(2) 铺装结构设计中,建议浇注式沥青混凝土不宜用在铺装上层,采用铺装上层为环氧沥青混凝土的设计可有效提高铺装结构整体抗永久变形能力。

(3) 在浇注与环氧组成的异性铺装结构中,铺装永久变形贡献率大部分是浇注式沥青混凝土,而环氧沥青混凝土的贡献率很小。

(4) 在浇注或环氧的双层同质铺装结构中,铺装上层的永久变形量要远远大于铺装下层,说明在同一铺装材料组成的钢桥面铺装层中,车辙变形主要发生在铺装结构上层,且浇注式沥青混凝土不适用于铺装上层。

参考文献:

- [1] Fwa T F, Ong H R G P. Critical rut depth for pavement maintenance based on vehicle skidding and hydroplaning consideration [J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 12(20): 1.
- [2] Shu X, Huang B, Chen X, et al. Effect of coarse aggregate angularity on rutting performance of HMA [J]. Pavement Mechanics and Performance, 2006, 12(4): 126.
- [3] Hua J, White T. A study of nonlinear tire contact pressure effects on HMA rutting [J]. The International Journal of Geomechanics, 2002, 2(3): 353.
- [4] 杨军, 丛菱, 朱浩然, 等. 钢桥面沥青混合料铺装车辙有限元分析[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 110.
YANG Jun, CONG Ling, ZHU Haoran, et al. Analysis on rutting potential of asphalt pavement on the steel deck by finite element method[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5): 110.
- [5] HE Guiping, WONG Winggun. Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21: 1809.
- [6] 罗桑, 钱振东, Harvey J. 环氧沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 16.
Luo Sang, Qian Zhendong, Harvey J. Research on dynamic modulus for epoxy asphalt mixtures and its master curve[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 16.