

长寿命路面结构与寿命预估

侯荣国¹,赵晓晴²,王选仓¹,曾 蔚^{1,3}

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064; 2. 淮海工学院
土木工程系,江苏 连云港 222005; 3. 西安铁路工程职工大学 道路与桥梁工程系,陕西 西安 710065)

摘 要:为解决现有路面设计寿命不足、实际使用寿命短等问题,从长寿命路面设计思想出发,对 PCC+AC 复合式路面(下面层为普通水泥混凝土,上面层为沥青混凝土)的荷载应力与温度应力进行分析,应用 ANSYS 分析软件,采用三维等参元法和弹性层状体系理论,分析确定 PCC+AC 复合式路面的力学模型,同时结合依托工程的 PCC+AC 长寿命路面结构进行试验验证。结果表明:影响 PCC 板底荷载应力和温度应力的主要因素为水泥混凝土板厚度、水泥混凝土弹性模量及 AC 层厚度,而 AC 层弹性模量对 PCC 板底温度应力影响较小;设计的复合路面使用寿命达到 40 a 以上。

关键词:道路工程;PCC+AC 复合式路面;应力分析;寿命

中图分类号:U416.2 **文献标志码:**A

Structure design and life predicting of long-life pavement

HOU Rong-guo¹, ZHAO Xiao-qing², WANG Xuan-cang¹, ZENG Wei^{1,3}

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Civil Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, Jiangsu, China; 3. Department of Road and Bridge Engineering, Xi'an Railway Engineering University, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: Aiming at the shortage of design life and actual life of pavement, considering the design of long-life pavement, this paper analyzed the structure stress and temperature stress of PCC+AC composite pavement based on three-dimensional isoparametric element and elastic layer system theory through ANSYS, and expounded the mechanics pattern of PCC+AC composite pavement, an actual highway with PCC+AC long-life pavement was constructed to test the life of the composite pavement. The result shows that: the main factors affecting load stress and temperature stress of PCC board are the thickness of cement concrete board and the concrete modulus and thickness of asphalt concrete, but the modulus of asphalt concrete affects temperature stress of PCC board hardly; the life of the composite pavement is over 40 a. 5 tabs, 4 figs, 7 refs.

Key words: road engineering; PCC+AC composite pavement; stress analysis; life

0 引 言

目前,中国道路普遍存在早期破坏现象,沥青混

凝土路面出现车辙、网裂和松散等;水泥混凝土路面出现断板、断角和错台等^[1]。这些早期破坏严重影响了路面的使用性能,降低了路面结构承载能力,使

收稿日期:2007-03-12

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200531881213)

作者简介:侯荣国(1977-),男,河北衡水人,博士研究生,E-mail:houljin123@sohu.com

道路使用寿命迅速衰减。本文针对目前道路使用寿命严重不足的现象,从长寿命路面设计思想出发,把水泥混凝土路面(PCC)+沥青混凝土路面(AC)的路面结构作为实现长寿命路面设计的一种路面类型,分析了该路面的主要影响因素,并通过几种 PCC+AC 复合式路面的结构组合,对路面使用寿命进行了预估,发现其寿命远远大于现有路面设计寿命,符合长寿命路面的设计思想。

1 力学模型的建立

在 PCC+AC 复合式路面结构中,下层的水泥混凝土板为主要的承重层,而上层沥青混凝土面层主要作为表面功能层。对这种路面结构进行荷载应力分析时,重点分析承重层(PCC 板)的应力状况,从而确保承重层的结构承载力。

1.1 计算模型

采用 8 节点三维等参元法以及弹性层状体系理论,对 PCC+AC 复合式路面进行荷载应力分析。路面结构模式如图 1 所示。

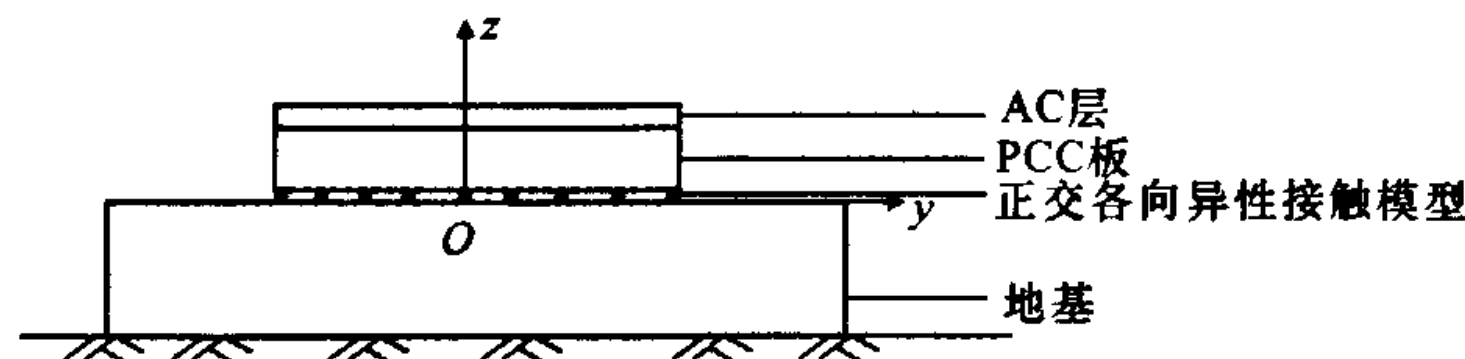


图 1 PCC+AC 路面结构模式

1.2 边界条件

(1)AC 层、PCC 板为有限尺寸;地基为弹性半空间地基(E 地基),根据计算精度要求,取尺寸为 $8\text{ m}\times 10\text{ m}\times 7\text{ m}$ 。

(2)AC 层与 PCC 板之间完全连续接触;PCC 板与地基之间用“正交各向异性接触模型”描述^[2]。

(3)AC 层、PCC 板及地基的四周面均为自由悬空面;地基的底面为固定面。

1.3 参数取值

在普通混凝土路面荷载应力计算中,PCC 板与地基之间的接触采用层间滑动的假定,认为 PCC 板与地基之间光滑接触,地基对 PCC 板的水平方向摩阻力可忽略,用“正交各向异性接触模型”描述,见表 1。表中: E_{11} 、 E_{22} 、 E_{33} 分别为 x 、 y 、 z 方向上的弹性模量; μ_{12} 、 μ_{23} 、 μ_{31} 分别为 xy 、 yz 、 zx 面内的泊松比; G_{12} 、 G_{23} 、 G_{31} 分别为 xy 、 yz 、 zx 面内的剪切模量。

表 1 PCC 板与地基间正交各向异性单元的参数

参数	弹性模量/MPa			泊松比			剪切模量/MPa		
	E_{11}	E_{22}	E_{33}	μ_{12}	μ_{23}	μ_{31}	G_{12}	G_{23}	G_{31}
取值	1	1	300 000	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1

其他计算参数在后述计算中给出。

2 计算结果分析

本文结构计算参数采用实际长寿命路面依托工程的实际道路结构参数,如表 2 所示。

表 2 结构参数

AC 层弹性模量/MPa	1 300
PCC 板弹性模量/MPa	31 000
水泥稳定碎石弹性模量/MPa	1 500
石灰土垫层弹性模量/MPa	150
土基弹性模量/MPa	40

注:石灰土垫层厚度 $h_1=20\text{ cm}$;水泥稳定碎石厚度 $h_2=18\text{ cm}$ 。

2.1 荷载应力分析

2.1.1 未加 AC 层的 PCC 板底最大弯拉应力

由图 2 可以看出,随着 PCC 板厚度 h_c 的增加,标准轴载在临界荷位处产生的荷载应力 σ_{ps} 逐渐减小;且随着 PCC 板厚度的增加,这种减小的趋势逐渐趋缓。

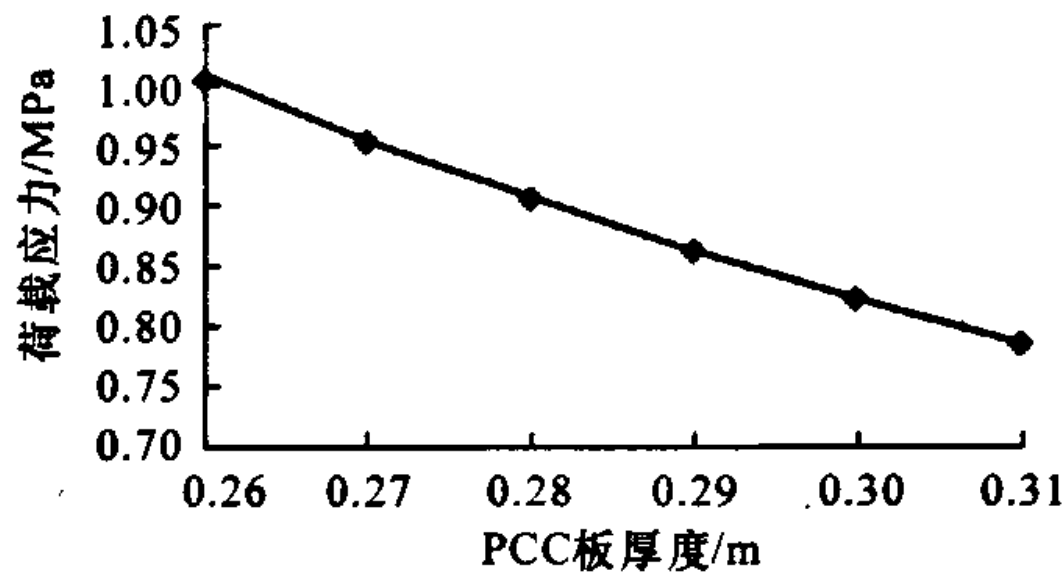


图 2 未加 AC 层时荷载应力随 PCC 板厚度变化的曲线

2.1.2 有 AC 层的 PCC 板底最大弯拉应力

由图 3 可以看到,有 AC 层后,PCC 板底的最大弯拉应力 σ_{psa} 还是有所减小的。在 PCC 板厚度固定时,PCC 板底最大弯拉应力随着 AC 层厚度 h_a 的增加而减小。AC 层厚度增加幅度相等时,PCC 板底的应力折减程度基本一致。

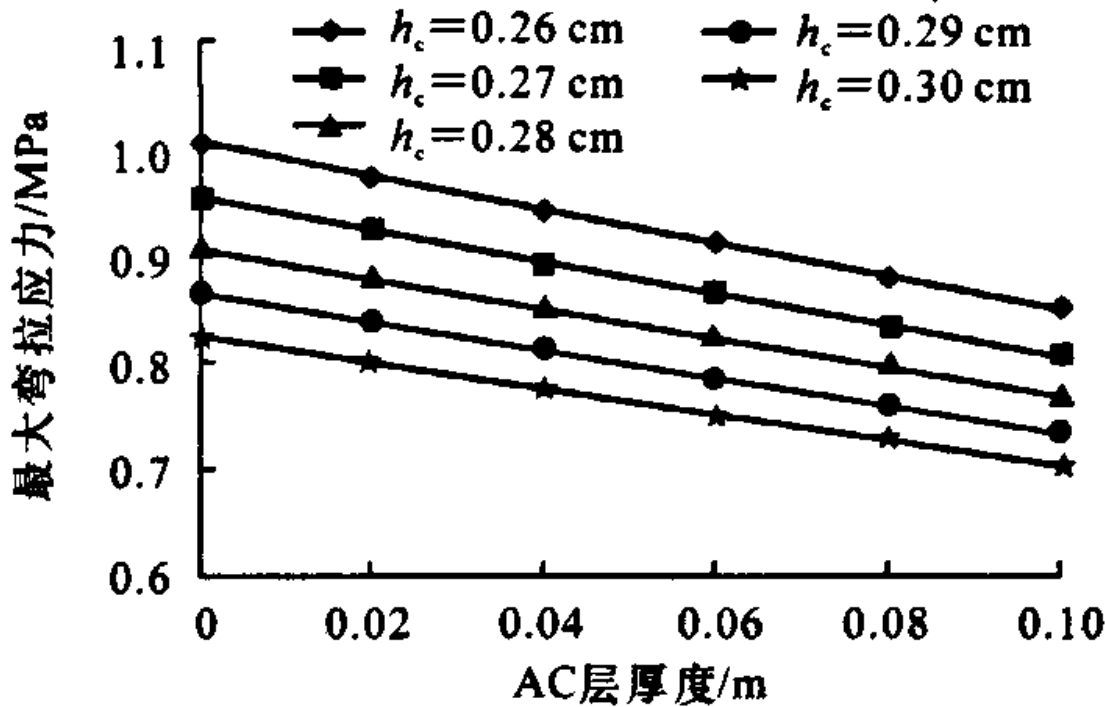


图 3 有 AC 层时应力随 PCC 板厚度和 AC 层厚度变化的曲线

2.1.3 其他因素分析

PCC 板底应力随 E_c/E_a 的增大而增大,特别是在 h_c 较小时,这一规律比较明显;另外,PCC 板底应力随 E_c/E_a 的增大而略有增大。因此,在常用 E_c/E_a ($24\sim 26$)、 h_a ($2\sim 10\text{ cm}$) 范围内, E_c/E_a 变化对板底应力的影响可忽略不计^[3](其中: E_a 为 AC 层弹

性模量; E_c 为水泥混凝土弹性模量; E_s 为 PCC 板底综合弹性模量)。

2.2 温度翘曲应力分析

混凝土板内温度应力主要为胀缩应力与翘曲应力,由于胀缩应力数值微小,故本文主要分析混凝土板的温度翘曲应力。产生温度翘曲应力的主要因素是存在温度梯度。一昼夜内混凝土板最大温度梯度出现时刻随着沥青层厚度的增加而逐渐滞后。通常,普通水泥混凝土路面的最大温度梯度出现在 13:00~14:00,而对于 PCC+AC 路面,最大温度梯度出现时刻约滞后 1~2 h。

2.2.1 最大温度梯度

文献[4]给出了有沥青上面层的 PCC 板最大温度梯度的推荐值,见表 3。

表 3 有沥青上面层的混凝土板的最大温度梯度值 T_g

AC 层厚度/ cm	各自然区划下的 $T_g/(m \cdot ^\circ C^{-1})$			
	Ⅱ、Ⅴ区	Ⅲ区	Ⅳ、Ⅵ区	Ⅶ区
0	83~88	90~95	86~92	93~98
4	58~62	62~67	60~65	66~70
8	40~43	46~48	43~49	47~50
12	28~30	30~32	29~31	31~33

2.2.2 温度翘曲应力计算

计算采用 PCC 板的平面尺寸为 3.75 m×4 m。

由图 4 可知,PCC 板温度翘曲应力随着 PCC 板厚度的增大而减小,且减小幅度逐渐趋缓;固定 PCC 板厚度时,PCC 板的温度翘曲应力随着 AC 层厚度的增大而减小,且减小幅度逐渐趋缓。

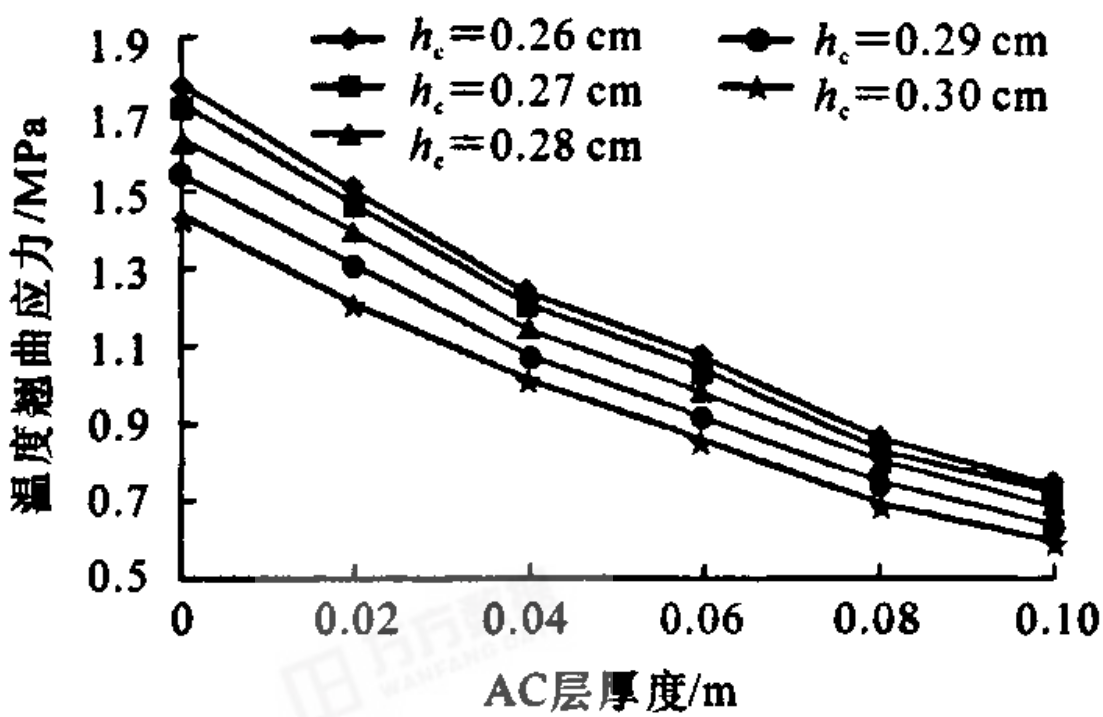


图 4 温度翘曲应力随 PCC 板厚度和 AC 层厚度变化的曲线

此外,计算中还发现,温度翘曲应力随 PCC 板长的增加而减小,因此,适当的增大 PCC 板长,能够有效地降低 PCC 板底应力。

2.2.3 其他因素分析

PCC 板底温度翘曲应力随 E_c 的增大而增大;当 h_c 、 E_c 不变时,PCC 板底温度翘曲应力随 AC 层厚度 h_a 的增大而增大,但增大幅度随 h_a 的增大而减小;同样,PCC 板底温度翘曲应力随 E_s 的增大而增大,但影响十分微小^[5-6]。

3 寿命预估

3.1 结构承载极限

根据表 2 的参数,通过变化沥青层厚度与水泥混凝土板厚度,计算各种路面结构组合下所能承受的最大累计当量轴次,见表 4。

表 4 结构承载能力

结构组合/cm	h_a	5.5	5.5	6.0	6.0
	h_c	28	30	28	30
累计当量轴次/次		1.65×10^8	7.56×10^8	1.90×10^8	8.82×10^8

3.2 寿命预估

通过依托工程验算。初始日标准轴载为 20 000 次,交通量增长率为 4%,车轮轮迹横向分布系数取 0.2,计算得到上述道路结构的使用寿命。

从表 5 中可以看出,相比原有设计年限为 15 a 的沥青混凝土路面(18 cm 面层)的设计方案,本研究的长寿命路面设计寿命最低达到了 43 a,从而大大提高了路面的设计寿命。

表 5 各结构组合下的路面设计寿命

结构组合/cm	h_a	5.5	5.5	6.0	6.0
	h_c	28	30	28	30
设计寿命/a		43	78	46	82

3.3 沥青层寿命

长寿命路面的主要设计思想为:在设计寿命期间,不发生结构性破坏,路面的损坏只发生在表面功能层,而不需要进行结构性大修^[7]。

前述计算结果主要考虑了 PCC 板的结构寿命,而对于沥青层的寿命,显然达不到如此长的年限。因此,在进行长寿命路面结构设计时,首先要保证主体结构的使用寿命,对于表面功能层,则尽量做好材料设计,力图达到较长的设计年限,必要时进行表面功能修复。

4 结 语

(1)长寿命路面是道路工作者一直追求的目标,本文选择 PCC+AC 路面结构进行长寿命路面研究,对此种路面结构进行了荷载与温度应力分析。

(2)通过依托工程的验算,发现 PCC+AC 路面结构承载能力大大提高,设计年限较常规路面结构延长许多,符合长寿命路面设计思想。

(3)虽然路面寿命预估可达 40 a 以上,但只适用于 PCC 层,而对于 AC 层,则需要进行特别设计,尽量提高其使用年限,必要时进行养护或加铺。

参考文献:

References:

- [1] 长安大学长寿命路面结构研究课题组. 高速公路长寿命路面典型结构成套技术研究[R]. 西安:长安大学, 2005.
- [2] 胡长顺,曹东伟. 连续配筋混凝土路面结构设计理论与方法研究[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(2): 57-62.
HU Chang-shun, CAO Dong-wei. On the design theory and method of continuously reinforced concrete pavement (CRCP) [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(2): 57-62.
- [3] 杨斌,陈拴发,胡长顺. 路面板断裂尺寸对沥青加铺层应力的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006, 26(1): 12-15.
YANG Bin, CHEN Shuan-fa, HU Chang-shun. Influence of cracking size of concrete pavement on stress of asphalt overlay[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 12-15.
- [4] JTG D40-2002, 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [5] 刘晓曦,王硕太. 机场混凝土道面封缝材料疲劳特性[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 44-47.
LIU Xiao-xi, WANG Shuo-tai. Joint sealant fatigue property of airport concrete pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 44-47.
- [6] 申爱琴,朱建辉,王晓飞,等. 聚合物改性超细水泥修补混凝土结构物微裂缝的性能及机理[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 46-51.
SHEN Ai-qin, ZHU Jian-hui, WANG Xiao-fei, et al. Performance and mechanism of polymer modified superfine cement for microcrack mending of concrete structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 46-51.
- [7] 杨永红,王选仓,韩国杰,等. 甘肃黄土地区土基回弹模量[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2005, 25(3): 7-10.
YANG Yong-hong, WANG Xuan-cang, HAN Guojie, et al. Rebound module of subgrade in Gansu loess area[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3): 7-10.
- ~~~~~
- (上接第21页)
- WU Xian-hui, ZHANG Deng-liang, LI De-chao. Full-scale test of asphalt pavement reflection cracking [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(6): 4-6.
- [2] 李淑明,许志鸿,蔡喜棉. 土工织物对复合式路面结构内力影响分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 28-31.
LI Shu-ming, XU Zhi-hong, CAI Xi-mian. Analysis of impact of geo-textile on stress of composite pavement structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 28-31.
- [3] 张鹏. 旧水泥混凝土路面黑色罩面反射裂缝的防治[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2005, 25(3): 16-18.
ZHANG Peng. Defence methods for reflective cracks in existed cement concrete black pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3): 16-18.
- [4] Akbulut H, Aslantas K. Finite element analysis of stress distribution bituminous pavement and failure mechanism [J]. Materials and Design, 2005, 26(4): 383-387.
- [5] 谈至明,姚祖康. 层间约束引起的双层水泥混凝土路面板的温度应力[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(1): 25-28.
TAN Zhi-ming, YAO Zu-kang. Thermal stress in two-layer concrete slab due to restraint of interface[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(1): 25-28.
- [6] 胡长顺,曹东伟. 有防裂夹层结构的旧水泥混凝土路面沥青加铺层力学分析[J]. 中国公路学报, 1999, 12(增刊): 1-8.
HU Chang-shun, CAO Dong-wei. Mechanics analysis of asphalt concrete overlay on the old cement concrete pavement with anti-cracking interlayer [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(S): 1-8.
- [7] 王辉,武和平. 沥青路面按弯沉等效轴载换算的研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 19-21.
WANG Hui, WU He-ping. Research on axle exchange based on deflection equivalent for asphalt pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 19-21.
- [8] 陈先华,黄卫,王建伟,等. 浇注式沥青混凝土铺装破坏原因[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 5-9.
CHEN Xian-hua, HUANG Wei, WANG Jian-wei, et al. Damage causes of mastic asphalt pavement on orthotropic steel deck plate[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(4): 5-9.