

# 水泥混凝土桥面铺装力学行为数值分析

李云良<sup>1,2</sup>, 纪伦<sup>1</sup>, 刑超<sup>1</sup>, 谭忆秋<sup>1</sup>, 张树和<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程博士后流动站, 150090 哈尔滨;  
3. 黑龙江省交通实业总公司, 150001 哈尔滨)

**摘要:** 为了分析桥面铺装层的力学特性及其影响因素, 结合桥面铺装的结构形式建立了有限元模型, 分析了不同水平制动力系数、铺装上下面层材料模量组合及铺装层厚度变化对铺装层内力学状态的影响规律. 结果表明, 不同的水平载荷对铺装层内的主应力影响较小, 而对铺装层内的剪应力影响较大; 随着水平载荷的增加, 铺装层及防水粘接层内的最大剪应力呈线性增大的趋势; 随着铺装层组合模量的提高, 铺装层内的主应力变化较小, 而层间剪应力相应减小, 但变化的幅度较小; 增加铺装层的厚度对主应力的影响很小, 随着厚度的增加层间最大剪应力减小. 研究结果可为桥面铺装材料的选择和结构设计提供理论参考.

**关键词:** 桥面铺装; 应力分析; 数值模拟; 模量组合; 防水粘接层

**中图分类号:** U443.33      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2013)10-0058-05

## Numerical analysis about mechanical behavior of concrete bridge deck pavement

LI Yunliang<sup>1,2</sup>, JI Lun<sup>1</sup>, XING Chao<sup>1</sup>, TAN Yiqiu<sup>1</sup>, ZHANG Shuhe<sup>3</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. Post-doctoral Research Center in Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

3. Heilongjiang Province Transportation Industrial Company, 150001 Harbin, China)

**Abstract:** A finite element model combined with bridge deck pavement structural style is established to analyze mechanical properties and influence factors of bridge deck pavement structure. The effect of different levels braking force coefficients, top and bottom layer material modulus combination of bridge deck pavement, deck pavement thickness variation are analyzed. Results show that different horizontal loads have little effect on principal stress but much effect on shear stress inside the pavement layer. With the increase of horizontal load, the maximum shear stresses inside pavement layer and waterproof adhesive layer increase linearly. Principal stress inside the pavement layer changes little, while shear stress between layers decreases in a small amplitude with the increase of combination modulus of pavement layer. Increase of the thickness of pavement layer has little effect on principal stress and maximum shear stress between layers decreases with increase of thickness. Conclusions obtained by this paper can be used to provide theoretical reference for material selection and structure design of bridge deck pavement.

**Key words:** bridge deck pavement; stress analysis; numerical simulation; elastic modulus; waterproof adhesive layer

桥面铺装材料的选择与铺装结构的设计会对桥面铺装层的力学性能产生较大的影响. 目前可

用于桥面铺装的材料很多, 且不同铺装材料的性能差别很大<sup>[1-2]</sup>, 铺装上下面层不同材料组合及其厚度的不同会对铺装层内部力学状态产生重要影响, 因此桥面铺装的材料设计及结构设计至关重要<sup>[3-5]</sup>. 铺装层的材料与结构设计是相互联系、相互影响的两个方面, 铺装层的应力状态取决于铺装层材料的厚度和模量组合特性.

**收稿日期:** 2012-10-12.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51078114);  
博士点新教师基金项目(20102302120058).

**作者简介:** 李云良(1973—), 男, 副教授;  
谭忆秋(1968—), 女, 教授, 博士生导师.

**通信作者:** 李云良, liyl-hit@163.com.

目前对于桥面铺装层的力学分析主要有理论分析及数值模拟两种方法. 理论方法主要是结合层状弹性体系理论对桥面铺装进行分析. Castro<sup>[6]</sup>结合层状弹性体系理论, 研究了不同桥梁结构桥面铺装的结构设计方法. 张占军等<sup>[7]</sup>结合层状弹性体系理论, 采用数值方法分析了水泥混凝土桥面铺装的层间应力状态. 罗立峰等<sup>[8]</sup>结合正交弹性小挠度薄板理论, 将桥面铺装层处理为各向同性的大挠度板, 假定铺装层与桥面板之间为相对滑动的接触状态, 得到了桥面铺装应力分析的微分方程. 杨新民等<sup>[9]</sup>结合层状弹性体系理论, 研究了混凝土桥面铺装层在外荷载作用下的应力响应行为. 在桥面铺装的数值模拟分析方面, 许涛等<sup>[10]</sup>建立了桥面铺装的力学分析模型, 分析了铺装层材料参数对铺装层力学状态的影响及其变化规律. 资建民等<sup>[11]</sup>利用 ANSYS 软件分析了桥面铺装的力学特性, 确定了最不利荷载的作用位置. 研究了钢桥面铺装层的应力应变关系及其规律, 确定了桥面铺装层材料模量对铺装结构层内力学状态的影响规律<sup>[12]</sup>. 徐金龙等<sup>[13]</sup>采用数值方法分析了高寒地区桥面铺装层的疲劳特性. 王越<sup>[14]</sup>研究了在车辆及温度荷载的耦合作用下, 桥面铺装层的变形及应力状态的变化规律.

本文结合层状弹性体系理论及桥面铺装的结构形式, 建立了桥面铺装的三维有限元数值分析模型, 研究了在行车荷载作用下, 桥面铺装层不同材料模量组合及桥面铺装上下面层的不同厚度组合对铺装层力学性能的影响, 为铺装层材料的选择和结构设计提供理论参考.

## 1 水平荷载对铺装层应力状态的影响

桥面铺装采用 3 层结构, 从下至上依次为防水粘接层(1 cm)、铺装下面层及铺装上面层. 水泥混凝土桥面板的厚度为 40 cm. 铺装下面层为中粒式沥青混凝土, 上面层为细粒式沥青混凝土, 材料的模量变化代表铺装材料的不同组合形式.

数值模拟分析采用如下假定: 1) 水泥混凝土、沥青混凝土及防水粘接层材料均为线弹性材料; 2) 有限元模型为周边固支, 结构层之间完全连续, 层间无滑移.

根据文献[15], 轮胎的接地面积简化为 60 cm × 320 cm 的矩形, 轮胎的接地压力为 0.707 MPa, 两轮的中心距为 1.8 m. 通过轮胎与地面之间的不同水平力系数模拟车辆制动或启动时产生的水平力作用对铺装层力学状态的影响.

选取水平荷载系数分别为 0、0.1、0.2、0.3、

0.4 和 0.5, 分析车辆制动或启动时产生的水平力对铺装层力学状态的影响. 上下面层沥青混合料的模量分别为 2 200、1 600 MPa, 上下面层的厚度均为 5 cm.

### 1.1 主应力

在不同水平荷载系数情况下, 铺装层轮载中心处第一主应力  $S_1$  及第三主应力  $S_3$  随深度  $D$  的变化如图 1、2 所示. 从图中可以看出, 在不同的水平力系数情况下, 铺装层内部的应力大小及其变化规律基本相同.  $S_1$  在铺装结构层的中性面以上为压应力, 在中性面以下为拉应力. 在沥青混凝土铺装面层内,  $S_1$  随铺装层深度的增加而减少.  $S_1$  在防水粘接层内急剧增加. 在混凝土桥面板内  $S_1$  呈线性变化趋势. 在整个铺装结构层内  $S_3$  则随  $D$  的增加而减小.

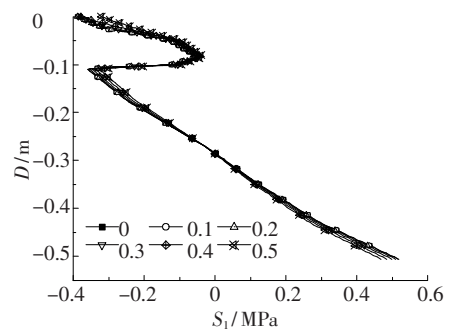


图 1 不同水平荷载系数的  $S_1$  值

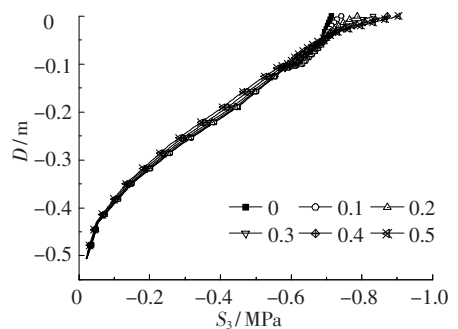


图 2 不同水平荷载系数的  $S_3$  值

### 1.2 剪应力

在不同水平荷载系数情况下, 轮载中心处铺装层的层间剪应力随深度的变化如图 3 所示. 在水平力系数为 0 时, 剪应力在沥青混凝土铺装层内随深度的增加出现振荡式的变化. 当水平力系数不为 0 时, 随着铺装层厚度的增加剪应力呈现单调下降的趋势.

铺装层及防水粘接层内的最大剪应力随水平力系数的变化如图 4 所示. 从图上可以看出, 铺装层内的最大层间剪应力随着水平力系数的增加而增大. 水平力系数为 0.5 时, 铺装层内的最大层间剪应力为 0.3 MPa. 因此水平力对铺装层内的最大层间剪应力的影响较大, 在选择铺装层的材料时, 要考虑水平力对铺装层力学性能的影响.

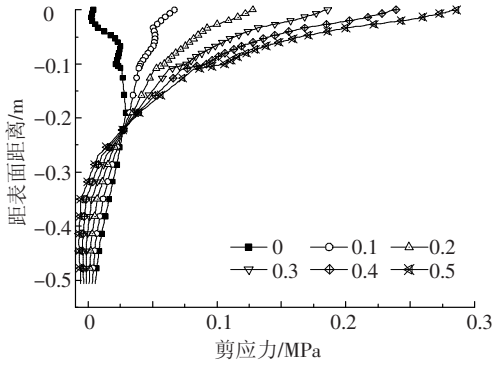


图 3 不同水平载荷系数的层间剪应力

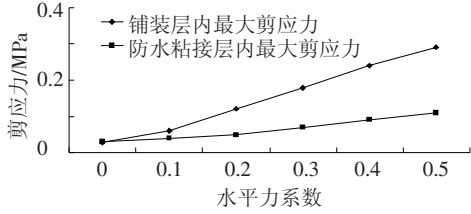


图 4 不同水平力系数情况下的最大层间剪应力

## 2 上下面层材料组合对铺装层应力状态的影响

通过铺装上下面层材料模量的变化,分析不同铺装材料的组合对铺装层力学状态的影响.上下面层的厚度为 5 cm.上面层的模量为 1 800 ~ 2 200 MPa,下面层的模量为 1 600 ~ 2 000 MPa.水平载荷系数分别为 0、0.5,分别模拟正常行车及车辆启动(或制动)情况下对铺装层的作用.

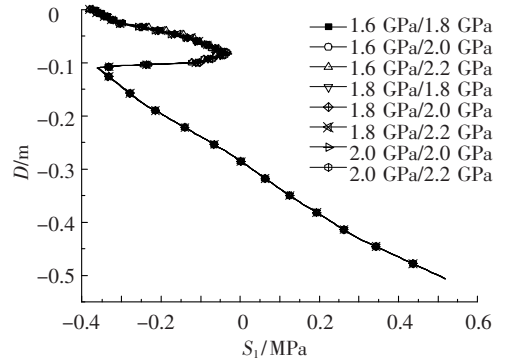
### 2.1 主应力

在不同材料模量组合情况下,轮载中心处  $S_1$  随深度的变化如图 5 所示.在不同材料模量组合时,铺装层内  $S_1$  的分布规律相同, $S_1$  的变化为 0 ~ 0.1 MPa,不同的模量组合对  $S_1$  的影响较小.当水平载荷系数为 0.5 时,规律完全相同.沥青混凝土与水泥混凝土的模量相比要低一个数量级,同时水泥混凝土桥面板的厚度是沥青混凝土铺装面层厚度的 4 倍,因此铺装层沥青混凝土模量的变化对铺装层的主应力影响较小.

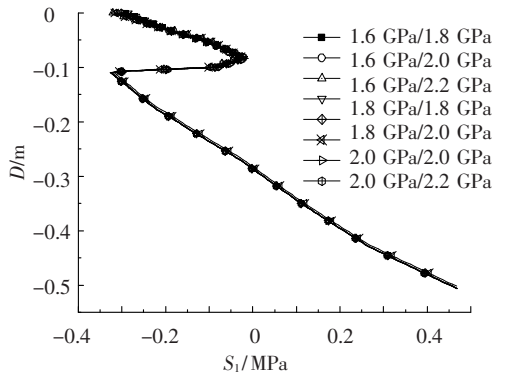
### 2.2 剪应力

轮载中心处铺装层层间剪应力在不同模量组合情况下随深度的变化如图 6 所示.从图中可以看出,在外荷载不变的情况下,不同模量组合时层间剪应力的变化趋势一致.与前面的分析结论相同,在水平载荷系数为 0 时,铺装层内剪应力存在最大值;在防水粘接层内与混凝土面板接触处的剪应力最大.在水平载荷系数为 0.5 时,结构层内的层间剪应力的随着深度的增加而减小,层间剪应力不存在极值.在不同的模量组合情况下,防水

粘接层内最大剪应力的变化如图 7 所示.随着铺装材料模量的增加,最大剪应力呈现下降的趋势,但下降的幅度很小,铺装层材料的不同模量组合对于层间剪应力的影响较小.

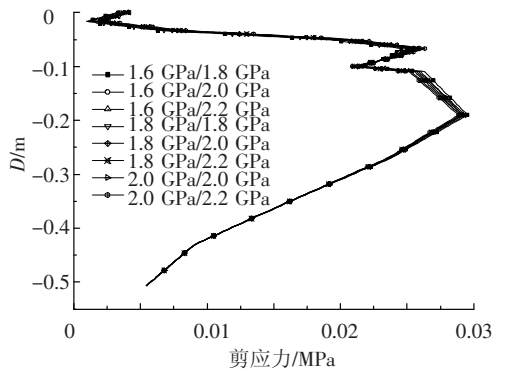


(a) 水平载荷系数为 0

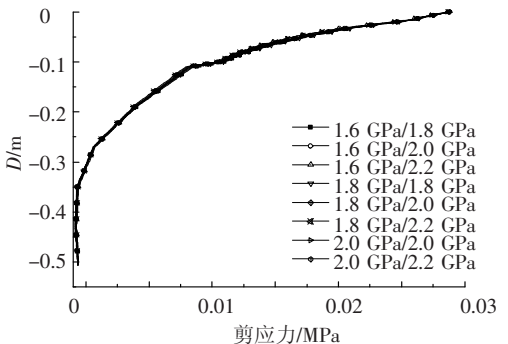


(b) 水平载荷系数为 0.5

图 5 不同模量组合时铺装层内第一主应力



(a) 水平载荷系数为 0



(b) 水平载荷系数为 0.5

图 6 不同模量组合与层间剪应力的关系

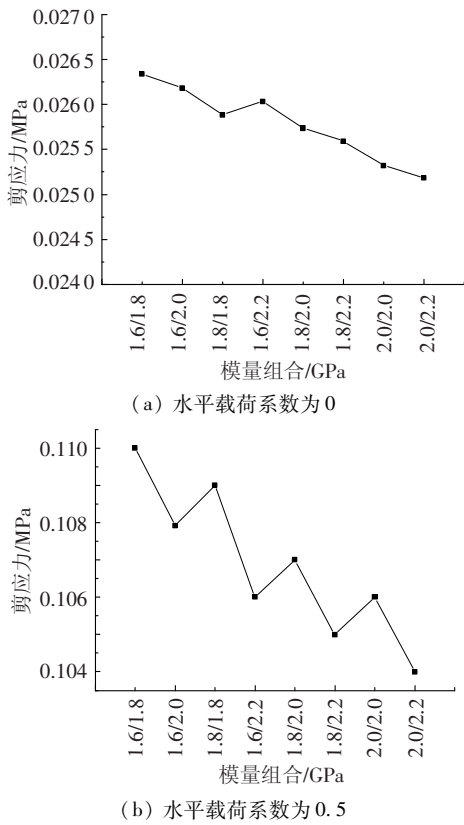


图 7 不同模量组合与层间剪应力的关系

### 3 铺装层厚度对铺装层应力状态的影响

在铺装层总厚度为 8 ~ 10 cm 时, 分别变化上下面层的厚度, 分析不同的铺装层厚度组合对应力状态的影响。

#### 3.1 主应力

轮载中心处的  $S_1$  在不同厚度组合情况下随深度的变化如图 8 所示. 从图上可以看出, 在两种不同的水平力系数情况下, 不同的厚度组合时铺装层内的  $S_1$  变化规律相同. 铺装层不同厚度组合时  $S_1$  的变化幅度不超过 0.001 MPa, 厚度变化对于  $S_1$  的影响较小. 铺装层厚度变化时防水粘接层内的  $S_1$  变化幅度超过了 0.1 MPa, 铺装层越厚防水粘接层内的  $S_1$  越小。

#### 3.2 剪应力

轮载中心处铺装层内剪应力随深度的变化如图 9 所示. 在水平力系数为 0 时, 不同厚度组合情况下铺装层内均存在着剪应力的极值, 最大值出现在桥面板与防水粘接层的粘接处. 在水平力系数为 0.5 时, 不同厚度情况下铺装层内的剪应力都随着深度的增加而减小. 不同厚度组合情况下, 防水粘接层内的最大剪应力如图 10 所示. 防水粘接层内的最大剪应力随着铺装层厚度的增加而减小. 在铺装层总厚度相同的情况下, 防水粘接层内的最大剪应力保持不变. 为了更好地发挥防水粘

层的结构性能、确保防水粘接层与混凝土桥面板之具有较好的粘接性, 应当尽量减小防水粘层内的剪应力. 因此桥面铺装层应当具有合理的厚度. 结合分析结果可知, 对于本文的铺装模型铺装层较为适宜的厚度为 10 cm.

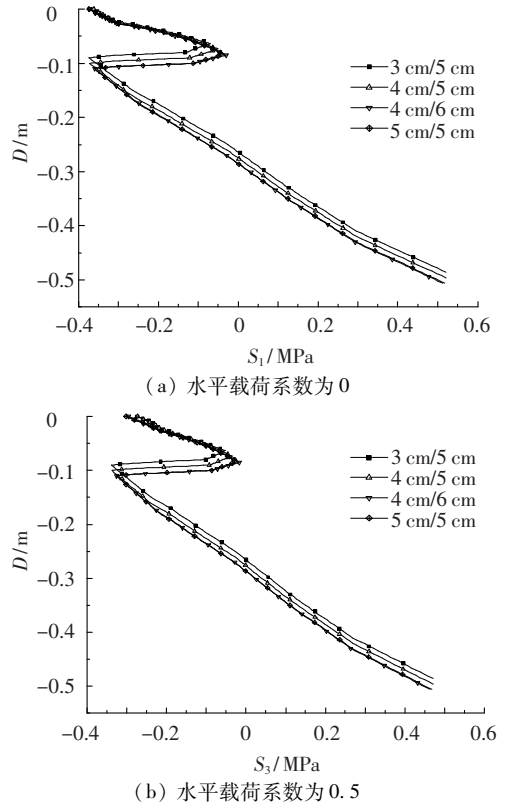


图 8 不同厚度组合时的第一主应力

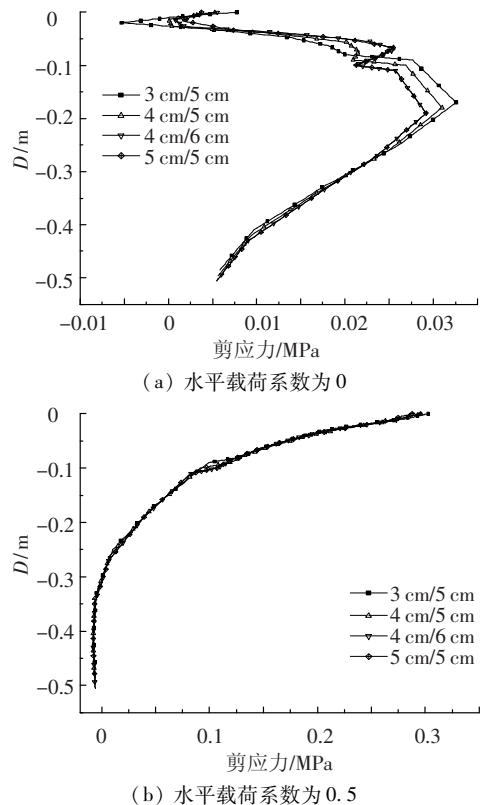


图 9 不同厚度组合时的层间剪应力

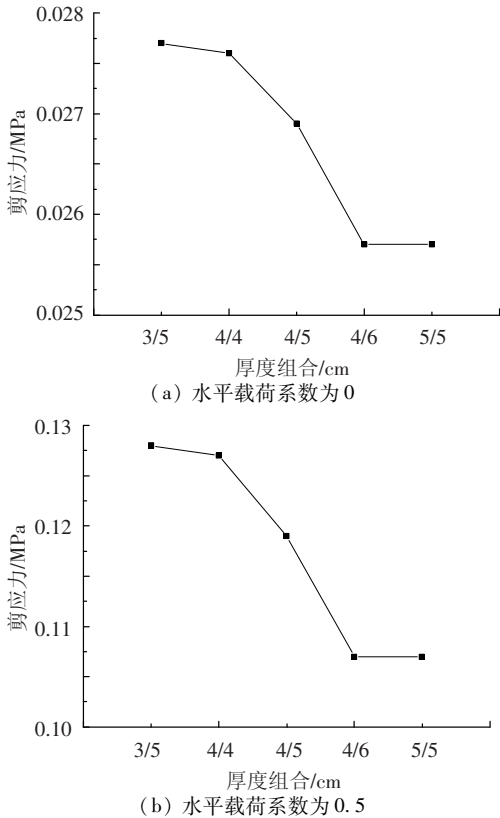


图10 不同厚度组合时的层间最大剪应力

## 4 模型的工程应用

哈尔滨松浦大桥长为3 450 m,主跨为268 m,边跨为208 m.采用独塔斜拉桥,主塔高为160 m.主梁采用钢混叠合梁.在主桥桥面铺装设计时,应用了本文所建立的分析模型,确定大桥的铺装结构形式为:上下面层均为AC-16 沥青混凝土,厚度均为5 cm,防水粘接层厚度为1 cm.通过对桥面铺装服役效果的跟踪监测,证明该桥的铺装结构形式及材料选择较为合理,铺装层没有出现车辙及开裂等病害,服役效果较好.

## 5 结论

1)不同水平荷载系数对铺装层内的主应力影响较小,主应力随铺装层深度的增加而减小,第一主应力在防水粘接层内急剧增加.随着水平荷载系数的增加,铺装层及防水粘接层内的最大剪应力呈线性增大的趋势.

2)铺装层组合模量的提高,铺装层内的主应力变化较小.水平荷载系数为0.5时,随着模量组合值的增加,防水粘接层内的最大剪应力下降,其变化的幅度不超过0.005 MPa,模量组合对于铺装层层间剪应力的影响很小.

3)铺装层厚度的变化对主应力的影响较小.随着铺装层厚度的增加,铺装层及防水粘接层内

的最大剪应力均减小.在铺装层总厚度相同而上下面层厚度变化的情况下防水粘接层内的最大剪应力基本不变.

## 参考文献

- [1] CAO Weidong, YAO Zhanyong, LIU Shutang, *et al.* Performance of composite modified asphalt with trinidad lake asphalt used as waterproofing material for bridge deck pavement[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2009,37(5):463-467.
- [2] SHAN Junhong, ZHOU Mingkai, LI Beixing, *et al.* Application of polypropylene fiber concrete in bridge deck pavement[J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 302-303:418-423.
- [3] SHENG Yanping, WANG Qian, LI Haibin. Theoretical analysis of extreme temperatures and thermal stresses in bridge deck pavements[J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2011,4(4):238-243.
- [4] 王立勇,钟原,李军.滨州黄河公路大桥桥面铺装设计与施工[J]. *公路交通科技*, 2005,22(8):74-77.
- [5] 高雪池,黄晓明,许涛.大跨径桥梁沥青混凝土桥面铺装层力学分析[J]. *公路交通科技*, 2005,22(1):69-72.
- [6] CASTRO M. Structural design of asphalt pavement on concrete bridges[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2004(31):695-702.
- [7] 张占军,王虎,胡长顺,等.水泥混凝土桥面沥青铺装及防水层荷载弯曲应力分析[J]. *中国公路学报*, 2004,10:45-46.
- [8] 罗立峰,钟鸣,黄成造.桥面铺装设计方法探讨[J]. *中南公路工程*, 1999,6:33-34.
- [9] 杨新民,王雨.沥青混凝土桥面铺装层力学性能的理论及数值研究[J]. *中外公路*, 2007,27(5):77-80.
- [10] 许涛,黄晓明.桥面铺装材料设计参数对铺装层受力影响[J]. *公路交通科技*, 2007,24(9):32-36.
- [11] 资建民,路庆昌,黄贤顺,等.正交异性钢桥沥青混凝土桥面铺装的力学分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2008,30(2):90-93.
- [12] SHEIKH A H, MUKHOPADHYAY M. Geometric nonlinear analysis of stiffened plates by the spline finite strip method[J]. *Computers and Structures*, 2000,76:765-785.
- [13] 徐金龙,王彬,吴少鹏.高寒地区水泥混凝土桥面沥青铺装层抗疲劳开裂性能分析[J]. *国外建材科技*, 2008,29(4):66-69.
- [14] 王越.沥青混凝土桥面铺装车辆荷载与温度荷载作用的耦合分析[J]. *北方交通*, 2010,6:63-66.
- [15] JTGB01—2003.公路工程技术标准[S].北京:中华人民共和国交通部,2004. (编辑 魏希柱)