

文章编号:1671-8879(2008)03-0021-04

## 复合式路面(PMCC-PCC)温度应力有限元分析

申爱琴<sup>1</sup>, 贾 玉<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 青岛市交通工程质量监督站, 山东 青岛 266011)

**摘 要:**聚合物改性水泥混凝土(PMCC)与硅酸盐水泥混凝土(PCC)复合式路面是一种新型路面结构,根据实际测量,结合相关研究理论,利用有限元方法对 PMCC-PCC 复合式路面的温度应力进行了分析,讨论了温度非线性、面层厚度、混凝土模量和材料线膨胀系数等对温度应力的影响。计算结果表明:与普通混凝土路面相比,PMCC-PCC 复合式路面的温度应力减小了 7% 左右,并随着上下面层厚度和模量、下面层线膨胀系数的增加和上面层线膨胀系数的减小而进一步减小,说明 PMCC-PCC 复合式路面具有较优的温度承受能力。

**关键词:**道路工程;聚合物改性水泥混凝土;复合式路面;温度应力;面层厚度;混凝土模量;线膨胀系数  
**中图分类号:**U416.216 **文献标志码:**A

## Finite element analysis of temperature stress in Polymer Modified Cement Concrete and Portland Cement Concrete(PMCC-PCC) composite pavement

SHEN Ai-qin<sup>1</sup>, JIA Yu<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Qingdao Quality Monitoring Department of Communication Construction, Qingdao 266011, Shandong, China)

**Abstract:** PMCC-PCC composite pavement is a new kind of pavement structure. This paper analyzed the temperature stress of PMCC-PCC composite pavement using finite element method. By the method, the influences of temperature nonlinear distribution, pavement thickness, concrete module and material linear expansion factor on the temperature stress were analyzed. The results show that the temperature stress of PMCC-PCC composite pavement is reduced about 7% than the one of normal concrete pavement, with the increase of thickness and module of upper and lower pavement, the reduction grows. The linear expansion factor of upper pavement has same influence while the linear expansion factor of lower pavement has reverse influence. PMCC-PCC composite pavement has a good performance in temperature stress. 5 tabs, 5 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; PMCC; composite pavement; temperature stress; pavement thickness; concrete module; linear expansion factor

## 0 引 言

聚合物改性水泥混凝土(Polymer Modified Concrete Cement, 缩写为 PMCC)具有弯拉弹性模

量低、弯拉强度高、路表面功能优越、抗冲击和耐疲劳等一系列优点<sup>[1-2]</sup>,适用于重交通、自然环境恶劣、对路表面功能要求高的路段,具有广泛的应用前景。然而,目前对 PMCC 在公路工程中的应用却研究很

收稿日期:2007-05-10

作者简介:申爱琴(1957-),女,四川绵阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:saq6305@163.com。

少<sup>[3-9]</sup>。为了充分发挥 PMCC 的优势,对其在公路工程中的应用进行了系统研究,并首次在广东惠州铺筑了 PMCC-PCC 复合式路面试验路段。本文着重分析 PMCC-PCC 复合式路面的温度应力。

PMCC-PCC 复合式路面板温度应力的分析基于以下基本假设:①上下面层板为等厚板,且材料均质连续、各向同性;②双层板的弯曲均为小挠度变形,且四边自由;③双层板层间竖向连续、无夹层,也无脱空和嵌入现象,结合方式可分为完全结合式、完全自由式或介于两者之间的半结合式;④面层层间接触良好,不存在热阻;⑤下面层板板底与基层竖向连续。

## 1 计算参数的确定和模型的建立

本文选用的材料参数见表 1。其中,面层厚度的取值范围由试验路实际厚度扩展得到。由于集料粒径的影响,上面层 PMCC 板的厚度不宜太小,一般为 6~12 cm,变化梯度为 2 cm;下面层硅酸盐水泥混凝土(Portland Cement Concrete,缩写为 PCC)板的厚度可根据面层总厚度约为 25 cm 时选取。

表 1 各结构层材料参数的取值范围

| 结构层   | 材料       | 弹性模量/GPa | 泊松比  | 厚度范围/cm |
|-------|----------|----------|------|---------|
| 上面层   | PMCC     | 25~27    | 0.15 | 6~12    |
| 下面层   | PCC      | 31       | 0.15 | 13~19   |
| 基层及路基 | 根据土质状况选取 | 0.187    | 0.30 |         |

PMCC-PCC 复合式路面的温度场可按照多层路面体系进行计算,对 layers 建立热传导方程为

$$\frac{\partial T_i(z,t)}{\partial t} = a_i \frac{\partial^2 T_i(z,t)}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中: $T_i(z,t)$  为温度场函数; $a_i$  为导热系数; $z$  为深度; $t$  为温度。

当层间无脱空或隔离层时,可认为接触面上下两层层面的温度和热流量相等,即满足温度函数

$$\left. \begin{aligned} T_i(z,t) &= T_{i+1}(z,t) \\ \lambda_i \frac{\partial T_i(z,t)}{\partial z} &= \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(z,t)}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\lambda_i$  为导热系数。

由于上下面层混凝土的热物理参数相近,故可以将双层混凝土面层作为一层考虑,结合太阳辐射变化,可以得到道路温度场的近似计算式为

$$t_p(\tau,z) = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} e^{-\beta z} \sin(6\omega + \beta z) \quad (3)$$

式中: $t_p(\tau,z)$  为道路温度场函数; $\tau$  为时间(h); $T_{\max}$  为道路路面最高温度; $T_{\min}$  为道路路面最低温度;

$\omega = \pi/12(\text{rad/h})$ ;  $\beta = [\omega/(2\lambda)]^{0.5}$ ;  $\lambda$  为导热系数,一般取  $0.003 \text{ m}^2/\text{h}$ 。

文献[7]在大量实测数据的基础上,分析并建立了混凝土路面最高温度  $T_{\max}$ 、最低温度  $T_{\min}$  和最高气温  $T_{a,\max}$ 、最低气温  $T_{a,\min}$  的经验回归公式

$$\left. \begin{aligned} T_{\max} &= 1.246 5 T_{a,\max} + 4.993 2, R^2 = 0.94 \\ T_{\min} &= 1.080 4 T_{a,\min} - 0.387 5, R^2 = 0.95 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

以惠州地区为例,每年的七月份,一般日最高气温为  $38^\circ\text{C}$ ,日最低气温为  $26^\circ\text{C}$ ,可求得 PMCC-PCC 复合式路面结构的温度梯度为  $54.5^\circ\text{C}/\text{m}$ (以 22 cm 厚度板作为标准),小于文献[10]推荐的惠州地区所属公路区划的最大温度梯度( $86\sim 92$ ) $^\circ\text{C}/\text{m}$ 。本文采用文献[10]推荐的最大温度梯度进行温度应力分析。

由于温度在水平方向上可以看作不发生变化,因此可以取路面板的 1/4 进行温度应力分析,如图 1 所示。在模型中,单元的平面尺寸取为  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ ,单元高度的选择根据温度非线性分布对温度应力的影响来设定。在上述模型的基础上,可以求解不同面层厚度和模量条件下的温度翘曲应力值,为 PMCC-PCC 复合式路面设计提供依据。其中,PMCC-PCC 复合式路面板的最大温度应力出现在路面板长边的中部。

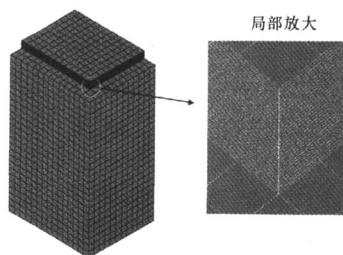


图 1 温度应力计算有限元模型

## 2 温度非线性分布的影响

为了分析温度非线性对翘曲应力的影响,同时作为单元划分的依据,考虑了以下 6 种温度分布方式(图 2):①温度在面层内线性分布(图 2(d));②温度在上下面层内线性分布(图 2(c));③温度在 8 cm 的薄层内线性分布;④温度在 4 cm 的薄层内线性分布;⑤温度在 2 cm 的薄层内线性分布;⑥温度在 1 cm 的薄层内线性分布(图 2(b))。

其中,上下面层模量分别取为 27 GPa 和 31 GPa,上下面层厚度的选取应便于单元网格的划分,并结合试验路段的结构层厚度,取为 8 cm 和 16 cm;温度梯度选取文献[10]中惠州地区所属公路区

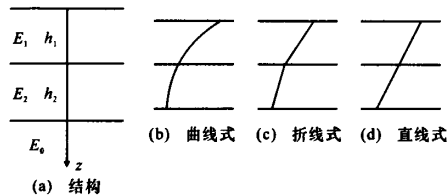


图 2 温度分布

注:  $E_1$  为上面层模量;  $E_2$  为下面层模量;  $E_0$  为路基回弹模量;  $h_1$  为上面层厚度;  $h_2$  为下面层厚度。

划的最大温度梯度的平均值,即 22 cm 板厚对应的温度梯度为 89 ℃/m。不同温度分布的温度应力计算结果见表 2。由于结合式 PMCC-PCC 复合式路面层间产生约束,在上面层底产生压应力或较小的拉应力,故本文仅计算下面层的温度应力。

表 2 不同温度分布的温度应力计算结果

| 温度分布方式      | ①    | ②    | ③    | ④    | ⑤    | ⑥    |
|-------------|------|------|------|------|------|------|
| 下面层温度应力/MPa | 3.57 | 3.00 | 2.79 | 2.72 | 2.15 | 2.14 |

由表 2 可见,由于温度非线性分布引起的内应力的影响,PMCC-PCC 复合式路面板所受到的温度应力较温度线性分布时有明显变化。随着单元高度的减小,温度分布趋于实际情况,温度应力逐渐减小并收敛,温度分布方式①比分布方式⑥的温度应力大 66.8%,可见温度非线性分布的影响是不能忽略的。其中,在温度分布方式⑤下,可认为温度应力收敛,即认为当单元高度为 2 cm 时,可以将单元内的温度分布作为线性分布。

3 PMCC-PCC 与 PCC 路面受力对比

为了分析 PMCC-PCC 复合式路面与 PCC 路面温度应力的区别,对 PCC 路面的温度应力进行了计算。PCC 路面板的厚度为 25 cm,PMCC-PCC 复合式路面选用试验路结构形式,面层的厚度组合分别为结构 I (8 cm+17 cm)和结构 II (12 cm+13 cm)。根据测试结果,试验路 PMCC 上面层和 PCC 下面层之间处于结合状态,只需考虑下面层 PCC 板的温度应力。温度应力计算结果见表 3。

表 3 温度应力计算结果

| 结构形式     | PCC  | PMCC-PCC 结构I | PMCC-PCC 结构II |
|----------|------|--------------|---------------|
| 温度应力/MPa | 2.33 | 2.18         | 2.15          |

由表 3 可见,PMCC-PCC 复合式路面的温度应力比面层总厚度相同的 PCC 路面有较大幅度的降低。结构 I 和结构 II 中混凝土板的温度应力分别比 PCC 路面结构减小了 0.15 MPa 和 0.18 MPa,减小比例分别为 6.44% 和 7.73%,表明 PMCC-PCC 复合式路面在温度应力方面具有一定的优势。

4 影响因素分析

4.1 面层厚度的影响

按照上下面层层间完全结合的方式,改变面层厚度,计算面层的温度应力,计算结果见图 3。对于完全结合式 PMCC-PCC 复合式路面,由于面层板之间的相互作用,上面层 PMCC 板受到压应力或较小的拉应力,所以只需考虑下面层 PCC 板受到的温度应力。

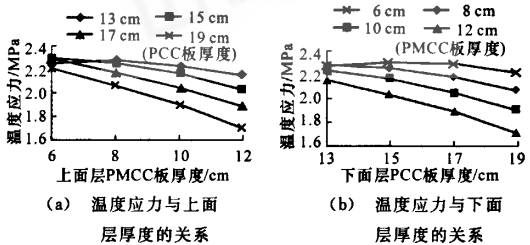


图 3 结合式 PMCC-PCC 复合式路面温度应力与面层厚度的关系

由图 3 可见,结合式 PMCC-PCC 复合式路面 PCC 下面层的温度应力随着上面层和下面层厚度的增加而减小,同时随着面层总厚度的增加和单位厚度的改变而引起应力变化增大。由于上下面板协同受力,上下面层厚度的增加对 PCC 下面层温度应力的影响趋势大致相同,且面层总厚度相等时,随着 PMCC 上面层厚度的增加,下面层 PCC 板受到的温度应力略有减小。例如总厚度为 25 cm 时,面层厚度组合为 6 cm+19 cm、8 cm+17 cm、10 cm+15 cm 和 12 cm+13 cm,对应的温度应力分别为 2.21 MPa、2.18 MPa、2.16 MPa 和 2.15 MPa,呈现略微减小趋势。

4.2 混凝土模量的影响

模量是影响温度应力值大小的另一关键因素,模量的变化也会引起温度应力的变化。取试验路上面层厚度为 8 cm、下面层厚度为 17 cm 的结构形式进行模量影响分析,可以得出温度应力与模量之间的关系,如图 4 所示(上下面层厚度为 8 cm+17 cm)。

分析图 4 可见,对于结合式 PMCC-PCC 复合式路

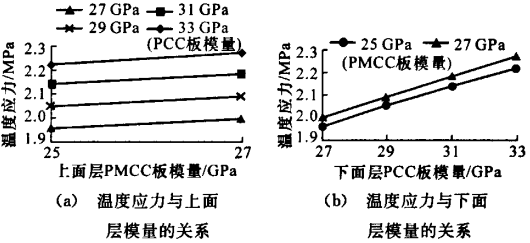


图 4 结合式 PMCC-PCC 复合式路面温度应力与模量的关系

面,上下面层模量的改变对 PCC 下面层板的温度应力均产生影响。随着模量的变化,温度应力基本为线性变化:上面层模量每增加 2 GPa,温度应力约增大 2%;下面层模量每增加 2 GPa,温度应力约增大 4%。从总体来看,模量的改变对温度应力的影响不大。当取不同的面层厚度时,模量的影响基本保持线性,如图 5 所示(上下面层厚度为 12 cm+13 cm)。图 5 中对应面层厚度为:上面层 PMCC 板厚 12 cm,下面层 PCC 板厚 13 cm。从图 5 还可以看出,随着上面层厚度的增加和下面层厚度的减小,上面层模量改变的影响增大,下面层模量的影响减小。

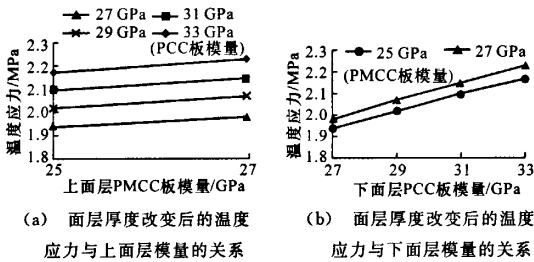


图 5 面层厚度改变后的温度应力与模量的关系

#### 4.3 材料线膨胀系数的影响

由于 PMCC-PCC 复合式路面上下面层的材料不同,其线膨胀系数也略有差别。对于结合式 PMCC-PCC 复合式路面板,由于上下面板协同受力,需要分析混凝土线膨胀系数对温度应力的影响。面层材料参数的取值见表 4;温度应力的计算结果见表 5(表中  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为上、下面层混凝土的线膨胀系数,单位为  $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ )。

表 4 分析线膨胀系数影响时面层材料参数取值

| 面 层      | 混凝土模量/<br>GPa | 混凝土厚度/<br>cm | 线膨胀系数/<br>( $10^{-5} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) |     |     |
|----------|---------------|--------------|---|-----|-----|
| 上面层 PMCC | 27            | 8            | 0.8   | 1.0 | 1.2 |
| 下面层 PCC  | 31            | 17           | 0.8   | 1.0 | 1.2 |

表 5 不同线膨胀系数时复合式路面板的温度应力 MPa

| 线膨胀系数  |     | $\alpha_1/(10^{-5} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$ |      |      |
|--|-----|--|------|------|
|  |     | 0.8  | 1.0  | 1.2  |
| $\alpha_2/(10^{-5} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$ | 0.8 | 1.74   | 2.52 | 3.30 |
|  | 1.0 | 1.40   | 2.18 | 2.96 |
|  | 1.2 | 1.06   | 1.84 | 2.62 |

由表 5 可见,对于结合式 PMCC-PCC 复合式路面,PCC 下面层的温度应力随着上面层 PMCC 材料线膨胀系数的降低和下面层 PCC 材料线膨胀系数的增加而减小:上面层混凝土线膨胀系数每增加  $0.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,温度应力增加 0.78 MPa;下面层混凝土线膨胀系数每增加  $0.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,温度应力减

小 0.34 MPa。这是由于上面层温度梯度相对较大,当增加其线膨胀系数时,其变形增大,使得下面层板中部产生更大的拱起变形;而下面层混凝土线膨胀系数的增加可以抵消部分温度变形,使温度应力减小。因此,在铺筑结合式 PMCC-PCC 复合式路面时,上面层应尽量选取线膨胀系数小的集料,而下面层集料的线膨胀系数应不小于上面层集料的线膨胀系数,以减小 PMCC-PCC 复合式路面板的温度应力。

## 5 结 语

(1)温度场分布为非线性,当将面层厚度细化为 2 cm 的薄层时,就可以将薄层内的温度看作线性分布,而温度应力计算结果产生的误差很小。

(2)PMCC-PCC 复合式路面与面层总厚度相同的 PCC 单层路面结构相比,温度应力有所减小,结构形式为 8 cm+17 cm 和 12 cm+13 cm 的 PMCC-PCC 复合式路面试验路的温度应力,比总厚度相同的单层式 PCC 路面板的温度应力分别减小了 6.44% 和 7.73%。

(3)下面层 PCC 板的温度应力随着上面层和下面层厚度的增加而减小,呈非线性变化,并随着面层总厚度的增加和单位厚度的改变引起的应力变化增大,而且上下面层厚度的增加对 PCC 下面层温度应力的影响趋势大致相同。

(4)结合式 PMCC-PCC 复合式路面温度应力随着上下面层模量的增加而增大:上面层模量每增加 2 GPa,温度应力增大约 2%;下面层模量每增加 2 GPa,温度应力增大约 4%,变化幅度均不大。

(5)减小上面层混凝土的膨胀系数和增大下面层混凝土的线膨胀系数可以减小结合式 PMCC-PCC 复合式路面下面层的温度应力和层间剪应力。上面层混凝土线膨胀系数每增加  $0.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,温度应力增加 0.78 MPa;下面层混凝土线膨胀系数每增加  $0.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,温度应力减小 0.34 MPa。因此,下面层混凝土材料的线膨胀系数不宜低于上面层 PMCC 材料的线膨胀系数。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 申爱琴,熊剑平,贾 玉,等.新型混凝土路面材料及施工工艺研究:聚合物改性水泥混凝土复合式路面结构分析与设计[R].西安:长安大学,2005.

显特点和应用优势。

(2)该算法能适应地形的变化,在自动联网中能直接方便地处理地物、断裂线等问题,在保证设计精度的前提下,具有较高的运行效率。

(3)对逐点插入算法中的数据结构、包容盒、空外接圆检测算法、快速查找点所在的三角形算法、快速插入新点并调整拓扑关系算法进行优化和改进,提出一种优化的逐点插入算法,使得构网效率几乎接近线性时间复杂度  $O(N)$ ,对所有点而言,其查找时间为常量变化,高于现行的大多数算法,并在实际应用中得到验证。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] Miles R E. Solution to problem 67-15 (probability distribution of a network of triangles) [J]. SIAM, 1969, (11): 399-402.
- [2] Sibson R. Locally equiangular triangulations [J]. Computer Journal, 1978, 21(3): 243-245.
- [3] Lingas A. The greedy and Delaunay triangulations are not bad in the average case [J]. Information Processing Letters, 1986, 22: 25-31.
- [4] Lee D T, Schacheer B J. Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation [J]. International Journal of Computer and Information Science, 1980, 9(3): 219-242.
- [5] Lawson C L. Software for C surface interpolation [M]. New York: Academic Press, 1977.
- [6] Watson D F. Computing the n-dimension Delaunay tessellation with application to Voronoi polygons [J]. Computer Journal, 1981, 24 (2): 167-172.
- [7] 刘学军,符铎砂,赵建三. 三角网数字地面模型快速构建算法研究 [J]. 中国公路学报, 2000, 13(2): 31-36.  
LIU Xue-jun, FU Xin-sha, ZHAO Jian-san. A study of algorithm for fast constructing triangulation irregular net (TIN) [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(2): 31-36.
- [8] 章孝灿,黄智才,戴企成,等. GIS 中基于拓扑结构和凸壳技术的快速 TIN 生成算法 [J]. 计算机学报, 2002, 25(11): 1212-1218.  
ZHANG Xiao-can, HUANG Zhi-cai, DAI Qi-cheng, et al. An algorithm of speedily building TIN based on topological structure and convex shell in GIS [J]. Chinese Journal of Computers, 2002, 25(11): 1212-1218.
- [9] 刘少华,程朋根,陈红华. 一种带岛屿约束数据域的三角网剖分算法研究 [J]. 计算机应用, 2003, 23(4): 96-98.  
LIU Shao-hua, CHENG Peng-gen, CHEN Hong-hua. Study of algorithm for triangulation of restrained data set with islets [J]. Computer Applications, 2003, 23(4): 96-98.
- [10] 武晓波,王世新,肖春生. Delaunay 三角网的生成算法研究 [J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 28-35.  
WU Xiao-bo, WANG Shi-xin, XIAO Chun-sheng. A new study of Delaunay triangulation creation [J]. ACTA Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(1): 28-35.

(上接第 24 页)

- [2] 申爱琴,熊剑平,黄 吴,等. 新型混凝土路面材料及施工工艺研究;聚合物改性水泥混凝土路面性能及复合式路面施工工艺研究 [R]. 西安:长安大学, 2005.
- [3] Nishizawa T, Fukute T, Kokubun S. Study of a method for analyzing the mechanical behavior of composite pavement [C]//TRB. Transportation Research Record 1684. Washington D C: TRB, 1999: 101-109.
- [4] 王晓飞,申爱琴,朱建辉. 磨细矿渣改性超细水泥修补微裂缝的性能 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 24-28.  
WANG Xiao-fei, SHEN Ai-qin, ZHU Jian-hui. Properties of microcrack mending of granulated ground blast furnace slag modified microfine cement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 24-28.
- [5] 胡长顺,王秉纲. 复合式路面设计原理与施工技术 [M]. 北京:人民交通出版社, 1999.
- [6] 宋焕生,赵祥模,王国强,等. 混凝土结构层析成像检测系统 [J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 73-77.  
SONG Huan-sheng, ZHAO Xiang-mo, WANG Guo-qiang, et al. Ultrasonic-tomography system for nondestructive concrete structure testing [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 73-77.
- [7] 谈至明,姚祖康,刘伯莹. 双层水泥混凝土路面板的温度应力 [J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 10-12.  
TAN Zhi-ming, YAO Zu-kang, LIU Bo-ying. Thermal stress analysis of two-layered concrete slabs [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(2): 10-12.
- [8] 李祝龙,吴德平,张亚洲. 公路工程聚合物水泥基材料的耐久性能 [J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(4): 32-36.  
LI Zhu-long, WU De-ping, ZHANG Ya-zhou. Durabilities of polymer cement materials in highway engineering [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 32-36.
- [9] 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.
- [10] JTG D40-2002, 公路水泥混凝土路面设计规范 [S].