

# 旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构力学分析

曾 胜<sup>1</sup>, 何宇航<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 公路工程学院, 湖南 长沙 410076;

2. 西安瑞通路桥科技有限责任公司, 陕西 西安 710075)

**摘 要:**采用有限元方法,对直接加铺与施加防反射裂缝措施后再加铺的路面结构进行了力学分析和比较,得到了交通荷载、温度变化和材料参数对沥青加铺层结构力学性能的影响规律。结果表明:直接加铺沥青层结构时,只增加沥青材料强度、厚度和地基模量,都只能在一定程度上改善沥青加铺层结构的力学性能,且不一定经济有效;而加设 STRATA 应力吸收层,并改善旧混凝土板接缝传荷能力,能较好地改善沥青加铺层在交通荷载和温度荷载作用下的应力应变状态。

**关键词:**道路工程;旧水泥混凝土路面;沥青加铺层;反射裂缝;结构力学;有限元

**中图分类号:**U416.216

**文献标志码:**A

## Structure stress of asphalt overlay on old cement concrete pavement

ZENG Sheng<sup>1</sup>, HE Yu-hang<sup>2</sup>

(1. School of Highway Engineering, Changsha University of Science and Technology,

Changsha 410076, Hunan, China; 2. Xi'an Ruitong Highway and Bridge Sci-Tech

Co Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

**Abstract:** The structure stress of old cement concrete pavement with asphalt overlay was analyzed by finite element method. The analyzed result was compared with the one of the structure with the treatment of anti-crack. The influence of traffic loads, temperature changes, and the materials' parameters on the structure stress of asphalt overlay was studied. The results show that when the asphalt overlay is directly paved on the old cement concrete pavement without the measures of anti-crack, only increasing the strength of asphalt materials, growing the depth of structure and enhancing the modulus of bases can improve the mechanic performance of asphalt overlay on a limited scale, and this method is not always economical and efficient. If STRATA stress absorbing interlayer is set on the old cement concrete pavement and the load transfer efficiency at joints is improved simultaneously, the stress and strain in the asphalt overlay structure under traffic and temperature loads can be improved significantly. 6 tabs, 6 figs, 8 refs.

**Key words:** road engineering; old cement concrete pavement; asphalt overlay; reflection crack; structure stress; finite element

收稿日期:2007-04-02

基金项目:湖南省自然科学基金项目(06JJ4072)

作者简介:曾 胜(1973-),男,湖南邵阳人,副教授,博士,E-mail:zhaojian711514@126.com



0 引 言

从 20 世纪 80 年代初期开始,中国修筑了大量的水泥混凝土路面。目前,大部分水泥混凝土路面已经达到或超过了使用寿命;其余没有达到使用寿命的水泥混凝土路面,由于行驶车辆的严重超载、超重,路面结构也已经严重破坏,面临修复<sup>[1]</sup>。国内外应用最多的是在旧水泥混凝土路面上加铺沥青混凝土面层,并对防治和延缓沥青加铺层反射裂缝的产生和发展进行了大量的研究,先后采取的主要措施有:增加沥青层厚度,设置应力吸收层、加筋沥青层,以及处治旧路面板等<sup>[2]</sup>。但这些措施收效不理想,而且缺乏系统的分析和比较。由于旧水泥混凝土路面+防反射裂缝层+沥青加铺层,便形成了复杂的刚柔复合结构,目前还没有一个成熟的研究模型。为此,本文依托湖南省长益(长沙—益阳)高速公路加铺改造工程项目,采用有限元理论与方法,对直接加铺与施加防反射裂缝措施后再进行加铺的路面结构进行了力学分析和比较,以掌握交通荷载、环境因素(温度变化)、材料参数以及设置防反射裂缝措施后对旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构的影响规律,为确定经济、合理的路面结构加铺方案提供理论依据。

1 有限元模型的建立

为深入分析沥青加铺层结构中的荷载应力和温度应力,采用三维有限元法对设置及未设置防反射裂缝层的加铺层结构进行对比分析。各实体模型如图 1 所示。模型 1 为直接加铺沥青路面结构;模型 2 为设置防反射裂缝措施(如 STRATA 应力吸收层)后加铺结构;模型 3 为旧混凝土面板破碎后新建沥青路面<sup>[3]</sup>。视路面结构为弹性层状体系,由于层间铺洒粘层油,因此假定各层完全连续接触,将破碎混凝土面板视为新建沥青面层的半刚性基层。根据长益高速公路设计资料,纵向设有拉杆,横缝无传力杆。各层材料参数如表 1 所示。

交通荷载为标准轴载 BZZ-100,轮胎内压 0.7 MPa,单个轮压作用范围 18.9 cm×18.9 cm,双轮间距 32 cm,两侧轮隙间距为 182 cm<sup>[4]</sup>,见图 2。

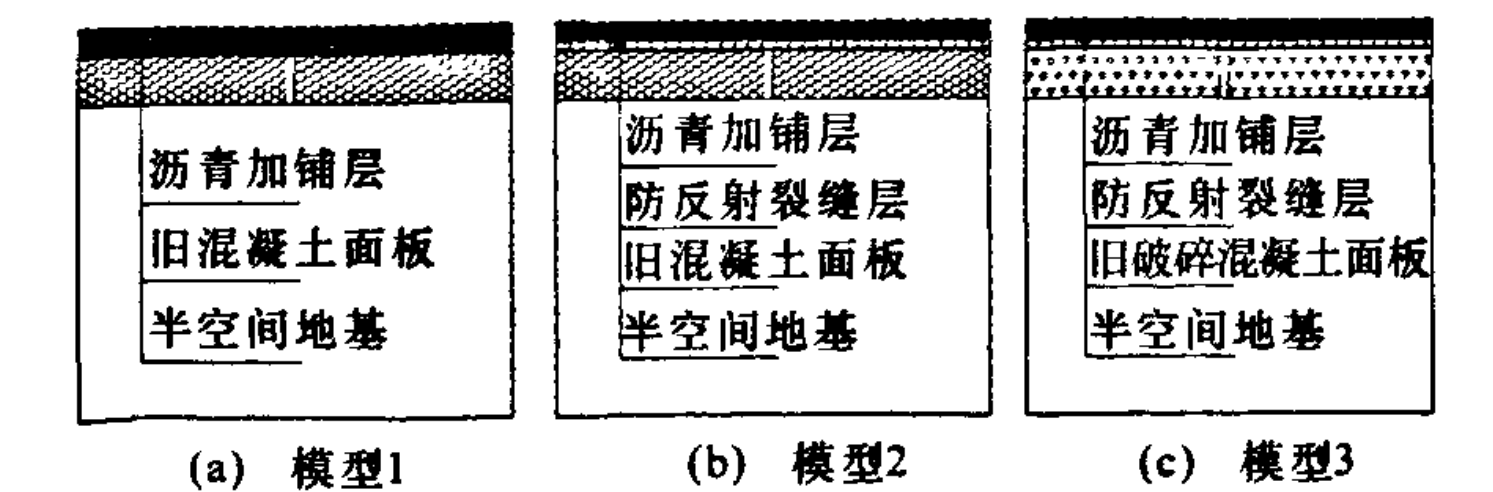


图 1 三维实体模型

表 1 各层材料参数

结构层	厚度 <i>h</i> /cm	弹性模量 <i>E</i> /MPa	泊松比 $\mu$	导热系数 $\lambda$ / (W·(m·℃) <sup>-1</sup> )	温缩系数 <i>a</i> /(℃ <sup>-1</sup> )
沥青加铺层	10	1 400	0.30	1.0	2.0×10 <sup>-5</sup>
STRATA 应力 吸收层	2	900	0.30	1.0	2.0×10 <sup>-5</sup>
旧混凝土面板 (5 m×4 m)	25	30 000	0.20	1.5	1.0×10 <sup>-5</sup>
旧破碎混凝土板	25	10 000	0.20	1.5	1.0×10 <sup>-5</sup>
地基		150	0.35	1.0	0.5×10 <sup>-5</sup>

2 交通荷载应力分析

2.1 直接加铺沥青结构

2.1.1 临界荷位的确定

临界荷位是指加铺层结构所产生最大拉应力、剪切应力和弯沉的荷载作用位置,即最不利荷位。为了初步考察临界荷位,取 4 种荷位下直接加铺沥青结构进行对比分析(图 3),其中  $A_1$  为图 2 中点 A 作用纵缝中部, $A_2$  为作用接缝一侧, $A_3$  为作用接缝中部, $A_4$  为作用板中心,计算结果如表 2 所示。

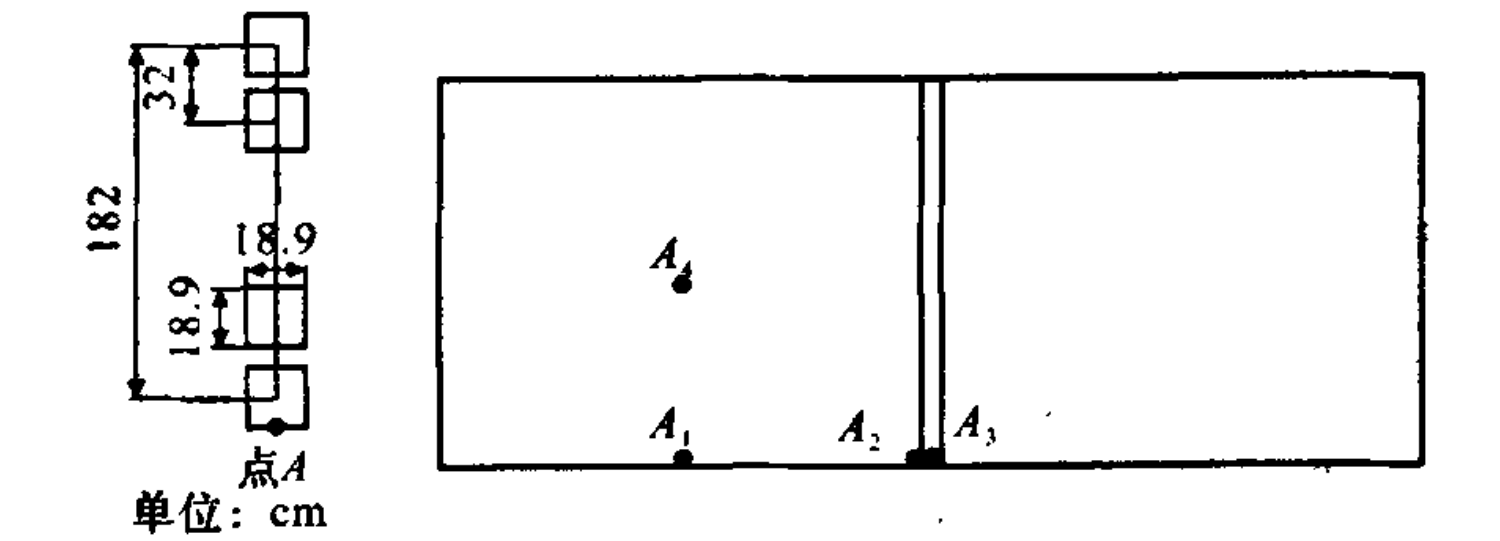


图 2 BZZ-100 图 3 荷位分布(俯视)

表 2 不同荷位时沥青加铺结构数值

计算指标	荷位 $A_1$	荷位 $A_2$	荷位 $A_3$	荷位 $A_4$
最大弯沉/mm	35.38	35.13	35.20	27.37
沥青层底部最大拉应力/MPa	0.053 90	0.013 70	0.014 11	0.020 60
沥青层底部最大剪应力/MPa	0.040 7	0.274 5	0.045 9	0.031 5
旧水泥混凝土底部最大 拉应力/MPa	0.936 2	0.698 6	0.540 4	0.273 3

从表 2 可以看出,对于最大弯沉、沥青层底部最大拉应力和旧水泥混凝土底部最大拉应力的临界荷位均为  $A_1$ (即纵缝中部),这同新建水泥混凝土路面的临界荷位一致<sup>[5]</sup>。沥青层底部最大剪应力临界荷位为  $A_2$ (即接缝一侧)。此时,在接缝处容易产生剪切型反射裂缝。因此,根据分析的需要,针对各种计算指标,分别选择  $A_1$ 、 $A_2$  为临界荷位。

2.1.2 结构参数敏感性分析

各计算参数与沥青加铺层模量的变化曲线如图 4 所示。

从图 4 可看出,随沥青层模量的增加,最大弯沉和旧水泥混凝土底部最大拉应力逐渐减小,其中减



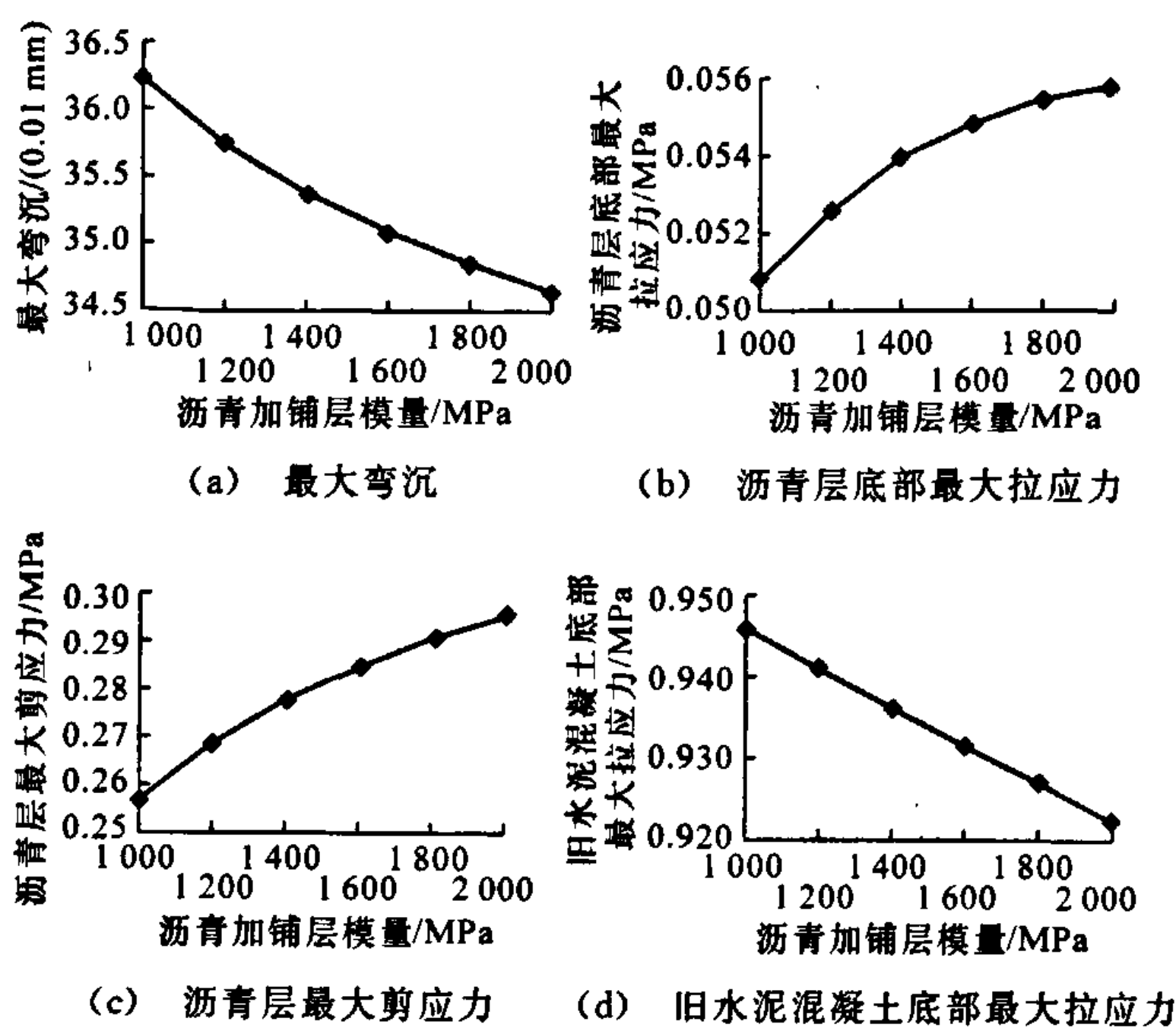


图4 各计算参数与沥青加铺层模量的变化曲线

小幅度较大的是最大弯沉;而沥青层底部最大拉应力和剪应力逐渐增大,其中增大幅度较大的是沥青层底部最大剪应力。这说明,沥青层强度的增加对减小最大弯沉、降低旧水泥混凝土底部最大拉应力有利,而对于降低沥青层底部最大拉应力、剪应力则不利。

各计算参数与沥青加铺层厚度的变化曲线如图5所示。

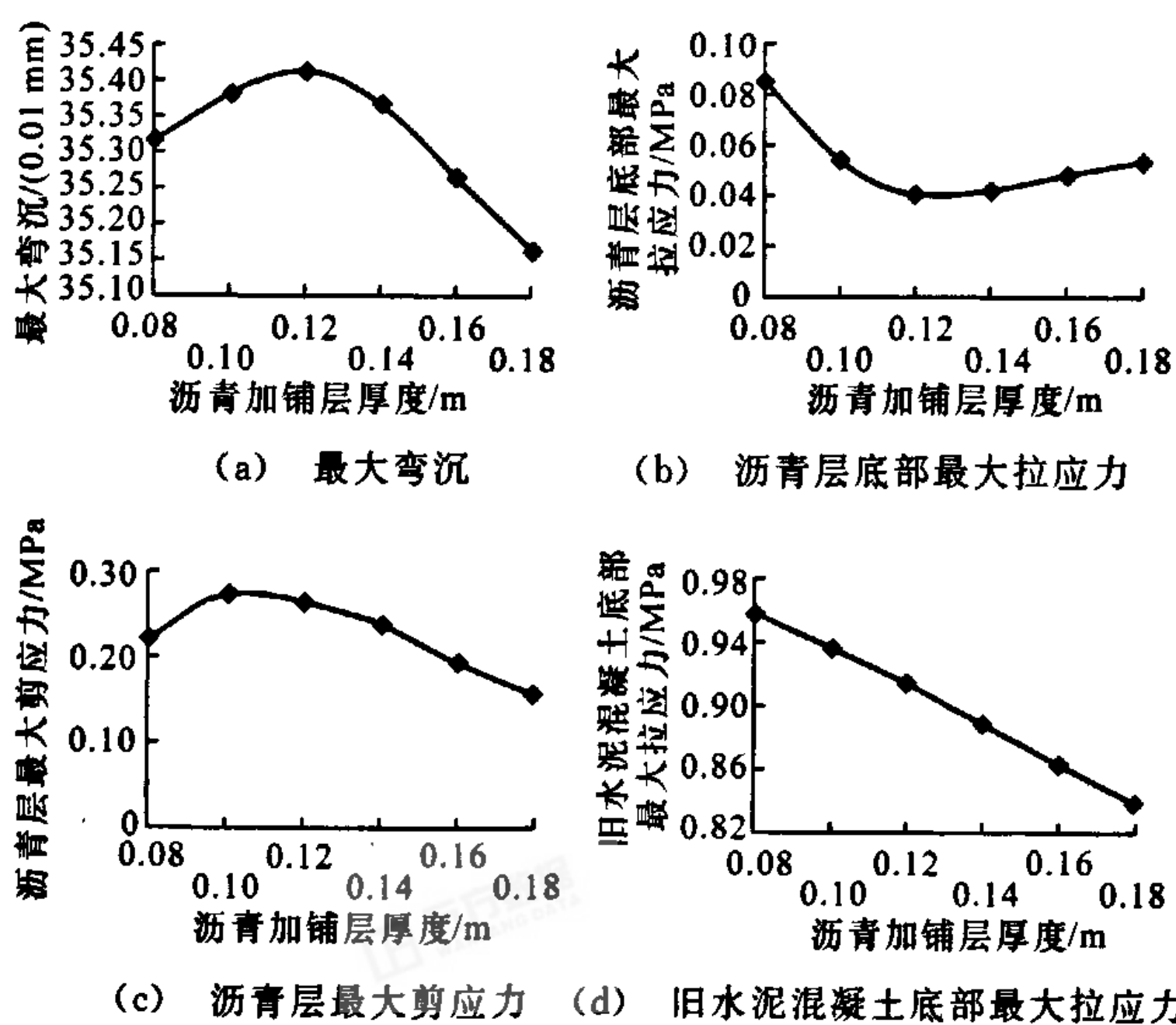


图5 各计算参数与沥青加铺层厚度的变化曲线

从图5可以看出,随沥青层厚度的增加,最大弯沉和沥青层底部最大剪应力先逐渐增大到一定峰值后开始下降,而沥青层底部最大拉应力则相反,只有旧水泥混凝土底部最大拉应力随着沥青层厚度的增加持续下降。这说明,一味增加沥青层厚度,除了增加工程造价外,并不一定对改善路面结构受力状况有利。

图6为各计算参数与地基模量的变化曲线。

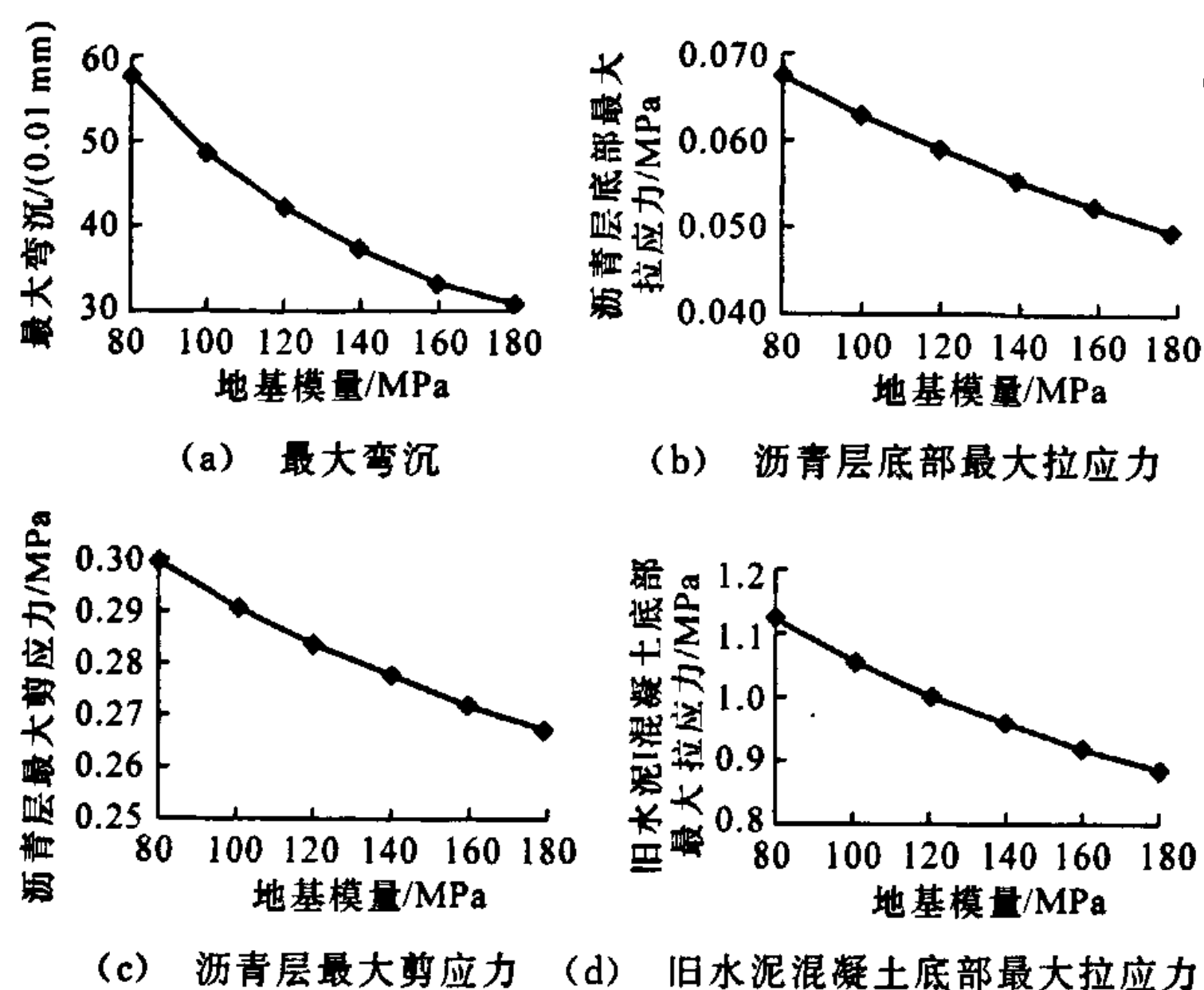


图6 各计算参数与地基模量的变化曲线

从图6可以看出,随着地基模量的增加,各计算参数均随之减小,减大幅度最大的是路面弯沉,其次为沥青层底部最大拉应力,最小的是沥青层底部最大剪应力。由此可见,地基模量对弯沉的影响最大。

## 2.2 处治防反射裂缝后加铺沥青结构

表3为对旧水泥混凝土路面进行处治、修复或施加防反射裂缝措施前后,沥青加铺层结构中各计算参数数值比较结果。需要说明的是,为了表征改善接缝传荷(如灌缝、加设传力杆)对路面结构各计算参数的影响,在模型的建立中,采用施加接缝模量的简化方法。该方法虽然不能准确量化接缝传荷能力,但在原理上与加设传力杆、增强路面结构的整体性和传荷能力、降低接缝处的应力集中完全一致,能够定性描述接缝传荷能力的影响。另外,对于破碎旧水泥混凝土面板,一般可将其视为新建沥青面层的半刚性基层<sup>[6]</sup>。

表3 处治防反射裂缝后沥青加铺层结构各计算参数(交通荷载)

计算参数	直接加铺结构	加设STRATA层	改善接缝传荷	破碎旧混凝土面板
弯沉/(0.01 mm)	35.38	35.01	24.58	29.58
沥青层底部最大拉应力/MPa	0.053 9	0.019 6	0.015 3	0.017 6
沥青层最大剪应力/MPa	0.274 5	0.219 1	0.045 6	0.063 5
旧水泥混凝土底部最大拉应力/MPa	0.936 2	0.916 5	0.308 2	0.222 1

从表3可看出,相对直接加铺沥青层,对旧水泥混凝土路面进行处治修复和施加防反射裂缝措施后,各计算参数有较明显的降低。其中,加设STRATA应力吸收层,大幅降低了沥青层底部的最大拉应力,但对其他参数影响较小,而改善接缝传荷能力与破碎旧水泥混凝土面板则对各参数的影响均较大。



3 温度荷载应力分析

3.1 温度荷载的选取

路面结构温度场的变化是一个复杂的过程,一般研究忽略了路面结构各层最大温度的后滞效应,而采用简化的指数函数来模拟路面结构温度随深度的变化,这显然与实际状况有些不符<sup>[7]</sup>。因此,本文对温度荷载直接选取温度梯度来分析温度翘曲应力,采用降温幅度来分析温度收缩应力。该方法不仅物理意义清楚明了,而且所选荷载与产生应力呈正比例关系(表 4),从而避开了结构层参数与路面结构温度场的交互影响。根据长益高速公路所处自然区划,加铺 10 cm 沥青层后,25 cm 旧水泥混凝土面板最大温度梯度取 20 ℃/m,降温幅度  $\Delta T = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。另外,在旧水泥混凝土路面沥青加铺层中,沥青混凝土实际属于粘弹性材料,温度场的变化一般仅影响其劲度模量,而对于旧水泥混凝土面板等脆性材料,则容易在温度变化下产生温度翘曲和收缩,继而在沥青层底部产生较大的拉伸和剪切应力<sup>[8]</sup>。因此,本文仅考虑旧水泥混凝土面板温度翘曲和降温收缩。

表 4 各计算参数与温度梯度的变化

计算参数	温度梯度/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ )			
	10	20	30	40
沥青层最大拉应力/MPa	0.015 8	0.031 6	0.047 4	0.063 2
沥青层最大剪应力/MPa	0.122 3	0.244 6	0.366 9	0.489 2
旧水泥混凝土底部最大拉应力/MPa	0.681 8	1.363 5	2.045 3	2.727 0

3.2 温度翘曲应力分析

表 5 为对旧水泥混凝土路面进行处治、修复或施加防反射裂缝措施前后,在旧混凝土面板产生温度翘曲时,各计算参数的比较结果。

从表 5 可以看出,处治防反射裂缝后沥青加铺层的结构应力状况有了明显的改善。其中加设 STRATA 应力吸收层对沥青层最大剪切应力有了较大的降低,但是对沥青层最大拉应力和旧水泥混凝土底部最大拉应力影响不大,而改善接缝传荷与破碎旧混凝土面板对温度翘曲所产生的应力影响均较为明显。

表 5 处治防反射裂缝后沥青加铺层结构各计算参数(温度翘曲)

计算参数	直接加铺结构	加设 STRATA 层	改善接缝传荷	破碎旧混凝土面板
沥青层最大拉应力/MPa	0.026 5	0.025 3	0.002 5	0.002 1
沥青层最大剪应力/MPa	0.174 9	0.078 0	0.019 0	0.016 5
旧水泥混凝土底部最大拉应力/MPa	1.314 5	1.426 3	0.938 2	0.312 7

3.3 温度收缩应力分析

表 6 为对旧水泥混凝土路面进行处治、修复或施加防反射裂缝措施前后,在旧混凝土面板产生温度收缩时,各计算参数的比较结果。

表 6 处治防反射裂缝后沥青加铺层结构各计算参数(温度收缩)

计算参数	直接加铺结构	加设 STRATA 层	改善接缝传荷	破碎旧混凝土面板
沥青层最大拉应力/MPa	2.948 6	1.005 8	0.014 6	0.012 8
沥青层最大剪应力/MPa	0.208 7	0.304 3	0.007 7	0.006 7
旧水泥混凝土底部最大拉应力/MPa	2.360 8	2.228 8	0.790 5	0.263 4

从表 6 可以看出,处治防反射裂缝后沥青加铺层的结构应力状况有了明显的改善。其中加设 STRATA 应力吸收层对沥青层最大拉应力影响较明显,但是对沥青层剪切应力和旧混凝土板底部最大拉应力影响不大。而改善接缝传荷与破碎旧混凝土面板对温度收缩所产生的应力影响均较大。

4 结 语

(1)旧水泥混凝土路面沥青加铺层底部最大拉应力、旧水泥混凝土底部最大拉应力的临界荷位均为纵缝中部,而沥青层底部最大剪应力临界荷位为接缝一侧;沥青层强度的增加对减小最大弯沉、降低旧水泥混凝土底部最大拉应力有利,而对降低沥青层底部最大拉应力、剪应力不利。

(2)只增加沥青加铺层厚度,并不一定对改善路面结构受力状况有利;地基模量增加,各计算参数均随之减小,其中弯沉受地基模量影响最大。

(3)对旧水泥混凝土路面进行处治修复和施加防反射裂缝措施后加铺沥青层,相对于直接加铺沥青层,结构应力状况有了明显的改善。其中,加设 STRATA 应力吸收层大幅降低了沥青层底部的最大拉应力和沥青层最大剪应力,而改善接缝传荷与破碎旧混凝土面板对温度翘曲和温度收缩所产生的应力影响均较为明显。

(4)考虑到破碎旧混凝土面板容易损害基层,为了保证加铺效果,在实际工程中,建议可以优先选择改善传荷能力后铺设 STRATA 应力吸收层+ SMA 或 AC 改性沥青面层的方案。

参考文献:

References:

[1] 武贤慧,张登良,李德超. 沥青路面反射裂缝足尺试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(6):4-6.

(下转第 25 页)



## 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.