

文章编号: 1002-0268 (2009) 05-0040-05

大粒径沥青混合料防裂机理耦合数值分析

资建民¹, 路庆昌¹, 王海军², 黄求喜³, 万伟¹

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074;

2. 长春市政工程设计研究院宁波分院, 浙江 宁波 315040;

3. 西华大学 建筑与土木工程学院, 四川 成都 610039)

摘要: 采用有限元方法分析 LSAM-30 基层沥青路面结构的最不利荷位在行车荷载、温度荷载以及两者耦合应力作用下的应力状态, 同时与设置相同厚度的 ATPB-30、AC-30I 基层的应力计算结果进行对比分析, 结果表明 LSAM-30、ATPB-30 基层比 AC-30I 基层有较好的缓解反射裂缝的能力。LSAM-30 粗骨料多, 公称粒径大, 因而导热系数大, 温缩系数小, 回弹模量小, 可有效减小结构层间温度梯度, 进而减小层间温度应力, 同时其表现出的足够的柔性也可以充分地吸收裂缝处的应变能, 因而具有较强的防裂能力。通过工程实例对比分析了 LSAM-30、ATPB-30、AC-30I 3 种基层的防裂性能。通过长期实际使用情况表明, 铺设 LSMA 基层的路面使用状况良好、未发现裂缝生长迹象, 而铺设其他 2 种基层的路面则出现了不同程度的裂缝, 结果表明 LSMA 基层具有明显的防裂性能。

关键词: 道路工程; 防裂机理; 数值分析; 大粒径沥青混合料; 反射裂缝

中图分类号: U416.01

文献标识码: A

Coupled Numerical Analysis of Anti-crack Mechanism of Large Stone Asphalt Mixture

ZI Jianmin¹, LU Qingchang¹, WANG Haijun², HUANG Qiuxi³, WAN Wei¹

(1. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Ningbo Branch of Changchun Municipal Engineering Design & Research Institute, Ningbo Zhejiang 315040, China;

3. School of Architecture & Civil Engineering, Xihua University, Chengdu Sichuan 610039, China)

Abstract: Stresses of pavement with flexible base of LSAM-30, ATPB-30 and AC-30I at the most adverse point under the function of traffic load and temperature load as well as the coupling of them were calculated and compared by finite element method. The result indicates that flexible bases of LSAM-30 and ATPB-30 are more effective in the prevention of reflection crack. Because of the great volume of coarse aggregate and large maximum nominal particle-size, the LSAM-30 thermal conductivity is greater, and the temperature shrinking coefficient is lower as well as the modulus of resilience, which could reduce the temperature gradient among the structure layers effectively and then diminish the thermal stress. At the same time, the adequate flexibility performance of the LSAM may also absorb strain energy at the crack of the semi-rigid subbase sufficiently. As a result, it presented preferable reflection crack resistance. A case study was conducted to do comparative analysis of anti-cracking performance of LSAM-30, ATPB-30 and AC-30I flexible bases. A long-term follow-up observation of test roads with the three bases shows that the pavement with LSMA base is in good condition and no sign of crack found while pavements with ATPB-30 and AC-30I flexible bases have varying degrees of crack. LSMA flexible base has an obvious performance of anti-crack.

Key words: road engineering; anti-crack mechanism; numerical analysis; large stone asphalt mixture (LSAM); reflection crack

收稿日期: 2008-03-13

基金项目: 湖北省交通厅科技攻关项目 (2005361)

作者简介: 资建民 (1958-), 女, 湖南长沙人, 教授, 研究方向为路面结构设计、施工理论与方法。 (zjmjt@163.com)

0 引言

半刚性基层沥青路面的反射裂缝问题如今越来越受到国内外公路界的重视, 但迄今仍没有得到有效的解决。大粒径沥青混合料被公认为是一种可以缓解反射裂缝的有效材料^[1]。但目前我国对于大粒径沥青混合料防反射裂缝的研究几乎全部停留在试验路的观测上^[2], 很少从力学的角度对其防裂机理进行研究。本文结合某高速公路铺筑 LSAM 基层试验路的实例进行研究。该高速公路为国家高速公路主骨架组成部分, 是其所在地第 1 条直接在主线摊铺 LSAM 基层的高速公路, 该地区地势起伏悬殊, 自然横坡陡峭, 高程多在 600~1 800 m, 最高达 2 000 m, 雾多湿重, 区域降雨量大。该高速公路 LSAM 基层试验段全长 16.45

km, 层厚 26.5 cm, 采用重交通公路沥青路面设计规范 (JTG D50-2006)^[3] 标准。通过对比相同条件下 ATPB-30、AC-30I 基层在行车荷载、温度荷载及两者耦合作用下的应力状态, 从有限元的角度^[4] 分析了大粒径沥青混合料的结构应力特征及其防裂机理。

1 路面结构有限元模型的建立

采用 ANSYS 有限元软件进行路面结构的仿真分析。路面结构在水平方向和深度方向取有限尺寸, 具体为纵向长 12.005 m, 横向宽 6.0 m, 路面各结构层厚度及所采用混合料的物理参数见表 1。其中, 结构层 3 采用 3 种方案, 即 LSAM-30、ATPB-30 和 AC-30I, 意在对比 3 种混合料的力学性能进行比较分析, 设计厚度均为 26.5 cm。

表 1 路面结构及主要计算参数

Tab 1 Pavement structure and main parameters

结构层	类型	厚度/ cm	回弹模量/ MPa	泊松比 ^[5]	温缩系数 ^[6] / (K ⁻¹)	等效导热系数 ^[7] / [W·(m ² ·K) ⁻¹]	密度/ (kg·m ⁻³)	比热/ [J·(kg·K) ⁻¹]	导热系数/ (m ² ·h ⁻¹)
1	AC-13G	4	1 400.0	0.35	2.5×10^{-5}	1.447	2 485	967	6.02×10^{-7}
2	AC-20G	6	1 200.0	0.35	2.3×10^{-5}	1.463	2 440	962	6.23×10^{-7}
方案 I	AC-30I	26.5	1 100.0	0.35	2.1×10^{-5}	1.534	2 420	957	6.62×10^{-7}
3 方案 II	LSAM-30	26.5	920.0	0.35	1.8×10^{-5}	1.581	2 410	948	6.92×10^{-7}
方案 III	ATPB-30	26.5	730.0	0.35	1.8×10^{-5}	1.023	2 030	929	5.42×10^{-7}
4	4.5% 水泥碎石	18	1 500.0	0.20	1.5×10^{-5}	1.500	2 330	810	7.95×10^{-7}
5	4% 水泥碎石	18	1 400.0	0.20	1.5×10^{-5}	1.500	2 300	810	8.05×10^{-7}
6	土基	—	40.0	0.40	0.5×10^{-5}	1.000	1 500 ⁽²⁾	880	7.58×10^{-7}

注: 导热系数为物体在加热或冷却时, 各部分温度趋于一致的能力, 是材料等效导热系数与材料密度和比热的比值。

为反映半无限大空间地基的特性, 土基采用扩大基础来模拟。取地基不同尺寸计算误差分析, 土基扩大基础尺寸拟定为 20.005 m×14.0 m×9.0 m, 长度方向为 Z 轴, 宽度方向为 X 轴, 深度方向 Y 轴。路面结构计算模型见图 1。

假定结构层 4 有一贯穿整个路宽的横向干缩裂缝, 裂缝宽度设为 0.5 cm, 裂缝处无传荷能力。计算采用的理论体系为: 沥青路面各结构层为线弹性层, 满足弹性层状体系理论^[8] 假设, 土基亦为弹性层, $\mu=0.40$, $c=100$ kPa, $\phi=30^\circ$, $\theta=5^\circ$ ^[9]。

对几何模型进行有限元网格划分时, 0.5 cm 裂缝处单元进行细化, 划分单元的最小节点间距为 0.125 cm, 其他部位按常规方法划分^[10]。单元网格划分的总节点数为 22 990, 路面结构单元数为 5 880, 扩大土基单元数为 14 260。离散后的路面结构三维有限元模型如图 2 所示。

2 轮载应力对比分析

轮载采用试验路的设计轴载 BZZ-100 (单轴双轮组, 轴载 100 kN), 轮胎接地压强 $p=0.7$ MPa, 单轮传压面当量圆直径 $d=21.30$ cm, 为方便建模, 视轮胎单轮接地形状为 18.9 cm×18.9 cm 的矩形, 接地面积 357.21 cm², 双轮中心距为 32 cm, 两侧轮隙间距

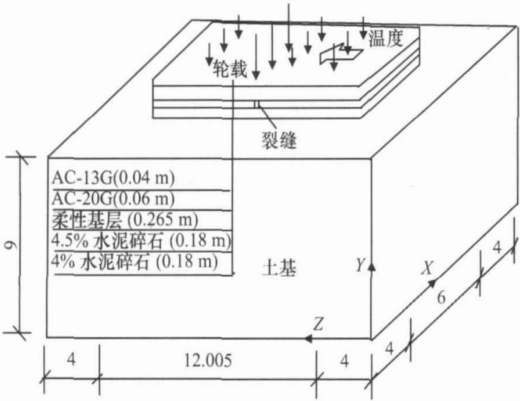


图 1 路面应力计算结构模型 (单位: m)
Fig 1 Structural model for pavement stress calculation (unit: m)

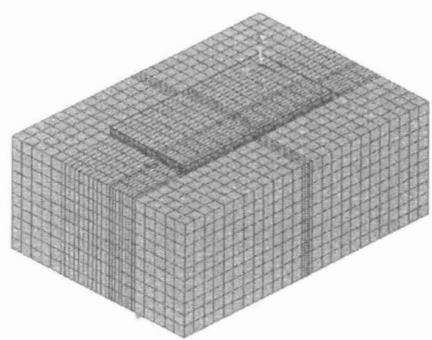


图 2 离散后的路面结构三维有限元模型

Fig 2 Dispersed 3D finite element model of pavement

表 2 轮载、温度及耦合应力作用下各基层裂缝处应力值

Tab 2 Stress of each flexible base at crack under the condition of load, temperature and coupling

基层 类型	荷载 类型	应力 / (× 10 ⁻⁶ MPa)										
		σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}	σ_1	σ_2	σ_3	$\tau_{\max}$	σ_{seqv}
AC-30I	轮载	-24 079	-215 030	7 751	4081.8	-90 993	-7 663.8	41 321	-25 200	-247 480	144 400.5	261 950
	温度	99 511	82 954	570 580	-9 914.7	-1 730.1	1 488.8	570 590	104 140	78 314	246 138	479 890
	耦合	96 963	-78 857	580 480	-14 300	-73 338	-6 673.6	588 590	98 118	-88 122	338 356	605 470
ISAM-30	轮载	-33 587	-212 300	-14 646	-5 360.8	-88 610	-5 144.2	20 104	-34 382	-246 250	133 177	243 730
	温度	85 720	88 002	476 780	-3 421.8	-1 739.8	1 183.4	476 800	90 456	83 254	196 773	389 990
	耦合	80 367	-73 747	476 990	-6 225.5	-71 484	-5 883.8	486 180	80 597	-83 167	284 673.5	507 680
ATPB-30	轮载	-45 437	-208 150	-40 385	6 640.4	-85 102	-2 112	-4 278.6	-45 790	-243 900	119 810.7	221 800
	温度	81 559	81 802	421 340	-6 085.2	-1 661.4	1 178.5	421 350	87 755	75 594	172 878	339 840
	耦合	72 345	-80 416	410 140	-6 883.1	-68 813	-4 593.2	419 640	72 648	-90 227	254 933.5	451 060

由表 2 可以看出, 基层采用 AC-30I 时裂缝处的最大主应力、最大剪应力及等效力均为最大, LSAM-30 与 ATPB-30 则顺序次之, 而且均有较大幅度的减少, 如图 3 所示。

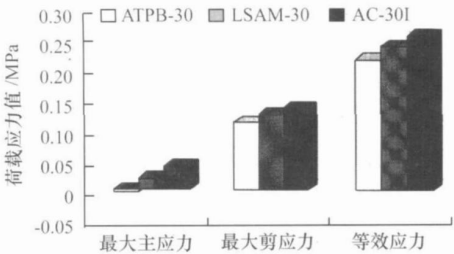


图 3 各柔性基层轮载应力对比图

Fig 3 Comparison of the load stresses of each flexible base

3 瞬态温度应力对比分析

外界条件往往是一个动态参量, 路面结构温度场的求解也是一个动态过程^[13], 在工程上一般用瞬态热分析计算温度场, 并将之作为热载荷进行应力分析。

试验路所在地区的外界温度从 1.7 °C→-7.3 °C 即降温 9 °C, 以此来计算温度应力。试验时外界温度连续降温具有均匀性, 降温时间为 12 h (43 200 s)。

182 cm^[11]。

土基底部完全约束, 各侧面水平方向位移均为 0; 沥青路面结构 (除结构层 4 外) 在两端横截面上水平位移为 0, 在两侧侧面上位移自由; 结构层 4 在 4 侧面上位移均自由; 面层表面作为自由面, 不进行任何约束。各层层间结合条件设为完全连续, 即层间无相对滑动。

本文就偏荷载作用下柔性基层的受力情况进行分析, 采用 8 节点三维六面体单元, 分析最不利荷位下沥青路面的应力分布状态^[12]。

基层底部裂缝处的应力计算结果如表 2 所示。

大风天气空气的热对流系数为 25 W/m²·K⁻¹。考虑路面与外界之间的对流换热。沥青路面各结构层材料的热力学性能参数见表 1。

假定路面层为均质、连续各向同性薄板^[14], 在同一平面上温度均匀分布, 只沿厚度 y 方向有温度变化。此时, 任一时刻 t 路面体内温度场可表示为: T= T (y, t)。路表为温度约束面, 其他部位不进行约束。

试验路 ISAM-30、AC-30I 和 ATPB-30 基层沥青路面结构 (0~0.725 m) 在 43 200 s 内沿 y 向一维节点温度场如图 4 所示。

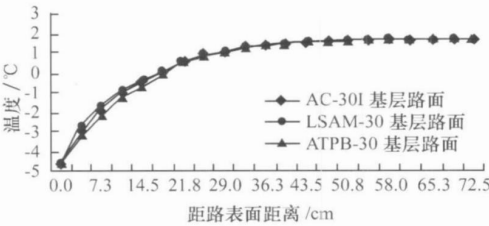


图 4 43 200 s 时刻温度场对比图

Fig 4 Comparison of the temperature fields at 43 200 s

从图 4 可见, 在路表至 21.8 cm 深度范围内, 任意两深度之间的温度梯度, 采用 ATPB-30 基层时最

大, 其次为 AC-30I, 采用 LSAM-30 时最小。随着路面深度的增加, 3 种类型路面的温度梯度值渐趋一致。

将以上计算的温度场作为热荷载作用于路面结构进行应力分析。单元类型及边界条件同轮载应力计算。采用的 0 应力基准温度为沥青混合料力学性能检测时的规定温度 15℃。基层底部裂缝处的应力计算结果如表 2 所示(忽略温度降低对路面材料各参数的影响)。

由表 2 可见, 在试验路降温 9℃时, 基层采用 AC-30I 时裂缝处的最大主应力 σ_1 、最大剪应力 $\tau_{\max}$ 及等效应力 σ_{seq} 均为最大, LSAM-30 与 ATPB-30 则顺序次之, 如图 5 所示。

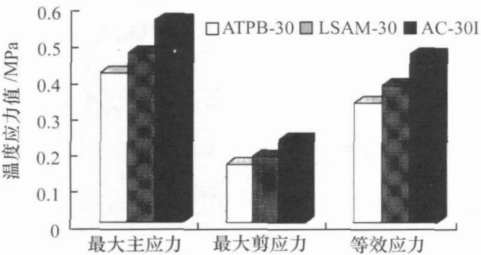


图 5 各柔性基层温度应力对比图

Fig 5 Comparison of the temperature stresses of each flexible base

4 热-荷载耦合应力对比分析

在此分析中, 将温度场中各结点温度作为体积荷载施加于轮载分析中以进行耦合应力计算。计算所采用的单元类型及边界条件同轮载应力计算。

热-荷载耦合作用下各柔性基层底部裂缝处的最大主应力 σ_1 、最大剪应力 $\tau_{\max}$ 及等效应力 σ_{seq} 计算结果如表 2 及图 6 所示。

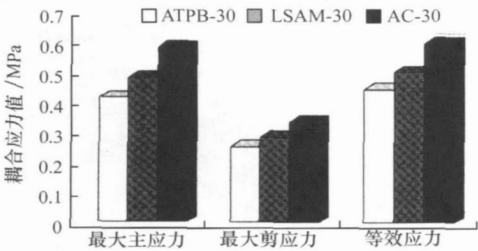


图 6 各柔性基层热-荷载耦合应力对比图

Fig 6 Comparison of the heat-load coupling stresses of each flexible base

由表 2 可知, 基层底部裂缝处所产生的最大主应力 σ_1 、最大剪应力 $\tau_{\max}$ 及等效应力 σ_{seq} 应力值在

轮载、温度耦合作用与温度荷载单独作用 2 种工况下, 其值均较为接近, 表明温度应力是引起沥青路面反射裂缝产生的主要原因, 以最大主应力 σ_1 为例, 各柔性基层的轮载、温度及耦合作用下 σ_1 的大小对比见图 7。

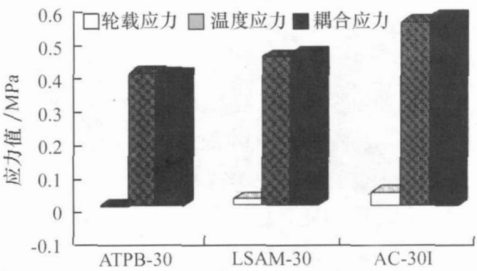


图 7 各基层轮载、温度及耦合作用下对比图

Fig 7 Comparison of of load and temperature and coupling of each flexible base

5 结论

(1) 分析结果表明, 温度应力是引起反射裂缝的主要原因。大粒径沥青碎石 LSAM-30、ATPB-30 具有较强柔性而能够较好地吸收裂缝处的轮载及温度应变能, 具有较强的防裂能力。

(2) 对比 LSAM-30 和 AC-30I 的应力计算结果, 表明对于密实型混合料, 粗骨料含量或粉-砂-胶粘结料的含量是影响混合料抵抗温度应力的关键因素(前者粗骨料多, 沥青-砂-矿粉用量少)。在柔性基层混合料的配合比设计中, 采用公称最大粒径较大的集料类型, 同时增加粗骨料用量、降低矿粉-砂率用量是减少柔性基层层间温度梯度及温度应力的有效措施。

(3) 对比 2 种大粒径沥青混合料 LSAM-30 与 ATPB-30 应力计算结果, 表明 ATPB-30 具有更为理想的防裂效果。但若从两者的路用性能进行综合评价, LSAM-30 比 ATPB-30 的路用性能更为理想, 因而前者是沥青稳定基层的首选材料。

(4) 自通车以来, 该高速公路 LSAM 基层试验段历经近 2.5 a 行车荷载和严寒的双重考验。现场观测表明, 铺设 LSAM 基层的沥青路面使用情况良好, 尚未发现反射裂缝的生长迹象, 而未铺设 LSAM 基层的路面段则局部不同程度地产生了反射裂缝, 表明 LSAM 基层防裂效果明显。

参考文献:
References:

[1] NCHRP RFPOR386 Design and Evaluation of Large Stone Asphalt Mixes [R] . Washington D C: Transportation Research

- Board, National Research Council, 1990: 122—155.
- [2] 冯俊领. 大粒径沥青混合料路用性能研究 [D] . 长沙: 长沙理工大学, 2004: 4—9.
FENG Junling Study of Road Performance of Large-stone Asphalt Mixture [D] . Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2004: 4—9.
- [3] 中华人民共和国交通部. JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范 [S] . 北京: 人民交通出版社, 2006.
P. R. China Ministry of Communications. JTG D50-2006 Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S] . Beijing: China Communications Press, 2006.
- [4] 罗辉, 朱宏平, 陈传尧. 有限元-无网格伽辽金耦合方法模拟沥青路面裂纹扩展 [J] . 公路交通科技, 2008, 25 (9): 1—6.
LUO Hui, ZHU Hongping, CHEN Chuanyao. Modeling of Crack Propagation in Asphalt Pavements by the coupled EFG and FE Method [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (9): 1—6.
- [5] 李峰, 孙立军. 沥青路面 Top-Down 开裂成因的有限元分析 [J] . 公路交通科技, 2006, 23 (6): 1—4.
LI Feng, SUN Lijun. Finite Element Analysis of Top-Down Cracking in Asphalt Pavement [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (6): 1—4.
- [6] 陈拴发, 高蕾, 董小坤. 高性能混凝土配合比设计参数对温缩系数的影响 [J] . 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25 (4): 1—4.
CHEN Shuanfa, GAO Lei, DONG Xiaokun. Influence of Mix-designed Parameters on Temperature Shrinkage Features of High Performance Concrete [J] . Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25 (4): 1—4.
- [7] 陈则韶, 葛新石, 顾毓沁. 量热技术和热物理性测定 [M] . 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 84—86.
CHEN Zeshao, GE Xinshi, GU Yuqin. Determination of Calorimetry Technology and Heat Physics [M] . Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1990: 84—86.
- [8] 王富玉, 任立锋, 刘元烈. 大粒径沥青混合料路用性能研究 [J] . 公路交通科技, 2003, 20 (5): 6—9.
WANG Fuyu, REN Lifeng, LIU Yuanlie. Study on Pavement Performance of ISAM [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20 (5): 6—9.
- [9] HANG H, HAND A J, HADDOCK J E, et al. An Object-oriented Framework for Finite Element Pavement Analysis [J] . Advances in Engineering Software, 2007, 38 (11/12): 763—771.
- [10] FANG H, HADDOCK J E, WHITE T D, et al. On the Characterization of Flexible Pavement Rutting Using Creep Model-based Finite Element Analysis [J] . Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 41 (1): 49—73.
- [11] 资建民, 龚文惠. 路基路面工程 [M] . 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 20—31.
ZI Jianmin, GONG Wenhui. Engineering of Subgrade and Pavement [M] . Guangzhou: Press of South China University of Technology, 2002: 20—31.
- [12] 聂忆华, 张起森. 长寿命沥青路面沥青层力学分析及其层位划分研究 [J] . 公路交通科技, 2008, 25 (5): 13—17.
NIE Yihua, ZHANG Qisen. Mechanical Analysis and Asphalt Layer Subdivision of Long Life Asphalt Pavement (LLAP) Structures [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (5): 13—17.
- [13] 刘寒冰, 张云龙, 高远. 连续配筋混凝土路面温度应力分析 [J] . 公路交通科技, 2008, 25 (3): 1—7.
LIU Hanling, ZHANG Yunlong, GAO Yuan. Analysis of Thermal Stress for Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP) [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (3): 1—7.
- [14] 李春雷, 李春香, 陈光营, 等. 半刚性基层沥青路面温度应力断裂力学分析 [J] . 公路交通科技, 2006, 23 (10): 33—36.
LI Chunlei, LI Chunxiang, CHEN Guangying, et al. Fracture Mechanic Analysis of Temperature Stress of Semi-rigid Base Asphalt Pavement [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (10): 33—36.