第 23卷 第 4期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol 23 No 4
2010年 12月 JOURNAL OF SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE) Dec. 2010

沥青路面典型结构力学分析

孙宇怀[1], 陈志国[1], 李永陆[2]

(1 吉林省交通科学研究所, 吉林 长春 130012; 2 吉林省交通建设集团, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对东北地区高速公路沥青路面状况, 依据东北地区道路冻区、交通等级、土基强度等级, 采用有限元对路面结构应力、应变及弯沉等指标进行了力学分析, 提出了不同冻区、不同干湿类型、不同土质和不同冻深条件下抗冻垫层厚度设计方法及推荐值, 最后给出东北地区高速公路沥青路面典型结构。

关键词: 高速公路; 沥青路面; 典型结构; 力学分析

中图分类号: U416 217 文献标识码: A 文章编号: 2095-0373(2010)04-0072-05

0 引言

近年来, 伴随着我国经济的快速发展, 汽车饱有量的迅猛增加, 干线公路上交通量大幅度增加, 车辆荷载日益重型化, 载货汽车的超载也变得越来越严重, 且公路运输部门和运输业者为了不断提高效率, 降低运输成本及能源消耗, 普遍采用大吨位重型汽车及汽车列车, 重载车辆比例逐年提高, 超载现象较为严重, 路面早期破坏成为比较突出的问题, 既影响了公路的交通运输, 又造成了巨大的经济损失。所以快速发展的交通量及重载和超载现象, 对沥青路面结构和材料指标提出了新的要求。

东北地区现有高速公路达到 4 600 km, 其中一些高速公路出现了较严重的早期病害, 每年要投入巨大的养护资金进行维修处理, 同时"十一五"、"十二五"期间, 东北地区要建设超过 4 000 km高速公路, 投资近 1 500亿元。如此大规模的公路建设, 将不允许出现严重的早期病害, 因此需提高路面建设技术, 采用科学合理的沥青路面典型结构, 实现东北地区公路建设又好又快发展。

依据东北地区交通量等级和土基模量分级的划分, 在沥青路面病害调查分析的基础上, 结合当地的筑路材料来源、交通条件、土基条件和经济发展以及已有试验工程的使用情况提出合理的路面结构形式, 通过力学分析计算提出适应于东北地区高速公路沥青路面的典型结构。

1 高速公路沥青路面典型结构设计

遵循路面耐久、基层坚实、土基稳定的原则, 结合各结构层功能正确合理的选择面层、基层和垫层是组合设计的前提条件。根据东北地区的气候特点及路面使用性能调查分析结果, 结合沥青路面各层分工(如下面层以抗疲劳为主、中面层以抗高温车辙与低温开裂为主), 在充分研究分析路面高强、耐磨、热稳性好和不透水等性能时, 也要考虑抗冻要求[1]。

(1)考虑到现有部分高速公路路段弯沉明显偏大, 路面结构整体强度不足的现象, 本研究中典型结构提出时, 结合实际情况和多年使用经验, 通过增加基层厚度和土基模量提高路面结构的整体强度。

(2)不同的土基强度对路面结构层厚度的要求不同, 因此典型结构提出应针对不同的土基强度等级提出满足结构要求的结构层厚度[2]。

(3)抗冻设计是东北地区路面结构设计中的重点, 路面厚度不仅要满足交通荷载作用下的结构要求, 还要对重冻区和中冻区的路面进行抗冻设计[3], 使路面厚度满足抗冻的要求。

结合东北地区高速公路沥青路面使用性能调查及病害分析结果、筑路材料、交通条件、土基条件, 并

收稿日期: 2010-08-29
作者简介: 孙宇怀 男 1970年出生 高级工程师

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

借鉴已有的路面结构[45], 初步拟定了重交通上限 $Ne = 2\,500$万次对应的东北地区沥青路面典型结构型式, 详细如下:

(1)计算路面典型结构Ⅰ。上面层密级配细粒式沥青混凝土, 厚度 5 cm; 中面层中粒式沥青混凝土, 厚度 6 cm; 下面层粗粒式沥青混凝土, 厚度 7 cm; 基层二灰稳定类、水泥稳定粒料类, 厚度 37 cm; 底基层二灰稳定类、水泥稳定粒料类, 厚度 25、22、17、15 cm, 对应的路基模量分别为 35~ 40、40~ 50、50~ 60、> 60 MPa。

(2)计算路面典型结构Ⅱ。上面层密级配细粒式沥青混凝土, 厚度 5 cm; 下面层中粒式沥青混凝土, 厚度 7 cm; 基层上层密级配沥青碎石, 厚度 15 cm; 底基层二灰稳定类、水泥稳定粒料类, 厚度 30、27、23、19、15 cm, 对应的路基模量分别为 35~ 40、40~ 50、50~ 60、60~ 80、> 80 MPa。

(3)计算路面典型结构Ⅲ。上面层密级配细粒式沥青混凝土, 厚度 5 cm; 下面层中粒式沥青混凝土, 厚度 7 cm; 基层二灰稳定类、水泥稳定粒料类, 厚度 37 cm; 基层下层二灰稳定类、水泥稳定粒料类, 厚度 20 cm; 底基层二灰稳定类、水泥稳定粒料类, 厚度 20、18、16 cm, 对应的路基模量分别为 40~ 50、50~ 80、> 80MPa。

2　沥青路面典型结构计算分析

近年来车辆超载严重, 为了减少超载对于路面结构的破坏, 在路面结构设计中提高路基模量已是广泛共识。为此, 将三种计算结构的路基模量均设定为 50 MPa, 在此基础上计算路面响应。采用自编有限元计算程序分析路面结构在重载交通作用下, 轮胎与路面接触压力对应为规范规定的均匀分布时, 沥青层不同深度处的应力变化情况, 用以分析重载对路面作用的机理。土基泊松比取 0.35, 抗压模量取 50 MPa, 其余材料泊松比取 0.25, 密级配细粒式沥青混凝土抗压模量取 2 000 MPa, 中粒式沥青混凝土取 1 800 MPa, 粗粒式取 1 200 MPa, 水泥稳定粒料基层取 3 600 MPa, 水泥稳定粒料底基层取 1 800 MPa。

2.1　各结构层底面和沥青层表面应力

从已确定的三类典型路面结构中各选取第一个设计厚度的典型路面结构。在 2倍标荷载即 1.4 MPa 作用下, 对沥青层表面、上面层底面、中面层底面、下面层底面、基层底面、底基层底面的应力、分别进行了计算分析, 图 1、图 2为计算路面结构Ⅰ的计算结果 (限于篇幅以下仅给出计算路面结构Ⅰ)。

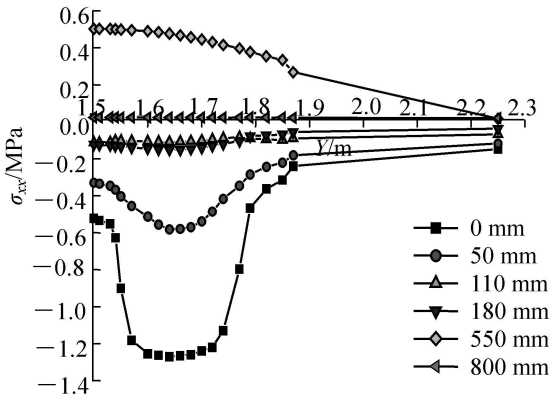

图 1　结构Ⅰ各结构层底面 σ_{xx}横向分布

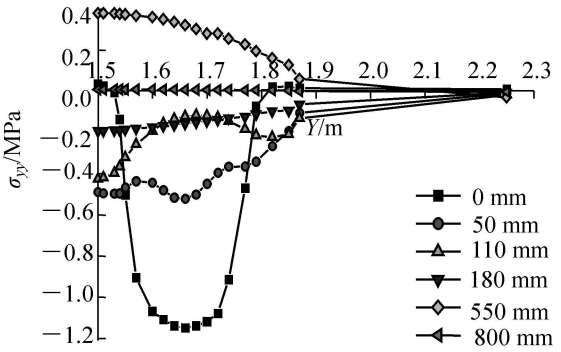

图 2　结构Ⅰ各结构层底面 σ_{yy}横向分布

从计算结果分析可以得出:

(1)路表车轮边缘外侧的地方 σ_{yy} 为拉应力, 其余各处为压应力; σ_{xx} 则始终为压应力。沥青层表面拉应力数值不大, 但是在荷载反复作用下, 出现疲劳开裂, 在行车带形成连续带状裂纹。

(2) 在沥青层底面, σ_{xx} 和 σ_{yy} 均为压应力。说明三种路面结构在超载车辆 (两倍于标准轴载) 作用下, 沥青层层底不会出现疲劳开裂。

(3) 计算结构一在基层层底 ($Z = 550$ mm)处, σ_{xx} 和 σ_{yy} 为拉应力, 在 $y = 0$处拉应力达到最大, 沿横向逐渐减小。在底基层层底 ($Z = 800$ mm)处, σ_{xx} 和 σ_{yy} 为拉应力, 在 $y = 0$处拉应力达到最大, 但数值很

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

小且随着 y 减小, 拉应力变化的幅度很小, 应力曲线几乎与 x 坐标平行。

(4)计算结构二最大拉应力出现在底基层层底(790 mm), 底基层层底拉应力和基层层底拉应力沿路面结构横向的变化趋势相近, 逐渐衰减, 趋于平缓。

(5)计算结构三最大拉应力出现在底基层底面(670 mm), 基层(沥青碎石)层底受压。

从表1、表2可以看出, 轴载越大, 路面结构层底拉应力越大。经计算, 三种结构中, 层底拉应力的增加比例和轴载的增加比例是一致的。

表1 计算路面结构Ⅰ不同层位 σ_{xx} 最大拉应力

计算点层位	深度	荷载工况一		荷载工况二		荷载工况三		荷载工况四	
	Z /mm	应力/MPa	Y /mm	应力/MPa	Y /mm	应力/MPa	Y /mm	应力/MPa	Y /mm
沥青层表面	0	—	—	—	—	—	—	—	—
上面层底面	50	—	—	—	—	—	—	—	—
中面层底面	110	—	—	—	—	—	—	—	—
下面层底面	180	—	—	—	—	—	—	—	—
水泥稳定料	550	0.246 0	1 500	0.369 1	1 500	0.492 2	1 500	0.738 3	1 500
水泥稳定料	800	0.007 1	1 500	0.010 6	1 500	0.014 19	1 500	0.021 29	1 500

注: 荷载工况一、二、三、四分别对应0.7、1.05、1.4、2.1 MPa的双圆均布荷载。

表2 计算路面结构Ⅰ不同层位 σ_{yy} 最大拉应力

计算点层位	深度	荷载工况一		荷载工况二		荷载工况三		荷载工况四	
	Z /mm	应力/MPa	Y /mm	应力/MPa	Y /mm	应力/MPa	Y /mm	应力/MPa	Y /mm
沥青层表面	0	0.017 0	1 553	0.025 5	1 553	0.034 0	1 553	0.051 1	1 553
上面层底面	50	—	—	—	—	—	—	—	—
中面层底面	110	—	—	—	—	—	—	—	—
下面层底面	180	—	—	—	—	—	—	—	—
水泥稳定料(基层)	550	0.189 4	1 500	0.284 1	1 500	0.378 9	1 500	0.568 3	1 500
水泥稳定料(底基层)	800	0.004 1	1 500	0.006 2	1 500	0.008 3	1 500	0.012 4	1 500

注: 荷载工况一、二、三、四分别对应0.7、1.05、1.4、2.1 MPa的双圆均布荷载。

2.2 路表、路基顶面弯沉及路基顶面压应变

由图3、图4可以看出, 重载作用下, 路面结构弯沉、路基顶面压应变等都增加, 在路面结构接近弹性体, 即沥青路面处在较低温度时, 路面结构响应随着荷载的增加等比例增加。

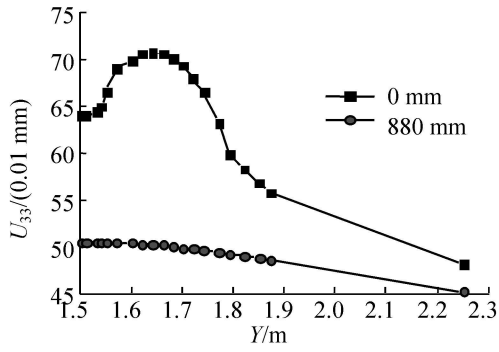

图3 路表和路基顶面弯沉横向分布

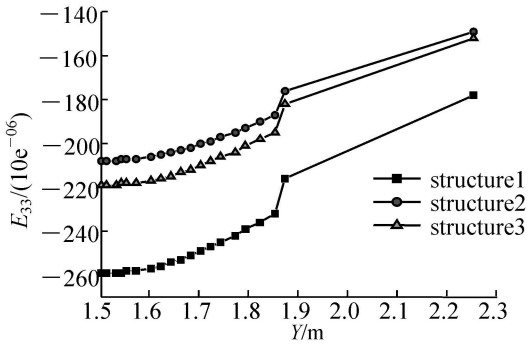

图4 路基顶面压应变横向分布

2.3 路面抗冻厚度验算

东北地区高速公路分布于特重、重冻和中冻三个冻区, 不同的冻区对路面抗冻设计的要求是不同的, 表现在对路面最小抗冻厚度以及垫层厚度两个方面要求不同。目前抗冻设计存在经验性, 抗冻垫层厚度偏薄, 导致冻胀翻浆病害频繁发生, 本研究充分考虑冻区、土质、路基干湿类型等因素, 根据交通部行业指南《公路工程抗冻设计与施工技术指南》中关于路面容许冻胀值及容许应变值对拟提出的路面典型结构进行抗冻性验算。

总结得出不同冻区中湿和潮湿路面对应不同路面最小结构层厚度要求。限于篇幅, 仅列出推荐的典型结构Ⅰ如下:

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(1)重交通。上面层密级配细粒式沥青混凝土, 结构层厚度 5 cm; 中面层中粒式沥青混凝土, 结构层厚度 6 cm; 下面层粗粒式沥青混凝土, 结构层厚度 7 cm; 基层二灰稳定类、水泥稳定粒料类, 结构层厚度 33~ 40 cm; 垫层砂砾、碎石, 结构层厚度①0~ 95 cm, ②0~ 55 cm; 底基层二灰稳定类、水泥稳定粒料类, 结构层厚度 20~ 25、17~ 22、17~ 20、16~ 18 cm; 对应路基模量分别为 35~ 40、40~ 50、50~ 60、> 60 MPa。

(2)中交通。上面层密级配细粒式沥青混凝土, 结构层厚度 4 cm; 中面层中粒式沥青混凝土, 结构层厚度 5 cm; 下面层粗粒式沥青混凝土, 结构层厚度 6 cm; 基层二灰稳定类、水泥稳定粒料类, 结构层厚度 32~ 37 cm; 垫层砂砾、碎石, 结构层厚度①0~ 90 cm, ②0~ 50 cm; 底基层二灰稳定类、水泥稳定粒料类, 结构层厚度 22~ 25、20~ 24、16~ 20、16~ 18 cm; 对应路基模量分别为 35~ 40、40~ 50、50~ 60、> 60 MPa。

相应的最小结构层厚度要求如表 3。

表 3　路面典型结构一最小厚度要求　　cm

道路冻区划分	路基类型	大地冻深	路基土类型		
			粘质土	粉质土	细粒土质砾
重冻区	中湿	150~ 200	80~ 105	80~ 120	80
重冻区	中湿	200~ 250	105~ 140	120~ 155	80~ 100
重冻区	潮湿	150~ 200	80~ 115	80~ 125	80~ 100
重冻区	潮湿	200~ 250	115~ 150	125~ 165	100~ 145
中冻区	中湿	100~ 150	80	80	80
中冻区	中湿	150~ 200	80~ 105	80~ 120	80
中冻区	潮湿	100~ 150	80	80	80
中冻区	潮湿	150~ 200	80~ 120	80~ 125	80~ 105

3　结论

综合交通等级、土基等级和气候划分, 根据路面结构组合设计原则, 结合东北地区的工程实践, 利用有限元方法对路面结构应力、应变及弯沉等指标进行计算分析, 得到以下主要结论:

(1)提出推荐的东北地区高速公路沥青路面典型结构, 此结构对东北不同冻区和不同路基潮湿环境下的道路设计与施工具有指导意义。

(2)重载情况下, 路面结构应力、应变和弯沉会增加, 进而促使路面出现车辙、沥青层疲劳开裂、反射裂缝等病害, 影响道路的服务水平和使用寿命。因此, 对于交通繁重和存在超载现象的部分地区, 在应用典型路面结构时, 需要适当提高路面结构的承载力和耐久性。

(3)针对目前抗冻垫层厚度偏小, 抗冻设计考虑不足的现象, 对抗冻垫层厚度重新进行了计算, 提出了不同冻区、不同干湿类型、不同土质和不同冻深条件下路面典型结构的抗冻垫层厚度范围。与国外同纬度地区典型结构对比结果表明, 沥青路面典型结构比较适合目前东北地区经济发展水平和区域特点, 但还需要在今后的实践中不断进行完善补充。

参　考　文　献

[1]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: 30-35.

[2]张晓冰, 黄晓明. 半刚性基层沥青路面典型结构厚度设计研究[J]. 中国公路学报, 1999, 12(2): 25-30.

[3]吉林省交通厅. 公路工程抗冻设计与施工技术指南[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 10-12.

[4]陈应时, 刘朝晖. 长沙市五一路沥青路面结构设计方案研究[J]. 湖南交通科技, 2002, 28(3): 4-6.

[5]陈忠达, 武建民, 张小荣, 等. 干线公路沥青路面典型结构的研究[J]. 公路交通科技, 2001, 18(2): 9-12.

(下转第 80页)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参 考 文 献

[1]严宝杰. 道路交通调查[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.

[2]Ahmed Abdel-Rahim, Michael Dixon, Li-Wei Tung. Automated Measurement of Approach Delay at Signalized Intersections: A Vehicle Event-Based Method[C]//Transportation Research Broad 2009. Washington: TRB, 2009. Paper#09-1287.

[3]Wassim Kebab, Michael P. Dixon, Ahmed Abdel-Rahim, Field Measurement of Approach Delay at Signalized Intersections Using Point Data[C]//Transportation Research Broad 2007. Washington: TRB, 2007: 34-77.

[4]Jianyang Zheng, Xiaolei Ma, Yinhai Wang, et al. Measuring Signalized Intersection Performances in Real-Time with Traffic Sensors[C]//Transportation Research Broad 2009. Washington: TRB, 2009. Paper#09-3119.

[5]Anuj Sharma, Darcy Bullock, James A. Bonneson. Input-Output and Hybrid Techniques for the Real Time Prediction of Delay and Maximum Queue Length at a Signalized Intersection[C]//Transportation Research Broad 2007. Washington: TRB, 2007: 68-80.

[6]Tomer Toledo. Statistical validation of traffic simulation models[C]//In Preprints of the 83nd Transportation Research Board Annual Meeting. Washington: TRB, 2004: 142-150.

[7]朱建平, 殷瑞飞. SPSS在统计分析中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

Error Statistics of Signalized Intersection Control Delay Detect Using Two Cameras

Zhang Huiling[1,2], **Li Keping**[2], **Sun Jian**[2]

(1. School of Transport, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract This paper describes the procedure of the signalized intersection control delay detect using two cameras and analyses the parameter's error index in detail. Using the Caoan-Lvyuan intersection's west approach scene, the theory of control delay collecting is introduced firstly. Secondly, the mean error index is used to compare each vehicle's detected travel time and the real travel time. For the mean error is nearly 0, the Theil's inequality coefficient is used to test the hypothesis that the detect travel time is equal to the real travel time. Through some processing, the average vehicle control delay is obtained for 1 cycle. Considering the delay's value, the mean relative error is used for the error's index. The statistics method is used to test that the control delay's mean relative error is no more than 10%, which proves the method's effectiveness.

Key words video detector; delay; error index; mean relative error; statistics

(上接第 75页)

Mechanics Analysis of Typical Asphalt Pavement Structures

Sun Yuhuai[1], **Chen Zhiguo**[1], **Li Yonglu**[2]

(1. Jilin Traffic Science Institute, Changchun 130012, China;
2. Jilin Traffic Construction Group, Changchun 130022, China)

Abstract In this paper, according to asphalt pavement condition of northeast freeway, based on the traffic level and subgrade strength grade on northeast cold areas, the author analyses the indicators of pavement structure stress, deformation and deflection, proposes the design method and the recommended value of frost cushion thickness in different cold areas, different dry and wet zones, different frozen depth and soil conditions, and finally proposes the typical northeast asphalt pavement structure of northeast freeway.

Key words freeway; asphalt pavement; typical structure; mechanical analysis

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net