

吴赣昌 著

半刚性路面 温度应力分析



科学出版社

半刚性路面温度应力分析

吴贇昌 著

科 学 出 版 社

1 9 9 5

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书深入地论述了外界气候条件和路面材料特性参数等对半刚性基层沥青路面温度场和温度应力的影响,建立了非线性二维层状体系沥青路面不稳定温度场的计算理论和二维粘弹性层状体系沥青路面温度松弛应力的计算理论,定量地揭示了外界气候条件(如太阳辐射、外界气温、风速等)和路面材料特性参数(如材料的热工参数、温缩系数、松弛模量等)与沥青路面温度场和温度应力之间的内在联系。

本书可供高等院校应用数学、土建、力学等专业的师生以及公路和土建工程技术人员、研究人员等参考。

半刚性路面温度应力分析

吴赣昌 著

责任编辑 吕虹

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995年10月第 一 版	开本:850×1168 1/32
1995年10月第一次印刷	印张:6 1/4
印数:1—1 000	字数:160 000

ISBN 7-03-004670-6/O·801

定价:12.00 元

前 言

半刚性基层沥青路面结构(又称为半刚性路面或简称为沥青路面)由于具有很多优点和明显的技术经济效益,目前已成为国内外高等级路面结构的主要发展方向.但使用期间,沥青路面易产生温度收缩裂缝(又简称为温度裂缝),这是一个世界各国普遍存在的问题.温度裂缝对沥青路面的危害主要体现在如下三个方面:一是裂纹边缘的破坏直接影响到路面的平整度;二是边角处的折断、边缘处的折断使路面碎裂和网裂不断发展;三是随着缝宽的增大,雨水易于渗入,使裂缝附近土基的含水量加大、承载强度减小,从而加剧路面的破坏、沉陷.因此,在修订路面设计规范或制订新的路面设计体系时,如何将控制温缩裂缝纳入路面设计规范已成为国内外研究的一个重要方向.

显然,若能比较准确地预测半刚性路面的开裂及开裂的条件,则有助于我们在路面设计时采取有效措施以预防或减少路面的开裂.为此,我们必须全面进行半刚性路面温度场和温度应力的研究.

路面结构完全处在自然环境中,由于经受着持续变化的大气影响,例如,太阳辐射和天空辐射以及外界气温的影响,太阳辐射与天空辐射的一部分从表面被反射,其余部分被吸收并转变为热能,这部分热能就与外界气温相迭加,由此产生可观的路表温度.一天内不断变化的表面温度,由于热传导的作用,就沿厚度方向产生了不稳定热流.

设想某一结构是完全自由支承的,则它在各个方向将按与不稳定热流相应的恒定的温度分布产生变形.只有在变形受阻的情况下,这种温度分布才会按与变形成正比的关系产生约束内力和约束应力.在变形完全受到阻碍的情况下,应力就与由此产生的温

度成正比. 对半刚性路面结构而言, 沿厚度方向不均匀分布的温度差, 由于层状结构之间的相互约束以及材料的粘弹性因素, 导致路面结构产生不均匀分布的温度应力. 当温度应力达到或超过路面材料的抗拉强度时, 半刚性路面就开裂.

由此看来, 为了能比较可靠地说明问题, 首先要在确定沿厚度方向温度分布的同时, 广泛地测定路表温度. 这种工作必须对全国有代表性的地区进行. 然而它们需要耗费大量的人力、物力和时间. 而且即使全年进行这种测定的话, 遇到极端温度的可能性也很小. 因此, 根据路面结构所在的地点和位置, 借助已有的标准气象测量资料和路面材料特性参数来掌握半刚性路面的温度场, 就显得很有意义. 此外, 如果半刚性路面的二维层状体系不稳定温度分布可用数学方式表达的话, 则借助现代数学理论工具, 就可能建立起二维粘弹性层状体系温度松弛应力的计算理论, 从而揭示半刚性路面温度应力变化与温度、变温速率、松弛性能、温缩性能、结构层厚度以及泊松比等之间的内在联系.

本书论述外界气候条件和路面材料特性对半刚性基层沥青路面温度应力的定量分析, 研究外界气温、太阳直接辐射、天空辐射、大气逆辐射和路表有效辐射等对路面表面的作用, 确定由此引起的路面结构内的不稳定温度场和温度应力, 这种温度应力特别与路面大幅度降温、持续低温、大风和路面材料的应力松弛性能、温缩性能、导热性能等有关, 研究上述因素对半刚性基层沥青路面结构温度应力的影响作用, 并探索沥青路面的开裂机理、开裂预测方法、沥青面层厚度设计方法等.

工程技术中有许多问题由于应用技术理论等方面的原因而未能得到较好的解决, 这些问题大都属于多学科研究领域. 这些问题的解决有助于推动现代工程朝着高质量、低消耗的方向发展. 本书作者就这方面的研究工作进行了有益的尝试.

在本书的撰写过程中, 作者得到了上海交通大学应用数学系方爱农教授在数学方面的指导, 并应用了华罗庚、林伟等教授建立

的偏微分方程组边值问题的解析理论,在此表示衷心的感谢!

本书所进行的研究工作先后得到了交通部“六五”重点科研项目 85-65J“半刚性路面的研究”、“七五”国家重点科技项目(攻关)75-24-01-01“高等级公路半刚性基层、重交通道路沥青面层和抗滑表层的研究”、“八五”国家重点科技项目(攻关) 85-403-02-02“半刚性基层沥青路面典型结构研究”,以及交通部“八五”科研项目“公路柔性路面设计规范”等的资助.其中部分研究工作是作者在长沙交通学院工作期间所做.

在道路方面,作者得到交通部公路科学研究所沙庆林研究员、交通部公路规划设计院杨孟余高级工程师、同济大学道路与交通工程研究所林绣贤研究员、长沙交通学院路桥系张启森教授、哈尔滨建筑大学道路与交通工程系郭大智教授等的指导.此外,吉林省公路勘察设计院李桂伦、徐峰高级工程师、交通部公路科学研究所孟书涛工程师等为本书的研究提供了大量的路面温度实测资料和气象资料,在此一并表示衷心的感谢!

吴赣昌

1995年8月于广东佛山大学

目 录

第一章	沥青路面的温度场	1
§ 1	国内外研究现状及其分析.....	1
§ 2	基本方程.....	8
第二章	路表边界条件分析	15
§ 1	热辐射的基本原理	15
§ 2	热交换系数	17
§ 3	路表面有效辐射	24
§ 4	太阳总辐射的日过程	30
§ 5	外界气温的日过程	35
第三章	二维非线性路面温度场的计算方法	38
§ 1	非线性路面温度场的数学模型	38
§ 2	周期性变化的路面温度场的理论解	39
§ 3	非周期性变化的路面温度场	49
第四章	温度场理论解的修正	52
§ 1	地温估计	52
§ 2	地温修正值	55
第五章	路面材料的热工参数	57
§ 1	路表面对太阳辐射的吸收率	57
§ 2	材料导热系数和导温系数	58
第六章	沥青路面温度场分析	61
§ 1	比较分析	61
§ 2	路面温度场随各因素变化的规律分析	66
§ 3	温度速率	74
§ 4	温度梯度	77
§ 5	小结	84
第七章	二维粘弹性体系沥青路面温度应力的研究	90

§ 1 国内外研究现状分析	90
§ 2 采用的理论分析体系	93
§ 3 弹性层状体系下沥青路面温度应力计算公式	93
§ 4 路面材料特性参数	104
§ 5 粘弹性理论体系下沥青路面温度应力的计算	122
第八章 温度应力计算与分析	129
§ 1 有关计算参数及其曲线拟合	129
§ 2 温度应力的计算结果及分析	131
§ 3 沿深度变化的温度应力	142
§ 4 沥青面层的厚度与路面结构的材料组合	150
§ 5 沥青路面开裂预测	157
第九章 展 望	162
参考文献	164
附录一	168
附录二	175

第一章 沥青路面的温度场

§ 1 国内外研究现状及其分析

路面结构完全处在自然环境的影响中,经受着持续变化的大气影响,如太阳辐射、天空辐射及外界气温的影响.太阳辐射与天空辐射的一部分从路表面被反射,余下的部分被吸收并转为热能.这部分热能与外界气温相叠加,由此产生了可观的路表温度,就产生热传导作用,主要为沿路面厚度向温度较低处传导.在一天内不断变化的表面温度,使路面结构内产生了不稳定热流.道路使用的长期实践使人们逐渐认识到路面温度状况可能对路面结构的强度和使用效果带来严重危害.从力学上分析,由于路面结构内的不稳定热流,路面结构的每一部分都将随着温度的升高或降低而趋于膨胀或收缩,但由于层状路面结构各部分之间的相互约束,这种变形不能自由发生,于是就产生了温度应力,当温度应力超过路面结构材料的抗拉强度时,沥青路面就开裂;从材料学上分析,半刚性基层沥青路面对温度十分敏感,沥青混合料的强度、劲度以及温缩性能等都随着温度的变化而变化.由于这种非线性关系,使得半刚性基层沥青路面温度场和温度应力的分析变得相当复杂.

确定路面结构的温度场,最直接的手段是在各地广泛地进行路面温度实地观测,这种实测工作必须对全国范围内有代表性的地区进行.然而它们需要耗费大量的人力、物力和时间.而且即使全年进行这种实测,遇到极端温度的可能性也很小.因此,根据路面结构所处的地区和位置,借助已有的标准气象资料来掌握路面温度场,就具有重要的理论和实用意义.

至今,路面结构温度场的理论分析工作已进行了近 70 年.早在 1925 年,美国就在 Arlington 对自然条件下沥青路面中的温度状况进行了实测.随后,美国、前苏联、德国、英国、日本等许多国家均对沥青混凝土或水泥混凝土路面的温度状况进行了大量的试验研究^[1-5].特别是近年来,由于半刚性基层沥青路面结构成为国内外高等级公路的主要发展方向,对沥青路面温度状况的研究工作已在世界各国广泛展开.综合各国学者的研究大致可分为两类.

一类是统计分析方法:在大量实测数据的基础上,采用概率统计方法.这种方法主要基于如下思想:时刻变化的气象和路面温度,用服从物理法则的公式是很难表达的,而且也不可能进行准确预测,为了定性定量地描述随气象条件变化的路面温度,必须在大量实测数据的基础上,用概率统计方法进行处理.

日本近藤佳宏等人对两种不同厚度的沥青混凝土路面的温度状况曾作过一年的实测工作,并采用统计方法进行了分析研究^[2].通过回归分析,认为路面结构内不同深度的最高或最低温度与路表温度及气温成线性关系,并采用 5% 显著性水平的 F 检验对路面各深度温度随时间变化的规律作了周期分析,得到温度变化的周期函数

$$T(t) = A + B_1 \sin\left(\frac{\pi}{12}t + \theta_1\right) + B_2 \sin\left(\frac{\pi}{6}t + \theta_2\right) \quad (1.1)$$

式中 t 均为时间变量.

秋山政敬的统计分析^[3]也得到了与(1.1)类似的结果:沥青混凝土层内最高温度与表面温度成线性关系,但层愈薄温度梯度愈大;路表温度与气温在晴天和阴天为曲线关系,在雨天为直线关系.

J. T. Christison 和 K. O. Anderson 还对四种不同结构的沥青混凝土路面的表面最低温度与最低气温以及表面温度振幅与气温振幅分别作了回归分析,得到了一些线性关系式^[4].此外,还有一些研究人员采用统计方法,通过回归分析认为路表温度和前五

天的平均气温以及不同深度的温度成确定关系^[5],或通过月平均气温确定路面体内的温度^[6]等。

最近几年,我国也进行了大量的沥青路面温度场观测工作,各观测单位大都采用统计方法进行了回归分析,并且得到了部分结果。

另一类是理论和半理论分析法:大量的温度实测统计结果表明,尽管大气温度及路面温度时刻变化,但依然可通过数学表达式很好地表达出来,例如近腾佳宏等人的统计分析结果表明路面不同深处温度随时间的变化规律可用正弦函数的线性组合来表达。因此,那种认为服从物理法则的公式难以表达路面温度场的思想就似欠全面。因为采用统计分析的方法无法揭示路面温度变化规律与影响因素之间的内在联系,因此 50 年代后期,采用理论分析方法研究路面温度场的工作越来越多。

1957 年,Barber 首先用半无限表面的介质温度周期变化时热传导方程的解来确定路面最高温度^[10],他的研究直到 70 年代后期仍为许多研究者所重视^[11,12]。Barber 采用下述基本假设:

1. 路面为半无限体;
2. 在边界处(路表面)受气温、太阳辐射和地面辐射的热力作用;
3. 气温是按正弦周期变化;太阳辐射按正弦正半波周期变化,地面辐射为太阳辐射的三分之一;太阳辐射和地面辐射共同作用的温度效应称为有效温度,它可近似地看作按正弦周期变化。

采用上述基本假设,Barber 推导出不同路面结构的最高温度的计算公式:

$$T^{\max} = \bar{T}_a + a \cdot L + b \cdot (0.5T_R + 3 \cdot a \cdot L) \quad (1.2)$$

式中 $T^{\max}$ 表示路表最高温度(°F);

$\bar{T}_a$ 为日平均气温(°F);

T_R 为日最高气温与最低气温之差(°F);

L 为太阳日辐射总量(Langleys);

a, b 是常数, 不同路面类型的 a 和 b 值见表 1.1.

表 1.1

路面类型	a	b
沥青混凝土	0.027	0.65
矿渣混凝土	0.016	0.75
砂砾混凝土	0.015	0.67

从 Barber 给出的个别天的实测与计算比较可见, 误差一般在 $0-3^{\circ}\text{C}$, 个别超过 6°C . 但 Barber 的分析不适用于路面最低温度的计算, 这是因为按正弦周期表示的有效温度在正半波同实际气温与太阳辐射的共同作用符合较好, 而在负半波却有明显的偏差.

前苏联的 Л. П. Горюшкин 曾对水泥混凝土路面温度场作过较为全面的研究^[16]. 1952 年至 1962 年的 10 年间, 他在前苏联的莫斯科等 6 个不同气候区的不同季节对水泥混凝土路面温度场变化的一般规律作了大量测定并进行了分析. 在确定温度场方面, 提出了路面结构具有不同层次的问题. 可是他又认为整个路面体系中各层材料的热物理性能相似, 可用综合导热系数统一表示各层的导热系数, 从而将问题归结为边界温度按周期变化的半无限体的热传导问题.

将层状路面结构视为半无限体来分析是否合适, 可能产生的误差如何, 还没有人从理论上进行过分析, 只是有些研究人员通过实际测定, 认为具有不同基层的路面温度相差不大. 但是, 1971 年, 芬兰为了了解设置隔温层对防止冰冻的作用时, 在试验中发现, 垫有 5cm 泡沫塑料板的 20cm 厚水泥混凝土路面中温度梯度有明显下降, 这说明了隔温层不仅对其下面基础的温度场有影响, 而且还影响了其上面路面的温度场^[14], 此外, 基层材料如土、砂等在冻结后导热性能明显提高, 这些使均质半无限体的假设产生较大的偏差. 在第十五届国际道路会议上, 前苏联提出采用当量层换

算的办法来计算层状路面的温度场,但这种当量换算是以路面底面温度不变为前提的,即基层材料的不同,不会改变路面的温度场。

为了把基层和路基的导热性能反映到路面温度场的理论分析中去,人们开始采用层状体系假设来确定路面温度场,这一假设认为,路面结构是由几种热物理性能不同的材料组成的.为了使各种边界条件均能获解而不受数学上困难的限制,一般都采用数值法求解。如 P. C. Pretorius 于 1969 年在他的探讨路面设计依据的博士论文中采用了有限元法^[15]等。

我国对路面温度场的研究主要开始于 80 年代初期前后.同济大学严作人、朱照宏等人在层状体系假设的基础上,从传热学和气候学的基本理论着手,用解析法对水泥混凝土路面一维温度场作了较深入的分析^[16],并从理论上分析了不同基层对路面温度场的影响,其结果可用于计算路面结构层内的最高和最低温度,水泥混凝土路面的最大温度梯度等。

对桥梁结构温度场研究较为出色的工作^[17]是德国的 F. Kehlbeck 在完成他的博士论文时作出的,主要研究了一维构件的桥梁结构的温度场和温度应力问题,他在分析太阳辐射对桥梁结构的影响方面的工作对路面结构温度场的研究亦有借鉴意义。

路面温度场研究的目的在于指导路面设计,使得正确的设计能够保证路面结构在不利的温度条件下具有足够的稳定性.但不同地区、不同材料的路面结构的不利温度是不同的,这就导致以往的研究者往往从自己所关心的路面温度条件出发,而不是从整个路面温度场出发来提出路面温度状况的分析意见.如 Barber 主要分析路表最高温度,Christison 和 Anderson 则主要研究低温情形,而景天然、严作人^[18]等则主要分析水泥混凝土路面的最高温度及最大温度梯度等.这种从某一方面着手来研究路面温度场的做法,有利于抓住要点,抛开次要因素,通过较简单的假设,使问题易于解决并有益于实际应用.然而当把这种个别场合下的研究成

果推广到一般场合时,就可能使研究成果的可靠性大大下降.

综合分析国内外路面温度场的研究现状,我们认为,要从一般意义上解决路面温度场的计算和分析问题,必须注意以下几个方面:

1. 路面结构温度场完全由路面材料特性(如各层材料的导热系数与导温系数、材料对太阳辐射的吸收率、路表热交换系数等)和环境气候条件(如外界气温、太阳辐射、天空辐射、路面有效辐射等)所确定,其中部分参数如路表热交换系数、路面有效辐射以及材料的导热系数等与待求的路面温度本身有密切的非线性变化关系.这就使得从一般意义上解决上述非线性问题变得相当复杂.因此,以往的研究者在进行路面结构温度场的研究时几乎都从自己所关心的方面,通过经验进行大量的简化,如在计算路面有效辐射方面:Barber^[10]扣除太阳辐射的三分之一作为地面有效辐射的热损失,而严作人^[16]等则通过扩大气温振幅来计及地面有效辐射.又如对路表热交换系数,几乎所有研究者都把它视为固定常数.这些简化虽然为问题的解决带来了方便,但却产生了以下几方面的问题:(1)使结果与条件之间的关系变得不明确;(2)结果误差较大,关于这一点,大部分研究者在估计由于某参数的简化所导致的结果误差时总是从局部情况出发,而对由于多个参数同时采用简化替代所产生的路面温度的综合误差却很少也很难估计.另一方面,除部分气象资料可从气象站获得外,其它,如路表热交换系数、路面有效辐射等是难以实时测定的,这些均要从路面温度的反算来解决.要比较符合实际地从一般意义上解决上述问题,则要克服数学上的困难,建立非线性路面温度场的计算和分析方法.

2. 在高等级公路中,路面结构通常是由面层(通常包括中粒式沥青混凝土罩面层和粗粒式沥青混凝土下面层等)、基层(通常包括上基层、下基层和砂砾垫层等)和土基组成的,是一种多层结构,对于这种多层结构,过去一般假定为由面层、基层和土基组成的三层结构进行研究,在文献[19]中,我们已对三层次路面结构的温

度场问题进行了研究并取得了一些成果,但是,对于需要巨额投资的高等级公路来说,仅对三层体系来研究是不够的,本书中我们以 n 层体系为基础对半刚性基层沥青路面温度场问题进行研究。

3. 虽然从 50 年代后期起,采用理论分析方法研究路面温度场的工作很多,但是,由于理论分析工具等方面的限制,以往的研究工作一般建立在一维理论上。

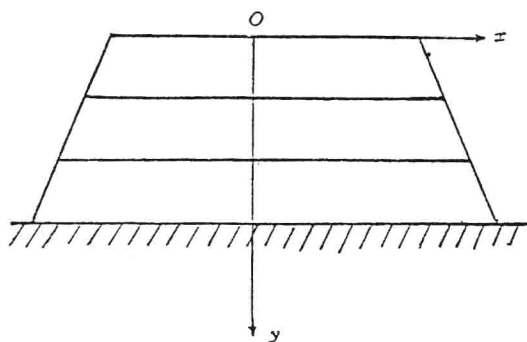


图 1.1 路面结构横截面图

从实际情况来看,沥青路面结构温度场分布应视为二维分布,考察高等级公路的几何形状,由于路面结构是填方修筑的,若与路面行车方向垂直取路面结构的一个截面,则此截面类似梯形,如图 1.1. 由于路面体不仅在路水平表面受到太阳辐射、气温等的影响,在两侧表面上也受到类似影响,根据热传导平衡原理,在这个截面内温度不仅沿路面厚度方向变化而且也沿水平方向变化. 因此,温度场是二维分布的. 1988 年,交通部重点科技项目 85-65J 课题组曾在我国广东惠州市郊的试验路上进行了沥青路面的温度实测,其结果表明,路面中间的温度与邻近路面两侧的温度在面层同一深处相差可达 $5-10^{\circ}\text{C}$,若有遮阴时相差更大. 因此,从尽可能符

合路面实际状况的角度出发,我们认为应采用二维层状体系理论来研究半刚性基层沥青路面结构的温度场问题.采用二维层状体系理论的另一个重要的原因是满足进行沥青路面二维温度应力分析的需要.

4. 虽然,自上个世纪以来,人们对周期性变化的温度场问题作了大量的分析研究,关于半无限体内的周期性温度场解已在许多科学领域中得到应用.但是在半刚性基层沥青路面的抗裂设计中,人们关心的是沥青路面在大幅度连续降温过程中及冬季低温时期的温度变化状况,这一时期沥青路面的温度场通常并不处于拟稳定状态,因而不能完全采用周期性温度场理论来研究.

§ 2 基本方程

在温度未达到完全平衡的每一物体内部,会发生热流.如果热量仅仅通过热传导来传播,则在均质各向同性的物体里,某一给定瞬间 t 的这种热流,可用温度场来表示.如果物体内的各质点用直角坐标系 O_{xyz} 确定,则在某一确定时刻,物体中各点的温度值可用温度场表示如下:

$$T = T(x, y, z, t)$$

根据沥青路面结构的实际情况,研究由 n 层组成的层状路面结构的温度场问题.假设路面结构中的温度分布与道路长度无关,则路面温度场可按平面应变问题进行研究.此时,任一确定时刻 t 的温度场可表示为

$$T = T(x, y, t)$$

取与道路长度方向垂直的一个截面作代表,设该截面的水平方向为 x 轴,垂直向下方向为 y 轴正向,作成如图 1.3 直角坐标系.

在一个连续温度场中,对于每一点来说,按确定方向存在着许多具有同样温度的相邻点.将所有等温点连接起来,就在物体内部形

成所谓等温面,如图 1.2. 对于等温线 T 上的点 A , 具有使温度变化为最大的一个唯一的特定方向. 这个方向是通过由 A 点至相邻等温面的最短连线给出的. 因此, 在点 A 处可以确定一个矢量, 其大小与相邻等温线的距离成反比, 并表示每单位长度内的温度变化. 这一矢量即为 A 点的温度梯度 $\text{grad}T$, 在温度增加方向它应取正号, 温度降低的方向表示为负值, 即 $-\text{grad}T$.

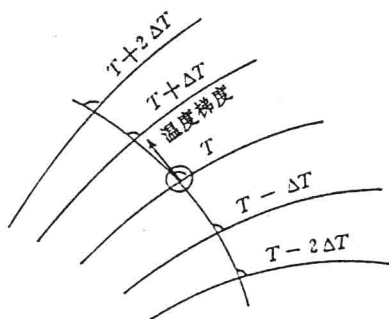


图 1.2 具有等温面的任意温度场

$$\text{grad}T = i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z}$$

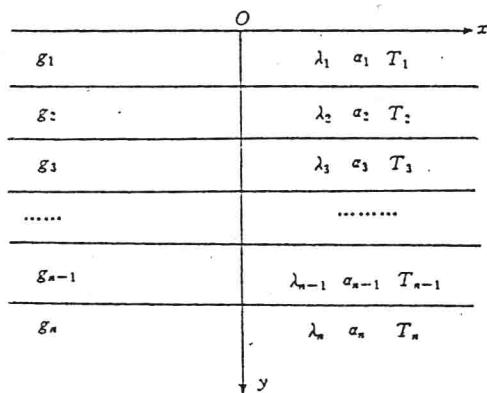


图 1.3 路面结构截面示意图