

摘要

半刚性路面是我国公路路面结构的主要型式。由于重载交通等诸多方面的原因,我国半刚性路面结构早期损坏严重,且早期修建的高速公路陆续进入大修期,高速公路大修任务繁重。大修中铣刨后的半刚性基层材料大量废弃,造成巨大的资源浪费、土地占压,并引发一系列的环境问题。针对我国高速公路大修中半刚性基层铣刨后浪费严重的现状,研究了高速公路二灰碎石基层再生后做刚性基层的技术。

提出了低配筋率钢筋网混凝土刚性基层的概念,建立了钢筋网混凝土基层荷载应力简化模型,分析了再生混凝土基层沥青路面的荷载应力。得到标准行车荷载和超载情况下,再生集料刚性基层沥青路面结构的受力情况及应力应变变化规律。通过三维有限元计算标准荷载和超载作用下不同配筋刚性基层结构的应力应变,确定不同钢筋网方案对刚性基层结构受力的影响,预测不同基层结构沥青路面的疲劳寿命,确定设置钢筋网的作用,钢筋网的设置位置和配筋率等。

分析混凝土基层上覆沥青面层路面结构的温度梯度,利用三维有限元模型,得到路面结构的温度场;并计算分析了混凝土基层沥青路面的温度应力及耦合应力。由于一年中温度骤降 15 摄氏度的天气极少,不像车辆荷载那样每天都有几千次,将温度荷载和车辆荷载一起产生的耦合应力作为计算路面结构疲劳寿命的依据是不合理的。

采用热-应力耦合方法,计算分析了不同刚性基层横缝间距对刚性基层沥青路面温度应力的影响,提出了适合再生集料刚性基层的横缝间距。研究认为,铺筑沥青面层后,基层的温度梯度较小,温度翘曲应力大幅减小,外界温度场的变化对再生集料刚性基层温度应力的影响较小,再生集料刚性基层的横缝间距由养护期末的极限降温控制。推荐出再生集料水泥混凝土基层的合理切缝间距。

根据刚性基层沥青路面复合式结构的具体要求,进行再生集料刚性基层沥青路面结构组合设计。结合工程实践和理论计算,推荐出基于原大修高速公路路面结构的合理的刚性基层沥青路面结构及面层、基层厚度。并给出混凝土基层沥青路面的结构设计步骤与设计实例。

铺筑试验路段,结合理论分析与国内外使用经验,进行再生集料混凝土基层

山东大学硕士学位论文

设计及验证，探寻合理的设计方法。

关键词：半刚性基层；再生集料；刚性基层；配合比；横缝间距；温度应力。

ABSTRACT

Semi-rigid pavement structure is the main type of pavement structure in China. Because of heavy traffic and many other reasons, the early damage of semi-rigid pavement structure is serious. Moreover, the early constructed freeway is going into the overhaul period one after another. The milled semi-rigid base material is enormous waste of resources, and result in a series of environmental problems. Considering the serious waste of milled semi-rigid base in freeway overhaul, a technique on reclaimed lime-fly ash macadam used in rigid base was studied.

The concept of rigid base with mesh reinforcement was put forward. Load stress simplified model of rigid base with mesh reinforcement was set up, and the stress of asphalt pavement with recycled concrete base was analyzed. Under the standard traffic load and overload conditions, its stress and strain changing rules were obtained. Through the three-dimensional finite element method, stress-strain of rigid structures of different reinforcement under standard load and overload was calculated to determine the impact of different programs on the mesh reinforcement structures. The fatigue lives of asphalt pavement with different rigid base structures were predicted. The role of mesh reinforcement, the reinforcement net settings location and reinforcement ratio were determined.

The temperature gradient of concrete base structure with asphalt surface was analyzed. The temperature field of pavement structure was obtained using three-dimensional finite element model. The thermal stress and coupling stress of asphalt pavement with concrete base were analyzed. Studies suggest that: the weather of temperature dropped 15°C a day is rarely, unlike the vehicle load as thousands times every day. Taking the coupling stress as the calculation basis of fatigue life is unreasonable.

Adopting thermal-stress coupling method, thermal stress of asphalt pavement with rigid base with different transverse joint spaces was calculated and analyzed. The transverse joint space suitable for rigid base of recycled aggregate was put forward. Studies suggest that temperature gradient and warping stress decreased sharply after paving asphalt concrete. The transverse joint space is controlled by extreme temperature reduction of rigid base in its curling period. The reasonable transverse joint space of recycled aggregate concrete base was recommended.

In accordance with the specific requirements of composite structure of asphalt pavement with rigid base, the pavement structure was designed. Combined with engineering practice and theoretical basis, recommend the reasonable asphalt pavement structure with rigid base in the highway overhaul and give structural design procedures and design examples.

Combined with theoretical analysis and experience both at home and abroad, trial pavement sections were constructed, the design and verification of recycled aggregate rigid base was carried out.

山东大学硕士学位论文

Key word: semi-rigid base; recycled aggregate; rigid base; mixture ratio;
transverse joint space; thermal stress.

原创性声明

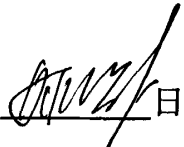
本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律責任由本人承担。

论文作者签名：吴世美 日期：2009.5.24

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：吴世美 导师签名： 日期：_____

第一章 绪论

1.1 研究目的及意义

半刚性路面是我国公路路面结构的主要型式。由于诸多方面的原因,我国半刚性路面结构早期损坏严重,且早期修建的高速公路陆续进入大修期,高速公路大修任务繁重。大修中铣刨后的半刚性基层材料大量废弃,造成巨大的资源浪费、土地占压,并引发一系列的环境问题。本课题将铣刨的半刚性基层材料用作沥青路面刚性基层,探讨经济耐久的再生集料刚性基层沥青路面结构形式。

半刚性路面结构对抵抗重载起到了良好的作用。但是,由于半刚性基层的干缩、温缩与脆性特性,以及重载交通的作用,基层开裂现象严重。基层一旦开裂,动载下的板块活动使沥青面层底部拉应力与剪应力大幅增长而导致反射裂缝与面层的快速疲劳,加速路面结构的开裂与唧浆破坏,破坏后其养护维修费用高。由于半刚性路面的开裂唧浆难以修复,近年来许多高速公路大修中将柔性基层应用于高速公路的维修结构中。但由于重载、柔性结构与原结构的协同性等问题,修复后的路面也出现了一些新的路面结构病害。

高速公路大修过程中,铣刨的大量半刚性基层材料被作为废料抛弃,不仅占压土地,而且对环境造成不利影响。铣刨的半刚性基层材料,特别是上基层材料,具有一定的级配、较高的强度,仍具有较高的利用价值。以铣刨的半刚性上基层材料作为骨料,配制成水泥混凝土刚性基层,探讨高速公路半刚性路面结构大修中修建刚性基层沥青路面的可行性,这对于缺乏石料地区,半刚性基层材料的再生利用,对保护环境与资源,降低工程建设成本,改善路面结构的受力状况,延长路面结构使用寿命,具有重要的经济和社会意义。

本课题依托京福高速德州段,对高速公路大修过程中原有二灰碎石半刚性基层的就地利用,研究二灰碎石再生集料的性能与再生利用技术,提高路面结构的耐久性能。本项目通过室内实验、试验路铺筑及路面结构力学的有限元计算分析,研究能抵抗重车、结构合理、经济耐用的再生集料刚性基层结构,提高路面结构的耐久性能。这对于探讨高速公路维修中再生集料的利用,节约资源,降低工程成本,减少矿山开采,保护环境与资源具有重大的社会与经济效益,是实现建筑资源环境可持续发展的主要措施之一。

1.2 国内外的研究现状

目前,国内、外对半刚性基层材料的再生利用主要是与沥青面层一起铣刨后进行冷再生利用。近年来,国内、外对冷再生技术进行了大量研究。在国外,美国、芬兰、法国及欧洲一些国家对沥青冷再生利用的配合比设计、施工工艺等进行了研究,在国内,同济大学的薛明^[1]、广东路桥的肖盈^[2]等,对沥青路面冷再生的材料、工艺、稳定剂及改性机理等进行了试验和理论研究,并在部分公路上进行了试验推广。但是,总体而言,冷再生利用技术尚不成熟,冷再生混合料的材料性能、配合比设计方法、及路用性能有待进一步研究,冷再生技术在高速公路中的利用受到一定的限制。在国内,张超^[3]、李征^[4]等人也就利用旧水泥混凝土做道路基层的技术开展了一些初步研究。

由于刚性基层沥青路面具有良好的耐久性和抗重车能力,素混凝土或连续配筋混凝土基层沥青路面在美、英、德等国的高速公路中应用较多。我国长安大学自2001年至今一直对贫混凝土^[5]、水泥混凝土、连续配筋混凝土及多孔混凝土^[6]等刚性基层沥青路面结构的力学特性和结构设计方法进行研究。马庆雷^[7]等对基于刚性基层(包括贫混凝土、水泥混凝土和钢筋混凝土基层)的耐久性沥青路面结构进行研究。但上述研究均未对刚性基层的板块尺寸、切缝间距等进行深入的理论分析和试验研究,所提出的切缝间距等技术数据缺乏理论依据。

如何充分利用半刚性基层材料,并再生后做刚性基层,以修筑耐久性好、抗重车能力强的刚性基层沥青路面,国内外研究尚为空白。根据我国高速公路大修任务艰巨、半刚性基层铣刨后浪费严重的现状,将半刚性基层再生后用作沥青路面的刚性基层,具有巨大的社会、经济效益和现实意义。以下分几个部分介绍相关的国内外研究现状:再生集料利用的国内外研究现状,刚性基层的国内外研究现状,及钢筋网加固技术的研究现状,及刚性基层切缝间距的研究现状。

1.2.1 刚性基层的国内外研究现状

刚性基层主要指以贫混凝土、水泥混凝土和连续配筋混凝土等材料作道路基层。这类基层强度高,抗冲刷能力强,耐久性好。加铺沥青面层材料后,可以综合刚性路面和柔性路面的优势,大大延长路面的使用寿命。在美、英、德等国也较多的采用素混凝土或连续配筋混凝土作为高速公路沥青路面基层。其中连续配

筋混凝土基层路面结构于19世纪30年代最早出现在美国新泽西州,后来在欧美得到了较为广泛的应用。

我国长安大学自2001年至今一直对贫混凝土、水泥混凝土、连续配筋混凝土及多孔混凝土等基层沥青路面结构进行研究,并通过实验路研究提出合理的结构形式。

长安大学的刘伟^[5]对贫混凝土基层混凝土路面结构的力学特性和结构设计方法进行深入研究,认为贫混凝土具有比常用的半刚性基层材料更加优良的疲劳性能,提出了贫混凝土基层混凝土路面的概率型结构设计方法。提出了贫混凝土两种形式的疲劳方程,并据此推导了混凝土路面结构贫混凝土基层的疲劳应力系数和沥青路面结构贫混凝土基层的抗弯拉强度结构系数。

对贫混凝土基层混凝土路面现有结构设计方法的应力计算进行了分析,发现等刚度法用于双层板路面的荷载应力计算是可行的,但用于温度应力计算会引起较大的误差。

利用三维有限元方法对贫混凝土基层混凝土路面进行了荷载应力和温度应力的大量计算,通过回归,得出了贫混凝土基层混凝土路面荷载应力及温度应力实用计算公式。针对规范中轴载换算存在的问题,分别根据面层和基层的荷载应力公式和疲劳方程,提出轴载换算公式以及疲劳应力系数。

长安大学的马庆雷^[7]对基于刚性基层(包括贫混凝土、水泥混凝土和钢筋混凝土基层)的耐久性沥青路面结构进行研究。认为刚性基层沥青路面较半刚性基层沥青路面具有使用寿命长,减少行程时间费、车辆运行费和事故费,可在较长时间内保持较高的服务能力,大大减少时间寿命周期费用等优点。

提出了普通水泥混凝土基层、贫混凝土基层厚度范围与合理切缝间距,建立了刚性基层沥青路面的结构设计方法;提出采用应力吸收层、大粒径沥青碎石混合料等结构层可有效地防止刚性基层因温度应力而引起的沥青面层反射裂缝。

利用三维有限元模型,分析了沥青面层厚度、基层厚度、基层模量和路基模量等参数对刚性基层的荷载应力、温度应力及其两者之间的复合应力的影响规律及其显著性。得出了标准轴载作用下基层应力以及不同轴型荷载作用下混凝土基层底面的荷载应力、温度应力及复合应力的实用计算公式。

长安大学的郑木莲^[6]对多孔混凝土排水基层进行研究,认为多孔混凝土具有

良好的温缩、干缩、抗冲刷和抗冻等物理性质。对疲劳试验数据进行分析, 得出了多孔混凝土作为水泥混凝土路面下面层荷载应力计算的疲劳应力系数, 和作为沥青路面基层层底弯拉应力验算的抗拉强度结构系数。

对于多孔混凝土基层水泥混凝土路面结构设计, 提出了组合设计的具体要求。从分析路面温度场入手, 研究了多孔混凝土基层的温度翘曲应力和温度胀缩应力, 据此分析了多孔混凝土基层接缝的设置依据和缝间距离。最后综合路面排水分析和应力分析与结构计算两部分内容, 提出多孔混凝土基层水泥混凝土路面的结构设计方法。

但是目前还未发现利用破碎半刚性基层作为再生集料骨料, 进行水泥混凝土刚性基层沥青路面结构设计的先例。

1.2.2 钢筋网加固技术的研究现状

在公路建设中一般采用连续配筋混凝土或钢丝网加固技术, 很少采用钢筋网。国内外对连续配筋混凝土的研究已经非常成熟, 并且都制定了相关的设计施工规范。但由于连续配筋混凝土基层沥青路面用筋多, 较难推广; 近年又提出钢丝网加固技术, 如陕西榆林地区就是为了改善沥青混凝土路面推移病害, 在沥青碎石路面中加入钢丝网^[18]。再如长安大学公路学院、陕西榆林公路管理局、中交第一公路勘察设计研究院联合研究^[19]在杨靖线上的陡坡推移路段, 针对沙漠地区公路的网裂和推移病害, 分别采用沥青微表处理和改性沥青混合料加铺钢丝网施工的工艺进行处理。选用直径为 3mm 的成品钢丝网, 每片为 10m² 的等边菱形网格, 菱形边长 6cm, 钢丝网的连接为点焊焊接; 沥青采用成品改性沥青, 并且在混合料中添加 1% 的水泥。对双面层路面, 浇洒透层油→摊铺 4cm 沥青碎石下面层→铺设钢丝网→摊铺 3cm 沥青碎石上面层→碾压→改性沥青薄层罩面。单面层路面, 浇洒透层油→铺设钢丝网→摊铺沥青碎石面层→碾压→改性沥青薄层罩面。历时一年后, 尚未出现推移、拥包, 取得了较好的效果。

焊接钢筋网混凝土结构一般应用于大型现浇混凝土结构和桥梁中, 在国外已经有广泛的研究。焊接钢筋网的应用始于 1901 年美国的马萨诸塞州 (Massachusetts)^[20], 用作预制混凝土的配筋。早在 20 世纪初^[21], 德国、意大利、奥地利、法国、美国等国家就制定了焊接钢筋网的标准。我国在 20 世纪 90

年代以后才逐渐采用焊接钢筋网，1995 年颁布实施了《钢筋混凝土用焊接钢筋网》，1997 年颁布实施了《焊接钢筋网混凝土结构技术规程》。目前我国焊接钢筋网的研究应用尚处于起步阶段，与发达国家有较大差距，规程提出其适用范围仅为工业及民用房屋及一般构筑物的板和墙的混凝土结构。

本课题采用钢筋网加固半刚性基层再生集料刚性基层路面结构目前国内外尚未有研究。

1.2.3 刚性基层横缝间距的国内外研究现状

混凝土基层的横向裂缝主要是由于在环境温度和相对湿度的影响下产生的温缩变形和干缩变形引起的。一般而言，混凝土随含水量变化而引起的干缩变形，主要取决于拌制混凝土时的单位用水量。单位用水量越大，干燥时的收缩也越大。因此，应在施工条件允许的范围内尽可能采用较小的单位用水量。至于其他影响因素，如水泥用量、水灰比等虽与干缩性有关，但影响程度远不如用水量。混凝土基层浇筑初期，表面的水分蒸发会引起表层混凝土的不均匀收缩。因此，必须采取相应的养生措施，以保证混凝土有良好的凝结硬化条件。可见干缩变形受施工条件的影响较大，可以得到有效控制，此处重点考虑温度变形的影响。

有关碾压混凝土、贫混凝土基层缩缝间距的研究相对较少。虽然普遍认为可比普通水泥混凝土路面适当延长间距，但多以一定时间的工程实践为依据。从路面力学理论分析延长缩缝间距的机理，一般是依据干缩和温缩系数来确定缩缝的间距。再生集料混凝土基层的缩缝间距可参照碾压、贫混凝土的缩缝研究成果。

对于碾压混凝土，有文献根据室内伸缩值的对比试验和试验路的铺筑验证，认为碾压混凝土路面每隔 10~15m 设置一条缩缝是可行的^[22]。西班牙、法国、澳大利亚等国家研究、应用碾压混凝土路面施工技术已有多年历史，但由于主要用于建造货场、港口码头、停车场和低等级道路工程，因此对接缝的研究较少，有的甚至与沥青路面一样，不预设接缝，任其自由开裂。根据第十八届世界道路会议的资料介绍，不预设横缝、自由开裂产生的横缝间距通常为 6~12m，有时可达到 20m。

日本道路协会 1990 年 5 月制订的“碾压混凝土路面技术指南(草案)”对横向缩缝提出的设置原则^[23]为：当板厚为 25cm 时，横向缩缝间距为 15~20m；板

厚小于 25cm 时, 间距为 10~15m。但这种规定主要依据实际工程观测, 尚未见到深入的试验研究成果或理论分析报告。

美国混凝土学会(ACI)325 委员会 1995 年发表的《碾压混凝土当前工艺水平的报告》^[24]中涉及碾压混凝土路面接缝设计的内容相当少, 仅在“路面设计的考虑”一节中提到: 采用横缝时, 一般间隔在 9.1m~21.3m 之间。

英国道路研究所的足尺试验路表明, 增加贫混凝土的强度会增大温度裂缝的间距和宽度。为了获得微裂缝的最佳分布, 德国建议在新建的贫混凝土基层上切缝。在下列情况下要求切缝:

(1) 贫混凝土基层的厚度大于或等于 20cm, 横向切缝的间距须小于 5m;

(2) 稳定基层的抗压强度超过上限值(12MPa), 横向切缝的间距须小于 5m。

德国对切缝间距的这一要求偏小, 但其对于厚度较大, 强度较高的贫混凝土基层需作切缝处理且切缝间距较小的思想值得借鉴。Foulkes 认为, 在水泥结基层中采用温缩系数高的粗集料可使板长缩短; 降低贫混凝土的强度到其低限 10MPa 可进一步调节裂缝的间距。但降低贫混凝土的强度对相邻板之间的锁结作用有害, 而这种锁结作用可提高整个基层的整体性, 为面板提供有力的支撑。

综上所述, 各国对缩缝设置的认识尚未统一, 虽普遍认为可比普通水泥混凝土路面适当延长间距, 但多以一定时间内的实践为依据, 尚缺乏从路面力学理论上深入分析延长缩缝间距的机理, 因而无法根据材料及结构的自身特性确定合理的缩缝间距。

再生集料混凝土基层与混凝土面层又存在显著不同, 其上面覆盖约 0.1m 厚的沥青混凝土面层, 大大缓解了温度的影响。目前尚未见有关再生集料混凝土基层接缝设置的论述。胡长顺等^[25]对碾压混凝土基层进行一系列物理力学性质研究, 得出其缩缝距离可较普通混凝土板的长, 并通过在试验路上设置不同间距的缩缝, 观察得出接缝间距为 10m 和 15m 板未发生断裂的结论。牛开民等^[25]通过对全厚式碾压混凝土路面进行应力分析, 并结合碾压混凝土本身的收缩特性, 认为每隔 6~10m 设置一条缩缝是可行的。对于贫混凝土基层缩缝间距, 普遍认为可比普通水泥混凝土路面适当延长, 孙家伟^[26]通过分析, 提出贫混凝土基层的横向缩缝间距一般可在 10~15m 之间选择。郑木莲^[27]通过一维热传导分析, 提出多孔混凝土基层接缝间距的计算方法, 认为多孔混凝土基层接缝间距在 10~20m

之间。

目前,国内外对普通水泥混凝土路面的温度应力进行了深入的研究,对沥青路面水泥混凝土基层温度应力的研究尚未系统。由于混凝土基层的平面尺寸从普通水泥混凝土基层到贫混凝土基层,变化较大,且在上方铺筑了沥青面层,改变了其温度特性,因此需要对混凝土基层沥青路面的温度场和温度应力进行分析。

1.3 研究内容

1. 再生集料刚性基层的构造研究

为遏制再生集料刚性基层的干缩、温缩反射裂缝对沥青面层的影响,对再生集料刚性基层不同缩缝间距、不同钢筋网配制方式进行荷载应力、温度应力数值模拟计算;并通过铺筑试验路进行结构性能的跟踪检测,以确定刚性基层的配筋技术、板块尺寸。

2. 刚性基层的切缝间距

研究再生集料刚性基层切缝间距的控制因素,提出再生集料刚性基层切缝间距的理论计算方法。

3. 再生集料刚性基层路面结构使用耐久性的研究

通过对大、中修中使用的再生集料刚性基层路面结构、柔性基层路面结构的力学性能、抗疲劳及经济性能进行对比分析,研究这两类基层的层位功能、受力特点、使用耐久性,为再生集料刚性基层路面结构设计提供理论依据,为高速公路大修中沥青路面结构类型的选择提供理论支撑。

4. 钢筋网对刚性基层受力的影响

探讨刚性基层中钢筋网的作用,比较钢筋网对行车荷载、温度荷载引起的刚性基层应力分布的影响,基层开裂前后,钢筋网的功能,及钢筋网对刚性基层疲劳寿命的影响。

5. 刚性基层的结构性能评价

通过对试验路的现场检测结果与理论计算结果的分析,以及试验路跟踪观测,对该路面结构性能做出合理的评价。

1.4 研究的技术路线

1. 建立再生集料刚性基层温度应力有限元计算模型,对再生集料刚性基层不

同缩缝间距进行温度应力数值模拟计算，以确定刚性基层的板块尺寸和切缝间距。

2. 建立刚性基层沥青路面结构的有限元计算模型，对再生集料刚性基层不同缩缝间距、不同钢筋网配制方式进行荷载应力、温度应力数值模拟计算，以确定刚性基层的配筋技术。

3. 进行水泥混凝土—沥青混凝土复合式路面结构设计

4. 结构性能对比试验研究。对再生集料刚性基层路面结构、柔性基层路面结构的力学性能、抗疲劳及经济性能进行对比分析，研究这两类基层的层位功能、受力特点、使用耐久性，为高速公路大修中沥青路面结构类型的选择提供理论支撑。

5. 试验路验证。

1.5 可行性分析

1. 理论知识

根据现在所掌握的专业知识、计算机操作能力、数学计算能力和前人的研究成果，可以完成本课题的数据处理和理论分析工作。

2. 试验技术条件

根据道路实验室现有的试验设备和技术条件，能够完成本课题所涉及的室外，室内试验。

3. 现场测试条件

现场工程技术成熟，监测仪器和设备齐全，能够全面和准确的观测所需数据。

4. 应用前景

目前我国高速公路的主要路面结构形式是半刚性基层沥青路面，这对抵抗重载交通起到了良好的作用。但是，由于半刚性基层的干缩、温缩与脆性特性，以及重载交通的作用，基层开裂现象严重。早期病害称为普遍现象。加之先期修建的高速公路目前已基本达到大修年限，半刚性路面结构大修任务繁重。目前大修中，铣刨的大量半刚性基层材料几乎全部作为废料抛弃，不仅占压土地，而且对环境造成不利影响。半刚性基层材料的利用问题十分突出。铣刨的半刚性基层材料，具有一定的级配、较高的强度，仍具有较高的利用价值。以铣刨的半刚性基层材料作为骨料，配制成水泥混凝土做刚性基层，对降低工程建设成本具有重要

的经济意义。特别是对于缺乏石料平原区高速公路，市场需求巨大。

该项目的研究，将提出合理的半刚性基层再生集料修建刚性基层沥青路面的设计和施工方法，可以降低工程费用，提高路面结构耐久性，有效利用半刚性路面大修中的废弃基层材料，减少环境的污染，降低工程成本和减少矿山开采具有良好的经济效益、社会和环境效益。这些都将更有利于该技术的应用与推广，符合节约资源，保护环境，可持续发展的理念。推广前景广阔。

根据上述条件，认为该课题的开展是可行的。

第二章 刚性基层的特点

2.1 现有沥青路面结构的病害

目前我国公路的主要路面结构形式是半刚性基层沥青路面，这对抵抗重载交通起到了良好的作用。相对于柔性基层来说，半刚性基层具有良好的板体性能，较高的强度和较强的荷载扩散能力。半刚性基层下路床顶面的荷载压应力与压应变较小，有利于保持路基处于良好的工作状态并处于弹性工作状态，从而有利于减轻沥青路面的车辙，同时，还能因地制宜地利用当地材料，具有较大的经济优势。因此，半刚性基层在我国得到了广泛应用，在路面结构形式中占据了主流地位。但是，半刚性基层本身存在难以克服的缺陷与不足：土的温缩系数比干缩系数大4-5倍，二灰土等半刚性基层的开裂多发生于气温较低的冬季，土的粘性愈大、石灰剂量愈高，石灰土基层裂缝愈多愈宽。通过加入粉煤灰、级配碎石改良而形成的二灰稳定级配碎石结构，虽然能减小裂缝的产生与发展，但还不能消除反射裂缝的出现。

国外专家研究发现，沥青面层下5-10cm 是产生车辙破坏的主要区域；我国的研究资料也认为在100KN轴载作用下，面层下2-7cm是剪应力的作用范围，是车辙病害易发区域，在这个范围内采用沥青碎石结构是不可行的。但在路面结构层与基层之间采用7cm的沥青碎石作为排水与反射裂缝缓解层是可行的。公路病害调查表明路面产生自下而上裂缝的居多，并进而引起其他病害。主要病害类型：坑槽、沉陷、纵缝、网裂。

2.2 基层类型与特点

2.2.1 路面基层的发展

为适应公路交通量的增长和重载车辆的增加，路面结构包括基层结构在不断更新和完善。就我国公路建设发展而言，道路基层经历了如下三个阶段：

1. 适应中、低交通的泥结碎石及级配砾石路面，其基层主要采用手摆片石、碎石土、碎砖等当地材料。由于交通量小以及是白色透气路面，能承担当时不大的交通量。

2. 随着公路里程的快速增长,为改善路面行车质量,采用沥青表面处治路面,原来的泥结碎石及级配砾石路面改作基层。在推广中发现该含土多、塑性指数大的泥结碎石及级配砾石基层越来越明显地暴露出它们水稳性不好的弱点。针对这种现象,当时用掺灰的方法对基层进行处理,收到了一定的效果。

3. 进入 20 世纪 80 年代以来,随着我国经济的迅速发展,高等级公路的里程不断增加。为适应高等级公路重交通、重载对道路的要求,一种以无机结合料稳定粒料为基层、沥青混凝土为面层的所谓“半刚性路面”被大量应用。国家在“七五”科技攻关中专门立项进行研究,并取得大量成果。半刚性基层在我国得到了广泛应用,在路面结构形式中占据了主流地位。基层一般采用无机结合料稳定粒料,厚度 15-25cm,底基层一般采用无机结合料稳定土,厚度 15-40cm。

2.2.2 各类基层特点

目前路面基层类型根据材料的力学行为可分为:柔性基层、半刚性基层和刚性基层。

1. 半刚性基层

半刚性基层指无机结合料稳定类基层,这是目前我国应用最广泛的基层,其结合料一般采用水泥、石灰、工业废渣等材料。半刚性基层承载力大、刚度大、模量高、板体性强、弯沉小,但这种材料温缩、干缩变形大,易开裂,属于脆性材料。基于半刚性材料强度高、模量大、板体性强的优点,我国路面设计时将半刚性基层作为承重层,提出强基薄面的设计思想。虽然近几年面层设计也有增厚的趋势,一些高速公路的沥青面层加厚至 18cm,但是半刚性基层的强度仍然控制在 3-5MPa,在施工中强度甚至更高,同时半刚性基层材料变形小,易断裂的缺点依然没有改变,反射裂缝仍然为半刚性基层沥青路面的主要破坏模式。

由于半刚性基层材料温缩和干缩特性,以及材料本身的脆性,裂缝的产生不可避免。裂缝的存在导致三种后果:首先,当车轮从裂缝的一侧经过到达裂缝的另一侧时,应力形成突变,并在裂缝处产生较大应力集中,表现为面层在裂缝处上下剪切和层底弯拉,这些应力,加之温度应力的综合、反复作用,导致面层疲劳而产生反射裂缝;其二,水沿裂缝渗入路面结构内,在行车荷载作用下,对基层、底基层、路基形成水力冲刷,将材料中的细料唧出,材料松散并形成坑槽,

半刚性基层失去板体性，弯沉迅速增大，最终导致结构破损；第三，界面上水的存在改变了接触条件，结构不再连续，界面成为半连续甚至光滑接触模式，这种情况使得路面的受力状态十分不利，沥青层底有可能出现超过极限拉应力，导致沥青面层开裂，承载力降低，产生车辙等病害。半刚性基层路面的破坏一般从半刚性基层的缩裂开始，然后破坏由基层向面层及向路基延伸，最终发展为整个路面结构的破坏，因此这种路面破坏模式属于路面的结构性破坏。一旦损坏，维修保养是目前面临的一大难题。

我国幅员辽阔，气候条件千差万别，但高速公路几乎全部采用半刚性基层的结构形式却过于单一，很难适应在不同气候环境下的使用要求，需要发展和研究多样化的基层材料，丰富高等级公路路面的结构形式。而柔性基层和刚性基层鉴于各自的优点，应进一步研究，以利选择应用。

2. 柔性基层

国际上应用较多的柔性基层主要包括级配碎石基层和沥青稳定碎石基层。

(1) 级配碎石基层

级配碎石基层是世界各国普遍采用的基层类型之一，采用具有一定厚度和严格级配要求的优质级配碎石作为上基层，而半刚性材料作为下基层。这种上柔下刚的倒装结构，使上下基层优势互补，既充分发挥半刚性基层沥青路面强度较高的优点，同时克服其缺点，能在很大程度上防治和减少半刚性基层的反射裂缝。但是，级配碎石层整体强度不足，抵抗变形能力差，在荷载多次重复作用下易产生塑性变形积累，为达到较高的压实度应采用重型压实标准。然而当其厚度较大时，即使达到较高压实度，在重复荷载作用下也会产生较大的残余变形。除可作为应力消散层用在沥青面层与半刚性基层之间外，级配碎石可在轻交通道路上用作薄沥青面层下的基层作为主要承重层(此时厚度较厚)，或在中重交通道路上用作厚沥青面层的基层或设置在一定厚度的沥青稳定碎石下作为底基层。

虽然我国级配碎石应用较早，但主要用于一般公路的基层和低等级公路的路面，或作为排水垫层，而且对碎石材料的级配要求不严，随意性较大，若将其大面积用于高等级公路，尚需进一步研究。

(2) 沥青稳定碎石基层

沥青稳定碎石基层是在级配碎石基础上发展起来的，是用适量的沥青对级配

碎石进行稳定后用作沥青路面的基层。与半刚性基层相比,沥青稳定碎石基层刚相对较小,具有较高的抗剪强度、抗弯拉强度和耐疲劳性,不易产生收缩开裂和水损害;与传统的用于面层的沥青混凝土相比,它是针对于基层用的,粒径偏大,级配偏粗,沥青用量偏少,对原材料的要求相对于面层要低。

沥青稳定碎石基层沥青路面的优越性主要体现在:由于面层和基层材料结构的相似性,路面结构受力、变形更为协调。设计优良的沥青稳定基层混合料能保证一定的空隙率,使水分顺畅地通过基层排出,不会滞留在路面结构中造成路面的水稳性破坏;沥青混合料对于水分的变化不敏感,受水和冰冻影响较小,不会因为干缩裂缝而导致面层出现反射裂缝;沥青稳定碎石基层同沥青面层一起构成全厚式沥青面层,从而使得整个沥青面层的修筑时间减少。

鉴于上述优点,使得沥青稳定碎石基层沥青路面在国外得到广泛应用,其中最有代表性的是美国全厚式沥青路面结构和英国长寿命沥青路面。国外沥青路面结构中沥青层总厚度较大,其路面结构相对于我国半刚性路面来讲,偏于柔性。国外的沥青路面结构有向进一步加厚沥青层的厚度并提高沥青稳定类基层强度的方向发展。国内在这方面做了一些研究,并对沥青稳定类基层沥青路面设计的各个方面进行了试验和分析,但这方面的研究工作刚刚起步,要通过实际道路的修筑,对沥青稳定类基层沥青路面的长期使用性能进行观测,以获得足够数据,进行分析。同时,由于近来石油价格的攀升,综合考虑我国国情,将其大面积推广应用尚有待商榷。

3. 刚性基层

刚性基层主要指以贫混凝土、水泥混凝土和连续配筋混凝土等材料作基层。这类基层强度高,抗冲刷能力强,耐久性好。加铺沥青面层材料后,可以综合刚性路面和柔性路面的优势,大大延长路面的使用寿命。

为提高沥青路面的耐久性,采用刚性基层是一种行之有效的措施,目前刚性基层可采用贫混凝土、水泥混凝土和连续配筋混凝土。根据各类刚性基层的物理力学特性,参考国内外相关研究成果,连续配筋混凝土基层、水泥混凝土基层和贫混凝土基层的设计基准期可分别为 60 年、45 年和 30 年,从而充分体现出其优越的耐久性能。

国内有关刚性基层的研究相对较少,只有近几年长安大学对贫混凝土、水泥

混凝土和连续配筋混凝土这三种刚性基层进行了研究,但随着对这种路面结构的进一步认识,以及路面结构耐久性理念的进一步发展,刚性基层必将得到越来越广泛的应用。

2.3 刚性基层材料特性

水泥混凝土作为刚性基层时与其作为面层相似,在其承受的荷载应力和温度应力之和超过其极限弯拉强度时,混凝土板便产生断裂破坏。在荷载和温度的重复作用下,混凝土基层会在低于其极限抗弯拉强度时出现疲劳破坏。本项目采用二灰碎石再生集料配制的水泥混凝土刚性基层,其性质与普通水泥混凝土基层的性质类似,以下主要研究再生集料混凝土的特性。

1. 再生混凝土的强度特性

强度是水泥混凝土硬化后的主要力学特性,我国国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》^[28]规定,混凝土强度有立方体抗压强度、棱柱体抗压强度、劈裂抗拉强度、弯拉强度、剪切强度和粘结强度等。与一般工程结构不同,水泥混凝土用作路面时以弯拉强度作为主要强度指标,抗压强度作为参考或辅助指标。但水泥混凝土作沥青路面结构的基层时,其力学特性也应与面层同等要求。

在沥青路面结构设计中,水泥混凝土基层板体将承受行车荷载和温度荷载的共同作用,基层底面所产生的弯拉应力和混凝土的弯拉强度确定了其所需要的厚度。因此,采用弯拉试验确定的弯拉强度能同路面受力状况相匹配。

弯拉试验采用梁式试件,试件的标准尺寸为 15cm×15cm×55cm,采用三点加荷方式。在混凝土基层施工质量的检验和评定时,直接进行弯拉强度试验有一定的困难,通常采用钻芯方式取出圆柱形试件,进行劈裂试验确定其劈裂强度,根据所建立的劈裂强度与弯拉强度的经验关系式,由劈裂强度得到弯拉强度。劈裂强度试验采用圆柱体试件,试件直径随钻芯直径而定,一般为 10cm 或 15cm,试件高度为混凝土的层厚。

另外,水泥混凝土的抗压强度和弯拉强度密切相关,抗压强度大时,弯拉强度也大,反之亦然,但弯拉强度比抗压强度低得多。

2. 混凝土的疲劳特性

同面层类似,水泥混凝土基层承受行车荷载及温度和湿度变化所产生的应力的反复作用。材料在承受反复应力作用时,会在低于静载极限强度值时出现疲劳

破坏。

对于混凝土的疲劳方程,国内外一些学者和机构进行了研究,在疲劳寿命 N 于 10^2 - 10^7 范围内得出线性疲劳方程如式 (2-1):

$$S = \frac{\sigma_{\max}}{f_r} = a - b \lg N \quad (2-1)$$

式中: S ——应力水平;

σ_{\max} ——反复应力最大值;

f_r ——混凝土的弯拉强度;

a 、 b ——混凝土疲劳试验确定的系数。

式(2-1)反映了应力级位对疲劳寿命的影响,但未考虑反复施加荷载时低应力的变化。这与结构受荷的实际情况不符,因此并不完善。实际情况中,混凝土基层承受行车荷载和温度荷载的共同作用。不受行车荷载作用时温度应力构成路面结构承受的反复应力的低应力,而行车荷载和温度应力的共同作用构成路面结构所承受的高应力。温度应力随时间不断变化,即高应力和低应力是不断变化的。为了考虑这种情况对疲劳寿命的影响,挪威的 Jacobson 在疲劳方程中引入一项表示低高应力比的系数 R , 采用如下形式:

$$S = \frac{\sigma_{\max}}{f_r} = a - b(1 - R) \lg N \quad (2-2)$$

式中: R 为低、高应力比, $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ 。

目前应用比较广泛的是含有低高应力比的双对数疲劳方程,即

$$\lg S = \frac{\sigma_{\max}}{f_r} = a - b(1 - R) \lg N \quad (2-3)$$

为研究方便,也可以建立如下的疲劳方程:

$$\lg \frac{S(1-R)}{1-SR} = \lg a - b \lg N \quad (2-4)$$

为了推导再生集料刚性基层的荷载应力疲劳系数,山东大学对再生集料混凝土试件进行疲劳试验。试件尺寸为 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 55\text{cm}$ 的小梁,疲劳试验在 INSTRON8500 疲劳试验机上进行,试件按三分点法加载。对试验数据进行回归

分析得到再生集料混凝土的疲劳方程，如式 2-5：

$$\lg S = \lg 1.072 - 0.0422 \lg N \quad (2-5)$$

可见再生集料混凝土的疲劳性能接近普通水泥混凝土，并且再生集料混凝土的疲劳寿命对应力变化的敏感程度和普通水泥混凝土基本相同，即具有相近的疲劳规律。

路面结构设计应考虑再生骨料混凝土的疲劳特性，主要是在计算再生集料刚性基层荷载应力时需要确定再生集料混凝土的荷载疲劳应力系数 K_f 。

对于荷载应力与温度应力综合疲劳作用下的再生集料刚性基层的疲劳方程，将荷载应力 σ_p 和温度翘曲应力 σ_t 代入式 2-4，取 $\sigma_{\min} = \sigma_t$ ， $\sigma_{\max} = \sigma_t + \sigma_p$ ，则，式 2-4 变为：

$$\lg \frac{\sigma_p}{f_r - \sigma_t} = \lg a - b \lg N \quad (2-6)$$

$$\text{或} \quad \frac{\sigma_p}{f_r - \sigma_t} = \frac{a}{N_e^b} \quad (2-7)$$

由此，得到疲劳应力系数 K_f 为：

$$K_f = \frac{1}{a} N_e^b \quad (2-8)$$

式中， N_e ——标准轴载在使用年限内的累计作用次数；

σ_t 、 σ_p ——温度应力和荷载应力；

a 、 b ——待定系数；

综上，根据再生集料刚性基层的疲劳方程（2-5），可知，再生集料混凝土的得到疲劳应力系数 K_f ：

$$K_f = \frac{1}{1.072} N_e^{0.0422} \quad (3-15)$$

$$\text{即：} \quad K_f = 0.9328 N_e^{0.0422} \quad (3-16)$$

3. 混凝土的收缩和膨胀

路面水泥混凝土除因凝结与硬化所引起的体积变化外，还因长期暴露于大自

然而受大气的温度和湿度，以及路基水温状况变化的影响，产生胀缩变形。混凝土处于自由状态下的体积变化，并无多大危害，但对水泥混凝土路面而言，由于受到相邻混凝土面板和路基支承条件的约束，其自由是受到限制的。这时的体积变化往往会使路面混凝土开裂破坏。

水泥混凝土热胀冷缩的大小取决于水泥石和骨料的温度胀缩系数的大小。一般水泥石的温度膨胀系数约为 $(15\sim 18)\times 10^{-6}$ 。而集料则随种类而异，其中以石英岩为最大，约为 $(10\sim 12)\times 10^{-6}$ 以石灰岩为最小，约为 $(4.5\sim 7.5)\times 10^{-6}$ 。

由于水泥混凝土中集料所占的比例超过 80%，因此，集料的胀缩性质起主导作用。通常，水泥混凝土路面在温度变化时，每升降 1°C ，平均每 100m 长度伸缩 1mm。路面设置胀缩缝目的是避免和控制路面混凝土产生不规则裂缝。

混凝土随含水量变化而引起的干缩变形，主要取决于拌制混凝土时的单位用水量。单位用水量越大，干燥时的收缩也越大。因此，应在施工条件允许的范围内尽可能采用较小的单位用水量。至于其他影响因素，如水泥用量、水灰比等虽与干缩性有关，但影响程度远不如用水量。混凝土路面浇筑初期，表面的水分蒸发会引起路表混凝土的不均匀收缩。因此，必须采取相应的养生措施，以保证混凝土有良好的凝结硬化条件。

第三章 再生集料刚性基层横向切缝间距的研究

3.1 概述

水泥混凝土除因凝结硬化所引起的干缩变形和干缩变形外,还因长期处于大自然中,受大气的温度和湿度,以及路基水温状况变化的影响,产生胀缩变形。混凝土处于自由状态下的体积变化,并无多大危害,但对路面结构而言,由于受到相邻结构层和路基支承条件的约束,其变形受到限制的,使得基层内产生温度伸缩和翘曲应力,这些往往会使混凝土刚性基层出现不规则开裂破坏。

为了避免和控制基层混凝土产生不规则裂缝,需要对再生集料刚性基层设置胀缩缝,即在铺筑沥青混凝土路面前,对刚性基层进行横向切缝,期望其后期在车辆荷载和温度应力的反复作用下沿着切缝开裂,从而避免出现不规则裂缝。

横向切缝设置的合理与否不仅关系到路面的寿命,而且影响路面的行车性能。切缝过多,不仅增加施工的复杂性,同时还容易导致唧泥、错台等破坏,严重影响路面的整体强度。但是切缝间距过大也会带来一些问题,例如:①温度翘曲应力增大,增加断板的可能性;②干缩和温度变化引起板的伸缩量增大,增加对填缝材料的弹性密封要求;③降低依靠集料嵌锁作用的接缝传荷能力等。因此,针对再生集料刚性基层的特点,采用有限元分析方法,研究确定合理的横向缩缝间距对提高路面使用质量具有重要意义。

一般地,混凝土面层与大气直接接触,受温度的影响较大,相应产生的温度应力亦较大,故需设置各种形式的接缝。而混凝土作为基层时,上覆沥青面层,大大改变了混凝土基层内环境温度的影响。混凝土基层内的温度应力究竟有多大,是否有必要设置接缝,则成为很有必要研究的问题,本文即从混凝土基层沥青路面的温度场出发,研究基层内的温度应力大小,从而对于混凝土基层的接缝设置做出回答。

3.2 影响横缝间距的关键因素

3.2.1 刚性路面的接缝设计方法

刚性路面的接缝间距计算目前有按均匀收缩和按翘曲应力控制两种计算方

法^[29]。按照均匀收缩变形受路基摩擦阻力的约束所产生的应力，不超过混凝土允许拉应力的原则确定缩缝最大间距，是最基本的方法之一。图 3-1 表示一长度等于 L 的混凝土面板，由于收缩，面板的内应力分布在中心处达到最大值。最大应力 σ_{\max}

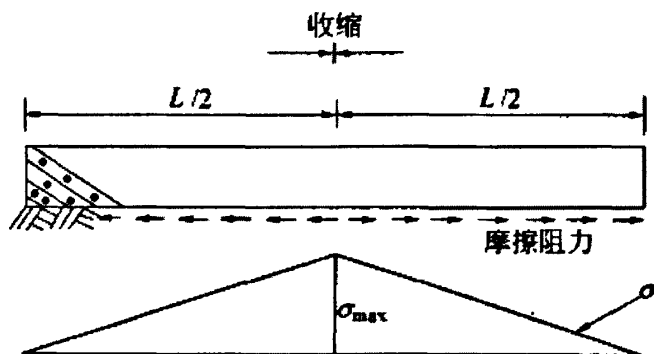


图 3-1 混凝土板的收缩应力

可按式 (3-1) 计算，即：

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2} \gamma f L \quad (3-1)$$

因此缩缝的最大间距 L 可按式 (3-2) 确定：

$$L = \frac{2[\sigma_c]}{\gamma f} \quad (3-2)$$

式中： $[\sigma_c]$ ——混凝土容许拉应力(Pa)；

γ ——混凝土的容重(N/m^3)；

f ——混凝土路面板与基层之间的摩擦阻力系数。

如果设置接缝的间距大于上述计算的 L 值，混凝土板将在 $L/2$ 处开裂。前人研究认为按翘曲应力控制确定的缩缝间距一般都小于按混凝土均匀收缩控制所确定的缩缝间距。混凝土路面的缩缝间距一般采用 4~6m。

刚性路面设计中，混凝土路面的切缝间距只是根据层间摩擦力及混凝土容许拉应力控制，没有考虑到混凝土板的厚度及环境温度的影响，显然是不合理的。

3.2.2 水泥混凝土基层温度收缩出现的时间

传统认为混凝土混合料终凝以后一段很短的时间内，容许拉应力极低，而新浇筑的混凝土路面，由于水化热的散失开始降温，水分也开始挥发，产生明显收缩；如果基层与面板之间摩擦阻力系数足够大，将出现横向贯穿裂缝；故水泥混凝土面板的接缝计算采用龄期两天的容许拉应力。

通过混凝土路面的施工观察可知，如果不进行混凝土路面的切缝处理，混凝土路面将在3天左右出现第一期开裂，裂缝间距约为20m。分析认为，混凝土面板的开裂是分期开裂，随龄期增长，裂缝间距由大到小，直至使用期内最终裂缝间距为4~6m。

本文研究的再生混凝土基层与混凝土面层不同，刚性基层养护到一定强度后就铺筑沥青混凝土面层，结构的受外界环境的影响程度减小。铺筑沥青面层后，基层的降温幅度减小，改变了基层的温度特性，温度场的变化对混凝土基层的影响较小，通过有限元计算认为极限降温下刚性基层的温度应力达不到基层混凝土的抗拉强度，不会引起刚性基层的开裂。由于铺筑了沥青混凝土面层，基层的与大气隔绝，水分蒸发量很小，基本可以忽略干缩变形对基层的影响。

本课题的试验路再生集料刚性基层采用10m间距的切缝间距，24小时内完成切缝，养护14天后铺筑沥青混凝土路面。在养护期间，混凝土基层没有出现任何裂缝，情况良好。养护时的混凝土基层及养护期满铺筑沥青混凝土前的混凝土情况良好，如图3-2及图3-3所示。



图3-2 再生集料混凝土基层养护图

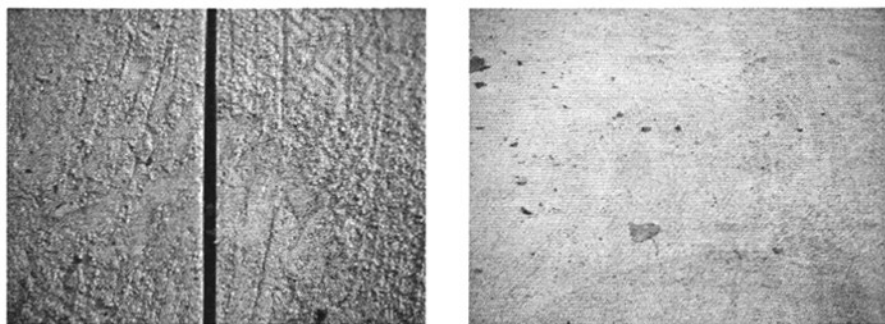


图3-3 再生集料混凝土基层养护期末图

综上所述，当刚性基层某一时刻的最大温度应力大于此时其容许拉应力时，再生水泥混凝土基层就出现了裂缝，养生期末，环境温度骤然降低时，混凝土基层温缩应力可能大于其容许拉应力。要分析刚性基层的切缝间距，就必须对养护期末刚性基层的温度场和温度应力进行分析。

本章以下章节将结合温度场的计算理论，采用有限元计算方法对养护期末刚性基层的温度场和温度应力进行分析。

3.3 温度场计算的基本理论

要分析再生集料混凝土基层的温度应力，首先应分析再生集料混凝土基层的温度场。温度的空间分布称为温度场。温度场不随时间变化称为稳态温度场；温度场随时间变化称为非稳态温度场。因此温度场有稳态温度场和非稳态温度场两种。

进入地表的热流以导热的方式传递给路面结构体内各处，路面体内导热属于非稳态导热。可用非稳态温度场表示路面结构体内各点随时间 t 变化的情况。在空间坐标系中，某一确定的时刻，物体温度场的数学表达式为：

$$T = T(x, y, z, t) \quad (3-3)$$

同一时间、空间内由温度相同的点构成的面称为等温面。非稳态温度场的等温面随着时间的不同而变化。取等温面的外法线方向为温度梯度的正方向，在直角坐标系中，温度梯度的表达式为：

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial x} i + \frac{\partial T}{\partial y} j + \frac{\partial T}{\partial z} k \quad (3-4)$$

式中 i, j, k 分别表示 x, y, z 方向的单位向量。

1. 热传导方程

假设路面结构第 i 层导热系数和导温系数分别为 λ_i 和 α_i ($i=1,2,\dots,n$)，厚度 h_i ($i=1,2,\dots,n$, 其中 $h_n=\infty$)，温度函数为 $T_i=T_i(x,y,z,t)$ ，同时令 ($H_0=h_1$, $H_1=h_1+h_2$, $H_{n-2}=h_1+h_2+\dots+h_{n-1}$, $H_{n-1}=\infty$)，则温度函数 $T_i=T_i(x,y,z,t)$ 满足热传导方程：

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \left[\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right], & 0 \leq z \leq H_0 \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \left[\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right], & H_0 \leq z \leq H_1 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial T_n}{\partial t} = \alpha_n \left[\frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right], & H_{n-2} \leq z \leq \infty \end{cases} \quad (3-5)$$

2. 层间接触边界条件

设路面各层接触条件良好，则在层间接触上、下两层的温度 T_i, T_{i+1} 及热流 q_i, q_{i+1} 是连续的，则在层间边界上温度函数 T 满足热传学的第四类边界条件：

$$\begin{cases} T_i \Big|_{z=H_i} = T_{i+1} \Big|_{z=H_i} \\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \Big|_{z=H_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \Big|_{z=H_i} \end{cases} \quad (3-6)$$

式中 ($i=1,2,\dots,n-1$)

对于半无限空间而言，在足够深处，由于地热的作用，其温度场随时间、深度的变化均不明显，此类边界条件可表示为：

$$|T(x,y,\infty,t)| = const \quad (3-7)$$

3. 路表边界条件

在沥青面层表面 $Z=0$ 处，温度函数 T_1 还应满足路表边界条件。

若已知边界温度为 $\varphi(t)$ ，则应满足

$$T_1 \Big|_{z=0} = \varphi(t) \quad (3-8)$$

此为第一类边界条件。

4. 外界气温的日变化规律

根据相关气象的资料分析,可以得到我国各地区正常天气时气温周期性日变化的规律:气温在下午2点左右达到最高,在凌晨5~6点时降至最低。气温变化的周期性和非对称性,可用三角函数的线性组合来拟合。同济大学严作人对此做了深入研究^[30],得出了气温日变化规律,表达式为:

$$T_a = T_1 + T_2[0.96 \sin(\omega(t-t_0)) + 0.14 \sin(2\omega(t-t_0))] \quad (3-9)$$

式中: T_1 ——日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), $T_1 = (T_{\max} + T_{\min})/2$;

T_2 ——日气温振幅 ($^{\circ}\text{C}$), $T_2 = (T_{\max} - T_{\min})/2$;

T_{\max} ——日最高气温 ($^{\circ}\text{C}$);

T_{\min} ——日最低气温 ($^{\circ}\text{C}$);

t ——时间变量。

3.4 刚性基层温度应力的有限元分析

本文采用有限元软件(ANSYS)计算刚性基层的温度应力^[31],分两步进行计算:第一步为铺筑沥青混凝土面层再生集料刚性基层的温度场分析;第二步进行热-结构耦合分析,将温度场分析结果作为体荷载加到模型结构中,以求解再生集料基层的温度应力。

3.4.1 有限元热分析

ANSYS 热分析基于能量守恒原理的热平衡方程,用有限元法计算各节点的温度,并导出其它热物理参数。ANSYS 热分析包括热传导、热对流及热辐射三种热传递方式。此外,还可以分析相变、有内热源、接触热阻等问题。它有稳态传热和瞬态传热两种类型。

1. 传热学经典理论

热分析遵循热力学第一定律,即能量守恒定律。

对于一个封闭的系统(没有热量的流入或流出)

$$Q - W = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (3-10)$$

式中： Q ——热量；

W ——做功；

ΔU ——系统内能；

ΔE_k ——系统动能；

ΔE_p ——系统势能；

对于大多数工程传热问题： $\Delta E_k = \Delta E_p = 0$ ；

通常考虑没有做功： $W = 0$ ，则： $Q = \Delta U$ ；

对于稳态热分析： $Q = \Delta U = 0$ ，即流入系统的热量等于流出的热量；对于瞬态热分析： $q = \frac{dU}{dt}$ ，即流入或流出的热传递速率 q 等于系统内能的变化。

2. 热传递的方式

(1) 热传导

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能的交换。热传导遵循傅里叶定律： $q'' = -k \frac{dT}{dx}$ ，式中 q'' 为热流密度 (W/m^2)， k 为导热系数 ($W/m \cdot ^\circ C$)，负号表示热量流向温度降低的方向。

(2) 热对流

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间，由于温差的存在引起的热量的交换。热对流可以分为两类：自然对流和强制对流。热对流用牛顿冷却方程来描述： $q'' = h(T_s - T_b)$ ，式中 h 为对流换热系数（或称膜传热系数、给热系数、膜系数等）， T_s 为固体表面的温度， T_b 为周围流体的温度。

(3) 热辐射

热辐射指物体发射电磁能，并被其它物体吸收转变为热的热量交换过程。物体温度越高，单位时间辐射的热量越多。热传导和热对流都需要有传热介质，而热辐射无须任何介质。实质上，在真空中的热辐射效率最高。

在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射,系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬—波尔兹曼方程来计算:

$q = \varepsilon\sigma A_1 F_{12}(T_1^4 - T_2^4)$, 式中 q 为热流率, ε 为辐射率(黑度), σ 为斯蒂芬—波尔兹曼常数, 约为 $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$, A_1 为辐射面 1 的面积, F_{12} 为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数, T_1 为辐射面 1 的绝对温度, T_2 为辐射面 2 的绝对温度。由上式可以看出, 包含热辐射的热分析是高度非线性的。

3. 稳态传热

如果系统的净热流率为 0, 即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量: $q_{\text{流入}} + q_{\text{生成}} - q_{\text{流出}} = 0$, 则系统处于热稳态。在稳态热分析中任一节点的温度不随时间变化。稳态热分析的能量平衡方程为(以矩阵形式表示):

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (3-11)$$

式中: $[K]$ 为传导矩阵, 包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数;

$\{T\}$ 为节点温度向量;

$\{Q\}$ 为节点热流率向量, 包含热生成;

ANSYS 利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件, 生成 $[K]$ 、 $\{T\}$ 以及 $\{Q\}$ 。

4. 瞬态传热

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程。在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理, 瞬态热平衡可以表达为(以矩阵形式表示):

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (3-12)$$

式中: $[K]$ 为传导矩阵, 包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数;

$[C]$ 为比热矩阵, 考虑系统内能的增加;

$\{T\}$ 为节点温度向量;

$\{\dot{T}\}$ 为温度对时间的导数;

$\{Q\}$ 为节点热流率向量，包含热生成。

5. 线性与非线性

如果有下列情况产生，则为非线性热分析：①材料热性能随温度变化，如 $K(T), C(T)$ 等；②边界条件随温度变化，如 $h(T)$ 等；③含有非线性单元；④考虑辐射传热。非线性热分析的热平衡矩阵方程为：

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = [Q(T)] \quad (3-13)$$

3.4.2 刚性基层温度应力分析

计算温度应力，必须先确定该结构的温度场。影响再生集料混凝土刚性基层的最大温度梯度的是基层本身的特性和外部情况。前者包括材料的导温系数、路面材料对太阳辐射的吸收率和放热系数等；后者包括基层厚度、太阳辐射和气温。

在文献^[32]中，对于沥青面层、贫混凝土基层、底基层和土基的多层体系，利用有限元法求解该路面的非线性瞬态温度场。在求解时，空间上利用有限元法，时间上采用差分法，获得了不同自然区划的温度场和最大温度梯度推荐值。

长安大学结合混凝土的强度特性和混凝土基层沥青路面的结构特性，计算了混凝土基层沥青路面的温度梯度如表 3-1 所示，其中列举了沥青层厚度 h_a 为 0-20cm，基层厚度 h_c 为 22cm 时，各自然区划内最大温度梯度变化范围。

表 3-1 不同自然区划的最大温度梯度推荐值表

区划 $h_a(cm)$	II	III	IV	V	VI	VII
0	0.88-0.94	0.95-1.00	0.93-0.98	0.90-0.96	0.92-0.97	0.98-1.04
4	0.62-0.66	0.65-0.71	0.64-0.70	0.63-0.68	0.64-0.69	0.69-0.74
8	0.43-0.46	0.48-0.51	0.46-0.50	0.44-0.47	0.45-0.49	0.50-0.53
12	0.30-0.32	0.32-0.34	0.31-0.33	0.30-0.32	0.30-0.33	0.33-0.35
16	0.30-0.31	0.30-0.31	0.30-0.31	0.30-0.31	0.30-0.31	0.31-0.33
20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

铺筑沥青路面前刚性基层的结构形式如图 3-4 所示，建立足尺寸三维模型，模型沿道路行车方向（定为 y 向）分别取 5m、10m、15m 和 20m（假定切缝间

距取为以上值), 路面宽度方向 (x 向) 取为 10m。根据路面结构实际受力情况确定模型边界条件如下: 底面各节点的自由度在 x、y、z 方向完全约束; 垂直于行车方向的两端面上的各节点, 除切缝深度范围内, 施加法向的约束; 垂直路宽方向的面上的节点施加 x 向约束; 路表作为自由面, 不进行任何约束。

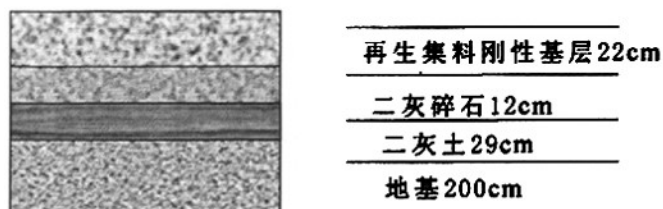


图 3-4 刚性基层结构形式

应用 8 节点热分析单元 SOLID70 对刚性基层结构实体模型进行网格划分, 计算模型如图 3-5。路面基层温度场有限元分析的热力学参数^[33,34]如表 3-2。假设基层结构在养护期末所受到的最大降温为 15 摄氏度 (当地可能出现的最大骤然降温幅度), 施加温度梯度进行基层温度场计算, 其结果如图 3-6。

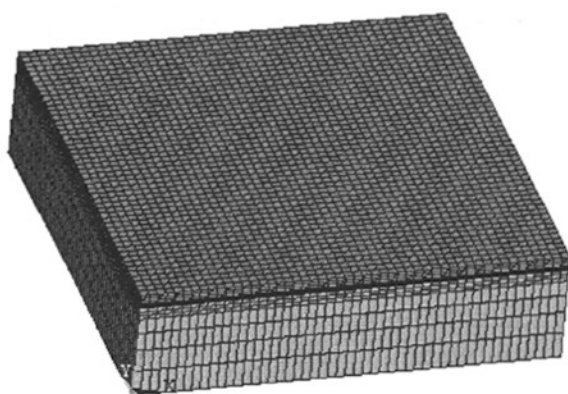


图 3-5 计算模型图 (10m)

表 3-2 温度场计算的热力学参数

	温度梯度/ °/m	热传导系数	比热	线膨胀系数/ (10 ⁻⁵)	密度/ kg/m ³
再生集料刚性基层	0.32	1.2	830	1	2330
二灰碎石下基层	0.15	1.3	950	1	1890
二灰土底基层	0.1	1.1	980	1.5	1860
土基	0.005	1.0	705	50	1700

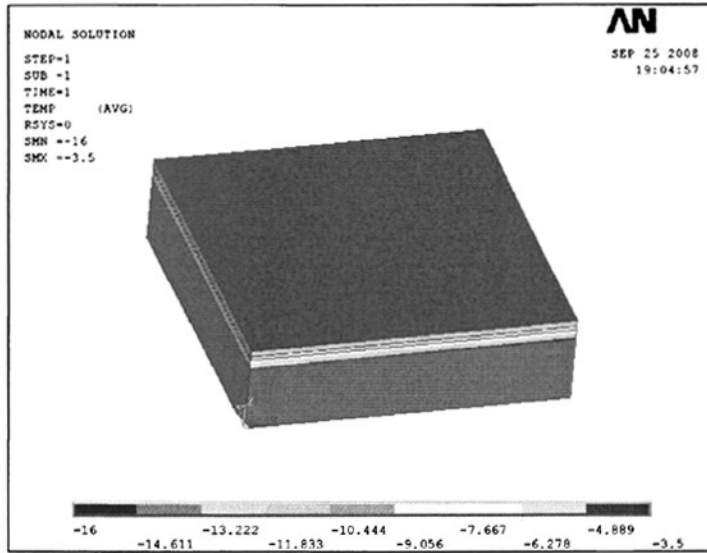


图 3-6 再生集料刚性基层的温度场 (10m)

将温度场计算结果作为体荷载加到模型结构中, 计算再生集料刚性基层的温度应力, 其中混凝土基层的模量采用养护期末的模量值。刚性基层结构的材料参数^[34,35]如表 3-3 所示。

表 3-3 刚性基层结构的材料参数

路面结构	材料类型	厚度 h (cm)	模量 E (MPa)	密度 ρ (kg/m^3)	泊松比 ν
刚性基层	再生水泥混凝土	22	19000 (14d)	2330	0.17
原下基层	二灰碎石	12	900	1890	0.3
底基层	二灰土	29	60	1860	0.3
路基	路基	200	30	1800	0.35

据上述分析再生集料混凝土基层的模量采用基层养护期末 (14 天) 的值。有限元计算刚性基层结构的纵向温度应力如图 3-7。

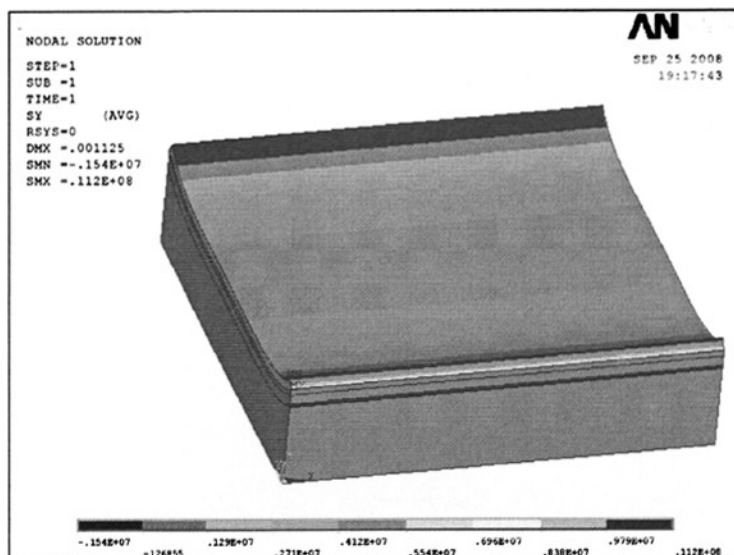


图 3-7 刚性基层的纵向温度应力云图 (10m)

由图 3-7 可以看出：刚性基层的最大温度应力出现刚性基层的切缝底部，这是由于刚性基层设置了横向切缝，切缝深度内的混凝土基层在温度作用下可以自由伸缩，切缝范围外的刚性基层法向约束，不能伸缩，故此处温度应力较大。当此处的温度应力超过混凝土的抗拉极限时，刚性基层沿切缝位置开裂，温度应力得到释放。综上刚性基层的横缝间距应由刚性基层混凝土板中间的最大温度应力控制。其他有限元分析云图如图 3-8~图 3-10 所示。

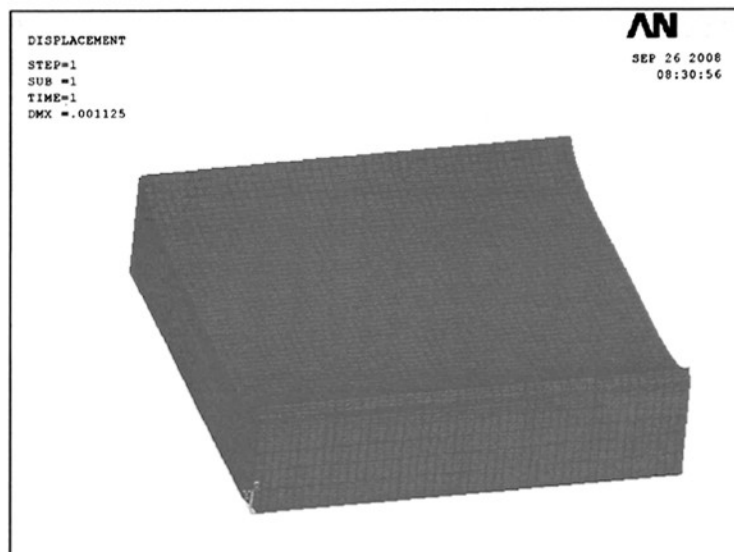


图 3-8 刚性基层的温缩变形图 (10m)

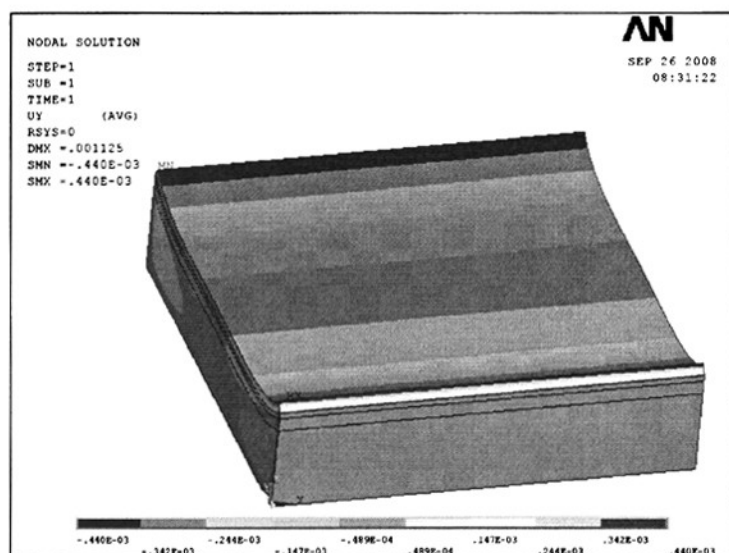


图 3-9 刚性基层的纵向温度应变云图 (10m)

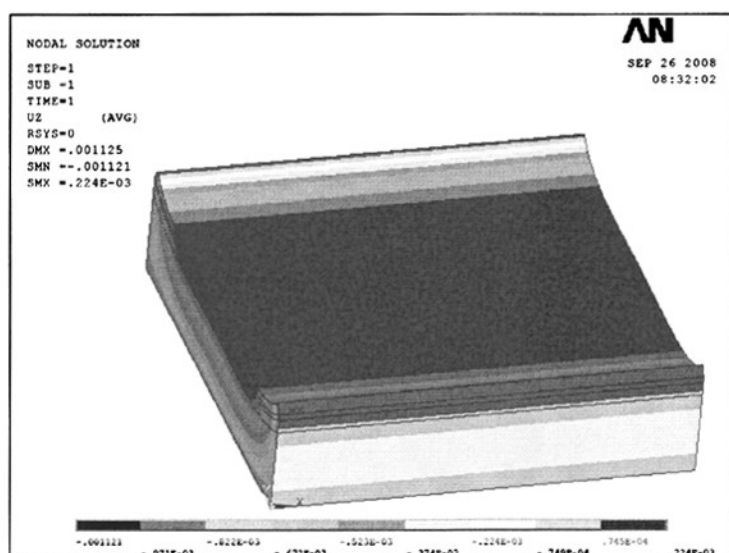


图 3-10 刚性基层的竖向温度应变云图 (10m)

取不同切缝间距的刚性基层的最大温度应力汇总如表 3-4。

表 3-4 刚性基层的最大纵向拉应力

	横缝间距/m	5.00	10.00	15.00	20.00
纵向拉应力最大值/MPa	刚性基层顶部	1.70	2.89	3.10	3.30
	刚性基层底部	1.45	1.56	1.85	2.00

由表 3-4 可见：刚性基层顶部的温度应力比底部的温度应力大，是因为基层

降温是从上而下的，刚性基层顶部降温值要比底部降温大，基层上下存在温度翘曲应力。随着设置的切缝间距的增大，刚性基层顶部所受到的纵向最大温度应力也显著增大，尤其是切缝间距从5m变到10m时，最大温度应力增加了70%；随着横缝间距的继续增加，温度应力增加的趋势逐渐减缓。在横缝间距为15米时达到配制的再生混凝土14d（刚性基层的养护期）的设计抗拉强度。

分别对不同切缝间距的刚性基层顶部、底部的最大纵向温度应力进行对比，如图3-11，图3-12所示。

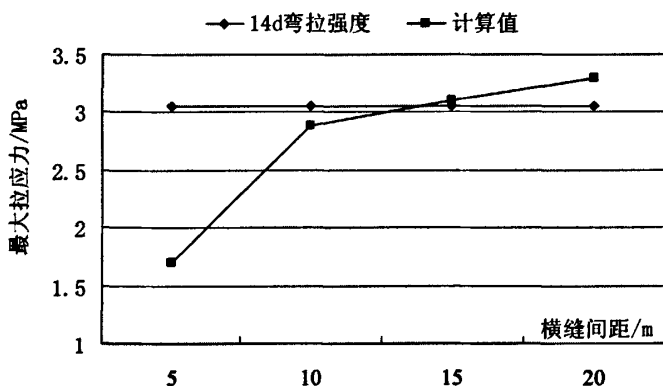


图 3-11 刚性基层顶部的最大纵向温度应力图

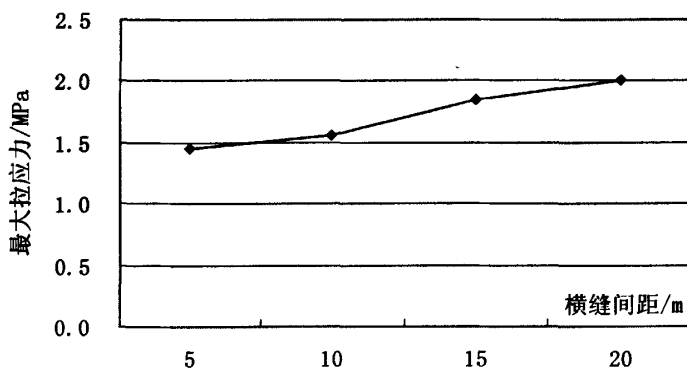


图 3-12 刚性基层底部的最大横向温度应力图

由图3-11~图3-12可以看出：。随着设置的切缝间距的增大，刚性基层顶部所受到的纵向最大温度应力也显著增大，尤其是切缝间距从5m变到10m时，最大温度应力增加了70%；随着横缝间距的继续增加，温度应力增加的趋势逐渐减缓，刚性基层切缝间距为15m时的最大纵向温度应力比切缝间距为10m的温度应力仅增加7.3%。在横缝间距为15米时达到配制的再生混凝土14d（刚性基层的

养护期)的设计抗拉强度,这说明如果设置的切缝间距为15m时,在刚性基层养护末期,如果出现骤然降温15摄氏度的情况,基层在温度应力的作用下就会拉断,在板中间位置出现新的裂缝。随着切缝间距的增大,基层底部最大纵向温度应力变化较其顶部要缓的多,这是因为基层底部的降温要比顶部小;且基层顶部相对底部收缩,减弱其收到的温度应力。

综上所述,再生集料刚性基层的横向切缝间距由养护期末的极限降温控制,计算分析,并考虑一定的安全性认为再生集料刚性基层的横向切缝间距应在10-12m的范围内。

3.5 混凝土刚性基层接缝设置

一年四季由于大气温度的周期性变化,混凝土基层会随之产生不同程度的胀缩变形。此外,一昼夜中,由于日温差较大,温度变化周期较短,在基层厚度范围内呈现不均匀分布,造成基层顶面和底面的温度坡差,使其产生翘曲变形。此类胀缩和翘曲变形如果较大,一旦受到约束,将在基层内产生胀缩应力和温度翘曲应力。若此应力之和超出极限值,基层即产生裂缝或被挤碎。

一般地,混凝土面层与大气直接接触,受温度的影响较大,相应产生的温度应力亦较大,故需设置各种形式的接缝。而混凝土作为基层时,上覆沥青面层,大大改变了混凝土基层内环境温度的影响。当刚性基层某时刻的最大温度应力大于此时其容许拉应力时,再生水泥混凝土基层就出现了裂缝,相对基层容许拉应力的最大温缩应力出现在养生期末(本项目养生14d),环境温度骤然降低时。计算分析认为再生集料刚性基层的横向切缝间距应在10-12m的范围内。

3.6 小结

1. 分析了影响再生集料刚性基层横向接缝的关键因素,指出以往刚性路面横缝设计与试验路矛盾之处,提出刚性基层横缝出现的关键时间。

2. 刚性路面设计中,混凝土路面的切缝间距只是根据层间摩擦力及混凝土容许拉应力控制,没有考虑到混凝土板的厚度及环境温度的影响,显然是不合理的。

3. 再生集料水泥混凝土刚性基层的切缝间距由温度应力决定。铺筑沥青面层后,基层的温度梯度较小,温度翘曲应力大幅减小,外界温度场的变化对再生集料刚性基层温度应力的影响较小,再生集料刚性基层的横缝间距由养护期末的极

限降温控制。

4. 再生集料刚性基层所受到的纵向最大温度应力随切缝间距的增大而显著增大，再生集料刚性基层的横向切缝间距应在 10-12m 的范围内。

第四章 再生集料刚性基层沥青路面的荷载应

力响应与耐久性分析

在行车荷载和温度变化的反复作用下,再生集料刚性基层内会产生荷载疲劳应力和温度疲劳应力。当两者之和超过再生混凝土基层的弯拉强度时,基层板将发生断裂,继而整个路面结构破坏。因此,在再生集料刚性基层沥青路面中,应计算基层的荷载疲劳应力和温度疲劳应力,且两者之和不应超过再生混凝土的设计弯拉强度,以控制因基层板断裂而造成的结构损坏。

目前,国内外对类似贫混凝土基层沥青路面的路面结构力学计算开展了一些研究。在美国,通常采用有效厚度法、挠度法和 ASSHTO 的力学一经验法等进行旧水泥混凝土路面沥青加铺层设计。在国内,长安大学以空间等参元理论和弹性层状体系理论为基础,引入正交各向异性接触模型,计算了碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面结构的荷载和温度应力,并形成较完整的碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面设计方法。同济大学、空军工程学院等单位利用有限元法、断裂力学理论等对旧水泥混凝土路面加铺沥青层的结构进行了分析。东南大学也对碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面的温度梯度进行了研究,就此也提出相应的计算方法。

但是前述研究均有其适用条件,用于再生集料刚性基层沥青路面的应力分析尚显得不完整,应用也不方便。但是再生集料刚性基层沥青路面结构与旧水泥混凝土路面加铺沥青面层、碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面^[1]等结构在材料特性和受力情况等方面有一定的相似。因此,本文根据再生混凝土的材料参数和刚性基层沥青路面的结构特点,借鉴这些路面结构的应力分析理论和方法来分析,对再生集料刚性基层的荷载应力和温度应力进行有限元计算分析。本章主要分析再生集料刚性基层的荷载应力,其温度应力将在第五章进行分析。

4.1 计算模型及参数

4.1.1 计算模型

再生集料刚性基层沥青路面结构可视为由沥青面层、再生水泥混凝土上基

层、二灰碎石下基层、二灰土底基层及路基组成的弹性层状体系。各层材料都采用 8 节点实体单元。假设上下层间完全连续。

刚性基层沥青路面的结构形式如图 4-1，建立足尺寸三维道路模型，模型沿道路行车方向（x 向）取 10m（参照第三章确定的横缝间距），路面宽度（y 向）取为 10m，根据路面实际受力情况确定模型边界条件如下：底面各节点的自由度在 x、y、z 方向完全约束；垂直于行车方向的两端面上的各节点，除刚性基层外，施加 x 向的约束；垂直路宽方向面上的节点施加 y 向的约束；路表作为自由面，不进行任何约束。

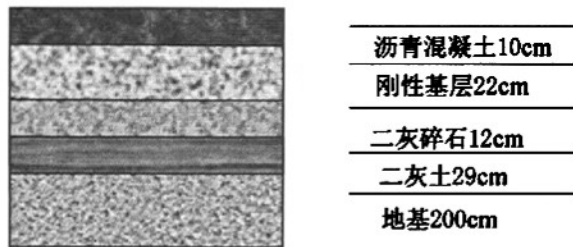


图 4-1 刚性基层沥青路面结构形式

应用 8 节点六面体单元 SOLID45，其中钢筋采用只承受弯拉应力的 link8 单元模拟。对刚性基层结构实体模型进行网格划分，计算模型如图 4-2。计算时采用标准荷载 BZZ-100，轮胎内压为 0.7MPa^[36]，采用矩形荷载，矩形尺寸为 18cm*19.8cm，双轮间距为 32cm。

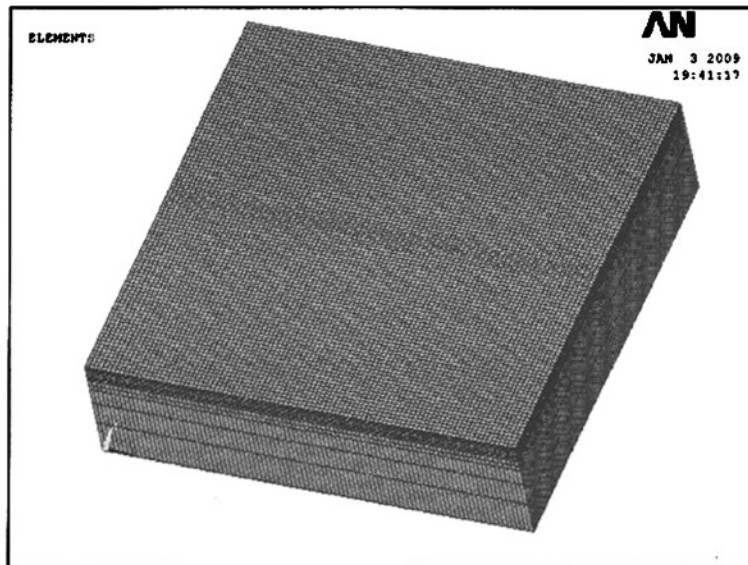


图 4-2 刚性基层沥青路面计算模型

4.1.2 计算参数

对混凝土基层沥青路面进行有限元分析，先要确定计算参数的大小和范围。主要包括面层厚度、面层模量、基层厚度、基层模量、路基模量及轴载等，对于高速公路的大修研究，以上参数基本都已确定。刚性基层沥青路面的材料参数如表 4-1 所示。

表 4-1 刚性基层沥青路面结构的材料参数

路面结构	材料类型	厚度 h (cm)	模量 E (MPa)	密度 ρ (kg/m ³)	泊松比 ν
面层	沥青混凝土	10	1400	2400	0.25
刚性基层	再生水泥混凝土	22	22000	2330	0.17
原下基层	二灰碎石	12	900	1890	0.3
底基层	二灰土	29	600	1860	0.3
路基	路基	200	30	1800	0.35

4.2 计算方案

为改善大修后高速公路的使用情况，延长路面结构的使用寿命和耐久性，对部分试验路的基层增设钢筋网结构，计算方案如表 4-2。分别对标准荷载作用下，素混凝土刚性基层和设置钢筋网的刚性基层沥青路面进行有限元分析。

表 4-2 计算方案

方案	钢筋网层数	钢筋网位置	钢筋直径
1	0	无	8mm
2	1	刚性基层层底 3cm 处	8mm
3	1	刚性基层层顶 7cm 处	8mm
4	2	基层层顶+基层层底	8mm

每一种方案都分为标准 (bzh) 轴载和超载 (cz) 两种情况进行计算，为了接下来表示方便，规定 bzh、cz30%、cz50%和 cz100%分别表示标准轴载、超载 30%、超载 50%和超载 100%。超载一倍时取轮压 0.88MPa，并相应调整当量圆的

半径和位置，为计算方便转化成矩形荷载。分别计算各种路面结构。超载的时候荷载集度根据赫克洛姆 (Heukelom) 和克洛朴 (Klomp) 提出的轮载 P 与接地压力 p 之间的关系计算轮压，即：

$$p_i / p = (P_i / P)^{1/3} \quad (4-1)$$

式中， P_i 、 P 分别为换算轴载与标准轴载， p_i 、 p 分别为相应轴载的轮压。计算出的轮载轮压如表 4-3 所示。

表 4-3 轮载与当量圆计算表

加载类型	矩形荷载 (cm)	圆心间距 1.5d (cm)	轮压 (Mpa)
bzh	19.8*18	32	0.7
cz30%	21.5*19.6	34	0.77
cz50%	22.6*20.5	36	0.81
cz100%	25*22.7	40	0.88

4.3 临界荷位的选取及适宜的单元尺寸

4.3.1 临界荷位的选取

不同的荷载作用位置，对基层会产生不同的作用效果。依据曹东伟等的研究认为，临界荷位随混凝土板尺寸的不同而变化，一般出现在图 4-3 所示的几个荷载位置上。计算不同荷位对应的刚性基层的应力应变，并对其进行分析，得到最不利荷载作用位置，即临界荷位。

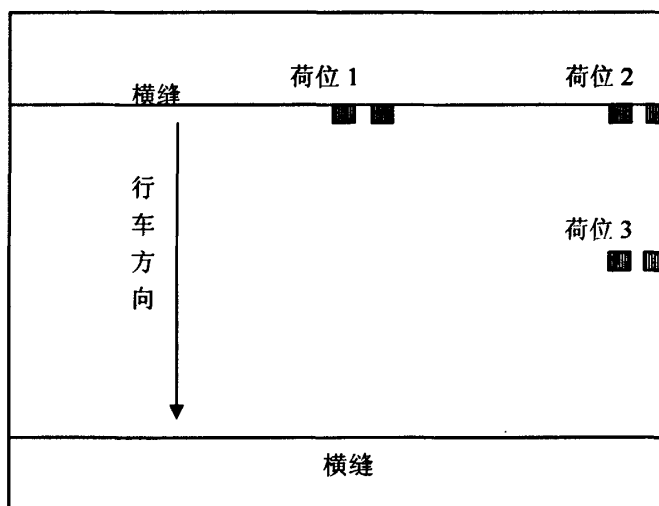


图 4-3 基层板的构造及荷位

标准行车 (BZZ-100) 荷载下, 不同荷位的基层最大应力的计算结果汇总如表 4-4, 比较图如图 4-4.

表 4-4 不同荷位对应的基层应力 (单位 MPa)

	荷位 1	荷位 2	荷位 3
纵向最大应力	0.108	0.522	0.989
横向最大应力	0.720	0.130	0.752

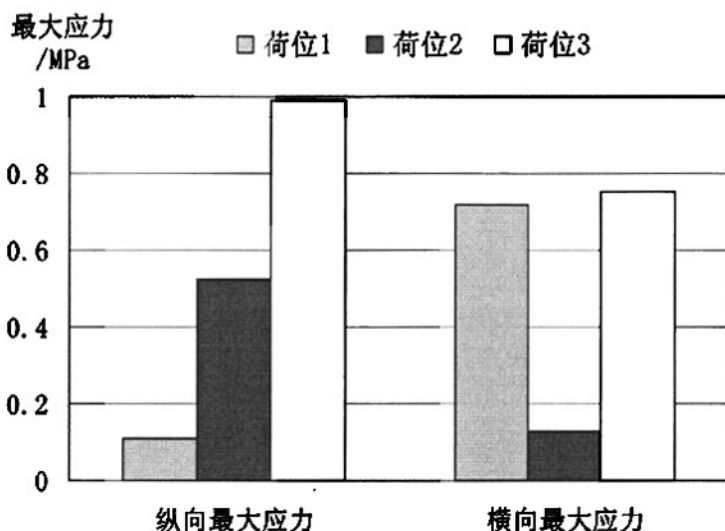


图 4-4 不同荷位的最大应力比较图

由表 4-4 及图 4-4 可以看出, 荷位 3 时的纵向拉应力最大, 可达 0.989MPa; 荷位 3 的基层的纵向拉应力值相对对其他荷位的基层拉应力要大得多, 其中是荷位 1 拉应力值的 9 倍; 荷位 3 的基层的横向最大拉应力值相对对其他荷位的基层拉应力也要大; 比较易得荷位 3 为临界荷位。对于临界荷位, 纵向的拉应力最大, 对整个基层结构的破坏起决定作用。

4.3.2 适宜的单元尺寸

按 4.1 节所述的计算模型和计算参数建立有限元分析模型^[37], 模型划分的平面网格尺寸长度分别采用 0.05m、0.1m、0.2m, 在荷位 3 处施加标准荷载(0.7MPa)。分别计算, 以确定达到计算精度的最大有限元网格尺寸。应力应变计算结果如表 4-5 和 4-6。图 4-5 为应力比较图。

表 4-5 不同网格尺寸的模型应力计算结果

加筋情况	网格尺寸		无筋	层底加筋	双层筋	层顶加筋
最大应力/MPa	0.05m	纵向	0.990	0.514	0.515	0.508
		横向	0.752	0.391	0.391	0.384
	0.1m	纵向	0.989	0.513	0.515	0.507
		横向	0.752	0.39	0.39	0.382
	0.2m	纵向	0.908	0.483	0.484	0.479
		横向	0.686	0.312	0.312	0.308

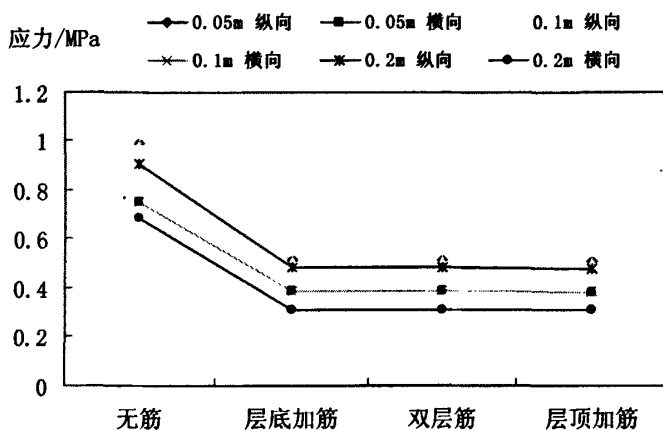


图 4-5 不同网格尺寸对应力计算结果的影响图

表 4-6 不同网格尺寸的模型应变计算结果

加筋情况	网格尺寸		无筋	层底加筋	双层筋	层顶加筋
最大应变 /10-5	0.05m	纵向	4.053	4.038	4.056	4.024
		横向	2.756	2.754	2.757	2.732
	0.1m	纵向	4.053	4.038	4.056	4.024
		横向	2.756	2.754	2.757	2.732
	0.2m	纵向	3.043	3.027	3.042	3.015
		横向	1.856	1.854	1.855	1.833

由表 4-5~4-6 和图 4-5 可以看出：单元网格尺寸为 0.2m 时，不同基层加筋方案的应力应变的变化规律与单元网格尺寸为 0.1m 时的各方案的应力应变变化规律相同，只是值略小，这是由 ANSYS 的有限元计算理论决定的，ANSYS 的解是无限的接近真实解的下限值，模型网格划分的越密，就越接近；单元网格尺寸为 0.05m 和 0.1m 两中网格尺寸的计算结果几乎相等，也就是说单元网格尺寸为 0.1m 时，结果已经接近真实解的下限，0.1m 的长度划分单元得到的计算结果精度已经可以了。

4.4. 标准荷载的计算结果分析

标准行车 (BZZ-100) 荷载下, 不配筋的再生集料刚性基层沥青路面的变形、应力和应变云图如图 4-6~图 4-10。

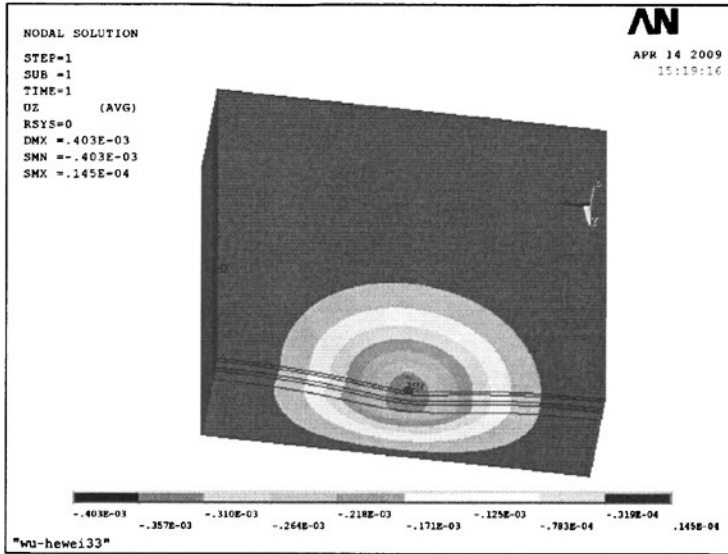


图 4-6 标准荷载作用下路面结构的 z 向变形云图

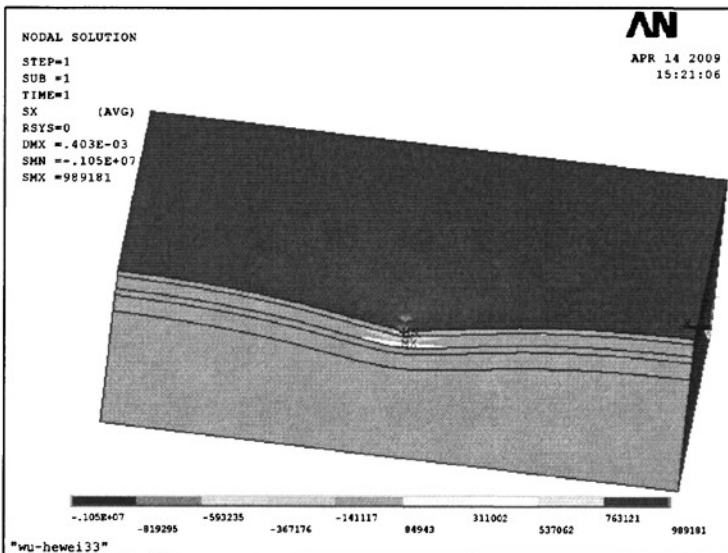


图 4-7 标准荷载作用下路面结构的 x 向应力云图

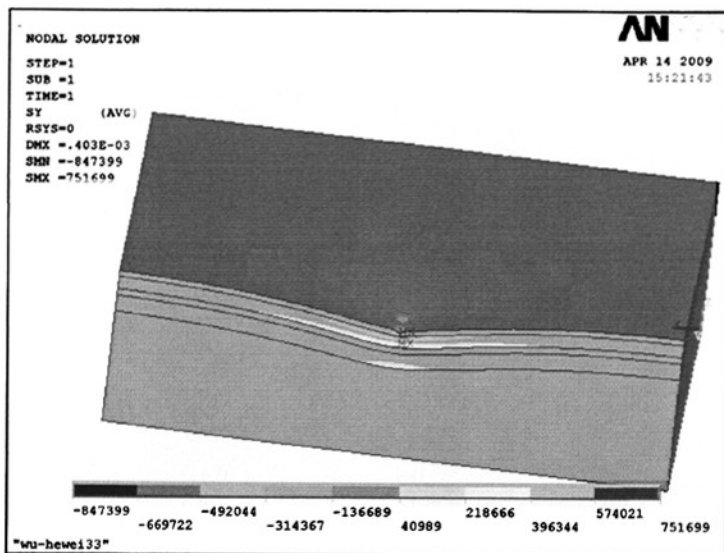


图 4-8 标准荷载作用下路面结构的 y 向应力云图

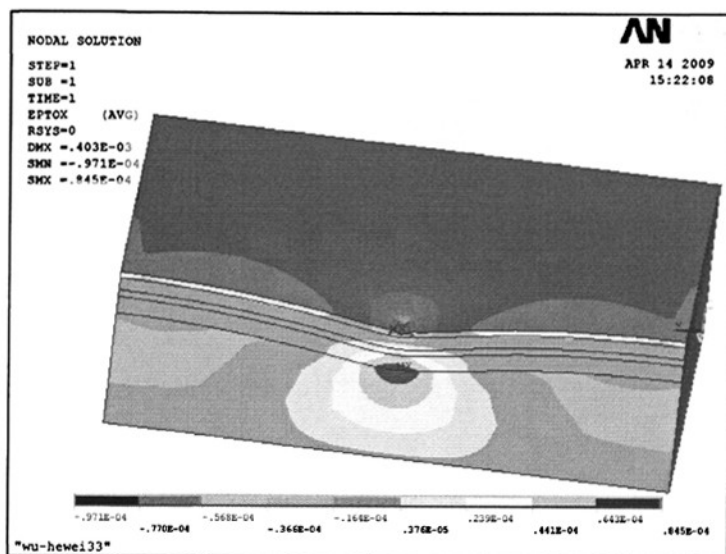


图 4-9 标准荷载作用下路面结构的 x 向应变云图

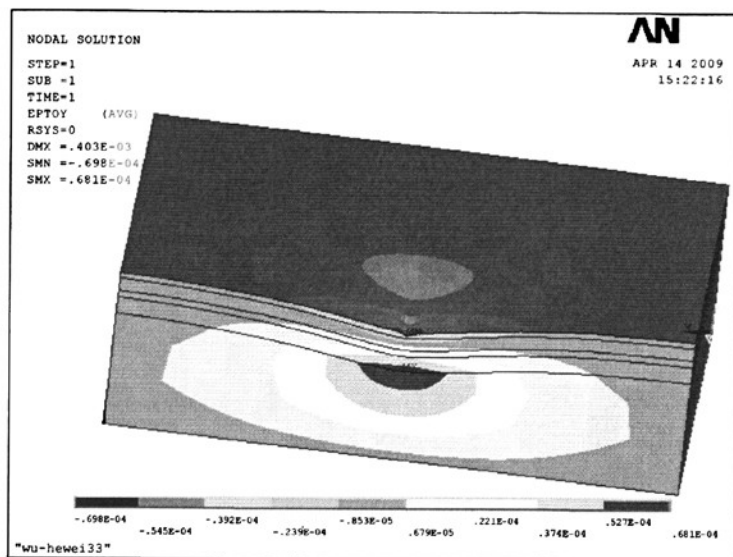


图 4-10 标准荷载作用下路面结构的 y 向应变云图

由图 4-6~图 4-10 可以看出：

标准行车荷载作用下，不配钢筋网的路面结构的弯沉以面层顶部轮底载位置最大，最大达 0.4mm。

再生集料刚性基层沥青路面的横向和纵向的拉应力最大值都出现在车轮荷载正下方的刚性基层底部，其中纵向（X 向）最大拉应力达 0.898MPa，横向最大拉应力也较大，将近 0.752Mpa；基层厚度的上半部分主要承受纵向压应力，基层顶部主要承受横向压应力；基层顶部的纵横向最大拉应力都很小，其中纵向最大应力不足 0.1Mpa，横向最大应力为 0.01Mpa，对结构的疲劳破坏影响很小；这说明刚性基层是主要的承重层，弯拉应力由基层底部承担，路面结构的疲劳破坏由基层底部的最大弯拉应力控制，主要是纵向拉应力控制。

再生集料刚性基层沥青路面的横向和纵向的拉应变最大值都出现在荷载正下方的土基顶部，结构面层主要出现压应变，基层内主要存在拉应变。

4.4.1 应力计算结果及分析

将标准荷载作用下，各计算方案的路面结构的最大拉应力整理汇总于表 4-7。

表 4-7 标准荷载作用下各方案路面结构的最大应力

最大应力/Mpa		无筋	层底加筋	双层筋	层顶加筋
基层底	纵向	0.989	0.513	0.515	0.507
	横向	0.752	0.390	0.390	0.382
基层顶	纵向	0.097	0.051	0.053	0.053
	横向	0.010	0.053	0.053	0.053
基层内	纵向	0.989	0.688	0.692	0.507
	横向	0.752	0.520	0.521	0.382

由表 4-7 可以看出：

标准荷载作用下，不同计算方案的路面结构的最大拉应力均出现在刚性基层底部，其中基层不设置钢筋网和基层顶部设置钢筋网时，基层的最大拉应力出现在基层底部荷载作用位置；基层底部设置钢筋网和基层设置双层钢筋网时，基层的最大拉应力出现在荷载作用位置基层底部的钢筋单元处。基层顶部的最大拉应力均比较小，且不同钢筋网布设位置的大拉应力相差不大，相对不设钢筋网的基层结构，纵向应力有所减小，横向应力有所增加。

基层设置钢筋网，对基层结构的应力影响较大，基层底部 3cm 处设置一层直径 8mm，间距 10cm 的钢筋网后，基层底的纵向拉应力由原来的 0.898MPa 变成 0.513MPa，比原来减少了 48.1%；基层底的横向拉应力由原来的 0.752MPa 变成 0.390MPa，比原来减少了 48.1%；可见基层底部设置钢筋网，对再生集料刚性基层的混凝土单元的应力影响较大，可以很大程度上延缓刚性基层的开裂，延长刚性基层的疲劳寿命。

在基层底部 3cm 处和基层顶部 7cm 处（切缝下方）分别设置一层直径 8mm，间距 10cm 的钢筋网后，基层底的纵向拉应力由原来的 0.898MPa 变成 0.515MPa，比原来减少了 47.9%；基层底的横向拉应力由原来的 0.752MPa 变成 0.390MPa，比原来减少了 48.1%；可见设置双层钢筋网，对再生集料刚性基层的混凝土单元的拉应力影响较大，可以很大程度上延缓刚性基层的开裂，延长刚性基层的疲劳寿命。

基层顶部 7cm（基层切缝下部，放置切缝时将钢筋网切断，破坏了结构的连续性）处，设置一层直径 8mm，间距 10cm 的钢筋网后，基层底的纵向拉应力由原来的 0.898MPa 变成 0.507 MPa，比原来减少了 48.7%；基层底的横向拉应力由原来的 0.752MPa 变成 0.382MPa，比原来减少了 49.2%；可见基层顶部设置钢筋网，相对其他钢筋网的布设方式，对再生集料刚性基层的混凝土单元的应力影响

较大，在很大程度上延缓刚性基层的开裂，延长刚性基层的疲劳寿命。

就三种不同的钢筋网布设方式，从标准荷载作用下基层结构的应力比较情况来看，设置双层钢筋网和只在层顶部设置钢筋网的应力情况比较接近，在基层顶部设置钢筋网最好，与在基层底部设置钢筋网的情况相比，基层底的纵向拉应力减小了 1.2%，横向拉应力减小了 2.1%；与在基层设置双层钢筋网的情况相比，基层底的纵向拉应力减小了 1.5%，横向拉应力减小了 2.1%。由此可见，基层内设置钢筋网的结构能很好的抵消基层底部的弯拉应力，延长基层结构的使用寿命；三种不同的加筋方案在改善基层受力方面作用相差不大；基层顶部设置钢筋网较其他方案略好。

分析可知，再生集料刚性基层的疲劳寿命由刚性基层混凝土的最大拉应力控制，对不同计算方案的刚性基层混凝土的最大拉应力的比较如图 4-11，不同计算方案的刚性基层底部混凝土的最大拉应力的比较如图 4-12。

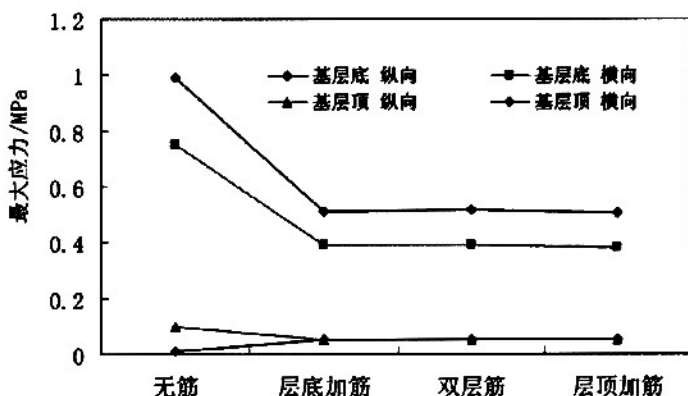


图 4-11 基层混凝土最大应力比较图

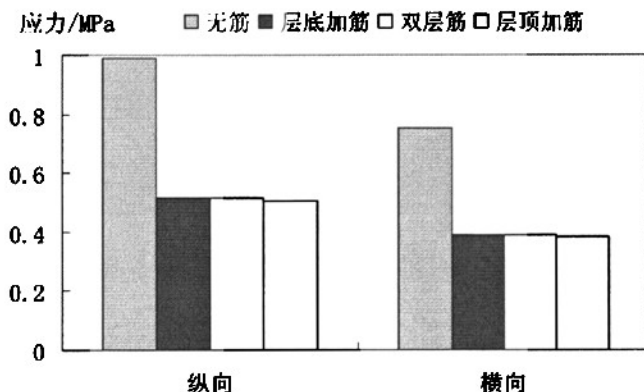


图 4-12 基层底部混凝土最大应力比较柱状图

由图 4-11 和图 4-12 可以形象的看出：标准荷载作用下，刚性基层混凝土的最大拉应力出现在基层底部纵向。不同计算方案的基层底纵向拉应力的变化趋势与基层底横向拉应力的变化趋势大致相同，都是无筋>加双层筋>层底加筋>层顶加筋。设置钢筋网的再生集料刚性基层底部的最大拉应力约为不设置钢筋网的基层拉应力的一半左右。三种布设钢筋网的基层结构相比，基层顶部纵向的最大拉应力及基层顶部横向的最大拉应力基本相同，且其值较小，可以忽略。

4.4.2 应变计算结果及分析

标准荷载作用下，各计算方案的路面结构的最大拉应变整理汇总于表 4-8。

表 4-8 标准荷载作用下各方案路面结构的最大应变比较

加筋情况/ 10^{-6}		无筋	层底加筋	双层筋	层顶加筋
基层底	纵向	40.53	40.38	40.56	40.24
	横向	27.56	27.54	27.57	27.32
基层顶	纵向	4.91	4.89	5.00	5.04
	横向	0.36	5.22	5.20	5.20

由表 4-8 可以看出：

标准荷载作用下，基层内的最大拉应变出现在基层底部的纵向，基层顶部的拉应变较小。相对于刚性基层不设置钢筋网，三种布设钢筋网的基层底部应变变化不大。纵向应变分别降低了：0.4%（层底加筋）、0%（加双层筋）、0.7%（层顶加筋）；基层底部横向应变分别降低了：0.1%（层底加筋）、0%（加双层筋）、0.9%（层顶加筋）。可见不同计算方案的基层底纵向拉应变的变化趋势与基层底横向拉应变的变化趋势大致相同，都是加双层筋>无筋>层底加筋>层顶加筋。

就三种不同的钢筋网布设方式，从标准荷载作用下基层结构的应变比较情况来看，三种计算方案的应变情况比较接近，在基层顶部设置钢筋网较好。综上所述可见，在基层顶部设置钢筋网相对其他钢筋网的布置方式略好，但从应变比较来看，优势不是很明显，三种加筋方式作用相差不大，与素混凝土的应变情况非常接近。

标准荷载作用下，不同计算方案的刚性基层混凝土的最大拉应变的比较如图 4-13，不同计算方案的刚性基层底部的最大拉应变的比较如图 4-14。

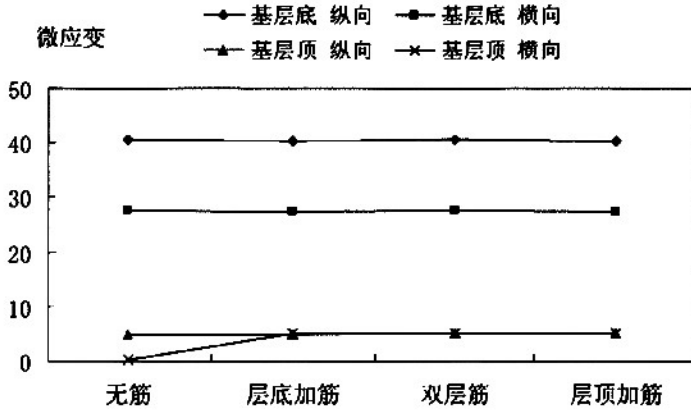


图 4-13 刚性基层最大应变比较图

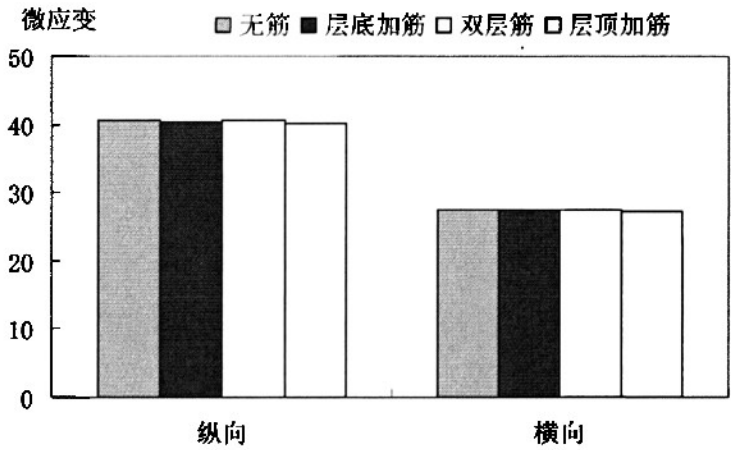


图 4-14 刚性基层最大应变比较图

由图 4-13~图 4-14 可以形象的看出：标准荷载作用下，刚性基层的最大拉应变出现在基层底部纵向。不同计算方案的基层底纵向拉应变之间差别不是很明显，基层底横向拉应变也大致相同，即不同计算方案之间应变差值不大，尤其是基层底部横向的拉应变几乎没有差别。

4.5 超载情况计算结果分析

分别对 cz30%、cz50%和 cz100%三种不同的轴载情况对应的布设不同钢筋的刚性基层路面结构进行有限元分析，取计算结果与 4.4 节计算的标准轴载作用下的路面结构的荷载应力响应进行对比分析。轴载超载一倍，刚性基层不配置钢筋网的应力应变云图如图 4-15~图 4-23。

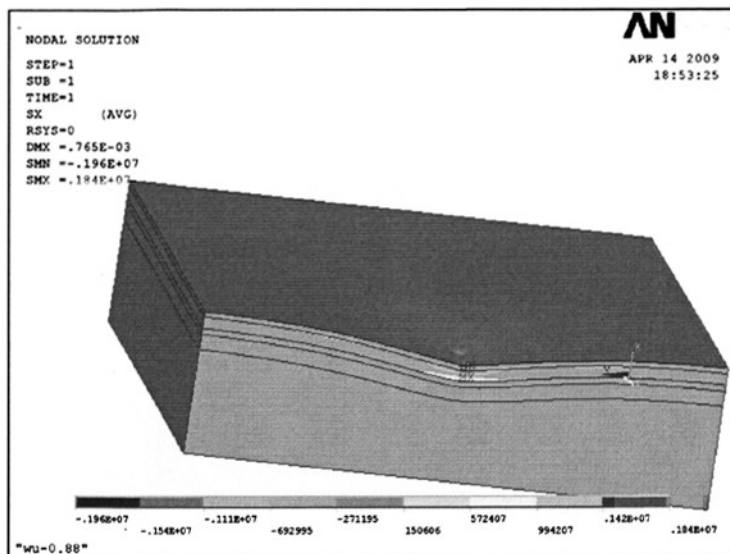


图 4-15 cz100%作用下路面结构的纵 (x) 向应力云图

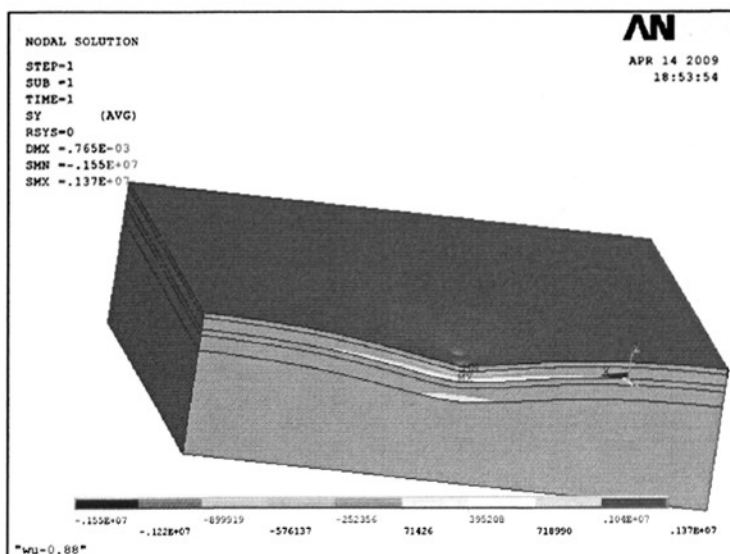


图 4-16 cz100%作用下路面结构的横 (y) 向应力云图

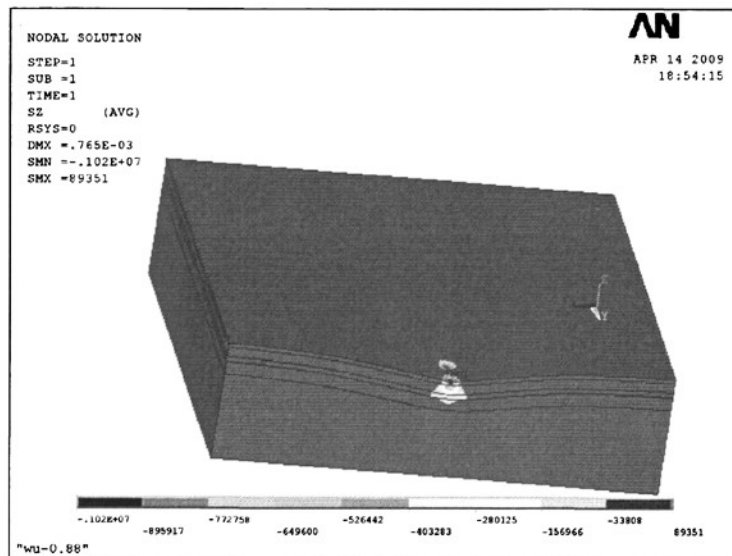


图 4-17 cz100%作用下路面结构的竖 (z) 向应力云图

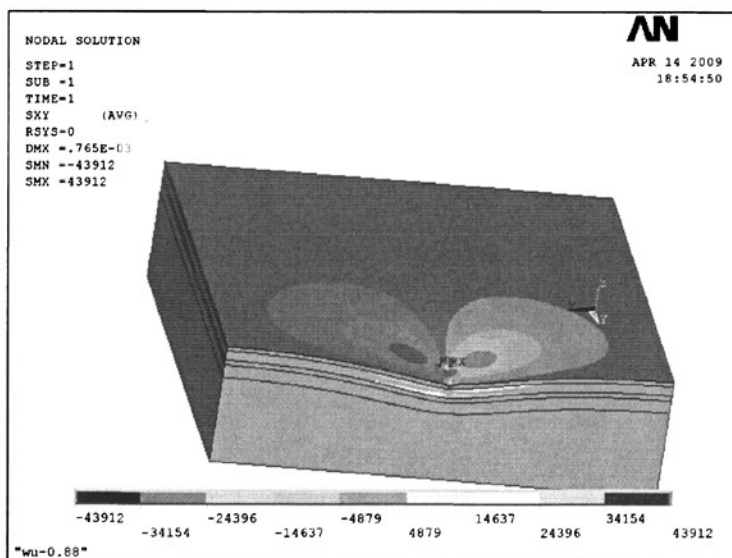


图 4-18 cz100%作用下路面结构的 xy 向剪应力云图

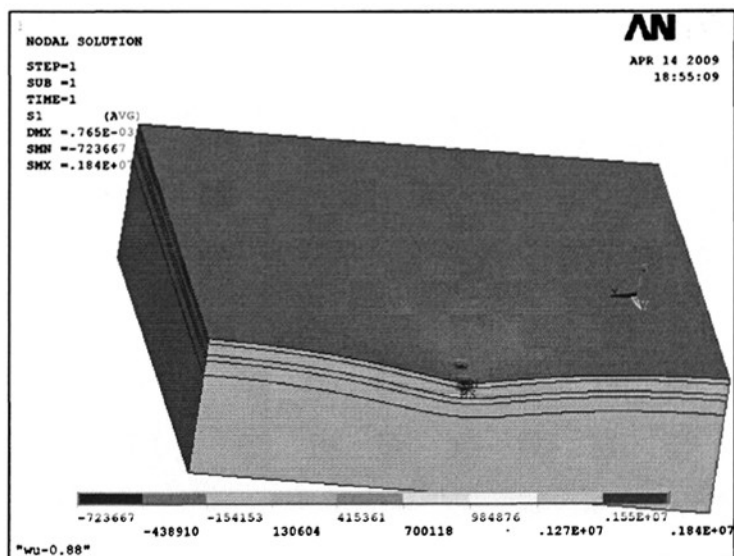


图 4-19 cz100%作用下路面结构的主应力 S1 云图

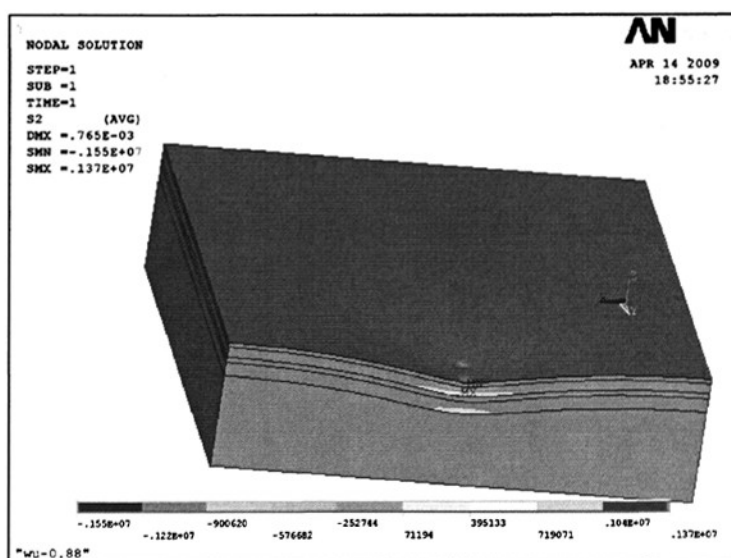


图 4-20 cz100%作用下路面结构的主应力 S2 云图

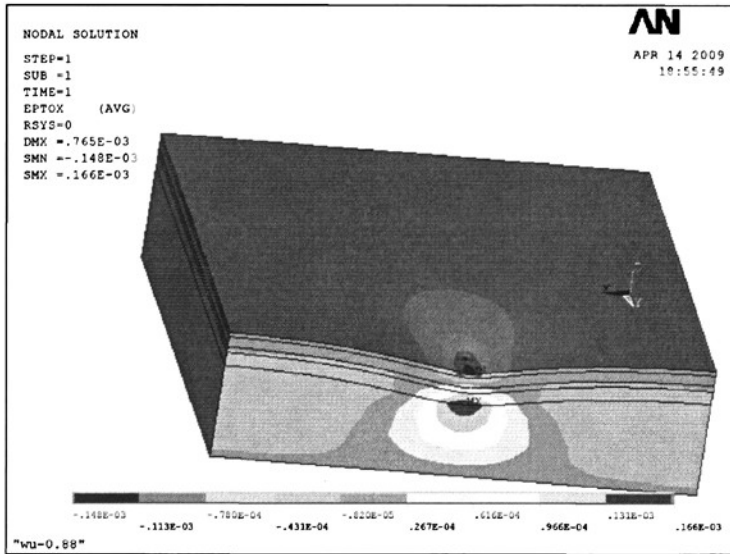


图 4-21 cz100%作用下路面结构的纵(x)向应变云图

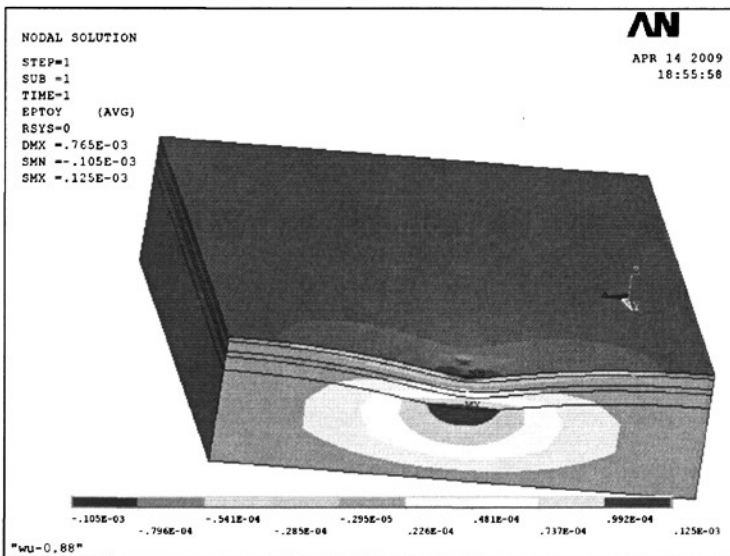


图 4-22 cz100%作用下路面结构的横(y)向应变云图

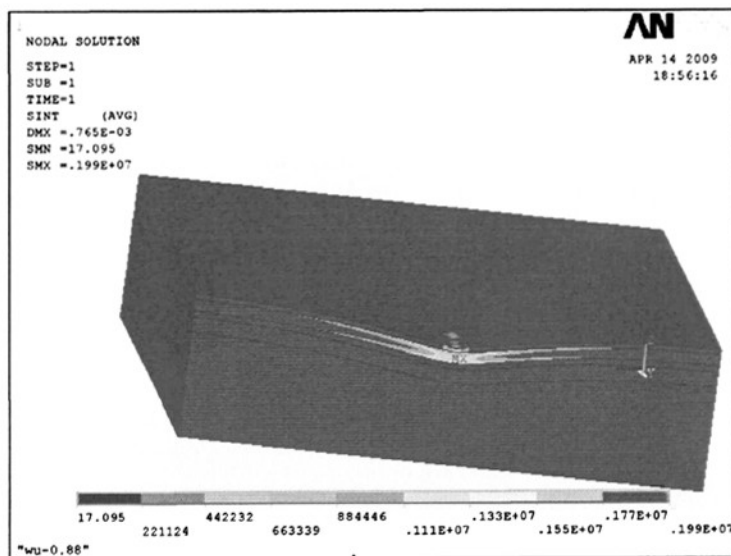


图 4-23 cz100%作用下路面结构的应力强度因子云图

由图 4-15 图 4-23 可以看出：

与标准荷载作用结构的应力分布规律相同，超载一倍的轴载作用下，路面结构的最大拉应力出现在基层底部的荷载作用位置，其中纵向最大拉应力达 1.838Mpa，横向最大拉应力达 0.952Mpa；面层结构和基层顶部主要受压应力，其中纵向最大压应力达 1.96Mpa，横向最大压应力达 1.55Mpa；结构竖向的拉应力较小，压应力最大达 1.02Mpa；结构的最大主应力出现的位置与最大拉应力出现位置想同，最大为 1.84Mpa。混凝土的抗压能力较强，且刚性基层的设计强度为 15Mpa，可见结构的压应力不会引起结构破坏；混凝土的抗弯拉能力较差，结构的最大拉应力为基层底的纵向最大拉应力，达 1.838Mpa，虽然未达到混凝土的设计抗拉强度，但在疲劳荷载作用下会引起结构的疲劳破坏。所以，路面结构的疲劳破坏由基层底部的最大弯拉应力控制。

与标准荷载作用结构的应变分布规律相同，超载一倍的轴载作用下，再生集料刚性基层沥青路面的横向和纵向的拉应变最大值都出现在荷载正下方的土基顶部，其中纵向最大拉应变为 166 个微应变，横向最大拉应变为 125 个微应变；最大压应变出现在荷载作用处的结构面层顶部，基层内主要存在拉应变。

结构的应力强度因子在竖向上主要集中在基层和面层两层内，平面上内主要集中在以荷载为中心的 3m*3m 的范围内，最大应力强度因子可达 1.99×10^6 ，

与结构的最大应力位置相对应。

4.5.1 应力计算结果及分析

Bzh、cz30%、cz50%和 cz100%三种不同的轴载情况对应的布设不同钢筋的刚性基层路面结构的应力计算结果如表 4-9。

表 4-9 不同轴载、配筋方案的应力计算结果

最大应力/Mpa		基层底		基层顶		基层内	
荷载	配筋	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
bzh	无筋	0.989	0.752	0.097	0.010	0.989	0.752
	层底加筋	0.513	0.390	0.051	0.053	0.688	0.520
	双层筋	0.515	0.390	0.053	0.053	0.692	0.521
	层顶加筋	0.507	0.382	0.053	0.053	0.507	0.382
cz30%	无筋	1.290	0.955	0.129	0.010	1.290	0.955
	层底加筋	0.669	0.495	0.068	0.070	0.899	0.661
	双层筋	0.671	0.495	0.070	0.070	0.903	0.663
	层顶加筋	0.661	0.486	0.071	0.070	0.661	0.486
cz50%	无筋	1.399	1.041	0.142	0.011	1.399	1.041
	层底加筋	0.725	0.539	0.075	0.077	0.975	0.721
	双层筋	0.728	0.540	0.077	0.077	0.980	0.723
	层顶加筋	0.717	0.530	0.078	0.077	0.717	0.530
cz100%	无筋	1.838	1.367	0.196	0.015	1.838	1.367
	层底加筋	0.952	0.708	0.104	0.106	1.282	0.948
	双层筋	0.956	0.708	0.107	0.106	1.288	0.950
	层顶加筋	0.943	0.697	0.108	0.106	0.943	0.697

由表 4-9 可以看出：

不论标准荷载还是超载作用下，不同计算方案的路面结构的最大拉应力均出现在基层底部，其中基层不设置钢筋网和基层顶部设置钢筋网时，基层的最大拉应力出现在荷载作用位置的基层底部；基层底部设置钢筋网和基层设置双层钢筋网时，基层的最大拉应力出现在荷载作用位置基层底部的钢筋单元处。面层内的最大拉应力均比较小，出现在面层底部，且不同钢筋网布设位置的面层最大拉应力及基层顶部最大拉应力基本相等，相对不设钢筋网的基层结构，纵向应力有所减小，横向应力有所增加。可见再生集料刚性基层的疲劳寿命由刚性基层混凝土的最大拉应力控制，刚性基层混凝土的最大拉应力出现在基层底部的纵向，故下面从基层底部的最大纵向拉应力来分析。

超载 30%时, 基层设置钢筋网, 对基层底部的最大应力影响较大, 基层底部设置一层钢筋网后, 基层底的纵向拉应力由原来的 1.290MPa 变成 0.669Pa, 比原来减少了 48.1%; 在基层底部和基层顶部分别设置一层钢筋网后, 基层底的纵向拉应力由原来的 1.290MPa 变成 0.671MPa, 比原来减少了 48%; 基层顶部设置一层钢筋网后, 基层底的纵向拉应力由原来的 1.290MPa 变成 0.661MPa, 比原来减少了 48.8%; 可见基层内设置钢筋网对再生集料刚性基层的混凝土单元的应力影响较大, 可以很大程度上延缓刚性基层的开裂, 延长刚性基层的疲劳寿命。就三种不同的钢筋网布设方式, 从标准荷载作用下基层结构的应力比较情况来看, 设置双层钢筋网和只在层底部设置钢筋网的应力情况比较接近; 在基层顶部设置钢筋网最好, 与在基层底部设置钢筋网的情况相比, 基层底的纵向拉应力减小了 1.2%; 与在基层设置双层钢筋网的情况相比, 基层底的纵向拉应力减小了 1.4%。

超载 50%的情况与超载 30%相似, 与素混凝土基层相比, 层底纵向最大拉应力, 层底加筋时减少 48.2%, 加双层钢筋网时减少 48%, 层顶加筋时减少 48.7%。与基层底部设置钢筋网相比, 层顶加筋的基层底的纵向最大拉应力减小了 1.1%; 与设置双层钢筋网的情况相比, 层顶加筋的纵向拉应力减小了 1.5%。

超载 100%的情况与其他超载情况类似, 与素混凝土基层相比, 层底纵向最大拉应力, 层底加筋时减少 48.2%, 加双层钢筋网时减少 48%, 层顶加筋时减少 48.7%。与基层底部设置钢筋网相比, 层顶加筋的基层底的纵向最大拉应力减小了 1%; 与设置双层钢筋网的情况相比, 层顶加筋的纵向拉应力减小了 1.4%。

综上所述, 在基层顶部设置钢筋网在抵消基层底部的弯拉应力, 延长基层结构的使用寿命方面比其他方案略好。再生集料刚性基层的疲劳寿命由刚性基层混凝土的最大拉应力控制。

不同加载方案的刚性基层底部混凝土的最大拉应力的比较如图 4-24~图 4-29。

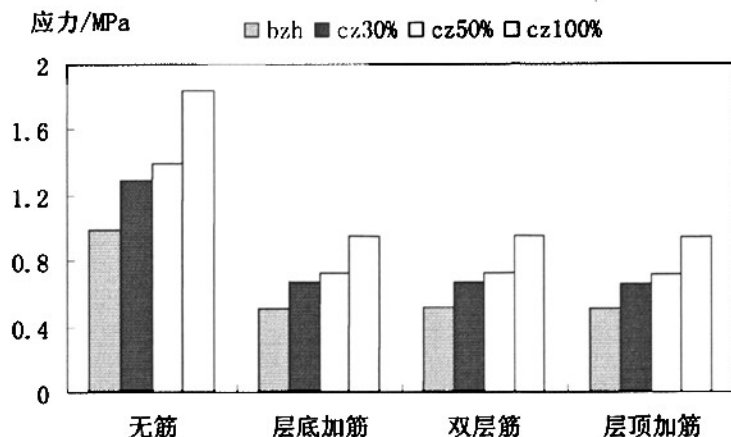


图 4-24 刚性基层底部最大纵向应力比较柱状图

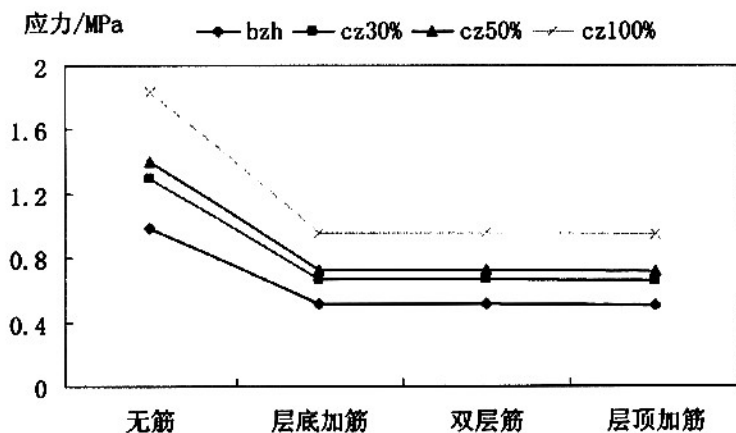


图 4-25 刚性基层底部最大纵向应力比较图

由图 4-24~图 4-25 知：

超载对再生集料刚性基层底部的纵向拉应力的影响较大。①素混凝土刚性基层：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应力相比，超载 30%时，层底最大拉应力增加 30.4%；超载 50%时，层底最大拉应力增加 41.4%；超载 100%时，层底最大拉应力增加 85.8%。②刚性基层层底加钢筋网：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应力相比，超载 30%时，层底最大拉应力增加 30.4%；超载 50%时，层底最大拉应力增加 41.3%；超载 100%时，层底最大拉应力增加 85.6%。③刚性基层设置双层钢筋网：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应力相比，超载 30%时，层底最大拉应力增加 30.3%；超载 50%时，层底最大拉应力增加 41.4%；超载 100%时，层底最大拉应力增加 85.6%。④刚性基层层顶加筋：与标准荷载下的基层底

部纵向最大拉应力相比, 超载 30%时, 层底最大拉应力增加 30.4%; 超载 50%时, 层底最大拉应力增加 41.4%; 超载 100%时, 层底最大拉应力增加 86%。

超载对不同基层配筋方案的底部的纵向拉应力的影响程度相似。

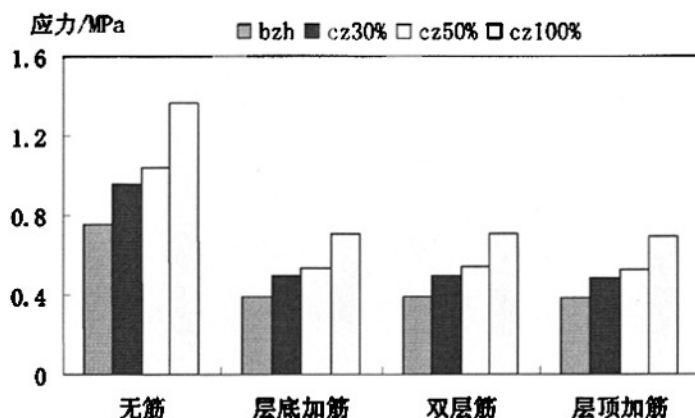


图 4-26 刚性基层底部横向应力比较柱状图

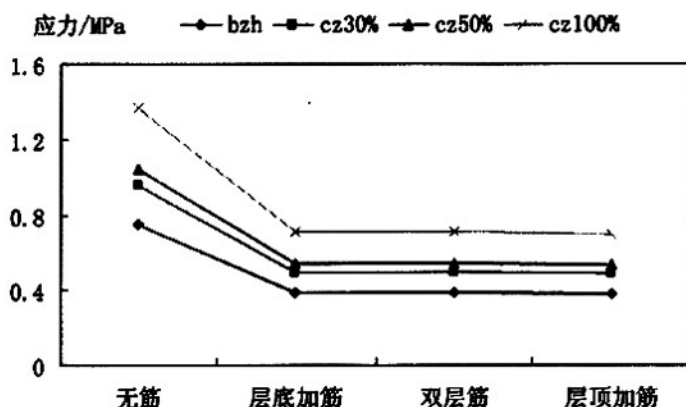


图 4-27 刚性基层底部横向应力比较图

由图 4-26~图 4-27 可知:

超载对再生集料刚性基层底部的横向拉应力的影响也比较大。①素混凝土刚性基层: 与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应力相比, 超载 30%时, 层底最大拉应力增加 27%; 超载 50%时, 层底最大拉应力增加 38.4%; 超载 100%时, 层底最大拉应力增加 81.8%。②刚性基层层底加钢筋网: 与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应力相比, 超载 30%时, 层底最大拉应力增加 26.9%; 超载 50%时, 层底最大拉应力增加 38.2%; 超载 100%时, 层底最大拉应力增加 81.5%。③刚性基层设置双层钢筋网: 与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应力相比, 超载 30%时,

层底最大拉应力增加 26.9%；超载 50%时，层底最大拉应力增加 38.2%；超载 100%时，层底最大拉应力增加 81.5%。④刚性基层层顶加筋：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应力相比，超载 30%时，层底最大拉应力增加 27.2%；超载 50%时，层底最大拉应力增加 38.7%；超载 100%时，层底最大拉应力增加 82.5%。

超载对底部的横向拉应力的影响比对底部的纵向拉应力的影响小，但规律类似。从影响比例上来看，超载对加双层筋的影响相对其他方案较小。

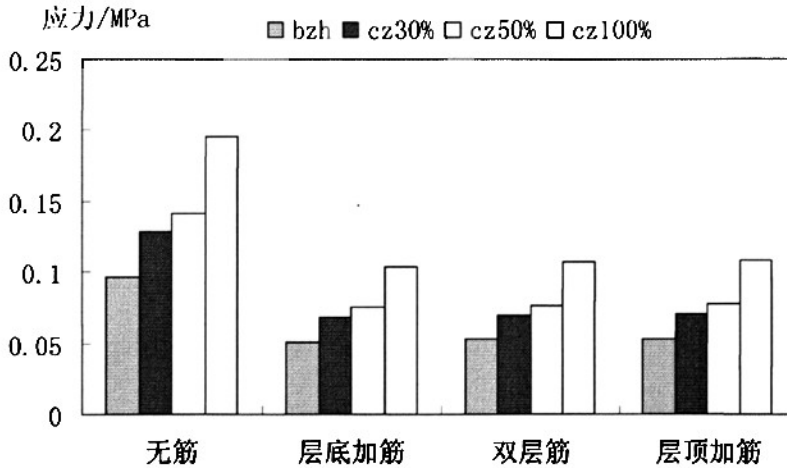


图 4-28 刚性基层顶部纵向应力柱状图

由图 4-28 可知：基层设置钢筋网之后，基层顶部的最大纵向拉应力比素混凝土刚性基层的基层顶部纵向拉应力减小了。超载对刚性基层顶部纵向拉应力的影响跟对其他位置应力的影响规律相同。

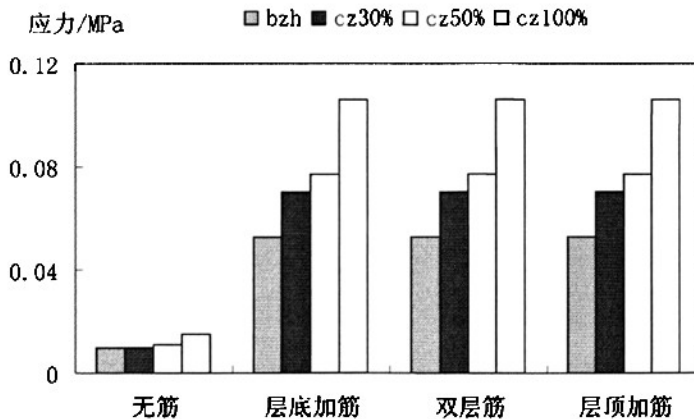


图 4-29 刚性基层顶部横向应力

由图 4-29 可知：基层设置钢筋网之后，基层顶部的最大横向拉应力比素混

凝土刚性基层的基层顶部横向拉应力增加了很多，这是由于基层设置了钢筋网，内部的纵横向应力重新分布造成的。超载对刚性基层顶部纵向拉应力的影响跟对其他位置应力的影响规律相同。超载时，基层设置双层钢筋网和层底加筋情况的基层顶部纵向应力值相等，比在层顶设置钢筋网时的应力值略大。

4.5.2 应变计算结果及分析

bzh、cz30%、cz50%和 cz100%三种不同的轴载情况对应的布设不同钢筋的刚性基层路面结构的应变计算结果如表 4-10。

表 4-10 不同轴载、配筋方案的应力计算结果

加筋情况/10-5		基层底		基层顶		基层内	
荷载	配筋	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
bzh	无筋	4.053	2.756	0.491	0.036	4.053	2.756
	层底加筋	4.038	2.754	0.489	0.522	4.038	2.754
	双层筋	4.056	2.757	0.500	0.520	4.056	2.757
	层顶加筋	4.024	2.732	0.504	0.520	4.024	2.732
cz30%	无筋	5.255	3.478	0.653	0.047	5.255	3.478
	层底加筋	5.251	3.472	0.640	0.695	5.251	3.472
	双层筋	5.273	3.473	0.666	0.693	5.274	3.473
	层顶加筋	5.234	3.445	0.670	0.692	5.234	3.445
cz50%	无筋	5.693	3.764	0.716	0.052	5.693	3.764
	层底加筋	5.688	3.768	0.712	0.763	5.688	3.768
	双层筋	5.713	3.768	0.730	0.761	5.713	3.768
	层顶加筋	5.671	3.739	0.735	0.760	5.671	3.739
cz100%	无筋	7.494	4.943	0.989	0.717	7.494	4.943
	层底加筋	7.479	4.946	0.984	1.055	7.479	4.946
	双层筋	7.509	4.943	1.009	1.053	7.509	4.943
	层顶加筋	7.463	4.910	1.016	1.052	7.463	4.910

由表 4-10 以看出：

各计算方案的基层底部纵向最大拉应变为各方案基层的最大拉应变；相同荷载作用下不同基层结构方案的最大应变变化不大；相同路面结构的基层内最大拉应变随着荷载的增加而增大。

基层底部最大纵、横向拉应变的变化规律与基层内最大拉应变的变化规律相同，基层顶部的最大纵、横向拉应变的规律与基层内最大拉应变的变化规律相同。

不同加载方案的刚性基层底部混凝土的最大拉应变的比较如图 4-30~图

4-33。

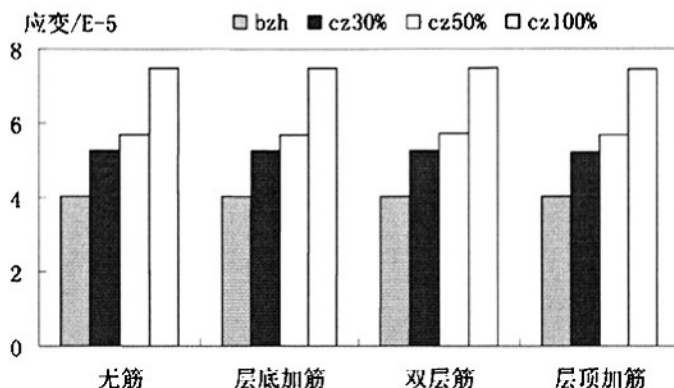


图 4-30 刚性基层底部最大纵向应变比较柱状图

由图 4-30 可以看出：

超载对再生集料刚性基层层底最大纵向应变影响较大。①素混凝土刚性基层：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应变相比，超载 30%时，增加 29.6%；超载 50%时，增加 40.5%；超载 100%时，层底最大拉应变增加 84.9%。②刚性基层层底加钢筋网：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应变相比，超载 30%时，层底最大拉应变增加 30%；超载 50%时，增加 40.9%；超载 100%时，增加 85.2%。③刚性基层设置双层钢筋网：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应变相比，超载 30%时，增加 30%；超载 50%时，增加 40.8%；超载 100%时，层增加 85.1%。④刚性基层层顶加筋：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应变相比，超载 30%时，增加 30.1%；超载 50%时，增加 40.9%；超载 100%时，增加 85.5%。可见超载对基层底部设置钢筋网的方案影响最大，对基层顶部设置钢筋网的方案影响最小。

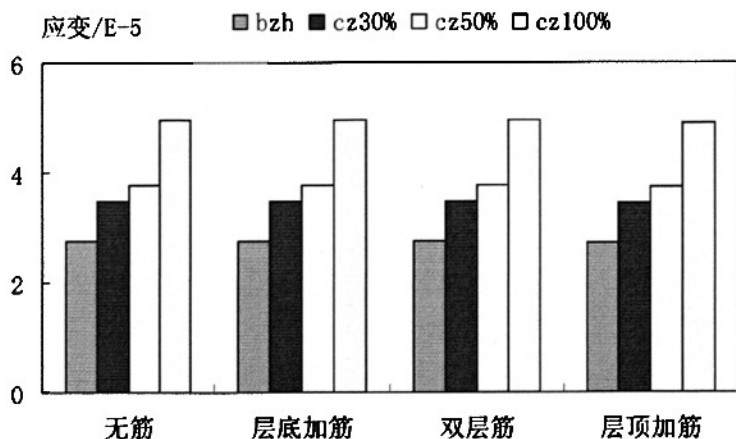


图 4-31 刚性基层底部最大横向应变比较柱状图

由图 4-31 可以看出：

超载对再生集料刚性基层层底最大横向应变影响较大。①素混凝土刚性基层：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应变相比，超载 30%时，增加 26.2%；超载 50%时，增加 36.6%；超载 100%时，层底最大拉应变增加 79.4%。②刚性基层层底加钢筋网：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应变相比，超载 30%时，层底最大拉应变增加 26.1%；超载 50%时，增加 36.8%；超载 100%时，增加 79.6%。③刚性基层设置双层钢筋网：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应变相比，超载 30%时，增加 26%；超载 50%时，增加 36.7%；超载 100%时，层增加 79.3%。④刚性基层层顶加筋：与标准荷载下的基层底部纵向最大拉应变相比，超载 30%时，增加 26.1%；超载 50%时，增加 36.8%；超载 100%时，增加 79.7%。可见超载对各方案基层底横向应变的影响相差不大。

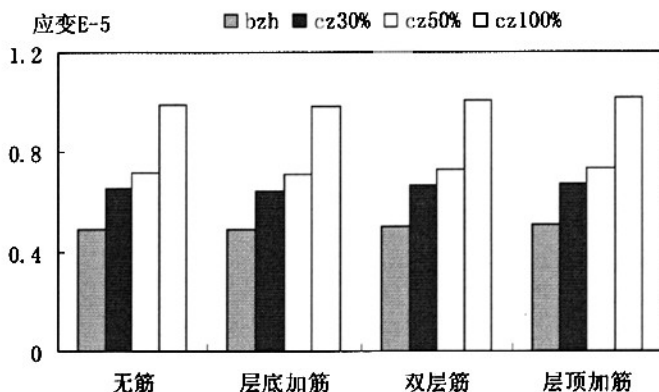


图 4-32 刚性基层顶部最大纵向应变比较柱状图

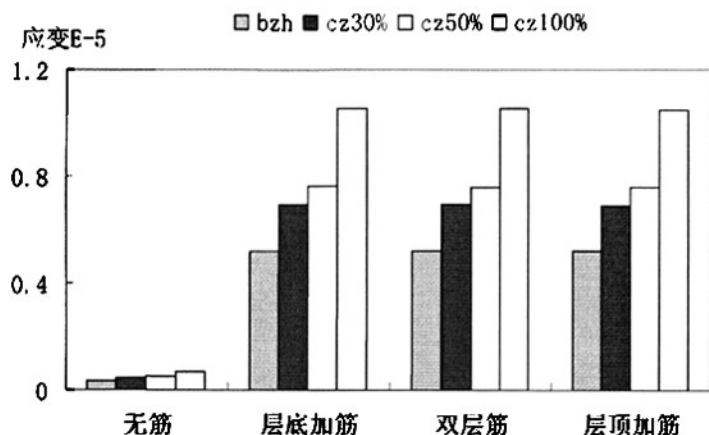


图 4-33 刚性基层顶部最大横向应变比较图

由图 4-32~图 4-33 可以看出：

再生集料素混凝土刚性基层顶部的最大纵向应变随荷载的增加而增大。超载 50%以内时，基层顶部的最大纵向应变变化缓慢，超载到标准荷载的一倍时，基层顶部的最大纵向应变迅速增加。不同基层钢筋网的结构应变变化规律一致。

不同加筋方案的基层结构随荷载的增加，基层顶部的最大横向应变，变化规律相似，基本是超载 30%，增加 30%左右，超载 50%，增加 45%左右，超载 100%，增加 100%左右。

4.6 疲劳寿命分析

根据第二章得到的再生集料水泥混凝土疲劳方程预测刚性基层的疲劳寿命：

$$\lg S = \lg 1.072 - 0.0422 \lg N \quad (5-6)$$

采用上述公式对不同路面结构在行车荷载作用下的疲劳寿命进行计算，结果汇于表 4-11。比较如图 4-34~4-35。

表 4-11 刚性基层的疲劳寿命

结构 荷载	无筋	层底加筋	双层筋	层顶加筋
BZH	2.03E+16	1.16E+23	1.06E+23	1.53E+23
Cz30%	3.75E+13	2.14E+20	2.00E+20	2.85E+20
Cz50%	5.48E+12	3.19E+19	2.89E+19	4.15E+19
Cz100%	8.52E+09	5.02E+16	4.55E+16	6.29E+16

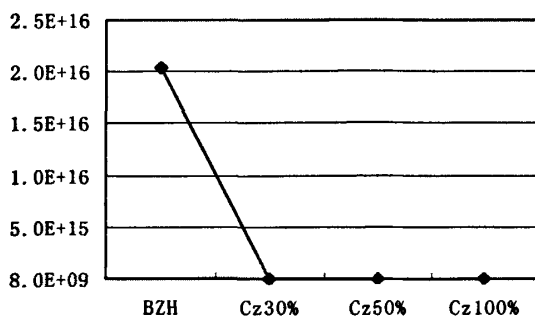
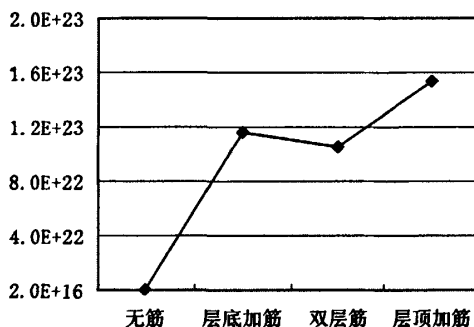


图 4-34 超载对普通混凝土基层疲劳寿命的影响图



4-35 标准轴载下不同方案疲劳寿命比较

由表 4-11 及图 4-34~4-35 可以看出：

超载对刚性基层疲劳寿命的影响很大，超载 30%的刚性基层疲劳寿命仅为标准荷载下的千分之一，超载到 100%时，刚性基层的疲劳寿命约为标准荷载下的 10^{-6} 。超载是刚性基层结构疲劳破坏的主要原因之一。

设置钢筋网可以很好的延长刚性基层的疲劳寿命，尤其是基层顶部加钢筋网的方案。标准荷载下，层底加筋时刚性基层的疲劳寿命约是普通水泥混凝土基层的 5.7×10^6 倍；设置双层钢筋网时，约为 5.2×10^6 倍；刚性基层顶部加钢筋网时，约为 7.5×10^6 倍。可以认为基层顶部加钢筋网可以很好的延长基层结构的疲劳寿命。

4.7 小结

本章通过三维有限元方法，对再生集料刚性基层沥青路面的荷载应力进行计算分析，得到以下结论：

1. 建立三维有限元模型, 确定计算参数, 根据结构应力, 确定模型的网格划分尺寸和结构的临界荷位。临界荷位随混凝土板尺寸的不同而变化, 本课题的基层结构的临界荷位在混凝土板的横向边缘, 纵向中间部位。

2. 结合当前的计算机条件, 通过试算确定再生集料刚性基层沥青路面结构有限元模拟计算的合理的单元尺寸, 认为网格尺寸与钢筋网网格尺寸一致, 取 0.1m, 基本能够满足精度要求。

3. 对再生集料刚性基层沥青路面的荷载应力进行计算分析。得到标准行车荷载和超载情况下, 再生集料刚性基层沥青路面结构的受力情况及应力应变变化规律。各结构方案的应力随荷载增加基本符合以下规律: 超载 30% 时应力增加 30%, 超载 50% 时应力增加 40%, 超载 100% 时, 层底最大拉应力增加 85%。各结构方案的应变随荷载增加的变化规律与应力变化规律一致, 变化值略小。

4. 计算标准荷载和超载作用下不同配筋刚性基层结构的应力应变, 确定不同加筋方案对刚性基层结构受力影响, 以选择最有方案。设置钢筋网的基层结构应力比素混凝土基层的应力明显减小, 设置钢筋网可以很好的抵抗车载应力, 延长基层寿命; 但是三种不同的钢筋网设置方案在改善基层受力方面区别不大。

5. 预测不同基层结构的疲劳寿命, 设置钢筋网可以很好的延长刚性基层的疲劳寿命, 尤其是基层顶部加钢筋网的方案。

第五章 刚性基层沥青路面的温度应力和耦合应力响应

路面结构不但受到行车荷载的反复作用，而且在自然环境下受到太阳辐射、气温等因素不断变化的影响。因此，路面结构内的温度随着气温日变化甚至年变化而变化。但温度下降时，混凝土基层会出现收缩变形，同时又受到各结构层相互约束，使得基层内产生温度伸缩和翘曲应力，而影响混凝土基层应力的主要是温度翘曲应力。

目前，国内外对普通水泥混凝土路面的温度应力进行了深入的研究，但是对沥青路面混凝土基层温度应力的研究尚未系统。由于混凝土基层的平面尺寸从普通水泥混凝土基层到贫混凝土基层，变化较大，且在上方铺筑了沥青面层，改变了其温度特性，因此需要对混凝土基层沥青路面的温度场和温度应力进行分析。

东南大学利用三维有限元法分析沥青罩面的碾压混凝土路面板的温度应力，并分析了沥青罩面厚度、碾压混凝土的线膨胀系数、板长以及板厚对温度应力的影响，最后确定了温度翘曲应力系数。长安大学利用有限元法分析了碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面的温度应力，其结果能够较好的反映实际情况。本文在已有研究的基础上，针对再生混凝土基层的特点进行计算分析。

5.1 温度梯度

计算温度应力，必须先确定该路面结构的温度场。影响混凝土基层沥青路面结构中基层的最大温度梯度因素是基层本身的特性和外部情况。前者包括材料的导温系数、路面材料对太阳辐射的吸收率和放热系数等；后者包括沥青层厚度，太阳辐射和气温。

混凝土基层上覆沥青混凝土面层后，温度状况与作为面层时发生变化。据日本岩间滋的测定，当沥青面层厚度为 5cm 时，有无加铺层的混凝土层顶面的温度几乎相同，而温度变化的相位要滞后 1-2h。沥青混合料对辐射热的吸收率及热传导性均高于水泥混凝土。因而这 5cm 相当于一个平衡点，沥青加铺层厚度小于 5cm 时，水泥混凝土层的顶面温度将高于无加铺层时的温度；而当加铺层厚度大于 5cm 时，水泥混凝土层的顶面温度则低于无加铺层时的温度。

长安大学采用有限元法求解有沥青加铺层的混凝土面层的温度场，得到沥青层每增加 4cm，混凝土面层的最大温度梯度约降低 30%，表层最高温度发生时刻

滞后 1h 的计算结果。在求解时，空间上利用有限元法，时间上采用差分法，获得了不同自然区划的温度场和最大温度梯度推荐值。

长安大学结合混凝土的强度特性和混凝土基层沥青路面的结构特性，计算了混凝土基层沥青路面的温度梯度如表 5-1 所示，其中列举了沥青层厚度 h_a 为 0-20cm，基层厚度 h_c 为 22cm 时，各自然区划内最大温度梯度变化范围。

表 5-1 不同自然区划的最大温度梯度推荐值表

区划 $h_a(cm)$	II	III	IV	V	VI	VII
0	0.88-0.94	0.95-1.00	0.93-0.98	0.90-0.96	0.92-0.97	0.98-1.04
4	0.62-0.66	0.65-0.71	0.64-0.70	0.63-0.68	0.64-0.69	0.69-0.74
8	0.43-0.46	0.48-0.51	0.46-0.50	0.44-0.47	0.45-0.49	0.50-0.53
12	0.30-0.32	0.32-0.34	0.31-0.33	0.30-0.32	0.30-0.33	0.33-0.35
16	0.30-0.31	0.30-0.31	0.30-0.31	0.30-0.31	0.30-0.31	0.31-0.33
20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

当基层厚度 h_c 不等于 22cm 时，可按表 5-2 进行修正。

表 5-2 不同 h_c 的最大温度梯度修正系数表

$h_c(cm)$	16	18	20	22	24	26	28
修正系数	1.19	1.13	1.08	1.00	0.93	0.87	0.81

5.2 计算模型及计算参数

5.2.1 计算模型

温度应力的计算采用三维有限元模型，同时为了便于与荷载应力进行耦合分析，计算模型与荷载应力计算模型相同。如图 4-2。

再生集料刚性基层沥青路面的温度应力计算同第四章介绍的基层温度应力的计算分析，也是采用有限元软件（ANSYS）分两步进行计算：第一步为再生

集料刚性基层沥青路面结构的温度场分析；第二步进行热—结构耦合分析，将第一步结构的温度场分析结果作为体荷载加到模型结构中，以求解路面结构的温度应力。

5.2.2 计算参数

再生集料刚性基层沥青混凝土路面温度场有限元分析的热力学参数如表 5-3。

表 5-3 温度场计算的热力学参数

	温度梯度/ ° /m	热传导系数/ w/(m.k)	比热/ J/(Kg° C)	线膨胀系数/ (10 ⁻⁵)	密度/ kg/m ³
沥青混凝土	0.85	1	900	2.1	2400
再生集料刚性基层	0.32	1.2	830	1	2330
二灰碎石下基层	0.15	1.3	950	1	1890
二灰土底基层	0.1	1.1	980	1.5	1860
土基	0.005	1.0	705	50	1700

5.3 温度应力结果及分析

温度荷载作用下，不配筋的再生集料刚性基层沥青路面的温度场、变形、应力和应变云图如图 5-1~图 5-8。

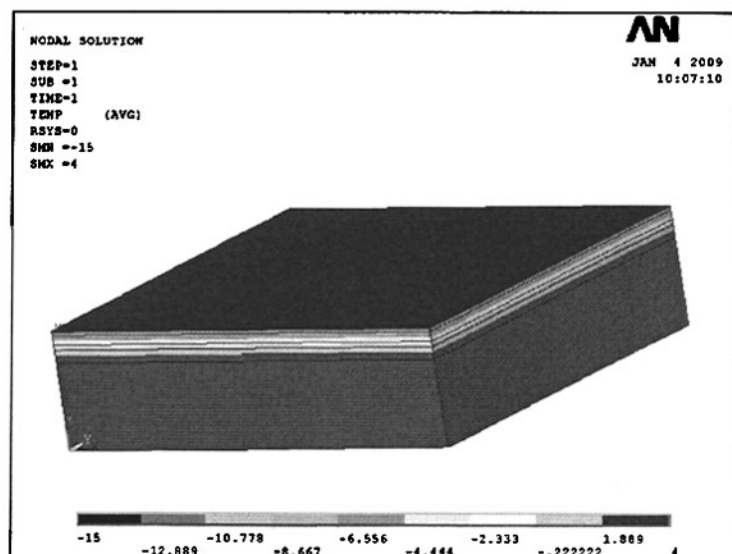


图 5-1 路面结构的温度场

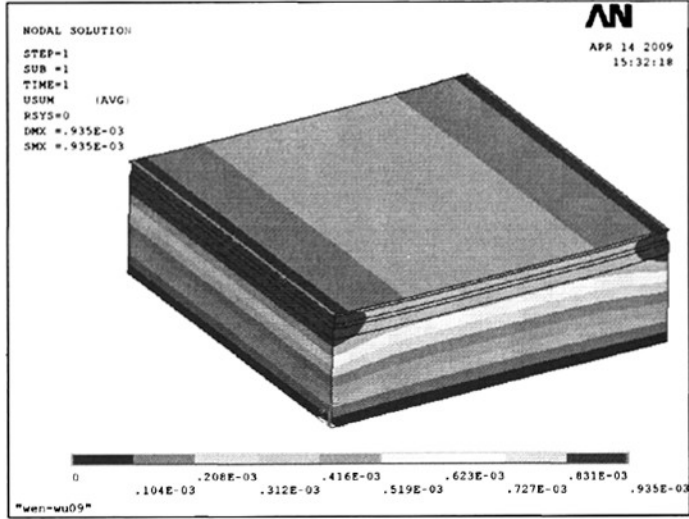


图 5-2 温度荷载下路面结构总变形图

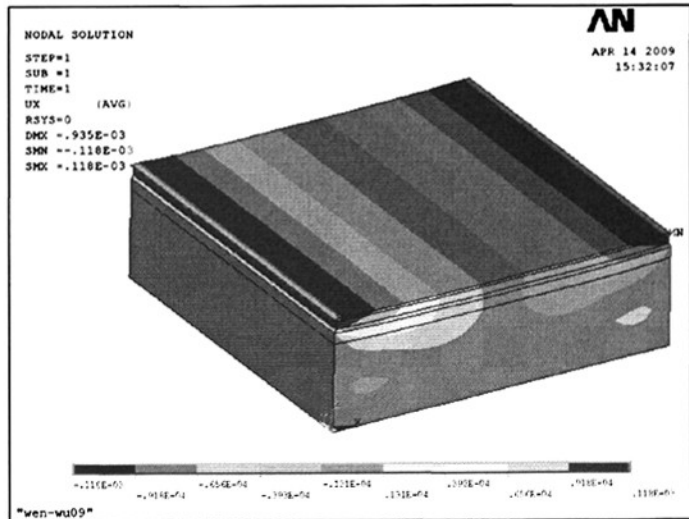


图 5-3 温度荷载下路面结构纵 (x) 向变形云图

由图 5-1~图 5-3 可以看出:

温度荷载 (温度骤降 15 摄氏度) 作用下, 再生集料刚性基层沥青路面的变形主要集中在基层切缝位置处的基层和面层处, 最大总变形为 0.93 mm, 基层纵向的变形沿混凝土板中对称, 最大为 0.03mm。

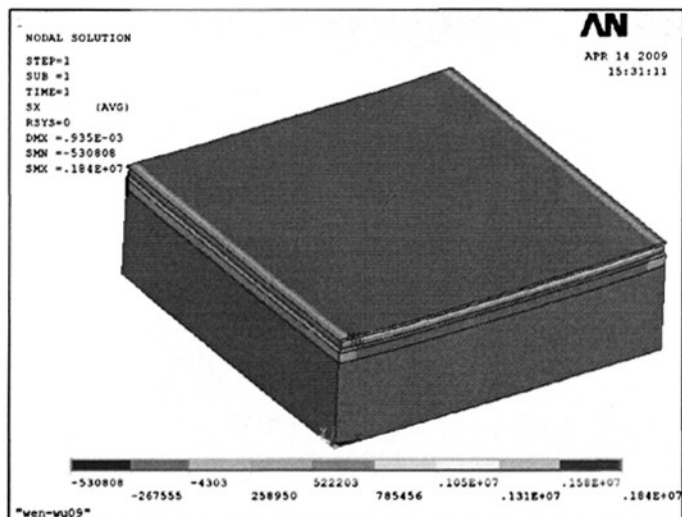


图 5-4 温度荷载下路面结构 x 向应力云图

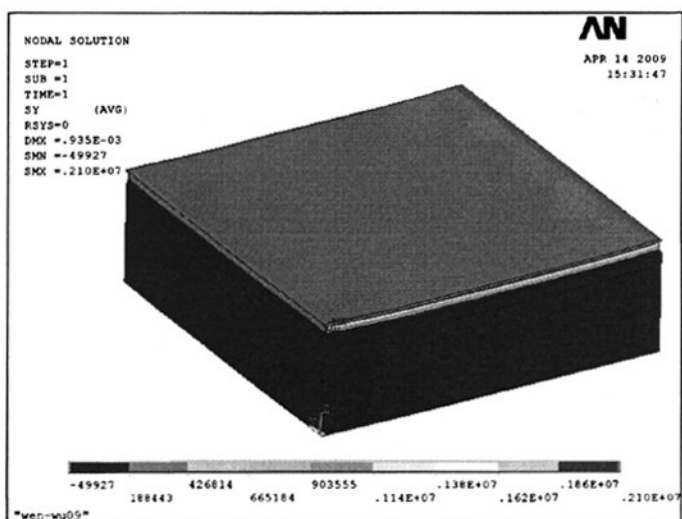


图 5-5 温度荷载下路面结构 y 向应力云图

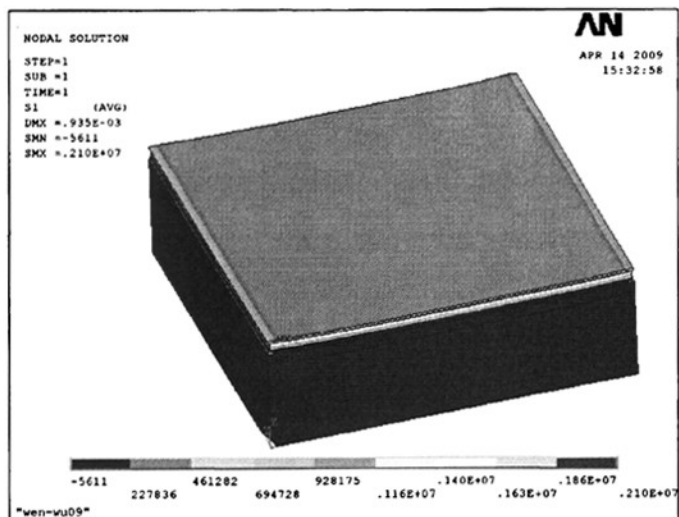


图 5-6 温度荷载下路面结构第一主应力云图

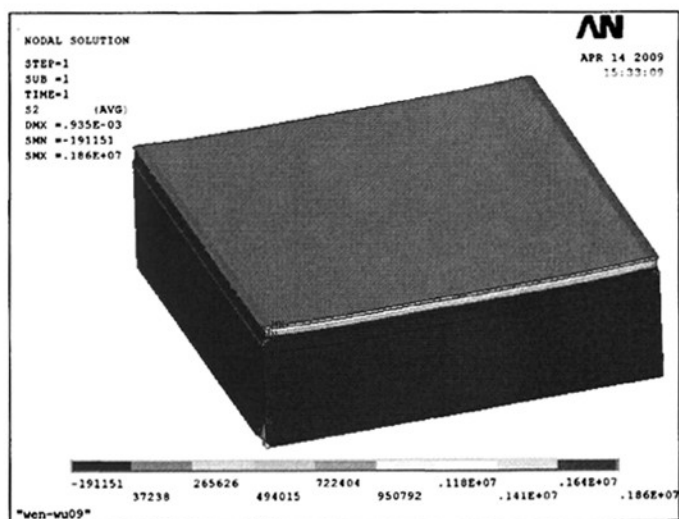


图 5-7 温度荷载下路面结构第二主应力云图

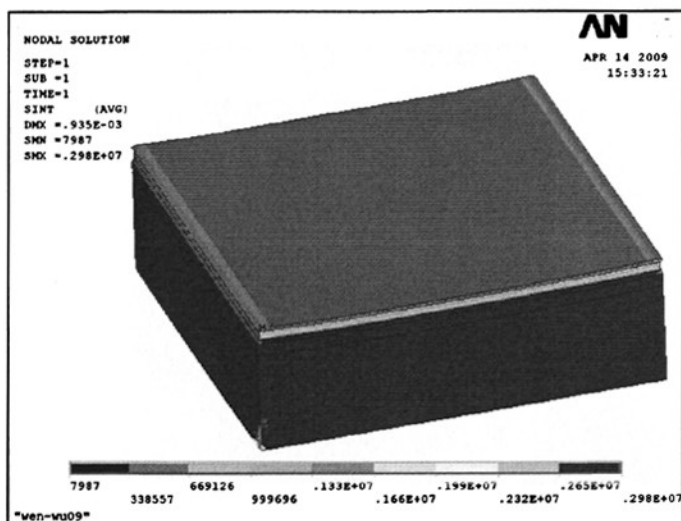


图 5-8 温度荷载下路面结构应力强度因子分布图

由图 5-4~图 5-8 可以看出:

刚性基层纵向的最大拉应力出现在切缝处的基层顶部,最大达到 1.838MPa。基层横向的最大拉应力出现在基层顶部边缘约束处,达到 2.095 MPa,这是由于刚性基层的横向边界处做了法向约束,基层顶部温差比基层底部温差大的结果。

刚性基层的第一主应力与基层的纵向应力的位置和大小相似,最大为 2.10MPa;下基层以下的路面结构承受的温度应力较小,温度应力主要集中在再生集料刚性基层内。刚性基层的第二主应力与基层的横向应力的位置和大小相似。

由路面结构的应力强度因子分布云图可以看出,温度应力主要作用在结构的刚性基层,尤其是基层混凝土的顶部四周边缘处。

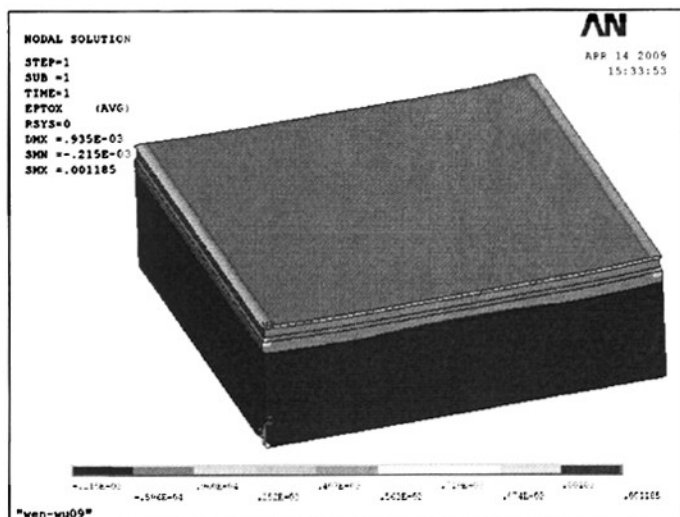


图 5-9 温度荷载下路面结构 x 向应变云图

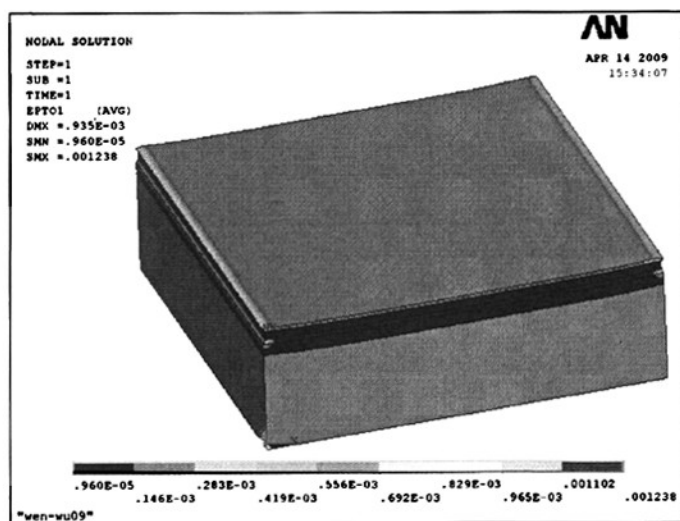


图 5-10 温度荷载下路面结构第一应变云图

由图 5-9~图 5-10 可以看出：

温度荷载作用下，再生集料刚性基层沥青路面的纵向应变，沿路面结构的竖向从上到下逐渐减小，最大出现在切缝处的面层顶部，土基内为压应变，其他结构内为拉应变；刚性基层沥青路面的第一主应变最大值出现在切缝处对应的的面层顶部，基层和底基层内主要以压应变为主，土基内以拉应变为主。

将不同配筋的刚性基层路面结构的温度应力计算结果汇总于表 5-4。

表 5-4 结构的温度应力计算结果 (单位: MPa)

加筋情况		无筋	层底加筋	双层筋	层顶加筋
基层底	纵向	0.05	0.911	0.228	0.109
	横向	0.193	0.580	0.155	0.129
基层顶	纵向	1.838	1.178	1.205	1.289
	横向	2.095	1.119	1.215	1.235
面层顶	纵向	1.372	1.075	0.705	0.638
	横向	0.780	0.693	0.612	0.599

由表 5-4 看出温度荷载下, 路面结构的最大拉应力出现在再生集料刚性基层顶部, 最大为 2.095MPa。基层配置钢筋对结构温度应力的影响还是很明显的, 尤其是对基层顶部的受力影响, 但是三种不同的基层配筋方式之间差别不是很大。不同方案的温度应力比较如图 5-11。

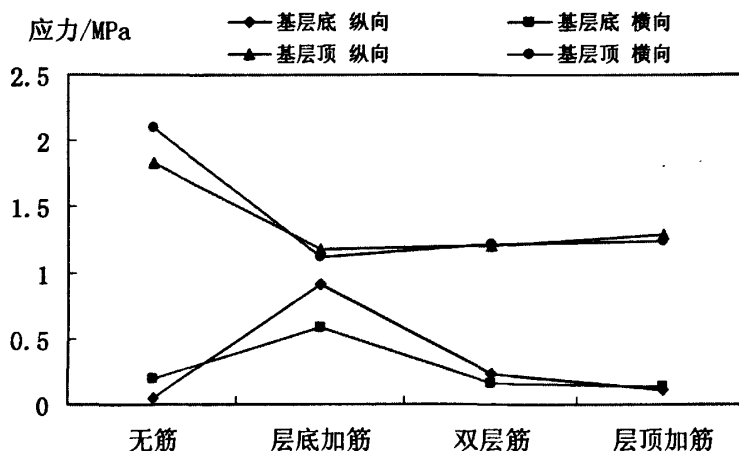


图 5-11 基层底部、顶部的温度应力比较图

由图 5-11 可以看出: 降温时刚性基层结构顶部的纵向和横向最大温度拉应力相差不大。在基层内设置钢筋网对刚性基层顶部的纵、横向温度应力影响较大, 其中设置钢筋网后, 基层顶部的纵向最大温度应力降低了 30%以上, 基层顶部的横向最大温度应力降低了 40%以上, 但是三种不同的基层配筋方式对基层顶部的最大温度应力影响不大。基层底部的纵横向温度应力 (除基层底部设置钢筋网外) 变化不大。

这种温度骤降的天气在一年中没有几次, 且其最大拉应力 (2.095MPa) 不超过再生集料混凝土 28d 的抗拉强度设计值, 故温度骤降引起的温度应力不会引起再生集料刚性基层沥青路面的破坏。

不同刚性基层结构的温度应变计算结果如表 5-5.

表 5-5 温度应变计算结果 (单位: 10^{-5})

加筋情况		无筋	层底加筋	双层筋	层顶加筋
基层底	纵向	3.021	8.273	1.783	0.839
	横向	0.960	3.620	0.960	0.960
基层顶	纵向	20.871	12.437	12.303	13.014
	横向	16.800	11.666	12.400	12.400

表 5-5 可以看出: 基层配置钢筋对结构最大温度应变的影响很明显的, 尤其是对基层顶部的应变影响, 但是三种不同的基层配筋方式之间差别不是很大。不同方案的温度应变比较如图 5-12。

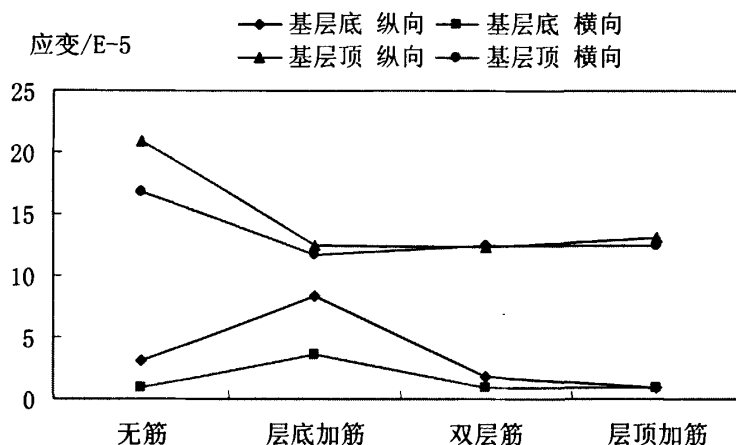


图 5-12 基层底部、顶部的温度应变比较图

由图 5-12 可以看出: 基层内各位置的应变随基层加筋方式不同的变化规律与其应力随基层加筋方式不同的变化规律一致。刚性基层结构顶部的纵向和横向最大温度应变相差不大, 基层底部的纵向和横向的最大温度应变 (除基层底部设置钢筋网外) 也相差较大。在基层内设置钢筋网对结构的温度应变影响较大, 其中设置钢筋网后, 基层顶部的纵向最大应变降低了约 37%, 基层顶部的横向最大应变也降低约 26%。基层底部的纵向温度应变也随配筋方式的不同明显改变, 其中基层底部加筋后应变反而大幅增加, 基层设双层筋时降低了 41%, 基层顶部加筋时降低了 72%。综上可认为: 温度荷载作用下, 基层顶部的纵向横应变相差不大, 其主要作用; 设置钢筋网对刚性基层的应变影响较大, 基层顶部的应变随加筋方案不同变化不大。

5.4 耦合应力结果及分析

在行车荷载和温度变化的反复作用下,再生集料刚性基层内会产生荷载疲劳应力和温度疲劳应力。当两者之和超过再生混凝土基层的弯拉强度时,基层板将发生断裂,继而整个路面结构破坏。因此,在再生集料刚性基层沥青路面中,应计算基层的荷载疲劳应力和温度疲劳应力,且两者之和不应超过再生混凝土的设计弯拉强度,以控制因基层板断裂而造成的结构损坏。对车辆荷载和温度应力共同作用(以下简称耦合荷载)下,不同刚性基层路面结构进行有限元分析。其中耦合应力作用下,不配筋的素混凝土刚性基层沥青路面结构的变形、应力、应变云图如图 5-13~图 5-15。

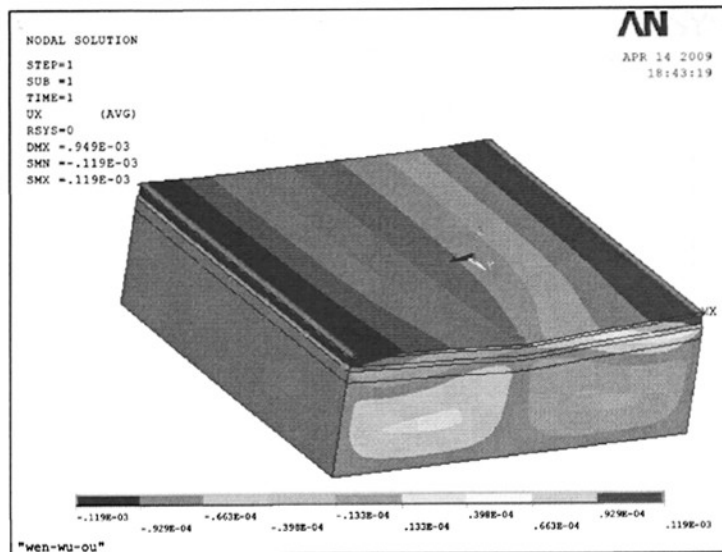


图 5-13 耦合荷载应力下路面结构纵向变形云图

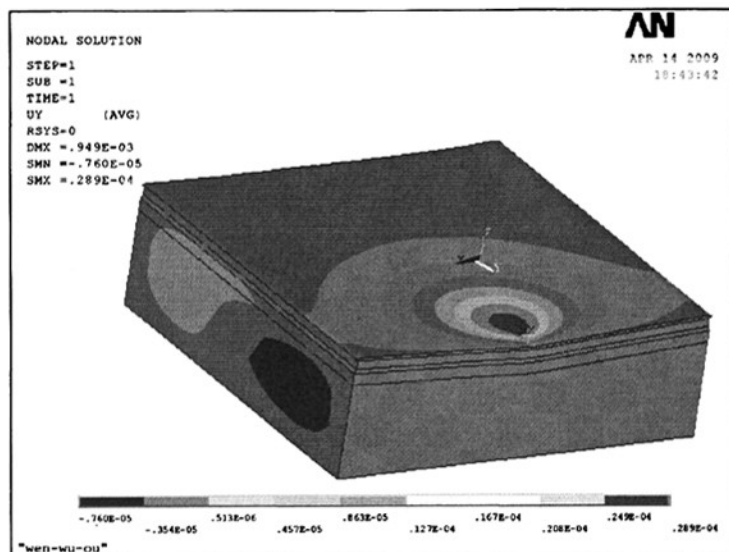


图 5-14 耦合荷载下路面结构横向变形云图

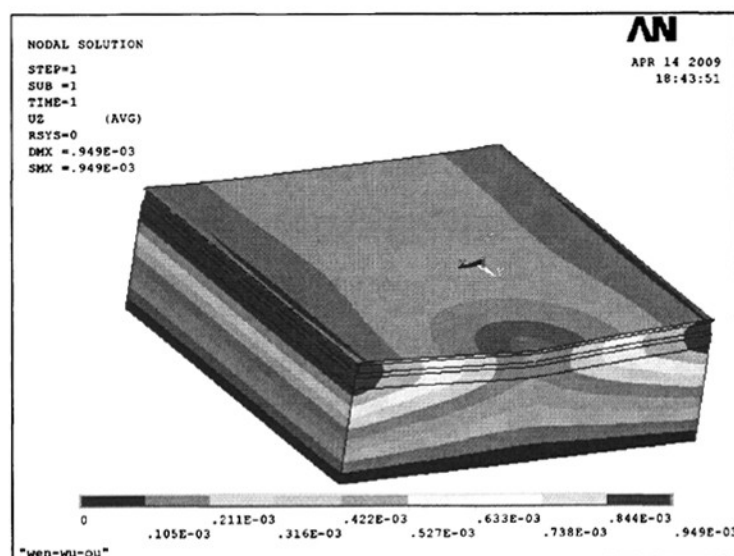


图 5-15 耦合荷载下路面结构竖向变形云图

由图 5-13~图 5-15 可以看出：

耦合荷载作用下，再生集料刚性基层沥青路面的变形是温度荷载引起的变形和车辆荷载引起的变形的综合。纵向变形主要集中在基层切缝位置的面层处，最大变形为 0.03 mm；基层横向的变形主要集中在荷载作用位置的土基内，最大为 0.02mm；竖向变形最大为 0.94 mm，主要集中在基层切缝位置的面层处，其中车

载作用位置的变形比只有温度应力时减少了,可见路面结构的变形主要是在 z 方向。车辆荷载在结构内产生的变形与温度荷载产生的部分结构变形相互抵消,故耦合荷载作用下,结构的各向变形都比温度荷载作用下结构的各向变形值小。

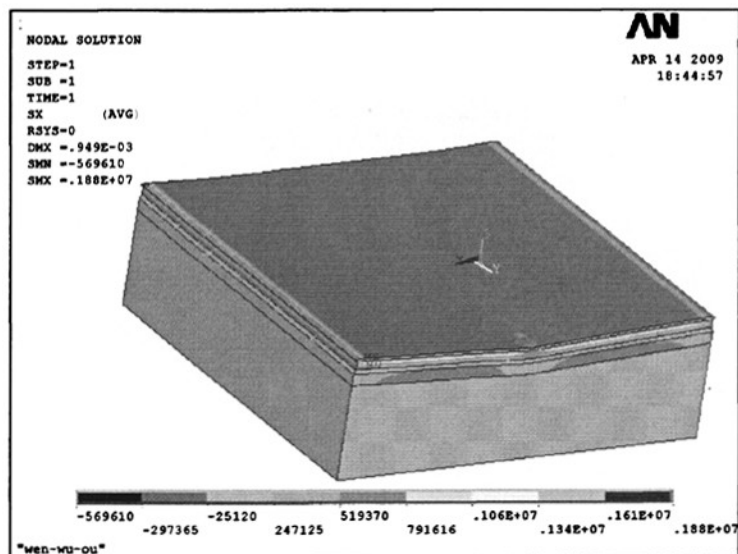


图 5-16 合荷载下路面结构纵向应力云图

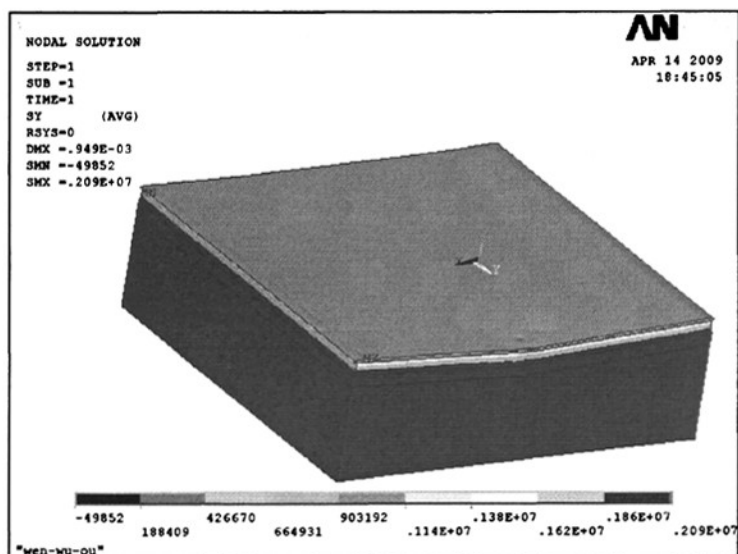


图 5-17 耦合荷载下路面结构横向应力云图

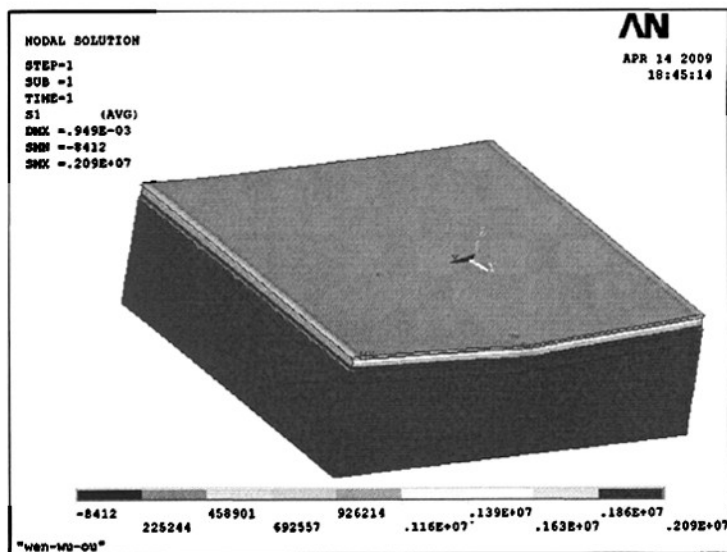


图 5-18 耦合荷载下路面结构第一主应力云图

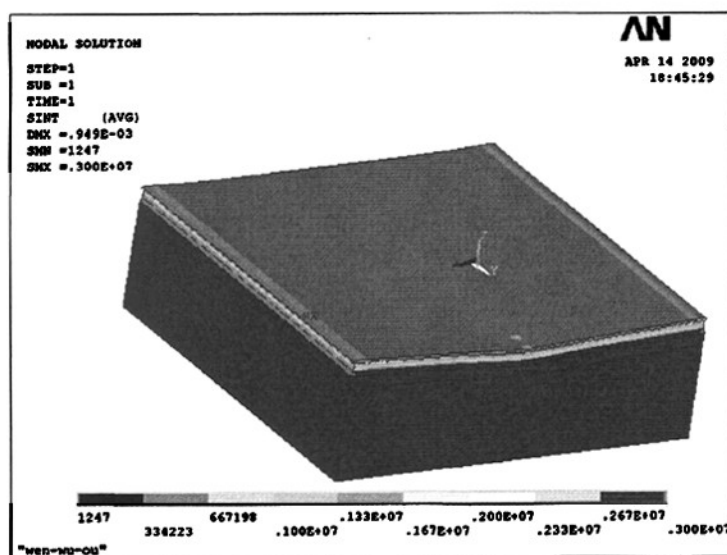


图 5-19 耦合荷载下路面结构应力强度因子分布图

由图 5-16~图 5-19 可以看出：

刚性基层纵向的最大拉应力达到 1.88MPa，与温度荷载作用下结构的纵向应力云图相近，车辆荷载产生的纵向应力对结构的耦合应力的最大值贡献不大。基层横向的最大拉应力出现在基层顶部边缘约束处，达到 2.09MPa，这是由于刚性基层的横向边界处做了法向约束，基层顶部温差比基层底部温差大的结果。结构

的其他位置的耦合应力基本为压应力，且值较小，对结构的疲劳破坏不会产生影响。

耦合荷载作用下，刚性基层的第一主应力与基层的纵向应力的位置和位置相当，最大为 2.09MPa，出现在混凝土基层的顶部，说明结构的第一主应力沿刚性基层的纵向；下基层以下的路面结构承受的耦合应力较小，耦合应力主要集中在再生集料刚性基层内。

由路面结构的应力强度因子分布云图可以看出，耦合应力主要作用在结构的刚性基层，尤其是基层混凝土板边缘的顶部，这与路面结构的温度传播方向和温度梯度有关。

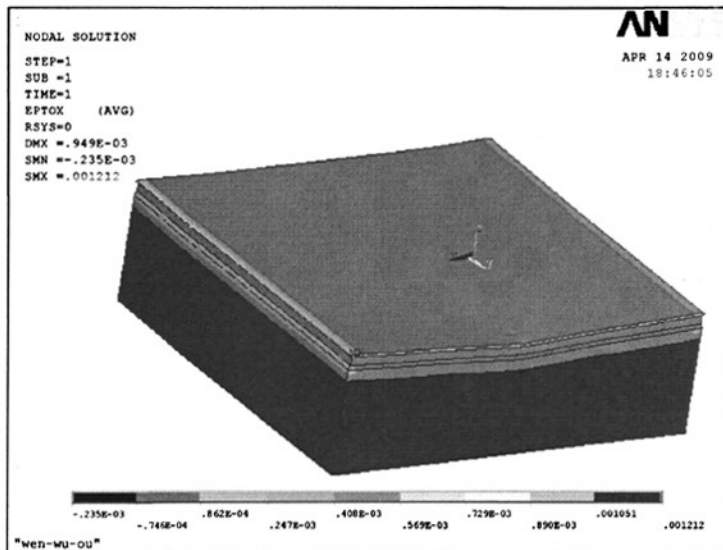


图 5-20 耦合荷载下路面结构纵向应变云图

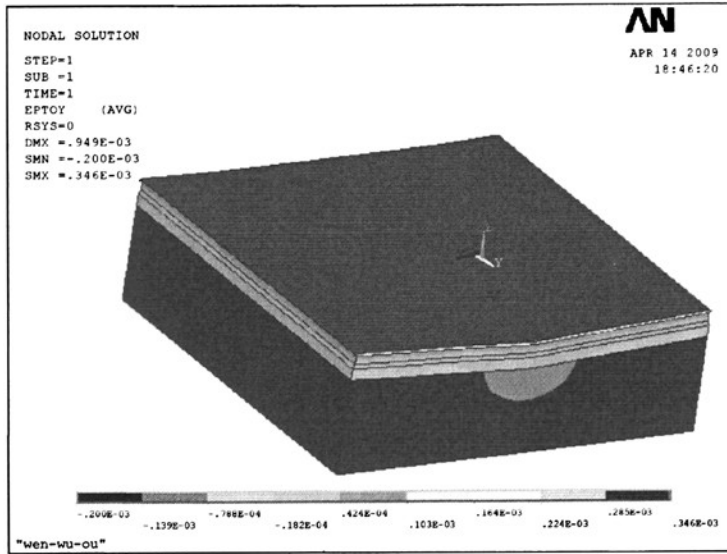


图 5-21 耦合荷载下路面结构横向应变云图

由图 5-20~图 5-21 可以看出：

耦合荷载作用下，再生集料刚性基层沥青路面的纵向应变，沿路面结构的竖向从上到下逐渐减小，最大出现在切缝处的面层顶部，土基内为压应变，其他结构内为拉应变；结构的横向应变也是沿路面结构的竖向从上到下逐渐减小，面层表面最大；耦合荷载作用下，路面结构的应变分布与温度荷载作用下路面结构的应变相差不大，可见车辆荷载对结构的耦合应变影响较小，结构的耦合应变主要是由温度荷载引起的。

但是一年中温度骤降 15 摄氏度的天气极少，不像车辆荷载每天都有几千次，故将温度荷载和车辆荷载一起，计算疲劳寿命是不合理的，应该根据车辆荷载计算路面结构的疲劳。

将不同配筋的刚性基层路面结构的耦合应力计算结果汇总于表 5-6。

表 5-6 结构最大耦合应力比较表

加筋情况		无筋	层底加筋	双层筋	层顶加筋	
最大应力/Mpa	基层底	纵向	0.771	0.671	0.635	0.616
		横向	0.931	0.509	0.522	0.512
	基层顶	纵向	1.881	1.169	1.251	1.317
		横向	2.094	1.258	1.268	1.265

由表 5-6 可以看出：

基层配置钢筋对结构的最大耦合应力的影响较明显,尤其是基层顶部的耦合应力。刚性基层结构顶部的纵向和横向最大温度拉应力相差不大。在基层内设置钢筋网对刚性基层顶部的纵横向的耦合应力影响较大,其中设置钢筋网后,基层顶部的纵向最大耦合应力降低了 30%以上,基层顶部的横向最大耦合应力降低了 40%以上;但是三种不同的基层配筋方式对基层顶部的最大温度应力影响不大;基层底部的纵向耦合应力变化不大,加筋对基层底部横向耦合应力的影响较大。

不同方案的耦合应力比较如图 5-22。

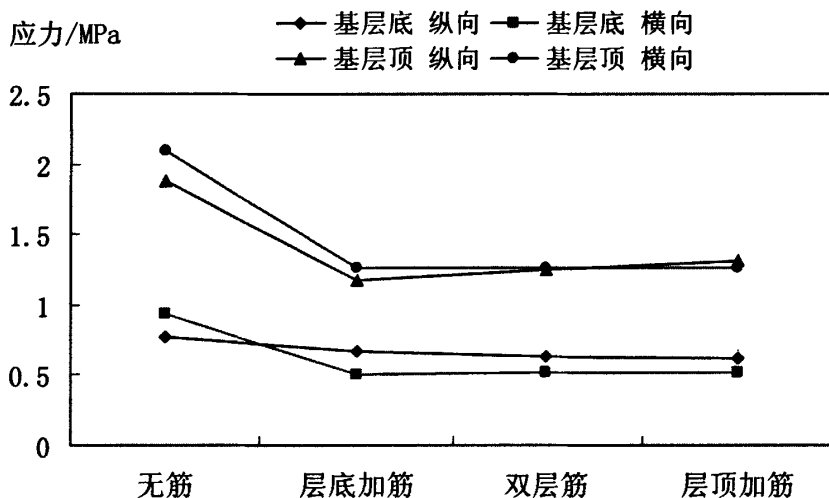


图 5-22 基层底部和顶部的耦合应力比较图

由图 5-22 可以看出:

刚性基层结构顶部的纵向和横向最大耦合应力相差不大,在基层内设置钢筋网对基层结构顶部的最大耦合应力影响较大,其中设置钢筋网后,基层顶部的纵向应力降低了 30%以上,基层顶部的横向应力也降低约 40%以上;但是三种不同的基层配筋方式对基层顶部的纵最大应变的影响不大。

5.5 小结

本章通过三维有限元方法,对再生集料刚性基层沥青路面的温度场、温度应力及温度和车辆荷载的耦合应力进行计算分析,得到以下结论:

1. 分析再生集料刚性基层沥青路面结构的温度梯度。建立三维有限元模型,确定计算参数,得到极限降温时路面结构的温度场。

2. 对刚性基层沥青路面的温度应力进行计算。得到该路面结构的温度应力分布规律；比较不同加筋情况对路面结构受力的影响。在基层内设置钢筋网对刚性基层顶部的纵、横向温度应力影响较大，其中设置钢筋网后，基层顶部的纵向最大温度应力降低了 30%以上，，基层顶部的横向最大温度应力降低了 40%以上，但是三种不同的基层配筋方式对基层顶部的最大温度应力影响不大。

3. 计算分析车辆荷载和温度荷载耦合应力作用下，不同刚性基层路面结构的变形和耦合应力，得到该路面结构的耦合应力分布规律；比较不同基层加筋方案对路面结构受力的影响。基层配置钢筋对结构的最大耦合应力的影响较明显，尤其是基层顶部的耦合应力。刚性基层结构顶部的纵向和横向最大温度拉应力相差不大。在基层内设置钢筋网对刚性基层顶部的纵横向的耦合应力影响较大，其中设置钢筋网后，基层顶部的纵向最大耦合应力降低了 30%以上，，基层顶部的横向最大耦合应力降低了 40%以上；但是三种不同的基层配筋方式对基层顶部的最大温度应力影响不大。

4. 研究认为，一年中温度骤降 15 摄氏度的天气极少，不像车辆荷载那样每天都有几千次，如果将温度荷载和车辆荷载一起产生的耦合应力作为计算路面结构疲劳寿命的依据，是不合理的。温度荷载为配置钢筋网的混凝土基层使用前期破坏的主要因素，车辆荷载为其后期破坏的重要因素，应分别考虑。

第六章 再生集料刚性基层沥青路面结构设计

6.1 再生集料刚性基层沥青路面的结构组合

再生集料刚性基层沥青路面以二灰碎石半刚性基层铣刨料配制的水泥混凝土作为路面基层，其上加铺沥青混凝土面层。这种路面结构与柔性路面相比可大幅度减少沥青路面的厚度，降低沥青用量，同时又可弥补水泥混凝土路面的不足，刚柔相济，大大改善路面的使用性能，延长路面的使用寿命。本节仅就刚性基层的结构设计提出要求，对于底基层、垫层或路基的要求同普通水泥混凝土路面。

1. 沥青面层

沥青面层的功能主要是提高路面表面的平整度、耐磨、抗滑性能，并扩散车轮荷载，减少冲击振动，及降低温度梯度，沥青面层的厚度应考虑满足上述功能，同时符合施工最小厚度要求并减缓反射裂缝。

沥青面层直接承受车轮荷载的反复作用和各种自然因素的影响，并将荷载传递到基层以下的结构层。面层可分为单层、双层和三层。双层结构分为表面层、下面层；三层结构分为表面层、中面层和下面层。有时为改善沥青路面的平整、抗滑等服务功能，可加铺磨耗层。

表面层的功能是提供安全、快速、舒适的行车条件，应具有平整密实、抗滑耐磨、稳定持久的表面服务功能，并具有抗老化、抗低温开裂、耐久性好等品质。中下面层应具有一定的热稳性、高温抗车辙性、密水、抗剥离及耐疲劳等性能。对沥青面层的要求同高等级公路沥青混凝土路面。

2. 刚性基层

再生集料刚性基层主要是沥青路面交通荷载和温度应力的主要承重层，应具有足够的弯拉强度、疲劳强度和耐久性。

普通水泥混凝土路面的设计基准期对高速公路和一级公路为30年，对于二级及二级以下公路为20年。但当其上面加铺沥青混凝土面层时，使其受力状况有所改善，从而延长其使用年限。由于刚性基层刚度相对较大，上路床如由细粒土、粘土质砂或级配不良砂组成，则基层与路床刚度差过大，会由此引起基层的开裂。因而，须在基层和路床之间设置下基层或底基层。下基层或底基层可采用级配粒

料、水泥稳定粒料、石灰粉煤灰稳定粒料以及无机结合料稳定土等，厚度一般大于18cm。此外，水温状况不良时，还要在底基层下面设置各种形式的垫层，其宽度与路基同宽，厚度一般不小于15cm。对于高等级公路的大修工程来说，对二灰碎石半刚性基层铣刨时，一般保留原道路的下基层和底基层，保证道路基层刚度的连续性。

6.2 再生混凝土基层的结构设计

6.2.1 设计依据

路面结构设计的目的是提供一种在预定使用期内同所处环境相适应，能承受预计交通荷载作用的路面结构。我国现行公路沥青路面设计规范中，沥青路面设计以路表面设计弯沉值为设计指标，并对高速、一级和二级公路的沥青面层或半刚性基层的层底拉应力进行验算。

对于混凝土基层沥青路面，基层刚度大且强度高，沥青面层表面弯沉小，一般均能符合设计要求。不过，由于在基层接缝处面层底部会产生应力集中，产生拉应力，从而容易产生反射裂缝，对路面使用性能和寿命影响较大，因此在结构设计时以控制反射裂缝为核心。与普通水泥混凝土路面类似，混凝土基层的设计依据是控制其疲劳应力不超过混凝土的弯拉强度，即以混凝土基层的荷载疲劳应力和温度疲劳应力之和不超过其抗弯拉强度确定基层厚度。

6.2.2 设置钢筋网的混凝土基层的破坏形式

设置钢筋网的再生混凝土作为路面基层使用时，需要承受车辆荷载和温度荷载的共同作用。在荷载作用下，设置钢筋网的再生混凝土基层因受板内钢筋网的约束而无法自由变形，常常带缝工作。依据国外使用经验，连续配筋混凝土基层破坏主要形式为钢筋拉断及板边冲断，配置钢筋网的混凝土基层与连续配筋混凝土基层的破坏形式有一定的相似性。

1、板边冲断破坏。产生板边冲断破坏，是因为基层在温度荷载作用下产生较多横向裂缝致使基层整体刚度下降，再重复车辆荷载作用下，基层受到面层传递来的冲击荷载，位于裂缝两侧的混凝土在过大冲击下产生松动至剥落，致使裂

缝的进一步扩大,使得裂缝间的板丧失纵向传荷能力而成为独立板块。由于再生集料刚性基层配置的是钢筋网,横向的配筋率和纵向的配筋率相同,所以横向拉应力一般不会使板沿纵向迅速断裂,产生板边冲断破坏。

2、钢筋拉断破坏。产生钢筋拉断破坏,是因为带缝工作的基层常常会受到面层下渗的雨水侵蚀作用。雨水在裂缝处锈蚀钢筋,使得钢筋洁面减少,基层纵向配筋率逐渐减小,钢筋所承受的拉应力会迅速增加,而使得钢筋断裂破坏。

6.2.3 再生混凝土基层接缝设置

混凝土基层在环境温度和相对湿度的影响下,会产生一定的温缩变形和干缩变形。一般而言,干缩变形受施工条件的影响较大,可以得到有效控制,此处重点考虑温度变形的影响。

一年四季由于大气温度的周期性变化,混凝土基层会随之产生不同程度的胀缩变形。此外,一昼夜中,由于日温差较大,温度变化周期较短,在基层厚度范围内呈现不均匀分布,造成基层顶面和底面的温度坡差,使其产生翘曲变形。此类胀缩和翘曲变形如果较大,一旦受到约束,将在基层内产生胀缩应力和温度翘曲应力。若此应力之和超出极限值,基层即产生裂缝或被挤碎。

一般地,混凝土面层与大气直接接触,受温度的影响较大,相应产生的温度应力亦较大,故需设置各种形式的接缝。而混凝土作为基层时,上覆沥青面层,大大改变了混凝土基层内环境温度的影响。混凝土基层内的温度应力究竟有多大,是否有必要设置接缝,则成为很有必要研究的问题,本文即从混凝土基层沥青路面的温度场出发,研究基层内的温度应力大小,从而对于混凝土基层的接缝设置做出回答。

1. 路面温度梯度

当混凝土基层上面覆盖沥青混凝土面层时,其温度梯度发生较大变化。随面层厚度增大,基层温度梯度减小,且当面层厚度介于0-12cm之间时,温度梯度呈线性迅速减小,当面层厚度大于12cm时,基层温度梯度减小的趋势不明显,基本保持在同一水平。此外,基层厚度越大,其温度梯度越小。

2. 混凝土基层施工至铺筑沥青面层阶段的温度应力分析

混凝土基层指再生集料水泥混凝土基层,一般采用摊铺振捣的工艺成型,浇

筑完毕即进行养生，此处分析再生混凝土基层的温度应力状况。

① 水泥混凝土凝结硬化阶段的温度与强度特征

再生水泥混凝土基层在铺筑沥青混凝土面层之前的受力状况，与普通水泥混凝土路面类似，只是不考虑荷载应力的作用。连续浇筑的水泥混凝土，因施工早龄期温度应力而产生的断板问题在路面工程中较为常见，其主要原因是施工早龄期混凝土的温度收缩和干燥收缩应力较大。及时切缝，使水泥混凝土长板有规则断开，以释放混凝土的温缩、干缩应力，是防止施工断板的有效措施。

水泥混凝土凝固初期的强度增长缓慢，而温度变化产生的温缩应力，干缩应力大于混凝土强度时就会产生裂缝，造成水泥混凝土施工断板。故判断是否会发生断板，需分析混凝土凝固过程中的抗拉强度，并计算温度应力和干缩应力。浇筑后的混凝土在水化热、气温、日光辐射的作用下，其温度随浇筑时间不同而在不同时刻出现峰值和谷值，混凝土路面板内温度变化经历了水泥水化热阶段和散热温度下降阶段。升温阶段经历时间约为6-8h，降温阶段速度要根据气温的变化而定，6-12h处于降温阶段。通常水泥终凝时间不超过12h，这一阶段的混凝土板处于降温收缩状态，是容易发生裂缝的一个时段。升温阶段混凝土膨胀变形产生压应力被混凝土的塑性所抵消，即温度峰值时混凝土内部的压应力比理论计算值要小得多，因此温度计算初始温度可从板温峰值开始。

混凝土的抗拉强度比抗压强度小的多，一般为抗压强度的 $1/10\sim 1/13$ ，并且水泥混凝土路面呈薄层带状结构，水泥水化热的散热较快，一般不会发生大体积混凝土结构的膨胀开裂现象。即施工期间水泥混凝土路面的开裂是由于温度收缩所引起，而不是由膨胀变形引起的。所以分析的时刻应是混凝土降温期间，板顶温度低于板底温度时，这时混凝土路面最容易产生裂纹。混凝土的早期抗拉强度测试较为困难，这方面数据较少。横山清等人将混凝土灌入特制的哑铃型模具，通过均匀张拉两侧的金属板得到混凝土早期抗拉强度随龄期的发展(图 6-1)。由图 6-1 可知，对于普通硅酸盐水泥，其早期抗拉强度较小，在 10h 时约为 0.1MPa，一天时为 1MPa 左右。

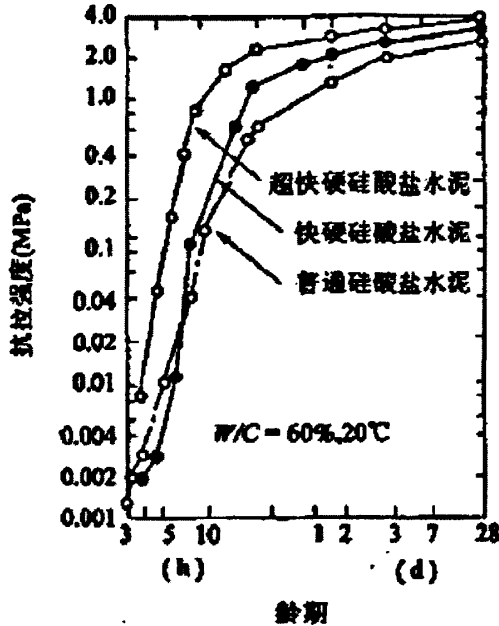


图 6-1 抗拉强度发展曲线

② 水泥混凝土路面凝结硬化阶段应力计算

温度沿板厚的分布是非线性的，在计算水泥混凝土路面的温度应力时，把温度应力分解成收缩应力、翘曲应力和内应力计算，然后迭加结果。由于施工阶段的水泥混凝土正处于凝固硬化的过程，内应力尚未形成，故只需迭加翘曲应力、收缩应力。同时还需要特别加以指出的是，水泥混凝土硬化过程中其温度、强度和弹性模量变化较快，均以时间 τ 的函数。在温度应力分析时，需利用实测的温度数据。

浇筑后水泥混凝土板在锯缝之前可认为完全被约束，则计算翘曲应力的公式为：

$$\sigma_q(\tau) = \frac{\alpha_l E(\tau) T_n(\tau)}{2(1-\mu_c)} \quad (6-1)$$

式中： $\sigma_q(\tau)$ ——混凝土硬化过程中不同时间的翘曲应力；

$E(\tau)$ ——混凝土硬化过程中不同时间的弹性模量；

$T_n(\tau)$ ——混凝土硬化过程中不同时间的板顶与板底的温度差；

α_l ——混凝土的热膨胀系数；

μ_c ——混凝土的泊松比，在早龄期可取 0.2；

τ ——混凝土浇筑后的时间，小时。

同样，混凝土在完全约束条件下胀缩应力的计算公式为：

$$\sigma_L(\tau) = \frac{\alpha_l E(\tau)}{(1 - \mu_c)} (T - T_{\max}) \quad (6-2)$$

式中： $\sigma_L(\tau)$ ——混凝土凝固不同时间的收缩应力；

T_{\max} ——混凝土浇筑 24h 内路面的最高温度；

T ——板温，也可按混凝土浇筑后 24h 内路面的最低温度 T_{\min} 计算。

此外，水泥混凝土在硬化和干燥过程中，水分逐渐减少，从而产生干缩变形。设混凝土的干缩应变为 $\varepsilon(\tau)$ 。在混凝土切缝前，可看作无限大板，变形全部约束。产生的干缩应力为：

$$\sigma_d(\tau) = \frac{E(\tau)\varepsilon(\tau)}{1 - \mu_c} \quad (6-3)$$

可见干缩应力计算公式与板均匀收缩应力计算形式一致，为计算方便，可把干缩换算成干缩当量温差，干缩产生的变形，相当于引起同样变形所需要的温度：

$$T(\tau) = \frac{\varepsilon(\tau)}{\alpha_l} \quad (6-4)$$

影响干缩率的因素很多，工程中宜通过试验确定不同龄期的干缩率 $\varepsilon(\tau)$ ，通过加强施工初期的养护，干缩的影响可以消除，因此计算时可忽略干缩的影响。

水泥混凝土路面凝结硬化期间板内最不利位置是板顶中部，故其应力可表示为：

$$\sigma(\tau) = \sigma_L(\tau) + \sigma_q(\tau) \quad (6-5)$$

③ 切缝间距

对于新浇筑的混凝土，一般需要切缝，切缝时间即根据水泥混凝土凝结阶段应力的发展趋势与其强度的增长趋势对比而定。前已述及，从浇筑完成时间算起 6-12 小时，水泥混凝土板已经越过水化热及日光辐射造成的升温阶段而进入降温阶段，处于收缩状态，加之此时水泥混凝土的抗拉强度较低，是板易产生裂缝的重要阶段。

为分析混凝土板早期的切缝问题，应先根据具体情况确定当时最不利情况下温度降低时混凝土板的温度梯度，以及板的平均温度降低值，计算混凝土板的温

度应力, 将其与该时刻混凝土的容许拉应力进行比较, 若求得温度应力小于混凝土的容许拉应力, 即进行切缝。

通过混凝土路面的施工观察可知, 如果不进行混凝土路面的切缝处理, 混凝土路面将在 3 天左右出现第一期开裂, 裂缝间距约为 20m。结合第三章的有限元模拟计算的基层温度应力认为, 混凝土面板的开裂是分期开裂, 随龄期增长, 裂缝间距由大到小, 直至使用期内最终裂缝间距为 4~6m。当混凝土的容许拉应力越大, 对应的切缝间距越长。

此外, 当混凝土板铺筑养生完成并形成设计强度时, 若不及时铺筑沥青混凝土面层, 其经受的温度环境可能较之凝结硬化阶段严酷, 产生的翘曲应力和温度应力更大, 此时切缝的必要性更大。同样地, 由于最大翘曲应力与最大胀缩应力同时出现的可能性不大, 应分别根据翘曲应力和胀缩应力确定接缝间距, 然后取其较小值为最终的间距值。

总之, 当混凝土浇筑完成且没有铺筑沥青混凝土面层之前, 混凝土基层承受的温度应力状态与普通水泥混凝土面层类似。其接缝间距应根据凝结硬化阶段和强度形成至铺筑沥青混凝土面层阶段的接缝间距综合确定。再生集料刚性基层所受到的纵向最大温度应力随切缝间距的增大而显著增大, 再生集料刚性基层的横向切缝间距以不超过 15m 为宜。

6.3 结构设计步骤及实例

6.3.1 设计步骤

混凝土基层沥青路面的结构设计步骤如下所示。

1. 环境与交通分析

根据公路所处的自然区划, 调查当地的温度状况, 确定路面结构内的温度梯度。根据相关的设计依据和设计资料, 进行轴载换算, 计算设计车道标准轴载日作用次数, 由此确定设计年限和轮迹荷载分布系数, 并计算设计基准期内标准轴载的累计作用次数。

2. 初拟路面结构

进行路面结构组合设计, 初拟包括面层在内的路面结构各层次的类型和厚度, 确定混凝土基层的平面尺寸, 并确定路面材料设计参数。

3. 确定路面结构

计算混凝土基层的荷载疲劳应力和温度疲劳应力,根据目标可靠度和变异水平等级选定可靠度系数,并检验极限状态表达式是否满足。如果能满足,则确定初选厚度为混凝土基层的设计厚度。否则,调整基层或面层厚度,重新计算并验证,直到满足极限状态的要求,从而确定最终的路面结构。

6.3.2 结构设计实例

为验证混凝土基层沥青路面的使用性能,在京福高速德州段大修工程中修筑试验段,试验段采用多种结构,此处给出其中一种结构的设计过程。

该试验段位于公路自然区划Ⅱ区,设计基准期30年。采用原二灰碎石基层再生集料配制的水泥混凝土基层,单幅路面宽7.5m。经交通调查得知,设计车道使用初期标准轴载日作用次数为6000,试设计该路面结构。

(1) 交通分析

京福高速济德段试验路处于Ⅱ区,安全等级为一级。临界荷位处的车辆轮迹横向分布系数取为0.22。取年平均增长率为8%。计算设计基准期内设计车道标准荷载累计作用次数为:

$$N_e = \frac{N_s[(1+\gamma)^t - 1] \times 365}{\gamma} \cdot \eta = \frac{6000 \times [(1+0.08)^{30} - 1] \times 365}{0.08} \times 0.22$$
$$= 54.58 \times 10^6 \text{ 次}$$

属重交通等级。

(2) 初拟路面结构

由于受原路面设计高程的限制,综合考虑高速公路、重交通等级,拟定沥青面层厚度为0.1m,再生混凝土基层厚度0.22m,下基层及以下路面结构为原高速公路路面结构:下基层为0.12m的二灰碎石基层,底基层为0.29m的二灰土。再生集料混凝土基层板不设纵缝,平面尺寸为宽3.75m,长10m。横缝为企口缝。

(3) 路面材料参数确定

取再生集料混凝土基层的弯拉强度标准值为4.5MPa,相应弯拉弹性模量标准值为22GPa。此外,根据现行规范,路基回弹模量取30MPa,二灰土底基层回弹模量取600MPa,二灰碎石下基层回弹模量取900MPa。计算得下基层顶面当量

回弹模量为 203.8 MPa，进一步得出其计算回弹模量为 591.0MPa。

(4) 基层荷载疲劳应力

参照长安大学计算、归纳分析得出的混凝土板底荷载应力计算公式，标准轴载在基层临界荷位处产生的荷载应力只与下基层顶面计算回弹模量、面层厚度、基层厚度和基层模量有关，计算公式为：

$$\begin{aligned} \sigma_{ps} = & -0.8846 + 1.6290 \times 10^{-4} E_2 + 2.7128 \times 10^{-3} h_1^2 - 4.2330 \times 10^{-3} h_1 h_2 \\ & + 1.4628 \times 10^{-3} h_2^2 - 1.5918 \times 10^{-6} h_2 E_2 + 2.5867 \times 10^{-5} h_2 E_1 = 0.747 MPa \\ & - 1.5570 \times 10^{-9} E_2^2 - 8.4211 \times 10^{-8} E_2 E_1 + 5.0710 \times 10^{-7} E_1^2 \end{aligned}$$

疲劳应力系数 $k_f = 0.9425 N_c^n = 0.9425 \times (54.58 \times 10^6)^{0.057} = 2.602$ ， $k_r = 0.80$ 。

根据公路等级，考虑偏载和动载等因素对路面疲劳损坏影响的综合系数 $k_c = 1.26$ 。

荷载疲劳应力计算为：

$$\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps} = 0.80 \times 2.602 \times 1.26 \times 0.747 = 1.94 MPa$$

(5) 基层温度疲劳应力

由表 5-1，沥青面层厚度为 10cm，基层厚度为 22cm 时，II 区基层最大温度梯度取 0.35 ($^{\circ}C/cm$)。按长安大学在置信水平为 0.05 时得出的混凝土板底温度应力回归公式计算，最大温度梯度时，混凝土基层的温度应力为：

$$\sigma_{tm} = -1.2884 + 2.5867 T_g + 3.3157 \times 10^{-3} h_2 E_2 = 1.22 MPa$$

温度疲劳应力系数 k_t 的计算为：

$$k_t = \frac{f_r}{\sigma_{tm}} \left[a \left(\frac{\sigma_{tm}}{f_r} \right)^c - b \right] = \frac{4.5}{1.22} \left[0.828 \times \left(\frac{1.22}{4.5} \right)^{1.323} - 0.041 \right] = 0.392$$

温度疲劳应力为：

$$\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm} = 0.392 \times 1.22 = 0.478 MPa$$

(6) 确定路面结构

高速公路的安全等级为一级，相当于一级安全等级的变异水平等级为低级，目标可靠度为 95%，按长安大学确定的各级公路可靠度设计标准知其可靠度系数 $\gamma_r = 1.33$ 。故

$$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) = 1.33 \times (1.94 + 0.478) = 3.22 \text{ MPa} \leq f_r = 4.5 \text{ MPa}$$

因而,当取沥青面层厚度为 10cm 时,再生水泥混凝土基层厚度为 22cm 可以承受设计基准期内荷载应力和温度应力的综合疲劳作用。可见,初拟路面结构满足设计要求,故将其确定为最终路面结构。

6.4 基层层底应变仪的埋设与现场检测

试验路铺筑过程中,在新建刚性基层的底部埋设光纤光栅 (FBG) 应变传感器以及温度传感器 (FBG-T),测定试验路面结构在标准轴载作用下的基层层底拉应变值,并与理论计算值进行比较,以验证理论计算的有效性。

6.4.1 系统介绍^[39]

(1) 光纤传感系统的发展

光纤光栅传感器是用光纤光栅制成的一种新型光纤传感器。光纤光栅是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型全光纤无源器件,利用光纤光栅制成多种传感器如温度、应变、应力、加速度、压强等传感器。不同的光纤光栅传感器可具有不同的工作波长,因此可以利用波分复用技术,在一根光纤级联多个光纤光栅传感器作分布式测量。它具有体积小、重量轻、与光纤兼容、插入损耗低、性能长期稳定性好等特点。特别适合在易燃,易爆和强电磁等恶劣环境下使用。

光纤温度传感器是光纤传感器中发展最快的一个分支,它取代传统的温度传感器,如电阻应变片,与电阻应变片相比,光纤传感器具有体积小,重量轻,不受电磁干扰,抗辐射,分布式测量等显而易见的优势,所以它特别适合在易燃,易爆和强电磁等特殊的场合应用。

(2) 光纤传感器的测量原理

光纤光栅就是一段光纤,其纤芯中具有折射率周期性变化的结构。根据模耦合理论, $\lambda_B = 2n\Lambda$ 的波长就被光纤光栅所反射回去(其中 λ_B 为光纤光栅的中心波长, Λ 为光栅周期, n 为纤芯的有效折射率)。如图 6-2 所示。

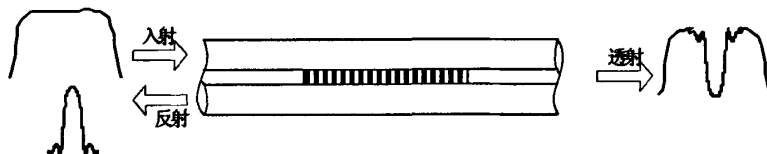


图 6-2 光纤传感器测量原理

反射的中心波长信号 λ_B ，跟光栅周期 Λ ，纤芯的有效折射率 n 有关，所以当外界的被测量引起光纤光栅温度、应力改变都会导致反射的中心波长的变化。也就是说光纤光栅反射光中心波长的变化反映了外界被测信号的变化情况。光纤光栅的中心波长与温度和应变的关系为：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_c)\Delta\varepsilon \quad (6-3)$$

其中， $\alpha_f = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$ 为光纤的热膨胀系数， $\xi = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ 为光纤材料的热光系数， $P_c = -\frac{1}{n} \frac{dn}{d\varepsilon}$ 为光纤材料的弹光系数。在 1550nm 窗口，中心波长的温度系数约为 10.3pm/°C，应变系数为 1.209pm/με。如果将 FBG 封装在温度增敏材料中，可以提高它的温度系数灵敏度，进而得到更大的测量精度。

传感器波长指的就是 FBG 反射谱（如图 6-3 所示）中的尖峰的中心波长。这些峰值波长随着应变和温度的改变而改变。当温度升高或应变增大时，FBG 传感器的峰值波长变长。如图 5-5，如果一个峰值波长 1535.050nm 的传感器从 25°C 加热到 35°C，传感器的峰值波长将增加到 1535.150nm（每 1°C 变化 10pm）。大多数 FBG 查询系统工作在 50nm 范围内，从 1520nm 到 1570nm。

传感器的中心波长是通过光纤光栅传感分析仪进行解调，转换为数字信号。其工作原理如下：

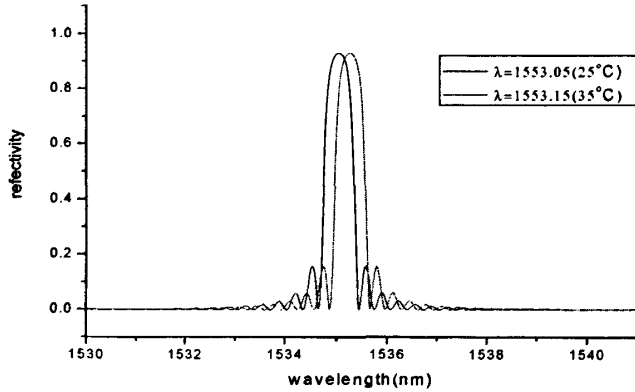


图 6-3 反射谱

系统工作时，光纤光栅传感分析仪内部光源发出连续的宽带光，经光缆传输到监测现场布设的光纤光栅传感器，这些传感器内部的测量敏感元件—光纤光栅对该宽带光有选择地反射回相应的一个窄带光，经同一传输光缆返回到光纤光栅传感分析仪内部探测器来测定出各个传感器所返回的不同窄带光的中心波长，从而解析出各监测点的测量值。由于多个传感器所返回的窄带光信号中心波长范围不同，所以可以将这些传感器串接组网实现多点同时测量，大大简化了传感器及引出线的布设，避免了以往逐点测量的不便。

(3) 系统特点

- ①系统具有自启动功能，可避免由于突发情况引起的监测中断，真正做到长期稳定监测。
- ②系统可以根据客户任选时间段对公路进行健康监测。
- ③采用实时动态校准，通过高精度的波长标准具及标准光栅进行校准，保证系统的测试精度要求。
- ④分辨率小于 1pm，重复性 2pm。
- ⑤利用 LabVIEW™ 图形用户接口，用户可以随意选择波长视图、动态视图、温度、应变等显示选项，并可为用户提供内部数据接口程序及数据翻译软件，在操作界面上有更大的自由度。
- ⑥设备采用精致坚固的外形设计，便于携带，能很好的适应恶劣环境，同样适合施工过程中的动态监测。
- ⑦本系统可实现网络化，在中央控制系统可时时对公路桥梁的健康情况进行

分析。

⑧设备采用查询式工作方式，可通过软件控制硬件扫描，扫描频率可调，用户可根据不同需要自行选择扫描频率。

(4) 系统运行环境

系统在 Windows 操作系统下，采用 SQL 和 Access2000 后台数据库等开发软件进行研究和开发。运行的软件环境为 WindowsXP/2000，对硬件环境无特别要求，采用通用的台式机或笔记本电脑即可，在线的要求有服务器和大型监测设备等。

(5) 系统结构图

光纤光栅温度及应变传感器可通过串联方式接入传输光缆中，通过传输光缆将光栅的波长信息传给光纤光栅分析仪，光纤光栅分析仪将采集到的光信号转变为电信号进行数据分析处理或者输出给上位机。如图 6-4 所示。

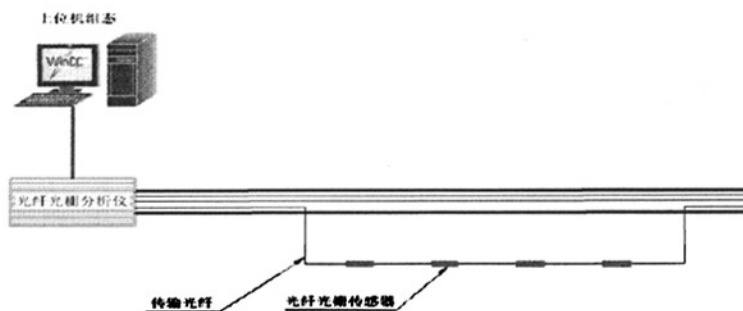


图 6-4 系统结构图

光纤光栅 (FBG) 应变传感器以及温度传感器 (FBG-T) 分别如图 6-5 和图 6-6 所示。



图 6-5 光纤光栅应变传感器



图 6-6 光纤光栅温度传感器

6.4.2 监测仪器的埋设方法^[40]

光纤光栅应变传感器 6 组，每组连接一个光纤温度传感器，均铺设在再生集

料刚性基层的底部（路面结构如图 4-1 所示）。试验路段 I 铺设 2 组共 6 只传感器，每组 1 只纵向布置的应变传感器和 1 只横向布置的应变传感器，并串联 1 只温度传感器；试验路段 II 铺设 1 组共 3 只传感器，2 只纵向布置的应变传感器，并串联 1 只温度传感器；试验路段 III 与试验路段 II 同；试验路段 IV 铺设 1 组共 3 个传感器，1 只纵向布置的应变传感器和 1 只横向布置的应变传感器，并串联 1 只温度传感器；试验路段 V 与试验路段 IV 同。

传感器的埋设步骤如下：

①埋设点周围的表面清理干净，将传感器放在指定的位置，用钢钉固定，其纵向位置距离路缘石 3.5m 处。

②埋设传感器。埋设时应注意保护传感器，先在传感器周围覆盖一层混凝土，防止在浇筑混凝土时传感器的位置发生错动。

③在硬路肩开挖宽约 10cm，深度为 10cm 的沟槽，以使传感器的跳线可以穿过硬路肩直至边坡上的竖井。。

④传感器埋设好之后，在数据线的输出端（边坡上）做一个 0.3m*0.3m*0.3m 的竖井，如图 6-7，用砖搭砌，然后用薄板覆盖，用塑料袋将数据线的线头保护好，以保护数据线不被破坏。

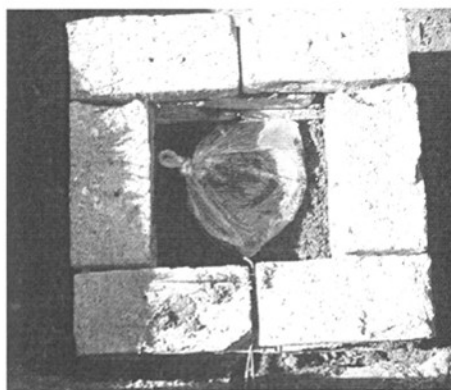


图 6-7 竖井

⑤基层施工完毕后对光纤应变传感器的性能进行检测，以确定传感器是否成活。通车后，在不同的季节与不同的荷载下采集数据。

在不同试验路段上埋设的传感器参数及位置如表 6-1。其中 I、II、III、IV 分别表示刚性基层不设置钢筋网、距基层底 3cm 加钢筋网、距基层顶 7cm 加钢筋网、及加双层钢筋网的情况。

山东大学硕士学位论文

表 6-1 传感器参数表及位置表

序号	中心波长 (nm)	埋设纵向 位置 (桩号)	试验段	埋设横 向位置	传感器 放置 方式	传感器 类型
1-1	1533.248	K28+620	I	外侧车道 轮迹线	横向	应变 传感器
1-2	1537.391	K28+620.4	I	外侧车道 轮迹线	纵向	应变 传感器
1-3	1557.470	K28+621	I	外侧车道 轮迹线		温度 传感器
1-1'	1533.932	K28+640	I	外侧车道 轮迹线	横向	应变 传感器
1-2'	1543.197	K28+640.4	I	外侧车道 轮迹线	纵向	应变 传感器
1-3'	1550.938	K28+641	I	外侧车道 轮迹线		温度 传感器
2-1	1533.729	K28+680	II	外侧车道 轮迹线	纵向	应变 传感器
2-2	1550.397	K28+700	II	外侧车道 轮迹线	纵向	应变 传感器
2-3	1555.512	K28+701	II	外侧车道 轮迹线		温度 传感器
3-1	1537.598	K28+740	III	外侧车道 轮迹线	纵向	应变 传感器
3-2	1547.513	K28+760	III	外侧车道 轮迹线	纵向	应变 传感器
3-3	1554.131	K28+761	III	外侧车道 轮迹线		温度 传感器
4-1	1554.722	K28+800	IV	外侧车道 轮迹线	横向	应变 传感器
4-2	1559.407	K28+800.4	IV	外侧车道 轮迹线	纵向	应变 传感器
4-3	1563.752	K28+801	IV	外侧车道 轮迹线		温度 传感器
5-1	1550.971	K28+850	V	外侧车道 轮迹线	横向	应变 传感器
5-2	1559.234	K28+850.4	V	外侧车道 轮迹线	纵向	应变 传感器
5-3	1561.731	K28+851	V	外侧车道 轮迹线		温度 传感器

6.4.3 检测结果分析

分别以在标准轴重、超载 30%和超载 60%的情况下，对试验路进行了现场检测，检测结果如表 6-2。

表 6-2 基层底最大拉应变检测值

试验段		I	II	III	IV
横向应变 /10 ⁻⁵	bzh	1.160			坏掉
	cz30%	1.618			
	cz60%	2.002			
纵向应变 /10 ⁻⁵	bzh	1.567	1.420	1.184	0.875
	cz30%	2.027	2.156	1.957	1.160
	cz60%	2.476	2.524	2.365	1.441

将标准荷载作用下传感器实际测量的数据与采用有限元分析的对应工况的基层层底最大拉应变进行比较，列于表 6-3。

表 6-3 基层层底最大拉应变检测值

试验段		I	II	III	IV
横向应变 /10 ⁻⁵	实测值	1.160			
	计算值	1.214			
纵向应变 /10 ⁻⁵	实测值	1.567	1.420	1.184	0.875
	计算值	1.862	2.156	1.828	1.631

应变/E-5 □ 横向实测 ■ 横向计算 □ 纵向实测 □ 纵向计算

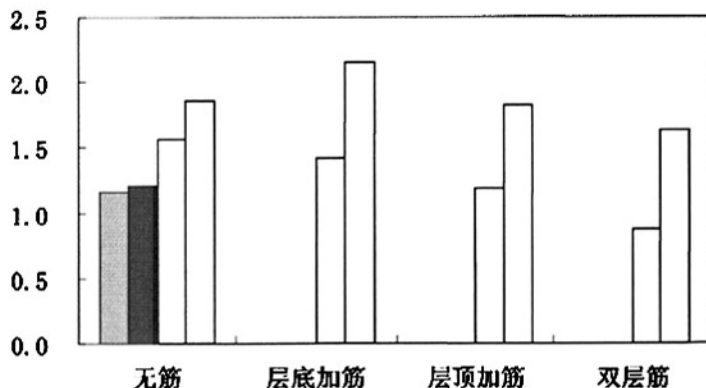


图 6-8 基层层底最大拉应变比较

由表 6-3 和图 6-8 可知，计算值和实测值基本都在 $10\mu\epsilon$ 数量级内，其计算值普遍比实测值要大 20%左右。可以认为两者符合度较高，同时也很好的验证了数值计算的准确性，为相关问题的数值模拟提供了较好的借鉴经验。

6.5 小结

1.分析了再生集料水泥混凝土基层不同使用阶段的温度应力,对其内部缩缝的设置,包括接缝设置的条件、接缝间距等问题进行探讨,并推荐再生集料水泥混凝土不同使用条件下的合理切缝间距。

2.在应力分析的基础上,初步探讨再生集料水泥混凝土基层沥青路面设计方法。根据试验路调查及国外使用经验,配置钢筋网的混凝土基层破坏的主要形式为钢筋拉断。分析知,温度荷载为配置钢筋网的混凝土基层使用前期破坏的主要因素,车辆荷载为其后期破坏的重要因素。

3.为检验有限元计算结果的有效性,在不同试验路段上埋设光纤光栅传感器来测定新加铺刚性基层层底拉应变,通过现场检测和结果分析发现,计算值和实测值两者符合度较高,验证了数值计算的准确性。

第七章 结论和展望

7.1 结论

(1) 提出了将大修中半刚性基层铣刨料再生做刚性基层的沥青路面结构, 通过建立三维有限元模型, 确定模型的网格划分尺寸和结构的临界荷位。

(2) 通过对再生集料水泥混凝土刚性基层在不同使用阶段的温度应力分析, 探讨了其内部缩缝的设置, 包括接缝设置的条件、接缝间距等问题, 推荐出再生集料水泥混凝土基层在不同使用条件下的合理切缝间距。

(3) 再生集料水泥混凝土刚性基层的切缝间距由温度应力决定。铺筑沥青面层后, 基层的温度梯度较小, 温度翘曲应力大幅减小, 外界温度场的变化对再生集料刚性基层温度应力的影响较小, 再生集料刚性基层的横缝间距由养护期末的极限降温控制。再生集料刚性基层所受到的纵向最大温度应力随切缝间距的增大而显著增大, 再生集料刚性基层的横向切缝间距以不超过 15m 为宜。

(4) 提出了低配筋率钢筋网混凝土刚性基层的概念, 建立了钢筋网混凝土基层荷载应力简化模型, 分析了再生混凝土基层沥青路面的荷载应力。得到标准行车荷载和超载情况下, 再生集料刚性基层沥青路面结构的受力情况及应力应变变化规律。通过三维有限元计算标准荷载和超载作用下不同配筋刚性基层结构的应力应变, 确定不同钢筋网方案对刚性基层结构受力的影响, 预测不同基层结构沥青路面的疲劳寿命, 确定设置钢筋网的作用, 钢筋网的设置位置和配筋率等。

(5) 分析混凝土基层上覆沥青面层路面结构的温度梯度, 利用三维有限元模型, 得到路面结构的温度场; 并计算分析了混凝土基层沥青路面的温度应力及耦合应力。得到该路面结构的温度应力分布规律; 比较不同加筋情况对路面结构受力的影响。研究认为, 一年中温度骤降 15 摄氏度的天气极少, 不像车辆荷载那样每天都有几千次, 如果将温度荷载和车辆荷载一起产生的耦合应力作为计算路面结构疲劳寿命的依据, 是不合理的。温度荷载为配置钢筋网的混凝土基层使用前期破坏的主要因素, 车辆荷载为其后期破坏的重要因素, 应分别予以考虑。

(6) 根据刚性基层沥青路面复合式结构的具体要求, 进行再生集料刚性基层沥青路面结构组合设计。针对刚性基层沥青路面的特点, 综合考虑施工、防止反射裂缝等因素, 结合工程实践和理论计算, 推荐出基于原大修高速公路路面结构

的合理的刚性基层沥青路面结构及面层、基层厚度。并给出混凝土基层沥青路面的结构设计步骤与设计实例。

(7)为检验有限元计算结果的有效性,在不同试验路段上埋设光纤光栅传感器来测定新加铺刚性基层层底拉应变,通过现场检测和结果分析发现,计算值和实测值两者符合度较高,验证了数值计算的准确性。

7.2 创新点

1. 提出适用于高速公路半刚性基层沥青路面大修的路面结构设计方法。
2. 再生集料刚性基层构造技术。

对再生集料刚性基层不同缩缝间距、不同钢筋网配制方式进行荷载应力、温度应力数值模拟计算;并通过铺筑试验路进行结构性能的跟踪检测,以确定刚性基层的配筋技术、板块尺寸和横缝间距。提出抑制刚性基层沥青路面结构反射裂缝的关键技术。

3. 得到再生集料混凝土刚性基层的疲劳方程。

7.3 展望

开展再生集料刚性基层的沥青路面结构研究具有重要理论意义和实用价值,目前由于条件所限仍有一些问题需进一步研究,概括起来主要有:

1. 刚性基层上沥青面层的工作特性、受力分析和结构设计方法尚需深入研究;
2. 沥青路面反射裂缝问题是道路界长期面临的一大技术难题,对于刚性基层沥青路面防裂措施的应力吸收层,其防裂机理与材料组成有待进一步研究;
3. 刚性基层沥青路面是一种全新的耐久性沥青路面结构,其试验路使用效果尚需进行较长时期的观测观察。

参考文献

- [1] 薛明, 谢昭彬, 金辉煌等. 厂拌冷再生技术在旧沥青路面改造中的应用[J]. 公路交通科技, 2008 (6): 03-06.
- [2] 肖盈. 沥青路面冷再生技术的应用及发展[J]. 公路交通技术, 2008(5): 52-56.
- [3] 张超. 废弃混凝土路面板在道路改建中的再利用. 交通运输工程学报, 2003, 3 (4) 5-9.
- [4] 李征. 再生集料在道路基层中的应用[J]. 山西建筑, 2006,32 (3): 168-169.
- [5] 刘伟. 贫混凝土基层混凝土路面结构设计研究. 长安大学硕士学位论文, 2003.
- [6] 郑木莲. 多孔混凝土排水基层研究. 长安大学博士学位论文, 2004.
- [7] 马庆雷. 基于刚性基层的耐久性沥青路面结构研究. 长安大学博士学位论文, 2006.
- [8] K.K.Sagoe-Crentsil. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. Cement and Concrete Research. 31(2001)707-712.
- [9] Andrzej.Ajudukiewicz and Alina.Kliscewica. Influence of recycled aggregate on mechanical properties of HS/HPA. Cement and Concrete Composites. 2002, 24(2):269-279.
- [10] Vivian.W.Y.Tam. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. Cement and Concrete Research. 2004.
- [11] Roumiana Zaharieva. Frost resistance of recycled aggregate concrete. Cement and Concrete Research. 34(2004) 1927-1932.
- [12] 侯劲汝, 张继疆, 赵紫苓. 道路再生混凝土基本性能的探讨[J]. 养护机械与施工技术, 2007 (8): 30-33.
- [13] 张亚梅. 再生混凝土配合比设计初探. 混凝土与水泥制品, 2002 (1): 7-9.
- [14] 张学兵, 邓寿昌. 再生混凝土单位体积用水量的试验研究[J]. 混凝土, 2004 (10) 38-40, 64.
- [15] 杜婷, 李惠强, 吴贤国. 混凝土再生骨料强化试验研究. 新型建筑材料, 2002 (3): 6-8.

- [16] 胡玉珊,邢振贤. 粉煤灰掺入方式对再生混凝土强度的影响. 新型建筑材料, 2005 (5): 26-27.
- [17] 张超,丁纪忠,郭金胜. 废弃水泥混凝土再生集料在半刚性基层中的应用[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002,22 (5): 1-4.
- [18] 钱璞, 辛斌科, 田建文. 榆林地区沥青路面推移病害原因分析和处治对策研究. 公路工程与交通, 2006 (1) 147-151.
- [19] 李娜, 高景伟, 董欣焯. 沙漠地区公路的主要病害及养护新工艺. 公路工程与交通, 2006 (10) 119-121.
- [20] Leonhard B E, Chang P. Potential gains through welded wire fabric reinforcement [J]. Journal Of Construction Engineering and Management, 1992, 118(2):244-257.
- [21] Andrew G, William C D, Denis M. Tests to determine performance of deformed welded wire fabric stirrups [J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(2):211-220.
- [22] 牛开民, 于建荣, 陈荣生. 碾压混凝土路面横向缩缝间距的研究[J]. 公路交通科技, 1997, 14 (1)
- [23] 日本道路协会. 碾压混凝土路面施工技术指南(草案), 1990. 5
- [24] 美国混凝土协会 325 委员会. 碾压混凝土当前工艺水平报告, 1995
- [25] 胡长顺、王秉纲等, 复合式路面设计原理和施工技术[M], 人民交通出版社, 1999.
- [26] 孙家伟. 贫混凝土基层混凝土路面研究[D]. 西安: 长安大学, 2001.
- [27] 郑木莲. 水泥混凝土路面多孔混凝土基层的接缝间距[J]. 中国公路学报, 2007, 20 (4) : 25-30
- [28] 中华人民共和国行业标准. 公路水泥混凝土路面施工技术规范 JTG F30-2003 [S]. 北京: 人民交通出版社. 1993
- [29] 邓学钧, 陈荣生等, 刚性路面设计[M], 人民交通出版社, 2005.
- [30] 严作人, 层状路面体系的温度场分析, 同济大学学报, Vol.3,1984.
- [31] 嘉木工作室编著. ANSYS 5.7 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工程出版社, 2002. 3
- [32] 中华人民共和国行业标准. 公路水泥混凝土路面设计规范 JTG D40-2003[S].

北京：人民交通出版社. 2002.

[33] 潘晓久, 碎石基层半刚性路面温度应力分析[J]. 安徽建筑, 2004, 06: 95-96.

[34] 杨学良, 刘伯莹. 沥青路面温度场与结构耦合的有限元分析[J]. 公路交通科技, 2006, 23(11):1-4.

[35] 李超华, 钱国平, 吴东强. 旧水泥混凝土上沥青罩面层温度应力分析[J]. 公路交通技术. 2004, 10(5):41-45.

[36] 邓学钧编著. 路基路面工程[M]. 北京：人民交通出版社, 2005. 8

[37] 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例[M], 中国水利水电出版社, 2004.

[38] Asphalt Institute. Thickness Design Asphalt Pavement for Heavy Wheel Loads (MS-23), 1986.

[39] 徐予生. 光纤传感器技术手册[M], 北京：电子工业出版社, 1987.

[40] 姚学亮. 沥青类路面结构力学响应与检测技术研究[D], 山东大学硕士学位论文, 2007.

致谢

本论文是在导师姚占勇教授的悉心指导下完成的。在论文完成之际，首先向我敬爱的导师表示我由衷的感谢和最诚挚的敬意！

三年来姚老师对我学业上严格要求，生活中关怀备至，并为我提供了优良的学习和工作环境，使我能够不断取得进步，获取新知，顺利地完成学业。导师渊博的知识、严谨的治学态度，高度的责任心和敬业心以及谦逊的人格，深深的感染了我，使我受益匪浅。

本论文的顺利完成，离不开各位老师、同学、朋友的关心和帮助。在此感谢商庆森教授和刘树堂教授在七年的大学生活中给予我的诸多帮助和关心；在此论文完成期间，崔新壮教授、张洪波博士和孙仁娟博士给与了我不厌其烦的指导，提出了很多宝贵意见，从他们身上，我学到了严谨细致的治学境界和一丝不苟的科研精神，在此向崔老师、张老师和孙老师表示真诚的谢意；试验期间，于孝清、马国梁和赵志广老师给了我科学的指导，在此表示深深的谢意！

论文进行期间，诸位同窗同门给了我力所能及的帮助，特别感谢郝连娟师姐、姚坤、牛伟同学和赵永峰师弟的无私的帮助，感谢与“再生集料刚性基层沥青路面结构性能研究”有关的所有人员，在此向他们表示诚挚的感谢！

感谢我的父母和哥哥，是他们的理解和支持能够使我在学校期间专心完成学业。感谢我的男朋友在生活上给了我无私的照顾和帮助！

感谢关心、支持、帮助过我的所有人！感谢文中所引用文献的编、著、译者！