

摘 要

在调查了国内多条高等级水泥混凝土路面使用状况后,发现温度变化和层间滞留水是造成水泥混凝土路面使用寿命减短的重要原因。为此,进行了贫混凝土基层混凝土路面层间作用机理及处治技术研究,以减少或避免温度变化和层间滞留水对路面的破坏,从而提高水泥混凝土路面的使用寿命。

针对温度变化对路面使用性能的影响,展开层间作用机理研究,发现层间界面层在温度变化下必然产生断裂破坏,得到层间过渡层断裂破坏后的层间接触模型;研制了现场层间推移试验仪器,进行层间界面层的应力和应变试验,得到层间界面层断裂破坏后的层间界面参数;展开层间力学特性研究,分别进行面板无温度翘曲变形和翘曲变形下的路面应力应变计算,得到层间最佳的接触参数,指出基层表面需磨光处理。由于基层表面大面积磨光处理既不经济,也不现实,故提出层间设置柔性隔离层,进行柔性隔离层下的路面应力应变计算,得到层间隔离层较佳的厚度和刚度范围,然后与层间不设隔离层比较后,指出层间宜设置隔离层,以改善路面的受力特性。

针对层间滞留水对路面使用性能的影响,开发了适合柔性隔离层的冲刷试验仪,进行稀浆封层、微表处和沥青混凝土等的冲刷试验,发现沥青混凝土的抗冲刷性能相对较好。

综合温度变化和层间滞留水对水泥混凝土路面层间性能的影响,得到具有排水防裂性能,且厚度为 1cm、刚度为 900MPa 的隔离层为最佳的层间材料,提出了最佳层间材料的结构模型。

关键词: 水泥混凝土路面 贫混凝土基层 层间作用机理 层间界面层
层间试验 摩尔-库仑模型 层间力学特性
隔离层冲刷性能 透水滤浆隔离防裂层

Abstract

After the investigations on the using condition of several domestic highway surfaces made up of cement concrete, we found that that it is temperature variation and remained water between layers that are causing the service life of the highway surfaces to be reduced. Therefore, we have been researching on the action mechanism as well as the handling technology between the lean cement concrete base and the cement concrete pavement so as to reduce or avoid the destructiveness of the highway surface made by temperature variation or the remained water between levels and then to prolong the service life of the cement concrete highway pavement.

The research on the interlayer action mechanism is started based on how temperature variation influences on the using function of the pavement, so that it is found that break destruction will happen to the boundary layers between levels inevitably and then the level contacting modals of level transitional layer; We developed the scene level passing testing instrument with which we have done the experiment of level boundary layer's stress and strain, then we got the parameter of level boundary layer whose level transitional layer has been broken and destructed; And then started the special research on level mechanics by carrying on kneading board non-temperature warping distortion as well as by computing the stress and strain abilities of highway pavement with warping distortion to get the best contact parameter of levels and point out that the lean cement concrete base surface need polish processing. It is uneconomical and impractical to polish most of the base surface, so we suggest establishing flexible insulating layers between levels and computing the stress and strain of the pavement with flexible insulating layers to get better scopes of thickness and rigidity of level isolation layers, then clearly, it is good to establish isolation layers to improve the stress characteristic of pavements by comparing with those levels without isolation layers.

With the influence on operational performance made by the remained water between layers, we developed a kind of washing out testers which fit for the flexible isolation layers with which we can carry on washout experiments of slurry seal course, micro surfacing and asphalt concrete, then the result is that the anti-washout function of asphalt concrete is relatively better.

Above all, according to the fact that the temperature variation and the remained water between levels influence on the function of the highway pavement made by cement concrete, we found that the best level material is a type of isolation level which is 1cm thick and 900MPa rigid with function of draining water and anti-cracking while mentioned the best structural modal of level material.

Key Word: cement concrete pavement lean cement concrete base

interlayer action mechanism boundary layer interlayer test

Mohr-Coulomb model interlayer mechanics washout experiment

material with draining water and anti-cracking

论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：吴超凡 2009 年 1 月 / 日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：吴超凡 2009 年 1 月 / 日
导师签名：王军刚 年 月 日

第一章 绪论

1.1 研究的目的和意义

随着我国经济实力的不断增强,公路建设得到了前所未有的高速发展,特别是改革开放后,我国开始建设一级公路和高速公路,各级公路的总里程均大幅度增长。如 1978 年前我国无一级公路和仅有少数二级公路,1985 年我国仅有 400km 一级汽车专用公路和 21200km 二级公路^[1],1985 年之后,我国公路建设就进入了一个跨越式高速发展的阶段。

截至 2007 年年底^[2],全国公路总里程达 358.37 万公里,等级公路里程 253.54 万公里,占公路总里程的 70.7%,高速公路 5.39 万公里(高速公路的总里程跃居世界第二位),一级公路 5.01 万公里,二级公路 27.64 万公里,形成四通八达的公路网,从而极大地推动我国经济的发展。

截至 2007 年年底^[2],全国有铺装路面 125.03 万公里,其中沥青混凝土路面 40.16 万公里,水泥混凝土路面则达到 84.88 万公里。由于重载车辆、路面结构内和结构外排水不畅、路面结构组合仍待优化等原因,导致我国的水泥混凝土路面和沥青混凝土路面均出现较为严重的早期破坏。如一级和高速公路水泥混凝土路面的设计年限为 30 年,然而实际使用寿命很少超过 10 年,国道 107 广东某段一级公路水泥混凝土路面于 1997 年建成通车,2005 年初局部路面大修,2006 年全线进行升级改造,实际使用不到 10 年就开始大修或改造;广西某高速公路水泥混凝土路面 1997 年建成通车,2006 年开始路面大修,实际使用 10 年后就开始加铺改造。

然而国外某些国家的水泥混凝土路面使用了 50~60 年,路面状况仍比较好,如比利时首都布鲁塞尔南部的一条水泥混凝土路面使用 67 年后,路况仍然较好^[3];德国柏林至慕尼黑高速公路水泥混凝土路面,上个世纪三十年代建成通车,使用 50 多年后路况仍然较好^[4]。

大量的研究成果和国内多条高速公路的调查结果表明^[5,6,7,8,9,10,11,12,13],温度变化和滞留在路面结构层内的水是造成我国水泥混凝土路面破坏的重要因素。

温度变化引起水泥混凝土面板的胀缩和翘曲变形,面板胀缩和翘曲变形受到基层与面层之间界面层限制,从而在基层与面层之间产生温度应力,一旦温度应力大于层间的约束应力,那么,基层与面层之间的层间界面层将产生断裂破坏,

从而在基层与面层之间形成微细空隙；层间界面层断裂破坏后，面板胀缩和翘曲变形变得较为自由，温度升高时，水泥混凝土面板、接缝填缝料膨胀，缩缝、胀缝缝隙宽度变窄，填缝料变软，一旦移出的填缝料被车辆轮胎粘结带走，那么接缝填缝料将缺损，温度降低时，水泥混凝土面板、接缝填缝料收缩，缩缝和胀缝缝隙宽度变大，填缝料变脆，可能引起填缝料断裂或与缝壁脱离，从而为地表降水进入基层与面层之间提供通道；层间界面层断裂破坏后，水泥混凝土面板在温度梯度作用下产生翘曲，由于半刚性或刚性基层刚度较大，翘曲面板的四个角顶处基层难以产生沉降，造成面板与基层的部分脱空，为地表降水进入基层与面层之间提供通道。

由于基层与面层之间没有排水通道，造成进入基层与面层间的水长期滞留在结构层内，在行车荷载作用下水分迁移，同时产生水压力，在压力水作用下，水分通过微裂缝向基层材料内部渗透，自由水的存在减短半刚性或刚性基层材料微裂缝区尖端的韧带高度，孔隙水的存在减弱韧带的作用，从而降低半刚性或刚性基层材料的断裂能，加速基层的疲劳破坏^[14,15,16,17,18]。

在面板胀缩、翘曲变形和动水压力作用下，基层表面会产生磨损。基层表面磨损后，在动水压力形成的拖曳力作用下，颗粒被搬动，从接缝驰离端搬运至接缝驰入端，导致驰入端抬起，驰离端沉陷，形成典型的路面错台^[14, 15]。部分被搬动的颗粒从接缝处挤出，造成面板底面脱空，从而使水泥混凝土面板的使用寿命减短。

因此，改善基层与水泥混凝土面层之间的层间性能，减少层间界面层断裂破坏和层间脱空，减少地表降水进入层间结构内，提高基层的抗水冲刷性能或及时排除层间结构水，将减少水泥混凝土面板的早期破坏和提高水泥混凝土路面的使用寿命，其具有非常重要的经济和社会意义。

为此，本文将重点研究贫混凝土基层与水泥混凝土面层的层间处理技术，旨在减轻温度变化对水泥混凝土路面的影响，减少进入层间的结构水对基层和隔离层的损坏等，从而防止水泥混凝土面板的早期损伤或损坏，提高水泥混凝土路面的使用寿命，以指导清连一级公路升级改造（高速）工程两百余公里路面加铺设计和路面施工控制，并为其它类似工程的设计与施工提供参考。

1.2 国内外研究现状及分析

1.2.1 层间相互作用研究现状及分析

贫混凝土基层与水泥混凝土面层的层间相互作用研究, 吴国雄、易志坚等^[19,20,21,22,23,24,25,26]认为: 由于基层表面凹凸不平和基层基体材料存在空隙, 面板浇筑时水泥砂浆极易渗入基层, 从而在基层与面层之间产生界面层。路面混凝土凝固初期, 界面层将基层与面层紧紧结合在一起, 几乎成为一体。随着时间的推移, 基层和面层各自的弹模、泊松比和强度以各自不同的速度在增长, 同时面层水泥混凝土逐渐凝结, 混凝土将产生收缩变形和周期性的温度变形, 在面板横缝切割后面层与基层之间存在不等量变形, 将导致本来融为一体的基层、界面层和面层沿界面层开裂和破坏, 造成面层与基层分离, 且分离界面处于一种非光滑的凸凹不平状态。

层间界面层的断裂引起面板的损伤或损坏, 文献^[19, 21,27,28,29,30,31]从断裂力学、损伤力学和路面疲劳破坏的基本原理出发, 得出了混凝土面板开裂破坏有3个阶段, 分别为初始薄弱层(层间界面层)的形成和微裂缝的产生阶段; 板中微裂纹的生成及其与板底微裂纹的连通阶段; 最后疲劳荷载的作用, 导致面板裂缝上下贯通, 使路面产生断裂破坏阶段。

按断裂力学原理, 水泥混凝土路面的疲劳破坏过程分为两个阶段, 即路面完好无损至板底表面形成明显的裂纹阶段和裂纹扩展至路面板完全断裂阶段, 并且第一阶段通常占材料总寿命的80%, 裂缝扩展至面板完全断裂所需的循环作用次数仅20%^[21,27,32]。然而, 在确定混凝土路面的疲劳强度时, 人们往往都是基于经典的应力—寿命法, 却对萌生裂纹的循环作用次数和使这一裂纹扩展到突然破坏的疲劳次数不加区分^[21]。

易志坚等^[21, 27,33,34,35,36,37]采用断裂力学有关原理, 并进行相关室内试验: 指出半刚性基层水泥混凝土路面的层间接触形式并非规范中假定的光滑接触模型, 而是层间具有巨大的抗剪切强度, 该剪切应力极大地阻止了混凝土面板的自由收缩和温度变形。肖益民等人^[38,39,40]在室内二灰碎石基层和水泥稳定基层上成型了C35混凝土, 测定了层间第一次断裂破坏和层间破坏后的水平推移应力和应变, 结果表明: 层间第一次断裂破坏需要克服相当大的阻力(粘结力), 而在层间界面层破坏后, 只需克服很小的阻力(滑动摩擦力)就能使面板移动, 且面板

与基层接触界面破坏后,面板在半刚性基层上滑动时的摩擦系数大于6.0。赵炜诚等^[41,42,43,44]人认为混凝土面层与贫混凝土基层之间的结合面是这个路面体系中的一个薄弱环节,其界面剪切和粘结强度都低于两侧的混凝土强度,并从微观角度定性地分析界面作用的本质和影响因素。

为了消除层间界面层对路面使用性能的影响,文献^[23, 45,46,47,48]建议层间设置隔离层或隔离剂,以消除层间相互粘结,避免层间界面层断裂破坏而造成面板的损伤或开裂。国内湖南某高速公路,在半刚性基层与水泥面板之间增设透层沥青,基层与面层因憎水性沥青薄膜的存在,部分隔断基层与面层的连接,通车运营5年后未发现基层唧浆,板底脱空等现象,路面使用性能较好^[49,51,52,53]。傅智^[49]认为,基层与面层之间增设柔性夹层,不但可以缓冲车辆冲击和振动,提高行车舒适性,而且可减少基层表面温度、湿度变化对面板的影响。

国外针对半刚性基层或刚性基层水泥混凝土路面的层间作用机理研究较少,他们主要通过工程实践,总结出层间应采取的结合形式。如德国的水泥混凝土路面,基层严格按照混凝土面层的横向和纵向缩缝锯切对应的缩缝,然后拉毛贫混凝土基层表面,随后铺筑水泥混凝土面层,旨在加铺后的水泥混凝土面层与贫混凝土基层完全连接为一个整体,采用该层间处理形式和路面结构的柏林至慕尼黑高速公路,通车运营了50余年后路况仍比较好^[4]。然而,美国部分州则采用基层与面层分离的界面形式,在贫混凝土基层强度达到设计要求后,若基层表面粗糙,则采用磨光机磨光基层表面,随后喷洒憎水性薄层乳化蜡,使基层与面层完全分离,路面使用寿命也较长^[43,54,55,56,57,58]。比利时在贫混凝土基层上直接加铺水泥混凝土面板,观测结果表明,面板开裂和基层冲刷较严重,而在贫混凝土基层与水泥混凝土面层之间增设6cm 沥青混凝土层后,面板开裂明显减少,路面使用性能明显改善^[3]。

国内的研究现状表明,半刚性基层或刚性基层水泥混凝土路面层间存在界面层的观点是一致的,然而界面层的强度是否低于面层和刚性基层或半刚性基层,没有具体的试验数据,仅是理论推断;层间界面层的强度随着水泥龄期的增长是如何变化的,目前还处于探索阶段;层间界面层断裂破坏后,温度变化引起层间相互作用和层间接触形式又是如何,也是处于探索阶段。

国外的研究现状表明,贫混凝土基层水泥混凝土路面采用层间加固(如德国)

或层间分离（如美国），水泥混凝土路面的使用寿命均较长，而介于层间加固与层间分离的路面结构（如比利时），路面破损较为严重，使用寿命较短，但在贫混凝土基层与水泥混凝土之间增设沥青混凝土柔性隔离后，路面使用寿命较长（如比利时）。

因此，分析贫混凝土基层与水泥面板的层间作用形式，揭示层间相互作用机理，通过现场试验验证或修正层间作用机理，从而指出不同层间处理措施的边界条件，结合已有工程的成功经验和失败教训，进行层间处理措施试验和比较，提出经济合理的层间处理方法，显得尤为必要。

1.2.2 层间相互作用力学研究现状及分析

为了比较不同层间处理措施对路面受力的影响，需展开层间相互作用的力学特性研究。鉴于贫混凝土基层的刚度大、板体性好，在其上加铺水泥混凝土面层，路面结构可模型化为弹性地基上由基层和面层组成的双层板^[59,60,61]。文献^[62,63,64,65]分析了双层板的层间结合形式，并给出了层间结合式、层间分离式和层间部分结合式模型的应力和位移公式。

层间结合式双层板的荷载应力计算，将双层混凝土板换算为等刚度的单层板，然后计算下层板的荷载应力和温度应力；层间分离式双层板的荷载应力则分别计算上层板和下层板的荷载应力，但仅考虑上层板温度应力，总应力值为荷载应力和温度应力之和。然而分离式双层板在温度翘曲和轴载共同作用下，上层板的总应力并不是分别计算翘曲应力和荷载应力之后的简单叠加^[59, 66]。文献^[45,67,68]研究表明，面板翘曲时，水泥混凝土面板可能仅部分与基层完全接触，部分与基层分离，在路面行车荷载作用下，现场实测面板底面的拉应力远大于温度应力和荷载应力的简单叠加。

水泥混凝土面层在温度变化时产生胀缩变形，若贫混凝土基层限制了水泥混凝土面层的变形，则在基层与面层之间产生剪切应力，该剪切应力为一对大小相等、方向相反的作用力与反作用力。由于贫混凝土基层与水泥混凝土面层的强度差异，两者弹性模量的不同，故在相同的层间剪切应力作用下，层间的位移将不一致，可得贫混凝土基层直接铺筑在水泥混凝土面层上，层间接触形式为满足古德曼（Goodman）模型的部分结合式^[62,69,70]。

部分结合式古德曼模型的结合系数介于 $0 \sim \infty$ 之间，层间的剪切应变难以测

得,因此,古德曼模型仅是一个理论模型,难以指导工程实际,且难以测定层间的结合系数。因此,设计规范^[71]仅提供了结合式和分离式双层混凝土板的荷载疲劳应力与温度疲劳应力的计算公式,而没有给出层间部分结合式的计算公式。

部分结合式模型的荷载应力计算,除了采用古德曼模型外,目前还有采用摩擦模型、弹簧模型或摩擦-弹簧模型进行力学计算。摩擦模型描述界面上的受力状态,为层间分离后的层间接触模型;弹簧模型描述平面状弱界面的变形特性,用法向刚度和切向刚度来描述弹簧层顶部与底部力学量之间的关系,模拟层间的压缩和剪切变形。如Totsky^[41, 72]在1981年提出了将多层路面体系模型转化为由板单元和弹簧单元交替组成的体系,板单元模拟体系的弯曲,而弹簧单元模拟体系中的层间相互压缩。Khazanovich等^[41, 73]在此基础上构建了8节点24个自由度的单元,上面4个节点置于上层板的中轴,而下面4个节点则置于下层板的中轴,一组层间弹簧联系上下两层板,其弹簧刚度取决于上下两层板的竖向压缩性质:

$$\left. \begin{aligned} S_t &= \frac{1}{\frac{1}{S_u} + \frac{1}{S_l}} \\ S_u &= \frac{2E_1(1-\mu_1)}{h_1(1-\mu_1-2\mu_1^2)} \\ S_l &= \frac{2E_2(1-\mu_2)}{h_2(1-\mu_2-2\mu_2^2)} \end{aligned} \right\}$$

式中: S_u 、 S_l ——分别考虑上层板和下层板压缩的弹簧刚度;

h_1 、 E_1 、 μ_1 ——上层板的厚度、弹性模量和泊桑比;

h_2 、 E_2 、 μ_2 ——下层板的厚度、弹性模量和泊桑比。

采用此模型,还可以分析上、下层之间设置夹层的情况。夹层的作用如同在层间设置一组弹簧。如果夹层材料的弹性模量为 E_b ,则夹层弹簧的刚度便可定义为:

$$S_b = \frac{2E_b(1-\mu_b)}{h_b(1-\mu_b-2\mu_b^2)}$$

式中: h_b 、 E_b 、 μ_b ——夹层的厚度、弹性模量和泊桑比。

包括夹层在内的层间弹簧刚度 S_i 则为:

$$S_i = \frac{1}{\frac{1}{S_u} + \frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_b}}$$

与上述等刚度单层板计算方案相比,这一计算模型既可考虑上层和下层板的压缩作用,也可考虑层间设置不同材料组成的夹层对双层板挠度和应力的影响,该模型提出了界面法向刚度的计算方法。赵炜诚等人^[41]借鉴上述思路,提出了界面处的切向刚度,并通过计算得出切向刚度的计算方法。

余定选^[74]提出了在上层和下层板之间设置8个节点24个自由度的夹层单元模型,考虑竖向刚度系数和切向刚度系数两个部分,前者为上下两层间产生单位竖向位移差的法向应力,后者为产生单位水平位移差的剪应力。这一模型可用于分析设置夹层对双层板挠度和应力的影响,但它没有考虑上层和下层的压缩作用。

采用弹簧模型虽然可以计算部分结合式双层板的荷载应力,然而由于弹簧模型的法向刚度和切向刚度测定较为麻烦,也只能作为一种理论方法,难以指导工程实际,兼之在贫混凝土基层与水泥混凝土面层之间存在界面层,该界面层厚度很薄,难以测得界面层的强度,进而给弹簧模型的计算结果带来较大的误差。

部分结合式双层板的温度应力计算模型,基本上均假定双层板紧密接触,面板的翘曲变形由板体自身重量和地基约束来平衡,如谈至明、姚祖康^[75, 76, 77, 78, 79, 80, 81]导出不同层间结合状况下由层间变形协调条件引起的层间约束应力的计算通式,分析板间约束应变的特性,并给出其计算公式。然而混凝土板在温度梯度作用下产生的翘曲变形,首先可能损坏贫混凝土基层与面层之间的界面层,其次是面板与贫混凝土基层出现部分脱空。为了消除部分脱空造成计算结果与实际应力的差别,文献^[59]将地基与面板的脱空量,修正为紧密接触,然后采用迭代法,进行应力计算,最后将荷载应力和温度应力进行简单叠加。

就力学模型而言,水泥混凝土路面属于弹性地基板三维连续体系。只有经过一系列简化假定和复杂的数学推演,才能建立以解析法为基础的应力分析方法。在求解微分方程和变形连续方程的解析解时,以轴对称弹性空间的一般解为基础,把平衡微分方程转换成为贝塞尔(Bessel)微分方程,利用汉克尔积分变换法,

导出应力和位移分量的一般表达式^[82]。

弹性地基板理论的研究虽已有百年历史, 挠度和应力的解析解^[82, 83]却主要局限于无限大板的情况, Winkler地基上矩形板的解析解近年才出现。Westergaard的板中、板边和板角应力计算公式, 长期以来得到路面界的广泛采用, 但其板边公式也仅在十几年前才得到确证, 而板角公式至今尚无严密的论证。这种应力分析法无法反映许多工程结构中的实际问题, 具有一定局限性。

随着有限元分析方法和计算机技术的发展, 各种复杂边界条件下弹性地基板的荷载应力和温度应力都可得到满意的数值解, 为混凝土路面结构分析提供了强有力的工具。黄仰贤与邓学钧通过简化方法或迭代方法, 将有限元分析范围扩大到由若干块板组成的多板系统。

国内外研究现状表明, 首先双层板的温度应力计算和荷载应力计算是相对独立的, 即面板受到的应力是温度应力和荷载应力的简单叠加, 此与实际情况不尽相同; 其次, 目前的层间接触形式和结合系数比较理论化, 难以指导工程实际; 第三、随着有限元分析方法和计算机技术的发展, 复杂边界条件下的弹性地基板荷载应力和温度应力都可得到满意的数值解。

为此, 耦合双层板的温度应力和荷载应力, 建立能够反映层间结合形式的计算模型, 采用通用有限元软件, 计算各种复杂边界条件下的弹性地基板荷载应力和温度应力, 以指导工程实践, 具有非常重要的意义。

1.2.3 层间材料性能研究现状及分析

为了减少层间界面层的断裂破坏而损伤水泥面板, 在半刚性基层或刚性基层表面喷洒隔离剂(如乳化沥青), 铺筑塑料或土工布等卷材, 或铺筑沥青混凝土^[3, 19, 20, 71, 84]。为了排除进入基层与面层之间的层间水, 文献^[20, 22, 23, 85]提出在半刚性基层或刚性基层与水泥混凝土面层之间设置透水滤浆隔离层, 具体做法是: 在碾压找平后的基层表面铺设一层薄膜隔离层, 再在薄膜隔离层上铺设一丝网结合层, 再在薄膜隔离层上直接浇筑水泥混凝土面层。

贫混凝土基层与水泥混凝土面层之间增设柔性隔离层后, 由于隔离层连接贫混凝土基层和水泥混凝土面层, 面板胀缩和翘曲变形时, 一旦隔离层受到的拉应力和拉应变超过夹层材料的最大拉应力或拉应变, 隔离层将产生断裂破坏^[45]。

在层间设置隔离剂或隔离层后, 目前的研究主要集中在减少水泥混凝土面板

损伤等领域,以提高面板的使用寿命等^[21,22,23,24],而对隔离层本身性能的研究几乎空白,如隔离剂自身材料的技术要求、适用条件,及隔离层自身技术要求。

由于对层间隔离层材料的研究不够深入,造成未能充分认识工程实践中的成功经验或失败教训,如江苏某旧沥青路面在加铺水泥混凝土路面改造时,一个加铺方案是将水泥混凝土面层直接加铺在旧沥青路面上,另一个加铺方案则是在旧沥青路面上加铺半刚性基层后再加铺水泥混凝土面板。通车运营3年多后表明,增设半刚性基层的路面加铺方案,其破坏程度远大于未加铺半刚性基层的路面结构方案,其原因未见深入分析,未见在旧沥青混凝土面层上加铺水泥混凝土面层前,对旧沥青面层具体的技术要求。

因此,只有充分认识隔离层或隔离剂材料自身可能遭到的破坏,分析材料自身应具备的性能和适用条件,深入研究和比较不同隔离层或隔离剂的性能,才能找到或研制出经济合理的层间隔离剂或隔离层材料,从而减少或消除水泥混凝土路面的早期损坏,提高水泥混凝土路面的使用寿命,具有非常重要的社会和经济意义。

1.3 主要研究内容

综合国内外贫混凝土基层或半刚性基层与水泥混凝土面层层间相互作用研究现状,可以发现在层间界面层、层间隔离层材料等研究已取得了大量的成果,然而还有一些问题缺乏系统性研究,有一些问题还处于探索阶段,有一些问题尚未展开研究,归纳起来可分三点:

(1) 对层间相互作用机理缺乏系统研究,对层间界面层的强度及温度变化引起层间相对位移等还处于探索阶段,尚缺层间作用机理的验证或修正等研究;

(2) 尚缺乏层间结合状态的现场试验研究,层间设置柔性隔离层对水泥混凝土路面应力应变的影响还处于探索阶段;

(3) 对层间隔离层材料性能缺乏系统研究,未见层间隔离层材料的疲劳断裂破坏等系统性研究,未见不同隔离层材料的性能比较研究,及隔离层材料的抗冲刷性能等研究。

针对国内外研究的不足,拟分以下四个部分进行研究。

1.3.1 层间相互作用机理分析

将采用化学的有关原理,结合施工中的实际情况,分析层间界面层的特性;

分析导致层间界面层断裂破坏的主要因素和层间破坏的必然性,结合工程实体,分析面板在层间界面层破坏后因温度变化而引起基层与面层相对位移等;分析层间界面层破坏后,基层表面的构造深度影响层间界面性能以及基层表面的不均匀性对面板受力的影响等。

1.3.2 层间相互作用试验研究

为了验证水泥混凝土路面层间作用机理的部分结论,结合工程实体,对层间设置不同的隔离层或隔离剂等措施后,进行层间水平推移应力变形试验,并通过试验验证层间界面层的强度和厚度的研究成果,进行层间界面层断裂破坏后的层间试验,验证层间的接触模型,取得层间接触模型的材料参数。

1.3.3 层间力学特性研究

根据层间相互作用机理和相互作用试验的研究成果,建立贫混凝土基层水泥混凝土路面的层间接触模型,采用有限元法模拟该层间接触模型,按照层间设置隔离剂和隔离层两种形式,分析不同层间接触状态下的路面应力应变,计算层间不同隔离层厚度、刚度、基层切缝宽度等因素下路面的应力和应变,得到层间较佳接触参数,及隔离层较佳的厚度和刚度,为层间设置隔离剂、隔离层材料提供较佳的力学参数。

1.3.4 层间材料性能研究

分析面板温度变形与隔离层变形的协调性,得出层间隔离层将因面板温度变形而破坏;进行隔离层材料的抗冲刷性能试验,比较了常用隔离层材料抗冲刷性能的优劣性;根据层间隔离层材料的力学性能、抗冲刷性能等研究成果,提出层间透水滤浆隔离防裂层的结构模型和力学参数,指导层间隔离层材料的研制。

1.4 技术路线

因为温度变化和滞留在层间的结构水是造成水泥混凝土路面破坏的重要因素,所以将展开温度变化和滞留在层间的结构水对水泥混凝土路面层间性能的影响研究,研究的技术路线见示意图1-1所示。

水泥混凝土面层直接浇筑在贫混凝土基层上,层间必然产生界面层。为此,首先进行层间作用机理研究,分析温度变化而造成层间界面层的断裂破坏,研究因温度变化而引起的层间相对位移和层间脱空,分析层间界面层断裂破坏后的层间界面性能,指出层间位移造成层间脱空的原因;其次,模拟面板因温度变化而

胀缩变形的试验,分析层间界面层断裂破坏对面板强度的损伤,分析层间界面层破坏前后的应力和应变,得到层间接触模型和层间界面参数,为路面应力计算提供模型和参数,并验证层间作用机理的部分结论;第三,温度变化引起面板翘曲变形,采用有限元法,计算翘曲面板和无翘曲面板的路面应力和应变,分析层间不同结合参数下路面的应力和应变,提出层间最佳的界面参数范围和适用条件;而在采用隔离剂无法调整层间界面参数时,提出在层间设置柔性隔离层,计算隔离层不同刚度和厚度下路面的应力和应变,提出层间隔离层最佳厚度和刚度,然后比较层间设置隔离层和不设隔离层下的路面应力和应变,提出不同层间界面下的层间处理措施。

层间滞留水对路面破坏的影响,主要研究层间滞留水对层间处理措施的影响,即层间滞留水对隔离层材料的影响,开发层间隔离层的抗冲刷试验仪,比较不同隔离层的抗冲刷性能,分析影响隔离层材料抗冲刷性能的因素和提高隔离层材料抗冲刷性能的措施。

为了减少温度变化和层间滞留水对路面的影响,拟开发新的层间隔离材料,以改善水泥混凝土路面的层间处理措施,提高水泥混凝土路面的使用寿命。

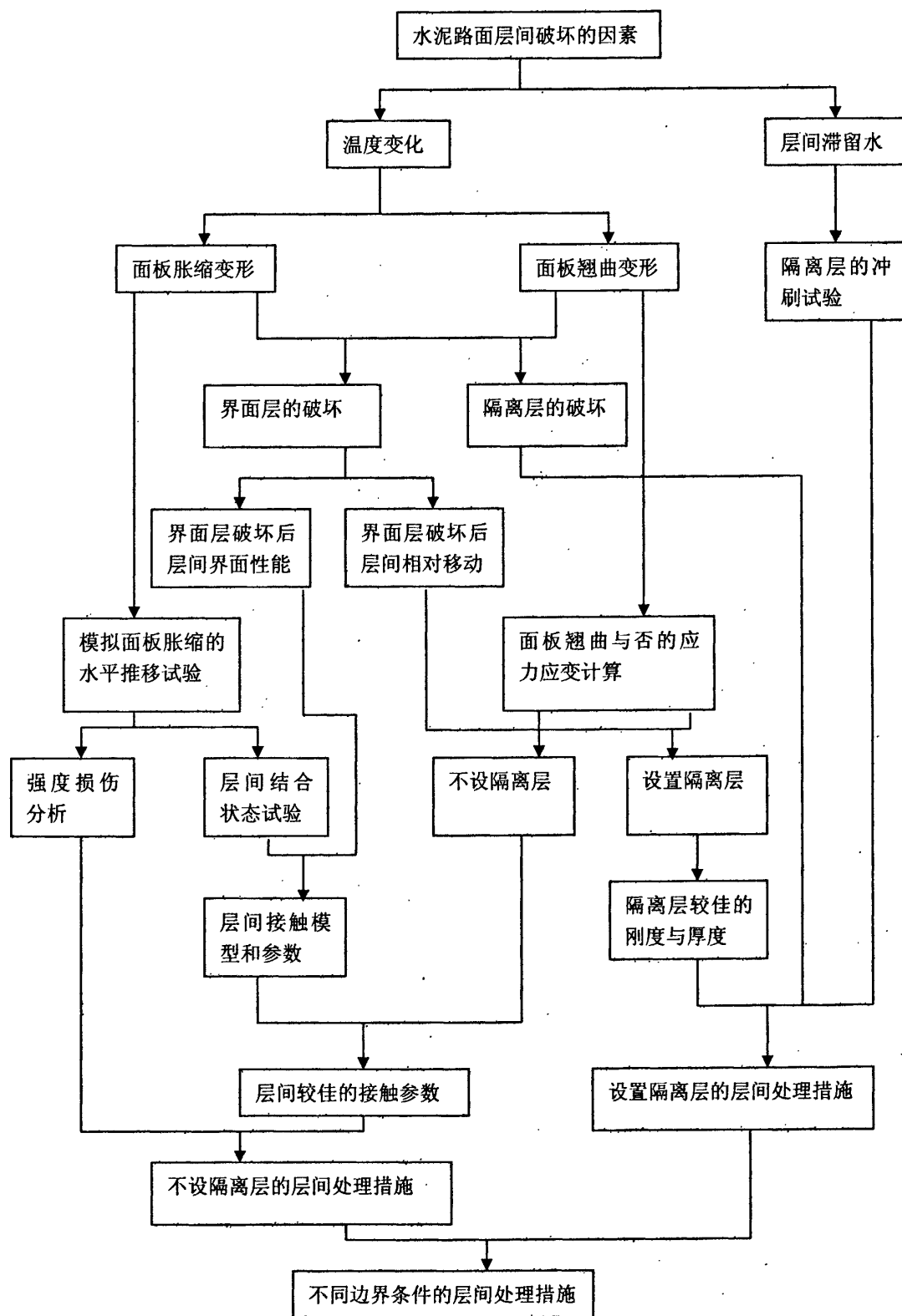


图1-1 研究技术路线示意图

第二章 水泥混凝土路面层间作用机理分析

水泥混凝土路面建成通车后直接暴露在大气之中,四季及每日白昼黑夜气温的周期变化,使得混凝土路面的温度也随之产生周期性的变化。由于混凝土材料的不可塑性,面板温度变化引起的膨胀、收缩等变形,一旦变形受到约束,面板不能自由伸缩,将产生温度应力^[86]。若温度应力大于基层与面层层间界面的抗剪强度或抗拉强度,则将在界面处产生破坏,如果界面遭到破坏,那么破坏前后的层间接触状态有何变化,及温度变化对层间接触形式又有何变化等,目前还处于研究阶段。

2.1 层间界面特性分析

在粗糙的贫混凝土基层表面上浇筑面层水泥混凝土时,水泥混凝土除了将填补基层表面凹陷处外,面层水泥浆体还将在基层毛细管压力、面层水泥混凝土自重和施工振捣功综合作用下,渗透至基层表面一定深度内。因此,层间界面并不是一个“面”,而是一个有一定厚度得“层”,这个“层”的结构和性质与水泥混凝土面层和贫混凝土基层有较大的区别。

为了分析层间界面的其它性质,定义层间界面厚度为“强度不同于基层和面层的层间(即基层和面层之间)厚度层”。因此,在面层水泥混凝土调平基层表面凹陷(以下简称“调平层”)和水泥浆体渗透至基层表面一定深度时(以下简称“渗透层”),将造成调平层和渗透层强度不同于基层和面层,即层间界面厚度为调平层厚度、渗透层厚度及面层底面过渡层厚度之和,其中面层底面过渡层厚度为 $0\sim 100\mu\text{m}$ ^[87]。

为了量化调平层和渗透层的厚度,在清连一级公路升级改造(高速)工程碾压贫混凝土基层表面,测试了基层表面的构造深度,同时借鉴渗水试验,分析层间调平层和渗透层的厚度。

2.1.1 层间调平层厚度

碾压贫混凝土基层通常采用水泥稳定土摊铺机摊铺,若摊铺宽度较大,如摊铺宽度在11m左右时,为减少路面离析,采用两台6m摊铺宽度的摊铺机一前一后施工。摊铺机的螺旋布料器往两侧布料时,粗料被传送到两端,从而在两台摊铺机的结合处粗集料较多,细集料较少,导致离析,如图2-1所示(简称“严重离析”);在摊铺机的出料口处部分粗集料还未接触到螺旋布料器就被混合料推走,从而在

布料口通常也存在局部离析，但是离析程度相对于两台摊铺机结合处要小一些，如图2-2所示（简称“一般离析”）；碾压贫混凝土基层施工完工后的正常基层表面较为平整，如图2-3所示（简称“表面平整”）。

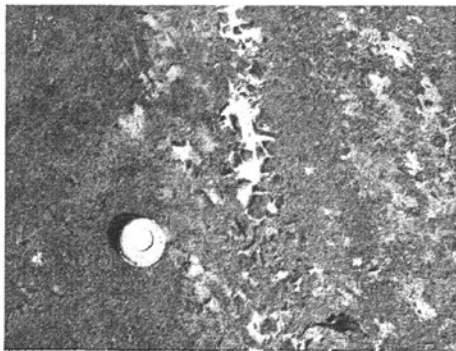


图2-1 基层表面严重离析



图2-2 基层表面不均匀离析（一般离析）

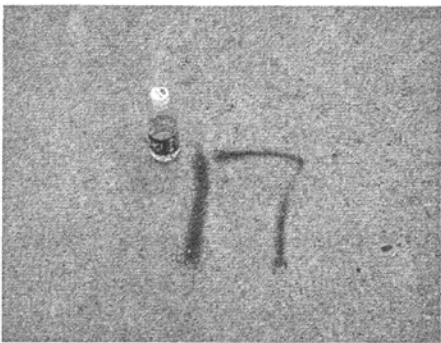


图2-3 基层表面平整



图2-4 行车后的基层表面

基层铺筑后若不能及时铺筑面层，且将基层作为施工临时便道，在工程车辆的搓揉下，表面的细集料易被带走，导致基层表面麻面，如图2-4所示。

现场的施工情况表明，碾压贫混凝土基层表面可为三种情况：① 基层表面平整（见图2-3），表面的构造深度可采用铺砂法进行检测；② 基层表面局部离析（见图2-1、图2-2）；③ 基层表面大面积均匀麻面（见图2-4）。基层表面局部离析和均匀麻面的表面构造深度可采用铺砂法测定指定位置平均构造深度，也可采用游标卡尺测量具体点位的构造深度。

在清连一级公路升级改造（高速）工程JK2252+400右幅长70米，共抽取了40个断面，每个断面布设三个点，分别为基层表面平整、基层表面一般离析和基层表面严重离析，采用铺砂法测定每个断面每个点的构造深度，共测了120点，将试验结果简单整理成表2-1和图2-5。

由图2-5和表2-1的构造深度分布状况, 基层表面的构造深度可控制0.25mm以内, 采用游标卡尺测量时离析处的构造深度, 最大约为10mm。

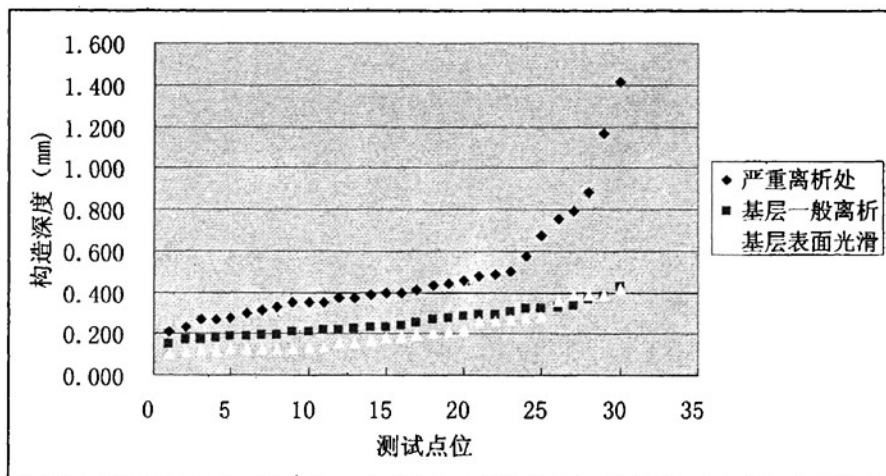


图2-5 碾压贫混凝土基层表面的构造深度测试结果

表2-1 碾压贫混凝土基层表面实测的构造深度 (mm)

基层表面状况	严重离析处	基层一般离析	基层表面光滑
平均值	0.489	0.255	0.211
标准差	0.270	0.069	0.095
最大值	1.415	0.429	0.421
最小值	0.209	0.149	0.108

假定基层表面的构造深度为常数, 则层间调平层的厚度则为 $k_1 \times R$, 其中 R 为基层表面的构造深度; k_1 为系数, 与基层表面微观构造有关, 一般 $k > 1$, 若基层表面具体位置的构造深度采用游标卡尺测量时, 则 $k=1$ 。

2.1.2 层间渗透层厚度

为了模拟面层水泥浆体进入基层表面毛细管的深度, 采用渗水试验仪, 试验方法与渗水试验相同, 渗水试验仪水面基本不下降模拟面层水泥混凝土湿润贫混凝土基层表面, 随后3min、5min、10min从细管流出的水模拟施工过程中水泥浆体渗透至基层的深度。在渗水试验时, 水从细管下部流出, 待水面基本不下降时, 记录仪器管的刻度, 并立即开动秒表, 分别记录3min、5min和10min时仪器管的刻度。

采用上面的试验方法和操作程序, 得到试验结果见表2-2所示, 整理表2-2得到表2-3, 其中单位时间内的渗透量 = $\frac{\text{某段时间内渗透量}}{\text{某段时间}}$; 10min内的渗透深度

$$= \frac{10\text{min内渗透量} - \text{基层材料的吸水量}}{\text{渗透面积} \times \text{基层的空隙率}}$$
，由于某一测定位置的渗透面积为一常数，

基层表面的孔隙率和基层材料的吸水量为变量，故某一时间内渗透深度为 $k_2 \times S$ ， S 为某一时间内单位面积的渗透量（mm）， k_2 为系数，与基层表面空隙率和基层材料的吸水量等有关。

表2-2 渗透试验的试验结果

时间 名称	稳定后读数 (ml)	3min后读数 (ml)	5min后读数 (ml)	10min后读数 (ml)
碾压贫混凝土基层	138	140	140	141
振捣贫混凝土基层	204	206	207	209
水泥混凝土面层	210	212	213	214
	326	326	326	327

表2-3 单位时间内的渗透量

时间 名称	3min内 (ml/min)	3~5min (ml/min)	5~10min (ml/min)
碾压贫混凝土基层	0.667	0	0.2
振捣贫混凝土基层	0.667	0.5	0.4
水泥混凝土面层	0.333	0.25	0.2

上述的分析结果表明，层间界面厚度：

$$h = k_1 \times R + k_2 \times S + D$$

式中： h —层间界面厚度（mm）；

R —基层表面的构造深度（mm）；

S —某一时间内单位面积基层上的渗透量（mm）；

D —面层底面过渡层厚度；

k_1 —系数，与基层表面微观构造有关；

k_2 —系数，与基层表面空隙率和基层材料的吸水量等有关。

由界面厚度公式可知，当采用悬浮密实结构的贫混凝土基层时，由于基层基本不透水，渗透层的厚度与调平层相比，基本可以忽略，然而若采用排水性贫混凝土，则渗透层的厚度将明显增大。

2.2 层间相互作用分析

2.2.1 层间界面层开裂分析

为了减少板间相互约束，降低面板的温度和湿度应力，混凝土面层设置胀缝与缩缝，使面层板沿缩缝和胀缝全深度开裂，减少面板的其它开裂。由于板长受

温度和湿度的变化而胀缩,其接缝缝隙宽度也随时间而不断发生变化。文献^[59]的多年量测的结果表明,接缝缝隙宽度的变化存在明显的规律:胀缝接缝宽度逐渐减小,缩缝接缝宽度不断增大。这种趋势,随胀缝间距的减小而表现得愈益突出。美国明尼苏达州一段试验路上的部分观测结果见表2-4^[88],其胀缝间距为36.0m,缩缝间距为4.5m,由表中数据可以看出,路面使用8年后,胀缝接缝宽度由25.4mm减少到6.35mm,即缩小了76.6%,而缩缝接缝的总宽度由零增加至夏季22.76mm和冬季的34.41mm,每条缩缝的平均接缝宽度,夏季达3.25mm,冬季达4.92mm。

表2-4 接缝缝隙宽度变化 (mm)

观测日期	胀缝缝隙宽度	缩缝缝隙宽度		接缝缝隙总宽度	板平均温度 (℃)
		总宽	每条平均宽		
1940.9.11	25.40	0	0	25.4	12.2
1940.10.11	25.79	1.49	0.21	27.28	16.7
1941.2.10	26.49	5.13	0.73	31.62	2.2
1941.7.29	17.41	3.22	0.46	20.64	35.5
1944.1.18	16.00	18.61	2.66	34.60	-0.6
1944.7.23	13.50	14.69	2.10	28.19	28.3
1948.2.4	8.10	34.41	4.92	42.52	-6.7
1948.8.19	6.35	22.76	3.25	29.11	33.3

文献^[59]认为在第一个膨胀循环内,面层板沿基层顶面向胀缝处膨胀,胀缝内的填缝条受到挤压而导致胀缝缝隙减小;而当温度季节性下降时,面层板收缩,但它不会以两条相邻胀缝间的路段中心为中心向内收缩,而是以两条相邻缩缝间的板长中心为中心向内收缩。同时,填缝条也没有足够的回弹能力将板推回原处。因而,膨胀时减少的缝隙宽度不可能完全回复,而残留一闭合量。

当基层约束面板的变形大于层间界面层的拉伸弹性变形和徐变变形时,层间界面层将产生断裂破坏。以一块混凝土板板长5m计,通常拉伸弹性应变 $\varepsilon_e = 1 \times 10^{-4}$,徐变 $\varepsilon_c = 2 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$ ^[23],可得每一缩缝的弹性变形 $= \frac{5}{2} \times (\varepsilon_e + \varepsilon_c) = 0.75\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$ 之间,由表2-4可知,在面板建成后的第一冬季,缩缝缝隙变化宽度为0.73mm,其缝隙变化宽度已接近混凝土的极限弹性变形,

四年后的变形冬季为2.66mm，夏季2.10mm，由此可以判定，水泥混凝土面板经过第一冬季时，层间的相对移动已接近混凝土的极限弹性变形，若干年后层间的相对移动必然大于界面层的极限弹性变形，故层间相对移动必然破坏层间的粘接，且离胀缝越近层间界面层遭到破坏越早。

2.2.2 层间相对移动分析

温度变化造成层间界面层破坏后，层间约束变为层间滑动摩擦和嵌锁，面板的胀缩变形较为自由。

当层间界面层较薄，界面层断裂后基层顶面仍较为平整，那么面板水平胀缩变形的相对移动面基本处于同一水平面上，即基层与面层仍然紧密接触，如图2-6所示；若层间界面层较厚，界面层断裂后的基层顶面为不规则曲面，那么面板水平胀缩变形引起基层与面层的相对移动，原相互嵌锁的层间不规则曲面将产生脱离，从而造成基层与面层脱空，如图2-7，即面层与基层间的接触从面接触转化为点接触或线接触，面层底面的支撑面积显著减少。

为了增大层间界面层断裂后面层与基层的接触面积，应减薄层间界面层的厚度，即应减薄层间调平层和层间渗透层的厚度。

为了验证上述的结论，在清连一级公路升级改造（高速）工程A2标段进行试验。

为了加快基层与面层之间的层间界面层断裂破坏，在铺筑水泥混凝土面层前，在基层表面喷洒一薄层乳化蜡。乳化蜡是多相分散体系，即将微小的蜡粒通过活性剂分散在水中，形成水包油型乳化蜡，当乳化蜡破乳后将在基层表面形成一薄层石蜡，由于石蜡分子极性很弱，范德华力非常小，极难粘合，一旦介入混凝土表面就会严重破坏混凝土之间的粘结效果。从理论上讲，哪怕分子级的蜡膜就会极大地破坏两层混凝土之间的粘合。

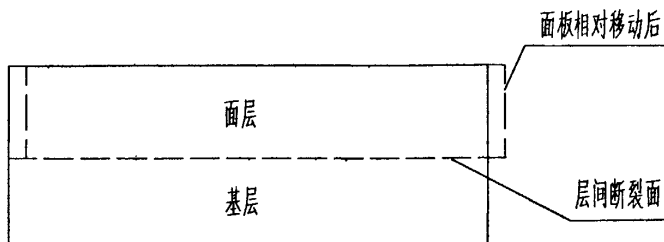


图2-6 层间断裂后基层顶面为平面的层间相对移动（面板向右移动）

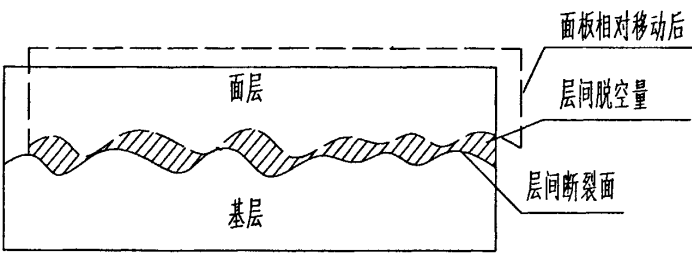


图2-7 层间断裂后基层顶面为曲面的层间相对移动（面板向右移动）

由于基层表面喷洒乳化蜡，蜡膜极大破坏层间粘结力，水泥混凝土面层铺筑3天后，层间界面上就已断裂破坏。2007年10月27日在A2标段JK2098+400、JK2098+420、JK2101+550、JK2101+600四处观测裂缝宽度随日温度变化（因基层和面板切缝位置未对齐而引起面板的反射裂缝，观测时此四处层间界面层已断裂破坏约1个月），裂缝宽度采用刻度放大镜测量，刻度放大镜的放大倍数为40倍，精度为0.05mm，观测结果见表2-5~表2-8，将数据整理成图2-8~图2-11；其中JK2098+420处基层表面均匀麻面，基层表面最大构造深度约15mm（采用游标卡尺测量）；面层相对基层移动造成基层与面层的脱空量，采用塞尺测量，测试结果见表2-9和图2-12所示。

表2-5 JK2106+600的实测裂缝宽度随温度变化

深度 (cm)	路表温度与测试时间							
	23:00	1:45	6:35	10:00	14:00	16:00	18:00	23:00
	20℃	19℃	17℃	27℃	37℃	36℃	27℃	20℃
0	0.825	0.85	1.075	0.975	0.675	0.725	0.675	0.825
5	0.55	0.625	0.65	0.625	0.4	0.5	0.475	0.55
12	0.4	0.425	0.6	0.45	0.275	0.35	0.275	0.4
20	0.275	0.3	0.55	0.45	0.3	0.25	0.275	0.275

表2-6 JK2105+500的实测裂缝宽度随温度变化

深度 (cm)	测试时间与路表温度							
	23:00	1:45	6:35	10:00	14:00	16:00	18:00	23:00
	20℃	19℃	17℃	27℃	37℃	36℃	27℃	20℃
0	1.385	1.55	1.8	1.55	1.2	1.225	1.05	1.385
5	0.85	1.075	1.35	1.225	0.875	0.775	0.95	0.85
12	0.725	0.925	1.025	0.95	0.7	0.625	0.95	0.725
20	0.65	0.55	0.9	0.85	0.55	0.5	0.9	0.65

表2-7 JK2098+420的实测裂缝宽度随温度变化

深度 (cm)	测试时间与路表温度							
	23:00	1:45	6:35	10:00	14:00	16:00	18:00	23:00
	20℃	19℃	17℃	27℃	37℃	36℃	27℃	20℃
0	1.35	1.4	1.65	1.45	1.075	0.9	1.05	1.35
5	1.2	1.425	1.6	1.375	0.95	0.9	0.95	1.2
12	1.175	1.275	1.475	1.275	0.825	0.85	0.95	1.175
20	0.4	0.525	0.7	0.65	0.375	0.4	0.45	0.4

表2-8 JK2098+400的实测裂缝宽度随温度变化

深度 (cm)	测试时间与路表温度							
	23:00	1:45	6:35	10:00	14:00	16:00	18:00	23:00
	20℃	19℃	17℃	27℃	37℃	36℃	27℃	20℃
0	1.575	1.95	2.225	1.875	1.3	1.3	1.325	1.575
5	1.325	1.625	1.8	1.55	0.975	1	1.05	1.325
10	1.05	1.175	1.425	1.2	0.775	0.75	0.85	1.05
15	0.8	0.95	1.1	1.025	0.725	0.675	0.7	0.8
20	1.25	1.45	1.7	1.5	1.1	1	1.05	1.25

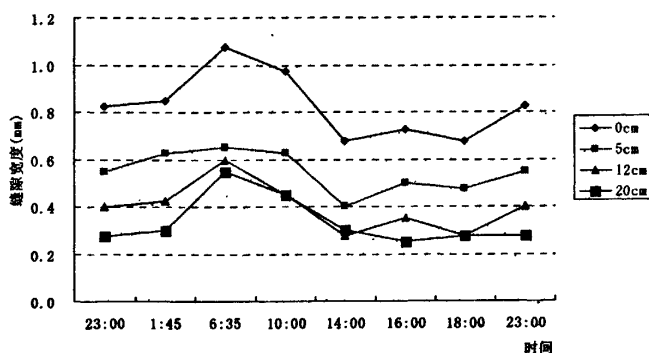


图2-8 JK2106+600处裂缝宽度随时间变化

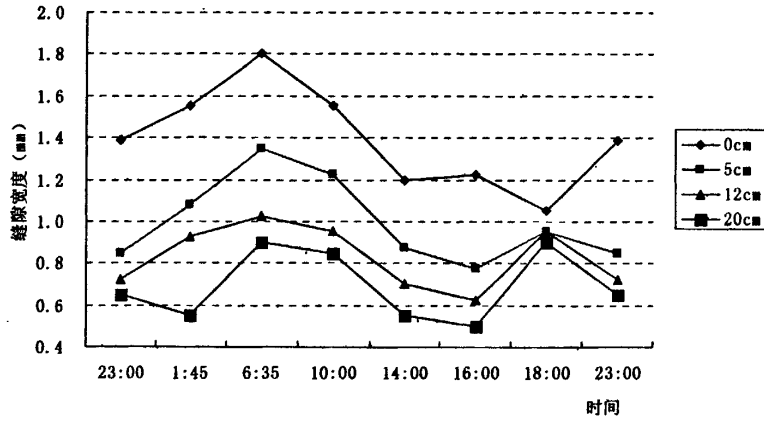


图2-9 JK2105+500处裂缝宽度随时间变化

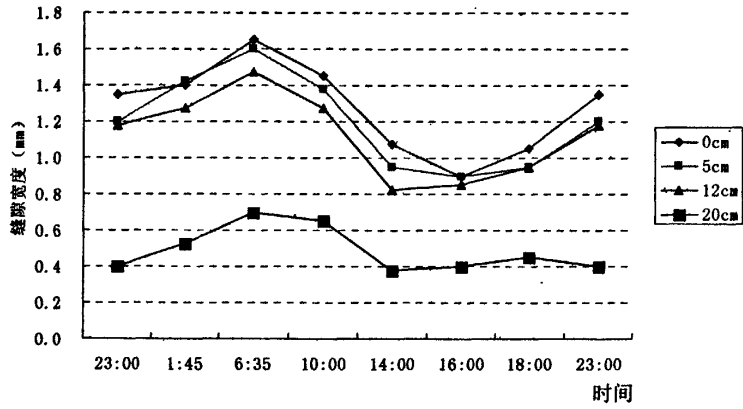


图2-10 JK2098+420处裂缝宽度随时间变化

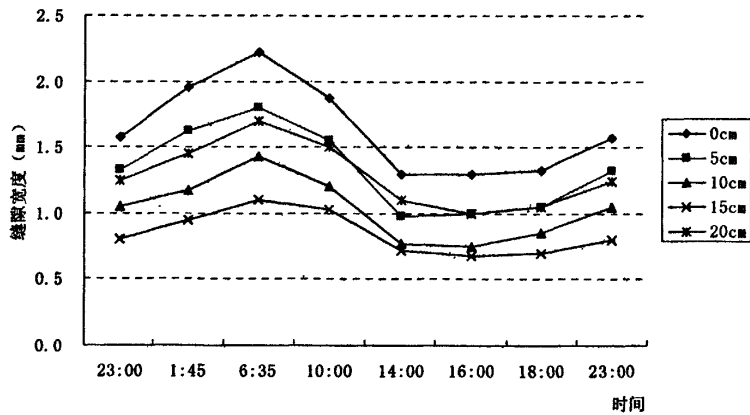


图2-11 JK2098+400处裂缝宽度随时间变化

由图2-8~2-11可知:

(1) 裂缝宽度随温度变化均呈上宽下窄, 一天内裂缝宽度随温度变化呈波浪式变化, 且裂缝宽度随距路表距离的增大而减小。最大裂缝宽度发生在早上6:00~7:00, 此时路表温度17℃, 为一天中路面温度的最低点, 最小裂缝宽度发生在15:00~16:00, 此时路表温度36℃, 路表温度比下午14:00时37℃低, 即最小裂缝宽度相对于路面最高温度有一定的延迟性。

(2) 在一天之内路表温度变化20℃左右, 裂缝宽度最大变化为0.95mm, 最小变化在0.25mm, 且大部分的缝宽变化在0.5mm左右。

表2-9 JK2098+420处层间脱空随时间/温度的变化 (mm)

位置	测试时间和测试温度							
	23:00	1:45	6:00	10:00	14:00	16:00	18:00	23:00
	20℃	19℃	17℃	27℃	37℃	36℃	27℃	20℃
缝左 8cm	1.95	2.1	2.4	1.6	0.3	0.2	0.3	1.95
缝右 8cm	1.8	2	2.2	1.5	0.3	0.1	0.2	1.8
缝右 167cm	4.5	4.8	5.1	4.3	3.8	3.5	3.8	4.5

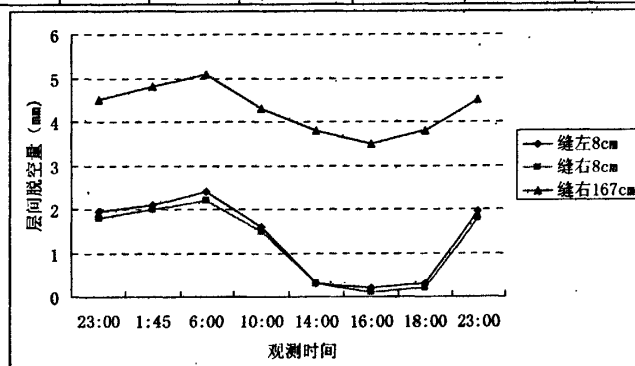


图2-12 层间脱空量随时间/温度变化

由图2-12可知:

1、基层与面层的脱空量也随时间显波浪式变化, 在温度最低时, 层间的脱空量最大, 在温度最高时层间的脱空量最小, 但脱空量并不为零, 即温度恢复到开裂前的温度时, 层间的错动具有不可恢复性。

2、在裂缝右侧167cm处的层间脱空量大于裂缝右侧8cm和裂缝左侧8cm处的层间脱空量, 且裂缝右侧167cm处的层间最小脱空量约为3.5mm, 裂缝两侧的层间脱空量近似为0。

为了进一步分析裂缝宽度与层间脱空量之间的关系, 将JK2098+420处每一时刻不同深度处的裂缝宽度取平均值作为横坐标, 离裂缝不同距离的层间脱空量

作为纵坐标, 得到层间脱空量与裂缝宽度的变化关系见图2-13所示。

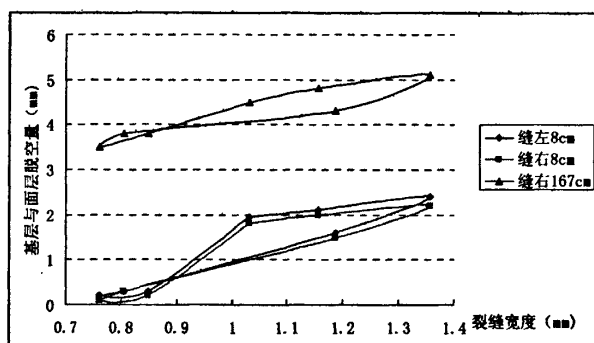


图2-13 层间脱空量随裂缝宽度的变化关系

由图2-13可知: 基层与面层之间的层间脱空量随裂缝宽度增大而增大, 即层间脱空量随面板的温度降低而增大。

上述的试验结果表明, ①层间界面层断裂破坏后, 面层因温度变化而产生层间相对移动具有不可恢复性; ②层间界面层断裂破坏后, 因温度变化引起层间相对移动时, 若基层顶面构造深度较大, 则面层与基层将从层间紧密接触状态逐渐界面到部分紧密接触部分脱空状态; ③由于面板膨胀时向胀缝移动, 而收缩时则以每一块面板的板中向内收缩, 因此假定基层表面构造深度均匀且较大时, 层间脱空量将随离胀缝的距离增大而减小。

2.3 层间界面层开裂后的界面分析

层间界面层在面板水平胀缩和竖直翘曲作用下产生开裂破坏, 界面层的开裂位置应为某一断面界面层强度最薄弱点。由于界面层厚度并不完全相同, 故层间界面层破坏后, 面板底面并非为一个平面, 因此, 假定界面层破坏后基层与面层的锯齿状连接如图2-14, 其中 w —锯齿状的角度($^{\circ}$), H —锯齿状的深度(mm)。

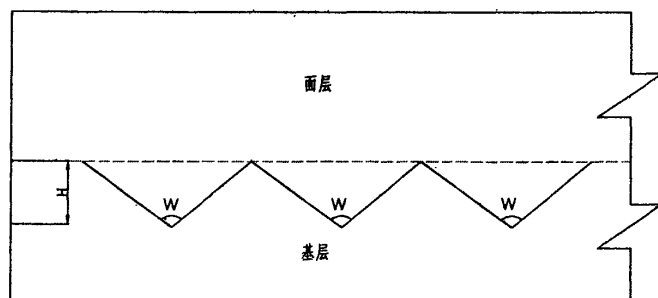


图2-14 层间界面层断裂后的接触形式

层间界面层开裂破坏后,层间粘结力和层间锯齿状限制了层间相对移动或移动趋势,假定层间锯齿状均匀分布,层间开裂后层间无粘结力,如图2-15所示,面板的胀缩应力等效为水平推力F,界面处的应力状况如图2-16所示。

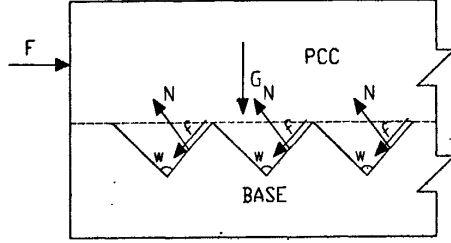
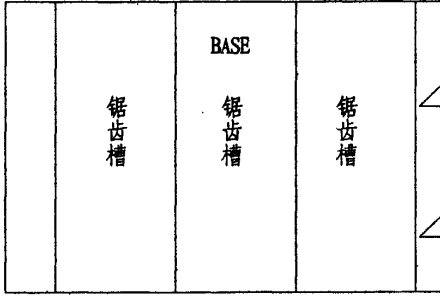


图2-15 基层顶面均匀锯齿槽平面示意图

图2-16 层间相互作用受力图

由图2-16可以看出,在胀缩应力作用下层间不发生滑动,即面板处于平衡状态,其水平方向和垂直方向的力应满足下列方程:

$$F - n * (f * \sin \frac{w}{2} + N * \cos \frac{w}{2}) = 0 \quad (2-4)$$

$$G - n * (-f * \cos \frac{w}{2} + N * \sin \frac{w}{2}) = 0 \quad (2-5)$$

$$f = \mu * N \quad (2-6)$$

式中: f ——基层顶面的摩擦力;

μ ——摩擦系数;

n ——基层表面均匀分布的 n 个离析槽。

将(2-6)带入(2-4)和(2-5)整理后得到(2-7)和(2-8):

$$N = \frac{F}{n * (\mu * \sin \frac{w}{2} + \cos \frac{w}{2})} \quad (2-7)$$

$$N = \frac{G}{n * (-\mu * \cos \frac{w}{2} + \sin \frac{w}{2})} \quad (2-8)$$

由(2-7)和(2-8)相等得到(2-9):

$$\frac{F}{G} = \frac{\mu * \sin \frac{w}{2} + \cos \frac{w}{2}}{\sin \frac{w}{2} - \mu * \cos \frac{w}{2}} \quad (2-9)$$

当 $w=180^\circ$ 时,即当基层顶面是平整时, $\frac{F}{G} = \mu$,层间接触形式为摩擦模型;

当 $w \neq 180^\circ$ 时, 层间的接触形式则不为摩擦模型, 如当 $w=90^\circ$ 时, $\frac{F}{G} = \frac{\mu+1}{1-\mu}$, 当

$w=60^\circ$ 时, $\frac{F}{G} = \frac{\mu+\sqrt{3}}{1-\mu\sqrt{3}}$, 由此可得 $\frac{F}{G} > 1$, 此时层间的接触形式为摩尔-库仑模

型, $\arctan(\frac{F}{G})$ 为摩尔-库仑模型的摩擦角。

取水泥混凝土面层与贫混凝土基层摩擦系数为0.1、0.2、0.25、0.3、0.4、0.5, 锯齿角度取 180° 、 135° 、 90° 、 60° , 得到摩尔-库仑摩擦角的计算结果, 见表2-10和图2-17。

表2-10 摩尔-库仑模型摩擦角与摩擦系数和锯齿角的关系表

摩擦系数 锯齿角度 ($^\circ$)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
180	5.7	11.3	14.0	16.7	21.8	26.6
135	28.4	33.8	36.5	39.4	44.4	49.0
90	50.7	56.3	59.1	61.8	66.8	71.6
60	65.8	71.4	74.1	76.7	81.8	86.6

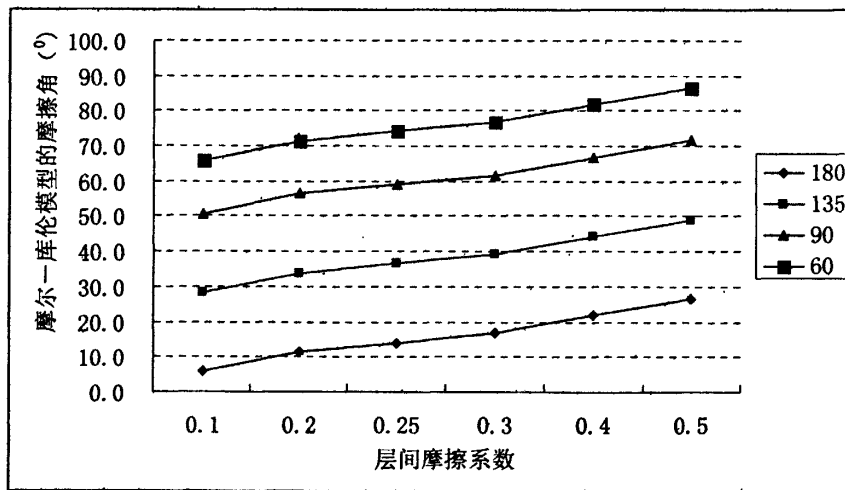


图2-17 摩尔-库仑模型摩擦角与层间摩擦系数和锯齿角的关系图

由图2-17可知:

- (1) 摩尔-库仑模型的摩擦角随层间摩擦系数增大而增大, 且近似呈线性关系;
- (2) 摩尔-库仑模型的摩擦角随锯齿角的增大而较小, 即基层表面越趋于平整, 层间摩擦角越小。

若层间界面层开裂破坏后,层间还有一定的粘结力,如贫混凝土基层表面喷洒乳化沥青后再加铺水泥混凝土面层,层间界面层破坏后层间还有粘结力,则层间的水平约束可采用 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ 表示,式中: c 为层间粘结力, φ 为层间摩擦角, σ 为层间垂直压应力。

上面的分析结果表明,层间界面层断裂破坏后,层间界面接触形式为摩尔-库仑模型。若基层顶面平整,且层间没有粘结力时,则层间界面接触形式为摩擦模型。

2.4 本章小结

(1) 贫混凝土基层与水泥混凝土面层间界面层并不是一个面,而是一个有一定厚度的层,这个“层”的结构和性质与水泥混凝土面层和贫混凝土基层有较大的区别;影响层间界面层厚度的主要因素为基层表面的构造深度和基层表面的渗透性,且层间界面层的厚度随基层表面构造深度的增大而增大,随基层表面渗透能力增强而增大。

(2) 为了避免因层间界面层断裂破坏而损伤水泥混凝土面板,应在层间设置隔离层或隔离剂,如在贫混凝土基层与面层之间铺设塑料布、洒乳化沥青、喷洒蜡质隔离剂等措施;为了避免因层间相对移动而造成层间脱空,应减小基层表面的构造深度、减少基层表面的渗透性;若因基层作为施工临时便道而导致表面麻面,且除麻面外没有开裂等缺陷,则应在层间设置一定厚度的柔性隔离层。

(3) 层间界面层断裂破坏后,层间界面接触形式为摩尔-库仑模型。若基层顶面平整,且层间没有粘结力时,则层间界面接触形式为摩擦模型。

第三章 水泥混凝土路面层间作用试验研究

由“第二章 水泥混凝土路面层间作用机理分析”的结果可知，因温度变化而引起的面板胀缩变形是层间界面层断裂破坏的主要因素之一。因此，为了模拟面板胀缩变形对层间界面性能的影响，需进行层间试验，分析层间界面层断裂破坏对面板强度的影响，研究层间界面层或隔离层（剂）断裂破坏前后的层间结合状态，为水泥混凝土路面层间力学特性研究提供模型和参数。

3.1 层间结合试验

为了模拟面板因胀缩变形受到约束而产生的应力和位移，需测试层间剪切应力和相应的水平位移。为此借鉴传统的梁式试件尺寸15cm*15cm*55cm，进行现场水平推力作用下的应力变形试验，模拟层间胀缩的剪切应力和层间位移，试验装置见示意图3-1，应力环测试层间剪切应力，千分表测量层间弹性变形。

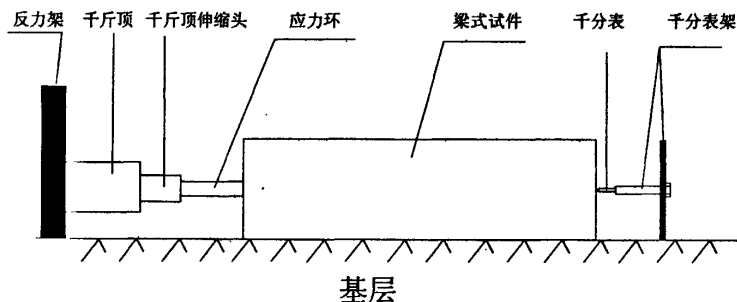


图3-1 层间水平推移应力应变试验设计图

按照图3-1的简图形式，在现场根据基层与试件的粘结程度，采用汽车轮或压路机钢轮作为反力架，采用油压千斤顶和不同精度的应力环，测试水平推力，现场试验如图3-2和3-3所示。

具体操作步骤为：在试件的一端停放压路机或汽车，油压千斤顶对准被测试件的中轴线，通过千斤顶将应力环固定住，随后在试件的另一侧安置千分表，开始加载，在油压千斤顶对试件逐级加载时，同时记录逐级加载对应的千分表读数，直至试件产生推移破坏。

水平剪切应力按 $\tau = \frac{F}{A}$ 计算，式中：F为现场实测水平推力，A为试件底面的

面积 ($0.15 \times 0.55 = 0.0825 \text{m}^2$); 垂直压应力 $\sigma = \frac{N}{A}$ 计算, 式中: N 为试件的重量。

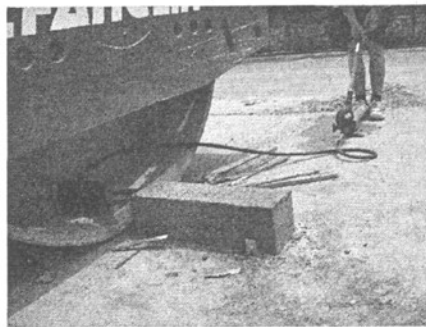


图3-2 现场层间水平推移应力变形试验(一) 图3-3 现场层间水平推移应力变形试验(二)

由于层间的结合形式主要表征层间界面层或隔离层的强度, 层间采用隔离剂弱化层间界面层的强度, 从而弱化层间结合。为此选用不同的隔离剂和隔离层, 进行层间应力应变试验, 随后将推移破坏后的梁式试件进行强度等试验。

隔离剂主要包括憎水性脆性隔离剂和憎水性柔性隔离剂, 脆性隔离剂选用乳化蜡, 柔性隔离剂选用阳离子慢裂乳化沥青。

隔离层选用ES-2型稀浆封层, 在基层表面浇筑1cm厚稀浆封层, 形成层间隔离层。

现场施工表明, 乳化蜡的粘度较低, 在横坡或纵坡较大时流动性很大, 易于流失; 乳化沥青粘度相对较大, 流动性较小, 因此, 在坡度较大时不适合采用乳化蜡。基层表面离析凹槽处常形成“小水坑”, 如图3-4和图3-5所示, 从而影响憎水性隔离膜的均匀性。



图3-4 离析处的乳化蜡

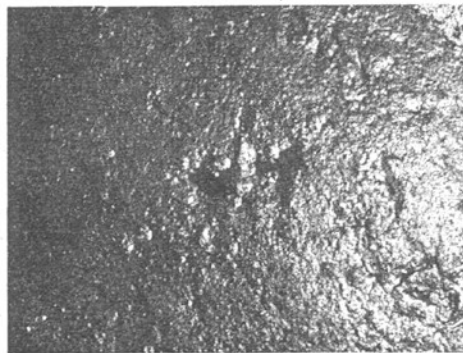


图3-5 离析处的乳化沥青

3.2 界面层（隔离层）破坏前层间推移试验

按照基层表面的构造深度和基层表面的处理形式，现场成型15cm*15cm*55cm梁式试件，每组成型3个试件，进行层间水平最大推移应力应变试验。

3.2.1 层间水平推移应力试验

在基层表面光滑、一般离析和严重离析上直接成型梁式试件，进行3天、7天、14天和28天龄期的水平最大推移应力试验，试验结果见表3-1和图3-6。

在基层表面光滑、一般离析和严重离析上喷洒蜡质隔离剂后成型梁式试件，进行3天、7天、14天和28天龄期的水平最大推移应力试验，试验结果见表3-2和图3-7。

表3-1 基层表面直接成型梁式试件的水平推移应力随龄期的试验结果

龄期 (天)	基层表面光滑 (KPa)	基层表面一般离析 (KPa)	基层表面严重离析 (KPa)
3	466.9	296.8	284.9
7	207.3	198.2	282.5
14	115.5	178.8	225.5
28	313.3	316.5	247.7

表3-2 基层表面喷洒蜡制隔离剂后的水平推移应力随龄期的试验结果

龄期 (天)	基层表面光滑 (KPa)	基层表面一般离析 (KPa)	基层表面严重离析 (KPa)
3	78.1	85.4	106.8
7	106.8	103.2	105.6
14	39.5	53.0	40.1
28	28.7	21.9	21.2

（注：基层表面光滑、一般离析和严重离析的构造深度见表2-1）

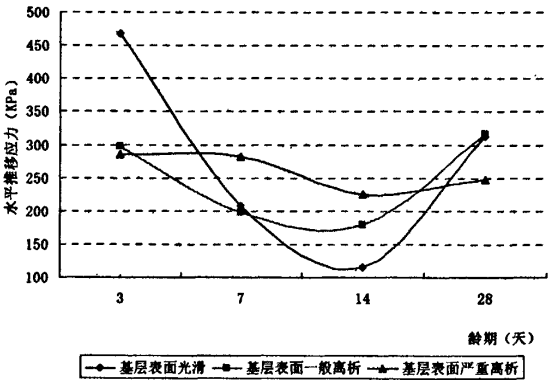


图3-6 基层表面直接成型梁式试件的推移应力随龄期的变化

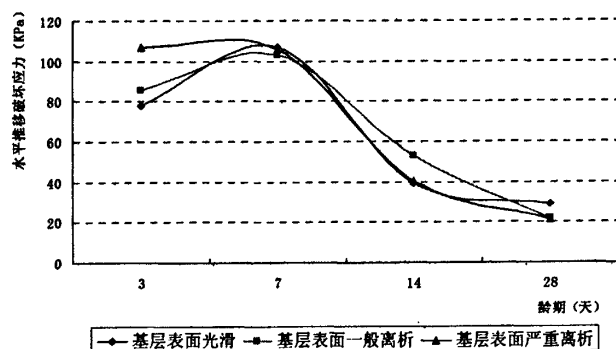


图3-7 喷洒蜡质隔离剂后成型梁式试件的推移应力随龄期的变化

由图3-6和图3-7可知:

(1) 在基层上直接成型梁式试件的水平最大推移应力随龄期呈开口向上的抛物线变化, 且在龄期为14天左右时层间粘结力最小; 而在基层表面喷洒蜡质隔离剂后, 梁式试件的水平最大推移应力随龄期呈开口向下的抛物线变化, 且在龄期为7天左右时层间粘结力最大, 且喷洒蜡质隔离剂后, 层间的连接性能显著降低; 在水泥混凝土的设计强度 (龄期为28天) 时, 喷洒蜡后的水平推移应力仅为对应龄期基层未处理时应力的8.18%。

(2) 水平最大推移应力随龄期的变化趋势为: 基层表面构造深度大, 水平最大推移破坏应力随龄期变化不明显, 特别是在基层上直接成型梁式试件的水平最大推移应力随龄期的变化情况。

层间水平最大推移应力随龄期的变化规律是: 当层间界面层强度随龄期的增长速率大于温度变化而损伤层间界面层时, 层间水平最大推移应力增大; 反之, 层间水平最大推移应力随龄期增长而降低。由于龄期为0天时界面层的强度为0, 说明基层上直接成型梁式试件时, 界面层达到最大强度的龄期小于3天, 基层表面喷洒蜡质隔离剂后层间界面层的最大强度在7天左右。

在基层上直接浇筑水泥混凝土时, 层间界面层的强度随龄期增长较快, 面板的温度变形受到的限制较大, 即温度变化对面板强度的影响也较大; 而基层上喷洒蜡质隔离剂后, 层间界面层的强度增长较为缓慢、强度较低, 说明基层上喷洒蜡质隔离剂后对面板的损伤较小。

基层表面不同构造深度的层间水平推移应力随龄期的变化趋势基本相同, 因此在基层表面喷洒乳化沥青后的层间试验时, 仅进行基层表面平整的水平推移应力随龄期的变化试验, 试验结果见表3-3和图3-8所示。

表3-3 基层表面喷洒乳化沥青后的水平推移应力随龄期变化

龄期(天)	3	7	14	28
推移破坏应力(KPa)	85.5	102.4	97.1	76.3

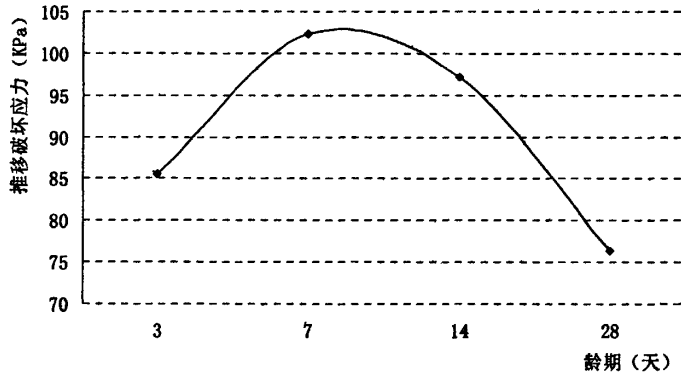


图3-8 喷洒乳化沥青后推移应力随龄期的变化

由图3-8可知,基层顶面喷洒乳化沥青后的水平推移应力随龄期的变化曲线呈开口向下的抛物线状,且在7天时的水平推移破坏应力最大,与基层表面喷洒蜡质隔离剂后的推移破坏应力随龄期变化的曲线走势完全相同,只是基层表面喷洒乳化沥青后,水平最大推移应力随龄期变化相对较小。

基层表面浇筑稀浆封层隔离层后,水平最大推移应力测定的是隔离层材料的抗水平剪切应力,因此,仅进行了7天的水平推移破坏应力试验,试验结果为7天的抗剪切破坏强度约为100KPa。

3.2.2 层间水平推移变形试验

在基层表面直接成型梁式试件和基层表面喷洒蜡质隔离剂后成型的梁式试件,其水平推移破坏均为瞬间破坏,采用千分表难以测得水平逐级应力下相对应的水平位移。

基层表面喷洒乳化沥青后成型的梁式试件,其7天龄期水平逐级应力下相对应的水平位移见表3-4和图3-9和图3-10所示。基层表面浇筑稀浆封层后成型的梁式试件,其水平逐级应力下相对应的水平位移见表3-5和图3-11所示,试验时现场的温度为35℃。

表3-4 基层表面喷洒乳化沥青后水平推移应力与水平位移（7天龄期）

推移应力 (KPa)	对应推移变形 (0.01mm)			
	试件 1	试件 2	试件 3	平均
12.1	0	0	1	0.33
24.3	1	0	1	0.67
36.4	1	1	1.5	1.17
48.6	1	1	2	1.33
60.7	1	1.5	2	1.50
72.9	1.5	2	3	2.17
85.0	1.5	3.5	6	3.67
97.1	10	6	9	8.33
推移破坏应力 (KPa)	97.1	108.1	102.0	102.4

表3-5 基层表面浇筑稀浆封层后水平推移应力与水平位移（7天龄期）

推移应力 (KPa)	对应推移变形 (0.01mm)		
	试件 1	试件 2	试件 3
12.1	0	0.5	1
24.3	0.5	2.0	2
36.4	1.5	3.0	3.5
48.6	2.5	5.0	5
60.7	3.0	8.0	8
72.9	4.0	12.0	11
85.0	8.0	16.0	15
97.1	9.0	20.5	19
109.3	11.5	29.0	38
121.4	25.0	55.0	
133.6	35.0		
145.7	45.0		
160.3	80.0		
顶推破坏应力 (KPa)	160.2	121.4	117.8

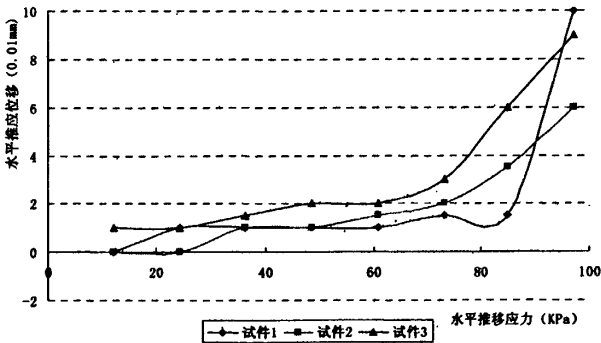


图3-9 基层表面喷洒乳化沥青后水平推移应力与水平位移的关系

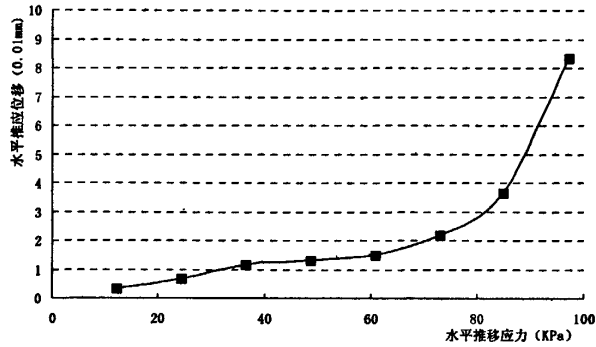


图3-10 基层表面喷洒乳化沥青后平均水平推移应力与水平位移的关系

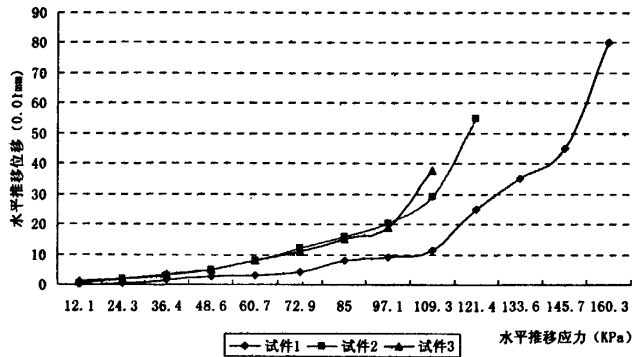


图3-11 基层表面浇筑稀浆封层后水平推移应力与水平位移的关系

由图3-9~图3-10可看出：水平推移应力与推移变形之间存在拐点，即在水平推移应力为0KPa~80KPa范围内，水平推移应力与变形基本呈直线变化，水平推移应力大于80KPa后水平推移变形随推移应力急剧增大，水平推移应力为80KPa对应的推移位移在0.02mm左右。

由图3-11可知：水平推移应力与推移变形也存在拐点，即水平推移应力在0~100KPa范围内，其推移应力与推移变形呈直线变化，当推移应力大于100KPa后，推移变形随推移应力急剧增长，水平推移应力为100KPa对应的位移约为0.15mm。

由图3-10和图3-11相比较可知：基层表面喷洒乳化沥青和浇筑稀浆封层后成型的梁式试件，其水平推移的破坏强度相差不大，然而破坏时稀浆封层对应的屈服变形是乳化沥青的7倍左右。

层间界面层（隔离层）断裂破坏前的层间试验结果表明：基层表面喷洒隔离剂或设隔离层，均可显著降低层间界面层的强度，从而减少层间界面层断裂破坏

而损伤水泥混凝土面板；基层表面喷洒柔性隔离剂或隔离层，可延缓面板因温度变形而破坏层间界面层或隔离层。因此，为了减少面板因界面层断裂而遭到损伤或破坏，应在基层表面喷洒隔离剂或浇筑隔离层，且优先选用柔性隔离剂或隔离层。

3.3 层间界面层破坏后层间试验

为了分析界面层断裂破坏对面板强度的损伤程度，在层间界面层断裂破坏后，再进行层间直剪试验和面板强度试验。

3.3.1 层间直剪试验

在水平推移破坏试验后，进行现场层间直剪试验，即在层间推移破坏试验后，将试件放置在层间断裂破坏前的位置，通过试件顶面叠加不同个数相同尺寸试件的方法，模拟施加不同的正应力，测试不同正应力下的水平推移应力，试验结果整理后见表3-6和图3-12所示。

表3-6 层间剪应力与正压力的试验结果

正 应 力 (KPa)	剪应力 (KPa)		
	碾压基层上	振捣基层上	基层表面洒蜡
3.01	2.74	2.80	2.05
6.01	5.60	5.04	3.64
9.02	7.00	6.91	5.51

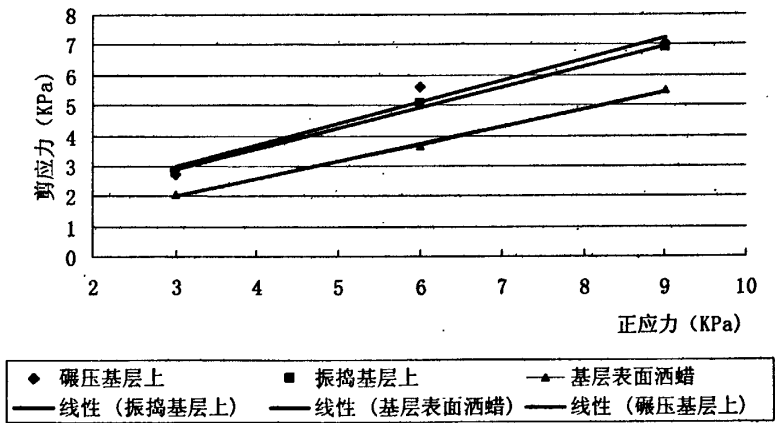


图3-12 层间剪应力与正压力的数据拟合图

由表3-6和图3-12可知：①层间断裂破坏后的剪切应力与正应力呈直线变化，为此可以判定层间破坏后的层间剪切关系可采用摩尔-库仑理论表征；②基层表面喷洒蜡质隔离剂后，层间断裂破坏后的粘结力和摩擦角均有较大降低，说明层

间喷洒脆性隔离剂,不但可降低了层间界面层的强度,而且还降低了层间断裂破坏后的层间约束应力。

为了采用摩擦角和粘结力两个指标分析层间破坏后的相互关系,将图3-12的水平推移应力与正应力曲线进行整理,得表3-7所示。

表3-7 层间断裂破坏后的层间粘结力与摩擦角

基层及表面处理	粘结力 c (KPa)	摩擦角 φ ($^{\circ}$)
碾压贫混凝土基层	0.859	35.3
振捣贫混凝土基层	0.809	34.3
喷蜡后的基层	0.280	29.9

鉴于试验的样本数量较少,层间界面层破坏后的层间接触参数还有待于完善。

3.3.2 试件强度试验

将层间推移破坏后的试件进行抗压和抗折试验,室内抗折试验采用三分点加载,且将试件与基层接触的面作为测试底面,将抗折试验破坏后的试件再进行抗压试验。在基层表面直接成型梁式试件推移破坏后抗折强度和抗压强度试验结果如表3-8、表3-9和图3-13~3-14所示,在基层表面喷洒蜡质隔离剂后梁式试件抗折强度和抗压强度试验结果如表3-10、表3-11和图3-15和3-16所示。

表3-8 基层表面直接成型梁式试件抗折强度 (MPa) 随龄期的变化

基层表面状况	3 天	7 天	14 天	28 天
严重离析	2.63	2.12	3.20	4.02
一般离析	2.61	2.06	2.85	4.26
表面光滑	2.76	1.94	2.14	3.93

表3-9 基层表面直接成型梁式试件抗压强度 (MPa) 随龄期的变化

基层表面状况	3 天	7 天	14 天	28 天
严重离析	13.50	15.15	26.60	38.53
一般离析	15.17	17.20	23.47	39.43
表面光滑	13.20	17.60	19.50	36.53

表3-10 喷洒蜡质隔离剂后梁式试件抗折强度 (MPa) 随龄期的变化

基层表面状况	3 天	7 天	14 天	28 天
严重离析	2.59	2.48	3.28	3.93
一般离析	2.33	1.98	3.41	4.06
表面光滑	2.29	2.48	3.77	4.05

表3-11 喷洒蜡质隔离剂后梁式试件抗压 (MPa) 强度随龄期的变化

基层表面状况	3 天	7 天	14 天	28 天
严重离析	13.20	20.60	25.65	37.97
一般离析	13.87	16.95	32.50	38.85
表面光滑	15.17	21.10	32.13	38.27

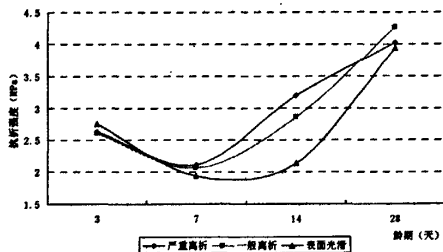


图3-13 抗折强度平均值随龄期的变化（“直接”）

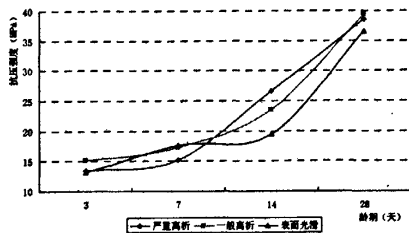


图3-14 抗压强度平均值随龄期的变化（“直接”）

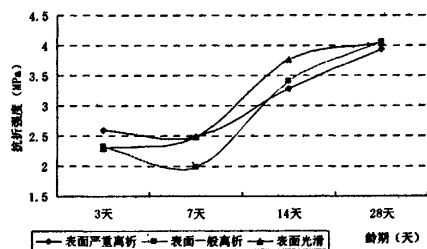


图3-15 抗折强度平均值随龄期的变化（“蜡质”）

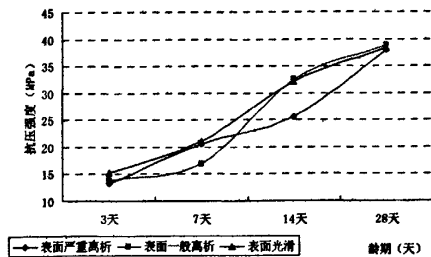


图3-16 抗压强度平均值随龄期变化（“蜡质”）

（注：图3-13~图3-16中“直接”指在贫混凝土基层上直接成型梁式试件，“蜡质”指在贫混凝土基层上喷洒蜡质隔离剂后再成型梁式试件）

由图3-13~图3-16可知：①水泥混凝土的抗压强度随龄期增长而增大，但早期（7天前）的强度增长速度与后期（14天后）增长速度相当，甚至早期强度增长还慢于后期的强度增长，说明水泥混凝土试件早期受到的损伤比后期大；②抗折强度随龄期变化呈近似开口向上的抛物线变化，特别是基层表面直接成型梁式试件的抗折强度由龄期3天到7天下降尤为明显，且在7天龄期时的抗折强度最低；

③直接成型在贫混凝土基层上梁式试件的抗折强度受基层表面构造深度影响较为明显,即基层表面构造深度越小,抗折强度损失越大,而基层表面喷洒蜡质隔离剂后,却是基层表面构造深度小时梁式试件的强度损失小。

由此说明,为了减少层间界面层断裂破坏而损伤水泥混凝土面板,应在基层表面喷洒隔离剂或隔离层,并要求基层表面平整。

3.4 本章小结

(1)层间界面层断裂破坏后,层间接触形式可采用摩尔-库仑模型,调整层间隔离剂材料,可调整层间的粘结力 c 。

(2)层间喷洒憎水性隔离剂后层间水平最大推移应力明显降低,特别是层间喷洒蜡质隔离剂后的层间最大推移应力仅为基层表面未处理的8.18%;层间断裂破坏后的层间最大推移应力将再次显著降低,其最大推移应力约为层间未处理的1%。

(3)层间界面层的强度变化引起层间结合系数的变化,试验结果表明,基层表面未处理而直接成型梁式试件,层间界面层的强度随龄期呈开口向上的抛物线变化,并在龄期为14天左右的强度最低,水平最大推移破坏后的试件的抗折强度随龄期也呈开口向上的抛物线变化,且在7~14天范围内抗折强度最低,说明层间界面层遭到温度变化引起损伤的同时,面层混凝土板也遭到损伤;层间喷洒隔离剂后,界面层的损伤和面层板的损伤也有类似的规律。

(4)现场试验结果和试件水平最大推移破坏的断裂面表明,基层表面未处理时层间界面层的强度介于贫混凝土和水泥混凝土面层之间,层间喷洒憎水性的隔离剂后可以弱化层间界面层的强度,从而减少因界面层断裂破坏而损伤水泥面板。

第四章 水泥混凝土路面层间力学特性研究

贫混凝土基层与水泥混凝土面层的层间界面层为脆性材料,脆性材料的破坏准则一般采用摩尔-库仑准则^[89, 90, 91, 92]:

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (4-1)$$

式中: σ_n --垂直应力, c --粘聚力, φ --内摩擦角。

文献^[89]通过试件静力试验得到混凝土的粘聚力和内摩擦角,由此可知,层间界面层破坏前贫混凝土基层与水泥混凝土面层的层间接触关系可采用摩尔-库仑模型表征,结合第二章和第三章的研究成果可知,层间界面层破坏前后,贫混凝土基层与水泥混凝土面层的层间接触关系均可采用摩尔-库仑模型表征。

贫混凝土基层上的面板在温度梯度作用下产生翘曲变形,基层与面层之间将因面板翘曲而产生层间脱空,如果在贫混凝土基层表面铺筑柔性隔离层,那么翘曲面板的支撑面积将增大,且摩尔-库仑模型无法表征基层与面层之间的接触关系,而只能将柔性隔离层作为一个独立的结构层。

为了分析层间界面层和隔离层对路面结构承载能力的影响,进行层间力学特性研究。

4.1 路面结构、材料参数与计算模型

4.1.1 路面结构和材料参数

假定面板平面尺寸为长500cm,宽400cm,荷载作用位置为面板纵向边缘中部,路面结构采用清连一级公路升级改造(高速)工程旧路加铺形式,其中旧路面面板采用冲击破碎方案,具体路面结构和材料见表4-1所示。

4-1 旧路加铺的路面结构形式和材料参数

路面结构层	厚度 (cm)	弹性模量 (MPa)	伯松比	备注
水泥混凝土面层	30	31000	0.15	
隔离层	1~10	100~1500		不设隔离层时采用摩擦角和 粘结力表征层间接触关系
贫混凝土基层	20	20000	0.15	
面板破碎处理	25	500	0.25	
土基	100	35	0.35	

4.1.2 计算模型

采用三维接触单元模型,通过接触单元的实常数来控制层间的接触状态,选择不同隔离层的刚度和厚度,模拟层间设置不同类型和不同厚度隔离层,建立路面结构计算模型。

4.1.2.1 无翘曲面板计算模型

假定环境温度和湿度保持恒定,面板不产生翘曲,根据路面结构形式,建立三维有限元多层体系单块自由板模型,计算采用8节点等参单元,边界条件为土基底部完全约束,侧面水平方向的位移均为零,面层表面作为自由面,不受任何约束。面板直接铺筑在贫混凝土基层上的模型见图4-1,面层与基层之间设置隔离层的模型见图4-2,不同的模型在不同工况下划分网格后的单元数目及节点数目会不尽相同。由于计算工作量较大,为了能尽量节省计算时间,将划分的单元、节点数目尽量控制在50000个以下。

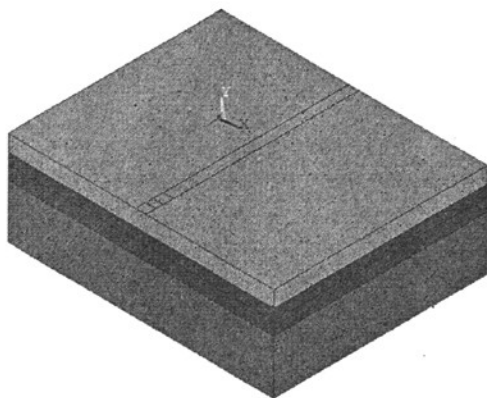


图4-1 面板直接铺筑在贫混凝土基层上的模型

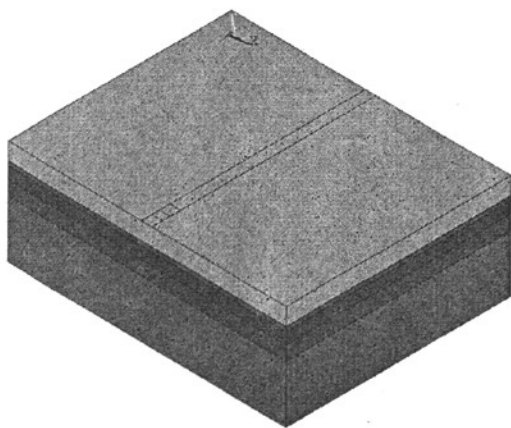
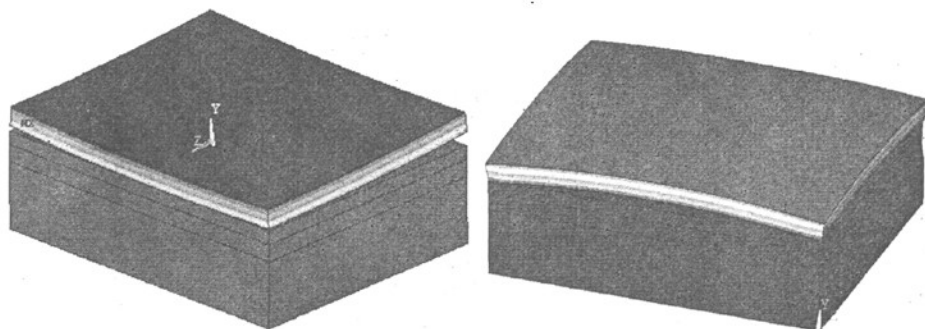


图4-2 面层与基层之间设置柔性隔离层的模型

4.1.2.2 翘曲面板计算模型

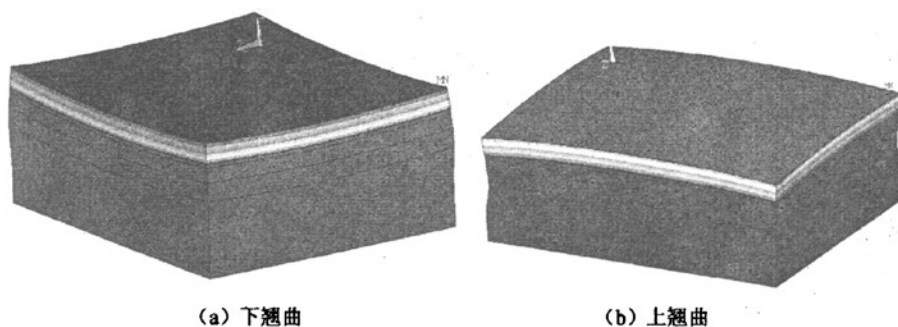
面板在正温度梯度作用下（路表温度高于路面底面温度），将产生上翘曲，面板在负温度梯度作用下（路表温度低于路面底面温度），将产生下翘曲。根据文献^[59]，利用热传导解析式推算不同深度（即板厚）处的温度梯度值，将它们同标准厚度（22cm）的梯度值相比后，得到不同面层厚度的最大温度梯度修正系数，此修正系数乘以标准厚度的最大温度梯度（取 $90^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ），即为该厚度的最大温度梯度修正推荐值，据此得到30cm厚的最大温度梯度为 $71.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，面板顶面温度与底面温度差为 21.33°C 。

在层间不设柔性隔离层时，面板翘曲后基层与面层之间将有一定脱空，层间接触模型见图4-3；层间设置柔性隔离层后，假定面板翘曲变形由柔性隔离层协调，则面层底面与隔离层之间紧密接触，层间接触模型见图4-4。



(a) 下翘曲（路表温度低于路面底面温度） (b) 上翘曲（路表温度高于路面底面温度）

图4-3 层间不设柔性隔离层时的层间接触模型



(a) 下翘曲

(b) 上翘曲

图4-4 层间设置柔性隔离层的层间接触模型

4.1.2.3 基、面层横向切缝错缝计算模型

为了减少基层与面层之间的柔性隔离层因基层切缝而产生破坏，采用基、面层横向切缝错缝布置形式；为了得到较佳的基层切缝宽度和基、面层横向切缝错

缝的最佳间距,将进行力学计算,其力学模型见图4-5所示,在此仅计算无翘曲面板在不同基层切缝宽度和不同基、面层横向切缝错缝间距下的路面应力和应变。

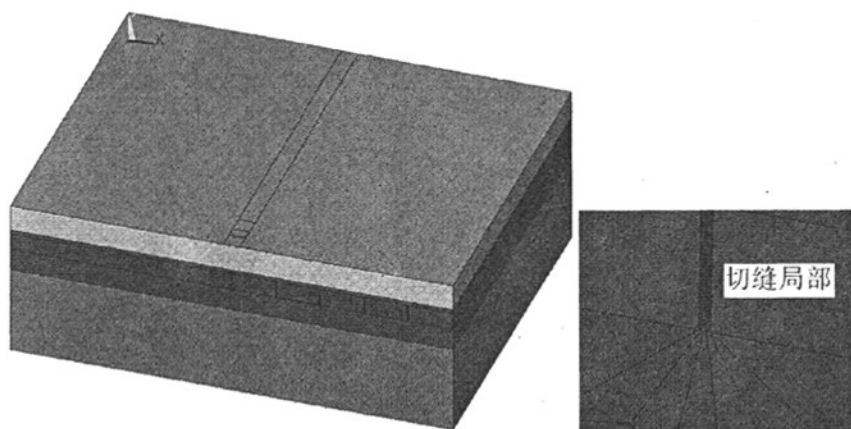


图4-5 基层横向切缝力学模型

4.1.3 荷载条件

按照规范中的荷载作用形式,以单轴100KN标准轴载作为作用荷载,轮胎接地面积由规范中的圆形均布荷载转换为正方形189mm*189mm,保持两轮中心间距320mm不变,垂直荷载0.7MPa。

按照规范中的荷载作用位置,即选取混凝土板的纵向边缘中部作为荷载和温度梯度综合疲劳损坏的临界荷位。

假定荷载在作用面内均匀分布,计算中同时考虑水平荷载和垂直荷载,即垂直荷载0.7MPa,而水平荷载是通过垂直荷载乘以车轮与路面间的摩擦系数得到,方向与Z轴方向垂直,根据已有研究成果,考虑最不利状况,按制动状态计算,摩擦系数取0.5,即:

$$q = f \times p = 0.5p$$

式中: q —水平荷载, MPa;

P —垂直荷载, MPa。

具体荷载作用形式见图4-6所示。

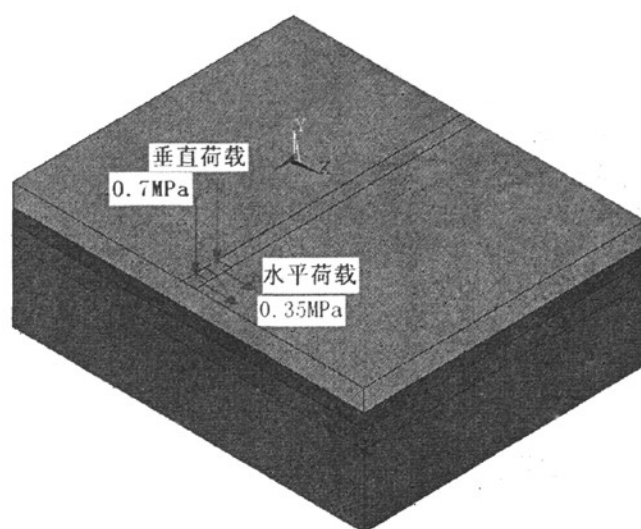


图4-6 荷载作用形式

4.2 层间设置无厚度隔离剂力学特性分析

为了避免层间界面层断裂而损伤水泥混凝土面板，需要在基层顶面喷洒憎水性隔离剂，然而应喷洒何种憎水性材料，则与喷洒隔离剂后的层间界面接触状态有密切关系。因此，按层间摩擦模型和摩尔-库伦模型，选取相应层间接触参数，分别计算面板不翘曲、翘曲状态下路面的应力和变形，旨在得到较佳的层间接触参数，以指导层间喷洒憎水性材料的技术要求。

4.2.1 无翘曲面板的路面应力应变计算

4.2.1.1 层间摩擦模型与路面应力应变

按照图4-1的模型，摩擦系数选择0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0，计算路面的应力和应变，计算结果见表4-2，整理成图4-7-图4-10所示。

表4-2 路面应力应变与层间摩擦系数的计算结果

摩擦系数	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1
路面弯沉/0.01mm	38.2	34.4	32.3	31.9	31.6	31.1	30.7
面层底最大剪应力/MPa	0	0.072	0.070	0.067	0.069	0.083	0.099
面层底最大拉应力/MPa	0.882	0.897	0.851	0.819	0.784	0.714	0.652
面层底最大等效应力/MPa	0.929	0.944	0.905	0.880	0.854	0.800	0.742
基层底最大拉应力/MPa	0.406	0.384	0.369	0.359	0.352	0.347	0.348

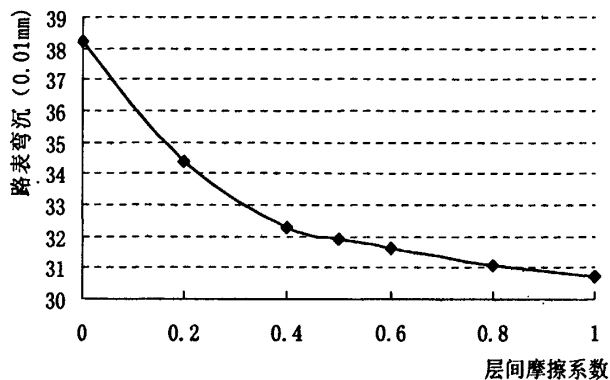


图4-7 路表弯沉与层间摩擦系数的关系

路表弯沉值随摩擦系数变化见图4-7所示,从图4-7可以看出:路表弯沉值随摩擦系数的增大而逐渐减小;且随着摩擦系数的增大,路表弯沉值的减大幅度逐渐趋缓;摩擦系数从0变化到1,路面弯沉减小了7.5(0.01mm),减幅约为摩擦系数为0时路面弯沉值的19.64%、摩擦系数为1时路面弯沉值的24.43%。

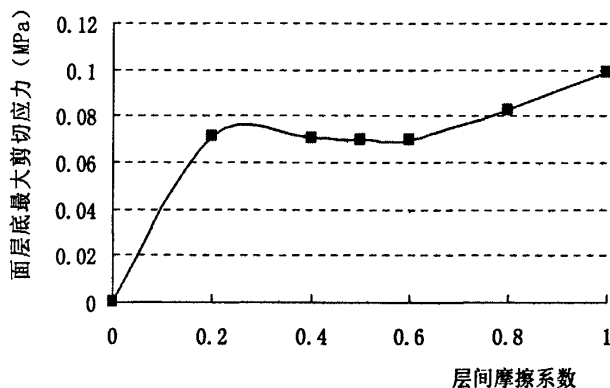


图4-8 面层底最大剪切应力与层间摩擦系数的关系

面层底最大剪切应力随摩擦系数变化见图4-8所示,从图4-8可以看出:面层底最大剪应力随摩擦系数的增大而逐渐增大,在摩擦系数0~0.2之间上升较快,随后在摩擦系数0.2~0.6之间略有小的下降,之后在摩擦系数0.6~1之间缓慢上升。

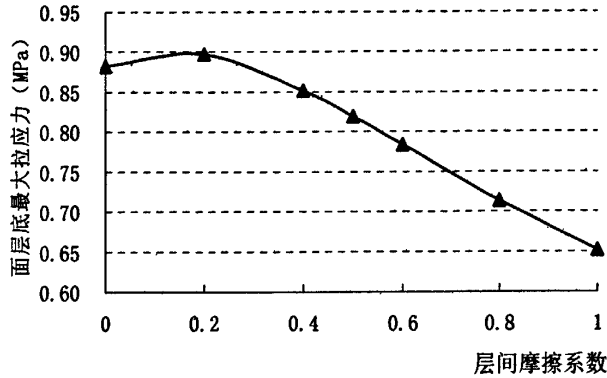


图4-9 面层底最大拉应力与层间摩擦系数的关系

面层底最大拉应力随摩擦系数的变化见图4-9所示,从图4-9可以看出:面层底最大拉应力在摩擦系数0~0.2之间较缓上升,随后在摩擦系数0.2~1之间较快下降;面层底最大拉应力在摩擦系数0.2时最大,在摩擦系数为1时达到最小;摩擦系数从0.2变化至1,面层底最大拉应力的降幅为摩擦系数0.2时的27.34%。

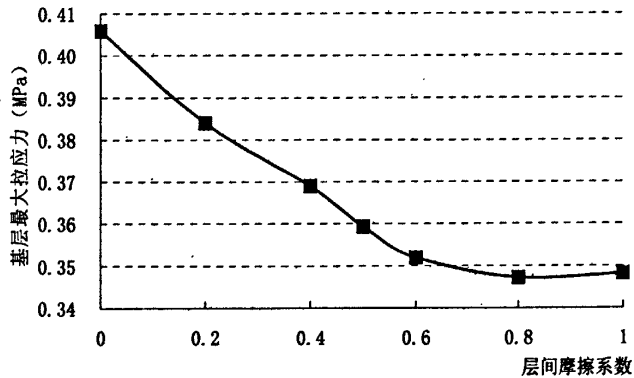


图4-10 基层最大拉应力与层间摩擦系数的关系

基层底面最大拉应力随摩擦系数变化见图4-10所示,从图4-10可以看出:在摩擦系数0.8之前,基层底最大拉应力随着摩擦系数的增加而逐渐减小,在摩擦系数0.6~0.8之间减幅趋缓;在摩擦系数0.8之后,随着摩擦系数的增加,基层底最大拉应力有非常微弱的增加;基层底最大拉应力在摩擦系数0时最大,在摩擦系数为0.8时达到最小;摩擦系数从0变化至0.8,基层底最大拉应力的降幅为摩擦系数0时的14.47%。

由于影响水泥混凝土路面结构性能的最关键因素为面板底面的最大拉应力，因此，在兼顾面板底面最大剪切应力和基层底面最大拉应力等因素，经综合分析后可知，摩擦系数 0.8~1 之间最利于基层和面层承受外界荷载。

4.2.1.2 层间摩尔-库伦模型与路面应力应变

按照图 4-1 的模型，选取摩尔—库伦接触模型的摩擦角： 0° 、 10° 、 30° 、 50° 、 70° 、 85° ，选取粘结力为：0 MPa、0.005 MPa、0.01MPa、0.03MPa、0.05MPa，计算结果见表 4-3~表 4-6 和图 4-11~图 4-14（当粘结力大于 0.05MPa 时的计算结果与 0.05MPa 相同，故表中未将其列出）。

表 4-3 路表弯沉值 (0.01mm) 与层间摩擦角和粘结力的关系

摩擦角/ $^\circ$ 粘结力 (MPa)	0	10	30	50	70	85
0	38.2	34.8	31.6	30.4	28.4	27.4
0.005	32.7	31.8	30.7	29.7	28.1	27.4
0.010	32.3	30.8	29.9	29	27.9	27.4
0.030	32.3	29.8	28.5	28.1	27.7	27.4
0.050	32.3	29.8	28.5	28	27.7	27.4

表 4-4 面层底面最大剪切应力 (MPa) 与层间摩擦角和粘结力的关系

摩擦角/ $^\circ$ 粘结力 (MPa)	0	10	30	50	70	85
0	0.000	0.072	0.069	0.098	0.128	0.107
0.005	0.005	0.072	0.074	0.083	0.131	0.107
0.010	0.008	0.071	0.078	0.087	0.113	0.107
0.030	0.008	0.075	0.082	0.089	0.098	0.107
0.050	0.008	0.075	0.082	0.089	0.098	0.107

表 4-5 面层底面最大拉应力 (MPa) 与层间摩擦角和粘结力关系

摩擦角/ $^\circ$ 粘结力 (MPa)	0	10	30	50	70	85
0	0.882	0.898	0.792	0.607	0.426	0.264
0.005	0.878	0.826	0.699	0.541	0.366	0.265
0.010	0.859	0.741	0.618	0.487	0.331	0.266
0.030	0.859	0.647	0.484	0.393	0.306	0.270
0.050	0.859	0.647	0.481	0.388	0.305	0.279

表 4-6 基层底面最大拉应力 (MPa) 与层间摩擦角和粘结力关系

摩擦角/ $^{\circ}$ 粘结力 (MPa)	0	10	30	50	70	85
0	0.406	0.386	0.353	0.349	0.371	0.390
0.005	0.406	0.392	0.365	0.361	0.378	0.390
0.010	0.407	0.394	0.375	0.37	0.383	0.390
0.030	0.407	0.414	0.402	0.395	0.392	0.389
0.050	0.407	0.414	0.404	0.398	0.393	0.389

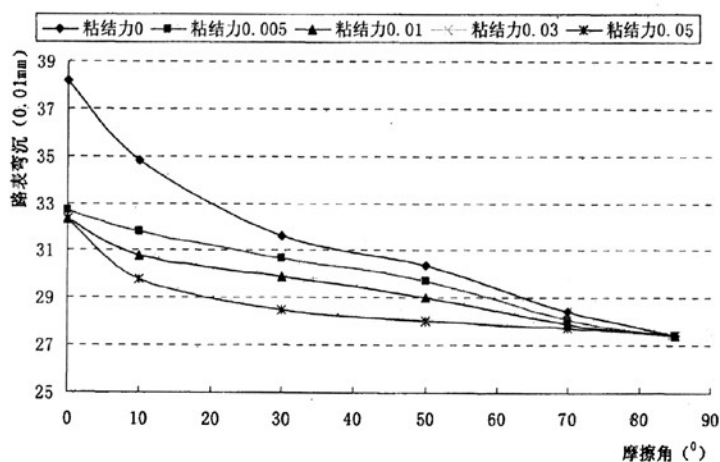


图4-11 路表弯沉与层间粘结力 (MPa) 和摩擦角的关系

路表弯沉值随摩擦角和粘结力的变化见图 4-11 所示, 从图 4-11 可看出, 随着粘结力的增加, 路表弯沉值逐渐减小, 但粘结力大于 0.03MPa 后路表弯沉值随粘结力增加基本保持不变; 随着摩擦角的增大, 路表弯沉逐渐减小; 当摩擦角为 0° 、粘结力 0 MPa 下的路表弯沉值明显高于其它粘结力下的路表弯沉值, 而随着摩擦角的增加, 各个粘结力下的路表弯沉值逐渐靠近, 直至 85° 摩擦角时所有粘结力下的路表弯沉聚集为同一值 27.4(0.01mm)。

面层底最大剪应力随摩擦角和粘结力的变化见图 4-12 所示, 从图 4-12 可看出, 粘结力愈大, 面层底最大剪应力随摩擦角的变化曲线愈趋于平直; 当摩擦角为 85° 时, 面层底最大剪应力受粘结力的影响非常小, 均在 0.107MPa 左右; 当摩擦角为 70° 时, 面层底最大剪应力受粘结力的影响最大; 面层底最大剪应力在摩擦角为 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 时较小, 而在 $60^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 时较大。

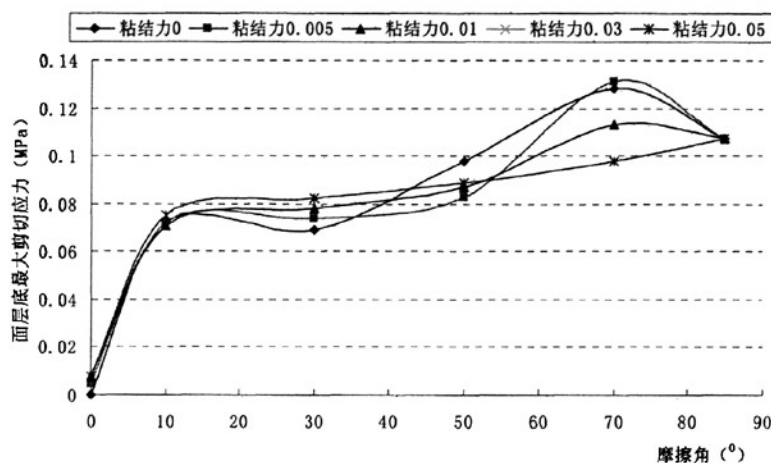


图4-12 面层底最大剪切应力与粘结力 (MPa) 和摩擦角的关系

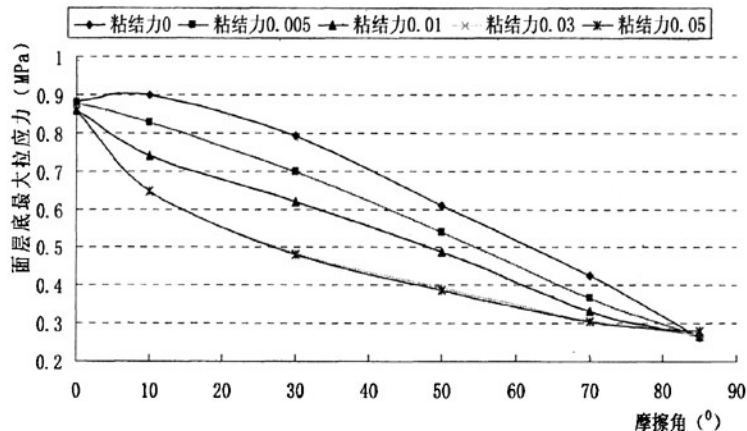


图4-13 面层底面最大拉应力与粘结力 (MPa) 和摩擦角的关系

面层底最大拉应力随摩擦角和粘结力的变化见图 4-13 所示, 从图 4-13 可看出, 面层底最大拉应力随摩擦角和粘结力呈橄榄状变化, 在摩擦角为 0° 和 85° 时面层底最大拉应力随粘结力的变化非常小, 在摩擦角为 30° 时各粘结力下面层底最大拉应力最为分散; 随着粘结力的增加, 面层底最大拉应力逐渐减小; 除层间粘结力为 0MPa 外, 面层底最大拉应力均随着摩擦角的增大而减小。

基层底最大拉应力随摩擦角和粘结力的变化见图 4-14 所示, 从图 4-14 可看出, 层间粘结力越大, 基层底最大拉应力随摩擦角的变化曲线愈趋于平直; 当粘结力大于 0.03MPa、摩擦角小于 10° 时, 基层底最大拉应力随着粘结力的增加而增大, 在摩擦角大于 10° 时基层底最大拉应力随着摩擦角的增大而减小; 当粘结力小于 0.01MPa, 且基层底最大拉应力的极小值处于摩擦角 $30^\circ \sim 50^\circ$ 之间, 在摩擦角 0° 、 85° 处基层底最大拉应力较大; 随着摩擦角的增加, 各个粘

结力下的基层底最大拉应力值逐渐靠近，至 85° 摩擦角时所有粘结力下的基层底最大拉应力几乎聚集为同一值，皆在 0.389MPa 附近。

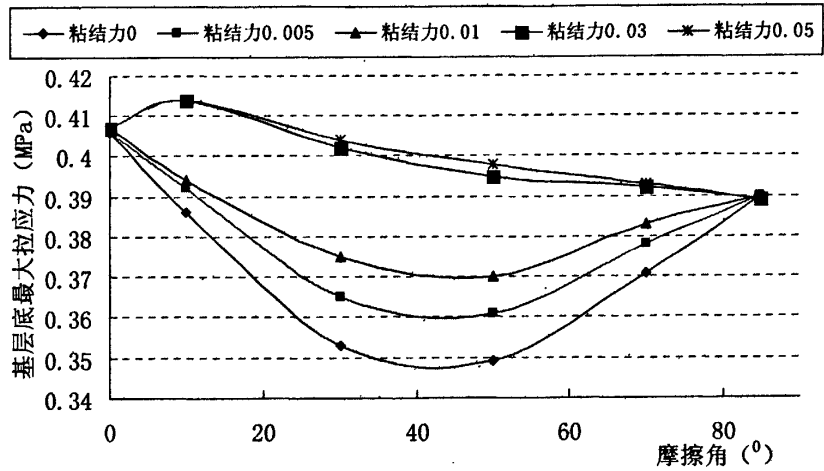


图4-14 基层底最大拉应力与层间粘结力 (MPa) 和摩擦角的关系

综上所述可知，层间摩擦角和粘结力越大越有利于面层承受外界荷载。层间粘结力不小于 0.03MPa 时，层间摩擦角越大越利于基层承受外界荷载，层间粘结力小于 0.03MPa 时，层间摩擦角在 30° ~50° 较利于基层承受外界荷载。

4.2.2 翘曲面板的路面应力应变计算

4.2.2.1 下翘曲面板的路面应力应变

按照面板的翘曲模型图4-3 (a)，分别计算摩擦角在0° ~85° 和粘结力在0~ 0.05MPa之间时下翘曲面板的路面应力和应变，计算结果见表4-7~表4-10，和图4-13~图4-16。

表4-7 路表弯沉(0.01mm)与粘结力和摩擦角的关系

摩擦角/° \ 粘结力 (MPa)	0	10	30	40	50	60	70	80
0	55.0	53.1	50.4	50.1	49.7	49.5	49.3	48.9
0.005	54.8	53.3	50.3	50.1	49.7	49.5	49.3	48.9
0.01	54.6	53.1	50.2	50.0	49.7	49.5	49.2	48.9
0.03	53.4	52.2	50.1	49.8	49.6	49.5	49.2	48.9
0.05	52.5	51.7	50.0	49.7	49.6	49.4	49.1	48.9

表4-8 层间最大剪切应力(MPa)与粘结力和摩擦角的关系

摩擦角/° 粘结力 (MPa)	0	10	30	40	50	60	70	80
0	0.000	0.149	0.263	0.326	0.364	0.341	0.476	0.716
0.005	0.005	0.150	0.260	0.337	0.353	0.331	0.487	0.716
0.01	0.010	0.149	0.254	0.350	0.360	0.320	0.497	0.716
0.03	0.030	0.148	0.258	0.387	0.367	0.315	0.539	0.715
0.05	0.050	0.181	0.297	0.315	0.324	0.342	0.578	0.713

表4-9 面层底面最大拉应力(MPa)与粘结力和摩擦角的关系

摩擦角/° 粘结力 (MPa)	0	10	30	40	50	60	70	80
0	0.400	0.392	0.356	0.317	0.318	0.319	0.456	0.793
0.005	0.398	0.392	0.340	0.318	0.318	0.319	0.464	0.803
0.01	0.396	0.392	0.321	0.318	0.318	0.319	0.471	0.814
0.03	0.389	0.393	0.317	0.318	0.318	0.333	0.501	0.825
0.05	0.387	0.403	0.319	0.318	0.318	0.377	0.532	0.826

表4-10 基层底面最大拉应力 (MPa) 与粘结力和摩擦角的关系

摩擦角/° 粘结力 (MPa)	0	10	30	40	50	60	70	80
0	1.263	1.184	1.143	1.089	1.121	1.157	1.188	1.224
0.005	1.259	1.198	1.139	1.080	1.123	1.158	1.188	1.225
0.01	1.254	1.184	1.133	1.064	1.125	1.158	1.188	1.226
0.03	1.216	1.142	1.109	1.089	1.132	1.162	1.189	1.224
0.05	1.159	1.152	1.065	1.103	1.136	1.165	1.191	1.222

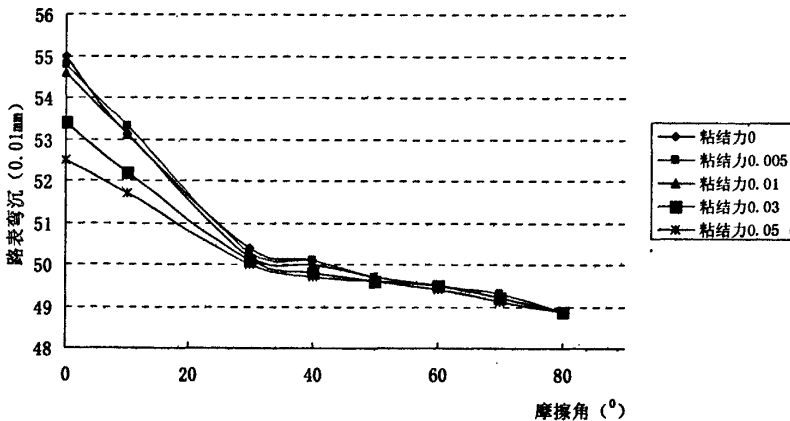


图4-13 路表弯沉与粘结力 (MPa) 和摩擦角的关系

路表弯沉值随摩擦角的变化见图4-13所示，从图4-13可看出，路表弯沉值随

着摩擦角的增加而逐渐减小,在摩擦角 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间下降幅度较大,而在摩擦角 $30^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 之间下降幅度较小;随着粘结力的增加,路表弯沉逐渐减小,在摩擦角 0° 时,不同粘结力下路表弯沉值比较分散,而随着摩擦角的增大路表弯沉值逐渐靠近,摩擦角大于 50° 时,路表弯沉值基本不受层间粘结力的影响。

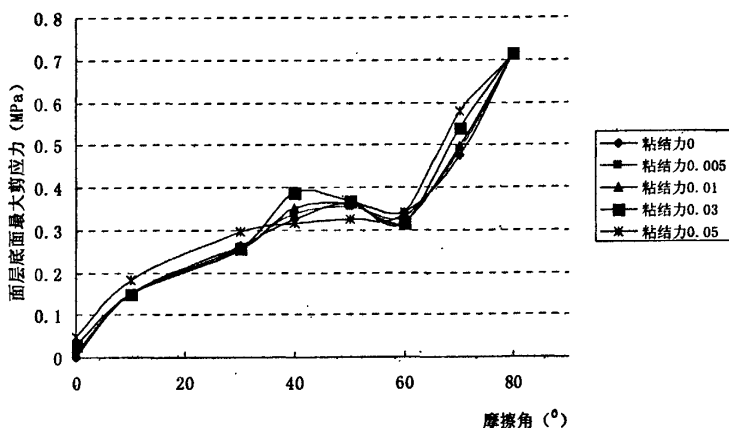


图4-14 面层底面最大剪切应力与粘结力 (MPa) 和摩擦角关系

面层底最大剪应力随摩擦角的变化见图 4-14 所示,从图 4-14 可看出,在摩擦角 $10^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 时,随着摩擦角的增加,面层底最大剪应力逐渐增加;在摩擦角 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时,随着摩擦角的增加,面层底最大剪应力逐渐减小;在摩擦角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 时,随着摩擦角的增大,面层底最大剪应力又逐渐增大,并达到了最大值;面层底最大剪应力随摩擦角的变化曲线,曲线波动程度随着粘结力的增加而增大,随着粘结力的减小,曲线波动程度趋于平缓;摩擦角在 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间时,粘结力为 0.05MPa 时面层底的最大剪应力最小。

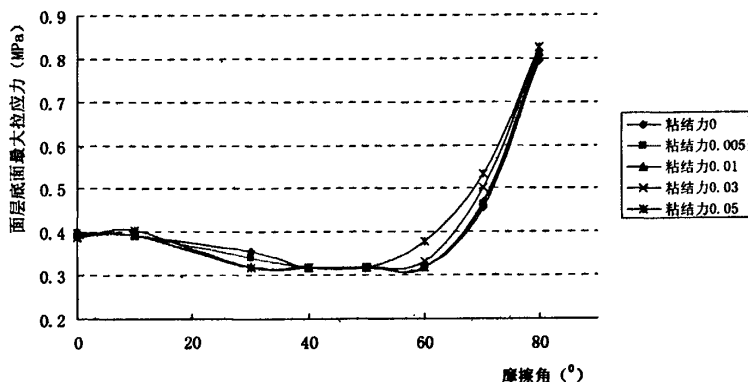


图4-15 面层底面最大拉应力与粘结力 (MPa) 和摩擦角关系

面层底最大拉应力随摩擦角的变化见图 4-15 所示, 从图 4-15 可看出, 在摩擦角 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 时, 随着摩擦角的增加, 面层底最大拉应力逐渐减小, 但减小幅度较小; 在摩擦角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 时, 随着摩擦角的增大, 面层底最大拉应力逐渐增大, 并在摩擦角 80° 时面层底最大拉应力达到最大值; 摩擦角 30° 时, 粘结力愈大面层底最大拉应力愈小, 而摩擦角在 60° 时, 面层底最大拉应力则随粘结力的增大而增大。

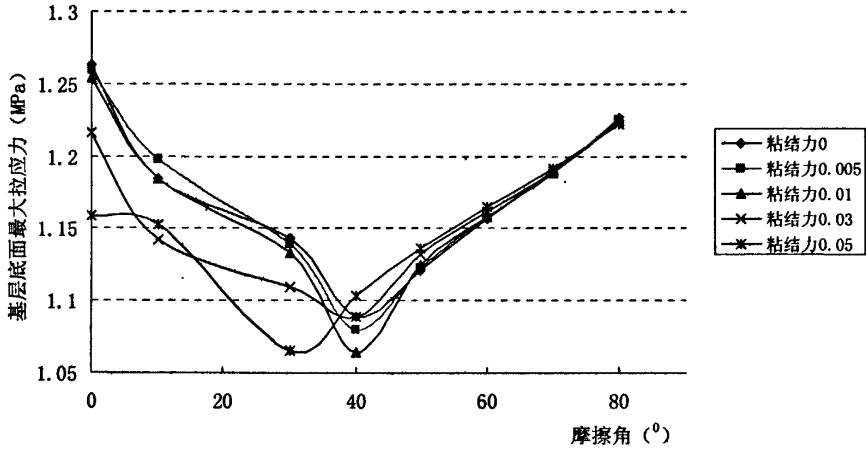


图4-16 基层底面最大拉应力与粘结力 (MPa) 和摩擦角的关系

基层底最大拉应力随摩擦角的变化见图 4-16 所示, 从图 4-16 可看出, 在摩擦角小于 40° 时, 大部分基层底最大拉应力随着摩擦角的增大而逐渐减小, 而摩擦角大于 40° 时, 基层底最大拉应力随着摩擦角的增大而增大; 摩擦角 40° 时, 基层底最大拉应力达到较小值, 且此时粘结力的大小对基层底最大拉应力的影响较大, 摩擦角大于 50° 时, 基层底最大拉应力受粘结力的影响相对较小。

综上所述, 不难看出, 当面板因温度梯度而发生下翘曲变形时, 较利于面层和基层承受外界荷载的摩擦角在 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间, 摩擦角大于 60° 时, 不利于基层和面层承受外界荷载。

4.2.2.2 上翘曲面板的路面应力应变

按照面板的翘曲模型图 4-3 (b), 分别计算摩擦角在 $0^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 和粘结力在 $0 \sim 0.05 \text{ MPa}$ 之间的路面应力和应变, 计算结果见表 4-11 ~ 表 4-14 和图 4-17 ~ 图 4-20。

表4-11 路表弯沉值与粘结力和摩擦角的关系 (0.01mm)

摩擦角/° 粘结力 (MPa)	0	10	30	40	50	60	70	80
0	62.5	60.8	58.8	59.2	60.1	61.3	62.2	63.2
0.005	62.1	60.6	58.8	59.4	60.3	61.4	62.3	63.2
0.01	61.7	60.3	58.9	59.5	60.4	61.5	62.3	63.3
0.03	60.5	59.4	59.3	60.2	61.1	62	62.7	63.4
0.05	59.6	58.7	59.9	60.9	61.8	62.4	63	63.6

表4-12 面层底面最大剪切应力与粘结力和摩擦角的关系 (MPa)

摩擦角/° 粘结力 (MPa)	0	10	30	40	50	60	70	80
0	0.000	0.243	0.269	0.329	0.292	0.298	0.334	0.417
0.005	0.005	0.238	0.274	0.310	0.286	0.303	0.340	0.420
0.01	0.010	0.233	0.283	0.291	0.282	0.308	0.346	0.424
0.03	0.030	0.210	0.252	0.285	0.277	0.318	0.370	0.440
0.05	0.050	0.212	0.256	0.284	0.327	0.341	0.391	0.453

表4-13 面层底面最大拉应力与粘结力和摩擦角的关系 (MPa)

摩擦角/° 粘结力 (MPa)	0	10	30	40	50	60	70	80
0	1.841	1.867	2.253	3.096	3.305	2.357	2.502	2.538
0.005	1.847	1.872	2.261	3.105	3.156	2.382	2.483	2.530
0.01	1.853	1.876	2.268	3.114	3.043	2.405	2.466	2.521
0.03	1.870	1.887	2.308	3.073	2.643	2.427	2.400	2.488
0.05	1.879	1.879	2.335	2.713	2.238	2.305	2.341	2.457

表4-14 基层底面最大拉应力与粘结力和摩擦角的关系 (MPa)

摩擦角/° 粘结力 (MPa)	0	10	30	40	50	60	70	80
0	0.389	0.393	0.411	0.425	0.428	0.430	0.412	0.373
0.005	0.389	0.392	0.412	0.424	0.427	0.426	0.408	0.371
0.01	0.388	0.392	0.415	0.424	0.426	0.422	0.405	0.368
0.03	0.386	0.392	0.417	0.421	0.424	0.403	0.391	0.361
0.05	0.385	0.401	0.415	0.419	0.401	0.388	0.375	0.363

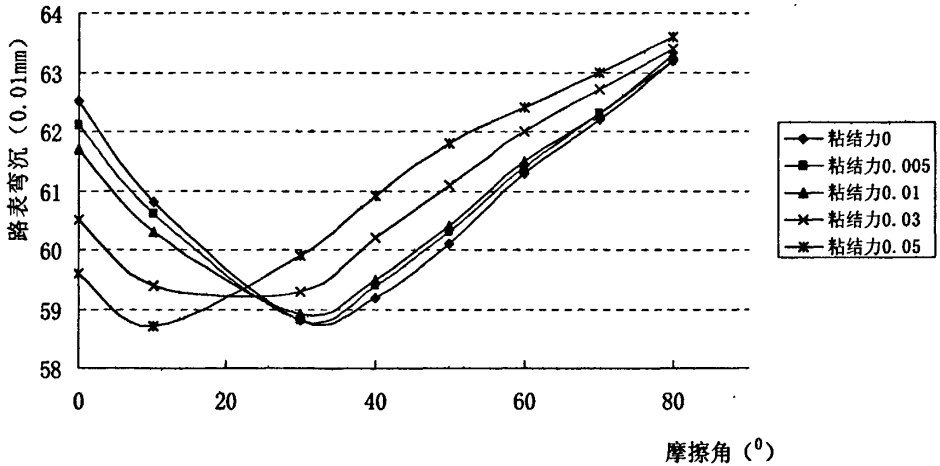


图4-17 路表弯沉与粘结力 (MPa) 和摩擦角的关系

路表弯沉值随摩擦角的变化见图 4-17 所示, 从图 4-17 可看出, 路表弯沉值随摩擦角呈开口向上抛物线变化, 并在摩擦角 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 时路表弯沉最小; 摩擦角约 21° 时, 不同粘结力下路表弯沉值趋于同一个值, 摩擦角小于 21° 时, 大部分路表弯沉值随粘结力增大而减小, 而摩擦角大于 21° 时, 大部分路表弯沉值随粘结力增大而增大。

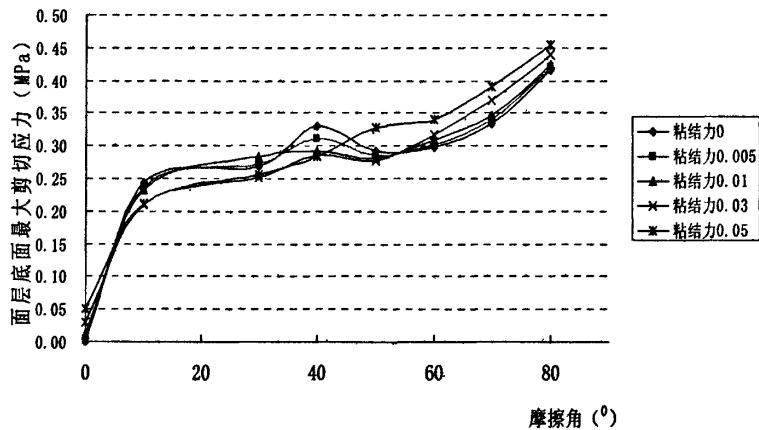


图4-18 面层底面最大剪切应力与粘结力 (MPa) 和摩擦角关系

面层底最大剪应力随摩擦角的变化见图 4-18 所示, 从图 4-18 可看出, 除了粘结力不大于 0.03MPa 和摩擦角 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 外, 面层底最大剪切应力随摩擦角的增大而增大, 在粘结力不大于 0.03MPa 和摩擦角 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 时, 面层底最大剪应力随着摩擦角的增大而减小。

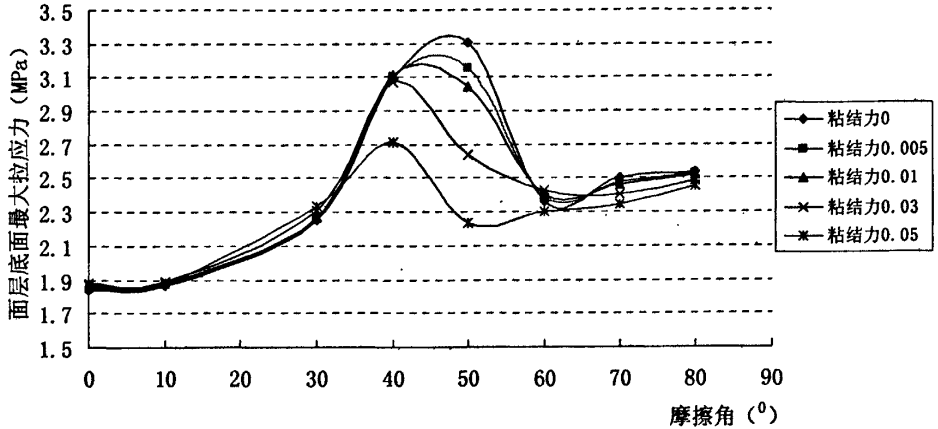


图4-19 面层底面最大拉应力与粘结力 (MPa) 和摩擦角关系

面层底最大拉应力随摩擦角的变化见图 4-19 所示, 从图 4-19 可看出, 摩擦角小于 40° 时, 面层底最大拉应力随摩擦角的增大而增大, 摩擦角在 $50^\circ \sim 60^\circ$ 之间时, 面层底最大拉应力随摩擦角的增大而迅速降低, 摩擦角大于 60° 时, 面层底最大拉应力随摩擦角的增大而略有增大, 在摩擦角为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 之间时面层底面的拉应力较大。摩擦角在 50° 时, 粘结力愈大面层底最大剪应力愈小。

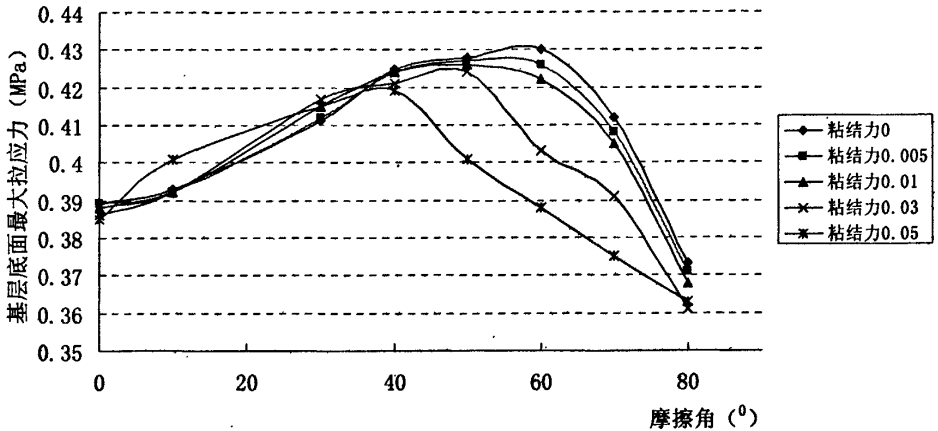


图4-20 基层底面最大拉应力与粘结力 (MPa) 和摩擦角的关系

基层底最大拉应力随摩擦角的变化见图 4-20 所示, 从图 4-20 可看出, 基层底最大拉应力随摩擦角呈开口向下的抛物线变化, 层间粘结力小于 0.03MPa 时, 摩擦角为 60° 的基层底面拉应力最大, 层间粘结力不小于 0.03MPa 时, 摩擦角在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 的基层底面拉应力最大, 且基层底面最大拉应力随层间粘结力的增大而减小。

综合分析,不难看出,当面板因温度而发生上翘曲变形时,摩擦角在 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间最不利于路面承载外界荷载,而在摩擦角在 0° 时最利于路面承受外界荷载,摩擦角大于 60° 时较利于路面承受外界荷载;粘结力越大越利于路面承受外界荷载,但与摩擦角变化对路面受力的影响相比,粘结力力对路面的影响的影响相对较小。

4.2.3 小结

综合层间不同界面参数下的计算结果可知,无翘曲和上翘曲面板的层间粘结力越大越利于面层承受外界荷载,下翘曲面板的层间粘结力对面层承受外界荷载的影响较小。为此,取层间粘结力为 0.03MPa ,在不同的层间摩擦角下比较面板变形状态对路面应力的影响,具体见图 4-21 和图 4-22。

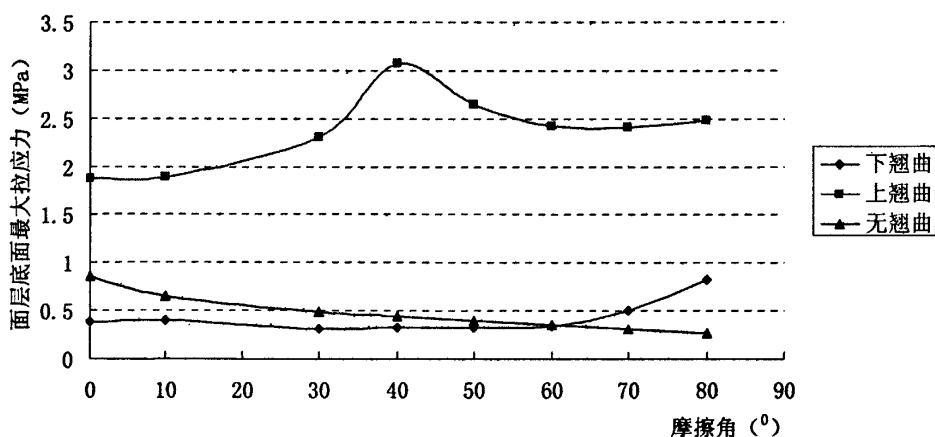


图 4-21 面层最大拉应力与层间摩擦角的关系

面层底面最大拉应力与面板变形、层间摩擦角和粘结力的关系见图 4-21, 由图 4-21 可知: 在相同的外界荷载作用下, 上翘曲面层底面的拉应力最大, 且在层间摩擦角为 40° 时, 面层底面的最大拉应力达到最大值; 下翘曲面板的面层底面最大拉应力随层间摩擦角的增大而减小, 而无翘曲面板的面层底面最大拉应力随层间摩擦角的增大而增大, 并在摩擦角约为 60° 时两种面板状态下的面层底面最大拉应力相等。

综合面板无翘曲和翘曲变形状态下的受力状况, 可得

(1) 在层间摩擦角为 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间时最利于面层承受外界荷载, 在层间摩擦角大于 60° 时较利于路面承受外界荷载, 层间摩擦角在 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 最不利于路面承受外界荷载;

(2) 在层间摩擦角为 0° 时, 在路面承受相同荷载下, 无翘曲面板的面层底面最大拉应力约为上翘曲状态下的 45%, 下翘曲面板的面层底面最大拉应力约为上翘曲状态下的 20%, 由此可知最不利于面板承受外界荷载的变形状态为上翘曲。

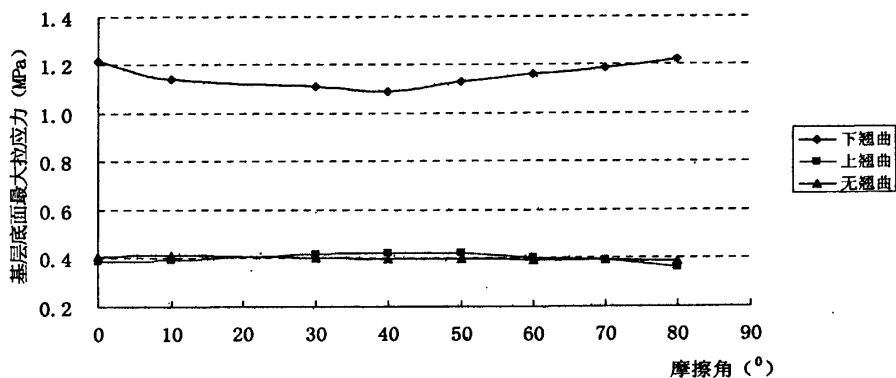


图 4-22 基层最大拉应力与层间摩擦角的关系

基层底面最大拉应力与面层变形、层间摩擦角和粘结力的关系见图 4-22, 由图 4-22 可知, 面板在下翘曲状态下基层受到的拉应力远大于面板上翘曲和无翘曲状态下的拉应力, 在摩擦角为 0° 时, 面板处于上翘曲和无翘曲状态下的基层最大拉应力约为面板处于下翘曲状态下的 30% 左右, 由此可知面板处于下翘曲状态时最不利于路面基层承受外界荷载。

由第三章表 3-7 的层间试验结果可知, 基层表面未处理而直接加铺水泥混凝土面层后, 层间的摩擦角在 35° 左右, 基层表面喷洒蜡质隔离剂后的层间摩擦角在 30° 左右, 此均处于最不利面层受力的层间接触参数范围内。

综合上述的计算结果可知, 为了减少面板底面的拉应力, 基层表面必须平整且表面孔隙较少, 以使层间的摩擦角在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 之间; 为了避免层间界面层破坏而损伤面层和基层, 必须在基层顶面喷洒隔离剂, 喷洒后的层间粘结力应大于 0.03MPa。

4.3 层间设置一定厚度隔离层的力学特性分析

为了使贫混凝土基层与水泥混凝土面层的层间摩擦角处于 $0^\circ \sim 20^\circ$ 之间, 通常需要磨光基层表面, 然后在基层表面喷洒隔离剂, 然而碾压贫混凝土基层施工时, 基层表面通常有局部麻面和离析, 若采用磨光基层表面, 则需将约 1cm 的

基层表面全部磨平，施工难度较大、造价较高。

为了消除基层表面局部麻面、离析对路面受力的影响，防止层间摩擦角处于不利于面层受力的范围内，可在基层表面铺设柔性隔离层，以免层间直接接触和调平基层表面的局部麻面和离析，协调面层的温度翘曲变形。

为此，按柔性隔离层厚度、刚度和面板变形等边界条件，分析静载作用下路面结构受力特性，旨在得到较佳的隔离层厚度和刚度。

4.3.1 无翘曲面板的路面应力应变计算

为了分析柔性隔离层厚度和刚度的大小对路面受力的影响，选取隔离层厚度1cm、3cm、4cm、6cm、8cm、10cm，隔离层刚度100MPa、300MPa、500MPa、700MPa、900MPa、1100MPa、1300MPa、1500MPa，按照表4-1的路面结构和各结构层参数，按图4-6的路面荷载分布形式和无翘曲面板的路面结构模型图4-2，进行路面应力和变形计算，计算结果见表4-16～表4-19和图4-23～图4-26。

表4-16 路表弯沉值与隔离层刚度和厚度的关系 (0.01mm)

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	100	300	500	700	900	1100	1300	1500
1	28.0		26.6		26.4		26.3	
3	29.3	27.4	26.7	26.4	26.2	26.0	25.9	25.9
4	29.7		26.9		26.2		25.9	
6	30.4	27.9	27.0	26.6	26.3	26.0	25.9	25.7
8	30.9		27.2		26.6		25.8	
10	31.4	28.3	27.2	26.6	26.2	25.9	25.7	25.6

表4-17 面层底最大剪应力与隔离层刚度和厚度的关系 (MPa)

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	100	300	500	700	900	1100	1300	1500
1	0.112		0.125		0.132		0.137	
3	0.095	0.096	0.099	0.101	0.103	0.105	0.107	0.109
4	0.083		0.083		0.087		0.090	
6	0.096	0.093	0.093	0.094	0.095	0.097	0.098	0.099
8	0.096		0.092		0.092		0.094	
10	0.097	0.092	0.091	0.091	0.091	0.091	0.092	0.092

表4-18 面板底最大拉应力与隔离层刚度和厚度的关系 (MPa)

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	100	300	500	700	900	1100	1300	1500
1	0.589		0.365		0.301		0.268	
3	0.729	0.563	0.485	0.435	0.399	0.372	0.350	0.332
4	0.761		0.515		0.426		0.373	
6	0.803	0.638	0.556	0.502	0.462	0.430	0.405	0.383
8	0.830		0.582		0.526		0.425	
10	0.849	0.684	0.599	0.542	0.500	0.466	0.438	0.414

表4-19 基层底面最大拉应力与隔离层刚度和厚度的关系 (MPa)

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	100	300	500	700	900	1100	1300	1500
1	0.307		0.328		0.333		0.335	
3	0.279	0.297	0.303	0.307	0.309	0.311	0.312	0.313
4	0.269		0.293		0.299		0.302	
6	0.254	0.273	0.279	0.282	0.284	0.285	0.286	0.287
8	0.241		0.266		0.269		0.272	
10	0.231	0.251	0.255	0.257	0.258	0.259	0.260	0.260

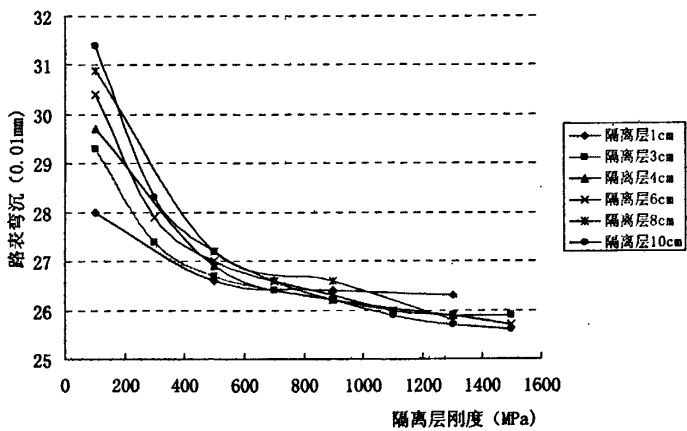


图4-23 路表弯沉值与隔离层刚度和厚度的关系

路表弯沉值随隔离层刚度和厚度的变化见图 4-23 所示，从图 4-23 可看出，路表弯沉值随隔离层刚度的增加而逐渐减小，且减小的幅度在隔离层刚度 100~500MPa 时较大；当隔离层刚度在 700MPa 以下时，隔离层厚度 1cm 时路表弯沉值最小，而当隔离层刚度在 900MPa 以上时，隔离层厚度 10cm 时路表弯沉值最

小。

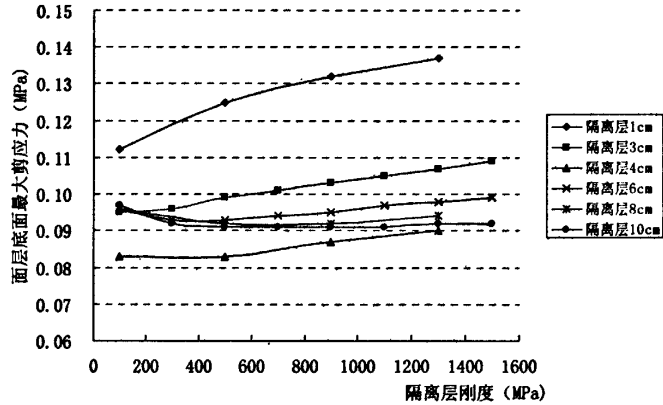


图4-24 面层底最大剪应力与隔离层刚度和厚度的关系

面层底最大剪应力随隔离层刚度的变化见图4-24所示, 从图4-24可看出, 面层底最大剪应力随隔离层刚度增加的变化规律因隔离层厚度的不同而有所不同, 隔离层厚度1cm~4cm时, 随隔离层刚度增加面层底最大剪应力逐渐增加, 隔离层厚度大于4cm时, 随隔离层刚度增加面层底最大剪应力先减少后增加; 总体上, 隔离层4cm厚时面层底最大剪应力相应较小, 而隔离层厚度1cm时面层底最大剪应力明显较大。

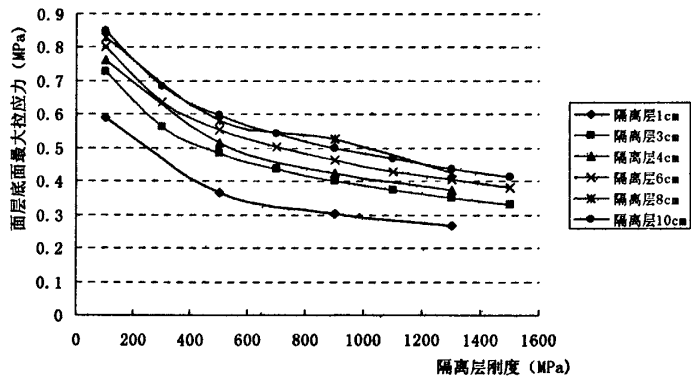


图4-25 面层底最大拉应力与隔离层刚度和厚度的关系

面层底最大拉应力随隔离层刚度的变化见图4-25所示, 从图4-25可看出, 面层底最大拉应力随隔离层刚度的增加而逐渐减小, 隔离层刚度100~500MPa时减

小幅度较大；面层底最大拉应力随隔离层厚度的增加而逐渐增大；当隔离层厚度为8cm、10cm时的面层底最大拉应力较大。

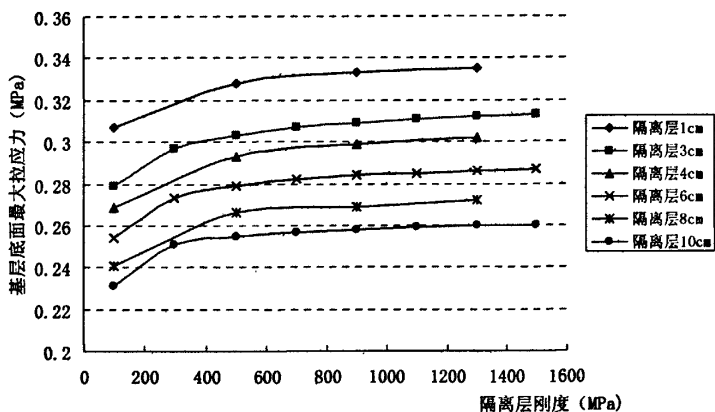


图4-26 基层底最大拉应力与隔离层刚度和厚度关系

基层底最大拉应力随隔离层刚度的变化见图 4-26 所示，从图 4-26 可看出，基层底最大拉应力随隔离层刚度的增加而逐渐增加，但增加幅度不大，约为 0.04MPa 以下；随着隔离层厚度的增加，基层底最大拉应力逐渐减小。

上面的计算结果表明：为了降低面板底面的最大拉应力，隔离层刚度不宜小于 500MPa，厚度不宜大于 6cm；为了降低面层底最大剪切应力，减少隔离层的剪切破坏，隔离层厚度首选 4cm，且刚度在 1300MPa 以下；为了降低基层底面受到的最大拉应力，隔离层的厚度也不宜过薄。

以减少面板底面最大拉应力为主要目标，综合考虑基层和隔离层的受力特性，可得较佳的隔离层厚度范围为 1~6cm，较佳的隔离层刚度为 500MPa~1300MPa。

4.3.2 翘曲面板的路面应力应变计算

根据无翘曲面板的路面应力应变计算结果，选取隔离层厚度1cm、3cm、4cm、6cm，刚度500MPa、700MPa、900MPa、1100MPa和1300MPa，进行面板翘曲状态下的路面应力应变计算。

4.3.2.1 下翘曲面板的路面应力应变

按照图4-4下翘曲的路面结构模型，进行路面应力应变计算，计算结果见表

4-20~4-23和图4-27~图4-30。

表4-20 下翘曲面板的路表弯沉值与隔离层刚度和厚度的关系

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	500	700	900	1100	1300
1	76.4	75.6	76.6	76.6	76.7
3	73.1	73.3	73.4	73.5	73.6
4	71.7	71.9	72	72.1	72.2
6	69.2	69.3	69.4	69.5	69.6

表4-21 下翘曲面板底面最大剪切应力与隔离层刚度和厚度的关系

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	500	700	900	1100	1300
1	0.103	0.106	0.109	0.111	0.113
3	0.077	0.079	0.084	0.089	0.093
4	0.068	0.073	0.082	0.088	0.094
6	0.076	0.076	0.085	0.092	0.098

表4-22 下翘曲面板底面最大拉应力与隔离层刚度和厚度的关系

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	500	700	900	1100	1300
1	1.085	1.175	1.238	1.285	1.321
3	0.801	0.897	0.972	1.032	1.081
4	0.733	0.829	0.903	0.964	1.016
6	0.652	0.744	0.818	0.879	0.932

表4-23 下翘曲面板的基层最大拉应力与隔离层刚度和厚度的关系

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	500	700	900	1100	1300
1	0.960	0.968	0.973	0.976	0.978
3	0.891	0.914	0.927	0.936	0.943
4	0.880	0.885	0.903	0.915	0.923
6	0.866	0.877	0.882	0.884	0.894

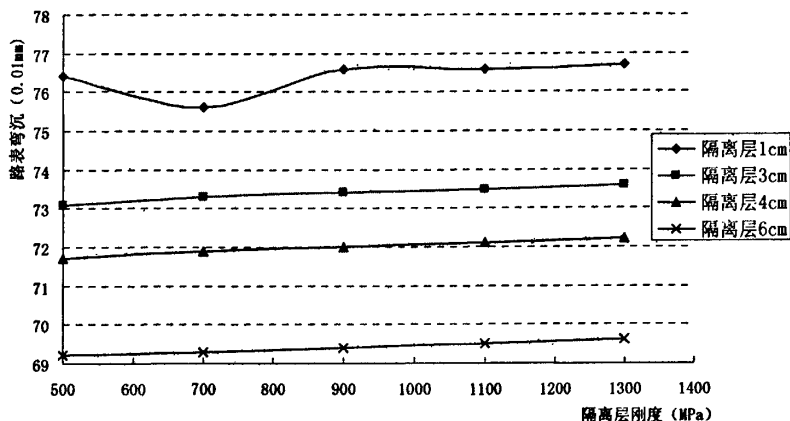


图4-27 路表弯沉值与隔离层刚度和厚度的关系

路表弯沉值随隔离层刚度和厚度的变化见图 4-27 所示, 从图 4-27 可看出, 隔离层厚度大于 1cm 时, 路表弯沉值随隔离层刚度的增加而逐渐增加, 但增加幅度很小, 仅约 0.5 (0.01mm) 左右; 隔离层刚度为 1cm 时, 路表弯沉值先随隔离层刚度增大而减小, 随后随隔离层刚度增大而增大; 隔离层刚度对路表弯沉的影响远不如隔离层厚度的影响大, 隔离层厚度 6cm 时, 路表弯沉值最小, 隔离层厚度 1cm 时, 路表弯沉值最大。

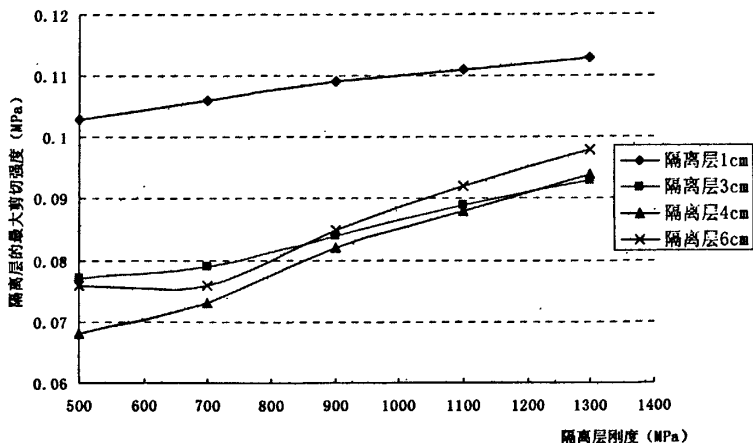


图4-28 面层底最大剪应力与隔离层刚度和厚度的关系

面层底最大剪应力随隔离层刚度和厚度的变化见图 4-28 所示, 从图 4-28 可看出, 面层底最大剪应力随隔离层刚度的增加而逐渐增加; 隔离层刚度与隔离层厚度对面层底最大剪应力的影响皆较明显; 隔离层厚度 4cm 时的面层底最大剪

应力值最小，而隔离层厚度 1cm 时面层最大剪应力最大。

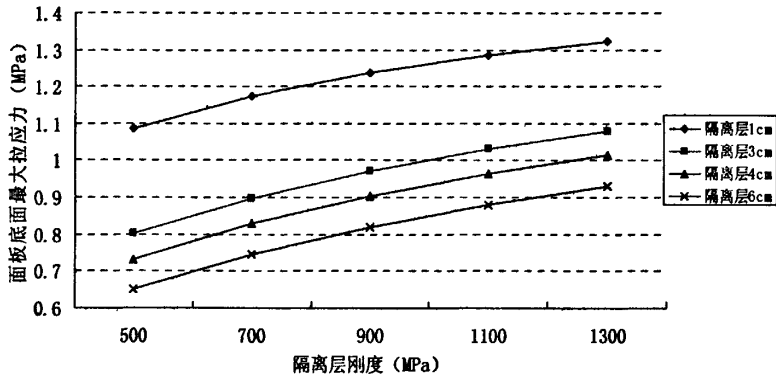


图4-29 面层底最大拉应力与隔离层刚度和厚度的关系

面层底最大拉应力随隔离层刚度和厚度的变化见图 4-29 所示，从图 4-29 可看出，面层底最大拉应力随隔离层刚度的增加而逐渐增加，且增加的幅度较大，隔离层刚度自 500MPa 增大至 1300MPa，面层底最大拉应力大约增加 0.28MPa；隔离层刚度与隔离层厚度对面层底最大拉应力的影响皆较明显；隔离层厚度 1cm 时的面层底最大拉应力值明显较大，隔离层厚度 6cm 时面层底最大拉应力明显较小。

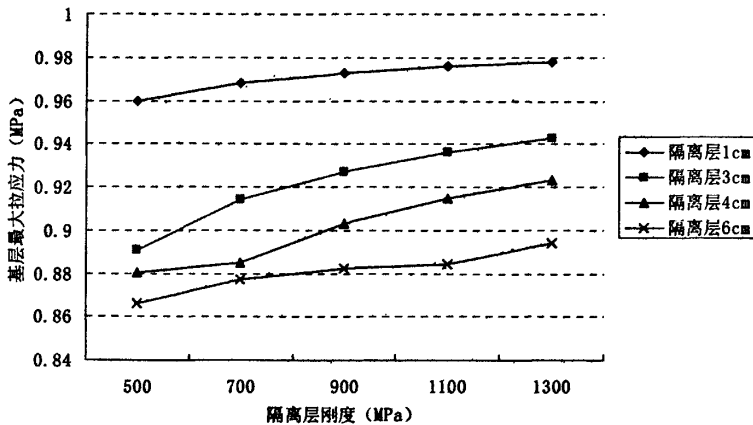


图4-30 基层底最大拉应力与隔离层刚度和厚度的关系

基层底最大拉应力随隔离层刚度的变化见图 4-30 所示，从图 4-30 可看出，基层底最大拉应力随隔离层刚度的增加而逐渐增加；隔离层厚度 1cm 时基层底最大拉应力值明显较大，隔离层厚度 6cm 时基层底最大拉应力明显较小。

综上分析,当面板下翘曲变形时,较佳的隔离层刚度范围为 500~900MPa,较佳的隔离层厚度范围为 4~6cm。

4.3.2.2 上翘曲面板的路面应力应变

按照图4-4上翘曲力学模型,进行路面应力应变计算,计算结果见表4-24~4-27和图4-31~图4-34。

表4-24 上翘曲面板的路表弯沉(0.01mm)与隔离层刚度和厚度的关系

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	500	700	900	1100	1300
1	149.6	149.5	149.5	149.4	149.4
3	141.5	141.2	141	140.9	140.8
4	135.4	135	134.7	134.5	134.4
6	136.3	135.6	135.2	134.9	134.7

表4-25 上翘曲面板底最大剪应力(MPa)与隔离层刚度和厚度的关系

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	500	700	900	1100	1300
1	0.153	0.159	0.163	0.166	0.168
3	0.120	0.124	0.127	0.130	0.133
4	0.103	0.106	0.109	0.112	0.114
6	0.111	0.113	0.115	0.116	0.118

表4-26 上翘曲面板底最大拉应力(MPa)与隔离层刚度和厚度的关系

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	500	700	900	1100	1300
1	1.949	1.901	1.870	1.848	1.832
3	2.211	2.138	2.088	2.050	2.021
4	2.300	2.222	2.167	2.126	2.093
6	2.442	2.358	2.298	2.251	2.214

表4-27 上翘曲面板下基层最大拉应力(MPa)与隔离层刚度和厚度的关系

刚度 (MPa) 厚度 (cm)	500	700	900	1100	1300
1	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008
3	-0.006	-0.006	-0.007	-0.007	-0.007
4	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.007
6	-0.005	-0.005	-0.006	-0.006	-0.006

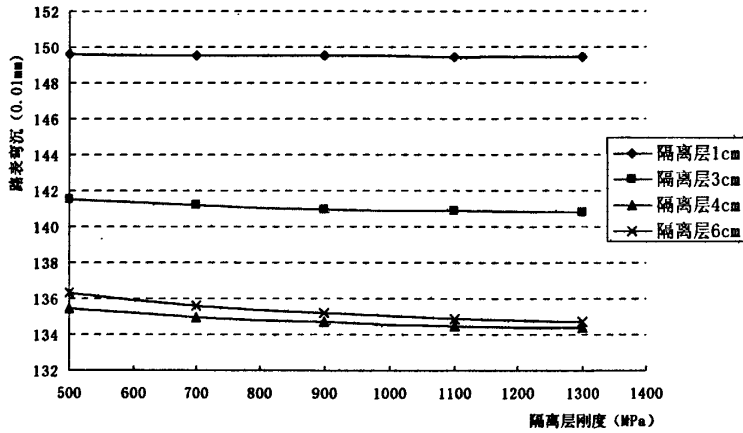


图4-31 路表弯沉与隔离层刚度和厚度的关系

路表弯沉值随隔离层刚度的变化见图 4-31 所示，从图 4-31 可看出，路表弯沉值随隔离层刚度的增加而逐渐降低；隔离层厚度 1cm 时，路表弯沉值较大，隔离层厚度 4cm 时，路表弯沉值较小，且隔离层厚度 4cm 与 6cm 时的路表弯沉值较接近；路表弯沉值在隔离层厚度 4~6cm、隔离层刚度 900~1300MPa 时相对较小。

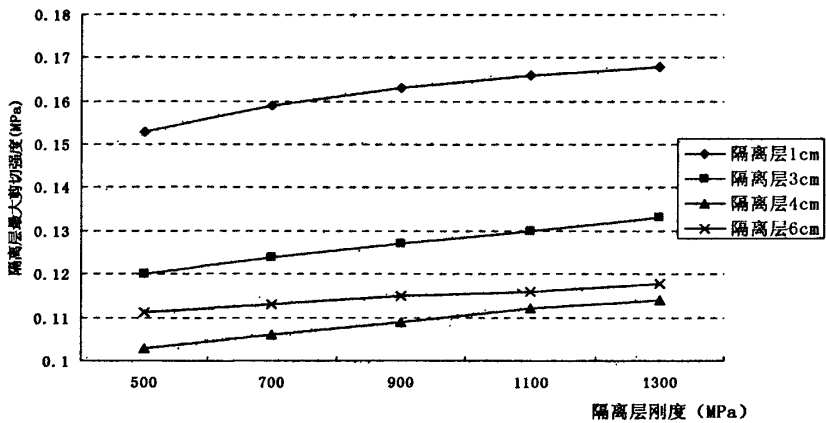


图4-32 面层底最大剪应力与隔离层刚度和厚度的关系

面层底最大剪应力随隔离层刚度的变化见图 4-32 所示，从图 4-32 可看出，面层底最大剪应力随隔离层刚度的增加而线性增大；隔离层刚度与隔离层厚度对面层底最大剪应力的影响皆较明显；隔离层厚度 4cm 时的面层底最大剪应力值较小，隔离层厚度 1cm 时的面层底最大剪应力值较大；面层底最大剪应力在隔离层厚度 4~6cm、隔离层刚度 500~900MPa 时相对较小。

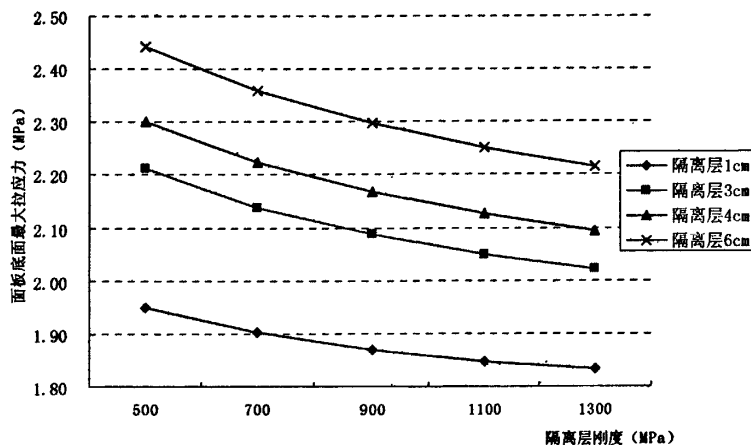


图4-33 面板底最大拉应力与隔离层刚度和厚度的关系

面层底最大拉应力随隔离层刚度的变化见图 4-33 所示，从图 4-33 可看出，隔离层刚度与隔离层厚度对面层底最大拉应力的影响皆明显。面层底最大拉应力随隔离层刚度的增加而逐渐减小，且减大幅度较大，隔离层刚度自 500MPa 增大至 1300MPa，面层底最大拉应力大约减小 0.2MPa；隔离层厚度 6cm 时的面层底最大拉应力值较高，隔离层厚度 3cm 时的居中，隔离层厚度 1cm 时的较小；面层底最大拉应力在隔离层厚度 1cm、刚度 900~1300MPa 时相对较小。

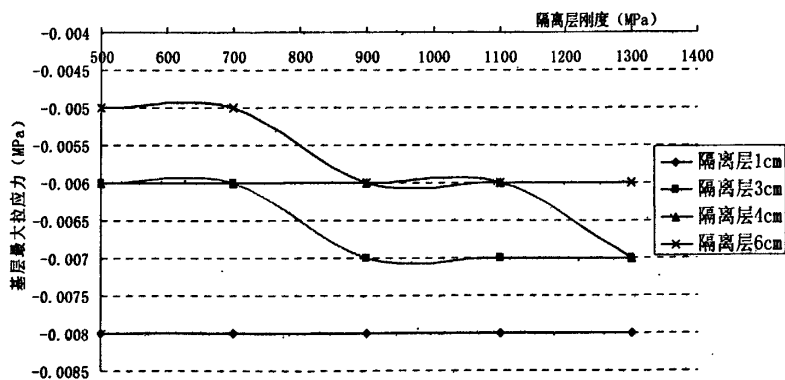


图4-34 基层底最大拉应力与隔离层刚度和厚度的关系

基层底最大拉应力随隔离层刚度的变化见图 4-34 所示，从图 4-34 可看出，基层底最大拉应力随隔离层刚度的增加而逐渐减小；隔离层厚度 6cm 时的基层底最大拉应力值最高，隔离层厚度 4cm 时的居中，隔离层厚度 3cm 时的最小，但是在各隔离层厚度和厚度下，基层底面最大拉应力均为负值，即基层只受到压

应力，而没有拉应力。

综上分析，当面板上翘曲变形时，最佳的隔离层刚度范围为 900~1300MPa，最佳的隔离层厚度范围为 1cm。

4.3.3 小结

为了比较面板在无翘曲、翘曲等变形状态下路面的应力，取隔离层的刚度为 900MPa，不同隔离层厚度的面层底面最大拉应力、面层底面最大剪切应力和基层底面最大拉应力见图4-35~4-37。

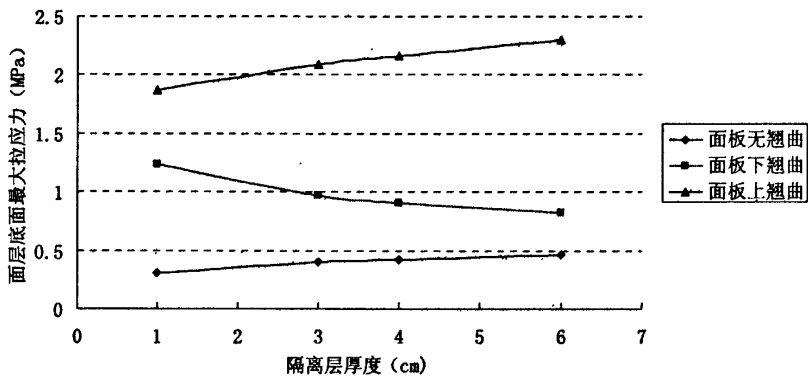


图4-35 面层底面最大拉应力与隔离层厚度的关系

面层底面最大拉应力随隔离层厚度变化见图4-35，由图可以看出：

(1) 面板在无翘曲和上翘曲状态下，在路面荷载作用下面层底面最大拉应力随隔离层厚度增加而增大，而面板处于下翘曲变形状态下，面层底面最大拉应力随隔离层厚度增厚而减小；

(2) 面板处于上翘曲状态下，在路面荷载作用下的板底拉应力比面板处于下翘曲和无翘曲状态下的大，其中面板处于无翘曲状态时面板底面的拉应力最小，在隔离层厚度为1cm时，下翘曲面板的面层底面最大拉应力为上翘曲面板面层底面最大拉应力的66%，无翘曲面板的面层底面最大拉应力仅为上翘曲面板面层底面最大拉应力的16%。

(3) 隔离层厚度为1cm时，面层底面的拉应力最小，即隔离层为1cm时最适合面层承受外界荷载。

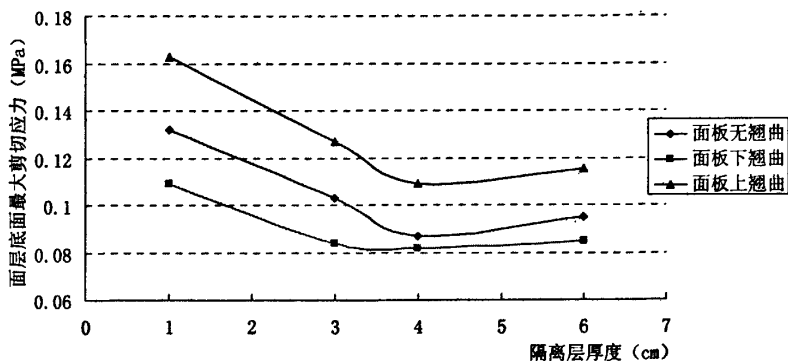


图4-37 面层底面最大剪切应力与隔离层厚度的关系

基层底面最大剪切应力随隔离层厚度变化见图4-37，由图可以看出：

(1) 隔离层厚度小于4cm时，面层底面最大剪切应力随隔离层厚度增大而减小，而隔离层厚度大于4cm时，面层底面最大剪切应力随隔离层厚度增大而又少量增大；

(2) 在相同外界荷载作用下，上翘曲面板的面层底面的剪切应力最大，下翘曲面板的面层底面的剪切应力最小，在隔离层厚度为4cm时面板处于下翘曲变形的面板底面最大剪切应力为面板处于上翘曲变形的75%，面板处于无翘曲变形的面板底面最大剪切应力为面板处于上翘曲变形的80%。

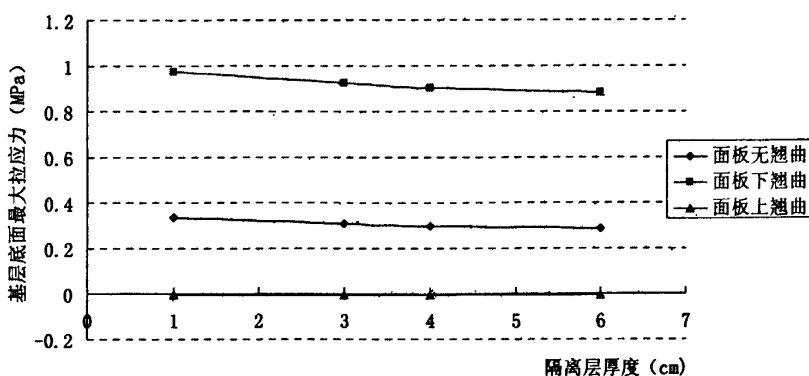


图4-36 基层底面最大拉应力与隔离层厚度的关系

基层底面最大拉应力随隔离层厚度变化见图4-36，由图4-36可以看出，基层底面最大拉应力随着隔离层厚度的增大而增大；面板处于下翘曲变形时基层底面

的最大拉应力比面板处于无翘曲变形的大,面板处于上翘曲变形时,基层底面最大拉应力均为负值,即基层底面只有压应力。

上述分析表明:在荷载作用下,对面板和隔离层最不利受荷状态为面板上翘曲,对基层最不利受荷状态为面板下翘曲;隔离层厚度为1cm时最利于面层承受外界荷载,但在该厚度下隔离层最容易遭到剪切破坏;隔离层厚度在4cm时隔离层最不容易遭到剪切破坏。

鉴于隔离层厚度为1cm厚度较薄,通常只能选择稀浆封层或微表处;由于稀浆封层和微表处的强度较低,材料的刚度通常较小,因此,若能提高1cm隔离层材料的强度、抗剪切等性能,则隔离层厚度为1cm、刚度为800~1000MPa时最利于路面承受外界荷载;如果1cm隔离层的刚度难以达到800~1000MPa,则隔离层材料可采用沥青混凝土,此时隔离层厚度为4cm、刚度为800~1000MPa时较利于路面承受外界荷载。

4.4 基层切缝与路面应力应变计算

为了减少贫混凝土基层的不规则温度收缩和干燥收缩裂缝,基层需预切缝。当层间设置无厚度隔离层时,基层切缝需与面层切缝相对齐;而当层间设置有厚度隔离层时,基层的切缝与面板不宜相对齐,以免隔离层在切缝处遭到破坏,从而加快隔离层冲刷而导致面板底面脱空。

针对贫混凝土基层预切缝与面层横向切缝错缝间距,文献^[3]提出基层与面层之间增设隔离层后基层与面层横向切缝的错缝间距宜控制在0.5m。而对于基层预切缝的缝宽研究,未见系统报道。为此,选取隔离层厚度为4cm,隔离层刚度为900MPa,采用图4-4的力学模型,计算不同基层切缝宽度和基、面层横向切缝错缝间距下路面的应力和应变,计算结果见表4-28~表4-31和图4-38~图4-41。

表4-28 路表弯沉值与基层切缝宽度及基层与面层错缝间距的关系

基层切缝宽度 (mm) / 基层与面层错缝间距 (m)	1	3	5	7	9
0.5	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7
1	26.7	26.7	26.7	26.7	26.8
1.5	26.7	26.8	26.9	26.9	26.9
2	27.0	27.1	27.2	27.2	27.2
2.5	27.3	27.4	27.5	27.5	27.6

表4-29 面板底最大剪切应力与基层切缝宽度及基层与面层错缝间距的关系

基层切缝宽度 (mm) \ 基层与面层切缝间距 (m)	1	3	5	7	9
0.5	0.164	0.164	0.164	0.164	0.164
1	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163
1.5	0.163	0.161	0.161	0.161	0.161
2	0.160	0.159	0.161	0.162	0.164
2.5	0.173	0.173	0.174	0.175	0.175

表4-30 面板底最大拉应力与基层切缝宽度及基层与面层错缝间距的关系

基层切缝宽度 (mm) \ 基层与面层切缝间距 (m)	1	3	5	7	9
0.5	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488
1	0.489	0.489	0.489	0.489	0.489
1.5	0.489	0.492	0.492	0.492	0.492
2	0.515	0.520	0.524	0.526	0.527
2.5	0.649	0.671	0.689	0.707	0.712

表4-31 基层最大拉应力与基层切缝宽度及基层与面层错缝间距的关系

基层切缝宽度 (mm) \ 基层与面层切缝间距 (m)	1	3	5	7	9
0.5	0.325	0.325	0.325	0.325	0.325
1	0.328	0.328	0.328	0.328	0.329
1.5	0.327	0.331	0.331	0.332	0.332
2	0.311	0.308	0.306	0.305	0.304
2.5	0.313	0.231	0.157	0.144	0.143

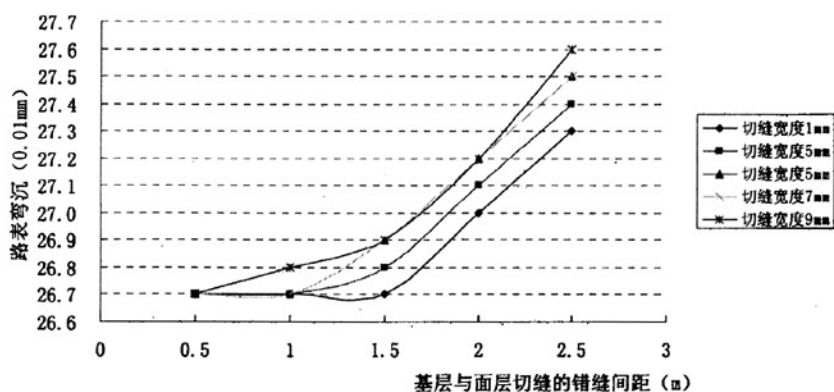


图4-38 路表弯沉与基层切缝宽度和基面层错缝间距的关系

路表弯沉值随切缝宽度和基面层切缝错缝间距变化见图4-38所示, 从图4-38

可看出,路表弯沉值随基、面层横向切缝错缝距离的增加而增大,特别是基层横向切缝错缝间距大于1.5m后,路表弯沉值随基层切缝间距的增大而明显增大;切缝宽度小于3mm、基层与面层切缝的错缝间距为0.5m~1.5m时,路表弯沉值较小。

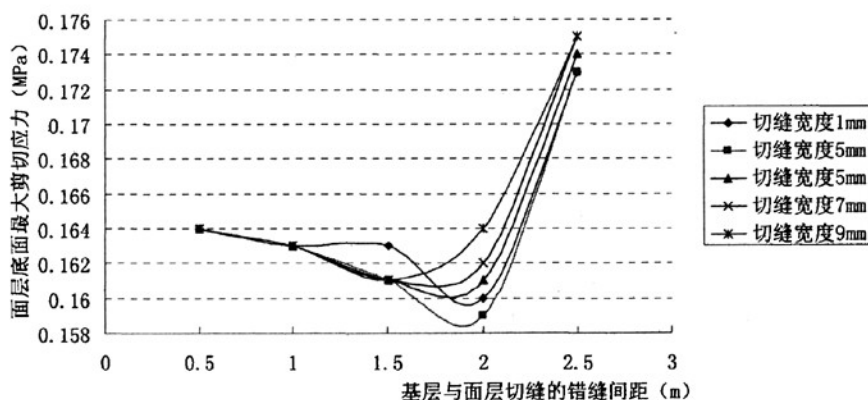


图4-39 面层底最大剪应力与切缝宽度和基层切缝间距的关系

面层底最大剪应力随基、面层横向切缝错缝间距和切缝宽度的变化见图 4-39 所示,从图 4-39 可看出,面层底最大剪应力在基、面层横向切缝间距 2.5m 时最大,在基、面层横向切缝错缝间距 1.5m~2m 时最小;基、面层横向切缝错缝间距 0.5m~1.5m 时,面层底最大剪应力随切缝宽度的增加反而逐渐减小,但变化幅度相对较小。

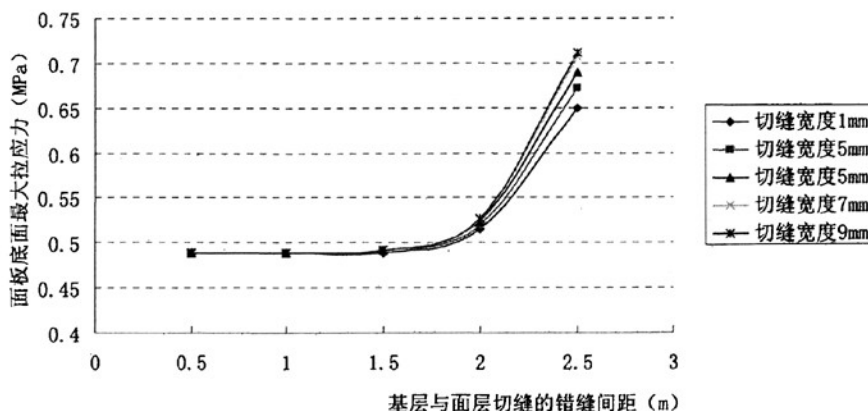


图4-40 面层底最大拉应力与切缝宽度和基层切缝错缝间距的关系

面层底最大拉应力随基、面层横向切缝错缝间距和切缝宽度的变化见图 4-40

所示,从图 4-40 可看出,在基、面层横向切缝错缝间距 0.5m~1.5m 时面层底最大拉应力较小,基、面层横向切缝错缝间距大于 1.5m 后,面层底最大拉应力随基、面层横向切缝错缝间距增大而明显增大,并在基、面层横向切缝错缝间距 2.5m 时最大;在基、面层横向切缝错缝间距 0.5m~1.5m 时,不同基层切缝宽度的面层底最大拉应力基本保持不变。

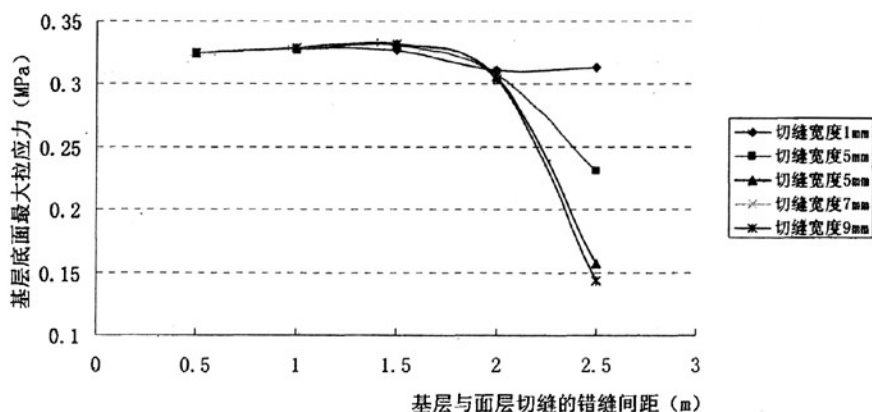


图4-41 基层底最大拉应力与切缝宽度和基面层切缝错缝间距的关系

基层底最大拉应力随基、面层横向切缝错缝间距和切缝宽度的变化见图 4-41 所示,从图 4-41 可看出,当基、面层横向切缝错缝间距 0.5m~1.5m 时,基层底最大拉应力随切缝宽度的增大而逐渐增大,但增加幅度很小;当基、面层横向切缝错缝间距 2m~2.5m 时,基层底最大拉应力随切缝宽度的增大而逐渐减小,且在错缝间距 2.5m 时减幅较大;基层底最大拉应力在基、面层横向切缝错缝间距 2.5m 时最小,在错缝间距 0.5m~1.5m 时较大。

与无切缝时相比,基、面层横向切缝错缝间距 0.5m~1m 时各层的受力变形情况和基层无切缝差异不大;基、面层横向切缝错缝间距 1.5m 和 2.5m 时,切缝宽度 1mm 会引起较大的基层底最大剪应力;基、面层横向切缝错缝间距 2m 处、切缝宽度 1mm~5mm 时能有效降低面层底最大剪应力,但引起路表沉降和面层底最大拉应力提高;错缝间距为 2.5m 时,仅在切缝宽度 3mm~9mm 时使得基层底最大拉应力显著降低。因此,综合考虑基层切缝成本和最大限度保护基层的整体性,基层切缝宽度为 3mm,错缝间距为 1m~1.5m。

经综合分析后可知,隔离层的较佳厚度 1cm、4cm,最佳刚度 900MPa,基、面层横向切缝错缝较佳间距为 1~1.5m,较佳的切缝宽度为 3mm。

4.5 综合分析

为了分析层间增设隔离层与层间未设隔离层的路面应力，将隔离层厚度为1cm、4cm，刚度为900MPa的计算结果，及层间摩擦角为 0° 、 10° ，层间粘结力为0.03MPa的路面应力绘制成图4-42和图4-43所示。

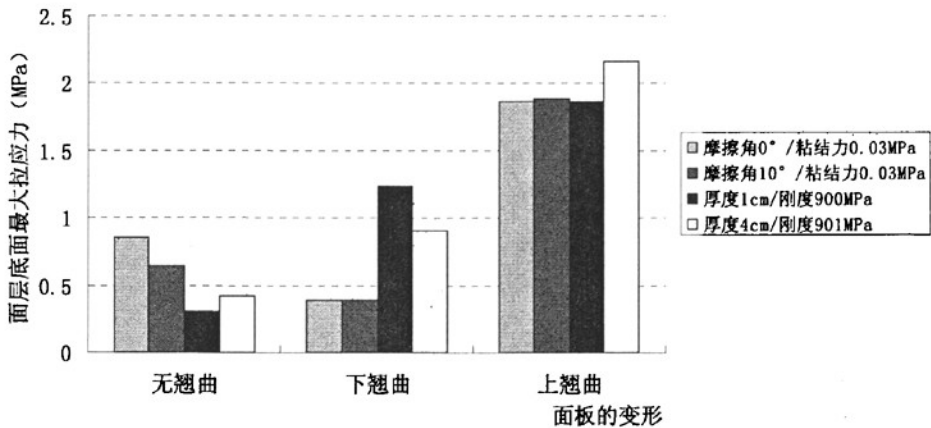


图4-42 面层底面最大拉应力与面板变形的关系

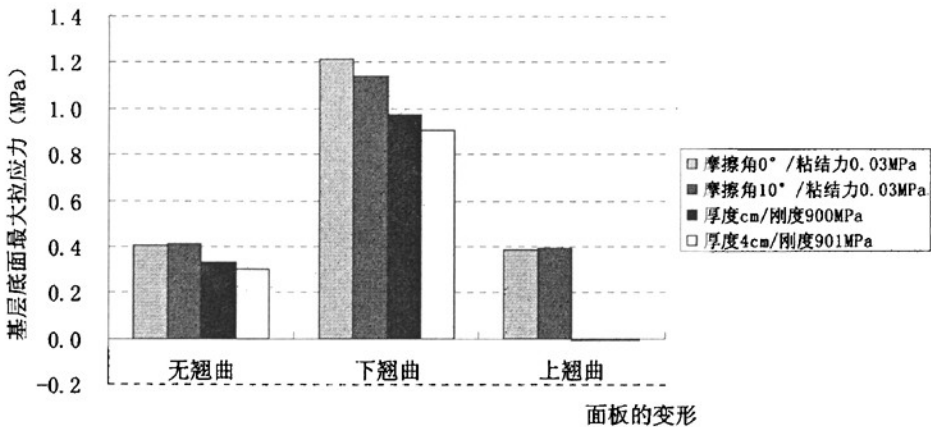


图4-43 基层底面最大拉应力与面板变形的关系

面层底面最大拉应力与面板变形的关系见图4-42，由图可以看出，面板处于上翘曲变形时，在路面外界荷载作用下，面层底面的拉应力大于面板处于下翘曲和面板无翘曲时的应力。面板无翘曲变形时，隔离层厚度为1cm时面板底面拉应力最小，而摩擦角为 0° 的面板底面拉应力最大；相反，在面板处于下翘曲变形

时,隔离层厚度为1cm时面板底面的拉应力最大,而摩擦角为 0° 时面板底面拉应力最小;面板处于上翘曲变形时,除了隔离层厚度为4cm外,其它三种面层底面拉应力基本相当。

基层底面最大拉应力与面板变形的关系见图4-43,由图可以看出,面板处于下翘曲时,在路面外界荷载作用下,基层底面的拉应力明显大于面板处于上翘曲和无翘曲时地应力。层间增设柔性隔离层后,面层基层底面受到的最大拉应力明显降低。

综合面层和基层底面最大拉应力与面板变形的关系图,可以得出,层间设置厚度1cm、刚度900MPa的隔离层将显著改善基层和面层抵抗温度变形和车辆荷载作用,层间设置厚度4cm、刚度900MPa的隔离层虽然使面层底面的拉应力有所增大,但是可以显著降低基层底面的拉应力;层间不设隔离层时,层间界面的摩擦角较小时,虽可减低面层底面的拉应力,但是基层底面受到的拉应力较大。

因此,为了减少路面破坏的深度,宜在基层与面层之间设置柔性隔离层,在隔离层的刚度能够达到900MPa时,隔离层厚度最佳厚度为1cm,若1cm隔离层材料的刚度难以达到900MPa时,隔离层材料选用沥青混合料,则隔离层厚度为4cm较利于路面承受外界荷载。

4.6 本章小结

(1) 水泥混凝土面层直接铺筑在贫混凝土基层或层间设置隔离剂时,层间的界面接触模型可采用摩尔-库仑模型表征,且层间摩尔-库仑模型可以直接表征层间摩擦模型。

(2) 在外界荷载作用下,面板处于上翘曲变形时面板底面拉应力远大于面层处于下翘曲变形和无翘曲变形的应力,面板处于下翘曲变形时基层底面拉应力远大于面层处于下翘曲变形和无翘曲变形的应力。

(3) 层间不设隔离层时,在层间摩擦角为 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间时最利于面层承受外界荷载,在层间摩擦角大于 60° 时较利于路面承受外界荷载,层间摩擦角在 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 最不利于路面承受外界荷载;试验结果表明,碾压贫混凝土基层表面未磨光而直接加铺水泥混凝土面层,层间的摩擦角在 35° 左右,基层表面喷洒蜡质隔离剂后的层间摩擦角在 30° 左右,此均处于面层最不利受力的层间接触状态。

(4) 层间设置隔离层时, 隔离层的刚度为800~1000MPa、厚度为1cm时最利于路面承受外界荷载; 隔离层的刚度为800~1000MPa、厚度为4cm时较利于路面承受外界荷载。

(5) 为了减少路面破坏的深度和改善路面承受外界荷载, 宜在基层与面层之间设置柔性隔离层。

(6) 层间不设隔离层时, 基层与面层的纵横向切缝必须完全对齐; 层间设置隔离层时, 基、面层横向切缝错缝较佳间距为1~1.5m, 较佳的切缝宽度为3mm。

第五章 水泥混凝土路面层间隔离层材料性能研究

在贫混凝土基层表面浇筑一定厚度的柔性隔离层,如稀浆封层、微表处或沥青混凝土,封层或沥青混凝土层与基层之间有一定的粘结力,浇筑水泥混凝土面层时,与隔离层接触或渗透至隔离层孔隙的水泥浆体水化等,将使面层与隔离层之间也有一定的粘结力,从而柔性隔离层将贫混凝土基层与水泥混凝土面层连接为一体。面板产生翘曲时,将引起隔离层沿厚度方向产生形变,当面板的翘曲变形超过隔离层材料的容许拉应变时,隔离层将被拉断;面板产生水平胀缩变形时,也将引起隔离层沿水平方向的剪切变形,面板的水平胀缩变形超过隔离层材料的抗剪切变形时,隔离层将出现剪切破坏。

从面板接缝或裂缝处渗透下来的水滞留在柔性隔离层孔隙或表面上时,在车辆荷载作用下将冲刷柔性隔离层,特别是柔性隔离层因水泥混凝土面板变形而破坏后,滞留在隔离层中的水分将对隔离层产生更加严重的冲刷破坏。

因此,若隔离层材料具有良好的抗冲刷性能或隔离层具有排除层间水等作用,且能够防止柔性隔离层因面板变形而破坏,则将减少柔性隔离层的破坏,从而提高水泥混凝土面板的使用寿命。

5.1 面层板温度变形与隔离层破坏分析

5.1.1 面层板胀缩变形与隔离层破坏

混凝土面板以年为周期的温度变化,其变化周期较长,变化的速度较缓慢,因此可近似看作沿深度方向是均匀变化^[86]。混凝土路面受周围温度变化的影响,它的线长量和体积量都会发生变化,将混凝土作为一种温度线弹性体,它的变形与发生变形前后的温差成正比,其相对线应变为:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \frac{\Delta L}{L} = \pm \alpha T_n \quad (5-1)$$

贫混凝土基层与水泥混凝土面板之间设置柔性隔离层,面板的胀缩、翘曲变形可近似为不受任何约束,能够自由变形。鉴于面层板的缩缝通常采用等间距的假缝形式,切缝深度为面层厚度的1/5~1/4,宽度为3~8mm,槽内填塞填缝料,因此当路面温度高于施工时路面的温度时,面板沿基层向胀缝移动,膨胀位移量以面板下1/5~1/4板厚混凝土温度变化为准,胀缝端部沿基层的位移量:

$$S = \alpha \times \Delta T(z, t) \times \frac{L}{2} \quad (5-2)$$

式中： α --混凝土的线膨胀系数（ $1/^\circ\text{C}$ ），通常可取为 $10^{-5}/^\circ\text{C}$ ；

$\Delta T(z, t)$ --在时间 t （以面板施工切缝为计时起点）内面层板下假缝底部 z 至板底的平均温度变化量（ $^\circ\text{C}$ ）；

L --两胀缝间的距离（ m ）。

假定每块板长为 5m ，那么第 i 条缩缝（ i --胀缝与 i 条缩缝之间有 i 块面板）沿基层的位移为：

$$S_i = \alpha \times \Delta T(z, t) \times \frac{L - 10i}{2} \quad (5-3)$$

由上式可知，缩缝处的移动位移量随缩缝离胀缝的距离增大而减小。

当面层板的温度低于施工时面层板的温度时，面层板收缩，此可能将缩缝的假缝底部混凝土拉断，并以两缩缝的中点为中心向内收缩，其最大收缩量为：

$$Q = \alpha \times \Delta T(z, t) \times \frac{5}{2} \quad (5-4)$$

假定两胀缝间距为 500m ，每块板长为 5m ，即两胀缝间共有 100 块面板，胀缝宽度为 40mm ，胀缝填缝材料为沥青填料或沥青处理的轻质木块，压缩系数为 2.0 ，中间共有 99 条缩缝，且面板下 $1/5$ 至 $1/4$ 板厚至板底的年最大温差（与施工时对应深度面板的温度差值）为 30°C ，由此可算得，如果胀缝处面板没有任何约束，那么胀缝自由端的最大位移量为：

$$S = \alpha \times \Delta T(z, t) \times \frac{L}{2} = 10^{-5} \times 30 \times 250 = 7.5\text{cm}$$

由此可知，假定面板底面自由伸缩，面板下 $1/5$ 至 $1/4$ 厚度至板底的年最大温差大于 16°C ，那么每条胀缝宽度均变窄至 20mm ，当温度循环一个周期后恢复到原施工时的温度，那么胀缝宽度变化量平分至每一条缩缝，即每条缩缝宽度增大 0.404mm 。

现场观测表明，假缝在经过两三天后就已产生贯通开裂。

由于缩缝处的移动位移量随缩缝离胀缝的距离减小而增大，将造成柔性隔离层的剪切破坏，且离胀缝越近，隔离层越容易产生剪切破坏；温度降低后，缩缝处的假缝断裂和缩缝变宽，与面层连成一体的隔离层受到假缝断裂的应力集中和缩缝变宽的影响，柔性隔离层必然产生断裂破坏，其断裂的位置与面层板的切缝相对应。

5.1.2 面层板翘曲变形与隔离层破坏

柔性隔离层上的水泥混凝土面板,将其视为支撑于弹性地基上的四周自由的矩形薄板^[86]。在板顶面和底面间出现温度坡差时,板会产生翘曲变形,假设温度沿板厚呈线性变化分布,且此翘曲变形不受约束,则面板曲率可按式(5-5)确定:

$$\frac{1}{R} = \frac{\alpha_t \Delta T}{h} \quad (5-5)$$

以 z 的零点取在四个角顶所构成的 xy 平面内,则面板变形后路面板在 Z 方向的挠度 w_1 ,可以由切面的几何关系近似地求得,即:

$$w_1 = \frac{[(\frac{a}{2})^2 + (\frac{b}{2})^2 - (x^2 + y^2)]}{2R} = \frac{\alpha_t \Delta T [(\frac{a}{2})^2 + (\frac{b}{2})^2 - (x^2 + y^2)]}{2h} \quad (5-6)$$

考虑面板自重时,假定面板翘曲隆起之后形似一块四角支撑在固定支座上的矩形板^[86],如图5-1所示。根据薄板理论,建立基本方程式:

$$D \nabla^2 \nabla^2 w = q \quad (5-7)$$

式中: q --板体自重均布荷载。

根据边界条件,弹性弯沉方程可选择三角多项式,即:

$$w_2 = \beta_1 \cos \frac{\pi x}{a} + \beta_2 \cos \frac{\pi y}{b} + \beta_3 \cos \frac{\pi x}{a} + \beta_4 \cos \frac{\pi y}{b} + \dots \beta_n \cos \frac{\pi y}{b} \quad (5-8)$$

在实用中,取前两项已足够精确,即:

$$w_2 = \beta_1 \cos \frac{\pi x}{a} + \beta_2 \cos \frac{\pi y}{b} \quad (5-9)$$

求解上式可归结为求解参数 β_1 、 β_2 。采用李茨(Ritz)变分法求解,薄板的总变形能为:

$$U_1 = \frac{D}{2} \iint \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\mu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (5-10)$$

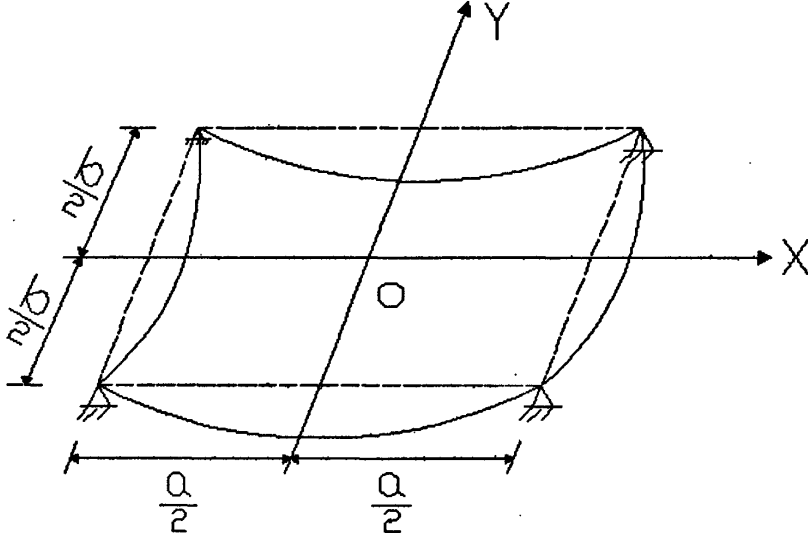


图5-1 近似矩形板示意

对于四个点固定支承的薄板，包括荷载在内的总势能为：

$$U = [U_1 - \iint q w(xy) dx dy] \quad (5-11)$$

为了求U的极值，将上式对 β_1 、 β_2 求导，并取导数为零，即：

$$\frac{\partial U}{\partial \beta_1} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \beta_2} = 0 \quad (5-12)$$

通过运算后，可以得到：

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{48qa^4(1-\mu^2)}{\pi^3 E(2h)^3} \cdot \frac{(\pi^2 - 8\mu \frac{b^2}{a^2})}{(\pi^4 - 64\mu^2)} \\ \beta_2 &= \frac{48qb^4(1-\mu^2)}{\pi^3 E(2h)^3} \cdot \frac{(\pi^2 - 8\mu \frac{a^2}{b^2})}{(\pi^4 - 64\mu^2)} \end{aligned} \right\} \quad (5-13)$$

由此得到：

$$w_2 = \frac{48qa^4(1-\mu^2)}{\pi^3 E(2h)^3} \cdot \frac{(\pi^2 - 8\mu \frac{b^2}{a^2})}{(\pi^4 - 64\mu^2)} \cdot \cos \frac{\pi x}{a} + \frac{48qb^4(1-\mu^2)}{\pi^3 E(2h)^3} \cdot \frac{(\pi^2 - 8\mu \frac{a^2}{b^2})}{(\pi^4 - 64\mu^2)} \cdot \cos \frac{\pi y}{b}$$

若面板的翘曲变形量由隔离层来协调，即隔离层受到的变形为： $w = w_1 - w_2$ ，

隔离层在各特征点处受到的变形为：

(1) $x=0, y=0$, 路面板中点: $w = \frac{\alpha_t \Delta T [(\frac{a}{2})^2 + (\frac{b}{2})^2]}{2h} - \beta_1 - \beta_2$;

(2) $x = \pm \frac{a}{2}, y=0$, 路面长边中心: $w = \frac{\alpha_t \Delta T [(\frac{b}{2})^2]}{2h} - \beta_2$;

(3) $x=0, y = \pm \frac{b}{2}$, 路面短边中心: $w = \frac{\alpha_t \Delta T [(\frac{a}{2})^2]}{2h} - \beta_1$;

(4) $x = \pm \frac{a}{4}, y = \pm \frac{b}{4}$, 路面中点至角顶的对角线中点:

$$w = \frac{\alpha_t \Delta T [\frac{3a^2}{16} + \frac{3b^2}{16}]}{2h} - (\beta_1 + \beta_2) \frac{1}{\sqrt{2}}$$

按照上面的计算公式，结合清连一级公路升级改造（高速）工程的材料参数：该项目板块平面尺寸：长5m，宽4m，板厚：0.3m，最大温度梯度为90℃/m，经过温度修正后板顶面与底面的最大温差为21.3℃，混凝土的泊桑比为0.15，混凝土的密度假定为2400kg/m³，即：a=5m；b=4m；h=0.3m； $\mu = 0.15$ ； $\Delta T = 21.3^\circ\text{C}$ ； $q = 7.2\text{KPa}$ ， $E = 31000\text{MPa}$ 。可计算出考虑面板自重影响后的隔离层的变形量，见表5-1所示：

表5-1 板下不同位置处隔离层的变变量（mm）

<div>X \ Y</div>	0	a/4	a/2
0	3.507	2.981	1.385
b/4	3.162	2.636	0.221
b/2	2.122	1.596	0.000

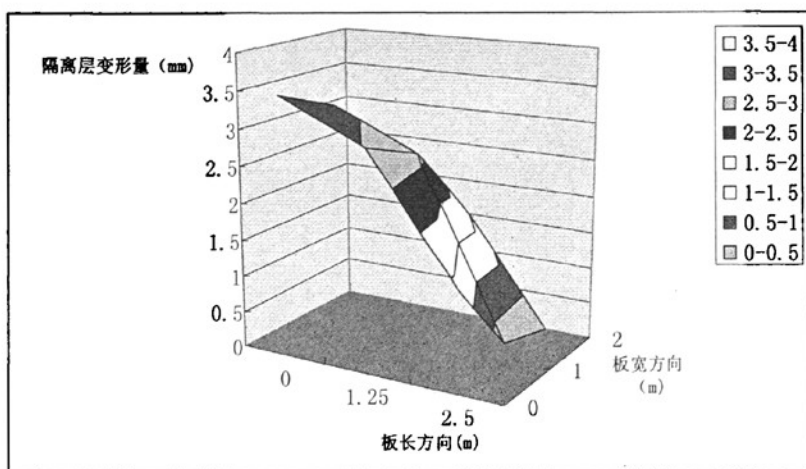


图5-2 1/4板下不同位置隔离层的变形量

在计算隔离层的变形量时,考虑翘曲板块四个角顶与隔离层接触,且四个角顶没有产生沉降,而实际上角顶支承在柔性隔离层上必然产生沉降,为此假定四个角顶的沉降量为面板最大翘曲量的一半,从而可得隔离层的最大拉伸变形量为1.753mm,最大压缩变形也为1.753mm,由此计算隔离层厚度不同时受到的最大拉伸应变,结果见表5-2所示。

表5-2 不同厚度隔离层因面板翘曲产生的最大拉应变

厚度 (mm)	10	30	40	60	80	100	120	140	160	200
拉应变 ($\mu\epsilon$)	175300	58433	43825	29217	21913	17530	14608	12521	10956	8765

根据文献^[93,94]的试验结果,见表5-3,沥青混合料采用AC-13 I型, HXL和SHL分别指欢喜岭沥青混合料和壳牌沥青混合料。

由表5-3可知,沥青混合料的弯曲破坏应变随加载速度变慢而有所增大,随试验温度的上升也有所增大。假定面板底面温度为20℃时面板达到最大翘曲变形,将表5-3与表5-2的数据进行比对,隔离层厚度小于80mm时,面板翘曲引起隔离层的拉应变均超过混合料的最大破坏应变。

鉴于层间柔性沥青混合料的厚度一般不会大于8cm,且沥青混合料的厚度大于80mm时,通常需要分层施工,而层间通常是混合料的薄弱点,因此,可以判断隔离层在面板的翘曲变形或多次翘曲变形后,将产生疲劳断裂破坏。

表5-3 HXL与SHL沥青混合料弯曲破坏应变（ $\mu\epsilon$ ）的比较

加载速率		50mm/min		5mm/min	
混合料的沥青品种		HXL	SHL	HXL	SHL
试验的温度 ($^{\circ}\text{C}$)	20	12900	19700	19800	32800
	15	11600	7400	13200	16100
	10	6630	2670	11400	10600
	5	4490	2420	7530	2910
	0	2380	1910	4340	2020
	-10	1570	1530	2310	1490
	-20	1500	1330	1910	1380

上述混凝土胀缩变形和翘曲变形引起隔离层的破坏结果表明：混凝土面板下柔性隔离层因混凝土面层板温度变形而遭到破坏，且破坏形式为平面上的开裂与面板的切缝相对应，在厚度方向将沿隔离层厚度的薄弱处断裂。

5.2 隔离层材料抗冲刷性能分析

层间柔性隔离层有封层和沥青混合料，常用的封层有稀浆封层、微表处、同步碎石封层、开普封层等。封层的厚度较薄，且主要作为预防性养护，其水稳定性通常采用湿轮磨耗试验予以评定；沥青混合料则采用冻融劈裂试验，测定混合料试件在受到水浸湿前后劈裂破坏的强度比，评价混合料水稳定性。

虽然湿轮磨耗试验和冻融劈裂试验能够反映混合料的抗水损害能力，但作为层间隔离层，湿轮磨耗试验和沥青混合料的冻融劈裂试验均无法模拟动载车辆重复作用下的动水压力和真空抽吸应力，且两种试验方法的试验结果没有可比性。

因此，将结合基层的冲刷过程，拟开发一套层间隔离层的冲刷试验仪，进行不同隔离层材料的抗冲刷试验。

5.2.1 冲刷试验仪开发

大量的研究表明^[19, 95]，导致面板脱空的冲刷包括真空抽吸冲刷和冲击冲刷两个过程。根据该冲刷过程，进行冲刷试验仪开发，其开发的思路是：利用震动台的震动产生动力水和出现局部真空，模拟基层或隔离层遭到水的冲刷，具体见图5-3~图5-5。

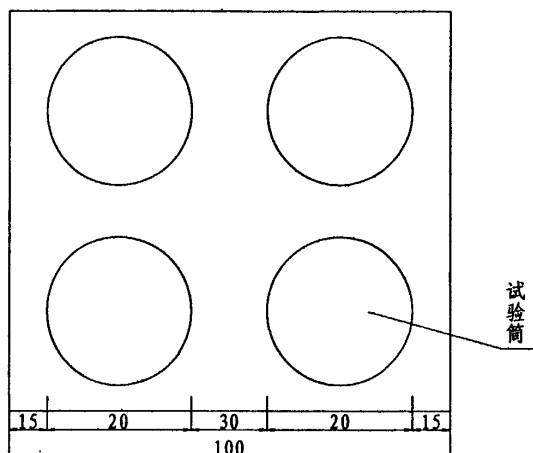


图5-3 冲刷试验仪的平面示意图 (cm)

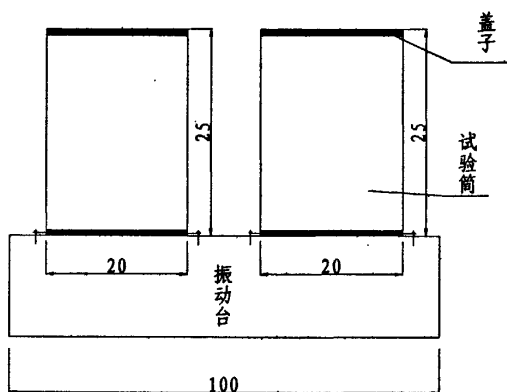


图5-4 冲刷试验仪的纵面示意图 (cm)

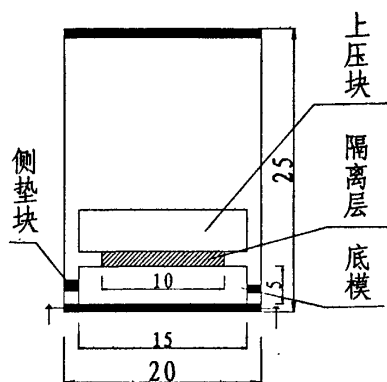


图5-5 冲刷试验的试块示意图(cm)

在图5-5中，当震动台向下振时，与试件分离的上压块由于惯性将与隔离层试件脱离，从而在上压块与试件之间产生瞬间真空，水被吸入瞬间真空位置，对试件产生抽吸冲刷，随后震动台上振时，试件向上移动，试件与上压块的水就被挤出，从而对试件产生冲击冲刷。

根据上述的开发思路，冲刷仪的设备包括：震动台、震动筒、试膜、配重块、垫块等。各设备组装形式为：在震动台上安装四个震动筒，通过螺栓将震动筒固定在震动台上，在震动筒中放好待测试件，采用串联在一起的橡胶片将试件固定在震动筒中，以免试件侧壁与震动筒相撞。向震动筒内加水，水面高度比隔离层试件的顶面稍高（约1cm），如图5-6、图5-7所示，其中震动台的频率为10Hz，上压块重量为6kg的铁质圆板。

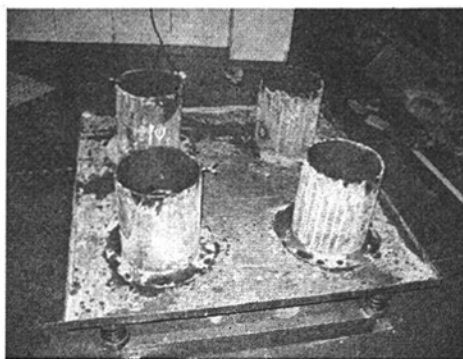


图5-6 振动冲刷试验仪（一）



图5-7 振动冲刷试验仪（二）

5.2.2 隔离层材料性能

5.2.2.1 隔离层原材料

为了比较不同隔离层的抗冲刷性能, 基质沥青采用90#SK沥青、改性沥青采用SBS改性90#SK沥青 (SBS的掺量4.7%)、乳化沥青采用90#SK乳化沥青、改性乳化沥青采用SBS改性SK沥青的乳化沥青, 乳化剂采用阳离子, 集料采用石灰岩石料。

90#基质SK沥青的技术性能见表5-4, SBS改性SK沥青的技术性能见表5-5, SK乳化沥青的技术性能见表5-6, 改性SK乳化沥青的技术性能见表5-7, 其中乳化剂为上海维什维克, 乳化剂用量为1.8%, 油水比为60: 40。

稀浆封层采用SK乳化沥青, 微表处采用SBS改性SK沥青的乳化沥青, 开普封层包括两种, 一种是基质沥青同步碎石封层+稀浆封层, 另一种是改性沥青同步碎石封层+微表处, AC-10采用基质SK沥青。

集料采用石灰岩, 各级集料的密度见表5-8所示, 其中细集料的砂当量为75%。

表5-4 SK A-90#基质沥青技术参数

检验项目		单 位	技术要求	检验结果
针入度 (25℃, 100g, 5s)		0.1mm	80~100	82
针入度指数 PI		—	-1.5~+1.0	-1.5
延度 (10℃, 5cm/min)		cm	≥20	60
延度 (15℃, 5cm/min)		cm	≥100	>100
蜡含量 (蒸馏法)		%	≤2.2	1.3
软化点		℃	≥44	45
动力粘度 60℃		Pa·s	≥140	476.1
闪点 (COC)		℃	≥245	340
溶解度		%	≥99.5	99.87
密度 (15℃)		g/cm ³	实测	1.052
RTFOT 后	质量变化	%	≤±0.8	-0.01
	针入度比 25℃	%	≥57	63
	延度 (10℃, 5cm/min)	cm	≥8	9

表5-5 SK A-90# SBS改性沥青技术参数

检验项目		单 位	技术要求	检验结果
针入度 (25℃, 100g, 5s)		0.1mm	60~80	69
针入度指数 PI		—	≥-0.4	-0.4
延度 (5℃, 5cm/min)		cm	≥30	49
软化点		℃	≥55	77
运动粘度 135℃		Pa·s	≤3	1.229
闪点 (COC)		℃	≥230	321
溶解度		%	≥99	99.6
密度 (15℃)		g/cm ³	实测	1.03
弹性恢复 25℃		%	≥65	94
RTFOT 后 残留物	质量损失	%	≤±1.0	-0.2
	针入度比 25℃	%	≥60	70
	延度 (5℃, 5cm/min)	cm	≥20	25
沥青与矿料的粘附性		级	≥5	5

表5-6 乳化沥青的技术参数 (采用SK A-90#乳化)

检验项目		单 位	技术要求	检验结果
筛上剩余量 (1.18mm 筛)		%	≤ 0.1	0.05
微粒子电荷		—	阳离子 (+)	阳离子 (+)
粘 度	恩格拉粘度 E_{25}	—	1~6	3.5
	标准粘度 $C_{25, 3}$	s	2~30	18.8
储存稳定性	1d	%	≤ 1	15.6
蒸发 残 留 物	残留物含量	%	≥ 55	62.9
	针入度 (25℃)	0.1mm	45~150	74
	软化点	cm	—	49
	延度 (10℃)	%	—	16

表5-7 改性乳化沥青技术参数 (采用SBS改性SK A-90#沥青乳化)

检验项目		单 位	技术要求	检验结果
蒸发 残 留 物	残留分含量, 不小于	%	50	50
	针入度 (100g, 25℃, 5s)	0.1mm	40~120	69
	软化点, 不小于	℃	50	53
	延度 (5℃), 不小于	cm	20	29
	溶解度, 不小于	%	97.5	—

表5-8 矿料的密度

试样规格 (mm)	表观相对 密度 γ_a	表干相对 密度 γ_s	毛体积相对 密度 γ_b	吸水率 W_x (%)	表观密度 ρ_a (g/cm ³)	毛体积密度 ρ_b (g/cm ³)
10~15	2.864	2.836	2.820	0.54	2.857	2.814
5~10	2.852	2.814	2.793	0.74	2.845	2.786
石屑	2.735	—	—	—	2.728	—
矿粉	2.703	—	2.698	—	—	—

5.2.2.2 隔离层混合料

选择了三种级配的稀浆封层, 分别为ES-1型、ES-2型和ES-3型, 选择了两种级配的微表处, 分别为MS-2型和MS-3型, 矿料的具体级配见表5-9和图5-8所示, 用2%的水泥替代2%的矿粉。

AC-10集料的级配采用规范中值, 具体见《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)。

表5-9

稀浆封层和微表处的矿料级配

筛孔尺寸 (mm)	不同类型通过各筛孔的百分率 (%)		
	ES-1 型	ES-2 型/MS-2 型	ES-3 型/MS-3 型
9.5		100	100
4.75	100	97.5	80
2.36	95	77.5	57.5
1.18	75	57.5	39
0.6	52.5	40	26.5
0.3	33.5	24	18.5
0.15	22.5	15.5	12.5
0.075	15	10	10

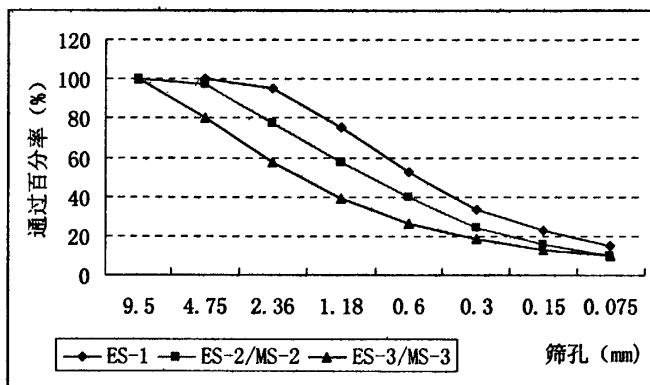


图5-8 矿料的级配图

稀浆封层和微表处的油石比为6%，通过室内试验，AC-10的油石比为5%。

开普封层中改性同步碎石封层采用10mm~15mm的集料，基质沥青同步碎石封层采用5mm~10mm的集料，洒布量为不小于表面积的75%。

5.2.3 隔离层试件成型方法

鉴于规范中无隔离层冲刷试验的试件成型方法，故在室内探索了多种试件成型方法，并与现场摊铺现状进行比较，得出一套可行的成型方法，具体如下：

(1) 稀浆封层、微表处成型

由于铁模（成型试件的底膜）表面有一层油膜，造成铁模表面憎水，成型在其上的微表处或稀浆封层浆体与铁模的粘附性较差，浆体容易向周边流淌，使得封层试件难以成型，且与铁模的粘结力较差。因此改良后的试件成型方法是：在铁模上涂少量基质沥青，以增强浆体与铁模之间粘结力，然后再在其上成型微表处或稀浆封层，这种方法可以避免浆体向周边流淌，是一种可行的成型方法。

(2) 开普封层试件成型

先在铁模上成型同步碎石封层,然后再在封层上成型稀浆封层或微表处。由于铁模的温度较低,喷洒在铁模的热沥青温度急剧下降,无法模拟同步碎石封层的施工工艺。因此,改良后的试件成型方法是:先将铁模(底模)和碎石放在163℃烘箱中烘一个小时,取出铁模后,在其上指定位置喷洒预先准备好的热沥青(普通沥青的温度为140℃,改性沥青的温度为165℃),再洒上预热过的碎石,然后采用胶皮棒碾压数遍,最后在其上成型微表处或稀浆封层试件。

(3) 沥青混合料试件成型

采用马歇尔法成型沥青混合料试件,然后将马歇尔试件切成厚度3cm的试件,接着在铁模上涂刷与沥青混合料相同的热沥青,最后将试件粘附在铁模上。

5.2.4 隔离层冲刷试验及试验结果

5.2.4.1 隔离层冲刷试验操作步骤

隔离层冲刷试验的操作步骤为:先将成型在铁模上隔离层试件养生,然后将铁模和黏附在铁模上的试件放置在60℃水浴中浸泡24h,接着将试件从水浴中取出,用拧干的湿毛巾擦干试件及铁模后,测得铁模和试件的总重量,再将试件放在振动筒中,每组四个试件分别放在四个振动筒中,加上6KG配重块,随后在振动筒四周插入用铁丝串联的橡胶垫块,向震动筒加水(水温20℃~25℃),水位比试件顶面高约1cm~2cm,打开震动台,每振动冲刷5min后,将试件取出,用拧干的湿毛巾擦干后称重,算得5min的冲刷损失量,最后以5min为一个冲刷单元,得到每5min的冲刷损失量,总冲刷时间不少于30min。

5.2.4.2 隔离层冲刷试验结果

按照冲刷试验的操作步骤,分别进行稀浆封层、微表处、开普封层和AC-10的冲刷试验。

不同级配稀浆封层的试验结果见表5-10和图5-9;不同级配微表处的冲刷试验结果见表5-11和图5-10所示;开普封层的冲刷试验结果见表5-12和图5-11所示;AC-10沥青混合料的冲刷试验结果见表5-13和图5-12所示。

表5-10 不同级配稀浆封层的累积损失量随冲刷时间变化

冲刷时间 项目	5min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min
稀浆封层 I 型 (g)	30.74	37.37	41.30	44.53	47.22	48.17	48.17	48.17
稀浆封层 II 型 (g)	16.84	25.69	33.13	37.88	43.60	46.95	50.46	54.45
稀浆封层 III 型 (g)	9.16	24.57	42.30	51.71	63.51	75.74	82.65	88.58

表5-11 不同级配微表处的累积损失量随冲刷时间变化

冲刷时间 项目	5min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min
微表处 II 型 (g)	0.65	3.33	5.74	8.02	9.58	10.40	10.60	10.80
微表处 III 型 (g)	0.58	2.40	3.07	3.60	5.06	7.95	10.62	13.40

表5-12 开普封层的累积损失量随冲刷时间变化

冲刷时间 (min) 项目	5	10	15	20	25	30	35
基质沥青同步碎石+ 稀浆封层 (g)	67.73	109.90	125.15	133.81	139.45	144.78	147.25
改性沥青同步碎石+ 微表处 (g)	8.38	19.63	31.79	49.08	62.83	77.86	

表5-13 AC-10沥青混合料累积冲刷损失随冲刷时间变化

冲刷时间 (min) 项目	5	10	15	20	30	40
试件-1	-6.01	-7.48	-6.07	-6.2	-6.61	-5.38
试件-2	-7.47	-7.4	-6.14	-5.8	-4.22	-4.43
试件-3	-4.09	-4.15	-3.31	-4.14	-3.88	-4.53
平均值	-5.86	-6.34	-5.17	-5.38	-4.90	-4.78

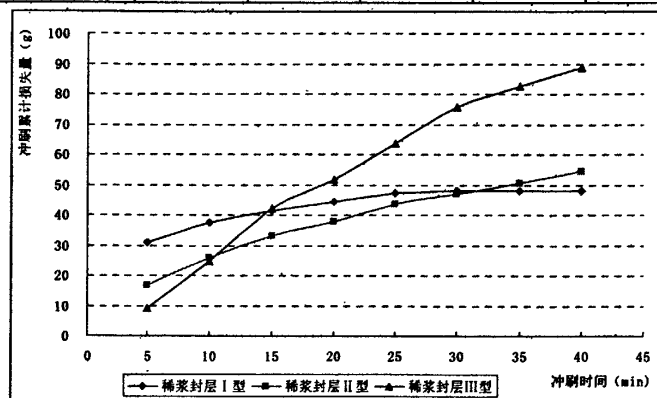


图5-9 不同级配稀浆封层累计损失量随冲刷时间变化

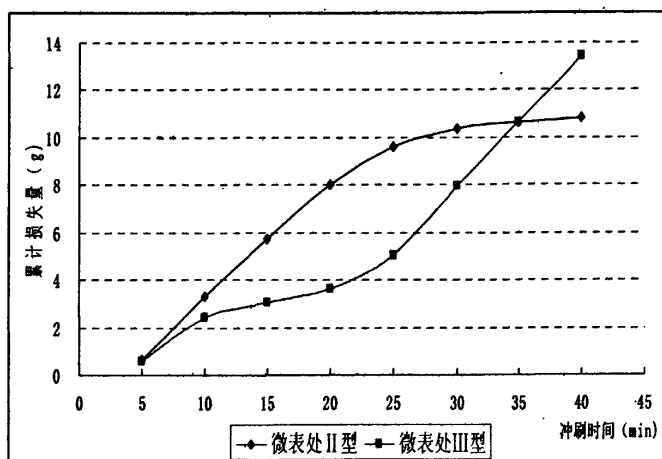


图5-10 不同级配微表处累计冲刷损失量随冲刷时间变化

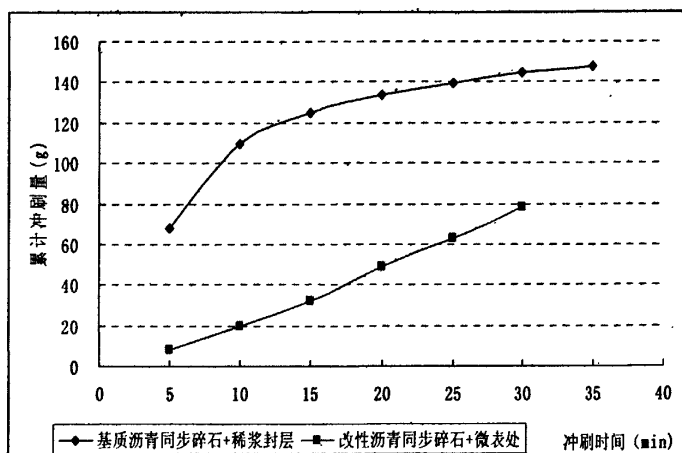


图5-11 开普封层累积冲刷损失量随冲刷时间变化

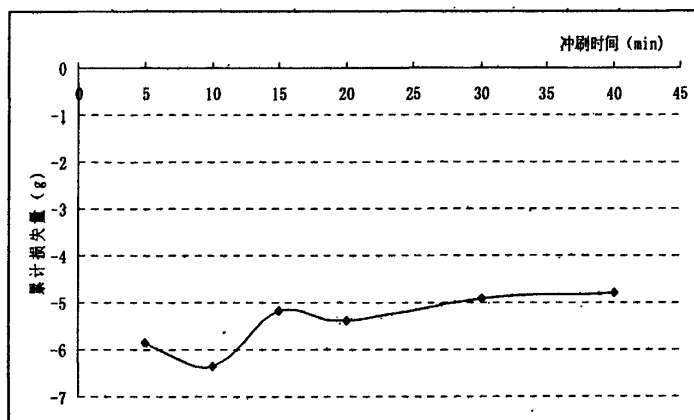


图5-12 AC-10 累计冲刷平均损失量随冲刷时间的变化

由图5-9可知：稀浆封层的累积损失量随冲刷时间延长而增大，但随冲刷时间的增长单位时间内冲刷损失量随冲刷时间的增长而减少；在冲刷早期，特别是在最早的冲刷5min内，冲刷损失量随封层级配的变粗而变小，但随后却随封层级配的变粗而变大。

由图5-10可知：微表处的累积冲刷损失量也随冲刷时间延长而增大，级配粗的微表处早期抗冲刷性能比级配细的好，然而后期级配细的抗冲刷性能却优于级配粗的，与稀浆封层的试验曲线基本相似，但从总的来讲，II型和III型级配的微表处抗冲刷性能没有大的区别。

由图5-11可知：开普封层的累积冲刷损失量也随冲刷时间的增长而增大，采用改性沥青比采用基质沥青的抗冲刷性能好，但冲刷损失量远大于微表处；未改性开普封层的累计损失质量也远大于稀浆封层。说明开普封层的抗冲刷性能比稀浆封层或微表处差。

由图5-12可知：AC-10试件受到冲刷后的质量不但没有减少，反而增大，在前面10min的冲刷时间内，试件未见掉粒，而是在上压块的振压下变得密实，10min后由于上压块碰撞试件边缘，少量的边角被碰掉，但碰掉的料不是纯石料，而是表面裹腹沥青的混合料。

5.2.5 冲刷试验结果分析

将稀浆封层、微表处、开普封层和AC-10的试验结果进行汇总，汇总结果见表5-14和图5-14所示。

表5-14 不同隔离层的累计冲刷损失量对比

类型 \ 项目	总质量 (g)	冲刷结束后的 质量 (g)	累计损失 的质量 (g)	损失质量占 总质量的比例 (%)
稀浆封层 I 型	90.66	44.92	45.75	50.5
稀浆封层 II 型	131.72	77.27	54.45	41.3
稀浆封层 III 型	181.60	93.02	88.58	48.8
微表处 II 型	126.01	115.21	10.80	8.6
微表处 III 型	176.95	163.55	13.40	7.6
基质沥青碎石封层+ 稀浆封层	217.34	72.56	144.78	66.6
改性沥青碎石封层+ 微表处	271.94	194.08	77.86	28.6
AC-10 沥青混合料	620.39	625.17	-4.78	-0.8

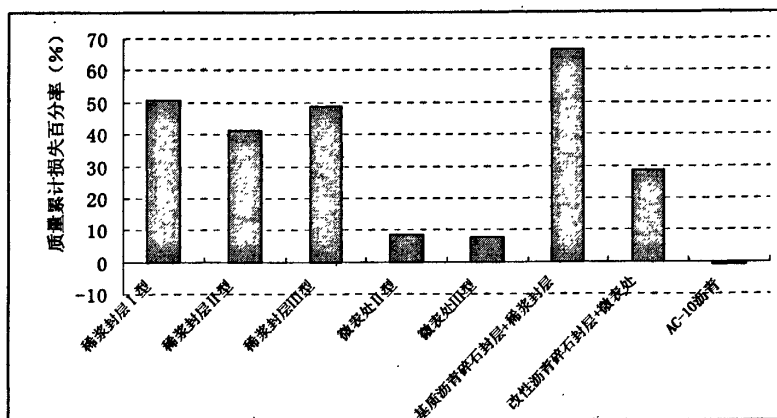


图5-13 不同隔离层的冲刷损失量比较

由图5-13可知：冲刷性能从优到差排列顺序是：沥青混合料>微表处>改性开普封层>稀浆封层>基质沥青开普封层。

从冲刷试验的优劣顺序可以看出，隔离层抗冲刷性能主要受沥青性能和隔离层局部存在缺陷的影响，而隔离层的材料级配对抗冲刷性能的影响相对较小。具体表现为：①沥青的性能：稀浆封层和微表处的沥青为乳化沥青破乳后的油包水型冷沥青，沥青混合料的沥青则是经过脱水的热沥青，故在相同的原沥青和石料性能下，沥青混合料对石料的黏附性远大于乳化沥青，从而沥青混合料的抗冲刷性能优于稀浆封层；乳化沥青改性后与集料的粘附性优于基质乳化沥青与集料的黏附型，从而微表处的抗冲刷性能优于稀浆封层。由此说明，提高沥青与集料之间的粘结力将显著提高隔离层的抗冲刷性能。②隔离层局部缺陷：开普封层由同步碎石封层和稀浆封层或微表处叠合而成，碎石封层的碎石一半面积被热沥青包裹，另一半碎石面积被稀浆封层或微表处包裹，稀浆封层或微表处破乳后与碎石的粘附性比与热沥青粘附性差，同时稀浆封层和微表处的浆体难以完全裹附碎石封层的碎石和填充碎石封层的内部空隙，造成碎石封层与微表处或稀浆封层间较小粘结力和较大的空隙的不利影响，一旦空隙内充满水，在动水压力的作用下的开普封层表面和内部同时遭到水的冲刷作用，其结果是抗冲刷性能均比微表处和稀浆封层差。

因此，为了提高柔性隔离层的抗冲刷性能，第一要提高沥青与石料之间的粘附性；第二、防止或减少隔离层材料产生局部缺陷，减少面板胀缩变形和翘曲变形而引起隔离层的局部缺陷。

5.3 隔离层材料开发思路

在面板的胀缩变形和翘曲变形作用下,柔性隔离层将产生与面板切缝位置对应的开裂和沿隔离层厚度薄弱处开裂,隔离层的局部缺陷随即产生,一旦隔离层内滞留水,那么在车辆荷载作用下,隔离层的抗冲刷性能将显著降低,隔离层材料被搬动后,将使板间产生错台,隔离层材料被搬出路面结构层时,层间将形成脱空,使水泥混凝土路面的使用寿命显著降低。

鉴于面板的温度变形和从接缝或裂缝渗入层间的结构水无法避免,故开发一种既能透水,且不受面板变形而造成断裂破坏的隔离层,显得非常必要。

基于隔离层的透水和防裂两种性能,结合隔离层的较佳厚度和刚度,提出透水滤浆隔离防裂层材料,结构形式见图5-14,从上往下的结构层分为防水防裂层、透水滤浆层、透水层和防水层四个部分,要求防水防裂层表面粗糙,增加面板水泥浆体与防水防裂层连接为一个整体,滤浆层的作用是过滤进入层间水的杂物,防止堵塞透水层,透水层的作用是迅速排除层间滞留水,防水层的作用是防止水分渗入基层。四个部分需要连结或粘接成一体,具体思路是:采用粘层油将防水防裂层与透水滤浆层粘结成一体,透水层和防水层通过粘层油连接为一体,最后采用针织将四个结构层连接成一体。

由“第四章 水泥混凝土路面层间力学特性研究”的结果可知,隔离层厚度为1cm,刚度为800~1000MPa时最有利于路面承受外界荷载,因此,连接成一体的透水滤浆隔离防裂层的厚度要求控制在1cm左右,材料的综合刚度控制在800~1000MPa左右。

根据上述隔离层的材料结构形式和技术要求,正在进行该透水滤浆隔离防裂层研制。

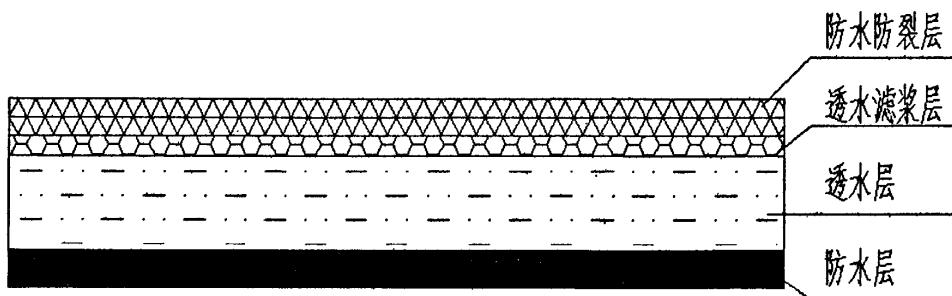


图5-14 层间柔性隔离层结构形式示意图

5.4 本章小结

(1) 混凝土面板下的柔性隔离层因混凝土面层板温度变形而必将遭到破坏, 隔离层的破坏形式为平面上与面板的切缝产生相对应开裂, 厚度方向将沿隔离层厚度的薄弱处断裂。

(2) 自行开发的冲刷试验仪可模拟隔离层遭受冲刷的两个过程, 采用该冲刷试验仪进行试验, 可区别出不同隔离封层的抗冲刷性能。

(3) 几种封层和沥青混凝土层的冲刷试验结果表明, 冲刷性能从优到劣的排列顺序是: 沥青混合料>微表处>改性开普封层>稀浆封层>未改性开普封层。

(4) 隔离层抗冲刷性能主要受沥青性能和隔离层局部存在缺陷的影响, 而隔离层的材料级配对抗冲刷性能的影响相对较小。

(5) 为了提高柔性隔离层的抗冲刷性能, 一要提高沥青与石料之间的粘附性; 二要防止或减少隔离层材料产生局部缺陷, 减少面板胀缩变形和翘曲变形而引起隔离层的局部缺陷。

(6) 鉴于面板的温度变形和从接缝或裂缝渗入层间的结构水将无法避免, 造成隔离层遭受断裂破坏和冲刷破坏也将无法避免。为此, 提出透水滤浆隔离防裂层的结构形式和技术要求, 以避免面板的温度变形和渗入层间的结构水破坏隔离层, 并提供层间隔离层材料的开发思路。

第六章 实体工程研究

本论文依托 G107 清（远）连（州）一级公路升级改造（高速）工程，针对该工程旧水泥混凝土改造加铺水泥混凝土路面的关键技术难题，展开贫混凝土基层混凝土路面层间作用机理及处治技术研究。

6.1 工程概况

广东清（远）连（州）一级公路位于粤西北山区，总体走向为南北方向，路线起点位于粤湘边界，接湖南省拟建的宜章至连州高速公路，终点位于清远市，接广州至清远高速公路，沿线经过连州市、连南瑶族自治县、阳山县、清新县和清远市，现有一级公路路线全长 215km。目前是国道 G107 粤境的重要组成部分，是珠江三角洲地区与广东省中北部地区及湖南省联系的重要通道。

该项目处于亚热带季风气候区，是南亚热带与中亚热带气候区的过渡地带，纬度较低，临近南海、太平洋，形成夏日长、气温高、光照充分、雨量充沛、雨量集中的特点。受山区特定地形影响，气候差异大，且气候特点突出。年平均气压 1012.6 毫巴，平均相对湿度 78%。该地区冬季主导风是东北风和北风，最大风力七级，夏季五月至九月的主导风向是东北风和南风，年平均风速 2.08 米/秒，平均气温 19.8~21.1℃。最高气温 37.5℃，最低气温 -0.6℃，全年无霜期达 315 天以上，年日照时数 1389~1793.6 小时。

清连一级公路是于 1997 年 11 月建成通车，建成初期是湘粤联系的唯一通道，日交通量达到 12000 辆/日，为南来北往经济贸易网站、特别是“三连一阳”山区脱贫致富发挥了重大作用。但是，清连一级公路开通 8 年来，主要因为超载、超限车辆多，造成路面严重破损，如图 6-1、图 6-2，行车不畅顺，交通量锐减，已失去路网功能的作用，不仅使投资者利益受损，而且存在很多安全隐患，严重制约了“三连一阳”经济社会的快速发展。因此，对旧路进行高速升级改造势在必行。

根据《国家高速公路网规划》和《广东省高速公路网规划》，清连一级公路的路线走廊位置属于二连浩特至广州国家高速公路的一部分，同时也是《广东省高速公路规划》中“第六纵”的重要组成部分。为了充分利用清连一级公路的通道走廊资源，加快实施和完善国家、广东省高速公路网、充分发挥骨架路网功能和

提高路网整体效益,减轻京珠高速公路交通压力,加强“泛珠江三角经济圈”内交通联系、增强珠江三角洲的辐射作用,保障交通运输主通道的交通安全,对清连一级公路实施升级改造十分必要,也十分迫切。2005年3月广东省政府决定对清连一级公路进行升级改造(高速),2006年4月广东省发改委对该项目予以核准。



图 6-1 严重破碎面板图(一)



图 6-2 严重破碎面板图(二)

升级改造采用双向四车道高速公路标准。设计速度采用 100 公里/小时和 80 公里/小时两种,对应路基宽度分别为 24.5 米和 21.5 米。

6.2 路面加铺形式

根据项目《工可报告》提供的交通量,考虑沿线超载车辆较多的实际情况,得到 30 年设计年限内北上方向(道路左幅)的标准轴载累计作用次数为 20720 万次,南下方向(道路右幅)的标准轴载累计作用次数为 30520 万次。交通等级属特重交通。

根据设计规范^[71],进行路面结构计算,结合国内外相关项目的成功经验,确定路面结构为贫混凝土基层水泥混凝土路面,旧路处理形式为,当旧水泥混凝土路面的断板率小于 30%时,采用冲击破碎或多锤头破碎旧水泥混凝土路面,作为路面的垫层;当旧水泥混凝土路面的断板率大于 30%时,将旧水泥混凝土面板全部挖除,然后重新加铺水泥混凝土路面,具体路面加铺层结构形式见表 6-1 所示。

根据论文的研究成果,对表 6-1 的加铺层结构形式进行完善,具体为该工程的 A₁、A₂、A₃、B₁ 标段在贫混凝土基层达到设计强度后,在基层表面喷洒蜡质隔离剂后,再加铺水泥混凝土面层,共铺筑了 132km,该工程的 B₂、B₃ 标段在贫混凝土基层达到设计强度后,先铺筑 1cm 的微表处,再加铺水泥混凝土面层,共铺筑了 83km。

表 6-1 清连一级公路旧水泥混凝土路面改造加铺结构

结构层名称	结构层厚度 (cm)			
	旧路破碎稳固段		旧路路面挖除段	
	E0=230MPa		E0=30MPa	
道路方向	北上方向	南下方向	北上方向	南下方向
水泥混凝土面层	28	30	28	30
碾压贫混凝土基层	19~24	17~22	22	20
水泥稳定碎石底基层			18	18
级配碎石垫层			15	15
总厚度	47~52	47~52	83	83

注：项目实施时，A1、A2、A3、B1 标段的碾压贫混凝土基层与水泥混凝土面层之间增设了蜡质隔离剂；在 B2、B3 标段的碾压贫混凝土基层与水泥混凝土面层之间增设了 1cm 微表处。

6.3 隔离剂或隔离层施工

在贫混凝土基层达到设计强度后，采用强力清扫车清扫基层表面的浮尘和杂物，然后喷洒乳化的蜡质隔离剂，浓缩型的喷洒剂量为 $0.2\sim 0.3\text{kg/m}^2$ ，普通型的喷洒剂量为 0.4kg/m^2 左右，采用液罐式动力喷洒车，要求喷洒剂量均匀，每个标段喷洒施工前，先进行 200~300m 的试验段，以确定具体的喷洒剂量，成膜后要求表面憎水；隔离层施工与蜡质隔离剂相仿，在贫混凝土基层达到设计强度后，采用强力清扫车清扫基层表面的浮尘和杂物，然后铺筑 MS-2 的微表处。蜡质隔离剂施工后的基层表面如图 6-3，铺筑微表处后的基层表面见图 6-4 所示。

在基层表面喷洒蜡质隔离剂或微表处后加铺水泥混凝土面层。

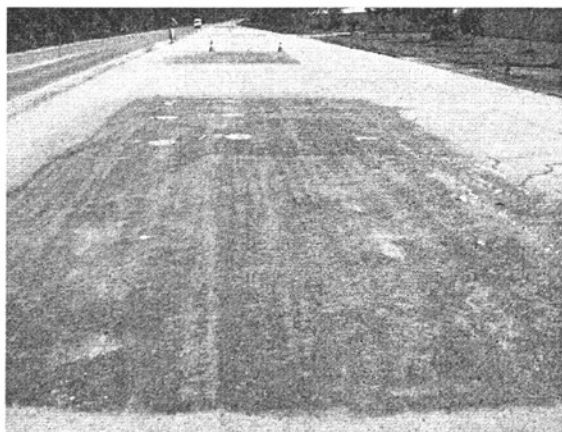


图 6-3 基层表面喷洒蜡质隔离剂后的状况

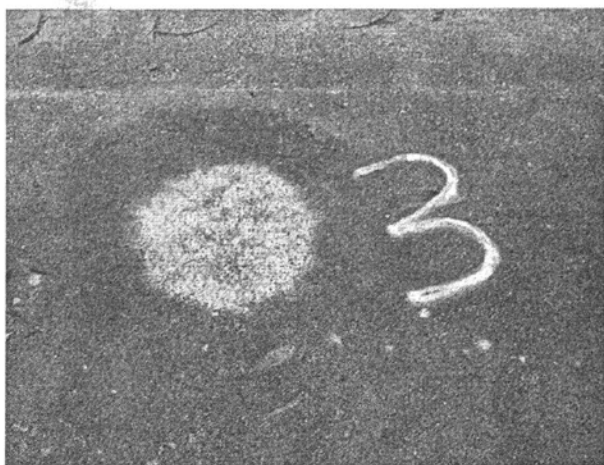


图 6-4 基层表面铺筑微表处后的状况

6.4 实体工程观测

在基层表面喷洒蜡质隔离剂的水泥混凝土路面，在路面通车前，部分段落出现断板，且断板处基层与面层之间有一定的脱空，如图 6-5 所示，现场的观测结果表明，面板施工后 3 天左右面层与基层就出现脱空，14 天龄期后部分工程车辆在面板上行驶，大概一个月后部分路段出现如图 6-5 的破坏图。



图 6-5 断裂的面板与基层之间有一定脱空

现场的连续观测表明，在基层表面离析处多发生面板断裂，具体表现为完工后基层表面离析或麻面，喷洒蜡质隔离剂后的表面状况如图 6-6，乳化蜡破乳后基层表面仍然离析或麻面，如图 6-7 所示，结合第二章的研究结果可知，由于层间界面层断裂后断裂面为曲面，面板胀缩变形引起层间相对移动，从而造成层间

脱空,层间脱空后,面板与基层的接触形式从原来的面接触转变为点接触或线接触,在工程车辆的作用下,引起面板的开裂破坏。

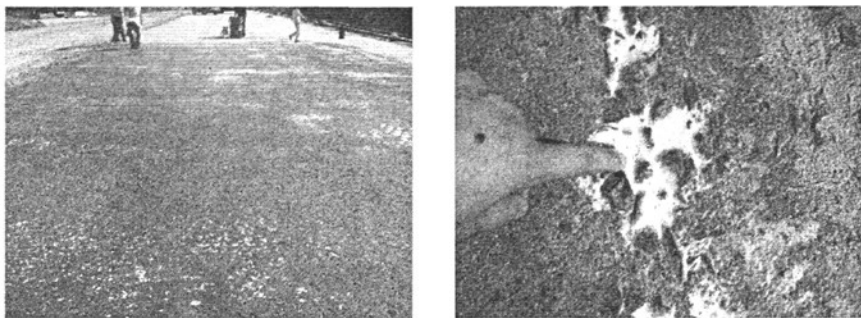


图 6-6 蜡质隔离剂施工后的基层表面状况图

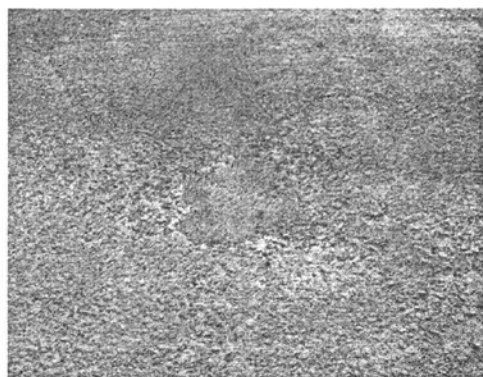


图 6-7 蜡质隔离剂破乳后的基层表面状况图

在基层表面浇筑微表处后铺筑的水泥混凝土面层,从 2007 年 7 月至今无出现面板类似的开裂现象,路面现场取芯结时,在芯样被拔出时,沿微表处的厚度方向断裂,如图 6-8 所示,即微表处将贫混凝土基层与水泥混凝土面层连接在一起。

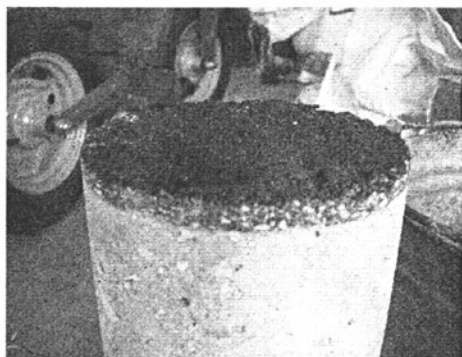
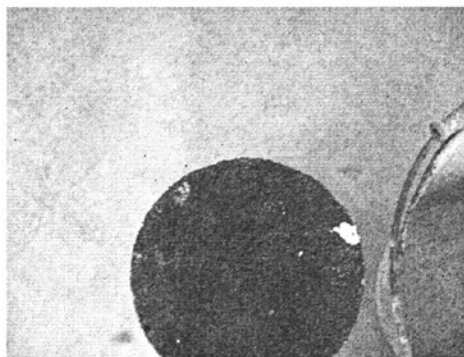


图 6-8 路面取芯试样图 (一)



路面取芯试样图 (二)

6.5 本章小结

实体工程观测结果和相关章节的研究结果可得：

(1) 基层表面离析或表面构造深度较大时，不宜采用隔离剂（如蜡质隔离剂）进行层间处理，而应采用有一定厚度的隔离层（如微表处或沥青混凝土），防止因面板温度胀缩变形引起层间脱空，在车辆荷载作用下导致面板断裂；

(2) 隔离层将基层和面层连接为一体，若面板翘曲变形引起隔离层的拉应变超过隔离层材料自身的最大拉应变，可能造成隔离层的断裂破坏。

第七章 结论、创新点与建议

7.1 结论

(1) 层间作用机理分析结果表明：①温度变化造成面板胀缩和翘曲变形，必然破坏层间界面层，且界面层的断裂面由界面层中强度薄弱点组成。②由于层间界面层的厚度随基层表面构造深度的增大而增大，随基层表面渗透能力增强而增大，因此，为了使界面层薄弱点组成的面趋于平面，需减小基层表面的构造深度和基层表面的渗透性，从而防止或减少界面层断裂后层间相对移动造成层间脱空。③为了减小因层间界面层断裂破坏而损伤水泥混凝土面板，应采用层间隔离材料消弱层间界面层的强度，如在贫混凝土基层与面层之间铺设塑料布、喷洒乳化沥青、喷洒蜡质隔离剂等措施；若基层作为施工临时便道等而导致基层表面麻面，则应采用层间设置一定厚度的隔离层，从而消除层间界面层断裂对面板的影响，消除层间界面层断裂后层间相对移动造成层间脱空。

(2) 模拟面板胀缩变形的现场层间试验结果和试件水平推移破坏的断裂面破坏状况表明：①层间界面层断裂破坏后，层间界面接触形式为摩尔-库仑模型。②基层表面未处理而直接成型梁式试件，层间界面层的强度随龄期呈开口向上的抛物线变化，在龄期小于3天前界面层强度达到最大，在龄期为14天左右的强度最低，说明龄期为14天时界面层遭到最大的损伤；水平推移破坏后试件的抗折强度随龄期也呈开口向上的抛物线变化，且在7~14天范围内抗折强度最低，说明层间界面层因温度变化遭到损伤时，面层混凝土板也遭到相应的损伤。

(3) 路面层间力学计算结果分析表明：①水泥混凝土面层直接铺筑在贫混凝土基层或层间设置隔离剂时，层间界面接触模型可采用摩尔-库仑模型表征，且层间摩尔-库仑模型可以直接表征层间摩擦模型。②在外界荷载作用下，面板处于上翘曲变形时面板底面拉应力远大于面层处于下翘曲变形和无翘曲变形的应力，面板处于下翘曲变形时基层底面拉应力远大于面层处于下翘曲变形和无翘曲变形的应力。③为了减少路面破坏的深度和界面层断裂破坏而损伤水泥混凝土面层，及改善路面承受外界荷载，宜在基层与面层之间设置柔性隔离层。④层间不设隔离层时，在层间摩擦角为 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间时最利于面层承受外界荷载，在层间摩擦角大于 60° 时较利于路面承受外界荷载，而层间摩擦角在 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 最

不利于路面承受外界荷载,试验结果表明,碾压贫混凝土基层表面未磨光而直接加铺水泥混凝土面层,层间的摩擦角在 35° 左右,基层表面喷洒蜡质隔离剂后的层间摩擦角在 30° 左右,此均处于面层最不利受力的层间参数范围内。⑤层间设置隔离层时,隔离层的刚度为 $800\sim 1000\text{MPa}$ 、厚度为 1cm 时最利于路面承受外界荷载,隔离层的刚度为 $800\sim 1000\text{MPa}$ 、厚度为 4cm 时较利于路面承受外界荷载。⑥层间设置隔离层时,基、面层横向切缝错缝较佳间距为 $1\sim 1.5\text{m}$,较佳的切缝宽度为 3mm ;层间不设隔离层时,基层与面层的纵横向切缝必须完全对齐。

(4)层间隔离层材料的性能研究表明:①混凝土面板下的柔性隔离层因混凝土面板温度变形而必将遭到破坏,隔离层的破坏形式为平面上与面板的切缝产生相对应开裂,厚度方向将沿隔离层厚度方向薄弱处断裂。②自行开发的冲刷试验仪可模拟隔离层遭受冲刷的两个过程,采用该冲刷试验仪进行试验,可区别出不同隔离层的抗冲刷性能。③几种封层和沥青混凝土层的冲刷试验结果表明,冲刷性能从优到劣的排列顺序是:沥青混合料>微表处>改性开普封层>稀浆封层>未改性开普封层。④隔离层抗冲刷性能主要受沥青性能和隔离层局部存在缺陷的影响,而隔离层的材料级配对抗冲刷性能的影响相对较小。为了提高柔性隔离层的抗冲刷性能,一要提高沥青与石料之间的粘附性,二要防止或减少隔离层材料产生局部缺陷,减少面板胀缩变形和翘曲变形而引起隔离层的局部缺陷。⑤鉴于面板的温度变形和从接缝或裂缝渗入层间的结构水将无法避免,造成隔离层遭受断裂破坏和冲刷破坏也将无法避免。为此,为了避免面板的温度变形和渗入层间的结构水破坏隔离层,提出层间透水滤浆隔离防裂层新材料的结构组成,并提供层间隔离层材料的开发思路。

综合上述的研究成果可以得出:①在贫混凝土基层上直接加铺水泥混凝土面层,温度变化造成层间界面层断裂而损伤水泥混凝土面板,且界面层断裂后层间界面的摩擦角在 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间,正处于水泥混凝土路面承受外界荷载较为不利的界面状态,此与比利时在贫混凝土基层上直接加铺水泥混凝土面板的使用寿命较短相一致;②在贫混凝土基层与水泥混凝土面层的层间摩擦角小于 30° 时,水泥混凝土路面的承受外界荷载能力较佳,此与美国采用磨光机研磨贫混凝土基层,喷洒蜡质隔离剂后浇筑水泥混凝土面层后路面使用性能较好相一致;③在贫混凝土基层与水泥混凝土面层之间增设沥青混凝土隔离层,可改善路面的使用性

能,特别层间增设透水滤浆隔离防裂层时,将提高水泥混凝土路面的使用寿命,此与比利时在贫混凝土基层和水泥混凝土面层之间设置沥青混凝土层后,水泥混凝土路面使用寿命较长的相一致。

因此,在贫混凝土基层上不宜直接加铺水泥混凝土面层,而应当在层间增设柔性隔离层,或基层表面磨光后喷洒隔离剂,从而改善贫混凝土基层水泥混凝土路面的使用性能。

7.2 创新点

(1) 系统分析了层间的作用机理,揭示了层间界面层的性质、破坏形式和层间破坏前后的界面结合状态与界面模型,同时进行层间不同结合形式的力学分析,得到了层间较佳的接触参数,从而为层间处理措施提供指导;

(2) 系统分析了层间隔离层的厚度和刚度对路面应力应变的影响,计算比较了翘曲面板和无翘曲面板下路面的应力和应变,得到隔离层材料最佳的厚度和刚度范围;

(3) 开发了隔离层材料的冲刷试验仪,比较了不同隔离层材料的抗冲刷性能,并分析了影响隔离层材料抗冲刷性能的主要因素,提出了改善隔离层抗冲刷性能的方法;

(4) 提出层间透水滤浆隔离防裂层的结构组成和材料性能要求,为研制该新材料提供技术支持。

7.3 建议

(1) 进一步完善冲刷试验仪,通过调整振动力、振幅、频率和上压块的重量等,模拟车辆行驶速度、车辆重量、板间错台、板间脱空等对隔离层的冲刷,进而进一步分析隔离层材料的抗冲刷性能;

(2) 在不同层间结合状态和隔离层结构下,进行车辆动荷载作用下的力学特性分析,进一步修正隔离层材料的力学特性和层间结合形式;

(3) 进一步研发层间透水滤浆隔离层,并研发适合不同气候、路面结构、路面厚度和交通量的层间透水滤浆隔离层材料;

(4) 对清连一级公路升级改造(高速)工程进行跟踪观测,收集相关的资料,修正相关的研究成果。

参考文献

- 1、王秉纲,郑木莲 水泥混凝土路面设计与施工[M] 人民交通出版社 2004, 5
- 2、http://www.moc.gov.cn/zhuzhan/tongjixinxi/fenxigongbao/tongjiigongbao/200804/t20080418_480524.html
- 3、FHWA Report.Concrete Pavements in Belgium, 1992.8.
- 4、FHWA Report.Concrete Pavements in Germany, 1992.8.
- 5、刘朝晖,李宇峙 重载交通对水泥混凝土路面结构的影响分析[J] 公路交通科技, 1999.11
- 6、刘伯莹,姚祖康 水泥混凝土路面的结构组合设计[J] 公路, 2002.8
- 7、全凯,陈四来 水泥砼路面的水损害及防治措施[J] 重庆交通学院学报, 2005.8
- 8、舒正超. 不容忽视的路面结构内部排水[EB / OL]. 北京: 中国公路网, 2003. 7. 30
- 9、陈瑜,张起森 水泥混凝土早期温度应力的计算方法[J] 长沙交通学院学报, 2004.9
- 10、潘华,邱洪兴 基于损伤力学的混凝土疲劳损伤模型[J] 东南大学学报(自然科学版), 2006.7
- 11、Parkard, R.G Structural design of concrete pavement with lean concrete lower course. 2nd international conference on concrete pavement design and rehabilitation, Purdue University, 1982, 119-131
- 12、张国新,彭静 考虑摩擦约束时面板温度应力的有限元分析[J] 水利学报, 2001.1
- 13、林仕雄 水泥混凝土路面损坏原因分析及处理方案比选[J] 公路, 2006.8
- 14、梁军林 水泥混凝土路面断裂破坏机理及应用研究 长安大学博士论文 2004.4
- 15、吴超凡,台电仓等 水泥混凝土路面病害发展过程研究[J] 公路交通科技, 2008.1
- 16、沙庆林 高等级公路半刚性基层沥青路面[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- 17、杨锡武,梁富权 养生条件对半刚性路面基层收缩特性的影响研究[J] 重庆交通学院学报, 1995.3
- 18、赵天波,李凤艳 添加高聚物对乳化蜡型混凝土养护剂性能的影响[J] 精细化工, 2000.1
- 19、易志坚,吴国雄等 基于断裂力学原理的水泥砼路面破坏过程分析及路面设计新构想[J] 重庆交通学院学报, 2001. 3
- 20、易志坚,唐伯明等 水泥砼路面面层与基层相互作用引起的基本破坏形式及重要影响[J] 重庆交通学院学报, 2001.11
- 21、吴国雄,易志坚等 水泥混凝土路面开裂过程研究[J] 公路, 2001.10
- 22、吴国雄,姚令侃等 水泥混凝土路面早期裂缝的形成机理[J] 西南交通大学学报, 2003.6
- 23、吴国雄 水泥混凝土路面开裂机理及破坏过程研究 西南交通大学博士论文 2003.9
- 24、张红波,周志刚 水泥混凝土面层与贫混凝土基层界面特性研究[J] 长沙交通学院学报, 2005.12
- 25、熬星 贫混凝土透水基层水泥混凝土路面结构分析 长沙理工大学硕士论文, 2004.5
- 26、张洪波 贫混凝土透水基层水泥混凝土路面温度应力分析 长沙理工大学硕士论文, 2005.4
- 27、蔡四维,蔡敏 混凝土的损伤断裂[M] 北京: 人民交通出版社, 1999.1
- 28、朱明程,刘西拉. 水泥混凝土路面的疲劳损伤研究 [J] 土木工程学报 1992.5
- 29、吴国雄,姚令侃 水泥路面开裂破坏的非线性机制[J] 土木工程学报, 2004.7
- 30、徐光辉 冯钧 路面结构动力系统响应问题的求解[J] 哈尔滨建筑大学学报 1999.3
- 31、黄立葵 孙晓立 易志华 路面结构的动荷载效应及对反分析结果的影响[J] 湖南大学学报: 自然科学版 2003.3

- 32、邓文英 金属工艺学[M] 北京 高等教育出版社. 2000
- 33、杨斌 旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构研究 长安大学博士论文 2005.6
- 34、资建民 荷载和环境作用在水泥混凝土路面内产生的应力[J] 中南公路工程 2000.6
- 35、Wu, Shie-shin, and Hearne, Jr, T.M. Performance of concrete pavement with economic base. Proceedings, 4th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University, 1989:683-696
- 36、Velz, P.G., and Carsberg, E.C. Investigational concrete pavement in Minnesota:18-year report. HRB Bulletin 274, 1960
- 37、徐灏. 疲劳强度[M]. 北京: 高等教育出版社. 1988
- 38、肖益民, 丁伯承 水泥混凝土路面与基层接触状况的研究[J] 公路 2000.9
- 39、《不同隔离层对水泥混凝土路面结构的疲劳性能影响研究》广东清连公路发展有限公司. 长沙理工大学 2007.11
- 40、吕惠卿,张湘伟等 水泥混凝土路面力学性能研究综述[J] 重庆大学学报(自然科学版), 2005.6
- 41、赵炜诚, 许志鸿等 混凝土面层与贫混凝土基层的层间作用对荷载应力和弯沉的影响[J] 中国公路学报 2003.10
- 42、张映雪, 秦仁杰等 旧水泥砼板上加铺钢筋砼设计方法研究[J] 公路与汽运 2004.4
- 43、Baalbaki M,Baalbaki W, Barkar S L, Comparison Study on mechanical properties and Microstructure of High Performance Concrete with Natural Aggregate and Synthetic Aggregate. In: Proceedings of International Conference on High Strength Concrete, Lillehammer,Noway,1993(2)
- 44、马银华, 易志坚等 结合式水泥砼路面加铺层的力学性能分析[J] 重庆交通学院学报 2005.4
- 45、Aswani Sasaanka Pulipaka, Quantifying the Relative Effects of Design and Site Factors on the Performance of Rigid Pavements Using SPS-2 LTPP Data ,Master of Science, Michigan State University,2005
- 46、符冠华, 卢拥军 土工合成材料在改造旧水泥混凝土路面中的应用研究[J] 土木工程学报, 2002.2
- 47、周乾, 冯坚等 层间作用对水泥混凝土路面温度应力的影响分析[J] 中南交通科技 2006
- 48、田稳苓, 赵志方等 新老砼的粘结机理和测试方法研究综述[J] 河北理工学院学报, 1998.2
- 49、傅智 水泥混凝土路面施工技术[M] 同济大学出版社 2004.3
- 50、Harr ,M.E and Leonards, G.A. Warping stresses and deflections in concrete pavements .Proceedings, HRB, 1959, 38: 286~320
- 51、约德 E J_韦特捷 Mw 著, 陈炳麟译. 路面设计原理[M] 北京: 人民交通出版社, 1983.
- 52、黄仰贤(美) 路面分析与设计[M] 北京: 人民交通出版社, 19981
- 53、李波, 梁旺强等 旧水泥路面沥青加铺层夹层结构的力学分析[J] 桂林工学院学报, 2005, 7
- 54、Concrete Pavements Design in Kansas Following the Mechanical-Empirical Pavement Design Guide, Taslima Khanum etc.
- 55、公路沥青路面施工技术规范(JTG F40-2004) 中华人民共和国交通部发布
- 56、Mehta P K.混凝土的结构、性能与材料.祝永年等译[M] 同济大学出版社, 1991
- 57、陈宏波, 李立寒等 水泥混凝土路面填缝材料若干性能的试验研究[J], 建设机械技术与管理, 2005.9

- 58、李厚民, 朱若燕等 蜂窝纸板与瓦楞纸板组合结构的缓冲特性[J] 湖北工业大学学报, 2005.10
- 59、姚祖康 著 水泥混凝土路面设计[M] 安徽科学技术出版社 1999.7
- 60、蒋应军 重载交通水泥混凝土路面材料与结构研究 长安大学博士论文, 2005.2
- 61、俞建荣, 邓学钧 水泥混凝土路面力学行为及其研究[J] 华东公路, 1990.5
- 62、郑传超, 王秉纲 道路结构力学计算[M] (上册) 北京: 人民交通出版社, 2003.1
- 63、夏永旭, 王秉纲 道路结构力学计算[M] (下册) 北京: 人民交通出版社, 2003.1
- 64、武建民, 伍石生 用三维有限元方法评价带接缝的旧水泥混凝土路面罩面[J] 长安大学学报 (自然科学版), 2002.1
- 65、胡雅琴.断裂力学理论在路面反射裂缝分析中的应用 [J] 西安公路学院学报, 1990.10
- 66、Leonards, G.A., and Harr, M.E. Analysis of concrete slabs on ground. Journal of Soil Mechanics, ASCE, 1959,85(SM3):35~58
- 67、周虎鑫,陈荣生, 齐诚 机场水泥混凝土加铺层温度翘曲应力研究[J] 中国公路学报. 1998.04
- 68、赵峥嵘 公路隧道内混凝土路面板裂缝间距与宽度的计算[J] 中外公路, 2005.2
- 69、LU SUN. Computer Simulation and Field Measurement of Dynamic Pavement Loading[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2001, 56 (3) : 297 - 313.
- 70、PROZZI J A, MADANAT SM. A Nonlinear Model for Predicting Pavement Serviceability [A]. Proceedings of the Seventh International Conference Applications of Advanced Technology in Transportation[C]. 2002. 481 - 488
- 71、《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40-2002)
- 72、Totsky, O.N. Behavior of multi-layered plates and beams on winkler foundation. 1981,6:54~58
- 73、Khazanovich, L. and Ioannides, A.M. Structural analysis of unbonded concrete overlays under wheel and environmental loads. TRR,1995,1449:174~181
- 74、余定选, 冷培义.考虑夹层作用的双层水泥混凝土道面板的计算[J]. 西安: 空军工程学报, 1985
- 75、谈至明, 姚祖康 层间约束引起的双层水泥混凝土路面板的温度应力[J] 交通运输工程学报 2001.5
- 76、资建民, 胡小弟 水泥混凝土路面三厚板模型分析[J] 中南公路工程, 2001.6
- 77、于洪泽 贫混凝土基层水泥路面厚度确定[J] 公路, 2002.9
- 78、周书林, 林有贵 广西旧水泥混凝土路面加铺层结构选型研究[J] 交通科技, 2005.5
- 79、谈至明, 姚祖康等 双层水泥混凝土路面板的温度应力[J] 中国公路学报 2003.4
- 80、谈至明, 周玉民等 水泥混凝土路面板温度翘曲应力[J] 公路, 2004.11
- 81、陈廷国, 王宪年等 水泥混凝土路面温度场研究[J] 公路, 2002.6
- 82、王秉纲, 邓学均. 路面力学计算[M]. 北京:人民交通出版社, 1985.
- 83、KOLLURU V SUBRAMAN IAM, SURENDRA P SHAH. Biaxial Tension Fatigue Response of Concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 25 (6) : 617 - 623.
- 84、Shad M.Sargand ,Roger Green, Huntae Kim ,Evaluation of Base Material under PCC pavement, TRB 2003 Annual Meeting
- 85、易志坚, 从变形协调关系看路面反射裂缝的形成机理[J] 重庆交通学院学报, 2003.12
- 86、邓学钧 陈荣生 刚性路面设计[M] 人民交通出版社 2005.1
- 87、吴中伟 康慧珍 高性能混凝土[M] 中国铁路出版社, 1999.9
- 88、Vel,P.G., and Carsberg, E.C. Investigational concrete pavement in Minnesota:18-year report.HRB Bulletin 274,1960
- 89、施士昇 混凝土的抗剪强度、剪切模量和弹性模量[J] 土木工程学报, 1999.4

- 90、石国柱,马彦飞等 混凝土剪切强度指标研究[J] 安阳师范学院学报, 2006, 第五期
- 91、张 擎, 王选仓等 水泥混凝土路面薄层修补的收缩性能研究[J] 公路交通科技, 2004.10
- 92、周秋景, 李同春等 循环荷载作用下脆性材料剪切性能试验研究[J] 岩石力学与工程学报, 2007.3
- 93、孙训方, 方孝淑等 材料力学[M] 高等教育出版社, 1993.8
- 94、沈金安 沥青及沥青混合料路用性能[M] 人民交通出版社, 2001.5
- 95、沙爱民, 胡力群 半刚性基层材料抗冲刷性能试验方法研究[J] 中国公路学报 2002.2
- 96、朱映波 再生混凝土的耐久性及其改善措施[J] 混凝土 2004.7
- 97、Hansen T. C. Recycling of demolished concrete and masonry. RILEM Report No. 6 ,E & FN SPON ,London ,1992.
- 98、Lamond J . F. Removal and reuse of hardened concrete. ACI Materials Journal ,2002 ,99 (3) :300 - 325.
- 99、邢振贤,周曰农. 再生混凝土的基本性能研究[J] . 华北水利水电学院学报,1998 ,19 (2) :30 - 32.
- 100、王滨生. 再生混凝土的力学性能研究[D] . 哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1998.
- 101、杜婷. 建筑垃圾再生骨料混凝土性能及骨料强化试验研究[D] . 武汉:华中科技大学,2001.
- 102、孔德玉,吴先君. 再生骨料混凝土研究[J] . 浙江工业大学学报,2003 ,31 (1) :28 - 32.
- 103、B. C. S. J . Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. Concrete Journal ,1978 ,16 (7) :18 - 31.
- 104、Rasheeduzzafar and Khan. Recycled concrete - a source of new aggregate. Cement ,Concrete ,and Aggregates (ASTM) ,1984 ,69 (1) :17 -27.
- 105、Mandal S. ,Chakraborty S and Gupta A. Some studies on durability of recycled aggregate concrete. The Indian Concrete Journal ,June 2002 ,pp385 - 388.
- 106、Malhotra V. M. Use of recycled concrete as a new aggregate. Report 76 - 18 ,Canada Center for Mineral and Energy Technology ,Ottawa ,Canada. 1976.
- 107、Buck A. D. Recycled concrete as a source of aggregate. ACI Journal ,1977 ,pp212 - 219.
- 108、Coquillat G Recyclage de materiaux de demolition dans la confection de Beton. CEBTP - Serviced' Etude des Materiaux Unites : Technologies des Betons. No. 80 - 61 - 248 ,Saint Remy les Chevreuse ,1982.
- 109、Rottler G Dauerhaftigkeit von Recyclingbetonen bei Frostbeanspruchung , Diplomarbeit , Institute for Massivbau und Baustofftechnologie ,Universitat Karlsruhe ,1985.
- 110、Karaa T. Evaluation technique des possibilites d' emploi des dechets dans la construction recherche experimentale appliquee au de beton fabriquee a partir de granulats de betons recycles. These de doctorat de Universite Paris ,France ,1986.
- 111、Nishibayashi S. ,and Yamura K. Mechanical properties and durability of concrete from recycled coarse aggregate prepared by crushing concrete. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Tokyo ,Japan ,1988 , 652 - 659.
- 112、Salem R. M. ,Burdette E. G. and Jackson N. M. Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete. ACI Materials Journal ,2003 ,100 (3) :300216 - 221.
- 113、Oliveira M. B ,and Vazquez E. The influence of restrained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. Waste Management ,1996 ,16 (1) :113 - 117.

- 114、Dhir R. K. ,Limbachiya M. C. Suitability of recycled aggregate for use in BS 5328 designated mixes. Proceedings of the Institution of CivilEngineers ,1999 ,134 (3) :257 - 274.
- 115、 Otsuki N. ,Miyazato S. ,and Yodsudjai W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone ,strength ,chloride peneration andcarbonation. Journal of Materials in Civil Engineering ,2003 ,15 (5) :443 - 451.
- 116、 Ryu J . S. Improvement on strengh and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Journal of Materials Science Letters ,2002 ,21 (1) :1565 - 1567.

攻读博士研究生期间主要论文和科技成果

一、发表的相关文章

- 1、三灰稳定砂砾力学性能研究 公路, 2005 年第五期 第一作者
- 2、半刚性基层材料的碾压机械优化组合研究 长安大学学报: 自然科学版-2007 年 27 卷 1 期-11-14 页 (EI 检索) 第一作者
- 3、半刚性基层材料的干缩性能研究 公路, 2007 年 10 月 第一作者
- 4、半刚性基层材料中掺加软纤维的抗裂机理研究 长安大学学报: 自然科学版 (已收录) 第一作者
- 5、水泥混凝土路面病害发展过程研究 公路交通技术, 2008 年第一期 第一作者
- 6、贫混凝土基层水泥混凝土路面层间隔离封层的抗冲刷性能研究 公路, 2008 年第七期 第一作者
- 7、水泥混凝土路面加铺沥青面层技术研究 公路交通技术, 2006 年第五期 第二作者
- 8、山区一级公路升级改造工程路面改造加铺技术 公路, 2008 年第七期 第二作者

二、主要参与课题

- 1、山区一级公路升级改造关键技术研究—水泥混凝土路面改造关键技术研究

三、荣誉与获奖情况

- 1、半刚性基层沥青路面抗裂技术研究, 河南省科技进步二等奖, 2007 年

致 谢

我在恩师王秉纲导师悉心指导下完成本论文。导师渊博的知识、严谨的治学态度、开阔的视野、求实的工作作风将使我终身受益。四年多来，无论在学习上，还是在工作上，王老师和师母杨韵华老师都给予我很大帮助，在论文完成之际，谨向王老师和师母杨老师表示衷心的感谢！

在论文的选题、开题、研究大纲制定及论文写作期间，一直得到中交第一公路勘察设计研究院台电仓教授级高工的指导和热心帮助，论文的各个环节都凝结着台总的心血和智慧。台总视野开阔、思维敏捷、知识渊博、平易近人、待人热忱，在此，向他表示衷心的感谢。

长安大学申爱琴教授、李炜光副教授和中交第一公路勘察设计研究院吴明先副院长、赵永国主任、张娟博士、蒋宗岑等对论文提出宝贵意见和建议，在此表示衷心的感谢。

在课题开展的过程中，西安工业大学刘百来副教授，长安大学熊建平博士、丁智勇博士、徐殴民博士、刘丽博士、殷伟等师弟师妹，深圳高速公路股份有限公司的吴羨、晁德志、马晓力、池林海等，清连一级公路升级改造（高速）项目B3 合同段的张平、黄武庭、冯熙伦等，河南高远公路养护公司的来小林、陈卫安、陈博等人指点与帮助，在此一并致谢。

最后，感谢我的父母和亲人，诚挚感谢我的妻子李朝鹏对我学习的理解、支持和关心，在此之际，我祝她和我们的儿子吴泌洋在新的一年里身体健康、开心快乐，并祝各位专家和同学新年快乐，万事如意！

吴超凡

2008. 12. 29 于西安