

## 摘 要

刚柔性路面指的是在水泥混凝土板上加铺沥青混合料面层而形成的复合式路面。本文在总结国内外有关刚柔性路面研究成果的基础上，针对刚柔性路面的界面层材料及力学特性开展了研究。

在对界面层的材料及受力特性进行剖析的基础上运用有限元软件分析计算了界面层的剪应力。对各种可能影响界面层剪应力大小的因素进行了分析计算，得到影响界面层剪应力较大的因素是沥青加铺层厚度、车辆行驶状态及车辆轴载。通过室内试验，对比研究了七种不同防水粘结层材料的力学特性，重点考查了水泥混凝土板界面处理方式以及防水粘结层材料对界面层强度的影响。得到了最佳的水泥混凝土板界面处理方式、各种界面的最佳沥青用量、精铣刨界面最佳的铣刨深度、各种形式抗剪强度试验结果间的相关性、抗剪强度与粘结强度之间的相关性等诸多有用结论。在理论分析与试验研究的基础上，结合实际情况提出了刚柔性路面界面层抗剪强度标准。

本文最后针对水泥混凝土路面加铺沥青层及水泥混凝土桥沥青混合料铺装的结构设计理论与方法进行了探讨，提出了几种典型的桥面铺装结构形式。同时，针对热涂 SBS 改性沥青和 AWP-2000F 纤维增强型防水涂料两种材料的界面层施工工艺进行了介绍。

**关键词：**道路工程；刚柔性路面；界面层；防水粘结材料；桥面铺装；抗剪强度；粘结强度；有限元方法；

---

## ABSTRACT

---

### ABSTRACT

Rigid flexible pavement refers to the plate in the concrete overlay asphalt mixture surface compound formed by the road. This paper on the basis of the research results of rigid flexible pavement at home and abroad, research that in view of the materials and mechanical properties of the interface of rigid-flexible pavement was carried out.

On the basis of the interface layer materials and the characteristics analysis, use of ANSYS research on the interface layer shear stress. The possible impact of the interface layer shear stress factors were analyzed, the most important factors impact of the interface layer shear stress is the asphalt overlay thickness, traffic conditions and vehicle axle load. Through laboratory test, a comparative study of seven different bonding layer waterproof material mechanical properties, a key test of cement concrete slab handling of the interface bonding layer and waterproof material on the strength of the interface layer. Find out the best cement concrete slab interface approach, the best asphalt content of the interface, precision milling depth of the best interface, in its various forms shear strength test results of the correlation between the shear strength and viscosity knot strength of the correlation between, and many other useful conclusions. In the theoretical analysis and experimental study on the basis of the actual situation with a rigid-flexible pavement interface layer shear strength standards.

Finally, this article on cement concrete pavement overlay layer of asphalt and cement concrete bridge asphalt mixture pavement structure design theory and methodology were discussed, proposed several typical bridge pavement structure. At the same time, in hot-daub SBS modified bitumen and AWP-2000F fiber reinforced waterproof coating layer interface of two materials construction technology was introduced.

**KEY WORDS:** highway engineering; rigid flexible pavement; interface layer; waterproof adhesive material; Deck Pavement; shear strength; bonding strength; finite element method;

## 重庆交通大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本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。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：王飞翔

日期：2008年3月10日

## 重庆交通大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文作者签名：王飞翔

指导教师签名：徐云波

日期：2008年3月10日

日期：08年3月10日

# 第一章 绪论

## 1.1 问题的提出

随着我国社会经济的发展，交通基础设施建设正处在一个快速发展时期。公路以其固有的灵活性和集散性特点，在交通运输事业发展中的地位不可替代。然而，随着社会发展，一方面，不断增加的交通量及轴载对道路结构强度及稳定性提出了更高的要求；另一方面，使用者对道路行车的快速性和舒适性也提出了更高的要求。路面作为道路结构重要的组成部分，对行车的舒适性、安全性和经济性有着直接的影响，对路面的养护和维修也起着控制性作用。因此，提高路面品质，改善路面使用性能，一直以来都是广大道路工作者所面临的重要任务。

水泥路面和沥青路面是高等级公路两种主要的路面结构形式，各有优缺点。在我国，作为刚性路面代表的水泥路面大多修建于上世纪 90 年代，且发展极为迅速，公路与城市道路水泥混凝土路面总里程已超过 30 万公里，目前仍以每年 2 万公里左右的速度增长，我国已成为世界上水泥路面拥有里程最多的国家<sup>[1]</sup>。水泥路面的修建，不仅发展了道路交通事业，而且还带动了沿线经济和社会的发展。但是，就国内目前水泥混凝土路面的使用状况而言，存在着不少问题。集中体现在以下几个方面：1，大部分早期修建的水泥路面，由于对交通量增长估计的不足，加之超载现象普遍，许多水泥路面出现承载力不足，出现严重的断板，路面整体性削弱，强度及稳定性大大衰减。2，水损坏严重。许多水泥路面接缝封水措施处理不当，填缝料质量不可靠，使用不久便失效，根本无法阻止水的进入，导致基层长期遭受水的侵蚀，最终导致板底脱空，出现各种形式的断板。3，水泥混凝土路面的维修问题。水泥路面的养护及维修问题一直以来都是道路工程界一个比较头疼的问题，这在一定程度上也制约了水泥路面的进一步发展和应用。因此，针对旧水泥混凝土路面的养护和维修问题开展研究具有重要的现实意义，对这一问题的研究应该包括三个方面：1，养护维修的机械设备问题；2，养护维修的材料问题；3，养护维修的施工工艺问题。

目前，针对旧水泥混凝土路面的维修改建措施主要是采取加铺新的面层。其中主要又包括两种基本的加铺方式：一种是加铺沥青混合料面层，一种是加铺新的水泥混凝土面层。加铺沥青混凝土面层能有效的改善旧水泥混凝土路面的使用性能，提高路面行驶的舒适性。同时，加铺沥青面层能有效的利用了旧水泥路面的强度，且施工便捷，对交通和环境影响小。因此，在国内外的旧水泥路面改建工程中，加铺沥青层十分普遍。

水泥混凝土路面加铺沥青面层形成了一种刚柔性的复合式路面结构，它不仅

具有沥青路面行车舒适和噪音小的特点，还具有水泥路面强度高、承载能力大和稳定性好的特点。但是，对刚柔性路面结构形式我们还缺乏深入细致的研究，目前的实际情况是工程实践走在的理论研究的前面。就工程实际应用来看，主要问题集中在两个方面：一是刚柔界面的处理技术。如何做好刚柔界面的粘结与防水处理对加铺后的路面的强度、稳定性、耐久性具有十分重要的作用。二是反射裂缝的防治问题。旧水泥路面原有的接缝及在使用过程中产生的裂缝很容易反射到沥青面层，而实际工程中，沥青加铺层厚度均不会太大，一般在4cm到6cm。因此，反射裂缝是旧水泥混凝土路面加铺沥青层面临的最主要的病害，如何防治反射裂缝一直都是国内外道路研究者所关注的热点问题。除此之外，在许多的桥面铺装结构中，也经常采用沥青混合料作为面层的铺装材料。从广义上讲，这也属于刚柔性复合路面结构。刚柔界面的处理对铺装层的使用性能也是至关重要的。从目前大多数桥面沥青铺装层结构的破坏来看，主要集中在沥青面层的开裂、沥青层与桥面板剥离、沥青面层的水损坏等。究其原因，主要还是由于刚柔界面的处理不当引起的。对于桥面铺装结构而言，界面的处理不仅要考虑足够的粘结强度，还要注意防水处理。作者认为，桥面铺装结构的防水要比路面加铺结构的防水更为重要。

因此，综合分析刚柔复合式路面结构的损坏来看，加强对刚柔界面的处治都是十分重要的。总的来说，刚柔界面的处理主要包括以下几个方面：1，界面处理材料的选择。作为界面处理材料，应该具有良好的粘结性能和不透水性能，并且应该具有良好的适应变形的能力。2，水泥混凝土板的处理。实践表明，水泥混凝土板的处理对提高刚柔界面的强度（粘结强度、抗剪强度），尤其是抗剪强度有十分重要的影响。本文将对此进行深入细致的研究。3，界面处治的施工工艺问题。主要是施工过程中如何确保界面的处治质量。从目前的实际工程来看，许多界面处治过后并没有达到预期设计的要求，分析过后，发现还是由于施工的原因。从桥面铺装来看，许多防水层在施工过后，其防水性能都有不同程度的下降。原因在于界面层的材料很脆弱，而且厚度又很薄，通常只有几个毫米，稍不注意就会被破坏。因此，必须加强和重视在施工过程中对界面层的保护，避免施工机械和工作人员对界面层的破坏。

美国的一项研究表明<sup>[2]</sup>，刚柔复合路面层间滑移是较为普遍的道路病害，得到了各国道路研究者的重视。该课题的研究对于提高刚柔复合式路面的抗剪强度，延长道路使用寿命，减少维修给以科学的理论和实践指导。为我国采用类似路面结构形式提供参考，为以后的规范修订提供基础，并为刚柔性路面层间剪应力分析和如何提高抗剪强度提供借鉴。因此，开展本文的研究具有重要的经济意义和社会意义。

## 1.2 国内外研究概况

在水泥混凝土上加铺沥青混凝土面层，即修筑刚柔性路面结构，不仅可以减少沥青用量（与柔性路面相比），又可以弥补刚性路面的不足，这样刚柔相济，大大改善了路面性能。这种路面结构在国内外的公路和水泥混凝土桥沥青面层铺装结构中都得到了广泛的应用。刚柔性路面的损坏与界面层性能的好坏有着直接关系。因此，做好刚柔性路面结构中水泥混凝土层和沥青混凝土面层之间的层间粘结，对水泥混凝土板面进行合理的处理，选择合适的中间夹层（具有防水粘结、应力吸收作用）材料，防止车辆荷载及渗入的水的作用下产生面层松散和坑槽破坏，寻求优良的刚柔性界面处理方案是一个急需解决的问题。但是，目前国内外大多数的研究主要集中在桥面铺装结构的防水粘结层的研究，研究的重点也是集中在粘结层的材料及结构组合形式，而针对水泥路面加铺沥青面层的研究主要是研究沥青加铺层的受力特点，加铺层的厚度设计等，且没有形成统一的设计理论与方法，专门针对刚柔性路面之间的界面特性及处治措施的研究非常少见。

### 1.2.1 国外研究概况

对于水泥混凝土+沥青混凝土复合式路面，在国外研究和应用较早。20世纪30年代英国修建了连续配筋混凝土(CRC)层上加铺沥青层的路面结构。美国近年来在高速公路拓宽中，把新铺并表面拉纹的水泥混凝土路面作为承重层，其上铺筑沥青混凝土，收到良好效果。

碾压混凝土(RCC)加沥青混凝土(AC)复合式路面结构的修筑是近年发展起来的。1985年西班牙某高速公路拓宽车道的施工，在基层为15cm厚的水泥稳定层上铺筑了厚23cm厚的碾压混凝土层，碾压混凝土上加铺了5cm厚的热拌沥青混合料。安达卢西亚高速公路上，设置了20cm的水泥稳定层，其上铺设了25cm厚的碾压混凝土，为了养生和兼做粘油层，洒布了沥青乳液，上层铺设了6cm沥青混合料联结层和4cm沥青混凝土。为了防止反射裂缝的产生，在联结层和表层的沥青混凝土之间，使用了起加固作用的土工合成材料。1984~1986年间，西班牙在高等级干线公路上，将RCC作为路面下层，上层铺筑沥青层，铺设面积已达 $3.0 \times 10^5 m^2$ 。1989~1991年西班牙在马德里通往法国边界的高速公路上，修筑RCC+AC复合式路面，采用双层式AC层厚达12cm。1989年1月澳大利亚Penith市在水泥稳定基层上修筑了RCC+AC复合式路面。巴西一些城市在市区承受中等交通和重交通的道路上成功修筑了复合式路面。1988年日本在某停车场对RCC作为沥青混凝土下层的适应性进行了研究，并将这种结构形式写进了1990年6月出版的《碾压

混凝土路面技术指南(草案)》中,根据日本《铺装》杂志1993年报导,在山阳高速公路河内至西条段修筑了9km的水泥混凝土(CC)+沥青混凝土(AC)复合式路面试验路,共11种结构类型,路面下层为不同厚度的连续配筋混凝土(CRC)或碾压混凝土(RCC),上层为10cm双层式沥青混凝土或5cm单层式沥青混凝土。

在美国,CRC+AC复合式路面结构形式较多用于旧路维护<sup>[3]</sup>,50年代就用沥青加铺层来修复PCC、CRC路面,用以改善荷载承受能力,提高路面的表面性能。另外有许多针对层间结合状态的研究,2002.10~2003.10美国威斯康星州交通部进行了一项研究课题,评估热拌沥青混凝土界面粘结性能。在新泽西州的亚特兰大市,联邦航空管理局的国家机场道路设施试验场利用FWD来分析层间的界面结合损害<sup>[4]</sup>,其根据是损害和未损害的路段,表面的回弹模量相差很大,可以用FWD来求得回弹模量确定层间结合状态的损伤程度,但当路面较厚时,层间结合状态对回弹模量的影响则可以忽略,因此需要寻找其他的丧失粘结性能所产生效果。为了确定层间结合状态丧失所产生的效果,需使用界面径向应力作为比较的基础。利用界面上和界面下的径向应力的代数差来求得。尽管该项目原意只是考虑沥青混凝土内部发生层间滑移,但可以借鉴分析不同材料间的层间结合状态。

以上是国外刚柔复合式路面的实际应用情况,对于其设计理论与设计方法,国外一些道路工作者也进行了一些初步计算与分析。英国Gregory曾建议将CRC+AC复合式路面的CRC层厚与AC作相关计算,用弹性理论分析计算沥青表层复合结构的作用。日本将沥青层表面作用的荷载按45度角扩散到混凝土板上,按阿灵顿半经验公式计算板底应力。前苏联则按应力扩散角考虑沥青层的影响之后,用弹性地基上无限大板计算板的荷载应力。Luther等人运用线弹性断裂理论对这一问题进行计算和分析,并进行室内试验验证,提出反射裂缝增长速率的计算模型<sup>[5]</sup>。Majidzadeh等人运用二维有限元法对沥青加铺层内的应力进行了分析,认为这种路面的裂缝主要是由于温度变化而引起混凝土板水平位移和翘曲产生的,并提出了计算面层拉应力的方法。B.Franck等人分析研究了因温度变化罩面层底部引起拉应变及车辆荷载通过接缝时,两块板产生挠度而引起罩面层剪应变。NanjimChen等人应用三层弹性理论对此进行求解,并考虑了应力消解层的效应。C.Claauwaert利用有限差分法对沥青加铺层进行荷载和温度综合作用下的力学分析。1988年,T.Krauthammer等人用二维有限元计算了PCC—AC复合式路面结构接缝的传荷能力,分析了沥青层中垂直与水平的拉、压应力、最大弯沉和最大剪应力,接缝处引入杆单元和梁单元。1990年,Mahmoud等人对水泥混凝土基层上的沥青层利用八面体进行了分析研究,提出了沥青层的临界厚度。

在桥面铺装的研究方面,国外发达国家对铺装防水的应用与研究有近百年历史,尤其针对桥面防水的研究已经历防水层—防水体系—桥面保护系统的不同阶

段，并且已具有相应的材料及结构体系的试验检测方法，供货技术条件和设计施工技术规程，防水层材料及防水体系的工程应用模式成熟。国外在水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装的研究偏重于应用方面。美国的 P. Martinelli 曾对桥面防水层破坏形式，气温和沥青混凝土施工温度、桥面准备状况对防水层与面层及桥面的粘结力的影响等进行研究，并认为当沥青混凝土层厚度大于 12cm 时，由行车荷载引起的剪应力将不会造成防水层的破坏<sup>[6]</sup>。

美国的 C. CARR 和 B. VALLERGA 就水泥混凝土桥桥面防水层体系的特性、使用要求和室内试验、野外检测等进行系统的研究后认为，防水层与面层和桥面之间的粘结力一般能满足行车的需要。但是，几乎所有防水层的不透水性能在面层施工后会下降或不能达到防水目的。因此，防水层应设置合适的保护层，并在试验室内对防水材料用电阻法测试其不透水性和进行抗冲击试验。C. CARR 和 B. VALLERGA 也创造性地提出了检验防水材料抵抗桥面裂缝的试验方法，同时，对一些常规试验方法进行了探讨<sup>[7]</sup>。英国 TRRL 的 A. price 针对防水层施工后的渗漏、层间粘结力差及耐高温性能不足等病害，对英国所有通过质量认证的防水材料进行了系统的测试和研究，他认为除一些质量根本不合格产品外，一般防水材料在热沥青混合料的高温和压路机的碾压作用下，极易产生损坏，因此，他建议防水层应设置保护层，同时，卷材类防水层的厚度不宜小于 2.5mm，且宜有较高的软化点，涂膜类防水层的厚度不宜小于 2.0mm；合适的粘层油可以增强防水层与面层和桥面的粘结力；环境温度和碾压温度对防水层的路用性能有一定的影响<sup>[8]</sup>。德国对于桥面铺装防水粘结材料的研究较早，应用较成功，已形成桥面铺装防水体系的成熟模式，德国混凝土桥面铺装规范 ZTV—BEL—B（混凝土桥面防水体系要求）中桥面防水有如下两种方法：①使用沥青卷材的防水体系，它由以下几部分组成：环氧下封闭层，沥青卷材，浇注式沥青保护层（约 3.5cm）；②使用弹性体材料的防水体系，它由以下几部分组成：环氧下封闭层，弹性体材料（液态），浇注式沥青保护层（约 3.5cm）。日本对于桥面铺装的防水粘结材料的研究同样较为系统，应用较多的几种防水粘结体系为：卷材防水材料与沥青橡胶粘结剂；3 层氯丁橡胶型防水材料与氯丁橡胶粘结剂；第三种利用浇注式沥青混凝土铺装下层的抗渗性而取消了防水层。丹麦采用的铺装防水体系与德国基本相同。

从欧美国家的桥面铺装形式来看，它们均在桥面铺装体系中专门设置了防水层，同时还设置了保护层（一般讲铺装下层作为保护层），两者共同形成桥面铺装的防水体系。虽然铺装的结构体系、防水体系和防水层材料的种类各不相同，但是都反映出它们对于桥面防水的重视。

## 1.2.2 国内研究概况

在国内，“七五”期间，开展了《我国水泥混凝土路面发展对策及修筑技术研究》(国家科技引导性项目 N0.025)的研究，其中对水泥混凝土(双层板)复合式路面设计理论与方法进行了研究；“八五”期间交通部科技立项，长安大学、全国水泥混凝土路面技术委员会、河南省交通厅、安徽省高速公路管理局、江苏省公路管理局、西安公路科学研究所等单位承担了《碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面修筑技术研究》，对 RCC+AC 复合式路面从设计理论、设计方法与参数选用到施工技术进行了深入的研究，取得了一定的成果<sup>[9][10][11][12]</sup>；同时长安大学承担了《碾压混凝土加铺沥青混凝土复合式路面结构设计理论与方法研究》，1993 年被列为国家自然科学基金资助项目。东南大学的俞建荣等对碾压水泥混凝土+沥青混凝土复合式路面的温度梯度进行了较详细的研究<sup>[13][14]</sup>。国内近年来对 RCC+AC 复合式路面研究较多，并在全国修筑了较多的工程实体，但这些实体工程的使用情况并不理想，最近应用的工程较少。

对于复合式路面的理论计算，我国也分为弹性层状体系法和有限元法。长安大学的王秉纲、胡长顺等对碾压水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面结构设计理论与方法进行了系统研究，采用八节点等参元<sup>[15]</sup>对复合式路面的荷载应力与温度应力进行了计算与分析，研制了临界荷位时板底最大应力计算诺模图，结合室内试验、试验路及实体工程的研究，提出了复合式路面结构设计方法。长沙理工大学的李宇峙、张起森等用线弹性断裂力学理论<sup>[16]</sup>进行沥青加铺层厚度设计。同济大学、空军工程学院等应用空间等参元、层状体系理论、断裂力学等对 PCC+AC 复合式路面结构进行了初步分析。对于粘结层抗剪强度，长安大学的胡长顺教授<sup>[17]</sup>和北京建筑工程学院的高金岐<sup>[18]</sup>等先后进行过粘结层的层间剪切试验，原理大体一致，只是试验的仪器、材料和试验条件有所区别。

在桥面铺装的研究方面，国内起步较晚，过去并不重视对桥面铺装防水粘结材料的研究。从 80 年代中期开始新建高速公路后，桥面铺装多以乳化沥青或热融沥青为粘结防水层，并辅以密级配沥青混凝土，以此构成桥面防水系统。实践证明，此类防水系统起不到对桥梁结构的防水保护作用，并导致桥面铺装的过早损坏；随着材料技术的发展 90 年代中期，各地开始发展改性沥青及改性乳化沥青，近年来国内又开始发展复合改性乳化沥青，陆续被广泛应用于桥面铺装的防水，并与密级配沥青混凝土配合使用组成桥面铺装的防水系统；但由于荷载条件下沥青类材料本身的防水局限性，以及密级配沥青混凝土的防水性局限，因此其防水性并未得到提高。90 年代后期，由于以前的桥面铺装未起到真正的防水作用，陆续出现桥梁结构和桥面板的钢筋锈蚀、和混凝土受损的现象，也开始研究和尝试

性应用防水卷材和其他高分子液体防水材料作为桥面铺装的防水层，同样在其上采用密级配沥青混凝土，并构成桥面铺装的防水体系，由于存在材料和施工工艺方面的问题，多数以铺装损坏为最终结果。

总的来说，国内外对水泥混凝土路面加铺沥青层结构的研究还处于初级阶段。研究的重点大多集中在面层沥青混合料的厚度计算以及水泥混凝土板加铺后的受力变化，对反射裂缝的研究主要集中在技术措施层面，没有对各种处治措施做深入的理论分析。对刚柔性路面的研究主要存在以下几方面的问题：1，刚柔复合路面结构模型的建立；2，对旧水泥混凝土路面的评价；3，刚柔界面的处理，此三个方面将是今后刚柔复合路面研究的重点。

## 1.3 本文研究的主要内容及预期成果

### 1.3.1 本文研究的主要内容

1，对刚柔复合式路面的结构行为进行研究。包括：刚柔复合路面结构的特点、主要损坏模式及机理分析、刚柔界面的特点及作用、目前常用的界面层处治措施及作用机理分析。

2，刚柔界面防水粘结层的试验研究。通过室内试验，主要考查以下几种不同防水粘结材料在不同混凝土板处理方式的情况下，界面的抗剪强度、抗拉强度、封水性和耐久性。室内试验拟采用的防水粘结层材料为：AWP-2000F型防水涂料、橡胶沥青、SBS 改性沥青、SBR 改性沥青、环氧沥青、溶剂型防水涂料。混凝土板的界面处理模拟实际工程分三种情况：1，不做任何处理；2，喷砂处理；3，精铣刨处理。

3，通过室内试验，对比研究不同防水粘结层材料的力学强度。研究在不同界面处治方式下的防水粘结层最佳沥青用量问题，重点研究精铣刨界面铣刨深度对界面层强度的影响，以及不同铣刨深度下的最佳沥青用量。对不同形式的抗剪强度试验进行对比研究，得到彼此之间的相关关系。

4，通过有限元分析软件 ANSYS，对界面受力情况进行分析，重点分析界面层的剪应力大小。用有限元软件进行界面层力学分析时考虑以下几方面因素：不同荷载（考虑超载）、不同行驶状态（考虑不同情况下刹车）、不同面层沥青混合料的厚度和模量。同时研究温度变化对界面层受力的影响，对不同界面处治方式进行有限元的数值模拟。

5，对刚柔复合式路面界面层的结构组合设计进行研究。包括：界面层材料的选择、界面层的结构设计、界面层的施工工艺及质量控制。

### 1.3.2 预期成果

通过本论文的研究，预期得到以下成果：

1，系统全面的对刚柔性路面的结构行为特点、损坏模式及机理、界面层特点及作用、常用的界面层处治措施进行了总结和比较研究。

2，对刚柔界面加强措施进行了试验研究，考虑了不同粘结材料、不同沥青用量、水泥混凝土板处治方式等对界面粘结及抗剪强度的影响。得到最佳的界面层粘结材料，最佳的沥青用量，最佳的混凝土板处治方式。并首次对混凝土板铣刨深度进行定量化研究，得出合理的水泥混凝土板铣刨深度。

3，针对不同的抗剪强度试验方法开展研究，得到直剪、 $30^{\circ}$ 斜剪和 $45^{\circ}$ 斜剪三种不同试验方法的试验结果的相关性。使得目前所有的关于防水粘结层材料的试验结果有了可比性的基础。

4，对刚柔界面的受力情况进行有限元分析。得到不同荷载、温度、车速下界面层的应力大小，同时得到各因素对界面受力的影响程度。对不同的混凝土板处治方式进行了数值模拟，得到了最佳的界面处治形状的理论依据。

5，通过对防水粘结层材料的室内试验研究和对界面层受力的有限元分析，针对防水粘结层的强度指标提出作者的修改建议，结合本课题组的研究，提出桥面铺装防水等级的概念。

6，根据研究成果，提出在不同环境条件下，刚柔性路面界面层结构设计的理论与方法，提出刚柔性路面防水粘结层的典型结构。

## 第二章 刚柔复合式路面结构分析

刚柔复合式路面通常指的是水泥混凝土路面加铺沥青面层后形成的复合式路面，广义上讲，凡是面层结构材料的模量相差特别大，明显呈现“一刚一柔”相结合的特点的路面都可以称为刚柔性路面。由于材料差异较大，刚柔性路面有着许多不同于一般路面结构的行为特点，本章将对刚柔性路面结构的特点进行全面深入的探讨。

### 2.1 刚柔复合式路面的特点

刚柔复合式路面的特点从大的方面来说，主要包括结构组成特点和力学行为特点。结构组成特点主要讨论的是材料性质及其组合后的特性，力学行为特点主要是讨论刚柔复合路面在使用过程中对荷载应力以及温度应力的响应。

#### 2.1.1 结构组成特点

刚柔复合式路面绝大部分都是在水泥混凝土路面上加铺沥青面层之后形成的，其特点是路面整体刚度大，稳定性好，行驶舒适性好。路面结构组成为：基层+水泥混凝土板+界面层+沥青面层。如图 2.1 所示。

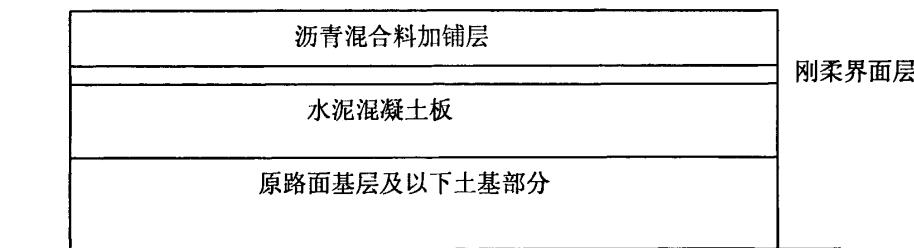


图 2.1 刚柔复合式路面典型结构图

Fig. 2.1 Rigid-flexible composite structure of the typical road

沥青加铺层厚度较大时，通常分两层摊铺，层间洒乳化沥青粘层油以加强粘结，两层混合料的级配可以相同也可以不同。界面层的材料通常采用的是改性沥青，厚度只有几个毫米，主要起到粘结和防水作用。界面层材料模量小，具有高粘度，弹性恢复性能好，能够很好的吸收水泥混凝土板由于形变而产生的应力，能够有效的抑制反射裂缝的传播。

刚柔性路面最大的特点是组成面层结构的材料的模量不一样，刚度相差很大。水泥混凝土板具有强度高、刚度大、温度敏感性小，材料模量相对比较稳定，属脆性材料。沥青面层材料模量小，温度敏感性大，材料模量随温度变化，呈现明

显的黏-弹-塑性。正是由于材料模量的差异较大，从而导致刚柔性路面在车辆荷载及温度应力作用下，呈现明显的变形不协调性。因此，较一般沥青路面而言，刚柔性沥青路面更容易开裂。

## 2.1.2 力学行为特点

路面结构的组成和各组成材料的力学性质决定了路面的力学行为特点。刚柔性路面的面层材料由刚性的水泥混凝土板和柔性的沥青混合料组成，其受力呈现以下几个方面的特点：1，当面层沥青混合料厚度较小时，路面呈现出刚性路面特点，水泥混凝土板承受较大的竖向应力和水平应力。此时的沥青面层对路面结构的受力没有起到大的改变作用，主要是起到改善路面行驶的舒适性，减小行驶噪音，主要起到功能性作用。2，当沥青面层较厚时，此时沥青面层具有明显的抗剪效应，也就是说，沥青面层承受了主要的水平应力。同时，对竖向应力也起到了很好的扩散作用。因此说，沥青加铺层越厚，仅从受力角度来看，对其下的水泥混凝土板是有利的。当旧水泥混凝土路面板厚度偏小时，可以考虑通过适当增加沥青面层厚度来补偿。3，在刚柔性路面结构中，无论面层沥青混合料厚度如何，刚柔性界面层所受到的剪应力都是不能忽视的。刚柔界面是刚柔性路面结构中的薄弱层，由于材料及厚度等原因，其抗剪强度往往不足以抵抗其所受到的剪应力，容易发生剪切破坏。另一方面，由于界面层处在刚柔过度的特殊位置，存在许多的不利的受力环境。例如，在水泥混凝土板的接缝处会出现较大的剪应力集中，由于板面存在尖角，也容易出现应力集中现象。也就是说，在界面层的某些局部部位会由于应力集中而导致破坏。4，除面层沥青混合料厚度外，其模量对结构的受力也有大影响。沥青混合料的级配、沥青的劲度等直接影响其扩散荷载的能力。

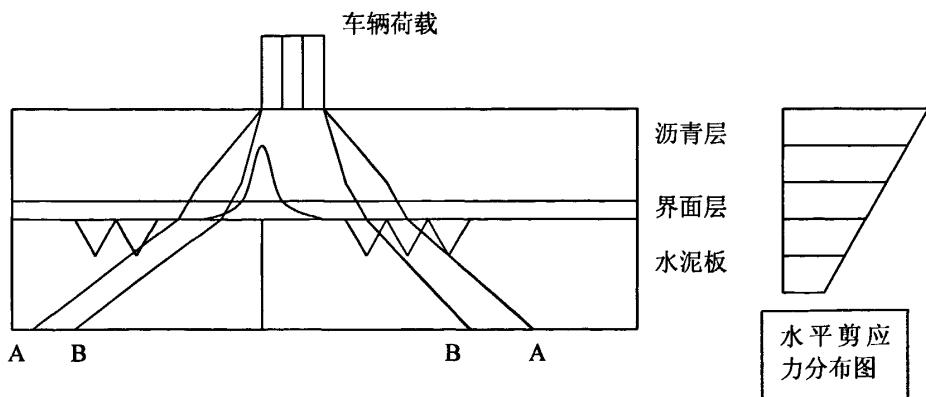


图 2.2 路面结构受力分布示意图  
Fig. 2.2 The distribution of Pavement structure

如图 2.2 所示，当沥青面层模量大，强度高，扩散荷载能力强，扩散范围如 A

线所示。在水泥混凝土板接缝处，会出现剪应力集中现象。路面结构层内水平剪应力如图所示，容易得出，当沥青面层较薄时，界面层受到的水平剪应力会相对增大。

## 2.2 刚柔路面主要的损坏形式及机理

同其他结构形式的路面有所不同，刚柔复合式路面的损坏主要集中在沥青加铺层的损坏，也就是说刚柔性路面的损坏主要集中在路面表层。水泥混凝土板发生损坏的情形不多见，除非沥青表层损坏极其严重，且未经及时有效的处理，损坏才有可能向下发展。当然，由于严重的设计缺陷，如：水泥混凝土板处治措施不当，板底存在脱空，厚度设计不合理，对交通量及交通荷载考虑严重不足，导致路面设计的承载能力严重偏低。在这些情形下，路面损坏有可能延伸到板及板以下各层。

### 2.2.1 损坏类型

大量的工程实践表明，刚柔性路面的损坏形式主要有以下三种：1，开裂；2，车辙；3，水损坏。刚柔性路面的开裂主要是反射裂缝，通常出现在旧水泥混凝土路面的接缝处。通过对裂缝处钻芯取样，可明显看到反射裂缝由下向上发展的痕迹（见图 2.3）。刚柔性路面的车辙同一般的柔性基层或半刚性基层沥青路面有所不同，刚柔性路面的车辙仅发生在沥青面层，其下部的水泥混凝土板是不会发生永久性的变形，不包括由于地基不均匀沉降而导致的混凝土板局部下陷。因此，实际中，沥青加铺层的车辙深度较一般沥青路面的小，并不是十分严重。但由于是刚柔性路面材料的结合，沥青面层又较薄，容易出现推移（见图 2.3），沥青面层和水泥混凝土板的剥离等现象。水损坏问题一直是令道路工作者头疼的问题，无论是沥青路面还是水泥路面，都不同程度的存在水损坏现象。对于水泥路面而言，水损坏表现为板底脱空、基层液化，出现唧泥和断板。对于沥青路面而言，水损坏主要表现为松散、坑槽（见图 2.3）。严重影响路面的使用质量，影响美观。刚柔性路面的水损坏主要表现为表面沥青面层的松散、坑槽，严重时可产生唧泥。目前，从国内修建的刚柔复合式路面使用情况来看，损坏情况还是十分普遍的。例如：河南省有三条高速公路采用了刚柔复合路面结构形式，分别是郑开高速公路、郑新高速公路和新许高速公路。以下是三条高速公路的路面结构形式及损坏状况的简单介绍<sup>[19]</sup>。

①郑开高速公路

1) 路面概况

全长 81Km, 路面结构为:从上到下依次为 5cmAC—16I 型中粒式沥青混凝土, 22cm 碾压水泥混凝土 RCC, 15cm 水泥稳定碎石, 15cm 水泥石灰稳定土。

## 2) 病害情况

### a. 路面裂缝

根据资料显示, 横向裂缝一般为间距 10 米一道路面贯通裂缝, 最大缝宽 2~3mm。该路段路面施工为全厚式碾压混凝土, 每间隔 10 米切缝以减少温度应力, 部分标段施工时改为现浇混凝土, 施工缝间距 10 米。经分析路面上出现的贯通裂缝即由此反射形成的。每块混凝土板上由于温度应力、车辆荷载共同作用或其下基础刚度差异, 由此出现了路面不规则的反射裂缝。

### b. 路面坑槽、唧浆、沉陷、车辙

开郑路在运营期间出现了部分坑槽、沉陷、唧浆和车辙等病害。在 2001 年开始进行的该项目工程大修中, 对以上病害进行了处理, 目前路面上已很少见到该类病害现象。

## ②郑新高速公路

### 1) 路面概况

路面一般结构层由上而下依次为上面层为 5cm 中粒式沥青混凝土 AC-20I, 下面层为 23cm 碾压水泥混凝土 RCC-30#, 基层为 15cm 水泥稳定碎石, 底基层为水泥石灰稳定土。

### 2) 维修养护史

郑新高速于 1994 年 12 月建成通车, 四年后(K0+000~K25+300)出现较为严重的损坏, 主要病害有:AC 层剥落、拥包或开裂; 路面沉陷、坑槽; 较多的裂缝(伴随板边破碎)。根据病害程度及类型, 分别采取挖补、压浆、更换面板等措施处理后, 全段加铺 5cmAC-20I 型中粒式沥青混凝土和 4cmAC-16I 型中粒式沥青混凝土(其中东半幅采用了 SBR 改型沥青)。本次起止时间为 2000 年 8 月 20 日~2001 年 6 月 1 日, 大修工程路面部分费用为 10200 万元。2001 年 3 月 20 日至 2001 年 9 月 1 日对 K25+300~K47+840 段进行大修, 全段加铺 5cmAC-20I 型粗粒式沥青混凝土和 4cmAC-16I 型中粒式沥青混凝土(其中东半幅采用了 SBR 改型沥青, 西半幅采用 SBS 改性沥青), 此次大修工程路面部分费用为 8379.6 万元。

通过两次大修工程(调查文件称为改善工程), 路面强度、平整度和抗滑性能得到改善, 但反射裂缝并未能得到根治, 在 1 年后再次出现较多的反射裂缝, 需要在每年雨季和冬季来临前, 使用美国 KOCH 灌缝材料灌缝。

### 3) 路面病害现状

该路段目前的主要病害为横缝、纵缝和轻度车辙。郑新养护工区 2003 年 5 月 20 日~24 日对路面病害调查的结果为:路面翻浆 11 处:裂缝 5068m, 沉陷、网裂、

坑槽  $81.25\text{m}^2$ 。

### ③新许高速公路

#### 1) 路面概况

路面一般结构层由下而上依次为水泥石灰稳定土  $15\text{cm}$ 、水泥稳定碎石  $20\text{cm}$ 、水泥混凝土  $25\text{cm}$  和  $5\text{cm}$  中粒式沥青混凝土 AC-20I。内侧路缘带宽  $0.75\text{m}$ , 外侧设  $2.5\text{m}$  紧急停车带和  $0.75\text{m}$  宽的路肩。

#### 2) 路面病害现状

新许养护工区 2003 年 5 月 20 日~24 日对路面病害调查的结果为:路面翻浆 51 处约  $267\text{m}^2$ ; 裂缝  $17826\text{m}$ ; 车辙  $1892\text{m}^2$ ; 沉陷、网裂、坑槽  $1487\text{m}^2$ 。

其中裂缝较为严重的路段为 K5+500~K7+500(东半幅), 平均每  $6\text{m}$  就有一道横缝, 裂缝宽度多为  $10\text{mm}$  左右, 部分裂缝具有支缝。K10+000~K17+000 段(东半幅)也有较多横缝。养护部门已对裂缝进行灌缝处理。

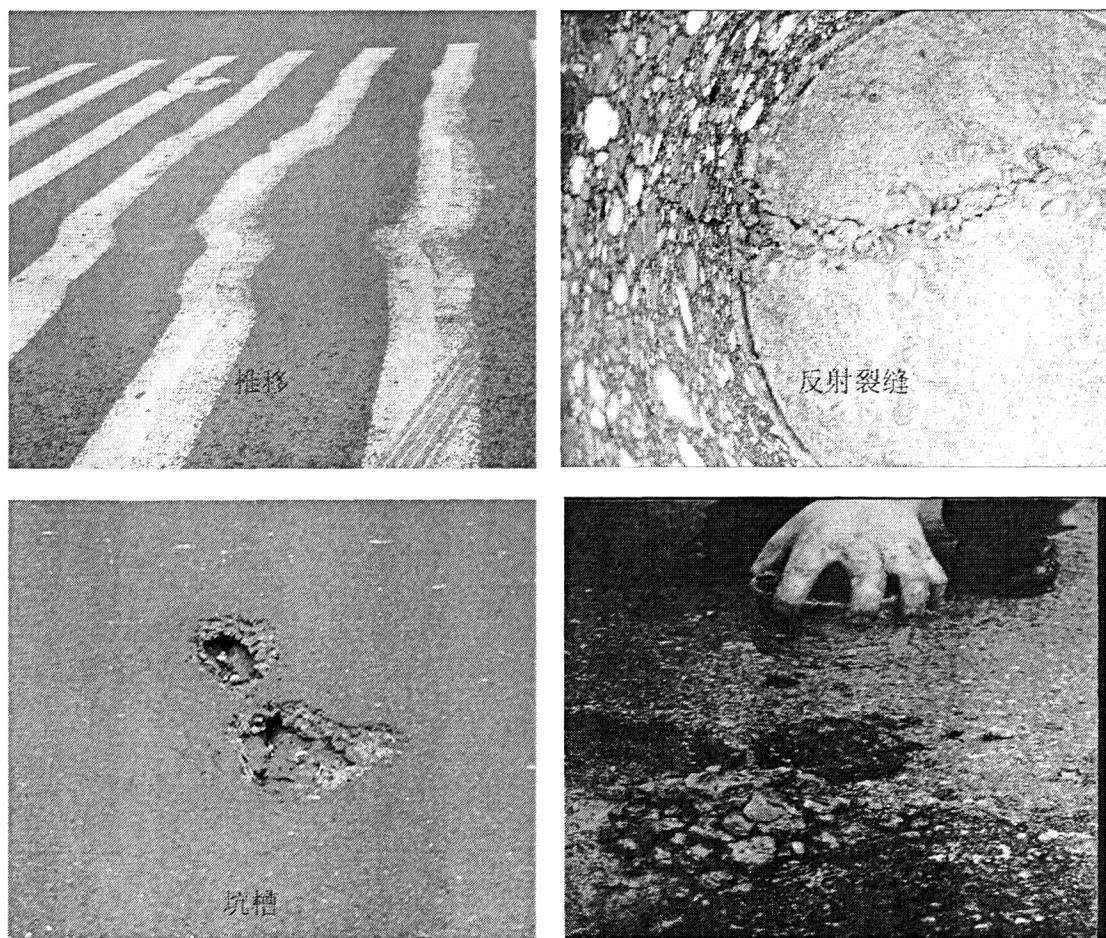


图 2.3 几种常见的路面损坏形式

Fig. 2.3 Several common forms of damage to the road surface

重庆市主城区道路自施行“白改黑”工程之后, 在部分路段, 如: 长大纵坡

处、平曲线半径较小处、公交车站处、桥涵等建筑物接头处，相继出现不同程度的损坏。大部分损坏形式表现为：推移、拥包、松散、剥离、坑洞。带有明显的水损坏特征，且沥青混合料加铺层在使用过程中表现出明显的早期损坏。以上路段处出现的损坏均是在“白改黑”工程完工后1~3年内出现的。图2-4是重庆主城区某公交车站“白改黑”工程使用两年后的损坏状况，该路段出现了加铺层沥青混合料严重的剥离，松散和坑洞十分明显，带有明显的水损坏特征。这与重庆高温多雨性气候特征不无关系。



图2.4 重庆主城区“白改黑”工程使用两年后损坏状况

Fig. 2.4 The situation of Chongqing “white to black” project after two years

## 2.2.2 损坏机理

要分析刚柔复合式路面的损坏机理，不外乎要考虑材料、设计和施工三个方面的因素。首先，从设计方面来看，由于缺乏相关的设计理论与规范的指导，目前我国的刚柔复合式路面的设计都是参考国外的一些经验，或者简单的将复合路

面结构按照水泥路面或者是沥青路面来考虑进行设计。没有对刚柔复合式路面的实际受力情况进行深入细致的分析，没有建立合理有效的刚柔复合式路面的力学分析模型。导致设计出来的沥青面层厚度不合理，刚柔界面的处理也缺乏相关理论作为指导，界面处理方式简单粗糙，粘结防水材料的选择不严格。导致界面层无法起到应有的作用，严重影响了刚柔性路面的使用寿命。此外，对加铺层沥青混合料的组成设计方面也缺乏研究，常采用与普通沥青路面相同的矿料级配和相同品质的沥青，没有从刚柔性路面的实际使用状况出发考虑沥青面层材料的设计问题。其次，在材料方面，目前还有待开发高性能的改性沥青和其它品种的材料，使其能够更好的适应刚柔界面极其苛刻的受力环境。对于面层沥青混合料而言，由于其厚度一般较小，通常只有普通沥青路面面层厚度的三分之一，因此，对其抗疲劳开裂性能，耐久性等要求就更高。因此，重点研究用于刚柔性路面界面层和面层的混合料材料具有重要的实用价值。最后，就是施工工艺的问题。目前，对于刚柔性路面的施工还没有专门的施工技术规范。在实际工程中，很多隐患都是由于施工组织的不合理造成的。例如：由于施工机械安排不合理，施工过程中时间和温度等因素考虑不严格，导致刚柔界面的破坏或者质量达不到要求。以下重点对刚柔性路面的反射裂缝、车辙及推移和水损坏进行分析。

### ①反射裂缝的形成机理及防治措施

反射裂缝是由于旧面层接缝或裂缝附近的位移引起接缝或裂缝上方沥青加铺层内出现应力集中造成的<sup>[20][21][22]</sup>。可以这么说，反射裂缝是一种“继生裂缝”，它是在原有裂缝的作用及影响下形成和发展的。旧水泥混凝土板在接缝处的位移包括由温度变化引起的水平方向的伸缩位移和由荷载作用下产生的竖向剪切位移。由于沥青层与板之间的粘结作用，导致沥青层内出现竖向剪切应力和水平向的拉应力。当此应力超过沥青混合料的抗拉强度，沥青层就会开裂。沥青加铺层反射裂缝扩展过程经历了三个阶段<sup>[23]</sup>：第一个阶段为起裂阶段，沥青加铺层由旧水泥混凝土路面接缝或裂缝处存在的缺陷引起；第二个阶段为稳定扩展阶段，沥青加铺层在交通荷载和温度作用引起的应力集中向上发展并贯穿整个沥青加铺层；第三个阶段为破裂阶段，沥青加铺层经过一段时间的运营，尤其是在冬季加铺层表面开始出现裂缝。由于各地区的温度状况不同，各路段的交通条件和路面结构状况也不同，反射裂缝可能主要由于温度作用产生，也可能主要由于荷载作用产生，或者由二者共同作用产生。如图 2.4 所示。



图 2.4 反射裂缝形成示意图

Fig. 2.4 Schematic diagram of a reflective crack

对于反射裂缝的防治，主要有以下几种：1，锯切横缝，在加铺的沥青层上锯切新的横缝，从而释放沥青层内过大的拉应力。2，加铺厚的沥青层，虽然厚的沥青层对于延缓反射裂缝的发展能起到一定的作用，但是从经济上考虑是不可取的，且过厚的沥青层会带来其他的问题，如车辙可能会因此变得严重。3，将水泥混凝土板碎石化。将板彻底破碎到规定尺寸范围，形成柔性基层，然后再加铺沥青面层，事实证明这样做能很好的控制反射裂缝问题，因为它避免了沥青层中可能出现的应力集中现象。但是，这样处理对环境影响较大，且破碎过程中对原有路基的强度和稳定性会造成很大的伤害，同时，有学者认为，这样做是一种很浪费的行为，因为，它没有充分利用原有路面的强度，而是毁坏了这种强度。4，加铺夹层。通过对刚柔性界面的处理，设计厚度几毫米的夹层，能够有效的控制反射裂缝的传播。目前，这种办法被认为是最有效也是最经济的解决刚柔性路面反射裂缝的办法。

## ②车辙和推移的形成机理及防治措施

车辙和推移是发生在沥青面层的永久性变形<sup>[24]</sup>。车辙表现为在轮迹处沥青层的凹陷，产生这种变形主要有几种可能。一是由于面层沥青混合料压实度不够，导致后期在车辆荷载的作用下，混合料被进一步压密所致，由此产生的车辙也叫“再压密型”车辙。还有就是由于沥青混合料的高温稳定性不足，导致在高温季节，在车辆荷载的作用下，沥青混合料出现侧向的剪切流动，形成车辙。除此之外，还有可能是由于面层混合料被磨耗而形成的车辙。推移主要是由于沥青混合料的高温稳定性不足，在车辆荷载水平力的作用下，发生推移。对于刚柔性路面而言，由于面层沥青混合料的厚度一般较小，且多数采用的是高粘度的改性沥青，沥青混合料的高温稳定性较好。因次，刚柔复合式路面的车辙并不是十分突出的问题。推移现象倒是常见，这主要是由于刚柔界面的抗剪及粘结强度不够所致。由于，水泥混凝土板刚度大，沥青层模量小且厚度薄，在车辆荷载水平力的作用很容易出现界面层的剥离，从而导致面层出现推移和拥包现象。

对于刚柔性路面出现的车辙和推移病害，主要的处治措施是两个方面，一方面提高沥青面层混合料的高温稳定性和强度，采用高性能的改性沥青作为粘结料。

另一方面，重点加强刚柔界面的粘结处理，提高其抗剪强度和粘结强度。使沥青层与水泥混凝土板更好的粘结在一起，提高整体受力性能。

### ③水损坏的发生与防治

水损坏是一个带有普遍性的话题，在此不做详细分析。刚柔性路面的水损坏的发生主要还是由于面层沥青混合料的设计空隙率不合理所致。本文认为，由于刚柔性路面的沥青面层较普通沥青路面的面层厚度要小，通常只有4cm~8cm。因此，水更容易从混合料空隙渗入。因此，建议用于水泥路面加铺层的沥青混合料设计空隙率要么小，直接做成不透水性沥青混凝土，或者干脆做大，直接做成透水性沥青面层，但是，修筑透水性路面必须做好刚柔界面的防水及排水措施，对此可参照透水路面的设计方法。此外，加强刚柔界面的粘结与防水处理，对于提高刚柔性路面的抗水损坏能力也是大有帮助的。对于面层沥青混合料的设计，应该考虑集料沥青的黏附性，尽量减小发生水损坏的可能性。

## 2.3 界面层的特点及作用

### 2.3.1 界面层特点

刚柔复合式路面的界面层处于沥青层与水泥混凝土板之间，起到粘结沥青层与水泥板的作用。由于处在刚柔过度部位，界面层所处的受力环境十分复杂，又因为界面层的材料特殊，厚度极小，很容易发生破坏。实践表明<sup>[25]</sup>，大多数的刚柔性路面发生破坏都是源于刚柔界面层的破坏和失效。界面层具有以下几个方面特点：1，界面层材料特殊。用作刚柔界面的材料要求具有很强的粘结能力，良好的适应变形能力，不透水性，足够的耐久性。而且，理论上只要具备以上条件的材料都可以用来做界面层材料。因此，界面层材料具有多样性特点。2，界面层所处位置特殊。界面层处在沥青层与水泥混凝土板之间，其上是模量较小的柔性的沥青混合料层，其下是模量较大的刚性的水泥混凝土板，界面层处在刚柔过渡部位，其受力苛刻，极易发生破坏。3，界面层受力特殊。界面层的破坏主要是由于水平方向的剪应力超过界面层的抗剪强度所致。因此，界面层的设计主要考虑的是抗剪强度。由于水泥混凝土板在温度作用下，发生翘曲变形，为避免沥青层与水泥混凝土板的剥离，还应该考虑界面层的粘结强度。界面层的抗剪强度主要依靠界面层板的挫槽深度与面层沥青混合料之间的机械咬合作用，界面层材料本身所能提供的抗剪强度十分有限，这一点已经被大量的试验所证明。而对于界面层粘结强度，则又是主要依靠界面层粘结材料本身的粘结强度。所以，界面层的受力与破坏所牵扯到的因素很多，相比面层沥青混合料和水泥混凝土板的受力和破坏而言，界面层的情况要复杂得多。

### 2.3.2 界面层的作用

界面层的作用十分明确，无论是旧水泥混凝土路面加铺沥青层，还是钢筋混凝土桥沥青层铺装，只要是存在刚柔性界面，其界面都应该具有以下几个方面的作用：1，粘结抗剪作用。起粘结沥青层与水泥混凝土板的作用，并且具有足够的抗剪强度，避免沥青面层的剪切破坏。2，防水作用。界面层应该具有不透水性，避免水渗透到水泥板及以下各层，防止路面基层受到水的侵害。3，界面层应该具有应力吸收的作用。由于处在刚柔过度位置，界面层的很多部位会存在应力集中的现象。为了避免应力集中造成沥青面层的破坏，要求界面层具有良好的适应变形的能力，能够吸收和分散集中的应力。这一点对抑制反射裂缝的发展有很大作用。

## 2.4 目前常用的界面层处治措施及作用机理分析

根据界面层所处的位置、特点及作用，对界面层进行处治，界面层的处治包括水泥混凝土板的处理和界面粘结防水层的设计。以下是目前常用的各种界面层处治措施及其作用机理的介绍。

### 2.4.1 水泥混凝土板的处理方式及作用

实践表明，水泥混凝土板的处理方式对刚柔界面的抗剪强度有很大影响。界面抗剪强度很大一部分来自于面层沥青混合料与混凝土板之间的机械咬合形成的嵌锁摩擦作用，已有大量试验证明了这一点。目前，常用的刚柔复合路面水泥混凝土板的处理方式主要有三种：1，人工打毛；2，机械打毛加喷砂处理；3，精铣刨；以下是三种打毛方式处理过后的水泥混凝土板界面形状示意图。



1 人工打毛                  2 精铣刨                  3 喷砂处理

图 2.5 不同打毛方式处理过后的混凝土板界面形状示意图

Fig. 2.5 The sketch of concrete interface shape  
after a different approach to hair

从三种方式处理过后的界面形状来看，精铣刨处理的界面棱角更加清晰，刻槽深度均匀；人工处理的界面呈现出来的是一个一个零散的小坑洞，混凝土板面很难形成宏观上的刻槽；喷砂处理的表面虽然能够形成宏观上的坑槽，但是由于喷砂过程中砂子与板面的强烈碰撞，导致处理后的界面没有清晰尖锐的棱角，界面呈曲线形。理论上讲，水泥混凝土板面越粗糙，棱角越清晰尖锐，加铺沥青面

层后能更有利与沥青混合料与板面的粘结，界面的嵌锁摩擦作用越明显，其抗剪强度就更高。因此，在三种方式中，精铣刨处理的效果最好，喷砂处理次之，人工处理方式最差。在实际工程中，三种界面处理方式得到的板面状态如图 2.6 至 2.8 所示。

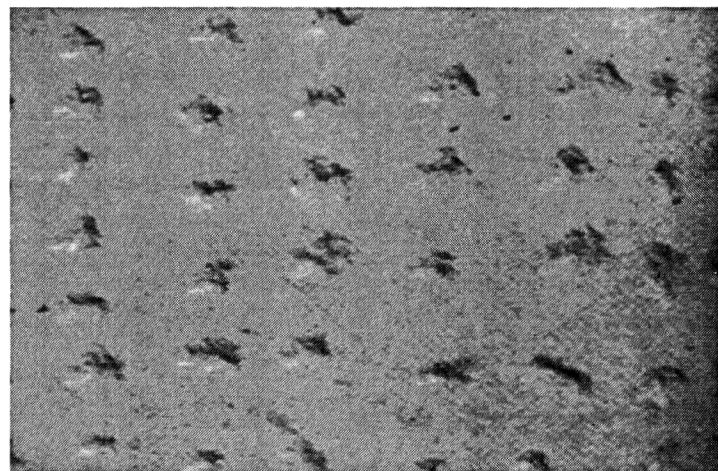


图 2.6 人工处理界面状态

Fig. 2.6 State manual processing interface

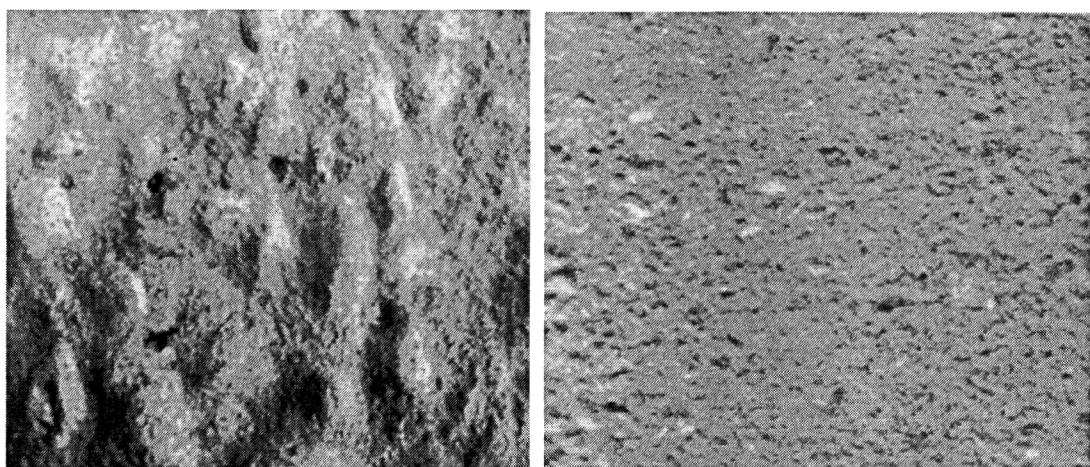


图 2.7 喷砂处理界面状态

Fig. 2.7 Sandblasting processing interface state

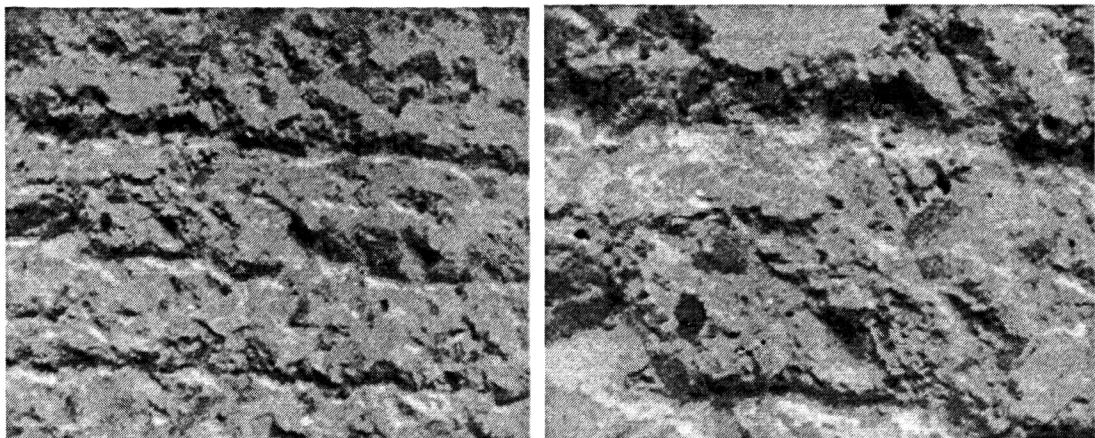


图 2.8 精铣刨处理界面状态  
Fig. 2.8 Fine milling processing interface state

在本论文的试验研究部分，对于水泥混凝土板的处理就是模拟了这三种界面处理的方式，各种处理方式的效果在本文第三章有详细论述。此处必须补充说明一点，对于混凝土板的打毛处理主要是为了加强沥青面层与混凝土板的粘结，目的是提高刚柔界面的抗剪强度。目前，用于界面粘结防水的材料越来越多，大量的土工合成材料在工程实践中被采用。比如：改性沥青油毡、土工布、玻纤格栅等。当界面层采用诸如此类的材料（可统称为卷材类）时，要求混凝土板具有良好的平整度，此时界面就不能打毛处理，否则，界面的棱角会对材料造成损坏，而且粗糙不平的板面也使得防水粘结卷材不便铺装，无法与板面紧密结合。如果一定要采用，则必须经过处理，如可设置一层沥青砂浆或细粒式沥青混凝土保护层，再在其上铺土工布或沥青油毡，起防水粘结作用。

## 2.4.2 常用界面防水粘结材料及作用机理

界面层的作用主要是防水和粘结，即加强沥青层与水泥混凝土板之间的粘结，改善面层混凝土受力条件；防止水的渗入对界面的破坏。其次，界面层还有一个重要的作用就是消散应力集中，阻断反射裂缝的传播，延缓和避免面层沥青混合料的开裂破坏。目前，常用的界面层材料可以分为两大类，一类是成型材料，直接摊铺，如各种卷材；一类是喷涂类材料，如各种改性沥青和高分子聚合物涂料，如聚氨酯、丙烯酸乳液等<sup>[26]</sup>。无论是那种材料，最终目的都是要起到防水、加强粘结、阻隔反射裂缝的作用。当然，不同的材料可能在某些方面的作用突出一些，而在某些方面的作用差一些。实际应用中，需要根据工程实际情况加一选择利用。一般而言，卷材类界面防水粘结材料的防水性能较好，粘结性能也不差，但界面的抗水平剪应力较差，抗剪强度不高。因此，在路面纵坡较大、弯道、停车场和加油站等特殊路段，水平剪应力作用明显，对层间抗剪强度较高时，卷材类界面须慎重考虑。涂抹类材料恰好相反，由于其施工适应性强，可以适应不同形态的

水泥混凝土界面。因此，通过对水泥板的处理，加强界面层的抗剪强度。通常涂抹类材料的界面层抗剪强度较大，粘结强度也能满足要求，但由于面层混合料集料和板面棱角的破坏作用，涂抹类材料的防水性能不好，尤其是在施工过后，其防水性能将有很大的下降。

无论是卷材类防水粘结材料还是涂抹类防水粘结材料，其作用机理都大同小异。首先，对于防水性能，无论是卷材还是涂抹类材料，其都具有不透水性。只要施工过程中不使其遭受破坏，防水作用是可以得到保证的。其次是粘结作用，对于卷材，其表面覆盖了一层具有很强粘结作用的物质，在加热后能够融化，从而实现层间的粘结，必要时还可以喷涂一层改性乳化沥青，以加强粘结。对于涂抹类材料，其粘结作用更是直接发挥，显而易见的了。

目前，在实际工程中<sup>[27][28][29]</sup>，为缓解反射裂缝的发生，界面层通常有三种做法。一是做应力吸收层 SAMI，一般采用的是薄层改性沥青或沥青橡胶，由于 SAMI 层具有良好的适应变形的能力，能够吸收水泥混凝土板接缝处位移产生的应力集中，通过自身的形变阻断了反射裂缝的传播。二是设置土工合成材料夹层，如土工格栅等，主要起到对面层沥青混合料的加筋作用，提高其抗拉强度，延缓开裂。三是设置级配碎石隔离层，由于级配碎石属散体材料，能够很好的阻隔裂缝的传播，同时能够很好的分散应力集中，避免沥青面层的开裂。总的来说，以上设置夹层延缓反射裂缝的措施都是利用了材料模量的不同，通过形变来吸收和分散应力集中，避免因应力集中导致的开裂，同时由于夹层材料具有良好的适应变形的能力，能够很好的阻断裂缝的传播，改变裂缝传播方向。理论上说，只要下层裂缝不穿透夹层，则面层沥青混合料是不会开裂的，即使裂缝穿透夹层，其能量大部份已被夹层吸收和分散了，能极大的延缓面层的开裂。对于界面层的施工，主要注意以下几个方面的问题：首先，必须做好水泥混凝土板的处理。板面必须清洁、干燥，灰尘和水的存在会严重影响层间的粘结；对于板底是否存在脱空一定要进行检测，发现有脱空一定要进行处理，换板或是压浆，保证板的弯沉符合规范要求；对于板接缝的处理尤其重要，必须重视接缝的灌缝密封，否则会严重影响界面层的施工，为反射裂缝的发展提供条件。其次，进行界面层的施工必须严格按照预先制定的施工工艺来做，必须注意避免由于施工组织不当导致对界面层的损坏。界面层厚度小，材料容易损坏，界面层施工完后一定要注意对其保护，施工沥青面层时，也是如此，避免面层混合料对界面层的损坏。

## 2.5 小结

通过对相关资料的调研和分析，总结本章内容，可以得到以下几点结论：

1, 刚柔复合式路面由于结构组成和材料上的非线性特点, 材料模量差异较大, 其受力具有如下特点: 沥青面层越厚, 模量越大, 面层承担的荷载效应越明显。反之, 混凝土板将承担主要的荷载作用。刚柔性界面层是抗剪切破坏的薄弱环节, 须加强处理。面层沥青混合料的耐久性与界面层性能有很大关系, 界面层粘结能力越好, 抗剪强度越高, 则面层稳定性越好, 使用寿命越长。刚柔性路面的整体强度及承载能力主要依靠的是下层水泥混凝土板。

2, 刚柔性路面的损坏形式主要有三种。即: 面层开裂、永久变形、水损坏。其中开裂破坏是最主要的, 刚柔性路面的开裂主要是由于反射裂缝。反射裂缝分剪切型和张开型两种, 车辆荷载及温度变化是引起反射裂缝的两大因素。从断裂力学的角度分析, 反射裂缝是由于旧水泥混凝土板在接缝处存在的缺陷造成了该部位的应力集中, 通过计算该处的应力强度因子  $K$ , 可以判断反射裂缝出现的时间和位置, 同时, 通过对应力强度因子  $K$  的分析, 可以得到影响反射裂缝发生和发展的各个因素。永久变形主要是由于层间结合不牢固, 面层沥青层较薄, 在车辆水平荷载作用下, 发生推移, 刚柔性路面由于面层混合料多采用高性能的改性沥青混合料, 且厚度不大, 车辙问题不是十分突出。水损坏主要是面层沥青混合料的设计不太合理, 如: 设计空隙率大小, 集料和沥青的选择, 面层厚度等。此外, 界面层的防水性能好坏也影响水损坏的程度。

3, 界面层的作用主要是加强层间粘结, 提高抗剪强度, 具有防水作用。界面层材料具有高粘度、低模量, 良好的适应变形能力和不透水性。界面层厚度小, 但变化范围较大, 从几毫米防水卷材到几厘米的改性沥青砂浆。界面层处理方式多种多样, 实际工程中, 应该根据工程具体情况, 选择合理的界面处治方案。包括: ①界面层材料的选择; ②界面层结构的设计; ③水泥混凝土板的处理方式等。但无论采取怎样的界面处治措施, 最终要达到的目的都一样: 防水、抗剪、粘结、阻隔反射裂缝。

### 第三章 刚柔性路面界面层剪应力的有限元分析

刚柔性路面主要包括两种结构形式，一种是就水泥混凝土路面上加铺沥青层，俗称“白改黑”路面，另一种是水泥混凝土桥沥青混合料铺装结构。二者在受力上有许多的相似之处，当然也存在较大差别。差别主要体现在：对于水泥路面加铺沥青层结构而言，基础牢固性好，稳定性高，而对桥面铺装结构而言，由于结构自身特点，其结构的柔度较路面大，受外界荷载影响结构振动频率较路面高出很多。此外，对于水泥路面加铺沥青层结构而言，由于水泥路面存在大量的接缝，沥青层反射裂缝问题较桥面铺装结构突出，而对于桥面铺装结构而言，重点是控制桥面由于弯矩变形而引起的沥青层受拉开裂。最后，对于水泥路面加铺沥青层结构而言，结构的损坏与土基的强度及稳定性有较大关系，而桥面铺装结构的损坏则与桥梁自身的结构形式有关。倘若抛开以上二者的不同之处，从刚柔性路面结构的本质出发，求同存异，考虑二者在受力及破坏上存在的共性。不难发现有以下共同特点：1，刚柔性路面结构面层材料模量相差大；2，刚柔性路面结构的损坏大多源于界面层的失效破坏；3，刚柔性路面的损坏形式大体相似，如：推移、开裂、剥离。究其原因，都是因为界面层的剪切破坏和粘结破坏。4，刚柔性路面界面层的作用及处理方式存在共同之处，只是侧重点有所不同。对于桥面铺装结构而言，界面层的作用主要是加强层间的抗剪和粘结，防止沥青铺装层发生推移，避免水平方向的剪切破坏。对于水泥路面加铺沥青层而言，界面层的作用主要是加强层间粘结，起到分散应力作用，避免沥青面层反射裂缝的出现。综上所述，本文在采用有限元分析和计算刚柔性路面界面层受力时，忽略二者的差别，只考虑其共性的部分。具体来说，对于桥面铺装结构而言，不考虑桥面负弯矩及桥梁震动对计算的影响；对于水泥路面加铺沥青层结构而言，不考虑土基强度及稳定性对计算的影响。

目前有许多通用的有限元分析软件可以用于各种路面结构的分析与计算，如 ANSYS，ADNIA，SAP 系列等。相对于平面的二维有限元分析，三维有限元分析能更好地模拟实际的路面结构，其分析结果也更接近路面实际的受力特点，因此本文拟采用三维有限元分析计算刚柔性路面界面层的受力。其中，重点考虑车辆轴载、车辆行驶状态、沥青层厚度、沥青层模量、界面层粘结状态等因素对界面层受力的影响。最后，根据理论计算的结果，综合考虑其他因素，提出刚柔性路面界面层强度的指标标准。

#### 3.1 有限元分析方法及模型的建立

刚柔性路面结构计算模型既不同于传统的柔性路面弹性层状理论体系，也不同于刚性路面的小挠度薄板理论。但是，可以根据所研究的重点，对其进行不同的简化。当重点考虑水泥混凝土板以下各层（基层或土基）的应力应变分析时，可以忽略沥青层的影响，直接套用刚性路面的小挠度薄板理论。当需要考虑水泥混凝土板及以上各层的应力应变分析时，可将结构视为弹性层状体系，运用弹性层状理论进行分析计算<sup>[30]</sup>。

### 3.1.1 有限元分析方法及 ANSYS10.0 软件介绍

力学分析的方法分为解析法和数值法两类<sup>[31]</sup>。解析法是运用经典的力学理论，建立所要求解问题的数学物理方程，通过严格的数学推导和计算，得到问题的函数形式解答，也称为解析解。然而，在实际问题中，由于结构形式的复杂，边界条件的模糊等，无法准确建立所求问题的数学物理方程，即使采取一定的假设勉强建立方程，大多数情况下，是得不到闭合的解析解的。数值法便是在此情况下产生的，简单来说，数值方法是对微分方程的近似解答，是通过将微分方程转变为近似替代的代数方程，然后通过求解代数方程得到问题的解答，因此数值法得到的解是近似的代数式解。目前数值分析方法有很多，如：差分法、边界元法、有限单元法等。其中，有限元法是运用最多，适用最广的数值分析方法。有限元法分析的过程概括起来可以分为以下五个步骤：①结构的离散化，将原结构体离散为有限个具有一定形状和大小的构件，这些构件通过有限个结点互相连接；②选择位移模式，对单元的位移分布做出一定的假设，也就是假定位移是坐标的某种简单函数，此函数即为位移模式，导出用结点位移表示单元内任意一点位移的关系式；③分析单元的力学特性，包括导出用结点位移表示单元应变、应力的关系式和建立单元的平衡方程，最终得到单元的刚度矩阵是单元分析的核心内容；④结合所有单元的平衡关系，建立整个结构的平衡方程。此部分包含两个方面的内容，一是将各个单元的刚度矩阵集合成结构的整体刚度矩阵；二是将作用于单个单元的等效结点力列阵集合成整个结构的荷载列阵；⑤求解未知结点位移和计算单元应力，根据方程组特点选择合适的计算方法，求出问题的解。从有限元法求解问题的过程可以看出有限元法的本质类似于微积分的思想，对于一个复杂的实际结构物而言，我们首先将其离散化，离散后的各个单元是形状和大小都十分规矩和我们所熟悉的几何形体，然后假设整个结构就是由这样有限多个规则的形体彼此通过结点连接形成的，通过单元分析，求得结点位移、单元的应力应变特性及刚度矩阵，最后集合得到整个结构的整体刚度矩阵和荷载、位移列阵。最终求出问题的解答。

目前有许多通用的有限元分析软件可以使用，其中 ANSYS 是应用范围最广，

功能最强大的有限元分析软件，包括从简单的线形静态分析到复杂的非线性动态分析。ANSYS 软件主要包括三个部分：使用前处理模块(PREP7)创建有限元模型、使用(SOLUTION)模块施加荷载进行求解、使用后处理模块(POST1 和 POST26 )进行结果分析。前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型；分析计算模块包括结构分析(可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析)、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力；后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示(可看到结构内部)等图形方式显示出来，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。软件提供了 100 种以上的单元类型，用来模拟工程中的各种结构和材料<sup>[32][33][34]</sup>。

### 3.1.2 有限元分析模型的建立

结合课题组一般水泥混凝土桥桥面铺装关键技术研究项目，以水泥混凝土桥沥青混合料铺装结构为例建立有限元模型，重点分析和计算刚柔界面的剪应力大小。建模之前，需做以下几点假设：

1，界面层完全连续，即沥青层、防水粘结层与桥面板彼此之间完全连续。事实上，桥面铺装各结构层之间是存在微小裂隙的，且随着时间的推移，整个结构的性能在衰退，表现为结构的刚度、强度和稳定性的减弱，层间出现较大缝隙。也就是说，实际运营过程中，各结构层粘结状态是界于完全连续和完全光滑之间的。而有限元计算结果表明，当层间出现不完全连续状态时，界面层的剪应力是略微减小的。因此，假设层间完全连续状态计算得到的层间剪应力是稍微偏大的，若以此作为抗剪强度设计标准是可靠的。此外，若界面层粘结效果好，施工质量过硬，各结构层之间结合状态是很好的，可视为完全连续状态。

2，忽略桥梁结构的震动和负弯矩影响，将桥面视为弹性半空间无限体，由于沥青铺装层材料模量较桥面水泥混凝土来说很小，模量比一般在 1/20 左右，所以，这样假设也认为是合理的。

3，为分析方便，假设各层材料具有线弹性性质，材料参数用 E,  $\mu$  表示。

4，由于沥青面层的保护作用，桥面板的温度相对稳定，计算时不考虑温度应力对界面层剪应力的影响。

因此，在以上假设前提下，桥面铺装结构可视为三层弹性体系，即：沥青层、防水粘结层和桥面板。

拟进行有限元分析的模型分为三层，各层都选用 8 节点三维等参元 SOLID 单元，单元的每个节点都有 3 个自由度—UX, UY 和 UZ。其中，沥青层选用 SOLID45，

界面层选用 SOLID64，桥面板选用 SOLID65 单元。计算分析汽车后轴作用下铺装层结构的受力情况，重点关注的是界面层的剪应力大小。模型尺寸为： $5 \times 10 \times 1\text{m}$ ，即沿桥面宽度方向取 5m，长度方向取 10m，厚度取 1m。这里利用模型的对称性，建立了 1/2 模型，荷载作用位置处，在进行网格划分时进行加密，划分网格后的有限元分析模型如图 3.1 所示。

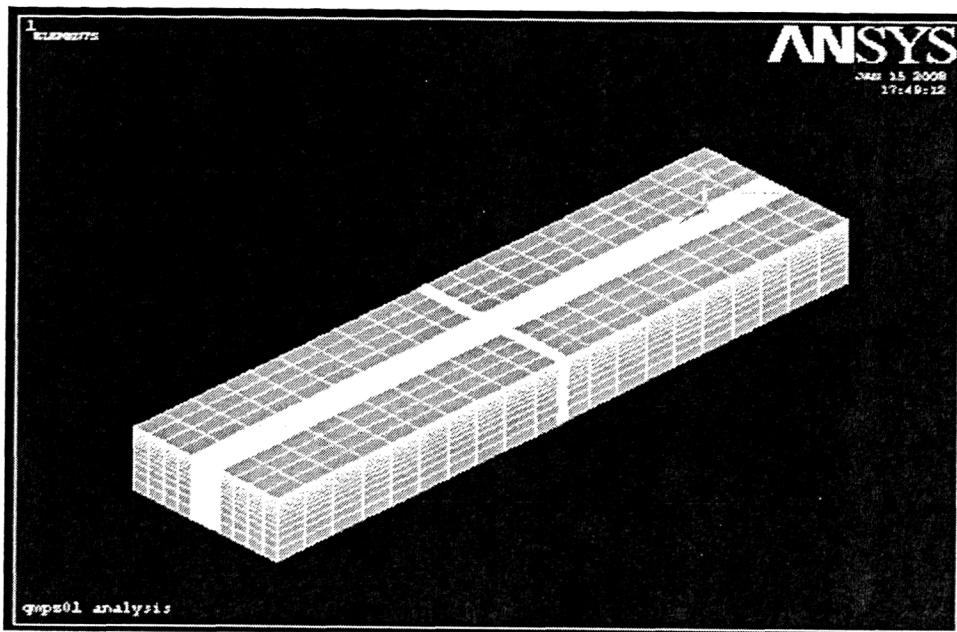


图 3.1 有限元分析模型

Fig. 3.1 Finite Element Analysis Model

约束条件为：梁端约束 Y、Z 方向的变形，两侧面约束 X 方向的变形，在对称面  $X=0$  施加对称约束。其中，X 为横桥向，Y 为顺桥向，Z 为沿桥厚度方向。定义了边界条件及施加荷载后的模型如图 3.2 所示。

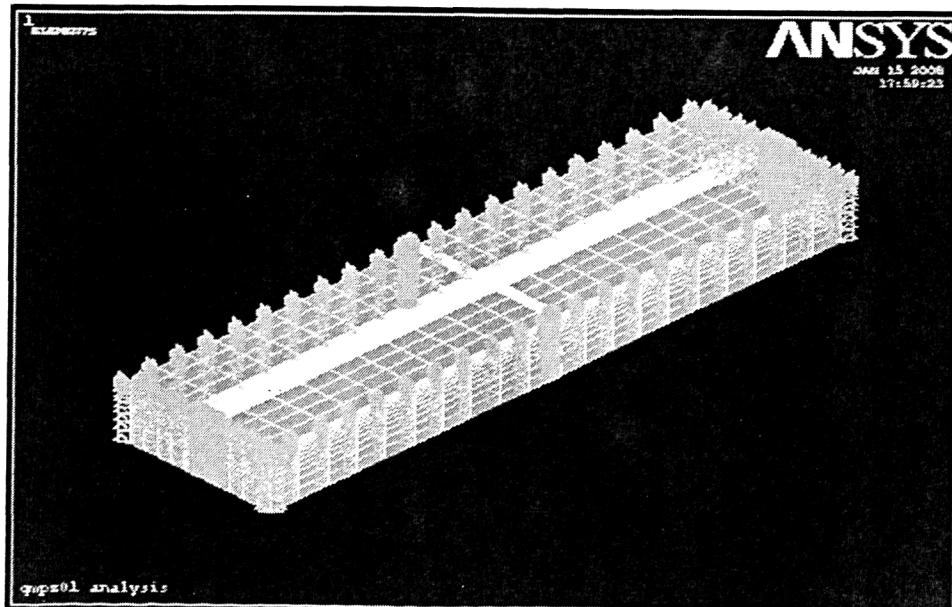


图 3.2 施加荷载和边界条件后的模型

Fig. 3.2 The model after Loads and boundary conditions imposed

### 3.1.3 荷载及模型参数

模型计算分析时,荷载采用了BZZ-100标准轴载,轴重100KN,轮压0.7MPa,双轮中心距32cm,轮距182cm。为计算简便,将双轮均布荷载简化为正方形荷载,根据公式:  $4pa^2=P$ ,其中:a为正方形边长,p为轮压,P为轴重。计算可得a=18.9cm。轮胎接地面积为357.21cm<sup>2</sup>,荷载图示及各部尺寸见图3.3所示。单位:cm。

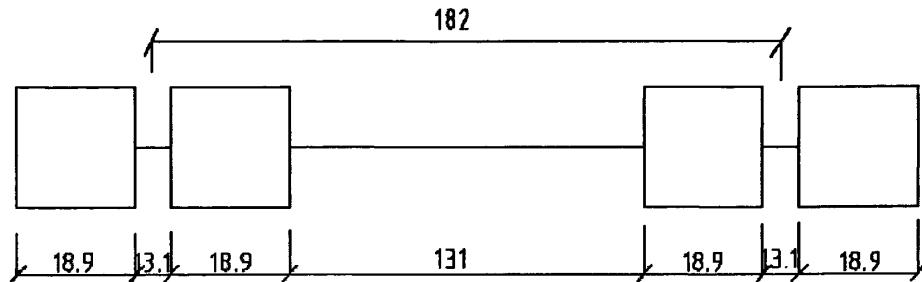


图 3.3 荷载图示  
Fig. 3.3 Load icon

计算过程中,同时考虑了车辆的垂直力和水平力作用,从而模拟车辆在桥面上的刹车情况。同时,考虑实际运营中,超载现象普遍,计算过程中还考虑了超载的情形。由于超载后,汽车的轮胎压力会有变化,轮压变化,接地面积也会变化,但由于目前还缺乏相关研究,为方便计算,不考虑超载后轮胎接地面积的改变,直接考虑为轮压的变化,并且视轮压就为轮胎接地压力。水平力按照垂直力乘上水平摩擦系数F确定,根据已有研究成果<sup>[35]</sup>,F=0.2表示缓慢制动;F=0.5表示紧急制动。考虑到最不利受荷情况(下坡且紧急制动),取F=0.75。

参考相关资料,桥面水泥混凝土板模量E<sub>c</sub>在28000MPa~32000MPa,取E<sub>c</sub>=30000MPa。由于桥面板的模量相对沥青面层材料模量大很多,且一般变化范围不大,故此次计算中不考虑桥面板模量变化对界面层受力的影响。沥青面层材料模量由于受温度变化影响较大,本次考虑沥青层模量变化范围为:800MPa~1500MPa,计算过程中考察面层沥青混合料模量的变化对铺装层受力的影响。界面层由于所用材料不一样,模量有很大差别,计算过程中,考虑界面层材料模量的变化范围为:10MPa~300MPa,界面层厚度为1~5mm。此外,取水泥混凝土材料泊松比μ为0.15,沥青混合料材料泊松比μ为0.25,界面层材料泊松比μ为0.2~0.4。各计算参数见表3.1。

表 3.1 有限元分析计算基本参数取值表

Tab. 3.1 The Table of basic parameters of Finite Element Analysis

参数取值	模量(MPa)	泊松比	厚度(cm)	水平力系数F
沥青层	800~1500	0.25	2~20	0.2~0.75
界面层	10~300	0.2~0.4	0.1~0.5	
桥面板	30000	0.15	150	

### 3.2 有限元计算结果与分析

水泥混凝土桥面沥青混合料铺装结构发生的损坏形式主要有推移、车辙和开裂。其中，车辙主要是由于加铺层沥青混合料本身在温度及荷载作用下抵抗永久变形能力差的缘故，解决问题的关键在于提高沥青混合料的高温稳定性和抗剪强度，提高其自身的抗变形能力。对于常见的桥面铺装结构的开裂和推移破坏，则主要是由于铺装层在车辆荷载及桥梁主体结构受力特性的影响下，发生无确定面的剪切破坏。而这种剪切破坏的外在表现形式就是桥面铺装层的推移和开裂。桥面铺装结构剪切破坏分为两种形式：一种是发生在加铺层沥青混合料内部的剪切破坏，这主要是由于沥青混合料本身的抗剪强度不足引起；另一种是发生在沥青加铺层与桥面板之间的剪切破坏，这主要是由于防水粘结层的损坏失效所导致的。防水粘结层材料的粘结强度和抗剪强度不足也会引起这种界面层的剪切破坏发生。

实践表明，桥面铺装结构的破坏绝大多数与防水粘结层的失效或者是强度不足有关。因此，本文也是重点计算了桥面铺装防水粘结层的受力，讨论了各种参数的变化对界面层受力的影响。严格来讲，界面层包括以下三个：防水粘结层与沥青层之间界面层、防水粘结层本身、防水粘结层与桥面板之间界面层。本文接下来的计算结果中所提到的界面层均是指防水粘结层本身。

#### 3.2.1 车辆轴载对界面层剪应力的影响

鉴于目前超载超限运输时有发生，而超载运输对路面结构产生的破坏远比人们想象的要严重得多。本文就针对超载对桥面铺装界面层受力进行有限元分析，标准轴载取为  $BZZ=100\text{KN}$ ，分别计算超载 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100% 情况下界面层的剪应力大小。此时，统一取沥青层厚度为 10cm，模量为 1200MPa；防水粘结层材料模量取 150，泊松比取 0.3，厚度取 0.2cm；水平力系数取  $F=0.5$ ，计算结果见表 3.2。

表 3.2 不同车辆轴载下的界面层剪应力计算结果  
Tab. 3.2 The interfacial layer shear stress results under the different axle load vehicles

轴载大小 (kN)	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
最大剪应力 (MPa)	0.204	0.232	0.272	0.319	0.361	0.404	0.447	0.495	0.542	0.591	0.652

由计算结果，可以得到界面层最大剪应力与轴载大小之间的关系图，如图 3.4

所示。

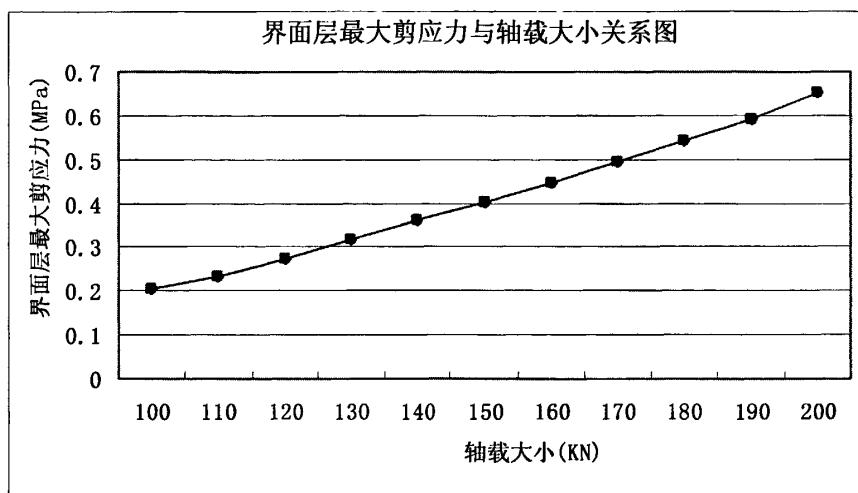


图 3.4 界面层最大剪应力随轴载大小变化图

Fig. 3.4 Maximum shear stress of Interfacial layer with axle load variation of size

由计算结果可知，车辆超载对桥面铺装防水粘结层受力极为不利。车辆轴载增大 1 倍时，界面层最大剪应力增长为原来的 3.2 倍，这对界面层的受力是极为有害的。尤其是当桥面铺装结构在使用一段时间之后，界面层材料的力学性能产生衰减，抗剪强度有所下降的情况下，很容易发生界面层的剪切破坏。因此，从确保桥面铺装正常使用和延长其使用寿命的角度考虑，应该严格制止车辆超载超限运输。对计算结果进行线性回归分析得到界面层剪应力与车辆轴载之间的关系为： $y=0.0045x-0.2606$ ，相关性系数  $R^2=0.9964$ 。

### 3.2.2 车辆行驶状态对界面层剪应力的影响

研究表明，车辆行驶状态对刚柔性路面结构界面层剪应力有很大影响。所谓车辆行驶状态包括：车辆的正常行驶（接近匀速行驶状态）、紧急刹车、特殊路段的紧急刹车（陡坡路段急刹车、急弯路段急刹车）等。其中，在特殊路段的紧急刹车对路面的受力最为不利，产生的破坏作用也最大。通过研究分析后可知，车辆行驶状态对路面的损坏程度与车辆行驶时产生的水平力大小有密切关系，因此，可以考虑采用不同的水平力系数来实现对车辆不同行驶状态的模拟。本文采用水平力系数  $F$  来模拟车辆的正常行驶 ( $F \approx 0$ )、一般情况下刹车 ( $F=0.2$ )、紧急刹车 ( $F=0.5$ ) 和特殊路段紧急刹车 ( $F=0.75$ ) 等四种行驶状态下车辆产生的水平力作用。此时，统一取沥青层厚度为 10cm，模量为 1200MPa；防水粘结层材料模量取 150，泊松比取 0.3，厚度取 0.2cm；车辆荷载取标准轴载  $BZZ=100\text{KN}$ ，计算结果见表 3.3。

表 3.3 不同车辆行驶状态下的界面层剪应力计算结果

Tab. 3.3 The interfacial layer shear stress  
results under Different vehicles

行驶状态	平直路段	一般情况下刹车	紧急刹车	特殊路段
	正常行驶 $F \approx 0$	$F=0.2$	$F=0.5$	紧急刹车 $F=0.75$
最大剪应力 (MPa)	0.026	0.082	0.204	0.306

计算结果表明，车辆行驶状态对界面层剪应力影响很大。特殊路段紧急刹车情况下界面层可能出现的最大剪应力为车辆正常行驶时可能出现的最大剪应力的 11.8 倍。此外，车辆行驶状态影响界面层剪应力大小是通过车辆水平力作用实现的。

### 3.2.3 沥青层厚度对界面层剪应力的影响

加铺层沥青混合料的厚度对界面层的受力有着直接的影响。对于界面层剪应力而言，已有的研究结果表明，随着加铺层沥青混合料的厚度增加，剪应力逐渐减小，当沥青层厚度超过 12cm 后，随着沥青层厚度增加剪应力减小的趋势逐渐变缓。本文运用 ANSYS 软件计算分析了不同沥青加铺层厚度下的界面层剪应力大小，此时，统一取车辆轴载为标准轴载  $BZZ=100\text{KN}$ ，沥青层模量为  $1200\text{MPa}$ ；防水粘结层材料模量取 150，泊松比取 0.3，厚度取 0.2cm；水平力系数取  $F=0.5$ 。考虑沥青层的厚度为 2~20cm，计算结果见表 3.4。

表 3.4 不同沥青层厚度下的界面层剪应力计算结果  
Tab. 3.4 The shear stress results of the interfacial  
layer under different thickness of Asphalt

沥青层厚度 (cm)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
最大剪应力 (MPa)	0.647	0.514	0.392	0.285	0.204	0.172	0.137	0.095	0.067	0.042

由计算结果，可以得到界面层最大剪应力与铺装层厚度之间的关系图，如图 3.5 所示。

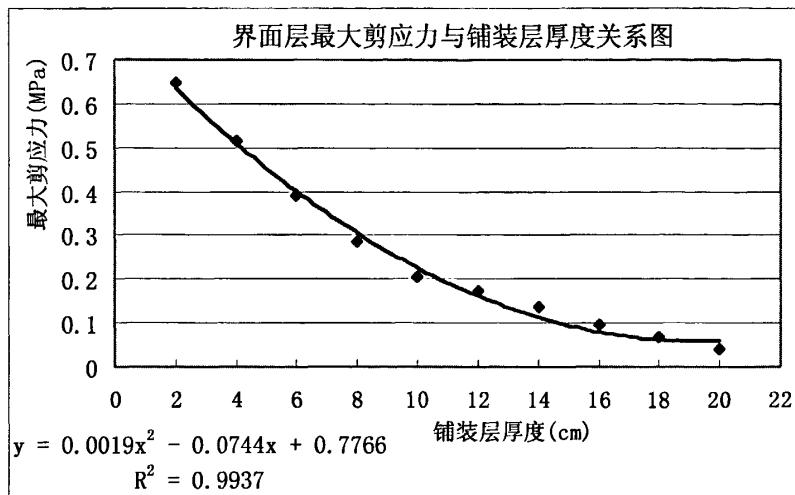


图 3.5 界面层最大剪应力随沥青层厚度变化图

Fig. 3.5 Interface with the maximum shear stress  
layer thickness variation of the asphalt

由计算结果可知，当沥青加铺层厚度超过 6cm 后，最大剪应力不超过 0.392。界面层剪应力随着沥青加铺层厚度的增加而减小。当沥青层厚度小于 10cm 时，界面层剪应力随沥青层厚度增大而减小的趋势尤为明显。因此，在工程实践中，若沥青加铺层厚度小于 10cm，可以考虑通过增加沥青层厚度的方式来降低界面层可能出现的最大剪应力。当沥青加铺层厚度超过 10cm 后，界面层最大剪应力随铺装层厚度的增加而减小的趋势有所减缓。换句话说，当沥青加铺层厚度超过 10cm 后，通过增加沥青加铺层厚度来减小界面层可能出现的最大剪应力是不太理想的措施。通过对计算结果的线性回归分析之后，得到界面层的最大剪应力与沥青加铺层厚度的关系为： $y=0.0019x^2-0.0744x+0.7766$ 。

### 3.2.4 沥青层模量对界面层剪应力的影响

在水泥混凝土桥沥青混合料铺装以及水泥路面加铺沥青层等刚柔性路面结构中，加铺层沥青混合料的模量对结构的受力有很大影响，尤其是对刚柔性界面层的受力影响更大。众所周知，沥青混合料是一种温度敏感性材料。在不同温度下，沥青混合料的模量都不一样，有时差别还很大。因此，温度对沥青路面的影响很大程度上就是通过改变沥青混合料的模量来实现的。对于水泥路面上加铺沥青层以及桥面铺装结构而言，由于有了加铺层沥青混合料的保护作用，水泥混凝土板受温度影响相对较小，板内温度梯度相对较小，板顶和板底温差不是特别大。因此，在刚柔性路面结构中可以忽略温度对水泥混凝土板的影响。但是，由于加铺层沥青混合料厚度一般较小，直接铺筑在水泥混凝土板之上，暴露于外界环境之中。温度对沥青层的影响是非常大的。考虑到以上实际情况，本文忽略了温度对

沥青层和水泥板的力学作用，即不考虑温度应力的作用，仅考虑温度对沥青混合料的模量的影响。而沥青混合料模量的改变是会影响到整个结构的受力的。

计算过程中，考虑温度的变化可能影响到的沥青混合料的模量变化范围为：800~1500MPa，计算时统一取车辆轴载为标准轴载 BZZ=100KN，沥青层厚度为 10cm；防水粘结层材料模量取 150，泊松比取 0.3，厚度取 0.2cm；水平力系数取 F=0.5，计算结果见表 3.5。

表 3.5 不同沥青层模量下的界面层剪应力计算结果  
Tab. 3.5 The interfacial layer shear stress results under different Modulus of layers of asphalt

沥青层模量 (MPa)	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
最大剪应力 (MPa)	0.226	0.218	0.212	0.207	0.204	0.199	0.193	0.185

由计算结果，可以得到界面层最大剪应力与铺装层模量之间的关系图，如图 3.6 所示。

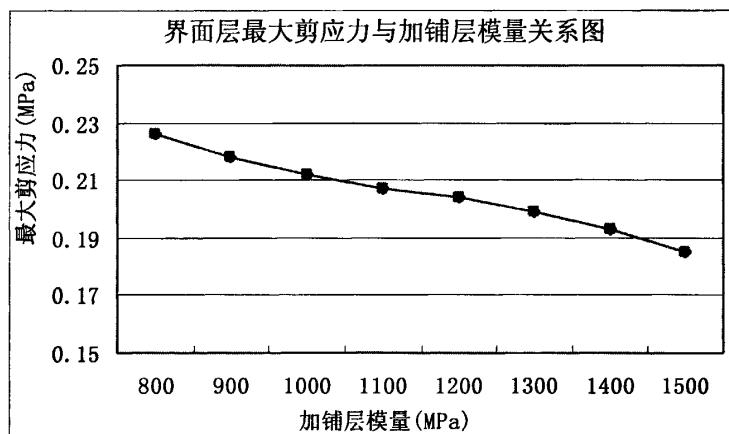


图 3.6 界面层最大剪应力随沥青层模量变化图  
Fig. 3.6 The maximum shear stress of Interface with variation of layer asphalt layer modulus

计算结果表明，加铺层沥青混合料模量变化（变化范围 800~1500MPa）对界面层剪应力影响并不大。随着沥青层模量的增加，界面层可能出现的最大剪应力略有减小。换句话说，温度变化能够改变影响沥青层的模量，但是对界面层可能出现的最大剪应力并无太大影响。外界温度变化并不会使界面层出现过大的剪应力而发生破坏，这一点通过有限元的分析和计算已经得到证实。但是，温度的改变，可以使得沥青混合料的模量发生变化，从而影响了沥青混合料本身力学性能，如抗剪强度、抗拉强度和应力松弛能力等。高温时，沥青混合料模量迅速减

小，抗剪强度下降，抵抗永久性变形能力大大降低，容易出现推移、拥抱等病害。此外，高温也会影响到界面层材料的力学性能，使其粘结强度和抗剪强度降低。因此，笔者认为：铺装层在高温季节容易发生各种病害（以加铺层永久性变形和界面层剥离为主），并不是因为界面层所受到的剪应力增大而导致的，实则是因为高温使得界面层材料的抗剪强度下降了。因此，提高界面层材料的高温抗剪强度，增强其温度稳定性是解决刚柔性路面高温病害的根本有效途径。

### 3.2.5 防水粘结层模量对界面层剪应力的影响

除加铺层沥青混合料模量对界面层的剪应力有影响外，防水粘结层材料本身的模量也对界面层的受力有很大影响。目前，用于桥面铺装的防水粘结层材料种类很多，有卷材类防水粘结材料，有各种聚合物改性沥青粘结防水涂料等等。采用的材料不一样，其力学特性也不一样，材料彼此之间的模量差别也较大。通过搜集资料，阅读相关文献<sup>[36]</sup>，得知目前常用的防水粘结层材料模量介于 10~300MPa。以此为基础，计算防水粘结层材料模量变化对界面层剪应力的影响。同样，在计算时统一取车辆轴载为标准轴载 BZZ=100KN，沥青层厚度为 10cm，沥青层模量为 1200MPa；防水粘结层材料泊松比取 0.3，厚度取 0.2cm；水平力系数取 F=0.5。计算结果见表 3.6。

表 3.6 防水粘结层材料模量对界面层剪应力的影响  
Tab. 3.6 Waterproof material modulus of the bonding layer of the interface layer of shear stress

防水粘结层模量 (MPa)	10	50	100	150	200	250	300
层间最大剪应力 (MPa)	0.216	0.210	0.207	0.204	0.202	0.201	0.201

由计算结果，可以得到界面层最大剪应力与界面层模量之间的关系图，如图 3.7 所示。

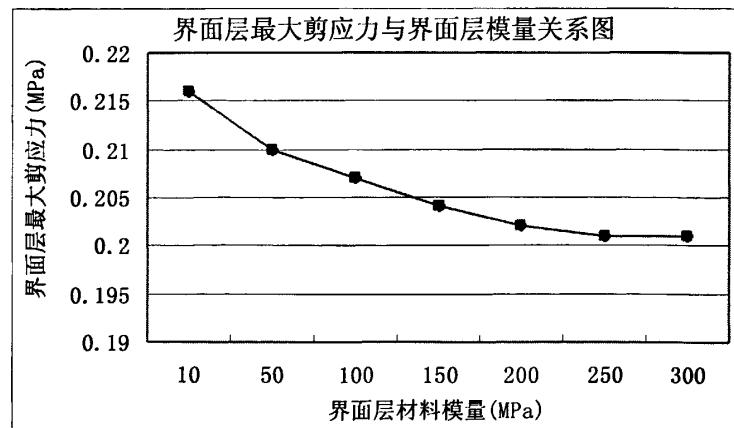


图 3.7 界面层最大剪应力随防水粘结层模量变化图  
Fig. 3.7 Maximum shear stress of Interfacial layer with variation of waterproof adhesive layer modulus

计算结果表明，防水粘结层材料模量对界面层可能出现的最大剪应力有一定影响，但影响不是特别大。总的变化规律是，随着防水粘结层材料模量的增大，界面层最大剪应力逐渐减小。当防水粘结层材料模量小于 50MPa 时，随着模量增大，剪应力减小较明显；当防水粘结层材料模量介于 50~200MPa 时，剪应力大小随模量的增大逐渐减小，但减小幅度变缓；当防水粘结层材料模量超过 200MPa 后，界面层剪应力几乎不再受防水粘结层材料模量变化的影响，基本保持不变。

### 3.2.6 防水粘结层厚度对界面层剪应力的影响

防水粘结层厚度取决于单位面积上的防水粘结层材料用量，它直接关系到防水粘结层的工程造价及防水粘结效果。此外，已有的研究成果表明防水粘结层的厚度对界面层抗剪强度有很大影响，见本论文第四章防水粘结层材料室内试验部分。防水粘结层厚度对界面层剪应力的影响可以通过有限元计算得到。根据桥面防水粘结层材料特性，聚合物改性沥青类防水粘涂料厚度一般为 1~5mm。计算过程中取粘结层厚度为 0~5mm，0 表示不设置防水粘结层。其他参数取值为：车辆轴载为标准轴载  $BZZ=100\text{KN}$ ，沥青层厚度为 10cm，沥青层模量为 1200MPa；防水粘结层材料模量取为 150MPa，泊松比取 0.3；水平力系数取  $F=0.5$ 。计算结果见表 3.7。

表 3.7 防水粘结层厚度对界面层剪应力的影响

Tab. 3.7 Waterproof adhesive layer thickness effects  
of the interfacial layer shear stress

防水粘结层厚度 (mm)	0	1	2	3	4	5
层间最大剪应力 (MPa)	0.195	0.201	0.204	0.200	0.199	0.199

由计算结果，可以得到界面层最大剪应力与界面层厚度之间的关系图，如图 3.8 所示。

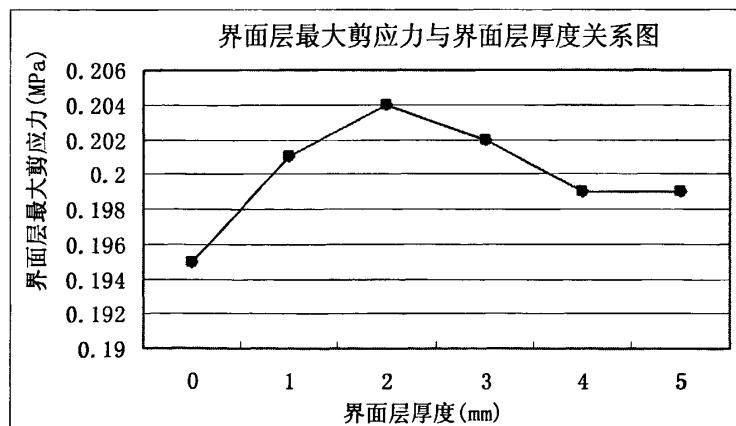


图 3.8 界面层最大剪应力随防水粘结层厚度变化图

Fig. 3.8 The maximum shear stress of Interfacial layer with thickness of waterproof adhesive layer

计算结果表明，界面层可能出现的最大剪应力随着防水粘结层厚度增大呈现先增大后减小的变化趋势，当防水粘结层厚度为 0 时，界面层剪应力最小；当防水粘结层厚度为 2mm 时，界面层剪应力最大；当防水粘结层厚度超过 3mm 后，剪应力变化很小，基本保持不变。总的来说，界面层厚度变化对界面层可能出现的最大剪应力影响并不是很大。

### 3.2.7 界面状态对界面层剪应力的影响

界面状态指的是沥青层与水泥混凝土板之间的结合状态，它取决于水泥混凝土板的界面处理方式和所采用的防水粘结层材料。界面状态对界面抗剪强度有很大影响，同时对界面层可能出现的最大剪应力也有影响。在分析界面状态对界面层剪应力的影响时，采用 ANSYS 三维有限元方法进行层间接触分析，假设沥青加铺层与水泥混凝土面层之间的摩擦系数  $f$  在 0~1 之间<sup>[37]</sup>。在进行有限元计算分析时，将桥面板当作“目标”面，采用 Targe170 单元来模拟 3D 的目标面，沥青混合料加铺层当作“接触”面，用三维 8 节点面一面单元 Conta174 来模拟。一个目标单元和一个接触单元构成了一个“接触对”，程序通过一个共享的实常数号来识别“接触对”，为了建立一个“接触对”，给目标单元和接触单元指定相同的实常数号。沥青加铺层与水泥混凝土面板之间面与面的接触模型见图 3.9。

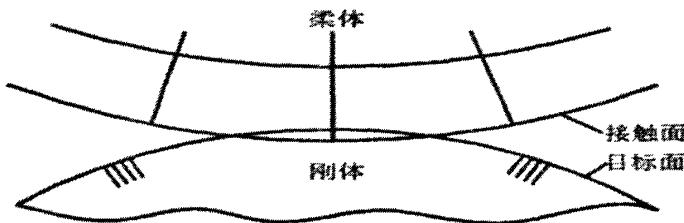


图 3.9 界面层面一面接触模型图  
Fig. 3.9 Contact model of Interface

计算基本参数为：车辆轴载为标准轴载  $BZZ=100\text{KN}$ ，沥青层厚度为 10cm，沥青层模量为 1200MPa；防水粘结层厚度为 2mm，模量取为 150MPa，泊松比取 0.3；水平力系数取  $F=0.5$ 。计算结果见表 3.8。

表 3.8 层间接触状态对界面层剪应力的影响

Tab. 3.8 Contact state of the between Layer impact interface shear stress

层间接触状态	$f=0$	$f=0.2$	$f=0.4$	$f=0.6$	$f=0.8$	$f=1$
层间最大剪应力 (MPa)	0.112	0.138	0.152	0.164	0.177	0.204

界面层最大剪应力与层间粘结状态之间的关系，见图 3.10 所示。

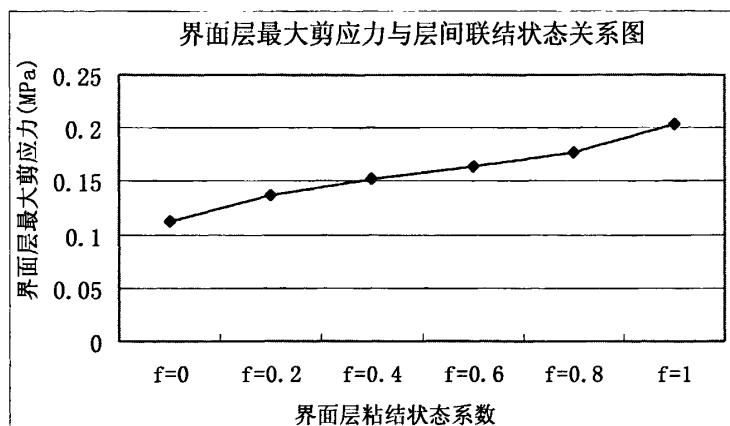


图 3.10 层间接触状态对界面层剪应力的影响图

Fig. 3.10 Layer on the interface between the contact state of the shear stress of plans

计算结果表明，层间接触状态对界面层可能出现的最大剪应力有较大影响。当接触系数  $f=0$  时，界面层可能出现的最大剪应力只有  $0.112\text{ MPa}$ ，约是完全接触 ( $f=1$ ) 时的一半。这说明，层间接触越好，界面层可能出现的剪应力也越大，说明层间接触良好时能够更好的传递车辆荷载水平力作用。当层间接触较好时，界面层抗剪强度也较大。当层间出现缝隙，存在不完全接触面时，虽说此时界面层的最大剪应力有所减小，但其抗剪强度下降得更多，或许已经发生了层间破坏，失去了抵抗剪切破坏的能力。

### 3.3 界面层剪应力的简化力学分析

相关研究表明，界面层在刹车时受到的剪应力较车辆正常行驶时产生的剪应力大很多，这一点在本章 3.2.2 节的计算中也有说明。有限元法的分析由于计算假定与实际的情况是有出入的，有限元计算结果的精度和可靠性由所建的模型及所取的参数决定。由于桥梁结构类型复杂，交通条件和自然环境条件也时常变化，有限元分析时往往无法将所有的因素都考虑进去，而忽略的因素对计算的结果是有影响的，一定情况下影响还是比较大的。因此，本文出于偏安全的考虑，采用简化的力学分析方法，考查在最不利状况下（超载刹车）铺装层所承受的最大剪应力。假定刹车时的惯性力完全传递到界面层，完全由相应面积下的界面层的抗剪能力承担刹车时产生的水平荷载（在实际刹车过程中，车辆制动距离、轮胎类型、路表面构造、铺装层厚度等都会影响水平荷载的大小）。

本次计算了标准轴载 BZZ-100 和标准轴载超载 30% 两种轴载情况下，在不同行

驶速度，刹车产生的剪应力。标准轴载超载 30%后，轴重增加，轮胎接地压力会有显著增大，轮胎压力增加，接地面积也会随之发生改变。参考相关文献后，取标准轴载超载 30%的轮胎接地压力为 1.092MPa，轮胎接地面积可通过轴重和轮胎接地压力计算得到。

此处提到的简化计算方法实际上就是运用功能原理，将车辆刹车时产生的动能与摩擦力所做的功结合起来，通过公式： $\frac{1}{2}mv^2 = f l$ （ $m$  为车辆质量，可通过轴重计算得到， $l$  为刹车距离）计算得到水平摩擦力  $f$ ，而水平摩擦力  $f = \tau s$ ， $s$  为界面层受力面积，认为等于轮胎接地面积。将功能关系式运用到此处，可以得到界面层剪应力的简化计算公式： $\tau = \frac{pv^2}{20l}$ ，其中， $\tau$  为所求界面层剪应力， $p$  为轮胎接地压力， $v$  为车辆行驶速度， $l$  为刹车距离。最终的简化计算结果见表 3.9。

表 3.9 界面层刹车时剪应力简化分析结果 (MPa)

Tab. 3.9 Interfacial layer to simplify the brakes when the shear stress analysis

车型	刹车距离 (m)	行驶速度 (Km/h)			
		120	100	80	60
BZZ-100	50	0.778	0.540	0.346	0.195
	80	0.486	0.338	0.216	0.122
BZZ-100 超载 30%	50	1.214*	0.842	0.540	0.304
	80	0.758	0.527	0.337	0.190

\*参考相关文献，车辆行驶速度达到 120km/h 时，很难在 50m 距离内刹车至完全静止状态。

从界面层剪应力简化计算方法及计算结果可以看出，当车辆轴重大，刹车距离短，行驶速度快时，界面层受到的剪应力为最大。从简化计算方法中的计算公式可以看出，剪应力与轮胎压力成正比，与刹车距离成反比，与行驶速度的平方成正比。此次计算的剪应力为防水粘结层所可能受到的最大剪应力，将车辆轮胎接地面积大小的铺装取为隔离体，则其受到的主要作用力见图 3-11。

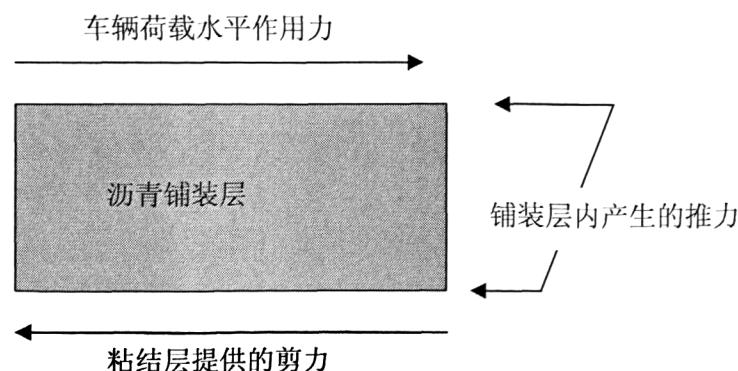


图 3.11 铺装层隔离体受水平力示意图

Fig. 3.11 Pavement of the level of isolation in the diagram

在最不利条件下，即当铺装层内的推力为 0 时，刹车产生的水平剪应力完全由防水粘结层承担，当轴载为 BZZ-100，行驶速度为 120km/h，刹车距离为 50m 时，防水粘结层可能承受的最大剪应力为 0.778MPa。而实际上界面层受到的剪应力一定是比 0.778MPa 要小的，若以此为标准要求界面层抗剪强度肯定是足够安全的。

### 3.4 刚柔性路面界面层抗剪强度标准

通过对刚柔性路面界面层剪应力的有限元分析与计算，得到了影响界面层剪应力的主要因素有加铺层沥青混合料的厚度，车辆行驶状态，车辆轴载大小等。在不同情况下，界面层可能出现的最大剪应力相差较大。综合来看，一般情况下，界面层最大剪应力界于 0.2MPa 到 0.6MPa 之间。那么，对于实际工程而言，如何制定合理的界面层抗剪强度标准是一个关键问题。标准定得过高，势必造成不必要的浪费，而且给设计和施工带来许多困难。标准定得过低，将起不到控制作用，路面容易发生破坏。部颁《公路沥青路面设计规范》(JTGD50-2006) 的规定<sup>[38]</sup>，建议桥面防水粘结层的抗剪强度按 0.4MPa 控制。笔者认为这一规定有它的一定的合理性，但在实际应用时存在问题。任何一个指标的制定，都要考虑其实际应用范围和应用条件，应该做到一切从实际出发，脱离实际的指标是毫无意义的。

笔者认为，刚柔性路面界面层抗剪强度标准应该在界面层力学分析基础上，考虑到路面使用品质与经济性的平衡，照顾到绝大多数的工程实际情况。考虑工程所在地气候条件，交通条件，工程重要程度等因素。综合考虑各种因素后，制定合理的抗剪强度标准。笔者的思路是，首先根据工程所在地气候环境、交通条件、工程重要性，对工程进行分类。分类之前，首先确定分类指标，如：气候条件、交通条件、工程重要程度等。工程所在地属夏酷热冬严寒气候恶劣区，年最高气温与最低气温相差较大，且交通条件较为恶劣，指交通量大、超载超限运输频繁、由于道路线形设计的原因，使得车辆在行驶时频繁出现刹车、加速或紧急制动等情况，并且工程本身比较重要，如特大型的桥梁，高速公路，或是重要的干线公路，城市主干道等。对于满足以上三个条件的，界面抗剪强度标准应该适当提高；而对于一般性工程，如：气候条件较平稳；交通条件较好，满足预先的各项设计要求；车辆行驶正常，道路本身无长大纵坡、急弯等不良行事路段，其界面层抗剪强度标准可适当放宽。

综合各种因素，结合目前的实际情况，提出如下界面层抗剪强度标准，见表 3.10。

表 3.10 刚柔性路面界面层抗剪强度标准

Tab. 3.10 The standard of interface layer shear strength of rigid flexible Pavement

刚柔性路面界面层抗剪强度标准	
第一类工程:	$\geq 0.5 \text{ MPa}$
第二类工程:	$\geq 0.4 \text{ MPa}$
第三类工程:	$\geq 0.3 \text{ MPa}$

说明:

第一类工程: 特大型桥桥梁、各种特殊路段桥梁(如立交桥匝道, 坡桥, 弯桥等); 长大纵坡路段、急弯路段、实际交通量大的高等级公路、存在较频繁超载、超限车辆运输的路段; 气候条件恶劣、年最高气温与最低气温相差超过  $45^{\circ}\text{C}$  或年最高气温超过  $35^{\circ}\text{C}$  的路段;

第二类工程: 各种形式的中型桥梁, 无特殊路段的大型桥梁; 无特殊路段的各高等级公路, 实际交通量不超过初试设计量, 不存在频繁的超载、超限车辆运输路段; 气候条件一般, 年最高温度不超过  $35^{\circ}\text{C}$ , 年最高气温与最低气温相差不超过  $45^{\circ}\text{C}$  的路段;

第三类工程: 各种形式的小桥, 无特殊路段的中桥; 无特殊路段的各等级公路(除高速公路, 城市主干道和各干线公路之外); 交通量较小, 不存在超载、超限车辆运输路段; 气候条件较好, 年最高温度不超过  $30^{\circ}\text{C}$ , 年最高气温与最低气温相差不超过  $40^{\circ}\text{C}$  的路段;

以上抗剪强度指标的确定, 主要是基于路段的实际交通条件和气候条件, 根本则是考虑到路段界面层可能受到的最大剪应力。同时, 并没有取界面层可能出现的最大剪应力, 因为, 这些最大值往往是在所有不利因素都同时出现之后取得的, 这在实际中是极少可能出现的。考虑到标准的广泛适用性, 考虑到指标的可控制性和可能造成的经济效应, 最后的取值通常是考虑到最有可能出现的一些控制性较强的且又不会造成巨大浪费的数值。

### 3.5 本章小结

本章通过有限元软件, 分析计算了刚柔性路面界面层在各种不同工况下可能出现的最大剪应力力。同时, 对各种可能影响界面层剪应力的因素进行了分析和计算。主要得到了以下几点结论:

1, 车辆行驶状态对界面层剪应力有很大影响。具体来说, 超载对界面层剪应力的影响程度为, 当超载达到 100%时, 界面层最大剪应力增大为原来的约 3.2 倍; 车辆制动对界面层的剪应力也有很大影响, 特殊路段紧急刹车情况下界面层可能出现的最大剪应力为车辆正常行驶时可能出现的最大剪应力的 11.8 倍。

2, 道路本身状况(如路段的纵坡, 转弯半径等)对界面层剪应力也有很大影响。路段的纵坡会增加车辆行驶时的水平力作用, 车辆在弯道路段行驶时会产生

离心力，而离心力对路面也表现为水平力作用。

3，加铺层厚度对界面层剪应力有很大影响，随着加铺层厚度的增加，界面层的剪应力随之下降。当加铺层厚度小于10cm时，随着加铺层厚度的增加，界面层最大剪应力显著下降；当加铺层厚度超过10cm后，这种变化趋势减缓。因此，在实际工程中，当加铺层厚度不足10cm时，可以考虑通过增加沥青层厚度的方式来降低界面层可能出现的最大剪应力。

4，沥青加铺层和界面层材料模量对界面层可能出现的最大剪应力均有一定的影响，但影响都不大，实际工程中，可以忽略不予考虑。

5，界面层厚度对剪应力有一定影响。总的变化趋势是，随着界面层厚度的增加，最大剪应力先增加后减小。当界面层厚度为2mm时，界面层最大剪应力最大；当界面层厚度超过3mm时，界面层剪应力基本保持不变。但总的来说，界面层厚度对界面层可能出现的最大剪应力影响亦不大。

6，界面层粘结状态对界面层可能出现的最大剪应力有较大影响。界面层完全粘结（连续）时的剪应力约为完全光滑时的2倍。界面层结合越紧密越牢靠，可能出现的最大剪应力越大。

7，通过简化的力学分析法对界面层剪应力进行了计算。计算结果表明，在标准轴载下，界面层可能出现的最大剪应力为0.778MPa，最小为0.122MPa。简化计算结果还表明，车辆轴载越大，行驶速度越快，刹车距离越短，界面层可能出现的剪应力也越大。

8，根据道路所在地区的气候条件、交通条件、工程重要程度等来对工程进行分类，根据不同的类别制定相应的界面层抗剪强度标准。提出，对于一类工程，界面抗剪强度标准定为 $\geq 0.5\text{ MPa}$ ；对于二类工程，界面抗剪强度定为 $\geq 0.4\text{ MPa}$ ；对于三类工程，界面抗剪强度定为 $\geq 0.3\text{ MPa}$ 。这一点与现行部颁规范中统一规定的 $\geq 0.4\text{ MPa}$ 有一定的区别。

## 第四章 刚柔性路面界面层加强措施的试验研究

刚柔复合式路面的界面层具有三大作用，即粘结作用、防水作用和延缓开裂作用。对于界面层性能的好坏，我们主要关注的是以下三点：粘结强度、抗剪强度、密水性。本章中，通过对不同的界面处理方案的室内试验，对比研究了不同水泥混凝土板的处理方式、不同的防水粘结材料以及界面层沥青用量等对界面层强度的影响，试验得到的数据可供施工选择和参考。

### 4.1 试验目的、原理及方法

#### 4.1.1 试验目的及原理

本次试验的目的明确，主要是针对刚柔复合式路面的界面层特性，研究不同的混凝土板处理方式、不同的防水粘结材料和沥青用量对界面层强度（粘结和抗剪）的影响。通过试验，可以得到最佳的水泥混凝土板处治方式、最佳的防水粘结材料和合理的沥青用量。此外，试验得到的数据可供后续的科研工作和实际工程的建设参考。

根据试验目的，决定采用拉拔试验和 $45^\circ$ 剪切试验分别测试界面层的粘结强度和抗剪强度。试验原理简单，如图 4.1 所示。

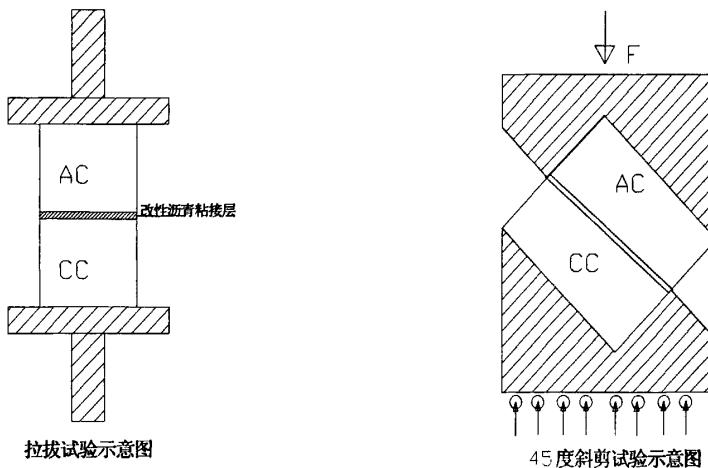


图 4.1 拉拔试验及 $45^\circ$ 斜剪试验试验示意图

Fig. 4.1 Drawing Test and  $45^\circ$  ramps shear test pilot sketch

拉拔试验可直接测定界面层的粘结强度，存在的主要问题是试验结果可能会受到尺寸效应的影响，目前还没有针对该试验的标准化的拉拔夹具。 $45^\circ$ 斜剪试验能够更好的模拟路面实际的受力情况，因为界面层的剪切破坏是在水平力和竖向

力共同作用下产生的，而直剪试验却没有考虑竖向力的作用，试验结果一定比真实值偏小。此外，根据已有研究成果，车辆紧急制动时，水平力可取垂直力的一半（即  $f=0.5$ ）。若按此比值进行试验，应采用  $25^\circ$  斜剪，然而考虑到在下坡路段紧急刹车等特殊条件，水平作用力可能占主导位置。采用  $45^\circ$  剪切试验是合理的，试验结果值得参考。目前广泛采用的直剪试验则根本没有考虑垂直力的作用，因此也无法考虑沥青面层厚度不同的影响，测得的结果大大偏小，与实际不符合。因此，本次试验没有采用直剪试验。直剪试验不考虑竖向力的作用，可用来检测防水粘结层材料本身的抗剪强度，而要研究实际路面在车辆荷载作用下的界面层抗剪强度就不合适了。此外，试验温度也是一个必须重点明确的问题。目前，已有的研究成果大多数的试验温度是  $25^\circ\text{C}$  和  $60^\circ\text{C}$ ，而部颁新版“公路沥青路面设计规范”（JTG/D50-2006）条文说明中指出，建议桥面防水粘结层抗剪强度按  $0.4\text{Mpa}$  控制，粘结强度按  $0.2\text{Mpa}$  控制，建材行业标准之“道桥用防水涂料”（JC/T975-2005）中也有类似的规定<sup>[39]</sup>。笔者认为这样的规定过于简单和粗糙，实际应用存在问题。已有的研究表明，桥面防水粘结材料除卷材外，大部分都属于改性沥青或是改性沥青基复合材料，这些材料具有明显的温度敏感性。具体来说，在  $25^\circ\text{C}$  情况下，防水粘结层的抗剪强度及粘结强度基本上都能满足以上规范建议的标准，而在  $60^\circ\text{C}$  高温情况下，目前使用的绝大多数桥面防水粘结材料的抗剪强度及粘结强度都达不到这一要求，而实际中却又不得不采用。这里存在这样一个问题，到底桥面防水粘结层的实际工作温度为多少，是否会达到  $60^\circ\text{C}$  的高温，如果有，则规定的  $60^\circ\text{C}$  情况的强度指标是合理的，必须要达到，否则，从理论上来说，桥面防水粘结层在高温情况下必然发生破坏。因为，桥面的交通量和车辆轴载不会因为高温而有所减少。然而，笔者在参考大量的文献资料基础上，通过一个简单试验发现：当桥面沥青混合料铺装层厚度在  $10\text{cm}$  以上时，假设外界环境温度为  $40^\circ\text{C}$ ，路面表面温度为  $60^\circ\text{C}$  情况下，防水粘结层温度在  $40^\circ\text{C}$  左右，不会超过  $45^\circ\text{C}$ 。因此，笔者建议：对于桥面防水粘结层提出抗剪及粘结强度要求是科学合理的，但是其具体数值及适用范围和条件需要修改。笔者以上所说的简单试验指的是：将一块废弃的车辙板试件放置在室外，暴晒 6 小时（上午 9 点到下午 3 点），然后，在下午 3 点时候，用温度计测得环境温度为  $38^\circ\text{C}$ ，水泥路面表面温度为  $56^\circ\text{C}$ ，而车辙板底部温度为  $46^\circ\text{C}$ ，车辙板底部水泥路面温度为  $49^\circ\text{C}$ ，车辙板厚度为  $5\text{cm}$ ，车辙板平面尺寸为： $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 。显然，如果车辙板厚度为  $10\text{cm}$ ，面积扩大 10 倍，其板底温度将会更低。

#### 4.1.2 试验方法

为了模拟刚柔性路面典型结构形式，采用“水泥混凝土板+界面层（防水粘结

层) + 沥青混合料面层”的结构进行试验。试验步骤简述如下，第一步：成型水泥混凝土板及养护；第二步：水泥混凝土板界面的处理，包括：清除浮浆、打毛和清洁等；第三步：涂抹改性沥青防水粘结层；第四步：加铺沥青混合料面层；第五步：试件的切割；第六步：试件的养护；第七步：强度测试。试验过程中，注意控制试验的温度及加载的速率，待试件界面破坏后停止试验，记录最终试验机上的荷载读数，以此作为计算界面层强度的依据。拉拔试验采用自制拉拔夹头，用建筑用 AB 粘结胶将试件粘在夹头上，在万能试验机上进行拉拔试验，控制拉拔速率为 2mm/min。剪切试验采用 45° 斜剪试验，自制夹具 (45° 和 30° 斜剪夹头)，将试件安放在夹具中，在压力机上进行试验，控制剪切速率为 30mm/min。注意剪切试验时，底面垫一排滚珠以解除夹具一端底面的水平向约束。控制试验温度为 20 °C、50 °C 两种。考虑到目前针对斜剪试验的斜剪角度还存在一定的分歧，以前许多的研究成果是基于直剪试验和 30° 斜剪试验得到的，因此，本论文在研究过程中，也采用了直剪试验和 30° 的斜剪试验，有针对性的进行了一组试验。期望得到不同试验方法情况下，抗剪强度试验结果的相关关系。

## 4.2 原材料的选择及试验

### 4.2.1 原材料的选择

试验原材料的选择非常重要，它直接关系到试验的结果是否可靠和有意义。对于沥青混合料而言，决定其物理力学性能的主要因素是沥青和级配。沥青是一种性质非常复杂的粘-弹-塑性材料，具有明显的感温性，在空气和光照的作用下可以被氧化而出现老化现象<sup>[40]</sup>。因此，沥青的性质是随着时间、温度等外界条件而改变的。结合本课题的研究类型，考虑到实际工程应用情况，综合各种因素之后，决定采用重交通道路石油沥青 AH-90 作为面层沥青混合料的胶结料。界面层采用改性沥青作为防水粘结层，本次试验对比研究了六种不同改性沥青作为防水粘结层的性能，它们分别是：橡胶粉改性沥青、SBS 改性沥青、SBR 改性沥青、环氧沥青、溶剂型防水涂料、AWP-2000F 纤维增强聚合物改性沥青防水涂料（以下简称 AWP-2000F 纤维增强改性沥青）。其中，环氧沥青为重庆志翔铺道公司生产的一种改性沥青材料，溶剂型防水涂料为重庆志翔铺道公司自行开发的一种桥面铺装防水粘结层用涂料。环氧沥青分 A 和 B 两个组分，A 组分由石油沥青和固化剂组成，B 组分为环氧树脂。使用前将 A 组分在 120°C 烘箱中预热 1 小时，B 组分在 70°C 烘箱中预热 1 小时，按重量比 A: B=100: 5 的比例混合，在小型旋转剪切仪中搅拌 5~10 分钟后立即使用。固化时间为：在 120°C 烘箱内 15 分钟基本固化，放置试验室内（温度为 25°C 左右）24 小时固化。SBS 改性沥青和 SBR 改性沥青均为成品，使用时没有特殊要求，与普通石油沥青一样，加热熔化后使用。AWP-2000F 纤维增强

聚合物改性沥青防水涂料是上海汇城建筑装饰有限公司自主开发的一种新型桥面粘结防水材料，在喷涂聚合物改性乳化沥青过程中，同步喷洒玻璃纤维，纤维直径13微米，长度2~3cm。实际施工过程中，AWP-2000F型桥面防水粘结材料分五次喷涂，其中，第二次和第四次喷涂时加入纤维。第一次直接喷涂改性乳化沥青，第二次加入纤维和改性沥青同步喷洒，依此类推。这样做的目的是使纤维能够尽量分散均匀，避免防水粘结层厚度存在较大的差异。以下是AWP-2000F纤维增强聚合物改性沥青防水涂料的技术指标<sup>[41]</sup>，见表4.1和表4.2。

表4.1 玻璃纤维材料技术指标  
Tab. 4.1 The technical indicators of Glass fiber materials

直径	长度	碱含量	灼烧损失	含水量	硬挺度	分散性	卷重
13微米	2~3cm	<0.5%	0.8	0.1	≥140	≥95%	(17±0.5) kg

表4.2 AWP-2000F纤维增强桥面粘结防水涂料技术指标  
Tab. 4.2 The technical indicators of AWP-2000F bonded fiber coating

序号	项目		项目指标
1	外观		搅拌后为黑褐色均质液体，搅拌棒上不粘附任何明显颗粒
2	固体含量，%		≥43
3	延伸性，mm		无处理：≥5.5；处理后：≥3.5
4	拉伸强度，MPa		≥0.8
5	柔韧性，-20±2℃		无裂纹、断裂
6	耐热性，180±2℃		无流淌和滑动，
7	粘结性，MPa		≥0.6
8	不透水性		0.3Mpa水压下，30min不渗水
9	抗冻性，-20℃		20次不开裂
10	耐腐蚀性	耐碱(20℃)	Ca(OH) <sub>2</sub> 中浸泡15d无异常
		耐盐水(20℃)	3%盐水中浸泡15d无异常
11	干燥性，25℃	表干	≤4h
		实干	≤12h
12	高温抗剪(60℃)，MPa		0.16
13	抗咯破及渗水		暴露轮碾试验(0.7Mpa, 100次)后，0.3Mpa水压下不渗水
14	人工气候加速老化	外观	无滑动、流淌、滴落
		纵向拉伸保持率，%	≥80
		低温柔度，℃	-3，无裂纹

集料应该选择洁净、干燥、无风化不含杂质的砂石料。一般而言，用于沥青混合料的集料要求具有良好的耐磨性、足够的强度、与沥青具有良好的粘附性，如：玄武岩、石灰岩等。结合实际情况，本次试验所用集料采用的是石灰岩。矿粉要求干燥、洁净，宜采用石灰岩或岩浆岩中的强基性岩石（憎水性石料）磨细得到的矿粉，这样的矿粉有利于提高沥青胶浆与集料的粘附性，一定程度上减少水损坏的发生。本次试验中采用的集料为石灰岩磨制而成的矿粉。水泥混凝土板选用 32.5 级普通硅酸盐水泥，集料与沥青混合料所用集料相同。

#### 4.2.2 原材料的试验结果

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052-2000) 对兰炼 AH-90 沥青进行常规试验<sup>[42]</sup>。其技术性能指标测试结果见表 4.3。

表 4.3 面层混合料用 AH-90 号沥青试验结果

Tab. 4.3 Surface mixture with AH-90 asphalt test results

试验项目	软化点(℃)	针入度(0.1mm) (25℃, 100g, 5s)	延度(cm) (5cm/min 15℃)	薄膜加热试验 (163℃, 5h) 老化后		
				质量损失	针入度比	延度(15℃)
测试值	46.5	91.4	>100	0.02%	75.6	45.2
要求值	≤43	80~100	≤100	≤0.08%	≤54	≤20

由表 4.3 可知，兰炼 AH-90 号沥青各项指标均能满足规范的要求，试验可以采用。

按照《公路工程集料试验规程》(JTJ 058-2000) 对试验用的石灰岩集料进行了测试<sup>[43]</sup>，其各项指标的测试结果见表 4.4~表 4.6。

表 4.4 集料表观密度测试结果

Tab. 4.4 Aggregate apparent density test results

粒径(mm)	密度(g/cm)	粒径(mm)	密度(g/cm)	规范要求值(g/cm)
13.2	2.72	2.36	2.73	≥2.5
9.5	2.71	1.18	2.74	
4.75	2.73	—	—	

表 4.5 集料吸水率测试结果

Tab. 4.5 Aggregate water absorption test results

粒径 (mm)	13.2	9.5	4.75	规范要求值
吸水率 (%)	0.85	0.92	0.88	≤2

表 4.6 集料压碎值和磨耗值测试结果

Tab. 4.6 Test results of Crushed aggregate value and Wear value

测试项目	测试值	规范要求
压碎值 (%)	16.2	≤28
磨耗值 (%)	19.6	≤30

由表 4.4~表 4.6 可以看出, 集料的物理及力学指标均满足《公路工程集料试验规程》(JTJ 058-2000) 的相关要求。此外, 采用沸煮法对集料与 AH-90 号沥青进行了粘附性试验。试验结果表现为在集料尖角部位沥青膜有轻微的剥落, 因此, 按照规定, 最终粘附等级评定为 4 级。

对用于界面层的改性沥青粘结防水材料同样按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052-2000) 对其性质进行了常规的试验。试验结果见表 4.7。

表 4.7 界面层改性沥青性能测试结果

Tab. 4.7 The test results of Interfacial layer modified asphalt performance

试验项目 材料种类	软化点 (℃)	针入度 (0.1mm)			5℃延度 (cm)	运动粘度 (135℃, P·s)	弹性恢复 (25℃, %)
		15℃	25℃	30℃			
SBS 改性沥青	65.2	31.2	58.6	85.3	35.5	<3	85
SBR 改性沥青	59.5	42.8	65.2	108.8	30.2	<3	80
环氧沥青	49.8	25.4	63.5	75.2	9.8	<1	55
橡胶沥青	71.5	19.2	39.5	48.5	25.6	<2	98

AWP-2000F 和溶剂型防水涂料在常温情况下, 呈液态, 流动性强, 常温下无法成型。因此, 对于这两种材料并没有做类似于沥青材料的三大指标试验。对于 AWP-2000F 型材料, 其各项技术指标直接参考了上海汇城建筑装饰公司的相关产品技术指标说明书及相关的材料性能检测报告。见表 4-1 至表 4-2。试验用水泥采用 C32.5 普通硅酸盐水泥, 重庆小南海水泥厂生产, 其各项技术性能指标经出厂检验合格, 试验用砂采用天然中砂。由于水泥和砂的性质对试验结果并无太大影响, 因此, 未对其各项技术指标进行测定。

通过以上的试验, 得到了试验原材料的主要技术性能指标, 保证了后续试验

结果的可靠性和科学性。

### 4.3 试件的成型及养护

本次试验是通过成型“水泥混凝土+沥青混合料”的复合板，在万能试验机上测定复合板刚柔界面的抗剪强度和粘结强度。试件的制作过程相对比较复杂，主要包括：水泥混凝土板的制作、混凝土板界面的处理、沥青混合料的设计及加铺、试件的切割。

#### 4.3.1 水泥混凝土板的成型

水泥混凝土基底块所用材料为普通硅酸盐水泥（32.5）、中砂（河砂）和集料（碎石）。按照C30强度等级设计，采用车辙板成型，试件尺寸为：300mm×300mm×50mm。水泥混凝土板的配合比设计参考水泥路面板的配合比设计<sup>[44]</sup>，按照《普通混凝土配合比设计规程》（JGJ55-2000）进行。

配合比参数的计算步骤如下：

1. 确定配制强度F<sub>配</sub>：

$$F_{\text{配}} = 1.10 \sim 1.15 F_{\text{设}}$$

2. 灰水比的计算

根据混凝土配制强度、水泥实测28d抗折强度和粗集料类型按统计公式(4-1)或(4-2)计算。

碎石混凝土：

$$F_{\text{配}} = -1.0097 + 0.3495f + 1.5684C/W \quad (4-1)$$

卵石混凝土：

$$F_{\text{配}} = -1.5492 + 0.4565f + 1.2618C/W \quad (4-2)$$

式中：f——水泥胶砂实测28d抗折强度，MPa；

3. 砂率的计算和确定

根据砂的细度模数和粗集料种类，从《普通混凝土配合比设计规程》（JGJ55-2000）中查取砂率S<sub>p</sub>。

4. 单位用水量

由上述水灰比W/C、砂率及规范规定的范围，按公式(4-3)或(4-4)计算单位用水量(砂石料以自然风干状态计)。

碎石：

$$W_0 = 104.97 + 0.309S_L + 11.27(C/W) + 0.61S_p \quad (4-3)$$

卵石：

$$W_0 = 86.89 + 0.370S_L + 11.24(C/W) + 1.00S_p \quad (4-4)$$

式中:  $W_0$ ——单位用水量  $W_0$ , Kg;

$S_L$ ——坍落度, mm;

$C/W$ ——灰水比, 水灰比之倒数;

$S_p$ ——砂率, %;

### 5, 单位水泥用量

由设计的灰水比, 由下式(4-5)计算, 并按规范取计算值与耐久性要求的最大水灰比和最小水泥用量表规定值两者中的大值。

$$C_0 = (C/W) * W_0 \quad (4-5)$$

式中:  $C_0$ ——单位水泥用量, Kg;

### 6, 单方混凝土砂石料用量

确定单方混凝土砂石料用量有两种基本方法, 一种是假定密度法, 一种是体积法。密度法可按式(4-6)和(4-7)联立求得:

$$C_0 + W_0 + S_0 + G_0 = Z \quad (4-6)$$

$$S_p = S_0 / (S_0 + G_0) \times 100\% \quad (4-7)$$

式中:  $C_0$ 、 $W_0$ 、 $S_0$ 、 $G_0$ ——水泥、水、砂、石的单位用量, Kg/m<sup>3</sup>;

$S_p$ 为砂率;

$Z$ 为水泥混凝土假定密度; 通常可取为2400~2600; 单位: Kg/m<sup>3</sup>。

体积法可按式(4-8)和(4-9)联立求得:

$$C_0 / \rho_c + W_0 / \rho_w + S_0 / \rho_s + G_0 / \rho_g + 10a = 1000 \quad (4-8)$$

$$S_p = S_0 / (S_0 + G_0) \times 100\% \quad (4-9)$$

式中:  $\rho_c$ 、 $\rho_w$ 、 $\rho_s$ 、 $\rho_g$ ——水泥、水、砂、石的(实测)表观密度, g/cm<sup>3</sup>;

$a$ ——水泥混凝土含气量, %;

通过以上步骤, 最终确定水泥混凝土的基准配合比为: 水泥: 砂: 石: 水=1:

1.68: 3.41: 0.45; 详细结果见表4.8。

表4.8 水泥混凝土配合比参数

Tab. 4.8 The parameter of cement concrete

水灰比	砂率 (%)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	每立方米材料用量(kg/m <sup>3</sup> )			
			水	水泥	砂	石
0.45	33	2450	169	375	629	1277

试验中, 每块板的尺寸为: 300mm×300mm×50mm; 体积为0.0045m<sup>3</sup>; 各种材料用量按此体积计算得到, 考虑3%的富余系数。采用车辙板成型水泥混凝土板, 脱模后送到养护室在标准条件下养护7天, 风干后备用。如图4.2所示。

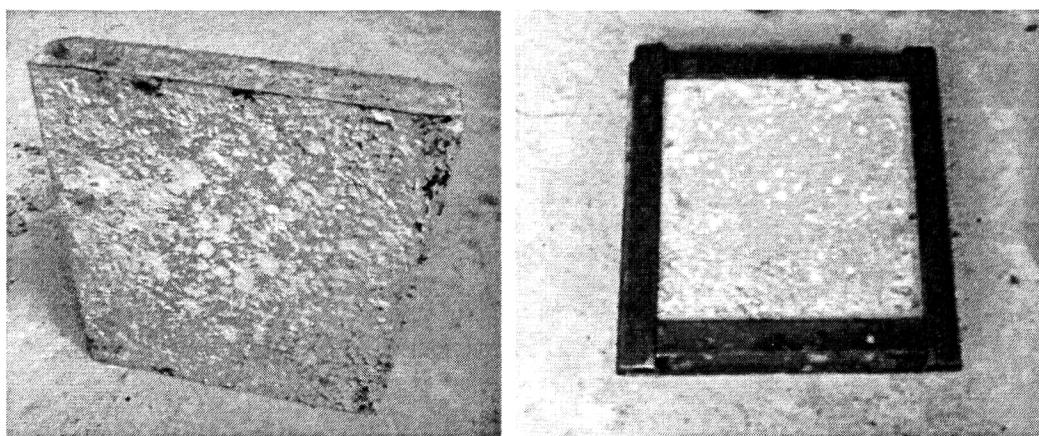


图 4.2 成型好的基底水泥混凝土板  
Fig. 4.2 Cement concrete slab of formed basement

#### 4.3.2 水泥混凝土板面的处理

模拟第二章中提到的三种不同界面处理方式，对水泥混凝土板进行凿槽处理。重点控制凿槽的深度和宽度。凿槽工具采用钢钎+铁锤和砂轮两种，前者主要模拟实际工程中的人工打毛界面，后者主要用来模拟喷砂和铣刨界面。打毛过程中控制槽的深度在 2mm~10mm 之间，宽度控制在 2mm~6mm 之间。对每种界面粘结材料，均留一块板不做打毛处理，以进行对比试验。所有的混凝土板均用水冲洗干净，使板面洁净，没有灰尘，然后烘干备用。界面处理过后的基底水泥混凝土板如图 4.3 所示。

#### 4.3.3 涂抹防水粘结层

用作刚柔性路面界面防水粘结层的材料有很多，但限于时间和精力，本次试验只考虑了聚合物改性沥青类防水粘结材料。具体来说，考虑了以下几种材料：AWP-2000F 型防水涂料、SBS 改性沥青、SBR 改性沥青、橡胶沥青、环氧沥青、溶剂型防水涂料。将准备好的水泥混凝土板放到 60℃烘箱预热半个小时备用。将改性沥青加热融化，取设计好的用量的沥青涂抹在板上，用毛刷顺凿槽方向将沥青涂刷均匀。做好标记，包括：沥青种类、沥青用量、凿槽深度等。涂抹防水粘结层材料之后的水泥板如图 4.4 所示。

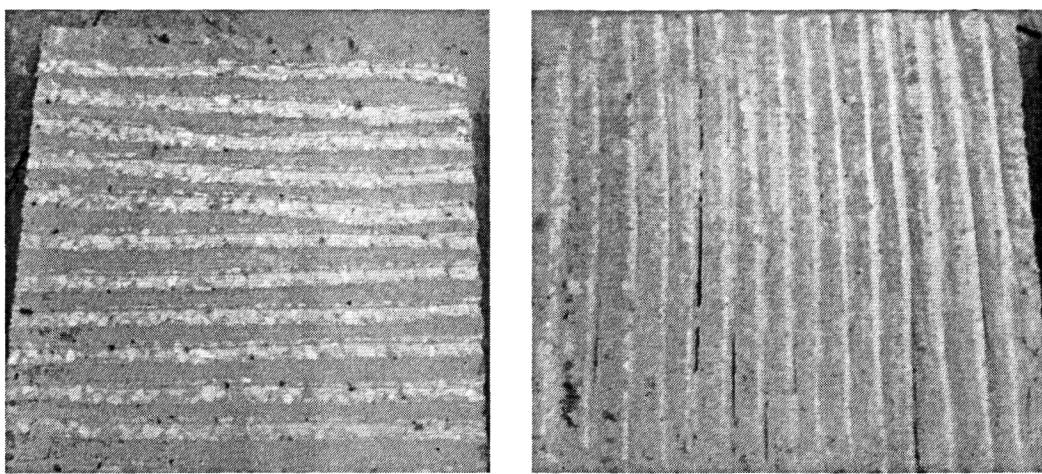


图 4.3 界面处理过后的水泥混凝土板

Fig. 4.3 Cement concrete slab after treatment of the interface

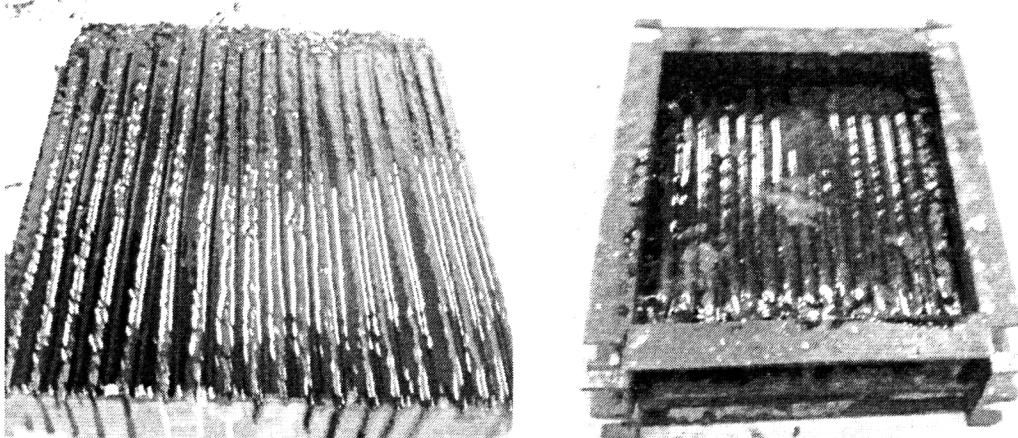


图 4.4 涂抹防水粘结层材料之后的水泥混凝土板

Fig. 4.4 Concrete slab after Coated waterproof material bonding layer

#### 4.3.4 加铺沥青混合料面层

加铺沥青混合料之前，必须确定沥青混合料的级配组成及混合料的沥青用量。沥青混合料的路用性能要求存在许多相互矛盾的地方。例如：高温和低温的要求，耐久性和表面抗滑要求等。对于普通沥青混合料而言，级配越细密，低温抗开裂和耐久性就越好，但是高温抵抗变形能力和表面抗滑能力较差。采用较粗的级配，可以改善沥青混合料的高温稳定性，提高表面抗滑力，但是耐久性和低温抗开裂性能又有所降低。因此，在实际工程中，沥青混合料采用分层铺筑，这样就可以根据各层所处位置和功能的不同，选择与之相适应的级配，充分发挥材料的潜力，最大限度的减少对材料性能要求的矛盾。从对桥面铺装结构的受力分析可知<sup>[45]</sup>：沥青混合料铺装上层中的拉应力大于铺装下层内的拉应力，防水粘结层与桥面板

及防水粘结层与沥青铺装层之间的剪应力大于铺装层内和层间的剪应力。基于以上理论,结合本试验的目的,对沥青混合料的组成进行设计。由于时间和精力的限制,考虑到试验研究的重点,本次试验只设计一种级配的沥青混合料,即不考虑面层沥青混合料的级配变化对防水粘结层强度的影响。综合考虑抗高温车辙变形以及混合料与防水粘结层的紧密接触,一般而言,细集料沥青混合料能够更好的与防水粘结层紧密接触,而骨架密实型的 SMA 沥青混合料又具有良好的抗高温变形能力。结合重庆高温多雨的气候特征,本次试验加铺层沥青混合料统一采用 AC-16C 型密级配沥青混凝土。AC-16C 型沥青混凝土级配范围见表 4.9,此次试验采用的级配为中值偏下,具体级配曲线见图 4.6。

表 4.9 加铺层沥青混合料级配设计  
Tab. 4.9 Graded design of overlay asphalt mixture

AC-16 C型	通过各筛孔的质量百分率(%, 方孔筛 mm)									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配 范围	90~ 100	76~ 92	60~ 80	42~ 62	30~ 50	22~ 40	16~ 28	9~ 25	6~ 18	4~8
级配 中值	95	84	70	52	40	31	22	17	12	6
设计 级配	90	80	65	45	35	25	20	12	8	5

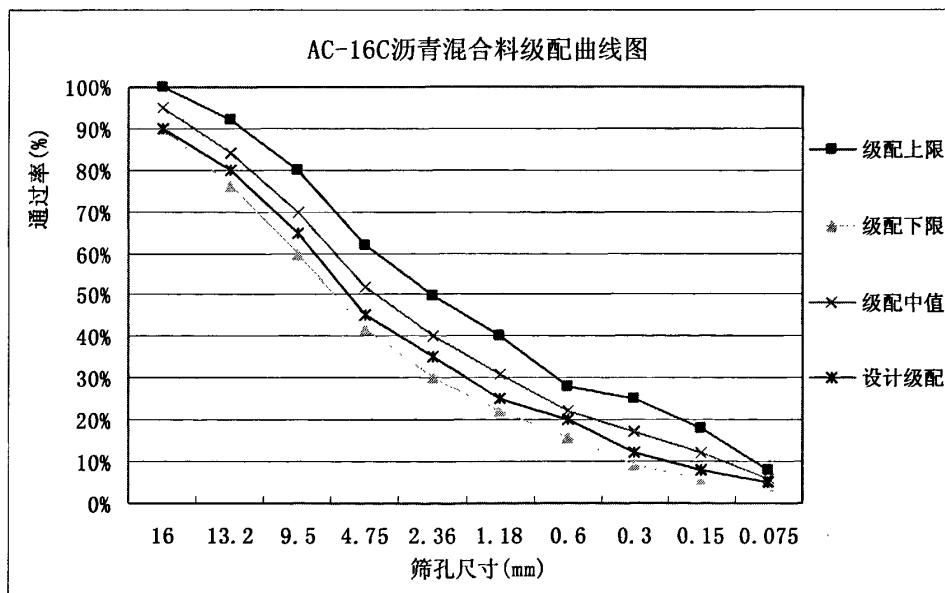


图 4.6 AC-16C 型沥青混合料级配曲线图  
Fig. 4.6 AC-16C-graded asphalt mixture curve

沥青混合料的最佳沥青用量按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000)的相关规定，通过马歇尔试验确定沥青混合料的最佳沥青用量。试验结果见表 4.10。

表 4.10 AC-16C 沥青混合料马歇尔试验结果  
Tab. 4.10 AC-16C asphalt mixture Marshall test results

油石比 (%)	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
相对密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.384	2.402	2.425	2.406	2.390
试件空隙率 (VV)	6.25	4.58	3.26	1.82	0.94
沥青饱和度 (VFA)	0.56	0.68	0.78	87	93
稳定度 (KN)	9.95	11.52	12.08	10.86	9.65
流值 (0.1mm)	25.5	29.7	31.8	33.4	36.3

根据表 4.10 可以确定出对应稳定度最大值的沥青用量，对应密度最大值的沥青用量和对应空隙率最大值的沥青用量，然后根据规范确定沥青用量的上限和下限，最终确定最佳沥青用量为：4.36%。当沥青用量为最佳沥青用量时，进行马歇尔试验，试验结果见表 4.11。

表 4.11 最佳沥青用量时沥青混合料的性能测试结果  
Tab. 4.11 The amount of asphalt mixture performance test results when best Asphalt

试验项目	相对密度 (g/cm <sup>3</sup> )	试件空隙率 (VV)	沥青饱和度 (VFA)	稳定度 (KN)	流值 (0.1mm)
试验值	2.416	4.05	0.72	11.85	30.2
规范要求值	—	3~6	70~80	>7.5	20~40

注：规范要求的值为高速公路、一级公路。

完成沥青混合料的组成设计后，按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000)的相关规定，进行沥青混合料的成型。具体做法为：首先将涂有防水粘结层的水泥混凝土板放入一块安装好的车辙板内，然后再加上一层车辙板，准备盛装沥青混合料用。将搅拌好的沥青混合料倒入车辙板内，整平后放到轮碾仪上进行碾压成型。在碾压过程中，注意使轮碾方向与于凿槽方向垂直。考虑到环氧沥青固化时间对实际施工具有重要意义，它关系到喷涂防水粘结层必须在多长时间内完成，喷涂后必须在多长时间内进行面层沥青混合料的摊铺。为了确定环氧沥青固化时间对界面抗剪强度的影响，在进行环氧沥青防水粘结层试件成型时，在其他条件相同情况下（界面刻槽深度、沥青涂抹量），特别单独考虑了间隔不同时间加铺沥青混合料面层其界面抗剪强度的变化。具体时间间隔为：0h, 0.5h, 1h, 2h, 4h，试验结果见本章第四小结试验结果及分析部分。考虑到整个试验的

安排，在进行防水粘结层材料的对比试验时，采用环氧沥青的所有试件都是在环氧沥青涂抹后立即加铺面层混合料面层，即没有时间间隔。碾压成型后的复合板见图 4.7。

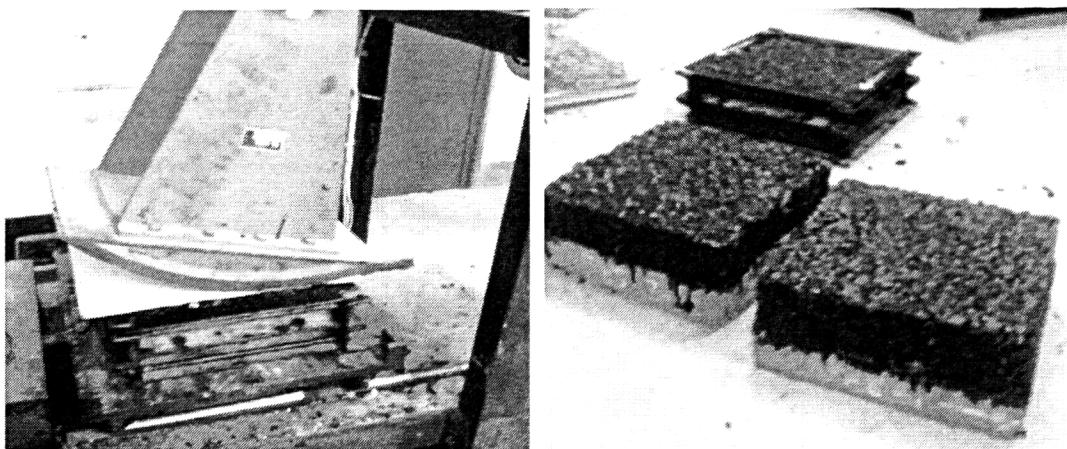


图 4.7 碾压成型后的水泥-沥青复合板  
Fig. 4.7 RCC forming the cement - asphalt composite plate

成型后的复合板试件放在试验室，在自然条件下养护一周左右，以待切割。其中环氧沥青粘结层由于材料强度形成的要求，将试件先放入 60℃烘箱 3 天，然后再取出同其他试件一起在自然条件下养护。

#### 4.3.5 试件的切割

将放置（自然养护）一周左右试件的水泥沥青复合板试件放到切割机上，按照试验所规定的尺寸进行试件的切割。拉拔试验试件尺寸为： $50 \times 50 \times 100$ （单位：mm），剪切试验试件尺寸为： $50 \times 100 \times 100$ （单位：mm）。切割好的试验试件如图 4.8 所示。

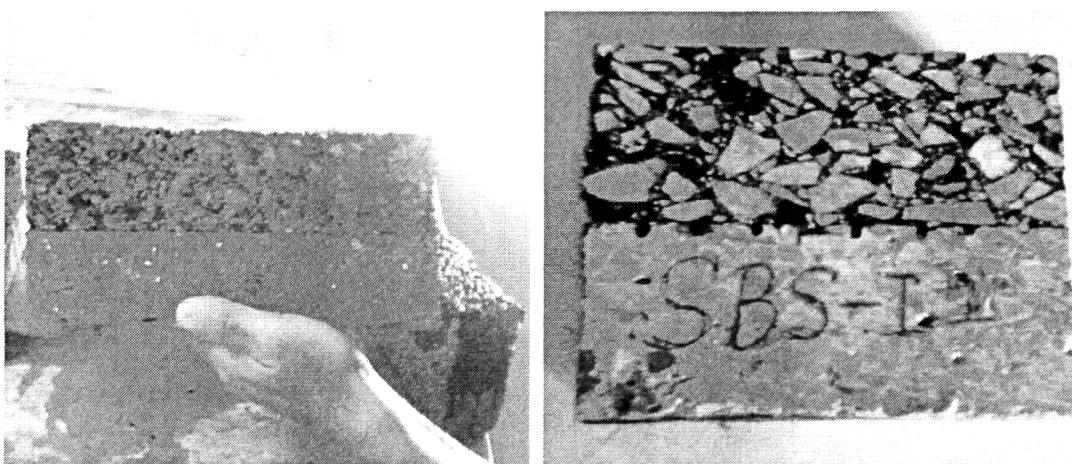


图 4.8 切割好的标准尺寸试验试件  
Fig. 4.8 Cutting stand-sized specimen test

将切割好的试件按不同类型（界面处理方式，防水粘结层材料）进行分类编号，分开放置以免混淆，准备进行强度测试。在进行强度试验之前，根据试验条件的要求，须对试件的温度进行调控。由于缺乏精确的温度调空设备，此处采用烘箱加热法控制试件所需的温度。考虑到试验过程中试件温度的损失，将烘箱温度调定在比试件所需温度高 5 度，加热时间定为 30 分钟。需要注意的是，试件从烘箱取出之后必须马上放到试验机器上进行强度试验。避免因试验时间过长而导致试件温度下降过大，影响试验结果。

## 4.4 试验结果与分析

本次试验内容包括刚柔界面的抗剪强度试验、粘结强度试验、封水性能试验、水稳定性试验。以下是各种界面材料在不同工况下的试验结果。由于试验内容比较多，试验结果也很多，以下分别给出各项试验结果并对各项试验结果进行分析。

### 4.4.1 剪切试验结果分析

界面层抗剪强度是评价刚柔性路面抵抗车辆荷载水平力破坏的重要指标。界面层是刚柔性路面的刚柔过度区，所用材料特殊，受力复杂。分析研究大量实际工程的损坏原因，都与界面层的失效和破坏有关。界面层抗剪强度不足容易引起面层沥青混合料的推移、拥包，甚至开裂，因此，刚柔性路面的设计和施工都对界面层的抗剪强度指标提出了严格的要求。实际路面界面层的剪切破坏是在水平力和竖向力共同作用下产生的，为了更好的模拟路面实际的受力状态，此次采用了 45° 斜剪试验对刚柔界面的抗剪强度进行了试验研究，试验过程中考虑了 20℃、50℃ 两个不同试验温度。刚柔性路面界面强度决定于界面材料和界面的处理方式，因此，试验第一步研究了不同防水粘结材料在不同板处理方式下的抗剪强度，试验过程中控制防水粘结层沥青用量为  $1.0\text{kg}/\text{m}^2$ ，精铣刨处理界面时，控制凿槽深度为 4mm 左右。抗剪强度试验见图 4.9 所示。

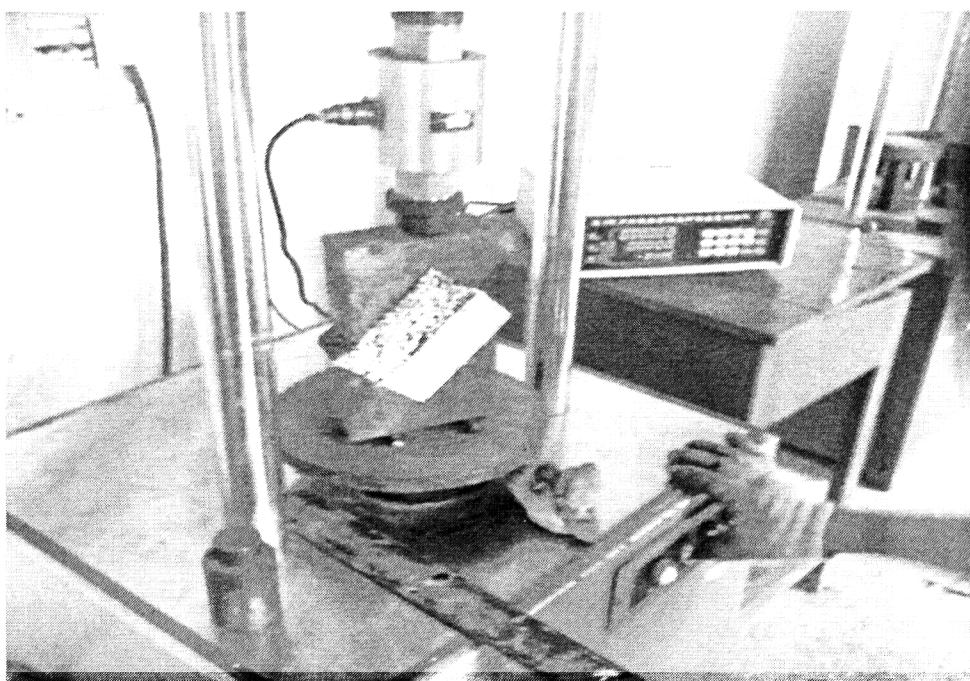


图 4.9 抗剪强度试验—— $45^{\circ}$ 斜剪  
Fig. 4.9 Shear strength test of  $45^{\circ}$ -Cut

20℃情况下，各种防水粘结材料在不同水泥混凝土板界面处理方式下的 $45^{\circ}$ 斜剪试验抗剪强度实验数据见表 4.12。

表 4.12 20℃情况下不同界面处治方式的 $45^{\circ}$ 剪切试验结果 (MPa)  
Tab. 4.12 Treatment methods of the interface  $45^{\circ}$  shear test results (20°C, MPa)

不同界面 不同材料	光面	人工处理	喷砂处理	精铣刨处理 (铣刨深度 4mm)
SBS 改性沥青(厚 2mm)	0.426	0.515	0.628	0.831
溶剂型涂料(厚 0.5mm)	0.202	0.235	—	—
SBR 改性沥青(厚 2mm)	0.395	0.457	0.540	0.685
AWP-2000F+纤维(厚 1m)	0.535	—	0.863	—
AWP-2000F(厚 0.5mm)	0.429	0.483	0.625	0.758
橡胶沥青(厚 3mm)	1.420	1.323	1.465	1.467
环氧沥青(厚 2mm)	0.761	—	0.985	—

注：表格中划横线表示该项数据未做实验。实验过程中发现：溶剂型防水涂料各项实验数据非常小，考虑过后，决定后续实验不再使用；环氧沥青由于性能很不稳定，实验发现数据离散性较大，其固化程度也差别很大，有些能完全固化，有些则不能完全固化，因此，后续试验决定不再使用。因此，在后续的实验数据中将不会再有环氧沥青和溶剂型涂料的实验数据了。此外，AWP-2000F+纤维由于受材料特性要求，只能用于光面或者是喷砂界面，不适宜用在铣刨界面和人工处理界面。

50℃情况下，各种防水粘结材料在不同水泥混凝土板界面处理方式条件下的 $45^{\circ}$ 斜剪试验抗剪强度实验数据见表 4.13。

表 4.13 50℃情况下不同界面处治方式的 45° 剪切试验结果 (MPa)

Tab. 4.13 Treatment methods of the interface 45° shear test results (50°C, MPa)

不同界面 不同材料	光面	人工处理	喷砂处理	精铣刨处理 (铣刨深度 4mm)
SBS 改性沥青(厚 2mm)	0.129	0.165	0.232	0.297
溶剂型涂料(厚 0.5mm)	0.023	0.035	—	—
SBR 改性沥青(厚 2mm)	0.105	0.147	0.202	0.285
AWP-2000F+纤维(厚 1m)	0.168	—	0.263	—
AWP-2000F(厚 0.5mm)	0.113	0.137	0.229	0.286
橡胶沥青(厚 3mm)	0.257	0.363	0.461	0.472
环氧沥青(厚 2mm)	0.750	—	0.973	—

以下是六种防水粘结层材料在 20℃下, 45°斜剪试验的抗剪强度对比, 以光面和喷砂界面为例。如图 4.10 所示。

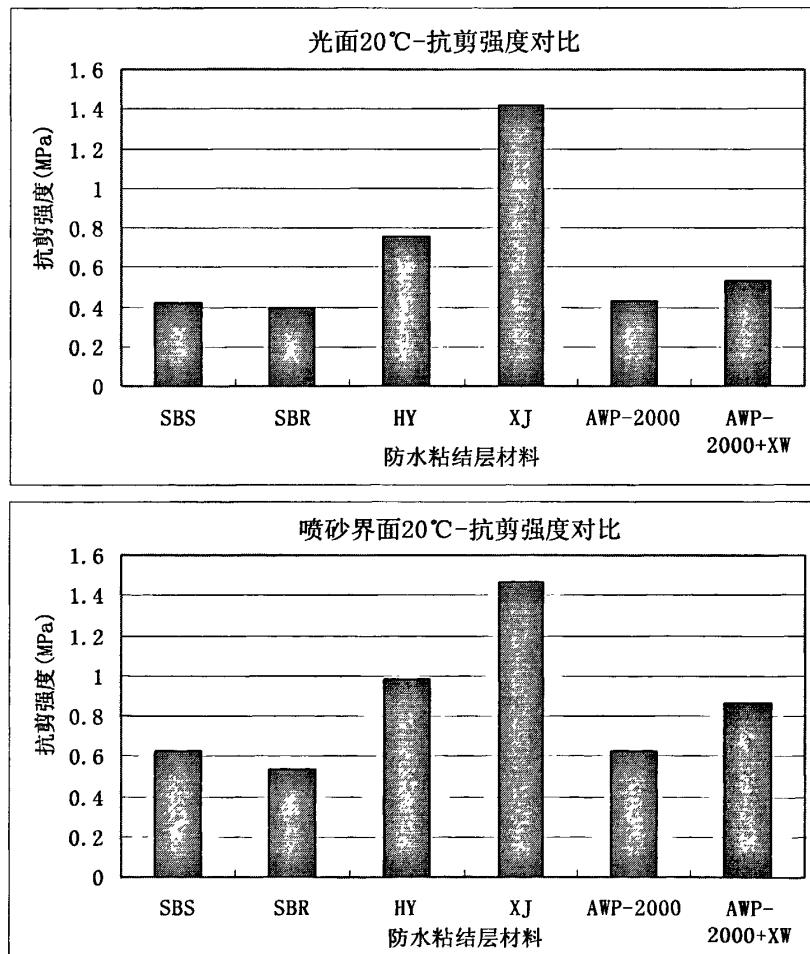


图 4.10 不同防水粘结层材料常温 20℃抗剪强度的对比图  
Fig. 4.10 Different bonding layer waterproof material  
at 20 °C shear strength of Comparison Chart

高温状况考虑的温度是 50℃，在 50℃ 条件下，各种材料的抗剪强度实验数据见表 4.13，同样以光面和喷砂界面为例，其 45° 斜剪试验抗剪强度对比如图 4.11 所示。

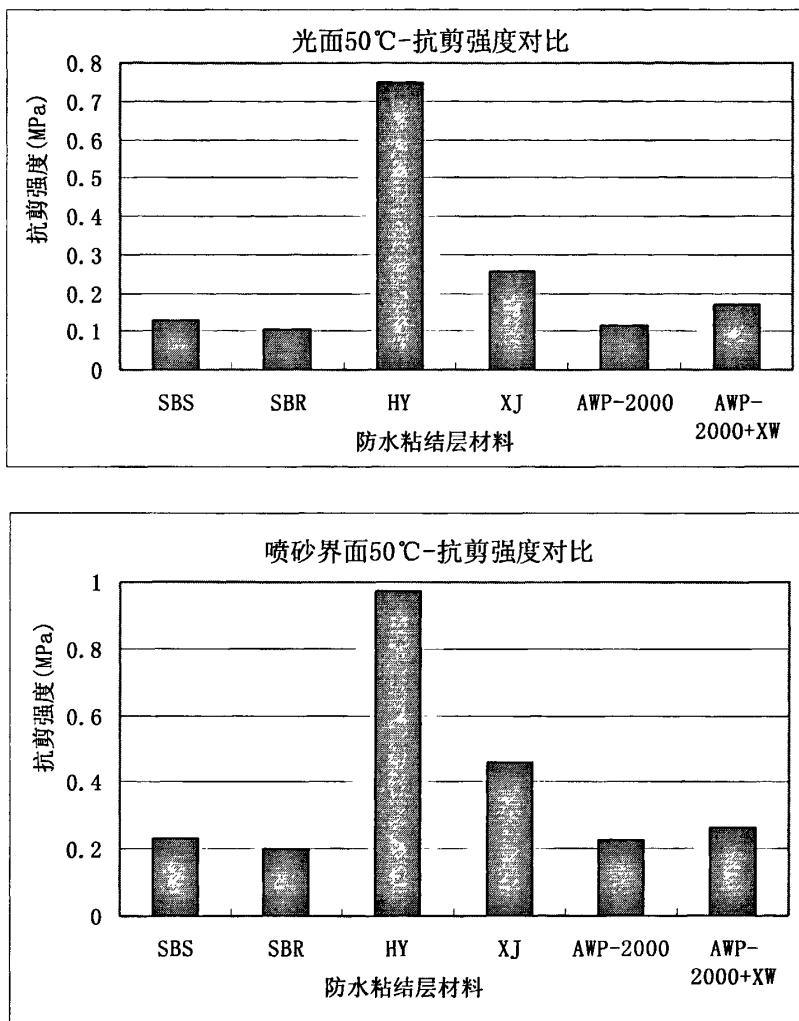


图 4.11 不同防水粘结层材料高温 50℃ 抗剪强度的对比图  
Fig. 4.11 Different bonding layer waterproof material at 50 °C shear strength of Comparison Chart

从试验结果可以看出：温度和界面状态对桥面防水粘结层抗剪强度影响十分明显。仅从抗剪强度来看，橡胶沥青防水粘结层最好，其次是 AWP-2000F+纤维，再其次是 SBS、SBR 和 AWP-2000F，且三者相差不大。最差的溶剂型防水涂料，其常温 20℃ 下，抗剪强度最高不过 2.35（人工界面）。环氧沥青试验结果离散较大，性能很不稳定，后期实验没有采用。但从先前的几组试验结果来看，其抗剪强度

较高，仅次于橡胶沥青，且其抗剪强度受温度影响非常小。换句话说，如果施工条件较好，能够保证环氧沥青实现正常的固化，其不失为一种较好的防水粘结层材料。温度对防水粘结层材料的抗剪强度影响非常大，除环氧沥青之外，其他几种材料的抗剪强度均随温度的升高而显著下降。环氧沥青属热固性材料，由于材料本身特性，其强度受温度影响较小。也就是说环氧沥青具有良好的温度稳定性，能够抵抗高温而不发生软化现象。图 4.12 以喷砂界面为例，反映了橡胶沥青、SBS 和 AWP-2000F+纤维三种材料在不同温度下抗剪强度的对比，由此可以直观看出温度对材料抗剪强度的影响。

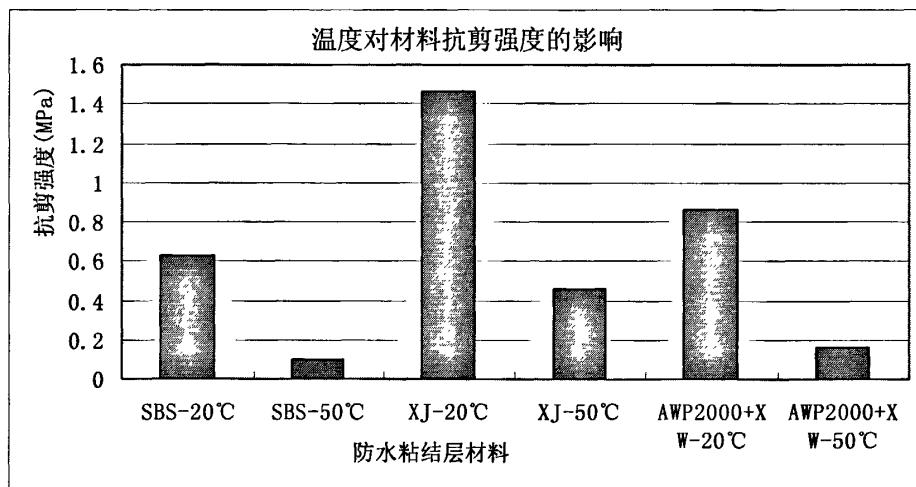


图 4.12 温度对防水粘结层材料抗剪强度的影响

Fig. 4.12 Impact on the shear strength of Temperature on the bonding layer waterproof material

#### 4.4.2 拉拔试验结果分析

除抗剪强度指标外，粘结强度也是防水粘结层一个非常重要的指标。粘结强度可以用来评价沥青层与水泥混凝土板之间的粘结性能，而沥青层与水泥混凝土板之间是通过防水粘结材料粘结的，因此，粘结强度实际上包含两方面的内容：一方面是防水粘结层与水泥混凝土板之间的粘结，另一方面是防水粘结层与沥青加铺层之间的粘结。沥青层与水泥混凝土板之间粘结的好坏直接影响到界面层的受力，使沥青加铺层底的拉应力显著增大，同时严重影响界面层的抗剪强度。本论文采用直接拉拔试验测量界面层的粘结强度。拉拔试验原理如图 4.1 所示。在前面 45° 斜剪实验的基础上，对 SBS 改性沥青、橡胶沥青、AWP-2000F 以及 AWP-2000F+纤维四种材料进行了拉拔实验。测试温度同剪切实验一样，低温采用的是常温 20℃，高温采用的是 50℃。拉拔试验如图 4.13 所示，测试结果见表 4.14

和表 4.15。

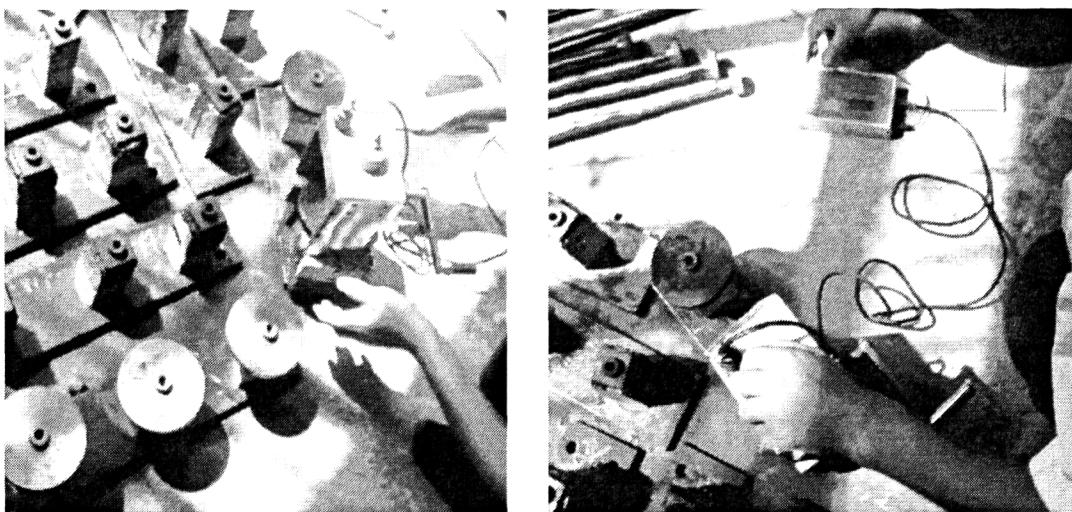


图 4.13 拉拔试验  
Fig. 4.13 Drawing Test

拉拔试验采用的是上海汇城装饰有限公司的小型手动拉拔仪，试验数据由电子仪自动采集，整个试验操作简便。

表 4.14 20℃情况下不同界面处治方式的拉拔试验结果 (MPa)

Tab. 4.14 Pulling test results of different methods  
of treatment interface (tem. 20°C; unit: MPa)

不同界面 不同材料	光面	人工处理	喷砂处理	精铣刨处理 (铣刨深度 4mm)
SBS 改性沥青(厚 2mm)	0.532	0.529	0.615	0.630
AWP-2000F+纤维 (厚 1m)	0.625	—	0.672	—
AWP-2000F(厚 0.5mm)	0.524	0.518	0.585	0.612
橡胶沥青(厚 3mm)	0.969	0.985	0.972	0.974

表 4.15 50℃情况下不同界面处治方式的拉拔试验结果 (MPa)

Tab. 4.15 Pulling test results of different methods  
of treatment interface (tem. 20°C; unit: MPa)

不同界面 不同材料	光面	人工处理	喷砂处理	精铣刨处理 (铣刨深度 4mm)
SBS 改性沥青(厚 2mm)	>0.274	>0.271	>0.269	>0.272
AWP-2000F+纤维 (厚 1m)	>0.273	—	>0.275	—
AWP-2000F(厚 0.5mm)	>0.269	>0.272	>0.271	>0.272
橡胶沥青(厚 3mm)	>0.270	>0.275	>0.269	>0.271

注：在 50℃高温条件下，试件进行直接拉拔实验时，发现破坏面均发生在沥青混合料层内，防水粘结层并未发生破坏。这说明，防水粘结层材料粘结强度在高温时足够大，已超过沥青混合料的高温抗拉强度。

以光面和喷砂界面为例，20℃情况下，各种材料的拉拔强度对比如图 4.14。

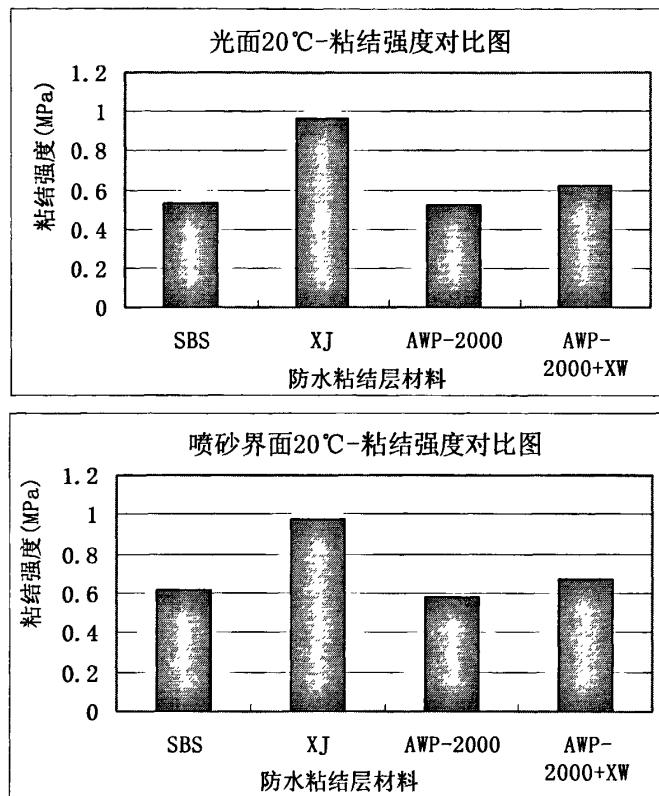


图 4.14 不同防水粘结层材料常温 20℃粘结强度的对比图  
Fig. 4.14 Different waterproof adhesive bond strength of the material Comparison Chart (tem. 20°C)

拉拔试验结果表明：几种防水粘结层材料的粘结强度相差不大，其中橡胶沥青较高，在常温下接近 1MPa，SBS 改性沥青与 AWP-2000F 防水涂料粘结强度相当。而 AWP-2000F+纤维比 AWP-2000F 粘结强度稍大。此次高温情况下的拉拔试验未能得到界面层的实际抗拉强度，高温拉拔实验破坏面均发生在沥青混合料层内。分析原因，笔者认为与沥青混合料所采用的沥青（普通 AH-90 号沥青）及矿料级配等有关，与成型工艺（压实度）也有关系，使得沥青混合料的高温稳定性不足，所以在高温情况下其抗拉强度较低。尽管如此，试验结果也足以说明：在高温 50℃情况下，几种防水粘结层材料的抗拉强度都是大于 0.275MPa 的。

#### 4.4.3 透水性试验

采用路面渗水仪对防水粘结层的封水性能进行测试。路面渗水仪形状及尺寸如图 4.15 所示。

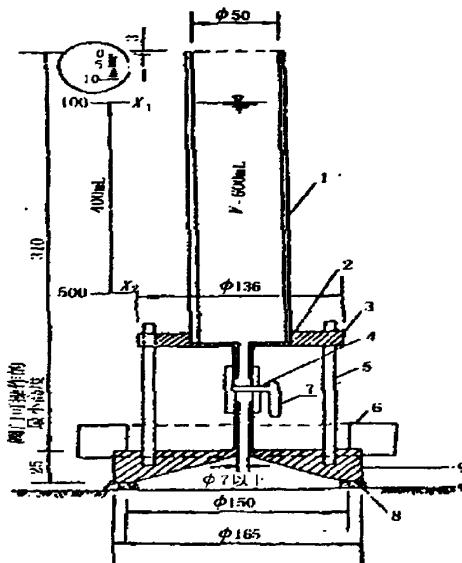


图 4.15 路面渗水仪器构造图 (单位: mm)

Fig. 4.15 Construction of the road leaking equipment (Unit: mm)

上面透明盛水量筒由有机玻璃制成, 容积为 600mL, 上有刻度。在 100mL 及 500mL 处有粗标线, 下方通过  $\Phi 10\text{mm}$  的细管与底座相接, 中间有一开关。量筒通过支架联结, 底座下方开口内径  $\Phi 150\text{mm}$ , 外径  $\Phi 165\text{mm}$ , 仪器附铁圈压重两个, 每个质量约 5Kg, 内径  $\Phi 160\text{mm}$ 。试验过程中准备记时秒表, 记录自开关打开后在规定时间内, 水面下降的距离, 以此来评价防水粘结层的封水性能。通过对几种防水粘结层材料进行透水性实验, 发现所有材料的密水性能都非常好, 可以认为是不透水的。当然, 这里需要指出的是直接针对防水粘结层材料进行的透水性实验并不说明加铺沥青层之后防水粘结层实际的密水性。因为, 在施工过程中, 施工车辆、人员及沥青混合料中的粗骨料均会对防水粘结层造成硌破等损坏, 使密水性下降。

因此, 在实际工程, 应该在防水粘结层施工完成后和沥青加铺层施工完成后分别进行两次渗水性试验。以检测防水粘结层实际的密水性能。

#### 4.5 精铣刨界面最佳铣刨深度

本论文首次针对精铣刨界面的铣刨深度进行了量化研究, 目的是想弄清楚精铣刨界面的铣刨深度与界面强度(抗剪强度和粘结强度)的关系。试验选择 AWP-2000F 涂料作为防水粘结层材料(不加纤维), 涂层厚度为 0.5mm。对不同铣刨深度进行了剪切试验和拉拔试验。试验结果见表 4.16 和表 4.17。

表 4.16 AWP-2000F 涂料-精铣刨界面最佳铣刨深度（试验温度：20℃）

Tab. 4.16 The best Milling depth of AWP-2000F (tem. 20℃)

铣刨深度	0	2	4	6	8	10
抗剪强度	0.429	0.521	0.758	0.877	0.792	0.721
粘结强度	0.524	0.565	0.612	0.625	0.63	0.536

表 4.17 AWP-2000F 涂料-精铣刨界面最佳铣刨深度（试验温度：50℃）

Tab. 4.17 The best Milling depth of AWP-2000F (tem. 50℃)

铣刨深度	0	2	4	6	8	10
抗剪强度	0.232	0.251	0.286	0.295	0.282	0.269
粘结强度	>0.165	>0.270	>0.272	>0.275	>0.276	>0.274

通过试验发现，铣刨深度对界面层抗剪强度和粘结强度都有一定影响。具体来说，随着铣刨深度逐渐增大，抗剪强度呈现先增大后减小的趋势，也即是随着铣刨深度的增大，抗剪强度出现一个峰值，此峰值对应的铣刨深度为 6mm。对于粘结强度而言，随着铣刨深度增大而不断增大，但增长趋势逐渐减缓。尤其是当铣刨深度超过 4mm 后，粘结强度随铣刨深度增加而增长缓慢。

分析原因，笔者认为有以下几方面：首先，随着铣刨深度由 0 逐渐增大，使得沥青混合料与水泥混凝土板之间的机械咬合作用增强，界面层的抗剪强度不再仅仅依靠防水粘结层自身的粘结作用，而部分依靠沥青混合料与水泥板之间的机械咬合作用。因此，随着铣刨深度增加，界面层抗剪强度呈现增大趋势。但是，随着铣刨深度的进一步增大，因为水泥板的凿缝深度较大，使得一方面加铺层沥青混合料与水泥板之间不能很好的密切粘结，不可避免会在凿缝内存留细微的缝隙，尽管随着铣刨深度增大，沥青混合料与水泥板之间有效接触面积增大，但随之出现细微缝隙的可能性也增大了，微裂隙的存在会削弱界面层的抗剪强度；另一方面由于铣刨深度过大，使得在凿缝尖端的应力集中更加明显，由于应力集中现象出现，使得界面层出现微裂纹的几率大大增加，因此，应力集中也会削弱界面层的抗剪强度。因此，出现界面层抗剪强度随铣刨深度增加而呈现先增后减的变化不足为奇。

其次，随着界面层铣刨深度的增大，使得沥青层与水泥板之间的有效接触面积逐渐增大。尽管随着铣刨深度的增加，沥青层与水泥板之间出现空隙和微裂纹的几率也随着增加，但显而易见的是，这并不影响有效接触面积的逐渐增大。此处提到的有效接触面积指的是沥青混合料与水泥板之间实际的接触面积，不包括彼此之间存在的空隙和微裂纹。因此，这里的有效接触面积只是一个理想化的概念，实际上并不确定，也是无法准确测量得到的。由于沥青混合料与水泥混凝土

板之间的有效接触面积逐渐增大，使得彼此之间的粘结强度也逐渐增大。而之所以会出现后期增长缓慢的原因，正是由于随着铣刨深度增大而出现更多的空隙和微裂纹的缘故。图 4.16 反映了界面层强度随铣刨深度的变化关系。

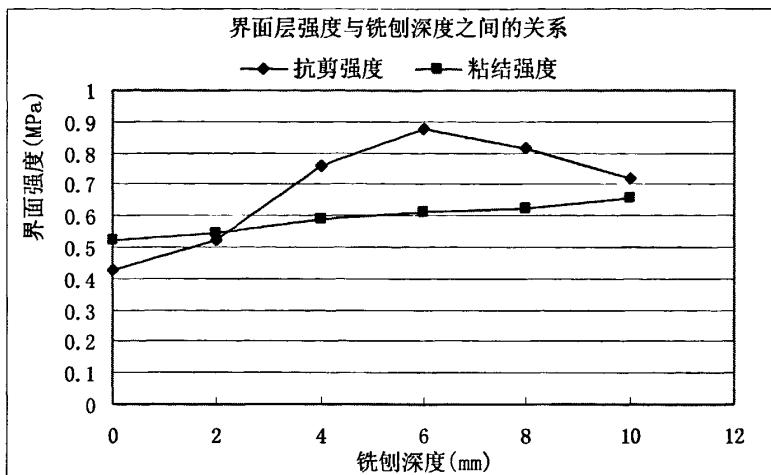


图 4.16 界面层强度随铣刨深度变化的关系图（试验温度：20℃）

Fig. 4.16 The relationship between the Interfacial layer milling depth and the intensity map (tem. 20°C)

通过对精铣刨界面铣刨深度的定量研究，得到的结论是：界面抗剪强度随着铣刨深度的增大呈现先增大后减小的变化趋势，当铣刨深度在 6mm 左右时，界面抗剪强度达到最大值；界面粘结强度随着铣刨深度的增大而逐渐增大，但当铣刨深度超过 4mm 之后，增大趋势不明显。综合考虑界面层抗剪强度及粘结强度后，笔者认为：对于精铣刨界面控制铣刨深度在 6mm 是最佳的。考虑实际施工可能存在的误差，提出精铣刨界面最佳铣刨深度为：5~7mm，控制在 4~8mm 是合适的。当然，实际工程中对铣刨深度的选择还需要考虑所在路段的实际受力情况，综合考虑各种因素之后决定。

#### 4.6 防水粘结层最佳沥青用量的确定

防水粘结层沥青用量的大小直接影响到防水粘结层的厚度，而防水粘结层厚度对界面层强度及耐久性有着至关重要的影响。本论文针对三种不同界面，即：光面、喷砂界面、精铣刨界面，其中精铣刨界面控制铣刨深度为 6mm。选用 SBS 改性沥青作为试验材料（由于在实验室制备大量橡胶沥青有一定的困难，因此没有选择橡胶沥青。而对于 AWP-2000F 型防水涂料，上海汇城公司对其进行了大量的试验研究，提出了针对不同界面状态下的最佳用量问题。因此，考虑到实际应用

价值,本论文也没有选择 AWP-2000F 型涂料做最佳用量试验。由于 SBS 改性沥青是成品,加热之后即可使用。试验起来比较方便,且考虑试验结果有一定的实际应用价值。故选用 SBS 改性沥青进行界面层最佳沥青用量的试验),全部试验结果均表明:对于每一种界面都存在有个最佳沥青用量,界面抗剪强度及粘结强度在最佳沥青用量处达到或接近峰值。试验结果见表 4.18 至表 4.20。

表 4.18 SBS 光面最佳沥青用量表 (试验温度: 20℃)  
Tab. 4.18 SBS smooth asphalt with the best Scale (tem. 20°C)

沥青用量 (kg/m <sup>2</sup> )	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4
抗剪强度 (MPa)	0.193	0.324	0.373	0.417	0.429	0.405	0.396	0.368
粘结强度 (MPa)	0.212	0.346	0.449	0.495	0.524	0.512	0.498	0.485

表 4.19 SBS 喷砂界面最佳沥青用量表 (试验温度: 20℃)  
Tab. 4.19 SBS sandblasting interface with the best asphalt Scale (tem. 20°C)

沥青用量 (kg/m <sup>2</sup> )	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
抗剪强度 (MPa)	0.306	0.442	0.516	0.583	0.615	0.655	0.628	0.602	0.562
粘结强度 (MPa)	0.205	0.310	0.426	0.479	0.537	0.585	0.611	0.558	0.521

表 4.20 SBS 铣刨界面最佳沥青用量表 (试验温度: 20℃; 铣刨深度 6mm)  
Tab. 4.20 SBS asphalt milling interface with the best Scale (tem. 20°C; deep 6mm)

沥青用量 (kg/m <sup>2</sup> )	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
抗剪强度 (MPa)	0.414	0.510	0.624	0.732	0.813	0.839	0.875	0.406	0.368
粘结强度 (MPa)	0.225	0.324	0.446	0.496	0.527	0.569	0.621	0.608	0.582

以光面和喷砂界面为例,界面强度与沥青用量之间的关系如图 4.17 及图 4.18 所示。

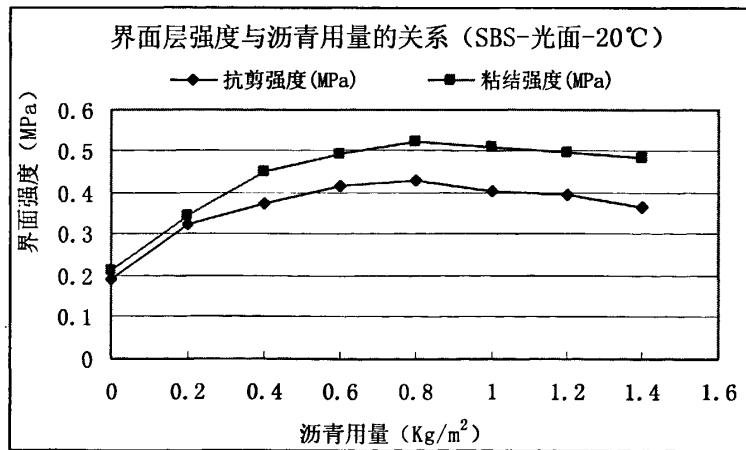


图 4.17 SBS 改性沥青用量与界面强度之间的关系图  
Fig. 4.17 The relationship between the strength of the interface and SBS modified bitumen content map

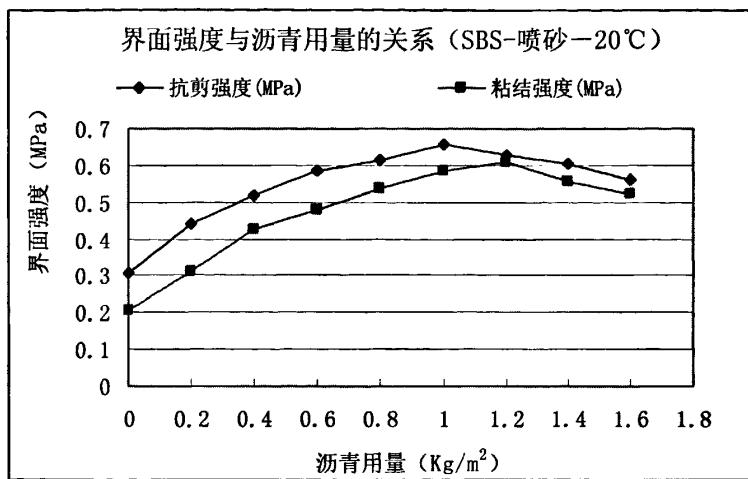


图 4.18 SBS 改性沥青用量与界面强度之间的关系图  
Fig. 4.18 The relationship between the strength of the interface and SBS modified bitumen content map

通过对 SBS 改性沥青最佳用量的试验研究, 得到的结论是: 对于喷砂界面最佳沥青用量为  $1.0 \text{kg}/\text{m}^2$ , 控制范围为:  $0.9 \sim 1.1 \text{kg}/\text{m}^2$  是合适的; 对于精铣刨界面而言, 最佳沥青用量为  $1.1 \text{kg}/\text{m}^2$ , 控制沥青用量在  $1.0 \sim 1.2 \text{kg}/\text{m}^2$  是合适的; 对于光面和人工处理界面, 控制沥青用量在  $0.8 \sim 1.0 \text{kg}/\text{m}^2$  范围内。最佳沥青用量随界面的粗糙程度不同略有不同, 总的变化规律是界面越粗糙, 最佳用量略有增大。另外, 考虑到实际工程的施工, 路面板对沥青的吸收作用, 沥青的挥发以及不可避免的浪费等因素, 建议实际施工最佳沥青用量在以上标准基础上加上  $0.3 \sim 0.5 \text{kg}/\text{m}^2$ 。

#### 4.7 防水粘结层材料耐久性及水稳定性试验

防水粘结层材料由于大多属于有机物, 如各种改性沥青和聚合物改性涂料。在实际使用过程中, 不可避免的会产生老化现象。尤其是在低温时期, 防水粘结层材料的抵抗低温开裂性能尤为重要。此外, 由于加铺的沥青混合料不可避免的会渗水。在多雨气候地区, 防水粘结层有可能长时间处于水的浸泡中。众所周知, 水对沥青基材料的各项性能有很大影响。因此, 人们自然会关注防水粘结层材料的水稳定性如何。即在长时期水的浸泡下, 防水粘结层的力学强度和防水性能等有何变化。本论文针对以上两点, 对防水粘结层材料的抗老化性能、低温抗收缩开裂性能和水稳定性能做了试验研究。试验结果见表 4.21。

表 4.21 防水粘结层材料耐久性试验结果（涂层厚：2mm）

Tab. 4.21 Bonding layer waterproof material durability test results

试验项目 试验材料	薄膜加热老化试验 (163℃, 5h)			薄膜低温抗开裂试验 (-10℃, 48h)	温度疲劳试验 (±20℃ 10 次)
	针入度比	质量损失	延度 (5℃)		
SBS 改性沥青	84%	0.53%	25	无开裂，有明显收缩	无开裂
橡胶沥青	62%	-0.26%	16	无开裂，有明显收缩	无开裂
AWP-2000F	—	—	—	无开裂，有明显收缩	无开裂
AWP-2000F+纤维	—	—	—	无开裂，无明显收缩	无开裂

注：低温疲劳试验是在最低温度-20℃，最高温度 20℃之间进行的循环变温度试验，每个温度控制时间为 30min。试验循环进行 10 次，合计用时 10h。

由表 4.21 试验结果可知，四种材料的抵抗温度变化的性能都比较好，在温度 ±20℃情况下，循环试验 10 次，用时 10h 均未出现开裂现象。此外，四种材料的低温抗开裂性能也比较好。在温度-10℃情况下，持续放置 48h 均未出现开裂现象，但除 AWP-2000F+纤维无明显收缩之外，其余三种材料都有比较明显的低温收缩现象。针对 SBS 改性沥青和橡胶沥青进行的薄膜烘箱老化试验发现，两种材料的抗老化性能均满足现行规范对改性沥青抗老化性能的相关技术要求。

对于防水粘结层材料的水稳定性试验，采用的试验方法较简单。将准备进行水稳定性试验的试件事先放入水（常温）中浸泡 48 小时，然后取出，将试件表面自然风干后，进行抗剪强度和粘结强度的测试。测试方法与先前一样，主要目的是观察试件在水浸泡后其界面层强度的变化，从而通过比较浸水前后试件界面强度来评价防水粘结层的水稳定性。试件统一采用喷砂界面，抗剪采用 45°斜剪，试验温度为 20℃，试验结果见表 4.22。

表 4.22 喷砂界面防水粘结层水稳定性强度试验结果  
Tab. 4.22 Sandblasting interface waterproof strength  
Of the bonding layer of water test results

界面强度 (MPa) 不同材料	抗剪强度	抗剪强度比	粘结强度	粘结强度比
SBS 改性沥青(厚 2mm)	0.572	91%	0.522	85%
AWP-2000F+纤维(厚 1m)	0.795	92%	0.575	86%
AWP-2000F(厚 0.5mm)	0.563	90%	0.493	84%
橡胶沥青(厚 3mm)	1.352	92%	0.826	85%

由表 4.22 试验结果可知，试件浸水 48h 之后，其界面强度都有不同程度的下

降，其中粘结强度下降 14%~16%，抗剪强度下降 8%~10%。由此可见，水的存在对界面层粘结强度影响比抗剪强度影响大。从以上四种材料的浸水强度试验可以知道，四种材料的水稳定性差别不大，其中以 AWP-2000F+纤维最好，其次是 SBS 改性沥青和橡胶沥青，且二者差别不大。以上四种材料中，最差的是 AWP-2000F 型涂料。

浸水后，界面强度之所以会降低，笔者认为有以下原因：首先，水的存在降低了界面层防水粘结层材料的粘结性能，水中所含的微量元素会影响防水粘结材料的粘结效果。其次，水分子进入到界面层之后，迅速占据界面层一切空隙，形成的水膜起到润滑作用，使得界面层的摩擦效应大大降低，从而影响界面层的抗剪强度。最后，水的长时间的存在，也使得界面层防水粘结层材料软化，水分子的表面张力还使得防水粘结层材料与水泥混凝土和沥青混合料之间发生微小的剥离，时间越长，这种软化剥离效果越明显。由于水对界面的软化和剥离作用，也会使得界面层的强度下降。

通过对防水粘结层的耐久性的研究，得到的结论是：防水粘结层材料的老化会使得其性能下降，从而会影响到界面层的强度，其中，水是影响界面层强度的最主要因素。因此，在实际工程中，应该做好沥青加铺层混合料的防水和排水设计，尽量减少水的下渗对防水粘结层造成的危害。至于防水粘结层材料的温度老化温度，笔者认为倒不是最主要的，以为，防水粘结层毕竟是位于沥青层和水泥板之间，受到二者夹层的保护作用。氧气、光和温度老化作用不是特别严重，相对面层沥青混合料的老化而言，防水粘结层的老化是很微弱的。其次，由于有面层沥青混合料的保护，其温度变化及温度剃度的影响也是极其微小，可以忽略。

#### 4.8 不同剪切试验之间的对比研究

目前，常用的防水粘结层抗剪强度试验有两大类，一类是直剪试验，包括无竖向压力的直剪试验和有竖向压力的直剪试验；另一类是斜剪试验，包括  $30^\circ$  斜剪试验和  $45^\circ$  斜剪试验。不同的剪切试验，就算是同一种界面材料，得到的界面抗剪强度差别也是非常的大。因此，导致众多的试验结果之间没有很好的可比性，参考价值不大。笔者认为这是一种极大的知识浪费。因此，在本论文的研究过程中，得到导师的指点，对不同的剪切试验进行了对比研究和分析。重点对无竖向压力的直剪试验、 $30^\circ$  斜剪试验和  $45^\circ$  斜剪试验三种进行了对比试验研究。试验统一采用 AWP-2000F 型防水涂料，界面采用光面，试验温度为  $20^\circ\text{C}$ ，防水粘结层厚度统一为 0.5mm。试件尺寸同前一样，均为： $5 \times 10 \times 10\text{mm}$  的复合试件。试验结果见表 4.23。

表 4.23 不同剪切试验的结果对比 (AWP-2000F-Smooth-20℃)

Tab. 4.23 Different shear test results contrast (AWP-2000F - Smooth-20℃)

试验结果(MPa) 试验方法	1	2	3	4	5	6	7	8	9
直剪试验 ( $V=0$ )	0.319	0.325	0.313	0.321	0.318	0.329	0.318	0.315	0.334
30°斜剪试验	0.405	0.414	0.396	0.406	0.397	0.419	0.403	0.398	0.422
45°斜剪试验	0.424	0.431	0.419	0.425	0.421	0.432	0.422	0.420	0.439

注:  $V$  表示竖向压力;

对以上九组剪切试验数据进行回归分析, 可以得到不同剪切试验方法得到的试验结果之间的相关关系。图 4.19 是线性回归分析结果, 回归分析时, 均是以 45° 斜剪数值为目标。通过线性回归分析得到 45° 斜剪试验与 30° 斜剪试验的抗剪强度试验结果存在以下相关关系:  $\tau_{45} = \tau_{30} \times 0.6806 + 0.1491$ ; 相关系数  $R^2=0.9499$ 。同理, 45° 斜剪试验与无竖向压力的直剪试验的抗剪强度试验结果相关关系为:

$$\tau_{45} = \tau_{sj} \times 0.9739 + 0.113; \text{ 相关系数 } R^2=0.9724.$$

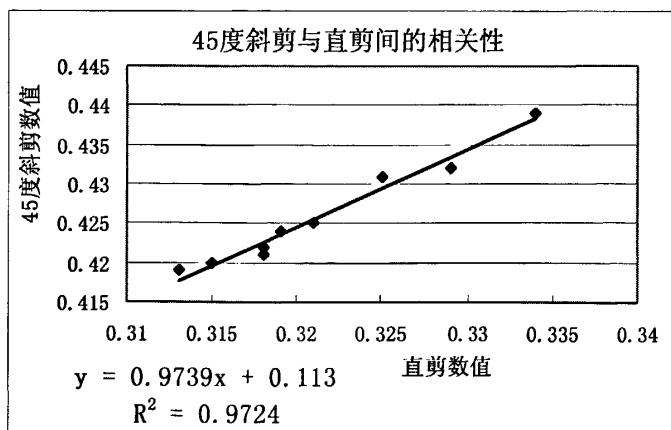
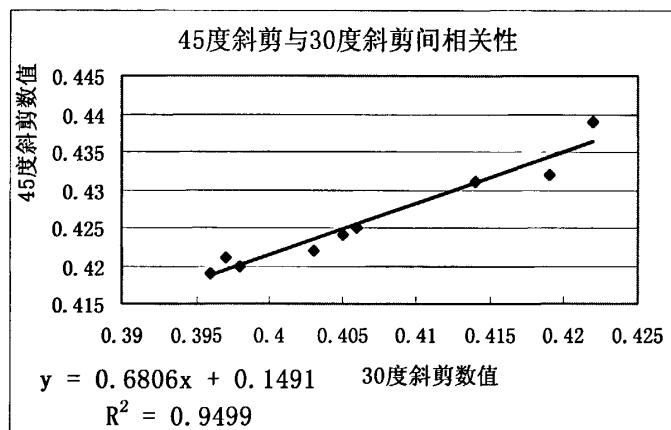


图 4.19 不同剪切试验抗剪强度结果间的相关性图

Fig. 4.19 Different shear test results shear strength of the correlation between the map

有了以上的换算关系，对以前所有的抗剪强度数据就有了可比性的基础。通过以上两个换算公式，可以将不同剪切试验的试验结果统一换算成 $45^{\circ}$ 斜剪试验的数值，然后同 $45^{\circ}$ 试验的抗剪强度数值进行对比分析。当然，也可以运用以上两个公式将 $45^{\circ}$ 斜剪的试验结果换算成 $30^{\circ}$ 斜剪和直剪试验的试验数值。当然，以上公式的可靠性是需要大量的试验结果进行验证的。只有通过大量的试验数据的积累，不断对相关性公式进行修正，其可靠性才能有保证。

#### 4.9 抗剪强度与粘结强度的相关性研究

通过室内试验研究发现，界面层的抗剪强度与粘结强度有着一定的相关性。换句话说，在同等条件下，界面层粘结强度高的其抗剪强度也相对较高，但对于不同的水泥板界面处理方式，不同的防水粘结层材料以及不同的抗剪试验方法而言，这种相关性存在差异。例如：试验发现，对于精铣刨界面，并不一定都是抗剪强度越高，其粘结强度也越高，这种相关性受刻槽深度的影响。但就普遍性而言，粘结强度高的其抗剪强度一般是比较好的。因此，本文针对界面层抗剪强度与粘结强度的关系，以AWP-2000F型涂料、喷砂界面为例，研究了在常温 $20^{\circ}\text{C}$ 及高温 $50^{\circ}\text{C}$ 情况下的抗剪强度( $45^{\circ}$ 斜剪)与粘结强度的相关性。试验结果见表4.24和表4.25。

表 4.24 AWP-2000F 型涂料-喷砂界面抗剪强度与粘结强度(温度:  $20^{\circ}\text{C}$ )

Tab. 4.24 Bond strength and shear strength of AWP-2000F  
-coating sandblasting interface (tem.  $20^{\circ}\text{C}$ )

试验组数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
粘结强度(MPa)	0.582	0.585	0.580	0.590	0.587	0.584	0.586	0.586	0.583
抗剪强度(MPa)	0.620	0.625	0.616	0.630	0.628	0.623	0.626	0.627	0.621

表 4.25 AWP-2000F 型涂料-喷砂界面抗剪强度与粘结强度(温度:  $50^{\circ}\text{C}$ )

Tab. 4.25 Bond strength and shear strength of AWP-2000F  
-coating sandblasting interface (tem.  $50^{\circ}\text{C}$ )

试验组数	1	2	3	4	5	6	7	8
粘结强度(MPa)	0.272	0.275	0.273	0.285	0.277	0.274	0.276	0.280
抗剪强度(MPa)	0.226	0.225	0.229	0.236	0.238	0.226	0.232	0.228

由试验结果可以看出，在 $20^{\circ}\text{C}$ 情况下界面层抗剪强度与粘结强度之间还是有着很好的相关性。由于 $50^{\circ}\text{C}$ 时，界面层实际拉拔强度并未测得，因此也就无法准确的判断其与抗剪强度之间的关系。以 $20^{\circ}\text{C}$ 的试验数据为基础，分析抗剪强度与

粘结强度之间的相关性，见图 4.20。采用一元线性回归分析得到抗剪强度与粘结强度之间的关系为： $\tau_{\text{抗剪}} = 1.4665 \tau_{\text{粘结}} - 0.2335$ ；相关系数  $R^2$  为 0.9588。得到了抗剪强度与粘结强度的关系，有两个用途：一方面是对今后开展的相关试验的试验结果的可靠性进行评价；另一方面是在工程实践当中，由于条件受到限制，在只能得到粘结强度或是抗剪强度的情况下，可以通过相关性公式，计算得到未知的强度。

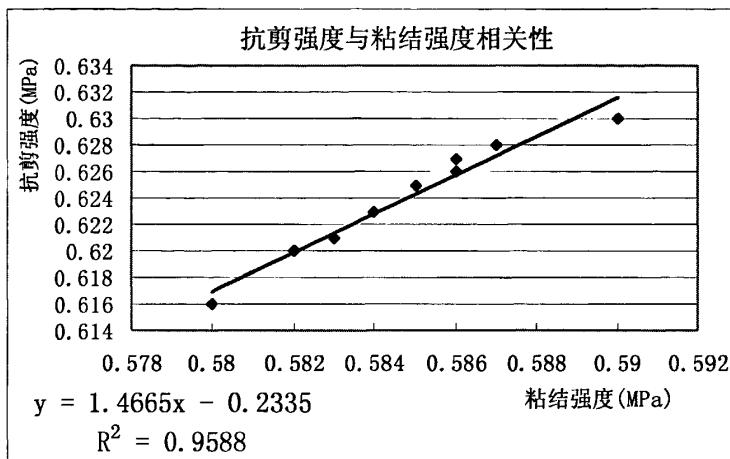


图 4.20 抗剪强度与粘结强度的相关性图  
Fig. 4.20 The relevance of Shear strength and bond strength map

## 4.10 本章小结

本章通过对防水粘结层的室内试验研究，得到以下结论：

1, 不同的水泥混凝土板界面处理方式是影响界面层强度的主要内在因素。试验对比分析了光面、人工界面、喷砂界面和精铣刨界面对界面强度的影响。其中仅从抗剪强度来看，精铣刨界面最好，其次是喷砂界面和人工界面，最差的是光面；仅从粘结强度来看，喷砂界面为最好，其次是铣刨界面，最差是人工界面和光面，其中人工界面较光面稍好。此外，考虑到防水粘结层材料特性要求，精铣刨界面及人工处理界面由于界面形态特征，不适合用在防水粘结层材料为 AWP-2000F+纤维及其他卷材类材料。综合界面层抗剪强度和粘结强度，以及考虑到防水粘结层材料的普遍适用性要求。笔者提出：对于高等级公路、特大跨径桥梁以及对界面层强度要求较高的刚柔复合式路面，界面处理方式应优先考虑采用喷砂界面。喷砂界面施工要求见本论文第五章相关章节。若存在局部路段对界面层抗剪强度要很高，应首先考虑采用精铣刨界面。人工界面和光面不能用在以上

工程，光面及人工界面只能用于低等级公路的加铺改造工程。在施工条件确实受到限制，且对路段进行力学分析之后，认为界面层强度允许，也可以采用光面或人工界面，但是，必须做好施工质量的控制。

2, 防水粘结层材料是影响刚柔性路面界面层强度的另一个重要的内在因素。本论文初步对橡胶沥青、热涂 SBS、SBR 改性沥青、环氧沥青、AWP-2000F (+纤维) 型涂料、溶剂型涂料等七种防水粘结层材料进行了试验。试验结果表明：橡胶沥青的抗剪强度和粘结强度都是最好的，其次是 AWP-2000F+纤维涂料、热涂 SBS 改性沥青和 SBR 改性沥青（二者差别不大）、溶剂型涂料强度最差。环氧沥青由于试验条件，数据离散程度很大，但从部分试验结果来看，其性能是比较好的，仅次于橡胶沥青。但是，其高温稳定性是所有材料中最好的，也就是说其界面强度在高温时下降最少。从材料的低温性能、抗老化性能以及施工方便性等方面考虑，AWP-2000F+纤维是最好的。不仅其强度较高，满足要求，且由于纤维的增强作用，界面层的耐久性、低温抗开裂能力、抗施工硌破能力等都是最好的。在特大跨径桥梁中应该优先考虑采用 AWP-2000F+纤维型防水粘结层材料。在水泥路面加铺沥青层工程中，界面层应优先考虑采用橡胶沥青作为应力吸收层，防止反射裂缝，起到抗剪、粘结、防水作用。在温度变化大，尤其是高温较高的地区，此时，对防水粘结材料的温度稳定性要求很高，应该优先考虑采用环氧沥青。环氧沥青的固化效果决定了其强度大小和其他性能好坏，因此，施工过程中必须严格控制环氧沥青防水粘结层的施工质量。SBS 和 SBR 改性沥青界面层强度基本上也是满足相关要求的，且其施工方便，施工质量容易控制，而造价较 AWP-2000F+纤维和环氧沥青低很多，因此，在一些工程上还是有很大的应用前景。溶剂型防水涂料界面层强度很低，因此不能用在对界面层强度要求较高的路段或是桥面铺装结构上，只能用于不考虑强度的一般性防水涂层中。

3, 本论文首次通过室内试验，研究了精铣刨界面的铣刨深度对界面强度的影响。将铣刨深度进行了量化的研究，得到了精铣刨界面最佳的铣刨深度为 6mm 左右，控制在 5~7mm 为宜。并且结合工程实际情况，提出在实际施工过程中，铣刨深度范围应控制在 4~8mm。

4, 本论文针对不同的水泥混凝土板界面，通过采用热涂 SBS 改性沥青进行试验研究，得到了不同界面状态下的最佳沥青用量，以供实际施工参考。对于喷砂界面，最佳沥青用量为 1.0kg/m<sup>2</sup>，控制范围为：0.9~1.1kg/m<sup>2</sup> 是合适的；对于精铣刨界面（铣刨深度 6mm）而言，最佳沥青用量为 1.1kg/m<sup>2</sup>，控制沥青用量制在 1.0~1.2kg/m<sup>2</sup> 是合适的；对于光面和人工处理界面，控制沥青用量在 0.8~1.0kg/m<sup>2</sup> 范围内。最佳沥青用量随界面的粗糙程度不同略有不同，总的变化规律是界面越粗糙，用量略有增大。另外，考虑到实际工程的施工，路面板对沥青的吸收作用，

沥青的挥发以及不可避免的浪费等因素，建议实际施工时，最佳沥青用量在以上标准基础上增加 0.3~0.5kg/m<sup>2</sup>。

5, 本论文首次对不同剪切试验进行了相关性研究。通过对比试验，研究了无竖向压力的直剪试验、30°斜剪试验、45°斜剪试验三者之间的相关关系。得到了三者之间的相关性及换算方程，如： $\tau_{45} = \tau_{30} \times 0.6806 + 0.1491$ ，相关系数  $R^2=0.9499$ ； $\tau_{45} = \tau_{zj} \times 0.9739 + 0.113$ ；相关系数  $R^2=0.9724$ 。使得不同抗剪试验得到的试验结果有了可比性的基础。此外，还选择了 AWP-2000F 型涂料，以喷砂界面为例研究了界面层抗剪强度与粘结强度之间的关系。得到了抗剪强度与粘结强度之间的相关性公式： $\tau_{\text{抗剪}} = 1.4665 \tau_{\text{粘结}} - 0.2335$ ；相关系数  $R^2$  为 0.9588。从而使得抗剪强度与粘结强度之间的相互换算成为可能，并有了科学的依据。但由于时间和精力所限，本论文未能对各种情况下的抗剪强度与粘结强度的相关性进行研究，在今后的工作当中可以逐步完善和补充。

## 第五章 刚柔性路面结构设计理论与方法研究

目前针对旧水泥混凝土路面加铺沥青层和水泥混凝土桥沥青混合料铺装没有统一的结构设计方法。结合目前实际情况，可考虑采用理论方法结合试验路研究提出符合我国国情的刚柔性复合路面的结构设计方法。目前国内外对以控制荷载型和温度型反射裂缝为标准的加铺层设计方法研究较少，国内对于桥面铺装结构的研究更是一片空白。因此，本文对旧水泥混凝土路面加铺沥青层及水泥混凝土桥沥青混合料铺装结构设计方法进行探讨，对完善加铺层设计的理论与方法，具有重要意义。

### 5.1 旧水泥路面加铺沥青层结构的设计方法

#### 5.1.1 设计参数

进行加铺层结构设计前需对交通状况、气候、旧混凝土路面结构、沥青加铺层结构和材料等设计参数进行调查和试验测定，具体内容有：

- (1) 交通量、交通组成、气候和自然区划等资料调查。
- (2) 旧水泥混凝土路面几何尺寸调查及混凝土板强度测试；旧水泥混凝土路面基层顶面当量回弹模量测试；旧混凝土路面接缝传荷能力调查评定；脱空板调查等。
- (3) 沥青混合料抗剪强度和抗拉强度的试验测定。
- (4) 各种路面材料的导热系数、导温系数及温度收缩系数等参数的试验测定。

#### 5.1.2 设计标准

在进行旧水泥混凝土路面上直接加铺沥青面层设计时，主要考虑满足两方面的指标要求，一是旧水泥混凝土路面结构经过加铺后达到强度要求；二是沥青加铺层能够满足防止荷载型及温度型反射裂缝的要求。因此，在设计时需要进行以下两项内容的计算：

##### (1) 旧水泥混凝土路面结构计算：

对沥青加铺层厚度的确定是以控制水泥混凝土路面的荷载应力及温度应力的综合疲劳作用不超过水泥混凝土弯拉强度为标准，临界荷位为水泥混凝土路面板的纵向边缘中部。

##### (2) 沥青加铺层结构计算：

计算点位为旧水泥混凝土路面接缝处沥青加铺层底部。

①满足防止加铺层荷载型反射裂缝要求

为防止沥青加铺层产生荷载型反射裂缝，沥青加铺层在荷载作用下产生的最大剪应力  $\tau_m$  应不大于沥青混合料的容许剪应力  $\tau_R$ 。容许剪应力  $\tau_R$  可按下式计算：

$$\tau_R = \frac{\tau}{K} \times K_f \quad (5-1)$$

其中：  $\tau_R$ ——沥青混合料的容许剪应力 (MPa)；

$\tau$ ——沥青混合料的抗剪强度 (MPa)；

$$\tau = \sigma_0 \operatorname{tg} \phi + C \quad (5-2)$$

$C, \phi$ ——沥青混合料的粘聚力 (MPa) 及内摩擦角 ( $^\circ$ )；

$\sigma_0$ ——计算点的有效法向应力 (MPa)；

$K$ ——路面抗剪时的结构强度系数，与两个因素有关，轴载重复作用次数  $N_e$  与道路等级系数  $A$ ，有如下关系：

$$K = \frac{0.35}{A} \times N_e^a \quad (5-3)$$

$a$ ——通过试验确定的系数；

$K_f$ ——考虑接缝传荷能力的剪应力折减系数。

## ②满足防止加铺层温度型反射裂缝的要求

由于沥青混合料是一种热粘弹性材料，在沥青路面温度应力发生、发展的全过程都伴随着应力松弛现象，沥青加铺层温度应力的线弹性分析结果要大于实际路面内的温度应力。因此，在温度应力计算时，应考虑沥青混合料松弛效应的影响。

为防止沥青加铺层产生温度型反射裂缝，考虑松弛效应后沥青加铺层的最大主应力  $\sigma_1$  应不大于沥青混合料的容许拉应力  $\sigma_R$ ，容许拉应力  $\sigma_R$  按下式计算：

$$\sigma_R = \frac{\sigma_{SP}}{K_{ST}} \quad (5-4)$$

式中：  $\sigma_R$ ——沥青混合料的容许拉应力 (MPa)；

$\sigma_{SP}$ ——沥青混合料的劈裂强度 (MPa)，由试验确定；

$K_{ST}$ ——与温度疲劳、级配类型相关的沥青混合料抗拉结构系数。

### 5.1.3 结构计算方法

#### (1) 旧水泥混凝土路面结构计算方法

##### ①荷载应力计算方法

先计算标准轴载在有沥青加铺层的水泥混凝土路面板临界荷位的荷载应力  $\sigma_{ps}$ ，然后计算考虑设计基准期内荷载应力累计疲劳作用、接缝传荷能力的应力折减作用以及偏载和动载等因素影响的荷载疲劳应力  $\sigma_{pr}$ 。

##### ②温度应力计算方法

先计算最大温度梯度时有沥青加铺层的水泥混凝土路面板临界荷位处温度翘

曲应力  $\sigma_{tm}$ , 然后计算考虑温度应力累计疲劳作用的温度疲劳应力  $\sigma_{tr}$ 。

当板底荷载疲劳应力和温度疲劳应力之和乘以与道路等级相应的可靠度系数  $\lambda_r$ , 不大于混凝土板实际弯拉强度, 初估沥青加铺层厚度可作为设计厚度。否则改变初估厚度重新计算。直到满足以上要求为止。旧水泥混凝土路面结构计算流程图如图 5.1 所示。

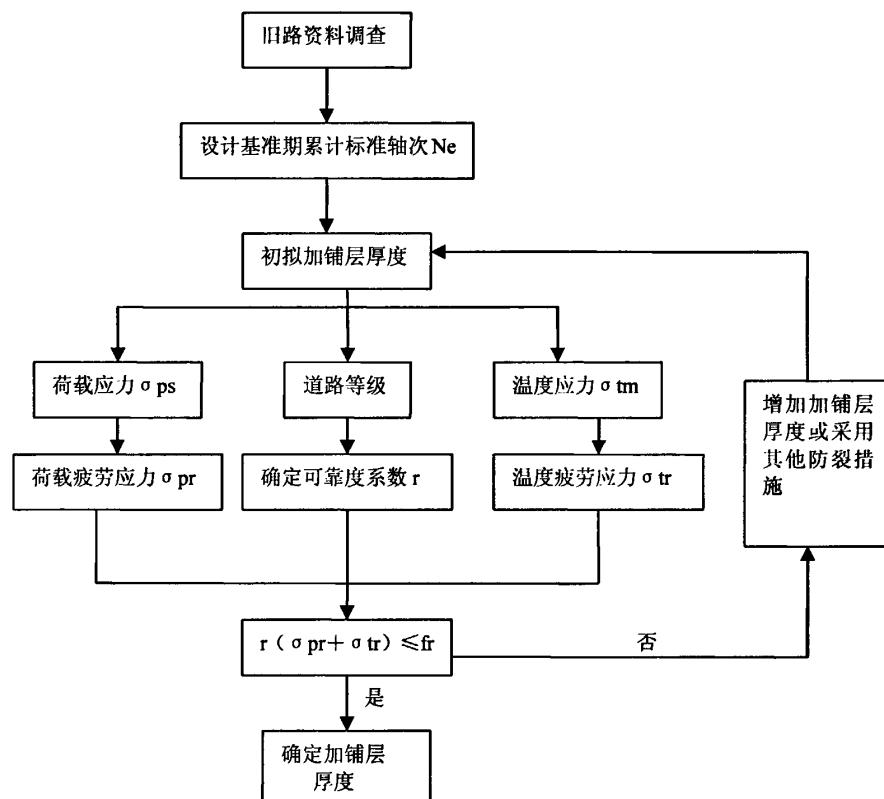


图 5.1 有沥青加铺层的旧水泥混凝土路面结构计算流程图

Fig. 5.1 There are asphalt overlay of the old cement concrete pavement structure calculation flowchart

## (2) 沥青加铺层结构计算方法

### ①以控制荷载型反射裂缝为标准的沥青加铺层计算

旧水泥混凝土路面接缝处沥青加铺层底部最大剪应力  $\tau_m$ , 通过有限元方法计算确定。沥青混合料的抗剪强度由试验确定, 计算考虑抗剪强度系数  $K$  和剪应力折减系数  $K_r$ , 的沥青混合料容许剪应力  $\tau_R$ , 若  $\tau_m$  不大于  $\tau_R$  时, 初估沥青加铺层厚度满足要求, 否则改变初估厚度重新计算。

### ②以控制温度型反射裂缝为标准的沥青加铺层计算

先采用有限元方法按最不利条件（低温、最大温度梯度）计算沥青加铺层的最大主应力  $\sigma_1$ ，然后计算考虑沥青混合料松弛效应的最大主应力  $\sigma_1'$ 。沥青混合料的劈裂强度  $\sigma_{sp}$  通过试验确定，计算考虑沥青混合料抗拉结构系数  $K_{ST}$  的容许拉应力  $\sigma_R$ ，若  $\sigma_1'$  不大于  $\tau_R$  时，初估沥青加铺层厚度满足要求，否则改变初估厚度重新计算。沥青加铺层结构计算流程图如图 5.2 所示。

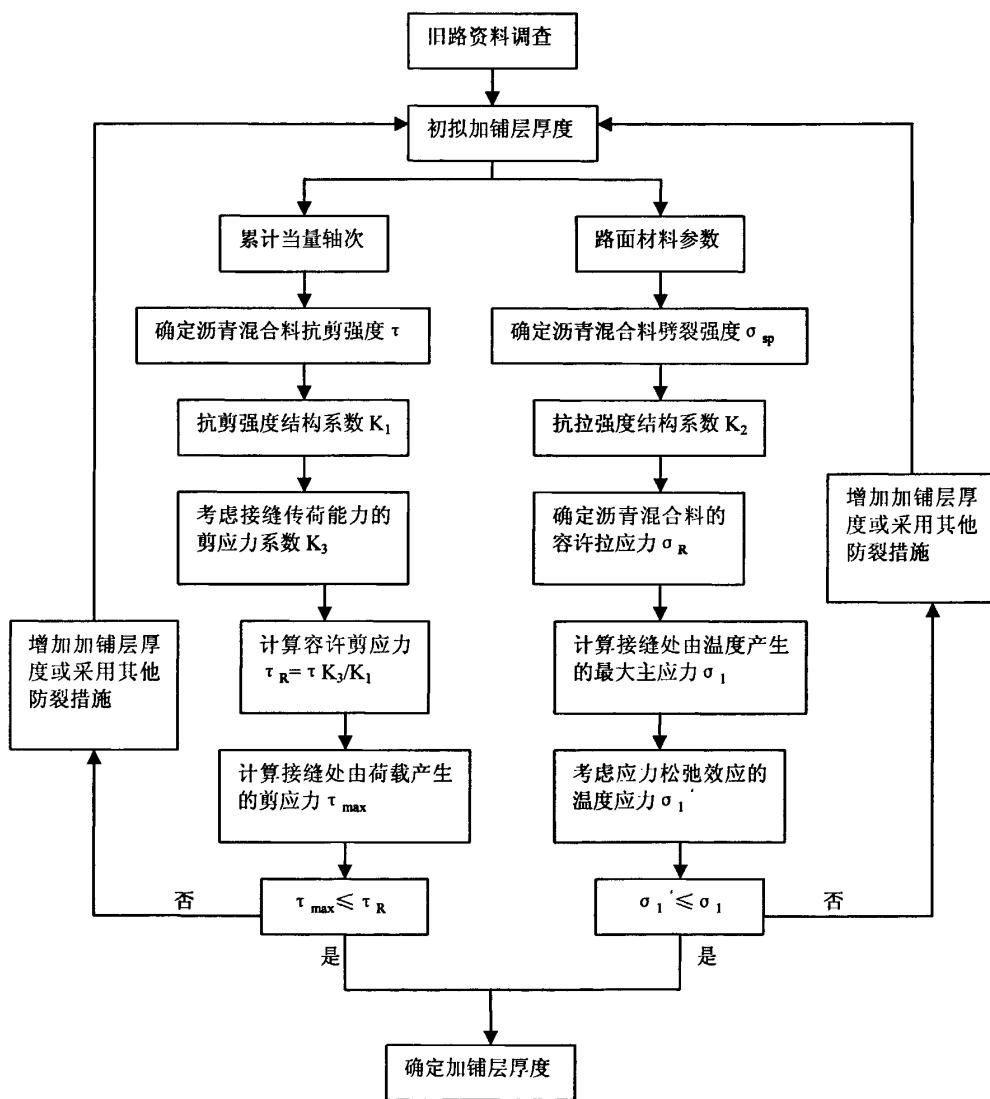


图 5.2 以控制荷载型及温度型反射裂缝为标准的沥青加铺层结构计算流程图

Fig. 5.2 To control the temperature and load type-reflective crack to a standard asphalt overlay structure calculation flowchart

## 5.2 水泥混凝土桥沥青混合料桥面铺装结构设计方法

目前，国内尚未见有关于桥面铺装结构的设计理论与方法。以前通常认为桥面铺装只是充当桥梁主体结构的防护层，起到保护桥面梁板和改善行车舒适性作用，不参与桥面结构的受力，因此，对于桥面铺装层结构的设计也为人们所忽略。桥面铺装结构的设计主要包括沥青铺装层厚度的确定和防水粘结层的设计两个方面。本文也是主要从以上两个方面探讨桥面铺装结构的设计。

### 5.2.1 设计参数

进行桥面结构设计前需对交通状况、气候、混凝土桥梁结构、防水粘结层材料、桥面铺装层结构和材料等设计参数进行调查和试验测定，具体内容有：

- (1) 交通量、交通组成、气候和自然区划等资料调查。确定桥面防水等级，进而确定防水粘结层材料及厚度等。
- (2) 运用有限元软件计算分析桥面铺装层结构的受力；重点计算铺装层沥青混合料的层底拉应力、防水粘结层受到的剪应力等。
- (3) 沥青混合料抗剪强度和抗拉强度的试验测定。桥面防水粘结层材料的抗剪强度及粘结强度的测定。
- (4) 各种路面材料的导热系数、导温系数及温度收缩系数等参数的试验测定。

### 5.2.2 设计标准

在进行水泥混凝土桥沥青混合料铺装结构设计时，主要考虑满足两方面的指标要求，一是控制沥青铺装层结构在设计寿命内不发生开裂破坏；二是沥青铺装层能够与桥面板牢固粘结，不发生推移、拥包、剥离等剪切和粘结破坏。因此，在进行桥面铺装设计时需要进行以下两项内容的计算：

- (1) 沥青铺装层内的受力计算（层底拉应力计算）

计算点位根据不同桥型而定，梁式桥可选为支座附近沥青铺装层底部。

为防止沥青铺装层由于荷载及温度等其他因素作用而产生开裂破坏，考虑沥青混合料一定的松弛效应后沥青铺装层内的最大主应力  $\sigma_1$  应不大于沥青混合料的容许拉应力  $\sigma_R$ ，容许拉应力  $\sigma_R$  按下式计算：

$$\sigma_R = \frac{\sigma_{SP}}{K_{ST}} \quad (5-5)$$

式中：  $\sigma_R$ ——沥青混合料的容许拉应力 (MPa)；

$\sigma_{SP}$ ——沥青混合料的劈裂强度 (MPa)，由试验确定；

$K_{ST}$ ——与温度疲劳、级配类型相关的沥青混合料抗拉结构系数；

$\sigma_1$  根据拟定的沥青铺装层厚度和防水粘结层形式，通过有限元分析计算得到；

## (2) 防水粘结层的受力计算(层间剪应力计算)

计算点位应根据不同桥型和不同防水粘结层材料而定, 梁式桥可选为支座附近。当防水粘结层材料为卷材类, 计算点应选在防水粘结层与桥面板之间; 当防水粘结层材料为涂膜类时, 计算点应选在防水粘结层与沥青铺装层之间<sup>[18]</sup>。

为防止防水粘结层由于荷载等其他因素作用而产生剥离等剪切破坏, 必须使桥面防水粘结层具备足够的抗剪强度和粘结强度。考虑在沥青混合料铺装层一定厚度情况下, 防水粘结层与桥面板及沥青铺装层间的最大可能出现的剪应力  $\tau_m$  应不大于防水粘结层的容许剪应力  $\tau_R$ 。即  $\tau_m \leq \lambda \tau_R$ ,  $\lambda$  为一定的安全系数。最大可能出现的剪应力  $\tau_m$  可以根据拟定的桥面铺装结构通过有限元软件分析计算得到。由于防水粘结层材料多种多样, 桥面板处理方式也各有不同, 因而容许拉应力  $\tau_R$  目前还很难用一个公式确定下来。比较可行的做法是通过室内试验确定, 而室内试验一般是一次性破坏强度, 这与桥面铺装结构实际出现的疲劳破坏还是有一定差别的。因此, 对于容许剪应力  $\tau_R$  的确定还需要进一步的深入研究。

### 5.2.3 桥面铺装设计步骤

第一步: 根据桥梁结构形式及其重要程度, 大致确定铺装层沥青混合料材料类型及相关技术要求, 如: 选用各种沥青、集料的要求、级配的设计等。根据桥梁结构形式及其重要程度, 结合工程所在地的气候类型、降水特点, 确定桥梁防水等级。进而根据防水等级大致确定选用何种防水粘结层材料及相关技术要求。

第二步: 加铺层沥青混合料材料组成设计以及防水粘结层材料的选定。根据工程实际情况, 确定采用何种沥青混合料做铺装层之后, 就是针对沥青混合料进行配合比设计, 并且对设计出来的沥青混合料相关技术性能进行试验测试。确定桥面板的处理方式, 并对防水粘结层的抗剪强度和粘结强度进行试验测试, 对防水粘结层材料的密水性能进行测试。

第三步: 对桥面铺装进行力学分析。重点分析和计算桥面铺装层内的剪应力大小、铺装层层底拉应力大小、防水粘结层的剪应力大小和拉应力大小。计算时应该根据桥梁实际的受力状况进行模拟, 如: 坡桥、弯桥等, 此外不同结构形式的桥梁受力也有所差别。在进行铺装层受力计算时, 一定要做到与实际桥梁结构的受力尽可能相近。

第四步: 确定沥青混合料铺装层厚度。根据第三步桥面铺装受力计算的结果以及第二步设计的沥青混合料类型, 依据试验结果(抗剪强度、粘结强度、耐久性等)综合确定沥青混合料铺装层的厚度。厚度的确定应该根据 5.2.2 中提到的相关设计标准来进行控制和设计。桥面铺装层厚度对桥梁结构的受力及铺装层本身的受力影响非常大, 确定铺装层厚度还应该根据桥面铺装的使用性能综合确定, 如: 车辙、行驶舒适性(平整度要求)等指标。

第五步：力学验算。对所设计出来的桥面铺装结构进行受力验算，看各项力学指标是否满足设计要求。此外，对所设计出来的桥面铺装结构还应该进行各项使用性能的综合评价，可以采取专家评审的方式进行。

### 5.2.4 桥面铺装典型结构

结合理论分析与室内试验研究，并考虑我国目前的实际情况，推荐桥面铺装沥青层厚度范围为 5~12cm，特殊情况可适当增加。同时认为下列几种沥青混凝土桥面铺装结构是可靠的、实用的，从长远上讲也是经济的[45]。

- 1，单层式：5cm 中粒式沥青混凝土+保护层+防水粘结层+防水混凝土；
- 2，双层式：上面层 3cm（或 4cm）细粒式或中粒式沥青混凝土+下面层 4cm（5cm, 6cm, 7cm）中粒式沥青混凝土+保护层+防水粘结层+防水混凝土；
- 3，三层式：上面层 3cm（或 4cm）细粒式或中粒式沥青混凝土+中间层 4cm（5cm）中粒式沥青混凝土+下面层 5cm（6cm, 7cm）粗粒式沥青碎石+保护层+防水粘结层+防水混凝土。

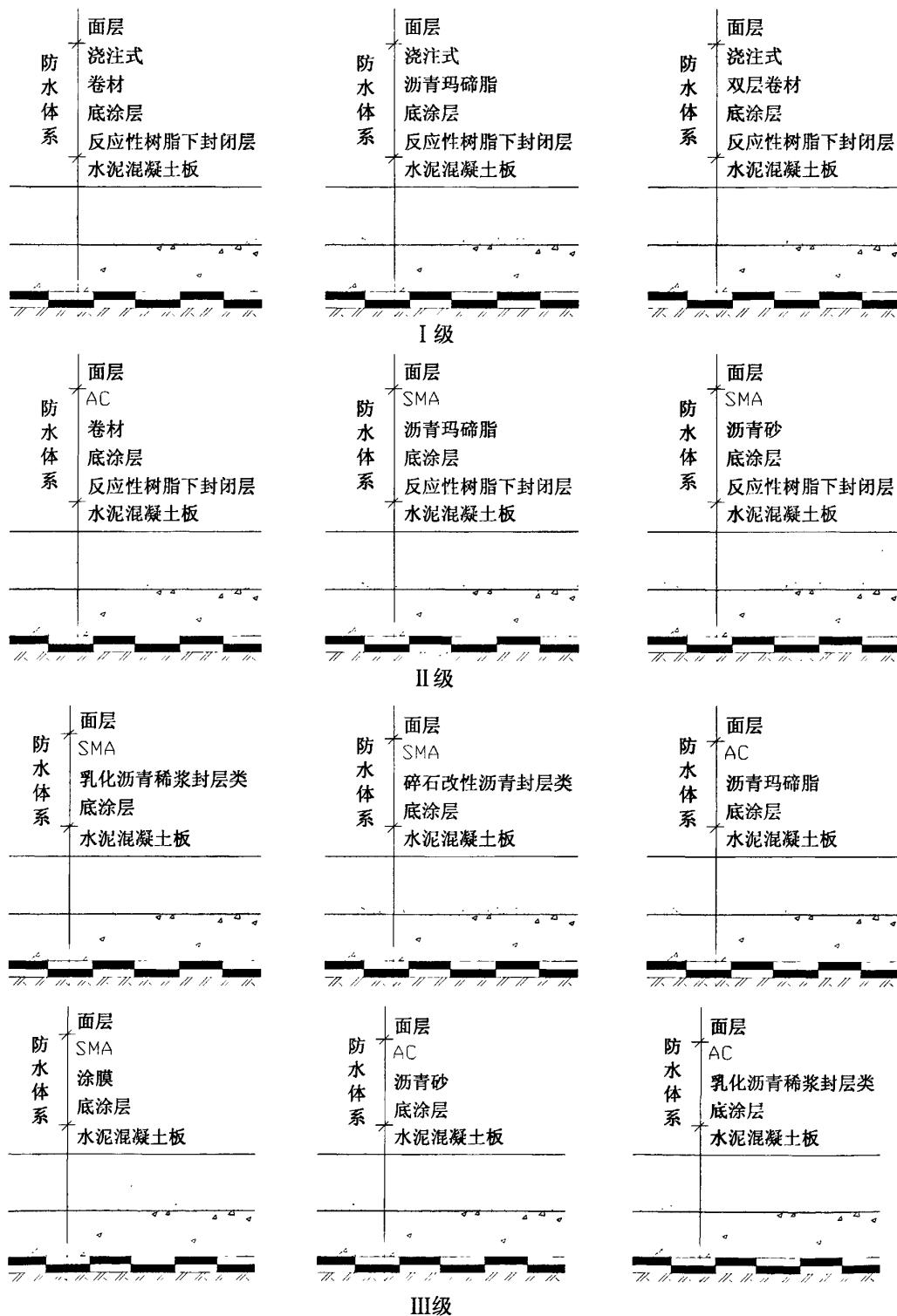
这里的上面层可采用 SMA 混合料，防水粘结层包括粘层、防水卷材或防水涂膜，总厚度应在 2~5mm 之间，保护层可根据具体情况选用，如果防水粘结层的抗破损性能较强，在沥青混凝土面层施工后仍能达到防水目的，也可不设置保护层。

2002 年由重庆交通科研设计院承担的交通部西部交通建设科技项目“桥面铺装材料与技术研究”中根据我国桥面铺装的具体情况从桥面铺装病害调查，到受力分析，室内试验，实体工程进行了较为系统的研究取得了不少有应用价值的研究成果[46]，在这些成果中具有重大意义的是：根据桥梁的设计安全等级和桥梁所处的气候环境条件，将桥梁对桥面的防水等级要求分为 I、II、III、IV 四个等级，见表 5.1。其中 I 级为最高防水等级，II、III、IV 级的防水等级依次降低。然后根据桥梁的防水等级要求对桥面铺装的典型结构进行相应的选择，并且提出了桥面铺装的典型结构图，如图 5.3 所示。

表 5.1 不同气候环境条件下桥梁的防水分级

Tab. 5.1 Under different climatic conditions bridges waterproof classification

防水等级	环境	气候	桥梁类别
I 级	CO <sub>2</sub> 的雨水+除冰盐或工业酸雾	冰冻区	特大桥、重要桥梁
II 级	CO <sub>2</sub> 的雨水+除冰盐或工业酸雾	冰冻区	大桥、中桥、重要小桥
	CO <sub>2</sub> 的雨水	非冰冻区	特大桥、重要桥梁
III 级	CO <sub>2</sub> 的雨水+除冰盐或工业酸雾	冰冻区	小桥、涵洞
	CO <sub>2</sub> 的雨水	非冰冻区	大桥、中桥、重要小桥
IV	CO <sub>2</sub> 的雨水	非冰冻区	小桥、涵洞



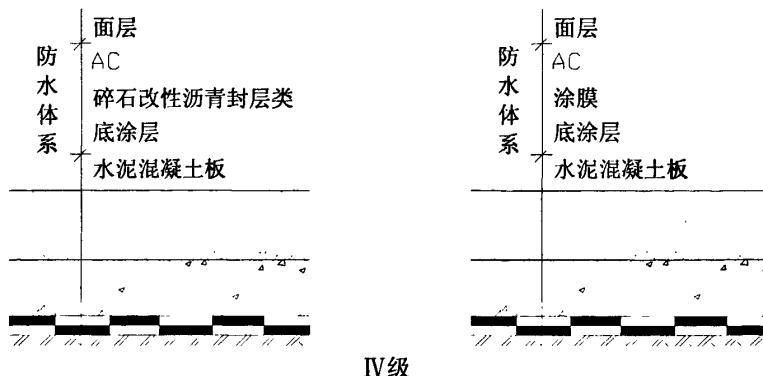


图 5.3 桥面铺装典型结构图  
Fig. 5.3 The typical structure of the bridge deck pavement

### 5.3 桥面铺装防水粘结层的施工与检测

施工质量的好坏严重影响桥面铺装的质量。从实践来看，很多的工程质量问题都与施工质量达不到要求有很大关系。因此，要做好桥面铺装，除做好桥面铺装结构的设计和材料的选择之外，必须要控制好施工质量，积极鼓励采用先进的施工工艺和技术。桥面铺装结构的施工主要包括桥面防水粘结层的施工和桥面沥青混合料铺装层的施工，本文只针对防水粘结层的施工做简单的介绍。

#### 5.3.1 防水粘结层材料的选择及其施工技术

##### (1) 防水粘结层材料的选择

防水粘结层的作用是防止由面层渗入的水进入桥面而破坏桥面板和腐蚀主梁钢筋，保证和延长桥梁的使用寿命。同时，防水粘结层作为桥面铺装的一个结构层，又必须满足层间抗剪强度和粘结强度的要求。所以，作为桥面铺装防水粘结层材料必须满足以下七个方面的要求：良好的不透水性能；与混凝土桥面和沥青面层有足够的粘结力；面层碾压后的无破损性；不低于面层设计寿命的耐久性；良好的耐高温和低温性能；对桥面准备状况有良好的适应性；抵御桥面裂缝的良好延伸性能。

然而目前各厂家提供的防水粘结材料性能测试结果，主要是针对建筑物防水而言的，因而不能切实反映路用性能要求。防水粘结层性能指标测试应能模拟防水粘结层在桥面铺装施工和使用的实际情况。因此，选择防水粘结层材料时应至少进行不透水性、层间抗剪强度、碾压无破损性、疲劳性能、耐高温和低温性能、延伸率等性能测试。目前国内能满足桥面铺装要求的防水材料主要有各种聚合物改性沥青基防水涂料和各种卷材（如：APP）。

## (2) 防水粘结层的施工

防水粘结层种类的不同，相应的施工工艺也不相同。这里就以 SBS 改性乳化沥青（涂膜类）和 AWP-2000F 纤维增强型防水涂料为例说明桥面铺装结构的施工过程。

### (1) SBS 改性乳化沥青防水粘结层施工工艺

#### ① 施工准备

桥面应平整、粗糙、干燥、整洁，不得有尘土、杂物或油污，桥面有规定的横坡，当不符合上述要求时应及时加以处理，对尖锐突出物及凹坑应予打磨或修补。桥面横坡要求：桥面横坡过于平缓则容易积水，面层渗入水难以排出，成为渗漏的原因之一。桥面防水是一个完整的概念，它必须与排水相结合，只有在无积水的情况下，桥面防水粘结层才可具有可靠性和耐久性。一般桥面横坡不应小于 2%。桥面平整度要求：桥面平整是保证防水质量的主要条件，桥面平整应包括两方面内容：一是要求桥面做得平坦，不允许出现高低不平或局部有隆起现象，用三米直尺检查不允许有大于 3mm 的间隙。二是应根据排水坡度做好泄水口等构造物的找坡，使之符合设计要求。因为泄水口周围的桥面状态，都会原样地反映到防水粘结层表面，如果处理不好，就会造成局部积水并影响排水。如果桥面凹凸不平或出现局部隆起，在做涂膜防水粘结层时会出现涂层深浅不均，涂膜厚处会起皱纹，涂膜薄处则防水性能与耐久性无法保证，且在行车作用下最易引起破坏。桥面强度要求：桥面强度指桥面混凝土具有一定的强度，且不得有起砂、脱皮、空鼓或积有灰浆、泥土等现象。涂膜防水主要是靠涂料渗入到桥面内部，并在表面形成足够厚度的涂膜，这就要求防水粘结层与桥面有充足的粘结力，它是检验防水粘结层成败的关键，也是保证防水粘结层在行车过程中不被剪切破坏的关键。而桥面强度不足，表面疏松和不清洁等，都容易使涂料与桥面粘结不牢。干燥程度要求：如前所述，涂膜防水粘结层与桥面的结合十分重要，如果桥面不充分干燥，涂料渗不进去，施工后的水气在压力下就会使防水粘结层与基层剥离、起鼓、产生气泡。根据经验，如将桥面含水率控制在 8% 以下，对防水涂膜基本上是安全的。含水率的测定可用高频水分测定仪测定。在工地上如无测试含水率的手段，可在桥面放一块防水卷材，3~5 小时后如卷材下面无水珠（潮湿），即认为基本干燥。细部构造要求：桥面与桥梁护栏结合处应做成三角形或弧形，这是因为在涂膜施工中，在阴阳角邻近有可能形成空隙。

#### ② 施工对气候要求

施工时的天气要求：防水涂料在形成涂膜以前如果遇到雨、雪，薄膜表面就会形成麻面或空隙，因此在初期结膜前（一般指实干时间，并以不少于一天为宜），如预计会遇到雨、雪时就不宜施工。尤应指出，防水涂料在成膜过程中如遇到雨、

雪，不仅会造成麻面和空隙，而且还有被水溶解或被雨水冲掉的可能，这对水乳型防水涂料危害性更大。因此在夏天施工时，必须考虑阵雨的影响，并采取相应的遮盖措施，如：铺塑料布等。如涂膜因雨水冲刷产生麻面或大片脱落，必须重新涂刷进行补救。施工时的温度要求：一般情况下，温度高，涂抹容易，干燥时间短，一次成膜较薄；温度低，涂刷困难，干燥时间长，一次成膜较厚。实践证明：防水涂料在5℃以下时溶剂挥发得很慢，成膜时间拖得很长。水乳型防水涂料在10℃以下，水分就不易蒸发干燥。特别是有些厚质涂料或材料一次涂得过厚，在低温时仅在表面形成一层皮膜，当气温降到0℃左右时，涂层就有冻坏的危险，对此必须注意。当然，如气温过高（超过300℃），涂料本身容易变稠，时间一长，粘度增大，防水涂膜就变厚。在这种情况下操作，也很难获得质量均匀的防水粘结层。综上所述，涂膜防水施工的最佳温度为10~30℃，以不低于5℃为限；当气温超过30℃时，应避开中午炎热的时间施工。

### ③工艺流程

SBS改性乳化沥青涂膜防水粘结层的施工时应注意以下几个方面的问题：①根据涂层结构的不同，涂膜防水粘结层一般可分为底涂层、中涂层和封面（罩面）层三个层次，每个层次又由若干道工序组成，这些层次都有不同的功能和作用。另外，各涂层之间必须有一定的干燥时间，才能使涂料有充分的结膜条件。每道涂层具体干燥时间，应根据当时的天气和温度、湿度的不同而定。一般实干时间在4~12h之间，贴布这一道工序的干燥时间应适当延长。这里有必要指出，涂刷间隔时间过长，涂层表面容易积存灰尘和其它杂物，影响上下涂层之间粘结：时间过短，则防水涂料尚未干燥，容易粘脚，破坏胶膜的形成，从而影响其防水效果。总之，各道涂层的施工间隔时间应以不粘脚（实干）为准。②整个防水粘结层施工后，应有一个自然养护时间，一般不少于7d。这是因为防水涂料随着时间的增长，其耐水性、粘结、抗裂等性能都有一定程度的提高。③在各层喷涂完成后，应即时洒布石屑或铺1cm左右的沥青石屑作为保护层，保护层的作用是防止防水粘结层在沥青面层摊铺和碾压过程中产生破损。

## （2）AWP-2000F纤维增强型桥面防水涂料施工工艺

同前SBS改性乳化沥青施工一样，对桥面要求一样是平整、粗糙、干燥、洁净，坚固。所不同的是，AWP-2000F纤维增强型桥面防水材料对桥面板的平整性要求很高，因为，如果桥面板平整度差，存在很大的构造深度，则纤维增强层无法与桥面板紧密粘结在一起。难免存在大量的空隙，严重影响了防水粘结层与桥面板之间的粘结强度。由于很多方面同SBS改性乳化沥青防水粘结层施工工艺差别不大，这里直接针对AWP-2000F施工中独有的一些特点进行介绍，相同部分不再赘述。

有关 AWP-2000F 型防水涂料的技术指标见第四章相关内容，其技术特点主要还是集中在施工工艺上面。AWP-2000F 采用的是同步切割纤维法施工，如图 5.4 所示。

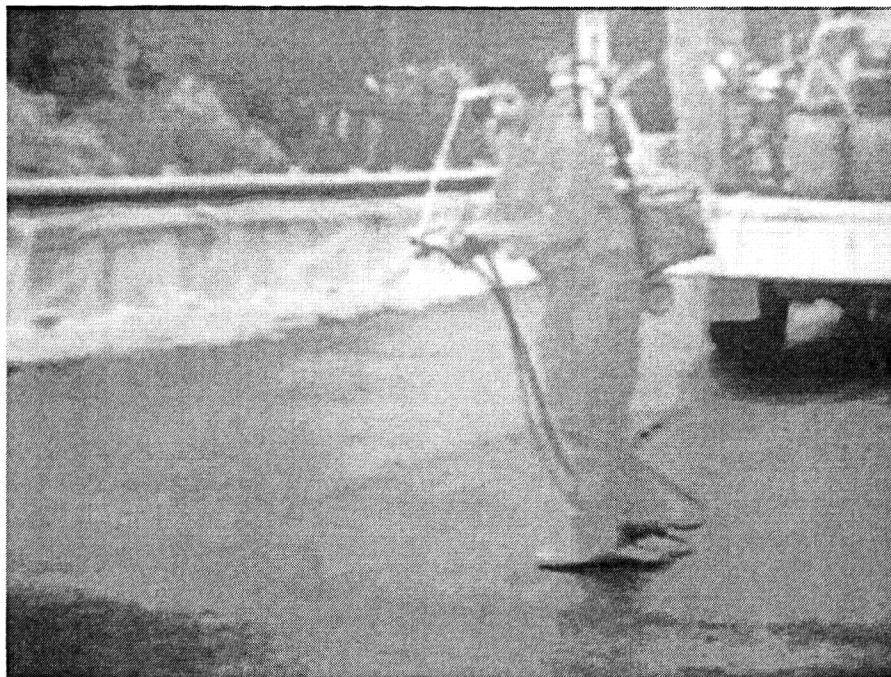


图 5.4 AWP-2000F 纤维增强型桥面防水涂料施工图（同步切割纤维法）

Fig. 5.4 AWP-2000F-fiber-reinforced bridge deck waterproofing coatings construction plans (Synchronization of cutting fiber)

### 5.3.2 防水粘结层施工质量的检测

防水粘结层材料选择时的室内试验和检测，主要是对防水粘结层材料的质量检验，为了防止施工人员违反操作规程现象的发生，还必须对施工后的防水粘结层质量进行检测。检测内容包括以下几个方面：

#### (1) 外观质量检测

主要检查防水粘结层施工后是否有因气泡而产生的鼓起及阴阳角、接头和搭接处的施工是否按要求施工。

#### (2) 涂膜类防水粘结层的厚度检测

桥面防水粘结层施工完成后，由检测人员用沥青针入度仪器量测防水粘结层的厚度，各个测点厚度必须满足技术标准规定，否则不得进行下道工序的施工，检测频率可为每  $1000\text{m}^2$  一处（4 点取平均值），不足  $1000\text{m}^2$  按  $1000\text{m}^2$  检测。

#### (3) 防水粘结层不透水性检测

防水粘结层不透水性能检测采用专门的不透水仪，如图 5.5。在室内进行试验时，按工地实际防水材料用量（涂膜）和工艺要求在室内制作试件并检测。检测

频率为对每座桥按  $2000\text{m}^2$  以下为一组,  $2000\sim4000\text{m}^2$  时为二组, 大于  $10000\text{m}^2$  时为三组, 每组 3 个试件。

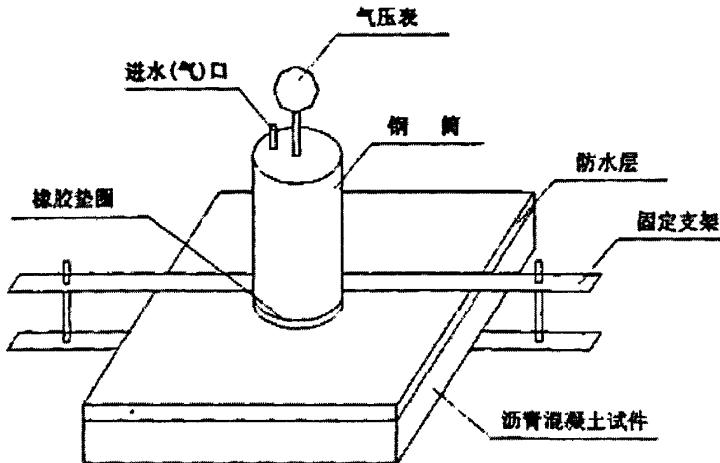


图 5.5 可加压式渗水仪  
Fig. 5.5 Instrument can be pressurized-water seepage

## 5.4 本章小结

本章对刚柔复合式路面结构设计方法进行了初步的探讨, 对水泥混凝土桥沥青层铺装结构中的防水粘结层进行了详细介绍。得到以下几点结论:

- (1) 在旧水泥混凝土路面沥青加铺层力学分析的基础上, 提出了旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构的设计参数和标准, 探讨了旧水泥混凝土路面直接加铺沥青层和水泥混凝土桥沥青混合料铺装结构的设计方法。
- (2) 结合理论分析与实验研究, 提出了桥面铺装的典型结构。对桥面铺装的防水等级及重庆地区桥面铺装的典型结构图进行了介绍。
- (3) 以 SBS 改性沥青和 AWP-2000F 纤维增强型防水涂料为例, 对桥面铺装结构的施工工艺及质量检测等内容进行了介绍。

## 第六章 结论与建议

### 6.1 主要结论

本文通过对刚柔复合式路面结构的分析与研究，重点对界面层材料及其力学性能进行了室内试验研究，运用有限元分析软件对界面层所受到的剪应力进行了计算，主要得到了以下一些结论：

1、刚柔复合式路面由于结构组成和材料上的非线性特点，材料模量差异较大，其受力具有以下特点：沥青面层越厚，模量越大，面层承担的荷载效应越明显。反之，混凝土板将承担主要的荷载作用。刚柔性界面层是抗剪切破坏的薄弱环节，须加强处理。面层沥青混合料的耐久性与界面层性能有很大关系，界面层粘结能力越好，抗剪强度越高，则面层稳定性越好，使用寿命越长。刚柔性路面的整体强度及承载能力主要依靠的是下层水泥混凝土板。

2、刚柔性路面的损坏形式主要有三种。即：面层开裂、永久变形、水损坏。其中开裂破坏是最主要的，刚柔性路面的开裂主要是由于反射裂缝。反射裂缝分剪切型和张开型两种，车辆荷载及温度变化是引起反射裂缝的两大因素。从断裂力学的角度分析，反射裂缝是由于旧水泥混凝土板在接缝处存在的缺陷造成了该部位的应力集中，通过计算该处的应力强度因子  $K$ ，可以判断反射裂缝出现的时间和位置，同时，通过对应力强度因子  $K$  的分析，可以得到影响反射裂缝发生和发展的各个因素。永久变形主要是由于层间结合不牢固，面层沥青层较薄，在车辆水平荷载作用下，发生推移，刚柔性路面由于面层混合料多采用高性能的改性沥青混合料，且厚度不大，车辙问题不是十分突出。水损坏主要是面层沥青混合料的设计不太合理，如：设计空隙率大小，集料和沥青的选择，面层厚度等。此外，界面层的防水性能好坏也影响水损坏的程度。

3、界面层的作用主要是加强层间粘结，提高抗剪强度，具有防水作用。界面层材料具有高粘度、低模量，良好的适应变形能力和不透水性。界面层厚度小，但变化范围较大，从几毫米防水卷材到几厘米的改性沥青砂浆。界面层处理方式多种多样，实际工程中，应该根据工程具体情况，选择合理的界面处治方案。包括：①界面层材料的选择；②界面层结构的设计；③水泥混凝土板的处理方式等。但无论采取怎样的界面处治措施，最终要达到的目的都一样：防水、抗剪、粘结、阻隔反射裂缝。

4、车辆行驶状态对界面层剪应力有很大影响。具体来说，超载对界面层剪应力的影响程度为，当超载达到 100% 时，界面层最大剪应力增大为原来的约 3.2 倍；

车辆制动对界面层的剪应力也有很大影响，特殊路段紧急刹车情况下界面层可能出现的最大剪应力为车辆正常行驶时可能出现的最大剪应力的 11.8 倍。

5、道路本身状况（如路段的纵坡，转弯半径等）对界面层剪应力也有很大影响。路段的纵坡会增加车辆行驶时的水平力作用，车辆在弯道路段行驶时会产生离心力，而离心力对路面也表现为水平力作用。

6、加铺层厚度对界面层剪应力有很大影响，随着加铺层厚度的增加，界面层的剪应力随之下降。当加铺层厚度小于 10cm 时，随着加铺层厚度的增加，界面层最大剪应力显著下降；当加铺层厚度超过 10cm 后，这种变化趋势减缓。因此，在实际工程中，当加铺层厚度不足 10cm 时，可以考虑通过增加沥青层厚度的方式来降低界面层可能出现的最大剪应力。

7、沥青加铺层和界面层材料模量对界面层可能出现的最大剪应力均有一定的影响，均表现为随着材料模量的增大，界面层最大剪应力逐渐减小。但这种影响都不大，实际工程中，可以忽略，不予考虑。

8、界面层厚度对剪应力有一定影响。总的变化趋势是，随着界面层厚度的增加，最大剪应力先增加后减小。当界面层厚度为 2mm 时，界面层最大剪应力最大；当界面层厚度超过 3mm 时，界面层剪应力基本保持不变。但总的来说，界面层厚度对界面层可能出现的最大剪应力影响亦不大。

9、界面层粘结状态对界面层可能出现的最大剪应力有较大影响。界面层完全粘结（连续）时的剪应力约为完全光滑时的 2 倍。界面层结合越紧密越牢靠，可能出现的最大剪应力越大。

10、通过简化的力学分析法对界面层剪应力进行了计算。计算结果表明，在标准轴载下，界面层可能出现的最大剪应力为 0.778MPa，最小为 0.122MPa。简化计算结果还表明，车辆轴载越大，行驶速度越快，制动距离越短，界面层可能出现的剪应力也越大。

11、根据道路所在地区的气候条件、交通条件、工程重要程度等来对工程进行分类，根据不同的类别制定相应的界面层抗剪强度标准。提出，对于一类工程，界面抗剪强度标准定为  $\geq 0.5\text{ MPa}$ ；对于二类工程，界面抗剪强度定为  $\geq 0.4\text{ MPa}$ ；对于三类工程，界面抗剪强度定为  $\geq 0.3\text{ MPa}$ 。这一点与现行部颁规范中统一规定的  $\geq 0.4\text{ MPa}$  有一定的区别。

12、不同的水泥混凝土板界面处理方式是影响界面层强度的主要内在因素。通过室内试验对比分析了光面、人工界面、喷砂界面和精铣刨界面对界面强度的影响。其中仅从抗剪强度来看，精铣刨界面最好，其次是喷砂界面和人工界面，最差的是光面；仅从粘结强度来看，喷砂界面为最好，其次是铣刨界面，最差是人工界面和光面，其中人工界面较光面稍好。此外，考虑到防水粘结层材料特性

要求，精铣刨界面及人工处理界面由于界面形态特征，不适合用在防水粘结层材料为 AWP-2000F+纤维及其他卷材类材料。综合界面层抗剪强度和粘结强度，以及考虑到防水粘结层材料的普遍适用性要求。笔者提出：对于高等级公路、特大跨径桥梁以及对界面层强度要求较高的刚柔复合型路面，界面处理方式应优先考虑采用喷砂界面。若存在局部路段对界面层抗剪强度要很高，应首先考虑采用精铣刨界面。人工界面和光面不能用在以上工程。光面及人工界面只能用于低等级公路的柔性改造工程。在施工条件确实受到限制，且对路段进行力学分析之后，认为界面层强度允许，也可以采用光面或人工界面，但是，必须做好施工质量的控制。

13、防水粘结层材料是影响刚柔性路面界面层强度的另一个重要的内在因素。本论文初步对橡胶沥青、热涂 SBS、SBR 改性沥青、环氧沥青、AWP-2000F (+纤维) 型涂料、溶剂型涂料等七种防水粘结层材料进行了试验。试验结果表明：橡胶沥青的抗剪强度和粘结强度都是最好的，其次是 AWP-2000F+纤维涂料、热涂 SBS 改性沥青和 SBR 改性沥青（二者差别不大）、溶剂型涂料强度最差。环氧沥青由于试验条件，数据离散程度很大，但从部分试验结果来看，其性能是比较好的，仅次于橡胶沥青。但是，其高温稳定性是所有材料中最好的，也就是说其界面强度在高温时下降最少。从材料的低温性能、抗老化性能以及施工方便性等方面考虑，AWP-2000F+纤维是最好的。不仅其强度较高，满足要求，且由于纤维的增强作用，界面层的耐久性、低温抗开裂能力、抗施工硌破能力等都是最好的。在特大跨径桥梁中应该优先考虑采用 AWP-2000F+纤维型防水粘结层材料。在水泥路面加铺沥青层工程中，界面层应优先考虑采用橡胶沥青作为应力吸收层，防止反射裂缝，起到抗剪、粘结、防水作用。在温度变化大，尤其是高温较高的地区，此时，对防水粘结材料的温度稳定性要求很高，应该优先考虑采用环氧沥青。环氧沥青的固化效果决定了其强度大小和其他性能好坏，因此，施工过程中必须严格控制环氧沥青防水粘结层的施工质量。SBS 和 SBR 改性沥青界面层强度基本上也是满足相关要求的，且其施工方便，施工质量容易控制，而造价较 AWP-2000F+纤维和环氧沥青低很多，因此，在一些工程上还是有很大的应用前景。溶剂型防水涂料界面层强度很低，因此不能用在对界面层强度要求较高的路段或是桥面铺装结构上，只能用于对界面层强度要求不高的一般性防水涂层中。

14、本论文首次通过室内试验，研究了精铣刨界面的铣刨深度对界面强度的影响。将铣刨深度进行了量化的研究，得到了精铣刨界面最佳的铣刨深度为 6mm 左右，控制在 5~7mm 为宜。并且结合工程实际情况，提出在实际施工过程中，铣刨深度范围应控制在 4~8mm。

15、本论文针对不同的水泥混凝土板界面，通过采用热涂 SBS 改性沥青进行

试验研究，得到了不同界面状态下的最佳沥青用量，以供实际施工参考。对于喷砂界面，最佳沥青用量为  $1.0\text{kg}/\text{m}^2$ ，控制范围为： $0.9\text{--}1.1\text{kg}/\text{m}^2$  是合适的；对于精铣刨界面（铣刨深度 6mm）而言，最佳沥青用量为  $1.1\text{kg}/\text{m}^2$ ，控制沥青用量制在  $1.0\text{--}1.2\text{kg}/\text{m}^2$  是合适的；对于光面和人工处理界面，控制沥青用量在  $0.8\text{--}1.0\text{kg}/\text{m}^2$  范围内。最佳沥青用量随界面的粗糙程度不同略有不同，总的变化规律是界面越粗糙，用量略有增大。另外，考虑到实际工程的施工，路面板对沥青的吸收作用，沥青的挥发以及不可避免的浪费等因素，建议实际施工时，最佳沥青用量在以上标准基础上增加  $0.3\text{--}0.5\text{kg}/\text{m}^2$ 。

16、本论文首次对不同剪切试验进行了相关性研究。通过对比试验，研究了无竖向压力的直剪试验、 $30^\circ$  斜剪试验、 $45^\circ$  斜剪试验三者之间的相关关系。得到了三者之间的相关性及换算方程，如： $\tau_{45} = \tau_{30} \times 0.6806 + 0.1491$ ，相关系数  $R^2=0.9499$ ； $\tau_{45} = \tau_{zj} \times 0.9739 + 0.113$ ；相关系数  $R^2=0.9724$ 。使得不同抗剪试验得到的试验结果有了可比性的基础。此外，还选择了 AWP-2000F 型涂料，以喷砂界面为例研究了界面层抗剪强度与粘结强度之间的关系。得到了抗剪强度与粘结强度之间的相关性公式： $\tau_{\text{抗剪}} = 1.4665 \tau_{\text{粘结}} - 0.2335$ ；相关系数  $R^2$  为 0.9588。从而使得抗剪强度与粘结强度之间的相互换算成为可能，并有了科学的依据。

17、在旧水泥混凝土路面沥青加铺层力学分析的基础上，提出了旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构的设计参数和标准，探讨了旧水泥混凝土路面直接加铺沥青层和水泥混凝土桥沥青混合料铺装结构的设计方法。

18、结合理论分析与实验研究，提出了桥面铺装的典型结构。对桥面铺装的防水等级及重庆地区桥面铺装的典型结构图进行了介绍。以 SBS 改性沥青和 AWP-2000F 纤维增强型防水涂料为例，对桥面铺装结构的施工工艺及质量检测等内容进行了介绍。

## 6.2 展望

限于本人的学识及能力，论文中定存在许多不足之处及错误，敬请各位专家教授批评指正。目前，国内外对于水泥混凝土路面加铺沥青层结构（刚柔复合式路面）的设计方法、施工技术等方面仍处于探索和试验阶段，许多的研究成果还需要在工程实践中不断的修改和完善，结合国内目前的实际情况，笔者认为在以下几个方面还需要进一步的深入研究：

1、刚柔性路面界面层的疲劳特性及层间粘结状态的力学描述。在运用有限元软件对界面层力学状态进行分析计算时，如何将水泥板的界面状态有针对性的比较精确的描述出来。在建模时，如何考虑旧水泥混凝土路面的强度、损坏状况等；

对于桥面铺装而言，如何考虑桥梁的结构差异、桥梁的振动及桥梁的弯矩（尤其是负弯矩）对界面层受力的影响，如何系统的考查道路状况、车辆荷载、温度等的综合作用。本文的分析，都是建立在单一因素影响下的力学分析。

2、对于界面层强度的试验方法及试验设备有待进一步的研究。目前，尚未见有比较明确的防水粘结层强度试验方法和实验器材。导致许多的试验结果缺乏可比性，许多研究成果在实际应用时遇到困难。此外，对于界面层抗剪强度标准也是需要做进一步的深入研究。使制定的标准具有可操作性强，科学合理，不至于造成浪费，且又具有很好的控制作用。

3、在旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构设计中，如何考虑真实条件下沥青加铺层的温度应力松弛效应、疲劳效应的计算以及相应设计参数的测定是一个难点，有待于进一步研究。鉴于旧水泥混凝土路面沥青加铺层力学计算的复杂性及试验路观测的长期性，沥青加铺层设计方法需要进一步的理论分析和试验研究以形成完善的设计体系。

## 致 谢

本文是在尊敬的导师凌天清教授悉心指导下完成的，凌老师治学严谨，诲人不倦，言传身教，在学习和生活上都给了我很大的帮助。导师渊博的学识使我感到学无止境；独到的见解告诉我在研究中要敢于探索、开拓与创新；扎实严谨的作风启示我在工作中要认认真真，脚踏实地，不骄不躁，不断进取。导师如父母，师恩难忘，我将永记心中。在此，向学习期间给我极大关怀、指导、支持和帮助的导师表示最诚挚的谢意。祝导师身体健康，家庭幸福！

在研究生学习期间，得到了师兄郑智能、董强以及师姐刘燕燕的关心和帮助，他们对作者论文的写作提出了许多宝贵的意见和建议，在此深表感谢！祝他们事业有成，家庭幸福！

本文试验工作得到了上海汇城公司的大力支持，在此深表感谢！感谢在试验过程中给予指点和帮助的老师和同学，他们是：陶善文、金康康、郝攀、吴丹、刘红琼、贾圣东、董营营、吴春波、英红、姚佳鑫等。在此祝他们学业有成，前程似锦！在有限元计算部分得到师兄王林涛、师姐刘明华的指点和帮助，在此一并表示感谢！

特别要感谢父母及女友王秀在生活上和精神上给予作者莫大的支持、关心和鼓励，他们的关爱和支持是作者求学的动力，他们殷切的期盼和无私的关爱将激励我永远向上！

感谢所有曾经关心和帮助过我的亲人、老师，同学和朋友们，祝他们平安、幸福！

最后，感谢各位百忙之中评阅论文和参加论文答辩的各位老师！祝你们工作顺利，家庭幸福！

## 参考文献

- [1] 胡长顺, 王秉纲. 复合式路面设计原理与施工技术. 北京: 人民交通出版社, 1999
- [2] Illinois Department of transportation. Performance of an Unbonded Concrete Overlay on I-74 Physical Research Report NO. 140 April 2002
- [3] Yusuf Mehta. Evaluation of Interlayer Bonding in HMA Pavements Research Progress Report For The Quarter Ending. WisDOT. 2003
- [4] David K. Hein, Chris Oolidis, Eric Magni, Doug MacRae. Investigation and Validation of Investigation and Validation of Composite Pavement Performance using the Falling Weight Deflectometer
- [5] Michaels Luther. Mechanistic Investigation of Reflection Cracking of Asphalt Overlays Committee on Design of composite pavement and Structural overlays, 1976.
- [6] Martinelli P. Bridge Deck Waterproof Membrane Evaluation. Sep. 1996
- [7] L. CARR B. VALLERGA. Nator proof Membrances For Protertion of Concrete Bredge Decks.
- [8] A. R. Price A FIELD TRIAL OF WATERPROOFING SYSTEMS FOR CONCRETE BRIDGE DECKS, 1989
- [9] 胡长顺, 王秉纲. 水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面结构研究. 中国公路学报, 1994, (4):12~19.
- [10] 戴时云, 胡长顺, 王秉纲. 碾压水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面结构的温度应力研究. 西安公路交通大学学报, 1995(6):1~6.
- [11] 贾玉钧, 胡长顺, 王秉纲. 复合式路面荷载应力统一分析方法. 西安公路交通大学学报, 1995(12):6~12.
- [12] 王秉纲. 有沥青上面层的水泥混凝土路面的应力分析. 公路, 2002(8):23~26
- [13] 俞建荣, 陈荣生. 碾压水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面中碾压水泥混凝土板的最大温度梯度. 中国公路学报, 1996(12):29~37.
- [14] 顾文钧, 俞建荣. 水泥砼与沥青砼复合式路面温度梯度分析. 东南大学学报, 1997, (5):23~27.
- [15] 王秉纲, 胡长顺. 碾压水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面结构研究. 中国公路学报, 1996(2).
- [16] 李宇峙, 张起森. 长永高速公路旧水泥混凝土路面上沥青混合料加铺层结构设计[J]. 中外公路, 2001(4)
- [17] 胡长顺, 王秉纲, 李杰武等. 复合式路面沥青层稳定性研究. 西安公路交通大学学报, 1998(10):1~6
- [18] 高金岐, 罗晓辉, 徐世法等. 沥青粘结层抗剪强度试验分析. 北京建筑工程学院学报, 2003(3):67~71.
- [19] 王林涛. 刚柔复合式路面结构分析研究 [硕士学位论文]. 重庆:重庆交通大学, 2005
- [20] 顾强康, 冷培义. 水泥混凝土道面上沥青加铺层反射裂缝试验研究[J]. 中国公路学报, 1999, 12(1): 21-27.
- [21] 何兆益. 碎石基层防止半刚性路面裂缝及其路用性能研究[博士学位论文]. 南京:东南大学, 1997
- [22] 周富杰. 防治反射裂缝的措施及其分析[博士学位论文]. 上海:同济大学交通运输学院, 1998
- [23] 杨斌. 旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构研究 [博士学位论文]. 西安:长安大学, 2005
- [24] 徐世法, 季节等. 沥青铺装层病害防治与典型实例. 北京:人民教育出版社, 2005
- [25] 赖用满. 旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构及材料性能研究 [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2004
- [26] 柏圆. 桥面铺装粘结层的研究 [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2005
- [27] 符冠华. 沥青混凝土加铺层改造旧水泥混凝土路面的应用研究 [博士学位论文]. 南京: 东南大学交通学院, 2001

- [28] 苏新国, 鲁圣弟. 冲击压实技术在混凝土路面改建中的应用. 公路, 2002(1):67-70
- [29] 潘忠良, 王绪高, 金露. 冲击压实技术在水泥混凝土路面快速修复中的应用研究. 公路交通科技, 2002(2):4-7
- [30] 张起森. 道路工程有限元分析法. 人民交通出版社, 1983
- [31] 朱照宏, 王秉纲, 郭大智. 路面力学计算. 北京: 人民交通出版社, 1985
- [32] 黄国权. 有限元法基础及 ANSYS 应用. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [33] 张亚欧, 谷志飞等. ANSYS 有限元分析实用教程. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [34] 叶先磊, 史亚杰. ANSYS 工程分析软件应用实例. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [35] 关昌余. 路面结构层间结合状态的研究. 中国公路学报, 1989
- [36] 罗立峰, 钟鸣等. 钢纤维增强聚合物改性混凝土桥面铺装技术. 广州: 华南理工大学出版社, 2004
- [37] 杨斌. 旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构研究 [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2005
- [38] 中华人民共和国行业标准. JTGD 50-2006 公路沥青路面设计规范. 北京: 人民交通出版社, 2006
- [39] 中华人民共和国建材行业标准. JC/T975-2005 道桥用防水涂料. 北京: 中国建材工业出版社, 2005
- [40] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能. 北京: 人民交通出版社, 2005
- [41] 上海汇城建筑装饰有限公司. AWP-2000F 纤维增强桥面粘结防水涂料-产品介绍及使用方法. 2006
- [42] 交通部公路科学研究所. JTJ052-2000 公路工程沥青及沥青混合料试验规程. 北京: 人民交通出版社, 2000
- [43] 交通部公路科学研究所. JTJ058-2000 公路工程集料试验规程. 北京: 人民交通出版社, 2000
- [44] 中华人民共和国行业标准. JGJ55-2000 普通混凝土配合比设计规程. 北京: 中国建材工业出版社, 2000
- [45] 张占军. 水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装结构研究 [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2000
- [46] 交通部重庆交通科研设计院等. 桥面铺装材料与技术研究总报告, 2005.

## 研究生期间参与的科研项目和发表的论文

### 1. 研究生期间参与的科研课题:

1. 广东佛开高速公路拓宽改建工程加筋土界面特性的试验研究。
2. 一般水泥混凝土桥桥面铺装关键技术研究。

### 2. 研究生期间发表的论文:

1. 运行车速理论在道路线形设计中的运用研究. 第一作者, 路基工程. 2007(5).
2. 模糊综合评判法在城市交通规划方案比选中的运用. 第一作者, 路基工程. 2007(5).
3. 拉拔试验研究的现状与发展. 公路交通技术. 第一作者, 2007(6).
4. 筋土界面摩擦特性的试验研究. 公路交通技术. 第一作者, 2008(3).
5. 沥青路面养护技术的现状与发展. 中国水运(学术版). 第一作者, 2007(9).
6. 路面管理系统在我国的现状与发展. 中国水运(学术版). 第一作者, 2007(10).