

## 摘要

目前，国内的路面形式主要有水泥混凝土路面和沥青混凝土路面两种，而基层方面主要以半刚性基层为主，但随着重载超载现象的产生和加重，半刚性基层的弊端也越来越明显，损害出现越来越早，甚至在初期就会出现车辙、坑槽、裂缝等病害，使得公路的寿命大大缩短，有些地段不得不提前进行大面积的维修或者重建，给我国经济带来了巨大的损失。

为了解决国内半刚性基层出现的诸多限制与病害，通过借鉴国外长寿命路面的设计理念，国内提出了复合式基层结构，即半刚性路基作底基层，沥青碎石或级配碎石作上基层的新的基层结构。本文从实体工程的变更入手，通过结构计算来对上述复合式基层结构进行研究，主要有以下几个方面：

(1) 采用我国现行的弯沉指标和层底弯拉应力方法、AASHTO 方法、AI 方法三种方法进行了结构验算和对比分析，从得到的结果看虽然都满足设计要求，但是存在一定的差异；

(2) 对比三种设计方法，由各种设计方法的应用范围及优缺点，通过综合评价，得到我国的设计方法不适用于复合式基层沥青路面。同时，在计算容许拉应变的时候，由于容许值随着路面材料的性质而改变，国外的标准和材料性质及参数测定方法有关，与国内的有所差别，所以不宜采用 AASHTO 方法。

(3) 通过计算结果与 BISAR 验证结果分析，论文研究的路面结构并非长寿命路面结构。目前长寿命路面的标准还没有具体的规定，但参照国内的研究，认为长寿命路面结构的要求为：沥青混凝土层底的弯拉应变不大于  $120 \mu\epsilon$ ，土基顶面压应变不大于  $280 \mu\epsilon$ ，所研究的路面结构增加沥青层厚度是达到长寿命路面结构标准的一种方法。

(4) 由工程实际情况，根据各个结构层在路面结构中发挥的不同作用，确定路面主要结构层所用材料、级配，然后对面层混合料进行路用性能检测，数据结果显示性能优越、选材合理、级配合适。

最后，通过对竣工后的路面进行现场检测，各项指标均符合设计标准要求。

关键词：复合式基层；力学验算；BISAR；路用性能；现场检测

## ABSTRACT

Currently, the two main forms of pavement in domestic are cement concrete and asphalt concrete, while base course construct is dominated by semi-rigid material. However, with the emergence and worsening of overloading, the disadvantage of semi-rigid base course becomes much more apparent. And the damage appears earlier, even in the preliminary stage, disease such as rutting, pit, cranny occurs. As a result, the lifespan of highway has been shortened dramatically. Some sections with large acreage have to be repaired or rebuild in advance, thus leading to heavy economic loss.

In order to deal with the limitations and diseases caused by semi-rigid base course, this thesis takes the foreign perpetual pavement design concept, proposing composite base construct, i.e., a new base course with semi-rigid base course as its subbase and asphalt macadam or graded macadam upbase. This thesis attaches itself to actual engineering, to study the mentioned structure by calculation. It's mainly in the following areas:

First, it adopts current deflection index and flexural tensile stress method, AASHTO method and AI method making construction checking and contrastive analysis, to cope with the changes during the process of pavement construction design. All the calculation results is satisfied with the design requirement, but there is a certain deference.

Second, comparing these three designing methods' application field and advantage and disadvantage, we come to the conclusion from comprehensive evaluation that our domestic designing method is not suitable for composite base asphalt pavement. At the same time, when calculates the allowed tensile strain, its due to the nature of the material as to change, and it related on the standards, material and the determination of parameters of abroad, and it is different with our country. So the AASHTO method is not suitable.

Third, according to the analysis of calculation results of BISAR, the road construction which the thesis mentioned is not the perpetual pavement. Currently, The requirement of perpetual pavement structure is not regulated, but referred the domestic information, the flexural strain of the bottom of asphalt layer is below  $120 \mu\epsilon$ , and the top of subgrade compressive strain is below  $280 \mu\epsilon$ . Adding the thickness of asphalt layer is one method of

fitting the standard of perpetual pavement construction.

Fourth, according to the actual engineering and the different roles of each layer, the thesis determines the material and gradation of the main construction layers of the pavement, and then detects the road performance of surface layer asphalt mixture. The result of data indicates that the performance is superior, the material selection is reasonable and the gradation is suitable.

Finally, the scene test after completion of surface layer shows that all the indicators are in line with the design standards.

**Key words:** Composite Base; Mechanics Check; BISAR; Road Performance; Field Test

# 长沙理工大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。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后果由本人承担。

作者签名：

日期：2019 年 5 月 19 日

## 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。本人授权长沙理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

2、不保密。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：

日期：2019 年 5 月 19 日

导师签名：

日期：2019 年 5 月

# 第一章 绪论

## 1.1 问题的提出以及研究意义

随着我国经济的飞速发展，我国公路交通事业在改革开放后也高速发展。从 1988 年沈大、沪嘉高速公路建成通车实现了中国大陆高速公路零的突破，到去年年底全国高速公路总里程达到 6.03 万公里<sup>[1]</sup>，这二十年，是我国公路事业突飞猛进、最具活力的二十年，我国的公路事业进入了以建设高速公路、一级公路等高等级公路为主的崭新时代。我国用短短的十多年走完了发达国家半个世纪的发展历程，公路在我国的社会和经济中担当着重要的角色。

但是，随着我国经济市场经济的进一步完善，运输企业越来越重视效益最大化，使得我国出现了前所未有的重载、超载现象，以至于在这样的长期影响下，我国的公路出现损害越来越早，甚至在初期就会出现车辙、坑槽、裂缝等病害，使得公路的寿命大大缩短，有些地段不得不提前进行大面积的维修或者重建，给我国经济带来了巨大的损失<sup>[2]</sup>。

现在的路面形式主要有水泥混凝土路面和沥青混凝土路面两种，而基层方面主要以半刚性基层为主。表 1.1 是我国部分高速公路路面结构<sup>[3]</sup>。

表 1.1 我国部分高速公路路面结构

道路名称	面层	基层
海南环岛公路（东线）	12cmAC	30cm 水稳碎石基层+15~19cm 级配碎石底基层
广州-深圳	22cmAC+10cmAM	23cm 水稳碎石基层+25cm 级配碎石底基层
广州-佛山	9cmAC+6cmAM	25cm 水稳石屑基层+28~37cm 水稳土底基层
广州-花都	7cmAC	20cm 水稳碎石基层+30cm 水稳石屑底基层
深圳深南大道	5cmAC+8cmAM	40cm 水稳石屑基层+20cm 水稳石屑底基层
厦漳高速公路	14cmAC	33cm 水稳碎石基层+20cm 水稳、石灰综合稳定土
杭甬	3~4cmAC+4~6cmAC+ 5~8cmAM	28~34cm 二灰、水泥稳定碎石基层+20cm 级配碎石底基层
沪嘉	10cmAC+7cmAM	46cm 粉煤灰三渣+20cm 碎石砂垫层
沪杭	17cmAC	37cm 二灰碎石基层+20cm 水泥碎石土
沪宁	16cmAC	18~40cm 二灰碎石基层+18~40cm 二灰土（或二灰砂、石灰土）
安新路	9cmAC+7cmAM	20cm 水稳碎石基层+35cm 二灰土底基层
京津塘	10~13cmAC+ 10~12cmAM	25cm 水稳碎石（砂砾）基层+20~45cm 石灰土（二灰土）
济青路潍坊段	15cmAC	24cm 二灰碎石基层+42cm 石灰土

京福路山东段	15cmAC	26cm 二灰碎石基层+29cm 二灰土
京石路	4cmAC+8cmAM	15cm 二灰碎石基层+40cm 石灰土
沈大路	9cmAC+6cmAM	25cm 水稳碎石基层+30cm 水稳十底基层

之所以有这么多的高速公路采用半刚性基层结构，固然有其自身的优点。长时间以来，人们普遍认为半刚性基层有以下优点：

- (1) 板体性强，有较高的承载能力和抗变形性能（包括弯沉和车辙）；
- (2) 有良好的抗冻性，能有效地治理季节性冰冻地区的翻浆；
- (3) 能充分利用当地地方性材料；
- (4) 初期投资省，可以用较少的资本修更多的路。

但随着重载超载现象的产生和加重，其弊端也越来越明显，公路研究工作者们也对其产生了质疑，他们开始充分的认识到了半刚性路面的缺陷<sup>[6]</sup>：

(1) 关于半刚性基层的板体性好及承载力强的优点。它是建立在受压和连续的界面条件的力学模式下的，如果基层和面层之间的界面条件因为水和结冰的原因变成滑动，沥青层和半刚性基层都将产生较大的拉应力和拉应变、剪应力，此时是否还有较高的弯拉强度就不一定了。

(2) 关于半刚性基层沥青路面普遍存在的不同程度上的裂缝是个不争的事实。这些裂缝是由于沥青面层的温缩裂缝、半刚性基层收缩开裂引起的放射裂缝等共同作用的缘故。发生裂缝的程度，包括发生的时间、裂缝的数量（间距）、裂缝的宽度都与基层材料和施工有这巨大的联系。我国尽管采取了各种措施，绝大部分高速公路沥青路面上的反射裂缝问题依然十分严重，再加上我国缺乏出现裂缝就进行沥青封缝的习惯，使得开裂得不到有效的处理。

(3) 半刚性基层的强度和模量会不断衰减。我国历来都采用表面弯沉作为路面强度和承载力的评价指标，但表面弯沉的变化过程要分为三个阶段<sup>[5]</sup>：路面竣工后的前1-2年为第一阶段，由于交通荷载的压密及半刚性基层材料的强度增长特性，路表弯沉将逐渐减小，大约在路面竣工后的第二年达到最小值。路面竣工后的第二年到第四年为第二阶段，路表弯沉不断增大，由于交通荷载的重复作用，以及水、温度状况的变化，加之混合料本身因拌合不均匀而导致强度非均匀性等因素的影响，结构内部的微观缺陷将因局部应力集中而扩展，并逐渐形成小范围的局部破损，从而导致结构的整体刚度下降，使路表弯沉急剧增大。在这之后为第三个阶段，当弯沉达到一定值之后就不再增加，趋于相对稳定状态。具体的变化情况见示意图1.1：

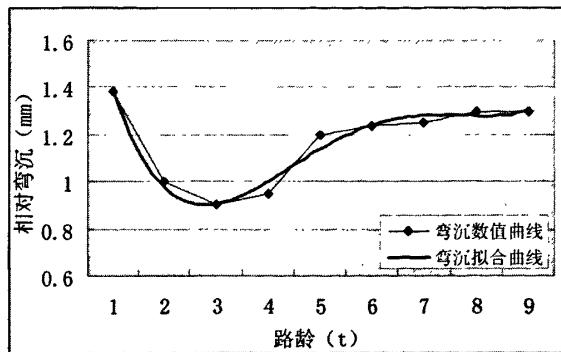


图 1.1 弯沉逐年变化曲线

(4) 半刚性基层沥青路面对大交通量及重载交通的敏感性大。对任何公路来说，超限超载车辆是沥青路面的“第一杀手”，这一点是毫无置疑的。因此综合世界上发达国家的经验，治理早期损害，必须治理超限超载车辆为首要条件。路面设计都是以标准轴载作为设计标准的，而半刚性基层相比于柔性基层来说轴载换算指数要大一些。因此，半刚性基层沥青路面对超限超载车辆的敏感性要远远大于柔性基层路面。

交通荷载的换算用以下公式表示：

$$N = \sum \left( \frac{P_i}{p} \right)^n$$

当为柔性基层的沥青路面结构时，所得到的指数 n 取 4；当进行半刚性基层层底拉应力验算时，大于 50KN 的荷载轴次换算，指数 n 取 8。这样一来，经过不同的指数换算后的荷载轴次相差甚大。结果见下表 1.2。

表 1.2 不同基层沥青路面的车辆轴载换算表

基层形式	n 值	100KN	130KN	200KN	300KN
半刚性基层	8	1	8.2	256	6561
柔性基层	4	1	2.9	16	81

由上表可以看出，在荷载轴次大于 100KN 时，随着荷载的增加，半刚性基层与柔性基层换算得到的结果差距变大，当轴载为 300KN 时，换算值相差高达 80 多倍，由此能清楚地体现出半刚性基层的沥青路面结构对超载车的敏感性之大。这也是国外不主张在重载交通路段采用半刚性基层沥青路面结构的重要原因。因此，有学者研究认为<sup>[6]</sup>，通过轴载重量对疲劳寿命的影响分析得出，当道路上行驶的超载车辆较多时，采用沥青稳定基层路面具有较好的适应性；当车辆以不超过 100kN 的普通车为主时，采用半刚性基层路面能够获得更长的使用寿命。

为了解决半刚性基层的这些弊病，人们在基层与面层之间设置沥青碎石、级配碎石、土工织物、应力吸收膜等结构来改善半刚性基层的排水条件，并阻止基层裂缝向上反射等。采用沥青碎石作为半刚性基层沥青路面的上基层，能够吸收和消减半刚性基层裂缝尖端应力和应变，从而减少裂缝的产生<sup>[7]</sup>。研究认为沥青碎石基层沥青路面对防止反射裂

缝的效果明显优于级配碎石的效果<sup>[8]</sup>。针对我国高速公路出现的通车后短时间内发生的早期损坏以及沥青路面的耐久性差，使用寿命短的弊病，国内研究者对此进行了深入的分析，并结合国外的先进路面结构设计理念，综合我国国情，制定了一些相应的设计及施工规程，并提出了相关的理论指导。

长期以来，我国沥青路面的设计都是采用“强基薄面”作为指导思想，过分强调基层的重要性，忽略了面层的功能。国外的永久性路面考虑路面各结构层的功能，铺筑有足够的厚度的基层和沥青层，以后路面有损坏的就只铣刨表面层，再重新加铺罩面，其设计寿命能长达30~40年甚至更久<sup>[9]</sup>。所以，国内正在研究此类路面结构，针对国内的实际情况加以改进，势必会对我国公路带来深远的影响同时结合个别路段应用柔性路基得到的意想不到的效果，通过借鉴国外的永久性路面的设计理念，国内提出了复合式路基结构，即半刚性路基作底基层，沥青碎石或级配碎石作上基层的新的路基结构<sup>[10]</sup>。本论文针对这一点，借鉴国外这种永久性路面的设计理念，就目前国内对此类路面结构的研究成果的基础上，主要研究以半刚性基层作为底基层，级配碎石作为过渡层，密级配沥青稳定碎石作为上基层的复合式基层的路面结构。该结构结合了半刚性基层的高强度和柔性基层的抗裂性能，能充分提高路面的路用性能，同时有级配碎石作为过渡层，能充分地缓解半刚性基层由于材料的温缩和干缩产生的裂缝<sup>[11]</sup>。解决了基层的弊病，路面的损坏就只限于面层本身，维修起来就容易得多，大大节约了财力物力和人力，这样的路面结构就趋向于了国外的永久性路面。

## 1.2 国内外复合式基层路面结构的研究现状

由于国内外的半刚性基层路面结构的研究和应用已经相对比较成熟，现在主要是针对复合式基层的柔性基层部分做更深一步的探讨。

### 1.2.1 国外的研究现状

国外现在使用最为普遍的沥青路面结构称之为永久性路面结构或者长寿命沥青路面结构，其主要思想是在路面内部，无论荷载应力还是温度应力，沿路面深度方向是急剧变小的，到一定深度，应力就不大了，这个深度的应力主要由沥青层承担，所以沥青层厚度较大（通常认为18cm以下对车辙的影响就很小了）。在沥青层内，表面层承受荷载、温度应力最大，又直接暴露在空气中，所以必须选择抗车辙、抗裂、抗磨耗、稳定、耐久、密水、粗糙抗滑的混合料和结构，通常采用高质量的改性沥青。中面层已经不暴露在表面，但仍需考虑抗车辙，对低温性能可以降低一级。下面层主要考虑抗疲劳，所以沥青质量主要考虑抗裂性能。由于表面层不可能长期使用下去不坏，以后维修只需要铣刨表面层换新加铺就行了，下面可以长期使用下去。

我国沥青路面设计规范中提到：

(1) 对半刚性基层沥青路面结构，沥青层底主要是压应力或很小的拉应力，沥青层的拉应力或拉应变不起控制作用，半刚性基层、底基层的拉应力起主要的控制作用。

(2) 对于柔性基层沥青路面结构，除用弯沉值可控制土基的压应变、压应力外，沥青层的拉应变受沥青层与粒料层间的模量比影响。模量比越大，沥青层的拉应变越大。

要减小沥青层与粒料层的模量比，在沥青层模量相对一定的情况下，只能加大粒料层的模量。因此对于水稳结构层，也就意味着增加水泥剂量，以提高其机构层的刚度。但与此同时，若半刚性基层的刚度（模量）越大，半刚性基层、底基层层底的拉应力、拉应变就越大，从而出现裂缝病害就越容易，造成沥青面层的反射裂缝就越发严重。这种裂缝都是自下而上扩展的，所以往往此类裂缝都是贯穿性的，这是路基路面最严重的结构型破坏，维修起来就只能是“开膛破肚”式的。

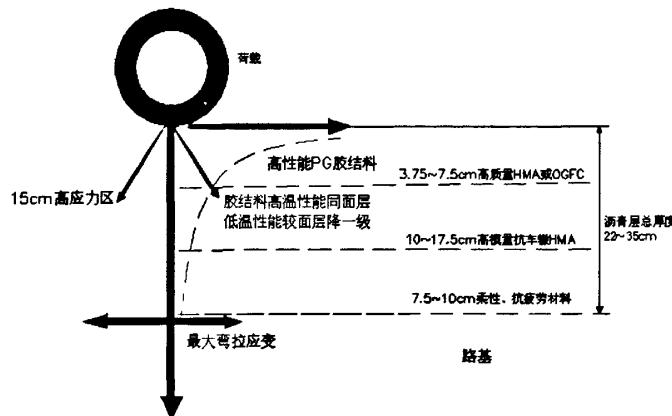


图 1.2 永久性路面设计理念

随着在全世界范围内道路荷载的不断增加，特别是重载交通对各国的沥青路面提出了新的挑战，如重载交通量的增长、重载轴载增加；慢速交通产生的更大的路面应力；高压轮胎引起应力的增加；道路加速磨光，这样按传统的路面设计体系和设计标准设计的路面常常达不到设计年限就出现了损坏，给高速公路、城市间的重要交通干道造成极大的压力。这样各国对路面进行了大量调查，调查发现，对于厚沥青层的沥青路面，虽然也同样承受着大交通量和重载荷载的作用，仍然保持着良好的使用性能。

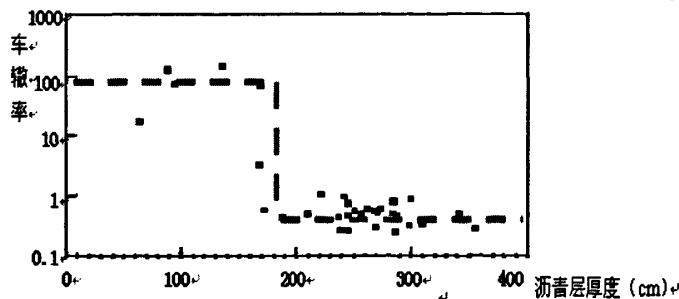


图 1.3 沥青层厚度与沥青车辙率关系曲线（每百万次交通量增加的车辙量）

英国 TRL 对 51 条道路进行调查，已观测到的路面破坏，如车辙和开裂均为表层车

辙和表层裂缝，是非结构性破坏，即厚沥青层道路不会出现沥青基层的疲劳开裂或来自于路面结构深层的变形<sup>[12]</sup>。车辙率的调查结果表明，对于柔性结构，当其厚度大于18cm时，车辙速率会迅速降低，当沥青面层厚为18~36cm时，车辙率与面层厚度无明显关系。同时，对厚沥青面层道路，车辙大部分主要发生在沥青层表面，此时的车辙不表示道路的整体结构不足，进一步罩面设计能保证基层结构良好<sup>[13]</sup>。在英国厚沥青层路面没有关于反射裂缝的权威性报告，表面开裂是一个厚沥青层、使用到服务期末的柔性路面相对较常见的现象，而很少反射裂缝，表明基层不存在疲劳性能减弱。

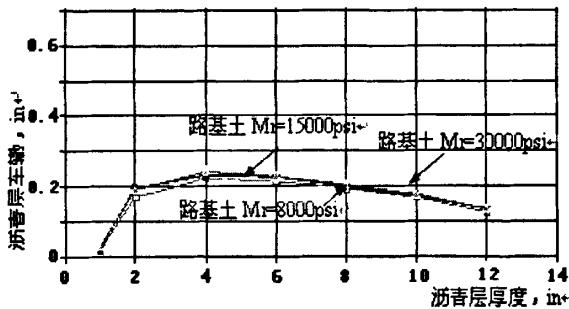


图 1.4 沥青层厚度对沥青层车辙量的影响

图 1.4 为 2002 年 AASHTO 设计指南研究结果。根据 LTTP 数据，考虑到结构层及路基土模量参数随季节变化及路面温度分布不均匀性，按照 AASHTO 2002 年模型进行了分析，得出了沥青层厚度对车辙影响图。可以看出，随着沥青层的增加到 10cm，车辙率在不断增加，但是沥青厚度继续增加，车辙率反而有所下降。实际上在相同气候条件及连续情况下，沥青层从 5cm 增加到 20cm 车辙率基本增加不大，即增加沥青层厚度对车辙率影响不是很明显<sup>[14][15]</sup>。

经过长时间的试验以及应用，国际上渐渐地形成了一种新的设计范例：增加交通量无需机械的增加沥青层厚度。这是由于有一个弯拉应变临界点，当路面结构层应力足够小，弯拉应变低于此值时，由于沥青混合料自身的自愈能力，沥青层底就不会产生疲劳损伤，因此继续增加沥青层的厚度降低沥青层底的弯拉应变水平就是多余的了。这个拉应变临界点对应的疲劳寿命就是疲劳极限。

国外的许多专家尽管各自的观点多少有些差别<sup>[16][17][18]</sup>，但对于沥青层底弯拉应力和基层顶面压应变的选择意见基本一致，图 1.5 为永久性路面力学性能标准模拟图。

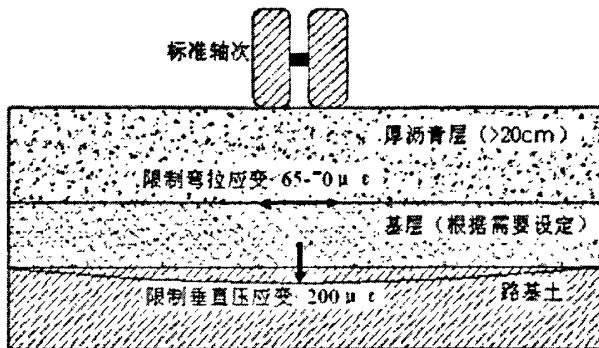


图 1.5 永久性路面力学性能标准图

了解了国际上这种永久性路面的发展形势以后，反顾我国的半刚性基层以及单纯的柔性基层沥青路面，我们所设计的沥青面层较薄，不可能实现这样的长寿命，它的使用寿命是有限的。

目前，国际上通用的沥青路面结构可以分为以下几种<sup>[19][20][21]</sup>（图 1.6），其中组合式结构路面是柔性基层与半刚性基层组合使用的路面。根据柔性基层的组合情况可以是沥青碎石基层+半刚性材料作为底基层，或者在其间设置碎石过渡层，这样的结构称之为倒装结构。水泥混凝土或者贫混凝土刚性基层的沥青路面实际上也是一种组合式路面。对旧水泥混凝土路面上加铺沥青面层的路面，如果混凝土板彻底打碎的可归入柔性基层沥青路面，如果混凝土板没有破碎直接加铺的可归入组合式路面<sup>[22]</sup>。由此可以看出，现在所提出的永久性路面结构属于组合式路面结构。

第一种	第二种	第三种	第四种	第五种	第六种
全厚式路面	柔性路面	半刚性路面	组合式路面	组合式路面 （倒装式结构）	组合式路面
沥青层 （各种沥青类结构层）	沥青混凝土	沥青混凝土	沥青混凝土	沥青混凝土	沥青混凝土
沥青碎石基层	半刚性基层	沥青碎石基层	沥青碎石基层	沥青碎石基层	水泥混凝土
				碎石过渡层	
粒料底基层	半刚性底基层	半刚性底基层	半刚性底基层	半刚性底基层	各种类型的底基层
路基（含抗冻层等）	路基（含抗冻层等）	路基（含抗冻层等）	路基（含抗冻层等）	路基（含抗冻层等）	路基（含抗冻层等）

图 1.6 沥青路面结构类型分类

在对国外主要国家的沥青路面结构形式的研究中我们不难发现：法国的路面结构形式中很少采用半刚性基层路面结构形式，而是主要以复合式基层路面和全厚式路面为主，各占一定的比例；英国的高速公路主要采用的是长寿命路面结构形式，而在高等级

公路，特别是大的交通量的路面结构中，以复合式基层的沥青路面结构为主要形式；德国的高速公路基层结构尽管以柔性为主，但也有半刚性基层做底基层、沥青稳定碎石基层做承重层的复合式基层的柔性路面结构；而美国在 2002 年版设计指南中推荐的路面结构设计组合中，尽管不提倡采用半刚性路面结构，但是在基层选择上却趋向于组合式；日本的高速公路采用较厚的沥青层+沥青稳定碎石基层，在沥青稳定基层下面一般下卧粒料底基层或者下卧水泥底基层；南非则更是在半刚性基层和沥青面层之间设置 15cm 的级配碎石或采用粗粒径沥青稳定基层作基层，这就是典型的复合式基层路面结构<sup>[23]</sup>。从以上各国高速公路采用的路面结构形式来看，特别是在重载道路上，复合式基层的沥青路面结构形式得到了大量使用，并且获得了良好的使用效果。

### 1. 2. 2 国内的研究现状

我国对于国外的这种永久性路面的研究比较晚，但从2000年之后，国内各大科研机构开始了广泛的研究和试验。研究主要针对于基层结构的形式，近些年趋向于半刚性基层上面加设柔性基层，对于沥青稳定碎石基层的研究越来越多，有的选择密级配的粒径较大的形成嵌挤结构的混合料，有的选择空隙率较大的排水式沥青混合料，还有些单位仍然在采用半开级配的沥青碎石AM。由此可见用作基层的沥青混合料类型好多，沥青稳定碎石混合料由于各国的使用习惯以及材料等差异，混合料类型上存在一定的差异。因此并非每种混合料类型都能够符合我国道路实际情况。

李峰<sup>[24]</sup>对长寿命路面结构做了三维有限元受力分析，得出路面面层厚度和基层模量变化时的力学指标的响应变化规律，为设计长寿命沥青路面提供了理论依据。

山东省交通科研所做了永久性沥青路面设计方法的研究<sup>[25]</sup>，在研究近年来国内外沥青路面结构设计最新研究成果的基础上，针对中何在作用下多种形式的沥青路面的结构响应规律进行了系统的研究。

交通部公路科研所在西部交通建设项目的《关于高速公路早期病害预防措施的研究》课题研究中，就现阶段的我国公路发展提出了自己的意见与看法，加强预防性养护，减少对社会的影响，与时俱进，引进国外成熟的技术与标准，特别是要做好路基。另外，还要改变目前我国沥青路面结构形式单一的问题，根据具体的气候和交通情况选择合理的路面结构形式。鉴于沥青路面的使用寿命取决于基层强度及模量的衰减历程，因而在现有的国内大量的以半刚性基层为主的沥青路面结构上实现永久性路面的构想是很难实现的，在这种实际情况下，推广应用柔性基层沥青路面和复合式基层沥青路面是适宜的<sup>[26]</sup>。

针对以上建议的提出，交通部公路科研所作了以下试验路：（1）青海省平西高速公路试验路（2）四川省南广高速公路试验路（3）山西省祈临高速公路试验路（4）江苏省沿江高速公路长寿命路面对试验路（5）福建省龙长高速公路试验路（6）福建省浦南高速公路试验路，以上六条高速公路的试验路除了福建浦南高速为刚竣工路段以外，从

其余的五条试验段的使用情况来看，已经取得了相当好的预期效果，不过要想更好地评价路面的使用情况，还需要对此路面结构与半刚性基层路面结构长期的观测比较。

## 1.3 本文的主要研究内容和思路

### 1.3.1 主要研究内容

综上所述，研究和借鉴国外的沥青路面结构形式的成功经验，开展我国复合式基层应用技术研究，对于缓解我国沥青路面早期病害，延长道路使用寿命具有必要性。国内现有的路面结构设计，单纯的半刚性基层沥青路面结构的研究现在已经相对成熟，而柔性基层沥青路面结构与复合式基层沥青路面结构研究相对较少，到目前为止，还没有沥青稳定碎石基层混合料的相关施工规范，更没有相关的设计方法和设计标准。因此，在开展长寿命沥青路面结构的研究时，路面结构厚度的确定要么采用国外的办法，要么参考国内的经验，根据交通实际凭经验确定，还没有形成系统的设计方法。本文在现有的文献资料和已有的研究成果的前提下，提出自己的意见与想法，具体的研究内容如下：

- (1) 由不同的设计方法对实体工程路面结构的力学分析和寿命验算评价；
- (2) 对计算结果进行比对分析，选取适合的设计计算方法；根据计算结果与长寿命路面参数对比，分析差别；
- (3) 评价实体工程的使用级配以及材料性能设计；
- (4) 评价实际路面性能。

### 1.3.2 主要研究思路及技术路线

本论文研究的主要思路和技术路线如图 1.7 所示。具体步骤如下：

- (1) 根据实体工程试验段前后的路面结构形式选择，针对两种典型路面结构通过三种常用的设计方法进行力学计算和寿命估算，得出经过修改后的路面结构在使用寿命和力学指标控制上均应优于初始结构；
- (2) 比较三种设计方法得到的计算数据，根据各自的优缺点来评价适合本研究所提及的复合式基层路面结构的设计计算方法；由路面结构计算值与长寿命路面结构的参数相比较，得出所研究的路面是否属于长寿命路面，如果不是，提出自己的观点；
- (3) 对实体工程各主要结构层所用的材料和级配进行检验，根据检验结果来评价其材料选择和级配设计的优劣性；
- (4) 在工程工期结束后针对路面表层进行一系列的现场性能检测，以评价实际路面的性能情况。



图 1.7 论文研究的技术路线

## 第二章 基于实体工程结构力学验算与对比分析

本实体工程为福建浦城至南平的一条双向四车道高速公路（浦南高速公路）。浦南高速是交通部公路科学研究院《福建省高速公路新型结构设计研究》课题项目其中的一个试验路段，笔者参与了此课题的研究并做了半年的跟踪调查分析，目前此工程已经结束并于今年年初通车。针对此高速公路的路面设计过程中对于路面结构形式的变更，笔者对前后两种结构进行了力学结构验算和对比分析。

### 2.1 实体工程主要的技术指标

#### 2.1.1 工程技术标准

表 2.1 主要技术标准

公路等级		高速公路
计算行车速度		80 公里/小时
路面设计标准荷载		BZZ—100KN
基本结构尺寸	路基宽度	24.5 米
	行车道	4×3.75 米
	中间带	2.5 米(含中央分隔带 1.5 米, 两侧路缘带各 0.5 米)
	硬路肩	2×2.75 米(含路缘带 0.5 米)
	土路肩	2×0.75 米

#### 2.1.2 工程沿线自然区划、气候分区、沿线自然地理概况

浦南高速公路工程地处福建西北部山区，自然区划，沿线地处中华人民共和国公路自然区划IV6a 区，即武夷南岭山地过湿区，总体上地形地势复杂，路基填挖变化频繁。路基土质高液限粘土居多，属粘质土地基，路基土设计回弹模量，对于中湿地带取 35.5MPa，干燥地带 40.5MPa，石方地带取 80MPa。

工程所在区域河流属闽江水系，主要河流有建溪、南浦溪、崇阳溪，为雨源型山溪性河流，水位受降水影响大。

该地区属亚热带季风湿润气候区，具大陆性气候特征，兼受海洋性气候影响，温和多雨，气温北低南高，年平均气温  $17.4^{\circ}\text{C} \sim 19.3^{\circ}\text{C}$ ，年平均降雨量  $1669 \sim 1907\text{mm}$ ，局部高达  $3848\text{mm}$ ，全年雨日  $164 \sim 177$  天，3~4 月为春雨季，雨量约占全年  $23 \sim 24\%$ ，5~6 月为梅雨季、雨量约占全年  $36 \sim 37\%$ ，7~9 月为台风、雷雨季约占  $20\%$ ，10 月至翌年 2 月为少雨期，约占  $20\%$ 。夏季多偏南风，冬季多偏北风，最大风速  $24\text{m/s}$ 。

## 2.1.3 交通荷载情况

从交通量组成看，各点总体上货车比例与客车接近，货车以小货、中货居多，客车以小客车为主，各调查点的车型比例汇总见下表 2.2。

表 2.2 交通量车型比例汇总表

车型	小型货车	中型货车	大型货车	小型客车	大型客车	拖挂车	小型拖拉	中大型拖拉	合计
百分比, %	23	22	4	44	4	0	2	1	100

从载运状况看，区域内货车超载现象较为普遍，根据报告，各调查点客、货车实载状况见下表 2.3。

表 2.3 车辆载运平均状况（实载率）

车型	小型货车	中型货车	大型货车	小型客车	大型客车	拖挂车
实载率, %	106	143	121	77	73	89

根据设计文件，考虑到超载情况，交通量增长率为 8.2%，设计使用年限为 15 年，交通量预估情况见下表 2.4。

表 2.4 交通量预测结果

年份	2009	2015	2020	2025	2029
平均交通量	9862	15576	22341	30244	37603

注：以标准小客车为标准。小型货车为 2.5 吨以下，中型货车为 2.5~7 吨，大型货车为 7 吨以上。小型客车 20 座以下，大型客车为 20 座以上。

## 2.1.4 路面结构形式

根据已知条件初步设计的路面结构形式，见表 2.5

表 2.5 最初拟定的路面结构形式

路基土类型	I	II	III
干燥类型	干燥或中湿	干燥	中湿
结构总厚度	64cm	81cm	81cm
结构组合	4cmAC-13C 6cmAC-20C 8cmAC-25C 1cm 下封层 30cm5%水稳碎石基层 15cm 级配碎石	4cmAC-13C 6cmAC-20C 8cmAC-25C 1cm 下封层 30cm5%水稳碎石层 17 cm3%水稳碎石层 15cm 级配碎石	4cmAC-13C 6cmAC-20C 8cmAC-25C 1cm 下封层 30cm5%水稳碎石层 17 cm3%水稳碎石层 15cm 级配碎石

由于在此课题项目之前，交通部公路科研所已经做过诸多复合式基层的试验路段，如青海平西、马平高速公路、四川南广高速公路、山西祁临高速公路、江苏沿江高速公路、福建龙长高速公路，从现在的路用效果来看，已经取得了预期的满意效果。所以，借鉴前几条高速的路面结构形式，修改方案，拟定了以下的路面结构，见下表 2.6。

表 2.6 最终拟定的路面结构形式

路面结构类型	I	II	III
路基土干燥类型	干燥或中湿	干燥	中湿
结构总厚度	64cm	81cm	81cm
结构组合	4cmAC-13C 6cmAC-20C 14cmATB-25 20cm 级配碎石 32cm 水稳底基层	4cmAC-13C 6cmAC-20C 14cmATB-25 20cm 级配碎石 20cm 水稳底基层 17cm 水泥土	4cmAC-13C 6cmAC-20C 14cmATB-25 20cm 级配碎石 20cm 水稳底基层 17cm 水泥土

## 2.2 路面结构力学验算及分析

由于笔者跟踪调查的路段结构类型为第 I 种，在此针对前后拟定的两种方案，在路基土干燥类型相同的情况下进行分析对比说明。

### 2.2.1 按照我国弯沉指标和层底弯拉应力进行验算分析

#### 1. 累计当量标准轴次<sup>[21]</sup>

对于弯沉和沥青层底弯拉应力验算，由前面的交通量调查求得路面竣工第一年的单向标准轴次  $N_1$  为 2208 次/日，取车道系数为 0.5，一个设计车道累计当量轴次为  $1.11 \times 10^7$  (BZZ-100)。而对于半刚性底基层层底弯拉应力验算，BZZ-100 荷载下的设计年限 15 年的累计当量标准轴次  $N_e'$  为  $0.96 \times 10^7$ 。

#### 2. 计算结构

表 2.7 计算结构

路段	I (初)	I (定)
结构组合	4cmAC-13C 6cmAC-20C 8cmAC-25C 1cm 下封层 30cm 5% 水稳碎石基层 15cm 级配碎石	4cmAC-13C 6cmAC-20C 14cmATB-25 20cm 级配碎石 32cm 水稳底基层
路基土 $E_0$	40MPa	40MPa

### 3. 计算结构参数

表 2.8 按照我国设计方法的结构参数

序号	材料	设计模量 (MPa)		15°C 剪裂强度 (MPa)	泊松比
		20°C	15°C		
1	AC-13C	1400	2000	1.4	0.25
2	AC-20C	1200	1800	1	0.25
3	AC-25C	1000	1200	0.8	0.25
4	ATB-25	1200	1400	0.8	0.25
5	级配碎石	300		-	0.25
6	水稳基层	1500/3500*		0.3	0.25
7	路基土	40		-	0.35

注：“\*”表示在抗压模量取值时，弯沉计算用时取 1500 MPa，拉应力计算用时取 3500 MPa。

#### 4. 计算设计弯沉值和层底容许拉应力

##### (1) 设计弯沉值 $l_d$

根据我国规范，设计弯沉由下式计算确定：

$$l_d = 600Ne^{-0.2} Ac \cdot As \cdot Ab$$

公路等级系数  $Ac$ ，对于高速公路、一级公路为 1.0；面层类型系数  $As$ ，沥青混凝土为 1.0；基层类型系数  $Ab$ ，对于 I (初) 路面结构由于是属于半刚性路面结构，所以取 1.6；而 I (定) 路面结构实际上是在半刚性基层的基础上，有级配碎石层作为过渡层，ATB-25 一层充当柔性基层作用，属于半刚性基层加柔性基层的复合式基层结构， $Ab$  的选择既不能用柔性基层的 1.0，也不能用半刚性基层的 1.6，在此，由于实体路面结构中，柔性基层与半刚性基层厚度的比例关系为 5: 8，笔者选择采用 1.4 的基层类型系数。

根据设计标准轴次，设计弯沉值  $l_d$  I(初)=37.4(0.01mm);  $l_d$  I(定)=32.7(0.01mm)。

##### (2) 各层底容许拉应力 $\sigma_R$

$$\sigma_R = \frac{\sigma_{sp}}{K_s}$$

对于沥青混合料：

$$K_s = 0.09Ne^{0.22} / Ac$$

对于无机结合料稳定粒料：

$$K_s = 0.35(Ne')^{0.11} / Ac$$

表 2.9 各层底容许拉应力  $\sigma_R$  计算结果

材料	AC-13C	AC-20C	AC-25C/ATB-25	水稳底基层
$\sigma_R$ , MPa	0.438	0.313	0.251	0.146

### 5. 结构弯沉和层底拉应力计算结果

根据弹性层状体系理论, 应用东南大学的 HPDS2003A 路面结构设计软件计算得到的结构弯沉和层底拉应力结果见表 2.10 和表 2.11。

表 2.10 弯沉计算结果

结构	计算弯沉值	设计弯沉值
I (初)	27.37	37.4
I (定)	25.36	32.7

表 2.11 弯拉应力计算结果

材料	AC-13C	AC-20C	AC-25C/ATB-25
$\sigma_R$ , MPa	0.438	0.313	0.251
I (初) 结构层底应力, MPa	受压	受压	受压
I (定) 结构层底应力, MPa	受压	受压	0.203

从表 2.10 和表 2.11 计算结果可以看出, 对于 I (初) 和 I (定) 两种路面结构, 无论是弯沉指标计算还是层底弯拉应力验算都能够满足要求, 且具有一定的富余。但是从计算结果看, I (定) 的弯沉值和结构层底拉应力都要比 I (初) 的小, I (定) 结构要优于 I (初) 结构。

### 2.2.2 按照 AASHTO 设计方法进行验算分析

#### 1. 累计标准轴次<sup>[2]</sup>

根据表 2.2、表 2.4 的交通数据, 由如下代表车型 (其中货车考虑了一定的超载, 超载比率见表 2.3), 根据 AASHTO 的公式, 换算成标准荷载 80KN 下的累计标准轴次如表 2.12。

#### 2. 计算结构

见表 2.7

#### 3. 基本结构参数

见表 2.13

表 2.12 按 AASHTO 计算 15 年的累计标准轴次(标准荷载 80KN)

车型	前轴数	后轴数	规定载重限					
			前轴重 (Kip)	前轴载 系数	后轴重 (Kip)	后轴 载数	累计 交通量	累计标准 轴次
金杯 SY132	1	1	2.9	0.001	6.2	0.012	22832645	374734
解放 CA141	1	1	5.5	0.007	15.4	0.536	21839921	49590107
黄河 JN150	1	1	11.0	0.132	22.8	2.516	3970895	22539685
江淮 AL6600	1	1	3.8	0.002	6.0	0.010	43679842	524158
黄海 DD650	1	1	11.0	0.132	20.5	1.651	3970895	7080105
解放 SP9134B	1	2	5.6	0.008	16.3	0.929	2978171	2790546
计算结果	双向累计标准轴次 8.29E+07, 车道系数 0.5, 方向分布系数 0.6, 设计累计标准轴次 2.49E+07。							

注：轴载换算按照 AASHTO 公式，货车考虑了一定的超载。

表 2.13 AASHTO 计算基本参数

基本参数			参数值
初始服务能力指数			4.2
最终服务能力指数			2.5
可靠性水平			95%
标准离差 $S_0$			0.35
正态偏差 $Z_k$			-1.645
层位系数 $a_i$	1	AC-13C	0.42
	2	AC-20C	0.40
	3	AC-25C/ATB-25	0.36
	4	级配碎石	0.14
	5	水稳基层	0.20
路基设计模量			40MPa

#### 4. 计算结果

表 2.14 结构 I (初) 计算结果

结构层	材料属性	结构系数 $a_i$	排水系数 $m_i$	厚度 $D_i$ (cm)	$SN_i$ 计算值 (in)
1	AC-13C	0.44	1	4	0.661
2	AC-20C	0.40	1	6	0.945
3	AC-25C	0.38	1	8	1.196
4	级配碎石	0.14	0.8	30	1.323
5	水稳基层	0.20	1	15	1.181
计算结果	$SN=5.31$ 。当路基土模量为 40MPa, 计算 80KN 对应的当量标准轴次为 3.10E+07。				

表 2.15 结构 I (定) 计算结果

结构层	材料属性	结构系数 $a_i$	排水系数 $m_i$	厚度 $D_i$ (cm)	$SN_i$ 计算值 (in)
1	AC-13C	0.44	1	4	0.661
2	AC-20C	0.40	1	6	0.945
3	ATB-25	0.38	1	14	2.094
4	级配碎石	0.14	0.8	20	0.882
5	水稳基层	0.20	1	32	1.575
计算结果	$SN=6.16$ 。当路基土模量为 40MPa, 计算 80KN 对应的当量标准轴次为 1.09E+08。				

AASHTO 疲劳方程:

$$\log W_{t18} = Z_R S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \log \left( \frac{\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5}}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} \right) + 2.32 \log M_r - 8.07$$

式中:  $M_r$ —为路基土有效回弹模量; $SN$ —为考虑当地的降水和排水条件的路面结构数,  $SN = D_1 \times a_1 + D_2 \times a_2 + \dots + D_n \times a_n$  $\times m_1 \times m_2 \dots \times m_n$ ; $D_1, D_2, \dots, D_n$ —为各结构层的厚度; $a_1, a_2, \dots, a_n$ —为各结构层的结构系数; $m_1, m_2, \dots, m_n$ —为各结构层的排水系数; $W_{t18}$ —为 80kN 单轴荷载的容许作用次数; $P_t$ —为在服务期末的服务能力指数; $Z_R, S_0$ —分别是正态偏差、标准差。

根据上述 AASHTO 公式计算的疲劳寿命如表 2.16。

表 2.16 AASHTO 计算结果(标准荷载 80KN)

路段	I (初)	I (定)
路基土 $E_0$	40MPa	40MPa
结构数 SN	5.31	6.16
计算的疲劳寿命	3.10E+07	1.09E+08
15 年设计累计标准轴次	2.49E+07	

从以标准荷载 80KN 的 AASHTO 计算结果可以看出, 两种路面结构都能满足按照交通量设计的 15 年累计标准轴次 2.49E+07, 但两种路面结构计算所得到的疲劳寿命分别为 3.10E+07 次和 1.09E+08 次, 相差三倍之多, I (定) 的路面结构类型要明显优于 I (初) 的路面结构类型。

## 2.2.3 按沥青协会 AI 方法进行验算

### 1. 累计标准轴次

根据表 2.2、表 2.4 的交通数据, 由如下代表车型 (其中货车考虑了一定的超载, 超载比率见表 2.3), 根据 AI 的荷载标准轴次换算公式, 换算成标准荷载 80KN 下的累计标准轴次如表 2.17。

表 2.17 按 AI 计算 15 年的累计标准轴次(标准荷载 80KN)

车型	前轴 数	后轴 数	规定载重限					
			前轴重 (Kip)	前轴载 系数	后轴重 (Kip)	后轴 载数	累 计 交 通 量	累 计 标 准 轴 次
金杯 SY132	1	1	2.9	0.001	6.2	0.012	22832645	432385
解放 CA141	1	1	5.5	0.007	15.4	0.536	21839921	50046738
黄河 JN150	1	1	11.0	0.132	22.8	2.516	3970895	23263202
江淮 AL6600	1	1	3.8	0.002	6.0	0.010	43679842	611518
黄海 DD650	1	1	11.0	0.132	20.5	1.651	3970895	7183349
解放 SP9134B	1	2	5.6	0.008	16.3	0.929	2978171	4053291
计算结果	双向累计标准轴次 8.56E+07, 车道系数 0.5, 方向分布系数 0.6, 设计累计标准轴次 2.57E+07。							

注: 按照 AI 方法进行换算, 货车考虑了一定的超载。

### 2. 计算结构

见表 2.7

### 3. 荷载图式及计算点位置

表 2.18 计算采用双圆荷载图式

每个轮胎荷载	轮胎接触压力	荷载半径	荷载圆间距
4500 (LBS)	85.00 (psi)	4.11 (in)	13.50 (in)

计算点位置位于沥青层层底、路基土顶面，其位置在平面上相对于 3 个不同位置。

表 2.19 计算点位置

位置	轮中央	轮边缘	两个轮隙的中央
X 方向距离轮中央的距离	0	4.11 (in)	6.75 (in)
Y 方向距离轮中央的距离	0	0	0

### 4. 基本材料参数

表 2.20 结构参数

序号	材料	模量 (MPa)	泊松比
1	AC-13C	4500	0.35
2	AC-20C	4200	0.35
3	ATB-25/ AC-25C	3500	0.35
4	级配碎石	300	0.35
5	水稳底基层	5000	0.20
6	路基土	40	0.45

表 2.21 沥青混合料的体积参数

序号	材料	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>
1	AC-13C	5	11
2	AC-20C	5	11
3	ATB-25/ AC-25C	5	11

### 5. 各控制点计算的容许疲劳寿命

沥青层底拉应变疲劳方程：

$$N_f = 0.00115 (\varepsilon_t)^{-3.29} |E^*|^{-0.854} \cdot C$$

式中， $\varepsilon_t$ —沥青层底容许拉应变；

$E^*$ —沥青混合料的动态模量；

C—空隙率 V<sub>a</sub> 和沥青体积 V<sub>b</sub> 的函数  $C=10^M$

其中  $M=4.84[V_b / (V_a+V_b) - 0.6875]$

路基层表面永久变形方程：

$$N_d = 1.365 \times 10^{-9} (\varepsilon_c)^{-4.477}$$

式中,  $\varepsilon_c$ —土基表面容许压应变

## 6. 计算结果

按 AI 方法计算的结果如下, 其最不利位置在轮隙中央。

表 2.22 按 AI 方法进行验算情况(标准荷载 80kN)

结构	AC-13C 层		AC-20C 层		ATB-25/ AC-25C 层		路基
	拉应变, $\mu\varepsilon$	疲劳寿命	拉应变, $\mu\varepsilon$	疲劳寿命	拉应变, $\mu\varepsilon$	疲劳寿命	压应变, $\mu\varepsilon$
I (初)	36.9	2.13E+08	22.3	1.18E+09	72.8	2.82E+07	69.5
I (定)	38.7	1.82E+08	20.9	1.47E+09	72.0	2.92E+07	98.5

从表 2.22 中可以看出, 最不利点在 ATB-25/ AC-25C 沥青层层底, 结构 I (初) 和结构 I (定) 疲劳寿命分别为  $2.82E+07$  和  $2.92E+07$ , 最终路面结构寿命结果见表 2.23。

表 2.23 按 AI 方法进行验算最终结果(标准荷载 80KN)

	设计疲劳寿命	计算疲劳寿命
I (初)	2.57E+07	2.82E+07
I (定)		2.92E+07

由最终结果可以看出, 两种路面结构的计算疲劳寿命都比原先设计的疲劳寿命长, 两种不同的路面结构的寿命比较来说, I (初) 比起 I (定) 稍微短一些, 但是都符合设计要求。

## 2.3 本章小结

针对实体工程, 结合跟踪研究的结构路段, 笔者就前后选取的路面结构, 采用我国现行的弯沉指标和层底弯拉应力方法、AASHTO 方法、AI 方法三种方法进行了结构验算和对比分析, 具体的计算结果汇总如下表 2.24。

表 2.24 三种方法计算结果汇总

结构形式	计算方法	设计疲劳寿命	计算疲劳寿命	设计弯沉值	计算弯沉值
I (初)	我国现行	/	/	37.4	27.37
	AASHTO	2.49E+07	3.10E+07	/	/
	AI	2.57E+07	2.82E+07	/	/
I (定)	我国现行	/	/	32.7	25.36
	AASHTO	2.49E+07	1.09E+08	/	/
	AI	2.57E+07	2.92E+07	/	/

通过数据我们不难看出, 两种路面结构不论通过哪种方法得到的计算结果, 都能符

合设计值，并且有一定的富余；但同时所得到的结果都显示，I（初）的设计指标都比 I（定）要差，无论是疲劳寿命还是弯沉。工程上采用的是 I（定）结构形式，增加了路面设计的保险系数。至于最后的路用性能如何，笔者会就此路面结构继续做后期的跟踪调查。

### 第三章 复合式基层路面结构特点及设计方法对比分析

良好的路面结构类型应该具有良好的路用性能。一般的沥青路面应该具备以下主要的使用性能<sup>[28]</sup>:

1. 高温稳定性，即抵抗高温流动变形的能力；
2. 低温抗裂性能，即抵抗低温收缩裂缝的能力；
3. 水稳定性，即抵抗沥青混合料受水的侵蚀逐渐产生沥青剥离、掉粒、松散、坑槽而产生破坏的能力；
4. 耐疲劳性能，即路面抵抗沥青混合料在反复荷载（包括交通和温度荷载）作用下发生破坏的能力；
5. 抗老化性能，即抵抗沥青混合料受气候影响出现发脆并逐渐丧失粘结力现象等各种不良性能的能力；
6. 表面服务性能，包括低噪声及潮湿情况下的抗滑性能，防止雨天的雨水在车后产生水雾等性能，这些性能直接影响交通安全以及对环境的保护；
7. 行驶舒适性能，主要是指由于平整度不良而产生的行车颠簸，也包括横向。

以上种种性能，涵盖了所有沥青路面结构所有应该具备的条件，即使是复合式基层沥青路面结构也不例外。

#### 3.1 复合式基层路面结构特点

对于复合式基层路面结构，就本论文研究结构而言自上而下分别为 AC-13C 抗滑表层、AC-20C 中面层、ATB-25 密级配沥青稳定碎石层、级配碎石过渡层、半刚性水泥稳定碎石承重层以及土基底层，在以上的各个层面中，均有自己的独自结构特点，共同为路面结构服务。

##### 3.1.1 面层

面层直接承受行车荷载的作用和感受温度和湿度变化对其性质的影响，并直接影响到行车的舒适性、安全性和运行效率（速度）以及效益（经济性）。因此对沥青面层的性能和面层材料的性质提出了多方面的要求。不管什么样的路基结构，只要是沥青路面，面层的主要功能就有以下几个方面：平整、抗滑、耐磨损、不透水、降低噪音、抗剪切变形（车辙和推移）、抗疲劳开裂、抗低温缩裂、抗老化、抗剥落等。

面层通常分为两层。上层称之为表面层或者磨耗层，除了级配之外还要在沥青材料上满足上述功能，因此在实体工程中采用了 SBS 改性沥青，以改善相应的路用功能。表面层下面称之为联结层，即 AC-20C。联结层的作用是改善路表面的平整度，提高面层的结构性等。联结层不直接同行车和环境接触，在上述性能要求中，抗滑、耐磨损、降低

噪音的要求可以免除，抗老化、抗剥落、抗剪切推移、抗低温缩裂和抗疲劳开裂的要求较表面层可以适当放宽。

### 3.1.2 基层和底基层

基层和底基层是路面结构的主要承重层，要求具有足够的强度（承载能力）、良好的抗车辙和抗疲劳开裂性能以及耐久性和水稳定性（抗剥落、耐冲刷）。对于本实体工程，基层结构为复合式，上基层为密级配沥青稳定碎石，中间级配碎石层作为过渡层，然后下卧半刚性水泥稳定碎石底基层，相对来说比较复杂，在此路面结构中，对于各自的作用来说，沥青稳定碎石主要是起到抗疲劳作用，其中采用了公称最大粒径为 25.0mm 的集料，是为了更好地增加混合料的抗剪切变形能力。级配碎石层能够很好地延缓反射裂缝的产生，但是在施工中要严格控制各项指标，以达到预期的效果。而半刚性水泥稳定碎石底基层的作用与一般的半刚性基层一样，能为路面提供足够大的承载力，但是半刚性基层公认的温缩和干缩产生的裂缝这一弊病是却难控制。

### 3.1.3 路基

路基是路面结构的基础，支持路面结构承受行车荷载的作用。路面结构要想使用耐久，不产生因路基塑性变形所引起的过量沉降和与之相伴随的裂缝等病害，路基必须具备均匀、稳定和一定的承载能力。实体结构地处福建西北部山区，自然区划，沿线地处中华人民共和国公路自然区划IV6a 区，即武夷南岭山地过湿区，总体上地形地势复杂，路基填挖变化频繁，土基回弹模量相差比较大，有些地方进行了换填，用石方取代原有的土方，以确保路面具有足够的地基承载力。

## 3.2 路面结构设计方法对比与分析

此实体工程的路面结构相对一般的高速公路来说比较复杂，主要是半刚性+柔性基层的复合式结构比较新颖，在路面结构设计上也有别于一般的半刚性基层路面结构和柔性基层路面结构。在上一章的结构计算中，采用了我国弯沉指标和结构层底弯拉应力控制设计方法、AASHTO 设计方法和 AI 设计方法三种方法来分别验算上述路面结构，但得到的结果多少有些差异。

### 3.2.1 我国弯沉指标和结构层底弯拉应力控制设计方法

我国现行的路面结构设计采用的理论是双圆分布垂直荷载作用下的弹性层状连续体系，在进行高速、一、二级公路的结构设计中，以路表回弹弯沉值和沥青混凝土层层底拉应力(拉应变)及半刚性材料层的层底拉应力为设计指标。路面荷载及计算点如图 3.1 所示。

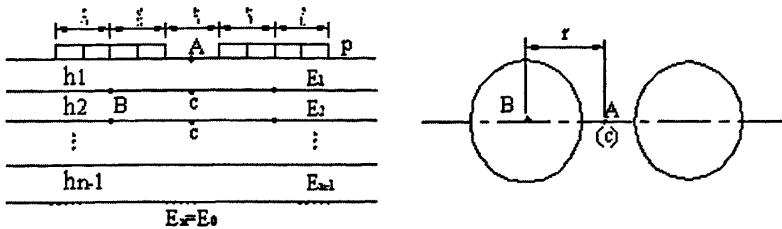


图 3.1 路面荷载及计算点图示

结构整体承载力与抵抗疲劳开裂是路面结构厚度设计应满足的要求：(1) 轮隙中心处(A点)路表计算弯沉值 $l_s$ 不大于设计弯沉值 $l_d$ ，即： $l_s \leq l_d$  (2) 轮隙中心(C点)或单圆荷载中心处(B点)的层底拉应力 $\sigma_m$ 也不应该大于容许拉应力 $\sigma_R$ ，即： $\sigma_m \leq \sigma_R$ ，路面结构设计按图3.2所示的流程进行。

### 一、主要设计内容包括：

- (1) 根据设计要求，按弯沉或弯拉指标分别计算设计年限内一个车道的累计标准当量轴次，确定设计交通量与交通等级、面层、基层类型，并计算设计弯沉值或容许拉应力。
- (2) 按路基土类与干湿类型及路基横断面形式，将路基划分为若干路段，确定各个路段土基回弹模量设计值。
- (3) 参考经验拟定几种可行的路面结构组合与厚度方案，根据选用的材料进行配合比试验，测定各结构层材料的抗压回弹模量、弯拉模量与抗拉强度等，确定各结构层的设计参数。
- (4) 采用多层弹性体系理论设计程序对路面厚度进行计算。
- (5) 对于季节性冰冻地区应验算防冻厚度是否符合要求。
- (6) 通过技术经济比较，确定路面结构方案。

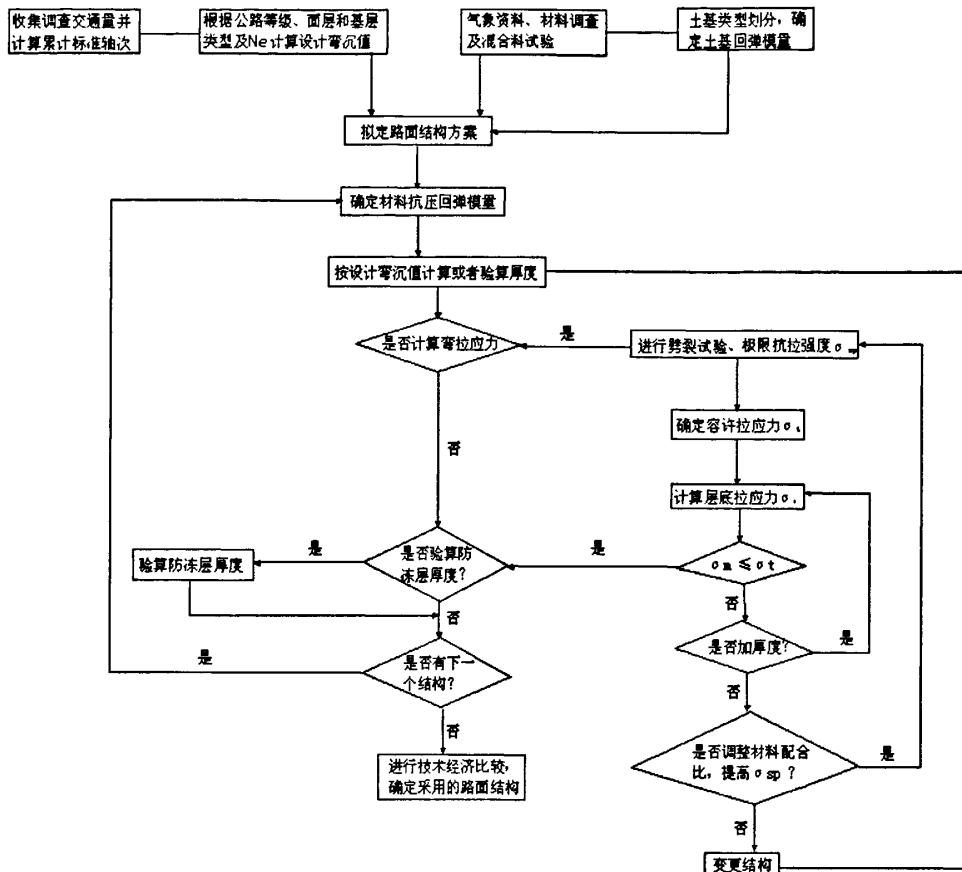


图 3.2 路面结构设计流程图示

## 二、设计弯沉值按式(3-1)计算确定

$$l_d = 600N_e^{-0.2} A_c A_s A_b \quad (3-1)$$

其中:  $l_d$  —— 设计弯沉值 (0.01mm);

$N_e$  —— 设计年限内一个车道累计当量轴次;

$A_c$  —— 公路等级系数, 高速公路、一级公路为 1.0, 二级公路为 1.1, 三、四级公路为 1.2;

$A_s$  —— 面层类型系数, 沥青混凝土面层为 1.0; 热拌和冷拌沥青碎石、上拌下贯或贯入式路面、沥青表面处治为 1.1; 中、低级路面为 1.2。

$A_b$  —— 基层类型系数, 对半刚性基层  $A_b=1.0$ ; 柔性基层  $A_b=1.6$ ; 对于组合式基层采用线性内插确定基层类型系数:

$$A_b = (H_F + 2)/20 \quad (3-2)$$

式中:  $H_F$  —— 为半刚性基层或底基层上柔性结构层总厚度 (cm);

## 三、以弯拉应力为设计指标时, 材料的容许拉应力 $\sigma_l$ 应按下列公式计算:

$$\sigma_R = \frac{\sigma_s}{K_s} \quad (3-3)$$

其中:  $\sigma_R$  —— 路面结构层材料的容许拉应力 (MPa);

$\sigma_s$  —— 沥青混凝土或半刚性材料的极限抗拉强度 (MPa);

$K_s$  —— 抗拉强度结构系数。

对沥青混凝土的极限抗拉强度, 指 15℃时的极限抗拉强度; 对水泥稳定类材料龄期为 90 天的极限抗拉强度 (MPa); 对二灰稳定类、石灰稳定类的材料龄期为 180 天的极限抗拉强度 (MPa)。对沥青混凝土面层的抗拉强度结构系数, 按式 (3-4) 计算:

$$K_s = 0.09 N_e^{0.2} / A_c \quad (3-4)$$

$$\text{对无机结合料稳定集料类: } K_s = 0.35 N_e^{0.11} / A_c \quad (3-5)$$

$$\text{对无机结合料稳定细粒土类: } K_s = 0.45 N_e^{0.11} / A_c \quad (3-6)$$

四、路面设计中各结构层的材料设计参数应根据公路等级和设计阶段的要求确定。

(1) 高速公路、一级公路施工图设计阶段应根据拟采用的路面材料实测设计参数; 各级公路采用新材料时, 也必须进行材料试验实测设计参数。

(2) 高速公路、一级公路初步设计阶段或二级及其以下公路施工图设计阶段可借鉴本地区已有的相近材料试验资料, 根据使用经验确定。

(3) 初步设计阶段设计参数选择参照附录 E 确定。

五、以路表弯沉值为设计指标时, 设计参数采用抗压回弹模量。

对于沥青混凝土试验温度为 20℃; 拉应力 (应变) 为设计指标时, 应采用抗拉强度与弯拉回弹模量, 对于沥青混凝土试验温度为 15℃, 也可采用劈裂强度与抗压回弹模量。

六、沥青混合料材料的设计参数按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的规定测定。考虑到模量取值的不利组合, 回弹模量的设计值按下式计算:

(1) 计算路表弯沉值时, 按式 (3-7) 计算:

$$E = \bar{E} - Z_\alpha S \quad (3-7)$$

(2) 计算层底拉应力时, 计算层以下各层的模量可采用式 (3-7) 计算; 计算层及以上各层模量应采用式 (3-8) 计算:

$$E = \bar{E} + Z_\alpha S \quad (3-8)$$

其中:  $\bar{E}$  —— 各试件模量的平均值;

$S$  —— 各试件模量的标准差;

$Z_\alpha$  —— 保证率按 95%, 系数取 2.0。

七、轮隙中心路表回弹弯沉的计算:

(1) 路表弯沉值按式 (3-9) 计算

$$l_s = 1000 \frac{2p\delta}{E_1} \alpha_c F \quad (3-9)$$

其中 :  $\alpha_c = f(\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta} \dots \frac{h_{n-1}}{\delta}, \frac{E_2}{E_1}, \frac{E_3}{E_2} \dots \frac{E_0}{E_{n-1}})$

## (2) 弯沉综合修正系数

$$F = 1.63 \left( \frac{l_s}{2000\delta} \right)^{0.38} \left( \frac{E_0}{p} \right)^{0.36} \quad (3-10)$$

其中:  $l_s$  —— 路面计算弯沉值 (0.01mm);

$p, \delta$  —— 标准车型的轮胎接地压强 (MPa) 和当量圆半径 (cm);

$\alpha_c$  —— 理论弯沉系数;

$E_0$  或  $E_n$  —— 土基回弹模量值 (Mpa);

$E_1, E_2, E_{n-1}$  —— 各层材料回弹模量 (Mpa);

$h_1, h_2, h_{n-1}$  —— 各结构层厚度 (cm)。

## 八、层底拉应力设计与验算:

层底拉应力以单圆中心 (B 点) 及双圆轮隙中心 (C 点) 为计算点, 并取较大值作为层底拉应力。按下式计算层底最大拉应力:

$$\sigma_m = p \bar{\sigma}_m \quad (3-11)$$

$$\bar{\sigma}_m = f(\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta} \dots \frac{h_{n-1}}{\delta}, \frac{E_2}{E_1}, \frac{E_3}{E_2} \dots \frac{E_0}{E_{n-1}})$$

其中:  $\bar{\sigma}_m$  —— 理论最大拉应力系数。

设计时, 应先拟定某一层作为设计层, 再根据施工厚度要求拟定面层和其它各层的厚度。当采用半刚性基层、底基层结构时, 可任选一层作为设计层; 当采用半刚性基层、粒料类材料为底基层时, 宜拟定面层、底基层厚度, 一般半刚性基层为设计层可得到合理的结构; 当采用柔性路面结构时, 宜拟定面层、底基层的厚度, 计算基层的厚度, 当求得基层厚度太厚时, 可考虑选用半刚性底基层, 其上再选用沥青稳定碎石作基层, 以减少路面总厚度, 增加结构强度和稳定性。

## 3.2.2 AASHTO 设计方法

### 一、设计标准和设计考虑<sup>[30]</sup>

AASHTO 设计方法采用现时服务能力指数 PSI 作为衡量路面使用性能的指标, 其值可通过路面的使用性能进行客观量测和主观评价相结合的方法确定。

$$PSI = 5.03 - 1.911g(1 + \overline{SV}) - 0.01\sqrt{C + P} - 1.38\overline{RD}^2 \quad (3-12)$$

其中， $\overline{SV}$ —轮迹带纵断面的平均坡度方差，运用 CHLOE 断面仪量测的结果；

C—已发展成网状裂缝的裂缝面积，以  $m^2/92.9 m^2$  路面计；

P—修补的面积，包括表面修补和补坑，以  $m^2/92.9 m^2$  路面计；

$\overline{RD}$ —平均车辙深度，这是用 1.2m 长的直尺，从车辙最深处中点量出的，每隔 7.62m 侧一点，最后取其平均值。

沥青路面刚修好时的初始服务能力  $PSI_0$  约为 4.2 左右，从初始状态到终端状态所经历的时段称为使用性能期，使用性能期内路面服务能力指数的变化量：

$$\Delta PSI = PSI_0 - PSI_t$$

设计人员可以根据需要规定服务能力的初始和终端值，由此确定设计标准  $\Delta PSI$  值。

AASHTO 设计方法以 AASHTO 试验路的观测资料为基础，建立了  $\Delta PSI$  同路面结构数 SN 和标准轴载 80KN 作用次数  $N_{18}$  的经验关系式：

$$\lg N_{18} = 9.36 \lg(SN + 1) - 0.20 + \frac{\lg \left[ \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \lg E_{se} - 8.07 - \beta s_z \quad (3-13)$$

其中：  $\beta$ —与目标可靠度  $Ps$  相应的可靠指标；

$s_z$ —交通预估和使用性能预估的总标准差；

SN—路面结构数，其值为  $SN = a_1 h_1 + a_2 h_2 + a_3 h_3$  (3-14)

$h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ —分别为沥青面层、基层和垫层的厚度 (in)；

$a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ —与各结构层材料类型和性质有关的层位系数；

$E_{se}$ —一路基土的有效回弹模量 (psi)。

在设计方法中，还考虑了一下几个方面：

(1) 环境对  $\Delta PSI$  的影响—主要考虑冻胀和膨胀黏土使服务能力变化量降低的影响。

(2) 路面结构的排水条件—主要反映在路面结构数 SN 中，

$$SN = a_1 h_1 + a_2 h_2 m_2 + a_3 h_3 m_3 \quad (3-15)$$

其中： $m_2$ 、 $m_3$ —相应为基层和垫层的排水系数。

## 二、设计参数

### 1. 使用性能期和分析期

设计使用性能期是指路面结构修建初期的服务水平衰变到需进行改建的终端服务水平所经历的时段，考虑的主要因素有：道路的功能等级、公众所能接受的路面进行大修的年限、初期修建所能提供的资金和寿命周期费用等。

进行路面设计方案分析时所采用的时段称为分析期。各种道路的分析期为：大交通量城市道路—30—50 年；大交通量公路—20—50 年。

### 2. 交通

(1) 标准轴载：80KN 单轴荷载。

(2) 轴载换算：道路上的各种轴载采用 AASHTO 路面结构设计方法的轴载当量换算

系数表中的的当量换算系数换算成标准轴载数。

(3) 各类货车当量轴载系数：在有称重设备时，将采集到的各类货车的轴载谱，按上述轴载换算系数分析各类货车的当量轴载系数。

(4) 分析期内设计车道的标准轴数，按下式计算：

$$N_{18} = (ADT)_0 \sum_{i=1}^n (T_{pi} T_{fi}) f_d f_i f_g \quad (3-16)$$

其中： $(ADT)_0$ —初始年的双向平均日交通量；

n—货车类型数；

$T_{pi}$ —i 类货车在日交通量中的所占比例；

$T_{fi}$ —i 类货车的当量轴载系数；

$f_d$ —方向系数。一般情况为 0.5，个别情况可变动于 0.3-0.7 范围内；

$f_i$ —车道系数，随各个方向的车道数而异，1 个车道时，系数为 1；2

个车道时，系数为 0.8-1.0；3 个车道时，系数为 0.6-0.8；4 个车

道时，系数为 0.5-0.75.

$f_g$ —分析期内交通增长系数，其值为

$$f_g = \frac{[(1+r)^t - 1] \times 365}{r} \quad (3-17)$$

t—分析期（年）；

r—分析期内交通年平均增长率。

### 3. 可靠度参数

目标可靠度  $P_s$ （可靠性水平 R）对应的可靠指标  $\beta$  按照下表 3.1 选取。

表 3.1 可靠度  $P_s$  与可靠指标  $\beta$  的对应关系

$P_s(\%)$	99	98	97	96	95	93	90	85	80	75	70	60	50
$\beta$	2.32	2.07	1.89	1.75	1.65	1.48	1.28	1.04	0.84	0.67	0.52	0.25	0

总标准差  $s_z$  按具体情况选定，AASHTO 设计方法按 AASHTO 试验路的误差分析结果，建议采用 0.45。

### 4. 路基土有效回弹模量

一年内不同时期测定的路基土回弹模量值  $E_s$ ，按他们对路面服务能力的相对损伤程度，分别赋予相应的权系数  $u_f$ ，求取平均损伤后，可得到路基土的有效回弹模量值  $E_{se}$ ，估算对路面服务能力的相对损伤程度  $u_f$ ：

$$u_f = 1.18 \times 108 E_s - 2.32 \quad (3-18)$$

叠加各月的相对损伤，除以月数后，可得到平均损伤，由此平均值，再利用公式 3-16，

便可确定路基土的有效回弹模量  $E_{se}$ 。

### 三、结构数与结构层厚度的选取

#### 1. 层位系数

路面结构各层次的层位系数，用于度量该层材料单位厚度所能提供的相对性能。层位系数可通过试验路确定，或者按与材料性质有关的试验曲线或关系式确定。

(1) 密级配沥青混凝土面层的层位系数  $a_1$ —可按它与材料在 68°F (20°C) 时的回弹模量  $E_{ac}$  的关系曲线 (图 3.2) 查取。

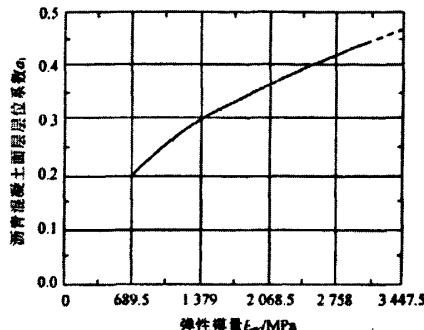


图 3.2 沥青混凝土面层层位系数  $a_1$  与该材料弹性模量  $E_{ac}$  的关系曲线

(2) 沥青处治基层的层位系数  $a_2$ —可按它与材料的回弹模量  $E_{bs}$  或者马歇尔稳定度的关系查图 3.3 确定。

(3) 水泥处治基层的层位系数  $a_2$ —可按它与材料的回弹模量  $E_{bs}$  或者 7d 无侧限抗压强度的关系，查图 3.4 确定。

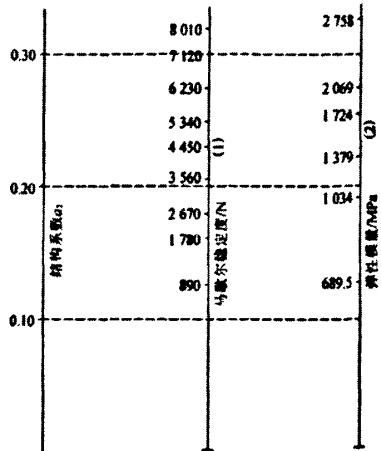


图 3.3 沥青处治基层层位系数  $a_2$  与该材料  
弹性模量  $E_{bs}$  和马歇尔稳定度的关系

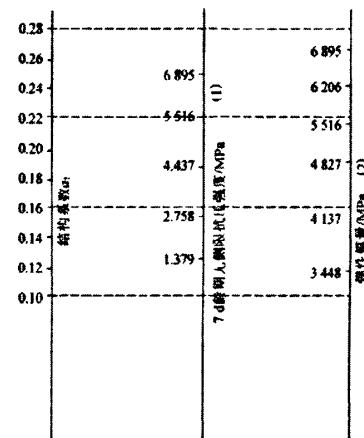


图 3.4 水泥处治基层层位系数  $a_2$  与该材料  
弹性模量  $E_{bs}$  和 7d 无侧限抗压强度的关系

(4) 粒料基层的层位系数  $a_2$ —可按它与材料的回弹模量  $E_{bs}$  的关系，由下式 (3-19) 确定：

$$a_2 = 0.2491 \lg E_{bs} - 0.977 \quad (3-19)$$

(5) 粒料垫层的层位系数  $a_3$ —可按它与材料的回弹模量  $E_{sb}$  的关系, 由下式(3-20)确定:

$$a_3=0.2271g E_{sb} - 0.839 \quad (3-20)$$

## 2. 排水系数

基层与垫层的排水系数  $m_2$  和  $m_3$ , 按路面结构在一年内可能处于饱水状态的时间以及排水质量, 参照下表 3.2、3.3 确定。

表 3.2 排水系数  $m_2$  和  $m_3$  与路面结构饱水状态和排水质量的关系

排水质量	路面结构处于接近饱水状态的时间百分比			
	<1%	1%-5%	5%-25%	>25%
极好	1.4-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
优	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
良	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
差	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
很差	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

表 3.3 排水质量的分级规定

排水质量	极好	优	良	差	很差
排水时间	2h	1d	1星期	1个月	水排不掉

## 3. 结构层厚度的选取

各结构层厚度按下述步骤由上到下进行:

(1) 取基层的模量  $E_{sb}$  作为路基土的有效回弹模量  $E_{se}$ , 按照(3-12)确定所需的结构数  $SN_1$ , 并用下式(3-21)计算面层的厚度  $h_1$ :

$$h_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad (3-21)$$

(2) 取垫层的模量  $E_{sb}$  作为路基土的有效回弹模量  $E_{se}$ , 按照(3-13)确定所需的结构  $SN_2$ , 并用下式(3-22)计算基层的厚度  $h_2$ :

$$h_2 \geq \frac{SN_2 - a_1 h_1}{a_2 m_2} \quad (3-22)$$

(3) 按路基土的有效回弹模量  $E_{se}$ , 按照(3-13)确定所需的结构  $SN_3$ , 并用下式(3-23)计算垫层的厚度  $h_3$ :

$$h_3 \geq \frac{SN_3 - a_1 h_1 - a_2 h_2 m_2}{a_3 m_3} \quad (3-23)$$

### 3.2.3 AI 设计方法

#### 一、理论基础<sup>[3]</sup>

AI 设计方法是把路面看成多层弹性体系，各层材料以弹性模量和泊松比表征，并考虑了沥青混合料的粘弹性和粒料的非线性等特征。

#### 二、设计标准

##### 1. 沥青层底面的容许拉应变

对于沥青体积  $V_b=11\%$  和空隙率  $V_a=5\%$  的标准混合料，疲劳方程为

$$N_f = 0.0796(\varepsilon_t)^{-3.291}|E^*|^{-0.854} \quad (\text{英制}) \quad (3-24)$$

而对于一般的混合料，疲劳方程为

$$N_f = 0.0796C(\varepsilon_t)^{-3.291}|E^*|^{-0.854} \quad (\text{英制}) \quad (3-25)$$

其中  $N_f$  为控制疲劳开裂的允许荷载重复作用次数，而  $|E^*|$  为沥青混合料的动模量，

$$\text{修正系数 } C=10^M, \quad M = 4.84 \left( \frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$$

82 年 AI 报告，按 3-24 式所得的疲劳开裂面积占总面积的 20%，上式改为公制为：

$$N_f = 1.15 \times 10^{-3} C |E^*|^{-0.854} (\varepsilon_t)^{-3.291}$$

由此得出

$$\varepsilon_t = \frac{0.128 \times 10^{0.304M} |E^*|^{-0.259}}{N_f^{0.304}} \quad (3-26)$$

本方法计算时采用弗恩等人制定的疲劳标准，且作了适当标定以反映沥青用量和空隙率的变化对疲劳寿命的影响。

##### 2. 土基表面容许压应变 $\varepsilon_c$ ：

$$N_d = 1.365 \times 10^{-9} (\varepsilon_c)^{-4.447} \quad (3-27)$$

由此得到

$$\varepsilon_c = 1.05 \times 10^{-2} N_d^{-0.223} \quad (3-28)$$

通过以上两个指标控制沥青层的裂缝和控制路面过量的永久变形。

#### 三、交通荷载

AI 设计方法中，荷载采用重复作用的 80KN 当量轴载次数的双圆荷载表示，且假定双轮胎为作用于路面层的两个一定接触压力、半径和间距的圆板，设计时的临界应变位

置位于双轮荷载对称轴上。有交通数据，当量轴载系数都是通过查表得到；若是无交通数据，则按照等级分类。

#### 四、材料设计参数

##### 1. 土基回弹模量 $M_r$

(1) 换算法。当  $CBR < 10\%$  时,  $M_r = 10 \cdot 3 CBR$

(2) 试验法——至少应有 6~8 个试验值。按交通量水平选定设计  $M_r$  的保证率,  $ESAL \leq 10^4$  时, 取试验模量值的 60%;  $10^4 \leq ESAL \leq 10^6$  时, 取试验模量值的 75%;  $ESAL \geq 10^6$  时, 取试验模量值的 87.5%。

##### 2. 粒料基层模量 $E_2$ ——与应力水平相关。

$$\text{应力对回弹模量的影响为: } E_2 = k_1 \theta^{k_2} \quad (3-29)$$

其中:  $\theta$ —第一应力不变量, 一般取 19.5psi;

$k_1, k_2$ —试验系数,  $k_1$  每个月不同, 选用的范围为 8000~12000psi (55.2~82.8MPa), 幂指数  $k_2=0.5$

在 DAMA 程序中, 由于由土基应力变化产生的模量变化通常很小, 所以将土基和沥青层视为线弹性, 而粒料层为非线弹性。其预测方程为:

$$E_2 = 10.44 h_1^{-0.471} h_2^{-0.041} E_1^{0.139} E_3^{0.287} K_1^{0.868} \quad (3-30)$$

其中:  $E_1, E_2, E_3$ —沥青层粒料及土基的模量;

$h_1, h_2$ —沥青层、粒料层的厚度;

$K_1$ —取值范围 8000~12000psi

##### 3. 热拌沥青砼的动模量

黄仰贤和威茨克 1979 年据 60 种不同 HMA 的试验得到:

$$|E^*| = 10^5 \times 10^{\beta_1} \quad (3-31)$$

式中:  $\beta_1 = f(P^{200}, f, \lambda^0, T, V_a, V_b)$

其中因子 T 为路面平均温度  $M_p$ ,  $M_p = M_a \left( 1 + \frac{1}{z+4} \right) - \frac{34}{z+4} + 6$ ,  $M_a$  为月平均气温(°F),

$z$  为表面下深度 (in)。月平均气温随年平均气温 (MAAT) 的变化情况见表 3.4。

表 3.4 月均气温随 MAAT 的变化情况

MAAT	月均气温 (°F)											
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
45°F	24	25	14	27	42	48	61	69	65	55	48	41
60°F	45	38	43	45	56	70	78	81	78	73	58	54
75°F	55	61	61	73	90	91	92	93	93	86	72	55

$|E^*|$  可据  $M_a, P^{200}, \lambda^0, T, V_a, V_b$  查 AI 出版的 MS-1 手册得到 (分 I、II、III型)。

## 五、环境影响

AI 设计方法考虑到了温度对 HMA 和乳化沥青混合料动模量的影响, 对有冻融的地区 ( $MAAT=7^\circ\text{C}$  和  $15^\circ\text{C}$ ) 考虑冻融对土基和粒料回弹模量的影响 ( $MAAT=24^\circ\text{C}$  不考虑), 并对相应的模量值进行了相应的修正。

## 六、结构厚度设计

根据不同基层类型 (沥青混凝土或 I、II、III类乳化沥青料) 及 ESAL 和  $M_r$  查诺谟图。诺谟图系根据将  $[\varepsilon_1]$ 、 $[\varepsilon_c]$ 、 $[\varepsilon_e]$  代入 DAMA 程序算得的较厚之基层绘制。厚度也可将  $[\varepsilon_1]$ 、 $[\varepsilon_c]$ 、 $[\varepsilon_e]$  代入 DAMA 直接算得。

## 七、AI 设计方法的设计流程

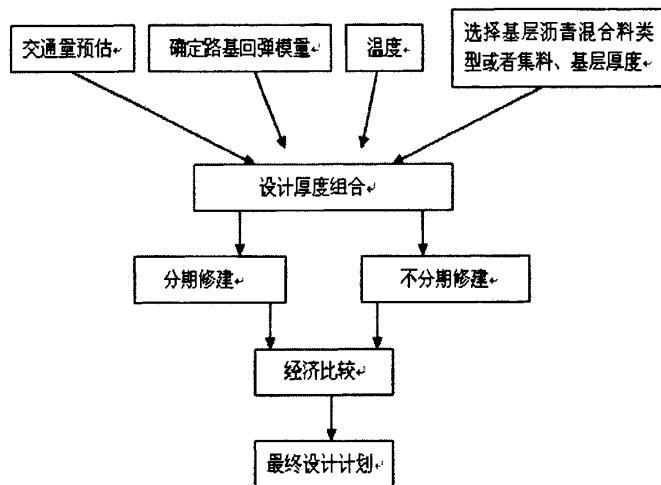


图 3.5 AI 设计方法的设计流程

### 3.2.4 国内外三种设计方法的比较

传统的柔性路面损坏主要是疲劳开裂和永久变形这两种结构性损坏, 几乎所有力学设计方法都是基于沥青层底拉应变和土基顶面压应变这两个指标进行柔性路面的结构设计, 且一般假定路面结构在分析期或使用期末将因结构性破坏而失效。

1. 在我国现行的沥青路面设计中, 存在着许多不足之处<sup>[22]</sup>:

(1) 现有沥青路面设计是从力学特性出发, 很少考虑路面的实际使用性能, 在力学特性与实际性能方面缺乏定量联系。

(2) 我国现行的设计方法是由公路等级、气候、水文、筑路材料、交通量等根据经验提出的结构组合及厚度, 然后进行设计计算, 缺少路面结构组合的定量设计。

(3) 应用现行规范设计指标体系进行路面结构的厚度设计时, 通常情况下半刚性基层上的沥青面层处于受压状态, 柔性基层上沥青面层的疲劳寿命高于由路表弯沉指标确定的路面结构寿命, 沥青面层不会出现疲劳开裂损坏, 这是与事实相违背的。

(4) 材料参数的选择上存在着诸多问题：材料强度不能直接反映结构强度；确定材料参数的试验条件与路面的实际状况差距较大；参数指标与路面使用性能的对应关系不明确；设计阶段与施工阶段参数不一致；监测条件不严格。

(5) 针对不同材料采用相同的疲劳或永久变形方程，设计弯沉值计算中所用到的基层类型系数 A 考虑不全面，取值范围较单一；修正系数 F 是以基于试验路段结果，通过数据回归分析得到的，其真实性值得商榷。

## 2. AASHTO 设计方法的主要特点：

(1) 以 AASHO 试验路为设计理论，得到路面耐用性能指标现时服务能力指数 PSI 与路面工作状态之间的关系，并根据不同的路面等级对路面使用状况的要求提出了路面设计标准。

(2) 建立了设计方法的基本方程，提出了不同设计标准的路面厚度计算、列线图和不同路面材料的等值系数。

(3) 给出了不同车型轴载与数量见的等效关系的轴载换算公式，建立了不同轴载间的等效换算关系，使轴载轻重与交通量多少对路面作用取得了合理的联系，解决了过去设计方法中以轮载大小表示交通荷载的问题。

(4) 引进了地区系数概念。

其不足之处在于：

(1) 强度标准不明确，耐用性的概念所反映的仅是路面表面的现象，未能揭示路面结构内部应力应变关系，只有条件与试验路接近时，设计结果才能使人满意。

(2) 未能考虑不同土基上路面的变形（弹性和塑性）以及变形累计规律的差别。

(3) 路面跟材料的等值系数反应的是各层材料的相对强度，一种材料用一个等值系数无法反映。

(4) 指定车辆在固定车道上行驶，其交通密集程度是单一型的，与实际的出入比较大。

## 3. AI 设计方法的主要优点：

(1) 在保证路面使用功能 (PSI) 的情况下考虑了路面的结构性能；

(2) 采用了弹性层状理论，并考虑了非线性；

(3) 沥青混合料的模量采用动态模量，考虑了沥青混合料的粘弹性特征。

(4) 提供了方便适用的诺谟图。

主要缺点是基层种类太少，适用面太窄。只考虑了垂直荷载作用，设计指标只有两个，没有考虑沥青路面的低温开裂和永久变形。

由以上三种设计方法的种种优缺点，结合上一章的路面结构分析数据结果不难看出，我国的设计方法与 AI 设计方法存在着结构分析上的差异，在面层的受力方面，我国的设计方法计算得到的结果为上中面层结构受压，而 AI 设计方法的结果为受拉，结合路面实际情况，在高速公路的实际运营当中，主要的路面表层病害是车辙跟裂缝，而

裂缝的产生，必然是由于沥青表面层结构受拉所致，也就是说，我国的设计方法得到的计算结果与实际情况相违背。从原理上分析国内外的结构计算的最大差别就是，国内的模量取值为静态模量<sup>[3]</sup>，而国外采用动态模量，静态模量要远远小于动态模量，模量取值的不同，直接影响到路面各层结构的受力问题。

大量工程实践表明采用弯沉作为控制指标，不能很好的表征路面的使用状况，即较低的弯沉指标并不意味着较高的路用性能，相反路面弯沉较小的路面可能会较路面弯沉大的路面破坏的情况严重得多。这种弯沉值与路面状况不相对应的现象在现有道路中并非少见。

在已做的复合式基层路面结构试验段中，平西路，马平路，南广路，江苏沿江路试验段均出现了弯沉实测值超出设计弯沉值 1/6-1/3 不等的现象，但是从路面使用情况来看，实际效果要比单纯的数据显示好的多。从本论文的依附工程看，同样出现了这种情况，在实体工程面层施工结束后一周内，笔者就整条高速公路六个施工标段内分别随机各选取了一段，六段总计约 10 公里进行了路表弯沉的检测，弯沉检测结果如下图 3.6。由 1140 个检测数据得到，有 1/5 的数据超过了设计弯沉值。但路面的后期具体使用状况如何，笔者会作跟踪调查。

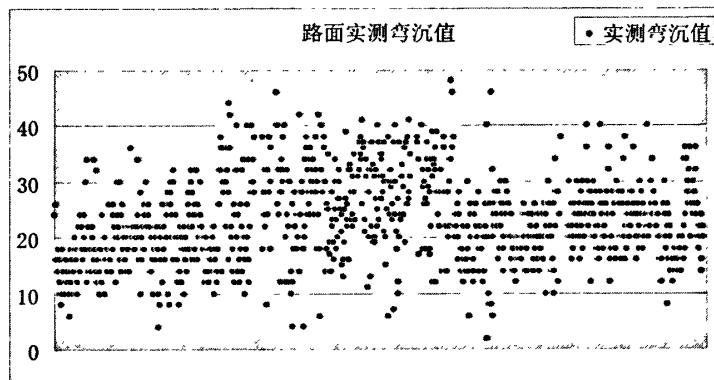


图 3.6 路面实测弯沉值汇总 (0.01mm)

我国很多道路人员认为目前的路面结构设计中片面地强调了路面结构的整体强度，尤其是片面地强调了基层的强度，没有考虑路面的使用性能，虽然所设计的路面结构整体强度很高，体现在竣工后路表值很小、半刚性基层强度高，但使用性能依然不好，不能满足重交通的要求，对半刚性沥青路面的承载能力、路用性能问题很是困惑，对弯沉指标评价合理性提出怀疑。

如何正确看待弯沉值，国外道路专家认为弯沉很少作为设计指标，因为弯沉与路面开裂、车辙都没有很好的联系，弯沉数据作为评价指标离散性较大，但是作为评价路面的均匀性还可以。

表 3.6 各国设计方法、设计指标情况汇总

机构	路面模型	设计指标	环境
----	------	------	----

Shell	多层弹性	疲劳(沥青层、水泥稳定层)、车辙(路基压应变)、车辙(沥青层)、半刚性材料疲劳	温度, 沥青老化
美 AI	多层弹性	疲劳(沥青层)、车辙(路基压应变)	温度、冻融
南非	多层弹性体系(设计为多层弹性体系, 分析可以采用有限元或者粘弹性体系)	疲劳(沥青层, 半刚性材料)、半刚性材料的压碎损坏(不作为设计标准)、车辙(路基土压应变)、重复剪切破坏(粒料层的剪切)	温度, 潮湿状况
英国诺丁汉	多层弹性体系	疲劳(沥青层)、车辙(路基土)	温度、车速
法国 LCPC	多层弹性体系	疲劳(沥青层, 半刚性层)、车辙(路基土)	温度、冰冻
比利时	多层弹性体系	疲劳(沥青层, 半刚性层)、车辙(路基土)	温度
1993 年 AASHTO	经验	路面服务能力指数	冻融、湿度
2002AASHTO (初稿)	多层弹性体系(设计采用多层弹性体系, 分析研究可以考虑有限元)	疲劳(沥青层, 半刚性层)、路面车辙(路基土、粒料层和沥青层的总车辙)、温度裂缝、平整度 IRI	温度、冻融、湿度、车速、日照、风速、降雨等
澳大利亚	多层弹性体系(设计采用多层弹性体系, 但是对于粒料材料为正交异性体。分析研究可以考虑有限元)	疲劳(沥青层, 半刚性层)、车辙(路基土)、综合破坏(薄沥青层)	温度、车速
德国	多层弹性	沥青混凝土疲劳破坏、车辙、压实度、土基压应变	温度
日本	多层弹性	疲劳(沥青层)、车辙(路基压应变)	温度、冰冻
俄罗斯	多层弹性	容许弯沉、疲劳(沥青层、水泥稳定层)、土基剪应力	交通荷载 温度
德州	多层弹性	疲劳(沥青层)、车辙(路基压应变)	温度
华盛顿州	多层弹性体系	疲劳(沥青层)、车辙(结构)	温度, 冰冻
明尼苏达州	多层弹性体系	疲劳(沥青层)、车辙(结构)	温度, 冰冻
爱达荷州	多层弹性体系	疲劳(沥青层)、车辙(结构)	温度, 冰冻
APA 沥青路面 联盟	多层弹性体系	疲劳(沥青层)、车辙(结构)	温度, 冰冻
我国	多层弹性	设计弯沉 疲劳(沥青层、半刚性材料)	

实际上各国外除了我国、俄罗斯采用弯沉作为设计指标外, 绝大部分国家的路面设计方法采用土基顶面压应变以及沥青层底的拉应变、或者采用 AASHTO 的服务性能指数作

为沥青路面设计指标，而且很多国家干脆就采用典型结构。从表 3.6 中可以看出，各国基本上都是以沥青层底弯拉应变控制疲劳开裂，路基土顶面压应变控制路基土车辙以及半刚性层底拉应力（应变）控制半刚性层的疲劳开裂，即在路面设计中以应变或者应力作为控制指标，因此在路面施工控制和工程验收中都是强调施工工程控制，不采用弯沉作为验收指标。

根据我国现行路面设计规范，半刚性路面的弯沉变化经历三个阶段。对于半刚性路面，竣工后的弯沉值与路面破坏的容许值是不同的，因此，为了统一设计状态、使用年限的极限状态以及竣工验收指标，将以前规范的路面容许设计弯沉值除以 1.2 得到的弯沉值作为设计弯沉值，且作为竣工验收弯沉指标。

但是，以上假设对于柔性结构并非合理，因为柔性基层材料模量随时间变化不明显。一方面，对于柔性基层沥青路面设计和竣工验收采用弯沉指标或者采用多大的指标值得斟酌，一方面我国目前的设计体系和竣工验收体系又都采用弯沉作为一个指标值，在现行新的柔性基层沥青路面设计方法和验收标准没有出来前，对于柔性结构可以采用国外成熟的方法进行设计和验算，如 AASHTO 法、AI 法等。对于弯沉指标可以作为一个实测值或者说参考值，其控制值可以通过试验路等论证确定，并在设计文件中说明。但是在计算容许拉应变的时候，其容许值随着路面材料的性质而改变，难以确定，国外的标准和他们的材料性质及参数测定方法有关，建议不采用 AASHTO 方法。

### 3.2.5 BISAR3.0 路面分析软件结构验证

BISAR 程序是基于多层弹性层状体系理论专为道路设计而编制的。属于力学-经验法，是国际上公认的比较完善的路面设计方法。其力学假设：

- (1) 把路面结构当作一种多层线性弹性体系，其中材料用杨氏弹性模量和泊松比表征；
- (2) 材料假定为均质的和各向同性的，路面各层在水平方向为无限大；
- (3) 荷载：一个圆面或几个圆面上作用着均布的垂直和(或)水平荷载(对于一般的设计方法采用一种标准的双轮荷载)。

在路面力学方面，该法以层状弹性体系理论为基础，但考虑了材料的非线性和粘弹性特性，在研究过程中曾以非线性体系理论和粘弹性体系理论来进行分析、对比，对理论在路面设计中的应用又做了大量验证工作。因此，该方法在理论上是比较完善的。运用 BISAR 程序进行计算采用标准轴载计算参数见表 3.7 所示：

表 3.7 标准轴载计算参数

标 准 轴 载	BZZ—100	标 准 轴 载	BZZ—100
标准轴载 P(kN)	100	单轮传压面当量圆直径 d(cm)	21.30
轮胎接地压强 P(MPa)	0.70	两轮中心距(cm)	1.5d

本文在计算沥青路面结构内的应力情况时，考虑到荷载的对称性，计算点选取在两轮荷载的中心、单轮轮心和荷载圆的内侧边缘处。示意图如图 3.7 所示：

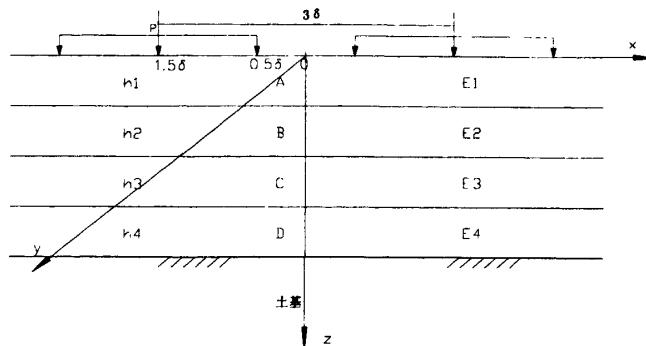


图 3.7 荷载圆图示及计算点位

计算时，以双轮间隙中心为坐标中心，车轴方向为 x 轴，行驶反方向为 y 轴，深度方向为 z 轴建立直角坐标系。

当采用 I (定) 方案进行结构组合时，采用 BISAR 程序计算分析结果如表 3.8 示。

表 3.8 I (定) 方案按 BISAR 程序计算结果

弯沉指标验算(轮隙中心处)			
BISAR 计算弯沉值 (理论值) 0.01mm	弯沉修正系数	计算弯沉值 (0.01mm)	设计弯沉值 (0.01mm)
46.63	0.629	29.33	32.70

应力指标验算			
路面结构层	层底最大应力(MPa)	容许拉应力(MPa)	层底最大应变( $\mu\epsilon$ )
ATB-25	0.162	0.251	125.9
土基	-0.013	0.146	129.3

### 3.2.6 长寿命路面与组合式基层结构路面的比较

#### 一、国外长寿命路面的应变控制指标

长寿命路面的设计思想是保证路面足够的厚度，把病害限制在路面表层，通过定期的表面修复，防止表面病害影响路面结构稳定，保证路面在 50 年以上的设计年限内不发生结构性的疲劳破坏。长寿命路面并不是一直不损坏，而是指路面的损坏仅发生在路面的上层，维修时不需要进行结构性的处理，只需将表层混合料铣刨、加铺等厚度的新拌混合料，维修十分方便、快捷，且能使用再生沥青混合料，经济有效。

英国 Nunn<sup>[3]</sup>提出，当沥青层超过一定厚度时，施工质量良好的路面结构不会产生源于层底的疲劳开裂和结构性车辙。在此基础上他们建立了厚度设计图，当标准轴次超过 80 万次后，沥青层厚度无须增加，这个拉应变临界点对应的疲劳寿命就是疲劳极限。国外对沥青混合料疲劳极限采用四点弯曲试验进行了论证，并得到了一些重要的结论：

- (1) 应变低于  $100 \mu\epsilon$  时可以获得疲劳寿命, 证明存在疲劳极限;
- (2) 应变低于  $100 \mu\epsilon$  时没有必要设置疲劳层, 采用改性沥青或提高沥青质量可以显著提高抗裂性能;
- (3) 永久性路面的结构性能与交通水平没有关系。

对于保证路面不出现结构性损坏的控制标准, Monismith 和 Long<sup>[36]</sup>建议控制沥青混凝土层底的弯拉应变不大于  $60 \mu\epsilon$ , 土基顶面压应变不大于  $200 \mu\epsilon$ 。而在崔鹏、孙立军等研究的国内长寿命路面设计指标中, 提出了适用于中国长寿命路面结构设计的控制指标: 沥青层底拉应变不大于  $120 \mu\epsilon$ , 土基顶面压应变不大于  $280 \mu\epsilon$ <sup>[36]</sup>, 由此看出, 目前为止还没有确定的指标来表征长寿命路面的具体情况。

## 二、复合式路基结构路面参数分析

本实体工程是采取国外长寿命路面结构, 根据国内现在研究的路面结构, 尽管已经铺筑了许多试验路, 但都是根据经验分析, 还没有具体的设计规范。尽管工程采用的路面结构跟国外的有一定的差别, 但是由 BISAR 计算分析结果可以看出, 沥青层底的拉应变为  $125.9 \mu\epsilon$ , 土基顶面的压应变为  $129.3 \mu\epsilon$ 。相对于国外的控制指标来说, 沥青层底的拉应力(拉应变)还是较大, 土基顶面的压应力(压应变)差不多相持平, 也就是说, 国内设计的这种复合式基层路面结构的沥青层底的拉应力太大, 达不到国外提出的长寿路面结构的标准。这样一来, 当路面出现破坏时, 还是从沥青层底的开裂开始, 自下而上贯穿整个沥青层, 直至整个路面发生破坏。根据国外的设计理念, 在基层材料和厚度不变的情况下, 加大沥青层的厚度能有效的减少荷载作用应力的向下传递, 当沥青层达到一定的厚度时, 沥青层底的弯拉应力应变就会很小, 这样就能防止沥青层因为弯拉应力过大而出现早期裂缝破坏。因此, 借鉴此设计方法, 针对本实体工程, 笔者在不改变路面其他结构层的材料、模量和厚度的情况下, 增加 ATB-25 的厚度, 再通过 BISAR 程序进行力学验算, 得到以下结果, 见表 3.9。

表 3.9 增加沥青稳定碎石层厚度后的 BISAR 程序计算结果

应力指标验算			
路面结构层	沥青稳定碎石层厚度 (cm)	层底最大应力 (MPa)	层底最大应变 ( $\mu\epsilon$ )
ATB-25	16	0.148	115
土基		-0.0056	123
ATB-25	18	0.137	105
土基		-0.0053	117
ATB-25	20	0.127	96
土基		-0.0051	112
ATB-25	22	0.118	88

土基		-0.0048	107
ATB-25	24	0.104	77
土基		-0.0046	102

从以上不同的厚度对应的应力应变数据规律不难看出，随着厚度的增加，不管是沥青稳定碎石层还是土基顶面的应力应变都会变小，当达到 16cm 以上，已经接近长寿命路面的指标要求。所以增加沥青稳定碎石层的厚度的方法是可行的，并且是越厚越好。但是在工程中还要考虑到现实性问题，所以选择厚度还要详尽的考虑实际。

### 3.3 本章小结

本章针对三种计算方法得到的实体路面结构数据结果，具体分析了三种设计方法以及各自的优缺点，得出以我国传统的弯沉作为设计指标对于本论文研究的复合式基层路面不适合，具体的结构分析设计还有待于进一步研究，在柔性路面的设计时建议借鉴采用国外的设计方法。但是同时在计算容许拉应变的时候，其容许值随着路面材料的性质而改变，难以确定，国外的标准和他们的材料性质及参数测定方法有关，与国内的材料性质和参数不相符，所以计算容许拉应变时建议不采用 AASHTO 方法。

对比国外长寿命路面与本实体工程的路面结构，利用 BISAR 程序计算分析得到，论文研究的结构并非长寿命路面结构，有一定的差距。根据长寿命路面结构理念，增加沥青稳定碎石层的厚度，计算后再进行对比，由此提出当 ATB 层厚达到一定厚度为能达到符合长寿命路面结构指标要求的方法之一，但具体的厚度要根据设计数据依据实际情况来定。

## 第四章 路面结构材料组成设计

在复合式基层路面结构中，起到关键作用的层位主要是防止反射裂缝的级配碎石层，承受路面荷载疲劳作用的沥青碎石层，抗车辙、抗滑、平整、耐磨损等作用的表面层，因此在此针对这三层的材料组成设计情况作详细的说明<sup>[37][38][39][40]</sup>。

### 4.1 级配碎石层

研究认为，当级配碎石材料作为沥青路面的上卧层时（具有柔性基层的半刚性沥青路面结构），不仅具有减缓半刚性沥青路面反射裂缝的作用，同时也具有一定的抗疲劳能力，但以抗反射裂缝为主。半刚性基层的横向裂缝具有在较短的时间内，即向上面的沥青层反射的趋势，设计上可以通过调整级配及碎石含量，并严格控制施工时含水量得以改善。

#### 4.1.1 原材料

集料必须清洁，不含有有机物、块状或团状的土块、杂物及其他有害物质。

粗集料：应采用耐久、坚硬的岩石轧制而成，级配碎石粗集料质量技术要求见表 4.1。

细集料：即 4.75mm 以下用料，宜采用洁净的石屑，细集料必须洁净，干燥，其质量技术要求见表 4.1。

水：应洁净，不能含有有害物质，来自可疑水源的水应该按照《公路工程水质分析操作规程》要求进行试验，一般可以采用饮用水。

表 4.1 级配碎石用集料技术要求

试验项目	粗集料技术指标	细集料技术指标
液限，不大于	—	25%
塑性指数，不大于	—	4%
砂当量，不小于	—	45%
压碎值，不大于	26%	—
洛杉矶磨耗值，不大于	35%	—
坚固性 <sup>[1]</sup> ，不大于	12%	12%
针片状含量，不大于	20%	—
水洗法<0.075mm 颗粒含量，不大于	1%	15%
软石含量，不大于	5%	—

注：[1]硫酸钠 5 个循环。

具体的原材料检测结果见下表 4.2。

表 4.2 级配碎石用集料检测结果

碎石规格	19~26.5	9.5~19	4.75~9.5	0~4.75
表观相对密度	2.738	2.740	2.751	2.760
毛体积相对密度	2.691	2.676	2.659	2.622
塑性指数	/	/	/	3.0
砂当量(%)	/	/	/	55
压碎值(%)	/	13.5	/	/
软石颗粒含量(%)	2	3	2	/
针片状颗粒含量(%)	5.8	13.0	9.2	/
水洗法<0.075mm 含量(%)	0.2	0.6	0.8	11.6
磨耗值(%)	17.6	17.8	17.8	/

#### 4.1.2 配合比设计

级配碎石基层的级配采用 GRH-25，其级配范围见表 4.3。

表 4.3 GRH-25 级配碎石级配范围

级配类型	通过下列筛孔(方孔筛, mm)的质量百分率(%)												
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
GRH-25	100	90~100	78~92	65~86	57~80	45~70	30~55	20~43	13~32	9~24	6~18	3~12	0~7

合成级配见表 4.4, 图 4.1.

表 4.4 矿料合成级配

集料规格	掺配比例	矿料合成级配试验												
		筛孔及相应通过百分率												
		0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19	26.5	31.5
0~4.75	40	11.4	18.9	25.1	37.6	52.2	69.3	97.5	100	100	100	100	100	100
4.75~9.5	13	0.8	0.9	1.2	1.4	1.7	2.2	23.7	98.8	100	100	100	100	100
9.5~19	29	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.7	2.8	18.8	48.9	71.5	96.5	100	100
19~26.5	18	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	1.9	19.2	80.4	100
合成级配	5	8.1	10.7	15.7	21.6	28.6	43	58.4	67.3	74.1	84.4	96.5	100	
规范级配	0~7	3~12	6~18	9~24	13~32	20~43	30~55	45~70	57~80	65~86	78~92	90~100	100	

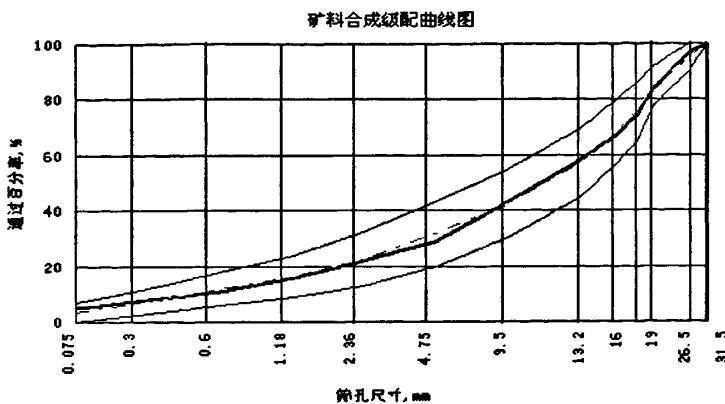


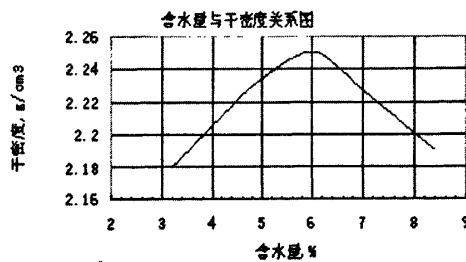
图 4.1 矿料合成级配曲线图

#### 4.1.3 混合料技术要求及性能检测

级配碎石混合料采用重型击实方法进行设计，确定最佳含水量，见表 4.5。最佳含水量下的混合料技术要求以及性能检测见表 4.6。

表 4.5 最佳含水量的确定

检测依据	JTJ 057-94	结构形式	级配碎石
设计级配比例 (%)	19~31.5:9.5~19:4.75~9.5:0~4.75=18:29:13:40		



最大干密度, g/cm <sup>3</sup>	2.250	最佳含水量, %	6.0

表 4.6 级配碎石混合料重型击实技术要求及性能检测

试验项目	技术要求	检测代表值
CBR, %, 不小于	100	167.5
固体体积率, %,	85~90	87.6

注：CBR 为最佳含水量下三层击实 98 次、4 天饱水下的 CBR。

#### 4.2 密级配沥青稳定碎石层

沥青稳定碎石在此作为上基层，除了起到承重作用之外，还起到关键的抗疲劳作用。

由于层位较低，可以选用公称最大粒径较大的集料，集料粒径增大，可以增加混合料的抗剪切变形能力，随着粒径的增加，厚度也应当相应的增加。本工程采用 25.0mm 的最大粒径，厚度采用 14cm，分两层铺设。

#### 4.2.1 原材料

##### 1. 沥青

沥青稳定碎石基层采用的是 A 级 70 号道路石油沥青，沥青技术要求应满足表 4.7 的要求。

表 4.7 70 号道路石油沥青技术要求

指 标	单 位	AH-70
针入度(25℃, 5s, 100g)	0.1mm	60~80
针入度指数 PI <sup>[1]</sup> , 不小于	—	-1.5~+1.0
软化点(R&B), 不小于	℃	46
60℃动力粘度, 不小于	Pa. s	180
10℃延度, 不小于	cm	15
15℃延度, 不小于	cm	100
蜡含量(蒸馏法), 不大于	%	2.2
闪点, 不小于	℃	260
溶解度, 不小于	%	99.5
密度(15℃)	g/cm <sup>3</sup>	实测记录
TFOT (或 RTFOT) 后残留物 <sup>[2]</sup>		
质量变化, 不大于	%	±0.8
残留针入度比(25℃, 5s, 100g), 不小于	%	61
残留延度(10℃), 不小于	cm	6

注：[1] 试验方法按照现行《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000) 规定的方法执行。用于仲裁试验求取 PI 时的 5 个温度的针入度关系式的相关系数不得小于 0.997。

[2] 老化沥青以 TFOT 为准，也可以采用 RTFOT。

##### 2. 粗集料

沥青混合料所用粗集料应该采用碎石，粗集料的生产必须由具有生产许可证的采石场生产，粗集料的粒径必须符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004) 中要求的沥青混合料用粗集料的规格。必须采用大型反击式破碎机加工成具有良好的颗粒形状，石质应该洁净、干燥、表面粗糙，质量应符合表 4.8 的要求。

表 4.8 沥青混合料用粗集料质量技术指标

指 标	单 位	要 求	
		表 面 层	其 它 层 次
压碎值, 不大于	%	26	28
洛杉矶磨耗值, 不大于	%	28	30
表观相对密度, 不小于	—	2.60	2.50
吸水率, 不大于	%	2.0	3.0
坚固性, 不大于	%	12	
针片状颗粒含量:			
按照配合比设计的混合料, 不大于	%	15	18
其中粒径大于 9.5mm, 不大于	%	12	15
其中粒径小于 9.5mm, 不大于	%	18	20
0.075mm 通过率(水洗法), 不大于	%	1	
软石含量, 不大于	%	3	5
磨光值 PSV, 不小于	—	42	—
粗集料与沥青的粘附性 <sup>[1]</sup> , 不低于	—	5	4

注: [1]福建地处多雨潮湿地区, 当地粗集料和沥青的粘附性不是很理想, 粗集料与沥青粘附性达不到要求时, 宜掺加消石灰、水泥或者用饱和石灰水处理后使用, 必要时可同时在沥青中掺加耐热、耐水、长期性能良好的抗剥落剂。当采用沥青抗剥落剂来提高沥青和集料的粘附性时, 应该进行沥青和沥青混合料的短期和长期老化后进行水煮法、检验沥青混合料的水稳定性能达到要求。

### 3. 细集料

细集料包括天然砂、机制砂和石屑, 细集料的生产必须由具有生产许可证的采石场、采砂场生产, 细集料必须具有一定的级配, 要符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004) 中要求的沥青混合料用细集料的规格。细集料应该洁净、干燥、无风化、无杂质, 质量应符合表 4.9 的要求。

表 4.9 沥青混合料用细集料质量技术要求

指 标	单 位	要 求
表观相对密度, 不小于	—	2.50
坚固性, 不大于	%	12
0.075mm 含量(水洗法) <sup>[1]</sup> , 不大于	%	3
砂当量 <sup>[2]</sup> , 不小于	%	60
亚甲蓝值 <sup>[2]</sup> , 不大于	g/kg	25
棱角性(流动时间), 不小于	s	30

注: [1]对于天然砂砾, 采用 0.075mm 通过率控制细集料的洁净程度;

[2]对于石屑和机制砂, 采用砂当量(适用于 0~4.75mm)或者亚甲蓝值指标(适用于

0~2.36mm 或 0~0.15mm) 来控制细集料的洁净程度。

#### 4. 填料

沥青混合料的填料应采用石灰岩等碱性岩石磨细得到的矿粉，要求矿粉始终保持干燥不起团，能自由从矿粉仓自由流动，拌和机的回收粉尘不得作为填料使用，为改善集料和沥青的粘附性，要求在矿粉中掺加矿粉总量 20% 的一级消石灰。矿粉质量应该符合表 4.10 的要求。

表 4.10 沥青混合料用矿粉质量要求

项目	单位	指标
表观相对密度, 不小于	—	2.5
含水量, 不大于	%	1
级配范围		
<0.6mm	%	100
<0.15mm	%	90~100
<0.075mm	%	75~100
外观	—	无团料结块
亲水系数	—	<1
塑性指数	%	<4
加热安定性	—	实测记录

#### 4.2.2 配合比设计

沥青稳定碎石层选用的公称最大粒径为 25.0mm，级配比例为 19~26.5mm：9.5~19mm：4.75~9.5mm；0~4.75mm；矿粉+消石灰=35：24：11：28：2，具体的级配范围以及合成级配情况见下表 4.11 以及图 4.2.

表 4.11 沥青稳定碎石试验级配范围

	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配范围	100	90~100	60~80	48~68	42~62	32~52	20~40	15~32	10~25	8~18	5~14	3~10	2~6
合成级配	100	99.3	70.0	61.8	53.1	43.7	30.9	20.8	15.8	10.9	8.2	7.1	4.8

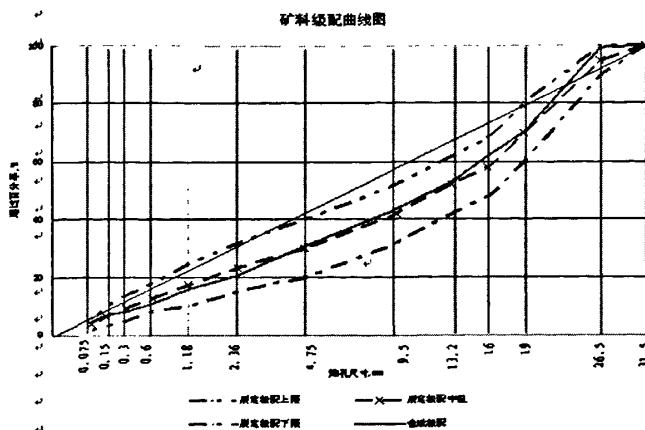


图 4.2 沥青稳定碎石矿料合成分级配曲线图

综合考虑浦南高速公路的工程性质、气候条件、交通条件等因素，确定最佳沥青用量为 4.2%。

#### 4.2.3 混合料技术要求及性能检测

按级配 19-26.5mm; 9.5-19mm; 4.75-9.5mm; 0-4.75mm; 矿粉+消石灰=35: 24: 11: 28: 2, 沥青用量 4.2% 成型马歇尔试件, 进行配合比设计检验, 其马歇尔试验结果如下表 4.12:

表 4.12 最佳沥青用量马歇尔试验结果

沥青用量 %	毛体积相对密度	最大理论相对密度	空隙率%	矿料间隙率%	有效沥青饱和度%	稳定度 KN	流值 mm	残留稳定性 (%)
4.2	2.325	2.441	4.7	13.5	64.9	9.59	2.6	86.0
技术标准	/	/	3-6	>12	55-70	>7.5	1.5-4.0	>80

### 4.3 密级配沥青抗滑表层

#### 4.3.1 原材料

沥青抗滑表层直接承受行车荷载的作用和外界环境的影响, 所处的环境最为恶劣, 因此对其提出的性能要求也就越多, 其中最主要的有平整、抗滑、耐磨损、抗车辙等。所以在路面表层的材料选择上, 沥青选用了 I-D 类 SBS 改性沥青, 具体的技术要求见下表 4.13。其他的原材料, 如粗细集料、矿粉等, 均与沥青稳定碎石的技术指标相同, 在此不多加赘述, 详见表 4.8、4.9、4.10。

表 4.13 SBS(I-D 类)改性沥青技术要求

沥青种类	单位	SBS 改性
针入度(25℃, 5s, 100g)	0.1mm	40-60

针入度指数 PI, 不小于	—	0
延度 (5°C, 5cm/min), 不小于	cm	20
软化点(R&B), 不小于	°C	60
运动粘度 (135°C), 不小于	Pa.s	3
闪点, 不小于	°C	230
溶解度, 不小于	%	99
弹性恢复 (25°C), 不小于	%	75
储存稳定性 (离析): 48h 软化点差, 不大于	°C	2.5
密度(15°C)	g/cm³	实测记录
TFOT (或 RTFOT) 后		
质量变化, 不大于	%	±1.0
残留针入度比(25°C, 5s, 100g), 不小于	%	65
残留延度 (5°C), 不小于	cm	15

#### 4.3.2 配合比设计

由于浦南高速公路的实际交通量比较大, 在面层配合比设计时选取规定中下限范围, 以增加面层的抗车辙性能和路面摩擦。具体的级配情况见下表 4.14 和图 4.3。最佳沥青用量确定为 4.8%。

表 4.14 面层矿料合成级配试验范围

集料规格	掺配比例	矿料合成级配试验									
		筛孔及相应通过百分率									
		16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
矿粉+消石灰	1	100	100	100	100	100	100	100	100	92.7	82
石屑	30	100	100	100	100	81.0	57.8	42.0	27.7	20.0	13.3
3-5mm 碎石	8	100	100	100	91	7.7	2.2	1.7	1.6	1.3	0.9
5-10mm 碎石	28	100	100	98.9	21.7	3.9	3.1	2.9	2.7	2.5	1.9
10-15mm 碎石	33	100	85.5	14.1	1.1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
合成级配		100	95.2	71.3	44.7	27.3	19.7	14.8	10.5	8.0	5.7
规范级配		100	90-100	68-85	38-68	24-50	15-38	10-28	7-20	5-15	4-8
工程设计级配		100	93-100	68-73	39-49	25-33	19-27	14-22	9-17	5-13	5-8

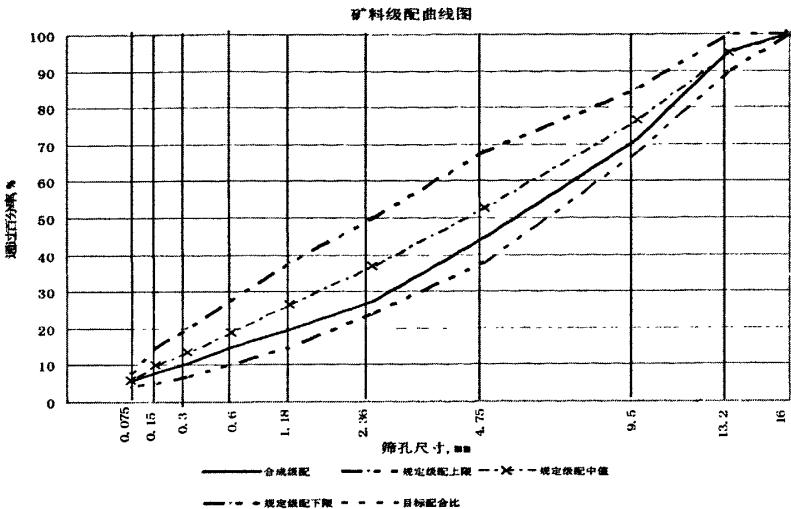


图 4.3 矿料合成分级配曲线

#### 4.3.3 混合料技术要求及性能检测

按照各粒级集料的掺配比例：10-15: 5-10: 3-5: 0-3: 矿粉=33: 28: 8: 30: 1，沥青用量 4.8%成型马歇尔试件，进行配合比设计检验，其马歇尔试验结果如下表 4.15：

表 4.15 最佳沥青用量马歇尔试验结果

沥青用量 %	毛体积相 对密度	最大理论 相对密度	空隙 率%	矿料间 隙率%	有效沥青 饱和度%	稳定度 KN	流值 0.1mm	残留稳定 度 (%)
4.8	2.563	2.677	4.2	16.1	74.1	15.35	34.5	91.4
技术标准	/	/	3-6	>14	65-75	>8.0	15-40	>85

#### 4.3.4 路用性能检测

##### 一、高温稳定性

沥青混合料是一种粘弹性材料，其物理力学性能与温度和荷载作用时间密切相关。沥青路面在使用期间，经受从低温到高温不同环境条件的考验。从一般意义上说，通常所说的高温稳定性能的高温条件，是指路面在使用过程中受交通荷载的反复作用，容易产生车辙、推移、拥包等永久性变形（也包括泛油）的温度范围，一般发生在夏季，特别是在我国的南方地区。路面破坏尤以车辙最为严重，所以解决路面破坏问题的首要任务就是解决车辙问题，也就是提高混合料的高温稳定性能<sup>[4]</sup>。

评价高温稳定性能的试验方法有单轴静载、动载、重复试验，三轴静载、动载、重复试验，中空圆柱试件的动力、剪切试验，棱柱形梁时间的弯曲蠕变试验，小型模拟试验设备的车辙试验，还有大型环道、直道试验设备的足尺路面高温性能试验等。而常规的试验方法是沥青混合料的室内模拟车辙试验。我国所采用的方法是制备 300mm\*300mm

\*50mm 的车辙试件，利用橡胶轮胎模拟实际的轮碾效果，在接地压强为  $0.7 \pm 0.05$ Mpa 的情况下，温度为  $60 \pm 1$ ℃，42 次/min 的加载速度作用于车辙试件上回来行走，时间约 1h 或最大变形达到 25mm 时为止，最后通过计算机程序计算得出沥青混合料的动稳定性（次/mm）。

笔者本次试验也是采用的室内模拟车辙试验，不过用的试验仪器为 APA 车辙试验仪。此仪器所采用的车辙试件是由旋转压实成型的直径  $\Phi 150$ mm，高 75mm 的圆柱形试件。碾压轮为圆凹槽钢轮，作用的橡胶管上，橡胶管再作用于试件上，橡胶管内充气，模拟轮胎实际情况，压力同普通轮碾式试验仪。温度及轮碾速度都可以根据情况自己设定。仪器和试件情况如下图 4.4 所示。

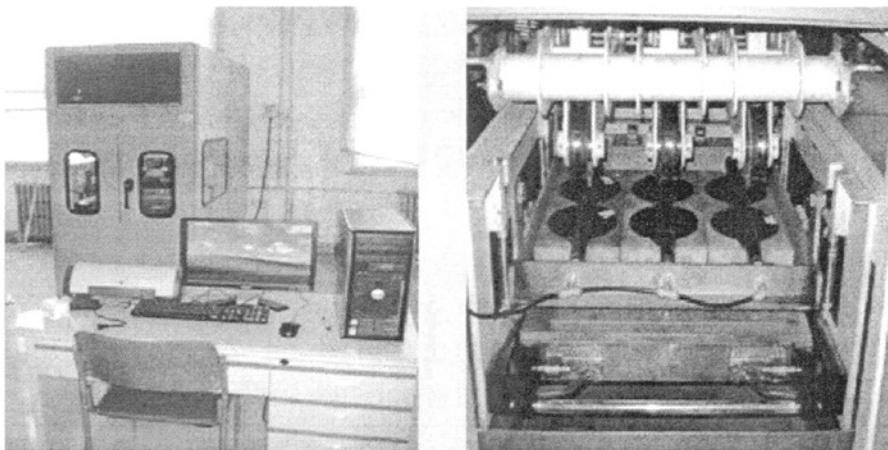


图 4.4 试验所用 APA 车辙试验仪以及车辙试件

试验数据结果见下表 4.13，车辙数据曲线示意图见图 4.5。

表 4.13 APA 车辙试验结果数据汇总

试验条件	加载次数	车辙深度 (mm)	车辙增长幅度 (%)	车辙率 Rate of Rutting (MM/HR)
50℃50 次	0	0	-	-
	25	0.201	-	28.94
	4000	3.475	94.22	2.97
	8000	3.85	9.74	0.34
60℃50 次	0	0	-	-
	25	0.045	-	6.48
	4000	2.796	98.39	2.49
	8000	3.985	29.84	1.07
60℃60 次	0	0	-	-
	25	0.219	-	31.54
	4000	3.379	93.52	2.86
	8000	4.216	19.85	0.75
70℃20 次	0	0	-	-
	25	0.517	-	74.45

	4000	9.403	94.50	8.05
	7994	12.167	22.72	2.49
70℃50 次	0	0	-	-
	25	0.39	-	56.16
	4000	5.877	93.36	4.97
	7993	9.443	37.76	3.22

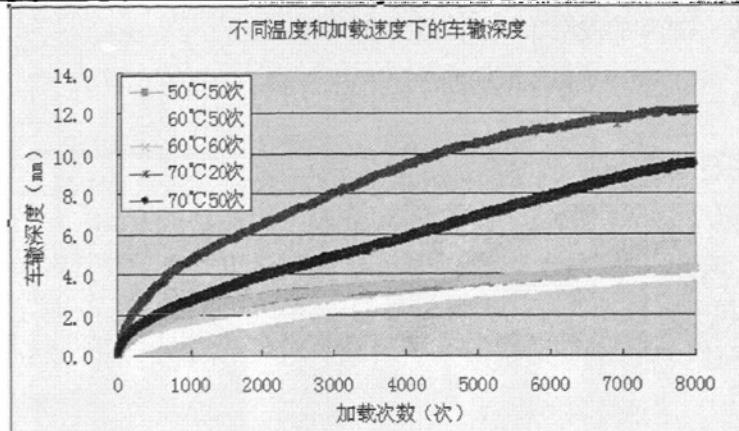


图 4.5 不同温度及加载速度下的车辙深度对比

从以上的数据和图示得知：温度越低、加载速度越快，车辙深度越小；反之则越深。由于此仪器还没有成熟的车辙数值计算方法规范，所以在此只能定性地分析并与方形车辙板试件的车辙试验数据相对比，以次达到评价高温稳定性指标的效果。由施工现场的资料显示，对于相同的集料、级配、沥青，所得到的常规高温稳定性试验的动稳定度平均为 5159 次/mm，对应于上图约为 4mm。在温度 60℃ 以下的情况，不管加载速度为 20 次/min、50 次/min 还是 60 次/min，从得到的试验数据来看，均能达到 2800 次/mm 的要求，针对福建北部的夏季当地气温，足以起到评价路面具有良好的高温稳定性的作用。

## 二、水稳定性

沥青路面在水或者冻融循环的作用下，由于汽车车轮动态荷载的作用，进入路面空隙中的水不断产生动水压力或真空负压抽吸的反复循环作用，水分逐渐渗入沥青与集料的界面上，使沥青粘附性降低并逐渐丧失粘结力，沥青膜从石料表面剥离，沥青混合料掉粒、松散，继而形成沥青路面的坑槽、推挤变形等损害。除了荷载及水分供给条件等外在因素外，沥青混合料的抗水损害能力是决定路面的水稳定性的根本性因素。评价水稳定性试验的方法是测定沥青混合料在浸水前后力学性能的变化，以浸水后的力学性质和原性质的对比作为对剥落的间接量度，沥青混合料在饱水的情况下强度降低越小说明水稳定性越好。

### (1) 浸水马歇尔试验

浸水马歇尔试验采用击实法成型圆柱体试件，击实次数为正反两面各 75 次。试验时将试件分为两组，每组四个。一组在 60℃ 恒温水浴箱中保养 0.5h 后测其马歇尔稳定度  $MS_1$ ；另一组在 60℃ 水浴中恒温保养 48h 后测其马歇尔稳定度  $MS_2$ ，试件的浸水残留

稳定度按下式计算：

$$MS_0 = \frac{MS_2}{MS_1} \times 100$$

式中： $MS_0$ —试件的浸水残留稳定度，%；

$MS_2$ —试件的浸水 48h 后的稳定度，KN；

$MS_1$ —试件按标准试验方法的稳定度，KN。

## (2) 冻融劈裂强度试验

冻融劈裂强度试验试件也采用小型马歇尔击实法成型圆柱体试件，击实次数为正反两面各 50 次。试验时将试件分为两组，每组四个。一组在 25℃水中浸泡 2 小时后测定，另一组饱水过程中如下：

- 1) 常温下(约 25℃)浸水 20min；
- 2) 0.09Mpa 浸水抽真空 15min；
- 3) -18℃冰箱中存放 16 小时；
- 4) 置于 60℃水浴中恒温 24 小时；
- 5) 水中浸泡 2 小时。

采用劈裂试验仪。首先测出压裂时的压力值  $P_T$ ，按公式  $R_T=0.06287P_T/h$  计算劈裂抗拉强度，再按下式计算冻融劈裂强度比 TSR：

$$TSR = \frac{R_{T2}}{R_{T1}} \times 100$$

式中：TSR—冻融劈裂强度比，%

$R_{T2}$ —冻融循环后第二组试件的劈裂抗拉强度，MPa；

$R_{T1}$ —未经冻融循环的第一组试件的劈裂抗拉强度，MPa。

表 4.14 浸水马歇尔试验结果汇总

	1	2	3	4	平均值	$MS_0$	规范要求
浸水 0.5h	10.354	9.847	12.678	11.365	11.061	/	
浸水 48h	9.684	9.259	11.490	10.547	10.245	92.6	$\geq 85$

表 4.15 冻融试验结果汇总

	1	2	3	4	平均值	TSR	规范要求
冻融前	11.335	9.487	10.643	11.437	10.726	/	
冻融后	9.599	8.517	9.274	9.872	9.316	86.8	$\geq 80$

从数据可以看出，在浸水马歇尔和冻融劈裂试验中，混合料均表现出了相当好的水稳定性性能，由此可以评价面层的配合比设计是合理的。

### 三、低温弯曲

沥青路面的温度开裂是路面破坏的主要形式之一。一方面，由于沥青结构层位于路面的最表层，直接受到气温变化的影响，当温度下降时，沥青面层就会产生收缩变形，但它和水泥混凝土路面不同，沥青路面没有收缩缝，于是这种变形会受到基层对路面的摩擦力和路面无限连续板体对收缩变形的约束作用，是沥青面层内部产生拉应力。另一方面，沥青混凝土具有应力松弛性能，当给沥青混凝土一定的应变时，由此产生的应力会随时间的延长而松弛，在一般的温度范围内，由温度降低而产生的拉应力，会由于应力松弛而使拉应力变小，将不产生出现裂缝那么大的应力。可是当温度变化过快时，路面内的应力来不及松弛就会出现过大的应力积累。与此同时由于温度降低，沥青混合料的应力松弛模量逐渐增大，应力松弛性能降低，也导致应力积聚过大，待温度应力积累到超过沥青混合料的极限抗拉强度时，路面就会出现裂缝，以此来使得应力释放出来。

影响沥青路面低温开裂的因素众多，但沥青性质及沥青用量是主要因素，美国著名的 SHRP 研究成果证明了沥青的性能对低温问题的直接贡献率为 80%<sup>[2]</sup>。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000)的标准，采用小梁低温弯曲试验，评价沥青混合料低温抗裂性能。

本试验采用的仪器为自行开发研制的低温弯曲试验仪，温控仪器为 HSL-225 型温湿度环境箱（见图 4.6）。试验测定-10℃温度下试件破坏时的最大荷载  $R_B$  及跨中挠度  $d$ ，其他各性能指标按下式计算，并整理数据于表 4.16 中。

$$R_B = \frac{3LP_B}{2bh^2}$$

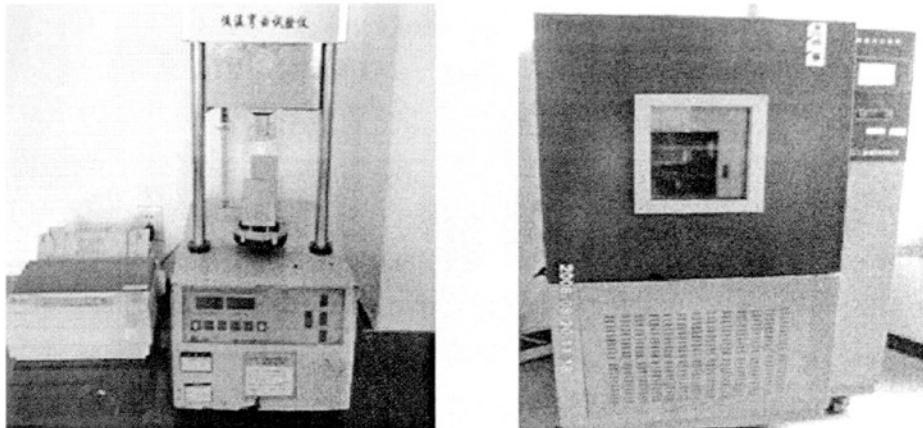
$$\varepsilon_B = \frac{6hd}{L^2}$$

$$S_B = \frac{R_B}{\varepsilon_B}$$

式中： $R_B$ 、 $\varepsilon_B$ 、 $S_B$ —分别为试件破坏时的抗弯拉强度，(Mpa)、最大弯拉应变( $\mu\varepsilon$ )、弯曲劲度模量(Mpa)；

$b$ 、 $h$ 、 $L$ —跨中断面试件的宽度、高度及试件的跨径，以 mm 计；

$P_B$ 、 $d$ —分别为试件破坏时的最大荷载(N)、跨中挠度(mm)。



a 低温弯曲试验仪

b 温湿度环境箱

图 4.6 低温弯曲试验所用仪器

表 4.16 低温弯曲试验数据汇总

编号	抗弯拉强度 (Mpa)	弯拉应变 ( $\mu\epsilon$ )	弯曲劲度模量 (Mpa)
1	10.36	2875.6	3602.7
2	9.48	2832.9	3346.4
3	10.04	3048.4	3293.5
4	8.94	2764.5	3233.9
平均值	9.705	2930.4	3311.8
规范要求	—	$\geq 2500$ (冬温区)	—

改性沥青较一般的基质沥青来说，能大大提高混合料的低温弯曲性能，增强路面的低温抗裂能力。在此低温弯曲试验中，以 SBS 改性沥青作为沥青混合料的结合料，从数据可以看出，不管是抗弯拉强度、弯拉应变，都表现出了良好的性能。

#### 4.4 本章小结

本章针对实体工程所研究的路面结构各层，特别是级配碎石层、沥青稳定碎石层、沥青抗滑表层三个层面，从原材料、配合比设计、混合料性能检测三个方面进行了详尽的说明，根据各个结构层在路面结构中的不同作用，调整路用材料、配合比设计方案，确保了各结构层良好性能的发挥。从设计结果看，均达到了设计施工规范要求以及福建省高速公路建设的实际指标技术要求。

针对路面抗滑表层，对混合料进行了路用性能检测。由于面层主要经受恶劣的外界环境影响，包括高温、低温、水损害、车辆荷载等，因此主要从高温稳定性、水稳定性、低温弯曲三个性能方面进行检测。数据结果显示，混合料的三种性能情况良好，反映出面层配合比设计合理，采用 SBS 改性沥青作为结合料是正确的选择。

## 第五章 路面现场性能检测

为了评定路面性能，在整条路面施工完毕，交通设施安装完之后，竣工通车前，笔者进行了现场检测，主要包括路表弯沉、路面抗滑性、平整度、渗水系数、厚度和压实度等<sup>[4]</sup>。

### 5.1 路表弯沉

路表弯沉检测采用的是贝克曼梁法。测试车为双轴、后轴双侧4轮的载重车，其标准荷载、轮胎尺寸、轮胎间隙及轮胎气压主要参数应符合下表5.1的要求。测试车可根据需要按公路等级选择，高速公路、一级及二级公路应该采用后轴100KN的BZZ-100，其他等级公路可采用后轴60KN的BZZ-60。本现场检测采用的是后轴100KN的BZZ-100。

表5.1 测定弯沉用的标准轴载参数

标准轴载等级	BZZ-100	BZZ-60
后轴标准轴载P(KN)	100±1	60±1
一侧双轮荷载(KN)	50±0.5	30±0.5
轮胎充气压力(MPa)	0.70±0.05	0.50±0.05
单轮传压面当量圆直径(cm)	21.30±0.5	19.50±0.5
轮隙宽度	应满足能自由插入弯沉仪侧头的测试要求	

贝克曼梁弯沉仪选择的长度为5.4m，弯沉值采用百分表量得。

测量地段为工程施工六个标段各随机选取一段，总共约长10km，检测数据汇总图示如图3.6，在的1140个弯沉检测值数据中有相当一部分超出了设计值。下表是每段的弯沉值结果，从计算值可以看出，在以各施工段为单位的情况下，弯沉代表值只有AB2段和CB2段大于容许弯沉值，弯沉检测不合格。

表5.2 各标段的弯沉值结果

	桩号	标段	平均值	标准差	代表值	容许弯沉值
弯沉值 (0.01mm)	K13+020~K15+020	AB1	23.7	4.53	31.2	32.7
	K47+500~K49+500	AB2	25.5	5.18	34.0	
	K118+500~K119+000	BB1	21.6	5.58	30.8	
	K136+150~K137+500	BB2	23.6	4.82	31.6	
	K169+000~K170+600	CB1	22.7	3.23	28.0	
	K210+000~K211+360	CB2	25.5	4.49	32.9	



图 5.1 路面弯沉检测现场

## 5.2 路面抗滑性能

检测路面抗滑性能的测试方法有制动距离法、偏转轮拖车法、摆式仪法、构造深度测试法，本次实际现场检测采用摆式仪法和构造深度测试法。

一、摆式仪法原理是摆式仪的摆锤底面装有一块橡胶滑块，当摆锤从一定高度自由下摆时，滑块面同试验表面接触。由于两者间的摩擦而损耗部分能量，使摆锤只能回摆到一定的高度。表面摩擦阻力越大，回摆高度越小（即摆值越大）。摩擦摆值数据汇总见下表 5.3。

表 5.3 摩擦摆值数据结果

标段	AB1	AB2	BB1	BB2	CB1	CB2	设计标准
平均值	66.8	65.6	68.8	64.6	65.2	66.4	不小于 54
标准差	1.56	1.68	1.78	1.26	1.18	1.99	

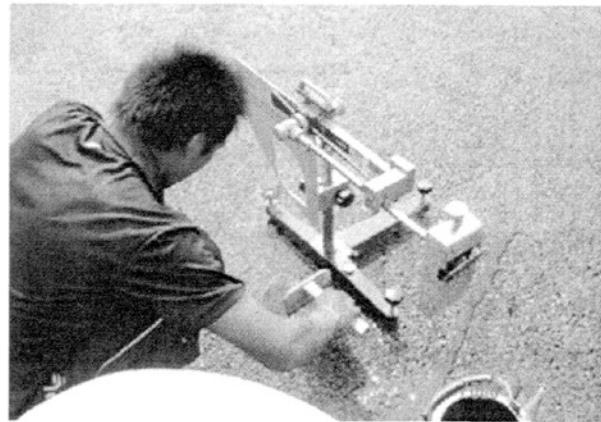


图 5.2 摩擦摆值检测现场

二、检测时采用的构造深度测试法为手工铺砂法。检测时，选取要测量的路面上的

点，将路面清扫干净，量砂筒灌满标准砂后倒在路面上，用推平板从里到外做摊铺运动，尽可能的将砂摊成圆形，直到表面上不再留有浮动余砂为止。用钢尺测量圆的两个垂直方向的直径，取其平均值。有计算公式求的构造深度 TD。具体的检测结果见下表 5.4。

表 5.4 构造深度检测结果

标段	AB1	AB2	BB1	BB2	CB1	CB2	设计标准
平均值	0.67	0.72	0.70	0.69	0.81	0.78	不小于 0.55
标准差	0.061	0.070	0.085	0.071	0.067	0.054	



图 5.3 路面构造深度现场检测

### 5.3 平整度

平整度是路面施工质量与服务水平的重要指标之一，测试设备分为断面类及反应类两大类。测试方法主要有三米直尺法、连续式平整度仪法、车载式颠簸累积仪法等。工地实测时采用的方法是连续式平整度仪法。

连续式平整度仪标准长 3m，中间为一长 3m 的机架，前后各有四个行走轮，前后两组轮的轴间距为 3m，机架中间由一个能起落的测定轮。测定轮上有检测箱可以根据具体情况设定采集长度。牵引车采用微型皮卡，行进速度为 5km/h，并保持匀速。测定结果代表值如下表 5.5。

表 5.5 平整度测试数据结果

平整度值 (mm)	桩号	标段	平均值	标准差	设计标准 不大于 1.2
	K13+020~K15+020	AB1	1.13	0.165	
	K47+500~K49+500	AB2	0.96	0.132	
	K118+500~K119+000	BB1	0.83	0.098	
	K136+150~K137+500	BB2	1.19	0.110	
	K169+000~K170+600	CB1	0.95	0.091	

	K210+000~K211+360	CB2	1.03	0.137	
--	-------------------	-----	------	-------	--

## 5.4 渗水系数

沥青路面的水损害是现阶段我国沥青路面主要的早期损坏模式之一。我国传统的路基结构均为不透水的，所以要求路面结构要么不渗水，要么水能从表层渗入接着能从中下面层排出。为了控制沥青路面的渗水特性，我国在公路沥青路面施工技术规范中对沥青层面上的渗水系数提出了要求，规定按照 T 0971 的试验方法进行渗水试验对于普通密级配沥青混合料以 300 ml/min 为上限值。沥青路面的渗水性对于预防路面早期损害有着重要的意义，施工及验收中的渗水试验也显得尤为重要。

检测路面渗水性能一般用的是渗水仪。操作时用密封材料将渗水仪与路面的接触面密封，使水不能从介面渗出，注水至规定要求，打开阀门，待水下降 100ml 时秒表计时，每 60 秒计数一次，直至水下降 500ml 为之。如果渗水速度很慢，从水面下降至 100ml 开始，测得 3min 的渗水量即可停止。若试验时水面下降至一定程度后基本保持不动，说明路面基本不渗水或者根本不透水。具体的检测结果见下表 5.6。

表 5.6 渗水试验检测数据

标段	AB1	AB2	BB1	BB2	CB1	CB2	设计标准
平均值	66	81	77	54	41	55	不大于 300ml/min
标准差	7.35	7.96	8.61	6.94	3.58	4.87	

## 5.5 厚度及压实度

路面实际厚度及压实度的检测都是通过钻芯取样来实现的。一次钻孔取芯得到的都是包含有不同层位的沥青混合料，根据机构组合情况用切割机将芯样沿各层结合面锯开分层进行测定。现将钻取的试件锯开分层后在水中用毛刷轻轻刷净粘附的粉尘，然后将试件晾干或者用电风扇吹干不少于 24 小时，直至恒重。按照现行《公路工程沥青及沥青混合料试验规范》(JTJ052-2000)的沥青混合料试件密度试验方法测定的视密度或者毛体积密度。用游标卡尺测量试件厚度，垂直方向分别测量，然后取其平均值。具体检测数据见下表 5.7。

表 5.7 厚度及压实度检测数据

标段	AB1	AB2	BB1	BB2	CB1	CB2	设计标准
厚度均值, mm	40.2	42.2	40.6	40.6	41.8	41.0	>40
标准差	0.52	0.56	0.59	0.78	0.75	0.51	

代表值	40.1	42.1	40.5	40.4	41.6	40.9	
压实度均值, %	100.3	99.2	99.6	99.7	100.1	100.0	>98
标准差	0.68	0.54	0.79	0.51	0.75	0.83	
代表值	100.1	99.0	99.4	99.5	100.0	99.9	

## 5. 6 本章小结

在实体工程全线表层铺筑结束之后，通过对路面进行的路表弯沉、路面抗滑性、平整度、渗水系数、厚度及压实度等的检测，初步了解了交工验收期的路面性能指标。

从平整度和压实度数据来看，在施工过程中对两者的控制比较严格，检测结果完全符合要求。对于平整度，单一面层结构是无法得到好的行车舒适性，好的平整度离不开表层以下结构的贡献，也就是作为主要承重作用的水泥稳定碎石层、起过渡层和防止反射裂缝作用的级配碎石层、起抵抗疲劳性能的密级配沥青稳定碎石层以及共同抵抗外界恶劣条件的中面层，除此之外，研究结构足够厚的柔性基层也是路面具有良好平整度的主要原因。

抗滑性能和渗水系数着重反映了材料以及级配的问题。数据显示，抗滑性能中不管是摆式仪法还是构造深度法均符合要求，并且标准差很小，变异系数也就更小。在级配设计中，10–15mm 和 5–10mm 两档粗集料所占的比例分别是 33% 和 28%，并且整个级配设计连续且良好，使混合料摊铺后不仅具有好的抗滑性能还具有好的抗渗水作用，个别路段甚至是不透水。此外渗水还与良好的压实度控制有密切的联系。

对于弯沉值检测，有个别标段不合格，其他的检测结果均符合设计指标。排除第三章所分析的原因外，个别路段出现的弯沉超标现象也有一定的原因，检测的 AB2 标段位置正好位于一料场出口附近，检测的 CB2 标段位置位于互通匝道出口附近，两者对于此路段的施工技术要求的控制上可能相对松懈。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 主要结论

本文针对福建浦南高速公路实体工程，笔者结合自己的研究方向，利用三种设计方法就其前后的结构变更进行了力学结构分析与验算；对三种设计方法进行相互间比较，根据研究的路面结构确定究竟采用何种设计方法适宜，并由分析软件的结果提出研究的路面结构存在的问题和要改进的方向；对路面实际的材料、级配、混合料性能情况进行详细说明；路路面层全部铺筑完毕后对研究的对象进行了现场检测。具体结论如下：

1. 通过阅读国外的文献资料，对国外的永久性路面结构的汇总与分析，比较其路面结构基层形式的优点同时暴露了我国大多数半刚性基层结构沥青路面的诸多弊病。提出应该借鉴国外的路面结构形式，修建长寿命路面。

2. 根据实体工程的路面结构变更，采用我国现行的弯沉指标和层底弯拉应力方法、AASHTO方法、AI方法三种方法进行了结构验算和对比分析，结果显示，不论通过哪种方法得到的计算结果，两种路面结构都能符合设计值，并且有一定的富余；但与此同时，I（初）的设计指标都比I（定）要差，无论是疲劳寿命还是弯沉值。但是三者的结果存在着相当大的差别。

3. 具体分析了三种设计方法以及各自的优缺点，通过对比并结合其他相同路面结构的试验路段情况得出，国内设计方法对于本论文研究的复合式基层路面不适合。但在计算容许拉应变的时候，容许值随着路面材料的性质而改变，难以确定，国外的标准和他们的材料性质及参数测定方法有关，与国内的材料性质和参数不相符，所以计算容许拉应变时也不宜采用AASHTO方法。

4. 对比国外长寿命路面与本实体工程的路面结构，利用BISAR程序计算分析得到，论文研究的结构并非长寿命路面结构。而增加沥青稳定碎石层的厚度后再进行计算可以得到，当ATB层厚达到一定厚度时可以达到长寿命路面结构的指标要求，但是采用多厚，除了经验外还没有具体的规范要求。

5. 通过对实体工程的三个关键层（级配碎石层、沥青稳定碎石层、沥青抗滑表层）从原材料、配合比设计、混合料性能检测三个方面进行的设计说明，依据不同的结构发挥的作用的不同，调整路用材料、配合比设计方案，确保了各结构层良好性能的发挥。针对受外界环境影响最为恶劣的抗滑表层，进行了路用性能检测，数据显示混合料的性能情况良好，反映出面层配合比设计合理，采用SBS改性沥青作为结合料选择正确。

6. 在实体工程全线表层铺筑结束之后，通过对路面进行的路表弯沉、路面抗滑性、平整度、渗水系数、厚度及压实度等的检测，得到交工验收期的路面性能指标。从检测结果看，除了弯沉检测中个别标段的数据不合格之外，其他各项指标均符合要求。

## 6.2 创新点

1. 采用我国现行的弯沉指标和层底弯拉应力方法、AASHTO方法、AI方法三种方法对路面结构进行了综合力学验算。
2. 对比了三种设计方法优缺点，结合以往做过的相同路面结构的试验路段，提出了我国的设计方法不适合柔性基层和复合式基层结构计算。
3. 增加沥青稳定碎石层厚度后用BISAR软件计算，提出理论上增加ATB结构层厚度即能符合长寿命路面结构的指标要求。

## 6.3 下一步亟待解决的问题

1. 我国的设计方法不适合论文研究的复合式基层路面结构，特别是在模量的选取以及基层类型系数上，具体的取值，有待下步讨论。
2. 在三种方法计算路面结构时，出现了理论相悖情况，尽管我国的设计方法不适合复合式路基路面结构，但国外的设计方法也有其自身的局限性，也不能说国外的就一定可以，所以针对这种新型路基结构，具体采用何种设计方法，有待商榷。
3. 在本论文对比长寿命路面和所研究的路面结构时提到，用 BISAR 计算的结果中，当沥青稳定碎石层加厚到 16cm 时，沥青层底拉应变为  $115 \mu\epsilon$ 、路基顶面应变为  $123 \mu\epsilon$ ，距离长寿命路面要求已经很近，再继续增加一定能达到要求。但是并不是一味的追求加大沥青层厚度就能达到长寿命，是否还有其他的决定因素，是下一步主要的研究内容。

## 参考文献

- [1]我国高速公路通车总里程2008年年底突破6万公里。  
<http://news.sohu.com/20090116/n261778313.shtml> 2009-01-06
- [2]沙庆林.高速公路沥青路面早期破坏现象与预防[M].北京：人民交通出版社，2001,3-6
- [3]张晓冰, 程日盛, 汪丽娟. 我国高速公路沥青路面厚度现状调查分析[J].河南交通科技, 1999(01): 22-25
- [4]沈金安,李福普等.高速公路沥青路面早期破坏分析与防治对策[M].北京:人民交通出版社,2004,41-55
- [5]中华人民共和国交通部.公路沥青路面设计规范(JTGD50-2006)[S].北京:人民交通出版社,2006
- [6]杨群, 黄晓明.沥青稳定基层与半刚性基层疲劳设计分析[J].公路交通科技, 2001(06):5-8
- [7]李君. 高等级公路柔性基层（级配碎石）的研究[D]: [硕士学位论文].大连: 大连理工大学, 2004
- [8]吉林公路勘测设计院, 等. 高等级沥青路面柔性基层的研究(沥青碎石基层研究报告) [R].长春: 吉林公路勘测设计院, 2003,33-37
- [9]舒富民.复合式基层长寿命沥青路面结构与材料研究[D]: [硕士学位论文].南京: 东南大学.2008.
- [10]交通部公路科学研究院.重载沥青路面设计规范研究报告, 2003,51-53
- [11]严二虎.沥青路面柔性基层材料设计方法与应用技术研究[D]: [博士学位论文].南京: 东南大学交通学院.2004.
- [12]International Conference of ISAP on Asphalt Pavements. Nordic Road & Transport Research.2002,169-172
- [13]Asphalt Pavement Alliance. Perpetual Pavements A Synthesis. Asphalt Pavement Alliance Order Number APA 101 1/02,2002,59-61
- [14]AASHTO Guide for Design of Pavement Structures,1993,112-115
- [15]AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. 2000,97-99
- [16]DAVID E.NEWCOMB,MARK BUNCHER,IRA J.HUDDLESTON.Concepts of Perpetual Pavement.[J]“Perpetual Bituminous Pavement” Circular of Transportantion Reserach.2001,10-13
- [17]A Synthesis of Perpetual pavements.APA 101.APA,2002,11-12
- [18]Mark Buncber,etc.Perpetual Pavement.Asphalt Institute.Fall 2000,223-226
- [19]Asphalt Institute,Thikness Design Asphalt Pavement for Highways & Streets (MS-1),

1991,68-69

- [20] Asphalt Institute, Thickness Design Asphalt Pavement for Heavy Wheel Loads(MS-23), 1986,28-31
- [21] Asphalt Institute, Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-mix Types (MS-2), 1984,26-29
- [22] Highways Agency et al. Design Manual for Roads and Bridges, Pavement Design and Maintenance, Pavement Design, HD26/01. London, 2001, 77-79
- [23] 沈金安.国外沥青路面设计方法总汇[M].北京:人民交通出版社, 2004,22-43
- [24] 李峰.长寿命沥青路面的结构组合分析[D]: [硕士学位论文].上海:同济大学, 2005
- [25] 山东省交通科学研究所, 等.永久性沥青路面设计方法研究(永久性路面研究)研究报告[R].济南:山东省交通科学研究所, 2008,346-348
- [26] 沈金安.沥青及沥青混合料的路用性能[M].北京:人民交通出版社, 2001,377-379
- [27] 邓学钧.路基路面工程[M].北京:人民交通出版社, 1999,196-199
- [28] (美) 黄仰贤.路面分析与设计[M].北京:人民交通出版社, 1994,179-183
- [29] 姚祖康.路面[M].北京:人民交通出版社, 1993,145-152
- [30] 李刚, 等.基于AASHTO的沥青混凝土路面设计方法[J].公路, 2008(09): 143-146
- [31] 孙洪燕, 崔惠德.沥青路面主要设计方法浅述[J].工程, 2006(20):46-47
- [32] 秦雯, 李彩霞.沥青路面设计方法及存在问题浅析[J].北方交通, 2007(01): 37-39
- [33] 杨永顺, 高雪池.引进和吸收国外沥青路面设计方法的必要性和可行性[J].华东公路, 2006(03):3-7
- [34] Michael Nunn, Brian W. Ferne. Design and Assessment of Long-life Flexible Pavements. Perpetual Bituminous Pavements Circular of Transportation Research. 2001,107-110
- [35] Monismith, C.L. and F.Long. Overlay Design for Cracked and Seated Portland Cement Concrete (PCC) Pavement—Interstate Route 710. Technical Memorandum TM UCB PRC 99-3, Pavement Research Center, Institute for Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1999,19-22
- [36] 崔鹏、邵敏华、孙立军.长寿命沥青路面设计指标研究[J].交通运输工程学报, 2008 (03):37-41
- [37] 严家伋.道路建筑材料[M].北京:人民交通出版社, 1995,99-101
- [38] 中华人民共和国交通部.公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTJ052-2000) [S]. 北京:人民交通出版社, 2000
- [39] 中华人民共和国交通部.公路沥青路面施工技术规范(JTGF40-2004)[S].北京:人民交通出版社. 2004
- [40] 中华人民共和国交通部.公路工程集料试验规程(JTGF40-2005)[S].北京:人民交通出版社. 2005

- [41]刘红瑛等.沥青混合料高温车辙评价指标的研究[J].石油沥青,2003(04): 56-59
- [42]Petersen J C,Robertson R E,Branthaver J F. Binder characterization and evaluation test methods[R]. Washington: National Research Council,1994,13-14
- [43]徐培华, 陈忠达.路基路面试验检测技术[M].北京: 人民交通出版社, 2002,261-266

## 致 谢

论文是在导师李闯民教授的精心指导下完成的，在此我要真诚的感谢李老师。从师数载，无论是在学习上还是生活上，李老师都给了我无微不至的关怀和爱护。导师不拘一格的科研思维给予我无尽的启迪，每一次的谆谆教导我都受益匪浅。同时，导师渊博的知识、严谨的治学态度、稳重的处事风范、一丝不苟的工作作风、坦诚和蔼的为人、崇高的敬业精神，都使我受到了极大的熏陶。此外，还有师母董艾辉教授对我在生活上的关心和思想上的教诲。在此，谨向恩师和师母致以诚挚的谢意和深深的祝福！祝福李老师全家身体健康！诸事顺意！

在研究生的学习、科研期间，得到了原道路二教研室各位老师的指导和关心。在论文的撰写期间特别得到了交通部公路科学研究院的李福普老师和严二虎博士的不吝指导和帮助，在此，一并感谢你们，祝愿你们及家人幸福、安康！

同时要深深地感谢和我一起度过近三年时光的兄弟姐妹们，是你们充实了我的学习生活，留给了我人生中一段美好的回忆。特别感谢师兄贺平、吴志勇、陈超；同门张天泽；师弟曲超、周和鸣、高占华。

最后要深深感谢我的父亲、母亲！是父母默默无闻和无私的奉献、长期的支持与鼓励，才能让我安心在他乡学习深造。特别感谢母亲这三年来对父亲的照顾，孩儿铭记在心！愿父母健康、幸福、长寿！

回首三年的学习、工作和生活，所有经历将成为我人生的一笔宝贵的财富！再次感谢所有关心和帮助我的人！

由于本人水平有限，缺点错误在所难免，恳请各位专家老师批评指正。

李 健

2009 年 4 月

# 附录 A 攻读学位期间发表论文目录及参加的科研项目

## 攻读学位期间发表论文目录

李闻民, 李健.Statistic Analysis of Factors of Bond Shear Strength between Pavement Layers for Coarse-graded and Fine-graded Mixture Specimens. Proceedings of First International Conference on Modeling and Simulation.  
Nanjing PR.China,August 5-7.2008.367-372. ISBN:978-1-84626-046-9

## 参加的科研项目

- |                         |            |
|-------------------------|------------|
| [1]沥青混合料矿料间隙率试验设计分析     | 湖南省自然基金    |
| [2]透水沥青的材料设计研究          | 湖南省建设厅     |
| [3]透水沥青路面材料组成及结构设计方法研究  | 湖南省科技厅     |
| [4]沥青混合料矿料间隙率测试方法研究     | 湖南省教育厅重点课题 |
| [5]旧水泥路面柔性基层材料组成及结构设计研究 | 江西省交通厅     |
| [6]福建省高速公路新型结构设计研究      | 交通部交通科学研究院 |