

南京理工大学

硕士学位论文

常州市武宜路BRT项目专用车道路面设计研究

姓名：缪冬生

申请学位级别：硕士

专业：建筑与土木工程

指导教师：丁建国;刘振兴

20081101

摘要

沥青路面设计的主要任务就是提出适合当地自然环境、满足行车使用要求的路面结构。本文结合常州市武进区武宜路 BRT 项目进行了专用车道路面设计的研究。

首先，在研究了国内外典型路面结构的基础上，进行了半刚性路面结构组合设计研究，明确了路面各结构层的功能定位，选择了各结构层合理的混合料类型和合理厚度，并给出了可 BRT 专用车道路面结构推荐方案。

其次，结合武宜路 BRT 项目，对本文给出的推荐方案进行了沥青混合料组成设计；选取了材料参数，利用 APBI 多层弹性层状体系计算程序，验算了各层混合料厚度满足规范要求。

最后，结合常州的气候环境、城市道路的典型损坏情况以及降噪要求，详细研究了国内外沥青混合料高温稳定性能以及水稳定性能的试验方法和评价指标，并进行了对比分析，确定了武宜路 BRT 专用车道沥青混合料所需采用的混合料性能验证方法；进行了混合料高温稳定性和水稳定性能的试验验证，确保路面结构能够满足使用过程中的要求。

关键词：快速公交（BRT）专用车道 半刚性路面 路面结构组合 沥青混合料高温稳定性 沥青混合料水稳定性 沥青混合料组成设计

Abstract:

The primary task of design for bituminous pavement is to provide the pavement structure applicable for local environment and transportation requirement. In this paper, the procedure of bituminous pavement design for BRT lane is studied to support the BRT construction project of Wuyi road in Changzhou.

First, based on the investigation of typical structures of pavement in many countries including China, the design for an half-rigid structure is studied, and the specific function of each layer is determined to select reasonable types of mixture and thickness of each layer. The recommended structure combinations for BRT lane are given .

Second, the composite design for asphalt mix of one recommended structure combination is carried out; the elastic layered system program APBI is used to check the thickness of each layer.

Thirdly, the test methods and evaluation indexes for high temperature stability and moisture susceptibility of asphalt mix are studied to make a comparative analysis. The certain testing methods and evaluation indexes are used to verify the mixture stability after a deep research in climate, representative diseases of urban road and requirement for lower noise in Changzhou city.

Keywords: Bus Rapid Transit (BRT) lane, half-rigid pavement, pavement structure composition, high temperature stability, moisture susceptibility, mixture composite design

声 明

本学位论文是在导师的指导下取得的研究成果，尽我所知，在本学位论文中，除了加以标注和致谢的部分外，不包含其他人已经发表或公布过的研究成果，也不包含我为获得任何教育机构的学位或学历而使用过的材料。与我一同工作的同事对本学位论文做出的贡献均已论文中作了明确的说明。

研究生签名： 缪冬生

二〇〇八年十月六日

学位论文使用授权声明

南京理工大学有权保存本学位论文的电子和纸质文档，可以借阅或上网公布本学位论文的全部或部分内容，可以向有关部门或机构送交并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的全部或部分内容。对于保密论文，按保密的有关规定和程序处理。

研究生签名： 缪冬生

二〇〇八年十月六日

1 绪论

1.1 项目背景

近几年来世界上许多城市正在逐步推广一种快速公共交通方式,称为快速公共汽车运营系统,简称快速公交系统(BRT)^[32]。BRT 起源于巴西的库里提巴市,是一种以常规公交为基础,以地面道路网为支撑,结合现代巴士技术,吸取轨道交通优点,并获得一定时空优先权(包括开设公交专用道和设置公交信号优先)和政策优先支持的一种新型城市公交系统,它既保持了常规公交的灵活性、经济性和便利性,又具有城市轨道交通容量大、速度快的特点。BRT 以其明显的优势赢得了世界许多城市的广泛认同。

BRT 在我国的发展也是如火如荼,自北京 2005 年 12 月 30 日国内首条快速公交线路建成通车至今,已有近 200 辆快速公交车辆行驶在各大、中城市的 BRT 线路上。江苏省常州市于 2008 年元旦正式开通快速公交线路(BRT),是继北京、杭州之后的全国第三条真正意义的快速公交线也是江苏省首条大容量快速公交(BRT),该线路北起沪宁高速公路南侧、长江贸易中心北侧,南至武进长途汽车站内,途经黄山路、黄河东路、通江大道、万福路、怀德北路、劳动西路、兰陵路、武宜路、鸣新东路、常武路;全长约 23.4 公里。常州的 BRT 一号线全线设两个停车场,分别为新北停车场和武进停车场;设一座保养场;设 27 个中间站。最大站间距 1943 米,最小站间距 499 米,平均站间距 836 米,平均行驶速度每小时 25.29 公里。BRT 建成后,从起点站到终点站车程约半个多小时,还可帮助乘客实现快速公交与普通公交的无缝隙换乘。



图 1-1 常州 BRT 车站

常州的快速公交车道布设在路中间,乘客通过人行步道进入路中站台。常州 BRT

采用新型大容量快速公交车,车长 18 米,额定载员 180 人,最高车速达每小时 75 公里,堪称国内最豪华的公交车。BRT 专用车道使 BRT 车辆行驶一路畅通无阻,运行速度较普通公交相比将提高 1 倍以上,时速达 30 至 40 公里,确保准点到站。

这种新型的公共交通方式的一个显著的特点是采用了 BRT 专用的车道,这一点和高等级公路的专用车道相似,是一种渠化交通的道路形式,但是行驶车速低于高等级公路的设计行车速度。相较于普通城市道路而言,BRT 专用车道使得车辆的行驶速度大大高于其他类型车辆的行驶速度,最高车速达到每小时 75 公里,正常行速度较普通公交相比将提高 1 倍以上,时速达 30 至 40 公里,车辆也采用新型大容量快速公交车,车长 18 米,额定载员 180 人,满载重量为 280kN。

快速公交系统 BRT 对其专用车道的性能提出了较普通城市道路更高的要求。首先,快速公交车辆较传统的公交车辆有更大的载重,而且有专门的行驶路线,更容易造成路面结构层的疲劳开裂和车辙,同时也需要更强的路面承载能力;另外在快速公交车辆启动和制动过程中,对路面结构表面作用远大于高速行驶车辆所产生的水平推力,这又对路面结构各层的层间黏结提出了更高的要求。所有这些对于路面结构的性能要求最终都归结为对于沥青路面设计的要求。

沥青路面设计的任务就是根据使用要求及气候、水文、土质等自然条件,密切结合当地实践经验,设计确定经济合理的路面结构,使之能承受交通荷载和环境因素的作用,在预定的使用期限满足各级公路相应的承载能力,耐久性、舒适性、安全性的要求。沥青路面设计包括原材料选择、混合料配合比设计和设计参数的测定,面层结构层组合和厚度计算及路面结构方案比选。其中路面结构组合设计是合理选择和安排沥青面层结构层次,使整个路面结构在设计使用年限里能够承受行车荷载和自然因素的共同作用,同时又能发挥各结构层的最大效能,使整个路面结构既经济又实用;沥青混合料设计是分析粒料和沥青等原材料性质,并确定粗集料、细集料、矿粉和沥青材料相互配合的最佳组成比例,使之既能满足沥青混合料的技术要求又符合经济的原则。

本文即针对 BRT 专用车道半刚性路面设计过程中的设计参数(交通参数等)、路面结构组合、路面结构层厚度计算、沥青混合料组成以及混合料性能等方面进行专用车道沥青路面设计研究,从而得出适应于 BRT 这种交通组织方式的路面结构。

1.2 国内外沥青路面设计方法

1.2.1 国外沥青路面设计方法

国外的沥青路面设计方法,分为经验法和力学——经验法两大类

(1) 经验法(Empirical Method)

经验法主要通过对试验路或使用道路的实验观测，建立路面结构、荷载和路面性能三者间的经验关系。最为著名的经验设计方法有美国加州承载比(CBR)法和美国各州公路和运输工作者协会(AASHTO 1993)柔性路面设计法。

(2) 力学 - 经验法(Mechanical-Empirical Method)

力学 - 经验法首先分析路面结构在荷载和环境作用下的力学响应(应力、应变、位移)，利用在力学响应与路面性能(各种损坏模式)之间建立的性能模型，按设计要求设计路面结构。最著名的是美国沥青协会(AI)法和壳牌石油公司柔性路面设计(Shell)法。

各个设计方法的设计思想、推荐材料、路面结构设计考虑都有所不同，各有所长。为了吸收和利用这些设计思想和方法中结构设计的某些优点和成果，分别对各设计方法的结构设计思想，典型材料或材料力学性能模型，典型设计标准加以评述。路面结构设计是根据环境、交通条件，选择结构和可用的建筑材料，在整个路面设计中，结构设计是确定路面设计合理性与经济性的关键所在，因此结构设计受到设计者的一致重视。路面设计必须对路面所在的环境条件和它服务的对象——交通进行详细分析和预测。交通方面，各种设计方法采用标准轴载作用次数计量交通量；英国普遍采用80kN为标准轴载(TRRL法、Shell法、NOTTINGHAM法)，地沥青协会(AI法)亦采用80kN为标准轴载，我国“规范”采用100kN作为标准轴载。

标准轴载作用次数的预测主要用年利率公式计算。环境因素中对温度的考虑，Shell法是根据月平均温度计算路面设计温度，即把每个月的平均温度乘以一个当量系数，再求平均值。AI法除考虑了温度对沥青材料的影响外，亦考虑温度对路基和基层的影响，对不同年平均温度下的沥青材料给出了推荐种类和要求。对于以经验为主的CBR、TRRL设计法在使用时应考虑气候是否与筑路地区相符合。在给定的交通和环境条件下，TRRL设计法是根据大量的材料和结构实验提出了相应的路面结构及典型材料，可称为半经验半理论法。

Shell法是一个非常系统的理论方法，也是最早应用弹性层状体系理论的方法。具有较为系统的材料力学性能的预测公式或图表，以Shell法为基础可以对不同环境和交通条件下的路面结构及应用材料进行分析，得出更简单的设计图表。AI法是以弹性层状体系理论为基础的，结合经验和实验资料建立起来的比较系统的方法，采用的是典型结构法，推荐的两种结构考虑了行车条件、材料的可适用性、施工周期和经济等因素。AI法的设计图表更为简单，只需根据交通量和路基回弹模量即可确定设计厚度，再根据对不同温度地区的推荐沥青混合料种类选择材料即可。NOTTINGHAM法是在TRRL法的路面结构实验资料，Shell法的材料力学性质预测方法和对两种英国典型材料(HAR、DBM)进行了长期系统的材料性质研究的基础上建立起来的。另外，现行世界各国热拌沥青混合料设计多为马歇尔方法。马歇尔法最早应用于第二次世界

大战期间，由密西西比州公路局的 Bruce Marshall 发明，并由美国陆军工程兵团改进和完善此法。

从以上的介绍中可以看出：世界各国无论是在路面结构组合设计方面，还是在材料选择和混合料组合设计方面都开始了从经验阶段向理论阶段的过渡，并将室内试验方法、设计指标与野外沥青路面的路用性能紧密联系，以使沥青路面获得最佳的路用性能为目标，进行路面结构组合设计及材料选择和组成设计。

1.2.2 我国公路沥青路面设计方法

我国公路沥青路面设计采用的是力学 - 经验法。其路面模型借鉴了 Shell 的理论设计法，把路面作为一种多层弹性体系。Shell 法和我国“规范”是以理论为主的设计方法，不同的是 Shell 法就一般结构给出几种典型材料并配有系统的材料性能预测方法和环境因素，交通状况分析方法；我国“规范”建议路面面层（沥青材料层）、基层结构厚度应与公路等级、气候、水文、土质条件、交通量及组成相适应；除规定了各层最小厚度（主要考虑施工），还认为各结构层应按回弹模量自上而下地递减进行组合。

在我国“规范”设计法中，材料特性以弹性模量和泊松比表征，土基回弹模量可根据现场实测法、查表法、室内试验法或换算法求得。各层材料统一采用圆柱体试件测定抗压回弹模量和劈裂模量。弯沉指标计算时，沥青混合料用 20℃ 抗压回弹模量；层底弯拉应力计算采用 15℃ 抗拉强度与弯拉回弹模量，也可以采用劈裂强度与抗压回弹模量。

交通荷载以双轮组单轴载 100kN 为标准轴载。轮胎接地压强 0.70MPa，单轮当量圆直径 d 为 21.3cm，两轮中心距为 1.5 d 。路表弯沉计算时须计算双圆均布荷载的轮隙中心点的弯沉。验算沥青混凝土层和半刚性材料层的底部拉应力时，须计算单圆荷载中心、轮隙中心处拉应力并取其较大值。

该设计方法以 2004 规范规定的设计弯沉和层底拉应力为设计标准。设计弯沉是表征路面整体刚度大小的指标，是路面厚度计算的主要依据。其计算式为：

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

其中， N_c 为设计年限内一个车道上的累计当量轴次； A_c 、 A_s 、 A_b 分别为公路等级系数、面层类型系数和基层类型系数。路面结构层容许拉应力 σ_R 是指路面结构在行车荷载重复作用下达到疲劳临界状态时容许的最大拉应力。其计算式为：

$$\sigma_R = \sigma_s / K_s$$

(1-2)

其中， σ_s 为沥青混凝土或半刚性材料在规定条件下（沥青混凝土：15℃；水泥稳定类材料：90d 龄期；二灰稳定类、石灰稳定类材料：180d 龄期）的极限抗拉强度，

MPa; K_1 为抗拉强度结构系数, 对于沥青混凝土面层 $K_1 = 0.09N_c^{0.22}/A_c$; 对于无机结合料稳定集料类 $K_1 = 0.35N_c^{0.11}/A_c$; 对于无机结合料稳定细粒土 $K_1 = 0.45N_c^{0.11}/A_c$ 对于季节性冰冻地区的高级和次高级路面, 还应进行防冻层厚度验算。

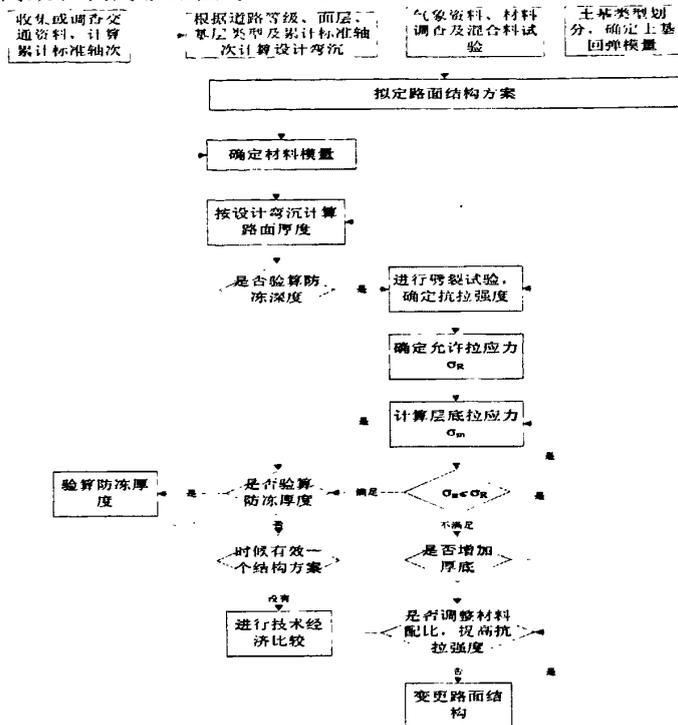


图 1-2 我国沥青路面设计流程图

热拌沥青混合料配合比设计采用马歇尔稳定度法, 按配合比设计拌制沥青混合料, 制成规定尺寸试件, 试件经 12h 测定其物理指标 (包括毛体积密度、孔隙率、沥青饱和度、矿料间隙率等) 以及稳定度和流值, 最后确定最佳的混合料组成。我国沥青路面设计流程可见图 1-2 所示。

1.3 本文的研究内容及研究路线

通过综合考虑路面结构性能和材料性能两个方面, 研究适合城市快速公交专用车道的路面结构形式、路面材料。本文的研究内容有:

- (1) BRT 专用车道适用的结构组合形式研究;
- (2) 各结构层混合料类型选择;
- (3) 快速公交车辆的交通特性及轴载换算;
- (4) 沥青混合料配合比设计及性能试验研究。

2 BRT 专用车道沥青路面结构组合研究

路面的结构组合是整个路面设计过程中最关键的步骤，一个好的路面必定有与其公路等级、交通量以及外在自然环境相适应的结构组合，才能保证其在设计年限内承受行车荷载和自然因素的共同作用，同时又能发挥各结构层的最大效能。同时，在结构组合设计过程中，能够较好的借鉴以往路面设计的成功经验，并运用于本文的研究之中。

本章将着重研究路面结构各功能层的功能定位、BRT 专用车道适合的结构组合形式以及合理的各结构层混合料选择等问题，最后将给出适于应用于 BRT 专用车道的几种路面结构组合形式并进行比选，以最终确定最优的路面结构组合方案。

2.1 沥青路面各结构层功能要求

在 BRT 专用车道路面结构组合设计过程中，明确各结构层的作用、力学特性以及主要的功能需要，是整个路面设计中关键的第一步。充分合理的利用路面的各结构层材料，不仅能保证路面具有更好的使用性能，同时其本身就是对原材料的节省。

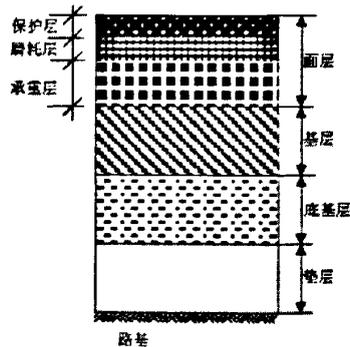


图 2-1 路面结构层划分

目前，高等级公路沥青面层多采用三层或两层结构。分两层时可分别称为表面层和底面层，分三层时可分别称为表(上)面层、中面层和底面层，路面面层不同深度处的功能是不相同的，对于 BRT 专用车道来说，应当根据各层的功能采取有针对性的设计。

1. 表(上)面层

表(上)面层是要求最高的层次，其主要功能是：在足够长的时间内提供平整的行驶表面；在要求的时间内提供足够的抗滑性能。

要实现这些功能，表(上)面层必须具有足够的耐久性，并满足以下要求：

- (1) 集料具有足够的纹理深度，面层具有适当的构造深度；
- (2) 具有很强的抗高温抗变形能力；

(3) 具有足够的低温韧性;

(4) 具有足够的强度, 具有扩散荷载的能力, 能够抵抗荷载的重复剪切作用和其他疲劳作用;

(5) 具有很强的抗水作用能力。

另外, 在噪声危害越来越被人们所关注的今天, 对于城市道路而言, 表面层还应当考虑减少噪声污染的问题。有调查结果显示^[1,54], 高等级公路两侧200m~300m的范围内形成的噪声污染带会显著影响附近的生态环境以及经济发展。噪声还直接影响到周围土地的价值, 有资料表明交通噪声每升高1dB, 土地的价格就会下降0.08%~1.26%之间, 平均降低0.9%左右。

2. 中面层

中面层的主要功能是: 抗车辙、抗低温缩裂、抗渗; 要实现这些功能, 中面层必须满足以下要求:

(1) 具有很强的抗高温抗变形能力;

(2) 具有足够的低温韧性;

(3) 具有很高的强度, 以抵抗荷载的重复作用

(4) 具有很强的抗水作用能力;

(5) 具有很强的耐久性。

抗车辙性能是城市道路结构组合设计中需要着重考虑的因素, 已有的研究显示^[2], 在城市道路交叉口附近的车道, 由于车辆行驶速度较慢, 荷载作用时间较长, 尤其在夏季高温时段, 很容易产生车辙病害。

3. 底面层

底面层在一般情况下极少出现可计量的永久变形, 其主要功能是: 抗疲劳; 抗渗或排水。

要实现这些功能, 底面层必须满足以下要求:

(1) 具有很高的强度, 以抵抗荷载的重复疲劳作用;

(2) 具有较强的抗水作用能力;

(3) 具有足够的耐久性。

以上各层的应力应变状态是不同的。表面层一般为三向受压区, 力学上以剪应力为主; 中面层一般力竖向受压区, 力学上以抗竖向压缩为主; 而底面层一般为两向拉伸区, 力学上以抗疲劳为主。

4. 封层

一般封层采用很薄的沥青层, 其主要功能是:

(1) 保护基层不受路面水渗流造成的冲刷影响;

(2) 增强基层与面层之间的粘结作用。

5. 基层和底基层

基层的主要功能是：具备较强的承受荷载能力。故能起到减小面层厚度的作用；具备一定的渗水和排水能力。要实现这些功能，基层需要满足以下的技术要求：

- (1) 具有较强的抗变形能力，以抵抗荷载的重复疲劳作用
- (2) 具有较强的抗水作用能力
- (3) 具有较强的抗压强度

底基层的主要功能是分担基层的承重作用，一般采用强度较基层材料低材料。

另外，美国沥青路面协会 (APA) 在其长寿命路面设计理念中，也突出了路面结构组合设计应根据路面受力特性，对各结构层分层设计。表面层为车辆提供良好的行驶界面，设计时采用高性能沥青混凝土，应具有足够抗车辙性能、抗表面开裂性能、良好的抗滑性能、缓解水雾的影响并能减小噪声，可以选择骨架型密实结构的沥青混合料，并采用优质沥青或改性沥青，也可采用开级配抗滑磨耗层 (OGFC) 以利于水从路面表面迅速排除。中间层起扩散荷载的作用，必须同时具有耐久性和稳定性，因为此层是承受车轮荷载作用的高应力区，极易产生剪切损坏，因此结构层须采用粗骨料的骨架结构，同时采用流动性较小的沥青，如较低针入度的硬沥青，设计采用高模量青混凝土^[53]。

2.2 BRT 专用车道结构组合研究

2.2.1 国外沥青路面典型结构

欧美及澳大利亚等国家普遍采用沥青处治的柔性碎石基层，其中英国较多使用贫混凝土基层，表 2-1 给出了欧美及澳大利亚等国家部分高速公路采用的沥青路面结构^[1, 26]；日本则更多的使用无机结合料稳定碎石作为底基层，表 2-2 给出了日本高速公路的路面结构^[1]。

表 2-1 欧、美及澳大利亚等国家部分高速公路采用的沥青路面结构

国家	沥青面层及厚度 (cm)	基层及厚度 (cm)	底基层及厚度 (cm)
奥地利	沥青砼 2.7+3.0+4.1	沥青稳定碎石 (14+16)	防冻层 (30)
比利时	沥青混凝土 (4+8)	沥青稳定碎石 (16)	底基层 (30)
意大利	沥青混凝土 (3+7)	沥青稳定碎石 (15)	级配砂砾 35+砂层 30~40
德国	浇注式沥混 3.5+沥混 5	砂砾沥青混凝土 (18)	贫混凝土 (15)+防冻层 (30)
	沥青混凝土 (4+3+5)	沥青稳定碎石 (18)	级配砂砾 (15)+防冻层 (30)
	沥青混凝土 (12 以上)	水泥结粒料	
挪威	沥青混凝土 (10)	沥青碎石 10+未筛分碎石 50	砂砾 20+防冻层 40~90
阿根廷	沥青混凝土 (7.5)	沥碎 12.5+沥乳稳定砂土 10	防冻层 (35)
法国	沥青混凝土 (3+4)	沥碎 16+水泥处治 10~35	砂底基层 (15)
荷兰	沥青混凝土 (4+4)	沥青稳定砂砾 (12~18)	水泥稳定砂砾 (15~40)

表 2-1 欧、美及澳大利亚等国家部分高速公路采用的沥青路面结构（续表）

瑞士	沥青混凝土 (3+4)	沥青碎石 (11)	砂砾 30+水泥处治砂砾 20
英国	热压式沥青混凝土 9.5	贫混凝土 (35.6)	级配砂砾 (15.2)
	热压沥青 3.8+粗沥青 6.8+热压沥青 6.3	贫混凝土 (19)	级配砂砾 (20)
	沥青混凝土 (15)	贫混凝土 (24)	水泥结粒料 (20~30)
瑞典	沥青混凝土 (5)	沥青碎石 (7.5)	水泥稳定砂砾 (18)
西班牙	沥青混凝土 3~5+4~6	沥青碎石 (6~10)	水泥砂砾 20+级配砂砾 15
	沥青混凝土 (8)	碾压混凝土	结合料处治
	沥青混凝土 (15)	水泥稳定粒料	结合料处治
波兰	中粒沥青 4+粗沥青 6	沥青碎石 8+水泥石屑 27	水泥石屑/路拌 12+砂砾 50
澳大利亚	沥青混凝土 (7.5)	级配碎石 15+石灰稳定砂 30	补强层 (25)
美国	沥青混凝土 (4+9)	沥青贯入 17.5+水泥碎石 16	砂砾 (25)
	沥青混凝土 (5)	沥青碎石 (19)	砂砾 (15)+加固层 (15)
	沥青混凝土 (7)	沥青碎石 (12)	级配砂砾 (75)

表 2-2 日本高速公路沥青路面结构

路名	沥青面层及厚度 (cm)	基层及厚度 (cm)	底基层及厚度 (cm)	总厚度 (cm)
名神 (1963)	10 中粒式+粗粒式	级配碎石 (20)	未处理级配砂砾 (20)	50
东名/冈琦 (1967)	10 中粒式+粗粒式	沥青碎石 (15)	级配碎石 (15)	40
东名/丰田 (1968)	10 中粒式+粗粒式	沥青碎石 (18)	级配碎石 (22)	50
东名/小牧 (1968)	10 中粒式+粗粒式	沥青碎石 (20)	水泥稳定碎石 (20)	50
中央 (1968)	10 中粒式+粗粒式	沥青碎石 (15)	水泥稳定碎石 (25)	50
东北 (1972)	10 中粒式+粗粒式	沥青碎石 (20)	水泥稳定碎石 (20)	50
中国 (1973)	10 中粒式+粗粒式	沥青碎石 (15)	水泥稳定碎石 (20)	45
北陆 (1974)	10 中粒式+粗粒式	沥青碎石 (10)	水泥稳定碎石 (30)	50
札樽 (1973)	10 中粒式+粗粒式	沥青碎石 (20)	未筛分碎石 (50)	80
道央 (1982)	10 中粒式+粗粒式	沥青碎石 (15)	水泥稳定碎石 (25)	50

2.2.2 我国部分高速公路的路面结构

截止 2006 年底,我国高速公路通车里程已经突破 4.54 万公里,总里程位居世界第 2 位。在这 20 来年的发展,我国高速公路路面结构形成了以半刚性基层沥青路面结构为主,几乎唯一的路面结构形式。表 2-3 是我国主要高速公路的沥青路面结构形式^[3, 33~34]。

表 2-3 我国主要高速公路沥青路面结构

名称	面层及厚度 (cm)				基层及厚度 (cm)	底基层及厚度 (cm)	通车时间
	上	中	下	总厚			
沪嘉	AK-13A AK-13B	粗粒式 沥青砼	沥青贯入	12 17	二灰碎石 (46)	部分路段砂 砾 (20)	1988
广佛	AC-20I (4)	AC-30 (5)	沥青碎石 (6)	15	水泥碎石 (20)	水泥石屑 (25~28)	1989
	AC-20I (4)		AC-30 (5)	9	水泥碎石 (25)	水泥石屑 (25~28)	
沈大	AC-20 (4)	粗粒沥 青砼(5)	沥青碎石 (6)	15	水泥砂砾 (20)	砂砾或矿渣	1990
首都机场	中粒式 沥青砼 (4)	粗粒式 沥青砼 (6)	沥青碎石 (8)	18	水泥稳定砂 砾 (18)	二灰稳定砂 砾 (16)	1993
济青	AC-20I (4)	AC-30 (6)	沥青碎石 (8)	18	水泥碎石 (20)	二灰土 (20)	1993
	SAC-20 (4)	AC-30 (6)	沥青碎石 (8)	18	水泥砂砾或 二灰碎石+ 1.5%水泥	石灰土 (39)	
	SAC-20 (4)	AC-30 (5)	沥青碎石 (6)	15			
广深	土质 路段	AC-20II (4)	AC-30 (8)	AM-30(10) + AM -40(10)	32	水泥碎石 (23)	1993
	石质 路段	AC-20II (4)	AC-30 (8)	AM-30(10) + AM -40(10)	32	级配碎石 (23)	
京石北京段	三期	中粒式沥 青砼 (3.5)	粗粒沥 青砼 (4.5)	沥青碎石 (7)	15	水泥砂砾 (20)	1994
	四期	中粒式沥 青砼 (3.5)	粗粒式 沥青砼 (4.5)	沥青碎石 (7)	15	二灰砂砾 (40)	
京津塘正常 地基软土段	AC-20I (5)	AC-30 (6)	沥青碎石 (12)	23	水泥碎石 (20)	石灰土 (30)	1994
	AC-20I (4)	AC-30 (5)	沥青碎石 (11)	20	水泥碎石 (20)	石灰土 (28)	
京哈	AK-16A (4)		AC-25I (6)	10	二灰碎石 (18)	水泥砂砾 (30~36)	1995
成渝 (柔性段)	中粒式砼 (5)		沥青碎石 (7)	12	级配碎石 (20)	石灰稳定泥 岩 (28~36)	1995
西宝	中粒式沥 青砼 (4)		沥青碎石 (8)	12	二灰砂砾	二灰土	1995
海南东线	中粒式 沥青砼 (4)	粗粒式 沥青砼 (4)	沥青碎石 (4)	12	水泥碎石 (20)	水泥碎石 (20)	1995
吕九	AC-20 (4)		沥青碎石 (6)	10	水泥粉煤灰 碎石 (20)	级配碎石 (30)	1996

沪宁	常州段	SAC-16 (4)	AC-25I (6)	AC-25 II (6)	16	二灰碎石 (25,28,30)	二灰、二灰 土或石灰土 (33,20,18)	1996
	镇江段	SAC-16 (4)	AC-25I (6)	AC-25 II (6)	16	二灰碎石 (20)	二灰土 (40)	
杭甬	K7.7-K2 8	AC-20 II (3)	AC-30 (6)	沥青碎石 (8) 沥青砂(1)	18	二灰/水泥 碎石 (25~34)	级配碎石 (20)	1996
	K28-K14 5	AC-20 II (5)	沥青砂 (1)	沥青碎石 (7)	13	二灰/水泥 碎石 (19~28)	级配碎石 (20)	
深汕	抗滑 AC (3)	中粒式 AC (5)	粗粒式 AC (6)	14	水泥石屑 (25)	级配碎石 (28,32,38)	1996	
泉厦	SAC-16 (4)	AC-25I (6)	AC-25 II (6)	16	5%水稳碎 石 (30)	3%水稳碎 石 (22~36)	1997	
石安	SAC-16 (4)	AC-25 (5)	沥青碎石 (6)	15	水泥碎石 (20)+二灰 碎石(20),水 泥碎石(20)	石灰土或二 灰土(20) 二灰土或二 灰砂(40)	1997	
南京 机场高速	SAC-16 (4.5)	AC-25I (6)	AC-25 II (6)	16.5	二灰碎石 (34)	二灰土 (20)	1997	
广花 软土段	AC-20 (3)		AC-20(4)	7	水泥碎石 (18~20)	水泥石屑 (25~34)	1998	
沪杭	中粒式砼 (4)	粗粒式 砼 (6)	粗粒式砼 (7)	17	二灰碎石 (37)	水泥碎石土 (20)	1998	
京福 (济南-泰 安)	AK-16A 或 AK-16B (4)	AC-20I (5)	AC-30I (6)	15	水稳碎石 (28)	石灰土 (34)	1999	
京沈 (廊坊段)	SMA-16 (4)	AC-20I (5)	AC-25I (6)	15	水稳碎石 (18)+二 灰碎石(18)	石灰土 (20)	2000	
江西梨温	AK-16A (4)	AC-20I (6)	AC-25I (6)	16	水稳碎石 (20)+水 稳碎石(20)	未筛分碎石 (20)	2001	
江苏宁靖盐	SMA-13 或 AK-13 (4)	AC-20I (6)	AC-25I (7)	17	二灰碎石 (35)	二灰土 (20)	2001	
湖北襄十 (襄樊-武 当)	Sup-13 (4)	AC-20I (6)	AC-20I (6)	16	水稳砂卵石 +水稳碎石 (36)	水稳砂卵石 (18)	2002	
山西大运 K11+500 -K26+000 (潮湿段)	AC-16I (4)	AC-20I (5)	AC-20I (6)	15	2%水泥的 二灰碎石 (30)	2%水泥的 二灰土 (30)	2003	
宁杭(一期)	AK-13 或 SMA-13 (4)	AC-20I (6)	AC-25I (8)	18	水稳碎石 (36)	二灰土 (20)	2003	

由表 2-3 看出,我国高速公路以半刚性基层沥青路面结构为主,通常由半刚性材

料底基层、半刚性材料基层和沥青面层构成。沥青面层厚度多数为 15~18cm，少部分为 9~12cm，除了京津塘高速公路采用较厚的面层，达 18~23cm。沥青面层多采用沥青混凝土，少部分下面层采用沥青碎石，为了提高上面层的抗滑及高温性能，现开始采用 SMA 结构。初期半刚性基层厚度多为 20cm 左右，后期加厚为 30~40cm，采用的材料多为水泥稳定碎石或二灰稳定碎石。半刚性底基层厚度为 20~40cm，采用的材料多为二灰土或石灰土，少部分采用级配粒料或稳定粒料。国内典型半刚性基层沥青路面结构可参见图 2-2 所示。

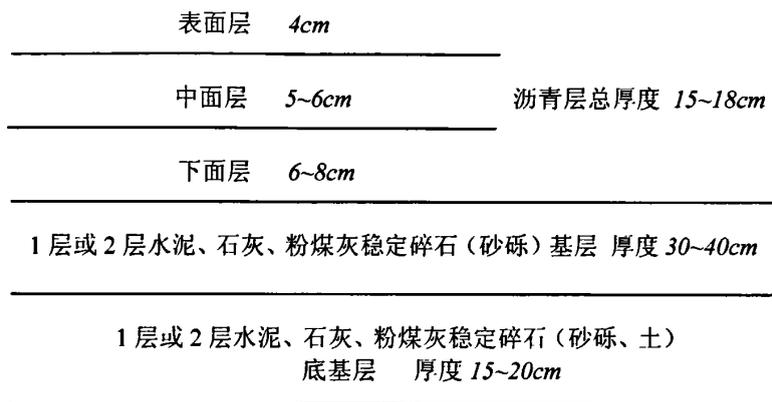


图 2-2 国内典型半刚性基层沥青路面结构

2.3 合理的各结构层混合料类型

在确定了路面结构组合之后，需要根据路面实际的性能需求和各个结构层功能选择适宜的各结构层混合料类型。我国《公路沥青路面设计规范》（JTG D50-2006）给出了结构层设计的规定：

沥青路面结构层可由面层、基层、底基层、垫层等多层结构组成，面层可分为单层、双层或三层、双层结构分为表面层、下面层。三层结构分为表面层、中面层、下面层。表面层应具有平整密实、抗滑耐磨、抗裂耐久性能；中下面层应具有高温抗车辙、抗剪切、密实、基本不透水的性能；下面层应具有耐疲劳开裂的性能。基层是主要的承重层，应具有稳定、耐久、较高的承载能力，可分为单层或双层。面层类型应与公路等级、使用要求、交通等级相适应。

各国沥青路面面层用沥青混合料类型为了改善沥青混凝土的性能，提高沥青路面的抗滑能力，确保行车安全舒适，在抗滑表层方面，不同国家也采取了不同的措施，甚至同一国家不同地区也有明显差异。通常比较普遍的做法有以下几种：

- (1) 使用改性沥青的传统连续级配沥青混凝土；
- (2) 在沥青混凝土表面撒布碎石：将预拌碎石用机械撒布在沥青混凝土表面，

再用压路机将碎石压入混合料,形成较好的宏观构造,这种处理措施普遍应用于英国、比利时、瑞典、德国和法国北部。

(3) 采用沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA): SMA是一种新型的粗集料断级配密实型沥青混合料,它由沥青玛蹄脂填充碎石骨架组成的骨架嵌挤型密实结构沥青混合料,主要是粗集料多(高达70~80%)、矿粉多(通常接近10%)、沥青结合料多、细集料少。它具有良好的表面抗滑能力,通常构造深度可达1.5mm~2.0mm,同时由于SMA是一种密实混合料,其耐久性能也得到很大提高。SMA路面于60年代初产生于德国,80年代首先在北欧的瑞典、芬兰等国得到推广,并迅速在欧美许多国家得到应用。

(4) 采用排水性的粗集料断级配多孔隙沥青混凝土路面(PAC): 排水性PAC路面空隙率超过15%,是一种开级配多孔式排水沥青混合料,在美国又称开级配磨耗层OGFC(Open Grade Friction Course),这种排水路面雨天抗滑性能好,同时还具有降低噪音,减少溅水和水雾等功用。70年代以来,许多国家对排水沥青路面进行了广泛的研究,并且逐步得到推广,不少国家已经在工程实践中采用了排水路面。

另外,目前发现具有降噪效果的沥青路面主要有:多孔性沥青路面(PA)、密实骨架橡胶沥青路面、SMA路面、多孔弹性路面(PERS)以及开级配磨耗层(OGFC)。这些路面材料一般是利用其大空隙、高弹性和大阻尼以及良好的路面平整度达到降噪效果的^[55]。上述路面中SMA路面不仅具有降噪的效果,还有很好的高温稳定性和抗滑能力。对于BRT专用车道表面层,使用SMA混合料是很好的选择。

2.4 半刚性基层沥青路面结构组合选择

半刚性基层沥青路面结构是我国高速公路普遍采用的路面结构。我国半刚性基层沥青路面面层通常有2~3层,其中多为3层,从上往下分别称为表面层、中面层和下面层。通常表面层层厚4cm,中面层厚5~6cm,下面层厚6~8cm^[3]。各层所采用的沥青混合料类型如表2-4所示^[41~43]。

表 2-4 沥青路面面层结构层次及采用混合料类型

结构层次	高速公路、一级公路	
	三层式路面	两层式路面
上面层	AC-13 AK-13 SMA-13 Sup-13 SAC-13 AC-16 AK-16 Sup-16 SMA-16 SAC-16 AC-20	AC-13 AK-13 Sup-13 SAC-13 SMA-13 AC-16 Sup-16 AK-16 SMA-16 SAC-16
中面层	AC-20 AC-25 SAC-20 Sup-20	-
下面层	AC-25 SAC-25 Sup-25 AC-30	AC-20 SAC-20 Sup-20 AC-25 SAC-25 Sup-25 AC-30

现行规范《公路沥青路面设计规范》(JTG D50 2006)对以前常用的混合料类型级配进行了调整,例如以前沥青路面表面层常用的 AK-13A、AK-16A 调整为 AC-13C、AC-16C,对于 AK-13B、AK-16B、AC-II 型级配现行规范不予推荐,都取消了,AC-20 I、AC-25 I 的级配也进行了调整,增加了粗集料的含量^[7]。

按照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50 2006)的建议,对于表面层,应具有密实均匀、抗滑耐磨的功能,特别是对于气候炎热、多雨潮湿地区,路线平纵线型不良路段,宜选用表面粗糙的抗滑面层(AC-C、SMA)。当表面层厚度为 4cm 时,可选用 AC-13C、SMA-13 等级配类型;长大纵坡段、弯道或重车多的路段,气候严寒地区的表面层厚度宜为 4.5~5cm,可选用 AC-16C、SMA-16 等级配类型。对于中、下面层,现已开始选用粗级配,使混合料向骨架密实型级配发展,以提高其高温稳定性和水稳定性。中面层可选用 AC-20C、SUP-20 或 SMA-20 等级配类型,下面层可选择沥青混凝土 AC-25、SUP-25 等。对于柔性基层,下面层还可以选择密级配沥青碎石 ATB-25、LSM-25、ATB-30 等级配类型^[7]。

各沥青层厚度应与混合料公称最大粒径相匹配,沥青混合料的一层压实最小厚度不宜小于混合料公称最大粒径的 2.5~3 倍,SMA 的一层压实最小厚度不宜小于混合料公称最大粒径的 2~2.5 倍。各结构层的设计厚度应根据级配类型、结构组合及施工条件确定,下表 3-4 是《公路沥青路面设计规范》(JTG D50 2006)推荐的不同沥青混合料压实最小厚度及适宜厚度^[7]。

表 2-5 规范推荐沥青混合料压实最小厚度与适宜厚度

沥青混合料类型		最大粒径 (mm)	公称最大 粒径 (mm)	符号	压实最小 厚度 (mm)	适宜厚 度 (mm)
密级配沥青混合 料 (AC)	砂粒 式	9.5	4.75	AC-5	15	15~30
	细粒 式	13.2	9.5	AC-10	20	25~40
		16	13.2	AC-13	35	40~60
	中粒 式	19	16	AC-16	40	50~80
		26.5	19	AC-20	50	60~100
粗粒 式	31.5	26.5	AC-25	70	80~120	
密级配沥青碎石 (ATB)	粗粒 式	31.5	26.5	ATB-25	70	80~120
		37.5	31.5	ATB-30	90	90~150
	特粗 式	53	37.5	ATB-40	120	120~150
沥青玛蹄脂碎石 混合料 (SMA)	细粒 式	13.2	9.5	SMA-10	25	25~50
		16	13.2	SMA-13	30	35~60
	中粒 式	19	16	SMA-16	40	40~70
		26.5	19	SMA-20	50	50~80

2.4.1 沥青面层混合料类型选择及合适厚度

SMA 混合料和 OGFC 混合料都具有良好的抗滑、降低噪音污染的性能,需要在 SMA 混合料和 OGFC 混合料中进行选择。国内外工程实际经验证明, SMA 有优于其他混合料的高温稳定性、低温抗裂性能以及很好的抗渗性能; OGFC 是一种开级配大孔隙率混合料,其透水性能以及水稳定性能非常好,可以解决江苏常州梅雨季节大量降水所需要的路表排水性能,降低水雾产生的可能,增强路面行驶的安全性,但这种排水型混合料的空隙很容易被灰尘堵塞,使排水性能越来越差。

中下面层应当具有较好的抗车辙、抗渗不透水以及抗疲劳能力,结合长三角地区以往工程经验,分别选择 AC-20C 和 AC-25C 作为 BRT 专用车道路面结构中下面层。其厚度一般为中面层 AC-20C, 6~10cm; 下面层 AC-25C, 8~10cm。由于 BRT 专用车道交通量不大,仅有一种车型,从技术经济角度来看,可以适当减薄面层厚度以降低造价,并对减薄后的厚度进行层底拉应力验算以及混合料稳定性验证试验,以确保路面结构的正常使用。

2.4.2 基层材料的选择及最小厚度

基层是半刚性路面中主要的承重层,应当具有稳定、耐久和较高的承载力。一般基层可以选用水泥稳定碎石或二灰稳定碎石,底基层可以采用与基层相同的半刚性材料,也可以采用稳定细粒土、二灰土、二灰砂。在采用级配粒料做底基层时,粒料中细粒土含量及塑性指数必须符合公路路面基层施工技术规范的规定。

从尽可能消除冲刷唧浆现象来说,主要是半刚性基层受到冲刷。建议路面结构中稳定粒料基层的最小厚度为 15cm~18cm。加上沥青面层厚度,稳定细粒土底基层处在路表 21cm~30cm 之下,能够避免冲刷现象。

2.4.3 合理的路面结构组合推荐

结合以上研究以及工程经验,分别给出以下几种可供选择的路面结构组合方案:

表 2-6 推荐的 BRT 专用车道半刚性路面结构组合方案 1

路面结构层	混合料类型	厚度
上面层	SMA-13	4cm
中面层	AC-20C	5cm
下面层	AC-25C	6cm
下封层	稀浆封层	0.6cm
上基层	水泥或二灰稳定粒料	36cm
底基层	水泥或二灰稳定细粒土	20cm

表 2-7 推荐的 BRT 专用车道半刚性路面结构组合方案 2

路面结构层	混合料类型	厚度
表面层	OGFC-13	3cm
防水粘结层	道路石油沥青+石屑	0.2cm+0.2cm
中面层	AC-20C	5cm
下面层	AC-25C	6cm
下封层	稀浆封层	0.6cm
上基层	水泥或二灰稳定粒料	36cm
底基层	水泥或二灰稳定细粒土	20cm

3 路面结构及混合料目标配比设计

武进中心城区位于常州市南部,作为常州城市主体城区的重要组成部分,地域总面积 1242 平方公里,占常州市区总面积的 67%,辖 23 个镇。为实施常州市城市发展总体战略和适应社会经济发展的需要,进一步完善城市基础设施,应接武进大桥建成投运所造成的交通需求,缓解城区交通拥挤状况,配合老城区改造及沿线地块开发,武进区政府决定对武宜路北段进行改造。同时为提高公交出行比例,改善交通结构,市政府将沿武宜路拓宽建设城市南北向快速公交线(BRT NO. 1)。本章结合常州市 BRT 系统常州市武进区武宜路项目,进行 BRT 专用车道新建路面设计的应用。

3.1 路面设计的参数

3.1.1 现行沥青路面设计规范轴载换算方法

我国现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)中采用的轴载换算公式结果表述如下:

关于标准轴载的取用问题,考虑到近年来道路交通量的增长较快,重车所占的比例增多,以及轻型车对半刚性基层沥青路面的疲劳损伤作用减小等因素。新规范统一采用 BZZ—100 作为标准轴载。

现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)轴载换算方法为:

(1). 当以设计弯沉值为指标及沥青层层底拉应力验算时,凡轴载大于 25kN 的各级轴载(包括车辆的前、后轴) P_i 的作用次数 n_i ,应按下述公式换算成标准轴载 P 的当量作用次数 N 。

$$N = \sum_{i=1}^K C_1 \cdot C_2 n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35} \quad (3-1)$$

式中: N ——标准轴载的当量轴次,次/日;

n_i ——被换算车型的各级轴载作用次数,次/日;

P ——标准轴载, kN;

P_i ——被换算车型的各级轴载, kN ;

C_1 ——轴数系数;

C_2 ——轮组系数,单轮组为 6.4,双轮组为 1,四轮组为 0.38。

当轴间距大于 3m 时,应按单独的一个轴载计算,此时轴数系数为 m ;当轴间距小于 3m 时,按双轴或多轴计算,轴数系数按下式计算:

$$C_1 = 1 + 1.2(m - 1) \quad (3-2)$$

式中: m ——轴数。

(2). 当进行半刚性基层层底拉应力验算时, 凡轴载大于 50kN 的各级轴载(包括车辆的前、后轴) P_i 的作用次数 n_i , 应按下述公式换算成标准轴载 P 的当量作用次数 N' 。

$$N' = \sum_{i=1}^K C'_1 C'_2 n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35} \quad (3-3)$$

式中: C'_1 ——轴数系数;

C'_2 ——轮组系数, 单轮组为 18.5, 双轮组为 1.0, 四轮组为 0.09。

当轴间距小于 3m 时, 双轴或多轴的轴数系数按下式计算。

$$C'_1 = 1 + 2(m-1) \quad (3-4)$$

上述轴载换算公式, 仅适用于单轴轴载小于 130kN 的各种车型的轴载换算。

目前国内外的交通量调查方法, 多数是采用轴载仪检测汽车轴重, 因此, 新规范用的是轴载比的公式形式。

轴载换算公式这一问题颇受国际上的关注, 在第十八届世界道路会议上, 对半刚性基层沥青路面结构采用轴载比 P_i/P_s 的公式时, 奥地利认为指数用 7.0; 法国认为指数用 10.0; 澳大利亚认为指数用 12。会议结论: 该指数应根据路面结构层的不同组合和材料性质决定。从我国路面结构的实际情况出发, 一般以路表容许弯沉值为路面结构厚度计算的控制指标, 轴载换算公式宜用公式 (3-1)。当半刚性基层沥青路面需验算拉力时, 宜用公式 (3-3)。

3.1.2 BRT 车辆的轴载换算和标准轴载累计当量作用次数

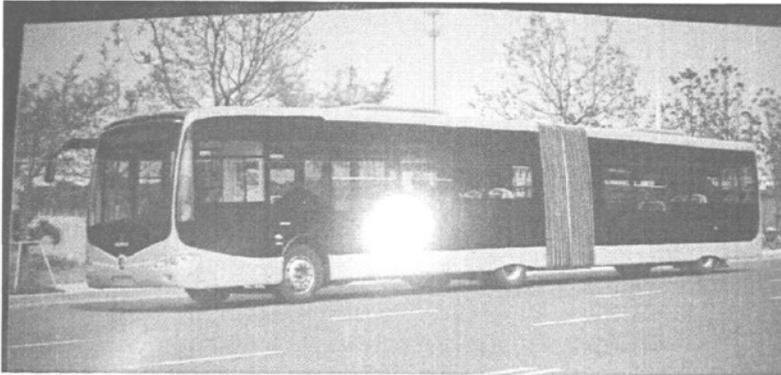


图 3-1 黄海 YS6180G 铰接快速公交客车

常州 BRT 采用型号为 YS6180G 铰接快速公交客车, 长 17.98 米, 宽 2.55 米, 轴距为 (1-2) 5250mm/(2-3) 7200mm。该车由江苏常隆客车有限公司组装, 采用斯堪尼亚客车成熟底盘技术, 配置符合欧 IV 排放标准的发动机, 动力强劲、低油耗; 采用最新款具有防翻车系统功能的电控铰接盘、电子调度控制阀, 具有高可靠性和稳定性; 冷却系统采用液压驱动恒温控制的冷却风扇, 用最小的动力保持应有的冷却水平, 使发动机的效率提高, 同时降低油耗; 发动机和变速器采用隔音装置。

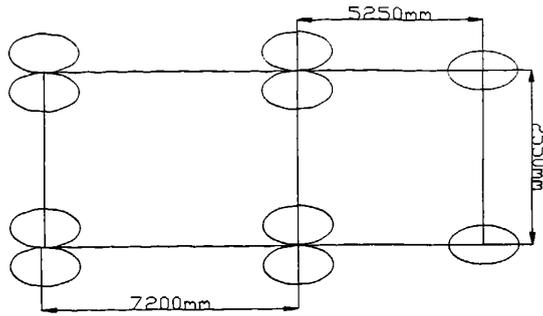


图 3-2 黄海 YS6180G 车辆轴距及轮组示意图

BRT 专用车道以设计弯沉值为指标及沥青层层底拉应力验算时的荷载换算：

1. BRT 车辆的轴载

通过实地测量，得到 BRT 车辆满载时的各轴轴载，分别为：

前轴轴载：79.2kN

中轴轴载：106kN

后轴轴载：94.8kN

2. 轴数系数与轮组系数

由于每个轴的轴载都大于 50kN，而且轴距都大于 3m，因此，轴数 $m=1$ ， $C_1=1$ $C_1=1$ ；前轴 $C_2=6.4$ ，中轴 $C_2=1$ ，后轴 $C_2=1$ 。

3. BRT 车辆的轴载作用次数

常州 BRT 公交系统将定点定时发出车辆以运载乘客，预计发车时间间隔为平时 30 分钟一班，高峰时段（早晚上下班高峰期，不包括中午，共 4 小时）每 3 分钟一班。可以得出

$$n_i \text{ (BRT 车辆轴载作用次数/日)} = 20 \times 60 / 30 + 4 \times 60 / 3 = 120 \text{ 次/日。}$$

4. BRT 车辆的标准轴载的日当量轴次

当以设计弯沉值为指标及沥青层层底拉应力验算时：

$$N = \sum_{i=1}^K C_1 \cdot C_2 \cdot n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35} = 528.238$$

当进行半刚性基层层底拉应力验算时

$$N' = \sum_{i=1}^K C'_1 \cdot C'_2 \cdot n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35} = 1054.766$$

3.2 实际路面的结构设计

常州属于VI,长江中下游平原润湿区,年降水量 1000~1400mm,土质为内陆软土、冲积土。平均最大冻深<10cm,区域内年均无霜期 226 天,相对湿度 80%,平均日照 2033 小时,年均气温 15.3℃,年均蒸发量 1382.5mm,略高于降水量,蒸降比 1.30。沿线老路标高,大部分为青岛高程 4~6 米之间,沿线地质较好,地耐力大部分在 100~200Kpa。道路设计使用年限为 20 年。

3.2.1 初拟路面结构方案

根据以上几章的研究,结合路基情况、路面环境条件,采用了 BRT 专用车道的路面结构组合方案 1:

4cm 改性沥青马蹄脂碎石(SMA-13,玄武岩骨料)+5cmAC-20C 中粒式密级配沥青混凝土+6cmAC-25C 粗粒式密级配沥青混凝土+ 0.6cm 稀浆封层 + 36cm 二灰碎石 +20cm12%石灰土。

3.2.2 初拟方案的材料设计参数

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2006)给出了各种混合料的参考模量值,并结合以往工程经验,确定各种混合料的材料设计参数:

对于 SMA 混合料,20℃抗压模量为 1400MPa,15℃抗压模量为 1800MPa,15℃为 1.65MPa;

对于中粒式沥青混凝土 AC-20,20℃抗压模量为 1200MPa,15℃抗压模量为 1800MPa,15℃为 1.0MPa;

对于密级配粗粒式沥青混凝土 AC-25,20℃抗压模量为 1000MPa,15℃抗压模量为 1400MPa,15℃为 0.8MPa;

对于二灰碎石,弯沉计算用的抗压模量为 1600MPa,拉应力计算时取 3600MPa,劈裂强度为 0.8MPa;

对于二灰土,弯沉计算用的抗压模量为 800MPa,拉应力计算时取 2400MPa,劈裂强度为 0.3MPa。

土基模量为 35MPa

3.2.3 各层材料的允许层底拉应力

1. 抗拉强度系数计算:

对沥青混凝土层, $K_s = 0.09N_c^{0.22} / A_c = 2.53$

对无机结合料稳定集料类, $K_S = 0.35N_c^{0.11} / A_c = 2.00$

对无机结合料稳定细粒土类, $K_S = 0.45N_c^{0.11} / A_c = 2.57$

2. 容许拉应力 σ_R 的计算

对于 SMA 沥青混凝土层, $\sigma_{R-SMA} = \frac{\sigma_S}{K_S} = 0.65MPa$

对于 AC-20, $\sigma_{R-AC20} = \frac{\sigma_S}{K_S} = 0.4MPa$

对于 AC-25, $\sigma_{R-AC25} = \frac{\sigma_S}{K_S} = 0.32MPa$

对于二灰稳定碎石, $\sigma_{R-二灰碎石} = \frac{\sigma_S}{K_S} = 0.33MPa$

对于二灰稳定土, $\sigma_{R-二灰土} = \frac{\sigma_S}{K_S} = 0.09MPa$

3.2.4 弹性层状体系模型路面结构计算

利用弹性多层体系应力位移分析程序 APBI, 计算双圆均布荷载作用下的多层弹性层状体系各层层底的拉应力, 计算图式如下:

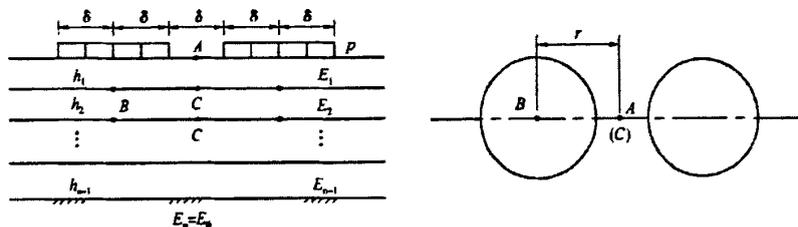


图 3-3 双圆均布荷载作用下多层弹性体系计算图示

经过计算分析得到每一结构层层底 B、D、E、C 四点的水平方向最大主应力见表 4-1:

表 3-1 APBI 各结构层底四点水平方向最大主应力值 (Mpa)

结构层序号	验算点位			
	B	D	E	C
1	-2.5564	-0.5724	-2.6984	-0.0313
2	-0.6812	-0.5922	-0.7501	-0.1441
3	-0.7878	-0.5852	-0.8651	0.0278
4	0.3001	0.3148	0.2729	0.2893

由表 4-1 以及容许拉应力计算结果可以看出, 当前各结构层厚度可以满足各层层底拉应力的要求。

3.3 BRT 专用车道面层混合料目标配合比设计

3.3.1 SMA-13 混合料的目标配合比设计

1. 配合比设计

集料: 玄武岩;

矿粉: 玄武岩矿粉;

沥青: SBS 改性沥青;

纤维：德国 JRS 木质素纤维，掺量为混合料质量的 0.3%。

表 3-2 SMA-13 型沥青混合料级配要求

筛孔	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	75	34	26	24	20	16	15	12
中值	100	95	62.5	27	20.5	19	16	13	12	10
下限	100	90	50	20	15	14	12	10	9	8

2. 初选级配

依据规范(JTG F40-2004)的要求，在选择集料结构时，根据关键筛孔(4.75mm)通过率，首选出粗、中、细三个级配，然后对比已建高速公路采用的油石比选择初始油石比分别制件马歇尔试件，得出试件的体积指标，根据体积指标初选一组满足或接近设计要求的级配作为设计级配。

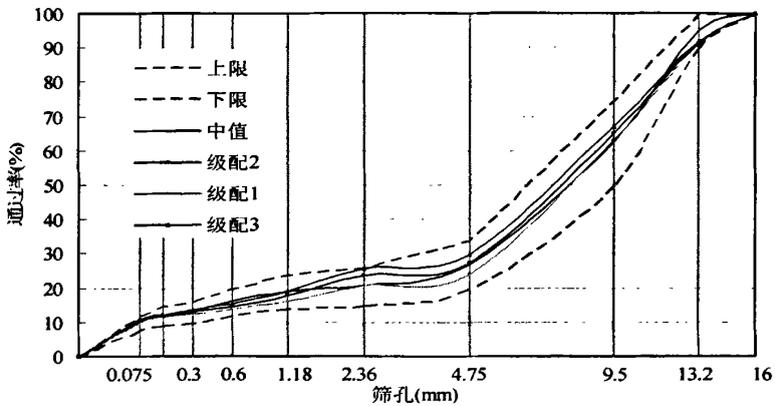


图 3-4 SMA-13 设计级配曲线图

根据规范规程要求采用捣实法测定大于 4.75mm 粗集料的松方密度并计算捣实状态粗集料骨架的间隙率。

表 3-3 捣实法试验结果

级配类型	粗集料的毛体积密度(g/cm ³)	粗集料的捣实松方密度(g/cm ³)	骨架间隙率(VCADRC)(%)
级配 1	2.87765	1.72	40.23
级配 2	2.87728	1.724	40.07
级配 3	2.87671	1.727	39.98

表 3-4 三种级配马歇尔试验结果

试验项目	技术要求	级配 1	级配 2	级配 3
初试油石比(%)		6.0	6.0	6.0
纤维掺量(%)		3	3	3
马歇尔试件击实次数	双面击实 50 次	双面击实 50 次		
毛体积密度(g/cm ³)		2.466	2.494	2.494

最大理论密度(g/cm ³)		2.607	2.604	2.601
空隙率 VV(%)	3~4	5.4	4.2	4.1
矿料间隙率 VMA(%)	17	18.02	17	16.83
粗集料骨架间隙率 (VCA _{mix})	≤VCA _{DRC}	35	36.81	38.92
沥青饱和度 VFA	75~85	70.1	75.01	75.64
稳定度(kN)	≥6	8.43	8.65	9.52
流值(0.1mm)		30.1	35.5	38.8

根据表 3-4 试验结果及选择 $VCA_{mix} < VCA_{DRC}$ 及 $VMA > 16.5\%$ 的要求作为设计级配, 选择级配 2 作为目标配合比设计级配。

3. 确定最佳油石比

按照初定级配 2 的范围成型试件, 选定油石比为 5.9、6.1、6.3 和 6.5 进行马歇尔试验。四种油石比马歇尔试验结果汇总如表 3-5 所示。

表 3-5 三种级配马歇尔试验结果

试验项目	技术要求	1	2	3	4
油石比(%)		5.9	6.1	6.3	6.5
纤维掺量(%)		3	3	3	3
马歇尔试件击实次数	双面击实 50 次	双面击实 50 次			
毛体积密度(g/cm ³)		2.487	2.498	2.502	2.502
最大理论密度(g/cm ³)		2.608	2.6	2.593	2.585
空隙率 VV(%)	3~4	4.6	3.9	3.5	3.2
矿料间隙率 VMA(%)	17	17.12	16.9	16.92	17.08
粗集料骨架间隙率 (VCA _{mix})	≤VCA _{DRC}	36.97	36.69	36.59	36.59
沥青饱和度 VFA	75~85	72.9	76.86	79.32	81.27
稳定度(kN)	≥6	9.14	8.73	9.25	8.64
流值(0.1mm)		24.3	24.3	24.4	24.32

4. 试验结果

通过以上试验和分析, 级配 2 为设计级配, 配合比为 1#: 2#: 3#: 4#: 矿粉=36: 39: 0: 15: 10, 油石比为 6.4%, 木质素纤维掺量为混合料质量的 0.3%。

3.3.2 AC-20C 中面层目标配合比设计

1. 原材料

集料: 石灰岩;

矿粉: 石灰岩矿粉;

2. 集料密度

采用网篮法 (T0304-2005) 对 1#料、2#料、3#料以及 4#料和 5#料中 2.36mm (含) 以上部分的集料进行密度和吸水率测试, 根据细集料密度及吸水率试验 T0330-2005 对 4#料和 5#料中 2.36mm 以下部分进行密度和吸水率测试 (4#料和 5#料的密度和吸水率采用体积合成的方法)。采用李氏比重瓶法对矿粉密度进行测试, 各种集料、矿粉及沥青的密度试验结果见表 3-6。

表 3-6 集料密度试验结果

材料	1#	2#	3#	4#	5#	矿粉
规格 (mm)	10~30	10~20	5~10	3~5	0~3	/
表观相对密度 γ_a (g/cm ³)	2.716	2.709	2.710	2.707	2.698	2.681
毛体积相对密度 γ_b (g/cm ³)	2.698	2.683	2.671	2.664	2.639	/
集料吸水率 w_x (%)	0.249	0.360	0.530	0.604	0.840	/

3. 合成级配

为验证配比本文亦采用了此配比合成级配如图 3-5 所示, 这种形式的级配通常较强的骨架嵌挤结构, 同时具有适宜的空隙率, 渗水性小, 有较好的高温稳定性, 表面还具有较大的构造深度。

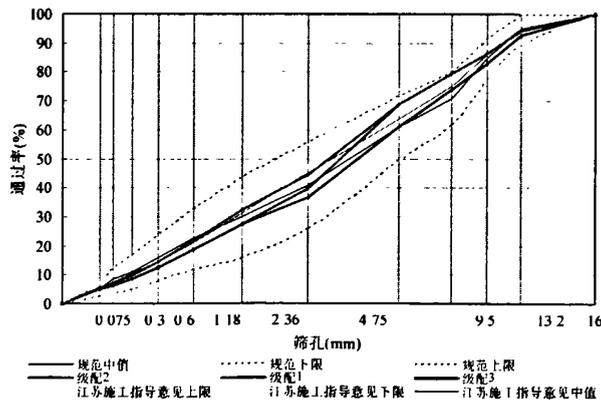


图 3-5 AC-20 设计级配曲线图

4. 最佳油石比确定

O2 标试验室进行马歇尔试验得出的最佳油石比如下:

$$OAC_1=4.15; OAC_2=(4.1+3.9)/2=4.00; OAC=(4.15+4.00)/2=4.1$$

为此, 本文在该油石比的基础上进行 OAC 和 $OAC \pm 0.3\%$ 、 $OAC \pm 0.6\%$ 五个油石比 (即油石比为 3.5、3.8、4.1、4.4、4.7) 制作马歇尔试件, 每个油石比成型 4 个试件, 测定其高度、干重、水中重、表干重、稳定度、流值, 计算出毛体积密度、稳定度、空隙率、流值、VMA、VFA, 验证各项体积参数是否符合要求。

沥青混合料的最大理论相对密度，如表 3-7 所示。

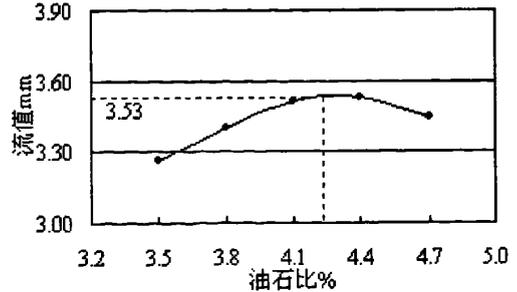
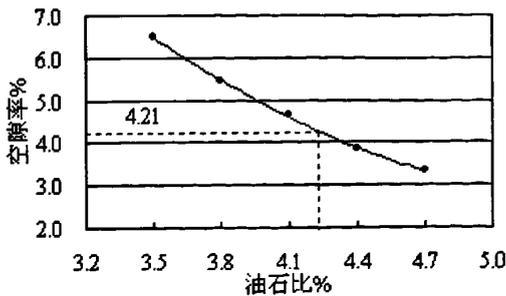
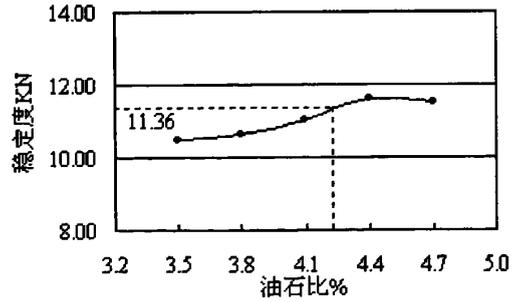
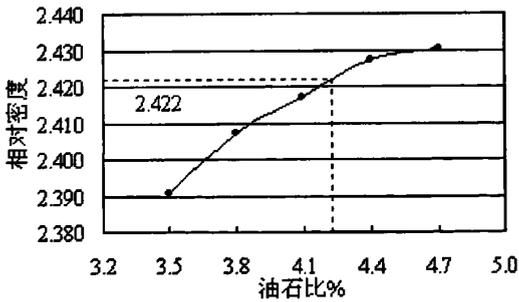
表 3-7 合成密度

		合成级配				
合成级配的表现相对密度	2.706					
合成级配的毛体积相对密度	2.670					
合成级配中矿料的吸水率	0.498					
系数 C 的确定	0.796					
合成级配的有效相对密度	2.670					
油石比(%)	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	
混合料的理论最大相对密度	2.557	2.546	2.535	2.524	2.514	

马歇尔试验试验结果见表 3-8，油石比和各项指标关系图如图 3-6 所示。

表 3-8 马歇尔试验试验结果

油石比 试验项目	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	技术标准
	试验结果					
最大理论相对密度	2.557	2.546	2.535	2.524	2.514	计算
毛体积相对密度	2.391	2.408	2.417	2.427	2.430	实测
空隙率 (%)	6.50	5.44	4.64	3.83	3.33	4~6
饱和度 (%)	51.9	58.7	64.4	70.4	74.5	65~75
矿料间隙率 (%)	13.50	13.14	13.04	12.94	13.07	/
吸水率 (%)	1.6	1.2	0.7	0.6	0.4	<2
稳定度 (KN)	10.47	10.64	11.03	11.61	11.53	≥8
流值 (mm)	3.26	3.40	3.51	3.53	3.45	1.5~4



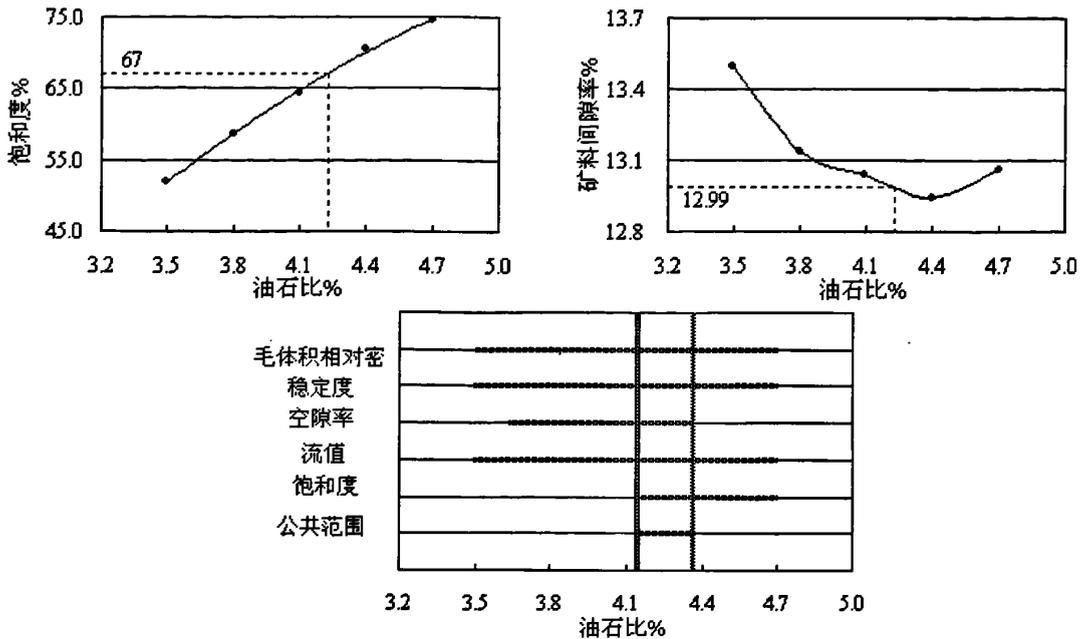


图 3-6 AC-20 沥青混合料油石比与各项指标关系图

由于密度没有出现最大值（最大值在曲线端部），直接取目标空隙率 4.3% 对应的油石比 $a_3=4.21\%$ 作为 OAC_1 ，所以 $OAC_1=4.21\%$ 。

根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004) 表 5.3.3-1——密级配沥青混凝土混合料马歇尔试验技术指标的要求，求取最小油石比 OAC_{min} 和最大油石比 OAC_{max} （不含 VMA 指标），根据图 3-6，求得 $OAC_{min}=4.14\%$ ， $OAC_{max}=4.36\%$ ，则 $OAC_2=(4.14\%+4.36\%)/2=4.25\%$ 。

最佳油石比 $OAC=(OAC_1+OAC_2)/2=(4.21\%+4.25\%)/2=4.23\%$ 。

3.3.3 AC-25C 目标配合比设计

1. 原材料

集料：石灰岩；

矿粉：石灰岩矿粉；

沥青：韩国 SK-70 沥青；

2. 集料密度

采用网篮法 (T0304-2005) 对 1#料、2#料、3#料以及 4#料和 5#料中 2.36mm (含) 以上部分的集料进行密度和吸水率测试，根据细集料密度及吸水率试验 T0330-2005 对 4#料和 5#料中 2.36mm 以下部分进行密度和吸水率测试。（4#料和 5#料的密度和吸水率采用体积合成的方法）采用李氏比重瓶法对矿粉密度进行测试，各种集料、矿粉及沥青的密度试验结果见表 3-9 和表 3-10。

表 3-9 集料密度试验结果

材料	1#	2#	3#	4#	5#	矿粉
规格 (mm)	10~30	10~20	5~10	3~5	0~3	/
表观相对密度 γ_a (g/cm ³)	2.708	2.709	2.710	2.707	2.698	2.681
毛体积相对密度 γ_b (g/cm ³)	2.691	2.683	2.671	2.664	2.639	/
集料吸水率 w_x (%)	0.229	0.360	0.530	0.604	0.840	/

表 3-10 沥青密度试验结果表

	密度 (g/cm ³)
韩国 SK-70 沥青	1.031

3. 合成级配

为验证其配比本文亦采用了此配比合成级配如图 3-7 所示,这种形式的级配通常较强的骨架嵌挤结构,同时具有适宜的空隙率,渗水性小,有较好的高温稳定性,表面还具有较大的构造深度。

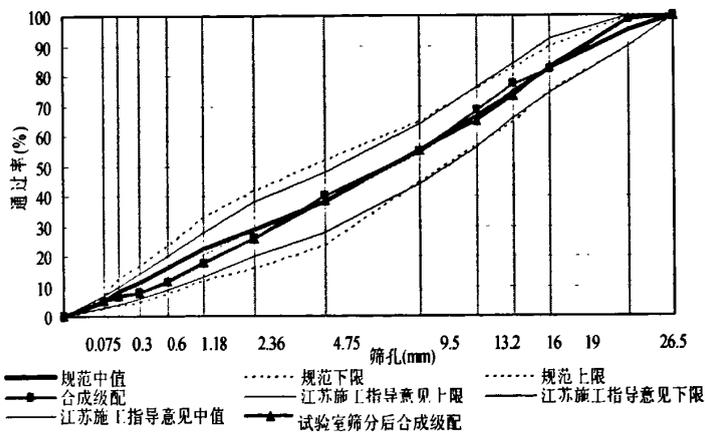


图 3-7 AC-25 设计级配曲线图

4. 最佳油石比确定

试验室进行马歇尔试验得出的最佳油石比如下:

$$OAC_1=4.03; OAC_2= (4.1+3.6) /2=3.85; OAC= (4.03+3.85) /2=3.94$$

为此,本文在该油石比的基础上进行 OAC 和 $OAC \pm 0.3\%$ 、 $OAC \pm 0.6\%$ 五个油石比(即油石比为 3.3、3.6、3.9、4.2、4.5)制作马歇尔试件,每个油石比成型 4 个试件,测定其高度、干重、水中重、表干重、稳定度、流值,计算出毛体积密度、稳定度、空隙率、流值、VMA、VFA,验证各项体积参数是否符合要求。

真空法确定混合料的最大理论相对密度,如表 3-11 所示。

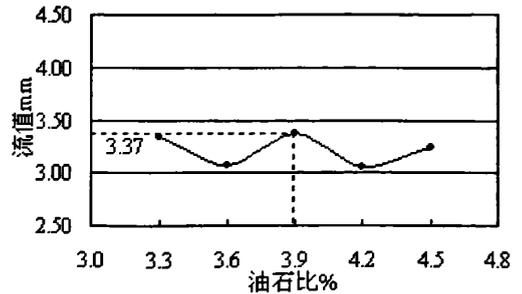
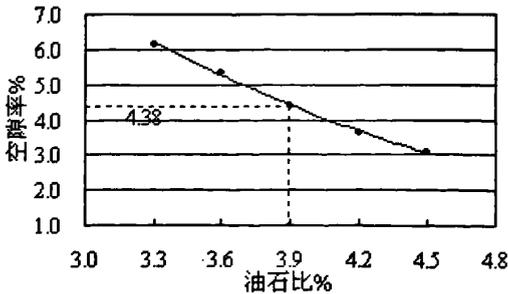
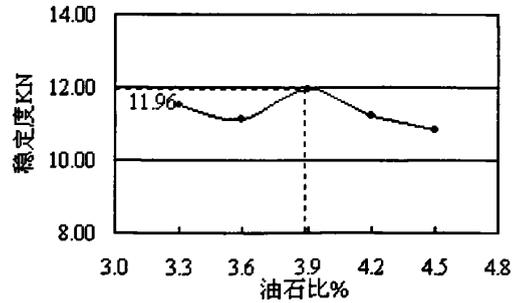
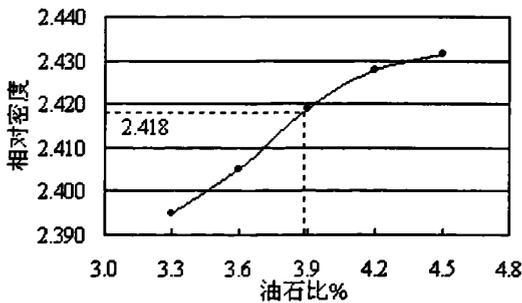
表 3-11 合成密度

		合成级配				
合成级配的表现相对密度	2.705					
合成级配的毛体积相对密度	2.670					
合成级配中矿料的吸水率	0.490					
系数 C 的确定	0.798					
合成级配的有效相对密度	2.682					
油石比(%)	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	
沥青相对密度	1.031					
混合料的理论最大相对密度	2.552	2.541	2.530	2.519	2.509	
备注：油石比为 3.9 的最大理论相对密度为真空法实测的，其他油石比为按照有效密度推算的。						

马歇尔试验试验结果见表 3-12，油石比和各项指标关系图如图 3-8 所示。

表 3-12 马歇尔试验试验结果

试验项目	油石比					技术标准
	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	
最大理论相对密度	2.552	2.541	2.530	2.519	2.509	计算
毛体积相对密度	2.395	2.405	2.419	2.428	2.432	实测
空隙率 (%)	6.16	5.35	4.40	3.61	3.09	3-6
饱和度 (%)	53.3	59.1	65.7	71.7	76.0	55~70
矿料间隙率 (%)	13.18	13.06	12.81	12.73	12.86	/
吸水率 (%)	1.2	0.8	0.6	0.4	0.4	<2
稳定度 (KN)	11.51	11.13	11.97	11.20	10.84	≥8
流值 (mm)	3.34	3.08	3.38	3.06	3.25	2~4



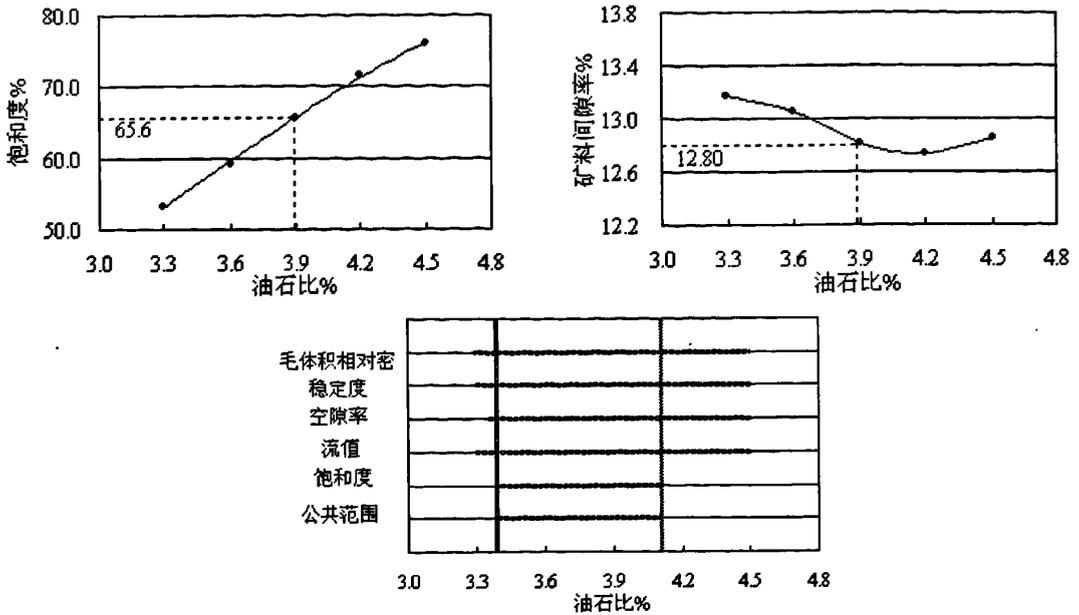


图 3-8 AC-25 沥青混合料油石比与各项指标关系图

由于密度没有出现最大值（最大值在曲线端部），直接取目标空隙率 4.0% 对应的油石比 $a_3=4.03\%$ 作为 OAC_1 ，所以 $OAC_1=4.03\%$ 。

根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004) 表 5.3.3-1——密级配沥青混凝土混合料马歇尔试验技术指标的要求，求取最小油石比 OAC_{min} 和最大油石比 OAC_{max} （不含 VMA 指标），根据图 3-8，求得 $OAC_{min}=3.39\%$ ， $OAC_{max}=4.11\%$ ，则 $OAC_2=(3.39+4.11)/2=3.75\%$ 。

最佳油石比 $OAC=(OAC_1+OAC_2)/2=(4.03+3.75)/2=3.89\%$ 。

4 沥青混合料性能的试验检验

为了保证 BRT 专用车道最大限度地满足车辆运行的要求, 保证行车速度、增强安全性和舒适性, 要求路基路面具有一些基本的性能, 这些性能包括: 承载能力、稳定性、耐久性、表面的平整及抗滑性能。在本文 BRT 专用车道结构组合研究中, 已经涵盖了承载能力、耐久性、表面平整及抗滑性能的因素, 因此本章将着重讨论检验沥青混合料高温稳定性和水稳定性的试验方法、评价指标以及这些试验方法的优缺点, 并结合上一章混合料目标配合比设计进行混合料性能验证试验。

4.1 沥青混合料的高温稳定性

4.1.1 车辙试验方法

车辙试验是模拟车轮荷载在路面上行驶而形成车辙的工程试验方法。通过板块状试件与车轮之间的往复相对运动, 使试块在车轮的重复荷载作用下, 产生压密、剪切、推移和流动, 从而产生车辙。该试验最初是由英国道路研究所 (TRRL) 开发的试验方法, 以后法国道路与桥梁研究中心 (LCPC) 和日本道路协会也相继进行了开发和研制, 在我国也有国产的车辙试验机。由于试验设备简单, 试验方便, 原理直观, 虽然它并不给出材料的力学参数, 也不能预估沥青混合料车辙形成的发展, 但它易于被人们理解和接受, 同时车辙试验结果与实际沥青路面的车辙之间有良好的相关性, 因而在欧洲、北美、日本、澳大利亚等国得到广泛应用。我国近年来也开展了较多的研究, 获得了一批成果。尽管各国都认同车辙试验方法, 但在试验设备、试验参数和评价指标上仍存在较大的差别。典型的车辙试验方法包括^[5, 56, 57]:

1. 法国中央道路桥梁研究院的轮辙试验仪 (FPRT)

试件尺寸 500mm×180mm×100mm, 用直径 400mm、宽 50mm 的充气轮胎 (0.6MPa), 轮载 5000N, 轮速 1.6m/s, 用荷载轮在气温 60℃ 条件下作用一定次数时产生相对永久变形 (永久变形的测量值与试件厚度的百分比) 评价沥青混合料的抗辙槽能力。对于用做表面层的沥青混凝土, 法国在上个世纪九十年代初规定车辙试验永久变形的两个等级如下:

等级2 轮碾3000次 永久变形<15%

等级3 轮碾10000次 永久变形<15% 等级3 适用于重交水平的道路。

2. 美国乔治亚州沥青路面分析仪 (APA)

沥青路面分析仪 APA (Asphalt Pavement Analyses) 是一种多功能轮载测试仪, 可用于评估干燥或潮湿条件下的沥青混合料抗永久变形能力。车辙试验是通过将条形或圆柱形试件放在可重复进行的车轮荷载下测量其轮迹处的永久变形, 以此对沥青混

合料的抗永久变形能力进行评价。试验条件为：

表 4-1 APA 试验条件及试件尺寸

试件尺寸		加速充气棒	碾压速度	轮载	加载次数	试验温度
条形试件	圆柱形试件	橡胶管				
300mm×125mm×75mm	直径150mm 高度75mm	气压0.96MPa	49.7次/mm	45kg	8000次	PG分级高温等级降一个等级的温度

3. 我国现行规范及试验规程采用的车辙试验仪

这类试验仪最早是有英国 TRRL 开发的，后在英国、欧洲、日本、北美和澳大利亚得到了广泛的研究应用。我国于“七五”“八五”期间，在日本样机的基础上开发了现行的车辙试验仪。试验条件如下：

表 4-2 我国车辙试验条件

加载轮尺寸	加载轮材料	轮压	碾压速度	试验温度	试件尺寸
直径200mm,宽50mm	橡胶轮实心轮胎	0.7Mpa	42次/mm	60℃	300mm×300mm×50mm

我国现行试验规程规定采用动稳定度来评价沥青混合料的车辙试验结果。

4. 汉堡车辙试验仪(HWTD)

表4-3 HWTD试验条件

加载轮尺寸	加载轮材料	轮荷载	碾压速度	试验温度	试件尺寸	试件湿度
直204mm,宽47mm	钢轮	695N	正弦式行进，在试件中心最高速度为0.33m/s	60℃	320mm×260mm×80mm	潮湿

以一定加载次数下的永久变形作为评价指标。

5. 单轮试验仪(PurWheel)

表4-4 PurWheel试验条件

加载轮	轮压	轮荷载	轮速	试验温度
直径620mm,宽75mm的充气轮	0.862Mpa	1900N	0.6m/s	60℃

以试件产生 6.35mm 轮辙深度时的加载次数作为评价指标。

由于世界各国的气候及交通条件差异很大，不可能强求所有的国家采用统一的试验仪器和评价指标。从模拟路面现场来看，采用充气轮或充气棒更能反映汽车轮胎作用在沥青路面的实际情况。其试验结果与实际路面的轮辙深度相关性更好。

4.1.2 车辙评价方法

目前，从各国车辙试验结果的评价指标来看，主要有以下三种评价方式^[5,57]：

1. 动稳定度(Dynamic Stability, 简称 DS)

动稳定度的含义是沥青混合料在高温条件下每产生 1mm 变形时，所承受的标准轴载的作用次数，是一个间接评价试件的变形情况的指标。

$$DS = \frac{(t_2 - t_1) \times 42}{(d_2 - d_1)} C_1 C_2 \quad (4-1)$$

式中：DS—沥青混合料的动稳定度（次/mm）

d_1 —时间 t_1 （一般为45min）的变形量（mm）

d_2 —时间 t_2 （一般为60min）的变形量（mm）

C_1 —试验机类型修正系数，曲柄连杆驱动试件的变速行走方式为1.0，链驱动试验轮的等速方式为1.5

C_2 —试件系数，试验室制备的宽300mm的试件为1.0，从路面切割的宽150mm的试件为0.8

动稳定度指标取最后15min的变形计算，是为了避免试验开始阶段，由于试件本身的压密变形，尤其是开始与试件接触的影响是比较合理的。但试件本身的压密变形也是车辙形式的一种，消除它是否合理有待探讨。同时，动稳定度结果也存在两种情况：一是同一组试件的变异性较大，相差30%-50%是比较普遍的，二是一些改性沥青混合料试验动稳定度很高，有的达10000次/mm左右，实际上这样的实验误差比较大，对仪器的精度要求较高，规范上要求测量精度为0.01mm以上，测量的量程一般为20-30mm。实际上要求传感器的相对精度为万分之五到万分之三以上，此精度一般已达到国产传感器精度的极限。

2. 永久变形(Permanent Deformation)或相对变形(Deformation of Relativity)

相对变形的含义是在规定作用次数、时间下所产生的变形与试件总厚度的比值，是一个直接评价试件变形的指标。这个次数根据实际交通荷载和沥青混合料使用要求不同而不同。计算公式为：

$$\delta = \frac{\Delta L}{L} \times 100\% \quad (4-2)$$

式中： δ —试件相对变形

ΔL —试件产生的总变形（mm）

L —试件的厚度（mm）

相对变形指标，总变形非常直观，但不同试件之I'HI的波动较大，整个变形中，开始阶段的几次碾压能产生很大变形，因为车辙试验开始阶段时机械装置有一调整过程，会有虚假变形，仪器与试件接触的好坏是数据波动的重要原因。另外，总变形能区分试验结果的差别，但不便估计变形的发展情况。

3. 动稳定度和永久变形(或相对变形)

美国SHRP在对沥青混合料永久变形性能的研究过程中，由英国诺丁汉大学SWK路面公司(SWK/UN)用车辙试验来验证SHRP建议的胶结料规范提出了车辙率(Rutting Rate)和车辙深度(Rut Depth)，分别表示为mm/MPah和mm。车辙率的表达形式与变形

率相比增加了一个车轮与试块间的接触应力这个参数，从研究的角度来说更为合理。当接触应力是个恒量时，车辙率与前述变形率的表达式是相同的。而且当车辙试验机的运行速度是确定值时，与动稳定度也可以相互换算。车辙深度即永久变形，且车辙深度除以车辙试件的厚度便是相对变形指标的形式，所以当车辙试件的厚度是确定值时，与相对变形也可以相互换算。故可以说车辙率和车辙深度在某种程度上与动稳定度、永久变形和相对变形是一致的。

4.1.3 混合料车辙试验

本文采用我国《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000)中的 T 0719 方法进行车辙试验，检验 BRT 车道各层沥青混合料的高温稳定性能。

试验结果如下：

1. 上面层 SMA-13 车辙试验检验

表 4-5 车辙试验结果汇总表

混合料类型	油石比 (%)	动稳定度 (次/mm)				
		1	2	3	平均	要求
SMA-13	6.4	3314	4335	3608	3752	≥3000

另外按规范要求，还对 SMA-13 混合料进行了谢伦堡析漏试验和肯塔堡飞散试验以检验混合料的骨架稳定性：

对 2#级配在最佳油石比下进行了谢伦堡析漏试验，沥青的析漏损失为 0.064% < 0.1%，满足要求。

对 2#级配在最佳油石比下进行了肯塔堡飞散试验，沥青混合料的飞散损失为 1.57% < 15%，满足要求。

2. 中面层 AC-20C 车辙试验检验

表 4-6 车辙试验结果汇总表

混合料类型	油石比 (%)	试验编号	45min 变形量 (mm)	60min 变形量 (mm)	动稳定度 DS (次/mm)	动稳定度均值 (次/mm)	变异系数 (%)	标准要求
AC-20	4.23	1	2.322	2.694	1688	1633	3.37	DS ≥ 1000
		2	2.108	2.506	1578			
		3	1.674	2.059	1633			

3. 下面层 AC-25C 车辙试验检验

表 4-7 车辙试验结果汇总表

混合料类型	油石比 (%)	试验编号	45min 变形量 (mm)	60min 变形量 (mm)	动稳定度 DS (次/mm)	动稳定度均值 (次/mm)	变异系数 (%)	标准要求
AC-25	3.89	1	6.340	6.684	1831	2012	8.73	DS _≥ 1000
		2	5.911	6.242	1909			
		3	3.973	4.247	2295			

混合料车辙试验结果证明,按本文配合比试验所得混合料能够满足规范的混合料高温稳定性要求。

4.2 混合料的水稳定性试验

多年来,国内外道路工作者进行了大量的沥青混合料水稳性试验研究工作,其中主要是对于沥青混合料水稳性的试验方法及评价指标的研究:

4.2.1 沥青混合料的水稳性试验评价方法

沥青混合料在浸水条件下,由于沥青与矿料粘附力降低,导致损坏,最终表现为混合料的整体力学强度降低,因而沥青混合料的水稳定性最终是由浸水条件下沥青混合料物理力学性能降低的程度来表征的。国内外采用这些方法对混合料水稳性展开了大量的试验研究,日前应用较广泛的主要试验方法如下^[5,6,22,58]:

1. 磨耗试验(abrasion test)

该试验将成型试件在 120F (490C)的水下浸泡 6 天或室温下浸泡 20h 后在 100F (360C)的水下浸泡 5h,随后在特定温度下进行水下磨耗试验,以质量损失为评价指标。它模仿了沥青路面在水和交通荷载下的水损,但试验耗时较长,同时质量损失的物理意义不明确。

2. 浸水马歇尔试验(Retained Marshall Test)

我国试验规程 T0709-2000. ASTM D1558 及日本道路铺装协会试验便览都对其作了规定。试验中规定将成型好的试件在热水(60 0C)中浸泡 48h 后试验,以浸水前后稳定度的比值(残留稳定度)作为评价该沥青混合料的水稳性指标并要求残留稳定度不小于 75。即:

$$Ms_0 = \frac{Ms_1}{Ms} \quad (4-3)$$

式中: Ms_0 — 试件的浸水残留稳定度 (%)

Ms_1 — 试件的浸水48h后的稳定度 (KN)

Ms — 试件的稳定度 (KN)

实践证明,室内标准击实 75 次的马歇尔试件,其空隙率通常为 3-5%,在这样低的空隙率情况下,水分根本无法进入沥青混合料试件内部,当然就更不可能对试件内部的沥青混合料产生水损害。除非是酸性石料,对于传统的 I 型密级配沥青混凝土,其残留稳定度均能满足规范的技术要求,甚至残留稳定度大于 100%的情况也时有出现。为此,第 17 届世界道路会议推荐将试件浸入 25℃水中 7d 后进行马歇尔试验,测量稳定度的降低和体积的变化,以此来评价水对混合料的影响,壳牌石油公司中央研究所经多年研究修订了浸水马歇尔试验,先经真空饱水后再在 60℃浸水 48h 试验,由于试件中先浸入冷水且水量较多,故浸入热水后膨胀严重,稳定度损失较大,更能反映抗水浸蚀的稳定性。饱水马歇尔试验的残留稳定度指标如式(2-2)所示:

$$Ms_0' = \frac{Ms_2}{Ms} \quad (4-4)$$

式中: Ms_0' — 试件的饱水残留稳定度 (%)

Ms_2 — 试件的饱水 48h 后的稳定度 (KN)

Ms — 试件的稳定度 (KN)

尽管残留稳定度作为沥青混合料的水稳性指标,在我国已经使用了多年,但残留稳定度在评价沥青混合料的水稳性仍存在很多的问题。主要体现在:

浸水马歇尔试验结果显示,不同沥青混合料残留稳定度拉不开差距。即使是采用两种粘附性有明显差别的石灰岩集料和花岗岩集料,浸水马歇尔试验的残留稳定度也十分接近,不便于评价沥青混合料的水稳性。这主要与浸水马歇尔试验的条件过于宽松有关。

浸水马歇尔试验试验条件与沥青路面现场的实际情况差距太大,另外浸水马歇尔试验是一种静态试验,没有模拟轮胎动荷载产生的抽吸作用,因此浸水马歇尔试验条件不太严酷,其结果与沥青混合料的实际路用性能相关性较差。马歇尔试验方法的优点是操作简单易行,结果也较稳定,但试验结果对沥青、石料特性反映不灵敏,另外,目前的研究对矿料骨架在马歇尔试验稳定度指标中的作用还不甚明了,因此该指标是否能完全反映沥青—石料本身的粘附性还存疑问,因而浸水马歇尔残留稳定度只能作为沥青混合料水稳定性的辅助指标。

3. 劈裂试验(Splitting Test)

劈裂试验的方法是测定试样在经水蚀前后的劈裂强度比 TSR 作为试验指标,即:

$$TSR = \frac{S_{T_{wet}}}{S_{T_{dry}}} \quad (4-5)$$

式中: TSR — 劈裂强度比 (%)

$S_{T_{wet}}$ — 饱水试件的劈裂强度 (MPa)

$S_{T_{dry}}$ — 干燥试件的劈裂强度 (MPa)

该试验的设计思想是以沥青结合料和沥青与集料之间的粘附性是控制劈裂强度的关键因素为前提, 劈裂的比值 TSR 则反映了混合料的水稳定性。该试验包括了通常的浸水劈裂和真空饱水劈裂两种试验。其中浸水劈裂试验中, 试件分为两组, 一组直接在 25℃ 水浴中浸泡 2h 后测定其劈裂强度; 另一组先在 60℃ 水浴中恒温 48h, 再在 25℃ 水浴中浸泡 2h 后测定其劈裂强度。而真空饱水劈裂试验方法与浸水劈裂试验类似, 只是有组试件需先在 25℃ 水浴中浸泡 20min, 然后在 0.09Mpa 下浸水抽真空 15min, 再在 25℃ 水浴中浸泡 2h 后测定其劈裂强度。

4. 洛特曼试验(Lottoman Test)

NCHRP-246 对其作了规定。该试验是在劈裂试验的基础上, 改革了水环境考验条件而发展起来的, 是评价沥青混合料水稳定性较为经典的方法。试验前先成型 ($\Phi 101.6 \times 63.5\text{mm}$ 的圆柱体试件 9 个, 将试件平均分为 3 组。其中第一组试件在 13 或 23℃ 测定劈裂模量, 或在 1.65mm/min 的加载速率下测定劈裂强度; 第二组试件在 660mmHg 下饱水 30min, 然后再作同样的测试; 第三组试件先在 660mmHg 下饱水 30min, 然后在 0 或 -18℃ 下冰冻 15h 后, 并在 60℃ 水中浸泡 24h, 再作同样的测试。根据三组试件的试验结果来计算劈裂强度比 TSR。

5. Tunnclif & Root 试验(NCHRP 274 ASTM 4867)

该试验与洛特曼试验极为相似, 其试验过程如下。先成型空隙率为 6-8% 的 $\Phi 101.6 \times 63.5\text{mm}$ 的圆柱体试件 6 个, 将试件平均分为 2 组。第一组试件在 25℃ 下以 51mm/min 的加载速率测定劈裂强度; 第二组试件先在 518mmHg 条件下饱水 5min, 使饱水率达到 55-80%, 然后在 60℃ 水中浸泡 24h, 再作同样条件下的测试。根据两组试件试验结果来计算劈裂强度。该试验认为临界水损的 TSR 值应在 0.7-0.8 之间, 该方法对试件的饱水率更为重视, 而仅在 60℃ 水中浸泡 24h 的环境考验是否充分值得考虑。

6. 改进的洛特曼试验(Modified Lottoman Test)

改进的洛特曼试验是由美国的 Kandhal 提出的, 即 AASHTO T283 试验, 实际上它是传统的洛特曼试验与 Tunnclif & Root 试验方法的结合。试验前先成型空隙率为 $7 \pm 1\%$ 的 $\Phi 101.6 \times 63.5\text{mm}$ 的圆柱体试件 6 个, 试件成型前, 拌制好的沥青混合料先在室温下冷却 $2 \pm 0.5\text{h}$, 然后放入 60℃ 烘箱中养生 16h, 养生后再放入 135℃ 烘箱中 2h, 以供压实成型试件使用。试件制好后在室温下放置 72-96h, 然后将试件平均分为 2 组。第一组试件不进行真空饱水; 第二组试件先在 254-660mmHg 条件下饱水 5min, 使饱水率达到 55-80%, 然后立即放入 60℃ 水中浸泡 24h, 再在 -18℃ 下冰冻 16h 后, 拿出后在 60℃ 水中浸泡 24h。两组试件均在 25℃ 水中养生 2h 后, 以 50mm/min 的加载速率分别测定劈裂强度, 并根据两组试件试验结果来计算劈裂强度比。

7. SHRP的环境条件试验系统 (ECS)

该试验方法由美国 Oregon 大学为 SHRP 研究计划而开发,其基本前提是混合料的空隙率是产生水损害的主要因素和原因。环境条件试验系统主要包括三个子系统:水浴系统、环境箱、加载系统,试验条件主要包括对于不同空隙率的混合料,经过一定程度的真空饱水,6h 的 60℃水中浸泡及-18℃的冰冻循环等不同的环境条件后,分别测定其回弹模量 M_R ,一般要求回弹模量 M ;比值大于 0.7。该方法目前并未被 ASTM 或 AASHTO 正式收录。

8. 浸水压缩试验(Inunersion-compression Test)

该试验方法在 AASHTOT 165 和 ASTM D1075 中对其作了规定,通过测定由于浸水造成的压缩强度损失来表征。试验时先成型 6 个 $\Phi 4$ 101.6×101.6mm 的圆柱形试件,试件空隙率控制在 6%。将试件分成 2 组,其中第一组试件在 25℃环境下至少 4h 后测定其压缩强度;第二组试件先放在 60℃水浴中 24h,然后放入 25℃水浴中 2h,然后测定其压缩强度,或者将第二组试件放在 49℃水浴中 4d,然后放入 25℃水浴中 2h,再测定其压缩强度;通过两组试件的压缩强度比表征浸水的影响。

该试验方法的试验时间较长,特别是浸水时没有真空,混合料饱水程度不得而知,因而对试验结果的影响较大。另外,浸水的水质对混合料水敏感性也有影响。同时该试验与现场相关性较差。

9. 德克萨斯冻融基座试验(Freeze-Thaw Pedestal)

该试验企图模拟 5 年寿命路面的胶结料的变化,试验中将单一尺寸的集料经拌和后形成的试件刮成的试块,通过在水中反复冻融,直至出现裂缝的循环次数可能与期望的寿命有关。试验方法为:先成型($\Phi 41.3 \times 19$ mm)的试件 3-5 个,成型时在试模内加 2815kN 的力,保持 20min。将试件刮成的试块在 24℃下养护 3d,然后将试件放在水浴中的垫块上在 12.2℃的温度下冰冻 15h 后,放在 25℃的常温水中 45min,再放入 49℃的烘箱中 9h,对试件进行观察,若裂缝不出现,则从冰冻步骤开始重新开始试验,直至出现裂缝为止。通常认为,循环次数在 10 次以下水稳定性不好,若循环次数大于 2025 次则有足够的抗水损害能力。该试验所用设备较简单,但试验中所用的试块只是混合料的一小部分,只测得沥青与集料之间的粘结性能,且该试验较费时,每个循环要一天的时间。

10. 我国的沥青混合料冻融劈裂试验

我国的沥青混合料冻融劈裂试验是在美国 AASHTO T283 试验基础上发展而来的,是一种简化了的 Lottman 试验,见试验规程 T0729-2000。试验中以固定击实次数 50 次成型 $\Phi 101.6 \times 63.5$ mm 的圆柱体试件 8 个,空隙率没有提出明确的要求,将试件平均分为 2 组。第一组试件不进行真空饱水;第二组试件在 730-740mmHg 的真空条件下保持 15min,并在常温水下放置 0.5h,将饱水后的试件放入-18℃的环境下冷冻 16h,

然后将其放入 60℃ 的恒温水浴中保温 24h 解冻, 再将此试件与第一组试件一起放入 25℃ 的恒温水浴中保温 2h 后, 以 50mm/min 的加载速率分别测定劈裂强度, 计算劈裂抗拉强度比 TSR 作为评价指标。

由于我国对 Lottman 试验进行了简化, TSR 指标要求与美国标准有所区别。参照美国 SHRP 研究计划的成果, 结合我国气候特征与国产材料的实际性能, “八五”国家科技攻关专题提出了沥青混合料水稳定性标准, 见表 4-8:

表 4-8 沥青混合料水稳定性标准

雨量气候分区	年降雨量 (mm)	马歇尔残留稳定度不小于 (%)	冻融劈裂残留强度不小于 (%)
I	大于 1000	75	无此区
II	500~1000	70	70
III	250~500	65	65
IV	小于 250	60	60

冻融劈裂试验与浸水马歇尔试验相比, 更好的模拟了路面现场实际发生的水损害, 尤其是寒冷地区冰冻作用的影响。不同沥青混合料的试验结果拉开了差距, 方便对沥青混合料的抗水损害性能进行评价。试验结果也同样适用于南方高温潮湿多雨的气候。

11. 浸水车辙试验 (Immersion wheel-tracking Test)

浸水车辙试验实际上是一种室内的轮辙设备, 以更好的模拟现场。主要包括 Hamberg 浸水车辙试验、我国“八五”科技攻关项目采用的浸水车辙试验和沥青路面分析仪 (APA) 浸水车辙试验

Hamberg 车辙试验仪为美国 FHWA 及科罗拉多州交通厅于 90 年从欧洲引进, 国外采用此设备进行了大量的研究和试验, Hamberg 车辙试验仪包括两个直径 203.6mm、宽度 47mm 的钢轮, 试验荷载为 705N, 加载轮运行速度为 50 次/min, 试验时能控制水浴系统温度, 车辙变形通过位移传感器测得, 传感器精度为 0.01mm。试验时采用直线压实成型机按照 7% 左右的空隙率成型直径 152mm、高度 62mm 的试件, 对于 PG64-22 等级的胶结料或 AC-20 混合料, 其试验温度为 40℃, 对于等级高于 PG64-22 的胶结料或强度大于 AC-20 的混合料, 其试验温度为 50℃, 对于钻取的芯样试验温度也是 50℃。然后经过 20000 次运行或最大变形达到 20mm, 试验完成。试验中自动记录试件车辙变形值及作出车辙变形与运行次数的关系图形。

4.2.2 水稳定性试验检验

对于热拌沥青混合料, 我国《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004) 规定, 必须进行浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验检验沥青混合料的水稳定性, 并且需要同时符合规范要求, 否则应采用抗剥落措施, 调整最佳沥青用量后再次试验。

本文采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052-2000) 中 T 0709 及 T 0729 分别进行最佳油石比下的浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验, 给出试验结果

如下:

1. 上面层 SMA-13 水稳定性检验

在最佳油石比下进行浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验来检验设计沥青混合料的水稳定性能。试验结果分别见表 4-9 和表 4-10。

表 4-9 浸水马歇尔试验结果

混合料类型	浸水马歇尔残留稳定度 (%)					规范要求 (%)
	1	2	3	4	平均	
SMA-13	82.2	83.4	85.4	81.8	83.2	≥80

表 4-10 冻融劈裂试验结果

混合料类型	非条件冻融劈裂强度 (MPa)				条件冻融劈裂强度(MPa)				TSR (%)	要求 (%)
	1	2	3	平均	1	2	3	平均		
SMA-13	0.764	0.794	0.725	0.761	0.864	0.908	0.972	0.915	83.2	≥80

2. 中面层 AC-20C 水稳定性检验

在最佳油石比下进行浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验来检验设计沥青混合料的水稳定性能。试验结果分别见表 4-11 和表 4-12。

表 4-11 浸水马歇尔试验结果

混合料类型	浸水马歇尔残留稳定度 (%)					规范要求 (%)
	1	2	3	4	平均	
AC-20C	86.2	87.4	85.4	86.6	86.4	≥85

表 4-12 冻融劈裂试验结果

混合料类型	实验条件					TSR (%)	要求 (%)
	条件冻融劈裂强度 (MPa)						
AC-20	1	2	3	4	平均	82.16	≥75
	0.666	0.611	0.616	0.631	0.631		
	非条件冻融劈裂强度(MPa)						
	1	2	3	4	平均		
	0.739	0.795	0.752	0.786	0.768		

3. 下面层 AC-25C 水稳定性检验

在最佳油石比下进行浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验来检验设计沥青混合料的水稳定性能。试验结果分别见表 4-13 和表 4-14。

表 4-13 浸水马歇尔试验结果

混合料类型	浸水马歇尔残留稳定度 (%)					规范要求 (%)
	1	2	3	4	平均	
SMA-13	85.2	82.1	82.4	81.6	82.8	≥80

表 4-14 冻融劈裂试验结果

混合料类型	实验条件					TSR (%)	要求 (%)
AC5	非条件冻融劈裂强度 (MPa)					78.08	≥75
	1	2	3	4	平均		
	0.552	0.541	0.530	0.561	0.546		
	条件冻融劈裂强度(MPa)						
	1	2	3	4	平均		
	0.703	0.707	0.708	0.685	0.701		

混合料水稳定性的试验证明，配合比设计所得出的混合料可以满足规范规定的混合料性能要求。

5 研究结论及进一步研究的设想

本文针对 BRT 专用车道设计过程中的、路面结构组合、设计参数（交通等）、路面结构层厚度计算、沥青混合料组成以及混合料性能等方面进行专用车道沥青路面设计研究，主要综合国内外结构组合，进行了专用车道适用的结构组合形式和各结构层混合料类型选择研究；分析了快速公交（BRT）车辆与交通特性，进行了轴载换算，进行了混合料目标配合比设计；从沥青混合料的高温稳定性和水稳定性方面，研究了混合料稳定性的试验方法和评价指标，结合实际工程的路面结构方案进行了混合料性能验证。

5.1 本文的主要研究结论：

(1) BRT 车辆轴载远大于普通公交车辆，其专用车道的交通特性也与普通城市路面差异很大，我国《城市道路设计规范》(CJJ37-90) 基于我国早期柔性基层路面的设计方法已不能适用于这种新型的交通组织形式。本文研究了 BRT 车辆特性和交通特性，并结合《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2006) 进行了车辆的轴载换算。

(2) 我国《城市道路设计规范》(CJJ37-90) 以标准轴载累计当量作用次数作为路面结构中沥青面层类型选择的依据不能适用于 BRT 专用车道。从 BRT 专用车道路面典型损坏和性能需求的角度，结合各结构层功能划分进行面层混合料类型选择是合理的途径。

(3) 路表面层混合料选用抗车辙和水稳定性强的混合料如近年推广应用的沥青马蹄脂碎石这种混合料，另外 SMA 混合料还有降低车辆行驶噪声的优点；也可以选用开级配抗滑磨耗层 (OGFC) 以利于水从路表面迅速排除。但同时需要做好 OGFC 之下各层的防水和排水设计，以保证中下面层和基层不受表层渗水的影响。中下面层采用了密级配沥青混合料。基层采用了二灰或水泥稳定碎石，底基层采用了二灰或水泥稳定细粒土，并且在基层与下面层之间设置了稀浆封层。

(4) 本文主要考虑混合料高温稳定性和水稳定性性能指标。混合料抗推挤变形的能力与各结构层层间粘结有很大关系，如果处理好各结构层之间的粘结，将有助于提高整个路面结构的抗推挤变形能力。

5.2 进一步研究的设想

虽然本文对于城市快速公交（BRT）专用车道的路面设计进行了研究，但是由于时间和精力有限，有些问题还待进一步研究：

(1) BRT 是一种具有很大推广价值的交通渠化方式, 目前国内很多大型城市都采用了这一公共交通方式, 本文仅仅结合了常州的实际工程项目进行了相关研究。有必要进行所有这些城市 BRT 专用车道的长期使用性能调查, 研究并给出适用于不同地区 BRT 专用车道的路面结构组合形式。

(2) BRT 专用车道的路面维修和养护必须保证 BRT 系统的正常运营或不对运营造成过大影响, 因此需要研究专门针对 BRT 专用车道的路面养护措施。

致 谢

本文是在丁建国老师和刘振兴老师的悉心指导下完成的。在工程硕士论文期间，他们给予了我很多帮助和教导，在他们的精心指导下我完成了这篇论文。从论文的选题、撰写直到定稿，这其中的每一个细节无不凝聚着导师的心血和汗水。导师给予学生科研能力方面的培养，同时导师的诲人不倦的育人精神将使我终身受益！值此论文完成之际，谨向导师表示衷心的感谢和深深的敬意！

我也要感谢这几年来培育我的南京理工大学，工程硕士期间使我学会了很多知识。同时，我也十分感谢南京理工大学土木工程系全体教师。另外我还要十分感谢徐立新、郭建军、吴文英、何文弋、是晓颖等同学在试验方面给我的无私帮助。在试验期间大家在一起做研究，在相互讨论、相互学习的过程之中给了我很多帮助，使我提高了很多，谢谢你们！

其次，我要深深感谢我的妻子，她多年来一直默默地为我奉献着，这也是我前进的动力。

最后，谨向所有关心和帮助过我的老师和朋友们表示最诚挚的感谢！

2008 年 10 月

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 沙庆林, 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京:人民交通出版社, 2001
- [3] 中华人民共和国行业标准, 公路工程集料试验规程 (JTJ 058-2000) [S]. 北京:人民交通出版社, 2000
- [4] 中华人民共和国行业标准, 公路工程石料试验规程 (JTJ 054-94) [S]. 北京:人民交通出版社, 1994
- [5] 中华人民共和国行业标准, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 (JTJ 052-2000) [S]. 北京:人民交通出版社, 2000
- [6] 黄晓明、吴少鹏、赵永利, 沥青与沥青混合料[M]. 南京:东南大学出版社, 2002
- [7] 中华人民共和国行业标准, 公路沥青路面施工技术规范 (JTJ F40-2004). 北京:人民交通出版社, 2004
- [8] 沈金安, 沥青与沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社, 2003
- [9] 中华人民共和国行业标准, 公路沥青路面设计规范 (JTJ D50-2006). 北京:人民交通出版社, 2006.
- [10] 邓学军, 黄晓明. 路面设计原理与方法[M]. 人民交通出版社, 2001
- [11] 沙庆林. 高等级公路半刚性基层沥青路面[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.
- [12] (美)黄仰贤 编著, 路面分析与设计[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.
- [13] 杨群. 高速公路沥青稳定基层结构与设计方法研究. 东南大学博士学位论文, 2001
- [14] 马希文 编.正交设计的数学理论[M]. 北京:人民教育出版社, 1981.
- [15] 中国现场统计研究会三次设计组, 全国总工会电教中心 编著.正交法和三次设计 [M]. 北京:科学出版社, 1985.
- [16] 邓绍玉. 辽宁省沥青路面典型结构研究. 长安大学硕士论文, 2004.
- [17] 沈志云, 邓学均. 交通运输工程学. 人民交通出版社, 2003.
- [18] 孙德栋. 当量轴次增长率与交通量增长率的探讨. 中南公路工程. 第 26 卷第 4 期, 2001, 12, P90-92.
- [19] 沪宁高速公路(江苏段)扩建工程, 工程可行性研究报告. 中交第二公路勘察设计研究院, 2003.
- [20] Harold L. Von Quintus. Hot-Mix Asphalt Layer Thickness Design for Longer-Life Bituminous Pavements. Circular of Transportation Research, 2001.
- [21] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2000

- [22] 沈金安. 高速公路沥青路面早期损坏分析与防治对策[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
- [23] 沈金安. 改性沥青与 SMA 路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
- [24] 黄晓明, 高建立. 不同路面结构的重载敏感性分析[J]. 公路交通科技, 2004, 21(2): 1~4
- [25] 华斌. 沪宁高速公路沥青路面结构抗车辙性能环道试验研究[J]. 现代交通技术, 2006, 5: 64~67
- [26] 吕伟民, 王锡通等. 国外沥青稳定柔性基层的材料与结构[J]. 中外公路, 2004, 24(6): 83~86
- [27] 梁鸿, 王国忠等. 高等级沥青路面结构研究综述[J]. 内蒙古农业大学学报, 2005, 26(3): 105~109
- [28] 李福普, 陈景等. 新型沥青路面结构在我国的应用研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 10~14
- [29] 周海生, 黄锡通等. 高等级道路沥青稳定基层的实践与思考[J]. 石油沥青, 2005, 19(6): 34~37
- [30] Haroad L. Von Quintus. *Hot-Mix Asphalt Layer Thickness Design for Longer-Life Bituminous Pavement Perpetual Bituminous pavement, Circular of Transportation Research, 2001*
- [31] AASHTO 2002. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structure[R]. NCHRP, 2004*
- [32] 邓小华. 广深高速公路路面结构使用效果评价[J]. 中外公路, 2003, 23(5): 53~55
- [33] 黄晓明, 吴少鹏等. 沥青与沥青混合料[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.7
- [34] 张晓冰, 程日盛等. 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, 19(1): 22~25
- [35] 董武斌, 白茂等. 南广高速公路沥青路面级配碎石基层的施工[J]. 公路交通技术, 2003, 6: 25~29
- [36] 符冠华, 曹荣吉等. 柔性基层沥青路面结构的设计研究[J]. 现代交通技术, 2005, 5: 68~71
- [37] 陈祥辉, 华斌等. 沪宁高速公路扩建工程路面工程技术研究[J]. 现代交通技术, 2006, 5: 53~58
- [38] 沈金安. 京津塘高速公路沥青层的设计、施工经验回顾[J]. 中外公路, 2001, 21(4): 10~14
- [39] 黄兴, 崔鹏. 渝湛高速公路试验路路面结构设计[J]. 广东公路交通, 2006, 3:

- 9~12
- [40] 王龙,孟书涛等. 级配碎石基层的设计参数研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(8): 22~27
- [41] 贾渝, 张全庚. 沥青路面结构层厚度与沥青混合料类型选择[J]. 公路, 2000, 3: 10~13
- [42] 贾渝, 赵延庆等. 再论沥青路面结构层厚度与混合料类型选择[J]. 现代交通技术, 2005, 5: 1~3
- [43] 段凌云. 沥青路面结构层厚度与沥青混合料类型选择[J]. 交通技术, 2006, 3: 94~97
- [44] 郑健龙, 周志刚等. 沥青路面抗裂设计理论与方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [45] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.11
- [46] AASHTO 2002. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures[R]. NCHRP, 2004
- [47] 胡小弟. 轮胎接地压力分布实测及沥青路面力学响应分析[D]. 上海: 同济大学, 2003
- [48] 孟岩, 郭林泉等. 路面载重车辆的荷载特征[J]. 公路交通科技, 2007, 24(4): 1~6
- [49] 曾凡奇, 黄晓明. 超载对沥青路面的影响[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 8~10
- [50] 张英杰, 曲建军等. 青岛市鞍山路交通量调查及分析[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2004, 25(3): 22~25
- [51] 张泽文, 张晓华等. 汉宜高速公路交通量调查与分析[J]. 交通科技, 2004, 3: 91~93
- [52] 郭中华, 王伟. 我国发展快速公交系统的技术探讨与实施对策[J]. 现代城市研究, 2004(12): 58~59
- [53] 崔鹏, 邵敏华, 王国英, 孙立军. 长寿命沥青路面结构组合探讨[J]. 中南公路工程, 2007, 32(3): 6~10
- [54] 刘雅萍. 公路生态环境工程设计研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2001.
- [55] 朱水坤, 林亚萍, 陈飞. 低噪声路面类型及其适用性分析[J]. 公路交通科技 应用技术版, 2007: 64~68
- [56] 贾娟, 张肖宁. 沥青混合料车辙试验方法的比较分析[J]. 公路 2004, 11: 199~202
- [57] 杨现茂. 国产重交通道路沥青的车辙试验研究[D]: (硕士学位论文). 西安: 长安大学道路与铁道工程系, 2003

- [58]韦金城. 国产重交通道路沥青混合料的水稳定性研究[D]:(硕士学位论文). 重庆: 重庆交通学院道路与铁道工程系, 2004

常州市武宜路BRT项目专用车道路面设计研究

作者: 缪冬生
学位授予单位: 南京理工大学

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1542328.aspx