

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.06.007

70 年来中国沥青路面结构设计方法发展沿革

张起森, 李雪连

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 该文首先介绍了在整个道路发展史中路面材料和发展,从条石路面到水结碎石路面再到沥青路面的整个发展过程。介绍了国际沥青路面结构设计发展的情况,从设计方法的发展到结构设计材料与性能相结合。其次,着重阐述了新中国成立 70 年来沥青路面设计方法的发展,对 1958、1966、1978、1986、1997、2006 和 2017 版共 7 版规范的编写过程及基础进行了解读,讨论了现行规范的某些不足之处。此外,还对与中国沥青路面设计方法相关的如有限元方法在道路工程中的应用、直道试验的建立和使用以及足尺环道等其他技术的发展进行了简要介绍。该文对了解中国沥青路面的发展历史及将来进一步完善中国沥青路面结构设计方法具有一定参考价值。

关键词: 沥青路面; 设计方法; 规范; 材料与结构; 发展

1 前言

沥青路面结构有很多的优点和技术特点,是各国广泛采用的主要路面结构形式。通过应用优良的路面结构形式,可以有效地提高路面结构强度、稳定性以及耐久性。沥青路面设计成功与否,与其在设计前期对于设计参数、路面材料的选取是否合理以及是否能反映道路修建过程中与实际情况相符合等关系密切。因此,路面材料的选择与设计参数的合理取值等是进行沥青路面设计的前提。

1.1 路面材料和结构发展状况

路面是随着交通的发展而发展的,水运是人类最早的交通工具之一。在 1830 年英国载客铁路通车以前,当时的陆上交通是以马车为主,路面是以条石铺砌而成。随着路面材料的发展,路面结构形式也随着发生改变。18 世纪末,泰雷萨格(Trasaguet)在条石路面上铺筑碎石面层,此人被称为近代路面的创始者;1815 年,苏格兰的马克当(Macadam)提出了水结碎石路面结构,自此碎石路面开始登上历史舞台。初期的路面结构如图 1 所示。

1712 年,瑞士首先发现了岩沥青,随后德、法等国也相继发现。在 1850 年左右,法国首先把岩沥青用于道路路面。1854 年,L.Malo 在巴黎修筑了薄层沥青路面,这称得上是热铺岩沥青路面之首,用渗透有 6%

~10% 沥青的石灰岩破碎后铺筑碾压而成。此后,美国从欧洲引入岩沥青,在美国东部修筑了岩沥青路面。1871 年,E.J.Desdment 在纽约修筑了第一条特尼利特湖沥青(南美)路面(以砂、石灰石粉掺拌碾压而成),得到了专利施工法,这更是近代热铺湖沥青路面之首。1872 年,华盛顿市(特区)用湖沥青和石油残渣铺筑了路面,它证明用石油残渣修筑路面也是可行的。

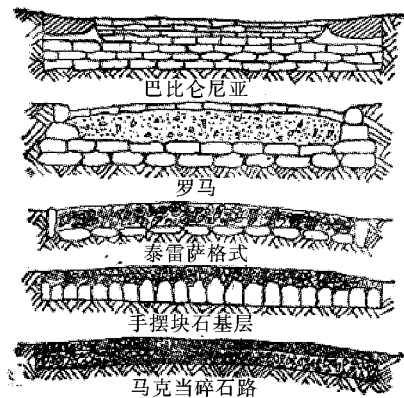


图 1 初期的路面结构图

1885 年之后,汽车工业开始兴起。在开启汽车交通时代的 1900 年,美国发明了 Warrenitebitulithic 路面,该路面下层为粗级配沥青混凝土,上层为沥青砂,经一次碾压而成,这就是双层式沥青路面的由来。1905 年,美国在堪萨斯州托皮卡市铺筑了 Topeka 沥青磨耗层,在 1920 年提出了沥青混合料的哈一费氏

收稿日期:2019-11-20(修改稿)

作者简介:张起森,男,教授,博士生导师。

(Hubbard—Field)方法,直到 1937 年在加州修筑了第一条 11.2 km 高速公路。从此,沥青路面成为现代高等级路面的主要路面形式,典型结构形式如图 2 所示。



图 2 沥青路面典型结构形式

1.2 国际沥青路面结构设计发展状况

近半个多世纪来,国际沥青路面结构设计方法的发展,经历了经验设计方法、以力学分析为基础的设计方法以及力学分析和工程实际(试验)相结合的力学—经验法(M—E 法,2002)。

1.2.1 经验法

经验法主要通过对试验路或使用道路的试验观测,建立路面结构(结构层组合、厚度和材料性质)、车辆荷载和路面使用性能三者之间的关系。目前仍在使用的方法有美国工程师军团水道试验站(WES)的加州承载比法 CBR 法(1920 年)、加州的“R”值法和 2002 版以前的美国各州公路及运输工作者协会(AASHTO)法等。

1.2.2 力学法

力学法的提出进一步完善了沥青路面结构设计,解决了经验法缺乏理论支撑的问题,从而使得沥青路面结构设计方法加以完善。力学分析法的提出经过 4 个发展背景:① Burmister's 两层和三层弹性体系的提出;② WASHO 道路试验、弯沉的出现;③ 1955 年 F.N. Hveem 发布了路面变形的著作;④ 1961 年 AASHO 道路试验完成。常见的有南非国家交通与道路研究所(NITRR)和美国联邦公路管理局等推出的基于计算机程序的设计方法。

1.2.3 力学—经验法

力学—经验法应用力学原理分析路面结构在荷载与环境作用下的力学响应,建立力学响应量与路面使用性能之间的关系模型,运用该模型完成结构设计。中国现行 2017 版的沥青路面设计方法、美国的壳牌(Shell)、沥青学会的 AI 法和 2002 年版的 AASHTO 法等均属于力学—经验法。

2002 年版的 AASHTO 设计方法改变了原 AASHTO 设计的经验法性质,成为力学—经验法(M—E 设计法)。其主要变动如下:① 沥青路面设计应满足其性能要求;新增永久变形、疲劳开裂(包括自下而上和 Top—down 开裂两种模式)、温度开裂及国际平整度指数 IRI;② 结构计算模型包括层状线性体系和非线性分析的有限单元程序;③ 设计输入参数采用了根据项目重要性的三水平输入法:Level—1~Level—3;④ 取消了当量单轴荷载(ESAL)法,而采用作用在路面上占优势的(或预测的)交通流轴载谱;⑤ 引入可靠度因素。具体流程如图 3 所示。

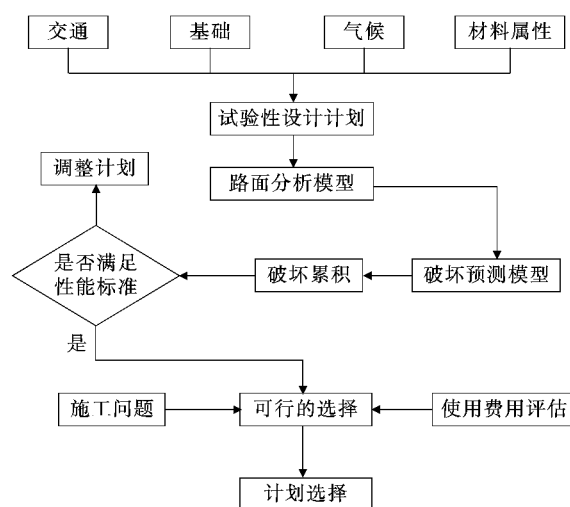


图 3 沥青路面设计流程

为了更加有效地完善当前沥青路面设计方法的不足,美国 AASHTO 联合国家公路研究项目 NCHRP 于 2004 年推出路面设计指南 Mechanistic—Empirical Pavement Design Guide(MEPDG)。该指南为典型的力学—经验法,为沥青路面的设计提供了统一的基础。MEPDG 在各层材料的特性和气候条件的基础上采用力学方法计算路面结构关键反应(应力、应变、变形),同时采用经验方法弥补室内试验和现场性能之间的差距,也用来反映当地实际的施工水平和其他变异性的因素。MEPDG 主要设计流程:首先建立分析所需的输入值,建立基础分析、路面材料特性及交通数据;接着进行结构性能分析,经过迭代分析,得出满足性能要求的路面结构;最后展开不同设计方案的工程分析及寿命周期分析。

近年来,道路工作者越来越认识到路面设计必须与沥青混合料设计一起综合考虑,如路面的疲劳破坏和沥青混合料的疲劳抗力,如果沥青混合料疲劳抗力不合适,那么路面在未达到预期交通荷载作用下就会

发生疲劳破坏。SHRP 沥青研究计划中对沥青混合料设计和分析进行了研究,其设计和分析流程见图 4。

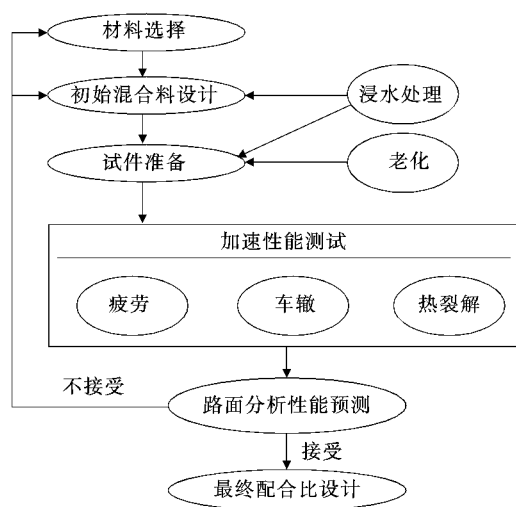


图 4 SHRP 沥青研究计划的混合料设计和分析

研究计划中对所选用的混合料要符合下面的减轻路面结构疲劳开裂的要求:

$$N \geq \frac{ESAL_s \cdot TCF \cdot M}{SF} \quad (1)$$

式中: N 为在预期现场应变水平的条件下, 试验室重复加载到疲劳破坏的荷载作用次数; $ESALS$ 为设计车道在设计期内预期当量 ($18\,000 l_b$) 的单轴荷载数; TCF 为温度转换因子; M 为可靠度剩子; SF 为替换因子。

SHRP 计划中 Superpave 沥青混合料设计方法主要有 3 点: ① 制定了以路面性能 (车辙、低温开裂、疲劳开裂) 为基础的沥青结合料规范, 沥青的指标直接与路面现场性能建立联系, 以路面最高和最低温度作为性能分级 (PG) 的依据; ② 制定了混合料体积配合比设计规范。矿料级配用 0.45 次方级配图确定容许级配, 提出了级配曲线控制点、限制区和最大公称尺寸的概念; 提出了 3 个水平设计要求和相关的路面性能预测; ③ 将沥青的物理化学性质、沥青混合料的性质与使用性能联系起来, 并进行试验验证。显然, 该法已将沥青混合料的设计与路面结构设计 (路面性能) 更好地联系起来。

值得注意的是经济因素会改变路面设计参数。1986 年 AASHTO 在修改路面设计指南时把寿命周期分析 (LCCA) 作为经济评价手段, 并强烈建议将其应用到路面设计过程中。在 2002 年修改 AASHTO 设计指南时就把 LCCA 完全整合到路面设计过程中。

2 中国 70 年来沥青路面设计方法发展沿革

1949 年以前, 中国公路十分落后, 绝大多数是砂土和碎石路面, 根本没有相关路面结构设计方法可循。20 世纪 50 年代初期, 基本上沿用伊万诺夫教授的方法——《柔性路面设计须知》(1954 年)。新中国成立后, 随着中国突飞猛进的经济的发展, 中国沥青路面设计方法发生了重大的变化, 特别是改革开放以来, 随着经济建设的飞跃发展, 中国高速公路从无到有, 在短短的 40 年里, 高速公路里程超过了 13 万 km, 登上世界第一的宝座。从 1949 年到 2019 年 70 年时间里, 交通运输部相继颁布了 7 版《公路沥青路面设计规范》(1958、1966、1978、1986、1997、2006 和 2017 版)。下文从规范的颁布次序探索中国沥青路面结构设计方法的发展沿革。

2.1 1958 版规范

1949 年之前, 中国公路运输十分落后, 低等级的碎石路面基本上按经验决定厚度, 少数大城市采用过类似美国加州承载比法 (CBR 法)。在 1949 年后, 开始了有计划的经济建设, 并十分重视交通运输行业的发展。为了工作的需要, 又限于当时的历史条件, 1958 年发布的沥青路面设计规范基本上是沿用了苏联 1954 年《柔性路面设计须知》的方法。其设计要点如下: 设计指标为相对变形 λ_k , 路基和材料强度采用变形模量 E , 路面设计基本公式如下:

$$E = \frac{\pi}{2\sqrt{\alpha}} \cdot \frac{p}{\lambda} = \alpha \cdot \frac{p}{\lambda} \quad (2)$$

式中: λ 为相对变形值; p 为达到相对变形值 λ 时的单位荷载; α 为应力分布系数。

对于单一均匀的土基或单一的路面材料整层, 取应力分布系数 $\alpha = 2.5$, 由此得:

$$E = \frac{\pi}{2\sqrt{2.5}} \cdot \frac{p}{\lambda} = \frac{pD}{l_0} \quad (3)$$

对于路基路面综合体, 取 $\alpha = 1.0$, 故其综合模量 E_e 为:

$$E_e = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{p}{\lambda} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{pD}{l} \quad (4)$$

这样, 双层体系的变形公式为:

$$l = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{pD}{E_0} \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \left[1 - \frac{E_0}{E_{1n}} \arctg(nh/D) \right] \right\} \quad (5)$$

式中: n 为双层体系换算为单层体系的换算系数, $n =$

$$2.5 \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}。$$

对苏联《柔性路面设计须知》存在的问题,同济大学林绣贤教授进行了深入的研究,并提出其问题的结论是进行双层体系换算时采用了不同的 α 值。

2.2 1966版规范

1966版规范纠正了苏联的某些错误,但其基本公式仍然是以均质体弹性理论为基础的简化公式,受力分布仍采用雅库宁近似公式。

1956年,经国务院批准交通部率先成立了公路科学研究院,并把柔性路面设计的研究列入国家12年远景科学研究规划中。1957年,中国建立了北京、上海、沈阳、西安、武汉、长沙和广州7个中心观测站,开始进行路基路面综合调查和水温状况的观测工作,并与北京大学开展了全中国道路气候分区修正方案的研究。1959年,提出了道路气候分区图、路基最小填土高度、土基压实标准和土基变形模量等一系列成果。1958和1959年在北京与上海进行了大型试槽试验,1961年在福建龙岩进行了整层和分层试验路比较分析。1962年,中国正式提出了修正路面设计基本公式的建议,经过一系列会议讨论研究,于1965年编写了《修订现行柔性路面设计方法及计算参数的建议》。1966年交通部批准把这些建议列入JTJ 1004-66《公路柔性路面设计规范》中。

经过全体道路工作者的努力,中国不仅纠正了苏联公式的一些错误,还提出了双层和多层体系连续积分法的一整套基本公式和参数,修改了道路分区图等,基本完成了国家规定的3512项任务。不过,该规范基本公式还是沿用单圆荷载图式的均质体弹性理论,且容许相对变形 λ 和综合安全系数 k 不符合实际,这些都有待进一步修改和完善。值得注意的是,同济大学吴晋伟与许志鸿、长安大学王秉纲、哈尔滨工业大学郭大智等在20世纪六七十年代,已求得了弹性层状体在单圆和双圆荷载作用下的精确解答,这为中国后来采用弹性多层体理论作为路面计算的模型打下了坚实的基础。

2.3 1978版规范

从1970年开始,由于老路补强的需要,中国很多科研工作者开展了弯沉补强经验公式的研究工作,提出了单参数、双参数和三参数的经验加固公式,经1971年济南会议和1972年太原会议研究确定采用三参数的补强公式:

$$h = \beta l_R^n \left(\frac{l_0}{l_R} - 1 \right)^n \quad (6)$$

式中: h 为路面补强层厚度; β 为补强层材料参数; m 为反应 l_R 对厚度 h 的影响参数,采用-0.25; l_0 为旧路的计算弯沉值; l_R 为路面补强后的容许弯沉值; n 为反应 $\frac{l_0}{l_R}$ 对厚度 h 的影响参数,采用0.35。

三参数公式是由湖南省交通科学研究院、内蒙古交通科学研究院和交通部重庆公路研究院分别提出,形式稍有不同,但均是从双圆荷载双层体系弹性理论的弯沉公式推导出来的,主要的差别是随着弯沉的增加厚度增加的大小不同。经试验路验证,大家一致认为交通部重庆公路研究所提出的公式(6)比较合理,故选其为旧路弯沉补强的计算公式而列入规范。同时确定容许弯沉为新的设计指标,代替原规范的容许相对变形值。1972—1973年,由交通部公路科学研究院组织组成的全国柔性路面容许弯沉调查组,从1972年3月开始对辽宁、山西、甘肃、江苏、湖南、广东、海南、四川、陕西和上海等省市沥青路面进行容许弯沉值检测,并于1973年6月提出了容许弯沉值的计算公式:

$$L_R = B/N^{0.2} \quad (7)$$

式中: L_R 为容许弯沉值; B 为回归系数; N 为设计年限内车道标准轴载累计数。

与此同时,很多科研工作者进行了单轴双轮荷载及不同车型的弯沉对比测定,并得到了不同轴载下的弯沉对比公式:

$$L_{s-1}/L_{s-2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{0.88} \text{ 或 } L_{s-1}/L_{s-2} =$$

$$P_1 \delta_1^{1.5} / P_2 \delta_2^{1.5} \quad (8)$$

式中: L_{s-1} 为非标准轴载的弯沉值; L_{s-2} 为标准轴载的弯沉值; P_1 为非标准轴载的单位压力; P_2 为标准轴载的单位压力; δ_1 为非标准轴载的当量荷载直径; δ_2 为标准轴载的当量荷载直径。

后经同济大学林绣贤等的深入研究,并结合美国1962年公布的AASHO试验报告,得到了作为1978年柔性路面设计规范的车辆换算公式:

$$N_2/N_1 = (P_1 \delta_1^{1.5} / P_2 \delta_2^{1.5})^{5.0} \quad (9)$$

式中: N_1 为非标准轴载的作用次数; N_2 为标准轴载的作用次数。

在弹性层状体系理论计算分析方面,由于计算机技术的发展,同济大学于1975年正式发布了双圆荷载作用下双层体系荷载圆中心的弯沉诺谟图。另外,从1974年开始由交通部公路科学研究院梅安今等分别

在内蒙古五原和甘肃定西修筑系统试验路进行现场验证。同时,湖南、山西、陕西和四川等许多省市结合各地工程修筑了试验路,为路面计算参数的取得提供了一批可贵的资料。此时,交通部公路设计院与北京大学地理系共同研究提出了中国道路自然区划图。

综上所述,1978 版 JTJ 014—78《公路柔性路面设计规范》体现了中国沥青路面设计方法的大转折与大发展,初步建立了中国柔性路面设计方法的体系。1978 版规范完全摒弃了苏联规范的体系,如单圆荷载作用下的均质体路面模型、相对形变作为路面设计指标和形变模型材料参数等。1978 版规范的主要变化:采用了双圆荷载作用下的双层弹性体系路面设计模型,得到了双圆双层体系弯沉诺谟图及其综合修正系数,提出了容许弯沉值公式;设计标准为双圆荷载中心处的表面回弹弯沉值,建立了以弯沉系数为基础的车辆轴载换算公式;材料参数采用回弹模量;多层体系采用了等效层法;对于老路厚度补强推荐了三参数的弯沉补强经验公式等。

2.4 1986 版规范

1986 版 JTJ 014—86《公路柔性路面设计规范》进一步完善了中国沥青路面设计方法的新体系。该体系纳入了“六五”国家攻关项目 75—24—1—1《高等级公路半刚性基层沥青路面结构、设计和抗滑表层的研究》和“七五”国家攻关项目 75—24—2—1《重交通道路沥青在高等级公路工程中的实用技术》所取得的主要成果中。并经过多次会议讨论,最后于 1982 年提出了基础理论、理论验证、设计参数、路面强度结构系数分报告及有关专题研究报告和总报告,并由交通部公路局主持组织交通、城建、民航等科研院所和高校专家进行评审。

该版规范主要内容如下:采用双圆荷载、三层体系为基础的弹性层状体理论;路表弯沉 l_R 、面层底层最大拉应力 σ_R 和路表轮缘处最大剪应力 τ_R 为设计指标;100 kN 的单轴双轮组为标准轴载,轮胎接地压力 p 为 0.7 MPa,轮胎当量半径 s 为 10.66 cm,见图 5。

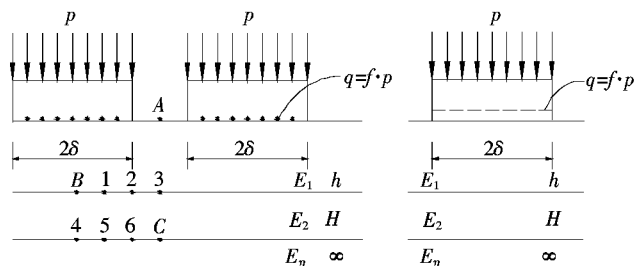


图 5 弯沉计算点示意图

1986 版规范在结构层之间的接触状态既考虑了连续状态也考虑了滑动状态或半连续半滑动状态。对材料黏弹性和各向异性问题,不是在理论计算中解决,而是在材料参数确定时把环境因素(温度、湿度等)考虑进去。在考虑动载作用时,把交通量和反复荷载的疲劳规律联系起来,以动静对比关系把静载测定的参数转化为动载性能参数。不过,在公路路面中没有考虑面层剪切应力。但是,对于城市道路交叉口、停车场和公共汽车停靠站等,车辆在启动和制动时车轮对路面所施加的水平作用力是使路面产生推移、拥包、车辙等破坏的重要原因,故在城市道路路面设计规范中将剪切应力作为设计指标。

此外,1986 版规范对弹性层状体系的实际运用进行试验验证,这是检验弹性层状体系理论可否应用于或怎样用于路面设计的一个关键问题。众所周知,由于弹性层状体系理论在建立之时有一些如弹性均质和各向同性等假定,这些假定不完全符合路面结构及材料组成的情况,因此理论分析的结果必然与实际情况存在差异,必须进行修正。这些验证工作由交通部公路科学研究所、同济大学道路与交通工程研究所、湖南省交通科学研究院、西安公路研究院、交通部重庆公路研究院、湖南大学等单位共同完成。主要进行了路表弯沉、面层和面层底部拉应力、拉应变及土基压应变的验证。通过在室内试槽、环道和现场埋设传感器对这些指标进行测定,取得了一批有价值的结果,为设计指标的修正提供了依据。

2.5 1997 版规范

1986 版规范奠定了中国沥青路面设计的新体系,这是很大的转折和进步。但它反映的基本上是低、中等级沥青路面的设计概念和实践经验,对于当时中国蓬勃进行的高速公路路面设计缺乏指导性,故 1997 版规范被提上日程。

在 1997 版规范中,设计指标仍是路表弯沉值,但同时将整体性结构层底面的弯拉应力作为验算指标引入规范中。路面计算体系是双圆垂直荷载作用下的多层连续弹性体系,取消了 1986 版规范的等效多层换算。在旧路面改建设计方面增加了路面结构厚度的设计方法,取消了原规范的经验公式。

另外,该规范增加了“七五”和“八五”攻关项目的许多新成果,特别是对于半刚性基层沥青路面的设计。该设计由同济大学林绣贤牵头,组织编写出版了《半刚性基层沥青路面》专著。对于半刚性基层反射裂缝问题,根据沙庆林院士的河北省保定试验路及长沙理工

大学(原长沙交通学院)完成的反射裂缝形成和扩展机理的研究,采取了结构和材料设计的双重抗裂措施,为减轻和延缓反射裂缝起到了一定的作用。同时对于弯沉综合修正展开深入研究,提出了更符合实际的弯沉综合修正系数。对于路面的材料设计系数和路基回弹模量的确定也作了更详细的规定。此外,还增加了 SMA 路面、沥青混合料的抗车辙和抗水损的指标以及水泥混凝土桥面铺装设计的内容等。

2.6 2006 版规范

从 20 世纪 90 年代至 21 世纪初,中国高速公路从无到有。从 1989 年的 27 km 到 2005 年猛增到 4.1 万 km,在世界高速公路排行榜中占居第二位(仅次于美国)。随着改革开放政策的深入贯彻,中国国民经济的持续发展,公路交通激增,这对路面设计和施工提出了新的挑战。为了总结高速公路建设的经验,吸纳新的科研成果,在交通部领导下,由交通部公路设计院主持开始了对 1997 版沥青路面设计规范的修订工作。

其中,沥青路面结构设计体系仍采用双圆均布垂直荷载作用下的弹性层状连续体系理论,路面作用的荷载及控制计算点如图 6 所示。该次修订工作,根据高等级公路修建的大量实践,侧重对路面结构和材料及旧路改建设计等进行了充实。对于路面可靠度设计问题,考虑到施工、材料等变异性的复杂性及可靠度指标确定等问题,暂时放弃了把沥青路面可靠度设计写入规范的打算。

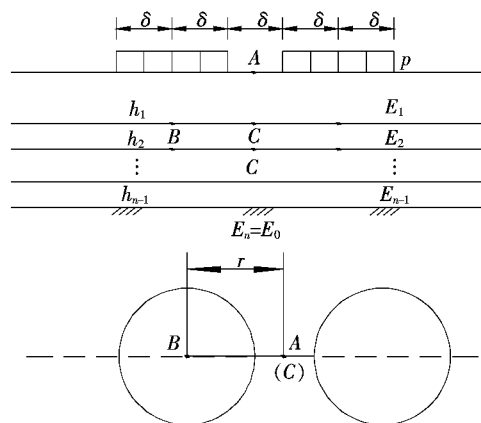


图 6 路面荷载及计算点图示

2006 版 JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》较 1997 版规范主要有如下变化:① 强调了交通荷载的调查、预测和分析,对沥青层层底拉应力设计和半刚性材料层的抗拉应力设计时,采用了不同的轴载当量换算公式;② 提出了按全寿命周期成本的理念进行路面设计,即路面建设费用,要把初期建设费,日后的

养护管理费和使用者费用(汽车维护费、油料消耗费)等综合起来考虑;③ 加强了原材料、混合料和路面结构层功能性要求的设计,增加了柔性基层,贫混凝土基层等设计、施工内容;④ 提出了防止早期水损坏,车辙和干缩(冻)裂纹的面层材料设计和施工技术措施;⑤ 加强了旧路改建设计的内容,提出了沥青路面加铺层和水泥混凝土路面加铺沥青层的方法;⑥ 充实了水泥混凝土桥面沥青铺装层的设计内容,但对钢桥面沥青铺装层的设计未加涉及。

2.7 2017 版规范

JTG D50—2017《沥青路面设计规范》应该说是中国沥青路面设计方法的又一推进。尽管在理论计算体系上没有大的改变,但在交通荷载调整和分析、设计指标、材料计算参数、试验方法和路基模量试验和取值上都有很大变化,总体上比较接近美国 2004 年版 AASHTO(M-E)路面设计指南。该版本修改内容具体如下:

(1) 在交通荷载参数方面,车辆类型按轴型组成为 11 类,取消了以往规范的客车、货车的分类方法。轴载当量换算按高速公路和一级公路改建设计采用水平一,其他情况可采用水平二或水平三,但还是维持了最后转换成标准轴载 100 kN 的方法。其各计算点的位置与 2006 版规范也有所不同,具体如图 7 所示。

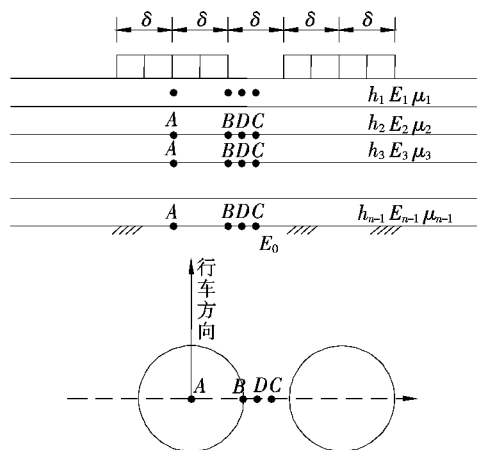


图 7 力学响应计算点位置图示

(2) 在设计标准方面,采用沥青混合料层的疲劳开裂、无机结合料层开裂、沥青混合料层永久变形、路基顶面压应变和路面低温开裂(使用季节性冰冻地区)。取消了路表容许弯沉值指标,但路面和路基完工验收时仍采用弯沉作为验收指标。

(3) 在路面模型的验算和修正方面,2017 版规范沥青混合料层疲劳开裂模型是根据 108 次常应力加载

模式和 618 次常应变加载模式疲劳试验结果得到的,并利用北京 3 个 ALF 试验路、美国加州 6 个 HVS 试验路、Westrack8 个试验路、明尼苏达 MnROAD10 个试验路和美国沥青技术中心 NCAT3 试验路,共 30 个试验段疲劳数据进行修正。无机结合料稳定层疲劳开裂的验证依据 148 个水泥稳定砂砾、水泥碎石、水泥土和石灰粉煤灰碎石 4 种材料的疲劳结果进行的。沥青混合料永久变形的预估模型是基于多种沥青混合料在不同温度、压力下的 229 个车辙试验结果建立的,并利用中国国内 10 余条公路和 5 个试验段对该模型进行了验算和修正。路基顶面竖向压应变模型通过整理 AASHTO 试验公式和 195 个试验路段反算得到的。沥青面层低温开裂采用经验法,分析了东北 10 余个路段情况与路面低温开裂的关系,并参考了加拿大 Hass 教授 19 世纪 80 年代建立的模型。很显然,对于一个

幅员辽阔的中国,上述验证显然还是很不够的,这是今后需要特别重视的问题。

(4) 在路面结构层材料设计参数方面,2017 版规范采用了 3 个水平确定方法,高速公路和一级公路施工图设计采用水平一,其他设计阶段采用水平二或水平三。路基模量和粒料回弹模量采用动态三轴仪测定,沥青混合料采用动态单轴压缩模量;无机结合料稳定类材料弯拉强度和弹性模量采用中间段法(水平一)单轴压缩试验测定;沥青混合料贯入强度以单轴贯入试验方法确定;沥青的低温性能以沥青弯曲梁流变试验(BBR)测定蠕变劲度或用沥青直接拉伸试验(DDT)确定断裂应变。对于二级及二级以上公路,沥青混合料公称最大粒径不大于 19.00 mm,应进行小梁弯曲试验确定其破坏应变。2017 版规范对不同路面结构组合提出了不同的设计指标验算,如表 1 所示。

表 1 不同结构组合路面的设计指标

基层类型	底基层类型	设计指标
无机结合料 稳定类	粒料类 无机结合料稳定类	无机结合料稳定层层底拉应力、沥青混合料层永久变形量
沥青结合料类	粒料类	沥青混合料层层底拉应变、沥青混合料层永久变形量、路基顶面竖向压应变
	无机结合料稳定类	沥青混合料层永久变形量、无机结合料稳定层层底拉应力
粒料类	粒料类	沥青混合料层层底拉应变、沥青混合料层永久变形量、路基顶面竖向压应变
	无机结合料稳定类	沥青混合料层层底拉应变,沥青混合料层永久变形量,无机结合料稳定层层底拉应力
水泥混凝土		沥青混合料层永久变形量

注:季节性冻土地区应增加沥青面层低温开裂验算和防冻厚度验算;在沥青混合料层与无机结合料稳定层间设置粒料层时,应验算沥青混合料层疲劳开裂寿命;水泥混凝土基层应按现行 JTG D40—2002《公路水泥混凝土路面设计规范》设计。

此外,2017 版规范提出了平衡湿度状态下的路基模量,并引用了温度调整系数和等效温度的概念对基准路面结构进行调整。2017 版规范在 3.0.1 节中规定了各级公路的路面结构可靠度和目标可靠度指标,并在结构验算中把目标可靠度指标 β 引入到各个验算方程中。但对沥青路面可靠度的定义并不明确,且各种路面结构施工和材料变异性,相关的可靠度系数没有给出,直接把目标可靠度指标 β 引入到可靠度计算中是不合适的。

3 中国沥青路面设计方法相关方面的发展

3.1 道路工程有限元分析方法

1965 年,中国科学院院士冯康发表了《基于变分

原理的差分格式》,被世界数学界公认为中国有限元的奠基人之作,此后中国科学院计算所许多研究人员开展了有限元方面的研究。张起森教授于 1970 年开始学习有限元,并开展了弹性多层半空间体系在对称荷载作用下的有限元分析,并将结果与同济大学公路研究所吴晋伟等的弹性多层半空间体系的解析解进行了对比分析。由于当时中国计算机容量小且速度慢,所以有限元计算结果误差比较大,但其各应力、应变和位移的变化规律性是一致的。随着计算机技术的发展,有限元分析结果慢慢得到业界的认可。与此同时,在湖南大学王磊教授和湖南省计算技术研究所谢干权的指导和帮助下张起森教授又开展了有限元半分析方法的研究,并得到了弹性层状半空间在表面水平荷载作用下的有限元半分析结果,还开展了层间接触非线性和材料非线性相关研究,于 1983 年出版了《道路工

程有限元分析法》专著。应该说,道路工程有限元分析在近几十年得到了很大发展,特别是对路面材料非线性(黏弹性,黏塑性等)、开裂分析、层间非连续接触、结构内部孔隙分析等问题的研究具有显著的优势。

3.2 道路足尺试验

20 世纪 50 年代,为了应用伊万诺夫教授的《柔性路面设计须知》,当时交通部科学研究院在北京等地进行了土基整层试槽模量试验。20 世纪 60 年代,交通部长沙公路工程研究所修建了可调节路基湿度的 $2.5\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ 试槽,采用反力架加载;同时,交通部上海公路工程研究所和东南大学修建了直径 5 m 的圆形试槽,并进行双层路面结构的加载试验。在 70 年代到 80 年代,湖南省交通科学研究院(原长沙公路工程研究所)配合规范修订的要求,修筑了 $3\text{ m} \times 5\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的大型试槽,开展了路面结构和路基的应力应变试验验证工作。重庆交通科学研究院(交通部交通科学研究院重庆分院)修筑了直径 10 m、厚 1.0 m、深 1.5 m 的圆形加载试槽,进行了多种路面结构和路基应力应变试验。在此期间,交通部科学研究院、甘肃省交通厅、内蒙古交通科学研究院、长安大学(原西安公路学院)和湖南大学等分别在甘肃定西、内蒙古五原和河南开封等现场铺筑了系统试验路,进行多种路基路面结构路表弯沉、面层和基层拉应变和拉应力、路表剪应力和路基压应力等试验研究,为当时规范的修订和完善提供了许多宝贵的数据。

在 20 世纪 90 年代,长沙理工大学(原长沙交通学院)修建了亚洲最大的室内直线式重复加载试验槽,如图 8 所示。试槽长 60 m、宽 2.5 m、深 1.5 m,利用双轮胎进行加载,移动速度 30 km/h。该设备为中国高速公路和大跨径钢桥面结构方案的选择及比较发挥了一定的作用。目前在长沙理工大学云塘校区又新建了一个直道加载试验槽为工程和科研工作服务。

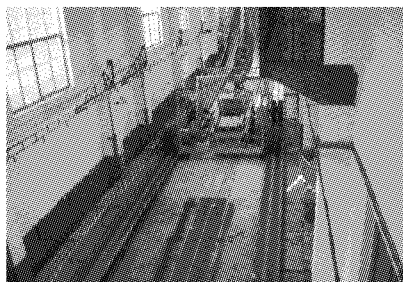


图 8 直道试验槽

中国老一辈的道路工程工作者一直在呼吁修建室

外足尺环道,这个愿望终于在 2012 年批准立项,并于 2014 批准建设。该工程位于北京市通州区,足尺路面总长度约 2 039 m,设计速度 60 km/h。在短短的几年时间取得了一批重要成果。

足尺路面试验环道 RIOHTRACK 为两车道,以内侧车道为加载车道,外侧车道为备用车道。加载试验采用 4 辆 10 轮斯太尔重型卡车,加载车载重轴单轴重以 16 t 为标准。环道路面结构布置见图 9。2016 年 11 月 26 日,足尺环道开始加载试运行,到 2017 年 11 月 15 日,环道实际加载时间 272 d,累计加载运行 440.788 km,按规范要求车辆换算成 100 kN 的标准轴次 350 万次,共进行 23 万次路面状况检测,检测内容包括路表破损状况(开裂)、承载能力(弯沉)、车辙、抗滑性及平整度等。2018 年 12 月 1 日,结束了第 52 周加载,累计加载 90.1 万 km,按弯沉等效原理的 4.35 次计算,相当于 10 t 标准轴载作用 737 万次,在加载期间共进行了 46 次路面状况调查测定。

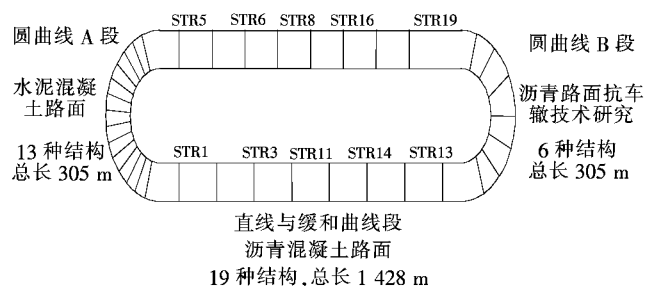


图 9 足尺路面试验环道结构布置图

足尺环道试验将从这些路面结构中选出路面性能好、耐久性好、寿命长的路面结构;为路面设计方法的完善和路面材料评价起到了很大的作用,也将为中国高等级公路的建设和发展发挥重大作用。

3.3 沥青路面黏弹性与动力响应

从 20 世纪 60 年代开始,交通部科学研究院袁龙蔚先生就进行了沥青流变学的研究,同济大学严家伋教授对中国胜利沥青和大庆沥青(渣油)进行了组分重配的研究,之后华南理工大学张肖宁教授等进行了沥青流变性能和沥青混合料组成 X 射线 CT 扫描获取图像信息,研究混合料的微观结构,但其与路面宏观性能的关系却研究得不多。

对于路面结构的黏弹性分析,目前从 Maxwell 本构模型出发做了一些探讨,但要得到理论解还是比较困难的。美国 AASHTO—2004 设计指南采用非线性有限元进行求解,可以说找到了一个比较简便的方法。

路面动力响应的研究,东南大学邓学钧教授率先进行探讨,理论上获得了动力响应方程,但目前离应用还有一定距离。

4 结 论

该文综述了国际沥青路面近半个多世纪的发展概况,较为详尽地论述了新中国成立 70 年来沥青路面结构设计方法的发展变化,以 1958 年中国交通部公路局发布第一部沥青路面设计规范到 2017 年交通部颁布的沥青路面设计规范共 7 版规范为基线,对各版规范建立的理论基础、设计指标、材料参数与试验方法、旧路改建和桥面设计等一一进行了说明和评述。总结如下:

(1) 简述了从条石路面到水结碎石路面再到沥青路面的沥青路面材料和结构发展过程。

(2) 国际上沥青路面结构设计方法主要有:经验法、力学法和力学—经验法。中国 2017 版沥青路面设计规范和 2004 年版的 AASHTO 设计方法均属于力学—经验法。

(3) 自新中国成立以来颁布的 7 版沥青路面设计规范均反映了中国沥青路面在每个时期的不同需求。其中,2017 版规范在交通荷载、设计指标、材料计算参数、试验方法和路基模量试验及取值上都有很大变化,还引用了温度调整系数和等效温度的概念对基准路面结构进行调整,总体上与美国 2004 版 AASHTO(M—E)路面设计指南比较接近。

(4) 有限元分析方法对路面材料非线性、开裂分析、层间非连续接触、结构内部孔隙分析等问题的研究具有显著的优势;足尺道路试验可为路基和路面的应力等研究提供许多宝贵的数据;对于沥青路面黏弹性与动力响应方面大多还处于理论研究阶段,具体应用还有一定距离。这些发展对进一步完善中国沥青路面结构设计方法提供了强有力的支持。

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] 季长玲,张华丽.沥青路面力学—经验设计方法(MEP-DG)简介[J].公路交通科技(应用技术版),2016(10).
- [3] 何兵,陈李峰.Superpave 沥青混合料设计体系介绍[J].公路交通技术,2008(z1).
- [4] Monismith C L, Brown S F. Developments in the Structural Design and Rehabilitation of Asphalt Pavements over Three Quarters of a Century[J].Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists A, 1999, 68: 128—251.
- [5] 交通部科学研究院.修订现行柔性路面设计方法及计算参数的建议[Z],1965.
- [6] JT 1004—66 公路柔性路面设计规范[S].
- [7] 林绣贤.柔性路面结构设计方法[M].北京:人民交通出版社,1988.
- [8] JTJ 014—78 公路柔性路面设计规范[S].
- [9] JTJ 014—86 公路柔性路面设计规范[S].
- [10] JTJ 014—97 公路沥青路面设计规范[S].
- [11] 同济大学道路与交通工程研究所.半刚性基层沥青路面[M].北京:人民交通出版社,1991.
- [12] JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S].
- [13] 张起森.高等路面结构设计理论与方法[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [14] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [15] 冯康.基于变分原理的差分格式[J].应用数学与计算数学,1965(4).
- [16] 张起森.道路工程有限元分析法[M].北京:人民交通出版社,1983.
- [17] 交通运输部公路科学研究院.足尺路面试验环道(RIOHTrack)2018 年度报告[R],2018.
- [18] 张肖宁,李智,虞将苗.沥青混合料的体积组成及其数字图像处理技术[J].华南理工大学学报(自然科学版),2002(11).
- [19] Kim Y R. Modeling of Asphalt Concrete[M]. ASCE Press, 2008.
- [20] 邓学钧,黄晓明,沈伟新.弹性层状体系的动力响应分析[J].土木工程学报,1995(3).