

沥青稳定+无机结合料稳定组合式基层 沥青路面设计综述

李雪连,陈鹏,查旭东

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:针对各国沥青稳定+无机结合料稳定组合式基层沥青路面的材料组成、结构形式、破坏类型、病害成因、设计指标与设计方法存在较大差异的现状,该文对此类沥青路面当前国内外所选取的材料类型与结构形式进行归纳,分析此类沥青路面结构的破坏类型及病害成因,探讨各国在组合式基层沥青路面设计方法方面的差异,并总结各国的病害控制类型和设计指标,据此推荐了组合式基层沥青路面合理的材料、结构组合与设计指标,为此类沥青路面的设计与应用提供参考。

关键词:沥青路面;组合式基层;设计方法;设计指标;车辙;开裂

中图分类号:U416.224

文献标志码:A

0 引言

路面结构是承受交通荷载和环境因素作用的主体,选取合理的设计指标、路面材料和结构组合是提高路用性能及延长路面使用寿命的重要保障^[1]。目前国际上常用的沥青路面结构主要有刚性基层沥青路面、传统柔性沥青路面、全厚式长寿命沥青路面、半刚性基层沥青路面和组合式基层沥青路面等,如图1所示。其中,刚性基层沥青路面在温度和荷载作用下容易产生车辙和反射裂缝等病害^[2];传统柔性沥青路面若承受荷载较大则易出现车辙和疲劳开裂等问题^[3];全厚式长寿命沥青路面结构能够承受荷载的反复作用,结构性能优良,但其造价高且易出现车辙等病害^[4-5];半刚性基层沥青路面虽承载能力好且价格便宜,但反射裂缝和水损坏等问题严重^[6-8]。组合式基层沥青路面是在沥青面层与半刚性基层或刚性基层之间设置柔性基层的路面结构,柔性基层主要包括粒料类和沥青稳定类基层^[9]。与传统的半刚性基层沥青路面相比,柔性基层的设置使半刚性材料层下移,从而可以充分利用柔性基层

的优点,缓解反射裂缝和水损坏等问题^[10]。与全厚式沥青路面相比,组合式基层沥青路面的底基层采用无机结合料稳定类材料,有着较高强度、承载能力和耐久性,能够减小沥青层的厚度和节省造价^[1]。因此,组合式基层沥青路面具有非常广泛的应用前景^[11]。

通常,组合式基层沥青路面结构的使用性能受材料种类、结构组合及路面结构设计指标与方法等影响显著^[12]。然而,目前各国选用的组合式基层沥青路面材料种类与结构形式存在明显的区别^[13],相应的设计方法也有一定的差异^[14-16]。对于沥青稳定+无机结合料稳定组合式基层沥青路面,在进行路面设计时,各国大多从控制车辙和疲劳开裂破坏出发,以沥青层层底拉应变、半刚性底基层层底拉应力和路基顶面压应变为设计指标^[17],而中国仍沿用半刚性沥青路面设计指标,针对性不足^[18]。为此,本文针对这种路面结构类型,总结国内外组合式基层沥青路面材料与结构应用情况,分析其破坏模式和病害成因,归纳各国设计时选取的病害控制类型与设计指标,最后针对性推荐相应的材料、结构组合与设计指标。

收稿日期:2023-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52178412)

作者简介:李雪连,女,博士,教授,博士生导师.E-mail:lixuelian@csust.edu.cn

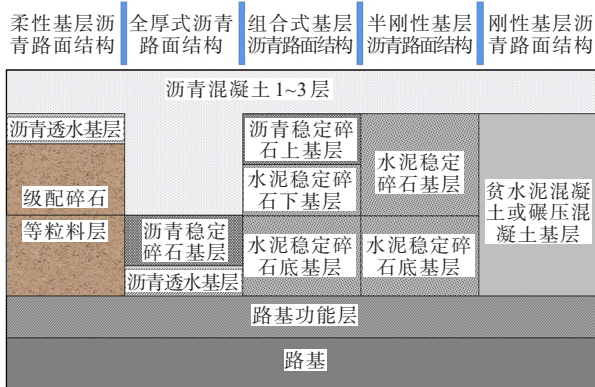


图1 常用沥青路面结构

表1 国外组合式基层沥青路面材料

国家	面层	基层	底基层
德国 ^[22]	沥青混凝土、 沥青玛蹄脂碎石	热沥青、乳化沥青、泡沫沥青稳定碎石	水泥稳定材料
美国 ^[23]	沥青混凝土	大粒径沥青混合料(LSM)、沥青稳定碎石(ATB)、乳化沥青稳定碎石、沥青混凝土、开级配沥青稳定碎石	无机结合料稳定材料
非洲 ^[24]	沥青混凝土	ATB	无机结合料稳定材料
日本 ^[25]	热拌沥青混合料	ATB、LSM、大粒径透水性沥青混合料(LSPM)、 沥青混凝土	水泥稳定材料
法国 ^[4]	沥青混凝土	ATB、沥青砂砾(GB)、高模量沥青混凝土(EME)	水硬性结合料稳定材料

表2 国外组合式基层沥青路面结构

国家	面层/cm	沥青稳定碎石 基层/cm	半刚性底 基层/cm
德国 ^[26]	12	14	15
美国 ^[27]	18~50	18~50	15~30
非洲 ^[28]	5~8	20~22	20~25
日本 ^[29]	10	8~15	15~30
法国 ^[30]	6~10	12~18	18~42

由表1、2可知：在材料方面，各国组合式基层沥青路面面层基本都是采用沥青混凝土，底基层采用无机结合料稳定类材料，其中基层材料的选择存在一定差异。为使道路建设更加绿色环保，德国基层采用的沥青稳定碎石类材料多是筛分后的碎石、回收的旧沥青路面材料(RAP)或是将这两种材料混合^[22]；美国^[23]和日本^[25]为适应不同的道路使用要求，则应用了多种类型的基层，如拥有较强承载力且成本低的大粒径沥青混合料基层与沥青稳定碎石基层，或是拥有较好排水能力但承载力稍弱的透水沥青混凝土基层。而在法国，除沥青稳定碎石和沥青砂砾之外，为提高路面结构承载能力和抗车

1 材料组成与结构形式

沥青稳定+无机结合料稳定组合式基层沥青路面充分结合了柔性基层和半刚性基层两者的优势^[19-21]，目前国内外常用的主要结构组合有：沥青面层+沥青稳定碎石基层(或沥青稳定碎石基层+级配碎石过渡层)+无机结合料稳定集料底基层^[10]。

1.1 国外

欧美、日本和非洲等国家组合式基层沥青路面结构常用的材料与结构层厚度见表1、2。

辙能力，常采用高模量沥青混凝土基层^[4]。总之，大部分国家主要采用沥青稳定碎石基层或大粒径沥青稳定碎石基层，还有适合不同道路使用要求的乳化沥青稳定碎石、沥青混凝土和开级配排水基层等。

在结构层厚度方面，各国的半刚性底基层厚度选取范围较广，除德国半刚性底基层的厚度统一规定为15 cm外，其他国家将半刚性底基层作为主要承重层结构，要求其厚度均应大于15 cm^[2]。在沥青层厚度的选取上，德国的承重层材料以沥青混合料为主，因此沥青层比半刚性底基层厚，一般为22~26 cm^[26]。据美国DCP 2002年统计，大部分路面结构为全厚式长寿命沥青路面，组合式基层沥青路面的比率仅为道路网的4.8%，因此美国的组合式基层沥青路面更倾向于采用较厚的沥青层，其厚度一般大于半刚性底基层，为18~50 cm^[27]。而在日本^[29]、法国^[30]和非洲等国家^[28]，沥青层与半刚性底基层的厚度取值相近，法国组合式基层沥青路面比日本多，较具代表性的如法国A10高速公路^[31]和日本山阳自动车道^[29]等。总之，组合式基层沥青路面结构的沥青

层厚度取值范围较广,为18~50 cm,半刚性底基层厚度与沥青层厚度的比例为1:0.5~1:3.4。

1.2 中国

自京津塘高速公路修建以来,中国组合式基层沥青路面常用结构见表3。

表3 中国组合式基层沥青路面结构

项目名称	建设时间/年	路面结构
京津塘高速公路 ^[32]	1987	5 cm 普通 LH-20+6 cm 普通 LH-30 I +12 cm 普通 ATB-40+20 cm 水泥稳定砂砾+20~45 cm 石灰稳定土
济青高速公路 ^[2]	1990	4 cm 改性 SMA-13+6 cm 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-25+10 cm 普通 ATB-25+36 cm 水泥稳定碎石+18/20 cm 水泥稳定碎石
广深高速公路(广州—深圳段) ^[33]	1994	4 cm 普通 LH-20 II +8 cm 普通 LH-30 II +10 cm 普通 HK-50+10 cm 普通 ATB-25+23 cm 水泥稳定碎石+25 cm 级配碎石
滨大高速公路试验段 ^[34]	2003	4 cm 改性 SMA-13+6 cm 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-25+15 cm 改性 LSPM-30+20 cm 二灰稳定碎石+20 cm 二灰土
山西祈临高速公路试验路 ^[35]	2003	4 cm 改性 SMA-16+8 cm 改性 AC-20+12 cm 普通 ATB-25+20 cm 水泥稳定碎石+20 cm 水泥稳定碎石
江苏省沿江高速公路试验路 ^[36]	2004	4 cm 改性 SMA-13+6 cm 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-25+7 cm 普通 ATB-25+15 cm 水泥稳定碎石+16 cm 水泥稳定碎石+20 cm 二灰土
乐温高速公路试验段 ^[37]	2006	4 cm 改性 SMA-13+6 cm 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-25+10 cm 普通 ATB-25+26 cm 水泥稳定碎石
济莱高速公路试验段 ^[34]	2007	4 cm 改性 SMA-13+6 cm 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-25+7 cm 改性 LSPM-30+35 cm 水泥稳定碎石
随岳中高速公路 ^[38]	2010	4 cm 改性 SMA-13+6 cm 改性 AC-20C+8 cm 普通 AC-25C+24 cm 普通 ATB-25+20 cm 水泥稳定碎石
石吉高速公路 ^[39]	2010	4 cm 改性 AC-13C+6 cm 改性 AC-20C+7 cm 普通 AC-25C+8 cm 普通 ATB-25+18 cm 水泥稳定碎石+15 cm 水泥稳定碎石+20 cm 级配碎石
韶赣高速公路改扩建项目 ^[40]	2011	4 cm 改性 AK-13C+6 cm 普通 AC-20C+15 cm 普通 ATB-25+19 cm 水泥稳定碎石+19 cm 水泥稳定碎石
青临高速公路 ^[34]	2013	4 cm 改性 SMA-13+6 cm 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-25+13 cm 改性 LSPM-30+34 cm 水泥稳定碎石
内蒙古自治区省道26线敖勒召其至东道梁(蒙宁界) ^[41]	2018	5 cm 改性 SMA-16+7 cm 普通 AC-20+12 cm 普通 ATB-25+36 cm 水泥稳定碎石+20 cm 水泥稳定碎石
宁夏京藏高速公路改扩建工程 ^[42]	2020	4 cm 改性 AC-13C+6 cm 改性 AC-20C+12 cm 普通 ATB-30+40 cm 水泥稳定碎石+20 cm 水泥稳定碎石
江西新余市国省道一级公路绕城改建工程 ^[43]	2021	4 cm 改性 AC-13C+6 cm 改性 AC-20C+8 cm 普通 AC-25C+10 cm 普通 ATB-25+16 cm 水泥稳定碎石+18 cm 水泥稳定碎石
广东阳茂高速改扩建工程 ^[4]	2021	4 cm 改性 SMA-13+6 cm 改性 AC-20+8 cm 普通 AC-20C+14 cm 普通 ATB-25+36 cm 水泥稳定碎石+20 cm 水泥稳定碎石+20 cm 级配碎石

由表3可知:在材料方面,中国组合式基层沥青路面的面层基本采用改性沥青,具有优良的抗车辙能力;基层大部分跟国外一样也是使用沥青稳定碎石、大粒径沥青稳定碎石或大粒径透水性沥青混合料;底基层使用水泥稳定碎石,部分路段还会使用二

灰稳定碎石以及二灰稳定土。其中,使用大粒径沥青碎石材料作基层的滨大高速公路试验段、济莱高速公路试验段以及青临高速公路等在通车多年后,路面状况依旧良好^[34]。不过,作为基层的沥青稳定碎石材料组成控制不会像传统面层的密级配沥青混

凝土那么严格,最大公称粒径一般为 19~40 mm,空隙率控制为 3%~12%,沥青用量也比面层的低^[23]。

在结构层厚度方面,面层厚度基本为 10~18 cm,沥青碎石基层的厚度为 7~15 cm(大部分道路沥青层较薄),而半刚性材料底基层的厚度大部分在 40 cm 以上。从京津塘高速公路^[32]和宁夏京藏高速公路扩建工程^[43]的应用状况可知,沥青层整体厚度偏低,仅为半刚性底基层厚度一半左右。另外,从广深高速公路^[33]、随岳中高速公路^[38]、乐温高速公路^[37]和山西祈临高速公路试验路段^[35]等的的应用状况可知,沥青层整体厚度有所增加,开始接近半刚性底基层厚度。总之,中国组合式基层沥青路面沥青层的取值范围多为 17~33 cm,厚度一般小于半刚性底基层。其中,底基层厚度与沥青层比例一般为 1:0.35~1:1。

2 破坏类型与病害成因分析

2.1 破坏类型

德国 A5 高速公路在经过 17 年的使用后,其性能依旧良好,只出现了轻微车辙和开裂^[44]。日本的山阳、广岛岩和馆山等高速公路在经过一段时间的使用后,路用性能较好,较少出现疲劳裂缝,主要为车辙破坏^[29]。法国 A10 高速公路^[31]和非洲捷斯至图巴高速公路^[28]等组合式基层沥青路面目前均出现了车辙和开裂。中国广深珠高速公路在使用 10 年后,路面整体性能较好,车辙平均深度为 7.7 mm,表面裂缝较少^[33]。广东省渝湛、河龙和粤赣等高速公路试验段的组合式基层沥青路面和半刚性基层沥青路面车辙深度均小于 15 mm,但裂缝率只有半刚性基层的 1/2,甚至只有 1/3^[33]。山东滨大、济莱和青临等高速公路试验段历经 10 多年的持续跟踪观测,组合式基层沥青路面结构在重载交通作用下目前路面状况依旧良好,仅有轻微表面裂缝^[34]。江苏省沿江高速公路苏州市常熟段,设置的两种组合式基层沥青路面结构组合在交通荷载作用下均出现了不同程度的车辙和裂缝^[36]。江西省南昌市郊区的乐温高速公路组合式基层路段的车辙与半刚性基层路段车辙深度相近,但裂缝数量更少^[37]。

总之,组合式基层沥青路面病害主要是车辙和裂缝。该类路面早期虽容易出现表面裂缝,但裂缝

并不深,对于较厚沥青层的沥青路面,其裂缝深度通常在 10 cm 以内,当路面性能下降时,对面层进行维护即可较快恢复路用性能^[45]。另外,有研究车辙深度与沥青层厚度之间联系的文献表明:当沥青层厚度超过某一临界厚度后,车辙深度不会一直增加,该临界厚度一般为 15~25 cm^[46]。因此,组合式基层沥青路面虽有着较厚的沥青层,但产生的车辙深度与半刚性基层路面相差不大^[37]。

2.2 病害成因分析

确定路面病害产生的原因对于路面结构设计、制定养护对策和节约养护资金具有重要意义,因此有必要对组合式基层沥青路面病害的成因进行分析。

2.2.1 车辙

组合式基层沥青路面同样容易出现车辙的原因主要是含沥青碎石基层在内的沥青层总厚度较大导致的。不过,组合式基层沥青路面车辙大部分出现在沥青层表面,且一般不会发生结构性变形^[37]。在高温和交通荷载作用下,可能会出现沥青层抗变形能力不足引起沥青层永久变形或是沥青层内部抗剪强度不足引起沥青混合料剪切流动,从而导致车辙。不过,沥青碎石基层的存在能减轻结构整体的剪应力水平,增强路面抗高温变形能力,进而很大程度避免了面层结构剪应力过大导致的车辙^[20]。

2.2.2 裂缝

组合式基层沥青路面裂缝的产生原因非常复杂,由荷载、温度、沥青老化以及施工等多因素造成^[47]。当位于高寒高海拔等温差较大区域时,长时间的低温作用或高低温循环产生温度应力会导致沥青面层早期易出现横向温缩裂缝,后期在车辆荷载作用下,轮迹带两侧易隆起出现纵向疲劳裂缝,并逐渐发展为自上而下的 Top-down 裂缝^[8]。对于厚沥青层,面层的温缩裂缝比底基层严重,故主要需控制沥青面层的温缩开裂^[17]。此外,虽然组合式基层沥青路面采用较厚的沥青层,能够缓解反射裂缝的出现,但是在热胀冷缩和荷载的反复作用下,半刚性底基层作为主要承重层可能会由于抗拉强度不足而产生开裂^[48]。在其开裂后,底基层与基层之间的黏结会逐渐失效,此时沥青层变为主要承重层,也会容易出现抗拉强度不足导致的路面开裂^[10]。如果没有进行

及时的维修养护,会进一步导致沥青路面发生网裂等病害^[49]。

3 设计方法

组合式基层沥青路面是在柔性基层与半刚性基层沥青路面基础上发展而来,各国目前常用的设计方法^[50]如图2所示。

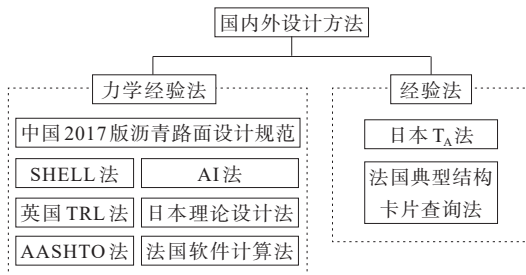


图2 组合式基层沥青路面设计方法

3.1 国外

3.1.1 AI法

AI设计方法把路面看成多层弹性体系,考虑各层材料的弹性模量和泊松比^[51]。在对组合式基层沥青路面进行设计时,AI法首先通过交通量预估、路基回弹模量、设计温度和选择的基层材料厚度确定路面结构组合,然后从控制路面永久变形和疲劳开裂两种病害出发,以沥青层层底拉应变以及路基顶面竖向压应变作为设计指标进行验算,最后通过经济性比较确定最终设计方案。

3.1.2 SHELL法

Shell设计方法由英荷Shell石油公司研究提出,理论较为完善,将组合式基层沥青路面假定为层间接触连续的三层体系,从控制路面永久变形和疲劳开裂两种病害出发,以路基顶面竖向压应变和沥青层层底拉应变为主要设计指标,以水泥稳定类基层层底拉应力(或应变)、路表总变形和沥青层低温缩裂为次要指标,对路面结构进行设计^[52]。

3.1.3 AASHTO法

AASHTO MEPDG-3是典型的力学-经验设计方法^[53]。在对组合式基层沥青路面进行设计时,该方法主要通过MEPDG软件输入交通资料、气候资料和路面结构材料等参数,经迭代分析后得出满足要求的路面结构组合,然后从控制路面永久变形、疲劳开裂和平整度不足3种病害出发,选取沥青层层底

拉应变、半刚性层底拉应力、沥青层永久变形量、土基顶面竖向压应变和平整度指数作为设计指标,进行不同设计方案的工程分析与寿命周期分析^[54]。

3.1.4 英国TRL法

英国规范的路面设计方法最早是基于试验路段采用经验方法,而后TRL615报告中补充了多层线弹性模型的理论设计方法。TRL设计法首先根据交通量和路基顶面的半空间等效刚度,选定路基顶面基础等级,然后依靠经验公式或规范附图确定基层厚度,并从控制路面永久变形和疲劳开裂两种病害出发,以半刚性底基层层底拉应力、路基顶面竖向压应变和沥青层层底拉应变为设计指标,对组合式基层沥青路面进行设计^[55]。

3.1.5 日本设计方法

目前,日本沥青路面设计有 T_A 法和理论设计方法两种^[56]。在对组合式基层沥青路面进行设计时,两种方法均考虑了路面的永久变形和疲劳开裂。不过, T_A 法是一种采用以车辆行驶试验为基础,经统计处理导出计算式的设计方法,不需要验算应力应变指标,只需验证各设计层厚度是否满足规范最小厚度下换算后的各设计层厚度即可。然而,理论设计方法则是将路面作为多层结构,采用弹性和黏弹性理论,选取沥青层层底拉应变、路基顶面竖向压应变作为主要设计指标,对路面进行设计^[57-58]。

3.1.6 法国LCPC法

现行法国路面结构设计方法主要有典型结构卡片查询法和软件计算法。通常情况下卡片法主要用于初步确定路面结构类型,软件法主要用来确定经济合理的路面结构厚度和验算应力应变等指标。在对组合式基层沥青路面结构进行设计时,从控制路面永久变形和疲劳开裂两种病害出发,以沥青层层底拉应变、半刚性底基层层底拉应力和路基顶面压应变作为设计指标进行设计。不过,因该结构沥青层总厚度和底基层厚度的比例接近1:1。法标认为:当半刚性底基层破坏后,沥青类基层会作为主要承重层,继续发挥作用直至破坏^[59]。因此,组合式基层沥青路面结构设计应该分两阶段设计:在第一阶段,半刚性底基层良好,与沥青碎石基层黏结正常,设计需满足半刚性底基层底面拉应力小于容许值和土基顶面的压应变小于容许值的要求;在第二阶段,半刚

性底基层发生破坏,底基层模量下降至完好时的1/5,强度降低的同时两基层层间脱离,设计需满足沥青碎石基层底面的水平拉应变小于容许值和土基顶面的压应变小于容许值的要求^[60]。

3.2 中国

目前,中国现行《公路沥青路面设计规范》(JTGD50—2017)(简称“2017版规范”)采用多层弹性连续体系理论进行组合式基层沥青路面结构设计^[61],首先根据交通量、道路环境和材料等因素初步确定各结构层厚度,然后从控制路面永久变形和疲劳开裂两种病害出发,以沥青混合料层永久变形和无机结合料稳定层层底拉应力作为设计指标对路面结构组合进行验算^[62]。

3.3 小结

在对组合式基层沥青路面进行设计时,各设计方法大多主要考虑了永久变形和疲劳开裂两种破坏,但设计理念、设计流程和设计指标等方面存在一定差异。在设计理念和设计流程方面,AI法、Shell法、英国TRL法、日本理论设计方法和中国2017版规范所用方法皆是组合式基层沥青路面看成多层弹性体系,根据交通量、道路环境和材料等因素初步确定各结构层厚度,再验算设计指标是否满足道路交通要求;而采用日本T_A法不需要验算应力应变指标,只需验证各设计层厚度是否满足规范最小厚度下换算后的各设计层厚度即可。此外,AASHTO法主要通过MEPDG软件确定各结构层厚度,再验算力学设计指标是否满足要求,只有法国进行了考虑半刚性底基层破坏前后的两阶段设计^[59]。

4 设计推荐

基于上述各国沥青稳定+无机结合料稳定组合式基层沥青路面的材料与结构组合情况、病害类型与成因分析,本文建议面层宜采用抗车辙能力较好的沥青混凝土,基层宜采用承载能力较强的沥青稳定碎石或大粒径沥青稳定碎石,半刚性底基层宜采用水泥稳定碎石。在结构方面,从路用性能角度出发,沥青层总厚度应当与半刚性底基层厚度相近,受投资限制可略小于底基层厚度。鉴于组合式基层沥青路面结构容易出现车辙和裂缝,本文还对各国的沥青路面设计指标进行汇总,如图3所示。

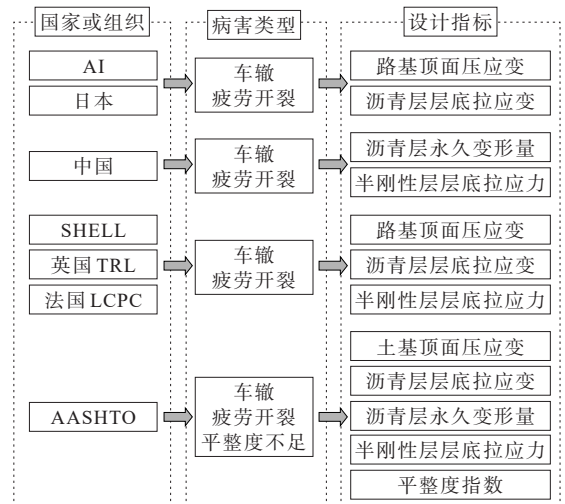


图3 不同国家或组织组合式基层沥青路面设计指标

组合式基层沥青路面结构主要是由沥青混凝土面层、沥青稳定基层和半刚性底基层组成的,容易出现车辙和开裂^[10]。因此,各国设计时大多从这两种病害类型出发,以沥青层层底拉应变、半刚性底基层层底拉应力和路基顶面压应变等为设计指标,对组合式基层沥青路面结构进行设计^[4]。但从图3可知:目前各国所采用的设计指标并不统一。中国2017版规范也考虑了路面永久变形和疲劳开裂,但仍沿用半刚性基层沥青路面的设计指标,缺乏针对性^[62]。其实,高温下沥青层剪应力过大也容易导致组合式基层沥青路面结构出现表面裂缝^[63],故为避免沥青层内剪应力过大导致路面结构出现失稳型车辙,中国1986版规范曾采用路表剪应力作为设计指标^[61]。此外,当位于高寒高海拔或温差较大区域时,沥青路面在温度应力的作用下,极易出现低温缩裂现象,为保证路面结构的低温性能,还应控制沥青层的低温开裂指数^[6]。

因此,综合考虑组合式基层沥青路面材料组成、结构形式、破坏类型、病害成因及设计指标与方法等,本文推荐将半刚性底基层层底拉应力和沥青层永久变形作为主要设计指标,以路基顶面压应变、沥青混合料低温开裂指数、沥青层最大剪应力和沥青层层底拉应变4个指标作为次要设计指标,进行半刚性底基层破坏前后两阶段的设计指标验算^[59]。

5 结论与建议

(1) 在基层材料方面,国内外主要采用强度高且

沥青用量低的沥青稳定碎石或大粒径沥青碎石,有时还采用适合不同道路使用要求的乳化沥青稳定碎石基层、沥青混凝土基层和开级配排水基层等。在结构厚度方面,国外沥青层厚度选取范围较广且一般大于半刚性底基层,而中国一般小于半刚性底基层。

(2) 在病害类型与成因方面,组合式基层沥青路面主要容易出现车辙和开裂。其中,车辙是沥青层抗变形能力和抗剪能力不足导致的;开裂主要是由于长时间的低温作用或高低温循环产生的温度应力与车辆荷载反复作用导致的,另外,承重层位抗拉强度不足以及路面结构层间黏结失效也容易导致该类路面底基层开裂并反射至沥青层。

(3) 在设计方法方面,各国设计方法大多在初步确定路面结构组合后,验算设计指标,从而选定最终结构方案,只有法国采用考虑半刚性底基层破坏前后的两阶段设计,更符合路面实际破坏过程。

(4) 建议面层材料宜采用抗车辙能力较好的沥青混凝土,基层材料宜采用强度高且沥青用量低的沥青稳定碎石或大粒径沥青稳定碎石,半刚性底基层材料宜采用水泥稳定碎石;沥青层总厚度与底基层厚度比例宜接近1:1;关于设计指标,建议以半刚性底基层层底拉应力和沥青层永久变形为主要设计指标,以路基顶面压应变、沥青混合料低温开裂指数、沥青层最大剪应力和沥青层层底拉应变4个指标为次要设计指标,进行半刚性底基层破坏前后两阶段的设计指标验算。

参考文献:

- [1] 赵楷文,张洪伟,全蔚闻,等.沥青路面结构设计指标优化及合理厚度探究[J].公路交通科技,2022,39(6):9-16.
- [2] 沈金安,李福普,陈景.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.
- [3] 王予红,温永,程怀磊,等.长寿柔性基层沥青路面的极限应变[J].中国公路学报,2020,33(10):102-114.
- [4] 徐希忠,韦金城,闫翔鹏,等.长寿命沥青路面研究现状及展望[J].中外公路,2023,43(1):36-43.
- [5] 索智,谭祎天,张亚,等.骨架密实型沥青稳定碎石混合料动态模量研究[J].建筑材料学报,2022,25(2):206-213.
- [6] 张玉,陈欣然.基于多源病害控制的内蒙古地区高速公路路面适用结构分析[J].公路,2022,67(1):1-7.
- [7] 邢丹,罗晓岚.级配碎石复合式基层沥青路面力学响应研究[J].公路工程,2020,45(3):240-246.
- [8] 冯新军,郝培文,查旭东.沥青稳定碎石基层抗反射裂缝能力评价方法[J].中国公路学报,2011,24(2):6-11.
- [9] 黄晓明.路基路面工程[M].6版.北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [10] 蒋松利,丁淑巍.基于法国标准的复合式基层沥青路面结构设计案例分析[J].中外公路,2018,38(5):69-72.
- [11] 柯文豪,陈华鑫,雷宇.青藏高寒高海拔地区宽幅公路沥青路面力学响应[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(1):34-43.
- [12] 虞峥,彭德清,谢鑫华.橡胶沥青应力吸收层设计[J].中外公路,2015,35(2):213-217.
- [13] 郭芳.基于时间硬化蠕变模型的组合式基层沥青路面结构车辙分析[J].公路工程,2015,40(6):214-217,222.
- [14] 曹建建,郑炳锋.4类不同基层沥青路面长期性能研究[J].公路,2020,65(4):1-6.
- [15] 毛雪松,黄喆,朱凤杰.高寒高海拔地区路面典型结构适应性研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(8):23-29.
- [16] 孟华君,王刚毅,曾国东,等.城市快速路升级改造旧路路面质量综合评估与控制对策研究[J].公路,2019,64(8):44-49.
- [17] 刘春雨,郑传峰.高寒高海拔地区沥青路面季节性损伤对比分析[J].公路工程,2018,43(6):62-67.
- [18] 李丽民,刘卫东,何兆益.国内外沥青路面设计研究综述[J].公路,2015,60(12):44-50.
- [19] 乔建刚,王伟,程璨,等.基于温度-荷载耦合场的沥青路面抗裂分析[J].公路,2019,64(8):38-43.
- [20] 张艳红,王晓帆.对两种复合式基层沥青路面剪应力的分析与思考[J].中外公路,2010,30(3):107-110.
- [21] 付宏渊,郭芳,邵腊庚.基于温度场的混合式基层沥青路面结构车辙数值模拟分析[J].公路交通科技,2015,32(12):46-52.
- [22] 吕伟民,王锡通,郑录化.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.
- [23] 彭凯.半刚性柔性复合式基层沥青路面结构与材料优化设计[D].长沙:长沙理工大学,2016.
- [24] 王琛,袁仁峰,赵宾.基于中国和法国规范对非洲某疏港公路路面结构对比研究[J].公路,2020,65(10):78-83.
- [25] 封雅宏,袁博,许斌,等.不同结构类型的全透水沥青路面长期性能分析[J].中外公路,2020,40(5):21-28.
- [26] 韦璐.德国沥青路面温度场的预估模型及应用[J].中外公路,2011,31(6):118-121.
- [27] 黄勇,田瑞芳.国内外高级沥青路面结构简述及对策探讨[J].公路交通科技(应用技术版),2008,4(5):57-61.
- [28] 程昊,王方立.红土粒料在塞内加尔路面结构设计中的

- 应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(2): 113-115, 121.
- [29] 日本道路协会. 日本沥青路面规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 1980.
- [30] 邵财泉. 中外沥青路面设计方法对比研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [31] BLANC J, HORNYCH P, DUONG N S, et al. Monitoring of an experimental motorway section[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(1): 74-89.
- [32] 郭忠印, 丛林, 潘正中, 等. 半刚性基层沥青路面结构施工阶段的测试与分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(S1): 8-12.
- [33] 许新权, 吴传海, 李善强. 广东省高速公路典型结构沥青路面使用性能调查与分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(4): 689-693, 699.
- [34] 王林, 韦金城, 张晓萌, 等. “四个一体化”破解长寿命沥青路面技术瓶颈[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3238-3246.
- [35] 李福普, 陈景, 严二虎. 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.
- [36] 蒋振雄. 江苏省廿年沥青路面技术框架与发展路径[J]. 公路交通科技, 2020, 37(2): 15-21.
- [37] 廖晓锋, 雷茂锦, 彭明. 江西省高速公路沥青混凝土路面早期病害及原因分析[J]. 公路, 2009, 54(10): 77-83.
- [38] 陈志民. 随岳中高速公路柔性路面设计与施工[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9(10): 223-224.
- [39] 曹林涛, 阙云. 江西省高速公路沥青路面温度特征与沥青 PG 分级[J]. 公路, 2015, 60(8): 14-20.
- [40] 温伟标, 赵伟, 杨海玲, 等. 骨架密实型水泥稳定碎石基层配合比设计及施工应用[J]. 中外公路, 2010, 30(2): 213-216.
- [41] 李强, 张振伟. ATB-30 沥青稳定碎石在宁夏京藏高速改扩建工程中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(11): 1-4, 8.
- [42] 陈欣然, 张玉. 大温差干旱地区复合式基层沥青路面应变更现场试验[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6623-6631.
- [43] 邹玲, 田飞, 刘国伟, 等. 公路基层水稳养生技术研究[C]//《施工技术》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2021 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(下册).《施工技术(中英文)》编辑部, 2021: 176-178.
- [44] 马庆雷. 基于刚性基层的耐久性沥青路面结构研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [45] 常乐, 彭妙娟. 三维沥青路面多层体系的黏弹性力学分析[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4): 1567-1573.
- [46] 刘刚, 陈磊磊, 钱振东, 等. 车辙深度对沥青路面结构性能影响性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(24): 36-40.
- [47] HERNANDO D, DEL VAL M A. A comprehensive overview on main distress mechanisms in composite pavements[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2013, 6(6): 737-744.
- [48] SUN L J, WANG G, ZHANG H C, et al. Initiation and propagation of top-down cracking in asphalt pavement[J]. Applied Sciences, 2018, 8(5): 774.
- [49] MA Z X, LIU L P, SUN L J. Investigation of top-down cracking performance of in-situ asphalt mixtures based on accelerated pavement testing and laboratory tests[J]. Construction and Building Materials, 2018, 179: 277-284.
- [50] 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.
- [51] The Manual Series-1 of the Asphalt Institute of America. Thickness design-asphalt pavement for highways and streets [S]. The Manual Series-1 of the Asphalt Institute of America, 1991.
- [52] Shell International Petroleum Co.Ltd.Shell pavement design manual-asphalt pavements and overlays or road traffic[M]. London:Shell International Petroleum Co. Ltd,1978.
- [53] 王永胜, 孔永健. AASHTO 沥青路面结构设计方法在我国的适用性研究[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(4): 58-62.
- [54] AASHTO. MEPDG-3 Mechanistic-empirical pavement design guide:A manual of practice[S].2020.
- [55] 英国规范 TRL.Overseas Road Note31[S].1993.
- [56] 日本道路协会.路面设计施工指针[S].2001.
- [57] 刘建伟, 申俊敏, 张脩, 等. 日本路面设计方法及路面设计[J]. 中外公路, 2016, 36(6): 45-50.
- [58] 沈金安. 2001 年 12 月版日本《路面设计施工指针》关于沥青路面设计方法简介[J]. 中外公路, 2004, 24(2): 103-111.
- [59] SETRA-LCPC.Catalogue des structures types de chaussées neuves[M].Paris:Publié par le SETRA & LCPC,1998.
- [60] 王乐宇, 廖公云, 李植淮, 等. 中法沥青路面结构设计参数重要性对比分析[J]. 中外公路, 2015, 35(5): 81-87.
- [61] 张起森, 李雪连. 70 年来中国沥青路面结构设计方法发展沿革[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 30-38.
- [62] 中交路桥技术有限公司. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [63] 张宜洛, 邓展伟, 郭创. 基于动载作用的组合式柔性基层路面典型结构优化设计研究[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 16-23.