DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.011 文章编号:1671-2579(2025)02-0099-07

松散性半刚性基层沥青混凝土路面改扩建关键技术研究

肖冠成

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司,广东 广州 510440)

摘要:部分早期建设的半刚性基层沥青路面存在基层严重松散状况,当通过验算无机结合料稳定层疲劳寿命来进行路面结构补强的设计方法行不通,同时该类路面扩宽方案受旧路面使用状况、旧路标高抬升、交通组织、路面再生等因素影响,成为改扩建设计中的重难点。为解决松散性半刚性基层沥青混凝土路面改扩建关键技术难题,该文基于深汕西高速公路改扩建项目,通过理论计算及实践验证的方法对该类路面加铺补强及拼宽技术进行研究。结果表明:结合规范要求及路面检测状况,将松散的水稳基层弱化为碎石粒料层,并将既有松散半刚性基层沥青路面简化为沥青结合料类材料层、粒料基层和路基结构体系进行结构补强验算,可得到满足规范要求的路面结构补强方案;针对旧路面不同设计标高抬升工况,需要综合考虑拼宽侧路面方案、施工便利性、交通组织等因素,制定差异化路面调平方案;路面扩宽方案需要综合考虑项目交通组织、交通分布、路面再生等因素,并通过设置台阶、枕梁、玻纤格栅等措施提高该类松散性基层沥青路面的拼接质量。深汕西改扩建一期工程路面已交工验收2年,目前路面使用状况良好,表明相关路面改扩建技术方案是可行的,相关经验可供类似项目参考。

关键词:松散性半刚性基层;路面改扩建;关键技术

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A

Research on Key Technologies for Reconstruction and Expansion of Loose Semi-Rigid Base Asphalt Concrete Pavement

XIAO Guancheng

(Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510440, China)

Abstract: Some early-constructed semi-rigid base asphalt concrete pavements have severe looseness in the base layer, which makes it impractical to evaluate the fatigue life of the inorganic binder-stabilized layer for pavement reinforcement under these conditions. This kind of pavement widening project is affected by the condition of the existing pavement condition, raised elevation, traffic management, pavement regeneration, and other factors. Consequently, such projects pose significant challenges in reconstruction and expansion design. To address the key technical issues in reconstructing and expanding loose semi-rigid base asphalt concrete pavements, this article focused on the Shenzhen–Shanwei West Expressway reconstruction and expansion project. Pavement overlay strengthening and widening techniques were studied through theoretical calculation and practical validation. The results show that by complying with relevant standards and considering pavement condition, the loose cement-stabilized base layer is treated as an unbound aggregate layer, and loose semi-rigid base asphalt pavement is simplified into a layered system comprising asphalt-bound material layer, an aggregate base layer, and the subgrade. A pavement structure reinforcement solution that meets regulatory standards is obtained. For scenarios involving different raised elevations of the existing pavement, factors such as split-width pavement scheme, construction feasibility, and traffic management are considered to obtain tailored pavement levelling solutions. For widening pavement, factors such as project traffic management, traffic distribution, and pavement regeneration need to be considered, and techniques such as step construction, body

收稿日期:2024-07-15(修改稿)

基金项目:广东省科技计划项目(编号:2021B1111610002)

作者简介:肖冠成,男,硕士,工程师.E-mail:809056319@qq.com

bolsters, and glass fiber grilles can be applied to enhance the quality of joints in loose base asphalt pavements. The first-stage project of the Shenzhen–Shanwei West Expressway reconstruction and expansion was completed two years ago, and the pavement remains in good condition. The results confirm the effectiveness of the proposed pavement reconstruction and extension solution, offering insights and references for similar projects.

Keywords: loose semi-rigid base; pavement construction and expansion; key technique

0 引言

沈阳至海口国家高速公路汕尾陆丰至深圳龙岗段(以下简称深汕西高速)是国家高速公路网规划“2纵”G15沈阳至海口国家高速公路的一段,同时也是广东省“十纵五横两环”高速公路主骨架中第五条横线的一段,是联系粤东地区与珠三角核心区的交通大动脉。现状道路为双向四车道,路基宽度24.5 m,其中硬路肩宽2.5 m,设计速度100 km/h,随着沿线经济发展交通量增长迅速,2017年路段平均交通量已达到37 599 pcu/d,趋于饱和拥堵,亟须进行改扩建以提高道路通行能力及服务水平。项目改扩建起点位于陆丰潭西镇,对接深汕东高速,路线向西途经汕尾市、深汕合作区、惠州市、深圳市,终点接惠盐高速,路线全长146.550 km,采用120 km/h(局部采用100 km/h)双向八车道高速公路技术标准,改扩建整体式路基宽42 m。

1 路面使用状况检测

1.1 旧路路面结构

深汕西高速于1996年建成通车,2008年进行路面大修,加铺两层沥青混凝土,现状路面结构如表1所示。

表1 现状行车道路面结构

Table 1 Pavement structure of existing carriageway

项目	行车道路面结构
2008年大修加铺路面	上面层:5 cm AC-16(改性)
	中面层:8 cm AC-25C(改性)
1996年建设路面	上面层:3 cm沥青抗滑层
	中面层:5 cm中粒式沥青混凝土
	下面层:6 cm热拌沥青碎石
	基层:28 cm水泥稳定碎石
	垫层:38 cm砂砾碎石

1.2 路面检测要点及结果

1.2.1 常规检测指标

(1) 路面厚度。通过雷达无损检测路面结构厚度,并取芯进行验证,现状路面结构与竣工图一致,全线取芯138个,基层芯样完好率仅为5.5%,现状水稳基层较松散,进一步通过硬路肩开槽(长×宽=2.5 m×1.5 m)验证水稳基层状况,结果表明:现状路面水稳基层松散严重。

(2) 路面破损。路面行车道I_{PCI}评定均为优良,主要病害横向裂缝占比约80%,次要病害纵向裂缝占比约6%。为进一步掌握典型病害发展情况,对典型裂缝处进行取芯调查。结果表明:沥青各层黏结相对紧密,但部分结构层存在松散现象;轻度横向裂缝芯样裂缝呈自上而下的发展趋势,裂缝未贯穿沥青层,判断为收缩裂缝或疲劳裂缝;重度横向裂缝、纵缝处裂缝贯穿沥青层,水稳基层碎裂,裂缝下宽上窄,判断为因基层损坏而产生的结构性裂缝。

(3) 弯沉检测。对上、下行行车道按1点/20 m的频率进行FWD落锤动态弯沉检测,道路总体结构强度均为“优良”。

(4) 车辙检测。全线车辙深度均值为3.95 mm,评定等级为“优”,现状路面车辙指标良好。

(5) 脱空检测。采用路面雷达对项目基层进行脱空检测,结果表明:基层脱空率约为7%,基层未出现大面积脱空状况。

1.2.2 路面力学性能指标

(1) 沥青混合料模量

试验芯样抗压回弹模量值为961~1 732 MPa,总体模量值偏低,表明沥青层经过多年使用,性能存在一定程度老化衰减。

(2) 水稳基层模量

根据FWD落锤动态弯沉检测结果,利用弯沉盆对水稳基层模量进行反算,模量平均值为695 MPa。

(3) 沥青混合料油石比

切割部分完好的沥青路面芯样进行抽提试验发现,2008年大修期加铺的上、中面层沥青混合料油石比分别为4.7%、3.9%;1996年建设期上、中、下面层沥青混合料油石比分别为4.5%、4.2%、4.1%;现状路面总体油石比偏小,存在沥青老化脱落情况。

(4) 沥青混合料级配情况

按混合料类型进行筛分试验,矿料级配除个别

筛孔质量通过率超出级配范围外，各结构层沥青混合料基本符合现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)矿料级配范围要求。

1.2.3　路基状况、路面排水状况

对路基取芯8处测定路基湿度，发现均为“中湿”状态；现状路基回弹模量平均值为35 MPa，现状路面排水状况良好，无唧浆现象。

2　旧路行车道加铺补强设计研究

2.1　规范相关规定

对于改建路面加铺补强设计，根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中第7.4.3条，对破损不严重且结构性能较好的既有路面，采用直接加铺方案或铣刨至某一结构层再加铺方案，同时对既有路面结构层和加铺层进行结构验算，将既有路面简化为由沥青结合料类材料层、无机结合料稳定层或粒料层和路基组成的三层体系，并利用弯沉盆反演或芯样实测的方法确定各层结构模量[1]。

2.2　深汕西高速路面结构补强计算模型

根据检测数据，现状沥青面层虽存在一定程度老化，但破损指标良好；现状路面基层松散较严重，但经2008年大修后路面弯沉指标均评定为“优”“良”，路床湿度、模量均符合要求，路面排水状况、脱空指标均较好，未出现结构性破坏。因此，拟对现状路面进行适当病害修复后予以利用，并结合设计年限内交通轴载对现状路面进行补强设计。

深汕西高速行车道现状路面结构为：5 cm AC-16C(改性)＋8 cm AC-25C(改性)＋14 cm建设期沥青混凝土＋28 cm水泥稳定碎石基层＋38 cm砂砾碎石垫层。对于基层为无机结合料稳定类的沥青路面，根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)(以下简称规范)第6.2.1条验算无机结合料稳定层层底拉应力，由于旧路水稳基层严重松散弯拉强度极低无法测定，因而无法通过验算无机结合料稳定层疲劳寿命进行路面结构补强设计。因此，结合规范及项目实际情况，将旧路水稳基层弱化为碎石层后进行路面结构补强计算，按《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)第7.4.3条将旧路简化为27 cm沥青结合料类材料层(现状27 cm沥青混凝土)＋66 cm碎石粒料层(28 cm松散水泥稳定碎石基层简化为粒料碎石层＋38 cm砂砾碎石层)＋路基组成的结构体系，并按《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)第6.2.1条对粒料类基层沥青混凝土路面的层底拉应变、沥青混合料层永久变形量、路基顶面竖向压应变3项指标进行验算，各计算参数取值如表2所示。

表2　路面结构材料参数

Table 2　Material parameters of pavement structure

序号	路面材料名称	厚度/mm	模量/MPa	泊松比	混合料永久变形量/mm
1	细粒式沥青玛蹄脂碎石(新加铺)	40	12 000	0.25	1.4
2	中粒式沥青混凝土(新加铺)	60	11 000	0.25	1.5
3	现状沥青路面(沥青类)	270	7 500	0.25	—
4	现状28 cm松散水稳碎石层(简化为粒料类)	280	695	0.35	
5	38 cm砂砾碎石层(粒料类)	380	190	0.35	
6	原路路基		35	0.40	

2.3　计算结果及加铺方案拟定

深汕西高速沥青混凝土路面设计使用年限15年，初始年主道大型客车和货车交通量为7 355辆/d，交通量年增长率γ为4.1%，主道设计使用年限内设计车道累计大型客车和货车交通量为1.34×10^7辆，属重交通等级。

采用HPDS 2017对现状路面进行结构补强验算，结果表明：如旧路加铺10 cm沥青层，沥青混合料层疲劳开裂寿命$N_{F1}=3.36\times10^7$轴次，设计使用年限内设计车道上的当量设计轴载累计作用次数$N_{ZB1}=3.34\times10^7$轴次；通车至首次针对车辙维修的期限内设计车道上的当量设计轴载累计作用次数$N_{ZB3}=2.5\times10^7$轴次，沥青混合料层永久变形量$D_{RA}=14.93$ mm；路基顶面竖向压应变$\varepsilon=87\times10^{-6}$，路基顶面容许竖向压应变$E_{ZR}=176\times10^{-6}$，沥青混合料层疲劳开裂寿命、沥青混合料层永久变形量、路基顶面竖向压应变均已满足规范指标要求。

根据上述计算，旧路至少加铺10 cm沥青层进行结构补强，根据路面结构组合设计，旧路面采用处治病害后直接加铺两层沥青面层方案：4 cm SMA-13和6 cm AC-20C(改性)。

2.4　旧路面加铺调平设计

深汕西高速建设期设计速度为100 km/h，受沿线通道净高抬升以及提速至120 km/h后纵断面调坡影响，局部路段设计标高较现状路面抬升较多。对于旧路加铺设计路面调坡方案，根据不同纵断面抬高值，结合拼宽侧路面方案、施工便利性、交通组

织等因素进行综合考虑，再根据不同工况采用沥青混凝土、水泥稳定碎石、碎石进行调平。深汕西高速路面加铺调坡方案如表3所示，旧路加铺调坡方案示意如图1所示。

表3 旧路加铺设计路面调坡方案

Table 3 Pavement slope adjustment plan for existing pavement overlay

序号	不同设计标高抬升值Δ*h*(cm)时的路面调坡方案					
	5≤Δ*h*<14	14≤Δ*h*<22	22≤Δ*h*<28	28≤Δ*h*<66	66≤Δ*h*<86	Δ*h*≥86
1	4 cm SMA-13	4 cm SMA-13	4 cm SMA-13	4 cm SMA-13	4 cm SMA-13	4 cm SMA-13
2	6～10 cm AC-20C	6 cm AC-20C	6 cm AC-20C	6 cm AC-20C	6 cm AC-20C	6 cm AC-20C
3	局部铣刨旧路面	8～10 cm AC-25C	8 cm AC-25C	8 cm AC-25C	8 cm AC-25C	8 cm AC-25C
4		局部铣刨旧路面	8～10 cm ATB-25	10 cm ATB-25	10 cm ATB-25	10 cm ATB-25
5			局部铣刨旧路面	15～38 cm水稳基层	19 cm水稳基层	19 cm水稳基层
6				局部铣刨旧路面	19 cm水稳基层	19 cm水稳层层
7					15～20 cm水稳底基层	20 cm水稳底基层
8					局部铣刨旧路面	*h* cm碎石垫层

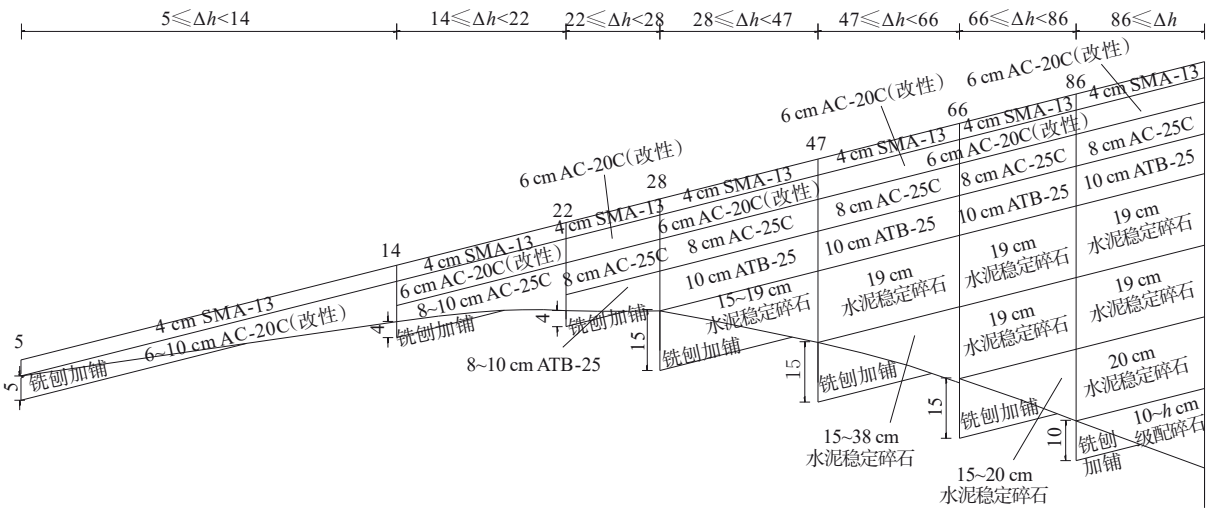

图1 旧路加铺调坡示意图(单位：cm)

Figure 1 Slope adjustment plan for existing pavement overlay (unit: cm)

3 旧路面扩宽关键技术

3.1 扩宽侧路面结构层的拟定

现状路面为半刚性基层沥青路面，拼宽侧结构组合设计需要综合考虑与旧路加铺结构层对应、扩宽侧路面交通状况、现状旧路沥青废料回收利用、交通组织等因素，且需要采取针对性措施提高松散性基层路面的拼接质量。

3.1.1 与旧路调平方案对应性

对于现状路面纵坡调整抬升段落，扩宽侧路面结构需要考虑尽量与旧路加铺的结构层一致，对于高于现状路面标高的扩宽侧路面结构，除调平层外，其余路面结构材料及厚度应与旧路加铺层对应一致，确保路面结构整体性。

3.1.2 结构耐久性

现状路面为双向四车道，深汕西高速旧路利用段以维持中线不动双侧扩宽为主，拼宽路面位于改扩建后第三、第四重车道，重车比例高、累计轴载作用次数多。基于长寿命路面设计理念，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，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，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[2-4]。因此，对于扩宽侧路面结构，在传统沥青下面层下方设置12 cm冷再生沥青混凝土或10 cm ATB-25，这样有利于提升结构强度，减缓水稳基层收缩性裂缝，提高路面结构使用耐久性。

3.1.3　路面废料利用

深汕西高速路面已运营二十余年,旧路病害处治沥青铣刨旧料较多,若将废料弃置会产生较大的能源浪费与环境污染,乳化沥青冷再生工艺可有效节约材料和能源,提升施工效率,增强沥青路面的工程力学稳定性,减少空气污染与噪声污染[5-7]。拟将旧路沥青废料厂拌冷再生后用于扩宽道路的柔性基层,既避免了资源浪费,又节约造价成本。

3.1.4　与交通组织的密切联系

扩宽侧路面结构的设置应与交通组织紧密结合,施工时旧路仍需要保证双向四车道通行,为避免新旧路面拼接位置出现冷接缝,影响路面使用质量[8],扩宽后半幅道路路面中上面层整体摊铺、碾压实施。交通组织分为三阶段实施:第一阶段,两侧道路拼宽施工路基路面至扩宽侧路面下面层;第二阶段,交通整体导改至已扩宽实施完下面层的右幅道路(保通侧)双四保通,左幅道路(非保通侧)新旧路面整体实施至中上面层;第三阶段,交通整体导改至已实施完中上面层的左幅道路,右幅路面整体实施中上面层。为提高临时保通路面的行驶质量,交通组织第二阶段右幅道路扩宽侧(保通侧)利用下面层进行临时保通,采用10 cm ATB-25柔性基层与8 cm AC-20C(改性)下面层进行临时保通,左幅道路扩宽侧(非保通侧)无临时通车需求,柔性基层与下面层分别采用12 cm厂拌冷再生沥青混凝土与8 cm AC-25(普通)。综合上述因素,现状沥青混凝土路面扩宽侧拟定结构方案如表4所示。

表4　扩宽侧路面结构

Table 4　Pavement structure of widened side

扩宽路面结构(保通侧)	扩宽路面结构(非保通侧)
上面层:4 cm SMA-13	上面层:4 cm SMA-13
中面层:6 cm AC-20C(改性)	中面层:6 cm AC-20C(改性)
下面层:8 cm AC-20C(改性)	下面层:8 cm AC-25C(普通)
柔性基层:10 cm ATB-25	柔性基层:12 cm厂拌冷再生沥青混凝土
下封层	下封层
基层:38 cm 5%～6%水泥稳定碎石	基层:38 cm 5%～6%水泥稳定碎石
底基层:19 cm 4%～5%水泥稳定碎石	底基层:19 cm 4%～5%水泥稳定碎石
垫层:18 cm级配碎石	垫层:18 cm级配碎石

3.2　扩宽侧路面拼接技术

新旧路面拼宽关键在于加强新旧路面结合处治,减少拼接处纵向裂缝。对于松散型半刚性基层沥青路面扩宽拼接,通过优化拼接缝位置、设置台阶、设置土工格栅、枕梁等综合措施提高新旧路面拼接质量。

3.2.1　拼接缝避开轮迹带

剪切疲劳破坏是拼接纵向裂缝产生的根本原因,尤其当位于轮迹带位置且重车较多时[9]。新旧路面拼接存在3个不利位置,分别是顶层接缝位置左侧、右侧0～50 cm区域以及第二道拼接缝左侧0～50 cm区域,新旧路面的拼接缝应尽量避开并远离改建后行车道轮迹带,避免拼接位置长期处于最不利受力位置,产生早期裂缝病害[10-13]。深汕西高速路面拼宽时,原则上应确保最上边3条拼接缝,尤其是基层的拼接缝,与轮迹带至少错开50 cm,避免拼接位置长期处于最不利受力位置,产生早期裂缝病害。

3.2.2　设置台阶

路面结构层拼接方式对拼接面顶部最大剪应力的影响较大,基层拼接台阶的设置形式对结构层底部剪应力的影响也较大。拼宽位置设置台阶后,顶面变形及结构层剪应力均有较大程度减小[14-15]。新旧路在有条件的位置逐层设置台阶并进行搭接,增加新旧路面搭接以保持稳定性,基层台阶搭接宽度按不小于0.20 m控制,面层台阶搭接宽度按不小于0.25 m控制。

3.2.3　土工格栅

行车荷载最不利位置为偏载,在偏载作用下,路面结构反射裂缝类型以剪切型为主要表现形式,路面结构设置玻纤格栅后,可明显延缓反射裂缝的扩展速率[16]。玻纤格栅可提高沥青面层整体抗拉强度,改善路面结构的应力分布情况,有效抵抗和延缓由半刚性基层开裂产生的反射裂缝[17-20]。为延缓拼接缝反射裂缝发展,在基层顶面及新旧路面沥青拼接位置跨缝设置宽1 m的玻纤格栅。

3.2.4　枕梁

深汕西高速路面建于1996年,现场实施过程中发现现状路面水稳层边部较松散,扩宽侧路面基层难以与旧路基层形成有效搭接,为确保新旧路面搭接质量,在现状沥青面层底与拼宽路面水稳上基层底拼接缝下方设置C30混凝土枕梁,枕梁进入新旧路面各20 cm,为保证新旧路面结构排水顺畅,在C30混凝土枕梁下方设置30 cm高透水混凝土,枕梁设置位置及细部构造图分别如图2、3所示,要求透水混凝土抗压强度不小于10 MPa,孔隙率不小

于20%,透水混凝土上方设置反滤土工布。枕梁施工工序主要为测量放样→旧路基层开挖→工作面修整→安装模板→混凝土拌和运料→浇筑→振捣压实→养护。

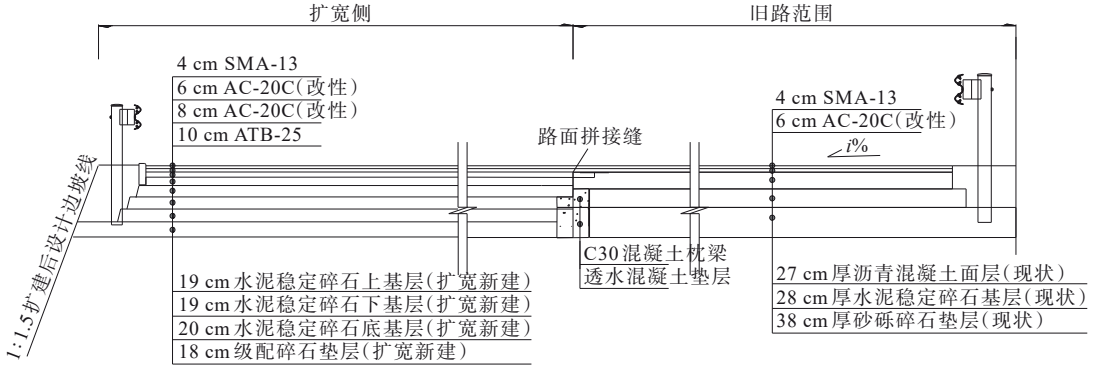

图2 路面拼宽枕梁设置图

Figure 2 Body bolster for pavement widening

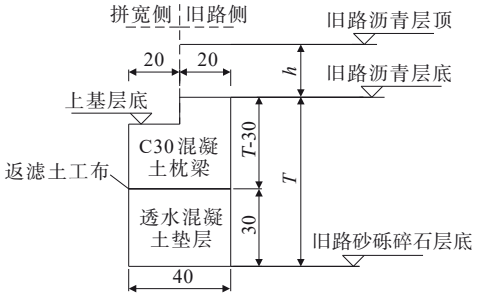

图3 枕梁细部构造图(单位:cm)

Figure 3 Detailed structure of body bolster (unit: cm)

4 结论

本文对松散性半刚性基层沥青路面有针对性地提出了检测要点,通过理论计算和实体工程应用,得出以下结论:

(1)该类路面无法通过验算无机结合料稳定层疲劳寿命来进行路面结构补强设计,结合规范要求及路面检测状况,可将松散的水稳基层弱化为碎石粒料层,将既有半刚性基层沥青路面简化为沥青结合料类材料层、粒料基层和路基3层体系,对粒料类基层沥青路面进行结构补强验算,结果表明各项指标能满足规范要求,该方法是可行的。

(2)对于不同设计标高抬升工况,除调平层外,旧路面加铺结构应尽量与拼宽侧一致,结合拼宽侧路面结构组合及施工厚度要求,视情况采用沥青混凝土、水泥稳定碎石、碎石层材料差异化调平方案。

(3)应综合考虑旧路加铺结构层、交通分布状况、旧路沥青废料利用、交通组织等因素,确定路面拼宽结构。扩宽侧其余路面结构材料及厚度应尽量与旧路加铺层对应一致,确保路面结构整体性。扩宽侧路面重车比例大,可通过设置柔性基层适当提高路面结构强度,保通侧采用10 cm ATB-25柔性基层与8 cm AC-20C(改性)下面层进行临时保通,非保通侧柔性基层与下面层分别采用12 cm厂拌冷再生沥青混凝土与8 cm AC-25(普通)。

(4)对于松散性半刚性基层沥青路面的拼接,确保最上边3条拼接缝,尤其是基层拼接缝应尽量与轮迹带错开至少50 cm,新旧沥青面层可设置台阶分层搭接,如旧路面基层松散无法设置台阶与扩宽侧路面基层形成有效搭接,可在新旧路面基层下方设置混凝土枕梁提高路面拼接质量,跨缝可设置玻纤格栅延缓拼接缝发展。

参考文献:

References:

[1] 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.
CCCC Road & Bridge Consultants Co.,Ltd..Specifications for design of highway asphalt pavement:JTG D50—2017[S].Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2017.

[2] 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.
JIANG Songli, DING Shuwei. Case study of designing composite base asphalt pavement structure based on French criterion[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018,38(5): 69-72.

[3] 李雪连,陈鹏,查旭东.沥青稳定+无机结合料稳定组合式基层沥青路面设计综述[J].中外公路,2023,43(5):1-8.
LI Xuelian, CHEN Peng, ZHA Xudong. Review of design for combined base asphalt pavements with asphalt treated base and cement stabilized subbase[J]. Journal of China &

Foreign Highway,2023,43(5): 1-8.

[4] 李清斌.高速公路改扩建工程路面结构及拼接设计研究[J].路基工程,2016(2): 138-142.
LI Qingbin. Study on pavement structure and splicing design of expressway reconstruction and expansion project [J].Subgrade Engineering,2016(2): 138-142.

[5] 常浩.乳化沥青厂拌冷再生技术在路面改造工程中的应用[J].中国公路,2021(13): 95-96.
CHANG Hao. Application of emulsified asphalt cold recycling technology in pavement reconstruction project [J].China Highway,2021(13): 95-96.

[6] 付涛.旧沥青路面冷再生混合料性能研究[J].中外公路,2018,38(6): 263-269.
FU Tao.Research on performance of cold recycled mixture in old asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway,2018,38(6): 263-269.

[7] 刘甲荣,杨伟刚,王凯,等.济青高速公路改扩建路面拼宽技术创新与实践[J].公路交通科技(应用技术版),2019(6): 3-6.
LIU Jiarong, YANG Weigang, WANG Kai, et al. Technical innovation and practice of pavement widening in reconstruction and expansion of Jinan–Qingdao Expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Application Technology Edition), 2019(6): 3-6.

[8] 张雷.改扩建高速公路新旧路面拼接施工技术[J].交通世界,2023(17): 64-66,69.
ZHANG Lei. Construction technology of splicing old and new pavement of reconstruction and expansion expressway[J].TranspoWorld,2023(17): 64-66,69.

[9] 姜正晖.高速公路改扩建沥青路面设计关键问题探析[J].中外公路,2020,40(4): 58-61.
JIANG Zhenghui. Analysis on key problems of asphalt pavement design for highway reconstruction and expansion[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 58-61.

[10] 闫亚鹏,谢晓军,柯文豪.机荷高速公路改扩建路面拼接设计要点研究[J].公路,2023,68(12): 66-70.
YAN Yapeng, XIE Xiaojun, KE Wenhao. Research on key points of pavement splicing design for reconstruction and expansion of Jihe Expressway[J]. Highway, 2023, 68(12): 66-70.

[11] 南秋彩.道路改扩建工程中新老路面拼接受力状态的数值模拟[J].公路工程,2018,43(6): 278-282.
NAN Qiucai. Numerical simulation of jointing state of new and old pavement in road reconstruction and expansion project[J]. Highway Engineering, 2018, 43(6): 278-282.

[12] 韩飞飞.改扩建高速公路拼接位置路面纵缝成因分析及预防措施[J].交通世界,2024(4):45-47.
HAN Feifei. Cause analysis and preventive measures of pavement longitudinal joint at splicing position of reconstruction and expansion expressway[J]. TranspoWorld, 2024(4):45-47.

[13] 程宇飞,孔军.基于客货分行模式的乌奎高速公路改扩建路面研究[J].公路,2021,66(10): 84-89.
CHENG Yufei, KONG Jun. Study on pavement reconstruction and extension of Urumqi–Kuitun Expressway based on passenger and freight branch mode[J].Highway, 2021,66(10): 84-89.

[14] 万瑞,张峻伟,张婷.路基路面拼接施工技术在高速公路改扩建中的应用[J].公路,2021,66(2): 351-357.
WAN Rui, ZHANG Junwei, ZHANG Ting. Application of subgrade and pavement splicing construction technology in expressway reconstruction and extension[J]. Highway, 2021,66(2): 351-357.

[15] 崔冬艳.高速公路改扩建沥青路面拼接施工技术分析[J].中国公路,2018(18): 116-117.
CUI Dongyan. Analysis on splicing construction technology of asphalt pavement in expressway reconstruction and expansion[J].China Highway,2018(18): 116-117.

[16] 杨小康.玻纤格栅防治沥青路面反射裂缝的机理与力学响应分析[J].交通世界,2020(23): 27-28,31.
YANG Xiaokang. Mechanism and mechanical response analysis of glass fiber grating to prevent reflection cracks on asphalt pavement[J]. TranspoWorld, 2020(23): 27-28,31.

[17] 孙文圃,白雨瓒,张洪亮.交通荷载作用下玻纤格栅对反射裂缝扩展的影响[J].公路与汽运,2019(6): 83-87.
SUN Wenpu,BAI Yuzan,ZHANG Hongliang. Influence of glass fiber grating on reflection crack propagation under traffic load[J].Highways & Automotive Applications,2019(6): 83-87.

[18] 卢新兵.玻纤格栅在沥青路面防裂中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(1): 29-31.
LU Xinbing. Application of glass fiber grating in asphalt pavement crack prevention[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Application Technology Edition),2017,13(1): 29-31.

[19] 杨三强,李鹏飞,刘璐,等.复合式应力吸收层的性能和动态响应研究[J].中外公路,2023,43(5):27-32.
YANG Sanqiang, LI Pengfei, LIU Lu, et al. Study on performance and dynamic response of composite stress absorber layer[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023,43(5):27-32.

[20] 张韶波.浅谈高速公路改扩建工程路面新旧结合部受力及处理[J].公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(4): 69-70.
ZHANG Shaobo. On the stress and treatment of the new and old joint of pavement in expressway reconstruction and expansion project[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Application Technology Edition),2016,12(4): 69-70.