

山区高速公路路面结构设计分析

——以重庆渝赤叙高速为例

陈怡唯 詹博文

中铁长江交通设计集团有限公司 重庆 401121

【摘要】：针对重载交通条件下山区高速公路路面结构设计的特殊需求，以重庆某山区高速公路为工程案例，开展路面结构设计分析与施工管理研究。通过现场调研与理论计算相结合的方法，分析了重载交通荷载作用下路面结构的力学响应特征，提出了适用于山区重载交通条件的路面结构组合方案。研究表明，合理的基层厚度与材料强度匹配可有效控制车辙变形，延长路面使用寿命，为类似山区重载交通高速公路建设提供技术参考。

【关键词】：重载交通；山区高速公路；路面结构设计

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.088

1 引言

随着我国西部地区经济的快速发展和物流运输需求的持续增长，山区高速公路日益承担起繁重的交通任务，尤其在资源富集区域，重载车辆比例显著升高。重载交通对路面结构产生的反复高应力作用，极易引发车辙、裂缝等早期病害，严重影响道路使用性能与服役寿命。而山区高速公路受地形地貌限制，纵坡大、弯道多、气候湿热，进一步加剧了路面结构的受力复杂性与施工难度。因此，针对重载交通条件下山区高速公路的特殊环境与荷载特征，开展科学合理的路面结构设计，具有重要的工程价值与现实意义。

2 工程概况

渝赤叙高速公路重庆段起于巴南区百节镇，与在建的五纵线渝南大道D段相接，向南依次跨越绕城高速和东环铁路，途经珞璜工业园南侧，在贾嗣镇附近与三环高速实现互通。随后线路跨过綦江河，沿箭河河谷展线，经过白燕村、紫荆村，并穿紫荆山隧道继续前行，再经嘉平镇、蔡家镇，在蔡家镇区域与江习高速交汇。此后，路线沿茶坝河谷延伸，最终止于中山镇西侧的渝川省界，与四川境内的渝赤叙高速顺畅衔接。

项目重庆境内全长约 64.828 公里。其中起点至三环高速段采用双向六车道标准建设，路基宽 33.5 米；三环高速至省界段则为双向四车道，路基宽 26 米。六车道与四车道之间的过渡通过贾嗣枢纽互通实现。全线桥隧比例约为 40%。

3 山区重载高速公路沥青路面结构设计要求

3.1 承载能力要求

设计要求基于预计的交通量和车辆类型，确保路面结构能够承受荷载并保持稳定。通过合理的层厚设计和材料选择，保证路面的结构强度和刚度，以满足设计寿命内的荷载要求^[1]。

高速公路沥青路面破坏的类型较多，包括沉降、坑槽、车辙及裂缝等^[2]。在重载交通和山区复杂地形双重作用下，路面需具备足够的强度来抵抗车辆荷载产生的应力、应变和变形。

具体表现为：通过合理的结构层厚度组合和材料模量匹配，控制沥青层层底拉应变不超过疲劳极限，防止疲劳开裂；控制基层层底拉应力在允许范围内；确保路基顶面压应变 $\leq 200 \mu \epsilon$ ，防止路基产生过大永久变形；同时需特别关注车辙深度控制，重载交通下要求车辙深度 $\leq 15\text{mm}$ 。设计时需采用多层弹性层状体系理论或有限元法进行力学验算，对标准轴载、重载轴载、温度应力、纵坡附加荷载等多种工况进行综合分析，确保结构在 15 年设计年限内不发生结构性破坏。

3.2 耐久性要求

耐久性要求关注路面在长期使用过程中抵抗环境因素和荷载反复作用的能力，是全寿命周期性能保障的关键。山区重载高速公路面临大温差、多雨、重载等多重考验，耐久性设计需重点考虑：沥青材料需具备良好的抗老化性能，抵抗紫外线、氧气和温度作用导致的性能衰减；面层混合料需具有优异的水稳定性，通过浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验等验证其抗水损害能力，防止水分侵入导致松散、剥落；低温地区需控制低温收缩裂缝，横向裂缝间距宜 $\geq 50\text{m}$ ；同时需考虑融雪剂、油污等化学物质的侵蚀作用。耐久性设计需从材料选择、结构组合、排水系统、施工工艺等多方面综合控制，确保路面在设计年限内保持良好使用状态，减少养护维修频率。

3.3 功能性要求

功能性要求关注路面的使用品质和行车体验，直接关系到交通安全和用户舒适度。山区高速公路弯多坡陡，功能性要求尤为重要：抗滑性能是首要指标，面层构造深度需 $\geq 0.7\text{mm}$ （SMA 面层），确保雨天行车安全，长大下坡路段可适当提高要求；平整度直接影响行车舒适性和车辆油耗，国际平整度指数（IRI）应 $\leq 2.0\text{m/km}$ ；部分靠近居民区的路段可考虑采用多孔降噪路面降低交通噪声；排水功能需满足山区多雨特点，表面排水、结构层内部排水、边缘排水系统需协调设计，防止积水导致水损害。功能性设计需在满足结构承载能力的基础

上,通过材料选择、表面纹理设计、施工工艺控制等手段实现,是提升路面服务水平的重要环节。

3.4 环境适应性要求

环境适应性要求强调路面结构对山区特殊自然条件的适应能力,是确保长期性能稳定的前提。设计需针对性考虑:温度适应性方面,需适应山区大温差,材料选择需兼顾高温抗车辙和低温抗裂性能;寒冷地区需考虑冻融循环影响,基层材料需具备抗冻性,防止冻胀破坏;多雨地区需强化排水设计,提高抗冲刷能力,防止水损害。在高速公路路面施工中,如果防排水措施不足,使得路表水无法有效快速排走,在道路表面就会形成水膜,高速公路上的车辆会以高速通过,在水膜影响下,路面的抗滑性能也会下降,使行驶车辆出现横向滑移的问题^[3];高填方、软基路段需验算沉降变形,必要时采用土工格栅加筋、换填处理等措施;此外还需考虑紫外线辐射、风蚀等特殊环境因素。环境适应性设计需结合当地气象、地质勘察数据,采用“因地制宜”的原则,避免套用标准设计导致性能不足。

4 路面结构方案设计

路面结构层主要是指路面的各个结构铺砌层部分,分析其各层所处的位置与具体的作用,目前高速公路路面结构层主要由面层、基层与垫层组成。路面在长期使用的过程中,会受到车辆荷载的影响,也会受到自然环境的影响,从而导致公路出现各种病害^[4]。

4.1 交通量预测

通过科学研究及分析,本项目的交通量预测结果见表 1,车型比例预测见表 2。

表 1 各特征年车型比例预测

项目	2026 年	2030 年	2035 年	2045 年	2055 年
全线平均	8826	18252	29141	42980	52659
年均增长率	/	15.6%	9.8%	4.4%	2.1%

表 2 车型比例预测

年份	小货	中货	大货	拖挂	集装箱	小客	大客
2026	5.3	4	5	6.3	9.4	66.0	4.0
2030	5	3.5	5.1	6.4	9.5	66.7	3.8
2035	4.6	3.2	5.5	6.4	9.6	67.2	3.5
2045	3.9	2.5	5.9	6.8	9.9	67.8	3.2
2055	3.6	2.3	6.1	6.9	9.9	68.3	2.9

根据交通量 OD 调查分析,本项目断面大型客车和货车交通量为 4609 辆/日,交通量年增长率为 7.5%,方向系数取 55.0%,车道系数取 80.0%。根据交通历史数据,按公路沥青路面设计

规范(JTG D50—2017)表 A.2.6-1 确定该设计公路为 TTC4 类,根据该规范公式(A.4.2)计算得到对应于沥青混合料层永久变形的当量设计轴载累计作用次数为 25,537,370,对应于无机结合料层疲劳开裂的当量设计轴载累计作用次数为 1,813,206,327。本公路设计使用年限内设计车道累计大型客车和货车交通量为 8,152,023,交通等级属于重交通。

4.2 路面结构设计

根据本项目的交通荷载等级及重庆山区高速公路地方特点,本项目路面结构见图 1 及图 2。

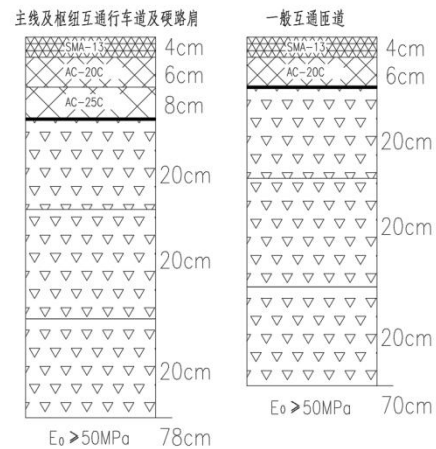


图 1 路面结构设计 1

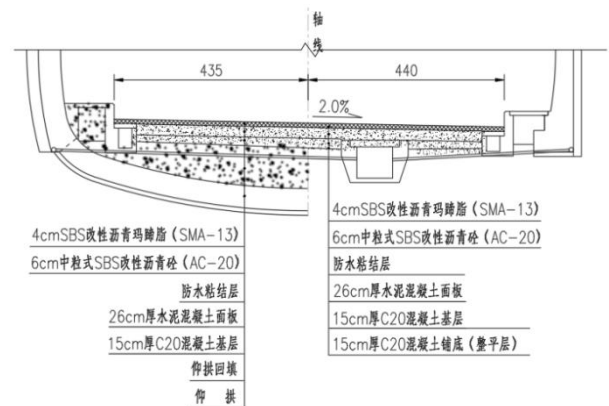


图 2 路面结构设计 2

(1) 主线及枢纽互通路面:

4 厘米 SBS 改性沥青玛蹄脂 SMA-13+6 厘米 SBS 改性 AC-20C+8 厘米 AC-25C+0.6 厘米(等效厚度)改性沥青同步碎石封层+20 厘米水泥稳定碎石上基层+20 厘米水泥稳定碎石下基层+20 厘米水泥稳定碎石底基层。沥青面层之间设改性乳化沥青粘层,基层顶面设乳化沥青透层。路面总厚度 78cm。

(2) 匝道路面:

4 厘米 SBS 改性沥青玛蹄脂 SMA-13+6 厘米 SBS 改性

AC-20C+0.6 厘米(等效厚度)改性沥青同步碎石封层+20 厘米水泥稳定碎石上基层+20 厘米水泥稳定碎石下基层+20 厘米水泥稳定碎石底基层。沥青面层之间设改性乳化沥青粘层,基层顶面设乳化沥青透层。路面总厚度 70cm。

(3) 桥面铺装:

桥梁铺装设计的原则是保持行车的舒适性、与邻近路面结构相容性和施工便利性。主线、陡坡和隧道路面结构均采用沥青混凝土路面,因此该项目桥梁铺装也采用沥青混凝土桥面铺装^[5]。

4 厘米 SBS 改性沥青玛蹄脂 SMA-13+6 厘米 SBS 改性 AC-20C+GS- I 溶剂型粘结剂防水涂层+混凝土调平层。沥青面层间设改性乳化沥青粘层。水泥混凝土调平层须做抛丸处理。

(4) 隧道路面

隧道路面采用复合式路面结构:4cm 温拌阻燃细粒式改性沥青玛蹄脂 SMA-13 上面层+6cm 温拌中粒式改性沥青混凝土 AC-20C 下面层+26cm 水泥混凝土面板+15cmC20 混凝土基层+15cm C20 素混凝土调平层(无仰拱时)。

根据表 G.1.2, 基准等效温度 T_{ξ} 为 23.6℃, 由式 (G.2.1) 计算得到沥青混合料层永久变形等效温度为 26.5℃。可靠度系数为 1.65。

4.3 路面结构计算

沥青混合料表面裂缝及轮迹带车辙累积发展必然造成柔性路面结构性病害^[6]。

根据公路沥青路面设计规范(JTG D50—2017)B.3.1 条规定的分层方法,将沥青混合料层分为 7 个分层。利用弹性层状体系理论,分别计算设计荷载作用下各分层顶部的竖向压应力 (P_i)。根据式 (B.3.2-3) 和式 (B.3.2-4), 计算得到 $d_1=-4.15$, $d_2=0.66$ 。把 d_1 和 d_2 的计算结果带入式 (B.3.2-2), 可得到各分层的永久变形修正系数(kR_i), 并进而利用式 (B.3.2-1) 计算各分层永久变形量(R_{ai})。各层永久变形累加得到沥青混合料层总永久变形量 $R_a=15.0(\text{mm})$, 根据公路沥青路面设计规范(JTG D50—2017)表 3.0.6-1, 沥青层容许永久变形为 15.0(mm), 拟

定的路面结构满足要求。

根据弹性层状体系理论,计算得到无机结合料层层底拉应力为 0.107MPa。根据气象资料,工程所在地区冻结指数 F 为 $0.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$, 按照表 B.1.1, 季节性冻土地区调整系数 k_a 取 1.00。根据式 (B.2.1-2), 现场综合修正系数为-1.433 根据工程所在地区,查表 G.1.2 得到基准路面结构温度调整系数为 1.46, 根据初拟路面结构和路面结构层材料参数,按式 (G.1.3-1) 计算得到温度调整系数 k_{T2} 为 1.28。由表 B.2.1-1, 对于无机结合料稳定粒料, 疲劳开裂模型参数 $a=13.24$, $b=12.52$ 。弯拉强度为 1.8MPa。根据以上参数,按式 (B.2.1-1) 计算得到无机结合料层底疲劳寿命为 10,406,512,041 满足要求。

公路所在地区月平均气温大于 0°C 的月份数为 12 个月,由此得到对应于贯入强度验算的设计车道累计设计轴载作用次数 N_{e5} 为 25,537,370。所在地区月平均气温大于 0°C 的各月份气温平均值为 18.4°C 。根据公路等级,参照表 3.0.6-1, 得到沥青混合料层容许永久变形量为 15.0mm。路面结构系数根据式 (5.5.8-2) 计算为 1.10, 沥青混合料层的综合贯入强度由式 (5.5.8-3) 确定为 0.95MPa, 根据式 (5.5.8-1), 得到沥青混合料层的贯入强度要求值为 0.69, 所以, 拟定的路面结构和材料满足贯入强度要求。

经计算,本山区重载交通高速公路项目的路面结构设计各参数指标均满足规范要求。

5 结论

本文针对山区重载高速公路沥青路面结构设计展开研究,通过结合具体工程案例,详细阐述了在复杂地形与重载交通耦合作用下路面结构的设计要求与关键技术对策。研究基于层位理论,提出了兼顾高强度、抗车辙与耐久性的路面结构组合方案,并进行了路面结构验算,确保了设计方案在控制车辙变形、无机结合料层底疲劳寿命和沥青贯入强度等关键指标上的有效性。结果表明,通过优化材料参数、合理确定各结构层厚度并加强层间粘结措施,能显著提升路面在重载条件下的路面使用性能。本研究为类似山区重载交通环境下的沥青路面设计与施工提供了有价值的理论依据和实践参考。

参考文献:

- [1] 刘家祥.高速公路半刚性基层沥青路面结构设计分析[J].运输经理世界,2023,(21):34-36.
- [2] 龚照东.高速公路沥青路面破坏原因与处理方案[J].交通世界,2020,(08):89-90.
- [3] 杜永盛.高速公路路面施工中的防排水策略探究[J].建筑技术开发,2019,46(05):33-34.
- [4] 俞记生,程淑薇.高速公路路面机构设计研究[J].交通世界, 2019,(36):46-47.
- [5] 刘佳涛.重载交通高速公路路面设计方案研究[J].建筑技术,2023,54(06):707-710.
- [6] 孙晓春.高速公路永久性沥青路面结构的设计及应用[J].交通世界,2023,(29):83-85.