

高温多雨区半刚性基层长寿命沥青路面设计

左贵强, 朱晓东, 何选, 张兴宇, 邬俊

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300074)

摘要:我国已建成较为完备的公路体系和城市路网。新的道路建设需要在保证质量的基础上逐步实现道路的绿色可持续发展。现依托重庆地区某沿江城市道路改建工程,在旧路病害调研的基础上,根据当地工程建设经验,借鉴国外长寿命路面设计理论,参考公路和城镇道路相关设计规范,采用路面结构批处理分析技术和有限单元数值模拟方法,提出适宜于高温多雨区的城市道路长寿命沥青路面结构。其研究成果对于相同气候地区的城市道路建设具有一定的参考价值。

关键词:长寿命沥青路面;高温多雨区;半刚性基层;有限单元;路面结构处理

中图分类号:U416.217

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2022)05-0069-05

0 引言

我国道路建设经过二十余年的高速发展,已建成较为完备的公路体系和城市路网。新的道路建设需要在保证质量的基础上逐步实现道路的绿色可持续发展。传统的沥青路面设计使用寿命一般为10~15 a,通常路面在使用8~10 a后进行中修,15 a后达到设计寿命进行改建。

长寿命沥青路面(Long-Life Asphalt Pavement, LLAP)或永久性路面(Perpetual Pavement, PP)的设计理念由欧美提出,是指路面设计寿命超过30 a,在使用年限内无结构性的修复或重建,仅需根据表面损坏状况进行周期性的修复^[1]。2020年8月中国公路学会设立“长寿命路面奖”,要求路面使用25 a,道路状况良好,且罩面间隔应不小于10 a。

相较于传统路面,长寿路面的初期投资较高,但寿命周期内养护成本相对较低,对通行影响较小,从而能够最大限度地提高道路全寿命周期的经济社会综合效益。

长寿命路面设计的根本理念是实现路面损坏模式的转变,即从“自下而上”的损坏转变为“自上而下”。长寿路面的理论基础是沥青混合料的疲劳极限^[2]。当荷载小于某一阈值时,沥青混合料不会发生疲劳破坏,这一阈值即为沥青混合料的疲劳极限。与普通的沥青路面相比,长寿命沥青路面的路面总厚

度较大,使得沥青层底的弯拉应变小于材料的疲劳极限,从而消除沥青层底的弯拉疲劳破坏,损坏只发生在道路表面。通过周期性养护修复路表破损路面,从而实现长寿命的设计理念。

长寿命路面设计方法主要建立在欧美国家六十余年的公路工程实践和理论研究的基础上,以最小路面厚度或柔性路面沥青层底拉应变为设计指标^[3]。我国研究人员结合国内公路建设实际情况,在材料疲劳特性^[4,5]、路面设计方法^[6-8]等方面开展研究,并在滨大高速、蓬莱高速、沪宁高速等建设项目中开展工程应用,取得良好效果。

目前针对我国城市道路特点的长寿命路面设计和工程应用较少。现依托重庆地区某沿江城市道路改建工程,在旧路病害调研的基础上,根据当地工程建设经验,借鉴国外长寿命路面设计理论,参考公路和城镇道路相关设计规范,采用路面结构批处理分析技术和有限单元数值模拟方法,提出适宜于高温多雨区的城市道路长寿命沥青路面结构。其研究成果对于相同气候地区的城市道路建设具有一定的参考价值。

1 依托工程

依托工程位于重庆市某沿江路段,原道路为半刚性结构沥青路面,已使用10 a,部分地段破损严重。课题组采用落锤式弯沉仪(FWD)对原路面结构强度进行检测,结合现场观测情况判断病害主要成因。

测试道路长6 068 m,分左右两幅分别测试,每100 m一个测点,部分路段由于施工无法测试,共计测点114个。图1统计了不同弯沉值出现的频次,例

收稿日期:2121-12-06

作者简介:左贵强(1983—),男,硕士,副院长,从事公路、市政道路设计及管理工作。

如:右幅弯沉值小于10的测点有12个,弯沉值介于10~20的测点有7个。图中曲线是小于某一弯沉值的累积占比。由曲线可知,左右幅路90%路段弯沉值小于50,表明原有道路多数路段承载力良好,表明道路整体结构良好。

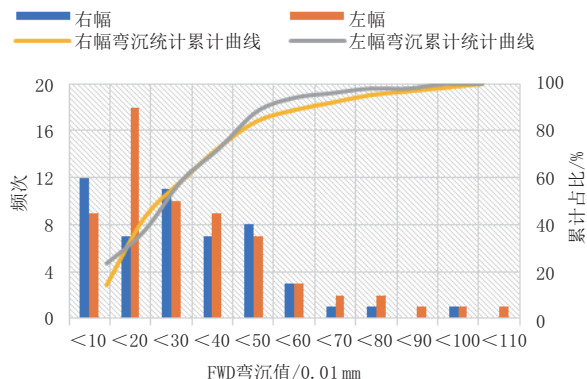


图1 弯沉测试统计柱状图

通过观察对比弯沉严重路段的现场照片（见图2）可知,这些路段的路面状况破损严重,呈现网状龟裂,结合地形判断属于排水不畅导致的路基承载力不足引起的结构型破坏。



图2 旧路 FWD 测试现场之实景

2 结构形式与设计指标选取

2.1 长寿命路面结构形式选取

国外长寿命沥青路面设计理论只适用于柔性路面结构,而我国采用半刚性路面结构以减少沥青层厚度。根据FWD测试 results 和重庆地区的工程建设经验,半刚性基层沥青路面在该地区使用效果较好,很少发生反射裂缝,因此将半刚性基层沥青路面也作为长寿命路面的初选方案。

研究选择了典型柔性和半刚性沥青路面结构,分析结构应力分布特点,图3和图4分别展示了典型半刚性和柔性结构道路横断面(XZ截面)沿行车方向(Y方向)的应力分布,表明在沥青层相对较薄的情况下,半刚性基层能够消除沥青层底拉应力,提

高沥青层自身的疲劳寿命。结合当地工程建设经验,建议采用半刚性结构形式。

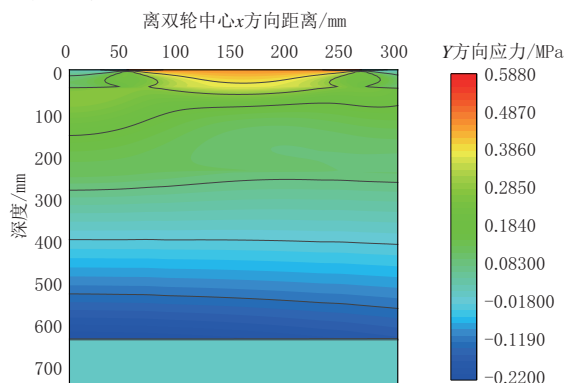


图3 典型半刚性沥青路面结构 XZ 截面 Y 方向应力分布图

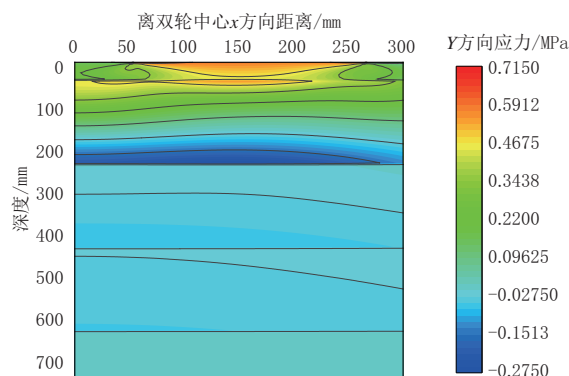


图4 典型柔性沥青路面结构 XZ 截面 Y 方向应力分布图

2.2 长寿命路面结构形式选取

《城镇道路路面设计规范》^[9]中沥青路面的设计指标是弯沉和半刚性基层底部拉应力。《公路沥青路面设计规范》^[10]根据路面结构形式不同,最多有5个设计指标,但不再以弯沉为设计指标;对于半刚性基层沥青路面,采用无机结合料层底拉应力作为控制指标,验算疲劳寿命。该验算指标并不能控制半刚性基层由于环境因素导致的裂缝。因此,对于无机结合料温缩干缩开裂目前尚无较好的评价方法。然而,通过重庆地区路面结构和病害调研发现,该地区的半刚性基层反射裂缝病害非常少,主要原因可能是由于高温多雨的气候环境不具备诱发半刚性材料干缩、温缩开裂的条件。

因此,鉴于该地区的情况,将半刚性基层沥青路面也纳入长寿命沥青路面结构体系中,取设计寿命30a,按照《公路沥青路面设计规范》验算半刚性基层疲劳寿命,同时建议无机结合料层的水泥参量不超过3.5%。

3 结构寿命验算

目前路面结构设计方法首先提出假定路面结构,然后验算各项技术指标。由于城市道路荷载情况

变化较多,且各因素之间相互影响,为准确分析各种因素之间相互影响,该项目通过二次开发的路面分析工具,批量分析路面结构组合,初拟路面结构、设计参数和主要考虑因素见表 1 所列,总计路面结构组合个数 24 000 个。

表 1 初拟半刚性透水长寿命沥青路面结构组合一览表

结构层	材料类型	厚度选取 /cm	模量选取 /MPa	备注
上面层	PA-13	4	200、400、800、1 600、3 200	荷载频率、材料组成对模量的影响
中面层	高模量 HMA	6、8	1 000、2 000、4 000、8 000、16 000	
下面层	ATB	8、12、16	800、1 600、3 200、6 400	
上基层	水稳碎石	20	6 000、8 000、10 000、12 000	水泥剂量对模量的影响
下基层	水稳碎石	20、25	6 000、8 000、10 000、12 000	
路基	土		10、30、50、70、90	干湿状态对模量的影响
合计结构组合数量:2 4000				

半刚性基层的疲劳寿命是决定该类型长寿命路面设计的主要指标,由于设计中采用了不同的模量值,依据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)提供的强度与模量对应关系(见表 2)和疲劳方程,结合结构分析计算得到的半刚性基层底部最大拉应力可以计算各拟定路面结构的疲劳寿命。

表 2 不同模量半刚性材料弯拉强度取值一览表

模量 /MPa	弯拉强度 /MPa
6 000	0.889 5
8 000	1.181 5
10 000	1.473 5
12 000	1.765 5

采用 30 a 设计年限,道路的累计标准轴载为 2 亿次。考虑到城市道路交通荷载相对较轻,该取值趋向保守,因此取 2 亿次为该项目长寿命路面结构寿命的阈值。图 5 统计了拟定的半刚性基层沥青路面的路面结构寿命,约 3 000 组结构组合寿命大于该阈值。

实践经验表明,半刚性沥青路面的反射裂缝问题并不能通过已有的理论准确分析。半刚性材料的开裂性随水泥剂量增加而显著增加,但在结构分析中,该趋势无法定量分析,并且在设计中,通过提高模量取值和弯拉强度可以显著提高计算得出的疲劳寿命,这与材料的抗裂性能是相违背的。因此,为保

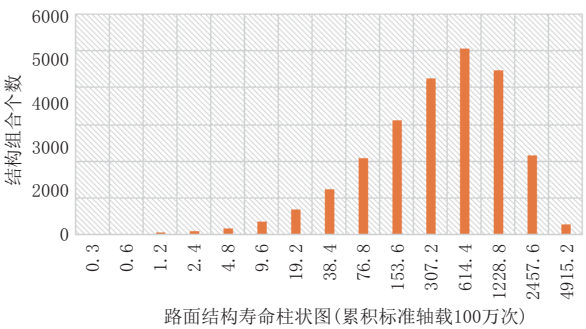


图 5 拟定结构组合预估寿命统计柱状图

证半刚性基层沥青路面的长期性能,该项研究建议水泥剂量不超过 3.5%。该水泥剂量低于重庆地区广泛采用的 4.5%水泥剂量。如前所述,重庆地区道路的半刚性基层反射裂缝病害较少,采用 3.5%水泥剂量的半刚性基层结构应具有更好的长期抗裂性能。

因此,在结构分析中以 2 亿次疲劳寿命为基本要求,选取满足要求且半刚性结构层模量最低(6 000 MPa)的结构组合形式为推荐结构。推荐结构见表 3 所列,上面层采用了排水沥青混合料,中面层采用了高模量沥青混合料。在该结构形式下,沥青层的多种模量取值(对应不同城市车辆荷载条件)均满足 2 亿次疲劳寿命。

表 3 推荐路面结构和材料参数表

结构层	材料类型	厚度 /cm
上面层	PA-13	4
中面层	HMA-20(高模量)	8
下面层	ATB-25	12
上基层	水稳碎石	20
下基层	水稳碎石	20
底基层	级配碎石	20
路基	土	

3.2 有限元结构分析验证

研究采用有限单元法(FEM)分析了最终推荐路面结构的应力分布特征,为保证计算结果准确性,计算宽度取值 8 m,路基深度取值 14 m。在轮胎与路面接触区域网格划分得较细,单元尺寸约为 0.01 m;单元尺寸随着深度和与双轮中心距离的增加逐渐增大(见图 6),主要采用 6 面体单元,过渡区域采用 4 面体单元,由于计算结构的对称性,计算取 1/4 结构。建立的 FEM 模型在保证精度的前提下,尽可能地减少计算量。

图 7 展示了路面结构内的最大主应力分布,在中面层底部最大主应力相对较大,但由于采用了高模量

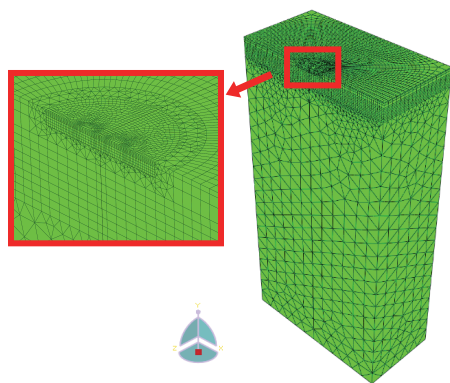


图6 有限元模型网格划分之图示

沥青混合料,最大主应变的数值范围在 60~20 mm 微应变,小于通常采用的沥青混合料疲劳极限。半刚性基层底部的也产生了较大的最大主应力。

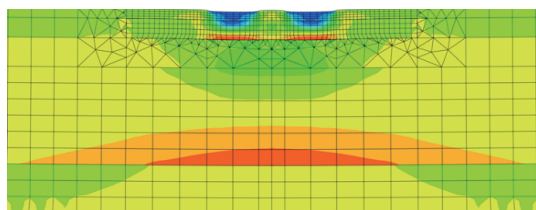


图7 路面结构最大主应力分布图

通过进一步提取 FEM 计算结果并绘制半刚性基层底部最大主应力随距离双轮中心距离(沿道路横向)的变化关系(见图 8),最大主应力为 0.173 MPa,通过计算得到对应的疲劳寿命为 2.06 亿次,满足设计要求。

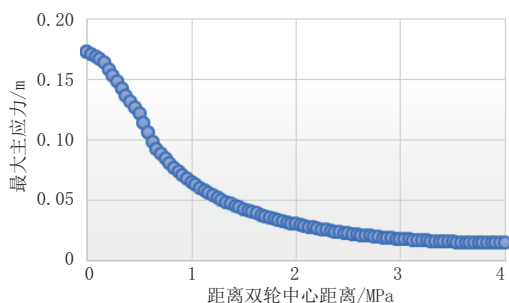


图8 半刚性基层底部最大主应力分布曲线图

4 路表功能验算

车辙是沥青路面的主要病害之一。依据长寿命沥青路面的设计理念,在长寿命路面服役期内(该项目 30 a)路面结构不会发生破坏,但服役一定时期(10~15 a)后上面层仍需铣刨重新铺筑。因此,在该项目中,车辙病害相关技术指标的验算年限与现行规范一致,取 15 a,累计轴载 5 000 万次。

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)和《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2011)对车辙病害的相关验算提出不同设计指标:《公路沥青路面设计规范》中采用沥青混合料层永久变形量,而《城

镇道路路面设计规范》中采用沥青层最大剪应力。为保证所设计的长寿命路面在常规服务期提供优异的路用性能,该项研究分别根据两种设计指标验算路面抗车辙能力。

4.1 沥青混合料层永久变形量验算

首先根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017),采用沥青混合料层永久变形量为设计指标,控制车辙病害的发生。规范中规定对无机结合料稳定类基层的高速和一级公路,设计年限内的累计永久变形量为 15 mm。

在验算过程中,首先根据项目情况和假定的路面结构收集验算基本参数(见表 4),其中 h_a 为沥青层总厚度,当厚度超过 200 mm 上限时,取值 200 mm。

表4 永久变形量验算基本参数表

N_{e3} 设计累计轴载次数	50 000 000
T_{ξ} 基准等效温度	23.6
h_a 面层厚度/mm	200
d_1	-3.54
d_2	0.64
T_{per} 沥青永久变形等效温度/℃	26.8
h_0 车辙试验试件厚度/mm	50

根据规范要求将设计的路面结构的各沥青层进行划分,划分结果见表 5 所列。采用弹性层状体系计算软件,计算各层中部的最大压应力 P_i ,之后根据式(2)计算每一层的永久变形量,之后根据式(1)进行累加。最终路面设计年限(上面层 15 a)内的累计永久变形量为 14.91 mm,满足规范要求。

表5 永久变形量计算表

结构	层数	厚度	Z_i	K_{ri}	P_i	D_s	R_{0i}	R_{ai}
上面层 40 mm	h_1	20	15	3.98	0.69	5 000	1.53	2.18
	h_2	20	30	6.85	0.68	5 000	1.53	3.66
	h_3	20	50	7.22	0.63	5 000	1.53	3.36
中面层 80 cm	h_4	20	70	6.07	0.54	5 000	1.53	2.14
	h_5	20	90	4.61	0.44	5 000	1.53	1.13
	h_6	20	110	3.30	0.36	5 000	1.53	0.56
下面层 120 mm	h_7	60	150	1.54	0.27	800	5.27	1.61
	h_8	60	210	0.42	0.2	800	5.27	0.26
R_a								14.91

$$R_a = \sum_{i=1}^n R_{ai} \quad (1)$$

$$R_{ai} = 2.31 \times 10^{-8} k_{Ri} T_{\text{per}}^{2.93} p_i^{1.80} N_{e3}^{0.48} \left(\frac{h_i}{h_0} \right) R_{0i} \quad (2)$$

式中: R_a 为沥青混合料层永久变形量,mm; R_{ai} 为第*i*分层永久变形量,mm; T_{pef} 为沥青混合料层永久变形等效温度,℃; N_{e3} 为设计使用年限内或通车至首次针对车辙维修的期限内,设计车道上当量设计轴载累计作用次数; h_i 为第*i*分层厚度,mm; h_0 为车辙试验试件的厚度,mm; R_{0i} 为第*i*分层沥青混合料在试验温度为60℃,压强为0.7 MPa,加载次数为2 520次时,车辙试验永久变形量,mm; k_{Ri} 为综合修正系数。

4.2 最大剪应力验算

《城镇道路路面设计规范》中采用沥青层最大剪应力控制车辙病害发生,最大剪应力需小于最大允许剪应力。最大允许剪应力根据式(3)计算:

$$[\tau_R]=\frac{\tau_s}{K_r}\tag{3}$$

式中: τ_s 为沥青混合料结构层60℃抗剪强度,MPa; K_r 为抗剪强度结构系数(快速路、主干道计算结果为1.2)。

由于《城镇道路路面设计规范》中并未给出排水沥青混合料60℃抗剪强度推荐值,设计阶段也无法实测材料的抗剪强度,故,该项研究根据设计材料要求和已有研究成果预测强度推荐值。

《排水沥青路面设计与施工技术规范》中要求排水沥青混合料动稳定度最小值为5 000。栗威^[1]和陈杰^[2]分别通过实验数据建立的抗剪强度和车辙动稳定度的经验关系(见表6),由此计算得到的抗剪强度值。两个经验公式的预估结果相差较小,研究选取两者中值1.1 MPa为沥青混合料60℃抗剪强度,相应的最大允许剪应力 τ_s 为0.912 MPa。

表6 抗剪强度预测表

D_s	τ_s/MPa	备注
5 000	1.18	根据栗威等研究成果计算 $Y=15\,680.79X-13\,443.43$
5 000	1.02	根据陈杰等研究成果计算 $Y=5\,836.2X-966.94$
均值		1.10 MPa

根据《城镇道路路面设计规范》沥青面层剪应力最大值计算点位置如图9所示,分别为:D点,荷载外边缘路表距单圆荷载中心点0.9倍当量圆半径;E点,当量圆外径处,深度距离路表0.1 h_1 ,距单圆荷载中心点,取两处的较大值作为面层剪应力。

通过计算得到,D点剪应力0.351 MPa,E点剪应力0.417 MPa,两者均远小于最大允许剪应力 τ_s (0.912 MPa),研究提出的长寿命排水沥青路面具有

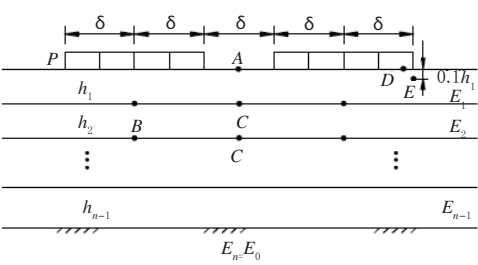


图9 《城镇道路路面设计规范》路面计算模型简图

较好的抵御车辙变形的能力,符合设计要求。

5 结 语

本文依托重庆地区某沿江城市道路改建工程,借鉴国外长寿命路面设计理论,参考公路和城镇道路相关设计规范,采用路面结构批处理分析技术和有限单元数值模拟方法,开展了高温多雨区半刚性基层长寿命沥青路面设计研究,得出以下结论:

- (1)FWD对原路面结构强度检测结果和重庆地区道路工程实践经验表明:高温多雨区的半刚性基层不易发生反射裂缝,可以采用半刚性基层沥青路面结构形式设计长寿命路面,建议水泥剂量为3.5%。
- (2)该项研究采用路面结构批处理分析技术,计算并分析了24 000种路面组合形式。该方法能够显著提高路面结构设计涵盖的参数范围,提高分析速度和结果的可靠性。
- (3)研究采用30 a为路面结构指标设计年限,15 a为表面功能指标(车辙)设计年限,提出的半刚性基层沥青路面结构满足2亿次累计标准轴载次数;抗车辙性能同时满足《城镇道路路面设计规范》和《公路沥青路面设计规范》的要求,对同类地区城市道路建设具有一定的参考和借鉴意义。

参考文献:

[1] Nunn Michael, Ferne B W. Design and Assessment of Long-Life Flexible Pavements. Perpetual Bituminous Pavements [M], Washington, DC: 2001: ISSN 0097-8515.

[2] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt [M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2010.

[3] Monismith, C.L. Analytically Based Asphalt Pavement Design and Rehabilitation: Theory to Practice, 1962-1992 [J], Transportation Research Record 1354, Transportation Research Board, Washington, DC, 1992.

[4] 刘福明.长寿命沥青路面损伤行为及其结构寿命合理匹配研究[D].广州:华南理工大学,2010.

[5] 李鹏.长寿命沥青路面设计指标研究[D].西安:长安大学,2007.

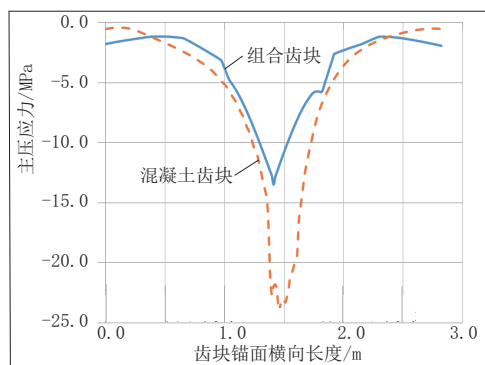


图7 齿块锚面应力路径图

护管理水平。

桥梁结构安全监测与预警评估系统由传感器子系统(图8)、数据采集传输子系统、数据处理与控制系统、结构健康与评估子系统组成,其层次图如图9所示。系统建成后能够实现自动对桥梁结构安全风险事件和主要风险源进行长期实时监测;并以实时监测数据为基础,结合人工试验检测成果,对桥梁结构安全风险进行预警和评估,为公路安全运营和养护维修决策提供技术支撑;结合行业主管部门的管理要求和养管单位的管理制度,建立桥梁安全评估体系和应急响应机制。

4 结 语

中都河大桥作为西部山区的水电站库区范围内修建的跨河桥,它所面临的建设条件具有一定代表性,其桥型方案、主梁和索塔的形式都是结合实际、因地制宜选择的结果;同时吸收了国内外混凝土斜拉桥设计和施工的宝贵经验和教训,着力在索塔抗震、斜拉索锚固区防裂、桥梁健康监控方面做了一些

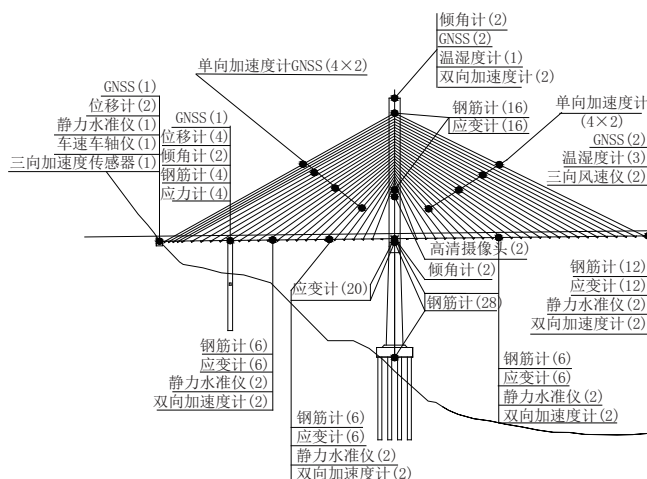


图8 传感器子系统总体布置图(示意半跨)

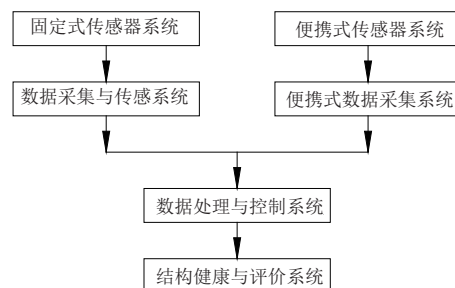


图9 安全监测与预警评估系统层次结构图

有益的尝试,大桥已于2019年10月开工建设,目前施工进展良好。

参考文献:

- [1] 刘士林,王似瞬.斜拉桥设计[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [2] 陶齐宇,曹发辉,蒋劲松,等.泸定大渡河兴康特大桥抗震设计关键技术[J].桥梁建设,2018,48(4).
- [3] 王为刚,奉龙成,王福敏.重庆市江津观音岩长江大桥索塔锚固区受力分析[J].公路交通技术,2007(2).

(上接第73页)

- [6] 崔鹏,邵敏华,孙立军.长寿命沥青路面设计指标研究[J].交通运输工程学报,2008(3):37-42.
- [7] 李小满.武汉市快速路与主干道长寿命路面结构研究[D].武汉:武汉工程大学,2014.
- [8] 王选仓,侯荣国.长寿命路面结构设计[J].交通运输工程学报,2007(6):46-49.

- [9] CJJ 193—2012,城镇道路路面设计规范[S].
- [10] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].
- [11] 栗威,黄美燕,魏建国.沥青道面高温抗车辙性能评价指标[J].长沙理工大学学报(自然科学版)[J],2013,10(4),9-16.
- [12] 陈杰,樊炜安,熊剑平,王彬.沥青混合料高温性能评价指标研究[J].中外公路,2020,40(2),268-272.