

基于路基路面综合评估的佛山一环高速化改造路面方案研究

黄红明, 曾国东, 周敏, 孟华君, 杨永前

(佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东 佛山 528041)

摘要:针对佛山一环高速化改造之际,调查分析了佛山一环的气候及交通量分布特点,开展了基于路基路面综合评估的路面使用性能研究,探索分析路面病害成因及改造设计方案。结合佛山一环高速化改造的项目特点、地域情况及路基路面综合评估现状,从路面结构耐久、技术成熟可行、施工简便、经济合理、安全环保等角度,提出佛山一环高速化改造路面工程的总体理念及设计原则,研究路面结构改造设计方案,以确保佛山一环高速化改造的顺利实施。

关键词:佛山一环;高速化改造;路基路面;综合评估;方案研究

佛山一环高速公路由东线(和顺至北滘公路主干线工程)、南线(北滘至乐从公路主干线工程)、西线(乐从至狮山公路主干线工程)、北线(狮山至和顺公路主干线工程)组成,全长 99.2 km,采用一级公路兼城市道路标准设计,由主、辅路系统组成,其中主路采用双向八车道,行车速度 100 km/h;辅路采用双向六车道,行车速度 50 km/h。

自 2006 年 11 月建成通车以来,佛山一环高速公路交通流量逐年上升,超载、重载车多,公路服务水平逐渐降低;部分路段由于路基沉降、原有道路排水设施部分失效等造成路面积水,影响行车安全;部分路段损坏较为严重且经常性养护维修,局部路段出现较严重的拥挤和堵车现象,已不能满足公路使用性能的需求,

对其进行改造已迫在眉睫。为了恢复佛山一环高速的服务水平,提高其路面使用性能,充分发挥快速通行能力,调查分析其气候及交通量的特点,开展基于路基路面综合评估的路面使用性能评估研究,研究分析路面病害成因及路面改造的总体设计方案。

1 佛山一环地域特点

1.1 气候特点

佛山一环高速属亚热带气候,日照充足,夏季气温高且高温持续时间长、冬季气温温和,高温集中在 7、8 月份,年平均气温 21.7~21.9℃,极端最高气温接近 40℃,极端最低气温-1.9℃;年平均降雨量 1 681.2

- *****
- [5] Z.G.Ghauch, G.G. Abou-Jaoude. Strain Response of Hot-Mix Asphalt Overlays in Jointed Plain Concrete Pavements due to Reflective Cracking [J]. Computers and Structures, 2013, 124: 38-46
- [6] Irene Gonzalez-Torre. Evaluation of Reflective Cracking in Pavements Using a New Procedure that Combine Loads with Different Frequencies [J]. Construction and Building Materials, 2015(7-5): 368-374.
- [7] 艾长发, 任东亚. 移动荷载下含纵横向双裂纹沥青路面复合断裂特性[J]. 西南交通大学学报, 2017(6).
- [8] 郇正能. 应用断裂力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [9] 苗雨, 吕加贺, 罗辉, 等. 含多裂纹沥青路面开裂机制及扩展研究[J]. 岩土力学, 2012(5).
- [10] 朱莉. 三维复合型脆性断裂行为的数值计算与实验研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2012.
- [11] 栗利强. 半刚性基层沥青路面疲劳裂缝扩展与寿命预估研究[J]. 土木工程学报, 2017(9).
- [12] 徐华. 半刚性基层沥青混凝土路面反射裂缝扩展和疲劳寿命研究[D]. 广西大学博士学位论文, 2012.
- [13] 徐东伟. 沥青路面加铺层力学分析及疲劳寿命预估[D]. 长安大学硕士学位论文, 2005.
- [14] JTJGD50-2006 公路沥青路面设计规范[S].

收稿日期: 2018-09-17

作者简介: 黄红明, 男, 硕士, 工程师. E-mail: 849225015@qq.com

mm,最大降雨量可达 2 000 mm,年平均雨日 146.5 d,雨季集中在 4—9 月,期间降雨量约占全年总降雨量的 80%,佛山一环高速属于典型的高温及潮湿多雨地区,

雨热同季,按沥青路面气候分区指标,属 1—4—1 夏炎热冬温潮湿区,其自然地理气候条件如表 1 所示。

表 1 自然地理气候条件

地理位置	极端最高气温/℃	极端最低气温/℃	多年平均气温/℃	多年月平均最低气温/℃	多年月平均最高气温/℃	最大年降雨量/mm	多年平均年降雨量/mm	年蒸发量/mm
亚热带	38.7	-1.9	21.8	13	28.8	2 000	1 681.2	1 400~1 600

1.2 交通流量特点

对比分析佛山一环高速典型年份的实测及工可预测交通量分布特点,如图 1、2 所示,实测的各线平均交通量分布趋势与工可预测的空间分布特征一致,均呈现“东线>南线>西线>北线”的分布趋势,其中东线交通量最大;各线实测交通量远超车可预测,2007 年东线实际交通量已是工可预测近 2 倍,2014 年部分点位已达到 20×10^4 pcu/d,远超过工可预测 2026 年的 14×10^4 pcu/d。根据图 3 可知,2014 年实测的各类型

车辆比例情况为:小客车(38.76%)>中货(24.34%)>拖挂车(19.78%)>大货(7.47%)>小货(5.07%),工可对小客比例预估相对较准确,但高估了小货比例,低估了中货、大货,尤其是拖挂车的比例。从佛山一环交通量调查情况可知,其交通量大,超载、重载车多,属于特重交通量等级。

2 路基状况评估

2.1 软基路段现状分类原则

通过对佛山一环进行现场踏勘和地质条件补勘等基础性工作,及对路容路貌和物理力学指标变化的分析;从治标、治本和高速化改造采取的措施等角度,结合累计沉降量、裂缝出现频率和路面维修方案设计等控制指标,对软基路段现状进行分类,具体分类原则见表 2,可为佛山一环高速化改造总体方案的制定提供技术支撑,也便于对软基路段的发展趋势做进一步的理论分析和数值计算。

2.2 软基路段基本现状及原因分析

根据佛山一环现场踏勘情况及软基路段分类原则,其软基路段现状分类所占比例情况如图 4 所示,北线为一环全线现状最好的一条线路,内外环现状基本一致,绝大多数为第一类路段,占北线路段长度的 72.2%;东线、西线、南线总体情况基本一致,但内外环现状各有差异,以东线为例,其内外环软基路段各现状分类所占比例情况见表 3,东线内环较外环稍差,部分路段现场踏勘时仍在维修,现场踏勘结果的优劣与新建施工阶段监控数据的正常与否基本吻合,东线沉降完成比例普遍偏小的居多,此种路段往往裂缝较多且沉降较大,另外卸载前沉降速率过大的路段,或集中卸载、异常卸载的路段往往裂缝较多且沉降较大。

从软基处理方面考虑,第一、二类情况中裂缝产生的主要因素是:路面面层材料选择和施工不当,路面结

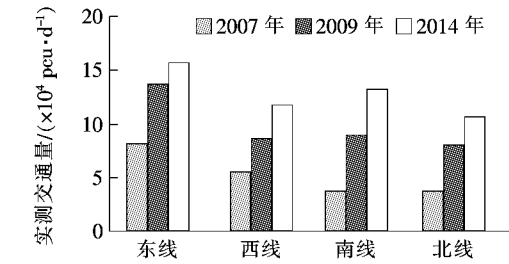


图 1 佛山一环实测交通量分布情况(典型年份)

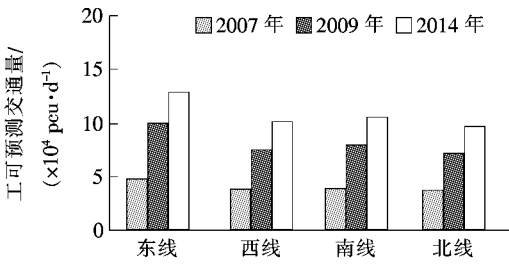


图 2 佛山一环工可预测交通量分布情况(典型年份)

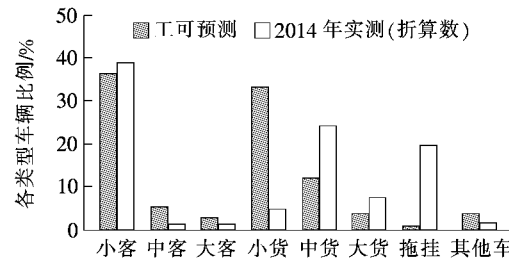


图 3 2014 年佛山一环各类型车辆比例情况

表 2 软基路段分类原则

类型	路面维修设计原则	控制指标分类
第一类	只需从路面面层考虑维修方案设计	① 平顺无裂缝;② 平顺有裂缝,且裂缝较少且小(100 m 范围内横、纵向裂缝不超过 2 条,裂缝宽度不大于 1 cm);③ 沉降不明显(工后沉降小于 10 cm),且裂缝较少(100 m 范围内横、纵向裂缝不超过 2 条)
第二类	需从路面面层、结构考虑维修方案设计	① 沉降不明显(工后沉降小于 10 cm),且裂缝较多(100 m 范围内横、纵向裂缝 3 条以上);② 沉降明显(工后沉降大于 10 cm、但已趋于稳定),裂缝较少(100 m 范围内横、纵向裂缝不超过 2 条);③ 沉降明显(工后沉降大于 10 cm、但已趋于稳定),且裂缝较多(100 m 范围内横、纵向裂缝 3 条以上)
第三类	需从路面面层、结构和深层软基处理考虑维修方案设计	① 沉降明显(工后沉降大于 10 cm、仍未稳定),裂缝较少(100 m 范围内横、纵向裂缝不超过 2 条)或局部修补过;② 沉降明显(工后沉降大于 10 cm、仍未稳定),且裂缝较多(100 m 范围内横、纵向裂缝 3 条以上)或整幅重铺;③ 沉降有明显波动路段(50 m 差异沉降大于 10 cm,肉眼能看出路面沉降明显波动)

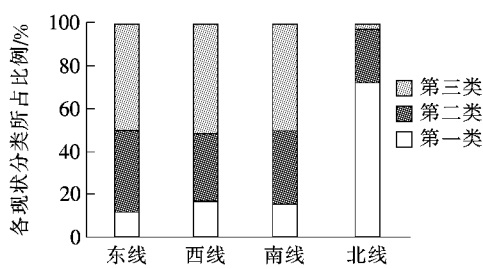


图 4 佛山一环软基路段现状分类所占比例情况

表 3 东线软基路段各现状分类所占比例情况 %

位置	第一类			第二类			第三类		
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
内环	0	0	8.6	6.7	1.0	27.7	25.6	30.5	0
外环	0	2.3	12.3	14.9	7.7	19.3	5.1	38.4	0

构层设计未充分考虑车流量、超载重载车多等因素造成的。第三类情况中裂缝产生的主要因素是:软基处

理不当造成的,车流量、超载车辆等其他因素起到了推波助澜的作用;从现场踏勘情况看,第三类主要发生在桥头过渡路段、含结构物路段和一些特殊路段(水载为预压荷载、有线外工程路段),若受经费限制,可考虑只对桥头过渡路段进行深层次软基处理。

3 路面使用性能评估

为了充分掌握佛山一环路面使用性能状况,采用 MMTS 多功能道路检测系统对其沥青路面损坏、平整度、车辙状况进行全覆盖检测,采用 SRCIM2007 型横向力系数测试系统对其路面横向力系数 SFC 进行全覆盖检测,采用贝克曼梁弯沉仪和 FWD 落锤式弯沉仪对其承载能力进行评价,最后采用钻芯法在典型病害路段对其路面结构层进行取芯,初步判断各典型病害发展状况,具体旧路路面检测内容如表 4 所示。

表 4 旧路路面检测内容

检测指标	检测频率	检测设备	检测范围
路面破损	连续检测,无间隔连续保存路面病害数据,以公里为单位计算 PCI		
平整度	连续检测,以 100 m 为单位保存沥青路面平整度指数,以公里为单位计算 RQI	MMTS 多功能道路检测系统	K0+000~K99+200
车辙	连续检测,以 10 m 为单位保存沥青路面车辙深度,以公里为单位计算 RDI		主路全幅
横向力系数	连续检测,以 20 m 为单位保存沥青路面横向力系数,以公里为单位计算 SRI	SRCIM2007 型横向力系数测试系统	

续表 4

检测指标	检测频率	检测设备	检测范围
弯沉	在抽检车道内连续检测,以公里为单位计算 $PSSI$	贝克曼梁弯沉仪	K0+000~K99+200 主路第 1、4 车道
	在典型路段内连续检测,以百米为单位计算各结构层模量 E_i	FWD 落锤式弯沉仪	K2+000~K82+000 主路部分典型路段
钻芯	按抽芯原则,在典型病害处钻取芯样	路面取芯机	K0+000~K99+200 主路全幅典型病害路段

3.1 路面损坏状况评估

佛山一环高速在交通荷载及环境条件的共同反复作用下,路面逐渐出现损坏现象,其 2014 年路面损坏状况指数 PCI 总体评价情况见表 5。从表 5 可知:佛山一环高速桥面铺装层状况良好,其优良率高达 95% 以上,且 1—2 车道和 3—4 车道无显著差异;路基段 1

—2 车道和 3—4 车道路况差异较大(3—4 车道破损状况明显比 1—2 车道严重),虽然东线、南线、西线、北线 1—2 车道和 3—4 车道总体评分均为“良”(分别为 85 分和 80 分左右),但其反映在路面现场实际病害面积上相差约 2.5 倍,3—4 车道 PCI 评价为中次差的路段长度也比 1—2 车道多 30 km 左右。

表 5 路面损坏状况指数 PCI 总体评价汇总(2014 年)

项目	路基段			桥面段		
	1—2 车道 PCI	3—4 车道 PCI	3—4 车道中次差 路段比 1—2 车道 上升比例/%	1—2 车道 PCI	3—4 车道 PCI	3—4 车道中次差 路段比 1—2 车道 上升比例/%
东线	85.0	80.3	21.8	90.5	87.3	2.7
南线	87.4	82.7	21.3	89.9	86.3	0
西线	85.5	80.7	27.2	95.0	90.1	0
北线	88.5	87.5	0.7	92.1	88.4	0
全线	86.4	82.5	16.2	91.4	88.0	1.3
东、南、西 线 $PCI>83$ 路段 比例为 81.9%			东、南、西 线 $PCI>83$ 路段 比例为 51.1%	$PCI>83$ 路段比例为 94.2%	$PCI>83$ 路段比例为 87.1%	

3.2 路面结构强度检测评估

佛山一环高速在运营过程中,随着交通量及累计轴载的增加,其结构强度逐渐衰减,并影响路面行车安全和使用寿命,根据现场弯沉和钻芯取样结果,第 4 车道状况相对第 1 车道均稍差,为确保路面结构强度评价的可靠性,取第 4 车道最不利值评价各路段的结构强度,评价结果见表 6。从路面结构强度指数总体评价情况来看,佛山一环全线路面结构强度仍保持在“优”等水平, $PSSI$ 值总体评分为 93.4,优良率为 88.3%,路面整体承载能力仍满足要求。外环(优良率 92.2%)略优于内环(优良率 84.7%),各路线中南线最好,西线、北线次之,东线相对较差(中及以下路段比例

有 27.4%)。从已有调查情况来看,佛山一环高速局部(几十米或者百米)路面损坏严重路段半刚性基层已出现结构性损坏,其路面病害最常见的表现形式主要有:① 纵横向裂缝交错密集;② 纵、横向裂缝两侧出现一定宽度网裂且伴有唧浆、沉陷;③ 局部网裂凹陷;④ 块状修补密集且重新开裂或损坏;⑤ 结构性辙槽。

3.3 路面行驶质量、抗滑性能及车辙深度检测评估

行驶质量、抗滑性能、车辙也是高速公路主要的路面使用性能,同时是确保路面行车舒适性及安全性的指标。从检测情况来看,佛山一环高速全线路段中有 96.8% 的路段平整度维持在优良水平,仅 3.2% 的路段平整度状况稍差。平整度较差路段主要集中在路

表 6 路面结构强度指数总体评价情况(2014 年)

路段	设计值	内环			外环			全幅			优良率/ %
		代表值	PSSI 值	评定等级	代表值	PSSI 值	评定等级	代表值	PSSI 值	评定等级	
东线	17.6	24.8	71.6	中	16.8	93.6	优	21.2	82.5	良	72.6
南线	20.6	14.3	98.4	优	15.9	96.2	优	15.0	97.4	优	100
西线	20.5	18.9	94.6	优	16.2	97.9	优	17.8	96.2	优	97.1
北线	18.1	16.4	95.1	优	16.3	95.4	优	16.4	95.2	优	91.5
全线	—	16.7	92.1	优	15.2	94.8	优	16.4	93.4	优	88.3

面病害发展较为显著且维修养护精细化控制欠佳的路段;其次是桥头过渡段的差异沉降引起的桥头跳车路段。全线路段中有 98.4% 的路段抗滑性能维持在优良水平,仅 1.6% 的路段抗滑性能较差;但是全线 *SFC* 代表值在 46 左右,已不能满足新建高速公路交(竣)工标准(≥ 54)要求。佛山一环高速属特重交通且全年持续高温的条件下,其沥青路面全线无明显车辙病害,路面车辙现状总体评价为良($RD \leq 10$ mm),仍能满足新建高速公路交(竣)工标准要求。

3.4 路面取芯检测评估

从佛山一环高速路面损坏状况检测情况来看,其路面病害约 90% 属裂缝类病害,其中以纵向裂缝为主,主要集中分布在 3—4 车道的轮迹带附近,其次为

横向开裂,开裂形式大多贯穿全路幅,另外还有小部分网裂、坑槽,路面损坏严重路段病害分类情况如表 7 所示。根据佛山一环路面损坏严重路段病害分类情况,对典型病害进行抽芯检测分析,全线共抽取芯样 81 个,其中纵向裂缝处 53 个,横向裂缝处 28 个,根据路面病害及钻取芯样特点(表 8)分析,纵向裂缝产生的原因主要有两方面:① 交通量以及超重荷载导致路面产生纵向裂缝;② 由于路基不均匀(含低矮路堤)沉降引起的反射裂缝。横向裂缝产生的原因主要有:基层反射裂缝、软土路基差异沉降裂缝和面层温缩裂缝。坑槽、网裂产生的原因主要有两方面:① 由于纵(横)裂缝的支缝扩散形成,是裂缝引发的次生破坏;② 由于施工质量引起的水损害。

表 7 路面损坏严重路段病害分类情况汇总

路段	裂缝类		松散类		其他类		各线所占 比例/%
	影响面 积/ m^2	所占比 例/%	影响面 积/ m^2	所占比 例/%	影响面 积/ m^2	所占比 例/%	
东线	3 749.2	88.2	195.7	4.6	304.3	7.2	50.2
南线	1 598.6	93.7	49.2	2.9	58.1	3.4	20.1
西线	1 945.5	90.8	43.8	2.0	153.3	7.2	25.3
北线	337.1	89.9	12.0	3.2	26.0	6.9	4.4
合计	7 630.4	90.1	300.7	3.5	541.7	6.4	100

表 8 佛山一环路面典型病害成因及芯样特点

典型病害类型	芯样特点	主要病害成因
纵向裂缝	轮迹带处共抽取 38 个芯样,其中 34 处裂缝自上而下发展,3 处自下往上发展	主要是由交通量以及超重荷载导致路面产生纵向裂缝
	非轮迹带处共抽取 15 个芯样,其中 8 个自上往下发展,7 个自下往上发展	主要由路基不均匀(含低矮路堤)沉降引起的反射裂缝
横向裂缝	裂缝处共抽取 28 个芯样,其中 12 处裂缝自下往上发展且基层开裂;16 处裂缝自上往下发展	基层反射裂缝(自下往上发展且基层开裂) 温度收缩裂缝(自上往下发展)

续表 8

典型病害类型	芯样特点	主要病害成因
网裂、坑槽		① 是由纵(横)裂的支缝扩散形成的,是裂缝引发的次生破坏;② 由于施工质量引起的水损害

4 路面改造方案研究

基于佛山一环高速路基路面的实际情况,参考中国类似工程的经验及教训,提出佛山一环高速化改造的总体理念:路面结构耐久、技术成熟可行、施工简便、经济合理、安全环保;总体设计原则:提高路面可靠度,

减少铣刨料,同时应符合分路段、分车道的少挖加铺方案原则。佛山一环高速化改造路面结构加铺厚度采用了 4 种方法进行设计与验算,如表 9 所示,计算不用加铺厚度的顶面设计弯沉值和层底拉应力,确定适宜的加铺厚度。根据表 9 中的路面结构设计验算方案,在考虑结构强度损伤折减的基础上,宜加铺的厚度为 7~11 cm。

表 9 路面结构加铺厚度设计与验算方法

方案	加铺厚度设计与验算方法
1	参考中国其他高速公路沥青路面改建设计经验,统一将旧沥青路面上基层视为级配碎石(500 MPa),旧沥青路面其余各层的模量均认为衰减至材料参数取值下限,重新进行路面结构设计
2	按规范新建沥青路面设计进行,但对于旧路面各结构层在材料设计参数的取值上采用规范推荐范围的下限值(考虑承受巨大交通量后材料的损伤)
3	按沥青层模量衰减至规范推荐值的下限值、半刚性基层模量衰减了 30%后计算
4	按规范改建路面设计方法进行

根据路面结构设计验算方案确定的适宜加铺厚度,综合其设计理念及设计原则对旧路路面的加铺采用整体加铺 10 cm(4 cm 上面层+6 cm 中面层)的方案,以相邻结构物进行纵断面拉坡拟合,其中中面层兼作调平层。从项目的实际特点及全寿命周期成本等角度出发,沥青上面层采用综合性能优良的 SMA-13,

中面层采用密级配改性沥青 AC-20C,抗滑磨耗层方案比选情况见表 10。结合该项目的实际情况(气候、交通量、路基状况、路面使用状况、扩建方案、资金、交通维护等)及总体设计理念及设计原则,拟采用的加铺方案如表 11 所示。

表 10 抗滑磨耗层方案比选情况

方案	优点	缺点
SMA	SMA 具有粗集料多,矿粉多,沥青含量大,细集料少的特点,是一种间断级配的沥青混合料。其大量的粗骨料形成紧密嵌挤的骨架结构,矿粉、纤维稳定剂、少量细集料和沥青组成的玛蹄脂填充其孔隙,使其具有抗车辙、抗滑耐磨、耐疲劳、高温稳定性以及水稳定性良好等优点	SMA 对沥青、碎石材料、施工机械、施工技术的要求较高,造价相对较高
AC	AC 结构已经有了成熟的配合比设计方法和施工经验,能较好地控制目标配合比和现场压实度、空隙率,在高速公路上已经成功应用	高温稳定性及抗滑性能存在不足

5 结论

(1) 调查分析了佛山一环的气候及交通量分布特点,佛山一环高速公路属于典型的高温及潮湿多雨地

区,雨热同季;其交通量大,超载、重载车多,属于特重交通量等级。

(2) 通过现场踏勘和地质条件补勘等基础性工作,结合累计沉降量、裂缝出现频率和路面维修方案设计等控制指标,从路基状况等角度考虑路面维修设计

表 11 拟采用旧路加铺方案

项目	分车道原则	PCI 为优、良且路面承载能力良好的路段	PCI 为中、次、差及纵横裂缝较多且弯沉不大于 25(0.01 mm)的路段	路面承载力不足的路段	桥面铺装
加铺方案		整体加铺 4 cmSMA-13 上面层+6 cm 改性 AC-20C 中面层,中面层兼作调平层			① 对于小桥、通道,在满足结构受力的条件下,直接加铺 4 cm 上面层,以方便纵坡平顺;② 对于中、大桥,原则上铣刨重铺 4 cm 上面层,同时设置 SBS 改性同步碎石封层
层间黏结	根据路面损坏状况,分	撒布 SBS 改性沥青同步碎石封层(1.5±0.1 kg/m ² + 满铺面积 60%~70%的 4.75~9.5 mm 单一粒径碎石)			
旧路面面层(4 cm AC-13C+6 cm AC-20C+8 cm AC-25C)	1、2 车道和 3、4 车道处理	表面病害处治	根据现场病害路段铣刨后的情况确定铣刨总厚度(6~18 cm),回补 AC-20C 或 AC-25C	铣刨 18 cm 面层,回补 2 层 ATB-25	
(底)基层处理		不处理	根据铣刨情况而定	挖除基层,采用水泥稳定碎石或贫混凝土或钢筋混凝土回填	

原则,建议对桥头过渡路段进行深层次软基处理。

(3) 对佛山一环高速路面使用性能进行检测评估,桥面铺装层状况良好,其优良率高达 95%以上,且 1—2 车道和 3—4 车道无显著差异;路基段 3—4 车道破损状况明显比 1—2 车道严重,其路面病害约 90%属裂缝类病害,其中以纵向裂缝为主,其次为横向开裂,另有小部分网裂、坑槽。从已有调查情况看,佛山一环高速局部(几十米或者百米)路面损坏严重路段半刚性基层已出现结构性损坏。

(4) 基于佛山一环高速路基路面的总体状况及高速化改造的总体理念,提出路面结构改造总体设计原则:提高路面可靠度,减少铣刨料,同时应符合分路段、分车道的少挖加铺方案原则。佛山一环高速化改造路面工程在按新建高速公路标准建设要求,同时考虑结构强度损伤折减的基础上,宜加铺的厚度为 7~11 cm,综合其设计理念及设计原则对旧路路面的加铺采用整体加铺 10 cm(4 cmSMA-13 上面层+6 cmAC-20C 中面层)的方案,中面层兼作调平层。

参考文献:

[1] 宋亮.基于灰色理论的改扩建旧路路面检测与评价[J].公路,2017(5).

[2] 葛婷,王晓飞,符铎.改扩建高速公路工程交通组织方法探讨[J].公路工程,2010(6).

[3] 陈峰林,凌晨,李豪.高速公路改扩建工程新旧路面基层拼接界面处理方案研究[J].公路,2017(11).

[4] 张永军,钟军.浅谈高速公路改扩建项目线形拟合与横坡调整[J].公路工程,2010(4).

[5] 徐长有,马正红,马晓晖.紧凑工期及保通条件下高速公路改扩建工程的统筹管理[J].公路交通科技:应用技术版,2018(1).

[6] 李峰伟.洛三高速公路改扩建工程平纵面拟合与分析[J].公路工程,2011(1).

[7] 陈方晔,陈六明.连续长大纵坡段一级公路高速化改造施工安全保通研究[J].中外公路,2014(6).

[8] 秦仁杰,刘朝晖,周科峰.郑洛高速公路旧路状况评价及加铺方案优化研究[J].中外公路,2007(4).

[9] 马晓宁,王选仓,张涛.高速公路改扩建条件评价体系研究[J].公路交通科技,2016(4).

[10] 高涛.高速公路改扩建工程旧路状况评价及处治对策研究[J].公路工程,2010(3).

[11] 许鹰,James Tsai,季节.基于生存分析模型的水泥混凝土路面大修策略评估[J].中外公路,2016(3).

[12] 李姝,张荣亮,张敏江.农村公路沥青路面基层状况评价指标研究[J].中外公路,2018(3).