

# 软基路段旧路性能综合评价及改造技术研究

陈忠云,王佳,黄红明

(佛山市公路桥梁工程监测站有限公司,广东 佛山 528041)

**摘要:**软基路段具有地质条件不良、沉降大等特点,因其后期改造难度大而备受关注。该文依托佛山一环西拓白金线旧路改造工程,通过软基路段沉降规律监测、分析及旧路面使用技术状况评价,将路段予以分类,提出调平加铺、补强加铺、预抛高3种因地制宜的改造方案。完工后检测数据表明路面整体性能优良,提出的分类处治改造方案合理、有效。

**关键词:**道路工程;软基路段;旧路改造;软基沉降;综合评价

**中图分类号:**U416

**文献标志码:**A

粤港澳大湾区的建设发展需要高效畅达的交通系统,佛山是粤港澳大湾区的重要节点城市,对交通基础设施的功能有更高的要求。然而由于一些既有道路在通行能力、舒适性等方面存在明显的不足,急需进行升级改造,以提高道路的服务功能,形成城市路网系统的骨架,引导城市空间结构拓展和出行方式转变<sup>[1]</sup>。

针对旧路改造工程技术,国内外许多学者进行了深入研究。晁德志等<sup>[2]</sup>针对山区公路升级改造,研究了山区公路升级改造路基稳定性评价方法和设计指标;高涛<sup>[3]</sup>针对高速公路改扩建,得到了适合于改建工程的路面使用性能综合评价指数,并根据评价结果提出了相应的处理措施;蒋中明等<sup>[4]</sup>在全面分析各种可利用因素后,提出了旧路可利用模糊综合评价方法;宋亮<sup>[5]</sup>将灰色理论引入旧路评价,提出了灰色聚类决策分析模型,对旧路性能进行综合评价并给出了处治方案;周永涛等<sup>[6]</sup>对区域土层进行分析,从沉降及稳定性等方面对高速公路软基处理方法进行较详细的理论计算,得到了适合某具体项目的软基处理方法;汤罗圣等<sup>[7]</sup>采用碎石桩+堆载预压即复合地基与固结排水相结合的方法处理某民用机场跑道软基,数值模拟结果表明该软基处理组合方法能够满足沉降要求。

综上所述,从已完成的旧路改造工程实践上看,存在对软基路段旧路改造的综合研究相对较少、处理方法较单一、成本偏高等问题。因此,该文结合佛山城市发展规划和佛山一环西拓战略,依托白金线旧路改造工程,通过软基路段沉降规律监测、分析及旧路面使用技术状况评价,将路段予以分类;针对分类后的路段,

分别提出不同的改造方案。最后对竣工后改造方案进行整体性能评价,以检验改造方案的合理性和实用性。

## 1 项目特点

### 1.1 路段概况

佛山一环西拓战略,主要是利用现有道路,通过节点改造、新建和改造道路等形式,建成里程约110.8 km的环线公路网。白金线旧路改造为二期改造工程中软基沉降病害最严重的路段。

白金线改造段全长10.0 km,均为软基路段,于2010年建成通车。现状为双向六车道一级公路兼顾城市道路功能,路基宽度33.5 m,路基为低矮路堤,高度不超过3 m,排水方式为边沟排水。2018年对6处共1.5 km沉降严重、影响行车安全的路段进行整治调平,现状沥青路面已无大规模裂缝或坑槽现象,但软基不均匀沉降引发的大面积路基沉陷现象仍然较普遍,部分路段沉降超过60 cm,路面呈波浪形,严重影响行车舒适性。

### 1.2 工程地质条件

项目位于珠三角地区。道路沿线以河口冲积平原地貌为主,地面高程为+2.0~+4.0 m,两侧河涌、鱼塘密布,地表水系极其发育,河流水位受潮汐影响,地下水位埋深0.4~4.2 m。沿线软土分布较广,厚度变化较大,一般厚为1.8~25.6 m,主要为淤泥、淤泥质土,一般未完成自重固结。原道路建设时根据不同软基深度,采用了换填、袋装砂井、水泥搅拌桩或CFG+袋装砂井等处理措施。

## 2 路基性能评价

### 2.1 现状软基分类

在对白金线进行现场踏勘和工程地质钻探,并结合累计工后沉降、路面病害、道路运营时间等进行

分析的基础上,为便于对软基沉降趋势做进一步的理论分析和现场监测,按工后沉降和现场特征将现状软基路段分为 3 类,分类原则及各类别路段占比见表 1。

表 1 软基路段分类原则

软基类别	分类原则	特点	比例/%
第 1 类	通车后累计工后沉降小于 20 cm,现场特征显示稳定	软土层厚度一般在 8 m 以下或非软基路段,路面没有明显的波浪现象	65
第 2 类	通车后累计工后沉降大于 20 cm,现场特征显示稳定	软土层厚度一般为 8~12 m,软基处理一般为袋装砂井,累计工后沉降大于 20 cm,大部分为近邻鱼塘路段,路面没有明显的波浪现象	15
第 3 类	通车后累计工后沉降大于 20 cm,现场特征显示不稳定	软土层厚度一般为 12 m 以上,软基处理一般采用袋装砂井、水泥搅拌桩或 CFG+袋装砂井,累计工后沉降大于 20 cm,路面存在较为明显的波浪现象,在桥头过渡路段、含结构物路段有明显的跳车现象	20

由表 1 可知:全线大部分路段属于第 1、2 类,现场特征显示基本稳定,无明显的工后沉降导致的路面起伏波浪现象;属于第 3 类的占比约 20%,该类别路段的软基深厚,工后沉降大且不稳定,局部路段沉降达 60 cm 以上,基本都经历了多次加铺处治,仍然出现较大的不均匀沉降现象,沉降裂缝多,路面存在明显的波浪现象,局部路段有明显的跳车现象。

### 2.2 沉降分析

针对现状软基分类的 3 个类别,考虑旧路改造工程可能采取的不同技术对软基工后沉降的影响,分别选取最不利断面和代表性断面,针对两种不同工况进行沉降分析,工况特征见表 2。软土参数根据地勘土工试验结果确定,其他材料的物理力学参数参考珠三角地区类似工程选取。

表 2 软基计算工况

工况	工况特征
1 施工扰动路基	针对软基土体扰动(如软基再处理等)后的沉降变化趋势。根据珠三角地区软土的灵敏性特点,考虑土体物理力学指标衰减后的沉降变化趋势,土体参数衰减 10%、20%和 30%时产生的累计沉降
2 路面调平加铺	因沉降调平、加铺路面、调整标高后的沉降变化趋势,调平加铺按增加填土厚度 20 cm、40 cm、60 cm 分别考虑

1、2 所示。

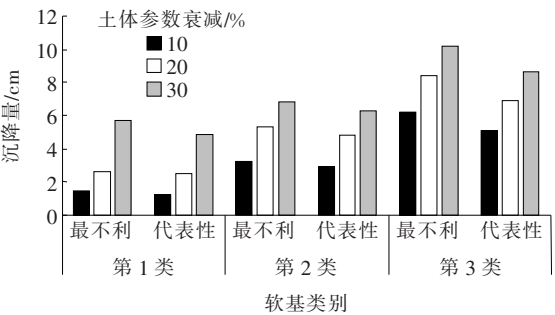


图 1 工况 1 施工扰动路基时沉降量

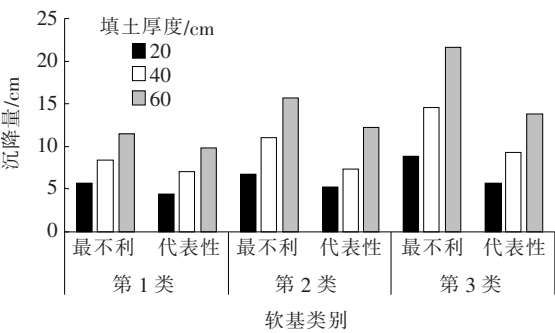


图 2 工况 2 路面调平增加填土时沉降量

由图 1、2 可知:

(1) 工况 1 时,在同等施工扰动条件下,不同病害程度的路段沉降差值均较小,最大约为 5 cm,而软土层厚度影响相对更大。考虑珠三角地区软土具有显著的灵敏性<sup>[8]</sup>,灵敏度一般大于 4,因此在改造中应尽可能消除该类沉降,避免工后沉降加大。

各典型断面在不同工况条件下的沉降结果如图

(2) 工况 2 时,现状路况对沉降量的影响并不大,不同的地质条件对增加填土引起的沉降影响比较大,除第 3 类最不利断面在增加 60 cm 填土的工后沉降大于 20 cm 外,其他断面的工后沉降基本在 15 cm 以内。

2.3 现场观测

前述软基状况分类和沉降分析均是在现场踏勘、现有资料和工程经验基础上得出的,可能存在一定局限性。为获得现场实际沉降发展情况,在设计阶段,选取 15 个观测断面进行了 6 个月的沉降观测,观测断面主要设置在沉降较大、路面破损严重的路段以及桥头过渡和含结构物路段。观测期内各断面的沉降观测结果见表 3。

表 3 沉降观测结果

软基 类别	断面 桩号	月最大沉 降量/mm	月平均沉降速 率/(mm·月 <sup>-1</sup> )	累计沉降/ mm
第 1 类	K38+020	2.25	1.65	8.25
	K38+190	2.25	1.20	6.00
	K38+790	3.25	1.75	8.75
第 2 类	K38+975	2.50	1.70	8.50
	K39+220	2.75	1.60	8.00
	K39+840	2.50	1.75	8.75
	K42+140	3.00	1.80	9.00
	BK0+000	3.85	2.10	10.50
第 3 类	BK0+320	2.80	1.96	9.80
	BK1+190	4.00	2.17	10.85
	BK1+580	3.00	2.20	11.00
	BK2+510	4.25	2.80	14.00
	BK2+750	2.75	2.25	11.25
	BK3+980	4.50	3.15	15.75
	BK4+360	4.10	2.20	11.00

由表 3 可知:① 各断面沉降差异较大,累计沉降最大值为 15.75 mm(月平均沉降速率为 3.15 mm/月),最小值仅为 6.00 mm(月平均沉降速率为 1.2 mm/月),两者相差 162.5%;② 第 1、2 类普通路段的累计沉降量基本为 10.0 mm 以下;第 3 类普通路段的累计沉降量一般为 10.0 mm 左右;但部分软基较深厚的路段,累计沉降量在 15.0 mm 左右,沉降量与环境变化和车载变化有关;③ 第 3 类中,特别是累计沉降量达 60 cm 或接近 60 cm 的一般路段,观测期间(近 6 个月)的累计沉降量并不大,一般为 15.0 mm 以内,说明这些路段与白金线整体的沉降状态类似;④ 监测期内,各断

面的月最大沉降量均小于 5 mm/月,月平均沉降速率最大为 3.15 mm/月。

参照 JTG D30—2015《公路路基设计规范》<sup>[9]</sup>中“关于沉降路段连续两月监测沉降量不超过 5 mm 作为沉降稳定”的判别条件,可得出在现有荷载下,白金线已基本接近沉降稳定状态。

3 路面性能评价

3.1 路面损害状况评价

(1) 路面损坏状况

根据 JTG 5210—2018《公路技术状况评定标准》<sup>[10]</sup>,白金线路面损坏状况指数( $I_{\text{PCI}}$ )评价结果如表 4 所示。

表 4 白金线路面损坏状况指数  $I_{\text{PCI}}$  评价汇总

路段	桩号	左幅		右幅		全幅		优良 率/ %
		评定 单元	平均 值	评定 单元	平均 值	平均 值	评价	
环线 段	K37	74.9		77.5				
	K38	68.2		75.9				
	K39	73.5	77.8	76.1	77.4	77.6	中	44.1
	K40	84.4		80.5				
	K41	88.2		77				
非环 线段	BK0	84.8		76.3				
	BK1	87.5		79.7				
	BK2	83.1	86.9	68.4	76.7	81.8	良	55.1
	BK3	87.3		77.7				
	BK4	91.6		81.6				

由表 4 可知:路面整体损坏较严重,其中环线段总体评价为中,优良率为 44.1%;非环线段总体评价为良,优良率为 55.1%。根据新建路面交工验收标准,全线路面均不达标,没有可以直接利用的路段。

(2) 路面损坏特点

白金线沥青路面主要的病害为裂缝类和其他类(修补),约占全部病害的 76%,其中裂缝类病害以纵向裂缝为主,特别是在第 2、3 车道轮迹带附近出现较严重的纵向裂缝、龟裂、块状裂缝。

3.2 路面结构强度评价

路面结构强度是路面服务能力的基础,与路面的损坏状况存在内在联系,在运营过程中路面结构强度随交通量和轴载累积的增加而逐渐衰减,目前中国将

回弹弯沉作为公路沥青路面结构强度的控制指标<sup>[11]</sup>。白金线路面弯沉检测结果如表 5 所示。

表 5 白金线各评定单元弯沉代表值

路段	桩号	弯沉/(0.01 mm)	
		左幅	右幅
环线段	K37	34.2	38.0
	K38	35.0	31.6
	K39	35.7	33.3
	K40	30.6	33.2
	K41	36.3	25.9
	K42	29.5	29.8
非环线段	BK0	24.6	34.3
	BK1	28.0	27.9
	BK2	53.8	36.1
	BK3	31.4	33.5
	BK4	21.1	31.4

由表 5 可知:白金线路面整体承载力较差,大部分路段的弯沉代表值已不满足原设计 21.6(0.01 mm)的要求,承载力最差的为非环线 BK2~BK3 路段,其左幅最大弯沉代表值为 53.8(0.01 mm),远大于原设计要求,在软基分类中属于第 3 类,应重点进行处治。结合现场调查情况分析,白金线整体承载能力较差与沿线软基出现较大不均匀沉降有一定的关系,局部路段已经出现较严重的半刚性基层结构性损坏,路面表现出纵横向裂缝较密集、网状裂缝、局部伴有沉陷唧浆和维修加铺路段重新出现损坏等常见病害。

3.3 路面基层完整性评价

为对路面深层病害进行调查分析,结合现场第 2、3 车道(重载车道)路面病害相对密集的现象,采用三维探地雷达系统对白金线第 2、3 车道路面基层完整性进行了检测,发现基层存在病害的路段占线路长度的 16.9%。基层主要病害为基层脱空、松散、不密实、基层沉降和基层裂缝等形式,其中基层脱空、松散和不密实,其本质上均是由于胶结材料失去黏结性能,结构层内部骨料之间嵌挤不密实所致,所以将这 3 种病害均归类于松散,并按松散、沉降和裂缝对基层病害情况进行分类统计,结果如表 6 所示。为分析基层病害的发展深度情况,对基层病害发展深度分布进行了统计,结果见表 7。

表 6 白金线各类病害所占比例 %

路段	松散	沉降	裂缝
环线段	4.0	59.6	36.4
非环线段	4.1	81.5	14.4

表 7 白金线基层病害不同发展深度情况比例 %

路段	上基层	下基层
环线段	14.8	85.2
非环线段	10.3	89.7

由表 6、7 可知:基层病害以沉降为主要表现形式,占比最大,非环线段占比高达 81.5%,基层变形(沉降)较明显;基层病害发展深度较大,病害路段 85%以上的病害已发展至下基层。基层病害情况进一步印证了该路段的整体承载能力不高。

3.4 路面典型病害取芯评价

根据白金线的路面损坏状况指数( $I_{\text{PCI}}$ )整体较差,路面病害以纵裂为主(约占全部病害的 70%),其中第 2、3 车道轮迹带附近出现较严重的纵向裂缝、龟裂、块状裂缝等特点,在典型病害处进行钻芯检测,全线共钻取芯样 30 个,芯样特点统计如表 8 所示。

表 8 路面典型病害芯样特点

路面典型病害	芯样特点
纵向裂缝	轮迹带芯样 14 个,3 处仅发展至上面层,4 处发展至中面层,7 处贯穿沥青面层;5 处基层完整,其余基层开裂或松散
	非轮迹带芯样 2 个,裂缝分别发展至沥青中、下面层,基层均完整
	对比芯样 3 个,沥青面层均密实完整;2 处基层开裂或松散,1 处基层密实完整
横向裂缝	横向裂缝芯样 1 个,已发展至水稳层,面层块裂,基层松散
龟裂及沉降	龟裂处芯样 6 个,龟裂处芯样基本存在沥青面层块裂,基层松散,损伤较严重
	沉降处芯样 4 个,沉降部位的芯样较为完整密实

由表 8 可知:白金线的纵向裂缝基本上宽下窄,裂缝由上往下发展,主要由于基层的不均匀沉降与形变、路面的疲劳裂缝所导致的沥青面层纵向开裂,横向裂缝主要由反射裂缝引起,在路面设计时,须重点考虑路基变形问题。

4 旧路改造方案研究

4.1 路基改造处理技术

综合上述路基状况评价,虽然白金线路面病害较多、软基沉降引发较大面积路基沉陷,但路基总体上已趋于接近现有荷载条件下的沉降稳定。鉴于工程建设时已经进行过深层软基处理,并已通车运营近 10 年,因此不建议进行大规模的深层软基加固处理。

在白金线改造工程路基路面综合处治中的路基改造技术选择时,宜选择对软基扰动小的方案。经综合比选,采用以下处治方案:① 第 1、2、3 类的普通路段等大部分路段,采用路面病害综合处治后调平加铺的方案;② 第 3 类中的结构物或桥头过渡路段、深厚软基等沉陷大的重点路段,且路面病害较严重,为减小路基沉降,采用袖阀管劈裂注浆,对软基进行加固补强,全线注浆加固的路段长 508 m(占比 5.1%);③ 若调平厚度接近或超过 60 cm 的路段,路面加铺标高可预

抛高 2~3 cm。

袖阀管劈裂注浆的作用机理是通过将水泥浆液注入土体中,利用浆脉挤压土体和浆脉的骨架作用,显著提高软弱土层的压缩模量、黏聚力和内摩擦角值,从而有效控制既有软基的不均匀沉降<sup>[12]</sup>。通过合理选择注浆参数,还能较好地控制注浆范围和注浆压力,逐次提升或降低注浆管可实现分段重复注浆,对运营道路软基不均匀沉降控制有较好的处理效果<sup>[13]</sup>。选用该注浆加固技术能较好地满足白金线的软基加固补强要求。

4.2 路面改造技术

4.2.1 改造方案

佛山一环西拓旧路改造工程坚持优质耐久、安全舒适、经济环保、社会认可的建设目标。基于白金线现状路面病害特点,考虑该路段交通量为重交通,货车存在重载与超载现象,路面改造主要解决路面沥青面层疲劳开裂与整体承载能力的问题,参考中国类似工程改造经验<sup>[14-17]</sup>,提出两种改造比选方案见表 9。

表 9 旧路综合改造加铺方案

改造 方案	旧路病害处治		路面整体 加铺方案	综合单价/ (元·m <sup>-2</sup> )	每双幅公 里/万元	推荐与否
	损坏轻微路段(第 1 车道与硬路肩)	纵向网裂严重路段 (第 2、3 车道)				
1	局部病害处治 后直接加铺	铣刨 18 cm 原沥青面层后对基层病害修补;12 cm 厂拌冷再生+厂拌热再生改性 AC-20C/AT-25 到原路面标高	4 cm 改性 SMA-13+	331.36	994	推荐方案
2	局部病害处治 后直接加铺	挖除 83 cm 厚原路面结构;15 cm 级配碎石垫层+25 cm 再生水稳下基层+25 cm 再生水稳上基层+12 cm 乳化沥青厂拌冷再生+厂拌热再生改性 AC-20C/AT-25 到原路面标高	6 cm 厂拌热 再生改性 AC-20C	383.40	1 150	比较方案

由表 9 可知:

(1) 解决沥青面层疲劳开裂方面:采用厂拌冷再生+厂拌热再生技术,对第 2、3 车道旧沥青路面进行全深度铣刨重铺,最大限度回收利用旧路 RAP 材料,避免大面积重建路面基层结构,方案 1 更符合国家环保、可持续发展理念。

(2) 提高整体承载力方面:通过计算分析,两个方案均能满足规范要求,达到提高路面整体承载能力的要求,但方案 1 能对原路面结构更充分利用。

(3) 经济性方面,方案 2 相比方案 1 综合单价高约 52 元/m<sup>2</sup>,方案 1 更经济。

综合上述分析,方案 1 既能解决路面整体承载力

不足和疲劳开裂问题,又能对原路面结构进行合理利用,避免大面积路面结构重构,整体技术经济性好,因此将方案 1 作为推荐方案。

4.2.2 路面加铺方案

考虑软基路段较多,路基存在持续沉降的可能,为了尽量减少因沥青加铺层增加恒载对路基的影响,同时兼顾路面耐久性,采取整体加铺 2 层(4 cm 改性 SMA-13+6 cm 厂拌热再生改性 AC-20C)沥青面层的方案,通过路面结构计算满足规范要求。

对沉陷路段,在病害处理后,根据调坡数据进行调平。一般沉陷路段采用厂拌热再生改性 AC-20C 调平,沉陷超过 20 cm 的路段采用厂拌热再生改性 ATB-1

25 分层调平,再整体加铺 2 层沥青混凝土面层。

5 旧路改造效果评价

旧路改造完成后,对路面进行了检测,改造后的路面性能指标如表 10 所示。

表 10 改造后路面性能指标

项目	单位	检测结果		技术要求
		环线段	非环线段	
弯沉	0.01 mm	11.30	12.60	≤22
平整度	m/km	1.29	1.51	≤2
横向力系数		59.60	63.90	≥54
车辙深度	mm	6.54	6.12	≤10

由表 10 可知:路面检测指标均满足规范和设计要求,性能优良,表明选取的旧路改造技术方案达到了改造建设目标。项目通车后将进一步跟踪观测路面长期使用性能。

6 结论

(1) 在白金线改造中,对软基路段进行了分类评价、计算和监测等综合分析,结合地质条件、原软基处理情况,最终采取对路基沉降较大、路面病害较严重的路段进行袖阀管劈裂注浆,对软基加固补强;一般路段结合路面改造进行处理。

(2) 对旧路路面性能进行了检测评价,路面整体损坏较严重,其中环线段总体评价为中,优良率为 44.1%;非环线段总体评价为良,优良率为 55.1%,主要病害为纵向裂缝和修补,第 2、3 车道病害严重;路面结构强度不足,弯沉值偏大,局部路段基层出现结构性损坏,第 2、3 车道基层存在病害的路段占全线的 16.9%,路面整体承载力不足。

(3) 基于白金线的旧路性能综合评价,提出了软基路段旧路改造技术方案。综合考虑路基沉降和路面病害特点,仅对沉降大的重点路段采用袖阀管劈裂注浆,对软基进行加固补强。路面改造按新建路面技术标准要求,同时考虑旧路结构综合利用,采用冷再生和厂拌热再生技术,对纵向网裂严重路段(第 2、3 车道)的沥青面层、破损基层进行旧路综合改造后,整体加铺 10 cm(4 cm 改性 SMA-13+6 cm 厂拌热再生改性 AC-20C)的技术方案。

(4) 对综合改造后的路面工程进行了检测,路面性能指标整体优良,采用的旧路改造技术方案经济合理,达到了改造建设目标。

参考文献:

[1] 袁胜强,曾小清,张伟略,等.城市快速路建设时机的决策模型与准则[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(9):1 294—1 301.

[2] 晁德志,吴雄飞,赵永国,等.山区一级公路升级改造工程路基稳定性评价及加固技术[J]. 公路,2008,53(7):77—79.

[3] 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,2010,35(3):14—18.

[4] 蒋中明,李磊,杨静,等.旧路路基可利用性模糊评价模型研究[J]. 公路,2012,57(11):10—14.

[5] 宋亮.基于灰色理论的改扩建旧路路面检测与评价[J]. 公路,2017,62(7):88—93.

[6] 周永涛,王海洋.软基处理方法在乐清北互通中的研究及运用[J]. 中外公路,2020,40(S2):114—118.

[7] 汤罗圣,岳敏,王云安,等.某民用机场跑道软基碎石桩+堆载预压综合处理方法研究[J]. 中外公路,2021,41(S2):20—23.

[8] 王岭.珠江三角洲地区大面积软土地基处理方法的研究[D]. 广州:广东工业大学,2005.

[9] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范:JTG D30—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[10] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准:JTG 5210—2018[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

[11] 王玉娜.改扩建高速公路现状评价及设计优化[D]. 郑州:郑州大学,2014.

[12] 李鹏,张庆松,张霄,等.基于模型试验的劈裂注浆机制分析[J]. 岩土力学,2014,35(11):3 221—3 230.

[13] 王安辉,丁选明,章定文.在役高速公路软基不均匀沉降病害注浆处治技术[J]. 东南大学学报(自然科学版),2017,47(2):397—403.

[14] 袁耀波.高速公路使用状况评估及路面修复技术案例分析[D]. 广州:华南理工大学,2017.

[15] 孟华君,王刚毅.佛山一环高速化改造先行段沥青路面大中修处治方案探讨[J]. 公路,2017,62(11):52—57.

[16] 黄红明,曾国东,周敏,等.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[J]. 中外公路,2019,39(2):47—53.

[17] 龚宁,曹建大.高速公路改扩建工程旧路加铺利用的研究[J]. 公路,2021,66(2):396—398.