

# 基于应力强度因子的旧水泥路面沥青 加铺层反射开裂特性研究

郭鑫峰, 徐勋倩\*, 仇云强, 肖蓓

(南通大学 交通学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 在路面改造中,旧水泥路面加铺沥青是一种十分有效的方法,但容易出现反射裂纹的问题。该文运用断裂力学和有限元数值模拟相结合的方法,研究在交通载荷作用下沥青表层反射裂纹扩展情况。通过应力强度因子对产生病害的路面进行了疲劳断裂寿命预估。探讨了裂纹反射深度、沥青加铺层弹性模量和厚度对产生病害路面疲劳断裂寿命的影响。研究表明:反射裂缝在交通载荷作用下以Ⅰ和Ⅱ型扩展为主;整个反射裂纹上最危险点在裂纹的边缘,比较容易发生裂纹扩展;交通载荷作用在水泥混凝土板边缘处对路面破坏最严重;反射深度越深,剩余的疲劳断裂寿命越少;增加沥青加铺层的厚度和降低沥青加铺层的弹性模量能够增加其疲劳断裂寿命;相比改变加铺层弹性模量,增加加铺层厚度对于路面的疲劳断裂寿命影响更明显。

**关键词:** 旧路改造; 反射裂纹; 断裂力学; 应力强度因子; 疲劳断裂寿命

加铺沥青法是一种直接在旧水泥混凝土路面上加铺沥青层的改造方法。其方法简单快捷,造价低廉,在旧水泥路面改造中被广泛使用。然而加铺沥青法修复的路面有容易产生反射裂纹的问题,因此对改造后产生反射裂纹的路面进行研究十分必要。沥青加铺层容易产生反射裂纹的主要原因为旧路面板块间存在接缝,路面改造后由于车载和四季温度变化等作用易在接缝的上方沥青加铺层底部形成反射裂纹。

关于反射裂纹,外国学者采用 COT 和 CDCTS 试验仪器评估了沥青混合料在低温条件下的断裂和疲劳性能;基于有序 logistic 回归模型的统计方法研究了低温对于沥青路面反射裂纹的影响;通过建立二维有限元模型研究了沥青路面反射裂纹扩展情况;提出了一种新程序来研究不同频率和不同幅度下的两个荷载对反射裂纹扩展的影响。中国国内学者对路面弯沉情况进行了研究,探讨了改变加铺层厚度、弹性模量和地基弹性模量对路面弯沉的影响,得到了防治反射裂纹的措施;研究了含纵横向双裂纹情况下沥青路面的断裂及疲劳寿命情况。

目前,针对旧水泥路面加铺沥青后产生反射裂纹的研究较为热门,基本采用试验或试验加仿真两种形式,且仿真大多为二维。二维仿真与实际情况存在一些差异,无法研究加铺路面反射裂纹上的敏感区域,对于加铺路面本身的疲劳寿命预估误差也较大。

该文基于 Ansys 有限元分析软件,通过断裂力学与有限元相结合的方法,以应力强度因子(张开型  $K_I$ 、剪切型  $K_{II}$ 、撕裂型  $K_{III}$ )为研究指标,研究车载型反射裂纹的开裂扩展趋势。通过 Pook 和 Richard 准则得到的复合型应力强度因子( $K_{eff}$ )研究反射裂纹上最危险点和路面最危险位置。使用 Paris 公式探讨改变裂纹反射深度、加铺层弹性模量和厚度对路面疲劳断裂寿命的影响。

## 1 建立模型

参考实际路况建立沥青加铺路面的三维模型,如图 1 所示。该模型分为 4 层[如图 1(a)],从上至下依次为:① 沥青混凝土加铺层,厚度为 0.12 m,底部建立

收稿日期:2018-05-22

基金项目:国家重点研发计划重点专项(编号:2016YFB0303103);江苏省基础研究计划项目(编号:BK20171254);南通市应用基础研究项目(编号:GY12016049);江苏省大学生创新训练计划项目(编号:201710304037Z)

作者简介:郭鑫峰,男,硕士研究生,E-mail:15606275813@qq.com

\* 通信作者:徐勋倩,女,博士,教授,E-mail:xunqian-xu@163.com

反射深度  $C$  为  $0.01\text{ mm}$  的裂纹[如图 1(b)];② 旧水泥混凝土板,由两块  $5\text{ m}\times 3.66\text{ m}\times 0.22\text{ m}$  的水泥混凝土板构成。板间  $0.01\text{ m}$  的距离模拟旧路面存在的缝隙;③ 半刚性基层,厚度为  $0.20\text{ m}$ ;④ 土基,考虑当地基深度大于  $9\text{ m}$  时,受力趋于平稳,所以将地基尺寸定为  $13.66\text{ m}\times 20\text{ m}\times 10\text{ m}$ 。

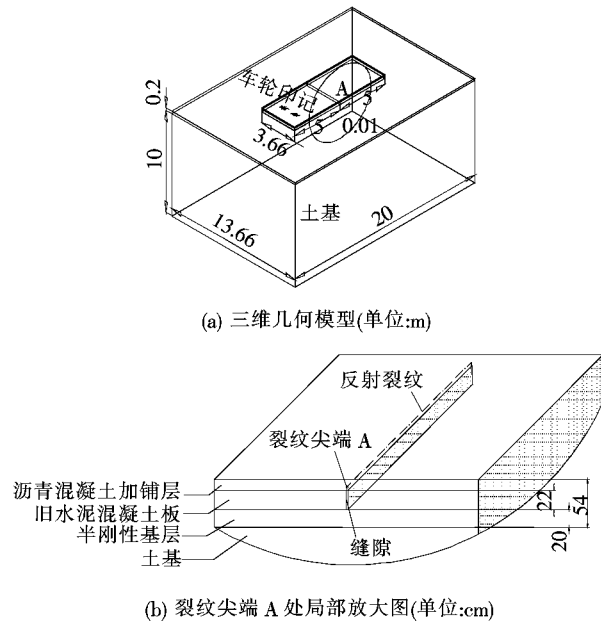


图1 沥青加铺路面三维模型

建立有限元模型,如图 2 所示。为提高计算准确性,在水泥混凝土板周围建立如图 2(a)所示的网格加密,在裂纹尖端 A 处进行如图 2(b)所示的网格加密。

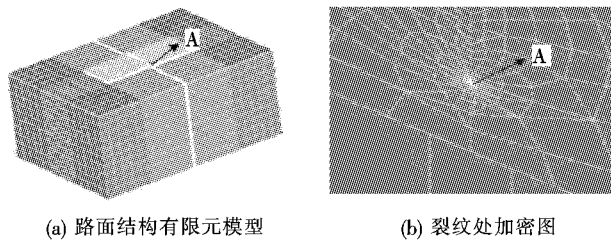


图2 有限元模型

模型各层材料参数如表 1 所示。

表1 路面模型各层材料参数

结构层	厚度/ m	模量/ MPa	泊松比	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
沥青加铺层	0.12	1 400	0.35	3 500
水泥混凝土板	0.22	36 000	0.15	2 700
半刚性基层	0.20	4 500	0.15	2 300
土基	10.00	500	0.20	1 900

2 行车仿真及结果分析

2.1 载荷形式

载荷形式为 BZZ-100,单轴双轮载荷。将轮胎接地面积简化为  $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$  的矩形,接地面边缘间距为  $100\text{ mm}$ ,轴长为  $1.8\text{ m}$ , $o$  为轮胎印记中点,分布集度为  $0.707\text{ MPa}$ ,如图 3 所示。

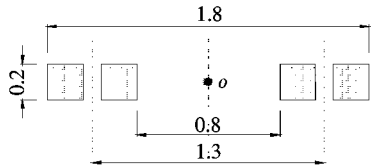


图3 BZZ-100 荷载(单位:m)

2.2 点位的选择

Ansys 在后处理时,可以通过应力外推法来计算应力强度因子。与二维模型相比,三维模型运用应力外推法存在选择裂纹上最危险截面的问题。如图 4 所示, $a$  为裂纹的中点, $c$  为裂纹的边缘, $b$  为  $a$  与  $c$  之间的中点。 $a$ 、 $b$ 、 $c$  三点都为可能的危险点位,所以作为计算点位。

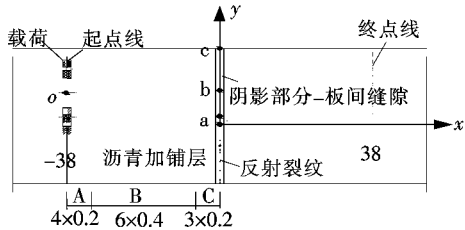


图4 沥青表面俯视图(单位:m)

以  $x$  轴正方向为行车正方向, $y$  轴正方向为车身横向移动正方向(图 4)。车载中点  $o$  从起点线沿着  $x$  轴正方向移动到终点线来模拟一次行车过程。由于行车路线关于  $y$  轴对称,所以只需要在  $y$  轴的一侧施加载荷。将起点线到裂纹间的区域分为 A、B、C 三区。由于裂纹变化密集度的原因,当车载移动到 A 区,用 4 次载荷模拟这段移动,载荷点位间距为  $0.2\text{ m}$ ,移动到 B 区用 6 个,载荷点位间距为  $0.4\text{ m}$ ,移动到 C 区用 3 个,载荷点位间距为  $0.2\text{ m}$ 。

2.3 仿真结果与分析

建立横向车距  $y_o=0$  时的三维模型,向  $x$  轴正方向移动载荷。载荷中点  $o$  从起点线移动到终点线。加载得到  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三点处的应力强度因子,其中一次加载形成的应力云图如图 5 所示。加载后裂纹的开裂方向如图 6 所示。

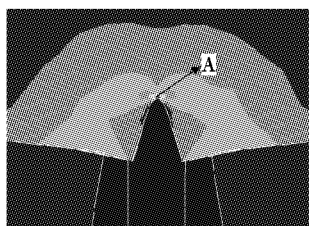


图 5 裂纹尖端 A 处应力云图

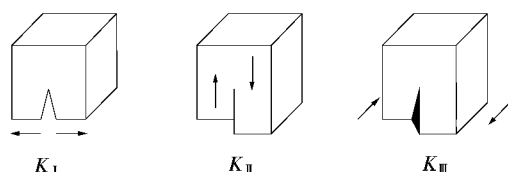


图 6 3 种开裂形式

通过应力外推法得到载荷在各个位置时, a、b、c 三点的 I、II、III 型应力强度因子。通过拟合绘出整个行车过程中 I、II、III 型应力强度因子变化曲线如图 7 所示。

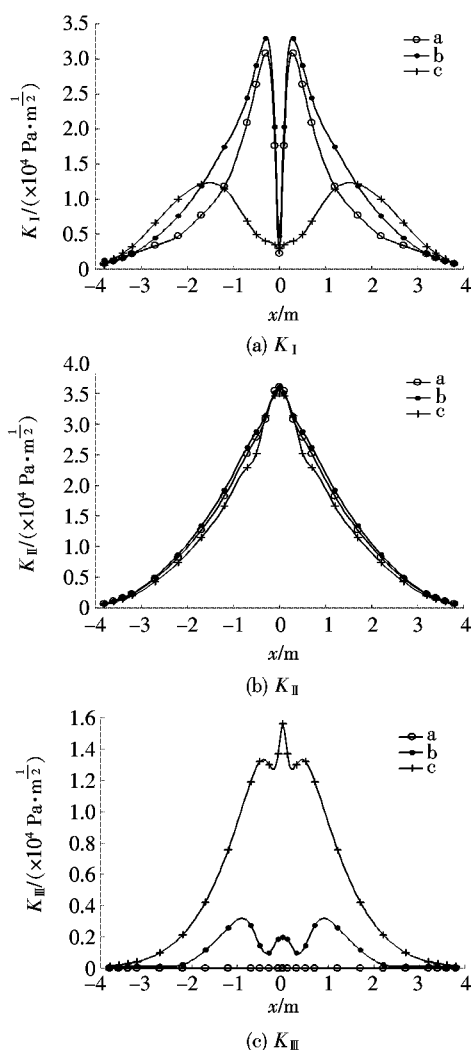


图 7 行车过程中应力强度因子变化曲线图

由图 7 可知:① 在此次行车过程中, a、b、c 三点的 I 型应力强度因子变化趋势相同, 且三点的极小值点都在裂缝的正上方, 极大值分布在缝隙两边;② a、b、c 三点的 II 型应力强度因子变化趋势相同, 最大值为载荷在裂缝正上方;③ b、c 两点 III 型应力强度因子变化趋势相同, a 点的 III 型应力强度因子几乎为 0。c 点的最大值在裂缝的正上方, b 点分布在裂缝的两边。

在行车过程中, 3 种应力强度因子都对裂纹扩展起到促进作用。而 I 和 II 型应力强度因子明显比 III 型应力强度因子大一个数量级, 所以反射裂纹以 I 和 II 型扩展为主。

3 种应力强度因子的最大值不在同一点。实际情况中, 裂纹的扩展方向也不是单一的。为综合分析 I、II、III 型应力强度因子对裂纹扩展的实际影响, 以及之后对产生病害的加铺路面进行疲劳断裂寿命预估, 引入复合应力强度因子。

## 2.4 复合应力强度因子

a 点 III 型应力强度因子几乎为 0, 所以不会产生横向剪切作用, 因此为 I + II 复合型裂纹。参考文献 [9]、[10] 采用 Pook 准则, 通过式 (1) 得到 I + II 复合型裂纹应力强度因子:

$$K_{eff} = \frac{0.83 K_I + \sqrt{0.45 K_I^2 + 3 K_{II}^2}}{1.5} \quad (1)$$

由图 7(c) 可知: b、c 点 III 型应力强度因子变化明显, 所以有横向的剪切作用。因此为 I + II + III 复合型裂纹。参考文献 [9]、[10] 使用 Richard 准则, 通过式 (2) 得到 I + II + III 复合型应力强度因子。

$$K_{eff} = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{K_I^2 + 4 (\alpha_1 K_{II})^2 + 4 (\alpha_2 K_{III})^2} \quad (2)$$

Richard 认为  $\alpha_1 = 1.155$ 、 $\alpha_2 = 1$ 。综合式 (1)、(2) 拟合得到  $K_{eff}$  的曲线图, 如图 8 所示。

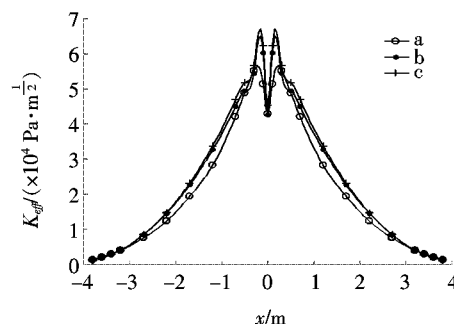


图 8 复合应力强度因子曲线图

由图 8 可知:① 载荷在距离裂纹 30 mm 处时, 复合应力强度因子达到最大值, 此处为水泥混凝土板边

缘处。所以,载荷在混凝土板边缘处对路面最危险;② c 点的复合应力强度因子略大于其他两点。在 $y_o=0$ 时,在裂纹边缘处的 c 点为最危险点,最易发生裂纹扩展。

## 2.5 车载横向移动对裂纹扩展的影响

前文的研究结果是基于横向车距 $y_o=0$ ,然而现实生活中,车辆多为偏离路面中线行驶,所以要模拟 $y_o$ 不为0时的情况。从图8可知:在载荷移动时,反射裂纹上 a、b、c 三点距离载荷中点 o 的横向距离是不同的,所以复合应力强度因子的值也不同,但是其达到峰值的位置是相同的。所以,只需要在 $x_o=30$  mm 处横向移动载荷,即可得到其他行车时,裂缝上最大的复合应力强度因子。

载荷中点 o 在 $x_o=30$  mm 处,横向向 y 轴正方向移动。加载后得到 $K_I$ 、 $K_{II}$ 、 $K_{III}$ ,通过式(1)、(2)计算复合应力强度因子,拟合得到图9所示曲线图。

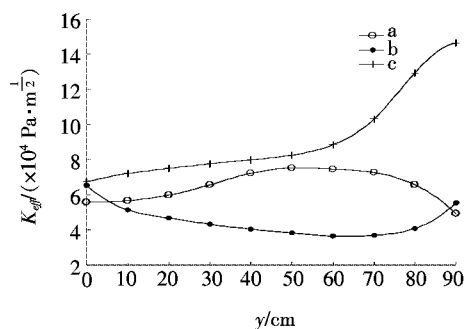


图9 横向复合应力强度因子曲线图

由图9可知:① c 点在任何位置,复合应力强度因子都大于 a、b 两点,c 点为病害路面上的最危险点,最易发生裂纹扩展;② 当横向车距 $y_o=90$  mm,此处同样在水泥混凝土板边缘,c 点的复合应力强度因子达到最大值,反射裂纹扩展最严重。

## 3 病害路面疲劳断裂寿命预估

### 3.1 反射深度与疲劳断裂寿命预估

选择横向车距 $y_o=0$ 时的行车,加载得到不同深度下横向反射裂纹上的复合应力强度因子最大值(表2)。

表2 不同反射深度下 $K_{eff}$ 的最大值

反射深度 $C/m$	$K_{eff-max}/$ ( $MPa \cdot m^{0.5}$ )	反射深度 $C/m$	$K_{eff-max}/$ ( $MPa \cdot m^{0.5}$ )
0.01	0.67	0.05	0.76
0.03	0.70	0.07	0.82

由表2可知:随着反射深度的增加,复合应力强度

因子的最值逐渐增大,综合裂纹扩展程度越来越大。

利用应力强度因子可以定量计算裂纹扩展速度,从而预估疲劳寿命。该文采用 Paris 公式来预估反射裂纹的疲劳断裂寿命。疲劳寿命计算公式为:

$$N = \frac{1}{A} \int_{C_0}^{C_f} \frac{1}{(\Delta K_{eff})^n} dc \quad (3)$$

式中: $C_0$ 为裂纹初始深度,模型中取值为0.01 m; $C_f$ 为疲劳破坏时的深度,一般选择面层厚度的2/3; $\Delta K_{eff}$ 为应力强度因子幅,且 $\Delta K_{eff}$ 可以通过等式 $\Delta K_{eff} = K_{eff-max} - K_{eff-min}$ 得到。交通载荷作用, $K_{eff-min}$ 值一般为0。 $A$ , $n$ 为进行结构疲劳断裂分析的关键材料性能参数,设 $A=10^{-7.4}$ , $n=4.5$ 。

采用三次多项式把裂缝的反射深度 $C$ 与应力强度因子幅 $\Delta K_{eff}$ 进行拟合,拟合式如下:

$$\Delta K_{eff} = a_1 C^3 + a_2 C^2 + a_3 C + a_4 \quad (4)$$

式中: $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 为多项式拟合系数; $C$ 为反射裂纹的深度。

将式(4)代入式(3)计算得到不同反射深度下路面的疲劳断裂寿命(表3)。

表3 不同反射深度下拟合得到的疲劳断裂寿命

反射深度 $C/m$	方程式	疲劳断裂 寿命/次
0.01		$8.1787 \times 10^6$
0.03	$\Delta K_{eff} = -673.74 C^3 +$	$2.2347 \times 10^6$
0.05	$90.668 C^2 - 0.883 C + 0.665$	$1.5479 \times 10^6$
0.07		$9.1326 \times 10^5$

由表3可知:随着反射深度的增加,剩余的疲劳断裂寿命急剧减少,直到路面完全破坏。

### 3.2 弹性模量对疲劳断裂寿命的影响

选择在车距 $y_o=0$ 时的行车,改变加铺层的弹性模量(1 000~1 600 MPa),计算不同深度下反射裂纹上的复合应力强度因子幅。然后通过式(4)进行拟合,再将拟合式代入式(3)得到疲劳寿命。拟合式和疲劳断裂寿命如表4所示。

由表4可知:① 当加铺层的弹性模量增加时,疲劳断裂寿命逐渐减小;② 弹性模量从1 000增加到1 200 MPa,疲劳断裂寿命降低了1.92%,弹性模从1 200增加到1 400 MPa,疲劳断裂寿命降低了2.66%,弹性模量从1 400增加到1 600 MPa,疲劳断裂寿命降低了3.573%。所以,弹性模量为1 400~1 600 MPa之间疲劳寿命的降低幅度较大。

表 4 不同弹性模量下拟合得到的疲劳断裂寿命

弹性模量/MPa	方程式	疲劳断裂寿命/次
1 000	$\Delta K_{eff} = -860.25 C^3 + 111.666 C^2 - 1.410C + 0.662$	$8.566\ 6 \times 10^6$
1 200	$\Delta K_{eff} = -205.303 C^3 + 13.531 C^2 + 3.031C + 0.61$	$8.401\ 8 \times 10^6$
1 400	$\Delta K_{eff} = -673.74 C^3 + 90.668 C^2 - 0.883C + 0.665$	$8.178\ 7 \times 10^6$
1 600	$\Delta K_{eff} = -846.11 C^3 + 109.611 C^2 - 1.405C + 0.68$	$7.886\ 5 \times 10^6$

3.3 加铺层厚度对疲劳断裂寿命的影响

依然选择在 $y_0 = 0$ 车距时,加铺层的弹性模量设为 1 400 MPa,改变加铺层的厚度(8~14 cm),计算初始裂纹从 $C_0$ 逐渐增加到 $C_f$ 时,不同深度下反射裂纹

上的复合应力强度因子幅。将反射深度与应力强度因子幅进行拟合,再将拟合式代入式(3)得到疲劳寿命。拟合式和疲劳断裂寿命如表 5 所示。

表 5 不同加铺层厚度拟合得到的疲劳断裂寿命

加铺层厚度/cm	方程式	疲劳断裂寿命/次
8	$\Delta K_{eff} = -984.44 C^3 + 110.21C^2 - 0.86C + 0.679$	$5.571\ 1 \times 10^6$
10	$\Delta K_{eff} = -3236.11 C^3 + 352.3 C^2 - 8.392C + 0.722$	$6.443\ 1 \times 10^6$
12	$\Delta K_{eff} = -673.74 C^3 + 90.668 C^2 - 0.883C + 0.665$	$8.178\ 7 \times 10^6$
14	$\Delta K_{eff} = -903.956 C^3 + 130.375 C^2 - 2.764C + 0.66$	$9.491\ 2 \times 10^6$

由表 5 可知:① 当加铺层厚度增加时,疲劳断裂寿命也逐渐增加;② 加铺层 $C$ 从 8 增加到 10 cm,疲劳断裂寿命增加了 15.65%,从 10 增加到 12 cm,疲劳断裂寿命增加了 26.94%,从 12 增加到 14 cm,疲劳断裂寿命增加了 16.03%。所以,沥青路面加铺层从 10 增加到 12 cm,增加的疲劳断裂寿命次数比较明显。

比较表 4、5,加铺沥青层厚度对于疲劳断裂寿命的影响更加明显。

4 结论

通过应力强度因子对反射裂纹进行分析,讨论了反射裂纹上最易扩展的点,确定了载荷对产生病害路面最不利的位置,对影响病害路面疲劳断裂寿命的因素进行了对比分析。得到结论如下:

- (1) 交通载荷作用下,沥青改造路面产生的反射裂纹最易在裂纹边缘处发生扩展。
- (2) 由于存在板件缝隙,载荷在水泥混凝土板边缘处裂纹最易扩展。
- (3) 反射深度越深,路面剩余疲劳断裂寿命越少,路面破坏越严重。
- (4) 增加加铺层的厚度和减小加铺层的弹性模量

能够减小裂纹的扩展,增大路面的疲劳断裂寿命。相对来说增加加铺层厚度对于疲劳断裂寿命的影响更明显。

该文只考虑了车辆垂直加载对改造后产生病害路面的影响,对于其他细微因素并未考虑。如特殊情况下,车辆急刹车时存在的水平作用力,四季昼夜温差较大时施加的温度载荷等,需要进一步研究。

参考文献:

[1] Ameri.M, Mansourian.A.Cracked Asphalt Pavement under Traffic Loading—A 3D Finite Element Analysis[J]. Engineering Fracture Mechanics,2011,78:1 817—1 826.

[2] 苗雨,万云冬,张绍敏.含反射裂纹沥青路面的动力响应分析[J].岩土力学,2009(8).

[3] Tirupan Mandal, Hao Yin. Correlating Laboratory and Full—Scale Reflective Cracking Tests for Airfield Pavements [J]. Construction and Building Materials, 2018, (169):47—58.

[4] Dawid Rys, Jozef Judycki. Comparison of Low—Temperature Cracks Intensity on Pavements with High Modulus Asphalt Concrete and Conventional Asphalt Concrete Bases[J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 478—487.

# 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