

# 基于均匀设计的刚性基层沥青路面破损机理 三维有限元分析\*

王雪莲<sup>1</sup>, 徐永钢<sup>2</sup>, 李锋燕<sup>3</sup>, 李晓军<sup>3</sup>

(1.广州航海学院, 广东 广州 510725; 2.广东省长大公路工程有限公司 第三分公司, 广东 广州 510620;  
3.西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 利用均匀设计软件对影响沥青路面结构安全性能的参数进行组合, 采用有限元方法分析刚性基层路面应力分布情况; 利用路面疲劳损伤潜在指数 APPDI<sub>3D</sub> 云图及应力状态组合形式研究刚性基层沥青路面结构的破坏模式, 在重点分析面层最大 APPDI<sub>3D</sub> 对应的主应力组成方式的同时, 提出 APPDI<sub>3D</sub> 与面层厚度和模量、基层厚度和模量、底基层厚度和模量、路基模量 7 个因素之间的关系。结果表明, 车辙、top-down 裂纹为刚性基层沥青路面早期破坏的主要模式; 刚性基层沥青路面的应力组成形式为压剪应力、拉剪应力及拉-压复合剪切应力; 通过回归分析得到的 APPDI<sub>3D</sub> 与 7 个因素之间的关系能很好地预测拟建路面结构的安全性能, 为拟建或在建多层路面结构设计提供理论依据。

**关键词:** 公路; 沥青路面; 刚性基层; 破损机理; 均匀设计

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)06-0115-06

随着中国公路物流业的快速发展, 车辆逐渐呈现多轴化、重载化和高轮压的趋势, 使沥青路面结构层的受力出现明显变化。车辆荷载不仅会造成路面结构损坏, 更是其他路面病害的重要诱发因素, 在重载和超载车辆的持续作用下, 路面出现 top-down 裂纹、车辙、层底弯拉等损坏现象的时间也呈现早期趋势。

在先前的研究中, 大多数学者都关注应力大小对路面破坏的影响, 更多人使用粘弹性力学和断裂力学的方法对 top-down 裂纹、车辙、层底弯拉的产生进行研究, 对应力中主应力组成方式对路面破坏的影响分析较少。该文利用路面疲劳损伤潜在指数 APPDI<sub>3D</sub> 云图及莫尔圆的方法分析路面结构的应力状态, 研究路面在多轴载、重载状态下的力学响应, 为解释路面破坏与路面结构材料优化设计奠定基础。

## 1 理论背景

德鲁克-普拉格理论在力学研究中应用广泛, 它是在广义米塞斯条件(德鲁克-普拉格条件 D-P 准则)下的一种岩土材料破坏评价标准。广义米塞斯条件为:

$$\alpha I_1 - \sqrt{J_2} = K \quad (1)$$

式中:  $\alpha = 1/\sqrt{3} \sin\varphi/\sqrt{3+\sin^2\varphi}$ ;  $\varphi$  为岩土内摩擦角;  $I_1$  为应力张量第一不变量;  $J_2$  为应力偏量第二不变量;  $K = \sqrt{3} c \cos\varphi/\sqrt{3+\sin^2\varphi}$ ;  $c$  为岩土内聚力。

如图 1 所示, 在应力空间上, 材料存在屈服曲面, 过等倾线作一平面, 即  $\pi$  平面, 则 D-P 准则在  $\pi$  平面上的投影矢量半径为:

$$r\sigma = \sqrt{2J_2} = \sqrt{2}(K + \alpha I_1) \quad (2)$$

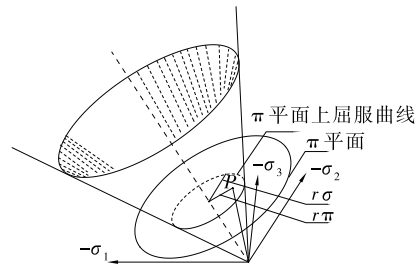


图 1 屈服曲线与屈服面示意图

根据上述屈服曲面与  $\pi$  平面的交线为  $\pi$  平面上屈服曲线的推断, 当  $\pi$  平面上任意一点在屈服曲线内时, 该点产生弹性变形, 卸荷后变形恢复; 当该点在屈服曲线外时, 该点产生塑性变形, 因而疲劳寿命短, 会最先达到破坏。由此定义路面疲劳损伤潜在指数 APPDI = 应力点矢量半径  $r\pi$ /该点极限线矢

\* 基金项目: 广东省交通科技项目(2013-02-020)

量半径  $r\sigma$ , 即:

$$APPDI = \frac{r\pi}{r\sigma} = \frac{\sqrt{2J_2}}{\sqrt{2J_2}} \quad (3)$$

## 2 计算方案

### 2.1 模型及参数

采用双轮组单轴载 100 kN 作为标准轴载, 采用单轴双圆均布垂直荷载作用下的弹性层状连续体系理论进行计算, 标准轴载下计算参数按表 1 取值。采用三维弹性有限元模型、八节点等参单元, 计算深度为 8 m, 宽度为 10 m。

### 2.2 刚性基层沥青路面性能影响因素分析

为了合理分析面层模量与厚度、基层模量与厚度、底基层模量与厚度、路基模量 7 个因素对路面结构性能影响的重要程度, 采用均匀试验设计方案, 选

表 1 标准轴载计算参数

参数名称	参数值
标准轴载类型	BZZ-100
标准轴载 $P/\text{kN}$	100
轮胎接地压强 $p/\text{MPa}$	0.7
单轮传压面当量圆直径 $d/\text{cm}$	21.3
两轮中心距/ $\text{cm}$	1.5 $d$

取 7 因素 22 水平试验进行计算参数组合, 制订沥青路面计算参数方案(见表 2)。

## 3 计算结果与分析

按照上述均匀试验计算方案, 采用有限元软件计算后, 利用式(3)计算各节点的  $APPDI_{3D}$  并排序, 得到 22 种方案下刚性基层沥青路面的最大  $APP-$

表 2 沥青路面计算参数方案

方案 编号	各因素的取值							$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\circ)$
	面层厚度	面层模量	基层厚度	基层模量	底基层厚度	底基层模量	路基模量		
	$x_1/\text{cm}$	$x_2/\text{MPa}$	$x_3/\text{cm}$	$x_4/\text{MPa}$	$x_5/\text{cm}$	$x_6/\text{MPa}$	$x_7/\text{MPa}$		
1	2	1 000	21	16 000	20	1 700	400	0.246 919 7	41
2	3	1 500	27	25 000	31	700	340	0.388 532 3	43
3	4	2 000	33	11 000	19	2 000	280	0.542 246 8	45
4	5	2 500	16	20 000	30	1 000	220	0.708 063 1	42
5	6	700	22	29 000	18	2 300	160	0.167 761 0	40
6	7	1 200	28	15 000	29	1 300	100	0.302 112 5	41
7	8	1 700	34	24 000	17	2 600	40	0.448 565 8	42
8	9	2 200	17	10 000	28	1 600	440	0.607 121 1	45
9	10	2 700	23	19 000	16	600	380	0.777 778 1	40
10	11	900	29	28 000	27	1 900	320	0.220 049 3	43
11	12	1 400	35	14 000	15	900	260	0.359 241 6	40
12	13	1 900	18	23 000	26	2 200	200	0.510 535 7	43
13	14	2 400	24	9 000	14	1 200	140	0.673 931 7	44
14	15	600	30	18 000	25	2 500	80	0.142 342 9	41
15	16	1 100	36	27 000	13	1 500	20	0.274 274 0	45
16	17	1 600	19	13 000	24	500	420	0.418 307 0	42
17	18	2 100	25	22 000	12	1 800	360	0.574 441 9	41
18	19	2 600	31	8 000	23	800	300	0.742 678 6	43
19	20	800	37	17 000	11	2 100	240	0.193 663 1	44
20	21	1 300	20	26 000	22	1 100	180	0.330 435 0	40
21	22	1 800	26	12 000	10	2 400	120	0.479 308 7	42
22	23	2 300	32	21 000	21	1 400	60	0.640 284 3	45

$DI_{3D}$ 值(见表 3)。

表 3 路面疲劳损伤潜在指数  $APPDI_{3D}$  计算结果

方案编号	$APPDI_{3D}$	方案编号	$APPDI_{3D}$	方案编号	$APPDI_{3D}$
1	0.824 5	9	0.526 0	17	0.703 0
2	0.727 9	10	1.584 7	18	0.569 9
3	0.634 6	11	0.977 4	19	2.137 3
4	0.480 8	12	0.758 6	20	1.022 6
5	1.332 9	13	0.576 7	21	0.753 8
6	0.997 5	14	2.843 0	22	0.651 7
7	0.815 4	15	1.426 0		
8	0.643 6	16	0.837 1		

根据表 3,刚性基层沥青路面不同参数组合下,面层  $APPDI_{3D}$  大于 1 的方案有 6 种,分别为方案 5、10、14、15、19、20。通过进一步计算,得到方案 5、10、14、15、19 下的  $APPDI_{3D}$  云图及应力莫尔圆(见图 2~6)。

从图 2 可以看出:方案 5 结构参数组合下刚性基层沥青面层  $APPDI_{3D}$  大于 1 的典型位置有 4 个。 $APPDI_{3D}$  最大值位于路表轮载前进方向,即图 2(a) 点 1 处,对应图 3(c) C1 剖面 A 点,  $APPDI_{3D} =$

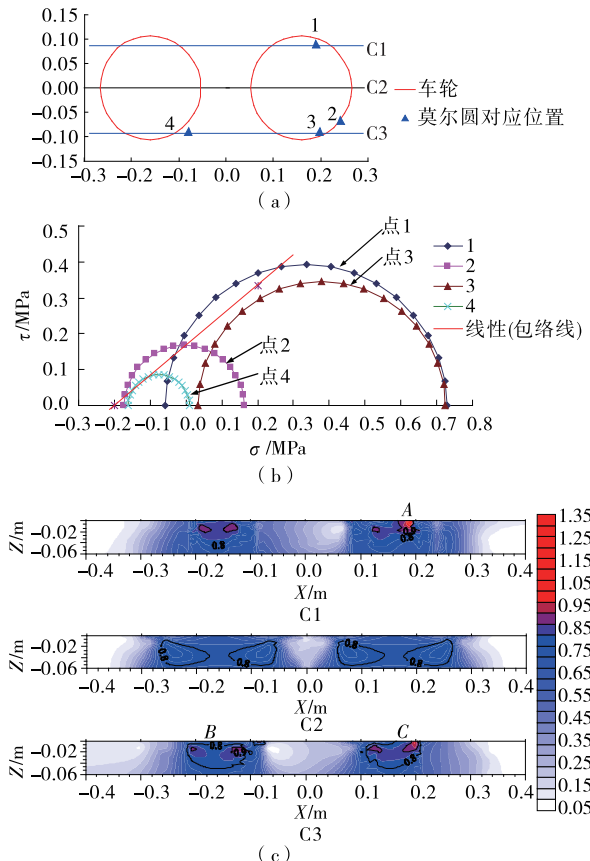


图 2 方案 5 对应的  $APPDI_{3D}$  等值线及莫尔圆

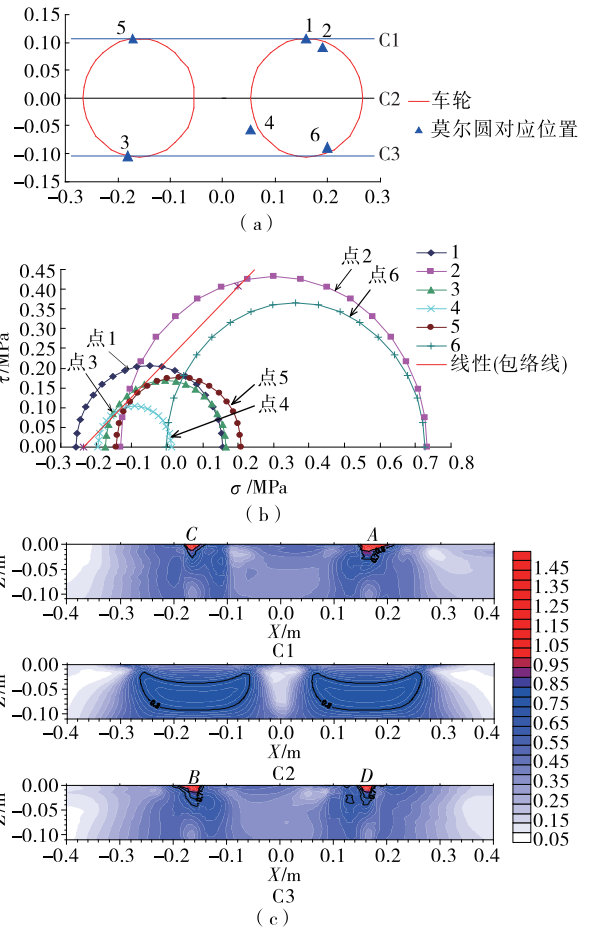
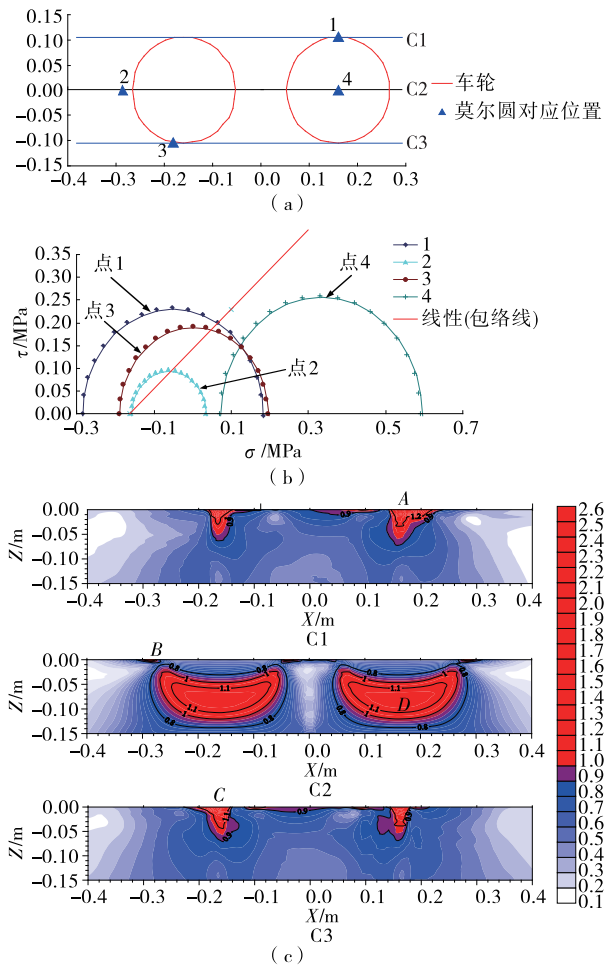


图 3 方案 10 对应的  $APPDI_{3D}$  等值线及莫尔圆

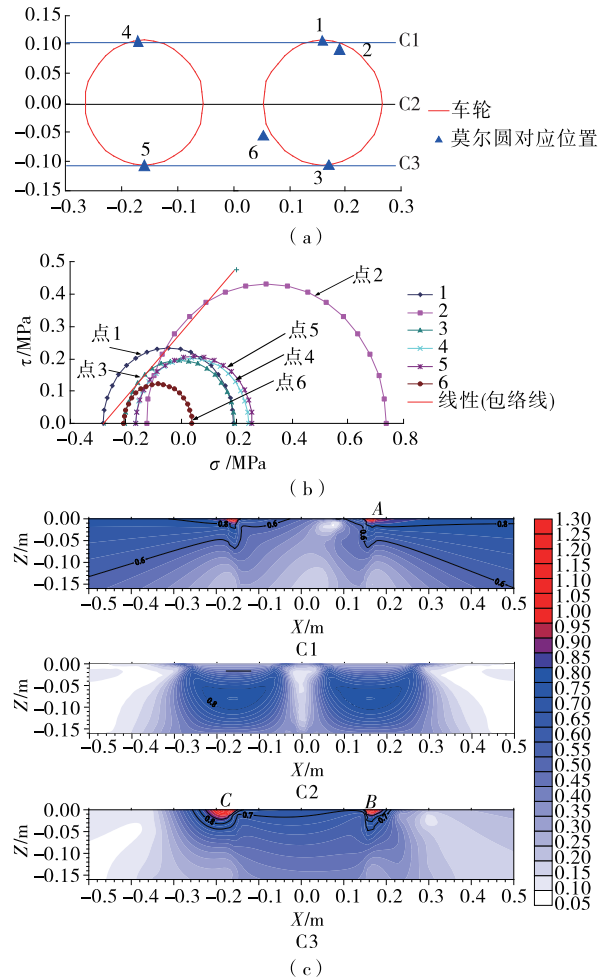
1.332 9,  $\sigma_1 = 0.728 1$  MPa,  $\sigma_3 = -0.057$  MPa,  $|\sigma_1| > |\sigma_3|$ , 应力状态为以压应力为主的拉-压复合剪切应力,破坏模式为车辙;点 2 位于轮载下方,应力状态为拉-压复合剪切应力;点 3 位于路表轮载下方,即图 3(c) C3 剖面 C 点,应力状态为压剪应力,破坏模式为车辙;点 4 位于轮载外侧 1 cm 处(B 点),  $APPDI_{3D} = 1.068 7$ ,  $\sigma_1 = 0.010$  MPa,  $\sigma_3 = -0.161 7$  MPa,  $|\sigma_1| < |\sigma_3|$ , 应力状态为拉剪应力,路面结构破坏模式为 top-down 裂纹[见图 3(c) C3 剖面];由图 3(c) C2 剖面分析,  $y=0$  剖面路面结构安全。

由图 3 可知:方案 10 结构参数组合下刚性基层沥青面层  $APPDI_{3D}$  大于 1 的典型位置有 6 个。 $APPDI_{3D}$  最大值位于路表轮载前进方向,即图 3(a) 点 1 处,对应图 3(c) C1 剖面 A 点,  $APPDI_{3D} = 1.584 7$ ,  $\sigma_1 = 0.156 5$  MPa,  $\sigma_3 = -0.255 9$  MPa,  $|\sigma_1| < |\sigma_3|$ , 应力状态为以拉剪应力为主的拉-压复合剪切应力,破坏模式为车辙和 top-down 裂纹;点 2 位于轮载下方,对应应力状态为拉-压复合

图4 方案14对应的 $APPDI_{3D}$ 等值线及莫尔圆

剪切应力;点3位于轮载下方,即图3(c)C3剖面B点, $APPDI_{3D}=1.0969$ , $\sigma_1=0.1653$  MPa, $\sigma_3=-0.1747$  MPa,应力状态为拉-压复合剪切应力,路面结构破坏模式为车辙;点4位于路表轮载外侧1 cm处, $APPDI_{3D}=1.0413$ , $\sigma_1=0.0119$  MPa, $\sigma_3=-0.1945$  MPa,应力状态为拉剪应力,路面结构出现破坏;点5位于轮载前进方向,即图3(c)C1剖面C点, $APPDI_{3D}=1.0156$ , $\sigma_1=0.2098$  MPa, $\sigma_3=-0.1446$  MPa,应力状态为拉-压复合剪切应力,路面结构破坏模式为车辙;点6位于轮载下方,即图3(c)C3剖面D点, $APPDI_{3D}=1.0084$ , $\sigma_1=0.7262$  MPa, $\sigma_3=-0.0034$  MPa,应力状态为压应力,路面结构破坏模式为车辙;由图3(c)C2剖面分析, $y=0$ 剖面路面结构安全。

由图4可知:方案14结构参数组合下刚性基层沥青面层 $APPDI_{3D}$ 大于1的典型位置有4个。 $APPDI_{3D}$ 最大值位于路表轮载前进方向,即图4(a)点1处,对应图4(c)C1剖面A点, $APPDI_{3D}=$

图5 方案15对应的 $APPDI_{3D}$ 等值线及莫尔圆

$2.8431$ , $\sigma_1=0.1797$  MPa, $\sigma_3=-0.2865$  MPa,应力状态为拉-压复合剪切应力,路面结构破坏模式为车辙和top-down破坏共存;点2位于路表轮载外侧2 cm处,即图4(c)C2剖面B点, $APPDI_{3D}=1.3805$ , $\sigma_1=0.0331$  MPa, $\sigma_3=-0.1597$  MPa, $|\sigma_1|<|\sigma_3|$ ,应力状态为拉剪应力,路面结构破坏模式为车辙或top-down裂纹;点3位于车轮前进反方向轮迹边缘,即图4(c)C3剖面C点,应力状态为拉-压复合剪切应力,路面结构破坏模式为车辙或top-down裂纹;点4位于轮载下方,即图4(c)C2剖面D点, $APPDI_{3D}=1.1877$ , $\sigma_1=0.5889$  MPa, $\sigma_3=0.0697$  MPa,应力状态为压剪应力,路面结构破坏模式为车辙。

由图5可知:方案15结构参数组合下刚性基层沥青面层 $APPDI_{3D}$ 大于1的典型位置有6个。 $APPDI_{3D}$ 最大值位于路表车轮前进方向,即图5(a)点1处,对应图5(c)C1剖面A点, $APPDI_{3D}=1.426$ , $\sigma_1=0.1891$  MPa, $\sigma_3=-0.280$  MPa,应力状

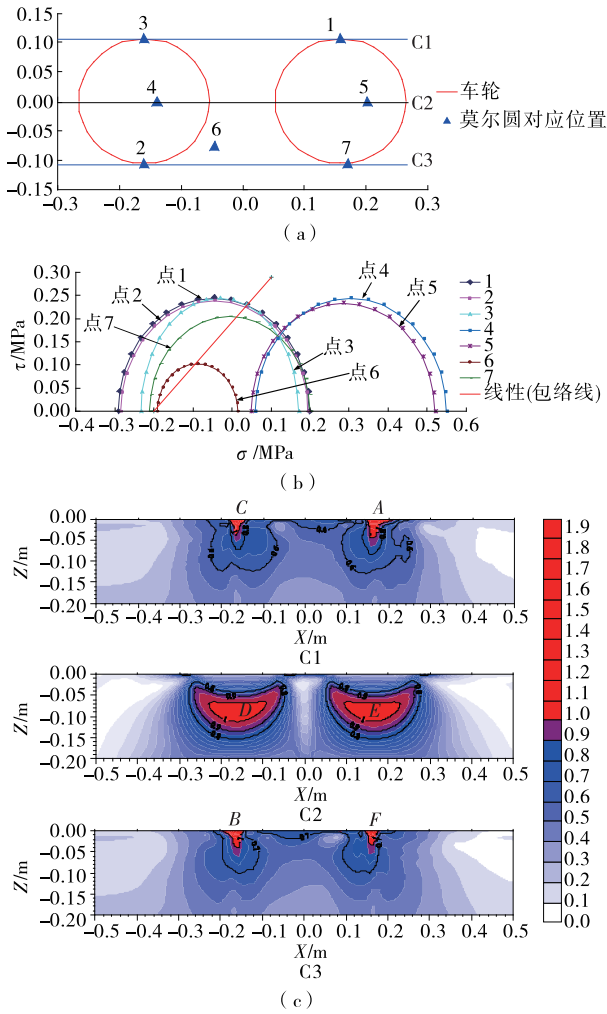


图 6 方案 19 对应的 APPDI<sub>3D</sub>等值线及莫尔圆

况为以拉剪应力为主的拉-压复合剪切应力,路面结构破坏模式为车辙;点 2 位于轮载下方,  $|\sigma_1| > |\sigma_3|$ , 应力状况为拉-压复合剪切应力;点 3 位于车轮前进方向轮载下方 1 cm 处,  $APPDI_{3D} = 0.959 4$ ,  $\sigma_1 = 0.241 3$  MPa,  $\sigma_3 = -0.164 5$  MPa, 应力状态为以压剪应力为主的拉-压复合剪切应力,路面结构破坏模式为车辙;点 4 位于车轮前进反方向,即图 5(c)C3 剖面 B 点,  $APPDI_{3D} = 1.069 5$ ,  $\sigma_1 = 0.190 5$  MPa,  $\sigma_3 = -0.202 9$  MPa, 应力状态为拉-压复合剪切应力,破坏模式为车辙;点 5 位于车轮前进反方向轮载下方,即图 5(c)C3 剖面 C 点,  $APPDI_{3D} = 0.955 9$ ,  $\sigma_1 = 0.255 1$  MPa,  $\sigma_3 = -0.163$  MPa,  $|\sigma_1| > |\sigma_3|$ , 应力状态为以压剪应力为主的拉-压复合剪切应力,路面结构破坏模式为车辙;点 6 位于轮载外侧 1 cm 处,  $APPDI_{3D} = 0.925 9$ ,  $\sigma_1 = 0.037 8$  MPa,  $\sigma_3 = -0.207 4$  MPa,  $|\sigma_1| < |\sigma_3|$ , 应力状态为拉剪应力,路面结构已破坏;由图 5(c)C2 剖面看, y

= 0 剖面路面结构安全。

由图 6 可知:方案 19 结构参数组合下刚性基层沥青面层  $APPDI_{3D}$  大于 1 的典型位置有 7 个。 $APPDI_{3D}$  最大值位于路表车轮前进方向,即图 6(a) 点 1 处,对应图 6(c)C1 剖面 A 点,  $APPDI_{3D} = 2.137 3$ ,  $\sigma_1 = 0.200 2$  MPa,  $\sigma_3 = -0.291 1$  MPa, 应力状态为以拉剪应力为主的拉-压复合剪切应力,路面结构破坏模式为车辙和 top-down 裂纹共存;点 2 位于路表车轮前进反方向轮迹边缘,即图 6(c)C3 剖面 B 点,对应应力状态为拉-压复合剪切应力,破坏模式为车辙和 top-down 裂纹共存;点 3 位于车轮前进方向,即图 6(c)C1 剖面 C 点,应力状态为拉-压复合剪切应力,破坏模式为车辙和 top-down 裂纹共存;点 4 位于轮载下方 8 cm 处,即图 6(c)C2 剖面 D 点,应力状态为压剪应力,路面结构破坏模式为车辙;点 5 位于轮载下方 8 cm 处,即图 6(c)C2 剖面 E 点,  $APPDI_{3D} = 1.026 1$ ,  $\sigma_1 = 0.521 6$  MPa,  $\sigma_3 = 0.050 8$  MPa, 应力状态为压剪应力,路面结构破坏模式为车辙;点 6 位于轮载外侧 2 cm 处,  $|\sigma_1| < |\sigma_3|$ , 应力状态为拉剪应力,路面结构已破坏;点 7 位于路表车轮下方,即图 6(c)C3 剖面 F 点,应力状态为拉-压复合剪切应力,路面结构破坏模式为 top-down 裂纹。

综上,刚性基层下沥青路面应力组成形式有压剪应力、拉剪应力和拉-压复合剪切应力 3 种,对应破坏模式有车辙和 top-down 破坏 2 种。

#### 4 APPDI<sub>3D</sub>影响因素分析

为了能根据  $APPDI_{3D}$  大小、位置及应力组合形式推断可能的路面结构破坏模式,进一步分析因素  $x_1 \sim x_7$  对 22 种方案中层  $APPDI_{3D}$  的影响,并进行逐步回归分析,得到二次回归公式如下:

$$\begin{aligned}
 APPDI_{3D} = & 4.08 + 5.23e^{-2} x_1 - 6.35e^{-3} x_2 + \\
 & 3.18e^{-6} x_2^2 + 1.04e^{-6} x_3 x_4 - 7.81e^{-7} x_1^2 x_2 - \\
 & 1.58e^{-5} x_1^2 x_5 + 2.10e^{-6} x_1^2 x_7 - 5.22e^{-10} x_2^3 - \\
 & 5.44e^{-13} x_4^2 x_6 + 5.34e^{-9} x_5^2 x_4 + \\
 & 4.93e^{-9} x_6^2 x_5 - 9.74e^{-11} x_6^2 x_7, R^2 = 0.998 5
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

方程式各项对回归过程的贡献(按偏回归平方和降序排列)为:

$$\begin{aligned}
 U(9) &= 0.378, U(9)/U = 5.47\% \\
 U(4) &= 0.269, U(4)/U = 3.89\% \\
 U(2) &= 0.257, U(2)/U = 3.73\%
 \end{aligned}$$

- $U(1)=0.203, U(1)/U=2.94\%$
- $U(11)=0.169, U(11)/U=2.44\%$
- $U(3)=0.153, U(3)/U=2.22\%$
- $U(5)=0.125, U(5)/U=1.82\%$
- $U(8)=0.103, U(8)/U=1.50\%$
- $U(7)=3.47e^{-2}, U(7)/U=0.503\%$
- $U(12)=1.51e^{-2}, U(12)/U=0.219\%$
- $U(10)=1.13e^{-2}, U(10)/U=0.163\%$
- $U(6)=5.13e^{-3}, U(6)/U=7.44e^{-2}\%$

式(4)表明:刚性基层沥青路面结构表层 APPDI<sub>3D</sub>影响因素复杂,与面层模量、面层厚度、基层模量、基层厚度等 7 个因素都有关,其中面层模量、面层厚度、基层模量、底基层模量的影响较大。

### 5 结论

- (1) 沥青路面早期主要破坏模式为车辙、top-down 开裂或车辙和 top-down 裂纹共存。
- (2) 刚性基层沥青路面的应力组成形式有压剪应力、拉剪应力及拉-压复合剪切应力。
- (3) 刚性基层沥青路面表层轮载前进方向、轮载下方受到 3 种应力组成的作用,这些应力组成方

式和 APPDI<sub>3D</sub>云图可解释车辙和 top-down 裂纹 2 种不同类型早期破坏模式。

(4) 通过逐步回归分析得到刚性基层沥青面层 APPDI<sub>3D</sub>与面层厚度和模量、基层厚度和模量、底基层厚度和模量、路基模量 7 个因素之间的关系,利用该回归方程可预测拟建路面结构的安全性能,为工程应用提供指导。

### 参考文献:

- [1] 王树威,陈艳艳,薄迎春.车辆轴载作用下半刚性基层沥青路面破坏潜力分级[J].武汉理工大学学报,2012,34(6).
- [2] 李海滨,武金婷,任红丽.沥青碎石与半刚性复合基层沥青路面力学响应[J].广西大学学报:自然科学版,2013,38(3).
- [3] 徐鹤明,郝培文.厚沥青路面 Top-Down 裂缝分析及对路面设计的启示[J].中外公路,2006,26(5).
- [4] 孙路遥,邱俊,王春林.沥青路面“由上而下”型裂缝成因分析[J].交通标准化,2008(5).
- [5] JTG D50-2006,公路沥青路面设计规范[S].

收稿日期:2017-04-10

\*\*\*\*\*

(上接第 114 页)  
就地热再生>铣刨加铺>薄层罩面,就地热再生在常张高速公路中修改造中的应用效果较好。

表 10 判断矩阵 A<sub>2</sub>-B

A <sub>2</sub>	B <sub>21</sub>	B <sub>22</sub>	B <sub>23</sub>	B <sub>24</sub>
B <sub>21</sub>	1	2	1/3	1/3
B <sub>22</sub>	1/2	1	1/4	1/4
B <sub>23</sub>	3	4	1	1
B <sub>24</sub>	3	4	1	1
权重	0.133	0.145	0.361	0.361

表 11 各养护方案下路面性能综合评价的关联度

养护方案	关联度
就地热再生	0.81
铣刨加铺	0.66
薄层罩面	0.46

### 4 结语

该文结合常张高速公路常德段就地热再生中修

项目,对再生后路面相关指标进行现场检测,得出再生后路面使用性能满足相关规范的要求;同时从理论分析的角度,对采用不同养护方案维修后的路面质量进行灰色评价,得出就地热再生施工工艺应用于常张高速公路中修工程能产生良好的效果。

### 参考文献:

- [1] 胡宗文,马士杰.基于路用性能的现场热再生沥青混合料设计[A].第三届国际路面养护技术论文集[C].2009.
- [2] JTG E20-2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [3] Asphalt Recycling and Reclaiming Association, Basic asphalt recycling manual[S].
- [4] 刘思峰.灰色系统理论的产生、发展及前沿动态[J].中国管理科学,2003,16(4).
- [5] 王广月.土建工程综合评价技术及应用[M].北京:人民交通出版社,2011.

收稿日期:2017-02-21