

## 水泥路面碎石化层顶部抗裂夹层疲劳性能分析\*

刘展瑞<sup>1</sup>, 罗少辉<sup>2</sup>, 袁朝圣<sup>2</sup>

(1.广西壮族自治区玉林公路发展中心, 广西 玉林 537000; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 旧水泥路面碎石化后会显著降低旧路面结构的整体强度, 导致沥青加铺层底易产生疲劳开裂破坏, 故常在碎石化层顶部增设富油沥青 AC-10 抗疲劳夹层。文中通过疲劳试验和数值计算, 分析不同荷载方式下碎石化层顶抗疲劳夹层的抗裂性能及抗裂力学机理。结果表明, 抗疲劳夹层对偏荷载作用下的抗裂效果最明显, 但对弯沉影响较小; 疲劳试验与数值模拟结果处于同一数量级, 疲劳寿命预估方程可行; 抗疲劳夹层通过改变裂纹边界、形状等延长裂纹扩展路径, 降低裂纹尖端奇异性, 从而显著提高沥青加铺结构的疲劳寿命。

**关键词:** 公路; 水泥路面碎石化层; 抗裂夹层; 疲劳寿命

中图分类号: U416.214

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)02-0047-05

对旧水泥路面采用专用设备进行均匀的原位冲击、破碎、压实, 破坏路面结构强度和整体性后形成碎石化结构层, 一般需通过加铺沥青层进行结构补强。新的路面结构在交通荷载不断作用下, 应力、应变长期处于交迭变化之下, 易产生疲劳开裂, 严重影响沥青加铺结构的使用寿命。为提高沥青加铺结构的使用寿命, 在碎石化层顶部增设抗裂性能优异的富油沥青 AC-10 抗疲劳夹层, 工程应用效果良好。为进一步揭示碎石化层顶部抗裂夹层的抗裂机理, 该文对抗裂夹层开展疲劳试验和数值计算分析。路面结构层疲劳寿命通过裂纹出现的阈值及扩展速率或材料性能(如强度)的衰减及对应的破坏准则进行研究分析。分析结构采用广西玉林市博白县省道 S209 线路面大修工程(包括 K141+541—K143+541、K144+541—K148+541 两段共 6 km), 旧水泥路面采用多锤头破碎工艺进行碎石化。在旧路面碎石化层与沥青加铺层之间设置 3 cm AC-10 沥青混合料抗裂夹层。通过疲劳试验测试 AC-10 沥青混合料的疲劳性能, 并建立有限元模型对比不同加铺方式下加铺层底的力学行为、裂缝尖端应力强度因子及其扩展速率, 探讨 AC-10 沥青混合料夹层抗裂作用的力学机理。

## 1 疲劳试验

### 1.1 试验材料及方法

#### 1.1.1 试验材料

沥青技术性能满足《公路沥青路面施工技术规

范》的要求, 粗、细集料和填料均为石灰岩石料, 沥青混合料按马歇尔试验法进行配合比设计。沥青混合料疲劳试件采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0703 方法轮碾成型, 再切割成棱柱体试件 250 mm×30 mm×35 mm。

#### 1.1.2 试验仪器及方法

采用 MTS-810 材料试验机进行中点加载弯曲疲劳试验, 模拟路面在车轮荷载作用下的实际受力情况。试验选用应力控制模式下半正弦波加载, 频率为 10 Hz, 荷载水平分别为 0.2、0.3、0.4 和 0.5 4 种应力比。为避免试件产生脱空现象, 半正弦波荷载的最小荷载为最大荷载的 2%。弯曲试验按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0715-2011 进行, 加载速率为 50 mm/min, 弯曲试验温度与疲劳试验温度为 15 °C。

### 1.2 疲劳方程

为减少试验误差, 每种混合料在每个应力比下制作 6 个试件进行弯曲疲劳试验, 试验结果见表 1, 试件破损或加载即坏不予记录。

对试验结果进行双对数曲线拟合, 具有较好的线性关系。疲劳方程如下:

$$N_f = ks^{-n} \quad (1)$$

式中:  $N_f$  为荷载作用次数, 即疲劳寿命;  $s$  为应力比  $\sigma/\sigma_f$ ;  $\sigma$  为每次施加于试件的常量应力的最大幅度;  $\sigma_f$  为根据弯曲试验确定的抗弯拉强度值;  $k$ 、 $n$  为回归系数,  $k$  反映材料疲劳性能的优劣,  $n$  表示材料的疲劳寿命对应力水平的敏感程度。

\* 基金项目: 广西玉林市科学技术局科学研究与技术开发计划项目(玉市科 201925003)

表1 沥青混合料疲劳试验结果

混合料类型	应力比	作用次数/次							平均值	变异系数%
		1	2	3	4	5	6	7		
AC-13C	0.2	83 049	104 634	87 437	77 480	94 083	80 313	77 055	86 293	11.5
	0.3	68 968	56 430	53 586	49 206	37 372	35 094	52 116	50 396	21.5
	0.4	20 134	23 908	19 805	24 086	25 045	18 753	19 056	21 541	13.6
	0.5	15 467	10 116	13 417	9 057	11 970	12 947	13 784	12 394	16.5
AC-10	0.2	92 806	102 044	83 565	89 604	110 935	91 097	91 876	94 561	10.8
	0.3	38 901	40 794	48 515	49 083	39 814	48 093	41 750	43 850	9.3
	0.4	31 709	25 097	30 810	25 885	26 903	29 658	23 180	27 606	10.3
	0.5	12 674	15 875	12 462	14 985	10 376	15 762	11 897	13 433	17.0
AC-20C	0.2	41 307	38 970	39 181	42 098	41 027	38 901	43 087	40 653	4.3
	0.3	18 724	20 896	19 710	20 094	18 976	19 720	18 149	19 467	4.7
	0.4	11 198	10 742	10 271	10 828	8 893	9 204	11 398	10 362	9.4
	0.5	3 908	5 720	4 118	3 980	3 409	3 897	3 255	4 041	19.5
ATB-25	0.2	22 869	21 986	19 875	22 837	19 776	18 823	20 722	20 984	8.1
	0.3	7 930	8 127	7 520	7 209	9 788	8 143	7 962	8 097	10.9
	0.4	4 093	4 102	5 174	4 756	4 192	4 374	4 802	4 499	8.1
	0.5	2 578	2 145	2 451	2 036	2 785	2 569	2 600	2 452	10.9

拟合得到 AC-10 沥青混合料的弯曲试验疲劳方程为:

$$N_f = 3\,646.6(\sigma/\sigma_f)^{-2.051} \quad (2)$$

$\sigma$  可取 AC-10 层底最大拉应力,  $\sigma = 0.34$  MPa, AC-10 抗弯拉强度为 8.22 MPa, 代入式(2), 得  $N_f = 2.51 \times 10^6$  次。该疲劳寿命为 AC-10 开始出现初始疲劳裂缝时的荷载作用次数, 是室内疲劳试验数据分析整理得到的疲劳方程的计算结果。国内外研究表明, 实际使用时现场疲劳寿命比室内疲劳试验所得结果大很多, 一般大 20~100 倍。按此估算的疲劳寿命为  $5 \times 10^7 \sim 2.5 \times 10^8$  次, 能满

足该工程设计交通量的要求。

## 2 抗裂层数值模拟分析

### 2.1 数值建模方法

采用 ABAQUS 有限元软件建立模型进行抗裂层数值分析。为模拟碎石化后路面结构, 将破碎后旧水泥路面分为 6 cm 碎石化层和 20 cm 块裂化层, 其中碎石化层通过降低模量和泊松比模拟, 块裂化层中每隔 60 cm 设置一条纵向裂纹, 由于块裂化层整体性较强, 不作断裂分析, 同时在抗裂夹层 AC-10 中设置随机微小裂缝。模型参数见表 2。

表2 模型参数及几何尺寸

层位类型	模型一			模型二		
	弹性模量/MPa	泊松比	计算厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	计算厚度/m
AC-13C	1 800	0.30	0.04	1 800	0.3	0.04
AC-20C	1 600	0.30	0.06	1 600	0.3	0.06
ATB-25	1 200	0.30	0.12	1 200	0.3	0.12
AC-10	1 800	0.30	0.03	—	—	—
碎石化上层	1 500	0.27	0.06	—	—	—
块裂化层/裂纹层	1 900	0.30	0.20	3 000	0.3	0.26
下基层	3 000	0.30	0.18	3 000	0.3	0.18
土基	50	0.40	0.32	50	0.4	0.32

对 AC-10 厚度及模量范围进行模拟时, 加铺层的层底应力随其模量、厚度而减少, 但从工程技

术、经济等方面考虑, 选择适合实际工程的参数。交通荷载以对称和偏载分布在纵向裂纹上方(见图 1)。

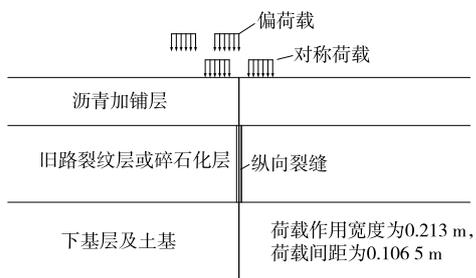
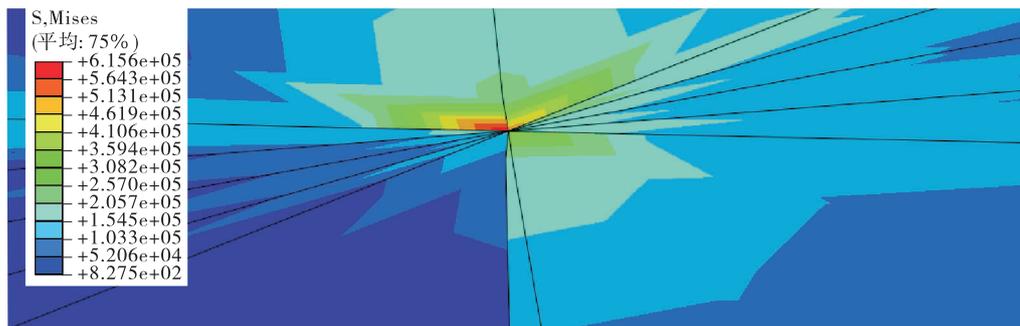


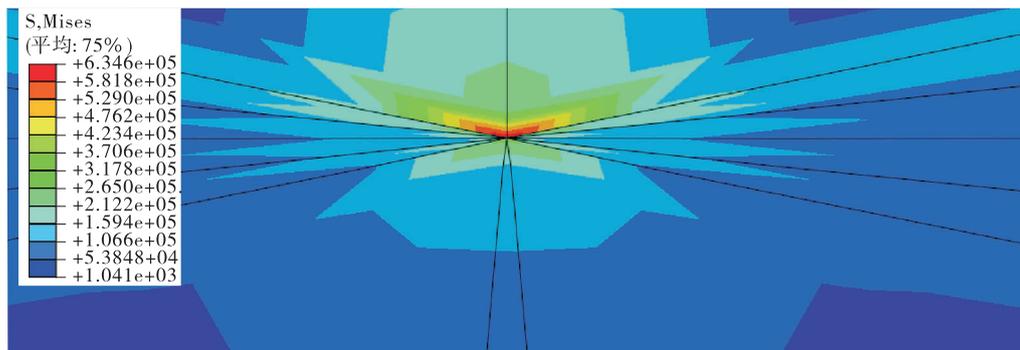
图 1 计算荷载分布

## 2.2 力学行为分析

如图 2 所示,荷载作用在路面时,裂缝周围的单元变形具有相互挤压的趋势,即裂缝趋于愈合;荷载消失时单元变形恢复,即裂缝张开。在循环荷载作用下裂缝的张合作用产生疲劳裂缝扩展。荷载分布方式不同,裂纹扩展速度也不同。对称荷载作用时,裂纹尖端应力呈对称分布,裂纹扩展效果较弱;偏载作用下,裂纹尖端左边应力明显大于右边。



(a) 对称荷载



(b) 偏荷载

图 2 模型一荷载作用下裂缝处应力分布云图(单位:Pa)

图 3 为偏荷载作用下 AC-10 层中裂纹竖向应力变化。从图 3 可看出:裂纹尖端(突变点)弯曲应力为负,即压缩应力,说明径向应力与竖向应力不会导致裂纹扩展,不考虑温度作用时,剪切应力是导致裂纹扩展的唯一原因。为模拟裂纹尖端出现的剪切破坏,在考虑疲劳裂纹破坏时选用最不利工况,即考虑偏载。

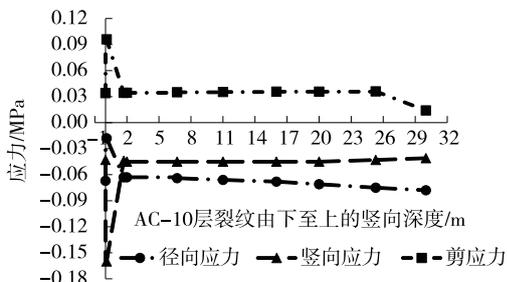


图 3 偏荷载作用下 AC-10 层中裂纹竖向应力变化

沥青加铺层层底应力及弯沉计算结果见表 3。由表 3 可知:1) 不论交通荷载是对称分布还是偏载分布,模型二下加铺层层底应力远大于模型一,说明 AC-10 的布设可极大降低加铺层层底应力,尤其在偏载作用下,AC-10 对应力减少程度远高于对称荷载。2) 在设有 AC-10 的情况下,交通荷载分布方式对加铺层层底应力的影响可忽略,远低于未布设 AC-10 偏荷载产生的应力,为对称荷载的 1.3~1.5 倍。这是由于 AC-10 起到了模量过渡作用,提高了路面结构整体模量的均匀性,同时 AC-10 具有较强的变形能力,能契合上层加铺层的变形,直接改变加铺层与下层之间的层间接触作用,降低最大等效应力和剪应力,消散基层裂缝尖端的能量,延缓裂缝向上扩展到新加铺层的表面。2) AC-10 对弯沉的影响较小,但并不是弯沉与下层模量

表3 沥青加铺层层底应力、弯沉分析结果

模型类型	等效应力/MPa		剪应力/MPa		弯沉/mm	
	对称荷载	偏荷载	对称荷载	偏荷载	对称荷载	偏荷载
模型一	0.079	0.078	0.036	0.039	0.364	0.364
模型二	0.142	0.183	0.054	0.085	0.375	0.375

及厚度关系不大,模型一下层组合形成的等效模量与模型二相差不大,AC-10对弯沉影响较小。

### 2.3 疲劳寿命预估

断裂力学理论认为,在外荷载作用时,若结构裂纹等缺陷附近产生很大的应力集中,将导致屈服强度不能满足裂纹处所产生的局部应力,从而使裂纹在外加循环应力作用下逐渐扩展,即疲劳裂纹扩展。交通荷载下沥青砼疲劳裂缝扩展过程分析可采用Paris经验公式[见式(3)]预估疲劳开裂寿命,但在进行数值模拟时需在材料受拉区布设一道长度为0.1~0.2 cm的初始裂纹。

$$\frac{da}{dN} = A(K)^n \quad (3)$$

式中: $da/dN$ 为裂纹扩展速率; $A$ 、 $n$ 为与材料性质(沥青混合物中沥青性质、含量及混合物孔隙率等)有关的系数; $K$ 为应力强度因子。

$A$ 、 $n$ 根据沥青砼疲劳试验数据确定,取疲劳裂缝扩展参数  $A = 1.475 \times 10^{-11}$ ,  $n = 1.903$ 。根据式

(3),将裂纹扩展长度沿其扩展方向分为多等份,从裂纹原始长度开始,逐步增大裂纹长度(一份设置为一步),以此来模拟裂纹从初始阶段到贯穿整个路面结构的各个阶段。模型一与模型二的有限元计算结果见表4,沥青层裂纹尖端应力强度因子的变化见图4。

从表4可看出:模型一路面结构总疲劳循环次数是模型二的1.9倍,3 cm AC-10增大了面层结构厚度,延长了裂纹扩展的路径长度,路面结构的疲劳寿命大幅提升;式(3)得到的AC-10疲劳次数为  $2 \times 10^7$ 次,相比疲劳试验得到的预估疲劳寿命  $5 \times 10^7 \sim 2.5 \times 10^8$ 次有所降低,这是由于有限元计算是基于断裂力学理论,在计算前需设定结构在荷载作用前即出现微小裂缝,AC-10的结构完整性受到破坏,降低了AC-10抵抗裂缝扩展的能力。

根据文献[15],旧水泥板破碎后模量降低,将使层间拉应力和裂纹尖端的应力强度因子增大,缩短路面疲劳寿命。但从表4、图4来看,破碎后应力强度因子比破碎前小1倍,说明下层模量大小不是影

表4 模型应力强度因子计算结果

步数	当前裂纹总长度/m	应力强度因子 $K_{II} / (\text{kPa} \cdot \text{m}^{1/2})$		当前步的疲劳次数 $N/\text{次}$	
		模型一	模型二	模型一	模型二
0	0.000	—	—	—	—
1	0.010	10.041 79	21.096 74	8 409 326.90	3 563 655.57
2	0.020	10.959 90	22.961 62	7 119 607.24	3 371 402.39
3	0.030	13.993 18	20.910 38	4 472 282.90	8 247 321.93
4	0.040	6.758 27	18.249 72	17 866 161.27	9 594 227.07
5	0.055	10.517 72	19.193 35	11 550 009.29	4 422 275.73
6	0.070	12.364 82	19.709 50	8 489 183.00	4 138 020.04
7	0.085	13.996 32	20.774 40	6 705 555.29	3 315 486.69
8	0.095	15.587 50	26.352 74	3 642 123.10	2 434 962.15
9	0.105	16.653 29	26.769 50	3 211 391.82	2 369 456.95
10	0.120	19.108 96	27.075 79	3 707 704.45	2 304 812.54
11	0.135	13.291 89	27.660 69	7 397 983.72	1 941 820.17
12	0.150	16.856 42	34.593 68	4 707 220.94	942 954.15
13	0.160	26.670 74	63.407 94	1 310 579.25	822 667.32
14	0.180	32.547 99	76.251 44	1 794 338.97	565 935.14
15	0.200	39.792 65	94.860 78	1 224 089.35	299 319.77
16	0.220	63.094 48	158.321 20	509 160.10	131 403.85
17	0.230	80.271 00	217.358 40	161 002.58	39 478.93
18	0.240	119.697 60	261.082 10	150 536.43	13 831.98

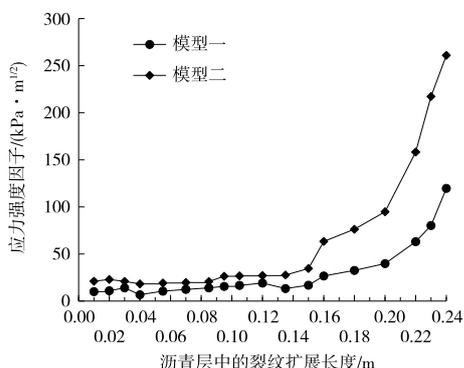


图4 沥青层裂纹尖端应力强度因子变化规律

响应力强度因子变化的主要因素。结合式(4)分析,碎石化技术在影响层间应力的同时,还降低了旧水泥板中裂纹长度 $a$ 及裂纹形状参数 $Y$ (与裂纹边界条件和几何形状有关),是影响裂纹扩展的主要因素。裂纹扩展到0.15 m时,沥青层中的应力在外荷载作用下迅速增大,导致应力强度因子变化速率迅速加快,使沥青层中应力的影响成为裂纹扩展的主导作用。模型二应力强度因子增速远快于模型一,是因为AC-10增大了下层结构的组合模量,使荷载作用下沥青层中产生的应力较小,碎石化层破碎粒径(模量)成为上层疲劳寿命的主要影响因素。

$$K_{II} = Y\tau\sqrt{\pi a} \quad (4)$$

式中: $K_{II}$ 为II型应力强度因子( $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ); $Y$ 为裂纹形状参数,与裂纹边界条件和几何形状有关; $\tau$ 为应力( $\text{Pa}$ ); $a$ 为裂纹长度( $\text{m}$ )。

从图4可看出:裂纹扩展到两种材料的交界面时,裂纹尖端的应力强度因子出现较明显的转折;裂纹扩展到0.03(模型一 AC-10 顶面)及0.12 m(模型二 ATB-25 顶面)时,应力强度因子有下降趋势或增速变缓,而在同一层中裂纹扩展速率增大。这是由于上一层阻断了裂缝的连续贯通,减弱了裂纹尖端的奇异性,同时新的沥青层将加强对裂纹的边界影响,使下层裂缝尖端的发展受到约束,裂缝形状参数减小。

### 3 结论

(1) 通过弯曲试验建立 AC-10 疲劳方程预估其疲劳性能,结果表明 AC-10 疲劳寿命能满足玉林市博白县省道 S209 线路面大修工程的交通荷载等级要求。

(2) 对比不同荷载分布方式下路面加铺结构的力学行为,AC-10 能大大降低沥青加铺层层底最

大等效应力及剪应力,基层垂直裂缝尖端的能量在 AC-10 界面水平消散,可延缓裂缝向上扩展到新加铺层的表面,且效果在偏荷载作用时更明显,为对称荷载的 1.3~1.5 倍,但 AC-10 对加铺层弯沉的影响较小。

(3) 不同加铺方式下 Paris 公式预估路面结构疲劳寿命与疲劳试验所得疲劳寿命在同一数级,设置抗裂夹层的路面结构的疲劳寿命约为未设置路面结构的 1.9 倍,抗裂夹层能显著提高碎石化路面结构的疲劳寿命。

(4) 在裂纹初始阶段,裂纹的连通长度及形状参数是影响裂纹扩展的主要因素。AC-10 通过阻断裂缝的连续性减弱裂纹尖端的奇异性,加强对裂纹的边界影响,使碎石化层裂缝尖端的发展受到约束作用,降低形状参数 $Y$ 、裂纹长度 $a$ ,增加面层厚度,从而延长裂缝扩展路径。

### 参考文献:

- [1] 王松根,张玉宏,曹茂坤.水泥混凝土路面碎石化改造技术应用与探讨[J].公路,2004(5):12-15.
- [2] 吴志勇,张肖宁,游宏,等.基于应变控制的沥青混合料疲劳寿命预测[J].华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(2):139-144.
- [3] PARK H M, CHOI J Y, LEE H J. Performance evaluation of a high durability asphalt binder and a high durability asphalt mixture for bridge deck pavements[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 219-225.
- [4] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范: JTG F40-2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [5] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [6] 田小革,吕松涛,郑健龙.沥青混合料的疲劳效应研究[J].公路交通科技,2005,22(10):11-13.
- [7] 陈定.TLA 改性沥青混合料疲劳性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2008.
- [8] 胡瑞波.拉压荷载作用下沥青混合料的疲劳特性研究[D].西安:长安大学,2012.
- [9] 刘小永.基于 MHB 碎石化技术的沥青加铺层力学特性分析[D].武汉:武汉理工大学,2011.
- [10] 张玉宏,李昶,王松根,等.碎石化后沥青加铺层应力对比分析[J].公路交通科技,2006,23(3):1-5.
- [11] 元松,谈至明.沥青路面荷载型竖向反射裂缝疲劳断

表4 软土地基处理方案各指标的熵权

指标	熵权 $w$	指标	熵权 $w$
水文地质	0.116 4	工期	0.131 5
施工条件	0.118 3	噪音	0.116 2
处治效果	0.138 8	对空气和水质的影响	0.121 1
造价	0.140 3	对周围建筑的影响	0.117 1

### 2.3.4 计算熵权密切值

按式(8)~(10)计算,得到3种软土地基处理方案的密切值  $c=[0.216\ 0\ 0.053\ 7\ 1.129\ 4]$ 。

### 2.3.5 综合评定结果

根据上述计算结果,处治效果、造价及工期的赋权较高,对软土地基处理方案选取的影响较大;长螺旋钻孔灌注桩的密切值最小,说明该方法优于钉形水泥土双向搅拌桩和静压预应力管桩。而实际工程中软土地基处理方案为长螺旋钻孔灌注桩,且施工后单桩竖向抗压承载力与复合地基承载力都符合要求,证明该处理方法有效、该评价模型科学合理。

## 3 结语

将密切值法引入软土地基处理方案优选中,建立基于熵权-密切值法的软土地基处理方案优选模型,该模型原理简单、概念清晰、易于实现,同时解决了一般模型需确定隶属函数等主观性参数的问题,使评价结果更精准。工程应用表明,模型评价结果与工程实际使用方案相吻合,施工后单桩竖向抗压承载力与复合地基承载力都符合设计要求,验证了模型的正确性及实用性。该模型能在考虑技术性、经济合理性、环境影响的情况下有效地对软土地基施工方案进行优选,对软土地基施工方案选择具有参考价值。

### 参考文献:

- [1] 亢长江.道路桥梁施工中的软土地基处理技术[J].建材与装饰,2019(18):256-257.  
 [2] 韩涛.公路施工中软土地基处理技术分析及应用[D].邯郸:河北工程大学,2017.

- [3] 张超.高速公路湖相软土地基处理效果与评价技术研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2017.  
 [4] 王广月,牛之庚,王萌,等.地基处理方案评价的灰色关联逼近理想解法[J].数学的实践与认识,2011,41(9):115-120.  
 [5] 李元军.层次分析法在公路软基处理方法选择中的应用[J].山西交通科技,2015(6):4-7.  
 [6] 胡德斌.公路软基处理决策问题智能化技术分析[J].河南建材,2016(3):261-262.  
 [7] 张士励,张亦飞,袁航新,等.考虑指标不确定性的软基处理方案优选模型[J].铁道工程学报,2010,27(3):19-23.  
 [8] 付旭,刘益良,刘晓立.基于层次分析法的软基处理方案灰色-模糊多属性群决策模型研究[J].北华航天工业学院学报,2017,27(4):1-4.  
 [9] 张瑞华,孙渤星,何思长,等.密切值法视角对四川省医疗机构发展概况的综合分析[J].中国卫生统计,2017,34(1):147-149.  
 [10] 孙佳佳,帅红,李荣荣,等.基于SD模型的湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力优化研究[J].科技和产业,2020,20(3):39-45.  
 [11] 赵芳芳.面板数据综合评价中权重确定方法研究[D].长沙:湖南大学,2017.  
 [12] 魏炜.基于密切值法的道路选线方案评价研究[J].西部交通科技,2020(1):56-58.  
 [13] 张星星.公路软土地基处理及沉降分析[D].邯郸:河北工程大学,2019.  
 [14] 张贤奎.汕头市软土的分布及工程地质特征[J].西部探矿工程,2001(增刊1):137-139.  
 [15] 李石坚.CFG桩在公路软土路基设计中的应用[J].工程与建设,2019,33(2):268-270.  
 [16] 程严毅.道路桥梁施工中软土地基处理技术应用实践[J].河南科技,2020(8):94-96.  
 [17] 杨晓月.软土路基处理技术在公路工程施工中的应用研究[J].工程建设与设计,2019(4):201-202.

收稿日期:2020-08-24

\*\*\*\*\*  
 (上接第51页)

- 裂分析[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(10):1352-1357.  
 [12] 周志刚.交通荷载下沥青类路面疲劳损伤开裂研究[D].长沙:中南大学,2003.  
 [13] 周玉民.水泥混凝土路面沥青加铺层反射裂缝机理与

设计方法研究[D].上海:同济大学,2007.

- [14] 赵冰,贺剑辉,关宏信,等.不同碎石化效果下沥青加铺结构断裂力学分析[J].交通科学与工程,2015,31(1):14-20.

收稿日期:2020-06-15