

# 复合式机场 道面荷载型反射裂缝影响因素分析

马翔 倪富健 陈荣生

东南大学，交通学院，南京 210096

**摘要:** 为了考察结构参数对复合式机场道面荷载型反射裂缝的影响规律和显性关系，基于线弹性断裂力学理论和平面应变假设，应用 ABAQUS 有限程序首先分析了在反射裂缝扩展过程中结构参数对复合式道面裂缝尖端应力强度因子的影响，然后利用正交设计，选取结构参数作为考察因素，计算裂缝尖端应力强度因子，并进行极差和方差分析。研究表明：随着裂缝不断扩展，I 型应力强度因子不断减小，II 型应力强度因子不断增加；土基模量、面层厚度对 I 型反射裂缝有显著影响，基层模量对 II 型反射裂缝也有显著影响，加固地基是复合式机场道面结构设计中效果最明显的一种抗反射裂缝措施。

**关键词:** 复合式机场道面；反射裂缝；应力强度因子；正交设计

中图分类号：TU248.6

文献标识码：A

文章编号：1672-4747(2009)03-0057-07

## Factor Analysis on the Load-bearing Reflective Cracking of Composite Airport Pavement

MA Xiang NI Fu-jian CHEN Rong-sheng

Transportation College, Southeast University,  
Nanjing, 210096, China

**Abstract:** To analysis the influence of structure parameter on the load-bearing reflective cracking of the composite airport pavement, and based on the linear elastic fracture mechanics and plane strain assumption, the finite element program of ABAQUS was firstly

收稿日期：2008-10-22.

基金项目：国家自然科学基金项目（60472120）

作者简介：马翔（1980-），男，湖北江陵人，东南大学交通学院工学博士，研究方向：路基路面材料。

used to analyze the influence of the structure parameter on stress intensity factor (SIF) during the crack extension. Then, taking the structure parameter as mix-designed parameters, the SIF was studied with orthogonal experiments, and the analyses of range and variance were done. The result shows that Mode I SIF decreased while Mode II SIF increased, during the reflective cracking extension; the modulus of the subgrade and thickness of the asphalt structure can obviously affect Mode I SIF, and the moduli of the base can obviously affect Mode II SIF. Reinforced subgrade is the best anti-reflection cracking method in the structure design of composite airport pavement.

**Key words:** Composite airport pavements, reflective cracking, stress intensity factors, orthogonal design

## 0 引言

沥青混凝土与水泥混凝土复合式机场道面刚柔相济, 兼顾刚性路面和柔性路面的优点。水泥混凝土板提供一个稳定、坚实的基础, 沥青混凝土则为表面功能特性优良的磨耗层。然而, 在水泥混凝土板间存在各种形式的接缝或裂缝, 在荷载和环境的作用下, 沥青面层在裂缝处容易引起应力集中, 产生反射裂缝, 水沿着裂缝渗入道面结构体内, 导致道面出现各种结构性破坏的病害。关于路面反射裂缝的产生、防治措施与室内模拟, 国内外已有许多相关研究成果<sup>[1]-[3]</sup>, 却鲜有针对复合式机场道面结构参数对反射裂缝影响因素的研究。文献[4]应用有限元和断裂力学理论分析了路面反射裂缝尖端的应力强度因子, 但其研究假设路面各层间完全连续, 张开型断裂引起的应力强度因子  $K_I$  为负, 反而阻止反射裂缝的发展。因此, 在分析过程中都只考虑了撕裂型断裂引起的应力强度因子  $K_{II}$  对路面反射裂缝的影响。实际上 I 型断裂是最常见、最基本也是最危险的, 而且, 层间完全连续的假设与路面的实际工作情况区别也很大。本文以线弹性断裂力学理论为基础, 考虑水泥板底与基层间的摩擦状况, 借助 ABAQUS 有限元软件分析复合式道面反射裂缝扩展过程中影响因素进行系统研究, 为复合式机场道面的结构设计提供依据。

## 1 线弹性断裂力学理论

线弹性断裂力学的研究对象是带有裂纹的线弹性

体。目前用于线弹性断裂力学研究的有以 Griffith-Orowan 理论为基础的能量理论和 Irwin 的应力强度因子理论, 本研究采用应力强度因子理论分析道面结构体内的裂缝。各种复杂的断裂形式, 可以分解为三种基本断裂类型的组合, 即 I 型断裂、II 型断裂和 III 型断裂。I 型断裂属于张开型断裂, II 型断裂属于滑移型断裂, III 型断裂属于撕裂型断裂。在这三种断裂类型中, 以 I 型断裂最常见、最基本也最危险。

依据断裂力学理论可知: 裂纹尖端是一个奇点, 常规的强度准则不再适用, 不能用应力值的大小来衡量材料的受力程度和极限状态, 而引入应力强度因子作为裂纹端部应力场强度的参量。裂缝尖端附近弹性场的常参量应力强度因子  $K$  表示了在外载作用下的断裂弹性构件裂纹尖端的力学性状, 它把影响裂纹尖端性状的各种因素综合为裂尖应力应变场的强度集中地表现出来。这实际上是以数值表示了不同裂纹尖端趋向开裂的严重程度。三种不同断裂类型产生的应力强度因子分别用  $K_I$ 、 $K_{II}$ 、 $K_{III}$  表示, 一般定义三种形式的应力强度因子为:

$$\left. \begin{aligned} K_I &= \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_y \Big|_{\theta=0} \sqrt{2\pi r} \\ K_{II} &= \lim_{r \rightarrow 0} \tau_{xy} \Big|_{\theta=0} \sqrt{2\pi r} \\ K_{III} &= \lim_{r \rightarrow 0} \tau_{yz} \Big|_{\theta=0} \sqrt{2\pi r} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由  $K$  的各种表达式可以看出, 在构件、裂纹、加载方式等确定以后,  $K$  值将随着外力的增大而增大。 $K$  值增大到一定程度时必然会导致构件的断裂破坏。

试验表明,对同一材料的不同构件,若以同一种开裂形式加载,且处于同一种应力状态下,那么,它们断裂时的  $K$  值是相同的,这一  $K$  值自然是一种临界值。把裂纹发生断裂破坏时的快速扩展现象称之为失稳扩展,那么,应力强度因子理论可以作如下叙述:当裂纹尖端应力强度因子  $K$  达到某一临界值时,裂纹发生失稳扩展。临界值称为材料的断裂韧度。它表征材料阻止裂纹失稳扩展的能力,是材料的一种机械性能参量,或称为材料的一种韧性指标。三种断裂类型的断裂判据为:

$$\left. \begin{aligned} K_I &= K_{IC} \\ K_{II} &= K_{IIC} \\ K_{III} &= K_{IIIC} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对于 I 型、II 型复合型断裂,本研究取偏于安全的直线型相关线  $K_{IC} = K_I + K_{II}$  作为 I、II 型复合加载下的工程断裂判据<sup>[5]</sup>,因此,采用式 3 计算复合型强度因子  $K^*$ 。

$$K^* = K_I + K_{II} \quad (3)$$

## 2 有限元模型及基本参数

### 2.1 模型选择及网格划分

本研究将机场道面结构简化为平面应变模型。根据线弹性断裂力学理论,裂缝尖端的应力应变具有奇异性,采用常规单元不能合理反映裂缝尖端应力场的奇异性,在裂缝尖端设置图 1 所示的奇异单元,采用 ABAQUS 程序中的 singularity 命令生成的奇异单元可以很好的模拟裂缝尖端的奇异性<sup>[6]</sup>。网格划分过程中对裂缝尖端进行细化,并采用过渡单元粗化尖端以外的单元(如图 2 所示),保证计算精度的同时,节约计算时间。

### 2.2 基本假设与参数

本研究以复合式机场道面为研究对象,采用三轴双轮(1.4 × 1.45m) B777-200B 作为计算荷载,主起落架轮胎压力为 1.45 MPa,单轮作用宽度

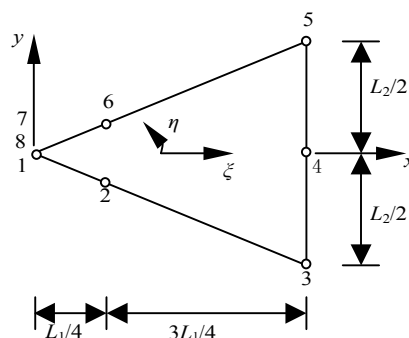


图 1 奇异单元

Fig.1 Singular element

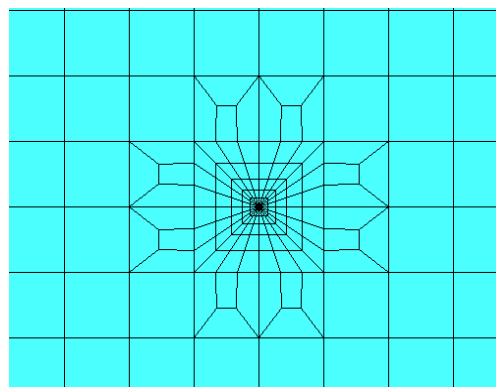


图 2 裂缝处网格

Fig.2 Mesh generation at the crack

0.22 m<sup>[7]</sup>。经过试算,假设初始裂纹出现在接缝边缘,荷位采用最不利的偏载(荷载作用于初始裂纹延长线边缘处),荷载间距为 1.45 m,单轮作用宽度为 0.22 m 的三轮荷载。在试算过程中发现,结构层间保持完全连续时,裂缝尖端 I 型应力强度因子始终为负,不可能存在张开型的反射裂缝,这与道面实际工作情况区别也很大,因此,计算过程中在水泥混凝土板与水稳基层间设置 0.3 的摩擦系数,其他各层保持完全连续。此外,假定各结构层都由线弹性的各向同性、均质材料组成,地基依据弹性半空间地基假设,在有限元程序中采用有限尺寸。研究过程中,模型的边界条件为:地基地部完全约束,各结构层两侧铰接,具体路面各层材料参数及厚度如表 1 所示。

表1 道面结构层厚度及材料参数

Tab.1 Thicknesses and material parameters of the pavement structure

序号	结构层	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比 <sup>[8]</sup>
1	沥青面层	10	2 000	0.35
2	水泥混凝土板	26	30 000	0.15
3	水稳基层	30	5 000	0.15
4	二灰底基层	36	600	0.15
5	土基	1 000	100	0.40

### 3 裂缝扩展过程中结构参数的影响

在复合式机场道面结构设计中, 关键的设计参数是各结构层的厚度与强度, 研究过程中假设裂纹一直保持垂直向上扩展, 通过裂缝尖端的应力强度因子讨论不同结构层的厚度与模量在反射裂缝扩展过程中的影响, 本文没有考虑水泥板参数的影响。a/h 为沥青面层裂缝扩展长度与面层厚度的比值, 通过 a/h 表征不同的裂缝扩展深度。各结构层参数对裂缝尖端应力强度因子影响如图 3~图 9 所示。

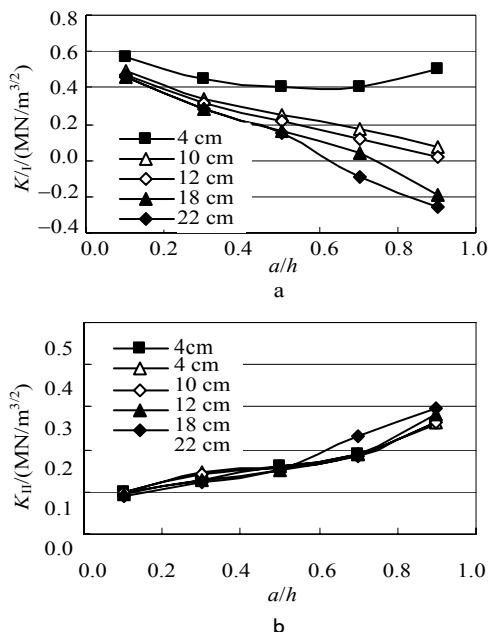


图3 不同面层厚度时反射裂缝扩展过程中的应力强度因子

Tab.3 SIF in the reflective crack developing with different asphalt layer thicknesses

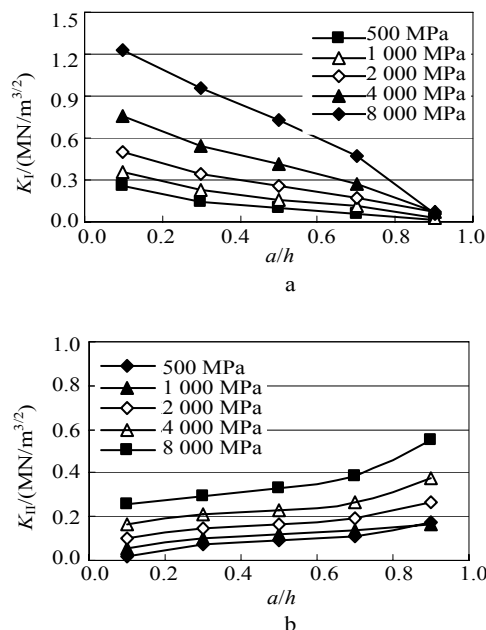


图4 不同面层模量时反射裂缝扩展过程中的应力强度因子

Tab.4 SIF in the reflective crack developing with different asphalt layer moduli

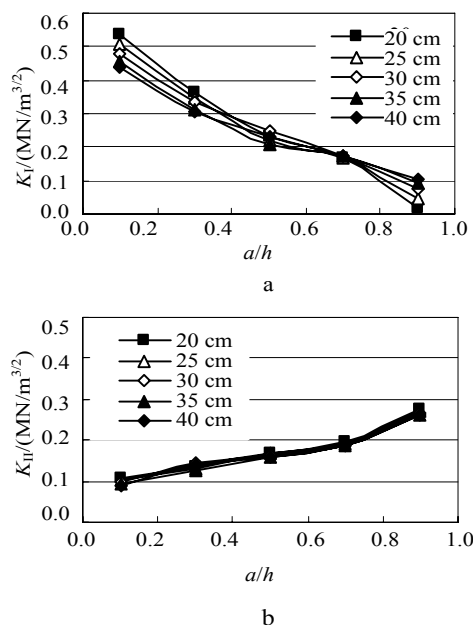


图5 不同基层厚度时反射裂缝扩展过程中的应力强度因子

Tab.5 SIF in the reflective crack developing with different base thicknesses

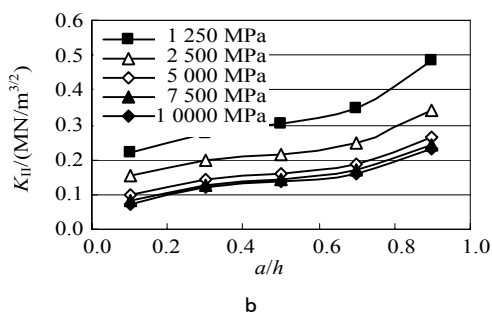
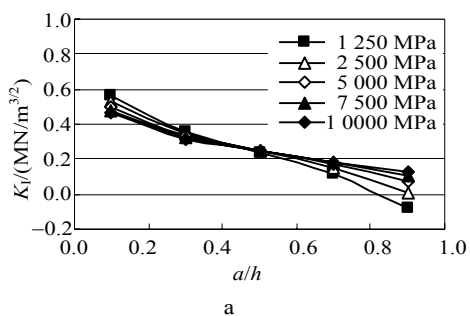


图6 不同基层模量时反射裂缝扩展过程中的应力强度因子

Tab.6 SIF in the reflective crack developing with different base moduli

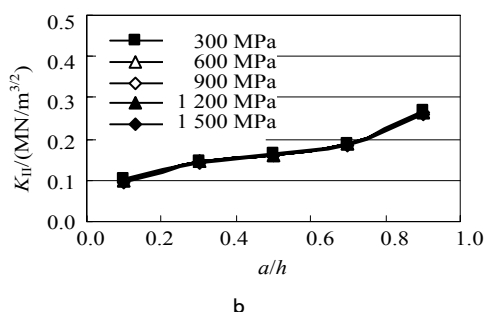
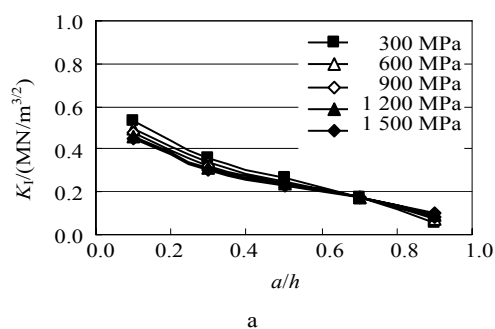


图8 不同底基层模量时反射裂缝扩展过程中的应力强度因子

Tab.8 SIF in the reflective crack developing with different sub-base moduli

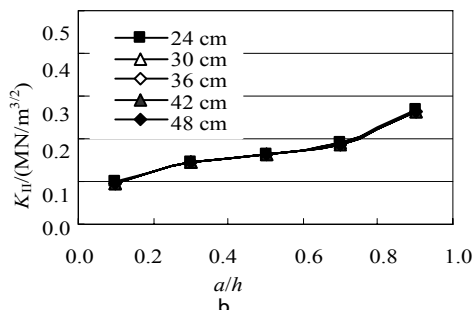
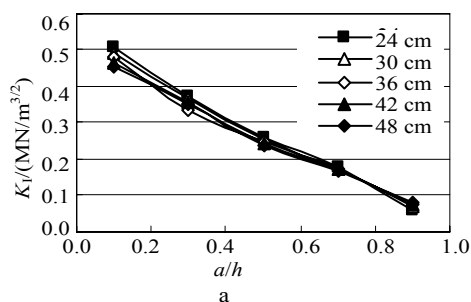


图7 不同底基层厚度时反射裂缝扩展过程中的应力强度因子

Tab.7 SIF in the reflective crack developing with different sub-base thicknesses

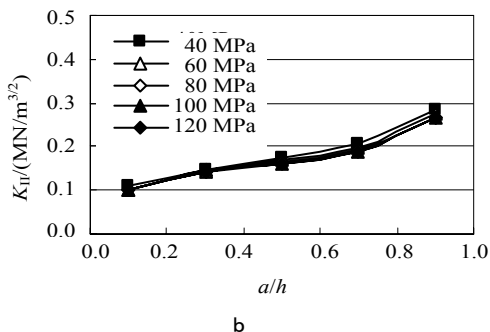
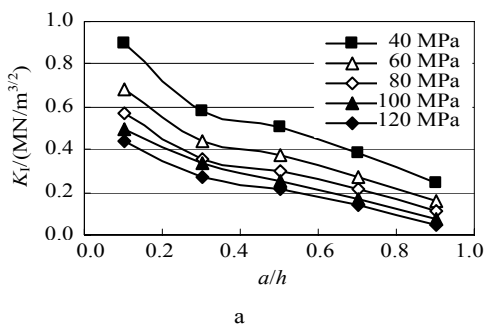


图9 不同土基模量时反射裂缝扩展过程中的应力强度因子

Tab.9 SIF in the reflective crack developing with different sub-grade moduli

通过以上各图的对比分析,得到如下几点结论:

(1) 随着裂缝不断扩展,  $K_I$  不断减小,  $K_{II}$  不断增加, 张开型的反射裂缝不容易产生, 但容易产生滑移型的反射裂缝;

(2) 随着裂缝扩展程度不同, 基层、底基层参数对 I 型应力强度因子的影响规律不同。在裂缝发展初期, 基层厚度越厚、模量越大; 底基层越厚、模量越大抗反射裂缝效果越好, 而在裂缝发展后期则呈现相反的规律;

(3) 面层模量对反射裂缝的发展影响明显, 无论裂缝扩展到何程度, 随着面层模量的增加, 两种类型应力强度因子都急剧增加, 这可以解释复合式道面冬天过后反射裂缝明显增加的现象;

(4) 除面层模量以外, 面层厚度、土基模量对 I 型应力强度因子影响也十分明显, 基层模量对 II 型应

力强度因子影响明显。

### 4 结构参数显著性分析

第三节内容分析了结构参数的单个因素在裂缝扩展过程中裂缝尖端应力强度因子的变化规律, 为了明确复合式道面抗反射裂缝设计关键的结构参数, 还需要进行各结构参数对反射裂缝影响的显著性分析。为此, 研究过程中采用正交设计法对面层厚度、基层厚度、基层模量、底基层厚度、底基层模量、土基模量等因素对反射裂缝的影响进行了显著性分析。面层模量随着温度而变化, 在结构设计中无法考虑, 因此, 正交设计过程中没有考虑面层模量因素。正交设计采用 7 因素 3 水平的正交表  $L_{18}(3^7)$ , 正交设计表<sup>[9]</sup>如表 2, 其中第 7 列为空列作为误差列。

表 2 L18 (37) 正交设计表及应力强度因子结果

Tab. 2 Orthogonal design table and the results of SIF

试验号	因素						空列	$K_I$	$K_{II}$	$K^*$
	面层厚度	基层厚度	基层模量	底基层厚度	底基层模量	土基模量				
1	4	20	2 500	30	300	40	1	1.023	0.211	1.235
2	4	30	5 000	36	600	80	2	0.525	0.127	0.652
3	4	40	10 000	42	900	120	3	0.346	0.085	0.431
4	10	20	2 500	36	600	120	3	0.336	0.205	0.541
5	10	30	5 000	42	900	40	1	0.588	0.150	0.738
6	10	40	10 000	30	300	80	2	0.349	0.116	0.466
7	18	20	5 000	30	900	80	3	0.370	0.135	0.505
8	18	30	10 000	36	300	120	1	0.244	0.110	0.354
9	18	40	2 500	42	600	40	2	0.504	0.167	0.671
10	4	20	10 000	42	600	80	1	0.541	0.101	0.642
11	4	30	2 500	30	900	120	2	0.393	0.207	0.600
12	4	40	5 000	36	300	40	3	0.821	0.116	0.938
13	10	20	5 000	42	300	120	2	0.353	0.156	0.509
14	10	30	10 000	30	600	40	3	0.620	0.137	0.757
15	10	40	2 500	36	900	80	1	0.360	0.197	0.557
16	18	20	10 000	36	900	40	2	0.550	0.134	0.684
17	18	30	2 500	42	300	80	3	0.373	0.166	0.539
18	18	40	5 000	30	600	120	1	0.229	0.124	0.353

分别对表 2 中的 18 种情况进行裂纹扩展中 ( $a/h$  取 0.3) 应力强度因子计算, 计算结果如表 2 所示 (厚度单位为: cm; 模量单位为: MPa; 强度因子单位为:

$MN/m^{3/2}$ 。) 并对计算结果进行极差和方差分析, 分析结果列于表 3 中。

方差分析时, 分别计算各因素的偏差平方和、

表3 计算结果分析

Tab.3 Analysis of the calculated results

影响因素	分析结果					
	极差分析(极差)			方差分析(F比)		
	$K_I$	$K_{II}$	$K^*$	$K_I$	$K_{II}$	$K^*$
面层厚度	0.230	0.021	0.232	21.50	4.44	24.00
基层厚度	0.094	0.023	0.117	3.63	4.53	6.14
基层模量	0.056	0.078	0.134	1.25	54.86	7.86
底基层厚度	0.046	0.017	0.065	0.75	2.58	1.71
底基层模量	0.092	0.008	0.088	3.50	0.53	3.71
土基模量	0.367	0.013	0.372	53.88	1.25	64.14

自由度以及  $F$  比,  $F$  比结果见表 3。本研究中的自由度为 2, 由  $F(2, 2)$  分布表<sup>[10]</sup>查得  $\alpha = 0.01$ ,  $\alpha = 0.05$ ,  $\alpha = 0.10$  时对应的临界值  $F_{1-\alpha}$  分别为 99, 19, 9。对照表 3 中方差分析结果可以看出, 在水平  $\alpha = 0.05$  时, 面层厚度和土基模量对于  $K_I$  的影响是显著的, 基层模量对  $K_{II}$  的影响是显著的, 面层厚度和土基模量对  $K^*$  影响是显著的, 极差分析结果表明影响程度排序与方差分析结果完全一致。

由此可见, 为了延缓反射裂缝的发展, 在复合式道面结构设计过程中, 需要重点采取如下几点措施:

#### 参考文献

- [1] 周志刚. 加筋延缓沥青路面反射裂缝的疲劳损伤分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 239-242.
- [2] 倪富健, 尹应梅, 高明生. 聚酯玻纤布防荷载型反射裂缝室内模拟试验[J]. 东南大学学报, 2007, 37(1): 128-131.
- [3] Gallego Juan, Prieto Jorge N. Development of new laboratory equipment for the study of reflective cracking in asphalt overlays [R]. Paper No. TRB2006, 2006.
- [4] 陈锋锋, 黄晓明, 岳学军. CRC-AC 复合式路面沥青层反射裂缝影响因素分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(2): 48-51.
- [5] Hibbitt, Karlsson & Sorensen. ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.0[M]. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc 2002.
- [6] 洪起超. 工程断裂力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
- [7] 中国航空信息中心《世界飞机手册》编写组. 世界飞机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [8] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [9] 侯化国, 王玉民. 正交试验法[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1985.
- [10] 唐鸿龄, 张元林, 陈浩球. 应用概率[M]. 南京: 南京工学院出版社, 1988.

(中文编辑: 吴继屏)

加固地基增加土基强度, 增加面层厚度, 增加基层强度和厚度, 其中加固地基是最经济也是效果最明显的一种措施。

## 5 结论

本文通过各结构参数对复合式机场道面反射裂缝尖端应力强度因子的影响分析, 主要得到如下几点结论:

- (1) 随着裂缝不断扩展, I 型应力强度因子不断减小, II 型应力强度因子不断增加。
- (2) 面层模量大的冬天更容易导致反射裂缝发展。裂缝初期, 基层厚度越厚, 模量越大, 底基层越厚, 模量越大抗反射裂缝效果越好, 而在裂缝发展后期呈现相反的规律。
- (3) 面层厚度、土基模量对 I 型反射裂缝有显著影响, 基层模量也对 II 型反射裂缝有显著影响。“建设过程中加固地基, 使用过程中保证土基强度”能有效延缓复合式机场道面反射裂缝的发展。