

文章编号:1005-0523(2013)06-0084-05

跨越结构层的反射裂缝扩展过程参数影响分析

刘仕贵

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:基于ABAQUS有限元软件和断裂力学分析理论,采用离散裂缝长度模拟反射裂缝扩展过程,针对裂缝由基层底扩展并跨越至面层顶时,不同结构层参数对裂缝尖端应力强度因子影响进行了分析,并通过工程实例进行了结构层参数优化设计计算。结果表明:在荷载作用下,基层底部往上存在一定范围的受拉区,受拉区裂缝将受到张拉和剪切的混合型作用,面层和基层参数的增大都会引起张拉型应力强度因子的增大,对早期裂缝控制不利;裂缝扩展后期,适当增大基层模量、厚度以及面层厚度可减小剪切型应力强度因子,其中适当增加面层厚度较明显;在防治反射裂缝扩展方面,在保证路面其他控制条件下,应选择较低的面层模量;工程实例的优化设计计算验证了前述结论。

关键词:反射裂缝;早期破坏;应力强度因子;结构层参数

中图分类号:U416

文献标志码:A

半刚性基层沥青路面结构具有整体强度高、水稳定性好、经济等优点,因此无论在高速公路还是低等级公路中都广泛采用,已成为我国沥青路面的主要结构形式。然而半刚性基层容易在工后产生干、温缩裂缝,这种裂缝会在行车荷载和环境作用下反射至面层,导致路面发生严重的早期破坏。裂缝的出现改变了路面结构的受力模式,使得半刚性基层裂缝处应力和位移不再连续,且裂缝处有可能出现拉应力集中现象,进而造成裂缝的向上延伸扩展^[1]。现有研究中^[1-4]主要针对基层有贯通裂缝时面层反射裂缝的扩展进行了研究,然而实际路面中半刚性基层裂缝不一定是贯通的;通常沥青面层处于受压状态,而基层下部为受拉状态,拉应力易使基层底部初始裂缝发生疲劳张拉扩展。再加上由于设计和施工方面存在的缺陷,现有用于防治反射裂缝措施的效果存在不良现象^[5-6],所以对于反射裂缝的防治不能仅依靠设置防治措施,更应从沥青路面结构层设计参数选取的合理性着手。因此,针对裂缝由基层底部扩展至面层顶时,从路面结构层参数对反射裂缝扩展的影响方面进行分析,从而为防治半刚性基层沥青路面结构因反射裂缝导致的早期破坏提供理论参考。

1 有限元计算模型及相关参数

根据我国沥青路面弹性体系设计理论,假定沥青路面结构各层是连续、完全弹性、均匀、各向同性,材料的力学性能服从虎克定律。采用有限元软件ABAQUS建立二维平面应变模型,宽度取6 m,深度方向取3 m,模型底部固定约束,路表自由,道路两侧约束水平位移。为提高计算效率及精度,采用非均匀的网格

收稿日期:2013-10-11

作者简介:刘仕贵(1987—),男,硕士研究生,主要研究方向为道路材料。

划分方法,由路面横向两侧向中间逐渐增密,由土基到路表逐渐增密,其中在裂缝尖端对网格进行细化。模型采用等参八节点单元,由于裂缝尖端存在应力集中现象,为提高计算精度,在裂缝尖端部位采用退化的四分之一节点单元^[7],有限元模型如图1所示。

反射裂缝向上扩展角度通常都比较大,由于车辆行驶过程中,裂缝尖端受到裂缝两侧方向相反的偏荷载作用使得裂缝扩展最终几乎是竖直向上扩展的^[3],因此本模型中裂缝采用竖直方向。为模拟反射裂缝由基层底部向面层顶的扩展过程,采用离散的裂缝长度,反射裂缝扩展过程模拟示意图如图2所示。

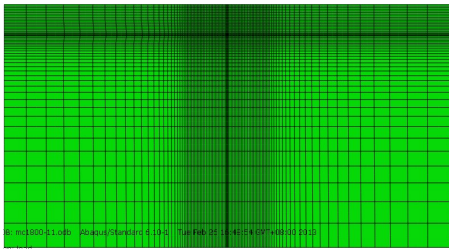


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

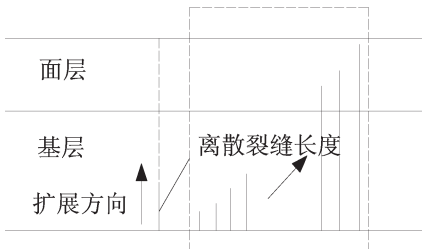


图2 裂缝扩展过程模拟示意图

Fig.2 Simulation diagram of on crack propagation process

车辆荷载采用标准荷载轮压为 $p = 0.7 \text{ MPa}$, 相当量圆直径 $d = 21.30 \text{ cm}$, 根据等效原则荷载转换为线荷载大小为 $0.117\ 371 \text{ MPa}$ ^[8]。荷载经过裂缝上方最不利情况分为正荷载和偏荷载, 面层反射裂缝无论在正荷载还是偏荷载作用下, 裂缝面处于受压状态, 形成反射裂缝的直接原因是裂缝尖端剪应力的奇异性^[9]。为此, 以下主要针对偏荷载进行计算分析。

本模型中采用典型半刚性基层沥青路面结构, 包括面层、基层、底基层、土基。通常面层由上、中、下三层组成, 考虑面层粘结相对较好且模量相差不大, 为方便计算面层采用一层, 厚度为叠加厚度, 模量为平均模量。王宏畅^[2]指出土基、底基层结构层参数对面层反射裂缝影响较小, 因此主要针对面层和基层结构参数的变化进行计算分析。参考公路JTG D50-2006对结构层参数要求, 取各结构层参数见表1。

表1 路面结构层参数

Tab.1 Structural parameters of layers

路面结构层	面层	基层	底基层	土基
基准模量/MPa	1 400	2 000	800	40
泊松比	0.25	0.3	0.35	0.4
基准厚度/cm	18	30	20	—
模量变化/MPa	1 000, 1 800	1500, 2500	—	—
厚度变化/cm	10, 25	20, 40	—	—

2 计算结果分析

根据断裂力学理论,对于带裂缝结构的应力场强度通常用应力强度因子(简称SIF)来描述,其中 K_I 为张拉型应力强度因子, K_{II} 为剪切型应力强度因子。考察某一量的变化对研究问题的影响,通常采用固定其它量方法,当结构层某一参数变化时,其他为基准参数,结构层模量变化时应力强度因子随裂缝扩展变化情况见图3,厚度变化时应力强度因子随裂缝扩展变化情况见图4,图中Surf表示面层,Base表示基层。

由图3可知,随着裂缝的扩展, K_I 由正变为负并负值不断增大, K_I 为正表示裂缝尖端受张拉作用,说明在荷载作用下,基层底部往上存在一定范围的受拉区; K_{II} 不断增大,在裂缝靠近路表时, SIF 将迅速增大。在基层受拉区,裂缝将受到张拉和剪切共同作用,增大面层和基层模量都将增大受拉区 K_I 。在基层

内,模量变化对 K_{II} 影响很小;在面层内,增大面层模量将增大 K_{II} ,增大基层模量将减小 K_{II} ,说明适当增大基层模量可以抑制反射裂缝的剪切扩展。

由图4可知,随着裂缝扩展, K_I 由正变负并负值不断增大,在基层受拉区 K_I 先增大后减小,增加面层厚度和基层厚度都将增大 K_I ,且会明显增大基层受拉区范围。 K_{II} 随着裂缝扩展不断增大,增大面层和基层厚度可以一定程度上减小剪切型应力强度因子 K_{II} (其中面层厚度较明显),但厚度增大到一定值后,对 K_{II} 减小不明显,甚至在面层内有可能增大 K_{II} 。可见,适当增大面层和基层厚度可以减小裂缝扩展后期剪切型应力强度因子,其中增大面层厚度较明显。

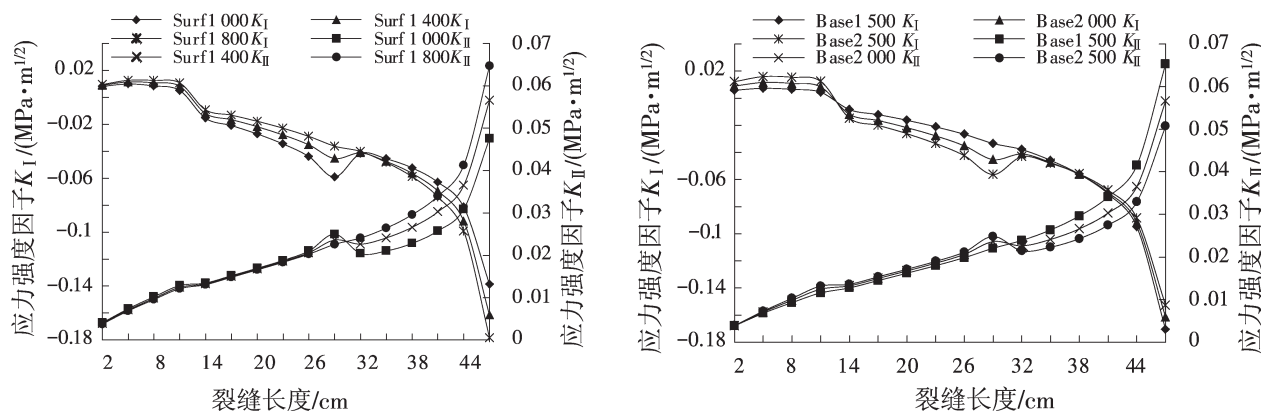


图3 不同结构层模量时应力强度因子随裂缝扩展情况

Fig.3 Situation of SIF in crack propagation with different structure layers modulus

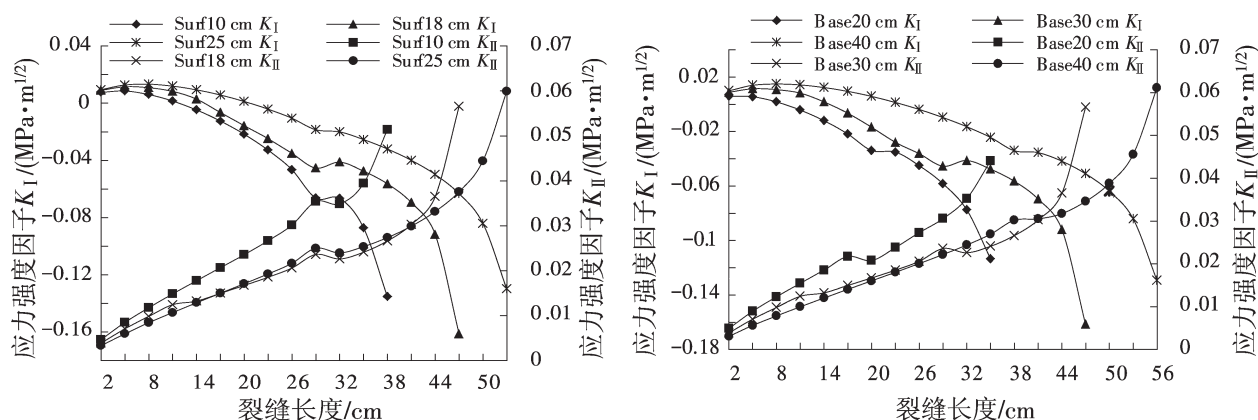


图4 不同结构层厚度时SIF随裂缝扩展情况

Fig.4 Situation of SIF in crack propagation with different structure layers thickness

3 工程实例优化设计

以江苏省海门市336省道绕城段沥青路面工程为例,应用上述得出结论对该工程路面结构层参数进行优化设计,选取了两种方案与原设计进行对比计算,其中,方案1主要考虑了降低面层模量和增大面层厚度,方案2主要考虑降低面层模量、减小面层厚度和增大基层厚度,两种方案都考虑通过提高基层模量来减小由于面层模量降低使面层车辙变形增大的情形,各结构层材料及其参数见表2。

由前文结论可知,反射裂缝由基层底扩展至面层顶时主要需要考虑两个相对不利阶段,一是扩展初期在基层内存在受拉区,二是扩展后期会受到较大剪切作用。因此,取基层底往上3 cm和基层底至下面层底往上2 cm两个离散的裂缝长度,分别计算了对应裂缝长度时的 K_I 和 K_{II} ,各方案应力强度因子计算结果对

比如图5。

由图5可知,当反射裂缝扩展至基层底往上3 cm时,方案1和方案2裂缝尖端所受的张拉型应力强度因子 K_I 相比原设计都有所增大,其中方案1增大18.4%,方案2增大43.1%;当反射裂缝扩展至下面层底往上2cm时,此时裂缝尖端主要受到不利的剪切作用,方案1裂缝尖端所受剪切型应力强度因子 K_{II} 相比原设计减小8.9%,方案2增大7.6%。综合考虑,方案1在防治反射裂缝扩张方面优于方案2,也验证了上文中所得适当增大面层厚度和减小面层模量可有效反射裂缝的剪切扩展的结论。

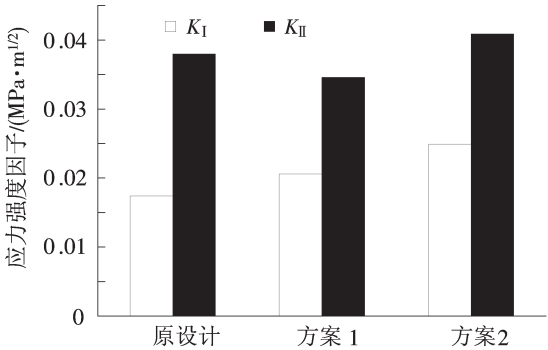


图5 各方案应力强度因子对比

Fig.5 Stress intensity factor comparison of different schemes

表2 结构层材料及其参数

Tab.2 Material and parameters of structural layers

结构层参数		上面层	下面层	水泥稳定碎石基层	底基层	土基
抗压回弹模量/Mpa	原设计	1 400	1 200	1 300		
	方案1	1 300	1 100	1 500	600	40
	方案2	1 200	1 000	1 800		
厚度/cm	原设计	4	8	30		
	方案1	5	10	30	20	—
	方案2	4	6	34		
泊松比		0.25	0.25	0.3	0.35	0.4

4 结论

基于有限元软件 ABAQUS 和断裂力学理论分析,针对结构层参数变化对反射裂缝由基层底扩展至面层顶的离散裂缝长度时的应力强度因子进行了计算分析,主要得到以下结论:

- 1) 在荷载作用下,基层底部往上存在一定范围的受拉区,增加面层和基层厚度都将明显增大受拉区范围,裂缝扩展初期在受拉区将受到张拉和剪切的混合型作用,后期以剪切开裂为主;
- 2) 在基层裂缝早期阶段,面层和基层参数的增大都会引起张拉型应力强度因子的增大,对裂缝早期控制不利;裂缝扩展后期,适当增大基层模量、厚度以及面层厚度可减小剪切型应力强度因子,其中适当增加面层厚度较明显;在防治反射裂缝扩展方面,在保证路面其他控制条件下,应选择较低的面层模量。
- 3) 通过工程实例优化计算,验证了上述分析得出的结论,同时指出通过增大面层厚度和减小面层模量来防治反射裂缝扩展应综合考虑经济性和有可能增大车辙变形等问题。

参考文献:

[1] 周建华. 半刚性基层沥青路面反射裂缝机理分析[J]. 现代交通技术, 2007, 4(1): 4-7.
[2] 王宏畅. 半刚性基层沥青路面反射裂缝扩展及寿命研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(2): 174-180.
[3] 元松, 谈至明. 沥青路面荷载型竖向反射裂缝疲劳断裂分析[J]. 同济大学学报, 2007, 35(10): 1352-1357.
[4] 詹海玲. 半刚性基层沥青路面反射裂缝综合防治[J]. 公路工程, 2008, 33(1): 121-123.
[5] 胡镇卿. 沥青路面反射裂缝的防治研究[D]. 石家庄: 河北工业大学, 2007.

- [6] 刘仕贵,于新. 结构层参数对SAMI-R防反射裂缝影响有限元分析[J]. 华东交通大学学报,2013,30(2):33-36.
- [7] BARSOUM R S. Further application of quadratic isoparametric finite elements to linear fracture mechanics of plate bending and general shells[J]. Int J Fracture, 1975, 11(2): 167-169.
- [8] 中华人民共和国行业标准. 公路沥青路面设计规范 JTG D50—2006[S]. 北京:中华人民共和国交通部,2006.
- [9] 郑健龙,张起森. 半刚性路面反射裂缝及其应力强度因子的有限元分析[J]. 岩土工程学报,1990,12(3):22-30.

Parameter Influence Analysis of Reflective Crack Propagation Process in Crossing Structure Layers

Liu Shigui

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on finite element software ABAQUS and the fracture mechanics, this paper firstly applies the discrete crack lengths method to simulate propagation process of reflective crack, then analyzes the influence of structure parameters on crack tip stress intensity factor by focusing on crack propagating from base bottom and across to surface top, and finally verifies the optimization design of structure layer parameters with an engineering project. Results show that: Up above base bottom it has a range of tension zone under function of loading, which makes crack tip subjected to hybrid function of tension and shear in tension zone. Increase in surface and base parameters will increase tension type SIF of base crack against early crack control. During later period of crack propagation, appropriate increase in base modulus, thickness and surface thickness can reduce the shear type SIF, and the surface thickness is obvious. In terms of preventing reflective crack extension, the lower surface modulus might be used to ensure other conditions control in pavement design.

Key words: reflection crack; early damage; stress intensity factor; structure parameters