

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.010

沥青路面失效开裂的数值模拟研究

余森开, 王庆阳, 刘建

(中铁十六局集团路桥工程有限公司, 北京市 101500)

摘要:为了深入了解沥青路面受荷载作用时的裂缝扩展规律,基于失效开裂材料二次开发以及扩展有限元方法,建立沥青路面的数值计算模型。通过试验与计算结果对比,分析沥青复合梁在荷载作用下的失效开裂特性,对比研究失效开裂材料二次开发模型与扩展有限元模型的计算结果。结果表明:基于失效开裂材料二次开发建立的计算模型可以很好地模拟沥青路面的裂缝扩展规律,计算结果与试验结果吻合良好;预设裂缝对路面受力性能的影响极大,在进行实际施工时应尽量减少路面材料裂缝,并提高路面的抗疲劳性能,以保证其良好的受力性能;平板支撑方式下沥青复合小梁裂缝扩展行为与实际路面状况极为接近;相比扩展有限元方法,基于失效开裂材料二次开发建立的计算模型适用性更好。

关键词:沥青路面;失效开裂;预设裂缝;扩展有限元;裂缝扩展规律

沥青路面具有无扬尘、噪声小、养护方便、行车平稳舒适等特点,在美国和日本,铺面采用沥青混合料的高速公路占90%以上。在中国,沥青混合料铺面占已通车公路总里程的75%。然而沥青路面在车辆等动荷载的反复作用下极易出现各种破坏和损伤问题,由于路面的初始缺陷与疲劳开裂极大地影响了行车的安全性以及路面的耐久性。因此研究沥青路面在荷载作用下的裂缝扩展以及失效开裂特性,可为探讨沥青路面开裂机理及相关的路面施工与设计提供依据。

近年来,大量学者运用有限元计算方法对混凝土、沥青混合料等裂缝扩展行为进行了数值模拟。现有数值模型常用的方法有扩展有限元方法、开裂单元嵌入法以及基于材料或单元二次开发进行开裂问题的计算研究。其中,金光来等研究了沥青混合料在I型和I-II复合型模式下的断裂问题,对单边切口梁的断裂过程进行数值模拟研究;程一磊等采用基于扩展有限元方法对沥青混合料小梁异质模型进行了三点弯曲断裂的数值模拟。

标准DMRB较为陌生,鲜有相关的介绍,该文通过具体项目,对比研究了AASHTO 1993和DMRB路面设计方法,以期为海外同类型道路建设项目提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 陈国威. 我国沥青路面设计方法和AASHTO设计方法的比较[J]. 理论研究, 2010(23).
[2] AASHTO 1993 Guide for Design of Pavement Structures[S].
[3] The UK Highways Agency (HA), Design Manual for Road and Bridge (DMRB) Volume 7 Section 2 Part 3 HD 26/06 Pavement Design[M], 2006.
[4] Ministry of Development Negara Brunei Darussalam, GSI

General Specification for Flexible Pavement[M], 1998.
[5] The UK Transport Research Laboratory (TRL), ORN 31 a Guide to the Structural Design of Bitumen Surfaced Roads in Tropical and Subtropical Countries[M], 1993.
[6] 李清泉. 基于AASHTO力学-经验法的柔性路面设计[J]. 中外公路, 2008(4).
[7] 沈金安. 国外沥青路面设计方法总汇[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
[8] The UK Highways Agency (HA), Design Manual for Road and Bridge (DMRB) Volume 7 Section 2 Part 1 HD 24/06 Traffic Assessment[M], 2006.
[9] The UK Highways Agency (HA), Interim Advice Note 73/06 Design Guidance for Road Pavement Foundations (Draft HD25) Revision 1[M], 2009.

收稿日期: 2020-10-25(修改稿)

基金项目: 中铁十六局集团有限公司科技研发计划项目(编号: K2018-28C)

作者简介: 余森开, 男, 高级工程师. E-mail: 375942126@qq.com

该文以现有高速公路沥青路面为研究对象,基于失效开裂材料二次开发以及扩展有限元方法,建立沥青路面数值计算模型。通过试验与计算结果对比,分析沥青复合梁在均质模型下的裂缝扩展路径,从而确定计算模型的合理性。在此基础上,分析沥青复合梁在荷载作用下的失效开裂特性,对比研究失效开裂材料二次开发模型与扩展有限元模型的计算结果。

1 沥青路面失效开裂材料二次开发

1.1 用户子程序

现有弹塑性计算模型大多是基于连续体建立的,即无论应力、应变增大至任何程度,单元依然存在一定的刚度,可继续传递结构的应力变化,这与实际情况不相符,为解决该问题,现有方法通常通过材料或单元的二次开发进行计算模型的建立。Abaqus 有限元软件中提供了对应大量的用户子程序来实现软件计算功能的扩充,该文选用 VUSDFLD 用户子程序对现有计算模型进行改进,其调用实现计算的方式如图 1 所示。

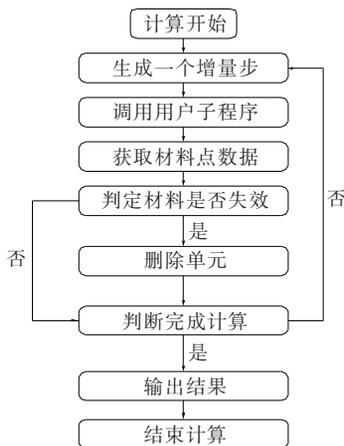


图 1 利用用户子程序实现材料失效二次开发

1.2 失效塑性应变

该文采用塑性应变作为单元失效删除的控制变量,其极限塑性应变根据现有断裂能理论中的最大主应变准则设置。根据文献[8],沥青断裂强度取 0.6 MPa,断裂能取 2 700 J·m,则设置当塑性应变超过 0.009 时认为单元失效,将单元删除,该单元的刚度不再计入计算模型中,实现对材料失效开裂的模拟。

2 扩展有限元方法

2.1 扩展有限元法基本原理

在传统有限元方法的基础上,基于水平集理论及

单位分解法提出了扩展有限元法,该方法模拟了裂缝在材料体内的扩展过程,其中水平集理论用来追踪裂纹发展方向并确定裂纹位置,单位分解法用来保证扩展有限元方法的收敛性。扩展有限元既继承了传统有限元方法的优点,同时在裂缝模拟方面又具有传统有限元无法比拟的优势。

扩展有限元的位移函数可表示为:

$$u = \sum_{i=1}^N N_i(x) \left[u_i + H(x)\alpha_i + \sum_{a=1}^4 F_a(x)b_{ia} \right] \quad (1)$$

式中: $N_i(x)$ 为有限元的形函数; u_i 为单元的节点位移; $H(x)$ 为 Heaviside 函数; α_i 为裂纹尖端贯穿的单元节点的附加自由度; $F_a(x)$ 为裂尖渐进位移的场函数; b_{ia} 为裂纹尖端嵌入单元的节点附加自由度。

2.2 开裂准则与扩展

对于断裂问题的计算分析,其是否裂纹扩展路径准确是衡量计算结果准确性的重要依据,需要根据材料的不同特性来选择不同的裂纹扩展准则。现有最大主应变准则和最大主应力准则为裂纹扩展研究中最常用的准则,现有裂缝扩展研究中认为,在温度较低时,沥青路面为准脆性材料。根据该假设,该文采用最大主应力准则作为沥青材料损伤的判定准则,其裂纹扩展方向与最大主应力方向垂直。

3 沥青复合小梁模型沥青路面失效开裂研究

3.1 有限元计算模型

利用 Abaqus 有限元软件中的 Explicit 模块与扩展有限元模块(XFEM)分别建立了基于失效开裂材料二次开发以及扩展有限元方法的沥青路面计算模型,考虑到梁的受力为平面应力问题,该文对计算模型进行简化,将计算模型进行二维处理,建立的数值计算模型如图 2 所示,计算模型采用四节点双线性平面应力四边形缩减积分单元(CPS4R)。

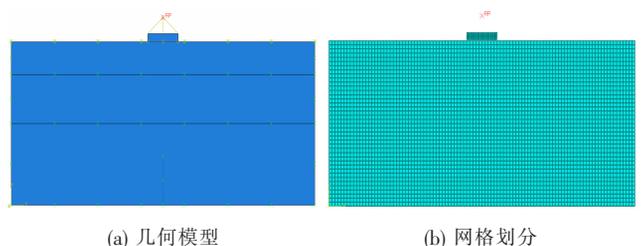


图 2 有限元计算模型

如图2所示,在梁跨中处设置一加载块,并将加载块顶面进行节点耦合,以便进行荷载施加,同时在梁底面预设裂缝,模拟路面疲劳开裂以及初始缺陷引起的沥青复合小梁开裂现象。

为验证该文计算方法的准确性,参考文献[8]中沥青复合小梁的试验结果。试验梁在偏离跨中2、4 cm处以及梁的跨中进行裂缝设置,裂缝深度设定为6

cm。试验梁按标准沥青面层混合料配合比进行制作,试验梁由上中下3个面层组成,各结构层通过黏层油黏结,3个面层所用沥青种类分别为AH-70H[#]石油沥青、SBS改性沥青、SBS改性沥青,沥青复合小梁尺寸为50 cm×12 cm×20 cm。根据文献[8],各面层材料属性参考表1,沥青断裂强度取0.6 MPa,断裂能取2 700 J·m。

表1 沥青层材料属性

路面结构	沥青层材料属性			混合料配合比/%		
	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比	沥青	矿粉	粗、细集料
上面层(沥青)	4	1 400	0.35	4.90	4.00	96.50
中面层(沥青)	6	1 200	0.30	4.33	4.00	96.00
下面层(沥青)	10	1 000	0.30	3.70	3.00	97.00

3.2 裂缝扩展与失效开裂特性

根据文献[8],分别建立了跨中以及偏离跨中2、4 cm处预设裂缝的计算模型,并建立了无预设裂缝的有限元计算模型,通过计算得到裂缝扩展过程如图3所示。通过比较可知:扩展有限元计算结果与基于失效

开裂材料二次开发计算所得的裂缝扩展方向基本一致。其中,随着预设裂缝逐渐偏离跨中位置,裂缝扩展路径都由一开始的竖直往上扩展转变为偏向荷载作用位置的斜向扩展,裂缝扩展总体趋势保持了一致。

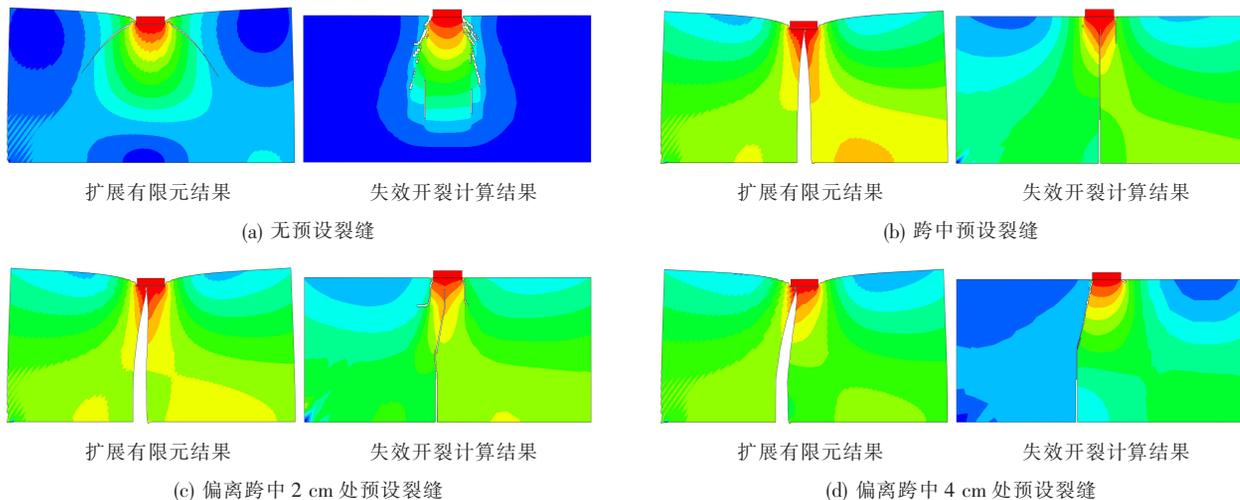


图3 沥青复合小梁模型的开裂特性

由图3(a)可知:在无预设裂缝时,构件在荷载作用下首先于加载一侧出现裂缝,并在持续加载后,于加载处另一侧出现裂缝,裂缝呈现45°由沥青表面向底部逐渐发展。最终裂缝呈现八字形发展,且裂缝宽度逐渐提高。

相比扩展有限元计算结果,基于失效开裂材料二次开发计算所得裂缝的结果更为全面,其计入了由于加载块加载引起的沥青局部受剪引起的裂缝扩展。

为进一步了解裂缝扩展对沥青路面受力性能的影响,提取开裂后的应力分布云图如图4所示。

由图4可知:计算所得应力演化方向较好反映了荷载的施加对沥青层的影响。由于沥青局部受剪,各失效开裂计算模型于加载梁腹部均出现剪切荷载引起竖向裂缝,基于失效开裂材料二次开发建立的计算模型可以较好地模拟其裂缝扩展形态。相比扩展有限元结果,该模型通过定义塑性应变的方法实现开裂问题的模拟,在单元删除后,无法模拟裂缝闭合时的接触问题,但由于该模型的计算结果具有良好的收敛性,计算

结果,该模型通过定义塑性应变的方法实现开裂问题的模拟,在单元删除后,无法模拟裂缝闭合时的接触问题,但由于该模型的计算结果具有良好的收敛性,计算

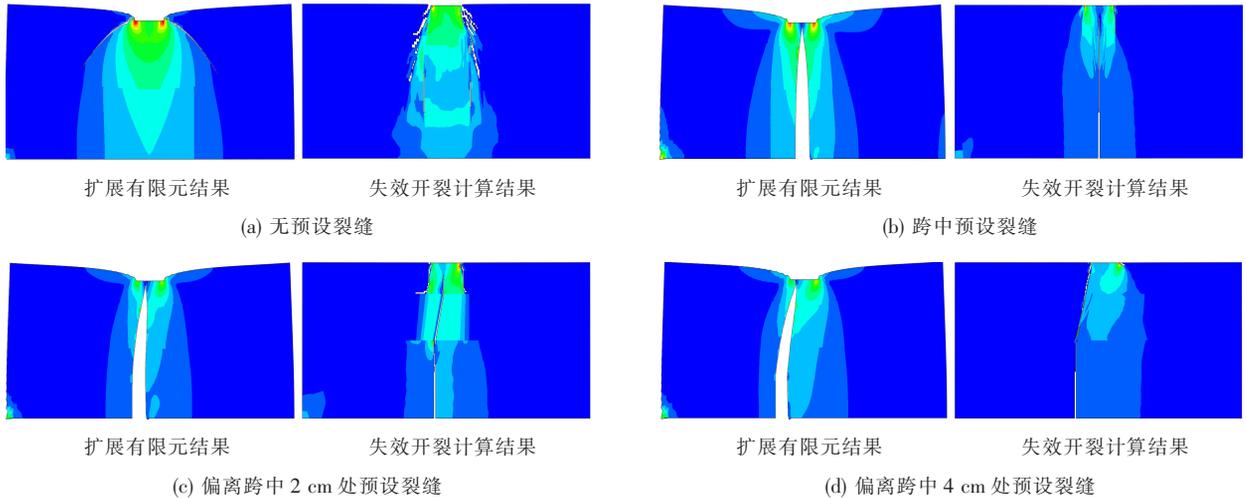


图 4 沥青复合小梁模型的应力分布特性

成本也较低,故相比扩展有限元,该模型适用于更广泛的计算分析。

4 结论

(1) 基于扩展有限元方法建立的计算模型可以很好地模拟沥青路面的裂缝扩展规律,计算结果与试验结果吻合良好,预设裂缝对路面受力性能的影响极大,在进行实际施工时应尽量减少路面材料裂缝,并提高路面的抗疲劳性能,以保证其良好的受力性能。

(2) 扩展有限元计算结果与基于失效开裂材料二次开发计算所得的裂缝扩展方向基本一致。且相比扩展有限元计算结果,基于失效开裂材料二次开发计算所得裂缝的结果更为全面,其计入了由于加载块加载引起的沥青局部受剪引起的裂缝扩展。

(3) 在荷载作用下,无预设裂缝沥青层首先于加载一侧出现裂缝,并在持续加载后,于加载处另一侧出现裂缝,裂缝呈现 45° 由沥青表面向底部逐渐发展,最终裂缝呈现八字形发展,且裂缝宽度逐渐提高。

(4) 相比扩展有限元结果,该模型通过定义塑性应变的方法实现开裂问题的模拟,在单元删除后,无法模拟裂缝闭合时的接触问题,但该模型的计算结果具有良好的收敛性,计算成本也较低,该模型适用于更广泛开裂问题的计算分析。

(5) 鉴于沥青材料的非均质性、路面不平整性、汽车动力荷载的随机性等因素对沥青路面受力性能的影响,还需进一步开展相关的试验研究与理论分析,为该

方法在同类型路面的设计、施工中建立一套完整系统的理论和计算方法提供依据。

参考文献:

- [1] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 2版. 北京:人民交通出版社, 2004.
- [2] 黄文柯. 沥青混合料细观结构的三维粘弹本构及虚拟力学试验研究[D]. 华南理工大学博士学位论文, 2016.
- [3] WANG H, ZHANG C, YANG L, et al. Study on the Rubber-Modified Asphalt Mixtures' Cracking Propagation Using the Extended Finite Element Method [J]. Construction & Building Materials, 2013, 47: 223-230.
- [4] 张晓东,任旭春. 混凝土开裂过程扩展有限元数值模拟[J]. 公路交通技术, 2010(3).
- [5] 金光来,黄晓明,梁彦龙. 两种不同模式下的沥青混合料断裂过程研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014(6).
- [6] 金光来,黄晓明,张苏龙,等. 基于内聚力模型的沥青混凝土疲劳损伤数值研究[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2013(4).
- [7] 程一磊,杨新华,张川川. 沥青混合料三点弯曲断裂的扩展有限元模拟[J]. 固体力学学报, 2017(3).
- [8] 朱海鹏,刘子楠,李双蓓,等. 预设裂缝沥青复合小梁扩展有限元模拟[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018(3).
- [9] 张擎,彭华,张洁,等. 一种新型拱形底面的水泥混凝土路面结构[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016(6).
- [10] 郭鑫峰,徐勋倩,仇云强,等. 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[J]. 中外公路, 2019(2).