

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.012

沥青路面 Top-Down 裂缝成因研究综述

梁悦, 邹晓翎

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400041)

摘要: 沥青路面 Top-Down 裂缝(TDC)已成为沥青路面主要且亟待研究的病害之一, 中国对 TDC 的研究屈指可数。该文在总结国内外沥青路面 TDC 研究方法的基础上, 从行车因素(荷载、车速)、气温因素、施工质量以及沥青混合料自身性质几个方面对其影响因素进行总结分析, 并对沥青路面 TDC 的机理进行探讨。分析表明: 国内外大多数都采用有限元数值模拟研究得到拉应力产生非轮迹带处的 TDC 和剪应力造成轮迹带处 TDC 的结论。

关键词: 沥青路面; Top-Down 裂缝; 有限元数值模拟; 形成机理; 影响因素

根据中国《2018年交通运输行业发展统计公报》, 中国公路总里程已达 484.65 万 km, 半刚性基层是其主要基层形式。与此同时, 已建成道路在外界条件的影响下干缩、温缩现象显著, 致使基层出现反射裂缝, 进而导致沥青路面结构的破坏。半刚性基层破坏后的维修极为困难且成本高昂, 极度影响正常交通运行。经过不断的探究及实体工程的应用, 美国、日本、欧洲各国逐步提倡采用不会产生反射裂缝、裂缝处理相对简单经济的柔性基层路面。从 LTTP DPS-6 (FHWA-RD-00-165) 提供的数据来看, 柔性基层沥青路面具有较长的使用寿命, 可以在使用 15 年之后才进行维修, 并且很多柔性基层沥青路面过了 20 多年才出现损坏。这与中国的半刚性基层沥青路面的使用寿命形成强烈的对比, 相信不久的将来, 中国也会推广柔性基层沥青路面。

作为柔性基层沥青路面早期病害的 TDC, 自然开始引起重视。为了顺应道路发展趋势, 做到未雨绸缪, 该文拟开展 TDC 的机理研究, 对于延长中国沥青路面寿命、提高社会及经济效益具有重要意义, 同时为日后的柔性基层沥青道路的发展提供借鉴与思考。

TDC 是指由路表产生并向沥青面层内部扩展传播的裂缝。一般来说, TDC 在产生初期既不影响路面结构承载力, 也不影响行车舒适性, 导致人们忽视其危害性并错过绝佳养护时机。实际上, TDC 对路面磨耗层的耐久性和路面结构使用寿命具有强烈影响。TDC 的存在使得雨水和其他物质很容易进入路面结构内部, 影响沥青混合料的空隙率、层间接触等, 成为

其他路面病害的诱因, 并且加速裂缝处和裂缝周围路面结构使用寿命的衰减, 加速路面服务性能的下降。该文在对国内外沥青路面 TDC 的研究方法进行分析总结的基础上, 主要从车辆荷载、气温、结构厚度和沥青混合料性质 4 个方面分析 TDC 产生原因及开展机理。以期对 TDC 开裂与发展进行控制和预估, 达到延长路面使用寿命的目的, 提高社会和经济效益, 同时为柔性基层沥青路面早期病害的预防与控制提供技术储备。

1 国内外主要研究结论

国外最早对 TDC 的研究是从 20 世纪 80 年代开始。而中国早期研究主要集中在传统半刚性基层路面的反射裂缝、温缩裂缝等, 对 TDC 的研究起步较晚。TDC 的研究方法以试验研究和数值分析为主, 随着断裂力学理论不断更新, TDC 的机理逐渐有据可循。但是, 由于 TDC 的影响因素众多, 目前 TDC 的相关研究还不够全面, 学界对于 TDC 产生和发展的机理研究同时存在一致和尚未达成共识的结论。

国内外研究目前已达成共识的有裂缝开裂形式及其特点等方面, 均认为 TDC 一般最先表现为轮迹带位置处的纵向裂缝, 之后渐渐出现横向裂缝, 最后纵向裂缝和横向裂缝交汇形成网状裂缝。根据路龄不同, TDC 最多可穿透 3 层沥青层。

对于 TDC 开裂和发展的影响因素, 学界还存在不同意见。Zhao Y 等利用多层弹性计算机代码

收稿日期: 2019-08-25

作者简介: 梁悦, 女, 硕士研究生, E-mail: liangyue0914@126.com

APRA 计算路面上的水平应力,认为行车荷载造成的路表面的横向拉应力是导致 TDC 开裂的最主要因素;Roque 等和 Dinegdae 等使用基于能量的裂缝开展模型研究后认为,横向拉应力是影响 TDC 的关键因素;徐欧明和郝培文研究后也提出同意的观点;Soon S 等根据路表拉应力产生的位置认为拉应力仅与非轮迹带处的纵向 TDC 有关。相反地,Mohammad 等、Al-Qadi 等以及李峰、孙立军将 TDC 归因于轮胎边缘处的载荷引起的剪切应变;顾凡等使用佛罗里达大学建立的基于断裂力学模型和 AASHTO 现有的路面 ME 设计模型对 TDC 根据产生位置的不同进行分类并研究,将轮迹带处 TDC 归因于剪应力,非轮迹带处的 TDC 由拉应力引起;文献[21]使用基于 Paris 公式的数值模拟研究后也认为是集中的剪应力导致 TDC 产生;Wang L. B 等提出对车辙敏感的混合料可能也对开裂敏感,剪应力和拉应力对 TDC 都有影响;同时,文献[7]指出,当不考虑老化,轮载下的剪应力是造成 TDC 开裂的主要原因;老化及降温后,路面结构的拉应力则成为主要因素;Miao. Y 等将多域混合边界点法(multi-domain hybrid boundary node method, hybrid BNM)和断裂理论相结合,避免了有限元法中网格划分对结果的影响,得到了更为精确的结果,结论指出水平应力对 TDC 的扩展有着不可忽视的作用。

除了围绕应力的意见分歧,学界还对路面结构和沥青混合料本身对 TDC 的影响有不同意见。文献[23]引入 CT 技术对沥青路面 TDC 的产生和扩展进行实时观测,分析开裂过程中路面结构的变化,认为混合料级配类型是裂纹扩展的影响因素之一。Svasdisant T 等认为 TDC 主要由荷载产生的路表横向拉应力和劲度模量的变化引起;Freitas D 等使用加速加载试验和三维非线性黏弹性有限元模型,研究发现车辙会促进 TDC 的产生,且空隙率、集料离析和黏层油在任何温度下对 TDC 都有显著影响,路表车辙对 TDC 的产生也有明显影响;Md Rashadul Islam 等在将 29 条试验段数据和已有的 TDC 预测模型进行对比后发现,同时考虑温度因素时,TDC 预测模型和实地数据的误差降低了 13%;Holewinski J 等研究认为温度是明尼苏达州 TDC 的主要影响因素。

国内外研究表明:TDC 主要产生位置为轮迹带,其余在非轮迹带的纵向或路面横向位置处;路面的温度应力、荷载应力、路面的结构、老化状况、道路施工质量等都会导致 TDC 的产生与扩展。

2 形成机理及影响因素

目前,针对沥青路面 TDC 的机理研究主要有以下 3 种观点:① 轮胎一路面接触会产生剪应力,在重复荷载作用下,轮一地接触剪应力超过沥青路面结构的极限强度导致路面在轮迹带处产生自上而下的剪切疲劳裂缝;② 极端温度条件下温度骤降导致路面产生难以松弛的温度应力,当温度应力超过极限应力强度时则导致路面 TDC 的产生,并且反复的升降温也会致使由于施工不当造成的微裂缝进一步扩展形成 TDC;③ 施工质量问题导致 TDC 的产生。

从以上观点以及相关研究可以总结出沥青路面 TDC 的形成主要受两方面因素影响:外部因素即汽车荷载、气候和施工因素,其中,车辆荷载包括行车速度以及行车荷载大小;内部因素即路面本身特性,包括沥青路面的厚度、模量、沥青路面混合料类型、空隙率、路面结构老化程度、黏结剂老化等。沥青路面 TDC 形成的影响因素及其相互关系如图 1 所示。

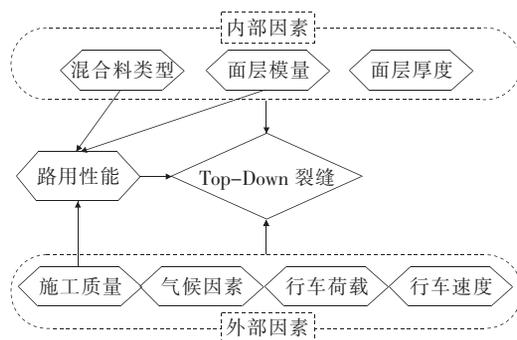


图 1 TDC 形成的影响因素

2.1 外部因素

在沥青路面 TDC 的研究中,外部因素主要指气候因素和车辆荷载因素。其中,气候因素包括温度的高低和降温幅度。

2.1.1 行车荷载

对于行车荷载这一因素,学者对于荷载引起的拉应力还是剪应力造成了 TDC 的产生各有看法。

文献[3,10,12-17,20,22,24]认为拉应力是造成 TDC 开裂的主要原因。Miao Y.、张翔宇通过有限元模型分别研究了有无水平荷载情况下的路面结构力学响应,得到的路面结构受力随裂缝深度变化如图 2、3 所示。

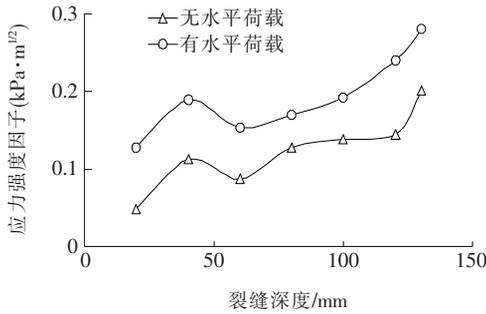
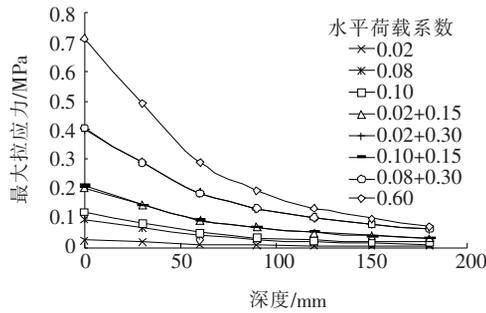
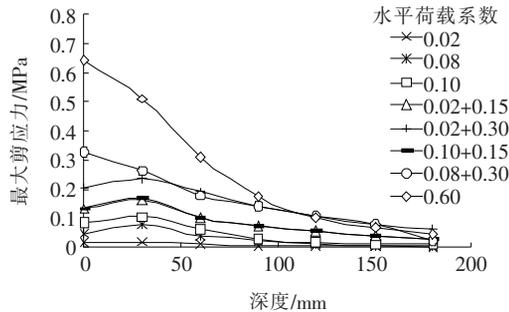


图 2 有无水平荷载作用下 K 值随裂缝深度的变化



(a) 拉应力随深度的变化



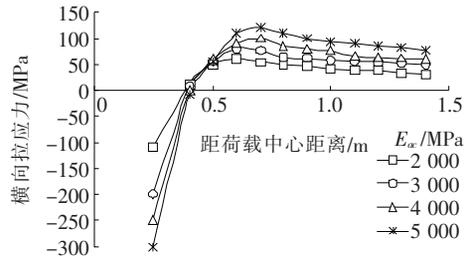
(b) 剪应力随深度的变化

图 3 不同水平荷载作用下应力随深度的变化

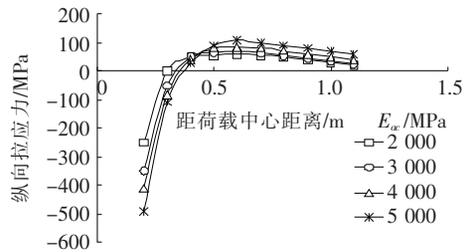
由图 2、3 可知:水平荷载的存在使应力强度因子 K 增大 2~3 倍。且水平荷载引起的路面结构的拉应力最大值出现在路面表层,最大剪应力在低水平荷载系数条件下出现在路面结构 30~60 mm,随着水平荷载系数的增大,剪应力的最大值出现在路表面。数据表明:水平荷载产生的拉应力是引起 TDC 产生的主要因素。

顾凡等对 TDC 进行了开裂位置的分类,对路面结构的汽车荷载力学响应做了更细致的研究,得到距荷载中心不同位置的横向拉应力和纵向拉应力的峰值变化如图 4 所示。

由图 4 可知:不论横向应力还是纵向应力,路面的压应力均不会造成 TDC,只有拉应力超过路面极限抗拉应力时才会造成路面的开裂。且拉应力峰值均出现在距车轮约 0.6 m 处,这可以解释非轮迹带处 TDC



(a) 沥青路面横向应力



(b) 沥青路面纵向应力

图 4 沥青路面应力峰值随不同荷载中心距离的变化

的成因。

与此同时,文献[7,10,15,18,19,21,22,28,33,34]认为轮胎下的高剪应力是造成 TDC 开裂的主要原因。其中,顾凡等对轮胎一路面接触面应力研究得到轮迹带处路面结构剪应力峰值变化如图 5 所示,并指出由于轮胎接地压力的存在,当剪应力超过路面结构极限抗剪应力时则产生轮迹带处的 TDC。

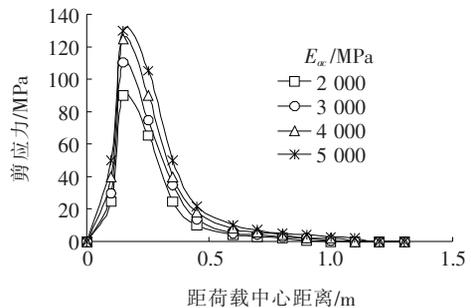


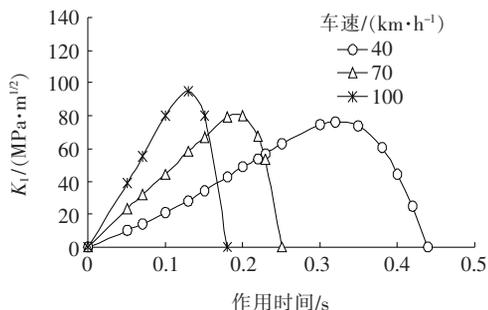
图 5 沥青路面剪应力峰值随不同荷载中心距离的变化

此外,李峰、孙立军的研究也得出相似结论,即:行车荷载引起的路面结构剪应力峰值位于轮迹带上,作用位置均位于路面结构上面层,且位置稳定。

由此可见,行车荷载是导致沥青路面结构产生 TDC 的主要因素之一。水平拉应力造成了非轮迹带处纵向 TDC 和横向 TDC,轮迹带处的纵向 TDC 归因于轮一地接触时在轮迹带处产生的高剪应力。

2.1.2 车速

赵延庆等通过有限元模型对车速与 TDC 的关系进行了研究,将结果绘制于图 6。

图6 不同车速下 K_I 时程曲线

由图6可知:行车速度对张开型应力强度因子 K_I 的作用频率有显著影响,车速越大,应力强度因子的频率增加,即作用时间变短。研究表明:随着应力强度因子作用频率的增加,沥青混合料抵抗裂缝扩展的能力提高。由此可得:较慢的行车速度会加速 TDC 扩展。

2.1.3 温度

由于沥青混合料具有温度敏感性,因此沥青路面结构在温度变化的影响下,势必会产生膨胀或收缩现象。特别是在急剧降温时,路面结构产生温度梯度,且沥青路面不像水泥混凝土路面那样具有收缩缝,收缩变形就会受到基层对路面的摩阻力和路面无限连续板体的约束作用,使沥青面层产生拉应力。即使沥青混凝土具有应力松弛性能,但是在急剧降温条件下,路面产生的温度应力来不及松弛,应力积累超过极限抗拉强度,则导致 TDC 的产生。

研究表明:急剧降温而使路面产生的温度应力也是使沥青路面产生 TDC 的原因之一。张翔宇通过有限元模型研究了路面温度应力在不同初始温度及降温幅度组合条件下随路面结构深度的变化情况,结果如图7所示。

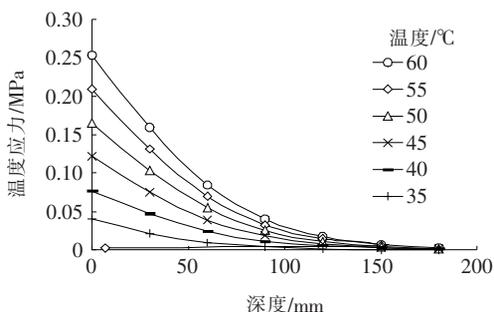
由图7可知:沥青路面产生的温度应力随着初始温度的升高和降温速度的加快而增加,并且温度应力在路表面达到峰值,随着路面结构深度的加深而减小。

洪海等对黑龙江省10条高等级公路的沥青混凝土路面裂缝调查分析后也提出,面层温度收缩变化是引起 TDC 的主要原因之一。

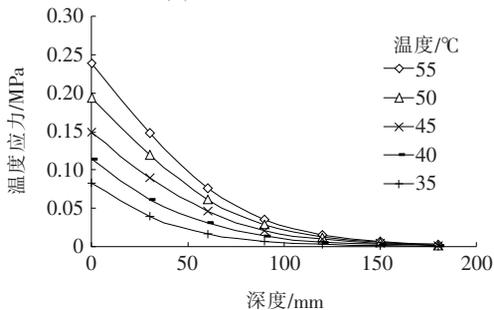
2.1.4 荷载因素和温度的比较

为了比较荷载和温度对 TDC 影响程度的不同,毛成对行车荷载、温度荷载以及两者共同作用下的情况进行计算分析。5种工况组合和计算结果见表1、2。

由表2可知:任一工况下剪切型应力强度因子 K_{II} 都远小于张开型应力强度因子 K_I 。对于只有行车荷载作用的工况1, K_I 远小于沥青路面材料的断裂



(a) 5 °C/h 降温速度



(b) 10 °C/h 降温速度

图7 不同降温速度时路面不同深度温度应力

表1 荷载组合的计算工况

工况	荷载组合
1	行车荷载
2	温度荷载,路表温差-10 °C
3	行车荷载,温度荷载,路表温差-10 °C
4	温度荷载,路表温差-20 °C
5	行车荷载,温度荷载,路表温差-20 °C

韧度 K_{IC} 值 ($K_{IC} = 4 \sim 5 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^{1/2}$),不可能导致 TDC 的产生。而在同时考虑行车荷载和温度荷载的情况下, K_I 增大为仅考虑行车荷载时的5倍左右,并且在路表温差为-20 °C时产生了大于 K_{IC} 值的应力强度,即会引起 TDC 的扩展。因此,文献[11,24,26,27,40]则提出,虽然行车荷载的反复作用会引起裂纹的产生和扩展,但其中起主要作用的是由温度(特指温度急剧下降)引起的温度应力。

2.1.5 施工因素

禚炜安、胡力群等在对沥青路面施工过程中的温度离析现场进行研究时发现,混合料的温度离析程度和路面压实变异度呈正相关;刘洪海提出了混合料摊铺时的碾压离析与路面压实变异度的正相关关系。同时,顾凡等通过建立的预测模型指出,压实度对 TDC 的开裂也存在影响,如表3所示。N1路段作为控制路段使用 PG 67-22 沥青和 20%RAP;N2路段与 N1

表 2 5 种工况下的计算结果

工况	裂缝长度 2 cm			裂缝长度 3 cm			裂缝长度 4 cm		
	$K_I / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_{II} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$\Theta_0 / (^\circ)$	$K_I / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_{II} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$\Theta_0 / (^\circ)$	$K_I / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_{II} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$\Theta_0 / (^\circ)$
1	5.47×10^{-2}	3.2×10^{-3}	6.65	6.44×10^{-2}	5.859×10^{-3}	10.22	7.09×10^{-2}	8.766×10^{-3}	13.71
2	2.755×10^{-1}	2.043×10^{-3}	0	3.316×10^{-1}	8.357×10^{-3}	0	3.689×10^{-1}	2.19×10^{-3}	0
3	3.303×10^{-1}	3.198×10^{-3}	1.11	3.961×10^{-1}	5.851×10^{-3}	1.70	4.398×10^{-1}	8.744×10^{-3}	2.28
4	5.511×10^{-1}	4.086×10^{-6}	0	6.632×10^{-1}	1.671×10^{-5}	0	7.378×10^{-1}	4.379×10^{-5}	0
5	6.058×10^{-1}	3.196×10^{-3}	0.60	7.277×10^{-1}	5.842×10^{-3}	0.92	8.087×10^{-1}	8.722×10^{-3}	1.24

注: Θ_0 为起裂角; K_I 、 K_{II} 分别为张开型、剪切型应力强度因子。

混合料相同,但压实度较高;N5 与 N1 混合料相同,压实度较低。由表 3 可以看出:压实度的增加只能略微延长沥青路面的 TDC 初始寿命,而压实度的降低却能显著降低 TDC 的寿命。

表 3 NCAT 试验路的 TDC 开裂寿命预测

路段 编号	TDC 开裂寿命/($\times 10^6$ 次)		
	纵向轮迹带	纵向非轮迹带	横向
N1	8.40	9.22	9.35
N2	8.77	11.06	11.30
N5	6.52	8.44	8.67

文献[24]指出由于施工引起的路面结构的刚度差异可导致 TDC 的产生。

由此可见,路面结构的施工质量同样影响着 TDC 的产生与发展。施工时应遵循 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求,尽量减少由于温度离析问题导致的 TDC,对于碾压产生的混合料离析,应从施工工艺和碾压设备两方面进行改进。

2.2 内部因素

2.2.1 沥青面层厚度

沥青面层与车辆和大气环境直接接触,承受着较大的行车荷载以及变化的气候条件的影响。为保证沥青路面具有良好的路用性能和耐久性,沥青面层必须具有足够的厚度,同时又要符合最大收益的原则,不能太厚。马正军在保证土基、底基层、基层结构参数不变的基础上分析面层厚度对 TDC 发育过程中应力强度因子 K 的影响,结果见图 8。

通过分析沥青面层厚度和 K_I 、 K_{II} 的关系,可知较薄路面层在任何裂缝深度处的有效应力强度因子 K 总比较厚路面层高。这一结论与梁俊龙和李仕华分别使用有限元分析沥青路面结构的力学响应时得到

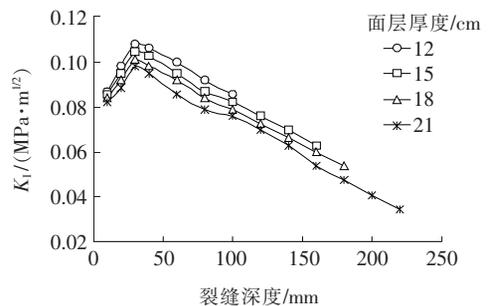
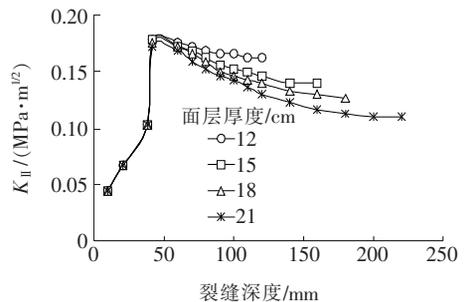
(a) K_I 随裂缝深度的变化(b) K_{II} 随裂缝深度的变化

图 8 不同面层厚度应力强度因子随裂缝切入深度的变化(偏载)

的结论和华盛顿州交通部(WSDOT)通过对州内 24 条道路芯样的分析得到的结论相近。说明沥青路面越厚,越不容易产生 TDC。但是,面层超过一定厚度之后,厚度对有效应力强度因子的变化已不具有关键性影响,在实际路面结构设计中,应考虑经济效益,酌情增加沥青路面面层厚度。

2.2.2 沥青面层模量

沥青路面受行车荷载的直接作用,必须具有一定的强度和稳定性。面层的劲度模量对路面的寿命至关重要,它直接关系到路面的承载能力。同时,沥青作为一种感温性材料,沥青材料模量的变化与温度呈负相关关系,温度低,模量就大,温度高,模量就低。因此,

考虑模量的变化其实就包含了温度的影响。讨论面层模量对有效应力强度因子 K 的影响,得到在对称均布荷载作用下,半刚性基层沥青路面面层层底 K 值随面层模量的变化规律,即:面层模量越高,面层底面的有效应力强度因子越大,裂缝更容易扩展。

同时,沥青模量也随着沥青的老化而增大。沥青老化造成的极高热应力被认为是产生横向 TDC 的因素之一。

2.2.3 沥青混合料类型

沥青路面由沥青混合料加以摊铺、碾压成型。而沥青混合料又是由一定黏度和用量的沥青材料和一定级配的矿质集料通过配合比设计和充分混合而成。不同的沥青种类、沥青含量和矿料级配等对沥青路面 TDC 的形成具有不同的影响。

(1) 沥青含量。文献[44]指出,沥青混合料中沥青含量越大抗裂性越好。

(2) 级配。文献[45]通过测定试件的平均线收缩系数来评价沥青路面在低温条件下的开裂,发现不同设计级配的沥青混合料的线收缩系数均随着沥青含量的增加而增大。在 AC-5、AC-10 以及 AC-13 共 3 种级配类型中,AC-5 更容易开裂,AC-10 具有更好的抗裂性。文献[46]对级配分别为 AC-13F、AC-13C 和 SAC-13 的混合料进行半圆弯拉试验,得到基质体弹性模量与断裂韧度 J_c 的关系如图 9 所示。文献[25]得出了同样的观点,即细级配的混合料抗裂性明显好于粗集配。

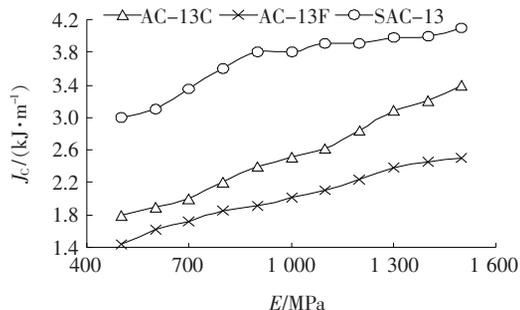


图9 基质体弹性模量与断裂韧度 J_c 的关系

(3) 空隙率。文献[24,25,44,47,48]研究指出空隙率在 TDC 发展中起到的重要影响,即沥青路面混合料的空隙率越大,越容易出现 TDC。AASHTO 在发布的 MEPDG 指南中也提出同样观点。

综上所述,沥青面层厚度、沥青面层模量和沥青混合料类型等内在因素都会对沥青路面 TDC 的开裂和发展产生影响。其中面层模量和温度具有相关性,可

与前述外部因素中的温度因素相结合进行分析。

3 预测模型

Meng Ling 等根据 AASHTO 的 ME 道路设计指南中提出的针对 TDC 分析预测的暂行办法,以及芯样的分析数据、微断裂力学、非均匀接触应力、热应力、LTPP 数据以及以动力学为基础的路面老化模型和理论,对黏弹性老化性能、路面模量预测、纵向热应力裂缝等子模型进行校准,得到更为精确的 TDC 预测模型。

根据美国交通研究委员会 (TRB) 2010 年在线上发布的 1-42A 项目的 162 文件,目前已开发出的普遍接受的预测模型有基于 VECD 的 TDC 开裂模型和基于 HMA-FM 的 TDC 发展模型。VECD 模型通过老化、自愈合、失效准则、黏塑性和热应力等几个子模型研究在裂缝产生之前破裂区的力学响应,来判断 TDC 的产生位置和产生时间。HMA-FM 模型则包含材料特性子模型、热响应模型、以时间为变量的路面开裂模型和基于能量的简化开裂模型,通过这些子模型来研究已有的 TDC 对裂缝发展的影响并总结裂缝随时间开展的规律。由于这两组模型各自独立,还不能对 TDC 进行预测。为了得到更准确的 TDC 预测结果,还应该将两组模型进行整合集成,使其成为同时考虑到荷载和环境综合影响的可同时处理多个裂缝损坏的模型。

4 现状评述

4.1 缺乏对路面结构非均质体的考虑

学者们多使用断裂力学理论和有限元的方法对沥青路面 TDC 进行研究。然而对于复合结构中的界面裂缝的扩展问题,均质各向同性线弹性材料的假设并不准确,应从非均质体的界面断裂力学角度进行研究。并且在建立三维有限元模型时,应建立动态模型而非静态,静态模型与动态模量并不匹配。

4.2 缺乏对荷载接地形式的考虑

传统的路面力学计算中,轮一地作用力分布形式被简化为圆形均布。但实际上,轮一地作用力分布形状更接近于长短轴比较接近的椭圆形,且只有轮胎面突出的花纹同路面相接触。轮一地作用力的分布并不均匀,而是随着荷载增减及轮胎压力不同有很大变化。

5 结 论

为了顺应道路行业的发展趋势,沥青路面 Top-Down 裂缝的研究具有重要意义。研究沥青路面 Top-Down 裂缝不仅有利于延长中国沥青路面寿命、提高社会及经济效益,同时也能为日后的柔性基层沥青道路的发展提供借鉴与思考。

该文综合了学者对沥青路面 TDC 的研究,主要结论如下:

(1) 沥青路面 TDC 的产生和开展受多种因素的影响。外部因素包括汽车荷载、行车速度以及温度,内部因素包括沥青路面的厚度、模量、沥青路面混合料矿料级配、路面结构老化程度、黏结剂老化等。在外部因素中,行车荷载的反复作用引起的剪应力、过低的车速和刹车过程产生的拉应力、急剧降温引起的温度应力都会引起裂纹的产生和扩展。

(2) 温度对沥青路面 TDC 的影响包括使路面结构产生温度应力,也包括对面层结构模量的影响。当温度急剧下降产生的温度应力来不及松弛,并且超过了极限抗拉强度,那么裂缝就会产生。

(3) 为了控制沥青路面 TDC 的产生和扩展,可以从设计方面入手。线形设计时减少最小半径路段和长陡坡路段;路面结构设计时在经济最优的原则下选择具有足够厚度的沥青面层和最优的沥青混合料级配;面层模量选择上,模量越大,路面结构强度、抗变形能力等越好,但是较高的模量会加速表面裂缝的扩展。因此,要对各因素进行统筹考虑,得到路面结构各性能的最佳组合。

参 考 文 献:

[1] 白璐,申爱琴,李涵. 柔性沥青路面在动荷载作用下 Town-Down 开裂模拟研究[J]. 公路交通科技,2017(9).

[2] 薛爱新,王洁光,王海军,等. 高速公路沥青路面裂缝发展对路面结构性能的影响研究[J]. 中外公路,2019(3).

[3] Miao Y, He T G, Yang Q. Multi-Domain Hybrid Boundary Node Method for Evaluating Top-Down Cracking Asphalt Pavements[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements,2010,34(9).

[4] Sangpetngam B, Brigissson B, Rouque R. Multilayer Boundary-Element Method for Evaluating Top-Down Cracking in Hot-Mix Asphalt Pavements[J]. Transportation Research Record,2004,10(2).

[5] 范植昱. 荷载和温度对沥青路面 Top-Down 开裂影响的

有限元分析[D]. 长沙理工大学硕士学位论文,2011.

- [6] 陈正伟,张洪亮,张珊珊. 基于断裂力学的沥青路面 Top-Down 开裂机理[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2017(6).
- [7] 张珊珊. 沥青路面 Top-Down 裂缝开裂机理研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2012.
- [8] 张翔宇. 行车荷载和温度作用下的沥青路面表面开裂研究[D]. 湖南大学硕士学位论文,2007.
- [9] 吕光印. 柔性基层沥青路面 Top-Down 开裂机理研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2008.
- [10] Gu F, Xue L, West R. Energy-Based Crack Initiation Model for Load-Related Top-Down Cracking in Asphalt Pavement[J]. Elsevier Ltd,2018,159:587-597.
- [11] 毛成. 沥青路面裂纹形成机理及扩展行为研究[D]. 西南交通大学博士学位论文,2004.
- [12] Zhao Y, Mohsen A, Fu G. Investigation of Mechanisms of Top-Down Fatigue Cracking of Asphalt Pavement [J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 196(6):1 436-1 447.
- [13] Dinegdae Y H, Birgissson B. Effects of Truck Traffic on Top-Down Fatigue Cracking Performance of Flexible Pavements Using a New Mechanics-Based Analysis Framework[J]. ROAD Mater. Pavement,2018,19(1).
- [14] Roque R, Zou J, Kim Y R, Baek C, Thirunavukkarasu S, Underwood B S, Guddati M N. Top-Down Cracking of Hot-Mix Asphalt Layers; Models for Initiation and Propagation[EB/OL]. [2010-2]. <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/164029.aspx>.
- [15] Dinegdae Y H, Onifade I, Jelagin D, Birgissson B. Mechanics-Based Top-Down Fatigue Cracking Initiation Prediction Framework for Asphalt Pavements [J]. ROAD Mater. Pavement,2015,16(4).
- [16] 徐鸥明,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(5).
- [17] Soon S, Drescher A, Stolarski H. Tire-Induced Surface Stresses in Flexible Pavements[J]. Transportation Research Record,2004,1 896(1).
- [18] Al-Qadi I L, Xie W, Elseifi M A. Frequency Determination from Vehicular Loading Time Pulse to Predict Appropriate Complex Modulus in MEPDG [J]. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, 2008,77.
- [19] 李峰,孙立军. 沥青路面 Top-Down 开裂成因的有限元分析[J]. 公路交通科技,2006(6).
- [20] Mohammad F A, Collop A C, Brown S F. Effects of Surface Cracking on Responses in Flexible Pavements[J].

- Proceedings of the Institution of Civil Engineers; Transport, 2005, 158(2).
- [21] 易昕. 三维有限元方法分析沥青路面自上而下裂缝的扩展[D]. 湖南大学硕士学位论文, 2006.
- [22] Wang L B, Myers L A, Mohammad L N. Micromechanics Study on Top-Down Cracking[J]. Transportation Research Record, 2003, 1 853(1).
- [23] 谢涛. 基于 CT 实时观测的沥青混合料裂纹扩展行为研究[D]. 西南交通大学博士学位论文, 2006.
- [24] Svasdisant T, Schorsch M, Baladi G Y. Mechanistic Analysis of Top-Down Cracks in Asphalt Pavements[J]. Transportation Research Record, 2002, 1 809(1).
- [25] Freitas D, Elisabete F, Pereira P. Effect of Construction Quality, Temperature, and Rutting on Initiation of Top-Down Cracking[J]. Transportation Research Record, 2005, 1 929(1).
- [26] Islam R M, Tarefder R A. Contribution of Day-Night Temperature Fluctuation to Top-Down Cracking in Asphalt Pavement[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2018, 32(1).
- [27] Holewinski J, Soon S, Drescher A. Investigation of Factors Related to Surface Initiated Cracks in Flexible Pavements[R]. <http://hdl.handle.net/11299/895>.
- [28] 马正军. 基于表面裂缝的沥青路面疲劳断裂分析[D]. 湖南大学硕士学位论文, 2005.
- [29] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [30] 禚炜安, 刘斌清. 基于红外热像仪的沥青路面施工过程温度离析状况评价[J]. 中外公路, 2016(3).
- [31] 胡力群, 暴英波, 王天林, 等. 基于热成像的沥青混合料摊铺温度均匀性分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2016(6).
- [32] 刘洪海, 吴少鹏, 玄东兴. 沥青路面碾压离析的试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004(6).
- [33] Myers L A. Development and Propagation of Surface-initiated Longitudinal Wheel Path Cracks in Flexible Highway Pavements[J]. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech, 2000, 30(11).
- [34] 张起森, 郑健龙, 刘益河. 半刚性基层沥青路面的开裂机理[J]. 土木工程学报, 1992(2).
- [35] 赵延庆, 王抒红, 周长红, 等. 沥青路面 Top-Down 裂缝的断裂力学分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010(2).
- [36] Sulaiman S, Stock A. The Use of Fracture Mechanics for the Evaluation of Asphalt Mixes[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1995.
- [37] 杨毅, 刘忠, 辛亚兵, 等. 动载作用下半刚性基层沥青路面应变响应的演化规律[J]. 中外公路, 2017(2).
- [38] 洪海, 程培峰. 黑龙江省沥青混凝土路面裂缝调查分析[J]. 中外公路, 2016(5).
- [39] 梁俊龙. 沥青路面动态模量及裂缝扩展研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2016.
- [40] Meng Ling, Xue Luo, Yu Chen, et al. Lytton. A Calibrated Mechanics-Based Model for Top-Down Cracking of Asphalt Pavements[J]. Construction and Building Materials, 2019, 208:102-112.
- [41] 李仕华, 王修山. 动载作用下半刚性沥青路面力学响应分析[J]. 中外公路, 2016(5).
- [42] Uhlmeyer, J. S., K. Willoughby, L. M. Pierce and J. Mahoney. Top-Down Cracking in Washington State Asphalt Concrete Wearing Courses. Issues in Pavement Design and Rehabilitation[R]. Transportation Research Record No. 1730. Washington D. C., 2000.
- [43] <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/top-down-cracking/>.
- [44] Freitas, E., P. Pereira and L. Picado-Santos. Assessment of Top-Down Cracking Causes in Asphalt Pavements. 3rd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Guimarães, Portugal, 2003.
- [45] 韩彰. 矿料级配对沥青路面低温抗裂性的影响[J]. 河北理工大学学报(自然科学版), 2011(2).
- [46] 刘敬辉, 王端宜, 刘宇. 采用 J 积分对沥青混合料抗裂性能进行评价[J]. 固体力学报, 2010(1).
- [47] T. Pellinen, G. Rowe, K. Biswas. Evaluation of Surface (Top Down) Longitudinal Wheel Path Cracking[R]. Final Report FHWA/IN/JTRP-2004/6, Indiana Department of Transportation, 2004.
- [48] J. H. G. Wamburga, J. N. Maina, H. R. Smith, Kenya Bituminous Materials Study[J]. Transportation Research Record, 1999, 1 681(1):129-137.
- [49] AASHTO, Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide; A Manual of Practice, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2008.
- [50] 何兆益, 杨锡武. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.