

环氧沥青砼疲劳及临界断裂机理研究

孙海军, 陈苏

(江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 结合 Superpave IDT 试验和 SCB 试验对环氧沥青砼的断裂性能进行研究, 通过 Superpave IDT 试验, 获取了环氧沥青砼的回弹模量、蠕变柔量等材料性能, 采用断裂能及耗散蠕变应变能对其疲劳性能进行了分析; 通过 SCB 试验开展不同温度条件下环氧沥青砼极限断裂研究, 并采用扩展有限元技术计算了应力强度因子。结果表明, 环氧沥青砼在低温条件下表现出脆弹性断裂, 其断裂性能受温度的影响显著; 在 4~20 ℃ 下, 环氧沥青砼的耗散蠕变应变能随温度增加而逐渐增大, 蠕变性能参数变化不大, 断裂强度因子则减小, 说明环氧沥青砼在该温度范围内的抗疲劳性能随温度逐渐提高, 而临界抗断裂性能逐渐降低。

关键词: 桥梁; 环氧沥青砼(EAC); 疲劳断裂; 蠕变应变耗散能; 断裂能

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0175-04

环氧沥青砼(EAC)是常用于钢桥面铺装的典型热固性材料, 路面裂缝作为 EAC 的主要病害, 直接影响其使用性能。沥青砼的断裂行为与材料强度和疲劳性能有关, 以往对钢桥面铺装结构抗疲劳性能的研究主要采用疲劳试验, 但试验成本较高。该文利用 Superpave IDT 试验对 EAC 在循环荷载作用下的疲劳性能开展研究, 并结合 SCB 试验和扩展有限元技术(XFEM)对环氧沥青砼的断裂强度及临界断裂性能进行分析, 从能量角度对 EAC 结构断裂性能进行研究。

1 材料试验与数值计算

1.1 试验准备

采用 Marshall 沥青混合料设计方法对 EAC 进行配合比设计, EAC 采用环氧沥青结合料和玄武岩集料, 最佳油石比为 6.5%, 矿料级配见表 1。

表 1 环氧沥青砼的设计级配

筛孔尺寸/ mm	通过百分 率/%	筛孔尺寸/ mm	通过百分 率/%
13.20	100.0	0.600	31.0
9.50	95.5	0.300	28.5
4.75	71.0	0.150	19.5
2.36	57.0	0.075	11.5
1.18	43.5		

根据钢桥面铺装病害调研结果, 疲劳裂缝多出现于冰雪融化期。因此, 试验温度设定为 10 ℃。考虑到 EAC 疲劳裂缝的形成机理, 增加 4 和 20 ℃ 两

个冰雪融化初期及末期温度。试件采用旋转压实仪制备, 控制空隙率为 2%, 试件成型后经切割处理, 得到厚度 50 mm、直径 100 mm 的试验芯样。

Superpave IDT 试验的加载设备采用万能材料试验系统, 变形实时监测设备分别固定于试件表面, 由相互垂直的 2 个 LVDT 传感器构成, 传感器间距 50 mm。

1.2 回弹模量试验

试验荷载采用半正弦波加载模式, 加载循环由 0.1 s 加载期和 0.9 s 间歇期组成。通过控制试验荷载的大小, 确保试件水平应变为 150~350 $\mu\epsilon$, 其中上限是为了保证水平应变处于线性粘弹范围, 下限则是为了保证试验结果不受试验误差的影响。

根据试件的变形曲线, 采用线性回归方法获取卸载阶段和恢复阶段的回归直线, 根据最大荷载和回弹变形数据求得回弹模量, 计算出 EAC 的回弹模量和泊松比(见图 1)。

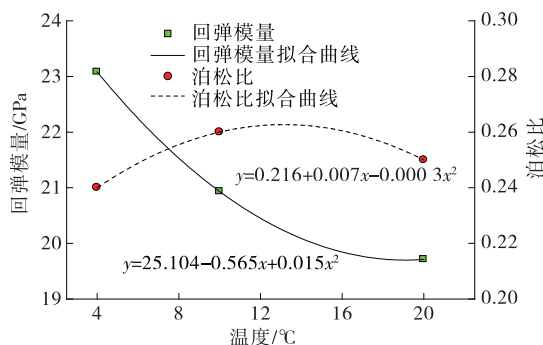


图 1 EAC 的回弹模量与泊松比

由图1可知:EAC的回弹模量随温度增加呈现减小趋势,且减小速率随温度增加而降低;泊松比随温度增加呈现先增加后减小的趋势,在13℃左右达到最大值,说明EAC在13℃时存在较大泊松效应。

1.3 蠕变试验

蠕变试验采用静载模式加载,加载时间为1 000 s。试验中控制试件100 s的水平应变为150~350 $\mu\epsilon$ 。通过蠕变试验计算EAC的蠕变柔量 $D(t)$,结果见图2,同时得到0、10及20℃下的蠕变性能参数值 m 分别为0.31、0.32、0.33。

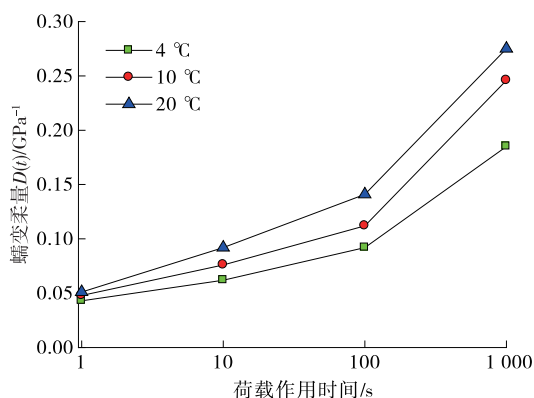


图2 蠕变柔量随时间的变化

由图2可看出:不同温度下EAC的蠕变柔量随荷载作用时间的变化趋势相似,在荷载作用初期,不同温度下EAC的蠕变柔量差异不大,而随着荷载作用时间的增加其差值逐渐增大,且温度越高,蠕变柔量的增加速率越大。

1.4 间接拉伸强度

间接拉伸强度试验采用位移控制模式,即加载速率控制为25 mm/min,直至试件沿加载方向完全破坏。根据试件破坏过程中的加载力和变形数据,计算EAC的拉伸强度等指标,结果见图3。

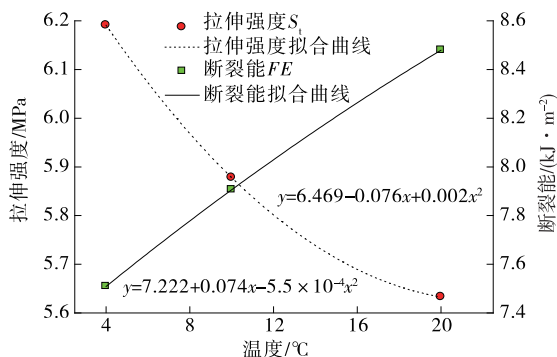


图3 EAC的拉伸强度及断裂能随温度的变化

根据图3,EAC的拉伸强度随温度增加而逐渐

减小,而断裂能表现出相反的趋势,即随着温度增大而增加。说明随着温度的增加,EAC逐渐表现出普通热塑性沥青砼的粘弹特性,其所发生的断裂在温度较低时是类似于水泥砼的脆性断裂,而温度较高时为粘弹性断裂。

2 SCB试验

2.1 SCB试验结果

通过SCB试验对极限荷载作用下的EAC断裂特性展开研究。由于温度较低时EAC表现出与水泥砼相似的弹脆性特征,采用应力强度因子 SIF 对EAC的脆性断裂进行分析。SCB试验采用三点弯曲加载方式,所用半圆形试件通过旋转压实仪制备,尺寸为直径150 mm、厚度50 mm,并预先切缝25 mm。需要指出的是,根据Molenaar J. M. M.等的研究成果,当试件厚度为25~75 mm时,沥青混合料的断裂特性是只与材料性质相关的定值。

试验温度采用4、10、15、20及24℃,压头下压速度控制为50 mm/min。不同温度条件下压头压力与竖向位移之间的关系见图4。

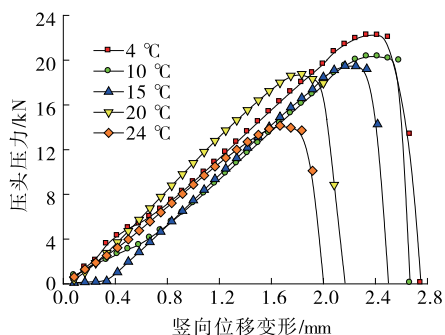


图4 不同温度下EAC的压力一位移曲线

由图4可知:在温度较低时,EAC的压力一位移曲线与普通沥青砼存在较大差别,主要表现为达到压力峰值后迅速下降,并未出现逐渐减小的粘弹性断裂变化,进一步验证了EAC在温度较低特别是低温环境下表现出类似于水泥砼材料的弹脆性性能;温度越低,EAC的压力与竖向位移越大。

2.2 SCB试验数值模拟计算

为了进一步研究EAC处于临界断裂时的力学特征,且考虑到温度较低时EAC所表现出的弹脆性材料性能,建立SCB有限元模型,假设试件为弹性材料,不同温度条件下材料参数根据上文试验通过拟合曲线内插法获取。有限元模型采用C3D8单元进行离散,断裂区通过设置XFEM模拟裂缝的自

由扩展过程。有限元模型见图 5。

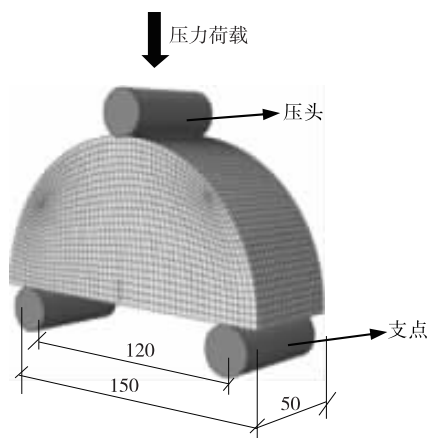


图 5 SCB 试件有限元模型(单位:mm)

基于 SCB 试验, Lim I. L. 和 Ayatollahi M. R. 等研究得到了能获取 I 型断裂强度的计算公式:

$$K_I = \frac{P}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_I \quad (1)$$

式中: P 为压头施加的压力; R 为 SCB 试件的半径; t 为 SCB 试件的厚度; a 为裂缝长度; Y_I 为通过数值应力分析方法确定的标准应力强度因子。

3 环氧沥青砼断裂行为研究

3.1 环氧沥青砼耗散蠕变应变能

利用 Superpave IDT 试验可以得到断裂能 FE 及耗散蠕变应变能 $DCSE$, 作为沥青砼疲劳开裂性能的判断依据。而断裂能阈值 FE_t 和耗散蠕变应变能阈值 $DCSE_t$ 是材料的固有属性, 分别定义为沥青砼损伤阈值的上、下限。 FE_t 和 $DCSE_t$ 的计算结果见图 6。

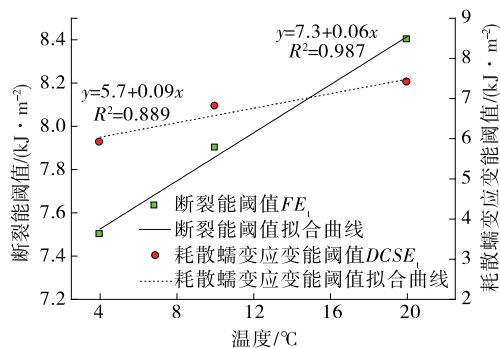


图 6 EAC 的断裂能和耗散蠕变应变能的变化趋势

由图 6 可知: EAC 的 FE_t 为 7~9 kJ/m², 且随温度升高呈线性增长趋势; $DCSE_t$ 随着温度升高也呈线性增长趋势, 在试验温度范围内, 温度越低,

$DCSE_t$ 越小。

在已知沥青砼材料 $DCSE_t$ 的条件下, 为分析其抗疲劳开裂性能, 还需知道该材料的蠕变性能参数。根据蠕变试验, 可得到 EAC 的蠕变性能参数 D_I 和 m 值随温度的变化规律(见图 7)。从中可见, EAC 的蠕变性能参数 D_I 和 m 值随着温度升高基本保持不变, 说明 EAC 的蠕变性能随温度变化不明显, 验证了 EAC 高温稳定性好的特点。

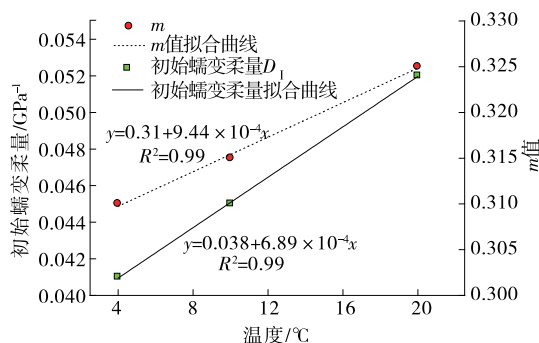


图 7 EAC 的初始蠕变性能参数

综上所述, 在温度为 4~20 °C 时, EAC 的耗散蠕变应变能阈值 $DCSE_t$ 随温度升高而线性递增, 而蠕变性能参数 D_I 和 m 值随温度升高基本保持不变, 所以 EAC 的抗疲劳性能随温度逐渐提高。但 EAC 是一种典型的热固性材料, 在低温条件下, EAC 的性能近似于弹脆性材料, 其 $DCSE_t$ 随温度变化曲线不存在拐点。因此, 对于 EAC 这类热固性材料的抗疲劳性能, 最不利温度应取为 4 °C。

3.2 环氧沥青砼应力强度因子

应力强度因子可作为沥青路面脆性断裂或疲劳断裂的基本指标, 通过数值模拟计算获取 Y_I , 进而计算得到 EAC 的应力强度因子 K_I 。根据环氧沥青砼材料断裂研究成果, 采用数值解即通过 SCB 试验数值模拟计算所得应力强度因子与理论解进行对比, 结果见图 8。

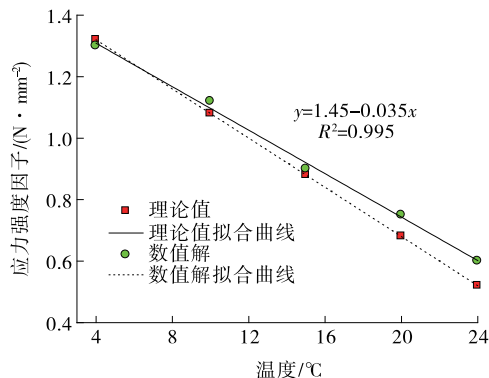


图 8 环氧沥青砼的应力强度因子

由图8可知:通过SCB试验数值模拟计算所得应力强度因子与理论值均呈现随温度增长而减小的趋势。温度较低时,数值解与理论解相差不大,但随着温度的增加,其差异逐渐增大。说明低温条件下将环氧沥青砼视为弹脆性材料是合适的,此时能用弹性断裂的 *SIF* 指标来表征其断裂特征。温度对环氧沥青砼 *SIF* 的影响较大,4℃条件下环氧沥青砼的 *SIF* 为 1.31 N/mm²,温度上升至 24℃时变化为 0.62 N/mm²,减小近 53%。但在高温时环氧沥青砼材料已表现出一定的粘弹性,因此采用 *SIF* 指标表征高温断裂特性还需进一步研究。

4 结论

该文结合 Superpave IDT 试验和 SCB 试验对环氧沥青砼的断裂性能进行研究。基于能量分析与数值计算,分析了不同温度条件下环氧沥青砼的疲劳断裂及临界断裂特征。在温度较低(4~20℃)时,环氧沥青砼的蠕变应变耗散能随温度升高而线性增大,其抗疲劳性能随温度升高而逐渐提高。相对疲劳性能而言,温度升高不利于环氧沥青砼的抗极限断裂性能,4℃条件下环氧沥青砼的 *SIF* 为 1.31 N/mm²,温度上升至 24℃时为 0.62 N/mm²,减小近 53%。由此可见,在 4~20℃温度范围内,环氧沥青砼的抗疲劳性能与抗临界断裂性能存在相反的变化趋势。

参考文献:

- [1] Zhang Z. Identification of suitable crack growth law for asphalt mixtures using the superpave indirect tensile test (IDT) [D]. University of Florida, 2000.
- [2] Zhang Z, Roque R, Birgisson B. Evaluation of laboratory measured crack growth rate for asphalt mixtures [A]. 80th Annual TRB Meeting [C]. 2001.
- [3] Villiers C. Sensitivity of superpave mixtures for development of performance-related specifications [D]. University of Florida, 2004.
- [4] Loulizi A, Flintsch G W, Al-Qadi I L, et al. Comparing resilient modulus and dynamic modulus of hot-mix asphalt as material properties for flexible pavement design [J]. Transportation Research Record: Journal of the TRB, 2006, 1970.
- [5] Molenaar J M M, Molenaar A A A. Fracture toughness of asphalt in the semi-circular bend test [A]. Proceedings of the Papers Submitted for Review at 2ND Euroasphalt and Eurobitume Congress [C]. 2000.
- [6] Kenny N, Dai Qingli. Investigation of fracture behavior of heterogeneous infrastructure materials with extended finite method and image analysis [J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2011, 23(12).
- [7] Xu Yangjian, Huang Yuan. On damage accumulation in the cyclic cohesive zone model for XFEM analysis of mixed-mode fatigue crack growth [J]. Computational Materials Science, 2009, 46.
- [8] Lim I L, Johnston I W, Choi S K. Assessment of mixed-mode fracture toughness testing methods for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1994, 31(3).
- [9] Ayatollahi M R, Aliha M R M. Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading [J]. Computational Materials Science, 2007, 38(4).
- [10] Roque R, Birgisson B, Drakos C, et al. Development and field evaluation of energy-based criteria for top-down cracking performance of hot mix asphalt [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2004, 73.
- [11] Qian Zhendong, Hu Jing. Fracture properties of epoxy asphalt mixture based on extended finite element method [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(11).
- [12] 李智. 环氧沥青混凝土的断裂参数及断裂能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2007.
- [13] 张顺先, 张肖宁, 徐伟, 等. 基于冲击韧性的钢桥面铺装环氧沥青混凝土疲劳性能设计研究 [J]. 振动与冲击, 2013(23).
- [14] 陈先华, 李炜农, 李洪涛. 基于 SCB 试验的环氧沥青混凝土断裂特性评估 [J]. 东南大学学报: 英文版, 2009, 25(4).
- [15] 闵召辉, 张占军, 黄卫. 不同沥青体分比环氧树脂沥青混合料的断裂性能 [J]. 中国公路学报, 2011, 24(3).
- [16] 陈春红, 陈浩锋. 基于复合梁的环氧沥青混凝土的断裂准则研究 [J]. 中外公路, 2010, 30(1).
- [17] 钱振东, 王江洋. 环氧沥青混凝土裂纹起裂与失稳扩展的临界特征 [J]. 工程力学, 2015, 32(1).
- [18] 孙勇. 环氧树脂修复桥梁构件混凝土的断裂能研究 [J]. 山西建筑, 2012, 38(17).
- [19] 苏群, 丁剑霆, 武鹤. 低温冰冻条件下聚丙烯纤维网混凝土断裂能试验研究 [J]. 黑龙江工程学院学报: 自然科学版, 2008, 22(3).