

桥面铺装层裂缝区积水冰胀应力特性分析*

孙志林, 曾毅, 周志刚, 胡省

(长沙理工大学 特殊环境道路工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为分析冰胀作用对桥面铺装层的破坏规律, 利用有限元软件 ABAQUS, 基于平面模型模拟分析桥面结构层裂缝内部积水结冰膨胀对桥面表面及结构内部应力的影响。结果表明, 在裂缝尖端区水平拉应力最大, 拉应力随裂缝长度的增加而加剧; 裂缝内冰胀力引起的铺装层表面竖向位移很小; 当裂缝长度较大时, 冰胀对层间有挤压作用; 冰胀作用主要引起裂缝尖端的应力集中, 导致裂缝扩展贯通。

关键词: 桥梁; 桥面铺装; 面层裂缝; 积水; 冰胀应力

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)02-0132-03

冰冻灾害是中国北方及西南地区普遍存在的一种自然灾害, 给交通基础设施造成巨大破坏, 严重影响人民群众的生产和生活。近年来, 冰冻现象呈向南方发展的趋势, 如 2008 年初南方冰雪灾害, 受灾地区的公路遭受冰冻的严重破坏, 交通运输几乎瘫痪。随着全球变暖现象的加剧, 可能引起的极端气候变化将更频繁, 未来可能出现持续时间更久、波及范围更大的冰冻现象, 对道路冰冻现象必须引起高度重视。

目前, 对于冰冻桥面处治的研究还集中于冰冻清除技术、冰冻损坏后的修复技术研究, 对于冰冻损伤防护技术的研究还是空白。而要提出切实有效的防护手段, 第一步就是要搞清楚冰冻对桥面的损伤机理。该文利用通用有限元软件 ABAQUS 对沥青桥面铺装层裂缝处积水结冰膨胀问题进行分析, 研究桥面裂缝部位积水结冰膨胀产生的铺装层力学响应特征, 为桥面铺装层在冰冻作用下的破坏机理提供力学分析基础。

1 计算模型及参数

以井睦(井冈山—睦村)高速公路鹅岭高架桥桥面结构为依托进行分析。由于桥梁钢筋砼结构(包括桥面板和纵横梁)的刚度远大于沥青混合料, 其模量比一般超过 20, 且桥面铺装层的表面为自由边界, 冰胀应力基本不会导致桥梁结构产生变形, 故假设桥面底部为刚性约束。由于冰胀应力为局部应

力, 其影响范围很小, 为提高计算效率, 取宽为 2 m 的二维桥面进行分析, 同时取模型横向边界为水平约束。裂缝区的冰胀应力有限元计算模型见图 1。

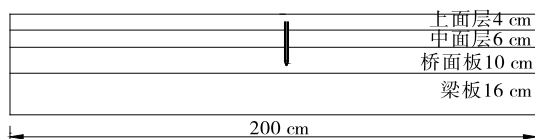


图 1 桥面结构裂缝冰胀模型示意图

桥面开裂后, 随着裂缝的扩展, 裂缝宽度不断增大, 裂缝区域会积水结冰。因此, 裂缝冰胀模型中假设裂缝宽度(短轴)为 1 cm, 长度(长轴)分别为 4、8、12 和 16 cm, 分析铺装层内冻胀应力分布。

冰胀问题只有在低温状况下才会发生, 而沥青混合料是一种温度敏感性材料, 在低温状况下表现为弹性材料甚至脆性, 故低温状况下沥青混合料视作线性弹性体。各结构层材料参数见表 1。

表 1 各结构层参数

结构层	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比
上面层	4	3 500	0.250
下面层	6	3 000	0.250
桥面板	10	32 000	0.167
梁板	16	36 000	0.167

基于弹性力学方法求解弹性层状体系的力学指标时作如下假设: 1) 沥青砼是均匀连续、各向同性的完全弹性材料; 2) 不计自重; 3) 沥青铺装层和桥面板之间完全连续; 4) 计算时简化为二维平面问题。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478052); 长沙理工大学特殊环境道路工程湖南省重点实验室开放基金资助项目(kfj150501); 湖南省教育厅资助项目(17C0049)

2 计算方法

假设裂缝区内的水结成冰后成为属性单一的物质,温度变化引起其体积变化(主要描述结冰现象),并假设冰的热膨胀系数恒定,则问题简化为:水结成冰,其体积膨胀10%,通过热膨胀公式计算得到产生10%体积变化时的温度变化量,然后将其输入ABAQUS中作为变温幅度计算温度应力。

物体由于温度变化而出现热胀冷缩现象,用热膨胀系数 α 表示,表达式为:

$$\alpha = \Delta V / (V \cdot \Delta T) \quad (1)$$

式中: ΔV 为物体体积变化; V 为物体体积; ΔT 为温度变化。

温度变化不是很大时, α 为常量,据此可把冰和水的体积表示如下:

$$V_{\text{冰}} = V_{\text{水}} (1 + 3\alpha \Delta T) \quad (2)$$

假设冰的膨胀系数为 $3.33 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $V_{\text{冰}} = 1.1V_{\text{水}}$,将相关参数带入式(2),得 $\Delta T = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。此外,冰的弹性模量为0.43 GPa,泊松比为0.3。

3 裂缝区冰胀应力特性分析

为分析裂缝区冻胀应力对沥青铺装层的影响,考察图2所示路径S1和S2的水平应力 S_x 及路径S3的竖向应力 S_y ,分析3条路径在冻胀应力影响下的应力分布。裂缝区长度为4 cm时裂缝区域附近的冰胀水平应力 S_{11} 和竖直应力 S_{22} 见图3、图4。

3.1 路径S1的应力分布

不同裂缝长度下路径S1的水平应力 S_x 分布见图5。由图5可知:路径S1上水平应力 S_x 在路

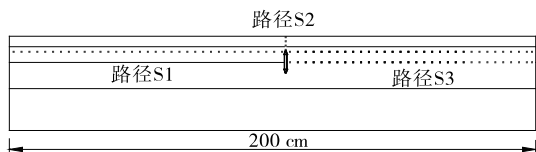


图2 裂缝区冰胀模型及应力提取路径

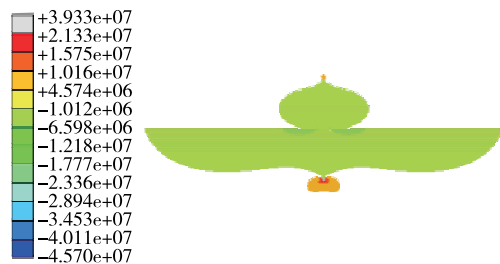


图3 裂缝区长度为4 cm时的冰胀 S_{11} 应力云图(单位:Pa)

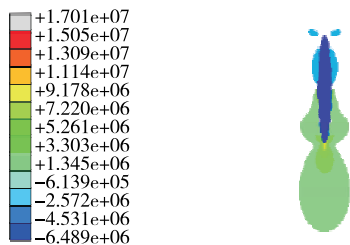


图4 裂缝区长度为4 cm时的冰胀 S_{22} 应力云图(单位:Pa)

径中间达到最大值,且迅速向两边衰减至零,即在裂缝尖端发生明显的应力集中现象,并随着裂缝长度(长轴)的增加应力集中程度更明显。裂缝长度为16 cm时裂缝尖端的集中应力为5.13 MPa,比裂缝长度为4 cm时增加37.2%。在集中应力作用下裂缝极易扩展,从而形成贯通裂缝。

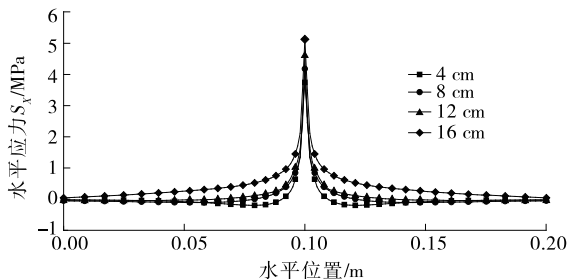


图5 不同裂缝长度下路径S1的水平应力 S_x 分布

3.2 路表竖向位移分布

不同裂缝长度下路表竖向位移分布见图6。由图6可知:随着裂缝长度的增加,铺装层表面的竖向位移增加,在裂缝正上方达到最大值,并向裂缝周围迅速衰减,其中裂缝长为16 cm时的影响范围不到0.5 m,引起路面的最大竖向位移为0.18 mm。说明在冻胀应力作用下铺装层表面的变形也出现集中现象,主要是因为冰块的体积有限;裂缝区的积冰冻胀力引起的铺装层表面的竖向位移较小,这主要与缺陷区域的体积和形状有关,裂缝缺陷区的体积较小,且接近针状。

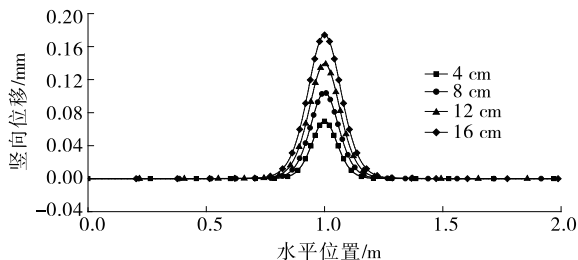


图6 不同裂缝长度下路表竖向位移分布

3.3 路径S2的应力分布

不同裂缝长度下路径S2的水平应力 S_x 分布见

图 7。由图 7 可知:沿路径 S2 即从桥面表面至裂缝尖端,水平应力开始变化缓慢,到达裂缝尖端位置时发生应力集中现象,裂缝长度为 4、8、12 和 16 cm 时,裂缝尖端的集中应力分别为 3.80、4.18、4.64 和 5.13 MPa。说明沿桥面铺装的深度方向,冰胀作用主要是引起裂缝尖端的应力集中,从而导致裂缝扩展贯通。

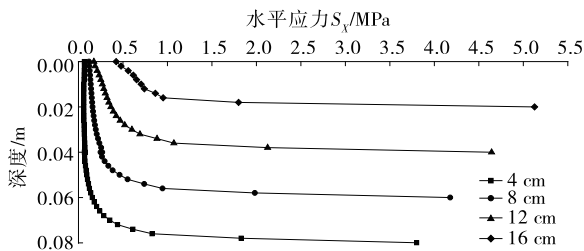


图 7 不同裂缝长度下路径 S2 的水平应力 S_x 分布

3.4 路径 S3 的应力分布

不同裂缝长度下路径 S3 的竖向应力 S_y 分布见图 8。由图 8 可知:裂缝长度为 4、6、8、12 和 16 cm 时,在路径 S3 的始端,即沥青层与桥面板层间和裂缝相交处铺装层的竖向拉应力分别为 2.38、1.64、1.19 和 0.19 MPa,说明随着裂缝长度的增加,裂缝与层间相交处铺装层的竖向拉应力不断减小。沿路径 S3 方向(即层间水平方向)的竖向拉应力先减小后趋近于零,在裂缝长度达 16 cm 时层间水平方向出现压应力,其值为 1.5 MPa 左右,说明裂缝长度过大时冰胀作用对层间有挤压作用。

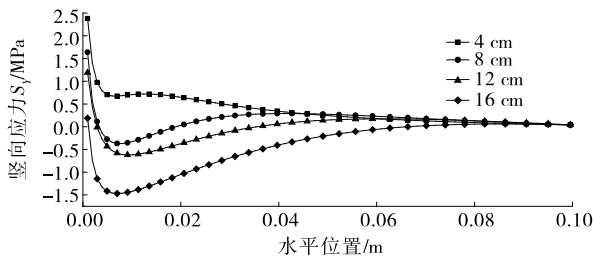


图 8 不同裂缝长度下路径 S3 的竖向应力 S_y 分布

4 结论

(1) 桥面面层裂缝内积水冰胀在裂缝尖端出现较大水平拉应力区,拉应力值随裂缝长度增加而增大,裂缝长度为 16 cm 时裂缝尖端的集中应力为 5.13 MPa,比裂缝长度为 4 cm 时增加 37.2%。在集中应力作用下裂缝极易扩展而形成贯通裂缝。

(2) 裂缝区的冰胀应力引起的桥面铺装层表面竖向位移较小,可忽略不计,裂缝长度为 16 cm 时引

起的路面最大竖向位移为 0.18 mm,作用范围不到 0.5 m。

(3) 随着裂缝长度的增加,裂缝与层间相交处铺装层的竖向拉应力减少,裂缝长度达 16 cm 时层间水平方向出现压应力,裂缝过长对裂缝经过的层间有挤压作用。

参考文献:

- [1] 钱航.温度-荷载耦合作用下大跨径悬索桥桥面铺装力学分析[D].南京:东南大学,2017.
- [2] 纪小平,郑南翔,张宜洛.桥面沥青铺装温度场的特性及预估模型[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(3).
- [3] 杨建军,郑健龙,钱国平.路面冻胀开裂热应力耦合分析[J].公路交通科技,2010,27(7).
- [4] Seible F, Latham C T. Horizontal load transfer in structural bridge deck overlays[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 116(10).
- [5] 司伟,马磊,肖楠.高原寒冷地区沥青混合料冻融循环作用下的抗压性能[J].公路交通科技,2013,30(4).
- [6] 周水文.基于表面能理论低温沥青混合料的抗冻性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [7] 刘莉萍.沥青桥面铺装水损害原因及预防措施分析[J].中国建材科技,2015(4).
- [8] 徐慧宁,张锐,谭忆秋,等.季节性冰冻地区冬季路面温度分布规律[J].中国公路学报,2013,26(2).
- [9] Qin Y H, Hiller J E. Modeling temperature distribution in rigid pavement slabs: impact of air temperature[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(9).
- [10] 赵立东.沥青路面凝冰损坏影响因素及微观机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [11] Wang H N, Huang Z H, Li L, et al. Three dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-ray CT[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1).
- [12] 韦佑坡,马磊,司伟.寒区沥青混合料抗压强度影响因素[J].公路交通科技,2012,29(4).
- [13] 徐慧宁,谭忆秋,张锐,等.极端低温天气及其对道路结构温度-湿度分布规律的影响[J].中国公路学报,2014,27(1).
- [14] JTG D50-2017,公路沥青路面设计规范[S].
- [15] 刘洪涛,张方胜,王光辉.沥青混凝土桥面铺装层孔洞积水结冰的有限元分析[J].工程与建设,2012,26(3).