

应力强度因子耦合作用下的加铺层 寿命预估年限计算方法

张喜民¹, 成高立², 陈 律³, 宋子豪³, 王选仓³

(1. 陕西交控市政路桥集团有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 陕西高速机械化
工程有限公司, 陕西 西安 710038; 3. 长安大学, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了延长公路使用年限并提高长寿命复合路面的建设和养护水平, 以尉许高速公路为依托, 开展加铺层寿命预估年限计算方法的研究。通过有限元软件模拟复合式路面沥青加铺层层底的应力状况, 分析应力强度因子出现负值的原因, 并提出从能量角度出发, 将几种不同类型的应力强度因子耦合为一个等效应力强度因子的方法。基于 Paris 公式, 提出一种利用有限元模型中加铺层层底应力强度因子来计算加铺层开裂年限的新方法。结果表明: 1) 沥青加铺层与水泥混凝土板之间的良好黏结抑制了沥青加铺层层底的弯拉变形, 因此路面不易产生张拉型反射裂缝; 2) 随着荷载从右向左移动, 剪切型荷载应力强度因子呈现中心对称分布, 裂缝经历了两次方向相反的剪切作用; 3) 基于 Paris 公式和有限元模型的特点, 计算了 5 种路面结构的开裂年限, 结果与实际情况较为符合。

关键词: 沥青加铺层; 应力强度因子; 寿命预估; 有限元模型; Paris 公式

中图分类号: U418.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)08-0041-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.08.100

Calculation method of estimated life of overlay under coupling effect of stress intensity factor

ZHANG Ximin¹, CHENG Gaoli², CHEN Lü³, SONG Zihao³, WANG Xuancang³

(1. Shaanxi Traffic Control Municipal Road & Bridge Group Co., Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi, China;
2. Shaanxi Motorway Mechanization Engineering Co., Ltd., Xi'an 710038, Shaanxi, China;
3. Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to extend the service life of highway and improve the construction and maintenance level of long-life composite pavement, the calculation method of the estimated life of the pavement is carried out based on the Weixu expressway. The stress conditions of the asphalt overlay of composite pavement are simulated by finite element software, the reasons for the negative value of the stress intensity factor are analyzed, and a method of coupling several different types of stress intensity factors into an equivalent stress intensity factor is proposed from the perspective of energy. Based on the Paris formula, a new method is proposed to calculate the cracking age of the overlay using the stress intensity factor of the overlay in the finite element model. The results show that: 1) The good bonding between the asphalt overlay and the cement concrete slab inhibits the bending and tensile deformation of the bottom of the asphalt overlay, so the pavement is not prone to tensile reflection cracks. 2) As the load moves from right to left, the stress intensity factor of shear load is distributed symmetrically, and the crack experiences two shear actions in opposite directions. 3) Based on the characteristics of the Paris formula and the finite element model, the cracking years of the five pavement structures are calculated, and the results

收稿日期: 2024-01-27

基金项目: 2018 年交通运输部交通运输行业重点科技资助项目(2018-MS2-042); 陕西省交通运输厅科研资助项目(20-24K, 20-25X, 20-32K)

作者简介: 张喜民(1981—), 男, 高级工程师, 从事公路工程建设、施工领域工作。

are more consistent with the actual situation.

Key words: asphalt overlay; stress intensity factor; life estimate; finite element model; Paris formula

随着我国道路工程行业的不断发展,对路面结构的研究也在不断深入。近年来,不少专家学者在旧水泥混凝土路面改建时提出了“白加黑”方案的基础上,进一步提出了一种在水泥混凝土板上加铺沥青混凝土的复合式路面结构^[1-3]。这种复合式路面结构因其承重层寿命长且养护费用低,在实际应用中取得了良好的效果^[4-6]。然而,由于水泥混凝土板板体结构中接缝的存在,导致其上的沥青加铺层反射裂缝问题较为严重^[7-8]。NG 等^[9]建立了一种定制的扩展有限元模型,发现该模型可以较为准确地预测水泥混凝土试样中的裂纹发展和断裂性能;LING 等^[10]通过三维扩展有限元模型 XFEM 模型研究了土工布在温度应力影响下的反射裂缝发展情况。相比传统有限元方法,XFEM 模型在道路疲劳性能研究中更为精确。

为了更准确地计算水泥混凝土板上沥青加铺层的开裂寿命,本文采用有限元软件 ABAQUS 模拟了 5 种不同路面结构在温度和荷载作用下加铺层层底的应力情况。基于能量叠加原理,将不同类型的应力强度因子进行了标量化处理,并结合

Paris 公式建立了行车荷载作用下反射裂缝疲劳寿命预估模型,从而计算了 5 种路面结构方案加铺层的开裂年限,以期为复合路面沥青加铺层寿命预测提供参考。

1 计算模型建立

利用有限元软件 ABAQUS 模拟尉许高速公路 5 种加铺方案的路面结构。原路面为 4 m × 3 m (长 × 宽) 的水泥混凝土板,并在两水泥混凝土板间设置 1 cm 宽的接缝。各方案厚度参数如表 1 所示。各种材料的杨氏模量、泊松比、密度和阻尼如表 2 所示。

基于 XFEM 模型,设置初始裂缝长度为 10 mm。路面结构 1 初始裂缝设置在 Strata 应力吸收层底部;路面结构 2、3 初始裂缝设置在橡胶沥青同步碎石封层底部;路面结构 4、5 初始裂缝设置在改性应力吸收层底部。所有裂缝均位于水泥混凝土板接缝的上方。在长寿命复合式路面三维有限元模型的表面,设置两条平行且等宽的动荷载带,作为行车荷载的施加方式。具体布置如图 1 所示。

表 1 各方案加铺层厚度参数

cm

方案 编号	第一层		第二层		第三层		第四层		第五层	
	厚度	材料	厚度	材料	厚度	材料	厚度	材料	厚度	材料
1	4	SMA-13	6	AC-20C	2.5	STARA	—	—	—	—
2	4	SMA-13	6	AC-20C	8.0	AC-25C	1	橡胶沥青同步碎石	—	—
3	4	SMA-13	6	AC-20C	1.0	橡胶沥青同步碎石	4	AC-13I	2	橡胶沥青同步碎石
4	6	AC-16C	2	改性沥青	—	—	—	—	—	—
5	4	AC-16C	6	AC-16C	2.0	改性沥青	—	—	—	—

表 2 复合式路面各层材料力学参数

结构层材料类型	杨氏模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	阻尼
SMA-13 沥青混凝土	9 750	0.35	2 100	0.9
AC-20 沥青混凝土	12 500	0.20	2 300	0.9
AC-16 沥青混凝土	11 250	0.20	2 400	0.9
Strata 应力吸收层	600	0.20	2 600	0.9
橡胶沥青同步碎石封层	600	0.20	2 350	0.9
水泥混凝土板	31 000	0.15	2 350	0.8
水泥稳定碎石基层	2 600	0.25	2 300	0.8
地基	40	0.40	1 800	0.4

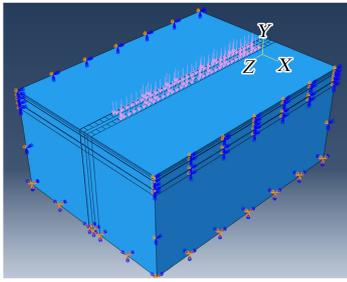


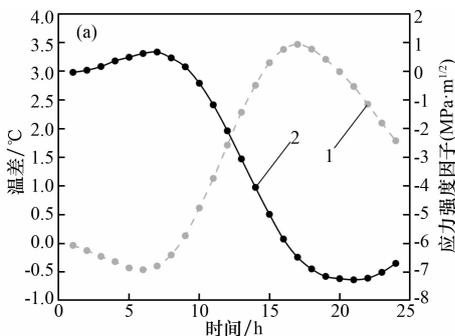
图 1 移动荷载的施加

2 应力模拟结果分析

在断裂力学中,反映裂纹尖端弹性应力场强弱的物理量称为应力强度因子。路面结构在温度变化和荷载作用下,主要产生温度应力强度因子 K_1 、张拉型荷载应力强度因子 K_1 和剪切型荷载应力强度因子 K_2 。

2.1 温度应力强度因子

图 2 为方案 1 在 2020 年 7、12 月时,混凝土板顶与板底间温差的变化情况。由图 2 可知:应力强度因子的变化与外界温差的变化呈现出规律性的负相关关系。当板顶与板底的温差大于 0 时,应力强度因子为负值。此时,混凝土板上部的温度高于下部,导致上部形变大于下部,使得混凝土板在横断面方向上形成向上拱起的状态。这会使相邻混凝土板上部的接缝间距减小,接缝处沥青面层受到的剪切应力随之减小,有利于车辆荷载的连续传递,不易出现反射裂缝。当板顶与板底的温差小于 0 时,应力强度因子为正值。此时,混凝土板上部的温度低于下部,导致上部形变小于下部,使得混凝土板在横断面方向上形成向下拱起的状态。这会使相邻混凝土板上部的接缝间距增大,接缝处沥青面层受到的剪切应力随之增大,不利于车辆荷载的连续传



递,容易出现反射裂缝。

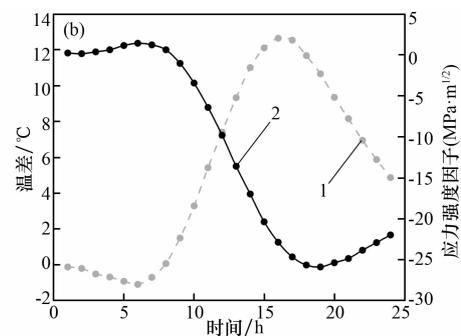
2.2 张拉型荷载应力强度因子

各方案的 K_1 型应力强度因子变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知:5 种加铺方案在 K_1 型应力强度因子的变化情况上表现出相同的规律,即 K_1 几乎一直小于 0,并且在接缝处达到最小值。当车辙荷载作用于反射裂缝一侧时, K_1 仍为负值。根据这一规律,在不考虑温度应力的影响下,可以确定复合式路面不容易发生张拉型反射裂缝。

沥青加铺层的层底是否出现张拉型反射裂缝,取决于车辆荷载作用下层底弯拉形变的大小。然而,沥青加铺层与水泥混凝土板之间的黏结情况会在一定程度上阻碍层底弯拉形变的产生。因此, K_1 型应力强度因子为负值表明,层间良好的黏结情况间接提升了加铺层底抵抗弯拉形变的能力。此外, K_1 型应力强度因子在接缝处达到最小的原因是,接缝处加铺层层底受到的绝大部分应力都转化为剪切应力而非弯拉应力。由此可以推断,复合式路面的反射裂缝主要以剪切型反射裂缝为主^[11]。

2.3 剪切型荷载应力强度因子

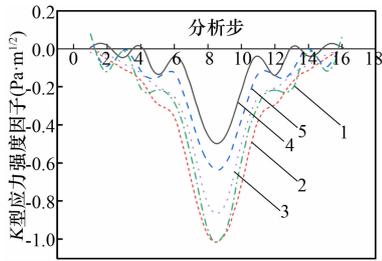
方案 1 的 K_2 型应力强度因子变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知:随着荷载从右向左移动,应力强度因子的大小呈现出明显的中心对称分布。当荷载经过接缝前,应力强度因子均为正值;当荷载经过接缝后,应力强度因子均为负值。分析表明,裂缝在荷载作用下经历了两次方向相反的剪切作用。因此,变化曲线中的负值仅仅是由于剪切方向不同引起的符号差异,所以在计算时应将所有应力强度因子按正值处理。



日期: (a) 2020 年 7 月; (b) 2020 年 12 月

1—温差; 2—应力强度因子 K

图 2 方案 1 混凝土板顶与板底间温差的变化



方案：1—1；2—2；3—3；
4—方案 4；5—方案 5。

图 3 各方案的 K_1 型应力强度因子变化曲线

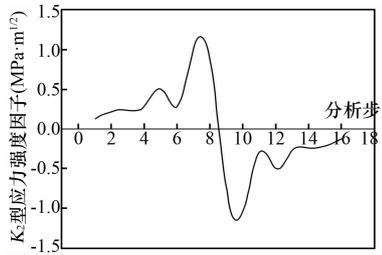


图 4 方案 1 的 K_2 型应力强度因子变化曲线

2.4 有效应力强度因子

对于路面材料本身而言，断裂韧度 K_{Ic} 是材料固有的物理属性，不区分温度型或荷载型^[12]。根据断裂力学理论，描述材料开裂可以从能量判据 G 、应力强度因子 K 等多个角度出发。这些不同的描述角度之间存在内在的联系，具体情况如表 3 所示。

从能量的角度出发，可以推导出不同类型应力强度因子的耦合结果应当是一个标量和，即

$$\Delta K = fK_1 + bK_1 + c|K_2| \quad (1)$$

式中： ΔK 为应力强度因子幅值， $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ； f 、 b 、 c 均为耦合系数，在不考虑温度场的情况下， $f=0$ 。

3 加铺层开裂寿命

3.1 反射裂缝疲劳破坏一般规律

在反射裂缝的发展阶段，疲劳裂缝的发展速率 da/dN 与裂缝尖端应力强度因子幅值 ΔK 的关系可以使用双对数坐标表示，如图 5 所示^[13]。其中：

da/dN 为疲劳裂纹扩展速率， $\text{mm}/\text{次}$ ； ΔK_{Ih} 为裂缝扩展阈值，对应 I 区域临界点； ΔK_c 为裂缝扩展达到不稳定快速断裂时的极限值，对应 III 区域的结束点。

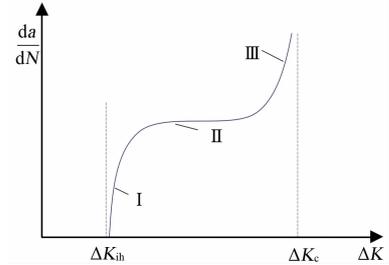


图 5 $da/dN - \Delta K$ 双对数曲线

裂缝的发展可以分为 3 个阶段：I 为低速稳定发展状态、II 为中速稳定发展状态、III 为高速发展状态。当 ΔK 达到 ΔK_{Ih} 时，裂缝进入稳定发展阶段，其发展速率符合 Paris 公式。由图 6 可知：在第 III 阶段， da/dN 值显著增大，但该阶段在材料疲劳裂缝发展的过程中所占时间极短，对材料使用寿命的影响较小。因此，建立 da/dN 公式时主要依据疲劳裂缝发展的前两个阶段^[14]。

3.2 行车荷载作用下反射裂缝疲劳寿命预估模型

Paris 公式是基于断裂力学理论提出的裂缝扩展公式。在模拟水泥混凝土路面加铺沥青层结构的疲劳破坏研究中应用较为广泛。当应用于路面结构时，Paris 公式可以改写为式(2)形式，其中 ΔK 为有效应力强度因子幅值^[15-16]：

$$\frac{da}{dN} = A (\Delta K)^n \quad (2)$$

式中： A 、 n 均为试验参数。

对式(2)在裂缝长度 a 从初始长度 a_0 到最终长度 a_f 的范围进行积分，可以得到裂缝发展寿命的表达式：

$$N = \frac{1}{A} \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{(\Delta K)^n} \quad (3)$$

式中： N 为裂缝发展寿命。

表 3 应力强度因子的能量解释

应力强度因子类型	出现负值的原因	受力角度解释	能量角度解释	计算时取值
温度型应力强度因子	板顶温度大于板底温度	路面可以多承受一部分额外的车辆荷载	路面可以多承受一部分额外的能量	原值
张拉型荷载应力强度因子	层间的黏结抑制了层底弯拉变形	路面可以多承受一部分额外的车辆荷载	路面可以多承受一部分额外的能量	原值
剪切型荷载应力强度因子	剪切方向发生改变	剪切方向改变导致了受力方向的变化	能量是标量，因此剪切方向的改变不影响能量的大小	绝对值

假定沥青加铺层与混凝土板之间完全连续,则混凝土板之间的接缝可以视为路面结构内部的原始裂缝。这些裂缝会从上而下在加铺层中扩展,最终在加铺层表面形成反射裂缝。因此,式(3)可以改写为式(4)形式,其中 h_a 为计算的加铺层厚度, mm。

$$N = \frac{1}{A} \int_0^{h_a} \frac{da}{(\Delta K)^n} \quad (4)$$

根据定积分将式(4)化简为

$$N = \frac{h_a}{A (\Delta K)^n} \quad (5)$$

在反射裂缝形成过程中, II型应力强度因子起主导作用,而 I型应力强度因子也发挥了一定的影响。因此,本文将两种荷载应力强度因子进行耦合,并给出其公式(不考虑温度场):

$$\Delta K = bK_1 + c |K_2| \quad (6)$$

结合有限元模拟结果,以方案1为例,应力强度因子的大小如图6所示。由图6可知:裂缝位置在分析步8与9之间。

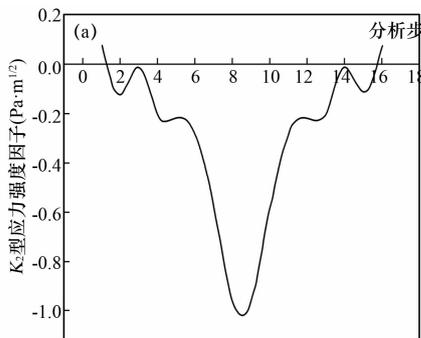
当移动荷载处于不同的分析步时,裂缝的荷载型和温度型应力强度因子均随之变化。为了反映动载在整个作用过程中对应力强度因子的影响,选取其在整个过程中的平均值作为代表值。具体公式如下。

$$M_1 = \frac{\int_L \alpha dL}{16} \quad (7)$$

$$M_2 = \frac{\int_L \beta dL}{16} \quad (8)$$

式中: M_1 、 M_2 为动载平均值; L 为裂缝长度, m; α 、 β 为裂缝处 K_1 、 K_2 型应力强度因子关系分析步的函数。

在根据整个过程中的平均值进行计算时,移



动荷载作用1次相当于平均应力强度因子作用16次。因此,在本文有限元模型的背景下, Paris公式最终改写为

$$N = \frac{h_a}{16A (\Delta K)^n} \quad (9)$$

$$\Delta K = bK_1 + c |K_2| \quad (10)$$

3.3 疲劳次数计算方法

3.3.1 应力吸收层影响修正

考虑到应力吸收层具有缓解应力的作用,认为应力吸收层顶面的应力强度因子为底面的一半,即应力吸收层吸收了约一半的应力。方案1、4、5均适用于此情况,相应的应力分布如图7所示。

3.3.2 大厚度沥青加铺层影响修正

基于直角三角形模型的应力分布,选取其中线处应力强度因子的70%作为整个深度上的平均应力强度因子。方案2、3可以使用这一修正后的方法进行计算。

3.3.3 Paris公式计算参数选取

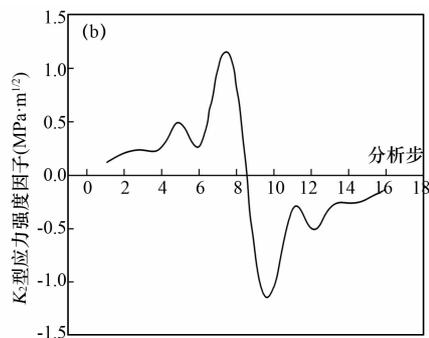
根据相关疲劳参数试验,回归计算不同应力水平下沥青加铺层和应力吸收层的疲劳参数,选取的 Paris公式参数如表4所示^[17]。

表4 沥青加铺层和应力吸收层的疲劳参数

不同试验层	$A/10^{-6}$	n
沥青加铺层	1.48	2.46
应力吸收层	14.3	1.85

3.3.4 耦合系数标定

已知原路面结构为方案4,该路面结构在使用第五年时表面出现了反射裂缝。因此,以这一条件为标准,对耦合系数 b 、 c 进行标定。计算结果如表5所示。



日期: (a) 2020年7月; (b) 2020年12月

图6 方案1应力强度因子与分析步位置的关系

表 5 不同耦合系数下的计算结果

拟定耦合公式	均值/(MPa·m ^{1/2})		ΔK /(MPa·m ^{1/2})	轴载循环次数/次	开裂年限/a
	K_1	K_2			
$\Delta K = 0.33 K_1 + 0.67 K_2$	-0.100 5	0.268 98	0.147 052	8 570 679.0	4.761 488
$\Delta K = 0.30 K_1 + 0.70 K_2$	-0.100 5	0.268 98	0.158 136	7 167 738.1	3.982 076
$\Delta K = 0.40 K_1 + 0.60 K_2$	-0.100 5	0.268 98	0.121 188	13 793 137.0	7.662 854

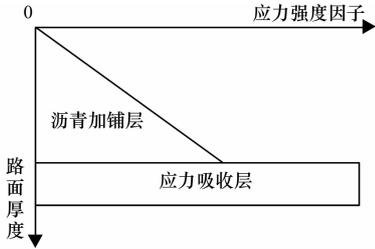


图 7 应力吸收层修正后的应力分布

由表 5 可知:在不考虑温度场的情况下,取 $a = 0.67$ 、 $b = 0.33$ 较为符合实际情况。由此,确定疲劳次数计算公式:

$$N_{\text{应力加铺层}} = \frac{h_a}{16 \times 1.48 \times 10^{-6} (\Delta K)^{2.46}} \quad (11)$$

$$N_{\text{应力吸收层}} = \frac{h_a}{16 \times 1.43 \times 10^{-5} (\Delta K)^{1.85}} \quad (12)$$

$$\Delta K = 0.67K_1 + 0.33 | K_2 | \quad (13)$$

式中: $N_{\text{应力加铺层}}$ 、 $N_{\text{应力吸收层}}$ 分别为加铺层、应力吸收层疲劳破坏次数,次。

3.3.5 各方案疲劳寿命计算

尉许高速公路为重载交通路面,考虑到交通量会随着年限增加的情况。通常,厚度较大的路面使用时间更长,交通量也更大。因此,选择厚度较小的方案计算轴次为 180 万次,厚度较大的路面计算作用轴次为 220 万次。各方案的计算结果如表 6 所示。由表 6 可知:除方案 5 外,其余各方案均与实际情况比较符合。方案 1 的开裂年限为 6 a,方案 2、3 的开裂年限为 9 a,方案 4 的开裂年限为 5 a。

表 6 各方案疲劳寿命计算结果

方案编号	均值/(MPa·m ^{1/2})		ΔK /(MPa·m ^{1/2})	轴载循环次数/次	开裂年限/a
	K_1	K_2			
1	-0.248 30	0.381 00	0.173 331	9 531 862	5.295 479
2	-0.325 70	0.342 61	0.122 068	18 746 778	8.521 263
3	-0.285 30	0.288 11	0.098 885	18 221 579	8.282 536
4	-0.268 98	0.268 98	0.147 052	8 570 679	4.761 488
5	0.254 56	0.254 56	0.114 413	26 644 420	14.802 46

4 结 论

(1) 对于温度型应力强度因子,当温度梯度为负时,应力强度因子为正,此时路面易发生温度型反射裂缝;而当温度梯度为正时,应力强度因子为负,此时路面能够承受更大的应力。

(2) 沥青加铺层与水泥混凝土板之间的黏结效果在一定程度上抑制了沥青加铺层层底的弯拉变形,因此不易产生张拉型反射裂缝。同时,张拉型荷载的应力强度因子为负值。

(3) 剪切型荷载应力强度因子的大小随着荷载从右向左移动呈现出明显的中心对称分布;荷载经过接缝前,应力强度因子均为正值;经过接缝后,应力强度因子均为负值;分析表明,裂缝经历了两次方向相反的剪切作用。

(4) 结合 Paris 公式和有限元建模的特点,计算得出不同路面结构的开裂寿命:方案 1 的开裂年限为 6 a,方案 2、3 为 9 a,方案 4 为 5 a。

参考文献:

- [1] 王楠,王芳,王选仓,等. 水泥混凝土加铺层“黑白”中间层结构的荷载应力分析[J]. 公路,2008,53(7): 131-135.
- [2] 赵军辉,陈文强,朱益军,等. 基于有限元方法的“白加黑”路面荷载应力研究[J]. 北方交通,2023(12): 22-25,30.
- [3] 罗雪平,陈楚鹏. 重交通条件下白加黑路面粗粒式应

- 力吸收结构层沥青混合料设计及其性能研究[J]. 西部交通科技,2023(7):69-72.
- [4] 王家主,沈逸伦,钟培鑫. 常温洒(撒)布型极薄磨耗层在水泥混凝土路面的直铺应用效果[J]. 公路,2023,68(3):8-12.
- [5] 胡迪. 高速公路“白加黑”路面改造工程项目旧路处治方案比选研究[J]. 西部交通科技,2022(8):14-15;114.
- [6] FU X, HUANG J Y, BAN Y X, et al. Thickness ranges calculation method of double asphalt overlay on concrete pavement[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1):4939.
- [7] AZARI H, LIN S B. Evaluation of the impact echo method for concrete bridge decks with asphalt overlays[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(2):436-444.
- [8] 王芳,王选仓,台电仓,等. 水泥混凝土加铺层贫混凝土基层荷载应力分析[J]. 公路,2008,53(7):135-139.
- [9] NG K, DAI Q I. Tailored extended finite-element model for predicting crack propagation and fracture properties within idealized and digital cementitious material samples[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138(1):89-100.
- [10] LING J M, TAO Z F, QIAN J S, et al. Investigation the influences of geotextile on reducing the thermal reflective cracking using XFEM[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(5):391-398.
- [11] 曹明明. 刚柔复合式基层沥青路面结构特征与荷载响应分析[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [12] 蔡燕霞. 橡胶沥青应力吸收层结构行为与路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2016.
- [13] 金光来. 基于扩展有限元的沥青路面疲劳开裂行为的数值研究[D]. 南京:东南大学,2015.
- [14] 张兰峰. 基于移动荷载和连续变温条件下沥青路面结构力学响应研究[D]. 西安:长安大学,2018.
- [15] 职子涵. 基于连续-非连续理论的损伤结构力学响应数值模拟分析[D]. 郑州:郑州大学,2020.
- [16] 张攀. 基于改进 Paris 公式的沥青路面反射疲劳裂缝动态扩展研究[D]. 长沙:湖南大学,2019.
- [17] 谭振宁. 沥青路面横向开裂的数值模拟与结构优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

(上接第40页)

的温度更接近外部环境温度,受外部温度的影响也更加显著。在环境温度分别为 600、700、800 °C 的情况下,T 梁的最高温度分别为 592、693、794 °C。T 梁内部钢筋的温度随着火灾温度的升高而增加,在不同受火温度条件下,随着时间的推移,同一钢筋不同位置之间的温度差逐渐趋近。

(3)随混凝土保护层厚度的增加,同一时刻钢筋的温度会相应降低,从而有利于减小钢筋的热损伤程度。当混凝土保护层厚度为 40 mm 时,钢筋温度下降的幅度出现明显变化,即存在一个转折点。因此,在实际工程中,对于有防火设计要求的建筑结构,建议适当增加混凝土保护层厚度,一般不应小于 40 mm。

参考文献:

- [1] 陆洲渊,徐朝晖. 火灾下钢筋混凝土柱温度场分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004,32(9):1121-1125.
- [2] 刘桥,韩重庆,许清风. 高强钢筋混凝土连续 T 形梁受火后抗弯性能试验研究与数值分析[J]. 工程力学,2015,32(12):179-187.
- [3] 许肇峰,陈映贞,饶瑞. 火灾下混凝土空心板温度场及损伤规律研究[J]. 中国公路学报,2019,32(1):87-98.
- [4] 王玉钊,邱英,徐天贵,等. 火灾中钢筋混凝土两端固结梁破坏模式变化规律[J]. 防灾减灾工程学报,2024,44(1):192-201.
- [5] 王卫华,董毓利. 带楼板钢筋混凝土 T 形梁火灾下(后)温度场研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(2):684-693.
- [6] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [7] EN 1993-1-2; Eurocode 3: Design of steel structures-part 1-2: General rules - structural fire design. European Committee for Standardization (CEN)[S]. Brussels,2005.
- [8] 李引擎,马道贞,徐坚,等. 建筑结构防火设计计算和构造处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1991.