

# 利用混凝土损伤塑性模型评价 CRCP+AC 复合式路面的损伤演变

王 斌, 杨 军, 张 磊  
(东南大学 交通学院, 南京 210096)

**摘 要:**在连续配筋混凝土复合式路面(CRCP+AC)的研究中,CRCP 面板的裂缝形态和分布模式是影响今后路面使用性能和生命周期的重要因素。研究采用 ABAQUS 有限元程序中的混凝土损伤塑性模型(CDP)表征 CRCP 面板的力学特性,结合三维瞬态热传导分析的温度场数据,分析了变温条件下的结构损伤情况;并进一步分析复合式路面在温度变化和交通荷载耦合作用下,CRCP 面板损伤的演化规律以及裂缝张开闭合的行为特征。研究认为沥青面层的作用不仅仅局限在功能性方面,它可以明显改善 CRCP 面板的受力状况;复合式路面设计中应根据 CRCP 面板的温缩性能和损伤性能综合考虑沥青面层的合理厚度。

**关键词:**复合式路面;混凝土损伤塑性模型;损伤分析;温度与荷载耦合作用

**中图分类号:**U416.216.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)06-0067-08

## Evaluation on the Damage Evolution of the CRCP+AC Composite Pavement by the Concrete Damedged Plasticity Material Model

WANG Bin, YANG Jun, ZHANG Lei

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

**Abstract:** In the study on the CRCP+AC composite pavement, the form and distribution pattern of cracks are two important factors influencing the performance and the lifetime of the pavement. The concrete damaged plasticity material model incorporated in the general purpose finite element software named ABAUQS was adopted to describe the mechanical characteristics of the CRC slab. Combining with the temperature field database drawn from the three-dimensional transient heat transfer analysis, the structural damage under the condition of temperature changing is analyzed. The structural damage evolution and the crack behavior of the CRC slab subjected to the thermal-mechanical coupling condition are further analyzed, which suggests that the role of the asphalt concrete surface is not confined only to the scope of improving the performance of the road, its capacity for improving the stress state of CRCP slab is worthwhile to be affirmed. And the reasonable thickness of AC layer should be designed in consideration of the thermal contraction and damage properties of the CRC slab comprehensively.

**Key words:** composite pavement; concrete damaged plasticity mode; damage analysis; thermal-mechanical coupling condition

收稿日期:2010-03-26

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(50908054)

作者简介:王斌(1978-),男,博士生,主要从事路基与路面工程研究,(E-mail)timbarrey@163.com。

CRCP+AC 复合式路面是在连续配筋水泥混凝土路面 (Continuously Reinforced Concrete Pavement, 简称 CRCP) 上加铺沥青混合料面层 (AC) 的一种“黑白并举、刚柔相济”的新型路面结构, 它能够在重载交通条件下, 提供较好的路用性能, 并在较长使用期内不发生结构性破坏 (只需对沥青混合料面层进行养护), 具有长寿命、低维护成本的特点<sup>[1]</sup>。但是由于混凝土的抗拉强度一般较低, 温度变化或温度荷载耦合作用易使混凝土所受拉应力达到或超过其极限抗拉强度, 从而产生裂缝。裂缝处的混凝土易剥落, 路表水的渗入会造成钢筋腐蚀, 引起荷载传递能力下降进而导致发生冲断破坏 (Punchout)<sup>[2]</sup>。

CRCP 面板内部纵横向钢筋对裂缝的形成发展具有一定制约和控制作用, 加铺沥青面层后其裂缝形态和分布模式与一般水泥混凝土路面有较大差别。国内外研究一般将 AC 作为磨耗层, 在 CRCP+AC 复合式路面设计中很少涉及 AC 层本身的设计, 或直接采用有效厚度法、弯沉法等进行加铺沥青层设计。较多关注沥青面层改善路面服务水平功能性作用, 如其与 CRCP 之间的粘结与防水性能; 或较多关注沥青面层反射裂缝的研究<sup>[3]</sup>。而沥青面层的结构性作用未被重视, 尤其是沥青面层对 CRCP 面板裂缝行为的影响作用尚无深入研究。

在对 CRCP+AC 复合式路面进行瞬态热传导分析的基础上, 利用混凝土损伤塑性模型表征 CRCP 面板的力学特性, 通过研究温度变化和温度荷载耦合作用条件下结构损伤的演变情况, 揭示 CRCP 面板的裂缝行为规律以及沥青面层对裂缝行为的影响, 明确沥青面层提高 CRCP 面板抗损伤能力的结构性作用。

## 1 混凝土损伤塑性模型

通用有限元软件 ABAQUS 在钢筋混凝土分析方面具有较强数值模拟能力, 主要的钢筋混凝土模型有考虑了钢筋强化作用的模糊裂纹模型、损伤塑性模型以及弹塑性模型等。其中混凝土损伤塑性模型 (Concrete Damaged Plasticity Material Model, 简称 CDP 模型) 以 Lubliner (1989)<sup>[4]</sup>, Lee, Fenves (1998)<sup>[5]</sup> 的模型理论为基础, 可以模拟各种结构型式, 例如梁、杆、壳和立方体等的混凝土以及其他准脆性材料。它采用同向损伤弹性和同向拉压塑性理论表征混凝土的非弹性行为。适用于低围压条件下混凝土受到单调荷载、循环荷载或动态加载情况。

模型中包括了非关联多重塑性硬化 (mutli-hardening plasticity) 和等向损伤弹性 (isotropic damaged plasticity) 用来描述混凝土材料破裂过程中形成的不可恢复的损伤。

### 1.1 应变率分解

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^{\text{el}} + \dot{\epsilon}^{\text{pl}} \quad (1)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$  是总应变率,  $\dot{\epsilon}^{\text{el}}$  是应变率弹性部分,  $\dot{\epsilon}^{\text{pl}}$  是应变率塑性部分。

### 1.2 应力应变关系

应力应变关系取决于损伤弹性。

$$\sigma = (1-d)\mathbf{D}_0^{\text{el}} : (\epsilon - \epsilon^{\text{pl}}) = \mathbf{D}^{\text{el}} : (\epsilon - \epsilon^{\text{pl}}) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{D}_0^{\text{el}}$  为初始损伤的材料弹性刚度矩阵;  $\mathbf{D}^{\text{el}}$  为退化弹性刚度矩阵,  $\mathbf{D}^{\text{el}} = (1-d)\mathbf{D}_0^{\text{el}}$ ;  $d$  为刚度退化变量, 从 0 (为损伤材料) 变化到 1 (完全损伤材料)。损伤将导致材料弹性刚度的降低。在损伤理论中, 刚度退化是各向同性的, 可以用退化变量  $d$  来表示。按照连续损伤力学, 有效应力为:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{D}_0^{\text{el}} : (\epsilon - \epsilon^{\text{pl}}) \quad (3)$$

柯西应力和有效应力之间的退化关系为:

$$\sigma = (1-d)\bar{\sigma} \quad (4)$$

对于任意材料界面, 因子  $(1-d)$  表示有效承受荷载面积 (总面积减去损伤面积) 和总面积之比。发生损伤时用有效应力表示柯西应力。此时外荷载主要由有效应力承担, 可用有效应力来计算塑性问题。退化变量由有效应力和一系列硬化变量  $\bar{\epsilon}^{\text{pl}}$  确定, 即:

$$d = d(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^{\text{pl}}) \quad (5)$$

### 1.3 屈服方程与流动法则

屈服函数  $F(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^{\text{pl}})$  代表有效应力空间的曲面, 决定破坏和损伤状态。对于非粘滞性损伤塑性模型:

$$F(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^{\text{pl}}) \leq 0 \quad (6)$$

流动势  $G$  决定塑性流动, 流动法则为:

$$\dot{\epsilon}^{\text{pl}} = \dot{\lambda} \frac{\partial G(\bar{\sigma})}{\partial \bar{\sigma}} \quad (7)$$

式中:  $\dot{\lambda}$  是非负的塑性因子。塑性势定义在有效应力空间。混凝土损伤塑性模型的弹塑性反应由有效应力和硬化变量来描述:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{D}_0^{\text{el}} : (\epsilon - \epsilon^{\text{pl}}) \in \{\bar{\sigma} | F(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^{\text{pl}}) \leq 0\},$$

$$\bar{\epsilon}^{\text{pl}} = h(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^{\text{pl}}) \cdot \bar{\epsilon}^{\text{pl}},$$

$$\dot{\bar{\epsilon}}^{\text{pl}} = \dot{\lambda} \frac{\partial G(\bar{\sigma})}{\partial \bar{\sigma}},$$

式中:  $\dot{\lambda}$  和  $F$  遵守 Kuhn-Tucker 条件:  $\dot{\lambda} F = 0; \dot{\lambda} \geq 0; F \leq 0$ 。柯西应力根据刚度退化变量  $d(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^{\text{pl}})$  计算。有效应力为:

$$\sigma = (1-d)\bar{\sigma} \quad (8)$$

刚度退化反应(式)会退化为弹塑性反应的本构关系(式),从而让模型更加适应于数值模拟分析。

### 1.4 力学行为

损伤塑性模型认为混凝土主要破坏机理为拉张开裂和压碎。屈服面(或破坏面)的演变由两个硬化变量  $\bar{\epsilon}_t^{pl}$  和  $\bar{\epsilon}_c^{pl}$  控制,分别对应拉张和压缩条件下的破坏机制,称为等效拉张或等效压缩塑性应变。

**1.4.1 单轴力学行为** 图1表示由损伤塑性表征的混凝土在单轴拉张或压缩时的应力应变关系。

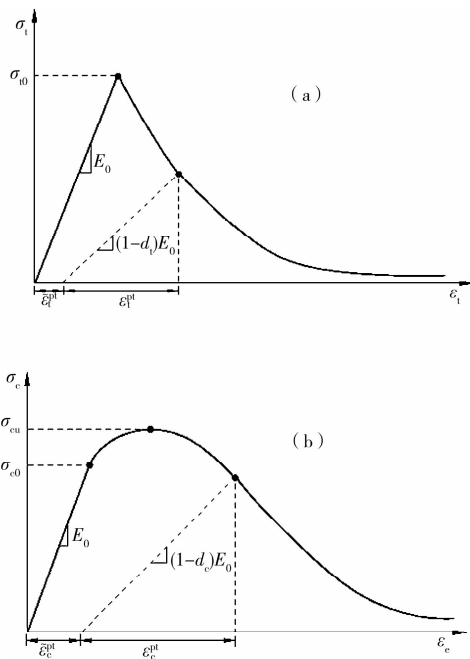


图1 混凝土单轴拉伸(a)和压缩(b)力学行为

图1中弹性刚度的降低由损伤变量  $d_t$ 、 $d_c$  ( $t, c$  分别表示拉张和压缩状态) 来表示,假设它们是等效塑性应变、温度  $\theta$  与场变量  $f_i$  的函数。

$$\begin{aligned} d_t &= d_t(\bar{\epsilon}_t^{pl}, \theta, f_i); 0 \leq d_t \leq 1 \\ d_c &= d_c(\bar{\epsilon}_c^{pl}, \theta, f_i); 0 \leq d_c \leq 1 \end{aligned} \quad (10)$$

损伤变量在 0 到 1 之间变化,0 表示未损伤完好状态;1 代表破坏时强度完全丧失状态。如果  $E_0$  为初始(未受损伤)弹性刚度,那么单轴拉张或压缩作用下,应力应变关系分别为:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= (1-d_t)E_0(\epsilon_t - \bar{\epsilon}_t^{pl}) \\ \sigma_c &= (1-d_c)E_0(\epsilon_c - \bar{\epsilon}_c^{pl}) \end{aligned} \quad (11)$$

式定义了材料的有效拉张或压缩内聚力,它决定了材料屈服或者破坏面的大小:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_t &= \sigma_t / (1-d_t) = E_0(\epsilon_t - \bar{\epsilon}_t^{pl}) \\ \bar{\sigma}_c &= \sigma_c / (1-d_c) = E_0(\epsilon_c - \bar{\epsilon}_c^{pl}) \end{aligned} \quad (12)$$

**1.4.2 单轴循环力学行为** 单轴循环加载条件

下,刚度恢复效应是混凝土材料在循环荷载作用下重要特征。混凝土损伤塑性模型假设弹性模量的缩减由退化变量  $d$  求得:

$$E = (1-d)E_0 \quad (13)$$

表达式定义了循环加载阶段中的拉张( $\sigma_{11} > 0$ )和压缩( $\sigma_{11} < 0$ )情况。刚度退化变量是应力状态和单轴损伤变量( $d_t$  和  $d_c$ )的函数。对于单轴循环加载情况,ABAQUS 假设:

$$(1-d) = (1-s_t d_c)(1-s_c d_t), 0 \leq s_t, s_c \leq 1 \quad (14)$$

式中: $s_t, s_c$  为应力状态函数,用来模拟应力反向加载时的材料刚度恢复效应。

$$\begin{aligned} s_t &= 1 - w_t r^*(\sigma_{11}); 0 \leq w_t \leq 1 \\ s_c &= 1 - w_c (1 - r^*(\sigma_{11})); 0 \leq w_c \leq 1 \end{aligned} \quad (15)$$

式中:

$$r^*(\sigma_{11}) = H(\sigma_{11}) = \begin{cases} 1 & \sigma_{11} > 0 \\ 0 & \sigma_{11} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

其中  $w_t$  和  $w_c$  为权重系数,和材料本身属性有关,控制着反向荷载过程中拉张或压缩刚度的恢复。图2为是荷载由拉张变化为压缩时刚度恢复效应的演示。

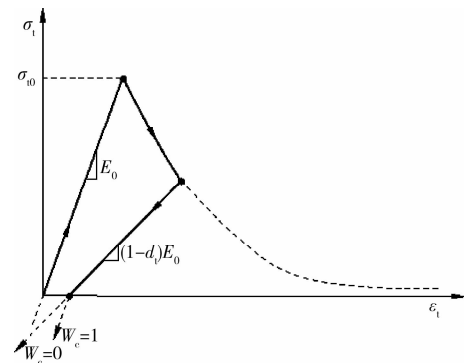


图2 压缩刚度恢复效应

假设材料没有被压碎,即压缩造成的损伤为 0,那么等效塑性应变  $\bar{\epsilon}_c^{pl}$  和损伤  $d_c$  都为 0。有:

$$(1-d) = (1-s_c d_t) = (1 - (1-w_c(1-r^*))d_t) \quad (17)$$

拉张情况:( $\sigma_{11} > 0$ ),  $r^* = 1$ ;则  $d = d_t$ ;压缩情况:( $\sigma_{11} < 0$ ),  $r^* = 0$ ,  $d = (1-w_c)d_t$ 。

如果  $w_c = 1$ ,那么  $d = 0$ ,说明材料完全恢复了刚度,即  $E = E_0$ 。另一方面,如果  $w_c = 0$ , $d = d_t$ ,说明没有发生刚度恢复现象。其余中间值说明材料有部分刚度恢复。因此  $d$  既可以反映刚度恢复效应,也可以反映裂缝的张开闭合行为。

## 2 有限元模型与材料力学参数

根据文献[6]中的气象和温度数据首先对模型进行夏季三维瞬态热传导分析,并综合考虑了太阳辐射、气温对流换热和路面辐射三种温度边界条件。其中太阳辐射根据文献[7]中提供的余弦函数并利用 ABAQUS 用户子程序 DFLUX<sup>[8]</sup> 模拟;气温对流换热根据文献[9]中提供的两个正弦函数的线性组合并利用用户子程序 FILM<sup>[8]</sup> 模拟;而路面辐射利用 ABAQUS 命令 SRADIATE<sup>[10]</sup> 定义。

热传导分析中,为了便于后续损伤分析中考虑交通轮载接触面和网格划分,并且满足混凝土面板长度大于 CRCP 平均横向裂缝间距的需要,建立如图 3 所示的路面结构模型,模型横截面尺寸如图 4 所示。采用 DC3D8(三维八结点实体热传导单元)对模型进行网格划分,利用“tie”命令<sup>[10]</sup> 定义路面各层之间的接触属性。CRCP 面板中的纵横向钢筋采用 DC1D2(两结点热传导杆单元)模拟,并利用植入单元技术<sup>[11]</sup> (Embedded Elements)将钢筋网整体移植到 CRCP 面板中,假设钢筋与混凝土界面接触良好,无相对滑移,如图 5 所示。其中横向钢筋与纵向钢筋呈正交布置,纵筋直径 16 cm,间距约为 12.6 cm,配筋率约为 0.6%;横筋直径 14 cm,间距为 60 cm。

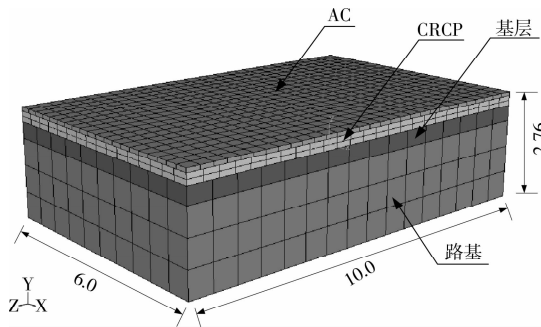


图 3 CRCP+AC 复合式路面有限元模型(单位:m)

表 1 路面结构材料力学参数<sup>[12]</sup>

参数	路面材料				
	沥青面层	CRCP	钢筋	基层	路基
弹性模量 $E$ / Pa	1.20E+09	3.00E+10	2.00E+11	8.00E+08	6.00E+07
泊松比 $\nu$	0.25	0.15	0.28	0.25	0.35
线膨胀系数 / °C	2.10E-05	1.00E-05	9.00E-06	2.00E-05	3.50E-05

表 2 混凝土损伤塑性材料力学参数<sup>[13]</sup>

参数	材料				
	膨胀角 $\psi(\theta, f_i)$	偏心参数 $\epsilon(\theta, f_i)$	$\sigma_{b+}/\sigma_{c0}$	应力不变量比 $K_c$	粘性参数 $\mu$
CRCP	15.0	0.1	1.16	0.667	0.000 5

$\sigma_{b+}/\sigma_{c0}$  为双轴/单轴塑性压缩应变比

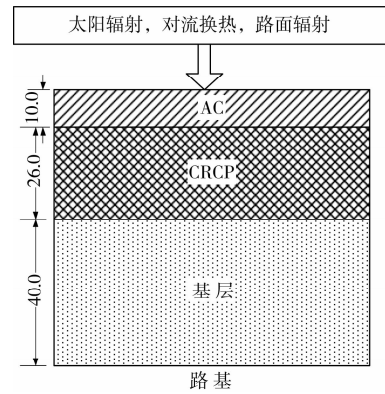


图 4 模型横截面轮廓图(单位:cm)

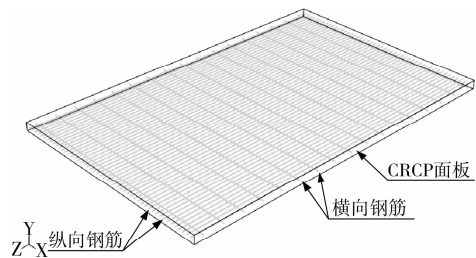


图 5 CRCP 面板钢筋配置图

根据热传导分析结果,进行路面结构的顺序耦合热应力分析之前,需要对原模型进行以下一些更新:1)去除原材料的热力学参数,以新的力学参数代替。2)去除原模型的所有温度边界条件,以正确的荷载边界约束条件代替,即模型底部施加固定约束;沿车辆行驶方向的两端施加纵向( $z$  方向)位移约束;垂直于车辆行驶方向的两端施加横向( $x$  方向)位移约束。3)改变原模型热传导单元的定义,以 C3D8R(三维八结点缩减实体单元)和 B31(三维两结点线性梁单元)分别定义模型中的路面结构和钢筋层。4)设置正确的分析步,准确读入温度场数据。路面结构的材料力学参数如表 1 所示。其中 CRCP 面板采用混凝土损伤塑性模型表征,参数见表 2 和表 3。



表3 混凝土压缩与拉伸行为力学参数<sup>[13]</sup>

应力/Pa	压缩行为		应力/Pa	拉伸行为	
	非弹性应变	损伤		开裂应变	损伤
24.019E+6	0.000 0	0.000 0	1.780E+6	0.000 0	0.000 0
29.208E+6	0.000 4	0.129 9	1.457E+6	0.000 1	0.300 0
31.709E+6	0.000 8	0.242 9	1.113E+6	0.000 3	0.550 0
32.358E+6	0.001 2	0.341 2	0.960E+6	0.000 4	0.700 0
31.768E+6	0.001 6	0.426 7	0.800E+6	0.000 5	0.800 0
30.379E+6	0.002 0	0.501 2	0.536E+6	0.000 8	0.900 0
28.507E+6	0.002 4	0.566 0	0.359E+6	0.001 0	0.930 0
21.907E+6	0.003 6	0.714 0	0.161E+6	0.002 0	0.950 0
14.897E+6	0.005 0	0.824 3	0.073E+6	0.003 0	0.970 0
2.953E+6	0.010 0	0.969 1	0.040E+6	0.005 0	0.990 0

\* 拉伸刚度恢复系数  $\omega_t = 0$  \* 压缩刚度恢复系数  $\omega_c = 1.0$

### 3 变温条件下的损伤分析

路面在 1 d 之内将经历升温 and 降温 2 个截然相反的过程。不同的变温条件将在结构内部引起压缩或拉伸的力学行为,而结构的初始应力场对应力水平、应力路径和历史有着重要影响。因此论文在进行热应力分析时,以夏季 1 d 中的最低气温为温度变化起点考察结构的受压状态,以 1 d 中的最高气温为温度变化起点来考察结构的受拉状态。

#### 3.1 结构受压力学行为

根据热传导分析,夏季 CRCP 路面最低温度出现在凌晨 5 点,以此时刻温度为计算起点,而以下午 14 点出现最高温度时刻为计算终点,时间跨度为 9 h。图 6 显示了路面结构在变温条件下压应力的变化时程曲线。

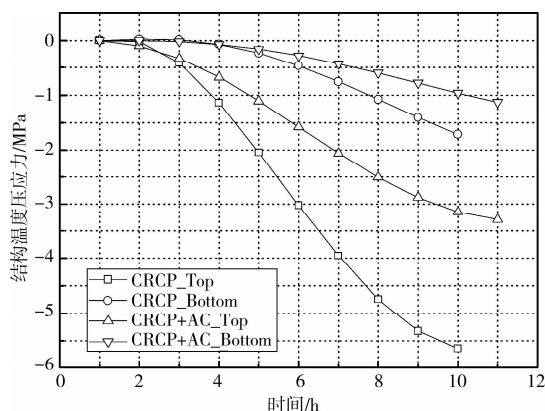


图6 温度压应力时程曲线

从图中可以得到这样的结论:在升温条件下,结构产生压应力。其中 CRCP 路面路表的压应力最大,但是远小于材料的屈服压应力,因此路面在 1 d

的变温过程中并没有产生压缩损伤。CRCP 路面板底部由于基层的约束作用以及变温幅度沿深度的衰减效应,产生的压应力小于表面。复合式路面由于沥青面层的隔温作用,在 CRCP 顶部和底部产生的压应力均有不同程度的下降。

根据以上结论,CRCP 面板在经历 1 d 的变温后,虽然有部分时间处于压缩状态,但是形成的最大压应力并没有超过材料的屈服压应力,没有形成损伤而处于弹性范围之内。因此接下来的分析主要关注结构变温条件下可能形成的拉伸损伤,而忽略压缩损伤。

#### 3.2 结构受拉力学行为

以夏季 CRCP 路面出现最高温度时刻下午 14 点为计算起点,分析 1 d 连续 24 h 路面温度应力变化情况。复合式路面由于温度场的不同,CRCP 表面最高温度出现在下午 16:30,以此时刻为计算起点,分析 1 d 连续 24 h 复合式路面温度应力变化情况。图 7 分别显示了 CRCP 路面的温度、温度应力、拉伸损伤和结构刚度退化系数 SDEG(SDEG 定义见式和文献[15])的变化时程曲线。

从图 7(a)可以看出:随着温度的降低,面板出现温度拉张应力。当降温进行约 5 h 以后,拉张应力值超过混凝土的拉伸破坏应力,结构内部出现微裂缝,拉张损伤值大于 0。由于出现损伤,结构承受拉应力的能力被削弱,即随着温度的不断下降,温度应力达到峰值应力之后便不会继续增大,而是出现应力应变的软化现象,损伤值也进一步变大。温度突变点,即变温速率突然增大会相应地大幅度提高结构损伤值。

当温度由降温向升温转变时,结构所受拉应力得到缓解并逐渐转变为压应力。由于拉张损伤是不可恢复的,最终的损伤值保持在约 0.3 的水平。从图 7(b)可以看出:拉张损伤是一个不会减小的量,而刚度退化系数 SDEG 却是处于变化中,可以增加,也可以减小。由于整个变温过程中压缩损伤始终为零,因此拉伸损伤和刚度退化系数都大于零的地方代表裂缝的张开,而拉伸损伤大于零、刚度退化系数 SDEG 等于零的地方代表闭合的裂缝。说明降温到升温的转变过程使原来张开的微裂缝趋于闭合。

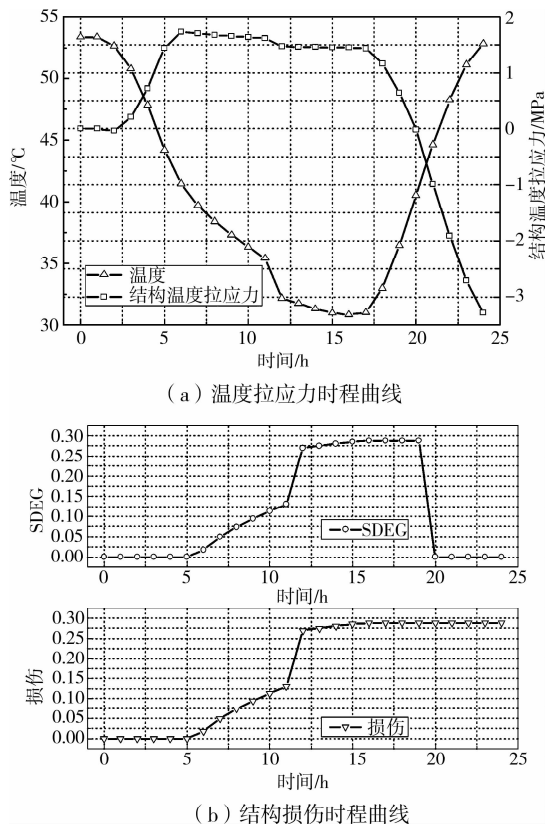


图 7 CRCP 路面温度应力与损伤

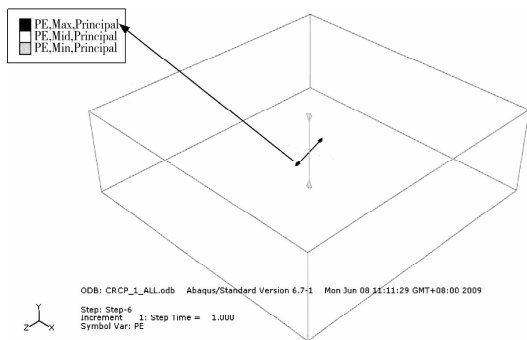


图 8 裂缝平面的法线方向

根据 Lubliner<sup>[4]</sup> (1989) 损伤塑性理论,假设裂缝起始于等效塑性拉应变大于零的地方 ( $\bar{\epsilon}_t^p > 0$ ), 而且最大塑性主应变为正。法向于裂缝平面的矢量

方向假设平行于最大塑性主应变的方向。因此图 8 中箭头所示单元的最大塑性主应变的方向即为裂缝平面的法向。

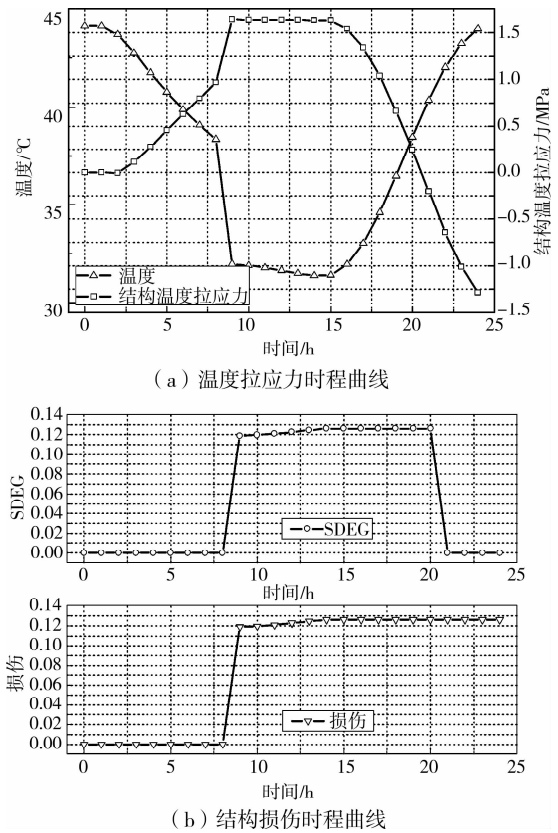


图 9 CRCP+AC 路面温度应力与损伤

图 9 中分别显示了复合式路面 CRCP 面板部分的温度、温度应力、拉伸损伤和结构刚度退化系数 SDEG 的变化时程曲线。相对于 CRCP 路面的区别在于:由于覆盖沥青面层,CRCP 达到混凝土破坏应力的时间有一定程度的延缓,最终形成的拉伸损伤约为 0.13,降低了 50%。其他变化规律例如应力应变软化、变温速率变化造成的损伤值突变以及裂缝的张开和闭合规律都与 CRCP 路面相似。说明复合式路面中的沥青面层可以在时间上延缓温度裂缝的形成,在一定程度上降低结构损伤,但是不能根除因混凝土受拉能力低而形成的路面破坏。

## 4 温度荷载耦合作用的损伤分析

### 4.1 交通荷载

进行温度荷载耦合作用下的力学分析,首先必须明确车轮与路面的接触轮迹,提出简化方法。黄仰贤<sup>[14]</sup>认为每个车轮与路面接触的大致形状可由一个矩形和两个半圆形组成。本文采用标准双轮轴载 100 kN,胎压为 0.7 MPa 进行计算,将接触面积简化为 0.23 m×0.16 m 的矩形(如图 10),并根据

这一尺寸对荷载作用处的 CRCP 面板进行网格细化。模型网格改变后新积分点的温度值将由原模型导入的温度值进行插值处理。

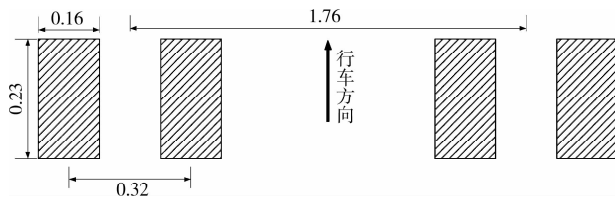


图 10 有限元模型单轴双轮荷载及等效接触面积示意图(单位:m)

#### 4.2 CRCP 路面损伤分析

根据夏季路面(无沥青面层上覆)的热传导分析,在导入温度场数据的同时,对模型施加荷载集度为 0.7 MPa 的双轮轴载进行温度荷载耦合分析。

图 11 为温度荷载耦合作用下,结构轴向拉应力、损伤和刚度恢复系数 SDEG 的时程曲线。当轴向拉应力达到混凝土的破坏应力之后,结构内部出现损伤,应力达到峰值后出现软化。尽管拉应力在之后由于温度变化而减小并进一步转变为压应力,但是由于拉伸损伤不可恢复,损伤值维持不变。刚度恢复系数 SDEG 虽然有减小趋势,但是始终大于零,说明拉张裂缝仍然处于张开状态,并没有闭合,保持约 0.95 的水平。而刚度恢复系数 SDEG 虽然有减小趋势,但是始终大于零,说明拉张裂缝仍然处于张开状态,并没有闭合。

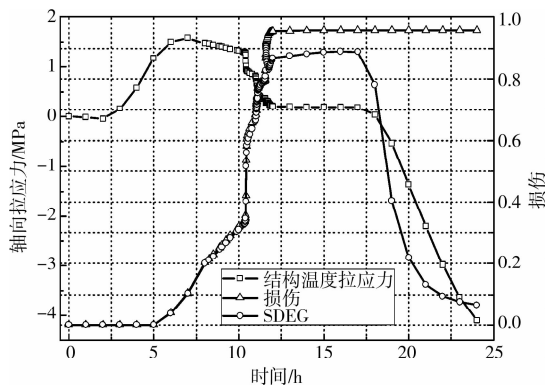


图 11 拉应力与损伤时程曲线

#### 4.3 复合式路面损伤分析

图 12 为复合式路面的 CRCP 面板在温度荷载耦合作用下轴向拉应力、损伤值和刚度恢复系数 SDEG 的时程曲线,演变规律与 CRCP 路面相似。区别在于产生的损伤值要更小,最终维持在 0.17 的水平,沥青面层使损伤值的降幅达到约 80%;而刚度恢复系数 SDEG 也最终到达零,说明沥青面层可以有效减小 CRCP 的损伤并且有利于拉伸裂缝最终

趋于闭合。

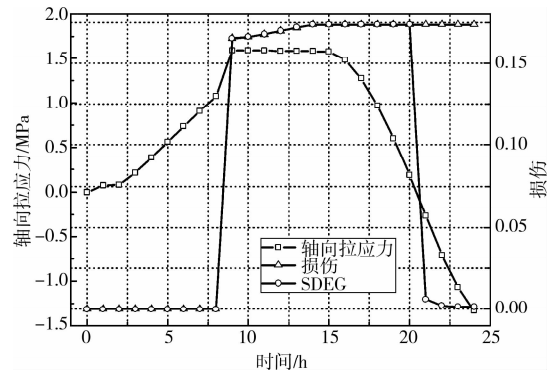


图 12 拉应力与损伤时程曲线(复合式)

不同条件下 CRCP 面板损伤值的对比见表 4。可见沥青面层的存在对于缓减 CRCP 面板的结构损伤具有显著效果。

表 4 CRCP 面板在不同条件下结构损伤值对比

损伤	变温作用	温度荷载耦合	增幅/%
CRCP	0.287 74	0.957 50	232.77
CRCP+AC	0.125 98	0.173 66	37.85
降幅/%	56.22	81.86	N/A

## 5 结论

通过利用有限元软件 ABAQUS 对 CRCP+AC 复合式路面进行的变温和温度荷载耦合作用下的结构损伤分析,可以得到以下结论:

1) CRCP 面板在经历 1 d 的变温后,虽然有部分时间处于压缩状态,但是形成的最大压应力并没有超过材料的屈服压应力,没有形成损伤而处于弹性范围之内。CRCP 面板底部由于基层的约束作用以及变温幅度沿深度的衰减效应,产生的压应力小于表面。复合式路面由于沥青面层的隔温作用,在 CRCP 顶部和底部产生的压应力均有不同程度下降。

2) 拉张损伤是与材料发生拉张破坏相关的一个不会减小的量,而刚度退化系数 SDEG 却是可增加亦可减小的变量。因此可以通过综合考察拉伸损伤值和刚度退化系数 SDEG 的方法判别结构内部裂缝的张开或闭合行为。

3) 沥青面层的作用不仅仅局限在提高路用性能方面。变温作用下,复合式路面中的沥青面层可以在时间上延缓温度裂缝的形成,在一定程度上降低结构的损伤,但是不能根除因混凝土受拉能力低而形成的路面破坏;对于温度荷载耦合作用下的复合

(下转第 79 页)

- (1): 97-100.
- [8] 张晔芝, 侯文崎, 叶梅新. 摩擦型高强度螺栓长接头螺栓传力比研究[J]. 长沙铁道学院学报. 2000, 18(4): 6-10.  
ZHANG YE-ZHI, HOU WEN-QI, YE MEI-XIN. Study on the Force-delivering Ratio of High Strength Bolt Friction Grip Long Joint. Journal of Changsha Railway University. 2000, 18(4): 6-10.
- [9] 朱铭, 王荣辉, 黄永辉. 钢桁桥长列高强螺栓群优选布置的有限元分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(4): 59-32.  
ZHU MING, WANG RONG-HUI, HUANG YONG-HUI. Finite element analysis on optimized arrangement of long list bolts group with high strength in steel truss bridges[J]. Journal of Chang an University (Natural Science Edition), 2009, 29(4): 59-32.
- [10] 谭明鹤, 王荣辉, 黄永辉, 等. 刚性悬索加劲钢桁梁桥特殊节点模型试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 47-52  
TAN MING-HE, WANG RONG-HUI, HUANG YONG-HUI, et. al. Special Joint Model Test of Stiff Suspension Reinforced Steel Truss Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 47-52.
- [11] 王秀丽, 沈世钊, 殷占忠, 等. 钢框架梁腹板开孔型连接节点力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(6): 65-76  
WANG XIU-LI, SHEN SHI-ZHAO, YIN ZHAN-ZHONG, et. al. Experimental Research on Mechanical Behavior of Beam-column Connections with Openings on Beam Webs in Steel Frames [J]. Engineering Mechanics. 2006, 23(6): 65-76.
- [12] 中华人民共和国国家标准. GB/T 3077-1999 合金结构钢[S]. 1999.
- [13] 中华人民共和国国家标准. GB/T 714-2000 桥梁用结构钢[S]. 2000.
- [14] 中华人民共和国行业标准 TB 1002.2-99 铁路桥梁钢结构设计规范[S]. 2000.
- [15] 中华人民共和国行业标准. JGJ 82-91 钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程. 1992.

(编辑 胡玲)

(上接第73页)

式路面, 沥青面层可以有效减小 CRCP 面板的损伤并且有利于拉伸裂缝最终趋于闭合。其改善结构受力状况的作用不应被忽视。因此在 CRCP+AC 复合式路面有关沥青面层合理厚度的设计中应综合考虑 CRCP 面板的温缩特性和损伤特性。

#### 参考文献:

- [1] 王秉刚, 郑木莲. 水泥混凝土路面设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] MICHAEL I DARTER, LAURA B, HECKEL NASIR G, et al. Field performance of continuously reinforced concrete pavement in illinois [R]. Urbana: Illinois Cooperative Highway and Transportation Press, 1999.
- [3] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003
- [4] J LUBLINER, S OLLER J OLIVER, E ONATE. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25: 299-329.
- [5] J LEE, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [6] 董侨. 沥青混凝土+连续配筋水泥混凝土复合式路面结构与材料研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [7] 郑健龙, 周志刚. 沥青路面抗裂设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [8] HIBBIT KARLSSON, SORENSEN. Anaqus user subroutines reference manual[M]. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence RI USA: ABAQUS, Inc., 2006.
- [9] 宋福春. 沥青路面非线性瞬态温度场分析[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2003, 19(4): 264-267.  
SONG FU-CHUN. Nonlinear analysis for transient temperature field of asphalt pavement [J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute, 2003, 19(4): 264-267.
- [10] HIBBIT KARLSSON, SORENSEN. Anaqus keywords reference manual [M]. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence RI USA: ABAQUS, Inc., 2006.
- [11] HIBBIT KARLSSON, SORENSEN. Anaqus /Cae user's manual [M]. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence RI USA: ABAQUS, Inc., 2006.
- [12] WANG BIN, YANG JUN. Evaluation on the effects of heavy vehicle dynamic loading on CRCP by 3D finite element method [C]//6th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology, Sapporo, Japan: 2008, 07: 103-110.
- [13] HIBBIT KARLSSON, SORENSEN. Anaqus verification manual [M]. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence RI USA: ABAQUS, Inc., 2006
- [14] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

(编辑 王秀玲)