

沥青路面碾压混凝土基层板切缝间距研究

王进勇¹ 颜 薇¹

1. 招商局公路信息技术(重庆)有限公司, 中国·重庆 400067

【摘要】基层预切缝是防止碾压混凝土基层沥青路面反射裂缝产生的有效措施之一,合理的预切缝间距对路面的受力情况和路面的完整性有很大的影响,基于此,利用ABAQUS平台建立含预切缝的碾压混凝土基层沥青路面有限元模型进行数值模拟分析。研究表明:碾压混凝土基层板长的增加有利于减小预切缝处沥青层底层的温度拉应力和温度拉压交替幅度,但不利于碾压混凝土基层板板底和板顶的温度拉应力和温度拉压交替幅度。

【关键词】沥青路面; 碾压混凝土基层; 预切缝间距

前言

近些年来,中国公路的建设重点以高等级公路为主,尤其是重载交通路段上,半刚性基层沥青路面结构已不足以适应现代交通发展的要求,为此,研究具有优良使用性能的高强度基层材料及适合我国经济发展水平的新型路面结构迫在眉睫^[1]。为适应交通运输的需求,碾压混凝土基层沥青路面将成为高等级公路路面结构的一种发展趋势^[2],然而反射裂缝是目前碾压混凝土基层沥青路面所面临的一大难题,基层预切缝作为防止碾压混凝土沥青路面反射裂缝产生的有效措施之一,预切缝间距设计便是该措施中的一个重要技术,该技术的理论研究对实际工程施工设计具有重要的参考价值。

1 基本理论及方法

1.1 热传导微分方程

路面结构的温度传递过程中仅考虑沿路面厚度方向的温度变化,一维热传导微分方程如式(1):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{pc} \times \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{pc} \times q(x, t) \quad (1)$$

式中: p 为路面各结构层的密度 (kg/m^3); λ 为路面各结构层的导热系数 ($\text{W}/\text{m}/\text{C}$); c 为路面各结构层的比热容 ($\text{J}/\text{kg}/\text{C}$); T 为路面各结构层的温度 (C); t 为时间 (s); x 为结构层距离道路表面的深度 (m); $q(x, t)$ 为在时间 t 深度 x 处路面的放热速率 (W/m^2)。

1.2 周期变温条件下的路面温度场边界形式

1.2.1 太阳辐射

$$q(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 12 - \frac{c}{2} \\ q_0 \cos m\omega(t-12) & 12 - \frac{c}{2} \leq t \leq 12 + \frac{c}{2} \\ 0 & 12 + \frac{c}{2} < t \leq 24 \end{cases} \quad (2)$$

太阳辐射的日变化规律采用严作人^[8]数学表达形式,如式(2)所示:

式中: $q(t)$ 为太阳辐射函数; q_0 为日中最大辐射, $q_0 = 0$.

131mQ , $m=12/c$; Q 为日太阳辐射总量,单位 J/m^2 ; C 为有效日照时间,单位 h ; Ω 为角频率, $\omega = 2\pi/24$ 。

1.2.2 气温与对流热交换

使用两个正弦函数并通过线性组合来对模拟气温的这种日变化规律,如(3)所示:

$$T_a = \bar{T}_a + T_m [0.96 \sin \omega(t-t_0) + 0.14 \sin 2\omega(t-t_0)] \quad (3)$$

式中: \bar{T}_a 为日平均气温, $\bar{T}_a = 0.5 \times (T_a^{\max} + T_a^{\min})$;

T_a^{\max} 为日最高气温; T_a^{\min} 为日最低气温; T_m 为日气温变化幅度, $T_m = 0.5 \times (T_a^{\max} - T_a^{\min})$; t_0 为初相位。

路表与大气之间的热交换用下式表示:

$$h_c = 3.7v_w + 9.4 \quad (4)$$

式中: h_c 为热交换系数,单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$; v_w 为日平均风速,单位 m/s 。

1.2.3 路面有效辐射

本研究中,采用式(5)实现对路面的有效辐射边界条件进行模拟:

$$q_F = \varepsilon\sigma \left[(T_1|_{Z=0} - T_Z)^4 - (T_a - T_Z)^4 \right] \quad (5)$$

式中 T_a 为气温 $T_1|_{Z=0}$ 为路表温度; T_Z 为绝对零度,取为 -273C ; 为 Stefan-Boltzman 常数; ε 为路面发射率, q_F 本研究取为 0.9 ; 为地面有效辐射,单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

1.3 沥青混合料的粘弹性表征

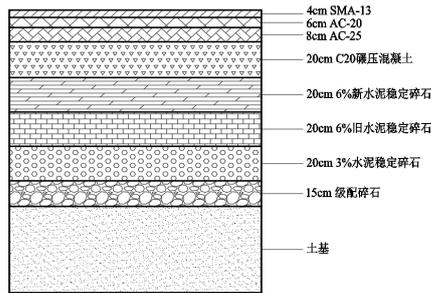
用广义 Prony 级数来实现粘弹性松弛特性的模型,用式(6)来表示 Prony 级数。

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (6)$$

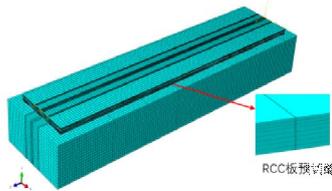
式中: E_∞ 为长期松弛模量。

2 计算模型及参数

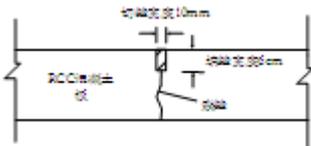
2.1 路面结构模型



图(a) 路面结构示意图



(b) 有限元模型网格划分图



(c) 碾压混凝土基层板预切缝示意图

图1 计算模型

模型中考虑的沥青路面结构形式如图1(a)所示,选取土基的模型平面尺寸为64 m(纵向)×16 m(横向)×8 m(竖向),土基上部结构的模型尺寸为60 m(纵向)×12 m(横向,考虑半幅路宽度)×1.13 m(竖向,其值取决于路面各结构层厚度),其中碾压混凝土基层板预切缝尺寸示意图如图1(c)所示,采用ABAQUS整体划分网格后的有限元模型如图1(b)所示。

为研究不同碾压混凝土基层板预切缝间距对沥青路面温度应力场、温-荷耦合应力场的影响,将对碾压混凝土基层板长为5 m、6 m、7 m、8 m、9 m、10 m、12 m、14 m、16 m、20 m的

表1 高温地区季节气象参数

时间(h)	低温(°C)	高温(°C)	时间(h)	低温(°C)	高温(°C)	时间(h)	低温(°C)	高温(°C)
1	11.2	28.3	9	11.5	29.5	17	16.0	34.6
2	10.9	27.4	10	13.3	30.4	18	14.7	33.6
3	10.1	27.2	11	14.9	31.1	19	14.6	32.8
4	9.9	27.3	12	15.8	33.3	20	13.9	31.7
5	9.7	27.1	13	16.4	34.7	21	13.6	30.8
6	9.2	27.0	14	16.8	35.5	22	12.8	29.5
7	9.8	28.6	15	16.5	35.9	23	12.5	29.4
8	10.7	29.0	16	16.4	34.7	24	11.8	29.0
日最高气温(°C)				16.8				35.9
日最低气温(°C)				9.2				27
日太阳辐射总量Q(MJ/m ²)				15.6				25.8
日平均风速v(m/s)				2.88				2.65
日照时间c(h)				7.2				11.8

模型分别进行建模分析。

2.2 计算参数

2.2.1 外部气象参数

选择较典型的高温地区气温来研究路面结构温度场的变化,温度场计算模型所需的气象参数见表1。

2.2.2 沥青路面材料热物性参数

路面各结构层所对应材料的热力学参数值^[3]如表2所示:

表2 路面各结构层材料的热力学参数

层位	材料	密度(kg/m ³)	热容量C	热传导率k
上面层	SMA-13改性沥青	2400	924.9	4680
中面层	AC-20普通沥青	2400	900	5040
下面层	AC-25普通沥青	2400	921.1	4186.8
基层	C25碾压混凝土	2480	970	6300
基层	6%水泥稳定碎石	2350	830	4320
底基层	6%水泥稳定碎石	2250	830	4320
底基层	3%水泥稳定碎石	2200	830	4320
底基层	级配碎石	2000	810	4680
土基	压实土	1900	800	5400
路面发射率ε		0.9		
太阳辐射吸收率α _s		0.85		
绝对零度T _z		-273		
Stefan-Boltzman常数		2.041×10 ⁻⁴		

2.2.3 沥青路面材料力学参数

参考文献^[4],沥青路面各材料的线膨胀系数取值如表3所示。

表3 路面结构材料线膨胀系数(10-5/°C)

材料	温度(°C)									
	-26	-20	-10	0	10	15	20	25	30	40
SMA-13	2.15	2.7	3.8	4.3	3.5	3.2	2.9	2.6	2.3	1.97
AC-20	1.3	1.6	2.1	2.6	2.4	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0
AC-25	1.2	1.5	1.8	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
C25碾压混凝土	1.1									
水泥稳定碎石	0.98									
级配碎石	0.5									
压实土	0.45									

沥青面层材料粘弹性参数取值^[5]如表4所示,用ABAQUS软件中内置的广义Prony级数和Williams-Landel-Fer方程(WLF方程)来实现这种特征。

表4 路面结构材料力学参数

材料	层位	动态模量(MPa)	泊松比
SMA-13改性沥青	上面层	11715(瞬态)	0.35
AC-20普通沥青	中面层	14254(瞬态)	0.35
AC-25普通沥青	下面层	13105(瞬态)	0.35
C25碾压混凝土	基层	35000	0.15
6%水泥稳定碎石	基层	19000	0.25
6%水泥稳定碎石	底基层	18000	0.25
3%水泥稳定碎石	底基层	14000	0.25
级配碎石	底基层	250	0.35
压实土	土基	250	0.4

此外, 沥青面层材料粘弹性参数^[6]见表5、表6。

表5 沥青面层材料Prony级数(g)

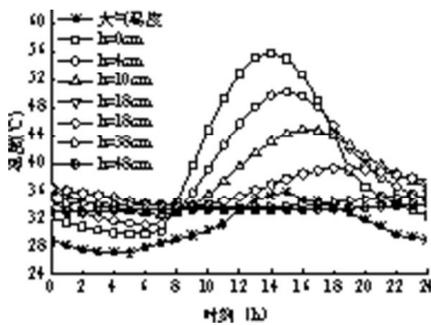
τ_i	g_i		
	SMA-13	AC-20	AC-25
0.001	0.26250	0.30098	0.34506
0.01	0.23561	0.20657	0.17369
0.1	0.22033	0.22248	0.22491
1	0.20457	0.19390	0.18183
10	0.03459	0.03515	0.03577
100	0.02880	0.02722	0.02543

注: 为材料剪切常数; τ_i 为松弛时间; 表5与表6参数均基于20℃。

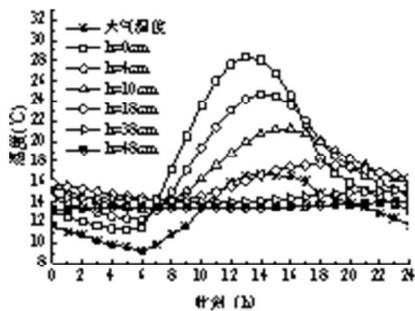
表6 沥青面层材料WLF方程参数

材料	参考温度 T_0 (℃)	C_1	C_2
SMA-13	20	28.3	265.7
AC-20	20	30.9	272.4
AC-25	20	10.44	126.62

2.3 碾压混凝土基层沥青路面的温度场



(a) 夏季高温时期



(b) 冬季低温时期

图2 高温地区路面结构温度场沿厚度方向分布情况

高温地区温度场计算结果如图2所示, 随着深度的增加, 外界环境的改变对路面结构温度场的分布影响变小, 沿路面厚度方向温度随时间变化的幅度越来越小, 到离路表0.48m左右时处开始趋于稳定, 故将路面结构深度48cm处的温度定为温度应力为零的初始温度场。

2.4 不同预切缝间距下沥青路面温度、温-荷耦合应力对比分析

预切缝碾压混凝土基层沥青路面与普通的沥青路面一样, 不仅受到温度荷载的影响, 还会受到车辆荷载的影响, 为了更鲜明的对预切缝碾压混凝土沥青路面进行受力特性分析, 有必要对温度应力场、温-荷耦合应力场随预切缝间距变化的情况

进行综合对比分析。

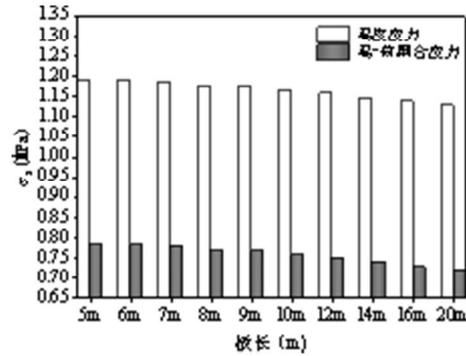


图3 预切缝处沥青层底的最大拉应力

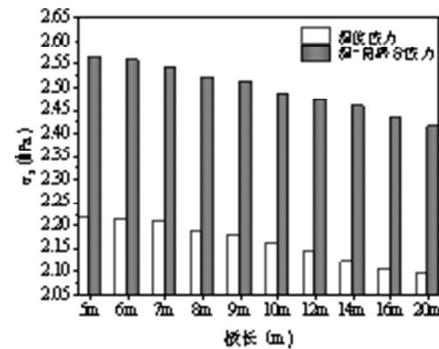


图4 预切缝处沥青层底的最大压应力

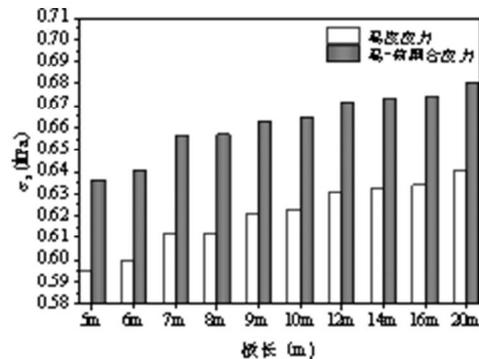


图5 碾压混凝土基层板底的最大拉应力

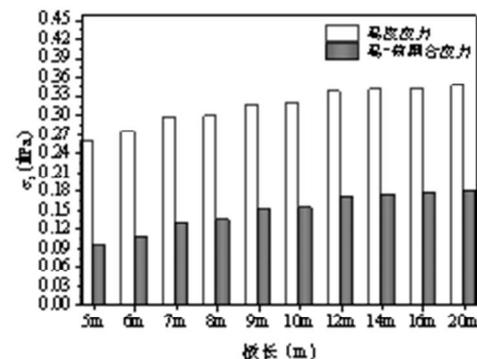


图6 碾压混凝土基层板底的最大压应力

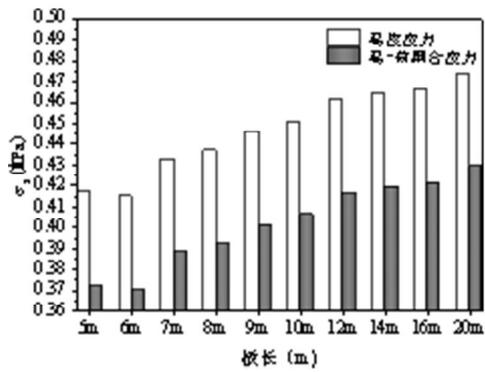


图7 碾压混凝土基层板顶的最大拉应力

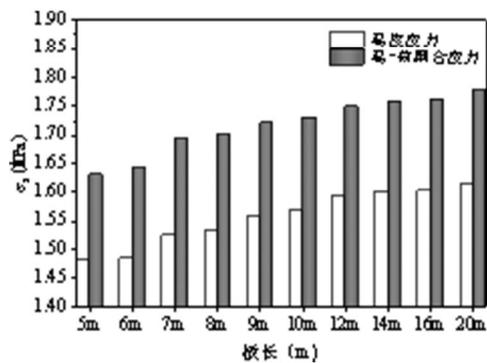


图8 碾压混凝土基层板顶的最大压应力

对于预切缝处沥青层底的温度应力、温-荷载耦合应力而言，板长的增加将会降低其拉应力和拉压交替幅度，简而言之，基层板长的增加对预切缝处沥青层底来说是有利的。对于碾压混凝土基层板的温度应力、温-荷载耦合应力而言，基层板长的增加将会增加碾压混凝土基层板的拉应力和拉压交替幅度。简而言之，板长的增加对临界荷位处的碾压混凝土基层板是不利的。路面结构的开裂破坏主要是由于温度应力的作用引起的，行车荷载的作用只是加剧和加快了这种破坏过程。

参考文献：

[1] 谢光宁. 碾压混凝土基层在高速公路中的应用研究[D]. 华南理工大学, 2014.
 [2] 郑凯. 浅析沥青混凝土和碾压混凝土复合式路面反射裂缝产生与发展机理[J]. 当代建设, 2003(06): 109-110.
 [3] 张坤. 大温差地区沥青路面横向裂纹扩展特性及疲劳寿命研究[D]. 兰州交通大学, 2019.
 [4] 潘雁石. 基于扩展有限元的沥青路面开裂研究[D]. 西南交通大学, 2018.
 [5] 汪海年. 青藏高原多年冻土地区路基温度场研究[D]. 长安: 长安大学硕士学位论文, 2004.
 [6] 甄西刚. 沥青面层温度裂缝的扩展有限元分析[D]. 郑州: 郑州大学硕士学位论文, 2012.

通讯作者：

颜薇 (1993-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向: 路面工程。