

# 短路基处 AC + OPC 复合式路面结构温度 应力响应分析

刘富强<sup>1</sup>, 郑木莲<sup>1</sup>, 王 帅<sup>2</sup>, 王 涛<sup>3</sup>

(1. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100032; 3. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘 要** 目的 研究短路基处斜向预应力混凝土上覆沥青层 (AC + OPC) 复合式路面结构的温度应力响应。方法 以短路基处 AC + OPC 复合式路面结构为对象, 采用均匀设计试验法进行计算方案组合设计, 应用 ANSYS 有限元软件建立 AC + OPC 复合式路面结构三维有限元模型, 分析短路基处 AC + OPC 复合式路面结构的温度应力响应。结果 温度梯度小于  $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$  时, AC + OPC 复合式路面结构 OPC 层的温度应力增长速率缓慢, 温度梯度增大  $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$  其温度应力增大  $0.03\text{ MPa}$ ; 温度梯度大于  $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$  时, 其温度应力快速增长, 温度梯度增大  $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$  其温度应力平均增大  $0.13\text{ MPa}$ 。结论 麦考特法和通用全局优化算法回归分析得到了复合式路面结构 OPC 层的温度应力计算公式。

**关键词** 短路基; 温度应力; 复合式路面; 均匀设计; AC + OPC

中图分类号 TU997

文献标志码 A

## Thermal Stress Response of AC + OPC Composite Pavement at Short Subgrade

LIU Fuqiang<sup>1</sup>, ZHENG Mulian<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>2</sup>, WANG Tao<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Special Region Highway Projects (Ministry of Education), Chang'an University, Xi'an, China, 710064; 2. CCCC Highway Consultants Co. Ltd., Beijing, China, 100032; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, 100044)

**Abstract:** In order to study the thermal stress response of oblique prestress reinforced concrete overlying asphalt layer (AC + OPC) composite pavement at short subgrade, the AC + OPC composite pavement was taken as the research object. Uniform design test method was used to design the scheme. ANSYS finite element software was used to establish a three-dimensional finite element model to analyze the thermal stress response of AC + OPC composite pavement at short subgrade. Results shown that when the thermal gradient is less than  $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ , the thermal stress of OPC layer of AC + OPC composite pavement structure grows slowly, and the thermal stress

收稿日期: 2020-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078051)

作者简介: 刘富强(1989—), 男, 博士, 主要从事道路工程结构与材料方面研究。

increases by 0.03 MPa with the thermal gradient increases by 0.05 °C/m. When the thermal gradient is greater than 0.50 °C/m, the thermal stress increases rapidly. The thermal stress increases by 0.13 MPa on average with the increase of thermal gradient by 0.05 °C/m. The calculation formula of thermal stress of oblique prestress reinforced concrete slab is obtained using the McCott method and the general global optimization algorithm.

**Key words:** short subgrade; thermal stress; composite pavement; uniform design; AC + OPC

由于路面暴露在大自然环境之中,随着周围气温的变化,路面结构内部的温度也随着发生改变。当路面结构层内的温度发生均匀变化时,结构层会产生胀缩变形。当胀缩变形受阻时会产生胀缩应力<sup>[1]</sup>;当路面结构层存在温度梯度时,结构层会产生翘曲变形,翘曲变形受阻时会产生翘曲应力。在进行应力分析时,温度应力对 AC + OPC 复合式路面结构产生的影响比荷载应力更加显著。由于斜向预应力混凝土上覆沥青层复合式路面 (AC + OPC) 中混凝土板体大,需要考虑变形和温度应力。国内外学者主要研究了普通混凝土温度场的变化规律以及温度梯度和温度应力的关系<sup>[2-9]</sup>。付建峰、姜利、颜可珍及田波等<sup>[10-13]</sup>对机场道面、基于应力吸收层的“白改黑”路面、非线性温度梯度作用下水泥砼及不同基层类型水泥砼路面的温度应力进行了研究。目前水泥混凝土温度应力的计算理论比较多<sup>[14]</sup>,不同理论采用的假设条件不同,彼此之间的差别比较大,而且存在很大的局限性。Westegraad 公式在计算分析过程中没有考虑板体的自重以及假设板和地基始终保持接触不会出现脱空,这种方法计算所得的翘曲应力偏大。采用有限元分析方法在分析混凝土板的翘曲应力时,充分考虑了混凝土板的自重以及在正负温度梯度下地基反力对板内翘曲应力产生的影响,也可以分析混凝土板翘曲变形时和地基的接触情况,充分考虑由于板的脱空对温度翘曲预应力的影响。由于短路基处 AC + OPC 复合式路面受力比较复杂,而温度应力也是不可忽略的应力之一。笔者主要对短路基处 AC + OPC 复合式路面结构斜向预应力混凝土板的温度应

力进行分析。

# 1 短路基及 AC + OPC 复合式路面结构

## 1.1 短路基的界定

短路基形式主要表现为纵横向填挖交界结合部路段<sup>[15-16]</sup>。所处地形地质条件较为复杂,此路段往往会对驾驶员的心理产生一定的影响。图 1 为心率与车速和道路平面线形之间的关系图。振动对人体精神、生理均会产生一定的影响,从而影响驾驶员的判断。汽车行驶速度、路面类型和不平整度均对道路行驶舒适度产生一定影响。潘晓东<sup>[17]</sup>提出通过驾驶员的脉搏数和血压的变动规律,研究道路线形构造对其形成的心理和生理上的负担程度,用实验和数理统计的方法建立驾驶员心理、生理上负担程度的评价指标,评价现有公路的行车安全性和舒适性。

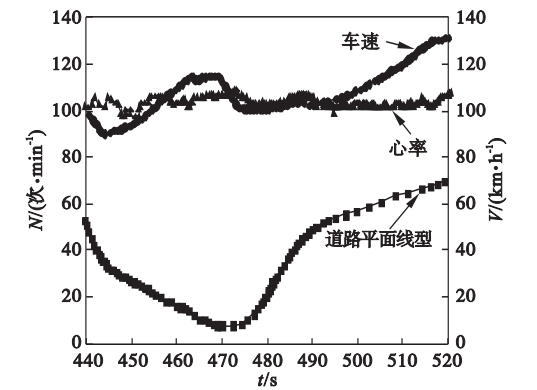


图 1 心率、车速及道路平面线形之间的关系  
Fig. 1 Relationship among heart rate, speed and road plane line

国内公路工程中对于短路基尚没有明确的界定,铁道部建技[2003]97号文明<sup>[18]</sup>明确规定:I级铁路桥梁较密集地段,两台尾之间

路基长度小于 150 m,且能满足设桥条件时,应以桥代路形式通过。国外对两桥(隧)间的短路基,通常采用加强路基、提高刚度、减少沉降的方法防治两桥(隧)间短路基处的桥头跳车。陕西省交通运输厅对不大于 200 m 的路基,一般建议采用贫混凝土基层上加铺沥青层的路面结构。

驾驶员行驶过程中出现两次振动时间超过 10 s 以上能够有效缓解其紧张及不适感觉<sup>[17]</sup>。目前,对于高速公路而言,在桥梁等特殊路段一般将速度限制在 60 ~ 80 km/h,在短路基两构造物间按照此速度行驶在 10 s 内所行驶的距离为 166 ~ 220 m。两构造物间较大的路基长度可有效改善行车舒适性。结合陕西省交通厅以及铁道部建技等相关规定,对于短路基长度适当放宽,由于受到地质、地貌条件限制,在两桥(隧)之间路基长度小于 200m 均可视为短路基。

1.2 AC + OPC 复合式路面结构

斜向预应力筋布置及 AC + OPC 复合式路面结构如图 2 所示。

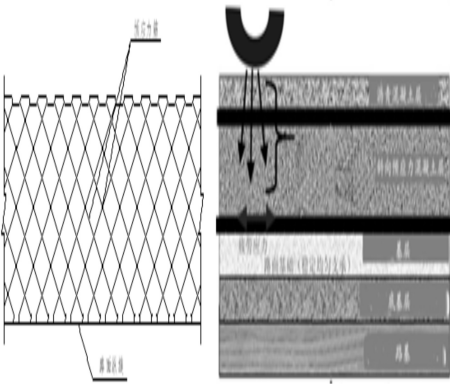


图 2 AC + OPC 复合式路面结构及 OPC 层预应力筋布置示意图

Fig. 2 AC + OPC composite pavement structure and the schematic diagram of tendon in the OPC slab

AC + OPC 复合式路面结构是一种兼具刚性和柔性路面结构优势的新型路面结构,具有良好的性能。斜向预应力混凝土层是在水泥混凝土内部设置双层斜向预应力筋,使预应力筋与路面纵向成一定角度,在路面横

向和纵向都产生预应力,实现在很大长度间不设置接缝,能够解决因接缝产生损害使普通混凝土路面破损的问题,有效提高水泥混凝土路面使用性能和寿命<sup>[19]</sup>。

2 计算参数及模型的建立

2.1 计算参数

(1) 温度梯度

计算 AC + OPC 复合式路面结构斜向预应力混凝土板的温度应力,需要首先确定该路面结构的温度梯度。《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)规定不同自然区划 22 cm 厚水泥混凝土路面的最大温度梯度  $T_{g,m}$ <sup>[20]</sup>(见表 1),其中海拔高的取高值,空气湿度大的取高值。当混凝土板厚度不是 22 cm 时,需要对最大温度梯度进行修正,不同混凝土层厚度的最大温度梯度修正系数  $\alpha_h$  如表 2 所示。

表 1 不同自然区划最大温度梯度推荐值

Table 1 Recommended values for maximum temperature gradients in different natural regions	
自然区划	$T_{g,m}/(^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^{-1})$
II, V	83 ~ 88
III	90 ~ 95
IV, VI	86 ~ 92
VII	93 ~ 98

表 2 不同混凝土层厚度的最大温度梯度修正系数

Table 2 Maximum coefficient of temperature gradient of concrete slabs with different thickness			
面层厚度/ cm	$\alpha_h$	面层厚度/ cm	$\alpha_h$
14	1.23	28	0.84
16	1.17	30	0.79
18	1.11	32	0.75
20	1.05	34	0.71
22	1.00	36	0.67
24	0.94	38	0.63
26	0.89	40	0.59

当水泥混凝土板上铺筑沥青层时,凝

土板的最大温度梯度需要修正,不同沥青层厚度的修正系数  $\xi_t$  如表 3 所示。修正后不同厚度混凝土板的最大温度梯度  $T_g$  如表 4 所示。

表 3 上覆沥青层混凝土板温度梯度修正系数

Table 3 Coefficient of temperature gradient correction for concrete slab overlaid asphalt layer

面层厚度/cm	$\xi_t$	面层厚度/cm	$\xi_t$
2	1.13	12	0.51
4	0.96	14	0.43
6	0.82	16	0.37
8	0.70	18	0.31
10	0.59	20	0.27

表 4 不同厚度混凝土板的最大温度梯度

Table 4 Maximum temperature gradient of concrete slab with different thickness

公路自然区划	$T_g / (^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^{-1})$						
	14cm	16cm	18cm	20cm	22cm	24cm	26cm
Ⅱ、Ⅴ	1.02 ~ 1.08	0.97 ~ 1.03	0.92 ~ 0.98	0.87 ~ 0.92	0.83 ~ 0.88	0.78 ~ 0.83	0.74 ~ 0.78
Ⅲ	1.11 ~ 1.17	1.05 ~ 1.11	0.1 ~ 0.105	0.95 ~ 1.00	0.90 ~ 0.95	0.85 ~ 0.89	0.80 ~ 0.85
Ⅳ、Ⅵ	1.06 ~ 1.13	1.01 ~ 1.08	0.95 ~ 1.02	0.90 ~ 0.97	0.86 ~ 0.92	0.81 ~ 0.86	0.77 ~ 0.82
Ⅶ	1.14 ~ 1.21	1.09 ~ 1.15	1.03 ~ 1.09	0.98 ~ 1.03	0.93 ~ 0.98	0.87 ~ 0.92	0.83 ~ 0.87

以及板与基层之间的脱空影响。在研究 AC + OPC 复合式路面结构的温度翘曲应力时,有限元模型遵循以下原则:①将斜向预应力混凝土板视为材质均匀的弹性体;②假定各结构层材料参数不受温度变化的影响;③斜向预应力混凝土板和基层之间的接触采用接触单元进行模拟。

2.3 温度翘曲应力有限元模型

AC + OPC 复合式路面各结构层都采用 Thermal solid70 单元来模拟,通过八节点来定义单元,每个节点具有 3 个方向的自由度,

(2)导热系数

混凝土材料的导热系数都比较接近,在 0.002 8 ~ 0.003 2 m<sup>2</sup>/h,一般取 0.003 m<sup>2</sup>/h。

2.2 模型假定

由于板顶和板底存在温度差,可能会导致斜向预应力混凝土板的一部分和基层脱离接触,从而导致混凝土板的翘曲应力减小。由于板自重的约束导致板的翘曲应力增加以及行车荷载的作用使脱空现象部分消失。因此在分析 AC + OPC 复合式路面结构斜向预应力混凝土板的温度应力时,为了保证计算结果的精确性,可以不考虑混凝土板的自重

预应力筋采用 LINK33 单元来模拟。有限元在进行热力学分析时采用顺序耦合的方法。

当一种较软的材料和另一种硬材料接触时,可以假定为刚体和柔体的接触类型,斜向预应力混凝土板和基层的接触问题可以视为此类接触,接触面摩擦系数取 0.8<sup>[21-24]</sup>。地基采用弹性层状半空间地基<sup>[25-28]</sup>。

首先进行热分析计算,通过热力学分析可以求解得到各个节点的温度,再作用在结构单元节点上,计算温度应力。计算参数如表 5 所示。

表 5 温度应力计算参数

Table 5 Parameters of thermal stress calculation

结构层	厚度/m	弹性模量/ MPa	泊松比	导热系数/ (w·(m·℃) <sup>-1</sup> )	线膨胀系数/ 10 <sup>-5</sup> (1·℃ <sup>-1</sup> )
沥青层	0.1	1 200	0.25	1.2	2
斜向预应力混凝土层	0.24	31 000	0.18	1.1	1.2
水泥稳定碎石层	0.36	2 000	0.20	1.2	0.9
土基	7	30	0.35	1.3	1.5

有限元模型如图 3 所示。不同温度梯度对温度应力的影响如图 4 所示。

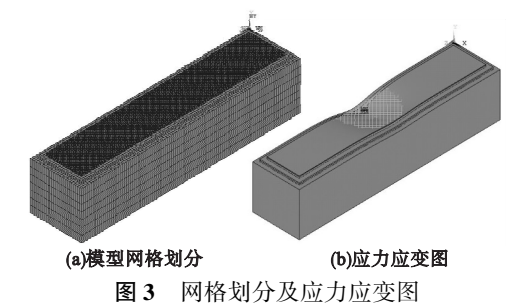


Fig. 3 Division of model and stress and strain diagram

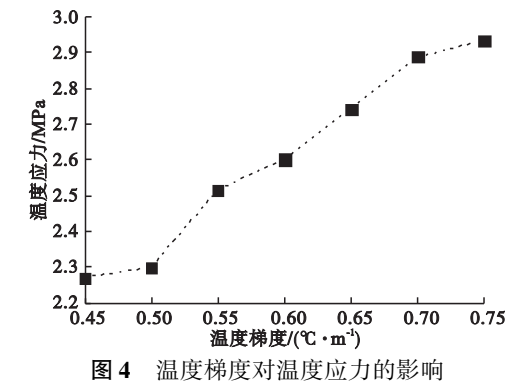


Fig. 4 Effects of thermal gradient on thermal stress

AC + OPC 复合式路面结构 OPC 层的温度应力随着温度梯度的增加不断增大,温度梯度小于 $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,增长速率缓慢;反之,其温度应力快速增长,温度梯度增大 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 其温度应力平均增大 $0.13\text{ MPa}$ 。根据自然区划、温度梯度对温度应力的影响、表 3 及表 4 选取温度梯度为 $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。

3 温度应力

通过提出斜向预应力混凝土板的温度应力计算实用公式,可以方便对 AC + OPC 复合式路面进行结构设计。为了使得到的计算公式具有较高的精确度,需要进行大量的计算,进行温度应力公式回归时需要考虑面层厚度 $h_1$ ,水泥混凝土板厚度 $h_2$ ,水泥混凝土板模量 $E_1$ ,基层模量 $E_2$ ,预应力 $q$ ,温度梯度 $Tg$ ,温度应力 $\sigma_t$ ,摩擦系数 $u$ ,因素水平的选取如表 6 所示。在保证计算结构具有代表性的条件下,采用均匀设计进行参数的组合,可以大大地减小计算次数。

表 6 因素水平表

Table 6 Factor-level table

因素								
水平	面层厚度/ cm	水泥混凝土 板模量 / MPa	水泥混凝土 板厚度/cm	基层模量/ MPa	预应力/ MPa	摩擦系数	温度梯度/ ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ )	
1	4	21 000	16	800	1.7	0.30	0.40	
2	5	22 000	17	1 000	1.8	0.35	0.45	
3	6	23 000	18	1 200	1.9	0.40	0.50	
4	7	24 000	19	1 400	2.0	0.45	0.55	
5	8	25 000	20	1 600	2.1	0.50	0.60	
6	9	26 000	21	1 800	2.2	0.55	0.65	
7	10	27 000	22	2 000	2.3	0.60	0.70	
8	11	28 000	23	2 300	2.4	0.65	0.75	
9	12	29 000	24	2 400	2.5	0.70	0.80	
10	13	30 000	25	2 500	2.6	0.75	0.85	
11	14	31 000	26	2 600	2.7	0.80	0.90	
12	15	32 000	27	2 700	2.8	0.85	0.95	

为分析各因素对 AC + OPC 复合式路面结构斜向预应力混凝土板温度应力响应的影响,采用均匀设计表进行方案组合设计,运用 $U_{12}^*(12^{10})$ 表来进行设计(见表 7)。均匀设计表相对应的均匀设计使用表规定了进行

均匀设计计算所需选取的列以及这些列所组成的试验方案的均匀度如表 8 所示。当有 2 个因素时,应选用 1,5 列安排试验;若有 3 个因素,应选用 1,6,9 列。D 表示均匀度偏差,其值越小,均匀设计的均匀度愈好。



表 7 U12 \* (12<sup>10</sup>) 均匀设计表

Table 7 U12 \* (12<sup>10</sup>) uniform design table

水平	因素									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2	3	4	5	6	8	9	10	12
2	2	4	6	8	10	12	3	5	7	11
3	3	6	9	12	2	5	11	1	4	10
4	4	8	12	3	7	11	6	10	1	9
5	5	10	2	7	12	4	1	6	11	8
6	6	12	5	11	4	10	9	2	8	7
7	7	1	8	2	9	3	4	11	5	6
8	8	3	11	6	1	9	12	7	2	5
9	9	5	1	10	6	2	7	3	12	4
10	10	7	4	1	11	8	2	12	9	3
11	11	9	7	5	3	1	10	8	6	2
12	12	11	10	9	8	7	5	4	3	1

表 8 U12 \* (12<sup>10</sup>) 使用表

Table 8 U12 \* (12<sup>10</sup>) table

因素数	列号	均匀度 <i>D</i>
2	1 5	0.116
3	1 6 9	0.184
4	1 6 7 9	0.223
5	1 3 4 8 10	0.227
6	1 2 6 7 8 9	0.267
7	1 2 6 7 8 9 10	0.227

根据因素数选取均匀设计表中的 1,2, 如表 9 所示。  
6,7,8,9,10 列进行均匀设计计算,计算结果

表 9 均匀设计计算结果

Table 9 Calculation results of uniform design

水平	因素							
	<i>h</i> <sub>1</sub> /cm	<i>E</i> <sub>1</sub> /MPa	<i>h</i> <sub>2</sub> /cm	<i>E</i> <sub>2</sub> /MPa	<i>q</i> /MPa	<i>u</i>	<i>T</i> <i>g</i> /(℃·m <sup>-1</sup> )	<i>σ</i> <sub>t</sub> /MPa
1	4	22 000	21	2 300	2.5	0.75	0.95	2.785
2	5	24 000	27	1 200	2.1	0.60	0.90	2.031
3	6	26 000	20	2 600	1.7	0.45	0.85	2.592
4	7	28 000	26	1 800	2.6	0.30	0.80	2.493
5	8	30 000	19	800	2.2	0.80	0.75	2.427
6	9	32 000	25	2 400	1.8	0.65	0.70	3.049
7	10	21 000	18	1 400	2.7	0.50	0.65	2.292
8	11	23 000	24	2 700	2.3	0.35	0.60	2.194
9	12	25 000	17	2 000	1.9	0.85	0.55	2.351
10	13	24 000	23	1 000	2.8	0.70	0.50	1.837
11	14	29 000	16	2 500	2.4	0.55	0.45	2.168
12	15	31 000	22	1 600	2.0	0.40	0.40	1.808

综合各层厚度、模量、滑动层摩擦系数、斜向预应力混凝土板中的预应力值及温度梯度对斜向预应力混凝土板温度应力的计算分析,得出斜向预应力混凝土板温度应力的回归公式。实践表明二项式回归对于各因素交互作用的情况可以得到较好的效果。因此为

$$\sigma_t = T_g^{0.5266} (5.9345 \times 10^5 E_1 + 1.0091 \times 10^7 E_2^2 + 0.0008 h_1 h_2 + 5.1842 \times 10^6 h_2 E_1 + 0.2600 q + 5.9854 u + 0.2593 u h_2). \quad (1)$$

## 4 结 论

(1)对短路基进行了界定,即公路中两构造物(桥梁、隧道、涵洞等)之间路基长度小于200 m均可视为短路基。

(2)温度梯度小于0.5 °C/m时,AC+OPC复合式路面结构OPC层的温度应力增长速率缓慢,温度梯度增大0.05 °C/m其温度应力增大0.03 MPa;温度梯度大于0.50 °C/m时,其温度应力快速增长,温度梯度增大0.05 °C/m其温度应力平均增大0.13 MPa。

(3)通过麦考特法和通用全局优化算法回归分析得到了斜向预应力混凝土板的温度应力计算公式。

## 参考文献

- [1] 艾长发,黄大强,高晓伟,等.高寒地区沥青路面温度行为数值分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(2):24-31.  
(AI Changfa, HUANG Daqiang, GAO Xiaowei, et al. Numerical analysis of asphalt pavement structure temperature behavior in cold regions [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2017, 36(2): 24-31.)
- [2] 王战兵.水泥混凝土路面非线性温度应力分析[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(9):61-63.  
(WANG Zhanbing. Nonlinear thermal stress analysis of cement concrete pavement [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2016, 12(9): 61-63.)
- [3] CHA S, JIN S. Prediction of thermal stresses in mass concrete structures with experimental and analytical results [J]. Construction and building materials, 2020, 258: 120367.
- [4] 骆亚军.“白加黑”路面温度场及应力场研究[D].广州:华南理工大学,2016.  
(LUO Yajun. Study on the temperature field and stress field for “white and black” pavement [D]. Guangzhou: South China

University of Technology, 2016.)

了充分考虑各因素之间的相互作用,采用二次多项式进行回归。应用回归软件1stopt对结果进行回归分析,采用麦考特法和通用全局优化算法得到斜向预应力混凝土板的温度应力计算公式。

- [5] MACKIEWICZP, SZYDO A. Thermal stress analysis in concrete pavements [J]. Journal of transportation engineering, part B: pavements, 2020, 146(3): 06020002.
- [6] TATSUO N, MASASHI K, YASUSI T, et al. Thermal stress calculation method for concrete pavement based on temperature prediction and finite element method analysis [J]. Transportation research record, 2017(1): 104-114.
- [7] FAN K, LI D, LI L, et al. Effect of temperature gradient on transient thermal creep of heated and stressed concrete in transient state tests [J]. Construction and building materials, 2019, 222: 839-851.
- [8] 张华.固化温度梯度对水泥混凝土路面温度应力的影响分析[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(9):113-116.  
(ZHANG Hua. Analysis of the effects of curing temperature gradient on thermal stress of cement concrete pavement [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2016, 12(9): 113-116.)
- [9] IVAN P, SERGEY P, YURI B, et al. Effect of thermal induced stress of concrete on performance characteristics of constructions [J]. E3S web of conferences, 2019, 97: 06026.
- [10] 付建峰,陈凤晨,苏新.基于实测温度的机场道面温度应力影响因素敏感性分析[J].中外公路,2017,37(4):38-41.  
(FU Jianfeng, CHEN Fengchen, SU Xin. Sensitivity analysis of affecting factors on temperature stress of airport pavement based on measured temperature [J]. Journal of China and foreign highway, 2017, 37(4): 38-41.)
- [11] 姜利,苏禹,程维,等.基于应力吸收层的“白改黑”路面温度应力有限元分析[J].科学技术与工程,2019,19(3):232-238.  
(JIANG Li, SU Yu, CHENG Wei, et al. Finite element analysis of temperature stress of “white to black” pavement based on stress absorption layer [J]. Science technology and engineering, 2019, 19(3): 232-238.)
- [12] 颜可珍,沈光辉,游凌云.非线性温度梯度作用下水泥混凝土路面力学分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(7):74-80.  
(YAN Kezhen, SHEN Guanghui, YOU Lingyun. Mechanical analysis of cement concrete pavement on nonlinear temperature

- profile [J]. Journal of Hunan university (natural sciences), 2015, 42 (7): 74 – 80. )
- [13] 田波, 权磊, 牛开民. 不同基层类型水泥混凝土路面温度翘曲结构试验与理论分析 [J]. 中国公路学报, 2014, 27 (6): 17 – 26. (TIAN Bo, QUAN Lei, NIU Kaimin. Structural experiment and theoretical analysis of thermal curling in JPCP with different base types [J]. China journal of highway and transport, 2014, 27 (6): 17 – 26. )
- [14] 谈至明, 姚祖康, 刘伯莹. 水泥混凝土路面的温度应力分析 [J]. 公路, 2002, 12 (8): 19 – 23. (TAN Zhiming, YAO Zukang, LIU Boying. Analysis of thermal stresses in cement concrete pavements [J]. Highway, 2002, 12 (8): 19 – 23. )
- [15] 刘富强, 郑木莲, 王帅, 等. 短路基处 CPC 层对 AC + CPC 复合式路面应力变形的影响 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2021, 37 (3): 494 – 501. (LIU Fuqiang, ZHENG Mulian, WANG Shuai, et al. Effects of CPC layer on stress and deflection of AC + CPC composite pavement structure at short subgrade [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37 (3): 494 – 501. )
- [16] 郑木莲, 刘富强, 王涛, 等. 荷载作用下短路基处 AC + CPC 复合式路面结构应力响应分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (4): 926 – 933. (ZHENG Mulian, LIU Fuqiang, WANG Tao, et al. Stress response analysis of AC + CPC composite pavement at short subgrade subjected to loading action [J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18 (4): 926 – 933. )
- [17] 潘晓东. 人体信息技术在道路几何构造安全性评价中的应用 [D]. 上海: 同济大学, 2002. (PAN Xiaodong. The application of body information technology on safety evaluation of road alignment [D]. Shanghai: Tongji University, 2002. )
- [18] 王涛. 基于斜向预应力混凝土复合式路面的短路基桥头跳车处治技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015. (WANG Tao. Research on the treatment technology of bridge-head jumping of short subgrade based on cross-tensioned prestressed concrete composite pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. )
- [19] 张东省, 韩森, 韩微微, 等. 斜张法双向预应力水泥混凝土路面关键设计参数研究 [J]. 公路, 2010, 12 (11): 70 – 73. (ZHANG Dongsheng, HAN Sen, HAN Weiwei, et al. Research on key design parameters of two direction cross-tensioned prestressed cement concrete pavement [J]. Highway, 2010, 12 (11): 70 – 73. )
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路水泥混凝土路面设计规范: JTG D40—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway cement concrete pavement: JTG D40—2011 [S]. Beijing: China Communication Press Co. Ltd., 2011. )
- [21] XU Y L, FAN W, CHENG P F, et al. Mechanical characterization of interface shear strain of multi-layer composite pavement [J]. International journal of pavement engineering, 2021, 22 (9): 1116 – 1122.
- [22] 冉武平, 张玉, 李爽. 沥青路面层间接触状态研究进展 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2019, 38 (8): 45 – 52. (RAN Wuping, ZHANG Yu, LI Shuang. Research progress on interlayer contact state of asphalt pavement [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2019, 38 (8): 45 – 52. )
- [23] 王亦麟. 软土地基桥头跳车处理探讨 [J]. 公路交通科技, 2000, 17 (1): 28 – 30. (WANG Yilin. Discussion on the treatment of bridge jumping in the soft land [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2000, 17 (1): 28 – 30. )
- [24] 丁彦听. 浅议公路桥头跳车的成因与防治 [J]. 公路交通科技, 2002, 19 (5): 92 – 98. (DING Yanting. Causes and prevention of bumping at bridge-head [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2002, 19 (5): 92 – 98. )
- [25] 张洪伟, 赵晓亮, 李喆. 复合式路面结构中黏结层材料的黏结力评价 [J]. 公路, 2014 (12): 26 – 28. (ZHANG Hongwei, ZHAO Xiaoliang, LI Zhe. Evaluation of cohesive force for adhesive layer materials sticky white with black pavement structure [J]. Highway, 2014 (12): 26 – 28. )
- [26] 任少傅, 王浩, 邹晓龙, 等. 复合式路面沥青面层车辙和侧向推移试验研究 [J]. 公路, 2019 (11): 6 – 13. (REN Shaobo, WANG Hao, ZOU Xiaolong, et al. Experimental study on rutting and lateral slippage of asphalt layer on composite pavement [J]. Highway, 2019 (11): 6 – 13. )
- [27] 张明杰, 祁文洋. 复合式路面与半刚性路面力学响应的对比 [J]. 石油沥青, 2016, 30 (6): 16 – 19. (ZHANG Mingjie, QI Wenyang. The mechanical response comparison of composite pavement and semi-rigid pavement [J]. Petroleum asphalt, 2016, 30 (6): 16 – 19. )
- [28] 朱春福, 程培峰, 赵广宇. 荷载和温度耦合作用下“白加黑”复合式路面沥青加铺层的受力分析 [J]. 中外公路, 2020, 40 (2): 40 – 45. (ZHU Chunfu, CHENG Peifeng, ZHAO Guangyu. Stress response of “white + black” composite pavement asphalt overlay under the coupling action of load and temperature [J]. Journal of China & foreign highway, 2020, 40 (2): 40 – 45. )
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)