

DOI: 10.7672/sjgs2026080089

寒区大温差环境下考虑多因素耦合作用的 钢桥面铺装层力学响应分析

陈俊名¹, 付磊¹, 李国栋², 乌兰托亚², 孙晗旭², 王怡菲²

(1. 中交建筑集团有限公司, 北京 100020; 2. 内蒙古大学, 内蒙古 呼和浩特 010021)

[摘要] 在寒区大温差环境下,探讨全桥变形-温度-车轮荷载耦合作用影响下的钢桥面铺装力学响应。依托呼和浩特市昭乌达路高架桥,针对4种典型的钢桥面铺装结构,通过有限元模拟的方法分析不同温度环境下钢桥面铺装的温度场和温度应力,结果表明,不同温度环境下铺装层温度场变化规律基本一致,与外界气温一样呈现出周期性变化;大温差的温度环境对桥面铺装的受力更为不利。开展钢桥面铺装在全桥变形-温度-车轮荷载耦合作用下的低温力学响应分析。结果表明,考虑桥梁结构变形对桥面铺装的影响,不仅使铺装结构受力变大,而且使铺装结构表面拉压力的周期性变化时间缩短,更容易引发疲劳破坏;且“下层浇筑式沥青混凝土+上层环氧沥青混凝土”铺装结构组合在低温下的力学性能更好。

[关键词] 桥梁;钢桥面;温度场;力学响应;多因素耦合

[中图分类号] U443.33

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0089-11

Mechanical Response Analysis of Steel Bridge Deck Pavement Layer Considering Multi-factor Coupling Under Large Temperature Difference in Cold Area

CHEN Junming¹, FU Lei¹, LI Guodong², WULAN Tuoya², SUN Hanxu²,
WANG Yifei²

(1. CCCC Construction Group Co., Ltd., Beijing 100020, China;

2. Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China)

Abstract: This paper investigates the mechanical response of steel deck pavement under the coupling effect of deformation, temperature and wheel load in the cold area. Relies on the Zhaowuda Road elevated bridge in Hohhot, aiming at four typical steel bridge deck pavement structures, the temperature field and thermal stress of steel bridge deck pavement under different temperature environments are analyzed by finite element simulation method. The results show that the temperature field of pavement layer under different temperature environment was basically the same, and showed periodic changes like the external temperature. The temperature environment with large temperature difference was more unfavorable to the force of bridge deck pavement. At the same time, the low temperature mechanical response of steel deck pavement under the coupling effect of deformation, temperature and wheel load was analyzed. The results show that considering the influence of bridge structure deformation on bridge deck pavement, not only the stress of the pavement structure is increased, but also the periodic change time of tensile and compressive force on the surface of the pavement structure was shortened, which was more likely to cause fatigue failure. The mechanical properties of the pavement structure combination of “lower poured asphalt concrete + upper epoxy asphalt concrete” are better at low temperature.

Keywords: bridges; steel bridge deck; temperature field; mechanical response; multi-factor coupling

0 引言

在钢桥结构体系中,桥面铺装是桥梁上部结构

的重要组成部分,在桥梁运营时起到联结桥梁结构、分散交通荷载的作用,同时还可以减少行车对桥面板的冲击,保护钢桥面板^[1-3]。受寒冷气候和大温差环境的影响,我国西北地区部分钢桥面铺装通车不久后就产生了较为严重的开裂和车辙等病害,降低了桥梁的服务质量,严重时甚至威胁交通安全,导致难以预估的经济损失^[4-6]。桥梁铺装损坏已经成为桥梁最主要的问题之一,近年来在国内外受到了普遍重视。为解决以上问题,国内外学者通过理论分析、数值模拟以及试验测试等方法进行了大量研究,在桥面铺装层温度场和温度应力分析方面,取得了一些有价值的成果。于新等^[7]通过数值仿真和现场监测结合的方法,研究了不同温度条件下沥青混凝土铺装层的温度场分布和温度应力变化规律,并将其与仅考虑车辆荷载情况下的力学响应进行了比较,得出温度应力对铺装层结构受力影响较大,需要在铺装层设计中重点考虑。苏子元^[8]利用有限元软件,基于内蒙古地区实际气候调查数据对寒冷地区的钢桥面铺装结构进行温度场模拟,确定了集宁南绕城公路钢箱梁桥铺装结构工作的温度场,尽管没有分析温度应力,但这为进一步研究提供了基础。Fan 等^[9]采用 OT 试验测试了 3 种钢桥面铺装材料(环氧沥青混合料 EA-10、浇筑式沥青混合料 GA-10 和高弹性沥青混合料 SMA-10)的抗裂性能,得到 GA-10 和 EA-10 更适合大温度变化。逯彦秋等^[10]对比了开放式箱梁和封闭式箱梁的桥面铺装层温度场,得出相比之下开放式箱梁铺装层最高温度可以下降 18℃。张利东等^[11]对季冻区中小跨径钢桥面铺装的力学响应进行了分析,认为低温下应以铺装层表面拉应力作为控制指标进行设计。Fan 等^[12]认为进行桥面铺装层温度场模拟时应考虑包括太阳辐射、日照时间、风速以及材料热物性参数在内的多种复杂因素,从而更加符合实际测量情况。Li 等^[13]研究了温度应变与温度变化之间的关系,得出二者呈正比关系,特别是在 60℃ 时观测到的最大温度主应力和最大温度剪应力远高于 -20℃ 时的数值,并且随着铺装层厚度的增加,最大温度主应力呈现出先升后降的趋势,而最大温度剪应力则随厚度增加而持续上升,这对于理解温度变化对钢桥面铺装性能的影响及设计更加有效的降温措施具有重要意义。

综上所述,目前桥面铺装的温度场及温度应力已有研究,但其开展范围目前主要以混凝土桥和我国南方钢桥为主,关于钢桥面铺装在我国北方寒冷地区昼夜温差大、紫外线强等极端气候条件下的温

度效应和温度应力的研究还比较少。本文以昭乌达路高架桥为工程背景,连续钢箱梁桥桥面铺装结构为研究对象,根据已有的铺装结构体系以及桥面铺装病害频发的成因,考虑桥梁结构变形、大温差环境和车轮荷载,分析钢桥面铺装在不同荷载组合工况下的力学行为,提出一种适用于寒区大温差环境下钢桥面铺装的典型结构,提高寒区大温差环境下桥面铺装的使用性能。

1 钢箱梁桥力学响应分析

1.1 计算模型建立

以昭乌达路高架桥金桥路段为工程背景,依据梁格法在有限元软件 MIDAS 中建立钢箱梁全桥模型。该桥上部结构采用组合装配式预制混凝土连续箱梁及钢箱梁结构,标准段桥宽 26m,设计车速 60km/h,其中第 5 联为钢箱梁梁段,桥跨布置为 (30+50+35)m,钢箱梁材料为 Q345qE 钢,混凝土调平层为 C50 混凝土,相关材料力学参数如表 1 所示。桥面铺装由上到下依次为 9cm 厚沥青混凝土铺装、防水层和 10cm 厚玄武岩纤维混凝土调平层。

表 1 高架桥构件材料和力学参数

Table 1 Materials and mechanical parameters of components for the viaduct

| 材料 | 弹性模量/GPa | 重度/(kN·m ⁻³) |
|----------|----------|--------------------------|
| Q345qE 钢 | 206.0 | 7 850 |
| C50 混凝土 | 34.5 | 2 500 |

在 MIDAS 中基于梁格法建立钢箱梁全桥模型时,纵向主梁沿钢箱梁腹板及顶底板中线精确划分,针对 26m 桥宽及 6 个箱室布置,设置 6 道主纵梁对应箱室腹板位置,每道纵梁截面特性通过调整面积、抗弯惯性矩(I_{yy} , I_{zz})及抗扭惯性矩(J)实现与原箱梁等效。顶板按横向刚度等效原则划分为纵梁,采用壳单元等效为梁单元的刚度换算方法,通过顶板有效宽度计算等效截面参数;底板根据 U 肋间距及高度分布特征划分为纵梁,U 肋刚度通过等效厚度法融入底板截面特性。横向梁格严格按实际横隔板布置划分,横梁采用等截面梁单元模拟,截面高度取横隔板实际尺寸,横梁与纵梁节点采用六自由度刚接,通过主从节点约束确保弯矩传递。单元划分时纵向主梁沿跨度方向采用等截面梁单元,支点附近区域单元尺寸加密至 1.5m,跨中区域扩大至 2m,横向梁单元与纵梁严格正交,节点强制对齐。边界条件基于桥梁下部结构布置及现实运营状况,通过对不同线位移的约束,模拟了支座的工作状态,并通过弹性连接模拟支座摩擦,相邻联结连接处采用弹簧单元模拟伸缩缝。全桥分析时车

辆荷载按 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》中公路—I 级车辆荷载取值。全桥模型的建立及边界条件如图 1,2 所示。

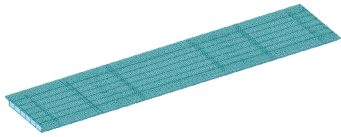


图 1 全桥模型

Fig. 1 The whole bridge model

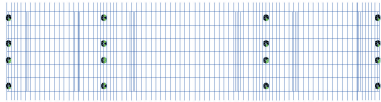


图 2 全桥模型边界条件

Fig. 2 Boundary conditions of the whole bridge model

1.2 全桥力学分析及响应结果

对全桥模型在中载和偏载等不同工况下进行受力分析,相对于其他指标,弯矩对全桥受力状况更具代表性,因此,为模拟实际情况且简化计算,以主梁竖向负弯矩为控制指标选出最不利荷载工况,该工况下全桥竖向弯矩如图 3 所示。

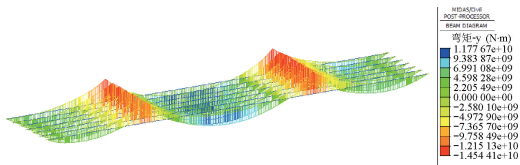


图 3 全桥竖向弯矩

Fig. 3 Vertical bending moment of the whole bridge

由图 3 可以看出,在外界车辆荷载作用下,全桥受力最大正弯矩为 $1.18 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}$,位于第 2 跨跨中;最大负弯矩为 $1.45 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}$,位于墩顶附近。弯矩越大,桥面铺装层受到因全桥变形而产生的纵向力作用也就越明显,墩顶附近的梁段由于受到负弯矩作用,其所在位置处的桥面铺装更容易受到纵向拉力而产生开裂。因此,选取墩顶附近左侧梁段作为最不利梁段建立有限元模型,并根据模型大小将其边界受力从整桥模型中提取出来,作为边界条件约束施加于后续桥面铺装的受力分析。

2 钢桥面铺装结构温度场分析

2.1 钢箱梁桥节段模型建立

根据昭乌达路高架桥金桥路段第 5 联标准横断

面图,采用有限元软件 ABAQUS 进行建模和数值仿真模拟。该路段钢箱梁桥面系为正交异性钢桥面板,顶板厚 16mm,腹板厚 16mm;U 形加劲肋开口宽 300mm,闭口宽 180mm,厚 8mm,相邻肋间中心间距 592mm;横隔板间距 1 500mm,厚 14mm。相关文献^[14]研究表明,当 U 肋取 6 个以上,横隔板数量>5 时,简化节段模型与子模型的计算误差仅为 3.7%。据此选取的节段模型宽度为 4 250mm,长度为 7 500mm。依照 JTG D50—2017《公路沥青设计规范》,采用“下层 50mm+上层 40mm”的双层沥青混凝土铺装结构,混凝土调平层厚 100mm。计算模型几何参数如表 2 所示,根据几何参数建立的局部梁段桥面铺装计算模型如图 4 所示。

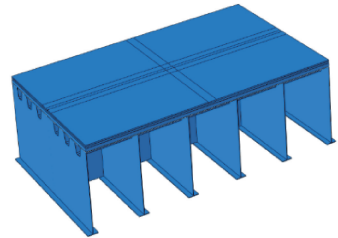


图 4 简化节段计算模型

Fig. 4 Simplified segment calculation model

依据全桥模型中提取出的边界受力状况,以此为边界条件进行局部节段建模。本文分析对象主要为桥面铺装部分,为提高仿真结果的准确性,对桥面铺装部分尤其是移动均布荷载作用区域进行了网格加密,同时为提高运算速度,减小计算压力,对桥梁其他部分的网格进行粗化,沿桥面铺装横向网格由密变疏。同时结合需要进行分析的问题,采用 C3D8R 实体单元对结构进行模拟。

由于铺装结构使用环境复杂多变,且铺装材料对于温度十分敏感,复合铺装结构温度场分析是一个十分复杂的问题。在实际工程应用中,防水黏结层通常只有几毫米的厚度。如采用 ABAQUS 这类有限元分析软件以实体单元进行建模,那么相对于铺装结构在厚度方向上的尺寸,防水黏结层的尺寸几乎可以忽略不计。这种尺寸上的差异可能会造成计算过程中的不收敛或误差增大。如前所述,虽然防水黏结层会对铺装结构的热传导产生一定影响,但相比之下,其影响远小于太阳辐射强度及桥面铺装结构周边环境温度的影响。特别是采用沥

表 2 计算模型几何参数

Table 2 Geometric parameters of the calculation model

| 模型宽 | 模型长 | 桥面板厚 | U 肋宽 | U 肋间距 | 横隔板厚 | 横隔板间距 | 铺装上层厚 | 铺装下层厚 | 腹板厚 | 混凝土调平层厚 |
|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-----|---------|
| 4 250 | 7 500 | 16 | 300 | 592 | 14 | 1 500 | 40 | 50 | 16 | 100 |

表 3 材料热物性参数

Table 3 Thermal property parameters of materials

| 参数 | AC | GA | SMA | 钢桥面板 | 混凝土 |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 热导率/[W·(m·K) ⁻¹] | 5 400 | 4 680 | 6 573 | 209 520 | 4 680 |
| 密度/(kg·m ⁻³) | 2 400 | 2 300 | 2 400 | 7 850 | 2 100 |
| 热容量/[J·(kg·°C) ⁻¹] | 920 | 942 | 1 168 | 460 | 850 |
| 泊松比 | 0.35 | 0.20 | 0.35 | 0.25 | 0.20 |
| 线收缩系数/°C ⁻¹ | 2.50×10 ⁻⁵ | 2.04×10 ⁻⁵ | 3.00×10 ⁻⁵ | 1.23×10 ⁻⁵ | 1.00×10 ⁻⁵ |
| Stefan-Boltzmann 常数/[J·(h·m ² ·K ⁴) ⁻¹] | 2.04×10 ⁻⁴ | — | — | — | — |

青作为防水黏结层的复合铺装结构,其界面热阻效应几乎可以忽略。因此,当采用 ABAQUS 软件进行复合铺装结构的温度场分析时,必须对铺装层的分析模型进行适当简化。基于以上分析,本文对简化后的节段模型作出如下假设。

- 1) 每层都是同性且均匀连续体。
- 2) 各铺装层间紧密连接,不计防水黏结层的厚度且忽略其对桥面铺装层导热的影响,桥面铺装上下层之间的热传导是连续的。
- 3) 铺装材料的热学物理特性不随温度变化而变化。

2.2 材料属性

通过分析相关文献^[15-18]总结了几种常用钢桥面铺装材料的热物性参数,如表 3 所示;同时选取了 4 种典型的钢桥面铺装组合结构^[19]用于分析,如表 4 所示。

表 4 典型桥面铺装结构

Table 4 Typical bridge deck pavement structure

| 铺装位置 | 工况 | | | |
|------|----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 铺装上层 | AC | SMA | SMA | SMA |
| 铺装下层 | AC | AC | GA | SMA |

2.3 边界条件

呼和浩特市地处北方寒冷地区,海拔较高,单日内较大的温差变化、较强的太阳辐射以及外界气温与桥面铺装的温差是影响桥面铺装层结构的最主要因素,因此气温及对流热交换、太阳总辐射热过程、结构层有效辐射量是本文有限元计算模型的 3 个主要边界条件,如图 5 所示。

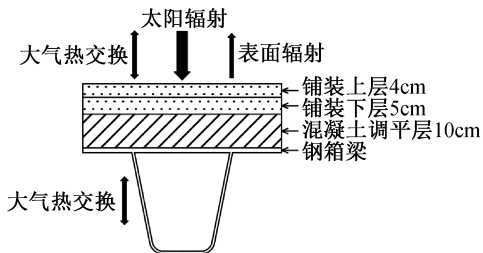


图 5 温度场模拟边界条件

Fig. 5 Boundary conditions for temperature field simulation

1) 太阳辐射

根据相关研究成果^[20],太阳辐射量 $Q(t)$ 的日变化过程可采用以下分段函数近似表示:

$$Q(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 12 - \frac{c}{2} \\ q_0 \cos m\omega(t - 12) & 12 - \frac{c}{2} \leq t \leq 12 + \frac{c}{2} \\ 0 & 12 + \frac{c}{2} < t \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_0 为中午最大辐射, $q_0 = 0.131mQ$, $m = 12/c$; Q 为日太阳辐射总量; c 为有效日照时间; ω 为角频率。

2) 气温及对流热交换

太阳辐射的周期性作用导致大气温度也呈现周期性变化,且温度变化趋势是非对称的。因此,简单的正弦函数并不足以准确描述这一复杂的温度变化过程,而使用 2 个正弦函数的线性组合来模拟日温变化,则可以使其符合实际气温的动态变化:

$$T(t) = T_1 + T_2 [0.96 \sin \omega(t - t_0) + 0.146 \sin 2\omega(t - t_0)] \quad (2)$$

式中: T_1 为日平均气温(°C); T_2 为日气温变化幅度(°C); ω 为角频率; t_0 为初相位,一般取 $t_0 = 9$ 。

桥面铺装层表面与周围大气的热交换系数与其主要影响因素风速 v 两者之间大致呈线性关系:

$$h_c = 3.7v + 9.4 \quad (3)$$

式中: h_c 为热交换系数(W/(m·°C)); v 为日平均风速(m/s)。

3) 桥面铺装有效辐射

桥面铺装结构的有效辐射交换是指其从周围环境如大气中吸收热辐射,随后通过表面以辐射的形式释放这些热量的过程。采用式(4)描述铺装层表面对外辐射量:

$$q_F = \varepsilon \sigma [(T_F - T_Z)^4 - (T_a - T_Z)^4] \quad (4)$$

式中: q_F 为地面有效辐射(W/(m·°C)); ε 为路面发射率,沥青路面取 0.81; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; T_F 为路表温度(°C); T_a 为大气温(°C); T_Z 为

绝对零度值($^{\circ}\text{C}$)。

2.4 温度场分析

2.4.1 钢桥面铺装结构的温度场分析

对钢桥面铺装有限元模型施加与其工作环境对应的边界条件,以 24h 为 1 个周期,通过 ABAQUS 进行有限元计算,由于结构形式较多,下文仅列出“下层 GA+上层 SMA”的钢桥面铺装结构在 4 种温度条件下的温度场分布,如图 6 所示。为描述简便,后文将“下层 GA+上层 SMA”简化为“GA+SMA”,以此类推。

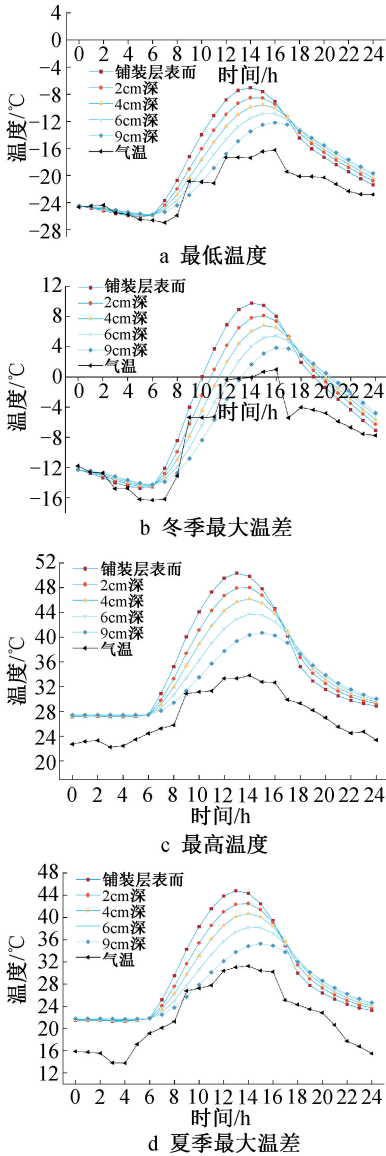


图 6 不同温度条件下 GA+SMA 铺装层温度场分布

Fig. 6 Temperature field distribution of GA+SMA pavement under different temperature conditions

由图 6 可以看出,无论哪种温度环境,钢桥面铺装的温度场都呈现出与外界气温一样的周期性变化规律,内部极值温度出现时间相较于结构层表面有所滞后,这与于新等^[7]的研究结论一致。铺装结

构的整体温度普遍高于外界气温,相较于外界气温差值,铺装结构内部温差更大,且铺装结构表面最为明显,最大温差可以达到 23~25 $^{\circ}\text{C}$,与 Li 等^[13]观测到的极端温度下铺装层高应力现象相符。铺装结构表面的温度变化最显著,因此更易产生由温度引起的病害,同时钢桥面铺装结构的使用环境较为严酷,冬季为-25 $^{\circ}\text{C}$ 以上,夏季达到 50 $^{\circ}\text{C}$ 以上,这与呼和浩特地区钢桥面铺装表面易出现裂缝和车辙的病害现象相吻合。

2.4.2 不同铺装结构组合的温度场分析

对 4 种典型钢桥面铺装结构在 4 种温度条件下的铺装层表面温度进行对比分析,计算结果如图 7 所示。

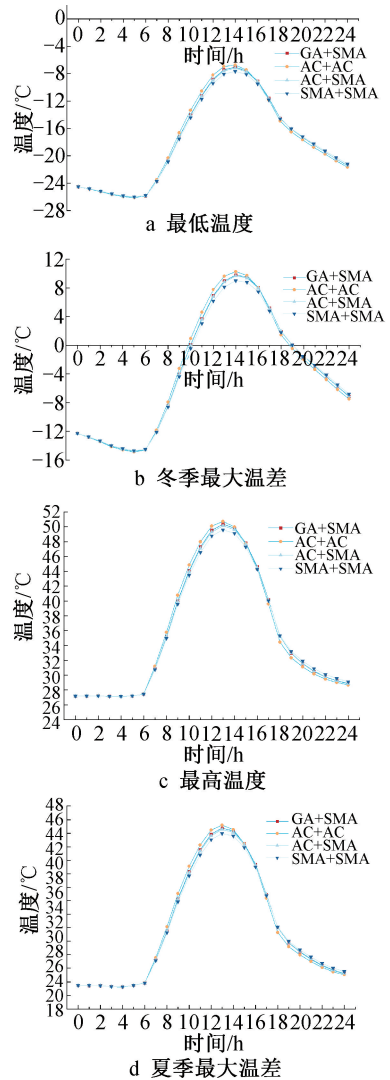


图 7 GA+SMA 铺装层表面温度分布

Fig. 7 Surface temperature distribution of GA+SMA pavement

由图 7 可以看出,4 种温度工况下,双层 AC 铺装结构组合表面温度变化都较大,双层 SMA 铺装结构组合的表面温度变化则较小。对比来看,当铺装

下层材料均为 AC 时,以 SMA 为上面层的铺装结构表面温度有所降低,这是因为一方面 SMA 材料的导热系数要大于 AC 材料,使热量从铺装上层传递到铺装下层的能力更强;另一方面 SMA 材料的比热容也要大于 AC 材料,铺装层升高 1°C 所需要的热量更多。当铺装上层材料均为 SMA 时,铺装结构表面温度由大到小的顺序依次为“GA+SMA”,“AC+SMA”和“SMA+SMA”,铺装材料的热物性参数不同是造成这一现象的主要原因;GA 材料的导热系数要小于 AC 材料,其作为铺装下层时热量向下传递较慢,又因为二者比热容几乎相同,因此 GA+SMA 铺装结构的表面温度较高;由于 SMA 的热传导率和比热容在 3 种铺装材料中最大,其作为铺装下层时热量向钢桥面板的传递速度也更快,因此 SMA+SMA 铺装结构的表面温度也较低,这与 Fan 等^[12]提出的 SMA 材料导热性能优势形成互补分析。

总体来说,4 种典型钢桥面铺装结构 1d 内的温度场变化差异不大,因此需要进一步结合铺装材料的力学参数对铺装结构的温度应力展开分析,以确定铺装结构在大温差环境下的力学响应,为后续设计分析提供参考依据。

3 钢桥面铺装结构温度应力分析

3.1 1d 中钢桥面铺装结构温度应力分析

铺装层表面开裂是大温差地区钢桥面铺装最常见的病害之一,而铺装结构表面的弯拉应力是造成铺装层表面开裂的主要原因。因此,本文以铺装结构表面的弯拉应力作为控制指标,假设 0 时刻桥面铺装结构的温度应力为 0,分析 24h 内铺装结构温度应力的变化,铺装结构表面横向拉应力 s_{11} 和纵向拉应力 s_{33} 在低温下随时间的变化规律如图 8 所示,高温下的变化规律如图 9 所示。

由图 8 可知,低温环境下,桥面铺装表面力学响应的变化规律与外界温度变化呈现出一致性,在 00:00—06:00 以拉应力为主,随着温度升高,结构层表面应力响应逐渐发展为压应力,并在 14:00 左右达到最大,之后随着铺装结构内部温度降低,结构层表面压应力逐渐减小并有重新发展成拉应力的趋势。

由图 9 可知,在高温环境下,桥面铺装层则几乎完全受到压应力作用,因而更容易发生剪切破坏;大温差环境下,桥面铺装层表面受力要更为不利,且横向应力稍大于纵向应力。

3.2 不同类型钢桥面铺装结构温度应力分析

对比 4 种典型钢桥面铺装结构组合在低温环境下和高温环境下的最大横向压应力 s_{11} 以及出现时间,具体结果如表 5、6 所示。

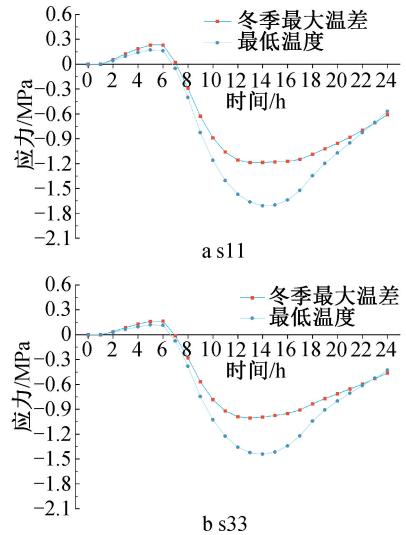


图 8 低温作用下钢桥面铺装表面拉应力

Fig. 8 Surface tensile stress of steel bridge deck pavement under low temperature

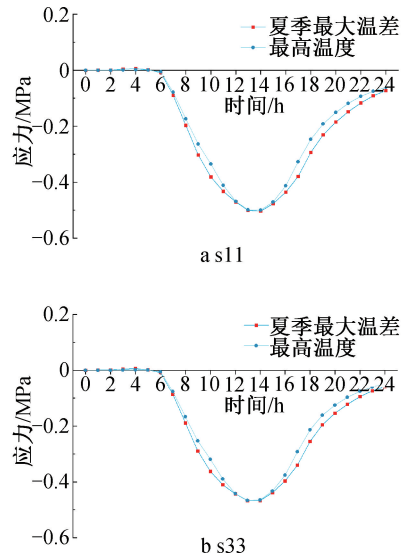


图 9 高温作用下钢桥面铺装层表面拉应力

Fig. 9 Surface tensile stress of steel bridge deck pavement under high temperature

表 5 低温环境下最大横向拉应力 s_{11} 及出现时间
Table 5 The maximum transverse tensile stress s_{11} and occurrence time under low temperature environment

| 项目 | 铺装结构组合 | | | |
|-----------|--------|--------|---------|--------|
| | AC+AC | GA+SMA | SMA+SMA | AC+SMA |
| 最大拉应力/MPa | 0.214 | 0.231 | 0.218 | 0.229 |
| 出现时间 | 05:00 | 05:00 | 05:00 | 05:00 |

表 6 高温环境下最大横向压应力 s_{11} 及出现时间
Table 6 The maximum transverse compressive stress s_{11} and occurrence time under high temperature environment

| 项目 | 铺装结构组合 | | | |
|-----------|--------|--------|---------|--------|
| | AC+AC | GA+SMA | SMA+SMA | AC+SMA |
| 最大拉应力/MPa | 0.184 | 0.504 | 0.474 | 0.495 |
| 出现时间 | 14:00 | 14:00 | 14:00 | 05:00 |

可看出,对于不同的铺装结构组合,无论哪种环境温度,其表面应力极值的出现时间都基本相同。低温环境下铺装结构表面拉应力差距较小,GA+SMA 组合的表面拉应力最大,为 0.231MPa,但也仅比表面拉应力最小的 AC+AC 组合大 8%;高温环境下情况则有所不同,其他 3 种铺装结构组合的表面最大压应力明显高于 AC+AC 组合,超过了 1 倍。因此 AC+AC 铺装结构组合的温度应力表现最好。

4 多因素耦合作用下的钢桥面铺装结构力学响应分析

4.1 全桥变形-温度耦合作用下钢桥面铺装力学响应

为分析桥梁结构整体变形对钢桥面铺装结构受力产生的影响,在 MIDAS 全桥计算模型中提取出与之对应弯矩作为边界条件,大小为 $8.5 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}$;因为在低温大温差环境下钢桥面铺装结构受力更为不利,以 GA+SMA 铺装结构在冬季最大温差下计算所得的温度场为环境条件进行分析。

将 2.4 节计算得到的温度场作为预定义场,同时在简化模型纵桥向两端施加 $8.5 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 的弯矩,计算 GA+SMA 铺装结构组合在冬季最大温差条件下受全桥结构变形-温度荷载作用 24h 的铺装层表面拉应力,结果如图 10 所示。

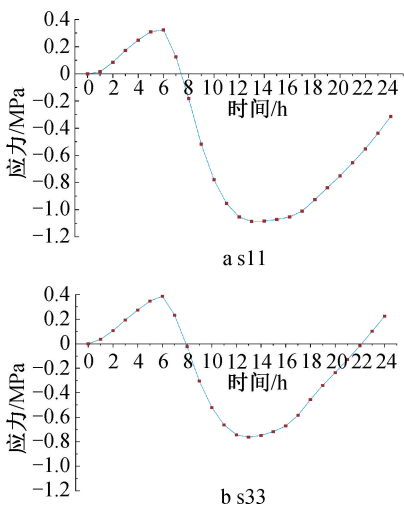


图 10 GA+SMA 铺装结构受全桥变形-温度耦合作用 24h 表面拉应力

Fig. 10 The 24h surface tensile stress of GA + SMA pavement structure under the coupling effect of the whole bridge deformation and temperature

由图 10 可以看出,受全桥结构变形的影响,与仅受温度荷载作用相比,钢桥面铺装层表面的拉应力有所增大,其中横向拉应力 s_{11} 的增幅较小,由

0.23MPa 提升到了 0.32MPa,增大了 39.1%;纵向拉应力 s_{33} 的增幅则较大,由 0.17MPa 提升到了 0.39MPa,提升约 129.4%。可见全桥变形是铺装层产生横向开裂的主要原因之一,因此需要避免超载现象的发生,以降低桥梁整体变形受力,减少横向裂缝的产生。

4.2 车轮荷载-温度耦合作用下钢桥面铺装力学响应

4.2.1 车轮荷载的简化及布置

参考 CJJ 11—2011《城市桥梁设计规范》,车辆荷载按城-A 级标准车进行取值,车辆后轴荷载为 140kN,由于车轮实际作用面近似为矩形,以矩形均布荷载形式对双轮荷载进行简化后,矩形宽 20cm、长 25cm,矩形邻近边间距取为 10cm,依据车辆轴重及矩形面积可计算出单轮胎压为 0.7MPa,车轮荷载简化情况如图 11 所示。

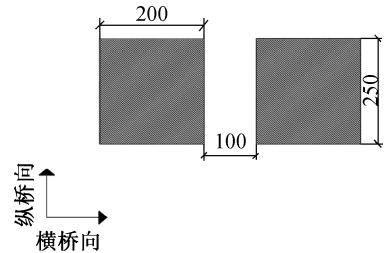


图 11 车轮荷载简化

Fig. 11 Simplification of wheel load

为确定车轮最不利荷载的作用位置,根据实际车道位置,并考虑正交异性钢桥面板几何特性,选取 3 种车轮荷载横向作用位置进行分析。

1) 荷位 1: 车轮荷载作用对称施加于腹板的正上方。

2) 荷位 2: 车轮荷载作用以最靠近腹板的 U 形加劲肋靠近腹板的一条边为中心对称施加于正上方。

3) 荷位 3: 车轮荷载作用以最靠近腹板的 U 形加劲肋的远离腹板的一条边为中心对称施加于正上方。

3 种车轮荷载横向作用位置如图 12a 所示,车轮荷载纵向作用位置选取距离模型中心 0, 250, 500mm 3 种情况进行分析,如图 12b 所示。

4.2.2 最不利荷位分析

假定简化模型整体温度为 0°C ,根据车轮荷载简化后的作用形式,铺装结构会受到车轮荷载在横桥向上更大的作用力,因此选用铺装结构表面横向拉应力作为分析时的控制指标。

1) 横向最不利荷位分析

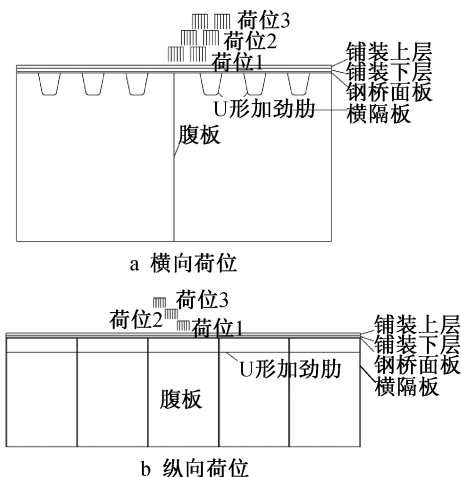


图 12 车轮荷载作用位置

Fig. 12 Position of wheel load

进行横向荷位分析时,假定 3 种横向荷位都作用在纵向荷位的荷位 1,不同横向加载位置下铺装结构表面最大横向拉应力 s_{11} 的计算结果如图 13 所示。

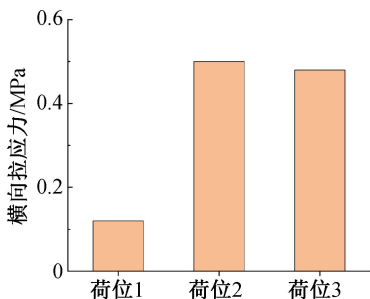


图 13 不同横向荷位铺装结构表面最大横向拉应力 s_{11}

Fig. 13 The maximum transverse tensile stress s_{11} on the surface of pavement structure with different transverse loading positions

由图 13 可知,按上述横向荷位进行加载时,铺装结构表面最大横向拉应力出现在荷位 2 处,达到了 0.5MPa,此时,车轮荷载作用以最靠近腹板的 U 形加劲肋靠近腹板的一条边为中心对称施加于其正上方;由于腹板处的局部刚度较大,相较于 U 肋对于桥面变形有更好的抑制作用,荷位 1 处的横向拉应力明显较小,仅为 0.12MPa;荷位 3 处的横向拉应力则稍小,但也达到了 0.48MPa。

2)纵向最不利荷位分析

根据上述分析,当车轮荷载作用于荷位 2 时,铺装结构表面横向拉应力最大,因此保持荷位 2 不变,分析车轮荷载的纵向最不利位置,不同纵向加载位置下铺装结构表面最大横向拉应力 s_{11} 的计算结果如图 14 所示。

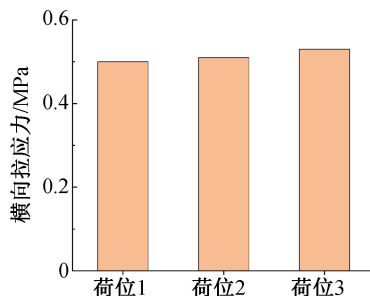


图 14 不同纵向荷位铺装结构表面最大横向拉应力 s_{11}

Fig. 14 The maximum transverse tensile stress s_{11} on the surface of pavement structure with different longitudinal loading positions

由图 14 可知,虽然 3 种荷位铺装层表面最大横向拉应力差距不大,都在 0.5MPa 左右,但荷载位置越靠近横隔板,铺装层表面横向拉应力越大,因此,车辆荷载纵向最不利加载位置为荷位 3。最终确定的横向最不利加载位置为荷位 2,纵向最不利荷位距离模型中心 500mm。

4.2.3 铺装结构力学响应

在最不利荷位进行加载,GA+SMA 铺装结构组合在冬季最大温差条件下受车轮荷载-温度耦合作用 24h 的铺装结构表面拉应力分布规律如图 15 所示。

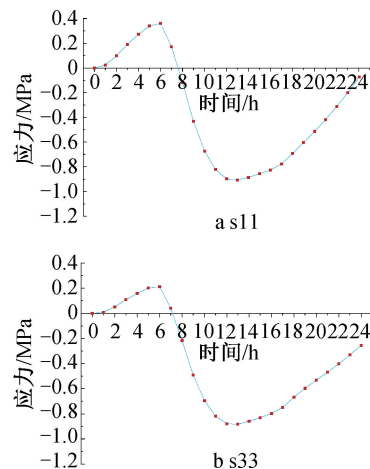


图 15 GA+SMA 铺装组合受车轮荷载-温度作用 24h 表面拉应力

Fig. 15 Surface tensile stress of GA+SMA pavement combination under vehicle load-temperature effect for 24 hours

由图 15 可知,车轮荷载对于铺装结构表面的横向拉应力影响较大,与仅受温度荷载作用相比,铺装结构表面拉应力有所增大,其中横向拉应力 s_{11} 的增幅较大,由 0.23MPa 提升到了 0.36MPa,增大了 56.5%;纵向拉应力 s_{33} 的增幅则较小,由

0.17MPa 提升到了 0.21MPa,仅提升约 23.5%。相比之下车轮荷载对铺装结构表面的横向拉应力影响较大,是桥面铺装表面产生竖向裂缝的主要原因之一,但对铺装结构表面的纵向拉应力的影响则要比全桥变形和温度荷载小得多。在早高峰 06:00—08:00 时间段,金桥路段作为主干路,车流量大,桥面铺装层主要以受拉为主,车辆荷载的反复作用,增加了桥面铺装产生开裂破坏的可能性。

4.3 全桥变形-温度-车轮荷载耦合作用下钢桥面铺装力学响应

4.3.1 铺装结构力学响应

对全桥变形-温度-车轮荷载耦合作用下桥面铺装结构的力学响应进行分析,在简化模型纵桥向两端施加从全桥计算中提取的弯矩,并在最不利荷位施加简化后的车辆荷载,最后以冬季最大温差下的温度场作为预定义场进行分析,铺装结构的力学响应结果如图 16 所示。

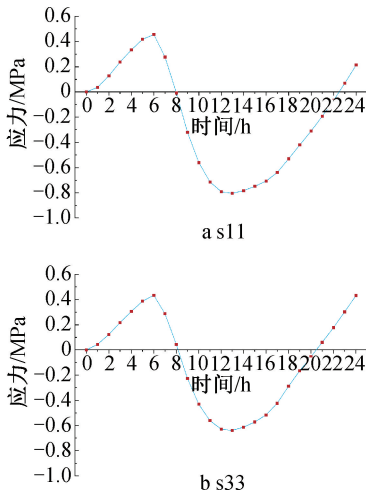


图 16 GA+SMA 铺装组合受全桥变形-温度-车轮荷载作用 24h 表面拉应力

Fig. 16 Surface tensile stress of GA+SMA pavement combination under full bridge deformation-temperature-vehicle load for 24 hours

由图 16 可以看出,与车轮荷载或全桥变形单独与温度荷载耦合作用相比,考虑全桥变形后,钢桥面铺装结构的表面横向拉应力和纵向拉应力均有所提高,最大值分别达到了 0.45MPa 和 0.43MPa,与仅受温度作用相比,分别提高了 95.6% 和 152.9%;除此之外,考虑多种荷载形式耦合作用后铺装结构在夜间也同样表现为受拉力作用,这意味着铺装结构拉压受力的周期变化时间缩短,更易产生由温度引起的破坏。因此与大部分研究仅考虑温度和车辆荷载的耦合作用相比,考虑全桥变形作用可以使钢桥面铺装设计更加合理,更能避免开裂

破坏现象的发生。

4.3.2 不同荷载因素对铺装结构表面应力的影响

铺装层表面开裂的病害时有发生,为更准确地描述不同荷载对开裂病害产生的贡献,有必要分析不同形式的荷载对铺装层表面拉应力的影响。基于贡献率的概念对上文计算结果进行分析,进而探究全桥受力变形、车轮荷载和温度荷载对钢桥面铺装结构表面不同方向拉应力的影响,如图 17 所示。

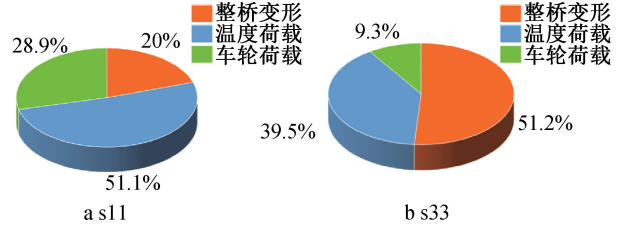


图 17 不同荷载因素对铺装结构表面拉应力的贡献率

Fig. 17 Contribution rate of different load factors to the surface tensile stress of the pavement structure

由图 17 可以看出,无论是纵向拉应力还是横向拉应力,温度荷载都是主要的影响因素,对于横向拉应力的贡献率为 51.1%,对于纵向拉应力的贡献率为 39.5%;而车轮荷载和全桥受力变形对钢桥面铺装表面拉应力的影响则略有不同,其中车轮荷载对于铺装结构表面横向拉应力的贡献较大,达到了 28.9%,对纵向拉应力的贡献只有 9.3%;而全桥受力变形对于铺装结构表面纵向拉应力的贡献较小,仅为 20%,对纵向拉应力的贡献则占一半以上,达到了 51.2%。因此,在分析和设计时考虑整桥变形的作用可以使钢桥面铺装结构受力更加合理,从而减少桥面铺装病害的发生。

为选取更适合呼和浩特地区的铺装组合结构,对前文所提到的 4 种典型铺装结构组合在该地区低温条件下进行受力分析。基于上文计算得到的不同铺装结构组合在冬季最大温差环境下的温度场,计算其在 0.7MPa 接地压力作用下的力学响应。不同铺装结构组合周期性的力学响应如图 18 所示,具体数值如表 7 所示。

4.4 不同铺装类型的钢桥面铺装结构在耦合作用下的力学响应

由图 18 和表 7 可以看出,在低温最大温差的环境条件及多场耦合的作用下,不同铺装结构组合的表面最大横向拉应力 s11 相差不大,均为 0.45MPa 左右,但最大纵向拉应力略有不同,其中双层 AC 的最大纵向拉应力最大,达到了 0.63MPa,而 GA+SMA 的最大纵向拉应力最小,为 0.43MPa。

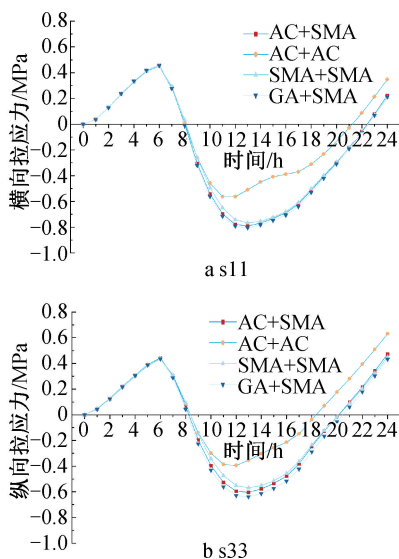


图 18 不同铺装结构组合表面拉应力
Fig. 18 Surface tensile stress of different pavement structure combinations

表 7 不同铺装结构组合表面最大拉应力

Table 7 The maximum tensile stress on the surface of different pavement structure combinations MPa

| 项目 | 铺装结构组合 | | | |
|-----------|--------|--------|---------|--------|
| | AC+AC | GA+SMA | SMA+SMA | AC+SMA |
| s11 最大拉应力 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.45 |
| s33 最大拉应力 | 0.63 | 0.43 | 0.45 | 0.47 |

造成此种现象的原因是铺装结构表面最大横向拉应力主要出现在 06:00 左右,该时间段各铺装结构组合表面温度差和内部温差均较低,铺装结构上层模量相近,由于温度荷载对于铺装结构表面横向拉应力的产生有一半以上的影响,因此各铺装结构组合表面应力差异较小;而铺装结构表面最大纵向拉应力主要出现在 24:00 左右,该时间段各铺装结构组合表面温度差和内部温差相较于 06:00 较大,因此铺装结构表面最大纵向拉应力表现出一定差异。综合来看,GA+SMA 铺装结构组合在低温下具有较好的力学性能。部分研究(如文献[8])推荐单层浇筑式沥青混凝土(GA)作为寒区铺装方案,但本文通过多因素耦合分析表明,GA+SMA 组合在纵向抗拉性能上更具优势,同时验证了分层设计的合理性。

5 结语

1) 钢桥面铺装各层温度场的变化规律与外界气温保持一致,呈现出周期性的变化规律,表面温差冬季可以达到 20~25℃,夏季则可以达到 23~25℃,因此大温差环境下铺装结构的受力极为不利。

2) 当车辆荷载以最靠近腹板的 U 形加劲肋的靠近腹板的一条边为中心对称施加于其正上方,并且靠近腹板时,钢桥面铺装层的受力更为不利;当轮压作用以最靠近腹板的 U 形加劲肋的靠近腹板的一条边为中心对称施加于其正上方时,对于车辙变形的计算最为不利。

3) 大温差环境产生的温度荷载是桥面铺装层受力最主要的影响因素,其对铺装层表面横向和纵向拉应力的贡献率可以分别达到 51.1% 和 39.5%;车辆荷载是铺装层表面产生竖向微裂缝的主要原因之一,其对铺装层表面横向拉应力的贡献率可以达到 28.9%;考虑全桥变形的影响后,铺装层表面受力增加,其对铺装层表面横向和纵向拉应力的贡献率分别为 20% 和 51.2%,同时铺装层表面拉压受力的周期变化时间缩短,更容易引发疲劳破坏,因此考虑全桥变形对铺装层受力是更合理的分析方法,尤其是对易产生横向裂缝的钢桥面铺装结构。在低温环境下,4 种典型铺装层结构组合的表面横向拉应力基本相同,但纵向拉应力有一定区别,综合比较后认为 GA+SMA 铺装结构组合在低温下的力学性能更好。

参考文献:

- [1] 黄卫,刘振清.大跨径钢桥面铺装设计理论与方法研究[J].土木工程学报,2005,38(1):51-59.
HUANG W, LIU Z Q. Research on theory and method of long-span steel bridges deck surfacing design [J]. China civil engineering journal, 2005, 38(1): 51-59.
- [2] 王朝辉,郭瑾,陈宝,等.桥面铺装结构的应用现状与发展[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(12):41-52.
WANG Z H, GUO J, CHEN B, et al. Application status and development of deck pavement structures [J]. Road machinery & construction mechanization, 2017, 34(12): 41-52.
- [3] 向磊.钢桥面铺装层养护管理系统研究[D].南京:东南大学,2016.
XIANG L. Research on the maintenance management system of the steel bridge deck pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [4] ZHANG Y Z, ZHANG M. Structure and behavior of floor system of two super high-speed railway Changjiang composite bridges [J]. Journal of central south university, 2011, 18(2): 542-549.
- [5] LIU P F, RAVEE V, WANG D W, et al. Study of the influence of pavement unevenness on the mechanical response of asphalt pavement by means of the finite element method [J]. Journal of traffic and transportation engineering (english edition), 2018, 5(3): 169-180.
- [6] WU S P, ZHANG G, HAN J, et al. Fatigue performance of bridge deck pavement materials [J]. Journal of Wuhan University of Technology (materials science edition), 2009, 24(2): 318-320.

- [7] 于新,刘云,吴建涛. 混凝土箱梁桥沥青混凝土铺装层温度应力分析[J]. 北京交通大学学报,2011,35(4):99-102,106.
YU X, LIU Y, WU J T. Thermal stress analysis of asphalt concrete pavement on concrete box girder bridge [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(4): 99-102, 106.
- [8] 苏子元. 寒区钢桥面浇注式沥青混凝土低温指标及铺装技术研究[D]. 西安:长安大学,2018.
SU Z Y. Study on steel bridge deck gussasphalt low-temperature index and pavement technology in cold regions [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [9] FAN X Y, LUO R. Experimental study on crack resistance of typical steel-bridge-deck paving materials [J]. Construction and building materials, 2021, 277: 1223-15.
- [10] 逯彦秋,陈宜言,孙占琦. 改善钢桥面铺装层高温作用的有效措施[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(7):115-119.
LU Y Q, CHEN Y Y, SUN Z Q. Effective measures to lower the temperature for steel bridge deck pavement [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(7): 115-119.
- [11] 张利东,曹健,张羽彤,等. 季冻区中小跨径钢桥面铺装的力学响应[J]. 筑路机械与施工机械化,2020,37(6):38-43.
ZHANG L D, CAO J, ZHANG Y T, et al. Mechanical responses of steel deck pavement on small-medium span bridges in seasonally frozen area [J]. Road machinery & construction mechanization, 2020, 37(6): 38-43.
- [12] FAN L, YANG W P, ZHOU D, et al. Temperature distribution and mechanical response of orthotropic steel bridge deck during paving of gussasphalt pavement [J]. International journal of steel structures, 2021, 21(1): 315-328.
- [13] LI H B, SHENG Y P, WANG Q. Study on thermal stresses the extreme temperature in bridge deck pavements using FEM analysis [J]. Advanced materials research, 2012: 1718-1721.
- [14] 钱振东,罗剑,敬森森. 沥青混凝土钢桥面铺装方案受力分析[J]. 中国公路学报,2005,18(2):61-64.
QIAN Z D, LUO J, JING M M. Mechanical analysis of asphalt concrete paving projects on steel bridge deck [J]. China journal of highway and transport, 2005, 18(2): 61-64.
- [15] 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.
QIAN H. Research on mechanical properties of long span suspension bridge deck surfacing subjected to coupling of temperature and load [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [16] 姚通. 基于 ABAQUS 的张承高速公路沥青路面永久变形影响因素分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2020.
YAO T. Analysis on influencing factors of permanent deformation of asphalt pavement of Zhangcheng Expressway based on ABAQUS [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [17] 陈志林. 湿热地区新型钢桥面板复合铺装结构温度场及车辙分析[D]. 长沙:长沙理工大学,2021.
CHEN Z L. Temperature field and rutting analysis of composite pavement structure on new type steel bridge deck in hot and humid area [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2021.
- [18] 马涛,廖公云,黄晓明. Abaqus 有限元软件在道路工程中的应用[M]. 3版. 南京:东南大学出版社,2021.
MA T, LIAO G Y, HUANG X M. Application of Abaqus finite element software in road engineering [M]. 3rd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2021.
- [19] 徐靖涵,郑木莲. 桥面铺装有限元模拟与应用研究进展[J/OL]. 工程力学: 1-25 [2024-04-06].
XU J H, ZHENG M L. Research progress of finite element simulation and application of deck pavement [J/OL]. Engineering mechanics: 1-25 [2024-04-06].
- [20] 严作人. 层状路面体系的温度场分析[J]. 同济大学学报, 1984(3): 76-85.
YAN Z R. Temperature field analysis of layered pavement system [J]. Journal of Tongji University, 1984(3): 76-85.

(上接第 73 页)

- SU W, DU B J, LI E L, et al. A semi-open compartment rear panel steel-concrete composite section: CN213086571U [P]. 2021-04-30.
- [11] 苏伟,杜宝军,李恩良,等. 一种混凝土箱梁斜拉桥锚拉板预埋结构:CN213925814U [P]. 2021-08-10.
SU W, DU B J, LI E L, et al. A pre embedded structure for anchor plates in concrete box girder cable-stayed bridges: CN213925814U [P]. 2021-08-10.
- [12] 李鹏程,陈平. 360 度旋转式大型悬臂提梁机的设计及应用[J]. 安徽建筑,2014,21(3):105-108.
LI P C, CHEN P. Design and application of large cantilever rubber-tired gantry crane with 360 degree [J]. Anhui architecture, 2014, 21(3): 105-108.
- [13] 李的平,文望青,严爱国,等. 大跨度斜拉桥上铺设无砟轨道工程实践[J]. 铁道工程学报,2020,37(10):78-82.
LI D P, WEN W Q, YAN A G, et al. Engineering practice of laying ballastless track on long span cable-stayed bridge [J]. Journal of railway engineering society, 2020, 37(10): 78-82.
- [14] 朱志辉,闫铭铭,李晓光,等. 大跨度斜拉桥—无砟轨道结构变形适应性研究[J]. 中国铁道科学,2019,40(2):16-24.
ZHU Z H, YAN M M, LI X G, et al. Deformation adaptability of long-span cable-stayed bridge and ballastless track structure [J]. China railway science, 2019, 40(2): 16-24.
- [15] 李秋义,张晓江,韦合导. 商合杭高铁裕溪河特大桥铺设无砟轨道关键技术研究[J]. 中国铁路,2020(6):44-51.
LI Q Y, ZHANG X J, WEI H D. Research on the key technology of laying ballastless track on Yuxi River Super Long Bridge of Shangqiu-Hefei-Hangzhou High Speed Railway [J]. China railway, 2020(6): 44-51.