

DOI: 10.7672/sgjs2026080079

寒区大温差环境下钢桥面铺装结构厚度 组合优化研究

陈俊名¹, 付磊¹, 李国栋², 乌兰托亚², 孙晗旭², 刘凯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] 为提高寒区钢桥面铺装的使用性能与寿命, 必须考虑桥面铺装层不同厚度对结构承载能力、耐久性及成本的影响。依托呼和浩特市昭乌达路高架桥金桥路段, 结合寒区大温差气候条件, 建立钢箱梁桥整体模型进行受力分析。基于局部梁端有限元模型, 探究钢桥面铺装结构的温度场分布规律; 同时对比了“GA+SMA”钢桥面铺装层在不同厚度组合情况下的结构温度、力学响应和永久变形。低温环境下改变铺装层厚度对结构表面温度分布有一定影响, 而高温环境下改变铺装层厚度对表面温度几乎没有影响。低温环境下, 增加上面层厚度可以有效减小铺装结构的表面拉应力和层间剪应力, 而下面层厚度的变化对这些应力的影响较小。高温环境下, 增加上面层厚度可以有效减小铺装结构的永久变形, 而下面层厚度的变化对永久变形的影响较小。综合考虑厚度变化对铺装结构温度、力学响应和永久变形的影响, “3cm 铺装下层+4cm 铺装上层”作为推荐的铺装结构厚度组合。

[关键词] 桥梁; 钢桥面; 温度场; 厚度优化; 有限元分析

[中图分类号] U443.33

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0079-10

Optimization Research of Thickness Combination for Steel Bridge Deck Pavement Structure Under Large Temperature Difference in Cold Area

CHEN Junming¹, FU Lei¹, LI Guodong², WULAN Tuoya², SUN Hanxu², LIU Kai²

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

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

Abstract: In order to improve the performance and service life of steel bridge deck pavement for high speed road in cold area, the influence of different thickness of bridge deck pavement layer on structural bearing capacity, durability and construction cost should be considered. Based on the finite element model of local girder segments, this paper investigated the temperature field distribution law of rigid deck pavement structure. At the same time, the structural temperature, mechanical response and permanent deformation of GA+SMA steel bridge deck pavement layer under different thickness combinations were compared. The analysis results showed that the thickness of the paving layer under low temperature environment had certain influence on the surface temperature distribution of the structure, while the thickness of the paving layer under high temperature environment had little effect on the surface temperature. Under low-temperature environment, increasing the thickness of the upper layer could effectively reduce the surface tensile stress and inter layer shear stress of the paving structure, while the change of the thickness of the lower layer has less effect on these stresses. Under high-temperature environment, increasing the thickness of the upper layer can effectively reduce the permanent deformation of the paving structure, while the change of the thickness of the lower layer has less effect on the permanent deformation. Considering the influence of thickness change on temperature, mechanical response and permanent deformation of paving structure, 3cm paving lower layer + 4cm paving upper

layer is recommended as the thickness combination of paving structure.

Keywords: bridges; steel bridge deck; temperature field; thickness optimization; finite element analysis

0 引言

桥面铺装层作为钢箱梁桥上部结构不可或缺的一部分,在桥梁体系中保护钢箱梁不受磨损以及雨水等液体侵蚀,且能够将上部荷载均匀传递至下部钢箱梁上,提高结构整体耐久性与安全性,同时为行驶车辆提供了平整、防滑的行驶路面,保证了行驶车辆的安全与舒适性^[1-2]。内蒙古自治区地处我国北部,冬季往往漫长,多严寒、多寒潮天气,且昼夜温差较大,在多种复合因素的累积下,大多数桥面铺装结构在早期服役期间就会出现不同程度的破坏,轻则使得行驶车辆舒适性下降,降低日间通行效率,重则导致水分渗透桥面板内部,加速钢筋锈蚀与混凝土劣化,削弱桥梁的结构强度^[3]。

目前国内外主要有 3 种铺装体系:环氧沥青混凝土、浇筑式沥青混凝土和双层改性沥青 SMA 铺装体系^[4-5]。在桥面铺装结构温度场与温度应力方面,于新等^[6]通过数值仿真和现场监测相结合的方法,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^[7]利用有限元软件,基于内蒙古地区实际气候调查的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的温度场,尽管没有分析温度应力,但为进一步研究提供了基础。逯彦秋等^[8]对比了开放式箱梁和封闭式箱梁的桥面铺装层温度场,相比之下开放式箱梁铺装层最高温度下降 18℃。张利东等^[9]对季冻区中小跨径的钢桥面铺装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^[10]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的情况。在力学分析与结构设计方面,Li 等^[11]根据连续损伤力学理论,为香港青马大桥开发了一种基于交通荷载影响的疲劳损伤预测模型,提出了一个描述累积损伤过程的动态本构关系式。肖秋明等^[12]对钢桥面铺装的剪切行为进行分析,结果显示在车辆荷载作用下,铺装层与钢面板间会产生显著的剪应力,特别是在轮迹中心周边区域会产生最大的剪应力,从而导致铺装层出现横向推移的病害。钱振东等^[13]通过有限

元模拟,探究了铺装层的模量、厚度及隔板间隙对其受力状态的影响,为南京长江二桥的铺装材料选择、钢箱梁构造和交通布局提供了科学依据。王民等^[14]将车辙试验、剪切试验与有限元建模分析结果结合,建立了 1 个回归模型来预测不同温度、荷载累计作用次数和抗剪性能参数下的车辙深度,预测结果和实测数据高度一致,并在此基础上预估了 2028 年不同温度和轴重组合下的车辙变形量。杨军等^[15]通过不同应力水平下的三轴重复加载试验计算得到用于 ABAQUS 模拟的 SMA 以及 MA 的蠕变模型参数,通过计算 60℃ 条件下荷载作用 1 000s 后的车辙深度,与实测值误差在 14% 以内,说明通过模拟的方法进行相关预测具有较高的可靠度。在特定铺装结构领域,学者往往采用结构试验结合有限元模拟进行分析,丁子豪^[16]基于高性能改性沥青对钢桥面铺装体系的适用性进行分析,认为双层高强沥青混凝土适用于高温地区,低温地区则宜采用双层高弹沥青混凝土,温度均衡的区域则适合使用“下层高弹+上层高强”的铺装结构。Guo 等^[17]通过研究认为,在保持桥面铺装沥青混合料总厚度不变的情况下,调整上层和下层沥青层的厚度对上层铺装的应力影响有限,但对下层铺装的应力则有显著影响。

综上所述,关于钢桥面铺装的研究在国内外虽然取得了较为显著的进展,但仍然存在一定的局限性,特别是在寒冷地区较大温差环境中不同厚度组合的铺装层结构使用性能差异较大。本文以呼和浩特昭乌达高架桥金桥路段为研究对象,结合当地气候条件,探究“GA+SMA”铺装层结构的最优组合厚度,以充分利用材料的力学性能,提高整体结构的使用性能、耐久性与安全性。

1 钢箱梁桥全桥受力分析

1.1 钢箱梁桥全桥模型建立

以昭乌达路高架桥金桥路段为工程背景,依据梁格法在 MIDAS 中建立钢箱梁全桥模型,以确定全桥最不利梁段的位置。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 联为钢箱梁段,桥跨布置为(30+50+35)m,钢箱梁材料为 Q345qE 钢,混凝土调平层采用 C50 混凝土。桥面铺装由上到下依次为 9cm 厚沥青混凝土(下层为浇筑式沥青混凝土,上层为沥青玛蹄脂碎石混合物)铺装、防水

层和 10cm 厚玄武岩纤维混凝土调平层。该桥配重设置于小桩号侧边支点处 1.89m 范围内和大桩号侧边支点处 0.63m 范围内箱梁制作段,压重混凝土采用 C35 混凝土,重 $2.65\text{t}/\text{m}^3$,6 个箱室共计配重分别为 90t 和 30t。

在 MIDAS 中建立钢箱梁全桥模型时,选用变截面 Timoshenko 梁单元来模拟钢箱梁,该单元不仅考虑了轴向和弯曲变形,还计入了剪切变形对刚度矩阵的影响,从而提高了模型的准确性;而对于混凝土板,则采用壳单元(shell elements),通过赋予适当的材料属性,建立了包括沥青混凝土铺装层在内的各层结构,以捕捉其复杂的力学行为。横隔板使用四边形板单元进行建模,考虑到横梁的重要性,用实体单元(solid elements)对其进行了精细模拟。为了简化计算并确保稳定性,钢箱梁与混凝土板之间的栓钉连接被处理为刚性连接,使两者间不存在相对滑移。

在网格划分上,根据变形特征优化了单元尺寸:跨中区域由于变形均匀采用较大单元,而在支座附近等应力变化剧烈的地方则使用较小单元以捕捉局部效应。其中,在进行纵横向梁格划分时,纵向梁格沿桥梁跨度方向划分,在支座和配重区域划分的密度更高,以确保局部受力准确性;横向梁格沿桥梁宽度方向划分,6 个箱室对应 6 个纵向主梁,横向设置间距 2~3m 的横梁以均匀分布荷载并保证横向刚度,桥面铺装和调平层通过等效荷载或附加质量施加。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,并综合考虑了温度变化、风荷载及地震作用等因素的影响,确保了模型与实际情况的高度吻合,实现了高效且精确的有限元分析。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。

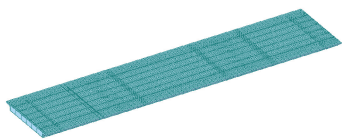


图 1 全桥模型

Fig. 1 The whole bridge model

1.2 全桥力学分析及响应结果

基于全桥模型,对其在中载和偏载等不同工况下的受力进行分析,以主梁竖向负弯矩为控制指标选出最不利的荷载工况,该工况下全桥竖向弯矩包

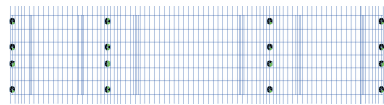


图 2 全桥模型边界条件

Fig. 2 Boundary conditions of the whole bridge model

络图如图 3 所示。

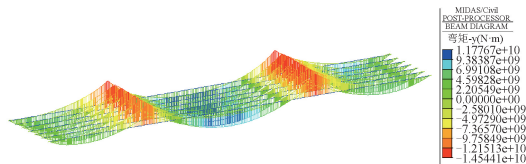


图 3 全桥竖向弯矩

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的作用,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,在进行有限元简化模型分析时,应选取墩顶附近左侧梁段作为最不利梁段,并根据模型大小将其边界受力从全桥模型中提取出来,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,使用 ABAQUS 软件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。有研究表明^[18],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。其中,钢桥面板、腹板、横隔板以及 U 形加劲肋等薄壁结构采用四节点减积分壳单元(S4R)进行模拟,而沥青混凝土铺装层等实体结构则使用八节点减积分实体单元(C3D8R)进行建模。计算模型的几何参数如表 1 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。

表 1 计算模型几何参数

Table 1 Geometric parameters of the calculation model

										mm
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

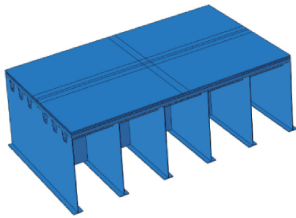


图 4 简化节段计算模型

Fig. 4 Simplified segment calculation model

由于铺装结构使用环境复杂多变,且铺装材料对温度十分敏感,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厚度,如果采用有限元分析软件 ABAQUS 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。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。特别是采用沥青作为防水黏结层的复合铺装结构,其界面热阻效应微乎其微,几乎可以忽略。因此,当使用 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的变化而变化。

2.2 材料属性

为分析钢桥面铺装在外界自然环境影响下的温度场变化规律,以及不同钢桥面铺装结构在不同温度条件下的温度场,需要在有限元模型中考虑铺装材料的热物性参数。通过文献分析的方法总结了常用的钢桥面铺装材料的热物性参数,如表 2 所示。为描述简便,以下分析中将“下层 GA+上层 SMA”表述为“GA+SMA”。

表 2 材料热物性参数

Table 2 Thermal property parameters of materials

参数	GA	SMA	钢桥面板	混凝土
热导率/ [W·(m·K) ⁻¹]	4 680	6 573	209 520	4 680
密度/ (kg·m ⁻³)	2 300	2 400	7 850	2 100
热容量/ [J·(kg·°C) ⁻¹]	942	1 168	460	850
泊松比	0.20	0.35	0.25	0.20
线收缩系数/ °C ⁻¹	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	—	—	—

2.3 边界条件与网格划分

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。

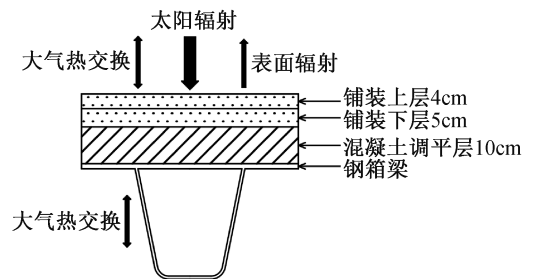


图 5 温度场模拟边界条件

Fig. 5 Boundary conditions for temperature field simulation

图 5 中各类边界条件在有限元模型中的实现方法如下。

1) 在 ABAQUS 中通过 Load 模块调用 DFLUX 子程序来实现桥面铺装上层的上表面受到日照影响而吸收的太阳辐射。

2) 在 ABAQUS 中通过 Interaction 模块调用 FILM 子程序来实现桥面铺装上层的上表面以及桥面板下表面与外界环境的热交换。

3) 在 ABAQUS 中通过 Interaction 模块中的表面辐射来直接定义铺装上层的上表面与外界环境的辐射换热。

为了更精确地模拟实际桥梁的受力状态,本研究对上下铺装层之间、铺装下层与混凝土调平层之间,以及混凝土调平层与钢桥面板之间的接触关系定义为完全绑定 (fully bonded),确保各层间无相对

滑移并准确反映层间的协同工作特性;同时,在节段模型中间底端实施了固定约束,限制所有6个自由度,并且横桥向和纵桥向的自由度也被完全固定,以模拟真实的支座约束情况。此外,对部分加载区域进行了网格局部加密处理,以提高关键部位的分析精度,捕捉应力集中和变形细节,同时依据上文,结合全桥模型提取的边界受力作为额外约束条件。边界条件及网格划分的具体布置如图6所示,确保了模型能够高效且准确地反映桥梁的实际受力行为。

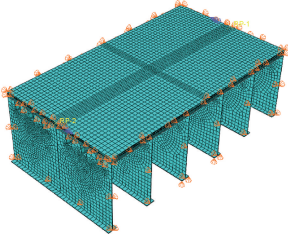


图6 局部梁段有限元模型边界条件

Fig. 6 Boundary conditions of the finite element model for local beam segment

2.4 温度场分析相关理论及计算方法

钢桥面铺装结构的温度场分析主要基于热传导理论,并通过傅里叶定律和三维瞬态导热方程来描述温度随着时间以及空间的变化,如式(1)所示。在实际应用中,桥面温度会受到太阳辐射、气温变化、对流热交换以及桥面有效辐射的影响。太阳辐射使用分段函数式(2)并通过 Fourier 级数式(3)平滑处理;气温变化使用2个正弦函数的线性组合进行模拟,如式(4)所示;有效辐射在进行计算时,常见的做法包括调整路面的散热系数以修正空气温度,或对接收到的太阳辐射强度进行调整,以模拟桥面铺装表面有效辐射的减弱效果。然而,以上两种方法都容易产生较大的误差,因此,使用式(6)直接确定地面有效辐射的边界条件,以更精确地反映实际情况。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = k \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k 为热扩散率, $k=h/(cp)$, h 为导热系数, c 为物质的比热容量, p 为密度; $T=T(x,y,z,t)$,为给定时刻介质在给定点的温度。

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

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。

$$q(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos \frac{k\pi(t - 12)}{12} \quad (3)$$

$$T(t) = T_1 + T_2(a + b) \quad (4)$$

式中: a_0 为一个完整日周期(24h)内太阳辐射强度的平均值; a_k 为太阳辐射强度日变化曲线中频率为 $k/24\text{Hz}$ 的余弦波动分量的幅值; $a = 0.96\sin\omega(t - t_0)$, $b = 0.146\sin 2\omega(t - t_0)$ 。

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

$$h_c = 3.7v + 9.4 \quad (5)$$

$$q_v = \varepsilon(c - d) \quad (6)$$

式中: q_v 为桥面铺装表面的净长波辐射热流密度; $c = (T_r - T_z)^4$, $d = (T_a - T_z)^4$ 。

2.5 钢桥面铺装结构的温度场分析

因此,对钢桥面铺装层温度场进行分析时,需要获取包括有效日照时数、日太阳辐射总量、日平均风速、日最高气温和日最低气温在内的5种气象参数,同时为了能精确到小时分析钢桥面铺装层的温度分布规律,还需要获得当日24h气温数据。以上数据需求通过专业气象数据平台获得呼和浩特地区2022—2023年的气象数据,选取最低气温、冬季最大温差、最高气温、夏季最大温差4种有代表性的气象条件。在此基础上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,得到GA+SMA的钢桥面铺装结构在以上4种温度条件下的温度场分布,如图7所示。

由图7可以看出,在给定的不同温度条件下,钢桥面铺装结构的温度场变化规律其温度变化幅值最大,随着铺装深度的增加,铺装结构内部峰值温度逐渐降低,同时由于混凝土调平层和U肋的保温作用,铺装结构内部极值温度的出现时间与铺装结构表面相比滞后1~2h;在两种低温环境下,铺装结构温度大部分时间都高于当日气温,但表面最低温度与当日最低温度接近。整体温度在04:00达到最低值,14:00达到最高值;06:00时,铺装结构内部温度分布各时刻是均匀的,温差最小。最低温度条件下铺装结构表面最低温度为 -26.05°C ,温差为 19.02°C ,比当日气温温差大 8.34°C 。冬季最大温差条件下铺装结构表面最低温度为 -14.76°C ,温差为 24.56°C ,比当日气温温差大 7.24°C 。呼和浩特地区钢桥面铺装的使用温度最低可以达到 -25°C 以上,低温下铺装层的材料模量会比高温下增加数倍,从而增加铺装结构的受力。因此,该地区易产

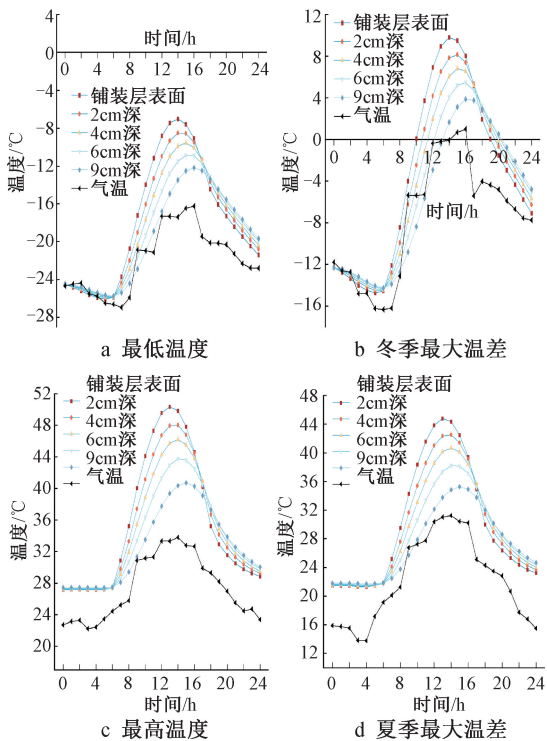


图7 不同温度条件下GA+SMA的温度场分布

Fig.7 Temperature field distribution of GA+SMA under different temperature conditions

生钢桥面铺装开裂等病害;与两种低温环境相比,两种高温环境下,铺装结构的起始温度要高于大气温度,同时铺装结构表面最高温度变化远大于大气温度,最高达到 50.35°C ,高于当日最高气温。最高温度条件下铺装结构表面温差为 23.21°C ,比当日气温温差大 11.65°C ,夏季最大温差条件下铺装结构表面温差为 23.52°C ,比当日气温温差大 4.99°C 。由于高温条件下铺装层弹性模量会随温度的升高而降低,相比于冬季,铺装结构上下层材料的弹性模量差不会产生较大的温度应力,应重点关注高温下铺装结构的永久变形等力学行为,避免产生车辙、推移等病害。

从上述规律可以看出,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°C 以上,夏季达到 50°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。

3 钢桥面铺装层厚度组合优化设计

适宜的厚度组合可以提高钢桥面铺装的使用性能,根据呼和浩特地区钢桥面铺装结构的具体环境需求,而GA+SMA因其具有优异的低温抗开裂和高温抗车辙的能力,因此该铺装结构更适合应用于该地区的钢桥;冬季最大温差环境下,铺装层表面受拉更严重;铺装层表面温度越高,铺装层永久变形量更大。基于以上3点对铺装层结构进行厚度优化设计,参考JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》对单层铺装取3,4,5cm 3种厚度进行正交组合,分析不同厚度组合对铺装层结构温度、力学响应和永久变形3个方面的影响,综合比选以确定最优的铺装结构组合。

3.1 不同厚度组合铺装结构在低温下的温度分布规律和力学响应

不同厚度组合的铺装结构其表面温度在冬季最大温差下的温度分布规律与第2节中所叙述的基本一致,但在温度最值上有一定的差异,不同厚度组合的铺装结构表面最高温度、最低温度与温差如表3所示。

由表3可看出,在低温环境下,当铺装结构下面层厚度一定时,随着上面层厚度的增加,其表面最高温度和最低温度均有所降低;当铺装结构上面层的厚度一定时,随着下面层厚度的增加,其表面最高温度和最低温度同样均有所降低;当铺装层总厚度一定时,下面层厚度越小,铺装结构表面的温差越小。造成上述现象的主要原因是,铺装层厚度的增加能减缓铺装内部热量向下传递的速度,提高铺装结构整体的保温能力,从而降低了铺装结构表面温度的温差;同时GA材料的比热容相比于SMA材料较低,下面层越厚,相同日照辐射量下,铺装结构表面温度更容易升高。

根据低温环境下铺装结构的温度分布规律,分析上下面层厚度变化对铺装结构受力的影响。分析时主要的控制指标为铺装层表面拉应力,由于结构层厚度的变化会对层间剪应力造成一定影响,为避免改变厚度产生较大的层间剪应力,将铺装层上

表3 低温下铺装结构表面温度

Table 3 Surface temperature of pavement structure at low temperature

项目	厚度组合/cm								
	3+3	3+4	3+5	4+3	4+4	4+5	5+3	5+4	5+5
最高温度	10.54	10.13	9.77	10.30	9.98	9.62	9.82	9.80	9.49
最低温度	-14.93	-14.85	-14.78	-14.87	-14.81	-14.74	-14.77	-14.76	-14.71
温差	25.47	24.98	24.55	25.17	24.79	24.36	24.59	24.56	24.20

下层间剪应力也作为控制指标之一,铺装结构力学响应结果如表 4 所示。

表 4 铺装结构在低温下的力学响应

Table 4 Mechanical response of paving structure

at low temperature				
厚度组合/cm	s11	s33	s12	s23
3+3	0.613	0.663	0.34	0.355
3+4	0.452	0.45	0.259	0.312
3+5	0.406	0.408	0.245	0.287
4+3	0.617	0.665	0.344	0.356
4+4	0.451	0.453	0.264	0.313
4+5	0.405	0.406	0.249	0.287
5+3	0.589	0.633	0.349	0.358
5+4	0.455	0.434	0.266	0.311
5+5	0.403	0.404	0.251	0.289

注:s11为铺装层表面横向拉应力,s33为铺装层表面纵向拉应力,s12为铺装上层和下层间的横向剪应力,s23为铺装层上层和下层间的纵向剪应力

由表 4 可看出,当铺装结构下面层厚度一定时,铺装结构表面拉应力和层间剪应力均和上面层厚度呈负相关趋势;当铺装结构上面层厚度一定时,随着下面层厚度的增加,铺装结构表面和层间应力则呈现出不同的变化,为更直观地表述铺装层厚度变化对铺装结构内部应力造成的影响,以铺装结构上面层和下面层的厚度分别达到 4cm 时为例,对各控制指标的变化进行单变量分析,计算结果如图 8 所示;同时,保持铺装层总厚度一定(8cm)进行各控制指标的对比,如图 9 所示。

对比图 8a,8b 可知,当铺装结构上面层厚度一定为 4cm 时,随着下面层厚度的增加,铺装结构表面呈现出纵向拉应力先增加后减少、横向拉应力先减小后增加的规律,铺装层间则呈现出横向剪应力增加、纵向剪应力减小的规律。但实际上各应力变化十分微小,几乎可以忽略不计。对比图 8c,8d 可知,当铺装结构下面层厚度一定为 4cm 时,随着上面层厚度的增加,铺装结构表面拉应力和层间剪应力均有一定程度的降低,但降低幅度随着上面层厚度的增加逐渐减小。当上面层由 3cm 变为 4cm 时,铺装结构表面横向拉应力、纵向拉应力、横向剪应力和纵向剪应力分别下降 26.9%,31.9%,23.3%,12.1%;当上面层厚度由 4cm 变为 5cm 时,其对应的应力分别下降 10.2%,10.4%,5.7%,8.3%。

由图 9 可以看出,3cm+5cm 厚度组合的铺装结构各控制指标均为最低,与 4cm+4cm 的厚度组合相差不大,但 5cm+3cm 的厚度组合各控制指标则明显大于其余两种厚度组合。

综上所述,铺装结构表面拉应力和层间剪应力受上面层厚度的影响较大,相较于改变下面层的厚

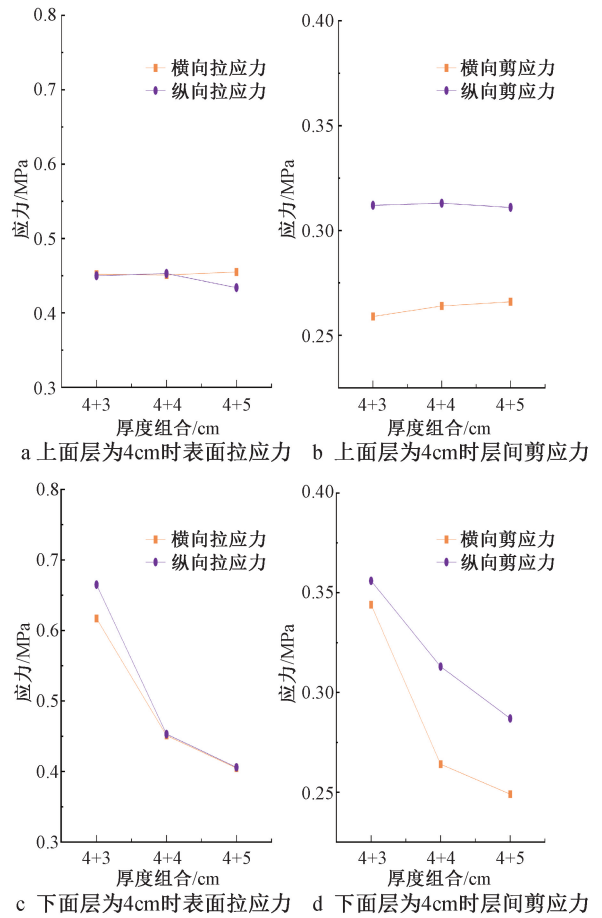


图 8 不同厚度组合的铺装结构在低温下的力学响应
Fig. 8 Mechanical response of pavement structure with different thickness combinations at low temperature

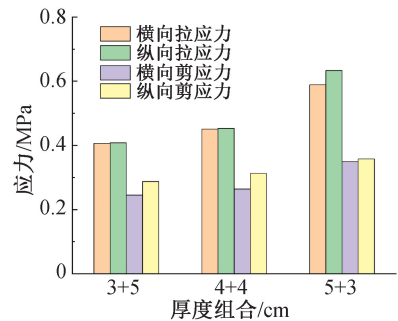


图 9 总厚度相同时铺装结构力学响应
Fig. 9 Mechanical response of pavement structure with the same total thickness

度,适当增加上面层的厚度可以明显改善钢桥面铺装的工作环境,减小铺装结构的表面和层间受力。

3.2 不同厚度组合铺装结构在高温下的温度分布规律和永久变形

对于不同厚度组合的铺装结构,其表面温度在高温环境下的分布规律与第 3 节中所叙述的基本一致,具体最高温度、最低温度和温差如表 5 所示。

由表 5 可以看出,与低温下的铺装结构表面温

度分布规律有一定差异不同,高温下,无论铺装层厚度组合如何变化,铺装结构的表面最高温度、最低温度以及温差基本相同,几乎不存在差异。

作为铺装层的主要材料,沥青混凝土是一种典型的黏弹性材料,在反复的荷载作用下长期受力,它会产生不同类型的应变:弹性、塑性、黏弹性以及黏塑性应变。其中,弹性应变可以在卸载后迅速恢复,部分黏弹性应变也能随时间逐步恢复。然而,塑性应变和黏塑性应变是不可逆的。这种材料在持续应力作用下产生的不可恢复变形称为蠕变,蠕变所致的永久变形被称作蠕变变形。当温度升高时,沥青混凝土的黏弹性属性更加明显,导致在高温环境下,反复的车辆荷载作用会使铺装结构表面形成严重的车辙(即永久变形)。

有很多不同的力学模型可以表征沥青混合料的黏弹性特性,主要有 Burgers 模型、修正的 Burgers 模型、Maxwell 模型、广义 Maxwell 模型、Kelvin 模型等。但根据国内学者的研究,ABAQUS 中自带的 Norton-Bailey 模型能较好地反映沥青混合料的蠕变特性,并具有形式简单、需求参数少的特点,在分析过程中易于收敛,因此选取 Norton-Bailey 模型作为模拟分析钢桥面铺装车辙的应变硬化蠕变模型。

其中路面材料的蠕变变形 ε_{cr} 可以表示为温度 T 、应力 q 和时间 t 3 个变量的联合函数,即有:

$$\varepsilon_{cr} = f(T, q, t) \quad (7)$$

对于应力 q 在分析中保持恒定的情形,ABAQUS 中计算时所用的应变硬化蠕变模型的表达式为:

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = Aq^n t^m \quad (8)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_{cr}$ 为单轴等效蠕变应变率; q 为应力; t 为时间; A, n, m 为模型参数, $A, n > 0, -1 \leq m \leq 0$ 。

对于应力 q 在分析过程中存在变化的场景,ABAQUS 中对于应变硬化蠕变模型的表达式则应改写为:

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = \{Aq^n [(m+1)\bar{\varepsilon}_{cr}]^m\}^{\frac{1}{m+1}} \quad (9)$$

在此基础上,根据高温环境下铺装结构的温度分布规律,计算铺装结构受轮载作用 50 万次后的永久变形,分析上下面层厚度变化对铺装结构永久变形的影响,计算结果如表 6 所示。

由表 6 可看出,总体来说,铺装结构整体变形受上面层厚度影响较大,当上面层厚度一定时,铺装结构车辙深度基本一致,几乎不随下面层厚度的变化而变化;当下面层厚度一定时,铺装结构车辙深度的大小与上面层的厚度呈负相关趋势;当铺装层总厚度一定时,上面层厚度越大,铺装结构车辙深度越小。

为直观地分析铺装层厚度变化对铺装结构在高温下的永久变形的影响,以上面层和下面层的厚度分别达到 4cm 时为例,对铺装结构各控制指标的变化进行单变量分析,结果如图 10 所示,同时保持铺装层总厚度一定(8cm)进行各控制指标的对比,如图 11 所示。

由图 11a 可以看出,当下面层厚度为 4cm 时,铺装结构因为车辆荷载作用而产生的永久变形与上面层厚度呈负相关的趋势,且随着上面层厚度的增加,其下降幅度逐渐减小。具体表现为:当上面层由 3cm 变为 4cm 时,铺装结构隆起变形由 5.066mm 变为 3.794mm,下降 25%,凹陷变形由 6.417mm 变为 5.596mm,下降 12.8%,车辙深度由 11.483mm 变为 9.39mm,下降 18.2%;当上面层由 4cm 变为 5cm 时,铺装结构隆起变形由 3.794mm 变为 2.654mm,下降 30%,凹陷变形由 5.596mm 变为 5.377mm,下降 3.9%,车辙深度由 9.39mm 变为 8.031mm,下降

表 5 高温下铺装结构表面温度

Table 5 Surface temperature of pavement structure at high temperature

℃

项目	厚度组合/cm								
	3+3	3+4	3+5	4+3	4+4	4+5	5+3	5+4	5+5
最高温度	50.50	50.36	50.36	50.55	50.34	50.15	50.15	50.35	50.13
最低温度	27.16	27.16	27.16	27.16	27.15	27.15	27.15	27.14	27.15
温差	23.34	23.20	23.20	23.39	23.19	23.00	23.00	23.21	22.98

表 6 铺装结构在高温下的永久变形

Table 6 Permanent deformation of pavement structure at high temperature

mm

项目	厚度组合/cm								
	3+3	3+4	3+5	4+3	4+4	4+5	5+3	5+4	5+5
隆起	5.098	3.829	2.698	5.066	3.794	2.654	5.161	3.716	2.613
凹陷	6.369	5.544	5.333	6.417	5.596	5.377	6.662	5.503	5.419
车辙深度	11.467	9.373	8.031	11.483	9.390	8.031	11.823	9.219	8.032

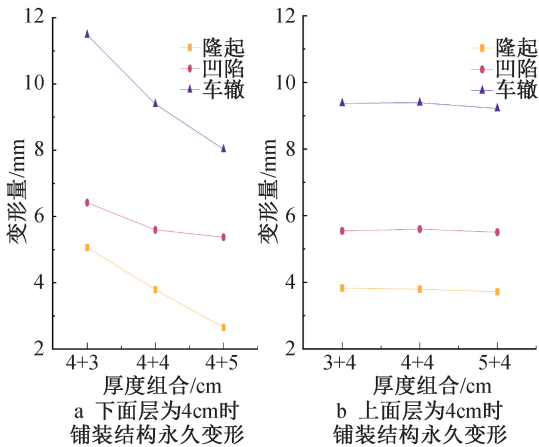


图 10 不同厚度组合的铺装结构在高温下的永久变形

Fig. 10 Permanent deformation of pavement structure with different thickness combinations at high temperature

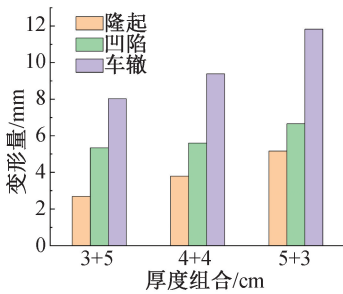


图 11 总厚度相同时铺装结构永久变形

Fig. 11 Permanent deformation of pavement structure when the total thickness is the same

14.5%。由此可见当上面层增加到一定厚度时,铺装结构的隆起变形量依然有大幅度下降的趋势,凹陷变形量改变则较小。由图 11b 可以看出,当上面层厚度一定时,铺装结构表面永久变形无论是凹陷量、隆起量还是车辙深度均无明显变化。

由图 11 可以看出,当铺装层总厚度一致时,上面层厚度越小,铺装结构永久变形量越大,具体表现为:当铺装结构厚度组合为 3cm+5cm 时,与 4cm+4cm 的厚度组合相比,凹陷变形两者相差不大,隆起变形则小 1.105mm,与 5cm+3cm 的厚度组合相比其凹陷变形小 1.329mm,隆起变形小 2.907mm,达到了 1 倍以上;铺装层厚度组合为 4cm+4cm 时,与 5cm+3cm 的厚度组合相比,凹陷变形小 1.066mm,隆起变形则小 1.367mm。由此可见,当铺装层总厚度一定,上面层为 4cm 左右时,铺装结构的凹陷变形向下面层的发展得到控制,继续增加上面层厚度仅能一定程度上减小其隆起变形。

综上所述,铺装结构永久变形同样受上面层厚度影响较大,铺装下层的厚度对铺装结构永久变形的影响有限,综合考虑铺装层表面和层间受力随铺

装层厚度变化的规律,以及增加铺装层厚度对工程造价的影响,本文认为“3cm 下层铺装+4cm 上层铺装”的铺装结构厚度组合是较为合适的。

4 结语

1) 低温环境下,不同厚度组合的铺装结构温度分布有一定差异。当铺装结构下面层厚度一定时,上面层越厚,铺装结构表面温度越低;当铺装结构上面层厚度一定时,下面层越厚,铺装结构表面温度越低;当铺装层总厚度一定时,下面层厚度越小,铺装结构表面的温差越小;而高温环境下改变铺装层厚度则对铺装层表面温度几乎没有影响。

2) 低温环境下,当铺装结构上面层厚度一定时,改变下面层厚度,铺装结构表面拉应力和层间剪应力几乎不发生变化;当铺装结构下面层厚度一定时,上面层厚度越大,铺装结构表面拉应力和层间剪应力越小,随着上面层厚度的增加,结构应力的减小幅度有所放缓;当铺装层总厚度一定时,上面层厚度越大,铺装结构的整体受力越小。

3) 高温环境下,当铺装结构上面层厚度一定时,铺装结构永久变形几乎不随下面层厚度的改变而发生变化;当铺装结构下面层厚度一定时,上面层厚度越大,铺装结构永久变形越小;当铺装层总厚度一定时,上面层厚度越大,铺装结构永久变形量越小。

4) 综合考虑厚度变化对铺装结构温度、力学响应和永久变形的影响,本文选定“3cm 下层铺装+4cm 上层铺装”作为推荐的铺装结构厚度组合。

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] 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.
- [4] 王体宏,时敬涛,李纯,等.钢桥面铺装技术现状与发展[J].石油沥青,2020,34(1):46-49.
WANG T H, SHI J T, LI C, et al. The status and development of steel bridge deck paving technology [J]. Petroleum asphalt, 2020, 34(1): 46-49.
- [5] 高博,王俏,王民,等.国内外典型桥面铺装组合结构性能研究[J].公路交通技术,2011,27(2):43-47.

- GAO B, WANG Q, WANG M, et al. Research on performance of combined structures for typical deck pavement at home and abroad[J]. Technology of highway and transport, 2011, 27(2): 43-47.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] LI Z X, CHAN T H T, KO J M. Fatigue damage model for bridge under traffic loading; application made to Tsing Ma Bridge[J]. Theoretical and applied fracture mechanics, 2001, 35(1): 81-91.
- [12] 肖秋明, 查旭东. 沥青混凝土钢桥面铺装的剪切分析[J]. 中南公路工程, 2000, 25(1): 53-54.
XIAO Q M, ZHA X D. Shear analysis of asphalt concrete steel bridge deck pavement[J]. Central south highway engineering, 2000, 25(1): 53-54.
- [13] 钱振东, 黄卫, 茅荃, 等. 南京长江第二大桥钢桥面铺装层受力分析研究[J]. 公路交通科技, 2001, 18(6): 43-46.
QIAN Z D, HUANG W, MAO Q, et al. Mechanical analysis of Nanjing Second Yangtze River Bridge deck pavement[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2001, 18(6): 43-46.
- [14] 王民, 肖丽, 胡德勇, 等. 钢桥面浇注式+SMA组合结构车辙变形深度预估[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 10-18.
WANG M, XIAO L, HU D Y, et al. Prediction of rutting depth of steel bridge deck pavement composite structure using gussasphalt + SMA[J]. China journal of highway and transport, 2021, 34(6): 10-18.
- [15] 杨军, 朱浩然, 崔娟. 钢桥面铺装混合料三轴重复加载试验变形特性[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(6): 24-28.
YANG J, ZHU H R, CUI J. Deformation properties of asphalt mixtures for steel bridge deck through repeated load triaxial test[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2008, 8(6): 24-28.
- [16] 丁子豪. 基于高性能改性沥青的钢桥面铺装体系研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
DING Z H. Research on the steel bridge deck pavement based on high-performance modified asphalts[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [17] GUO K, LIANG J W, HAN X, et al. Numerical simulation of double deck pavement for long-span cable-stayed bridge[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2020, 568(1): 012001.
- [18] 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.

(上接第45页)

- ZHANG Y Z, WANG Z X, CHEN H, et al. Finite element analysis of stable bearing performance for socket-type disc lock formwork support frame[J]. Construction technology, 2025, 54(20): 85-89.
- [3] 陈达贤, 潘文智, 赵文雁, 等. 双向大跨度悬挑结构拆撑方案对比研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(2): 71-75.
CHEN D X, PAN W Z, ZHAO W Y, et al. Comparative research on two-way large-span cantilever structure dismantling support scheme[J]. Construction technology, 2025, 54(2): 71-75.
- [4] 厉天数, 何一军, 史磊斌, 等. 高空大跨度型钢混凝土组合结构模板支撑体系施工技术[J]. 施工技术, 2014, 43(2): 84-87.
LI T S, HE Y J, SHI L B, et al. Construction of the formwork supports of the large-span steel reinforced concrete composite at high altitude[J]. Construction technology, 2014, 43(2): 84-87.
- [5] 朱为亮. 高层大悬挑混凝土结构施工方案设计与实施[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHU W L. The design and implementation of the construction technology of the large-span cantilevered concrete structure of the high-rise building[D]. Chongqing: Chongqing University 2012.
- [6] 郭正兴, 温科, 陈安英. 盘扣式钢管模板支撑架高效应用技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(17): 67-70, 130.
GUO Z X, WEN K, CHEN A Y. Efficient application technology of disc buckle steel pipe formwork support frame[J]. Construction technology, 2024, 53(17): 67-70, 130