

温度-荷载作用下钢桥面铺装层间黏结性能分析

刘东亮¹, 周维维², 徐韵淳²

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 上海浦东路桥(集团)有限公司, 上海市 201210]

摘要: 钢桥面铺装结构中, 层间黏结性能是桥面板和铺装层协同受力和变形的关键因素。为分析温度-荷载耦合作用下钢桥面铺装层间黏结性能的响应规律, 建立了基于内聚力模型的钢桥面铺装三维有限元仿真模型, 耦合温度场计算对各影响因素进行正交分析, 结果表明: 层间接触状态、温度和垂直荷载为层间剪应力和损伤起始系数的主要影响因素, 设计和管理过程中应重点关注高温重载路段的层间黏结性能; 随抗剪强度衰减, 损伤起始系数加速增大, 工程中应重点警惕层间黏结性能衰减, 尤其是层间抗剪强度和位移参数的同步脆性衰减, 断裂能下降更快, 局部损伤更易发生并扩展。

关键词: 钢桥面; 桥面铺装; 有限元; 层间接触

中图分类号: U443.33; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0057-06

Analysis on Interlayer Bonding Performance of Steel Bridge Deck Pavements under Temperature-Load Action

LIU Dongliang¹, ZHOU Weiwei², XU Yunchun²

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Pudong Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 201210, China]

Abstract: In the steel bridge deck pavement structure, the interlayer bonding performance is a key factor for the coordinated force and deformation of the bridge deck and the pavement layer. To analyze the response rule of interlayer bonding characteristics of steel deck pavement under the temperature-load coupled action, a three-dimensional finite element simulation model of the steel bridge deck pavement based on a cohesion model is established. The orthogonal analysis of each influencing factor is conducted by coupling the temperature field calculation. The results indicate that the interlayer contact condition, temperature and vertical load are the main influencing factors of interlayer shear stress and damage initiation coefficient. In the design and management process, the particular attention should be paid to the interlayer bonding performance of high-temperature and heavy-load sections. With the attenuation of shear strength, the damage initiation coefficient increases at an accelerated rate. In engineering, the particular attention should be paid to the attenuation of interlayer bonding performance, especially the synchronous brittle attenuation of interlayer shear strength and displacement parameters. The fracture energy drops more rapidly, and the local damage is more likely to occur and spread.

Keywords: steel bridge deck; bridge deck pavement; finite element; interlayer contact

0 引言

钢桥面铺装结构具有各向异性, 受力和环境条件复杂, 界面破坏是其最常见且关键的病害之一。钢桥面铺装的层间黏结性能直接决定了荷载传递与结构协调能力。若层间黏结性能不足, 易发生脱层、推移等破坏, 显著降低铺装耐久性^[1-2]。层间黏结性

能是保证钢桥面铺装结构整体性和服役寿命的关键控制因素。

针对层间黏结性能, 使用数值仿真是通用且有效的分析方法^[3-4]。许多研究人员建立钢桥面铺装的局部有限元模型, 采用了不同的层间接触模型假设: (1) 通过设置不同面层或面层与基层之间的摩擦系数, 考虑连续、不完全连续、完全滑移的层间接触状态^[5-8]; (2) 设置一定模量的薄层单元作为层间黏结层^[9]; (3) 通过内聚力模型表示层间黏结性能和层间的损伤和脱黏行为^[10-11]。其中, 内聚力模型可直接与试验结果对应, 且剪切破坏的过程和实测数

收稿日期: 2025-10-16

基金项目: 上海市科技创新行动计划(23DZ1202902; 23DZ1202805); 上海市交通委员会科研项目(JT2023-KY-010)

作者简介: 刘东亮(1996—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路结构研究工作。

据^[12]相匹配,并可描述层间的黏结、损伤及脱黏全过程,因此本研究采用内聚力模型表示钢桥面层间黏结性能。

为明确钢桥面铺装层间黏结性能的响应规律,建立基于内聚力模型的钢桥面铺装三维有限元模型,耦合不同条件下的钢桥面温度场,分析了温度、层间接触状态、荷载作用水平力和铺装材料等不同因素的影响,为钢桥面铺装的设计管理和监测提供参考。

1 有限元模型构建

1.1 结构形式

(1)钢箱梁

钢箱梁有限元模型采用带顶部U型加劲肋的正交异性结构,纵向长度为15 m,横向长度为5.4 m。隔板的间距为3.0 m,桥面板板厚为14 mm,U型加劲肋板厚8 mm,上口宽为300 mm,下口宽170 mm,高为280 mm,间距600 mm。

(2)桥面铺装

钢桥面铺装的结构形式选用双层SMA、SMA+OGFC、双层PRAC三种铺装材料组合形式,结构厚度均为4 cm+4 cm,如表1所示。

表1 钢桥面铺装材料组合表

结构	双层SMA	SMA+OGFC	双层PRAC
上面层	4 cm SMA-10	4 cm OGFC-13	4 cm PRAC-13
下面层	4 cm SMA-13	4 cm SMA-13	4 cm PRAC-13

1.2 材料参数

有限元模型中涉及的材料包括SMA-10、SMA-13、OGFC-13、PRAC-13和钢结构,不同温度条件下的材料弹性力学参数如表2所示。

1.3 层间接触模型

本研究对桥面铺装上下面层之间和钢构件之间的层间接触采用完全接触。

桥面铺装和钢箱梁之间的层间接触状态采用双线性内聚力模型表示,该模型可将剪切试验结果应用于模型中^[11]。内聚力模型采用二次名义应力准则,通过损伤起始系数F和损伤变量D表达层间黏结性能损伤状态,范围均为0~1,如图1和式(1)~(2)所示。由于层间基本为压应力,损伤起始系数约等于剪应力合力与层间抗剪强度的比值。

$$F = \sqrt{\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0}\right)^2}$$

(1)

表2 模型材料力学参数表

混合料类型	密度/(kg·m ⁻³)	温度/°C	E/MPa	泊松比μ
SMA-13 ^[13]	2 400	20	4 562	0.3
		30	2 377	0.3
		40	1 237	0.3
		50	671	0.3
		60	387	0.3
OGFC-13 ^[14]	2 200	20	2 480	0.3
		30	1 286	0.3
		40	737	0.3
		50	463	0.3
		60	314	0.3
SMA-10 ^[13]	2 400	20	4 556	0.3
		30	2 413	0.3
		45	889	0.3
		60	419	0.3
PRAC-13	2 400	4.4	13 446	0.3
		21.1	6 739	0.3
		37.8	2 352	0.3
		54.4	906	0.3
钢结构 ^[11]	7 800		210 000	0.3

$$D = \frac{\delta_1(\delta_{\max} - \delta_0)}{\delta_{\max}(\delta_1 - \delta_0)}$$

(2)

式中:F为二次名义应力准则的损伤起始系数,0~1;<t_n>、t_s、t_t分别为垂直拉应力和两个方向的水平剪应力;t_n⁰、t_s⁰、t_t⁰分别为垂直抗拉强度和两个方向的水平抗剪强度;D为损伤变量,0~1,0表示没有损伤,1表示完全脱黏;δ_{max}为加载过程中最大位移;δ₀和δ₁分别为内聚力模型最大应力和完全脱黏点位移。

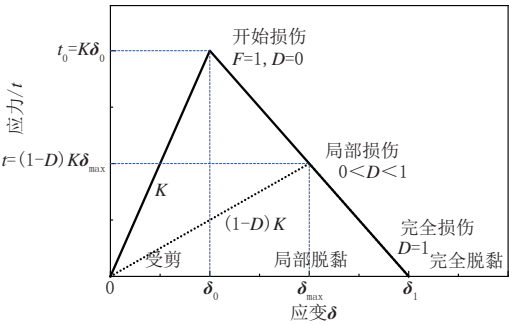


图1 内聚力模型示意图

参考相关研究试验结果^[11],内聚力模型抗剪强度对应位移采用1.5 mm。根据层间接触状态优劣,抗剪强度τ_m分别采用2.0、1.0、0.5 MPa,如表3所示,断裂能为双线性内聚力模型围成的面积。

1.4 边界条件

钢桥面结构有限元模型中,钢桥面的桥面板、横隔板、纵向加劲肋等钢构件采用壳单元(S4),桥面铺装采用三维实体单元(C3D8R)。钢桥面铺装和钢箱

表 3 层间接触内聚力模型参数表

层间接触状态	抗剪强度 τ_m / MPa	损伤起始位移 δ_0 / mm	脱黏位移 δ_f / mm	黏结系数 K / (MPa·mm ⁻¹)	断裂能 / (N·mm ⁻¹)
好	2.0	1.5	3.0	1.33	3.0
中	1.0	1.5	3.0	0.67	1.5
差	0.5	1.5	3.0	0.33	0.75

梁之间的层间黏结,通过面与面之间的相互作用设置为内聚力模型,如图 2 所示。



图 2 钢桥面铺装有限元模型

边界条件设置为:底部完全固定,桥面板两段铰接。分析步采用静力通用分析步,作用时通过预定义场附加温度场计算结果,使材料参数根据温度场的变化进行插值计算。网格在荷载作用位置进行局部加密。

1.5 荷载作用

1.5.1 垂直荷载

车辆荷载参考《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[15],采用公路—I 级汽车荷载的后轴,轴重为 140 kN。轮印采用单轴双轮均布荷载形式,接触面为矩形,长宽分别为 25 cm 和 20 cm,双轮的轮胎中心距为 30 cm,接地压强为 0.7 MPa,单轮的具体轮印参数如表 4 所示^[11]。

表 4 车辆荷载轮印参数

轴重 P /kN	轮印面积 A /cm ²	宽度 b /m	长度 a /m	接地压强 p /MPa	轮胎中心距/ cm
140	500	0.2	0.25	0.7	30

1.5.2 水平荷载

水平荷载采用垂直车辆荷载的比值进行表示,即水平力系数,如式 3 所示。水平力系数采用 0.02、0.2 和 0.5 分别表示正常行驶、正常刹车和紧急刹车 3 种行驶状态。

$$T = f_h P \tag{3}$$

式中: T 为水平荷载; f_h 为水平力系数; P 为垂直荷载。

1.5.3 最不利荷位

由于钢桥面铺装存在正交异性,层间剪切作用和荷载作用位置密切相关,对横向荷位和纵向荷位分别进行分析,待选荷位如图 3 所示。横向荷位分别为轮载中心位于 U 型肋间中点、上口接缝处和 U

型肋中心;纵向荷位分别为轮载中心位于隔板间中心、隔板间 1/4 处、隔板处和荷载侧边与隔板相邻。

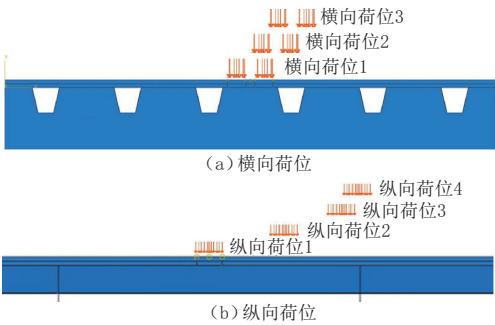


图 3 荷载作用位置

不同荷位计算得到的结果如图 4 所示,所有工况的层间接触均未损伤,采用损伤起始系数确定最不利荷位。

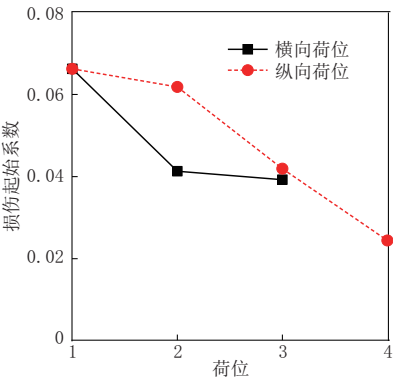


图 4 最不利荷位计算结果

由图 4 可知,最不利荷位为横向荷位 1 和纵向荷位 1,即轮载中心位于 U 型肋间中心和隔板间中心。

2 温度场

2.1 温度场模型

基于上海市实测气象数据,分析钢箱梁和钢桥面的温度场,常温条件对应春秋季节的平均气温,高温条件对应夏季高温天气。温度场条件采用的数据如表 5 所示。各结构层材料的热传递参数如表 6 所示。

表 5 温度场计算参数

天气条件	最低气温/℃	最高气温/℃	平均风速/(m·s ⁻¹)	日辐射/(MJ·m ⁻²)	日照时数/h
常温	15.85	22.01	2.58	13.43	11.36
高温	29.5	39.2	2.62	23.74	13.14

温度场模型考虑了太阳辐射、空气热对流换热和路面有效辐射的作用,沥青铺装发射率采用 0.81。

表6 材料热传递参数

天气状况	比热容/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}$)	导热系数/ ($\text{J}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
OGFC	865	3 960
SMA、PRAC	900	46 80
钢结构	460	216 000

钢箱梁采用壳单元 S4R,桥面铺装层采用三维实体单元 DC3D8。分析步采用热传递分析步,为稳态分析步+瞬态分析步,瞬态分析步时长为 48 h,取后 24 h 为分析结果。

2.2 温度场计算结果

荷载作用位置各结构层界面的温度时程曲线如图 5 所示。

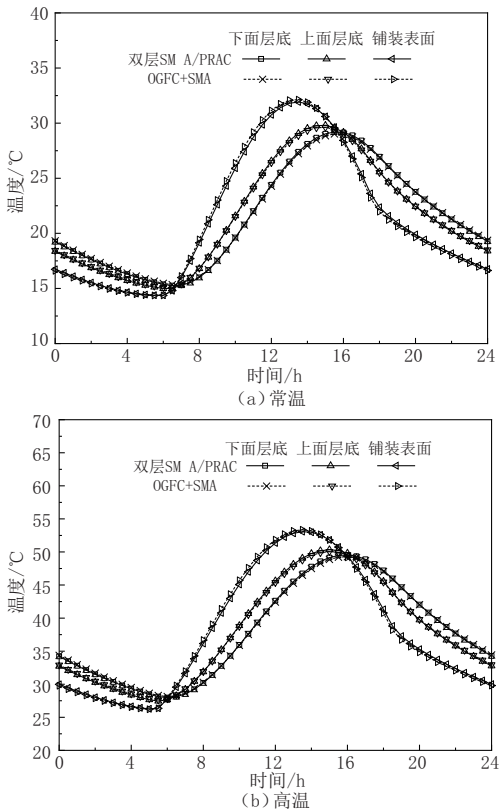


图5 不同结构层界面温度时程曲线

由图 5 可知,铺装材料的差异对温度时程曲线的影响较小,最大差异为 0.64 °C。在 1 d 之中,桥面铺装表面温度在夜间缓慢下降,太阳辐射出现后迅速升温,直到约 13:30 时达到峰值,随后快速下降直到 24:00。由于太阳辐射、空气热对流换热和路面有效辐射的作用主要通过铺装表面进行,铺装表面温度升降时速度最快,且变化先于其他层面,在 6:00—7:00 和 15:30—16:30 时不同结构层面温度发生交叉。同时,由于钢桥面导热系数较高,钢桥面不同铺装层之间的温度曲线和极值差异小于混凝土桥面^[16]。常温和高温条件下,铺装表面、上面层底、下

面层底的最高温度分别为 53.3、50.1、49.3 °C 和 32.1、29.6、29.0 °C。后续层间黏结性能分析采用铺装表面温度最高时的温度场计算。

3 层间黏结性能分析

3.1 正交试验方案

本研究采用正交试验分析各影响因素对钢桥面铺装层间黏结性能的影响。试验影响因素包括铺装材料、温度、垂直荷载、水平荷载和层间抗剪强度,包括 4 个三水平和 1 个两水平因素,采用混合水平正交设计表 L18(2¹×3⁷) 进行正交试验设计,方案如表 7 所示。

表7 正交实验方案表

序号	温度	层间接触	垂直荷载/MPa	水平力	铺装材料
1	高温	好	0.7	0.02	双层 SMA
2	高温	好	0.9	0.2	OGFC+SMA
3	高温	好	1.1	0.5	双层 PRAC
4	高温	中	0.7	0.02	OGFC+SMA
5	高温	中	0.9	0.2	双层 PRAC
6	高温	中	1.1	0.5	双层 SMA
7	高温	差	0.7	0.2	双层 SMA
8	高温	差	0.9	0.5	OGFC+SMA
9	高温	差	1.1	0.02	双层 PRAC
10	常温	好	0.7	0.5	双层 PRAC
11	常温	好	0.9	0.02	双层 SMA
12	常温	好	1.1	0.2	OGFC+SMA
13	常温	中	0.7	0.2	双层 PRAC
14	常温	中	0.9	0.5	双层 SMA
15	常温	中	1.1	0.02	OGFC+SMA
16	常温	差	0.7	0.5	OGFC+SMA
17	常温	差	0.9	0.02	双层 PRAC
18	常温	差	1.1	0.2	双层 SMA

3.2 直观分析

直观分析包括均值分析和极值分析,如表 8 所示,指标包括层间剪应力合力和损伤起始系数。

由表 8 可知,对于层间剪应力指标,层间接触的极差最大,影响程度最大,这是因为较高的层间抗剪强度使层间滑移降低,影响范围缩小,进而剪应力集中增强;影响程度排序为:层间接触>垂直荷载>温度>水平力>铺装材料。对于损伤起始系数,垂直荷载的影响程度最大,影响程度排序为:垂直荷载>温度>层间接触>水平力>铺装材料。损伤起始系数的最不利组合为高温-层间状态差-垂直荷载 1.1 MPa-水平力系数 0.5-铺装材料为 OGFC+SMA。因此,层间接触、温度和荷载为层间黏结的主要控制因素,水平力和铺装材料影响有限,由于层间抗剪强度提高会使

表 8 直观分析表

指标	因素	水平			极差	排序
		1	2	3		
层间剪应力	温度	0.104	0.157		0.053	3
	层间接触	0.071	0.124	0.196	0.126	1
	垂直荷载	0.096	0.131	0.164	0.069	2
	水平力	0.113	0.130	0.149	0.036	4
	铺装材料	0.116	0.134	0.141	0.026	5
损伤起始系数	温度	0.094	0.148		0.054	2
	层间接触	0.142	0.124	0.098	0.043	3
	垂直荷载	0.093	0.123	0.148	0.055	1
	水平力	0.105	0.115	0.144	0.039	4
	铺装材料	0.103	0.130	0.131	0.029	5

剪应力集中,层间黏结性能强化的边际效益存在减弱趋势。

3.3 方差分析

层间黏结性能的方差分析结果如表 9 所示。

表 9 方差分析表

指标	来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F	P
层间剪应力	温度	1	0.012 7	0.012 7	30.27	0.001
	层间接触	2	0.047 7	0.023 8	56.73	0
	垂直荷载	2	0.014 2	0.007 1	16.93	0.001
	水平力	2	0.003 9	0.001 9	4.62	0.046
	铺装材料	2	0.002 1	0.001 1	2.5	0.143
	误差	8	0.003 4	0.000 4		
	合计	17	0.084 0			
损伤起始系数	温度	1	0.013 2	0.013 2	44.57	0
	层间接触	2	0.005 7	0.002 9	9.66	0.007
	垂直荷载	2	0.009 0	0.004 5	15.2	0.002
	水平力	2	0.004 9	0.002 4	8.25	0.011
	铺装材料	2	0.003 1	0.001 6	5.28	0.034
	误差	8	0.002 4	0.000 3		
	合计	17	0.038 2			

由表 9 可知,对于层间剪应力,层间接触的 F 值最大,为主导因素,层间接触、温度、垂直荷载和水平力的 P 值均 <0.05 ,可认为有显著影响。对于损伤起始系数,主导因素为温度,这是由于高温使铺装结构层模量降低,钢桥面-铺装界面承担更多剪应力,使损伤起始系数减小,层间更易发生损伤;所有因素的 P 值均 <0.05 ,均可认为有显著影响。

综上,钢桥面铺装的设计和管理过程中,应重点关注高温重载路段的层间黏结性能,工程上应重点保证界面黏结性能和施工质量。结合试验确定的层间黏结性能内聚力模型,损伤起始系数可作为安全评估和监测指标,为铺装结构设计、施工控制及荷载管理提供量化依据。

3.4 衰减层间黏结性能分析

为进一步明确层间黏结性能衰减情况下的层间接触状态,基于正交试验的损伤起始系数最不利组合,分析两种衰减情况下的损伤起始系数和损伤变量:(1)仅缩减抗剪强度 t^0 ; (2)同步缩减 t^0 、位移 δ_0 和 δ_1 。计算结果如图 6 和图 7 所示,图 7 为损伤起始系数达到 1 的两种工况的损伤变量形态。

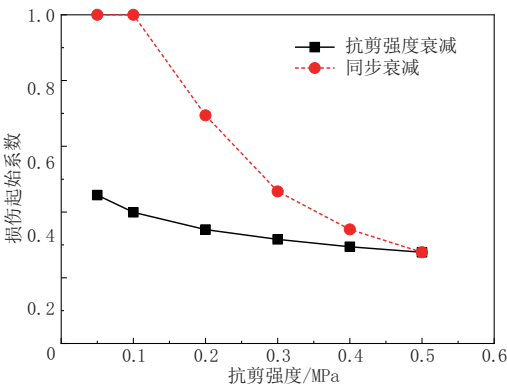


图 6 层间黏结性能衰变的损伤起始系数

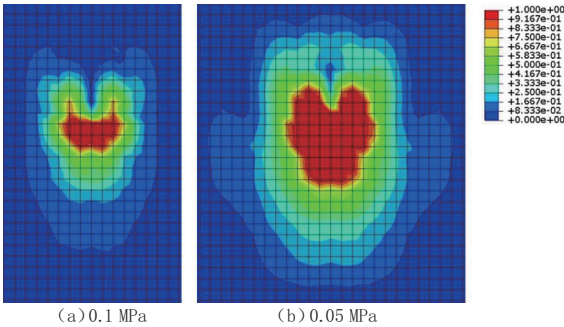


图 7 同步衰减时损伤变量形态

由图 6 可知,随抗剪强度衰减,损伤起始起始并非非线性下降,而是呈一定的对数特征,随抗剪强度衰减,损伤起始系数加速降低。与仅抗剪强度衰减相比,同步衰减的黏结系数 K 不变,而是位移和抗剪强度同步减少,对断裂能的影响更大,损伤起始系数降低幅度更大,直到 0.1 MPa 时,已有局部发生层间黏结性能损伤(见图 7),随层间黏结性能进一步衰减,荷载作用导致的脱黏范围进一步扩大。因此,实际工程中对于层间黏结性能衰减应重点关注,尤其是针对“变脆”的同步衰减情况,避免重复高温重载导致的层间黏结损伤扩大。

4 结 论

本研究针对钢桥面铺装结构建立三维有限元力学仿真模型,基于温度场和内聚力模型,分析了层间接触状态、温度、荷载和铺装材料对层间黏结性能的影响,主要结论如下。

(1)在常温和高温条件下,钢桥面铺装表面最高温度为 $53.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $32.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,铺装结构内部温度差异较小。

(2)层间剪应力和损伤起始系数的主要影响因素为层间接触状态、温度和垂直荷载,在设计和管理过程中,应重点关注高温重载路段的层间黏结性能。

(3)随抗剪强度衰减,损伤起始系数加速增大,工程中应重点警惕层间黏结性能衰减,尤其针对层间抗剪强度和位移参数的同步脆性衰减,断裂能下降更快,局部损伤更易发生并扩展。

参考文献:

- [1] 杨媛媛,苏凯,程斌.上海长江大桥主桥钢桥面铺装维修方案对比分析[J].城市道桥与防洪,2021(3):133-136.
- [2] 彭政玮,马杰灵,湛文涛,等.部分长江大桥钢桥面铺装常见病害分析与处治建议[J].公路与汽运,2021(5):138-141.
- [3] 张德佳.基于病害控制的城市中小跨径钢桥面铺装设计[J].城市道桥与防洪,2016(6):150-152.
- [4] 徐靖涵,郑木莲.桥面铺装有限元模拟与应用研究进展[J].工程力学,2024(41):1-24.
- [5] 吕润华,张海虎.考虑层间接触状态的沥青路面力学性能分析[J].科学技术与工程,2022,22(25):11203-11211.
- [6] 孙志林,黄晓明.考虑层间接触的沥青路面非线性疲劳损伤特性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(6):2385-2389.
- [7] 仲钰,李杰,黄敏.层间接触状态和横向力大小对车辙贡献率的影响[J].武汉工程大学学报,2015,37(2):5-9.
- [8] 朱洋.水泥路面上沥青超薄罩面数值模拟及力学行为实验[D].广州:华南理工大学,2022.
- [9] 卜勇,郑俊秋,姜严旭.沥青混凝土超薄罩面层间黏结强度数值模拟分析[J].市政技术,2017,35(5):26-28.
- [10] 翟志超.考虑不同层间状态的沥青路面温度与荷载作用行为分析[D].长沙:中南大学,2022.
- [11] 程成.基于内聚力模型的钢桥面与铺装界面剪切特性研究[D].南京:东南大学,2014.
- [12] 林丽蓉,高一鸣,胡小弟.实测轮载下层间接触条件对沥青路面的力学影响分析[J].中外公路,2014,34(2):93-97.
- [13] 莫正华,吕建锋,胡德勇,等.钢桥面铺装材料的动态模量及其主曲线研究[J].中国公路,2021(1):98-99.
- [14] 李金凤.多孔沥青混合料的空隙分布特征及声学行为特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
- [15] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [16] 黄晓清.高架快速路排水沥青铺装车辙变形分析[J].上海公路,2025(1):7-11.