

基于内聚力模型的UHPC-沥青磨耗层层间损伤演化数值模拟

戴克学

兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年11月15日; 录用日期: 2025年12月6日; 发布日期: 2025年12月19日

摘要

UHPC层与沥青磨耗层层间有效粘结对延长钢桥面铺装层使用寿命, 避免脱层、滑移等病害十分重要。依托实体工程项目, 建立了正交异性钢桥面局部铺装结构, 基于内聚力模型和Abaqus二次开发Usdflld子程序, 研究车辆循环荷载作用下引起层间损伤的主要因素, 层间损伤的最不利位置和层间疲劳损伤演化规律。模拟结果表明: 车辆循环荷载作用下层间损伤由横桥向和纵桥向的剪应力引起, 剪应力最大值在轮载作用区域边缘, 为0.184 MPa, 层间损伤的最不利位置和剪应力最大值分布区域一致, 层间疲劳损伤累积以基于断裂能的损伤演化准则计算, 以界面刚度退化率D表征, 随着车辆循环荷载作用次数增加, D以非线性方式不断增大, 在损伤演化后期, D的变化速率加快, 当荷载循环次数为1106万次时D增大至1, 层间粘结失效。最后利用修正的Chaboche模型对数值模拟结果非线性拟合, 得到层间疲劳损伤演化方程。

关键词

钢桥面铺装, 损伤演化, 内聚力模型, Usdflld子程序

Numerical Simulation of Interfacial Damage Evolution in UHPC-Asphalt Wearing Course Based on Cohesive Zone Model

Kexue Dai

College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: November 15, 2025; accepted: December 6, 2025; published: December 19, 2025

Abstract

Effective interfacial bonding between the UHPC layer and asphalt wearing course is essential for

文章引用: 戴克学. 基于内聚力模型的 UHPC-沥青磨耗层层间损伤演化数值模拟[J]. 土木工程, 2025, 14(12): 3002-3013. DOI: 10.12677/hjce.2025.1412322

extending the service life of steel bridge deck pavements and preventing distresses such as delamination and slippage. Based on an actual construction project, a localized pavement structure was established on an orthotropic steel bridge deck. Through the cohesive zone model and Abaqus user-defined field subroutine (Usdfl) development, this research investigates: Primary contributing factors to interfacial damage under vehicular cyclic loading, critical damage-prone locations at the interface and evolution mechanisms of interfacial fatigue damage. Simulation results demonstrate: Interfacial damage is primarily induced by transverse and longitudinal shear stresses under vehicular cyclic loading. The peak shear stress (0.184 MPa) occurs at the periphery of the wheel load application zone. Critical interfacial damage locations coincide with the maximum shear stress distribution areas. Interfacial fatigue damage accumulation follows a fracture energy-based evolution criterion, characterized by the stiffness degradation rate D . D increases nonlinearly with increasing loading cycles, exhibiting accelerated deterioration in later evolution stages. At 11.06 million loading cycles, D reaches unity, indicating complete interfacial bonding failure. Finally, the modified Chaboche model was employed to perform nonlinear fitting of the numerical simulation results, yielding the interfacial fatigue damage evolution equation.

Keywords

Steel Deck Pavement, Damage Evolution, Cohesive Zone Model, User-Defined Field Subroutine

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，“钢-UHPC - 沥青磨耗层”刚性铺装技术在我国得到发展和应用，越来越多的钢桥梁将超高性能混凝土(UHPC)材料应用于钢桥面铺装层[1]，UHPC 的引入显著提升了钢桥面板的刚度，有效减少了钢桥面板的疲劳开裂问题。但是由于 UHPC 材料组分不包含粗骨料，成型后表面致密且光滑，其材料组成、力学性能、表面特征与沥青混凝土存在较大的差异，在荷载的长期作用下，UHPC 与沥青面层间的有效粘结是非常重要的，它对于防止钢桥面铺装层发生脱层、滑移等病害，延长钢桥面铺装层使用寿命具有重要意义。

对于 UHPC 和沥青磨耗层层间粘结问题，学者们进行了大量研究，Chen [2]等基于拉拔和剪切试验，通过不同的表面处理方式，评价 UHPC 和沥青混凝土层层间粘结性能，然后利用神经网络进行预测，预测值与实测值相关性较高，研究结果为提高 UHPC 与沥青面层的粘结性能，从而提高桥梁耐久性具有重要意义。王民[3]等对 UHPC 表面糙化处理，选用不同的粘结剂在不同温度条件下分析 UHPC 与沥青磨耗层层间粘结强度、剪切强度变化规律，研究结果为解决层间粘结问题提供了一种有效途径。刘幕[4]等对寒冷地区 UHPC 层与沥青面层粘结失效导致沥青面层发生滑移或者脱落展开研究，在不同试验条件下分析层间抗剪强度变化规律，同时采用数值模拟对试验结果验证，研究结果可为延长钢桥面使用寿命提供理论依据。湖南大学李嘉[5] [6]及其团队针对 UHPC 和沥青磨耗层层间粘结问题，研究了层间粘结和剪切机理、层间粘结和剪切强度影响因素以及层间静力性能和疲劳寿命的相关性，研究成果对于 UHPC 和沥青磨耗层间有效粘结提供了重要的理论价值。现有研究主要关注在静力荷载作用下 UHPC 与沥青磨耗层间粘结和剪切性能变化，对于循环荷载作用下层间粘结失效问题研究较少。

因此，本文基于内聚力模型和 Usdfl 子程序，对 UHPC 层和沥青磨耗层在循环荷载作用下层间粘结失效问题展开研究，分析层间损伤演化规律，以期为钢桥面铺装层维护提供理论依据。

2. 内聚力模型

2.1. 内聚力理论

内聚力模型(Cohesive Zone Model, CZM)是一种用于描述材料界面分离行为的力学模型[7] [8]，广泛应用于复合材料、粘结结构等领域的界面力学分析，内聚力模型通过损伤的累积反应材料微裂纹的发展，并以损伤的形式表征。该理论通过引入内聚力界面单元，模拟界面在拉伸和剪切载荷作用下的损伤和断裂过程。内聚力模型的核心在于定义界面单元的应力-位移关系，通常包括裂纹萌生、裂纹扩展和断裂阶段，见图1。在有限元分析中，内聚力模型可以有效地捕捉界面裂纹的萌生和扩展过程，从而为预测结构失效提供重要依据。

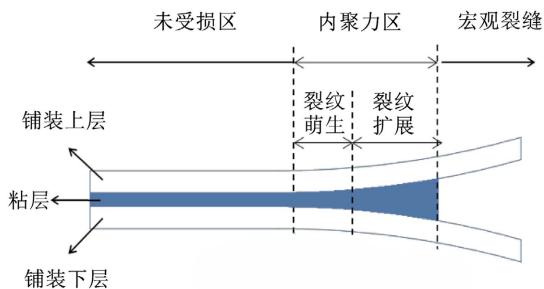


Figure 1. Schematic diagram of cohesion model
图 1. 内聚力模型示意图

2.2. 内聚力本构模型

内聚力本构模型有多种形式，目前最常用的是双线性本构模型，是由 Wittmann [9]等基于连续损伤力学开发的，它通过两个线性阶段来模拟界面的初始线性变形、非线性损伤和最终断裂过程[10]，见图2所示。

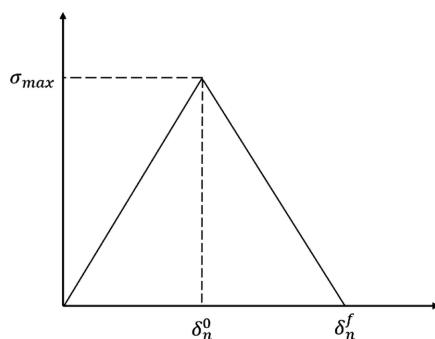


Figure 2. Bilinear constitutive model
图 2. 双线性本构模型

双线性本构模型控制方程为：

$$T_n = \begin{cases} \frac{\sigma_{\max}}{\delta_n^0} \delta & \left(\delta \leq \delta_n^0 \right) \\ \delta_{\max} \frac{\delta_n^f - \delta}{\delta_n^f - \delta_n^0} & \left(\delta > \delta_n^0 \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_n 为法向或切向的应力值; σ_{\max} 为法向或切向最大应力; δ_n^0 为法向或切向的最大应力所对应的位移; δ_n^f 为法向或切向的最大位移。

2.3. 内聚力损伤准则

内聚力损伤准则是内聚力模型中用于判断界面单元是否发生损伤和断裂的标准。本文利用二次名义应力准则和基于能量的损伤演化准则判定界面单元是否发生损伤, 二次名义应力准则考虑各个方向应力的耦合效应, 各方向名义应力率的平方和等于 1 时损伤开始萌生, 能够更准确地模拟界面损伤, 控制方程为:

$$\left\{\frac{t_n}{t_n^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_s}{t_s^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_t}{t_t^0}\right\}^2 = 1 \quad (2)$$

式中: t_n 为名义主应力即法向应力; t_s 、 t_t 为第一、第二剪切方向的应力; t_n^0 、 t_s^0 、 t_t^0 为各方向名义应力最大值。

基于能量的损伤演化准则以断裂能为控制指标, 断裂能在数值上等于应力 - 位移曲线与坐标轴所形成图形的面积, 基于断裂能的损伤演化准则控制方程如下:

$$\left\{\frac{G_n}{G_n^c}\right\}^\alpha + \left\{\frac{G_s}{G_s^c}\right\}^\alpha + \left\{\frac{G_t}{G_t^c}\right\}^\alpha = 1 \quad (3)$$

式中: G_n 为法向应力做的功; G_s 为第一剪切方向应力做的功; G_t 为第二剪切方向应力做的功; G_n^c 为界面失效时的法向断裂能; G_s^c 为界面失效时第一剪切方向的断裂能; G_t^c 为界面失效时第二剪切方向的断裂能; α 为混合型裂纹扩展的相关性系数。

2.4. 内聚力参数

内聚力模型的准确性取决于合理的参数设置, 包括界面刚度、断裂能和最大应力。界面刚度决定了初始加载阶段界面的应力 - 位移关系, 断裂能反映界面抵抗裂纹扩展的能力, 最大应力则是界面单元失效的临界应力值。本文中内聚力参数从文献[11] [12]得到, 具体参数见表 1。

Table 1. Cohesion parameters
表 1. 内聚力参数表

界面方向	强度(MPa)	刚度(N·mm ⁻³)	断裂能(N·mm ⁻¹)
法向	1.12	1.77	1.84
切向	1.75	2.11	2.78

2.5. Usfld 子程序开发

Usfld 子程序是一种用户自定义场变量子程序, 可用于在 Abaqus 的模拟过程中动态地更新场变量, 这些场变量可以代表材料的损伤状态或其他与损伤演化相关的参数, 适用于材料属性随多物理场变化的场景[13]。Usfld 的核心原理是通过用户编程动态控制积分点场变量, 使其能够灵活响应局部状态(应力、应变、温度等), 并直接或间接影响材料属性。这种机制突破了 Abaqus 内置材料模型的限制, 为复杂多场耦合问题提供了有效的解决方案。在 UHPC-沥青面层层间损伤演化的模拟中, 通过 Usfld 子程序, 可以根据当前的应力状态、位移以及预设的损伤准则来计算损伤系数 D, 并实时更新材料属性, 从而反映材料在荷载作用下的损伤演化过程。具体实现过程中, 首先需要在 Abaqus 的输入文件中定义相应的场变量, 并在材料属性中将这些场变量与材料的力学性能参数相关联。然后, 在 Usfld 子程序中编写计算逻

辑, 根据当前的应力、位移以及损伤准则来计算场变量的值。每次迭代计算时, Abaqus 都会调用 Usdflld 子程序来更新场变量的值, 从而实现损伤演化的模拟, Usdflld 子程序运算流程图见图 3。

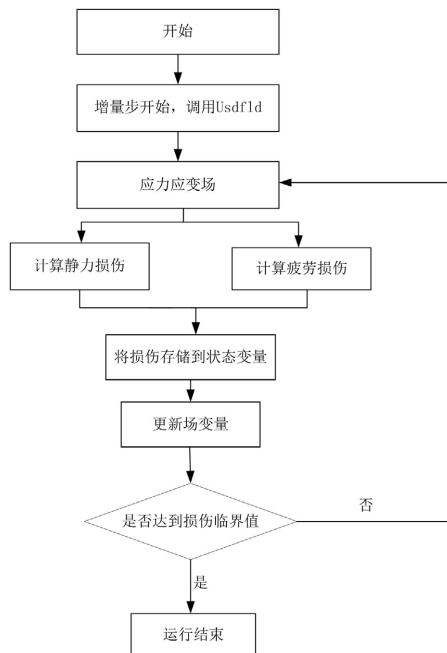


Figure 3. Usdflld subroutine operation flowchart

图 3. Usdflld 子程序运算流程图

本文利用 Fortran 编写 Usdflld 子程序, 通过 Fortran 语言的高效计算能力和灵活性, 实现了对 UHPC-沥青面层层间损伤演化的精确模拟。在子程序的编写过程中, 充分考虑了材料的非线性特性和复杂的应力状态, 确保了模拟结果的准确性和可靠性。

3. 层间损伤演化模拟

3.1. 工程背景

本文依托山东某大跨径斜拉桥, 钢桥面铺装结构为: 主桥钢箱梁行车道范围内桥面铺装自上而下依次为 4 cm 厚 SMA-13 细粒式改性沥青混凝土 + 粘结层 + 6 cm 超高性能混凝土, 主桥采用分两幅设计, 桥面宽 2×37.5 m; 单幅横向布置为 1 m (防异物侵限监测系统) + 0.55 m (SS 级防撞护栏) + 4 m (非机动车道) + 0.6 m (SX 级防撞护栏) + 7.5 m (辅助车道) + 0.6 m (SS 级防撞护栏) + 7 m (锚索区) + 0.6 m (SS 级防撞护栏) + 12.0 m (快速车道) + 0.6 m (SX 级防撞护栏) + 1.5 m 缓冲带 + 0.55 m (SS 级防撞护栏) + 1 m (防异物侵限监测系统) = 37.5 m。

3.2. 有限元建模

利用 Abaqus 有限元软件, 建立带有铺装结构的正交异性钢桥面局部模型, 模型尺寸及边界条件参考文献[14], 如图 4 所示, 模型主要由钢桥面板、UHPC 层、SMA 层横隔板、U 形肋、栓钉组成。其中局部钢桥面板的尺寸为: 3 m (长) \times 1.2 m (宽) \times 16 mm (厚), 横向设有两条间距为 0.6 m 的 U 形加劲肋, 纵向设有两条间距 3 m 的横隔板, 栓钉规格 10 \times 40 mm, 横向间距 30 cm, 纵向间距 20 cm, 铺装结构为上层 SMA (4 cm) + 下层 UHPC (6 cm)。

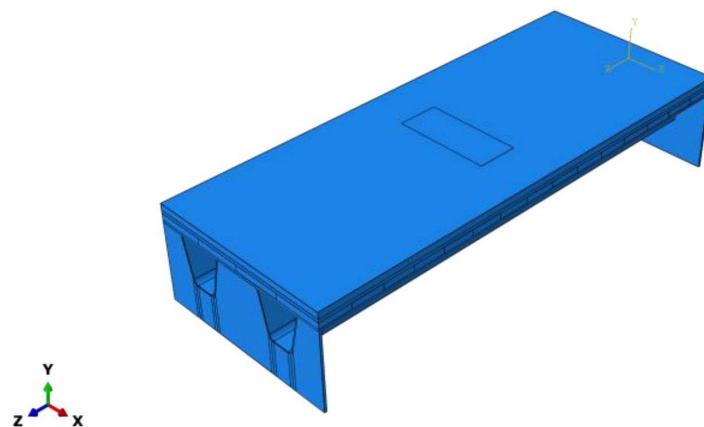


Figure 4. Schematic diagram of finite element model
图 4. 有限元模型示意图

模型中各项材料参数见表 2。

Table 2. Material parameters table
表 2. 材料参数表

材料	SMA-13	UHPC	钢板
密度(kg/m^3)	2450	2750	7850
弹性模量(MPa)	629	44,500	206,000
泊松比	0.25	0.2	0.3

为了模拟 UHPC-沥青面层间损伤演化，需要在 UHPC 与沥青面层之间建立一层零厚度粘结层，粘结层截面类型为 cohesive，单元类型为内聚力单元(COH3D8)。

Abaqus 中零厚度内聚力单元层构建方式为：在 mesh 模块，利用 edit mesh 中 create solid layers 功能，选择模型上面层的底面，构建厚度为 0.1 mm 的单元组，然后再利用 edit mesh 中 node 功能，选择厚度为 0.1 mm 单元组的上表面节点，向下偏移 0.1 mm 得到零厚度单元层，见图 5，图中红色区域为所建立的内聚力单元层。

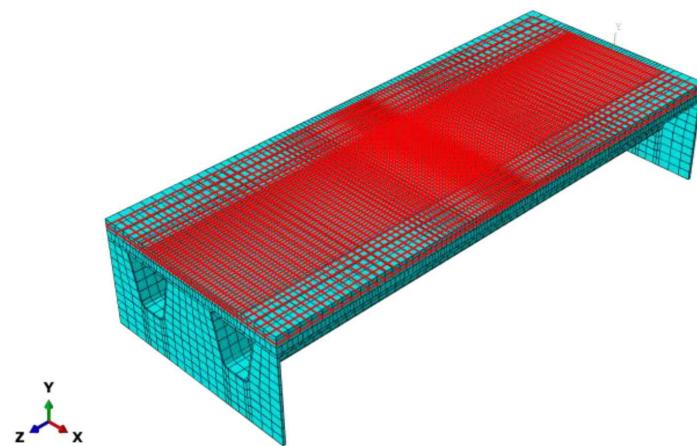


Figure 5. Schematic diagram of zero thickness cohesive element layer
图 5. 零厚度内聚力单元层示意图

根据《公路桥涵设计通用规范 JTG-2015》，选择标准轴载(BZZ-100)作为模拟荷载，荷载大小为 0.7 MPa。车辆荷载通过轮胎与路面的接触面传递，荷载作用面积为 0.6×0.25 m，车辆横向加载见图 6。

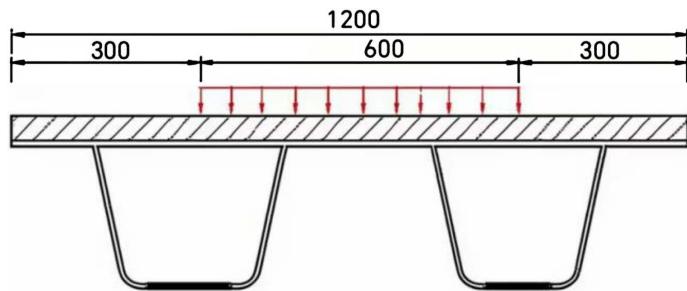


Figure 6. Schematic diagram of lateral loading of vehicle load
图 6. 车辆荷载横向加载示意图

3.3. 层间剪应力分析

在车辆荷载作用下，层间剪应力是评估铺装层性能的重要指标之一，也是铺装层间发生损伤的主要原因，首先分析静力荷载作用下层间剪应力在横向和纵向的分布特征，横桥向和纵桥向层间剪应力分布云图见图 7 和图 8。

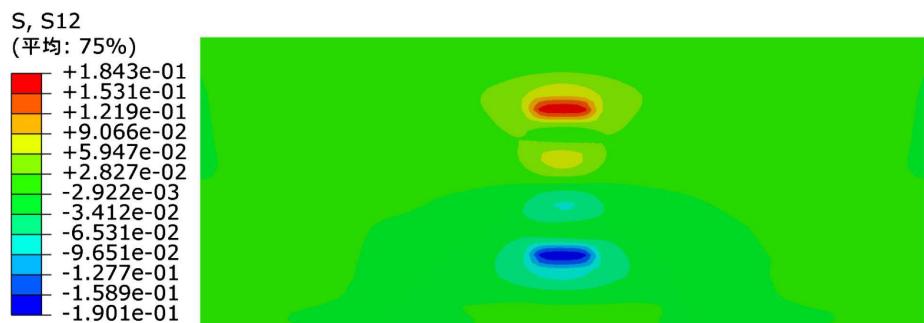


Figure 7. Cross bridge shear stress cloud map
图 7. 横桥向剪应力云图

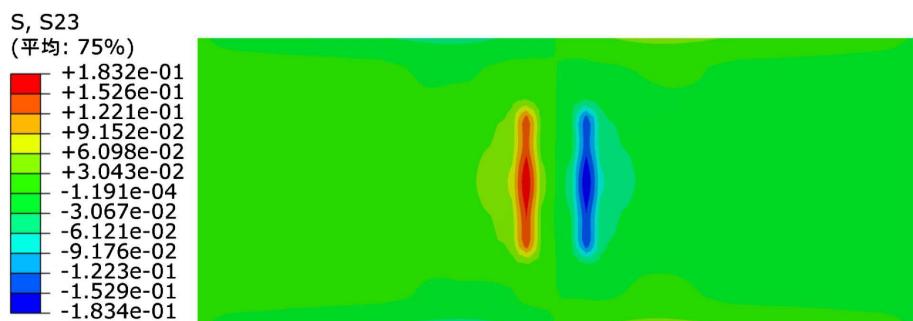
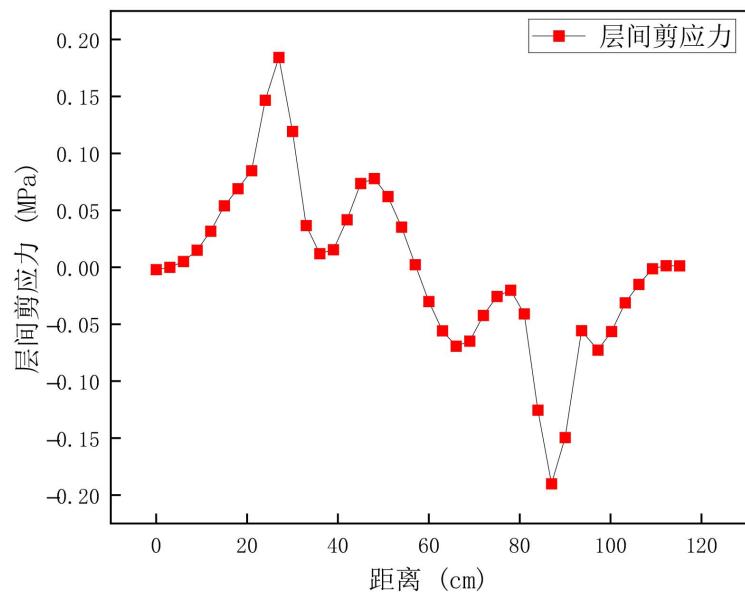
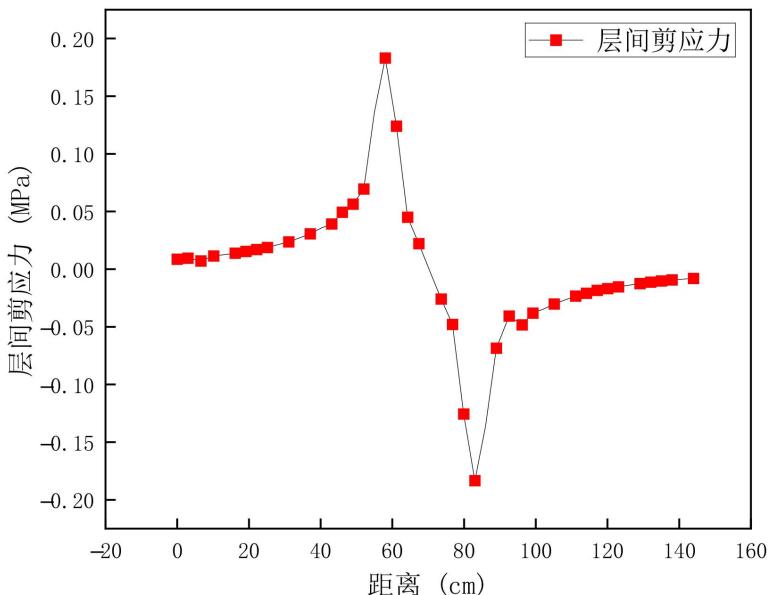


Figure 8. Longitudinal shear stress cloud map of the bridge
图 8. 纵桥向剪应力云图

由图 7 和图 8 可知，车辆荷载作用下剪应力主要分布在轮载边缘，根据剪应力云图得到横桥向和纵桥向剪应力的变化规律，见图 9 和图 10。

**Figure 9.** Variation law of transverse bridge shear stress**图 9.** 横桥向剪应力变化规律**Figure 10.** Variation law of longitudinal bridge shear stress**图 10.** 纵桥向剪应力变化规律

车辆荷载作用下横桥向和纵桥向层间剪应力沿加载中心对称分布,在加载中心两侧剪应力大小相等,方向相反,剪应力最不利位置为加载区域边缘,应力峰值为 0.184 MPa。

3.4. 层间损伤分布

通过层间剪应力的分析可知,层间损伤可能发生的位置是加载区域边缘,但是损伤的程度是未知的,内聚力模型可以有效的解决这个问题,内聚力模型以损伤度的形式直观的表征 UHPC-沥青面层层间损伤程度,车辆荷载作用下由剪应力引起的损伤程度和分布情况见图 11。

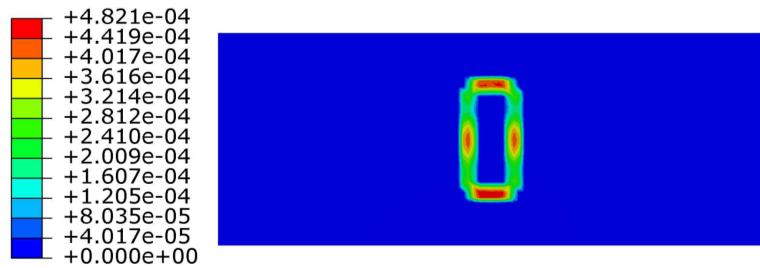
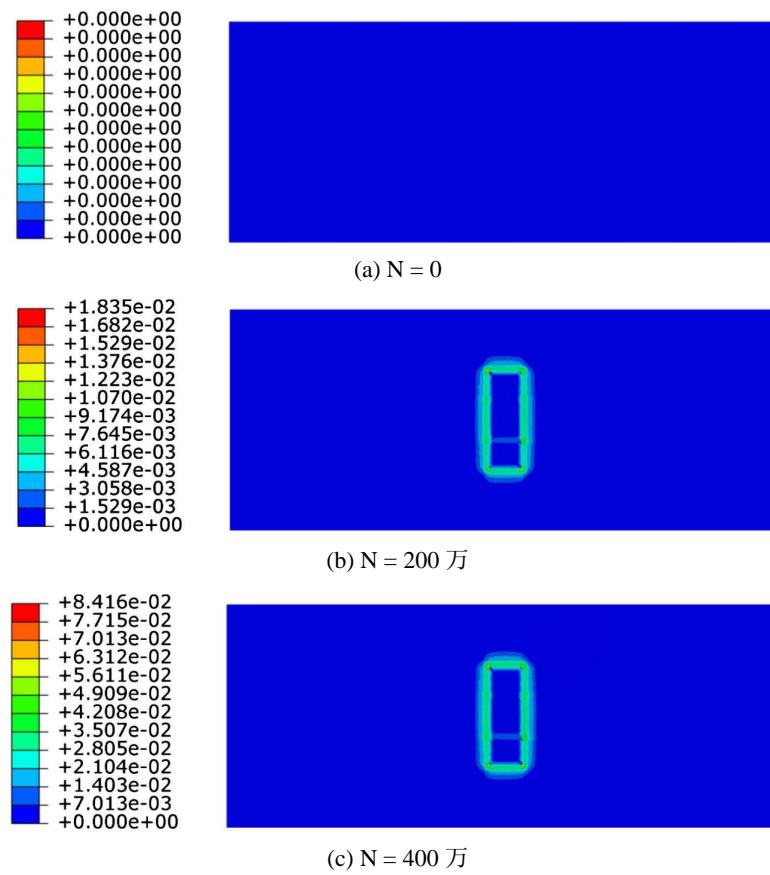


Figure 11. Distribution of interlayer damage under vehicle load
图 11. 车辆荷载作用下层间损伤分布

车辆荷载作用下 UHPC-沥青面层层间损伤主要分布在加载区域边缘，与层间剪应力的分布一致，进一步说明了层间损伤由剪应力引起，层间损伤是由基于能量的损伤演化准则即界面断裂能计算得到，采用损伤度 D 表示， D 最大值为 0.00048。损伤度的大小反映了界面单元损伤的程度，损伤度越大，说明界面单元的损伤越严重。

3.5. 疲劳损伤演化

疲劳损伤是指在重复荷载作用下，材料内部逐渐积累损伤，最终导致材料失效的过程。为了研究车辆荷载循环作用下层间损伤演化规律，采用所开发的 Usdflld 子程序，将子程序接入 Abaqus，通过子程序的迭代计算，得到车辆循环荷载作用下损伤度 D 随荷载循环次数的演化规律，不同循环次数下的损伤度 D 的变化情况见图 12。



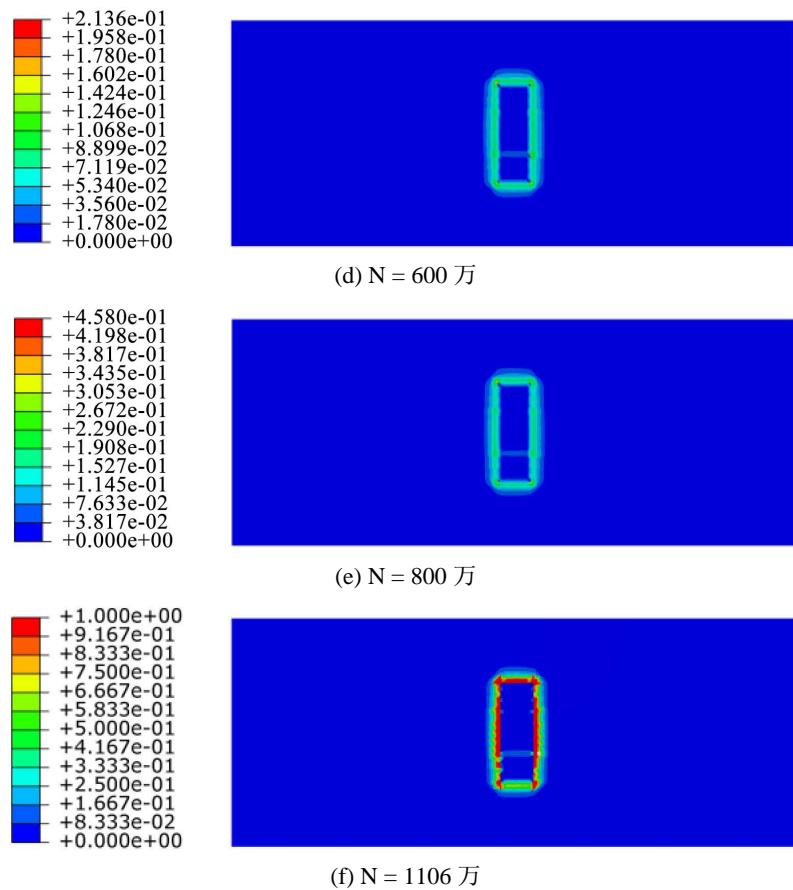


Figure 12. Cloud diagram of interlayer damage evolution under vehicle load
图 12. 车辆荷载作用下层间损伤演化云图

由图 12 可知, 车辆循环荷载作用下, UHPC-沥青面层层间损伤仅发生在加载区域边缘, 在其他区域不会产生损伤, 根据损伤演化云图, 得到 UHPC-沥青面层层间损伤度 D 随荷载循环次数增加的变化曲线见图 13。

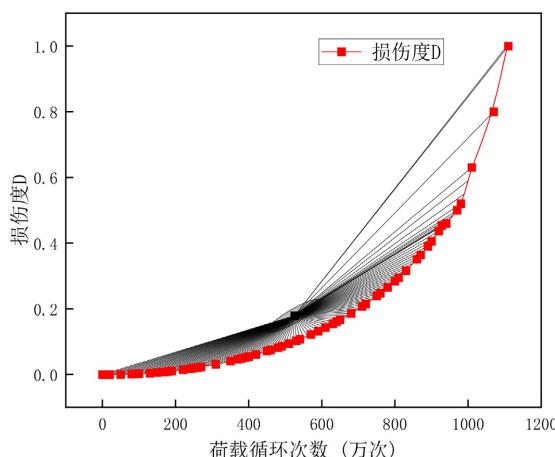


Figure 13. Damage evolution curve under vehicle load
图 13. 车辆荷载作用下损伤演化曲线

由图 13 可知, UHPC-沥青面层层间损伤是非线性损伤, 随着荷载循环次数的增加, 损伤度 D 逐渐增大, 说明在循环荷载作用下, UHPC-沥青面层层间损伤逐渐累积。在损伤演化初期, D 缓慢增大, 随着循环次数的增加, 层间损伤累积, D 增长速度逐渐加快, 当损伤度 D 为 1 时, 界面单元失效。车辆荷载作用下, 最不利位置在 1106 万次循环荷载作用后, UHPC-沥青面层层间发生粘结失效, 此时, 可以认为该位置已达到其疲劳寿命。

3.6. 非线性疲劳损伤拟合

在疲劳损伤力学中, 可用于表征非线性损伤特征的演化方程为 Chaboche 模型[15] [16], 其控制方程为:

$$D(N) = 1 - \left(1 - \frac{N}{N_f}\right)^\beta \quad (4)$$

式中: N_f 为损伤失效循环次数; β 为非线性累积损伤参数。

本文将 Chaboche 模型修正[17], 基于修正后的模型对车辆荷载作用下层间损伤演化曲线进行非线性拟合, 利用 Origin 软件通过自定义函数实现, 经过不断迭代计算最终达到收敛, 拟合结果见图 14。

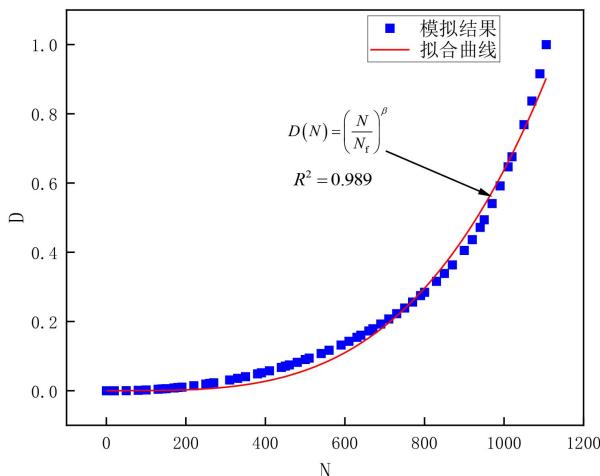


Figure 14. Nonlinear fitting curve
图 14. 非线性拟合曲线

非线性拟合结果表明, 修正后的模型与模拟结果具有较强的相关性, 得到非线性疲劳损伤演化方程为

$$D(N) = \left(\frac{N}{N_f}\right)^\beta \quad (5)$$

其中, 非线性疲劳损伤累积参数 β 的值为 3.4417。

4. 讨论

本文基于内聚力模型对 UHPC 与沥青混凝土层间粘结失效过程进行模拟, 以损伤度的形式进行表征, 研究结果对于钢桥面铺装层使用寿命具有一定指导意义。但是在研究过程中仍然存在很多不足, 首先在实际钢桥面铺装层服役过程中, 环境温度对层间粘结性能有很大影响, 从而导致内聚力参数是变化的,

本文未考虑温度变化影响。其次本文模拟时各项材料性能为定值, 实际服役过程中随着荷载的长期作用, 各项材料性能会逐渐退化, 使得层间受力状态发生变化。最后, 本文中模型尺寸较小, 模型是否存在边界效应影响有待进一步研究。因此, 后续可进一步优化所开发的子程序, 同时考虑温度效应和材料性能退化的影响, 使得模拟结果更接近于实际状态。

5. 结论

本文对车辆循环荷载作用下 UHPC-沥青面层层间损伤演化进行数值模拟, 得出以下结论:

- (1) 车辆荷载作用下层间剪应力沿加载中心对称分布, 剪应力在加载中心两侧大小相等, 方向相反, 剪应力最大值在轮载边缘, 最大值 0.184 MPa。
- (2) 层间疲劳损伤演化是非线性的, 损伤演化初期, 损伤度 D 缓慢增大, 随着荷载循环次数增加, 损伤不断累积, 损伤速率增大, 当荷载循环次数达到 1106 万次时, 层间损伤失效。
- (3) 基于修正的 Chaboche 模型, 对数值模拟结果进行非线性拟合, 拟合曲线与模拟结果高度吻合, 最终建立了层间疲劳损伤演化方程。

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2024 [J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 1-160.
- [2] Lu, Z., Feng, Z., Yao, D., Li, X., Jiao, X. and Zheng, K. (2021) Bonding Performance between Ultra-High Performance Concrete and Asphalt Pavement Layer. *Construction and Building Materials*, **312**, Article ID: 125375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125375>
- [3] 王民, 李志祥, 郑睿涵, 等. 钢桥面沥青磨耗层-UHPC 界面联结性能提升技术[J]. 应用化工, 2025, 54(5): 1360-1364.
- [4] 刘幕, 栾志千, 徐海宏, 等. 寒区钢桥面超高性能混凝土铺装层层间剪切强度研究[J]. 河北工业科技, 2023, 40(5): 374-380.
- [5] 夏杨嘉玲, 李嘉, 王万鹏, 等. UHPC-沥青面层粘结性能试验研究[J]. 公路工程, 2019, 44(3): 166-169, 239.
- [6] 李嘉, 董亮, 夏杨嘉玲, 等. UUPC-沥青磨耗层环氧界面剂粘结性能研究[J]. 公路工程, 2020, 45(5): 51-55.
- [7] 谢浩, 陈思斌, 黄永亮, 等. 基于内聚力模型的网格尺寸及参数敏感性研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(6): 111-118, 128.
- [8] Chen, Z., Dai, Y. and Liu, Y. (2023) Numerical Study on High-Cycle Fatigue Crack Growth of Sinusoidal Interface Based on Cyclic Cohesive Zone Model. *International Journal of Fatigue*, **174**, Article ID: 107748. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107748>
- [9] Wittmann, F.H., Rokugo, K., Brühwiler, E., Mihashi, H. and Simonin, P. (1988) Fracture Energy and Strain Softening of Concrete as Determined by Means of Compact Tension Specimens. *Materials and Structures*, **21**, 21-32. <https://doi.org/10.1007/bf02472525>
- [10] 常留红, 李飘, 郑景琦, 等. 周期性荷载作用下混凝土-环氧涂层界面裂纹损伤演化机制[J]. 西安理工大学学报, 2023: 1-11.
- [11] 李嘉, 夏杨嘉玲, 王万鹏, 等. 超高性能轻型组合桥面 UHPC-沥青面层层间黏结性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 11-20.
- [12] 李嘉, 陈思远, 黄聪, 等. UHPC-SMA 层间静力性能与疲劳寿命相联性[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 14-22.
- [13] Wang, S., Li, D., Li, Z., Liu, J., Gong, S. and Li, G. (2021) A Rate-Dependent Model and Its User Subroutine for Cohesive Element Method to Investigate Propagation and Branching Behavior of Dynamic Brittle Crack. *Computers and Geotechnics*, **136**, Article ID: 104233. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104233>
- [14] Jiang, J., Leng, J., Zhang, J. and Guo, J. (2022) Interfacial Behavior of the Steel-UHPC Composite Deck with Toughened Epoxy Bonding. *Frontiers in Materials*, **9**, Article ID: 859214. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.859214>
- [15] 曹宽. 荷载和变温综合作用下沥青路面非线性疲劳损伤研究[J]. 北方交通, 2018(10): 53-56, 60.
- [16] 薛彦卿, 丁锋, 陈峰林, 等. 路用水泥混凝土疲劳损伤的可靠度分析[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6): 1009-1014.
- [17] 邓燃. 市政道路沥青路面疲劳特性及耐久性评价研究[J]. 江西建材, 2024(1): 226-228.