

基于有限元方法的桥面铺装结构应力响应分析

白涛¹, 陈宝¹, 阮新¹, 万晨光^{2,3}

(1. 河南交通投资集团有限公司商丘分公司, 河南 商丘 476000;

2. 河南省中工设计研究院集团股份有限公司, 河南 郑州 450000;

3. 河南省固废材料道路工程循环利用重点实验室, 河南 郑州 450000)

摘要:为明确水平荷载与垂直荷载耦合作用下水泥混凝土桥面铺装的力学响应规律,为防水黏结层技术要求制定提供理论支撑,采用 ABAQUS 有限元软件建立 T 形梁桥面铺装三维模型,系统分析水平力系数对铺装层间剪应力、层内剪应力、拉应力和拉应变的影响。结果表明:水平荷载对铺装层间纵向剪切影响显著,远大于横向;车辆加减速及紧急刹车使沥青铺装上层层内最大剪应力增幅达 94%,且最大剪应力峰值从 4 cm 深度上移至铺装层顶面;沥青铺装上层纵向拉应力、拉应变分别增幅 433%、335%,成为横向裂缝始发区域,研究揭示了水平荷载对桥面铺装受力状态的恶化机制。

关键词:桥梁工程;应力响应规律;有限元分析;荷载耦合;防水黏结层

中图分类号: U416.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2026)02-0015-08

0 引言

随着中国交通基础设施的快速发展,水泥混凝土桥梁已成为公路交通网络的核心组成部分,截至 2025 年底全国公路桥梁总量达 114.25 万座,其中水泥混凝土桥梁占比超过 90%^[1]。这类桥梁的桥面铺装多采用沥青混合料与混凝土桥面板的组合体系,两者材料性质差异显著,需通过防水黏结层实现刚-柔过渡,其性能直接决定桥面铺装的整体性和耐久性^[2-3]。然而,重载交通日益严重、车辆加减速及紧急刹车产生的水平荷载,导致桥面铺装频繁出现推移、拥包、裂缝和水损坏等病害,不仅影响行车安全舒适,还会加速桥梁结构腐蚀,大幅增加养护成本^[4-5]。

防水黏结层作为桥面铺装的关键功能层,需同时满足防水隔离和层间黏结双重需求,其相关研究已受到广泛关注。在防水黏结层材料方面,刘云等^[6]通过室内剪切试验和拉拔试验,对橡胶沥青、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(Styrene-Butadiene-Styrene, SBS)改性沥青、SBS 改性乳化沥青、涂膜类防水黏结层材料等水泥混凝土桥面防水黏结层材料进行了黏结性能研究,得出用 SBS 改性沥青和橡胶沥青作为防水黏结层是混凝土箱梁桥防水黏结层材料首选;Kong et al^[7]制备水性环氧树脂乳化沥青,明确 20% 环氧树脂掺量与 0.9 kg/m² 喷涂量为最优参数,其固化后“蜂窝状”结构显著提升层间黏结与抗剪性能,温度敏感性最低;Cen et al^[8]通过水浸、盐蚀、老化试验,确定 GY、HRB、RH 3 种材料最优涂布量分别为 0.9、0.7、1.2 kg/m²,证实 GY 材料在抗腐蚀、抗老化及水稳定性方面表现最优;Shi et al^[9]采用接枝共聚法制备新型水性环氧树脂,优化接枝温度(110 ℃)与时间(2 h),当环氧树脂掺量超 40% 时,材料拉拔强度与存储稳定性显著提升。在力学性能方面,何丽红等^[10]通过 Ansys 有限元分析,明确防水黏结层最大剪应力随铺装层厚度、模量增大而降低,优选模量为 100~300 MPa,且车辆制动与超载会使剪应力增幅达 112.8%;李云良等^[11]利用数值模拟的方法,分析了不同条件下的桥面铺装层间受剪状态;王虎等^[12]通过水平冲击

收稿日期:2026-02-09 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20260022

基金项目:2024 年度郑州市优秀青年科技人才项目(桥面铺装防水黏结层黏结质量轻量化智能检测设备开发);“科创中原”行动青年人才托举工程项目(2023HYTP013);河南省交通运输厅科技项目(2020J-2-10)

作者简介:白涛(1980—),男,高级工程师,研究方向为公路与桥梁。E-mail:251661145@qq.com

白涛,陈宝,阮新,等.基于有限元方法的桥面铺装结构应力响应分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2026,39(2):15-22.

荷载加载,分析了不同沥青层厚度、不同黏结层厚度以及不同接触黏聚力下铺装层的力学响应,但对层间结构的抗剪性能状况未做研究;Pokorski et al^[13]、Raab et al^[14]将室内试验与力学分析相结合,对铺装结构层间剪切特性进行了分析,然而其仅限于将力学分析中层间最大剪应力与层间极限抗剪强度进行简单对比,并未对层间极限抗剪强度的影响因素进行分析。

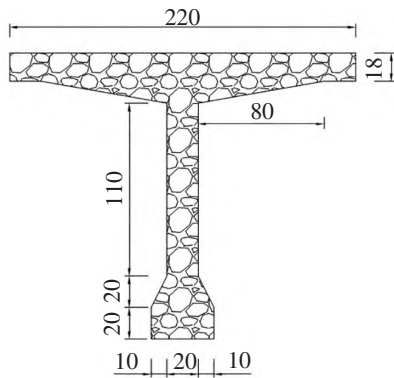
总体来看,国内研究多聚焦单一荷载作用下的材料性能和力学性能评价,对水平荷载与垂直荷载耦合作用下铺装结构的力学响应规律挖掘不够深入,导致防水黏结层技术要求缺乏针对性,难以有效指导工程实践^[15-16]。基于上述背景,现围绕水泥混凝土桥面防水黏结层的关键功能与技术要求展开研究。通过分析桥面铺装常见病害成因,明确防水黏结层的核心功能需求;采用有限元方法系统探究车辆荷载作用下铺装结构的层间剪应力、层内剪应力、拉应力及拉应变等力学响应特征,揭示水平荷载对铺装结构受力状态的影响规律。研究成果可为防水黏结材料选型、性能评价及施工质量控制提供理论支撑,对提升水泥混凝土桥面铺装的耐久性和安全性具有重要工程意义。

1 模型建立与基本假设

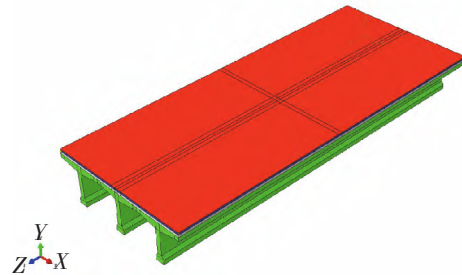
1.1 模型建立

1.1.1 模型尺寸

为探究桥面铺装防水黏结层功能,利用 ABAQUS 有限元软件对桥面铺装结构层间受力状态进行静、动载分析。模型采用工程常用 T 形截面梁,如图 1(a)所示,横向采用 3 片梁并联的形式,纵向长度 16 m,如图 1(b)所示。



(a) T 形梁截面尺寸(单位:cm)



(b) T 形梁三维模型

图 1 T 形梁模型

1.1.2 材料参数

桥面铺装采用 3 层结构设计,自上而下依次为沥青混合料上层、沥青混合料下层及水泥混凝土调平层。各部分具体参数取值详见表 1。

表 1 结构层基本参数

结构参数	材料	模量/MPa	泊松比	厚度/cm
沥青上面层	AC-13C 沥青混合料	1 200	0.35	4
沥青下面层	AC-20C 沥青混合料	1 400	0.35	6
混凝土调平层	C30 水泥混凝土	30 000	0.20	10
主梁	C50 水泥混凝土	36 000	0.20	

1.1.3 边界条件及网格划分

桥面结构左右两侧设置为水平约束,梁底马蹄的下表面设置为水平和垂直约束。对主梁结构采用 0.4 m×0.4 m×0.4 m 的网格密度划分,铺装层采用不等间距划分,荷载区域网格尺寸为 0.01 m×0.01 m×0.01 m,如图 2 所示。

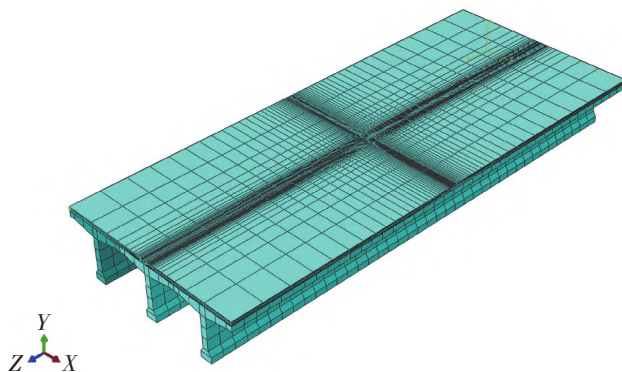


图 2 T 形梁桥梁铺装网格模型

1.1.4 作用荷载

《公路沥青混凝土设计规范》(JTG D50—2017)规定,道路路面设计荷载采用双圆荷载,标准轴载为 BZZ-100,当量圆直径为 21.3 cm,接触面均布压力为 0.707 MPa。在实际路面研究过程中,学者往往将荷载形式简化为正方形或者长方形。一般来说,简化后的荷载应当满足 2 个条件:①荷载简化后方便研究计算;②荷载简化后可以反映实际的轮载作用形式和接地压力。本研究中,将圆形荷载换算成边长为 19.2 cm 和 18.6 cm 的长方形均布荷载^[17],具体转化过程如图 3(a)所示。为简化计算,在不考虑荷载施加位置对铺装结构层力学响应影响的前提下,双矩形垂直均布荷载的中心位置与 T 形梁中轴线对齐,具体布置形式如图 3(b)所示。

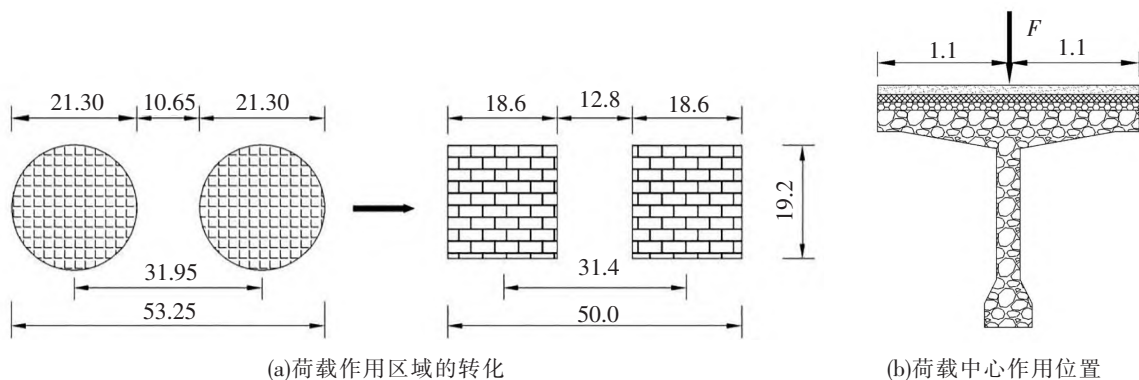


图 3 作用荷载模型(单位:cm)

车辆在行驶过程中,桥面铺装层会受到水平方向的作用力,主要包括行驶过程中的摩擦力和水平制动力等。其中车辆的水平制动力对铺装层的受力影响较大。

根据现行设计规范,水平制动荷载为

$$F = fP \quad (1)$$

式中, P 为车辆轮压; f 为水平力系数, $f = 0.2$ 时表示缓慢制动,适用于停车场、交叉口等缓慢制动处, $f = 0.5$ 时表示紧急制动。

现保持表 1 各结构层参数不变,水平力系数 f 依次选取 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5,计算不同水平力系数 f 影响下的铺装结构层及层间应力响应情况。

1.2 基本假设

为减少模拟的难度,在建立桥面铺装有限元模型时,作如下假设:①各结构层材料均视为均匀、连续且各向同性的弹性体;②桥面板与铺装层界面及各结构层间均保持完全连续状态,无相对滑动现象;③桥梁梁体、铺装层及防水层均处于无裂缝的正常工作状态;④铺装层、防水层与桥梁主体协同承受汽车荷载作用,计算过程中暂不考虑温度应力、桥面负弯矩及桥面振动等因素对桥面铺装的影响;⑤忽略桥梁振动对计算的影响。

2 结果与讨论

2.1 铺装结构层间剪应力响应分析

图 4 展示了沥青铺装层间(2 层沥青铺装界面、沥青层与调平层界面)最大横向、纵向剪应力随水平力系数变化的规律。

就最大横向剪应力的演化趋势而言,沥青层与调平层界面、2 层沥青铺装界面的最大横向剪应力,均随水平力系数的提升呈平缓上升态势。当水平力系数为 0 时,上述两处界面的最大横向剪应力分别为 170.67 kPa 和 160.88 kPa;当该系数升高至 0.5 时,相应数值则分别为 178.25 kPa 和 170.28 kPa,增幅分别约为 4%与 6%。这一变化幅度说明,车辆水平荷载对铺装结构层间横向剪切效应的作用程度相对缓和。

上述两处界面的最大纵向剪应力随水平力系数的增大呈现出显著的线性递增规律,与最大横向剪应力的平缓变化特性存在明显差异。其中,沥青层与调平层界面的最大纵向剪应力在水平力系数达到 0.5 时达到 277.63 kPa,相较于水平力系数为 0 时的 168.33 kPa 增长 65%;2 层沥青铺装界面的最大纵向剪应力则从水平力系数为 0 时的 155.36 kPa 增长至 0.5 时的 309.92 kPa,增幅更是达到 99%。这一结果表明,车辆水平荷载对铺装结构层间纵向剪切效应的影响程度显著高于横向。

在所有水平力系数工况下,沥青层与调平层界面的最大横向剪应力始终稍高于 2 层沥青铺装界面的对应值。最大纵向剪应力的对比则呈现出阶段性差异:当水平力系数处于 0~0.1 的低水平范围时,沥青层与调平层界面的最大纵向剪应力大于 2 层沥青铺装界面;当该系数提升至 0.2 及以上时,鉴于水平荷载对 2 层沥青铺装界面纵向剪切状态的作用更为显著,后者的最大纵向剪应力随即超过前者,且两者的差值随水平力系数的进一步增大而不断扩大;当水平力系数达到 0.5 时,2 层沥青铺装界面的最大纵向剪应力比沥青层与调平层界面的对应值高出 12%。

2.2 铺装结构层最大剪应力响应分析

2.2.1 层内最大剪应力峰值

图 5 展示了各铺装层最大剪应力峰值随水平力系数的演化特征。分析表明,所有铺装层的最大剪应力峰值均随水平力系数的升高呈渐进增大态势,其中沥青铺装上层对水平力系数的响应敏感度最高:水平力系数为 0.1 时,其峰值为 321.515 kPa,相较于水平力系数为 0 时的 304.240 kPa,增幅仅为 6%;后续水平力系数持续增大时,该荷载的影响效应显著强化,当系数达到 0.5 时,最大剪应力峰值攀升至 624.440 kPa,较系数 0.1 时的增幅高达 94%。该变化特征表明,车辆加减速、紧急制动等实际行驶工况,对沥青铺装上层层内剪切状态的影响极为显著。

针对沥青铺装下层、混凝土调平层,水平力系数升至 0.5 时,两者的最大剪应力峰值分别达到 390.515、308.860 kPa,与水平力系数为 0 时的 304.240、277.430 kPa 相比,增幅分别为 28%、11%。二者的增幅显著低于沥青铺装上层,这一现象说明,车辆水平荷载对铺装结构层内剪切状态的作用强度,会随结构层埋深的增加而快速衰减。

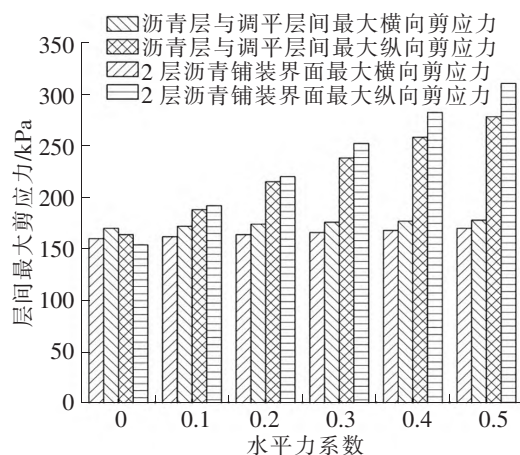


图 4 层间最大剪应力随水平力系数变化情况

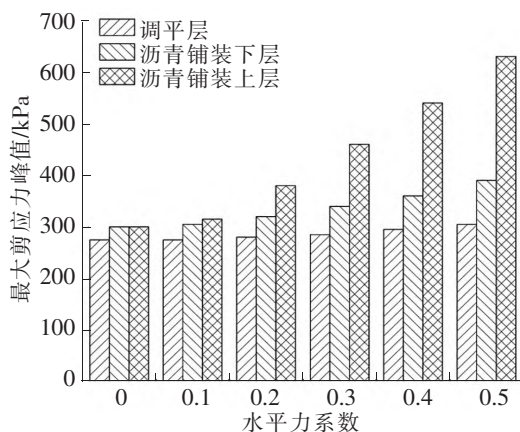


图 5 各铺装层最大剪应力峰值随水平力系数变化情况

2.2.2 最大剪应力沿深度方向变化

图6呈现了不同水平力系数条件下,铺装结构最大剪应力沿深度方向的分布特性,该数据源自桥面铺装最大剪应力峰值点对应的深度剖面。分析结果表明,当水平力系数为0时,随着铺装结构深度的增加,最大剪应力出现2个明显峰值,分别分布于深度4、12 cm;前者坐落于2层沥青铺装的界面处,峰值为308.756 kPa;后者位于调平层上部区域,峰值为253.855 kPa,前者较后者高出22%。这一分布特性揭示,在仅承受垂直荷载作用的情况下,2层沥青铺装均处于不利剪切受力状态。据此,在桥面铺装沥青层材料设计阶段,上、下2层沥青材料均需具备优良的抗剪切性能,从而保障铺装结构长期服役的稳定性。

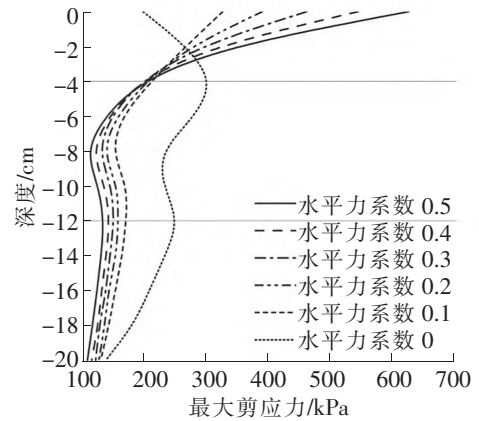


图6 最大剪应力沿深度方向变化情况

当施加车辆水平荷载后,铺装结构最大剪应力峰值的深度分布规律产生显著改变。考虑到不同水平力系数下的分布特征具有相似性,本文选取水平力系数0.3作为典型工况进行详细分析。在垂直与水平荷载耦合作用下,最大剪应力沿深度方向依旧呈现2个峰值,分别位于沥青铺装层顶面和12 cm深度处:顶面峰值达到458.530 kPa,而12 cm深度处的峰值仅为146.370 kPa,前者明显大于后者。在整个沥青面层范围内,最大剪应力随着深度的增加呈现出快速衰减的趋势。到沥青层层底时,最大剪应力已经降至117.705 kPa,降幅高达74%。对比仅受垂直荷载时的剪应力分布情况可见,引入水平荷载后,沥青铺装上层的剪切受力状态显著恶化。

在各水平力系数工况下,沥青铺装层表面的最大剪应力(即第1个峰值)随水平力系数的增大持续上升;而12 cm深度处的第2个峰值,则随水平力系数的增大逐步减小。这一变化规律表明,当车辆处于加减速、紧急制动等行驶工况时,沥青铺装层上表面附近区域成为桥面铺装结构的最不利受剪区域。在此工况下,沥青铺装上层易因层内剪切失效引发推移、拥包、车辙等病害。因此,在沥青铺装上层材料设计过程中,需针对混合料级配实施专项抗剪切优化,或直接选用抗剪性能优异的沥青混合料,以此提升铺装结构的抗剪切破坏能力。

2.3 拉应力和拉应变响应分析

2.3.1 最大拉应力和拉应变

各铺装层最大横向、纵向拉应力随水平力系数的演化规律分别如图7、图8所示。分析结果显示,沥青铺装上层的最大横向与纵向拉应力均随水平力系数的增大呈持续攀升态势。当水平力系数提升至0.5时,其最大横向拉应力、最大纵向拉应力达到188.050、552.610 kPa;相较于水平力系数为0时的120.590、103.620 kPa,增幅分别达到56%、433%,纵向拉应力的增幅显著高于横向拉应力。这一变化特征明确表明,车辆水平荷载显著加剧了沥青铺装上层的纵向受力劣化程度,使得该层更易因纵向拉应力累积而引发横向裂缝。

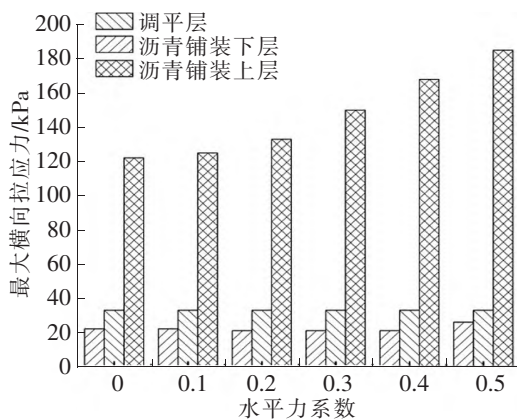


图7 最大横向拉应力随水平力系数变化情况

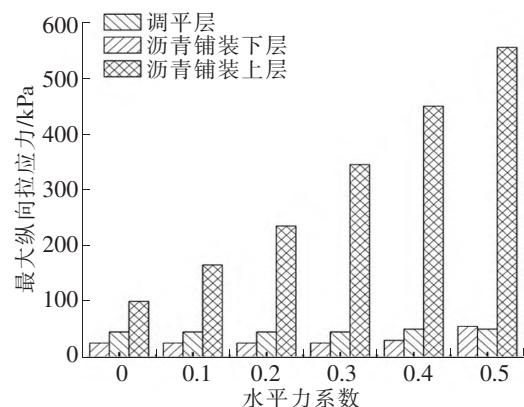


图8 最大纵向拉应力随水平力系数变化情况

对于沥青铺装下层与混凝土调平层而言,在不同水平力系数工况下,两者的最大横向、纵向拉应力波动范围极小,整体呈现稳定状态。与此同时,这 2 层的应力数值远低于沥青铺装上层的对应数值,且随着水平力系数的增大,二者与沥青铺装上层拉应力的差值不断扩大,该差值在纵向拉应力方面表现得尤为突出。这一现象充分说明,车辆水平荷载对桥面铺装结构受拉状态的影响主要集中于沥青铺装上层,其作用效应随结构层埋深的增加快速衰减,对埋藏较深的沥青铺装下层及调平层几乎未产生明显作用。

各铺装层最大横向、纵向拉应变随水平力系数的演化规律分别如图 9、图 10 所示。对于 2 层沥青铺装结构,在各水平力系数下,最大横向拉应变均出现于层间界面。

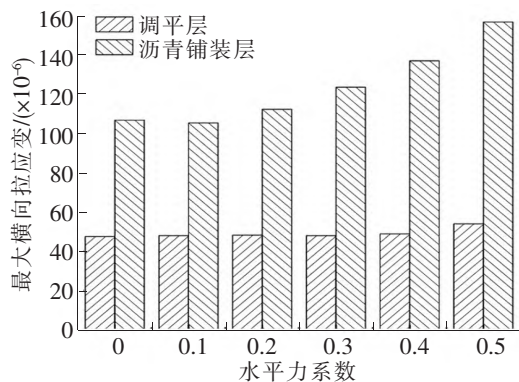


图 9 最大横向拉应变随水平力系数变化情况

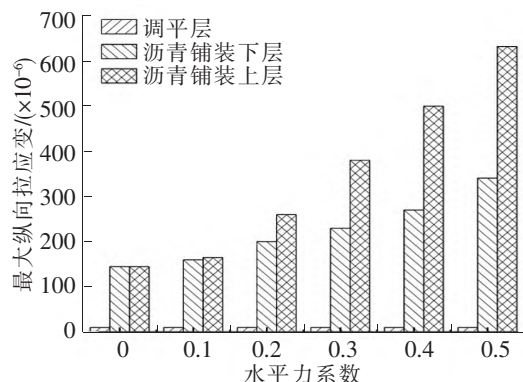


图 10 最大纵向拉应变随水平力系数变化情况

结合图 9 分析可知,沥青层最大横向拉应变随水平力系数的增大呈平缓上升态势。当水平力系数提升至 0.5 时,最大横向拉应变达到 156.744×10^{-6} ,相较于水平力系数为 0 时的 106.744×10^{-6} ,增幅为 47%。沥青层最大横向拉应变显著大于调平层,且调平层最大横向拉应变随水平力系数的波动幅度极小,基本维持稳定,这一特征表明车辆水平荷载对调平层横向受拉状态的影响可忽略不计。

由图 10 分析可得,2 层沥青铺装的最大纵向拉应变均随水平力系数的增大呈上升趋势。当水平力系数升至 0.5 时,沥青铺装上、下层的最大纵向拉应变分别为 631.610×10^{-6} 、 340.450×10^{-6} ,相较于水平力系数为 0 时的 145.210×10^{-6} ,增幅分别达到 335%、134%,其中沥青铺装上层的增幅显著高于下层。此外,当水平力系数处于 0.2~0.5 区间时,最大纵向拉应变的增长速率明显高于 0~0.2 区间。与横向拉应变的分布特征一致,调平层最大纵向拉应变远低于 2 层沥青铺装,且受水平力系数的影响极为微弱。

2.3.2 最大拉应力和拉应变沿深度方向变化

不同水平力系数条件下,最大横向、纵向拉应力沿深度方向的分布规律分别如图 11、图 12 所示。分析结果表明,在各水平力系数工况下,最大横向与纵向拉应力沿深度方向的总体分布趋势基本一致,核心差异主要表现为:随着水平力系数的增大,最大横向与纵向拉应力数值同步增大,且沥青铺装层的受拉范围随之扩大,这一变化特征在纵向拉应力上体现得尤为显著。具体而言,水平力系数为 0 时曲线截距对应的深度小于水平力系数为 0.5 时的对应深度。

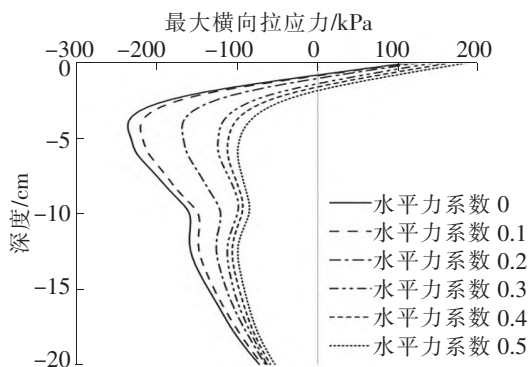


图 11 最大横向拉应力沿深度方向变化情况

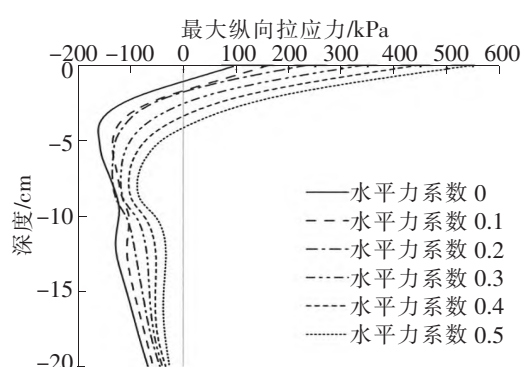


图 12 最大纵向拉应力沿深度方向变化情况

进一步针对不同水平力系数工况,对铺装结构最大横向、纵向拉应变沿深度方向的分布特征(数据选自各工况最大拉应变对应位置的深度剖面)实施深入探究。

由图 13 可知,各水平力系数下最大横向拉应变沿深度的分布规律基本一致,仅在应变数值上存在微小差异。各工况下的拉应变峰值均集中分布于沥青铺装层内,且最大横向拉应变峰值均汇聚于 4 cm 深度处,该位置恰好对应 2 层沥青铺装的层间界面。这一分布特征对 2 层沥青铺装的变形协调性提出了更高要求,同时也进一步凸显了铺装结构层间黏结性能的技术保障需求。

由图 14 可见,当水平力系数为 0 和 0.1 时,最大纵向拉应变沿深度的分布特征与横向拉应变相近,即应变峰值均集中于 2 层沥青铺装的层间界面;当水平力系数 ≥ 0.2 时,在水平荷载的作用下,最大纵向拉应变的分布深度发生偏移,其在沥青铺装层内的分布形态也呈现出显著差异。在此工况条件下,整个沥青铺装层内均承受拉应变作用,且最大纵向拉应变随深度的增加快速衰减,至 10 cm 深度时已趋近于 0。该分布特征与仅承受垂直荷载时的应变分布规律相近,这一现象印证了水平荷载对铺装结构纵向拉应变的影响主要聚焦于沥青铺装层,对调平层的作用效应可忽略不计。

3 结语

本文梳理了防水黏结层的核心功能,借助 ABAQUS 有限元软件对桥面铺装结构层间受力状态开展静、动载分析,得到如下结论:

(1) 车辆水平荷载对铺装结构层间剪切状态的影响存在显著方向性差异,对纵向剪切的作用远强于横向。以 2 层沥青铺装层层间为例,纵向最大剪应力从水平力系数 0 时的 155.36 kPa 增至 0.5 时的 309.92 kPa,增幅达 99%,远超横向最大剪应力 6% 的增幅。

(2) 车辆加减速、紧急制动等典型行驶工况,对沥青铺装上层内剪切状态的作用效应尤为显著:当水平力系数达到 0.5 时,其最大剪应力峰值为 624.440 kPa,相较于水平力系数 0.1 时的 321.515 kPa,增幅高达 94%;而该水平荷载对沥青铺装下层及混凝土调平层剪切状态的作用则相对缓和。

(3) 车辆水平荷载的施加与否,对最大剪应力峰值在铺装结构中的深度分布影响尤为突出。当水平力系数为 0 时,最大剪应力峰值坐落于 4 cm 深度位置(即 2 层沥青铺装层间界面);引入水平荷载后,该峰值显著上移至沥青铺装层顶面。

(4) 车辆水平荷载显著加剧了沥青铺装上层的纵向受拉损伤劣化程度,当水平力系数为 0.5 时,该层最大纵向拉应力、拉应变相较于水平力系数为 0 时,增幅分别达到 433%、335%。值得关注的是,在各水平力系数工况下,铺装结构的最大横向与纵向拉应力均汇聚于铺装层顶面区域。

参 考 文 献

- [1] 交通运输部. 2024 年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2025-06-12(002).
- [2] Huang Biao, Shi Jie, Chen Songqiang. Research on the performance of different waterproof bonding layer materials for steel bridge decks[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 39858.
- [3] Gao Feng, Gao Xuan, Chen Qian, et al. Materials and performance of asphalt-based waterproof bonding layers for cement concrete bridge decks: a systematic review[J]. Sustainability, 2022, 14(23): 15500.

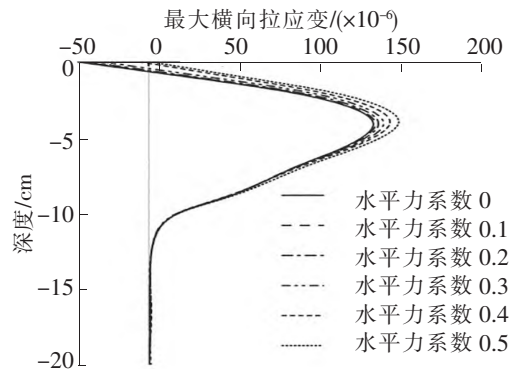


图 13 最大横向拉应变沿深度方向变化情况

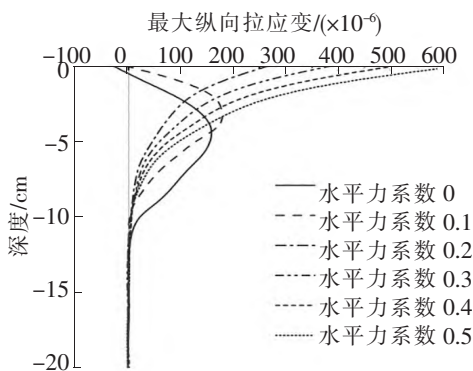


图 14 最大纵向拉应变沿深度方向变化情况

- [4] Lei Xiaoqi, Li Tingyuan, Chen Huiqiang. Mechanical analysis and experimental study on the shear performance of waterproof adhesive layer toward concrete bridge deck pavement[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, 22: e04250.
- [5] Chen Leilei, Liu Gang, Pan Gengshen, et al. Investigation on the pore water pressure in steel bridge deck pavement under the coupling effect of water and vehicle load[J]. *Construction & Building Materials*, 2023, 409: 134021.
- [6] 刘云, 于新, 戴忧华, 等. 混凝土箱梁桥铺装防水粘结层力学性能[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(1): 57-61.
- [7] Kong Lin, Su Shaonan, Wang Zilin, et al. Microscale mechanism and key factors of waterborne epoxy resin emulsified asphalt enhancing interlayer bonding performance and shear resistance of bridge deck pavement[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 419: 135570.
- [8] Cen Feng, Zhong Jianjun, Gao Peiwei, et al. Multiscale evaluation of the effect of corrosive media on bitumen waterproof layer adhesion[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 423: 135630.
- [9] Shi Shuang, Zang Dongdong, Chen Xiang, et al. Preparation and properties of a novel waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 371: 130767.
- [10] 何丽红, 谷颖佳, 张博, 等. 混凝土桥面防水黏结层剪应力有限元分析[J]. *公路*, 2024, 69(1): 53-57.
- [11] 李云良, 纪伦, 刑超, 等. 水泥混凝土桥面铺装力学行为数值分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(10): 58-62.
- [12] 王虎, 陈翔, 王雅. 层间接触条件下黏弹性铺装层力学分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(7): 66-72.
- [13] Pokorski P, Radziszewski P, Sarnowski M. Fatigue life of asphalt pavements on bridge decks[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 153: 556-562.
- [14] Raab C, Arraigada M, Partl M, et al. Cracking and interlayer bonding performance of reinforced asphalt pavements[J]. *European Journal of Environmental & Civil Engineering*, 2017, 21: 14-26.
- [15] 王笃喜. 水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装防水黏结层的性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012: 1-6.
- [16] 石程光. 桥面铺装材料结构组合与防水黏结层性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 1-9.
- [17] 张磊, 陈静云. 沥青混凝土桥面铺装车辙变形的非线性有限元模拟分析[J]. *中外公路*, 2011, 31(1): 88-94.

Stress Response Analysis of Bridge Deck Pavement Structure Based on Finite Element Method

BAI Tao¹, CHEN Bao¹, RUAN Xin¹, WAN Chenguang^{2,3}

(1. Shangqiu Branch of Henan Communications Investment Group Co. Ltd., Shangqiu 476000, China;

2. Henan Zhonggong Design & Research Group Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China;

3. Henan Key Laboratory of Recycling Solid Waste Materials in Road Engineering, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To clarify the mechanical response law of cement concrete bridge deck pavement under the coupling action of horizontal and vertical loads, and to provide theoretical support for formulating technical requirements for waterproof bonding layers, a three-dimensional model of T-beam bridge deck pavement was established using ABAQUS finite element software. The effects of horizontal force coefficients on interlayer shear stress, intralayer shear stress, tensile stress, and tensile strain of pavement layers were systematically analyzed. The results show that horizontal loads exert a significant influence on the longitudinal shear between pavement layers, which is far greater than that on transverse shear. Vehicle acceleration, deceleration, and emergency braking increases the maximum intralayer shear stress of the upper asphalt pavement layer by 94%, and the peak value of the maximum shear stress shifts upward from a depth of 4 cm to the top surface of the pavement layer. The longitudinal tensile stress and tensile strain of the upper asphalt pavement layer increase by 433% and 335%, respectively, making it the initiating area of transverse cracks. This study has revealed the deterioration mechanism of horizontal loads on the stress state of bridge deck pavement.

Key words: bridge engineering; stress response law; finite element analysis; load coupling; waterproof bonding layer