

doi: 10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.019

基于响应面法的隧道复合式路面力学响应分析

翁斌^{1,4}, 张超^{2,3}, 阙云^{4*}, 章灿林⁴, 徐松⁴

(1. 福州外语外贸学院 智能建造学院, 福州 350202; 2. 福建省高速技术咨询有限公司, 福州 350001;
3. 福建省高速公路工程重点实验室, 福州 350001; 4. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108)

摘要:为揭示移动荷载作用下公路隧道复合式路面结构力学响应,通过现场试验与有限元法相结合及模型精度验证的手段,基于响应面法设计方法分析有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面力学响应。结果表明,无论有仰拱,还是无仰拱,轴载对各项力学指标的影响最大,混凝土基层厚度对各项力学指标的影响较小,水平荷载对混凝土面板板底拉应力和沥青面层层间剪应力的影响较大,对沥青面层层底拉应变影响较小;无仰拱时围岩模量对各项力学指标的影响大于有仰拱;有仰拱时混凝土面层厚度对沥青面层层底拉应变的影响大于沥青面层厚度,混凝土面层厚度对沥青面层层间剪应力的影响大于基层厚度,无仰拱时影响相反;有仰拱隧道复合式路面结构轴载换算系数得到混凝土面层设计轴次是现行规范的1.8倍,无仰拱是1.3倍;有仰拱、无仰拱时混凝土面层疲劳寿命分别比设计轴载大17和8个数量级,沥青面层疲劳寿命均比设计轴载大1个数量级。研究结果可为隧道复合式路面结构设计研究提供参考。

关键词:隧道复合式路面;响应面;力学响应;移动荷载;疲劳寿命

中图分类号:U416.2

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)02-0176-12

Mechanical Response Analysis of Tunnel Composite Pavement Based on Response Surface

WENG Bin^{1,4}, ZHANG Chao^{2,3}, QUE Yun^{4*}, ZHANG Canlin⁴, XU Song⁴

(1. School of Intelligent Construction, Fuzhou University of International Studies and Trade, Fuzhou 350202, China; 2. Fujian Provincial Expressway Technology Consulting Co., Ltd, Fuzhou 350001, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Expressway Engineering, Fuzhou 350001, China; 4. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to reveal the mechanical response of highway tunnel composite pavement structural under moving load, field test and finite element method were combined to verify the model accuracy. Response surface test design method was used to analyze the mechanical response of tunnel composite pavement with and without inverted arch. The results showed that axial load had the greatest influence on mechanical indexes regardless of inverted arch, the thickness of concrete base layer had little influence on the mechanical indexes. And the horizontal load had great influence on the tensile stress of concrete slab and the shear stress between layers of asphalt surface, but had little influence on the tensile strain of asphalt surface. The influence of surrounding rock modulus on mechanical parameters without inverted arch was greater than that with inverted arch. In the case of inverted arch, the thickness of concrete surface had a greater effect on the tensile strain of asphalt layer than that of asphalt layer, and the thickness of concrete surface had a greater effect on the shear stress of asphalt layer than that of base layer, but the effect was opposite without inverted arch. The axial load conversion coefficient of composite pavement structure with inverted arch tunnel was obtained that the design axis of concrete surface was 1.8 times of the current standard and 1.3 times of that without inverted arch. The fatigue life of concrete surface with and without inverted arch respectively was 17 and 8 orders of magnitude longer than that of design axle load, and the fatigue life of asphalt surface was 1 order of magnitude longer than that of design axle load. The research results can provide a reference for the design method of tunnel composite pavement structure.

Keywords: Tunnel composite pavement; response surface; mechanical response; moving load; fatigue life

收稿日期:2023-06-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008113);福建省住房和城乡建设厅科技项目(2022-K-318)。

第一作者简介:翁斌,硕士,讲师。研究方向为道路工程。E-mail: wengbin_1997@qq.com

*通信作者:阙云,博士,教授。研究方向为道路工程。E-mail: queyun_2001@fzu.edu.cn

引文格式:翁斌,张超,阙云,等. 基于响应面法的隧道复合式路面力学响应分析[J]. 森林工程,2024,40(2):176-187.

WENG B, ZHANG C, QUE Y, et al. Mechanical response analysis of tunnel composite pavement based on response surface[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):176-187.

0 引言

随着山区高速公路总里程的增加,由于地形限制,在线形设计中不得不选用隧道设计,隧道在路线设计中的重要性不断提高。隧道设计新规范^[1]建议复合式路面作为隧道路面的主要结构形式,但国内公路隧道路面结构设计一般采用普通路面结构设计相应的技术标准。而隧道作为重要基础设施,集中两地间大部分交通量,交通集中、渠化严重、车辆加速及制动次数高且路面基层支撑条件与隧道外有明显差异。因此,分析移动荷载作用下公路隧道复合式路面结构的力学响应对隧道复合式路面结构设计研究有重要意义。

目前,国内外学者对复合式路面结构的力学分析方法主要为有限元法和弹性层状体系法2种。有学者采用弹性层状理论方法进行复合式路面结构沥青层的力学分析^[2-3];有学者通过有限元方法分析复合式路面沥青面层和混凝土面层的力学响应^[4-7]。

国内在山区公路隧道复合式路面结构力学分析方面也有许多成果。相关学者采用数值模拟方法分析静载作用下路面结构模量、结构层尺寸和水平荷载等因素对隧道复合式路面力学响应的影响规律^[8-10]。也有相关学者利用三维有限元方法,分别提出层顶拉应力、层底拉应力、接缝处层顶剪应力、层底拉应变和剪应力等作为沥青层厚度设计指标^[11-12]。李英涛^[14]基于有限元方法,提出混凝土板厚度的设计方法和抗剪强度作为沥青面层混合料的设计指标。陈剑锋^[15]通过弹性层状体系理论计算层间最大剪应力,并考虑隧道内温度分布状况对结构层厚度分段设计。

上述相关研究已经取得较为丰硕的成果,可为进一步认识隧道复合式路面力学行为提供素材,但对于隧道复合式路面结构力学响应的研究仍存在以下3个问题。

1)各影响因素对隧道复合式路面结构力学响应都会产生影响,但其显著性大小排序并未得出。

2)研究多集中在静载作用,对于移动荷载作用下隧道复合式路面结构力学响应变化规律尚不清晰。

3)规范方法计算设计轴次、适用于隧道复合式路面结构的设计轴次和疲劳开裂作用次数之间的关系仍不明确。

响应面法基于数学与统计学理论,通过响应曲面及等高线对变量的多水平试验结果进行研究,能以较少的工况对试验结果进行全面分析,反映各因素间交互作用对指标的影响显著性大小,是一种广泛应用于试验设计与优化的数学统计方法。马士宾等^[16]和苏禹等^[17]采用响应面法研究影响石质路基沥青路面和应力吸收层力学指标的因素及各因素间交互作用的影响显著性大小。通过响应面法,研究路面结构层厚度、围岩模量、车辆荷载及水平荷载对隧道复合式路面动力响应的影响。基于此,以某隧道复合式路面实体工程为研究对象,结合现场试验以及有限元技术,通过响应面法对隧道复合式路面进行参数敏感性分析,通过参数随机变化研究移动荷载作用下有仰拱、无仰拱隧道复合式路面力学响应的变化规律,为隧道复合式路面结构设计研究提供借鉴。

1 有限元模型及精度验证

1.1 有限元模型概况

1.1.1 模型尺寸

现场试验依托于福建省某高速公路隧道路面工程,隧道内复合式路面结构分为有仰拱和无仰拱2种类型。有仰拱路面结构从上到下分别为:4.5 cm AC-16 C 沥青砼面层、5.5 cm AC-20 C 沥青砼面层、24 cm C40 砼面层、20 cm C20 砼基层、15 cm C15 砼底基层、仰拱填充及仰拱、围岩;无仰拱路面结构从上到下分别为:4.5 cm AC-16 C 沥青砼面层、5.5 cm AC-20 C 沥青砼面层、24 cm C40 砼面层、20 cm C20 砼基层、15 cm 级配碎石垫层、围岩。采用 ABAQUS 软件进行三维建模并划分网格,如图1所示。

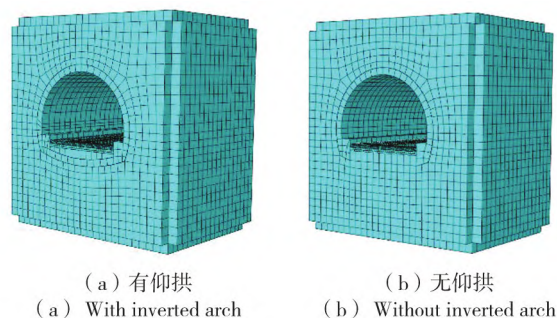


图1 隧道复合式路面有限元模型网格划分

Fig. 1 Meshing of finite element model of tunnel composite pavement

本研究为模拟相邻混凝土板对分析板块的影响,采用2车道共6块路面板模型。横、纵缝取

1 cm,横缝和纵缝中间设置传力杆和拉杆。沥青混凝土面层、水泥混凝土面层与水泥混凝土基层层间接触良好,水泥混凝土基层以下结构层间完全连续。

1.1.2 材料参数

参考设计图与相关规范^[18-19]确定模型中各结构参数,均采用线弹性材料参数,见表1。

表1 各结构材料参数^[20]

Tab. 1 Material parameters of each structure^[20]

结构 Structure	厚度(h)/cm Thickness	密度(ρ)/(kg·m ⁻³) Density	弹性模量(E)/MPa Elasticity modulus	泊松比(μ) Poisson's ratio
AC-16 C	4.5	2 450	1 300	0.25
AC-20 C	5.5	2 430	1 200	0.25
C40 面层 C40 surface	24.0	2 500	31 000	0.15
C20 基层 C20 base	20.0	2 450	25 000	0.15
C15 底基层 C15 subbase	15.0	2 400	21 000	0.15
级配碎石 Graded broken stone	15.0	2 000	200	0.25
软弱围岩 Weak surrounding rock	-	2 200	500	0.25
高强围岩 High strength surrounding rock	-	2 600	8 000	0.20
拉杆 Tie bar	-	7 850	200 000	0.30
传力杆 Dowel bar	-	7 850	200 000	0.30

1.1.3 边界条件

采用无限元传输边界模拟远处的围岩介质,在X、Y、Z方向两侧分别设置无限元边界,减小动力荷载在围岩边界处的反弹。

1.1.4 移动荷载

隧道内车辆减速、制动次数高,且隧道考虑排水和排烟因素导致纵坡坡度较大,使其受到的水平荷载远大于普通公路,紧急制动下水平力系数超过0.5。取后双联轴每侧双轮胎进行研究,移动荷载选取BZZ-100标准轴载,轮胎接地压强0.7 MPa,将轮胎与路面接触形状简化为16.7 cm×21.3 cm的矩形,两侧轮胎中心距185 cm、单侧两轮中心距34 cm的矩形均布荷载,两轴间距为135 cm。在Abaqus有限元软件中采用Dload和Utracload子程序实现车辆作用下的轴载和水平荷载的移动。

1.2 现场试验与模型验证

1.2.1 传感器埋设

采用DH1204埋入式应变计测量水泥混凝土面层板底行车方向的线性应变。分别选择有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面水泥混凝土面层板板底埋设传感器,埋设位置分别为纵缝中部(I)、混凝土板中部(II)、横缝中部(III)和板角(IV),布置情

况如图2所示。对比混凝土面层板底部不同位置的动态应变峰值可知,隧道复合式路面结构混凝土面层板在车辆作用下最不利的荷载位置为纵缝边缘中部^[20]。

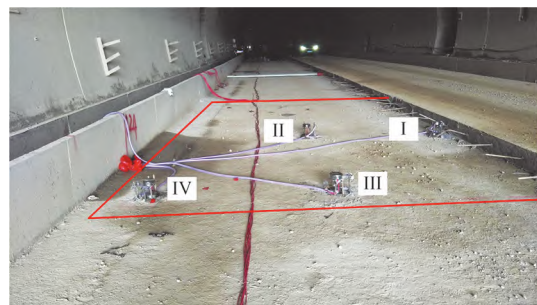


图2 传感器现场布置

Fig. 2 Onsite sensor layout

1.2.2 模型验证

试验车辆前轴为单轴单轮,后轴为双轴双轮,试验开始前通过现场地磅测出车辆总质量为35 t,根据轴载参数计算可知后轴重力为126 kN。选取现场试验中3个不同的行车速度所采集的混凝土面板板底动态应变时程曲线与有限元模拟数据进行验证,试验中车辆匀速行驶,故不考虑水平荷载的

影响。

图 3 分别为有仰拱、无仰拱的混凝土面层板在现场试验和有限元模拟中纵缝中部板底纵向动态应变时程曲线对比,图 3 中现场试验数据增加了车辆前轴通过传感器时的应变数据。对比可知,现场试验和数值模拟得到混凝土板纵缝中部板底动态

应变时程的变化规律基本一致。但现场试验中测得混凝土板底应变略小于有限元模拟,原因是现场试验难以保证车辆精确地沿纵缝边缘行驶。综上,研究所建立的三维有限元模型可较好地模拟动载下隧道复合式路面结构的力学响应。

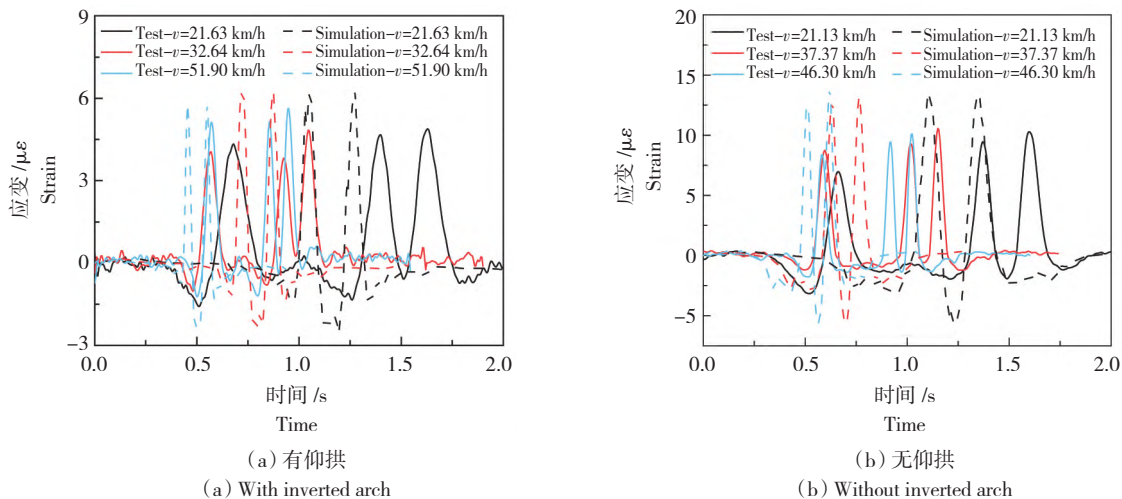


图 3 混凝土面层板纵缝中部板底纵向动态应变时程曲线

Fig. 3 Time history curve of longitudinal dynamic strain at the bottom of longitudinal seam of concrete surface slab

1.3 分析指标

参考相关文献^[11-15]和规范^[18-19],选取 3 个分析指标,分别为混凝土面板板底最大拉应力、沥青面

层层底最大拉应变和沥青面层层间最大剪应力,分析其变化规律。各分析指标对应的力学响应及其位置的选取见表 2。

表 2 各指标对应的力学响应及其竖向位置

Tab. 2 Corresponding mechanical response and vertical position of each index

分析指标 Analysis index	混凝土面板板底最大拉应力(σ_c) Maximum tensile stress of concrete slab bottom	沥青面层层底最大拉应变(ε_a) Maximum tensile strain of asphalt bottom layer	沥青面层层间最大剪应力(τ_{max}) Maximum shear stress between layers of asphalt surface
力学响应 Mechanical response	行车方向水平拉应力	行车方向水平拉应变	最大剪应力
平面位置 Plane position	纵缝处轮迹中部	纵缝处轮迹边缘	纵缝处轮迹中部
竖向位置 Vertical position	混凝土板板底	沥青面层层底	根据实际情况

2 基于响应面法的结构力学响应分析

2.1 工况设计

响应面法的基本原理是通过简单显式函数拟合隐式极限状态函数,得到变量与响应值间的函数关系,将大量试算工作转变成简单数学问题,大多数响应面问题都可以用一阶或二阶多项式近似模型来解决。

采用响应面试验设计方法设计工况,根据 Box- Behnken 的中心组合试验设计原理,A、B、C、D、E、F 因素的低、中、高水平分别用-1、0、1 的编码表示,设计试验的因素水平见表 3。荷载轴型采用双联轴、每侧双轮。

2.2 方差和显著性分析

在分析软件中,对各类函数模型进行显著性检验,对有仰拱和无仰拱的复合式路面混凝土面板板

表 3 响应面设计因素水平及编码

Tab. 3 Response surface design factor level and code

编码 Code	A 沥青面层厚度 (h_1)/cm A Thickness of asphalt(h_1)	B 混凝土面板厚度 (h_2)/cm B Thickness of concrete slab(h_2)	C 混凝土基层厚 (h_3)/cm C Thickness of concrete base(h_3)	D 围岩模量(E)/MPa D Surrounding rock modulus(E)	E 轴载(P)/kN E Axle load(P)	F 水平力系数(f) F Horizontal force coefficient(f)
-1	9	22	18	500/8 000	100	0.3
0	10	24	20	750/10 000	150	0.5
1	11	26	22	1 000/12 000	200	0.7

底最大拉应力(σ_c)、沥青面层层底最大拉应变(ε_a)、沥青面层层间最大剪应力(τ_{\max})计算结果进行方差分析和显著性分析。结合方差分析结论,参考规范[18-19]中的轴载响应公式,采用幂函数形式分别对 σ_c 、 ε_a 和 τ_{\max} 进行回归公式拟合。

2.2.1 混凝土面板板底最大拉应力(σ_c)

σ_c 的方差分析见表4和表5。由表4和表5可知,1)有仰拱时各因素中B、E和F都对 σ_c 有显著

影响,其中对E和F的影响为极显著($P < 0.01$),对A、C和D的影响不显著($P > 0.05$)。对于 σ_c ,各因素之间的相互作用不显著,显著性排序由大到小分别为: P 、 f 、 h_2 、 h_1 、 h_3 、 E 。2)无仰拱时各因素中B、E和F都对 σ_c 有显著影响($P < 0.05$),其中B和E的影响为极显著($P < 0.01$),A、C和D的影响不显著($P > 0.05$)。显著性排序由大到小分别为 P 、 h_2 、 f 、 E 、 h_1 、 h_3 。

表 4 混凝土面板板底最大拉应力的方差分析表(有仰拱)

Tab. 4 Variance analysis table of maximum tensile stress of cement concrete slab bottom (with inverted arch)

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean square	F	p	显著性 Significance
Model	0.149 9	6	0.025 0	38.631 4	< 0.000 1	极显著
A	0.001 2	1	0.001 2	1.903 8	0.174 2	不显著
B	0.003 0	1	0.003 0	4.700 7	0.035 2	显著
C	0.000 5	1	0.000 5	0.814 2	0.371 5	不显著
D	0.000 0	1	0.000 0	0.016 0	0.899 9	不显著
E	0.132 5	1	0.132 5	204.907 9	< 0.000 1	极显著
F	0.012 6	1	0.012 6	19.445 9	< 0.000 1	极显著
R^2	0.831 4					

表 5 混凝土面板板底最大拉应力的方差分析表(无仰拱)

Tab. 5 Variance analysis table of maximum tensile stress of cement concrete slab bottom (without inverted arch)

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean square	F	p	显著性 Significance
Model	1.176 5	6	0.196 0	127.130 4	< 0.000 1	极显著
A	0.002 8	1	0.002 8	1.867 8	0.178 2	不显著
B	0.083 4	1	0.083 4	54.075 2	< 0.000 1	极显著
C	0.001 9	1	0.001 9	1.259 9	0.267 4	不显著
D	0.003 5	1	0.003 5	2.321 2	0.134 3	不显著
E	1.078 3	1	1.078 3	699.145 0	< 0.000 1	极显著
F	0.006 3	1	0.006 3	4.113 1	0.048 2	显著
R^2	0.942 0					

图4为有仰拱时不同混凝土面板厚度下 σ_c 关于轴载和水平力系数的响应面图。由图4可知,轴载对 σ_c 的影响大于水平力系数,较低和较高轴载作用下, σ_c 随水平力系数的增加而上升,且在较低轴载作用下升幅更大。较低和较高水平力系数作用下, σ_c 随轴载的增加而上升,且较低水平力系数作

用下降幅更大。混凝土面板厚度由22 cm增加到26 cm,轴载和水平力系数对 σ_c 的影响也逐渐增大。在较低和较高的轴载以及水平力系数作用下, σ_c 随着混凝土面板厚度的增加而下降,且在较低的轴载以及水平力系数作用下 σ_c 的降幅更大。

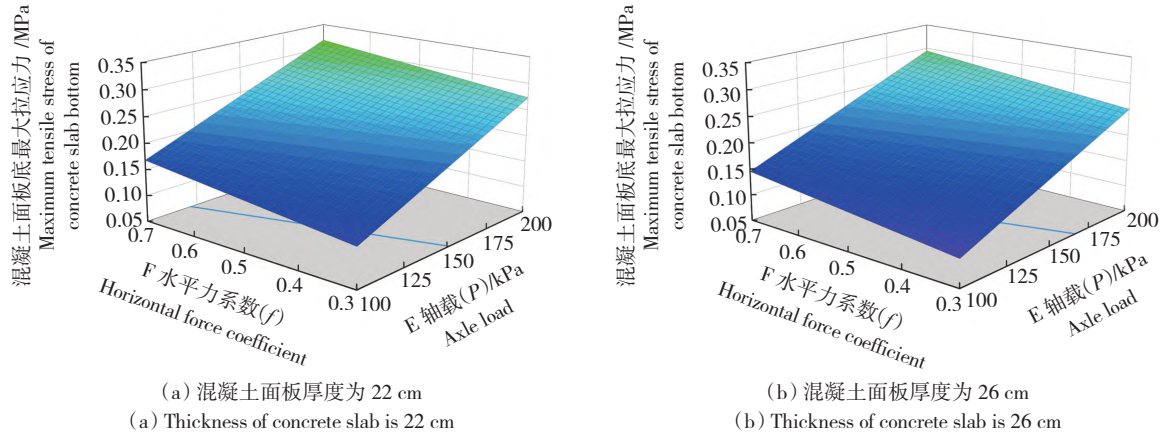


图 4 有仰拱时轴载和水平力系数作用 σ_c 响应面变化

Fig. 4 Variation of σ_c response surface under axial load and horizontal force coefficient with inverted arch

图 5 为无仰拱时不同水平力作用下 σ_c 关于轴载和混凝土面板厚度的响应面图。由图 5 可知,在较低和较高的轴载作用下, σ_c 随混凝土面板厚度的增加而下降,且在较低轴载作用下 σ_c 的降幅更大;在较低和较高混凝土面板厚度下, σ_c 随轴载的增加

而上升,且在较高混凝土面板厚度下 σ_c 的升幅更大。轴载对 σ_c 的影响要大于混凝土面板厚度的影响,轴载越大,混凝土面板厚度对 σ_c 的影响越小;当水平力系数由 0.3 增加到 0.7 时, σ_c 随之上升,轴载越大,混凝土板厚度越小时, σ_c 的升幅越小。

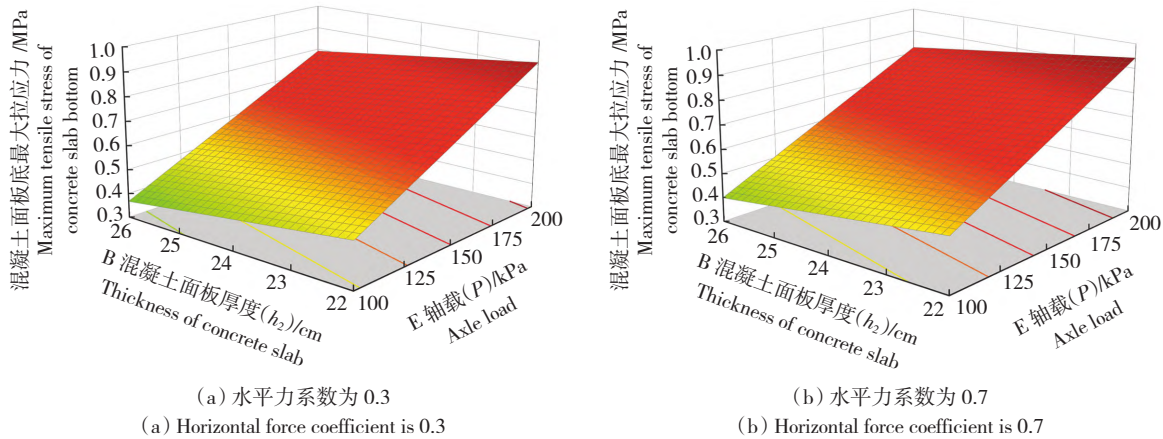


图 5 无仰拱时轴载和混凝土面板厚度作用 σ_c 响应面变化

Fig. 5 Variation of σ_c response surface under axial load and thickness of concrete slab without inverted arch

2.2.2 沥青面层层底最大拉应变 (ϵ_a)

ϵ_a 的方差分析见表 6 和表 7。由表 6 和表 7 可知:1)有仰拱时各因素中 A、B 和 E 都对 ϵ_a 有显著影响 ($P < 0.05$),其中 B 和 E 的影响为极显著 ($P < 0.01$),C、D 和 F 的影响不显著 ($P > 0.05$)。对于 ϵ_a ,显著性排序由大到小分别为: P, h_2, h_1, h_3, f, E ; 2)无仰拱时各因素中 A 和 E 对 ϵ_a 的影响均为极显著 ($P < 0.01$),B、C、D 和 F 的影响不显著 ($P > 0.05$)。显著性排序由大到小分别为: P, h_1, E, h_2, h_3, f 。

图 6 为有仰拱时不同轴载作用下 ϵ_a 关于沥青

层厚度和混凝土面板厚度的响应面图。由图 6 可知,混凝土面板厚度对 ϵ_a 的影响大于沥青层厚度,在较低和较高的混凝土面板厚度下, ϵ_a 随沥青层厚度的增加而下降,且在较低的混凝土面板厚度下 ϵ_a 降幅更大。在较低和较高的沥青层厚度下, ϵ_a 随混凝土板厚度的增加而上升,在较高的沥青层厚度下 ϵ_a 的升幅更大。当轴载由 100 kN 增加到 200 kN, ϵ_a 大幅度增加,但沥青层厚度和混凝土板厚度对 ϵ_a 的影响逐渐减小。综上,增加沥青层厚度以及降低混凝土板厚度都能有效减小沥青混凝土面层层底最大拉应变。

表 6 沥青面层层底最大拉应变的方差分析表(有仰拱)

Tab. 6 Variance analysis table of maximum tensile strain of asphalt bottom layer (with inverted arch)

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean square	<i>F</i>	<i>p</i>	显著性 Significance
Model	75 939.69	6	12 656.62	24.757 5	< 0.000 1	极显著
A	2 323.32	1	2 323.32	4.544 6	0.038 3	显著
B	5 210.32	1	5 210.32	10.191 9	0.002 5	极显著
C	1 083.03	1	1 083.03	2.118 3	0.152 2	不显著
D	161.57	1	161.57	0.316 0	0.576 7	不显著
E	65 900.23	1	65 900.23	128.907 2	< 0.000 1	极显著
F	1 261.21	1	1 261.21	2.467 0	0.123 0	不显著
<i>R</i> ²	0.759 6					

表 7 沥青面层层底最大拉应变的方差分析表(无仰拱)

Tab. 7 Variance analysis table of maximum tensile strain of asphalt bottom layer (without inverted arch)

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean square	<i>F</i>	<i>p</i>	显著性 Significance
Model	109 804.60	6	18 300.76	71.671 8	< 0.000 1	极显著
A	11 592.78	1	11 592.78	45.401 1	< 0.000 1	极显著
B	458.71	1	458.71	1.796 4	0.186 6	不显著
C	143.57	1	143.57	0.562 2	0.457 1	不显著
D	895.68	1	895.68	3.507 7	0.067 3	不显著
E	96 608.15	1	96 608.15	378.349 2	< 0.000 1	极显著
F	105.69	1	105.69	0.413 9	0.523 1	不显著
<i>R</i> ²	0.901 5					

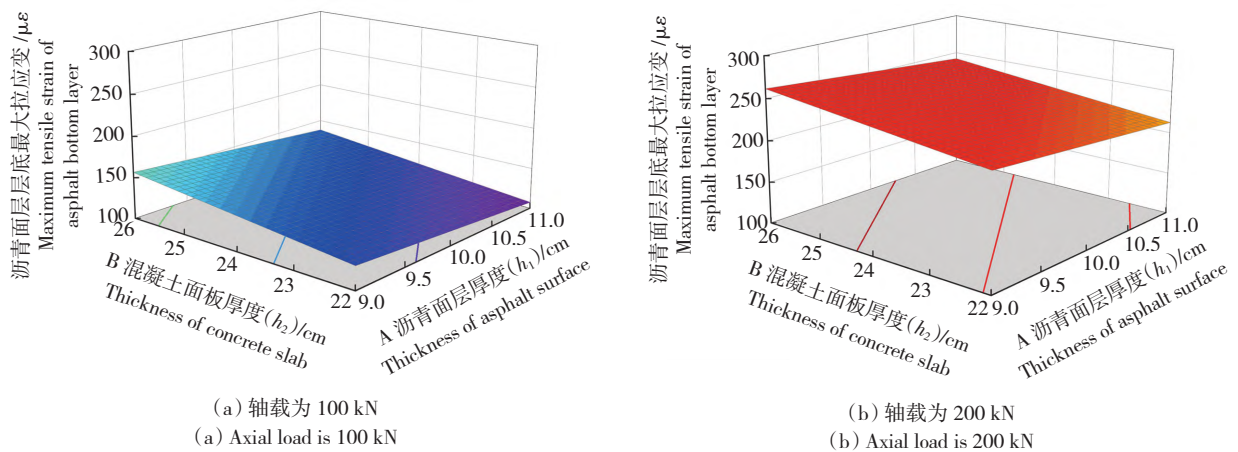


图 6 有仰拱时沥青面层厚度和混凝土面板厚度作用 ϵ_a 响应面变化

Fig. 6 Variation of ϵ_a response surface under thickness of asphalt surface and thickness of concrete slab with inverted arch

图 7 为无仰拱时不同围岩模量下 ϵ_a 关于沥青面层厚度和轴载的响应面图。由图 7 可知,在较低和较高的沥青层厚度下, ϵ_a 随轴载的增大而上升,且在较高沥青层厚度下 ϵ_a 的升幅更大。在较低和较高的轴载作用下, ϵ_a 随沥青层厚度的增加而下降,且较低轴载作用下 ϵ_a 的降幅更大。轴载对 ϵ_a

的影响要大于沥青面层厚度的影响,轴载越大,沥青面层厚度对 ϵ_a 的影响越小。当围岩模量由 8 000 MPa 增加到 12 000 MPa 时, ϵ_a 随之下降且轴载越小、沥青层厚度越大, ϵ_a 的下降幅度越大,说明增加沥青面层厚度可以有效降低沥青层底拉应力。

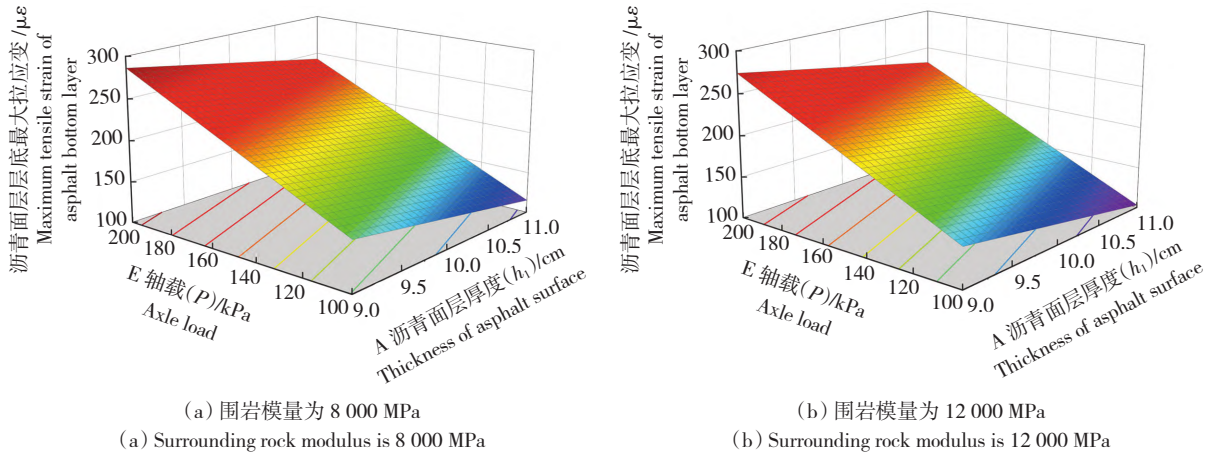


图 7 无仰拱时沥青面层厚度和轴载作用 ε_a 响应面变化

Fig. 7 Variation of ε_a response surface under thickness of asphalt surface and axial load without inverted arch

2.2.3 沥青面层层间最大剪应力(τ_{max})

τ_{max} 的方差分析见表 8 和表 9。由表 8 和表 9 可知:1)有仰拱时各因素中 A、B、E、F 对 τ_{max} 都有极显著的影响,交互作用中 EF 以及 F^2 对 τ_{max} 影响的极显著($P < 0.01$),其显著性大于因素 A 和 B,其余各项对 τ_{max} 的影响均不显著($P > 0.05$)。显著性排序由大到小分别为: $P、f、h_1、h_2、E、h_3$;2)无仰拱时各因素中 A、E、F 都对 τ_{max} 有显著影响($P < 0.01$),其中 E、F 的影响为极显著,B、C、D 的影响不显著($P > 0.05$)。显著性排序由大到小分别为: $P、f、h_1、E、h_3、h_2$ 。

图 8 和图 9 为有仰拱时不同沥青面层厚度以及混凝土面板厚度下 τ_{max} 关于轴载和水平力系数的等高线图以及响应面图。由图 8 和图 9 可知,在较低和较高的水平力系数下, τ_{max} 随轴载作用的增加呈线性上升趋势,且在较高的水平力系数下 τ_{max} 升幅更大。较低的轴载作用下, τ_{max} 随水平力系数的增加先下降后上升;较高的轴载作用下, τ_{max} 随水平力系数的增加不断上升,且在较高水平力系数下上升更快。轴载对 τ_{max} 的影响大于水平力系数,轴载越大,水平力系数对 τ_{max} 的影响越大。

表 8 沥青面层层间最大剪应力的方差分析表(有仰拱)

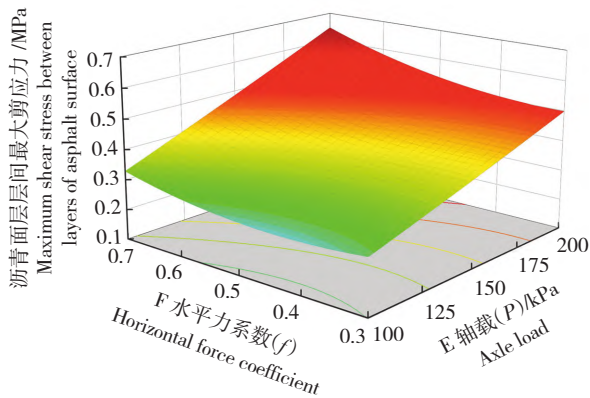
Tab. 8 Variance analysis table of maximum shear stress between layers of asphalt surface (with inverted arch)

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean square	F	p	显著性 Significance
Model	0.528 2	14	0.037 7	128.713 1	< 0.000 1	极显著
A	0.003 9	1	0.003 9	13.332 9	0.000 8	极显著
B	0.002 7	1	0.002 7	9.343 6	0.004 0	极显著
E	0.419 2	1	0.419 2	1430.247 0	< 0.000 1	极显著
F	0.077 7	1	0.077 7	265.281 7	< 0.000 1	极显著
AB	0.000 7	1	0.000 7	2.312 3	0.136 4	不显著
AE	3.07×10^{-5}	1	3.07×10^{-5}	0.104 7	0.748 0	不显著
AF	0.000 5	1	0.000 5	1.685 6	0.201 8	不显著
BE	0.000 3	1	0.000 3	0.851 2	0.361 9	不显著
BF	0.000 7	1	0.000 7	2.516 7	0.120 7	不显著
EF	0.005 1	1	0.005 1	17.394 1	0.000 2	极显著
A ²	1.32×10^{-5}	1	1.32×10^{-5}	0.045 0	0.833 0	不显著
B ²	0.001 1	1	0.001 1	3.873 1	0.056 2	不显著
E ²	0.000 1	1	0.000 1	0.342 3	0.561 8	不显著
F ²	0.015 9	1	0.015 9	54.493 6	< 0.000 1	极显著
R ²			0.831 4			

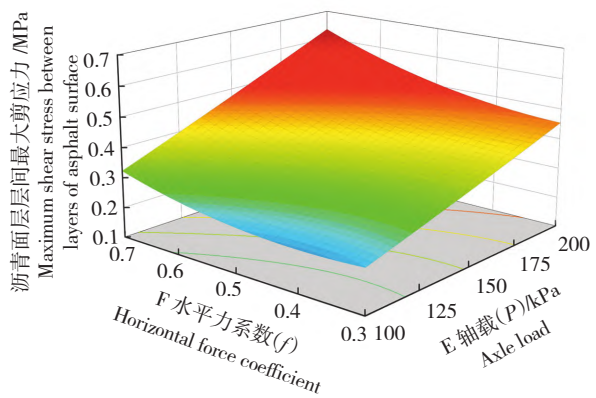
表9 沥青面层层间最大剪应力的方差分析表(无仰拱)

Tab.9 Variance analysis table of maximum shear stress between layers of asphalt surface (without inverted arch)

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean square	<i>F</i>	<i>p</i>	显著性 Significance
Model	0.397 9	6	0.066 3	108.807 8	< 0.000 1	极显著
A	0.007 3	1	0.007 3	11.937 2	0.001 2	显著
B	9.85×10 ⁻⁶	1	9.85×10 ⁻⁶	0.016 2	0.899 4	不显著
C	7.82×10 ⁻⁵	1	7.82×10 ⁻⁵	0.128 3	0.721 8	不显著
D	0.001 4	1	0.001 4	2.269 5	0.138 6	不显著
E	0.376 0	1	0.376 0	616.905 8	< 0.000 1	极显著
F	0.013 29	1	0.013 29	21.589 9	< 0.000 1	极显著
<i>R</i> ²			0.932 8			



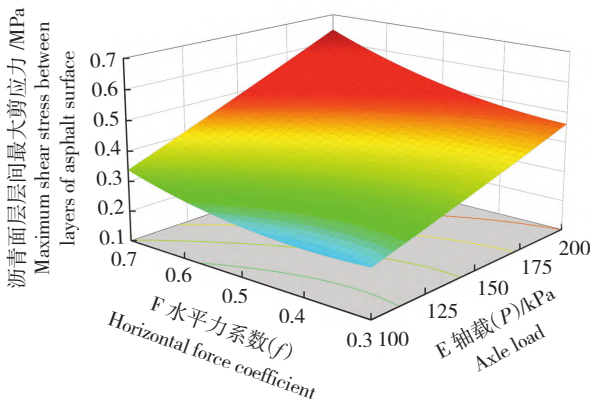
(a) 沥青面层厚度为 9 cm
(a) Thickness of asphalt surface is 9 cm



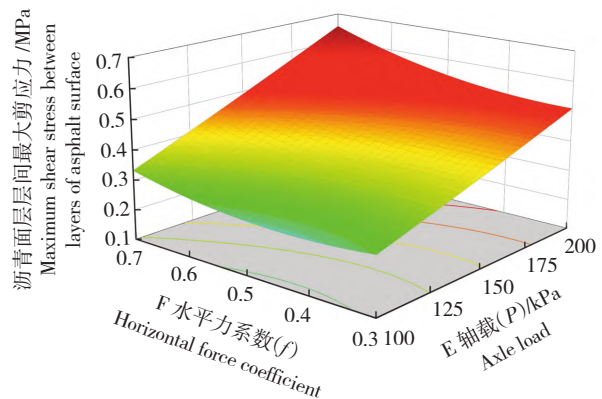
(b) 沥青面层厚度为 11 cm
(b) Thickness of asphalt surface is 11 cm

图8 有仰拱时不同沥青面层厚度下轴载和水平力系数作用 τ_{max} 响应面变化

Fig.8 Variation of τ_{max} response surface of different thickness of asphalt surface under axial load and horizontal force coefficient with inverted arch



(a) 混凝土面层厚度为 22 cm
(a) Thickness of concrete surface is 22 cm



(b) 混凝土面层厚度为 26 cm
(b) Thickness of concrete surface is 26 cm

图9 有仰拱时不同混凝土面板厚度下轴载和水平力系数作用 τ_{max} 响应面变化图

Fig.9 Variation of τ_{max} response surface of different thickness of concrete slab under axial load and horizontal force coefficient with inverted arch

当沥青层厚度由 9 cm 增加到 11 cm 时, τ_{max} 随之减小, 但当轴载和水平力系数较高时 τ_{max} 的降幅

较小, 说明当轴载和水平力较大时增加沥青面层厚度对 τ_{max} 的影响有限。当混凝土面板厚度由 22 cm

增加到 26 cm 时, τ_{\max} 随之增大,当轴载和水平力系数都较低时, τ_{\max} 的升幅最大;当轴载较低,水平力系数较高时, τ_{\max} 的升幅最小。

图 10 为无仰拱时不同围岩模量下 τ_{\max} 关于沥青面层厚度和轴载的响应面图。由图 10 可知,在较低和较高的沥青层厚度下, τ_{\max} 随轴载的增大而上升,且在较高沥青层厚度下 τ_{\max} 的升幅更大。在较

低和较高的轴载作用下, τ_{\max} 随沥青层厚度的增加而下降,且较低轴载作用下 τ_{\max} 的降幅更大。轴载对 τ_{\max} 的影响要大于沥青面层厚度的影响,轴载越大,沥青面层厚度对 τ_{\max} 的影响越小。当水平力系数由 0.3 增加到 0.7 时, τ_{\max} 随之上升,且轴载越小,沥青层厚度越大, τ_{\max} 的升幅越小,说明增加沥青面层厚度可以有效降低沥青层间最大剪应力。

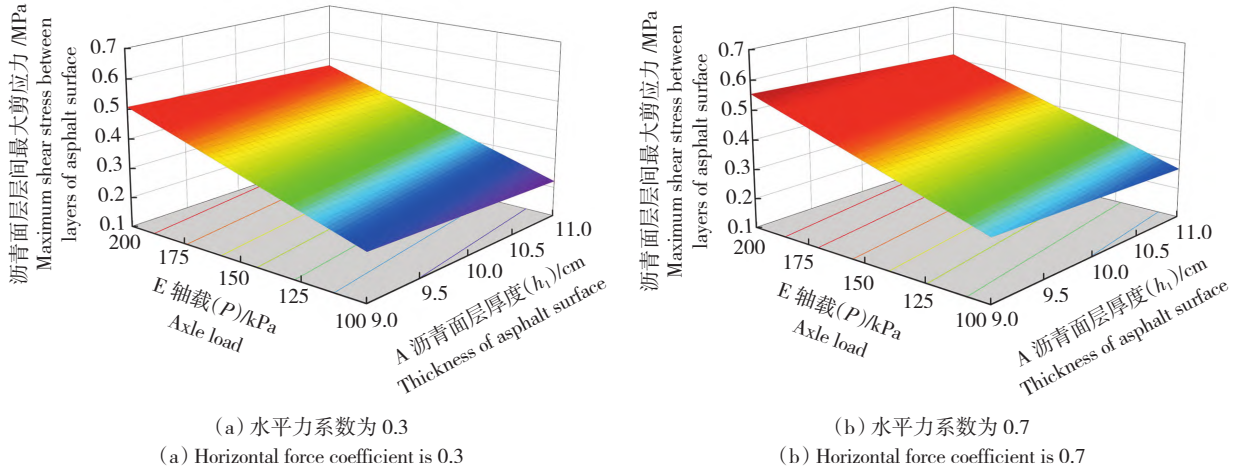


图 10 无仰拱时沥青层厚度和轴载作用 τ_{\max} 响应面变化图

Fig. 10 Variation of τ_{\max} response surface under thickness of asphalt surface and axial load without inverted arch

2.3 各响应回归公式拟合

采用幂函数形式分别对 σ_c 、 ε_a 和 τ_{\max} 进行回归公式拟合,见式(1)一式(6)。

$$\sigma_{c有} = 0.009 h_2^{-0.61} P^{1.062} f^{0.258} \quad (1)$$

$$\sigma_{c无} = 0.364 h_2^{-1.073} E^{-0.093} P^{0.977} f^{0.057} \quad (2)$$

式中, $\sigma_{c有}$ 和 $\sigma_{c无}$ 分别为有仰拱和无仰拱的水泥混凝土板板底最大拉应力, MPa。该回归公式相关系数 R^2 分别为 0.82 和 0.94,说明方程有较好的拟合效果。

$$\varepsilon_{a有} = 0.758 h_1^{-0.524} h_{20.793} P^{0.832} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{a无} = 93.819 h_1^{-1.168} E^{-0.166} P^{0.986} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_{a有}$ 和 $\varepsilon_{a无}$ 分别为有仰拱和无仰拱的沥青混凝土面层层底最大拉应变, $\mu\varepsilon$ 。该回归公式相关系数 R^2 分别为 0.73 和 0.91,说明方程有较好的拟合效果。

$$\tau_{\max有} = 0.008 h_1^{-0.282} P^{0.971} f^{0.329} \quad (5)$$

$$\tau_{\max无} = 0.022 h_1^{-0.452} E^{-0.093} P^{0.968} f^{0.140} \quad (6)$$

式中, $\tau_{\max有}$ 和 $\tau_{\max无}$ 分别为有仰拱和无仰拱的沥青面层层间最大剪应力, $\mu\varepsilon$ 。该回归公式相关系数 R^2 分别为 0.92 和 0.93,说明方程有较好的拟合效果。

3 隧道复合式路面疲劳寿命分析

3.1 轴载换算系数

3.1.1 水泥混凝土板板底最大拉应力

根据《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)^[18]中对于轴载 P_i 和设计轴载 P_s 产生相同疲劳损伤时相应的作用次数 N_i 和 N_s 的关系,见式(7)。

$$\frac{N_i}{N_s} = \left(\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{ps}} \right)^{\frac{1}{0.057}} \quad (7)$$

式中, σ_{pi} 和 σ_{ps} 分别为轴载 P_i 和设计轴载 P_s 在同一路面结构产生的荷载应力。

将式(1)和式(2)分别代入式(7)得到有仰拱、无仰拱时轴载 P_i 和设计轴载 P_s 与作用次数 N_i 和 N_s 的关系。故在计算混凝土面层疲劳开裂作用次数时,有仰拱路面的轴载换算系数为 18.6,无仰拱路面为 17.1。

3.1.2 沥青面层层底最大拉应变

根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[19]中沥青层混合料疲劳开裂寿命公式,轴载 P_i 和设计轴载 P_s 产生相同疲劳损伤时相应的作用

次数 N_{fi} 和 N_{fs} 的关系,见式(8)。

$$\frac{N_{fs}}{N_{fi}} = \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_s} \right)^{3.97} \quad (8)$$

式中, ε_i 和 ε_s 分别为轴载 P_i 和设计轴载 P_s 在同一路面结构沥青层底拉应变。

将式(3)和(4)分别代入式(8)得到有、无仰拱时轴载 P_i 和设计轴载 P_s 与作用次数 N_i 和 N_s 的关系。故在计算沥青面层疲劳开裂作用次数时,有仰拱路面的轴载换算系数为 3.3,无仰拱路面为 3.9。

3.2 路面疲劳寿命

基于某隧道复合式路面结构,通过力学响应公式按轴载 BZZ-100、水平力系数为 0.3 计算有仰拱

和无仰拱的隧道复合式路面沥青混凝土面层和水泥混凝土面层的力学响应值,见表 10。

由表 10 可知,采用适用于隧道复合式路面结构的轴载换算系数计算得到沥青面层疲劳设计轴载作用次数与现行规范差别不大,有仰拱时混凝土面层设计轴次是现行规范的 1.8 倍,无仰拱是 1.3 倍。水泥混凝土面层疲劳寿命远大于设计轴载作用次数,沥青层疲劳寿命略大于设计轴载作用次数。有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面混凝土面层疲劳寿命分别比设计轴载大 17 和 8 个数量级,沥青层疲劳寿命比设计轴载大 1 个数量级。有仰拱的混凝土面层疲劳寿命比无仰拱大 9 个数量级。

表 10 力学响应计算值及疲劳开裂寿命

Tab. 10 Calculated value of mechanical response and fatigue cracking life

工况 Operating condition	$\varepsilon_a/\mu\varepsilon$	σ_c/MPa	τ_{\max}/MPa	沥青面层 Asphalt surface			水泥混凝土面层 Concrete surface		
				疲劳寿命 Fatigue life	设计轴次 Design axis	设计轴次(规范) Design axis (standard)	疲劳寿命 Fatigue life	设计轴次 Design axis	设计轴次(规范) Design axis (standard)
有仰拱 With inverted arch	130.1	0.126	0.246	2.33×10^8	2.48×10^7	2.48×10^7	9.19×10^{24}	8.56×10^7	4.67×10^7
无仰拱 Without inverted arch	141.0	0.450	0.252	1.47×10^8	2.53×10^7	2.48×10^7	1.94×10^{15}	6.05×10^7	4.67×10^7

4 结论

通过现场试验与有限元方法相结合的手段,基于响应面法进行移动荷载作用下有仰拱、无仰拱隧道复合式路面力学响应分析,得到以下主要结论。

1) 无论有仰拱,还是无仰拱,轴载对各项力学指标的影响最大,混凝土基层厚度对各项力学指标的影响较小;水平荷载对混凝土板板底拉应力和沥青面层层间剪应力的影响较大,而对沥青面层层底拉应变影响较小。

2) 无仰拱时,围岩模量对各项力学指标的影响大于有仰拱;有仰拱时,混凝土面层厚度对沥青面层层底拉应变的影响大于沥青面层厚度,混凝土面层厚度对沥青面层层间剪应力的影响大于基层厚度,无仰拱时影响相反;有仰拱时,轴载和水平力系数对层间剪应力的交互作用显著。

3) 有仰拱隧道复合式路面结构轴载换算系数得到混凝土面层疲劳设计轴次是现行规范的 1.8 倍,无仰拱是 1.3 倍,有仰拱、无仰拱的典型隧道复合式路面混凝土面层疲劳寿命分别比设计轴载大 17 和 8 个数量级,沥青面层疲劳寿命均比设计轴载

大 1 个数量级。

【参 考 文 献】

- [1] 交通运输部. 公路隧道设计规范第一册土建工程: JTG 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. Ministry of Transport of The People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Tunnels Section 1 Civil Engineering: JTG 3370.1—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [2] GREGORY J M. Continuously reinforced concrete overlays of flexible pavements on trunk road A2[R]. Great Britain: TRRL Supplementary Report, 1983.
- [3] 阳宏毅, 刘朝晖. 水泥砼与沥青砼复合式路面层间剪应力分析[J]. 公路与汽运, 2004(6): 41-43. YANG H Y, LIU Z H. Analysis of interlaminar shear stress of cement concrete and asphalt concrete composite pavement[J]. Highways & Automotive Applications, 2004(6): 41-43.
- [4] MAJIDZADEH K, ABDULSHAFI A, ILVES G J, et al. A mechanistic model for thermally induced reflection cracking of portland cement concrete pavement with reinforced asphalt concrete overlay[C]//International Colloquium on Automata, Languages & Programming. Springer-Verlag,

- 1987: 83-93.
- [5] YANG B, YANG T Q, PENG G D. Analysis on the loading stress, thermal stress and coupling stress in PCC-AC composite pavement [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 383-390: 2700-2704.
- [6] 王昌衡,程焰兵,李建康. 移动荷载作用下 CRCP 横向裂缝处力学响应分析[J]. *公路工程*, 2016, 41(1): 98-102.
WANG C H, CHENG Y B, LI J K. Analysis on mechanical response of transverse crack of CRCP under moving load [J]. *Highway Engineering*, 2016, 41(1): 98-102.
- [7] 李盛,张豪,程小亮. 非均布三向应力作用下 CRC+AC 复合式路面动力响应分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(3): 971-982.
LI S, ZHANG H, CHENG X L. Dynamic response analysis of CRC+AC composite pavement under non-uniform three-way stress [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(3): 971-982.
- [8] 谢建新. 隧道连续配筋混凝土与沥青混凝土复合式路面结构研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
XIE J X. Research on the structure of tunnel continuously reinforced concrete and asphalt concrete composite pavement [D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [9] 李瑞. 隧道复合式沥青路面材料与结构特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
LI R. Research on the structure and material of the composite tunnel pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [10] 黄兴,胡小弟,李小青. 实测轮胎下隧道复合式路面结构力学响应分析[J]. *土木工程与管理学报*, 2013, 30(3): 24-28.
HUANG X, HU X D, LI X Q. Study on mechanistic responses in composite asphalt pavements in tunnel under measured tire-pavement contact pressure [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2013, 30(3): 24-28.
- [11] 杨群,郭忠印,陈立平. 考虑水平荷载的公路隧道复合式路面表面拉应力分析[J]. *公路交通科技*, 2006, 23(1): 16-19.
YANG Q, GUO Z Y, CHEN L P. Stress analysis of compound pavement in road tunnel considering level loads [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23(1): 16-19.
- [12] 石春香,杨群,郭忠印. 公路隧道复合式沥青路面结构设计方法[J]. *上海交通大学学报*, 2009, 43(2): 222-225.
SHI C X, YANG Q, GUO Z Y. Design method for composite pavement in highway tunnel [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2009, 43(2): 222-225.
- [13] 杨士真. 寒区隧道复合式路面结构动力响应与寿命分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
YANG S Z. Dynamic response and life analysis of composite pavement structure of tunnel in cold region [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [14] 李英涛. 老山隧道路面型式选择及结构设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
LI Y T. The pavement type selection and structure design research of Laoshan tunnel [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [15] 陈剑锋. 广西靖那高速坡荷隧道路面结构方案研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
CHEN J F. Research on pavement structure scheme of Pohe tunnel in Guangxi Jing-Na highway [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015.
- [16] 马士宾, 高建强, 魏建慧, 等. 基于响应面法的石质路基沥青路面结构优化研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(3): 44-50.
MA S B, GAO J Q, WEI J H, et al. Structure optimization of stone roadbed asphalt pavement based on response surface method [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2019, 38(3): 44-50.
- [17] 苏禹, 周跃, 殷建强. 基于响应面法的应力吸收层应力模拟研究[J]. *中国市政工程*, 2020(1): 16-20, 27, 90.
SU Y, ZHOU Y, YIN J Q. Stress simulation study on stress absorbing layer based on response surface method [J]. *China Municipal Engineering*, 2020(1): 16-20, 27, 90.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路水泥混凝土路面设计规范: JTG D40—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport of The People's Republic of China. Specifications for design of highway cement concrete pavement: JTG D40—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
Ministry of Transport of The People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement: JTG D50—2017 [S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [20] 翁斌, 阙云, 章灿林, 等. 隧道复合式路面动力响应影响因素的权重分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2023, 21(1): 32-39, 145.
WENG B, QUE Y, ZHANG C L, et al. Influencing factors and weight analysis of dynamic response of composite pavement [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2023, 21(1): 32-39, 145.